

Structural Properties and Engineering Application Analysis of Polyester and Epoxy Glass Fiber Reinforced Plastic Pipe

Yujun Sun

Lianyungang Zhongfu Lianzhong Composite Materials Group Co., Ltd., Lianyungang, Jiangsu, 222000, China

Abstract

Polyester and epoxy fiberglass pipes have formed a typical application system of “medium and low pressure long-distance buried” and “medium and high pressure multi-bend surface or buried mixed” in scenarios such as China’s water supply and drainage, municipal sewage, chemical medium transportation, and oil and gas field gathering and injection. This paper, using continuous winding and traditional winding process documents, epoxy pipe design and inspection documents as clues, combined with China’s current standard clauses and engineering practices, discusses the differences between the two resin systems in terms of lining, anti-seepage, pressure-bearing, and connection structures, and proposes operational design selection, manufacturing control, on-site installation, and pressure test acceptance points accordingly. The study shows that the fiber orientation and curing method of the structural layer determine the safety margin for pressure-bearing and external pressure resistance, while the connection interface and backfilling conditions jointly affect the service life and leakage risk.

Keywords

polyester and epoxy glass fiber reinforced plastic pipes; structural performance; engineering applications; strategies; analysis

聚酯与环氧玻璃钢管道结构性能及工程应用分析

孙玉军

连云港中复连众复合材料集团有限公司, 中国·江苏·连云港 222000

摘要

聚酯与环氧玻璃钢管道在中国给排水、市政排污、化工介质输送与油气田集输注水等场景中形成了“中低压长距离埋地”与“中高压多弯头地面或埋地混合”的典型应用体系。本文以连续缠绕与传统缠绕工艺文件、环氧管设计与检验文件为线索, 结合中国现行标准条款与工程实践, 讨论两类树脂体系在内衬、防渗、承压与连接构造方面的差异, 并据此提出可操作的设计选型、制造控制、现场安装与试压验收要点。研究表明, 结构层纤维取向与固化方式决定承压与抗外压的安全裕度, 连接界面与回填工况共同影响寿命与泄漏风险。

关键词

聚酯与环氧玻璃钢管道; 结构性能; 工程应用; 策略; 分析

1 引言

玻璃钢管道依靠树脂基体与玻璃纤维层结构协同承载, 内衬层控制渗透与耐介质腐蚀性, 结构层以铺层角度提供承压与刚度。比如给排水工程中, 聚酯基夹砂管的分类、环刚度等级与试验方法在 GB/T 21238 等标准中已体系化规定。又比如在油气田注水、集输与化工输送中, 环氧玻璃钢管更关注长期静水压与接头可靠, 工程设计与验收常参考 SY/T 6769.1 等行业规范。本文据此提炼结构性能要点, 并以制造、连接、敷设与试压为主线提出可核查的应用策略。

【作者简介】孙玉军(1976-), 男, 中国江苏连云港人, 本科, 中级工程师, 从事复合材料玻璃钢聚酯管道、环氧管道及其制品的设计、制造、安装、验收; 结合项目的应用和改进分析研究。

2 聚酯与环氧玻璃钢管道概述

聚酯玻璃钢管道以不饱和聚酯树脂为基体, 配合短切毡、针织毡与无碱玻纤, 必要时引入石英砂形成夹砂结构, 以缠绕或连续缠绕方式成型, 内衬层负责耐介质腐蚀与防渗, 结构层承担环向与轴向载荷, 夹砂层提升环刚度并抑制短期变形。生产环节强调分层用胶与定量输送, 内衬树脂与结构层树脂分别计量并与纤维、石英砂浸润混合。环氧玻璃钢管道以双酚 A 型环氧树脂及酸酐或胺固化体系为主, 常配套螺纹或机械接头实现连接^[1]。承插“O”型圈产品在承口端规定范围增设针织毡加强以改善接头区应力过渡。

3 聚酯与环氧玻璃钢管道结构性能分析

3.1 层合承压与纤维取向

聚酯与环氧玻璃钢管的承压能力由结构层环向纤维占比、浸润质量与固化程度共同决定。聚酯体系在常温固化条

件下更依赖促进剂与引发剂的配比，生产中通过稳定缠绕张力与滚压排气，避免夹杂与局部脱层，从而控制环向强度离散。环氧体系以固化反应控制为主，升温与保温阶段将温度波动限定在窄范围并在高温段保持至完全固化。检验环节常以 DSC 与 Tg 指标反推固化充分性，并与静水压或爆破压力形成互证。端部与接头区还需通过铺层角度与局部加强实现应力过渡，避免轴向载荷在短距离内突变引发开裂。

3.2 环刚度与抗外压稳定

埋地工况下，玻璃钢管结构评价不能只看内压，还需把土压力、回填压实与交通荷载转化为外压稳定问题。聚酯夹砂管通过在结构层与外层之间布置石英砂夹层提高弯曲刚度并降低短期变形，连续缠绕工艺对切纱与落砂位置实行错位并保留距离，避免纤维与砂料在同一落点叠加形成弱界面。大口径高刚度产品在成型支撑阶段还对托轮夹角作限定，以减小未完全固化时的椭圆化。环氧玻璃钢管虽少采用厚夹砂层，但可通过提高结构层模量与控制固化收缩抑制椭圆度增长，并在埋地段通过止推与支墩体系降低弯头区附加外载，从而减少回填不均引起的局部屈曲与开裂敏感性风险。

3.3 固化充分性与热湿稳定

聚酯与环氧玻璃钢管的热环境适应性，直接体现为固化充分性、残余应力水平与介质渗透速率的综合结果。聚酯体系多在常温条件下固化，需通过凝胶时间与放热峰控制避免厚壁区域过热产生微裂纹，并在配方端稳定促进剂与引发剂比例，使反应速率与缠绕节拍匹配，同时在外表层采取封闭与脱粘措施以形成连续树脂膜，延缓水解与氧化。环氧体系通常配置分段升温的后固化制度，酸酐与胺类体系对加温介质压力与升温速率均设下限控制，借助阶梯保温把反应推进到高转化率，并以热分析指标作为过程判定口径。若升温过快或保温不足，玻璃化转变温度偏低会在运行温度下引起模量衰减并促使螺纹区应力松弛。工程上应把介质温度、现场固化条件与检验判据统一到同一技术文件中，避免仅凭室温硬度或外观判断耐久。

3.4 连接界面与耐久防渗

聚酯与环氧玻璃钢管道的失效多从连接界面启动，其结构性能宜以界面强度、渗透路径与施工可控性耦合评价。对接层压连接，现场结构层应分次补强，单层铺放厚度受限并在每层滚压赶尽气泡，避免形成毛细渗漏通道，内壁成型应保证过渡圆滑并避免台阶，配套工艺还对推荐树脂含量给出区间并要求首层与最外层不刮胶，以减少树脂贫化层。环氧螺纹或机械接头的关键在于密封面完好与预紧力稳定，装配时按温度分档控制扭矩并防止端部损伤。长期运行中，若固化不足或密封面受损，介质会沿纤维与树脂界面渗入并触发层间疲劳扩展，因此连接段应与固化与检验制度同步设定^[2]。

4 聚酯与环氧玻璃钢管道工程应用策略

4.1 制造过程的分层质量控制

为保证聚酯与环氧玻璃钢管在给排水、化工与海工等工况下的耐蚀与承载一致性，制造端应把内衬与结构层作为两条质量进行闭环控制。第一，聚酯管内衬胶料与结构层胶料分路计量与输送，配置计量泵并复核计量偏差，按配方控制黏度与凝胶时间，胶杯法复核凝胶时间，促进剂与固化剂先稀释后加入并满足最低搅拌时长，搅拌罐液位留出安全余量，中转桶上口设置金属网过滤并按运行小时清洗过滤与淋胶孔，树脂槽温度与回流量监控以稳定浸润，避免凝胶颗粒进入浸润区造成条纹与孔洞，同时内衬耐介质体系、结构层选高模量体系并对每批胶做凝胶时间对照。第二，缠绕成型对短切纱落点与夹砂落点实行错位布置并保持轴向间距，切纱刀与砂嘴位置用标尺锁定，砂料入仓前进行粒径级配与含水量抽检，含水量偏高时先烘干或更换并用压缩空气疏通供砂管路，供气压力维持工艺窗口以稳定砂幕，DN2000 以上管材对托轮夹角与支撑间距窄区间控制并在线测椭圆度，偏离时优先调整支撑与纤维张力并校核缠绕角度。第三，网格布与毡类铺设执行张力与搭接宽度控制，搭接边沿划定定位线并采取错缝搭接，滚压排气与补喷浸润同步，局部堆积层数按工艺卡限制并在胶化前清除疙瘩与干斑，修磨仅限轻修整且磨削方向顺纤维，边角处补喷封闭以避免纤维切断与树脂贫化^[1]。第四，环氧管固化以温度与时间双指标管理，升温与保温阶段温度公差控制在 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 内，超限时通过调风量或吹气纠偏并记录，厚壁环氧管采用分段升温或内加热以减小径向温差，最高温段持续保温至表面硬度稳定并按批抽测 Tg 确认固化程度，降温阶段缓冷并在脱模前把管壁温度降至脱模窗口。

4.2 连接与接头施工的可控性

为提升聚酯与环氧玻璃钢管道工程连接的一致性，现场宜将关键尺寸、树脂反应与装配受力纳入可追溯工序。第一，对聚酯玻璃钢管对接层压或承插修补，先用定位卡具锁定同轴并复核对接间隙，端部按工艺坡口打磨后脱脂除尘，铺层由内向外进行且单层厚度控制在规上上限内，滚压排气与补胶同步直至纤维全透胶无白斑，弯曲段逐层调整纤维角度与搭接宽度并在外层做圆角收口。第二，层压树脂按推荐树脂含量与固化体系计量搅拌，记录批号、环境温度与可使用时间，首层及最外层不刮胶以保留富树脂表面，承插加工面先涂密封树脂形成连续富树脂层且厚度不小于 0.25 mm，再用球囊或内模具分段压实，固化达到工艺规定后拆除压实工具并复查内壁过渡连续、无气泡空洞与干斑。第三，承插双 O 型圈接头除检视承口端加强层、端面缺陷与密封槽光洁度外，应按公称直径控制端面垂直度并在插口做深度标记，装配前清洁承插面并涂相容润滑介质，推入时保持轴线一致匀速到位，禁止敲击加强区，装配后核对胶圈未翻转并

复查单口试压孔与进水嘴贴合不渗漏。第四,环氧树脂玻璃钢螺纹或机械接头连接前保持保护帽完好并清洁密封面,干毛刷清理螺纹颗粒后用环规测至收紧位置并记录旋合牙数,按规定采用聚四氟乙烯密封带与密封胶控制旋合阻力,按环境温度选取扭矩范围并分步均匀上紧,过渡到钢制系统时使用专用转换件并校核同轴度,完工后对外观、扭矩复核与端部损伤建立记录闭环。

4.3 埋地敷设、回填与止推协同

埋地敷设应把搬运防损、沟槽支承、回填约束与止推构造纳入同一质量链控制,使聚酯与环氧树脂管在土体中获得连续受力边界。第一,进场验收核对外观与承插口尺寸,装卸采用叉车或软吊带并配护角,控制吊点间距与摆动幅度,严禁钢缆勒吊、滚落和抛掷,落地用木枕隔离硬地面,堆场找平排水后限高堆码,两层管间垫木条并保持端部保护帽完好,碰伤部位按修补工艺即时封闭。第二,管沟开挖后复测底宽与高程,沟底清除尖硬杂物,软弱地基先换填级配砂石并分层夯实,必要时采取降排水,管底铺中粗砂垫层并整形成连续弧形床,按设计控制有效支承角且两侧对称,穿越硬软交界处加过渡垫层或土工布,避免局部悬空引起椭圆度增长与接口受剪。第三,回填按先侧后顶、分层对称实施,管侧回填料选细粒土或筛分砂,粒径与含水量受控,管腋用人工捣固或小型夯机密实至规定压实度以形成侧向约束,回填至管顶以上0.3m后方可机械碾压,碾压避开直接跨压承口,同步布设压实度检测点并复核中心线与高程,出现空洞或位移即返工。第四,弯头、三通、变径及高压管箍段配置止推座并与回填衔接施工,按 $A=T/\sigma a \times F_s$ 核算受力面积,止推受力面浇筑在未翻动原土上并定位对准管中心,浇注前对穿越段加橡胶垫或聚乙烯隔离层,混凝土达强度后分级加压,4英寸16MPa的45°弯头推力约 $4.97 \times 10^4 \text{N}$,沙质泥土 σa 约 $1.44 \times 10^4 \text{kg/m}^2$ 且 F_s 为1.5时受力面积约 0.52m^2 ,长距离管线在折点与阀室附近按间距分设止推座^[4]。

4.4 试压验收与运行期修复

为确保聚酯与环氧树脂管道投运质量,试压验收与运行期修复应抓住关键控制点。第一,试压前逐根核查管体、管件外观与端部保护,重点识别擦伤是否进入结构层,承插胶圈、法兰密封面清洁无砂粒,支墩或止推座达到强度且管侧回填已形成约束,接口处留出观察面,注水自下游缓

慢充满并在高点排气,对新做层压或包覆区按测点抽测巴氏硬度核固化^[5]。第二,升压采用分级缓升与稳压观察,预试验升至试验压力稳压30min,允许补水但不得超压,巡检接口渗漏、管体渗汗,异常即卸压处理,主试验停补压稳定15min并核对允许压力降后,将压力降至工作压力恒压30min复查外观,试压期间两端及后背顶撑处严禁站人,缺陷仅可标记后卸压修补。第三,出厂与到场复核宜将固化充分性与承压试验写入条款,聚酯夹砂管可按产品标准逐根完成外观、尺寸及巴氏硬度检验,环氧体系除水压外宜结合Tg与DSC残余放热评估固化,对现场二次粘接或层压接头,按工艺评定点数测量巴氏硬度并取平均值,扭矩与对中偏差同步复核以压缩装配变量。第四,运行期渗漏或外伤先隔离泄压并排空,修复区保持干燥,低压且非结构贯穿可用鞍形补片或套筒式管箍止漏并复核夹紧力,涉及结构层裂纹或纤维外露时,按斜坡修补法打磨成渐变搭接面,手糊分层包裹并滚压排气,固化达规定硬度后再分级升压复压验证界面稳定。

5 结语

综上所述,聚酯与环氧树脂管道在中国分别形成以夹砂管网为代表的市政输配体系与以高压环氧管线为代表的油气田管线体系。结构性能的关键不在单一材料参数,而在内衬致密性、结构层取向、固化充分性与连接界面质量的协同控制。面向工程实施,制造端应以计量、浸润、固化与检验构成可追溯闭环,现场端应以连接、回填、止推与试压构成可复核链条。

参考文献

- [1] 周彬,朱炳麟.玻璃钢结构力学性能试验研究[J].河南科技, 2021, 40(34):3.
- [2] 席卫民,李强,牛建升,等.玻璃钢用不饱和聚酯树脂的生产方法[J].福建化工, 2021(7):16-18.
- [3] 龚常胜.燃气联合循环发电厂大口径玻璃钢管施工工艺技术[J].装饰装修天地, 2022(18).
- [4] 张羲黄,李金柱,武海军,et al.静,动态压缩下环氧树脂玻璃钢的力学行为和特性[J].Chinese Journal of High Pressure Physics, 2021, 35(6).
- [5] 张晨,周松林,南洋,等.环氧树脂粘度对玻璃钢管道抗拉强度的影响[J].纤维复合材料, 2022(1).