

大理石粉掺量对砂浆性能的影响研究

胡文慧¹, 田世泽¹, 罗恩昊¹, 胡琴^{1,*}, 刘圣慧¹, 黄东阳¹, 张金团^{1,2,*},
班桂萌², 赵若飞¹, 蔡则许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: 在建筑行业中, 大理石的广泛应用产生大量废粉, 对环境造成危害。本研究旨在探究大理石废粉在砂浆中的最佳掺量, 实现资源循环利用与环境可持续发展。研究采用人造岗石产业废粉等质量替代砂, 固定水泥与水用量, 设计 6 组不同掺量试验。依据相关标准制作试件并养护, 测试砂浆密度、稠度、流动性及不同龄期抗折抗压强度。结果显示, 废粉掺量为 10% 时, 砂浆综合性能最佳, 此时稠度最高、流动性最优, 抗折抗压强度达峰值。超过 10% 后, 多项性能显著下降。研究表明, 大理石废粉替代砂制备砂浆可行, 10% 为最佳掺量, 这为固废资源化和环保型砂浆开发提供了技术支持。

关键词: 大理石废粉; 砂浆性能; 可持续利用; 抗折抗压强度

Study on the influence of marble powder content on mortar performance

HU Wen-Hui¹, TIAN Shi-Ze¹, LUO En-Hao¹, HU Qin^{1,#}, LIU Sheng-Hui¹,
HUANG Dong-Yang¹, ZHANG Jin-Tuan^{1,2,#}, BAN Gui-Meng², ZHAO
Ruo-Fei¹, CAI Ze-Xu¹

¹. Hezhou University, Hezhou 542899, China

². Guilin University of Technology, Guilin 541004, China

Abstract: In the construction industry, the extensive application of marble produces a large amount of waste powder, which is harmful to the environment. The purpose of this study is to explore the optimum dosage of marble waste powder in mortar, so as to realize resource recycling and environmental sustainable development. In this study, the waste powder of artificial stone industry was used to replace sand, and the amount of cement and water was fixed. Six groups of different dosage tests were designed. According to the relevant standards, the specimens were made and cured, and the mortar density, consistency, fluidity and flexural and compressive strength at different ages were tested. The results show that when the content of waste powder is 10 %, the comprehensive performance of mortar is the best. At this time, the consistency is the highest, the fluidity is the best, and the flexural and compressive strength reaches the peak. After more than 10 %, many performances are significantly reduced. The research shows that it is feasible to replace sand with marble waste powder to prepare mortar, and 10% is the best dosage, which provides technical support for the development of solid waste recycling and environmentally friendly mortar.

Keywords: Marble waste powder, Mortar performance, Sustainable use, Flexural compressive strength

大理石作为一种常见的建筑材料, 在建筑领域被广泛应用。然而, 在大理石的开采和加工过程中, 会产生大量的废粉。这些废弃废粉在一定程度上对自然环境造成严重危害。为了合理利用这些废弃资源, 国内外学者开始研究大理石废粉在建筑材料中的应用, 尤其是其在砂浆中的掺入效果。通常情况下, 碳酸钙废料主要以粉尘的形式存在, 这些碳酸钙废粉尘一般用来取代水泥或细骨料制作

砂浆,但对砂浆的各项性能提升有限,且取代量也不能过多^[1]。

废石粉部分取代砂用于水泥砂浆,能改善砂浆的和易性、减少砂浆收缩、提高抗压强度并有利施工^[2]。陈平^[3]等认为废废粉替代河砂的质量分数在20%以下时,砂浆流动度及力学性能均有所提高。王嘉杰^[4]研究发现,掺加适量大理石废粉(8%~10%)可提高水泥浆体力学性能;肖佳(取代水泥)等^[5]研究了大理石废粉对水泥基胶凝材料流动性、强度和干缩的影响,研究发现水泥胶砂强度随大理石废粉掺量增加先增大后减少,掺量为5%其抗折和抗压强度最大。大理石废粉的掺加显著影响了水泥强度,可以有效提高早起强度,但是不利于晚期强度的增长^[6]。还有研究表明大理石废粉经磨细后能像粉煤灰等矿物掺合料一样,对水泥起到一种填充效应,改善混凝土的孔隙特征,改善浆—集料界面结构。在凝结阶段,微细废粉还可以产生微集料填充效应和晶核效应,诱导水泥的水化产物析晶,加速水泥水化反应,促进水泥早期强度的发展^[7]。Valeria Corinaldes^[8]等研究指出在高效减水剂前提下大理石废粉替代砂比替代水泥效果更好,废粉填充作用会更加明显,在相同的工作性水平下,掺量为10%时达到最大抗压强度。

总体而言,国内外研究都表明大理石废粉在一定掺量范围内取代砂制作砂浆具有可行性,不仅能解决部分环保问题,还能在一定程度上改善砂浆性能,具有良好的应用前景,但也存在一些问题,如对大理石废粉的纯度、细度等有一定要求,在实际应用中需要进一步优化工艺和配合比设计等。

砂浆作为建筑行业不可或缺的材料,其性能直接影响到建筑结构的强度和耐久性。因此,用大理石废粉取代水泥和砂制作砂浆来研究不同废粉掺量对砂浆性能的影响规律,不仅有助于解决废弃废粉的环境问题,还能为改善砂浆性能提供新的思路和方法。

本研究旨在探讨大理石废粉替代砂石对砂浆新拌性能、抗折抗压强度等方面的影响。探讨大理石废粉在砂浆中的最佳掺量,以期在保证砂浆性能的前提下,最大限度地利用废弃废粉资源,实现资源的循环利用和环境的可持续发展。

1 试验设计

1.1 试验原材料

水泥选用江华海螺水泥有限责任公司生产M32.5砌筑水泥;大理石废粉采用人造岗石产业废粉,记为DF;砂采用贺州学院砂场天然砂并对天然砂进行颗粒级配1.18-0.6占35%,0.6-0.3占35%,0.03-0.075占30%,细度模数为2.73,属II区中砂;试验用水采用贺州市自来水。

1.2 配合比设计

试验以大理石废粉等质量替代砂设计6组试验,砂浆具体配合比见表1,固定水泥与水用量,调整砂废粉比例。

1.3 试件制作

试件依据《建筑砂浆基本性能试验方法标准》(JGJ/T70—2009),采用机械搅拌砂浆,搅拌机符合《试验用砂浆搅拌机》JG/T3033规定。考虑大理石废粉颗粒细小而极易团聚,吸水性能较强,先将废粉与水泥在外搅拌约0.5min,使两者初步混合均匀,减少团聚现象。再将水、废粉水泥混合物、砂依次放入搅拌机中搅拌,搅拌用量宜为搅拌机容量的30%~70%,搅拌时间不应少于120s。搅拌过程中,密切观察砂浆的状态,确保搅拌均匀。搅拌完后将砂浆拌合物装入标准试模中并进行振动密实,以保证试件内部密实,无明显气孔。24h后拆模,在标准条件下(温度20±2℃,相对湿度95%以上)养护1d、3d、7d、28d。图1,图2为本次试件制作所用仪器设备。

表 1 试验配合比
Table 1 Test Mix Proportions

试验编号	废粉掺量/%	水/g	水泥/g	大理石废粉/g	砂/g
SJ	0	324	540	0	1350
DFSS10	10	324	540	54	1296
DFSS20	20	324	540	108	1242
DFSS30	30	324	540	162	1188
DFSS40	40	324	540	216	1134
DFSS50	50	324	540	270	1080

备注：其中，SJ 为基准组，DFSS 为试验组，表示大理石废粉等质量替代水泥。
Note: Among them, SJ is the reference group, and DFSS is the test group, indicating that the quality of marble waste powder replaces cement.



图 1 砂浆搅拌机
Fig. 1 Mortar-mixing machine



图 2 SHBY-90 型养护箱
Fig. 2 SHBY-90 curing box

1.4 试验方法

表观密度：依据 JGJ/T70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》测试砂浆的表观密度。

稠度测定：根据 GB/T1346—2011《水泥标准稠度用水量、凝结时间、安定性检验方法》进行测试。

流动性测定：按照 GB/T2419—2005《水泥胶砂流动度测定方法》测试。图 3 为 NLD-3 型水泥胶砂流动度测定仪。

抗折抗压强度测定：依据 GB/T17671—2021《水泥胶砂强度检验方法(ISO 法)》，首先制作 40mm×40mm×160mm 的棱柱体试件，试体连同试模一起在湿气中养护 24h，脱模后在水中养护至试验龄期。随后采用仪器对不同龄期试块进行抗压、抗折强度试验。抗折抗压试验机如图 4 所示。



图 3.NLD-3 型水泥胶砂流动度测定仪
Fig.3 NLD-3 cement mortar fluidity tester



图 4 WYA-300B 全自动抗折抗压试验机
Fig.4 WYA-300B automatic bending and compression testing machine

2 试验结果与分析

2.1 密度

为研究大理石废粉掺量对砂浆密度的影响，对不同掺量的砂浆进行密度、扩展度、稠度试验，结果如表 2 所示。

表 2 砂浆新拌性能试验记录
Table 2 Test record of fresh mortar performance

试样编号	密度（kg/m ³ ）	扩展度（mm）	稠度（mm）
SJ	2032.5	181.4	34.7
DFSS10	2024	228	77.5
DFSS20	2027.33	206.9	63.3
DFSS30	1811	189.2	41
DFSS40	1993.67	180.1	29
DFSS50	2010.67	181.5	41.3

图 5 为砂浆密度随掺量的变化情况。如图 5 及表 2 所示，随着废弃大理石粉掺量的增加，砂浆的密度在不断下降。当大理石废粉替代量在 30%时，密度达到最低点 1811kg/m³，与 SJ 组相比，降低了 10.90%，降幅最大。

这是因为大理石废粉的比表面积较大，具有较高的吸水性，当大理石粉掺量增加时，为了保证砂浆的流动性，就需要额外添加更多的水。过多的水分在砂浆硬化过程中蒸发，会形成孔隙，这些孔隙会使砂浆的体积增大^[9-10]，从而降低砂浆的密度和强度；最后，砂是有连续级配的，大小不同粒径的颗粒搭配，能达成较为紧密的堆积效果，但大理石废粉的颗粒形态和级配与普通砂浆中的砂等骨料不同。一般来说，大理石废粉颗粒可能更细，形状也较为不规则。当大量掺入时，会破坏原

来砂浆中骨料的良好级配, 使颗粒之间的空隙不能被很好地填充, 导致整体结构变得疏松, 从而使砂浆密度降低^[1]。

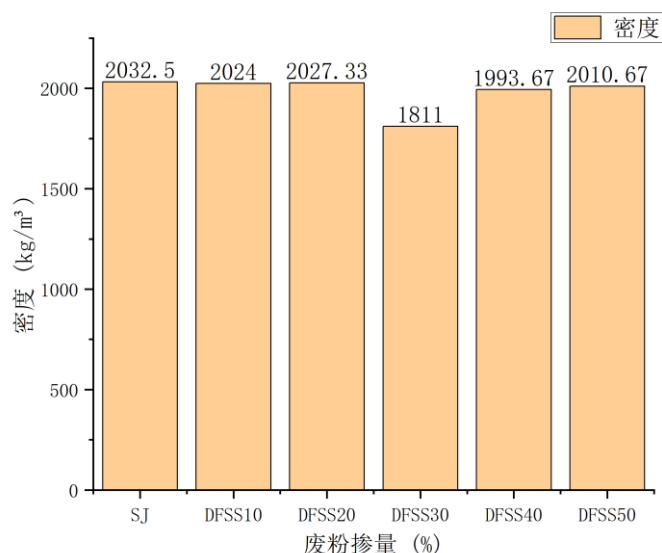


图 5 砂浆密度随掺量的变化情况

Fig. 5 The change of mortar density with dosage

2.2 稠度

通过试验, 得到砂浆稠度随大理石废粉掺量变化的数据, 具体变化趋势见图 6。

如图 6 所示, 砂浆稠度随大理石废粉掺量的增加, 稠度呈现先大幅增加后下降再小幅回升的趋势。废粉替代量为 10% 时稠度最高, 40% 时稠度最低。当废弃大理石粉的掺量分别为 10%、40%、50% 时, 对应的砂浆稠度分别为 77.5 mm、29 mm、41.3 mm。

当废粉掺量从 0 增加到 10% 时, 稠度从 34.7 mm 急剧上升至 77.5 mm。可能是因为大理石废粉在一定程度上会参与水泥的水化反应。掺入适量的大理石粉末可以使水泥中的石灰石反应更充分^[11], 生成新的物质水化硅酸钙 (C-S-H), 增加浆体的内聚力, 使砂浆结构更紧密, 导致稠度上升。其次废粉颗粒能够填充砂颗粒间的部分较大孔隙, 使得砂浆的颗粒级配更为紧密。随着颗粒间的接触点增多而摩擦力增大^[12], 使得砂浆稠度上升。当废粉掺量从 10% 继续增加到 40% 时, 稠度持续下降, 从 77.5 mm 降至 29 mm。这是由于废粉颗粒进一步填充孔隙, 使体系颗粒堆积更加紧密, 孔隙率降低, 尽管颗粒间接触点增多, 但自由水流动更顺畅, 在一定程度上抵消了摩擦力增加的影响, 导致稠度下降^[12]。废粉掺量增加时, 其对水泥的物理稀释作用也会使砂浆体系中的自由水相对增多, 从而降低砂浆稠度^[13]。

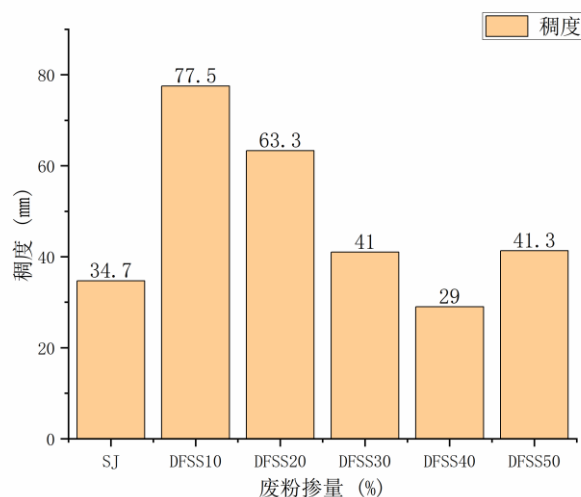


图 6 砂浆稠度随废粉掺量的变化情况

Fig. 6 The change of mortar consistency with the content of waste powder

2.3 流动性

图 7 为不同试验组的砂浆流动扩展度随废粉掺量的变化情况。

在试验组中，随着废粉掺量的增加，砂浆流动扩展度呈现逐渐降低的趋势。如图 7 所示，砂浆流动扩展度在 DFSS10 达到峰值后逐渐下降。DFSS10 扩展度最高为 228 mm，提高了 25.7%，而 DFSS40 最低仅 180.1 mm，降低了 0.72%。

大理石废粉粒径介于水泥与砂之间，10%掺量可优化体系颗粒级配，形成“水泥-废粉-砂”的连续粒径分布。肖凌云等^[14]研究发现，花岗岩废粉取代砂 10%时，混凝土坍落度先增后减，分界点处空隙率最低，颗粒滑动阻力最小。陈丽梅等^[15]通过胶砂试验证实，废粉掺量 5%~10%时，颗粒填充使浆体包裹性增强，流动性提升。肖佳等指出，废粉表面的 CaCO_3 与水泥水化产物交互，减少了自由水的吸附损耗，维持水膜厚度，进一步提升流动性。大理石废粉颗粒表面光滑，10%掺量时可在砂粒间形成“滚珠”结构，降低机械咬合。桂苗苗等^[16]通过复掺试验发现，废粉颗粒的球形度提高了拌合物的触变性，10%掺量时粘聚性与流动性达到平衡。王凤娟等^[17]的混凝土试验证实，10%大理石废粉取代砂时，拌合物屈服应力降低 12%，塑性粘度下降 8%，流动性最优，过量则会导致蓄水量失衡。

根据上述文献可以得知，大理石废粉的掺入可以有效的提高混凝土的流动性。由此也可以得出，大理石废粉的掺入对砂浆流动性也会有一些改善。由于大理石废粉颗粒相对较细，在低掺量时（如 DFSS10），其能够有效地填充于砂粒之间的孔隙中，良好的颗粒级配可减小颗粒间空隙，降低填充水需求^[18]，大理石废粉在低掺量时优化了砂浆颗粒级配，使得砂浆内部结构更加紧密，颗粒间的接触面积增大，摩擦力减小，从而提高了砂浆的流动性和强度；但当废粉掺量过高（如 DFSS50）时，过多的废粉会破坏砂原本的良好堆积结构。此时，砂浆体系中需要更多的水分来包裹和润滑颗粒，导致砂浆的需水量增加。这不仅会使砂浆在搅拌和施工过程中的流动性变差，而且在硬化后，由于水分蒸发留下的孔隙增多，砂浆的强度和耐久性也会受到严重影响^[19]，表现为强度下降和抗渗性、

抗冻性等性能的降低。总体而言，在一定范围内的大理石废粉掺量，可以提高砂浆的流动性和强度。本次试验中最佳掺量为 10%，掺入废粉的砂浆能在施工过程中更好地实现自流平效果，保证铺展均匀性。

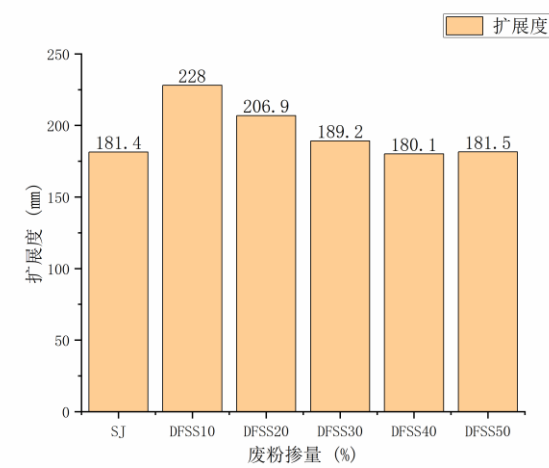


图 7 砂浆扩展度随掺量的变化情况
Fig. 7 Variation of the mortar flow spread diameter

由图 6 和图 7 可得稠度与扩展度呈正相关关系。正常情况下，材料的稠度与扩展度呈负相关，即稠度越大，扩展度越小。但在一些特殊情况下，二者会呈正相关。本次试验的特殊性在于用大理石废粉取代砂制作砂浆。而大理石废粉的颗粒特性、吸水性和化学活性等特性，对砂浆的稠度和扩展度影响较大。这些特性会改变砂浆内部的颗粒结构、水分分布和化学反应，进而影响砂浆的流动性和稠度。大理石废粉主要成分碳酸钙在一定条件下能与水泥水化产物氢氧化钙发生反应，生成碳酸钙凝胶，这会增加砂浆的黏聚性，使稠度增大，同时凝胶能改善颗粒间的润滑，扩展度因此增加，改变了二者原有的负相关关系。废粉中的杂质可能干扰水泥正常水化，延缓或加速水化进程，影响水化产物生成量和结构，进而影响砂浆的稠度和扩展度。

2.4 立方体抗压抗折强度

对不同掺量的砂浆试件进行抗折抗压强度试验，得到不同龄期的强度数据，见表 3 和表 4。其抗折强度和抗压强度随大理石废粉掺量的变化分别见图 8 和图 9。

由图 8 可以看出，试验组抗折强度随大理石废粉掺量的增加呈现先增大后减小的规律，DFSS10 表现出最佳的抗折强度性能，超过 10%后，抗折强度随掺量增加而逐渐降低。DFSS 试件在各个时间点的抗折强度均有所提高，较不掺大理石废粉的试件相比，3d 时的提高幅度最大（16.22%），而 28d 时的提高幅度才（4.92%）。这表明大理石废粉掺量为 10%的试件在早期（3d）对抗折强度的提升效果更为显著，而在后期（7d、14d、28d）的提升效果相对较小。由图 9 可知，DFSS 系列抗压强度随大理石废粉掺量的变化的规律与其抗折强度一致。抗压强度随废粉掺量的增加呈现先升高后下降的趋势，且在废粉掺量为 10%时达到峰值。超过 10%后，抗压强度随掺量增加而逐渐降低。

表 3 试验抗折强度
Table 3 Test flexural strength

抗折强度	3d（MPa）	7d（MPa）	14d（MPa）	28d（MPa）
------	---------	---------	----------	----------

SJ	3. 7	5	5. 8	6. 1
DFSS10	4. 3	5. 1	6	6. 4
DFSS20	3. 8	5. 1	5. 5	6. 2
DFSS30	3. 9	5. 2	5. 3	6. 1
DFSS40	4. 1	4. 8	5. 5	6. 2
DFSS50	4. 2	4. 9	5. 7	6. 3

表 4 试验抗压强度
Table 4 Test compressive strength

试样编号	3d (MPa)	7d (MPa)	14d (MPa)	28d (MPa)
SJ	15. 8	21. 9	26. 3	27. 5
DFSS10	18	23. 9	30. 3	31. 6
DFSS20	12. 6	19. 6	23. 1	24. 1
DFSS30	14. 5	15. 4	19. 4	25
DFSS40	14. 6	21. 6	24. 7	27. 3
DFSS50	15. 1	19. 3	20. 4	25

大理石废粉的颗粒尺寸通常比水泥颗粒大，但比砂颗粒小。当它以 10%的比例取代砂时，能够很好地填充到水泥浆体和砂颗粒之间的空隙中，优化了混凝土的颗粒级配。这使得混凝土内部结构更加密实，减少了孔隙和缺陷，从而提高了混凝土的抗折抗压强度。如果取代比例过高，可能会因大理石废粉过多而导致颗粒堆积，影响整体结构的均匀性和密实性。在水泥水化过程中，微细的大理石废粉可以作为晶核，诱导水泥的水化产物析晶^[20]。张军^[21]、万召华^[22]等指出大理石废粉中 CaCO_3 能加速水泥 C_3S 的早期水化速度，使得浆体强度提高，促进了早期强度的发展，同时，使硬化后的水泥石与集料之间的过渡区密实性得以改善，而过渡区的强度是混凝土强度的决定性因素之一^[23]。10%的取代量能较好地发挥晶核作用，过多则可能会因晶核数量过多而相互干扰，不利于水化产物的正常生长和结构形成。大理石废粉并非完全惰性，其主要成分碳酸钙等可以与水泥水化过程中产生的氢氧化钙发生反应，生成水化硅酸钙凝胶等物质。这些反应产物有助于填充孔隙，使水泥石结构更加密实，从而提高强度。当大理石废粉取代砂比例为 10%时，其参与水化反应的程度较为适宜，能够在不影响其他性能的前提下，最大程度地提高混凝土的抗折抗压强度。如果取代比例过高，颗粒堆积影响结构均匀性和密实性，晶核数量过多相互干扰，反应过于剧烈或生成过多非活性物质，对强度产生不利影响。

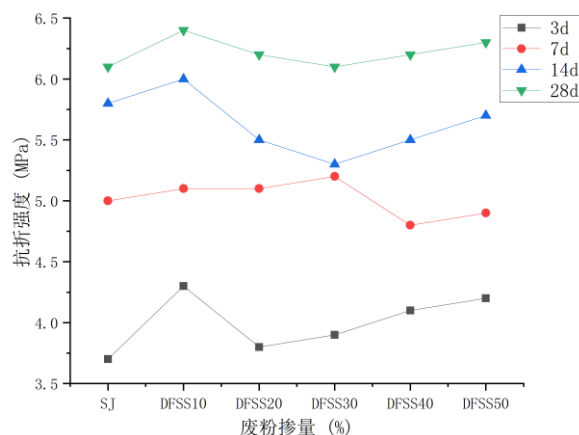


图 8 DFSS 系列抗折强度变化情况

Fig. 8 The change of flexural strength of DFSS series

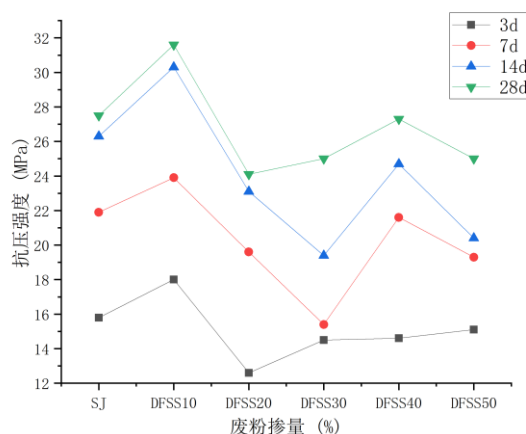


图 9 DFSS 系列抗压强度变化情况

Fig. 9 The change of compressive strength of DFSS series

3 结论

本研究聚焦大理石废粉替代砂对砂浆性能的影响，得出以下关键结论：

(1) 最佳掺量及性能优势：大理石废粉替代砂的最佳掺量为 10%。此时，砂浆扩展度、稠度适宜，施工性能良好；28d 抗折抗压强度较高，能满足工程受力需求。超过 10%时，砂浆多项性能显著下降。

(2) 强度提升特点：10%掺量的试件早期抗折强度提升较快，后期提升较弱；抗压强度变化规律与之相同，均在 10%掺量时达峰值。

(3) 应用可行性及意义：大理石废粉替代砂制备砂浆切实可行。这为废粉资源化利用提供新途径，助力环保型砂浆开发。在实际工程中，可减少天然砂消耗、降低成本、减少废弃物排放，推动建筑行业绿色发展。

4 致谢

本研究的顺利开展特别感谢广西创誉工程检测有限公司梁中华总经理的指导和支持,本研究得到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)、大学生创新训练计划项目(202411838006、202411838034、S202411838154、S202411838155)等项目资助,在此一并表示感谢。

参考文献

- [1] 黄政宏.大理石废粉对砂浆性能的影响研究[D].广东工业大学,2018.
- [2] 鞠丽艳,张雄.废废粉在商品砂浆中的应用研究[J].新型建筑材料,2002,(12):42-43.
- [3] 陈平,张路辉,刘荣进,等.废废粉-锰渣微粉制备自流平砂浆的试验研究[J].混凝土,2016,(11):116-118+122.
- [4] 王嘉杰.云南省白色大理石资源概览[J].石材,2015,(01):47-50.
- [5] 肖佳,郭明磊,何彦琪,等.大理石废粉对水泥基胶凝材料性能影响研究[J].混凝土,2016,(01):99-102.
- [6] 张帆,张金团,李桂山,等.大理石废粉对水泥物理力学性质影响试验研究[J].江西建材,2020,(06):32-33.
- [7] 饶美娟.废弃物的粉末在水泥基材料中的水化机理及性能影响研究[D].武汉大学,2014.
- [8] Corinaldesi V ,Moriconi G ,Naik R T .Characterization of marble powder for its use in mortar and concrete[J]. Construction and Building Materials,2010,24(1):113-113.
- [9] Li L ,Huang Z ,Tan Y , et al.Recycling of marble dust as paste replacement for improving strength, microstructure and eco-friendliness of mortar[J].Journal of Cleaner Production,2019,21055-65.
- [10] 李特,李琦.石粉对混凝土性能影响及微观机理分析[J].佛山科学技术学院学报(自然科学版),2023,41(05):63-67.
- [11] 王军.大理石粉末掺量对水泥混凝土性能的影响研究[J].四川水泥,2023,(04):11-13.
- [12] 童小根,张凯峰,罗作球,等.建筑固废再生砖砂在湿拌砂浆中的应用研究[J].混凝土世界,2023,(02):87-91.
- [13] 吕南,牟志财,张双成.不同比例铁尾矿粉掺量对砂浆和易性和力学性能影响研究[J].广东建材,2024,40(01):25-28.
- [14] 肖凌云,姚翔,沈万玉,等.花岗岩废粉在泵送混凝土中的应用[J].广东建材,2018,34(03):13-16.
- [15] 陈丽梅.机制砂废粉含量对水泥胶砂流动度和强度影响实验研究[J].中国住宅设施,2023,(12):43-45.
- [16] 苏维维,任龙芳,夏京亮,等.不同细度废粉对胶砂性能的影响及碳排放分析[J].混凝土,2024,(07):153-155+159.
- [17] Fengjuan W ,Fanxu M ,Taotao F , et al.Effect of stone powder content on the mechanical properties and microstructure of tunnel slag aggregate-based concrete[J].Construction and Building Materials,2023,388
- [18] 卢文运,高国防,季娟,等.水泥颗粒级配对其性能的影响[J].新型建筑材料,2018,45(04):85-88+92.
- [19] 王圣博,钱宁.建筑垃圾再生微粉在砂浆中的应用研究现状[J].中国住宅设施,2019,(03):82-83+118.
- [20] 施发军.福建石材加工废弃废粉的综合利用[J].福建建材,2013,(10):15-17.
- [21] 张军,裴向军,李正兵.大理石废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.
- [22] 万召华,王勇.大理石废粉对水泥水化性能的影响研究[J].常州工学院学报,2023,36(04):6-11.
- [23] 彭鸿涛,詹镇峰,谢亮,等.大理石、花岗岩废粉对水泥浆体流变性能的影响[J].混凝土,2018,(08):92-95+99.

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)、大学生创新训练计划项目(202411838006、202411838034、S202411838154、S202411838155)

第1作者简介:胡文慧,2004-12,女,本科在读,贺州学院,土木工程专业。E-mail:1458634107@qq.com

第1通讯作者:胡琴,1986-07,女,工程师、助理研究员,研究方向:绿色建筑材料。E-mail:huqin051@hzxy.edu.cn; 张金团,1982-05,男,教授、高级工程师,研究方向:绿色建筑材料。zhangjit@hzxy.edu.cn