

建筑修复用改性NHL砂浆的抗裂控制与粘结特性

李家顺^{1*}, 郝泽慧¹, 邓弘扬^{1#}, 毛智添¹, 刘建军², 徐涛²

¹武汉轻工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉

²武汉市天时建筑工程有限公司, 湖北 武汉

收稿日期: 2025年5月24日; 录用日期: 2025年6月16日; 发布日期: 2025年6月26日

摘要

本文针对历史建筑修复中天然水硬性石灰(NHL)砂浆易塑性收缩开裂、粘结性能不足等问题, 通过掺入生石灰、低碱水泥及稻壳、纸巾纤维等改性材料, 系统研究了改性NHL砂浆的抗裂性能与粘结特性。实验设计了8组配合比(C0~C7), 在实验室模拟(大风环境)和现场施工条件下, 对比分析了裂缝数量、长度、最大宽度及28 d粘结强度。结果表明: 混掺10%生石灰与10%低碱水泥(C3)可显著减少裂缝, 而进一步添加5%稻壳纤维和5%纸巾纤维(C5)可实现零开裂; 低碱水泥掺量为30% (C6)时粘结强度最优, 粘结强度达0.25 MPa。但掺量增至50% (C7组)时因体积失稳引发开裂。现场施工验证了实验室结论, 室外环境下纤维的桥连与保水作用有效抑制了恶劣气候引起的开裂。本研究为历史建筑修复提供了一种抗裂性强、相容性高且可规模化的改性NHL砂浆解决方案, 兼具文化遗产保护与工程实践价值。

关键词

历史建筑外墙修复, 天然水硬性石灰, 早期开裂, 粘结强度, 室外施工

Crack Resistance Control of Modified NHL Mortar for Building Restoration Adhesive Properties

Jiashun Li^{1*}, Zehui Hao¹, Hongyang Deng^{1#}, Zhitian Mao¹, Jianjun Liu², Tao Xu²

¹School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan Polytechnic University, Wuhan Hubei

²Wuhan Tianshi Construction Engineering Co. Ltd., Wuhan Hubei

Received: May 24th, 2025; accepted: Jun. 16th, 2025; published: Jun. 26th, 2025

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 李家顺, 郝泽慧, 邓弘扬, 毛智添, 刘建军, 徐涛. 建筑修复用改性 NHL 砂浆的抗裂控制与粘结特性[J]. 土木工程, 2025, 14(6): 1505-1514. DOI: 10.12677/hjce.2025.146162

Abstract

In this paper, to address the problems of natural hydraulic lime (NHL) mortar's susceptibility to plastic shrinkage and cracking and insufficient bonding performance in the restoration of historical buildings, the anti-cracking performance and bonding characteristics of the modified NHL mortar were systematically studied by mixing quicklime, low alkali cement and modified materials such as rice husk and tissue paper fiber. Eight groups of mixing ratios (C0~C7) were designed, and the number of cracks, length, maximum width and 28 d bond strength were comparatively analyzed under laboratory simulation (windy environment) and on-site construction conditions. The results show that: mixing 10% quicklime and 10% low alkali cement (C3) can significantly reduce the cracks, and further adding 5% rice husk fiber and 5% paper towel fiber (C5) can achieve zero cracking; the bond strength of low alkali cement is optimal when the dosage of low alkali cement is 30% (C6), with a bond strength of 0.25 MPa; however, the dosage is increased to 50% (C7), which triggers the cracking due to the volumetric instability. The field construction verified the laboratory conclusion that the bridging and water retention effects of fibers in the outdoor environment effectively inhibited the cracking caused by severe weather. This study provides a crack-resistant, highly compatible and scalable modified NHL mortar solution for the restoration of historic buildings, which is valuable for both cultural heritage preservation and engineering practice.

Keywords

Restoration of Facades of Historic Buildings, Natural Hydraulic Lime, Early Cracking, Bond Strength, Outdoor Construction

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

历史建筑修复不仅是对文化遗产的保护，更是对历史记忆的延续、文化传承的推动和社会经济发展的促进。但受多种[1]因素影响，留存下来的古建筑都出现不同程度的风化，在影响古建筑长久保留下去[2]。因石灰是文物建筑建造过程中常使用的材料[3][4]，将其用于文物建筑的修复越来越受文物保护工作者的青睐。

天然水硬性石灰(NHL)具有适中的机械强度，便于施工，利于水气交换而使得墙体透气呼吸，防水性很好，并能与被加固材料很好地相容[5]。NHL 作为一种建筑修复材料能够被应用于历史建筑砌体墙表面的修复当中。我国关于天然水硬性石灰的研究起步较晚，最早对 NHL 进行详细研究介绍的是彭反三博士[3]，但目前国内对于天然水硬性石灰的研究不够成熟。国内建筑修复用材料主要源于德赛堡 NHL2。尽管天然水硬性石灰在文物建筑修复领域效果优异，但部分性能仍需改进[6]。

历史建筑修复过程中，由于室外环境条件恶劣，总是伴有大风、降雨、暴晒等气候条件，在使用了 NHL 砂浆涂抹于待修复历史建筑砌体墙砖面后，由于墙体可能存在与历史建筑不兼容现象，通常会出现修复材料上墙后脱落现象[7]。在 NHL 的制备和硬化过程中，塑性收缩和开裂问题一直是亟待解决的关键挑战之一。同时，在未进行养护条件下，墙面容易出现开裂情况。NHL 的塑性收缩开裂不仅影响文物建筑外观，影响美观性。还可能导致结构的力学性能下降，甚至危及修复工程的长期稳定性[8]。

相关学者将混凝土领域常用的材料用于天然水硬性石灰改性。掺和料的加入可以增大塑性收缩抗拉

强度,从而提高抗裂指数。其中,生石灰起到了膨胀作用,减少收缩,防止裂缝产生[9]。采用低水化热、低收缩性的低碱硅酸盐水泥,以降低水化热从而减少收缩低,也能够减少泛碱,同时增强强度[10]。还有相关学者将不同种类的纤维材料、植物纤维[11]用于天然水硬性石灰砂浆的改性。稻壳灰作为硬纤维,纸巾纤维作为软纤维,都能够增加强度,减少裂缝产生。纤维材料[12]可有效改善砂浆基体间的连接从而提高砂浆的弯曲强度、韧性、抗收缩开裂性能、次生裂纹性能,从而降低了收缩引起的开裂风险[13] [14]。

本文开展 NHL 砂浆的改性研究,使其更适用于修复历史建筑砌体墙。通过在 NHL 中添加掺合料、纤维并进行调色,形成一种能应用于历史建筑砌体墙表面且不会出现开裂现象的改性 NHL 砂浆。同时,通过观察改性 NHL 砂浆在墙面的修复情况和 28 d 粘结强度测试结果,探讨改性 NHL 砂浆大规模应用于实际历史建筑修复工程当中的可行性。

2. 原材料和实验方法

2.1. 原材料

以天然水硬性石灰(NHL)为主原料,通过添加生石灰、低碱水泥、稻壳纤维、纸巾纤维、等掺合料及纤维和石英砂、色粉,制备改性 NHL 砂浆。

NHL 采用石灰石、矿渣、粉煤灰和硅灰于实验室煅烧制备而成,具体材料性能如表 1 所示。生石灰的细度分别为 305 m²/kg;低碱水泥购于南昌县华禹建材厂,低碱水泥的碱含量的质量分数为 0.48%,质量符合 GB 175-2023《通用硅酸盐水泥》的规定,28 d 抗压强度为 52.5 MPa,低碱水泥的化学成分如表 2 所示;稻壳纤维为稻壳粉,购于湖北省黄冈市。纸巾纤维为普通卷纸,裁碎成长为 1~2 mm 的短小丝状。石英砂粒径为 70~110 目。

Table 1. Material properties of NHL2
表 1. NHL 的材料性能

性能	28 d 抗压强度/MPa	初凝时间/h	终凝时间/h
NHL2	8.94	19.67	36.67

Table 2. Chemical composition of low-alkali cement
表 2. 低碱水泥的化学成分

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Loss	R ₂ O
含量(%)	20.82	5.78	3.44	60.25	3.40	2.01	2.78	0.48

在制备前,需将两种纤维材料和 NHL 等原材料进行预处理。稻壳纤维需经过了(热水浸泡 1 h 后烘干),纸巾纤维需(冷水浸泡 30 min)。使用孔径为 0.075 mm 的筛网,先对 NHL 进行筛处理,以便后期砂浆上墙后颗粒少,涂抹后墙面更光滑。

2.2. 改性 NHL 砂浆的制备

先对 NHL 进行过筛处理,确保 NHL 细度,利用电子秤精确称取 NHL 100 g,按照不同实验组配合比称取不同辅助材料、添加剂及细砂。由于使用的原材料量较少,故采用手动拌合的方式,先进行 3 min 干料搅拌,随后加入一定量水后混合 2 min。当实验组包含纤维时,需最后掺入纤维搅拌 1 min。拌合总时长为 5~6 min。

本次试验的基准配合比通过课题组此前试验配合比调整得到,根据基准配合比的基础上掺加不同的掺合料和纤维,共采用 8 组配合比。其中,不掺掺合料和纤维的对照组记为 C0。单掺生石灰和低碱水泥

的, 记为 C1、C2。混掺两种掺合料记为 C3。在混掺掺合料的基础上单掺稻壳纤维, 混掺稻壳纤维和纸巾纤维记为 C4、C5。低碱水泥掺量占主原料的质量分数的 30%和 50%, 记为 C6, C7。

各实验组原材料组成如表 3 所示。

Table 3. Experimental ratios for modified NHL mortar

表 3. 改性 NHL 砂浆的实验配合比

案例	主原料/g	掺合料/g		纤维/g		石英砂/g	水灰比
	NHL	石灰	低碱水泥	稻壳	纸巾		
C0	100	0	0	0	0	300	0.4
C1		0	10	0	0		
C2		10	0	0	0		
C3		10	10	0	0		
C4		10	10	5	0		
C5		10	10	5	5		
C6		0	30	0	0		
C7		0	50	0	0		

2.3. 施工方法与环境

将上述实验组 C0~C7 改性 NHL 砂浆应用于砖面修复当中, 在涂抹前先对墙面风化层进行清理, 使用刮刀将砂浆分层多次均匀涂抹于砖面上, 使改性 NHL 砂浆与砖表面紧密贴合。同时, 在实验室环境下施工过程中打开风扇, 风扇转速为 1420 次/min, 模拟室外大风环境, 并对各组的开裂情况进行记录。记录各组 24 h 时的裂缝数量, 裂缝长度和最大宽度作为混凝土开裂评价指标[15]。裂缝长度视为各条裂缝端部折线的长度之和并用直尺测量, 同时使用裂缝观测仪沿裂缝走向测量各时间段裂缝最大宽度, 并记录裂缝数量[16]。随后将实验组应用于室外施工现场当中, 探究改性 NHL 砂浆应用于室外施工与实验室环境下的差异。

2.4. 粘结强度测试

砖面涂抹改性 NHL 砂浆 28 d 后进行粘结强度测试, 使用粘结强度测试仪测试。根据欧洲标准(BS EN 459-2:2021)规定粘结强度应 ≥ 0.2 MPa。粘结测试采用了购买于北京中交建仪科技发展有限公司粘接强度测试仪 BJZJ-6000C, 使用 AB 胶涂抹于金属拉拔头(直径 50 mm), 随后将其粘接于墙面, 等待胶粘剂固化后, 通过测试仪施加垂直拉力, 直到拉拔头与墙面分离。

3. 结果与探讨

3.1. 开裂情况分析(实验室模拟结果)

将实验组 C0~C7 应用于实验室或施工现场当中。其中, 将 9 组改性 NHL 砂浆应用于实验室内及施工现场分成两个实验大组, C0、C2、C3、C4 和 C5 五组为实验组一, 研究掺合料和纤维对改性 NHL 砂浆开裂的影响。C0、C1、C6 和 C7 四组为实验组二, 研究低碱水泥掺量变化对改性 NHL 砂浆开裂的影响。实验组开裂情况及抑制效果如图 1 和图 2 所示。

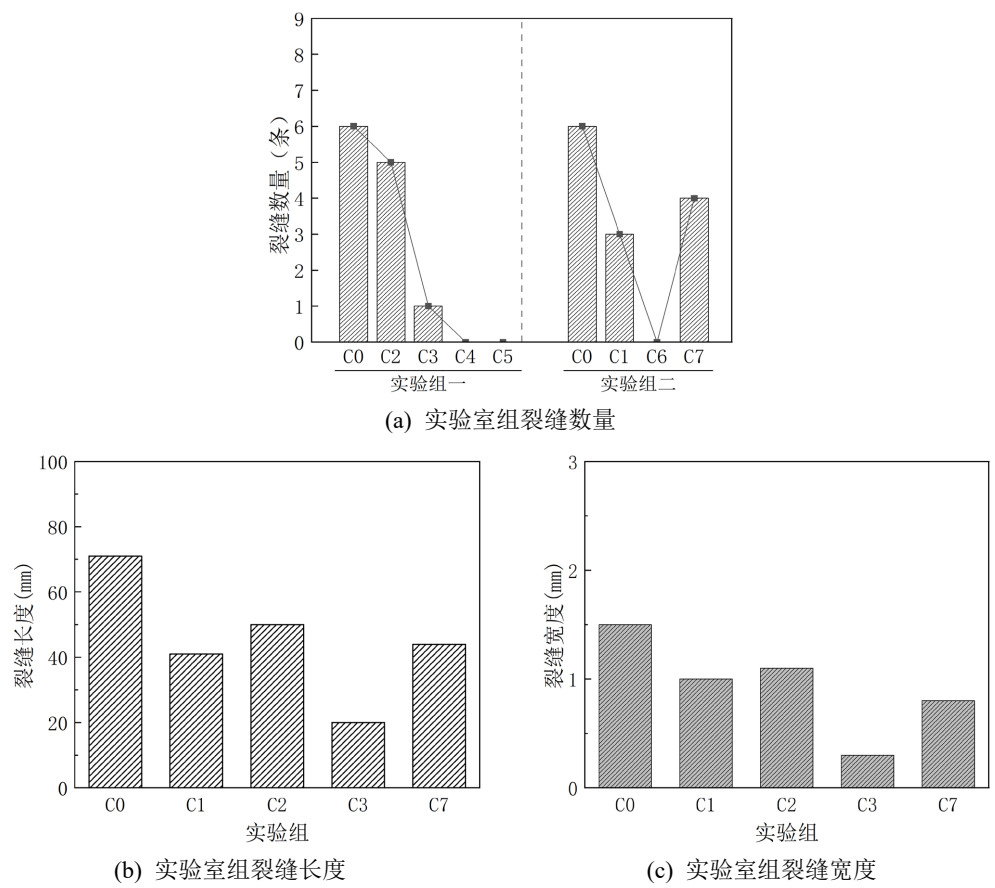
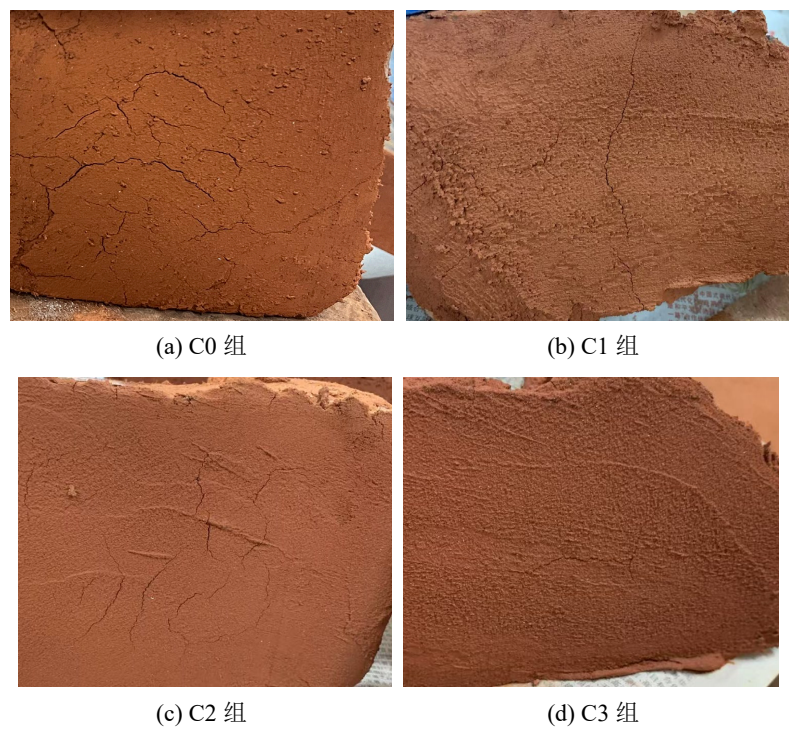


Figure 1. Laboratory mortar cracking evaluation index simulation results
图 1. 实验室砂浆开裂评价指标模拟结果



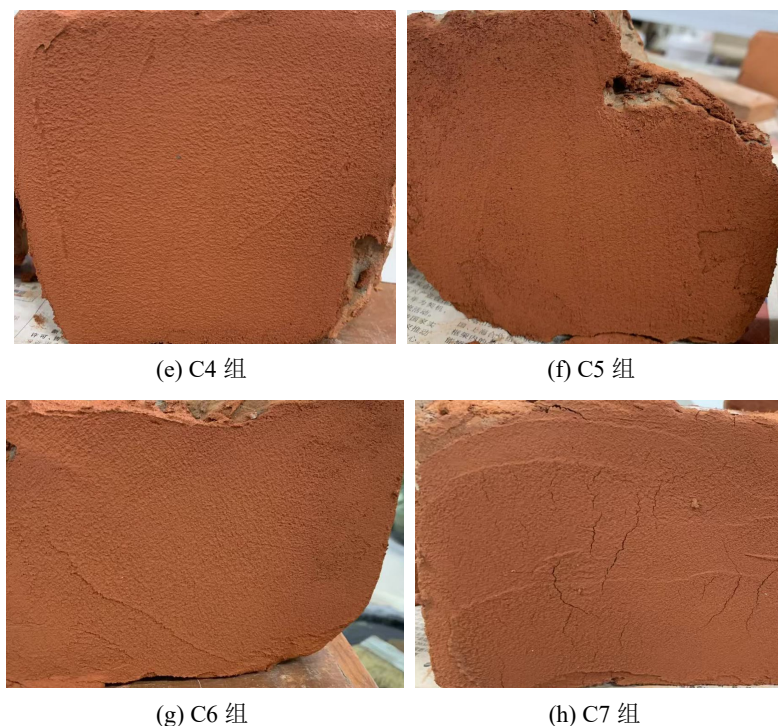


Figure 2. Cracking of mortar (in the laboratory)
图 2. 砂浆的开裂情况(实验室内)

在实验室内将各组涂抹上墙砖, NHL 砂浆与墙砖能够完好地粘结上, 且在刚涂上墙后, 表面平整, 砂浆表面当时未出现裂缝, 经过 12 h 后开始观察开裂情况, 实验上墙情况如图 2 所示。8 组中只有 C4、C5 和 C6 上墙 24 h 未出现裂缝, 如图 2(e)、图 2(f)和图 2(g)所示。在实验组一中, C0, C2, C3 均出现裂缝, 其中对照组 C0, 如图 2(a)所示, 出现了 6 条裂缝, 裂缝总长 75 mm, 最大宽度为 2.5 mm。如图 2(c)所示, C2 在 10%单掺生石灰, 裂缝数量开始减少, C3 在混掺生石灰和低碱水泥后, 裂缝数量开始大量减少, 只能看到 1 条细微裂缝。横向对比 C1、C2 和 C3, 单掺 10%低碱水泥, 单掺 10%生石灰和混掺两种掺合料。从裂缝数量, 裂缝长度和最大裂缝宽度等开裂评价指标来体现改性效果。混掺效果最优, 单掺低碱水泥其次, 单掺生石灰最差, $C3 > C1 > C2$ 。说明掺合料生石灰和低碱水泥的膨胀性能和增加强度对 NHL 防止开裂起到作用[17] [18]。随着掺合料和纤维的加入, 裂缝数量, 长度和最大宽度逐渐减少, 且在 C3 基础上掺加纤维的 C4 和 C5 组开始没有出现裂缝。C5 组在混掺 5%稻壳纤维和 5%纸巾纤维后, 效果更佳, 说明稻壳纤维、纸巾纤维和常见纤维一样起到了桥连作用, 由于其高吸水性, 向周围释放了其吸收的水分, 减少了 NHL 内部水分的快速散发, 有效地限制了开裂现象发生。在实验组二中, 随着低碱水泥掺量增加, 裂缝数量、长度和最大宽度逐渐降低。从对照组 C0 到 C1 组单掺 10%的低碱水泥, 如图 2(b)所示, 裂缝数量降到 3 条, 到 C6 组单掺 30%低碱水泥组没有出现裂缝, 但在 C7 组单掺 50%低碱水泥时, 掺量过大, 出现开裂现象, 出现了 4 条裂缝。说明适量的低碱水泥会使 NHL 强度提升, 水泥发生更多水化[19], 提高改性 NHL 的密实度, 降低了裂缝的形成风险, 也对粘接性起到一定的积极影响。

3.2. 粘结强度

对实验组 C0~C7 改性 NHL 砂浆进行 28 d 粘结强度测试, 得到如下数据, 如图 3 所示。其中 C3、C4、C5 和 C6 组 28 d 粘结强度均达到欧洲标准 0.2 MPa。在 C0、C1、C2 和 C3 组中, 分别单掺和混掺掺合料对 NHL 砂浆的粘结强度有提升, 其中 C1 单掺 10%低碱水泥比 C2 单掺 10%生石灰的粘结强度高,

C3 混掺低碱水泥和生石灰强度继续提升, 且超过 0.2 MPa。C3、C4 和 C5 组中, C4 在 C3 的基础上继续掺加 5%稻壳纤维, C5 在 C4 加掺 5%纸巾纤维。掺加纤维的 C4 和 C5 两组粘结强度均超过 0.2 MPa, 且 C5 的粘结强度高于 C4, 说明混掺纤维对粘结强度产生积极影响。在 C1、C6 和 C7 组中, 低碱水泥的添加量分别为 10%、30%和 50%, 其 28 d 粘结强度随着低碱水泥的添加量的增多而增强, 而在当低碱水泥添加量达到 50%时, 其 28 d 粘结强度有所下降, 故当低碱水泥添加量在 30%时, 其 28 d 粘结强度符合规范要求。

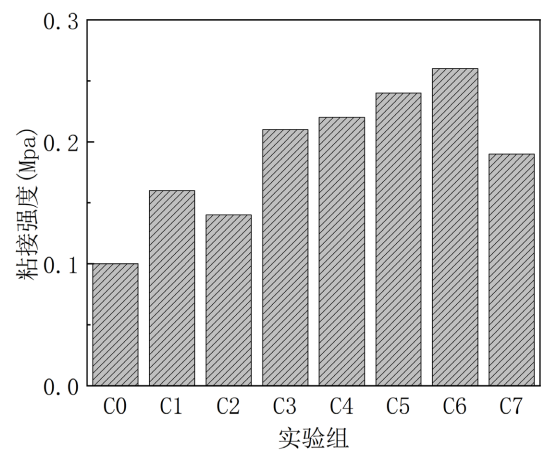
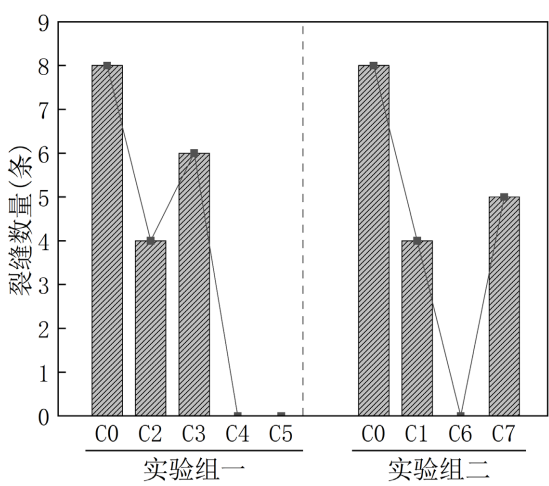


Figure 3. 28 d bond strength of modified NHL mortar to wall bricks
图 3. 改性 NHL 砂浆与墙砖的 28 d 粘结强度

3.3. 现场施工实验分析

考虑到实验室实验和现场施工环境还是存在差异, 8 组实验中, 是否开裂情况, 现场施工和实验室实验现象一致, 但现场施工中实验组, 开裂数量、长度和最大开裂宽度, 均较实验室结果有略微增长。由于室外光照时温度较高, 水分散失快, 同时, 迎风面在风吹下水分散失速度加快, 室外环境更加恶劣。可见, 在室外环境下, 由于受到阳光照射和刮风影响, 室外施工的修复后墙体会更易产生裂缝, 对改性 NHL 的防止早期开裂的要求更高。所以需将实验组 C0~C7 共 8 组用于施工现场。现场施工开裂情况及抑制效果如图 4, 图 5 所示。



(a) 现场施工裂缝数量

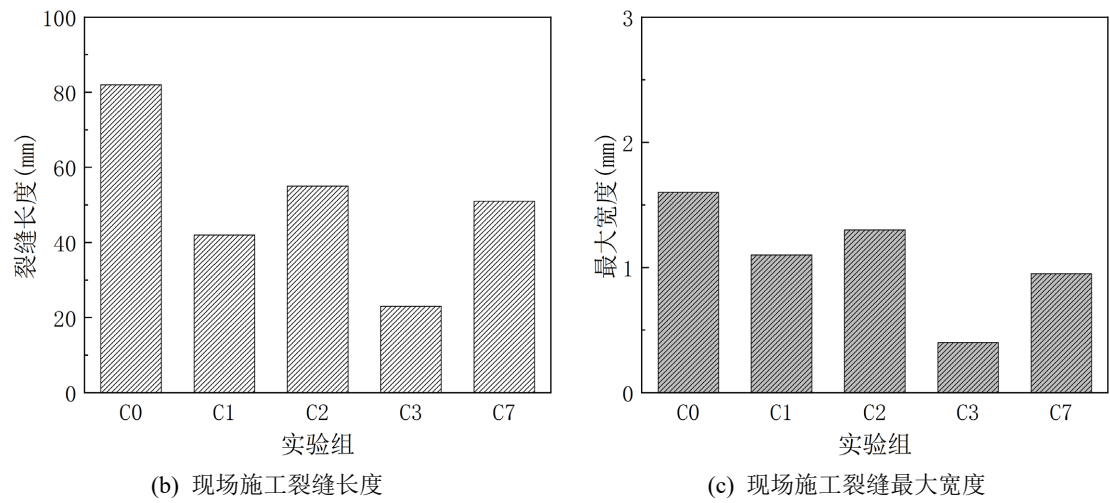


Figure 4. Evaluation indicators for mortar cracking (construction site)
图 4. 砂浆开裂评价指标(施工现场)

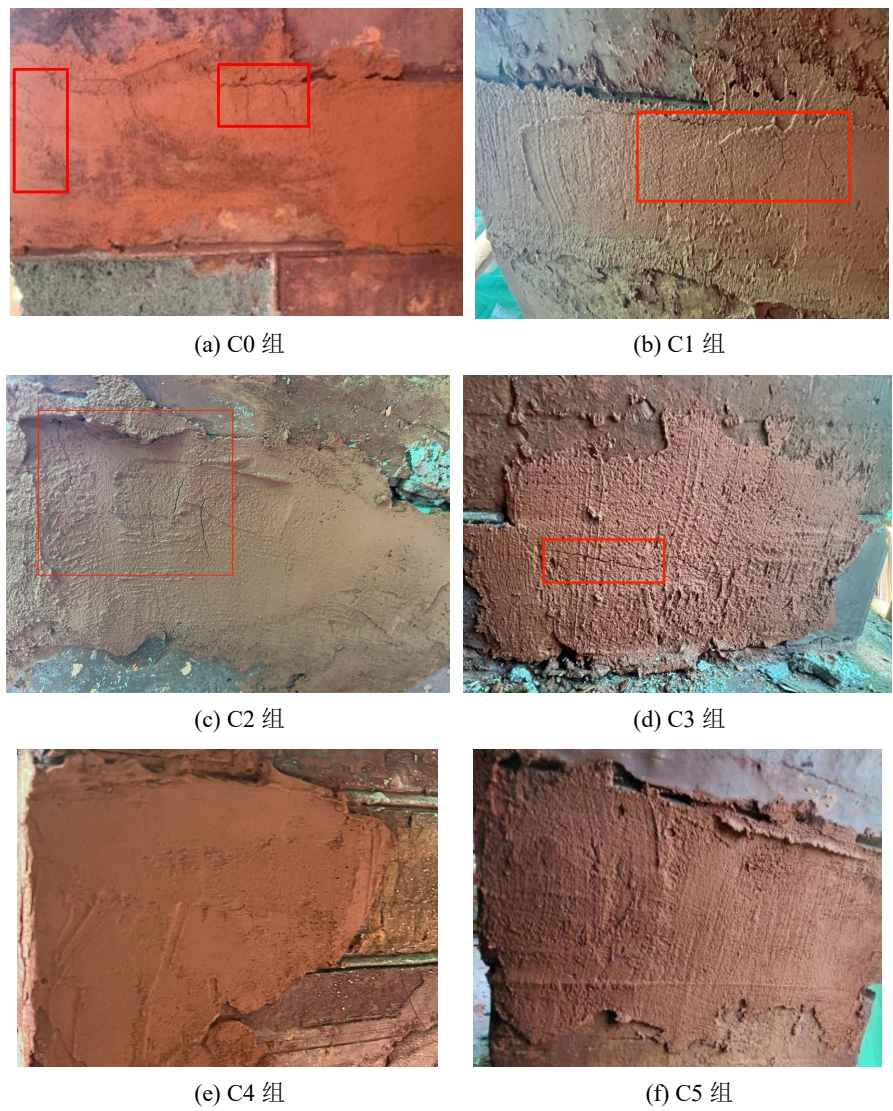




Figure 5. Mortar cracking (construction site)
图 5. 砂浆开裂情况(施工现场)

先将对照组 C0 施工上墙, NHL 砂浆与墙体能够完好的粘结上, 且在刚涂上墙后, 砂浆表面未出现裂缝, 但在 24 h 后, 墙面出现了 8 条裂缝, 长度在 1~2 cm, 可见普通 NHL 在户外现场施工比实验室更易产生裂缝。C1 组和 C2 组单掺低碱水泥和生石灰, 开裂情况开始抑制, 裂缝数量开始减少, 裂缝最大宽度开始减小。但如图 5(b)和图 5(c)所示。但相对于实验室而已, 现场施工产生的裂缝条数多 1~2 条。C3 组混掺低碱水泥和生石灰抑制开裂效果更佳, 只出现 2 条细微短小裂缝, 最大宽度仅为 0.9 mm, 如图 5(e), 跟实验室试验开裂情况基本一致。C4 组和 C5 组, 开始掺入纤维, C5 组在单掺 5%稻壳纤维时, 即使经过 24 h 风吹和光照, 砂浆表面依然没有产生裂缝。C6 组加掺%纸巾纤维后, NHL 砂浆在用于砖面过程中不易涂抹, 涂抹过程中有颗粒感, 表面不够平整光滑, 24 h 后砂浆表明也没有产生裂缝。说明即使在户外恶劣的环境下, 纤维对 NHL 抑制开裂的效果依然明显。

根据低碱水泥的添掺量不同, 将 C0 组、C1 组、C6 组和 C7 组上墙对比如图 5(g)和图 5(h)所示。施工结果和实验室结果一致, 四种砂浆都易涂抹上墙, 表面光滑平整, 且砂浆与砖面粘结完好。只有 C6 掺量 30%的 NHL 砂浆, 未产生裂缝, 抑制开裂效果最佳。而在低碱水泥掺量达到 50%时, 由于低碱水泥在遭受到温度变化时往往其体积容易发生变化, 从而导致产生内部应力, 而这种应力超过水泥的强度极限时, 往往会产生开裂, 产生了 5 条裂缝。为了减少水泥内部的收缩, 故在制备改性 NHL 砂浆时, 应当调节低碱水泥的添加量, 防止添加过多低碱水泥而导致砂浆表面开裂。同时, 大量添加低碱水泥势必会提高粘结强度, 但砂浆与墙面间粘结强度过高, 容易导致墙体的开裂和变形, 对墙体自身带来不利影响。

4. 结论

本文以 NHL 为原材料, 通过添加不同掺合料和外加剂制备改性 NHL 砂浆, 然后将其涂抹于砌体墙砖表面, 记录其在室外施工环境参数下的早期开裂情况, 并在放置 28 d 后进行粘结强度测试。结果表明:

1) 掺合料与纤维的抗裂作用显著: 掺合料生石灰和低碱水泥的膨胀性能及增强特性, 对 NHL 砂浆的防开裂效果明显, 其中混掺效果优于单掺。稻壳纤维和纸巾纤维通过桥连作用及高吸水性, 有效减少 NHL 内部水分快速散失, 显著抑制开裂现象, 复掺两种纤维(C5 组)可在实验室和现场环境下完全避免裂缝产生, 抗裂性能最优。

2) 低碱水泥掺量 30% (C6 组)时, 28 d 粘结强度达 0.25 MPa (超欧洲标准), 且无开裂现象; 但掺量增至 50% (C7 组)时, 因水化热积聚与体积收缩失衡, 导致开裂。研究表明, 30%掺量为强度提升与体积稳定的临界阈值。

3) 现场施工受阳光照射和刮风影响, 水分散失更快, 修复后墙体比实验室环境更易产生裂缝, 对改性 NHL 砂浆的早期抗裂性能要求更高。不过, 纤维在室外恶劣环境下对 NHL 砂浆的抗裂抑制效果依然突出。

推荐优化后的改性 NHL 砂浆 C5 (10%生石灰 + 10%低碱水泥 + 5%双纤维)或 C6 (30%低碱水泥)配方, 兼顾抗裂性、粘结强度(≥ 0.2 MPa)与施工可行性。施工工艺简便, 适用于不同环境下的历史建筑砌体墙修复, 其配合比可作为工程设计的参考依据, 推动 NHL 材料在文化遗产保护中的规模化应用。

参考文献

- [1] 陈娟. 古建筑保护在城市更新中的意义与策略[J]. 美与时代(城市版), 2024(4): 18-20.
- [2] van Hees, R.P.J., Binda, L., Papayianni, I. and Toubakari, E. (2004) Characterisation and Damage Analysis of Old Mortars. *Materials and Structures*, **37**, 644-648. <https://doi.org/10.1007/bf02483293>
- [3] 彭反三. 天然水硬性石灰[J]. 石灰, 2009(3): 44-48.
- [4] 李之吉, 张植萌. 历史建筑修复中原真性的探讨——以长春敷岛寮旧址为例[J]. 吉林建筑大学学报, 2022, 39(1): 50-54.
- [5] 徐树强, 马清林. 文物建筑修复用天然水硬性石灰基砂浆的研究进展[J]. 石窟与土遗址保护研究, 2022, 1(2): 81-92.
- [6] 王小燕, 曹力强, 叶武平, 等. 历史建筑砖石结构修复用注浆材料的制备研究[J]. 新型建筑材料, 2024(5): 33-35+51.
- [7] 顾立龙, 商怀帅, 吴亚月. 偏高岭土在人造水硬性石灰修复砂浆中的应用研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(12): 4351-4359+4367.
- [8] 刘泽, 王琳琳, 姜启衍, 等. 水泥用石灰岩制备天然水硬性石灰 NHL2 的工艺优化与性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2019(8): 2513-2517.
- [9] 杨建林, 宋文伟, 王玉贵, 等. 古建筑用水硬性石灰的合成及力学性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(8): 2633-2639.
- [10] 常洪雷, 陈繁育, 曲明月, 等. 生石灰和膨胀剂对砂浆自修复性能的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(6): 1014-1022.
- [11] 杨莎, 钱觉时, 熊青青, 等. 低碱水泥凝结异常与机理分析[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(8): 1136-1143.
- [12] Badagliacco, D., Megna, B. and Valenza, A. (2020) Induced Modification of Flexural Toughness of Natural Hydraulic Lime Based Mortars by Addition of Giant Reed Fibers. *Case Studies in Construction Materials*, **13**, e00425. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00425>
- [13] 马一平, 余少同, 游璐, 等. 纤维参数对水泥基材料减裂效果的影响[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(5): 797-802.
- [14] Carmona, V.B., Oliveira, R.M., Silva, W.T.L., Mattoso, L.H.C. and Marconcini, J.M. (2013) Nanosilica from Rice Husk: Extraction and Characterization. *Industrial Crops and Products*, **43**, 291-296. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.06.050>
- [15] 徐飞, 杨隽永, 杨毅. 水硬石灰作为贺兰口岩画加固材料的耐候性能研究[J]. 文物保护与考古科学, 2016, 28(4): 31-39.
- [16] 张坤, 刘妍, 杨富巍. 传统水硬性灰浆性能的影响因素综述[J]. 文物保护与考古科学, 2023(3): 130-137.
- [17] Grist, E.R., Paine, K.A., Heath, A., Norman, J. and Pinder, H. (2015) The Environmental Credentials of Hydraulic Lime-Pozzolan Concretes. *Journal of Cleaner Production*, **93**, 26-37. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.01.047>
- [18] 杨建林, 白雨鑫, 王来贵. 不同龄期水硬性石灰力学性能变化规律及机理研究[J]. 实验力学, 2022, 37(3): 419-429.
- [19] 徐树强, 王乐乐, 马清林, 等. 天然水硬性石灰在不同碳化条件下的水化反应[J]. 文物保护与考古科学, 2017, 29(4): 1-8.