

地下金属矿山充填采矿法应用分析

宋书杨

新巴尔虎右旗超凡矿业有限责任公司 内蒙古 满洲里 021400

摘要：本文聚焦地下金属矿山充填采矿法，阐述其分类、核心功能及材料工艺要求。分析该采矿法在安全、资源、环境方面的显著优势，深入探讨充填材料优化、工艺创新、地压监测控制等关键技术。展望其绿色化、智能化、协同化发展趋势，旨在为提升地下金属矿山开采的安全、高效与环保水平提供理论支撑与实践参考，推动矿山可持续发展。

关键词：地下金属矿山；充填采矿法；应用分析

引言：地下金属矿山开采对资源供应意义重大，但传统采矿法存在安全风险高、资源浪费、环境破坏等问题。充填采矿法凭借独特优势逐渐兴起，它通过填充采空区，有效解决诸多难题。本文将系统分析地下金属矿山充填采矿法的理论基础、应用优势、关键技术及发展趋势，为该采矿法在地下金属矿山的进一步推广应用提供全面的理论依据与实践指导。

1 地下金属矿山充填采矿法理论基础

1.1 充填采矿法分类

地下金属矿山充填采矿法依据充填材料特性、施工工艺及适用场景可分为多种类型，核心分类包括干式充填采矿法、水砂充填采矿法和胶结充填采矿法三大类。干式充填采矿法以碎石、废石等固体物料为充填体，通过机械或重力输送至采空区，适用于缺水、物料来源充足的矿山，但其充填体密实度较低，承载能力有限。水砂充填采矿法借助水流将砂质充填材料输送至采空区，充填效率较高，充填体密实度优于干式充填，不过需配套完善的排水系统，避免采空区积水影响采矿作业^[1]。胶结充填采矿法是当前应用较广泛的类型，通过在充填材料中添加胶凝材料（如水泥、粉煤灰等），使充填体具备良好的胶结强度和承载性能，可有效控制地压，适用于高应力、复杂地质条件的矿山，尤其适合贵重矿产资源的回收。

1.2 充填采矿法核心功能

地下金属矿山充填采矿法的核心功能集中体现在采空区治理、地压控制、资源高效回收及作业安全保障四个关键维度。采空区治理是其基础功能，通过充填材料填充采矿后形成的空区，可有效避免空区顶板垮塌、围岩变形等地质灾害，防止地表沉陷，保护地表生态环境和周边构筑物安全。地压控制功能主要通过充填体的承载作用实现，充填体可与围岩协同受力，分担围岩压

力，减少巷道变形和支护难度，提高矿山开采的稳定性。资源高效回收功能体现在该方法可实现对边角矿、残留矿等难采资源的回收利用，降低资源浪费，提升矿山资源利用率，尤其适用于资源稀缺、价值较高的金属矿山。作业安全保障功能则通过优化采矿环境实现，充填后形成的稳定作业空间可减少透水、瓦斯突出、顶板事故等安全隐患，为采矿作业人员和设备提供安全保障，同时降低矿山安全生产管理成本。

1.3 充填材料与工艺要求

充填材料的选择与工艺质量直接决定充填采矿法的应用效果，因此对二者均有明确且严格的要求。充填材料需满足强度、稳定性、流动性及经济性等核心指标，常用材料包括废石、尾砂、戈壁砂等骨料，以及水泥、石膏、工业废渣等胶凝材料。其中，骨料需具备良好的级配和物理稳定性，避免因材料风化、破碎影响充填体强度；胶凝材料需根据充填体强度要求合理配比，兼顾强度与经济成本，同时尽量利用工业废弃物，实现资源循环利用。工艺要求方面，首先需保障充填材料的搅拌均匀性，确保胶凝材料与骨料充分混合，提升充填体整体强度；其次，输送工艺需满足高效、稳定要求，根据材料特性选择机械输送、水力输送或风力输送等方式，避免输送过程中出现堵管、离析等问题；充填施工需严格控制充填速度和充填顺序，确保采空区充填密实，避免出现空洞、缝隙等缺陷。

2 地下金属矿山充填采矿法应用优势

2.1 安全效益

地下金属矿山充填采矿法的安全效益是其核心优势之一，显著降低矿山开采过程中的各类安全风险。相较于传统空场采矿法、崩落采矿法，该方法通过充填体填充采空区，从根源上解决采空区顶板垮塌和围岩变形的隐患，有效避免因空区失稳引发的地表沉陷、巷道坍塌

等地质灾害,保护矿山井下作业空间和地表周边环境的安全^[2]。同时,充填体可有效隔离含水地层,减少透水事故的发生概率,尤其适用于水文地质条件复杂的矿山。另外,充填采矿法可降低地应力集中程度,减少巷道支护压力,降低支护结构失效引发的安全事故风险。从实际应用效果来看,采用充填采矿法的矿山,顶板事故、地表沉陷事故发生率显著低于传统采矿方法,作业人员的安全保障水平大幅提升。

2.2 资源效益

充填采矿法在资源效益上优势显著。传统采矿方法受采空区稳定性制约,难以有效回收边角矿、残留矿、薄矿体等难采资源,致使大量矿产滞留地下。而充填采矿法借助充填体维持采场稳定,能精准开采这些难采资源,大幅提升回采率,尤其对金矿、铜矿等高价值金属矿山,可直接增加经济效益;充填材料可大量利用矿山开采产生的废石、尾砂等固体废弃物,减少其堆放占地与环境污染,降低采购成本,实现资源循环利用。它还能有效控制采场变形,为后续作业创造稳定条件,延长矿山服务年限,提升综合效益;尾砂作为常见充填骨料,来源广、成本低。经分级、脱水等预处理后,可满足不同强度充填体配制需求。利用尾砂充填,既能解决其堆存带来的环境与安全隐患,又能将其转化为有价值的材料,实现二次利用。如一些金属矿山将尾砂与水泥等胶凝材料按比例混合,制成性能良好的充填料浆用于采空区,有效提高了资源利用率,降低了充填成本。

2.3 环境效益

地下金属矿山充填采矿法在环境保护方面具有显著优势,可有效减轻矿山开采对生态环境的破坏。首先,该方法通过充填体填充采空区,能够有效阻止地表沉陷,保护地表植被、耕地和构筑物,避免因地表沉陷引发的生态破坏和地质灾害。其次,充填材料可大量消纳矿山开采过程中产生的废石、尾砂等固体废弃物,减少固体废弃物的露天堆放量,降低废弃物淋溶水对土壤和地下水的污染风险,同时节约了废弃物堆放占用的土地资源。另外,相较于传统采矿方法,充填采矿法可减少地下涌水的排放,降低对区域水文环境的影响,同时减少采矿过程中粉尘、噪声的产生,改善矿山周边的空气质量和生态环境。在绿色矿山建设背景下,充填采矿法通过“以废治废”“边采边充”的模式,实现了矿山开采与环境保护的协同发展,为矿山生态修复和可持续发展提供了有效支撑。

3 地下金属矿山充填采矿法关键技术分析

3.1 充填材料优化

充填材料性能关乎充填采矿法效果与成本。当前优化主要有两方面:一是利用工业废弃物替代部分传统胶凝材料。如用粉煤灰、矿渣粉等替代部分水泥制备新型复合胶凝材料,既降低成本,又实现工业废弃物资源化利用,还可添加减水剂、早强剂等外加剂改善其流动性与早期强度。二是研发新型充填材料,这是未来优化重点方向,包括高水速凝、膏体、纤维增强充填材料等,它们强度高、流动性好、凝固快,能适应复杂地质和特殊采矿场景,提升方法适用性与可靠性。对于尾砂充填材料,添加合适化学添加剂可改善其流变性与凝固性能,如分散剂提高流动性,速凝或缓凝剂调节凝固时间。另外,对尾砂进行表面改性处理,增强其与胶凝材料的粘结力,也能提高充填体强度与稳定性。

3.2 充填工艺创新

充填工艺创新是提升充填效率与质量的关键技术,近年来随矿山智能化、机械化发展,其向高效、自动、智能方向迈进。膏体充填工艺是当下应用较广的创新工艺,通过优化材料配比制备膏状充填体,它流动性佳、不离析、充填密实度高,能减少采空区空洞,提升充填体强度,降低水耗与环境污染;自动化充填工艺引入智能控制系统和在线监测设备,对充填材料配比、搅拌、输送、充填等全过程自动控制,提升效率的同时保障质量稳定,减少人为误差^[3]。另外,分段、分层等精细化充填工艺创新应用,可依据采场地质与开采进度精准充填,增强充填体与围岩协同受力效果。在尾砂充填工艺里,全尾砂膏体充填技术是创新方向,它将未分级全尾砂与胶凝材料、水等混合成膏体料浆,经管道输送至采空区,具有充填体强度高、沉降率低、环境影响小等优点,能解决传统尾砂排放问题,提高充填质量。

3.3 地压监测与控制

地压监测与控制是保障充填采矿法安全应用的关键技术,其核心任务是实时掌握采场及围岩的应力变化规律,及时调整充填参数和支护措施,确保采场稳定。地压监测技术主要包括应力监测、位移监测、声波监测等多种手段,通过在采场围岩、充填体、巷道周边布设监测传感器,实时采集地应力、围岩位移、充填体变形等数据,并通过智能监测系统实现数据的实时传输、分析和预警。当地压监测数据出现异常时,可及时采取调整充填材料配比、增加充填强度、加强巷道支护等控制措施,避免地压过大引发采场失稳。通过地压监测数据的积累和分析,可优化充填参数和采矿方案,提升矿山开采的科学性和安全性。数值模拟技术的应用,可提前预判采场地压分布规律,为地压控制方案的制定提供

理论支撑,进一步提升地压监测与控制的精准性和有效性。

4 地下金属矿山充填采矿法发展趋势

4.1 绿色化

绿色化是地下金属矿山充填采矿法未来核心趋势之一,契合我国绿色矿山与生态文明建设要求,主要体现在:一是充填材料绿色化。进一步加大尾砂、废石等工业废弃物利用比例,研发无水泥或低水泥胶凝材料,减少水泥使用碳排放,实现“以废治废”循环发展;二是充填工艺绿色化。优化作业流程,减少粉尘、噪声、废水产生,采用环保输送设备和搅拌工艺,降低对周边环境的污染;三是开采与生态修复协同化。将充填采矿与地表生态修复结合,以充填体稳定地表,助力植被恢复与耕地保护。另外,绿色化还体现在优化充填成本,提升绿色开采经济性与可持续性。在尾砂充填上,推动其高效利用与绿色处置,加强分级分类利用,开发针对性工艺产品,注重环保,防止泄漏与二次污染。

4.2 智能化

智能化是地下金属矿山充填采矿法的重要发展方向,随着人工智能、大数据、物联网等技术的快速发展,充填采矿将逐步实现全流程智能化管控。未来智能化发展将聚焦于四个关键环节:一是充填材料制备的智能化,通过智能传感器实时监测材料配比、湿度、粒度等参数,利用AI算法自动调整配比方案,保障充填材料质量的稳定性;二是充填输送的智能化,采用智能输送设备和在线监测系统,实时监测输送压力、流量等参数,实现输送过程的自动调控,避免堵管等故障的发生;三是充填施工的智能化,通过无人化充填设备、远程操控系统,实现充填作业的无人化操作,提升作业效率和安全性;四是地压监测与预警的智能化,构建大数据驱动的地压监测预警平台,整合多源监测数据,通过AI算法实现地压风险的精准预判和智能预警,为采场稳定控制提供实时支撑^[4]。智能化发展将大幅提升充填采矿的效率、质量和安全性,推动矿山开采向智能化、无人化方向转型。

4.3 协同化

协同化是地下金属矿山充填采矿法未来的重要发展趋势,强调充填采矿与矿山其他生产环节、技术体系的协同融合,提升矿山开采的综合效益。未来协同化发展将主要体现在三个维度:(1)充填采矿与采矿工艺的协同化,实现充填作业与采矿作业的精准衔接,根据采矿进度动态调整充填参数和充填时机,提升采矿与充填的协同效率;(2)充填采矿与资源综合利用的协同化,将充填材料的制备与矿山固体废弃物处理、水资源循环利用相结合,实现资源的全链条循环利用,提升矿山资源开发的综合效益;(3)充填采矿与矿山安全管理的协同化,将地压监测、充填质量监测与矿山安全管理体系相融合,构建一体化安全管控平台,实现安全风险的全方位预警和管控。另外,协同化还将体现在跨学科技术的融合上,整合采矿工程、材料科学、信息技术、环境工程等多学科技术,推动充填采矿法向更高效、更安全、更环保的方向发展,为矿山可持续发展提供技术支撑。

结束语

地下金属矿山充填采矿法优势显著,在安全、资源、环境效益上表现突出,关键技术不断突破创新。其绿色化、智能化、协同化发展趋势,契合时代对矿山开采的要求。未来,随着技术持续进步,充填采矿法将不断完善,为地下金属矿山安全高效开采、资源综合利用及生态环境保护提供更坚实保障,推动矿山行业迈向可持续发展新征程。

参考文献

- [1]杨恒涛.地下金属矿山充填采矿法应用分析[J].冶金与材料,2025,45(10):130-132.
- [2]蒲世海.地下金属矿山充填采矿技术安全分析[J].世界有色金属,2024(6):85-87.
- [3]何先胜,谢志强.地下金属矿山开采中连续开采关键技术的应用[J].世界有色金属,2025(7):91-93.
- [4]卢宏建,夏传祥,武立彬,等.金属矿山充填体强度需求发展现状与展望[J].矿产保护与利用,2024,44(2):1-10.