

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2026.01.020

不同结构类型全尺寸柔性复合管力学性能对比

常泽亮¹, 燕自峰¹, 夏明明¹, 丁晗², 李厚补², 包佳钰^{2,3}, 范春前⁴

(1. 中国石油塔里木油田分公司, 中国石油天然气集团有限公司超深层复杂油气藏勘探开发技术研发中心, 新疆维吾尔自治区超深层复杂油气藏勘探开发工程研究中心, 新疆超深油气重点实验室, 新疆库尔勒 841000; 2. 中国石油集团工程材料研究院有限公司, 油气钻采与储运装备全国重点实验室, 西安 710077; 3. 北京化工大学化学工程学院, 北京 100029; 4. 中国石油天然气股份有限公司长庆油田分公司, 第二产建项目组, 甘肃庆阳 745100)

摘要:随着油气田开发的不断深入, 对于输送管道的要求也日益严格, 金属管道易被腐蚀, 塑料管道耐压性差, 纤维缠绕增强柔性复合管因其许多优点而备受青睐。在流动性沙漠区域中, 传统非黏结型柔性复合管常会因结构失稳、受压伸长及气体渗透导致失效风险增大, 而黏结型柔性复合管通过熔结或黏结方式成型, 具有结构稳定、耐气体渗透性强的优点。为明确黏结型柔性复合管在流动性沙漠区域的适用性, 对比分析了涤纶丝增强非黏结型复合管、涤纶带增强黏结型复合管和玻纤带增强黏结型复合管的承压性能、拉伸性能与扭转性能, 展开了全尺寸复合管的抗形变可靠性研究, 并建立了三种复合管的分离式有限元模型, 模拟其在内压载荷作用下的力学性能。综合试验结果与有限元分析模拟数据, 结果表明: 黏结型增强复合管的承压性能、拉伸性能、扭转性能均优于非黏结型复合管, 其中玻纤带增强黏结型复合管的各项性能优于涤纶带增强黏结型复合管, 即玻纤带增强黏结型管道更适合流动性沙漠环境服役。

关键词: 柔性复合管; 黏结型; 抗形变可靠性; 力学性能; 有限元分析

中图分类号: TE973 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2026)01-0158-06

Comparison on mechanical properties of full-scale flexible composite pipes with different structural types

CHANG Zeliang¹, YAN Zifeng¹, XIA Mingming¹, DING Han², LI Houbu², BAO Jiayu^{2,3}, FAN Chunqian⁴

(1. PetroChina Tarim Oilfield Company, R&D Center for Ultra Deep Complex Reservoir Exploration and Development, CNPC, Engineering Research Center for Ultra-deep Complex Reservoir Exploration and Development, Xinjiang Uygur Autonomous Region, Xinjiang Key Laboratory of Ultra-deep Oil and Gas, Korla 841000, China; 2. Tubular Goods Research Institute, China National Petroleum Corporation & State Key Laboratory of Oil and Gas Equipment, Xi'an 710077, China; 3. Beijing University of Chemical Technology, College of Chemical Engineering, Beijing 100029, China; 4. PetroChina Changqing Oilfield Company, Second Production Construction Project Team, CNPC, Qingyang 745100, China)

Abstract: As the development of oil and gas fields continues to deepen, the requirements for transportation pipelines have become increasingly strict. Metal pipelines are prone to corrosion, while plastic pipelines have poor pressure resistance. Fiber-wound reinforced flexible composite pipes are favored due to their many advantages. In mobile desert regions, traditional non-bonded flexible composite pipes often face increased failure risks due to structural instability, compressive elongation, and gas permeation. In contrast, bonded flexible composite pipes, formed through fusion or adhesive bonding, exhibit superior structural stability and enhanced resistance to gas permeation. To evaluate the applicability of bonded flexible composite pipes in mobile desert environments, comparative analyses of pressure resistance, tensile performance and torsional performance were conducted among three types of pipes: polyester filament-reinforced non-bonded composite pipes, polyester tape-reinforced bonded composite pipes and glass fiber tape-reinforced bonded composite pipes. Research on anti deformation reliability of full-size composite pipes was carried out and partitioned finite element models of three pipe types were established to simulate their mechanical behavior under internal pressure loading. Integrating experimental results with finite element analysis data, the findings demonstrate that the pressure-bearing performance, tensile performance and torsional performance of the bonded reinforcement composite pipe are all superior to those of the non-bonded composite pipe. Among them, fiberglass tape-reinforced bonded composite pipes exhibit superior overall

通信作者: 包佳钰, 硕士研究生, 从事油气田用非金属与复合材料相关研究工作

收稿日期: 2025-10-25

引用格式: 常泽亮, 燕自峰, 夏明明, 等. 不同结构类型全尺寸柔性复合管力学性能对比[J]. 工程塑料应用, 2026, 54(1): 158-163.

CHANG Zeliang, YAN Zifeng, XIA Mingming, et al. Comparison on mechanical properties of full-scale flexible composite pipes with different structural types[J]. Engineering Plastics Application, 2026, 54(1): 158-163.

performance compared to polyester tape-reinforced bonded pipes, indicating that fiberglass tape-reinforced bonded pipes are more suitable for service in mobile desert environments.

Keywords: flexible composite pipe; bonded type; deformation resistance reliability; mechanical property; finite element analysis

近年来,随着油气田开发的不断深入,对管道的要求也越来越高,尤其对于可耐高温、耐腐蚀的管道^[1],但目前常用的金属管道不耐腐蚀、塑料管道耐压性能差^[2]。纤维缠绕增强柔性复合管(RTP)是一种以高性能纤维(如涤纶纤维、玻璃纤维、碳纤维等)作增强层的新型管道,RTP既拥有金属管道耐压性能高的优点,又拥有非金属管柔韧性高、耐腐蚀的优点^[3],其用量增速为非金属管道之最^[4]。RTP质量轻、可弯曲,整管可盘卷运输,现场铺设快速方便、施工方便^[5],使用寿命长,制作成本低,可设计性强^[6],故成为近年管道研究的热门课题之一^[7]。

RTP通常可分为非黏结型柔性复合管和黏结型柔性复合管两种,传统非黏结型柔性复合管由聚合物内衬层、增强层和外保护层三层结构组成,内衬层通常为热塑性塑料,增强层为高性能纤维,外保护层为聚乙烯树脂,三层互为独立结构(如图1所示)。目前传统非黏结型柔性复合管在国内外油气集输管线中已规模应用,并取得了比较好的应用效果^[8]。但是从结构上看,非黏结型柔性复合管的内衬结构易坍塌,在压力波动下会受压伸长^[9],出现挤压变形,结构失稳的情况^[10];安装和运行过程中易发生管体扭转或弯折^[11];管内气体(如CO₂、H₂S等)易渗透至夹层^[12],从而在积聚压力的作用下导致外保护层聚乙烯屈服,形成鼓包。黏结型柔性复合管是一种通过熔结或黏结方式,将内衬层、增强层和外保护层熔结为一体的复合管道,管体增强层与相邻各层形成不可相对运动的整体式管壁结构,可以做到更大口径;由于三层结构熔结成为一体,故其气体阻隔性增强,不易因气体渗透生成鼓包;在6.4 MPa压力等级以下可采用非金属增强套筒接头,杜绝了管接头腐蚀问题;并且黏结型柔性复合管还有柔韧性好、结构稳定性强等优点,可以适应复杂的海洋环境^[13],是海上油气输送的关键设备。与传统的钢制管道相比,黏结型柔性复合管质量轻、耐腐蚀,成为了深水立管生产应用的新方向^[14]。以芳纶纤维带连续复合管为主的黏结型柔性复合管在海洋油气资源开发中应用广泛,但因芳纶纤维带连续复合管价格昂贵且通常为小口径管,黏结型柔性复合管目

前在油田方面国内外仍处于试用阶段。油田集输管道具有数量大、距离短、输量少的特点,非金属管道可以有效地缓解石油行业腐蚀等问题^[15],从技术和经济两方面考虑,推荐使用非金属管道^[16]。

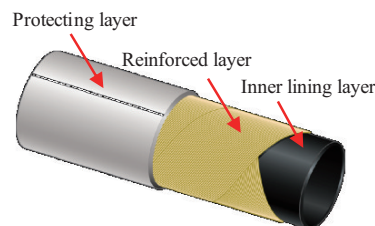


图1 传统非黏结型柔性复合管结构示意图^[17]

Fig. 1 Schematic diagram of traditional non-bonded flexible composite pipe structure^[17]

近年来,某西部油田的非金属管道用量呈逐年稳步上升趋势,主要用于油气混输、注水输水、集输油、集输气等领域。西部油田区块处于流动性沙漠腹地,因沙丘移动导致传统非黏结型柔性复合管在受压运行过程中,存在拉伸、扭转及弯曲等结构失稳现象,见图2。此西部油田柔性复合管用于油气集输,压力主要在16 MPa以下,温度低于65℃,部分高压注水管线压力达到20 MPa以上,部分管线运行温度达到80~90℃,普通柔性复合管不再适用,本项目选取具有代表性的DN65 mm PN16 MPa (DN:公称通径;PN:公称压力)开展室内评价试验及现场试验。

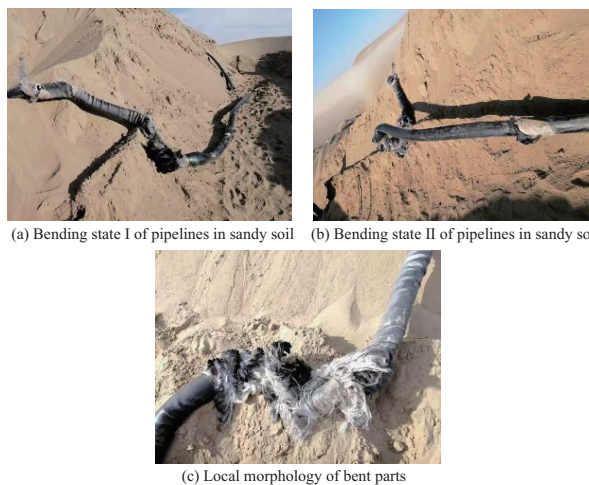


图2 传统非黏结型柔性复合管现场弯折情况

Fig. 2 Field bending condition of traditional non-bonded flexible composite pipe

针对在流动性沙漠腹地中,非黏结型柔性复合管易弯折失效、芳纶纤维带黏结型柔性复合管成本高的问题,亟需开展对于黏结型柔性复合管在流动性沙漠区域的适用性研究,为指导现场应用提供支撑。

1 试验部分

1.1 主要原料

涤纶丝增强非黏结型复合管、涤纶带增强黏结型复合管:DN65 mm PN16 MPa,宝鸡天联汇通复合材料有限公司;

玻纤带增强黏结型复合管:DN65 mm PN16 MPa,河北建投宝塑管业有限公司。

1.2 主要设备及仪器

水压试验系统:XGNB,承德精密试验机有限公司;

万能试验机:WAW-500-JR,新三思(上海)企业发展有限公司;

扭转试验机:NDW-10000,济南邦威仪器有限公司。

1.3 测试与表征

本文选取型号为DN65 mm PN16 MPa的复合管道开展室内评价试验及现场试验,试验温度范围为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$,分析对比涤纶丝增强非黏结型复合管、涤纶带增强黏结型复合管和玻纤带增强黏结型复合管的承压性能、轴向拉伸性能与扭转性能。

承压性能依据标准GB/T 15560-1995测试,将不同结构增强塑料复合管采用非金属管材水压试验系统进行短时水压爆破试验,试验时间60 s,通过破坏性试验获得复合管极限承压能力。

轴向拉伸性能依据标准GB/T 5349-2005测试,将不同结构增强塑料复合管采用万能试验机进行轴向拉伸试验,拉伸速率为 2 mm/min ,通过破坏性试验获得复合管极限抗轴向拉伸能力。

扭转性能采用非金属管材扭转试验机进行测试,最大扭矩 $10\ 000\text{ N}\cdot\text{m}$,扭转速度 $0.72\sim 360\text{ }^{\circ}/\text{min}$,通过破坏性试验获得复合管极限抗扭转能力。

2 结果与讨论

2.1 承压性能分析

对三种同规格(DN65 mm PN16 MPa)、不同类型的复合管进行室温短时爆破,得到的水压爆破压力结果见表1,爆破压力曲线见图3,试验后样品外观如图4所示,涤纶丝增强非黏结型复合管与玻纤带增强黏结型复合管在近接头部位失效,涤纶带增

强黏结型复合管为管体失效。由表1可知,黏结型复合管爆破压力均大于非黏结型复合管爆破压力,涤纶带增强黏结型复合管强度比涤纶丝增强非黏结型复合管高9.9%,玻纤带增强黏结型复合管爆破压力比涤纶丝增强非黏结型复合管高21.9%,三种复合管中玻纤带增强黏结型复合管爆破压力最高、承压性能最好。

表1 不同增强类型复合管爆破压力

Tab. 1 Burst pressure of composite pipes with different reinforcement types

Pipe types	Burst pressure/MPa	Failure mode
Polyester fiber reinforced non bonded type composite pipe	48.3	Pipe blasting
Polyester fiber tape reinforced bonded type composite pipe	53.1	Pipe blasting
Glass fiber tape reinforced bonded type composite pipe	58.9	Pipe blasting

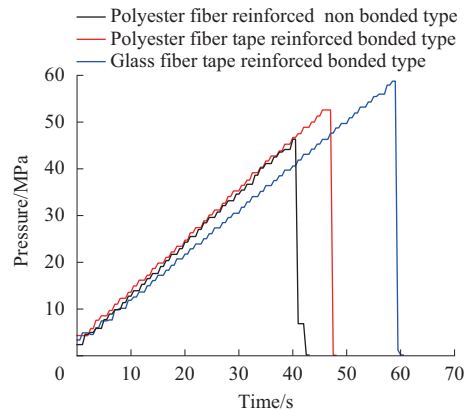


图3 不同增强类型复合管室温水压爆破曲线

Fig. 3 Water pressure explosion curves of different reinforced composite pipes at room temperature

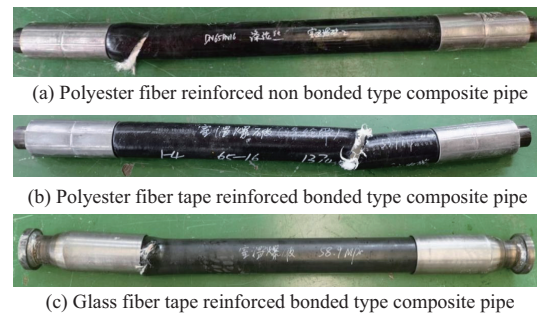


图4 不同增强类型复合管爆破形貌

Fig. 4 Blasting morphology of different reinforced types of composite pipes

2.2 拉伸性能分析

对三种同规格(DN65 mm PN16 MPa)、不同类型的复合管进行整管轴向拉伸试验,并对拉伸至屈服后的管道进行室温短时爆破试验,试验结果见图5至图7。涤纶丝增强非黏结型复合管拉伸试验过程

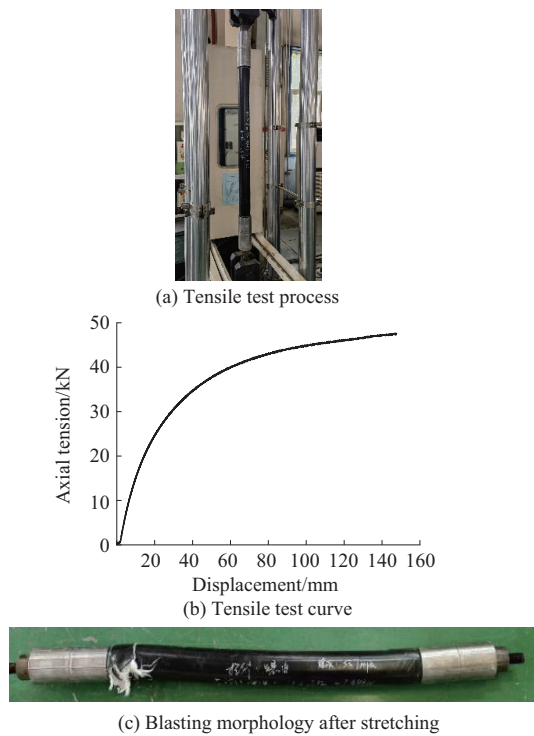


图5 涤纶丝增强非黏结型复合管的拉伸试验过程、拉伸曲线及拉伸后爆破形貌

Fig. 5 Tensile test process, tensile curve and blasting morphology after stretching of polyester fiber reinforced non bonded type composite pipe

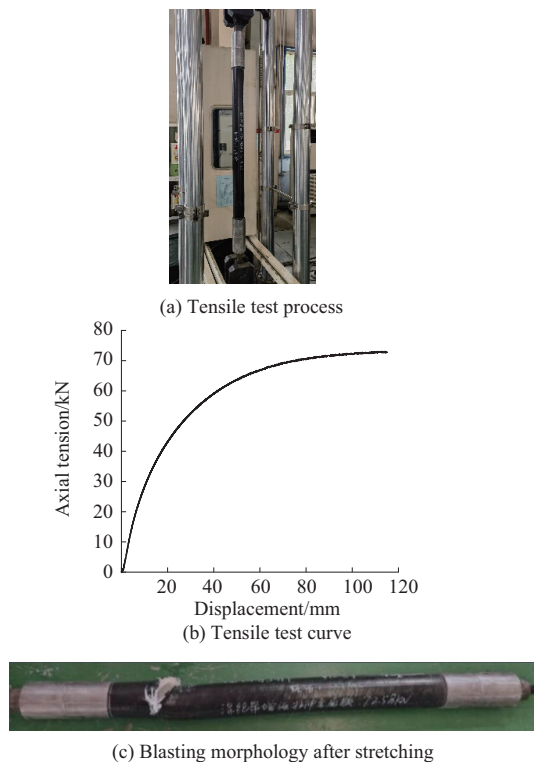


图6 涤纶带增强黏结型复合管的拉伸试验过程、拉伸曲线及拉伸后爆破形貌

Fig. 6 Tensile test process, tensile curve and blasting morphology after stretching of polyester fiber tape reinforced bonded type composite pipe

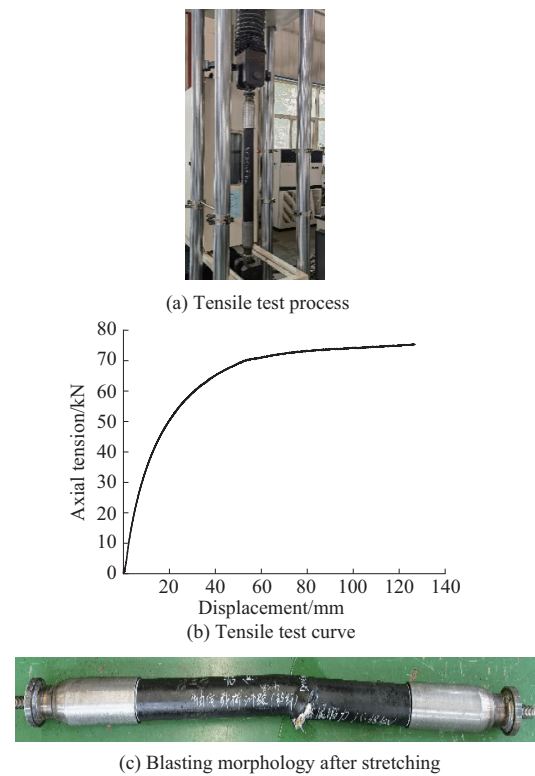


图7 玻纤带增强黏结型复合管的拉伸试验过程、拉伸曲线及拉伸后爆破形貌

Fig. 7 Tensile test process, tensile curve and blasting morphology after stretching of glass fiber tape reinforced bonded type composite pipe

及曲线如图5a和图5b所示,其拉伸至屈服时的最大拉力,即拉伸屈服强度为47.48 kN。涤纶带增强黏结型复合管和玻纤带增强黏结型复合管拉伸试验过程及拉伸曲线如图6a、图6b和图7a、图7b所示,其拉伸屈服强度分别为72.85、75.38 kN。对拉伸至屈服后的涤纶丝增强非黏结型复合管、涤纶带增强黏结型复合管、玻纤带增强黏结型复合管开展水压爆破试验,爆破压力分别为53.7、53.1、57.7 MPa,试验后样品外观如图5c、图6c、图7c所示。

不同类型增强复合管在拉伸试验后开展水压爆破试验,得到爆破压力曲线如图8所示,拉伸屈服强度及屈服后爆破强度见表2。由表2可知,黏结型复合管屈服强度均大于非黏结型复合管屈服强度,涤纶带增强黏结型复合管屈服强度比涤纶丝增强非黏结型复合管高53.43%,玻纤带增强黏结型复合管屈服强度比涤纶丝增强非黏结型复合管高58.76%,涤纶丝增强非黏结型复合管拉伸至屈服后承压性能有所提高,涤纶带增强黏结型复合管承压性能未发生变化,玻纤带增强黏结型复合管承压性能略有降低。拉伸屈服后承压能力:玻纤带增强黏

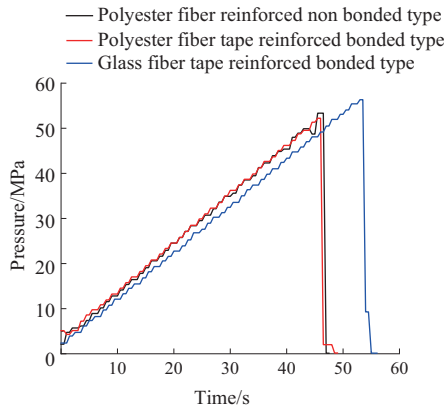


图8 不同增强类型复合管拉伸后水压爆破曲线

Fig. 8 Water pressure blasting curves of different reinforced composite pipes after stretching

表2 不同增强类型复合管拉伸屈服强度及屈服后爆破强度

Tab. 2 Tensile yield strength and post-yield burst strength of different reinforced composite pipes

Pipe types	Tensile yield strength/kN	Explosive strength after yielding/MPa
Polyester fiber reinforced non bonded type composite pipe	47.48	53.7
Polyester fiber tape reinforced bonded type composite pipe	72.85	53.1
Glass fiber tape reinforced bonded type composite pipe	75.38	57.7

结型复合管>涤纶带增强黏结型复合管>涤纶丝增强非黏结型复合管。

2.3 扭转性能分析

采用扭转试验机对同规格、不同类型的柔性复合管进行整管扭转试验,结果见图9至图11。涤纶丝增强非黏结型复合管扭转试验过程样品外观如

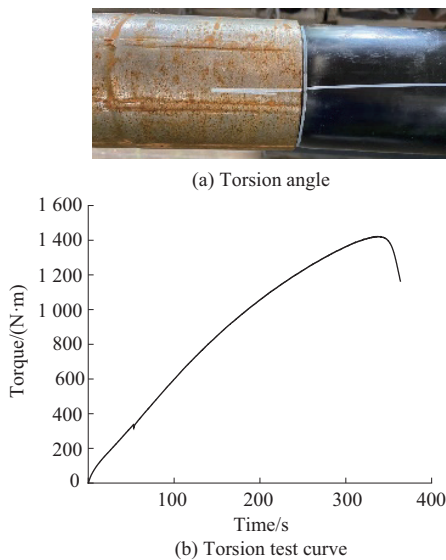


图9 涤纶丝增强非黏结型复合管的扭转角度和扭转试验曲线

Fig. 9 Torsion angle and torsion test curve of polyester fiber reinforced non bonded type composite pipe

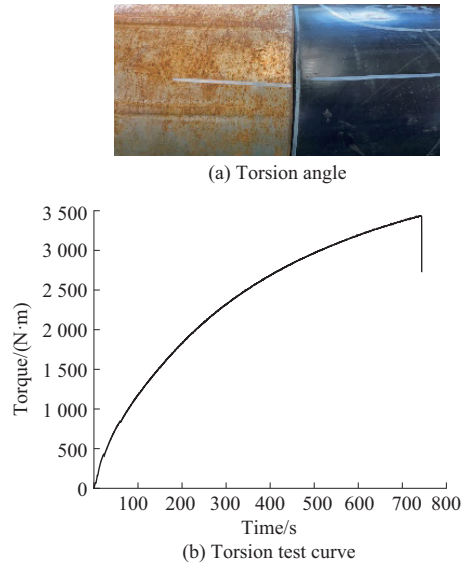


图10 涤纶带增强黏结型复合管的扭转角度和扭转试验曲线

Fig. 10 Torsion angle and torsion test curve of polyester fiber tape reinforced bonded type composite pipe

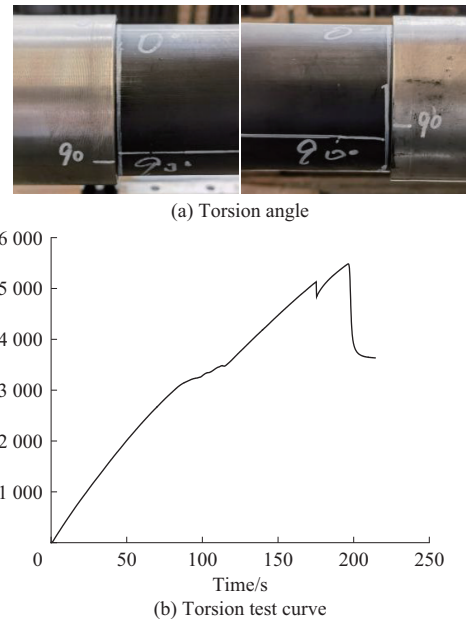


图11 玻纤带增强黏结型复合管的扭转角度和扭转试验曲线

Fig. 11 Torsion angle and torsion test curve of glass fiber tape reinforced bonded type composite pipe

图9a所示,可见管体在扭矩的作用下结构发生了明显的变形现象,接头与管体之间在高扭矩的作用下略微滑移(如图9b),扭转试验曲线如图9c所示,其扭矩峰值为1420 N·m。涤纶带增强黏结型复合管扭转试验过程样品外观如图10a所示,管体在扭矩的作用下结构发生扭曲变形,接头与管体之间在高扭矩的作用下略微滑移(如图10b),扭转试验曲线如图10c所示,其扭矩峰值为3434 N·m。

玻纤带增强黏结型复合管扭转试验前后样品

外观如图 11a 所示,管体在扭矩的作用下整体结构保持完整未见扭曲,但接头与管体之间在高扭矩的作用下发生了相对移动(如图 11b)。扭转试验曲线如图 11c 所示,其扭矩峰值为 5 482 N·m。

将不同类型增强复合管的扭转峰值角度以及对应扭矩记录在表 3 中,对比三种复合管,可得玻纤带增强黏结型复合管抗扭转能力最好,扭转角度最小,管体结构保持稳定,刚性最好,其抗扭转能力是非黏结型的 3.86 倍,涤纶带增强黏结型复合管的屈服扭矩是非黏结型的 2.42 倍,柔韧性最好。

表 3 不同增强类型柔性复合管扭转屈服角度以及对应扭矩

Tab. 3 Torsional yield angle and corresponding torque of flexible composite pipes with different reinforcement types

Pipe types	Yield point torsion angle/(°)	Max torque/(N·m)
Polyester fiber reinforced non bonded type composite pipe	60.8	1 420
Polyester fiber tape reinforced bonded type composite pipe	126.5	3 434
Glass fiber tape reinforced bonded type composite pipe	36.0	5 482

3 结论

(1)黏结型复合管的承压能力显著优于非黏结型。其中,玻纤带增强黏结型复合管表现最佳,其爆破压力比涤纶丝非黏结型管道高出 21.9%,表明其抵抗内部压力的能力最强。

(2)黏结型复合管的屈服强度远高于非黏结型。玻纤带增强黏结型复合管的屈服强度最高,比非黏结型高出 58.76%。在拉伸屈服后,玻纤带增强黏结型复合管的剩余承压能力最好,展现了更好的结构完整性。

(3)玻纤带增强黏结型复合管的抗扭转能力最好,刚性最好,结构最稳定;而涤纶带增强黏结型复合管则展现了最好的柔韧性。两者的抗扭转能力分别是非黏结型管道的 3.86 倍和 2.42 倍。

(4)综合试验结果,对比管道各项力学性能可知,玻纤带增强黏结型复合管展现出最优的承压、抗拉伸和抗扭转能力,这表明其具备应对流动性沙漠环境复杂静态载荷的潜力。

参考文献

[1] 王涛. 柔性复合管在油田集输中的应用探析[J]. 中国石油石化, 2017(1):80-81.
WANG Tao. Application of flexible composite pipe in oilfield gathering and transportation[J]. China Petrochem, 2017(1):80-81.

[2] 闫治国,张骁勇,魏斌,等. 纤维缠绕增强柔性复合管研究现状与

发展趋势[J]. 云南化工, 2021, 48(2):22-24, 27.

YAN Zhiguo, ZHANG Xiaoyong, WEI Bin, et al. Research status and development trend of ber-reinforced flexible composite pipe[J]. Yunnan Chemical Technology, 2021, 48(2):22-24, 27.

[3] 张兆,刘鹏,徐超,等. 玻璃纤维增强热塑性复合管性能评价方法研究进展[J]. 中国塑料, 2019, 33(8):136-143.

ZHANG Zhao, LIU Peng, XU Chao, et al. Research progress in performance evaluation methods of continuous glass fiber-reinforced thermoplastic composite pipes[J]. China Plastics, 2019, 33(8):136-143.

[4] 陈庆国,齐国权,夏明明,等. 地面集输用柔性复合管爆管失效原因分析[J]. 石油管材与仪器, 2021, 7(4):49-54.

CHEN Qingguo, QI Guoquan, XIA Mingming, et al. Burst failure of reinforced thermoplastic pipe used in ground gathering and transportation[J]. Petroleum Tubular Goods & Instruments, 2021, 7(4):49-54.

[5] 张伟福,张赞,严长亮,等. 柔性复合管特点及其制造、现场施工介绍[J]. 化工管理, 2024(30):159-162.

ZHANG Weifu, ZHANG Zan, YAN Changliang, et al. Introduction of characteristics, manufacture and site construction of flexible composite pipe[J]. Chemical Management, 2024(30):159-162.

[6] 尹承禹,丁夷飞. 柔性复合管在油田中的应用[J]. 云南化工, 2020, 47(11):15-16, 19.

YIN Chengyu, DING Yifei. Application of flexible composite pipe in oil field[J]. Yunnan Chemical Technology, 2020, 47(11):15-16, 19.

[7] 张玉川. 高压增强热塑性塑料管[J]. 国外塑料, 2008, 26(10):42-45.

ZHANG Yuchuan. High-pressure reinforced thermoplastic pipe[J]. World Plastics, 2008, 26(10):42-45.

[8] 王志翔,肖越,李彦辉,等. 国产化 RTP 管在中海油海外项目的成功实践和展望[J]. 中国海洋平台, 2020, 35(4):64-69.

WANG Zhixiang, XIAO Yue, LI Yanhui, et al. Successful applications and optimistic envision of homegrown RTP pipe in CNOOC's overseas projects[J]. China Offshore Platform, 2020, 35(4):64-69.

[9] 李金,马超,张新庆,等. 塔里木油田某气田地面输水系统柔性复合管爆破失效原因分析[C]//2025 国际石油石化技术会议(IPPTC), 北京:陕西省石油学会石油工程专业委员会, 2025:1-14.

LI Jin, MA Chao, ZHANG Xinqing, et al. Analysis of the failure causes of flexible composite pipe blasting in the surface water supply system of a gas field in tarim oilfield[C]//2025 international petroleum and petrochemical technology conference (IPPTC), Beijing: Professional Committee of Petroleum Engineering of Shaanxi Petroleum Society, 2025:1-14.

[10] XU Y X, BAI Y, FANG P, et al. Structural analysis of fibreglass reinforced bonded flexible pipe subjected to tension[J]. Ships and Offshore Structures, 2019, 14(7):777-787.