

基于混合硅源煅烧的稻壳基NHL制备及性能研究

李家顺^{1*}, 郝泽慧¹, 邓弘扬^{1#}, 胡锦涛¹, 陈瑞², 王辉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6月22日; 录用日期: 2025年7月12日; 发布日期: 2025年7月25日

摘要

针对传统天然水硬性石灰(NHL)原料依赖进口、环境兼容性不足的问题, 本文以石灰石、稻壳灰和硅灰为原料煅烧制备稻壳基NHL, 通过抗折抗压试验、X射线衍射、扫描电子显微镜、热重分析、凝结时间和流动度测试等多种手段, 系统研究了所制石灰砂浆的力学性能、微观结构及工作性能, 并采用粘结强度仪评估了修复砂浆在历史建筑清水砖墙修复中的应用效果。结果表明, 通过混合硅源(LS-SF-RHA)制备的NHL, 表现出最佳的抗压强度和力学性能, 28天水化产物主要为C-S-H凝胶和CaCO₃。在实际应用中, 该组砂浆展示出优异的粘结强度和良好的修复效果, 且与历史墙体兼容性较好。此研究通过资源化利用稻壳废弃物, 不仅减少了对进口NHL材料的依赖, 还为历史建筑修复提供了一种低成本、生态型的解决方案, 具有广泛的应用前景和显著的环境效益。

关键词

天然水硬性石灰, 稻壳灰, 力学性能, 工作性能, 微观结构, 粘结强度, 工程应用

Preparation and Properties of Rice Husk-Based NHL Based on Calcination of Mixed Silica Sources

Jiashun Li^{1*}, Zehui Hao¹, Hongyang Deng^{1#}, Jinxuan Hu¹, Rui Chen², Hui Wang²

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

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

Received: Jun. 22nd, 2025; accepted: Jul. 12th, 2025; published: Jul. 25th, 2025

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 李家顺, 郝泽慧, 邓弘扬, 胡锦涛, 陈瑞, 王辉. 基于混合硅源煅烧的稻壳基 NHL 制备及性能研究[J]. 土木工程, 2025, 14(7): 1723-1735. DOI: 10.12677/hjce.2025.147186

Abstract

Aiming at the problems of traditional natural hydraulic lime (NHL) raw materials relying on imports and insufficient environmental compatibility, this paper prepares rice husk-based NHL by calcining limestone, rice husk ash and silica fume, and systematically investigates the mechanical properties, microstructure and working of the resulting lime mortar by various means such as flexural and compressive tests, X-ray diffraction, scanning electron microscope, thermogravimetric analysis, setting time and fluidity tests, etc. The mechanical properties, microstructure and working properties, and the bond strength meter was used to evaluate the application effect of the restoration mortar in the restoration of clear water brick walls of historical buildings. The results showed that the NHL prepared by mixing silica sources (LS-SF-RHA) exhibited the best compressive strength and mechanical properties, and the hydration products at 28 days were mainly C-S-H gel and CaCO_3 . In practical applications, this group of mortars demonstrated excellent bond strength and good restoration results with good compatibility with historic walls. This study not only reduces the dependence on imported NHL materials through the resourceful utilization of rice husk waste, but also provides a low-cost and ecological solution for the restoration of historic buildings, which has a wide range of application prospects and significant environmental benefits.

Keywords

Natural Hydraulic Lime, Rice Husk Ash, Mechanical Properties, Workability, Microstructure, Bond Strength, Engineering Applications

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

历史建筑是人类文明的重要遗产[1],但其外部砖墙长期暴露于自然环境中,易受风化、开裂、泛碱等影响,导致结构劣化,降低其美观性和耐久性。如果缺乏及时有效的修复,其历史、文化和艺术价值可能遭受不可逆的损失[2]。因此,寻找兼具优良力学性能、环境兼容性和可持续性的修复材料至关重要。

天然水硬性石灰(Natural hydraulic lime, NHL)因其独特的水硬、气硬复合胶凝特性,在历史建筑修复领域展现出显著优势。由于 NHL 水化碳化过程生成 C-S-H 凝胶和 CaCO_3 ,使其具有早期水硬强度、后期碳化增强能力,良好的透水透气性、自我修复能力和抗盐性,可有效维持传统砌体结构的材料兼容性与耐久性[3][4]。然而,我国商用 NHL 长期依赖进口,高昂成本制约了其在遗产保护中的规模化应用。为此,学者们积极探索本土化制备路径:通过钙质原料替代(石灰石尾矿[5]、料礓石和阿嘎土[6]、石灰岩[7])、硅质原料优化(姜石[8]、铅锌尾矿[9])等策略改善烧成产物的水硬活性,取得了一定的研究成果。此外,硅灰(SF)含有 90%以上的无定形 SiO_2 ,在高性能混凝土领域广泛应用[10][11],也已被证实可作为硅质原料煅烧制备 NHL [12][13]。

近年来,生物质硅源替代研究为 NHL 制备提供了新思路。我国每年约产生 4000 万吨稻壳废弃物,长期堆放或焚烧稻壳不仅造成了严重的环境污染,还会导致虫卵滋生。研究表明,稻壳经控温煅烧可获得含有高活性 SiO_2 的稻壳灰(RHA),其火山灰活性与硅灰相当[14][15]。目前,稻壳灰已广泛应用于多个领域,尤其在混凝土行业中,利用稻壳灰不仅能够显著提高混凝土的抗压强度,还能优化其孔隙结构,

从而提升混凝土的耐久性[16]。若将 RHA 引入 NHL 制备体系, 既可实现固废资源化利用, 又可降低材料成本, 具有显著的生态经济效益。

因此, 本研究以石灰石、稻壳灰、硅灰为原料煅烧制备生态型 NHL。采用 X 射线衍射(XRD)和热重分析(TG)表征煅烧产物的矿物组成及含量。将煅烧产物制备为 NHL 砂浆, 通过抗压强度实验和扫描电子显微镜(SEM)分析 NHL 砂浆的力学性能和微观结构。此外, 采用凝结时间和流动度测试 NHL 砂浆的工作性能, 并在武汉市历史建筑外墙修复项目中开展现场实验, 评估在修复过程中的粘结性能及兼容性。研究成果可为农业废弃物的资源化利用提供新思路, 推动低成本、生态型 NHL 在历史建筑修缮中的应用。

2. 原材料和实验方法

2.1. 原材料

实验采用湖北黄冈石灰石(Limestone, LS)作为钙质原料, 河北灵寿硅灰(Silica fume, SF)与实验室自制备稻壳灰(Rice husk ash, RHA)作为硅质原料, 硅灰与稻壳灰的比表面积分别为 $18.636\text{ m}^2/\text{g}$ 和 $231.384\text{ m}^2/\text{g}$, 三者的化学组成如表 1 所示。

Table 1. Chemical composition of raw materials
表 1. 原材料的化学组成

Materials	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	SO ₃	K ₂ O	LOI
LS	54.91	0.12	0.06	-	0.04	0.08	0.02	43.0
RHA	1.48	96.98	0.13	0.09	0.12	0.45	0.16	-
SF	1.65	88.93	0.56	0.86	3.78	0.49	1.78	-

稻壳灰制备: 采用冰醋酸预处理法去除稻壳中金属杂质。将稻壳与 80%冰醋酸溶液(冰醋酸: 水 = 1:10)按 1:10 固液比混合, 密封浸泡 16 h。酸浸后经 5 次水洗去除酸性残留, 85℃烘干 12 h, 随后于 600℃马弗炉中煅烧 1.5 小时制得 RHA (制备流程见图 1)。该法通过冰醋酸的质子化作用溶解金属氧化物及盐类, 有效提升硅源纯度与反应活性[17]。

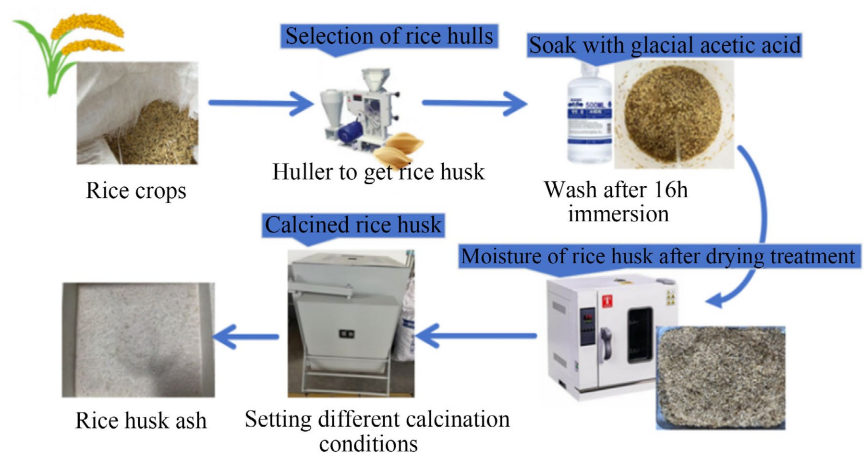


Figure1. Flow chart for the preparation of rice husk ash
图 1. 稻壳灰的制备流程图

RHA 的 XRD 图谱(图 2)显示在 $2\theta = 23^\circ \sim 25^\circ$ 存在无定形 SiO_2 弥散峰, 未见晶相特征峰, 证实其非晶

态结构。SEM 分析(图 3)显示 RHA 呈类似玉米粒的多边形颗粒状,具有明显层状夹层结构及纳米级无定形 SiO₂ 聚集形成的薄片,显著提升其化学活性[18] [19]。

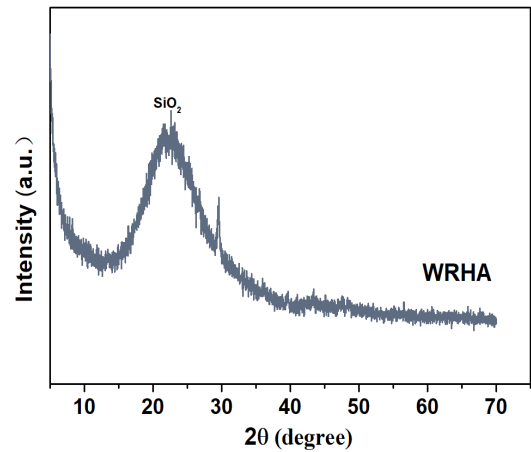


Figure 2. XRD pattern of rice husk ash
图 2. 稻壳灰的 XRD 图谱

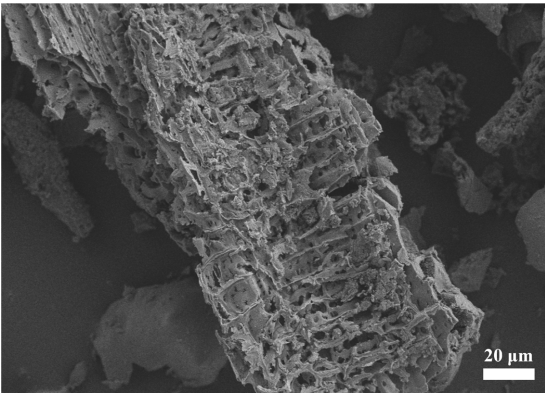


Figure 3. SEM image of rice husk ash
图 3. 稻壳灰的 SEM 图

2.2. 煅烧制备与实验测试方法

Table 2. Experimental group
表 2. 实验组别

No.	calcination temperature/°C	calcination time/h	Ca/Si	W/%		
				LS	RHA	SF
M1	1050	2	1.5	70	-	30
M2			1.4	70	15	15
M3			1.3	70	30	-
M4			2.3	80	20	-
M5			5.1	90	10	-

本研究基于石灰石、稻壳灰和硅灰体系,通过调整硅源类型及钙硅比(Ca/Si),探讨不同配比对 NHL

制备及其性能的影响。根据相关文献的研究结果, 1050℃的煅烧温度和 2 h 的煅烧时间被证明能够有效制备 NHL [20] [21]。因此, 本文采用这一煅烧参数进行实验设计。实验共设置了五个组别(见表 2)。

按照上述实验组制备生态型 NHL, 流程如图 4 所示。首先将石灰石破碎后与稻壳灰、硅灰经 18 目筛分, 按设计配比机械混料 30 min; 将混合均匀的原料压制成圆饼状, 将圆饼状坯体置于实验电炉中, 以 5℃/min 升温至 1050℃保温 2 h 后, 自然冷却至室温得到熟料; 熟料研磨成粉后, 在室温环境下, 加入等质量的水消化 30 min, 随后放入烘箱中烘干, 最终得到 NHL 样品。

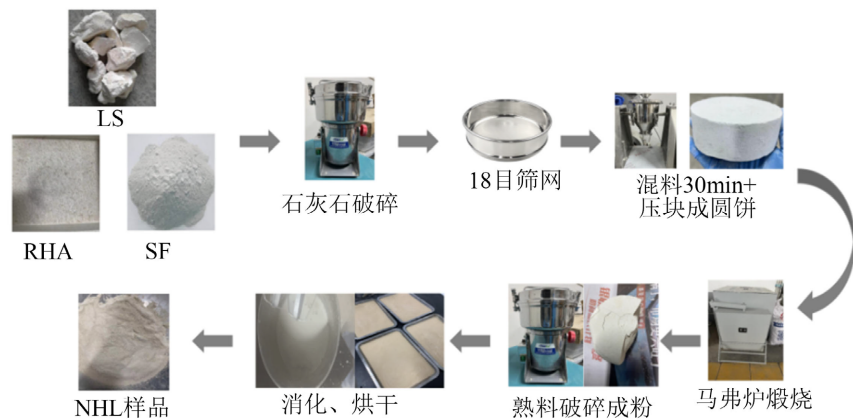


Figure 4. Calcination preparation process
图 4. 煅烧制备流程

微观测试: 采用 XRD (Bruker D8 Advance) 分析 NHL 样品的矿物组成及晶型结构; 采用 TG (Netzsch) 分析 NHL 样品在不同温度下的质量变化; 采用 SEM (ZEISS Gemini SEM 300) 和 EDS (Oxford AZteLiveOne X plore 30) 观察与力学性能测试同批次的 NHL 砂浆试块的微观形貌, 分析其水硬性产物的生成情况。

抗压强度: 以 NHL 样品和石英砂质量比为 1:3, 水灰比为 0.4, 制备 40 mm × 40 mm × 160 mm 的试样, 自然养护 28 天。根据 GB/T 17671-2021 《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》测 NHL 砂浆试块的抗压强度。

工作性能: 以 NHL 样品与石英砂质量比为 1:3, 水灰比为 0.4, 其中石英砂的粒径取 0~0.5 mm, 制备 NHL 砂浆, 根据 JGJ/T 70-2009 《建筑砂浆基本性能试验方法标准》和 GB/T 2419-2005 《水泥胶砂流动度测试方法》测试 NHL 砂浆的凝结时间和流动度[22] [23]。

粘结强度: NHL 样品与石英砂质量比为 1:3, 石英砂的粒径取 0~0.5 mm, 水灰比 0.4。在武汉市坤厚里一处风化严重的砖墙区域进行修复实验。修复前清理墙面灰尘和杂质, 确保所有修复材料在相同条件下使用。砂浆颜色通过色差仪调节, 使修复区域与墙面色调一致。覆膜养护 28 天, 使用中交建仪型号为 BJZJ-6000C 的粘结强度测试仪进行测试。

3. 结果与探讨

3.1. 矿物组成分析

XRD 结果可以观察到 NHL 样品的主要矿物相为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 C_2S 。通过统一衍射峰强度的纵坐标范围进行半定量分析(见图 5), 对比硅源类型和 Ca/Si 比对矿物组成的影响。与 M2 (LS-SF-RHA 组) 相比, M1 (LS-SF 组) 具有较高的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 峰值和较低的 C_2S 峰值, 表明硅灰在煅烧过程中与 CaO 反应不完全, 导致气硬性成分较高。而 M2 的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 峰值在三组中最低, C_2S 峰值最高, 这主要是因为稻壳灰具有较大的比表面积和多孔结构, 能够更好地参与反应, 而硅灰的微米颗粒则帮助提高反应的速度, 进而显著

增加了 C_2S 的生成。对比 M3、M4 和 M5 发现,随着 Ca/Si 比的升高(即稻壳灰含量减少), $Ca(OH)_2$ 的峰值逐渐增加,而 C_2S 峰值减小。M5 (Ca/Si 比最高组)具有最高的 $Ca(OH)_2$ 峰值和最低的 C_2S 峰值,表明过高的 Ca/Si 比会减少水硬性成分,使样品趋向气硬性。这表明 Ca/Si 比直接影响 NHL 中水硬性成分的比例,过高的 Ca 含量会抑制 C_2S 的生成,削弱水硬性特性。

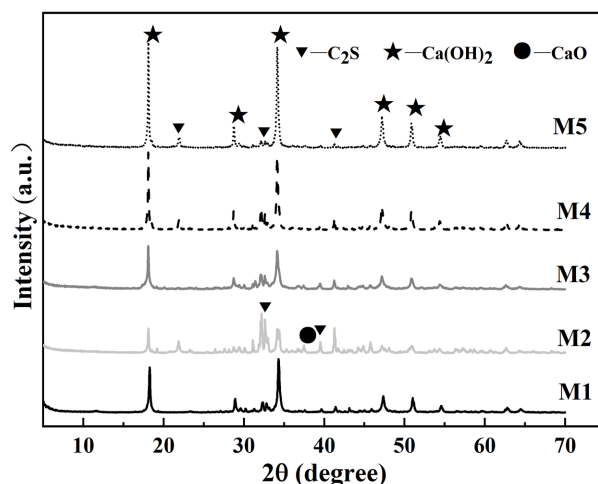


Figure 5. XRD patterns of different samples

图 5. 不同样品的 XRD 图谱

3.2. 热重分析

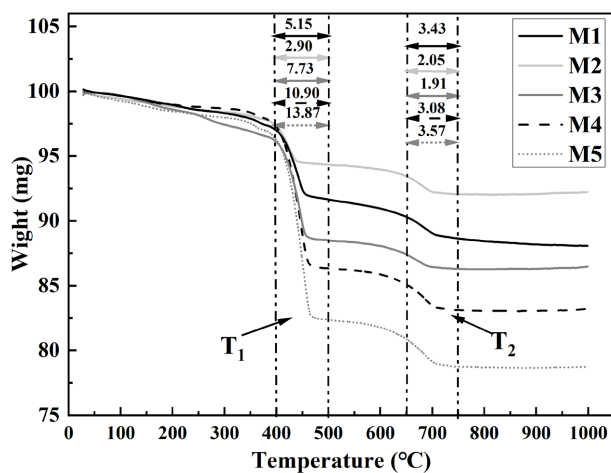


Figure 6. TG curves of NHL samples

图 6. NHL 样品的 TG 曲线

XRD 图谱主要用于分析样品矿物组成,而热重分析(TG)则定量评估 $Ca(OH)_2$ 含量。图 6 和图 7 展示了不同实验组的 TG 和 DTG 曲线,用于分析硅源类型和 Ca/Si 比对矿物组成的影响。TG/DTG 曲线显示, $Ca(OH)_2$ 的脱水发生在 $400^{\circ}C \sim 500^{\circ}C$ (T_1 阶段), $CaCO_3$ 的分解发生在 $650^{\circ}C \sim 750^{\circ}C$ (T_2 阶段)。图 6 中, LS-SF-RHA 组在 T_1 阶段的质量损失较小,表明 $Ca(OH)_2$ 含量较低,说明稻壳灰和硅灰的混合使用提升了煅烧反应效率,促进了 C_2S 的生成。相比之下, M3 在 T_1 阶段的质量损失最大,表明 $Ca(OH)_2$ 含量较高,这可能是因为稻壳灰作为纳米材料,分散性较差,导致煅烧反应不充分。该结果与 XRD 分析一致,

说明 LS-SF-RHA 组具有最佳的煅烧反应效率,生成更多 C_2S 。随着 Ca/Si 比升高(稻壳灰含量减少), $Ca(OH)_2$ 含量逐渐增加, C_2S 含量相应减少。M5 (Ca/Si 比最高组)在 T1 阶段的质量损失最大,表明 $Ca(OH)_2$ 含量最高,而 C_2S 最少。这表明过低的稻壳灰含量会减少 C_2S 生成,降低 NHL 的水硬性特性。

通过 TG/DTG 曲线的分析, T1 和 T2 阶段的质量损失可以准确地评估 $Ca(OH)_2$ 的含量[24]。由于样品为煅烧消化后的 NHL 熟料,尚未发生碳化,因此将 T2 阶段的 $CaCO_3$ 分解量换算为 $Ca(OH)_2$ 含量,全面计算样品的矿物组成。

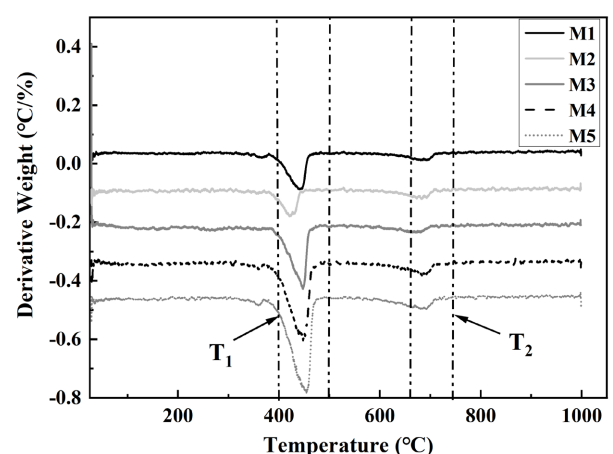


Figure 7. DTG curves of NHL samples
图 7. NHL 样品的 DTG 曲线

NHL2、NHL3.5 和 NHL5 中主要矿物相 $Ca(OH)_2$ 的含量百分比分别不低于 35%、25%、15% [25]。表 3 显示, M1~M5 组的 $Ca(OH)_2$ 百分含量均符合标准,但部分样品超出标准范围,数值偏高。尤其是 M5 (Ca/Si 比最高组) $Ca(OH)_2$ 含量远超标准上限,表明其水硬性成分不足,可能影响修复效果。为了保证 NHL 兼具水硬性和气硬性,应避免稻壳灰含量过低,以获得最佳的力学性能和修复适用性。

Table 3. $Ca(OH)_2$ content in NHL samples
表 3. NHL 样品中 $Ca(OH)_2$ 的含量

No.	Calcium-silicon ratio	$Ca(OH)_2$ (%)
M1	1.5	26.94
M2	1.4	15.36
M3	1.3	34.99
M4	2.8	49.99
M5	3.9	63.02

3.3. 工作性能

为了评估 NHL 砂浆的施工适用性,进行了工作性能测试,以检验流动度和凝结时间是否符合工程应用要求。结果显示 M1~M5 组样品均符合标准要求,具有良好的施工可行性。硅灰、稻壳灰混合组(M2)中 $Ca(OH)_2$ 较少,浆体流动性更好。随着 Ca/Si 比的增加(稻壳灰含量减少),砂浆流动度下降,凝结时间缩短。这表明 NHL 的气硬性成分 $Ca(OH)_2$ 含量对砂浆工作性能至关重要。提高煅烧原材料中稻壳灰的含量有利于提高 NHL 砂浆的流动性并延长凝结时间,但过高的 Ca/Si 比会导致流动性差、凝结加速,影响施工。

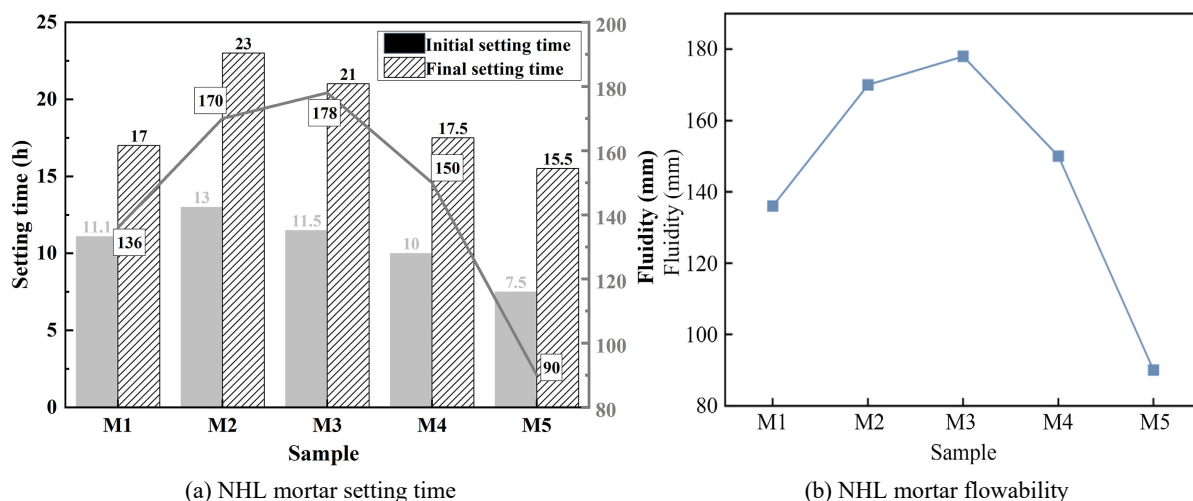


Figure 8. Evaluation indicators for mortar cracking (Construction site)

图 8. NHL 砂浆的工作性能

3.4. 抗压强度分析

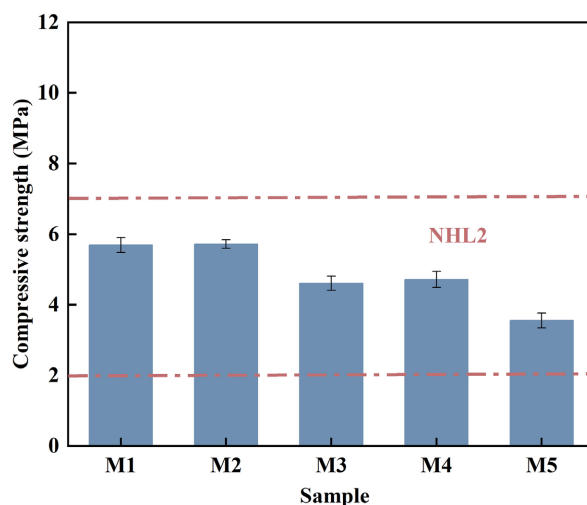


Figure 9. Compressive strength of NHL mortar

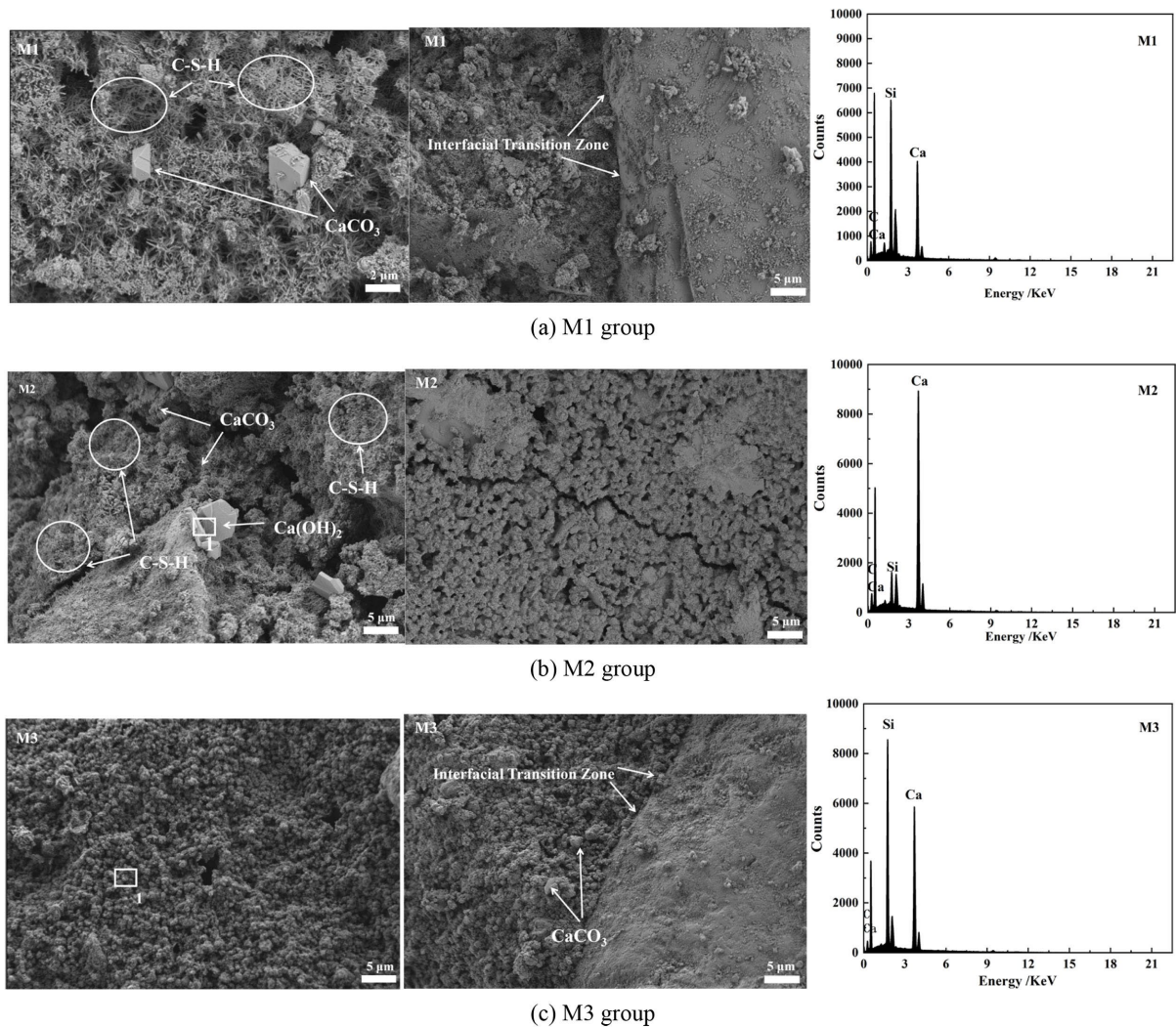
图 9. NHL 砂浆样品抗压强度

实验结果表明, 硅源类型和 Ca/Si 比对 NHL 砂浆的抗压强度有显著影响。根据欧洲标准 BS-EN-459-1:2015 [25], 所有样品均满足 28 天抗压强度的要求(见图 8), 但不同硅源和 Ca/Si 比的变化导致抗压强度存在差异。全稻壳灰组(M3)的抗压强度低于全硅灰组(M1)和硅灰与稻壳灰混合组(M2)。结合 XRD 和 TG 分析发现, M3 组的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量较高, 而 C_2S 含量较少, 表明水硬性反应较弱, 导致强度下降。这是因为稻壳灰作为纳米材料, 其分散性较差, 而硅灰颗粒较大且呈球形, 有助于更好地参与煅烧反应, 从而促进 C_2S 的生成并提高 NHL 样品的抗压强度。当稻壳灰与硅灰混合时, 硅灰的比例增大, 反应效率提升, 进一步增强了 NHL 砂浆的力学性能。此外, Ca/Si 比的升高导致抗压强度呈现非线性变化: 当稻壳灰含量过少(如 M5 组)时, 水硬性成分不足; 而当稻壳灰含量过多(如 M3 组)时, 由于纳米材料分散性差, 煅烧反应不充分, 同样导致水硬性成分含量降低。因此, 合理控制煅烧原材料中稻壳灰的含量对提升 NHL 砂浆的力学性能至关重要。

3.5. 微观结构分析

为了进一步探究 NHL 的微观结构, 采用扫描电子显微镜(SEM)和能谱分析(EDS)对五组样品进行了分析(见图 9)。整体来看, 五组样品砂浆中均形成了大量 CaCO_3 , 表明水化碳化过程良好, 且形成了较为致密的微观结构。此外, 所有样品表面均可观察到 C-S-H 凝胶, 这些凝胶与 CaCO_3 紧密结合, 显著提高了砂浆的密实性和粘结性能, 符合 NHL 水化碳化产物的典型特征。

全硅灰组(M1)中, 界面区域存在裂缝, 而硅灰与稻壳灰混合组(M2)生成均匀分布的针棒状 C-S-H 凝胶, 与 CaCO_3 相互嵌合, 填充孔隙, 提高了结构密实性。微结构中可见极少量六方片状的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体, 其可能是由 C_2S 水化形成且未被碳化。在 M3 组中, 尽管碳化效果显著, CaCO_3 结构较为致密, 但 C-S-H 凝胶较少, 未能形成整体的网络结构, 导致力学性能较差。进一步分析 M3、M4、M5 组, 不难发现煅烧原材料的 Ca/Si 比对 NHL 的水化碳化产物具有显著影响。随着 Ca/Si 比的逐渐增加, NHL 样品中的气硬性成分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 逐渐消失, 说明其已经完全被碳化。在 M4 和 M5 组中, 针棒状 C-S-H 凝胶与基体材料形成了良好的界面结合, 并紧密包裹 CaCO_3 颗粒。然而, 尽管 M4 和 M5 组的结构较为致密, 但由于水硬性成分的减少, 可能会影响其力学性能和耐久性。



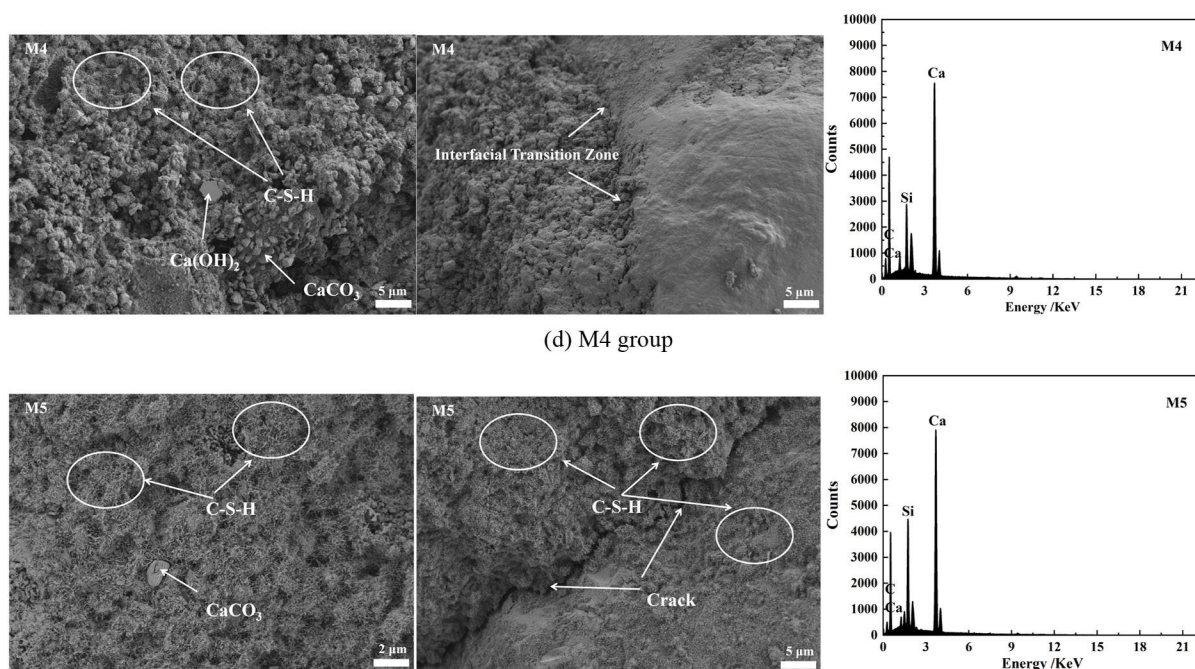


Figure 10. SEM images and EDS analysis of NHL mortar curing at 28 days
图 10. NHL 砂浆养护 28 天的 SEM 照片和 EDS 分析

3.6. 修复效果

现场实验修补情况如图 11 所示。修复过程中，M1、M2 和 M3 组表现出良好的流动性和粘结性，易于涂抹且能与墙体紧密结合，修复表面均匀平整。相比之下，高 Ca/Si 比的 M4 和 M5 组流动性差，修复表面颗粒感强，难以与墙体紧密结合，施工性能较差。

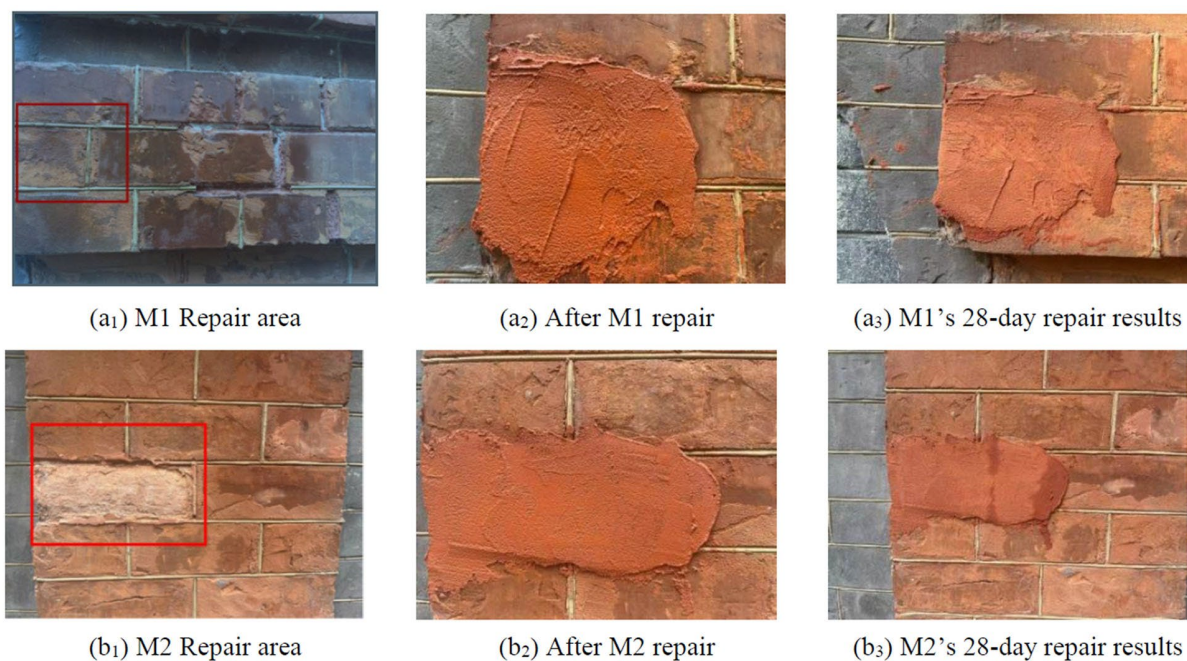




Figure 11. Comparison before and after repair and at 28 days wall condition

图 11. 修补前后对比及其 28 d 墙面情况

28 天后, M1、M2 和 M3 组未出现裂缝, 表现出良好的稳定性和耐久性。M4 组有贯穿性裂缝, M5 组则有较多细长裂缝。煅烧原材料的 Ca/Si 比较大时, NHL 的水硬性成分减少, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 增加, 导致材料在失水过程中收缩, 进而产生裂缝。此外, 在高湿度环境下, M4 组出现泛碱现象, 表现为修复表面有白色析出物, 主要是由于施工区域靠近地面, 受湿度和环境变化影响较大, 特别是经历高温和暴雨后, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 向表面迁移并析出。M5 组远离潮湿环境, 因此未出现泛碱现象。为了提高外墙修复层的外观效果和耐久性, 必须限制 NHL 中的水硬性成分含量。

3.7. 粘结强度分析

粘结强度是决定 NHL 是否适用于工程修复的关键指标, 欧洲标准规定其应达到不小于 0.2 MPa [25]。为验证不同配比 NHL 修复砂浆的粘结性能, 进行了粘结强度测试, 结果如图 12 所示。M1、M2 和 M3 组均在不开裂的情况下满足粘结强度要求, 表明它们在实际应用中具备良好的稳定性和粘结性能。由于 M4 组修复区域出现大面积缺陷和贯穿性裂缝, 粘结强度严重不足。相对地, M5 组的修复区域裂缝主要出现在砖面勾缝区, 较平整的砖面未见明显开裂。因此, M5 组的粘结强度符合标准, 但该配比下 NHL 砂浆的水硬性成分不足, 在大面积修复外墙缺陷时, 仍存在裂缝扩展和施工稳定性下降的风险。

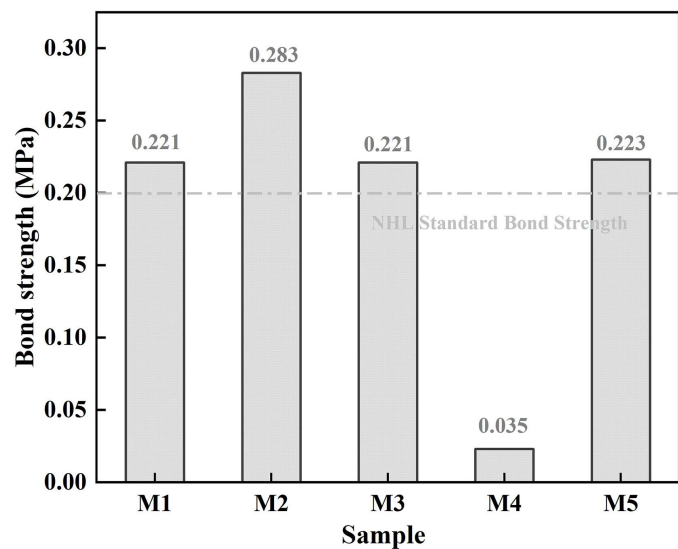


Figure 12. Bond strength of NHL mortar

图 12. NHL 砂浆的粘结强度

4. 结论

本研究以石灰石(LS)、稻壳灰(RHA)及硅灰(SF)为原料,通过煅烧制备混合硅源的稻壳基水硬性石灰(NHL),系统探究了硅源类型及钙硅比(Ca/Si)对其性能的影响,并评估了其在历史建筑修复中的应用潜力,得出以下结论:

(1) 稻壳灰与硅灰的协同使用显著提升了煅烧反应效率,促进水硬性成分 C_2S 的生成,降低气硬性 $Ca(OH)_2$ 含量。过高的 Ca/Si 比会导致 C_2S 减少、 $Ca(OH)_2$ 增加,削弱 NHL 的水硬性特性。

(2) 混合硅源(LS-SF-RHA)组的抗压强度最优,其微观结构中均匀分布的 C-S-H 凝胶与致密 $CaCO_3$ 形成嵌合结构,显著提高密实性与力学性能。过高或过低的稻壳灰含量均会因水硬性成分不足或反应效率下降影响 NHL 的力学性能。

(3) 随着 Ca/Si 比增加,NHL 砂浆流动度下降、凝结时间缩短,过高的 Ca/Si 比会导致施工性能变差。LS-SF-RHA 组在现场实验中表现出优异的粘结强度,未见裂缝及泛碱现象,且与历史墙体兼容性良好。高 Ca/Si 比组因水硬性不足,易出现收缩裂缝和泛碱问题。

该制备方法不仅降低了 NHL 对进口材料的依赖,还实现了稻壳废弃物的高附加值利用,兼具优良力学性能、环境兼容性和可持续性,为历史建筑修复提供了低成本、生态型材料解决方案,具有显著的工程应用潜力。

参考文献

- [1] Hou, X. (2022) Research on the Protection Strategy of Ancient Buildings in Qingmichuan Ancient Town of Hanzhong Based on the Concept of Authenticity Protection. *Open Access Library Journal*, **9**, 1-13.
- [2] Feng, B., Hu, Y. and Hou, M. (2021) A Method for Monitoring Bulge of Ancient City Wall after Repair. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, **46**, 221-224. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xlvi-m-1-2021-221-2021>
- [3] 彭反三. 天然水硬性石灰[C]//中国石灰协会. 2009 冶金石灰技术交流会论文集. 2009, 44-48.
- [4] 戴仕炳, 陈卉丽, 冯太彬, 等. 从防风化到维稳——严重劣化石窟寺砂岩表层预防性干预技术策略初探[J]. 石窟与土遗址保护研究, 2023, 2(2): 103-112.
- [5] Luo, K., Li, J., Peng, K., Lu, Z., Hou, L. and Jiang, J. (2023) Properties of Natural Hydraulic Lime Prepared from Calcite

- Tailings. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **35**, Article 04022415.
[https://doi.org/10.1061/\(asce\)mt.1943-5533.0004580](https://doi.org/10.1061/(asce)mt.1943-5533.0004580)
- [6] 李黎, 赵林毅, 王金华, 等. 我国古代建筑中两种传统硅酸盐材料的物理力学特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(10): 2120-2127.
 - [7] 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, 38(8): 2513-2517.
 - [8] 杨建林, 宋文伟, 王来贵, 等. 姜石合成水硬性石灰及物理力学性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2018, 37(7): 1766-1775.
 - [9] 沈雪飞, 薛群虎, 徐亮, 等. 利用铅锌尾矿制备天然水硬性石灰可行性研究[J]. 硅酸盐通报, 2013, 32(10): 1973-1978.
 - [10] Abdal, S., Mansour, W., Agwa, I., Nasr, M., Abadel, A., Onuralp Özkılıç, Y., *et al.* (2023) Application of Ultra-High-Performance Concrete in Bridge Engineering: Current Status, Limitations, Challenges, and Future Prospects. *Buildings*, **13**, Article 185. <https://doi.org/10.3390/buildings13010185>
 - [11] Adil, G., Kevern, J.T. and Mann, D. (2020) Influence of Silica Fume on Mechanical and Durability of Pervious Concrete. *Construction and Building Materials*, **247**, Article 118453. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118453>
 - [12] 刘泽, 张延博, 王栋民. 一种天然水硬性石灰及其制备方法[P]. 中国专利, CN113666652. 2022-07-12.
 - [13] 王栋民, 薄艾, 王映祥. 用于制备天然水硬性石灰的组合物、天然水硬性石灰及其制备方法[P]. 中国专利, CN115583825. 2023-01-10.
 - [14] Jhatial, A.A., Goh, W.I., Mo, K.H., Sohu, S. and Bhatti, I.A. (2019) Green and Sustainable Concrete—The Potential Utilization of Rice Husk Ash and Egg Shells. *Civil Engineering Journal*, **5**, 74-81.
<https://doi.org/10.28991/cej-2019-03091226>
 - [15] Huang, S., Jing, S., Wang, J., Wang, Z. and Jin, Y. (2001) Silica White Obtained from Rice Husk in a Fluidized Bed. *Powder Technology*, **117**, 232-238. [https://doi.org/10.1016/s0032-5910\(00\)00372-7](https://doi.org/10.1016/s0032-5910(00)00372-7)
 - [16] 缪菊红, 姚义俊, 裴世鑫. 材料综合实验中融入节能减排理念的探索与实践[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(12): 233-236.
 - [17] 郝泽慧, 邓弘扬, 毛智添, 等. 冰醋酸预处理制备白色稻壳灰及其结构特性分析[J]. 武汉轻工大学学报, 2024, 43(4): 81-87.
 - [18] Vlaev, L., Petkov, P., Dimitrov, A. and Genieva, S. (2011) Cleanup of Water Polluted with Crude Oil or Diesel Fuel Using Rice Husks Ash. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, **42**, 957-964.
<https://doi.org/10.1016/j.jtice.2011.04.004>
 - [19] Wang, J., Xiao, J., Zhang, Z., Han, K., Hu, X. and Jiang, F. (2021) Action Mechanism of Rice Husk Ash and the Effect on Main Performances of Cement-Based Materials: A Review. *Construction and Building Materials*, **288**, Article 123068.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123068>
 - [20] 张朋娟, 宋学锋. 煅烧工艺与钙硅比对水硬性石灰组成及性能的影响[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(5): 725-732.
 - [21] Bo, A., Wang, H., Wang, D. and Zhang, D. (2022) Thermodynamic and Kinetic Analysis on the Effect of Caso4 on Calcination of Natural Hydraulic Lime. *Materials Today Communications*, **31**, Article 103374.
<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.103374>
 - [22] 中国建筑材料联合会. GB/T 1346-2011, 水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
 - [23] 中国建筑材料联合会. GB/T 2419-2005, 水泥胶砂流动度测试方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
 - [24] 张大江. 水硬性石灰基材料的水碳化机理和微结构演变机制研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2021.
 - [25] CEN (2015) BS EN 459-1: 2015 Building Lime.