

## 新型复合材料管材检测技术及可靠性分析

李 帅

上海建科深水港检验有限公司, 上海 201306

[摘要] 复合材料管材以其卓越的轻量化、强度及耐腐蚀性, 广泛应用于建筑、石油天然气运输、化工及供水等多个领域。然而, 随着使用环境日益复杂, 特别是高温、高压及强腐蚀等极端条件下, 复合材料管材的可靠性与耐久性面临较大挑战。确保管材在长时间使用中的稳定性与安全性, 必须依赖准确的检测与可靠性分析。随着技术的不断发展, 复合材料管材的性能已经得到显著提升, 尤其是新型检测技术的应用, 使得管材的评估方法更加精准高效。本文探讨复合材料管材的检测技术与可靠性分析, 旨在为相关领域的技术进步与应用推广提供理论依据与实践参考。

[关键词] 复合材料管材; 检测技术; 可靠性分析; 性能评估

DOI: 10.33142/ec.v8i2.15362

中图分类号: V226

文献标识码: A

## New Composite Material Pipe Testing Technology and Reliability Analysis

LI Shuai

Shanghai Jianke Deepwater Port Inspection Co., Ltd., Shanghai, 201306, China

**Abstract:** Composite material pipes are widely used in various fields such as construction, oil and gas transportation, chemical industry, and water supply due to their excellent lightweight, strength, and corrosion resistance. However, as the usage environment becomes increasingly complex, especially under extreme conditions such as high temperature, high pressure, and strong corrosion, the reliability and durability of composite pipe materials face significant challenges. Ensuring the stability and safety of pipes during long-term use relies on accurate testing and reliability analysis. With the continuous development of technology, the performance of composite pipe materials has been significantly improved, especially with the application of new detection technologies, making the evaluation methods of pipe materials more accurate and efficient. This article explores the testing technology and reliability analysis of composite material pipes, aiming to provide theoretical basis and practical reference for technological progress and application promotion in related fields.

**Keywords:** composite material pipes; testing technology; reliability analysis; performance evaluation

### 引言

复合材料在建筑、石油天然气管道以及供水领域的广泛应用, 源于其优异的力学性能与抗腐蚀特性, 已使其成为许多行业的首选材料。然而, 随着使用环境复杂性的增加, 特别是在高温、高腐蚀性或其他极端条件下, 复合材料管材的性能稳定性也面临挑战。在传统检测技术中, 目视检查及简单物理性能测试已无法全面评估管材在复杂环境中的实际性能。因此, 新型无损检测技术应运而生, 成为研究的焦点。例如, 超声波检测与X射线成像等技术已被证明能够精确评估管材内部缺陷, 且不会造成损伤。与此同时, 随着可靠性分析方法的不断进步, 管材的使用寿命预测及失效模式分析得到了进一步加强。

### 1 新型复合材料管材检测概述

复合管材是以金属与热塑性塑料复合结构为基础的管材, 内衬塑聚丙烯、聚乙烯或外焊接交联聚乙烯等非金属材料成型, 具有金属管材和非金属管材的优点。

#### 1.1 新型复合材料管材分类

##### 1.1.1 铝塑复合管

铝塑复合管由五层结构组成: 中间为一层焊接铝合金,

内外层为聚乙烯, 通过胶合层黏结而成。该管材兼具聚乙烯塑料管的良好耐腐蚀性和金属管的高耐压性。根据聚乙烯材料的不同, 铝塑复合管分为两种: 适用于热水的交联聚乙烯铝塑复合管, 以及适用于冷水的高密度聚乙烯铝塑复合管。其规格范围为 $\Phi 14 \sim \Phi 32$ , 采用夹紧式铜配件连接, 广泛用于建筑内的配水支管和热水器管道。

##### 1.1.2 钢塑复合管

钢塑复合管以无缝钢管或焊接钢管为基管, 内壁涂覆高附着力、防腐蚀、食品级卫生型的聚乙烯粉末涂料或环氧树脂涂料。部分钢塑复合管由镀锌管内壁涂覆一定厚度的UPVC塑料制成。通过预热内装或内涂流平工艺, 这种管材既保留了钢管的高强度和刚性, 又具备塑料管材的卫生性能。钢塑复合管适用于石油、天然气输送、工矿用管、排水管及冷水管等多个领域, 也常见于建筑给水系统中。

##### 1.1.3 铝合金衬塑复合管

铝合金衬塑复合管由铝合金外管和热塑性塑料内管组成。外层铝合金不仅起到阻氧作用, 更重要的是提供结构承载力。该管材适用于生活冷热水管, 并分为冷热分用型和冷热通用型。

#### 1.1.4 涂塑钢管

涂塑钢管是在钢管内壁融溶一层厚度为 0.5~1.0mm 的有机物,如聚乙烯(PE)树脂、乙烯-丙烯酸共聚物(EAA)、环氧(EP)粉末、无毒聚丙烯(PP)或无毒聚氯乙烯(PVC)。这种内涂塑复合钢管采用预热内装或内涂流平工艺制成,既保留了钢管的高强度和耐水流冲击性能,又有效缓解了钢管易腐蚀、污染、结垢及消防性能差等问题<sup>[1]</sup>。部分涂塑钢管由镀锌钢管通过类似工艺改进而成,是传统镀锌管的升级产品。其主要型号包括:GS-X-SP-T-EP、GS-SP-T-EP、GS-D-SP-T-EP (PE),规格范围为 $\Phi 15\sim\Phi 100$ 。

#### 1.1.5 钢骨架管

钢骨架 PE 管采用优质低碳钢丝为增强材料,高密度聚乙烯为基体,通过钢丝点焊成网与塑料同步挤出填注,连续拉膜成型,形成双面防腐压力管道。管径范围为 $\Phi 50\sim\Phi 500$ ,采用法兰连接,主要用于市政、化工及油田管网。该管材是在孔网钢带钢塑管的基础上发展而来。相比于孔网钢带,其钢丝骨架提高了承压能力并保留了阻氧性能,且避免了钢带成型和对接焊的工艺难题。钢骨架管的性能与孔网钢带钢塑管基本相似。

### 1.2 复合材料的基本特性

复合材料通过将具有显著物理或化学性质差异的两种或多种材料结合,利用特定工艺形成,展现了优异的力学性能、抗腐蚀能力及轻质高强的特性。增强相与基体相的有效结合使得复合材料在保持低密度的同时,具备了卓越的承载能力。特别是抗腐蚀性能,在酸、碱、盐等腐蚀性环境中,材料的结构能够保持稳定,几乎不受老化或分解影响。与传统金属材料相比,复合材料的密度较低,但其比强度显著较高,减轻了运输与安装负担,且改善了机械设备的动态性能及能源利用效率。复合材料的热学特性可根据需求进行优化,某些材料具备出色的热绝缘或导热性能,能够在复杂温度环境下可靠工作<sup>[2]</sup>。此外,复合材料在电学领域的应用潜力也不容忽视,凭借其能够被设计为绝缘、半导电或导电材料,满足不同领域的需求。针对高湿、高温或极低温等极端环境,复合材料的性能基本不受影响,保证了其在各种恶劣条件下的可靠性。通过优化基体与增强材料的种类、比例以及复合方式,复合材料的性能可以根据特定应用的要求灵活调节。

## 2 复合材料管材检测技术

### 2.1 检测技术概述

随着其在多个领域的广泛应用,传统的检测方法已无法满足管材复杂结构和特殊性能的要求,这使得现代检测技术变得尤为重要。常用的检测技术可分为无损检测、力学性能检测以及微观结构与化学成分分析等几大类。无损检测技术能在不破坏管材的前提下,发现内部缺陷,从而保证管材的可靠性;力学性能检测通过拉伸、压缩、弯曲等试验,评估管材在不同载荷作用下的表现;微观结构与

化学成分分析技术则有助于了解管材的内部组织和成分,确保其满足使用需求。

### 2.2 力学性能检测技术

力学性能检测技术在管材使用过程中至关重要。通过施加不同的外力,可以模拟管材在实际应用中可能面临的各类力学条件,如拉伸、弯曲及压缩等。管材的力学性能不仅决定其在工作环境中的可靠性,还对其设计及选材具有深远影响。常用的检测方法包括拉伸试验、弯曲试验、压缩试验、剪切试验与硬度试验,这些测试为管材的性能评估、设计优化与应用提供了有力支持。

#### 2.2.1 拉伸试验

拉伸试验主要通过施加外力来测量管材的抗拉强度、屈服强度、延展性及断后伸长等指标。该试验揭示了管材在拉伸负载下的应力-应变关系,并反映出其变形与断裂特性。管材试样被固定在拉伸机中,负载逐渐增加,直到其发生断裂。测试过程中记录的应力与应变变化形成的曲线,能够帮助评估管材的力学性能。该试验在选材与设计过程中具有重要作用,特别是在管材承受拉伸负荷的场景中,数据结果提供了可靠的参考依据。在试验时,需确保环境温度与湿度符合标准要求,以保证数据的准确性。

#### 2.2.2 弯曲试验

弯曲试验评估管材在弯曲负载下的抗弯强度与刚度,特别是在管道系统中,弯道或曲线部分的管材表现尤为关键。通过施加集中负荷或弯矩使管材发生弯曲,过程中记录管材的变形及变形后的恢复性。通过这些数据可以判断管材在实际工作中的安全性及变形模式。此试验不仅帮助预测管材在弯曲受力下的变形行为,也为管材在弯道或曲线部分的应用提供了设计依据。通过测量最大弯曲角度、弯曲半径等关键数据,能为确保管材的稳定性及耐久性提供支持。

#### 2.2.3 压缩试验

压缩试验用于测试管材在高压环境下的力学性能,特别是其抗压强度、屈服强度及塑性变形特性。在试验中,管材试样被置于压缩试验机内,逐步增加施加的压力,直到管材发生明显变形或破坏。通过这一过程,能够评估管材在高压环境下的行为表现。该试验广泛应用于石油、天然气等领域,在这些高压环境下,管材的稳定性与安全性至关重要。压缩试验的结果为工程师提供了重要的数据,帮助选材及设计,以确保管材在极端压力下的可靠性。屈服后变形的分析尤为重要,能够揭示管材的塑性特性及其应对高压的能力。

#### 2.2.4 剪切试验

剪切试验主要用于评估管材在受到剪切力作用下的抗剪强度与剪切模量。管材在连接、焊接等部位常常面临剪切力,因此此类试验对于评估这些关键区域的安全性至关重要。通过逐步施加剪切负荷,管材直到发生剪切变形

或破坏,测试过程中所记录的数据能揭示其在剪切负荷下的性能。这类试验通常使用专门的剪切试验机,通过滑动或扭转施加剪切力。通过对剪切变形及破坏模式的分析,不仅能帮助发现管道连接部分的潜在弱点,还能为优化管道设计提供有力依据,避免剪切力作用导致管道失效。

#### 2.2.5 硬度试验

硬度试验测量管材表面的硬度,以评估其抗磨损、抗压及表面强度。硬度是管材耐久性、耐磨性及抗腐蚀能力的重要指标,尤其在管材表面暴露于摩擦、磨损或腐蚀环境中时。常用的硬度测试方法包括布氏硬度、洛氏硬度与维氏硬度,分别适用于不同硬度范围的管材。试验中,标准负荷被施加到管材表面,通过压痕测量表面硬度值。硬度测试结果为评估管材的抗磨损性、抗腐蚀性及其耐久性提供了定量依据,尤其在管材经过热处理或焊接后的性能变化分析中,硬度试验具有重要作用。通过这些数据,工程师能够判断管材在长期使用中的表现,为后续应用提供可靠支持。

### 3 复合材料管材的可靠性分析

#### 3.1 可靠性分析的基本概念与评价指标

可靠性分析旨在评估复合材料管材在长时间使用过程中的稳定性与耐久性,从而确保其在实际应用中的可靠性。失效率、平均无故障时间及可靠性函数是常见的评价指标。失效率表示管材在特定时间内发生故障的频率,而平均无故障时间则为管材的预期寿命提供预测。可靠性函数则表示管材在某一时间点保持正常功能的概率。

#### 3.2 复合材料管材的失效模式与原因分析

复合材料管材的失效模式多种多样,主要表现为裂纹扩展、疲劳失效、腐蚀、磨损及热老化等。裂纹扩展通常起源于微小缺陷,在外力作用下逐步扩展,最终导致管材断裂;疲劳失效则在循环载荷作用下,管材内的微损伤逐渐积累,最终造成整体破坏。腐蚀与磨损主要受到化学物质或水的影响,逐渐削弱管材的强度及稳定性;热老化则是在高温环境下,管材内部的化学成分发生变化,影响其力学性能与耐用性。

#### 3.3 可靠性统计与试验数据分析方法

为评估复合材料管材在不同工况下的可靠性,常采用回归分析、极值理论及蒙特卡罗模拟等统计与试验数据分析方法。回归分析可识别影响管材可靠性的关键因素,进而构建相应的预测模型;极值理论侧重于管材在极限工况下的表现,评估其可靠性;蒙特卡罗模拟通过模拟多次实验过程,揭示管材在复杂环境下的可靠性分布。

#### 3.4 环境因素对可靠性的影响

复合材料管材的可靠性受到多种环境因素的影响,主要包括温度、湿度、化学介质、辐射及机械载荷等。温度波动可能导致管材的膨胀或收缩,从而影响其力学性能与结构稳定性;湿度则可能导致水合作用或水解反应,进而

降低管材的抗腐蚀能力;化学介质,如酸、碱、盐等,可能与管材发生反应,造成腐蚀或分解;辐射与机械载荷的作用可能改变管材的微观结构,影响其长期使用性能。考虑到这些环境因素对管材可靠性的影响,有助于在设计与材料选择过程中提高其在恶劣环境中的耐久性与安全性。

### 3.5 复合材料管材的寿命预测模型

多种数学与统计模型可用于预测复合材料管材的使用寿命,这些模型结合了管材的失效模式、工作条件及环境因素。常见的寿命预测模型包括 Weibull 分布模型、Arrhenius 模型及 Coffin-Manson 模型。Weibull 分布模型能够有效描述管材在不同负荷条件下的失效行为,适用于各类材料的可靠性分析;Arrhenius 模型则主要用于研究温度对管材寿命的影响,特别是在高温环境下的表现;Coffin-Manson 模型则用于评估管材在疲劳载荷下的寿命。

### 4 复合材料管材检测与可靠性提升的优化策略

#### 4.1 检测技术的优化与创新

复合材料管材的性能评估依赖于检测技术的精准性,然而,在面对复杂结构及微小缺陷时,现有的超声波、X射线与电磁检测方法逐渐暴露出局限性。为了解决这些问题,创新性的检测技术应运而生。例如,结合超声波技术与红外热成像技术,不仅提高了缺陷检测的灵敏度,还增强了对微小裂纹的识别能力。同时,借助人工智能与机器学习算法的分析,检测过程中的大数据处理能够显著提升缺陷识别的自动化程度与准确性。

#### 4.2 提高可靠性的设计与制造工艺改进

在材料选择方面,采用高强度且耐腐蚀的复合材料,如增强碳纤维或陶瓷基复合材料,可有效提高管材的抗压能力与耐腐蚀性。设计阶段,通过应用拓扑优化及多尺度建模技术,不仅优化了管材的性能,还实现了材料效能的最大化。在制造工艺上,精密的挤出与热压成型工艺能够消除潜在缺陷,确保管材的整体质量<sup>[4]</sup>。而创新的树脂浸渍技术增强了管材表面的结合力,使其具有更强的耐压与抗腐蚀性能。

#### 4.3 质量控制与可靠性保障措施

在生产过程中,从原材料的选用到成品的检验,每一环节均需进行严格的质量监控。使用统计过程控制(SPC)与质量功能展开(QFD)等工具,能够有效识别生产中的潜在问题,减少不合格品的产生。通过定期的生命周期管理与维修,管材的使用寿命得以延长,并在整个生命周期内维持最佳状态。有效的质量控制与保障措施,确保了复合材料管材在实际应用中的可靠性,也为后续的维护管理提供了保障。

#### 4.4 复合材料管材在特殊环境中的性能改进方案

在极端环境条件下,复合材料管材面临着高温、高湿、强酸碱腐蚀或辐射等多种影响,这些因素可能导致管材性能的明显下降。为应对这些挑战,需要采取相应的性能改

进措施。例如,通过引入耐高温填料,如陶瓷颗粒或碳纤维,可以提高管材的热稳定性;对于腐蚀问题,可通过涂覆防腐层或选用具有高耐化学腐蚀性的聚合物材料,增强管材的抗腐蚀能力。此外,采用三维织物增强复合材料不仅能提高管材的力学性能,还能增强其在高压环境下的稳定性。

## 5 结语

随着复合材料技术的快速发展,要保证复合材料管材在使用过程中长时间的稳定性与安全性,必须依赖先进的检测技术与可靠性分析方法。尽管现有的无损检测技术与可靠性分析方法已取得显著进展,但在精确度与环境影响评估方面,仍有待进一步提升。未来,随着人工智能与大数据等技术的快速发展,复合材料管材的检测与性能评估将更加高效、精准。预计,未来的研究将进一步探索环境因素对管材性能的影响,并完善其可靠性与寿命预测模型。随着相关技术的不断创新,复合材料管材将能够在更为苛

刻的环境下展现优异的性能,进而为各行业提供更加安全、稳定的解决方案。

## [参考文献]

- [1]李兴.碳纤维复合材料异型管材的力学性能仿真与优化[D].上海:东华大学,2023.
- [2]国家发展改革委等.竹缠绕复合材料及其管道管材被列入《加快“以竹代塑”发展三年行动计划》“以竹代塑”主要产品名录[J].世界竹藤通讯,2023,21(5):3.
- [3]徐冬梅,刘华新,李艳.BFRP条带-PVC管材复合加固纤维再生混凝土短柱轴压性能[J].复合材料科学与工程,2024(6):95-105.
- [4]徐冬梅,刘华新,李艳.BFRP条带-PVC管材复合加固纤维再生混凝土短柱轴压性能[J].复合材料科学与工程,2024(6):95-105.

作者简介:李帅,当前就职单位名称:上海建科深水港检验有限公司,当前职称级别:中级职称。