

# 工业废渣制备矿山充填胶凝材料的工艺优化与性能调控

侯万梅<sup>1,2</sup> 王鹏程<sup>1,2</sup> 郭燕<sup>1,2</sup> 唐大才<sup>1,2</sup> 褚长永<sup>3</sup> 张廷亮<sup>4</sup> 李贵琦<sup>4</sup>

1. 西部矿业集团科技发展有限公司 青海 西宁 810006

2. 青海省高原矿物加工工程与综合利用重点实验室 青海 西宁 810006

3. 西部矿业股份有限公司锡铁山分公司 青海 大柴旦 816203

4. 巴彦淖尔西部铜业有限公司 内蒙古 巴彦淖尔 015599

**摘要:** 本文聚焦工业废渣制备矿山充填胶凝材料, 先分析工业废渣特性并筛选, 阐述制备工艺, 涵盖流程、原料预处理、混合与粉磨。接着探讨性能调控, 明确目标, 分析激发剂与掺合料的作用。通过多种测试方法评价胶凝材料性能, 包括基本性能、微观结构、充填性能。结果表明, 优化后的胶凝材料满足矿山充填需求, 实现资源循环利用与成本降低。

**关键词:** 工业废渣; 矿山充填; 胶凝材料; 工艺优化

引言: 矿山充填对保障开采安全、减少环境破坏意义重大, 胶凝材料是关键。传统胶凝材料成本高、资源消耗大, 工业废渣的利用成为研究热点。工业废渣种类多、特性复杂, 科学筛选与合理利用是制备高性能胶凝材料的前提。本文深入分析工业废渣特性并筛选, 优化制备工艺, 调控性能, 通过系统测试评价其应用于矿山充填的可行性, 为资源循环利用提供新思路。

## 1 工业废渣的特性分析与筛选

工业废渣作为工业生产过程的副产物, 种类繁多, 特性各异。其物理特性方面, 不同废渣的粒度、密度、硬度等差异显著。化学特性上, 废渣成分复杂, 含有的金属氧化物、硅酸盐等成分比例不同, 部分废渣还含有有害物质。如氟石膏渣含有氟, 若处理不当会对环境造成严重污染。对工业废渣进行筛选至关重要。筛选时, 需综合考虑多方面因素<sup>[1]</sup>。首先依据其化学成分, 判断是否具有潜在利用价值, 如含硅、铝高的废渣可用于生产建材。其次考虑物理特性, 适合做路基材料的废渣应具备一定强度和稳定性。再者, 要评估环境影响, 优先筛选无害或低害的废渣进行处理利用。通过科学筛选, 能将工业废渣变废为宝, 实现资源循环利用, 减少对自然资源的开采, 降低环境污染, 推动工业可持续发展。

## 2 工业废渣制备矿山充填胶凝材料的制备工艺

### 2.1 制备工艺流程概述

工业废渣制备矿山充填胶凝材料的工艺流程呈系统性递进模式, 以“原料处理—配料混合—粉磨均化—成品储存”为核心主线。首先从各工业排放点收集废渣, 经初步分拣去除大块杂质后输送至预处理单元; 预处理后的废渣与水泥熟料、激发剂等辅助原料按设计比例进

入配料系统, 通过电子计量设备精准控制各组分量; 配料完成后送入混合机进行预混合, 确保物料初步分散均匀; 随后将混合物料送入球磨机或立磨机进行粉磨, 控制粉磨时间和转速以保证成品细度达标, 粉磨过程中可通过调节通风量控制物料温度; 粉磨后的物料经选粉机筛选, 不合格粗粉返回磨机重新粉磨, 合格细粉进入成品仓储存; 最后根据充填作业需求, 将成品胶凝材料与骨料、水按比例混合制成充填浆料, 通过管道输送至矿山采空区。整个流程需严格控制各环节参数, 确保成品性能稳定。

### 2.2 原料预处理方法

原料预处理是提升胶凝材料性能的关键环节, 针对不同废渣特性采用差异化处理方法。对于颗粒粗大、成分不均的高炉矿渣、钢渣、铅锌铜冶炼渣, 先采用颚式破碎机进行粗碎, 再通过圆锥破碎机细碎至粒径小于10mm, 破碎过程中通过磁选设备去除废渣中的金属杂质, 减少对后续设备的磨损。冶炼渣若含水量较高(超过15%), 需进入烘干机采用热风干燥, 控制出口水分在5%以下, 避免储存和粉磨过程中结块; 对于含有机杂质的粉煤灰, 可通过低温焙烧(300-400℃)去除有机物, 提升活性<sup>[2]</sup>。电石渣因呈糊状且含水量高, 需先经压滤机脱水至含水率30%左右, 再进行烘干破碎, 至粒径符合要求, 同时通过筛分设备分级, 不同粒径组分分别储存备用。所有预处理后的原料需进行成分检测, 确保各项指标满足配料要求, 检测不合格的原料需重新处理或调整配比。

### 2.3 混合与粉磨工艺

混合工艺采用“预混合+二次混合”的双重混合模

式,提升物料均匀性。预处理后的各原料按配比进入双轴桨叶混合机进行预混合,混合时间控制在3-5min,桨叶转速为150-200r/min,通过变频调速确保物料充分分散,避免局部成分集中。预混合后的物料送入球磨机进行粉磨,磨机规格根据产能确定,装球量为磨机有效容积的40%-50%,钢球级配采用大、中、小三级搭配(如 $\Phi 100\text{mm}$ 、 $\Phi 60\text{mm}$ 、 $\Phi 30\text{mm}$ ),级配比例为3:4:3,提升粉磨效率。粉磨过程中控制磨机转速为20-25r/min,通风量为1.5-2.0 $\text{m}^3/\text{min}$ ,通过风温调节控制磨机内温度不超过100 $^{\circ}\text{C}$ ,防止激发剂提前反应。粉磨时间根据成品细度要求确定,通常为2-3h,当物料比表面积达到400-450 $\text{m}^2/\text{kg}$ 时停止粉磨。粉磨后物料经斗式提升机送入选粉机,分选效率控制在85%以上,合格成品进入成品仓,粗粉返回磨机进行二次粉磨。

### 3 工业废渣制备矿山充填胶凝材料的性能调控

#### 3.1 性能调控的目标与要求

性能调控以满足矿山充填工程实际需求为核心目标,明确“强度适配、流动性良好、稳定性优异、经济性合理”四大核心要求。强度方面,根据充填部位不同制定差异化指标,采场接顶充填要求28d抗压强度不低于3.5MPa,采空区下部充填要求28d抗压强度不低于3MPa,同时早期强度需满足脱模和承载需求,3d抗压强度不低于0.92MPa。流动性要求胶凝材料浆体初始坍落度不小于200mm,扩展度不小于300mm,静置1h后坍落度损失率不超过15%,确保浆体在管道输送过程中不堵塞、不离析。稳定性要求浆体分层度不超过30mm,硬化后体积收缩率低于0.5%,避免出现裂缝影响充填体整体性。经济性要求通过优化配比降低水泥等高价原料掺量,工业废渣利用率不低于70%,同时控制制备成本较传统胶凝材料降低10%以上,实现资源利用与成本控制的平衡。

#### 3.2 激发剂对胶凝材料性能的调控

激发剂通过破坏工业废渣玻璃体结构、促进水化反应进程实现性能调控,不同类型激发剂调控效果存在显著差异。碱性激发剂(如氢氧化钠、水玻璃)可快速提升浆体pH值,破坏废渣中硅氧键和铝氧键,释放活性硅、铝离子,加速水化硅酸钙、水化铝酸钙等胶凝产物生成,3d抗压强度可提升30%-50%,但过量掺加会导致浆体凝结时间缩短,掺量超过5%时易出现早期开裂。硫酸盐激发剂(如石膏、硫酸钠)与废渣中的铝酸钙反应生成水化硫铝酸钙,该产物呈针状晶体交织分布,可显著提升胶凝材料早期强度和抗渗性,石膏掺量为4%-6%时,28d抗压强度提升20%-30%,但掺量过高会导致后期强度倒缩。复合激发剂(如氢氧化钠+石膏)可发挥协同

效应,氢氧化钠加速早期反应,石膏优化产物结构,当二者掺量比例为1:3时,胶凝材料3d和28d抗压强度分别提升45%和35%,同时改善浆体流动性,坍落度损失率降低10%。

#### 3.3 掺合料对胶凝材料性能的调控

掺合料通过“活性补充、颗粒级配优化、水化进程调节”实现性能调控,合理选用可提升胶凝材料综合性能。矿粉作为高活性掺合料,掺量为20%-30%时可补充钙、硅成分,促进水化产物生成,28d抗压强度提升15%-25%,同时细化孔径分布,抗渗性提升30%以上<sup>[3]</sup>。硅灰粒径细小(平均粒径0.1-0.3 $\mu\text{m}$ ),比表面积大,掺量为5%-10%时可填充胶凝材料内部孔隙,形成致密结构,抗压强度提升20%-30%,但掺量过高会导致浆体流动性下降,需搭配减水剂使用。石灰石粉作为惰性掺合料,掺量为10%-15%时可优化颗粒级配,降低浆体泌水率,同时减少高价原料用量,制备成本降低8%-12%,但掺量超过20%会导致强度明显下降。掺合料复掺时需注重协同效应,如矿粉+硅灰(比例3:1)复掺,可同时提升强度和致密性,28d抗压强度提升35%-45%。

### 4 工业废渣制备矿山充填胶凝材料的性能测试与评价

#### 4.1 性能测试方法与标准

性能测试严格遵循国家标准和行业规范,确保测试结果准确可靠。强度测试依据《水泥胶砂强度检验方法(ISO法)》(GB/T 17671-1999),采用40mm $\times$ 40mm $\times$ 160mm棱柱体试块,在标准养护条件(温度20 $\pm$ 2 $^{\circ}\text{C}$ ,湿度 $\geq$ 90%)下养护至3d、7d、28d后,通过压力试验机进行抗压强度和抗折强度测试,加载速率控制在2.4kN/s $\pm$ 0.2kN/s。流动性测试依据《水泥净浆流动度测定方法》(GB/T 8077-2012),采用截锥圆模(上口直径36mm、下口直径60mm、高度60mm),将浆体装入模中振捣后拔模,测量浆体扩散直径作为流动度指标。微观结构分析采用扫描电子显微镜(SEM)观察试块水化产物形貌,依据《水泥水化产物的扫描电子显微镜分析方法》(JC/T 1086-2008),选取试块中心区域取样,经喷金处理后进行观测;采用X射线衍射仪(XRD)分析矿物组成,扫描范围为5 $^{\circ}$ -80 $^{\circ}$ ,扫描速率为5 $^{\circ}/\text{min}$ 。充填性能评价参照《矿山充填技术规范》(YS/T 5418-2021),通过现场工业试验测试浆体输送阻力、充填体完整性等指标。

#### 4.2 胶凝材料的基本性能测试

基本性能测试涵盖强度、流动性、凝结时间、泌水率等关键指标。强度测试结果显示,优化配比后的胶凝材料3d抗压强度为1.2MPa、抗折强度为0.3MPa,7d抗

压强度为2.5MPa、抗折强度为0.6MPa, 28d抗压强度为3.8MPa、抗折强度为0.9MPa, 完全满足矿山下部充填强度要求; 若用于接顶充填, 调整配比后28d抗压强度可提升至5.2MPa。流动性测试中, 初始流动度为520mm, 静置1h后流动度为450mm, 坍落度损失率为13.5%, 符合长距离管道输送要求(流动度  $\geq$  400mm)。凝结时间测试采用维卡仪法, 初凝时间为3h20min, 终凝时间为5h10min, 避免了早期凝结导致的管道堵塞问题。泌水率测试依据《混凝土泌水率测定方法》(GB/T50080-2016), 静置2h后泌水率为2.1%, 低于标准要求的3%, 确保充填体结构均匀, 无分层现象。

#### 4.3 胶凝材料的微观结构分析

微观结构分析通过SEM和XRD揭示胶凝材料水化机理和性能提升本质。SEM观测显示, 养护3d的试块内部存在大量絮状水化硅酸钙(C-S-H)凝胶和少量针状水化硫铝酸钙(AFt)晶体, 凝胶结构疏松, 存在较多孔隙; 养护7d后, C-S-H凝胶数量显著增加, AFt晶体交织分布, 孔隙数量减少, 结构更致密; 养护28d后, C-S-H凝胶形成连续网络结构, AFt晶体填充于凝胶间隙, 孔隙进一步细化, 平均孔径从3d的50nm降至28d的20nm, 致密结构为高强度提供支撑。XRD分析表明, 养护前原料特征峰以石英、长石等惰性矿物为主; 养护3d后出现C-S-H和AFt特征峰, 峰值较弱; 养护28d后, C-S-H和AFt特征峰强度显著提升, 石英等惰性矿物特征峰强度降低, 说明废渣中活性成分充分参与水化反应。

#### 4.4 胶凝材料的充填性能评价

充填性能评价通过实验室模拟和现场工业试验综合开展, 确保胶凝材料适配矿山实际工况。实验室模拟输送测试采用管径100mm、长度50m的模拟管道, 浆体流

速控制在1.5-2.0m/s, 测试结果显示管道沿程阻力损失为8-10kPa/m, 低于传统胶凝材料的12-15kPa/m, 输送能耗降低30%以上, 且连续输送2h后管道无结垢现象。现场工业试验选取某铁矿1200m水平采空区, 充填面积为500m<sup>2</sup>, 充填厚度为3m, 采用管道输送浆体, 输送距离为800m, 浆体到达充填工作面时流动度为430mm, 满足充填作业要求。充填完成后28d, 现场钻芯取样测试显示, 充填体抗压强度为3.6MPa, 与实验室测试结果偏差小于5%; 充填体表面平整, 无明显裂缝, 钻孔成像显示内部结构均匀, 无空洞、分层等缺陷。另外, 充填体与围岩粘结强度测试为0.8MPa, 粘结性能良好, 有效保障了采空区稳定性, 综合评价该胶凝材料完全满足矿山充填工程需求。

#### 结束语

本研究成功利用工业废渣制备出满足矿山充填需求的胶凝材料。通过科学的筛选、优化的工艺及精准的性能调控, 实现工业废渣的高效利用, 不仅降低制备成本, 还减少对自然资源的开采和环境污染。未来, 可进一步拓展废渣种类, 优化配比与工艺, 提升胶凝材料性能, 推动其在更多矿山工程中的应用, 促进矿业可持续发展。

#### 参考文献

- [1]尹晓灿.浅谈充填采矿法[J].中国金属通报,2024,(11):33-35.
- [2]路燕泽,王立杰,王社光,王庆刚,何伟.钢渣基复合充填胶凝材料开发及配比优化[J].中国矿业,2022,31(11):123-128.
- [3]杨富磐.煤化工废渣资源化利用中焦油提取及分离技术创新[J].现代盐化工,2025,52(03):74-76.