

一、项目名称

复杂油气注采环境微生物/氧腐蚀防控关键技术

二、提名意见

该项目面向气驱、水力压裂等复杂油气开发条件下管柱、管道局部腐蚀加剧、突发失效风险突出等重大工程需求，针对传统腐蚀评价、防护材料及化学防控技术难以适应多因素耦合环境的关键瓶颈，系统开展腐蚀机理、耐蚀材料、绿色药剂和功能涂层研究。项目揭示了微生物、氧、垢层、高矿化度介质等多因素耦合作用下管材局部腐蚀新机制，建立了复杂环境腐蚀模拟评价方法；创新提出了“Cu 主动抑菌-Cr 稳定成膜-阻断胞外电子传递”协同设计理念，研制了耐 CO₂/微生物腐蚀钢材；研发了兼具杀菌抑膜与界面缓蚀功能以及抗氧阻垢性能的双功能药剂，构建了材料-药剂多机制协同防控技术；突破了主动拒液、缓蚀剂持续释放及隔热增强等关键技术，形成多功能长效防护涂层体系。

项目总体上构建了贯通“机理认知-风险评价-材料本体抗蚀-绿色化学防控-表面长效防护”的复杂油气注采系统微生物/氧腐蚀防控技术体系，推动腐蚀防护由单因素、被动式向多因素协同、主动防控转变，对降低油气装备穿孔断裂风险、延长服役寿命、保障复杂油气资源安全高效开发具有重大意义。项目授权国家发明专利 16 件、软件著作权 2 件，发布国家/团体标准 3 项，发表学术论文 32 篇，出版专著 2 部，总体达到国际先进水平。项目成果在四川页岩气勘探开发有限责任公司等油气田和防腐产品生产企业得到推广应用，产生良好的经济效益和社会效益。

提名该项目为陕西省科学技术进步奖二等奖。

三、项目简介

复杂油气资源高效开发是保障国家能源安全、推动油气田稳产增产的重要基础。随着氮气驱、CO₂ 驱、水力压裂等提高油气采收率和增产技术的规模化应用，油气注采系统服役环境由传统单一 CO₂/H₂S 腐蚀向氧、微生物、压裂砂/沉积垢等多因素耦合环境演变，腐蚀呈现局部化、隐蔽化和突发性特征。以川南核心页岩气田为例，管柱失效案例中腐蚀穿孔占比达 25%、管道失效案例中腐蚀穿孔占比达 80%，与微

生物腐蚀相关的占比高达 30-60%。在多因素耦合作用下管柱、管道局部减薄、点蚀穿孔及断裂失效已成为制约复杂油气资源安全高效开发的关键问题。然而，现有腐蚀放空技术仍主要基于均匀腐蚀评价、耐蚀材料被动防护以及单一缓蚀/屏蔽措施，难以准确表征和识别复杂服役环境下的局部腐蚀风险，也难以实现腐蚀损伤的长效、精准防控。因此，亟需面向复杂油气注采环境，厘清微生物/氧等多因素耦合条件下的局部腐蚀机理，突破局部腐蚀风险识别与长效防控关键技术，为复杂油气资源安全高效开发提供技术支撑。

本项目面向复杂油气注采系统长周期安全服役重大需求，围绕“腐蚀机理、耐蚀材料、化学防控、功能涂层”开展系统攻关，揭示多因素耦合局部腐蚀机制，创制本体抗微生物腐蚀钢及双功能防腐药剂，构建主动拒液、持续缓蚀和隔热增强的多功能涂层体系，推动油气装备腐蚀防护由“单因素评价、被动耐蚀、单一防护”向“多因素耦合判识、材料本体抗蚀、多机制协同防控”转变，为复杂油气注采条件下管柱和管道安全长周期服役提供理论与技术支撑。项目授权国家发明专利 16 件、软件著作权 2 件，发布国家和团体标准 3 项，发表学术论文 32 篇，出版专著 2 部。

主要创新成果如下：

1. 揭示复杂因素耦合局部腐蚀机制，建立复杂环境腐蚀评价新方法。 揭示“氧阴极去极化加速-垢层闭塞自催化-微生物/沉积物协同局部化-高 Cl⁻强化微生物腐蚀”的多因素耦合机制，阐明注入气携氧导致管柱快速腐蚀失效的作用链条，突破垢下腐蚀主要归因于氧浓差电池的传统认识，发现生物膜-沉积物作用下“均匀腐蚀减缓而局部腐蚀急剧加深”的规律；明确高 Cl⁻环境下 H₂ 中间传递主导的微生物腐蚀机制。在此基础上，建立覆盖超临界 CO₂、真实腐蚀垢层及应力-缝隙耦合等复杂工况的腐蚀模拟评价方法体系，实现由单因素均匀腐蚀评价向多因素耦合局部失效判识提升。

2. 研发 Cu-Cr 协同抗微生物腐蚀钢，建立材料本体主动抗蚀新技术。 提出“Cu 主动抑菌-Cr 稳定成膜-阻断胞外电子传递”协同设计方法，形成含 Cu、Cu-Cr 复合的抗菌耐蚀材料。含 Cu 钢抗 MIC 性能随着 Cu 含量升高而显著增强，添加 0.6%Cu 使得最大点蚀速率较常规钢降低 90%，表面附着菌数量降低近 6 个数量。Cu-Cr 协同能够显著降低生物膜厚度、腐蚀失重和点蚀深度，并且耐蚀性能随着 Cr 含量升高而显著提升。5Cr-0.6Cu 钢在保证高强度的同时，在含微生物环境中的腐蚀失重较 X80

钢降低 96%，实现强度与抗 MIC 性能协同提升。推动油气用钢由传统被动耐蚀向材料本体主动抗菌、阻断微生物腐蚀转变。

3. 研发“杀菌抑膜+界面缓蚀”双功能药剂，构建多机制协同化学防控技术。

突破传统杀菌剂与缓蚀剂功能割裂的防控模式，研制松香基及烟梗提取物（TSE）双功能抑制剂，实现杀菌、生物膜抑制与金属界面缓蚀功能协同。松香基硫脲咪唑季铵盐对 X80 钢的 MIC 抑制率达到 94%，TSE 对典型腐蚀菌生物膜附着细胞去除率达 99.9%、MIC 抑制率达 98%、非生物腐蚀抑制率 85%。构建“材料本体-双功能药剂-复合杀菌组分”协同防护模式，“Cr-Cu 钢+RTIQAS+银纳米颗粒”使得腐蚀电流密度和失重较传统 X80 钢降幅达 99%。提出“沉淀膜+有机吸附+螯合阻垢”的协同增效思路，形成耐高温抗氧缓蚀剂，缓蚀率达到 97%，实现高温下界面对氧的阻隔以及对腐蚀的抑制。

4. 构建“主动拒液-缓释防腐-隔热增强”多功能涂层体系。阐明纳米颗粒调控聚合物自流平的“受限流动效应”，构筑耐磨超双疏主动拒液界面，经 1000 h 盐雾及 1000 次砂纸摩擦后仍保持超疏水性能。发明将负载缓蚀剂的 100-200nm 介孔 SiO_2 微胶囊加入防腐涂料中实现缓蚀剂缓慢释放及涂层本体防腐的叠加效果，使得涂层在溶液中浸泡 1500h 后仍保持初始状态，大幅延长涂层服役寿命。提出在膨胀蛭石层间原位生成 SiO_2 气凝胶，发明兼具低导热、疏水和机械稳定性的隔热填料，复合涂层导热系数由 0.35 降至 0.18 W/(m·K)，并通过高温高压性能检测，形成适应复杂井筒环境的长效表面防护技术。

项目形成了贯通机理认知、风险评价、材料本体抗蚀、绿色化学防控和多功能表面防护的复杂油气注采系统腐蚀防控技术体系，为降低局部穿孔和断裂风险、减少传统杀菌剂使用及环境负荷、提升油气管柱和管道长周期安全服役能力提供了关键科技支撑。项目成果在新疆塔科深地能源技术开发有限公司等防腐产品生产企业推广应用，在四川页岩气勘探开发有限责任公司等重点油气田现场得到应用，累计创效超 3 亿元、新增利润超 9000 万元，取得良好的经济效益和社会效益。

四、客观评价

（1）验收意见

中国石油科技项目“耐蚀、抗菌、高强度低密度油井管新材料开发”(2021DJ2703)验收评价报告(中油科验字[2024]第 017 号):创新形成了抗菌管材合金成分及显微结构与其抗菌/耐蚀性能之间的构效关系,为满足强腐蚀油气环境中新型管材开发和应用奠定了基础,为集团公司深层油气、页岩油气等油气开发提供支撑。

中国石油院所超前储备项目“油气管道服役过程中内腐蚀遗传效应解析及急速致损模型研究”(2020D-5008)验收评价报告(油管科验字[2022 年]第 07 号):攻克了油气集输管道工艺串联效应下急速腐蚀致损的预测及控制技术,解决了沉积层覆盖条件下局部蚀坑微环境定量解析、局部蚀坑生长速度预测、化学药剂渗透及应用效果等问题。

中国石油长庆油田分公司科技项目“盆地东部煤岩气井腐蚀因素判识及防腐对策评价”(2025-21746)验收意见:阐明了煤岩气井腐蚀主控机制;筛选出了适配苛刻工况的高效防腐药剂配方,在室内模拟工况条件下可控制腐蚀速率 $<0.076\text{mm/a}$,可同时实现高效缓蚀、广谱杀菌。

(2) 科技查新

国家一级科技查新咨询单位冶金工业信息标准研究院出具的科技查新报告(2026YJZX-2058):在所查国内外文献中,可以看到项目所在单位技术人员发表与本项目相关的文献,未见其它与所述“复杂油气注采环境微生物/氧腐蚀防控关键技术”内容相同的报道。

(3) 国内外知名学者关注和引用

“抗 MIC 合金设计+绿色/双功能杀生剂+多策略协同 MIC 控制”的成果在一些重要刊物中被引用和评述。北京科技大学腐蚀防护中心研究团队在论文“The effect of Cr-Cu modification on the microbiologically influenced corrosion resistance of X70 pipeline steel”(RSC Advances, 2026, 16(32): 29218-29230)中评述“通过 Cr-Cu 微合金化/合金设计从材料本体层面提高 MIC 抗力”是值得继续研究的方向,并且该论文中将此研究思路延续下来。中国石油大学(华东)化学与化工学院研究团队在论文“Synergy-enabling lignin derivatives via Steglich esterification for eco-friendly prevention of microbiologically influenced corrosion in oilfield”(Environmental Research, 2026, 305: 124890)中讨论新型生物基/绿色 MIC 控制材料时详细引用了本项目成果的具体技术

参数，并将本成果作为“绿色多功能 MIC 控制”的代表性工作。中国海洋大学化学与化工学院研究团队在论文“The performance and mechanisms of imidazoline phosphonate inhibitors in mitigating sulfate-reducing bacteria-induced under deposit corrosion” (*Corrosion Science*, 2025, 257: 113317) 中引用本创新成果，并评述“使用兼具缓蚀和杀菌性能的双功能药剂是颇具前景的策略”。

“超双疏涂层”成果在一些重要的国际刊物中被引用。浙江大学研究团队发表在论文“Modulating solvent-dependent wettability in superhydrophobic and oleophobic coatings” (*Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2026, 742, part 1: 140360) 中比较不同溶剂时发现异丙醇对 SiO₂ 溶胶颗粒具有很有效的分散作用，将流平和颗粒组织问题追溯到溶剂依赖的胶体分散和成膜机制，认为颗粒尺寸与成膜过程确实是调控超疏水/疏油性能的重要变量，值得继续从溶剂-胶体相互作用角度进行机理细化。北京航空航天大学的研究团队在论文“Superamphiphobic coating with microskeleton-filler structure for cooking fume: Excellent anti-wear and anti-corrosion” (*Chemical Engineering Journal*, 2026, 533: 174794) 中引用本成果，认为双超疏涂层有很强的抗污潜力，在此基础上通过纳米填料、含氟层和网络拓扑结构，进一步提升耐磨性和耐蚀性。

(4) 第三方机构的检测与评价

针对抗菌耐蚀材料，中国石油大学（北京）测试中心的检测报告（2019 石油测字[M]第 084 号）表明 L245N-RCB 牌号的抗菌耐蚀材料在模拟页岩气含 CO₂ 和 SRB 环境中的均匀腐蚀速率较普通 L245N 钢降低 58%，点腐蚀速率降低 86%。

针对杀菌/缓蚀配方及其复配的杀菌缓蚀剂和环空保护液产品，中国石油集团工程材料研究院有限公司石油管检测实验室的检测报告（(2026)检测字 0468 号）表明复配环空保护液产品的静态均匀缓释率为 96.6%、对硫酸盐还原菌和腐生菌的杀菌率为 100%。西安市产品质量监督检验院的检验报告（H2601216）表明杀菌缓蚀剂中未检出有机氯。宁波海关技术中心的检测报告（2600002147）表明杀菌缓蚀剂对皮肤刺激类别属于无刺激性、急性经口毒性分类为未分类、急性危害水生环境物质为类别 1、急性经皮毒性分类为未分类、急性吸入毒性分类为不属于类别 1 至类别 3。

针对涂料配方及其涂层产品，国家石油管材质量检验检测中心的检测报告（(2025)

质检字 0371 号、(2025)质检字 0353 号) 表明：涂层的外观、干膜厚度、附着力、耐磨性、耐化学介质性能、耐高温高压性能、耐腐蚀性能指标满足 SY/T 6717-2016、GB/T 5210-2006 的要求。

五、应用情况和效益

1. 应用情况

项目成果已经在防腐产品生产企业和油气田进行应用。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	四川页岩气勘探开发有限责任公司	失效理论、失效分析和腐蚀控制技术	应用于四川页岩气 105 井的腐蚀控制	2023.01 ~ 2025.12	朱文旭 13882061791
2	新疆塔科深地能源技术开发有限公司	含氧环境用缓蚀剂等 产品配方	新增缓蚀剂以及衍生产品销量 5100 吨，应用于塔里木油田。	2023.01 ~ 2025.12	徐俊博 15899017388
3	新疆海辰油气技术有限责任公司	缓蚀剂和杀菌缓蚀剂等 配方	新增缓蚀杀菌剂销量超 3000 吨，应用于塔里木、长庆、西南等油田。	2023.01 ~ 2025.12	王宝林 18196299555
4	西安三环石油管材科技有限公司	缓蚀剂和杀菌缓蚀剂等 配方	新增缓蚀杀菌剂销售 1880 吨，应用于塔里木、长庆、浙江等油田。	2023.01 ~ 2025.12	李小龙 18392719274
5	北京中恒永信科技有限公司	新型涂料配方和涂层技术	新增内涂层产品销售 51980 根，应用于长庆、川渝等油田。	2023.01 ~ 2025.12	刘 迪 18801119762
6	四川海隆石油技术有限公司	新型涂料配方和涂层技术，用于油管修复和涂层质量提升	涂层技术用于旧油管修复再利用。	2023.01 ~ 2025.12	王建超 0817-5239169
7	宝山钢铁股份有限公司中央研究院	抗菌耐蚀钢的成分设计和组织-性能调控技术	用于抗菌耐蚀管线钢的生产，产品在	2023.01 ~ 2025.12	齐亚猛 13761161875

	(技术中 心) 钢管特 钢技术中心		中石化涪陵 页岩气田等 油气田应用。		
--	-------------------------	--	--------------------------	--	--

2. 经济效益和社会效益

(一) 经济效益:

项目针对微生物/氧腐蚀等油气田新兴腐蚀问题研发的抗菌耐蚀材料、缓蚀/杀菌剂配方及防腐涂料配方与涂层工艺等系列防腐材料和技术，其中抗菌耐蚀材料由宝山钢铁股份有限公司生产，并在涪陵推广应用；缓蚀/杀菌药剂配方及衍生复配药剂则推广至新疆塔科深地能源技术开发有限公司等生产企业；防腐涂料及涂层技术推广至北京中恒永信科技有限公司等生产企业。相关产品和技术先后在长庆油田、塔里木油田、川渝页岩气田中实现工程应用。通过抑制腐蚀介质及腐蚀微生物活性、降低金属腐蚀速率、提高材料耐蚀性能，有效延长了管材和装备构件服役寿命，减少了因腐蚀造成的维修、更换及停产作业频次。累计创效超 3 亿元、新增利润超 9000 万元。

(二) 社会效益:

项目研究开发的抗菌钢、缓蚀剂、杀菌剂、防腐涂层等耐蚀新材料、新技术和新产品在油气田开发、集输及相关装备制造与运行单位推广应用，有效提升了油气井管柱、集输管线及装备构件的耐腐蚀性能和服役可靠性，降低了微生物腐蚀、氧腐蚀等引起的泄漏、穿孔和失效风险，保障了油气生产系统安全、稳定、长周期运行。相关成果满足了深层、复杂及高腐蚀环境油气资源开发对材料与腐蚀防护技术的需求，提高了我国油气装备腐蚀控制与安全保障水平，有力支撑了深层油气资源安全高效开发，对保障国家能源安全、促进油气行业绿色低碳和高质量发展具有显著的社会效益。

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	模拟超临界二氧化碳输送管道腐蚀的试验装置及试验方法	中国	ZL 20201090 0875.2	2025 年 5 月 27 日	第 7962294 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	袁军涛;赵密锋;马磊;熊茂县;蔡锐;付安庆;尹成先;范磊
2	发明专利	松香基硫脲咪唑季铵盐的制备方法及其应用	中国	ZL 202311648 811.8	2024 年 3 月 1 日	第 6750344 号	东北大学	王迪;徐大可;李向红;王岳松;王福会;田泽宏;刘蓓;吴亚林;李祉霖
3	论文	Robust and anti-corrosive superamphiphobic coatings regulated by self-levelling	中国	2025, 56: 105684	2025 年 1 月 1 日	Surfaces and Interfaces	中国石油集团工程材料研究院有限公司;西安建筑科技大学;西安交通大学;塔里木油田	Rong Wei, Yixing Qi, Juantao Zhang, Yuan Wang, Ning Gao, Naixin Lv, Shaobo Feng, Wenwen Song, Anqing Fu, Qiuli Zhang
4	发明专利	一种清洁转向酸用缓蚀剂及其制备方法	中国	ZL 201811149 897.9	2022 年 3 月 1 日	第 4966595 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	张娟涛;宋文文;尹成先;李循迹;杨春林;付安庆;李彬;李有伟;艾克热木
5	发明专利	一种延长涂层服役寿命的微胶囊缓蚀剂及其制备方法	中国	ZL202210 603042.9	2025 年 11 月 25 日	第 8514592 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;西安三环石油管材科技有限公司	何佳;张娟涛;范磊;鲜俊;王浩;刘洋;尹成先;刘强
6	发明专利	一种改性膨胀蛭石填料及由其制备的防护涂料	中国	ZL202511 318051.3	2025 年 11 月 25 日	第 8517958 号	中国石油集团工程材料研究院有限公司;中国石油天然气集团有限公司	吕乃欣;黄居峰;李轩鹏;魏蓉;张娟涛;尹成先
7	发明专利	马来酰亚胺/ α -烯烃多元共聚物、马来酰亚胺/ α -烯烃多元共聚油溶性减阻剂及其制备方法和应用	中国	ZL 202410821 061.8	2025 年 3 月 14 日	第 7794146 号	中国石油天然气集团有限公司	魏蓉;王远;高宁;张娟涛;范磊;尹成先
8	论文	Combination of Cr-Cu-bearing	中国	2025, 248: 112807	2025 年 2 月 20 日	Corrosion Science	东北大学;俄亥俄大学	Yalin Wu, Zhilin Li, Di

		pipeline steel and novel biocides as a strategy to combat microbiologically influenced corrosion						Wang, Zehong Tian, Bei Liu, Zishuai Zhou, Tingyue Gu, Fuhui Wang, Dake Xu
9	发明专利	一种用于腐蚀试验溶液的除氧装置及其操作方法	中国	ZL 201710539 569.9	2024 年 3 月 1 日	第 6755519 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	袁军涛;张慧慧;付安庆;李发根;吕乃欣;李磊
10	发明专利	一种表面存在腐蚀垢层的金属基体制备方法及其垢下腐蚀试验	中国	ZL202010 899145.5	2024 年 8 月 27 日	第 7326287 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	韩燕;蔡锐;谢俊峰;赵密锋;赵雪会;马庆伟

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
袁军涛	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
魏 蓉	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	参与特殊环境用缓蚀剂和防腐涂层研究
王 迪	3	无	副教授	东北大学	东北大学	参与微生物腐蚀机理及杀菌缓蚀剂研究
李轩鹏	4	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	参与失效机理和特殊含氧环境的防腐材料研究
黄居峰	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	参与页岩气田环境腐蚀机理及防腐涂层研究
张慧慧	6	无	副教授	西安科技大学	西安科技大学	参与抗菌耐蚀材料组织调控和性能研究
张小涛	7	企业专家	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	参与抗菌耐蚀材料、缓蚀/杀菌剂和防腐涂层的现场试验及应用
齐亚猛	8	无	高级工程师	宝山钢铁股份有限公司	宝山钢铁股份有限公司	参与抗菌耐蚀管材的研发及制造
韩 燕	9	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	参与特殊环境腐蚀试验方法和失效机理研究
张娟涛	10	所长	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	参与特殊环境用缓蚀剂研究

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，主要负责复杂注采环境失效机理研究、复杂注采环境腐蚀试验方法研究、抗菌耐蚀材料研发、缓蚀剂和多功能防腐涂层研发。创新点 1、2、3、4 主要贡献单位。
2	东北大学	主要负责微生物腐蚀机理研究及杀菌缓蚀剂研发。创新点 1 和 3 主要贡献单位。
3	西安科技大学	主要负责抗菌耐蚀材料组织调控和性能研究。创新点 2 主要贡献单位。
4	四川页岩气勘探开发有限责任公司	主要负责抗菌耐蚀材料、缓蚀/杀菌剂和防腐涂层的现场试验及应用。创新点 1、3 和 4 主要贡献单位。
5	宝山钢铁股份有限公司	主要负责抗菌耐蚀管材的研发、生产制造及推广应用。创新点 2 主要贡献单位。

九、完成人合作关系说明

完成人合作关系说明

（1）袁军涛、魏蓉、李轩鹏、黄居峰和韩燕，共同完成中国石油天然气集团有限公司科学研究与技术开发项目“耐蚀、抗菌、高强度低密度油井管新材料开发”（2021DJ2703），主要贡献了创新点 1、2 和 4。

（2）袁军涛、李轩鹏、韩燕和张娟涛，共同完成中国石油天然气集团有限公司院所超前储备项目“油气管道服役过程中内腐蚀遗传效应解析及急速致损模型研究”（2020D-5008(2020Z-08)），主要贡献了创新点 1 和 3。

（3）袁军涛、魏蓉、李轩鹏、黄居峰和张娟涛，共同完成中国石油长庆油田分公司科研服务项目“盆地东部煤岩气井腐蚀因素判识及防腐对策研究”（2025-21746），主要贡献了创新点 1、3 和 4。

（4）袁军涛、李轩鹏和王迪，共同完成石油管材及装备材料服役行为与结构安全国家重点实验室开放课题“管道内腐蚀急速致损模型研究”（2021K-3），主要贡献了创新点 1 和 3。

（5）袁军涛、张慧慧和韩燕，共同完成陕西省科技项目“多元热流体环境中的腐蚀损伤机制及控制技术研究”（2020KJXX-063），主要贡献了创新点 1 和 2。

（6）袁军涛、李轩鹏和齐亚猛，共同完成宝山钢铁股份有限公司科技项目“典

型集输工况中耐微生物腐蚀管线管腐蚀适用性研究”（2021-569），主要贡献了创新点 2。

（7）袁军涛、黄居峰和张小涛，共同完成四川页岩气勘探开发有限责任公司科技项目“泸州区块页岩气地面集输系统腐蚀防控技术研究”（LZYYQ-JSZS-2023-0077），主要贡献了创新点 1、3 和 4。