

大理石废粉取代水泥对砂浆的性能影响研究

赵若飞¹, 蔡则许¹, 胡琴¹, 田世泽¹, 罗恩昊¹, 刘圣慧¹, 黄东阳¹, 张金团^{1,2,*},
班桂萌², 胡文慧¹

1. 贺州学院, 广西 贺州, 542899

2. 桂林理工大学, 广西 桂林, 541004

摘要: 广西贺州每年因大理石加工产生超百万吨废粉, 露天堆放引发粉尘污染、土壤酸化及地下水污染等环境问题, 严重威胁区域生态与居民健康。面对“双碳”战略下的固废资源化与绿色建材转型需求, 本研究以大理石废粉为对象, 通过等质量替代水泥(0%、5%、10%、15%、20%、25%)制备六组砂浆, 系统探究其对砂浆工作性能(稠度、扩展度)、密度及力学性能(3d、7d、14d、28d抗压及抗折强度)的影响规律。试验结果表明: 随着废粉掺量的增加, 砂浆的流动性有着明显的改善, 但其力学性能呈非线性下降趋势; 掺量25%时, 砂浆稠度与扩展度分别达8.93 cm和24.37 cm, 较基准组(0%掺量)提升157.3%与34.3%; 当养护龄期为28d时, 相比于基准组, 25%废粉掺量的砂浆的抗压强度降低了50%, 抗折强度降低了34.8%。大理石废粉在水泥砂浆中的最佳掺量范围为5%-10%, 可兼顾工作性能优化(稠度、扩展度提升)、力学强度保留及规避高掺量胶凝缺陷, 实现废料资源化与性能协同提升。

关键词: 大理石废粉; 水泥; 砂浆; 抗压强度; 抗折强度

Study on the Influence of Marble Powder Dosage Substituting Cement on Mortar Performance

Ruofei Zhao¹, Zexu Cai¹, Qin Hu¹, Shize Tian¹, Enhao Luo¹, Shenghui Liu¹, Dongyang Huang¹, Jintuan Zhang^{1,2,*}, Guimeng Ban², Wenhui Hu¹

1. Hezhou University, Hezhou, Guangxi, China, 542899

2. Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi, China, 541004

Abstract: Annually, Guangxi Hezhou generates over ten million tons of marble processing waste powder, whose open-air accumulation has precipitated environmental crises including particulate pollution, soil acidification, and groundwater contamination, posing severe threats to regional ecosystems and public health. Addressing the dual imperatives of solid waste valorization and green building material transition under China's "Dual Carbon" strategy, this study investigates six mortar groups prepared through equal mass substitution of cement with marble waste powder (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%), systematically examining its impacts on mortar workability (consistency, flow spread), density, and mechanical properties (3d, 7d, 14d, 28d compressive and flexural strengths). Experimental findings reveal that increasing waste powder content significantly enhances mortar fluidity while inducing a non-linear decline in mechanical performance: at 25% substitution, consistency and flow spread reached 8.93 cm and 24.37 cm respectively, representing 157.3% and 34.3% improvements over the control group (0% content); at 28-day curing, compressive and flexural strengths decreased by 50% and 34.8% respectively compared to the baseline. The optimal substitution range of 5%-10% achieves synergistic optimization by balancing workability enhancement (elevated consistency and flow spread), mechanical strength retention, and avoidance of high-content cementitious defects, thereby reconciling waste recycling objectives with performance optimization in cement

mortar applications.

Keywords: Marble waste powder; Cement; Mortar; Compressive strength; Flexural strength

作为全国重要碳酸钙产业基地，广西贺州在产业规模化发展过程中面临严峻生态环境压力。露天采矿活动引发植被退化、水土流失及基岩层大面积裸露，导致区域地貌景观破碎化。生产环节中，粉体加工产生的细颗粒物污染与高浊度废水排放共同构成复合型环境负荷。基于国家“双碳”战略导向与原材料工业绿色转型要求，本研究通过大理石废粉掺入砂浆的可行性试验，探索工业固废在建材领域的资源化路径。而在利用废粉掺入砂浆的方面上，国内外已有许多研究：

Daniel Mulat Nega 等^[1]发现掺入高达 15% 的大理石废粉和黄岗岩粉混合物可以提高砂浆的堆积密度、抗压强度和均匀性，在 10% 的混合物取代率时能观测到最佳性能。其中 Lezzerini Marco 等^[2]发现大理石废料取代水泥制成砂浆时，往往会引起力学性能的下降，在许多情况下，其取代率高达不到 25% 时其负面影响在可接受范围内。Mamaru Yenesew Alemu 等^[3]通过用不同比例（0 - 30%）的大理石和玻璃废料粉部分替代水泥，发现大理石和玻璃废料粉使用量控制在 10% 以内是提升砂浆性能的最佳选择。

李海^[4]利用广西贺州产生的人造大理石废料，探究将其废料利用到水泥砂浆中制备高性能透水建材，结果得出，人造大理石废料对水泥胶砂强度的负面影响较大，掺入量宜少。胡春华等^[5]通过废陶瓷粉和大理石粉复合比例替代水泥用量，对其砂浆试件进行抗压强度试验，得到复合取代 15% 水泥时力学性能最优的结果。黄政宏^[6]对不同水胶比、大理石粉掺量的砂浆进行抗压强度等试验，发现水胶比、大理石粉掺量对砂浆立方体的力学性能、微观结构及各项耐久性能具有重要影响。马源等^[7]通过设置不同添量的大理石粉组，对水泥基材料进行干缩、水化等性能试验，发现适量添加大理石粉，可以优化水泥基材料水化性能，减小水泥基材料干缩性，增加水泥基材料流变性。

国内外研究均表明，在一定掺量范围内，大理石废粉替代砂或水泥制备砂浆具备可行性。该技术不仅可消纳大量固废，缓解矿区生态压力，还能通过微集料效应改善砂浆和易性及密实度，展现出良好的环保与工程应用前景。然而，这些研究也指出，废粉的纯度、粒径分布及活性成分波动可能影响砂浆性能均质性，且高掺量下因胶凝物质减少导致的强度劣化问题亟待解决，需进一步进行优化预处理工艺与配合比设计试验实现性能可控。

砂浆作为建筑工程中用量最大的基础材料之一，其力学性能与耐久性直接决定结构安全与使用寿命。通过系统研究大理石废粉掺量对砂浆流动性、强度发展及长期稳定性的影响规律，不仅可拓展固废资源化路径，降低天然砂石开采压力，更能为开发高性能低碳砂浆提供理论支撑。

本研究聚焦大理石废粉替代砂石对砂浆性能的调控机制，通过测试不同掺量下新拌砂浆工作性、立方体试件抗压及抗折强度，明确废粉在砂浆体系中的功能阈值。旨在探明“环保效益-力学性能”协同最优掺量区间，为推进大理石废粉规模化应用、构建“矿山-建材”循环产业链提供技术依据，助力“无废城市”建设与双碳目标实现。

1 试验设计

1.1 原材料

水泥：江华海螺水泥有限责任公司生产 M32.5 砌筑水泥；大理石废粉：取自贺州某碳酸钙加工厂，外观如图 1 可见，经粉碎烘干，成分包含 48.53%CaO, 0.6%Fe₂O₃, 0.31Al₂O₃, 7.45MgO, 0.55%SiO₂^[8]；细骨料：ISO 标准砂，细度模数 2.7，含泥量≤0.5%；水：自来水，pH=7.0，符合《混凝土用水标准》

(JGJ 63-2006)。



图 1 大理石废粉
Fig. 1 Marble waste powder

1.2 配合比

大理石废粉取代水泥组如表 1 所示：

表 1 配合比
Table 1 Mix Proportions

试验编号	水/g	水泥/g	大理石废粉/g	砂/g	废粉掺量 (%)
SJ	6	10	0	25	0
DFSJ5	6	9.5	0.5	25	5
SFSJ10	6	9	1	25	10
DFSJ15	6	8.5	1.5	25	15
DFSJ20	6	8	2	25	20
DFSJ25	6	7.5	2.5	25	25

1.3 试件制作

砂浆试件制备严格遵循 JGJ/T70-2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》要求，选用符合行业标准 JG/T3033《试验用砂浆搅拌机》技术要求的行星式搅拌机进行机械拌合。针对大理石废粉粒径较小、易发生团聚现象及较强吸水性的特点，试验采用分步混合工艺：首先将废粉与水泥置于干燥容器中预先干拌 30 秒，促进粉体均质化并降低团聚概率；随后按水、废粉水泥混合物、砂的顺序投料，投料量控制在设备额定容量的 30%-70%区间，总搅拌时长不低于 120 秒（其中慢速搅拌 60 秒后切换至快速搅拌）。拌合过程中实时监测浆体均匀度，确保无结团或泌水现象。成型阶段将新拌砂浆分两次注入标准试模，采用分层振捣工艺排除内部气泡，每层振捣至表面泛浆且无显著气泡逸出。经 24 小时静置养护后脱模，将试件置于标准养护室（温度 20±2℃、相对湿度≥95%）中分别养护至 3d、7d、14d、28d 龄期。该工艺通过优化材料引入顺序与拌合参数，有效缓解废粉团聚导致的性能离散问题，保障试件内部结构密实性与数据可靠性。

1.4 试验方法

稠度试验：参照《建筑砂浆基本性能试验方法标准》（JGJ/T 70-2009），采用稠度仪测定砂浆流动性，单位 cm。试验设备图 2 如所示。

扩展度试验：参照《水泥胶砂流动度测定方法》（GB/T 2419-2005），测定砂浆扩展直径，单位 cm。试验设备如图 3 所示。

密度试验：参照《干混砂浆物理性能试验方法》（GB/T 29756-2013），测定密度，单位 kg/m³。

试件制备与养护：参造《建筑砂浆基本性能试验方法》（JGJ/T 70-2009），将新拌砂浆制成 40 mm×40 mm×160 mm 试件，标准养护（20±2 ℃，RH≥95%）3d、7d、14d、28d 后测试抗压强度，而后参造《水泥胶砂强度检验方法（ISO 法）》（GBT17671-2021）测定抗折强度。测试抗压与抗折强度设备如图 4 所示。



图 2 砂浆稠度仪
Fig. 2 Mortar consistency tester



图 3 水泥胶砂流动度测定仪
Fig. 3 Cement mortar flow table tester



图 4 水泥抗折抗压压力试验机
Fig. 4 Cement flexural and compressive strength testing machine

2 试验结果与分析

2.1 稠度

稠度试验结果如表 2 所示：

表 2 稠度试验数据
Table 2 Consistency test data

试验编号	废粉掺量（%）	第一盘（cm）	第二盘（cm）	第三盘（cm）	平均值（cm）
SJ	0	3.7	3.4	3.3	3.47
DFSJ5	5	7.3	4.3	5.2	5.60
DFSJ10	10	6.5	6.6	6.0	6.37
DFSJ15	15	9.0	8.9	7.1	8.33
DFSJ20	20	7.0	7.5	/	7.25
DFSJ25	25	7.6	9.7	9.5	8.93

如图 5 可见，当大理石废粉掺量从 0%增至 25%时，砂浆稠度由 3.47 cm 显著提升至 8.93 cm，增幅达 157.3%，呈现非线性增长趋势。20%掺量异常下降 13.0%（8.33→7.25 cm），25%掺量再次跃升 23.2%（7.25→8.93 cm）。数据表明，废粉掺量需控制在 15%以内以平衡流动性提升与工艺稳定性。

掺量 5%时稠度突增 61.4%（3.47→5.60 cm），5%-15%增速放缓（5.60→8.33 cm）这是因为颗

粒较为圆滑^[8]，易形成滚珠效应，在 0%~15%间，形成“滑动层”，降低颗粒咬合力，起到类似润滑剂的作用，导致稠度突增。20%掺量异常下降 13.0%（8.33→7.25 cm），原因在于当掺量超过形成“滑动层”的临界阈值时，大理石粉增大了水分需要填充的空间^[9]，使砂浆中的自由水减少，进而引发稠度下降。突破 25%掺量再次跃升 23.2%（7.25→8.93 cm），这是由于水泥中含有较多细颗粒及中颗粒成分，而大理石粉的细颗粒主要分布于中颗粒区间且含量较少。通过掺入大理石颗粒可优化水泥胶凝体系的颗粒级配：其既有效填充水泥浆体孔隙结构，又能置换出孔隙空间中的自由水，从而显著提升水泥砂浆的流动性能^[10]。

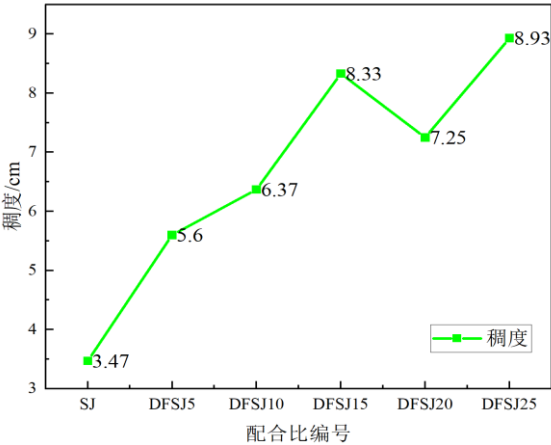


图 5 废粉掺量对砂浆稠度的影响折线图

Fig. 5 Line Chart of the Effect of Waste Powder Content on Mortar Consistency

2.2 扩展度

扩展度试验结果如表 3 所示：

表 3 扩展度试验数据

Table 3 Expansion Test Data

试验编号	废粉掺量（%）	第一盘（cm）	第二盘（cm）	第三盘（cm）	平均值（cm）
SJ	0	19.54	16.20	18.67	18.14
DFSJ5	5	21.04	21.51	18.29	20.28
DFSJ10	10	22.60	21.75	20.75	21.70
DFSJ15	15	22.87	23.08	22.86	22.94
DFSJ20	20	22.55	22.79	23.67	23.00
DFSJ25	25	24.64	23.37	25.10	24.37

如表 3 和图 6 可见，随着大理石废粉掺量的增加，砂浆扩展度呈现显著提升趋势。基准组（SJ，0%掺量）扩展度平均值为 18.14 cm，掺量 5%时（DFSJ5 组）扩展度增至 20.28 cm，增幅 11.8%；掺量进一步增至 10%（DFSJ10 组）时，扩展度达 21.70 cm，较基准组提升 19.6%。值得注意的是，掺量 15%-25%阶段扩展度增速加快，DFSJ15 组扩展度为 22.94 cm（+26.5%），DFSJ20 组为 23.00 cm（+26.8%），而掺量 25%时（DFSJ25 组）扩展度跃升至 24.37 cm，较基准组增幅达 34.3%。

对于此类现象，可以结合石粉对水泥砂浆流动性能的影响试验^[11]来推测指标变化的原因：在水泥砂浆体系中引入与石粉化学成分相似的废粉后，其颗粒的掺入会填补砂子与水泥之间的级配空隙，通过粒径级配效应优化体系的密实性，以促使部分被颗粒间包裹的水分得以释放。同时，废粉的微集料含量高，使得废粉与水泥间发生填充效应，减少颗粒间的空隙^[12]，有效削弱骨料颗粒间的摩擦

碰撞；而废粉的颗粒也能与水泥颗粒形成互补作用，进而置换出水分^[13]。这种多重作用机制最终显著增强了砂浆的流动性能。

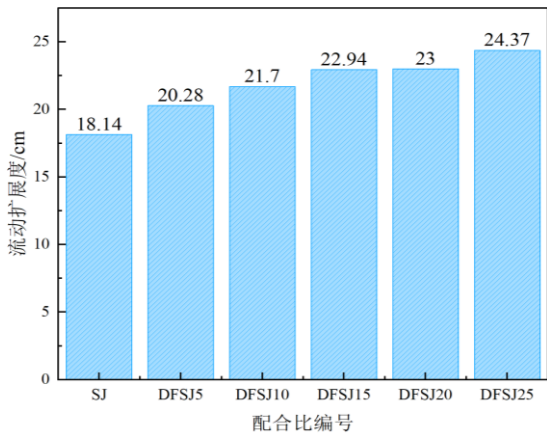


图 6 废粉掺量对砂浆扩展度的影响柱形图

Fig. 6 Bar Chart of the Effect of Waste Powder Content on Mortar Expansion

2.3 密度

密度试验结果如表 4 所示：

表 4 密度试验数据
Table 4 Density Test Data

试验编号	废粉掺量（%）	砂浆密度（kg/m³）	密度变化率（%）
SJ	0	2032.50	0.00
DFSJ5	5	2049.00	+0.81
FDSJ10	10	1830.00	-9.96
DFSJ15	15	1988.00	-2.19
DFSJ20	20	2007.67	-1.22
DFSJ25	25	1975.50	-2.81

如表 4 试验数据可见，当大理石废粉掺量从 0%增至 25%时，砂浆密度呈现非线性波动趋势。基准组（SJ，0%掺量）密度为 2032.50 kg/m³，5%掺量时密度小幅上升至 2049.00 kg/m³（+0.81%），10%掺量时下降至 1830.00 kg/m³（-9.96%），随后逐步回升至 15%掺量的 1988.00 kg/m³（-2.19%）、20%掺量的 2007.67 kg/m³（-1.22%），最终 25%掺量时为 1975.50 kg/m³（-2.81%）。

随着大理石废粉掺量增加，砂浆密度呈现“低掺量微升—中掺量骤降—高掺量部分回升”的非线性变化规律。在低掺量阶段（0%-5%），废粉细颗粒通过微集料填充效应优化水泥与砂的级配，减少孔隙率，使密度从基准组的 2032.50 kg/m³ 小幅提升至 2049.00 kg/m³（+0.81%）。当掺量增至 10%时，废粉对水泥的替代导致水化产物生成不足，加之废粉高比表面积吸附自由水引发实际水胶比降低，振捣过程中浆体黏度增大、气泡滞留增多，使得密度显著下降至 1830.00 kg/m³。而后在掺量在 10%-20%阶段时，同样可以结合废弃石粉对水泥砂浆的性能试验^[14]来推测指标变化的原因：与石粉类似，废粉在砂浆基体中分散性较好，随着替代率的增大，单位体积内废粉的净含量逐渐增加，且废粉能够沉积并填充水泥砂浆内部的微细孔径，使得砂浆密度略有回升。

2.4 抗压强度

抗压强度测试结果如图 7 所示：

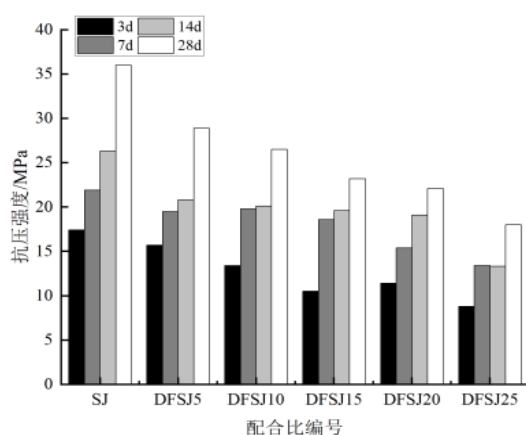


图 7 3d、7d、14d、28d 不同配合比所测抗压强度值

Fig. 7 Compressive Strength Values of Different Mix Proportions at 3d, 7d, 14d, and 28d

如图 7 可见, 随着养护龄期的延长, 各配合比砂浆试件的抗压强度均呈现增长趋势, 但增长速率与最终强度值受废粉掺量影响。基准组 (SJ) 在 3d、7d、14d、28d 的抗压强度分别为 17.4 MPa、21.9 MPa、26.3 MPa、36.0 MPa, 表现出典型的水泥基材料强度发展规律, 28d 强度较 3d 提升 106.9%。随着大理石废粉掺量从 5% 增至 25%, 各龄期试件强度均呈阶梯式下降。以 28d 强度为例, DFSJ5、DFSJ10、DFSJ15、DFSJ20、DFSJ25 组强度分别为 28.9 MPa、26.5 MPa、23.2 MPa、22.1 MPa、18.0 MPa, 较基准组分别下降 19.7%、26.4%、35.6%、38.6%、50.0%, 表明废粉掺量超过 10% 后, 试件强度呈现显著劣化趋势。其根本机理在于, 大理石废粉作为替代水泥的引入, 减少了胶凝体系中水泥的占比, 抑制了水化反应的充分进行, 最终使得各养护周期内胶砂试件的力学性能呈现规律性衰减, 这与已有的相关结论一致^[1517]。

从强度增长率来看, 基准组 3d 至 28d 强度增幅达 106.9%, 而 DFSJ5 至 DFSJ25 组增幅分别为 84.1%、97.8%、121.0%、93.9%、104.5%。图中低掺量 ($\leq 15\%$) 废粉, 可能因为沈旦中等^[18]学者归纳的粉煤灰在水泥混凝土中的三大效应之一的微集料效应, 促进后期强度发展。但高掺量 ($\geq 20\%$) 下水泥占比过低导致胶凝体系缺陷, 抑制强度持续增长。试验中 DFSJ15 组 14d 至 28d 强度增幅达 18.4% (19.6→23.2 MPa), 显著低于基准组的 36.9% (26.3→36.0 MPa), 进一步验证该掺量下废粉的填充效应与抑制水泥水化的协同作用, 同时, 也可归因于大理石废粉表面非常光滑且形状扁平^[19]。

2.4 抗折强度

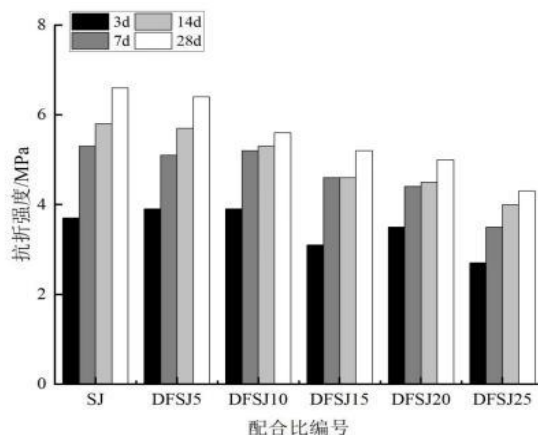


图 8 7d、14d、28d 不同配合比所测抗折强度值

Fig. 8 Flexural Strength Values of Different Mix Proportions at 7d, 14d, and 28d

抗折强度测试结果如图8所示。如图8可见,随着养护龄期的延长,各配合比砂浆的抗折强度均呈递增趋势,但增幅受废粉掺量影响。基准组(SJ)3d、7d、14d、28d抗折强度分别为3.7 MPa、5.3 MPa、5.8 MPa、6.6 MPa,其28d强度较3d增长78.4%,符合水泥基材料强度发展的典型规律。随着废粉掺量增加,各龄期抗折强度逐渐下降,但降幅明显低于抗压强度。以28d强度为例,DFSJ5、DFSJ10、DFSJ15、DFSJ20、DFSJ25组强度分别为6.4 MPa、5.6 MPa、5.2 MPa、5.0 MPa、4.3 MPa,较基准组分别下降3.0%、15.2%、21.2%、24.2%、34.8%,表明废粉对抗折强度的削弱作用呈现渐进式特征,未出现类似抗压强度的骤降拐点。值得注意的是,低掺量阶段($\leq 10\%$)的强度损失相对可控,DFSJ5组28d强度仍接近基准组水平,而DFSJ10组保留基准组85%的强度,说明废粉对砂浆韧性的负面影响弱于刚性承载能力。

DFSJ5、DFSJ10组3d抗折强度略高于SJ组,这是由于废粉中 CaCO_3 对水泥基材料的水化进程具有显著调控作用。已有研究表明,其 CaCO_3 可促进水泥 C_3S 的初期水化反应速率, CaCO_3 细度越高, C_3S 水化越快,其作用在早期更为明显。同时因为 C-S-H 和 Ca(OH)_2 在 CaCO_3 表面作用,改善了 CaCO_3 颗粒的表面状态,使 CaCO_3 颗粒与 C_3S 颗粒粘结,而这有利于提高强度^[20],故在一定掺量范围内,大理石粉能提高水泥砂浆的强度。这种作用机制使得在低掺量条件($\leq 5\%$)下,此类反应可有效改善水泥基材料的早期力学性能,表现为胶砂试件的抗压强度呈现正向增长趋势。而大理石粉掺量过高时,由于水泥掺量相对降低产生的稀释效应为主,浆体中胶结物质减少,导致试块强度下降^[21],同时,也可归因于过多废粉因水泥的稀释而干扰水化过程,导致水化产物 CSH 的减少^[22]。

3 结论

本研究系统探讨了大理石废粉等质量替代水泥(0%-25%掺量)对砂浆工作性能、密度及力学性能的影响规律,揭示了废粉掺量与材料性能的关联机制,并提出了适配不同工程场景的优化掺量区间,得到以下主要结论:

(1) 随着大理石废粉掺量增加,砂浆稠度呈非线性变化,而扩展度持续显著提升且中高掺量阶段增速加快。

(2) 大理石废粉掺量对砂浆密度产生非线性调控效应:掺量5%时因微集料填充优化级配使密度微升0.81%,而掺量10%因水化产物不足等因素导致密度骤降9.96%;随后15%-25%掺量阶段,废粉通过沉积填充微细孔径,密度逐步回升。

(3) 大理石废粉掺量对砂浆力学性能呈现差异化。相比于抗折强度,废粉掺量对砂浆抗压强度的影响更显著:掺量超10%后,抗压强度劣化加剧,而抗折强度下降趋势较缓,低掺量时碳酸钙颗粒与 C_3S 粘结提升早期韧性。

(4) 综合各项指标变化,当废粉掺量 $\leq 10\%$ 时,其可兼顾工作性能良好的同时维持力学性能损失可控。该阈值可平衡材料性能与固废利用需求,为处理过多的大理石废粉提供新途径。

参考文献

- [1] Nega D M, Yifru B W, Taffese W Z, et al. Impact of partial replacement of cement with a blend of marble and granite waste powder on mortar[J]. Applied Sciences, 2023, 13(15): 8998.
- [2] Lezzzerini M, Luti L, Aquino A, et al. Effect of marble waste powder as a binder replacement on the mechanical resistance of cement mortars[J]. Applied Sciences, 2022, 12(9): 4481.
- [3] Alemu Y M, Yehualaw D M, Nebiyu M W, et al. Marble and Glass Waste Powder in Cement Mortar [J]. Applied Sciences, 2025, 15 (7): 3930-3930.
- [4] 李海. 人造大理石废料在水泥砂浆中的应用研究[D]. 海南大学, 2022.

- [5] 胡春华, 朱玉林, 李鹏飞, 等. 复掺废陶瓷粉和大理石粉对水泥基材料耐硫酸盐性的影响[J]. 应用化工, 2023, 52(06): 1665-1668+1674.
- [6] 黄政宏. 大理石粉对砂浆性能的影响研究[D]. 广东工业大学, 2018.
- [7] 马源, 段树月, 孙辉, 等. 大理石粉对水泥基材料性能的影响分析[J]. 居舍, 2023, (30): 73-75.
- [8] 陈磊. 大理石废粉对水泥水化及砂浆性能影响研究[D]. 桂林理工大学, 2024.
- [9] 杨子园, 籍凤秋, 宋雅情, 等. 大理石粉对水泥基材料性能的影响研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2023, (02): 89-93.
- [10] 梁汉浩, 赖秋慧, 陈佰强, 等. 大理石粉对水泥基胶凝材料性能影响探究[J]. 科技创新导报, 2020, 17(04): 66-67.
- [11] 陈锡. 石粉对水泥砂浆流动性影响机理研究[J]. 福建建材, 2021, (08): 20-23.
- [12] 张军, 裴向军, 李正兵. 大理石粉对水泥浆体力学性能和微观结构的影响研究[J]. 甘肃水利水电技术, 2011, 47(09): 8-10+29.
- [13] 郑杭州. 大理石粉对水泥基胶凝材料性能的影响研究[J]. 江西建材, 2019, (04): 43-44+47.
- [14] 古华. 废弃石粉对水泥砂浆性能影响的研究[J]. 企业科技与发展, 2024, (11): 99-103.
- [15] 宋健民, 黄宝莲, 张胜权, 等. 废弃大理石粉对水泥胶砂性能的影响研究[J]. 宁波工程学院学报, 2022, 34(01): 7-11.
- [16] Ergün A. Effects of the usage of diatomite and waste marble powder as partial replacement of cement on the mechanical properties of concrete[J]. Construction and building materials, 2011, 25(2): 806-812.
- [17] Arel H Ş. Recyclability of waste marble in concrete production[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 131: 179-188.
- [18] 沈旦申, 张荫济. 粉煤灰效应的探讨[J]. 硅酸盐学报, 1981, 9(1): 57-63.
- [19] Khattab M, Jaradat O, Hachemi S, et al. An experimental study on the use of waste marble as replacement of aggregates and cement in construction material[J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2024, 9(7): 269.
- [20] 章春梅, V.S.Ramachandran. 碳酸钙微集料对硅酸三钙水化的影响[J]. 硅酸盐学报, 1988, (02): 110-117.
- [21] 肖佳, 郭明磊, 何彦琪, 等. 大理石粉对水泥基胶凝材料性能影响研究[J]. 混凝土, 2016, (01): 99-102.
- [22] Danish A, Mosaberpanah M A, Salim M U, et al. Reusing marble and granite dust as cement replacement in cementitious composites: A review on sustainability benefits and critical challenges[J]. Journal of Building Engineering, 2021, 44: 102600.

基金项目: 广西住房城乡建设科学技术计划项目(科研开发类)、广东省普通高校重点领域专项(2023ZDX3106)、广西高校中青年教师科研基础能力提升项目(2025KY0792)以及大学生创新创业训练计划项目(202411838006、202411838034、S202411838154、S202411838155)。

¹ **第1作者:** 赵若飞(2003-), 男, 本科在读, 研究方向: 绿色建筑材料。E-mail: 1520029875@qq.com。

*** 通讯作者:** 张金团(1982-), 男, 博士研究生, 教授、高级工程师, 研究方向: 绿色建筑材料。E-mail: zhangjt@hzxy.edu.cn。