

充填采矿技术在薄萤石矿山采矿工程中的应用研究

陈伟坤 金怀涛

浙江省矿产资源集团有限公司 浙江 杭州 310007

摘要：薄萤石矿山矿体厚度薄、围岩破碎、开采空间狭小，传统采矿方法存在安全性差、矿石贫化损失率高、资源浪费及生态破坏等诸多问题。本文结合薄萤石矿开采特性与充填采矿基础理论，对比多种采矿工艺，优选机械化上向水平分层充填采矿法，优化充填材料配比、采场结构及采充时序参数，并配套智能监测系统。工程实践证实，该技术可有效控制地压灾害，提升矿产资源回收率，实现固废资源化利用，综合应用效益显著。

关键词：充填采矿技术；薄萤石矿山；采矿工程；应用

引言：薄萤石矿体地质构造复杂，矿岩完整性差、整体稳定性弱，开采过程中极易出现围岩垮塌、片帮等安全事故。传统空场法、留矿法适配性不足，不仅开采安全风险高，还存在矿产资源利用率低、尾矿堆存污染环境等问题，难以满足现代矿山安全、绿色、高效的开采要求。为此，本文针对性优化充填采矿技术体系，通过现场试验验证技术优势，为薄萤石矿山智能化、绿色化开采提供可靠技术支撑。

1 薄萤石矿山开采特性与充填采矿基础理论

1.1 薄萤石矿体开采技术条件

(1) 矿体地质特征：薄萤石矿体普遍厚度小、倾角多变、埋藏深度不均，矿体厚度均匀性差，局部存在膨大、缩窄现象。受地质构造、断层及节理裂隙切割影响，矿体连续性中等偏弱、分布零散、边界不规则，采场开采空间严重受限，是薄萤石矿开采难度大的核心因素。(2) 矿岩物理力学性质：薄萤石矿体与围岩硬度较低、单轴抗压强度小，岩体完整性差、破碎程度高，整体稳定性薄弱。开采扰动易引发裂隙扩张、岩体松动，进而出现围岩变形、片帮、垮塌等安全问题，对采场支护方案和开采工艺标准提出了极高要求^[1]。(3) 矿区开采制约因素：传统工艺适配性差，采场空间狭小，设备布设受限；爆破可控性差，易超挖、破损围岩；充填接顶密实度不足，支护效果不佳，同时矿石贫化、损失率偏高，资源浪费突出。

1.2 充填采矿技术分类与适配性分析

(1) 胶结充填技术：以尾砂和胶结材料为核心原料，按配比搅拌后输送至采空区，分为常规尾砂与全尾砂胶结充填两种。该工艺成熟、充填体强度稳定，适配高应力、围岩破碎的矿区，可有效管控采场变形，缺点是物料配比精度要求高、固化周期较长。(2) 膏体充填技术：将尾砂、粉煤灰、水等原料配比制成膏体料浆，

经管道泵送完成充填。该技术固废利用率高，充填体密实性、整体性优良，无泌水离析问题，适配围岩破碎、地压控制标准高的薄萤石矿采场。(3) 削壁充填技术：开采过程中剔除的围岩废石直接用于采空区充填，工艺流程简单高效。该技术适配极薄萤石矿体开采，可减少围岩混入，有效降低矿石贫化率，适配狭小采场的作业场景。

2 薄萤石矿山充填采矿方案设计与参数优化

2.1 采矿方法对比与优选

(1) 传统采矿方法弊端分析：浅孔留矿法、普通空场法适配常规厚大矿体，但用于薄萤石矿体短板明显。薄矿体采场空间狭小，浅孔留矿法凿岩、出矿受限，矿石滞留量大；空场法依靠围岩自稳，因萤石矿围岩破碎，顶板垮塌、片帮风险高。两种方法均需预留大量永久矿柱，资源回收率低、贫化率高。(2) 充填采矿备选方案对比：从安全性、经济性、资源利用率、环保性四维度对比胶结充填、膏体充填、削壁充填。削壁充填工艺简单、成本低，但强度弱；胶结充填强度高但固废利用率低；膏体充填流动性好、固废消纳强，优势显著^[2]。(3) 最优采矿方法确定：综合薄萤石矿体厚度小、围岩破碎、地压不稳等条件，优选机械化上向水平分层充填采矿法。该方法分层开采、分层充填，作业灵活适配狭小采场，无需预留永久矿柱，兼顾安全支护、资源回收与固废利用，完全适配薄萤石矿山复杂工况。如图1。

2.2 充填材料配比优化设计

(1) 充填原材料性能检测：以矿区自产萤石尾砂、普通硅酸盐水泥、井下拌合水为核心充填原材料，开展系统性能检测试验。对尾砂的颗粒级配、堆积密度、含水率、孔隙率等物理参数进行测试，检测水泥凝结强度、安定性等指标，同时检测拌合水杂质含量、酸碱度，明确各类原材料基础性能参数，排查不合格材料，

为配比试验提供精准基础数据,保障充填材料适配井下施工条件。(2) 配比试验方案设计:为探究最优充填参数,设置多组梯度试验,设计不同灰砂比、含水率变量组合。通过配制不同配比的充填料浆,分别测试料浆流动度、初凝与终凝时间、泌水率,同时养护试样并检测不同龄期充填体的抗压、抗拉强度,系统分析不同配比对充填体施工性能与固结性能的影响,明确各参数的作用规律。如图2。(3) 最优配比确定:结合薄萤石矿采场支护需求与施工条件,优先保障充填体早期强度满足采场稳定要求,同时兼顾料浆流动性、泵送效果与施工成本。通过对比各组试验数据,剔除强度不足、流动性差、成本过高的配比方案,最终筛选出适配性最优的材料配比,可有效解决薄矿体充填固结慢、支护效果差、施工成本高的问题^[3]。

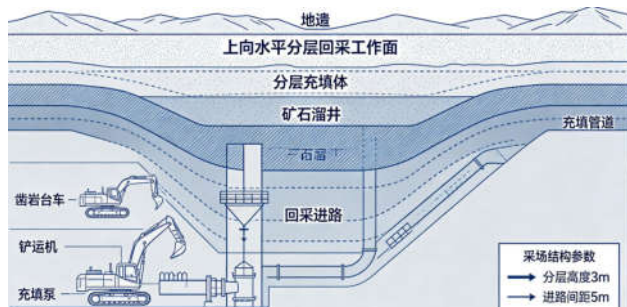


图1 机械化上向水平分层充填采矿法示意图

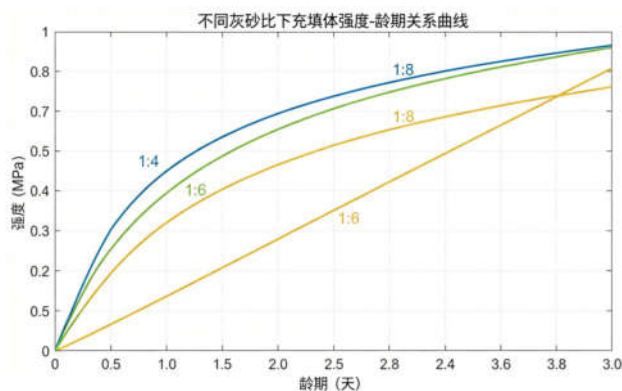


图2 不同灰砂比下充填体强度-龄期关系曲线图

2.3 充填采矿工艺参数优化

(1) 采场结构参数优化:针对薄萤石矿体开采空间狭小、围岩易失稳的特点,对采场核心结构参数进行优化调整。合理缩减采场跨度,优化分层开采高度,匹配矿体薄厚变化特征;优化矿柱尺寸与布设方式,取消冗余永久矿柱,采用临时支护替代,在保障采场结构稳定的前提下,最大限度提升矿石回收总量,适配薄矿体开采空间局限。(2) 充填施工参数优化:聚焦薄矿体充填接顶不密实、料浆离析等核心难题,优化充填施工关键

参数。科学设定分层充填厚度,匹配开采分层高度;调控充填泵送速率,避免流速过快造成离析、流速过慢引发堵管;优化接顶施工工艺,采用分次充填、稳压接顶方式,有效提升采空区充填密实度,彻底解决薄矿体充填接顶不实、支护存在盲区的问题。(3) 采充时序参数优化:统筹凿岩爆破、出矿支护、充填养护全流程,优化采充时序间隔。明确单分层开采、支护、充填的作业周期,规范充填体养护时长,确保充填体达到预设强度后再开展下一分层开采,实现开采、支护、充填协同衔接,避免工序冲突,在保障采场安全稳定的前提下,有效提升整体开采作业效率^[4]。

2.4 充填系统配套设计

(1) 充填输送系统设计:结合矿区地形高差、井下采场分布及开采深度,优化设计充填输送管路系统。依据最优料浆流动性参数,匹配管路管径、铺设路径与输送坡度,合理布设主干管与分支管,规避管路弯折、高低落差过大等问题,保障充填料浆输送稳定、均匀,杜绝堵管、漏浆问题,满足各采场充填施工需求。(2) 智能监测系统配置:配套搭建井下智能动态监测系统,在采场围岩、充填体关键点位布设应力、位移、沉降监测设备,全程实时采集施工与养护阶段数据。通过数据实时传输、分析与预警,动态掌握围岩变形与充填体固结状态,实现充填施工全过程智能化管控,及时排查安全隐患,保障采充作业安全有序开展。

3 充填采矿技术在薄萤石矿山采矿工程应用效果分析与评价

3.1 工程应用概况

(1) 矿区工程概况:本次工业试验选取某薄萤石矿典型开采区块作为试验场地,矿区交通条件便利,开采配套设施完善。试验区块矿体整体厚度小、连续性一般,围岩破碎、节理裂隙发育,地压活动较为明显,属于典型的复杂薄萤石矿体开采条件。矿区前期采用传统空场采矿法,存在安全隐患多、资源损耗大等问题,具备良好的技术改造与试验条件,可有效验证优化后充填采矿技术的实际应用效果。(2) 现场施工流程:现场严格采用优化后的机械化上向水平分层充填采矿工艺施工,主要分为矿体凿岩爆破、矿石清运、顶板围岩支护、充填料浆制备、管道泵送充填、充填体养护六大核心工序。施工过程中严格控制分层开采高度与充填厚度,严控料浆配比、输送速率及接顶质量,全程落实工序质量检测与现场管控,规避堵管、充填不实、围岩扰动等施工问题,保障采充作业标准化、规范化开展。

3.2 安全稳定性效果分析

(1) 围岩变形监测分析: 通过布置围岩位移与沉降监测点位, 对比充填开采前后监测数据可知, 传统开采模式下围岩位移、沉降量大, 变形持续时间长, 围岩处于不稳定状态。应用充填采矿技术后, 充填体快速贴合围岩并形成支撑约束, 围岩变形速率显著放缓, 最终沉降量与位移量大幅降低, 围岩变形得到有效控制, 支护效果显著。(2) 采场应力分布分析: 结合现场监测与数值模拟结果分析, 传统空区开采会造成采场应力集中, 顶板与两帮应力差值较大, 易出现岩体破坏失稳。充填完成后, 采空区被充填体有效填充, 应力集中现象大幅缓解, 采场应力分布均匀化, 围岩承载压力显著降低, 采场整体应力状态趋于稳定, 有效提升了井下开采安全储备^[5]。(3) 地质灾害防控效果: 充填体可有效支撑顶板、加固两帮围岩, 彻底改善采空区悬空的危险状态。相较于传统开采方式, 新工艺基本杜绝了顶板垮落、岩壁片帮等井下常见灾害, 同时有效抑制采动引发的岩层移动, 减少地表沉降变形, 大幅降低了矿山地质灾害发生概率, 实现安全开采。

3.3 资源开采效益分析

(1) 资源回收率对比: 传统采矿工艺因矿柱留存、残矿流失、围岩混入等问题, 矿石回采率偏低、贫化率偏高。充填采矿法采用分层采充协同工艺, 无需预留大量永久矿柱, 可最大限度回收矿体资源, 同时减少围岩混入矿体的情况, 有效降低矿石贫化率, 大幅提升薄萤石矿体资源利用率, 解决了薄矿体资源浪费的行业难题。(2) 固废资源化效益: 本次工程充分利用矿山萤石尾砂、井下废石作为充填骨料, 替代传统外购充填材料。大量矿山固废直接回填至井下采空区, 实现了固废就地消纳与资源化利用, 有效减少尾矿库堆存压力, 提升矿山固废综合利用率, 契合矿山固废减量利用的生产要求。

3.4 经济与环保综合效益评价

(1) 经济效益分析: 充填采矿工艺虽增加了充填制备、管路运维等施工成本, 但矿石回采率提升、贫化率

下降带来了显著的资源增收效益, 同时省去大量矿柱遗留造成的资源损失, 减少地质灾害治理、尾矿运维等额外费用, 综合经济效益远优于传统开采工艺。(2) 环保效益分析: 该技术将尾砂、废石等固废回填井下, 大幅减少尾矿地表堆存体量, 降低尾矿库运维风险。同时有效抑制岩层移动与地表塌陷, 保护地表地形地貌, 减少水土流失与扬尘污染, 大幅降低矿山开采对周边生态环境的破坏, 生态环保优势突出。(3) 综合效益总结: 综合安全、资源、经济、环保多维度分析, 优化后的充填采矿技术适配薄萤石矿体开采特征, 既能保障采场安全稳定、规避地质灾害, 又能提升矿产资源回收率、实现固废资源化利用, 兼顾生产安全、经济效益与生态环保, 具备极高的工程应用与推广价值。

结束语

本文优化的充填采矿技术体系, 有效解决了薄萤石矿山开采空间受限、围岩易失稳、资源损耗严重等行业痛点。通过科学优选采矿工艺、优化各项关键参数, 实现了开采与充填作业的高效协同。该技术不仅大幅提升井下开采安全性, 降低地质灾害发生概率, 还提升了矿石回收率与固废利用率, 兼顾经济效益与生态效益, 对同类薄矿体矿山开采具有重要的参考与推广意义。

参考文献

- [1] 罗领. 矿山采矿工程中充填采矿技术的实践[J]. 世界有色金属, 2024, 8(19): 208-210.
- [2] 吴春辉. 充填采矿技术在金属非金属矿山采矿工程中的应用策略研究[J]. 山西冶金, 2023, 46(10): 102-104.
- [3] 张鹏, 刘杰. 煤矿膏体充填采矿技术的应用难点与对策[J]. 煤炭科学技术, 2023, 13(5): 89-95.
- [4] 陈明, 赵辉. 深部矿山充填体强度控制技术研究[J]. 采矿技术, 2022, 20(12): 145-148.
- [5] 张耕硕. 充填采矿技术在采矿中的应用对策分析[J]. 模型世界, 2024, 9(14): 103-105.