

金属矿山采矿工程技术与施工安全事故防范

刘晓华

江西铜业集团建设有限公司井巷分公司

DOI:10.32629/jsse.v3i4.17856

[摘要] 金属矿产资源的开采是国家工业发展与经济建设的重要基石。本文梳理了以智能化为趋势的现代采矿技术体系,深入剖析了顶板坍塌、边坡失稳、爆破伤害及井下透水等四类主要施工安全事故的致因。针对这些风险,论文立足工程项目经验,分别从升级智能化采矿装备、优化高效掘进技术、引入绿色充填技术等多个方面,探讨了基于技术前置性优化的主动安全事故防范策略,望有助于促进金属矿山采矿工程事业的高质量发展。

[关键词] 金属矿山; 采矿工程; 施工安全; 方法策略

中图分类号: U227.6 文献标识码: A

Mining Engineering Technology and Construction Safety Accident Prevention of Metal Mine

Xiaohua Liu

Jiangxi Copper Group Construction Co., LTD, Jiujiang, Jiangxi province

[Abstract] The exploitation of metal mineral resources serves as a crucial foundation for national industrial development and economic construction. This paper systematically reviews the modern mining technology framework characterized by intelligent trends, while conducting an in-depth analysis of the root causes of four major construction safety incidents: roof collapses, slope instability, blasting-induced injuries, and underground water ingress. Drawing on engineering project experience, the study proposes proactive safety prevention strategies through technological optimization, including upgrading intelligent mining equipment, optimizing high-efficiency tunneling techniques, and implementing eco-friendly backfilling technologies. These measures aim to facilitate the high-quality development of metal mining engineering.

[Key words] metal mine; mining engineering; construction safety; methods and strategies

矿山开采活动始终伴随着岩体失稳、爆炸、水害等多种高风险因素,施工安全事故时有发生,严重威胁人员生命安全与企业可持续发展。传统安全管理模式多侧重于事后的应急处置与制度约束,未能从根本上将安全要素融入生产技术的初始设计端。随着智能化、绿色化成为矿业发展的新方向,技术本身正从生产工具演变为核心的安全保障手段。因此,如何优化采矿核心技术,从源头上识别、评估并控制施工安全风险,成为当前矿山安全领域亟待解决的关键课题。

1 金属矿山采矿工程核心技术概述

1.1 地下采矿技术

一方面,空场采矿法作为地下采矿中应用较早的传统技术,适用于围岩稳固性强、矿石回采难度较低的矿床,可在采矿过程中不立即充填采空区,而是借助矿柱的支撑作用维持采场稳定,待采场作业完成后再根据实际情况对采空区进行处理。另一方面,充填采矿法则根据充填材料的不同可分为胶结充填与非胶结充填两大类,核心技术优势在于能够通过向采空区填充特定

材料,有效控制围岩变形与地表沉陷。此外,崩落采矿法主要利用岩石自身的重力或爆破产生的冲击力,使采场围岩与矿石一起崩落,从而实现矿石回收与采空区处理的同步完成。

1.2 露天采矿技术

露天剥离与采矿工艺是露天矿山开采的核心流程,涵盖穿孔、爆破、铲装、运输等核心环节,各环节的技术规范直接决定了开采效率与施工安全。其中,穿孔环节需根据矿石与围岩的物理力学性质,选择合适的穿孔设备与孔径参数,确保炮孔深度、间距符合爆破设计要求;爆破环节则应合理选择炸药类型、确定爆破参数,严格执行爆破安全规程;铲装环节需匹配与开采规模相适应的铲装设备,规范操作流程,提高矿石装载效率;运输环节要规划合理的运输线路,选用大型矿用卡车、皮带输送机等运输设备,确保矿石与剥离物的高效转运。

1.3 新兴采矿技术发展趋势

智能化采矿技术是金属矿山采矿工程的显著发展趋势,尤其是通过大数据、物联网、人工智能等先进技术与采矿工程的

深度融合,更是可实现采矿作业的智能化感知、精准化控制与高效化管理。以物联网技术为例,其可在采矿设备、作业环境、人员身上布设各类传感器,对开采过程中设备运行状态、围岩稳定性、环境参数、人员位置等关键信息进行实时采集,用于辅助提升技术应用效果。同时,绿色采矿技术的发展趋势同样显著,其目标在于在实现资源高效开采的同时,最大限度地减少对生态环境的破坏,实现资源开发与生态保护的协同发展。

2 金属矿山采矿工程施工安全事故类型及成因

2.1 顶板事故

顶板事故多发生在空场采矿法采场、巷道掘进工作面以及采空区周边区域,尤其在破碎带等地质条件复杂、顶板支护不及时或支护工艺不合理的场景下更易发生。作为地下金属矿山最频发的安全事故之一,顶板事故具有极强的突发性,往往在无明显预警信号的情况下瞬间发生,大块岩石突然坠落或顶板整体垮塌,不仅会直接造成作业人员伤亡,还可能堵塞井下通道、损毁采矿设备,甚至引发瓦斯突出、透水等次生事故。数据表明,金属矿山顶板事故约占地下矿山事故总数的28%,其中因支护不及时或支护结构不达标导致的事故占比超过60%^[1]。典型案例中,顶板垮落高度可达3-8米,瞬间载荷超过200吨,足以摧毁常规支护体系^[2]。

2.2 边坡失稳事故

露天矿山边坡是人工开挖形成的高陡边坡,其稳定性直接取决于岩体结构、岩土物理力学性质、边坡角度设计以及外部环境扰动。而边坡失稳事故则主要发生在露天金属矿山,是由边坡岩体在重力、爆破震动、雨水渗透等多重因素作用下,稳定性失衡引发的滑坡、崩塌等灾害,其影响范围极为广泛,一旦发生滑坡或崩塌,大量岩土体瞬间下滑,掩埋露天采场作业面,损毁大型采矿设备。研究表明,边坡失稳前通常存在持续3-15天的变形加速阶段,日位移速率可从0.5mm/天骤增至10mm/天^[3]。但由于部分矿山未建立完善的边坡监测系统,或对前期征兆重视不足、处置不及时,最终导致事故发生。

2.3 爆破事故

爆破事故的常见类型包括早爆、迟爆、爆破飞石伤人、爆破震动引发坍塌等,具有瞬时性和高破坏性等特征,多与违规作业相关。其中,早爆是指炸药在未达到预定爆破时间前提前引爆,多由爆破器材质量不合格、起爆系统故障、外来电干扰等因素导致,由于违背了预设作业流程,极易造成现场作业人员的直接伤亡;迟爆则是炸药在预定时间后延迟引爆,此时作业人员可能已进入爆破区域进行后续作业,突然的爆炸会带来猝不及防的伤害。爆破产生的强烈震动会诱发周边围岩坍塌、边坡失稳等次生事故,尤其在地质条件复杂的矿山,爆破震动的叠加效应会进一步放大安全风险。

2.4 透水事故

透水事故即矿山开采过程中,地下水、地表水或老空水突然涌入采场或巷道的灾害,其隐蔽性强、处置难度大,多发生在巷道掘进穿透含水层、断层破碎带或老空区的场景,初期可能表现

为巷道壁渗水、淋水增大,若未及时识别并处置,会迅速发展为大量水体突涌,瞬间淹没作业区域。透水事故不仅会造成作业人员溺水伤亡,还会损毁采矿设备、破坏矿山生产系统,同时会导致地下水水位下降,影响周边地区的水资源环境。处置透水事故的难点在于难以快速确定透水水源和涌水量,救援过程中还可能面临水位上涨、有毒有害气体溢出等风险,给救援工作带来极大挑战。

3 基于核心技术优化的施工安全事故防范措施

3.1 升级智能化采矿装备,动态安全管控

地下矿山可全面推广智能掘进机、无人值守提升系统、自主导航铲运机等装备,以有效降低人员井下作业风险,而露天矿山则应重点部署无人采矿车、智能爆破机器人、边坡智能监测钻机,从源头减少爆破作业中的人为失误(如表1所示)。实际应用表明,采用智能掘进机后,巷道掘进效率提升25-40%,同时减少作业人员50%;无人采矿车在试点矿山中实现连续运行5000小时无重大事故,运输效率提高30%,碰撞风险降低90%^[4]。在动态安全管控体系构建上,应通过装备搭载的各类传感器,实时采集设备运行参数、作业环境数据,并借助5G技术实现数据的高速传输与边缘计算,确保风险信息的实时性。构建风险预判模型,对采集到的多维数据进行关联分析,当数据出现异常波动时,系统自动触发分级预警,通过现场声光报警、管理人员手机终端推送等方式及时提醒处置。

表1 智能采矿装备关键技术与应用指标

装备类型	关键技术	主要功能	适用场景
智能掘进机	激光导向、自动切割、远程监控	自动识别岩层,精准掘进	地下矿山巷道掘进
无人采矿车	北斗/GPS定位、自动驾驶、车路协同	自动运输矿石,避障与路径规划	露天矿山运输
智能爆破机器人	远程装药、参数自动设定、起爆控制	替代人工装药,精确控制爆破参数	露天与地下爆破作业
边坡监测钻机	多参数传感器、实时数据传输、AI预警	实时监测边坡位移、应力、水位等	露天矿山边坡

3.2 优化高效掘进技术,强化岩爆防控

推广应用硬岩掘进机(TBM)与悬臂式掘进机协同作业模式,针对不同地质条件适配掘进参数,在完整性较好的岩层中,采用TBM进行高效连续掘进,通过调整刀盘转速、推进速度匹配岩石硬度,减少掘进过程中对围岩的扰动。在破碎带或高应力区域,则切换为悬臂式掘进机分段掘进,配合浅孔爆破弱化岩体强度,避免强行掘进引发岩爆。在超前探测方面,采用地质雷达、声波探测与钻孔窥视相结合的综合探测技术,在掘进前对前方50-100米范围内的地质构造、岩体应力分布进行精准探测,建立地质风险台账。针对高应力区域,采取超前钻孔卸压、松动爆破卸压等措施,通过在掘进工作面周边布设卸压钻孔,释放岩体内部积聚的应力,降低岩爆发生概率。采用联合支护体系,根据探测到的岩体完整性等级调整支护参数,确保支护结构的稳定性。

3.3 引入绿色充填技术,控制地表沉降

绿色充填技术可利用矿山固废等绿色充填材料, 在实现采空区有效支撑的同时, 降低资源浪费与环境影响, 从根源上防范因采空区塌陷引发的地表沉降。在充填材料选择上, 应优先采用矿山尾矿、煤矸石、建筑垃圾等固废材料, 通过破碎、筛分、配比优化后制备成胶结充填体或膏体充填材料(如表2所示)。针对不同矿床条件, 优化充填工艺参数, 对于深埋高应力采空区, 采用高浓度膏体充填工艺, 通过高压泵送系统将充填材料精准输送至采空区, 确保充填体密实度, 而浅部采空区, 则可采用分级尾砂胶结充填工艺, 平衡充填成本与支护效果。某大型铁矿采用全尾砂膏体充填技术后, 采空区充填体强度达5.2MPa, 地表沉降量控制在50mm以内, 尾砂利用率达95%, 年减少固废排放120万吨, 同时节省排土场用地约30公顷^[5]。

表2 绿色充填材料性能指标与工艺参数

充填材料类型	主要成分	抗压强度 (MPa)	流动性 (坍落度/cm)	适用采空区类型
尾矿胶结充填体	尾矿、水泥、添加剂	3.0 - 5.0	18 - 25	浅部采空区、低应力区
膏体充填材料	全尾砂、胶凝材料、水	5.0 - 8.0	20 - 28	深部高应力采空区
建筑垃圾再生充填体	建筑垃圾骨料、胶结剂	2.5 - 4.0	15 - 22	浅部非关键区域
煤矸石充填体	煤矸石、粉煤灰、水泥	2.0 - 3.5	12 - 20	缓倾斜煤层采空区

3.4改进无轨运输与封闭式提升系统

优先推广新能源智能无轨胶轮车, 搭载智能导航、自动避障、超速预警等功能, 通过矿山物联网平台实现实时调度与远程监控, 减少人为操作失误引发的碰撞、翻车事故。优化运输巷道设计, 拓宽巷道断面、增设会车避让点, 在转弯、坡道等危险路段设置反光标识、减速带及智能预警装置, 当两车接近安全距离时自动触发声光报警。建立运输车辆全生命周期管理机制, 定期开展设备检修维护, 重点检测制动系统、转向系统及防爆装置, 确保车辆安全性能达标。对提升井架、井筒进行封闭改造, 采用

钢结构封闭罩与防火防爆板材, 隔绝外部粉尘、雨水及杂物进入, 同时减少提升过程中气流对提升容器的干扰。构建全方位提升安全监测系统, 实时监测提升容器的运行速度、位置、钢丝绳张力及井筒内的风速、粉尘浓度等参数。

4 结语

综上所述, 金属矿山安全高效生产的根本出路在于推动采矿工程技术向安全与效率协同发展方面转型。因此, 技术人员应宏观审视金属矿山采矿工程技术的核心技术内涵, 精准把握诱发安全事故的各类潜在因素, 以确保相关技术策略的针对性。随着数字孪生、人工智能、先进传感等技术的进一步融合, 采矿工程技术与施工安全将实现更深层次的“一体化”设计, 只有坚持技术创新的安全导向, 让先进技术真正成为风险识别的前沿哨兵和事故防范的坚固屏障, 才能最终构建起以人为本、预防为主、的现代矿山安全生产新格局, 推动矿业走向安全、绿色、智能的高质量发展道路。

[参考文献]

- [1]陈飞. 智能化矿山采矿技术中的安全管理问题探讨[J]. 世界有色金属, 2023, (21): 211-213.
- [2]王应明. 露天采矿工程中的采矿技术与施工安全[J]. 工程建设(维泽科技), 2025, 8(6): 128-130.
- [3]常胜鲁. 矿山工程采矿技术及安全管理研究[J]. 中国金属通报, 2025, (10): 46-48.
- [4]侯仁义. 采矿工程中的采矿技术与施工安全分析[J]. 内蒙古煤炭经济, 2024, (4): 88-90.
- [5]崔建超. 安全采矿技术在某大型地下金属矿山的研究与应用[J]. 矿业工程, 2024, 22(3): 11-16.

作者简介:

刘晓华(1977--), 男, 汉族, 江西广丰人, 现就职于: 江西铜业集团建设有限公司井巷分公司, 中级工程师, 本科, 研究方向: 矿业工程。