

深部矿体开采技术难点及应对策略研究

李 杰

中国神华能源股份有限公司保德煤矿 山西 忻州 036603

摘 要：本文聚焦深部矿体开采领域，深入剖析其在地质条件、开采工艺、安全保障、设备性能及环境控制等方面存在的技术难点，结合实际开采场景分析问题成因，并从地质探测、工艺优化、安全防控、设备升级和环境治理等角度提出针对性应对策略，旨在为深部矿体高效、安全开采提供技术参考。

关键词：深部矿体；开采技术；技术难点；应对策略；安全开采

引言

浅部矿产资源渐趋枯竭，深部矿体开采成为必然走向。然而，深部开采环境特殊，高地应力、高温、高水压及复杂地质构造等问题交织，让开采难度远超浅部。尽管当下开采技术持续进步，可岩爆、突水、支护失效等状况仍频繁发生，严重制约开采效率与安全。在此背景下，深入研究深部矿体开采技术难点，探寻科学有效的应对之策，对保障资源供应、推动矿业高质量发展意义重大。本文将结合实际案例展开系统探讨。

1 深部矿体开采的环境特征与挑战

深部矿体开采环境具有显著的特殊性，随着开采深度增加，地应力呈现非线性增长，部分矿区深度每增加100米，垂直应力可提升2-3MPa，极易引发岩爆等地质灾害；同时，地下温度随深度递增，多数深部矿井温度超过35℃，部分高热能矿区甚至达到50℃以上，对作业人员及设备稳定性构成严重威胁。此外，深部含水层分布复杂，水压普遍较高，突水风险显著上升，某铁矿深部开采中曾因揭露隐伏含水层，导致涌水量瞬间达到800m³/h，造成开采作业中断。这些环境特征相互叠加，使深部矿体开采面临前所未有的技术挑战。

2 深部矿体开采的主要技术难点

2.1 地质条件探测精度不足

深部地质构造复杂多变，传统钻探手段难以精准识别断层、破碎带等隐伏构造，某铜矿在开采深度1200米处因未探明小型断层，导致回采工作面突水，造成直接经济损失超千万元。物探技术在深部应用中受高应力环境干扰，信号衰减严重，对矿体边界、岩体完整性的探测误差可达15%-20%，影响开采设计的准确性。此外，深部岩体物理力学参数随应力变化而改变，实验室测定值与现场实际存在较大偏差，导致支护设计难以适配实际受力状态^[1]。

2.2 开采工艺适应性不足

浅部开采成熟的空场法、充填法在深部应用中存在明显局限，空场法留设的矿柱在高应力作用下易发生变形破坏，某金矿采用空场法开采1000米以深矿体时，矿柱压缩量达300mm，引发顶板冒落；充填法面临深部充填体强度增长缓慢的问题，传统水泥基充填材料在高应力下易出现塑性流动，无法及时承载围岩压力。同时，深部矿体开采的凿岩效率显著下降，因岩体硬度增加，凿岩速度较浅部降低40%-50%，炮孔利用率不足60%，严重影响开采进度。

2.3 安全保障体系不完善

高地应力引发的岩爆是深部开采最突出的安全隐患，其发生具有突发性和破坏性，某煤矿深部开采中发生的岩爆事件，瞬间释放的能量将20mm厚的钢板撕裂，造成设备损毁。现有岩爆预警技术主要依赖应力传感器监测，预警准确率仅为60%左右，且预警时间窗口较短，往往难以实现有效规避。此外，深部开采中的通风散热效率低下，传统轴流式通风机在高阻力风道中风压损失达30%，部分作业面风速不足0.5m/s，无法满足散热与有害气体排出需求。

2.4 开采设备适应性差

现有开采设备多基于浅部环境设计，在深部高应力、高温环境下故障频发，液压支架立柱在高地应力作用下密封件磨损速度加快3-4倍，使用寿命从浅部的2000次循环降至800次以下；凿岩机液压系统在高温环境中易出现油液黏度下降，导致作业压力不稳定，钻进效率波动幅度超过25%。同时，深部开采空间有限，大型设备移动与调度困难，某铁矿深部巷道宽度仅4.5米，导致大型铲运机转弯半径不足，影响出矿效率^[2]。

3 深部矿体开采技术难点的应对策略

3.1 提升地质探测技术精度

(1) 深部地质环境的复杂多变，对探测技术的精度和可靠性提出了极高要求，传统单一探测手段已难以满

足精准开采的需求。为此,构建“钻探-物探-数值模拟”三位一体的深部地质探测体系,成为提升探测精度的关键。在钻探环节,引入定向钻进技术,结合满眼钻井工艺,利用高精度随钻测量系统(MWD)实时调整钻孔轨迹,使水平探测距离大幅延伸,有效减少了探测盲区。例如,某深部铜矿在1500米水平应用此技术,成功探明了多条隐伏断层,为回采方案的科学调整提供了有力支撑。(2)物探技术方面,全波列测井仪的应用需根据地层岩性特征灵活调整参数。在坚硬岩体中,采用高频声波发射以清晰识别微裂隙;在松软岩层中,则切换至低频模式以更精准地反映岩体完整性。通过频谱分析与声波时差校正,断层探测误差被显著降低。同时,分布式光纤传感技术的布设遵循“钻孔-巷道”立体网络原则,实时捕捉岩体应变变化,大幅缩短了应力集中区的预警响应时间。(3)深部地质参数反演系统通过建立动态修正机制,以现场实测数据为约束,利用粒子群优化算法迭代更新数值模型,实现了地质模型与实际开采条件的动态适配。这一系统不仅提高了地质模型的准确性,还能自动识别开采扰动引发的参数变异,及时触发参数重校准程序,为深部矿体开采提供了更为可靠的地质依据^[3]。

3.2 优化深部开采工艺体系

在深部开采工艺体系优化中,需从多方面精准发力以实现高效安全开采。(1)分段空场嗣后充填工艺方面,创新聚焦于充填材料与施工时序。选用磷铝酸盐水泥作胶凝材料,搭配特定粒级配比的废石骨料,显著提升充填体强度。某铁矿在1100米水平应用时,提高分段高度,增加每循环充填量,配合边采边充模式,有效控制采场围岩收敛量,大幅降低岩爆发生率,兼顾了开采效率与围岩稳定。(2)中深孔微差爆破技术优化,关键在于构建“孔网参数-起爆序列-岩体响应”关联模型。针对不同岩体特性,合理选择布孔方式、孔距排距及最小抵抗线。起爆时差梯度设置,配合高精度导爆管雷管控制起爆误差,使爆破能量均匀释放。某钨矿应用后,炮孔利用率提升,爆破振动速度峰值降低,有力保护了巷道支护结构。(3)连续采矿工艺高效实施,依赖设备选型与作业流程深度耦合。选用合适规格的天井钻机、双臂液压凿岩台车和电动铲运机,借助激光定位系统优化铲装路径。某镍矿构建“凿岩-爆破-出矿”连续作业线,压缩采矿循环时间,通过远程操控中心实时调整凿岩参数,严格控制炮孔偏斜率。这些优化举措从不同工艺环节入手,为深部开采提供了可靠的技术支撑,保障了开采工作的高效、安全推进。

3.3 构建全方位安全保障系统

在深部开采中,构建全方位安全保障系统是保障人员安全、设备稳定运行以及开采作业顺利推进的重中之重,涵盖岩爆预警、通风降温、防水治水等多个关键方面。

(1)岩爆预警系统的可靠性建立在多源数据精准时空匹配之上。微震监测系统通过合理布设三维检波器,设定高采样率,捕捉微破裂事件;光纤光栅式应力传感器按一定密度分布,精准测量应力;声发射探头安装在巷道周边,识别岩体裂纹扩展信号。再借助时间-空间-能量三维分析模型,融合研判多种特征,形成三级预警机制。某深部煤矿的实践有力证明了该系统的有效性,成功识别岩爆前兆并提前预警,为人员和设备安全争取了宝贵时间。(2)深部通风降温系统采用“主动制冷+高效输配”的复合路线。地表集中制冷站选用合适机组,按需设计制冷量,通过保温管道输送载冷剂至井下形成冷风循环;高温热源区采用冰浆输送系统,降温效果显著。同时,利用CFD数值模拟技术优化通风网络,合理调整巷道断面等参数。某铁矿应用后,作业面风速提升,空气交换效率大幅提高,有害气体浓度得到有效控制。(3)防水治水体系构建“超前探测-区域封堵-局部控制”的立体防线。地面预注浆采用特定施工方式和注浆孔布置,选用合适浆液,有效降低单位涌水量和突水系数;井下工作面利用瞬变电磁仪超前探测,对异常区加密注浆并设置止水帷幕,形成防水隔离带,确保回采涌水量在可控范围内。(4)全方位安全保障系统各部分紧密配合、协同作用,从不同角度应对深部开采中的安全挑战,为深部矿产资源的安全高效开采提供了坚实保障^[4]。

3.4 升级开采设备性能指标

深部开采环境复杂恶劣,对开采设备性能提出了严苛要求,升级设备性能指标必须突破高温、高应力、空间受限这三重约束。(1)耐高温液压支架的研发运用了“材料-结构-系统”三级防护策略。顶梁与底座选用低合金高强钢,经等温淬火工艺处理后,抗冲击韧性显著提升;立柱密封件采用复合结构,大幅扩展了工作温度范围;集成强制冷却系统,有效控制液压油温度。某煤矿在1100米水平应用特定型号支架,在高温环境下连续长时间工作无故障,支护阻力稳定,寿命更是传统支架的两倍,为深部开采提供了可靠的支护保障。(2)凿岩设备的高效化改造着重于冲击机构与刀具材料的创新。液压凿岩机采用双活塞冲击系统,提高了冲击频率与能量,配合优质钻头,在坚硬花岗岩中的钻进速度大幅提升。钻头表面镀覆特殊涂层,增强了耐磨性,延长了使用寿命。某钼矿应用该套设备后,掘进月进尺显著增加,刀具消耗成本降低,开采效率与经济效益双双提

升。(3)狭小空间作业设备采用模块化设计,遵循“功能集成+快速拆装”原则。遥控铲运机分体式结构便于快速更换部件,动力系统适应高海拔环境,控制系统定位精准、遥控距离远、操作延迟低。某锡矿在薄矿体开采中,该设备能灵活通过狭窄联络道,快速恢复支护状态,出矿效率提高,还让人员远离高风险区域,保障了人员安全与开采作业的顺利进行。设备性能的升级,为深部开采的高效、安全推进奠定了坚实基础。

3.5 创新运输与提升系统设计

在深部开采作业里,创新运输与提升系统设计是提升整体效率、保障开采顺利推进的关键环节,需从运输、提升以及矿岩脱水预处理等多方面综合施策。(1)深部运输系统效率的提升,依赖线路优化与装备升级的协同作用。环形运输网络采用“多分支-单闭环”结构,合理规划主环线路半径并避免急弯,设置折返式联络道与道岔自动转换系统,让矿车换向不停车,极大提高了通过能力。无人驾驶矿车借助激光雷达与视觉融合导航,具备高精度识别与短制动距离的优势,车载智能调度终端能动态规划路径,有效降低了运输空驶率,缩短了单程运输时间,让运输流程更加高效、顺畅。(2)提升系统的高强度化改造着重于钢丝绳与驱动装置的性能突破。碳纤维复合芯钢丝绳破断拉力大、自重轻,绳槽衬垫材料摩擦系数稳定、磨损率低。提升机驱动系统采用永磁同步电机,调速范围广、启动加速度大。某铅锌矿提升系统改造后,单次提升量增加,提升循环时间压缩,日提升量大幅提升,显著增强了开采的物资运输能力。(3)矿岩脱水预处理构建“分级过滤-强制干燥”工艺链。井下脱水站通过振动筛与压滤机串联,结合添

加絮凝剂,有效降低滤饼含水率。在运输转载点设置热风干燥装置,利用井下回风余热对矿岩二次干燥,进一步控制含水率,降低了矿车黏结率,减少了清车作业时间,保障了运输系统的稳定运行。这一系列创新设计,为深部开采的高效、安全、稳定开展提供了坚实支撑^[5]。

结语

深部矿体开采是矿业发展的必然趋势,其技术难点具有复杂性、系统性特点,涉及地质探测、开采工艺、安全保障等多个领域。通过提升地质探测精度、优化开采工艺、构建安全保障系统、升级设备性能及创新运输提升设计等策略,可有效应对深部开采面临的挑战。未来,随着智能化、信息化技术的深入应用,深部矿体开采将逐步实现“少人化”“无人化”,推动矿业行业向安全、高效、绿色方向发展。同时,需持续加强基础理论研究,为深部矿体开采技术突破提供更坚实的科学支撑。

参考文献

- [1]孙宜耐,刘苏,刘景东.玲珑金矿深部矿体安全高效回采技术研究[J].现代矿业,2023,39(05):47-51.
- [2]李杨,宋卫东,杜云龙,张超,张少鹏.深部倾斜破碎金矿体高效开采技术研究[J].金属矿山,2023,(03):29-35.
- [3]彭康.断裂带下深部缓倾斜破碎矿体安全高效开采关键技术.山东省,山东黄金矿业股份有限公司新城金矿,2022-01-10.
- [4]刘佳.深部开采灰岩承压水防治技术体系研究及应用[J].江西煤炭科技,2024,(04):118-121.
- [5]李夕兵,郭懿德,陈江湛,等.岩体弱化方法及其在深部高应力硬岩机械化开采中的应用[J].有色金属(矿山部分),2024,76(06):51-63.