

利用废瓷粉和废石膏制备抹灰砂浆

张胜军^{1,2}, 罗俊扬¹, 赵 愿¹, 杨志祥², 成 岳¹

¹景德镇陶瓷大学材料科学与工程学院, 江西 景德镇

²江西墨塔科技股份有限公司, 江西 景德镇

收稿日期: 2025年8月14日; 录用日期: 2025年9月14日; 发布日期: 2025年9月22日

摘 要

本研究旨在用废瓷粉和废石膏分别替代传统拌灰砂浆中的天然砂骨料和部分胶凝材料制备复合胶凝再生抹灰砂浆。采用 $L_8(2^7)$ 正交实验法, 研究废石膏、废瓷粉和水泥掺量等因素对复合胶凝再生抹灰砂浆性能的影响。对抹灰砂浆进行物理性能(流动度、稠度等)、力学性能(抗压/抗折强度)测试及微观结构表征。通过正交实验筛选出最佳配方: 废石膏为30% (wt%), 废瓷粉为40% (wt%), 水泥为30% (wt%), 纤维素醚为1.2 g/kg, 消泡剂为2.0 g/kg, 减水剂为1.5 g/kg, 水灰比为0.35。最佳组合的稠度测量值为88 mm, 14天拉伸粘结强度(与混凝土基层) 0.45 MPa, 28天收缩率0.07%, 保水率90.5%和抗压强度15.59 MPa, 符合国家标准JGJ/T 240-2011《再生骨料应用技术规程》(内墙抹灰)和GB25181-2019《预拌砂浆》中普通抹灰砂浆的性能指标要求, 用于室内干燥区域非承重墙抹灰。研究表明, 废瓷粉与废石膏存在协同效应, 能提高水泥增强型废石膏再生抹灰砂浆的抗压强度、改善微观结构。本研究为废瓷和废石膏在抹灰砂浆中的应用提供了理论支持和实践依据, 具有减少废弃物堆积、缓解资源短缺的意义。

关键词

废瓷粉, 废石膏, 抹灰砂浆, 抗压强度

Preparation of Plastering Mortar Using Waste Porcelain Powder and Waste Gypsum

Shengjun Zhang^{1,2}, Junyang Luo¹, Yuan Zhao¹, Zhixiang Yang², Yue Cheng¹

¹School of Materials Science and Engineering, Jingdezhen Ceramic University, Jingdezhen Jiangxi

²Jiangxi Mortar Technology Co., Ltd., Jingdezhen Jiangxi

Received: Aug. 14th, 2025; accepted: Sep. 14th, 2025; published: Sep. 22nd, 2025

Abstract

This study aims to prepare composite cementitious recycled plaster mortar by replacing natural

文章引用: 张胜军, 罗俊扬, 赵愿, 杨志祥, 成岳. 利用废瓷粉和废石膏制备抹灰砂浆[J]. 材料科学, 2025, 15(9): 1797-1805. DOI: 10.12677/ms.2025.159191

sand aggregates and some cementitious materials in traditional mortar mix with waste porcelain powder and waste gypsum, respectively. Using the L8 (2⁷) orthogonal experimental method, the effects of factors such as waste gypsum, waste ceramic powder, and cement dosage on the properties of composite cementitious recycled plaster mortar were studied. Conduct physical property tests (flowability, consistency, etc.), mechanical property tests (compressive/flexural strength), and microstructure characterization on plastering mortar. The optimal formula was selected through orthogonal experiments: waste gypsum was 30% (wt%), waste ceramic powder was 40% (wt%), cement was 30% (wt%), cellulose ether was 1.2 g/kg, defoamer was 2.0 g/kg, water reducer was 1.5 g/kg, and water cement ratio was 0.35. The optimal combination has a viscosity measurement value of 88 mm, a 14-day tensile bond strength (with concrete base) of 0.45 MPa, a 28-day shrinkage rate of 0.07%, a water retention rate of 90.5%, and a compressive strength of 15.59 MPa. It meets the performance requirements of ordinary plastering mortar in the national standards JGJ/T 240-2011 "Technical Specification for Application of Recycled Aggregates (Interior Wall Plastering)" and GB25181-2019 "Ready mixed Mortar", and is used for plastering non load bearing walls in indoor dry areas. Research has shown that there is a synergistic effect between waste ceramic powder and waste gypsum, which can improve the compressive strength and microstructure of cement reinforced waste gypsum recycled plastering mortar. This study provides theoretical support and practical basis for the application of waste porcelain and waste gypsum in plastering mortar, which has the significance of reducing waste accumulation and alleviating resource shortages.

Keywords

Waste Porcelain Powder, Waste Gypsum, Plastering Mortar, Compressive Strength

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. 前言

随着工业化和城市化的快速发展，全球工业固废排放量呈持续攀升态势。以建筑与陶瓷产业为例，废瓷和废石膏已成为两类具有代表性的高产量固体废弃物。在建筑行业中，陶瓷材料因其优异的装饰性与耐久性被广泛应用于瓷砖铺贴、卫生洁具制造等领域。研究表明，陶瓷生产流程中的废品率普遍达到5%~10%，若考虑原料加工、烧成收缩及后期切割损耗，部分工艺环节的废弃物产生量甚至高达15% [1]。日用陶瓷厂每万件产品产生约0.30吨废石膏模具，卫生陶瓷厂每万件产品产生约2.49吨废石膏模具，其中约30%未得到有效利用 [2]。

巨量废瓷与废石膏的露天堆放或填埋处置，正引发多重生态环境危机。首先，土地资源侵占问题突出，导致周边耕地退化与生态空间碎片化 [3]。其次，污染物迁移风险加剧。检测表明，某废瓷填埋场周边土壤中镉含量超标4.8倍，严重威胁农作物安全 [4]。而废石膏除含可溶性硫酸盐 (SO_4^{2-} 浓度 > 2000 mg/kg) 外，磷废石膏还可能残留氟化物及放射性核素，其长期堆存已导致多地地下水硬度升高、氟斑牙疾病发病率上升等公共卫生事件 [5]。此外，废瓷破碎产生的 $\text{PM}_{2.5}$ ~ PM_{10} 级粉尘可随风扩散至数公里外，诱发区域性雾霾及呼吸道疾病；废石膏细颗粒则易在湿度变化下板结扬尘，加剧大气颗粒物污染 [6]。

另一方面，建筑材料行业正面临资源约束与绿色转型的双重挑战。天然砂资源枯竭态势严峻：联合国环境署报告指出，全球建筑用砂需求年均增长5.5%，但天然河砂储量仅能维持50年现有开采强度，且过度采砂已造成全球70%的河流生态系统退化 [7]。中国多省份已出台天然砂禁采令，导致其市场价格

近十年上涨逾 300% [8] [9]。将废瓷粉与废石膏协同引入抹灰砂浆体系, 可实现“以废治废”的循环经济模式[10] [11]。白明等[12]研究发现废瓷掺量为 5%~10%时, 抗压强度可从 12 MPa 增至 13.8 MPa, 抗折强度从 3 MPa 增至 3.24 MPa。肖琪聘等[13]通过系统实验验证了废瓷骨料混凝土的力学性能, 指出当废瓷骨料替代率达到 30%~40%时, 28 天抗压强度可达 35~40 MPa, 较普通混凝土(32 MPa)提升 5%~10%, 但其吸水率高达 3%~5% (普通混凝土吸水率为 1%~2%), 需通过表面改性(如硅烷浸渍, 浸渍时间 2 小时)将吸水率降低至 1%~2%以满足工程需求, 废瓷骨料的棱角状形貌(颗粒长径比 2~3)有助于增强界面粘结, 但可能导致工作性下降(坍落度从 200 mm 降至 180 mm)。

本研究旨在用废瓷粉和废石膏替代传统拌灰砂浆中的天然砂和部分胶凝材料, 探索废瓷粉与废石膏的协同利用机制, 为废瓷和废石膏在抹灰砂浆中的应用提供理论支持。

2. 实验

2.1. 实验原材料

本课题所用废石膏和废瓷来自某陶瓷厂, 所用 P·O42.5 水泥为鑫山水泥的 P·O42.5 普通硅酸盐水泥。原料化学成分分析见表 1。

Table 1. Chemical composition analysis of raw materials (wt/%)
表 1. 原料化学成分分析(wt/%)

成份	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	P ₂ O ₅	SO ₃	I.L	Σ
废石膏	2.10	0.80	0.30	32.50	0.20	0.10	0.05	1.80	44.20	17.84	99.89
废瓷粉	70.28	18.96	1.63	1.22	1.10	3.05	2.23	0.15	0.06	0.98	99.66
水泥	23.45	5.37	2.81	60.24	2.56	0.37			2.86	2.24	99.95

外加剂有纤维素: 400 黏度纤维素(广东龙湖科技股份有限公司), 消泡剂(镇江同创新材料科技有限公司), 减水剂(镇江同创新材料科技有限公司), 用水来自实验室。

2.2. 水泥力学性能

水泥的基本物理力学性能如表 2 所示。

Table 2. physical and mechanical properties of cement
表 2. 水泥物理力学性能

水泥	标稠%	凝结时间/min		抗折强度/MPa		抗压强度/MPa	
		初凝	终凝	3d	28d	3d	28d
P·O42.5	27.4	186	230	6.1	8.6	26.4	49.6

2.3. 实验仪器设备

电子天平(JJ200 型, 常熟市双杰测试仪器厂), 电热鼓风干燥箱(JC101 型, 南通嘉程仪器有限公司), 水泥胶砂钢模具(40 × 40 × 160 mm, 中宇仪器有限公司), 斤秤(JCS-F, 浙江永康有限公司), 标准稠度仪(ISO, 沧州万春设备有限公司), 震击式标准振筛机(ZBSX-92A, 河北金晟仪器厂), 水泥抗折抗压一体机(SFK-300, 河北沧州仪器厂), 水泥净浆搅拌机(NJ-160A, 沧州博宽实验仪器有限公司), 水泥砼恒温恒湿标准养护箱(SHBY-40B, 浙江吉翼仪器仪表有限公司), 鄂式破碎机(EP-2, 鹤壁市浩天电气有限公司),

标准稠度仪(TD505-WK1 型, 无锡中科建材仪器有限公司), 高速粉碎机(500 g, 河南鹤壁诚信仪器), X 射线粉末衍射仪(DX-2700B, 丹东浩元仪器有限公司), 扫描电镜(SEM)(KYKY - EM3900M, 北京中国科学院科学仪器)。

2.4. 实验过程

(1) 按照配合比准确称取各种原材料, 包括废石膏、废瓷粉、水泥合计 2 kg、外加各种外加剂和水。先将干料放入搅拌机中, 先进行干拌, 使各成分充分混合均匀, 一般干拌时间为 1~2 分钟。然后缓慢加入水, 继续搅拌 10~15 分钟, 直到砂浆达到均匀、无结块的状态。搅拌过程中要注意控制搅拌速度和时间, 确保砂浆的和易性良好。

(2) 将搅拌好的砂浆按照 JGJ/T 70 方法测定稠度和保水率, 之后倒入钢模中成型。在倒入砂浆时, 一边倒入一边振荡, 以排除砂浆中的气泡, 保证试件的密实性。然后用抹刀将试件表面抹平, 使其与试模边缘平齐。

(3) 将成型好的试件放入养护箱中进行养护, 24 h 后脱模。养护条件为温度(20 ± 2) $^{\circ}\text{C}$, 相对湿度不低于 90%。养护时间根据实验要求而定, 一般为 7 天、14 天和 28 天。在养护过程中, 要定期检查养护箱的温度和湿度, 确保养护条件符合要求。

2.5. 实验设计

在本研究中, 选择废石膏掺量、废瓷粉掺量、水泥掺量等因素来研究其对抹灰砂浆性能的影响, 具有多方面的依据。选择 $L_8(2^7)$ 正交实验法因素水平见表 3。

Table 3. Factor and level
表 3. 因素水平

因素 水平	(A) 废石膏%	(B) 废瓷粉%	(C) 水泥%	(D) 纤维素 g/kg	(E) 消泡剂 g/kg	(F) 减水剂 g/kg	(G) 水灰比
1	35	35	30	0.9	1.5	1.5	0.35
2	30	40	25	1.2	2.0	2.5	0.40

2.6. 性能测试

按现行行业标准 JGJ/T 240-2011《再生骨料应用技术规程》(内墙抹灰)中的方法分别测定砂浆的稠度和保水率(JGJ/T 70)、拉伸粘结强度(JGJ/T 70, 14 天, 与混凝土基层)、收缩率(GB/T 29417, 28 天)及抗压强度(GB/T 17671, 28 天)。采用 X 射线粉末衍射仪和扫描电镜(SEM)分别检测分析样品的晶相组成和形貌。

3. 结果分析与讨论

3.1. 实验结果及直观分析

本实验采用 $L_8(2^7)$ 正交实验法, 对抹灰砂浆的物理性能和力学性能进行了研究, 以确定各性能指标下的最优因素水平组合。正交实验的因素包括废石膏掺量、废瓷粉掺量、水泥掺量等, 每个因素设置了不同的水平。表 4 是正式实验正交实验结果。

由极差(R)有大到小的分析可得, 影响抗压强度的主次因素为主次因素: $C > A > B > F > E > D > G$, 最优组合: 即影响因素的大小排列为水泥 > 废石膏 > 废瓷粉 > 减水剂 > 消泡剂 > 纤维素醚 > 水灰比。由均值大小分析可得, 抗压强度的最优组合为 A2B2C1D2E2F1G1, 即废石膏为 30%, 废瓷粉为 40%,

水泥为 30%，纤维素醚为 1.2 g/kg，消泡剂为 2.0 g/kg，减水剂为 1.5 g/kg，水灰比为 0.35。

Table 4. Range analysis of orthogonal experiment results
表 4. 正交实验结果极差分析表

试验号	A 废石膏	B 废瓷粉	C 水泥	D 纤维素醚	E 消泡剂	F 减水剂	G 水灰比	稠度(mm)	保水率(%)	抗压强度 (Mpa)
1	1	1	1	1	1	1	1	86	85.5	14.12
2	1	1	1	2	2	2	2	88	89.2	14.04
3	1	2	2	1	1	2	2	94	90.8	11.47
4	1	2	2	2	2	1	1	98	87.6	11.82
5	2	1	2	1	2	1	2	89	91.5	12.56
6	2	1	2	2	1	2	1	87	88.3	12.35
7	2	2	1	1	2	2	1	95	86.7	15.34
8	2	2	1	2	1	1	2	84	93.1	15.43
K1	51.45	53.07	58.93	53.49	53.37	53.93	53.63			
K2	55.68	54.06	48.20	53.64	53.76	53.20	53.50			
k1	12.86	13.26	14.73	13.37	13.34	13.48	13.40			
k2	13.92	13.52	12.05	13.41	13.44	13.30	13.38			
R	0.96	0.26	2.68	0.04	0.10	0.18	0.02			

注：k1 = K1/4；k2 = K2/4。

3.2. 各因素对砂浆性能的影响分析

(1) 水泥在抹灰砂浆中的抗压强度影响最大(极差 R 最大 2.68)，是提供砂浆强度的关键成分，其掺量直接决定了砂浆的力学性能。水泥的水化反应形成的水化产物是砂浆强度的主要来源，但过高的水泥掺量会增加成本，同时可能导致砂浆收缩开裂等问题。因此，合理控制水泥掺量对于获得性能优良且经济合理的抹灰砂浆至关重要，本研究采用 30%水泥。

(2) 废石膏在本研究中影响抹灰砂浆的抗压强度属于第二主要因素(极差 R = 0.96)，废石膏的预处理工艺对于提高其在抹灰砂浆中的性能至关重要。主要的预处理工艺包括煅烧活化和细度调整。煅烧活化是将废石膏在一定的温度下进行煅烧，使其发生物理和化学变化，从而提高其活性。实验表明，将废石膏在 170℃~190℃的温度下煅烧，可以使其从二水硫酸钙(CaSO₄·2H₂O)转变为半水硫酸钙(CaSO₄·0.5H₂O)，从而提高其胶凝性。在煅烧过程中，温度和时间是关键的工艺参数。一般来说，煅烧温度控制在 180℃左右，煅烧时间为 2~3 小时。这样可以使废石膏充分活化，煅烧活化使废石膏的胶凝性得到提高，从而增强了抹灰砂浆的粘结强度和抗压强度。

细度调整是通过粉碎等方法将煅烧后的废石膏调整到合适的粒度(1.19 mm 及以下)，使废石膏能够更好地与其他材料混合，提高了砂浆的均匀性和稳定性。通过预处理，废石膏能够更好地应用于抹灰砂浆中，调节抹灰砂浆的稠度和保水性，提高了砂浆的性能和质量。实验数据显示，将废石膏研磨至一定的细度后，其比表面积增大，与其他材料的反应活性增强，从而提高了抹灰砂浆的强度和粘结性[14]。

废石膏作为抹灰砂浆的重要组成部分，其掺量会显著影响砂浆的凝结时间、强度和保水性等性能。不同含量的废石膏在砂浆水化过程中会与其他成分发生复杂的物理化学反应，从而改变砂浆的性能。例如，适量的废石膏可以调节水泥的水化速度，避免水泥过快凝结，影响施工操作。

同时废石膏溶解度比较高。长期接触水容易软化，因此在配方中用量不能太高，本试验中用量在 3% 左右，而且主要用于室内干燥区域非承重墙的抹灰。

(3) 废瓷粉在本研究中影响抹灰砂浆的抗压强度属于第三因素(极差 $R = 0.26$)本实验原材料需要进行预处理成粉末，废瓷的粉碎过程主要包括破碎、研磨和筛分三个步骤。首先是破碎阶段，将大块的废瓷通过颚式破碎机进行粗碎，将其破碎成较小的颗粒，再经过高速粉碎机后过筛，粒径在 8 目(2.36 mm)以下。粉碎好的废瓷粉具有一定的火山灰活性，将其掺入抹灰砂浆中，不仅可以减少天然砂等资源的使用，还能改善砂浆的某些性能。如文献[4]指出，在废石膏基砂浆中添加陶瓷废料能提高其表面硬度、吸水性、附着力和机械阻力。然而，废瓷粉的掺量过高可能会导致砂浆的和易性变差，强度降低等问题，因此需要确定合适的掺量范围。

(4) 纤维素醚(D)、消泡剂(E)、减水剂(F)和水灰比(G)外加剂等在本研究中影响影响抹灰砂浆的抗压强度属于次要因素(极差 R 都很小)，纤维素醚有保水作用延缓水分蒸发，确保水泥充分水化，尤其在干燥或多孔基材上，减少开裂风险。可以提高砂浆粘稠度，增强抗垂挂性，使垂直墙面施工更顺畅，减少材料浪费。因为废瓷粉棱角多，硬度高，但界面粘结弱，加纤维素醚增塑剂，可以改善砂浆与废瓷粉等基材的和易性和粘附性，降低空鼓、脱落风险。除此还能延缓凝结时间，延长可操作窗口，适合大面积施工。

消泡剂可以抑制搅拌和施工中引入的气泡，减少硬化后内部孔隙，提升密实度和抗压强度。减少孔隙可降低水分渗透，提高抗冻融和抗腐蚀能力。

减水剂降低水灰比，减少用水量同时保持流动性，提高砂浆密实度，从而增强强度和耐久性。减少收缩开裂低水灰比减少干燥收缩，降低开裂概率，尤其适用于厚层抹灰。提升施工效率，改善砂浆流动性，使涂抹更省力，提高工作效率。减水剂降低用水量，纤维素醚保水，共同优化水化环境，兼顾强度与工作性。纤维素醚增稠可能引入气泡，消泡剂则消除气泡，确保结构致密。三者结合：综合提升砂浆的施工性、力学性能和耐久性，满足高质量抹灰需求。

3.3. 最佳配方的确定与验证

抹灰砂浆的主要性能指标要求是，抗压强度、保水性、拉伸粘结强度、收缩率和 α 放射性。最佳配方中废石膏为 30%，废瓷粉为 40%，水泥为 30%，纤维素醚为 1.2 g/kg，消泡剂为 2.0 g/kg，减水剂为 1.5 g/kg，水灰比为 0.35。为了验证最佳配方的性能优势，制备了最佳配方的样品，并与其他配方的样品进行了性能对比。表 5 验证实验数据表明，最佳组合的稠度测量值为 88 mm，完全符合国家标准要求(70~100 mm)，14 天拉伸粘结强度(与混凝土基层)0.45 MPa，28 天收缩率 0.07%，并与其保水率 90.5%和抗压强度 15.59 MPa，符合国家标准 JGJ/T 240-2011《再生骨料应用技术规程》(内墙抹灰))和 GB25181-2019《预拌砂浆》中普通抹灰砂浆的性能指标要求。因为所用原料都不含放射性，因此，本研究样品没有检测放射性。

Table 5. Comparison table of best formula and standards
表 5. 最佳配方与标准对比表

性能	保水率(%)	稠度 (mm)	收缩率 (%) (28 d)	14 天拉伸粘结强度 (MPa) (与混凝土基层)	28 天抗压强度(MPa)
本实验	90.5	88	0.07	0.45	15.59
标准	≥85	70~100	≤0.10%	≥0.30	≥M10

最佳配方的砂浆在抗压强度表现出了明显的优势，流动度与稠度也符合国家标准要求。这些数据充

分说明了最佳配方的优势，它能够在保证砂浆工作性能的前提下，显著提高砂浆的力学性能，满足实际工程的需求。

在力学性能方面，废石膏掺量的增加会导致砂浆的抗压强度在一定程度上降低。废瓷粉的掺入对砂浆的力学性能有积极影响。废瓷粉掺量的增加，砂浆的抗压有所提高。这是因为废瓷粉具有一定的活性，能够参与水泥的水化反应，填充孔隙，提高砂浆的密实度[14]。水泥掺量的增加会显著提高砂浆的抗压强度，因为水泥是砂浆中的主要胶凝材料，其水化产物能够提供较强的粘结力和强度。

3.4. 抹灰砂浆样品的 XRD 和 SEM 表征分析

为了探究养护时间对材料的晶体结构影响，对养护时间分别为 7 天，14 天以及 28 天的样品进行 XRD 分析结果见图 1。XRD 图谱显示，三个不同养护时间的样品 XRD 图谱均与二水硫酸钙(Ca(SO₄)(H₂O)₂)高度匹配，样品 2-Theta 为 11.6°，20.7°，29.1°，31.2°，33.4°处的主衍射峰与 Ca(SO₄)(H₂O)₂ 的(020)，(-121)，(-141)，(002)，(051)晶面相重合，表明废石膏是该材料的主要结晶相。此外随着养护天数的增加，样品的结晶度逐渐提高，结晶度的增加表明废石膏在水分充足的条件下逐步转化为二水废石膏，晶体结构趋向完整。对三个样品进行了抗压强度测试，抗压结果分别为 7 天：2.135 mpa，14 天：4.565 mpa 以及 28 天：5.187 mpa，表明长时间养护可以有效提升样品的力学性能。压强度的提升与废石膏结晶度正相关，符合废石膏基材料强度来源于晶体交织结构的特性。

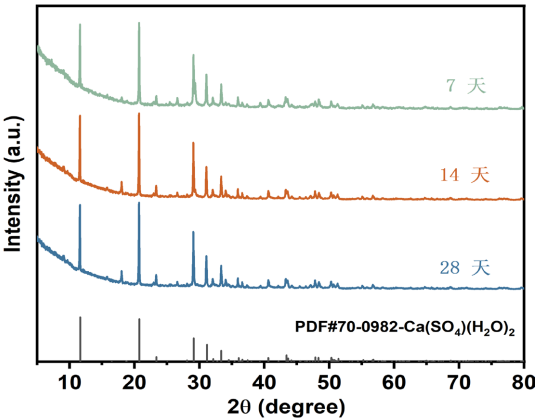


Figure 1. XRD patterns of plaster mortar samples under different curing times
图 1. 不同时间养护下抹灰砂浆样品的 XRD 图

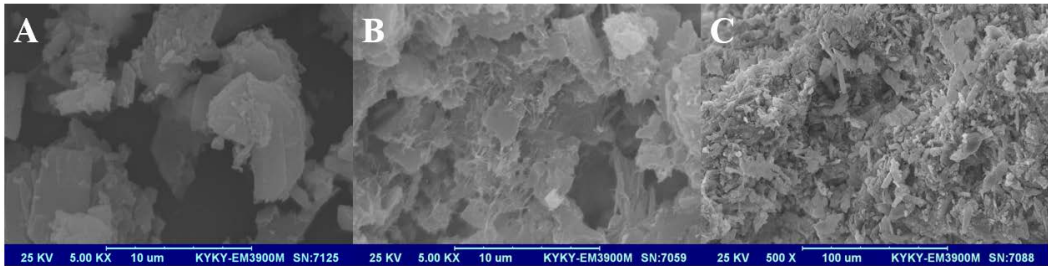


Figure 2. SEM images of plaster mortar samples under different curing times
图 2. 不同时间养护下抹灰砂浆样品的 SEM 图

从图 2 中可以观察到，当养护阶段为七天时(图 2(A))，微观特征基体疏松，未完全水化的废石膏颗粒和废瓷分散其中，孔隙率较高(微米级孔隙明显)。水化产物(如 C-S-H 凝胶)初步生成，但尚未形成连续网

络结构。抗压强度较低，主要受限于基体疏松和界面结合薄弱。废石膏的硫酸盐虽促进早期水化，但反应尚未充分。

当养护阶段为 14 天时(图 2(B))，微观特征基体密实度显著提升，孔隙减少，水化产物增多并填充孔隙。废瓷颗粒被水化产物包裹，界面结合改善(裂缝减少)，微骨料效应显现。抗压强度大幅提升，归因于水化产物积累和孔隙率降低。废石膏的硫酸盐进一步激发水化反应，形成更多 C-S-H 凝胶和钙矾石。

当养护阶段为 28 天时(图 2(C))，微观特征表现为标尺较大(100 μm)，显示宏观结构均匀性良好，无明显大裂缝或团聚。推测微观层面基体已高度致密，水化反应接近完成。抗压强度进一步增长，但增速放缓，表明水化进入后期稳定阶段。废瓷的微骨料填充作用可能接近极限，废石膏的硫酸盐反应或趋于饱和。

微观结构分析结果表明，废石膏的存在会影响水泥的水化过程和产物的形成。适量的废石膏可以调节水泥的凝结时间，但过多的废石膏会导致钙矾石的大量生成，从而使砂浆内部结构变得疏松，降低其力学性能。废瓷粉在砂浆中可以起到填充孔隙和微集料的作用，改善砂浆的微观结构。通过 SEM 观察发现，废瓷粉与水泥石之间有良好的界面结合，能够增强砂浆的整体性能。

从化学机理上看，废瓷粉因含有较高的 SiO_2 (60%~80%)和 Al_2O_3 (10%~20%)，具有一定的火山灰活性，可与水泥水化产生的氢氧化钙($\text{Ca}(\text{OH})_2$)发生二次水化反应，生成水化硅酸钙(C-S-H)和水化铝酸钙(C-A-H)等胶凝产物，从而增强材料强度[15]。废石膏则通过提供 Ca^{2+} 和 SO_4^{2-} ，调节水泥水化过程，促进钙矾石(Aft)生成，当两者共同存在时，表现出显著的协同效应。曹雅娴等[16]通过 XRD 和 SEM 分析发现，废瓷粉与废石膏复配后(质量比 1:1)，界面结合力增强 20%以上(粘结强度从 0.8 MPa 增至 1.0 MPa)，同时微观结构更加致密(孔径从 50 μm 减小至 30 μm)，这为后续研究提供了重要的理论基础。

4. 结论

(1) 正交实验结果表明，最佳配方中废石膏为 30%，废瓷粉为 40%，水泥为 30%，纤维素醚为 1.2 g/kg，消泡剂为 2.0 g/kg，减水剂为 1.5 g/kg，水灰比为 0.35。最佳组合的稠度测量值为 88 mm，14 天拉伸粘结强度(与混凝土基层) 0.45 MPa，28 天收缩率 0.07%，并与其保水率 90.5%和抗压强度 15.59 MPa，符合国家标准 JGJ/T 240-2011《再生骨料应用技术规程》(内墙抹灰)和 GB25181-2019《预拌砂浆》中普通抹灰砂浆的性能指标要求。

(2) 微观结构表征结合扫描电子显微镜(SEM)和 X 射线衍射(XRD)分析，废瓷粉的颗粒形态和表面特性(如多棱形和粗糙表面)有助于改善砂浆的微观结构，增加密实度。废石膏在水化过程中与水泥和废瓷粉发生化学反应，生成具有胶凝性的水化产物(如硫酸钙二水合物)，进一步增强了砂浆的强度。两者的协同作用优化了砂浆的孔隙结构，减少了有害孔隙，提高了耐久性。

(3) 本研究验证了废瓷和废石膏应用于抹灰砂浆的可行性，砂浆性能达到国家标准要求。不仅降低了污染物排放量，更高效地利用了资源，不仅带来经济效益，还将带来显著的社会效益。该研究可为加大固废瓷与废石膏的资源化利用以及可持续发展起到一定的推动作用，推动废弃物在建筑材料领域的更广泛应用。

基金项目

景德镇市科技项目(项目编号: 2023GY005), 合同编号 2025360201089139。

参考文献

- [1] Catalin, S., Daniela, M.L., Monica, P.L. and Raluca, S.L. (2023) Recycling Plaster Waste as a Substitute for Aggregates

- in Obtaining Plastering Mortars. *Buildings*, **13**, Article 491. <https://doi.org/10.3390/buildings13020491>
- [2] Zaharie, A., Țințișan, M.L., Siomin, A., Manea, D.L. and Pleșa, M.L. (2023) Reuse of Mixed Masonry Wastes in Plastering Mortars. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **1283**, Article ID: 012014. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1283/1/012014>
- [3] 蒋婷. 工业废石膏的资源化利用技术研究[D]: [硕士学位论文]. 苏州: 苏州科技大学, 2021.
- [4] 王贵禄, 王迪, 陈燕菲, 等. 磷废石膏抹灰砂浆绿色建材研究[J]. 四川建材, 2024, 50(7): 29-30, 33.
- [5] 徐亮, 胡瑾, 张欣, 等. 工业固废石膏-水泥基材料加固土体技术研究进展[C]//《施工技术(中英文)》杂志社, 亚太建设科技信息研究院有限公司. 2024 年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(上册). 2024: 91-94.
- [6] 贾伟超, 孙宏明, 孙玉川. 抹灰砂浆塑性开裂机理及防治措施[C]//《施工技术(中英文)》杂志社, 亚太建设科技信息研究院有限公司. 2024 年全国工程建设行业施工技术交流会论文集(上册). 北京: 建研院检测中心有限公司, 2024: 342-344.
- [7] 吉丽萍. 废石膏模在水泥生产中的应用实践[J]. 中国水泥, 2022(3): 83-85.
- [8] 冯文静, 李保金, 田源, 等. 砂浆产品绿色认证现状及发展趋势分析[J]. 混凝土世界, 2023(12): 80-84.
- [9] 纳科. 利用化工废石膏制备新型建筑胶凝材料的研究[J]. 粘接, 2023, 50(11): 91-93.
- [10] 杨医博, 杨雯, 张毅, 等. 全再生砂抹灰砂浆配合比设计方法研究[J]. 新型建筑材料, 2023, 50(6): 46-49, 54.
- [11] 孙晓玮, 邵佳慧, 王巧梭, 等. 浅谈废瓷的资源化再利用研究[J]. 佛山陶瓷, 2022, 32(11): 45-47.
- [12] 白明, 陈畅, 王宇斌. 外掺料对废石膏基复合材料力学性能的影响[J]. 矿产保护与利用, 2020, 40(3): 110-114.
- [13] 肖琪聃, 冯留洋, 徐钊栋, 等. 废瓷骨料混凝土制备及基本力学性能研究[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2022, 35(2): 325-330.
- [14] 赵晨阳, 吴丰辉, 瞿广飞, 等. 废石膏制备硫酸钙晶须的高附加值利用前景[J]. 环境化学, 2022, 41(3): 1086-1096.
- [15] 纪罗军, 赵红林. 从循环经济角度看工业副产废石膏的资源化利用[J]. 硫酸工业, 2021(9): 1-8.
- [16] 曹雅娴, 侯慧芳, 刘曙光, 等. 固废瓷在水泥基材料中的应用和研究进展[J]. 中国陶瓷, 2020, 56(12): 53-60.