

引用格式: 尹成先, 张海兵, 苏航, 等. 新型冶金无缝双金属复合管的研发及应用[J]. 钢管, 2026, 55(2): 1-7. YIN Chengxian, ZHANG Haibing, SU Hang, et al. Development and application of a new metallurgically-bonded seamless bimetallic composite pipe[J]. Steel Pipe, 2026, 55(2): 1-7.

新型冶金无缝双金属复合管的研发及应用*

尹成先^{1,2}, 张海兵^{2,3}, 苏航^{1,2}, 李文升^{1,2}, 刘永刚¹, 祝国川^{1,2}, 马晓峰^{2,3}, 冯耀荣^{1,3}

(1. 中国石油集团工程材料研究院有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 中石油(河北)工程新材料科技有限公司, 河北 秦皇岛 066000; 3. 西安德信成科技有限责任公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 开展新型冶金无缝双金属复合管的研发, 攻克了复合管坯制备、热成型、冷成型、热处理等核心技术, 形成新型冶金无缝双金属复合管及其配套的焊接、螺纹连接和管件制备技术。性能测试表明, 产品界面达到冶金结合, 结合强度高, 实现了力学性能与耐腐蚀性能的协同优化, 综合性能优于现有同类产品, 可适配高温、高压、高腐蚀工况。产品工程应用的效果良好, 且技术经济性显著, 具有广阔的工程应用前景和显著的经济效益。

关键词: 冶金无缝双金属复合管; 腐蚀防护; 油井管; 输送管

DOI:10.19938/j.steelpipe.1001-2311.2026.2.01.07

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Development and Application of a New Metallurgically-bonded Seamless Bimetallic Composite Pipe

YIN Chengxian^{1,2}, ZHANG Haibing^{2,3}, SU Hang^{1,2}, LI Wensheng^{1,2},

LIU Yonggang¹, ZHU Guochuan^{1,2}, MA Xiaofeng^{2,3}, FENG Yaorong^{1,3}

(1. CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an 710077, China;

2. CNPC (Hebei) Engineering New Materials Technology Co., Ltd., Qinhuangdao 066000, China;

3. Xi'an Dexincheng Technology Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: The research and development of a new metallurgically-bonded seamless bimetallic composite pipe is carried out. A series of key technologies difficulties are overcome, including the composite pipe-used billet preparation, hot forming, cold forming and heat treatment and so on. A new metallurgically-bonded seamless bimetallic composite pipe and related supporting technologies concerning welding, threaded connection and tubular fitting manufacturing are developed. The results of relevant performance tests show that the product interface achieves metallurgical bonding with high bonding strength, and the collaborative optimization of mechanical properties and corrosion resistance of the pipe is also achieved. The comprehensive performance of the pipe is superior to existing similar products, which adapts to high-temperature, high-pressure and highly-corrosive working conditions. The product has achieved satisfactory effectiveness in engineering applications, featuring remarkable technical and economic advantages, and having broad engineering application prospects, as well as significant economic benefits.

Key words: metallurgically-bonded seamless bimetallic composite pipe; corrosion and protection; oil country tubular goods; line pipe

随着全球油气资源勘探开发逐步向深层、深

*中国石油天然气集团有限公司科技项目(编号 2023-ZZ11-03, 名称《材料表面功能化改性及成形理论研究》)

尹成先(1975-), 男, 博士, 正高级工程师, 陕西省中青年科技创新领军人才, 主要从事油气田及炼化领域腐蚀与防护研究工作。

通信作者: 冯耀荣(1960-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 中国石油学会会士。

海、低渗透、非常规领域推进, 油气井管柱和地面集输管线的服役条件愈发复杂苛刻。含硫油气田、高温高压气井井下及地面集输系统往往含有较高的 H_2S 、 CO_2 、 Cl^- 、 O_2 、细菌等腐蚀性介质, 造成油气井管柱和地面集输管线系统的严重腐蚀, 严重影响油气田开发的安全性、稳定性和经济性。同样, 在石油炼化、超临界发电、 CO_2 封存和利用、新能源存储和输送等领域, 设备管道往往需要在承受高

压的同时抵御强腐蚀介质的侵蚀。常用的防腐技术包括选用耐腐蚀材料、表面涂镀层、添加缓蚀剂、改变腐蚀环境或工艺参数等,其中材料防腐是最根本的防腐手段。关于腐蚀环境下管材的选用,通常是按照腐蚀介质的含量、温度、压力和力学条件按照相关标准或通过模拟工况环境的试验评价来进行^[1]。在严酷腐蚀环境下,不得使用 316L 奥氏体不锈钢、2205 双相不锈钢及 028、825、G3、625 等铁镍基或镍基耐蚀合金,材料和加工制备成本高,导致工程成本显著增加,难以规模化应用,甚至有的工程目标难以实现。近年来发展起来的双金属复合管结合碳钢或低合金钢基管的力学性能和不锈钢或耐蚀合金覆层耐蚀性能,是严酷腐蚀环境下综合性能优良、高性价比的解决方案^[1-8]。

双金属复合管通过将耐腐蚀的薄层(覆层)与高强度的基层材料(如碳钢、低合金钢)进行复合,实现了“结构支撑”与“功能防护”的协同优化。其中,冶金无缝双金属复合管相较于机械结合式复合管(仅靠过盈配合或焊接)及有缝复合管(存在焊缝薄弱区),具有界面结合强度高、无纵向焊缝风险、抗失稳能力强、耐疲劳性能优异等显著优势^[2-10]。近年来,随着深海深地工程、油气和新能源输送管道工程等重大工程对管材可靠性要求的提升,以及氢能输送对材料氢脆敏感性的严苛要求,研发高质量的新型冶金无缝双金属复合管已成为材料成形技术与应用领域的关键课题。

针对现有双金属复合管界面结合强度低、缺陷多、易出现衬管塌陷、焊缝腐蚀等问题^[11-17],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)联合相关企业开展了新型冶金无缝双金属复合管的研发和推广应用,攻克了复合管坯制备、热成型、冷成型、热处理等系列关键核心技术并开始工业化应用,形成新型冶金无缝双金属复合管及其应用配套技术。

1 研发历程与产品体系

1.1 研发历程

2018 年工程材料研究院确立冶金无缝双金属复合管研发方向;2019—2021 年与西安德信成科技有限责任公司组建创新联合体,突破热塑性成型、高精度冷成型等关键技术,形成优于国家标准及 API 标准的系列产品;2021—2023 年完成复合集输管、油管、钻杆的开发和现场试验及工程应

用;2023—2024 年启动 3 万 t/年生产线建设,成立中石油(河北)工程新材料科技有限公司,推进产业化,项目于 2025 年 7 月投产。

1.2 产品体系

针对油气田井下与地面集输系统需求,形成三大类产品体系,基层选用碳钢/低合金钢,覆层涵盖奥氏体不锈钢、双相不锈钢、铁镍基和镍基合金等耐蚀材料,基层与覆层厚度比例可根据需求调整。

(1) 冶金复合集输管及管件:基层为 L245、L360、L415、L450、L485、L555 等 API Spec 5L《管线管规范》和 GB/T 9711《石油天然气工业 管线输送系统用钢管》中规定的各类碳钢和低合金钢材质,以及相应的酸性环境用碳钢和低合金钢材料(最高钢级 L485);内覆层为 316L、2205、2507、825、625 等各类耐蚀合金。配套弯管、弯头、三通等管件。此外,还研发了薄壳多层结构冶金无缝双金属复合输送管的低成本焊接技术。

(2) 冶金复合油套管:基层为 J55、N80、P110、Q125、V140 等 API Spec 5CT《套管和油管规范》和 GB/T 19830《石油天然气工业 油气井套管或油管》中规定的各类碳钢或低合金钢材质,以及相应的酸性环境用碳钢和低合金钢材料(最高钢级 C110);内覆层为 S13Cr、316L、2205、2507、028、825、G3、625 等各类耐蚀合金。此外,还研发了冶金无缝双金属复合油管管的系列化螺纹连接技术。

(3) 冶金复合钻杆:基层为 E75、X95、G105、S135 等 API Spec 5DP《钻杆规范》和 GB/T 29166《石油天然气工业 钻杆》中规定的各类碳钢或低合金钢材质,以及相应的酸性环境用碳钢和低合金钢材料(最高钢级 F105);内覆层为 S13Cr、316L、2205、2507、028、825、G3、625 等各类耐蚀合金。此外,还研发了冶金无缝双金属复合钻杆管体镦粗、摩擦焊接及螺纹连接技术。

研发的冶金复合管产品外径 60~350 mm,壁厚 5~25 mm,适配不同腐蚀等级油气田环境,如图 1 所示。

2 生产工艺与关键技术

新型冶金无缝双金属复合管遵循冶金复合制坯→热成型→冷成型→热处理→精整→检测技术路线(图 2),攻克 5 项核心技术,保障产品性能和质量^[18-22]。

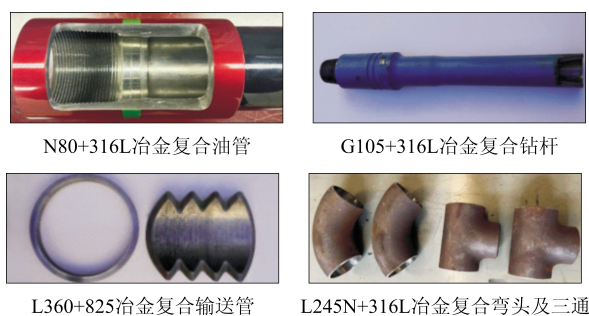


图1 冶金复合管示意

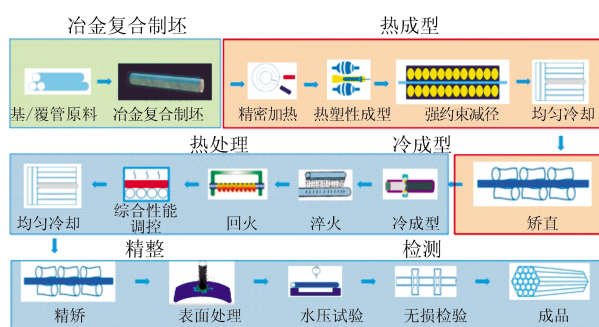


图2 新型冶金无缝双金属复合管生产流程

(1) 冶金复合制坯技术：通过基/覆管精密表面预处理、中间层合金制备、热力耦合实现C和合金元素的互扩散，从而实现不同金属之间的冶金结合，界面结合强度显著提高。

(2) 热穿孔轧制成型技术：精准控制加热、热穿孔、热轧、冷却参数，解决复合材质热加工界面分离、壁厚不均、耐蚀合金材料敏化等问题，确保毛管质量和高成材率。

(3) 冷轧技术：控制冷轧速度和变形量，必要时进行中间退火热处理，防止冷轧过程中出现开裂，尺寸精度显著提高。

(4) 一体化热处理技术：设计阶梯式加热、分段式冷却制度，兼顾碳钢或低合金钢基层力学性能与耐蚀合金覆层防腐性能，合理制定和控制热处理工艺参数，实现力学性能与耐蚀性能协同优化。

(5) 专用无损检测技术：开发超声波相控阵无损检测技术，壁厚检测精度达0.05 mm，可有效检测界面结合效果、层间和内部缺陷，实现全生产过程质量控制。

3 产品性能测试与分析

按 API Spec 5CT、API Spec 5LD《耐腐蚀合金包覆或衬里钢管规范》、GB/T 37701《石油天然气工业用内覆或衬里耐腐蚀合金复合钢管》等标准测试

产品主要性能。

(1) 冶金复合集输管：L245+316L 复合管屈服强度 359 MPa、抗拉强度 528 MPa，界面结合强度 344 MPa，在 CO₂ 分压 1.24 MPa 环境下均匀腐蚀速率 0.002 5 mm/a，硫化物应力腐蚀开裂(Sulfide Stress Cracking, SSC)、氢致开裂(Hydrogen Induced Cracking, HIC) 测试均无失效；L360+2205 复合管覆层 α 相比例 55.83%，组织分布均匀。

(2) 冶金复合油套管：P110+825、P110+316L 复合管屈服强度 767 MPa、抗拉强度 ≥ 871 MPa，界面结合强度 ≥ 433 MPa，远高于 API Spec 5LD 标准的 140 MPa；按 GB/T 10124《金属材料实验室均匀腐蚀全浸试验方法》进行均匀腐蚀试验，腐蚀失重速率低至 0.000 5 g/(m²·h)，试样表面无点蚀现象，极限塑性形变下无界面分离、开裂。

(3) 成型与表面性能：产品内表面平整光滑，粗糙度 $R_a \approx 0.15 \mu\text{m}$ ，远优于激光熔覆($R_a \approx 17 \mu\text{m}$)和内堆焊(R_a 毫米级)复合管，界面原子扩散距离 20~25 μm ，冶金结合牢固。

(4) 界面组织与性能：对 P110+825 复合管界面进行从碳钢一侧沿着垂直结合界面方向向 825 一侧的元素线扫描，界面组织及性能如图3所示。从图3结果来看，C、Mo、Ti、Cr、Mn、Fe、Ni 等元素均发生了不同程度的扩散；Fe、C 元素由碳钢侧向 825 侧发生扩散，主要是由于温度和元素浓度梯度提供的驱动力；Mn、Mo、Cr、Ni 元素是从 825 侧向碳钢一侧进行扩散，原子跃迁扩散的主要驱动力是温度和复合界面两侧元素的浓度差提供的。而且，通过对界面元素扩散距离测定，扩散距离为 20~25 μm ，靠近界面处的硬度值最大达到了 6.6 GPa 左右，其他位置的硬度变化不是很大，硬度变化趋势较为稳定，说明碳钢和 825 耐蚀合金达到了良好的冶金结合。

4 配套技术开发

4.1 焊接工艺技术

形成 ERNiCrMo-3 焊丝焊接工艺，进行了 316L、2205 等材质焊接工艺评定；开发端面合金化技术，实现纯材焊接，简化施工并提高质量；现场焊缝采用超声波、射线、内窥镜联合检测，开发中小直径自动焊技术。

4.2 螺纹连接技术

开发两类螺纹连接结构：经济型采用对顶式/

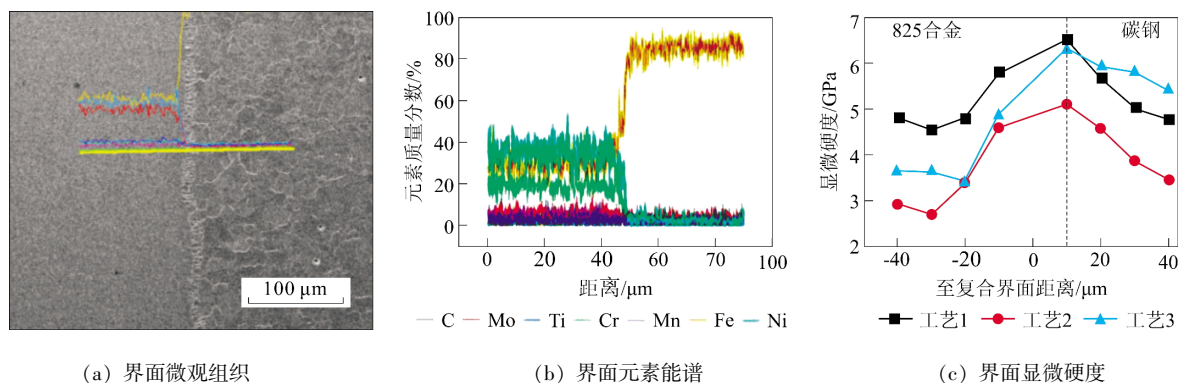


图3 P110+825 冶金无缝双金属复合管界面组织及性能

对顶式+密封圈, 适配常规螺纹, 成本低, 适用于中低压油气井; 气密封型采用激光增材制造技术, 对管端和接箍进行耐蚀合金化处理, 研发的 PC-1、PC-2 特殊螺纹密封性能稳定, 适用于高酸性气田。两类螺纹连接结构如图 4 所示^[23-24]。

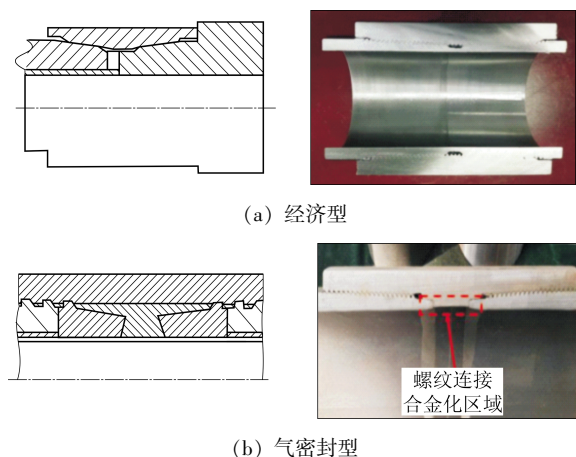


图4 两类特殊螺纹连接结构示意图

4.3 管件制备技术

开发了 L360+825 等材质冶金复合弯管, 开发了 L245+316L 冶金复合弯头、三通等管件, 经化学成分、力学性能、腐蚀性能全项检测, 产品均满足 GB/T 35067《石油天然气工业用耐腐蚀合金复合管》、GB/T 35072《石油天然气工业用耐腐蚀合金复合管》等要求, 实现复合管与管件一体化应用。

5 工程应用实践

(1) 集输管: 2021 年 L245N+316L 冶金复合管在长庆油田完成 3.2 km 示范应用, 焊接方式为氩弧焊+625 焊丝+背气保护, 投运后无腐蚀、泄漏, 运行状况良好。

(2) 油套管: 2023 年 N80+316L 复合油管在长

庆油田多个采油厂及二氧化碳捕集、利用与封存 (Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS) 注入井应用, 制定的国家标准 GB/T 44560—2024《石油天然气工业用冶金复合油管》已正式实施。

(3) 钻杆: 开发的 $\Phi 88.9 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ (基管)+1.35 mm (覆层) 规格 G105+316L 复合钻杆, 解决了管体的镦粗、管体与接头的焊接以及焊接后内壁的整体防腐问题, 钻杆管体在弯曲、拉伸、扭转、压扁等多种工况下, 耐蚀层和基体结合紧密, 性能满足 API Spec 5DP 标准要求。2023 年 G105+316L 复合钻杆在中石化西北局顺北区块 8 000 m 深井完成 2 次下井试验, 首次进尺 1 185.44 m, 纯钻进时间 182 h, 超深井工况服役性能优异。

(4) 产品服役情况: L245N+316L 复合管在长庆油田试验段使用 2 年后取下, 取出后的试验段对剖并清洗, 清洗后的照片如图 5 所示。对比使用前后内表面 316L 复合管形貌可知, 服役后的复合管内表面 316L 不锈钢层完整、光滑, 未见明显腐蚀现象, 焊缝位置完整光亮, 无明显腐蚀现象。测量服役前后复合管的壁厚, 发现壁厚减薄率 0.49%。服役 2 年后, L245N+316L 复合管的壁厚无明显减薄, 腐蚀速率 0.016 mm/a, 验证了 L245N+316L 双金属复合管的使用性能和可靠性。

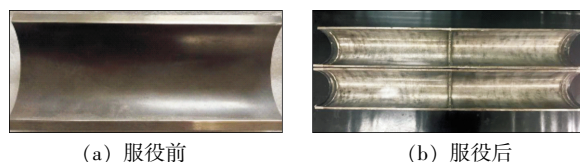


图5 L245N+316L 复合管服役前后内表面形貌

6 技术经济性分析

6.1 技术优势

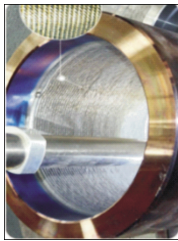
与激光熔覆复合管和内堆焊冶金复合管相比,

新型产品内表面更光滑、生产效率更高、规格覆盖更全，解决了传统产品界面缺陷、焊缝腐蚀、管径受限等问题，无损检测技术成熟，可实现井下+地

面全场景应用，整体技术达国际先进水平，具体对比见表1。内堆焊复合管和激光熔覆复合管如图6所示。

表 1 新型冶金无缝双金属复合管与传统冶金复合管对比

产品类型	内表面		衬层厚度/ mm	产品规格/ mm	生产 效率	工艺特点
	形貌	$R_a/\mu\text{m}$				
冶金无缝双金属复合管	平整光滑，无需打磨	约 0.15	≥ 1.5	$\Phi 60\sim 406$	高	一体成型，成材率高，界面结合牢固，无损检测成熟
激光熔覆双金属复合管	略粗糙，需打磨	约 17	0.5~1.0	$\geq \Phi 50$	低	焊道间微观缺陷多，缺陷控制难度大；热输入影响基材性能
内堆焊双金属复合管	略粗糙，需打磨	毫米级	2~3	$\geq \Phi 114$	较低	



(a) 内堆焊复合管



(b) 激光熔覆复合管

图 6 内堆焊复合管和激光熔覆复合管示意

6.2 经济优势

冶金无缝双金属复合管产品在中高度腐蚀区块(如塔里木盆地、四川盆地)主要用于替代纯耐蚀合金管材，降低一次性投资；在常规腐蚀区块(如鄂尔多斯盆地)主要用于替代易失效的碳钢或低合金管材，降低全生命周期投资^[25-26]。

(1) 一次性投资：以四川盆地高含硫油气田为例，平均井深 5 000 m，需要采用镍基合金油管以满足服役需求，采用 P110SS+825 复合油管较采用纯材 825 油管的一次性投资从 1 333 万元降至 526 万元，节约投资 60%。

(2) 全生命周期投资：以 $\Phi 89\text{ mm}\times 5\text{ mm}$ 集输管为例，参考长庆造价指标，针对碳钢、碳钢+缓蚀剂、机械复合管、冶金无缝复合管及耐蚀合金管等 5 种防腐方案对比，分析 20 年服役周期内的累计投资成本，考虑到了管材费、安装费、检测费、维修费及环保治理费等主要费用，产品投运 4 年后投资低于机械复合管，5 年后低于碳钢管，8 年后低于所有传统防腐方案，管材费、维修费、环保治理费综合成本优势显著。

不同防腐方案 20 年服役周期内的累计投资成本分析如图 7 所示。

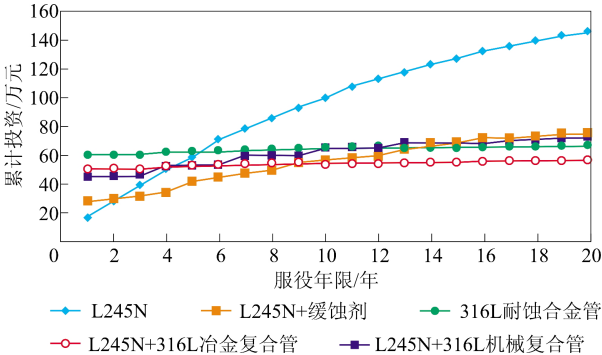


图 7 不同防腐方案 20 年服役周期内的累计投资成本分析

7 结论及展望

经过近十年的联合研究攻关，攻克了复合管坯制备、热成型、冷成型、热处理等系列关键核心技术并开始工业化应用，形成新型冶金无缝双金属复合管及其应用配套技术，基本形成了集输管及管件、油套管、钻杆等产品体系。产品外径 60~350 mm，壁厚 5~25 mm；界面达到冶金结合，结合强度高，实现了管材力学性能与耐腐蚀性能的协同优化，产品综合性能优于现有同类产品，可适应油气田高温、高压、高腐蚀复杂工况，也适用于石油炼化、超临界发电、CO₂封存和利用、新能源存储和输送等领域。目前产品已在长庆油田、中石化西北局完成集输管、油套管、超深井钻杆的现场试验和工程应用，运行效果良好。产品技术经济性显著，具有广阔的工程应用前景和显著的经济社会效益。

今后应针对油气田井下和地面集输系统、石油炼化、超临界发电、CO₂封存和利用、新能源存储和输送等领域的具体工况开展系统研究：建立基于腐蚀环境的复合管选材评价体系，实现智能化选材；优化不同材料/钢级集输管焊接技术，提升焊

接质量和效率;完善超深井/高酸性气田用高密封、高防腐螺纹连接技术;开展复杂工况下长期服役性能试验,建立寿命评估方法。

参考文献

- [1] 李鹤林. 石油管工程学[M]. 北京: 石油工业出版社, 2020. LI Helin. Petroleum pipe engineering[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2020.
- [2] 杨专钊. 油气集输用双金属复合管[M]. 北京: 石油工业出版社, 2018. YANG Zhuanzhao. Bimetallic composite pipes for oil and gas gathering and transportation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2018.
- [3] 李发根, 吴泽, 曾德智, 等. 油气集输用双金属复合管制造及应用关键技术[M]. 北京: 石油工业出版社, 2022. LI Fagen, WU Ze, ZENG Dezhi, et al. Key technologies for manufacturing and application of bimetallic composite pipes for oil and gas gathering and transportation[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2022.
- [4] 魏斌, 李鹤林, 李发根. 海底油气输送用双金属复合管研发现状与展望[J]. 油气储运, 2016, 35(4): 343–355. WEI Bin, LI Helin, LI Fagen. Research status and prospect of bimetallic composite pipes for submarine oil and gas transmission[J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2016, 35(4): 343–355.
- [5] 李发根, 付安庆, 张正芳, 等. 油气集输用双金属复合管制造及应用技术现状与展望[J]. 石油管材与仪器, 2026, 12(1): 1–7. LI Fagen, FU Anqing, ZHANG Zhengfang, et al. Current status and prospects of manufacturing and application technologies of CRA lined or clad pipes for oil and gas field gathering and transportation[J]. Petroleum Tubular Goods & Instrument, 2026, 12(1): 1–7.
- [6] 闫可安, 许天早, 韩礼红, 等. 双金属复合管的研究现状与发展趋势[J]. 化工技术与开发, 2020, 49(10): 45–50. YAN Ke'an, XU Tianhan, HAN Lihong, et al. Research status and development trend of bimetal composite pipe[J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2020, 49(10): 45–50.
- [7] 聂向晖, 李亮, 刘迎来, 等. 双金属复合钢管的生产工艺及工业应用[J]. 石油管材与仪器, 2017, 3(1): 14–17. NIE Xianghui, LI Liang, LIU Yinglai, et al. Production technology and application of CRA clad or lined pipe[J]. Petroleum Tubular Goods & Instrument, 2017, 3(1): 14–17.
- [8] 常永刚, 王长安, 杨专钊, 等. 油气输送用双金属复合管的生产工艺分析及质量控制[J]. 焊管, 2017, 40(4): 49–52. CHANG Yonggang, WANG Chang'an, YANG Zhuanzhao, et al. Production process analysis and quality control of bimetal clad steel pipe used for oil and gas transportation[J]. Welded Pipe and Tube, 2017, 40(4): 49–52.
- [9] 杨专钊, 魏伟荣, 刘腾跃, 等. 海洋油气输送用双金属复合管安装现状与趋势[J]. 石油管材与仪器, 2017, 3(2): 5–8, 27. YANG Zhuanzhao, WEI Weirong, LIU Tengyue, et al. Research on status and prospects of installation of bimetallic CRA pipes for offshore oil and gas[J]. Petroleum Tubular Goods & Instrument, 2017, 3(2): 5–8, 27.
- [10] 李发根. 高腐蚀性油气集输环境用双金属复合管[C]//中国机械工程学会压力容器分会, 合肥通用机械研究院. 压力容器先进技术—第九届全国压力容器学术会议论文集. 西安: 中国石油集团石油管工程技术研究院, 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, 2017: 141–145. LI Fagen. Bimetal lined/clad pipe used in highly corrosive oil and gas gathering and transferring environments[C]//China Mechanical Engineering Society Pressure Vessel Branch, Hefei General Machinery Research Institute. Advanced technology in pressure vessels—Proceedings of the 9th National Conference on Pressure Vessels. Xi'an: CNPC Tubular Goods Research Institute, State Key Laboratory for Performance and Structure Safety of Petroleum Tubular Goods and Equipment Materials, 2017: 141–145.
- [11] 张金星, 夏晓晖, 宋成立, 等. 油田用双金属机械复合管失效原因分析与对策[J]. 装备环境工程, 2022, 19(11): 133–141. ZHANG Jinxing, XIA Xiaohui, SONG Chengli, et al. Failure analysis and measures of bimetallic mechanical composite pipe for oil field[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(11): 133–141.
- [12] 李磊, 邝献任, 姬蕊, 等. 某油田 316L/L360NB 机械式双金属复合管失效行为及原因分析[J]. 表面技术, 2018, 47(6): 224–231. LI Lei, KUANG Xianren, JI Rui, et al. Analysis on failure behavior and reason of 316L/L360NB mechanically bimetallic composite pipes used in an oil field[J]. Surface Technology, 2018, 47(6): 224–231.
- [13] 李发根, 杨家茂, 冯泉, 等. 在役双金属复合管道失效机制及控制措施分析[J]. 焊管, 2019, 42(9): 64–68. LI Fagen, YANG Jiamao, FENG Quan, et al. Failure mechanism and control measures analysis of bimetal composite pipelines[J]. Welded Pipe and Tube, 2019, 42(9): 64–68.
- [14] 丁晗, 李先明, 安超, 等. L245/316L 双金属复合管的失效分析[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(2): 157–161, 166. DING Han, LI Xianming, AN Chao, et al. Failure

- analysis of L245/316L bimetal composite pipes[J]. Corrosion and Protection, 2018, 39(2): 157-161, 166.
- [15] 潘旭, 周永亮, 冯志刚, 等. 双金属复合管内衬塌陷问题与建议[J]. 石油工程建设, 2017, 43(1): 57-59. PAN Xu, ZHOU Yongliang, FENG Zhigang, et al. Problems and suggestions on collapse of bimetal composite pipe lining[J]. Petroleum Engineering Construction, 2017, 43(1): 57-59.
- [16] 张蕾涛, 张红星, 刘德鑫, 等. 激光熔覆复合涂层裂纹产生原因及控制研究进展[J]. 金属热处理, 2020, 45(8): 233-239. ZHANG Leitao, ZHANG Hongxing, LIU Dexin, et al. Research progress on causes and control of cracks in laser clad composite coatings[J]. Heat Treatment of Metals, 2020, 45(8): 233-239.
- [17] 任阳, 刘永良, 汪洋, 等. 埋地双金属复合管焊缝区域腐蚀风险及阴保效果评价[J]. 腐蚀与防护, 2024, 45(8): 42-49. REN Yang, LIU Yongliang, WANG Yang, et al. Evaluation of corrosion risk and cathodic protection effect for weld of buried bimetal composite pipe[J]. Corrosion and Protection, 2024, 45(8): 42-49.
- [18] 西安德信成科技有限责任公司. 一种冶金复合钢管的制备方法: CN112718912B[P]. 2025-01-21. Xi'an Dexincheng Technology Co., Ltd. Preparation method of metallurgical composite steel pipe: CN112718912B[P]. 2025-01-21.
- [19] 西安三环石油管材科技有限公司, 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. 一种冶金复合双金属钻杆及其制造方法: CN117001271B[P]. 2026-01-30. Xi'an Sanhuan Petroleum Tubular Goods Technology Co., Ltd., China National Petroleum Corporation, CNPC Tubular Goods Research Institute. Metallurgical composite bimetallic drill pipe and manufacturing method thereof: CN117001271B[P]. 2026-01-30.
- [20] 西安德信成科技有限责任公司. 耐酸性环境腐蚀钢管用钢、双金属冶金复合油套管及其制备方法: CN120700377B[P]. 2026-03-10. Xi'an Dexincheng Technology Co., Ltd. Steel for acid corrosion resistant steel pipe, bimetallic metallurgical composite oil casing and preparation method thereof: CN120700377B[P]. 2026-03-10.
- [21] 西安德信成科技有限责任公司. 整体式冶金复合双金属油管及制备工艺: CN117506331B[P]. 2026-01-30. Xi'an Dexincheng Technology Co., Ltd. Integral metallurgical composite bimetallic tubing and preparation process thereof: CN117506331B[P]. 2026-01-30.
- [22] 西安德信成科技有限责任公司. 一种带有内耐蚀层的管路端对端连接方法: CN114087459B[P]. 2025-07-25. Xi'an Dexincheng Technology Co., Ltd. End-to-end connection method for pipeline with inner corrosion resistant layer: CN114087459B[P]. 2025-07-25.
- [23] 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. 双金属复合管连接结构: CN117249314A[P]. 2023-12-19. China National Petroleum Corporation, CNPC Tubular Goods Research Institute, Xi'an Sanhuan Petroleum Tubular Goods Technology Co., Ltd. Connection structure of bimetallic composite pipe: CN117249314A[P]. 2023-12-19.
- [24] 西安三环石油管材科技有限公司, 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. 一种双金属复合管件螺纹连接结构: CN117188989A[P]. 2023-12-08. Xi'an Sanhuan Petroleum Tubular Goods Technology Co., Ltd., China National Petroleum Corporation, CNPC Tubular Goods Research Institute. Thread connection structure of bimetallic composite pipe fitting: CN117188989A[P]. 2023-12-08.
- [25] 庄钢, 陈洪琪, 高瑞全, 等. “十四五”期间我国重要钢管品种的发展与创新[J]. 钢管, 2025, 54(1): 1-6. ZHUANG Gang, CHEN Hongqi, GAO Ruiquan, et al. Development and innovation of domestic key steel pipe types in 14th FYP period[J]. Steel Pipe, 2025, 54(1): 1-6.
- [26] 庄钢, 郑贵英, 陈洪琪, 等. “十三五”“十四五”我国无缝钢管生产装备及工艺技术发展[J]. 钢管, 2025, 54(6): 8-13. ZHUANG Gang, ZHENG Guiying, CHEN Hongqi, et al. Development of domestic seamless steel tube production equipment and process technology during 13th and 14th FYP periods[J]. Steel Pipe, 2025, 54(6): 8-13.

(收稿日期: 2026-03-25)

欢迎订阅《钢管》杂志 邮发代号: 62-195