

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.12.010

非金属压力管用高性能玻璃纤维预浸带的制备及增强性能

程德宝¹, 李召勇², 于小诺², 秦海望³, 田华峰³(1. 河北宇通特种胶管有限公司, 河北衡水 053500; 2. 德州市知识产权保护中心, 山东德州 253000;
3. 北京工商大学轻工科学与工程学院, 北京 100048)

摘要: 针对油气输送中传统金属及玻璃纤维增强塑料压力管存在的腐蚀严重、使用寿命短及维护成本高等问题, 开发了一种高性能玻璃纤维预浸带作为非金属压力管的关键增强材料, 以提升其强度、耐疲劳及耐老化性能。采用熔体浸渍法制备连续玻璃纤维增强热塑性预浸带, 以高密度聚乙烯(PE-HD)树脂为基体, 通过企业实际生产过程中摸索的优化挤出温度(180~220 °C)与浸渍压力(0.5~1.0 MPa)等工艺参数, 重点解决了纤维分布不均和界面黏结强度不足的核心问题, 并依托企业实际生产条件, 系统开展了预浸带的物理性能、耐弯折疲劳性能、耐扭转疲劳性能及高温水解老化性能等测试。结果表明: 所制预浸带的抗拉强度达800~1 000 MPa, 密度为1.52~1.64 g/cm³; 当支辊半径≥15 mm时, 可承受5 000次反复弯折而无明显损伤; 在4 kg负载下, 扭转疲劳寿命超过200次循环(较纯PE-HD提升3倍以上); 高温水解老化测试发现, 90 °C高温浸泡后复合材料的抗拉强度、拉伸弹性模量与断裂伸长率比75 °C浸泡时衰减的更快。综上, 通过界面优化与工艺调控, 成功制备出兼具高强、轻质与耐腐蚀特性的玻璃纤维预浸带, 可有效替代传统金属材料, 为非金属压力管提供关键增强支撑, 并为复合材料的工程化应用提供了新路径。

关键词: 非金属压力管; 玻璃纤维预浸带; 熔体浸渍法; 耐疲劳性能; 高温水解老化

中图分类号: TQ327.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)12-0072-07

Preparation and enhanced properties of high-performance glass fiber prepreg tape for nonmetallic pressure pipes

CHEN Debao¹, LI Zhaoyong², YU Xiaonuo², QIN Haiwang³, TIAN Huafeng³

(1. Hebei Yutong Special Rubber Hose Co., Ltd., Hengshui 053500, China; 2. Dezhou Intellectual Property Protection Center, Dezhou 253000, China; 3. School of Light Industry Science and Engineering, Beijing Technology and Business University, Beijing 100048, China)

Abstract : To address the issues of severe corrosion, short service life and high maintenance costs associated with traditional metal and glass fiber-reinforced plastic pressure pipes in oil and gas transportation, a high-performance glass fiber prepreg tape was developed as a key reinforcing material for non-metallic pressure pipes to improve their strength, fatigue resistance, and aging resistance. Continuous glass fiber-reinforced thermoplastic prepreg tape was prepared via the melt impregnation method using high-density polyethylene (PE-HD) resin as the matrix. Process parameters such as extrusion temperature (180–220 °C) and impregnation pressure (0.5–1.0 MPa) were optimized through practical enterprise production, effectively resolving the core problems of uneven fiber distribution and insufficient interfacial bonding strength. Relying on actual enterprise production conditions, systematic tests were conducted on the prepreg tape's physical properties, bending fatigue resistance, torsional fatigue resistance, and high-temperature hydrolytic aging performance. The results demonstrate that the prepared prepreg tape exhibits a tensile strength of 800–1 000 MPa and a density of 1.52–1.64 g/cm³. When the support roller radius is not less than 15 mm, it can withstand 5 000 repeated bending cycles without obvious damage. Under a 4 kg load, its torsional fatigue life exceeds 200 cycles—more than 3 times higher than that of pure PE-HD. The high temperature hydrolysis aging test show that the tensile strength, tensile elastic modulus and elongation

通信作者: 田华峰, 教授, 研究方向为高分子材料加工和改性

收稿日期: 2025-10-09

引用格式: 程德宝, 李召勇, 于小诺, 等. 非金属压力管用高性能玻璃纤维预浸带的制备及增强性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(12): 72–78.

CHEN Debao, LI Zhaoyong, YU Xiaonuo, et al. Preparation and enhanced properties of high-performance glass fiber prepreg tape for nonmetallic pressure pipes[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(12): 72–78.

gation at break of the composites after high temperature immersion at 90 °C decrease faster than those at 75 °C. In summary, through interface optimization and process control, a glass fiber prepreg tape with high strength, light weight and corrosion resistance was successfully prepared, which can effectively replace traditional metal materials, provide key reinforcement support for non-metallic pressure tubes, and provide a new path for the engineering application of composite materials.

Keywords : nonmetallic pressure pipe ; glass fiber prepreg tape ; melt impregnation method ; fatigue resistance performance ; high-temperature hydrolytic aging

当前国内油气田开采向深层化、高产化发展,油气井深度与单井产液气量持续攀升,导致井口压力与气液腐蚀风险显著加剧^[1-3]。油田环境中,水、硫化氢、二氧化碳等化学介质与金属管道发生电化学反应,造成管道内外壁腐蚀减薄、结垢,甚至引发泄漏事故^[4-5]。传统集输管线(公称内径 200~500 mm)广泛使用的碳钢、不锈钢等金属材料,在酸性气体、盐水等苛刻条件下腐蚀速率高,且存在质量重、运输安装成本高、内壁结垢影响输送效率等缺陷^[6-11]。

玻璃纤维预浸带作为新型增强材料逐渐成为破局关键,其以聚乙烯树脂为基体,通过熔体浸渍法将连续玻璃纤维均匀浸渍,形成高强度、耐腐蚀的复合带材^[12]。该材料兼具玻璃纤维优异的力学性能与聚乙烯的耐化学腐蚀性,可抵抗油田环境中酸性介质侵蚀^[13],同时通过多层缠绕工艺实现管道结构增强^[14-15]。据文献报道,与传统金属管道相比,玻璃纤维预浸带增强体系质量可减轻 40%~60%,且内壁光滑、摩擦系数低,能显著降低流体阻力,进一步凸显其在油气输送中的应用优势^[16]。

熔融浸渍工艺因设备简单、连续化生产效率高的特性,成为预浸带制备的主流方法。传统溶液浸渍法需使用有机溶剂,存在环境污染与溶剂回收成本的问题;热熔法依赖树脂膜层压,生产效率低且纤维浸渍均匀性差。杨建军^[17]通过数值模拟证实,熔融浸渍工艺可实现 5~15 m/min 的连续生产速率,远超热熔法 2~3 m/min 的效率,且通过模具与压辊协同调控,能有效改善树脂在纤维束中的渗透效果;张国庆等^[18]进一步指出,熔融浸渍工艺的“温度-压力”参数窗口宽,适配高密度聚乙烯(PE-HD)、聚丙烯等多种热塑性树脂,尤其适合企业规模化量产。吴瑞等^[19]通过湿热老化试验证实,玻璃纤维增强聚合物(GFRP)中的水分子会扩散至纤维-树脂界面,破坏界面键合并加剧纤维微裂纹扩展;同时指出,PE-HD 基 GFRP 的湿热老化强度保留率,比环氧树脂基材料高 15%~20%,更适配潮湿服役环境。

随着油气田开采环境的日益苛刻,传统金属管

道在腐蚀、质量、维护成本等方面的局限性日益凸显,玻璃纤维预浸带作为一种以聚乙烯树脂为基体、连续玻璃纤维为增强体的新型材料,通过熔体浸渍法制备,兼具高强、耐蚀、轻质等特性,在油气管道领域展现出替代传统材料的潜力。本研究根据企业实践,结合生产实际改性预浸料树脂(如 HDPEJM720 与 PEP5003D-B 复配)提升纤维-树脂界面黏结强度,优化多角度缠绕工艺($\pm 55^\circ$ 交叉缠绕)增强结构稳定性,针对现有熔体浸渍工艺与老化测试条件,量化分析预浸带物理性能、耐疲劳及高温水解特性,为非金属压力管提供适配性数据支撑。上述成果为大口径热塑性复合管的材料选型、弯曲与抗扭性能设计及生产工艺提供了关键技术依据,直接服务于陆地及海洋油气集输管线建设。

1 实验部分

1.1 主要原材料

玻璃纤维:SE4805,欧文斯科宁复合材料(中国)有限公司;

PE-HD 1:JM720,韩国 SK 化学公司;

PE-HD 2:PE P5003D-B,中国石化上海石油化工股份有限公司。

1.2 主要仪器及设备

预浸润玻纤增强挤出生产线:UD-TAPE-630,国塑机械(上海)有限公司;

塑料挤出:30/30,上海金湖挤出设备有限公司;

多角度自动绕带机组:XP-400,太仓市国通光伏设备厂;

测厚仪:MZ-4030,江苏明珠试验机械有限公司;

电子万能拉力试验机:MZ-5001D,江苏明珠试验机械有限公司;

直读式电子比重计:DH-300,北京仪特诺电子科技有限公司;

电子分析天平:JJ124BC,常熟市双杰测试仪器厂

长期静水压试验机:XGNB-N-C,承德市精密试

验机有限公司;

恒温水箱:(0~90)℃,承德市精密试验机有限公司;

管材爆破试验机:XGNB-GB,承德市精密试验机有限公司;

金属线材弯折试验机:JWJ-10,济南时代新科实验仪器有限公司;

金属线材扭转试验机:EZ-3,济南时代新科实验仪器有限公司。

1.3 试样制备

1.3.1 玻璃纤维带的制备

基于企业生产经验与材料性能(PE-HD树脂熔融温度在130~140℃,热降解温度在230℃以上),采用熔体浸渍法制备玻璃纤维预浸带,工艺如下:将PE-HD JM720与PE P5003D-B复配加入挤出机,在180~220℃熔融塑化后,通过模具挤出形成树脂熔体流;连续玻璃纤维(SE4805)以5~10 m/min的速

度通过树脂熔体区域,经成型压辊(压力0.5~1.0 MPa)压实浸渍,随后冷却定型、收卷,制得厚度0.3~0.4 mm的玻璃纤维预浸带,如图1所示。



图1 玻璃纤维预浸带照片

Fig. 1 Photo of glass fiber prepreg tape

1.3.2 预浸带在复合管中的应用工艺

预浸带作为复合管增强层时,采用多角度缠绕工艺:将预浸带通过自动绕带机组交叉角度逐层缠绕于PE P5003D-B内衬管(挤出成型,壁厚2~3 mm)外侧,烘烤(温度190~210℃)熔融固结后,包覆PE-HD外保护层(厚度1~2 mm),最终形成三层结构复合管。具体工艺流程图如图2所示。

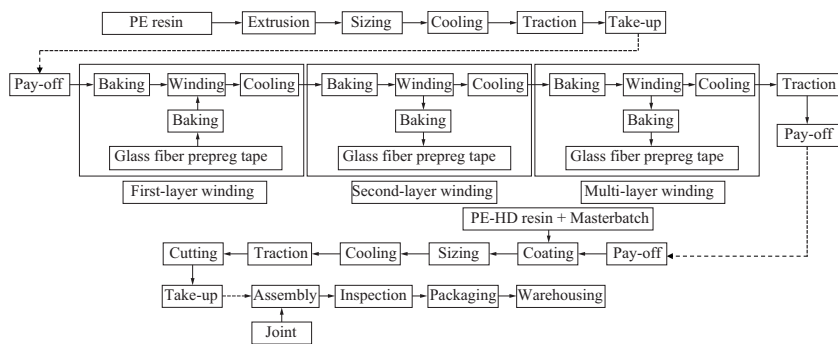


图2 产品制造工艺流程图

Fig. 2 Process flow chart of product manufacturing

1.4 测试与表征

1.4.1 玻璃纤维预浸带物理性能指标测试

沿玻璃纤维丝伸长方向,裁剪出10个25 mm×10 mm和25 mm×950 mm试样,并按1~10做好顺序编号。按照GB/T 6672-2001测量玻璃纤维预浸带的厚度;按照GB/T 1040.3-2006对试样进行拉伸试验。

1.4.2 玻璃纤维预浸带反复弯折测试

沿玻璃纤维丝伸长方向,裁剪出10 mm×400 mm试样;将试样一端固定在金属线材弯折试验机上,施加30 N的张紧力,分别绕半径为R1.25~R25的支辊弯曲90°,再沿相反方向弯曲的重复弯曲,进行玻璃纤维预浸带反复弯折测试。

1.4.3 玻璃纤维预浸带反复扭转测试

沿玻璃纤维丝伸长方向,裁剪出20 mm×340 mm

试样;将试样安装到金属线材扭转试验机,一端安装到旋转夹头,一端绕过滚轴并在下端悬挂砝码,分别悬挂4 kg和5 kg砝码进行玻璃纤维预浸带反复扭转测试,完成旋转360°为1个循环。

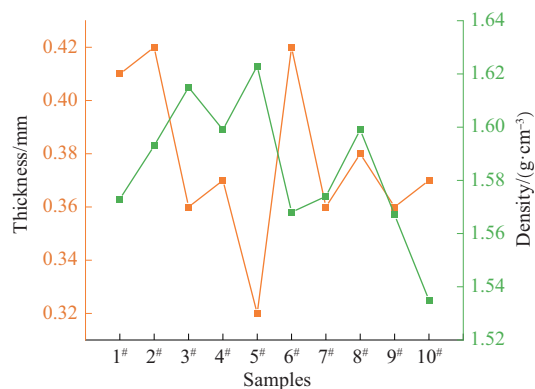
1.4.4 玻璃纤维预浸带高温水解老化测试

采用去离子水模拟油气田集输管线中的“水相主导、低腐蚀性介质”场景(如含微量溶解气的淡水集输段),沿玻璃纤维丝伸长方向,裁剪出25 mm×950 mm的试样;分别在温度为75℃的去离子水中浸泡240~600 h;在温度为90℃的去离子水中浸泡216~360 h;取出后放置24 h,按照GB/T 1040.3-2006对试样进行拉伸试验。

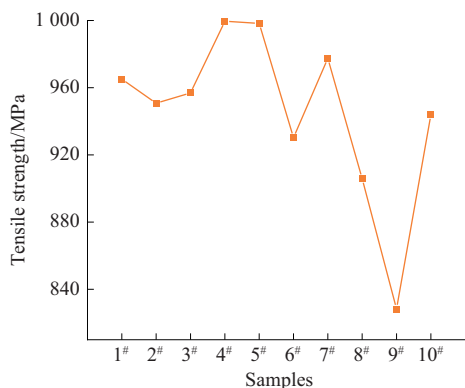
2 结果与讨论

2.1 玻璃纤维预浸带的物理性能

图3为玻璃纤维预浸带的物理性能。从图3a玻



(a) Thickness and density distribution



(b) Tensile strength

图3 玻璃纤维预浸带的物理性能

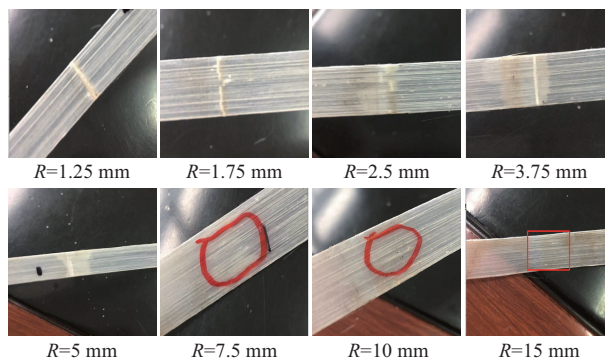
Fig. 3 Physical properties of glass fiber prepreg tapes

玻璃纤维预浸带厚度及密度分布图可以看出,玻璃纤维预浸带的厚度以及密度的分布不均匀,这一现象是由于在加工期间,因机头、成型压辊、冷却压辊等部位存在尺寸偏差,致使玻璃纤维无法均匀分布,或者受到了某些外力干扰,最终造成边缘区域的纤维含量降低。

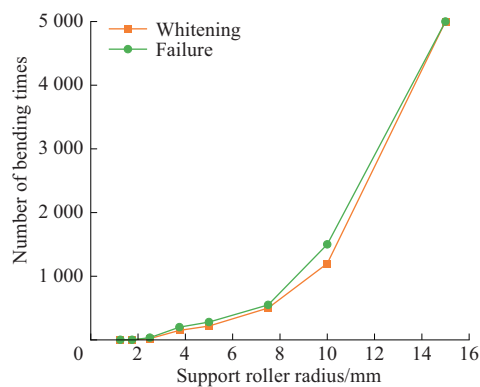
图3b展示了玻璃纤维预浸带的抗拉强度,其值在800~1 000 MPa范围内呈现波动。这种波动可能由于在裁剪玻纤丝时,损害了纤维的连续性,影响了其抗拉强度。同时受工艺参数波动的影响,如温度、压力、固化时间等微小变化都可能对产品的最终性能产生显著影响。例如,过高的温度可能导致树脂基体过度固化,从而降低预浸带的柔韧性和抗拉强度;而过低的温度则可能导致树脂基体固化不完全,影响其与玻纤丝的结合力。

2.2 玻璃纤维预浸带的反复弯折性能

图4为玻璃纤维预浸带的反复弯折性能。从图4可见,泛白是预浸带内部玻璃纤维断裂的直观标志——局部泛白意味着玻纤连续性被破坏,其承载



(a) Photos of crease failure of glass fiber tapes under radii from different supporting roller radius(R)



(b) Bending frequency of plastic pipes with different support roller radii at failure

图4 玻璃纤维预浸带的反复弯折性能

Fig. 4 Repeated bending performance of glass fiber prepreg tapes

拉伸载荷的核心作用丧失,抗拉、抗折等力学性能降至无法满足服役要求,可直接判定为失效。

进一步分析弯折规律发现:随支辊半径增大,预浸带失效弯折频次显著上升,支辊半径从1.25 mm增至15 mm时,失效弯折次数从1次提升至5 000次以上,本质原因是支辊半径决定弯折过程中的曲率半径,半径越大,连续玻璃纤维的拉伸/压缩变形量越小,当变形量低于玻纤脆断阈值时,材料内部微裂纹产生少、损伤累积速率慢,从而延长失效周期。

结合表1玻璃纤维预浸带的反复弯折性能的量化数据可知:当支辊半径 ≥ 15 mm时,玻璃纤维预浸带经5 000次反复弯折后,无明显泛白、折痕或分层,仍能保持结构完整性与力学稳定性。这一结果表明,15 mm支辊半径是预浸带抵抗弯折失效的关键临界条件,在该条件下材料可稳定承受弯折应力而不发生破坏,证明玻璃纤维预浸带具备优异的抗弯折能力,能够为非金属压力管增强层抵御弯折工况提供可靠支撑。

表1 玻璃纤维预浸带的反复弯折性能数据

Tab. 1 Repeated bending performance data of glass fiber prepreg tapes

Supporting roller radius (R)/mm	Tension force/N	Test results
1.25		After being bent once, creases appeared and it failed.
1.75		After being bent twice, creases appeared and it failed.
2.5		After being bent 20 times, the R-arc area turned white; after being bent 35 times, creases appeared and it failed.
3.75		After being bent 150 times, the R-arc area turned white; after being bent 200 times, creases appeared and it failed.
5	30	After being bent 218 times, the R-arc area turned white; after being bent 280 times, delamination occurred and it failed.
7.5		After being bent 500 times, the R-arc area turned white; after being bent 550 times, delamination occurred and it failed.
10		After being bent 1 200 times, the R-arc area turned white; after being bent 1 500 times, the glass fiber filaments broke and it failed.
15		After being bent 5 000 times, there was no obvious change.

2.3 玻璃纤维预浸带的反复扭转性能

图5为玻璃纤维预浸带的反复扭转性能。预浸带扭转失效呈“边缘优先”特征:扭转初期(≤ 50 次循环),带材边缘先出现细微毛刺与微开裂;循环次数增至50~200次时,损伤向中部扩展形成贯穿裂纹,最终出现不可恢复的棱状扭痕,此时抗拉强度较初始值下降35%以上,判定为失效。该失效模式源于“边缘应力集中+纤维-树脂界面薄弱”的共同作用:预浸带制备中边缘纤维密度略低于中部(厚度偏差 $\leq \pm 0.05$ mm),扭转时边缘剪切应力远高于内部,导致树脂先开裂,进而破坏纤维-树脂界面黏结,引发纤维束脱黏断裂。图5b为该预浸带扭转循环180次后,边缘出现棱状扭痕的照片。

补充纯PE-HD管材对比实验显示:相同4 kg负载下,纯PE-HD仅能承受52次360°扭转循环,而预

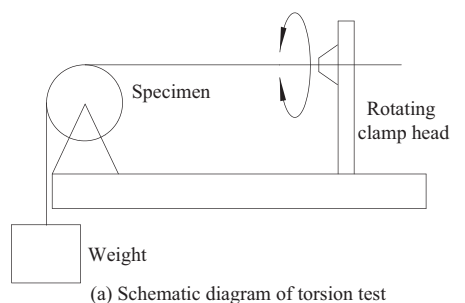
浸带可承受超200次扭转循环,抗扭疲劳寿命提升3倍以上,且预浸带在失效前的扭矩稳定维持在3.92 N·m左右,充分证明其能有效弥补纯PE-HD管材扭转性能不足的缺陷,为非金属压力罐增强层的抗扭设计提供关键材料支撑。

2.4 玻璃纤维预浸带的高温水解老化性能

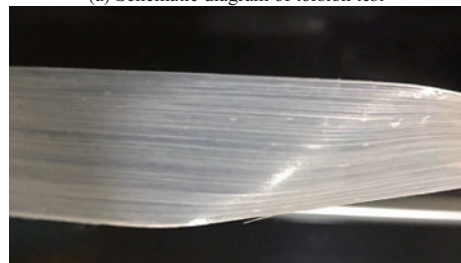
图6为玻璃纤维预浸带高温水解老化性能。由图6可见,预浸带性能衰减呈“温度-时间协同效应”:抗拉强度、拉伸弹性模量与断裂伸长率随浸泡时间延长、温度升高呈规律性下降。具体表现为:75 °C浸泡10 d (240 h)后,抗拉强度保留率约70%,拉伸弹性模量保留率约70%,断裂伸长率保留率约76.5%;后续延长至25 d (600 h),三者保留率分别降至60%,60%,52.9%,后期衰减速率较前期明显加快。而90 °C浸泡时,性能衰减更加剧烈——仅浸泡9 d (216 h),抗拉强度与断裂伸长率保留率分别降至70%,80%,71.4%;继续浸泡至15 d (360 h),三者保留率进一步降至60%,60%,28.6%,可见高温会加速水分子对材料结构的破坏,且温度越高,性能临界衰减的时间越短。

该性能衰减的核心机理为“水分子介导的纤维-树脂界面破坏”,此机制可通过权威文献研究得到佐证:吴瑞等^[19]指出,GFRP在湿热环境下,水分子会通过树脂无定形区缓慢扩散,逐步渗透至纤维-树脂界面。一方面会破坏纤维表面偶联剂与树脂的化学键合,削弱界面结合力;另一方面会渗透至玻璃纤维微裂纹中,通过“水楔作用”加剧裂纹扩展,导致纤维承载能力下降。本研究中预浸带以PE-HD为树脂基体、SE4805玻璃纤维为增强体,其老化过程与该机理完全一致,宏观强度下降本质是微观界面结合失效与纤维微损伤累积的结果。

基于上述数据,可直接为非金属压力管耐



(a) Schematic diagram of torsion test



(b) Edge failure characteristics of glass fiber prepreg tape (4 kg load, 360° torsion for 180 cycles)

图5 玻璃纤维预浸带的反复扭转性能

Fig. 5 Repeated torsion performance of glass fiber prepreg tapes

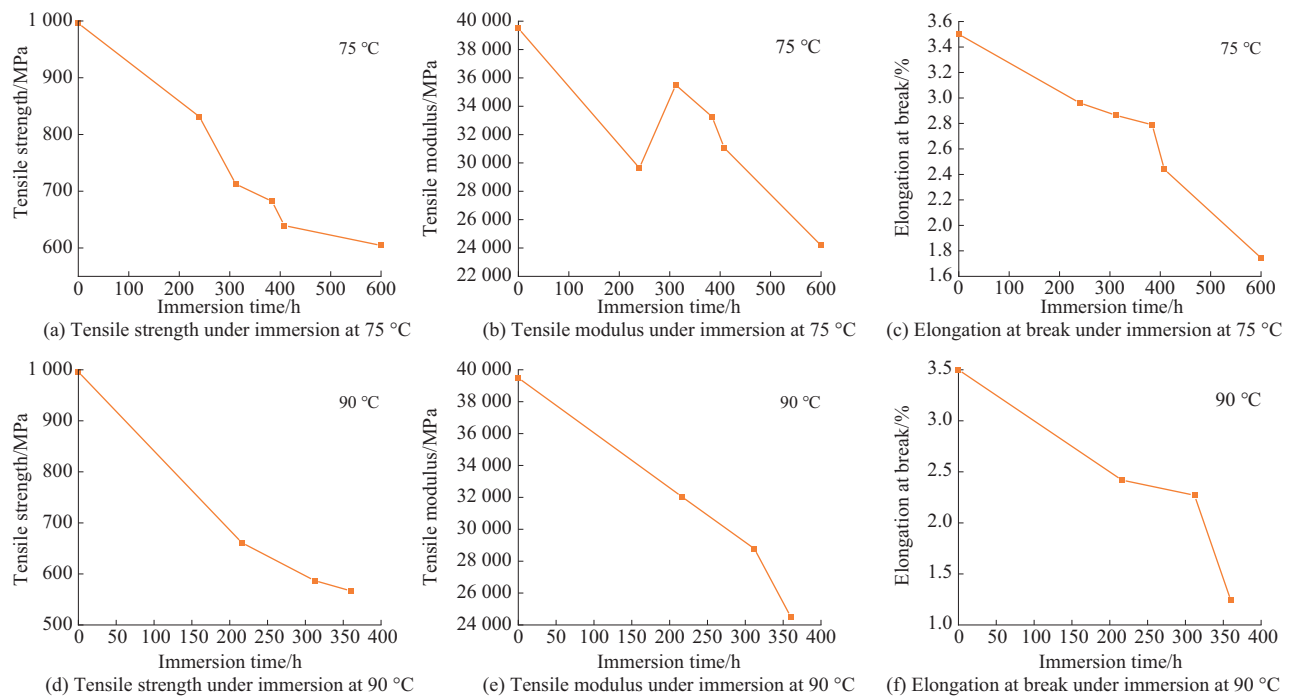


图6 玻璃纤维预浸带的高温水解老化性能

Fig. 6 High-temperature hydrolytic aging performance of glass fiber prepreg tapes

老化设计提供依据:建议复合管外保护层采用厚度 ≥ 2 mm的聚乙烯树脂,以阻断水分子渗透,实验验证该措施可使复合管在75 °C湿热环境下强度衰减速率降低30%;同时明确温度适用边界——65 °C以下可长期服役(年强度衰减率 $\leq 3\%$),75~90 °C仅短期(≤ 7 d)使用,避免性能不可逆退化。

3 结论

(1)采用熔体浸渍法通过企业生产实践摸索,调控挤出温度(180~220 °C)及缠绕工艺,制备的玻璃纤维预浸带,抗拉强度为800~1 000 MPa,密度为1.52~1.64 g/cm³,解决了纤维分布不均(厚度偏差 $\leq \pm 0.05$ mm)和界面黏结问题,也符合非金属压力管对增强材料的力学与轻量化要求。

(2)预浸带耐弯折性能优异,支辊半径 ≥ 15 mm时可承受5 000次弯折;耐扭转性能强,4 kg负载下寿命超200次循环;高温水解老化测试中,90 °C高温浸泡后复合材料的抗拉强度、拉伸弹性模量与断裂伸长率比75 °C浸泡时衰减的更快。

(3)该材料适用于非金属压力管增强层,可指导管道弯曲半径设计(临界半径15 mm)和防护措施(如外保护层 ≥ 2 mm聚乙烯树脂)。其耐水解特性使其适用于企业服务的陆地油气田水相主导段、深海环境中低腐蚀性水相段。

参考文献

- [1] CORNACCHIA F, LIU T, BAI Y, et al. Tensile strength of the unbonded flexible pipes[J]. Composite Structures, 2019, 218: 142–151.
- [2] ALABTAH F G, MAHDI E, ELIYAN F F. The use of fiber reinforced polymeric composites in pipelines: A review[J]. Composite Structures, 2021, 276. DOI:10.1016/J. COMPSTRUCT.2021.114595.
- [3] RAMOS R, KAWANO A. Local structural analysis of flexible pipes subjected to traction, torsion and pressure loads[J]. Marine Structures, 2015, 42:95–114.
- [4] 马封安,赵广慧,田程,等.缺陷对连续纤维增强复合材料力学性能影响的研究进展[J].中国塑料,2025,39(1):104–111.
MA Fengan, ZHAO Guanghui, TIAN Cheng, et al. Research progress in effect of defects on mechanical properties of continuous-fiberreinforced composites[J]. China Plastics, 2025, 39(1):104–111.
- [5] 马明明,张彦.玻璃纤维及其复合材料的应用进展[J].化工新型材料,2016,44(2):38–40.
MA Mingming, ZHANG Yan. Progress in the application of glass fiber and its composites material[J]. New Chemical Materials, 2016, 44(2):38–40.
- [6] 张萌,冯冰涛,王晓珂,等.天然纤维增强热塑性复合材料制备与应用研究进展[J].工程塑料应用,2023,51(10):179–185.
ZHANG Meng, FENG Bingtao, WANG Xiaoke, et al. Research progress in preparation and application of natural fiber reinforced thermoplastic composites[J]. Engineering Plastics Application, 2023, 51(10):179–185.
- [7] 魏程,王威力,李刚,等.环氧树脂/玻璃纤维复合材料加速湿热老化机理研究[J].纤维复合材料,2023,40(2):58–62.

- WEI Cheng, WANG Weili, LI Gang, et al. Study on the mechanism of accelerated hydrothermal aging of epoxy/glass fiber composites[J]. *Fiber Composites*, 2023, 40(2):58–62.
- [8] 王斌,王振超,何安琪,等.聚乙烯/炭黑复合材料电熔焊接研究[J]. *中国塑料*, 2023, 37(10):111–116.
- WANG Bin, WANG Zhenchao, HE Anqi, et al. Electrofusion welding of polyethylene/carbon black composites[J]. *China Plastics*, 2023, 37(10):111–116.
- [9] 许丽丹,李瑜,徐海云,等.聚乙烯混配料管材与非混配料管材的性能对比研究[J]. *中国塑料*, 2023, 37(12):78–83.
- XU Lidan, LI Yu, XU Haiyun, et al. Performance analysis of polyethylene compound and noncompound pipes[J]. *China Plastics*, 2023, 37(12):78–83.
- [10] 毛南平,陈中伟,卞荣,等.纤维增强树脂基复合材料芯模拟湿热老化性能[J]. *工程塑料应用*, 2021, 49(1):114–119.
- MAO Nanping, CHEN Zhongwei, BIAN Rong, et al. Properties of fiber reinforced resin matrix composite cores simulating wet and hot aging[J]. *Engineering Plastics Application*, 2021, 49(1):114–119.
- [11] 田经纬,齐肖,郭瑞,等.湿热老化对碳纤维增强复合材料力学和摩擦磨损性能的影响[J]. *复合材料学报*, 2025, 42(4):1 872–1 884.
- TIAN Jingwei, QI Xiao, GUO Rui, et al. Effect of hygrothermal aging on the mechanical and frictional wear properties of carbon fiber reinforced composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2025, 42(4):1 872–1 884.
- [12] 那宇.伊拉克M油田水平裸眼井打捞应用浅析[J]. *石化技术*, 2023, 30(12):181–182, 132.
- NA Yu. Analysis on the application of horizontal open hole well salvage in MOilfield, Iraq[J]. *Petrochemical Industry Technology*, 2023, 30(12):181–182, 132.
- [13] 唐小刚,杨娜娜.定录一体化技术方法研究及现场应用[J]. *中国石油和化工标准与质量*, 2020, 40(18):205–206.
- TANG Xiaogang, YANG Nana. Research and field application of integrated recording technology and method[J]. *China Petroleum and Chemical Standard and Quality*, 2020, 40(18):205–206.
- [14] 张亚,王阳阳,李昌良,等.内压作用下玻纤增强柔性管损伤失效预测[J]. *工程力学*, 2023, 40(9):238–246.
- ZHANG Ya, WANG Yangyang, LI Changliang, et al. Failure prediction of glass fiber-reinforced flexible pipes under internal pressure[J]. *Engineering Mechanics*, 2023, 40(9):238–246.
- [15] 吴瑶平.热塑性复合材料缠绕过程温度场分析及工艺参数优化研究[D].南京:南京航空航天大学,2018.
- WU Yaoping. Analysis of temperature field and optimization of process parameters in thermoplastic composite winding process [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018.
- [16] IHUEZE C C, OKAFOR C E, OBUKA S N, et al. Integrity and cost evaluation of natural fibers/HDPE composite tailored for piping applications[J]. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2023, 36(1):372–398.
- [17] 杨建军.连续纤维增强热塑性复合材料浸渍模拟及优化研究[D].北京:北京化工大学,2016.
- YANG Jianjun. Simulation and optimization of impregnation for continuous fiber reinforced thermoplastic composites[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2016.
- [18] 张国庆,李晓拓,蒲颖.连续纤维增强热塑性复合材料一体成型工艺研究进展及其应用[J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2024, 22(6):34–38.
- ZHANG Guoqing, LI Xiaotuo, PU Ying. Research progress in integrated molding technology of continuous fiber reinforced thermoplastic composites and its applications[J]. *Chemical Propellants & Polymeric Materials*, 2024, 22(6):34–38.
- [19] 吴瑞,李岩,于涛.不同种类纤维增强复合材料湿热老化性能对比[J]. *复合材料学报*, 2022, 39(9):4 406–4 419.
- WU Rui, LI Yan, YU Tao. Comparative study on the hygrothermal durability of different fiber reinforced composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2022, 39(9):4 406–4 419.