

现代采矿理念与充填采矿技术研究

刘 杰

神木县隆德矿业有限责任公司 陕西 榆林 719000

摘要：现代采矿理念强调绿色、系统化智能化与可持续发展。充填采矿技术作为重要支撑，通过人工充填体控制采空区变形，实现安全开采。本文详细阐述了充填采矿技术的理论基础，包括定义分类、材料特性与适配机制、工艺系统装备集成。分析了核心优势，如地压控制、地表保护、资源高效利用及复杂地质适应性。并探讨了创新方向，涵盖材料、工艺、设备创新及多技术融合，为采矿行业绿色智能发展提供参考。

关键词：现代采矿理念；充填采矿技术；绿色采矿；可持续发展；创新方向

引言：采矿行业作为资源开发的重要领域，传统模式面临资源浪费、生态破坏等诸多问题。随着时代发展，现代采矿理念应运而生，强调绿色、系统化智能化与可持续发展。充填采矿技术作为实现这些理念的关键手段，能有效控制地压、保护地表、提高资源利用率。深入探究现代采矿理念与充填采矿技术，对推动采矿行业转型升级，实现资源开发与生态保护协调发展意义重大。

1 现代采矿理念的核心内涵

1.1 绿色采矿理念

绿色采矿以资源高效利用与生态保护协同发展为目标。在资源开发环节，通过优化采矿方法与工艺参数，提升矿石回采效率，将传统采矿中难以利用的低品位矿石纳入开采范围，最大限度挖掘矿产资源价值^[1]。针对采矿过程中产生的废料，采用精细化分类管理策略，从源头控制废石与尾砂的产生量，通过改进爆破参数、优化采掘顺序等手段，减少剥离量与废料排放规模。在废料处理环节，构建循环利用体系，将废石经破碎筛分后作为建筑骨料，尾砂经脱水处理后用于制备充填材料，通过物理化学改性技术提升废料利用性能，形成“开采-加工-利用”闭环产业链，有效降低固体废弃物对生态环境的压力。

1.2 系统化与智能化理念

系统化采矿强调矿区全要素协同管理，将地质勘探、开采设计、生产运营、生态修复等环节纳入统一框架，运用系统工程理论构建资源-环境-经济复合系统模型。通过多目标优化算法平衡各要素间的矛盾关系，实现采矿活动与区域发展的动态适配。智能化管理依托物联网技术构建矿区感知网络，在矿区关键位置部署50-100个传感器，实时采集地质条件、设备状态、环境参数等数据，利用大数据分析技术挖掘生产规律，结合机器学习算法建立采矿工艺优化模型。在安全监控领域，部署

多源传感器阵列实现风险要素智能识别，通过数字孪生技术构建虚拟矿场进行灾害模拟推演，为应急决策提供科学依据，推动采矿管理向精准化、预见性方向转型。

1.3 可持续发展理念

可持续发展要求采矿活动遵循生态承载力原则，在开发过程中采用充填采矿、保水开采等技术手段控制地表变形，通过数值模拟技术优化采场布局，将地表变形控制在0.1-0.3米以内，最大限度减少对地表建筑物与生态系统的扰动。在经济维度，建立资源开发收益共享机制，通过社区共建项目、技能培训计划等方式提升当地居民获得感，促进区域经济多元化发展。在社会维度，注重采矿工程全生命周期管理，在规划阶段开展社会影响评估，运营阶段实施环境监测公示，闭坑阶段落实生态修复责任，确保资源开发活动符合社会公众利益诉求，实现经济效益、社会效益与生态效益的有机统一。

2 充填采矿技术的理论基础

2.1 充填采矿法定义与分类体系

充填采矿法是以人工充填体作为核心支护介质，通过控制采空区变形实现安全开采的技术体系。该方法通过向采空区输送特定材料构建支撑结构，有效转移围岩应力，抑制地表沉降与岩层移动^[2]。依据充填材料物理状态差异，可划分为干式充填、水力充填、胶结充填及膏体充填四大类型。干式充填采用块石或砂土等散体材料，依赖自重形成堆积体；水力充填通过水流携带细颗粒物沉积固化；胶结充填添加水泥基或化学胶凝剂提升材料强度；膏体充填利用高浓度料浆的触变性实现低析水率充填。按回采空间维护方式划分，上向分层充填适用于缓倾斜矿体，通过逐层回采与充填形成连续支护，每层回采高度控制在2-5米；下向分层充填则针对不稳固顶板条件，自下而上构建人工假顶；嗣后充填在完成矿房回采后集中充填，适用于大规模开采场景。

2.2 充填材料特性与适配机制

充填材料选择需综合考量矿岩力学特性、开采深度及服务年限等因素。废石类材料具有成本低廉优势,但需控制粒径级配防止离析,将粒径控制在0-50毫米范围内;尾砂经分级脱泥处理后,可制备不同强度等级的胶结充填体;工业废渣如高炉渣、粉煤灰通过活性激发技术,可部分替代水泥实现资源化利用;高水速凝材料通过水化反应快速形成早期强度,适用于紧急支护场景,早期强度可达1-3兆帕;膏体材料由骨料、胶凝剂及水按特定比例混合,具有不离析、不脱水特性,可有效控制充填体收缩变形。材料适配需建立三维指标体系,涵盖力学性能、流变特性及经济指标,通过正交试验优化配比参数,确保充填体强度满足不同开采阶段需求。

2.3 充填工艺系统与装备集成

充填工艺系统包含制备、输送及监测三大模块。制备环节通过双轴搅拌机实现物料均匀混合,采用变频调速技术控制料浆浓度波动范围,将浓度波动控制在 $\pm 1\%$ 以内。输送方式选择取决于矿井条件,水力输送适用于长距离低浓度料浆运输,需控制流速防止管道磨损,流速控制在1-3米/秒;机械输送通过活塞泵或转子泵实现高浓度料浆增压输送,对设备耐磨性要求较高;管道自流输送依赖地形高差,需进行水力坡度计算确保输送稳定性。关键装备发展呈现智能化趋势,充填泵集成压力反馈调节系统,搅拌机配备在线粘度检测装置,输送管道安装应力应变传感器,监测控制系统通过物联网技术实现全流程数据采集与异常预警,构建“制备-输送-质量反馈”闭环控制体系。

3 充填采矿技术的核心优势

3.1 地压控制与安全保障机制

充填采矿通过构建人工支撑体系实现地压的动态平衡。充填体与围岩接触后形成复合承载结构,将原本集中于矿柱的应力向采空区周边扩散,有效降低局部应力集中程度。在深部开采中,充填体可部分抵消上覆岩层的自重压力,减缓岩体内部能量积聚,从而抑制岩爆等动力灾害的发生^[3]。对于矿柱结构,充填材料提供的侧向约束使其处于三向应力状态,这种受力条件的改善显著提升了岩体的抗剪强度,增强了矿柱的长期稳定性。此外,充填体填充了采空区与工作面之间的空间,阻断了空气的自由流动,既减少了瓦斯积聚的风险,也降低了粉尘扩散的可能性,为井下作业提供了多重安全保障。

3.2 地表环境保护效能

充填采矿通过控制岩层移动范围实现地表生态的持续保护。传统采矿方法形成的采空区易导致上覆岩层发

生大面积弯曲下沉,而充填体对岩层的支撑作用限制了这种移动的发育高度,从而有效保护地表建构筑物的基础稳定性。在农田保护方面,充填采矿避免了地表塌陷区的形成,维持了土壤结构的完整性和水文条件的稳定性,减少了耕地资源的损毁。尾砂充填技术的推广应用显著降低了尾矿库的建设需求,既减少了土地占用,又消除了尾砂扬尘污染和溃坝等次生灾害的风险。充填采矿通过减少对地表环境的扰动,为矿区生态系统的自我修复创造了有利条件,促进了采矿活动与生态保护的协调发展。

3.3 资源高效利用路径

充填采矿通过优化开采空间布局实现了资源的高效回收。分层充填工艺允许对矿体进行更精细的分割,使得传统方法难以回采的边角矿体和低品位矿体得到有效利用,从而提高了矿石的整体回采率。这种开采方式还为选矿工艺的优化提供了条件,通过分采分运实现不同品位矿石的分级利用,提升了资源的综合利用效率。充填材料中大量使用废石和尾砂,减少了对天然骨料的开采需求,实现了固体废弃物的资源化利用。这种循环利用模式不仅延长了矿山的服役年限,还通过提高资源产出效益增强了企业的市场竞争力,为矿山的可持续发展奠定了基础。

3.4 复杂地质条件适应性

充填采矿通过灵活调整工艺参数展现了对复杂地质条件的广泛适应性。在破碎矿体开采中,高浓度膏体充填可快速形成具有一定强度的人工假顶,为后续回采作业提供稳定的作业平台。对于高应力区域,采用分阶段充填的方式可实现地压的渐进转移,避免应力集中对开采活动的影响。深部开采中,充填体可部分抵消高温环境的不利影响,改善作业条件。针对地下水丰富的矿体,速凝充填材料可快速封闭渗流通道,配合有效的排水系统实现水害治理。对于矿岩不稳固的矿段,通过调整胶凝剂掺量和养护时间,可制备出不同强度等级的充填体,满足不同开采阶段的支护需求。这种工艺的灵活性使得充填采矿技术能够适应各种复杂的地质条件,为不同类型矿山的开采提供了可靠的技术保障。

4 充填采矿技术的创新方向

4.1 材料创新维度

新型胶凝材料的研发正突破传统材料性能局限,朝着环境适应性与功能复合化方向演进。低碱度胶结剂通过调控水化反应路径,在降低体系pH值的同时维持强度发展,有效缓解了充填体对井下金属设备的腐蚀问题,并减少了对地下水环境的潜在影响^[4]。早强型材料则通过

引入特种矿物掺合料或化学激发剂,加速胶凝材料的水化进程,使充填体在短时间内形成早期支撑结构,这对于缩短采场暴露时间、提升开采效率具有重要意义。工业废料资源化利用技术聚焦于赤泥、钢渣等大宗固废的活化改性,通过物理激发与化学改性相结合的方式,将原本难以利用的工业废料转化为高性能充填材料,既解决了固废堆存带来的环境风险,又降低了对天然资源的依赖,形成资源循环利用的闭环系统。

4.2 工艺优化路径

高浓度充填技术通过提升料浆固相含量,优化颗粒级配与流变特性,显著减少了充填过程中的脱水环节,使充填体在较短时间内形成致密结构,强度发展更快,特别适用于深部开采与高应力矿体的支护需求。智能化充填系统集成多参数实时监测与自适应控制技术,通过分布式传感器网络获取料浆浓度、流速、压力等关键指标,经智能算法分析后自动调整配比参数与输送速率,避免了人工操作的主观误差,确保了充填体质量的稳定性与均质性。部分先进系统还具备故障诊断与预测性维护功能,能够提前识别设备异常状态,为充填作业的连续性提供保障。

4.3 设备升级方向

高效充填泵的研发聚焦于耐磨材料与液压系统的协同优化,采用新型陶瓷涂层或高铬合金衬板提升过流部件的抗磨损性能,延长设备使用寿命;变频调速技术的引入使泵送流量与压力能够精准匹配不同输送条件,既满足了长距离输送需求,又降低了能耗。管道输送技术通过流场模拟优化管径与布局设计,减少弯头、阀门等局部阻力件造成的能量损失,同时开发自清洁管道内壁技术,防止料浆沉积堵塞,确保输送系统的长期稳定运行。无人化作业设备集成远程操控与自主导航技术,充填机器人可完成料浆制备、输送、质量检测等全流程作业,在高温、高湿、高粉尘等恶劣环境下替代人工操

作,显著提升了作业安全性与效率。

4.4 多技术融合趋势

充填采矿与溶浸采矿的协同应用形成了"开采-充填-浸出"的一体化工艺模式,充填体既作为采场支护结构,又作为溶浸液的渗透通道,通过控制浸出剂流向与浓度梯度,实现了低品位矿体的高效开发。深海采矿领域探索将充填技术应用于海底矿柱加固与沉积物回填,通过研发适用于高压、低温环境的特种充填材料,防止开采活动引发的海底滑坡等生态灾害,维护深海生态系统稳定。物联网技术贯穿充填全生命周期管理,从原料配比、制备输送到底板养护,各环节数据通过无线传输汇总至云端平台,构建数字孪生模型实现过程追溯与质量预警,为工艺优化与决策支持提供数据驱动的智能解决方案,推动充填采矿向绿色、智能、高效方向深度转型。

结束语

现代采矿理念引领下的充填采矿技术,凭借显著的地压控制、地表保护、资源高效利用及复杂地质适应性优势,已成为采矿行业转型升级的重要方向。通过材料、工艺、设备的持续创新及多技术的深度融合,充填采矿技术不断突破传统局限,实现更高效、更环保、更智能的开采模式。这不仅有助于提升矿山企业的经济效益与市场竞争力,更为全球采矿行业的可持续发展提供了有力支撑,推动行业迈向更高水平。

参考文献

- [1]于彦辉.现代煤矿采矿理念与充填采矿技术探究[J].能源与节能,2025(9):56-58.
- [2]焦富国.现代采矿理念与充填采矿技术研究[J].能源与节能,2022(3):124-125,134.
- [3]万林海.香炉山钨矿分层充填采矿工艺改进与实践[J].采矿技术,2025,25(1):195-200.
- [4]杨宁.充填采矿技术在磷矿山井下开采的应用[J].科海故事博览,2023(10):31-33.