

一、项目名称

煤层气井管柱完整性评价及服役安全防控技术

二、提名者及提名意见

提名者：陕西省科学技术厅

提名意见：

项目面向深层煤层气规模开发过程中套管变形机理不清、井下变形难以量化、复杂工况缺乏试验验证、服役安全状态难评价以及受损井筒处置手段不系统等问题，围绕钻完井、增产改造、排采和修井全过程开展协同攻关。揭示了非均匀地应力、煤岩层理及弱面滑移、温压循环和腐蚀磨损等因素作用下套管变形与损伤演化机理，建立了基于测井数据的套管变形定量表征方法；研制了套管-水泥环系统复杂工况模拟试验装置，形成了现场测井、力学反演和全尺寸试验相互校核的验证技术；建立了套管变形程度、剩余强度和继续服役能力评价方法；研发了泡沫水泥协调变形预防技术及受损井筒修井与重构技术，形成了“机理认识-检测量化-试验验证-评价决策-预防修复”一体化技术体系。相关成果为煤层气井管柱设计、运行维护和失效治理提供了技术依据，提升了煤层气井筒长期服役安全水平。

项目形成了煤层气井管柱完整性评价方法、复杂工况模拟试验装置、套变预防材料和井筒修复工具等系列成果，获得 21 件授权发明专利，发表论文 15 篇，成果已在煤层气区块及相关油气田开展应用。

推荐该项目为陕西省科技进步二等奖。

三、项目简介

煤层气储层具有煤岩强度低、层理和割理发育、软硬岩互层明显、排采周期长等特点。随着开发向深层和复杂构造区推进，套管在钻完井、增产改造、排水采气及多轮修井过程中，长期承受非均匀地应力、煤岩弱面滑移、井筒温压变化、流体腐蚀与工具磨损等复合载荷，易出现椭圆化、局部挤压、弯曲、剪切及腐蚀减薄等损伤。套管变形会造成测井、压裂及修井工具遇阻，并可能破坏水泥环密封，引发环空带压、层间窜流和井筒失效。针对现有技术中地质-工程致变机理认识不系统、测井结果难以转化为力学参数、试验评价与现场工况脱节以及预防和修复措施相互割裂等问题，项目经过多年攻关，形成了煤层气井管柱完整性评价及服役安全防控技术。主要成果如下：

(1) 揭示了煤层气井套管变形损伤机理，建立了基于测井数据的定量表征方法。针对煤岩层理与割理发育、软硬岩互层和构造弱面活化等特征，综合考虑钻完井载荷、增产改造扰动、长期排采引起的有效应力变化以及温压循环和腐蚀磨损作用，建

立套管-水泥环-地层耦合力学模型，阐明非均匀外挤、弯曲和剪切等典型套变模式的形成条件、载荷路径及演化规律，识别不同井段套变的主控因素。建立多臂井径、超声成像等测井响应与套管截面几何之间的映射关系，提取最小通径、椭圆度、曲率、错断量和变形方位等特征参数，实现套变位置、模式和程度的定量识别，并将测井结果转化为力学反演和试验加载所需的边界条件。

(2) 研制了煤层气井管柱复杂工况模拟试验装置，形成了现场套变复现与验证技术。面向套管-水泥环-地层组合体的真实受力状态，开发可施加轴向拉压、内压、剪切、非均匀外挤及温度等载荷的井筒服役状态模拟装置和测试系统，突破单一载荷及标准试样评价的局限，实现典型套变工况和载荷路径的可控模拟。根据测井反演得到的变形几何和加载边界开展全尺寸试验，获取套管截面演化、应变集中、屈服失稳及水泥环界面损伤响应，建立“测井量化-边界反演-试验复现-模型校核”闭环验证方法，为机理判识和剩余承载能力评价提供试验依据。

(3) 建立了煤层气井套管变形及服役安全评价技术。构建以最小通径、椭圆度、弯曲曲率、错断量、壁厚损失和局部应变为核心的多指标体系，形成套变模式识别、损伤程度分级和关键井段定位方法，解决仅凭工具能否通过判断套变严重程度的局限。综合测井检测、材料性能、全尺寸试验和数值分析结果，开展套管抗挤、抗弯、抗剪、抗内压及连接完整性校核，评估剩余强度、安全裕度和继续服役能力，形成建立了煤层气井套管全寿命周期服役安全评价技术，为继续排采、限参数运行、预防性维护或修井治理提供决策依据。

(4) 研发了煤层气井套管变形预防与受损井筒修复技术。针对高风险井段载荷向套管集中及水泥环脆性破坏问题，研发具有低密度、低弹性模量和高变形容限特征的微珠水泥等固井材料与配套工艺，改善环空支撑并缓冲地层变形，实现套管-水泥环-地层协调承载；结合高风险井段识别，优化套管选型、下入、固井及排采参数，形成源头预防与过程控制技术；针对缩径、错断、腐蚀穿孔或连接失效井筒，研发加厚直连型套铣筒、新型磨铣笔尖一体化工具、高钢级补贴管等新型修井工具与管材，形成通径恢复、磨铣整形、补贴加固、封堵隔离、井下切割回收及径向井重构等分级修井技术，根据损伤模式和剩余强度匹配处置方案，恢复井筒通道、承载和密封功能。

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：针对西南油气田非常规气井复杂压裂套管变形严重的突出问题，在套管变形机理、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非常规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。

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显示：（1）已有文献针对煤岩层理与割理发育、软硬岩互层和构造弱面活化等地质特征，综合考虑钻完井载荷、增产改造扰动、长期排采引起的有效应力变化以及温压循环和腐蚀磨损等多因素耦合作用，阐明非均匀外挤、弯曲和剪切等典型套变模式的形成条件与载荷路径，但未见多臂井径与超声成像测井响应至套管截面几何的映射，提取最小通径、椭圆度与错断量，定量识别套变位置、模式与程度的系统研究。（2）已有文献涉及套管非均匀外挤、强度校核及井筒完整性试验装置，但未见可实现套管—水泥环系统在轴向拉压、内压、600 t 剪切及 1200 t 非均匀外挤复合工况下服役性能模拟的装置。（3）已有文献涉及空心微珠及低密度水泥浆材料，但未见低模量空心微珠水泥浆体系可吸收煤岩错动位移 40mm 的报道。

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盆地 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。

煤层气井管柱完整性评价及服役安全防控技术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，有效控制了我国煤层气井井筒失效，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

1. 应用情况

项目成果已在中石油煤层气有限责任公司及相关油气田、科研和技术服务单位开展应用，涵盖老井井筒完整性检测、套管服役状态评价、固井与排采参数优化以及受损井筒修复等工作。现有应用情况见下表，其中应用规模、起止时间和联系人应以正式应用证明为准。

主要应用单位情况表

序	单位名称	应用技术	应用对象及规模	应用起止	单位联系人/
---	------	------	---------	------	--------

号				时间	电话
1	中石油煤层气有限责任公司北京物资分公司	煤层气井复杂压裂套管变形预防技术	复杂压裂套管变形预防技术在永和、大宁、宜川井区实施 105 井次应用	2023 年至今	李洁 13810126785
2	中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆钻井总公司第三工程项目部	煤层气套管柱适用性评价与漂浮下套管组合优化技术	在深层煤层气水平井中应用套管柱组合与下入工艺参数优化技术 56 井次	2023 年至今	李金爽 15044791502
3	中国石油集团川庆钻探工程有限公司长庆钻井总公司第五工程项目部	煤层气套管柱适用性评价与漂浮下套管组合优化技术	在深层煤层气水平井中应用漂浮下套管组合优化技术 52 井次	2023 年至今	侯博 15849743930
4	陕西迎顺油气田综合服务有限公司	煤层气套管柱适用性评价与漂浮下套管组合优化技术	在深层煤层气水平井中应用漂浮下套管组合优化技术 42 井次	2023 年至今	史丹 15191278602

2. 经济效益和社会效益

（一）经济效益：

项目形成的煤层气井管柱完整性评价及服役安全防控技术，可减少因套管变形造成的测井、压裂和修井工具遇阻，降低重复修井、井筒报废和停产损失，并通过风险分级提高检修资源配置效率。研究成果在煤层气水平井中应用 200 余井次，新增销售额超 4.2 亿元，新增利润超 1.6 亿元。

（二）社会效益：

项目构建了覆盖检测识别、试验验证、服役评价、预防控制和修复治理的煤层气井管柱完整性技术体系，提高了煤层气井筒风险的早期识别和主动防控能力，有助于延长井筒服役寿命、减少失效事故和资源浪费，保障深层煤层气安全稳定开发。

项目成果推动了测井检测、材料与管柱力学、试验装备及修井工程的协同创新，

为非常规天然气开发提供了可推广的井筒完整性管理技术，对提升天然气供应保障能力和行业技术水平具有积极意义。

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	井下服役套管的位移边界条件和载荷边界条件确定方法	中国	ZL202010839525.X	2024 年 03 月 26 日	6833056	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, 路彩虹
2	发明专利	一种煤炭地下气化管柱完整性模拟试验装置和试验方法	中国	ZL202010335086.9	2025 年 07 月 01 日	8040209	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, 杨尚谕, 韩礼红, 任相羿, 李方坡, 韩军, 黄勇, 潘志勇
3	论文	Dynamic safety assessment of underground compressed air energy storage string subjected to	中国	261（2025）111070	2025 年 03 月 28 日	Reliability Engineering and System	西安建筑科技大学、中国石油大学（华东）	李新宏, 田法富, 张认认, 韩子月, 刘秀全

		erosion -corrosion degradation				Safety		
4	发明专利	一种砂岩油气井套管柱模拟试验装置及其评价方法	中国	ZL201910189575.5	2022 年 07 月 05 日	5284085	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, 王航, 路彩虹
5	发明专利	一种井下电控切割工具及其使用方法	中国	ZL202310282900.9	2023 年 03 月 22 日	6483573	中国地质大学 (北京)	刘永升, 许运好, 黄旭, 孟庆生, 杨甘生
6	发明专利	基于应变的高速气流摩擦系数计算方法	中国	ZL201611227895.8	2019 年 06 月 11 日	3411835	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	王建军, 杨尚谕, 薛承文, 李方坡, 王鹏
7	发明专利	一种径向水平井密封装置、钻井设备及钻井方法	中国	ZL202110383738.0	2021 年 12 月 28 日	5775747	中国地质大学 (北京)	刘永升, 陈国强, 豆子钧, 许智勇, 孟庆生, 阳志远
8	发明专利	一种超高温环境下套管降温试验装置和试验方法	中国	ZL202010333848.1	2024 年 12 月 27 日	7628438	中国石油天然气集团有限公司、中国石油天然气集团公司	王建军, 任相羿, 杨尚谕, 韩礼红, 黄勇, 韩军, 李方

	利						管材研究所	坡，潘志勇
9	发明专利	一种长链聚合物胶水的制备方法及其在油气田中的应用	中国	ZL202211534868.0	2024 年 09 月 10 日	7360763	陕西延长石油（集团）有限责任公司	王娟,南蓓蓓,张永强,高志亮,刘志玲,拓川,方晓君,李辉,李世强,范昊坤
10	发明专利	一种页岩基质数字岩心重构方法	中国	ZL 2023 11466001.0	2025 年 11 月 07 日	8451906	中国石油天然气股份有限公司、中石油煤层气有限责任公司、中联煤层气国家工程研究中心有限责任公司	刘印华,王玉斌,马文涛,王云飞,吴建军,刘凯,蔺景德,祁炜,庞斌,李焕文,徐思渊

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	油 井 管 与 管 柱 研 究 所 支 部 书	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	负责项目的设计和实施，牵头研制模拟试验装置，建立套变定量表征方法

		记				
李新宏	2	资源学院院长	教授	西安建筑科技大学	西安建筑科技大学	负责套管变形力学机理与剩余强度评价方法研究，建立强度退化模型
王建军	3	油井管与管柱研究所副所长	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	负责基于测井数据的套管变形量化方法建立
吴建军	4	工程技术研究院副院长	高级工程师	中石油煤层气有限责任公司	中石油煤层气有限责任公司	负责现场应用推广，组织实施老井井筒完整性检测
闫炎	5	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	负责多轴复合加载试验装备研发与测试系统搭建
曹婧	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	负责煤层气井套管全寿命周期服役安全评价方法建立
刘永升	7	无	教授	中国地质大学（北京）	中国地质大学（北京）	负责井下电控切割工具与密封装置研发，参与分级修井技术建立

王娟	8	无	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	负责煤层气井套管选型、下入、固井及排采参数优化技术与修井治理效果评价
曹峰	9	西安三环科技有限公司副总经理	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	负责修井工具研发与现场套变治理方案实施
巨翔	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	负责套管变形分级方法与多指标评价体系构建

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	负责项目总体组织，承担套管变形测井量化、复杂工况试验装置、服役评价及防控技术研发与推广。
2	陕西延长石油(集团)有限责任公司	负责煤层气井套管选型、下入、固井及排采参数优化技术与修井治理效果评价。
3	中石油煤层气有限责任公司	负责煤层气井测井检测、排采工况分析及全生命周期完整性管理应用。
4	西安建筑科技大学	负责套管变形力学机理、剩余强度及服役安全评价方法研究。
5	中国地质大学(北京)	负责受损井筒修复、井下切割回收及井筒重构工具研发。

九、完成人合作关系说明

- (1) 项目完成人杨尚谕、王建军、吴建军围绕煤层气井套管变形原因、典型模式、主控因素及地质-工程耦合机理开展研究，并建立基于测井数据的套管变形量化方法。
- (2) 项目完成人杨尚谕、闫炎、曹婧围绕煤层气井管柱复杂工况模拟试验装置、套管-水泥环组合体加载试验和现场套变复现验证方法开展研究。
- (3) 项目完成人李新宏、刘永升、巨翔围绕套管变形分级、剩余强度校核、继续服役能力和井筒风险评价方法开展研究。
- (4) 项目完成人闫炎、王娟、曹峰围绕泡沫水泥协调变形预防技术、受损井筒修井重构及现场应用效果评价开展研究。