

石灰石粉预涂胶屑及硅灰两阶段法提升橡胶水泥砂浆性能研究

黄 方, 郭有蒙

中国市政工程中南设计研究总院有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年3月27日; 录用日期: 2025年4月18日; 发布日期: 2025年4月28日

摘 要

本研究聚焦于石灰石粉(LP)预涂胶屑及硅灰(SF)两阶段法对橡胶水泥砂浆性能的影响。通过一系列实验, 探究了不同掺量的LP预涂胶屑和SF对砂浆抗压强度、抗折强度、耐磨性、水泥浆-胶屑界面及吸附性能的作用规律。结果表明, 该两阶段法有效改善了橡胶-水泥基质界面, 提升了砂浆的力学性能和耐磨性, 降低了吸附性。在特定掺量下, 含SF和10% LP预涂胶屑的混合物抗压强度与基准相当, 抗折强度更高。研究成果为橡胶水泥砂浆在建筑领域的广泛应用提供了理论依据和技术支持。

关键词

石灰石粉, 硅灰, 橡胶水泥砂浆, 界面特性, 力学性能, 吸附性能

Study on Improving the Properties of Rubber Cement Mortar by Using Two Stages of Limestone Powder Precoating with Rubber Dust and Silica Fume

Fang Huang, Youmeng Guo

Central & Southern China Municipal Engineering Design and Research Institute Co., LTD, Wuhan Hubei

Received: Mar. 27th, 2025; accepted: Apr. 18th, 2025; published: Apr. 28th, 2025

Abstract

This study focuses on the effect of LP precoating and SF two-stage method on the properties of rubber cement mortar. Through a series of experiments, the effects of LP and SF on compressive

strength, flexural strength, wear resistance, cement-cement interface and adsorption properties of mortar were investigated. The results show that the two-stage method can effectively improve the rubber-cement matrix interface, improve the mechanical properties and wear resistance of mortar, and reduce the adsorption property. The compressive strength of the mixture containing SF and 10% LP pre-coated chips is equivalent to the standard, and the bending strength is higher. The research results provide theoretical basis and technical support for the wide application of rubber cement mortar in the construction field.

Keywords

Limestone Powder, Silica Fume, Rubber Cement Mortar, Interface Characteristics, Mechanical Properties, Adsorption Property

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球汽车产业的蓬勃发展,废旧轮胎的数量急剧增加[1]-[4]。据统计,每年全球产生的废旧轮胎数以亿计,如何有效处理这些废旧轮胎已成为环境保护和资源利用领域的重要课题。将废旧轮胎加工成胶屑,并应用于水泥基复合材料中,不仅可以解决废旧轮胎的处置难题,还能实现资源的循环利用,具有显著的环境和经济效益。

然而,橡胶水泥砂浆在实际应用中面临着诸多挑战[5]-[11]。其中,橡胶颗粒与水泥基质之间较差的界面粘结性,导致了复合材料机械强度的降低,这严重限制了橡胶水泥砂浆在建筑领域的广泛应用。许多研究表明,改善橡胶-水泥基质界面是提升橡胶水泥砂浆性能的关键所在。

在过去的研究中,众多学者尝试了各种方法来改善橡胶-水泥基质界面,如表面预处理、添加辅助胶凝材料等,但效果参差不齐。一些方法虽然在一定程度上提高了复合材料的某些性能,但整体机械强度仍难以达到预期目标,且部分方法存在成本高、工艺复杂等问题。

石灰石粉(LP)和硅灰(SF)作为常见的建筑材料添加剂[12]-[16],在改善水泥基复合材料性能方面具有潜在的优势。LP具有良好的填充效应,能够优化水泥浆体的微观结构;SF则具有较高的火山灰活性,可与水泥水化产物发生二次反应,生成更多的胶凝物质,增强材料的密实度。本研究创新性地采用LP预涂胶屑和SF的两阶段法,旨在探索一种高效、经济的提升橡胶水泥砂浆性能的方法。

2. 实验材料及方法

2.1. 实验材料

本实验选用普通硅酸盐水泥(OPC)作为胶凝材料,其物理化学性能指标符合标准。硅灰(SF)作为辅助胶凝材料,具有较高的活性和比表面积,能够有效改善水泥浆体的微观结构。石灰石粉(LP)用于预涂胶屑,其粒径细小,能够在胶屑表面形成一层均匀的包覆层。

细骨料采用符合规范要求的标准砂,其颗粒形状规则、级配良好。胶屑由机械破碎废旧轮胎获得,通过筛分分析其粒径分布,结果显示约86%的胶屑颗粒粒径小于2.3 mm。

在预涂过程中,LP和水的用量分别为胶屑质量的15%和5.25%。将胶屑、水和LP在搅拌机中低速搅拌均匀,然后将预涂后的胶屑在空气中干燥24小时,并储存于塑料袋中备用。

2.2. 试验设计

本实验设计了多组不同配合比的砂浆试件, 以研究 LP 预涂胶屑和 SF 对橡胶水泥砂浆性能的影响。具体配合比如表 1 所示:

Table 1. Design of mix proportion
表 1. 配合比设计

混合物名称	细骨料体积替代率(%)	水泥替代率(%)	各材料用量(g)				
			水	水泥	硅灰	细骨料	胶屑
R	0	0	242	500	-	1375	0
A5	5	0	242	500	-	1306	28.5
A10	10	0	242	500	-	1238	57.1
A15	15	0	242	500	-	1169	85.6
C5	5	0	242	500	-	1306	28.5
C10	10	0	242	500	-	1238	57.1
C15	15	0	242	500	-	1169	85.6
C5 + SF	5	10	242	450	37	1306	28.5
C10 + SF	10	10	242	450	37	1238	57.1
C15 + SF	15	10	242	450	37	1169	85.6

注: “R”代表基准混合物(Reference mixture), 即不含有胶屑的普通砂浆试件。“A”代表含有未经过 LP 预涂处理胶屑的混合物(As-received crumb rubber mixtures)。其中, A5、A10、A15 中的数字表示胶屑替代细骨料的体积百分比分别为 5%、10%、15%。“C”代表含有 LP 预涂胶屑的混合物(Limestone Powder pre-coated crumb rubber mixtures)。同样, C5、C10、C15 里的数字代表 LP 预涂胶屑替代细骨料的体积百分比为 5%、10%、15%。设置这组混合物, 目的是探究 LP 预涂胶屑对砂浆性能的作用。而像 C5 + SF、C10 + SF、C15 + SF, 则表示在含有对应比例 LP 预涂胶屑的基础上, 又添加了 10%水泥替代率的硅灰(Silica Fume, 缩写为 SF), 用于研究 LP 预涂胶屑和 SF 共同作用时对橡胶水泥砂浆性能的影响。

2.3. 测试方法

2.3.1. 抗压强度测试

采用 50 mm × 50 mm × 50 mm 的立方体试件, 每组制备 3 个试件。在试件养护 28 天后, 使用压力试验机以 1.7 kN/s 的加载速率进行加载, 直至试件破坏, 记录破坏荷载并计算抗压强度。

2.3.2. 抗折强度测试

制作 40 mm × 40 mm × 160 mm 的棱柱体试件, 每组 4 个。在试件养护 28 天后, 采用三分点加载方式, 以 0.072 mm/min 的加载速率进行测试, 记录破坏荷载并计算抗折强度。

2.3.3. 耐磨性测试

使用 100 × 52 mm 的圆柱体试件, 每组 3 个。试件在切割辊转速为 200 rpm、压力为 98 N 的条件下, 每个面研磨 2 分钟。测试结束后, 称量试件的质量损失, 计算质量损失率以评估耐磨性。

2.3.4. 吸附性测试

采用 50 mm × 50 mm × 50 mm 的立方体试件, 每组 3 个。将试件的浇筑面浸入 3.5 mm 深的水中, 分别在 0.25、1、4 和 24 小时测量其吸水量, 计算吸水速率以评估吸附性。

3. 结果及分析

3.1. 抗压强度

不同配合比砂浆试件的抗压强度测试结果如图 1 所示。从图中可以看出，随着胶屑掺量的增加，橡胶水泥砂浆的抗压强度呈下降趋势。其中，A5、A10 和 A15 试件的抗压强度分别为基准试件 R 的 85.6%、75.2%和 62.3%。这主要是由于胶屑与水泥基质之间的界面粘结性较差，导致在受力过程中容易产生应力集中，同时胶屑的加入增加了混合物的孔隙率，降低了材料的密实度。

对于含有 LP 预涂胶屑的试件，其抗压强度有所改善。C5、C10 和 C15 试件的抗压强度分别为基准试件 R 的 89.6%、81.6%和 67.7%。这是因为 LP 预涂在胶屑表面，在一定程度上改善了胶屑与水泥基质之间的界面过渡区，增强了界面粘结力。

当同时添加 LP 预涂胶屑和 SF 时，抗压强度得到了更显著的提升。C5 + SF、C10 + SF 和 C15 + SF 试件的抗压强度分别为基准试件 R 的 104%、96.8%和 75.2%。这得益于 SF 的火山灰反应，生成了更多的胶凝物质，填充了孔隙，使基体更加致密，同时 LP 与 SF 的协同作用进一步改善了橡胶 - 水泥浆体颗粒界面，从而有效提高了抗压强度。

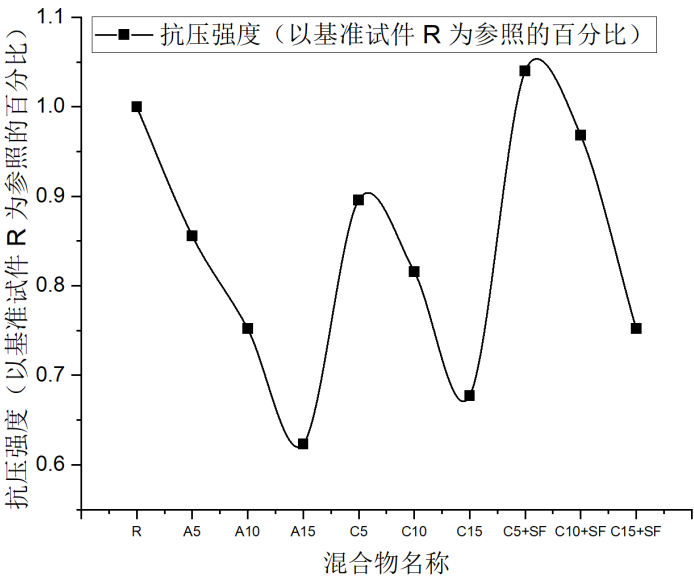


Figure 1. Compressive strength test results of mortar specimens with different mix ratios

图 1. 不同配合比砂浆试件的抗压强度测试结果

3.2. 抗折强度

抗折强度测试结果如图 2 所示。与抗压强度趋势相似，随着胶屑掺量的增加，橡胶水泥砂浆的抗折强度逐渐降低。A5、A10 和 A15 试件的抗折强度分别为基准试件 R 的 96.2%、86.5%和 71.2%。

含有 LP 预涂胶屑的试件抗折强度变化不明显，C5、C10 和 C15 试件的抗折强度与含有未预涂胶屑的对应试件相近。然而，当添加 SF 后，抗折强度显著提高。C5 + SF、C10 + SF 和 C15 + SF 试件的抗折强度分别为基准试件 R 的 119.2%、109.6%和 96.2%。这表明 SF 的加入不仅改善了基体的微观结构，还增强了橡胶 - 水泥浆体颗粒界面的韧性，使材料在受弯时能够承受更大的变形而不发生断裂。

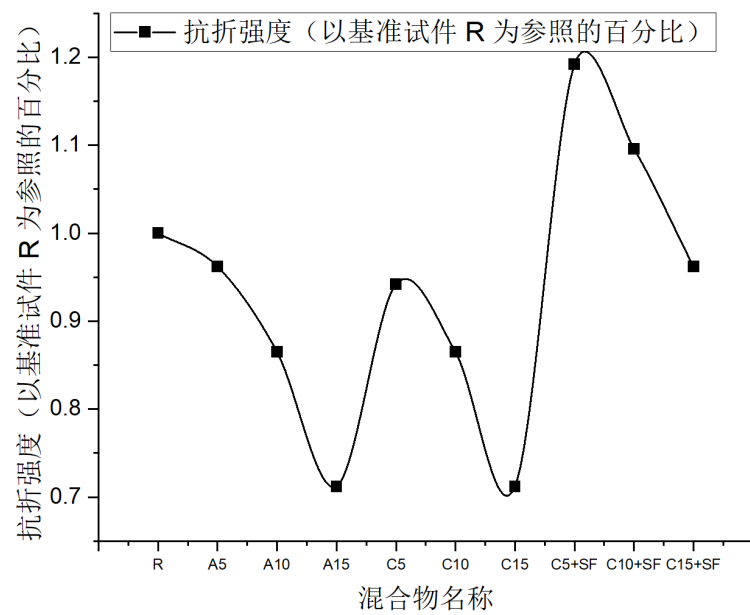


Figure 2. Bending strength test results of mortar specimens with different mix ratios
图 2. 不同配合比砂浆试件的抗折强度测试结果

3.3. 耐磨性能

耐磨性测试结果以质量损失率表示，如图 3 所示。所有橡胶水泥砂浆试件的质量损失率均高于基准试件 R，表明胶屑的加入降低了材料的耐磨性。A5、A10 和 A15 试件的质量损失率分别为 0.25%、0.40% 和 0.42%，而基准试件 R 的质量损失率仅为 0.13%。这是因为在研磨过程中，胶屑容易从试件表面脱落，形成孔隙，加速了材料的磨损。

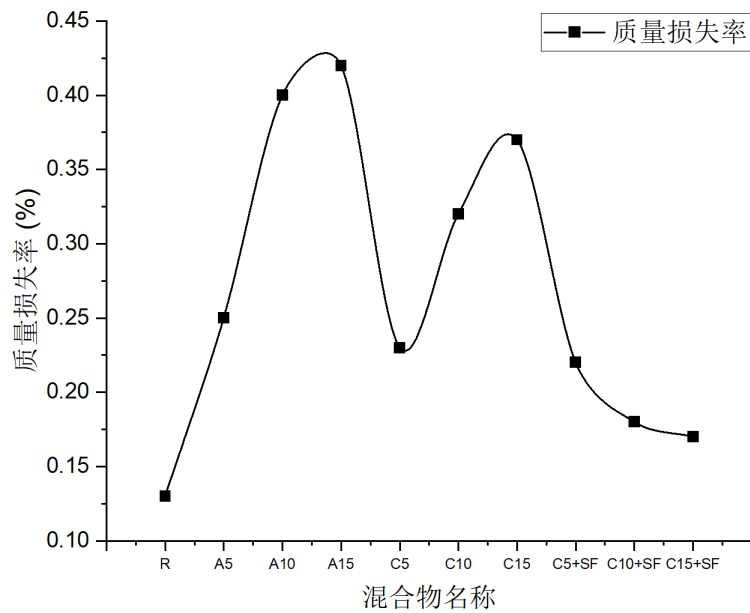


Figure 3. Quality loss of mortar specimens with different mix ratio after wear test
图 3. 不同配合比砂浆试件的磨损试验后质量损失

LP 预涂胶屑对耐磨性有一定的改善作用, C5、C10 和 C15 试件的质量损失率分别为 0.23%、0.32% 和 0.37%。当同时添加 LP 预涂胶屑和 SF 时, 耐磨性得到了更明显的提升。C5 + SF、C10 + SF 和 C15 + SF 试件的质量损失率分别为 0.22%、0.18%和 0.17%。这主要是由于 LP 和 SF 的协同作用增强了橡胶 - 水泥浆体颗粒界面的粘结力, 使胶屑更牢固地结合在基体中, 减少了胶屑的脱落, 从而提高了材料的耐磨性。

3.4. 吸附性能

吸附性测试结果如图 4 所示。随着胶屑掺量的增加, 橡胶水泥砂浆的吸水速率逐渐降低。A5、A10 和 A15 试件在 24 小时后的吸水速率分别比基准试件 R 降低了 24.3%、43.0%和 51.7%。这是因为胶屑的加入增加了混合物中的气孔含量, 降低了毛细管压力, 从而减少了水分的吸收。

LP 预涂胶屑对吸水速率的影响较小, C5、C10 和 C15 试件在 24 小时后的吸水速率与含有未预涂胶屑的对应试件相近。然而, 添加 SF 后, 吸水速率进一步降低。C5 + SF、C10 + SF 和 C15 + SF 试件在 24 小时后的吸水速率分别比基准试件 R 降低了 29.4%、47.6%和 59.2%。这是由于 SF 的火山灰反应生成了更多的凝胶物质, 填充了孔隙, 细化了孔径, 降低了孔隙的连通性, 从而有效提高了材料的抗渗性, 减少了水分的吸收。

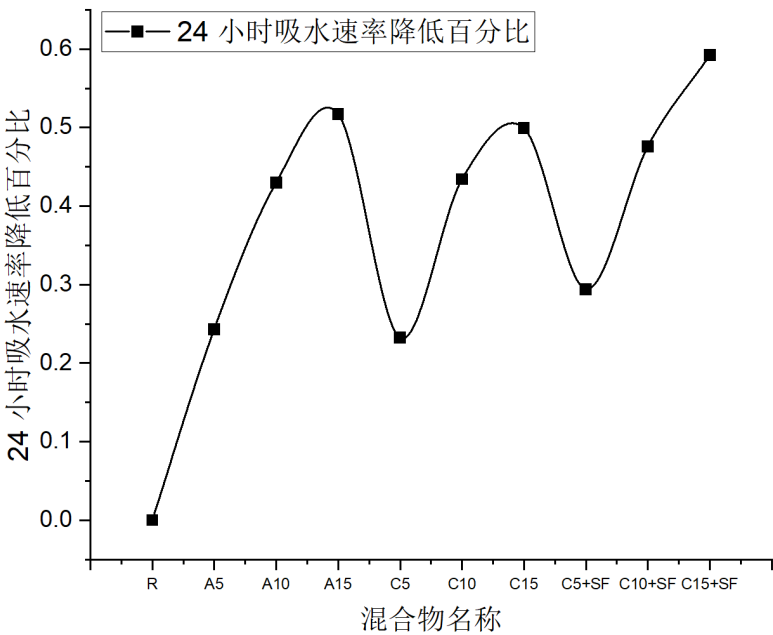


Figure 4. Test results of adsorbability of mortar specimens with different mix ratios
图 4. 不同配合比砂浆试件的吸附性测试结果

4. 结语

本研究通过实验深入探究了石灰石粉预涂胶屑及硅灰两阶段法对橡胶水泥砂浆性能的影响, 得出以下主要结论:

(1) 胶屑的加入会降低橡胶水泥砂浆的抗压强度、抗折强度和耐磨性, 但石灰石粉预涂胶屑和硅灰的两阶段法能够有效改善橡胶 - 水泥基质界面, 提升材料的力学性能和耐磨性。在含有 10% LP 预涂胶屑和 SF 的混合物中, 抗压强度与基准相当, 抗折强度比基准提高了约 10%~19%。

(2) 胶屑的加入降低了橡胶水泥砂浆的吸附性, 随着胶屑掺量的增加, 吸水速率明显降低。同时, SF 的加入进一步提高了材料的抗渗性, 使吸水速率降低更为显著, 最大降低幅度可达 59.2%。

(3) 石灰石粉预涂胶屑及硅灰两阶段法是一种有效的提升橡胶水泥砂浆性能的方法, 在实际工程应用中具有潜在的应用价值, 为废旧轮胎在建筑材料领域的大规模应用提供了新的途径和理论依据。

未来的研究可以进一步优化两阶段法的工艺参数, 探索不同类型橡胶屑和添加剂的组合效果, 以及研究该方法在不同环境条件下的长期性能稳定性, 为橡胶水泥砂浆的广泛应用提供更全面的技术支持。

参考文献

- [1] 黄海延, 李子锋, 徐刘杰, 王超, 高宁博, 宋庆彬. 废旧轮胎裂解炼油中试技术、环境及经济评估[J]. 中国环境科学, 2024, 44(5): 2916-2922.
- [2] 何宏伟, 崔晨, 马杰, 靳雨诗, 马青原, 李长河. 废旧轮胎高值化综合利用研究现状[J]. 橡胶科技, 2025, 23(1): 5-9.
- [3] 梁声振, 殷进, 贾晓曼, 李伟, 尤兴萌. 废旧轮胎热解炭黑资源化研究进展[J]. 化工新型材料, 2024, 52(9): 231-236.
- [4] 岳红亚, 毕玉峰, 徐润, 张常勇, 丁婷婷, 李怀峰, 刘晓威, 宋修广. 废旧轮胎在道路工程中的应用研究进展[J]. 材料导报, 2022, 36(16): 76-86.
- [5] 张金松, 唐雨轮, 占佳佳, 庞建勇. 动静加载下微硅粉-橡胶/水泥砂浆的力学性能[J]. 复合材料学报, 2024, 41(8): 4287-4298.
- [6] 杨荣周, 徐颖, 陈佩圆, 王佳. SHPB 劈裂试验下橡胶水泥砂浆的动态力学、能量特性及破坏机理试验研究[J]. 材料导报, 2021, 35(10): 10062-10072.
- [7] 杨荣周, 徐颖, 郑强强, 陈佩圆, 王佳. 分级等荷循环受压下橡胶水泥砂浆的疲劳损伤演化[J]. 建筑材料学报, 2021, 24(5): 961-969.
- [8] 杨荣周, 徐颖, 陈佩圆, 龚玖. 干、湿养护条件下橡胶水泥砂浆的静态压缩性能及损伤本构模型[J]. 中南大学学报(英文版), 2021, 28(7): 2158-2178.
- [9] 杨荣周, 徐颖, 陈佩圆, 王佳. SHPB 劈裂试验下橡胶水泥砂浆的动态力学、能量特性及破坏机理试验研究[J]. 材料导报, 2021, 35(10): 10062-10072.
- [10] 杨荣周, 徐颖, 陈佩圆. 养护湿度对橡胶水泥砂浆动态压缩破坏特征及能量耗散的影响[J]. 材料导报, 2020, 34(14): 14070-14078.
- [11] 潘瑾, 王鹏举. 纳米高岭土对橡胶水泥砂浆性能影响试验研究[J]. 四川建材, 2020, 46(8): 3-4.
- [12] 李涛, 汤鸿, 杨威, 王继果, 宗明明, 杨建明. 硅灰和石灰石粉对 MKPC 浆体力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2019, 38(11): 3512-3517.
- [13] 徐世焱, 葛唯. 硅灰和石灰石粉对碾压混凝土抗裂性能的影响[J]. 水利水电科技进展, 2018, 38(3): 54-59.
- [14] 邓懋, 申波, 吴洪梅, 陈松, 黄先桃, 谢青青. 石灰石粉含量和粒径对水泥水化热的影响[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(2): 420-428, 438.
- [15] 高桂海. 石灰石粉做矿物掺合料对水泥路面性能的影响研究[J]. 中外公路, 2021, 41(5): 283-287.
- [16] 刘晓峰, 蒋琼明. 石灰石粉对再生混凝土力学性能及抗冻性影响研究[J]. 湘潭大学自然科学学报, 2020, 42(2): 120-126.