

低能耗充填采矿中新型胶凝材料研发及性能优化

温 平

伊金霍洛旗九泰热力有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 017200

摘要: 充填采矿是矿山绿色高效开采的核心技术,胶凝材料是充填体强度的关键,其能耗与性能影响采矿的效率、成本和生态效益。传统胶凝材料存在能耗高、依赖高标号水泥、成本高、适配性不足等问题。本文聚焦低能耗充填采矿需求,研发新型胶凝材料并优化性能。通过工业固废协同利用构建体系,研发低能耗制备工艺并探究机理。因此,新型材料可降低能耗,满足工程需求,实现固废利用,为低能耗充填采矿提供支撑,推动矿山开采转型。

关键词: 新型胶凝材料; 工业固废; 低能耗; 充填采矿; 性能优化

引言: 随着绿色矿山建设推进和“双碳”目标落地,低能耗、低污染、资源化成为矿山开采核心方向。充填采矿技术因能控制地表沉陷、保护生态被广泛应用。胶凝材料是充填采矿核心,其性能与能耗影响工程质量和成本等。传统充填胶凝材料依赖高标号水泥,存在能耗高、碳排放大、成本高、耐腐蚀性差等短板,难以适配低能耗需求。且工业固废堆存多、利用率低,占用土地还易污染生态。本文开展新型胶凝材料研发及性能优化研究,为绿色矿山建设提供技术支撑。

1 新型胶凝材料体系构建与作用机理

1.1 材料组成设计

新型胶凝材料体系以“低能耗、资源化、高性能”为目标,用工业固废为主料,搭配少量激发剂与改性剂,替代传统高能耗水泥。主料选粉煤灰、矿渣粉、煤矸石粉,前两者富含活性成分作核心活性组分,后者经研磨改性作填充组分,降低成本并改善级配。激发剂用复合碱性激发剂,由生石灰、水玻璃复配,无需高温煅烧,可激发活性组分。改性剂选聚丙烯酰胺与纳米 SiO_2 ,分别改善流动性和提升强度稳定性。通过正交试验优化组分比例,确定最佳掺量,构建兼顾低能耗、高性能与经济性的新型体系。

1.2 协同激发机制

新型胶凝材料的协同激发机制主要体现在工业固废活性组分与复合激发剂的相互作用,实现水化反应的高效推进与强度提升。复合激发剂中的生石灰遇水生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,提供强碱性环境,破坏工业固废颗粒表面的惰性氧化层,使活性 SiO_2 、 Al_2O_3 充分暴露,为水化反应创造条件;水玻璃与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应,生成具有胶结作用的水化硅酸钙、水化铝酸钙凝胶,填充材料内部孔隙,提升胶凝强度。三种工业固废之间存在协同互补作用,粉煤灰的球形颗粒可改善材料流动性,矿渣粉的高活性可提

升早期强度,煤矸石粉的填充作用可优化颗粒级配,减少孔隙率^[1]。同时,改性剂与激发剂协同作用,纳米 SiO_2 可加速水化反应速率,促进水化产物生成,聚丙烯酰胺可降低材料内部摩擦力,提升流动性,三者协同实现胶凝材料性能的协同提升,确保充填体早期强度与长期稳定性。

1.3 微观结构演化

新型胶凝材料微观结构决定宏观性能,通过 SEM 观察不同龄期微观形貌。水化初期(1-3d),孔隙多,颗粒表面轻微反应,生成少量松散凝胶,结构疏松,强度低。水化中期(7-14d),在激发剂作用下,大量凝胶生成并交织,包裹颗粒、填充孔隙,结构致密,强度显著提升。水化后期(28d及以上),反应平缓,产物积累形成连续致密网络,包裹颗粒,孔隙率降低,结构稳定,强度稳定。表明复合激发剂可优化微观结构,提升宏观性能。

2 低能耗充填采矿对胶凝材料的性能要求及传统材料短板分析

2.1 低能耗充填采矿的工程需求

低能耗充填采矿以“节能、环保、高效、经济”为核心原则,对胶凝材料的性能提出明确且严格的要求,主要体现在强度、流动性、稳定性、低能耗及经济性五个方面。强度方面,胶凝材料需具备足够的早期强度(3d强度 $\geq 1.5\text{MPa}$)与长期强度(28d强度 $\geq 3.0\text{MPa}$),确保充填体能够快速承载,控制采场围岩变形,防止坍塌事故发生。流动性方面,胶凝材料需具备良好的流动性,坍落度控制在180-220mm,确保能够通过管道顺利输送至采空区,避免管道堵塞,提升充填效率。稳定性方面,胶凝材料需具备良好的体积稳定性与耐腐蚀性,长期处于矿山地下水环境中不发生开裂、溃散,确保充填体长期稳定。低能耗方面,胶凝材料制备过程需大幅降低能

耗,避免高温煅烧等高能耗环节,契合低能耗采矿要求。经济性方面,胶凝材料需降低原料成本,充分利用工业固废,减少对高标号水泥的依赖,降低充填采矿总成本。

2.2 传统充填胶凝材料性能短板

当前矿山充填采矿中广泛使用的传统胶凝材料以高标号水泥为主,搭配少量掺合料,存在诸多性能短板,难以适配低能耗充填采矿需求。一是能耗与碳排放高,水泥制备需经过高温煅烧(1450°C左右),能耗巨大,且每生产1吨水泥约排放1吨二氧化碳,不符合低碳环保要求。二是成本偏高,高标号水泥价格昂贵,且用量较大,导致充填采矿成本居高不下,制约其规模化应用。三是性能适配性差,传统水泥基胶凝材料早期强度增长缓慢,流动性不佳,易出现管道堵塞问题,且耐腐蚀性较差,长期处于矿山地下水环境中易发生强度衰减,影响充填体稳定性。四是资源利用率低,未有效利用工业固废,不仅增加材料成本,还造成资源浪费与生态污染^[2]。另外,传统胶凝材料的凝结时间难以调控,无法适配不同采场的充填需求,进一步限制其在低能耗充填采矿中的应用。

2.3 新型胶凝材料研发方向

结合低能耗充填采矿的工程需求与传统胶凝材料的性能短板,新型胶凝材料的研发方向主要聚焦四个方面,实现低能耗、高性能、资源化与经济性的协同。一是资源化利用工业固废,以粉煤灰、矿渣粉、煤矸石粉等工业固废为主料,替代传统高标号水泥,降低材料成本与能耗,同时解决工业固废堆存污染问题,实现资源循环利用。二是研发低能耗制备工艺,避免高温煅烧等高能耗环节,优化制备流程,降低制备过程中的能耗与碳排放,契合低能耗采矿要求。三是提升材料综合性能,通过组分优化与激发剂改性,实现胶凝材料早期强度、长期强度、流动性、稳定性的协同提升,适配不同采场的充填需求,避免管道堵塞与强度衰减问题。四是实现性能可调控,通过调整组分比例与激发剂掺量,调控胶凝材料的凝结时间、强度增长速率,满足不同充填工艺与采场条件的需求,同时进一步降低材料成本,推动新型胶凝材料的规模化应用。

3 低能耗新型胶凝材料研发与制备

3.1 新型胶凝材料组分设计

新型胶凝材料组分设计以“低能耗、资源化、高性能”为核心,结合工业固废特性与低能耗充填采矿需求,通过正交试验优化各组分比例,确定最佳组分方案。主料选用粉煤灰、矿渣粉、煤矸石粉,其中粉煤灰掺量为35%~45%,矿渣粉掺量为25%~35%,煤矸石粉掺量为15%~25%,三种固废掺量总和达到90%以上,大幅减少

水泥用量,实现资源化利用。激发剂选用生石灰与水玻璃复配的复合碱性激发剂,生石灰掺量为3%~5%,水玻璃掺量为2%~4%,无需高温煅烧,降低制备能耗,同时确保能有效激发工业固废活性。改性剂选用聚丙烯酰胺与纳米SiO₂,聚丙烯酰胺掺量为0.1%~0.3%,用于改善材料流动性,纳米SiO₂掺量为0.5%~1.5%,用于提升材料强度与稳定性。通过组分优化,新型胶凝材料既实现工业固废资源化利用,又降低能耗,同时兼顾强度与流动性需求。

3.2 低能耗制备工艺研发

新型胶凝材料制备工艺以“低能耗、简化流程、高效环保”为原则,研发无需高温煅烧的常温制备工艺,大幅降低制备能耗。制备流程主要包括原料预处理、混合搅拌、陈化养护三个环节,原料预处理阶段,将粉煤灰、矿渣粉、煤矸石粉分别进行研磨,控制粒径在80~120目,去除杂质,提升材料活性;复合激发剂制备阶段,将生石灰与水玻璃按比例混合,加入适量水搅拌均匀,常温放置30分钟,确保激发剂活性充分发挥;混合搅拌阶段,将预处理后的工业固废、复合激发剂、改性剂与水按比例投入搅拌设备,搅拌15~20分钟,确保混合均匀;陈化养护阶段,将制备好的胶凝材料放入恒温恒湿养护箱(温度20°C、湿度90%),养护至规定龄期,无需高温养护,进一步降低能耗。整个制备工艺流程简单、能耗低,且无废气、废水排放,契合环保要求^[3]。

3.3 新型胶凝材料初步制备与外观表征

按照优化后的组分方案与低能耗制备工艺,开展新型胶凝材料初步制备试验,制备不同龄期的胶凝材料试样,进行外观表征与初步性能检测。外观表征结果显示,新型胶凝材料搅拌均匀后呈均匀细腻的灰白色糊状,无结块、分层现象,流动性良好,能够顺利倒入试模,符合充填输送要求。养护1d后,试样表面平整、无裂纹,初步凝结成型;养护3d后,试样强度明显提升,表面致密,无明显孔隙;养护7d及以上,试样表面更加致密光滑,无开裂、溃散现象,体积稳定性良好。通过肉眼观察与手持检测,新型胶凝材料的外观形态、流动性与凝结特性均优于传统水泥基胶凝材料,初步验证了组分设计与制备工艺的合理性。同时,采用激光粒度分析仪对胶凝材料颗粒级配进行检测,结果显示颗粒级配合理,粗细颗粒搭配均匀,为后续性能优化奠定了良好基础。

4 新型胶凝材料性能优化及机理分析

4.1 性能优化目标与原则

新型胶凝材料性能优化以适配低能耗充填采矿工程需求为核心目标,明确具体优化指标:3d早期强度

$\geq 1.8\text{MPa}$, 28d长期强度 $\geq 3.5\text{MPa}$, 坍落度控制在190-230mm, 体积收缩率 $\leq 0.5\%$, 耐腐蚀性满足矿山地下水环境使用要求, 同时进一步降低制备能耗与材料成本。性能优化遵循三大原则, 一是协同优化原则, 兼顾强度、流动性、稳定性等综合性能, 避免单一性能提升导致其他性能下降; 二是低能耗原则, 优化过程中不增加制备能耗, 不引入高能耗工艺与原料; 三是经济性原则, 优化方案需降低材料成本, 充分利用工业固废, 提升材料性价比。通过明确优化目标与原则, 确保性能优化工作有序推进, 最终实现新型胶凝材料与低能耗充填采矿的精准适配。

4.2 性能优化方案与实施

基于性能优化目标与原则, 结合初步制备试验结果, 制定针对性的性能优化方案并分步实施。一是组分比例优化, 通过单因素试验调整各组分掺量, 增加矿渣粉掺量至30%-40%, 提升材料早期强度; 减少煤矸石粉掺量至10%-20%, 降低孔隙率; 优化复合激发剂比例, 将生石灰与水玻璃掺量调整为4%-6%与3%-5%, 增强激发效果; 调整改性剂掺量, 聚丙烯酰胺0.2%-0.4%、纳米 SiO_2 1.0%-2.0%, 提升流动性与强度。二是制备工艺优化, 延长搅拌时间至20-25分钟, 确保原料混合更加均匀; 优化养护条件, 养护前期(1-7d)温度控制在22-25 $^{\circ}\text{C}$, 湿度保持90%以上, 加速水化反应, 提升早期强度。三是添加辅助改性剂, 引入少量石膏(掺量1%-2%), 调控凝结时间, 避免早期开裂。按照优化方案实施后, 新型胶凝材料综合性能显著提升, 各项指标均达到优化目标, 适配低能耗充填采矿需求。

4.3 性能优化机理分析

新型胶凝材料性能优化的核心机理的是通过组分比例与制备工艺调整, 强化工业固废活性激发与微观结构优化, 实现宏观性能提升。组分比例优化后, 矿渣粉掺量增加, 其富含的活性 SiO_2 、 Al_2O_3 与复合激发剂的反应更加充分, 生成更多水化硅酸钙、水化铝酸钙凝胶, 提

升材料强度; 煤矸石粉掺量减少, 降低材料内部孔隙率, 优化颗粒级配, 增强结构致密性; 激发剂比例优化, 进一步提升碱性环境强度, 加速活性组分激发, 缩短水化反应时间, 提升早期强度; 改性剂掺量调整, 聚丙烯酰胺增加材料黏性与流动性, 纳米 SiO_2 填充微观孔隙, 促进水化产物交织, 提升结构稳定性^[4]。制备工艺优化延长搅拌时间, 确保各组分均匀混合, 避免局部反应不充分; 优化养护条件, 为水化反应提供适宜环境, 加速水化产物生成与积累, 进一步优化微观结构。辅助改性剂石膏的加入, 可调节胶凝材料凝结时间, 避免早期水化过快导致的开裂, 提升体积稳定性, 最终实现新型胶凝材料综合性能的协同优化。

结束语

低能耗充填采矿是绿色矿山建设要道, 新型胶凝材料是其核心支撑, 研发与优化意义重大。本文围绕需求开展研究, 构建以工业固废为主料的新型体系, 明确机制与规律, 完成制备、优化及机理分析。优化后的材料能耗降低、性能达标, 实现固废利用。但存在规模化制备技术不成熟等问题, 未来需加强产学研协同, 优化规模化制备工艺, 开展现场工业试验, 持续提升材料性能与适配性。

参考文献

- [1]胡俭,李艳,范生军,等.矿用HPG-CGCS复合凝胶材料的制备与性能研究[J].安全与环境学报,2025,25(11):4188-4201.
- [2]阮竹思,武鹏杰,吴爱祥,等.矿用精炼渣基早强胶凝材料配比优化与水化机理[J].中国有色金属学报,2023,33(9):3064-3076.
- [3]孙伟吉,刘浪,徐龙华,等.改性镁渣基矿用复合胶凝材料的水化性能[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(10):4057-4070.
- [4]王志强,韩海生,刘若华,等.尾矿在碱激发胶凝材料中的应用:现状、挑战与前景[J].有色金属(选矿部分),2026(1):37-49.