

地下金属矿山的充填采矿技术研究

赵 龙

新疆有色冶金设计研究院有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要：地下金属矿山开采易引发地表塌陷，充填采矿技术是关键。本文阐述其核心原理、分类、关键指标，分析充填材料组成与性能调控，介绍关键工艺与设备，探讨基于开采条件优化、智能化、绿色化等创新方向。为提升地下金属矿山充填采矿技术水平，保障矿山安全高效开采，实现资源合理利用与生态保护提供参考。

关键词：地下金属矿山；充填采矿技术；充填材料；智能化充填；绿色充填

引言：地下金属矿山开采在国民经济中意义重大，但传统开采方式易形成采空区，引发上覆岩层变形、冒落及地表塌陷等灾害。充填采矿技术凭借充填体提供力学支撑、分散应力，成为保障矿山安全开采的重要手段。深入研究该技术，对提高矿石回收率、降低安全事故损失、实现矿山可持续发展具有不可忽视的作用。

1 地下金属矿山充填采矿技术基础

1.1 充填采矿技术的核心原理

采场充填的力学支撑机制是充填采矿技术的基石。地下金属矿山开采中，矿石采出形成空区，若不处理，上覆岩层会变形、冒落，引发地表塌陷。充填体凭借强度和刚度为上覆岩层提供支撑，分散应力，维持采场稳定^[1]。充填体与围岩相互作用复杂。二者接触后，在应力下相互挤压、摩擦。围岩对充填体产生侧向压力，限制其横向变形；充填体对围岩提供反作用力，抑制其进一步变形破裂。合理利用可提升采场整体稳固性。充填过程影响矿山开采系统。充填作业影响采矿进度效率，时间过长会延误后续工序。充填料输送若堵塞、泄漏，会干扰生产秩序。但科学合理充填能改善作业环境，降低顶板冒落风险，保障设备运行和人员作业安全。

1.2 充填采矿技术的分类体系

按充填材料特性，有胶结充填、非胶结充填等。胶结充填用水泥等胶凝材料将骨料胶结，强度高，适用于深部或地质复杂矿体；非胶结充填以废石、尾砂等松散材料充填，成本低，多用于浅部或对强度要求不高的矿体。按充填工艺流程，包括干式、水砂和胶结充填工艺。干式充填用输送设备将干燥骨料送入采场；水砂充填将骨料与水混合成砂浆输送；胶结充填在砂浆中加入胶凝材料。不同工艺在设备配置、操作难度和充填效果上有差异。按采场结构与充填时机，有嗣后和连续充填。嗣后充填先采矿后充填，适用于矿体厚度大、开采强度高

的矿体；连续充填边采矿边充填，能及时支撑采场，减少空区暴露时间，适用于地质条件较差的矿体。

1.3 充填采矿技术的关键技术指标

充填体强度相关指标因开采条件和用途而异。一般要求具备足够抗压强度，承受上覆岩层压力和采矿动载荷。不同深度、矿体条件下强度要求不同，深部开采时要求更高。充填效率与均匀性评价指标关乎充填质量。充填效率用单位时间充填采场体积衡量，高效充填可缩短采矿周期；均匀性指充填体在采场内分布均匀程度，均匀性好能保证整体性能稳定，避免薄弱部位。技术经济性核心评价维度涵盖成本、效益等方面。成本包括充填材料、设备、人工等费用，降低成本能提高经济性；效益体现在提高矿石回收率、减少资源浪费和降低安全事故损失上，综合考量可评估技术可行性。

2 充填材料的组成与性能调控

2.1 充填材料的核心组分

胶凝材料是充填材料关键成分，类型多样，常见有水泥、粉煤灰、矿渣微粉等。水泥水化反应迅速，能快速提供早期强度，保障充填体初期承载能力^[2]。粉煤灰和矿渣微粉等工业副产物可降低成本，改善后期性能，与水二次水化生成更多胶凝物质，增强密实度。骨料在充填材料中起骨架支撑作用。选材需考虑粒径、级配、强度等因素。一般选用天然砂石或破碎加工废石，要求粒径分布合理，粗细搭配形成紧密堆积结构，提高强度，且骨料应具有足够强度，避免破碎影响整体性能。外加剂种类丰富，功能各异。减水剂减少用水量，提高充填料流动性，相同水灰比下获得更高强度；早强剂加速胶凝材料水化反应，缩短充填体达设计强度时间，满足快速开采需求；缓凝剂延长胶凝材料凝结时间，便于施工操作。

2.2 充填体的核心性能及影响因素

力学性能是充填体核心性能之一，包括抗压、抗拉、抗剪等。调控途径多样，调整胶凝材料用量可改变充填

体强度,增加胶凝材料比例能提高抗压强度;优化骨料级配可增强抗剪性能,使骨料间咬合更紧密;添加外加剂也能对力学性能产生显著影响。变形性能与稳定性紧密相关。充填体在受力或环境因素作用下会发生变形,若变形过大可能导致失稳。影响因素涵盖胶凝材料种类、骨料性质、充填料浓度等。胶凝材料弹性模量影响充填体整体变形特性,骨料硬度决定其抵抗变形能力,充填料浓度过高或过低都不利于保持稳定变形。耐久性关乎充填体长期使用效果,抗侵蚀、抗冻融等性能受多种条件制约。水质、温度变化、化学物质侵蚀等都会影响耐久性。水质中酸性或碱性物质可能腐蚀胶凝材料,温度剧烈变化引发冻融循环会破坏充填体结构,降低强度。

2.3 新型充填材料的研发方向

工业固废基充填材料资源化利用是重要方向。将废石、尾矿等工业固废作为原料,经加工处理后用于充填,既解决固废堆存问题,又降低充填材料成本。通过合理配比和工艺优化,可使固废基充填材料性能满足要求。高性能复合充填材料配比优化是提升性能的关键。将不同类型胶凝材料、骨料和外加剂进行复合,发挥各自优势,获得更高强度、更好耐久性和稳定性的充填材料。通过试验研究确定最佳配比,实现性能最优。低成本环保充填材料技术探索符合可持续发展理念^[3]。研发以天然材料或可再生材料为基础的充填材料,减少对传统胶凝材料依赖,降低生产过程中的能耗和污染排放。同时要确保材料性能满足充填要求,实现经济效益与环境效益双赢。

3 充填采矿的关键工艺与设备

3.1 充填材料的制备工艺

物料配比精准控制是充填材料制备基础。依据不同采场地质条件、开采要求和充填体所需性能,精确计算胶凝材料、骨料、外加剂等物料比例。采用自动化配料系统,采用高精度传感器实时监测投放量,结合智能控制系统及时调整,确保每批次配比符合设计要求。搅拌工艺优化对混合均匀性保障至关重要。搅拌设备转速、搅拌时间和搅拌方式影响物料混合效果。高速搅拌加快物料分散速度,但过高转速可能导致飞溅;搅拌时间不足使混合不充分,过长增加能耗。通过试验确定最佳搅拌参数,还可采用多级搅拌提升混合均匀性。制备系统流程设计兼顾效率与质量。合理规划物料储存、输送、搅拌、检测等环节布局,减少物料转运距离和时间。引入先进生产管理理念,对制备过程实时监控和数据分析,及时发现并解决潜在问题,提升系统运行效率。

3.2 充填输送工艺与技术

管道输送过程中,流态特征与阻力控制是关键。充填料在管道内流动时,会呈现不同的流态,如层流、紊流等。不同的流态对输送阻力和能耗影响较大。通过调整充填料的浓度、流速等参数,可控制流态,降低输送阻力。合理选择管道材质和内壁粗糙度,也能减少摩擦阻力。当充填料流速控制在1-3米/秒时,可较好地控制流态和输送阻力。自流输送与加压输送各有适用条件。自流输送适用于地形坡度较大、充填料流动性好的情况,具有能耗低、设备简单的优点。加压输送则适用于地形平坦或需要长距离输送的场景,通过泵等加压设备提供动力,确保充填料顺利到达采场。在地形坡度大于15°时,自流输送的应用比例较高;而长距离输送超过500米时,加压输送更为合适。输送系统的堵塞预防与处理技术不容忽视。定期对管道进行检查和清理,防止杂物进入;控制充填料的粒径和浓度,避免过大颗粒或过高浓度导致堵塞。一旦发生堵塞,可采用高压水冲洗、机械疏通等方法及时处理。

3.3 采场充填工艺与控制

充填顺序与分层充填需满足特定技术要求。根据采场形状和开采进度,合理安排充填顺序,确保充填体均匀上升。分层充填时,要严格控制每层充填高度和充填时间间隔,保证每层充填体都能充分凝固和承载上部压力。每层充填高度一般控制在1-2米,充填时间间隔为12-24小时。充填体泌水控制与排水工艺设计关系到充填体质量。充填料在凝固过程中会出现泌水现象,若不及时排出,会导致充填体强度降低^[4]。可在采场内设置排水设施,如排水管、排水沟等,将泌水及时排出。采场充填质量的现场调控措施包括实时监测充填体的强度、密实度等指标,根据监测结果调整充填材料配比、充填速度等参数,确保充填质量符合设计要求。

3.4 关键设备的技术特征

搅拌设备的类型多样,需根据充填材料的特性和生产规模进行性能适配。例如,双轴搅拌机适用于高浓度充填料的搅拌,具有搅拌均匀、效率高的特点;单轴搅拌机则适用于低浓度充填料,结构简单、操作方便。双轴搅拌机的搅拌效率可达30-50立方米/小时,单轴搅拌机为20-30立方米/小时。输送设备的选型要综合考虑输送距离、输送量、地形条件等因素。离心泵适用于低浓度、大流量的充填料输送;螺杆泵则适用于高浓度、小流量的输送,且能提供稳定的压力。离心泵的输送流量可达50-100立方米/小时,螺杆泵为10-30立方米/小时。运行保障方面,要定期对设备进行维护保养,确保设备处于良好运行状态。充填辅助设备如充填管路清洗设备、充

填料检测设备等,在充填作业中也发挥着重要作用。清洗设备可及时清理管路内的残留充填料,防止堵塞;检测设备能实时监测充填料的各项性能指标,为充填工艺调整提供依据。

4 充填采矿技术的优化与创新方向

4.1 基于开采条件的技术优化

针对不同矿体赋存条件,充填方案需进行针对性优化。对于缓倾斜薄矿体,可采用分段充填法,根据矿体厚度和倾角合理划分分段高度,优化充填体与矿体的接触关系,提高采矿回收率。而对于厚大矿体,全尾砂胶结充填法更为适用,通过调整胶凝材料用量和充填料浓度,确保充填体具备足够的强度来支撑上覆岩层。对于厚度大于20米的厚大矿体,全尾砂胶结充填法可使充填体强度达到3-5MPa,满足支撑要求。复杂地质条件下,充填技术调整策略至关重要。在断层、褶皱等地质构造发育区域,充填前需对地质情况进行详细勘探,了解构造的规模、产状等信息。依据勘探结果,调整充填材料的配比和充填顺序,如在断层破碎带附近增加胶凝材料用量,提高充填体强度,防止出现塌陷等安全事故。采用分层分段充填方式,逐步填充采空区,降低地质构造对充填效果的影响。

4.2 智能化充填技术的发展

充填系统的智能监测与数据采集技术是智能化发展的基础。在充填管路、搅拌设备、输送泵等关键部位安装各类传感器,实时采集充填料的流量、压力、浓度、温度等参数,以及设备的运行状态信息。通过无线传输技术将数据传输至监控中心,实现对充填过程的全方位、实时监测。基于智能算法的充填参数实时调控可进一步提升充填质量。利用大数据分析和机器学习算法,对采集到的数据进行深度挖掘和分析,建立充填参数与充填体性能之间的关联模型。根据模型预测结果,实时调整充填材料的配比、搅拌时间、输送速度等参数,确保充填体性能始终满足设计要求。智能化充填设备的研发与集成应用是智能化充填技术的重要支撑。研发具有自动配料、自动搅拌、自动输送功能的智能化搅拌设备和输送设备,实现充填作业的自动化和智能化。将各类智能

化设备进行集成,形成完整的智能化充填系统,提高充填作业的效率 and 可靠性。

4.3 绿色充填技术的创新路径

充填过程的污染控制与减排技术是绿色充填的关键。采用封闭式搅拌和输送系统,减少充填料在制备和输送过程中的粉尘排放。对充填废水进行集中处理和回用,降低水资源消耗和废水排放量。同时优化充填材料配方,减少胶凝材料等对环境有潜在影响的物质使用。生态友好型充填材料的应用探索为绿色充填提供了新方向^[5]。研发以工业固废、建筑垃圾等为原料的生态友好型充填材料,不仅可解决废弃物处理难题,还能降低充填材料成本。这类材料在满足充填体性能要求的同时,对环境的影响较小,符合可持续发展理念。充填与矿山生态修复的协同技术可实现矿山开采与生态保护的有机结合。在充填过程中,根据矿山生态修复需求,在充填材料中添加植物种子、营养土等物质,为植被生长创造条件。充填完成后,及时进行植被恢复和生态重建,加速矿山生态系统的恢复和重建进程。

结束语

地下金属矿山充填采矿技术不断发展,在保障开采安全、提高资源利用率等方面成效显著。通过基于开采条件优化、智能化、绿色化等创新路径探索,能进一步提升技术性能。持续推动该技术进步,有助于实现矿山开采与生态保护的平衡,为行业稳定发展筑牢根基,创造更大综合效益。

参考文献

- [1]朱恒扬.地下金属矿山的充填采矿技术分析[J].冶金与材料,2025,45(6):70-72.
- [2]李绍,王新彦.地下金属矿山的充填采矿技术分析[J].世界有色金属,2024(13):109-111.
- [3]方煜.地下金属矿山的充填采矿技术要点探讨[J].警戒线,2024(2):153-156.
- [4]南二刚.地下金属矿山充填采矿技术分析[J].世界有色金属,2025(10):111-113.
- [5]张齐盛.关于地下金属矿山充填采矿技术的研究[J].冶金与材料,2024,44(9):154-156.