

深部开采条件下矿床地质构造特征研究

王彦淞 李晓杰

山东黄金矿业(莱州)有限公司三山岛金矿 山东 烟台 261442

摘要: 本文聚焦深部开采条件下矿床地质构造特征。阐述深部地质环境呈“三高一扰动”态势,分析主要构造类型及深部特征、构造应力场特点。探讨深部构造对矿体形态、采矿工程的影响,介绍深部构造探测技术,提出基于构造研究的工程对策,剖析深部构造与多场耦合效应及相应工程措施,为深部矿床开采提供理论与技术支持。

关键词: 深部开采; 矿床地质构造; 构造应力场; 多场耦合

引言: 随着浅部矿产资源日益减少,深部开采成为必然趋势。深部矿床地质构造复杂多变,与浅部差异显著,其地质环境、构造类型、应力场等特征,对矿体形态、采矿工程及矿井灾害等有着重要影响。深入研究深部开采条件下矿床地质构造特征,掌握其规律,对保障深部采矿工程安全高效推进、实现资源合理开发利用意义重大。

1 深部矿床地质构造特征

1.1 深部地质环境特征

深部矿床地质环境具有显著区别于浅部的独特特征,核心呈现“三高一扰动”的典型态势,即高地应力、高地温、高渗透压及开采扰动叠加的复杂环境。随着开采深度增加,地温随深度梯度递增,通常每加深100m地温升高2-3℃,深部岩体温度普遍超过30℃,部分矿区可达50℃以上,显著改变岩体物理力学性质。地应力呈现明显的非线性增长,水平应力往往占据主导地位,侧压力系数多大于1,部分矿区可达2.0以上,导致岩体从浅部的弹性状态向深部的塑性状态转变。同时深部岩体经历多期构造运动叠加,完整性遭到破坏,裂隙发育且连通性强,地下水渗流条件复杂,渗透压显著升高,加之岩浆活动留下的痕迹,共同构成了深部矿床复杂多变的地质环境,也为后续矿床勘探和开采带来了诸多挑战。

1.2 主要构造类型及其深部特征

深部矿床主要构造类型以断裂、褶皱及次级裂隙为主,各类构造在深部呈现出与浅部截然不同的特征。断裂构造作为深部最发育的构造类型,多为深切型多期演化构造,走向以东西向、北西向为主,倾向稳定且倾角较大,多大于70°,深部断裂多表现为压扭性,部分断裂带充填断层泥,易发生剪切活化^[1]。褶皱构造多为复背斜、复向斜,核部多由古老地层构成,是含矿流体运移与富集的有利空间,深部褶皱形态更为复杂,多伴随次

级褶皱和裂隙发育,连续性较差。次级裂隙在深部分布密集,以陡倾角为主,优势倾向具有明显分带性,部分裂隙宽度大于10mm,连通性强,直接影响岩体完整性和含矿性。另外,深部还发育镁铁质-超镁铁质杂岩体等与成矿相关的侵入构造,岩相分异清晰,多期次侵入特征明显,是深部矿体形成的重要载体。

1.3 深部构造应力场特征

深部构造应力场受区域构造运动、岩体自重及多期构造叠加影响,呈现出复杂多变且规律性较强的特征。深部应力场以水平挤压应力为主,三向主应力关系多表现为最大水平主应力 > 最小水平主应力 > 垂直主应力,水平应力主导作用显著,侧压力系数平均值可达2.0以上。应力分布具有明显的深度相关性和分带性,随着深度增加,主应力值呈非线性递增,在500-850m深度范围内,最大水平主应力可达到28-44MPa,垂直主应力可达14-22MPa。应力方向与区域构造走向一致,多为北西向或北东向,且受断裂、褶皱构造影响,在构造交汇部位、断裂带附近易出现应力集中现象。深部应力场具有时空演化特征,受开采扰动影响,应力会发生重新分布,形成局部应力异常区,直接影响岩体稳定性和工程安全性。

1.4 深部构造对矿体形态与产状的控制

深部构造是控制矿体形态、产状及分布的核心因素,各类构造通过不同方式制约矿体的形成与赋存。断裂构造主要通过提供成矿通道和赋矿空间控制矿体,压扭性断裂及其次级断裂的复合部位的构造夹持区,是矿体富集的有利地段,矿体多呈脉状、透镜状分布,产状与断裂走向一致,倾角随断裂倾角变化而调整。褶皱构造的核部及翼部转折处,因岩体破碎、裂隙发育,为含矿流体的运移和沉淀提供了良好条件,矿体多沿褶皱轴部或翼部呈层状、似层状分布,形态受褶皱形态控制。次级裂隙网络则控制着矿体的细微形态和分布范围,使

矿体呈现出分支、复合、尖灭等特征^[2]。此外,深部侵入构造与矿体关系密切,杂岩体的岩相分异的不同部位,矿体形态和产状存在差异,多呈不规则脉状、椭圆状,随杂岩体延伸而分布。

2 深部构造对采矿工程的影响

2.1 构造对围岩稳定性的影响

深部构造直接决定围岩稳定性,不同构造类型对围岩的破坏程度和影响范围存在显著差异。断裂带及次级裂隙发育区,岩体完整性差、胶结程度低,加之深部高地应力作用,易发生围岩剥落、片帮甚至垮塌,尤其是充填断层泥的断裂带,抗剪强度低,在应力扰动下易发生滑移失稳。褶皱构造的核部岩体受拉应力作用,裂隙发育,围岩强度显著降低,而翼部岩体受挤压应力作用,易产生塑性变形,导致围岩大变形。深部构造交汇部位,应力集中现象突出,岩体受力复杂,易发生突发性失稳破坏。构造发育程度越高,围岩渗透性越强,地下水易沿构造裂隙渗透,软化岩体,进一步降低围岩强度,加剧围岩失稳风险,给采矿工程的支护和施工安全带来严重威胁。

2.2 构造对地压显现的影响

深部构造是地压显现的主要控制因素,其发育规模、产状及分布直接影响地压显现的强度和形式。在断裂构造发育区,尤其是大尺度深切断裂附近,应力集中明显,地压显现强烈,易出现岩爆、冲击地压等剧烈地压现象,随着开采深度增加,岩爆发生率显著上升,在深度超过1000米的矿井中,岩爆发生率可达30%。褶皱构造的翼部和转折处,岩体应力分布不均,易出现局部应力集中,导致巷道围岩变形量增大、支护结构破坏等温和型地压显现。次级裂隙密集区,岩体整体性差,地压显现以围岩剥落、片帮为主,且持续时间长,增加了地压控制难度。另外,构造运动形成的残留应力与采动应力叠加,会进一步加剧地压显现强度,给采矿工程的安全高效推进带来极大挑战。

2.3 构造对采掘工程布置的制约

深部构造对采掘工程布置具有显著的制约作用,直接影响工程布置的合理性、安全性和经济性。断裂带尤其是活动性断裂带,岩体稳定性差、灾害风险高,采掘工程需避开此类区域,若无法避开,需增加支护强度和防护措施,大幅增加工程成本。褶皱构造的核部裂隙发育,围岩稳定性差,不适宜布置大型采掘工程,翼部岩体相对稳定,可作为采掘工程的优先布置区域,但需考虑应力分布特点优化布置方向。次级裂隙密集区,需合理调整采掘工程的间距和走向,避免工程穿越过多裂

隙,降低围岩失稳风险^[3]。同时深部构造控制着矿体的分布,采掘工程布置需结合构造特征和矿体形态,确保工程能够有效揭露和开采矿体,当开采深度超过800m时,还需控制工作面长度,降低应力集中系数,实现采掘工程与构造、矿体的合理匹配。

2.4 构造对矿井灾害的控制作用

深部构造是矿井各类灾害发生的重要控制因素,直接决定灾害的类型、发生频率和危害程度。断裂构造作为地下水、瓦斯的运移通道和富集场所,易引发突水、瓦斯突出等灾害,尤其是连通性强的断裂带,可导致地下水快速涌入矿井,造成淹井事故,同时也可能导致瓦斯异常涌出,增加爆炸风险。褶皱构造的核部和断裂交汇部位,应力集中明显,易引发冲击地压、岩爆等灾害,威胁施工人员安全。次级裂隙密集区,岩体破碎,易发生冒顶、片帮等灾害,且可能加剧地下水和瓦斯的渗透扩散,扩大灾害影响范围。构造活动形成的薄弱带,在采动扰动下易发生失稳,诱发多种灾害叠加发生,如冲击地压引发的围岩垮塌、瓦斯泄漏等,进一步提升了矿井灾害的防控难度。

3 深部构造探测技术与工程对策

3.1 深部构造探测技术

深部构造探测技术主要分为地球物理探测、钻孔探测及综合探测三类,各类技术相互补充,实现对深部构造的精准刻画。地球物理探测技术应用广泛,其中三维激电测深法可实现对埋藏深、规模小的含矿构造的精细三维刻画,通过构建高精度电阻率与极化率模型,精准识别含矿杂岩体分布;地震探测技术包括短周期密集台阵探测、光纤地震仪探测等,可获取深部岩体结构和构造形态信息,其中可重复人工震源技术提高了探测的可控性和准确性。钻孔探测技术主要包括超声波钻孔电视、水压致裂等,可直接获取深部构造的几何参数、应力数据及岩体完整性信息,为构造分析提供直接依据。综合探测技术通过整合各类探测数据,结合地质资料进行综合解释,有效弥补单一探测技术的不足,提高深部构造探测的精度和可靠性,为采矿工程设计和施工提供科学支撑。

3.2 基于构造研究的工程对策

基于深部构造研究的工程对策,核心是围绕构造特征优化工程设计、强化灾害防控,保障采矿工程安全高效推进。针对断裂构造发育区,采用注浆加固、锚杆支护等措施,提高岩体完整性和抗剪强度,对于活动性断裂,需设置防护屏障,避免工程穿越;对于应力集中的构造部位,采用主动超前预裂爆破、深浅孔组合爆破

等卸压技术,降低应力集中程度,抑制地压显现。结合褶皱构造特征优化采掘工程布置,避开核部等不稳定区域,翼部布置工程时优化支护参数,采用高强度支护材料,抑制围岩变形。针对次级裂隙密集区,合理调整工程间距和走向,加强围岩监测,及时发现并处理围岩失稳隐患。建立基于构造特征的灾害预警体系,实时监测构造活动和应力变化,提前采取防控措施,降低灾害发生风险。

4 深部构造与多场耦合效应

4.1 深部构造-应力-温度-渗流耦合特征

深部构造-应力-温度-渗流四场耦合具有相互作用、相互影响的复杂特征,构成了深部矿床独特的地质环境系统。构造是耦合系统的基础,断裂、褶皱等构造为应力传递、热量扩散和流体渗流提供了通道,同时构造活动也会改变应力分布、温度场和渗流场特征。应力场通过挤压、拉伸作用改变岩体结构,影响构造裂隙的发育和连通性,进而控制渗流通道的分布,同时应力作用会产生摩擦热,改变局部温度场。温度场的变化会影响岩体的物理力学性质和流体黏度,进而影响应力分布和渗流速度。渗流场中的流体通过渗透作用软化岩体,降低岩体强度,同时流体运移会携带热量,改变温度场分布,四场相互耦合、协同作用,形成复杂的动态平衡系统,直接影响深部岩体稳定性和矿体赋存状态。

4.2 耦合条件下的围岩响应机制

在深部复杂地质环境中,构造-应力-温度-渗流四场耦合作用使围岩呈现出高度非线性的动态响应特征,其演化过程可划分为三个典型阶段。耦合作用初期,应力场与温度场协同作用引发岩体热-力耦合变形,温度升高导致矿物颗粒热膨胀,应力集中区域产生压缩变形,而低温区则出现收缩效应,形成微观裂隙的初始启裂。渗流场通过孔隙压力作用降低岩体有效应力,流体中的化学物质与矿物发生水岩反应,进一步弱化胶结物强度,形成“化学-力学”双重软化机制。随着耦合强度提升,当应力水平突破岩体峰值强度后,塑性变形区呈非稳定扩展态势,构造裂隙在渗流冲刷作用下发生“水力劈裂”效应,裂隙网络密度增加30%-50%,岩体渗透率呈指数级增长^[4]。温度梯度引发的热应力与构造应力叠加,在断层交汇部位形成高应力核区,其能量积聚速率较均

匀区域提高2-3倍。最终失稳阶段表现为脆性破坏的突发性和延性破坏的渐进性并存特征,高应力区岩体以岩爆形式抛射,而渗流通道发育区则呈现渐进式垮塌。时空差异性显著体现在:断层带变形速率是完整岩体的5-8倍,地温梯度异常区裂隙扩展速度提升40%,这种非均匀演化特征对深部工程支护提出动态调控、分区治理的迫切需求。

4.3 多场耦合条件下的工程对策

针对深部构造-应力-温度-渗流多场耦合条件,工程对策核心是实现多场协同控制,降低耦合作用对采矿工程的不利影响。应力控制方面,采用爆破卸压、锚杆锚索支护等措施,优化应力分布,降低应力集中程度,抑制围岩塑性变形;温度控制方面,采用通风降温、水冷降温等技术,降低深部工作面温度,改善作业环境,同时减少温度变化对岩体性质的影响。渗流控制方面,采用注浆堵水、排水降压等措施,封堵构造裂隙,减少地下水渗透,降低岩体软化程度。建立多场耦合监测体系,实时监测构造活动、应力、温度和渗流参数的变化,构建耦合效应预测模型,提前预判围岩响应和灾害风险,优化工程设计和支护方案,实现采矿工程与多场耦合环境的适配,保障工程安全稳定推进。

结束语

深部开采条件下矿床地质构造特征研究至关重要。深部复杂的地质构造给开采带来诸多挑战,通过对其地质环境、构造类型、应力场等特征的研究,结合先进的探测技术,制定针对性的工程对策,并考虑多场耦合效应,能有效应对挑战。未来需持续深入研究,不断完善理论与技术,以更好地指导深部矿床开采实践,推动矿业可持续发展。

参考文献

- [1]何永波,刘乾.矿床地质构造特征及其对成矿模式的制约关系研究[J].世界有色金属,2023(24):194-196.
- [2]李知栋,胡文荣,蔡拓.厂坝铅锌矿床的基本地质构造特征及深部探矿研究[J].中国金属通报,2024(17):58-60.
- [3]唐豪.铅锌矿床地质特征及成矿机理分析研究——以湖南某矿为例[J].世界有色金属,2026(5):64-66.
- [4]余华婷,秦续峰,李云昊,等.深部开采条件下地表沉降规律研究[J].科技风,2023(27):74-77,129.