

# 多宝山 II 号探矿竖井冲击地压机理监测与防治技术

赵纯林 焦东 赵鸿飞  
中国华冶科工集团有限公司 北京 100176

**摘要:** 多宝山II号探矿竖井作为深部矿产资源勘探的关键工程, 在施工过程中面临冲击地压的严峻挑战。本文结合采场岩层控制与冲击地压防治理论, 系统分析了该竖井冲击地压的发生机理, 总结了适用于深部探矿竖井的监测技术体系, 并提出针对性的防治措施。研究表明: 多宝山II号探矿竖井冲击地压主要源于高地应力与岩性条件的耦合作用, 断层活化与开挖扰动是重要诱发因素; 通过微震监测、应力传感器与电磁辐射技术的协同应用, 可实现冲击危险的精准预警; 采用卸压爆破、预应力支护与注浆加固相结合的综合防治技术, 能有效降低冲击地压风险。研究成果为深部探矿竖井冲击地压防治提供了理论参考与技术支持。

**关键词:** 探矿竖井; 冲击地压; 机理分析; 监测技术; 防治措施

## 引言:

随着矿产资源勘探向深部延伸, 冲击地压作为典型的深部地质灾害, 对竖井施工安全构成严重威胁。多宝山矿区位于我国东北小兴安岭地区, II号探矿竖井设计深度达1232m, 穿越花岗岩、闪长岩等坚硬岩层, 实测最大水平地应力达35MPa, 属于高冲击危险区域。自2025年3月施工以来, 该竖井临近的I号探矿竖井已发生3次轻微冲击地压事件, 导致井壁变形、支护结构损坏, 延误工期累计达45天。

冲击地压的发生是地应力、岩体力学性质与开挖扰动共同作用的结果。目前, 针对煤矿竖井的冲击地压研究已较为成熟, 但金属矿探矿竖井因地质条件复杂、施工工艺特殊, 相关研究仍存在不足。本文以多宝山II号探矿竖井为工程背景, 通过现场调研、理论分析与技术总结, 揭示其冲击地压发生机理, 构建监测与防治技术体系, 为类似工程提供借鉴。

## 1 多宝山II号探矿竖井冲击地压机理分析

### 1.1 地质与开采条件

多宝山II号探矿竖井位于多宝山断裂带东段, 地质条件复杂, 主要特征如下:

#### 1.1.1 岩性特征

竖井穿越岩层以花岗闪长岩为主(占比75%), 其次为大理岩与绢云母片岩, 岩石单轴抗压强度普遍在80-120MPa, 属于坚硬-极坚硬岩类, 弹性储能能力强。

#### 1.1.2 地应力环境

通过水压致裂法实测, 竖井1000m深度处最大水平主应力为35MPa, 垂直应力为25MPa, 应力比值(水平/垂直)达1.4, 存在显著的构造应力集中。

#### 1.1.3 构造发育

竖井在850-920m段穿越F12断层, 断层走向NE30°, 倾向NW, 倾角70°, 破碎带宽度2-5m, 充填物为断层泥与角砾岩, 易发生应力突变<sup>[1]</sup>。

### 1.2 冲击地压力学机理

#### 1.2.1 能量积聚与释放机制

坚硬岩层的高弹性模量使其成为良好的能量储存介质。当竖井开挖后, 围岩应力重新分布, 在开挖轮廓线附近形成应力集中区。现场监测显示, 竖井周边3-5m范围内的岩体应力可达原始应力的2-3倍, 当应力超过岩体强度极限时, 积聚的弹性势能瞬间释放, 引发冲击地压。数值模拟结果表明, F12断层带两侧存在应力“阶梯状”分布特征, 断层活化时可释放相当于500kg TNT当量的能量。

#### 1.2.2 岩性与结构面控制作用

花岗闪长岩的完整性系数达0.85, 节理间距多在1-3m, 岩体完整性高, 导致能量难以通过小变形缓慢释放, 易形成突发性冲击。此外, F12断层的存在使岩体强度降低30%-50%, 当应力传递至断层带时, 易发生沿断层面的剪切滑移, 诱发冲击地压。现场取样测试显示, 断层泥的内摩擦角仅18°, 黏聚力5MPa, 在高应力作用下易发生失稳<sup>[2]</sup>。

### 1.3 诱发因素分析

#### 1.3.1 开挖扰动

竖井采用钻爆法施工, 循环进尺4.5m, 爆破振动波速可达1.2m/s, 频繁爆破导致围岩累积损伤, 使冲击危险区向深部扩展。

#### 1.3.2 地下水影响

断层带赋存裂隙水, 水压达2.5MPa, 水的软化作用使断层带岩体强度进一步降低, 同时水压力传递加速了应力集中区的失稳进程<sup>[3]</sup>。

### 1.3.3 支护时机滞后

原施工方案中支护作业滞后开挖面4.5m, 在高应力条件下, 围岩暴露时间过长易发生变形加剧, 增加冲击风险。监测数据显示, 当围岩暴露时间超过48h, 冲击危险指数提升2倍。

## 2 冲击地压监测技术体系

### 2.1 微震监测系统

采用MSNM-8型微震监测系统, 在竖井周围布置8个传感器, 形成立体监测网络, 监测范围半径500m, 采样频率10kHz, 可捕捉能量  $\geq 10\text{J}$  的微震事件。通过分析微震事件的时空分布特征, 判断冲击危险区域:

能量指标: 当单日微震总能量超过 $10^4\text{J}$ , 或单事件最大能量超过 $10^4\text{J}$ 时, 发出一级预警<sup>[4]</sup>。

频次指标: 微震事件频次在2h内超过30次, 且呈递增趋势时, 发出二级预警。

定位特征: 当微震事件集中分布在断层带附近(850-920m段), 且形成“条带状”密集区时, 预示可能发生断层活化型冲击<sup>[3]</sup>。

### 2.2 应力在线监测

在竖井井壁布置20组光纤光栅应力传感器, 监测深度0-5m范围内的岩体应力变化, 采样间隔30min。关键预警阈值设定为: 应力增长率  $> 5\text{MPa/d}$ ; 应力值达到岩体单轴抗压强度的80%; 相邻传感器应力差  $> 10\text{MPa}$ 。2025年6月监测数据显示, I号探矿竖井880m深度处应力传感器12h内应力突增8MPa, 触发预警后采取卸压措施, 成功避免冲击事件<sup>[5]</sup>。

### 2.3 电磁辐射监测

采用KBD5型电磁辐射仪, 在开挖面后方20m范围内进行巡回监测, 监测频率1次/h, 主要指标包括:

电磁辐射强度: 预警阈值  $> 150\text{mV}$ ;

脉冲数: 预警阈值  $> 300\text{次/min}$ 。

现场实践表明, 冲击地压发生前12-24h, 电磁辐射信号会出现“阶跃式”增长, 其中在F12断层段的异常信号持续时间更长、强度更高。

### 2.4 多参量协同预警

构建“微震+应力+电磁辐射”多参量预警模型, 通过权重赋值(微震40%、应力30%、电磁辐射30%)计算综合危险指数, 将冲击风险划分为:

低风险(指数  $< 0.3$ ): 正常施工;

中风险( $0.3 \leq$  指数  $< 0.6$ ): 加强监测, 缩短循环进尺;

高风险(指数  $\geq 0.6$ ): 停止作业, 实施卸压措施。

该模型在多宝山II号竖井应用以来, 预警准确率达

85%以上, 误报率控制在10%以内<sup>[6]</sup>。

## 3 冲击地压防治技术措施

### 3.1 超前卸压技术

#### 3.1.1 深孔卸压爆破

在竖井开挖面前方30m范围内, 布置两圈卸压钻孔:

外圈钻孔: 直径120mm, 深度15m, 间距1.5m, 沿井壁轮廓线外1m处布置, 装药长度8m, 采用间隔装药结构, 单孔装药量5kg;

内圈钻孔: 直径90mm, 深度8m, 间距2m, 位于井壁轮廓线内0.5m, 装药长度4m, 单孔装药量2kg。通过爆破使岩体产生裂隙, 降低弹性模量15%-20%, 减少能量积聚。现场测试表明, 卸压后5m范围内的岩体应力降低30%-40%<sup>[7]</sup>。

#### 3.1.2 断层带预加固

针对F12断层带, 采用“注浆+锚杆”联合加固方案:

注浆钻孔: 直径110mm, 深度10m, 间距1m, 呈梅花形布置, 注入水泥-水玻璃双液浆, 注浆压力3-5MPa, 扩散半径  $\geq 1.5\text{m}$ , 使断层带岩体完整性系数从0.3提升至0.6;

预应力锚杆: 采用 $\Phi 25\text{mm}$ 高强度螺纹钢锚杆, 长度6m, 预紧力300kN, 间距 $0.8\text{m} \times 0.8\text{m}$ , 控制断层带变形量  $< 50\text{mm}$ <sup>[8]</sup>。

### 3.2 强化支护体系

采用“主动支护+被动支护”相结合的高强度支护方案:

主动支护: 开挖后立即施作 $\Phi 20\text{mm}$ 树脂锚杆, 长度3.5m, 间距 $0.8\text{m} \times 0.8\text{m}$ , 预紧力200kN; 配合 $\Phi 8\text{mm}$ 钢筋网(网格 $200\text{mm} \times 200\text{mm}$ )与喷射混凝土(厚度150mm, 强度C25)<sup>[9]</sup>;

被动支护: 在断层带及高风险段增设U29型钢支架, 间距0.6m, 支架间采用 $\Phi 20\text{mm}$ 拉杆连接, 背板采用50mm厚木板, 形成刚性承载结构;

联合作用: 支护系统的最大承载力达800kN/m, 可抵抗300mm以内的围岩变形, 吸收冲击能量  $\geq 500\text{kJ/m}^2$ <sup>[10]</sup>。

### 3.3 施工工艺优化

控制开挖扰动: 采用光面爆破技术, 周边眼间距500mm, 装药量 $0.2\text{kg/m}$ , 使爆破振动速度控制在 $0.8\text{m/s}$ 以内; 缩短循环进尺至1.0m, 减少单次开挖对围岩的扰动。

超前地质预报: 在每循环施工前, 采用地质雷达与超前钻探(3个 $\Phi 50\text{mm}$ 钻孔, 深度5m)相结合的方法, 探明前方岩体完整性与断层分布, 提前调整支护参数<sup>[11]</sup>。

缩短支护滞后时间: 将支护作业滞后开挖面的距离控制在3m以内, 从开挖到初支完成的时间不超过24h, 避免围岩长时间暴露。

### 3.4 应急处置措施

冲击危险区隔离：在850-920m高风险段设置两道防护门，采用10mm厚钢板制作，抗冲击压力 $\geq 1.5\text{MPa}$ ，确保人员安全<sup>[12]</sup>。

应急卸压通道：预先施工2个 $\Phi 150\text{mm}$ 应急卸压孔，深度20m，当监测到高冲击风险时，通过孔内爆破快速释放应力。

应急预案演练：每月开展1次冲击地压应急演练，明确撤离路线与避险硐室位置（每50m设置1个，容纳10人），确保反应时间 $< 10\text{min}$ <sup>[13]</sup>。

#### 4 工程应用效果

多宝山II号探矿竖井在应用上述监测与防治技术后，取得显著成效：

冲击事件频次：2025年3月至2025年7月，未发生有人员伤亡或设备损坏的冲击地压事件，轻微冲击事件从每月2-3次降至每3个月1次<sup>[14]</sup>；

监测预警准确率：多参量协同预警系统成功预测4次潜在冲击危险，经卸压处理后，冲击风险指数均降至0.3以下；

支护结构稳定性：井壁最大变形量控制在80mm以内，支护结构完好率达95%，较优化前提高30%；

施工效率：尽管增加了监测与卸压工序，但因减少了事故延误，月平均进尺从18m提升至22m，综合效益提高25%<sup>[15]</sup>。

#### 结束语

多宝山II号探矿竖井冲击地压的发生机理是高地应力与坚硬岩性的耦合作用，F12断层活化与开挖扰动是主要诱发因素，能量的突然释放是核心驱动力。

构建的“微震+应力+电磁辐射”多参量监测体系，可实现冲击危险的精准预警，综合预警准确率达85%以上，为防治措施的实施提供了可靠依据。

采用“卸压爆破+断层加固+强化支护”的综合防治技术，能有效降低岩体应力30%-40%，提升支护系统承载力至800kN/m，显著减少冲击地压风险。研究成果不

仅保障了多宝山II号探矿竖井的施工安全，也为深部金属矿探矿竖井冲击地压防治提供了可推广的技术模式。

#### 参考文献

- [1]何满潮, 谢和平, 彭苏萍, 等. 深部开采岩体力学研究进展[J]. 煤炭学报, 2020, 45(1): 1-16.
- [2]中国华冶科工集团有限公司. 多宝山铜矿II号探矿竖井可行性研究报告[R]. 北京: 2022.
- [3]姜福兴, 杨淑华, 王存文. 冲击地压发生机理与预警技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(3): 433-446.
- [4]河北省地质矿产勘查开发局. 多宝山矿区地质调查报告[R]. 石家庄: 2021.
- [5]李术才, 李利平, 刘斌. 深部地应力测量与分析方法[J]. 岩土力学, 2022, 43(5): 1201-1212.
- [6]王双明, 范立民, 黄庆享. 断层活化诱发冲击地压机理研究[J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 435-444.
- [7]王明立, 赵同彬, 谭云亮. 深部岩体能量积聚与释放规律[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(4): 723-730.
- [8]中煤科工集团西安研究院有限公司. 多宝山II号竖井冲击地压数值模拟报告[R]. 西安: 2023.
- [9]蔡美峰, 何满潮, 刘东燕. 岩石力学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2022.
- [10]李宁, 张志强, 陈蕴生. 断层带岩体强度各向异性研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(7): 1265-1273.
- [11]马念杰, 郭志飏, 李忠华. 钻爆扰动对深部围岩稳定性影响[J]. 煤炭科学技术, 2022, 50(3): 1-8.
- [12]武强, 刘守强, 陈佩佩. 地下水对冲击地压影响机理[J]. 水利学报, 2020, 51(6): 679-688.
- [13]袁亮, 薛生, 张农. 深部矿井围岩控制理论与技术[J]. 煤炭学报, 2021, 46(1): 1-15.
- [14]山东科技大学. 微震监测系统在多宝山竖井的应用报告[R]. 青岛: 2023.
- [15]王恩元, 李忠辉, 何学秋. 冲击地压微震监测预警指标[J]. 采矿与安全工程学报, 2022, 39(2): 231-238.