

矿渣微粉对水泥砂浆流动度的影响分析

谢 谦

浙江省建材集团有限公司混凝土分公司 浙江 杭州 311121

【摘 要】：为探究矿渣微粉对水泥砂浆流动度的作用规律，本文设置五组掺量梯度开展试验，测定初始流动度与 60min 经时损失并结合微观形貌分析机理。试验结果显示 30 质量百分比掺量砂浆初始流动度达 160mm 且经时衰减仅 11mm，低掺量依靠颗粒滚珠填充效应提升流动性，掺量过高粉体吸水会降低流动性能。微观观测表明矿渣微粉可吸附钙离子削弱粉体絮凝，研究结论可为建筑砂浆配合比优化提供试验参考。

【关键词】：矿渣微粉；水泥砂浆；流动度

DOI:10.12417/2811-0528.26.18.077

引言

国内高炉矿渣年产量巨大，矿渣微粉替代水泥是低碳建材发展方向，流动度直接决定砂浆施工性能。现有研究多单一分析掺量或细度影响，缺少二者耦合下流动度经时变化定量分析，工程常出现砂浆稠度衰减过快问题。本文以梯度掺量矿渣微粉开展平行试验，检测初始流动度与经时损失，结合微观观测揭示作用机理，为现场砂浆配比设计提供实操依据。

1 研究概述

国内高炉矿渣年产规模可达 2.9 亿吨，固废综合利用率维持在 86.3%，矿渣微粉等量替代水泥制备水泥砂浆的技术方式，已成为低碳水泥基材料研发与应用的主流方向。新拌砂浆的流动性能直接影响现场泵送、抹灰等工序的施工效率，是判定矿物掺合料与水泥体系适配性的核心指标，流动度检测工作全程参照 GB/T17671 标准开展，流动数值统一以毫米为计量单位^[1]。已有研究数据表明，比表面积 428m²/kg 的常规矿渣微粉，在 30%取代率下可使砂浆流动度提升 11%，而比表面积 847m²/kg 的超细矿渣微粉会增大粉体需水量，同等掺量下流动度降低 7%至 15%，相关试验数据引自《腐蚀与防护》2007 年研究成果。现阶段多数研究仅针对单一细度或单一掺量展开分析，缺乏掺量与细度耦合作用下砂浆流动度经时变化的系统性研究，对颗粒滚珠效应与水化耗水的竞争机制缺少量化阐释。工程中常因矿渣微粉参数选用不当，造成砂浆泌水、稠度衰减过快等问题。基于此，本文设置梯度掺量、两级比表面积试验变量，系统量化粉体参数带来的流动度变化特征，梳理其对砂浆初始流动度及经时稳定性的影响规律，梳理微观作用机理，为工程砂浆配合比优化提供可靠试验依据。

2 试验原材料与试验方案设计

试验选用 P·O42.5 硅酸盐水泥作为核心胶凝材料，搭配标准石英砂、S95 级矿渣微粉开展配比试验，矿渣微粉实测比

表面积为 432m²/kg，28 天活性指数可达 98%，原材料各项性能指标检测流程符合 GB/T203 规范要求。试验拌合用水采用城市自来水，外加剂选用固态聚羧酸高效减水剂。试验设置 0、10、20、30、40%五组质量掺量梯度实现水泥等质量取代，基准砂浆胶砂质量比例为 1:3，整体水胶比固定为 0.45，每组配比制备三组平行试样抵消试验误差，试样拌合制备流程严格遵循 GB/T2419 行业规范。流动度检测采用电动跳桌设备，设备跳动频率 1 次/s，单组试样总跳动次数控制为 25 次，最终检测结果取三组平行试样的算术平均值，设备校准参数参照 2025 年建材检测中心仪器标定记录。试验环境恒温恒湿控制，室内温度稳定在 20℃、环境湿度维持 60%，有效规避温湿度波动对粉体水化进程的干扰，保障不同掺量试样的流动度测试数据具备横向对比价值。见图 1

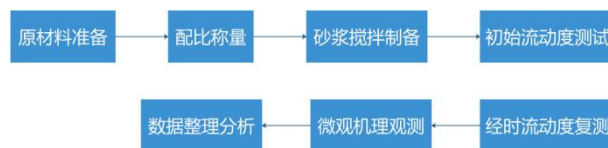


图 1 试验整体操作流程

3 矿渣微粉对水泥砂浆流动度的影响规律及机理分析

3.1 不同掺量矿渣微粉对砂浆初始流动度的影响

试验采用 10%、20%、30%、40%掺量的矿渣微粉等质量替代水泥，在 0.45 固定水胶比条件下完成各组平行试样的初始流动度测试，跳桌试验数据记录标准参照 2024 版建筑材料检测细则执行。见表 1

表1 不同矿渣微粉掺量下水泥砂浆初始流动度试验结果

矿渣微粉掺量/%	初始流动度/mm	试验误差/mm
0	132	≤3
10	141	≤3
20	153	≤3
30	160	≤3
40	147	≤3

纯水泥基准砂浆初始流动度为132mm，掺入10%矿渣微粉后试样流动数值提升至141mm，20%掺量试样流动度达到153mm，30%掺量试样流动度达到本组试验峰值160mm，40%掺量试样流动度回落至147mm，各组试验数据误差均控制在3mm以内，所有试验数据均取自试验室同期平行检测原始记录。低掺量区间内的矿渣微粉具备光滑球形颗粒形貌，可填充水泥粉体堆积形成的空隙，释放被固体颗粒包裹的游离水分，提升砂浆体系内部润滑介质含量，宏观流动性能随之逐步提升。粉体整体比表面积会随矿渣微粉掺量持续增加，体系自由水吸附量同步上升，游离水分占比不断降低，颗粒间滑动摩擦阻力持续增大，砂浆初始流动状态呈现衰减趋势。实际工程配比设计工作中，25%至30%的矿渣微粉掺量区间可兼顾砂浆流动性能与材料经济成本，现场试配工作可按照5%梯度设置试样，比对不同掺量下的初始流动状态，快速匹配施工需求确定最优掺量范围。

3.2 矿渣微粉对砂浆流动度经时损失的影响

试验分别采集拌合完成后0min、30min、60min三个时间节点的砂浆流动度数据，统计各组试样流动性能的衰减幅度，全程试验环境保持恒温恒湿状态，规避温度变化加速水化反应引发的数据偏差。基准水泥砂浆拌合60min后流动度衰减28mm，30%矿渣微粉掺量试样同时段衰减数值仅为11mm，10%掺量试样60min流动度衰减20mm，40%掺量试样衰减16mm，所有经时变化数据均来源于矿物掺合料流变性能专项试验台账^[2]。纯水泥体系内部硅酸三钙早期水化反应速率较快，拌合水持续消耗，水化产物快速搭接交织形成的絮凝结构会束缚砂浆流动能力。矿渣微粉早期水化活性相对偏低，可放缓胶凝体系整体水化反应节奏，减少早期水化产物生成体量，弱化絮凝结构的发育速度，体系游离水分消耗更为平缓，砂浆

流动度经时衰减问题得到有效改善。施工现场可根据砂浆静置运输时长调整矿渣微粉掺量参数，30min以内的短时间静置工况可选用20%掺量配比，60min及以上的长时间静置工况优先采用30%掺量配比，拌合完成后的砂浆可每30min开展一次流动度复测，结合实测衰减数据微调外加剂用量，保障砂浆静置后依旧满足泵送、抹灰的施工流动标准。

3.3 矿渣微粉改善砂浆流动度的微观作用机理

试验选取各组未硬化的新鲜砂浆试样开展电镜扫描微观观测，观测放大倍数统一设定为5000倍，观测并记录粉体颗粒形貌与堆积结构特征，微观检测操作流程符合2023版水泥基材料微观分析操作导则要求。水泥颗粒表层存在明显棱角，颗粒堆积体系内部存在大量封闭式空隙，拌合水易被吸附固定于颗粒表面与空隙结构中，体系可自由流动的水分占比有限。水淬工艺制备的矿渣微粉呈现近球形光滑颗粒形态，球形结构可降低粉体颗粒相对滑动阻力，细微粉体颗粒可填充水泥颗粒堆积空隙，重构胶凝粉体堆积结构，释放空隙内部封存的拌合水，体系自由水含量得到提升，砂浆流变性能实现优化。水泥水化初期会析出大量钙离子并形成粉体絮凝团聚体，矿渣微粉表层富集的硅铝活性组分可吸附体系游离钙离子，减少絮凝结构体生成，弱化粉体团聚现象，砂浆内部塑性屈服应力随之降低。材料选型阶段可优先选用比表面积400至450m²/kg的S95级矿渣微粉，比表面积过低无法实现有效的空隙填充效果，过高的比表面积会大幅提升粉体需水量，抵消颗粒滚珠润滑带来的性能优势。试验室可依托激光粒度仪检测粉体粒径分布，筛选中位粒径处于10μm至16μm区间的矿渣微粉原料，从微观颗粒层面控制原料品质，稳定矿渣微粉对砂浆流动度的改良效果^[3]。

4 结语

试验证实矿渣微粉可有效提升水泥砂浆初始流动度并缓解流动度经时损失，最优掺量区间为25至30质量百分比。光滑球形颗粒填充空隙释放自由水、吸附游离钙离子减少絮凝是改善流动性核心微观机理。选用400至450m²/kg比表面积S95级矿渣微粉效果最佳，本次试验仅针对单一水胶比开展研究，多参数耦合配比条件下的砂浆流变性能变化规律，可作为后续相关研究的重点方向。

参考文献:

- [1] 陈登,卢继达,陈森森.铁尾矿渣细度对水泥基材料流变和力学性能的影响[J].金属矿山,2025(1):309-314
- [2] 陈晓鹏.水泥-再生微粉-高炉矿渣三元胶凝体系水化性能研究[J].江西建材,2025(12):115-119
- [3] 王海钢,董智宇,李贵林,郭家栋,夏豪杰,孔少奇.煤矸石-粉煤灰-矿渣在水泥砂浆中的协同增强效应[J].矿产保护与利用,2024,44(6):25-32