

高分子复合材料在给排水管道中的应用研究进展

周 铄

(昆明市市政工程设计研究院(集团)有限公司, 云南昆明 650228)

摘要: 高分子复合材料凭借其耐腐蚀、轻质高强及功能可设计等优势在给排水管道领域逐步替代传统金属与混凝土材料, 成为解决管道腐蚀、破裂及环境适应性等问题的关键材料。该文系统阐述了高分子复合管材料的分类与特性, 重点围绕力学性能、耐久性、环保可持续性 & 功能设计核心领域综述了其研究应用最新进展。当前研究通过纤维增强与界面优化、基体功能化改性及绿色制造工艺创新等路径显著提升了材料的综合性能和功能化设计潜力, 以实现适配日益复杂的工程应用需求。该文旨在推动高分子复合管材向高性能、长寿命、环境友好与功能设计一体化方向发展, 为智慧水务与韧性城市建设提供理论参考。

关键词: 建筑保温; 高分子复合管材; 耐久; 力学; 功能设计

中图分类号: TB 332

Advances in the Application of Polymer Composites in Water Supply and Drainage Pipelines

ZHOU Shuo

(Kunming Municipal Engineering Design and Research Institute (Group) Co., Ltd., Kunming 650228, Yunnan, China)

Abstract: Polymer matrix composites have gradually replaced traditional metallic and concrete materials in water supply and drainage pipelines due to their corrosion resistance, lightweight and high-strength properties, and tailorable functionality, thereby emerging as critical materials for addressing pipeline corrosion, fracture, and environmental adaptability issues. This paper systematically elaborates the classification and characteristics of polymer composite pipe materials, with a focus on reviewing the latest research and application advancements in core areas such as mechanical properties, durability, environmental sustainability, and functional design. Current studies have significantly enhanced the comprehensive performance and functional design potential of these materials through approaches including fiber reinforcement and interface optimization, matrix functionalization modification, and innovations in green manufacturing processes, in order to meet increasingly complex engineering application requirements. The paper aims to promote the development of polymer composite pipe materials toward high performance, extended lifespan, environmental friendliness, and integrated functional design, providing theoretical references for smart water management and resilient city construction.

Key words: building insulation; polymer composite pipes; durability; mechanics; functional design

给排水管道作为城市基础设施的核心组成部分, 其材料性能与耐久性直接影响水资源的高效利用和环境保护。传统金属和混凝土管道存在易腐蚀、结垢和机械损伤等缺陷, 难以满足现代城市对管道系统高效、环保和可持续发展需求^[1]。高分子复合材料以其耐腐蚀性、轻质高强和易加工成型等特性, 逐渐成为给排水管道领域的研究热点。

近年来, 材料科学和制造技术的进步推动了高分子复合材料在给排水管道中的广泛应用, 显著提升了管道的综合性能。然而, 其在实际工程中仍面临诸多挑战, 如长期耐久、力学强度及环保性等问题^[2]。此外, 全球对可持续发展的重视也促使环保型高分子复合材料及其绿色制造技术成为研究重点。本文系统综述高分子复合材料在给排水管道中的应用进展, 分析其性能与制造工艺优化策略, 并探讨未来发展方向与挑战, 以期对相关领域的研究与工程实践提供参考。

1 给排水管道用高分子材料的分类与组成

当前给排水管道用高分子材料主要分为热塑性树脂基复合材料、热固性树脂基复合材料和功能化复合材料三大类。热塑性树脂基复合材料以聚乙烯(PE)、聚氯乙烯(PVC)等可熔融加工树脂为基体, 具有加工灵活、可回收的特点, 但高温稳定性与抗蠕变性能较弱, 多用于非压力排水系统。热固性树脂基复合材料以不饱和聚酯(UP)、环氧树脂(EP)等交联固化树脂为基体, 通过纤维增强形成高强度层合结构, 耐高温、抗压性能优异, 但不可回收, 适用于高压输水与腐蚀环境[3]。功能化复合材料则通过引入降噪、抗菌、自修复等组分, 赋予管道智能感知或主动防护能力, 是未来管道技术升级的重要方向。

给排水管道高分子材料主要由基体、增强材料、功能添加剂等成分构成。基体作为连续相, 决定材料的耐

腐蚀性、加工性与热稳定性^[4]；增强材料（如玻璃纤维、碳纤维或无机颗粒）通过分散或定向排布提升力学性能；功能添加剂则针对特定需求设计，实现如渗漏监测、抑制微生物滋生、自修复等特异性功能。此外，增塑剂、稳定剂等助剂用于优化加工流动性与长期耐久性。通过对各组分进行协同设计后的高分子复合材料可精准适配不同工程场景需求。

2 高分子复合管材的特性

高分子复合材料的核心优势源于其组分设计与结构可调性。热塑性树脂基复合材料（如PE、PVC）凭借熔融-结晶的可逆特性，可实现高效挤出成型与二次加工。在保证其断裂伸长率（>500%）与低温韧性（-60℃抗冲击）显著优于传统金属管道的同时仍具有优异的耐化学腐蚀特性，可抵御酸碱介质侵蚀^[5]。热固性基复合材料（如环氧/玻璃纤维层压管）通过三维交联网络与纤维定向铺层，轴向抗压强度可达400MPa以上，同时具备低热膨胀系数（ $<3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ ），适用于温度变化频繁的地下管网^[6]。功能化复合材料则突破单一性能局限，如引入银系抗菌剂的PP-R材料可实现管道同时具有优异的耐热性和抗菌能力，而采用微囊自修复技术的管道在保持高韧性的基础上可进一步实现自修复。

尽管具备多重优势，各类高分子复合材料仍存在固有缺陷。热塑性材料在长期静载荷下易发生蠕变松弛（应变速率 $>1\%/年$ ），且热氧化降解倾向（氧化诱导时间 $<30\text{min}$ ）限制其在高温输水系统中的应用^[5]。热固性材料因交联密度高，界面韧性不足（层间剪切强度 $<40\text{MPa}$ ），多向应力下易发生纤维-基体脱粘失效，且固化过程产生VOCs排放，需配套环保工艺^[6]。功能化材料中，功能组分的引入可能引发基体相容性劣化，存在材料性能此消彼长的风险。因此，材料性能的优化需兼顾组分协同效应与全生命周期可靠性，以适配不同工况下的力学、化学性能及功能需求。

3 高分子复合管材的应用研究进展

3.1 力学性能

力学性能是评判管道物理强度的基本指标，直接决定其应用环境与范围，现有研究常通过创新结构设计提升管道力学综合性能。王全龙等^[7]研发的新型聚乙烯轴中空壁管材通过管壁内等距均匀分布的中空层结构设计，在等量原料下显著提升截面惯性矩，增强力学强度。实验表明，该管材在3%外径变形时外荷载达25吨，30%径向变形仍保持结构完整，兼具高抗外荷载能力与环柔性能。傅小坚等^[8]以高密度聚乙烯（HDPE）为基体，通过错绕钢丝网增强层与高性能树脂黏结复合结构，研制出钢丝网骨架聚乙烯复合管。当内压载荷低于3MPa时，高强度钢丝主承压，赋予该管材轻量化、柔韧性好、运输施工便捷、寿命长及机械性能优异等综合优势。邓宗梁^[9]采用缠绕成型工艺开发了内壁平整、外壁带螺旋中空肋的波纹管，外肋由软管辅助支撑。直立内肋设计显著提升环刚度（达SN16）和波峰稳定性，增强抗压

抗冲击性，并能适应管基不均匀沉降。此外，其兼具高柔韧性，断裂伸长率超500%，可应用于严苛环境。

纤维增强也是提升复合材料综合力学性能的有效手段，通过调控纤维类型及掺量可显著优化基体的力学强度、耐热性及耐久性，但需平衡不同纤维含量对拉伸、弯曲、冲击等性能的差异化影响，以实现材料性能的协同提升。杨静等^[10]采用碳纤维（CF）与高密度聚乙烯（HDPE）制备了HDPE/CF复合材料，并研究CF掺量对复合材料力学性能和耐久性能的影响。结果表明，随着CF掺量的增加，复合材料的力学性能和耐久性能均得到增强；当CF掺量为12%时，复合材料的拉伸强度比纯HDPE提高145.9%，弯曲强度比纯HDPE提高220.4%，冲击强度比纯HDPE降低5.9%。此外，当CF掺量为12%时，复合材料具有最优的热稳定性，其维卡软化温度最高，比纯HDPE提高19℃。孙亚颇^[11]采用模压成型制备不同玻璃纤维掺量（0~20%）的聚酯基复合材料。通过实验证实，随纤维掺量增加，拉伸强度与冲击强度同样呈现先增后减变化规律，断裂延伸率和弯曲强度则持续下降；当纤维掺量为15%时综合力学性能最优，拉伸强度为26.1MPa，冲击强度为8.1MPa、弯曲强度为30.5MPa，此时断裂延伸率降至2.6%。其优异的力学性能归因于适量掺杂玻璃纤维可形成定向分布结构，增强界面结合，进而提升力学强度。

3.2 耐久与老化性能

水管耐久和抗老化性能是决定管材使用寿命的关键因素，当前研究主要通过工况适配材料优选、基体改性剂复合添加与外防护层构筑等策略协同提升其力学强度、耐腐蚀性及环境稳定性，从而有效延缓老化进程并延长服役寿命。谢加强等^[12]通过引入硅烷偶联剂、纳米二氧化硅及有机硅憎水剂对不饱和聚酯树脂实施复合改性，系统研究了不同改性体系对材料耐水与力学行为的影响规律。实验结果表明，二氧化硅改性试样在综合性能方面表现最优，其吸水率显著下降，耐磨性能提升尤为显著（磨损率降幅达30%），拉伸弹性模量、断裂伸长率及拉伸强度分别达到144MPa、7.3%和15.5kN，展现出优异的界面结合与承载能力。此外，外防护层构筑也是提升其耐久性的有效手段。张小婧^[13]将碳纤维复合材料通过环氧树脂等黏结剂粘贴在被加固结构表面或内部用于提升管道结构强度。经数据分析显示，采用碳纤维加固技术不仅可提高结构的承载能力、延长被加固结构的使用寿命，还可修复结构的损伤和缺陷，相对于传统加固方法，该技术更精细有效。

高分子材料在高温高湿环境中易发生热氧降解，导致分子链断裂并引发脆化、分层及黄变等老化现象，直接影响塑料管材的工程适用性。刘德俊等^[14]选取交联聚乙烯（PEX）、耐热聚乙烯（PE-RT）和高密度聚乙烯（PE100）三类材料开展对比研究，通过90℃热水加速老化实验发现，经过90天热老化后，三类材料的热力学性能均呈现衰退趋势，其中PEX因交联结构形成的三维网络可有效抑制分子链断裂，展现出最优性能保持率，其拉伸强度维持在20MPa以上，维卡软化温度超过85℃，220℃氧化诱导时间达20min，证实其作为耐高

温复合管内衬材料的工程可行性。

3.3 环保与可持续性

环保与可持续发展理念是工程材料领域创新与转型的核心驱动力,其要求材料研发、生产及应用全生命周期中实现资源高效利用、环境负荷最小化以及社会效益最大化。程军^[15]以聚合物为基体,以磷石膏为填料,制备了一系列磷石膏/聚合物复合管材,此方案不仅可以解决磷石膏堆存对环境的污染,而且可以对磷石膏进行回收利用。经实验证实,磷石膏与聚合物基体界面相容性良好,当掺量提升至70%时复合材料仍展现出优异的耐久性,其聚合物基排水管在350℃高温环境下质量损失率仅为5%。进一步测试管道实际应力学性能,交通荷载、流体荷载及土压力对周向应变的贡献率分别为43%、20%和11%,力学响应特征符合工程应用标准,证实了此类管材在实际市政排水系统中的适用性。

当前另一研究方向围绕绿色化工目标,开发无毒环保助剂体系,通过替代传统有害添加剂优化材料加工与服役性能,推动高分子材料向环境友好方向升级。黄宝元等^[16]研究验证了有机钙锌复合热稳定剂在PVC-U管材生产中的环保替代可行性。通过优化润滑体系与加工工艺,该稳定剂可完全取代传统铅盐体系,制备出符合国标的无铅管材。对比实验显示,新型稳定剂在关键性能指标上保持优势:维卡软化温度稳定在86.2℃,二氯甲烷浸渍后表面劣化度 $\geq 4L$,落锤冲击试验TIR值控制在10%以内,与铅盐体系性能相当。值得注意的是,采用钙锌体系的管材密度降低至1516kg/m³,拉伸强度相较对照样提升6.3%,达到43.6MPa,表明该体系兼具轻量化与增强效应。经2000h紫外加速老化测试,两种体系管材的黄变指数 Δb 值差异小于0.8,证实环保型产品在耐候性方面同样满足户外管网使用要求。该研究从力学性能、加工特性及环境适应性多维度论证了无铅化技术的工程应用价值。

3.4 智能化与功能性

为满足日益复杂的应用要求,当前高分子复合管材研究正朝着智能化和功能性方向快速发展,通过材料改性、功能添加剂引入及智能修复技术,在降噪性能优化、长效抗菌功能实现以及自修复机制开发等关键领域取得进展,显著提升了管材的综合性能并拓展了其工程应用场景。

陈永平^[17]创新性地将氯化聚氯乙烯(PVC-C)为基体的耐高温静音排水管应用在建筑高度不超100m的工业与民用建筑排水系统中。经测试,证实其在满足高强度(20℃时弹性模量为3000MPa)、安全性(自熄性)、耐腐蚀性(耐酸碱和其他腐蚀性液体)和耐高温性(维卡软化温度 $\geq 93^\circ\text{C}$)的同时具备较好的降噪效果(按水流量1L/s时的噪声测试值:48.9dB(A))。解决了耐热建筑塑料排水管道安装不够方便、管道规格不全需转换管材、管材容易燃烧等问题。

陆国强等^[18]选用银系抗菌剂以一定比例掺入PP-R材料中研制了具有抗菌性能的PP-R管材。实验结果表明,银系抗菌剂在PP-R材料中最佳添加浓度为5%,该浓度下材料对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌具有较高的杀

菌效果,在经过24h测试后其抑菌率分别为99.975%和99.985%。此外,对抗菌管材进行121℃的热处理后,其抑菌率几乎没有下降,证实抗菌管材在高温环境下具有优异的抗菌和热稳定性能。

微胶囊自修复技术通过预埋含有修复剂与催化剂的微胶囊网络,使材料在受损时触发自主修复机制:当裂纹扩展至微胶囊处,囊壁破裂释放的修复剂与基体中催化剂接触,随即引发原位聚合反应,有效填补并修复损伤部位。Jones等^[19]创新采用多巴胺包覆工艺制备热塑性微胶囊,以聚双酚A-环氧氯丙烷/环氧树脂复合体系作为双重功能相,实现裂纹自修复的同时增强了材料韧性。实验证实,该体系在180℃高温固化过程中仍能保持修复成分活性,使制备的环氧树脂基材料在高温工况下维持优异的热稳定性和自修复能力。该研究为开发适用于油气输送、化工管道等严苛环境的长寿命自修复复合材料管材提供了重要思路,确保管材在复杂应力与腐蚀环境下的耐久性和安全性。

4 结语

综上所述,高分子复合材料在给排水管道领域的应用已取得显著进展,其核心优势体现在力学性能可调性、耐腐蚀性、轻量化及功能化设计等方面。当前研究主要通过基体材料优化、增强相复合设计及功能添加剂引入等手段,实现管材的综合性能提升,兼顾给排水功能需求与绿色低碳发展目标。

未来高分子复合管材的发展在力学性能方面需优化纤维与基体界面结合机制,发展多尺度力学模拟与智能自适应材料以应对复杂荷载;针对耐久性与老化性,应建立多因素耦合老化评价体系,开发原位监测技术与可逆交联树脂以延长寿命并实现回收;环保与可持续性领域需推动生物基材料、废弃物高值化利用及低碳制造工艺,构建全生命周期绿色产业链;智能与功能性方向则需突破多功能集成技术、光响应抗菌剂及环境刺激响应材料,结合人工智能加速材料设计与应用升级,进而推动管材向高性能、长寿命、环境友好与智能感知的一体化方向跨越。

参考文献

- [1] 冯锦华. 给排水管道施工中容易出现的问题与对策[J]. 城市建设理论研究(电子版),2024(27):130-132.
- [2] 陈稳超. 试析建筑给排水管道安装施工技术要点[J]. 建材与装饰,2020(1):39-40.
- [3] 陈健. 新型塑料给排水管材的特点及应用前景[J]. 山西建筑,2007(32):168-170.
- [4] 王伟,黄榜,曾建梅,等. 关于我国塑料排水管道企业标准的现状分析[J]. 轻工标准与质量,2024(1):53-55.
- [5] 王刚,邹静蓉,李嘉慧,等. 新型排水管在渗沟结构中的排水性能试验研究[J]. 中外公路,2023,43(6):32-36.
- [6] 赵德源,徐杰,王峥,等. 改性环氧树脂喷涂技术在排水管道非开挖修复中的应用研究[J]. 施工技术,2024,53(12):113-117.
- [7] 王全龙,郭明杰,杨金辉,等. 高性能聚氯乙烯轴中空壁管道在城市排水工程中的应用[J]. 给水排

- 水,2022,58(S1):406-411.
- [8] 傅小坚, 张晓楠, 阮伟东, 等. 钢丝网骨架聚乙烯管凹陷力学性能研究 [J]. 低温建筑技术, 2024,46(9):41-44.
- [9] 邓宗梁. 浅谈内肋增强聚乙烯 (PE) 螺旋波纹管的性能特点和应用 [J]. 福建建材, 2017(1):49-50.
- [10] 杨静, 李欣. 碳纤维增强高密度聚乙烯复合材料的力学性能和耐久性能研究 [J]. 塑料科技, 2024,52(5):95-97.
- [11] 孙亚颀. 建筑用聚酯玻纤复合材料的制备与性能分析 [J]. 功能材料, 2023,54(3):3174-3178.
- [12] 谢加强, 陈进, 褚绶红, 等. 耐水不饱和聚酯树脂的改性研究 [J]. 化工新型材料, 2024,52(10):126-130.
- [13] 张小婧. 碳纤维加固技术在城市给排水管道中的应用研究 [J]. 工程技术研究, 2023,8(20):78-80.
- [14] 刘德俊, 张阿昱, 刘亚明, 等. 增强热塑性塑料管材高温水浴老化性能研究 [J]. 塑料工业, 2021,49(1):98-101.
- [15] 程军. 磷石膏聚合物复合材料在建筑排水管道中的应用 [J]. 城市建设理论研究 (电子版), 2024(1):140-142.
- [16] 黄宝元, 陈宏, 冯济斌, 等. 新型有机钙锌热稳定剂在硬质聚氯乙烯管道中的应用研究 [J]. 塑料助剂, 2020(4):25-29.
- [17] 陈永平. 建筑用新型耐温静音塑料排水管材应用探讨 [J]. 给水排水, 2023,59(S2):789-791,79.
- [18] 陆国强, 王迪, 廖欢. 银系抗菌剂在无规共聚聚丙烯 (PP-R) 中的抗菌性能研究 [J]. 广东化工, 2024,51(22):34-35.
- [19] JONES A R, WATKINS C A, WHITE S R, et al. Self-healing thermoplastic-toughened epoxy [J]. Polymer the International Journal for the Science & Technology of Polymers, 2015,74:254-261.

(上接第 62 页)

- [15] BAE M, LEE H, CHOI G, et al. An Effective Expanded Graphite Coating on Polystyrene Bead for Improving Flame Retardancy [J]. Materials, 2021,14(21):6729.
- [16] DONG F H, WANG Y Q, WANG S B, et al. Flame-retarded polyurethane foam conferred by a bio-based nitrogen-phosphorus-containing flame retardant [J]. Reactive and Functional Polymers, 2021,168:105057.
- [17] LIAN R C, OU M Y, GUAN H C, et al. Facile fabrication of multifunctional energy-saving building materials with excellent thermal insulation, robust mechanical property and ultrahigh flame retardancy [J]. Energy, 2023,277:127773.
- [18] YUAN Y, XU L L, WANG W. Tri-phase flame retardant system towards advanced energy-saving building materials with highly efficient fire and smoke toxicity reductions [J]. Construction & Building Materials, 2024,433:136719.
- [19] 刘秀玉, 张冰, 张浩, 等. 基于 TG-FTIR 与 XPS 的硬质聚氨酯泡沫 / 膨胀石墨复合材料阻燃机理研究 [J]. 光谱学与光谱分析, 2020,40(05):1626-1633.
- [20] 洪晓东, 代文娟. 含磷阻燃剂阻燃硬质聚氨酯泡沫塑料的性能研究 [J]. 工程塑料应用, 2013,41(08):95-99.
- [21] 尚欣宇, 毕晓柯, 谭海彦, 等. 木质素和焦磷酸哌嗪复合膨胀型阻燃剂对环氧树脂材料阻燃性能的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2023,51(06):140-145.
- [22] 吴唯, 王佳玮, 张雪薇, 等. 二氧化钛纳米管对环氧树脂膨胀阻燃体系的协效阻燃作用 [J]. 功能高分子学报, 2018,31(1):88-94.
- [23] SHAO Z B, CUI J, LIN X B, et al. In-situ coprecipitation formed Fe/Zn-layered double hydroxide/ammonium polyphosphate hybrid material for flame retardant epoxy resin via synergistic catalytic charring [J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2022,155:106841.

《合成材料老化与应用》杂志投稿邮箱: hccllhyyy@163.com

欢迎 QQ: 3939249835 在线投稿