

金属矿山深部开采地质条件变化规律研究

王 赫

赤峰金都矿业有限公司 内蒙古 赤峰 025350

摘 要:随着浅部金属矿产资源不断减少,深部采掘成为矿业发展趋势。但是由于深部地质环境与浅部有较大区别,复杂性、多变性和不确定性给深部采矿工程带来很大困难。本文从金属矿山深部开采过程中地质环境变化入手,着重探讨了深部地应力场、岩层结构、地下水以及地温场等地质环境随深度增大而发生变化特点。结果表明,深部地质环境变化是非线性和强耦合过程,在浅部主要是由于结构面对地质环境影响较大,在深部则是由于应力—温度—流体等多种因素相互作用造成。同时本文也研究了地质环境变化给采矿方法、围岩管理以及防治灾害带来影响,从而为进一步做好金属矿山深部安全、高产奠定良好基础。

关键词:深部开采;金属矿山;地质条件;变化规律;地应力;多场耦合

引言

矿产资源是国民经济和社会发展的物质基础,在长期大规模开采中,我国浅部金属矿产资源日益匮乏,采矿深度逐年增加,年均约 10-15m,大量金属矿山已进入深部开采。一般而言,开采深度大于 1000m 可认为是深部开采,而一些矿山已经达到了 2000m 甚至更深。深部开采条件不同于浅部,主要问题是地质条件的变化。这种变化并不是简单的参数线性增大,而是呈现为高应力、高温、高压、强烈时间效应等多种因素相互作用形成的深部特殊的工程地质条件。

1 深部地应力场变化规律

地应力是深部开采矿山必须重视的地质条件,在与浅部比较中,深部地应力大小、方向以及分布特点都存在较大差异,而这些差异又对巷道稳定、岩爆发生可能性以及矿山地压管理造成影响。

1.1 应力水平显著增高

随着深度增加,上覆岩层自重应力呈线性增加趋势。但是,深部地应力场并非单纯的静水压力场。大量的现场监测结果表明,在千米以下深度范围内,水平构造应力往往大于或者远大于竖直方向上的应力,在强烈构造活动区尤为突出。这些较高的水平构造应力使深部岩石处于三向不等压甚至高偏应力状态。而当最大主应力和最小主应力之差超过定值后,岩石内部会储存大量弹性能,是动力灾害的能量源。而深部应力场一般在 100~200MPa 以上,远远高于浅部岩石强度,使岩石由脆性转变为脆—韧性,从而改变了岩石的力学性质以及破坏形式。

1.2 应力方向与分布的复杂性

深部地应力场的方向不仅由区域构造控制,而且还受到局部地质构造如褶皱、断裂等的影响,在不同的深度层次上最大主应力方向可发生改变而造成应力场分带,而应力方向的不均匀性又给根据浅部地质资料预测深部应力带来很大的不确定性。另外,应力场还受岩性的制约,在由不同硬度岩石相间的矿区中,由于岩石力学性质的不同,应力会在层面发生反射以及再分配从而产生应力集中带或者应力遮挡区,这也是造成深部开采矿井巷道围岩非对称变形以及工作面突发性冲击地压的原因之一。

1.3 时间效应与动力特性

深部岩体处于较高应力条件下具有显著流变性质,在巷道开挖之后,围岩应力重新分布所需时间较长,变形随着时间逐渐发展,有蠕变、松弛以及破裂扩展现象发生,这都与时间有关,因此对深部巷道进行支护时必须考虑到其长期稳定性问题。更重要的一点是,深部高应力积累能量受到开采干扰可在短时间内释放而造成岩爆、矿震等动力型灾害^[1]。而且这种动力型灾害出现频率及严重程度随着深度增大而呈现非线性递增关系,说明深部地应力已经由以静载为主变为静动载共同作用的状态,这也是深部与浅部地压管理不同之处所在。

2 深部岩体结构与力学属性演化

深部岩体结构不是浅部结构的简单延续,它是受到构造作用、高应力影响以及热力交互形成的复合体。其结构劣化及其自组织性是造成深部岩体工程效应的原因。

2.1 原生结构面的闭合与活化

在浅部, 岩体稳定性主要由断层、节理、层理等不连续结构面所决定, 在一定深度以下, 由于巨大的围压使大多数张开型节理和裂缝闭合, 它们的摩擦角随着法向压力增大而增大, 在静载情况下可能会有较好的稳定性, 但是当处于深层高偏应力时, 一些早前已经闭合或者胶结的老龄结构面(例如断层面)就会发生剪切滑动以及活化, 成为卸荷弱区, 而这种活化往往伴随着微震的发生并且有可能造成断层失稳, 其机理不同于浅部结构面对张开破坏。

2.2 新生破裂的萌生与扩展

深部高应力使岩体内出现大量的新生微裂缝, 这些微裂缝起源于矿物颗粒间、包裹体等地质构造薄弱位置, 在不断增大的应力作用下发展并连通而形成宏观断裂带, 这是岩体内能量释放以及结构重排的过程, 从而造成岩体强度下降甚至脆性-延性转化^[2]。随着深度加大, 岩体破坏方式由拉伸-剪切混合型转变为以剪切型为主并且有明显体积增大的特征, 这是由于应力造成的破坏演变所引起的, 在应力作用下, 深部岩体的有效力学性质(如弹性模量、泊松比、内聚力)都会随着应力路径和时间发生变化。

2.3 岩体质量的区域性劣化

深部岩体质量(如 RQD 值、BQ 值)不是随着深度增加而逐渐变差, 而是十分不均匀并且分区域的变化, 在高应力集中区或者靠近构造破碎带上, 岩体质量差, 而处在应力较小的地方岩体质量还可以。这就是说, 在深部存在着优良与较差的岩体质量共存的情况, 也就是所谓的“好中藏坏、坏中存好”。另外, 在深部由于强烈动力作用的影响(比如爆破、岩爆等), 会对周边岩石造成再次破坏, 从而影响到它们的使用寿命, 使岩体质量不断恶化。

3 深部地下水系统演化与水文地质结构变异

深部地下水系统是在高温、高压及构造运动影响下形成的一套处于稳定状态系统。而深部开挖破坏这种平衡关系, 造成水文地质环境发生很大改变。

3.1 渗流场与应力场的耦合效应

深部岩体渗透率对应力非常敏感。随埋藏加深, 围压增大使原生裂隙受到挤压而闭合, 一般情况下岩体的整体渗透率较低, 起到较好的隔水作用; 但是在一些构造破碎带或者由于高地应力造成的破裂带及采动影响区等地质条件较好区域, 裂隙较发育, 连通性好, 渗透率可以提高几个数量级, 成为主要的导水通道。“压密—

破裂—增渗”, 造成深部渗流场具有明显的非均质性和各向异性。应力场对裂隙的开启程度和孔隙度有较大影响从而影响渗流场, 同时孔隙水压力变化又可以通过有效应力影响到应力场, 两者之间存在着密切联系。

3.2 水化学场与温度场的协变

深部地下水化学类型随着深度改变而不同, 在浅部受大气降水补给为主的淡化带, 越往下, 由于水与岩石接触时间更长, 温度更高, 地下水逐步演变为高矿化度的氯化物型或者硫酸钠型水体; 在深层高温有利于矿物溶解、沉积以及离子间相互作用发生, 使得水体中硅、钙、镁等离子含量提高; 另一方面, 地温梯度决定了地下水密度、粘度从而影响地下水流动的方向以及速度, 在深层, 热量引起的对流可能是促进地下水运动的一种方式, 在这种情况下就出现了热-水-力-化四种因素相互影响的局面, 使水文地质条件变得更为复杂。

3.3 突涌水灾害的致灾模式改变

浅部矿井突水一般具有断层、陷落柱等特定导水通道。但是深部突涌水却表现为“高压、大流量、隐蔽性强”。因为深部地应力大, 在开采影响下容易激活原有构造或者出现新的断裂带从而连通深部承压含水层。突水通道也不再是事先确定的一个点或者一个面, 而是有可能是由于采动应力一系列裂缝构成的网络。另外, 在深部高温高压条件下, 水处于高压承压状态, 一旦揭露就会有大量的能量释放, 往往伴随着大量的泥土喷出而导致突水突泥事故, 预防与治理都极为困难。

4 深部地温场特征及热害机制

地温随着深度增大而升高是一般情况, 在深部金属矿中由于存在构造、岩性和地下水流动以及放射性元素衰变等因素的影响, 因此地温场更复杂。

4.1 地温梯度的非均匀性

全球平均地温梯度为 25-30°C/千米, 在金属矿山中由于区域地质条件以及岩浆作用的影响使得地温梯度较大, 在一些地区可达到 40-60°C/千米。而且地温梯度并不是一个固定数值, 它会随着深度及不同的构造位置有所不同, 在一些断层带或者岩体接触带等地质条件较差的地方其地温梯度较高从而产生局部高温区, 造成地温分布不均而在同样深度下各处热量危害程度不同^[3]。因此要准确预测地下深处温度就需要考虑岩石的热学性质、地下水流动换热以及古代的地温场演变过程。

4.2 热-力耦合效应

高温对井下工作场所造成不良影响的同时也改变了

岩石力学性质,在温度上升过程中,岩石中矿物颗粒受热膨胀而形成热应力,在此基础上再叠加高构造应力,则围岩应力更加复杂,有利于裂隙产生和发展;另外,温度提高降低了岩石的弹性模量及强度,提高了其塑性流动的能力,从而导致地下深处岩层更容易出现塑性破坏。热-力耦合作用对于高地温矿井来说尤为显著,它也是造成地下深部巷道大变形以及支护失效的原因之一。

4.3 热-流-固耦合作用

地温场与地下水渗流场、应力场之间存在密切联系。地下水运动带来热量而改变地温场,同时由于温度变化导致水的密度以及黏度发生变化从而改变渗流场。在深部高温差作用下可能会出现热对流现象加快深层热量向上输送形成“热廊道”。另外温度的变化造成的热胀冷缩也会使裂缝张开或者闭合进而影响岩石透水性。因此研究深部地温场需要考虑多种因素的影响而不能单独进行研究。

5 地质条件多场耦合机制及对开采的影响

5.1 多场耦合的内在关联

深部地质系统的核心是应力场(S)、渗流场(H)、温度场(T)以及化学场(C)之间相互作用。应力场引起岩石变形导致岩石孔隙率以及渗透率变化从而改变渗流场;渗流场中孔隙压力变化会影响有效应力,反过来又会对应力场产生影响;温度场会使岩石发生热胀冷缩从而改变应力状态并且会影响流体黏度以及化学反应速度;化学场可以通过溶解-沉积改变岩石中矿物成分以及裂缝发育情况从而进一步影响岩石力学以及水力学性质。这四种场在深部紧密联系在一起形成一个典型的 THMC(热-水-力-化)耦合体系而且它们的变化是非线性的、不确定的。

5.2 对开采设计与工艺的制约

深部地质条件的变化需要对开采理念进行根本上改变,传统的依靠经验的设计浅部开采方式已经不能满足要求,在深部采场上要充分考虑高应力的方向性,合理布置采场走向及跨度,尽量使重要工程避开高应力集中区域;而选择采矿方法时不仅要考虑地压管理还要考虑到地热问题,由于充填采矿法可以较好地解决这两个问

题,因此在深部矿山中越来越被重视;此外,在深部巷道支护上也要由原来单纯的被动支护发展为一种主动与被动相结合的方式,即采用高强度预应力锚杆与让压支护相结合的综合支护方式来应对大变形。

5.3 灾害防控的综合性策略

深部矿山遇到的主要问题——岩爆、突水、高温热害,在本质上均是由于多种场之间相互影响而造成的失稳。岩爆是在应力场控制下的能量瞬时释放所致,但是水压及温度的变化会影响其临界值;突水是应力场与渗流场联合作用下形成通道所致;热害是温度场与通风条件共同作用产生结果^[4]。因此,深部灾害防治应摒弃单一因素治理方式,采取以多场耦合监测为基础预警模式。即:地应力与微震联合监测、渗流压力与水量在线检测、地温与风流热交换变化情况分析等,利用各种信息综合判断灾害发生前兆以及发展过程。

6 结语

金属矿山深部开采与浅部存在本质差异,表现为地应力急剧增高复杂化、岩体结构劣化、地下水压力升维及地温非均匀增强等多场强烈耦合效应。这些变化是深度驱动的系统性协同响应,而非孤立现象。因此,深部开采设计与灾害防控必须基于对多场耦合机制的深刻理解,将地质条件从“静态背景”转变为“动态演化对象”。未来研究应聚焦三大方向:一是发展适应深部环境的原位精细探测技术;二是深化 THMC(热-水-力-化学)耦合过程的理论模型;三是融合现代信息技术构建动态地质信息平台。旨在实现从被动适应到主动调控的跨越,从而保障深部金属矿产资源的安全、高效及可持续发展。

参考文献

- [1] 蔡美峰,何满潮,刘东燕.深部岩体力学与开采技术.岩石力学与工程学报,2022,41(8):1513-1529.
- [2] 李夕兵,周健,王少锋.深部硬岩矿山岩爆机理与防控研究进展.中国有色金属学报,2023,33(2):321-336.
- [3] 孙豁然,杨天鸿,唐春安.深部开采渗流-应力耦合作用与突水灾害机理.煤炭学报,2021,46(6):1745-1755.
- [4] 张向东,刘保国,赵兴东.深部高应力巷道围岩控制理论与技术.采矿与安全工程学报,2022,39(3):425-436.