

## 煤矿巷道快速掘进对冲击地压诱发效应及防治研究

滑柱轮

徐矿集团新疆分公司, 新疆 乌鲁木齐 830017

[摘要]随着煤矿开采深度增加与单进水平提升,快速掘进引起的冲击地压问题日益突出。文中以张双楼煤矿 23903 材料道与切眼为工程背景,系统分析了快速掘进条件下冲击地压的时空演化特征与诱发机制。研究表明,快速掘进使工作面前方支承压力峰值向迎头迁移、应力集中系数增大,顶板暴露面积增速提高导致破断能量集中释放,形成了“静载累积+动载触发”的叠加致灾模式。基于“监测预警-主动卸压-支护加固-限员防护”四位一体防冲体系,提出了掘进速度分级控制、大直径钻孔卸压、顶板预裂爆破、防冲限员管理等综合防治措施。现场实践表明,该体系有效降低了掘进期间冲击事件频次与能量级别,实现了安全与效率的协调统一。研究成果可为深井高应力区巷道快速掘进的冲击地压防控提供参考。

[关键词]快速掘进;冲击地压;诱发效应;监测预警;卸压防治

DOI: 10.33142/ec.v9i9.20416

中图分类号: TD324

文献标识码: A

## Research on the Induced Effect and Prevention of Impact Ground Pressure in Rapid Excavation of Coal Mine Roadways

HUA Zhulun

Xinjiang Branch of Xuzhou Coal Mining Group, Urumqi, Xinjiang, 830017, China

**Abstract:** With the increase of coal mining depth and the improvement of single entry level, the problem of rockburst caused by rapid excavation is becoming increasingly prominent. The article takes the 23903 material channel and cutting hole of Zhangshuanglou coal mine as the engineering background, and systematically analyzes the spatiotemporal evolution characteristics and triggering mechanism of rockburst under rapid excavation conditions. Research has shown that rapid excavation causes the peak support pressure in front of the working face to shift towards the front, increases the stress concentration coefficient, and increases the rate of increase in the hanging area of the roof, resulting in the concentrated release of fracture energy, forming a superimposed disaster mode of "static load accumulation + dynamic load triggering". Based on the four in one anti erosion system of "monitoring and early warning - active pressure relief - support reinforcement - personnel protection", comprehensive prevention and control measures such as graded control of excavation speed, pressure relief of large-diameter boreholes, roof pre-cracking blasting, and anti erosion personnel management are proposed. On site practice has shown that this system effectively reduces the frequency and energy level of impact events during excavation, achieving a coordinated unity of safety and efficiency. The research results can provide reference for the prevention and control of rockburst during rapid excavation of tunnels in high stress areas of deep wells.

**Keywords:** rapid excavation; impact ground pressure; inducing effect; monitoring and early warning; pressure relief prevention and control

### 引言

冲击地压是深部煤矿开采中典型的动力灾害,其突发性强、破坏性大,严重威胁矿井安全生产。近年来,随着综掘装备能力提升与支护技术进步,煤矿巷道单进水平显著提高,部分矿井月进尺从 150m 提升至 260m 以上。快速掘进缩短了巷道施工周期,缓解了采掘接续紧张,但同时也改变了围岩应力调整与能量释放的时序特征,使得冲

击地压的发生风险趋于复杂化。

巷道掘进本质上是围岩应力场的卸载与重构过程。快速掘进使这一过程在更短的时间内完成,应力重新分布被压缩,能量释放更加集中。与回采工作面相比,掘进巷道空间狭小、支护跟进存在滞后,一旦发生冲击,往往造成严重的人员伤害与设备损毁。因此,揭示快速掘进对冲击地压的诱发效应,建立针对性防治技术体系,对于保障深

井巷道安全高效掘进具有重要意义。

本文以张双楼煤矿 23903 材料道及切眼为工程背景, 结合理论分析与现场实践, 研究快速掘进条件下冲击地压的诱发机制, 提出系统的监测预警与防治措施, 以期为类似条件下的巷道掘进防冲提供借鉴。

## 1 工程背景与冲击危险性分析

### 1.1 工程概况

23903 材料道位于 23 采区, 西起 23 采区东翼区段轨道联络巷, 东至 23 采区边界, 设计长度 1107.4m, 巷道标高-1070m~-1110m, 沿 9 煤顶板掘进。煤层厚度 2.4~8.0m, 平均 3.6m, 倾角  $19^{\circ} \sim 30^{\circ}$ , 平均  $24^{\circ}$ 。巷道断面为梯形, 毛宽 5.1m、毛高 3.0m, 采用锚网索梁联合支护。23903 切眼与之相邻, 设计长度 171.8m, 断面为矩形。

该区域地质构造复杂, 预计揭露多条断层, 其中落差大于 1m 的断层 3 条。煤层具有 II 级自然发火倾向, 煤尘爆炸指数 35.06%, 瓦斯含量  $1.2\text{m}^3/\text{t}$ 。上覆 23723、23725 采空区, 邻近 23901、23923 采空区, 属于典型的“三面采空”孤岛应力环境。

### 1.2 冲击危险性评价

采用综合指数法对 23903 材料巷道开展冲击地压危险性评估, 计算得出该巷道冲击危险指数为 0.57, 整体判定为中等冲击危险。从多因素耦合分区结果来看, 巷道内的弱冲击危险区和中等冲击危险区相互交错分布; 诱发该巷道冲击地压的核心原因主要有四点: (1) 深埋高地应力: 巷道埋深超 1000m, 原始地应力水平高, 本身就具备冲击地压发生的基础条件; (2) 采空区侧向应力叠加: 巷道掘进过程中, 邻近采空区的侧向支承压力, 和掘进施工产生的扰动应力相互叠加, 大幅提升了巷道围岩应力水平; (3) 地质构造应力集中: 巷道周边断层发育, 断层破碎带区域极易出现应力集中, 诱发围岩失稳冲击; (4) 上覆采空区扰动影响: 本煤层与上部采空区间距仅 9.5~11.0m, 上覆岩层稳定性差, 受上部采空区扰动影响, 进一步增大了巷道冲击失稳的风险。

## 2 快速掘进对冲击地压的诱发效应

### 2.1 掘进速度与应力场演化特征

巷道快速掘进会改变围岩应力完成重新分布的时间。数值模拟结果表明: 当掘进速度从 4m/d 提高到 12m/d, 工作面前方支护压力的峰值位置由 8.2m 前移到 3.9m; 应力集中系数从 1.45 升高至 1.95, 高应力区范围从 5.2m 扩大到 10.8m。掘进速度越快, 工作面附近煤层积攒的弹性能量就越高。围岩内部的应力来不及充分释放, 这时如果再受到采掘切割或是支护施工的扰动, 储存起来的弹性

能就会突然释放, 很容易引发冲击地压。

现场测量证实了这一趋势。23903 材料隧道开挖速度加快后, 工作面后方 5m 范围内平均岩屑量由  $3.1\text{kg}/\text{m}$  增加到  $4.2\text{kg}/\text{m}$ , 部分周期超过  $4.5\text{kg}/\text{m}$  的临界值。同时, 煤炮声频率增加, 表明煤体处于高应力的临界状态。

### 2.2 快速掘进对顶板破断与能量释放的影响

快速开挖增加了顶板暴露面积的增长速度, 老顶板裂隙的时空特征发生了显著变化。月进尺为 150m 时, 微震事件的单次能量大多小于  $10^4\text{J}$ 。每月的连续时间增加到 260m 后, 单个能量大于  $5 \times 10^4\text{J}$  的事件每月发生三次以上, 最大的一次达到  $1.2 \times 10^6$ 。微震事件集中在正面后 20~40m 范围内, 与周期性破裂位置一致。

快速掘进缩短了两次顶板断裂的间隔。能量不能分几期缓慢释放, 而倾向于一次断裂集中释放, 形成强烈的动载荷扰动。这种动载荷与高静载荷相结合, 当叠加应力超过煤体强度时, 就会引发冲击地压。

### 2.3 掘进速度对工作面前方煤体应力集中的影响

掘进速度提高之后, 煤体在较短的揭露时间内不能达到充分的卸压效果。工作面前方支承压力的峰值位置向迎头移动, 应力集中程度增大。用数值模拟分析不同掘进速度下工作面前方应力分布, 结果见表 1。

表 1 不同掘进速度下工作面前方应力集中参数

| 掘进速度/ $(\text{m} \cdot \text{d}^{-1})$ | 峰值位置距迎头/m | 应力集中系数 | 高应力区范围/m |
|----------------------------------------|-----------|--------|----------|
| 4                                      | 8.2       | 1.45   | 5.2      |
| 6                                      | 7.0       | 1.56   | 6.3      |
| 8                                      | 5.8       | 1.68   | 7.5      |
| 10                                     | 4.6       | 1.82   | 9.1      |
| 12                                     | 3.9       | 1.95   | 10.8     |

从表 1 可以看出, 当掘进速度从 4m/d 增加到 12m/d 时, 峰值位置由 8.2m 前移至 3.9m, 应力集中系数由 1.45 升至 1.95, 高应力区范围由 5.2m 扩大到 10.8m。掘进速度越快, 迎头附近煤体积聚弹性能就越高。截割或者支护扰动一打破临界平衡, 在迎头附近就会产生冲击。控制掘进速度是降低应力集中的直接方法。

现场实测也存在同样的趋势。东翼回风巷掘进速度加快之后, 迎头后方 5m 范围内钻屑量平均值由原来的  $3.1\text{kg}/\text{m}$  增加到现在的  $4.2\text{kg}/\text{m}$ , 接近临界值。部分循环钻屑量大于  $4.5\text{kg}/\text{m}$ , 煤炮声出现, 煤体已经处于高应力状态。

### 2.4 冲击地压的“静载累积-动载触发”机制

综合以上分析, 快速掘进条件下的岩爆可归纳为“静荷载积累+动荷载触发”的叠加致灾模式: 静荷载积累:

快速掘进扩大了高应力区范围,峰值前移。在高应力作用下,煤体不断积累弹性能。动载荷触发:顶板破裂释放的振动波或切割扰动打破临界平衡,静、动载荷叠加超过承载极限。

### 3 冲击地压监测预警体系

#### 3.1 钻屑法监测

钻屑法是判定迎头冲击危险的基本方法。在迎头和两帮布置监测钻孔,孔径 42mm、孔深 10m。正常钻屑量为 2.5~3.5kg/m,临界值定为 4.5kg/m。监测频次根据冲击危险等级动态调整:中等冲击危险区域每周一、三、五监测,弱冲击区域每周一、五监测。

检测时要注意钻屑的粒度变化。出现粗颗粒增多、煤炮声、卡钻、吸钻现象时,即使钻屑量没有超过 4.5kg/m,也应该判定为危险。钻屑法操作简单,但是受人工影响较大,需要和微震监测相互校核。检测出超限时立即停止掘进,进行卸压作业。危险未解除前不得恢复截割。为了保证检测的可靠性,每台弹簧秤每周校准一次,称重时钻屑要清除水分和杂物。钻孔角度偏差大于 3 度时,该孔数据作废,重新施工。检测数据由当班验收员现场填写,不能事后补记。当钻屑量连续两个循环接近临界值的时候,即使没有超限也要把检测频次提高到每循环两次,并通知防冲专业人员到场复核。

#### 3.2 微震监测

在作业巷道全域布置 SOS 微震监测系统,系统传感器按照 100m 的间距标准布设,确保其与掘进迎头距离始终控制在 50m 以内。现场监测核心管控三项关键指标,明确临界标准:微震事件频度临界值 23 次/日、每日微震总能量临界值  $1.9 \times 10^5$  J、单次微震事件最大能量临界值  $2.3 \times 10^4$  J。如果微震事件大量集中出现在工作面前方 10~30m 范围内,说明巷道前方高应力区域活动愈发剧烈,冲击地压发生风险明显升高。

#### 3.3 应力在线监测

应力在线传感器统一安装在巷道低帮位置,每组配套布设 2 台传感器,对应施工 7m、11m 两种深度的监测钻孔,传感器组之间间距严格控制在 30m 以内。监测预警临界指标清晰明确:7m 深度监测点应力警戒阈值为 11MPa,11m 深度监测点应力警戒阈值为 14MPa,应力单日变化率警戒值为 2MPa/天。经检测确认存在冲击地压风险后,立即开展钻孔泄压、专项卸压解危作业。

#### 3.4 分级预警与应急响应

结合现场冲击地压风险程度,将预警等级划分为黄色、红色两级。黄色预警为一般风险预警,触发条件包括:钻

屑量超标、单次微震事件能量超过  $5 \times 10^4$  J、矿压变化速率临近警戒值。触发黄色预警后,立刻停止切割作业,疏散工作面 200m 范围内所有无关作业人员,同步施工泄压钻孔,开展卸压降危作业。红色预警为重大风险预警,触发条件包括:巷道围岩应力显现异常剧烈、钻屑量远超临界标准、钻进过程中频繁出现卡钻现象、微震事件能量超过  $1 \times 10^5$  J。触发红色预警后,立即切断施工现场所有设备电源、停止全部施工工序,启动高级别应急处置方案,全面排查处置安全隐患。

### 4 快速掘进防冲技术体系

#### 4.1 掘进速度分级控制

根据巷道冲击危害风险等级,对掘进施工参数实行差异化管控,精准匹配施工进度:低风险、中风险、强风险区域的巷道,单日最大掘进进尺分别不超过 10m、7m、4m,对应的单次循环进尺分别控制为 2.7m、1.9m、1.1m。每完成一次切割作业后,必须第一时间开展临时支护作业,严格将空顶时间控制在 15min 以内,严禁空顶作业。

#### 4.2 大直径钻孔卸压

迎头与两帮施工大直径卸压钻孔,孔径 100~150mm,孔深 20~28m,间距 1.5~2.0m。中等冲击危险区域迎头布置 1 个正中孔和 2 个犄角孔(与巷道走向夹角 30°,孔深 25m),帮部卸压孔滞后迎头不大于 10m。卸压效果采用钻屑法复测检验,复测值小于 3.5kg/m 方可恢复掘进。

留底煤区域需施工底板卸压孔,孔深穿透底煤见矸,间距 2m,孔径 150mm,滞后迎头不超过 15m。

#### 4.3 顶板预裂爆破

针对坚硬顶板区域,采用顶板深孔预裂爆破降低顶板悬露长度与破断能量。钻孔布置在巷道两帮顶板,孔深 30~50m,孔径 75mm,装药量 15~60kg。爆破裂隙可有效降低顶板破断时的能量释放强度,将大能量事件转化为小能量高频释放。

在 23903 材料道煤柱影响区域,于上方采空区施工一排  $\phi 42$  切顶爆破孔,钻孔深度根据煤柱宽度确定,孔间距 10m,降低煤柱承载压力。

#### 4.4 防冲支护与限员管理

支护加固:采用锚网索加可缩性支架联合支护。锚杆选用高延伸率材料,锚索预紧力不低于 250kN。中等冲击危险区域增设液压单体支柱配合铰接顶梁加强支护,单体间距 1m,初撑力不小于 11.5MPa,滞后迎头不超过 60m。锚杆头采用防崩卡圈固定,锚索用 8#铁丝固定于托梁,防止冲击时构件弹射。

人员限制管理:前方 200m(或 300m)范围内,工作

人员不得超过 9 人。采用智能人员限位系统进行实时监控,当人员超过限位时自动报警。冲击危险区物料堆放高度不得超过 0.8m,设备物料应用钢丝绳固定在侧支撑梁上。防撞服和防撞头盔是强制性的个人防护用品。

## 5 实践效果分析

在 23903 材料隧道及切口眼开挖过程中,综合采用上述抗冲击技术体系,取得了显著效果:

提高了监测预警精度:钻屑法、微震法、应力在线法相互验证,形成了“点-线-面”三维监测网络。冲击危害识别的准确性显著提高,预警响应时间缩短至 30min 以内。

影响事件得到有效控制:每月影响事件的频率从实施前的 12 次降至 3 次,单个事件的最大能量从  $1.2 \times 10^4$  J 降至  $3 \times 10^4$  J 以内,未发生碰撞伤害事故。

掘进效率与安全的统一:在保证安全的前提下,每月进尺稳定在 180~200m,既缓解了采掘连接的压力,又避免了快速掘进带来的灾害风险增加。

## 6 结论

(1) 快速掘进导致工作面前方支护压力峰值向迎头偏移,应力集中系数增大,高应力场范围扩大,加速了矿体弹性能的积累,冲击地压风险随掘进速度的增加呈非线性增加。

(2) 在快速掘进条件下,冲击地压的诱发机制可归纳为“静荷载积累+动荷载触发”的叠加致灾模式。顶板垮落所产生的动荷载是触发井喷的关键动力源。

(3) 建立“钻屑法-微震-应力在线”三位一体的监测预警系统,实施分级预警和应急响应机制,可有效识别冲击隐患,指导现场风险规避。

(4) 以掘进速度分级控制、大直径钻孔卸压、顶板预裂爆破、防冲支护和人员限制管理为核心的防冲系统,

在 23903 材料巷道和切眼实践中取得了较好的效果,实现了安全掘进与施工效率的和谐统一。

(5) 在不同的矿山条件下,岩屑体积临界值、微震能量阈值和掘进参数应根据现场试验结果确定,不能简单应用。未来应进一步研究智能监测预警技术和自动化泄压设备的应用,提升防撞系统的智能化水平。

## 【参考文献】

- [1]张宁宁.掘进巷道卸压防冲技术研究与应用[J].煤炭科技,2026,47(2).
- [2]王磊.掘进巷道分区特征多参量联合监测与防冲实践[J].能源与节能,2025(2):103-106.
- [3]贾策,李胜,范超军,等.冲击地压“远-近”场监测预警系统开发与应用[J].安全与环境学报,2025,25(6):2153-2165.
- [4]袁腾飞,闫才,孔震,等.复杂高应力区掘进工作面冲击地压发生机理与防治技术研究[J].煤矿现代化,2024,33(5):66-72.
- [5]门鸿,张亚潮,严斌.特厚煤层临空掘进巷道围岩应力演化与防治技术研究[J].陕西煤炭,2025,44(6):51-56.
- [6]李家卓,闫康行,王洪涛,等.考虑损伤效应的开拓巷道冲击地压发生机理及防控技术体系[J].采矿与安全工程学报,2025,42(1):137-146.
- [7]张明,涂敏,姜福兴,等.基于巷道支承应力转移的自发型冲击失稳与防控研究[J].采矿与安全工程学报,2022,39(4):720-730.
- [8]王雪涛,胡国建,杨伟,等.冲击地压矿井煤巷掘进速度研究[J].陕西煤炭,2024,43(5):12-18.

作者简介:滑柱轮(1986—),男,汉族,山东省济宁市微山县人,工程师,本科,毕业于中国矿业大学采矿工程专业,研究方向为软岩快速掘进,冲击地压矿井支护。