

超深铁矿采动扰动下围岩亚稳态失稳防控工艺及工程应用

张明帅

五矿世纪矿业(鞍山)有限公司 鞍山市 114000

DOI:10.32629/ems.v8i5.20193

[摘要] 本文构建了“监测—预警—支护—充填—再监测”的闭环工艺。采用微震监测与数值计算协同识别亚稳态演化窗口,以位移速率 5 mm/d 与应力集中系数 $K \approx 2.5$ 作为核心阈值,配套高预应力全长锚固与分级充填的时程强度匹配,联合事件能量不低于 1×10^4 J 的实时预警策略。现场应用表明:微震事件月均次数由 15 次降至 5 次,断面最大位移由 15 mm 降至 5 mm,应力集中系数由 2.5 回落至 1.2,综合失稳风险降低率达 70%。经济测算显示,年度支护费用节约约 300 万元,停产损失减少约 200 万元,合计直接经济效益约 500 万元。该闭环体系有效压缩敏感窗口至小时级管理,显著提升深部回采安全与布局优化能力。

[关键词] 超深铁矿; 围岩亚稳态; 采动扰动; 支护与充填协同; 微震监测预警

引言

深部资源开发使矿山逐步进入高应力与强构造耦合的复杂环境。围岩在能量积聚与结构弱化并存条件下更容易进入临界响应区,微小扰动即可触发突变。传统以均化支护或事后补强为主的做法难以适应长壁状采场的时空演化特征,易造成承载路径在边墙与拐角带聚集,进而放大不稳定源。尤其在采场分段回采与嗣后充填交替运行条件下,节理张开与充填体硬化往往不同步,使拱架连续性受损并诱发微震事件簇集与位移速率跃升。为此亟需一种将机理识别、阈值判别与工序响应一体化的技术体系,通过对扰动、响应与结构弱化的链条化刻画,实现对亚稳态窗口的主动收敛。

1 工程概况

本研究以埋深 1200 - 1500 m 的超深铁矿主体工程为对象,矿体处于高应力、强构造裂隙的岩体环境中。围岩以中粗粒花岗岩为主,节理与剪切裂隙交织发育,断续性与各向异性显著,实测最大水平主应力达到 35 MPa,局部围压与剪切共同作用,形成明显的能量积聚。

矿山把阶段嗣后充填法作为主要采矿工艺,采场单元为 15 m × 20 m × 100 m 的长壁状结构,分段回采与充填交替进行,采动扰动呈带状扩展。进一步观察发现,局部围岩出现亚稳态失稳征候,即在临界稳定状态下受微小扰动触发而突变,现场表现为微震事件频发、位移速率阶段性增大。

2 采动扰动下围岩亚稳态失稳防控工艺研究

2.1 超深铁矿围岩亚稳态失稳机理分析

在埋深 1200-1500 m 的高应力与强构造裂隙耦合环境中,

围岩处于能量积聚与结构弱化并存的临界状态。本研究把微震监测与 FLAC3D 计算相结合来刻画采动扰动引发的应力重分布、裂隙再激活与充填体时变硬化的相互耦合机理,依靠震源时序、位移场与应力场的协同表征来识别亚稳态演化窗口。以每月约 15 次的微震事件统计尺度提取频度与能级的动态特征,关联巷道位移速率与边墙应力集中区的空间迁移,从而把扰动、响应与结构弱化的时空链条清晰化,服务于判据构建与阈值设定^[1]。

表 1 某超深铁矿围岩力学参数表

岩性	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	单轴抗压强度 σ_c /MPa
中粗粒花岗岩	50	0.25	120
富矿铁矿石	70	0.27	150
剪切破碎带岩块	20	0.28	60
水泥砂浆充填体	8	0.30	25

从力学本质来看,节理面张开与充填体强度增长不同步,会把局部拱架承载路径推向侧壁与顶底板交汇区,使应力集中系数 K 在采场边界与结构面交切位置逼近 2.5。耦合分析用于判定,当位移速率超过 5 mm/d 即可纳入失稳预警阶段,若同时出现微震频度维持在月均水平而能级向中高能转移,则体系进入亚稳态临界域。由此构建判别指标体系,把 K 、位移速率、微震频度与能级结构以及节理开度增量作为核心量纲,结合表 1 所列岩性参数对参数域进行约束,进而把失稳触发条件明确为 K 接近 2.5 并叠加位移速率阈值的耦合状态。

$$K = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0}$$

其中, K 表示应力集中系数, 单位为无量纲; σ_{max} 为围岩局部最大主应力, 单位为 MPa; σ_0 为原岩应力, 单位为 MPa。

2.2 采动扰动下围岩亚稳态失稳防控关键技术

针对埋深超千米采动扰动导致承载路径向边墙与顶底板交汇区迁移的实际情况, 本研究将防控策略凝练为承载路径重构、强度时程匹配与扰动识别响应三位一体的协同技术体系。高预应力锚杆支护采用直径 25 mm、长度 6 m、预应力 300 kN 的全长锚固构型, 依靠把浅层松弛带与深部完整岩体联结为受拉拱来重塑受力链条, 并把局部荷载从结构面交切区回迁至稳定体积内部^[2]。

从时空强度匹配角度来看, 分级充填体强度优化技术把采场位置与边墙应力迁移路径作为核心约束, 设置早龄期目标强度 3-5 MPa, 靠近采动边界与顶底板交汇区取上限, 在结构面密集带选用延缓硬化的掺配方案, 使硬化时程与节理张开趋于同步, 从而降低承载拱架的失配断裂概率并提高回采与充填交替窗口的稳定性。针对扰动触发与响应闭环, 微震实时监测预警技术构建 1 Hz 持续采集与事件快速定位流程, 以单次事件能量不低于 10^{-4} J 作为触发阈值, 联合位移速率与 K 的阈域判别, 形成分级预警与处置联动^[3]。

2.3 防控工艺集成与流程图设计

在埋深 1200 - 1500 m 的高应力与强构造裂隙复合条件下, 本研究将已识别的亚稳态触发机理与关键技术整合为“监测—预警—支护—充填—再监测”的闭环工艺, 力求将载荷路径、时程强度与扰动识别统一在同一流程中运行。闭环的核心在于把多源数据融合成可执行的工序指令, 前端依靠微震、位移与应力三类信息构建驱动因子库, 中端围绕阈值判别与处置等级把支护与充填措施精细化匹配, 末端以再监测反馈来修正阈值与参数设置, 从而使敏感时段与敏感区段被持续收敛并进入可控域。流程结构与节点互联关系见图 1, 节点之间采用时序控制与阈值控制的双重约束, 既限定动作触发条件, 又规定工序衔接窗口, 使支护与充填动作嵌入采动节奏而不过度滞后。

从流程运行来看, 监测环节持续采集微震信号并进行事件定位, 采样频率设为 1 Hz, 单次事件能量不低于 1.0×10^{-4} J 作为纳入统计的下限。巷道周边布置位移计与应力计, 位移速率以 5 mm/d 为敏感阈值, 结合数值反演与现场应力计

数据推定 K 的时空演化趋势。预警环节依据滑动时间窗对频度与能级结构进行识别, 若位移速率接近或超过阈值, 且高能事件呈向边墙与顶底板交汇区迁移, 同时 K 在 2.2 以上并朝 2.5 逼近, 则触发预警 I; 若能级继续上移并形成簇集, 且 K 在局部尖峰保持高位, 则升级为预警 II。处置指令在预警发出后即被下发至现场班组与充填站, 时间上以小时级对接采场作业计划, 空间上定位于结构面交切区及其外侧一个支护间距的扩展带^[4]。

围绕处置动作的工程配置, 支护环节把高预应力全长锚固作为基础构型, 锚杆直径为 25 mm、长度为 6 m、预应力为 300 kN, 预警 I 工况下把锚杆间距收紧至 1.2 m × 1.2 m, 并增设钢筋网与 50-80 mm 喷射混凝土以连成受拉拱; 在拐角带与能量积聚显著区段, 增设 7-9 m 长锚索并对交切节理带进行低压注浆以降低开度增量。充填环节把分级配比与时程控制当作主要抓手, 靠近采动边界与顶底板交汇区的早龄期强度按 4-5 MPa 取值, 结构面密集带采用延缓硬化方案以追赶节理张开节奏, 使承载拱架获得连续性。通过以上集成, 工艺既形成了对敏感区段的快速响应链条, 又在时间上把穿插作业与安全边界耦合起来, 借此把亚稳态演化窗口压缩至短时可控范围, 流程化表达见图 1。

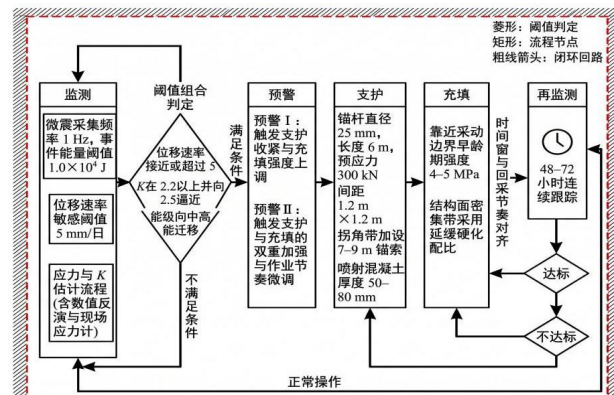


图 1 超深铁矿围岩亚稳态失稳防控工艺流程图

3 防控工艺工程应用效果评估

3.1 现场监测数据对比分析

采动扰动在埋深超千米空间呈带状扩展, 为评估防控工艺效果, 将前后两个可比监测阶段的微震与围岩变形应力数据进行同口径对齐。监测网络保持 1 Hz 连续采集与事件纳入阈值一致, 巷道侧壁及拐角带位移计布置位置不做调整, 旨在把工序差异对指标的影响降至可辨识范围。数据处理环节沿用滑动时间窗统计频度与能级结构的统一流程, 同时把位移速率与应力集中系数的时序曲线进行同尺度归一化, 以便

识别结构面交切区的响应强度变化与峰值位置迁移^[5]。对比结果显示,微震事件的月均频度由高位水平收敛至低位区间,位移峰值在敏感窗口内被显著压低,应力集中系数由临界上沿回落至常规承载区间,三者之间的耦合关系表现为能级结构与位移峰值的同步降幅,并把尖峰位置从结构面交切区回迁至稳定体积内部。位移与应力的耦合曲线在处置后出现相位差缩短的特征,表明充填体早龄期强度与节理张开节奏的时程匹配对承载拱架的连续性具有正向作用。综合考虑微震频度、位移峰值与应力集中系数的多维约束,监测对比所呈现的量化差异与闭环工艺的目标一致性较高,见表2,用以支撑后续阈值修订与工序时序微调的参数化依据。

表2 防控工艺应用前后监测指标对比表

指标	应用前	应用后	变化幅度
微震事件次数	15 次每月	5 次每月	降低 66.7%
最大位移量	15 mm	5 mm	降低 66.7%
应力集中系数 K	2.5	1.2	降低 52.0%

3.2 失稳风险降低效果评估

本节基于综合风险量化来评估闭环工艺的抑危效应。综合风险值把微震能级结构、位移速率、应力集中系数 K 及节理开度增量纳入统一尺度,按阈值域进行归一与加权,从而把多源指标映射为可比的风险指针,用以表征亚稳态演化强度与时空迁移特征。

$$R = \frac{S_{pre} - S_{post}}{S_{pre}} \times 100\%$$

其中, R 表示失稳风险降低率(单位: %), S_{pre} 为应用前综合风险值(单位: 无量纲), S_{post} 为应用后综合风险值(单位: 无量纲)。

将本矿井工艺实施前综合风险值取 80, 实施后取 24 代入公式, 得到 $R=70\%$, 表明闭环工艺对亚稳态触发的整体贡献度较高。承载路径重构把峰值应力由结构面交切区回迁至稳定体积, 时程强度匹配把充填硬化与节理张开趋于同步, 预警处置联动把高能事件的空间簇集引导为分散释放。

3.3 经济效益分析

埋深 1200 - 1500 m 采场采动扰动呈带状扩展, 敏感窗口已被闭环工艺压缩至小时级管理。经济可行性评估从成本核算与损失规避两个维度展开, 成本口径对齐矿山财务年度报表, 费用归集遵循直接材料、直接人工与施工设备摊销的分类方式, 统计周期覆盖完整财政年度, 以保证核算边界的一

致性与可比性。支护费用层面, 承载路径重构把高预应力锚杆与喷射层的配置集中至结构面交切区, 时程强度匹配减少早龄期返修与二次支护, 叠加微震阈值触发下的差异化加固, 形成材料用量和工时的协同压降, 年度支护费用较既往全域均化策略缩减并形成 300 万元的直接节约。停产损失层面, 分级预警与小时级处置把突发性停产由年度累计 10 天降低到 2 天, 按单日综合损失系数 25 万元进行估算, 折算年度损失减少 200 万元; 产线转序波动随之收敛, 设备待机与人员闲置对管理费用的外溢影响同步降低。

结语

本文提出面向超深铁矿围岩亚稳态失稳的闭环防控工艺, 通过阈值驱动的监测预警、承载路径重构与充填时程匹配的协同, 实现敏感区段的快速识别与小时级处置。现场应用验证了对微震频度、位移峰值与应力集中系数的同步压降, 综合风险显著收敛, 带来明确的经济收益与工序稳定性提升。方法的关键在于以 K、位移速率与能级结构构成的判别体系与支护充填策略的动态联动, 并依托再监测对阈值与参数持续校准。该体系具备向不同岩性与构造背景推广的潜力, 亦对深部延伸段的采场时序与支护密度优化提供了定量依据。后续工作将围绕多尺度实时反演、充填材料自适应配比与智能预警联动展开, 以进一步提升深部复杂环境下的工程韧性与本质安全水平。

[参考文献]

- [1] 孙述海, 王文斌, 周波, 等. ZK 铁矿复杂水文地质条件及水害防治技术研究 [J]. 地质与勘探, 2025, 61 (06): 1283-1295.
- [2] 赵爱明. 矿山机械设备在铁矿中的应用与管理措施研究 [J]. 中国设备工程, 2025, (18): 64-66.
- [3] 王开鹏. 井下铁矿开采中深孔爆破技术分析 [N]. 山西科技报, 2025-09-15 (B08).
- [4] 叶丽娟, 赵丽君, 张云, 等. 华北地区铁矿损毁土地现状及风险防范建议 [J]. 华北地质, 2025, 48 (03): 104-117.
- [5] 葛成明. 铁矿采矿工艺技术探讨 [J]. 新疆钢铁, 2025, (03): 40-42.

作者简介: 张明帅, 出生年月: 1972.03.12, 男, 汉族, 籍贯: 山东 济南, 学历: 研究生, 职称: 高级工程师, 研究方向: 采矿工程。