

# 低硅铁尾矿制备抹面砂浆试验研究

李鹏飞<sup>1</sup>, 李育彪<sup>2,3</sup>, 李超前<sup>1</sup>, 陈坤<sup>2,3</sup>, 汤启宙<sup>1</sup>, 吴晓勇<sup>2,3</sup>

1. 武钢资源集团程潮矿业有限公司, 湖北 鄂州 436000;
2. 武汉理工大学 资源与环境工程学院, 湖北 武汉 430070;
3. 矿物资源加工与环境湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430070

中图分类号: TD926.4 文献标识码: A 文章编号: 1001-0076(2022)06-0081-08  
DOI: 10.13779/j.cnki.issn1001-0076.2022.06.011

**摘要** 抹面砂浆用于涂抹在建筑物或建筑构件表面, 起到保护墙体的作用, 提高防潮、防腐蚀、抗风化性能, 增加耐久性; 同时可使建筑达到表面平整、清洁和美观的效果。武钢资源集团程潮矿业有限公司杨家湾尾矿坝低硅铁尾矿堆存量巨大、利用难度大, 以该低硅铁尾矿为原料, 通过添加水泥和外加剂利用水化反应机理制备抹面砂浆, 探究了水胶比、胶砂比、可再分散乳胶粉用量、纤维素醚用量等因素对抹面砂浆性能的影响, 并在水胶比为 0.8、可再分散乳胶粉用量 1.67%、羟丙基甲基纤维素醚用量 0.6%、引气剂用量 0.06%、铁尾矿质量分数为 71.4%(胶砂比 1/2.5)的高掺量条件下制备出和易性较好、稠度和凝结时间合适、抗压强度为 M5 等级、满足《GB/T 25181—2019 预拌砂浆》的铁尾矿抹面砂浆, 为低硅铁尾矿的资源化利用提供了一条有效利用途径。

**关键词** 低硅铁尾矿; 水化反应; 抗压强度; 抹面砂浆

## 前言

随着我国城市化进程的加快及建筑行业的蓬勃发展, 现有建筑面积达到了 400 多亿 m<sup>2</sup>, 且未来 15 年, 建筑业仍将保持较高增长速度, 对抹面砂浆的需求和要求越来越高。铁尾矿等工业固体废弃物具有良好的“形态效应”、“微集料填充效应”, 若将其作为矿物掺合料取代天然砂, 可推动低成本、绿色环保砂浆的研制与发展。

我国铁矿具有品位低、共生矿产多等特点, 选矿过程中往往产生大量尾矿<sup>[1]</sup>。每处理 1 t 铁矿石产生约 0.48 t 铁尾矿<sup>[2]</sup>。2016 年, 我国铁尾矿产生量为 7.98 亿 t, 占当年各类矿山尾矿总产生量的 49.87%, 铁尾矿总堆存量超过 100 亿 t, 综合利用率低于 20%<sup>[3]</sup>。2018 年我国铁尾矿总产量 4.76 亿 t, 约占全国尾矿总产量的 39.3%<sup>[4]</sup>。铁尾矿根据硅含量高低可分为高硅铁尾矿(>45%)和低硅铁尾矿(<45%)<sup>[5]</sup>, 其中高硅铁尾矿可作为机制砂原料、水泥制品原料等建筑材料, 但低硅铁尾矿往往难以综合利用, 需要额外添加含硅物质来满足相关标准。低硅铁尾矿常见的利用方式有

三个: 利用水化热反应原理使低硅铁尾矿代替或部分代替砂石与水泥等材料黏合成强度更高的材料, 如加气混凝土、蒸压砖等<sup>[6-8]</sup>; 利用高温烧结技术制备陶粒、瓷质砖<sup>[7-8]</sup>; 利用高温晶化技术将低硅铁尾矿制备成微晶泡沫玻璃等<sup>[9]</sup>。

采用高温烧结法处理铁尾矿制备建材的能耗高、工艺流程复杂, 而利用水化热反应原理制备建材则无需高温条件, 工艺简单、成本较低。抹面砂浆是利用水化反应制备的一种重要建筑材料, 主要涂抹在建筑物、建筑构件表面以及基底材料的表面, 兼有保护基层和满足使用要求的作用。因此, 利用铁尾矿水化反应进行抹面砂浆制备技术研发, 具有重要现实意义。

## 1 试验

### 1.1 原材料

原料为杨家湾尾矿坝铁尾矿, 通过对不同取样点矿样进行分析测试, 选取合适粒度的铁尾矿作为制备抹面砂浆的骨料, 该铁尾矿各粒级含量和物相分析结果如表 1、图 1 所示。

收稿日期: 2022-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51974215)

作者简介: 李鹏飞(1985—), 男, 河北元氏人, 工程师, 主要从事选矿管理工作, E-mail: 358512150@qq.com。

通信作者: 李育彪(1985—), 男, 湖北武汉人, 教授, 主要从事矿产综合利用研究, Email: yubiao.li@whut.edu.cn。

表 1 铁尾矿各粒级含量

Table 1 Content of iron tailings by particle size

粒级/目	+4	-4+8	-8+16	-16+32	-32+50	-50+100	-100+200	-200+325	-325+400	-400
含量/%	2.12	5.52	3.62	8.92	15.26	16.40	24.60	5.81	2.06	15.69

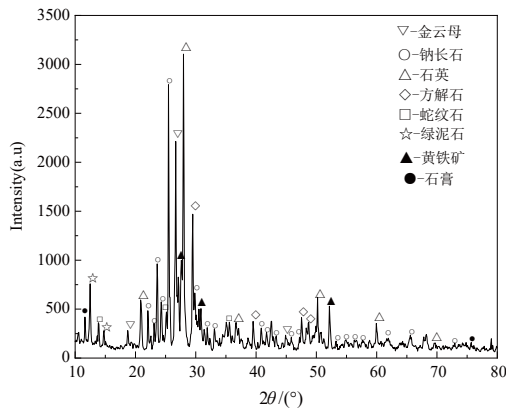


图 1 铁尾矿 XRD 图谱

Fig. 1 XRD pattern of iron tailings

根据表 1 可知, 所取样品+300 μm 颗粒的累积筛余量为 35%, 未达到 GB/T 14684—2011《建设用砂》中颗粒级配标准, 无法直接作为机制砂使用, 但该粒度范围的铁尾矿可作为抹面砂浆等建材细骨料使用。通过 X 射线衍射图谱分析(XRD)可知, 铁尾矿中有金云母、钠长石、石英、方解石等, 进一步进行了 X 射线荧光光谱分析(XRF)和石粉含量测试分析, 结果如表 2 所示。

表 2 铁尾矿 XRF 分析结果

Table 2 XRF results of iron tailings

成分	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TFe	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	MgO	MnO	NiO
含量	35.10	12.93	20.00	11.96	8.37	7.59	1.74	4.62	4.21	0.24	0.02
成分	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PbO	Rb <sub>2</sub> O	SrO	TiO <sub>2</sub>	ZnO	ZrO <sub>2</sub>	BaO	Co <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CuO	Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
含量	0.22	0.02	0.04	0.17	0.69	0.05	0.06	0.21	0.05	0.06	0.01

由表 2 可知, 该尾矿中 SiO<sub>2</sub> 含量 35.10%, 为低硅铁尾矿, 利用难度较大。进一步利用亚甲蓝法测定其含泥量, 如表 3 所示, MB 值测定为 0.5 g/kg, 小于标准规定的 1.4 g/kg, 判定以石粉为主(-75 μm 小于 15%), 满足 GB 51032—2014《铁尾矿砂混凝土应用技术规范》中作为抹面砂浆的骨料要求。

表 3 铁尾矿石粉含量测试结果

Table 3 Test results for stone dust content of iron tailings

样品	MB (亚甲蓝值)/(g·kg <sup>-1</sup> )	MB 标准值/(g·kg <sup>-1</sup> )	-75 μm 含量/%
铁尾矿	0.5	1.4	12.48

胶凝材料为华新 42.5 普通硅酸盐水泥(华新水泥股份有限公司), 混凝土添加剂有引气剂(山东省莱阳市宏祥建筑外加剂厂), 可再分散乳胶粉(德国瓦克), 羟丙基甲基纤维素醚(HPMC)(上海阿拉丁试剂有限

公司), 脱模剂采用混凝土试件高效脱模剂(武汉佳华建材有限公司)。混凝土添加剂的添加量均为胶凝材料的质量分数。

## 1.2 试验设备

激光粒度分析仪(Mastersizer 2000), 英国马尔文仪器有限公司; X 射线衍射仪(X'Pert PRO)、X 射线荧光衍射仪(Axios), 荷兰帕纳科公司; 水泥砂浆搅拌机(JJ-5), 沧州建仪中科路桥试验仪器有限公司; 优质工程塑料标准试件模具(70 mm×70 mm×70 mm), 北京中交建仪科技发展有限公司; 砂浆稠度仪(SC-145), 北京中交建仪科技发展有限公司; 数显式液压压力试验机(YE8-400), 济南天辰试验机制造有限公司; ISO 水泥标准稠度凝结时间测定仪(维卡仪), 无锡华南实验仪器有限公司; 砂浆保水率测定仪, 河北菲尔德仪器设备有限公司; 标准恒温恒湿养护箱(YH-4013), 河北中柯达仪器有限公司。

## 1.3 试验流程

利用铁尾矿制备抹面砂浆, 按照一定质量配比称取所需原料; 置于水泥胶砂搅拌机(搅拌速率 300 r/min)中搅拌 2~3 min 混合均匀, 加入一定量水, 搅拌 3 min, 适宜的成型料浆温度为 15~30 °C; 搅拌均匀后的浆料倒入模具中, 室温下静置 24 h 后脱膜, 适宜的成型环境温度为 5~35 °C; 养护方式, 标准恒温恒湿养护箱养护(20±1 °C, 湿度 95%); 测定砂浆保水率、稠度、凝结时间等; 28 d 养护后得测试样, 进行抗压强度、干密度等测试。测试方法均按照 JGJ/T 70—2009《建筑砂浆基本性能试验方法标准》测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 水胶比试验

水泥的水化反应是砂浆强度的直接来源, 是指在水的作用下水泥中各组分与之发生化合作用, 从无水状态转变为含结合水状态的反应过程, 包含水解和水合两个阶段, 主要产物为水化硅酸钙和钙矾石<sup>[10-11]</sup>。没有水的存在, 水化反应就无法进行。为探究用水量与胶凝材料水泥用量的比值(水胶比)对抹面砂浆性能的影响, 固定胶砂比(水泥用量与尾矿用量比值)为 1/2.5、可再分散乳胶粉用量 2.0%、纤维素醚 0.8%、引气剂 0.08%, 进行不同水胶比(1~0.75)的条件试验。抹面砂浆部分性能指标如表 4 所示。

表 4 水胶比对抹面砂浆性能的影响

Table 4 Effect of water-binder ratio on the performance of plastering mortars

编号	水胶比	稠度/mm	保水率/%	凝结时间/min		和易性
				初凝	终凝	
1-1	1.00	115	>99	420	720	较好
1-2	0.95	110	>99	420	720	较好
1-3	0.90	103	>99	420	720	较好
1-4	0.85	95	>99	390	690	合适
1-5	0.80	90	>99	390	690	合适
1-6	0.75	83	>99	390	660	合适

由表 4 可知, 随水胶比增加, 抹面砂浆稠度呈递增趋势, 当水胶比大于 0.95 时, 抹面砂浆稠度  $\geq 110$  mm, 不满足 GB/T 25181—2019《预拌砂浆》中普通抹面砂浆的基本稠度标准要求; 由于铁尾矿石粉含量较高, 故吸水率较大, 水胶比大小对抹面砂浆的保水率影响不大, 保水率都大于 99%, 满足标准中对保水率的要求; 随水胶比增加, 抹面砂浆的初凝时间及终凝时间都有所增加, 初凝时间为 5~7 h 内, 终凝时间为 10~12 h 内, 满足凝结时间要求, 能达到预期产品目标, 砂浆的和易性较好。

进一步针对表 4 中试验条件下制备的砂浆制品进行性能测试, 探究水胶比对 28 d 抗压强度的影响, 结果如图 2 所示。

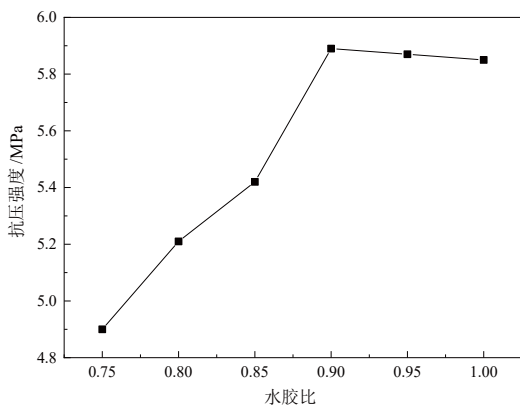


图 2 水胶比对抹面砂浆 28 d 抗压强度的影响  
Fig. 2 Effects of water-binder ratio on the compressive strength of plastered mortar at 28 d

由图 2 可以看出, 在水胶比 0.75~0.90 范围内, 随水胶比增大, 28 d 抗压强度逐渐增强, 在水胶比为 0.90 时, 28 d 抗压强度达到最高值 5.89 MPa; 水胶比在 0.9~1.0 之间, 抗压强度趋于平稳, 并有减弱趋势。主要原因是: 当水胶比较小时, 铁尾矿中的微细粒填充在砂浆中, 吸收大量水分, 导致水泥水化作用较弱; 当水胶比较大时, 水泥水化时水分较多, 尾矿砂浆较稀, 尾矿和水泥接触面积大, 水化反应均匀完全, 因此其抗压强度比水胶比较低时要高。综合以上抹面砂浆性能及抗压强度等指标, 后期试验选用最优水胶比

0.80。

## 2.2 胶砂比试验

普通硅酸盐水泥作为重要的无机胶凝材料, 具有较强胶凝性, 在该研究中可用于增强砂浆早期强度<sup>[12]</sup>。为了探明水泥对该体系普通湿拌抹面砂浆性能的影响, 将胶砂比作为变量进行相关研究。为探究胶砂比对抹面砂浆性能的影响, 按上述基础配比, 砂浆的水胶比取 0.8, 其他条件不变, 进行了不同胶砂比的条件试验, 胶砂比根据抹面砂浆制备的设计要求, 选用范围为 1/2.5~1/4.0。抹面砂浆部分指标性能如表 5 所示。

表 5 胶砂比对抹面砂浆性能影响

Table 5 Effects of binder-sand ratio on the performance of plastering mortars

编号	胶砂比	稠度/mm	保水率/%	凝结时间/min		和易性
				初凝	终凝	
2-1	1/2.5	90	>99	390	690	较好
2-2	1/3.0	84	>99	420	720	较好
2-3	1/3.5	71	>99	420	720	较好
2-4	1/4.0	53	>99	420	720	合适

由表 5 可知, 随胶砂比增加, 抹面砂浆稠度逐渐减小, 且变化幅度较大, 从胶砂比为 1/2.5 时的 90 mm 降低到了胶砂比为 1/4.0 时的 53 mm, 下降了 41%; 由于铁尾矿吸水率大, 抹面砂浆保水率仍 >99%; 此外, 随胶砂比增加, 抹面砂浆的初凝时间及终凝时间都有所增加, 主要是由于铁尾矿填隙的水泥量减少, 水化反应变慢, 凝结时间变长, 砂浆初凝时间为 5~7 h, 终凝时间为 10~12 h, 满足砂浆凝结时间要求。

胶砂比对 28 d 抗压强度的影响结果如图 3 所示。

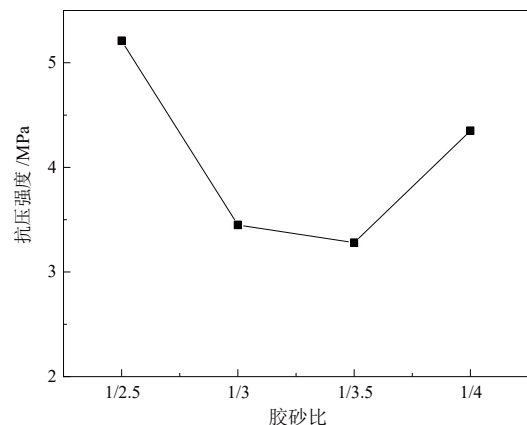


图 3 胶砂比对抹面砂浆 28 d 抗压强度的影响  
Fig. 3 Effects of binder-sand ratio on compressive strength of plastered mortar at 28 d

如图 3 所示, 随胶砂比增加, 抹面砂浆 28 d 抗压强度呈现先降低后上升的趋势, 从胶砂比为 1/2.5 时的抗压强度 5.21 MPa 到胶砂比为 1/3.5 时的最低抗压强度 3.28 MPa, 抹面砂浆抗压强度下降了 37%。然而,

随胶砂比进一步增加到 1/4.0, 其抗压强度又增加到 4.35 MPa, 但是稠度指标不满足。可能原因是: 随胶砂比增加, 水泥水化反应减弱, 抗压强度减小; 当尾矿量足够大时, 铁尾矿填充到砂浆中, 增加了砂浆密实度, 导致抗压强度上升。由于低硅铁尾矿的硅含量低、吸水量高等性质, 只有胶砂比为 1/2.5 时, 抹面砂浆能达到 M5 标准。综合稠度、和易性等性能以及抗压强度等指标, 选用后续试验最优胶砂比为 1/2.5。

### 2.3 可再分散乳胶粉掺量试验

可再分散乳胶粉可以改善新拌砂浆的流动性能, 同时具有引气作用, 过量使用会起到增稠作用<sup>[13-14]</sup>。为探究可再分散乳胶粉掺量对抹面砂浆性能的影响, 进行了不同掺量的条件试验, 胶砂比为 1/2.5, 其他条件不变, 可再分散乳胶粉掺量为 1%~2.67%。抹面砂浆部分指标性能如表 6 所示。

表 6 可再分散乳胶粉掺量对抹面砂浆性能的影响  
Table 6 Effects of dispersible emulsion powder dosage on the performance of plastering mortar

编号	可再分散 乳胶粉掺量/%	稠度/mm	保水率/%	凝结时间/min		和易性
				初凝	终凝	
3-1	1	93	>99	390	660	较差
3-2	1.33	92	>99	390	690	较差
3-3	1.67	94	>99	390	690	合适
3-4	2.0	95	>99	390	690	合适
3-5	2.33	101	>99	420	720	合适
3-6	2.67	103	>99	420	720	较好

由表 6 可以看出, 随着可再分散乳胶粉用量的增加, 抹面砂浆稠度总体呈递增趋势, 掺量为 1.0%~2.0% 时, 稠度缓慢增加, 当掺量大于 2.0% 时, 稠度迅速增加, 当掺量为 2.33% 以上时, 稠度超过 100 mm; 可再分散乳胶粉掺加可以改善抹面砂浆的保水性能, 加上铁尾矿吸水率较大, 抹面砂浆保水率都大于 99%, 满足抹面砂浆保水率要求; 随可再分散乳胶粉用量的增加, 初凝时间及终凝时间都有所增加, 但都在标准要求范围内, 能达到预期的目标。

可再分散乳胶粉掺量对抹面砂浆 28 d 抗压强度影响结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 随可再分散乳胶粉掺量的增加, 抹面砂浆 28 d 抗压强度呈递减趋势, 掺量增加到 1.67% 时, 抗压强度从 5.62 MPa 降到 5.19 MPa; 掺量增加到 2.33%, 抗压强度降到 5.05 MPa, 但都大于 5 MPa, 满足《预拌砂浆》标准中 M5 强度等级要求; 随可再分散乳胶粉掺量继续增加到 2.67%, 抗压强度下降到 4.87 MPa。这可能主要是由于乳胶粉中含有表面活性物质, 与砂浆一起搅拌时会引入一定微气泡, 乳胶粉掺量越大, 引入的气泡量越大, 砂浆湿容重越低、收缩率越大、

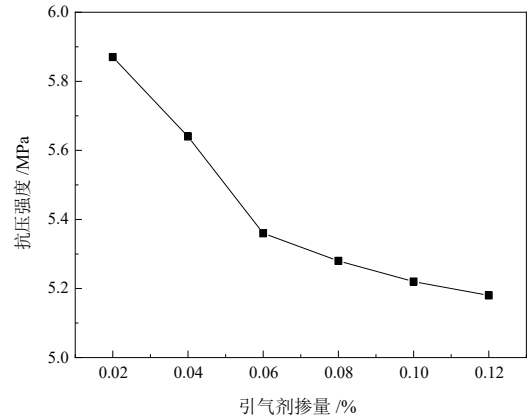


图 4 可再分散乳胶粉掺量对抹面砂浆 28 d 抗压强度的影响  
Fig. 4 Effects of redispersible powder admixture on compressive strength of plastered mortar at 28 d

抗压强度越小。张国防等认为可再分散乳胶粉改变了砂浆孔结构, 增大了砂浆的总孔隙率和平均孔直径<sup>[15]</sup>; 王培铭等则认为可再分散乳胶粉加剧砂浆的孔结构三维曲折度分布差异<sup>[16]</sup>。综合以上抹面砂浆的性能及抗压强度等指标, 后续试验可再分散乳胶粉掺量为 1.67%。

### 2.4 羟丙基甲基纤维素醚掺量试验

砂浆中使用低掺量的纤维素醚即可显著改善砂浆性能, 发挥保水、增稠、改善施工等性能。具有良好的保水性, 对抹面砂浆的水化进程起一定保障作用, 避免干燥开裂发生<sup>[17-20]</sup>; 施工性能主要表现在明显改善砂浆流动性和湿黏性<sup>[21]</sup>。为探究羟丙基甲基纤维素醚掺量对抹面砂浆性能的影响, 进行了不同掺量的条件试验, 可再分散乳胶粉掺量为 1.67%, 其他条件不变, 羟丙基甲基纤维素醚掺量为 0.2%~1.2%。抹面砂浆部分指标性能如表 7 所示。

表 7 羟丙基甲基纤维素醚掺量对新拌抹面砂浆性能的影响  
Table 7 Effects of HPMC dosage on the properties of freshly mixed plastered mortar

编号	纤维素醚 掺量/%	稠度/mm	保水率/%	凝结时间/min		和易性
				初凝	终凝	
4-1	0.2	93	>99	390	690	较差
4-2	0.4	92	>99	420	720	较差
4-3	0.6	93	>99	420	720	较好
4-4	0.8	93	>99	450	690	较好
4-5	1.0	95	>99	450	720	合适
4-6	1.2	94	>99	480	720	合适

如表 7 所示, 随纤维素醚掺量增加, 抹面砂浆稠度有增加趋势, 但变化幅度不大, 在 92~95 mm 内; 此外, 纤维素醚对于砂浆凝结时间也有一定影响, 随掺量增加呈不断增长趋势<sup>[22]</sup>, 纤维素醚掺量少于 0.6% 时,

其凝结时间都满足预期目标;纤维素醚主要是通过影响砂浆孔结构演变而改变了水分的传输方式<sup>[18]</sup>。但是本试验中,骨料为铁尾矿,吸水率较高,所以纤维素醚掺量对铁尾矿抹面砂浆的保水率影响较小,保水率都大于 99%;此外,纤维素醚的掺入可有效提高砂浆流动度,即对抹面砂浆的施工和易性有明显提升作用<sup>[23-24]</sup>,主要原因是:纤维素醚在抹面砂浆中起到引气剂作用,引入一定量气泡,在砂浆起到了“滚珠轴承”作用,从而显著改善砂浆和易性<sup>[22]</sup>。

纤维素醚对抹面砂浆 28 d 抗压强度的影响结果如图 5 所示。

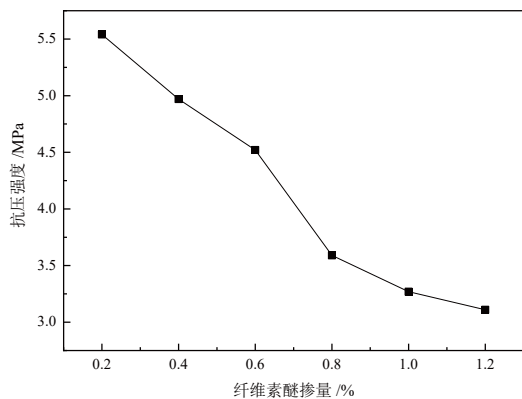


图 5 羟丙甲基纤维素醚掺量对抹面砂浆 28 d 抗压强度的影响

Fig. 5 Effects of HPMC dosage on compressive strength of plastered mortar at 28 d

从图 5 中试块强度的变化曲线可知,纤维素醚可显著降低砂浆抗压强度。当纤维素醚掺量为 0.2%~1.2% 时,砂浆的 28 d 抗压强度下降幅度较大,从 5.54 MPa 降低到 3.11 MPa,降幅为 43.9%。随纤维素醚掺量增加,砂浆强度的降低趋势相对减小,可能是由于砂浆在快速搅拌过程中,引入大量空气,转化为细小气泡存在于浆体中,由于纤维素醚的加入,增加了砂浆黏性,对气泡起到了稳定作用,阻止其向外部逸出,形成了大量封闭的微观孔隙,增加砂浆孔隙率,使微观结构变得更加松散,同时对水化产物生长起抑止作用<sup>[18]</sup>,进一步降低砂浆抗压强度。综合砂浆上述性能指标,后续试验纤维素醚掺量选择 0.6%。

## 2.5 引气剂掺量试验

引气剂是建筑砂浆添加剂内最常用的一种,少量的引气剂可以改善砂浆和易性,提高砂浆抗渗性和抗冻性,引气剂对预拌砂浆初期流变性能的改善成为推动其广泛应用的重要力量<sup>[25]</sup>。为探究混凝土引气剂掺量对抹面砂浆性能的影响,进行了混凝土引气剂不同掺量的条件试验,纤维素醚掺量为 0.6%,其他条件不变,引气剂掺量为 0.02%~0.12%。抹面砂浆部分指标性能如表 8 所示。

表 8 混凝土引气剂掺量对新拌抹面砂浆性能的影响

Table 8 Effects of concrete air-entraining agent dosage on the performance of freshly mixed plastered mortar

编号	引气剂 / %	稠度 / mm	保水率 / %	凝结时间 / min		和易性
				初凝	终凝	
5-1	0.02	85	>99	390	690	粘刀
5-2	0.04	95	>99	420	720	粘刀
5-3	0.06	96	>99	420	720	合适
5-4	0.08	98	>99	450	690	合适
5-5	0.10	96	>99	450	720	合适
5-6	0.12	97	>99	480	720	合适

如表 8 所示,掺入引气剂后,砂浆稠度增大到 98 mm 后趋于平缓,和易性得到明显改善,凝结时间也随之增加。主要原因是:引气剂改善了砂浆气液界面活性,在砂浆搅拌过程引入大量微小密闭气泡,使引气剂在气泡周围定向排列,降低了表面张力,使气泡稳定存在<sup>[26-27]</sup>。微小密闭气泡像“滚珠”填充在砂浆中,从而降低了砂浆的砂粒间摩擦力,改善了砂浆和易性<sup>[26-28]</sup>。当引气剂掺量超过 0.08% 时,砂浆稠度在 96~98 mm 波动,因为引气剂引入的气泡增多,其表面形成的水膜增多,需要消耗一部分水,所以引气剂掺量应该控制在合理范围内。

引气剂对抹面砂浆 28 d 抗压强度的影响结果如图 6 所示。

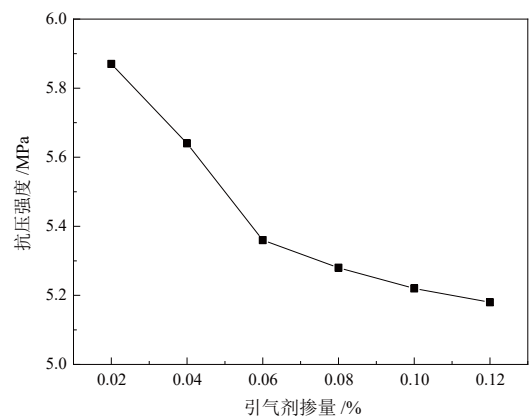


图 6 引气剂掺量对抹面砂浆 28 d 抗压强度的影响

Fig. 6 Effects of air-entraining agent dosage on compressive strength of plastered mortar at 28 d

引气剂掺量较小时,改善了铁尾矿抹面砂浆的和易性,当掺量为 0.02% 时,砂浆 28 d 抗压强度最高达到 5.87 MPa,但是增加引气剂掺量,砂浆抗压强度呈下降趋势。主要原因是:随引气剂掺量增加,砂浆搅拌过程中引入的气泡增多,使砂浆孔径变大,砂浆孔隙率和含气量增加,减小了胶凝材料浆体的有效面积,降低砂浆抗压强度<sup>[26,29-30]</sup>。引气剂掺量为 0.12% 时,抹面砂浆抗压强度降至 5.18 MPa,仍能满足砌筑砂浆 M5 的强度等级要求。综合砂浆上述性能指标,引气

剂最佳掺量为 0.06%。

## 2.6 最优条件试验

单因素条件试验确定的低硅铁尾矿制备抹面砂浆最优原料配比为胶砂比 1/2.5、水胶比 0.8、可再分散乳胶粉用量 1.67%、羟丙基甲基纤维素醚用量 0.6%、引气剂用量为 0.06%，由于不同试验阶段操作过程中外界温度、水温等条件发生了变化或测试误差，不同试验阶段所得试件测试指标存在一定差异。因此，在 20±1 ℃ 的环境温度及水温条件下，进行最优条件重复试验，试验获得试件干密度 1 498.5 kg/m<sup>3</sup>，28 d 抗压强度，5.28 MPa，稠度 96 mm，保水率 >99%，导热系数 0.133 8 W/(m·K)，和易性较好，可见试件能满足国标《GB/T 25181—2019 预拌砂浆》中强度等级 M5 级的砂浆要求。

## 3 结论

本研究针对程潮矿业有限公司杨家湾尾矿坝中的低硅尾矿制订了该铁尾矿的分级综合利用路线，利用高掺量的低硅铁尾矿成功制备出一种和易性较好、稠度和凝结时间适中的 M5 等级的抹面砂浆，满足《GB/T 25181—2019 预拌砂浆》中普通抹面砂浆的要求。为低硅铁尾矿提供了一种有效利用途径，同时拓宽了抹面砂浆的原材料范围，节省了原材料成本，使尾矿等固体废弃物得到了资源化利用，对低碳环保和建筑节能减排具有重要现实意义。

(1) 抹面砂浆抗压强度随水胶比和水泥用量增大而逐渐增大，当水胶比 0.80、胶砂比 1/2.5 时，制备的抹面砂浆强度较高，稠度、保水率、和易性较好，抗压强度等指标满足国标《GB/T 25181—2019 预拌砂浆》中强度等级 M5 级要求。

(2) 抹面砂浆抗压强度随可再分散乳胶粉用量增加先增大后减小，稠度逐渐增加；抹面砂浆的抗压强度随聚丙烯纤维用量增加呈下降趋势，适量纤维素醚可显著提高抹面砂浆和易性；引气剂可明显改善砂浆和易性，抗压强度随其用量的增加先增大后减小。

(3) 低硅铁尾矿抹面砂浆最佳原料配比为胶砂比为 1/2.5、水胶比为 0.8、可再分散乳胶粉用量为 1.67%、羟丙基甲基纤维素醚用量 0.6%、引气剂用量为 0.06%，在 20±1 ℃ 的条件下，制得抹面砂浆 28 d 抗压强度为 5.28 MPa，稠度为 96 mm，保水率 ≥99%，和易性较好。

### 参考文献：

- [1] 陈永亮. 鄂西低硅铁尾矿烧结制砖及机理研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2012.  
CHEN Y L. Preparation and mechanism of fired bricks and tiles with low-silicon iron tailings from wtbesern huel [D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2012.
- [2] 卢瑞植, 甘敏, 林欣威. 矿山尾矿资源综合利用现状及前景分析[J].

现代矿业, 2020, 36(12): 5-7.

LU R Z, GAN M, LIN X W. Current situations and prospect analysis discussion of mines tailings comprehensive utilization[J]. Modern Mining, 2020, 36(12): 5-7.

- [3] 范敦城. 齐大山铁尾矿预富集—深度还原提铁及尾渣综合利用研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2018.  
FAN D C. Research on pre-concentration and deep reduction of Qidashan iron ore tailings and the comprehensive utilization of tailings [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2018.
- [4] 张彪, 姜春志. 铁尾矿资源综合利用及研究进展[J]. 中国金属通报, 2020(21): 68-69.  
ZHANG B, JIANG C Z. Comprehensive utilization and research progress of iron tailings resources[J]. China Metal Bulletin, 2020(21): 68-69.
- [5] 赵云良. 低硅铁尾矿制备蒸压砖技术及机理研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.  
ZHAO Y L. Preparation technology and mechanism of autoclaved bricks made from low silicon iron tailings [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012.
- [6] 王长龙, 倪文, 李德忠, 等. 山西灵丘低硅铁尾矿制备加气混凝土的试验研究[J]. 煤炭学报, 2012(7): 1129-1133.  
WANG C L, NI W, LI D Z, et al. Experimental study of using Shanxi Lingqiu low-silica iron ore tailings to produce aerated concrete[J]. Chinese Journal of Coal, 2012(7): 1129-1133.
- [7] 王德民, 雷国元, 宋均平, 等. 低硅铁尾矿陶粒的制备与应用[J]. 金属矿山, 2013(9): 163-166.  
WANG D M, LEI G Y, SONG J P, et al. Preparation and utilization of ceramsite made of low silica iron tailings[J]. Metal Mine, 2013(9): 163-166.
- [8] 王德民, 胡百昌, 储腾跃, 等. 低硅铁尾矿制备建筑陶粒及其性能研究[J]. 新型建筑材料, 2016(2): 36-38.  
WANG D M, HU B C, CHU T Y, et al. Study on preparation and performances of building ceramsite with low silica iron tailings[J]. New Building Materials, 2016(2): 36-38.
- [9] 陈晓晓. 低硅铁尾矿制微晶玻璃的试验研究[J]. 矿产综合利用, 2011(5): 41-44.  
CHEN X L. Experimental research on preparation of glass-ceramics using low-silicon iron tailings[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2011(5): 41-44.
- [10] 彭小芹, 兰聪, 王淑萍, 等. 水化硅酸钙粉体对水泥水化反应过程及机理的影响[J]. 建筑材料学报, 2015, 18(2): 195-201.  
PENG X Q, LAN C, WANG S P, et al. Effects of the C-S-H powder on the hydration process and mechanism of cement[J]. Journal of Building Materials, 2015, 18(2): 195-201.
- [11] 郭磊. 水泥水化反应研究与进展[J]. 商品与质量, 2019(23): 252.  
GUO L. Research and progress of cement hydration reaction[J]. The journal quality of goods, 2019(23): 252.
- [12] 严子伟, 刘黎, 孙晋峰, 等. 铝酸三钙和碳酸钙对硅酸盐水泥早期力学强度及凝结时间的协同作用研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(5): 1470-1476.  
YAN Z W, LIU L, SUN J F, et al. Synergistic effect of tricalcium aluminate and calcium carbonate on early mechanical strength and setting time of portland cement[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(5): 1470-1476.
- [13] X. C, R. FAcrylic Powder modified portland cement[J]. Cement, Concrete and Aggregates, 1995, 17(2): 218-226.
- [14] PHAN V. Relationship between the adhesive properties and the rheological behavior of fresh mortars[D]. Ecole Normale Supérieure

- de Cachan, 2012.
- [ 15 ] 张国防, 王培铭. E/VC/VL三元共聚物对水泥砂浆孔结构和性能的影响[J]. 建筑材料学报, 2013, 16(1): 111-114.  
ZHANG G F, WANG P M. Effects of ethylene/vinyl chloride/vinyl laurate redispersible terpolymer on pore structure and properties of cement mortar[J]. Journal of Building Materials, 2013, 16(1): 111-114.
- [ 16 ] 王培铭, 赵国荣, 张国防. 可再分散乳胶粉在水泥砂浆中的作用机理[J]. 硅酸盐学报, 2018(2): 256-262.  
WANG P M, ZHAO G R, ZHANG G F. Mechanism of redispersible polymer powder in cement mortar[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2018(2): 256-262.
- [ 17 ] 李玉海. “增粘剂”对纤维素醚在砂浆中应用性能的影响初探[J]. 新型建筑材料, 2018, 45(3): 97-100.  
LI Y H. Discussion on effect of thickener to the application performance of cellulose ether in mortar[J]. New Building Materials, 2018, 45(3): 97-100.
- [ 18 ] 王培铭, 赵国荣, 张国防. 纤维素醚在新拌砂浆中保水增稠作用及其机理[J]. 硅酸盐学报, 2017, 45(8): 1190-1196.  
WANG P M, ZHAO G R, ZHANG G F. Mechanism on Water Retention and Thickening of cellulose ethers in fresh mortars[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2017, 45(8): 1190-1196.
- [ 19 ] 闫孝伟. 新型湿拌砂浆外加剂的研究[J]. 四川建材, 2019, 45(7): 19-21.  
YAN X W. Study on new wet mixed mortar admixture[J]. Sichuan Building Materials, 2019, 45(7): 19-21.
- [ 20 ] 熊捷, 康兰艳, 叶君. 纤维素醚在干混砂浆中的应用进展[J]. 化工进展, 2009(6): 1043-1046.  
XIONG J, KANG L Y, YE J. Progress in the application of cellulose ethers for dry-mixed mortar[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2009(6): 1043-1046.
- [ 21 ] 李玉海, 贺平. 纤维素醚表面改性对瓷砖胶拉伸胶粘强度的影响[J]. 新型建筑材料, 2015, 42(4): 81-83.  
LI Y H, HE P. Effect of cellulose ethers surface treatment on bonding strength of tile adhesive[J]. New Building Materials, 2015, 42(4): 81-83.
- [ 22 ] 柳京育, 单俊鸿, 李春, 等. 脱硫石膏基无砂自流平砂浆的制备与性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2021, 40(11): 3654-3661.  
LIU J Y, SHAN J H, LI C, et al. Preparation and performance of desulphurized gypsum-based sandless self-leveling mortar[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2021, 40(11): 3654-3661.
- [ 23 ] 李连勇, 岳建伟, 来强. 外墙保温抗裂砂浆性能试验研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2011, 41(2): 214-216.  
LI L Y, YUE J W, LAI Q. Test on anti-crack mortar for exterior wall thermal insulation[J]. Journal of Henan University(Natural Science), 2011, 41(2): 214-216.
- [ 24 ] 戴民, 魏征, 李秀. 聚合物砂浆保水性研究[J]. 混凝土, 2015(7): 128-130.  
DAI M, WEI Z, LI X. Performance of high water retention of cement mortar[J]. Concrete, 2015(7): 128-130.
- [ 25 ] 权娟娟, 王宁, 郭增辉, 等. 引气剂对新拌砂浆性能的影响研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(9): 2681-2685.  
QUAN J J, WANG N, GUO Z H, et al. Effect of air-entraining agent on the properties of fresh mortar[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(9): 2681-2685.
- [ 26 ] 肖力光, 李根壮, 蒋大伟. 引气剂对火山渣干混保温砌筑砂浆性能的影响[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(4): 73-76.  
XIAO L G, LI G Z, JIANG D W. Effect of air entraining agent on performance of volcanic slag dry-mixed thermal insulation masonry mortar[J]. New Building Materials, 2019, 46(4): 73-76.
- [ 27 ] 任崑崑, 柯国炬, 何晓雁, 等. 基于表面张力和温度的引气剂和引气水泥砂浆性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2015, 34(2): 331-334.  
REN W Y, KE G J, HE X Y, et al. Property research on air-entraining agent and air-entrained cement mortar based on surface tension and temperature[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2015, 34(2): 331-334.
- [ 28 ] 范树景, 王培铭. 引气剂对玻化微珠保温砂浆长期干燥收缩的影响[J]. 建筑材料学报, 2016, 19(1): 1-7.  
FAN S J, WANG P M. Effect of air entraining agents on the long-term drying shrinkage of glazed hollow beads thermal insulation mortar[J]. Journal of Building Materials, 2016, 19(1): 1-7.
- [ 29 ] 冯晓乔, 虞爱平. 掺引气剂和聚氨酯混合砂浆保温隔热性能试验研究[J]. 新型建筑材料, 2020, 47(5): 108-111.  
FENG X Q, YU A P. Experimental study on thermal insulation performance of polyurethane mixed mortar mixed with air entraining agent[J]. New Building Materials, 2020, 47(5): 108-111.
- [ 30 ] 朱绘美, 王培铭, 张国防. 引气剂对水泥基饰面砂浆泛白的影响及其机理[J]. 建筑材料学报, 2017, 20(1): 1-6.  
ZHU H M, WANG P M, ZHANG G F. Effect of air entraining agent on efflorescence of cement-based decorative mortar and its mechanism[J]. Journal of Building Materials, 2017, 20(1): 1-6.

## Preparation of Plastering Mortar from Low-silicon Iron Tailings

LI Pengfei<sup>1</sup>, LI Yubiao<sup>2,3</sup>, LI Chaoqian<sup>1</sup>, CHEN Kun<sup>2,3</sup>, TANG Qizhou<sup>1</sup>, WU Xiaoyong<sup>2,3</sup>

1. WISCO Resources Group Chengchao Mining Company Limited, Ezhou 436000, China;

2. School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

3. Hubei Key Laboratory of Mineral Resources Processing and Environment, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China

**Abstract:** Plastering mortar is a kind of mortar that mainly used on the surface of buildings or building elements, thereby protecting walls, improving moisture resistance, corrosion resistance and weathering resistance, and increasing its durability. Meanwhile, a flat, clean and beautiful building surface can be achieved after applying the plastering mortar. The stockpiling of large tailings in Yangjiawan tailings pond of WISCO Resources Group Chengchao Mining Co. LTD has difficulties for utilization due to its low-silica contents. In this paper, the effects of water-binder ratio, binder sand ratio, dispersible emulsion powder dosage, cellulose ether dosage and other factors on the performance of plastering mortar were investigated. A high admixture of 71.4% iron tailings (binder-sand ratio 1/2.5) was used to prepare the plastering mortar. The tailing-made plastering mortar with good compatibility, suitable consistency and setting time, and compressive strength of M5 grade was prepared, providing an effective way for the resource utilization of the large amount of low-silicon iron tailings in this tailing pond.

**Keywords:** low silica iron tailings; hydration reaction; compressive strength; plastering mortar

引用格式: 李鹏飞, 李育彪, 李超前, 陈坤, 汤启宙, 吴晓勇. 低硅铁尾矿制备抹面砂浆试验研究[J]. 矿产保护与利用, 2022, 42(6): 81-88.

LI Pengfei, LI Yubiao, LI Chaoqian, CHEN Kun, TANG Qizhou, WU Xiaoyong. Preparation of plastering mortar from low-silicon iron tailings[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources, 2022, 42(6): 81-88.

投稿网址: <http://hcbh.cbpt.cnki.net>

E-mail: [kcbh@chinajournal.net.cn](mailto:kcbh@chinajournal.net.cn)