

聚乙烯醇纤维增强磷建筑石膏基复合材料性能优化研究

谢舒成

(四川建筑职业技术大学, 四川 德阳 618000)

摘要: 磷建筑石膏作为工业副产资源化利用的绿色建材, 具备质轻、防火、保温等优势, 但固有脆性大、抗裂能力不足等缺陷限制了其工程应用。本文以聚乙烯醇(PVA)纤维为增强相, 制备PVA纤维改性磷建筑石膏基复合材料, 系统探究纤维掺量、长度及分散状态对复合材料力学性能、耐水性能与耐候性能的影响规律, 分析纤维桥接、拔出等增强机理, 并对材料制备工艺、成本管控方案进行优化。试验结果表明, 适量掺入PVA纤维可显著改善基体脆性, 提升复合材料强度、韧性与长期服役性能。研究成果可为高性能磷石膏基绿色建材的研发及工程推广提供试验依据与技术参考。

关键词: 磷建筑石膏; 聚乙烯醇纤维; 力学性能; 工艺优化

中图分类号: TU528.57 **文献标识码:** A **文章编号:** 3134-9781(2026)04-0001-03

磷建筑石膏是磷肥工业生产过程中产生的固体副产物, 将其资源化制备为建筑石膏, 既能够消解工业固废、保护天然石膏矿产资源, 也契合建筑行业低碳、绿色发展的主流方向。传统磷建筑石膏制品耐火、隔声性能优良, 制备工艺简单, 然而材料本身脆性特征显著, 受荷载作用时易产生裂缝, 耐水、耐候性能偏弱, 难以应用于外墙、户外构件等复杂工况, 制约了该材料的规模化应用^[1]。

纤维增强是改善无机胶凝材料脆性、提升综合性能的有效手段。聚乙烯醇(PVA)纤维具备强度高、模量适中、亲水性好、化学稳定性强等特点, 与石膏基体界面结合效果优异, 是无机胶凝材料理想的增强纤维。目前国内外已有诸多研究证实, PVA纤维可有效提升混凝土、普通建筑石膏的抗裂性与韧性, 但其针对磷建筑石膏体系的适配性、作用机理及成套制备工艺仍有待系统完善。

为充分挖掘磷建筑石膏的应用潜力, 本文开展PVA纤维增强磷建筑石膏基复合材料的试验研究。通过设计多组对照试验, 分析纤维参数对材料宏观性能的影响, 结合微观观测揭示增强机制, 同时优化纤维分散、成型养护等关键工序, 制定合理的成本控制方案。研究旨在解决磷建筑石膏脆性大、耐久性差等问题, 推动工业副产磷石膏在建筑工程中的高值化利用。

1 试验原料与试验方法

1.1 试验原材料

试验所用基体材料为工业副产磷建筑石膏, 经煅烧、除杂、粉磨处理后使用; 增强材料选用商用PVA短切纤维, 纤维抗拉强度高, 表面富含羟基, 亲水性

良好; 辅助外加剂包括缓凝剂、减水剂、表面活性剂, 用于调控浆体工作性能与纤维分散效果; 试验用水为城市自来水。

1.2 试件制备与养护

磷建筑石膏基体采用湿法工艺制备, 控制反应温度80~90℃, 体系pH值维持在7.5~8.0, 掺入占石膏质量0.3%的缓凝剂, 将初凝时间调控至60min左右, 满足施工操作要求。按照预设配比依次称量磷石膏、PVA纤维、外加剂与水, 先将干粉物料预混, 再加水搅拌; 针对纤维易团聚问题, 采用机械搅拌+超声波分散复合工艺, 超声波功率100W, 分散时长5min, 保障纤维在浆体中均匀分布^[2]。

将搅拌完成的浆体注入标准模具, 经静压成型后静置脱模, 在标准养护环境下养护至规定龄期, 开展各项性能测试。试验设置空白对照组(未掺纤维)与多组纤维改性组, PVA纤维掺量按体积分数设置为0.5%、1%、1.5%、2%、3%、5%, 纤维长度选取3mm、6mm、9mm三个梯度, 开展变量对照试验。

1.3 测试项目与表征手段

采用万能材料试验机开展抗压、抗拉、三点弯曲试验, 测定复合材料力学强度与韧性; 开展浸水试验、多水源浸泡试验评价材料耐水性能; 利用气候模拟试验箱进行紫外线老化、温湿度循环及冻融试验, 分析材料耐候性能; 借助扫描电子显微镜(SEM)观测复合材料微观形貌、纤维分布状态以及纤维与基体的界面结合情况; 结合断裂力学理论分析材料破坏模式与纤维增强机理^[3]。

2 PVA纤维理化特性及增强机理

2.1 PVA纤维基本特性

PVA纤维分子链中含有大量羟基官能团,赋予材料优异的亲水性,纤维与磷石膏浆体可实现良好浸润,硬化后二者界面粘结强度较高。该纤维拉伸强度可达数百兆帕,柔韧性、耐热性与耐候性良好,在常规建筑服役环境中性能稳定。同时,PVA纤维耐酸碱腐蚀,与磷建筑石膏的化学相容性佳,不会与基体发生不良反应,是适配石膏基材料的优质增强相。

2.2 纤维增强作用机理

PVA纤维对磷建筑石膏基体的增强作用主要体现在桥联效应与拔出耗能效应。当复合材料承受外力作用、基体内部萌生微裂纹时,跨越裂纹的PVA纤维可承担部分应力,传递荷载并约束裂纹扩展,即纤维桥联效应,有效提升材料初裂荷载与整体强度。

当外力持续增大,裂纹进一步发展,界面粘结力不足以固定纤维时,纤维会从石膏基体中缓慢拔出。该过程会持续消耗外界能量,改变材料破坏形式,使基体从单纯的脆性断裂转变为延性破坏,显著提升复合材料的韧性与抗冲击能力。纤维长度、直径以及界面结合状态,会直接影响拔出耗能效果,纤维过长易发生缠绕团聚,过短则难以发挥桥联作用,因此存在最优纤维尺寸区间。此外,均匀分散的PVA纤维可在基体内部形成三维网络结构,细化石膏晶体、降低基体孔隙率,优化材料内部微观结构,从本源上提升复合材料的致密性与整体性。

3 PVA纤维对复合材料力学性能的影响

3.1 纤维掺量对强度的影响

试验结果表明,PVA纤维掺量对复合材料抗压、抗折、抗拉强度存在显著影响,强度随纤维掺量增加整体呈现先上升后下降的变化规律。未掺纤维的空白组磷建筑石膏,抗压强度为15.0MPa,抗拉强度2.5MPa。当纤维体积掺量在0.5%~1.5%区间内,材料强度持续提升:掺量1%时,复合材料抗压强度提升20%,抗折强度提升15%,增强效果最为突出。

当纤维掺量超过2%后,过量纤维难以在浆体中均匀分散,出现团聚、缠绕现象,基体内部引入大量缺陷与孔隙,应力集中问题加剧,复合材料各项强度逐步下降。综合力学试验数据确定,PVA纤维在磷建筑石膏基体中的合理掺量区间为1%~2%。

3.2 纤维长度与分布对韧性的影响

固定纤维掺量为1.5%,分别采用3mm、6mm、9mm三种长度纤维开展对比试验。结果显示,纤维长度6mm

时,复合材料韧性提升效果最优,相较于空白组韧性提升30%左右。3mm短纤维桥接跨度有限,阻裂能力较弱;9mm长纤维易发生缠绕,分散难度大,易形成内部缺陷,反而削弱增韧效果。

纤维分布状态同样是影响韧性的关键因素。采用超声波分散工艺后,纤维分散均匀度大幅提升,基体内部三维网络结构完整,裂纹扩展路径被不断偏转、阻断,材料抗裂能力显著增强。人为预制初始裂缝开展扩展试验可知,纤维均匀分布的试件,裂纹扩展速率更慢、扩展路径更曲折,抗裂性能远优于纤维团聚的试件。

3.3 材料破坏模式变化

纯磷建筑石膏试件受力后无明显塑性变形,裂纹出现后迅速贯通,呈现典型脆性破坏。掺入适量PVA纤维后,试件达到极限荷载后不会瞬间断裂,依旧具备一定承载能力,破坏形式转变为延性破坏。结合断裂力学分析,纤维的介入有效提升了材料应力强度因子,延缓了微裂纹的萌生与发展,改善了基体固有的脆性缺陷^[3]。

4 PVA纤维对复合材料耐久性的改善

4.1 耐水性能

石膏基材料孔隙率较高,水分易沿孔隙渗入基体,造成强度衰减。浸水试验表明,掺入3%PVA纤维的复合材料,吸水率较空白组降低20%。一方面,纤维形成的网络结构细化了基体孔隙,延长了水分渗透路径,发挥物理阻隔作用;另一方面,PVA纤维与石膏界面结合紧密,减少了界面缝隙,降低了水分侵入通道。

分别采用自来水、雨水、海水开展长期浸泡试验,改性复合材料均表现出更优的稳定性。PVA纤维耐盐蚀、耐水溶胀性能良好,在海水环境中可有效抵御氯离子侵蚀,适用于潮湿、滨海等水环境工况。同时,纤维优化了石膏晶体排布,基体整体致密性提升,进一步强化了抗水侵蚀能力^[4]。

4.2 耐候性能

模拟户外自然环境开展加速老化试验,设置紫外线辐射、高低温循环、湿度交变等工况,持续试验12个月。试验结束后,未改性磷石膏试件外观色差明显,强度保留率仅78%;PVA纤维改性试件颜色变化率仅2.1%,抗压强度保留率达到92%。

50次冻融循环试验结果显示,纤维增强试件未出现表层剥落、裂纹扩张等病害,结构完整性良好。PVA纤维可缓冲温度、冻融循环产生的温度应力,约束基体体积变形,避免微裂纹在循环荷载下持续发育,显著提升材料户外耐候能力^[6]。

4.3 长期使用性能预测

基于加速老化试验数据,采用Weibull分布模型对复合材料长期性能进行预测。在95%置信水平下,该复合材料服役50年,整体强度损失不超过15%;模拟20年自然老化工况,强度保留率高于90%。多因素耦合老化试验证实,在温湿度、化学侵蚀等复杂环境共同作用下,改性复合材料依旧能够满足建筑构件的耐久性设计要求。

5 制备工艺优化与成本控制

5.1 纤维分散工艺优化

纤维团聚是影响复合材料性能的主要工艺难题。传统单一机械搅拌难以实现高掺量纤维的均匀分散,本研究采用机械搅拌+超声波+表面活性剂复合分散体系:添加纤维质量1%的表面活性剂,降低纤维表面张力,再配合100W超声波分散5min,可有效打散纤维束。优化后纤维分散均匀度提升30%,复合材料抗折强度同步提升15%。该工艺操作简便、附加成本低,适合规模化生产。

5.2 成型与养护工艺优化

对成型压力、模具工艺及养护制度进行优化,确定最佳静压成型压力区间,在压实浆体的同时避免纤维受压断裂。引入自动化生产线,实现配料、搅拌、成型、养护全流程自动化,减少人为操作误差,产品合格率与生产效率提升近一倍。低温慢速干燥工艺替代传统高温烘干,规避快速脱水引发的内应力与微裂纹,进一步保障成品质量。

5.3 原材料选型与成本管控

原材料成本是制约该材料推广的重要因素。基体

选用工业副产磷建筑石膏,替代天然石膏,降低原材料成本,同时实现固废资源化;纤维优先选用国产高性价比PVA短切纤维,在保证力学性能的前提下,降低采购成本。结合最优纤维掺量进行配比设计,在性能达标的前提下减少纤维用量。同时依托自动化工艺降低废品率与物料损耗,综合实现性能与成本的平衡,提升产品市场竞争力。

6 结论

PVA纤维可有效改善磷建筑石膏的脆性缺陷,通过桥联效应与拔出耗能效应提升复合材料强度、韧性与抗裂性能。后续可开展纤维表面纳米改性研究,进一步强化纤维——基体界面结合强度,同时开展材料全生命周期研究,探索废旧复合材料的回收与再生利用工艺,推动磷石膏基绿色建材实现可持续发展。

参考文献:

- [1] 姜浙江,安红芳,廖正毅,等.碳酸钙晶须对脱硫石膏基复合胶凝材料性能的影响[J].应用化工,2023,52(10):2766-2770.
- [2] 石泽雨,陈秋月,赵文翰,等.磷石膏领域研究展望[J].中国环境科学,2026,46(5):2594-2609.
- [3] 王思骅,汤骥,王锦,等.聚乙烯醇纤维对磷建筑石膏性能影响的试验研究[J].四川水泥,2025,(4):20-23.
- [4] 李何潇,陶忠,黄荣贵.PVA纤维-工程磷建筑石膏基复合材料砌体力学性能试验研究[J].材料导报,2025,39(S2):362-368.
- [5] 唐浪,陶忠.纤维对磷石膏基复合材料工作性能的影响研究现状[J].材料导报,2025,39(S1):408-414.
- [6] 宁兴桃,陶忠,黄荣贵,等.聚乙烯醇纤维对磷建筑石膏基复合材料性能的改善研究[J].材料导报,2024,38(S2):646-650.

Optimization of Properties of Polyvinyl Alcohol Fiber-Reinforced Phosphogypsum-Based Composites

Xie Shucheng

(Sichuan Vocational and Technical University of Architecture, Deyang, Sichuan 618000)

Abstract: Phosphogypsum for construction, as a green building material produced through the resource utilization of industrial by-products, offers advantages such as light weight, fire resistance, and thermal insulation. However, its inherent high brittleness and insufficient crack resistance limit its engineering applications. In this study, polyvinyl alcohol (PVA) fibers were used as the reinforcing phase to prepare PVA fiber-modified phosphogypsum-based composites. The effects of fiber content, length, and dispersion state on the mechanical properties, water resistance, and weather resistance of the composites were systematically investigated. Reinforcement mechanisms, including fiber bridging and pullout, were analyzed, and the material preparation process and cost control scheme were optimized. The experimental results show that the incorporation of an appropriate amount of PVA fibers can significantly improve matrix brittleness and enhance the strength, toughness, and long-term service performance of the composites. The research findings can provide an experimental basis and technical reference for the development and engineering application of high-performance phosphogypsum-based green building materials.

Keywords: phosphogypsum for construction; polyvinyl alcohol fiber; mechanical properties; process optimization