

深部矿体高效开采方法与关键技术研究

奚英霞

浙江秦核环境建设有限公司 浙江 嘉兴 314001

摘要: 随着浅部矿产资源的逐渐枯竭,深部矿体开采成为矿业发展的必然趋势。深部矿体开采面临高地应力、高温、高岩爆风险等诸多复杂地质和工程难题,传统开采方法和技术难以满足高效、安全开采需求。本文深入剖析深部矿体开采特点与难点,重点研究充填开采、空场嗣后充填开采、分段空场嗣后充填开采等高效开采方法的技术细节与参数,并对岩爆防治、地压控制、通风降温等关键技术进行深入探讨,为深部矿体高效开采提供理论支撑与实践指导。

关键词: 深部矿体; 高效开采方法; 关键技术; 岩爆防治; 地压控制

1 引言

矿产资源是支撑人类社会经济发展的重要物质基础。然而,经过长期的开采,浅部矿产资源日益减少,深部矿体开采已成为矿业领域的关键发展方向。一般而言,埋深超过800-1000米的矿体可定义为深部矿体。与浅部矿体相比,深部矿体开采面临着更为复杂的地质条件和严峻的工程技术挑战。高地应力、高温、高岩爆风险、岩体破碎以及通风困难等问题,严重制约了深部矿体开采的效率和安全性。因此,深入研究深部矿体高效开采方法与关键技术具有重要的现实意义。

2 深部矿体开采的特点和难点

2.1 高地应力

随着开采深度的增加,地应力呈显著增长趋势。研究表明,每增加100米深度,垂直地应力大约增加2.5-3.0MPa。高地应力会导致岩体发生强烈的变形和破坏,使巷道围岩的收敛变形增大。例如,在某些深部矿山,巷道开挖后,顶板下沉量可达数十厘米,两帮移近量甚至超过一米,这极大地增加了巷道支护的难度和成本。同时,高地应力还可能引发岩爆等地质灾害,岩爆发生时,岩块以极高的速度弹出,对矿工的生命安全和设备的正常运行构成严重威胁。

2.2 高温

深部矿体所处的环境温度较高,一般每增加100米深度,温度升高3-5℃。在一些深度超过1500米的矿山,井下温度可达40℃以上,甚至更高。高温环境不仅会影响矿工的工作效率和身体健康,导致矿工出现中暑、疲劳等症状,还会使设备的性能下降,增加设备的故障率^[1]。例如,电动机在高温环境下运行时,其输出功率会降低,散热困难,容易烧毁。此外,高温还会加速岩石的风化和变质,降低岩体的强度和稳定性,进一步增加开采的难度。

2.3 高岩爆风险

岩爆是深部矿体开采中常见的一种地质灾害,它是由高地应力作用下,岩体中积聚的弹性应变能突然释放而引起的。岩爆具有突发性、破坏性强等特点,可能导致巷道坍塌、设备损坏和人员伤亡。

2.4 岩体破碎

深部矿体受高地应力和长期地质构造运动的影响,岩体往往比较破碎,节理裂隙发育。破碎的岩体增加了开采过程中的冒顶、片帮等事故的发生概率。在一些深部矿山的采场,顶板冒落高度可达数米,两帮片帮范围可达数平方米,严重威胁着矿工的生命安全。同时,破碎的岩体也给巷道支护和采场稳定性控制带来了困难,需要采用更加复杂的支护结构和支护工艺。

2.5 通风困难

深部矿体开采距离地面较远,通风路线长,通风阻力大。例如,在一些深度超过1000米的矿山,通风路线长度可达数千米,通风阻力可达数千帕。同时,高温、高湿和粉尘等恶劣环境对通风系统提出了更高的要求。为了保证深部矿体的有效通风,降低有害气体浓度,改善作业环境,需要采用大功率通风设备,增加通风设施的投资和运行成本。

3 深部矿体高效开采方法研究

3.1 充填开采

充填开采是深部矿体高效开采的重要方法,核心在于合理选充填材料与工艺,以控制地压、减少岩爆、提高采场稳定性、提升资源回收率、降低矿石贫化率并减少尾矿排放。充填材料方面,水泥砂浆适用于开采价值高、对充填强度要求高的矿体,配比一般为水泥:砂=1:4-1:6,水灰比0.4-0.6,28天抗压强度5-10MPa,但成本高,每立方米数百元;尾砂胶结充填料利用选矿厂尾砂作骨料,水泥用量为尾砂质量的8%-15%,28天抗压

强度3-8MPa, 成本比水泥砂浆低30%-50%, 还能减少尾矿排放; 高水材料是新型充填材料, 配比一般为甲料: 乙料: 水 = 1:1:2-1:1:3, 1小时抗压强度1-2MPa, 24小时抗压强度3-5MPa, 适用于开采价值低、对充填强度要求不高的矿体, 成本低, 每立方米可控制在百元以内。充填工艺上, 自流输送充填适用于充填距离近、坡度大的情况, 依靠重力使充填料浆自流到采空区, 设备简单、能耗低, 但充填距离和高度受限; 泵送充填用于充填距离远或高度大的情况, 需配备专用充填泵和输送管道, 能满足大规模深部矿体开采需求, 但设备投资和运行成本高。

3.2 空场嗣后充填开采

空场嗣后充填开采是融合空场法与充填法的开采方式, 先以空场法回采矿房, 结束后用充填材料充填采空区, 兼具空场法生产能力大、成本低与充填法控制地压、提高资源回收率的优点。在矿房和矿柱尺寸及布置方面, 矿房跨度依矿体厚度和岩体稳定性而定, 10-20米厚矿体跨度可控制在8-12米, 大于20米厚矿体跨度不宜超15米, 高度一般不超50米; 矿柱宽度为矿房跨度的0.3-0.5倍, 高度与矿房同, 间距依矿体稳定性和开采强度确定, 一般为矿房跨度的1-1.5倍, 矿柱可连续或间隔布置, 连续布置利于稳定但降低回采率, 间隔布置可提高回采率但需合理确定尺寸和间距^[2]。充填时机应根据矿房回采后的地压活动及采场稳定性要求, 回采结束后尽快充填, 先临时支护, 1-2周内完成作业; 充填强度依开采深度、地应力大小和采场稳定性等因素确定, 开采深度大、地应力高的矿体, 充填体28天抗压强度不低于5MPa, 开采深度小、地应力低的矿体, 不应低于3MPa。

3.3 分段空场嗣后充填开采

分段空场嗣后充填开采将矿块沿高度划分若干分段, 先以空场法回采各分段矿房, 结束后自下而上用充填材料充填采空区, 适用于厚度大、倾角陡的矿体。其分段高度依矿体地质条件与开采设备能力确定, 不宜过大以降采场地压, 30-50米厚矿体分段高度可控制在10-15米, 大于50米厚矿体不宜超20米; 矿房尺寸根据分段高度和岩体稳定性确定, 跨度控制在8-12米, 长度依矿体走向和开采强度确定, 一般不超50米; 充填工艺上, 各分段矿房回采结束后自下而上充填, 材料可选尾砂胶结充填料或高水材料, 要保证充填体密实度和强度, 可采用分层充填, 每层高度不宜超2-3米, 待上一层达一定强度后再充填下一层。

4 深部矿体开采关键技术研究

4.1 岩爆防治技术

4.1.1 应力解除技术

应力解除技术包含超前钻孔卸压与深孔爆破卸压两种方式。超前钻孔卸压是在巷道掘进或采场回采前, 于岩体钻设10-20米深、75-110毫米直径的钻孔, 间距依岩体应力和岩爆风险定为3-5米, 借此释放岩体部分应力, 降低岩爆发生可能性与强度; 深孔爆破卸压针对应力集中程度高的岩体, 钻设20-30米深、90-150毫米直径的深孔并装药爆破, 使岩体应力释放形成破碎带以降低岩爆风险, 其爆破参数需根据岩体性质和应力状态合理设计以确保卸压效果。

4.1.2 支护技术

支护技术包含锚杆、锚索与喷射混凝土支护。锚杆是常用支护材料, 通过连接岩体与周围稳定岩体提高整体性和稳定性, 直径一般为18-25毫米, 长度2-4米, 间距和排距0.8-1.2米, 岩爆风险高区域可用高强度、高预应力锚杆提升效果; 锚索比锚杆更长, 能提供更大支护力, 直径15.24-21.6毫米, 长度10-20米, 间距和排距2-3米, 适用于岩体破碎、应力大区域以控制岩爆; 喷射混凝土可封闭岩体表面防岩块剥落, 提高岩体强度和稳定性, 厚度50-100毫米, 强度等级不低于C20, 岩爆风险高区域可用钢纤维喷射混凝土增强抗裂性能和韧性。

4.1.3 监测预警技术

监测预警技术涵盖应力、位移与声发射监测。应力监测是在岩体安装电阻应变片式、振弦式等应力传感器, 测量精度不低于 $\pm 1\%FS$, 实时监测应力变化以发现异常, 为岩爆预警提供依据; 位移监测于巷道和采场周围布置收敛计、全站仪等位移传感器, 测量精度不低于 ± 1 毫米, 位移速度超阈值时预示岩爆将至, 需及时预警; 声发射监测利用高灵敏度、具实时性的系统, 在岩体安装传感器监测声发射信号频率、能量等参数, 判断岩体破坏程度与岩爆风险, 准确捕捉信号。

4.2 地压控制技术

4.2.1 合理确定开采顺序

根据矿体的地质条件和开采要求, 合理确定开采顺序, 避免形成高应力集中区。一般来说, 应采用由上而下、由浅入深的开采顺序, 先开采上盘矿体, 后开采下盘矿体; 先开采浅部矿体, 后开采深部矿体^[3]。在开采过程中, 应尽量保持采场的对称开采, 避免出现一侧开采过快、另一侧开采过慢的情况, 以减少地压的不平衡。

4.2.2 充填技术

如前文所述, 充填开采是控制地压的有效方法之一。通过充填采空区, 可以改变岩体的应力分布, 减少地压活动。在充填过程中, 应保证充填体的质量和充填

效果,避免出现充填不实、充填体强度不足等问题。同时,应根据矿体的开采深度和地应力大小,合理确定充填体的强度和充填顺序。对于开采深度较大、地应力较高的矿体,应采用高强度充填材料,并按照自下而上的顺序进行充填。

4.2.3 锚固技术

采用锚杆、锚索等锚固措施,将岩体与周围稳定岩体连接在一起,提高岩体的整体性和稳定性,控制地压的发展。锚固技术的关键在于合理确定锚杆、锚索的参数和布置方式。锚杆、锚索的长度、直径、间距和排距应根据岩体的性质、地应力大小和开采要求进行设计。同时,在锚固施工过程中,应保证锚杆、锚索的安装质量和预应力施加效果,以确保锚固效果。

4.3 通风降温技术

4.3.1 优化通风系统

合理设计通风路线,减少通风阻力,提高通风效率。可采用多级机站通风、分区通风等方式。多级机站通风是将通风系统划分为多个机站,每个机站配备不同功率和风量的风机,根据矿井的通风需求进行调节。分区通风是将矿井划分为若干个独立的通风区域,每个区域设置独立的通风系统,减少通风路线的长度和通风阻力。通过优化通风系统,可以将井下风流速度控制在0.25-4m/s的合理范围内,保证作业地点的有效风量。

4.3.2 制冷降温技术

在深部矿体中设置制冷设备,如冷水机组、空气冷却器等,对进入矿井的空气进行冷却,降低作业环境的温度。冷水机组的制冷量应根据矿井的热负荷进行确定,一般来说,每吨矿石开采产生的热量约为1000-1500kJ,可根据矿井的产量和开采深度计算热负荷^[4]。空气冷却器应安装在通风系统的关键位置,如进风井口、主要巷道等,以提高冷却效果。通过制冷降温技术,可

以将井下作业地点的温度降低5-10℃,改善作业环境。

4.3.3 个体防护技术

为矿工配备个体防护用品,如隔热服、冷却背心等,减少高温对矿工的影响。隔热服采用特殊的隔热材料制成,能够有效阻挡热量的传递,使矿工体表温度降低3-5℃。冷却背心内部装有冷却介质,通过循环流动带走矿工身体的热量,使矿工感觉凉爽舒适。个体防护技术是通风降温技术的补充,能够在一定程度上提高矿工在高温环境下的工作舒适度和安全性。

结语

深部矿体开采面临高地应力、高温及高岩爆风险等挑战,传统方法难以满足高效安全需求。研究表明,充填开采、空场嗣后充填开采和分段空场嗣后充填开采等方法通过优化开采参数和充填材料选择,能有效控制地压,减少岩爆,提升采场稳定性,实现高效开采。岩爆防治、地压控制和通风降温等技术在其中发挥关键作用。展望未来,需加强深部岩体力学特性研究,开发新型充填材料与工艺,推进智能开采技术的研发应用,并注重深部矿体开采的安全管理和环境保护,以促进可持续发展。科技进步将不断推动深部矿体开采技术创新。

参考文献

- [1]王永成.深部倾斜破碎金矿体高效开采技术研究[J].世界有色金属,2025,(03):82-84.
- [2]李杨,宋卫东,杜云龙,等.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]王平,骆正杰,兰建强,等.程潮铁矿深部矿体分区开采方案优选研究[J].矿业研究与开发,2024,44(04):1-9.