

柔性复合软管接头的材料与异质界面设计及工况适配

刘洋¹ 方卫林¹ 李振军¹ 张荣达^{2*} 刘向东^{2*}

1 国家石油天然气管网集团有限公司西部管道有限责任公司 2 中国科学院长春应用化学研究所

DOI:10.32629/pe.v3i6.18042

[摘要] 柔性复合软管接头是油气管道震后快速抢修系统的核心部件,其服役可靠性取决于材料体系的性能协同与异质材料界面的稳定结合。本文基于柔性复合软管接头设计相关研究,聚焦材料科学(金属、密封、胶粘剂选型与性能调控)及异质界面(金属-聚合物、纤维-树脂)构筑两大核心,系统综述接头核心材料的选型逻辑、异质界面的结合机制与优化路径,并简要提及结构设计中材料与机械功能的适配关系。研究表明,20#钢(承载)-EPDM/NBR共混物(密封)-双组份聚氨酯胶粘剂(界面连接)构成的材料体系,结合“化学键合+机械互锁”的界面优化策略,可满足-30℃~50℃、 ≥ 5 MPa严苛工况需求,有效解决异质界面脱粘问题。本文为接头材料设计与界面优化提供理论参考,也为同类异质连接部件研发提供借鉴。

[关键词] 复合软管接头; 材料设计; 异质界面; 工况适配

中图分类号: S220.4 **文献标识码:** A

Material and Heterogeneous Interface Design with Operating Condition Adaptation for Flexible Composite Hose Joints

Yang Liu¹ Weilin Fang¹ Zhenjun Li¹ Rongda Zhang^{2*} Xiangdong Liu^{2*}

1 West Pipeline Co., Ltd. of National Petroleum and Natural Gas Pipeline Network Group Co., Ltd.

2 Changchun Institute of Applied Chemistry, Chinese Academy of Sciences

[Abstract] Flexible composite hose joints are core components of post-earthquake rapid emergency repair systems for oil and gas pipelines, and their service reliability depends on the performance synergy of material systems and the stable bonding of heterogeneous material interfaces. Based on relevant research on the design of flexible composite hose joints, this paper focuses on two core aspects: materials science (selection and performance regulation of metals, sealing materials, and adhesives) and the construction of heterogeneous interfaces (metal-polymer, fiber-resin). It systematically reviews the selection logic of core materials for the joints, the bonding mechanisms and optimization paths of heterogeneous interfaces, and briefly addresses the adaptation relationship between materials and mechanical functions in structural design. Research shows that the material system composed of 20# steel (load-bearing), EPDM/NBR blend (sealing), and two-component polyurethane adhesive (interface bonding), combined with the interface optimization strategy of "chemical bonding + mechanical interlocking", can meet the harsh working conditions of -30℃~50℃ and ≥ 5 MPa, and effectively solve the problem of heterogeneous interface debonding. This paper provides a theoretical reference for the material design and interface optimization of the joints, and also offers insights for the development of similar heterogeneous bonded components.

[Key words] Composite hose joints; Material design; Heterogeneous interfaces; Operating condition adaptation

引言

在油气管道震后抢修场景中,柔性复合软管凭借轻量化、易安装优势成为关键装备,而接头作为软管与管道的连接枢纽,其性能直接决定系统密封性与耐压性^[1]。当前接头面临两大核心挑战:一是异质材料界面不稳定,金属如钢与聚合物如聚氨

酯、纤维如聚芳酯与树脂间,因物理化学性质差异如热膨胀系数、表面能、极性,易发生脱粘,导致泄漏或承载失效;二是材料体系适配性不足,金属的耐蚀性与加工性、密封材料的耐油性、弹性、胶粘剂的界面结合力难以同时匹配高压、耐油、宽温工况^[2]。

现有研究多关注工程结构设计, 却缺乏对“材料性能-界面行为-服役可靠性”关联机制的系统梳理。本文基于柔性复合软管接头设计相关研究, 聚焦材料科学与异质界面构筑两大核心, 其中材料科学涉及金属、密封、胶粘剂的选型与性能调控, 异质界面包括金属-聚合物、纤维-树脂两类, 系统综述接头核心材料的选型逻辑、异质界面的结合机制与优化路径, 明确“材料选型支撑界面稳定、界面优化提升整体性能”的核心关系, 为接头高性能化研发提供理论参考, 也为同类异质连接部件的创新设计提供借鉴^[3]。

1 柔性复合软管接头的核心材料体系设计

接头材料需满足“承载耐压-介质阻隔-界面协同”三重功能, 选型需平衡性能、工况与经济性, 核心包括起承载作用的金属材料、起密封作用的橡胶材料以及解决界面连接的灌注胶粘剂三类^[4]。

1.1 金属材料承载单元的选型与性能适配。金属材料作为接头的力学承载核心, 需兼顾强度、耐腐蚀性、加工性与经济性。现有候选材料特性差异显著: 以不锈钢304为例, 其耐腐蚀性优异, 尤其适用于化工环境, 但密度较高, 比20#钢高出约15%, 成本也达到20#钢的两倍, 不利于快速安装; 黄铜经济性较好, 但耐油性差, 在油气介质中腐蚀率可达0.1至0.2毫米, 仅适用于低压系统; 铜镍合金虽耐海洋腐蚀, 却存在加工难度大和焊接性能差的问题^[5]。

综合考虑工况需求, 包括耐压不低于5MPa、耐温范围在-30℃至50℃, 20#钢作为一种优质低碳钢成为最优选择。其冷挤压性能良好, 伸长率不低于25%, 无回火脆性, 弹性模量在20℃时为210GPa, 热膨胀系数在20至500℃区间为 $13.9 \times 10^{-6} / \text{K}$, 能够与聚氨酯基体良好匹配, 从而减少温度循环引起的界面应力; 其热导率在20℃时为 $51.08 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$, 可有效避免局部过热导致的性能退化^[6]。

1.2 密封材料防漏单元的性能调控与协同。密封材料需实现零泄漏目标, 其核心性能要求包括耐油性, 如在10#机油中浸泡72小时体积变化率不超过8%; 弹性, 即压缩永久变形率不高于18%; 以及宽温适应性, 如在-30℃下不脆裂^[7]。纯金属密封材料耐高温高压, 但容易被腐蚀; 纯橡胶如EPDM柔性优良, 但耐油性较差, 在10#机油中浸泡体积变化率可达15%; 复合材料虽能兼顾多项优势, 但成本较高。

为平衡性能与经济性, 可采用三元乙丙橡胶与丁腈橡胶按7:3比例组成的共混体系。其中EPDM的饱和主链保障了耐老化性, 在100℃热空气中老化1000小时后拉伸强度保留率可达82%; NBR中的氰基则提升了耐油性, 使体积变化率降至8.5%。在此基础上添加15份硅烷改性纳米碳酸钙, 其粒径为50纳米, 通过物理交联作用进一步提升拉伸强度, 从12MPa提高至16MPa, 并增强抗压缩变形能力, 使压缩永久变形率降至18%, 从而完全适配油气介质工况^[8]。

1.3 灌注胶粘剂异质连接单元的界面适配与优化。灌注胶粘剂是实现金属与聚合物、纤维与树脂等异质连接的关键材料,

需具备高粘接强度、耐油耐温性及良好相容性。在环氧胶脆性较大、瞬间胶耐油性差、硅橡胶强度较低的对比下, 双组份聚氨酯胶粘剂因弹性优良, 断裂伸长率不低于150%, 抗振动性能出色, 在1000次压力循环后强度保留率仍保持在90%以上, 且能够与金属表面的羟基及聚合物中的氨基形成多重结合, 因而成为最优选择^[9]。

其性能优化主要聚焦于三方面: 首先调整异氰酸酯预聚体与多元醇固化剂的比例至1.2比1, 提高游离异氰酸基含量, 从5%增至8%, 从而强化与金属表面羟基的反应程度; 其次添加5%的有机化蒙脱土, 利用其层状结构延长油介质渗透路径, 使耐油渗透系数降低40%; 最后引入0.5%的硅烷偶联剂KH-550, 通过形成“金属-Si-O-树脂”化学键桥接机制, 将界面剪切强度从25MPa提升至34MPa^[10-11]。

2 异质材料稳定界面的构筑机制与优化

异质界面(金属-聚合物、纤维-树脂)的稳定性是接头可靠服役的核心, 其构筑需结合协作策略、结合机制与优化技术, 实现“初始强度高-长期稳定性好”^[12]。

2.1 刚柔耦合协作对异质界面的支撑作用。刚柔耦合结构是接头的宏观设计基础, 其协作策略直接影响界面受力状态。“刚主柔从”以刚性金属为承载核心, 柔性聚合物降低接触刚度, 减少界面应力集中; “柔主刚从”以柔性密封材料为主动单元, 让刚性金属提升其输出力, 避免过度形变导致的界面脱离; “刚柔协作”让刚性金属与柔性纤维-树脂层共同承载, 通过载荷均匀分配降低界面局部载荷^[13]。

其中“刚柔协作”最利于界面稳定: 例如由刚性的20#钢接头芯与柔性的聚芳酯纤维增强PU层协同承载时, 纤维层的形变可有效缓冲轴向拉力, 从而减少金属与聚合物界面的剪切应力, 降低脱粘风险, 为界面的长期稳定提供宏观力学保障^[13]。

2.2 异质界面的结合方式与核心机制。异质界面的结合方式决定初始强度, 主流方式包括三类: 螺栓、卡箍等机械连接便捷但易产生应力集中, 需配合EPDM垫片缓解; 激光焊、超声波焊等焊接适用于金属-热塑性聚合物连接, 但对加工精度要求高, 易导致聚合物碳化; 通过粘合树脂进行胶接, 因设备简单、界面应力分布均匀, 成为接头异质连接的首选^[12]。

界面结合的核心机理包括三方面: 一是化学键合, 通过硅烷偶联剂, 如KH-550在异质材料间构建共价键, 界面剪切强度提升30%~40%; 二是表面润湿与吸附, 粘合树脂需充分润湿金属表面, 测试指标为接触角 $\leq 30^\circ$, 界面结合力得以提升25%, 这直接得益于喷砂处理工艺, 该工艺将表面粗糙度Ra从 $0.2 \mu\text{m}$ 增加至 $0.8 \mu\text{m}$, 从而显著优化了PU树脂在20#钢上的润湿效果; 三是双电层机制, 金属与聚合物表面因电子转移形成双电层, 如铜合金-PU界面电势差 $0.2\text{V} \sim 0.3\text{V}$, 产生静电引力辅助界面结合^[12]。

2.3 异质界面的优化路径。为提升界面稳定性, 需从“粘合树脂改性”与“基体表面预处理”双管齐下:

• 树脂改性: 以聚碳酸酯多元醇(PCDL)替代传统聚醚多元醇制备聚氨酯树脂, 提升耐水解性(50℃、90%湿度老化1000h质量

损失率从3%至1.2%);引入三羟甲基丙烷(TMP)调控交联密度($4.5 \times 10^{-4} \sim 4.8 \times 10^{-4} \text{ mol/cm}^3$),减少油介质渗透引发的界面溶胀^[10-11]。

•表面预处理:物理法(Ar/O₂等离子体刻蚀,100W×5min)通过轰击增加聚合物表面粗糙度与活性基团;化学法(硅烷偶联剂处理、阳极氧化)构建“反应位点”,20#钢经KH-550处理后,与聚氨酯胶粘剂的化学键合密度增加,界面剪切强度提升至32MPa^[12]。

此外,新型无缩径接头设计也辅助界面稳定。通过焊接将注胶接头与金属承拉层直接连接,避免传统内胀外扣工艺导致的材料形变;向接头空腔注入大量粘合树脂,固化后形成“整体式界面层”,减少应力突变,抗拔脱能力提升40%以上^[12]。

3 接头结构设计中的材料与结构适配

接头结构设计需以材料性能为根本依据,实现材料功能与机械功能之间的有效匹配,其核心在于密封原理的落实与关键尺寸的优化。

3.1密封原理中材料的协同实现高密封。封系统采用了机械锥面密封与特种胶粘剂相结合的复合方案。该方案中,由20#钢制成的密封锥面,其锥度为1比10,与聚氨酯改性密封面进行高精度配合,两者间隙控制在0.05mm以内。装配时通过不低于10兆帕的机械压力实现初始密封。随后,特种聚氨酯胶粘剂在微观层面流动并填补残余间隙,最终形成机械互锁与化学粘合共同作用的双重密封体系,从而将介质泄漏率稳定控制在 $1 \times 10^{-6} \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ 以下^[6]。

3.2尺寸配合与卡箍结构对材料性能的保障。在尺寸配合方面,软管与接头之间的内径间隙被严格限定在0.5mm至1mm的范围内。这一设计既能有效避免流体介质产生涡流,也能防止安装过程中的损伤。金属接头的壁厚则依据20#钢不低于245MPa的屈服强度进行计算,确保在5MPa的工作压力下,其壁厚不小于8mm,从而杜绝结构变形风险。

卡箍结构由20#钢无缝钢管焊接后分切为4片制成。其齿形经过优化,设置为8个齿,这一数量在保证受力均匀的同时也兼顾了加工可行性。卡箍的内开口尺寸H偏差控制在 $\pm 0.3 \text{ mm}$ 之内,以此确保其与对接法兰面能够紧密贴合^[7]。

4 结论与展望

柔性复合软管接头的性能优化本质上是材料科学与界面工程的系统性融合。以20号钢作为承载骨架、EPDM与NBR共混体系作为密封单元、双组份聚氨酯胶粘剂作为连接媒介所构建的材料组合,为界面长期稳定奠定了坚实基础;通过化学键合、机械互锁与刚柔协作相结合的界面构筑策略,从根本上解决了异质材料因性质差异而容易脱粘的难题;而在结构设计中实现材料性能与机械功能的精准适配,进一步保障了接头在复杂工况下的整体性能。

未来研究可从三个方向深入展开:一是开发具备自修复能力的界面材料,例如基于温敏微胶囊的胶粘剂体系,以实现接头在微损伤阶段的自主修复功能;二是构建以生物基材料为主的体系,如推广蓖麻油基聚氨酯等绿色材料,降低对传统化石资源的依赖;三

是融合分子动力学与有限元分析等多尺度模拟方法,准确预测界面在复杂载荷下的失效行为,从而显著缩短产品研发周期。

【参考文献】

- [1]范冲.陆上油气田用柔性复合管接头优化设计与评价研究[D].西安:西安石油大学,2023.
- [2]李胜华,何永祝,张劲松,等.柔性接头用低模量硅橡胶配方及界面粘接技术研究[J].固体火箭技术,2004,(03):201-203.
- [3]李平.油气输送用粘接热塑性复合管截面强度及专用接头优化设计计算[D].北京:北京化工大学,2020.
- [4]齐丽薇.非金属管道在油田中的应用现状与对策[J].化学工程与装备,2021,(03):132-133.
- [5]张冠军,齐国权,戚东涛.非金属及复合材料在石油管领域应用现状及前景[J].石油科技论坛,2017,36(02):26-31+37.
- [6]王莹,付文耀,淡勇,等.原油不同因素对20钢输油管道内壁腐蚀的影响[J].材料保护,2018,51(03):121-123+126.
- [7]袁培峰.密封材料在油气储运领域的应用[C]//中国石油和石化工程研究会.中国油气管道建设与储运技术交流暨油气储运新技术、新设备、新材料展示会论文集.郑州中原应用技术研究开发有限公司,2014:88-102.
- [8]袁兆奎,吴天昊,李楠,等.制动橡胶密封材料的性能优化及寿命预测[J].橡塑技术与装备,2019,45(15):42-46.
- [9]Wang Dan,Zhang J Fu,Su Z M.Fabrication of metal/polymer layer structure composites by demulsification-induced fast solidification[J].Journal of Physics:Conference Series,2021,1759:012010.
- [10]程娟,李明田.KH-550对含硅聚氨酯胶粘剂性能的影响[J].中国胶粘剂,2019,28(02):26-29+33.
- [11]邹德荣.提高聚氨酯胶对玻璃钢粘接强度的研究[J].粘接,2000,(03):22-23.
- [12]Wei F C,Wei Y P,Yao X,等.Review: Enhancing bond strength of heterogeneous metal-polymer components the perspective of surface micro-nano morphology construction[J].Journal of Materials Science,2025,60(14):6023-6058.
- [13]畅元江,王仕超,李健,等.深水隔水管-防喷器组耦合系统动力学建模与仿真验证[J].振动与冲击,2024,43(11):1-8.

作者简介:

刘洋(1986--),男,汉族,安徽省砀山县人,本科学士学位,高级工程师,研究方向: 应急与维抢修。

李振军(1984--),男,汉族,山东寿光人,硕士,高级工程师,研究方向: 管道保护、完整性管理。

方卫林(1986--),男,汉族,云南罗平热门人,本科,高级工程师,研究方向: 管道工程。

张荣达(1996--),男,汉族,吉林长春人,博士,助理研究员,研究方向: 聚氨酯胶粘剂及其复合材料。

刘向东(1982--),男,汉族,黑龙江哈尔滨人,博士,研究员,研究方向: 高分子多层复合材料。