

纤维骨架增强柔性复合软管在油气输送中的关键技术研究进展

何小彭¹ 曹磊¹ 程磊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/etd.v6i5.16895

[摘要] 纤维骨架增强柔性高分子多层复合材料凭借其独特的轻质高强、耐腐蚀及高柔韧性特性,成为油气输送领域应对震后抢修、复杂地形等苛刻工况的理想选择。本文系统综述了该类材料在油气输运场景下的研究进展,重点分析了聚氨酯树脂与芳纶、聚芳酯等高性能纤维的协同作用机制,探讨了三维编织承力层结构、抗静电功能设计与纤维-树脂界面优化等关键技术,并结合典型工程案例评估了其应用效能。最后,针对当前技术瓶颈,从材料国产化、界面精准调控及结构功能一体化等方面提出了未来发展方向。本文旨在为柔性复合软管的性能提升与工程应用提供系统性参考。

[关键词] 纤维骨架增强; 柔性复合软管; 油气输送; 界面优化

中图分类号: TE151 **文献标识码:** A

Research Advances in Key Technologies of Fiber-Skeleton Reinforced Flexible Composite Hoses for Oil and Gas Transportation

Xiaopeng He¹ Lei Cao¹ Lei Cheng¹ 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] Fiber-skeleton reinforced flexible polymer multilayer composites have emerged as an ideal solution for oil and gas transportation under demanding conditions such as post-earthquake emergency repair and complex terrains, owing to their unique combination of lightweight, high strength, corrosion resistance, and excellent flexibility. This paper systematically reviews recent research advances in these materials for pipeline applications, with a focus on the synergistic mechanisms between polyurethane resins and high-performance fibers such as aramid and Vectran. Key technologies including the design of three-dimensional woven load-bearing layers, anti-static functional design, and fiber-resin interface optimization are discussed. Representative engineering cases are analyzed to evaluate their application performance. Finally, future development directions are proposed to address existing challenges, including material localization, precise interface control, and the integration of structural and functional capabilities. This review aims to provide a systematic reference for performance enhancement and engineering application of flexible composite hoses.

[Key words] Fiber skeleton reinforcement; Flexible composite hose; Oil and gas transportation; Interface optimization

引言

油气输送管道作为国家能源安全的生命线,其可靠性与适应性直接影响能源供给效率与社会经济发展^[1]。特别是在地质灾害频发区、深海等复杂环境,以及需要快速响应的应急抢险场景中,传统钢质管道因重量大、柔韧性不足、连接工艺复杂等固有限制,已难以满足现代化油气输送的多样化需求^[2]。在此背景下,纤维骨架增强柔性复合软管通过将高强度纤维的承载优势与柔性聚合物基体的弹性特性相结合,实现了轻质高强、耐腐蚀

与可盘卷部署的协同统一,成为弥补刚性管道不足的关键技术路径^[3]。

该类软管的综合性能取决于“纤维骨架-树脂基体-界面过渡区”的多层级协同设计^[4]。近年来,研究重点集中在三个维度:一是材料体系的创新,包括聚氨酯树脂的耐油耐温改性、芳纶等高性能纤维的表面功能化;二是结构设计的突破,如三维编织承力层的优化、抗静电等功能一体化集成;三是界面科学的深化,涉及纤维与树脂的界面作用机理及等离子刻蚀等表面改性技术

的应用^[5-7]。这些系统性研究显著提升了软管的耐压等级、服役寿命及环境适应性,推动了其在陆上输油、海底管道及应急抢险等多场景的工程应用。

本文系统综述纤维骨架增强柔性复合软管在油气输送领域的最新研究进展,重点剖析其材料体系构建、结构设计原理与界面优化机制,并结合典型工程案例评估其应用效能。最后,针对当前技术瓶颈,从高性能化、功能集成及智能化监测等方向展望未来发展路径,以期为该类软管的研发创新与工程应用提供理论参考和技术支撑。

1 油气输送管道材料分类与性能对比

表1 油气输送管道材料的特点分析

管材类型	示例图片	管道接头组成	优点	缺点
管道钢		管线钢/金属衬垫焊接而成	产量大用量大、耐压强度高、具有较高的低温韧性和优良的焊接性能	易腐蚀、接头密封性能较差;质量大存储运输困难;不适用于快速装配
3PE防腐钢管		环氧底漆/热熔胶/辐射交联聚乙烯组成	耐腐蚀性、抗水汽渗透性以及力学性能优异	耐温性差,高温熔化、低温脆化;结构密封性差,接口处易破损;存储运输困难
金属软管		波纹管,网套,法兰接头组成	可弯曲性、抗疲劳性、耐高低温、耐腐蚀性	接头位移精密,选型不当会造成金属软管早期失效;加工难度大,密封面容易碰伤
橡胶软管		内胶层,钢丝编织层和外胶层组成	可弯曲性、压力温度范围广,耐化学性能更高	不耐磨、易老化
RTP管材		外层为聚乙烯,内层采用聚合物材料,中间层为增强纤维	可有弯弯曲曲,良好的抗腐蚀性、耐高压、耐冲击、耐磨损等特点	单位米重和盘卷半径均大于柔性复合软管
柔性复合软管		高性能多功能层复合结构,刚柔耦合快速接头	轻质高强,耐磨性是橡胶管的三倍以上,耐油、耐腐蚀、耐溶剂、耐高温、耐老化,接头密封性好,可快速连接	高柔性,高压力圈内空白,研发难度大,无货架产品

当前油气输送管道主要分为刚性管道与柔性管道两大体系。刚性管道以金属材料为主,如碳钢管、管线钢及PE防腐钢管等,虽具有高强度和经济性优势,但普遍存在重量大、耐腐蚀性依赖附加涂层、接头密封性不佳等问题,在震后抢险等需要快速

部署的场景中适应性较差。

相比之下,柔性管道展现出更优的工程适应性。其中,金属软管易疲劳断裂,橡胶软管耐磨性差且易老化,RTP管柔性与盘卷性能不足,均存在一定局限。而柔性复合软管通过聚氨酯内层与芳纶增强层的协同设计,实现了轻质高强、耐油耐磨和优异柔韧性的统一,其盘卷半径小、铺设效率高,尤为契合震后快速抢修的需求,已成为该领域的重要发展方向。管道材料的选择需匹配服役环境(压力、温度、介质腐蚀性)与抢修需求(快速铺设、轻量化),刚性管道与柔性管道在性能与适用场景上形成互补,其核心参数对比见表1。

2 柔性复合软管材料研究进展

柔性复合软管的性能主要由树脂基体与增强材料决定。当前研究集中于聚氨酯树脂改性及高性能纤维应用,以平衡强度、柔韧性与界面相容性。

2.1 树脂基体

聚氨酯(PU)因其优异的耐磨性(可达橡胶的3倍)及耐油、耐海水腐蚀性能,成为高压和恶劣环境下的首选材料。通过纳米填料(如二氧化硅、碳纳米管)改性可进一步提升其界面结合力和耐磨性^[8]。聚氯乙烯(PVC)则以低成本优势广泛应用于低压场景,常通过聚酯增强或与聚酰胺共混以改善耐油性与耐化学性^[9]。耐温性能方面,添加抗氧化剂、紫外线吸收剂等可使软管适应-40℃至+120℃的工作范围,硅橡胶、氟树脂等特种材料也在极端温度场景中取得应用。生物基材料作为环保替代方向受到关注^[10]。制造工艺上,优化树脂灌注策略有助于提升浸渍质量、减少内部缺陷^[11-12]。

2.2 橡胶材料

橡胶软管结构多为内胶层、骨架层与外胶层,其耐压性能取决于骨架材料与编织方式。丁腈橡胶(NBR)耐油性优良,聚酰胺/NBR共混可提高NBR低温柔性与稳定性,适用于高寒液压系统^[13]。氢化丁腈橡胶(HNBR)耐热、耐化学性更优,用于航空燃油管等部件。耐温型橡胶方面,苯基改性硅橡胶可改善-75℃以下的弹性,全氟醚橡胶(FFKM)则耐受275℃以上高温。耐磨与耐腐蚀性能可通过橡胶共混、补强填料及优化衬里与硫化工艺予以提高。

2.3 聚氨酯树脂结构调控

聚氨酯性能取决于软段(聚酯/聚醚多元醇)与硬段(异氰酸酯与扩链剂)的微相分离结构。软段主导弹性和低温性能,聚醚型聚氨酯低温柔性优异;硬段影响强度与耐热性,脂肪族异氰酸酯耐氧化性优于芳香族体系^[14]。提高硬段含量可增强氢键作用,进而提升材料强度和耐磨性。通过软硬段的合理设计,可调控聚氨酯以满足高压软管的综合性能要求。

3 骨架增强纤维的性能与改性

在柔性复合软管结构设计中,增强纤维的性能直接影响软管的力学强度与耐久性。当前以芳纶、涤纶和聚芳酯为代表的高性能纤维,因其独特的分子结构和物理特性,成为软管增强层的主流选择。

3.1 芳纶纤维

芳纶纤维凭借其主链中刚性苯环与酰胺键的协同作用, 展现出优异的比强度和高模量。其主要分为对位芳纶 (PPTA, 结构式如图1所示) 和间位芳纶 (PMIA, 结构式如图2所示)。对位芳纶拉伸强度可达钢丝的6倍, 耐温范围达-170℃至560℃^[15]。间位芳纶在保持良好耐热性的同时具有更高的断裂伸长率^[16]。然而, 芳纶纤维表面光滑、化学惰性强, 需通过等离子体处理或酸刻蚀等表面改性方法提升界面结合强度。

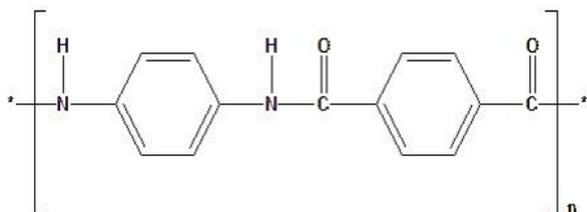


图1 聚对苯二甲酰对苯二胺 (PPTA) 的结构式

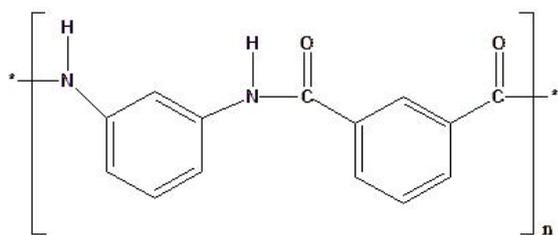


图2 聚间苯二甲酰间苯二胺 (PMIA) 的结构式

3.2 涤纶纤维

涤纶纤维 (PET) 分子链中苯环赋予刚性, 亚乙基提供柔性, 具有良好的力学性能和疏水性。如表2所示, 与芳纶相比, 涤纶的热性能和力学性能稍逊, 但成本优势显著^[17]。涤纶纤维同样需通过表面改性改善与树脂的界面结合。

表2 骨架纤维核心性能对比

纤维类型	密度 (g/cm ³)	拉伸强度 (GPa)	弹性模量 (GPa)	耐温范围 (°C)	关键优势	改性需求
对位芳纶	1.44	2.8~3.2	70~110	-170~200	比强度高(钢丝的6倍)	表面活性低, 需刻蚀/接枝
涤纶	1.38	1.1~1.3	9~11	-40~150	成本低、疏水性优	模量低, 需复合增强
聚芳酯 (Vectran)	1.41	3.0~3.3	75~106	-70~250	耐湿热(吸水率0%)、耐摩擦	加工难度大, 需优化纺丝工艺
聚酰亚胺	1.45	2.5~2.8	60~80	-200~300	耐高温、阻燃 (LOI≥30%)	成本高, 需降本产业化
PEEK	1.32	0.4~0.7	3~6	-100~250	耐化学腐蚀(耐90℃硫酸)	强度低, 需与碳纤维复合

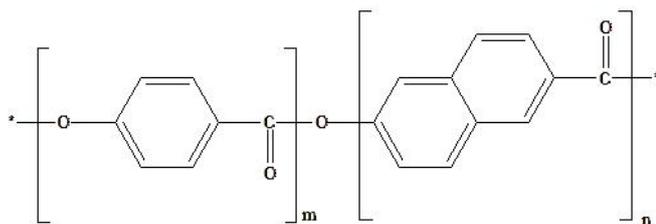


图3 聚芳酯 (Vectran) 的结构式

3.3 聚芳酯纤维

聚芳酯纤维 (如Vectran纤维) 是一种热致液晶聚合物纤维, 其分子结构式如图3所示。

该纤维分子链沿轴向高度取向, 兼具高强度、高模量和极低的吸湿性, 且耐湿热、耐磨损性能优异^[18]。Vectran纤维与对位芳纶的性能对比见表3, 其在湿热环境下的强度保持率显著高于PPTA纤维, 这主要得益于其分子链中稳定的酯键结构。这些特性使其在航空航天、海洋工程等苛刻环境中具有独特优势, 但高昂成本限制了其大规模应用。

表3 Vectran纤维与对位芳纶 (PPTA) 的基本物性对比

物性	Vectran		芳纶	
	Vectran HT	Vectran UM	PPTA(Reg)	PPTA(HM)
密度/(g·cm ⁻³)	1.41	1.41	1.44	1.45
热分解温度/°C	>400	>400	>400	>400
LOI	28	28	30	--
吸水率/%	0	0	4.9	4.3
拉伸强度/GPa	3.27	2.9	2.8	2.8
断裂伸长率/%	3.8	2.7	3.9	2.3
拉伸模量/GPa	75.5	105.7	70.4	110.6
吸水强度/GPa	3.3	2.9	2.5	2.6
干燥吸水强度/%	100	100	91	95

3.4 聚酰亚胺与聚醚醚酮纤维

对于超高温极端环境, 聚酰亚胺 (PI) 纤维和聚醚醚酮 (PEEK) 纤维是更先进的选择。聚酰亚胺纤维长期使用温度可超过300℃, 具备优异的机械性能和阻燃性^[19]。聚醚醚酮纤维熔点达343℃, 长期使用温度250℃, 对多种化学品具有卓越耐受性, 且阻燃性和尺寸稳定性好^[20]。

未来研究将继续聚焦于纤维表面改性及界面优化, 并通过低成本制造技术提升柔性复合软管的综合性能与市场竞争力。

4 关键结构与界面优化

柔性复合软管的工程适用性依赖于宏观结构与微观界面的协同优化。本节从承力层设计、功能化技术和界面优化三个方面阐述其关键技术进展。

4.1 承力层结构与功能设计

作为软管的力学骨架, 承力层设计需平衡强度与柔韧性。采用“粗细纤维混编”策略可优化耐压性能与弯曲半径的匹配^[21]。在组织结构方面, 双轴向编织提供优异的轴向拉伸强度, 而三维编织通过多向纤维交织显著提升抗剪切性能, 这对吸收地震等工况产生的横向应力至关重要^[22]。

针对油气输送中的静电累积风险, 防静电处理是保障安全的关键技术。目前主要采用铜丝/树脂共挤出和导电填料改性两

种路径。前者通过优化口模流道确保铜丝均匀分布,有效降低体积电阻率;后者通过添加炭黑或碳纳米管形成导电网络,需控制填料团聚以避免影响基体柔韧性^[23]。

4.2 界面作用机理与优化方法

纤维-树脂界面是应力传递的关键区域,其性能直接影响复合材料宏观力学行为^[24-25]。界面结合涉及多重机理:界面浸润理论强调树脂对纤维的充分浸润是形成良好界面的前提;化学键理论指出通过偶联剂形成“分子桥”是实现强界面结合的有效途径;酸碱作用理论则关注纤维与树脂表面官能团的酸碱相互作用^[26-27]。

基于上述理论,界面优化主要从三个层面展开:树脂基体改性通过调整化学结构与力学性能提升相容性;纤维表面改性通过等离子刻蚀等物理方法或酸蚀等化学方法增加表面粗糙度与活性位点;助剂添加则利用偶联剂和增韧剂在界面形成过渡层,增强结合强度与韧性^[28]。

4.3 典型工程应用

优化后的柔性复合软管已在多项重大工程中验证其技术优势与发展水平。在横贯东西的能源动脉西气东输管道中,复合材料软管广泛应用于站场设备连接,其中玻璃钢骨架与聚氨酯内衬的协同设计,兼顾结构强度与优异耐化学腐蚀性,显著提升了管道系统的密封可靠性。面对忠武输气管道渝东鄂西段复杂地质与地震风险,柔性复合软管凭借其出色的柔韧性与抗位移能力,有效吸收地壳应力,成为保障管道抗震安全的关键技术之一。在海洋与苛刻环境领域,东方-洋浦-海口输气管道等项目将复合软管用于水下平台柔性连接,适应海底地形变化与洋流冲击,展现出良好的环境适应性。此外,以江苏爱索Pipe-in-Liner™为代表的非开挖修复技术,通过“折U穿管-充气胀圆”工艺形成“管中管”结构,采用耐温95℃的PUX材料与纤维增强层,实现单次修复距离超1000米、施工效率达400米/小时,为老旧管道及震后快速重建提供了先进解决方案。这些工程实践标志着国内柔性复合软管已从构件级应用向系统化、功能化方向持续发展。

5 结论与展望

纤维骨架增强柔性高分子多层复合材料通过优化的材料选型、结构设计与界面调控,在油气输送领域展现出卓越的应用潜力。当前,以聚氨酯为基体、芳纶等高性能纤维为增强相的体系已较为成熟,三维编织与抗静电等功能化技术进一步提升了其工程适应性。然而,高端纤维依赖进口、长效可靠性评估不足及快速连接技术瓶颈仍是制约其发展的关键问题。

未来研究应聚焦于三大方向:一是推动聚芳酯等高端材料的国产化与低成本制备;二是发展界面状态的精准表征与调控方法;三是探索智能感知结构与绿色可循环路径,以实现该类材料在更广泛能源基础设施中的规模化、智能化应用。

[参考文献]

[1] Chen C, Li C, Reniers G, 等. Safety and security of oil and gas pipeline transportation: A systematic analysis of research trends and future needs using WoS[J]. Journal of Cleaner Prod

uction 2021, 279, 123583.

[2] Qiu, C, Tian S, Wang Y. Structural failure and mechanical response of buried pipelines under offshore fault dislocation[J]. Applied Sciences 2025, 15, 9450.

[3] Amaechi C V, Ja' e I A, Reda A, 等. Scientometric review and thematic areas for the research trends on marine hoses[J]. Energies 2022, 15, 7723.

[4] Mokhtarzadeh M, López Jimé nez F, Maute K. Concurrent level set topology and fiber orientation optimization of fiber-reinforced composite structures[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization 2024, 67, 117.

[5] Cheng H, Li F, Bu Y, 等. A Survey on the design and mechanical analysis of cryogenic hoses for offshore liquid CO₂ ship-to-ship transfer[J]. Journal of Marine Science and Engineering 2025, 13, 790.

[6] Goda Ibrahim, Padayodi Essole, Raelison R N, 等. Enhancing fiber/matrix interface adhesion in polymer composites: Mechanical characterization methods and progress in interface modification[J]. Journal of Composite Materials 2024, 58 (29):3077 - 3110.

[7] Qu Z, Li K, Yuan Y, 等. Fracture failure analysis of central tearing behavior and a novel tearing strength model for flexible composites[J]. Polymer Composites 2025, 0:1-12.

[8] Wang F, Feng L, Ma H, 等. Influence of nano-SiO₂ on the bonding strength and wear resistance properties of polyurethane coating[J]. Science and Engineering of Composite Materials, 2018, 26(1):77-83.

[9] 周杰, 肖汉文, 叶正涛. 聚氯乙烯的增韧改性研究进展[J]. 胶体与聚合物 2015, 33(4):10.13909/j.cnki.1009-1815.2015.04.009.

[10] Delgado-Sánchez C, Tenorio-Alfonso A, Cortés-Triviño E, 等. Development of bio-based materials: Synthesis, characterization and applications[J]. Polymers 2022, 14, 3599.

[11] Lukaszewicz D H J A, Ward C, Potter K D, 等. The engineering aspects of automated prepreg layup: History, present and future[J]. Composites: Part B 2012, 43(3):997-1009.

[12] Jiang Y, Xu J, Liu M, 等. Simulation study and optimization strategies for vacuum infusion of GFRP hoses based on resin time-viscosity variables[J]. Polymers 2024, 16, 1328.

[13] Sun S, Nie D, Zhang Y, 等. An interesting phase transition in polyamide 6/nitrile rubber blend induced by temperature and pressure and its effect on tribological performance[J]. Journal of Applied Polymer Science 2024, 141:e56036.

[14] Yan Z, Yang P, Yang H, 等. Influence of hard segment content on microphase separation and dielectric performance of polyurethane elastomers[J]. Colloid and Polymer Science 2025,

12(1):10.1007/s00396-025-05489-2.

[15]Teng F,Yuan Y,Li N,等.Molecularly engineered para-aramid papers with plasma-activated interfacial precision for multifunctional extreme-environment applications[J].Composites: Part B2025,307,112881.

[16]Zhuo Y,Wang K,Hou L,等. Molecular dynamics study on structural modulation and dyeing property optimization of meta-aramid in a DMSO/electrolyte system[J].Journal of Colloid and Interface Science2025,678:732-741.

[17]Mao Y,Li Q,Wu C.Surface modification of PET fiber with hybrid coating and its effect on the properties of PP composites[J].Polymers2019,11,1726.

[18]Beers D E, Ramirez J E.Vectran high-performance fiber[J].Journal of the Textile Institute1990, 81(4): 561-574.

[19]Min J,Zhao X,Ding Q,等.Continuous polyimide fiber reinforced ceramic matrix composites with high-temperature flame retardancy and mechanical reliability[J].Journal of Materials Science & Technology2026,251:81-88.

[20]Vacogne C,Wise R.Joining of high performance carbon fibre/PEEK composites[J].Science and Technology of Welding and Joining2011,16(4),369-376.

[21]Jeyaguru S,Thiagamani S M K,Siengchin S,等.Effect of various weaving architectures on mechanical, vibration and acoustic behavior of Kevlar-Hemp intra-ply hybrid composites[J].Composites: Part A2024,176:107845.

[22]Elayarajal R,Rajamurugan G.Performance of hybrid composites fabricated by flax/hemp fibers using wire mesh plain weaving techniques[J].Fibers and Polymers2024,25:4873-4883.

[23]Huang J,Zhao X,Wu Y,等.Facile green path to interconnected nano-graphite networks to overtake graphene as conduct

ive fillers[J].Carbon2021,173:667e675.

[24]Anaya-Ramirez R C,Rios-Soberanis C R,Herrera-Franco P J. Identification of micro-failure processes of HDPE-henequen fiber composite material by using acoustic emission monitoring: Effect of fiber surface modification[J].Polymer Composites2023,44:2697-2709.

[25]Chatziathanasiou T,Lee Y,Villanova J,等.Questioning the representativeness of damage mechanisms in single-fiber composites via in situ synchrotron X-ray holo-tomography[J].Small2024,20,2406168.

[26]S Z.Hyperbranched polymers in modifying natural plant fibers and their applications in polymer matrix composites—a review[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry2019,67(32):8715-8724.

[27]刘柳薪,卢晓英,吴颖,等.碳纤维增强树脂基复合材料界面改性及应用进展[J].材料工程2024,52(9):70-81.

[28]Benard Q, Fois M, Grisel M,等.Influence of the polymer surface layer on the adhesion of polymer matrix composites[J].Journal of Thermoplastic Composite Materials2009,22(1): 51-61.

作者简介:

何小彭(1986--),男,汉族,重庆合川人,本科,高级工程师,研究方向:油气长输管道维抢修业务。

曹磊(1984--),男,汉族,陕西定边人,本科,高级工程师,研究方向:油气长输管道维抢修业务。

程磊(1986--),男,汉族,安徽砀山人,本科,高级工程师,研究方向:管道完整性、油气长输管道维抢修业务。

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。