

一、项目名称

高钢级石油管材微观组织及力学性能智能评价关键技术及应用

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省科学技术厅

提名意见：

石油管材质量与可靠性直接影响油气田安全生产与国家能源战略安全。随着深层、超深层油气开发加快，高钢级管材应用规模持续扩大，传统检测方式因金相制样效率低、显微组织鉴别主观性强、断口判定误差大等瓶颈，已难以适配质量控制需求。

本项目面向行业重大需求，系统突破三大核心关键技术：一是发明焊接接头低倍显微表征制备—成像—分析一体化技术，焊缝道次边界清晰度提升，实现环焊缝区域自动分割与道次特征精准提取；二是攻克金相高通量自动制备与显微组织智能分析技术，制样效率达 20~25 件/小时，优于国际同类设备，智能分析 26 类复杂显微组织秒级识别准确率超 91%；三是建立塑韧性智能分析系列技术，断口关键参数评定准确率提升 10%、效率提升 50%，突破断口偏移导致试样报废的技术瓶颈。项目获授权发明专利 12 件，制修订国家标准 1 项、团体标准 2 项，取得软件著作权 2 项，发表论文 15 篇，其中 SCI/EI 论文 8 篇，落地转化形成 5 台/套检测仪器/设备，构建“试验装备+算法软件+标准规范”成果体系。

成果已在工程材料研究院、陕西燃气集团、长庆油田、西南油气田及天津钢管、烟台鲁宝等骨干企业广泛应用，近三年累计产生经济效益超 15 亿元，显著提升了石油管材检测行业智能化水平与整体效率，有力推动了金属材料检测产业向自动化、数字化、智能化转型升级，为国家能源安全战略和陕西高端检测装备产业发展提供了坚实技术支撑。

推荐该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖。

三、项目简介

石油管材是油气勘探开发及输送的核心装备，其质量和可靠性直接影响油气田的生产效率和安全运行。随着我国深层、超深层油气开发步伐加快，高钢级石油管材应用规模持续扩大，对管材组织均匀性、强韧性匹配及服役可靠性提出了更为严苛的要求。与此同时，石油管检测行业长期面临金相制样效率低、一致性差，显微组织鉴别依赖人员经验、主观性强，力学试验断口人工判定误差大、智能化程度不足等共性技术难题，传统检测方式已难以适配高钢级管材的质量控制需求。

本项目依托中国石油集团公司科研项目，历时多年技术攻关，系统突破焊接接头表征、金相自动制备与组织识别、塑韧性分析等智能评价技术，构建了“自动制备—智能成像—智能分析”技术体系，形成覆盖石油管材微观组织及力学性能智能评价的智能化解决方案，为油气钻采及输送安全运行提供了检测技术支撑。

主要科技创新点如下：

（1）**发明了焊接接头低倍显微表征制备—成像—分析一体化技术。**发明了管线焊接接头金相试样专用浸蚀剂及分步浸蚀工艺，焊缝道次边界清晰度提升 5 倍；开发高分辨宏观金相拍摄分析装置，图像分辨率达 2k 以上；构建了深度学习图像识别模型，实现环焊缝区域自动分割与道次特征精准提取，特征提取准确率提升 5% 以上，形成了覆盖焊接接头低倍评价全过程的智能化技术体系。

（2）**攻克了金相高通量自动制备与显微组织智能分析技术。**发明了全流程金相试样制备技术和制样设备，能够依据不同工艺要求，自动、连贯地完成预磨、磨光、抛光清洗等全流程工序，批量制备出无任何划痕、表面呈镜面状态的高品质抛光试样，制样效率 20~25 件/小时，制样效率及一致性优于国际同类设备；发明了含裂纹金相样品智能浸蚀增强及失效断口表面处理技术，裂纹及断口分析效率提升 3 倍；针对石油专用管材显微组织特征，设计专用轻量化 AI 模型，实现 26 类复杂显微组织秒级识别，准确率超过 91%。

（3）**建立了塑韧性智能分析系列技术。**采用更适配拉伸试样断裂模式的计算模型，研发了金属材料断后伸长率测试方法和装置，突破性解决了传统方法在断口发生偏移时测量不准或者试样报废的问题。建立了夏比冲击断口、准静态断裂韧度断口特征像素级识别方法和研制了断口图像采集及智能分析设备，引入深度神经网络优化计算模型，实现断口关键参数智能量化评定，准确率提升 10%、效率提升 50%，完成了从图像采集到参数计算的全流程自动评定。

本项目获得授权发明专利 12 件；制修订国家标准 1 项、团体标准 2 项；取得计算机软件著作权 2 项；发表论文 15 篇，其中 SCI/EI 论文 8 篇；落地转化形成全流程高通量金相自动制样设备、高分辨宏观金相显微镜、断口图像采集与智能分析设备等 5 台/套检测仪器/设备，构建了“试验装备+算法软件+标准规范”的成果体系。

项目成果已在工程材料研究院国家质检中心、长庆油田、西南油气田等油田及相关企业和陕西燃气集团得到推广应用，有效支撑了油气田用管材入库检验、失效分析以及能源站场工艺管道用管的质量管控工作，显著提升了检测效率和检测结果的可靠性。同时，成果在天津钢管、烟台鲁宝等国内石油专用管骨干制造企业完成推广转化，助力企业提升产品质量管控效率、降低检测人力成本；并通过西安航晨机电科技股份有限公司等省内高新技术企业实现产业化落地，形成智能检测装备的本地化研发能力。近 3 年累计产生经济效益超 15 亿元，全面提升了石油管材检测行业的智能化分析水平与整体效率。

本项目突破了石油专用管材显微组织及力学性能智能评价系列关键技术与核心装备，推动金属材料检测产业向自动化、数字化、智能化转型升级。成果既服务国家能源安全战略，又带动陕西高端检测装备产业发展，为全省建设区域先进制造业中心、打造西部先进制造高地提供了坚实技术支撑。

四、客观评价

1. 课题验收意见

1) 中国石油集团工程材料研究院有限公司科技管理处于 2020 年 9 月 22 日对项目支撑课题《石油管材理化性能评价技术研究》进行了验收。形成的主要验收意见汇总如下：课题研究开发了石油管材焊缝（高频电阻焊、高钢级管线环焊缝）浸蚀及分析新技术与装置，使焊缝形貌清晰准确显示。本课题研究成果提升了实验室检测能力和技术水平，已应用于国家质检中心实验室的日常检测工作中。

2) 西安航晨机电科技股份有限公司于 2023 年 4 月 21 日对项目支撑课题《高通量金相智能检测技术研发与产业化项目》进行了结题评审。形成的主要评审意见总结如下：项目立项契合高端金属检测装备国产化、质检数字化行业发展需求，研究目标清晰，技术路线合理，过程管理规范完整。攻克三大核心关键技术，创新突出：一体化高通量金相制备工艺解决人工制样短板；轻量化图像识别技术替代人工主观判读；配套大数据同步专利实现检测数据闭环管控，三项创新形成完整软硬件一体化解决方案，技术指标全部达预期，部分指标优于行业现有产品。知识产权布局完善，专利、标准、学术论文、实体装备成果齐全，技术转化落地成效显著，成套检测装备已在第三方质检、金属制造企业批量应用，产业化经济效益突出，具备良好行业推广价值。

2. 第三方客观评价

1) 科技查新报告

2026 年 8 月 10 日，科学技术部西南信息中心查新中心针对“高钢级石油管材微观组织及力学性能智能评价关键技术研究及应用”项目成果进行了科技查新，形成科技查新报告 1 项。报告主要结论如下所述。

(a) 主要技术与当前国内外同类技术比对情况如下：

“经对比分析：……上述文献均未具体述及查新点中的“高钢级管线环焊缝两步复配腐蚀液分步腐蚀工艺、含裂纹金相试样灰度函数整体抬升图像处理方法、拉伸试样断后伸长率偏移补偿测量方法、管线环焊缝宏观金相智能拍摄分析装置、高钢级厚壁管件热处理状态深度学习智能检测系统、石油管材全链条大数据同步管控方法、HFW 钢管焊接接头浸蚀工艺及 GB/T 39077-2024 标准对应的双相不锈钢有害相检测体系”等技术特征。”

(b) 科技查新综合结论：“……综合上述技术特征的“高钢级石油管材微观组织及力学性能智能评价关键技术研究及应用”，在所检文献以及时限范围内，除本项目文献之外，国内外未见相同文献报道。本项目具有新颖性。”

2) 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有限公司检测校准（CNAS），仪器精度完全满足试验测试要求。

3. 项目已取得成果

本项目获得授权发明专利 12 件；制修订国家标准 1 项、团体标准 2 项；取得计算机软件著作权 2 项；发表论文 15 篇，其中 SCI/EI 论文 8 篇；落地转化形成全流程高通量金相自动制样设备、高分辨宏观金相显微镜、断口图像采集与智能分析设备等 5 台/套检测仪器/设备。

五、应用情况和效益

1. 应用情况

本项目成果已在中国石油集团工程材料研究院、长庆油田、西南油气田等油田及相关企业和陕西燃气集团得到推广应用，有效支撑了油气田用管材入库检验、失效分析以及能源站场工艺管道用管的质量管控工作，显著提升了检测效率及结果可靠性；同时在天津钢管、烟台鲁宝等国内石油管骨干制造企业完成推广转化，助力企业提升产品质量管控效率、降低检测人力成本；并通过西安航晨机电科技股份有限公司、西安维度测控技术有限公司等省内高新技术企业实现产业化落地，形成智能检测装备的本地化研发能力，落地转化形成全流程高通量金相自动制样设备、高分辨宏观金相显微镜、断口图像采集及智能分析设备等 5 台/套有形化检测仪器/设备，构建了“试验仪器+算法软件+标准规范”的成果体系。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	中国石油集团工程材料研究院有限公司	焊接接头低倍显微表征制备—成像—分析一体化技术、金相高通量自动制备与显微组织智能分析技术、塑韧性智能分析系列技术	管材质量监督检验；试验技术、设备开发推广	2020 年—至今	宋寰/029-81887879
2	西安航晨机电科技股份有限公司	金相高通量自动制备与显微组织智能分析技术	全流程制样新设备研发及成果转化	2023 年—至今	牛文龙/18629501499
3	陕西燃气集团有限公司	焊接接头低倍显微表征制备—成像—	能源站场工艺管道	2023 年—至今	郭星辰/15829041169

		分析一体化技术、金相高通量自动制备与显微组织智能分析技术、塑韧性智能分析系列技术	用管的质量检验		
4	中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司	焊接接头低倍显微表征制备—成像—分析一体化技术、金相高通量自动制备与显微组织智能分析技术、塑韧性智能分析系列技术	油田用管的质量检验	2020 年—至今	田青/029-86597932
5	中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司	焊接接头低倍显微表征制备—成像—分析一体化技术、金相高通量自动制备与显微组织智能分析技术、塑韧性智能分析系列技术	油田用管的质量检验	2020 年—至今	陈熙平/028-86014767
6	天津钢管制造有限公司	金相高通量自动制备与显微组织智能分析技术、塑韧性智能分析系列技术	钢管生产制造过程中的质量控制、检验检测效率提升	2020 年—至今	张传友/13302075921
7	烟台鲁宝钢管有限责任公司	金相高通量自动制备与显微组织智能分析技术、塑韧性智能分析系列技术	钢管生产制造过程中的质量控制、检验检测效率提升	2024 年—至今	尹卫东/13863813860
8	西安维度测控技术有限公司	金相高通量自动制备与显微组织智能分析技术、塑韧性智能分析系列技术	新设备研发及成果转化	2023 年—至今	崔鹏军/13572137656

2. 经济效益和社会效益

（一）经济效益：

本项目完成单位中国石油集团工程材料研究院有限公司、西安航晨机电科技股份有限公司、陕西燃气集团有限公司利用本项目成果开展石油管质量监督、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。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西南油气田分公司等部分代表性应用单位应用项目成果对物资检验全链条管控，有效避免了不合格管材流入作业现场造成的损失，取得了显著经济效益。经测算近三年累计取得整体经济效益逾 15 亿元。

（二）社会效益：

本项目成果“高钢级石油管材微观组织及力学性能智能评价关键技术”的应用，大幅提升了我国石油管材质量检测的安全保障能力，满足了油气勘探开发与长输管道安全运行的技术需求，有力支撑了国家能源安全战略落地。通过西安航晨机电科技股份有限公司等省内高新技术企业实现产业化，带动陕西高端检测装备产业发展，为全省建设区域先进制造业中心、打造西部先进制造高地提供技术支撑。在长庆油田、西南油气田等油气田，以及天津钢管等钢管生产制造企业推广应用，有效支撑管材入库检验、失效分析及能源站场工艺管道质量管控，显著提升检测效率和可靠性，保障油气钻采及输送安全运行。

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	一种管线环焊缝宏观金相拍摄分析装置及其使用方法	中国	CN 1110771 58 B	2024 年 6 月 25 日	7138885	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	仝珂；樊治海；瞿婷婷；白小亮；何小东；陈志昕
2	发明专利	基于深度学习的高钢级厚壁管件热处理状态检测系统及方法	中国	CN 1128627 63 B	2024 年 10 月 29 日	7484219	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	仝珂；刘青；贾君君；刘文红；樊治海；李小龙
3	发明专利	一种拉伸试样断后伸长率测量方法及辅助测量装置	中国	CN 1111223 08 B	2022 年 6 月 3 日	5203358	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	梁明华；贾君君；何小东；蔺卫平；李娜
4	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	CN 1111031 83 B	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	仝珂；何小东；樊治海；李为卫；丛深

5	发明专利	一种 HFW 钢管焊接接头宏观参数显示方法	中国	CN 1098703 32 B	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	仝珂；张华；何小东；朱丽霞；丛深
6	发明专利	一种埋弧焊钢管焊缝焊偏量参数的检测仪	中国	CN 1091757 63 B	2021 年 1 月 29 日	4228182	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	贾君君；李为卫
7	发明专利	基于大数据技术的产线管控集成数据同步方法及系统	中国	CN 1194207 70 B	2025 年 5 月 13 日	7934881	西安航晨机电科技股份有限公司	雷济瑜；马波；卜石；牛文龙
8	发明专利	一种含裂纹金相试样的浸蚀及图像处理方法和设备	中国	CN 1117958 83 B	2023 年 4 月 25 日	5906449	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	仝珂；刘青；马卫锋；李小龙
9	发明专利	一种重度腐蚀污染失效断口的处理装置及方法	中国	CN 1177981 36 B	2025 年 9 月 23 日	8291275	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	仝珂；赵金兰；樊治海；白小亮；李小龙；丛深；瞿婷婷；刘青
10	标准	奥氏体-铁素体（双相）不锈钢中有害相的检测方法	中国	GB/T 39077- 2024	2024 年 7 月 24 日	国家市场监督管理总局；国家标准化管理委员会	中国石油集团工程材料研究院有限公司；中国科学院金属研究所；湖州永兴特种不锈钢有限公司；江苏省特种设备安全监督检验研究院；中国石油天然	仝珂；盖秀颖；丛深；孙梓凯；吴明华；申俊；翟婷婷；王志楠；王泉生；马强；黄国根；郭思奇；王建

							气股份有限公司西南油气田分公司安全环保与技术监督研究院；陕西省特种设备检验检测研究院；江苏容大材料腐蚀检验有限公司；浙江省特种设备科学研究院；长庆石油勘探局有限公司；浙江德威不锈钢管业股份有限公司；马鞍山尊马科技有限公司；冶金工业信息标准研究院；中国石化工程建设有限公司；天津钢管制造有限公司；上海宝世威石油钢管制造有限公司	坡；王心禾；冯惠伟；于佳音；王金光；吕传涛；徐红庄；李英存；王瑜；袁梦；赵冰；张重远；张宇锋；施慰卿；姜丽美；张传友；颜丞铭
--	--	--	--	--	--	--	--	--

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
全珂	1	/	正高级工程师	中国石油集团工程材料研究院有	中国石油集团工程材料研究院有	担任项目负责人，负责项目的总体方案制定及具体实施，对创新点 1，2，3 均做出突出

				限公司	限公司	贡献，主要解决了高钢级管线环焊缝金相形貌分道次显示、HFW 钢管焊接接头宏观参数显示等焊接接头低倍显微表征制备—成像—分析一体化技术研究难题，提出了高钢级厚壁管件热处理状态检测系统及方法、含裂纹金相试样的浸蚀及图像处理方法、重度腐蚀污染失效断口的处理方法等智能分析及参与研制全流程高通量金相试样制样设备。
刘青	2	/	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	主要负责显微组织智能表征装备与检测评价系统集成技术等关键技术研究及应用推广；参与全流程金相制备技术及自动化制样设备、含裂纹金相试样浸蚀及图像处理方法等关键技术的研究和应用推广。对创新点 1，2，3 均做出贡献。
牛文龙	3	/	高级工程师	西安航晨机电科技股份有限公司	西安航晨机电科技股份有限公司	主要负责金相高通量自动制备与显微组织智能分析技术研究及应用推广。参与高通量金相制样、显微组织图像识别技术的开发，负责金相图像数据采集单元对接专利队列排序算法，调试多类型金相数据智能切分与实时同步逻辑。对对创新点 2 有突出贡献。
张帆	4	/	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	负责项目过程中需要的金相制样及分析，参与高通量金相制样设备及技术研发过程中的基础试验，为智能分析技术提供前期试验数据。对创新点 1，2，3 均做出贡献。

姜瑞雪	5	/	高级工程师	陕西燃气集团有限公司	陕西燃气集团有限公司	负责项目研发过程中试验技术的现场应用及数据收集，进行现场反馈从而对试验技术进行调整。对创新点 1，2，3 均做出贡献。
梁明华	6	/	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	负责金属材料断后伸长率辅助测量装置的研发并参与建立了力学试验断口特征智能识别技术。对创新点 3 有突出贡献。
雷济瑜	7	/	工程师	西安航晨机电科技股份有限公司	西安航晨机电科技股份有限公司	参与设计自动制样装备总体方案，同步规划检测数据标记、串并行同步架构，制定金相图像数据分块传输策略，搭建制样设备与专利数据同步系统一体化技术方案，完成装备、算法、数据传输协同攻关。对创新点 2 做出贡献。
贾君君	8	/	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	主要负责埋弧焊钢管焊缝焊偏量参数检测仪的研发，并参与了材料断后伸长率测量装置的研发。对创新点 1 和创新点 3 做出贡献。
张萌	9	/	高级工程师	西安航晨机电科技股份有限公司	西安航晨机电科技股份有限公司	参与全流程高通量金相试样制样设备的研发及成果转化。对创新点 2 做出贡献。
丛深	10	/	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	参与环焊缝宏观形貌分道次显示、焊接接头宏观参数显示及重度腐蚀污染失效断口的处理方法等技术研究及应用。对创新点 1 和创新点 2 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	项目牵头单位，主要负责创新成果 1、创新成果 2 和创新成果 3 的研究与应用工作，针对高钢级石油管材微观组织及力学性能智能评价存在的关键技术难题，攻关形成了 3 项核心创新成果、5 台/套专用仪器/设备、以及 1 项国家标准和 2 项软件著作权。应用并推广了高钢级管线钢焊接接头道次浸蚀方法及拍摄装置的应用、金相自动制备和智能表征技术以及材料韧塑性智能分析技术。
2	西安航晨机电科技股份有限公司	西安航晨机电科技股份有限公司作为项目核心研发、装备制造与产业化落地主体，全程围绕金相试样高通量自动制备与显微组织智能识别核心创新点开展全链条技术攻关，同步自主完成《基于大数据技术的产线管控集成数据同步方法及系统》发明专利研发适配，打通金相硬件设备、AI 识别算法、大数据同步软件一体化成套技术体系，填补石油管材高通量智能金相检测行业空白。
3	陕西燃气集团有限公司	作为项目主要完成单位，参与成果“焊接接头低倍显微表征制备—成像—分析一体化技术”、“金相试样高通量自动制备与显微组织智能识别技术”、“塑韧性智能分析系列技术”的现场应用推广工作，为项目成果前期提供大量现场试验数据。

九、完成人合作关系说明

完成人合作关系说明

本项目研究团队由材料工程、机械工程、油气储运工程以及计算机信息制造等相关专业技术人员共同组成。项目完成人全珂（第 1 完成人）、刘青（第 2 完成人）、张帆（第 4 完成人）、梁明华（第 6 完成人）、贾君君（第 8 完成人）、丛深（第 10 完成人）来自中国石油集团工程材料研究院有限公司，牛文龙（第 3 完成人）、雷济瑜（第 7 完成人）、张萌（第 9 完成人）来自西安航晨机电科技股份有限公司。姜瑞雪（第 5 完成人）来自陕西燃气集团有限公司。

全珂、刘青共同作为发明人完成发明专利“一种含裂纹金相试样的浸蚀及图像

处理方法和设备”。仝珂、丛深共同作为发明人完成发明专利“一种高钢级管线环焊缝的宏观形貌分道次显示方法”、“一种 HFW 钢管焊接接头宏观参数显示方法”；共同参与标准 GB/T 39077-2024《奥氏体-铁素体（双相）不锈钢中有害相的检测方法》制定。仝珂、刘青、贾君君共同作为发明人完成发明专利“基于深度学习的高钢级厚壁管件热处理状态检测系统及方法”。仝珂、刘青、丛深共同作为发明人完成发明专利“一种重度腐蚀污染失效断口的处理装置及方法”。梁明华、贾君君共同作为发明人完成发明专利“一种拉伸试样断后伸长率测量方法及辅助测量装置”。牛文龙、雷济瑜共同作为发明人完成发明专利“基于大数据技术的产线管控集成数据同步方法及系统”。仝珂、刘青、梁明华共同立项项目支撑子课题《石油管材理化性能评价技术研究》。牛文龙、雷济瑜、张萌、仝珂、刘青、张帆共同立项项目子课题《高通量金相智能检测技术研发与产业化项目》。仝珂、张帆、丛深、姜瑞雪共同对创新成果 1 和创新成果 3 进行了应用推广。仝珂、刘青、牛文龙、雷济瑜共同对创新成果 2 进行了应用推广。