

充填采矿工艺优化及矿山固废资源化利用路径研究

侯俊亮

山西长治羊头岭东掌煤业有限公司 047100

DOI: 10.32629/ems.v8i8.21599

[摘要] 矿产资源开采过程极易产生大量矿山固废，带来地表堆存、生态破坏、地质灾害等难题。充填采矿能够利用固废开展地下采空区治理，实现采矿与固废处置协同推进。本文明确充填采矿优化与固废资源化利用总体目标，从充填配比、输送系统、施工工序阐述工艺优化方法，探索固废预处理、骨料替代、分级利用、管控体系等资源化实施路径。研究旨在推动矿山绿色转型，提升资源综合利用率，降低开采成本，为同类矿山实现安全生产、生态保护与经济效益协调发展提供参考。

[关键词] 充填采矿；工艺优化；矿山固废；资源化利用；绿色矿山

随着绿色矿山建设的不断发展，传统采矿模式固废堆存的压力凸显，采空区塌陷和水土污染的危险越来越受到人们的关注。充填采矿法具有安全可控，固废消纳能力较强的优点，被广泛采用。促进充填工艺系统性和开辟矿山固废资源化利用通道是解决矿山环境压力提升和矿产开发综合效益至关重要的措施。在此基础上，重点对充填采矿工艺优化与固废资源化利用进行了系统性的分析，以期能够为矿山企业的绿色开采实践工作提供一定的思路参考。

一、充填采矿工艺优化及矿山固废资源化利用的目标

充填采矿过程的优化和矿山固废的资源化利用是在建设绿色矿山的总方向下进行的，综合考虑了井下开采的安全、资源的有效利用和矿区生态的保护三个主要方向，从安全生产层面上讲，采用工艺优化增强了充填体的整体强度和稳定性，对围岩起到了有效的支撑作用，地表沉降得到了控制，杜绝了采空区垮塌和突水隐患，建设井下开采环境的稳定性和可靠性^[1]。在资源利用方面，尽可能多地消化井下掘进废石和选矿尾矿等矿山固废并减少固废地表堆存，提高固废综合利用率并减少尾矿库和排土场的运行维护投入，拉长固体废物利用链条。在经济效益方面，不断优化充填材料的消耗，缩短充填作业周期和降低充填综合成本等，用固废代替外购砂石骨料减少原材料的采购支出，提高矿山的整体利润。从生态环保的角度来看，土地占用减少，粉尘、土壤和水体污染减轻，矿山生态修复的压力减轻。长远目标是形成“采矿—产废—填充”闭环产业链，将矿产开采、固废处置和采空区治理等环节一体化推进，促进矿山从传统粗放开采模式向安全、高效、循环可持续发展模式转变。

二、充填采矿工艺优化的方法

（一）优选充填配比参数

充填配比对充填体的力学性能、固结周期和材料成本等有直接影响，也是优化充填采矿工艺的关键环节。不同矿山出露的尾矿和废石的理化性质有明显区别，胶凝材料类型、骨料粒径、料浆浓度及养护条件等均对充填体的强度有一定影响。进行配比参数优化需系统地进行室内试验和现场工业试验，以检测固废骨料的颗粒级配、有害杂质的含量，对不同的灰砂比进行试验，其中包括在料浆浓度下，充填体的单轴抗压强度、凝结时间和收缩变形^[2]的测试。在实验数据的支持下划定了若干组适配的配比方案，将采场底部、矿柱区域和边缘围岩不同部位的差异化配比标准区分，并针对受力大的部位适当增加充填体的强度，在采空上次要部位合理减少胶凝材料的使用。同时配合季节温度的变化进行配比的动态调整，在低温环境下对缓凝和促凝组分进行优化，以避免料浆提前堵管或固结迟缓。优化时建立配比数据库不断追踪井下充填体的实际形成效果，并进行参数动态修正。科学的配比方案不仅可以保证井下安全生产要求的力学指标，还可以增加尾矿、废石和其他固废的掺配比例和降低胶凝材料的消耗量，使充填质量和生产成本达到均衡，达到安全和效益的双向提高。通过对固废骨料和胶凝材料配合比比例的精准调控，能够进一步提高充填体的整体密实度和抗渗、抗冻性，并有效抵抗井下潮湿、承压等复杂环境对结构造成的破坏，延长充填体的服役年限。

（二）完善充填输送系统

充填输送系统担负着料浆制备、管道输送和采场卸料等

整个过程的任务，其输送的稳定与否直接关系到充填作业的连续性，许多矿山原有的输送系统都存在着不足：料浆配制搅拌不足，粗骨料与细骨料脱离，管道严重磨损，经常堵塞管道，输送流量起伏较大，导致充填作业的中断和维护成本较高，输送系统的优化需从制备站点、输送管线、监测设施等多维度协调进行^[3]。在充填站的改造中，对搅拌设备进行了更新，增加了多级搅拌装置以确保固废骨料、胶凝材料和水体的均匀搅拌，避免骨料沉淀和离析。管线优化中，依据输送距离、料浆特性对管路走向进行了合理规划，减少了急弯和变径等易磨损部位，选择耐磨管材并对关键部位增加耐磨衬板。配套加装了流量、压力和浓度在线监测装置以实时了解管路的运行状况，对压力异常情况及时报警，防止堵管和爆管事故的发生。同时对冲洗管路系统进行了改进，建立了标准化的启停、管路冲洗的操作流程，减少了管路内结垢的可能性。对长距离充填采场可以加装增压装置以保证料浆的输送能力。输送系统的不断优化可以增强充填作业的连续性、减少设备检修的频率、降低停工损失、确保在矿山固废大规模消纳的情况下充填工作的顺利进行。基于此，该优化充填输送系统可显著提高固废料浆运输适配性和承载能力，并有效破解了大掺量尾矿和粗颗粒废石料浆运输难的技术难点，显著提高矿山固废总体消纳效率。采用智能化的在线监测手段可以实现对整个输送过程的动态控制，准确捕捉到料浆浓度的波动，管路压力的突变和局部磨损的异常情况 etc 隐患问题，做到对故障的超前预判和超前处理，尽可能避免突发性停机事故的发生。标准化管路冲洗及启停流程可有效降低管道内残留固废堆积硬化现象，提高输送管道寿命，减少设备更换和日常运行维护经费投入。同时稳定有效的输送体系能够保证持续，大量充填作业的进行，配合现代化高强度采矿的生产节拍，使采矿作业和固废充填处置同步进行，综合提高矿山的整体生产效率和绿色开采水平。

（三）革新充填施工工序

充填施工工序涉及采场准备、分区封堵、料浆输送、分层充填和养护监测等一系列过程，工序布置不合理易增加循环作业的时间并限制采矿生产效率，传统的施工模式往往存在充填和回采工序矛盾，分层充填间隔时间不尽合理，挡墙施工简单诱发跑浆，缺少常态化的监控。对充填施工工序进

行了革新，先引入采掘充填协同组织方案对回采分区和充填时序进行了科学规划，做到分区交替回采和交替充填以降低工序间的互相干扰。改进了采场封堵工艺、优化了充填挡墙构筑标准、增强了密封性、有效地防止了充填料浆的渗漏和损失。实施分层有序充填工艺严格控制单层充填厚度并根据充填体固结速度制定充填间隔时间以避免上层载荷对未形成的下层充填体造成损伤。同时对充填后期监测工序进行了改进，布置了位移和应力监测点位以追踪充填体在形成过程中的稳定性。制定标准化的作业流程，确定每个岗位的操作规范、作业时限及质量验收标准等，促进施工流程的规范化。通过工序革新，缩短了“采矿—充填”总体循环周期，促进了井下生产接续效率的提高，确保了充填体成形质量，并为矿山固废规模化利用进行采空区充填工作提供了有序施工保证。

三、充填采矿工艺的矿山固废资源化利用路径

（一）固废前处理提质改性

矿山固废以选矿尾矿和掘进废石为主，原始固废一般具有颗粒级配差、含泥量高和有害杂质含量超标的特点，将其直接应用于充填将降低充填体的强度，并增加输送堵管的危险性，固废预处理提质改性是指采用一系列的处理手段对固废的理化特性进行改良，以达到充填骨料的使用要求。对较大块石的开挖废石设置了破碎和筛分工序以控制骨料粒径的范围和去除超大块石；以细粒尾矿为研究对象，采用脱水调控含水率的方法来降低料浆中的过量水分和固结时间。对含泥量和可溶性盐含量超标的固废通过冲洗和分级分选等方法除去有害组分，避免充填体在后期发生溶蚀和开裂等问题。一些性能不佳的固废可以通过加入少量改性辅料来优化颗粒堆积结构和增强骨料密实度。矿山可结合其固废的产出规模配套构建简单的预处理生产线来就地处理固废并减少外部转运成本。预处理结束后，建立质量检验机制对固废的粒度、杂质指标进行分级检测，将符合条件的材料送至充填系统中，对不符合条件的材料进行进一步加工。固废提质改性可以扩宽可利用固废类型，增加固废与充填物料掺配比，破解劣质固废不易直接应用于井下充填之痛，促进更多的矿山固废资源化消纳。

（二）固废代替充填骨料

传统的充填工程往往外购河砂和碎石作充填骨料,骨料的购买和长途运输显著增加了充填成本,但也给砂石开采造成了生态压力,促进矿山固废取代天然骨料是实现固废资源化最为直接和切实可行的途径。矿山生产中不断产生的掘进废石和尾矿经预处理可以按级配的要求互相配成人工混合骨料,并逐渐代替外购砂石。企业可以按照充填工艺的要求设计尾矿分别充填,废石胶结充填和尾矿—废石混合充填等几种方案。废石骨料具有强度高的特点,适用于粗骨料充填体系;细尾矿可以用作细集料,优化料浆的和易性。根据不同采场的受力条件对固废骨料的比例进行灵活的调整,以保证充填体力学性能的同时实现固废替代率的最大化。实施时协调井下产出固废的转运线路,就近优先消纳,并减少固废地面堆存的周转环节。矿山自产固废代替天然骨料的长期规模化使用可以显著削减充填原材料的购买成本,降低固废排到地表的堆存总数量,同时缓解尾矿库容量紧张的压力,构建了一个“井下产废,井下使用”的循环运作模式,旨在平衡经济效益与减少污染和碳排放的需求。

(三) 建设固废分级利用模式

矿山产出固废类型复杂,理化性能差异大,单一的利用模式很难将固废的价值充分发挥,易导致优质固废的浪费和劣质固废的不可利用,固废分级利用模式的建构需根据颗粒大小、矿物成分和力学性能等进行分类定级并实行分质利用和分类处置。对具有较高强度和较好级配的大块废石优先处理成填充粗骨料,粒径均匀,杂质少的尾矿作为胶结充填细骨料,含泥量高、性质差的细泥类固废被限制在受力条件单一的采空区进行非结构性充填。建立固废源头分级机制对掘进废石和选矿尾矿进行分别收集,从而避免了不同属性固废的无序杂糅。同时开辟分级利用上、下游通道,将适宜填筑的材料直接运输到填筑系统中,对暂时达不到填筑标准的固废进行适当堆存和批量预处理。条件较好的矿山也可扩大道路,对少量优质固废可探索建材制备等资源化的其他方向,不能资源化利用的固体废弃物可合规处理。分级利用模式实现了优劣分用和物尽其用的目标,促进了固废消纳总量的总体增加,促进了固废资源化利用向精细化和高效化方向发展。

(四) 健全固废利用和管控体系

矿山固废资源化和充填工艺的协同运行离不开系统化的

管理制度的支持,许多矿山固废利用过程中台账缺失,质量管控粗放,职责划分不清晰,长期规划不到位,限制了循环利用的可持续发展。健全固废利用管控体系一是要完善管理制度,对固废的产生、转运、预处理和充填利用等各个环节的管理规范进行界定,并对各个部门的岗位职责进行界定。需要建立一个完整的台账系统,持续记录固废的产生量、处理量和充填消纳量,并定期计算固废的综合利用率。构建了质量管控流程,实现了进入充填系统固废原料抽样检测常态化,消除了不合格原料大量下放到井下影响充填安全的问题。同时,也制定了中长期的固废资源化利用规划,并根据开采进度来预测固废的产出规模,以匹配充填采空区的容量,并动态调整固废消纳方案。加强人员技术培训,提高一线员工的规范操作。具备条件的矿山建立数字化监管平台对固废流转和充填施工数据进行实时监测。完备的管控体系可以规范固废利用全过程,预防质量风险和安全隐患,确保充填采矿消纳固废模式的长期平稳运行。

结束语

充填采矿工艺的优化和矿山固废的资源化利用,是绿色矿山建设的重要着力点。依靠充填配比、输送系统和施工工序等多维优化能够不断提高充填工程的稳定性和作业效率,可有效消纳尾矿、掘进废石,并减轻地表固废的堆存压力和控制采空区灾害风险及降低矿山综合开采成本。今后矿山企业应继续推动采矿、充填和固废利用一体化协调发展,并不断探索与自身情况相适应的技术方案以健全循环产业链,真正做到矿产资源的安全开采、固废的高效利用和矿区的生态保护,促进三者之间的协同。

[参考文献]

- [1] 方元. 小坝磷矿山分段空场嗣后充填采矿工艺探析[J]. 能源与节能, 2025(06): 229-231.
- [2] 甘雨浓. 庙沟铁矿崩落法转充填法采矿工艺及经济效益研究[J]. 矿业工程, 2025, 23(04): 6-10+27.
- [3] 廖九波. 分段凿岩阶段空场嗣后充填采矿工艺及采场稳定性优化研究[J]. 世界有色金属, 2025(16): 91-94.

作者简介: 侯俊亮, 男, 1985年8月出生, 汉族, 山西省长治市上党区人, 助理工程师, 充填开采项目技术人员, 大学本科。