

# 夹砂玻璃钢管常见渗漏原因分析及维修对策

黎书宁

新疆兵团水利水电工程集团有限公司 新疆 乌鲁木齐 848116

**摘要:** 夹砂玻璃钢管 (Fiberglass Reinforced Plastic Mortar Pipe, FRPM管) 凭借其优异的耐腐蚀性、轻质高强、水力性能好及长寿命等综合优势, 在市政给排水、化工、电力、海水淡化及农业灌溉等领域得到广泛应用。然而, 在实际工程运行中, 管道系统仍不可避免地出现渗漏问题, 不仅造成资源浪费、环境污染, 还可能危及工程安全与社会稳定。本文旨在系统性地剖析FRPM管在全生命周期内发生渗漏的根本原因, 从设计、制造、运输、安装到运行维护等多个维度进行归因, 并据此构建一套科学、高效、经济的维修对策体系。为相关从业人员提供技术参考, 以期提升FRPM管道系统的可靠性与服役寿命。

**关键词:** 夹砂玻璃钢管; 渗漏; 原因分析; 维修对策; 复合材料; 接口失效

## 引言

我国基础设施建设持续推进, 环保要求愈发严格, 传统金属管道因易腐蚀、重量大、施工复杂等缺陷, 逐渐被高性能非金属复合材料管道取代。夹砂玻璃钢管 (FRPM管) 作为典型纤维增强热固性树脂基复合材料管道, 自20世纪80年代引入国内后, 凭借卓越性能成为现代流体输送管网关键部分。它由内衬层、含玻璃纤维增强层和石英砂夹芯层的结构层及外保护层构成, 多层结构赋予其独特优势, 但也使失效模式复杂。FRPM管设计寿命通常超50年, 但实际工程中早期渗漏事故频发, 渗漏点成为管网薄弱环节, 会造成资源损失、运营成本增加, 甚至引发安全事故。故深入探究其渗漏成因, 制定预防与修复策略, 既有理论价值, 也有迫切现实意义, 本文将对此展开论述。

## 1 夹砂玻璃钢管的基本结构与特性

### 1.1 基本结构

FRPM管是典型三层复合结构。内衬层位于最内侧, 直接接触输送介质, 多为0.5至1.5毫米厚的富树脂层, 能防介质侵蚀, 保证内壁光滑, 减少水流阻力与水头损失。中间结构层是承载核心, 由内外玻璃纤维增强层及中间石英砂层组成。玻璃纤维经缠绕浸渍树脂固化, 提供抗拉强度与环刚度; 石英砂通过树脂胶结, 提升整体刚度, 抵抗外压变形, 降低成本。最外侧外保护层也是富树脂结构, 可抵御紫外线、化学物质、微生物及机械磨损等外部环境的影响。

### 1.2 主要特性

FRPM管力学性能各向异性, 因纤维缠绕工艺, 环向强度远高于轴向。正常使用应力下呈线弹性, 几乎无塑性变形, 但具脆性, 局部应力超极限易脆性断裂,

裂纹扩展快。作为复合材料, 它对缺陷敏感, 制造中的气泡、分层, 运输安装的磕碰损伤, 都可能成应力集中源, 在长期载荷或冲击下诱发裂纹, 导致渗漏。理解这些, 是准确诊断渗漏根源的前提。

## 2 夹砂玻璃钢管渗漏原因的系统性分析

### 2.1 设计阶段的先天不足

设计是工程成败的源头。若选型不当, 未充分考虑输送介质的化学性质 (如强酸、强碱或氧化剂)、工作压力、外部土壤载荷及温度变化等因素, 而错误匹配树脂体系 (如在耐腐蚀要求高的场合选用普通不饱和聚酯树脂) 或管道刚度等级, 将导致内衬层过早降解或管体失稳变形。接口设计缺陷同样致命, 承插口的锥度、公差或“O”型圈槽尺寸若与密封件不匹配, 会直接影响密封的均匀性和可靠性。更为普遍的问题是对位移补偿的忽视, 长距离管线若未设置足够的柔性接头或伸缩节, 热胀冷缩与地基不均匀沉降产生的附加应力将直接作用于刚性接口, 极易造成密封失效<sup>[1]</sup>。此外, 在弯头、三通等产生水流推力的关键节点遗漏混凝土支墩设计, 会使巨大的不平衡力直接拉裂接口, 这是许多严重泄漏事故的根本原因。

### 2.2 制造与材料环节的质量隐患

内衬层作为直接接触介质的屏障, 若因工艺控制不严而存在针孔、微裂纹、厚度不均或固化不完全等问题, 其化学防护功能将大打折扣。尤其危险的是内衬层与结构层之间出现分层, 这会形成低阻力的渗透通道, 使介质绕过结构层从其他位置渗出, 极具隐蔽性。结构层内部若因纤维浸润不良、缠绕张力失控或固化制度不合理而产生气泡、干斑、富胶区等缺陷, 不仅会显著降低管道的整体力学性能, 也为介质渗透提供了微观路

径。石英砂若含有泥沙杂质或级配不佳,会影响其与树脂的结合强度,形成薄弱区。对于承插连接管,承口椭圆度超标、插口端面不平整等制造精度问题,会破坏“O”型圈安装后的均匀压缩状态,导致局部密封失效。

### 2.3 运输与装卸过程中的物理损伤

在吊装、运输及现场搬运过程中,若操作粗暴或防护措施不到位,管体尤其是承插口等薄弱部位极易遭受硬物撞击或摩擦,造成局部凹陷、肉眼可见的裂纹乃至保护层破损。这些损伤无论显性或隐性,都成为应力集中源。在后续的内水压力或外部土壤压力长期作用下,裂纹会迅速扩展,最终演变为贯穿性裂缝,引发渗漏。此外,现场堆放时若层数过高或支撑点设置不当,底层管道会因承受过大弯曲应力而产生永久变形或内部隐裂,为日后的失效埋下伏笔。

### 2.4 安装施工环节的操作失误

“三分材料,七分施工”在此类工程中尤为贴切。沟槽开挖后若底部清理不净,残留尖锐石块或树根,或未按规范铺设足够厚度的砂垫层,会导致管道受力不均,在回填后产生过大的局部弯曲应力而开裂。接口安装是渗漏高发区,其失败往往源于一系列看似微小却影响深远的疏忽:承口、“O”型圈及插口未彻底清洁;使用了黄油、机油等与橡胶不相容的润滑剂,导致密封圈溶胀老化;以及未使用专业工具,仅凭人力强行插入,造成插入深度不足或轴线偏斜,使“O”型圈无法均匀压缩甚至被剪切损坏<sup>[2]</sup>。回填作业违规,如混入大块硬物、未分层夯实,尤其在管顶50厘米保护范围内直接使用重型机械碾压,会对管道施加瞬间冲击载荷,极易压坏管体或使接口位移失效。阀门等附件若未设独立支架而悬挂在管道上,其重量形成的额外弯矩也会导致接口松动或管体疲劳开裂。

### 2.5 运行维护与外部环境因素

系统运行中泵阀的快速启闭会产生剧烈水锤,其瞬时压力峰值数倍于工作压力,可加速材料疲劳,诱发爆管。外部环境的变化,如地面新增构筑物、超载车辆通行、邻近基坑开挖或打桩施工,会改变管道原有的受力平衡。地震、滑坡等地质灾害则可能直接拉断管体或脱开接口。在城市地下空间日益拥挤的背景下,第三方施工破坏已成为重大安全威胁。此外,尽管FRPM管耐老化性能优良,但在极端紫外线、持续高温或特定化学介质的长期侵蚀下,树脂基体会发生缓慢降解,导致材料韧性下降,抗裂能力减弱,最终在正常工况下也可能发生渗漏。

## 3 夹砂玻璃钢管渗漏的维修对策体系

应建立一套“预防为主、防治结合、方法得当”的维修对策体系。

### 3.1 预防性措施

最经济、最有效的防渗漏策略无疑是预防。这要求从项目伊始就进行精细化的设计,严格依据AWWAM45、ASTMD2996/D2997或国标GB/T21238等权威标准进行管材选型和结构计算,充分考虑所有可能的静态与动态载荷组合,并特别关注热胀冷缩和地基位移的补偿措施。对于弯头、三通等关键节点,必须强制设计并验算混凝土支墩,以平衡水流推力。在材料源头上,应选择信誉卓越的供应商,并要求其提供完整的材质报告和出厂检验记录,必要时可实施驻厂监造或委托第三方进行抽检,严把质量关。施工阶段的规范化管理是预防的最后一道闸门。必须对施工队伍进行FRPM管专用安装技术的系统培训,使其深刻理解接口清洁、润滑、插入等关键工序的重要性。同时,配备经验丰富的专业监理,对沟槽验收、管道进场检验、接口安装、回填等每一个环节进行全程旁站监督,确保施工严格按照规程执行。回填作业尤其需要谨慎,应采用细粒土或中粗砂分层回填,每层虚铺厚度不超过30厘米,并使用小型夯实机具进行压实,严禁在管顶以上50厘米范围内使用重型机械直接碾压。在运行管理方面,应在泵站出口和关键阀门处安装缓闭止回阀、水锤消除器等设备,有效抑制水锤压力的产生<sup>[3]</sup>。同时,建立并不断完善管网GIS地理信息系统,清晰、准确地标示出所有管线的位置和埋深,为城市建设和第三方施工提供可靠依据,从根本上防范人为破坏。

### 3.2 渗漏后的应急与修复对策

#### 3.2.1 接口渗漏的修复

承插式接口渗漏最为常见,修复相对便捷。首先关闭上下游阀门,排空管段内介质,然后小心开挖至接口位置,暴露渗漏点。检查“O”型圈是否损坏、挤出、翻转,承插口是否有裂纹或变形。修复方案包括:方案一(首选):重新安装。若管口完好,可将管道拔出,彻底清洁承口、“O”型圈槽和插口,更换全新的、规格匹配的“O”型圈,涂抹专用润滑脂后,使用导链严格按照规程重新插入到位。这是最彻底、可靠的修复方法。方案二:外部抱箍加固。若无法拔出管道(如空间受限或管段过长),可采用不锈钢哈夫节(Clamp)进行外部密封。哈夫节内衬有弹性密封垫(如丁腈橡胶),通过紧固螺栓产生的径向压力,将密封垫紧紧压在渗漏的接口处,实现止漏。此法施工快,但属于临时或半永久性措施,长期可靠性不如重新安装。

### 3.2.2 管体渗漏的修复

#### (1) 小面积损伤(针孔、微裂纹)

泄压、干燥、打磨破损区域至露出新鲜纤维,形成羽状坡口。然后按“富树脂腻子→短切毡层→表面毡层”的顺序,逐层手糊与原管材相同或相容性更好的树脂(通常选用韧性更好的环氧或乙烯基酯树脂),每层充分浸润、压实,排除气泡。固化后打磨平整,涂刷保护层。此法适用于低压、小面积的损伤。

(2) 中等面积破损(裂纹长度 $< 1/3$ 周长,孔洞直径 $< 50\text{mm}$ )

在表面修复的基础上,增加环向和轴向的玻璃纤维布增强层,形成一个局部的“补强套筒”。增强层的宽度应超出破损区域边缘至少 $100\text{mm}$ ,层数根据管径和压力计算确定。此法能有效传递载荷,恢复结构完整性。

#### (3) 大面积破损或结构性断裂

一是更换管段法:这是最根本的解决方案。切除损坏的管段,两端制作成平口或承插口(视原管道类型而定),然后用一段新管和两个抢修接头(Mechanical Coupling)进行连接。抢修接头通常由两个半圆形壳体、内衬密封圈和高强度螺栓组成,安装快捷,密封可靠,能适应一定角度的偏转,是处理严重破损的标准方法<sup>[4]</sup>。二是内衬修复法(CIPP):对于不便开挖的大口径主管,可采用原位固化法(Cured-In-Place Pipe)。将浸渍有热固性树脂的软管(通常为涤纶毡)通过水压或气压翻转或拖入待修复管道内,然后利用热水、蒸汽或紫外线使其固化,形成一层紧贴旧管内壁的新“管中管”。此法无需大规模开挖,但成本较高,且会略微减小管道内径。

### 3.3 修复材料与工艺的关键要点

无论采用何种修复方法,修复材料的选择和工艺的执行都是决定成败的核心。修复所用树脂的化学兼容性、固化收缩率、与原管材的粘结强度以及自身的韧性都至关重要。通常,环氧树脂因其卓越的粘结性能和综合力学性能而被优先选用;在腐蚀性要求极高的场合,乙烯基酯树脂则是更好的选择。必须严禁使用与原管树

脂体系不相容的材料,以免引发新的界面问题。修复前的表面处理是整个工艺中最关键的步骤。必须彻底清除待修复区域的所有油污、水分和松散物,并通过打磨使其表面粗糙化,以最大化粘结面积并形成有效的机械嵌合力。手糊修复作业对环境条件有较高要求,应在干燥、温度适宜(通常在 $15$ 至 $30$ 摄氏度之间)的环境下进行。湿度过高会干扰树脂的固化反应,而温度过低则会显著延长固化时间,甚至导致固化不完全,严重影响修复质量。修复工作完成后,必须进行严格的质量检验。除了细致的外观检查外,还应对修复区域进行局部的气密性或水压试验,只有在确认无任何渗漏迹象后,方可进行回填和恢复运行。

### 4 结语

夹砂玻璃钢管渗漏是系统性工程问题,根源涉及设计、制造、运输、安装及运维全链条。经分析,接口问题是不规范安装操作导致的渗漏首要原因;管体渗漏多因外部机械损伤、基础处理不当或水锤冲击。预防优于治理,精细化设计、严格材料控制和规范施工管理可最大限度杜绝渗漏。已发生渗漏时,应建立分级响应维修体系:接口问题优先考虑重新安装;管体损伤根据程度采用表面修复、局部包封、更换管段或非开挖内衬等技术。未来,智能传感和物联网技术将推动FRPM管道健康监测变革,通过预埋光纤光栅传感器或部署声发射监测系统,实时感知、定位和预警早期损伤,将渗漏风险扼杀在萌芽,实现从被动抢修到主动预防的转变,提升管道系统安全性、可靠性和经济性。

### 参考文献

- [1]胡立周,孙颖晖,贾莹洁,等.玻璃钢夹砂管层间界面损伤及力学特性研究[J].中国塑料,2025,39(08):69-74.
- [2]路世龙.试析水利灌区输水管道的玻璃钢夹砂管施工应用[J].产品可靠性报告,2025,(05):124-125.
- [3]张爱峰.大口径连续缠绕玻璃钢夹砂管与钢管连接技术[J].水利科技,2023,(04):43-45.
- [4]乔吉仁,赵建居,王宇.玻璃钢夹砂管在水利工程中的质量控制分析[J].山东水利,2023,(11):38-40.