

矿山充填胶凝材料力学性能与耐久性协同提升机制研究

侯万梅^{1,2} 王佳^{1,2} 唐大才^{1,2} 郭燕^{1,2} 李向荣³ 杨亮³ 权开兴⁴

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. 巴彦淖尔西部铜业有限公司 内蒙古 巴彦淖尔 015599

4. 西部矿业股份有限公司锡铁山分公司 青海 大柴旦 816203

摘要: 本文聚焦矿山充填胶凝材料, 阐述其核心概念、理论基础与性能评价指标体系, 分析材料组分、环境养护等因素对力学性能与耐久性的影响, 并排序关键因素。提出协同提升技术优化策略, 构建协同评价体系, 给出不同场景材料选型建议及工程应用保障措施, 旨在实现材料力学性能与耐久性协同提升, 推动矿山充填技术发展。

关键词: 矿山充填; 胶凝材料; 力学性能; 耐久性

引言: 矿山充填采矿技术中, 胶凝材料是关键。其能将固体废弃物胶结固化, 形成有强度和稳定性的充填体, 对控制地压、减少地表沉陷及固废资源化意义重大。然而, 当前矿山充填胶凝材料在力学性能与耐久性协同提升方面面临挑战。基于此, 深入研究其协同提升机制, 对优化材料性能、提高矿山充填效果及保障矿山安全生产具有重要现实意义。

1 矿山充填胶凝材料核心理论与性能评价基础

1.1 核心概念界定

矿山充填胶凝材料是矿山充填采矿技术中关键物质, 指能将矿山尾矿、废石等固体废弃物胶结固化, 形成具备一定强度和稳定性充填体的功能性材料。其核心概念涵盖胶凝机理、材料构成及应用范畴三方面。胶凝机理体现材料水化反应及胶结固化过程中的物理化学变化, 即通过水化产物凝结硬化包裹骨料形成整体结构。材料构成以胶凝组分、骨料及外加剂为核心, 胶凝组分提供胶结能力, 骨料降低成本并增强结构, 外加剂调节性能。应用范畴聚焦矿山采空区充填, 实现控制地压、减少地表沉陷及固废资源化目标, 明确该概念为后续理论研究和性能评价奠定基础, 区别于其他工程胶凝材料的独特属性。

1.2 理论基础

矿山充填胶凝材料核心理论基础涵盖水硬化理论、孔隙结构形成理论及界面胶结理论。水硬化理论揭示胶凝组分与水反应生成水化产物的过程, 如硅酸盐水泥基材料中硅酸三钙、硅酸二钙与水反应生成水化硅酸钙凝胶, 成为强度核心来源; 对于固废基胶凝材料, 还涉及火山灰反应等二次水化过程, 激发潜在胶凝活性^[1]。孔隙结构形成理论阐明水化过程中孔隙演化规律,

孔隙率、孔径分布直接影响材料强度和耐久性, 低孔隙率及合理孔径分布可提升性能。界面胶结理论关注胶凝组分与骨料界面结合机制, 界面过渡区的密实度决定整体结构承载能力, 改善界面过渡区性能可提高充填体整体强度, 三大理论相互关联, 构成材料研发和应用的理论支撑。

1.3 性能评价指标体系

矿山充填胶凝材料性能评价指标体系围绕力学性能、工作性能及耐久性三大核心构建。力学性能指标包括抗压强度、抗拉强度及粘结强度, 抗压强度反映充填体承受地压的能力, 需测试不同龄期强度值; 抗拉强度体现抵抗拉伸破坏的能力, 粘结强度保障与围岩或相邻充填体的结合效果。工作性能指标涵盖流动性、凝结时间及泌水率, 流动性决定材料输送和充填密实性, 用扩展度测试表征; 凝结时间需匹配施工节奏, 避免过早或过晚凝结; 泌水率控制在合理范围, 防止内部形成孔隙。耐久性指标包含抗渗性、抗侵蚀性及抗冻性, 抗渗性阻止地下水渗入引发结构破坏; 抗侵蚀性抵御矿山地下水所含酸碱物质侵蚀; 抗冻性适应寒冷地区交替冻融环境。各指标明确测试标准和阈值, 形成全面的性能评价体系。

2 胶凝材料力学性能与耐久性的影响因素分析

2.1 材料组分影响因素

胶凝材料组分对力学性能与耐久性的影响体现在各组分种类、掺量及配比的协同作用。胶凝组分种类决定核心性能, 硅酸盐水泥基材料早期强度高, 但成本高; 固废基胶凝材料如粉煤灰、矿渣基材料, 需通过活化激发胶凝活性, 掺量过高会降低早期强度, 但可提升后期强度和耐久性。骨料级配直接影响密实度, 连续级配骨

料可减少孔隙，提高抗压强度和抗渗性，细骨料过多会增加需水量，导致收缩开裂；粗骨料粒径过大易造成界面过渡区薄弱，降低粘结强度。外加剂种类和掺量精准调控性能，减水剂减少用水量，降低孔隙率，提升强度和抗渗性；缓凝剂延长凝结时间，避免施工过程中过早硬化；膨胀剂补偿收缩，减少裂缝产生。各组分搭配失衡会导致性能下降，如胶凝组分不足会使强度偏低，骨料级配不合理会降低耐久性。

2.2 环境与养护影响因素

环境与养护条件对胶凝材料力学性能与耐久性产生显著且持续的影响。养护温度直接影响水化反应速率，常温养护下水化反应平稳，强度逐步增长；高温养护可加速早期水化，提高早期强度，但过高温度会导致内部温度梯度增大，产生裂缝，降低后期强度和耐久性；低温养护会延缓水化进程，甚至导致水化反应停滞，强度发展受阻^[2]。养护湿度决定水化反应充分性，湿度不足会使表面水分蒸发过快，产生干缩裂缝，破坏内部结构，降低抗压强度和抗渗性；持续湿润养护可保障水化产物持续生成，细化孔隙结构，提升耐久性。使用环境中的侵蚀介质直接影响耐久性，矿山地下水含有的氯离子、硫酸盐等会渗透进入材料内部，与水化产物发生反应，生成膨胀性物质，导致结构开裂；地下水位变化引发的干湿交替会加速材料老化，冻融环境下内部孔隙水结冰膨胀，造成结构破坏，这些因素均需在材料设计和应用中重点考量。

2.3 关键影响因素识别与优先级排序

通过正交试验、灰色关联分析及层次分析法结合工程实践数据，识别胶凝材料力学性能与耐久性的关键影响因素并排序。第一关键因素为胶凝组分配比，其直接决定水化产物种类、数量及结构，合理配比可优化孔隙分布、提升界面结合质量，对强度和耐久性起决定性作用，优先级最高。第二是养护制度，涵盖养护温度、湿度及养护龄期，充分养护保障水化反应充分进行，减少裂缝产生，直接影响性能发挥，优先级次之。第三为骨料级配，良好级配提升密实度，减少渗透通道，对力学性能和抗渗性影响显著，优先级第三。第四为使用环境侵蚀程度，强侵蚀环境会加速材料劣化，影响耐久性寿命，优先级第四。第五为外加剂掺量，虽可调控性能，但过量或不足会产生负面影响，作用相对间接，优先级第五。该排序为针对性优化性能提供明确方向，提升技术研发和工程应用效率。

3 力学性能与耐久性协同提升技术优化

3.1 协同提升设计目标

胶凝材料力学性能与耐久性协同提升设计目标以工程实际需求为核心，实现强度发展与耐久性能的同步优化、动态匹配及经济高效。同步优化指材料在各龄期抗压强度、抗拉强度满足充填体承载要求的同时，抗渗性、抗侵蚀性、抗冻性等耐久性能达到使用环境寿命标准，避免出现高强度低耐久性或高耐久性低强度的失衡问题。动态匹配根据矿山开采深度、地压条件、地下水侵蚀等级及服务年限等参数，差异化设计性能指标，如深部高应力矿山需提高早期强度和抗压缩变形能力，高侵蚀环境需强化抗化学侵蚀性能。经济高效在满足性能要求的前提下，最大化利用尾矿、废石等固废资源，降低胶凝组分量，控制材料生产成本和施工成本，同时减少固废堆存污染，实现技术性能与经济环保的协同统一。

3.2 基于固废活化的胶凝体系优化

基于固废活化的胶凝体系优化通过物理活化、化学活化及复合活化手段，激发尾矿、矿渣、煤矸石等固废的潜在胶凝活性，构建高效胶凝体系。物理活化采用机械粉磨方式细化固废颗粒，增大比表面积，提高与水及胶凝组分的反应接触面积，同时通过颗粒级配优化，减少胶凝体系内部孔隙^[3]。化学活化掺入碱性激发剂（如氢氧化钠、水玻璃）或硫酸盐激发剂（如石膏），破坏固废颗粒表面惰性层，促进硅铝质组分溶解并参与水化反应，生成更多水化硅酸钙、水化铝酸钙等强度型水化产物。复合活化结合物理与化学活化优势，先通过机械粉磨改善颗粒形态，再加入复合激发剂调控水化进程，同时优化胶凝组分与固废的配比，使体系形成密实的微观结构。该优化方式既提升胶凝材料抗压强度、粘结强度等力学性能，又因密实结构增强抗渗性、抗侵蚀性等耐久性，还实现固废资源化利用。

3.3 养护与施工工艺协同优化

养护与施工工艺协同优化从施工过程衔接和性能保障角度，构建“施工参数匹配-养护方式适配-过程质量控制”的一体化体系。施工工艺优化聚焦搅拌、输送及充填环节，搅拌采用梯度搅拌工艺，先将胶凝组分与外加剂预拌，再加入骨料和水高速搅拌，确保组分均匀分散；输送采用低流速、稳压力输送方式，避免浆体离析和管道堵塞；充填采用分层充填、振捣密实工艺，减少空隙和分层界面。养护工艺根据施工环境动态调整，常温环境采用覆盖洒水养护，保持表面湿润；低温环境采用保温养护，维持内部水化温度；高湿度环境采用通风与保湿结合养护，防止表面泛碱。同时建立施工与养护的衔接机制，充填完成后4小时内启动养护，根据施工进度调整养护范围，通过过程监测实时反馈性能数据，动

态优化工艺参数,保障力学性能与耐久性协同发展。

4 力学与耐久性协同评价体系及应用建议

4.1 协同评价体系构建

力学与耐久性协同评价体系以“指标量化-权重分配-综合评级”为核心,结合静态测试与动态监测构建。指标量化选取抗压强度、抗拉强度、粘结强度作为力学核心指标,抗渗等级、抗侵蚀系数、抗冻融循环次数作为耐久性核心指标,明确各指标测试标准,如抗压强度采用标准试块28天龄期测试,抗渗等级采用逐级加压法测试。权重分配通过层次分析法结合工程案例数据,确定力学指标与耐久性指标权重分别为0.4和0.6,其中抗压强度和抗渗等级权重最高,分别为0.15和0.2。综合评级将各指标测试结果标准化处理后,按权重计算综合得分,划分为优秀(85分以上)、良好(70-85分)、合格(60-70分)、不合格(60分以下)四个等级。同时引入动态监测模块,通过埋设传感器实时监测充填体在服役过程中的强度变化和劣化程度,实现静态评价与动态监测的协同,提升评价准确性。

4.2 不同场景下的材料选型建议

针对不同矿山场景,结合地质条件、服役要求及经济成本提出材料选型建议。浅部低应力、弱侵蚀场景,优先选用粉煤灰-水泥复合胶凝材料,以30%-40%粉煤灰替代水泥,配合萘系减水剂,既满足28天抗压强度3-5MPa要求,又降低成本,实现固废资源化。深部高应力、中侵蚀场景,采用矿渣-水泥-硅灰复合体系,硅灰掺量5%-8%,矿渣掺量40%-50%,通过碱性激发剂活化,保障28天抗压强度达8-12MPa,抗渗等级达P8以上,抵御高应力和中等侵蚀。高寒高冻融场景,选用早强型水泥-火山灰复合材料,掺入5%-10%早强剂和3%-5%引气剂,优化孔隙结构,使早期强度快速发展,抗冻融循环次数达200次以上,适应低温冻融环境。高侵蚀(如含硫酸盐)场景,采用硫铝酸盐水泥-矿渣复合体系,配合抗硫酸盐外加剂,提升抗侵蚀系数至0.9以上,保障长期耐久性。

4.3 工程应用保障措施

工程应用保障措施从质量控制、过程管理及后期监测构建全流程保障体系。质量控制环节建立原材料进场检验制度,对胶凝组分、骨料、外加剂进行性能检测,不合格材料严禁进场;搅拌过程采用自动计量系统,控制各组分误差在 $\pm 1\%$ 以内,确保配比精准;试块制作与充填同步进行,每批次制作3组标准试块,测试力学性能和耐久性指标。过程管理推行“班组自检-项目部抽检-第三方检测”三级验收制度,重点检查搅拌均匀性、输送稳定性及充填密实度,对分层充填界面进行专项处理,确保结合紧密。后期监测在充填体关键部位埋设应力传感器、渗压传感器及位移计,实时监测应力变化、渗透情况及变形量,数据传输至监控平台,当指标超出阈值时发出预警。同时建立运维档案,记录材料性能、施工参数及监测数据,为后续材料优化和工程改进提供依据,保障充填体长期稳定服役。

结束语

本文围绕矿山充填胶凝材料力学性能与耐久性协同提升机制展开研究,从理论到实践,涵盖影响因素分析、技术优化、评价体系构建及应用建议等方面。研究成果为矿山充填胶凝材料研发与应用提供了理论依据与实践指导,有助于提升矿山充填质量与效率,推动矿山行业绿色可持续发展,未来可进一步探索更高效的协同提升技术与更精准的评价方法。

参考文献

- [1]杜朝阳,孙光中.基于造纸污泥灰的矿山充填胶凝材料活性激发试验[J].有色金属(矿山部分),2023,75(3):57-62.
- [2]张艳佳,汤畅,刘生玉,等.精炼渣基矿山充填胶凝材料制备及水化机理[J].金属矿山,2022(6):230-236.
- [3]狄燕清,安美子,李峰,等.活化钒尾矿制备高性能矿山充填胶凝材料研究[J].非金属矿,2025,48(2):9-11.