· 产品研发 ·

高性能双金属冶金复合油套管开发

黄永智[1,2]，高志明[1]，吕传涛[2]，陈鹏飞[2]
（1 天津大学，天津 300354；2 天津钢管制造有限公司，天津 300301）

摘　要：针对我国深层、超深层及高酸性油气田开发中传统油套管腐蚀失效严重的瓶颈问题，开展了高性能双金属冶金复合油套管关键技术研究。通过创新“外层高强度抗硫低合金钢+内层耐蚀合金”材料体系，确定了外层抗硫低合金钢的关键成分（质量分数）：≤0. 008%P，≤0. 002%S，0. 50%~1. 00%Cr，0. 20%~0. 40%Mo；以及内层 20-40 型镍基耐蚀合金的主要成分：20. 00%~23. 00%Cr，≥40. 00%Ni，5. 00%~8. 00%Mo。开发了“电渣复合坯+控轧控冷”短流程制备技术，明确了电渣重熔过程熔速控制在 5. 0~6. 5 kg/min、热轧初轧温度 1 150~1 200 ℃、终轧温度≥900 ℃、累计变形量≥60%、淬火温度 900~950 ℃与回火温度 600~680 ℃的关键工艺参数。ϕ88. 9 mm×7. 34 mm 复合管界面剪切强度达到 572~585 MPa，外层低合金钢材料的抗拉强度 865~982 MPa，在模拟苛刻工况下均匀腐蚀速率≤0. 003 mm/a，比行业标准低两个数量级。该成果已在高腐蚀性油气田完成工程示范，为我国深层油气安全高效开发提供了技术支撑。

关键词：双金属复合管；油套管；耐腐蚀材料；短流程制备；特殊螺纹连接
DOI:10. 20057/j. 1003-8620. N260037　　**中图分类号：**TG142. 1；TE931. 2

Research and Development of High-Performance Bimetallic Metallurgically Bonded Composite Tubing and Casing

Huang Yongzhi[1,2], Gao Zhiming[1], Lü Chuantao[2], Chen Pengfei[2]
(1 Tianjin University, Tianjin 300354, China; 2 Tianjin Pipe Corporation, Tianjin 300301, China)

Abstract: Aiming at the bottleneck of severe corrosion failure of conventional casing and tubing in the development of deep, ultra-deep and high-sour oil and gas fields in China, a systematic study on key technologies of high-performance bimetallic metallurgically bonded composite OCTG was carried out. By adopting an innovative material system of "high-strength sour-service low alloy steel outer layer + corrosion-resistant alloy (CRA) inner layer", the critical chemical composition ranges (mass fraction) of the outer sour-service low alloy steel (≤ 0. 008%P, ≤ 0. 002%S, 0. 50%-1. 00%Cr, 0. 20%-0. 40%Mo) and the main composition of the inner 20-40 type nickel-based CRA (20. 00%-23. 00% Cr, ≥40. 00% Ni, 5. 00%-8. 00% Mo) were determined. A short-process manufacturing route combining "electroslag remelting (ESR) composite billet + controlled rolling and cooling" was developed, through which the key process parameters were established: ESR melting rate controlled at 5. 0-6. 5 kg/min, initial hot rolling temperature of 1 150-1 200 ℃, finish rolling temperature ≥ 900 ℃, cumulative reduction ≥ 60%, quenching temperature of 900-950 ℃, and tempering temperature of 600-680 ℃. For the ϕ88. 9 mm×7. 34 mm composite pipe, the interfacial shear strength reached 572-585 MPa, and the tensile strength of the outer low alloy steel was 865-982 MPa. Under simulated harsh service conditions, the uniform corrosion rate was ≤ 0. 003 mm/a, which was two orders of magnitude lower than the industry standard. This achievement has been demonstrated in engineering applications in highly corrosive oil and gas fields, providing technical support for the safe and efficient development of deep oil and gas resources in China.

Key Words: Bimetallic Composite Pipes; Oil Tubing and Casing; Corrosion-Resistant Materials; Short-Process Manufacturing; Premium Threaded Connections

当前，全球能源供需格局深刻变革，油气资源勘探开发逐步向地质条件更复杂、环境更苛刻的领域拓展。据不完全统计，我国已探明的油气田中，约三分之一含有硫化氢、二氧化碳等腐蚀性介质[1]。特别是在四川盆地、塔里木盆地等地区的深层油气藏，普遍存在高温、高压、高含硫的"三高"特征[2]，对管材的耐腐蚀性能提出了极高要求。

传统低合金钢油套管在这些苛刻环境下服役时，易发生硫化物应力腐蚀开裂（SSC）、氢致开裂（HIC）及均匀腐蚀等多种形式的失效[3]。近年来，因管柱腐蚀导致的安全事故时有发生[4]，不仅造成巨大的经济损失，更对生态环境和人民生命安全构

基金项目：国家重点研发计划课题（2022YFB3705800）资助
作者简介：黄永智（1987—），男，博士在读；　**E-mail：**huangyongzhi2007@126.com；
收稿日期：2026-03-13
Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

成严重威胁。虽然全镍基合金管材能够满足耐腐蚀要求[5]，但其昂贵的价格和关键的镍资源受制于人的现状，严重制约了其大规模应用。

为解决上述腐蚀失效问题，国内外学者开展了大量双金属复合管的研究工作[6]。目前主要的制备方法包括爆炸复合法、机械复合法等[7]。然而，采用上述方法成型的复合管，其复合层界面以机械结合为主，结合强度较低。因此，这类复合管目前主要应用于地面油气输送管线。一旦承受拉伸、压缩、内压、外压、弯曲、高温等井下复合载荷作用，内外层极易发生分层失效，带来严重的安全隐患。迄今为止，鲜见该类低结合强度复合管在井下恶劣环境中成功应用的报道。

与上述机械结合为主的复合管不同，双金属冶金复合管采用"低成本高强度基层+高性能耐蚀覆层"的复合结构设计，通过冶金结合实现界面原子级扩散，从根本上避免了分层失效风险。该方案既保证了管柱的结构强度，又提供了优异的耐腐蚀性能，因而成为解决高酸性油气田管材腐蚀问题的理想方案。然而，该技术在实际推广应用过程中仍面临三大技术难题：一是异种金属高质量冶金结合的实现；二是复合管专用连接结构的完整性保障；三是规模化生产的工艺稳定性控制[6]。

本研究基于国家重点研发计划项目，系统开展了高性能双金属冶金复合油套管的关键技术研究，攻克了从材料设计、制备加工到工程应用的全链条技术难题，并成功实现了产业化示范应用。

1 试验材料及方法

1.1 材料创新设计

本研究采用理论计算与实验验证相结合的方法，创新设计了功能梯度材料体系。外层材料选用自主开发的高钢级抗硫碳钢，通过多元微合金化设计和纯净钢冶炼技术，实现了高强度与优异抗硫化物应力腐蚀性能的完美匹配。钢种的成分设计借鉴了110SH-1钢级热采套管的开发经验[8]，在此基础上进一步优化了Cr、Mo含量以满足高含硫环境的抗SSC要求。

在成分设计方面，首先，将磷、硫等有害元素含量控制在极低水平（w[P]≤0.008%，w[S]≤0.002%），显著提高了材料的抗氢致开裂能力；其次，通过添加w[Cr]0.50%~1.00%、w[Mo]0.20%~0.40%等碳化物形成元素，利用其弥散分布的碳化物作为氢原子的强陷阱，有效降低了钢对硫化物应力开裂的敏感性；同时，添加适量Al起到了细化晶粒的作用[9]，进一步改善了材料的韧性和抗腐蚀性能，具体成分控制见表1。

内层耐蚀合金采用高性能镍基合金（如20-40型），通过提高镍元素占比，并搭配特定含量的钼元素，显著提升材料在含氯离子环境中的抗点蚀能力，具体成分见表2。

1.2 短流程制备技术

针对传统复合管制备工艺流程长、成本高、界面结合质量不稳定等问题，本研究开创性地开发了“电渣复合坯+控轧控冷”短流程制备技术。该技术路线相比传统工艺，能耗显著降低，成材率明显提升，具备突出的技术与经济优势。

在复合坯制备阶段，采用先进的电渣重熔复合技术[10]。通过优化渣系组成、精准控制熔速（5.0~6.5 kg/min）和结晶器冷却强度等关键参数，有效抑制了界面氧化物的生成，确保了复合界面的纯净度。研究证实，通过对核心工艺参数的合理调控，可获得最佳的界面结合质量，电渣重熔后制备的复合管坯情况如图1所示。

热轧成型过程中，重点研究了异种金属的协调变形行为。通过建立如图2所示的复合管热轧穿孔过程的有限元模型，精确预测了不同道次下界面的应力应变分布，进而优化了轧制规程。实践表明，初轧温度1 150~1 200 ℃、终轧温度≥900 ℃、累计变形量≥60%时，可实现理想的界面冶金结合效果，热轧成型复合管如图3所示。轧后钢管采用控冷工艺，以5~10 ℃/s的冷却速率冷却至650~700 ℃，随后空冷至室温。上述控轧控冷工艺参数的制定参考了套管钢带热轧产业化的相关实践[11]。

热处理工艺对复合管最终性能起决定性作用。通过系统的热处理试验，建立了工艺参数-组织-性能的对应关系。最终确定了适配的淬火温度（900~950 ℃）与回火温度（600~680 ℃）区间，该工艺使外

表1 外层抗硫低合金钢（110ksi级抗硫钢）化学成分控制（质量分数）

Table 1 Chemical composition of outer low alloy steel (110ksi grade sulfur-resistant steel) %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Al	V/Ti
0.22~0.28	0.20~0.35	0.40~0.60	≤0.008	≤0.002	0.50~1.00	0.20~0.40	0.15~0.30	0.015~0.040	0.02~0.06

表 2 20−40 型镍基合金内层耐蚀合金主要成分(质量分数)
Table 2 The main components of the inner corrosion−resistant alloy for type 20−40 nickel−based alloys　%

Cr	Ni	Mo	Fe
20.00~23.00	≥40.00	5.00~8.00	余量

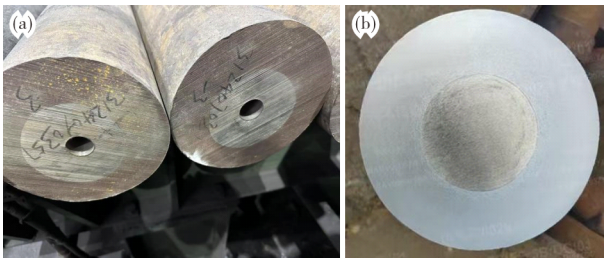


图 1　电渣重熔制备的复合管坯:(a)成品复合坯,(b)复合坯剖面

Fig. 1　Composite pipe billet prepared by electroslag remelting : (a) finished composite billet, (b) cross−section of the composite billet

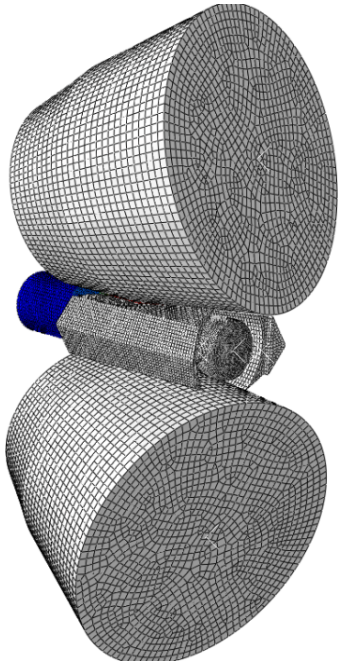


图 2　穿孔过程仿真计算

Fig. 2　Numerical simulation of piercing process

层低合金钢获得回火索氏体组织,同时,促进界面元素适度扩散,实现了强度与韧性的最佳匹配。

1.3　界面结合机理研究

复合管界面结合质量是其可靠性的关键保证。采用扫描电镜(SEM)、透射电镜(TEM)等检测方法,深入分析了界面的微观结构和元素分布规律。结果表明,优化工艺制备的复合管界面实现了完全的冶金结合,界面区域宽度控制在较窄范围,元素呈

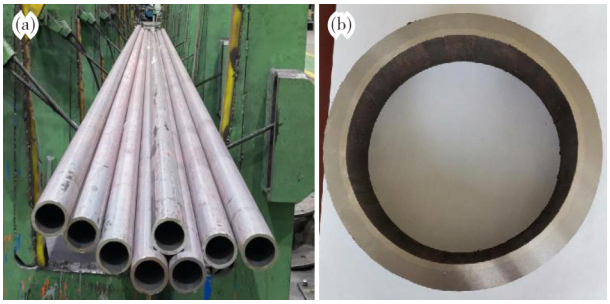


图 3　热轧成型复合管:(a)热轧成型复合管,(b)复合管剖面

Fig. 3　Hot−rolled composite pipe : (a) hot−rolled composite pipe, (b) cross−section of the composite pipe

梯度分布,无明显的脆性相析出,如图 4 所示。

通过剪切试验和断口分析,发现界面结合强度主要取决于两个因素:一是机械结合作用,即通过轧制变形实现的机械互锁;二是冶金结合作用,即通过界面元素的互扩散形成的原子级结合。当剪切强度达到 380 MPa 以上时,断裂位置通常发生在基层或覆层材料本身[12],而非结合界面,这表明界面结合强度已高于基体材料的强度。

1.4　专用气密封螺纹连接技术

复合管螺纹连接的技术挑战主要来自三个方面:首先,螺纹加工会破坏内衬耐蚀层的连续性,导致基层低合金钢暴露,形成腐蚀通道;其次,异种材料在螺纹啮合过程中的应力分布复杂,容易导致应力集中;此外,高温高压工况下的密封可靠性要求极高。

为解决这些难题,本研究提出了“管端堆焊重建+特殊螺纹优化”的一体化解决方案,如图 5 所示。在管端加工区域,采用自动化堆焊工艺熔覆与内衬层成分相匹配的耐蚀合金材料,重建完整的耐腐蚀屏障。通过优化堆焊工艺参数,包括调控适配的电流范围(200~250 A)、匹配的电压参数(25~30 V)及控制合理的层间温度区间(≤300 ℃),最终获得组织致密、无缺陷的堆焊层。

基于复合管的特殊结构和服役条件,本研究开发了新型特殊螺纹连接结构,如图 6 所示。该结构具有以下特点:采用梯形螺纹设计,这种设计使连接在承受拉伸载荷时螺纹啮合更紧密,显著提高了抗过扭和抗压缩能力;设置金属对金属主密封结构,采用锥面-锥面密封形式,在过盈配合下产生极高的接触压力[13],确保气体级密封性能;配备内扭矩台肩,既作为上扣扭矩的控制基准,又提供辅助密封和抗弯曲能力。

通过全尺寸试验验证,该连接结构在经历三次

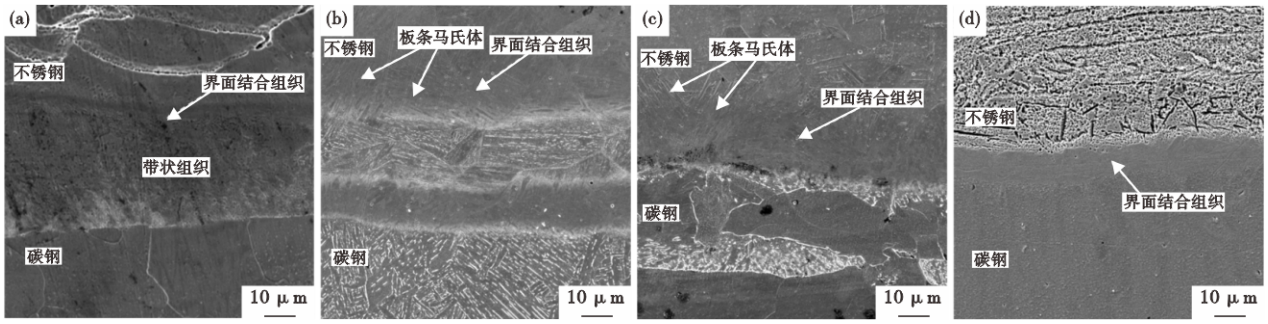


图4　不同热处理后试样复合界面处SEM图像:(a)原始试样,(b)淬火试样,(c)退火试样,(d)调质试样

Fig. 4　SEM images of the composite interface of specimens after different heat treatments: (a) as-received specimen, (b) quenched specimen, (c) annealed specimen, (d) quenched and tempered specimen



图5　复合管管端堆焊处理

Fig. 5　End overlay welding of composite pipe

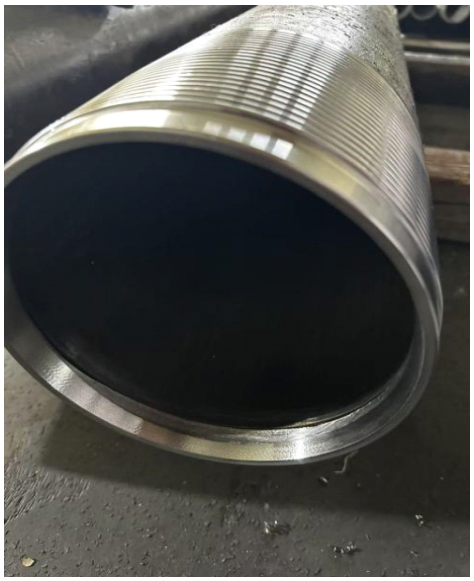


图6　复合套管螺纹试样

Fig. 6　Threaded sample of composite casing

完整的上卸扣循环后,螺纹牙型和密封面仍保持完好,无可见磨损和粘扣现象,证明了其良好的可重复使用性。

为确保连接结构设计的可靠性,本研究建立了如图7所示的精细化的有限元模型,模拟分析了螺纹连接在不同工况下的力学行为和密封性能。分析结果表明,在上扣工况下,螺纹牙根部的最大应力为585 MPa,远低于材料的屈服强度;在内部压力70 MPa、轴向拉伸载荷500 kN的复合载荷条件下,密封面的接触压力始终保持在45 MPa以上。

2　综合性能评价

2.1　力学性能测试

为全面评价ϕ88.9 mm×7.34 mm规格复合管的力学性能,本研究按照GB/T 228.1—2021《金属材料 拉伸试验 第1部分:室温试验方法》,委托国内权威检测机构开展了系统的测试分析。拉伸试验结果显示,外层低合金钢材料的抗拉强度达到865~982 MPa,屈服强度为777~924 MPa,断后伸长率为17%~24%,全面满足并超过了110ksi钢级的性能要求[14]。

界面剪切强度是评价复合管质量的关键指标,依据GB/T 6396—2008《复合钢板力学及工艺性能试验方法》进行测定。测试结果表明,对于ϕ88.9 mm×7.34 mm的复合管,其界面剪切强度(见表3)达到572~585 MPa,高于350 MPa的技术要求。宏观断口分析显示,破坏发生在基体材料而非结合界面,进一步证实了界面结合质量的可靠性。

2.2　耐腐蚀性能系统评价

在耐腐蚀性能方面,依据JB/T 7901—2023,模拟实际苛刻工况(高温、高压含腐蚀性介质及高盐环境),开展了ϕ88.9 mm×7.34 mm系统的腐蚀试验。均匀腐蚀试验结果表明,20-40型镍基合金均表现出极低的腐蚀速率(≤0.003 mm/a),腐蚀后形貌如图8所示;两种材料的腐蚀性能显著低于任务书规定的腐蚀速率要求(0.3 mm/a),降幅达两个数量级,充

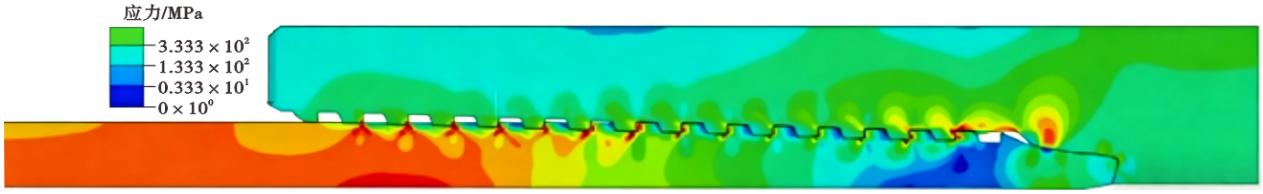


图7　有限元分析结果
Fig. 7　Finite element analysis results

表3　复合管剪切强度测试结果
Table 3　Shear strength test results of composite pipe

试样编号	剪切强度/MPa	断裂位置
1	585	基层材料
2	572	基层材料
3	568	基层材料
4	581	基层材料
5	575	基层材料

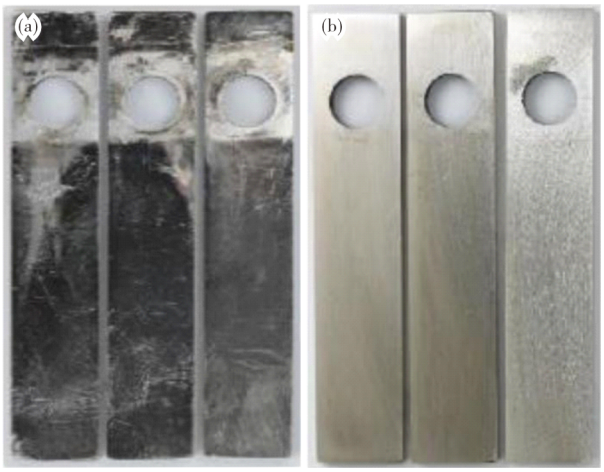


图8　试样清洗前后:(a)试样清洗前,(b)试样清洗后
Fig. 8　Specimens before and after cleaning : (a) before cleaning, (b) after cleaning



图9　SSC腐蚀试样
Fig. 9　SSC Corrosion specimens



图10　工业化试生产复合油管
Fig. 10　Composite tubing from industrial trial production

分展现出极其优异的耐腐蚀性能。

抗硫化物应力腐蚀开裂(SSC)试验按照NACETM0177—2016标准中的A法进行[15],持续720 h后,所有试样均未发生断裂,SSC腐蚀试样如图9所示。经10倍放大镜观察,受拉表面未见任何裂纹,证明材料具有卓越的抗SSC能力。

此外,依据GB/T 37619—2019《金属和合金的腐蚀 电化学试验方法》,通过电化学测试和微观分析,深入研究了复合管的腐蚀机理。结果表明,内层耐蚀合金表面形成了致密稳定的钝化膜[16],其中,铬元素的富集对提高钝化膜的稳定性起到了关键作用。

2.3　产业化试生产

基于前期关键技术研发成果,组织开展了复合管产业化试生产,通过组建技术、生产、质检专项团队制定全流程方案,完成生产设备调试、工装夹具适配及人员培训后,在试生产过程中对电渣复合坯制备、控轧控冷、管端堆焊等关键工序实施动态监控与参数优化,最终成功产出如图10所示产品。

产品覆盖了较宽的规格范围,其中外径系列包括60.3、73.0、77.0、88.9、101.6、114.3、139.7、177.8 mm等,壁厚系列涵盖6.0、7.0、7.34、8.0、9.5 mm,内层耐蚀合金厚度为1.5~3.0 mm(可根据腐蚀工况定制),单支长度9~12 m,钢级满足API SPEC 5CT:2023 110 ksi要求,连接形式采用特殊螺纹接头,气密封性能满足ISO 13679:2019 CAL IV级要求。经检测,产品的界面结合质量、力学性能及耐蚀性能均满足预定技术要求,既验证了短流程工

艺的产业化可行性，也为后续规模化生产积累了核心经验[17]。

2.4 工程示范应用

2025年8月，ϕ77 mm×7 mm（内层20-40型镍基合金厚度1.5~2.0 mm）规格双金属复合无缝油管在国内某大型油田成功完成下井示范应用。施工过程中，复合管展现出良好的工程适应性。与传统油管相比，其连接操作流程基本相同，无需特殊的工具和工艺，显著降低了现场施工的难度。通过精确的扭矩控制和规范的操作流程，所有复合管连接一次成功率100%，施工过程顺利。截至目前，示范井已稳定运行数月，生产参数正常，井口装置无泄漏，初步验证了复合管在真实工况下的可靠性。

3 结论

1）通过创新“外层高强度抗硫低合金钢+内层耐蚀合金”材料体系，确定了外层抗硫低合金钢的关键成分（质量分数）：≤0.008%P，≤0.002%S，0.50%~1.00%Cr，0.20%~0.40%Mo；以及内层20-40型镍基耐蚀合金的主要成分为20.00%~23.00%Cr，≥40.00%Ni，5.00%~8.00%Mo。实现了复合管高强度、高韧性和优异耐腐蚀性能的有机结合。界面剪切强度达到572~585 MPa，远高于350 MPa的技术要求。

2）开发了“电渣复合坯+控轧控冷”短流程制备技术，确定了生产复合管的关键工艺最佳参数：电渣重熔熔速5.0~6.5 kg/min，初轧温度1 150~1 200 ℃，终轧温度≥900 ℃，累计变形量≥60%，淬火温度900~950 ℃，回火温度600~680 ℃。

3）开发的专用气密封螺纹连接技术，通过“管端堆焊重建+特殊螺纹优化”的一体化方案，有效解决了复合管连接部位的腐蚀防护和密封可靠性难题，连接结构的气密封性能满足最严格的井况要求。

4）系统性性能评价表明，复合管在模拟苛刻工况下表现出卓越的耐腐蚀性能，均匀腐蚀速率≤0.003 mm/a，抗SSC性能通过NACE TM0177-2016标准考核。

5）成功的工程示范应用证明，复合管具有良好的工程适应性和可靠性，为解决高酸性油气田管柱腐蚀问题提供了有效的技术方案，具备大规模推广应用的条件。

参考文献

[1] 张 智，蔡 楠，赵苑瑾，等. 四川盆地超深高含硫气田井下管柱完整性设计理念与方法[J]. 天然气工业，2023，43(4)：148-156.

[2] 胡 勇，惠 栋，杜 强，等. 四川盆地中坝气田雷三气藏高效开发及其对中国高含硫气藏开采的意义[J]. 天然气工业，2024，44(11)：24-36.

[3] 赵密锋，付安庆，秦宏德，等. 高温高压气井管柱腐蚀现状及未来研究展望[J]. 表面技术，2018，47(6)：44-50.

[4] Carneiro R A，Ratnapuli R C，de Freitas Cunha Lins V. The influence of chemical composition and microstructure of API linepipe steels on hydrogen induced cracking and sulfide stress corrosion cracking[J]. Materials Science and Engineering：A，2003，357(1-2)：104-110.

[5] 沈 函，周高阳，王新田，等. C110级油套管钢的显微组织和晶体学特征对硫化物应力开裂的影响[J]. 上海金属，2023，45(2)：20-26.

[6] 李效华，侯文芝，吕传涛，等. 冶金复合油套管技术的研究进展[J]. 钢管，2024，53(4)：11-21.

[7] 杜心康，王建江，赵忠民，等. 重力分离SHS陶瓷内衬复合管界面现象[J]. 复合材料学报，2001，18(4)：72-75.

[8] 唐 科，王秀敏，彭 俊，等. 稠油热采井用110SH-1钢级热采套管的开发[J]. 特殊钢，2020，41(4)：43-47.

[9] 吕国成，包丽明，朱金禄，等. Nb-Ti微合金化含铬J55石油套管用钢的生产实践[J]. 特殊钢，2015，36(4)：28-30.

[10] 张玉海，王永然. 石油套管钢Φ150～Φ200 mm连铸圆坯的质量控制[J]. 特殊钢，2013，34(3)：42-44.

[11] 武利平，智建国，刘 青，等. 套管TG22热轧钢带研究及产业化[J]. 特殊钢，2020，41(1)：21-23.

[12] Baghaei M H，Faraji G. Punch plastic deformation pipe cladding (PPDPC) as a novel tube cladding method[J]. Journal of Advanced Materials and Processing，2016，4：21-28.

[13] KleverR F J. On the mechanics of premium connections in casing and tubing[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition. Society of Petroleum Engineers，1992. SPE-24692-MS.

[14] API Speccificatio 5CT. Specification for casing and tubing[S]. 10 th ed. Washington：American Petroleum Institute，2018 incorporating errata 3，2020.

[15] NACE International. NACE TM0177-2016 laboratory testing of metals for resistance to sulfide stress cracking and stress corrosion cracking in H2S environments[S]. Houston：NACE International，2016.

[16] Jiang Z，ZhangY，Wang L，et al. Corrosion behavior of stainless steel cladding layer in CO_2-H_2S-Cl^- environment[J]. Corrosion Science，2021，187：109472.

[17] Wang H，Zhang Z，Chen S，et al. Advanced manufacturing technologies for corrosion resistant alloy-clad OCTG for extreme sour service[C]. SPE Annual Technical Conference and Exhibition，Houston，Texas，USA，October 3-5，2022. SPE-200981.