

深部金属矿床高效开采方法对比与适用性分析

侯志超

山东黄金矿业(玲珑)有限公司 山东 烟台 265419

摘要:随着浅部矿产资源的日益枯竭,深部金属矿床开采成为矿业发展的重要方向。本文深入探讨了深部金属矿床开采面临的挑战,详细对比了空场采矿法、充填采矿法、崩落采矿法等主要高效开采方法的特点、优缺点。通过对不同开采方法在地质条件、开采技术经济指标、安全保障等方面的适用性分析,为深部金属矿床选择科学合理的开采方法提供理论依据和实践参考,旨在提高深部金属矿床开采效率、保障开采安全并实现可持续发展。

关键词:深部金属矿床;高效开采方法;对比分析;适用性

1 引言

矿产资源是人类社会发展的重要物质基础,随着全球经济的持续增长,对金属矿产资源的需求不断攀升。然而,经过长期的开采,浅部易开采的金属矿床逐渐减少,深部金属矿床开采成为保障资源供应的必然选择。一般来说,当开采深度超过800-1000米时,即进入深部开采范畴。深部开采面临着诸多不同于浅部开采的特殊问题,如高地应力、高温、高井深等,这些因素给开采工作带来了极大的挑战,传统开采方法在深部环境下往往难以满足高效、安全开采的要求。因此,研究深部金属矿床高效开采方法,并对其适用性进行深入分析,具有重要的现实意义。

2 深部金属矿床开采面临的挑战

2.1 高地应力问题

开采深度增加,地应力显著增大。据海姆公式,垂直地应力与深度成正比,开采深度达1000米时,垂直地应力可达25-27MPa。山东黄金集团三山岛金矿开采深度超1000米,部分达1300米,高地应力致井巷围岩变形破坏加剧,-1050中段运输巷道曾现严重岩爆,一次较大规模岩爆释放能量约5兆焦耳,损坏支护和设备,威胁人员安全,该矿每年因此损失数百万元。

2.2 高温环境

深部矿井温度高,加上机电设备散热,井下作业环境温度进一步升高。地温梯度一般为2-3℃/100m,深度1000米矿井原始岩温可达30-40℃。江西德兴铜矿地下开采深度800-1200米,-1000中段井下作业环境温度常超35℃,部分超40℃。高温影响人员健康和工作效率,加速设备磨损老化,环境温度超28℃时,人员工作效率下降10%-15%,误操作率增加,该矿每年因高温设备维修费用增加数百万元。

2.3 高井深带来的问题

高井深使矿石和废石提升运输距离增加,提升能耗增大。云南普朗铜矿井深超1200米,采用单绳缠绕式提升机,每次提升8吨,提升高度1200米,速度6m/s,每次提升时间200s,每次提升能耗较大,能耗成本随提升次数增加显著上升。此外,高井深还加大通风难度,通风费用上升,该矿通风费用占矿山总成本18%左右。

2.4 地质条件复杂

深部矿床地质条件复杂,断层、褶皱等地质构造发育,岩体破碎,水文地质条件复杂,涌水量增大^[1]。安徽铜陵冬瓜山铜矿开采深度超1000米,矿区内断层发育,一条大型断层贯穿矿床,断层破碎带宽10-20米,岩体完整性系数低至0.1-0.3,开采遇断层破碎带曾致采场塌方,停产2个月,损失超2000万元。该矿水文地质条件复杂,矿井正常涌水量3000立方米/天,最大5000立方米/天,增加排水成本和开采难度。

3 主要深部金属矿床高效开采方法对比

3.1 空场采矿法

3.1.1 方法特点

空场采矿法是将矿块划分为矿房和矿柱,先采矿房,后采矿柱。在回采矿房时,利用矿柱和围岩的天然支撑力维护采空区,待矿房采完后,再回采矿柱并及时处理采空区。该方法具有采矿强度大、生产能力高、工艺简单等优点。常见的空场采矿法有全面采矿法、房柱采矿法和分段采矿法等。以房柱采矿法为例,在矿房中留设规则的矿柱,矿柱尺寸根据矿岩的物理力学性质和地压情况确定,一般矿柱的间距为8-15米,矿柱的直径或边长为3-8米。

3.1.2 优点

由于采场作业空间大,可采用大型采掘设备,实现高效开采,能够满足大规模生产的需求。例如,湖南柿竹园多金属矿采用全面采矿法,日采矿量可达2500吨以

上,月生产能力超过7.5万吨。该矿使用的大型掘进台车,每小时掘进进度可达3-5米,大大提高了采矿效率。不需要大量的充填材料,减少了充填成本,同时工艺相对简单,降低了生产成本。空场采矿法是一种传统的采矿方法,在浅部矿床开采中应用广泛,技术成熟,工人操作熟练。

3.1.3 缺点

随着开采深度的增加,地应力增大,采空区围岩稳定性降低,容易发生大面积冒顶、片帮等事故,对井下人员和设备安全构成严重威胁。为了维护采空区的稳定,需要留设大量的矿柱,导致部分矿石资源无法回收,降低了资源回收率。矿房采完后,采空区处理是一个难题。如果处理不当,可能会引发地表塌陷等地质灾害。

3.2 充填采矿法

3.2.1 方法特点

充填采矿法是在回采矿房的过程中,向采空区充填采矿废石、尾砂等充填材料,以控制地压、防止围岩移动和塌落,为后续回采作业创造安全条件。该方法可根据充填材料和充填方式的不同,分为干式充填采矿法、水力充填采矿法和胶结充填采矿法等^[2]。胶结充填采矿法是目前应用较为广泛的一种方法,其充填材料一般由水泥、尾砂和水按一定比例配制而成,水泥用量一般为尾砂质量的8%-15%。充填体的强度可根据开采要求进行调整,一般28天抗压强度可达1-5MPa。

3.2.2 优点

充填体能够及时支撑围岩,有效控制地压,减少冒顶、片帮等事故的发生,提高井下作业的安全性。由于不需要留设大量的矿柱来维护采空区稳定,可以实现大部分矿石的回收,提高了资源回收率。充填采矿法的资源回收率可达85%-95%。适用于各种地质条件的矿床,尤其是开采条件复杂、矿石品位较高、需要保护地表建筑物的深部矿床。例如,凡口铅锌矿矿区地表有大量的建筑物和农田,为了保护地表环境,采用充填采矿法进行深部开采,有效地控制了地压,保护了地表建筑物的安全,同时实现了高效开采。充填采矿法可以利用矿山废石和尾砂作为充填材料,减少了废石和尾砂的排放,降低了对环境的污染。据统计,每采用充填采矿法开采1万吨矿石,可减少废石排放约5000立方米。

3.2.3 缺点

充填材料的制备、运输和充填作业需要投入大量的设备和资金,增加了生产成本。充填采矿法涉及充填材料的配比、输送、充填工艺等多个环节,工艺复杂,对技术和管理水平要求较高。由于充填作业需要一定的时

间,会影响采场的生产进度,导致生产效率相对较低。

3.3 崩落采矿法

3.3.1 方法特点

崩落采矿法是随着矿石的回采,有计划地崩落围岩充填采空区,以控制地压和管理采空区。该方法可分为单层崩落法、分层崩落法、分段崩落法和阶段崩落法等。以分段崩落法为例,将矿块划分为多个分段,在每个分段中进行回采和崩落围岩作业。分段高度一般为10-20米,崩落步距根据矿岩的稳定性和放矿要求确定,一般为3-5米。

3.3.2 优点

崩落采矿法可采用大型采掘设备,实现高效开采,生产能力较大,能够满足大规模开采的需求。适用于各种地质条件的矿床,尤其是矿体厚度较大、倾角较缓的矿床。与充填采矿法相比,崩落采矿法不需要专门的充填材料和充填设备,降低了生产成本。崩落采矿法的生产成本与空场采矿法相近,略高于空场采矿法。

3.3.3 缺点

在崩落围岩过程中,可能会产生大量的粉尘和有害气体,对井下作业人员的健康造成危害。同时,崩落围岩可能会引起地表塌陷,对地表建筑物和生态环境造成破坏。由于崩落围岩会混入部分矿石,导致矿石贫化率增加,资源回收率相对较低^[3]。崩落采矿法会使地表产生较大幅度的塌陷,对地表建筑物、农田和生态环境造成严重影响,需要采取相应的保护措施。

4 深部金属矿床高效开采方法适用性分析

4.1 地质条件适应性

4.1.1 矿体厚度和倾角

崩落采矿法适用于矿体厚度大、倾角缓($< 45^\circ$)的矿床,可采较大采场参数提高效率。如鞍钢弓长岭铁矿,矿体厚30-50米,倾角 30° - 40° ,用阶段崩落法,单次爆破量数千吨,月产超20万吨。空场采矿法适用于矿体厚度中等、倾角陡($> 45^\circ$)且矿岩稳固的矿床。如湖南瑶岗仙钨矿,矿体厚5-15米,倾角 60° - 80° , f 值 > 8 ,用分段空场法,矿石自溜,减少运输环节。充填采矿法适应各种厚度和倾角矿体,尤其适合厚度小、倾角变化大、矿岩稳固性差的矿床。如云南会泽铅锌矿,通过及时充填控制地压,保障安全,提高资源回收率。

4.1.2 围岩稳定性

在围岩稳定性较好的矿床中,空场采矿法可以充分发挥其生产效率高的优势。但如果围岩稳定性较差(围岩的坚固性系数 f 小于5),采用空场采矿法容易发生冒顶、片帮等事故,此时充填采矿法是更好的选择,因为

充填体可以提供有效的支撑,保证采场的安全。崩落采矿法适用于围岩中等稳定以上(f 大于3)的矿床,通过崩落围岩来控制地压。

4.1.3 水文地质条件

对于水文地质条件复杂的矿床,充填采矿法具有一定的优势。充填体可以堵塞地下水通道,减少矿井涌水量,降低排水成本。例如,某水文地质条件复杂的金属矿山,采用充填采矿法后,矿井涌水量从原来的500立方米/小时降低到200立方米/小时,排水成本降低了60%。而空场采矿法和崩落采矿法在处理矿井涌水方面相对困难,需要采取额外的防水和排水措施。

4.2 开采技术经济指标适应性

4.2.1 生产成本

从生产成本角度来看,空场采矿法成本相对较低,但如果考虑采空区处理和地压管理成本,其综合成本可能会增加。充填采矿法由于充填材料和充填作业的费用较高,生产成本相对较高。以某金属矿山为例,采用空场采矿法的单位生产成本为80元/吨,而采用充填采矿法的单位生产成本为120元/吨。崩落采矿法成本介于两者之间,但如果考虑地表塌陷赔偿和环境保护成本,其成本也可能上升。

4.2.2 生产效率

在生产效率方面,空场采矿法和崩落采矿法通常具有较高的生产能力,能够满足大规模开采的需求。充填采矿法由于充填作业的影响,生产效率相对较低^[4]。例如,江西德兴铜矿的部分矿段采用空场采矿法,通过合理布置采场和采用高效的采掘设备,日采矿量可达5000吨以上,月生产能力超过15万吨。但如果结合先进的充填技术和设备,提高充填速度,也可以实现较高的生产效率。

4.2.3 资源回收率

充填采矿法的资源回收率最高,能够最大限度地回收矿石资源。空场采矿法的资源回收率相对较低,主要受矿柱留设的影响。崩落采矿法的资源回收率也较低,由于矿石贫化率较高,导致实际回收的矿石量减少。例如,某矿山采用充填采矿法的资源回收率为90%,采用空场采矿法的资源回收率为65%,采用崩落采矿法的资源回收率为75%。

4.3 安全保障适应性

4.3.1 地压控制

充填采矿法在控制地压方面具有明显优势,充填体

能够及时支撑围岩,有效减少地压对井巷和采场的破坏。空场采矿法在深部开采中,地压管理难度较大,容易引发地压灾害。崩落采矿法通过崩落围岩来释放地压,但崩落过程可能会产生冲击地压等危险。例如,某深部矿山采用空场采矿法时,地压监测显示采场周边应力集中,存在冒顶风险;而采用充填采矿法后,应力得到有效释放,采场稳定性明显提高。

4.3.2 通风防尘

在通风防尘方面,空场采矿法和充填采矿法相对容易实现良好的通风条件,能够有效降低井下粉尘和有害气体浓度。崩落采矿法在崩落围岩过程中会产生大量的粉尘,通风防尘难度较大,需要采取有效的通风和降尘措施。例如,某采用崩落采矿法的矿山,井下粉尘浓度曾高达500毫克/立方米,通过加强通风和安装喷雾降尘装置后,粉尘浓度降低到50毫克/立方米以下。

4.3.3 火灾防治

对于有自燃发火倾向的矿床,充填采矿法可以通过充填材料隔绝空气,防止矿石自燃。空场采矿法和崩落采矿法在火灾防治方面相对困难,需要加强通风管理和火灾监测。例如,某含硫金属矿山采用空场采矿法时,曾发生矿石自燃事故,造成了一定的经济损失;而采用充填采矿法后,未再发生自燃事故。

结语

深部金属矿床高效开采方法的选择需综合考虑地质条件、技术经济指标和安全保障等因素。空场法适用于矿体厚大、回收率要求不高的稳定矿体;充填法虽成本较高,但安全性好、回收率高、环境友好,适合复杂条件及需保护地表的深部矿床;崩落法则适用于厚大缓倾斜矿体且对地表影响要求较低的情况。未来,应加强地压控制、通风降温与智能装备研发,推动智能化、绿色化开采技术发展,提升深部矿山的安全性、效率与可持续性,为我国金属资源供应提供有力保障。

参考文献

- [1]王刚.深部金属矿床开采中的井下采矿技术与工艺优化研究[J].冶金管理,2024,(07):85-87.
- [2]王勇,吴爱祥,杨军,等.深部金属矿开采关键理论技术进展与展望[J].工程科学学报,2023,45(08):1281-1292.
- [3]梁阿拉坦巴根.关于金属矿深部矿体开采方案及应对风险措施[J].世界有色金属,2022,(01):27-29.
- [4]杨小聪,蒋合国.深部金属矿山卸荷开采与预处理技术综述[J].中国矿业,2025,34(04):64-75.