

附件：

## 科技进步奖公示项目 1

### 一、项目名称

高端金属板带高效精整生产核心工艺装备研发与应用

### 二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省科技厅

提名意见：精整生产线主要用于对金属板带进行剖分、矫直、重卷、切边、检查以及涂油等工序作业，是板带从钢厂走向用户的关键环节，是成品板带质量的最终保障。

该项目开发出一套多功能高效精整生产线工艺装备技术，打破了该领域长期被德国森德威、日本三菱、奥地利安德里茨等国外几大厂商垄断的局面，实现了高端金属板带高精度、高质量、高效率批量稳定生产。

该项目成果已推广应用到华菱安赛乐米塔尔汽车板有限公司、广西钢铁、宝武等大型骨干企业数十条生产线，结果表明该生产线及工艺装备性能稳定，工作可靠，经济效益和社会效益显著。

该项目经陕西省机械工业联合会组织专家鉴定，整体技术达到国际先进水平，拟提名其为陕西省科学技术进步奖二等奖。

### 三、项目简介

精整生产线主要用于对金属板带进行剖分、矫直、重卷、切边、检查以及涂油等工序作业，是板带从钢厂走向用户的关键环节，是成品板带质量的最终保障。以高档汽车面板、食品级镀锡板、超高强特殊钢以及高强高韧铝合金板等为代表的高端金属板带精整工艺装备与关键技术主要掌握在德国森德威、日本三菱、奥地利安德里茨等国外几大钢铁集团手中。

高端金属板带对表面质量、板形质量和卷取质量等要求极高，其产品规格尺寸多样，精整处理工序繁杂，核心技术难度大。国内精整生产控制方法与数学模型缺乏，导致表面质量、板形质量以及卷取质量等指标与国际水平仍存在很大差距，技术与市场长期被国外公司所垄断。

项目组以陕西省重点科技创新团队计划项目和广西钢铁集团有限公司防城港钢铁基地国家重点建设工程项目为依托，进行了工艺创新，开发了关键模型，实现了工艺装备及控制技术的国产化。形成关键技术创新如下：

1、多功能高效精整生产工艺及关键装备的研发。创造性提出了集剖分、矫直、重卷、切边、检查、涂油等多工序于一体的多功能高效精整生产方法。研制了剖分切边圆盘剪、全自动滚筒飞剪等核心装备，实现了高端金属板带的高效化、协同化和绿色化精整生产。

2、精整生产过程高稳运行及板形与表面质量综合控制技术开发。提出了高速稳定运行参数优化设计方法及共振控制技术，创建了拉伸弯曲矫直机及辊式矫直机工作参数预设及闭环控制模型。解决了高速运行时，板带稳定性差及共振造成的表面擦

划伤，解决了矫直生产时，依靠经验设定工作参数造成的板形不良，实现了表面质量与板形质量的综合精细控制。

3、成品钢卷卷取质量核心控制技术开发。提出了开卷机、卷取机传动功率计算方法及张力梯度控制方法，创建了助卷张力预设定和控制模型，研发了软钳口定位控制技术。解决了钢卷带头印、塔形与错层等质量缺陷，实现了带卷的高质量卷取。

研发的多功能高效精整线，将剖分、矫直、重卷、切边、检查和涂油等多种功能集中于一条生产线，其生产能力是单一功能生产线的3倍，降低生产成本超过50%，节能减排超过50%。自主研发了关键工艺模型，掌握了高端金属板带表面质量、板形质量及卷取质量等综合控制技术，取得了显著的应用效果：表面质量的纵向Rz差值 $\leq 0.12\mu\text{m}$ ，横向Rz差值 $\leq 0.17\mu\text{m}$ ；板形质量控制在2-4I，封闭率0.5%以内；单侧卷取错层 $\leq 0.5\text{mm}$ ，彻底打破了国外高水平公司的技术封锁，成功替代进口。已推广到华菱安赛乐米塔尔汽车板有限公司、广西柳州钢铁集团有限公司、山东钢铁集团日照有限公司、广西钢铁集团有限公司、宝武钢铁集团等著名企业数十条生产线，迅速扩大了产能，实现了批量替代进口的目标。

#### 四、客观评价

##### （一）科技成果鉴定—国际先进水平

2022年3月25日，陕西省机械工业联合会组织召开了该项目的科技成果鉴定会。经专家质询和讨论，形成如下意见：

1、研制了全自动滚筒飞剪、开头装置、废边卷取装置、剖分圆盘剪等核心装备组成的生产线，实现了以高品质汽车面板为代表的高端金属板带高效精整生产。

2、提出了机组高速稳定运行参数优化设计方法、拉伸弯曲矫直机工作参数预设定及闭环控制方法，开发了机组共振控制技术及软钳口定位控制系统等核心技术，解决了擦划伤、带头印与板形差等生产难题，实现了表面质量与板形的综合精细控制。

3、创建了开卷机、卷取机的张力梯度控制以及助卷机张力预设定和控制方法，解决了卷取塔形与错层的技术难题，实现了带卷的高质量卷取。

鉴定委员会一致认为：该项目整体技术达到了国际先进水平。

##### （二）科技成果查新

2021年8月2日，机械工业信息研究院对该项目进行了国内外联机检索，得出以下结论：除该查新项目委托方发表的文献和项目介绍外，在其他相关文献中未见有与该项目查新点所述技术特征相同的报道。

##### （三）检验报告

2022年6月2日，该项目委托陕西省机械产品质量监督检测总站有限公司对“高品质汽车面板高效精整线工艺装备”进行检验，检验报告编号“No: 22507025”，共检高品质汽车面板高效精整线的28项质量指标，符合28项，不符合0项。

##### （四）验收意见

2021年3月31日，陕西省科学技术厅组织有关专家，对中国重型机械研究院承担的陕西省重点科技创新团队计划项目《高品质汽车板剖分拉矫重卷检查机组关键技

术及设备研究创新团队》进行了验收，验收委员会一致认为，该项目完成了合同书规定的内容，达到了验收要求，一致同意通过验收。

### 五、应用情况

目前，该项目成果已经成功推广应用到华菱安赛乐米塔尔汽车板有限公司、广西柳州钢铁集团有限公司、山东钢铁集团日照有限公司、广西钢铁集团有限公司、宝武钢铁集团等著名企业数十条生产线，迅速扩大了产能，实现了批量替代进口的目标。主要应用单位情况如下表所示。

表 主要应用单位情况

| 序号 | 单位名称            | 应用对象及规模                       | 应用起止时间    | 单位联系人/电话           |
|----|-----------------|-------------------------------|-----------|--------------------|
| 1  | 华菱安赛乐米塔尔汽车板有限公司 | NO. 1&NO. 2 重卷检查机组            | 2014~2022 | 刘军<br>13973875725  |
| 2  | 广西柳州钢铁集团有限公司    | 冷轧 1#-5#重卷拉矫检查机组              | 2014~2022 | 李文福<br>18078256860 |
| 3  | 山东钢铁集团日照有限公司    | 2030 冷轧 1#、2#重卷机组及重卷（拉矫）机组    | 2018~2022 | 李广秀<br>15098756180 |
| 4  | 广西钢铁集团有限公司      | 防城港钢铁基地 2030 冷轧项目 1#、2#重卷检查机组 | 2016~2022 | 吴军<br>13487074729  |
| 5  | 武汉钢铁有限公司        | 1#横切机组改重卷机组                   | 2019~2022 | 肖晟<br>15972921186  |
| 6  | 宝钢湛江            | 宝钢湛江 1550 冷轧单元重卷机组            | 2015~2022 | 孙建中<br>13501818629 |

### 六、主要知识产权和标准规范等

| 序号 | 知识产权类别 | 名称                        | 授权号              | 授权日期       | 发明人                 |
|----|--------|---------------------------|------------------|------------|---------------------|
| 1  | 发明专利   | 一种带钢剖分拉矫重卷检查机组生产方法        | ZL201710486410.5 | 2019-07-23 | 孙亚波；崔卫华；李宏伟；任玉成；张康武 |
| 2  | 发明专利   | 基于最小目标定尺长度的滚筒飞剪传动设计参数计算方法 | ZL201610382504.3 | 2019-05-10 | 孙亚波；崔卫华；刘渭苗；任玉成；张康武 |
| 3  | 发明专利   | 基于剪切目标定尺长度的滚筒飞剪传动控制参数计算方法 | ZL201610383597.1 | 2018-06-26 | 孙亚波；崔卫华；刘渭苗；任玉成；张康武 |
| 4  | 发明专利   | 一种极薄带钢精整机组运行参数设           | ZL201410317213.7 | 2017-03-15 | 张康武；李剑；任玉成；孙亚       |

|    |         |                        |                  |            |                         |
|----|---------|------------------------|------------------|------------|-------------------------|
|    |         | 计方法                    |                  |            | 波；刘渭苗                   |
| 5  | 发明专利    | 一种极薄带钢高速精整机组振动计算方法     | ZL201410283031.2 | 2016-04-20 | 孙亚波；刘渭苗；张康武；任玉成         |
| 6  | 发明专利    | 一种拉伸弯曲矫直机工作参数设定方法      | ZL201910113939.1 | 2020-06-26 | 孙亚波；李宏伟；张康武；崔卫华；马兰松；靳恩辉 |
| 7  | 发明专利    | 一种辊式矫直机工作参数预设方法        | ZL202111018428.5 | 2022-11-29 | 孙亚波；李宏伟；靳恩辉；张康武；任玉成     |
| 8  | 发明专利    | 一种卷取机传动功率计算方法及张力梯度控制方法 | ZL201610688409.6 | 2017-11-10 | 任玉成；孙亚波；崔卫华；李宏伟         |
| 9  | 发明专利    | 一种带钢精整机组助卷张力预设方法及控制方法  | ZL201810060106.9 | 2021-04-20 | 孙亚波；崔卫华；刘渭苗；李宏伟；马伟然     |
| 10 | 国家或行业标准 | 带材拉伸弯曲矫直机              | JB/T 12939-2016  | 2016-10-22 | 王鹏；王社昌；张勇安；任玉成；靳恩辉；许展望  |

## 七、主要完成人情况

|  |               |      |        |    |   |
|--|---------------|------|--------|----|---|
| 姓名   | 孙亚波           | 技术职称 | 正高级工程师 | 排名 | 1 |
| 工作单位   | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |   |
| 完成单位   | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |   |
| 对本项目技术创造性贡献：负责高品质汽车面板精整生产线核心工艺与关键工艺模型研究、实验研究及现场施工、调试和验收工作。                   |               |      |        |    |   |
| 姓名   | 李俊辉           | 技术职称 | 正高级工程师 | 排名 | 2 |
| 工作单位   | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |   |
| 完成单位   | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |   |
| 对本项目技术创造性贡献：负责审查项目整体方案，负责项目的立项、工艺规范和实施过程管理工作。                                |               |      |        |    |   |
| 姓名   | 张康武           | 技术职称 | 正高级工程师 | 排名 | 3 |
| 工作单位   | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |   |
| 完成单位   | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |   |
| 对本项目技术创造性贡献：负责核心装备及生产工艺的开发，在本项目中投入工作量占本人工作总量的 85%。负责精整生产线开卷与卷取的技术研究及现场实施等工作。 |               |      |        |    |   |
| 姓名   | 靳恩辉           | 技术职称 | 高级工程师  | 排名 | 4 |
| 工作单位   | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |   |
| 完成单位   | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |   |

|   |               |      |       |    |    |
|---|---------------|------|-------|----|----|
| 对本项目技术创造性贡献：负责精整生产线及核心设备的设计及现场实施工作，在本项目中投入工作量占本人工作总量的 70%。              |               |      |       |    |    |
| 姓名  | 李宏伟           | 技术职称 | 高级工程师 | 排名 | 5  |
| 工作单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |       |    |    |
| 完成单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |       |    |    |
| 对本项目技术创造性贡献：负责精整生产线核心工艺与智能综合控制系统的开发，在本项目中投入工作量占本人工作总量的 80%。             |               |      |       |    |    |
| 姓名  | 梁光正           | 技术职称 | 高级工程师 | 排名 | 6  |
| 工作单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |       |    |    |
| 完成单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |       |    |    |
| 对本项目技术创造性贡献：负责精整生产线关键设备数学控制模型的建立及大数据技术处理和数据分析工作，在本项目中投入工作量占本人工作总量的 80%。 |               |      |       |    |    |
| 姓名  | 冯沙            | 技术职称 | 高级工程师 | 排名 | 7  |
| 工作单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |       |    |    |
| 完成单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |       |    |    |
| 对本项目技术创造性贡献：负责精整生产线流体传动技术工作及设备监制、现场调试工作，在本项目中投入工作量占本人工作总量的 70%。         |               |      |       |    |    |
| 姓名  | 俞洪杰           | 技术职称 | 高级工程师 | 排名 | 8  |
| 工作单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |       |    |    |
| 完成单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |       |    |    |
| 对本项目技术创造性贡献：负责精整生产线核心装备设计及现场实施工作，在本项目中投入工作量占本人工作总量的 80%。                |               |      |       |    |    |
| 姓名  | 马伟然           | 技术职称 | 高级工程师 | 排名 | 9  |
| 工作单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |       |    |    |
| 完成单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |       |    |    |
| 对本项目技术创造性贡献：负责精整生产线核心装备设计及现场实施工作，在本项目中投入工作量占本人工作总量的 80%。                |               |      |       |    |    |
| 姓名  | 马兰松           | 技术职称 | 高级工程师 | 排名 | 10 |
| 工作单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |       |    |    |
| 完成单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |       |    |    |
| 对本项目技术创造性贡献：负责精整生产线核心工艺及现场实施工作，在本项目中投入工作量占本人工作总量的 60%。                  |               |      |       |    |    |

## 八、主要完成单位

|      |               |    |   |
|------|---------------|----|---|
| 单位名称 | 中国重型机械研究院股份公司 | 排名 | 1 |
|------|---------------|----|---|

对本项目技术创新和应用的贡献：

中国重型机械研究院股份公司主持完成了高品质汽车面板高效精整线工艺装备开发及应用项目的所有研发与推广工作。主要创新工作如下：

- 1、多功能高效精整生产工艺及关键装备的研发。研制了剖分切边圆盘剪、全自动滚筒飞剪、全自动开头工艺装备、全自动废边卷取工艺装备等核心装备，研发了高品质汽车面板多功能高效精整工艺生产方法，实现了以高品质汽车面板为代表的高端金属板带高效精整生产。
- 2、精整生产过程高稳运行及板形与表面质量综合控制技术开发。提出了高速稳定运行参数优化设计方法、拉伸弯曲矫直机及辊式矫直机工作参数预设及闭环控制方法，开发了高速运行共振控制技术 & 软钳口定位控制系统等核心技术，解决了擦划伤、带头印与板形差等生产难题，实现了表面质量与板形的综合精细控制。
- 3、成品钢卷卷取质量核心控制技术开发。创建了开卷机、卷取机传动功率计算方法及张力梯度控制方法、助卷张力预设和控制方法，解决了卷取塔形与错层的技术难题，实现了带卷的高质量卷取。

中国重型机械研究院股份公司主持完成的多功能高效精整生产工艺装备完全替代进口，打破了该领域长期被德国森德威、日本三菱、奥地利安德里茨等国外几大厂商垄断的局面，实现了以高品质汽车面板、高档家电板、超高强钢板、食品级镀锡板为代表的高端金属板带高精度、高质量、高效率的批量稳定生产，为发展我国自主知识产权的精整装备与工艺提供了成功范例，带动了我国重型装备的科技进步，为保障国民经济建设，实现绿色低碳经济做出了突出贡献。

## 九、完成人合作关系说明

本项目由中国重型机械研究院股份公司专项团队集体完成，其中第 1 完成人孙亚波与第 2 完成人李俊辉共同完成该项目总体技术方案设计并组织项目实施，重点研发了精整生产工艺及表面质量控制技术，共同完成专利“一种废边卷取机减速机构”；第 1 完成人孙亚波与第 3 完成人张康武共同创建了拉伸弯曲矫直机及辊式矫直机工作参数预设及闭环控制模型，解决了高速运行时，板带稳定性差及共振造成的表面擦划伤问题；第 3 完成人张康武与第 6 完成人梁光正、第 7 完成人冯沙、第 8 完成人俞洪杰共同开发了创建了助卷张力预设和控制模型，研发了软钳口定位控制技术，解决了钢卷带头印、塔形与错层等质量缺陷问题。

第 1 完成人孙亚波与第 5 完成人李宏伟共同开发剖分重卷技术，共同完成专利“一种带钢剖分拉矫重卷检查机组生产方法”；第 9 完成人马伟然和第 1 完成人孙亚波、第 5 完成人李宏伟共同开发助卷张力控制技术并完成专利“一种带钢精整机组助卷张力预设及控制方法”。第 4 完成人靳恩辉与第 1 完成人孙亚波共同开发橡胶套筒软钳口定位带头方法，消除“带头印”对带材表面质量及卷边质量的影响；第 10 完成人马兰松与第 1 完成人孙亚波共同开发了高速精整机组运行参数设计方法与振动频率计算方法，完成专利“一种拉伸弯曲矫直机工作参数设定方法”。

## 科技进步奖公示项目 2

### 一、项目名称

高效高性能精密板坯连铸新型结晶器装备研发及应用

### 二、提名者及提名意见

**提名单位：**陕西省科技厅

**提名意见：**我国高端汽车板生产流程中的连续铸钢环节对结晶器装备提出了较高要求，高端板坯连铸结晶器装备及其核心技术的研发与应用对我国钢铁企业向高质量发展转型具有重要意义。该项目以高端汽车板生产为例，立足高效高性能精密板坯结晶器核心装备及关键技术国内自主设计与研发，历经十余年技术攻关，最终突破了高端板坯结晶器装备与工艺的技术瓶颈，打破了国外高端连铸装备与关键技术长期垄断的局面。项目成果已成功推广应用到邯钢、湖南华菱钢铁和宝山钢铁股份有限公司等国内大型钢铁企业，实现了高端结晶器装备及其关键技术的国产化替代，经济和社会效益显著。经专家鉴定，该项目成果具有自主知识产权，整体技术达到国际先进水平。

拟提名该项目为科学技术进步奖二等奖。

### 三、项目简介

本项目以高端汽车板生产为目标，开展高效高性能精密板坯结晶器装备及关键技术的自主设计与研发，其中高效体现在提高产量，研发方向是提高连浇炉数和提高连铸机拉速。提高连浇炉数的关键技术是结晶器在线热态调宽技术；提高拉速的核心是高拉速结晶器铜板水缝优化技术。高性能精密体现在保质量，采用的技术是高精度结晶器液位波动控制技术。为此，中国重型机械研究院股份公司联合西安交通大学和西安建筑科技大学，历经十余年持续攻关，形成关键技术创新如下：

1、建立了结晶器高精度液位波动控制模型和连铸机自动开浇模型，获得了塞棒开度对钢水流量影响规律；建立了鼓肚力扰动补偿模型和工艺参数自适应控制模型，实现了结晶器内高温钢液动态高度的精确控制；

2、建立了适应大倒角结晶器在线热态调宽模型和保锥控制模型，提出了结晶器在线热态调宽系统工艺参数计算方法，实现了板坯连铸断面尺寸的高精度动态控制；

3、研制出结晶器铜板变截面水缝结构，实现了高端板坯结晶器高效均匀冷却，显著提升了板坯连铸拉速和性能；

项目研发的技术推广到宝山钢铁股份有限公司、广西盛隆冶金有限公司、攀钢集团攀枝花钢铁有限责任公司等 10 家钢铁公司 33 流生产线，打破了国外高端连铸装备与关键技术长期垄断的局面，完全满足进口装备和技术的国产化替代，经济和社会效益显著，应用前景广阔，为发展我国具有自主知识产权的高端板坯连铸装备基础理论研究、智能控制技术的研发和工业化应用起到奠基和引领作用。经专家鉴定，该项目成果具有自主知识产权，整体技术达到国际先进水平。

### 四、客观评价

1、2022 年，陕西省机械工业联合会组织召开了该项目的科技成果鉴定会，经专家质询和讨论，鉴定委员会认为：该项目成果具有自主知识产权，整体技术达到国际先进水平；

2、2022 年，陕西省科学情报研究所对该项目进行了国内外联机检索，得出结论：除该查新项目委托方及合作方发表的文献和项目介绍外，在其他相关文献中，未见与该项目有相同的文献报道；

3、该项目委托陕西省机械产品质量监督检测总站对该项目进行检验，检验报告编号 22505144，共检验高效高性能精密板坯连铸新型结晶器装备质量指标 13 项，全部符合指标要求。

### 五、应用情况

项目研发的技术推广到宝山钢铁股份有限公司、广西盛隆冶金有限公司、攀钢集团攀枝花钢铁有限公司、河北邯钢集团邯宝钢铁有限公司、湖南华菱涟源钢铁有限公司、河北普阳钢铁集团和福建青拓新材料有限公司等 10 家钢铁公司 33 流生产线。

### 六、主要知识产权和标准规范等

| 序号 | 知识产权类别 | 名称   | 授权号               | 授权日期       | 发明人          |
|----|--------|--|-------------------|------------|--------------|
| 1  | 发明专利   | 一种结晶器电动调宽装置窄边锥度控制方法  | ZL201711287989.9  | 2020-05-22 | 高琦、何博、高朝波等   |
| 2  | 发明专利   | 一种连铸机结晶器在线运行判定系统   | ZL201310104332.X  | 2015-07-29 | 高琦、李新强、温恒等   |
| 3  | 发明专利   | 一种实时在线修正板坯窄面缺陷的智能控制装置及方法                                     | ZL202110637282.6  | 2022-07-01 | 王文学、刘赵卫、何博等  |
| 4  | 发明专利   | 一种塞棒液压控制系统   | ZL201310417622.X  | 2016-04-20 | 丘铭军、郭星良、陈国防等 |
| 5  | 发明专利   | 一种结晶器锥度在线保持液压控制系统  | ZL201610184259.5  | 2017-12-12 | 丘铭军、郭星良、陈国防等 |
| 6  | 发明专利   | 一种基于变分模态分解和支持向量回归的信号预测方法                                     | ZI.201810783956.1 | 2021-07-13 | 苏文斌、雷竹峰、梁显祺  |
| 7  | 实用新型专利 | 一种控制结晶器热调宽软夹紧力的智能系统  | ZL201921313038.9  | 2020-05-22 | 王文学、刘赵卫、杨超武等 |
| 8  | 实用新型专利 | 用于板坯连铸机结晶器宽面的多层复合铜板  | ZL201920829562.5  | 2020-04-24 | 刘赵卫、高琦、曾晶等   |
| 9  | 软件著作权  | 连铸装备液压驱动式结晶器液面自动开浇控制系统 V1.0                                  | 2020SR0934303     | 2020-08-17 | 米进周、史伟、高琦等   |
| 10 | 论文     | Mold-Level Prediction for Continuous Casting Using VMD - SVR | Metals            | 2019-04    | 苏文斌、雷竹峰、杨拉道等 |

### 七、主要完成人情况

|   |               |      |        |    |   |
|---|---------------|------|--------|----|---|
| 姓名  | 高琦            | 技术职称 | 高级工程师  | 排名 | 1 |
| 工作单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |   |
| 完成单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |   |
| 对本项目技术创造性贡献：开发完成大倒角结晶器板坯热态智能调宽系统数学模型；完成连铸电磁搅拌结晶器项目的总体方案设计；开发完成连铸机自动开浇工艺控制模型。  |               |      |        |    |   |
| 姓名  | 何博            | 技术职称 | 正高级工程师 | 排名 | 2 |
| 工作单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |   |
| 完成单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |   |
| 对本项目技术创造性贡献：完成中间包水力学模型研究、结晶器内流场控制技术研究；完成结晶器电动调宽装置窄边锥度控制方法设计；完成自动开浇工艺控制模型实验验证。 |               |      |        |    |   |
| 姓名  | 王文学           | 技术职称 | 高级工程师  | 排名 | 3 |



|   |               |      |        |    |    |
|---|---------------|------|--------|----|----|
| 工作单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |    |
| 完成单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |    |
| 对本项目技术创造性贡献：开发完成大倒角结晶器板坯热态智能调宽系统工艺模型；开发完成结晶器水缝优化设计工艺方案；开发完成多模式电磁控流结晶器铜板水缝多目标优化算法模型。   |               |      |        |    |    |
| 姓名  | 关杰            | 技术职称 | 正高级工程师 | 排名 | 4  |
| 工作单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |    |
| 完成单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |    |
| 对本项目技术创造性贡献：中国机械工业集团有限公司科技发展基金项目“高品质特殊钢特超厚板连铸技术及创新平台”项目负责人，完成项目的总体规划设计。“涟钢 210 转炉厂 2#连铸机板坯结晶器电磁搅拌控流技术改造工程配套结晶器”和“涟钢 210 转炉厂 1#连铸机自动开浇项目”技术顾问，为项目研发提供技术指导。 |               |      |        |    |    |
| 姓名  | 苏文斌           | 技术职称 | 教授     | 排名 | 5  |
| 工作单位  | 西安交通大学        |      |        |    |    |
| 完成单位  | 西安交通大学        |      |        |    |    |
| 对本项目技术创造性贡献：提出“一种基于变分模态分解和支持向量回归的信号预测方法”来预测板坯连铸结晶器液面，为高精度结晶器液面控制系统的模型开发应用提供了算法支撑。   |               |      |        |    |    |
| 姓名  | 姚成功           | 技术职称 | 高级工程师  | 排名 | 6  |
| 工作单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |    |
| 完成单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |    |
| 对本项目技术创造性贡献：完成了多模式电磁控流结晶器的机械设计和嵌入式电磁式液面传感器方案设计；结合计算机模拟分析对高品质钢电磁控流专用结晶器铜板进行开发性设计；提出并实现组合式板坯结晶器大夹紧力预紧与全液压铸坯宽度及锥度控制技术及装备。                                    |               |      |        |    |    |
| 姓名  | 张朝晖           | 技术职称 | 教授     | 排名 | 7  |
| 工作单位  | 西安建筑科技大学      |      |        |    |    |
| 完成单位  | 西安建筑科技大学      |      |        |    |    |
| 对本项目技术创造性贡献：参与协助方案设计、产品研发以及工程化应用方案的科研；协助完成项目关键技术创新，共同突破完成了结晶器铜板变截面水缝结构的设计和模拟，实现了高端板坯结晶器高效均匀冷却。  |               |      |        |    |    |
| 姓名  | 米进周           | 技术职称 | 高级工程师  | 排名 | 8  |
| 工作单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |    |
| 完成单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |    |
| 对本项目技术创造性贡献：完成了结晶器自动开浇电气控制的总体方案设计、电气元器件选型、计算机及网络控制的详细设计以及现场程序调试工作。  |               |      |        |    |    |
| 姓名  | 史伟            | 技术职称 | 高级工程师  | 排名 | 9  |
| 工作单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |    |
| 完成单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |    |
| 对本项目技术创造性贡献：独立设计了结晶器液位控制与自动开浇的硬件控制设备，独立自主开发了结晶器液位控制与自动开浇的软件控制程序，并进行了实验室实验及现场调试。   |               |      |        |    |    |
| 姓名  | 陈国防           | 技术职称 | 高级工程师  | 排名 | 10 |
| 工作单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |    |
| 完成单位  | 中国重型机械研究院股份公司 |      |        |    |    |
| 对本项目技术创造性贡献：主要负责本项目液压伺服控制系统的方案制定、详细设计、现场调试及售后工作；设计并应用了高效可靠的结晶器锥度在线保持液压控制系统；设计并应用了高效可靠的塞棒液压控制系统。   |               |      |        |    |    |

## 八、主要完成单位

|      |               |    |   |
|------|---------------|----|---|
| 单位名称 | 中国重型机械研究院股份公司 | 排名 | 1 |
|------|---------------|----|---|

|   |          |    |   |
|---|----------|----|---|
| 对本项目技术创新和应用的贡献：1. 在陕西省重大科技创新项目“大型板坯连铸成套技术装备产业化”的资金支持下，完成结晶器在线热调宽模型和结晶器漏钢预报系统研发，实现了结晶器关键技术的自主突破和技术储备；2. 成立研发团队，申报中国机械工业集团有限公司科技发展基金“高品质特殊钢特超厚板连铸技术及创新平台”项目，获得研发经费 500 万元，完成中间包、结晶器水力学模型试验台、仿真实验室和二冷综合换热系数测试试验台，为高精度结晶器液位控制技术研发提供物理实验和仿真模拟平台；利用国家自然科学基金和陕西省科研基金完成“结晶器高精度液位波动控制系统”的算法模型开发与液压系统及装置研发；3. 建立产学研联盟，联合湖南华菱涟源钢铁有限公司、西安交通大学和西安建筑科技大学开展结晶器关键技术的联合研发与工程应用；4. 研发完成高效高性能精密板坯连铸新型结晶器装备，完成 3 项专有技术的研发与工程应用，实现高端连铸核心装备的国产化替代，为我国生产高端汽车板提供了高端装备支撑；5. 项目已成功应用于河北邯钢集团邯宝钢铁有限公司和湖南华菱涟源钢铁有限公司。同时项目研发的技术推广到宝山钢铁股份有限公司、广西盛隆冶金有限公司、攀钢集团攀枝花钢铁有限公司等 10 家钢铁公司 33 流生产线。为钢铁企业提供全生命周期装备和技术服务工作。 |          |    |   |
| 单位名称  | 西安交通大学   | 排名 | 2 |
| 对本项目技术创新和应用的贡献：1. 在该项目的完成过程中，西安交通大学充分发挥自身在算法模型方面的开发优势，积极参与项目中“结晶器高精度液位波动控制模型”研究，提出“一种基于变分模态分解和支持向量回归的信号预测方法”来预测板坯连铸结晶器液面波动；2. 西安交通大学牵头联合中国重型机械研究院股份公司申请国家自然科学基金面上项目“基于多信息源流数据的连铸扇形段辊缝值预测关键技术研究”项目获批，项目研发过程中针对结晶器液位波动预测进行深入研究，授权发明专利 1 件，发表 SCI 论文 3 篇；3. 该技术已在涟钢、普阳、盛隆等 10 家钢铁公司 33 流生产线投入应用，取得了显著的经济效益和社会效益。   |          |    |   |
| 单位名称  | 西安建筑科技大学 | 排名 | 3 |
| 对本项目技术创新和应用的贡献：1. 在该项目的完成过程中，西安建筑科技大学充分发挥自身在钢铁冶金工艺及技术方面的科研优势，积极参与该项目连铸工艺及铸坯质量控制研究，参与协助方案设计、产品研发以及工程化应用方面的科研，协助解决了该项目科技成果攻关过程的关键技术难题，保证了项目顺利开展；2. 协助中国重型机械研究院股份公司完成项目关键技术创新，共同突破完成了结晶器铜板变截面水缝结构的设计和模拟，实现了高端板坯结晶器高效均匀冷却，显著提升了板坯连铸拉速和性能。3. 该项目的研发成果已经推广应用至国内外钢铁企业，并取得了良好的社会效益和经济效益。  |          |    |   |

### 九、完成人合作关系说明

高琦（第 1 完成人）与何博（第 2 完成人）自 2007 年 12 月至 2019 年 8 月，以共同知识产权方式合作，产出发明专利“一种结晶器电动调宽装置窄边锥度控制方法”和“流场三维数据采集装置”；

何博（第 2 完成人）与王文学（第 3 完成人）自 2007 年 12 月至 2019 年 8 月，以共同知识产权方式合作，产出发明专利“一种实时在线修正板坯窄面缺陷的智能控制装置及方法”；

高琦（第 1 完成人）与关杰（第 4 完成人）自 2012 年 12 月至 2015 年 12 月，在关杰院士的指导下完成中国机械工业集团有限公司科技发展基金项目“高品质特殊钢特超厚板连铸技术及创新平台”。建成了中间包、结晶器水力学模型试验台，为高精度结晶器液位控制模型测试提供了平台支撑。

高琦（第 1 完成人）与苏文斌（第 5 完成人）自 2015 年 7 月至 2019 年 12 月联合申报国家自然科学基金面上项目“基于多信息源流数据的连铸扇形段辊缝值预测关

键技术研究”。作为项目第 4 完成人，对研究辊缝控制对结晶器液面波动的影响与预测提供工艺与现场经验指导。

高琦（第 1 完成人）作为“涟钢 210 转炉厂 2#连铸机板坯结晶器电磁搅拌控流技术改造工程配套结晶器”项目负责人，与姚成功（第 6 完成人）2018 年 10 月至 2020 年 7 月，完成了国内首套自主研发设计的多模式电磁控流结晶器的工程应用。

高琦（第 1 完成人）作为“涟钢 210 转炉厂 1#连铸机自动开浇项目”项目负责人，与米进周（第 8 完成人）、史伟（第 9 完成人）和陈国防（第 10 完成人）自 2019 年 5 月至 2020 年 6 月，完成国内首套高精度结晶器液面控制技术的工程应用。以共同知识产权方式合作，产出软件著作权“连铸装备液压驱动式结晶器液面自动开浇 控制系统 V1.0”。

## 科技进步奖公示项目 3

### 一、项目名称

乏燃料后处理设备用高耐蚀Ti35合金产业化关键技术

### 二、提名者及提名意见

提名单位:陕西省科学技术厅

提名意见：项目团队面向国家重大需求，对自主研发的高耐蚀 Ti35 合金进行了产业化应用研究，突破了大单重铸锭工程化制备、大规格高均质锻件制备、大口径薄壁高直线度管材制备、Ti35 合金配套焊丝制备及氩弧焊接、大直径厚复层 Ti35 合金/不锈钢复合接头制备等产业化关键技术，填补了我国乏燃料后处理用高耐蚀材料领域空白，居国际领先水平。项目获得授权专利 9 件、标准 13 项、质量控制文件 135

份，发表高水平学术论文4篇，成果被认定为陕西省重点新产品、陕西省工业精品。

项目成果应用于我国乏燃料后处理示范工程，实现了重大工程核心材料的自主保供。首批应用获直接经济产值7.2亿元，开拓了钛材在高端核材料领域的应用，创造了显著的经济效益和社会效益。

成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科学技术进步奖提名条件，同意推荐。

提名该项目为陕西省科学技术进步奖一等奖。

### 三、项目简介

2017年国务院正式批复了《核安全与放射性污染防治“十三五”规划及2025远景目标》，进一步明确了乏燃料后处理的核燃料闭式循环政策，以保障核电安全有序发展，助力实现“双碳”目标。当前我国每年乏燃料产生量已达千吨以上，但每年后处理能力仅为50吨，建设乏燃料后处理厂迫在眉睫。乏燃料后处理关键工艺设备长期服役于含阳离子的高温浓硝酸介质，设备用高耐蚀材料已成为制约我国乏燃料后处理技术发展的瓶颈之一。

本项目针对乏燃料后处理设备用高耐蚀Ti35合金面临的产业化问题，开展了技术攻关，形成了核心自主知识产权，实现了我国乏燃料后处理重大工程核心材料的自主保供，提升了我国乏燃料后处理技术水平。

主要科技创新如下：

#### 1. 大单重铸锭工程化制备技术

针对Ti35合金组元熔点及密度差异大、大单重铸锭熔炼熔池深，导致成分偏析及性能波动的问题，设计了低熔点Ti40Ta中间合金成分，提出了Ti、Ta混合粉“一步法”组合电极短流程制备方法；开发了“梯度功率”熔炼技术，分步实现Ti、Ta合金化及浅熔池下的均匀扩散，降低了铸锭径向成分波动；通过全流程控氧，将Ti35合金氧含量控制在最佳阈值范围。基于上述技术，解决了熔点差近1倍、密度差近3倍的Ti、Ta均匀化难题，提高了合金成分及性能批次稳定性。

#### 2. 大规格高均质锻件制备技术

对于Ti35合金铸锭原始晶粒粗大、变形抗力低加剧大横截面金属非均匀流动，导致大规格锻件晶粒均匀细化难的问题，创新性提出交叉相区锻造细晶策略，利用Ti35合金的低层错能特性，实现了高密度变形孪晶和几何必须位错储存、亚晶界及高密度位错处动态再结晶，将原始超1厘米晶粒细化至100微米以下；采用“棱面交替”锻造技术，结合长时中温退火，减小锻件表层与心部的组织差异。实现了大规格高均质Ti35合金锻件的批量生产，探伤级别达到A级。

#### 3. 大口径薄壁高直线度管材制备技术

对于国内缺乏Ti35合金大口径薄壁管材制备技术的现状，开发了“斜轧穿孔+两辊轧制+三点弯曲校直+立式约束热处理”集成技术，利用斜轧穿孔结合坯料控温，抑制了穿孔坯料大塑性流动导致的壁厚不均；基于有限元与晶体粘塑性（VPSC）模拟，并通过试验验证，实现了管材两辊大变形轧制；发明了“超大口径钛合金管材校直”

装置，配合立式约束热处理，解决了残余应力引起的薄壁管材直线度下降问题。实现了外径 $\geq 400\text{mm}$ 、壁厚 $\leq 12\text{mm}$ 、长度 $\geq 4200\text{mm}$ 、直线度 $\leq 0.5\text{mm}/1\text{m}$ 的大口径薄壁高直线度Ti35合金管材首次制备。

#### 4. Ti35合金配套焊丝制备及氩弧焊接技术

针对Ti35合金焊接接头与母材力学性能匹配差、传统工艺制备焊丝易出现孔洞等问题，设计了低杂质含量Ti35HS焊丝合金成分；基于Ti35合金室温变形的应变速率敏感性，开发了Ti35HS焊丝低速率辊模冷拉拔、分段真空热处理制备技术，提高了丝材表面与芯部金属流动的同步性和均匀性，避免了焊丝孔洞缺陷的产生，保障了成品焊丝杂质含量显著优于设计指标。

针对Ti35合金热导率低易产生焊接应力，导致乏燃料后处理设备尺寸精度下降的问题，开发了Ti35合金“悬挂组对焊接+注水封堵控温”集成技术，实现了焊接热应力及焊后残余应力调控，Ti35合金大型设备满足焊缝质量I级、直线度公差小于 $0.5\text{mm}/1\text{m}$ 等技术指标。

#### 5. 大直径厚复层Ti35合金/不锈钢复合接头制备技术

为避免Ti35合金/不锈钢熔化焊接引入的脆性Ti-Fe金属间化合物，采用爆炸复合焊接技术制备复合接头，但对于大直径厚复层复合接头，由于Ti35合金在爆炸冲击下发生非均匀流动，导致了异材界面局部熔化、结合率不足等问题。结合Ti35合金热物理性能，基于试验验证，发明了专用焊接装置达到钛/不锈钢同心度、间隙、碰撞角等精确可控，保证了爆炸能量均匀传递，提高了界面结合性，实现了大直径厚复层Ti35合金/不锈钢复合接头批次稳定制备，界面结合率达100%，室温剪切强度 $\geq 195\text{MPa}$ 。

本项目成果保障了我国乏燃料后处理工业示范厂重大工程的应用需求，实现了我国乏燃料后处理用高耐蚀材料的自主保供，首批应用获直接经济产值达7.2亿元。随着我国乏燃料后处理厂建设提速，近10年乏燃料后处理厂的建设将达到2400亿元的经济规模，具有自主知识产权的Ti35材料需求量将达到1000吨以上，直接经济产值约50亿元，为陕西省带来综合经济效益上百亿元。实现了钛合金在我国核工业领域高端应用，带动陕西省钛合金重点产业链升级，提高我国乏燃料后处理安全水平。

### 四、客观评价

#### （一）专家评价意见

2024年6月15日，陕西省技术转移中心组织专家组对“乏燃料后处理设备用高耐蚀Ti35合金产业化关键技术”项目成果进行会议评价，从新颖性、创新比重、领先程度、成熟度、知识产权清晰度、市场应用、经济效益、与“四个面向”的紧密程度八个方面进行了评价，综合评价结论为：该研究成果填补了我国乏燃料后处理高耐蚀材料领域空白，居国际领先水平。

#### （二）科技查新报告

2024年6月12日，委托国家发明奖查新单位、国家一级科技查新咨询单位陕西省科学技术情报研究院对“乏燃料后处理设备用高耐蚀Ti35合金产业化关键技术”进行了国内外科技查新，形成科技查新报告（编号CX20240601034），查新结论：在所检

索的国内外相关数据库中，未见有涉及该查新课题创新点技术内容的“乏燃料后处理设备用高耐蚀Ti35合金产业化关键技术”文献的公开报道。

### **（三）用户单位评价**

中核四〇四有限公司：西北有色金属研究院研制的核用Ti35合金材料（属于Ti-Ta合金系列）已应用于中核甘肃核技术产业园工程，至投入使用以来，Ti35材料相关设备运行稳定，其结果表明，Ti35合金材料在沸腾硝酸溶液中耐蚀性能表现优异。截至目前，尚未出现腐蚀问题，符合产业园工程特殊工况条件下的相关技术、质量要求。

航天晨光股份有限公司：我司从2021年开始应用高耐蚀Ti35合金材料产业化关键技术，使用Ti35材料约3吨，覆盖公司19台套设备，应用时间已达2年，材料质量合格，暂未出现使用问题。

西安核设备有限公司：本公司从2019年开始应用高耐蚀Ti35合金材料产业化关键技术，使用Ti35材料约75吨，覆盖公司17台套设备，应用时间已达4年，材料性能良好，提升了设备质量和安全性。

中国核工业二三建设有限公司：我公司从2020年开始应用高耐蚀Ti35合金材料产业化关键技术，使用Ti35材料约6吨，应用时间已达3年，材料复验合格，质量满足工程要求。

北京五隆兴科技发展有限公司：我司从2020年开始应用高耐蚀Ti35合金材料产业化关键技术，使用Ti35材料制造核级设备用蒸汽喷射泵8套，应用时间已达3年，材料性能良好，提升了蒸汽喷射泵的质量和安全性。

陕西诺盈自动化仪表有限公司：我司从2021年开始应用高耐蚀Ti35合金材料产业化关键技术，使用Ti35材料制造耐蚀仪表元件10余套，应用时间已达2年，材料耐蚀性能优异，提升了仪器、仪表的使用寿命。

### **（四）重点新产品认定**

2021年，Ti35合金被陕西省工业和信息化厅认定为陕西省重点新产品、陕西省工业精品。

### **（五）学术论文评价**

中国核动力研究设计院科学技术年报（2011）《工业化规模生产的Ti35钛合金在动力堆乏燃料模拟溶解液中的腐蚀行为》论文中指出：各项试验结果表明，Ti35合金在动力堆乏燃料模拟溶解液中的腐蚀抗力可以满足设计提出的要求，是后处理溶解器优良的候选结构材料。

## **五、应用情况**

项目成果已在中国核电工程有限公司、中国核工业二三建设有限公司、北京五隆兴科技发展有限公司、航天晨光股份有限公司、西安核设备有限公司、陕西诺盈自动化仪表有限公司等单位承担的国家重点型号工程的多台套设备及管路、仪表元件中应用。

主要应用单位情况表

| 序号 | 单位名称          | 应用的技术 | 应用对象及规模                      | 应用起止时间          | 单位联系人/<br>电话        |
|----|---------------|-------|------------------------------|-----------------|---------------------|
| 1  | 中国核电工程有限公司    | 整体技术  | 乏燃料后处理工业示范厂 1 期, 2 期 32 台套设备 | 2018.12-2022.12 | 张猛<br>/15210582971  |
| 2  | 中国核工业二三建设有限公司 | 整体技术  | 后处理管路等, 约 6 吨                | 2020.8-2023.6   | 吴全奎<br>/17344133008 |
| 3  | 北京五隆兴科技发展有限公司 | 整体技术  | 蒸汽喷射泵, 8 台套                  | 2020.3-2021.6   | 宗宝瑞<br>/13681267133 |
| 4  | 航天晨光股份有限公司    | 整体技术  | 后处理器等 19 台套设备                | 2021.3-2023.5   | 林笑晨<br>/13770631446 |
| 5  | 西安核设备有限公司     | 整体技术  | 后处理设备, 17 台套设备               | 2021.11-2022.12 | 宋杰<br>/15249236379  |
| 6  | 陕西诺盈自动化仪表有限公司 | 整体技术  | 耐蚀仪表元件 10 余套                 | 2021.5-2021.12  | 张旭<br>/15029066800  |

## 六、主要知识产权和标准规范等目录

| 序号 | 知识产权类别 | 知识产权具体名称                   | 国家(地区) | 授权号                  | 授权日期       | 证书编号     | 权利人              | 发明人   |
|----|--------|----------------------------|--------|----------------------|------------|----------|------------------|---|
| 1  | 标准     | Ti35 钛合金铸锭                 | 企标     | 标准号: Q/RMI 1001-2018 | 2018.12.11 | /        | 西安稀有金属材料研究院有限公司  | 张于胜、吴金平、赵恒章、赵彬、杨帆                                       |
| 2  | 标准     | Ti35 钛合金锻造板坯               | 企标     | 标准号: Q/RMI 3001-2019 | 2019.03.05 | /        | 西安稀有金属材料研究院有限公司  | 张于胜、吴金平、赵恒章、赵彬、杨帆                                       |
| 3  | 发明专利   | 一种耐硝酸腐蚀的 Ti35 钛合金          | 中国     | CN112662913B         | 2021.12.10 | 4840399  | 西安稀有金属材料研究院有限公司  | 吴金平, 赵恒章, 赵彬, 杨帆, 张于胜, 潘晓龙, 田丰                          |
| 4  | 发明专利   | 一种预防 VAR 一次锭熔炼过焊缝处掉块的控制方法  | 中国     | CN114293042B         | 2022.12.06 | 5631896  | 西部超导材料科技股份有限公司   | 罗文忠, 华正利, 王阳阳, 张升懿, 吴江涛, 何涛, 何永胜, 杜玉俊, 孙峰, 王凯旋, 刘向宏, 冯勇 |
| 5  | 发明专利   | 一种大尺寸耐蚀 Ti35 合金锻件的制备方法     | 中国     | CN112692204B         | 2022.09.23 | 5472232  | 西安稀有金属材料研究院有限公司  | 吕智丹, 吴金平, 赵恒章, 张于胜, 赵恺, 姬坤海, 李欢                         |
| 6  | 发明专利   | 一种大口径薄壁 Ti35 钛合金无缝管材及其制备方法 | 中国     | CN112453104B         | 2021.05.07 | 4405259  | 西安稀有金属材料研究院有限公司  | 赵恒章, 吴金平, 赵彬, 杨帆, 张于胜, 潘晓龙, 田丰                          |
| 7  | 实用新型专利 | 一种用于高精度超大口径钛合金管材的校直装置      | 中国     | CN219442983U         | 2023.08.01 | 19424910 | 西安赛特思迈钛业有限公司     | 魏芬绒, 杨晓康, 罗斌莉, 陈曦, 尚文涛, 马伟, 侯旭倩                         |
| 8  | 实用新型专利 | 一种钛棒与不锈钢管的焊接装置             | 中国     | CN218799788U         | 2023.04.07 | 18787116 | 西安天力金属复合材料股份有限公司 | 李莹, 朱磊, 王虎年, 王礼营, 冯海龙, 曹磊, 魏艺斌, 王茹                      |

|    |      |                       |    |              |            |         |                 |                          |
|----|------|-----------------------|----|--------------|------------|---------|-----------------|--------------------------|
| 9  | 发明专利 | 一种 Ti35HS 钛合金焊丝材的制备方法 | 中国 | CN112317993B | 2021.04.30 | 4390595 | 西安稀有金属材料研究院有限公司 | 赵恒章，吴金平，赵彬，杨帆，张于胜，潘晓龙，田丰 |
| 10 | 发明专利 | 一种薄壁管件焊接成型控制系统及方法     | 中国 | CN107186342B | 2023.04.07 | 5865152 | 西安优耐特容器制造有限公司   | 李宁，叶建林，郝大来，赵益辉，金跃峰，付维军   |

## 七、主要完成人情况

| 排名 | 姓名  | 技术职称 | 行政职务    | 工作单位            | 完成单位            | 对本项目的贡献  |
|----|-----|------|---------|-----------------|-----------------|--|
| 1  | 张于胜 | 正高   | 副院长     | 西北有色金属研究院       | 西北有色金属研究院       | 负责总体方案制定和组织实施，指导铸锭、板坯等批产稳定性工作，并制定企业标准 2 项，在大口径管制备工艺集成创新、配套焊丝质量提升等关键技术路径确定中贡献突出，获发明专利 4 件，涵盖主要科技创新 1、2、3、4 项。 |
| 2  | 刘向宏 | 正高   | 总工程师    | 西部超导材料科技股份有限公司  | 西部超导材料科技股份有限公司  | 负责 Ti35 合金铸锭、锻件制备的整体攻关和产业化方案，突破了 Ti35 合金均质熔炼和大规格锻件制备技术，提升了钛合金行业相关技术水平并实现了产业化应用，涵盖主要科技创新第 1 项、第 2 项。          |
| 3  | 马敬  | 正高   | 总工程师    | 中国核电工程有限公司      | 中国核电工程有限公司      | 协助负责人完成关键技术的实施及项目推广和应用。负责乏燃料后处理设备总体设计、技术指标制定工作，承担了产业化材料及设备相关技术指标及验收条件的制定和质量管控等工作。                            |
| 4  | 吴金平 | 正高   | 院长助理、所长 | 西安稀有金属材料研究院有限公司 | 西安稀有金属材料研究院有限公司 | 负责本项目的总体执行和技术攻关，在关键技术路径确定及产业化技术应用等方面贡献突出，获授权发明专利 4 件，涵盖主要科技创新第 1、3、4 项。                                      |
| 5  | 赵恒章 | 正高   | 副主任     | 西安稀有金属材料研究院有限公司 | 西安稀有金属材料研究院有限公司 | 主要负责技术攻关工作，在大口径管材制备及高质量配套焊丝制备中贡献突出，涵盖主要科技创新第 3、4 项。  |
| 6  | 叶建林 | 高工   | 董事长     | 西安优耐特容器制造有限公司   | 西安优耐特容器制造有限公司   | 组织了焊接技术研究，涵盖了主要科技创新第 4 项。  |
| 7  | 何涛  | 高工   | 无       | 西部超导材料科技股份有限公司  | 西部超导材料科技股份有限公司  | 在 Ti35 合金均质熔炼制备技术等方面开展了大量的技术研究工作，为 Ti35 合金大规格铸锭的制造和应用提供了重要的实验数据和技术支撑，涵盖主要科技创新第 1 项。                          |
| 8  | 赵彬  | 正高   | 副主任     | 西安稀有金属材料研究院有限公司 | 西安稀有金属材料研究院有限公司 | 参与 Ti35 合金材料产业化制备批产稳定性研究及技术攻关，在大口径管材工艺制定及实施、大规格锻件技术攻关中贡献突出，涵盖主要科技创新第 2、3 项。                                  |
| 9  | 张晓园 | 高工   | 无       | 西部超导材料科技股份有限公司  | 西部超导材料科技股份有限公司  | 在 Ti35 合金大规格锻件制备技术等方面开展了大量的技术研究工作，为 Ti35 合金大规格棒材、锻件的制造和应用提供了重要的实验数据和技术支撑，涵盖主要科技创新第 2 项。                      |
| 10 | 张成  | 高工   | 总工程师    | 西安优耐特容器制造有限公司   | 西安优耐特容器制造有限公司   | 负责配套焊丝焊接工艺评定及氩弧焊技术攻关，涵盖主要科技创新第 4 项。  |
| 11 | 杨帆  | 工程师  | 无       | 西安稀有金属材料研究院有限公司 | 西安稀有金属材料研究院有限公司 | 参与批产稳定性研究工作，涵盖了主要科技创新第 1 项。  |
| 12 | 杨晓康 | 正高   | 总经理     | 西安赛特思迈钛业有限公司    | 西安赛特思迈钛业有限公司    | 在高直线度大口径薄壁 Ti35 钛合金管材和高品质配套焊丝的技术开发中贡献突出，涵盖主  |



|    |     |     |      |                  |                  |   |
|----|-----|-----|------|------------------|------------------|---|
|    |     |     |      |                  |                  | 要科技创新第 3 项、第 4 项。   |
| 13 | 李莹  | 高工  | 主任助理 | 西安天力金属复合材料股份有限公司 | 西安天力金属复合材料股份有限公司 | 解决了该项目中大直径，厚复层连接件的制备难题，成功开发出多规格钛合金/不锈钢爆炸复合过渡连接件，并形成核行业标准 1 项，涵盖主要科技创新第 5 项。 |
| 14 | 郭延辉 | 高工  | 副部长  | 西安稀有金属材料研究院有限公司  | 西安稀有金属材料研究院有限公司  | 参与技术攻关，主要负责 Ti35 钛合金产业化的批产稳定性和质量管控，涵盖主要科技创新第 1 项。                           |
| 15 | 吕智丹 | 工程师 | 无    | 西安稀有金属材料研究院有限公司  | 西安稀有金属材料研究院有限公司  | 发明了一种大尺寸耐蚀 Ti35 合金锻件的制备方法，提高了锻件的组织均匀性，涵盖主要科技创新第 2 项。                        |

### 八、主要完成单位及创新推广贡献

| 排名 | 完成单位            | 创新推广贡献   |
|----|-----------------|--|
| 1  | 西北有色金属研究院       | 西北有色金属研究院针对前期研究现状和国家重大任务的质量和进度要求，成立了后处理工程项目部，统筹规划，集中各单位优势，分工协作，围绕产业化关键技术，负责制定项目总体方案、技术路线、研究内容和目标，按期保质完成了设备交付，保障了国家重大工程建设，为我国核工业的发展提供了稀缺材料和乏燃料后处理设备，开拓了陕西省核材料和装备产业发展领域。推动了项目成果在 3 项国家重点型号工程多台套设备及管路、仪表管中的应用，极大提高了乏燃料后处理关键设备、核心部件的安全性、可靠性与使用寿命，有力提升了我国乏燃料后处理的技术水平，取得了显著的经济效益和社会效益。 |
| 2  | 西安稀有金属材料研究院有限公司 | 作为项目第 2 完成单位，整体负责 Ti35 钛合金材料的产业化技术攻关及生产、质量控制，与设计部门商定关键部件材料验收技术条件，并进行了相关的合格性评价工作，促进了各项产业化关键技术的突破，是主要科技创新第 1 项、第 3 项、第 4 项的主要参与单位。西安稀有金属材料研究院有限公司积极推进本项目成果的转化，荣获陕西省重点新产品和陕西省工业精品，为我国核工业的发展提供了稀缺材料，开拓了陕西省核材料产业发展领域。   |
| 3  | 中国核电工程有限公司      | 作为项目的第 3 完成单位，承担产业化材料技术指标及验收条件的制定和质量管控等工作。从上世纪 90 年代，开始与西北有色金属研究院合作开发乏燃料后处理设备用高耐蚀钛合金，一直支持国产化材料的进程和相关的工程应用工作。推动了 Ti35 合金在乏燃料后处理工业示范厂的应用，提升了我国乏燃料后处理技术，实现了自主保供，在国际上产生了一定的影响。   |
| 4  | 西部超导材料科技股份有限公司  | 作为项目的第 4 完成单位，围绕钛合金大单重均质铸锭和高品质锻件需求，突破了成分偏析及组织均匀性控制技术，是主要科技创新第 1 项、第 2 项的主要参与单位，为产业化应用提供了技术支持和优质材料，促进了陕西省钛产业优化，提升了产品附加值，具有较强的示范作用。  |
| 5  | 西安优耐特容器制造有限公司   | 作为项目第 5 完成单位，是核乏燃料后处理设备制造的实施单位，开展了 Ti35 合金配套焊丝的焊接工艺评定及氩弧焊接技术研究，是主要科技创新 4 的参与单位。应用本成果完成了乏燃料后处理多台套设备制造，推动了钛合金装备制造技术水平的提升。  |
| 6  | 西安赛特思迈钛业有限公司    | 作为项目第 6 完成单位，是专业从事以钛及钛合金为主的生物医用和国防军用稀有金属加工材的国家重点“专精特新”小巨人企业，负责高直线度大口径薄壁 Ti35 钛合金管材和高品质配套焊丝制备方案设计和  |

|   |                  |  |
|---|------------------|--|
|   |                  | 实施，是主要科技创新第 3 项、第 4 项的参与单位。  |
| 7 | 西安天力金属复合材料股份有限公司 | 作为项目第 7 完成单位，攻克了大直径、厚复层 Ti35/不锈钢复合管接头制备难题并形成产业化，研发的多规格爆炸复合管接头，已应用于乏燃料后处理工程中，形成核工业标准 EJ/T20283-2021《钛及钛合金/奥氏体不锈钢爆炸复合连接件》。 |

## 九、完成人合作关系说明

西北有色金属研究院成立了后处理示范工程项目部，负责项目的具体执行。第一完成人张于胜为后处理示范工程项目部主任，是本项目的负责人。其他完成人吴金平为副主任，赵恒章、赵彬、杨帆、郭延辉、吕智丹为项目部成员。完成人马敬为中国核电工程有限公司总工程师，在项目中与西北有色金属研究院和西安稀有金属材料研究院有限公司就 Ti35 钛合金产业化技术指标的制订、验收和质量管控工作进行了合作。

完成人刘向宏、何涛、张晓园、杨晓康、李莹、叶建林、张成均为西北有色金属研究院控股产业公司人员，在产业化关键技术研究方面完成了大量的工作。完成人刘向宏、何涛、张晓园与张于胜等项目部成员在熔炼、锻造等方面合作，突破了大单重铸锭工程化制备技术、大规格高均质锻件制备技术，在主要科技创新第 1 项、第 2 项方面有突出贡献。完成人杨晓康与张于胜等项目部人员开发了大口径薄壁高直线度管材、高质量配套焊丝制备技术，在主要科技创新第 3 项、第 4 项方面有突出贡献。完成人叶建林、张成开展了 Ti35 材料氩弧焊接技术攻关，成功制备出多台套乏燃料后处理设备并获得工程应用，在主要科技创新第 4 项方面有突出贡献。完成人李莹与项目部人员进行了大直径厚复层 Ti35 合金/不锈钢复合接头制备技术攻关，解决了制备难题并形成产业化，在主要科技创新第 5 项方面有突出贡献。

完成人合作关系情况汇总表

| 序号 | 合作方式       | 合作者/项目排名                                 | 合作起始时间  | 合作完成时间  | 合作成果   | 证明材料 |
|----|------------|--|---------|---------|--|------|
| 1  | 共同参与制定标准规范 | 张于胜/1<br>吴金平/4<br>赵彬/8<br>赵恒章/5<br>杨帆/11 | 2018.10 | 2023.12 | Ti35 钛合金铸锭，Q/RMI 1001-2018，2018，12.03，标准。                  | 附件 1 |
| 2  | 共同参与制定标准规范 | 张于胜/1<br>吴金平/4<br>赵彬/8<br>赵恒章/5<br>杨帆/11 | 2019.01 | 2023.12 | Ti35 钛合金锻造板坯，Q/RMI 3001-2019，2019.03.05，标准。                | 附件 2 |
| 3  | 共同立项       | 赵彬/8<br>吴金平/4<br>张于胜/1<br>赵恒章/5<br>杨帆/11 | 2020.01 | 2022.12 | 核乏燃料后处理用 Ti35 耐蚀钛合金成果转化，2020CGXNX-023，2020.01，陕西省技术创新引导专项。 | 附件 9 |
| 4  | 共同知识产权     | 吴金平/4<br>赵恒章/5<br>赵彬/8                   | 2019.01 | 2023.12 | 一种耐硝酸腐蚀的 Ti35 钛合金，ZL202011404069.2，2021.12.10，发明。          | 附件 3 |

|   |                |  |         |         |  |       |
|---|----------------|--|---------|---------|--|-------|
|   |                | 杨帆/11<br>张于胜/1                           |         |         |  |       |
| 5 | 共同<br>知识<br>产权 | 何涛/7<br>刘向宏/2                            | 2019.01 | 2023.12 | 一种预防 VAR 一次锭熔炼过程<br>焊缝处掉块的控制方法，<br>ZL202111662436.3，2022.12.06，<br>发明。 | 附件 10 |
| 6 | 共同<br>知识<br>产权 | 吕智丹/15<br>吴金平/4<br>赵恒章/5<br>张于胜/1        | 2020.06 | 2023.12 | 一种大尺寸耐蚀 Ti35 合金锻件<br>的制备方法，ZL202011565697.9，<br>2020.09.23，发明。         | 附件 11 |
| 7 | 产业<br>合作       | 张于胜/1<br>刘向宏/2<br>吴金平/4<br>何涛/7<br>张晓园/9 | 2019.01 | 2020.10 | Ti35 合金大规格铸锭、棒材及锻<br>件制备工艺研究，技术服务。                                     | 附件 12 |
| 8 | 产业<br>合作       | 张于胜/1<br>杨晓康/12<br>吴金平/4<br>赵恒章/5        | 2019.01 | 2020.10 | 高精度大口径钛无缝管材试制，<br>技术服务。  | 附件 13 |
| 9 | 产业<br>合作       | 张于胜/1<br>李莹/13<br>吴金平/4<br>杨帆/11         | 2019.02 | 2020.02 | 钛/不锈钢爆炸复合管制备工艺<br>研究，技术服务。   | 附件 14 |

## 科技进步奖公示项目 4

### 一、项目简介

航天测运控天线系统状态评估与辅助决策技术

### 二、提名者及提名意见

提名单位：中国电子科技集团公司第三十九研究所

提名意见：项目建立了基于智能诊断技术的天线传动系统诊断评估和预测模型，提出了基于任务风险源的多源异构数据融合及故障特征快速关联筛选方法，确定了模型的最优训练特征集，提高了人工神经网络的学习训练效率。提出了多工况小样本和强噪声小样本条件下故障数据迁移强化训练方法，建立了基于双重注意力机制的智能诊断模型。解决了天线系统状态评估和健康趋势预测难题，填补了国内航天测运控天线故障快速诊断与状态评估的空白。该项目突破了多项关键技术，技术复杂、难度大、创新性强，解决了天线系统状态评估和健康趋势预测难题，填补了国内航天测运控天线故障快速诊断与状态评估的空白，保障了载人航天、深空探测等重大任务圆满实施。

提名该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖。

### 三、项目简介

航天测运控设备状态评估与任务决策技术针对当前载人航天、深空及火星探测等重大任务对测运控天线系统高可靠性、强健壮度的新要求，针对测运控天线系统故障实时监测与诊断、状态评估与预测以及任务辅助决策的关键技术开展研究及工程应用，属于技术新、难度大的创新性研究。

项目以我国地基航天测控网主用天线系统为研究对象，基于智能诊断决策和多源异构数据融合理论，将故障数据采集、融合处理、智能诊断、状态评估、趋势预测及辅助决策等功能有机融合，建立了测控天线系统的层次分析模型，确定了系统状态监测参数和诊断、评估及预测的方法，故障诊断正确率优于 95%，装备平均检测维护时间比人工缩短 30%以上，并设计形成了以综合健康体检、装备效能评估和联合故障诊断为目标任务的综合信息化服务及任务决策系统，提高了航天测控网的资源配比和运行维护效率，保障了重大航天任务圆满实施。项目实现了多种类型的模型以适应故障诊断、健康评估以及故障预测等装备状态鉴定需求并实现了工程化应用。

### 四、客观评价

相关第三方的鉴定结论：该成果针对当前载人航天、深空及火星探测等重大任务对测运控天线系统高可靠性、强健壮度的新要求，突破多源异构数据融合等多项关键技术，研制了天线状态评估及任务决策系统，提高了航天测控网的资源配比和运行维护效率，保障了重大航天任务圆满实施。

主要技术进步点和创新点：

1、揭示了天线传动系统关键部件故障失效的底层机理，建立了基于智能诊断技术的天线传动系统诊断评估和预测模型，提出了基于任务风险源的多源异构数据融合及故障特征快速关联筛选方法，确定了模型的最优训练特征集，提高了人工神经网络的学习训练效率。

2、提出了多工况小样本和强噪声小样本条件下的故障数据迁移强化训练方法，建立了基于双重注意力机制的智能诊断模型，研制了工程样机及配套软件系统，实现了工程化准实时故障诊断，将天线传动系统故障诊断准确率提升至 95%以上。

3、提出并设计了测运控天线系统层次分析模型，实现了任务决策可量化置信数据覆盖率 100%、故障检查及维修时间减少了 50%以上，解决了天线系统状态评估和健

康趋势预测难题，填补了国内航天测运控天线故障快速诊断与状态评估的空白。

鉴定委员会认为，该项目技术复杂、难度大、创新性强，拥有多项自主知识产权，核心技术自主可控，总体技术达到国际先进水平（其中航天测运控天线智能诊断技术国际领先）。该成果已应用于我国载人航天、深空及火星探测、15 米多频段对地观测专项等重大任务配套测运控天线系统，产生了显著的社会效益与经济效益，具有应用前景广阔。

### 五、应用情况

在新研航天地面设备进行上分布式部署应用，预计一年可节约巡检维护成本下降 50%，设备故障率降低 60%，可用度提高 60%，可显著提高设备系统的保障能力。该项目研制的健康管理保障终端及已在用户单位某站统一系统中应用，并在后续新研的系列 12 米双三频三轴设备和 15 米多频段一体化设备、10 米测量设备等数十套航天地面设备上进行了推广应用，在十三五中科院 15 米、12 米等多套遥感地面站上进行了部署应用，后续新研设备均需配置健康管理保障终端。

测控中心在本系统研制的基础上，开展了多站部署、中心升级改造的推进工作，在本项目技术的基础上加强了中心管理，形成了与地面测控网任务系统的对接，将系统数据与测控资源调度有效结合，进一步提高了地面测控网内管理航天地面设备的效能。

### 六、主要知识产权和标准规范

| 成果         | 名称  | 编号   | 成果权利人                         |
|------------|---|--|-------------------------------|
| 发 明 专利     | 一种测控天线电机故障特征筛选方法  | 授权号：CN10920550B  | 邱德敏、梁波、范海涛、焦鹏、周涤宇、赵国华、余磊      |
| 发 明 专利     | 一种适用于多极选编的高精度编码器跳码评估方法  | 授权号：CN10920550B  | 侯锦、雒小红、王鹏、张晓婕                 |
| 新 型 实 用 专利 | 天线齿轮箱振动测量装置   | 授权号：CN207881943U   | 邱德敏、梁波、焦鹏、李玉瑄、谢茂林、余磊、刁洪超、霍曾元  |
| 新 型 实 用 专利 | 一种能快速固定安装的电机电流测量装置  | 授权号：CN209894937U   | 邱德敏、焦鹏、谭甲坤、贾正平、刁洪超、刘亭、祝敬乐、王元亨 |
| 新 型 实 用 专利 | 一种能方便充电的电机电流测量装置  | 授权号：CN209608492U   | 邱德敏、焦鹏、谭甲坤、贾正平、刁洪超、刘亭、祝敬乐、王元亨 |
| 软著         | 天线阵工程天线健康管理<br>系统应用软件   | 授权（登记）号：2023SR0281294                                    | 侯锦                            |
| 软著         | 测控、雷达面天线自动<br>标校测试模块  | 授权（登记）号：2023SR0459934                                    | 侯锦                            |
| 软著         | 编码检测评估软件  | 授权（登记）号：2023SR1500013                                    | 侯锦                            |
| 论文         | Servo DC motor fault<br>diagnosis driven by<br>multi-source<br>heterogeneous data | DDCLS2021（第十届数据驱动控制与学习会议），021.5 苏州，EI 检索号 20213610868120 | 邱德敏、孙明伟、范海涛、邵军飞、蔺元祯、霍曾元、祝敬乐   |
| 论文         | 重构转速信号重采样的<br>天线系统轴承故障检测<br>方法  | 兵器装备工程学报 2021 .10  | 凡国龙、侯锦、周春燕                    |

|    |   |   |                                 |
|----|---|---|---------------------------------|
| 论文 | 一种适用于多极旋变的高精度编码器跳码监测评估方法  | 电子设计工程, 2021 年 4 月  | 侯锦、王鹏                           |
| 论文 | 基于健康管理功能的测控天线一体化维护保障系统研究  | 国外电子测量技术, 2021.4  | 侯锦、王鹏                           |
| 论文 | 转台式测控天线健康评估系统关键技术研究   | 通讯世界, 2019.10.  | 侯锦                              |
| 论文 | A reliability evaluation method for embryonic cellular array based on Markov status graph model | Journal of Systems Engineering and Electronics, 卷 31, 期 . 2, 2020 pp.432 - 446, sci 检索号:000530866600019,        | 王涛, 蔡金燕, 孟亚峰, 朱赛                |
| 论文 | Embryonic array configuration optimization method based on reliability and hardware consumption | Chinese Journal of Aeronautics. 2019, 卷 32 (03) 期, sci 检索号:000461786900010                                      | 王涛, 蔡金燕, 孟亚峰, 朱赛                |
| 论文 | Reliability evaluation method for warm standby embryonic cellular array                         | Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 卷 12, 期. 1, 2021 pp.617 - 634, sci 检索号:000532111700006 | 王涛, 蔡金燕, 孟亚峰, 朱赛, 吕萌, 李泽西       |
| 论文 | 多级平行轴齿轮传动系统动力学仿真  | 测控技术 ISSN 1000-8829, 2021 年 40 卷, 11 期  | 王鹏、李建容                          |
| 论文 | 直流电机电刷磨损预测的粒子滤波方法   | 微电机, 2021 年 8 月   | 王鹏、张作君                          |
| 论文 | 大型抛物面天线健康管理系统设计研究   | 通讯世界, 2019.10.  | 王鹏                              |
| 论文 | Real-time Adaptive Weighted Fusion of Multi-radar's Mutual Guidance Data                        | CVC2022 (第六届控制与智能化国际会议), 2022.10 南京   | 霍曾元, 邱德敏, 咎少东, 祝敬乐              |
| 论文 | 测控天线健康管理及支撑保障系统研究及设计  | 测控技术 ISSN 1000-8829, 2022.8.  | 侯锦、吴宗清、胡红军、秦明暖、付树洪              |
| 论文 | 基于修正瑞利分布的 S/Ka 双频天线捕获概率分析   | 中国空间科学技术, 2023 年 10 月 25 日, ISSN 1000-758X  | 章鹏飞、刘军锋、曾凡鹏、鲁高飞、潘胤圭             |
| 论文 | 胚胎电子系统技术在航天电子装备中的应用   | 电讯技术, 2023, 卷 63, 期, 9, 1439-1447   | 王涛, 李泽西, 陈学军, 王戈, 刘军锋, 邓德鑫, 孟海涛 |

## 七、主要完成人情况

| 姓名  | 排名 | 技术职称/职务 | 工作单位   | 对本项目贡献                                     |
|-----|----|---------|--------|--|
| 任文龙 | 1  | 高工/副所长  | 39 所   | 系统总体技术路线规划、总体方案设计、项目管理                     |
| 吴宗清 | 2  | 高工      | 卫星测控中心 | 总体方案设计与系统功能框架设计、任务决策功能规划设计                 |
| 侯锦  | 3  | 高工      | 39 所   | 故障诊断模型设计、特征项筛选及评估指标确定、评估流程设计、层次分析模型设计、软件开发 |
| 刘军锋 | 4  | 工程师     | 卫星测控中心 | 传感器布局设计、分布式数据采集设计、任务能力分析、智能诊断方法设计          |
| 李睿智 | 5  | 工程师     | 卫星测控中心 | 数据预处理方法设计、深度学习模型训练及参数调试                    |
| 王涛  | 6  | 工程师     | 卫星测控中心 | 可靠性模型分析、评估模型设计                             |

|     |    |     |        |                                       |
|-----|----|-----|--------|---------------------------------------|
| 王鹏  | 7  | 高工  | 39 所   | 天线系统失效模式分析及机电故障模式识别、系统机电监测及故障分析功能需求分解 |
| 祝敬乐 | 8  | 技师  | 卫星测控中心 | 数据采集系统硬件设计及实现、调试                      |
| 余磊  | 9  | 工程师 | 卫星测控中心 | 系统软件设计及软件测试                           |
| 周春燕 | 10 | 高工  | 39 所   | 系统测试平台设计及系统功能测试                       |

八、主要完成单位及创新推广贡献

| 排序 | 完成单位              | 对本项目的贡献   |
|----|-------------------|---|
| 1  | 中国电子科技集团公司第三十九研究所 | 主持项目关键技术研究，完成了天线系统故障机理及采集、监测信号预处理与特征信号分离、状态特征提取与评估指标建立、健康状态诊断预测与评估的模型与方法的技术基础研究，建立了天线传动系统诊断评估和预测模型，提出了基于任务风险源的故障特征快速关联筛选方法，确定了模型的最优训练特征集。提出并设计了测运控天线系统层次分析模型，完成了测站、中心状态监测、诊断、评估和预测的软件设计，实现了工程化应用设备并进行了部署。 |
| 2  | 中国西安卫星测控中心        | 参加了系统总体架构、任务风险源识别、天线传动系统模型、智能诊断模型等关键技术研究，完成了基于多源异构数据融合的航天测运控天线故障特征快速关联技术的论证与模型设计。将项目研究成果在本单位内多个测控设备进行测试验证和推广使用，极大促进了项目研究的不断完善、解决了工程实践中存在的问题，为项目的推广应用做出了突出贡献。  |

九、完成人合作关系说明

完成人合作关系主要为项目研究小组合作形式，分工明确，由 39 所人员完成故障及失效模式分析和主要模型研究设计与参数标定，以及状态特征提取与评估指标建立和系统工作流程设计等，由中国西安卫星测控中心部队完成任务风险源识别，基于多源异构数据融合的航天测运控天线故障特征快速关联技术的论证与模型设计，并组织工程应用部署与测试设计，双方开展协同开展关键技术的论证、设计和验证工作。

科技进步奖公示项目 5

一、项目名称：城市污泥协同大宗固废多路径制备绿色建材关键技术与工程应用

二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省科学技术厅

提名意见：该项目属于固废资源化综合利用和绿色建材领域。项目以城市污泥和

大宗固废多路径协同制备绿色建材，实现固废的资源化、规模化应用为出发点，针对难处置的城市污泥和大宗固废，创新地开发了污泥预处理技术及多组份固废净化分选技术，为多源固废协同处置提供条件；开发出多种绿色建材产品及其绿色制备关键技术，建立了绿色制备工艺技术集成与产品应用技术。该成果创新性突出、技术指标先进，解决了城市污泥与大宗固废资源化利用过程中的关键技术难题。

项目研究成果已成功应用于陕西西安、富平、宝鸡、新疆、广东、四川、安徽、重庆等地，特别在国家可持续发展议程创新示范区、粤港澳大湾区、“一带一路”和陕西西咸新区得到大量推广和应用，经济与社会效益显著。

项目总体成果达到国际领先水平。项目成果对无废城市、海绵城市建设和工业低碳化技术水平发展具有重大贡献，引领固废资源化产业高质量发展。

拟提名该项目为陕西省科学技术进步奖一等奖。

### 三、项目简介

本项目属于固废资源化综合利用和绿色建材领域。

随着新型城镇化和工业化的快速发展，城市固废（污泥、建筑垃圾）与工业固废（煤矸石、尾矿、冶炼废渣等）堆存量和年产量日益增加，对环境和社会造成了严重影响，同时“无废城市”建设试点工作方案的实施，实现其减量化、无害化、资源化处置已迫在眉睫。项目以城市污泥和大宗固废多路径协同制备绿色建材，实现固废的资源化、规模化应用为出发点，围绕国家生态文明建设重大战略、国家可持续发展战略、陕西省固废资源化全产业链高质量发展的要求，针对难处置的城市污泥和大宗固废，开发出城市污泥和大宗固废预处理关键技术、绿色建材及其制备工艺关键技术、建成 1 批绿色制备工艺技术集成与产品应用技术示范，攻克了城市污泥协同大宗固废资源化、规模化消纳的难题，实现产业化推广应用，取得了系列创新性研究成果。主要创新性技术内容包括：（1）创新地开发了污泥预处理技术及多组份固废净化分选技术，为多源固废协同处置提供条件；（2）开发出绿色建材产品及其绿色制备关键技术；（3）建立了绿色制备工艺技术集成与产品应用技术，为工程应用提供技术支撑。

项目研究成果已成功应用于陕西西安、富平、宝鸡、新疆、广东、四川、安徽、重庆等地，推广应用绿色建筑材料生产线 48 条，并建成示范工程 150 余万平方米，特别在国家可持续发展议程创新示范区、粤港澳大湾区、“一带一路”、京津冀地区、关天经济区和陕西西咸新区得到大量推广和应用，经济与社会效益显著。经成果鉴定，项目总体成果达到国际领先水平。项目成果对对无废城市和海绵城市建设，工业低碳化技术水平发展具有重大贡献，引领固废资源化产业高质量发展。

### 四、客观评价

#### （一）专家意见及验收鉴定意见

1、中国工程院院士陈勇教授认为：项目采用创新性预处理技术提高污泥脱水能力，攻克了污泥掺量低、环境污染严重等重大技术难题，将污泥含水率有效脱至 40%，使得烧结制品中污泥（含水率 40%）掺量 30%以上，开发城市污泥绿色墙体材料及其绿色制造关键工艺技术，完成绿色制造工艺技术集成示范与产品应用，推动了城市污



泥协同大宗固废在墙材行业的资源化利用，具有明显的经济效益、社会效益，市场前景广阔。项目研究成果达到国际领先水平。

2、2015年2月15日，陕西省科技厅组织专家对“烧结保温砌块成套生产工艺与结构应用技术”进行科技成果鉴定，鉴定委员会一致认为：开发出3类节能保温新产品、配套专用于干混薄层砂浆新产品、烧结保温砌块薄灰缝施工工艺及薄灰缝厚度控制技术，可实现砌筑灰缝1~2mm，降低热量损失并节约灰缝原材料80%以上；建立了烧结保温砌块砌体结构设计和构造技术。研究成果砌块孔型优化技术、薄灰缝厚度控制技术达到国际领先水平。

3、2023年8月26日，中国建筑材料联合会组织专家对“城市污泥和矿化垃圾制备绿色墙材关键技术研究与应用”进行科技成果鉴定，鉴定委员会一致认为：项目集成创新了“污泥蒸汽破壁-复合絮凝-高效压滤脱水-余热干化”四级深度脱水技术；污泥（含水率80%）掺量达到40%以上，开发污泥复合矿化垃圾烧结墙材和污泥基轻质阻燃纳米复合芯材保温板；项目成果达到国际先进水平。

4、2021年7月30日，国家项目牵头单位组织专家，对“十三五”重点研发计划课题“城市污泥和矿化垃圾制备绿色墙材关键技术与示范”（2017YFC0703201）进行综合绩效评价，专家组一致认为：课题开发污泥复合矿化垃圾烧结墙体材料，实现污泥（含水率80%）制备烧结墙材掺量达到40%以上；开发污泥基保温板材，实现污泥（含水率80%）掺量达到50%以上，污泥保温板材导热系数达到0.026 W/m·K。该成果已经登记，达到国际领先水平。

5、2023年3月18日，中国建筑材料科学研究总院有限公司组织专家，对“十三五”国家重点研发计划课题“村镇地域再生材料制备生态建材关键技术研究”（2018YFD1101001）进行综合绩效评价，专家组一致认为：课题组成功采用不同生产工艺生产河湖淤泥保温建材制品，淤泥掺量达到80%以上。

6、2018年5月25日，农业农村部科技教育司组织专家，对项目组完成的国家公益性行业（农业）科研专项“生活污水沼气化处理利用技术及设备研究与示范”（201303101）进行验收，验收专家组一致认为：项目针对我国生活污水资源化利用技术手段缺乏、效率低等问题，从生活污水预处理、厌氧发酵、消化污泥资源化利用3个方面，构建了污泥物理化学预处理、高固体沼气发酵、墙体材料制备与农田安全利用技术体系。

7、2015年3月27日，国家科技部、住房和城乡建设部组织专家，对项目组完成的“十二五”国家科技支撑计划“节能烧结类墙体材料成套应用技术研究（2011BAJ04B01）”进行了课题验收，验收专家委员会一致认为：课题组对烧结保温砌块及墙体热工性能、薄灰缝施工工艺和灰缝厚度控制技术研究，研发了薄灰缝砌块砂浆；通过烧结保温砌块、砌体、墙体力学性能和抗震性能试验研究，提出了砌块、砌体、墙体设计指标及计算公式，最终建立了烧结保温砌块砌体结构设计方法。

8、2016年11月29日中国建筑材料集团有限公司组织专家，对项目组完成的“十二五”国家科技支撑计划课题“水泥、墙材、窑炉大气污染物治理关键技术与示

范（2013BAC13B01）”进行了课题验收，验收专家委员会一致认为：课题组开发了墙材窑炉大气污染物协同处置技术，示范线实测浓度与国家标准相比降低了 40%以上。

9、2015 年 3 月 31 日住房和城乡建设部建筑节能与科技司组织专家，对项目组完成的“十二五”国家科技支撑计划“固体废弃物本地化再生建材利用成套技术

（2011BAJ04B05）”进行了课题验收，验收专家委员会一致认为：课题组成功研制出干化污泥消纳率达 30%以上的普通污泥轻骨料、干化污泥消纳率达 35%以上的污泥超轻骨料。

**（二）本项目曾获科技奖励情况**

| 序号 | 获奖项目名称                 | 时间      | 奖项名称                        | 等级    | 主要获奖人        | 授奖单位           |
|----|------------------------|---------|-----------------------------|-------|--------------|----------------|
| 1  | 固废综合利用制取再生增强轻骨料关键技术与应用 | 2021.12 | 中国建筑材料流通协会建材与家居行业科学技术奖技术转化类 | 一 等 奖 | 权宗刚、浮广明、王科颖等 | 中国 建筑 材 料流通协会  |
| 2  | 生活污泥资源化墙体材料关键技术研究与应用   | 2018.12 | 中国建材集团技术进步奖                 | 一 等 奖 | 权宗刚、浮广明、郑文衡等 | 中国 建 材 集 团有限公司 |
| 3  | 节能型烧结保温砌块成套生产工艺与应用技术   | 2017.12 | 中国建材集团科技进步奖                 | 一 等 奖 | 权宗刚、浮广明等     | 中国 建 材 集 团有限公司 |

**五、应用情况**

项目研究成果已成功应用于陕西西安、富平、宝鸡、新疆、广东、四川、安徽、重庆等地，推广应用绿色建筑材料生产线 48 条，并建成示范工程 150 余万平方米。

## 科技进步奖公示项目 6

**一、项目名称：**秦岭铁尾矿绿色建材资源化产业链关键技术及工程应用

**二、提名者及提名意见**

提名单位：陕西省科学技术厅

提名意见：项目以秦岭铁尾矿绿色建材资源化利用及在装配式建筑中应用为目标，针对秦岭铁尾矿排放量大、活性低以及装配式预制构件自重大等问题开展了系统性、创新性研究，提出了铁尾矿“一库一品、精细分选、梯级利用”的资源转化路径。通过常温加工、中温烧结、高温熔融的处理方法，将不同组分与粒径的铁尾矿加工成混凝土用骨料、高强陶粒及岩棉制品等，最终用于装配式建筑的现浇体系、轻质预制构件体系及外墙保温体系。通过高效大颗粒流态化传热效率提升技术、含铁生产废液生物矿化技术、莫来石前驱体梯次诱导生长烧结技术、富铁纤维及制品结构与性能优化技术、轻质预制构件结构性能及设计方法等创新性关键技术，创建了秦岭铁尾矿全组分利用的规模化、高值化新模式及标准化体系，打通了从绿色秦岭、绿色建材、绿色建造到绿色建筑的区域产业链。项目成果已在产业链相关企业实现产业化。

项目完成单位包括高等院校及产业链相关企业，在黄河流域生态保护及高质量发展的国家战略指引下，通过联合技术攻关，实现铁尾矿固废建材资源化利用，助力新型建筑工业化快速发展，形成绿色新质生产力，具有巨大的环境、经济和社会效益。项目成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科技进步奖提名条件。

拟提名该项目为陕西省科学技术进步奖一等奖。

**三、项目简介**

本项目属于土木建筑领域。

秦岭环境保护是我国生态文明建设的重要内容之一。秦岭地区矿山开采和选矿留下的大量尾矿为区域环境带来巨大威胁。铁尾矿是在一定选矿技术和条件下提取有价组分后排放的废弃物，主要包括粗选排放的铁尾矿废石，以及细选排放的铁尾矿粉。铁尾矿约占矿石开采量的 50%~80%，体量巨大；且存在活性弱、资源化难度大且利用

率低等问题；铁尾矿大量堆放影响生态环境，存在安全隐患。尽快消纳秦岭地区历史堆存及不断产生的铁尾矿，是践行习近平总书记“绿水青山就是金山银山”理念，推行秦岭保护相关政策的重要举措。同时，建筑行业存在基础原材料如砂石等资源短缺、绿色建材供给不足、装配式建筑优势无法充分发挥等问题，制约了行业绿色低碳发展步伐。针对上述问题，本项目团队历时 15 年，在国家自然科学基金项目、陕西省重点研发计划项目、陕西省建设科技计划项目等 10 余个项目及产业链相关企业的支持下，以秦岭铁尾矿资源化利用为目标，以绿色建材为桥梁纽带，以装配式建筑为应用场景，通过理论分析、试验研究与工程示范等多种手段，对铁尾矿建材资源化、绿色建材生产、装配式预制构件设计与生产等关键技术开展了系统性研究，在铁尾矿骨料、铁尾矿（陶粒）混凝土、铁尾矿岩棉制品、轻质装配式预制构件的研发、生产与工程应用等方面取得了系列创新性成果。结合秦岭-大西安区域特征，通过“政-产-学-研-金”深度融合，贯通了“绿色秦岭-绿色建材-绿色建筑-绿色建筑”的区域产业链，为打造具有鲜明地域特征的建筑业内陆改革开放新高地，形成绿色新质生产力，做出重要贡献。

本项目在铁尾矿资源化利用的产业链体系中开展技术创新工作，取得的主要技术创新成果如下：

**（一）铁尾矿骨料流态化高效换热装备研发与铁尾矿骨料混凝土绿色生产。**通过理论分析与模型试验阐明了大颗粒气固两相流动力学特性及换热机理，发明了立式铁尾矿骨料烘干选粉一体式装置，提升了铁尾矿机制砂烘干和粉尘脱除效率；研发了铁尾矿骨料混凝土、砂浆、灌浆料等系列绿色建材产品；通过生物矿化技术，将铁尾矿混凝土生产废水与生活废水结合，利用铁相催化作用获得球形纳米碳酸钙并回用于混凝土，实现了铁尾矿混凝土绿色生产及产品性能提升的双重目标。

**（二）铁尾矿岩棉纤维多尺度调控理论与制品生产技术。**基于单纯形法的分子动力学模拟，建立了  $\text{FexOy-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO-CaO}$  五元体系多相微观结构模型，阐明了富铁岩棉纤维变温过程中微观结构演化机理；通过多目标协调，确定了铁尾矿纤维组分优化调制方法，降低了体系熔化性温度，增加了纤维玻璃体网络聚合度，提升了岩棉纤维热稳定性；通过 CT 扫描对铁尾矿岩棉制品进行细观模型重构，分析了纤维细观结构对材料热工能性能、力学性能的影响规律，提出铁尾矿岩棉制品细观结构优化控制参数。构建了异向拼接岩棉复合型保温一体化模板，在保证保温隔热要求的基础上提升岩棉复合模板的力学性能，满足绿色建筑要求。

**（三）铁尾矿陶粒前驱体诱导强化烧结理论及轻质预制构件设计与生产技术。**结合铁尾矿富铁特征，首创了铁相价态优化控制及莫来石前驱体诱导陶粒性能提升技术，大幅提升铁尾矿陶粒力学性能。建立了铁尾矿陶粒吸水动力学模型及混凝土中轻质骨料上浮模型，明确了铁尾矿陶粒混凝土生产工艺参数。通过实验研究与数值模拟，分析了铁尾矿陶粒混凝土轻质预制构件承载能力和变形特性，提出了铁尾矿陶粒混凝土轻质预制构件设计方法。研发了铁尾矿陶粒混凝土-轻钢复合墙板，根据圈梁构造柱理论，建立了弱钢框架-轻钢复合墙体结构体系，并提出完整的设计

方法。

本项目研究成果已在产业链相关企业实现工业化生产。本成果构建的绿色区域产业集群，创建了矿山固废资源化利用与新型建筑工业化协同发展的新范式，必将 对实现“双碳目标”、做好秦岭卫士、促进建筑业绿色低碳高质量发展做出贡献。

## **四、客观评价**

### **（一）科技成果查新**

项目成果于 2023 年 3 月 16 日进行了国内、外科技查新，以铁尾矿砂高效烘干-粉尘脱除装置的研发，生物矿化及铁尾矿混凝土生产控制技术，铁尾矿耐火岩棉生产技术，铁尾矿高强陶粒生产技术，铁尾矿陶粒混凝土轻质预制构件设计和生产技术 5 个关键技术为查新点，通过国内外 25 个文献数据库进行检索并对比，得出结论：除项目组成员发表的前期研究成果外，未见到与该项目查新点内容相同的中外文文献报道，证明了本项目的创新性。

### **（二）科技成果评价**

2023 年 5 月 8 日，陕西省土木建筑学会组织中国工程院刘加平院士(评价委员会主任)、牛荻涛教授（评价委员会副主任）、王栋民教授、冷发光研究员、李辉教授、肖慧教授级高工、韩大富教授级高工 7 位专家，对“基于区域产业链的秦岭铁尾矿绿色建材资源化关键技术及工程应用”成果进行了科技评价，评价委员会一致认为：项目成果整体达到国际领先水平。

## **五、应用情况**

### **（一）应用情况**

根据项目主要完成单位及部分应用单位的不完全统计，本项目发明的铁尾矿砂高效烘干-粉尘脱除装置已在陕西迈特斯科新材料有限公司、陕西铁力耐特绿色建材有限公司等企业的铁尾矿机制骨料生产线组装并应用；本项目的含铁生产废水生物矿化技术、铁尾矿陶粒制备技术、铁尾矿岩棉生产技术等核心技术已在中建西部建设北方有限公司、陕西合力保温材料制品有限责任公司等企业投产运行；本项目研发的铁尾矿骨料、预拌混凝土和砂浆、铁尾矿陶粒混凝土轻质预制构件、铁尾矿岩棉等绿色建材产品已应用于西安绕城大修项目、曲江御井路保障性公租房项目、融创南长安街壹号项目等多个项目中。

基于本项目成果编制的《西安市普通预拌砂浆生产与应用技术规程》(DBJ61/T 85-2014)、《机制砂生产与应用技术规程》(DBJ 61/T 137-2017)、《预拌混凝土绿色 生产与管理技术规程》(DBJ61/T188-2021)、《绿色建材评价技术标准》(DB 61/T5022-2022)、《铁尾矿陶粒混凝土预制构件应用技术规程》(DB 61/T 5064-2023)等陕西省工程建设标准被陕西土木建筑行业的生产、设计、施工及检验检测各环节广泛采纳和应用。

### **（二）主要应用单位情况表**

| 序号 | 单位名称             | 应用的技术 | 应用对象   | 应用起止时间     |
|----|------------------|-------|--|------------|
| 1  | 陕西铁力耐特绿色建材有限公司   | ①     | 采用该技术生产的铁尾矿骨料主要应用于西安泰成混凝土有限责任公司等商混企业和西康高铁项目等。              | 2018.06 至今 |
| 2  | 陕西迈特斯科新材料有限公司    | ①     | 采用该技术生产的铁尾矿骨料主要应用于陕西中兴混凝土工程有限公司、西安新意达建筑制品有限公司、金匠建设集团有限公司等。 | 2016.03 至今 |
| 3  | 中建西部建设北方有限公司     | ①     | 采用该技术生产的铁尾矿骨料混凝土主要用于西安地铁八号线 3 标项目、秦商国际中心项目等。               | 2017.05 至今 |
| 4  | 陕西宏阳商品混凝土工程有限公司  | ①     | 采用该技术生产的铁尾矿骨料混凝土主要用于柞水服务区升级改造项目、柞水越影商住项目等。                 | 2016.03 至今 |
| 5  | 西安锦晟建材有限公司       | ①     | 采用该技术生产的铁尾矿骨料混凝土主要应用于西安绿地丝路全球文化中心住宅 DK1 项目、陆港新家园一期项目等。     | 2018.04 至今 |
| 6  | 陕西合力保温材料制品有限责任公司 | ②     | 采用该技术生产的铁尾矿岩棉主要应用于陕西鑫苑置业有限公司、陕西海琛建筑工程有限公司等开发建设的相关项目。       | 2018.11 至今 |
| 7  | 陕西建工第五建设集团有限公司   | ①②    | 采用该技术生产的铁尾矿骨料混凝土和铁尾矿岩棉主要用于海康威视西安科技园建设项目、西安团结安置社区及配套项目等。    | 2018.01 至今 |
| 8  | 宝鸡市育才房地产开发有限公司   | ①②    | 采用该技术生产的铁尾矿骨料混凝土和铁尾矿岩棉主要用于育才“一号公园”住宅小区项目、育才“天悦”住宅小区项目等。    | 2018.07 至今 |
| 9  | 陕西秦达建材有限公司       | ③     | 采用该技术生产的铁尾矿陶粒主要应用于陕西投资远大建筑工业有限公司、陕西未来创投建设科技有限公司等。          | 2018.11 至今 |
| 10 | 陕西投资远大建筑工业有限公司   | ③     | 采用该技术生产的铁尾矿陶粒混凝土轻质预制构件主要应用于大明宫金茂府项目、秦汉里保障性租赁住房工程项目等。       | 2019.10 至今 |

## 六、主要知识产权和标准规范等目录(限 10 条)

| 序号 | 知识产权类别 | 知识产权具体名称          | 国家(地区) | 授权号              | 授权日期       | 证书编号    | 权利人                 | 发明人                          |
|----|--------|-------------------|--------|------------------|------------|---------|---------------------|------------------------------|
| 1  | 发明专利   | 一种多层鼓泡流态化除粉立式烘干装置 | 中国     | ZL201510628193.X | 2017.12.19 | 2745533 | 长安大学; 柞水县宏阳尾矿治理有限公司 | 李晓光, 鲁绍锋, 屈雅安, 谢诚, 曾健        |
| 2  | 发明专利   | 一种轻质陶粒及制备方法       | 中国     | ZL201810991997.X | 2020.4.10  | 3751157 | 长安大学                | 李晓光, 秦晋一, 裴秀卫, 王攀奇, 陈传新, 屈雅安 |

|    |      |  |    |                                      |            |   |                  |   |
|----|------|--|----|--------------------------------------|------------|---|------------------|---|
| 3  | 发明专利 | 一种高强耐火岩棉及制备方法  | 中国 | ZL201810932947.4                     | 2020.1.17  | 3667304   | 长安大学             | 李晓光；屈雅安                                       |
| 4  | 标准   | 西安市普通预拌砂浆生产与应用技术规程   | 中国 | DBJ 61/T 85-2014                     | 2014.04.21 | 备案号：J12657-2014                                       | 西安市城乡建设委员会，长安大学等 | 李晓光；屈雅安等                                      |
| 5  | 标准   | 机制砂生产与应用技术规程   | 中国 | DBJ 61/T 137-2017                    | 2017.08.03 | 备案号：J13971-2017                                       | 西安市城乡建设委员会，长安大学等 | 李晓光；屈雅安等                                      |
| 6  | 标准   | 预拌混凝土绿色生产与管理技术规程   | 中国 | DBJ 61/T 188-2021                    | 2021.06.03 | 备案号：J15778-2021                                       | 西安市建筑节能协会，长安大学等  | 李晓光；常瑞凤；刘云霄；屈雅安；梁坤等                           |
| 7  | 标准   | 绿色建材评价技术标准   | 中国 | DB 61/T5022-2022                     | 2022.03.10 | 备案号：J16278-2022                                       | 西安市建筑节能协会；长安大学等  | 李晓光；屈雅安；常瑞凤；梁保真等                              |
| 8  | 标准   | 铁尾矿陶粒混凝土预制构件应用技术规程   | 中国 | DB 61/T 5064-2023                    | 2023.08.01 | 备案号：J17082-2023                                       | 长安大学；西安市建筑节能协会   | 李晓光；梁保真；常瑞凤；朱小磊等                              |
| 9  | 论文   | Cyclic performance of steel frame fabricated with cold-formed steel composite wall structure   | 中国 | DOI10.1016/j.engstruct.2022.114892   | 2022.09.24 | Engineering Structures 270 (2022) 114892              | 长安大学             | Jiqin Wang, Tianhua Zhou, et al.              |
| 10 | 论文   | Urea supply control in microbial carbonate precipitation to effectively fill pores of concrete | 中国 | DOI10.1016/j.conbuildmat.2021.125123 | 2021.11.11 | Construction and Building Materials 310 (2021) 125123 | 长安大学             | Jinyi Qin, Qingyang Qin, Xiaoguang Li, et al. |

## 七、主要完成人情况

主要完成人情况如下：

|  |         |     |   |
|--|---------|-----|---|
| 姓 名  | 李晓光     | 排 名 | 1 |
| 行政职务   | 副院长     |     |   |
| 技术职称   | 教授      |     |   |
| 工作单位   | 长安大学    |     |   |
| 对本项目主要学术贡献：<br>负责铁尾矿绿色建材产品研发相关技术路线的制定，进行产品研发技术指导和实施。发明了多层鼓泡流态化除粉立式烘干装置、轻质陶粒及制备方法、高强耐火岩棉及制备方法，完成 了铁尾矿骨料、铁尾矿岩棉、铁尾矿陶粒、轻质预制构件等绿色产品的试制。研究成果为铁尾 矿资源化及在绿色装配式建筑中的应用提供了重要理论、技术及产品支撑，并获得了显著经济 和社会效益。 |         |     |   |
| 姓 名  | 周吉峰     | 排 名 | 2 |
| 行政职务   | 董事长/总经理 |     |   |
| 技术职称   | 正高级工程师  |     |   |

|  |                |
|--|----------------|
| 工作单位   | 陕西科技控股集团有限责任公司 |
| 对本项目主要学术贡献：<br>负责项目整体规划，通过组织相关高校和企业开展技术和产品研发，建立秦岭铁尾矿绿色建材资源化及其应用区域产业链方案。开展低硅铁尾矿陶粒及发泡混凝土研究，为铁尾矿轻质骨料在预制构件及新型墙体材料中的应用奠定基础，同时，指导集团下属建筑设计院等相关单位开展本项目标准系列的标准宣贯工作，保证其在建筑工程设计中履行规范重要条款。 |                |

|  |      |     |   |
|--|------|-----|---|
| 姓 名  | 周天华  | 排 名 | 3 |
| 行政职务   | 无    |     |   |
| 技术职称   | 教授   |     |   |
| 工作单位   | 长安大学 |     |   |
| 对本项目主要学术贡献：<br>开展绿色装配式轻钢复合建筑结构受力性能及设计理论研究，借助铁尾矿陶粒轻质混凝土 的材料优势，将“圈梁—构造柱”抗震体系引入到传统冷弯薄壁型钢结构体系中，提高了结构 体系的整体性和抗震性能，拓展了铁尾矿陶粒轻质混凝土的应用方向。 |      |     |   |

|   |              |     |   |
|---|--------------|-----|---|
| 姓 名   | 王军           | 排 名 | 4 |
| 行政职务  | 副总经理         |     |   |
| 技术职称  | 教授级高级工程师     |     |   |
| 工作单位  | 中建西部建设股份有限公司 |     |   |
| 对本项目主要学术贡献：<br>系统开展了尾矿骨料在混凝土以及砂浆中的应用研究，开发了多强度等级混凝土和砂浆产 品，研究了铁尾矿机制骨料性能对混凝土和和砂浆性能的影响规律和机理，通过配合比设计优 化和外加剂技术，提升了铁尾矿混凝土性能，为固废骨料混凝土和砂浆的规模化推广应用做出 了主要贡献。 |              |     |   |

|  |      |     |   |
|--|------|-----|---|
| 姓 名  | 秦晋一  | 排 名 | 5 |
| 行政职务   | 无    |     |   |
| 技术职称   | 副教授  |     |   |
| 工作单位   | 长安大学 |     |   |
| 对本项目主要学术贡献：<br>对含铁生产废液生物矿化技术做出贡献，提出采用含铁生产废水与生活废水制备混凝土生 物矿化早强组分，主持生物矿化中试平台的搭建。此外，参与铁尾矿陶粒制备与诱导烧结过程 研究，参与高温熔融铁尾矿岩棉中各元素组分变化规律分析，参与《铁尾矿陶粒混凝土预制构 件应用技术规程》DB 61/T5064-2023 的编撰工作。 |      |     |   |

|      |    |     |   |
|------|----|-----|---|
| 姓 名  | 梁坤 | 排 名 | 6 |
| 行政职务 | 无  |     |   |
| 技术职称 | 讲师 |     |   |



|  |      |
|--|------|
| 工作单位   | 长安大学 |
| 对本项目主要学术贡献：<br>对铁尾矿陶粒混凝土的和易性控制技术做出主要贡献，建立了多孔骨料吸水动力学模型，开展了铁尾矿陶粒混凝土附加用水量研究，参与铁尾矿陶粒混凝土轻质预制构件相关研究，参与了《预拌混凝土绿色生产与管理技术规程》DB 61/T 188-2021 和《铁尾矿陶粒混凝土预制构件应用技术规程》DB 61/T 5064-2023 的研究和编撰工作。 |      |

|   |       |     |   |
|---|-------|-----|---|
| 姓 名   | 刘云霄   | 排 名 | 7 |
| 行政职务  | 无     |     |   |
| 技术职称  | 高级工程师 |     |   |
| 工作单位  | 长安大学  |     |   |
| 对本项目主要学术贡献：<br>在利用铁尾矿为混凝土用粗细骨料，制备预拌混凝土方面进行技术攻关，同时研发高性能 铁尾矿灌浆料、超高性能混凝土等，拓展铁尾矿综合利用途径。参与陕西省地方标准《预拌混 凝土绿色生产与管理技术规程》DBJ61/T 188-2021、《绿色建材评价技术标准》DBJ61/ T5022-2022 等的编制工作。 |       |     |   |

|  |                |     |   |
|--|----------------|-----|---|
| 姓 名  | 朱小磊            | 排 名 | 8 |
| 行政职务   | 总经理            |     |   |
| 技术职称   | 高级工程师          |     |   |
| 工作单位   | 西安安居未来建设科技有限公司 |     |   |
| 完成单位   | 西安安居未来建设科技有限公司 |     |   |
| 对本项目主要学术贡献：<br>促进了铁尾矿资源化产品相关科技成果转化落地。通过铁尾矿陶粒混凝土轻质预制构件生产工艺优化，实现了持续稳定的产业化生产，推动了铁尾矿陶粒混凝土叠合板、楼梯等预制构件在工程中的推广应用。参与了《铁尾矿陶粒混凝土预制构件应用技术规程》DBJ61/T 5064-2023 的研究和编制工作。 |                |     |   |

|  |              |     |   |
|--|--------------|-----|---|
| 姓 名  | 梁保真          | 排 名 | 9 |
| 行政职务   | 副总经理、总工程师    |     |   |
| 技术职称   | 高级工程师        |     |   |
| 工作单位   | 陕西建工集团股份有限公司 |     |   |
| 完成单位   | 陕西建工集团股份有限公司 |     |   |
| 对本项目主要学术贡献：<br>主持《建筑与市政工程绿色施工评价标准》DB 61/ T5003-2021 的研究和编制工作，有力推 动了铁尾矿绿色建材在施工现场的应用，打通了铁尾矿绿色建材从矿山到建筑工程应用的关 键环节。 |              |     |   |

|     |     |     |    |
|-----|-----|-----|----|
| 姓 名 | 鲁绍锋 | 排 名 | 10 |
|-----|-----|-----|----|

|  |               |
|--|---------------|
| 行政职务   | 执行董事          |
| 技术职称   | 工程师           |
| 工作单位   | 陕西迈特斯科新材料有限公司 |
| 完成单位   | 陕西迈特斯科新材料有限公司 |
| <p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>开展了铁尾矿机制骨料快速烘干和除尘设备研发、生产线组装、调试和参数优化以及市场化推广应用工作，为铁尾矿骨料、混凝土和砂浆生产及推广应用做出重要贡献。参与了《机制砂生产与应用技术规程》DBJ 61/T 137-2017 的研究和编制工作。</p> |               |

|   |                |     |    |
|---|----------------|-----|----|
| 姓 名   | 常瑞凤            | 排 名 | 11 |
| 行政职务  | 董事             |     |    |
| 技术职称  | 无              |     |    |
| 工作单位  | 西安安居未来建设科技有限公司 |     |    |
| 完成单位  | 西安安居未来建设科技有限公司 |     |    |
| 对本项目主要学术贡献：<br>参与了《预拌混凝土绿色生产与管理技术规程》DB 61/T 188-2021、《建筑与市政工程绿色 施工评价标准》DB 61/ T5003-2021 及《绿色建材评价技术标准》DB 61/T5022-2022 的研究和 编制工作，全力推动标准宣贯与实施，为铁尾矿资源化产品在预拌混凝土、预制构件、保温材 料等生产企业应用落地起到关键作用。 |                |     |    |

|   |                  |     |    |
|---|------------------|-----|----|
| 姓 名   | 张敏               | 排 名 | 12 |
| 行政职务  | 董事长兼总经理          |     |    |
| 技术职称  | 高级工程师            |     |    |
| 工作单位  | 陕西合力保温材料制品有限责任公司 |     |    |
| 完成单位  | 陕西合力保温材料制品有限责任公司 |     |    |
| 对本项目主要学术贡献：<br>主持实施铁尾矿岩棉制备生产线优化、调试和生产组织工作，完成了铁尾矿制备岩棉制品 的科技成果转化，有力推动了铁尾矿岩棉制品产业发展及市场应用规模持续扩大。 |                  |     |    |

|   |                  |     |    |
|---|------------------|-----|----|
| 姓 名   | 周鸿霖              | 排 名 | 13 |
| 行政职务  | 无                |     |    |
| 技术职称  | 正高级工程师           |     |    |
| 工作单位  | 陕西省现代建筑设计研究院有限公司 |     |    |
| 完成单位  | 陕西省现代建筑设计研究院有限公司 |     |    |
| 对本项目主要学术贡献：<br>研究了铁尾矿岩棉板构造措施及对保温性能的影响，提出了铁尾矿岩棉轻型保温装饰一体板构造设计方法，组织编写《轻型保温装饰一体板构造图集》(陕 2022TJ 068),为铁尾矿岩棉的推广应用做出了重要贡献。 |                  |     |    |

|  |              |     |    |
|--|--------------|-----|----|
| 姓 名  | 罗作球          | 排 名 | 14 |
| 行政职务   | 总工程师（二级单位）   |     |    |
| 技术职称   | 教授级高级工程师     |     |    |
| 工作单位   | 中建西部建设股份有限公司 |     |    |
| 完成单位   | 中建西部建设股份有限公司 |     |    |
| 对本项目主要学术贡献：<br>参与铁尾矿机制骨料安全性评价、铁尾矿骨料混凝土性能提升、混凝土厂站废液利用等研究工作，组织并完成铁尾矿骨料混凝土和砂浆的性能调整、厂站生产和市场化应用推广工作，为铁尾矿混凝土和砂浆的规模化应用做出重要贡献。 |              |     |    |

|   |      |     |    |
|---|------|-----|----|
| 姓 名   | 屈雅安  | 排 名 | 15 |
| 行政职务  | 无    |     |    |
| 技术职称  | 讲师   |     |    |
| 工作单位  | 长安大学 |     |    |
| 完成单位  | 长安大学 |     |    |
| 对本项目主要学术贡献：<br>参与高强耐火岩棉、多层鼓泡流态化除粉立式烘干装置等的研发工作；参与了《机制砂生 产与应 用技术规程》 DB 61/T137-2017、《 预 拌 混 凝 土 绿 色 生 产 与 管 理 技 术 规 程 》 DB 61/T188-2021）、《绿色建材评价技术标准》DB 61/T5022-2022 的研究和编制工作，为铁尾矿绿 色 建材的推广应用做出贡献。 |      |     |    |

## 八、主要完成单位情况及创新推广贡献

|   |                |
|---|----------------|
| 单位名称  | 陕西科技控股集团有限责任公司 |
| <p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>陕西科技控股集团有限责任公司为项目的主要负责单位，主要负责秦岭矿山采空区回填、矿区生态恢复设计、尾矿资源化利用整体规划等工作。组织长安大学、陕西建工集团股份有限公司、陕西合力保温材料制品有限责任公司、陕西省现代建筑设计研究院有限公司等高校和相关企业开展铁尾矿资源化路径研究、绿色产品研发及相关技术转化和产品推广应用工作。提出了从绿色矿山生态治理、铁尾矿绿色建材资源化、装配式绿色建造到绿色建筑的固废资源化产业链体系，推动铁尾矿混凝土、铁尾矿岩棉等绿色建材产品在育才“一号公园”住宅小区、育才“铂悦府”住宅小区、高新发展大都荟等项目中的应用，取得了显著的经济、社会和环境效益。</p> |                |
| 单位名称  | 长安大学           |

|   |  |
|---|--|
| <p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>长安大学主要负责铁尾矿绿色建材产品研发、项目立项申报、科技成果评价等工作。主要围绕 铁尾矿骨料流态化高效换热装备研发、铁尾矿骨料混凝土绿色生产、铁尾矿岩棉纤维多尺度调控理论 与制品生产技术、铁尾矿陶粒前驱体诱导强化烧结理论及轻质预制构件设计与生产技术等所有创 新点开展研究工作。</p> |  |
|---|--|

|   |              |
|---|--------------|
| 单位名称  | 陕西建工集团股份有限公司 |
| <p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>陕西建工第五建设集团有限公司参与了项目相关技术路线的制定，参与了创新性技术（3）中 铁尾矿陶粒轻质预制构件的研究工作,参与了铁尾矿绿色建材产品在工程建设项目中的应用工作。通过编制《建筑与市政工程绿色施工评价标准》DB 61/T5003-2021，促进了铁尾矿固废建材在实际 建筑工程中的推广和应用。</p> |              |

|   |              |
|---|--------------|
| 单位名称  | 中建西部建设股份有限公司 |
| <p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>中建西部建设股份有限公司开展了区域尾矿安全性评价及建材资源化方面工作，研究了各类尾矿在预拌混凝土中的应用，开发了多强度等级混凝土（砂浆）产品，对铁尾矿混凝土（砂浆）的性 能提升做出了主要贡献，促进了尾矿混凝土（砂浆）规模化的推广应用。</p> |              |

|  |                |
|--|----------------|
| 单位名称   | 西安安居未来建设科技有限公司 |
| <p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>西安安居未来建设科技有限公司（前陕西未来创投建设科技有限公司）开展了铁尾矿陶粒混凝土轻质预制构件生产与应用研究工作。通过成果转化，开展了铁尾矿陶粒轻质混凝土楼梯、叠合板 等新产品的研制与产业化工作，在装配式工程项目上得以推广应用，取得了良好的效果。</p> |                |

|  |               |
|--|---------------|
| 单位名称   | 陕西迈特斯科新材料有限公司 |
| <p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>陕西迈特斯科新材料有限公司参与了项目中创新性技术（1）中铁尾矿砂高效烘干除尘装置的 研发、调试及产业化应用，实现了铁尾矿废石骨料化的规模化应用。</p> |               |

|   |                  |
|---|------------------|
| 单位名称  | 陕西合力保温材料制品有限责任公司 |
| <p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>陕西合力保温材料制品有限责任公司参与项目创新性技术（2）中铁尾矿岩棉的性能优化、产业化 生产及岩棉板构造设计及推广等工作。</p> |                  |

|  |                  |
|--|------------------|
| 单位名称   | 陕西省现代建筑设计研究院有限公司 |
| <p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>陕西省现代建筑设计研究院有限公司通过秦岭废弃矿硐回填设计，促进了创新性技术（1）中铁尾矿机制骨料的应用；参与了创新性技术（2）中铁尾矿岩棉外墙外保温系统构造设计；参与了创新性技术（3）中铁尾矿陶粒混凝土轻质预制构件设计方法研究等工作，促进了相关技术和产品的推广与应用。</p> |                  |

## 九、完成人合作关系说明

李晓光作为本次申报奖励排名第一人，主要负责本项目的策划、研发、推广应用及本次申报材料的撰写工作。与其它项目申报人的合作关系如下：

李晓光与周吉峰：长安大学李晓光与陕西科技控股集团有限责任公司周吉峰合作完成陕西省重点研发计划-基于缩聚烧结过程机理分析的低硅铁尾矿陶粒发泡混凝土研究(2020SF-360)，开展了铁尾矿陶粒的研制工作及在发泡混凝土中的应用研究。李晓光与周天华、秦晋一、梁坤、刘云霄、屈雅安：李晓光、周天华、秦晋一、刘云霄、梁坤、屈雅安均为长安大学教师。李晓光与周天华自2019年起共同开展了陕西省重点研发计划-绿色装配式轻钢复合建筑结构受力性能及设计理论研究（2019SF-239）的课题研究工作。李晓光与秦晋一共同开展了铁尾矿陶粒的研制工作，授权《一种轻质陶粒及制备方法》发明专利。同时，共同开展了微生物矿化技术在混凝土中的应用研究，合著《Urea supply control in microbial carbonate precipitation to effectively fill pores of concrete》等论文。李晓光与刘云霄共同开展铁尾矿砂浆及在绿色建材中应用研究，合著《铁尾矿砂水泥基灌浆料性能研究》等论文。李晓光与梁坤共同开展了铁尾矿陶粒预制构件研究与推广工作，合著《Theoretical analysis of water absorption kinetics of recycled aggregates immersed in water》等论文。李晓光与屈雅安共同开展了铁尾矿机制骨料在预拌混凝土中的研究，编制了《机制砂生产与应用技术规程》DBJ 61/T 137-2017等工程建设标准。

李晓光与罗作球：长安大学李晓光与中建西部建设股份有限公司的罗作球共同开展了各类尾矿在预拌混凝土中的应用，混凝土预拌厂废浆水智能监控系统与绿色生产研究工作。

王军与罗作球：中建西部建设股份有限公司的王军与罗作球共同开展开展混凝土厂站废水利用研究，共同参与授权发明专利《一种混凝土搅拌站废水废渣再利用工艺及再利用系统》。

李晓光与朱小磊：长安大学李晓光与西安安居未来建设科技有限公司朱小磊共同完成了铁尾矿陶粒混凝土在轻质预制构件生产与应用研究。通过成果转化，开展了铁尾矿陶粒轻质混凝土楼梯、叠合板等新产品的试制和产业化工作，在装配式工程项目上得以推广应用。

李晓光与梁保真：长安大学李晓光与陕西建工第五建设集团有限公司梁保真共同

参与编制《建筑与市政工程绿色施工评价标准》DB 61/T5003-2021 等工程建设标准，明确在绿色施工过程中使用绿色建材的要求，为铁尾矿绿色建材在建筑工程中推广与应用打下良好基础。

李晓光与常瑞凤：长安大学李晓光与西安安居未来建设科技有限公司常瑞凤共同立项开展了《建筑与市政工程绿色施工评价》DB 61/T5003-2021、《绿色建材评价技术标准》DB 61/T5022-2022 编制工作。

李晓光与鲁绍锋：长安大学李晓光与陕西迈特斯科新材料有限公司鲁绍锋自2008 年起一直从事铁尾矿骨料生产装备、铁尾矿预拌混凝土和砂浆研究和推广应用工作，共同授权《一种多层鼓泡流态化除粉立式烘干装置》发明专利，为实现铁尾矿规模化应用起到了重大示范引领作用。

李晓光与张敏：长安大学李晓光与陕西合力保温材料制品有限责任公司的张敏通过长期针对外墙外保温岩棉制品的研究，于2018 年共同获得陕西省科技进步二等奖，并在此基础上进一步探索铁尾矿岩棉的制备和生产技术。

张敏与周鸿霖：陕西合力保温材料制品有限责任公司的张敏与陕西省现代建筑设计研究院有限公司的周鸿霖共同开展铁尾矿岩棉外墙外保温系统的构造设计研究，并共同编制陕西省推广应用标准设计图集《轻型保温装饰一体板构造图集》（陕 2022TJ 068）。

完成人合作关系情况汇总表

| 序号 | 合作方式       | 合作者/项目排名                       | 合作起始时间  | 合作完成时间 | 合作成果                        | 证明材料              |
|----|------------|--------------------------------|---------|--------|-----------------------------|-------------------|
| 1  | 共同立项       | 李晓光 1，秦晋一 4，梁坤 6，周吉峰 2，屈雅安 15  | 2015.12 | 至今     | 基于缩聚烧结过程机理分析的低硅铁尾矿陶粒发泡混凝土研究 | 项目合同（任务）书<br>结题证明 |
| 2  | 共同立项       | 周天华 3，李晓光 1                    | 2008.06 | 至今     | 绿色装配式轻钢复合建筑结构受力性能及设计理论研究    | 项目合同（任务）书<br>结题报告 |
| 3  | 共同参与制定标准规范 | 李晓光 1，梁保真 9，常瑞凤 11，朱小磊 8，刘云霄 7 | 2008.06 | 至今     | 铁尾矿陶粒混凝土预制构件应用技术规程          | 工程建设标准            |
| 4  | 共同知识产权     | 李晓光 1，鲁绍锋 10，屈雅安 12            | 2008.06 | 至今     | 一种多层鼓泡流态化除粉立式烘干装置           | 发明专利              |
| 5  | 产业合作       | 李晓光 1，常瑞凤 11，罗作球 14，屈雅安 15     | 2015.03 | 至今     | 混凝土预拌厂废浆水智能监控系统与绿色生产研究      | 陕西省科技成果登记证书       |

|   |                    |                  |             |    |  |                |
|---|--------------------|------------------|-------------|----|--|----------------|
| 6 | 共同知识<br>产权         | 王军 5，罗作<br>球 14  | 2010<br>.06 | 至今 | 一种混凝土搅拌站废 水<br>废渣再利用工艺及 再利<br>用系统                          | 发明专利           |
| 7 | 共同获奖               | 李晓光 1，张<br>敏 13  | 2012<br>.04 | 至今 | 2018 年度陕西省科学<br>技术二等奖“建筑墙体 保<br>温材料服役性能提 升技<br>术及支撑产品产 业化” | 获奖证书           |
| 8 | 共同参与<br>制定标准<br>规范 | 张敏 12，周<br>鸿霖 13 | 2015<br>.01 | 至今 | 轻型保温装饰一体板 构<br>造图集（EPS 、STP 岩棉<br>装饰一体板）                   | 推广应 用 标<br>准设计 |

# 科技进步奖公示项目 7

一、项目名称：城镇居住建筑节能降碳关键技术与应用

二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省科学技术厅

提名意见：研究团队围绕解决基于“节能降碳”的建筑全生命周期绿色低碳理论体系和关键技术问题，遵循基础理论研究、关键技术突破、标准体系建设、示范项目应用的原则，突出绿色低碳建筑领域关键技术和落地项目绿色技术集成两大重点经过 10 多年系统研究，探索了陕西省建筑热工设计分区，提出不同气候类型建筑绿色低碳设计理论与应用模式；探索建筑设计、室内物理环境和建筑节能内在的联系。基于不同地区的室内环境需求和可再生能源分布，研发了适应性强的高性能围护结构和高效暖通空调系统。构建了时间和空间维度广泛覆盖的节能标准体系，为陕西省城镇居住建筑的节能减碳提供了全面的技术支撑和标准指导。项目的创新成果提升了城镇建筑的综合性能，减少能源消耗和碳排放，为实现全球性的气候变化提供了“陕西方案”。

研究团队建立了陕西省城镇居住建筑节能减碳系列标准体系，主编多项建筑节能设计通用规范，覆盖了从早期的居住建筑 65% 节能，现行的 75% 节能和未来即将推广的 82.5% 和 90% 节能标准，实现了在时间发展维度的全覆盖。主编和参编多项暖通技术规程和图集，在空间维度上兼顾了陕西省不同气候区域的建筑节能需求。

目前为止，研究团队部分成果已获得知识产权 18 项，其中发明专利授权 9 项，实用新型专利授权 40 项，软件著作权登记 15 项；主编完成工程建设标准、规范和图集 10 部，参编完成工程建设图集 2 部，资料集 1 部；发表相关科技论文 100 余篇，SCI 顶级期刊论文 6 篇，中文核心论文 20 余篇。

拟提名该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖。

三、项目简介：

本项目属于建筑热环境、土木建筑工程学科领域。

在全球范围内，联合国可持续发展目标（SDG）对人居环境提升和城市的节能减碳提出了双重的要求。中国积极响应可持续发展的议题，制定了具有里程碑意义的“双碳”目标，旨在推动经济社会发展全面绿色转型。陕西省，作为中国西北地区的重要省份，拥有约 20.58 万平方公里的地理面积和 3800 万人口。其独特的地理位置和显著的地理气候差异，形成了陕南的夏热冬冷地区和关中、陕北的寒冷地区，导致城镇居住建筑的室内物理环境存在显著差异性。陕西省既有居住建筑面积超过 17 亿  $\text{m}^2$ ，施工面积超过 2 亿  $\text{m}^2$ 。通过系列理论研究和突破实现环境舒适和节能降碳的双重目标，对于推动陕西省乃至整个西北地区的可持续发展具有重要意义。

通过理论研究探索了陕西省建筑热工设计分区，进而探索建筑设计，室内物理环境和建筑节能内在的联系。基于不同地区的室内环境需求和可再生能源分布，研发了适应



性强的高性能围护结构和高效暖通空调系统。在技术突破的基础上，项目构建了时间和空间维度广泛覆盖的节能标准体系，为陕西省城镇居住建筑的节能减碳提供了全面的技术支撑和标准指导。本项目的创新性成果提升了城镇建筑的综合性能，减少能源消耗和碳排放，为实现全球性的气候变化提供了“陕西方案”。

本研究取得了以下创新性成果：

针对陕西省气候条件的特殊性，提出了一套城镇居住建筑节能降碳设计理论体系。通过分析室内物理环境特征，明确了不同气候区域的供暖需求和围护结构设计参数。探索了多种供暖方式的内在原理和综合评价方法，为室内环境优化提供了设计参数。研究了室内热舒适性，节能减碳与建筑设计的关系，为绿色建筑设计提供了科学依据。

提升围护结构热工性能方面取得突破，研发低导热系数的页岩空心砖和自动调节室内湿度的调湿建筑材料，以及适应被动式超低能耗建筑的屋面和墙体构造，节点和连接件等。提出了基于蓄混水技术的地下水源热泵系统供暖技术，完善了中深层地热供暖技术和数据平台研发，有效提升了建筑可再生能源利用效率。

建立了陕西省城镇居住建筑节能减碳系列标准体系，主编多项建筑节能设计通用规范，覆盖了从早期的居住建筑 65%节能，现行的 75%节能和未来即将推广的 82.5%和 90%节能标准，实现了在时间发展维度的全覆盖。主编和参编多项暖通技术规程和图集，在空间维度上兼顾了陕西省不同气候区域的建筑节能需求。

本项目节能减碳关键技术在陕西省多项工程项目中应用和推广，如汉中的示范住宅应用了多项高效水源热泵供暖和热计量技术，系统节能率达到 34.5%。

研究成果共取得知识产权 18 项，其中发明专利授权 9 项，实用新型专利授权 40 项，软件著作权登记 15 项；主编完成工程建设标准、规范和图集 10 部，参编完成工程建设图集 2 部，资料集 1 部；发表相关科技论文 100 余篇，SCI 顶级期刊论文 6 篇，中文核心论文 20 余篇。

## 四、客观评价

### （一）结题验收报告与节能评估报告

本项目研发的多项被动式超低能耗关键技术和标准指导了陕西省科技资源统筹中心科研办公楼设计，光伏发电占总电耗比例为 3.6%，可再生能源产生的热水比例为 100%，建筑节能率达 73.09%。非传统水源利用率为 41.73%，可再循环材料利用率达 10.51%。本项目研发的中深层地热关键技术应用于陕西省寒冷地区典型城市——西安市的陕西省西咸新区沣东新城西咸人才大厦，涉及供暖面积 81 万平方米。一个采暖季（四个月）相较于传统燃煤锅炉供热，可替代标准煤约 1.44 万吨，减少 CO 排放量约 3.75 万吨，减少 SO<sub>2</sub>排放量约 345.91 吨，减少氮氧排放物约 201.78 吨，减少粉尘排放量约 172.96 吨。

本项目所研发的蓄混水技术和冷热计量方案，水源热泵系统一体化设计在陕西省夏热冬冷地区典型城市——汉中的惠泽小区住宅楼进行项目示范应用。经国家级民用建

筑能效测评中心——陕西省建筑科学研究院组织的节能技术评估表明，该技术成果具有良好的经济效益和社会效益。根据现场检测分析，与传统燃煤锅炉供暖相比，示范项目的高效节能型地下水源热泵供暖集成技术的系统节能率为 34.5%。与传统的供暖系统相比，示范项目地下水源热泵系统的 CO<sub>2</sub> 减排量为 171761 kg/季，SO<sub>2</sub> 减排量为 1390 kg/季，粉尘减排量为 695kg/季，供暖季常规能源替代量为 156.46 tCO<sub>2</sub>e (5.18kgce/m<sup>2</sup>)。在示范项目中，采用了太阳能热水集中供应系统后，每年可获得太阳能热量约为 279934MJ，每年可节省 5.4 万元运行费用，CO<sub>2</sub> 减排量为 76101kg/a，SO<sub>2</sub> 减排量为 616kg/a，粉尘减排量为 308kg/a。

## （二）同行评价

1、中国建筑西北建筑设计研究院有限公司暖通专业总工季伟教授级高级工程师认为，课题组编制的《陕南夏热冬冷地区居住建筑水源热泵供暖工程技术规程》（DBJ/61T144-2018）弥补了我省相关标准规范的空白，促进我省城乡建筑模式持续健康发展，对完成节能减排目标，提高人民生活质量具有积极的意义。

2、陕西省建筑设计研究院（集团）有限公司副总建筑师柳成辉教授级高级工程师认为，研究取得了有价值的创新研究成果，为我国夏热冬冷地区居住建筑供暖设计提供了科学的依据，对居住建筑节能优化设计具有实践指导意义，促进了夏热冬冷地区相关行业发展，为保障和改善民生作出了贡献。

3、陕西省建筑环境与能源工程技术研究中心主任赵民教授认为，本项目结合陕南地区建筑供暖工作的实际，提出太阳能的有效存储和梯级利用，对实现节能减排，提高建筑热舒适具有积极意义。

4、西安市建筑设计研究院有限公司副总建筑师李献军教授级高级工程师认为，课题组所提出的夏热冬冷地区供暖设计分区方法及与之相匹配的围护结构性能指标体系为我国夏热冬冷地区居住建筑供暖应用提供了技术支撑，改善了居住建筑热环境，为夏热冬冷地区供暖设计及能源节约和环境保护具有重要意义。

5、陕西省建筑设计研究院（集团）有限公司暖通专业总工鱼向荣教授级高级工程师认为，课题组提出的地下水源热泵系统协同优化的新技术有效减少了输配系统能耗，节省了运行费用，提高了设备使用年限，节能、经济效果显著，具有很好的应用前景。

## （三）获得科技奖励

2020 年 4 月，本项目获得陕西省教育厅颁发的陕西高等学校科学技术奖一等奖（排名 1/7）。

## 五、应用情况：

### （一）示范工程

课题研发了改性低辐射材料和填充保温页岩砖、基于流量热量关系模型的供暖计量装置、新型保温节能一体化装饰板和太阳能相变蓄热及毛细管网低温辐射供暖系统，相关成果在 17.8 万平方米的示范工程中应用并通过了验收。

本项目的研究成果在夏热冬冷地区典型城市——陕西省汉中的惠泽小区住宅楼进行工程示范应用。经国家级民用建筑能效测评中心——陕西省建筑科学研究院组织的节能技术评估证明，该技术成果具有良好的经济效益和社会效益。

## （二）主要应用单位情况汇总表

| 序号 | 单位名称            | 应用的技术   | 应用对象及规模                    | 应用起止时间                    | 单位联系人/电话            |
|----|-----------------|---|----------------------------|---------------------------|---------------------|
| 1  | 汉中天泽房地产开发有限公司   | 地下水源热泵系统、蓄混水技术、按每户空调水流量分摊收费的冷热计量方案和太阳能热水集中供应系统                    | 惠泽小区、滨江丽苑小区和茶城商业办公楼        | 2013.5-2015.12            | 冯焕燎<br>/13369229363 |
| 2  | 西咸新区沣渭新能源发展有限公司 | 中深层地热清洁能源供热系统关键技术研究与应用  | 西咸新区能源金贸区综合能源供应项目一期、二期、四期， | 2020.08-2022.03           | 王川<br>/17702910610  |
| 3  | 郑州郑沣能源发展有限公司    | 中深层地热清洁能源供热系统关键技术研究与应用  | 郑东新区科学谷数字小镇、云溪苑及凤栖苑        | 2020.04-2022.03           | 王伟<br>/18089136995  |
| 4  | 陕西省科技资源统筹中心     | 多种复合围护结构、双层呼吸玻璃幕墙、中庭电动遮阳膜系统、土壤源热泵+冷梁系统、机翼遮阳系统、固定遮阳系统、屋面绿化、光伏光热系统等 | 陕西省科技资源统筹中心科研办公楼           | 2009.04.01至<br>2018.04.17 | 刘建国<br>/02988857922 |

## 六、主要知识产权和标准规范等目录

| 序号 | 知识产权类别 | 知识产权具体名称   | 国家（地区） | 授权号             | 授权日期        | 证书编号 | 权利人      | 发明人                     |
|----|--------|------------|--------|-----------------|-------------|------|----------|-------------------------|
| 1  | 标准     | 居住建筑节能设计标准 | 中国     | (DBJ61-65-2011) | 2012年05月01日 | /    | 西安建筑科技大学 | 闫增峰;付涛;侯钢平;薛建华;屈兆焕;柳成辉等 |

|    |      |                          |    |                     |                  |          |                    |                           |
|----|------|--------------------------|----|---------------------|------------------|----------|--------------------|---------------------------|
| 2  | 标准   | 居住建筑节能设计标准               | 中国 | (DB 61/T5033-2022)  | 2022 年 07 月 31 日 | /        | 西安建筑科技大学           | 闫增峰;张园;季伟;赵民;柳成辉;邓军等      |
| 3  | 标准   | 超低能耗居住建筑节能设计标准           | 中国 | ( DBJ61/T 189-2021) | 2021 年 06 月 30 日 | /        | 中联西北工程设计研究院有限公司    | 倪欣;闫增峰;刘涛;薄蓉;王翼等          |
| 4  | 标准   | 近零能耗建筑设计标准               | 中国 | (DB 61/T 5084-2023) | 2024 年 04 月 10 日 | /        | 中联西北工程设计研究院有限公司    | 倪欣;梁晓光;闫增峰;于文海;王智刚;薄蓉等    |
| 5  | 标准   | 居住建筑绿色设计标准               | 中国 | (DBJ61/T81-2014)    | 2014 年 04 月 30 日 | /        | 西安建筑科技大学           | 闫增峰;王陕生;张欧;沈西平;田川;党春红;路芸等 |
| 6  | 规范   | 陕南夏热冬冷地区居住建筑水源热泵供暖工程技术规程 | 中国 | DBJ/61T1 44-2018    | 2018 年 11 月 14 日 | /        | 西安建筑科技大学           | 闫增峰;王智伟;王赞社;成怀德;王占伟;董旭娟等  |
| 7  | 发明专利 | 一种基于房屋建筑的智能供暖方法及其系统      | 中国 | ZL20191019 7853.1   | 2021 年 06 月 08 日 | /        | 陕西西咸新区沣西新城能源发展有限公司 | 刘洪涛;强聪望;马涛;鲁耀基;陈浩;金文亚     |
| 8  | 发明专利 | 一种蓄水调峰解耦回灌型地下水源热泵系统      | 中国 | ZL20101014 7746.7   | 2012 年 10 月 31 日 | 10702 93 | 西安建筑科技大学           | 王智伟;彭毅;蔡慧华;史磊             |
| 9  | 发明专利 | 一种再生水源热泵供暖系统协同优化运行方法     | 中国 | ZL20161061 6694.0   | 2019 年 02 月 22 日 | 32653 59 | 西安建筑科技大学           | 王智伟;施翀;王雨;王占伟             |
| 10 | 发明专利 | 一种基于渗透系数模型的回灌井堵塞预测诊断方法   | 中国 | ZL20141023 5568.1   | 2017 年 02 月 15 日 | 23850 71 | 西安建筑科技大学           | 王智伟;惠一峰;杨锋斌;闫清;张云龙;闫增峰    |

#### 七、主要完成人情况表:

|   |                 |     |   |
|---|-----------------|-----|---|
| 姓 名   | 闫增峰             | 排 名 | 1 |
| 行政职务  | 西安建筑科技大学学报编辑部主任 |     |   |
| 技术职称  | 教授              |     |   |
| 工作单位  | 西安建筑科技大学        |     |   |
| 完成单位  | 西安建筑科技大学        |     |   |
| 对本项目技术创造性贡献：<br>为本项目主要完成人，统筹协调保证课题按计划圆满完成。从事建筑物理环境研究二十余年，组织开展了大量节能减碳的理论研究，并主编和参编多项建筑节能，绿色建筑相关标准，对创新点（1），（2），（3）均有重要贡献。具体完成内容如下：1.开展大量城镇居住建筑节能减碳相关的理论研究，发表相关论文 100 余篇；2.主编了课题相关标准 4 部，参编 4 部；3.研制了一种适合夏热冬冷地区建筑节能要求的低 导热系数页岩空心砖并获得实用新型；4.作为主要发明人研发相关高效节能采暖设备获得发明专利 5 项。 |                 |     |   |

|   |                 |     |   |
|---|-----------------|-----|---|
| 姓 名   | 邢超              | 排 名 | 2 |
| 行政职务  | 华盛院创意总监         |     |   |
| 技术职称  | 正高级工程师          |     |   |
| 工作单位  | 中联西北工程设计研究院有限公司 |     |   |
| 完成单位  | 中联西北工程设计研究院有限公司 |     |   |
| 对本项目技术创造性贡献：  |                 |     |   |
| 参与了项目的整体研究；负责完成了一种被动式超低能耗建筑的重型设备屋面结构研究；参与完成了适用于被动式超低能耗建筑的屋面节点技术和断热桥支撑连接件技术，有效降低了建筑的热桥效应，提高了建筑的保温隔热性能，为实现建筑的超低能耗目标提供了有力保障。参与完成了节能减碳关键技术在陕西省民用建筑工程项目中应用和推广；参与完成了陕西省城镇居住建筑节能减碳系列标准体系（《超低能耗居住建筑节能设计标准》（DBJ61/T 189-2021）、《近零能耗建筑设计标准》（DB 61/T 5084-2023））；负责完成了西安天谷雅舍项目的超低能耗方案设计。 |                 |     |   |

|   |                 |     |   |
|---|-----------------|-----|---|
| 姓 名   | 刘涛              | 排 名 | 3 |
| 行政职务  | 副院长             |     |   |
| 技术职称  | 正高级工程师          |     |   |
| 工作单位  | 中联西北工程设计研究院有限公司 |     |   |
| 完成单位  | 中联西北工程设计研究院有限公司 |     |   |
| 对本项目技术创造性贡献：<br>参与了项目的整体研究；参与完成了项目城镇居住建筑节能降碳设计理论体系研究；参与完成了陕西省城镇居住建筑节能减碳系列标准体系（《超低能耗居住建筑节能设计标准》（DBJ61/T 189-2021）、《近零能耗建筑设计标准》（DB 61/T 5084-2023））；参与完成了被动式超低能耗建筑的屋面和墙体构造研究；参与完成了节能减碳关键技术在陕西省民用建筑工程项目中应用和推广。 |                 |     |   |

|     |     |     |   |
|-----|-----|-----|---|
| 姓 名 | 强聪望 | 排 名 | 4 |
|-----|-----|-----|---|

|   |                    |
|---|--------------------|
| 行政职务  | 副总工程师              |
| 技术职称  | 高级工程师              |
| 工作单位  | 陕西西咸新区沣西新城能源发展有限公司 |
| 完成单位  | 陕西西咸新区沣西新城能源发展有限公司 |
| 对本项目技术创造性贡献：<br>参与了项目的整体研究；<br>参与完成了节能减碳关键技术在陕西省民用建筑工程项目中应用和推广。 |                    |

|   |          |     |   |
|---|----------|-----|---|
| 姓 名   | 王智伟      | 排 名 | 5 |
| 行政职务  | 无        |     |   |
| 技术职称  | 教授       |     |   |
| 工作单位  | 西安建筑科技大学 |     |   |
| 完成单位  | 西安建筑科技大学 |     |   |
| 对本项目技术创造性贡献：<br>为课题重要完成人，对项目发明和创新点（2）（3）有重要贡献。具体完成内容如下：1.提出了地下水源热泵系统协同优化新技术，确立了基于蓄混水技术的地下水源热泵系统，建立了地下水源热泵系统优化设计和工程应用适应性评价方法，提出了采用按每户空调水流量分摊收费的冷热计量技术，发明了相关专利 6 项；2.参编相关标准 2 项；3.发表相关论文 10 余篇。 |          |     |   |

|  |                 |     |   |
|--|-----------------|-----|---|
| 姓 名  | 郑琨              | 排 名 | 6 |
| 行政职务   | 所长助理            |     |   |
| 技术职称   | 高级工程师           |     |   |
| 工作单位   | 中联西北工程设计研究院有限公司 |     |   |
| 完成单位   | 中联西北工程设计研究院有限公司 |     |   |
| 对本项目技术创造性贡献：<br>参与了项目的整体研究；参与完成了适用于被动式超低能耗建筑的屋面节点技术和断热桥支撑连接件技术；参与完成了节能减碳关键技术在陕西省民用建筑工程项目中应用和推广；参与完成了陕西省城镇居住建筑节能减碳系列标准体系（《超低能耗居住建筑节能设计标准》（DBJ61/T 189-2021）、《近零能耗建筑设计标准》（DB 61/T 5084-2023））；参与完成了多个低碳节能居住建筑设计。 |                 |     |   |

|      |                 |     |   |
|------|-----------------|-----|---|
| 姓 名  | 杨潇然             | 排 名 | 7 |
| 行政职务 | 无               |     |   |
| 技术职称 | 高级工程师           |     |   |
| 工作单位 | 中联西北工程设计研究院有限公司 |     |   |
| 完成单位 | 中联西北工程设计研究院有限公司 |     |   |

|  |  |  |  |
|--|--|--|--|
| 对本项目技术创造性贡献：<br>参与完成了陕西省城镇居住建筑节能减碳系列标准体系（《超低能耗居住建筑节能设计标准》（DBJ61/T 189-2021）、《近零能耗建筑设计标准》（DB 61/T 5084-2023））；<br>参与完成了超低能耗建筑设计理论体系研究；<br>参与完成了多个绿色低碳建筑项目的方案设计。 |  |  |  |
|--|--|--|--|

|  |                 |     |   |
|--|-----------------|-----|---|
| 姓 名  | 蒋浩              | 排 名 | 8 |
| 行政职务   | 无               |     |   |
| 技术职称   | 高级工程师           |     |   |
| 工作单位   | 中联西北工程设计研究院有限公司 |     |   |
| 完成单位   | 中联西北工程设计研究院有限公司 |     |   |
| 对本项目技术创造性贡献：<br>参与完成了超低能耗建筑设计理论体系研究；<br>参与完成了陕西省城镇居住建筑节能减碳系列标准体系（《超低能耗居住建筑节能设计标准》（DBJ61/T 189-2021）、《近零能耗建筑设计标准》（DB 61/T 5084-2023））；<br>参与完成了多个绿色低碳建筑项目的方案设计。 |                 |     |   |

|  |                 |     |   |
|--|-----------------|-----|---|
| 姓 名  | 王翼              | 排 名 | 9 |
| 行政职务   | 院长助理            |     |   |
| 技术职称   | 高级工程师           |     |   |
| 工作单位   | 中联西北工程设计研究院有限公司 |     |   |
| 完成单位   | 中联西北工程设计研究院有限公司 |     |   |
| 对本项目技术创造性贡献：<br>参与完成了超低能耗建筑设计理论体系研究；<br>参与完成了陕西省城镇居住建筑节能降碳综合性设计理论体系；<br>参与完成了陕西省城镇居住建筑节能减碳系列标准体系（《超低能耗居住建筑节能设计标准》（DBJ61/T 189-2021）、《近零能耗建筑设计标准》（DB 61/T 5084-2023））；<br>参与完成了陕西省第一个超低能耗居住建筑施工图设计；<br>参与完成了适用于被动式超低能耗建筑的屋面节点技术和断热桥支撑连接件技术。 |                 |     |   |

|      |                    |     |    |
|------|--------------------|-----|----|
| 姓 名  | 周阳                 | 排 名 | 10 |
| 行政职务 | 无                  |     |    |
| 技术职称 | 高级工程师              |     |    |
| 工作单位 | 陕西西咸新区沣西新城能源发展有限公司 |     |    |
| 完成单位 | 陕西西咸新区沣西新城能源发展有限公司 |     |    |

|  |
|--|
| <p>对本项目技术创造性贡献：</p> <p>参与了项目的整体研究；</p> <p>参与完成了节能减碳关键技术在陕西省民用建筑工程项目中应用和推广。</p> |
|--|

八、主要完成单位情况表：

|  |                 |
|--|-----------------|
| 单位名称   | 中联西北工程设计研究院有限公司 |
| <p>对本项目科技创新和应用推广情况的贡献：</p> <p>本项目的第一完成单位，统筹协调保证课题按计划圆满完成。对创新点（2），（3），（4）有重要贡献，主编城镇居住建筑节能减碳相关标准 5 项，研发多项居住建筑被动式超低能耗关键技术，获得实用新型 20 余项，发表建筑节能减碳相关的高水平论文 10 余篇。作为陕西省代表性工程设计单位，推进多项被动式超低能耗技术的应用示范和推广。</p> |                 |

|   |          |
|---|----------|
| 单位名称  | 西安建筑科技大学 |
| <p>对本项目科技创新和应用推广情况的贡献：</p> <p>本项目的主要完成单位，对创新点（1），（2），（3）均有重要贡献。开展大量节能减碳理论研究，主持编制相关的技术规程和图集，研发相关高效节能采暖设备，提出了地下水源热泵系统协同优化新技术，确立了基于蓄混水技术的地下水源热泵系统，建立了地下水源热泵系统优化设计和工程应用适应性评价方法，提出了采用按每户空调水流量分摊收费的冷热计量技术。拥有本项目 20 余项发明专利、实用新型及软件著作权的所有权，是本项目 30 余篇相关论文的第一署名单位。</p> |          |

|  |                    |
|--|--------------------|
| 单位名称   | 陕西西咸新区沣西新城能源发展有限公司 |
| <p>对本项目科技创新和应用推广情况的贡献：</p> <p>本项目的主要完成单位，对创新点（2），（4）有重要贡献。发表与中深层地热能理论和技术研发相关的高水平论文 3 篇。研发了使用与中深层地热的热泵换热器，并获取发明专利 1 项；研发中深层地热能地热井数据分析系统，取得软件著作权 1 项；推进中深层地热在关中地区的工程示范和应用推广。</p> |                    |

九、完成人合作关系说明：

由项目完成人闫增峰；邢超；刘涛；强聪望；王智伟；郑琨；杨潇然；蒋浩；王翼；周阳组建的“城镇居住建筑节能降碳关键技术与应用”课题研究开发团队中，包括了从事建筑学、建筑热工、建筑环境及设备、暖通工程、动力工程及工程热物理、制冷与低温工程、过程装备与控制工程等多方面的高级专门技术人才，已进行了长期合作。

完成人闫增峰来自西安建筑科技大学，为本项目的负责人，统筹协调保证课题按计划圆满完成。对课题组编制相关的技术规程和图集以及发明创新点(1)、(2)、(3)有重要贡献。具体完成内容如下：(1)主编了课题相关标准 4 部，参编 2 部；(2)研制了一种适合



居住建筑节能要求的低导热系数页岩空心砖；(3)研发相关高效节能供暖设备，参与发明专利 5 项；(4)发表相关研究论文十余篇。

完成人邢超来自中联西北工程设计研究院有限公司，为本课题重要完成人，对项目发明和创新点(2)、(3)、(4)有重要贡献。具体完成内容如下：(1)负责完成了被动式超低能耗建筑屋面结构研究和节点技术等研究。(2)参与完成了节能减碳关键技术 in 陕西省民用建筑中的应用和推广和城镇居住建筑节能减碳系列标准体系的编制。

完成人刘涛来自中联西北工程设计研究院有限公司，为本课题重要完成人，参与了项目的整体研究。具体完成内容如下：(1)参与完成了项目城镇居住建筑节能降碳理论体系研究；(2)参与完成了陕西省城镇居住建筑节能减碳系列标准体系的编制；(3)参与完成了被动式超低能耗建筑的屋面墙体构造研究和节能减碳关键技术 in 陕西省民用建筑工程项目中应用和推广。

完成人强聪望来自陕西西咸新区沣西新城能源发展有限公司，为项目主要参与人，参与了项目的整体研究和相关关键技术在居住建筑中的应用和推广。

完成人王智伟来自西安建筑科技大学，为本课题的重要完成人，对项目发明和创新点(1)、(2)有重要贡献。具体完成内容如下：(1)提出了地下水源热泵系统协同优化新技术，确立了基于蓄混水技术的地下水源热泵系统，建立了地下水源热泵系统优化设计和工程应用适应性评价方法，提出了采用按每户空调水流量分摊收费的冷热计量技术，发明了相关专利 8 项；(2)参编相关标准 2 项；(3)发表相关论文十余篇。

完成人郑琨为主要项目主要参与人，主要参与完成了项目城镇居住建筑节能降碳设计理论体系研究和陕西省城镇居住建筑节能减碳系列标准体系的编制。

完成人杨潇然为主要项目主要参与人，主要参与完成了陕西省城镇居住建筑节能减碳系列标准体系的编制，并参与完成了相关绿色低碳建筑项目的方案设计。

完成人蒋浩为主要项目主要参与人，主要参与完成了超低能耗建筑设计理论体系的研究和相关绿色低碳建筑项目的方案设计。

完成人王翼为主要项目主要参与人，主要参与完成了超低能耗建筑设计理论体系的研究和相关实际工程的应用和绘制了陕西省第一个超低能耗居住建筑施工图设计。

完成人周阳为主要项目主要参与人，负责研究成果相关重要技术在示范项目的工程建设和应用实施。

# 科技进步奖公示项目 8

**一、项目名称：**多层立交结构防灾减灾抗震性能研究与工程应用

**二、提名者及提名意见**

提名单位：陕西省科学技术厅

提名意见：

该团队以多层立交结构作为研究对象，通过有限元仿真分析软件建立有限元模型，设计实施振动台试验，研究多层立交结构基于性能抗震设计方法，形成多层立交桥梁基于多级设防水准思想体系和相关抗震设计方法，对了解多层立交桥梁的损伤破坏机理、进行基于性能的抗震设计以及地震过后桥梁结构的修复等方面具有重要意义。团队通过本项目研究提出的科技创新显著促进了桥梁抗震设计理论的发展，完善桥梁抗震设计理论体系，显著促进了多层立交桥梁领域的科技进步。

该团队提出的科技创新点适用于多层立交桥梁 5 级抗震设防水准、5 级抗震性能水准和 4 级抗震性能目标为基础内容的抗震性能目标矩阵：通过有限元非线性时程分析和模型试验，获得多层立交桥梁在破坏历程、塑性铰数量和顺序、延性构件耗能等方面的地震响应规律；采用振型组合分布模式的 Pushover 方式对框架式多层立交桥梁进行了推倒分析得到了多层立交桥梁从弹性阶段到塑性阶段的抗震性能发展变化历程；通过选择刚度退化损伤模型对多层立交桥梁进行损伤判别，划分 5 级损伤指标范围，并确定损伤指标与性能水准的对应关系。

其研究成果有效支撑了雨润农副产品全球采购中心、西铜高速城市段尚稷路立交工程二期工程和宜川县滨河路桥梁等工程建设，工程造价节约 150~400 元/m<sup>2</sup>，非常有效的节约了土地资源，减少了项目建设对环境影响，同时为团队单位产生了技术设计及咨询合同，具有显著的经济、社会和环保效益。

拟提名该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖。

**三、项目简介：**

**（一）立项背景**

我国处于地震多发区域，且呈现出强度大、频率高、破坏强的特点，给国家经济和社会发展带来阻力。城市多层立交结构因其对城市交通效率的极大提高，在我国得到迅速发展。多层立交结构建设在城市交通枢纽位置，属于城市生命线工程，相关抗震研究国内外较少，研究理论体系尚属空白，尚无规范可循。多层立交结构防灾减灾抗震性能研究，具有广阔应用前景和重要实践意义。

**（二）主要科技创新**

以多层立交结构为研究对象，通过仿真分析并实施大比例结构模型振动台试验，探究多层立交结构地震响应规律，再现结构在地震作用下的破坏、倒塌状况、灾变机理及塑性铰的发展情况，形成多层立交结构基于多级设防水准的抗震理论体系及评估方法。

主要创新点如下：

1、提出多层立交结构抗震设防水准、抗震性能目标，形成了同类结构抗震设计方法。

2、通过理论分析和模型试验，获得了多层立交结构在破坏历程、塑性铰出铰顺序和数量、延性构件耗能等方面的地震响应规律。

3、选择刚度退化损伤模型对多层立交结构进行损伤判别，提出 5 级损伤指标体系，确定了损伤指标与性能水准的对应关系。

4、基于研究成果并结合我国相关抗震规范，提出多层立交结构基于性能抗震设计流程及抗震性能评估方法。

### （三）授权知识产权情况

本项目研究过程中获得的知识产权情况包括：申请发明专利 1 件，授权发明专利 2 件，授权实用新型专利 4 件，授权外观专利 1 件，获取软件著作权 1 项，发表论文 16 篇（其中 2 篇 SCI，8 篇 EI），编制标准 2 项。

### （四）经济效益和社会效益及促进行业科技进步作用

团队研究成果有效支撑多个项目建设，指导多座桥梁抗震设计，产生显著经济效益，应用本项目研究成果进行抗震设计的项目相比同类项目节约造价 150~400 元/平方米。项目团队通过理论分析、试验研究、工程应用示范，完成雨润农副产品全球采购中心桥梁工程、西安市西三环-锦业路立交工程、西铜高速城市段尚稷路立交工程二期工程、丹州新区滨河路桥梁工程项目等项目的抗震设计。项目成果应用可降低工程造价，提升城市桥梁防灾减灾水平，加强城市韧性建设，有效节约土地资源，减少建设对环境的污染。项目研究培养和引进多名高层次人才，具有显著经济效益、社会效益和环保效益。

通过本项目的研究显著促进桥梁抗震设计理论的发展，填补多层立交桥梁的研究空白，完善桥梁抗震设计理论体系，显著促进多层立交桥梁领域的科技进步。

## 四、客观评价

### （一）科技成果评价及成果登记

“多层立交结构抗震性能研究”科技成果于 2024 年 3 月 27 号通过了陕西省技术转移中心组织开展的科技成果评价，形成如下主要意见。

1、成果评价资料齐全、内容完整、数据翔实，符合评价要求。项目取得以下技术创新：①提出多层立交结构抗震设防水准、抗震性能目标，形成了同类结构抗震设计方法。②通过理论分析和模型试验，获得了多层立交结构在破坏历程、塑性铰出铰顺序和数量、延性构件耗能等方面的地震响应规律。③选择刚度退化损伤模型对多层立交结构进行损伤判别，提出 5 级损伤指标体系，确定了损伤指标与性能水准的对应关系。

2、项目取得以下主要成果：发表高水平论文 16 篇，其中 SCI 收录 2 篇、EI 收录 8 篇、CSCD 收录 3 篇、中文核心期刊 3 篇；获授权发明专利 1 件、实用新型专利 4 件、外观专利 1 件，软件著作权 1 项。

3、该成果成功应用于西铜高速城市段尚稷路立交工程二期工程、丹州新区滨河路桥梁工程等项目，取得较好经济效益和社会效益。

4、评价专家组一致认为，该项目研究成果总体达到国际先进、国内领先水平，一致同意通过评价。

5、建议：进一步加大推广应用力度。

2024年3月28日，经陕西省科学技术厅审核，“多层立交结构抗震性能研究”科技成果获取陕西省科技成果登记证书。批准登记号：9612024Y1185。

## （二）支撑课题验收意见

2023年11月28日，陕西省科学技术厅组织有关专家，对陕西省科技创新团队“多层立交结构抗震性能研究创新团队”（编号：2018TD-040）进行了验收。专家组听取项目汇报，审查了验收申请书，经质询和讨论，形成如下意见：

1、提交的验收资料齐全，符合验收要求。

2、建设期内，团队在以下几个方面取得了实效：

研究成果与效益：围绕多层立交结构抗震技术问题，开展了基于性能的多层立交结构抗震设计基本理论及方法、试验及推广应用研究，取得了较为突出的成效。与西安雨润农产品全球采购有限公司、宜川县住房和城乡建设局合作，将研究成果应用于雨润农副产品全球采购中心桥梁工程、丹州新区滨河路桥梁工程项目中，取得了良好的经济效益和社会效益。

能力建设与人才培养：依托陕西省研究生联合培养示范工作站，采用产学研合作的人才培养模式，提升团队成员能力水平。建设期内，团队带头人入选国机集团高层次人才计划，荣获陕西省“五一巾帼标兵”“三秦青年科创先进团队”等称号；引进高层次人才4名；培养博士生2名，硕士生3名。

团队管理与合作：运行管理规范，有切实可行的团队建设规划和年度工作计划；主持第一届桥梁结构极端荷载与防护学术会议，参加第七届中美桥梁可持续发展研讨会等会议，对外学术交流广泛。

3、根据审计报告结果，项目专项经费支出合理，符合相关规定。

综上所述，完成了项目合同书规定的内容，达到了验收要求。验收专家组一致同意通过验收。

## （三）科技查新报告

2022年03月25日，经一级科技查新咨询单位陕西省科学技术情报研究院对本项目科技成果国内外查新，得到结论，国内外已有研究①未明确述及针对框架式多层立交桥梁抗震性能目标矩阵；②未见明确述及通过有限元非线性时程分析和模型试验，获得框架式多层立交桥梁在破坏历程、塑性铰数量和顺序、延性构件耗能等方面的地震响应规律的综合研究。③未明确述及采用振型组合分布模式的Pushover方式对框架式多层立交桥梁进行了推倒分析。④未明确述及针对框架式多层立交桥梁进行损伤指标及与性能

水准的对应关系进行研究。研究成果具有创新性。报告编号：CX20240300476。

#### （四）科技成果收录

2022 年 10 月 27 号，经陕西省科学技术情报研究院审核，科技报告“基于性能的框架式多层立交桥抗震设计研究”收录于陕西省科技报告服务系统，收录证书号 SNSTR-2022-002987。

#### 五、应用情况：

本项目属于基础设施建设减灾防灾、城市韧性研究领域。成果服务于基础设施中的桥梁建设技术，研究成果先后指导多个桥梁相关项目的抗震设计，具有显著的经济效益、社会效益和环保效益。

（一）雨润西安农副产品全球采购中心位于经发区，高架桥通过匝道与交易区厂外道路衔接。项目团队通过数值理论分析、振动台试验验证详细研究此项目桥梁的抗震性能。研究发现桥梁在纵向地震作用下墩柱弯矩从墩顶到墩底依次增加，在横向地震作用下，表现出与普通桥梁不同的受力特性，梁在纵桥向和横桥向的塑性铰出现顺序不同，不同尺寸刚度系梁对塑性铰出现顺序的影响。结合研究成果对本项目的桥梁进行精细的抗震设计，产生较好的经济效益，共节约造价 2217 万。同时多层设计有效节约了土地资源，减少了建设对环境污染。

（二）滨河路为宜川县交通大动脉。项目包括黄河桥及牡丹桥，全长 364m，在此项目中，由多层立交结构抗震性能研究创新团队完成该桥抗震设计，有效支撑项目建设，节约造价共计约 474 万元。

（三）尚稷路与西铜路立交位于西安市城北。立交南北向全长 720m，东西向全长 1673.738m，立交总体方案为三层。由多层立交结构抗震性能研究创新团队为该桥抗震设计提供技术指导，有效支撑项目建设。节约造价共计约 1773 万。

（四）甘州区水生态环境修复治理项目 2020 年度工程桥梁全长 245m，桥梁全宽 28m。工程建安费 1.112 亿。研究团队参与该桥抗震咨询，为工程项目混凝土桥梁抗震设计提供了重要的决策支持和技术支持，通过本团队提出的多级损伤指标与性能水准的对应关系，应用在项目抗震计算分析中，优化工程设计，有效节省工程材料，节约造价共计约 240 万。

（五）西三环-锦业路立交工程项目为两层分离式立交，桥梁长度 382.2m，建安费 1.6 亿。研究团队参与该桥抗震技术咨询，所提出的基于性能抗震设计流程及抗震性能评估方法在该桥抗震设计建设中得到直接采纳，有效节省工程材料，节约造价 260 万。

（六）国高包茂线(G65)曲江至太乙宫段改扩建工程项目全长 18.531 公里，立交 5 处，总投资 26.32 亿元。团队参与该桥抗震技术咨询，为工程项目设计提供重要技术支持，所提出的多层立交结构在顺桥向和横桥向的合理约束体系和基于性能抗震设计流程及抗震性能评估方法在该桥抗震设计中得到采纳，有效节省工程材料，节约造价共计约 623 万。

（七）项目位于西安曲江花朝路，跨南三环。桥梁长 323.72m，变高箱梁，建安费 1.4 亿。团队提供抗震咨询，采用基于性能的抗震设计流程及抗震性能评估方法对桥梁工程在地震作用下的安全性进行判别，给出桥梁合理约束体系建议，优化下部结构配筋，节约了工程材料，提高了结构抗震韧性。节约造价共计约 198 万元。

#### 六、主要知识产权和标准规范等目录：

| 序号 | 知识产权类别 | 知识产权具体名称  | 国家（地区） | 授权号                    | 授权日期       | 证书编号          | 权利人                          | 发明人                                |
|----|--------|---|--------|------------------------|------------|---------------|------------------------------|------------------------------------|
| 1  | 论文     | Influence of bearing configuration on dynamic response of multilayer overpass structure | 中国     | ISBN-13: 9781728170817 | 2020.02.28 | ICMTM A2020   | 中联西北工程设计研究院有限公司              | 宗雪梅<br>王小冬                         |
| 2  | 实用新型专利 | 一种框架式多层立交桥梁模型振动台试验用钢板防护装置   | 中国     | ZL202120634086.9       | 2021.10.08 | 14351355      | 中联西北工程设计研究院有限公司              | 宗雪梅<br>周敕<br>杨芳<br>朱国强<br>刘刚<br>吴江 |
| 3  | 发明专利   | 一种采用超韧性纤维混凝土加固震后桥墩的方法   | 中国     | ZL201810445129.1       | 2019.04.26 | 3349224       | 长安大学                         | 周敕<br>姜永存<br>宋建伟<br>付佳飞<br>刘进      |
| 4  | 发明专利   | 一种施工阶段的斜拉桥系统  | 中国     | ZL201310700617.X       | 2016.08.24 | 2194493       | 长安大学                         | 李宇<br>李琛<br>杨赐<br>付曜<br>吴桂楠        |
| 5  | 实用新型专利 | 一种城市立交桥桥梁用抗震支座  | 中国     | ZL202023228448.9       | 2021.11.02 | 14565059      | 中联西北工程设计研究院有限公司              | 王小冬<br>宗雪梅<br>刘刚<br>张允<br>杨芳<br>周红 |
| 6  | 标准     | 预制装配式混凝土综合管廊工程技术规程  | 中国     | T/CSPST C 71-2021      | 2021.10.12 | 中国科技产业化促进会    | 中建丝路建设投资有限公司、中联西北工程设计研究院有限公司 | 王俊杰<br>汤明<br>宗雪梅等                  |
| 7  | 论文     | 地震作用下双层桥梁结构参数敏感性分析  | 中国     | 工程抗震与加固改造              | 2022.02.01 | 2022,44:57-64 | 中联西北工程设计研究院有                 | 刘刚<br>薛磊<br>宗雪梅                    |

|    |    |                  |    |                  |            |                 |                         |                        |
|----|----|------------------|----|------------------|------------|-----------------|-------------------------|------------------------|
|    |    |                  |    |                  |            |                 | 限公司，四川公路桥梁建设集团有限公司，长安大学 | 周敕<br>杨芳<br>刘阳         |
| 8  | 论文 | 多层桥梁结构合理抗震体系研究   | 中国 | 地震工程与工程振动        | 2020.12.01 | 2020,40:103-110 | 西安科技大学，长安大学             | 张玥<br>薛磊<br>周敕         |
| 9  | 论文 | 地震作用下多层桥梁结构弹塑性分析 | 中国 | 沈阳建筑大学学报(自然科学版)  | 2021.01.01 | 2021,37:104-112 | 西安科技大学，长安大学             | 张玥<br>薛磊<br>杨宝刚<br>周敕  |
| 10 | 其他 | 框架式多层立交桥梁        | 中国 | ZL202030675101.5 | 2021.03.23 | 6421241         | 中联西北工程设计研究院有限公司，长安大学    | 宗雪梅<br>杨芳<br>朱国强<br>周敕 |

#### 七、主要完成人情况：

|  |                 |     |   |
|--|-----------------|-----|---|
| 姓 名  | 宗雪梅             | 排 名 | 1 |
| 行政职务   | 公司副总工程师         |     |   |
| 技术职称   | 正高级工程师          |     |   |
| 工作单位   | 中联西北工程设计研究院有限公司 |     |   |
| 完成单位   | 中联西北工程设计研究院有限公司 |     |   |
| 对本项目主要学术贡献：<br>项目研究总负责人，负责从立项申报、开题、研究到成果验收各阶段全过程的组织和协调工作：负责研究目标的拟定、研究技术路线的确定、项目成果总体水平把握，以及创新方向与创新点的论证；负责依托工程的落实。对多层立交结构抗震性能的实桥应用进行技术把关，提出多层立交结构多级抗震设防水准、抗震性能目标思想，带领课题组形成同类结构抗震设计方法，编制混凝土框架式多层立交桥梁抗震设计导则。全面投入项目的研究工作，投入工作量占本人 70%，发表相关论文 4 篇(EI 收录 3 篇)，申请发明专利 1 项、获准实用新型专利 4 项、获准外观专利 1 项。对第 1、2、3 创新点做出创新性贡献，对项目整体水平的取得做出了突出贡献。 |                 |     |   |

|      |      |     |   |
|------|------|-----|---|
| 姓 名  | 周敕   | 排 名 | 2 |
| 行政职务 | 无    |     |   |
| 技术职称 | 教授   |     |   |
| 工作单位 | 长安大学 |     |   |
| 完成单位 | 长安大学 |     |   |

|   |                 |     |   |
|---|-----------------|-----|---|
| 对本项目主要学术贡献：<br>作为项目研究主要完成人，参与项目申报、开题的组织协调工作;采用新型支座连接方式和新型钢板防护装置圆满完成框架式多层立交桥模型桥梁振动台试验。提出了框架式多层立交桥连续倒塌破坏准则，基于拆除构件法进行了框架式多层立交桥的抗连续倒塌分析。投入工作量占本人 65%，发表相关论文 10 篇(SCI 收录 2 篇、EI 收录 8 篇)，获准发明专利 1 项、获准实用新型专利 3 项、获准外观专利 1 项。对第 2、3、4 创新点做出主要贡献。 |                 |     |   |
| 姓 名   | 吴登科             | 排 名 | 3 |
| 行政职务  | 无               |     |   |
| 技术职称  | 工程师             |     |   |
| 工作单位  | 中联西北工程设计研究院有限公司 |     |   |
| 完成单位  | 中联西北工程设计研究院有限公司 |     |   |
| 对本项目主要学术贡献：<br>作为项目研究主要团队成员，参与完成试验设计，编制试验报告，编制技术标准，参与完成成果水平评价工作。对本项目主要技术贡献：对比不同约束体系下框架式双层立交桥桥梁的地震响应规律，得到了框架式多层立交桥在顺桥向和横桥向的合理约束体系，指导研究成果在具体项目中的应用。   |                 |     |   |

|   |                 |     |   |
|---|-----------------|-----|---|
| 姓 名   | 杨芳              | 排 名 | 4 |
| 行政职务  | 无               |     |   |
| 技术职称  | 高级工程师           |     |   |
| 工作单位  | 中联西北工程设计研究院有限公司 |     |   |
| 完成单位  | 中联西北工程设计研究院有限公司 |     |   |
| 对本项目主要学术贡献：<br>作为项目研究主要执行者，杨芳组织完成项目申报，编制研究报告及工作报告，编制技术规程，组织完成成果水平评价。积极推广项目技术成果，完成推广项目设计工作，推进实际工程应用。对本项目主要技术贡献：通过理论研究、数值分析，得到多层立交结构地震响应和延性性能规律，通过振动台试验，再现结构在地震作用下的破坏、倒塌等灾变机理及塑性铰在框架墩柱间的发展情况。投入工作量占本人 65%，发表相关论文 3 篇（EI 收录 2 篇），申请发明专利 1 项、获准实用新型专利 3 项、获准外观专利 1 项。对创新点 2、3 做出主要贡献。 |                 |     |   |

|      |                 |     |   |
|------|-----------------|-----|---|
| 姓 名  | 霍旭挺             | 排 名 | 5 |
| 行政职务 | 无               |     |   |
| 技术职称 | 工程师             |     |   |
| 工作单位 | 中联西北工程设计研究院有限公司 |     |   |
| 完成单位 | 中联西北工程设计研究院有限公司 |     |   |



|   |  |  |  |
|---|--|--|--|
| 对本项目主要学术贡献：<br>作为项目研究团队成员，参与项目的立项申报、基础调研工作，参与项目推广应用，参与课题验收与成果评价组织工作。投入工作量占本人 30%。 |  |  |  |
|---|--|--|--|

|      |                     |     |   |
|------|---------------------|-----|---|
| 姓 名  | 周新平                 | 排 名 | 6 |
| 行政职务 | 无                   |     |   |
| 技术职称 | 高级工程师               |     |   |
| 工作单位 | 西安中交一公院瑞通科研试验检测有限公司 |     |   |
| 完成单位 | 西安中交一公院瑞通科研试验检测有限公司 |     |   |

|  |  |  |  |
|--|--|--|--|
| 对本项目主要学术贡献：<br>作为项目研究主要团队成员，参与制定项目实施方案，完成振动台试验设计工作，进行试验数据采集与整理，得到多层立交结构地震响应和延性性能规律。对本项目主要技术贡献：采用增量动力分析方法进行框架式多层立交桥梁的易损性分析，得到不同构件的损伤响应。参与编制混凝土框架式多层立交桥梁设计导则。对应用工程的优化设计提出建设性意见，投入工作量占本人 45%。对创新点 3 做出贡献。 |  |  |  |
|--|--|--|--|

|      |        |     |   |
|------|--------|-----|---|
| 姓 名  | 张玥     | 排 名 | 7 |
| 行政职务 | 无      |     |   |
| 技术职称 | 副教授    |     |   |
| 工作单位 | 西安科技大学 |     |   |
| 完成单位 | 西安科技大学 |     |   |

|  |  |  |  |
|--|--|--|--|
| 对本项目主要学术贡献：<br>作为项目研究主要团队成员，基于 CSiBridge 研究多层立交结构分别采用传统抗震体系、减隔震体系和延性抗震体系时的抗震性能,提出合理抗震体系。在此基础上，基于 Sap2000 采用增量动力的分析方法,给出多层立交结构桥墩塑性铰的产生机制,完善多层立交结构桥梁抗震设计理论。投入工作量占本人 40%，发表相关论文 3 篇（SCI、CSCD 收录各 1 篇）。对第 3、4 创新点做出贡献。 |  |  |  |
|--|--|--|--|

|      |                 |     |   |
|------|-----------------|-----|---|
| 姓 名  | 王博              | 排 名 | 8 |
| 行政职务 | 无               |     |   |
| 技术职称 | 高级工程师           |     |   |
| 工作单位 | 中联西北工程设计研究院有限公司 |     |   |
| 完成单位 | 中联西北工程设计研究院有限公司 |     |   |

|   |  |  |  |
|---|--|--|--|
| 对本项目主要学术贡献：<br>作为项目研究团队成员，参与项目的立项申报、基础调研工作，参与实桥推广应用工作，组织依托工程实施以及实桥应用后技术效果评价。投入工作量占本人 30%。 |  |  |  |
|---|--|--|--|

|   |      |     |   |
|---|------|-----|---|
| 姓 名   | 李宇   | 排 名 | 9 |
| 行政职务  | 无    |     |   |
| 技术职称  | 副教授  |     |   |
| 工作单位  | 长安大学 |     |   |
| 完成单位  | 长安大学 |     |   |
| 对本项目主要学术贡献：<br>作为项目研究主要团队成员，对本项目主要技术贡献：建立考虑土体约束的等效 SDOF 模型，编制弹塑性动力分析程序，以改进的地震损伤性能评估模型作为性能目标的量化工具，建立能考虑近震效应和 SSI 效应的影响，并综合强度、位移、能量三重指标的梁式桥基于性能的抗震设计方法。投入工作量占本人 40%，发表相关论文 3 篇（EI 收录 3 篇），获软件著作权 1 项。 |      |     |   |

|   |      |     |    |
|---|------|-----|----|
| 姓 名   | 朱国强  | 排 名 | 10 |
| 行政职务  | 无    |     |    |
| 技术职称  | 其它   |     |    |
| 工作单位  | 长安大学 |     |    |
| 完成单位  | 长安大学 |     |    |
| 对本项目主要学术贡献：<br>作为项目研究团队成员，参与振动台试验研究，参与采集试验数据，分析试验结论，撰写试验报告；参与多层立交结构基于性能的抗震性能评估。参与整体报告撰写、修改等工作，投入工作量占本人 55%，发表相关论文 4 篇（EI 收录 4 篇），获准实用新型专利 1 项、获准外观专利 1 项。 |      |     |    |

### 八、主要完成单位情况表

|   |                 |
|---|-----------------|
| 单位名称  | 中联西北工程设计研究院有限公司 |
| 对本项目主要学术贡献：<br>中联西北院作为牵头单位，负责团队搭建、技术路线确定、试验设计、项目应用等核心工作内容。建立有限元模型，研究多层立交桥梁基于性能的抗震设计方法。设计并实施大比例模型桥振动台试验，探究多层立交桥梁地震响应规律并对其抗震性能做出评价。创新性的提出多层立交结构抗震设防水准、抗震性能目标，形成了同类结构抗震设计方法:通过理论分析和模型试验，获得了多层立交结构在破坏历程、塑性铰出铰顺序和数量、延性构件耗能等方面的地震响应规律；选择刚度退化损作模型对多层立交结构进行损伤判别，首次提出 5 级损伤指标体系，确定了损伤指标与性能水准的对应关系；基于研究成果并结合我国相关抗震规范，首次创新性的提出多层立交桥梁基于性能抗震设计流程及抗震性能评估流程。<br>将本团队研究的成果进行标准化，并积极在多个项目中推广应用。在雨润二期建设工程、西铜高速城市段尚稷路立交工程二期工程和宜川县丹州新区滨河路桥梁工程等项目的抗震设计中进行了指导，在多层立交抗震目标确定、结构体系选择和控制截面设计配筋方面提供了具体的措施建议，促进了成果的转化。 |                 |

|  |      |
|--|------|
| 单位名称   | 长安大学 |
| <p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>负责项目技术研究、完成研究报告编撰、参与项目验收鉴定工作。创新性成果和主要贡献如下：</p> <p>提出框架式多层立交桥梁基于性能抗震设计的抗震设防水准、抗震性能水准以及抗震性能目标。对框架式多层立交桥梁有限元模型进行时程分析得到不同峰值地震作用下框架式多层立交桥梁的受力响应，分析总结框架式多层立交桥梁结构的受力特点。采用振型组合分布模式的 Pushover 方法对框架式多层立交桥梁进行了推倒分析，得到了框架式多层立交桥梁从弹性阶段到塑性阶段的抗震性能发展变化历程。采用 Chopra 改进能力谱法对框架式多层立交桥梁进行基于性能的抗震性能评估。对比不同约束体系下框架式双层立交桥梁的地震响应规律，得到了框架式多层立交桥梁在顺桥向和横桥向的合理约束体系。基于拆除构件法进行了框架式多层立交桥梁的抗连续倒塌分析，提出了框架式多层立交桥梁连续倒塌破坏准则。采用新型支座连接方式和新型钢板防护装置圆满完成了框架式多层立交桥梁模型桥梁振动台试验，同时将新型支座连接方式推广应用到斜拉压力输水管桥的振动台试验中，取得了理想的试验结果。协助确定了背景桥梁工程的抗震设防目标，并对支座选型、约束体系、构造设计和墩柱配筋等方面给出了合理建议，优化抗震设计方案，促进了成果的应用和推广。</p> |      |

|  |                     |
|--|---------------------|
| 单位名称   | 西安中交一公院瑞通科研试验检测有限公司 |
| <p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>作为项目参与单位之一，参与制定项目实施方案、参与项目的结题验收工作、协助完成了多层立交结构振动台模型试验设计及数据采集。通过试验数据整理与分析，提出了多层立交结构地震响应规律和延性指标合理取值范围，将本团队研究的成果进行标准化，并积极在多个项目中推广应用。</p> |                     |

|   |        |
|---|--------|
| 单位名称  | 西安科技大学 |
| <p>对本项目主要学术贡献：</p> <p>参与制定项目研究方案，以框架式多层立交桥梁为研究对象，基于 CSiBridge 平台分别采用传统抗震体系、减隔震体系和延性抗震体系对其进行了抗震性能分析，提出了框架式多层立交桥梁的合理抗震体系。在此基础上，基于 Sap2000 采用增量动力分析方法分析了多层立交结构桥墩塑性铰产生的机制，完善了多层立交结构桥梁抗震设计理论。协助完成了框架式多层立交桥大比例尺振动台试验，取得了较理想的试验效果。在雨润二期建设工程、西铜高速城市段尚稷路立交工程二期工程和宜川县丹州新区滨河路桥梁工程等项目建设中协助完成了桥梁有限元模型建模和数值分析，对工程结构合理抗震体系的选取及抗震性能目标的确定提出了合理建议，促进了成果的转化。</p> |        |

九、完成人合作关系说明：

本项目完成人共 10 位，宗雪梅/1、吴登科/3，杨芳/4，霍旭挺/5、王博/8 隶属于中联西北工程设计研究院有限公司；周勣/2、李宇/9、朱国强/10 隶属于长安大学；周新平/6 隶属于西安中交一公院瑞通科研试验检测有限公司；张玥/7 隶属于西安科技大学。

第一完成人宗雪梅，中联西北工程设计研究院有限公司，正高级工程师，工学博士，是陕西省创新能力支撑计划《多层立交结构抗震性能研究创新团队》(2018TD-040)项目负责人。

①与第 2 完成人周勣、第 4 完成人杨芳、第 9 完成人李宇共同完成《多层立交结构抗震性能研究创新团队》(2018TD-040)项目立项；

②与第 2 完成人周勣、第 4 完成人杨芳共同完成论文：《地震作用下双层桥梁结构参数敏感性分析》；

③与第 2 完成人周勣、第 4 完成人杨芳、第 10 完成人朱国强共同形成成果：实用新型专利《一种框架式多层立交桥梁模型振动台试验用钢板防护装置》、外观设计专利《框架式多层立交桥梁》；

④与第 4 完成人杨芳共同形成成果：实用新型专利《一种城市立交桥桥梁用抗震支座》；

⑤与第 2 完成人周勣、第 3 完成人吴登科、第 4 完成人杨芳、第 5 完成人霍旭挺、第 6 完成人周新平、第 7 完成人张玥、第 8 完成人王博、第 9 完成人李宇共同完成《多层立交结构抗震性能研究创新团队》(2018TD-040)项目验收；

第二完成人周勣，长安大学，教授，工学博士，是陕西省创新能力支撑计划《多层立交结构抗震性能研究创新团队》(2018TD-040)核心成员。

①与第 7 完成人张玥共同完成论文：《多层桥梁结构合理抗震体系研究》、《地震作用下多层桥梁结构弹塑性分析》。

②与第 1 完成人宗雪梅、第 3 完成人吴登科、第 4 完成人杨芳、第 5 完成人霍旭挺、第 6 完成人周新平、第 7 完成人张玥、第 8 完成人王博、第 9 完成人李宇共同完成《多层立交结构抗震性能研究创新团队》(2018TD-040)项目验收；

各完成人依托陕西省创新能力支撑计划“多层立交结构抗震性能研究创新团队(2018TD-040)”、中央高校基本科研业务费专项资金项目“多层立交结构动力特性及地震响应研究(51078306)”等课题开展联合人才培养与深度合作，相关完成人间的合作形式包括共同知识产权、论文合著、共同立项、成果验收等。

## 科技进步奖公示项目 9

**一、项目名称：**角膜基质透镜植入联合角膜交联术治疗晚期圆锥角膜机制研究

**二、提名者及提名意见**

**提名单位：**陕西省科学技术厅

**提名意见：**该项目研究发现了角膜基质透镜植入联合角膜交联术可提高晚期圆锥角膜患者角膜生物力学性能，从基础实验和临床实验两个方面探究了该手术的原理及机制。研究表明，角膜基质透镜植入联合角膜交联术后角膜的抗拉强度和弹性模量增加，这可能是通过交联增加角膜胶原纤维的直径及纤维化程度实现的。术后患者的角膜厚度显著增加，且未观察到显著的不良反应，进一步证实了手术的有效性及安全性。这些研究结果的临床意义在于：证明了角膜基质透镜植入联合角膜交联术具有良好的有效性和安全性，为圆锥角膜的治疗提供了一种有效的手术方法，具有良好的应用前景。

根据《陕西省科学技术厅关于 2024 年度省科学技术奖提名工作的通知》（陕科发[2024]17 号）文件，鉴于“角膜基质透镜植入联合角膜交联术治疗晚期圆锥角膜”项目在眼科学转化医学及技术应用方面取得的创新性科技成果，推动了圆锥角膜治疗的临床应用，为本省科技进步及社会经济发展做出的突出贡献。

拟提名该项目为陕西省科学技术进步奖三等奖。

**三、项目简介**

角膜交联术作为唯一主动控制圆锥角膜进展的手术，在角膜厚度低于 400 微米时因可能损伤内皮而不适用。目前临床治疗方法只有角膜移植手术，但是受限于角膜的来源。本中心前期临床中，针对于最薄厚度为 300-400 微米之间待移植圆锥角膜，于角膜基质层间植入同种异体基质透镜，增加角膜厚度，使同期行快速角膜交联术，有效地解决了角膜厚度不适用于交联术的缺陷，避免在这种条件下的角膜移植。然而，目前该手术于国际国内均处于起步阶段，省内仅我中心开展，虽然临床有效性和安全性较好，该种手术背后的科学机制仍然有待探索，主要为：1）术后角膜内部分子键改变，2）植入透镜和受体角膜之间的粘结状态，3）角膜基质纤维细胞微观结构改变，4）术后角膜细胞活性、胶原分布和炎症反应情况。因此我中心开展兔眼圆锥角膜模型进行透镜植入联合角膜交联术，并观察化学、物理、生理学的变化，包括：氨基改变和基团变化；通过角膜的拉伸、抗张强度，评估角膜强度改变；采用酶降解法验证交联后的稳定性；采用扫描电镜观察表面形貌，采用透射电子显微镜观察内部形貌；观察交联后角膜细胞活性和炎症反应情况，为临床应用该技术提供理论支持和基础支撑。

**四、客观评价**

本项目成功研制出角膜基质透镜植入联合角膜交联术治疗晚期圆锥角膜机制的技术方法。

本项目的研究成功受到同领域国内外专家的良好评价，在国内外杂志发表相关文章9 篇，专利1 个。

五、应用情况

- 1、角膜基质透镜植入联合角膜交联术可显著增加圆锥角膜的角膜厚度，增加角膜抗拉强度和弹性模量，术后角膜生物力学性能增强，具有良好的有效性和安全性。
- 2、该手术作为新的探索，对患者而言，大幅度减少患者经济压力，单眼手术费用1.7 万，相比较角膜穿透性角膜移植手术费用减少 50%，且手术供体充足，无需等待捐献角膜植片。无需住院，门诊即可手术，术后用药简单且短期，是一种有前景的临床术式。

六、主要知识产权和标准规范等目录

| 序号 | 知识产权类别 | 知识产权具体名称   | 国家（地区）                            | 授权号                            | 授权日期             | 证书编号 | 权利人 | 发明人 |
|----|--------|--|-----------------------------------|--------------------------------|------------------|------|-----|-----|
| 1  | 论文     | Antioxidant Carbon Dots Nanozyme Loaded in Thermosensitive in situ Hydrogel System for Efficient Dry Eye Disease Treatment | Int J Nanomedicine                | doi:10.2147/ijn.s456613        | 2024 年 4 月 30 日  |      | 张明真 | 韦伟  |
| 2  | 论文     | Clinical outcomes of stromal lenticule rotation to correct mixed astigmatism   | Eur J Ophthalmol                  | doi:10.1177/11206721231221165. | 2023 年 12 月 5 日  |      | 韦伟  | 孙西宇 |
| 3  | 论文     | Point-of-care monitoring of dry eye disease using lysozyme in tear based on  | Sensors and Actuators B: Chemical | doi:10.1016/j.snb.2022.133179. | 2022 年 12 月 16 日 |      | 张明真 | 韦伟  |

|    |    |   |               |   |               |  |    |     |
|----|----|---|---------------|---|---------------|--|----|-----|
|    |    | commercial pregnancy test strips            |               |   |               |  |    |     |
| 4  | 论文 | 异体角膜基质透镜植入联合角膜胶原交联术治疗圆锥角膜的短期临床观察            | 中华眼科杂志        | d0I:10. 3760/cma. j. cn112142-20221204-00621.         | 2024年 05月 14日 |  | 韦伟 | 刘佳  |
| 5  | 论文 | 角膜基质透镜植入联合角膜胶原交联术治疗圆锥角膜术后角膜上皮重塑             | 国际眼科杂志        | DOI: 10. 3980/j. issn. 1672-5123. 2023. 12. 25.       | 2023年 12月 08日 |  | 韦伟 | 贺婷  |
| 6  | 论文 | 角膜塑形镜联合 0.1 g·L <sup>-1</sup> 阿托品延缓儿童近视进展分析 | 眼科新进展         | DOI: 10. 13389/j. cnki. rao. 2023. 0177.              | 2023年 11月 05日 |  | 韦伟 | 申笛  |
| 7  | 论文 | SMILE 术中应用十字定位法矫正低中度散光的临床效果                 | 国际眼科杂志        | DOI: 10. 3980/j. issn. 1672-5123. 2024. 2. 23.        | 2024年 02月 08日 |  | 韦伟 | 曹文佳 |
| 8  | 论文 | 去上皮与跨上皮快速角膜胶原交联术治疗圆锥角膜长期疗效的临床观察             | 中华眼科医学杂志（电子版） | DOI: 10. 3877/cma. j. issn. 2095-2007. 2023. 06. 003. | 2024年 04月 03日 |  | 韦伟 | 徐静  |
| 9  | 论文 | FS-LASIK Xtra 治疗中高度近视患者术后 2a 的矫正效果          | 国际眼科杂志        | DOI: 10. 3980/j. issn. 1672-5123. 2024. 2. 22.        | 2024年 02月 08日 |  | 韦伟 | 李金孝 |
| 10 | 专利 | 一种用于术者实施小切口角膜基质透镜取出术的眼科设备                   |               | ZL 2021 2 1897055. 9                                  | 2022年 03月 01日 |  | 韦伟 | 韦伟  |

## 七、主要完成人情况

| 排序 | 完成人 | 行政职务         | 技术职称      | 工作单位         | 完成单位         | 对本项目的贡献                        |
|----|-----|--------------|-----------|--------------|--------------|--------------------------------|
| 1  | 韦伟  | 眼科医院<br>副院长  | 主任医师      | 陕西省眼科<br>研究所 | 陕西省眼科<br>研究所 | 负责科研任务分<br>工、把握科研进<br>度、管理科研资金 |
| 2  | 申笛  |              | 副主任医<br>师 | 陕西省眼科<br>研究所 | 陕西省眼科<br>研究所 | 圆锥角膜动物模型<br>的构建                |
| 3  | 补亚忠 |              | 研究员       | 西安交通大<br>学   | 西安交通大<br>学   | 实验设计                           |
| 4  | 王晓睿 |              | 主治医师      | 陕西省眼科<br>研究所 | 陕西省眼科<br>研究所 | 单轴拉伸试验及剥<br>离试验                |
| 5  | 孙西宇 |              | 主治医师      | 陕西省眼科<br>研究所 | 陕西省眼科<br>研究所 | 组织学染色和超微<br>结构分析               |
| 6  | 张红兵 | 副所长          | 主任医师      | 陕西省眼科<br>研究所 | 陕西省眼科<br>研究所 | 实验设计                           |
| 7  | 王小东 | 眼科医院<br>院长助理 | 主任医师      | 陕西省眼科<br>研究所 | 陕西省眼科<br>研究所 | 动物实验中手术操<br>作                  |
| 8  | 朱海峰 |              | 副主任医<br>师 | 陕西省眼科<br>研究所 | 陕西省眼科<br>研究所 | 临床评估                           |

## 八、主要完成单位及创新推广贡献

完成单位陕西省眼科研究所，成功搭建了“角膜基质透镜植入联合角膜交联术治疗晚期圆锥角膜机制创新性的技术应用平台”，目前该研究表明角膜基质透镜植入联合角膜交联术后角膜生物力学性能增强，具有良好的有效性和安全性，对于治疗晚期圆锥角膜患者提供了新的思路，有良好的应用前景。

## 九、完成人合作关系：

韦伟作为课题负责人，负责本课题的任务分工、把握科研进度、管理科研资金。对本项目的贡献在于负责项目的申请、实施和结题，使本项目顺利实施。

申笛作为课题主要参与者，主要负责圆锥角膜动物模型的构建及动物饲养。对本项目的贡献在于完成本项目中的动物实验。

补亚忠作为课题主要参与者，主要负责动物实验的设计。对本项目的贡献在于设计本项目中动物实验的分组及实验流程。

王晓睿作为课题主要参与者，主要负责动物实验中各组角膜生物力学指标的检测。对本项目的贡献在于完成本项目中的单轴拉伸试验及剥离试验。

孙西宇作为课题主要参与者，主要负责对角膜组织进行 H&E 和 MT 染色观察角膜基质的超微结构，同时使用胶原纤维进行定量分析。对本项目的贡献在于完成本项目中的组织学染色和超微结构分析。



张红兵作为课题主要参与者，主要负责本项目中临床实验的设计。对本项目的贡献在于设计本项目中临床实验的观察指标及实验流程。

王小东作为课题主要参与者，主要负责本项目中动物实验手术操作。对本项目的贡献在于完成本项目中的动物实验。

朱海峰作为课题主要参与者，主要负责本项目中临床受试者的随访复查和结果评估。对本项目的贡献在于对临床实验结果进行评估。

## 科技进步奖公示项目 10

### 一、项目名称：

煤矿水灾智能防控关键技术装备及云平台

### 二、提名者及透明意见

**提名单位：**陕西省科学技术厅

**提名意见：**该项目系统地建立了煤矿水灾智能防控技术和装备体系，在灾源精准探测、灾害要素智能监测与预警、隐患智能化治理和水灾防控全过程智能云平台等方面取得重大突破。

项目研发出煤矿水灾隐患智能精准探测技术与装备，实现了定向钻机自主钻进、参数自适应调节，以及钻孔进行径向隐伏水患探测数据实时提取与立体成像，破解了煤矿井下水患超前智能精准探测难题；研发出煤矿水灾多场耦合监测智能预警技术与装备，实现基于“井-地-孔”立体监测网络的导水通道精准识别与水灾智能预警，综合预警准确率提升至 90%；研发出煤矿水灾智能化超前区域治理技术与装备，实现了疏放水工程智能设计、自动化监测与智能反馈调节，水灾治理注浆工程的快速响应与智能化注浆及全过程管控，显著提升综合工效；构建开发了煤矿水灾智能防控云平台，实现了煤矿水灾防控信息管理、风险评价、智能辨识与应急响应全过程管控。

项目制（修）订行业标准 3 项，获授权发明专利 27 件，出版专著 2 部，发表论文 46 篇，登记软件著作权 17 项，成果写入《煤矿地质工作细则》等国家规范性文件，荣获 2022 年中国专利优秀奖等。成果全面达到国际领先水平，提升了我国煤矿水灾智能防控技术与装备水平，为保障我国矿山安全高效智能生产提供了重要技术支撑，具有极为广阔的应用前景。

拟提名该项目为陕西省科学技术进步奖一等奖。

### 三、项目简介：

本项目隶属于矿山安全科学技术领域，应用于我国煤矿智能化建设及水灾防控。

煤炭是国家能源安全稳定供应的“压舱石”，但我国作为世界上煤矿水文地质条件最为复杂的国家，全国 83%以上的煤矿均受到水灾隐患威胁，制约 35 亿 t/a 煤炭安全开采。煤矿水灾影响范围之广、影响程度之深，水灾防控成为我国煤炭安全高效开发的重

要保障和国家能源安全的重大战略需求。长期以来，传统煤矿防治水工程多以人工操作实施为主，水灾隐患探测、监测精度，治理工程效率均存在较大瓶颈，难以支撑煤炭安全高效智能开采的需求。国家发改委等八部委印发《关于加快煤矿智能化发展的指导意见》指出“重点突破重大危险源智能感知与预警技术，……，建设多功能融合的一体化平台”，为煤矿水灾防治技术的数字化、智能化升级与技术突破指明了方向。为此，本成果依托国家重点研发计划、国家发改委实验室建设项目、企业重大项目等，针对煤矿水灾隐患探测精度低、监测预警准确性差、治理工程效率低等重大难题，研发出煤矿水灾防控“探、监、治、管”的数字化转型与智能化升级技术、装备及系统，形成煤矿水灾安全高效绿色智能防治新模式，具体创新性成果如下：

1、研发出煤矿水灾隐患智能精准探测技术与装备。研制出煤矿水患井下智能定向钻机与孔口高水压协同控制系统，开发出基于钻进工况识别的自适应定向钻进控制技术，实现了定向钻机自动钻进、钻进参数自适应调节与高水压喷孔智能防范，单次施工钻杆 100 根，可抗水压能力达 6MPa；研发出定向钻孔中瞬变电磁仪及钻孔时域电磁法径向探测系统，实现了钻孔径向隐伏水患探测数据提取与立体成像，形成了煤矿水患“长掘长探”超前探测技术，最大探测深度 1100m，径向探测范围 30m。

2、研发出煤矿水灾多场耦合监测智能预警技术与装备。研制出抗干扰连续电法监测装备、电极-线缆孔中电极串，研发出微震信号孔中拾震传感器与微震信号高精度时钟同步技术，建立了电法-微震耦合的“井-地-孔”空间布署监测系统。发明了煤矿采动影响时序数据相关性校正方法，创建了电阻率-微震信号联合解译成像技术；开发了煤矿水灾多源监测融合分级预警技术，突破了不同煤矿阈值设定瓶颈。

3、研发出煤矿水灾隐患数智化高效治理技术与装备。开发了矿井涌水量预测数值计算方法及水灾超前防治数字化设计系统，创建了煤矿致灾水源区域智控疏放技术，实现了疏放水工程的智能设计、自动化监测与智能反馈调节；构建出我国煤矿区全工况超前区域治理模式及选择准则，创建了多源信息隐蔽导水通道综合智能判识方法与分段保压梯度注浆工艺，研制出车载移动式智能化注浆平台，实现了区域治理注浆工程的快速响应与智能化注浆施工。推动煤矿水灾隐患治理向数字化、智能化的方向跨越。

4、开发出煤矿水灾智能防控云平台。搭建了煤矿水灾全过程智能防控平台架构及系统模块，研发出煤矿水灾治理工程智能分析管控系统、煤矿水灾应急抢险辅助决策系统，实现了煤矿水灾防控信息管理、风险评价、智能辨识与应急响应全过程管控，实现了从“人防”到“智防”的重大转变。

项目成果入选自然资源部、国家矿山安全监察局先进适用技术目录和工信部“制造业单项冠军”等名录，应用于陕煤、山能、国能等大型煤炭企业，以及全省煤矿水灾风险监测监控预警。推动了我国矿山安全领域向数字化、智能化转型和高质量发展，取得了重大经济、社会效益，系统提升了国家煤炭能源安全保障能力，全面达到国际领先水平。

#### 四、客观评价：

项目研发的煤矿水灾智能防控关键技术装备及云平台较以往技术对比，在水患探测、监测预警、水患治理、防控平台多个方面，全面实现了煤矿水灾的数字化与智能化变革升级，填补国内外多项技术和装备空白，主要客观评价意见如下：

项目验收鉴定评价方面：

1、“十三五”国家重点研发计划项目“矿井突水水源快速判识与水灾防控关键技术研究 2017YFC0804100”综合绩效评价：中国 21 世纪议程管理中心组织行业专家对项目进行综合绩效评分为 93.00 分（达到优秀标准），认为项目研发成果“提升了我国矿山水害防控与水灾应急抢险水平”。

2、“矿井水害防控与远程诊断云平台”鉴定意见：中国煤炭工业协会组织院士专家鉴定认为“项目成果取得了显著的经济及社会效益，对推动矿山水害防治技术进步具有重要意义，达到国际领先水平”。

3、“采煤工作面水害隐患抗干扰电阻率法监测技术与装备”鉴定意见：中国煤炭工业协会组织院士专家鉴定认为“项目成果在矿井电阻率法监测系统、施工工艺、监测数据处理和成像解释方法等方面达到了国际领先水平”。

项目社会评价方面：

1、项目获得了自然资源部、国家矿山安全监察局等高度认可。项目研发的“煤矿井下钻孔瞬变电磁探测技术”“煤矿井下微震+视电阻率联合监测技术”成果被列入自然资源部《矿产资源节约和综合利用先进适用技术目录（2022 年版）》；“防治水智能化定向钻机”成果被列入国家矿山安全监察局《矿山安全先进适用技术及装备推广目录（2024 年）》。

2、项目成果形成的“煤矿水害智能防控解决方案”入选第五届中国工业互联网大赛全国百强，获首届国企数字场景创新专业赛奖。项目核心专利“煤层底板含水层超前区域治理模式分类确定方法”获 2022 年度中国专利优秀奖。

#### 五、应用情况：

项目成果应用于煤矿水灾防控全过程的灾源精准探测、灾害要素智能监测与预警、隐患智能化治理和水灾防控全过程管控等方面。项目成果在大型煤炭基地成功推广应用，大大提升了煤矿水灾防控过程中灾源探测的效率和精度，且通过建立“井-地-孔”立体监测网络实现了开采过程中灾害的实时监测与预警，对于水灾隐患利用煤矿水灾智能化超前区域治理技术与装备进行了高效治理，部署的煤矿水灾智能防控云平台，实现了煤矿水灾全过程的智能化防控，整体技术的应用提升了煤矿水灾防控的水平和效率，为煤矿安全智能高效生产提供有力的保障。

项目研发成果整体于 2020 年开始在我国陕北、黄陇、神东等亿吨级大型煤炭基地逐步推广应用，新增销售总额超 20 亿元。此外，煤矿水灾智能防控云平台成功应用于国家矿山安全监察局陕西局，为矿山安全监管监察提供灾害防控数字化平台，有效提升

全省煤矿水灾防控工作的监管监察能力与水灾应急管理水平及治理能力。

## 六、主要知识产权和标准规范等

| 序号 | 知识产权类别 | 知识产权具体名称              | 国家（地区） | 授权号              | 授权日期        | 证书编号        | 权利人                                    | 发明人                                   |
|----|--------|-----------------------|--------|------------------|-------------|-------------|--|---------------------------------------|
| 1  | 发明专利   | 煤层底板含水层超前区域治理模式分类确定方法 | 中国     | ZL201910856992.0 | 2020年12月22日 | 4167709     | 中煤科工集团西安研究院有限公司                        | 董书宁, 刘其声, 王皓, 郭小铭, 南生辉, 郑士田, 王宇航      |
| 2  | 发明专利   | 一种电性成像结果中异常体边界智能识别方法  | 中国     | ZL202210154804.1 | 2022年6月24日  | 5257495     | 中煤科工集团西安研究院有限公司                        | 范涛, 李萍, 张鹏, 李渊, 赵睿, 刘磊, 李宇腾, 蒋必辞      |
| 3  | 发明专利   | 矿井水害隐患电法监测系统和方法       | 中国     | ZL202211552887.6 | 2023年7月18日  | 6148630     | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司                      | 鲁晶津, 王冰纯, 袁博, 王云宏, 崔伟雄, 蒋齐平, 李博凡, 段建华 |
| 4  | 标准     | 数值法预测矿井涌水量技术规范        | 中国     | KA/T 5—2023      | 2023年10月26日 | KA/T 5—2023 | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司、西安科技大学、陕西煤化工集团有限责任公司 | 王皓、董书宁、刘基、姬亚东、王晓东、刘英锋、孙学阳、周振方、赵春虎、乔伟  |
| 5  | 发明专利   | 基于地层岩性识别的井下定          | 中国     | ZL201610466157.2 | 2019年5月7日   | 3364429     | 中煤科工集团西安研究院有限公司                        | 李泉新, 石智军, 方俊, 曹明, 温榕, 高珺, 毕志          |

|    |                  |   |    |                  |                           |          |  |   |
|----|------------------|---|----|------------------|---------------------------|----------|--|---|
|    | 利                | 向孔顺层<br>导向钻进<br>系统及方<br>法                 |    |                  | 日                         |          |  | 琴，许超  |
| 6  | 发<br>明<br>专<br>利 | 钻孔底部<br>隐伏水害<br>全方位超<br>前探测装<br>置及其方<br>法 | 中国 | ZL202010601018.2 | 2023<br>年 3<br>月 3<br>日   | 5763171  | 中煤科工集<br>团西安研究<br>院有限公司                                  | 范涛，燕斌，石<br>亚丁，石显新，<br>赵兆，赵睿，李<br>博凡，刘磊            |
| 7  | 发<br>明<br>专<br>利 | 一种适用<br>于煤矿井<br>下钻机的<br>自动加卸<br>杆装置       | 中国 | ZL201811238047.6 | 2020<br>年 5<br>月 5<br>日   | 3784749  | 中煤科工集<br>团西安研究<br>院有限公司                                  | 方鹏，姚克，刘<br>智，张锐，张占<br>强，邵俊杰，陈<br>逢雷，王松，许<br>超，王龙鹏 |
| 8  | 发<br>明<br>专<br>利 | 一种分布<br>式透明工<br>作面全巷<br>道监测系<br>统及方法      | 中国 | ZL202010752328.4 | 2022<br>年 11<br>月 22<br>日 | 5600451  | 中煤科工集<br>团西安研究<br>院有限公司                                  | 董书宁，雷晓荣，<br>刘再斌，燕斌，<br>李旭，韩保山，<br>段建华，巨朝晖         |
| 9  | 发<br>明<br>专<br>利 | 矿井电法<br>监测电阻<br>率异常响<br>应快速判<br>识方法       | 中国 | ZL202110703669.7 | 2023<br>年 5<br>月 12<br>日  | 5962825  | 中煤科工集<br>团西安研究<br>院有限公司                                  | 鲁晶津，王云宏，<br>崔伟雄，王冰纯，<br>李德山，段建华，<br>南汉晨，丛琳        |
| 10 | 论<br>文           | 煤矿水害<br>智能化防<br>控平台架<br>构及关键<br>技术        | 中国 | 2022 年 47 卷 2 期  | 2022<br>年 2<br>月 15<br>日  | 煤炭学<br>报 | 中煤科工集<br>团西安研究<br>院有限公<br>司，陕西省<br>煤矿水害防<br>治技术重点<br>实验室 | 王皓，董书宁，<br>姬亚东，乔伟，<br>尚宏波，朱开鹏，<br>周振方，宁殿艳         |

#### 七、主要完成人情况：

| 项<br>目 | 姓<br>名 | 行<br>政 | 技术<br>职称 | 工作单位<br>/完成单位 | 对本项目的贡献 |
|--------|--------|--------|----------|---------------|---------|
|--------|--------|--------|----------|---------------|---------|

| 排名 |     | 职务    |    |                   |   |
|----|-----|-------|----|-------------------|---|
| 1  | 董书宁 | 主任    | 正高 | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | 项目总负责人，主持项目立项，负责总体技术方案制定，并具体组织实施。对创新成果 1、2、3、4 均做出了创造性贡献：创建了煤矿水灾智能防控体系架构，组织研发煤矿水患智能探测、监测预警技术与装备，发明煤矿水患全工况区域智能注浆治理技术与装备；组织开发煤矿水灾智能防控云平台。 |
| 2  | 王皓  | 副院长   | 正高 | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | 项目主要参与人，负责总体技术方案编制。对创新成果 2、3、4 均做出了创造性贡献：提出了煤矿水灾风险智能预警技术，研发了煤矿致灾水源区域智控疏放技术，并组织开展现场试验与推广；提出了煤矿水灾全过程智能防控平台架构并组织研发关键技术模块。                  |
| 3  | 李泉新 | 分院副院长 | 正高 | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | 项目主要参与人，对创新成果 1、3 做出了创造性贡献：构建了煤矿井下防治水智能定向钻机运动学模型，开发出全自动智能装卸钻杆系统，组织智能钻机现场试验；参与研发煤矿水灾隐患超前区域智能注浆治理技术与装备。                                   |
| 4  | 范涛  | 子公司副总 | 正高 | 西安煤科透明地质科技有限公司    | 项目主要参与人，对创新成果 1 做出了创造性贡献：研发出煤矿水患探测钻孔瞬变电磁仪，开发出钻孔瞬变电磁三分量解译算法，以及电性异常边界智能识别成像算法，组织长掘长探技术推广；参与研发煤矿水灾因素连续电法监测技术与装备。                           |
| 5  | 杜耀波 | 院长    | 正高 | 中煤科工集团信息技术有限公司    | 项目主要参与人，对创新成果 4 与项目总体推广应用做出了创造性贡献：组织煤矿水灾智能防控云平台的示范推广，以及煤矿水灾智能防控各项技术与装备的试验与推广应用，全面推进了项目成果的应用进程。  |
| 6  | 鲁晶津 | 无     | 副高 | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | 项目主要参与人，对创新成果 2 做出了创造性贡献：研发了抗干扰连续电法监测装备与孔中电极串，创建出连续电法、微震耦合解译技术，参与开发了云平台监测数据标准化数据接口协议与流处理技术。   |
| 7  | 王晓东 | 分院副院  | 正高 | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | 项目主要参与人，对创新成果 4 做出了重要贡献：负责开展了煤矿水灾防治工程数字化设计方法的构建，并对利用数值法进行煤层顶板涌水量预测方法进行了完善，并参与技术现场试验。  |

|    |     |       |    |                   |   |
|----|-----|-------|----|-------------------|---|
|    |     | 长     |    |                   |   |
| 8  | 赵兆  | 副主任   | 副高 | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | 项目主要参与人，对创新成果 1 做出了重要贡献：研发出超小型发射线圈、高精度磁探头等钻孔物探设备关键部件，参与研制高强度无缆探管与钻孔物探设备现场试验。                              |
| 9  | 乔伟  | 无     | 中级 | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | 项目主要参与人，对创新成果 2、4 做出了重要贡献：开发了多源监测数据迁移子系统、水灾监测预警与排水系统智能联动系统，研发了煤矿水灾治理工程智能分析管控系统。                           |
| 10 | 尚宏波 | 无     | 中级 | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | 项目参与人，对创新成果 4 做出了重要贡献：负责了煤矿水灾多源监测数据的融合分析与多要素耦合预警方法的研究，并参与了水灾防控平台架构的节点设计和系统开发。                             |
| 11 | 郭小铭 | 副主任   | 副高 | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | 项目参与人，对创新成果 2、3 做出了重要贡献：研发出矿井涌（突）水水源智能辨识方法，参与构建我国煤矿区全工况超前区域治理模式及选择准则，研发多源信息隐蔽导水通道综合智能判识方法，发明了水平孔分段保压注浆方法。 |
| 12 | 朱开鹏 | 分院副院长 | 副高 | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | 项目参与人，对创新成果 3、4 做出了重要贡献：研制车载移动式智能化注浆平台，开发了煤矿防治水多源信息管理系统，建立水灾风险动态评价系统模块。                                   |
| 13 | 方鹏  | 无     | 正高 | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | 项目参与人，对创新成果 1 做出了重要贡献：设计出智能钻机多执行机构整体式窄体紧凑型结构，研发出自适应定向钻进控制技术与工艺。   |
| 14 | 柴蕊  | 主任    | 副高 | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | 项目参与人，对创新成果 4 做出了重要贡献：参与构建了大数据实时高速处理云平台底座，参与开发多源异构信息的融合分析。  |
| 15 | 周振方 | 无     | 副高 | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | 项目参与人，对创新成果 3 做出了重要贡献：研发了矿井涌水量动态预测计算方法，建立了水平曲线孔组疏放水非稳定流数值模型，研发出致灾水源多目标控制疏放模型。                             |

## 八、主要完成单位

| 项目排名 | 完成单位              | 对项目的贡献   |
|------|-------------------|--|
| 1    | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | <p>项目研发和实施的牵头单位，对主要创新成果 1、2、3、4 均有重要贡献。</p> <p>(1) 总体负责项目实施，制定技术方案，负责项目组织和成果推广；</p> <p>(2) 负责煤矿水灾隐患智能精准探测技术与装备研发，研制出煤矿水患井下智能定向钻机与孔口高水压协同控制系统，开发出基于钻进工况识别的自适应定向钻进控制技术，研发出定向钻孔中瞬变电磁仪及钻孔时域电磁法径向探测系统；</p> <p>(3) 负责煤矿水灾多场耦合监测智能预警技术与装备研发。建立了连续电法-微震耦合的“井-地-孔”空间布署监测系统及方法，创建了电阻率-微震信号联合解译成像技术，开发了煤矿水灾多源监测融合分级预警技术；</p> <p>(4) 负责煤矿水灾隐患智能化高效治理技术与系统研发。创建了煤矿致灾水源区域智控疏放技术，研发出全工况超前区域智能注浆治理技术体系，研制出车载移动式智能化注浆平台。</p> <p>(5) 负责煤矿水灾智能防控云平台研发。搭建了煤矿水灾全过程智能防控平台架构及系统模块，研发出煤矿水灾治理工程智能分析管控系统、煤矿水灾应急抢险辅助决策系统。</p> <p>(6) 负责项目成果的工业性试验及推广服务。</p> |
| 2    | 中煤科工集团信息技术有限公司    | <p>项目研发和实施的参与单位，对主要创新成果 4 有重要贡献。</p> <p>(1) 协助项目负责单位进行项目总体设计和方案编制；</p> <p>(2) 负责煤矿水灾智能防控云平台中三维地质体-井巷联合建模技术研发，构建数字孪生模型；</p> <p>(3) 全面推广煤矿水灾智能防控各项技术与装备。</p>   |
| 3    | 西安煤科透明地质科技有限公司    | <p>项目研发和实施的参与单位，对主要创新成果 1 有重要贡献。</p> <p>(1) 协助项目负责单位进行项目总体设计和方案编制；</p> <p>(2) 负责煤矿水患探测钻孔瞬变电磁仪研发，设计并研制瞬变电磁仪设备，开发钻孔瞬变电磁三分量解译算法，构建电性异常边界智能识别成像算法；</p> <p>(3) 参与研发煤矿水灾因素连续电法监测技术与装备，负责设备现场试验与改进。</p>   |

## 九、完成人合作关系说明：

项目完成人董书宁、王皓、郭小铭、赵兆、王晓东、李泉新、乔伟、周振方、鲁晶



津、尚宏波、朱开鹏，在 2017 年 7 月至 2020 年 12 月期间，合作立项、实施并完成的“十三五”国家重点研发计划项目“矿井突水水源快速判识与水灾防控关键技术研究”，是本次奖励申报的直接依托支撑项目。

项目完成人王皓、乔伟、朱开鹏、柴蕊、李泉新、赵兆、王晓东、方鹏、尚宏波，在 2018 年 1 月至 2020 年 12 月期间，共同完成中煤科工集团西安研究院科技创新重点基金“矿井水患远程诊断平台”项目，构建了一套部署在云服务器上的“矿井水患远程诊断平台”，是本项目创新成果 2、4 的核心。

项目完成人董书宁、王皓、郭小铭，在 2019 年 9 月至 2020 年 12 月期间，完成发明专利“煤层底板含水层超前区域治理模式分类确定方法”材料编写与专利申报，提出了煤层底板水害超前区域治理模式分类确定方法，并获得授权。

项目完成人范涛、赵兆，在 2020 年 6 月至 2023 年 3 月期间，共同完成发明专利“钻孔底部隐伏水害全方位超前探测装置及其方法”材料编写与专利申报，提出一种全方位超前探测钻孔底部隐伏水害装置及其方法，并获得授权。

项目完成人王皓、董书宁、王晓东、周振方、乔伟，在 2018 年 5 月至 2023 年 10 月，共同组织参与了《数值法预测矿井涌水量技术规范》标准编制工作，成为利用数值法预测矿井涌水量的主要参考性标准。

项目完成人杜耀波、王皓，在 2023 年 9 月至 2024 年 5 月期间，共同参与完成了《煤矿地质工作细则释义》的编制工作，将项目多项先进成果写入国家级规范参考手册。

项目完成人王皓、董书宁、乔伟、尚宏波、朱开鹏、周振方，在 2021 年 6 月至 2021 年 12 月期间，共同完成撰写并发表学术论文“煤矿水害智能化防控平台架构及关键技术”，立足煤矿水害智能化防控的多重需求，构建了煤矿水害智能化防控平台，相关成果被行业权威期刊《煤炭学报》（EI 收录）发表。

## 科技进步奖公示项目 11

### 一、项目名称：

厚硬顶板矿压动力灾害井下分段压裂超前区域防治关键技术与装备

### 二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省科技厅

提名意见：在我国复杂的沉积环境下，约 1/3 的煤层上覆存在有厚硬顶板，分布广泛，回采过程中悬顶面积大，突然垮落时易造成矿震、冲击地压、强矿压动力显现等动力灾害问题。

现有防治技术多为局部治理，效果难以保证，矿压动力灾害仍持续不断，亟需开发煤层厚硬顶板矿压动力灾害的超前区域防治技术及装备。

基于以上关键问题，中煤科工西安研究院（集团）有限公司通过研究提出了基于“垮落填充+煤柱+承重岩层”协同支撑的单一厚硬顶板和“低位控来压-高位增破断-复合减叠加效应”的高低位错步短距破断的冲击、矿震等动力灾害防治机制。首创研发了煤矿井下定向长钻孔裸眼分段压裂成套装备，建立了压裂效果“时空”响应的多参量动-静结合的综合监测技术体系，创建了超前、精准、区域的矿压动力灾害防治新模式。成果已成功在山东兖矿、中煤西北能源、国能神东、彬长公司 20 个矿井 60 余个大型综采工作面示范应用，取得了良好的应用效果。创造了煤矿井下单孔 806m 长分 17 段以上压裂、覆盖 300m 以上宽度工作面的超前区域治理新记录。

项目取得授权发明专利 15 件，受理发明专利 6 件，发表科技论文 25 余篇，其中 SCI/EI 收录 13 篇，软件著作权 2 项。

拟提名该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖。

### 三、项目简介：

“厚硬顶板矿压动力灾害井下分段压裂超前区域防治关键技术与装备”成果主体来源于中煤科工西安研究院（集团）有限公司自筹资金科技创新重点项目“煤层坚硬顶板水力压裂超前改造技术研究”研究成果。

在复杂的沉积作用下，我国有 1/3 煤层形成了单一和复合厚硬顶板砂、砾岩，这些厚硬岩层厚度十数米甚至上百米，且具有强度高和整体性好等基本特征，开采过程中极

易形成大范围覆岩空间结构，其失稳运动往往伴随不同程度的矿震、冲击地压、强矿压动力显现等问题。针对以上灾害问题，现有采取的防治方法主要有井下短钻孔水力压裂和爆破技术，整体取得了一定防治效果，但均存在不同程度问题，如短钻压裂钻探施工精度低，裸眼封孔效果差，有效治理范围小，无法区域防治；井下爆破存在工程量大，成本高，引发次生的 CO 等有毒气体污染井下环境，近年来政府对火工品监管力度越来越大，申请困难，难以推广使用。为了克服以上问题，项目提出了厚顶板强矿压动力灾害分段压裂区域卸压防治技术及装备研究，并通过理论研究、数值模拟分析，结合工程应用示范研究，攻克了煤矿井下厚硬顶板定向长钻孔裸眼分段压裂装备、矿震及冲击等动力灾害防治技术及综合评价方法的难题，形成多项创新成果。

项目在西安研究院科技创新基金重点项目支持下，针对上述难题开展科技攻关，取得了以下主要创新成果：

### **（一）揭示了厚硬顶板地质成因、矿压动力灾害形成机制及防治原理**

我国复杂的沉积环境，在分流河道、天然堤、分流间湾沉积相控制作用下，形成了厚层坚硬砂岩普遍发育情况，极易形成单一厚硬大面悬顶突然垮落和复合厚硬顶板同时或相互作用破断运移引发的矿压动力灾害（冲击地压、矿震等）。在区域沉积环境研究基础上，通过“单井相-剖面-平面相”三位一体的沉积小旋回和单砂体精细追踪技术，实现了对复合坚硬顶板在矿井和工作面尺度上的单层追踪和时空展布精细刻画。揭示了研究区在曲流河河道边滩沉积微相作用下，经过沉积、成岩演化作用最终形成了以钙质、钙铁质胶结为主，抗压强度为 60~105MPa，单层厚度>10 m 的厚层状坚硬砂岩体的地质成因机制。建立了单一厚层和复合厚硬顶板覆岩运移力学模型，揭示了厚硬顶板大悬臂结构破断和复合扰动叠加诱发矿压动力灾害的机制，提出了基于“垮落填充+煤柱+承重岩层”协同支撑的单一厚硬顶板和“低位控来压-高位增破断-复合减叠加效应”的高低位错步短距破断的冲击、矿震等动力灾害防治原理。

### **（二）首创研发了煤矿井下厚硬顶板矿压动力灾害超前区域主动防治成套技术装备**

厚硬顶板矿压动力灾害压裂防治效果受目标层选择和超高位轨迹精准控制、裸眼封孔和压裂工具输送、压裂泵组排量和压力、单孔分段级数等直接影响。现有研究成果未见有顶板分段压裂区域防冲目标层选择方法，煤矿井下仅有适合煤层瓦斯增透抽采的整体压裂装置；石油天然气领域，为大直径、套管式、泵送桥塞+射孔压裂联做的压裂工艺，需要点火射孔作业，无法满足井下施工条件，且成本极高，厚硬顶板压裂参数定量设计研究不足。为了克服以上问题，项目构建了厚硬顶板压裂卸压位置精准判识模型，提出了压裂造缝深度计算方法，形成了厚硬顶板强矿压动力灾害控制的“纵、横、深”压裂裂缝判识方法，分析得出最优裸眼分段压裂施工参数组合。研发了由裸眼钻孔密封、定压压裂、可控安全分离和裸眼钻孔清洗等适用于坚硬顶板分段水力压裂的关键装置，并集成开发了远程智能可控、自动监测、多档位高压压裂泵组，形成了适合煤矿井下定向长钻孔裸眼分段压裂成套装备。研制了可变幅、大倾角移动成孔平台，开孔倾角

0~50°，垂高可达 100m 以上成孔，可通过电控或气控自移，安全便捷。装备可实现单孔 1000m、垂高 100m 以上分 17 段的压裂，裸眼密封能力达 70MPa 以上，装备输出压力 80MPa，泵组排量 87.5 m<sup>3</sup>/h，根据施工需要可实现 5 个档位控制调整，能实现 2km 以上距离的控制监测。开辟煤矿井下厚硬顶板矿压动力灾害超前区域防治新模式。

### （三）建立了压裂效果“时空”响应的多参量动-静结合的综合监测技术体系

准确掌握顶板分段水力压裂裂缝的几何形态、延展和压裂后微震能量、采场应力、岩移变形及矿压变化等特征，对评价厚硬顶板区域矿压动力灾害防治效果，检验和提高压裂防灾控灾设计的准确性具有重要指导作用。该体系主要针对压裂效果和灾害防治效果两部分，时间上分压裂前、中、后；空间上，工作面、孔内、顺槽及地表，方法上涉及压裂数据处理、矿压数据监测、微震分析、孔内瞬变电磁，音频电透视、煤体应力，围岩及地表变形等。通过压裂数据分析、孔内瞬变电磁、音频电透视、孔中窥视及存储式微地震方法，由表及里，从点到线到面至体的研究了分段压裂裂缝发育及展布特征。具体表现为通过音频电透视揭示压裂裂缝体积全貌、孔内瞬变电磁展示裂缝平面范围及方向、微地震重点监测破断裂缝形成规律、孔内窥视探测岩层压裂裂缝表面具体特征，综合对比，实现压裂裂缝发育特征定量化分析。对压裂治理与未治理区域来压步距、强度和微震能量事件数据动态分析，综合超前煤壁应力，井-地联合的变形监测分析，从压裂与未压裂治理区域应力场、变形场和能量场多场融合对比，实现区域防灾效果定量评价。

项目取得授权发明专利 15 件，受理发明专利 6 件，发表科技论文 25 余篇，其中 SCI/EI 收录 13 篇，软件著作权 2 项。

项目研究成果已在纳林河二号井、东滩煤矿、布尔台、胡家河、孟村等 20 个矿井 60 余个大型综采工作面推广应用，累计治理区域超过 8.0×10<sup>6</sup>m<sup>2</sup>，累计新增销售额 38.21 亿元，创造新增利润 13.03 亿元，新增税收 7.61 亿元。项目研究成果可应用于矿震、冲击地压、过集中煤柱高应力危险区，硬煤改造，加速回采，煤层瓦斯增透等多个领域，应用前景广泛，丰富了煤矿井下厚硬顶板强矿压防治手段，填补了煤矿井下定向长钻孔裸眼分段压裂装备和技术空白。

项目成果分别在 2020 年 5 月 14 日、2021 年 12 月 29 日、2022 年 4 月 14 日被中国煤炭工业协会组织有关专家对该项目进行了科技成果鉴定，项目研究成果均达到“国际领先水平”。

## 四、客观评价：

（一）2020 年 5 月 14 日，中国煤炭工业协会组织专家对“煤矿井下坚硬顶板强矿压灾害定向长钻孔分段水力压裂超前防治技术及装备”项目进行了成果鉴定。鉴定意见如下：①首创了煤矿坚硬顶板定向长钻孔裸眼分段水力压裂技术，开展了顶板压裂目标层优选、定向长钻孔布置方式和压裂参数的研究，建立了井下超长综采工作面强矿压超前治理新模式。②研发了煤矿井下水平定向长钻孔的多点拖动式裸眼分段压裂成套装

备，包括裸眼钻孔密封、定压压裂、可控安全分离和裸眼钻孔清洗等适用于坚硬顶板分段水力压裂的关键装置。③研发了煤层坚硬顶板分段水力压裂效果立体综合监测技术，实现了多方位监测压裂裂缝在目标层中的展布方位和形态等特征，为煤矿井下水力压裂效果评价、钻孔在平面或空间布置和压裂参数优化提供了监测评价新方法。④项目成果已在布尔台、保德、榆家梁和石圪台等特大型煤矿成功应用，有效缓解和控制了综采工作面强矿压显现，取得了良好效果，经济和社会效益显著。⑤项目成果在煤矿井下坚硬顶板强矿压灾害防治领域达到国际领先水平。

（二）2021 年 12 月 29 日，中国煤炭工业协会组织专家对“巨厚砂岩顶板定向长钻孔水力压裂矿震防治技术研究”项目进行了成果鉴定。鉴定意见如下：①采用大倾角“回转钻进+风力排渣”复合动力钻进技术，实现了过泥岩段钻进 212m，基于孔口岩屑性状对比控制定向钻进，成功进入目标层位。②利用小通径油管（ $\Phi 47\text{mm}$ ）成功实现了大孔径（ $\Phi 120\text{mm}$ ）拖动式分段压裂，为矿震区域超前治理提供了方法。③提出了基于压裂实时参数分析、地面三分量频率谐振探测裂缝、回采期间微震及支架阻力数据监测的水力压裂矿震防治效果综合评价方法，实现了压裂状态的实时监测。④项目成果达到国际领先水平。

（三）2021 年 12 月 22 日，陕西省科学技术情报研究院对“复合坚硬顶板冲击地压定向长钻孔分段压裂超前区域主动防治技术研究”项目进行了科技查新，未见中外文相关文献涉及“厚硬顶板矿压动力灾害超前区域防治关键技术装备”相关研究内容报道。

（四）2022 年 4 月 14 日，中国煤炭工业协会组织专家对“复合坚硬顶板冲击地压定向长钻孔分段压裂区域防治技术”项目进行了成果鉴定。鉴定意见如下：①建立了复合坚硬顶板覆岩运移力学模型，揭示了复合坚硬顶板地质成因和致灾机理，提出了复合坚硬顶板高低位错步短距破断冲击防治机制，形成了“低位降来压步距-高位增破断频次-高低位减叠加效应”的复合坚硬顶板冲击地压区域防治技术模式。②研制了复合坚硬顶板井下定向长钻孔分段压裂成套装备，开发了“高-低”位复合坚硬顶板快速、精准定向成孔工艺，建立了压裂关键层选取和裸眼分段压裂关键技术参数优化方法。③研发了多参量动-静结合的“时空”响应综合监测技术，建立了能量、应力、矿压及变形等多数据源融合的防冲效果定量评价方法，为煤矿井下定向长钻孔分段压裂防冲优化设计及区域防冲效果监测评价提供了方法手段。④项目成果达到国际领先水平。

## 五、应用情况：

项目研究成果自 2018 年在神东公司布尔台煤矿开展了整体应用，截止 2024 年 6 月，已在东滩煤矿、纳林河二号井、母杜柴登、胡家河、孟村、大佛寺、保德煤矿、榆家梁等 20 个矿井 60 余个大型综采工作面推广应用，其中施工分段压裂钻孔 360 余个，累计压裂 2800 余段，累计治理区域超过  $1.0 \times 10^7 \text{m}^2$ ，治理区域均已安全回采，累计新增销售额 38.21 亿元，创造新增利润 13.03 亿元，新增税收 7.61 亿元。其典型应用情况如下：

（一）厚硬顶板地质成因、矿压动力灾害形成机制及防治原理在纳林河二号井、母

杜柴登、布尔台、东滩等典型厚硬顶板矿震、冲击等动力灾害矿井应用，揭示了厚硬顶板的成因机制，分析了矿压动力灾害演化机制，研究了厚硬顶板定向长钻孔裸眼分段压裂区域防灾原理。

（二）煤矿井下厚硬顶板矿压动力灾害超前区域主动防治成套技术装备，成功在东滩、纳林河、母杜柴登、胡家河、孟村、保德等典型厚硬顶板强矿压矿井开展了应用。定量确定了压裂防灾目标层位，形成了厚硬顶板强矿压动力灾害控制的“纵、横、深”压裂裂缝判识方法，分析得出最优裸眼分段压裂施工参数组合。累计 2800 余次的工程应用试验，装备裸眼耐压能力达到 70MPa，装备输出最大排量达 87.5m³/h，远程可控，数据自动储存记录，具备钻孔自清洗功能，单孔实现 806m 长垂高达 100m 以上的压裂施工，累计压裂 17 段，填补了煤矿井下定向长钻孔裸眼分段压裂装备空白。

（三）煤矿井下坚硬顶板强矿压灾害定向长钻孔分段压裂超前区域治理模式成功在布尔台、保德、榆家梁等 10 个矿井 40 个工作面，累计治理区域超过 6.8×10<sup>6</sup>m²。压裂区域与未压裂区域来压步距由 24~30m 降低至 17~21m，来压范围由平均 110 架缩小至 20~40 架，来压期间支架阻力由平均 48.2MPa 将至 38.1MPa；顺槽围岩应力降幅为 22.22%~32.05%，截止目前已安全掩护治理区域高效回采。

（四）压裂效果“时空”响应的多参量动-静结合的综合监测技术体系成功在纳林河二号井、母杜柴登、东滩煤矿、胡家河、孟村等煤矿开展了应用示范，透明化展示了压裂裂缝延展方向、规模和形态，优化压裂施工参数和钻孔布置。通过压裂与未压裂区域对比分析可知，压裂改造后顶板来压步距、动载系数、来压范围分别由 17.6m 降至 11.67m，1.44 降至 1.23，140 架降至 40~60 架；治理工作面压裂区与未压裂区相比超前煤壁应力降幅达 65%以上，与相似地质条件工作面相比，压裂区超前煤壁应力降幅达 70%以上，压裂区微震能量平面发育由 150m 降低至 99m，垂向上更是由 169m 降低至 53m，加速了地面沉降稳定，沉降速度提升 150%以上，巷道变形得到有效控制，降幅达 40%以上，截止目前已实现治理区域安全、高效回采。

六、主要知识产权和标准规范等目录：

| 序号 | 知识产权类别 | 知识产权具体名称       | 国家（地区） | 授权号          | 授权日期       | 证书编号    | 权利人       | 发明人      |
|----|--------|----------------|--------|--------------|------------|---------|-----------|----------|
| 1  | 发明专利   | 一种坚硬顶板冲击地压分段控向 | 中国     | ZL2020101088 | 2021-11-09 | 4779399 | 中煤科工西安研究院 | 郑凯歌；张俭；李 |
| 2  | 发明专利   | 坚硬顶板梳状长钻孔分段压裂巷 | 中国     | ZL2020101088 | 2021-06-22 | 4502946 | 中煤科工西安研究院 | 郑凯歌；李延军； |

|    |      |   |    |                   |            |         |                                      |                    |
|----|------|---|----|-------------------|------------|---------|--------------------------------------|--------------------|
| 3  | 发明专利 | 一种推动式孔内一体快速封孔装  | 中国 | ZL202010158526.8  | 2022-03-15 | 4997968 | 中煤科工西安研究院                            | 赵继展; 郑凯歌;          |
| 4  | 发明专利 | 煤矿水力压裂用摆动式连续加注  | 中国 | ZL2018110932      | 2021-01-19 | 3355402 | 中煤科工西安研究院                            | 赵继展; 郑凯歌;          |
| 5  | 发明专利 | 一种孔内延时自主封孔装置及使  | 中国 | ZL202111068726.5  | 2021-09-13 | 4836453 | 中煤科工西安研究院                            | 赵继展; 郑凯歌           |
| 6  | 发明专利 | 一种煤矿井下定向压裂射孔装置  | 中国 | ZL202010630402.5  | 2022-06-14 | 5228743 | 中煤科工西安研究院                            | 张俭; 王晨阳; 赵         |
| 7  | 发明专利 | 一种喷射切缝压裂一体化装  | 中国 | ZL 202210065154.3 | 2024-02-27 | 6748183 | 中煤科工西安研究院                            | 郑凯歌; 王泽阳;          |
| 8  | 发明专利 | 一种角度可控定向射孔及切缝一体化装置及应用方法   |    | ZL 202210065155.8 | 2024-02-27 | 6748109 | 中煤科工西安研究院<br>(集团)有限公司                | 王泽阳; 郑凯歌; 戴楠等      |
| 9  | 论文   | Mining-Induced Stress Control by Advanced Hydraulic Fracking under a Thick Hard Roof for Top Coal Caving Method: A Case Study in the Shendong Mining Area | 外文 |                   | 2021-12    |         | MInerals (SCI)                       | Zheng Kaige et al. |
| 10 | 论文   | Evolution and management of thick-hard roof using goaf-based multistage hydraulic fracturing  | 外文 |                   | 2021-04    |         | Arabian Journal of Geosciences (SCI) | Zheng Kaige et al. |

|  |  |   |  |  |  |  |  |  |
|--|--|---|--|--|--|--|--|--|
|  |  | technology—a case study in western Chinese coal field |  |  |  |  |  |  |
|--|--|---|--|--|--|--|--|--|

## 七、主要完成人情况：

| 项目排名 | 姓名  | 行政职务 | 技术职称  | 工作单位/完成单位         | 对本项目的贡献  |
|------|-----|------|-------|-------------------|--|
| 1    | 郑凯歌 | 副所长  | 副研究员  | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 项目总负责，对创新成果 1、2、3 均有重要贡献。具体包括：确定项目的总体技术方案并组织实施；总体把关煤矿井下坚硬顶板动力灾害超前区域弱化解危技术开发，发明了煤矿井下坚硬顶板超前弱化方法，提出了压裂效果综合监测方法体系。 |
| 2    | 李彬刚 | 所长   | 研究员   | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 项目主要参与者，对创新成果 2、3 均有重要贡献。具体包括：技术指导专家，组织审定了压裂煤矿井下分段压裂工程应用实施方案，提出了裸眼分段压裂成套装备改进方案，组织了压裂裂缝监测技术应用，并进行了成果推广。         |
| 3    | 张群  | 无    | 研究员   | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 项目主要参与者，对创新成果 1/2、3 有重要贡献。具体包括：负责井下裸眼分段压裂效果综合评价方法应用质量把关和验收，进行研究报告审核和鉴定成果组织及审查。                                 |
| 4    | 陈志胜 | 所长   | 研究员   | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 项目主要参与者，对创新成果 1、2、3 均有重要贡献。具体包括：负责压裂装备研发方案总体把关，综合监测方案的制定，参与完成孔内压裂成套工具设计、加工和工程应用，组织并参与压裂效果综合监测工程示范。             |
| 5    | 张俭  | 部长   | 高级工程师 | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 项目主要参与者，对创新成果 2、3 均有重要贡献。具体包括：组织和审查煤矿井下分段压裂工程应用实施方案，参与发明了一种坚硬顶板冲击地压分段控向压裂治理技术等，组织和落实工程试验场地，并根据试验结果，提出优化改进方案。   |
| 6    | 李延军 | 部长   | 副研究员  | 中煤科工集团西安研究院有限公司   | 项目主要参与者，对创新成果 3 有重要贡献。具体包括：负责井下裸眼分段压裂效果综合评价方法应用组织，主持综合监测试验方案设计。  |



| 项目排名 | 姓名  | 行政职务 | 技术职称  | 工作单位/完成单位         | 对本项目的贡献  |
|------|-----|------|-------|-------------------|--|
| 7    | 戴楠  | 副部长  | 助理研究员 | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 项目主要参与者，对创新成果 2 有重要贡献。具体包括：负责煤矿井下坚硬顶板强矿压动力灾害分段压裂超前区域防治技术示范工程施工协调和管理，主持示范工程方案设计及报告审核。   |
| 8    | 王泽阳 | 项目经理 | 助理研究员 | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 项目主要参与者，对创新成果 1、2 有重要贡献。具体包括：参与完成复合厚硬顶板冲击地压和单一厚硬顶板强矿压灾害工程试验，参与研究报告编写。                  |
| 9    | 赵继展 | 部长   | 副研究员  | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 项目主要参与者，对创新成果 2、3 有重要贡献。具体包括：参与完成压裂效果综合监测试验，进行压裂和监测效果的审核和把关。                           |
| 10   | 杨森  | 项目经理 | 助理研究员 | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 项目主要参与者，对创新成果 2、3 均有重要贡献。具体包括：组织审定了压裂煤矿井下分段压裂工程应用实施方案，提出了裸眼分段压裂成套装备改进方案，组织了压裂裂缝监测技术应用。 |

#### 八、主要完成单位及创新推广贡献：

| 项目排名 | 完成单位              | 对项目的贡献  |
|------|-------------------|---|
| 1    | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | <p>对本项目科技创新和推广应用的贡献：</p> <p>（1）负责项目总体技术方案的制定，负责项目的组织实施；</p> <p>（2）研究揭示了厚硬顶板地质成因、矿压动力灾害形成机制及防治原理；</p> <p>（3）研发了煤矿井下定向长钻孔裸眼分段压裂成套技术及装备；</p> <p>（4）揭示了煤矿井下厚硬顶板矿压动力灾害发生机理，构建了煤矿井下厚硬顶板矿压动力灾害裸眼分段压裂超前防治区域工艺技术流程；</p> <p>（5）综合监测了分段压裂矿压动力灾害区域防治效果和压裂裂缝发育特征；</p> <p>（6）将研究成果大规模推广应用至冲击地压、矿震等矿压动力灾害区域防治。</p> |

#### 九、完成人合作关系说明：

该项目成果由中煤科工西安研究院（集团）有限公司研究完成。郑凯歌为成果第 1 完成人，自 2018 年开始至今，作为总负责人主持项目立项和整体研究工作，主要完成人在项目中的合作经历如下：

1. 郑凯歌（1）、李彬刚（2）、张群（3）、陈志胜（4）、张 俭（5）、李延军（6）、戴楠（7）、王泽阳（8）、赵继展（9）、杨森（10）共同完成《厚硬顶板矿压动力灾害超前区域防治关键技术与装备》研究工作，对创新成果 1、2、3 做出了重要贡献，首创了煤矿厚硬顶板定向长钻孔裸眼分段水力压裂技术，揭示了厚硬顶板地质成因、矿压动力灾害形成机制及防治原理，研制了煤矿井下水平定向长钻孔的多点拖动式裸眼分段压裂成套装备，研发了压裂效果“时空”响应的多参量动-静结合的综合监测技术体系，建立了井下超长综采工作面强矿压超前治理新模式，开发了厚硬顶板强矿压动力灾害控制的“纵、横、深”压裂裂缝判识方法，分析得出最优裸眼分段压裂施工参数组合，定量评价了压裂裂缝延展和灾害防治效果。丰富了煤矿井下厚硬顶板矿压动力灾害防治手段，填补了煤矿井下定向长钻孔裸眼分段压裂装备和技术空白。

2. 中煤科工西安研究院（集团）有限公司郑凯歌（1）、李彬刚（2）、张群（3）、陈志胜（4）、李延军（6）、赵继展（9）共同完成的“煤矿井下坚硬顶板强超长定向长钻孔裸眼分段压裂强矿压灾害防治技术与装备”项目，获得 2020 年中国安全生产协会科学技术二等奖。

3. 中煤科工西安研究院（集团）有限公司郑凯歌（1）、李彬刚（2）、张群（3）、陈志胜（4）、张俭（5）、李延军（6）、戴楠（7）、王泽阳（8）、杨森（10）共同完成的“复合坚硬顶板冲击地压定向长钻孔分段压裂超前区域主动防治技术研究”项目，获得 2022 年中国煤炭工业协会科学技术二等奖。

4. 中煤科工西安研究院（集团）有限公司郑凯歌（1）、李彬刚（2）、陈志胜（4）、张俭（5）、李延军（6）、戴楠（7）、赵继展（9）、杨森（10）共同申请发明专利 4 项，对项目核心技术成果进行了专利保护，明确了项目成果的具体实施方法。

5. 中煤科工西安研究院（集团）有限公司郑凯歌（1）、戴楠（7）、杨森（10）、王泽阳（8）共同发表论文 2 篇（EI 两篇），详细分析了复合坚硬顶板冲击地压分段压裂区域防治机理、坚硬顶板强矿压动力灾害演化机理与超前区域防治技术，阐明了在典型矿井的推广应用效果。

## 科技进步奖公示项目 12

### 一、项目名称：

矿用钻具柔性制造关键技术与智控平台

### 二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省科学技术厅

提名意见：矿用钻具是支撑煤炭资源安全、高效、绿色开发的重要技术装备，随着瓦斯抽采、探放水等钻孔新技术的开发与应用，对高品质、定制化、短周期、可追溯的钻具产品供应需求日益强烈。当前矿用钻具普遍采用粗放生产模式，存在自动化程度低、劳动强度大、产品质量不稳定、交货周期长等问题。针对上述现状，项目突破智能生产关键技术，研发了自主可控核心装备，建立了柔性智能生产线和工业互联网管控平台，构建了平台化、多维度、集数据采集-分析为一体的智能生产新模式，并取得四项主要创新成果：（1）研发了集加工检测打标一体化的螺纹制造技术；（2）开发了多工序柔性混线生产及协同控制技术；（3）开发了全流程标识规范和溯源管理系统；（4）研建了基于工业互联网的智能生产运营管控平台。

项目研究成果对我国矿用钻具智能生产新模式探索和产业高质量发展起到了示范引领作用，已在中煤科工西安研究院（集团）有限公司、西安煤科检测技术有限公司、安标国家矿用产品安全标志中心有限公司等多个单位推广应用，在提高生产智能化程度、加快新产品研制、提升管理效能等方面成效显著。近四年，项目主要完成单位创新成果已累计创造经济效益超过 11.98 亿元，制造的钻具新产品已推广至全国 183 个煤矿。基于项目成果建成的数字化车间获评工信部、发改委等四部委智能制造示范工厂揭榜单位和智能制造优秀场景。科技创新成果获授权发明专利 10 项，受理发明专利 12 项，登记软件著作权 12 项，发表科技论文 21 篇。

项目研究成果中的多项创新性技术、系统平台、生产管理模式具有普适性，亦可为其他装备离散制造企业提供示范借鉴和技术推广应用。

提名该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖。

### 三、项目简介：

矿用钻具是支撑煤炭资源安全、高效、绿色开发的重要技术装备，随着瓦斯抽采、探放水等钻孔新技术的开发与应用，对高品质、定制化、短周期、可追溯的钻具产品供应需求日益强烈。当前钻具普遍采用粗放生产模式，存在自动化程度低、劳动强度大、

产品质量不稳定、交货周期长等问题。针对上述现状，项目在陕西省工业转型升级重点项目“钻探装备智能制造数字化车间”（陕工信发〔2017〕503号）、中煤科工西安研究院（集团）有限公司（以下简称“西安研究院”）科技创新重点项目“钻杆数字化车间仿真设计与制造工艺研究”（编号：2019XAYZD08）、“钻杆摩擦焊接无人工作站的研建”（编号：2018XAYZD06）、“钻杆生产信息化平台建设”（编号：2016XAYPT02）等项目支持下开展相关研究。突破螺纹检测、相位摩擦焊接、感应热处理、柔性产线协同控制等关键技术，建立矿用钻具智能生产线和信息化管控平台，满足低成本、高效率、高质量的产品市场需求。项目取得以下四项主要创新成果：

#### **（一）研发了集加工检测打标一体化的螺纹制造技术**

突破了矿用钻具接头螺纹光学扫描综合测量技术、刀具多参数综合监测及迭代反馈技术，融合工业机器人、机器视觉等技术，研建了接头螺纹加工生产线，实现了20种矿用钻具接头螺纹加工、打标、检测的一体化生产和全流程质量监控。

#### **（二）开发了多工序柔性混线生产及协同控制技术**

攻克了相位摩擦焊接闭环控制、焊缝中频感应热处理能量温度双闭环控制、自适应环抱点阵喷涂和柔性产线智能调度排产等技术，建成了钻具智能生产线，实现了多规格钻杆的摩擦焊接、热处理、外圆加工、喷涂的柔性混线生产。

#### **（三）开发了矿用钻具全生命周期溯源管理平台**

建立了基于二级节点的行业级全流程标识规范，攻克了模糊界面二维码解析技术、RFID广域识别技术，研建了矿用钻具全生命周期溯源管理平台，打造了上下游企业数据和业务集成共享新模式，实现了矿用钻具“产供销用”全过程的信息采集和质量管控，形成了完整追溯链。

#### **（四）研建了基于工业互联网的智能生产运营管控平台**

针对矿用钻具离散制造特点，构建了集中化的业务流程标准模型库，解耦多系统业务交错执行模式，集成TCM、SAP、MOM、WMS、刀具管理、数据采集等业务系统，基于微服务提供业务执行操作，建成可集中管理、分步部署、统一数据源、业务流程驱动、过程透明、全流程追溯和信息连续传递的智能生产运营管控平台，形成了生产柔性化、流程数据化、对象模型化、过程透明化的智能生产新模式，提质降本增效效果显著。

项目获授权发明专利10项，受理发明专利12项，登记软件著作权12项，发表科技论文21篇，培养硕士3名。经中国煤炭工业协会科技成果鉴定，该研究成果达到了国际领先水平。

### **四、客观评价：**

#### **（一）科学技术成果鉴定评价**

2023年3月31日，中国煤炭工业协会组织有关专家对项目成果进行了鉴定，以彭苏萍院士、刘峰和马宏伟专家组成的鉴定委员会的鉴定意见为：

项目基于钻具生产制造的数字化车间建设需求，针对钻具生产特点和运营模式，提

出了离散型钻具制造数字化转型与智能化升级的研究路径，研发了集加工检测打标一体化螺纹制造技术、摩擦焊接与焊缝热处理关键性技术及柔性产线智能调度算法，建成了钻具智能生产线；借助多元信息化手段构建了钻具智能运营管控平台，实现了销售、计划、采购、生产等多维度数据动态关联，形成了生产柔性化、流程数据化、对象模型化、过程透明化的智能生产新模式。

项目实施后，显著提升了生产管理效能和产品质量，钻具订单交付周期缩短 21.7%，资源综合利用率提升 10.5%，产品服务煤矿企业数量增长 38.6%，取得了良好的经济和社会效益。鉴定委员会一致认为，该项目研究成果达到了国际领先水平。

## **（二）科技查新报告**

2023 年 3 月 24 日，中煤科工西安研究院（集团）有限公司委托一级查新资质单位陕西省科学技术信息研究院对项目所列创新点进行了查新，报告检索了国内外相关数据，查新结论为：在国内外公开发表的中外文文献中，除本查新项目成员发表的论文和申请的专利以外，与本项目查新点完全相同的未见报道。

## **（三）验收意见**

### **1、陕西省工业产业发展项目**

2021 年 11 月，陕西省工业和信息化厅组织专家对《钻探装备智能制造数字化车间》进行了验收，验收组一致认为：项目提出的离散制造数字化车间设计、钻探装备离散智能制造实现、制造过程质量信息数据采集和分析达到了验收标准，各项指标均优于考核指标，建议验收通过。

### **2、西安研究院科技创新基金项目**

2021 年 7 月，中煤科工集团西安研究院有限公司组织专家对《钻杆数字化车间仿真设计与制造工艺研究》进行验收，验收组一致认为：项目开发了钻杆接头内螺纹检测技术，解决了狭小空间非接触式螺纹测量的行业难题，形成了钻杆摩擦焊缝连续热处理质量评价方法和外圆自动断屑加工方法，布局了基于仿真的可重组钻杆数字化产线，为钻杆数字化车间落地提供了指导作用。项目成果解决了劳动强度大、生产管控弱等问题，提高了生产效率和管理水平。

## **（四）获奖荣誉**

项目成果先后获得工信部等四部委“智能制造示范工厂揭榜单位”“智能制造优秀场景”以及“中国智能生产杰出应用奖”“陕西省工信厅智能车间”“陕西省工业互联网标杆工厂”等荣誉。工业互联网应用场景成果“基于标识解析二级节点的钻探装备溯源平台”获得第四届中国工业互联网大赛青岛赛站二等奖，成果“钻探装备数字化柔性智造工厂”获首届国企数字场景创新专业赛二等奖，成果“基于物联网的制造要素互联感知管控平台”入选工业和信息化部物联网赋能行业发展典型案例，“钻探机具数字化制造工业互联网平台”入选西安市工业互联网试点示范项目。

## **五、应用情况：**

项目研究成果在西安研究院钻探装备制造公司、西安煤科检测技术有限公司、安标国家矿用产品安全标志中心有限公司等多个单位推广应用，在提高生产智能化程度、加快新产品研制、提升管理效能等方面应用成效显著。

### **（一）在中煤科工西安研究院（集团）有限公司智能工厂建设及钻探装备产业数字化转型过程中应用。**

在智能生产方面，基于创新成果“集加工检测打标一体化的螺纹制造技术”研建了接头加工生产线，实现了螺纹加工、接头自动上下料、螺纹在线检测、在线打标、铁屑集中收集等全过程无人化连续生产，实现 20 种接头混线生产，产品合格率为 99.7%。人均产量由 90 只/班提高到 420 只/班。基于创新成果“多工序柔性混线生产及协同控制技术”研建了国内首条钻具柔性生产线，实现了 6 种不同规格钻杆摩擦焊接、焊缝热处理、外圆加工的连续柔性生产，单班年产能由 20 万根提升至 30 万根。开发的自适应环抱点阵喷涂及智能捆扎技术，集成了喷涂打标-环保治理-码垛成型的钻具表面处理全生产环节，解决了异型复杂钻杆喷涂和 120 余种产品的混线捆扎生产难题，生产效率提升 33.6%。

在数字化管控能力提升方面，开发的矿用钻具全生命周期溯源管理平台用于钻探机具全生命周期管理，实现了钻具生产全业务链信息闭环管理和质量追溯。创新成果“基于工业互联网的智能生产运营管控平台”实现了多源传感信息数据采集和多维度数据融合，形成了生产柔性化、流程数据化、对象模型化、过程透明化的智能生产新模式。

在产品质量提升与新产品研发方面，集成化的加工检测技术替代人工质检，确保了检验标准化和一致性，显著提升了矿用钻具产品质量，缩短了产品试制周期，助推钻具新产品研发。新研制的整体式宽翼片螺旋钻杆、高韧性钻杆、仿生钻杆等系列产品在神东、淮南、淮北等全国多个煤矿区进行了推广应用。2019 年 10 月，无缆大通孔高强度钻具在神东保德煤矿成功钻成主孔深度 3353 米沿煤层超长定向钻孔，创造了坑道定向钻进新的孔深世界纪录。2019 年 12 月，研制的 $\Phi 89$  高韧性钻杆在晋城成庄矿，施工顶板高位 $\Phi 195$  mm 大直径钻孔，单孔施工深度达到了 500 m；在淮南顾桥矿，施工 $\Phi 220$  mm 顶板高位大直径定向钻孔，创造了孔深 506m 的记录。近几年钻具产品推广销售的矿区数量逐年增加，2022 年推广矿区达到 183 个，同比增长 38.6%。

近四年累计生产各类钻具 67.63 万根（只），产值超过 11.25 亿元。

### **（二）项目研究成果“智能生产运营管控平台”在西安煤科检测技术有限公司推广应用。**

采用了基于数据特征的变采样率制造数据同步采集方法和产线多粒度数据存储技术，为西安煤科检测技术有限公司开发了数字化检测平台，应用于钻探装备检测过程数据记录，优化了检测结果传递业务流程，实现了钻探装备产品出厂检验的在线管控和高可信检测数据追溯档案管理，业务流转效率显著提升。

### **（三）项目研究成果“矿用产品安标全流程标识规范和溯源管理系统”在安标国家**

矿用产品安全标志中心有限公司推广应用。

通过对矿用安标发放与使用管理、行业准入认证、信息识别与追溯及过程监控的一体化管理，解决了安标产品全生产-售后过程不透明等问题，实现了安标产品生产全业务链信息闭环管理和质量追溯，提升了安标资源计划、调度、分配的科学性和准确性，实现追溯过程数字化、透明化，管理过程的科学化。研究成果助推了全煤炭行业装备制造业务的数字化转型，能满足矿用关键装备的事中、事后监管及溯源管控支撑服务的需要，达到矿用装备安全管理领域国际先进水平。

六、主要知识产权和标准规范等目录：

| 序号 | 知识产权类别 | 知识产权名称                    | 国家（地区） | 授权号          | 授权日期       | 证书编号             | 权利人               | 发明人                             |
|----|--------|---------------------------|--------|--------------|------------|------------------|-------------------|---------------------------------|
| 1  | 发明专利   | 基于传感器的管件内螺纹检测方法、管件筛选方法及系统 | 中国     | CN112871737B | 2021/1/12  | CN202110036489.8 | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 田东庄,董萌萌,陈彦宇,周春,田宏杰,王亚波,米陇峰,荣明达  |
| 2  | 发明专利   | 一种大螺距锥形内螺纹检测装置及方法         | 中国     | CN110567423B | 2021/2/26  | CN201910789402.7 | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 董萌萌,周春,许翠华,黄煌,田宏杰,牟培英,朱宁,吴智峰,王渤 |
| 3  | 发明专利   | 一种钻杆加工自动上料系统和方法           | 中国     | CN111571289B | 2021/12/7  | CN202010434783.X | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 董萌萌,田东庄,路前海,赵飞,鄢忠方,吕孟           |
| 4  | 发明专利   | 钻杆螺旋槽加工用钻杆对扣装置、上卸钻杆系统和方法  | 中国     | CN112676870B | 2021/11/30 | CN202011490617.8 | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 路前海,董萌萌,吴智峰,鄢忠方,吕孟,王亚波,陈彦宇,王渤   |
| 5  | 发明专利   | 一种钻杆公接头、自动插接式螺旋钻杆         | 中国     | CN111119753B | 2021/8/31  | CN202010117284.8 | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 陈彦宇,董萌萌,牟培英,吴智峰,范运林,杨虎伟,李鹏,马宇   |

|    |          |                               |    |               |            |                      |                   |                                      |
|----|----------|-------------------------------|----|---------------|------------|----------------------|-------------------|--------------------------------------|
|    |          | 及其施工方法                        |    |               |            |                      |                   |                                      |
| 6  | 发明专利     | 一种大螺距锥形外螺纹检测装置及方法             | 中国 | CN109489581B  | 2020/10/16 | CN2018115334<br>17.9 | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 董萌萌, 吴智峰, 牟培英, 周春, 王亚波, 朱宁, 兰菲, 王渤   |
| 7  | 发明专利     | 一种钻杆分料装置及分料方法                 | 中国 | CN112896818B  | 2022/8/30  | CN2021100792<br>79.7 | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 路前海, 鄢忠方, 吕孟, 刘庆修, 王亚波, 董萌萌, 周春, 米陇峰 |
| 8  | 发明专利     | 一种焊接式多头螺旋钻杆的绕制装置及方法           | 中国 | CN112756910B  | 2022/3/15  | CN2020115603<br>13.4 | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 李浩儒, 张晓亮, 杨瑞博, 田宏杰, 李晴, 牟培英, 亓勇, 杨卫卫 |
| 9  | 计算机软件著作权 | 生产信息化管理系统                     | 中国 | 2022SR0874134 | 2022/6/30  | 软著登字第9828333号        | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 董萌萌, 周春, 田宏杰, 肖琪, 孙保山, 王亚波           |
| 10 | 计算机软件著作权 | MOM 数字化制造运营管控平台套件-生产管理系统 V1.0 | 中国 | 2023SR0213964 | 2022/9/30  | 软著登字第10801135号       | 中煤科工集团信息技术有限公司    | 安迪, 苏靖钦, 杨博                          |

七、主要完成人情况：

| 项目排名 | 姓名  | 行政职务         | 技术职称 | 工作单位/完成单位         | 对本项目的贡献   |
|------|-----|--------------|------|-------------------|---|
| 1    | 田东庄 | 西安研究院制造公司总经理 | 研究员  | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 项目总负责人，对创新成果 1、2、3、4 有重要贡献，具体包括：负责项目的总体规划、审定和指导；提出了钻杆柔性制造理念，创新了钻杆离散制造新模式；负责钻具智能生产线方案设计，负责钻杆摩擦焊接智能生产、多工序协同调度等技术研发；负责创新成果的鉴定工作。 |



|   |     |               |       |                   |   |
|---|-----|---------------|-------|-------------------|---|
| 2 | 田宏杰 | 制造公司智能制造技术部主任 | 副研究员  | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 项目主要参与人，对创新成果 1、2、3、4 有重要贡献，具体包括：负责矿用钻具多工序柔性混线生产技术开发，负责智能生产线实施建设；参与智能生产运营管控平台开发，负责多业务系统数据集成方案设计及实施组织；参与项目成果的凝练、总结工作。  |
| 3 | 董萌萌 | 西安研究院生产管理部主任  | 副研究员  | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 项目主要参与人员，对创新成果 1、2、3、4 有重要贡献，具体包括：负责焊缝感应热处理、智能调度排产等技术的开发，负责矿用钻具全生命周期溯源管理平台的实施建设；负责生产运营管控平台架构设计和数据集成；参与螺纹光学综合测量技术方案设计。 |
| 4 | 周春  | /             | 助理研究员 | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 项目主要参与人，对创新成果 1、2、4 有重要贡献，具体包括：参与螺纹检测制造技术研究，开发摩擦焊接控制上位机系统，参与柔性产线智能调度排产等技术示范应用，负责智能生产运营管控平台实施建设，参与项目成果的凝练、总结工作。        |
| 5 | 许翠华 | 西安研究院人力资源部 主任 | 研究员   | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 项目主要参与人，对创新成果 2、4 有重要贡献，具体包括：负责摩擦焊接自动上下料及闭环控制技术研究，设计摩擦焊机自动化生产技术方案，参与摩擦焊接无人工作站研建；负责建设钻杆信息化平台开发，规范钻具生产制造流程。             |
| 6 | 黄煌  | /             | 助理研究员 | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 项目主要参与人，对创新成果 2 有重要贡献，具体包括：开发了相位摩擦焊接闭环控制系统，参与摩擦焊接控制上位机系统研究，参与柔性产线智能调度排产等技术研究。   |
| 7 | 安迪  | 信息公司智能制造部部长   | 工程师   | 中煤科工集团信息技术有限公司    | 项目主要参与人，对创新成果 3、4 有重要贡献，具体包括：负责矿用钻具全生命周期溯源管理平台开发，参与智能生产运营管控业务架构设计及系统开发工作，参与项目成果推广应用。                                  |
| 8 | 陈彦宇 | /             | 助理研究员 | 中煤科工西安研究院（集团）     | 项目主要参与人，对创新成果 1、2 有重要贡献，具体包括：负责螺纹检测技术研究，参与摩擦焊接数字孪生技术研究；负责柔性产线智能调  |

|    |     |   |       |                   |   |
|----|-----|---|-------|-------------------|---|
|    |     |   |       | 有限公司              | 度排产等技术研究，参与项目成果的凝练、总结工作。  |
| 9  | 王亚波 | / | 助理研究员 | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 项目主要参与人，对创新成果 1、2 有重要贡献，具体包括：负责热处理工艺研究，参与摩擦焊接闭环控制系统开发，参与钻杆柔性生产线建设及控制系统功能开发。   |
| 10 | 米陇峰 | / | 助理研究员 | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 项目主要参与人，对创新成果 1、2 有重要贡献，具体包括：参与接头螺纹加工生产线方案设计、产线建设及控制系统功能开发；参与项目成果转化应用及产品性能试验。 |

#### 八、主要完成单位及创新推广贡献：

| 项目排名 | 完成单位              | 对项目的贡献   |
|------|-------------------|--|
| 1    | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | <p>（1）总体负责矿用钻具柔性制造关键技术与智控平台开发工作，制定项目研究方案，负责创新成果的工业性试验、工程示范及成果推广；</p> <p>（2）负责研发集加工检测打标一体化的矿用钻具螺纹制造技术，突破了多规格钻具接头机器视觉引导定位与抓取、狭窄空间内型腔复杂轮廓非接触多参数测量等难点，基于创新成果研建了接头加工生产线，获得了相关专利、软件著作权及论文；</p> <p>（3）负责开发矿用钻具多工序柔性混线生产及协同控制技术，研发了相位摩擦焊接闭环控制系统，构建了摩擦焊接工艺过程数字孪生解析模型，开发了多规格、多工序混联分布式生产协同控制技术，基于创新成果研建了钻杆柔性生产线，获得了相关专利、软件著作权及论文；</p> <p>（4）负责钻具全流程标识规范和溯源管理系统示范工程实施建设与验证，攻克了模糊界面二维码识别与解析技术、RFID 芯导天线长距离射频等技术；</p> <p>（5）负责研建了基于工业互联网的智能生产运营管控平台，搭建了多层级计划管理、质量管理、工艺管理等数据链，构建了状态感知、过程监控、业务协同的生产运营管理模式；</p> <p>（6）负责项目成果的凝练、总结工作，组织项目验收和鉴定工作。</p> |
| 2    | 中煤科工集团信息技术有限公司    | <p>（1）参与项目的总体技术方案和实施方案制定，参与示范工程建设，负责成果的推广应用；</p> <p>（2）参与矿用钻具全生命周期溯源管理平台开发，建立了基于二级节点的矿用装备行业级全流程标识规范；</p> <p>（3）参与智能生产运营管控平台开发，设计了柔性制造业务系统集成架构；</p> <p>（4）负责研究成果“矿用产品安标全流程标识规范和溯源管理系统”在安标国家矿用产品安全标志中心有限公司推广应用和实施建设工作；</p>   |

|  |  |                                 |
|--|--|---------------------------------|
|  |  | (5) 参与项目成果的凝练、总结工作，参与项目验收和鉴定工作。 |
|--|--|---------------------------------|

### 九、完成人合作关系说明：

该项目成果由中煤科工西安研究院（集团）有限公司、中煤科工集团信息技术有限公司共同完成。

田东庄为成果第 1 完成人，负责项目立项和整体研究工作，主要完成人合作关系如下：

1.田东庄（1）、田宏杰（2）、董萌萌（3）、周春（4）、许翠华（5）、黄煌（6）、安迪（7）、陈彦宇（8）、王亚波（9）、米陇峰（10）共同完成鉴定成果《矿用钻具柔性制造关键技术研究及智控平台开发》的研究工作，对创新成果 1、2、3、4 作出了重要贡献。

2.田东庄（1）、田宏杰（2）、董萌萌（3）、周春（4）、安迪（7）共同完成了溯源管理系统、智能生产运营管控平台的开发工作，对创新成果 3、4 作出了重要贡献，共同取得计算机软件著作权《MOM 数字化制造运营管控平台套件-生产管理系统 V1.0》《生产信息管理系统》。

3.田东庄（1）、田宏杰（2）、董萌萌（3）、黄煌（6）、陈彦宇（8）、米陇峰（10）共同完成矿用钻具柔性制造关键技术研究及智能产线建设工作，对创新成果 1、2 作出了重要贡献。

4.田东庄（1）、董萌萌（2）、陈彦宇（8）、周春（4）、田宏杰（2）、王亚波（9）、米陇峰（10）共同获授权发明专利《基于传感器的管件内螺纹检测方法、管件筛选方法及系统》，对创新成果 1 作出了重要贡献。

5.董萌萌（3）、周春（4）、许翠华（5）、黄煌（6）、田宏杰（2）共同获授权发明专利《一种大螺距锥形内螺纹检测装置及方法》，对创新成果 1 作出了重要贡献。

6.董萌萌（3）、周春（4）、王亚波（9）共同完成螺纹加工检测打标一体化技术研究，获授权发明专利《一种大螺距锥形外螺纹检测装置及方法》，对创新成果 1 作出了重要贡献。

7. 王亚波（9）、董萌萌（3）、周春（4）、米陇峰（10）共同设计完成了钻杆自动分料装置的设计与开发应用，共同获授权发明专利《一种钻杆分料装置及分料方法》。

8.田东庄（1）、董萌萌（2）共同获授权发明专利《一种钻杆加工自动上料系统及方法》，对创新成果 2 作出了重要贡献。

9.田东庄（1）、董萌萌（3）、田宏杰（2）、周春（4）、许翠华（5）、黄煌（6）、陈彦宇（8）、王亚波（9）、米陇峰（10）共同研发了相位摩擦焊接闭环控制技术，构建了

摩擦焊接工艺过程数字孪生解析模型，共同取得计算机软件著作权《摩擦焊视觉引导系统 V1.0》《钻杆摩擦焊接无人工作站数字孪生系统 V1.0》《钻杆摩擦焊接工作站数据采集系统 V1.0》。

10.田东庄（1）、陈彦宇（8）、米陇峰（10）共同研发了基于机器视觉的钻杆接头定位识别技术，共同取得计算机软件著作权《钻杆接头视觉定位引导系统》，对创新成果 1 作出了重要贡献

## 科技进步奖公示项目 13

**一、项目名称：**采煤工作面随采地震动态探测技术与装备

**二、提名者及提名意见**

**提名单位：**陕西省科学技术厅

**提名意见：**

对采煤工作面内部隐蔽致灾地质因素随采实时、动态监测，是煤矿企业几十年梦寐以求希望解决的难题，也是煤炭行业科技工作者奋斗多年的目标。提名的“采煤工作面随采地震动态监测技术与装备”项目，创新提出了将采煤机振动信号替代井下炸药震源的奇思构想，既有避免炸药安全隐患、降低施工强度的现实意义，同时采煤机的连续振动具有叠加（上万次）探测反复验证、精准查明隐蔽致灾地质体的先天优势。项目组历时 10 多年，攻克了采煤机震源高精度脉冲化、低信噪比数据自适应成像、采集数据实时传输自动处理和成像等难题，经中国煤炭工业协会鉴定为国际领先水平。项目成果已经在十多个矿井、数十个工作面进行了推广应用，取得了显著的探测效果。经过多年知识产权布局，该发明成果已申报专利 24 项，授权 20 项，形成的专利池已覆盖该发明成果在采集、处理、成像仪器和工艺等各环节。颁布行业标准 1 项。

拟提名该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖。

**三、项目简介**

该项目属于矿山安全技术领域，主要用于煤矿智能化探测，服务于煤炭安全、高效、绿色开采。

随着煤矿安全高效集约化生产模式的推广和无人化、智能化开采时代的到来，煤矿采煤工作面要求超前查明影响回采的小构造、隐蔽致灾地质因素以及实现工作面地质透明化的需求日趋强烈。为此西安院对随采地震监测技术开展了先导性研究，随采地震动态探测技术以采煤机切割煤壁产生的振动信号作为震源信号，通过在回采工作面两顺槽和孔内布设地震传感器实时接收信号，克服了传统矿井地震勘探中炸药震源应用受限的弊端，施工过程不再影响煤矿正常的生产活动；利用随采地震数据实时处理和动态成像技术，实现对煤矿井下回采工作面前方一定区域或者工作面内部煤层中断层、陷落柱、煤层变薄区等静态地质条件精细监测，同时随采地震监测还可以解决回采工作面顶板破碎带、应力集中区、突出危险区等动态灾变条件的随采随探和监测预警。项目取得以下重大创新性成果：

**（一）首创了采煤机震源数值模拟及波场高精度重构技术。**

1、采煤机震源数值模拟技术。对采煤机截割方式及滚筒的受力情况进行分析，进而以震源力函数的形式，将不同时间不同位置的荷载分布作为震源在波动方程进行加载，通过高阶交错风格有限差分法对波动方程进行求解，模拟采煤机切割时振动引起产

生的随采地震信号。最终，对正演随采地震数据进行波场分析、处理，从而掌握了采煤机震源的波传播机理。

2、随采地震采煤机震源格林函数重构方法。根据采煤机震源函数特点，研发出在时空连续情况下震源函数的时空解耦方法；通过理论推导利用远场信号重构采煤机震源格林函数，实现了近场震源信号缺失时随采地震时空双域脉冲化，并对采煤机进行实时定位，解决了随采地震利用全波场勘探的技术瓶颈。

## **（二） 创新研发了低信噪比数据自适应、高精度成像关键技术。**

1、随采地震数据的自动清洗技术。利用数据之间的互相关时差、能量、频散等特征，实现了采煤机截割、停机、空转三种状态的自适应识别；

2、随采地震随机噪声和单频噪声的自适应压制技术。基于互相关的方法，一次性压制所有道集的强单频能量，相比逐道压制噪声的方法，运行效率更高，人为干预影响更小；通过提取的高信噪比互相关随采地震记录，为后期成像处理提供了更高质量的基础数据，提高成像精度。

3、动态反演及高精度构造成像技术。对随采地震采集获取的有效信号，利用地震波 CT 图像重构技术，对采煤工作面内部进行了成像，来探明工作面内的地质构造，并实现了成像结果的动态更新。利用上一周期成像的结果作为初始模型，结合当前周期随采地震数据成像对初始模型不断优化，动态更新，最终实现了更新周期一刀煤时间（约为 2~3h）的动态成像，实现监测工作面内的地质构造的异常变化。

4、低信噪比地震信号的时频域直接拾取初至技术。首先对低信噪比信号开展时频正变换；然后在时频域进行噪声自适应衰减；最后，根据地震信号在时频域的系数叠加响应和时间域具有相同波形表征的特点，直接在时频域利用基于统计学的方法开展初至拾取。该技术具有运行速度快、人工干预少的自适应特点，通过获取的低信噪比数据的准确初至位置，将提升采集质量欠佳区域的被动源震源定位、速度分析以及层析成像等地震处理结果的准确性。

## **（三） 开发了首台套随采地震在线采集传输、实时自动处理系统。**

1、井下无 GPS 信号下的高精度同步采集和随采数据的实时自动处理技术。针对随采地震探测的实时性要求，通过对改进 IEEE1588 同步协议，增加地面定时队主钟授时、主钟自动优选和多系统分组同步等机制，实现了井下无 GPS 信号下的高精度同步采集；研制出了井下采集传输设备、地面采集控制软件和数据实时自动处理系统，具有高效采集、在线传输、自动处理、无人值守、成果可视化和构造数字化等优点。

2、井下采集传输设备及地面采集控制软件的研发。本文针对随采地震监测装备的特点，充分分析其观测系统和监测数据的特点，利用数据库和文件系统的优点，设计了软件的数据结构；考虑处理软件的特点，设计了与处理软件之间的接口；最后基于 MFC 开发框架，开发了数据采集软件。此外，提出了一种随采地震专用探测方法，通过利用孔中接收对工作面进行逐次细分探测，解决了由于射线覆盖盲区和射线方位角覆盖范围

率引起的反演奇异性高的问题，有效提高了工作面地质构造和速度反演的精度。

#### 四、客观评价

(一)2022年4月14日,中国煤炭工业协会在北京组织专家对中煤科工集团西安研究院有限公司完成的“基于采煤机震动的随采探测技术与装备”项目成果进行了鉴定。与会专家听取了项目汇报,审查了相关资料,经质询、讨论,形成以下鉴定意见:

1、研发了采煤机连续震源的弹性波数值模拟技术,提出随采地震观测的优化方案,为随采地震高精度动态探测奠定了基础。

2、提出了无近场震源信号的采煤机震源波场高精度重构技术,有效实现了无近场震源信号时随采地震波场的“脉冲化”处理,降低了数据采集的施工难度和对生产的影响。

3、研发出随采地震数据处理关键技术,实现了随采地震低信噪比数据的自适应、高精度动态成像,提高了随采地震探测精度和准确率。

4、研发出随采地震数据在线采集、实时传输、自动处理系统,实现了对采煤工作面前方地质构造和动态应力变化的实时动态探测。

鉴定委员会认为该成果达到国际领先水平,同意通过鉴定。

(二)2021年11月,中煤科工集团西安研究院有限公司委托国家科委科技信息司认定的教育部科技查新工作站(Z08)对项目成果进行了科技查新,查新结论认为:在国内外公开发表的中外文文献中,除本查新项目课题组成员发表的论文和申请的专利以外,与本项目查新点完全相同的未见报道。

(三)2016年3月,国家科技重大专项“煤与煤层气地质条件精细探查技术与装备”项目办组织专家对《煤矿井下工作面超前探测技术与装备》进行验收。验收组认为,项目研究了采煤机切割煤时产生的振动信号特征,以此作为连续震源进行波场传播分析和三维地震数值模拟。研究了随采数据针对性的处理方法,将随采地震数据处理纳入槽波数据处理的范围。根据分析处理技术和解释方法,编写算法程序,包括数据的输入输出、预处理、可视化、数据分析模块、处理流程模块、解释模块及人机交互等,界面友好、性能稳定,应用效果很好,具有很好的推广价值。

(四)项目成果被主流媒体宣传报道14篇,被选为中国煤科2021年度大事,“首台、首套、首次”频现,创新引领作用凸显,并被推送到集团公司官方平台。同时被国家矿山安全监察局门户网站、IntelMining智能矿业、智能煤矿、中国煤炭报、绿色能源世界、淮河能源集团等公众号多次进行了跟踪报道,产生了良好的社会影响。

#### 五、应用情况和效益

项目成果应用于煤矿井下工作面回采时对工作面前方的静态地质构造和动态应力变化进行实时动态超前监测。研究成果有助于对回采前方可能存在的隐伏构造和应力异常进行精确探查,确保煤矿安全高效生产,同时可以为回采工作面地质透明化模型动态更新提供实时监测数据,推进煤矿智能化建设,推动煤炭行业技术进步。本项目成果属

于新研发技术，已成为煤矿智能化建设中地质保障领域的关键技术，预计未来几年随着煤矿智能化程度的深入，随采地震监测技术将会得到大规模推广应用，助力煤矿智能化建设，为安全高效生产提供更好的保障。

采煤工作面随采地震监测技术已在陕西小保当一号煤矿、蒲白建庄煤矿、内蒙唐家协会煤矿等十多个煤矿、数十个工作面进行了应用，具有探测距离远（最远提前 400 米探测，且得到准确性验证）和精度高（1 米以上断层探测精度达到 90%）的优点，取得了较好的应用效果。

该成果累计新增产值约 1.2 亿元，新增利税 7.7 亿元。本项目成果属于新研发技术，已成为煤矿智能化建设中地质保障领域的关键技术，预计未来几年随着煤矿智能化程度的深入，随采地震监测技术将会得到大规模推广应用，助力煤矿智能化建设，为安全高效生产提供更好的保障。

## 六、主要知识产权目录

| 序号 | 知识产权类别 | 知识产权名称                     | 国家（地区） | 授权号               | 授权日期       | 证书编号    | 权利人               | 发明人                            |
|----|--------|----------------------------|--------|-------------------|------------|---------|-------------------|--------------------------------|
| 1  | 发明专利   | 基于井地联合的煤矿采空区三维弹性波层析探测方法    | 中国     | ZL201710747770.6  | 2019.07.02 | 3440118 | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 王保利；王云宏；吴海；张庆庆；金丹              |
| 2  | 发明专利   | 一种基于联合字典的煤层巷道锚杆振动噪声压制方法    | 中国     | ZL2018111511624.4 | 2021.05.25 | 4440561 | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 王云宏；燕斌；王保利；陈建友；王晓凯；陈文超；金丹      |
| 3  | 发明专利   | 一种基于频率域的煤层 Love 型槽波压缩方法及装置 | 中国     | ZL201320276249.6  | 2018.10.19 | 3116194 | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 王保利；陆斌；金丹；姬广忠；王云宏；吴海；覃思；张庆庆；刘强 |
| 4  | 发明专利   | 一种煤层底板隐伏突水陷落柱动态定位方法        | 中国     | ZL201710657566.5  | 2018.11.23 | 3158708 | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 程建远；胡继武；王保利；王盼；覃思              |
| 5  | 发明专利   | 用于随采地震信号的强单频和随机噪声压制方法及系统   | 中国     | ZL201910166009.2  | 2020.10.27 | 2388317 | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 刘强；陆斌；王云宏；王保利；覃思；崔伟雄           |



|    |      |  |    |                  |            |  |                   |                                   |
|----|------|--|----|------------------|------------|--|-------------------|-----------------------------------|
| 6  | 发明专利 | 一种基于皮带机的煤矿工作面实时探测系统及方法   | 中国 | ZL201510593248.8 | 2017.09.01 | 2606345                                    | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 陆斌；胡继武；王季；王保利；吴海；覃思               |
| 7  | 发明专利 | 基于检波器细分阵列的煤矿开采地震探测系统及方法  | 中国 | ZL201810610808.X | 2019.11.08 | 3587953                                    | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 陆斌；程建远；胡继武；覃思；王保利；刘强              |
| 8  | 标准   | 回采工作面随采地震探测技术  | 中国 | NB/T 11529-2024  | 2023.12.13 | NB/T 11529-2024                            | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 王保利；王云宏；覃思；程建远；金丹；崔伟雄；段建华；程久龙；张平松 |
| 9  | 论文   | The research and implementation of velocity analysis methods for reverse time migration angle-gather | 中国 | 19 卷第 4 期        | 2022.12    | APPLIED GEOPHYSICS                         | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 王保利；高静怀                           |
| 10 | 论文   | The Effectiveness and Application of the Gradient Sparse Regularization-Based Deconvolution Method   | 中国 | 19 卷             | 2022 年     | IEEE GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING LETTERS | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 金丹；王保利；豆旭谦；王树威；智敏                 |

## 五、 主要完成人情况

| 项目排名 | 姓名 | 行政职务 | 技术职称 | 工作单位/完成单位 | 对本项目的贡献 |
|------|----|------|------|-----------|---------|
|------|----|------|------|-----------|---------|

|   |     |        |       |                   |  |
|---|-----|--------|-------|-------------------|--|
| 1 | 王保利 | 副所长    | 研究员   | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | 项目总负责人, 对创新成果 1、2、3 均有重要贡献, 具体包括: 负责具体组织实施; 主持了基于采煤机震动的随采探测技术的研发, 并开发了配套软件; 主持了采煤机震源数值模拟及波场高精度重构技术的研发, 解决了随采地震数据高精度脉冲化问题; 主持了低信噪比数据自适应、高精度成像关键技术及随采探测数据采集设备的研制, 研发出了随采地震在线采集传输、实时自动处理系统。 |
| 2 | 王云宏 | 科创院副院长 | 副研究员  | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | 项目主要参与人, 对创新成果 2、3 有重要贡献, 具体贡献包括: 主持了随采探测技术与装备在不同地质条件矿区的试验及推广应用; 在随采地震在线采集传输、实时自动处理系统中, 对数据传输网络平台进行了设计及搭建。   |
| 3 | 程建远 | 院总工    | 研究员   | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | 项目主要参与人, 对创新成果 2、3 有重要贡献, 具体贡献包括: 对高精度成像存在的技术难题提出了研究思路; 在随采地震在线采集传输、实时自动处理系统中, 提出了一种随采地震专用探测方法, 通过利用孔中接收对工作面进行逐次细分探测方法。  |
| 4 | 金丹  |        | 副研究员  | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | 项目主要参与人, 对创新成果 1、2 有重要贡献, 具体贡献包括: 模拟了采煤机切割时振动引起产生的随采地震信号, 对采煤机震源进行了数值模拟; 提出了随采地震随机噪声和单频噪声的自适应压制技术, 取得较好的应用效果。  |
| 5 | 崔伟雄 | 部长     | 助理研究员 | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | 项目参与者, 对创新成果 3 有重要贡献, 具体贡献包括: 针对随采地震监测装备的特点, 利用数据库和文件系统的优点, 设计了井下采集传输设备及地面采集控制软件的数据结构。   |
| 6 | 段建华 | 部长     | 研究员   | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | 项目参与者, 对创新成果 3 有重要贡献, 具体贡献包括: 在随采探测数据采集设备研制中, 设计了数据存储结构及数据管理模式, 并研发了相关程序模块。  |
| 7 | 覃思  |        | 副研究员  | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | 项目参与者, 对创新成果 2、3 有重要贡献, 具体贡献包括: 完成了随采地震数据的自动清洗技术。利用数据之间的互相关时差、能量、频散等特征, 实现了采煤机截割、停机、空转三种状态的自适应识别。  |

|    |     |     |       |                   |   |
|----|-----|-----|-------|-------------------|---|
| 8  | 关奇  |     | 助理工程师 | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | 项目参与者,对创新成果3有重要贡献,具体贡献包括:多次参与并主持了多个矿区的井下数据采集工作。 |
| 9  | 高小伟 | 所长  | 高工    | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | 项目参与者,对创新成果3有重要贡献,具体贡献包括:多次参与并主持了多个矿区的井下数据采集工作。 |
| 10 | 蒋齐平 | 副所长 | 高工    | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | 项目参与者,对创新成果3有重要贡献,具体贡献包括:多次参与并主持了多个矿区的井下数据采集工作。 |

## 八、主要完成单位及创新推广贡献:

| 项目排名 | 完成单位              | 对项目的贡献  |
|------|-------------------|---|
| 1    | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司 | <p>对创新成果1、2、3均有重要贡献,具体包括:</p> <p>(1) 总体负责基于采煤机震动的随采探测技术与装备研制,制定总体技术方案,负责项目组织和成果推广;</p> <p>(2) 负责基于GPU平台的煤矿井下三维弹性波波场高效模拟技术及仿真软件开发,获得了GPU三维三分量弹性波正演模拟软件等软件著作权;</p> <p>(3) 负责随采探测数据的关键处理技术及配套软件,获得了相关专利及软件著作权;</p> <p>(4) 研发出随采地震数据处理系统及随采地震数据处理国产化软件,获得了相关软件著作权及专利;</p> <p>(5) 负责随采探测数据采集设备的研制,取得了探测装置的MA认证、试验、生产及产品推广;</p> <p>(6) 拓展了基于采煤机震动的随采探测技术的应用范围;</p> <p>7) 负责项目成果的工业性试验和推广服务。</p> |

## 九、完成人合作关系说明

该项目成果由中煤科工西安研究院(集团)有限公司完成。

王保利为成果第1完成人,自2018年开始至今,作为总负责人主持项目立项和整体研究工作,负责项目的验收与鉴定工作,主要完成人在项目中的合作关系如下:

1. 王保利、王云宏、程建远、金丹、崔伟雄、段建华、覃思、张庆庆、关奇、李刚共同完成科学成果鉴定项目《基于采煤机震动的随采探测技术与装备》的研究工作,对创新成果1、2、3作出了重要贡献。

2. 王保利、王云宏、覃思、程建远、金丹、崔伟雄、段建华共同发布能源行业标准《回采工作面随采地震探测技术》,对创新成果2作出了重要贡献。

3. 王保利、王云宏、金丹共同获授权发明专利《基于井地联合的煤矿采空区三维弹性波层析探测方法》，对创新成果 1 作出了重要贡献。王云宏、王保利、金丹共同获授权发明专利《一种基于联合字典的煤层巷道锚杆振动噪声压制方法》，对创新成果 2 作出了重要贡献。王保利、金丹、王云宏、覃思共同获授权发明专利《一种基于频率域的煤层 Love 型槽波压缩方法及装置》，对创新成果 2 作出了重要贡献。程建远、王保利、覃思共同获授权发明专利《一种煤层底板隐伏突水陷落柱动态定位方法》，对创新成果 3 作出了重要贡献。王云宏、王保利、覃思、崔伟雄共同获授权发明专利《用于随采地震信号的强单频和随机噪声压制方法及系统》，对创新成果 2 作出了重要贡献。王保利、覃思共同获授权发明专利《一种基于皮带机的煤矿工作面实时探测系统及方法》，对创新成果 3 作出了重要贡献。程建远、覃思、王保利共同获授权发明专利《基于检波器细分阵列的煤矿开采地震探测系统及方法》，对创新成果 3 作出了重要贡献。

4. 王保利完成论文《The research and implementation of velocity analysis methods for reverse time migration angle-gather》，对创新成果 1 作出了重要贡献。金丹、王保利完成论文《The Effectiveness and Application of the Gradient Sparse Regularization-Based Deconvolution Method》，对创新成果 2 作出了重要贡献。

## 科技进步奖公示项目 14

**一、项目名称：**替代倾斜后高抽巷的大直径钻孔配套技术与装备研究

**二、提名者及提名意见**

**提名单位：**陕西省科学技术厅

**提名意见：**大直径钻孔技术为煤矿生产中部分巷道施工开辟了新的施工途径，可在瓦斯抽放、巷道通风等方面发挥其突出优势，代替后高抽巷、煤仓溜煤眼、联络巷道等。提名的“替代倾斜后高抽巷的大直径钻孔配套技术与装备研究”项目，创新提出了通过施工大直径钻孔替代倾斜后高抽巷的技术思路，既有克服原有瓦斯治理模式的不足、缩短工期、降低施工成本的现实意义，同时还有降低工人施工强度、大大提高施工安全性的社会意义。项目组历时 5 年多，成功研制出大直径钻孔配套技术与装备，通过现场试验及应用表明，可有效替代倾斜后高抽巷，解决了倾斜后高抽巷施工效率低、安全性差的问题。经中国煤炭工业协会鉴定为国际领先水平。项目成果已经在多个工作面进行推广应用，取得了显著的应用效果。该发明成果已申报专利 3 项，授权 3 项。

拟提名该项目为陕西省科学技术进步奖三等奖。

**三、项目简介：**

该项目属于矿山安全技术领域，主要用于解决煤矿井下工作面回采初期瓦斯问题。通过施工大直径钻孔贯通高抽巷，从而替代倾斜后高抽巷的施工。

在井下瓦斯治理方面，多数采用倾斜后高抽巷抽放邻近层瓦斯的方法，但后高抽巷瓦斯抽放方法存在着工程量大、施工工期长成本高等不足，造成矿井采掘接替紧张，一直是制约工作面正常接替和瓦斯治理的短板。为此西安院通过对替代倾斜后高抽巷的大直径钻孔配套工艺技术与装备研究，克服原有瓦斯治理模式的不足，采用高效实用的大直径钻孔施工设备和配套钻进工艺，从工作面开口施工大直径钻孔和高抽巷贯通，以此来替代倾斜后高抽巷，降低施工成本，提高施工效率，最终形成一套替代倾斜后高抽巷的大直径钻孔配套工艺技术与装备。通过贯通孔钻进工艺研究和现场工业性试验，研发出一套大直径钻孔施工工艺技术及配套装备，达到安全高效施工的目的，为全国煤矿企业瓦斯治理工作起到良好的示范作用，推动瓦斯治理工作水平再上新台阶。项目取得以下重大创新性成果：

**（一）研发了替代倾斜后高抽巷的大直径钻孔成孔工艺**

1、先导孔高效精准贯通轨迹控制工艺研究。开发了新型内凹式多翼保直钻头和螺旋式满眼粗径钻具来解决先导孔保直性较差的问题。开发的新型内凹式多翼保直钻头利用内凹结构，从钻头整体结构、改变布齿方式和密度、高强度焊接技术等多方位进行优化，配合螺旋式满眼粗径钻具，实现了钻孔外缘岩层先破碎而中心部分岩层后切削，利用中心部分岩柱的支撑作用，达到减缓钻具偏斜的目的，保证了先导孔的精准贯通；

2、大直径钻孔微抖动导向扩孔钻进工艺研究。考虑大直径扩孔时钻具及扩孔钻头所受负载大，造成的钻机高频震动等问题。通过对导向式扩孔工艺的研究，研制一种新型的螺旋扩孔钻头，螺旋扩孔钻头由前端的螺旋导向器和导向器后端的弧角型扩孔钻头组成，所受阻力与普通扩孔钻头相比明显减小。通过对钻机结构的研究，研究设计高强度稳固结构，通过加强钻机变幅装置的稳固性从而达到大直径贯通孔施工中钻机的稳定，提高结构整体刚性，减小系统抖动对钻孔轨迹保直性的影响；

3、大直径钻孔反井式扩孔工艺研究。在先导孔与高抽巷贯通的基础上，研究新型大直径反井钻头，在贯通端卸下先导钻头，更换反井钻头，通过回拖扩孔的方式进行大直径钻孔的施工。

## **（二）创新研制了大直径贯通孔快速成孔专用钻机**

1、自行研制了 ZDY22000LK 型煤矿用履带式全液压坑道大直径钻孔专用大功率钻机，具备施工 $\Phi 500-700\text{mm}$ 的大直径贯通孔，贯通长度可达到 100m 的能力；最大给进和起拔力不小于 270kN 和 390kN，可以满足本煤层特别是薄煤层的双层孔或多层孔施工、邻近层瓦斯抽采钻孔施工、底抽巷穿层孔施工等绝大多数瓦斯抽采钻孔的需求；钻机额定转矩为  $22000\text{N}\cdot\text{m}\sim 4500\text{N}\cdot\text{m}$ 、额定转速为  $35\text{r}/\text{min}\sim 150\text{r}/\text{min}$ ，能满足处理孔内事故的需要，钻机设计钻孔主轴倾角 $-180^\circ\sim +180^\circ$ 、钻孔满足水平开孔高度调节范围  $870\text{mm}\sim 1740\text{mm}$ ，采用组合式给进油缸，安装距小、结构紧凑。行程 1250mm，可实现中间加持钻杆，节省钻进辅助时间，钻机外形尺寸小，方便调角、翻转，便于全断面施工；

2、远程电液双控制系统研究。针对现有技术中的缺陷和不足，本项目研发了一种具备集成式液压联动阀块的电液双控制系统，为钻机提供一种集成化程度更高、功能回路更完善、操作更简便、实现远距离检测与控制钻机主要动作的电液双控系统方法。解决了操作人员位于钻机后方或侧面手动操作钻机时，视线遮挡、操作不便等问题甚，提高安全生产效率。

## **（三）多功能履带泵车研制**

1、远程电液双控制系统泥浆泵车研究。自行研制了 BLY500/8K 型矿用履带式泥浆泵车，具有泥浆泵、液压吊臂和钻杆箱等装置的多功能用途。多功能泥浆泵车用于大直径钻孔施工中向钻孔输送冲洗液（泥浆、清水、皂化液），可提供冲洗液最大流量  $500\text{L}/\text{min}$ ，最大压力 8MPa；具有可遥控自主行走、集成性好、性能先进、操作简便、作业安全省力等特点。

2、 $360^\circ$  旋转机械吊臂式泥浆泵车研究。由于配套直径为 127mm 长度 1000mm 的钻杆，单根重量可达 80 斤，在更换  $\Phi 368/153\text{mm}$  螺旋扩孔 PDC 钻头、 $\Phi 510/368\text{mm}$  螺旋扩孔 PDC 钻头、扶正器以及现场水箱等重物，通过人为举重尤为困难，为了减轻劳动量，BLY500/8K 型矿用履带式泥浆泵车加装旋转可伸缩的吊臂来起吊钻杆钻头等，同时和吊臂一起配套使用的还有分隔式钻杆箱，方便吊臂抓取钻杆，从而能够实现井下减

人、节省劳动力的目标。

#### 四、客观评价

(一) 2023 年 12 月 14 日,中国煤炭工业协会在北京组织专家对山西华阳集团新能股份有限公司和中煤科工西安研究院(集团)有限公司共同完成的“替代倾斜后高抽巷的大直径钻孔配套技术与装备研究”项目进行了科技成果鉴定。与会专家听取了项目汇报,审阅了相关资料,经质询、讨论,形成以下鉴定意见:

为了提高高抽巷施工安全性,缩短施工周期,降低成本,提高效率,本项目旨在研发特种大直径钻孔施工工艺技术和配套装备,以解决煤矿在瓦斯抽采、通风、抢险救援等方面对于井下大直径钻孔技术装备的需求。

1、研发了用于替代倾斜后高抽巷的大直径贯通钻孔先导孔精准贯通技术和大直径钻孔导向式扩孔钻进技术及成孔工艺。

2、研制出用于施工替代倾斜后高抽巷的大直径贯通钻孔的 ZDY22000LK 型大扭矩大直径专用钻机。

3、研制出 BLY500/8K 型专用带式多功能泥浆泵车、专用高强度钻头和抗弯能力强钻杆等配套装备。

鉴定委员会一致认为:项目成果在华阳二矿实践应用,累计施工大直径钻孔 14 个,总进尺 2350m,最大孔径 510mm,最大孔深 91m,13 个大直径钻孔与工作面高抽巷贯通。现场试验数据证实,大直径贯通钻孔可满足工作面高抽巷初采期间瓦斯治理抽放需求,取得了良好的替代效果,可大幅度降低成本,缩减施工周期,社会效益显著,具有推广应用前景。项目提供的技术资料齐全,符合鉴定要求,已完成了技术开发合同书规定的内容同意通过技术鉴定,成果达到了国际领先水平。

(二) 2023 年 11 月,中煤科工西安研究院(集团)有限公司委托国家科委科技信息司认定的科技查新咨询单位陕西省科学技术情报研究院项目成果进行了科技查新,查新结论认为:在国内外公开发表的中外文文献中,除本查新项目课题组成员发表的论文和申请的专利以外,与本项目查新点完全相同的未见报道。

(三) 2023 年 12 月,山西华阳集团新能股份有限公司产业技术研究总院组织有关专家对“替代倾斜后高抽巷的大直钻孔配套技术与装备研究”项目进行验收,通过听取项目情况汇报,审阅验收资料,经质疑、讨论,形成如下验收意见:

1、研制了用于施工替代倾斜后高抽巷的大直径贯通钻孔的 ZDY22000LK 型大直径专用钻机、BLY500/8K 型专用多功能泵车及配套钻具;

2、研发了用于替代倾斜后高抽巷的大直径贯通钻孔先导孔精准贯通技术和大直径钻孔导向式扩孔钻进技术,形成了一套适合煤矿井下施工  $\Phi 510\text{mm}$  贯通孔的装备与工艺技术方法;

3、项目在华阳二矿 81203、81204 和 151108 工作面开展工业性试验,累计施工大直径钻孔 14 个,总进尺 2350m,其中孔径 510mm 钻孔 8 个,最大孔深 91m。有效解决

了初采期间瓦斯问题；

4、依托项目研究，取得实用新型专利 1 项，在核心期刊《煤矿机械》发表论文 1 篇，项目成果通过中国煤炭工业协会鉴定为国际领先水平。

五、应用情况：

项目成果成功应用于山西华阳集团新能股份有限公司所属矿区 15#煤层工作面。研究成果通过三期工程成功解决 3 个工作面回采初期瓦斯问题，一期钻孔总截面积 0.6394m<sup>2</sup>，二期钻孔总截面积 0.8168m<sup>2</sup>，三期钻孔总截面积 0.5331m<sup>2</sup>，工作面瓦斯涌出量稳定，工作面各地点瓦斯浓度符合规定，初采顺利结束，根据工作面回采期间瓦斯抽采数据分析，达到了替代工作面倾斜后高抽巷的效果，成功解决矿井采掘接替紧张问题。煤矿生产企业应不断拓展智能化技术装备应用场景，项目成果有助于煤矿井下危险区域、繁重岗位机械化减人和自动化换人政策施行，通过智能操作和远程控制技术，减少岗位的人员需求，降低单班作业人数。预计未来几年随着煤矿智能化程度的深入和井下减人政策的施行，项目成果将会得到大规模推广应用，助力煤矿高效安全生产。

通过对大直径贯通钻孔与倾斜后高抽巷的两种回采初期瓦斯治理模式的分析对比，得出以大直径钻孔替代倾斜后高抽巷的治理模式可节约经济成本达 70%，1 个工作面直接节约成本约 61.04 万元，有着良好的经济效益。施工周期方面，大直径钻孔施工替代倾斜后高抽巷可缩减施工周期 38%，可大大提高生产衔接效率。人员投入方面，大直径钻孔施工相比于掘进作业，人员投入减少了 78%。项目实施矿区平均需要治理的工作面 31 个，若全部使用该项目成果治理初采期瓦斯问题，则可为矿方减少 25048 人次出勤，节省工期 372 天，直接节约施工费用 1892.24 万元。因此，替代倾斜后高抽巷的大直径钻孔配套技术与装备具有广泛的推广应用前景。

六、主要知识产权目录：

| 序号 | 知识产权类别 | 知识产权名称           | 国家（地区） | 授权号              | 授权日期       | 证书编号     | 权利人                              | 发明人                          |
|----|--------|------------------|--------|------------------|------------|----------|----------------------------------|------------------------------|
| 1  | 发明专利   | 一种适用于煤矿井下钻孔用的扶正器 | 中国     | ZL201911324325.4 | 2021.08.10 | 4604853  | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司                | 金新；米陇峰；王传留；魏宏超；高晓亮；刘徐三；张金宝   |
| 2  | 发明专利   | 一种煤矿井下大直径随钻扩孔钻头  | 中国     | ZL202111376456.4 | 2023.08.11 | 6228176  | 中煤科工西安研究院（集团）有限公司                | 居培；王传留；田宏杰；金新；高晓亮；许超；赵建国；魏宏超 |
| 3  | 实用新型   | 一种孔口密封装置及连续换钻杆装置 | 中国     | ZL202220895451.6 | 2022.08.12 | 17148180 | 山西华阳集团新能股份有限公司；中煤科工西安研究院（集团）有限公司 | 金新；李强；张金宝；汪芸；王晓东；魏宏超；王博；叶嗣喧  |
| 4  | 论文     | 替代后高抽巷           | 中国     | 44 卷第 1          | 2023.01    | 煤矿机械     | 山西华阳集团                           | 金新；李强；王博；                    |



|   |    |                         |    |              |          |      |  |                 |
|---|----|-------------------------|----|--------------|----------|------|--|-----------------|
|   |    | 的大直径钻孔<br>配套技术与装<br>备研究 |    | 期            |          |      | 新能股份有限<br>公司；中煤科<br>工西安研究院<br>(集团)有限<br>公司 | 魏宏超；张金宝；张<br>跃丰 |
| 5 | 论文 | 立柱稳固滑轨<br>油缸及油路系<br>统设计 | 中国 | 41 卷第 7<br>期 | 2020. 07 | 煤矿机械 | 中煤科工西安<br>研究院 (集团)<br>有限公司                 | 汪芸              |
| 6 | 论文 | 遥控钻机电液<br>控制系统故障<br>监控  | 中国 | 52 卷第 5<br>期 | 2021. 05 | 煤矿安全 | 中煤科工西安<br>研究院 (集团)<br>有限公司                 | 张刚              |

#### 七、主要完成人情况：

| 项目<br>排名 | 姓<br>名 | 行<br>政<br>职<br>务 | 技<br>术<br>职<br>称 | 工<br>作<br>单<br>位<br>/<br>完<br>成<br>单<br>位 | 对本项目的贡献  |
|----------|--------|------------------|------------------|---|--|
| 1        | 金新     | 钻探分院院长           | 副研究员             | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司                         | 项目总负责人，对创新成果 1、2、3 均有重要贡献，具体包括：负责项目具体组织实施及施工管理；主持了替代倾斜后高抽巷的大直径钻孔成孔工艺的研发，并研制配套装备；主持了大直径贯通孔快速成孔专用钻机的研制，解决了远距离操控问题；主持了多功能履带泵车的研制，研发出了具有旋转吊臂式泥浆泵车。 |
| 2        | 尹金辉    | 科长               | 高级工程师            | 山西华阳集团新能股份有限公司                            | 项目主要参与人，对创新成果 1 有重要贡献，具体贡献包括：协调具体施工中出现的的问题，推动项目鉴定与验收，推动替代倾斜后高抽巷的大直径钻孔成孔工艺在所属矿区的施行。   |
| 3        | 魏宏超    | 钻探分院西北公司经理       | 副研究员             | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司                         | 项目主要参与人，对创新成果 1、2、3 有重要贡献，具体贡献包括：对大直径钻孔保直性难题提出了研究思路；对现场具体施工中遇到的问题提出解决办法，保障现场施工顺利进行。  |
| 4        | 白杰     | 部长               | 工程师              | 山西华阳集团新能股份有限公司                            | 项目主要参与人，对创新成果 1 有重要贡献，具体贡献包括：协调设备出入井，推动项目验收与鉴定。  |
| 5        | 王博     | 科长               | 助理研究员            | 中煤科工西安研究院(集团)有限公司                         | 项目主要参与人，对创新成果 1、2 有重要贡献，具体贡献包括：施工现场主要负责人，协调整体施工的进程，把关施工时间节点，对项目开工、中期验收、发表专利、文章有重要贡献  |
| 6        | 李月奎    | 部长               | 高级工程师            | 山西华阳集团新能股份有限公司                            | 项目参与者，对创新成果 1 有重要贡献，具体贡献包括：对施工数据的采集、分析、阶段验收报告有重要贡献，对项目的整体推进有重要贡献。  |

|   |             |        |               |                               |   |
|---|-------------|--------|---------------|-------------------------------|---|
| 7 | 段<br>贺<br>明 | 科<br>员 | 助理<br>研究<br>员 | 中煤科工西<br>安研究院<br>(集团)有限<br>公司 | 项目主要参与人，对创新成果 1 有重要贡献，具体贡献包括：<br>施工现场主要负责人，负责现场整体施工、项目验收、项目<br>鉴定、报告编写，负责井下数据采集及分析工作。 |
|---|-------------|--------|---------------|-------------------------------|---|

#### 八、主要完成单位及创新推广贡献：

| 项目<br>排<br>名 | 完成单位                          | 对项目的贡献  |
|--------------|-------------------------------|---|
| 1            | 中煤科工<br>西安研究<br>院（集团）<br>有限公司 | 对创新成果 1、2、3 均有重要贡献，具体包括：<br>（1）负责项目各设备选型与配套、研制与开发、施工方案以及工艺参数等方案的制定，负责项目现场试验及测试的实施；<br>（2）负责现场测试数据、资料的分析；<br>（3）对项目现场施工进行技术指导与技术把关；<br>（4）获得了相关核心论文及专利；<br>（5）负责大直径钻孔配套设备的研制，取得了 MA 认证、试验、生产及产品推广；<br>（6）负责项目整体的验收、科技查新、项目鉴定；<br>（7）负责项目成果的工业性试验和推广服务。 |
| 2            | 山西华阳<br>集团新能<br>股份有限<br>公司    | （1）提供本项目研究所需要的技术基础资料；<br>（2）提供井下施工所需人员，确保项目顺利开展；<br>（3）负责有关本项目的现场工程施工（包括成孔、封孔试验及效果检验等工作）和日常数据的观测记录；<br>（4）负责试验施工安全措施编制，并组织现场实施；<br>（5）负责项目终验。   |

#### 九、完成人合作关系说明：

该项目成果由山西华阳集团新能股份有限公司和中煤科工西安研究院（集团）有限公司完成。

金新为成果第 1 完成人，自 2019 年开始至今，作为总负责人主持项目立项和整体研究工作，负责项目的整体协调、推进、验收、鉴定等工作，主要完成人在项目中的合作关系如下：

1、金新、尹金辉、魏宏超、白杰、王博、李月奎、段贺明共同完成“替代倾斜后高抽巷的大直径钻孔配套技术与装备研究”项目科学研究、现场施工、成果鉴定、项目验收等工作，对创新成果 1、2、3 作出重要贡献。

2、金新、魏宏超、王博对企业标准《BLY500（8）K 型矿用履带式泥浆泵车》和《ZDY22000LK 型煤矿用履带式全液压坑道钻机》的形成，做出突出贡献，对创新成果 2、3 作出了重要贡献。

3、金新、魏宏超共同获授权发明专利《一种适用于煤矿井下钻孔用的扶正器》，对创新成果 1 作出了重要贡献。金新、魏宏超共同获授权发明专利《一种煤矿井下大直径

随钻扩孔钻头》，对创新成果 1 作出了重要贡献。金新、魏宏超、王博共同获授权实用新型专利《一种孔口密封装置及连续换钻杆装置》，对创新成果 1 作出了重要贡献。

4、金新、王博、魏宏超完成论文《替代后高抽巷的大直径钻孔配套技术与装备研究》，对创新成果 1 作出了重要贡献。

# 科技进步奖公示项目 15

## 一、项目名称：

高性能药盒自动装箱关键技术研发与应用

## 二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省科学技术厅

提名意见：高性能药盒自动装箱关键技术研发与应用项目是轻工业西安机械设计研究院有限公司依据市场需要，独立自主研发的具有完全知识产权的全新药盒装箱技术及装备。主要可用于药品、食品、礼品、玩具、零件等轻工产品的包装生产，重点是采用坐标机器人关键技术，解决全自动装箱速度提升难题；采用双作用可调节复合抓取关键技术，解决药盒阵列排布的多层装箱难题；采用可伸缩自由换道关键技术，解决药盒产品并线理料和单列变多列理料难题；采用多轴伺服控制技术，在主副轴之间按照特定数学模型曲线同步跟踪控制，建立适用于多种产品的增强型插补控制算法，优化了机械传动，增加了设备的柔性，提高了生产速度。利用数字化包装周期的逻辑概念，进行运动控制、轨迹控制和位置控制，进一步提高了装箱机控制的精确性和准确性。为我省的药品生产包装提供了全新解决方法，也为我国轻工包装自动化机械领域提供了一种全新的高性能药盒自动装箱技术与装备，对推动行业技术进步起到了推动作用。

拟提名该项目为陕西省科学技术进步奖三等奖。

## 三、项目简介

1、背景及意义：高性能药盒自动装箱关键技术研发与应用属于先进装备制造领域，该项目属于轻工包装自动化设备，由轻工业西安机械设计研究院有限公司基于市场需要，独立自主开发具有独立知识产权的高新技术产品，是一项行业技术领先的轻工包装机械设备。该项目解决了包装机械范畴内的药品、食品、礼品、玩具、零件等轻工产品的包装生产，虽然轻工包装机械行业近些年来得到了迅速的发展，但是其连续生产能力还不能满足当前的生产需求，尤其是在自动化药盒装箱工段基本依靠手工实现，其产能已经相当落后，成为急需研发的技术难点，同时满足干净无污染和低能耗的要求，设备的产能需达到 1 万盒/小时才能满足连续生产的需求。

2、研究内容及关键核心技术：该项目主要研发的内容包括采用坐标机器人关键技术，解决全自动装箱速度提升难题；采用双作用可调节复合抓取关键技术，解决药盒阵列排布的多层装箱难题；采用可伸缩自由换道关键技术，解决药盒产品并线理料和单列变多列理料难题；采用多轴伺服控制技术，在主副轴之间按照特定数学模型曲线同步跟踪控制，建立适用于多种产品的增强型插补控制算法，优化了机械传动，增加了设备的柔性，提高了生产速度。利用数字化包装周期的逻辑概念，进行运动控制、轨迹控制和位置控制，进一步提高了装箱机控制的精确性和准确性。为我国轻工包装自动化机械领域提供了一种全新的高性能药盒自动装箱技术与装备，对推动行业技术进步起到了推动

作用。

3、主要创新点：该项目分为三个创新点，分别是药盒装箱工艺创新：首次采用药盒连续整理，链道分隔，机械分组，多次抓取，一次释放，坐标机器人式连续装箱工艺原理，大大提高了生产速度。本设备在运行过程中无需停顿，在运行中自动完成理盒、输盒、抓盒、装箱、封口等功能。整体工艺动作符合线性逻辑要求，整个过程连续且高效，在保证执行动作稳定可靠，也提高了生产速度及生产效率。药盒装箱技术创新：在该项目中，将药盒整理输送技术，药盒抓取技术，坐标机器人技术，与传统的包装技术相互融合，攻克药盒高速输送易漂移，分道分组易卡顿，装箱易卡角等技术难题，采用多伺服同步协作，各执行机构全部采用模块化设计，即有利于提升技术研发速度，且可控制设备运行的速度，也使得各机构间配合动作更加顺畅，在设备上，确保设备的安全性、准确性和可靠性。药盒装箱控制技术创新：首先需要对装箱机的运行轨迹进行优化，通过对装箱机构的曲线运动轨迹的优化，机构的机械原理数学模型的搭建，建立适用于多种产品的增强型插补控制算法，并进行不断模拟演练，进而实现对装箱运行轨迹的不断优化，每种产品对应一种细分算法编程，使药盒装箱控制技术不断提升。该设备的智能控制系统具有编程方便、开发周期短、维护简单、通用性强、使用方便、控制功能强、模块化结构、扩展能力强等优点。

#### **四、客观评价**

高性能药盒自动装箱设备技术满足药盒的整理、阵列、排列和多层装箱，其中包括理料、开箱、装箱、封箱等工序的要求；生产效率该设备产量达到每小时 10000 盒，符合中大型药品生产企业的产能需求，并采用先进的触摸屏嵌入式系统及 PLC 控制，人机界面可以设定参数及显示数据。整机性价比高于国内同类型产品，在降低生产企业运营成本的同时提高生产效率，为企业的转型发展提供坚实的保障，也为我国轻工包装自动化机械领域提供了一种全新的高性能药盒自动装箱技术与装备，对推动行业技术进步起到了推动作用。

#### **五、应用情况和效益**

高性能药盒自动装箱设备研发完成后，进行定点试生产（有用户合作），在药品、食品等相关行业做试范样板，然后进入小批量生产阶段，共销售 7 台，实现产值 896 万元，实现利润 98 万元。本项目在相关的技术开发过程中，对机械制造工艺与设备的开发工作进行了长期的技术累计，形成了面向智能制造的领域知识建设、共享与应用示范，形成了良好的社会文化氛围，推进了轻工包装技术的发展。

本成果服务企业 2 家，西安天中源环保科技有限公司、西安怡晟达科技有限公司。共授权 10 件专利，其中发明专利 7 件，实用新型专利 3 件。

该设备研发完成后，交付西安天中源环保科技有限公司、西安怡晟达科技有限公司，用户反馈，高性能药盒自动装箱设备各项技术指标均达到要求，该设备故障率低，运行稳定可靠，能够大幅减轻工人劳动强度，提高生产效率，取得良好的经济效益。

经过用户的使用，高性能药盒自动装箱设备质量稳定。该项目的成功实施可以给单位带来较高的经济效益，其性能参数与国外同类型设备持平，今后将逐步代替进口药盒自动装箱设备，为国家节约外汇。可以预测，未来随着该设备的推广应用，国产高性能药盒自动装箱设备可以满足国内企业快速发展的需要，有着广阔的市场空间和前景。

## 六、主要知识产权和标准规范等目录

| 序号 | 知识产权类别 | 知识产权具体名称           | 国家（地区） | 授权号          | 授权日期       | 证书编号       | 权利人              | 发明人             |
|----|--------|--------------------|--------|--------------|------------|------------|------------------|-----------------|
| 1  | 实用新型专利 | 一种快速单盒供给机构         | 中国     | CN203358948U | 2013/12/25 | 第3340175号  | 轻工业西安机械设计研究院     | 李存良、施俊文、李佩等     |
| 2  | 发明专利   | 一种小方盒快速装箱设备与方法     | 中国     | CN113955205B | 2023/1/3   | 第5678741号  | 轻工业西安机械设计研究院有限公司 | 施俊文、李丽阁、袁松林、王晔等 |
| 3  | 发明专利   | 一种用于齿轮表面除油装置及方法    | 中国     | CN114887995B | 2023/4/28  | 第59215350号 | 轻工业西安机械设计研究院有限公司 | 李存良、施俊文、王晔等     |
| 4  | 实用新型专利 | 一种多盖同步供给机构         | 中国     | CN204281246U | 2015/4/22  | 第4259094号  | 轻工业西安机械设计研究院     | 李存良、李佩等         |
| 5  | 发明专利   | 一种齿轮快速去除毛刺设备及使用方法  | 中国     | CN113977379B | 2023/9/15  | 第6327290号  | 轻工业西安机械设计研究院有限公司 | 苟向民、李存良、袁松林等    |
| 6  | 实用新型专利 | 一种单片纸隔板连续储存输送及输出结构 | 中国     | CN218201362U | 2023/1/3   | 第18184374号 | 轻工业西安机械设计研究院有限公司 | 袁松林、施俊文、李佩、王晔等  |
| 7  | 发明专利   | 一种多功能成型牵引机构        | 中国     | CN102275652B | 2015/9/9   | 第1780246号  | 轻工业西安机械设计研究所     | 苟向民等            |
| 8  | 发明专利   | 一种多层装箱机构           | 中国     | CN101823573B | 2014/10/   | 第1498810   | 轻工业西安机械设计研       | 苟向民等            |

|    |      |                  |    |              |           |           |                  |     |
|----|------|------------------|----|--------------|-----------|-----------|------------------|-----|
|    |      |                  |    |              | 15        | 号         | 究所               |     |
| 9  | 发明专利 | 包装盒片输送装置和输送方法    | 中国 | CN105460287B | 2019/6/11 | 第3409642号 | 轻工业西安机械设计研究院有限公司 | 王晔等 |
| 10 | 发明专利 | 大容器包装立式自动装盒装置和方法 | 中国 | CN105836183B | 2018/1/16 | 第2779505号 | 轻工业西安机械设计研究院     | 李佩等 |

## 七、主要完成人情况

| 姓名  | 排名 | 行政职务  | 技术职称     | 工作单位             | 完成单位             | 对本项目贡献   |
|-----|----|-------|----------|------------------|------------------|--|
| 李存良 | 1  | 科研办主任 | 高级工程师    | 轻工业西安机械设计研究院有限公司 | 轻工业西安机械设计研究院有限公司 | 负责项目总负责和系统规划设计,创造性提出坐标机器人式连续装箱工艺原理,主持核心技术攻关,同时对项目总体方案进行审核,对机械、气动、自动控制分部方案进行审核校对,对项目成员进行明确分工,保质保量完成项目的研发工作。 |
| 施俊文 | 2  | 总经理   | 教授级高级工程师 | 轻工业西安机械设计研究院有限公司 | 轻工业西安机械设计研究院有限公司 | 主要负责高性能药盒自动装箱机的自动控制系统方案的设计与校对,创造性提出并攻克适用于多种产品的增强型插补控制算法,全程参与设备试运行  |

|     |   |          |          |                  |                  |   |
|-----|---|----------|----------|------------------|------------------|---|
|     |   |          |          |                  |                  | 的调试工作。  |
| 苟向民 | 3 | 副总经理     | 教授级高级工程师 | 轻工业西安机械设计研究院有限公司 | 轻工业西安机械设计研究院有限公司 | 主要负责高性能药盒自动装箱机的药盒抓取机构的设计工作,创造性提出并攻克双作用可调节复合抓取关键技术,全程参与设备试运行的调试工作。 |
| 王晔  | 4 | 设计二室主任助理 | 工程师      | 轻工业西安机械设计研究院有限公司 | 轻工业西安机械设计研究院有限公司 | 主要负责高性能药盒自动装箱机的坐标机器人移动机构的设计,创造性提出并攻克坐标机器人传动与稳定关键技术,全程参与安装调试等工作。   |
| 李佩  | 5 | 研办主任助理   | 工程师      | 轻工业西安机械设计研究院有限公司 | 轻工业西安机械设计研究院有限公司 | 主要负责高性能药盒整理机构的设计,创造性提出并攻克药盒可伸缩自由换道关键技术,全程参与设备试运行的调试工作。            |
| 袁松林 | 6 | 职员       | 工程师      | 轻工业西安机械设计研究院有限公司 | 轻工业西安机械设计研究院有限公司 | 主要负责高性能药盒自动装箱机的纸箱输送机构的设计,创造性提出并攻克纸箱输送整理技术,全程参与设备试运行的调试工作。         |



|     |   |    |           |                          |                          |   |
|-----|---|----|-----------|--------------------------|--------------------------|---|
| 李丽阁 | 7 | 职员 | 高级工<br>程师 | 轻工业西安机械<br>设计研究院有限<br>公司 | 轻工业西安机械<br>设计研究院有限<br>公司 | 主要负责高性能<br>药盒自动装箱机<br>的伺服传动机构<br>的设计,创造性提<br>出并攻克多轴伺<br>服精密传动技术,<br>全程参与设备试<br>运行的调试工作。 |
|-----|---|----|-----------|--------------------------|--------------------------|---|

## 八、完成人合作关系说明

该项目七位完成人工作单位均为轻工业西安机械设计研究院有限公司，共同承担和完成该科研项目。项目由第一完成人李存良主持完成，施俊文、苟向民、王晔、李佩、袁松林、李丽阁分别作为具体研发人员，共同参与前期调研、技术方案制定、技术研发及项目实施，以上七人均均为项目重要实施参与人员。

本项目的第一完成人为李存良，任职科研办主任，高级工程师，工作于轻工业西安机械设计研究院有限公司。是代表专利 1-1、1-3、1-4 的第一发明人，1-5 的第五发明人。在本项目中负责项目总负责和系统规划设计，创造性提出坐标机器人式连续装箱工艺原理，主持核心技术攻关，同时对项目总体方案进行审核，对机械、气动、自动控制分部方案进行审核校对，对项目成员进行明确分工，保质保量完成项目的研发工作。

本项目的第二完成人为施俊文，任职总经理、教授级高级工程师，工作于轻工业西安机械设计研究院有限公司。是代表专利 1-2 的第一发明人，1-1、1-3、1-6 的第二发明人。在本项目中主要负责高性能药盒自动装箱机的自动控制系统方案的设计与校对，创造性提出并攻克适用于多种产品的增强型插补控制算法，全程参与设备试运行的调试工作。

本项目的第三完成人为苟向民，任职副总经理，教授级高级工程师，工作于轻工业西安机械设计研究院有限公司。是代表专利 1-7 的第一发明人，1-5 的第三发明人，1-8 的第四发明人。在本项目中主要负责高性能药盒自动装箱机的药盒抓取机构的设计工作，创造性提出并攻克双作用可调节复合抓取关键技术，全程参与设备试运行的调试工作。

本项目的第四完成人为王晔，任职设计二室主任助理，工程师，工作于轻工业西安机械设计研究院有限公司。是代表专利 1-3 的第三发明人，1-2、1-9 的第四发明人，1-6 的第八发明人。在本项目中主要负责高性能药盒自动装箱机的坐标机器人移动机构的设计，创造性提出并攻克坐标机器人传动与稳定关键技术，全程参与安装调试等工作。

本项目的第五完成人为李佩，任职科研办主任助理，工程师，工作于轻工业西安机械设计研究院有限公司。是代表专利 1-4 的第三发明人，1-6 的第四发明人，1-1、1-10 的第五发明人。在本项目中主要负责高性能药盒整理机构的设计，创造性提出并攻克药

盒可伸缩自由换道关键技术，全程参与设备试运行的调试工作。

本项目的第六完成人为袁松林，任职职员，工程师，工作于轻工业西安机械设计研究院有限公司。是代表专利 1-6 的第一发明人，1-2 的第三发明人，1-5 的第七发明人。在本项目中主要负责高性能药盒自动装箱机的纸箱输送机构的设计，创造性提出并攻克纸箱输送整理技术，全程参与设备试运行的调试工作。

本项目的第七完成人为李丽阁，任职职员，高级工程师，工作于轻工业西安机械设计研究院有限公司。是代表专利 1-2 的第二发明人。在本项目中主要负责高性能药盒自动装箱机的伺服传动机构的设计，创造性提出并攻克多轴伺服精密传动技术，全程参与设备试运行的调试工作。

该项目于 2024 年 7 月 3 日至 2024 年 7 月 12 日进行公示，公示内容包括：项目名称、提名者及提名意见、项目简介、客观评价、应用情况主要知识产权和标准规范等目录、主要完成人情况、主要完成单位及创新推广贡献完成人合作关系说明。

# 科技进步奖公示项目 16

## 一、项目名称：

管状药自动化混同制备技术研究与应用

## 二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省科学技术厅

提名意见：管状药自动化混同制备技术研究与应用是轻工业西安机械设计研究院有限公司依据市场需要，研究建立管状药自动化混同工艺技术与装备，取代现有手工操作，解决混同过程中存在的本质安全性差和质量不稳定等问题，同步提高工序生产效率，为未来连续自动化生产线建设提供技术支持。

拟提名该项目为陕西省科学技术进步奖三等奖。

## 三、项目简介

1、背景及意义：管状药自动化混同制备技术研究与应用属于先进装备制造领域，该项目属于装备制造领域的光机电一体化设备，由轻工业西安机械设计研究院有限公司基于市场需要，独立自主开发具有独立知识产权的高新技术产品，一项行业领先的管状药自动化制造设备。该项目解决了管状药混同过程中存在的本质安全性差和质量不稳定等问题，提供了一种全新的管状药自动化生产工艺及方法，可以用自动化设备代替人工操作，及安全环保又提质增效。特别是面对管状药行业近些年来快速发展需要，连续生产能力需要大幅度提升的前提下，管状药生产前端自动化混同工段基本依靠手工实现，其产能已经相当落后，成为急需研发的设备难点，该设备需要同时满足改造难度低、干净无污染和低能耗的要求，目前国产管状药混同设备的设计产能基本都处于 100kg/小时，而 GZY300 管状药自动化混同设备的产能能够达到 400kg/小时从而满足连续生产的需求。

2、研究内容：该项目主要研发的内容包括研究建立管状药自动化混同工艺技术与装备，取代现有手工操作，解决混同过程中存在的本质安全性差和质量不稳定等问题，同步提高工序生产效率，为未来连续自动化生产线建设提供技术支持。

3、主要创新点：该项目分为三个创新点，分别是通过研究塔拉索夫混同器原理，对现行的混同工艺进行改进：为提高混同效率与质量，首先对混同工艺进行了改进，将 4 个批次的管状药独立放置 4 个料仓，通过每个料仓内理料及上料机构与输送机构的速度匹配以实现 4 个批次管状药在输送带上均匀排布。研制自动化混同装置：针对混同工艺，开发自动化混同装置 1 套。该装置由 4 个料仓和 1 套水平输送机构组成，且每个料仓内含 1 套理料及上料机构，实现混同自动化。研制自动化装箱装置：由于管状药含有含能材料，为防止在装箱过程中跌落、碰撞造成事故，研制自动化装箱装置 1 套。该装置能够在装箱过程中实现自动伸缩以及垂直升降，保障管状药在周转箱中均匀排布，且跌落高度较小，安全性较高。

#### 四、客观评价

管状药自动化混同制备技术满足管状药的加料、混同、装箱、下料等工序的要求；生产效率由原来的 100kg/小时提高至 400kg/小时，混同效果可达到每箱（200 根，4 个批次，每个批次理论上是 50 根）不同批次相差 1~2 根，整机性价比远高于国内同类产品，在降低生产企业运营成本的同时提高生产效率。为企业的发展提供坚实的保障。该项目的成功实施可以给单位带来较高的经济效益，同时可以降低进口管状药自动化混同设备的价格，为国家节约大量的外汇。可以预测，随着该设备的推广应用，国产管状药自动化混同设备可以满足国内需要。

#### 五、应用情况和效益

管状药自动化混同制备技术研发完成后，进行定点试生产，在管状药行业做试范样板，然后进入小批量生产阶段，共销售 1 台，实现产值 235 万元，实现利润 21 万元。本项目在相关的技术开发过程中，对机械制造工艺与设备的开发工作进行了长期的技术累计，形成了面向智能制造的领域知识建设，共享与应用示范。形成了良好的社会文化氛围，推进了我国制造业的发展。

本成果服务企业 1 家，西安创易工坊智能科技有限公司。共授权发明专利 1 项，实用新型 2 项。

该设备研发完成后，经调试运行平稳，交付西安创易工坊智能科技有限公司，用户反馈，管状药自动化混同制备各项技术指标均达到要求，该设备故障率低，运行稳定可靠，能够减轻工人劳动强度，提高生产效率，取得较好的经济效益。

#### 六、主要知识产权和标准规范等目录

| 序号 | 知识产权类别 | 知识产权具体名称       | 国家（地区） | 授权号          | 授权日期      | 证书编号         | 权利人                           | 发明人          |
|----|--------|----------------|--------|--------------|-----------|--------------|-------------------------------|--------------|
| 1  | 实用新型专利 | 一种管材自动计数理料机    | 中国     | CN218368705U | 2023/1/24 | 第 18353003 号 | 轻工业西安机械设计研究院有限公司              | 彭英民、吕佳怡、李甲壬等 |
| 2  | 发明专利   | 一种管状药自动混同系统和方法 | 中国     | CN113800230B | 2023/1/24 | 第 5713191 号  | 轻工业西安机械设计研究院有限公司、西安中轻包装机械有限公司 | 吕佳怡等         |
| 3  | 实用新型专利 | 一种管棒类材料的输送周转箱  | 中国     | CN216189429U | 2022/4/5  | 第 16155975 号 | 轻工业西安机械设计研究院有限公               | 王李刚等         |

|  |  |  |  |  |  |  |                        |  |
|--|--|--|--|--|--|--|------------------------|--|
|  |  |  |  |  |  |  | 司、西安中轻<br>包装机械有<br>限公司 |  |
|--|--|--|--|--|--|--|------------------------|--|

### 七、主要完成人情况

| 姓名  | 排名 | 行政<br>职务        | 技术<br>职称         | 工作<br>单位                 | 完成<br>单位                 | 对本项目贡献   |
|-----|----|-----------------|------------------|--------------------------|--------------------------|--|
| 白旭晶 | 1  | 设计二<br>室副主<br>任 | 工程师              | 轻工业西安机械<br>设计研究院有限<br>公司 | 轻工业西安机械<br>设计研究院有限<br>公司 | 负责项目总负责<br>和设计,同时对项<br>目总体方案进行<br>审核,对项目成员<br>进行分工,完成本<br>项目的研发工作。 |
| 彭英民 | 2  | 技术总<br>监        | 教授级<br>高级工<br>程师 | 轻工业西安机械<br>设计研究院有限<br>公司 | 轻工业西安机械<br>设计研究院有限<br>公司 | 在本项目中负责<br>整机衔接机构自<br>动化控制与整体<br>校对。                               |
| 王李刚 | 3  | 职员              | 工程师              | 轻工业西安机械<br>设计研究院有限<br>公司 | 轻工业西安机械<br>设计研究院有限<br>公司 | 在本项目中负责<br>管状药自动化混<br>同制备技术的主<br>关键部件设计。                           |
| 吕佳怡 | 4  | 职员              | 助理工<br>程师        | 轻工业西安机械<br>设计研究院有限<br>公司 | 轻工业西安机械<br>设计研究院有限<br>公司 | 在本项目中负责<br>整机主动力机构<br>设计。  |
| 郭小莉 | 5  | 职员              | 工程师              | 轻工业西安机械<br>设计研究院有限<br>公司 | 轻工业西安机械<br>设计研究院有限<br>公司 | 在本项目中负责<br>对整机的部分机<br>构进行研发设计<br>以及后续调试工<br>作。                     |
| 李甲壬 | 6  | 职员              | 助理工<br>程师        | 轻工业西安机械<br>设计研究院有限<br>公司 | 轻工业西安机械<br>设计研究院有限<br>公司 | 在本项目中负责<br>预应力释放机构<br>的设计和校核工<br>作。                                |
| 刘睿  | 7  | 职员              | 工程师              | 轻工业西安机械<br>设计研究院有限       | 轻工业西安机械<br>设计研究院有限       | 在本项目中负责<br>设备机械与电器   |

|  |  |  |  |    |    |                          |
|--|--|--|--|----|----|--------------------------|
|  |  |  |  | 公司 | 公司 | 的安装与调试工作。全程参与设备试运行的调试工作。 |
|--|--|--|--|----|----|--------------------------|

八、完成人合作关系说明

该项目七位完成人工作单位均为轻工业西安机械设计研究院有限公司，共同承担和完成该科研项目。项目由第一完成人白旭晶主持完成，彭英民、王李刚、吕佳怡、郭小莉、李甲壬、刘睿分别作为具体研发人员，共同参与前期调研、技术方案制定、技术研发及项目实施，以上七人均均为项目重要实施参与人员。

本项目的第一完成人为白旭晶，任职设计二室副主任，工程师，工作于轻工业西安机械设计研究院有限公司。在本项目中负责项目总负责和设计，同时对项目总体方案进行审核，对项目成员进行分工，完成本项目的研发工作。

本项目的第二完成人为彭英民，任职技术总监、教授级高级工程师，工作于轻工业西安机械设计研究院有限公司。是代表专利 1-1 的第四发明人，在本项目中负责整机衔接机构自动化控制与整体校对。

本项目的第三完成人为王李刚，任职职员，工程师，工作于轻工业西安机械设计研究院有限公司。是代表专利 1-3 的第九发明人，在本项目中负责管状药自动化混同制备技术的主关键部件设计。

本项目的第四完成人为吕佳怡，任职职员，助理工程师，工作于轻工业西安机械设计研究院有限公司。是代表专利 1-1 的第九发明人、1-2 的第三发明人，在本项目中负责整机主动力机构设计。

本项目的第五完成人为郭小莉，任职职员，工程师，工作于轻工业西安机械设计研究院有限公司。在本项目中负责对整机的部分机构进行研发设计以及后续调试工作。

本项目的第六完成人为李甲壬，任职职员，助理工程师，工作于轻工业西安机械设计研究院有限公司。是代表专利 1-1 的第十发明人，在本项目中负责预应力释放机构的设计和校核工作。

本项目的第七完成人为刘睿，任职职员，工程师，工作于轻工业西安机械设计研究院有限公司。在本项目中负责设备机械与电器的安装与调试工作。

该项目于 2024 年 7 月 3 日至 2024 年 7 月 12 日进行公示，公示内容包括：项目名称、提名者及提名意见、项目简介、客观评价、应用情况主要知识产权和标准规范等目录、主要完成人情况、主要完成单位及创新推广贡献完成人合作关系说明。

# 科技进步奖公示项目 17

## 一、项目名称

X70HD/X80HD 大应变管线钢管及应用关键技术

## 二、提名者及提名意见

提名单位：省科技厅

提名意见：大口径高压输气管道途经地震带、滑坡带等特殊地区的失效控制和安全保障是国际上研究的热点和重大难题，也是我国复杂工况重大管道工程的迫切需求。提高管线钢管自身的变形能力是解决该难题的最佳途径。该团队历经十余年研究攻关，攻克了 X70HD/X80HD 大应变管线钢管及应用关键技术。取得多项创新成果：

(1) 在国际上首次系统研究形成 X70HD/X80HD 大应变管线钢管变形行为表征、评价、预测、控制技术，建立了大应变管线钢和钢管新产品技术指标体系和标准。

(2) 自主创新研发了 X70HD/X80HD 大应变管线钢板及其制造技术。

(3) 自主研发了 X70HD/X80HD 大应变直缝埋弧焊钢管及其制造技术。

(4) 自主设计发明制造了具有灵活性和准确性的全尺寸钢管变形能力试验评价系统。

拟提名该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖。

## 三、项目简介

该项目属于材料科学与工程、冶金和机械工程、石油天然气工程的交叉学科。适用于大口径高压油气管道优化设计、管材制造、服役性能评价及失效控制与安全保障。大口径高压油气管道途经地震带、滑坡带、矿山采空区、沉陷带等特殊地质环境时的失效控制是国际上研究的热点和重大难题，也是我国中缅管道等重大工程的迫切需求。该项目依托国家科技支撑计划课题“X80 管材规范关键技术研究”等多个重大科技项目，历经十余年的研究攻关，攻克了 X70HD/X80HD 大应变管线钢管关键技术指标设计与评价、大应变管线钢板设计与制造、大应变钢管制造、实物模拟变形装置及试验评价等技术难题，在世界上首次将大变形钢管批量应用于中缅、西气东输三线等重大管道工程。主要技术创新点：

1、系统研究建立了钢管材料应力比等关键技术指标与钢管临界屈曲应变的关系，发明了钢管临界屈曲应变能力的预测方法；创新提出用多个应力比、屈强比、均匀变形伸长率等多参量联合表征评价和控制钢管变形能力的方法；首次建立 X70HD/X80HD 大应变管线钢和钢管产品技术指标体系和标准。

2、自主研发形成 X70HD/X80HD 大应变钢板制造成套技术，攻克了钢板成分、组织、性能、工艺综合调控技术难题，研发了具有合适比例和尺寸的“多边形铁素体+贝氏体”双相组织控制技术，突破了国际上贝氏体+M/A 大应变管线钢制造工艺，获得了具备低屈强比、高均匀延伸率、高应力比、高韧性的大应变管线钢板。

3、自主研发形成 X70HD/X80HD 大应变 JCOE 和 UOE 直缝埋弧焊钢管制造技术，研发了钢管成型、扩径等关键工艺技术，发明了高强韧匹配焊接材料，自主研发了集焊接坡口设计、电流、电压和焊材匹配的钢管多丝埋弧焊接技术，解决了钢管母材和焊缝性能合理匹配及材料成型、焊接、扩径、热涂覆过程性能劣化难题。

4、发明并设计制造了钢管内压+弯曲大变形实物试验装置，该装置具有可更换式法兰盘、可拆卸式承载框架、轴承式力臂支撑等特征；研发形成钢管实物模拟变形试验技术。

该成果获得授权专利 25 件，其中发明专利 22 件；国际标准附录 1 项、行业和企业标准 5 项；发表论文 48 篇，其中 SCI/EI 检索 26 篇。相关项目获得省部级特等奖 1 项，一等奖 2 项。

#### **四、客观评价**

该项成果突破了我国 X70HD/X80HD 大应变管线钢管研发及应用中的重大技术瓶颈，实现了从无到有到大批量生产应用的跨越式发展。该成果取得重大技术创新和显著经济效益，总体达到国际先进水平，在大应变管线钢管关键技术指标建立和实物试验装置及技术两方面达到国际领先水平。该项成果保障了中缅管道等重大工程的质量和安全可靠运行，显著提升了我国大口径高强度油气管道建设技术水平，使我国管道建设水平继续保持国际领跑地位。带动了冶金、制造等相关产业的发展，推动了行业技术进步，具有良好社会效益。

#### **五、应用情况和效益**

##### **（一）应用情况**

该项成果为用于地震断裂带、滑坡带、矿山采空区、沉陷带等复杂工况，以及基于应变设计地区的管道用管材的技术指标确定、大应变管线钢和钢管研发、质量及服役性能检测评价、管道质量提高和本质安全保障等提供了系统配套的技术。

中国石油集团工程材料研究院有限公司应用 X70HD/X80HD 大应变管线钢管及应用关键技术成果，对管线设计、选材、制造、标准、采购、应用等过程提供了全方位的技术支持和服务，推动了大应变钢管的国产化进程和实际工程应用。

本项目成果在钢铁生产、钢管制造、管道运营等企业获得了全面的推广应用。采用本项目成果和技术，南京钢铁股份有限公司、湖南华菱湘潭钢铁有限公司、宝山钢铁股份有限公司、鞍钢股份有限公司、中国石油渤海石油装备有限公司、宝鸡石油钢管有限责任公司等钢铁和钢管生产企业，在国内首次开发并批量生产了  $\phi 1016\text{mm} \times 17.5/21\text{mm}$  5 km； $\phi 813\text{mm} \times 14.7/17.2\text{mm}$  X70HD 大应变钢板/钢管和  $\phi 1219\text{mm} \times 26.4\text{mm}$  X80HD 大应变钢板/钢管，取得了显著的经济和社会效益，同时极大的促进了企业的技术进步，提高了产品制造水平，为中缅、西三线、陕京四线等国家重大管道工程建设和安全运行提供了保障。

2011 年，该项目成果在中缅油气管道建设中整体应用，采用基于应变的设计方法，



使用 X70 大变形钢管，克服了通过 9 度区、5 条活动断裂带以及地质灾害易发地段等可能发生地面位移区段内管道的大应变难题，保障了中缅油气管道的建设质量，同时由于免于绕避上述特殊地段，节省了巨额的工程投资。

2012 年，在西气东输三线首次在基于应变设计地区应用了国产  $\phi 1219\text{mm} \times 26.4\text{mm}$  X80HD 大应变钢管，推动了 X80HD 大应变钢管的国产化及应用。2017 年，在陕京四线天然气管道的建设中，国产 X80HD 大应变管线钢管获得了进一步的推广应用。项目成果解决了重大管道工程建设和运行中由于地震及地质灾害引发的钢管位移失效的瓶颈问题，保障了我国重大管道工程顺利建成投产和安全运行。

主要应用单位情况表

| 序号 | 单位名称             | 应用的技术                      | 应用对象及规模                                       | 应用起止时间   | 单位联系人/电话                |
|----|------------------|----------------------------|---|----------|-------------------------|
| 1  | 国家管网集团西南管道有限责任公司 | X70HD/X80HD 大应变管线应用关键技术    | 用于中缅管道基于应变设计地区的建设，使用大应变钢管 5 万吨以上              | 2012 年至今 | 陈 莎 ，<br>02862721515    |
| 2  | 南京钢铁股份有限公司       | X70HD/X80HD 大应变管线钢管用钢板制造技术 | 进行 X70HD/X80HD 大应变管线钢管用钢板制造，产生经济效益超 344711 万元 | 2011 年至今 | 郝 春 霞 ，<br>02557074052  |
| 3  | 湖南华菱湘潭钢铁有限公司     | X70HD/X80HD 大应变管线钢管用钢板制造技术 | 进行 X70HD/X80HD 大应变管线钢管用钢板制造，产生经济效益超 95075 万元  | 2011 年至今 | 熊 祥 江 ，<br>073158654086 |
| 4  | 巨龙钢管有限公司         | X70HD/X80HD 大应变管线钢管制造技术    | 进行 X70HD/X80HD 大应变管线钢管的制造，产生经济效益超 65272 万元    | 2011 年至今 | 顾 芳 ，<br>02266332220    |
| 5  | 湖南胜利湘钢钢管有限公司     | X70HD/X80HD 大应变管线钢管制造技术    | 进行 X70HD/X80HD 大应变管线钢管的制造，产生经济效益超 90298 万元    | 2011 年至今 | 张 兆 磊 ，<br>13615339040  |

## （二）经济效益和社会效益

**经济效益：**国家管网集团应用本项目成果在中缅管道建设 120 公里基于应变设计管道，克服了通过 9 度地区、5 条活动断裂带以及地址灾害易发地段等可能发生地面位移的管道大应变难题，保证了中缅管道的顺利投产和安全运行，近 3 年新增经济效益 172851 万元，新增利润 39880 万元。南京钢铁股份有限公司、湖南华菱湘潭钢铁有限公司、巨龙钢管有限公司、湖南胜利湘钢钢管有限公司等企业应用该成果在世界上首次大

批量生产 X70HD/X80HD 大应变管线钢和钢管并应用于中缅、西气东输三线、陕京四线等重大管道工程的建设。同时相关研究成果解决了产品研制、生产制造、性能预测评价过程中遇到的一系列技术难题，提升了企业产品质量水平，形成了高性能产品研发能力，促进了新产品的应用，提升了企业的市场竞争力。近 3 年，生产制造企业利用本项目相关技术，合计实现新增产值 595357.66 万元、新增利润 97115.35 万元。

近三年，项目完成单位累计新增销售额 238123.5 万元，新增利润 43143.63 万元，其他应用单位新增销售额 530085.2 万元，新增利润 93851.72 万元。合计新增销售额 768208.66 万元，新增利润 136995.35 万元。

**社会效益：**该项目突破了我国在 X70HD/X80HD 大应变管线钢管在关键技术指标、预测评价方法、试验装置和技术、钢板和钢管制造等环节的重大技术瓶颈，形成了选材、制造、评估、应用成套技术，实现了从无到有、到大批量生产应用的跨越式发展。

该项创新技术已成为我国保证基于应变设计管道安全的核心技术，保障了中缅、西气东输三线、陕京四线等重大管道工程的质量和安全性，使我国管道建设水平继续保持国际领跑地位。推动了行业技术进步，带动了冶金、制造等相关产业的发展，为保障国家油气能源战略通道安全、社会稳定和人民群众的生命财产安全做出了贡献。

该项成果为我国未来管道建设和运行安全提供强有力的技术支持，推广应用前景广阔。

六、主要知识产权证明目录（限 10 条）

| 号 | 知识产权类别 | 具体名称                    | 家  | 授权号（标准编号、论文年卷页）  | 授权日期            | 证书编号（标准批准发布部门、期刊名） | 权利人（标准起草单位、论文发表单位）           | 发明人（标准起草人、论文作者）                    |
|---|--------|-------------------------|----|------------------|-----------------|--------------------|------------------------------|------------------------------------|
| 1 | 发明专利   | 一种 X70 或 X80 抗大变形钢管生产方法 | 中国 | ZL201010550557.4 | 2013 年 7 月 31 日 | 1244571            | 中国石油天然气集团公司，中国石油天然气集团公司管材研究所 | 张伟卫；吉玲康；陈宏远；熊庆人；宫少涛；罗登；熊湘江；陈小伟；付彦宏 |
| 2 | 发明     | 一种高钢级大应变管线钢和钢管          |    | ZL201010251848.3 | 2011 年 12       | 873190             | 中国石油天然气集团公司，中                | 冯耀荣、吉玲康、                           |

|   |                  |                                    |        |                          |                          |         |  |   |
|---|------------------|------------------------------------|--------|--------------------------|--------------------------|---------|--|---|
|   | 专<br>利           | 的制造方法                              |        |                          | 月 7<br>日                 |         | 国石油天然气<br>集团公司管材<br>研究所  | 陈宏远、<br>陈宏达、<br>李鹤林、<br>杨龙  |
| 3 | 发<br>明<br>专<br>利 | 一种钢管弯曲变<br>形试验系统                   | 中<br>国 | ZL<br>201110446<br>626.1 | 2015<br>年 4<br>月 12<br>日 | 1371317 | 中国石油天然<br>气集团公司  | 吉玲康；<br>李彦峰；<br>陈宏远；<br>邹海萍；<br>冯耀荣；<br>左水利；<br>宫少涛；<br>杨勇鸣；<br>黄呈帅 |
| 4 | 发<br>明<br>专<br>利 | 快速确定钢管屈<br>曲应变能力的方<br>法            | 中<br>国 | ZL2009100<br>87054.5     | 2012<br>年 1<br>月 11<br>日 | 896523  | 中国石油天然<br>气集团公司，中<br>国石油天然气<br>集团公司管材<br>研究所                       | 吉玲康，<br>陈宏远，<br>李为卫，<br>宫少涛   |
| 5 | 发<br>明<br>专<br>利 | 钢管弯曲变形试<br>验系统不同长度<br>试验管的调整装<br>置 | 中<br>国 | ZL<br>201210013<br>361.0 | 2015<br>年 1<br>月 21<br>日 | 1572026 | 中国石油天然<br>气集团公司，中<br>国石油天然气<br>集团公司管材<br>研究所，中国重<br>型机械研究院<br>有限公司 | 陈宏远；<br>李彦峰；<br>吉玲康；<br>杨勇鸣；<br>冯耀荣；<br>左水利；<br>黄呈帅；<br>邹海萍；<br>王海涛 |
| 6 | 发<br>明<br>专<br>利 | 钢管弯曲变形试<br>验系统中试验管<br>管端转角测量装<br>置 |        | ZL2011103<br>63323.3     | 2014<br>年 6<br>月 4<br>日  | 1412202 | 中国石油天然<br>气集团公司，中<br>国石油天然气<br>集团公司管材<br>研究所，中国重<br>型机械研究院<br>有限公司 | 吉玲康；<br>李彦峰；<br>冯耀荣；<br>左水利；<br>陈宏远；<br>邹海萍；<br>王海涛；<br>杨勇鸣；        |

|    |      |                                 |    |                         |           |                 |                                  |  |
|----|------|---------------------------------|----|-------------------------|-----------|-----------------|----------------------------------|--|
|    |      |                                 |    |                         |           |                 |                                  | 宫少涛  |
| 7  | 发明专利 | 制管用钢板应力参数获取的方法、钢板选取方法           | 中国 | ZL 202010817943.9       | 2023年5月9日 | 5950148         | 中国石油天然气集团有限公司，中国石油集团渤海石油装备制造有限公司 | 陈小伟；吴亚军；王旭；刘鉴卫；白学伟；韩铁利；张花廖淑梅               |
| 8  | 标准   | 附录 N PSL 2 用于纵向塑性应变的钢管订货条件      | 美国 | API SPEC 5L             | 2018年     | 美国石油学会          | 中国石油集团工程材料研究院有限公司（TGRI）          | 陈宏远、吉玲康、张伟卫、王鹏李炎华、杨坤、夏季                    |
| 9  | 标准   | 基于应变设计地区油气管道用直缝埋弧焊钢管            | 中国 | SY/T 7042-2022          | 2022年     | 国家能源局           | 中国石油集团工程材料研究院有限公司                | 王磊、陈宏远、吉玲康、张伟卫、高雄雄、王鹏等                     |
| 10 | 标准   | X80 天然气管道工程基于应变设计地区用直缝埋弧焊管技术规格书 | 中国 | DEC-NGP-S-PL-005-2020-1 | 2020年6月   | 国家石油天然气管网集团有限公司 | 中国石油天然气集团公司管材研究所                 | 陈宏远、王磊、张伟卫、吉玲康、池强、王鹏、杨坤、高雄雄、齐丽华、李为卫、夏季、胡美娟 |

## 七、主要完成人情况表

| 完<br>成<br>人 | 排<br>名 | 行<br>政<br>职<br>务 | 技<br>术<br>职<br>称 | 工<br>作<br>单<br>位  | 完<br>成<br>单<br>位                                  | 对<br>本<br>项<br>目<br>贡<br>献   |
|-------------|--------|------------------|------------------|-------------------|---|--|
| 陈宏远         | 1      | 书 记 /<br>副所长     | 正高               | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 中国石<br>油集<br>团工<br>程材<br>料研<br>究院<br>有限<br>公<br>司 | 提出并参与大变形钢管技术指标研究、技术标准起草，多项产品及试验装置专利发明人，负责组织全尺寸内压弯曲试验系统的研制，参与大变形钢管的推广与应用工作。 |
| 张伟卫         | 2      |                  | 正高               | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 中国石<br>油集<br>团工<br>程材<br>料研<br>究院<br>有限<br>公<br>司 | 参与 X70HD/X80HD 大应变管线钢板和钢管试制评价工作。   |
| 王鹏          | 3      |                  | 正高               | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 中国石<br>油集<br>团工<br>程材<br>料研<br>究院<br>有限<br>公<br>司 | 参加项目技术指标和技术标准研究，参加大应变钢管的评价和实物实验工作。   |
| 王磊          | 4      |                  | 高工               | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 中国石<br>油集<br>团工<br>程材<br>料研<br>究院<br>有限<br>公<br>司 | 参与大变形钢管技术指标研究、技术标准起草。  |
| 高雄雄         | 5      |                  | 高工               | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 中国石<br>油集<br>团工<br>程材<br>料研<br>究院<br>有限<br>公<br>司 | 参加项目技术指标和技术标准研究，参加大应变钢管的评价和实物实验工作。   |
| 吉玲康         | 6      |                  | 正高               | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 中国石<br>油集<br>团工<br>程材<br>料研<br>究院<br>有限<br>公<br>司 | 参与 X70HD 大应变钢管关键技术指标研究，参与实物内压弯曲试验系统研制、大应变钢管研制及推广应用。                        |
| 杨坤          | 7      | 副经理              | 高工               | 中国石油集             | 中国石<br>油  | 参加项目技术指标和技术标准研   |

|     |    |             |    |                                |                                    |  |
|-----|----|-------------|----|--------------------------------|------------------------------------|--|
|     |    |             |    | 团工程材料<br>研究院有限<br>公司           | 集团工程<br>材料研究<br>院有限公<br>司          | 究，参加大应变钢管的评价和实<br>物实验工作。   |
| 吴亚军 | 8  | 经理          | 高工 | 中国石油集<br>团渤海石油<br>装备制造有<br>限公司 | 中国石<br>油集团渤海<br>石油装备<br>制造有限公<br>司 | 主要负责本技术的放大研究和工<br>业化转化，尤其是稳定批量生产<br>的工作，实现大应变管线钢的稳<br>定工艺，并获得发明专利。 |
| 夏季  | 9  | 书记          | 高工 | 国家管网集<br>团西南管道<br>有限责任公<br>司   | 国家管网<br>集团西南<br>管道有限<br>责任公司       | 对该项技术的推广应用做出重要<br>贡献，推动大应变管线钢管在中<br>缅管道工程中的推广应用。                   |
| 李炎华 | 10 | 书记 /<br>副所长 | 正高 | 中国石油集<br>团工程材料<br>研究院有限<br>公司  | 中国石<br>油集团工程<br>材料研究<br>院有限公<br>司  | 参与 X70HD/X80HD 大应变管线钢<br>板和钢管试制评价工作。参加大<br>应变钢管的评价和实物实验工<br>作。     |

## 八、主要完成单位及创新推广贡献

| 序<br>号 | 主要完成单位                 | 创新推广贡献  |
|--------|------------------------|---|
| 1      | 中国石油集团工程材料<br>研究院有限公司  | 项目组织和牵头单位，主要贡献：（1）负责项目总体思路、<br>技术路线和研究方案制定并组织实施。（2）建立了钢管材料<br>应力比等关键技术指标与钢管临界屈曲应变的关系，发明了钢<br>管临界屈曲应变能力的预测方法；创新提出用多个应力比、屈<br>强比、均匀塑性变形伸长率等多参量联合表征评价和控制钢管<br>变形行为的方法；首次建立 X70HD 大应变管线钢和钢管新产品<br>技术指标体系和标准。（3）研发钢管内压+弯曲大变形实物试<br>验装置总体设计思路，形成钢管实物模拟变形试验技术。（4）<br>参与 X70HD 大应变钢板制造成套技术、X70HD 大应变 JCOE 直缝<br>埋弧焊钢管制造技术研发。（5）负责对产品质量性能的检测<br>评价，推动大应变管线钢和钢管的工程应用。 |
| 2      | 中国石油集团渤海石油<br>装备制造有限公司 | 项目主要完成单位之一，主要贡献：（1）是 X70、X80 大应变<br>钢管的研发、制造的主要单位，组织完成了 X70、X80 大应变钢  |

|   |                  |   |
|---|------------------|---|
|   |                  | 管制造关键技术攻关，攻克形成了 X70HD/X80HD 大应变钢管均匀应变成型技术、多丝高速低热输入焊接技术、低温涂覆技术等关键技术，实现了我国 X70HD/X80HD 大应变钢管国产化。（2）累计为中缅管线提供 X70HD 大应变钢管 2.87 万吨，并为陕京四线、西三线等管道工程批量供应 X80HD 大应变焊管。 |
| 3 | 国家管网集团西南管道有限责任公司 | 项目主要完成单位之一，主要贡献：主要负责项目成果推广应用工作。为大应变管线钢和钢管在中缅管道工程中的首次大批量成功应用做出重要贡献。  |

## 九、完成人合作关系说明

| 序号 | 合作方式               | 合作者项目排名                               | 时间                          | 成果                                  |
|----|--------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| 1  | 共同知识<br>产权         | 陈宏远/1、张伟卫/2、吉玲康/6                     | 2008 年 01 月<br>-2010 年 12 月 | 发明专利：一种 X70 或 X80 抗<br>大变形钢管生产方法    |
| 2  | 共同知识<br>产权         | 陈宏远/1、吉玲康/6                           | 2008 年 01 月<br>-2012 年 12 月 | 发明专利：一种高钢级大应变<br>管线钢和钢管的制造方法        |
| 3  | 共同知识<br>产权         | 陈宏远/1、吉玲康/6                           | 2010 年 01 月<br>-2013 年 12 月 | 发明专利：一种钢管弯曲变形<br>试验系统               |
| 4  | 共同知识<br>产权         | 陈宏远/1、吉玲康/6                           | 2008 年 01 月<br>-2010 年 12 月 | 发明专利：快速确定钢管屈曲<br>应变能力的方法            |
| 5  | 共同知识<br>产权         | 陈宏远/1、吉玲康/6                           | 2009 年 01 月<br>-2012 年 12 月 | 发明专利：钢管弯曲变形试验<br>系统不同长度试验管的调整<br>装置 |
| 6  | 共同知识<br>产权         | 陈宏远/1、吉玲康/6                           | 2010 年 01 月<br>-2011 年 12 月 | 发明专利：钢管弯曲变形试验<br>系统中试验管管端转角测量<br>装置 |
| 7  | 共同知识<br>产权         | 吴亚军/8                                 | 2020 年 01 月<br>-2022 年 12 月 | 发明专利：制管用钢板应力参<br>数获取的方法、钢板选取方法      |
| 8  | 共同参与<br>制定标准<br>规范 | 陈宏远、吉玲康、张伟卫、王鹏、<br>李炎华、杨坤、吴亚军、夏季      | 2013 年 1 月<br>-2018 年 12 月  | 标准：附录 N PSL 2 用于纵向<br>塑性应变的钢管订货条件等  |
| 9  | 共同参与<br>制定标准<br>规范 | 陈宏远/1、张伟卫/2、王鹏/3、王<br>磊/4、高雄雄/5、吉玲康/6 | 2021 年 1 月<br>-2023 年 6 月   | 标准：基于应变设计地区油气<br>管道用直缝埋弧焊钢管         |

|    |            |   |                  |                                   |
|----|------------|---|------------------|-----------------------------------|
| 10 | 共同参与制定标准规范 | 陈宏远/1、张伟卫/2、王鹏/3、王磊/4、高雄雄/5、吉玲康/6、杨坤/7、夏季/9 | 2018年1月至2020年12月 | 标准：X80天然气管道工程基于应变设计地区用直缝埋弧焊管技术规格书 |
|----|------------|---|------------------|-----------------------------------|



# 科技进步奖公示项目 18

## 一、项目名称

深层油气钻探关键装备构件研发及应用

## 三、提名者及提名意见

提名单位：陕西省科学技术厅

提名意见：该项目依托我国深层油气钻探开发重大工程，围绕油气钻探装备服役安全重大问题，经过 8 年攻关研究，系统梳理了油气装备材料技术体系，研发了深层油气钻探用高强韧钻杆、耐腐蚀钻杆、高抗扭钻杆、轻型大钩、吊环及井架底座等新材料新产品，形成了相应的标准规范和检测评价技术，填补国内多项空白。研发的高性能新材料新产品在国内制造企业和钻探公司广泛应用，大幅提升了我国钻探装备制造能力和服役性能，满足了我国深层超深层油气钻探开发需求，创造了显著的经济和社会效益。推荐该项目申报陕西省科技进步二等奖。

拟提名该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖。

## 三、项目简介

装备是油气钻探开发的利器 and 保障，为了满足深层油气钻探需求，本项目依托中石油集团和陕西省科研课题，经过 8 年攻关研究，梳理了油气装备材料技术体系，研发了深层油气钻探用高强韧钻杆、耐腐蚀钻杆、高抗扭钻杆、轻型大钩、吊环及 H 型钢等产品，填补国内多项空白，授权发明专利 18 件，形成标准 6 项，著作 1 部，发表论文 18 篇。主要创新成果如下：

1、开发高强韧抗腐蚀钻杆新材料新工艺，建立高性能钻杆服役安全技术体系，研制了 V150/U165 高强韧钻杆、耐腐蚀钻杆及高抗扭钻杆产品。

2、开发了 1100MPa 级低碳马氏体钢新材料，实现 150mm 截面锻钢件全截面性能均匀一致，研制了轻型吊环等产品。

3、开发了 600MPa 级大截面铸钢新材料，形成了铸造新方法新工艺，研制了轻型大钩等铸钢件新产品，减重 15%以上，返修工作量降低 50%。

4、建立了钻探装备用高强钢及焊缝服役安全关键指标，形成了高强钢适用性评价方法，开发了 500MPa 级热轧 H 型钢，研发了新型井架底座，减重 10%以上。

## 四、客观评价

陕西省科技厅和中国石油天然气集团有限公司科技管理部先后组织专家对相关内容进行了验收。形成的主要验收意见如下：

1、开发了钻井大钩用大截面高强度合金铸钢新材料新工艺，材料屈服强度达到 600MPa 以上，设计了新型轻量化钻井大钩，建立了大钩浇铸数值模拟分析模型，优化了铸造工艺，研制出轻型钻井大钩产品并进行现场应用，减重 15%以上，返修周期缩短 50%。

2、开发了吊环用大截面低碳马氏体钢新材料新工艺，材料屈服强度达到 1100MPa

以上，揭示了马氏体钢合金强韧化机理，优化了锻造热处理工艺，研制了轻型吊环产品并进行现场应用，减重 10%以上，实现 150mm 直径锻件产品全截面性能均匀一致。

3、建立高强钢及焊缝关键技术指标，形成高强钢适用性评价方法，开发了 500MPa 级热轧 H 型钢新材料新工艺，揭示了热轧 H 型钢微观组织强韧化机理，优化制造工艺，研制出 500MPa 级热轧 H 型钢并用于新型井架底座设计制造，减重 10%以上。

4、开发了高强韧耐腐蚀钻杆新材料新工艺，优化了钻杆焊接及热处理工艺，设计了高抗扭钻杆结构，建立了钻杆关键技术指标，研制出 V150/U165 超高强韧钻杆和抗腐蚀钻杆新产品，强度提升 11%以上。

5、揭示了高钢级钻杆强度和韧性指标随温度的变化规律，确定了高钢级钻杆产品成分及性能控制指标，建立了钻杆断裂韧性与其强韧性指标的关系方程，基于先刺后断控制形成了高钢级钻杆冲击功要求，揭示了钻杆疲劳寿命分布规律，建立了钻杆疲劳寿命预测模型。

## 五、应用情况和效益

### （一）应用情况

主要应用单位情况表

| 序号 | 单位名称              | 应用的技术               | 应用对象及规模          | 应用起止时间   | 单位联系人/<br>电话       |
|----|-------------------|---------------------|------------------|----------|--------------------|
| 1  | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 钻探装备构件产品研发及服役性能评价技术 | 油气钻探公司及制造企业技术服务。 | 2018 年至今 | 艾志刚<br>13468819315 |
| 2  | 宝鸡石油机械有限责任公司      | 高性能钻探装备构件新材料新产品制造技术 | 高性能装备构件制造。       | 2019 年至今 | 党恩<br>15353013550  |
| 3  | 渤海能克钻杆有限公司        | 高性能钻杆新材料新产品制造技术     | 高性能钻杆制造。         | 2019 年至今 | 王显林<br>18730766836 |
| 4  | 江苏曙光华阳钻具有限公司      | 高性能钻杆新材料新产品制造技术     | 高性能钻杆制造。         | 2018 年至今 | 黄海春<br>13921728323 |
| 5  | 上海海隆钻具有限          | 高性能钻杆新材料新产品制        | 高性能钻杆制造。         | 2018 年至今 | 高斌强<br>13681998972 |

|  |    |     |  |  |  |
|--|----|-----|--|--|--|
|  | 公司 | 造技术 |  |  |  |
|--|----|-----|--|--|--|

**(二) 经济效益和社会效益**

**1、经济效益：**

2018 年以来，项目研发的高性能钻杆、高性能大钩、吊环、井架底座等新材料新产品先后在宝鸡石油机械有限公司、渤海能克钻杆有限公司等制造企业投入生产制造，近 3 年新增销售额约 377183 万元，新增利润约 29868 万元。依托深层油气钻探关键装备构件研发及应用项目形成的油气装备材料研发检测技术应用于工程材料研究院有限公司技术服务工作，2021 至 2023 年，新增收入 4201 万元，新增利润 630 万元。

**2、社会效益：**

项目研究开发的高性能新材料新工艺新产品在我国钻探装备制造企业、钻探公司推广应用，大幅提升了我国装备构件的制造质量和服役性能，满足了我国深层油气钻探开发需求，有力支持了我国深层油气钻探作业，创造了显著的社会效益。

**六、主要知识产权证明目录（限 10 条）**

| 号 | 识<br>产<br>权<br>类<br>别 | 具体名称  | 家      | 授<br>权<br>号（标<br>准<br>编<br>号、<br>论<br>文<br>年<br>卷<br>页） | 授<br>权<br>日<br>期    | 证<br>书<br>编<br>号<br>（标<br>准<br>批<br>准<br>发<br>布<br>部<br>门、<br>期<br>刊<br>名） | 权利<br>人（标<br>准<br>起<br>草<br>单<br>位、<br>论<br>文<br>发<br>表<br>单<br>位） | 发<br>明<br>人<br>（标<br>准<br>起<br>草<br>人、<br>论<br>文<br>作<br>者） |
|---|-----------------------|---|--------|---|---------------------|--|--|---|
| 1 | 发<br>明<br>专<br>利      | 一种屈服<br>强度大 于<br>1138MPa 的<br>钻<br>杆用钢管及其<br>制造方法 | 中<br>国 | ZL2<br>01810<br>300984.<br>3                            | 2020 年 08 月<br>07 日 | 392610<br>1  | 中国石油天然气<br>集团有限公司、中<br>国石油天然气集<br>团公司管材研究<br>所                     | 李方坡, 王<br>建军, 冯耀<br>荣, 韩礼红                                  |
|   | 发<br>明<br>专<br>利      | 一种中锰低<br>碳马氏体钢、<br>超深井钻机<br>吊环及其制<br>备方法          | 中<br>国 | ZL2<br>02010<br>687369.<br>X                            | 2022 年 01 月<br>04 日 | 488217<br>8  | 中国石油天然气<br>集团有限公司、中<br>国石油天然气集<br>团公司管材研究<br>所                     | 李方坡   |
|   | 发<br>明<br>专<br>利      | 一种超深井<br>石油钻机提<br>升系统大钩<br>用钩体                    | 中<br>国 | ZL2<br>02011<br>376335.                                 | 2022 年 10 月<br>04 日 | 549762<br>0  | 宝鸡石油机械有<br>限责任公司、中<br>国石油天然气集<br>团有限公司                             | 宋伟, 王高<br>社, 高啸天,<br>等                                      |

|   |      |                                    |    |                              |                     |             |   |                              |
|---|------|------------------------------------|----|------------------------------|---------------------|-------------|---|------------------------------|
|   |      | 的铸造方法                              |    | 5                            |                     |             |   |                              |
|   | 发明专利 | 一种超高强度<br>钻杆用含镍耐<br>腐蚀钢管及其<br>制造方法 | 中国 | ZL20181<br>0<br>300981.<br>X | 2020 年 08 月<br>07 日 | 392610<br>0 | 中国石油天然气<br>集团有限公司、中<br>国石油天然气集<br>团公司管材研究<br>所      | 李方坡, 王<br>建军, 冯耀<br>荣, 韩礼红   |
|   | 发明专利 | 一种低碳马氏<br>体钢、万米钻<br>机吊环及其<br>制备方法  | 中国 | ZL2<br>02010<br>688384.6     | 2022 年 01 月<br>04 日 | 488071<br>6 | 中国石油天然气<br>集团有限公司、中<br>国石油天然气集<br>团公司管材研究<br>所      | 李方坡                          |
| 6 | 发明专利 | 一种大型薄壁<br>法兰的胎模内<br>锻造成形方法         | 中国 | ZL20201<br>1380441<br>.0     | 2023 年 3 月<br>10 日  | 577574<br>7 | 宝鸡石油机械有<br>限责任公司; 中国<br>石油天然气集团<br>有限公司             | 康海鹏, 高<br>啸天, 王高<br>社, 党恩, 等 |
| 7 | 发明专利 | 一种石油钻机<br>提升系统用游<br>车提环胎模锻<br>锻造方法 | 中国 | ZL2<br>02010<br>969491.6     | 2022 年 10 月<br>04 日 | 549663<br>7 | 宝鸡石油机械有<br>限责任公司、中油<br>国家油气钻井装<br>备工程技术研究<br>中心有限公司 | 康海鹏, 杨<br>永强, 司桂<br>珍, 等     |
|   | 发明专利 | 一种钻井船或<br>浮式钻井平台<br>用游车大钩装<br>置    | 中国 | ZL2<br>02010<br>987383.1     | 2022 年 09 月<br>02 日 | 542<br>4007 | 中油国家油气钻<br>井装备工程技术<br>研究中心有限公<br>司、宝鸡石油机械<br>有限责任公司 | 王文君; 张<br>强; 杜明贤,<br>等       |
|   | 发明专利 | 一种井架二层<br>台自动排管装<br>置              | 中国 | ZL2<br>01610<br>789550.5     | 2018 年 10 月<br>02 日 | 309633<br>3 | 宝鸡石油机械有<br>限责任公司                                    | 王东, 高翔,<br>王玲, 等             |
| 0 | 发明专  | 一种 165 钢级<br>钻杆焊缝热处<br>理方法         | 中国 | ZL2<br>01610                 | 2017 年 11 月<br>21 日 | 270773<br>0 | 中国石油集团渤<br>海石油装备制造<br>有限公司、渤海能                      | 陈玉松, 陈<br>长青, 王显<br>林, 等     |

|  |   |  |  |          |  |  |         |  |
|--|---|--|--|----------|--|--|---------|--|
|  | 利 |  |  | 400778.0 |  |  | 克钻杆有限公司 |  |
|--|---|--|--|----------|--|--|---------|--|

## 七、主要完成人情况表

| 完成人 | 排名 | 行政职务 | 技术职称  | 工作单位               | 完成单位               | 对本项目贡献             |
|-----|----|------|-------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 李方坡 | 1  | 无    | 教授级高工 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司  | 中国石油集团工程材料研究院有限公司  | 负责项目的设计和实施         |
| 党恩  | 2  | 无    | 高级工程师 | 宝鸡石油机械有限责任公司       | 宝鸡石油机械有限责任公司       | 参与高强韧材料及产品制造技术研究   |
| 宋伟  | 3  | 无    | 高级工程师 | 宝鸡石油机械有限责任公司       | 宝鸡石油机械有限责任公司       | 参与高强韧铸钢材料及产品制造技术研究 |
| 王显林 | 4  | 无    | 高级工程师 | 中国石油集团渤海石油装备制造有限公司 | 中国石油集团渤海石油装备制造有限公司 | 参与高强韧钻杆材料及产品制造技术研究 |
| 康海鹏 | 5  | 无    | 工程师   | 宝鸡石油机械有限责任公司       | 宝鸡石油机械有限责任公司       | 参与高强韧锻钢件产品制造技术研究   |
| 任相羿 | 6  | 无    | 高级工程师 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司  | 中国石油集团工程材料研究院有限公司  | 参与材料强韧化机理及检测评价技术研究 |
| 王文君 | 7  | 无    | 高级工程师 | 宝鸡石油机械有限责任公司       | 宝鸡石油机械有限责任公司       | 参与高性能铸钢产品设计开发      |
| 党宁  | 8  | 无    | 高级工程师 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司  | 中国石油集团工程材料研究院有限公司  | 参与高强韧材料设计开发及检测     |

|     |    |   |       |                   |                   |                 |
|-----|----|---|-------|-------------------|-------------------|-----------------|
|     |    |   |       | 公司                |                   |                 |
| 高翔  | 9  | 无 | 高级工程师 | 宝鸡石油机械有限责任公司      | 宝鸡石油机械有限责任公司      | 参与高性能井架底座结构设计研究 |
| 艾志刚 | 10 | 无 | 高级工程师 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 参与性能材料检测评价技术研究  |

#### 八、主要完成单位及创新推广贡献

| 序号 | 主要完成单位             | 创新推广贡献                          |
|----|--------------------|---------------------------------|
| 1  | 中国石油集团工程材料研究院有限公司  | 负责项目的设计和实施，主要负责高性能材料设计开发及适用性研究。 |
| 2  | 宝鸡石油机械有限责任公司       | 主要负责钻探装备关键构件产品设计和制造技术研究及应用      |
| 3  | 中国石油集团渤海石油装备制造有限公司 | 主要负责高性能钻杆产品设计和制造技术研究及应用         |

#### 九、完成人合作关系说明

本项目研究团队由材料工程和机械设计制造等相关专业技术人员共同组成。第一、四、八、十完成人共同围绕高性能钻杆材料及产品研制和推广应用进行合作；第一、三、七完成人共同围绕高性能铸钢及大钩等产品研制和推广应用进行合作；第一、二、五、六完成人共同围绕高性能锻钢及吊环等产品研制及推广应用进行合作；第一、九完成人共同围绕高性能钻机井架底座用钢等产品研制及推广应用进行合作。项目成果是研究团队合作协同攻关的结果，通过在我国石油装备制造企业和深层油气田钻探开发过程中推广应用，结合现场应用反馈情况，项目组不断深化提升研究内容，形成新的成果，并继续在现场推广应用和效果分析，历经八年的不懈努力，研制了深层油气钻探用高性能装备产品，为保障我国深层油气钻探开发贡献了自己的微薄之力。

# 科技进步奖公示项目 19

## 一、项目名称

石墨烯改性石油管材涂层关键技术研发及应用

## 二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省科学技术厅

提名意见：该项目针对我国石油管材用石墨烯改性涂层缺陷抑制机制不明、涂层功能化设计及成膜调控技术缺失、适用性评价方法不完善等导致的涂层抗渗性低、耐高温老化不足、品质控制不理想等问题，在石墨烯改性石油管材涂层强化机理与复配机制、成膜调控与工业化成套制备、跨阶段质量评价与应用等技术方面取得了系列发明和创新，研制出了具有自主知识产权的系列高性能石墨烯改性石油管材涂层，发明了涂层抗渗、多场耦合环境损伤等多套工况适用性评价方法及装置，形成了涂层设计、制造、评价及应用全链条技术体系，并实现了工业化应用。所形成的相关技术先后在中石油图博涂层、新疆德丰防腐等生产企业推广应用，创效超 6 亿元；在长庆页岩油、辽河油田、新疆油田等国家重大油气工程和重点油气田现场应用，累计应用 500 余口井，为企业带来了显著的经济效益，对我国石油工业中特殊工况管材产业技术进步、产品升级和可持续发展有重大推动作用。项目授权国家专利 21 件（发明 15 件），发布行业/企业标准 11 项，发表高水平论文 48 篇；获得中国石油集团工程材料研究院有限公司科技进步一等奖。项目技术总体达到国际先进水平。

拟提名该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖。

## 三、项目简介

该项目属于材料失效与保护技术领域。

石油管材是保障国家能源安全的“生命线”。涂层是减缓管材本体环境损伤、延长服役寿命的关键材料，对于油气高效安全生产具有重要作用。

随油气勘探开发深入，管材涂层面临气、水、油、固共存的多相耦合腐蚀介质，高温高压高动载等日趋复杂多变的服役环境。当前，我国长庆、新疆等重点油气田重大油气钻采工程用国产管材涂层存在抗渗性低、耐高温老化性能不足、耐磨性差等问题，导致管材涂层高温老化、起泡、开裂、剥落等失效频发，严重影响油气高效安全生产。国内现用高端管材重防腐涂层产品 90%以上被欧美国家垄断，相关技术严格保密，存在成本高、供货周期长、易受“卡脖子”限制等问题。

石墨烯具有独特的二维纳米结构，其改性涂层具有优异的耐高温、抗渗、耐磨性能，是重防腐涂层的研发热点。然而，国内外石油管材用石墨烯改性涂层研发存在缺陷抑制机制不明、涂层功能化设计及成膜调控技术缺失、适用性评价方法不完善等诸多科学问题与技术瓶颈，导致涂层抗渗性低、耐高温老化不足、品质控制不理想等问题，尚不满

足我国重大油气钻采工程对高性能石油管材涂层的需求。

本项目针对上述关键问题，依托国家自然科学基金“油水耦合介质中石墨烯改性环氧涂层的防腐性能及机理研究”、陕西省重点研发计划“油气井注采油管用石墨烯重防腐涂层关键技术研发及应用”和中国石油集团战略储备基金“石墨烯技术在油管表面处理中的应用基础研究”等项目，经过近 10 年研究，在石墨烯改性石油管材涂层强化机理与复配机制、成膜调控与工业化成套制备、跨阶段质量适用性评价与应用等技术方面取得了系列发明和创新，研制出了具有自主知识产权的系列高性能石墨烯改性石油管材涂层，发明了涂层抗渗、多场耦合环境损伤等多套工况适用性评价方法及装置，形成了涂层设计、制造、评价及应用全链条技术体系，并实现了工业化应用。主要科技创新包括：

1、针对石油管材用石墨烯改性涂层功能化设计理论技术不完善的问题，首次提出了涂层耐温耐蚀性能提升的石墨烯“离子捕获”强化机理及“负热膨胀”缺陷抑制机制，发明了石墨烯改性涂层“聚合接枝-氧桥联”联合复配技术，形成了 APTS-ZrO<sub>2</sub>-GPTS-bRGO 改性环氧酚醛、BTA-SiO<sub>2</sub>-GO 改性环氧、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-GO 改性聚氨酯等系列复配涂层体系。提出了石墨烯纳米填料含量、比表面积、粒径、层数、含氧量等关键性能指标及参数。石墨烯改性涂层抗渗性提升逾 30%、热解温度提升 10%以上。

2、针对石墨烯改性管材涂层成膜调控技术缺失、成膜孔隙缺陷控制难的问题，发明了基于界面弹性失配控制的高温交联多级固化工艺，首次提出了石墨烯对钢-涂层界面空化与涂层孔隙抑制机制，形成了石墨烯涂层成膜调控缺陷控制方法，攻克了基于涂敷参量-固化工艺-成膜厚度的涂层性能调控技术，形成了涂层工业化制备成套技术，开发出三类别的石油管材用高性能石墨烯改性涂层产品系列，涂层产品孔隙率降低 30% 以上，耐温性能提升逾 20%，涂层制备周期由 16 小时降低至 4 小时。

3、针对石墨烯改性管材涂层适用性评价方法不完善的问题，发明了管材涂层油水耦合介质抗渗性评估、全尺寸实物涂层管材“化-热-力”多场耦合环境适用性评价等方法及装置，国际首次建立了基于“小试样筛选-关键性能模拟验证-全尺寸适用性评价-现场试验验证”的石墨烯石油管材涂层工况环境适用性评价技术体系，填补了国内外技术空白。

4、针对实物工况服役性能极限数据缺失，工程应用难等问题，构建了涂层柔性双向防护损伤控制下入、多尺度跨阶段的涂层质量及服役性能后评价方法等理论技术，在国际上首次完成了石墨烯改性油管涂层下井试验与工业化应用，探明了石墨烯改性油管涂层服役性能极限，形成了石墨烯改性石油管材涂层跨阶段质量评价方法及系列标准。

项目获授权国家专利 21 件（发明 15 件），制定行业/企业标准 11 项，发表论文 48 篇；获中国石油工程材料研究院科技进步一等奖、CSTM 标准贡献奖等；培养陕西省中青年科技创新领军人才等省部级以上高层次人才 4 人次。项目完成了石墨烯改性石油管材涂层国际首次下井试验，打破相关技术国际垄断，成果获中国石油报、石油商报等新闻



报道；项目成果先后在中国石油图博涂层、新疆德丰防腐等石油管材涂层生产企业推广应用，创效超 6 亿元；在长庆页岩油、辽河、新疆等国家重大油气工程和重点油气田现场累计应用 500 余口井，经济社会效益显著。项目成果应用对我国石油工业中特殊工况管材产业技术与涂层防腐技术进步、产品升级和可持续发展有重大推动作用，为保障我国油气高效钻采和输送安全提供重要技术支撑。

#### 四、客观评价

本项目自主创新研究了具有“耐高温、耐蚀、耐磨”等系列优异性能的石墨烯涂层新技术，形成了石墨烯改性石油管材涂层耐高温耐蚀机制、石墨烯涂层复配机制、成膜调控机制、全自动涂层制备系统、涂层质量评价与应用技术等系列基础理论技术研究原始创新成果。本项目攻克了管材涂层高温孔隙缺陷及高温活化抑制、跨阶段质量集成评价方法等共性技术难题，降低了涂层鼓包、开裂、剥落等失效问题，有效提升了注水井管材的服役寿命，同时具有很好的经济性和现场可操作性。为中国石油集团公司油气开发主营业务发展提供了新的技术支撑。

由中国石油集团石油管工程技术研究院组织并由中国石油集团专家构成的验收委员会认为，该技术创新性强，成果总体国际先进。具体成果如下：（1）针对石油管材用石墨烯改性涂层功能化设计理论技术不完善的问题，首次提出了涂层耐温耐蚀性能提升的石墨烯“离子捕获”强化机理及“负热膨胀”缺陷抑制机制，发明了石墨烯改性涂层“聚合接枝-氧桥联”联合复配技术，形成了功能化石墨烯改性涂层复配涂层体系。提出了石墨烯纳米填料含量、比表面积、粒径、层数、含氧量等关键性能指标及参数。石墨烯改性涂层抗渗性提升逾 30%、热解温度提升 10%以上。（2）针对石墨烯改性管材涂层成膜调控技术缺失、成膜孔隙缺陷控制难的问题，发明了基于界面弹性失配控制的高温交联多级固化工艺，形成了石墨烯改性涂层性能调控与工业化制备成套技术，开发出三种类别的石油管材用高性能石墨烯改性涂层产品系列，涂层产品孔隙率降低 30%以上，耐温性能提升逾 20%。（3）针对石墨烯改性管材涂层适用性评价方法不完善的问题，发明了管材涂层油水耦合介质抗渗性评估、全尺寸实物涂层管材“化-热-力”多场耦合环境适用性评价等方法及装置，国际首次建立了基于“小试样筛选-关键性能模拟验证-全尺寸适用性评价-现场试验验证”的石墨烯石油管材涂层工况环境适用性评价技术体系，填补了国内外技术空白。（4）针对实物工况服役性能极限数据缺失，工程应用难等问题，构建了涂层柔性双向防护损伤控制下入、多尺度跨阶段的涂层质量及服役性能后评价方法等理论技术，在国际上首次完成了石墨烯改性油管涂层下井试验与工业化应用，探明了石墨烯改性油管涂层服役性能极限，形成了石墨烯改性石油管材涂层跨阶段质量评价方法及系列标准。

项目在“2022 中国国际石墨烯创新大会”、“2023 中国国际石墨烯创新大会”作特邀报告，在“2022 第二届石油石化装备产业科技大会暨科技创新成果展览会分会论坛”、“2023 中国材料大会分会论坛”作专题报告。报告引起国内外石墨烯技术与表面改性技

术学术界、中国石墨烯联盟及腐蚀防护领域学者等研究团体广泛关注和一致好评。国家新材料产业发展专家咨询委员会委员李义春，中国复合材料学会理事李铁虎教授等同行专家一致认为，与同类研究相对比，从石墨烯涂层耐温耐蚀机理与复配机制、石墨烯涂层产品研制、质量评价与应用技术上都实现了原始创新和突破，多项创新填补了国内空白，是一项具有完全自主知识产权的原创技术；该成果在石墨烯改性石油管材技术领域达到了国际先进水平。

当前，我国重防腐涂料/涂层市场被国外技术垄断，70%以上石油管材重防腐涂料产品长期依赖进口。本项目超前研发了功能化石墨烯改性石油管材涂层新技术，进一步丰富和完善了石油管材防护涂层技术体系，实现了石墨烯技术在苛刻环境油气开发中的验证和技术突破，打破了石油管材重防腐涂料被国外垄断的技术现状。本项目成果具有重要的科学价值，为石油管材表面改性提供了新方向新技术，为推动我国油气工业及石油管材涂层制造业持续健康发展提供技术支撑，应用前景广阔，具有重大经济社会效益。

## **五、应用情况和效益**

### **（一）应用情况**

1、耐磨、耐高温、耐蚀涂层材料和涂层跨阶段质量评价方法等相关成果在济宁卫士宝化工科技有限公司等涂料生产企业应用，在提高涂层耐磨、耐高温和耐蚀性能、涂料/涂层质量控制方面进一步优化，石墨烯改性涂料/涂层质量合格率从85%提高到99%以上；与传统防腐类产品相比较综合性能提高30%以上，加工综合成本基本持平，促进了产品的升级换代。近7年累计销售额逾7700万元，新增利润1540余万元。涂料/涂层产品在长庆油田、新疆油田、延长油田等注水开发工况中得到广泛应用，产品服役安全性优良，市场反应很好。

2、耐高温和耐蚀涂层材料、涂层跨阶段质量评价方法和配套应用技术等相关成果在新疆德丰亿升石油防腐工程有限公司等涂层防护石油管材加工企业应用，显著促进了涂层产品质量与服役性能，涂层质量合格率从87%提高到99%以上。2017年至今，石油管材涂层陆续在新疆油田注水开发工况中应用500余口井，应用效果良好。近7年累计销售额逾6300万元，新增利润1134余万元。

3、耐蚀耐磨涂层材料、涂层成膜控制方法与工业化成套制备技术、涂层跨阶段质量评价方法等相关成果在巨龙钢管有限公司应用，生产效率提高20%，产品合格率提高至99%以上，显著提升了石油管材服役安全性能，产品在中俄东线、西气东输、川气东送等国家重大油气工程建设中得到广泛应用。近6年累计销售额逾3亿元，新增利润4500余万元。

4、涂层成膜控制方法与工业化成套制备技术和涂层跨阶段质量评价方法在河北华油一机图博涂层有限公司应用，生产效率提高30%，产品合格率提高至99%以上，产品在塔里木油田、川渝油气田、长庆油田、西北油田等国内含硫化氢、二氧化碳、氯离子腐蚀环境，以及深层超深层油气勘探中得到广泛应用。近6年累计销售额逾1.8亿元，

新增利润 3600 余万元。

5、本项目研制的石墨烯改性耐蚀耐高温油管涂层在长庆油田分公司第十二采油厂庄 9 区、庄 36 区，第二采油厂西峰油区，页岩油开发分公司岭南作业区等区块注水井中应用，使用效果良好。因显著延长油管服役寿命，降低管检周期等产生可观的经济效应。

6、涂层跨阶段质量评价方法等相关成果成功应用于涂层防护石油管材质量检验当中，有效缩短了质检项目响应时间，获得了用户的高度评价和肯定。经测算，应用该成果后通过提升涂层防护石油管材检验服务质量和提升评价技术水平等产生的效益逾 400 万元/年。

主要应用单位情况表

| 序号 | 单位名称             | 应用的技术                              | 应用对象及规模  | 应用起止时间                           | 单位联系人/电话             |
|----|------------------|------------------------------------|--|----------------------------------|----------------------|
| 1  | 巨龙钢管有限公司         | 涂层跨阶段质量评价方法                        | 利用本项目的涂层跨阶段质量评价方法和选材方法等研究成果，产品合格率提高至 99%以上，涂层防护石油管材累计生产销售产值超 3 亿元                        | 2018 年 6 月 30 日至 2024 年 6 月 30 日 | 张晓慧<br>/15076700257  |
| 2  | 新疆德丰亿升石油防腐工程有限公司 | 石墨烯改性耐高温和耐蚀涂层材料、涂层跨阶段质量评价方法和配套应用技术 | 涂层质量合格率从 87%提高到 99%以上，与传统防腐类产品相比综合性能提高 30%以上，在新疆油田注水开发工况中应用 500 余口井，应用效果良好。累计效益超 6300 万元 | 2017 年 6 月 30 日至 2024 年 6 月 30 日 | 许文忠<br>/18999500931  |
| 3  | 河北华油一机图博涂层有限公司   | 全自动涂层制备系统和涂层跨阶段质量评价方法              | 生产效率提高 30%，产品合格率提高至 99%以上，涂层防护石油管材累计生产销售产值约超 1.8 亿元                                      | 2018 年 6 月 30 日至 2024 年 6 月 30 日 | 胡建修<br>/0317-2572474 |
| 4  | 济宁卫士宝化工科技有限公司    | 石墨烯改性耐磨、耐高温、耐蚀涂层材料和涂层跨阶段质量评价方法     | 石墨烯改性涂料/涂层质量合格率从 85%提高到 99%以上，累计效益超 7700 万元  | 2011 年 10 月 20 日至 2021 年 1 月 5 日 | 徐娜<br>/13655370630   |

|   |                      |                |  |                     |                     |
|---|----------------------|----------------|--|---------------------|---------------------|
| 5 | 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司 | 石墨烯改性耐蚀耐高温油管涂层 | 在长庆油田分公司第十二采油厂庄9区、庄36区，第二采油厂西峰油区，页岩油开发分公司岭南作业区等区块注水井中应用，使用效果良好。                | 2020年8月1日至2024年7月5日 | 吕海卫<br>/13201880939 |
| 6 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 涂层跨阶段质量评价方法    | 涂层跨阶段质量评价方法等相关成果成功应用于涂层防护石油管材质量检验当中，通过提升涂层防护石油管材检验服务质量和提升评价技术水平等产生的效益逾400万元/年。 | 2018年6月1日至2024年7月5日 | 张雪琴<br>/15353560511 |

**（二）经济效益和社会效益**

**经济效益：**

- 1、耐磨、耐高温、耐蚀涂层材料和涂层跨阶段质量评价方法等相关成果在济宁卫士宝化工科技有限公司等涂料生产企业应用，近7年累计销售额逾7700万元，新增利润1540余万元。
- 2、耐高温和耐蚀涂层材料、涂层跨阶段质量评价方法和配套应用技术等相关成果在新疆德丰亿升石油防腐工程有限公司等涂层防护石油管材加工企业应用，近7年累计销售额逾6300万元，新增利润1134余万元。
- 3、涂层成膜控制方法与工业化成套制备技术、涂层跨阶段质量评价方法等相关成果在巨龙钢管有限公司应用，近6年累计销售额逾3亿元，新增利润4500余万元。
- 4、涂层成膜控制方法与工业化成套制备技术、涂层跨阶段质量评价方法等成果在河北华油一机图博涂层有限公司应用，近6年累计销售额逾1.8亿元，新增利润3600余万元。
- 5、涂层跨阶段质量评价方法等相关成果在中国石油集团工程材料研究院有限公司应用，通过提升涂层防护石油管材检验服务质量和提升评价技术水平等产生的效益逾400万元/年。

**（二）社会效益：**

项目成果应用于济宁卫士宝等涂料生产企业，促进了涂料产品质量提升与升级换代，新增利润超1540万元，提升了企业的核心竞争力，社会效益显著。

项目成果应用于新疆德丰、巨龙钢管、河北华油一机、工程材料研究院等涂层防护石油管材加工制造企业，促进了产品质量提升与升级换代，推动了石油管材加工制造企业的技术进步，新增利润超9000万元，提升了企业的核心竞争力，社会效益显著。

项目成果应用于长庆油田、新疆油田等注水开发工程，以及中俄东线、西气东输、川气东送等国家重大油气工程建设中得到广泛应用，大幅度提高了复杂工况油气钻采输

送效率和服役安全，避免了井漏、井喷、污染地层等恶性环境事故发生，保障了我国油气资源开发等国民经济重大领域的战略安全，社会效益显著。

六、主要知识产权证明目录（限 10 条）

| 号 | 知识产权类别 | 具体名称                        | 国家 | 授权号（标准编号、论文年卷页）      | 授权日期            | 证书编号（标准批准发布部门、期刊名） | 权利人（标准起草单位、论文发表单位）             | 发明人（标准起草人、论文作者）          |
|---|--------|-----------------------------|----|----------------------|-----------------|--------------------|--------------------------------|--------------------------|
|   | 发明专利   | 用于注水井的油管用防结垢涂料及其制备和使用方法     | 中国 | ZL 2021 1 0261029 .5 | 2022 年 11 月 1 日 | 55484 98           | 中国石油天然气集团有限公司，中国石油天然气集团公司管材研究所 | 朱丽娟;冯春;曹亚琼;宋雅聪           |
|   | 发明专利   | 一种改性酚醛环氧涂料及其制备方法和应用         | 中国 | ZL 2020 1 0760959 .0 | 2022 年 2 月 1 日  | 49171 59           | 中国石油天然气集团有限公司，中国石油天然气集团公司管材研究所 | 冯春;朱丽娟;宋雅聪;曹亚琼           |
|   | 发明专利   | 一种铝合金钻杆用耐磨石墨烯改性微弧氧化涂层及其制备方法 | 中国 | ZL 2019 1 0257171 .5 | 2021 年 5 月 28 日 | 44485 46           | 中国石油天然气集团有限公司，中国石油天然气集团公司管材研究所 | 朱丽娟;冯春;路彩虹;韩礼红;蒋龙;王航     |
|   | 发明专利   | 一种 KD 级表面渗铝改性抽油杆用钢及其杆体制造方法  | 中国 | ZL 2018 1 0468139 .7 | 2020 年 6 月 9 日  | 38347 97           | 中国石油天然气集团有限公司，中国石油天然气集团公司管材研究所 | 冯春;路彩虹;朱丽娟               |
|   | 发明专利   | 一种油井管屈曲管柱的高温腐蚀和冲刷试验装置       | 中国 | ZL 2015 1 0763429 .0 | 2018 年 7 月 10 日 | 29951 18           | 中国石油天然气集团有限公司，中国石油天然气集团公司管材研究所 | 朱丽娟;冯春;袁军涛;王鹏;徐欣;韩礼红;王新虎 |

|  |             |  |   |                               |                              |                                   |   |  |
|--|-------------|--|---|-------------------------------|------------------------------|-----------------------------------|---|--|
|  | 明<br>专<br>利 | 一种短尺<br>防腐钢管的制<br>备方法  | 国 | ZL<br>2019 1<br>0689801<br>.6 | 2<br>020<br>年 6<br>月 19<br>日 | 38485<br>23                       | 中国石油天然气<br>集团有限公司，中国<br>石油集团渤海石油装<br>备制造有限公司  | 张晓<br>慧； 郭莉；<br>巩忠旺；臧<br>永杰；陈红<br>昌；杨鹏飞；<br>谭冀川；胡<br>毅   |
|  | 文           | Corrosion<br>behavior of<br>epoxy<br>composite<br>coatings<br>reinforced<br>with reduced<br>graphene<br>oxide<br>nanosheets in<br>the high<br>salinity<br>environments | 国 | 493<br>(2019)<br>889-896      | 2<br>019<br>年 6<br>月 28<br>日 | Appli<br>ed<br>Surface<br>Science | 1. Tubular<br>Goods Research<br>Institute, China<br>National Petroleum<br>Corporation,<br>2. School of<br>Chemistry and<br>Chemical<br>Engineering,<br>Southwest<br>Petroleum<br>University,  | Li Juan<br>Zhu ; Chun<br>Feng ;<br>Yaqiong<br>Cao  |
|  | 文           | A High<br>Performance<br>Anti<br>Corrosive<br>Epoxy Coating<br>Based on Ultra<br>Thin<br>Hydroxyapatit<br>e Nanosheets<br>with Ph<br>Responsive<br>Functions           | 国 | 202<br>3.28.62<br>23          | 2<br>023<br>年 7<br>月 27<br>日 | molec<br>ules                     | 1. Tubular<br>Goods Research<br>Institute, China<br>National Petroleum<br>Corporation,<br>2. School of<br>Chemistry and<br>Chemical<br>Engineering,<br>Southwest<br>Petroleum<br>University,<br>3. Petrochina<br>Changqing Oilfield<br>Company, China | Chun<br>Feng,<br>Li Juan<br>Zhu,<br>Legang<br>Chen,<br>Xuezhi<br>Hui,<br>Jinling<br>Liu, Lei<br>He,<br>Xiaofeng<br>Bai,<br>and<br>Zongxue Yu |

|   |   |  |   |                     |           |  |   |  |
|---|---|--|---|---------------------|-----------|--|---|--|
|   |   |  |   |                     |           |  | National Petroleum Corporation,<br>4. Bureau of Geophysical Prospecting Inc.,<br>China National Petroleum Corporation               |  |
|   | 准 | 油管石墨烯改性涂层质量要求及检验   | 国 | T/C STM 00242-2 021 | 2021年4月1日 | 中关村材料试验技术联盟  | 中国石油集团石油管工程技术研究院;北方石墨烯产业研究院;天津宝抵紫荆创新研究院;河北华油一机图博涂层有限公司;渤海装备研究院(信息中心);中国石油天然气股份有限公司新疆油田分公司;中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司;中国石油天然气股份有限公司大港油田分公司 | 朱丽娟;冯春;韩礼红;高古辉;易汉平;胡建修;纪海涛;谢斌;王守虎;樊红旗;胡晓威;葛红江                                  |
| 0 | 准 | Internal coating of line pipe for non-corrosive gas transmission service | 国 | SY/T 6530-2010 (EN) | 2021年1月7日 | National Energy Administration of the People's Republic of China | CNPC Tubular Goods Research Institute   | Xu Ting;Ma Xiaofang;Qu Yixin;Chen Junfeng;Xu Xiaofeng;Nie Hongfang;Han Ruijing |

## 七、主要完成人情况表

| 完成人 | 排名 | 行政职务 | 技术职称 | 工作单位               | 完成单位               | 对本项目贡献   |
|-----|----|------|------|--------------------|--------------------|--|
| 朱丽娟 | 1  | 无    | 正高   | 中国石油集团工程材料研究院有限公司  | 中国石油集团工程材料研究院有限公司  | 项目负责人，承担中国石油战略储备基金课题“石墨烯技术在油管表面处理中的应用基础研究”与技术服务合同“新疆油田注水井防腐油管性能评价及适用性研究”。提出了涂层耐温耐蚀性能提升的石墨烯“离子捕获”强化机理及“负热膨胀”缺陷抑制机制，发明了石墨烯改性涂层“聚合接枝-氧桥联”联合复配技术。创新发现了纳米颗粒功能化石墨烯的钢-涂层界面空化与涂层孔隙抑制机制，研制了系列石墨烯改性石油管材涂层。建立了石墨烯涂层抗渗性等评估方法，涂层防损伤下入技术及后评价方法，填补了国内技术空白。对创新点 1、2、3、4 做出了突出贡献。 |
| 冯春  | 2  | 总工程师 | 正高   | 中国石油集团渤海石油装备制造有限公司 | 中国石油集团渤海石油装备制造有限公司 | 项目主要完成人，提出项目研究的总体思路和实施方案，首创石墨烯改性石油管材涂层概念。通过石墨烯涂层复配机制，研制了耐高温、耐蚀 2 类石墨烯改性石油管材涂层，耐温性能提升 10% 以上，耐蚀性能提升 30% 以上。国内首次完成了石墨烯改性涂层油管下井试验，并建立了石墨烯改性石油管材涂层后评价方法。对创新点 1、4 有突出贡献。  |
| 徐婷  | 3  | 无    | 正高   | 中国石油集团工程材料研究院有限公司  | 中国石油集团工程材料研究院有限公司  | 项目完成人，参与了石油管材用石墨烯涂层多场耦合环境适用性评价方法、工况环境适用性评价体系研究，协助建立了多尺度跨阶段的石墨烯改性涂层质量及服役性能后评  |



|     |    |          |    |                      |                      |  |
|-----|----|----------|----|----------------------|----------------------|--|
|     |    |          |    |                      |                      | 价方法，参与制定了石墨烯改性石油管材涂层防结垢、质量要求及检验等系列标准。对创新点 3、4 有突出贡献。                                     |
| 胡建修 | 4  | 企业专家     | 副高 | 中国石油集团渤海石油装备制造有限公司   | 中国石油集团渤海石油装备制造有限公司   | 项目完成人，试验确定了最佳固化工艺参数，开展了钻杆防腐内涂层质量控制标准化工作，为石墨烯改性石油管材涂层制备工艺室内调控与工业化试制提供技术支撑。对创新点 1、3 有突出贡献。 |
| 惠学智 | 5  | 常务副厂长    | 副高 | 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司 | 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司 | 项目完成人，参与完成了石墨烯改性涂层油管下井试验与工业化应用，建立了石墨烯石油管材涂层应用后评价方法。对创新点 4 有突出贡献。                         |
| 张华佳 | 6  | 无        | 副高 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 项目完成人，参与石油管材高温劣化行为与机理研究，参与建立了石墨烯涂层化-热-力多场腐蚀性能评价方法。对创新点 1、3 有突出贡献。                        |
| 蒋龙  | 7  | 副所长      | 正高 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 项目完成人，参与完成了石墨烯改性涂层性能评价，参与形成了石墨烯涂层跨阶段质量评价方法。对创新点 3 有突出贡献。                                 |
| 杜伟  | 8  | 研究所党支部书记 | 副高 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 项目完成人，参与研究思路与方案设计，参与完成了石墨烯涂层跨阶段质量评价方法。对创新点 3 有突出贡献。                                      |
| 张晓慧 | 9  | 副厂长      | 副高 | 中国石油集团渤海石油装备制造有限公司   | 中国石油集团渤海石油装备制造有限公司   | 项目完成人，参与完成了石墨烯改性石油管材涂层成膜调控与工业化制备。对创新点 2 有突出贡献。   |
| 张雪琴 | 10 | 无        | 副高 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 项目完成人，参与完成了石墨烯改性涂层性能评价。对创新点 3 有突出贡献。   |

八、主要完成单位及创新推广贡献

| 序号 | 主要完成单位               | 创新推广贡献  |
|----|----------------------|---|
| 1  | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | <p>作为项目牵头单位，负责项目总协调，经过多年攻关，通过引入、改进石墨烯技术，从理论、实验方法和实践上提升了石油管材的耐高温耐蚀耐磨性能，形成了石墨烯涂层耐温耐蚀机理与复配机制、成膜调控与质量评价技术、先导性工程示范应用等一系列基础应用研究原始创新成果。</p> <p>1. 创新发现了石墨烯提升石油管材涂层耐高温性能的“负热膨胀效应”机理与耐蚀性能的“离子捕获”机制、“聚合接枝”与“氧桥联”的石墨烯涂层复配机制，国内首创研发耐高温、耐蚀、耐磨系列石墨烯改性石油管材涂层，综合性能提升逾 30%。</p> <p>2. 创新发现了纳米颗粒功能化石墨烯在涂层高温交联过程中，通过降低钢与涂层、面层与底层的弹性失配，对界面空化与孔隙的抑制机制，形成了石墨烯改性石油管材涂层成膜调控方法和工业化成套制备技术，涂层质量稳定性提升逾 20%，生产效率提升逾 25%。</p> <p>3. 创新了石墨烯改性涂层防结垢、抗渗、化-热-力多场耦合环境耐蚀性能评价方法，形成了石墨烯涂层跨阶段质量评价方法，填补了国内技术空白。</p> <p>4. 国际首次完成了石墨烯改性涂层油管下井试验与工业化应用，建立了石墨烯石油管材涂层应用后评价方法。</p> |
| 2  | 中国石油集团渤海石油装备制造有限公司   | <p>1、参与了石墨烯改性涂层成膜调控方法与工业化成套制备技术研究，分析了固化温度和固化时间等因素对固化度的影响，探索了涂层附着力、涂层耐磨性与固化度的关系，获得了最佳固化工艺参数。</p> <p>2、从环境、操作、设备、检验和安全等方面研究了钻杆防腐内涂层质量控制标准化工作，探索验证了石墨烯涂层质量评价方法的可行性，为石墨烯改性石油管材涂层制备提供了技术支撑。</p>  |
| 3  | 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司 | <p>参与完成了石墨烯改性涂层油管现场下井试验，自 2020 年起在长庆油田采油十二厂、采油二厂、页岩油项目等区块注水井中累计完成现场入井试验 10 余口。</p>  |

九、完成人合作关系说明

项目合作人冯春，于 2015 年 8 月至 2023 年 12 月通过共同知识产权等合作方式，通过参与研发形成石墨烯涂层复配技术，研制了耐高温、耐蚀系列石墨烯改性石油管材

涂层，与项目第一完成人合作完成了防结垢涂料及其制备和使用方法等发明专利授权。

项目合作人徐婷，于 2015 年 8 月至 2023 年 12 月通过共同知识产权等合作方式，参与了石油管材用石墨烯涂层跨阶段质量评价方法研究，协助建立石墨烯改性涂层油管下井试验样品的后评价方法，与项目第一完成人合作完成了石油管材涂层用石墨烯及石墨烯分散液评价方法等标准的制修订工作。

项目合作人胡建修，于 2015 年 8 月至 2023 年 12 月通过产业合作、共同知识产权等合作方式，研究了标准化工作对钻杆防腐内涂层成膜质量控制的重要作用，探索验证了石墨烯涂层质量评价方法的可行性，为石墨烯改性石油管材涂层制备工艺室内调控与工业化试制提供技术支撑，与项目第一完成人合作完成了油管石墨烯改性涂层质量要求及检验等标准的制修订工作。

项目合作人惠学智，于 2015 年 8 月至 2023 年 12 月通过共同知识产权等合作方式，完成了石墨烯改性涂层油管下井试验与工业化应用，参与建立了石墨烯石油管材涂层应用后评价方法，与项目第一完成人合作完成了 pH 响应功能的环氧涂层研究等论文发表。

项目合作人张华佳，于 2015 年 8 月至 2023 年 12 月通过共同知识产权等合作方式，深入研究石油管材高温劣化行为与机理，参与建立了石墨烯涂层化-热-力多场腐蚀性能评价方法，与项目第一完成人合作完成了石墨烯改性石油管材涂层防结垢性能测试方法等标准的制修订工作。

项目合作人蒋龙，于 2017 年 5 月至 2023 年 12 月通过共同知识产权等合作方式，参与了石墨烯改性涂层防结垢、抗渗、化-热-力多场耦合环境耐蚀性能评价方法，形成了石墨烯涂层跨阶段质量评价方法，与项目第一完成人合作完成了一种铝合金钻杆用耐磨石墨烯改性微弧氧化涂层及其制备方法等发明专利授权。

项目合作人杜伟，于 2017 年 6 月至 2023 年 12 月通过产业合作等合作方式，参与建立了石墨烯涂层跨阶段质量评价方法。

项目合作人张晓慧，于 2015 年 8 月至 2023 年 12 月通过产业合作、共同知识产权等合作方式，参与完成了石墨烯改性石油管材涂层成膜调控与工业化制备技术研究，完成了一种短尺防腐钢管的制备方法等发明专利授权。

项目合作人张雪琴，于 2017 年 8 月至 2023 年 12 月通过产业合作等合作方式，参与完成了石墨烯改性涂层性能评价等研究工作。

## 科技进步奖公示项目 20

### 一、项目名称

石油管数智化检测关键技术研究及应用

### 二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省科学技术厅

提名意见：石油管是石油和天然气运输的关键基础设施，其安全运行对于能源供应、环境保护和社会稳定具有重要意义。然而传统的计量及检测方法存在效率低、准确性不足，人工成本高等问题。本项目突破了石油螺纹传统量值传递方式，首创了数字化量值传递技术。开发了数字化螺纹检测系统，实现了螺纹检测的智能化和数字化。攻克了微观组织形貌智能分析、特殊缺陷智能检验等技术难题。制定了高性能石油管的计量、检测及质量评价配套系列标准。项目成果显著，获得授权发明专利 10 件、授权实用新型专利 10 件；制修订国家标准 2 项，行业/团体标准 7 项，企业标准 10 项；在国内外发表学术论文 23 篇（SCI 6 篇、EI 7 篇）。这些成果直接应用于长庆油田、西南油气田、青海油田等油气田，用于石油管产品的螺纹计量、检验检测、旧管修复等工作。同时，该技术上海宝钢、江苏常宝普莱森钢管有限公司等国内石油管骨干制造企业得到推广转化。

拟提名该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖。

### 三、项目简介

石油专用管是石油和天然气开采过程中不可或缺的重要装备，其质量和可靠性直接影响到油气田的生产效率和安全运行。随着油气资源的不断开发，专用管在高温高压、腐蚀性介质和复杂地质条件下运行的频率越来越高，这对其检测技术提出了更高的要求。传统的检测方法，如人工检验和常规仪器检测，存在检测效率低、精度不足、漏检率高等问题，难以全面、准确地评估专用管状态和潜在风险。此外，人工检测过程繁琐，耗时长，成本高，且容易受到人为因素的影响，增加了操作风险和检测误差。

现有的计量技术、检验技术及装备、配套标准已不能满足石油行业高质量发展的需求。具体所面临的的技术难题如下：

一是传统量值传递方式由于量规制造材质差异及频繁使用导致磨损变形，量值传递容易出现偏差。大规格量规旋合费时费力，操作人员劳动强度大。

二是现有螺纹检测、微观组织分析、特殊缺陷的智能检验技术不完善。

三针对高性能石油管的计量、检测及质量评价的标准缺失。

针对上述技术难题，本项目在中国石油基础研究和战略储备项目“石油专用螺纹量值智能检测及传递技术研究”等项目的支持下，针对石油螺纹计量、检验检测、配套标准存在的关键技术难题，攻关形成了4项试验技术、3套试验装备、以及19项质量评价标准。

主要科技创新点：

一是开发了虚拟紧密距算法，建立了实测数据的数字模型重构技术，突破了石油螺纹传统量值传递方式，首创石油专用螺纹数字化量传技术。

二是开发了数字化螺纹检测系统、高钢级管线环焊缝金相形貌分道次显示技术及图像采集分析装置、缺陷智能检验方法及装置，实现了石油管螺纹、微观组织分析、无损检验的数字化和智能化。

三是制定了高性能石油管的计量、检测及质量评价配套系列标准。建立了“传统技术更迭+数字化创新+质量基础要素融合”特色石油管质量评价体系。

本项目获得授权发明专利10件、授权实用新型专利10件；取得计算机软件著作权8项；制修订国家标准2项，行业/团体标准7项，企业标准10项；在国内外发表学术论文23篇（SCI 6篇、EI 7篇）。过去3年累计产生经济效益20多亿元。项目成果已在长庆油田、西南油气田、青海油田得到推广应用，指导了石油管在油气田现场的质量检验、下井应用以及旧管修复工作；项目成果还在上海宝钢、江苏常宝等国内石油管骨干制造企业完成推广转化。研究成果推动了油气行业向数字化智能化的转型和升级。

## 四、客观评价

### （一）与当前国内外同类技术对比

1 石油专用螺纹数字化量值传递技术：美国PMC、日本黑田精工等掌握了原始量规及地区量规精密制造技术，控制量值传递，但数字化量传技术尚未开展；宝石机采用实体量规量值传递。本项目首创了石油专用螺纹数字化量传技术，虚拟紧密距与实体紧密距误差小于0.04mm。

2 螺纹单项参数数字化检测：美国Gagemaker、西安泰锐等生产的螺纹单项仪测量精度为0.01mm；单项参数检测时间约30秒，本项目成果的测量精度为0.008mm；系统整体测量效率提升30%。

3 石油管微观组织金相形貌智能分析技术：国内外一般采用了硝酸酒精溶液或者苦味酸溶液，无法清晰显示每个焊接道次。本项目可清晰显示环焊缝根焊、热焊、填充焊、盖面焊的焊接道次。

### （二）科技查新结论

陕西省科学技术情报研究院查新结论：

1 未见明确涉及虚拟紧密距计算的方法研究；未见综合采用电感式传感器、单片机、无线数据传输的数字化螺纹检测系统研究。

2 未见高钢级管线环焊缝的宏观金相形貌分道次显示技术及图像分析装置研究。

### （三）课题验收意见

1、《石油专用螺纹量值智能检测及传递技术研究》验收意见：建立了满足石油专用螺纹参数检验要求的智能检测方法，提出石油专用螺纹智能检测系统校准方法。开发的样机在实验室检测中进行了应用，提高了检测效率。

2、《石油管材理化性能评价技术研究》验收意见：开发了石油管材金相组织检测与评定新技术；开发了石油管材焊缝浸蚀与分析新技术与装置，使焊缝形貌清晰准确显示。课题成果提升了实验室检测能力和水平，已应用于国家质检中心日常检测。

3、《回收油套管再制造技术研究及工业化应用》验收意见：完成了回收套管修复再利用特殊螺纹选型及特殊螺纹接头实物评价方法研究及应用。“BJC-II”型特殊螺纹具有优异的连接强度、气密封性和抗粘扣性能。完成了合同规定的阶段研究任务，实现了预期目标。

### （四）第三方评价

1、项目核心成果“数字化螺纹检测系统”获得陕西省工业和信息化厅颁发的《陕西省重点新产品》证书；项目核心成果“数字化螺纹检测系统”获得中国石油集团公司2020年度自主创新重要产品。

2、项目核心成果“高精度校验仪”经中国计量科学院检验校准，完全满足试验测试要求。

3、项目核心成果“高分辨率宏观形貌图像采集分析系统”经西安汉唐分析检测公司检测校准（CNAS），仪器精度完全满足试验测试要求。

（五）本项目获得授权发明专利 10 件、授权实用新型专利 10 件；取得计算机软件著作权 8 项；制修订国家标准 2 项，行业/团体标准 7 项，企业标准 10 项；在国内外发表学术论文 23 篇（SCI 6 篇、EI 7 篇）。

### （六）曾获科技奖励情况

本项目成果获 2022 年度中国石油集团工程材料研究院有限公司科技进步一等奖。

## 五、应用情况和效益

### （一）应用情况

项目成果“石油专用螺纹量值传递技术及智能检测仪器”直接应用于上海宝钢、天津钢管、中海油能源发展公司等生产制造企业，系统整体精度从 0.01mm 提升至 0.008mm，效率整体提升了 30%。通过技术服务的方式，在油田开展理化性能与缺陷检验工作，为长庆油田、西南油气田、青海油田、上海宝钢、江苏常宝检验检测油管、套管、钻具类产品近 300 万吨，检验检测数据 20000 万个，提升了物资检验的检验效率和技术水平。

近 3 年开展了 90 余项石油管失效分析，为油田事故处理和防控措施提供了技术支持。

主要应用单位情况表

| 序号 | 单位名称                   | 应用的技术   | 应用对象及规模              | 应用起止时间    | 单位联系人/电话             |
|----|------------------------|---|----------------------|-----------|----------------------|
| 1  | 中国石油集团工程材料研究院有限公司      | 石油专用螺纹量值传递技术及智能检测仪器、石油管全尺寸及微观组织性能检验检测技术及装置、高性能石油管计量检测配套标准 | 管材质量监督检验；试验技术、装备开发推广 | 2021 年-至今 | 宋寰<br>/029-81887879  |
| 2  | 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司   | 石油管全尺寸及微观组织性能检验检测技术及装置、高性能石油管计量检测配套标准                     | 油田用管的质量检验、下井应用       | 2021 年-至今 | 田青<br>/029-86597932  |
| 3  | 中国石油天然气股份有限公司西南油气油田分公司 | 石油管全尺寸及微观组织性能检验检测技术及装置、高性能石油管计量检测配套标准                     | 油田用管的质量检验、下井应用       | 2021 年-至今 | 陈熙平<br>/028-86014767 |
| 4  | 中国石油天然气股份有限公司青海油田分公司   | 石油管全尺寸及微观组织性能检验检测技术及装置、高性能石油管计量检测配套标准                     | 油田用管的质量检验、下井应用、物资检验  | 2021 年-至今 | 冯洪<br>/0937-8921538  |
| 5  | 江苏常宝普莱森钢管有限公司          | 石油专用螺纹量值传递技术及智能检测仪器、石油管全尺寸及微观组织性能检验检测技术及装置                | 油套管的质量控制、检验检测、产品研发   | 2021 年-至今 | 许雷明<br>/13921022316  |

(二) 经济效益和社会效益

经济效益：

- 1、本项目完成单位中国石油集团工程材料研究院有限公司利用本项目成果开展 6000 余项的石油管质量监督、质量仲裁、型式试验、石油管新产品开发与评价、新试验装备开发及推广等技术服务项目。近三年成果推广收入达到 29600 万元，净利润 2600 万元。
- 2、长庆油田、西南油气田、青海油田应用本成果指导了石油管在油气田现场的质

量检验、下井应用以及旧管修复工作。通过该技术成果的实施，石油管平均寿命延长 2 年，从而起到减少石油管采购量的效果。近三年采购石油管数量节约采购金额 152200 万元。

3、江苏常宝普莱森、上海宝钢应用项目成果相关试验技术、装备、标准等成果，解决了质量控制、检测技术、检测设备、工艺流程等一系列技术难题，近三年获得利润 1600 万元。

计算方式：

新增净利润=技术服务工作量\*单位价格-生产成本-税金及附加-管理费用-企业所得税。

节约采购金额=新技术实施前单位成本（元/吨）\*原计划采购数量-新技术实施后单位成本（元/吨）\*实际采购数量（万吨）。

**社会效益：**通过石油管数字化智能化检测技术的应用，石油管的检测效率和准确性大幅提升，不仅保障了石油和天然气运输的安全性，还降低了环境污染和生态破坏的风险，维护了公共安全。提高了行业检测的自动化水平，减少了对人工操作的依赖，降低了企业的人力成本。延长了石油管的使用寿命，节约了大量资源和费用。项目的成功实施和推广应用，促进了石油管道检测技术的进步和创新。通过制定和推广相关技术标准，提升了行业的整体技术水平，推动了石油和天然气行业向数字化、智能化方向发展，为行业的可持续发展注入了新的活力。综上所述，“石油管数智化检测关键技术研究及应用”项目不仅在技术创新和经济效益方面取得了显著成果，更在提升能源安全、保护环境、节约资源、推动技术进步和促进社会经济发展等方面产生了重要的社会效益。该项目为实现安全、绿色、可持续发展的目标做出了积极贡献。

六、主要知识产权证明目录（限 10 条）

| 序号 | 知识产权类别 | 具体名称         | 国家 | 授权号（标准编号、论文年卷页）    | 授权日期             | 证书编号（标准批准发布部门、期刊名） | 权利人（标准起草单位、论文发表单位）             | 发明人（标准起草人、论文作者）       |
|----|--------|--------------|----|--------------------|------------------|--------------------|--------------------------------|-----------------------|
| 1  | 发明专利   | 一种虚拟紧密距测量方法  | 中国 | ZL 2020104 86470.9 | 2022 年 7 月 5 日   | 528549 7           | 中国石油天然气集团有限公司；中国石油天然气集团公司管材研究所 | 白小亮，余志，樊治海，韩新利，艾裕丰，冯娜 |
| 2  | 发明专利   | 三维螺纹测量仪的校准方法 | 中国 | ZL 2019113 55705.4 | 2021 年 09 月 24 日 | 469701 1           | 中国计量科学研究院                      | 位恒政；王为农；崔剑秋；郭斯宜       |



|   |          |                                   |    |                              |                  |   |                                |                                |
|---|----------|-----------------------------------|----|------------------------------|------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|
|   | 利        |                                   |    |                              |                  |   |                                |                                |
| 3 | 发明专利     | 一种高钢级管线环焊缝的宏观形貌分道次显示方法            | 中国 | ZL 202010006044.0            | 2022 年 6 月 3 日   | 5203504   | 中国石油天然气集团有限公司；中国石油天然气集团公司管材研究所 | 全珂、何小东、樊治海、李为卫、丛深              |
| 4 | 国家标准     | 螺纹量规扫描测量仪校准规范                     | 中国 | JJF 1950-2021                | 2021 年 12 月 28 日 | 国家市场监督管理总局  | 中国计量科学研究院、深圳市中图仪器科技有限公司等       | 王为农；裴丽梅；任国营；位恒政                |
| 5 | 发明专利     | 一种石油管内壁椭圆度测量仪及其测量方法               | 中国 | ZL 202011257383.2            | 2022 年 6 月 3 日   | 5203936   | 中国石油天然气集团有限公司；中国石油天然气集团公司管材研究所 | 余志，何浩华，张益铭，林凯，樊治海，戚东涛，白小亮      |
| 6 | 发明专利     | 一种便携式石油管内壁缺陷测量仪                   | 中国 | ZL 201810307878.8            | 2020 年 1 月 7 日   | 3655875   | 中国石油天然气集团有限公司；中国石油天然气集团公司管材研究所 | 余志                             |
| 7 | 发明专利     | 一种 HFW 钢管焊接接头宏观参数显示方法             | 中国 | ZL201910055119.1             | 2022 年 5 月 10 日  | 5140241   | 中国石油天然气集团有限公司；中国石油天然气集团公司管材研究所 | 全珂，张华，何小东，朱丽霞，丛深               |
| 8 | 计算机软件著作权 | 圆螺纹参数测量系统 V1.0                    | 中国 | 2020SR1074172                | 2020 年 09 月 10 日 | 软著登字第 5952868 号   | 中国石油天然气集团有限公司；中国石油天然气集团公司管材研究所 | 中国石油天然气集团有限公司；中国石油天然气集团公司管材研究所 |
| 9 | 论文       | Analysis and investigation of the | 中国 | Volume1 31, January 2022, 10 | 2021 年 8 月 26 日  | <a href="https://doi.org/10.1016/">https://doi.org/10.1016/</a> | 中国石油天然气集团有限公司；中国石油天然气集团公司管材研究所 | 全珂、赵金兰、刘强等                     |

|    |    |  |    |                                  |                |   |                                |             |
|----|----|--|----|----------------------------------|----------------|---|--------------------------------|-------------|
|    |    | leakage failure of a casing used in a shale gas well   |    | 5891                             |                | i. engf<br>ailana<br>1. 2021<br>. 10589<br>1  |                                |             |
| 10 | 论文 | Analysis and investigation of the leakage failure on the shale gas gathering and transmission pipeline | 中国 | Volume 140, October 2022, 106599 | 2022 年 4 月 6 日 | <a href="https://doi.org/10.1016/j.engfailana.2022.106599">https://doi.org/10.1016/j.engfailana.2022.106599</a> | 中国石油天然气集团有限公司；中国石油天然气集团公司管材研究所 | 全珂、白小亮、樊治海等 |

## 七、主要完成人情况表

| 完成人 | 排名 | 行政职务 | 技术职称 | 工作单位              | 完成单位              | 对本项目贡献  |
|-----|----|------|------|-------------------|-------------------|---|
| 余志  | 1  | 普通人员 | 副高级  | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 项目负责人，负责项目方案研究及技术开发工作，制定具体研究计划方案，设计研究思路，组织实施。<br>具体负责创新点 1 石油专用螺纹量值传递技术及智能检测仪器开发，是本项目主要知识产权第 5 项、第 6 项发明专利的第一发明人，第 1 项发明专利的第二发明人。 |
| 位恒政 | 2  | 普通人员 | 副高级  | 中国计量科学研究院         | 中国计量科学研究院         | 参与创新点 1 石油专用螺纹量值传递技术及智能检测仪器开发，负责创新点 3 高性能石油管的计量、检测及质量评价配套系列标准，是本项目主要知识产权第 2 项发明专利的第一发明人。  |

|     |    |      |     |                      |                      |  |
|-----|----|------|-----|----------------------|----------------------|--|
|     |    |      |     |                      |                      | 人，第4项国家标准的第四起草人。   |
| 仝珂  | 3  | 普通人员 | 正高级 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 具体负责创新点2石油管全尺寸及微观组织性能检验检测技术及装置开发，是本项目主要知识产权第3项、第7项发明专利的第一发明人。      |
| 于卓  | 4  | 副处级  | 副高级 | 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司 | 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司 | 参与创新点1石油专用螺纹量值传递技术及智能检测仪器开发，参与了项目成果在长庆油田分公司应用推广工作。                 |
| 田青  | 5  | 普通人员 | 副高级 | 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司 | 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司 | 具体负责创新点2石油管全尺寸及微观组织性能检验检测技术及装置开发，参与了项目成果在长庆油田分公司应用推广工作（见应用证明）。     |
| 白小亮 | 6  | 正处级  | 正高级 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 参与创新点1石油专用螺纹量值传递技术及智能检测仪器开发，负责项目成果的应用推广工作。是本项目主要知识产权第1项发明专利的第一发明人。 |
| 刘青  | 7  | 普通人员 | 副高级 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 具体负责创新点2石油管全尺寸及微观组织性能检验检测技术及装置开发，参与了项目成果在油田现场应用推广工作。               |
| 裴丽梅 | 8  | 普通人员 | 副高级 | 中国计量科学研究院            | 中国计量科学研究院            | 参与创新点1石油专用螺纹量值传递技术及智能检测仪器开发，是本项目主要知识产权第4项国家标准的第二起草人。               |
| 陈雷  | 9  | 普通人员 | 副高级 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 参与创新点3高性能石油管的计量、检测及质量评价配套系列标准，参与了项目成果在油田现场应用推广工作。                  |
| 吴德彬 | 10 | 普通人员 | 副高级 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 参与创新点3高性能石油管的计量、检测及质量评价配套系列标准，参与了项目成果在油田现场应用推广工作。                  |

## 八、主要完成单位及创新推广贡献

| 序号 | 主要完成单位               | 创新推广贡献   |
|----|----------------------|--|
| 1  | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 作为项目主持单位和主要完成单位，工程材料研究院全面负责项目技术研究工作，主要贡献包括：1）研发了石油专用螺纹量值传递技术及智能检测仪器。2）发明了石油管全尺寸及微观组织性能检验检测技术及装置。3）制定了高性能石油管的计量、检测及质量评价配套系列标准。建立了“传统技术更迭+数字化创新+质量基础要素融合”特色石油管质量基础设施关键评价体系。进行了大量的组织协调以及应用推广工作。近三年开展 6000 余项的石油管质量监督、质量仲裁、型式试验、石油管新产品开发与评价、新试验装备开发及推广等技术服务项目。项目成果已直接应用于长庆油田、西南油气田、青海油田等单位，成为石油管质量安全领域的重要技术支撑。 |
| 2  | 中国计量科学研究院            | 作为主要完成单位，中国计量科学研究院全面参与项目研究工作，主要贡献包括负责项目成果在计量领域的应用推广工作，在长度计量方面做了大量的试验研究，测试数据为创新点 1 石油专用螺纹量值传递技术模型的建立提供了技术支持，为创新点 3 高性能石油管的计量、检测及质量评价配套系列标准做出了贡献。  |
| 3  | 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司 | 作为主要完成单位，长庆油田分公司全面参与项目研究工作，主要贡献包括负责项目成果在长庆油田分公司开展应用推广工作，开展了油田用管质量检验、下井应用技术及相关标准制定的研究工作，对创新点 1、2 做出了贡献。   |

## 九、完成人合作关系说明

本项目由中国石油集团工程材料研究院有限公司、中国计量科学研究院以及中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司等 3 家单位组成的科研团队协作完成，充分实现了优势互补、协同攻关的合作模式。项目组成员相互协作共同完成对本项目的研究工作。

项目完成人余志、仝珂、白小亮、刘青、陈雷、吴德彬为中国石油集团工程材料研究院有限公司的员工，是“石油管数智化检测关键技术研究及应用”项目团队的核心技术人员，已进行了长期的合作。项目完成人位恒政、裴丽梅为中国计量科学研究院的员工，全面参与项目研究工作，主要贡献负责项目成果在计量领域的应用推广工作，在长度计量方面做了大量的试验研究，测试数据为创新点 1 石油专用螺纹量值传递技术模型的建立提供了技术支持、为创新点 3 高性能石油管的计量、检测及质量评价配套系列标准做出了贡献。项目完成人于卓、田青为中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司

的员工，负责项目成果在长庆油田开展应用推广工作，指导了石油管在油气田现场的旧管修复、质量检验、下井应用及相关标准制定，对创新点 1、2 做出了贡献。

完成人余志是本项目的负责人，负责项目方案研究及技术开发工作，制定具体研究计划方案，设计研究思路，组织实施。具体负责创新点 1 石油专用螺纹量值传递技术及智能检测仪器开发，是本项目主要知识产权第 5 项、第 6 项发明专利的第一发明人，第 1 项发明专利的第二发明人。

完成人位恒政参与创新点 1 石油专用螺纹量值传递技术及智能检测仪器开发，负责创新点 3 高性能石油管的计量、检测及质量评价配套系列标准，是本项目主要知识产权第 2 项发明专利的第一发明人，第 4 项国家标准的第四起草人。

完成人仝珂具体负责创新点 2 石油管全尺寸及微观组织性能检验检测技术及装置开发，是本项目主要知识产权第 3 项、第 7 项发明专利的第一发明人。

完成人于卓参与创新点 1 石油专用螺纹量值传递技术及智能检测仪器开发，参与了项目成果在长庆油田分公司应用推广工作。

完成人田青参与参与创新点 2 石油管全尺寸及微观组织性能检验检测技术及装置开发，参与了项目成果在长庆油田分公司应用推广工作。

完成人白小亮参与创新点 1 石油专用螺纹量值传递技术及智能检测仪器开发，负责项目成果的应用推广工作。是本项目主要知识产权第 1 项发明专利的第一发明人。

完成人刘青参与参与创新点 2 石油管全尺寸及微观组织性能检验检测技术及装置开发，参与了项目成果在油田现场应用推广工作。

完成人裴丽梅参与创新点 1 石油专用螺纹量值传递技术及智能检测仪器开发，是本项目主要知识产权第 3 项国家标准的第二起草人。

完成人陈雷具体参与创新点 3 高性能石油管的计量、检测及质量评价配套系列标准，参与了项目成果在中国石油天然气集团有限公司的应用推广工作，指导了石油管在油气田现场的旧管修复、质量检验以及下井应用。

完成人吴德彬参与创新点 3 高性能石油管的计量、检测及质量评价配套系列标准，参与了项目成果在中国石油天然气集团有限公司的应用推广工作，指导了石油管在油气田现场的旧管修复、质量检验以及下井应用。

完成人排名严格按照对成果的实际贡献大小依次排名。经项目组成员充分协商，按完成人承担完成的研究任务、科技创新点贡献、推广应用工作量等综合实际绩效依次排名，各完成人及所在单位一致同意其排名。

## 科技进步奖公示项目 21

### 一、项目名称

天然气站场管道及设施服役安全关键技术研究及应用

### 二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省科学技术厅

提名意见：该项目针对站场工艺管道及设施在温度、振动等复杂工况下腐蚀、环焊缝安全控制等技术难题，突破了站场工艺管道和环焊缝温度和振动耦合损伤失效机理、风险评估、缺陷检测、安全评价和维修维护等完整性关键技术，取得了 5 项创新成果，为站场工艺管道在温度、振动等复杂工况耦合下的失效预防和控制提供了理论和技术基础，部分研究成果经专家鉴定达到国际领先水平。项目发表论文 26 篇（SCI/EI 9 篇），授权专利 10 件（其中发明专利 7 件，实用新型专利 3 件），编制软件 4 件，发布标准 6 项，研究成果已在研究成果已经在西气东输一线、二线、三线、陕京管线、中缅管道、靖西三线等 60 余座天然气站场应用，为站场工艺管道的工艺选型、施工优化、定期检验及维修维护提供技术支撑，累计获得经济效益 1.28 亿元。同时，研究成果的推广应用有效降低了天然气站场管道失效事故概率，有力保障了管道服役安全和平稳运行，社会效益更加显著。研究成果进一步丰富和完善了天然气管道失效控制和完整性评价技术，推动管道安全工程技术进步。

拟提名该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖。

### 三、项目简介

天然气场站作为天然气输配系统中的关键环节，具备天然气的储配、调度分流、工艺处理等功能。天然气站场管道及设施繁杂，运行工况复杂，环焊缝具有不同材质对接、

壁厚差异大、连头口多、结构复杂等特点，特别是在压缩机的影响下，大量管线及管件处于高温和振动状态，完整性管理难度较大，导致近年来失效事故多发，严重影响天然气输送安全。目前迫切需要解决以下问题：1）压缩机出口管道防腐层损伤失效机理尚不明确；2）站场工艺管线环焊缝工况多样，失效因素多样，难以预测失效高风险点，导致管理工作缺乏重点；3）不同材质、不等壁厚对接环焊缝失效机理尚不明确，缺乏可靠的检测评价技术；4）环焊缝在应力-振动耦合疲劳服役条件下的寿命预测模型尚不完善；5）目前管道缺陷修复技术只适用于常规的直管段，不适用于站场三通、弯头等管件结构的缺陷修复，急需填补空白。

本项目为国家重点研发计划《油气管道及储运设施损伤致灾机理与演化规律研究》、中国博士后科学基金《天然气站场内不同材质对接环焊缝缺陷容限研究》、中石油科学研究与技术开发项目《油气管道损伤致灾机理与演化规律研究》、西部管道科研项目《压缩机进出口管线防腐评价项目》、北京管道科研项目《压缩机出口管道环焊缝振动疲劳寿命预测技术》等课题主要研究成果集成。

针对站场工艺管道和管件在温度、振动和环境等复杂工况下外防腐层、环焊缝和厚壁管件失效机理和服役安全等技术难题，项目突破了站场工艺管道和设施失效机理、风险评估、缺陷检测、安全评价和维修维护等完整性关键技术，取得了 5 项创新成果，部分研究成果经专家鉴定达到国际领先水平：

1、在国内首次搭建了温度-振动-环境多因素耦合试验平台，揭示了站场典型防腐层腐蚀介质渗融-微观缺陷扩展-附着力衰减失效机理和损伤规律，建立了埋地管道 FBE 和 3PE 两种典型防腐层剩余寿命预测模型，在西一线、西二线等站场应用效果良好，专家评价：成果达到国际领先水平。

2、在国内首次建立了以材料性能-焊接缺陷-载荷为主的环焊缝失效风险评价指标体系，自主开发了历史失效案例数据库和机器学习算法，形成了多源数据驱动的油气管道环焊缝失效行为智能预测模型和软件。在陕京管道、中缅管道、靖西三线等多座站场进行了推广应用，避免了多起恶性事故的发生。

3、提出了环焊接头力学性能微区表征方法，揭示了站场不同材质、不等壁厚对接环焊缝强韧性分布规律和断裂机理，建立了不同特征区域的缺陷容限和韧性控制指标；制定了不等壁厚对接环焊缝最优射线和超声融合探伤工艺和检测流程，为西二线和西三线站场环焊缝隐患排查提供了技术支撑。

4、在国内首次建立了基于振动载荷-缺陷-结构等主因素的压缩机进出口环焊缝半定量风险评价方法；研发了应力-振动疲劳工况模拟试验系统，掌握了典型环焊缝疲劳裂纹扩展规律，建立了环焊缝振动疲劳寿命预测模型和评价方法，提出了削减激振力强度和阻尼调节相结合的延寿措施。在陕京管道 15 座站场进行了推广应用。

5、基于弹塑性理论和全截面屈服准则，建立了异形结构管件的环氧钢套筒设计方法和修复技术，全尺寸试验验证表明修复效果良好，编制了修复质量飞检评价指标体系

和检验技术规范，为西气东输站内隐患整改提供了技术支撑。

项目发表论文 26 篇（SCI/EI 9 篇），授权专利 10 件（其中发明专利 7 件，实用新型专利 3 件），编制软件 4 件，发布标准 6 项。研究成果已在研究成果已经在西气东输一线、二线、三线、陕京管线、中缅管道、靖西三线等 60 余座天然气站场应用，为站场工艺管道的工艺选型、施工优化、定期检验及维修维护提供技术支撑，累计获得经济效益 1.28 亿元。同时，研究成果的推广应用有效降低了天然气站场管道失效事故概率，有力保障了管道服役安全和平稳运行，社会效益更加显著。研究成果进一步丰富和完善了天然气站场管道及设施失效控制和完整性评价技术，推动管道安全工程技术进步。

#### 四、客观评价

天然气站场管道及设施繁杂，运行工况复杂，环焊缝具有不同材质对接、壁厚差异大、连头口多、结构复杂等特点，特别是在压缩机的影响下，大量管线及管件处于高温和振动状态，完整性管理难度较大，导致近年来失效事故多发，严重影响天然气输送安全。本项目在国家重点研发计划《油气管道及储运设施损伤致灾机理与演化规律研究》等 5 项纵横向课题资助下，针对站场工艺管道在温度、振动等复杂工况下腐蚀、环焊缝安全控制等技术难题，突破了站场工艺管道和环焊缝温度和振动耦合损伤失效机理、风险评估、缺陷检测、安全评价和维修维护等完整性关键技术，取得了以下创新成果：

（1）搭建了温度-振动-环境多因素耦合试验平台，揭示了站场典型防腐层腐蚀介质渗融-微观缺陷扩展-附着力衰减失效机理和损伤规律，建立了埋地管道 FBE 和 3PE 两种典型防腐层剩余寿命预测模型。（2）在国内首次建立了以材料性能-焊接缺陷-载荷为主的环焊缝失效风险评价指标体系，自主开发了历史失效案例数据库和机器学习算法，形成了多源数据驱动的油气管道环焊缝失效行为智能预测模型和软件。（3）提出了环焊接头力学性能微区表征方法，揭示了站场不同材质、不等壁厚对接环焊缝强韧性分布规律和断裂机理，建立了不同特征区域的缺陷容限和韧性控制指标；制定了不等壁厚对接环焊缝最优射线和超声融合探伤工艺和检测流程，为西二线和西三线站场环焊缝隐患排查提供了技术支撑。（4）在国内首次建立了基于振动载荷-缺陷-结构等主因素的压缩机进出口环焊缝半定量风险评价方法；研发了应力-振动疲劳工况模拟试验系统，掌握了典型环焊缝疲劳裂纹扩展规律，建立了环焊缝振动疲劳寿命预测模型和评价方法，提出了削减激振力强度和阻尼调节相结合的延寿措施。（5）基于弹塑性理论和全截面屈服准则，建立了异形结构管件的环氧钢套筒设计方法和修复技术，全尺寸试验验证表明修复效果良好，编制了修复质量飞检评价指标体系和检验技术规范，为西气东输站内隐患整改提供了技术支撑。

项目发表论文 26 篇（SCI/EI 9 篇），授权专利 10 件（其中发明专利 7 件，实用新型专利 3 件），编制软件 4 件，发布标准 6 项。研究成果已在研究成果已经在西气东输一线、二线、三线、陕京管线、中缅管道、靖西三线等 60 余座天然气站场应用，为站场工艺管道的工艺选型、施工优化、定期检验及维修维护提供技术支撑，累计获得经济



效益 1.28 亿元。同时，研究成果的推广应用有效降低了天然气站场管道失效事故概率，有力保障了管道服役安全和平稳运行，社会效益更加显著。研究成果进一步丰富和完善了天然气管道失效控制和完整性评价技术，推动管道安全工程技术进步。

项目在技术创新性、经济效益、社会效益等方面成果显著，均得到业界专家和业主的认可。

2021 年 03 月 19 日, 中国石油天然气集团公司管材研究所在西安组织专家对“十三五”国家重点研发计划课题“油气管道及储运设施损伤致灾机理与演化规律研究”(课题编号: 2016YFC0802101)创新成果进行了评价。专家组审阅了相关资料、听取了课题组汇报, 经质询和讨论, 形成专家意见。其中涉及到本项目的创新点有两条: (1) 建立了温度和振动耦合作用下防腐层损伤预测模型, 揭示了防腐层温度振动耦合作用下的微观失效机制; (2) 建立了温度和振动耦合作用防腐层损伤等试验平台, 提升了试验研究能力。专家组认为, 压缩机出口埋地管道防腐层温度及振动耦合作用损伤预测方法达到国际领先水平。

2024 年经陕西省科学技术情报研究院对本项目的 5 个创新点进行查新, 结果表明在以下方面均具有创新性: (1) 通过温度和振动耦合作用试验, 揭示了熔结环氧涂层(FBE)原始损伤扩展的微观失效机理; (2) 建立了振动耦合环境下的站场压缩机进出口管线环焊缝振动疲劳的半定量风险评估模型; (3) 通过微区力学性能试验揭示了站场工艺管道变壁厚对接环焊缝的强韧性分布规律; (4) 通过应力-振动疲劳试验, 建立了压缩机出口管道环焊缝疲劳寿命预测模型; (5) 采用环氧套筒修复技术, 实现站场异形管件的分级修复补强。

该项目成果获 2023 年中国石油集团工程材料研究院有限公司科技进步一等奖。

五、应用情况和效益

(一) 应用情况

项目成果已经在西气东输一线、二线和三线 30 多座站场、陕京一线、二线和三线 15 座站场、陕西省天然气公司靖西三线等 20 多座站场进行应用。具体情况如下表所示。

| 主要应用单位情况表 |                  |  |                       |               |                      |
|-----------|------------------|--|-----------------------|---------------|----------------------|
| 序号        | 单位名称             | 应用技术   | 应用对象及规模               | 应用起止时间        | 单位联系人/电话             |
| 1         | 国家管网集团西部管道有限责任公司 | 埋地管道防腐层剩余寿命评价技术、不等壁厚对接环焊缝缺陷容限评价及无损检测技术、异形环氧钢套筒修复技术 | 西气东输一线、二线、三线沿线 30 座站场 | 2019 年-2023 年 | 周会萍<br>/0991-7561367 |
| 2         | 国家管网集            | 应力-振动疲劳工况环焊  | 陕京管道                  | 2021          | 周永涛                  |

|   |              |  |               |               |                      |
|---|--------------|--|---------------|---------------|----------------------|
|   | 团北京管道有限公司    | 缝风险评价和疲劳寿命评价及延寿技术、多源数据驱动的油气管道环焊缝失效行为智能预测技术 | 15 座站场        | 年-2023 年      | /010-84884433        |
| 3 | 陕西省天然气股份有限公司 | 多源数据驱动的油气管道环焊缝失效行为智能预测技术                   | 靖西三线管道 20 座站场 | 2020 年-2023 年 | 孟鑫伟/<br>029-86156291 |

### 1、国家管网西部管道公司

2019-2023 年，国家管网集团西部管道有限责任公司委托中国石油集团工程材料研究院开展西气东输一线、二线沿线 30 座站场的埋地管道防腐层剩余寿命评价技术研究。针对埋地管道防腐层损坏工程问题，根据管道服役环境、工况、管道及防腐层材料情况，研发搭建多因素耦合加载试验平台，进行温度-振动-环境多因素耦合条件下的试验和理论研究，获得了不同介质、温度下，FBE 和 3PE 两种典型防腐层的性能退化规律、微观缺陷演变机制，据此确定了防腐层选型原则和寿命预测模型，形成了站场防腐层选型技术规范，使 30 座站场防腐层年均损坏维修次数减少了 90%，减少开挖维修年均 50 余次，避免管道泄漏事故 5 起。

建立的不等壁厚对接环焊缝缺陷容限评价及无损检测技术，在西气东输一线、二线、三线检测评价缺陷点缺陷点 920 个点，避免管道泄漏事故 12 起，修复 176 处。

### 2、国家管网北京管道公司

2021 年-2023，在陕京管道一、二、三线沿线阳曲压气站、应县压气站、榆林压气站站、兴县压气站站、阳曲压气站站、石家庄压气站站等 15 座站场应用应力-振动疲劳工况环焊缝风险评价和疲劳寿命评价及延寿技术、多源数据驱动的油气管道环焊缝失效行为智能预测技术，预测发现压缩机出口埋地管道防腐层严重损伤隐患 5 处，应用振动工况下环焊缝的风险评估技术筛选高风险环焊缝 100 余道，应用变壁厚不同材质对接环焊缝缺陷检测技术检测环焊缝 150 余道，应用变壁厚不同材质对接环焊缝的缺陷容限与安全评价成果评价缺陷 100 余处，应用振动工况下环焊缝缺陷剩余寿命预测技术评价缺陷 10 余处，累计发现重大隐患 8 处。应用异形环氧钢套筒排除隐患 8 处。累计预防安全事故 8 起，经济效益 1.28 亿元。

### 3、陕西省天然气股份有限公司

2020 年-2023 年，多源数据驱动的油气管道环焊缝失效行为智能预测技术在靖西三线 20 座站场应用，预测发现高风险环焊缝 120 余道，避免事故 9 起。

## （二）经济效益和社会效益

### 1、经济效益：

北京管道有限公司所属的陕京管道系统是我国第三大天然气管道系统，是“陕西、

内蒙古、山西、河北、北京、天津”三省两市一区沿线的保障线，事关 70 多座城市、1000 多家大中型企业以及约 1.2 亿人的用气保障，地位特殊、责任重大。为了进一步降低天然气站场设施风险水平，排查安全隐患，为复杂工况下设施的安全服役提供理论基础和技术依据，北京管道公司与中国石油集团工程材料研究院有限公司联合攻关，围绕压缩机进出口管道防腐层损伤机理、站内变壁厚不同材质对接环焊缝缺陷检测及安全评价、振动-预应力工况下环焊缝缺陷的疲劳寿命预测及异形环氧套筒修复等方面开展深入系统研究，形成了多项关键技术成果，并将成果在陕京管道沿线站场进行了应用。

截止 2023 年底，该项目成果在陕京一、二、三线沿线 15 座站场进行应用。预测发现压缩机出口埋地管道防腐层严重损伤隐患 5 处，应用振动工况下环焊缝的风险评估技术筛选高风险环焊缝 100 余道，应用变壁厚不同材质对接环焊缝缺陷检测技术检测环焊缝 150 余道，应用变壁厚不同材质对接环焊缝的缺陷容限与安全评价成果评价缺陷 100 余处，应用振动工况下环焊缝缺陷剩余寿命预测技术评价缺陷 10 余处，累计发现重大隐患 8 处。应用异形环氧钢套筒排除隐患 8 处。

成果 3 年来累计预防安全事故 8 起。每起停输减少收益为 4 天×300 万元/天=1200 万元，恢复供气成本约 200 万元，间接经济损失 200 万元，合计减少经济损失 8 起×（1200+200+200）万元/起=1.28 亿元，社会效益更加显著。

2、社会效益：

本项目针对站场工艺管道及设施在温度、振动等复杂工况下腐蚀、环焊缝安全控制等技术难题，突破了站场工艺管道和环焊缝温度和振动耦合损伤失效机理、风险评估、缺陷检测、安全评价和维修维护等完整性关键技术，对解决环境问题、推动行业发展等方面做出了重要贡献。

在解决环境问题方面，在国内首次建立了压缩机出口管道环焊缝疲劳寿命预测模型和评价方法，建立了站场三通、弯头等管件的异形环氧套筒修复补强技术，发现大量环焊缝振动疲劳问题，通过修复手段降低了站场管道及设施失效事故率，从而间接减少了管道事故所造成的环境污染、人员伤亡和财产损失。

在推动行业发展方面，针对站场工艺管道及设施在温度、振动等复杂工况下腐蚀、环焊缝安全控制提出关键问题进行科学及工程研究，涉及的学科种类繁多，在项目研究过程中，积极与各行业专家之间进行学术交流，互通有无，长短互补，为解决本行业问题提供了更多的创新性研究思路及方法，促进了跨行业交流。

六、主要知识产权证明目录（限 10 条）

| 序号 | 知识产权类别 | 具体名称       | 国家 | 授权号（标准编号、论文年卷页）  | 授权日期   | 证书编号（标准批准发布部门、期刊名） | 权利人（标准起草单位、论文发表单位） | 发明人（标准起草人、论文作者） |
|----|--------|------------|----|------------------|--------|--------------------|--------------------|-----------------|
| 1  | 发明专    | 天然气场站压缩机出口 | 中国 | ZL202010997894.1 | 2023 年 | 5734251            | 中国石油天              | 聂海亮；马卫          |

|   |      |                          |    |                   |                  |         |                              |   |
|---|------|--------------------------|----|-------------------|------------------|---------|------------------------------|---|
|   | 利    | 管道防腐层服役可靠性预测方法           |    |                   | 2 月 10 日         |         | 然气集团公司、中国石油天然气集团公司管材研究所      | 锋; 任俊杰; 王珂; 党伟; 曹俊; 宋恩鹏; 罗金恒; 赵新伟; 霍春勇      |
| 2 | 发明专利 | 一种焊缝特征区域变形损伤演化规律实验方法     | 中国 | ZL202010785545. 3 | 2023 年 4 月 25 日  | 5915180 | 中国石油天然气集团公司、中国石油天然气集团公司管材研究所 | 聂海亮; 马卫锋; 王珂; 曹俊; 党伟; 任俊杰; 宋恩鹏罗金恒; 赵新伟; 霍春勇 |
| 3 | 发明专利 | 一种管道焊缝微区拉伸试样加工及测试方法      | 中国 | ZL202010323039. 2 | 2023 年 4 月 25 日  | 5916161 | 中国石油天然气集团公司、中国石油天然气集团公司管材研究所 | 聂海亮; 马卫锋; 王珂; 任俊杰; 曹俊; 党伟; 宋恩鹏; 罗金恒; 赵新伟    |
| 4 | 发明专利 | 一种埋地含缺陷管道承受极限载荷评估方法      | 中国 | ZL202011376691. 7 | 2022 年 12 月 02 日 | 5622007 | 中国石油天然气集团公司、中国石油天然气集团公司管材研究所 | 曹俊; 马卫锋; 王珂; 任俊杰; 聂海亮; 罗金恒; 赵新伟; 霍春勇        |
| 5 | 发明专利 | 绘制各向异性材料断裂成形极限图的方法及其使用方法 | 中国 | ZL 20201053920. 5 | 2023 年 05 月 26 日 | 5996877 | 中国石油天然气集团公司、中国石油天然气集团公司管材研究所 | 曹俊; 马卫锋; 王珂; 任俊杰; 聂海亮; 李付国; 罗金恒 赵新伟         |
| 6 | 发明专利 | 一种使用环氧钢套筒修复管道效果的评价方法     | 中国 | ZL201910901482. 0 | 2022 年 07 月 05 日 | 5280179 | 中国石油天然气集团公司、中国石油天然气集团公司管材研究所 | 任俊杰; 马卫锋; 王珂; 罗金恒; 聂海亮; 曹俊; 赵新伟             |

|   |      |  |    |                                     |                     |                      |  |   |
|---|------|--|----|-------------------------------------|---------------------|----------------------|--|---|
| 7 | 发明专利 | 一种管道环焊缝缺陷安全评价方法  | 中国 | ZL201910023680.1                    | 2021 年<br>3 月 30 日  | 4331558              | 中国石油天然气集团公司、中国石油天然气集团公司管材研究所   | 王珂；罗金恒；马卫锋；李丽锋；任俊杰  |
| 8 | 论文   | The anti - Temperature-vibration properties of viscoelastic anticorrosive tape | 中国 | Petroleum Science 19(2022)2413-2419 | 2022 年<br>11 月 16 日 | Petroleum Science 19 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司  | 聂海亮，马卫锋，胡晓威，党伟，任俊杰，王珂，曹俊，姚添，梁晓斌   |
| 9 | 标准   | 管线钢环焊接头微区试验方法 第 1 部分：拉伸试验 T/CSTM 00578.1—2023                                  | 中国 | T/CSTM 00578.1-2023                 | 2023 年<br>11 月 17 日 | 中关村材料试验技术联盟          | 中国石油集团工程材料研究院有限公司、西北工业大学、陕西省特种设备检验检测研究院、陕西省天然气股份有限公司、中国石油天然气股份有限公司浙江油田分公司、宝鸡钢管公司、中国特种设备安全与节能促进会、中国石油天然气管道科学研究院有限公司、国家管 | 聂海亮、马卫锋、任俊杰、王珂、党伟、姚添、梁晓斌、贾海东、郝凤本、毛颖、吴驰、鲁磊、彭云超、侯兵、霍春勇、袁港、祝少华、徐晓林、李烨铮、刘宇、张晓明、王瑜、黄呈帅、张巧生 |

|    |          |                         |    |               |                  |                 |   |                             |
|----|----------|-------------------------|----|---------------|------------------|-----------------|---|-----------------------------|
|    |          |                         |    |               |                  |                 | 网集团西部管道有限责任公司、国家管网集团东部原油储运有限公司、长庆工程设计有限公司 |                             |
| 10 | 计算机软件著作权 | 基于历史大数据的管道环焊缝失效风险智能预测软件 | 中国 | 2022SR0080868 | 2021 年 10 月 14 日 | 软著登字第 9035067 号 | 中国石油天然气集团有限公司                             | 马卫锋，王珂，姚添，曹俊，任俊杰，聂海亮，党伟，梁晓斌 |

七、主要完成人情况表

| 完 成 人 | 排名 | 行政职务 | 技术职称   | 工作单位              | 完成单位              | 对本项目贡献   |
|-------|----|------|--------|-------------------|-------------------|--|
| 马卫锋   | 1  | 所长   | 正高级工程师 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 担任项目组长，负责项目的总体方案制定及具体实施，对创新点 1. 2. 3. 4. 5 均做出贡献。主要解决了站场温度和振动耦合作用下防腐层损伤预测、环焊缝振动疲劳风险评估、不等壁厚环焊缝检测、环焊缝预应力-振动疲劳寿命预测、异形环氧套筒修复技术问题和试验平台搭建。 |
| 聂海亮   | 2  | 无    | 高级工程师  | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 负责搭建温度和振动耦合作用试验平台，建立温度和振动耦合作用下防腐层损伤预测、开展异形环氧套筒修复模拟仿真。对创新点 1. 5 均做出贡献。  |
| 任俊杰   | 3  | 无    | 高级工程师  | 中国石油集团工程材料研究院有限   | 中国石油集团工程材料研究院有限   | 负责识别环焊缝振动疲劳风险因素，建立风险评估方法，搭建环焊缝预应力-振动疲劳试验平台、建立  |

|     |    |     |        |                   |                   |  |
|-----|----|-----|--------|-------------------|-------------------|--|
|     |    |     |        | 公司                | 公司                | 疲劳寿命预测模型。对创新点 2.4 均做出贡献。   |
| 周顺  | 4  | 无   | 工程师    | 国家管网集团北京管道有限公司    | 国家管网集团北京管道有限公司    | 参与识别环焊缝振动疲劳风险因素和风险评估方法应用、开展异形环氧套筒修复技术现场应用。对创新点 2.5 做出贡献。                   |
| 王珂  | 5  | 无   | 正高级工程师 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 参与建立了压缩机出口环焊缝振动疲劳半定量风险评估方法，并提出了压缩机进出口管线环焊缝的风险控制措施。对创新点 2 做出贡献。             |
| 党伟  | 6  | 无   | 高级工程师  | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 参与研发了压缩机出口应力、振动疲劳工况模拟试验平台，和建立了压缩机出口管道环焊缝疲劳寿命预测模型和评价方法。对创新点 4 做出贡献。         |
| 梁晓斌 | 7  | 无   | 高级工程师  | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 提出了不等壁厚对接环焊缝射线无损检测的双胶片技术和薄壁侧补偿厚度曝光对比技术。对创新点 3 做出贡献。                        |
| 曹俊  | 8  | 无   | 高级工程师  | 北京航空航天大学宁波创新研究院   | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 开展站场不同材质、不等壁厚对接环焊缝强韧性分布规律和断裂机理。对创新点 3 做出贡献。                                |
| 武玮  | 9  | 无   | 副教授    | 西北大学              | 西北大学              | 参与识别环焊缝振动疲劳风险因素和建立了压缩机出口环焊缝振动疲劳半定量风险评估方法，对创新点 2 做出贡献。                      |
| 蔡克  | 10 | 副主任 | 高级工程师  | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 参与建立站场三通、弯头等管件的异形环氧套筒修复补强技术和异型环氧钢套筒分级修复方法，异形环氧套筒修复技术问题和试验平台搭建。对创新点 5 做出贡献。 |

## 八、主要完成单位及创新推广贡献

| 序号 | 主要完成单位            | 创新推广贡献  |
|----|-------------------|---|
| 1  | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 主要负责总体技术方案的制定，技术问题分析，试验平台搭建可行性分析，技术路线的确定。建立站场工艺管道和环焊缝温度和振动耦合损伤失效机理、风险评估、缺陷检测、安全评价和维修维护等 5 项关键技术，搭建了试验平台，协调各合作单位的分工，合理配置资源，对全面完成项目预期工作目标起到了决定性的作用。 |
| 2  | 西北大学              | 协助第 1 完成单位完成相关技术的总体设计与研发工作，参与建立了环焊缝振动疲劳半定量风险评估方法，参与开展站场不同材质、不等壁厚对接环焊缝强韧性分布规律和断裂机理研究，保证项目的顺利进行。  |
| 3  | 国家管网集团北京管道有限公司    | 协助第 1 完成单位完成相关技术的总体设计与研发工作，提供了项目现场问题调查和技术路线把关，参与环焊缝振动疲劳风险评估和异形环氧套筒修复技术开发、开展项目研究成果的现场应用。   |

## 九、完成人合作关系说明

### 完成人合作关系说明

2017 年至 2022 年，中国石油集团工程材料研究院有限公司马卫锋、聂海亮、任俊杰、王珂、党伟、曹俊等人员开展压缩机出口管线防腐层、环焊缝在温度振动耦合下的失效机理及测试方法研究，并申请“天然气场站压缩机出口管道防腐层服役可靠性预测方法”、“一种焊缝特征区域变形损伤演化规律实验方法”、“一种管道焊缝微区拉伸试样加工及测试方法”等 3 项发明专利。

2017 年至 2022 年，中国石油集团工程材料研究院有限公司马卫锋、聂海亮、任俊杰、王珂、曹俊等人员开展站场埋地管道极限承载能力及修复效果评价技术研究，并申请“一种埋地含缺陷管道承受极限载荷评估方法”、“绘制各向异性材料断裂成形极限图的方法及其使用方法”、“一种使用环氧钢套筒修复管道效果的评价方法”等 3 项发明专利。

2020 年至 2022 年，中国石油集团工程材料研究院有限公司马卫锋、任俊杰、王珂等人员开展站场环焊缝缺陷评价研究，并申请发明专利“一种管道环焊缝缺陷安全评价方法”。

2020 年至 2022 年，中国石油集团工程材料研究院有限公司马卫锋、聂海亮、任俊杰、王珂、党伟、曹俊、梁晓斌等人员开展压缩机出口管线防腐层选型及环焊缝接头失效智能预测技术研究，并发表 SCI 论文“The anti-Temperature-vibration properties of viscoelastic anticorrosive tape”，合著 ASTM 标准“管线钢环焊接头微区试验方



法 第 1 部分：拉伸试验 T/CSTM 00578.1—2023”，合作申请软件著作权“基于历史大数据的管道环焊缝失效风险智能预测软件”。

2020 年至 2021 年，中国石油集团工程材料研究院有限公司马卫锋、王珂、蔡克与国家管网集团北京管道有限公司周顺、西北大学武玮共同立项并完成“压缩机出口管道环焊缝振动疲劳寿命预测技术”项目研究及应用。

## 科技进步奖公示项目 22

### 一、项目名称

页岩油气井复杂压裂套管变形预防技术及工业化应用

### 二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省科学技术厅

提名意见：项目围绕我国非常规油气工业化开发以来井筒完整性问题突出的特征，形成了页岩油气井复杂压裂套管变形预防技术及工业化应用。明确了页岩油气井复杂压裂套管变形的原因，明晰了套管变形的主要模式，确定了高参数水利压裂导致页岩储层滑移是套管变形的主控因素，揭示了套管剪切变形的微观和宏观机理。自主设计研制了国际首台套非常规油气井套管柱模拟试验系统，实现了地层剪切载荷、非均匀外挤载荷、温度内压循环载荷、轴向拉压载荷、扭矩等复合工况套管柱-水泥环系统性能模拟试验能力。基于反演方法确定了地层滑移边界条件，创新性的提出了井筒协调变形的套管变形预防新技术，在西南油气田、长庆油田、延长油田和新疆油田工程试验 230 井次，套变预防效果良好，实现了工业化推广。建立了页岩油气井全生命周期的套管柱选材及工况适用性评价技术，制订了国家标准，编译形成了专业软件，为页岩油气井套管柱设计选用及评价提供技术依据，填补国内外相关领域的技术空白，保障了页岩油气井筒完整性，助力页岩油气资源高质量建产。

项目获得国家授权发明专利 18 件、实用新型专利 3 件，登记软件著作权 3 项，制订标准 4 项，发表论文 19 篇，成果推广应用效益 13.0 亿元。

拟提名该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖。

### 三、项目简介

在当前全球能源结构转型大背景下，页岩油气作为一种重要的非传统能源，其开采与利用已在全球范围内引发了能源革命。美国作为页岩油气的先行者，其技术突破和产业化实践为全球能源市场带来了深远的影响。我国页岩油气资源储量巨大，分布广泛，具有巨大的开发潜力和经济价值。大规模体积压裂是页岩油气开发的重要手段，高参数的水力压裂易导致套管变形，变形后的套管影响桥塞等工具通过，压裂段数减少，降低了单井的产量。对比国内外页岩油气开采历程，复杂压裂套管变形问题国内外均持续存在，国外页岩储层物性好单井产量大，套变对产量的影响较小；而国内页岩储层厚度小，单井产量小，套变对产能的影响巨大。建立页岩油气井复杂压裂套变预防新技术，为保障页岩油气井全生命周期井筒完整性、页岩油气高效建产提供针对性技术依据，推动页岩油气产业的快速发展意义重大。主要成果如下：

1、根据套管变形井测井数据，基于室内全尺寸验证校核了套管变形量，确定了套管变形的剪切和非均匀外挤模式；系统梳理了影响套管变形的因素，确定了高参数水力压裂是导致套管变形的主控因素；通过理论方法、数值仿真方法和试验方法揭示了套管柱剪切变形机理。

2、自主设计研制了国际首台套非常规油气井套管柱模拟试验系统，实现了地层剪切载荷、非均匀外挤载荷、温度内压循环载荷、轴向拉压载荷、扭矩等复合工况套管柱-水泥环系统性能模拟试验能力；实现室温~400℃载荷/位移/速率控制、1000t 拉/压、200MPa 内压、1200t 径向载荷、100mm 径向位移、40kN.m 扭矩复合加载能力，填补了国内外技术空白。

3、依托非常规油气井套管柱模拟试验系统，根据套变井修正后的套变数据，反演确定了页岩滑移边界条件；基于反演方法确定了页岩储层滑移的边界条件，创新性的提出了通过水泥环改性的井筒协调变形的套管变形预防新技术，在西南油气田、长庆油田、延长油田和新疆油田工程试验 230 井次，套变预防效果良好，实现了工业推广。

4、首次提出了套管柱在剪切、非均匀外挤载荷工况的评价方法，建立了页岩油气井下套管、固井、压裂和生产工况全生命周期的套管柱选材及工况适用性评价技术，制订了国家标准，编译形成了软件，为页岩油气井套管柱设计选用及评价提供技术依据，填补国内外相关领域的技术空白。

项目获得国家授权发明专利 18 件、实用新型专利 3 件，登记软件著作权 3 项，制订标准 4 项，发表论文 19 篇。套变主控因素和机理方面获得了 1 件专利、4 篇论文；非常规油气井套管柱模拟试验系统获得了 7 件专利、1 篇论文；套变预防技术方面获得了 7 件专利、4 篇论文和 2 套软件；套管全生命周期评价方面获得了 6 件专利、10 篇论文、4 项标准和 1 套软件。

推广应用情况：形成得“页岩油气井复杂压裂套管变形预防技术及工业化应用”成果在四川页岩气勘探开发有限责任公司、陕西延长石油（集团）有限责任公司、中国石

油天然气股份有限公司长庆油田分公司、东营普洛孚能源技术有限公司、库尔勒凯泰石油技术服务有限责任公司得到广泛应用，共计 230 井次，套变预防效果良好。

经济效益：形成的“页岩油气井复杂压裂套管变形预防技术及工业化应用”成果在中国石油集团工程材料研究院有限公司、四川页岩气勘探开发有限责任公司、陕西延长石油（集团）有限责任公司、中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司、东营普洛孚能源技术有限公司、库尔勒凯泰石油技术服务有限责任公司产生效益，累积新增销售额 130188 万元，新增利润 85904 万元。

#### 四、客观评价

中国石油集团科技管理部于 2016 年 6 月 2 日组织验收委员会，对中国石油集团工程材料研究院承担的科技项目《复杂工况气井油套管柱失效控制与完整性技术研究》（2014A-4214）进行了验收，验收委员会听取项目汇报后，经质询和讨论，形成主要验收意见：针对西南油气田页岩气井复杂压裂套管变形严重的突出问题，在页岩气井套管变形机理、套变主控因素、套变模式确定等方面开展了大量工作，完成了各项研究任务，达到考核指标要求。验收委员会一致同意通过验收。涉及的主要成果和创新点包括明确了页岩油气井复杂压裂套管变形的原因，明晰了套管变形的模式，确定了套管变形的主控因素，揭示了套管变形的微观和宏观机理。

中国石油集团科技管理部于 2021 年 4 月 23 日组织验收委员会，对中国石油集团工程材料研究院有限公司承担的科技项目《页岩气井套管柱应变设计方法研究》（2019A-3911）进行了验收，验收委员会听取项目汇报后，经质询和讨论，形成主要验收意见：针对页岩气井复杂压裂套管变形的原因、机理、套变预防技术、现场应用效果评价等方面开展了大量的工作，完成了各项研究任务，达到考核指标要求。验收委员会一致同意通过验收。涉及的主要成果和创新点。

（1）自主设计研制了国际首台套非常规油气井套管柱模拟试验系统，实现了地层剪切载荷、非均匀外挤载荷、温度内压循环载荷、轴向拉压载荷、扭矩等复合工况套管柱-水泥环系统性能模拟试验能力。（2）基于反演技术确定了页岩储层滑移边界条件，创新性的提出了井筒协调套变控制技术，填补国内外技术空白，在西南油气田、长庆油田、延长油田和新疆油田工程试验 230 井次，套变预防效果良好，实现了工业推广。

（3）建立了页岩油气井全生命周期的套管柱选材及工况适用性评价方法，制订了国家标准，编译形成软件，为非常规油气井套管柱设计选用及评价提供技术依据，填补国内外相关领域的技术空白。该成果创新性强，获得国家授权发明专利 18 件、实用新型专利 3 件，登记软件著作权 3 项，制订标准 4 项，发表论文 19 篇。相关技术在中国石油集团工程材料研究院有限公司、四川页岩气勘探开发有限责任公司、陕西延长石油（集团）有限责任公司、中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司、东营普洛孚能源技术有限公司、库尔勒凯泰石油技术服务有限责任公司创效超过 13 亿元。

2021 年 2 月 22 日，中国石油天然气集团有限公司科技管理部组织召开了中国石油

集团工程材料研究院有限公司完成的《复杂油气井管柱工况模拟试验评价与应用技术》科技成果鉴定视频会。鉴定委员会听取了成果汇报、查新报告和应用报告，审查了技术文件，通过质询和讨论形成鉴定意见：非常规油气井管柱/井筒工况模拟试验评价技术，形成套管柱或井筒非均匀外挤、剪切及复合加载模拟装备与试验能力，填补了国内外技术空白，达到国际领先水平。

陕西省科学技术情报研究院出具的查新报告（编号：CX20240601160），结论显示：

（1）相关文献涉及页岩气水平井多级压裂过程中套管变形研究综述，研究了环空束缚流体、岩性界面、温压交变、地层滑移对套管应力以及应变的影响，页岩气井压裂过程中套管变形以剪切变形和挤压变形为主，断层沿天然裂缝或层理弱面滑移导致套管发生剪切变形；文献涉及页岩气井压裂套管变形机理及物理模拟分析，明确了压裂过程中水力裂缝与天然裂缝交互作用规律，验证了天然裂缝面滑移剪切套管变形的机理。未见明确述及压裂过程中页岩层理滑移、断层运移与裂缝扩展耦合作用下套管变形动态演化机理分析。（2）文献涉及油气井密度减轻材料空心微珠的研究进展，美国 3M 公司经过多年的研究，已经形成了多个系列的空心微珠产品，并形成了 7 个 HGS 系列高性能空心玻璃微珠产品；在微珠密度相同的情况下，微珠的承压能力与其粒径有关，粒径越小微珠的抗压强度越大。文献涉及一种超低密度水泥浆用复合减轻材料以及低压漏失井用超低密度水泥浆，天然漂珠的粒径为  $31.724\sim 287.748\ \mu\text{m}$ ，闭孔珍珠岩的粒径为  $26.716\sim 475.067\ \mu\text{m}$ ，人造空心玻璃微珠  $0.644\sim 19.921\ \mu\text{m}$ ，微硅的表面积为  $15\sim 25\ \text{mm}^2/\text{g}$ ，超细微珠的粒径为  $18\sim 26\ \mu\text{m}$ 。未见明确述及用于套管变形防治的空心微珠水泥内微珠的粒径范围  $50\sim 150\ \mu\text{m}$  和密度。（3）文献涉及非常规油气井压裂过程中水泥环完整性实验评价；文献涉及基于非均匀载荷的注采井套管损坏机理及抗挤套管校核方法；文献涉及高温高压井环空带压条件下套管强度安全可靠评价；文献涉及一种油气井分段压裂模拟实验装置及其模拟井筒。未见明确述及压裂工况下油气井井筒服役状态模拟试验装置可实现套管柱-水泥环系统在轴向拉/压与内压作用下剪切极限载荷 600 t、非均匀外挤极限载荷 1200 t 工况下的服役性能模拟。

2021 年 6 月中国石油报和中国石油天然气集团有限公司官网头版头条刊登了该技术“中国石油油气井套变控制技术获实质性突破”的报道。报道显示 2021 年该技术首次在四川威远 3 个套变高风险平台成功进行了现场试验，套变控制效果显著。

页岩油气井复杂压裂套管变形预防技术及工业化应用的突破及产业化的实施，满足了我国非常规油气高效能开发的需求，有效控制了我国深层页岩油气井筒失效，提高井筒的完整性，降低建井成本，减少碳排放，应用前景广阔，取得了显著的经济效益和社会效益。

## 五、应用情况和效益

### （一）应用情况

形成得“页岩油气井复杂压裂套管变形预防技术及工业化应用”成果在四川页岩气

勘探开发有限责任公司、陕西延长石油（集团）有限责任公司、中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司、东营普洛孚能源技术有限公司、库尔勒凯泰石油技术服务有限责任公司得到广泛应用，共计 160 井次，具体见下表所示：

**主要应用单位情况表**

| 序号 | 单位名称                 | 应用的技术             | 应用对象及规模  | 应用起止时间                | 单位联系人/电话           |
|----|----------------------|-------------------|--|-----------------------|--------------------|
| 1  | 四川页岩气勘探开发有限责任公司      | 页岩油气井复杂压裂套管变形预防技术 | 单位自 2021 年来至今，页岩油气井复杂压裂套管变形预防技术广泛应用于泸州等页岩油气井区的油气井钻完井及生产阶段，应用共计 30 口井次，取得了良好的现场应用效果。  | 2021.01.01~2023.12.20 | 王业众<br>15008340926 |
| 2  | 陕西延长石油（集团）有限责任公司     | 页岩油气井复杂压裂套管变形预防技术 | 单位自 2021 年来至今，页岩油气井复杂压裂套管变形预防技术广泛应用于延长的油气井钻完井及生产阶段，应用共计 20 口井次，取得了良好的现场应用效果。         | 2021.01.01~2023.12.20 | 张永强<br>13152162539 |
| 3  | 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司 | 页岩油气井复杂压裂套管变形预防技术 | 单位自 2021 年来至今，页岩油气井复杂压裂套管变形预防技术广泛应用于庆阳等页岩油气井区的油气井钻完井及生产阶段，应用共计 105 口井次，取得了良好的现场应用效果。 | 2021.01.01~2023.12.20 | 欧阳勇<br>18729278073 |
| 4  | 东营普洛孚能源技术有限公司        | 页岩油气井复杂压裂套管变形预防技术 | 自 2021 年来至今，页岩油气井复杂压裂套管变形预防技术广泛应用于庆阳、陇东等页岩油气井区的油气井钻完井及生产阶段，应用共计 40 口井次，取得了良好的现场应用效果。 | 2021.01.01~2023.12.20 | 王鹏飞<br>13655465039 |
| 5  | 库尔勒凯泰石油技             | 页岩油气井复            | 自 2021 年来至今，应用页岩油气井复杂压裂套管变形预   | 2021.01.01~2023.12.20 | 张小丽<br>15099238616 |

|  |                   |                         |  |  |  |
|--|-------------------|-------------------------|--|--|--|
|  | 术服务有<br>限责任公<br>司 | 杂压裂<br>套管变<br>形预防<br>技术 | 防技术广泛应用于页岩油气<br>井区的油气井钻完井及生产<br>阶段，应用共计 35 口井次，<br>取得了良好的现场应用效果。 |  |  |
|--|-------------------|-------------------------|--|--|--|

## （二）经济效益和社会效益

**经济效益：**形成的“页岩油气井复杂压裂套管变形预防技术及工业化应用”成果在中国石油集团工程材料研究院有限公司、四川页岩气勘探开发有限责任公司、陕西延长石油（集团）有限责任公司、中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司、东营普洛孚能源技术有限公司、库尔勒凯泰石油技术服务有限责任公司产生效益，累积新增销售额 130188 万元，新增利润 85904 万元，具体如下：

### 中国石油集团工程材料研究院有限公司

2021-2023 年期间，依据项目成果在页岩油气井复杂压裂套管变形预防技术及工业化应用领域套管-水泥环完整性研究、套管柱工况适用性评价、钻完井工程技术服务、工程应用推广合同额度统计，累积新增销售额 4172 万元，新增利润 836 万元。

### 四川页岩气勘探开发有限责任公司

2021-2023 年期间，页岩油气井复杂压裂套管变形预防技术广泛应用于泸州等页岩油气井区的油气井钻完井及生产阶段，应用共计 30 口井次，取得了良好的现场应用效果，现场应用服役 3 年来，大幅度提高井筒油井管柱的服役寿命，减少了套变遇阻、邻井压窜的现象，目前统计，累积新增销售额 13716 万元，新增利润 9396 万元。

### 陕西延长石油（集团）有限责任公司

2021~2023 年期间，页岩油气井复杂压裂套管变形预防技术广泛应用于延长的油气井钻完井及生产阶段，应用共计 20 口井次，取得了良好的现场应用效果，现场应用服役 3 年来，大幅度提高井筒油井管柱的服役寿命，减少了套变遇阻、邻井压窜的现象，目前统计，累积新增销售额 12672 万元，节约成本 9672 万元。

### 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司

2021-2023 年期间，页岩油气井复杂压裂套管变形预防技术广泛应用于庆阳等页岩油气井区的油气井钻完井及生产阶段，应用共计 105 口井次，取得了良好的现场应用效果，现场应用服役 3 年来，大幅度提高井筒油井管柱的服役寿命，减少了套变遇阻、邻井压窜的现象，目前统计，累积新增销售额 15578 万元，节约成本 7700 万元。

### 东营普洛孚能源技术有限公司

2021-2023 年期间，页岩油气井复杂压裂套管变形预防技术广泛应用于庆阳、陇东等页岩油气井区的油气井钻完井及生产阶段，应用共计 40 口井次，取得了良好的现场应用效果，现场应用服役 3 年来，大幅度提高井筒油井管柱的服役寿命，减少了套变遇阻、邻井压窜的现象，目前统计，累积新增销售额 31200 万元，节约成本 24000 万元。

### 库尔勒凯泰石油技术服务有限责任公司

2021-2023 年期间，应用页岩油气井复杂压裂套管变形预防技术广泛应用于页岩油气井区的油气井钻完井及生产阶段，应用共计 35 口井次，取得了良好的现场应用效果，现场应用服役 3 年来，大幅度提高井筒油井管柱的服役寿命，减少了套变遇阻、邻井压窜的现象，目前统计，累积新增销售额 52850 万元，节约成本 34300 万元。

**社会效益：**页岩油气井复杂压裂套管变形预防技术及工业化应用的突破及产业化的实施，可有效降低建井成本，增加单井产量，降低井筒完整性失效的风险，对于缓解我国能源供需矛盾，保障国家能源安全具有重要意义。

页岩油气资源的高效开采有助于减少对煤炭等传统能源的依赖，从而降低碳排放，推动绿色能源发展。促进了我国非常规油气钻采技术的创新和发展，提升了我国油气行业的整体技术水平，支撑了油气行业的产业升级和高质量发展，为实现“双碳”目标、促进经济高质量发展做出积极贡献。

六、主要知识产权证明目录（限 10 条）

| 序号 | 知识产权类别 | 具体名称                       | 国家 | 授权号（标准编号、论文年卷页）  | 授权日期       | 证书编号（标准批准发布部门、期刊名） | 权利人（标准起草单位、论文发表单位）             | 发明人（标准起草人、论文作者）                         |
|----|--------|----------------------------|----|------------------|------------|--------------------|--------------------------------|---|
| 1  | 发明专利   | 一种页岩气井水泥环在剪切载荷下破碎形态分级装置及方法 | 中国 | ZL202010997904.1 | 2023.04.07 | 第 5862254 号        | 中国石油天然气集团有限公司；中国石油天然气集团公司管材研究所 | 杨尚谕；韩礼红；王建军；潘志勇；路彩虹；王航                  |
| 2  | 发明专利   | 一种套管抗剪切性能评价方法              | 中国 | ZL201810002310.5 | 2020.08.07 | 第 3924861 号        | 中国石油天然气集团公司；中国石油天然气集团公司管材研究所   | 杨尚谕；韩礼红；王鹏；王建军；冯东；王建军；冯春；王航；路彩虹；冯耀荣；刘亚旭 |
| 3  | 标准     | 石油天然气工业 页岩油气井套管选用及工况适用性评   | 中国 | GB/T 43231—2023  | 2023.09.07 | ICS 75.180.10      | 中国石油集团工程材料研究院有限公司              | 杨尚谕、韩礼红、王建军、曾波、蔡萌、路宗羽、方伟、魏风             |

|   |      |                      |    |                  |            |           |                                |  |
|---|------|----------------------|----|------------------|------------|-----------|--------------------------------|--|
|   |      | 价                    |    |                  |            |           |                                | 奇、宋毅、屈玲、王鹏、欧阳勇、张平、周小金、路彩虹、齐悦、李东风、黄永智、文春宇、赵映辉、刘海平、曹婧、牟易升、闫炎、杨思齐、赵云峰、董小卫、李远征、樊恒、毕刚、赵新波、邵兵、贾善坡、曹峰 |
| 4 | 发明专利 | 一种套管非均匀外挤能力评价方法      | 中国 | ZL201810002596.7 | 2020.11.06 | 第4080910号 | 中国石油天然气集团公司；中国石油天然气集团公司管材研究所   | 韩礼红；杨尚谕；王鹏；王建东；王航；路彩虹；王建军；冯春；冯耀荣；刘亚旭   |
| 5 | 发明专利 | 一种预防油气井套管二次损坏的方法     | 中国 | ZL202110224385.X | 2023.03.17 | 第5787408号 | 陕西延长石油（集团）有限责任公司               | 张永强；杨志刚；南蓓蓓；杨添麒；方晓君；董晨曦；拓川；吕烁；司小明；王珂；迟九蓉；孙淑娟   |
| 6 | 发明专利 | 一种防止封隔器失效的酸化作业安全控制方法 | 中国 | ZL202010251345.X | 2022.02.01 | 第4917399号 | 中国石油天然气集团有限公司；中国石油天然气集团公司管材研究所 | 王建军；李方坡；杨尚谕；池明；路彩虹；李丽锋；孙建华   |
| 7 | 发明专利 | 一种测定水平井筒胶结界面失效长度的系   | 中国 | ZL201811059435.8 | 2020.12.01 | 第4124882号 | 中国石油天然气股份有限公司                  | 欧阳勇；段志锋；蒙华军；来轩昂；吴学   |



|    |                  |                                     |    |                      |                |                   |  |                                     |
|----|------------------|-------------------------------------|----|----------------------|----------------|-------------------|--|-------------------------------------|
|    | 利                | 统及方法                                |    |                      |                |                   |  | 升；高云文；<br>张燕娜；陈春<br>宇；赵巍；艾磊；<br>李治君 |
| 8  | 发<br>明<br>专<br>利 | 一种油气井水<br>泥环密封性能<br>检测评价装置<br>及评价方法 | 中国 | ZL2020102<br>52185.0 | 2023.0<br>4.25 | 第<br>59088<br>51号 | 中国石油天然<br>气集团有限公<br>司；中国石油<br>天然气集团公<br>司管材研究所 | 杨尚谕；韩礼<br>红；王建军；路<br>彩虹；潘志勇；<br>王航  |
| 9  | 发<br>明<br>专<br>利 | 基于超声波发<br>射法的水力压<br>裂裂缝监测系<br>统及方法  | 中国 | ZL2017107<br>36548.6 | 2020.1<br>1.06 | 第<br>40752<br>06号 | 中国石油天然<br>气集团公司；<br>中国石油天然<br>气集团公司管<br>材研究所   | 杨尚谕；韩礼<br>红；王鹏；王建<br>军              |
| 10 | 发<br>明<br>专<br>利 | 确定高速气流<br>摩阻系数的试<br>验装置和测试<br>方法    | 中国 | ZL2016112<br>27891.X | 2019.1<br>0.11 | 第<br>35558<br>95号 | 中国石油天然<br>气集团公司；<br>中国石油天然<br>气集团公司管<br>材研究所   | 王建军；杨尚<br>谕；薛承文；李<br>方坡；付太森         |

## 七、主要完成人情况表

| 完成人 | 排名 | 行政职务 | 技术职称   | 工作单位              | 完成单位              | 对本项目贡献          |
|-----|----|------|--------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 杨尚谕 | 1  | 副所长  | 正高级工程师 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 组织开展项目整体攻关      |
| 王建军 | 2  | 副所长  | 正高级工程师 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 装备开发，工况模拟试验评价   |
| 陶诗平 | 3  | 总经理  | 高级工程师  | 四川页岩气勘探开发有限责任公司   | 四川页岩气勘探开发有限责任公司   | 套变机理研究，现场应用效果评价 |
| 牟易升 | 4  | 无    | 工程师    | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司 | 套变机理研究，现场应用     |

|     |    |    |        |                      |                      |                  |
|-----|----|----|--------|----------------------|----------------------|------------------|
| 张永强 | 5  | 主任 | 正高级工程师 | 陕西延长石油（集团）有限责任公司     | 陕西延长石油（集团）有限责任公司     | 套变机理研究，现场应用      |
| 曹婧  | 6  | 无  | 工程师    | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 套变控制新技术攻关，现场应用   |
| 欧阳勇 | 7  | 所长 | 正高级工程师 | 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司 | 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司 | 套变机理研究，现场应用      |
| 曹银萍 | 8  | 无  | 教授     | 西安石油大学               | 西安石油大学               | 套变机理研究           |
| 闫炎  | 9  | 无  | 工程师    | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 套变机理研究，套变控制新技术攻关 |
| 张鑫  | 10 | 无  | 工程师    | 中国石油天然气股份有限公司新疆油田分公司 | 中国石油天然气股份有限公司新疆油田分公司 | 套变机理研究，现场应用      |

## 八、主要完成单位及创新推广贡献

| 序号 | 主要完成单位               | 创新推广贡献   |
|----|----------------------|--|
| 1  | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 负责项目总体管理和实施，揭示复杂压裂工况套管剪切变形机理，开发非常规油气套管评价装置，形成井筒协调变形技术，创新点 1、2、3、4 主要贡献单位 |
| 2  | 陕西延长石油（集团）有限责任公司     | 套变机理研究和现场应用跟踪评价，创新点 1 和 4 主要贡献单位   |
| 3  | 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司 | 套变机理和套变控制技术应用单位，创新点 1 和 4 主要贡献单位   |
| 4  | 西安石油大学               | 页岩油气井套变模式、套变机理研究，创新点 1 主要贡献单位  |
| 5  | 中国石油天然气股份有限公司新疆油田分公司 | 套变机理研究和现场应用跟踪评价，创新点 1 和 4 主要贡献单位   |
| 6  | 四川页岩气勘探开发有限责任公司      | 套变机理研究和现场应用跟踪评价，创新点 1 和 4 主要贡献单位   |

## 九、完成人合作关系说明

（一）杨尚谕、陶诗平、牟易升、张永强、欧阳勇、曹银萍、闫炎、张鑫负责确定了页岩油气井复杂压裂套管变形的原因，明晰了套管变形的模式，确定了套管变形的主控因素，揭示了套管变形的微观和宏观机理。

（二）杨尚谕、王建军、牟易升、曹婧、闫炎等负责自主设计研制了国际首台套非常规油气井套管柱模拟试验系统，实现了地层剪切载荷、非均匀外挤载荷、温度内压循环载荷、轴向拉压载荷、扭矩等复合工况套管柱-水泥环系统性能性能模拟试验能力。

（三）杨尚谕、王建军、牟易升、曹婧、闫炎等负责创新性的提出了井筒协调变形的套管变形预防新技术，形成了同区块地层滑移量预测、下套管工艺优化和套变高风险井段固井水泥浆改性的一体化套变控制技术。

（四）张永强、欧阳勇、张鑫、陶诗平、曹婧、闫炎等负责新技术的现场推广应用技术研究。

## 科技进步奖公示项目 23

### 一、项目名称

油气介质作用下塑料管材服役性能评价关键技术研究与应用

### 二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省科学技术厅

提名意见：该项目针对近年来塑料管材在油气田应用过程中出现的三个新问题，开展了技术研究与应用工作，形成了三项新技术：（1）针对塑料管材在服役过程中凝聚态结构变化分析技术欠缺，导致性能退化评价技术不完善的问题，建立了系统全面的塑料管材凝聚态结构表征分析技术，深入解析塑料管材凝聚态结构，明确了服役过程中塑料管材凝聚态结构变化引起的性能退化机理及失效机理；（2）针对塑料管材在输气应用时缺乏气体渗透关键性能评价技术的问题，建设完成了国内首套全尺寸塑料管材气体渗透测试评价系统并形成了相应测试评价技术，填补了国内空白；（3）针对塑料管材寿命预测不准确的问题，基于上述机理与评价数据，形成了针对油气介质作用下的塑料管材剩余寿命评价技术，提高了塑料管材服役安全评价的准确性，对塑料管材全生命周期的完整性管理提供了有效支撑。

拟提名该项目为陕西省科学技术进步奖三等奖。

### 三、项目简介

在油气资源开发过程中，随着油气介质腐蚀性增强，金属管道的腐蚀问题日趋严重。与金属管道相比，塑料管材不仅耐腐蚀性能优异、可设计性强、重量轻，无需焊接、连接方便快捷，而且从生产到应用全生命周期内可减少碳排放 30% 以上、降低能耗超过 50%，符合“双碳”目标下，油气资源开发绿色低碳转型的需求，国内外各大油田都在大力推广应用。由于塑料管材与金属管材在材料结构、服役性能方面的差异，塑料管材在服役过程中的结构与性能变化机理不明，相应的服役性能评价技术不完善，影响了塑料管材的全生命周期的安全评价。

本项目以中国石油天然气集团公司科研课题《油田长输非金属管道应用关键技术》为依托，从塑料管材在服役过程中的结构与性能变化机理出发，对关键性能评价技术进行了创新，提高了塑料管材服役性能评价水平，进一步有效降低了塑料管材的失效率，有效提升了管线的服役安全性。项目主要技术突破包括：

一是针对塑料管材在服役过程中凝聚态结构变化分析技术欠缺，导致性能退化评价技术不完善的问题。本项目通过对常用塑料管材料的模拟服役试验，探索并形成了建立了系统全面的塑料管材凝聚态结构表征分析技术，在理论上明确了塑料管材在服役过程中微观结构与宏观服役性能的变化规律和对应关系，阐明了塑料管材的服役性能退化机理并形成了配套的评价技术，发表学术论文 1 篇，授权发明专利 3 项；

二是塑料管材在输油输水领域得到成熟应用，在输气领域还处于试验阶段，针对塑料管材在输气应用中的关键服役性能气体渗透性能评价技术尚属空白的问题，本项目通过对气体在塑料管材中渗透机理的研究，结合塑料管材在油田的应用形式，建设完成了具有自主知识产权的国内首套全尺寸塑料管材气体渗透测试评价系统并形成了相应测试评价技术，填补了行业空白，登记软件著作权 1 项，发表学术论文 1 篇，荣获中国石油和石油化工设备工业协会颁发的 2022 年度中国石油石化装备行业新技术、新产品、新材料“优秀创新成果”；

三是塑料管材在油田服役过程中，面临温度、压力、油气介质成分等无规律交变影响，导致其老化进程加快，现有的长期静液压或老化试验方法周期太长，只能考虑到单一介质类型、单一环境因素（如温度、时间）、单一破坏形式（韧性或脆性）等条件对高分子材料老化性能的影响，且不能明确材料的老化模式和失效形式，基于此的剩余寿命评价技术适用性差。本项目将塑料管材置于模拟油气输送工况环境中，采用超声相控阵技术测试热塑性塑料样品的杨氏模量，并判定试验样品是否存在失效缺陷及缺陷形式。通过绘制样品杨氏模量与试验时间关系曲线，进而得到杨氏模量降低 50% 时对应的试验周期。绘制试验温度与杨氏模量降低 50% 时对应试验周期的阿伦尼乌斯关系图，拟合得到两者之间关系式。以该关系式为基础，引入不同的置信下限，进而计算出在模拟油气工况条件下塑料管材的剩余寿命，评价准确率显著提升，授权发明专利 2 项，支撑制定标准 2 项。

本项目研究成果从机理上补充了塑料管材在服役过程中的结构与性能的变化机理，

并形成了有针对性的服役性能评价关键技术，在陕西省内各非金属管材制造企业得到规模化应用，有效降低了非金属管线的失效率，使用管材寿命提升 2~3 倍，有效降低了失效事故带来的环境污染，支撑 2 项标准制定，产生了显著的社会效益。项目成果近三年支撑工程材料研究院塑料管材质量检测、失效分析、技术转化、咨询服务及科技创新等方面和陕西省内塑料管材制造企业在产品的设计、选材、生产、施工、验收等方面共新增产值约 4.4 亿元，新增利润 8290 万元，节约资金 5518 万元。

#### 四、客观评价

2022 年 8 月 18 日，由中国石油和石油化工设备工业协会组织鉴定，获 2022 年度中国石油石化装备行业“新技术 新产品 新材料”优秀创新成果，证书编号 CPEIA202208A029。

#### 五、应用情况和效益

##### （一）应用情况

主要应用单位情况表

| 序号 | 单位名称                              | 应用的技术                   | 应用对象及规模  | 应用起止时间    | 单位联系人/电话           |
|----|-----------------------------------|-------------------------|--|-----------|--------------------|
| 1  | 中国石油集团工程材料研究院有限公司                 | 内衬选材评价、整管气体渗透性评价及剩余寿命评价 | 质量检测、失效分析、技术转化、咨询服务及科技创新等新增收入 1603 万                       | 2021-2023 | 郭琛<br>029-81887710 |
| 2  | 全国石油天然气标准化技术委员会<br>石油管材专业标准化技术委员会 | 选材、产品制造及现场应用等标准制定       | 研究成果用于石油管材专业标准化技术委员会对我国石油工业用管材的标准体系建设中，完善了我国石油工业用非金属管材标准体系 | 2021-2023 | 吕华<br>15829605815  |
| 3  | 西安斯通管业有限公司                        | 内衬选材评价技术、产品质量验收检测       | 产品的设计、选材、生产、施工、验收，新增销售额 1.7 亿                              | 2021-2023 | 黄昌会<br>13379299401 |
| 4  | 宝鸡天联汇通复合材料有限公司                    | 内衬选材评价技术、产品质量验收检测       | 产品的设计、选材、生产、施工、验收，新增销售额 1.5 亿                              | 2021-2023 | 贾康康<br>18691712181 |

|   |                           |                        |                                     |           |                    |
|---|---------------------------|------------------------|-------------------------------------|-----------|--------------------|
| 5 | 陕西延长石油西北橡胶有限责任公司          | 内衬选材评价技术、产品质量验收检测      | 产品的设计、选材、生产、施工、验收，新增销售额 8793 万元     | 2021-2023 | 高雄<br>13619106316  |
| 6 | 陕西欣欣智能管业有限公司              | 内衬选材评价技术、产品质量验收检测      | 产品的设计、选材、生产、施工、验收，新增销售额 1217 万元     | 2022-2023 | 朱华升<br>13784186216 |
| 7 | 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司第八采油厂 | 内衬选材评价、整管力学性能评价、剩余寿命评价 | 管材的性能评价、适用性评价和剩余寿命预测，管线服役寿命延长 2~3 倍 | 2021-2023 | 陈龙<br>029-86573215 |

## （二）经济效益和社会效益

**经济效益：**自项目实施以来，经济效益显著，包括直接和间接经济效益，分述如下：近三年产生的直接经济效益如下：

1、基于项目成果应用，实施单位为塑料管材质量检测、失效分析、技术转化、咨询服务、科研创新等累计收入 1603 万元，利润 305 万元。

2、依托项目成果，累计生产塑料管材超过 3500km，销售额约 4.3 亿元，新增利润 8290 万元。

近三年产生的间接经济效益如下：

项目成果用于指导制造企业技术研发及产品迭代，显著减少了研发过程中的原材料、人工、研发、检验检测等试验等成本投入，节约资金 5518 万元。

综上，项目成果近三年新增产值约 4.4 亿元，新增利润 8290 万元，节约资金 5518 万元。

## （二）社会效益：

本项目开发塑料管材服役性能评价关键技术成功用于国内各大油气田，有效解决了钢制管道腐蚀问题，为中石油塔里木油田、长庆油田和中石化西北油田完成失效分析 12 项，包括输送含硫凝析油水的柔性复合管、高压气举用柔性复合管、输送含油污水的钢丝网骨架塑料复合管、输水干线用柔性复合管等，总结形成了塑料管材在服役过程中常见的失效机理，并结合管材凝聚态结构的分析结果，从管材料配方优化、管材结构设计、制造工艺优化、运输、施工和应用各环节提出了改进措施，有效的提高了柔性复合管、塑料合金管、钢丝网骨架管等塑料管材的服役安全性和使用寿命，有效保障了非金属复合连续管的安全、长远运行提升其应用效果，保障了我国主要油气田的安全生产，减少

了管道失效事故带来的人员伤亡及环境污染问题，对于保障国家能源安全具有重要的战略意义，项目成果获得了显著的社会效益。

项目创造性提出了服役安全评价研究方向并建立了对应的工业化应用技术，有效的支撑新检测评价方法的建立，如指导完成了国内首套全尺寸塑料管材气体渗透测试评价系统和相应测试评价技术的建立，解决了国内无法实现全尺寸塑料管材气体渗透性能评价的技术难题，填补了国内行业空白。支撑制定了 2 项标准，为油气田塑料管材质量把控、科学应用奠定了基础，为油气田非金属复合管的完整性发展提供强有力支撑。

六、主要知识产权证明目录（限 10 条）

| 序号 | 知识产权类别 | 具体名称                   | 国家 | 授权号<br>（标准编号、论文<br>年卷页） | 授权日期      | 证书编号<br>（标准批准<br>发布部门、<br>期刊名） | 权利人（标准起草<br>单位、论文发表单<br>位）     | 发明人（标准起<br>草人、论文作<br>者）              |
|----|--------|------------------------|----|-------------------------|-----------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------------|
| 1  | 发明专利   | 一种复合材料蠕变行为测试夹具及测试方法    | 中国 | ZL201810530754.6        | 2022.3.29 | 5037945                        | 中国石油天然气集团有限公司；中国石油天然气集团公司管材研究所 | 张冬娜、戚东涛、邵晓东、马秋荣、蔡雪华                  |
| 2  | 发明专利   | 多层共挤塑料管耐温性能测试装置及方法     | 中国 | ZL202011308836.X        | 2022.8.5  | 5360611                        | 中国石油天然气集团有限公司；中国石油天然气集团公司管材研究所 | 齐国权、戚东涛、李厚补、魏斌；蔡雪华、丁楠、邵晓东、张冬娜、丁晗、孔鲁诗 |
| 3  | 发明专利   | 一种预测油气环境下热塑性塑料服役寿命试验方法 | 中国 | ZL202010252187.X        | 2023.5.26 | 5995828                        | 中国石油天然气集团有限公司；中国石油天然气集团公司管材研究所 | 李厚补、葛鹏莉、马相如、戚东涛、丁楠、丁晗                |
| 4  | 发明专利   | 一种复合材料增强管线钢管用缠绕机       | 中国 | ZL202010339390.0        | 2022.6.3  | 5203873                        | 中国石油天然气集团有限公司；中国石油天然气集团公司管材研究  | 孔鲁诗、张冬娜、戚东涛、李厚补                      |

|   |      |                                 |    |                  |            |         |  |   |
|---|------|---------------------------------|----|------------------|------------|---------|--|---|
|   |      | 及其使用方法                          |    |                  |            |         | 所  |   |
| 5 | 发明专利 | 一种埋地管道保护板及其安装方法                 | 中国 | ZL201810785018.5 | 2020.2.14  | 3694698 | 中国石油天然气集团有限公司；中国石油天然气集团公司管材研究所   | 齐国权、马秋荣、戚东涛、李厚补、魏斌、丁楠、张冬娜、邵晓东、蔡雪华         |
| 6 | 标准   | 石油天然气工业用非金属复合管 第1部分：钢骨架增强聚乙烯复合管 | 中国 | SY/T 6662.1-2022 | 2022.11.04 | 国家能源局   | 中国石油集团工程材料研究院有限公司、胜利油田孚瑞特石油装备有限责任公司、四川自强科技有限公司、中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司、中国石油天然气股份有限公司塔里木油田分公司、中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司、中国石油化工股份有限公司西北油田分公司、西安三环石油管材科技有限公司、北京隆盛泰科石油管科技有限公司 | 齐国权、戚东涛、李厚补、陈来玉、赵利国、许荣辉、刘海峰、燕自峰、陈飞、李磊、葛鹏莉 |
| 7 | 标准   | 石油天然气工业用钢丝预浸带增强聚乙烯粘结复合管         |    | T/CPSI01303-2023 | 2023.8.4   | 中国石油学会  | 中国石油集团工程材料研究院有限公司、宝鸡天联汇通复合材料有限公司、江苏赛尔超高压特种管业   | 张冬娜、周金喜、吴河山、韩洪涛、黎世鹏、王赤宇、徐婷、李厚补、丁楠、贾康康、杨志  |



|    |       |  |    |                   |           |                              |   |                                    |
|----|-------|--|----|-------------------|-----------|------------------------------|---|------------------------------------|
|    |       |  |    |                   |           |                              | 有限公司、塔里木油田油气工程研究院、四川金石东方新材料科技有限公司、安徽优耐德管道技术有限公司、张家港格莱恩科技有限公司、中裕软管科技股份有限公司 | 锋、卞冬明、付林、顾生锐                       |
| 8  | 软件著作权 | 全尺寸塑料管材气体渗透测试及数据处理软件 V1.0  | 中国 | 2023SR0650973     | 2023.6.14 | 软著登字第11238144号               | 中国石油天然气集团有限公司；中国石油集团工程材料研究院有限公司   | 孔鲁诗、李厚补、魏斌、邵晓东、朱文峰                 |
| 9  | SCI论文 | Failure analysis of a reinforced thermoplastic pipe used in an oil transportation system | 美国 | 138 (2022) 106403 | 2022.5.4  | Engineering Failure Analysis | 中国石油集团工程材料研究院有限公司   | 孔鲁诗、李厚补、戚东涛、李先明、燕自峰、夏明明、陈庆国、王福善、范鑫 |
| 10 | SCI论文 | Molecular Simulation on Permeation Behavior of   | 美国 | 2022, 14, 545     | 2022.1.28 | Polymers                     | 中国石油集团工程材料研究院有限公司   | 李厚补、张学敏、褚慧芳、齐国权、丁晗、高雄、孟吉星          |

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
|  |  | CH <sub>4</sub> /CO <sub>2</sub> /H<br>2S<br>Mixture<br>Gas in<br>PVDF at<br>Service<br>Condition<br>s |  |  |  |  |  |  |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|

## 七、主要完成人情况表

| 完<br>成<br>人 | 排名 | 行政<br>职务 | 技术职称      | 工作单位                          | 完成单位                          | 对本项目贡献  |
|-------------|----|----------|-----------|-------------------------------|-------------------------------|---|
| 孔<br>鲁<br>诗 | 1  | 无        | 高级工程<br>师 | 中国石油集<br>团工程材料<br>研究院有限<br>公司 | 中国石油集<br>团工程材料<br>研究院有限<br>公司 | 项目负责人，创新点 1、2 和 3 主要<br>贡献者，作为第一完成人提出项目<br>总体设计和技术方案，主持完成塑<br>料管材服役性能关键技术研究，开<br>发了国内首套全尺寸非金属管材气<br>体渗透测试评价系统和相应测试评<br>价技术。证明材料见附件：1-2、2-8、<br>2-12、2-13。 |
| 张<br>冬<br>娜 | 2  | 无        | 高级工程<br>师 | 中国石油集<br>团工程材料<br>研究院有限<br>公司 | 中国石油集<br>团工程材料<br>研究院有限<br>公司 | 项目主要完成人，创新点 1 和 3 的<br>主要贡献者。完成了复合材料蠕变<br>行为测试夹具及测试方法的开发，<br>牵头制定 CPSI 团体标准 1 项。证明<br>材料见附件：1-1、1-2、2-8、2-9、<br>2-11。                                     |
| 朱<br>文<br>峰 | 3  | 无        | 高级工程<br>师 | 中国石油集<br>团工程材料<br>研究院有限<br>公司 | 中国石油集<br>团工程材料<br>研究院有限<br>公司 | 项目主要完成人，创新点 2 的生要<br>贡献者。完成了评价技术在失效分<br>析、科研创新等领域的应用。证明<br>材料见附件：2-12。  |
| 齐<br>国<br>权 | 4  | 无        | 高级工程<br>师 | 中国石油集<br>团工程材料<br>研究院有限<br>公司 | 中国石油集<br>团工程材料<br>研究院有限<br>公司 | 项目主要完成人，创新点 1 和 3 的<br>生要贡献者。建立了多层共挤塑料<br>管耐温性能测试装置及方法，完成<br>了管道保护方法开发，牵头制定一  |

|     |   |               |        |                      |                           |  |
|-----|---|---------------|--------|----------------------|---------------------------|--|
|     |   |               |        |                      |                           | 项行业标准。证明材料见附件：1-2、2-9、2-10、2-14。   |
| 李厚朴 | 5 | 非金属与复合材料研究所所长 | 正高级工程师 | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 中国石油集团工程材料研究院有限公司         | 项目主要完成人，创新点2和3的主要贡献者。建立了油气介质作用下塑料管材的寿命预测方法，完成了塑料管材中渗透机理的研究。证明材料见附件：1-2、1-3、2-12。 |
| 蔡雪华 | 6 | 无             | 高级工程师  | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 中国石油集团工程材料研究院有限公司         | 项目主要完成人，创新点1的主要贡献者。完成了评价技术在质量检测、技术转化、咨询服务等领域的应用。证明材料见附件：1-1、1-2、2-9。             |
| 董立超 | 7 | 采油工艺研究所所长     | 高级工程师  | 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司 | 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司第八采油厂 | 项目主要完成人，主要负责评价技术在长庆油田采油八厂的现场应用，对本项目创新点1、3的现场验证有贡献。证明材料见附件：2-7。                   |

## 八、主要完成单位及创新推广贡献

| 序号 | 主要完成单位               | 创新推广贡献   |
|----|----------------------|--|
| 1  | 中国石油集团工程材料研究院有限公司    | 作为本项目的牵头单位，组织协调了对整个项目的攻关研究，对本项目的创新点均做出了贡献：（1）建立了系统全面的塑料管材凝聚态结构表征分析技术，深入解析塑料管材凝聚态结构，明确了服役过程中塑料管材凝聚态结构变化引起的性能退化机理及失效机理；（2）建设完成了国内首套全尺寸塑料管材气体渗透测试评价系统并形成了相应测试评价技术，填补了国内空白；（3）形成了针对油气介质作用下的塑料管材剩余寿命评价技术，提高了塑料管材服役安全评价的准确性。所有知识产权的第一完成单位。 |
| 2  | 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司 | 作为本项目的参与单位，协助项目完成单位开展了塑料管材服役性能评价关键技术的现场应用，完成了现场配套应用技术开发及对应设备研制工作，并对相关的关键指标参数进行验证，配合完   |

|  |  |                                    |
|--|--|------------------------------------|
|  |  | 成了相关技术推广，跟踪并评价了塑料管材服役安全评价关键技术应用效果。 |
|--|--|------------------------------------|

九、完成人合作关系说明

该项目由中国石油集团工程材料研究院有限公司（简称：工程材料研究院）和中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司（简称：长庆油田）通过产学研合作的形式共同完成。项目参与单位和各完成人团结合作，分工明确，为项目的成功实施和完成做出了贡献。

根据工程材料研究院在国内各大油田的现场调研结果和长庆油田采油八厂提供的塑料管材服役情况和应用问题，有针对性的提出塑料管材服役安全评价关键技术方案，孔鲁诗（第一完成人）、张冬娜（第二完成人）、齐国权（第四完成人）、李厚补（第五完成人）依托工程材料研究院油气钻采输送装备全国重点实验室开展机理研究与关键核心技术的研发；朱文峰（第三完成人）和蔡雪华（第六完成人）依托工程材料研究院国家石油管材质量检验检测中心对塑料管材服役安全评价关键技术进行了中试验证，在陕西省内塑料管材制造厂家进行技术推广，创造了经济效益；董立超（第七完成人）负责依托长庆油田对塑料管材开展现场服役性能跟踪评价研究，验证关键评价技术的有效性，有效降低了长庆油田采油八厂塑料管材的失效率，减少了因失效造成的环境污染和经济损失，创造了社会效益。

上述合作关系介绍准确无误，证明材料真实可靠，并得到各参与单位和人员的共同确认。

# 科技进步奖公示项目 24

**一、项目名称：**

复杂环境下岩质边坡灾变机理及防控关键技术

**二、提名者及提名意见**

提名单位：陕西省科学技术厅

提名意见：本项目系统研究了复杂环境下岩质边坡灾变机理及防控关键技术。研发了复杂环境条件下层状岩体的动力特性试验方法及装置，揭示了层状岩体的强度衰减演化规律，建立了综合考虑损伤效应的层状岩体动力劣化模型，为层状岩质边坡的动力稳定分析和精细化设计提供了理论支撑。建立了地震作用下层状岩质边坡稳定动力极限应变判定准则，提出了基于拉剪动力强度折减的边坡支护设计方法，研发了减震让压锚杆、抗滑短桩、柔性面层等边坡绿色防护关键技术。建立了 MIC-XGBoost-LSTM 边坡位移预测模型，提出了边坡变形加速点动态识别与失稳预测无量纲时间阈值法，构建了数据、机理双驱动的边坡动力稳定评价与风险管控平台。

研究成果广泛应用于安岚高速、西成铁路、张呼铁路等重大项目的边坡工程中，经济效益、社会效益和环境效益显著。本项目研究成果为岩质边坡动力稳定性分析及防护设计等提供了重要科学依据，对实现交通强国和秦岭生态环境保护等国家战略具有重要意义。

项目成果材料齐全、规范，无知识产权纠纷，人员排序无争议，符合陕西省科技进步奖提名条件。

拟提名该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖。

### 三、项目简介

习近平总书记指出，秦岭是我国是中华民族的祖脉和中华文化的重要象征，加强秦岭生态环境保护是陕西义不容辞的责任。然而秦岭地区岩质斜坡众多，随着内外营力的作用，极易发生崩塌、滑坡等地质灾害。这些灾害和隐患严重影响着工程安全建设及稳定运行，每年造成的经济损失高达数十亿元。除天然高陡边坡外，人工边坡稳定问题也值得关注。随着我国基础设施建设的不断推进，西部地区众多重大工程项目不得不“穿山越岭”，并将不可避免地形成人工挖方边坡，给工程建设带来安全风险。特别是岩质边坡极易在受到地震作用、工程扰动以及环境侵蚀等荷载作用下产生动力损伤或滑移。

针对山区岩质边坡防治面临的“认识不全、评价不准、防治不精”三重科学技术难题，信电综合勘察设计研究院有限公司联合长安大学等相关高校及勘察、设计与施工单位，在国家自然科学基金、国家重点研发计划等科研课题的支持下展开科技攻关。项目面向国家重大需求和人民生命财产安全，采取产学研用模式，推动双链融合，针对复杂环境下岩质边坡灾变机理及防控关键技术开展科研攻关，在理论、方法、技术等方面协同创新，攻克了岩质边坡动力破坏的防治难题，取得了如下创新成果：

（一）研发了复杂环境条件下层状岩体的动力特性试验方法及装置，揭示了层状岩体的强度衰减演化规律，建立了综合考虑损伤效应的层状岩体动力劣化模型，为层状岩质边坡的动力稳定分析和精细化设计提供了理论支撑。

（二）建立了地震作用下层状岩质边坡稳定动力极限应变判定准则，提出了基于拉剪动力强度折减的边坡支护设计方法，研发了减震让压锚杆、抗滑短桩、柔性面层等边坡绿色防护技术。

（三）建立了 MIC-XGBoost-LSTM 边坡位移预测模型，提出了边坡变形加速点动态识别与失稳预测无量纲时间阈值法，构建了数据、机理双驱动的边坡动力稳定评价与风险管控平台。

### 四、客观评价

本项目历时 16 年，以国家自然科学基金、国家重点研发计划等项目为依托，以大量工程实践为支撑，形成关于复杂环境下岩质边坡灾变机理及防控关键技术的系列研究成果，已成功应用于安岚高速、平天高速、呼张铁路、宁陕城区综合改造、镇巴城北体育场等项目中，创造经济效益达 5 亿元，已获得陕西省高等学校科学技术研究优秀成果奖一等奖 1 项，主参编标准 5 部，出版专著 4 部，发表 SCI 和 EI 论文 80 余篇，授权国家专利 30 余项，获得省级工法 1 项，经济、社会、环境效益显著。研究成果为层状岩质边坡动力稳定性分析及防护设计等提供了重要科学依据，有力地推动了边坡工程领域

的技术进步，对于提高地震等动力诱发边坡失稳灾害的防御能力具有重要理论意义，对实现交通强国和秦岭生态环境保护等国家战略具有重要现实意义。

五、应用情况

本项目针对复杂环境下岩质边坡灾变机理及防控关键技术开展科研攻关，在理论、技术和方法多个方面完成了突破。研发了复杂环境条件下岩体的动力特性试验方法及装置，揭示了层状岩体的强度衰减演化规律，建立了综合考虑损伤效应的层状岩体动力劣化模型，为层状岩质边坡的动力稳定分析和精细化设计提供了理论支撑。建立了地震作用下岩质边坡稳定动力极限应变判定准则，提出了基于拉剪动力强度折减的边坡支护设计方法，研发了减震让压锚杆、抗滑短桩、柔性面层等边坡绿色防护关键技术。建立了MIC-XGBoost-LSTM 边坡位移预测模型，提出了边坡变形加速点动态识别与失稳预测无量纲时间阈值法，构建了数据、机理双驱动的边坡动力稳定评价与风险管控平台，对山区边坡监测预警与防灾减灾具有普遍推广意义和重要应用价值。

项目研究成果应用于青岛地铁工程、西成铁路、安岚高速、平天高速、合铜高速、天庄高速、呼张铁路、九绵高速五里坡隧道、蒙华铁路、宁陕城区综合改造、镇巴城北体育场等 10 余项重点项目中得到应用推广，取得了显著的经济、社会及环境效益，为层状岩质边坡动力稳定性分析及防护设计等提供了重要科学依据，有力地推动了边坡工程领域的技术进步。

六、主要知识产权和标准规范等目录(限10条)

| 序号 | 知识产权类别 | 知识产权具体名称  | 国家(地区) | 授权号 | 授权日期      | 证书编号 | 权利人               | 发明人                   |
|----|--------|---|--------|-----|-----------|------|-------------------|-----------------------|
| 1  | 专著     | 基于霍普金森杆试验的千枚岩动力学特性研究                                  | 中国     |     | 2023.6.1  |      | 长安大学              | 许江波，赖杰，董彤，向钰周         |
| 2  | 论文     | 节理千枚岩能量传递与动力学特性                                       | 中国     |     | 2021.7.1  |      | 长安大学              | 许江波，费东阳，孙浩琿，崔易仑       |
| 3  | 论文     | Monitoring of train-induced vibrations on rock slopes | 中国     |     | 2017.8.29 |      | 长安大学              | 许江波，晏长根，赵旭，杜柯，李恒，谢永利  |
| 4  | 论文     | Field investigation of force and displacement within  | 中国     |     | 2018.8.9  |      | 长安大学、西安铁路局科学技术研究所 | 许江波，李恒，杜柯，晏长根，赵旭，李武，许 |

|    |      |   |    |                      |              |         |  |  |
|----|------|---|----|----------------------|--------------|---------|--|--|
|    |      | a strata slope using<br>a real-time remote<br>monitoring system |    |                      |              |         |  | 新桩   |
| 5  | 专著   | 高边坡地质与防护加固  | 中国 |                      | 2021. 2. 1   |         | 信电综合勘察<br>设计研究院有<br>限公司                              | 陈能远, 南亚<br>林, 李氦   |
| 6  | 发明专利 | 高寒区边坡多重传感<br>信息融合与智能监测<br>系统及监测方法                               | 中国 | CN<br>113155203<br>B | 2022. 11. 29 | 5613686 | 哈尔滨工业大<br>学、哈尔滨工<br>业大学重庆研<br>究院、中铁十<br>七局集团有限<br>公司 | 凌贤长, 李新<br>宇, 陈宏伟, 丛<br>晟亦, 唐亮, 邢<br>文强, 程志和,<br>胡意如, 朱磊 |
| 7  | 发明专利 | 一种人工充填节理岩<br>体动力特性试验方法  | 中国 | CN<br>109374408<br>B | 2021. 10. 22 | 4743060 | 长安大学   | 柴少波, 王昊,<br>胡志平, 温馨                                      |
| 8  | 发明专利 | 冻融循环作用下基于<br>充填节理波阻抗的岩<br>石劣化测试方法                               | 中国 | CN<br>114324603<br>B | 2022. 09. 06 | 5433139 | 长安大学   | 柴少波, 刘欢,<br>宋浪, 高志华,<br>李显鹏, 柴连<br>增, 宋博阳                |
| 9  | 论文   | 干湿循环作用下充填<br>节理岩石压缩特性   | 中国 |                      | 2023. 8. 1   |         | 长安大学   | 柴少波, 宋浪,<br>刘欢, 阿比尔<br>的, 刘帅                             |
| 10 | 专著   | 复杂条件下边坡破坏<br>机理及稳定性研究   | 中国 |                      | 2021. 1. 1   |         | 中国人民解放<br>军火箭军工程<br>大学                               | 赖杰, 刘云   |

## 七、主要完成人情况

主要完成人情况如下:

| 序号 | 姓名  | 性别 | 出生年月     | 技术职称 | 文化程度(学位) | 工作单位   | 对成果创造性贡献  |
|----|-----|----|----------|------|----------|--------|---|
| 1  | 许江波 | 男  | 1985. 11 | 副教授  | 博士       | 长安大学   | 项目总负责, 主要负责项目的策划、组织以及实施工作, 并对创新点 1、2、3 做出了重要贡献。 |
| 2  | 陈   | 男  | 1987. 08 | 高级工  | 硕士       | 信电综合勘察 | 主要负责研究成果推广应用, 对创新点 2 做                          |



|    |     |   |         |        |      |                 |                          |
|----|-----|---|---------|--------|------|-----------------|--------------------------|
|    | 能远  |   |         | 程师     |      | 设计研究院有限公司       | 出了重要贡献。                  |
| 3  | 陈宏伟 | 男 | 1966.03 | 正高级工程师 | 博士   | 中铁十七局集团有限公司     | 对项目成果推广应用做出了重要贡献。        |
| 4  | 柴少波 | 男 | 1989.01 | 副教授    | 博士   | 长安大学            | 对创新点 1、2 做出了重要贡献。        |
| 5  | 贺海超 | 男 | 1982.12 | 高级工程师  | 工程硕士 | 信电综合勘察设计研究院有限公司 | 对项目成果推广应用做出了重要贡献。        |
| 6  | 赖杰  | 男 | 1986.02 | 讲师     | 博士   | 火箭军工程大学         | 对创新点 2 抗震试验与优化设计做出了重要贡献。 |
| 7  | 丛宇  | 男 | 1984.12 | 教授     | 博士   | 青岛理工大学          | 对创新点 3 做出了重要贡献。          |
| 8  | 刘渊  | 男 | 1986.03 | 副教授    | 博士   | 火箭军工程大学         | 对创新点 3 做出了重要贡献。          |
| 9  | 刘松亮 | 男 | 1982.02 | 高级工程师  | 学士   | 中铁十七局集团有限公司     | 对项目成果的推广应用做出了重要贡献。       |
| 10 | 高虎艳 | 男 | 1971.11 | 正高级工程师 | 学士   | 西安市轨道交通集团有限公司   | 项目顾问，指导科研成果的转化和应用工作      |

## 八、主要完成单位情况及创新推广贡献

### （一）信电综合勘察设计研究院有限公司

作为本项目的第一完成单位，信电综合勘察设计研究院有限公司负责本项目组织管理、统筹协调、仪器开发以及保证科研资金的投入等，率先在本单位的工程项目中应用本项目研究成果，牵头推进拉剪动力强度折减边坡支护设计方法中的关键技术省内多个工程建设项目中应用实践，研发了多项边坡支护技术，取得了良好的示范效应，并为项目的运转提供后勤保障和资源调配，推动了项目的有序进行，为项目的创新和应用做出了以下重要贡献：

1、负责项目现场工作的开展和监测数据的收集；

2、成功研制出系列边坡韧性增强支护结构，构建了边坡变形控制与绿色防护成套关键技术，有效控制了边坡侧向变形；

3、组织项目研究成果在实际工程的应用，在同行技术交流会中完成了对项目研究成果的宣传和推广工作。

## **（二）长安大学**

项目合作单位，发挥高校在基础理论研究方面的优势，在国家自然科学基金等资助下，开展了较为系统深入的理论研究，主要负责制定项目总体方案、技术路线、研究内容和目标。其对项目的创新和应用做出了如下贡献：

- 1、研发了动力耦合作用下岩体损伤动力特性试验装置；
- 2、构建了体累积损伤量化评价方法及累积损伤劣化模型，推导了多元环境作用下岩体动态强度劣化控制方程；
- 3、建立了 MIC-XGBoost-LSTM 边坡位移预测模型，提出了边坡变形加速点动态识别与失稳预测无量纲时间阈值法。

## **（三）火箭军工程大学**

与长安大学合作完成项目的基础理论研究，主要负责岩体损伤及边坡稳定性方面的研究，同时对项目进行推广应用和实践，对项目主要贡献有：

- 1、建立了动态冲击下层状岩体的裂纹扩展准则；
- 2、建立了边坡稳定动力极限判定准则；
- 3、提出了拉剪动力强度折减边坡设计方法。

## **（四）青岛理工大学**

与长安大学合作完成项目的基础理论研究，负责岩体损伤方面的实验开展以及损伤模型的研究，同时对项目成果进行推广应用和实践，对本项目的主要贡献有：

- 1、揭示了层状岩体动力特性的关键影响因素；
- 2、建立了多元环境作用下岩体动态强度劣化方程；
- 3、通过参加全国学术交流会，完成了对项目研究成果的改进、宣传和应用；

## **（五）中铁十七局集团有限公司**

项目合作单位，主要负责项目的资金支持、边坡数据的采集及研究成果转化应用和实践工作，对本项目的主要贡献有：

- 1、研发了一种温度、湿度、应力状态以及位移监测集成监测仪器，并在同行技术交流会中进行宣传、推广；
- 2、负责了现场监测仪器的布设和边坡数据的采集；
- 3、负责完成了对项目研究成果中监测系统在工程中的应用，及时对系统进行验证，保证项目研究成果契合实际。

## **（六）西安市轨道交通集团有限公司**

项目合作单位，负责指导项目成果在实际工程中的推广应用和实践，对本项目的主要贡献有：

- 1、指导了多个铁路、地铁项目的优化设计与边坡安全防控。

2、将相关研究成果推广应用到山区交通基础设施建设领域的边坡治理工程中，取得了显著效果。

九、完成人合作关系说明

本项目采用产学研的研究模式，以企业为主体，联合长安大学、火箭军工程大学等高校，以解决工程实践中出现的难题为目的，开展科研攻关，提升行业的科技水平。

许江波作为本项目的负责人和牵头人，也是信电综合勘察设计研究院有限公司“陕西省“四主体一联合”土体工程技术研究中心”的学术带头人；带领陈能远、柴少波、丛宇等同志进行理论研究，与陈宏伟、贺海超、刘松亮等同志共同完成了科技成果的转移转化和工程优化应用；高艳虎对工程实践进行了指导，提出了建设性意见和建议。完成人合作关系情况汇如下：

| 序号 | 合作方式     | 合作者/项目排名 | 合作起始时间     | 合作完成时间      | 合作成果  |
|----|----------|----------|------------|-------------|---|
| 1  | 论文合著     | 陈能远/2    | 2008 年 9 月 | 2023 年 12 月 | 干湿循环作用下花岗岩动态力学性质研究                            |
| 2  | 产业合作     | 陈宏伟/3    | 2013 年 1 月 | 2017 年 11 月 | 西成铁路客运专线上的应用                                  |
| 3  | 共同获奖     | 柴少波/4    | 2011 年 9 月 | 2023 年 12 月 | 2023 年陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖一等奖                    |
| 4  | 共同参与制定规范 | 贺海超/5    | 2014 年 6 月 | 2019 年 4 月  | 合作编制柔性面层等边坡韧性增强支护结构的研制开发和规范                   |
| 5  | 论文合著共同获奖 | 赖杰/6     | 2010 年 9 月 | 2023 年 12 月 | 干湿循环作用下花岗岩动态力学性质研究、2023 年陕西高等学校科学技术研究优秀成果奖一等奖 |
| 6  | 共同立项     | 丛宇/7     | 2009 年 1 月 | 2023 年 12 月 | 山区公路滑坡失稳机理及监测预警系统研究                           |
| 7  | 论文合著     | 刘渊/8     | 2016 年 1 月 | 2023 年 12 月 | 基于不完备频响函数的结构损伤统计识别研究                          |
| 8  | 产业合作     | 刘松亮/9    | 2014 年 6 月 | 2019 年 4 月  | 九景衢铁路工程应用                                     |
| 9  | 产业       | 高虎艳/10   | 2015 年 9 月 | 2023 年 12 月 | 指导呼张高铁工程建设项                                   |

|  |    |  |  |  |       |
|--|----|--|--|--|-------|
|  | 合作 |  |  |  | 目上的应用 |
|--|----|--|--|--|-------|

## 科技进步奖公示项目 25

**一、项目名称**

应用于全球导航卫星掩星探测（GNOS）的高相位中心稳定天线技术

**二、提名者及提名意见**

提名单位：陕西省科学技术厅

提名意见：全球导航卫星掩星探测仪（GNOS）为我国低轨气象卫星风云三号系列上均搭载的有效载荷，可进行全天候的掩星大气和电离层观测，所应用的具有高相位中心稳定度的掩星探测仪天线突破了多项技术难题。项目经过十余年的艰辛研究，经历了预研、实验星转为了 03 批、04 批等接近十颗正样卫星的延续研制工作，建立了完整的多星组网工作体制。创新性解决了宽波束范围内的高相位中心稳定度实现技术、多模多频工作时的高相位中心稳定度实现技术、整星条件下的高相位中心稳定度实现技术等三大难题。项目研究成果总体达到国内领先、国际先进水平。风云三号气象卫星已被世界气象组织纳入新一代世界极轨气象卫星网，气象探测数据受世界认可，其中掩星探测仪天线主要指标优于国外同类产品。

项目团队研制了我国首套具有完全自主知识产权的兼容北斗及 GPS 的掩星探测仪天线系

统。实现我国掩星探测技术和掩星数据的自主可控和国产替代，打破了国外垄断，拓展了北斗系统在气象领域的应用。

应用全球导航卫星掩星探测仪天线的风云三号气象卫星在自然灾害监测和防灾减灾中作用显著，不仅可以对台风、暴雨、洪涝、干旱、冰雪、沙尘暴、大雾等气象灾害进行有效监测，而且能为农林灾害、海洋灾害、地质灾害、生态与环境灾害监测和评估提供高精度定量探测资料。满足农业、交通、航空、航天、水利、环境、林业等行业对各类专业气象观测的新需求，具有重大的社会效益。符合陕西省科学技术进步奖二等奖提名条件。

拟提名该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖。

### 三、项目简介

高相位中心稳定天线技术应用于风云三号系列卫星和商业卫星掩星探测仪天线，该天线是国际首台兼容 GPS 和北斗导航系统的掩星探测仪设备，是提升系统掩星观测范围和数据反演精度的先决因素，在民用气象领域成功应用。项目解决了掩星探测仪天线高相位中心稳定度特性的难题，将 $\pm 63^\circ$ 宽波束范围内的天线相位中心稳定度提升至 $\pm 0.43\text{mm}$ ，确保了系统国际先进水平的大气掩星折射率反演精度，改善了我国国产自主数值天气预报能力，推动了北斗导航系统在气象领域的应用。获得 10 项国家授权专利、发表论文 18 篇，形成 5 种类型 8 个型号系列化产品等自主知识产权。

应用于全球导航卫星掩星探测（GNOS）的高相位中心稳定天线技术完成了 5 颗正样卫星的在轨试验验证，其中两颗卫星已经在轨运行超期服役 2 年，得到充分的验证同时积累了丰富的气象数据。随着多星组网工作应用的实现，全球观测频次从每 12 小时一次提高到每 6 小时一次。作为国内光谱测量通道最多、功能最全、性能最先进、精度最高的极轨遥感卫星，有效提高全球数值天气预报的精度和时效。

应用于全球导航卫星掩星探测（GNOS）的高相位中心稳定天线技术同时应用于 QX-1 系列商业卫星中，联合风云三号系列卫星的应用，预计每年可产生经济效益大于 5500 万元。

### 四、客观评价

风云三号 F 星掩星探测仪天线于 2023 年 8 月随风云三号卫星发射升空，同时兼容北斗、GPS 和 Galileo 三大导航系统，至目前为止，与风云三号掩星探测仪接收机同样兼容多系统掩星观测功能的卫星计划为 ACE+计划和 Pyxis 卫星计划，目前均没有公开的数据报导。鉴于此，新一代风云三号掩星探测仪接收机系统及其天线，处于国际先进水平。

风云三号系列卫星中的 04 星（FY3C）、05 星（FY3D）每天实际产生近 1500 次大气掩星探测数据，包括全球分布的折射率、温度、湿度、压强和电离层电子密度等垂直廓线数据产品，各项指标均达到国际先进水平。截至目前，已累计提供超过 500 万次掩星事件数据产品，各类产品廓线大于 1500 万条，数据产品通过了国内外多家业务和研究

机构的质量评估，其中北斗和 GPS 兼容的大气掩星折射率反演精度优于 1%（10 千米到 30 千米），与国际同类产品精度相当；北斗和 GPS 兼容的电离层掩星电子峰值密度反演精度优于 20%。

2022 年 12 月 9 日，中国电子科技集团有限公司科技质量部对应用于全球导航卫星掩星探测（GNOS）的高相位中心稳定天线技术进行了技术鉴定，评价指出项目技术复杂，研究难度大，取得了重大技术创新，拥有自主知识产权，自主可控，总体技术达到国内领先、国际先进水平。

五、应用情况和效益

应用于全球导航卫星掩星探测（GNOS）的高相位中心稳定天线技术在风云三号 03 星~10 星中有应用经历，其中目前有 5 颗正样产品随整星在轨运行。掩星探测仪天线在前序产品研制基础上，性能指标实现了较大提升。能够兼容 GPS 和北斗导航系统，接收 GNSS 大气和电离层掩星信号以及导航定位信号。该天线在星载平台有限尺寸和重量条件下，实现了较高的波束宽度以及相位中心稳定度等电性能要求。掩星探测仪天线的宽波束覆盖保证了掩星事件观测范围、高相位中心稳定度特性保证了载波相位数据反演精度、宽波束范围内的高增益特性保证了信号信噪比要求，上述指标均为影响系统性能的核心指标，保证了掩星探测仪系统的探测精度和先进性。该技术同时应用于 QX-1 气象卫星，小型化商业 GNSS 掩星探测仪天线的成功在轨运行拉开了百星量级商用微纳星座 GNSS 遥感应用的帷幕，为后续大规模组网观测奠定了坚实基础。

全球导航卫星掩星探测仪天线兼容北斗系统，北斗掩星探测进入业务化运行，实现我国掩星探测技术和掩星数据的自主可控和国产替代，拓展了北斗系统在气象领域的应用，在自然灾害监测和防灾减灾中作用显著，满足农业、交通、航空、航天、水利等行业对各类专业气象观测的新需求，具有重大的社会效益。有效提高全球数值天气预报的精度和时效，对完善全球对地观测系统具有重要意义。全球导航卫星掩星探测仪天线的研制成功，对我国星载平台大气探测水平有着较大的推动作用。

风云三号系列卫星掩星探测仪已经获取了丰富的地球大气探测数据，被广泛应用于在国内外天气、气候、环境和灾害监测中，取得了显著的经济效益，风云三号后续型号发射升空后，进一步增强我国防灾减灾和应对气候变化能力。结合该技术在商业卫星及下一代掩星探测仪天线的论证应用，预计每年可产生经济效益大于 5500 万元。

六、主要知识产权和标准规范目录

| 序号 | 知识产权类别 | 知识产权具体名称 | 国家（地区） | 授权号              | 授权日期       | 证书编号    | 权利人              | 发明人          |
|----|--------|----------|--------|------------------|------------|---------|------------------|--------------|
| 1  | 发明专利   | 垂直插针传输结构 | 中国     | ZL201611174292.6 | 2019-10-18 | 3564062 | 中国电子科技集团公司第二十研究所 | 周云林、吕苗、谢飞、郭睿 |
| 2  | 发明专利   | 圆极化天线    | 中国     | ZL202211567874   | 2023-08-11 | 6227832 | 中国电子科技集团公司       | 王敏、万涛、       |

|    |      |                        |    |                  |            |          |                  |                        |
|----|------|------------------------|----|------------------|------------|----------|------------------|------------------------|
|    |      |                        |    | .6               |            |          | 第二十研究所           | 韩博、吕苗、倪涛、谢飞、周云林        |
| 3  | 发明专利 | 一种基于共模差模的宽频带紧凑型圆极化天线   | 中国 | ZL202210033972.5 | 2022-10-28 | 5540457  | 西安电子科技大学         | 胡伟、陈霏、周博裕、姜文、高雨辰       |
| 4  | 发明专利 | 一种自解耦的圆极化滤波天线阵列        | 中国 | ZL202211039504.5 | 2023-07-25 | 6177251  | 西安电子科技大学         | 魏昆、程泓钧、姜文、胡伟、洪涛、高雨辰    |
| 5  | 发明专利 | 一种非对称双脊喇叭天线            | 中国 | ZL202011187672.X | 2022-12-27 | 5665039  | 中国电子科技集团公司第二十研究所 | 倪涛、魏明、刘鹏、王敏、张欢、万涛      |
| 6  | 发明专利 | 旋转对称排布的弹载高增益后向辐射调相阵列天线 | 中国 | ZL202110021102.1 | 2022-9-13  | 5448774  | 中国电子科技集团公司第二十研究所 | 王敏、李方、倪涛、张轶、贾望屹、秦锐     |
| 7  | 实用新型 | 一种GNSS-R测高仪定位天线        | 中国 | ZL202221655015.8 | 2022-11-18 | 17824944 | 中国电子科技集团公司第二十研究所 | 刘英虎、王敏、韩博、穆欣、倪涛、杜若楠、谢飞 |
| 8  | 实用新型 | 一种具有宽波束覆盖特性的阵列天线       | 中国 | ZL202222493590.9 | 2023-02-21 | 18491420 | 中国电子科技集团公司第二十研究所 | 王敏、倪涛、刘英虎、穆欣、王伊、李方     |
| 9  | 实用新型 | 中心短路的四馈双层双频圆极化天线       | 中国 | ZL201420669503.3 | 2015-03-11 | 4168131  | 中国电子科技集团公司第二十研究所 | 周云林、谢飞、吕苗              |
| 10 | 实用新型 | 四馈双层双频圆极化天             | 中国 | ZL201420669983   | 2015-03-11 | 4166366  | 中国电子科技集团公司       | 周云林、谢飞、                |

|  |  |   |  |    |  |  |            |    |
|--|--|---|--|----|--|--|------------|----|
|  |  | 线 |  | .3 |  |  | 第二十研究<br>所 | 吕苗 |
|--|--|---|--|----|--|--|------------|----|

科技进步奖公示项目 26

一、项目名称

印制板组件工艺与寿命预测模型系统及应用

二、提名者及提名意见

提名单位：陕西省科学技术厅

提名意见：本项目面向印制板组件在恶劣环境中高可靠服役的需求，针对现有仿真模型准确度低，进行焊点可靠性分析时寿命预测困难等问题，通过开展印制板组件工艺与寿命预测模型系统研究及应用，深入分析印制板组件在多物理场耦合下的失效机理，将数字模型与实物验证相结合，构建了工艺模型和寿命预测模型，获取了产品可靠性关键指标与工艺控制参数之间的关系，在源头上消除了组件焊点的质量隐患，避免了由于焊点失效导致的印制板组件故障，提高了产品的质量与可靠性，从而节省大量时间和经济成本。

该项目技术复杂，研究难度大，技术上有较大创新，总体达到国内领先水平，部分技术达到国际先进水平，拥有自主知识产权，自主可控。项目成果在印制板组件的装配与生产中得到广泛应用，效益显著。该项目所述内容真实，主要完成单位、主要完成人组成及排序无争议，申报材料属实。

拟提名该项目为陕西省科学技术进步奖三等奖。



### 三、项目简介

项目团队创新性提出了一种基于激光干涉、差值拟合的回流焊焊膏弹性模量测量方法，实现了焊膏弹性模量的原位测量，解决了焊膏在回流焊过程中挥发以及焊膏与铜箔发生的反应导致弹性模量难以测量的问题，为焊点成型过程的精确模拟仿真提供了重要的数据支撑；建立了印制板组件服役过程的热-力-电多物理场耦合数学模型，创新性提出了基于能量损伤归一的多物理场耦合下焊点寿命预测方法，通过加载温循、振动、加电等多种载荷，实现了焊点寿命的精确预测。发明了基于纳米涂层钢网、架桥法预制焊料的特殊关键器件低空洞率焊接工艺方法，关键器件热风回流焊焊接空洞率降低至 10%，产品一次调试通过率提升至 98%。获得 1 项发明专利授权，3 项实用新型专利授权，发表论文 12 篇。

研制的模型系统在满足中电科 20 所印制板组件可靠性设计与工艺设计的需求的同时，亦可满足印制板组件行业可靠性设计与工艺设计需求，寿命预测模型系统在中电科瑞测公司、深圳市华盛通用科技有限公司等 3 家单位得到应用，仿真得到的寿命与试验寿命误差小，准确度高，可指导产品可靠性设计，改变了原来可靠性设计中需要开展大量环境试验的情况，节省了共计 1101 万元的可靠性试验费用；回流焊工艺模型在西安晶捷电子、西安铭朗电子科技有限责任公司等 5 家单位进行应用，模型得到的回流焊接曲线、焊点形态与实际结果偏差小，数据有效、准确可信，在印制板组件研制生产中，采用模拟仿真手段进行工艺参数的设计，替代了原有的工艺试验过程，节省了共计 1739 万的工艺试验费用，节省成本共达到 2840 万元。

### 四、客观评价

2023 年 12 月 21 日，中国电子科技集团有限公司对本项目进行了技术鉴定。以西北工业大学张卫红院士为主任的成果鉴定委员会认为，本项目技术复杂、研究难度大，在印制板组件多物理场耦合建模及寿命预测方面具有较大技术创新，拥有自主知识产权，自主可控。项目总体达到国内领先水平，其中多物理场耦合下焊点寿命预测方法达到国际先进水平，成果已应用于印制板组件的装配生产与试验中，效果显著。

成果鉴定委员会认为本项目针对印制板组件在恶劣环境服役时，焊点在综合应力下易开裂、现有仿真模型准确度低、寿命预测困难、特殊关键器件焊接空洞率高等问题，开展了工艺攻关，构建了工艺模型和寿命预测模型，获取了产品可靠性关键指标与工艺控制参数之间的关系，消除了组件焊点的质量隐患，提高了产品的质量与可靠性。

### 五、应用情况和效益

印制板组件工艺与寿命预测模型系统已应用于中电科瑞测（西安）科技服务有限公司、西安铭朗电子科技有限责任公司、深圳市华盛通用科技有限公司等单位的印制板组件的实际装配生产与试验中，情况如下：

1、中电科瑞测（西安）科技服务有限公司使用了温度循环、随机振动、多物理场耦合下焊点寿命预测模型，对 L 波段接收激励模块、控制子板、接收发射组件等产品印

制板组件进行了可靠性分析和寿命预测，模拟结果与实际结果偏差 10%以内，避免了大量可靠性试验，节省了 847 万元可靠性试验成本；

2、西安铭朗电子科技有限责任公司、西安晶捷电子科技有限公司、陕西龙伸电气有限公司使用了回流焊工艺模型对印制板组件回流焊接工艺进行模拟，仿真获得了回流焊接曲线，模型精度高，模拟温度与实测温度相差在 5℃以内，模型能有效指导工艺人员设计工艺，为三家单位各节省了工艺试验经费 489 万元、437 万元与 256 万元；

3、西安瑞特三维科技有限公司使用了焊点工艺预测模型，预测了接收处理板、音频子板等印制板组件不同回流温度下的焊点形貌，元器件实际焊点形态与仿真结果相差 10%以内，模型精度高，能够准确模拟实际研制环境，研制生产中不再需要开展大量工艺试验，节省了 282 万元的研制生产成本；

4、深圳市华盛通用科技有限公司使用了印制板组件工艺与寿命预测模型，通过梯度下降法模拟了焊点成型过程，节省了 230 元生产成本，使用寿命预测模型预测焊点寿命，避免了大量的可靠性试验，节省了 180 万元试验费用，共带来 410 万元的经济效益；

5、中国电科 20 所在通讯产品印制板组件 L 波段接口单元的研制中，通过本项目的获得的回流焊工艺模型，对现有工艺进行优化改进，提出了 LGA 器件低空洞率焊接方法，采用具有纳米涂层的高精度开孔钢片进行预制焊料，然后使用架桥法进行焊膏印刷，解决了由于 LGA 封装器件焊接高度低，在进行回流焊接时空洞率较大、存在较多缺陷的问题，实现了 LGA 器件低空洞率高质量焊接，焊接空洞率降低至 10%以下，产品一次调试通过率提升至 98%。

六、主要知识产权

| 序号 | 知识产权类别 | 知识产权具体名称               | 国家 | 授权号              | 授权日期             | 证书编号     | 权利人              | 发明人               |
|----|--------|------------------------|----|------------------|------------------|----------|------------------|-------------------|
| 1  | 专利     | 基于差值法的回流焊过程中焊料弹性模量测量方法 | 中国 | ZL202010793383.8 | 2023 年 3 月 10 日  | 5774491  | 西安电子科技大学         | 田文超；史以凡；陈勇；陈帅；王文龙 |
| 2  | 专利     | 一种 QFP 器件引脚变形校型工装      | 中国 | ZL202122469964.9 | 2022 年 5 月 13 日  | 16516373 | 中国电子科技集团公司第二十研究所 | 金星；王文龙；陈帅；谭小鹏     |
| 3  | 专利     | 一种射频绝缘子焊接辅助装置          | 中国 | ZL202120433550.8 | 2021 年 11 月 16 日 | 14714843 | 中国电子科技集团公司第二十研究所 | 刘志丹；赵志平；张飞；陈帅；罗小宇 |
| 4  | 专利     | 一种用于单片微波集成电路           | 中国 | ZL202120423394.7 | 2021 年 12 月 28 日 | 15323809 | 中国电子科技集团         | 陈帅；赵文忠；吴昕         |

|   |    |   |    |                  |                 |                      |                            |                                 |
|---|----|---|----|------------------|-----------------|----------------------|----------------------------|---------------------------------|
|   |    | 芯片批量共晶焊接的装置   |    |                  |                 |                      | 公司第二十研究所                   | 雷; 刘志丹                          |
| 5 | 论文 | Effect of the reflow process on IMC growth for different devices and complex components   | 欧洲 | 2022, 31: 115028 | 2022 年 12 月 1 日 | Smart Mater. Struct. | 西安电子科技大学; 中国电子科技集团公司第二十研究所 | 崔昊; 田文超; 赵旭涛; 陈帅; 陈志强           |
| 6 | 论文 | The Reliability of the Complex Components under Temperature Cycling, Random Vibration, and Combined Loading for Airborne Applications | 欧洲 | 2023, 13: 473    | 2023 年 3 月 1 日  | Crystals             | 西安电子科技大学                   | 崔昊; 田文超; 徐汉阳; 王恒; 黄家波; 彭春喜; 陈志强 |
| 7 | 论文 | The Study of the Reliability of Complex Components during the Electromigration Process  | 欧洲 | 2023, 14: 499    | 2023 年 3 月 1 日  | Micromachines        | 西安电子科技大学                   | 崔昊; 田文超; 张一名; 陈志强               |
| 8 | 论文 | Effect of Electromigration on Interfacial Reaction In Ni/Sn63Pb37/Cu BGA Solder Joints  | 美国 | 2021             | 2021 年 9 月 14 日 | 2021 22nd ICEPT      | 中国电子科技集团公司第二十研究所           | 张飞; 陈帅; 刘志丹; 王文龙                |
| 9 | 论文 | Reflow Soldering Process Optimization Based on Surface Evolver Solder Joint   | 美国 | 2021             | 2021 年 9 月 14 日 | 2021 22nd ICEPT      | 中国电子科技集团公司第二十研究所; 西安电子科技大学 | 金星; 王文龙; 赵文忠; 张雨婷; 谭小鹏; 陈帅      |

|        |        |   |        |                 |                   |            |                              |                  |
|--------|--------|---|--------|-----------------|-------------------|------------|------------------------------|------------------|
|        |        | Shape<br>Simulation<br>and Finite<br>Element<br>Analysis of<br>PCB Assembly |        |                 |                   |            |                              |                  |
| 1<br>0 | 论<br>文 | LGA 器件焊点<br>缺陷分析及解<br>决措施   | 中<br>国 | 2021, 1, 5<br>1 | 2021 年 1<br>月 1 日 | 印制电路<br>信息 | 中国电子<br>科技集团<br>公司第二<br>十研究所 | 王文龙; 陈<br>帅; 谭小鹏 |

## 科技发明奖公示项目

**一、项目名称：**高性能金属纤维多孔材料制备技术及多功能应用

**二、提名者及提名意见**

提名单位：陕西省科学技术厅。

提名意见：金属纤维多孔材料是由大量孔隙和少量金属纤维骨架构成的一类非常重要的结构功能一体化材料，具有孔形稳定、可折叠、可加工、可焊接等优点，在航空航天、石油化工、能源、环保等领域的噪声控制、能量交换和过滤分离中发挥着极其重要和不可替代的作用。

该项目发明了纤维骨架晶粒细小且无竹节状分布的瞬时高温烧结技术，有效抑制了纤维骨架晶粒的异常长大，阐明了微米级金属纤维骨架的微观组织和烧结结点的形成与长大规律，建立了金属纤维烧结图，揭示了金属纤维多孔材料的烧结机制；发明了金属纤维多孔材料热膨胀调控烧结技术，解决了结点数量少、烧结颈发育不充分的难题；发明了多孔与致密材料异质界面活化烧结技术，攻克了二者之间接触面积小、烧结驱动力低的瓶颈；发明了高性能金属纤维多孔材料及制品的规模稳定生产技术，开发了不锈钢、铁铬铝、镍等 6 种材质、20 余种规格高性能金属纤维多孔材料，已在精密电子器件、斯特林发电机等行业得到推广应用。

该项目制备的高性能金属纤维多孔材料支撑了我国噪声控制、高效换热等行业的技术进步和自主创新发展，在新能源、船舶、医疗器械、国防军工等领域也正日益展现出广阔的应用前景。

拟提名该项目为陕西省技术发明奖二等奖。

### 三、项目简介

该项目属于金属材料领域。

金属纤维多孔材料是由大量孔隙和少量金属纤维骨架构成的一类非常重要的结构功能一体化材料，具有孔形稳定、可折叠、可加工、可焊接等优点，在航空航天、能源化工、节能环保等领域的噪声控制、能量交换和过滤分离中发挥着极其重要和不可替代的作用。随着我国双碳战略目标的实施，电子器件、新能源、冶金等行业对金属纤维多孔材料的综合性能提出了巨大挑战，迫切需要突破三大瓶颈：一是金属纤维骨架的强塑性难以满足应用需求；二是多孔材料在高温、强振动等苛刻环境下可靠性低、寿命短；三是多孔与致密复合材料难以制备。

项目历经 13 年，从波动力学、粉末冶金原理和扩散理论出发，发明了系列高性能金属纤维多孔材料及制品制备技术，实现了规模生产和应用，主要发明点如下：

一是揭示了金属纤维多孔材料的烧结机制，阐明了微米级金属纤维骨架的微观组织和烧结结点的形成与长大演化规律，建立了金属纤维烧结图，提出了孔隙、纤维骨架和烧结结点协同控制新思路。

二是发明了金属纤维骨架晶粒细小且无竹节状分布的瞬时高温烧结技术。充分利用高密度位错在高温烧结时作为空位高速扩散的通道，促进烧结结点的快速形成、发育与长大，有效抑制了纤维骨架晶粒的异常长大，实现了纤维骨架的强塑性最佳匹配。采用该技术制备的金属纤维骨架的拉伸强度为 522.5MPa，较传统烧结技术提高 80%，而延伸率仅降低 0.7%。

三是发明了金属纤维多孔材料热膨胀调控烧结技术。开发了气流振动铺制、金属纤维骨架约束等专有技术，显著增大了金属纤维之间的接触面积，解决了结点数量少、烧结颈发育不充分的难题，制备出高强高韧金属纤维多孔材料。该材料的拉伸强度由传统烧结的 15MPa 提高到 21MPa，而延伸率仅降低 1.2%。

四是发明了多孔材料和致密材料异质界面活化烧结技术，开发了梯度孔结构纤维多孔材料、粉末颗粒表面活化、粉末浆料配制及喷涂等专有技术，突破多孔材料与致密材料接触面积小、烧结驱动力低等难题，显著降低烧结温度、缩短烧结时间。复合材料的界面结合强度由传统烧结的 15MPa 提高到 35MPa 以上。

五是发明了高性能金属纤维多孔材料及制品的规模稳定生产技术。开发了不锈钢、铁铬铝、镍等 6 种材质、20 余种规格高性能金属纤维多孔材料，其中超薄高孔隙率多孔/致密复合材料和梯度结构金属纤维多孔回热器实现了进口替代。

项目授权发明专利 20 项、实用新型专利 5 项，出版专著 1 部，发表论文 43 篇，SCI

收录 28 篇，主持制定行业标准 1 项，培养研究生 5 名（博士 1 名，硕士 4 名）。

项目建成年产 5 万余平方米高性能金属纤维多孔材料及制品生产线，产品已用于精密电子器件隔声罩、斯特林发电机回热器等企业，支撑了我国噪声控制、能量交换等行业的技术进步和自主创新发展，在新能源、船舶、医疗器械、国防军工等领域也正日益展现出广阔的应用前景。

#### 四、客观评价

##### （一）科技计划项目验收意见

1、陕西省科技计划项目验收意见（2020 年）：项目研究了金属纤维多孔材料孔结构的精确控制方法，优化了金属纤维多孔材料与致密板的复合工艺，以及金属纤维多孔材料与金属薄膜的低温成型工艺，研制的金属纤维多孔复合材料兼具较好的吸声/隔声性能及阻尼减振性能。

2、陕西省科技计划项目验收意见（2019 年）：项目研究了限域空间内用吸声元件的孔结构优化设计、制备及其规模化生产的工艺，对金属纤维多孔吸声元件的孔结构进行优化、匹配与精确控制，将薄膜与金属纤维多孔梯度结构相结合制备出多孔吸声元件。通过对吸声元件的结构及相关性能进行测试，验证了所用工艺及制备方法的可行性及可控性。

3、国家自然科学基金委员会验收意见（2017 年）：项目研究了微米级 316L 不锈钢纤维烧结过程中再结晶组织演变和竹节状晶粒形成机制、金属纤维多孔材料烧结结点形成与长大机理，建立了 316L 不锈钢纤维和 Cu 纤维烧结图；开发了快速升降温烧结技术，解决了金属纤维多孔材料的孔隙、结点和纤维骨架协同控制的国际性难题。

4、国家 973 计划课题验收意见（2015 年）：课题研究工作创新性显著，在航天及石化领域噪声处理中的应用属国际首创，总体上达到了国际先进水平。基于梯度孔结构多孔材料制备工艺及吸声机理，研制出新型超薄金属纤维多孔复合结构的高效吸声材料，应用于高敏电子器件噪声处理中，显著提高了电子器件的工作精度和可靠性。

##### （二）用户应用评价意见

1、中国电子科技集团公司第二十六研究所：西北有色金属研究院研制的新型超薄（1.5mm ~ 3.0mm）金属纤维多孔吸声件成功地应用于微机械惯性测量组合中，该产品在地面经过了严苛的可靠性增长试验和噪声试验，未发生老化、减振降噪性能降低现象，快速推进了遥测系统用微机械惯性测量组合的研制进度，保证了该遥测系统总任务节点，飞行试验取得圆满成功。采用金属纤维多孔吸声件的微机械惯性测量组合在遥测系统中得到推广应用。自 2011 年，已采购 60 余批次，总计 6000 余件金属纤维多孔吸声件装备于多个遥测系统中，至今使用情况良好。

2、兰州空间技术物理研究所：西北有色金属研究研制的烧结型金属纤维多孔回热器具有“高热容量、低流阻”的优异特性，显著降低了斯特林机的损耗和最低制冷温度，提高了斯特林的整体性能。自 2017 年，累计采购回热器 50 余件。

3、中车唐山机车车辆有限公司：西北有色金属研究院研制的大尺寸（1227mm×1150mm×20mm）、高孔隙率、低密度梯度结构金属纤维多孔吸声件通过了我单位的吸声性能和隔声性能的测试，满足设计指标要求。多孔吸声件的平均吸声系数超过 0.5，降噪效果超过 30dB。

4、西北工业大学：西北有色金属研究院采用梯度孔结构不锈钢纤维多孔材料研制的螺旋形水下吸声件装机测试表明，其降噪效果达到了技术指标要求，满足应用需求。自 2015 年我单位已采购 10 余批次，累计 60 余件吸声件，至今使用情况良好。

### （三）技术检测报告

北京理工大学对项目制备的不锈钢纤维多孔材料的吸声系数进行了测试。结果表明：声波频率为 50-1000Hz 时，材料的平均吸声系数为 0.526。

西安汉唐分析检测有限公司对项目制备的不锈钢纤维多孔材料的拉伸性能进行了测试。结果表明：瞬时高温烧结技术制备的不锈钢纤维多孔材料的抗拉强度为 21MPa，延伸率为 7.2%，而传统烧结技术制备的不锈钢纤维多孔材料的抗拉强度仅为 15MPa，延伸率为 8.4%。

西安汉唐分析检测有限公司对项目制备的不锈钢纤维多孔/致密复合材料的隔声量进行了测试。结果表明：声波频率为 50-6400Hz 时，材料的平均隔声量为 60.40dB。

### （四）学术评价意见

中国工程院院士、中南大学原校长黄伯云教授的评价：在国家自然科学基金的支持下，西北有色金属研究院在金属纤维多孔材料研究方面取得了多项开创性的成果：（1）在烧结机理方面，发现烧结结点的形成在正常的加热和冷却条件下，主要通过表面扩散机制来实现；采用快速升降温条件时，主要通过位错扩散机制完成。（2）在声学性能方面，开发出了梯度孔结构金属纤维多孔材料，表现出优异的吸声性能，在中高频范围内吸声系数保持在 0.8 以上，其低频吸声系数也超过了 0.2。这种梯度孔超薄材料（2mm）已经在受限空间内的吸声降噪中得到应用。《金属纤维多孔材料—孔结构及性能》一书的出版，不仅丰富了金属纤维多孔材料制备的基础原理，而且提供了多方面的实践指导，对从事金属多孔材料研究与开发的科技工作者具有重要的参考价值。

国际知名材料学家、澳大利亚皇家墨尔本理工大学 Ma Qian 教授的评价：论文“Fabrication of high strength and ductile stainless steel fiber felts by sintering”系统研究了不锈钢纤维毡的烧结工艺，开发了一种新型烧结技术，获得了未形成竹节状晶粒的临界烧结工艺，文章评述“Advances in Sintering”（JOM, 2016, 68（3）：876-877）。

## 五、应用情况

### （一）应用情况

项目制备的高性能金属纤维多孔材料已在中国电子科技集团公司第二十六研究所、兰州空间技术物理研究所、西北工业大学、香港科技大学、北京理工大学等单位得到推

广应用，支撑了我国民用卫星、电器、换热等行业的技术进步和自主创新发展，产生了显著的经济效益和社会效益。

主要应用单位情况如表 1 所示。

表 1 主要应用单位情况表

| 序号 | 单位名称              | 应用的技术             | 应用对象及规模            | 应用起止时间        | 单位联系人/电话            |
|----|-------------------|-------------------|--------------------|---------------|---------------------|
| 1  | 中国电子科技集团公司第二十六研究所 | 金属纤维多孔/致密复合材料制备技术 | 卫星关键部件噪声控制，6000 余件 | 2011 年至今      | 陈宏<br>/13996332802  |
| 2  | 兰州空间技术物理研究所       | 金属纤维多孔材料制备技术      | 金属纤维多孔回热器，50 余件    | 2017 年至今      | 罗新奎<br>/18993199654 |
| 3  | 西北工业大学            | 梯度孔结构金属纤维多孔材料制备技术 | 水下吸声材料，60 余件       | 2018 年-2022 年 | 任树伟<br>/18991283906 |
| 4  | 中车唐山机车车辆有限公司      | 梯度孔结构金属纤维多孔材料制备技术 | 高速列车减振降噪           | 2022 年至今      | 韩铁礼<br>/15931532781 |
| 5  | 香港科技大学            | 金属纤维多孔材料制备技术      | 金属纤维多孔吸声材料，50 余件   | 2016 年-2017 年 | 方亦<br>/18594228186  |
| 6  | 北京理工大学            | 梯度孔结构金属纤维多孔材料制备技术 | 973 计划项目低频噪声控制研究   | 2012 年-2015 年 | 周萧明<br>/13810231521 |
| 7  | 中国科学院声学研究所        | 金属纤维多孔材料制备技术      | 纤维多孔金属吸声材料试验件      | 2014 年-2016 年 | 王晓林<br>/18600102499 |

（二）经济效益和社会效益

经济效益：项目开发的高性能金属纤维多孔材料已经在本项目完成单位西北有色金属研究院全面实现量产和销售。项目成果实施以来，项目完成单位累计为中国电子科技集团公司第二十六研究所、兰州空间技术物理研究所、中车唐山机车车辆有限公司、西北工业大学、西安交通大学、香港科技大学、中科院声学研究所等单位提供高性能金属纤维多孔材料 6000 余件、金属纤维多孔回热器 50 余件，实现销售额 144.17 万元。高性能金属纤维多孔材料及制品已用于精密电子器件隔声罩、斯特林发电机回热器等企业，支撑了我国减振降噪、高效换热等行业的技术进步和自主创新发展，在新能源、船舶、医疗器械、国防军工、交通运输等领域也正日益展现出广阔的应用前景。

近 3 年（2021 年 - 2023 年），项目成果累计新增销售额 47.91 万元，如表 2 所示：



表 2 近 3 年新增销售额及利润情况

| 自然年  | 新增销售额/万元 | 新增利润/万元 |
|------|----------|---------|
| 2021 | 24.78    | 0       |
| 2022 | 11.59    | 0       |
| 2023 | 11.54    | 0       |
| 合计   | 47.91    | 0       |

社会效益：项目研发的高性能金属纤维多孔材料及制品可广泛应用于航空、航天、国防军工、能源、环保、医疗器械等领域的吸声降噪、能量交换和过滤分离等行业，在带来显著经济效益的同时，也产生了显著的社会效益，具体包括：

**一是有利于我国航空航天事业的高质量发展。**项目研制的超薄高孔隙率多孔/致密复合材料已用于我国民用卫星的噪声控制，显著降低了噪声对精密电子器件及装备输出信号精度的影响；此外，高性能金属纤维多孔回热器已用于斯特林发电机的热量交换，显著降低了斯特林机的功率损耗和最低制冷温度，促进我国航空航天事业的高质量发展。

**二是有利于高技术企业的技术进步和自主创新发展。**精密电子器件噪声控制和斯特林机热量交换用高性能金属纤维多孔材料及制品已实现进口替代，有利于相关产品的升级换代，促进企业的技术进步和自主创新发展。

**三是对行业的示范性和带动作用巨大。**项目研制的高性能金属纤维多孔材料及制品将促进金属纤维新型制备技术的开发和产业化发展，相关产品和技术还可推广到其他噪声控制、高效换热、过滤分离、能量吸收等行业，为行业的发展形成了示范效应。

六、主要知识产权目录

| 序号 | 知识产权类别 | 知识产权具体名称                | 国家（地区） | 授权号           | 授权日期             | 证书编号    | 权利人       | 发明人                       |
|----|--------|-------------------------|--------|---------------|------------------|---------|-----------|---------------------------|
| 1  | 发明专利   | 一种防止金属纤维多孔材料晶粒异常长大的烧结方法 | 中国     | CN105108149 B | 2017 年 6 月 23 日  | 2530019 | 西北有色金属研究院 | 王建忠，马军，李爱君，许忠国，汤慧萍，敖庆波，支浩 |
| 2  | 发明专利   | 一种金属纤维多孔吸水材料的制备方法       | 中国     | CN103406738 B | 2015 年 11 月 18 日 | 1841636 | 西北有色金属研究院 | 王建忠，汤慧萍，敖庆波，支浩，马军，荆鹏，许忠国  |
| 3  | 发明专利   | 一种低频吸声材料的制              | 中国     | CN10512743    | 2017 年 9 月 22 日  | 2634061 | 西北有色金属研究  | 敖庆波，汤慧萍，王建忠，              |

|    |            |  |    |                       |                     |             |                   |  |
|----|------------|--|----|-----------------------|---------------------|-------------|-------------------|--|
|    |            | 备方法                                    |    | 1 B                   |                     |             | 院                 | 支浩，马军，<br>李爱君，许忠<br>国  |
| 4  | 发明专<br>利   | 一种不锈钢<br>纤维毡的烧<br>结方法                  | 中国 | CN<br>10505766<br>8 B | 2017 年 6<br>月 23 日  | 25304<br>70 | 西北有色<br>金属研究<br>院 | 马军，汤慧<br>萍，李爱君，<br>许中国，王建<br>忠，支浩，敖<br>庆波                    |
| 5  | 发明专<br>利   | 一种 316L 不<br>锈钢纤维烧<br>结毡的制备<br>工艺      | 中国 | CN<br>10779072<br>1 B | 2019 年 7<br>月 12 日  | 34509<br>45 | 西北有色<br>金属研究<br>院 | 马军，王建<br>忠，李爱君，<br>敖庆波                                       |
| 6  | 发明专<br>利   | 一种回热器<br>的制备方法                         | 中国 | CN<br>10791755<br>5 B | 2020 年 7<br>月 17 日  | 38944<br>52 | 西北有色<br>金属研究<br>院 | 王建忠，汤慧<br>萍，马军，敖<br>庆波，李爱君                                   |
| 7  | 发明专<br>利   | 一种低频吸<br>声材料的制<br>备方法                  | 中国 | CN<br>10484630<br>1 B | 2017 年 3<br>月 15 日  | 24145<br>73 | 西北有色<br>金属研究<br>院 | 王建忠，敖庆<br>波，马军，支<br>浩，许忠国，<br>李爱君，汤慧<br>萍                    |
| 8  | 发明专<br>利   | 强化沸腾传<br>热用双重孔<br>结构多孔铜<br>材料的制备<br>方法 | 中国 | CN103465<br>543B      | 2015 年 7<br>月 29 日  | 17378<br>31 | 西北有色<br>金属研究<br>院 | 支浩，汤慧<br>萍，朱纪磊，<br>李广忠，李<br>钢，王建忠，<br>敖庆波，马<br>军，李爱君，<br>许忠国 |
| 9  | 发明专<br>利   | 一种传热用<br>金属纤维复<br>合多孔表面<br>的制备方法       | 中国 | CN<br>10243075<br>2 B | 2013 年 1<br>月 23 日  | 11271<br>48 | 西北有色<br>金属研究<br>院 | 支浩，汤慧<br>萍，朱纪磊，<br>王建忠，敖庆<br>波，马军                            |
| 10 | 实用新<br>型专利 | 一种隔声罩                                  | 中国 | CN<br>20336673<br>0 U | 2013 年 12<br>月 25 日 | 33361<br>21 | 西北有色<br>金属研究<br>院 | 敖庆波，汤慧<br>萍，王建忠，<br>朱纪磊，支<br>浩，马军                            |

## 七、主要完成人情况

| 姓名  | 排名 | 行政职务 | 技术职称 | 工作单位      | 完成单位      | 对本项目贡献  |
|-----|----|------|------|-----------|-----------|---|
| 王建忠 | 1  | 所长助理 | 正高   | 西北有色金属研究院 | 西北有色金属研究院 | 本项目的负责人，提出了项目总体研发思路和实施方案，主持完成高性能金属纤维多孔材料制备技术开发、批量制备及推广应用，参与完成行业标准 1 项，主持编写专著 1 部，获多项授权专利。 |
| 敖庆波 | 2  | /    | 正高   | 西北有色金属研究院 | 西北有色金属研究院 | 主要研发人员，负责实验样品制备、声学性能测试分析，高性能金属纤维多孔材料小批量制备，主持完成行业标准 1 项，参与编写专著 1 部，获多项授权专利。                |
| 马军  | 3  | /    | 正高   | 西北有色金属研究院 | 西北有色金属研究院 | 主要研发人员，负责高性能金属纤维多孔材料的力学性能测试分析，金属纤维多孔回热器小批量制备及推广应用，参与完成行业标准 1 项，参与编写专著 1 部，获多项授权专利。        |
| 支浩  | 4  | /    | 高工   | 西北有色金属研究院 | 西北有色金属研究院 | 主要研发人员，负责金属纤维多孔材料烧结结点形成与长大规律研究，多孔材料的传热性能测试分析，获多项授权专利。                                     |
| 李爱君 | 5  | /    | 工程师  | 西北有色金属研究院 | 西北有色金属研究院 | 主要研发人员，负责高性能金属纤维多孔材料烧结机制研究及小批量制备工作，参与完成行业标准 1 项，参与编写专著 1 部，获多项授权发明专利。                     |
| 许忠国 | 6  | /    | 工程师  | 西北有色金属研究院 | 西北有色金属研究院 | 主要研发人员，负责高性能金属纤维多孔材料批量制备及推广应用工作，获多项授权专利。  |

## 八、主要完成单位情况

本项目由西北有色金属研究院完成。

项目实施过程中，西北有色金属研究院积极开展科技计划项目申请、组织管理与实施工作，组织团队开展项目难点、关键问题分析，论证项目实施方案，制定技术路线，并落实任务分工，定期检查任务完成情况。西北有色金属研究院揭示了金属纤维多孔材料的烧结机制，阐明了微米级金属纤维骨架的微观组织和烧结结点的形成与长大演化规律，建立了金属纤维烧结图，提出了孔隙、纤维骨架和烧结结点协同控制新思路；发明了纤维骨架晶粒细小且无竹节状分布的瞬时高温烧结技术、纤维多孔材料热膨胀调控烧

结技术、多孔与致密材料异质界面活化烧结技术，解决了结点数量少、烧结颈发育不充分的问题，攻克了多孔材料与致密材料之间接触面积小、烧结驱动力低的难题，制备出高强高韧金属纤维多孔材料，实现了金属纤维多孔材料的孔隙、结点和骨架的协同控制。西北有色金属研究院建成年产 5 万余平方米高性能金属纤维多孔材料及其制品生产线，实现了不锈钢、铁铬铝、镍等 6 种材质、20 余种规格高性能金属纤维多孔材料的长期稳定供货，有力支撑了我国航空航天、能源、环保、国防军工等领域的技术进步和自主创新发展。

## 九、完成人合作关系说明

本项目成果由西北有色金属研究院完成。王建忠长期从事金属纤维多孔材料及其产品的研发及推广应用工作。作为负责人带领团队成员发明了纤维骨架晶粒细小且无竹节状分布的瞬时高温烧结技术、纤维多孔材料热膨胀调控烧结技术、多孔与致密材料异质界面活化烧结技术，实现了高性能金属纤维多孔材料及其制品的规模稳定生产，取得了重要的技术创新和应用推广成效。

1、该项目完成过程中，第 1 完成人王建忠、第 2 完成人敖庆波完成科技成果验收 4 项；第 3 完成人马军参与完成科技成果验收 3 项；第 4 完成人支浩参与完成科技成果验收 2 项；第 5 完成人李爱君参与完成科技成果验收 3 项；第 6 完成人许忠国参与完成科技成果验收 1 项。

2、项目完成人王建忠、敖庆波、马军、李爱君共同完成我国首个行业标准“烧结金属多孔材料-阻尼性能的测定（YS/T 1538-2022）”的制定工作；同时，共同完成专著“金属纤维多孔材料-孔结构及性能”的撰写工作。

3、项目第 1 完成人王建忠共获得授权专利 25 项，其他完成人敖庆波、马军、支浩、李爱君、许忠国均参与了这些专利的发明创造，其中第 2 完成人敖庆波合作 25 项，第 3 完成人马军合作 24 项，第 4 完成人支浩合作 15 项，第 5 完成人李爱君合作 11 项，第 6 完成人许忠国合作 6 项。

4、项目第 1 完成人王建忠与其他完成人合作完成科技论文 43 篇，第 2 完成人敖庆波合作完成 34 篇，第 3 完成人马军合作完成 33 篇，第 4 完成人支浩合作完成 19 篇，第 5 完成人李爱君合作完成 15 篇，第 6 完成人许忠国合作完成 5 篇。

