第 9 卷◆第 4 期◆版本 1.0◆2026 年
文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4732 /（中图刊号）：561GL001

铜矿深部开采冲击地压灾害防治技术研究

吉威风
四川黄金股份有限公司木里分公司
DOI:10.32629/gmsm.v9i4.2515

[摘　要] 铜矿深部开采中,高地应力环境与硬脆性矿岩的力学特性共同导致冲击地压灾害频发,严重制约深部资源的安全高效开发。本文围绕铜矿深部开采冲击地压灾害防治技术展开系统研究,从能量积聚与释放的力学机制出发,建立了动静载荷叠加条件下的冲击能量判据,构建了多参数综合监测预警指标体系,并重点阐述了卸压调控与吸能让压支护两项核心防治技术。
[关键词] 铜矿深部开采；冲击地压；能量判据；卸压技术；让压吸能支护
中图分类号：TD853　文献标识码：A

Research on Rockburst Prevention Technology in Deep Mining of Copper Mines

Weifeng Ji
Muli Branch, Sichuan Gold Co., Ltd.

[Abstract] In deep copper mining, high in-situ stress environment together with the mechanical properties of hard and brittle rock mass frequently induces rockburst hazards, which seriously restricts the safe and efficient exploitation of deep resources. This paper systematically investigates the prevention technologies for rockburst hazards in deep copper mining. Starting from the mechanical mechanism of energy accumulation and release, a rockburst energy criterion under the superposition of dynamic and static loads is established. A multi-parameter comprehensive monitoring and early warning index system is constructed. Two core prevention technologies, pressure relief regulation and energy-absorbing yielding support, are elaborated emphatically.
[Key words] deep copper mining; rockburst; energy criterion; pressure relief technology; energy-absorbing yielding su

1 引言

当前,我国多座铜矿已进入深部开采阶段。其中,抚顺红透山铜矿开采深度已达1100 m以上,冬瓜山铜矿超过900 m,阿舍勒铜矿、谦比希铜矿等也相继进入深部开采。深部开采面临“高地应力、高地温、高岩溶水压和强开采扰动”的“三高一扰动”力学环境,冲击地压(岩爆)等动力灾害的发生频率和强度显著增加。冲击地压是坚硬脆性岩体在高应力集中区发生的一种特殊地压显现,由弹性能突然释放引发,常伴有可感知声响,并以动态弹射或崩溃抛掷破坏为典型表现形式。它不仅严重威胁矿山安全生产,而且已成为制约铜矿深部开采的关键技术瓶颈。

2 铜矿深部开采冲击地压灾害的概述

2.1深部高应力环境下冲击地压的能量积聚

铜矿深部开采的冲击地压灾害与高地应力环境密切相关。从能量角度分析,深部铜矿岩体在开挖前处于三向压应力平衡状态,岩体内部储存了大量弹性应变能。随着开采活动的进行,开挖面附近的岩体发生应力重分布,切向应力集中程度不断提高。当应力集中区的岩体所积聚的弹性应变能密度超过其储能极限时,岩体发生突然的脆性破坏,储存的弹性应变能以动能和振动波的形式急剧释放,即发生冲击地压。铜矿岩体的硬脆性特征使得其在峰值强度前积聚的弹性应变能占总输入能量的比例较高,破坏过程表现为突发性失稳,能量释放速率远大于煤矿中的煤岩体。

2.2动静载荷叠加条件下的冲击能量判据

铜矿深部开采中,冲击地压的发生与爆破振动、断层滑移等产生的动载扰动密切相关。动载扰动叠加于静载应力场之上,可在局部区域形成瞬态的高应力状态,促使岩体中的微裂纹快速扩展贯通,最终触发宏观失稳。

设岩体在静载作用下的应力状态为σ_s,动载扰动产生的附加应力为$\sigma_d t$,则叠加后的动态应力为：$\sigma(t)=\sigma_s+\sigma_d(t)=\sigma_s+\sigma_{d0}\cdot f(t)$。式中,$\sigma_{d0}$为动载应力幅值(Pa)；ft为动载波形函数,对于爆破振动可取为指数衰减形式 $f(t)=e^{-\lambda t}\sin(\omega t)$,其中λ为衰减系数,ω为角频率。

当叠加应力σt超过岩体动态强度σ_{cd}时,岩体发生动力破坏。基于能量原理,可建立冲击地压发生的能量判据。将岩体单

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

元中可释放的弹性应变能与耗散能之比定义为冲击能量指数 K_E：$K_E=\frac{U_e-U_c}{U_c}$ 式中，U_c为岩体单元发生破坏所需的临界耗散能密度(J/m³)。当 KE>1时，表明岩体单元中储存的弹性应变能在扣除破坏耗散能之后仍有剩余，剩余能量将以动能形式释放，具备发生冲击地压的能量条件；当K_E≤1时，则不会发生冲击地压。

进一步考虑动载作用的影响，将动载输入能量W_d纳入能量判据。动载输入能量可用振动波能量密度表示：$W_d=\rho c\int_0^{t_0}v^2(t)\,dt$ 式中，ρ为岩体密度(kg/m³)；c为纵波波速(m/s)；vt为质点振动速度(m/s)；t_0为振动持续时间(s)。修正后的能量判据为：$K_E'=\frac{U_e+W_d-U_c}{U_c}$。当 $K_E'>1$时，判定为有冲击危险。

3 冲击地压多参数综合监测预警体系

微震监测是铜矿深部冲击地压预警的核心技术手段。其原理是通过在采区周围布设多通道传感器阵列，实时采集岩体破裂产生的弹性波信号，经定位算法确定震源位置，并根据波形特征反演破裂的尺度和能量释放水平。单一监测指标难以全面反映铜矿深部冲击地压的复杂致灾过程。为此，建立包含微震活动性参数、能量释放指标和应力状态参数的多参数综合预警指标体系。

微震活动性参数包括：微震事件频次n(次/d)、能量释放率E_r(J/d)和b值。能量释放率定义为：$E_r=\frac{1}{T}\sum_{i=1}^{N}E_i$。式中，T为统计时段(d)；N为时段内微震事件数；E_i为第i个事件的辐射能量(J)。能量释放率的持续上升是岩体加速破裂的直观表现。

应力状态参数包括：应力集中系数$k=\sigma_{max}/\sigma_0$(σ_{max}为实测最大应力，σ_0为原岩应力)和应力变化速率$\Delta\sigma/\Delta t$。当应力集中系数超过1.5且应力变化速率超过0.5 MPa/d时，应提高预警等级。

综合预警等级依据各指标的超限程度确定。当$E_r>E_{r,0}$($E_{r,0}$为矿山统计确定的能量释放率基准值)且$b<b_0$(b_0为b值预警阈值)时，判定为黄色预警；当$K_E'>1$且应力集中系数$k>1.5$时，判定为橙色预警；当出现$E_r>3E_{r,0}$且伴随高能量微震事件($E_i>10^6$ J)时，判定为红色预警，需立即采取卸压或停产避险措施。

4 铜矿深部开采冲击地压灾害防治技术

4.1卸压调控技术

卸压调控技术是通过人为干预改变采区围岩的应力分布状态，将高应力集中区转移至远离开采空间的深部围岩中，或通过预制裂隙降低岩体的储能能力，从而削弱冲击地压的能量基础。

4.1.1深孔爆破卸压

深孔爆破卸压是通过在应力集中区施工深孔并实施爆破，利用炸药爆炸产生的冲击波和爆生气体在岩体中形成裂隙网络，使原本连续的高应力岩体转化为破碎介质，降低其储能能力，并将应力峰值向围岩深部转移。卸压爆破的主要参数包括炮孔深度、孔径、装药量和孔间距。炮孔深度应使爆破形成的卸压区覆盖应力集中区的范围。设应力集中区的深度范围为h_1至h_2，则炮孔深度L应满足：$L\geq h_2+h_e$。式中，h_e为爆破有效影响深度的附加量，一般取0.5～1.0 m。孔径d通常取60～100 mm，装药量Q按单位孔长装药量q计算：$Q=q\cdot L_c$。式中，L_c为装药段长度(m)；q 为单位孔长装药量(kg/m)，对于铜矿硬岩，q一般取1.5～3.0 kg/m。孔间距 S应保证相邻炮孔爆破后形成的裂隙区相互贯通，按经验公式：S=8~12 d。深孔爆破卸压的工程实施应遵循“先卸压、后开采”的时序原则。卸压爆破应超前于回采工作面一定距离进行，超前距一般不小于20～30 m，以保证卸压效果在开采应力调整完成之前已经形成。

4.1.2水力压裂卸压

水力压裂卸压是利用高压水在岩体中的致裂作用，在应力集中区形成人工裂隙网络，改变岩体的应力分布状态和力学性质。与爆破卸压相比，水力压裂的致裂过程更为平缓可控，对围岩的扰动程度较小，适用于对振动敏感的铜矿深部区域。水力压裂的破裂压力P_b是核心设计参数，其计算式为：$P_b=3\sigma_h-\sigma_H+\sigma_t$。式中，$\sigma_h$为最小水平主应力(MPa)；$\sigma_H$为最大水平主应力(MPa)；$\sigma_t$为岩体抗拉强度(MPa)。对于铜矿硬岩，$\sigma_t$一般为5～15 MPa。实际施工压力应取$P_b$的1.2～1.5倍，以保证裂隙的有效扩展。水力压裂的施工参数包括压裂段长、注水流量和压裂持续时间。压裂段长一般取5～10 m，注水流量取30～80 L/min，单段压裂持续时间以压力曲线出现明显下降拐点为结束标志。压裂形成的裂隙网络使岩体的等效弹性模量降低，从而减小弹性应变能的储存能力。研究表明，水力压裂预处理可使压裂区岩体的弹性应变能密度降低30%～50%。

4.1.3大直径钻孔卸压

大直径钻孔卸压是通过在巷道帮部或采场周边施工大直径钻孔，在钻孔周围形成一定范围的破碎区，使高应力区向深部转移。该技术施工简便、成本较低，适用于应力集中程度中等且岩体完整性较好的区域。钻孔的卸压效果取决于钻孔直径和间距的合理匹配。钻孔直径d_b一般取100～150 mm。钻孔间距S_b应使相邻钻孔的塑性区相互重叠，按下式确定：$S_b=2R_p=2r_0\left[\frac{(\sigma_0+c\cot\varphi)(1-\sin\varphi)}{c\cot\varphi}\right]^{\frac{1-\sin\varphi}{2\sin\varphi}}$。式中，$R_p$为钻孔周围塑性区半径(m)；$r_0$为钻孔半径(m)；$\sigma_0$为原岩应力(MPa)；c为岩体黏聚力(MPa)；$\varphi$为内摩擦角(°)。对于铜矿深部硬岩，当钻孔直径为120 mm、原岩应力为30 MPa时，塑性区半径约为钻孔半径的2.5～4.0倍。钻孔的布置方式应根据应力集中区的空间形态确定。对于巷道帮部应力集中，宜采用扇形布置，钻孔仰角根据地应力方向调整；对于采场顶板应力集中，宜采用放射状布置，钻孔深度覆盖顶板应力集中层位。

4.2吸能让压支护技术

卸压调控技术降低了岩体中积聚的弹性应变能，但无法完全消除剩余能量释放对支护结构的冲击作用。因此，铜矿深

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

部开采的支护系统必须具备吸收冲击能量和适应围岩大变形的能力。

4.2.1让压锚杆与吸能锚索

让压锚杆的核心设计思想是在锚杆杆体与托盘之间设置可压缩的让压构件,当围岩变形产生的荷载超过让压构件的屈服强度时,让压构件发生塑性变形或结构压缩,锚杆杆体随之产生可控的伸长,从而在保持锚固力的同时适应围岩的大变形。让压锚杆的让压量通常为100～300 mm,工作阻力为100～200 kN。其力学特性可用双线性本构模型描述,即在弹性阶段,荷载与位移呈线性关系;达到屈服荷载后,荷载基本保持恒定而位移持续增大。吸能锚索在常规锚索的基础上增加了吸能装置。以缩管式让压吸能锚索为例,其吸能机构利用钢管在轴向压缩过程中的塑性扩胀变形来耗散能量。试验研究表明,缩管式让压吸能锚索的单次冲击吸收能量可达103 kJ,工作阻力稳定维持在240～280 kN,在实现120 mm让压变形条件下锚索不发生破断。吸能锚索的吸能能力与其结构参数密切相关,通过调整吸能套管的壁厚和材料屈服强度,可实现吸能阻力在300～500 kN范围内的调整,以适应不同强度等级围岩的支护需求。

4.2.2可缩性钢架与多级联合支护体系

可缩性钢架采用U型钢拱形结构,通过卡缆连接实现节点的滑动让压。当围岩压力超过卡缆的预紧力时,U型钢构件发生相对滑动,钢架整体产生缩让,释放围岩压力。可缩性钢架的可缩量一般为200～500 mm,承载能力为200～400 kN/榀。在铜矿深部巷道中,可缩性钢架通常与锚杆-锚索联合使用,形成“锚杆-锚索-钢架”三级支护结构。

多级联合支护体系的协同工作原理可概括为“分级承载、逐级让压、协同吸能”。锚杆作为第一级支护,承担浅部围岩的锚固作用,控制浅层破裂的发展；锚索作为第二级支护,将支护范围延伸至深部稳定岩层,提供深层锚固力;可缩性钢架作为第三级支护,承受围岩整体的变形压力并在必要时通过滑动让压释放能量。多级联合支护体系的实施应遵循“先锚后架、及时支护”的工序原则。锚杆施工应在开挖后立即进行,锚索在锚杆施工完成后24 h内完成,钢架在锚索施工完成后48 h内架设。支护参数应根据围岩的冲击危险等级动态调整：黄色预警区域可采用“让压锚杆+吸能锚索”两级支护；橙色预警区域应增加可缩性钢架,形成三级支护;红色预警区域应在三级支护基础上加密锚索间距并增大钢架规格。

5 案例分析

案例铜矿属火山喷发-沉积成因的大型黄铁矿型铜锌多金属矿床。矿山采用竖井与斜坡道联合开拓,主采中段集中于+400 m～0 m水平,现已进入千米级深部开采阶段。矿区矿体为急倾斜厚大矿体,上盘黄铁矿围岩破碎、整体性差,下盘凝灰岩坚硬脆性显著,深部岩体呈现高地应力、高地温、高渗透的“三高”赋存特征。在多中段平行回采、隔一采一的强采动扰动下,+150 m、+450 m等中段频繁出现围岩大变形、矿柱应力骤增、巷道底鼓片帮及采场微振动等动力灾害,局部甚至出现塑性区贯通与瞬时岩爆险情,严重制约深部资源安全高效开发。

针对上述冲击地压灾害,矿山确立了“控能、卸压、吸能、稳岩”的防治思路,重点应用分区分级卸压调控与吸能让压联合支护两项技术。在+150 m中段上盘破碎高应力区,采用深孔卸压爆破与密集卸压钻孔组合工艺,布设深度8～12 m、间距1.5 m的卸压钻孔,引导弹性应变能缓慢释放,同时优化爆破参数以削弱动静应力叠加;对充填体包裹的厚大矿柱,则采用分步分层开挖卸压工艺,逐级释放集中应力,避免能量瞬时突变。在支护方面,采场顶板及破碎上盘围岩采用“锚杆+锚索+金属网+喷射混凝土”基础支护,并配套高能量吸收装置实现让压变形吸能；高风险巷道增设U型钢封闭支架与底部加固梁,有效防控底鼓与帮部失稳。此外,矿山同步优化采场结构参数,将原20 m宽高危采场调整为≤12 m的稳定结构,并严格落实“采完即充”的嗣后充填工艺,阻断应力与能量传递路径。整套技术体系规模化应用后,矿区冲击地压灾害得到根本性管控,冲击振动与片帮冒顶频次大幅下降,矿石损失率稳定控制在6.57%、贫化率6.69%,安全回收深部高应力矿柱矿石超15万吨,实现了深部矿山灾害可控与资源高效回采的双重目标。

6 结论

综上所述,铜矿深部开采冲击地压灾害防治应以能量积聚与释放机制为理论基础,以动静载荷叠加条件下的冲击能量判据为危险判别依据,以微震活动性、能量释放率和应力状态等多参数综合监测为预警手段,以深孔爆破、水力压裂和大直径钻孔等卸压调控技术为应力转移措施,以让压锚杆、吸能锚索和可缩性钢架组成的多级联合支护体系为动力冲击防护屏障,进而形成“能量判据定级—综合监测预警—卸压调控转移—让压吸能防护”的完整技术体系。该体系从能量源头减量、传播路径阻断和承载终端防护三个环节协同控制冲击地压风险,可为铜矿深部开采的安全高效实施提供系统化技术支撑。

[参考文献]

[1]姚逸飞,李敏智,李俊平,等.三鑫金铜矿深部开采地压控制实践[J].黄金,2025,46(6):23-27.

[2]刘锋,王昭坤,马凤山,等.矿山深部卸压技术研究现状及展望[J].黄金科学技术,2019,27(3):425-432.

[3]赵兴东,李元辉,刘建坡,等.红透山铜矿微震监测系统的建立及应用研究[J].采矿与安全工程学报,2012,29(1):72-77.

[4]郭玉豹,张苏闯,杨凯.深部开采地压活动特征分析及采场结构参数优化研究[J].采矿技术,2024,24(6):43-47.

[5]张君鹏,詹进,于涛,等.某金属矿深部原岩应力测量及地应力场分布规律研究[J].采矿技术,2021,21(6):33-35.

作者简介：

吉威风(1990--),男,汉族,河南柘城人,硕士研究生,工程师,研究方向为矿山地质管理、矿山地质灾害管理。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.