

赵斌,吕坤,李云鹏,等.厚硬顶板破断诱发矿震机制及减震技术[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2026,45(2):155-163. DOI:10.11956/j.issn.1008-0562.20250485  
ZHAO Bin, LYU Kun, LI Yunpeng, et al. Mechanism of mine seismicity induced by thick and hard roof failure and mitigation techniques[J]. Journal of Liaoning Technical University(Natural Science), 2026, 45(2): 155-163. DOI: 10.11956/j. issn. 1008-0562.20250485

## 厚硬顶板破断诱发矿震机制及减震技术

赵斌, 吕坤, 李云鹏, 何吉清, 马傲然

(煤炭科学技术研究院有限公司, 北京 100013)

**摘要:** 为探究诱发矿震的因素,降低矿震发生的频次及程度,以鄂尔多斯某矿为工程背景,结合现场评估、理论分析、方案设计、现场实测及工业性试验,分析厚硬顶板破断诱发矿震机制,提出“顺槽顶板水力压裂+定向长钻孔水力压裂+地面深孔爆破”协同卸压减震技术。研究表明:厚硬顶板工作面矿震诱发因素包括工作面埋深、地质构造、地层岩性变化、推进速度、周期来压等,当多个因素叠加时,矿震诱发频率升高,采取卸压减震技术后,工作面平均周期来压步距由 17.32 m 缩短至 14.81 m,减少 14.49%,月度微震事件频次由 185 次增加至 1 902 次,小能量微震事件占比达到 73.2%,呈现“高频+低能”的分布规律,卸压减震效果良好,极大降低了矿震发生的风险程度。研究结论为类似条件下的矿震治理提供参考。

**关键词:** 厚硬顶板; 矿震; 协同卸压; 卸压减震; 立体治理

中图分类号:TD324

文献标志码:A

文章编号:1008-0562(2026)02-0155-09

## Mechanism of mine seismicity induced by thick and hard roof failure and mitigation techniques

ZHAO Bin, LYU Kun, LI Yunpeng, HE Jiqing, MA Aoran  
(China Coal Research Institute, Beijing 100013, China)

**Abstract:** In order to investigate the factors inducing mine seismicity and reduce the frequency and degree of mine seismicity, this study focuses a coal mine in the Ordos region. By integrating field evaluation, theoretical analysis, scheme design, in-situ measurement, and industrial-scale testing, the mechanism of mining-induced seismicity triggered by thick-hard roof fracture was analyzed, and a cooperative pressure-relief and seismicity-reduction technology combining “hydraulic fracturing in roadway roof, directional long-hole hydraulic fracturing, and surface deep-hole blasting” was proposed. The research results show that the inducing factors of mining-induced seismicity in thick-hard roof working faces include mining depth, geological structures, lithological variations, advance rate, periodic weighting, etc. When multiple factors overlap, the frequency of mining-induced seismicity increases significantly. After implementing the pressure-relief technology, the average periodic weighting interval of the working face was reduced from 17.32 m to 14.81 m, a decrease of 14.49%. The monthly frequency of microseismic events increased from 185 to 1 902, with small-energy microseismic events accounting for 73.2%, exhibiting a “high-frequency, low-energy” distribution pattern. The pressure-relief and seismicity-reduction technology demonstrated excellent effectiveness, significantly lowering the risk level of mining-induced seismicity. The research conclusions provide a reference for mine earthquake control under similar conditions.

**Keywords:** thick and hard roof; mine seismicity; coordinated pressure relief; pressure relief and shock mitigation; three-dimensional governance

收稿日期: 2025-11-14 修回日期: 2025-12-13 接受日期: 2025-12-26 责任编辑: 张雯

基金项目: 国家自然科学基金项目(52404215; 52474230); 煤科院科技发展基金项目(2024JC-05; 2024JC-06; 2024QN-04)

作者简介: 赵斌(1993-),男,山西运城人,硕士,助理研究员,主要从事矿山压力与岩层控制方面的研究。E-mail: 274938407@qq.com

## 0 引言

近年来,中国各大矿区浅部煤炭资源日益枯竭,矿井正以每年10~25 m的开采强度向深部区域发展<sup>[1]</sup>。随着矿井开采深度和开采强度的逐年增加,由采动影响引发的矿震等系列灾害愈发严重,对矿井的安全高效生产以及地面居民的生活造成了严重的威胁<sup>[2-4]</sup>,矿震问题仍是困扰矿井安全高效生产的难题之一。

针对煤矿矿震发生的机制及防控技术,窦林名等<sup>[5]</sup>通过理论分析、数值模拟和现场调研等方法,分析了矿震诱发冒顶的破坏特征与影响因素,认为高静载、强扰动及支护强度是影响矿震的主控因素。罗生虎等<sup>[6]</sup>采用理论分析的方法,分析了矿震的力学机理与影响因素,提出实际工程应基于煤岩结构和力学响应的内在关联,采用“调结构、控响应”的理念建立防控措施。周坤友等<sup>[7]</sup>通过调研分析、数值模拟的方法对煤岩动力失稳特征进行分析,提出重建主被动支护和加强卸压的防治方法。杨金诺等<sup>[8]</sup>采用理论分析和数值模拟的方法模拟矿震诱发冲击地压的过程,认为当巷道受到静载应力超过临界塑性区时会诱发冲击地压。张田录<sup>[9]</sup>以海石湾煤矿为工程背景,通过数值模拟、理论分析等方法对强矿震的震源机制和主控因素进行分析,认为工作面坚硬顶板岩层、底板薄岩层、保护层与被保护层间岩层厚度变化等对强矿震事件发生存在显著影响。GONG等<sup>[10]</sup>、ZHANG等<sup>[11]</sup>通过现场调研和理论分析的方法对典型矿井矿震现象进行整理归纳,发现砂岩层破断是诱发矿震的主要影响因素。MENDECKI等<sup>[12]</sup>、WEI等<sup>[13]</sup>通过理论建模和数值模拟,分析矿井开采全生命周期内“覆岩-地表”的联动性,认为覆岩运动和地表沉降特征存在明显联系。杨耀等<sup>[14]</sup>结合理论分析和现场实测反演强震事件发生前后覆岩应力场分布特征,解析强矿震应力触发机制,认为巨厚覆岩剧烈运动并瞬时破断释放能量是强震频发的主要原因。邹俊鹏等<sup>[15]</sup>借助PFC<sup>2D</sup>模拟煤层开采过程中上覆多关键层的破坏过程,分析其采动应力场变化规律,推导了亚关键层破断的最大拉应力计算公式。

针对矿震发生的机理及防控技术,现有研究多聚焦于矿震诱因分析、围岩结构控制优化以及工程防治,且治理措施不系统,通常仅针对某关键岩层进行卸压处理,卸压层位选取存在一定的盲目性,卸压效果不理想,尤其在特厚煤层领域

的相关研究极少。作者以鄂尔多斯某矿为研究背景,通过“现场评估+理论分析+方案设计+工业性试验+效果评价”相结合的手段,分析矿震发生的宏观特征,和诱发矿震的影响因素,通过微震监测和关键层位计算,确定震源分布层位,提出以“控制推进速度+大范围顶板层位弱化”为核心的“井上下协同卸压、高中低位立体治理”措施,为类似条件矿井提供理论借鉴。

## 1 矿井概况

某矿位于内蒙古自治区鄂尔多斯市准格尔旗境内,61盘区为首采盘区,盘区内布置了9个工作面,其中6个工作面已回采完毕(61601、61605、61607、61617、61610、61612工作面),2个掘进工作面(61616、61609工作面),2个回采工作面(61608工作面、61603工作面备采)。盘区煤层平均厚度约为27.23 m,采用综采放顶煤回采工艺,采放比为1:4.4,顶板管理采用全部垮落法,61盘区采掘工程平面布置见图1。

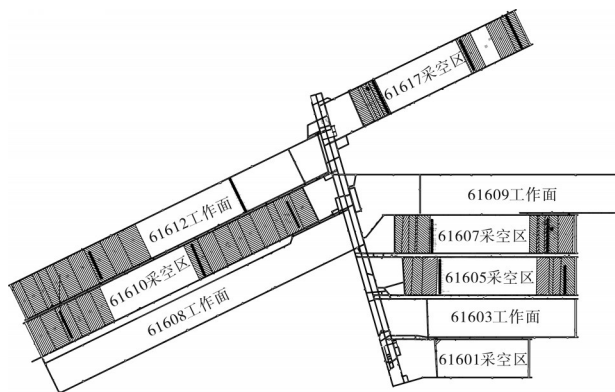


图1 61盘区采掘工程平面

Fig.1 mining and excavation engineering plan of panel 61

## 2 大能量有感矿震事件显现特征

矿井开采过程中,首采面61601、61610及61617工作面回采期间矿压相对稳定,未发生明显动压异常显现,而61605、61607及61612工作面回采期间矿压显现较为强烈,主要表现在以下方面:一是超前50 m范围煤炮震顶频繁,多次发生超前段巷道震顶伴随瞬间底鼓现象,底鼓量为100~500 mm,伴随部分锚杆(索)托盘崩落、退锚失效;二是超前支架架间底鼓及顶板下沉,多次压死超前支架,影响工作面正常推采;三是单元支架工作阻力明显增加,超前50 m范围内单元支架工作阻力一直保持在30 MPa以上;四是两帮移近量达2.5~3.0 m,导致电缆单轨吊无法正常前移,井下显现情况见图2。



图2 井下矿压显现情况

Fig.2 manifestation of underground mining pressure

对上述矿震事件进行分析,发现矿震事件发生时普遍存在以下特征:工作面埋深较大,北翼工作面埋深接近400 m,南翼工作面埋深接近600 m;工作面上方存在多层单层厚度超过10 m的砂岩层,且部分砂岩单轴抗压强度超过47 MPa;矿震事件发生时,工作面推采速度均超过4.0 m/d,且工作面多存在日均推进速度、日均产量不均匀增减情况;工作面遇断层(落差超过15 m)、挠曲带及其他构造异常区时,矿震事件发生概率增加;矿震事件多发生在工作面周期来压期间;工作面相邻侧存在单个或多个采空区;工作面上方各地层岩性及厚度突然发生变化区域易诱发矿震;微震监测事件波形呈现出频率低、振幅大、持续时间长等特点,在主要能量到达前有微小的前兆信号,频谱连续且存在明显尖峰,不同方位的监测点P波会记录到压缩和膨胀两种初动方向。

### 3 大能量有感矿震发生机制

#### 3.1 矿震发生机理

矿震是煤矿开采过程中的岩层震动现象,在采动影响下工作面上方厚硬顶板破断易诱发矿震。低位顶板破断见图3。随着工作面向前开采,工作面上覆低位基本顶发生初次、周期弯曲变形破断,伴随岩层震动造成低位岩层矿震现象,此时震源

点距离采场空间较近,产生的震动波容易对采场区域产生强烈影响。

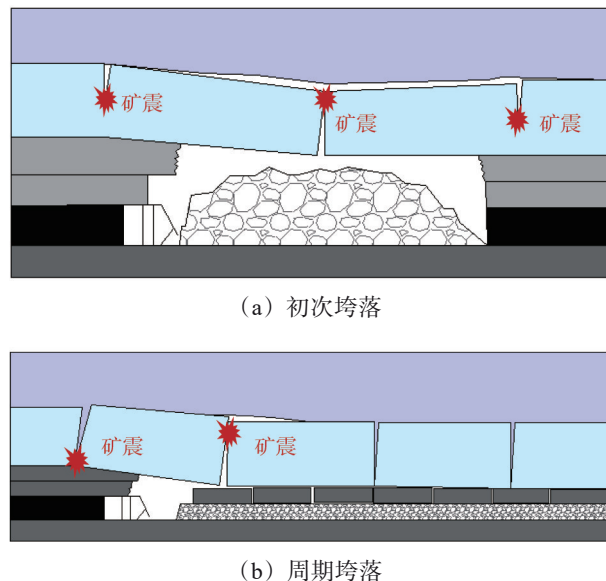


图3 低位顶板破断

Fig.3 low level roof broken

高位顶板破断见图4。伴随工作面采空区面积的逐步扩大,岩层破坏向高位岩层延伸,高位关键层及其控制的岩层逐渐变形破断,造成岩层震动。此时震源位于远场高位岩层时,产生的震动波对工作面扰动较小,但易对地面建筑物造成晃动影响,尤其是地表黄土层厚度较小的区域<sup>[16]</sup>,地面建筑物晃动更为强烈。

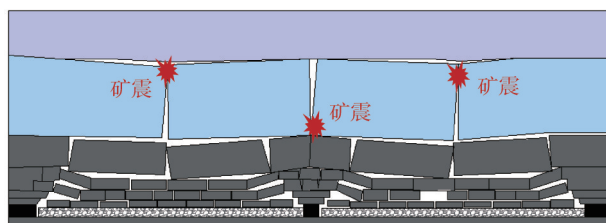


图4 高位顶板破断

Fig.4 high level roof fracture

按固支梁计算低位基本顶初次破断时释放的弹性能<sup>[17-20]</sup>为

$$U_{dc} = \frac{\sqrt{2} b_{dc} h_d^2 R_t^{2.5}}{24 \sqrt{q_{dc}} E_d}, \quad (1)$$

式中:  $q_{dc}$  为基本顶初次破断时上覆岩层载荷;  $E_d$  为基本顶的弹性模量;  $R_t$  为基本顶岩层的抗拉强度;  $h_d$  为基本顶的厚度;  $b_{dc}$  为基本顶初次破断时的悬空跨度。

按悬臂梁计算低位基本顶周期破断时释放的弹性能<sup>[17-21]</sup>为

$$U_{dz} = \frac{b_{dz} h_d^2 R_t^{2.5}}{6\sqrt{3} \sqrt{q_{dz}} E_d}, \quad (2)$$

式中:  $q_{dz}$  为基本顶周期破断时上覆岩层载荷;  $b_{dz}$  为基本顶周期破断时的悬空跨度。

高位厚硬顶板初次破断释放的弹性能<sup>[17-21]</sup>为

$$U_{gc} = \frac{q_{gc}^2 L_{gc}^5 b_{gc}}{48 E_g h_g^3}, \quad (3)$$

式中:  $q_{gc}$  为基本顶初次破断时上覆岩层载荷;  $E_g$  为关键层的弹性模量;  $h_g$  为关键层厚度;  $b_{gc}$  为基本顶周期破断时的悬空跨度;  $L_{gc}$  为关键层初次破断步距。

高位厚硬顶板周期破断释放的弹性能<sup>[17-21]</sup>为

$$U_{gz} = \frac{3q_{gz}^2 L_{gz}^5 b_{gz}}{2E_g h_g^3}, \quad (4)$$

式中:  $q_{gz}$  为基本顶周期破断时上覆岩层载荷;  $b_{gz}$  为基本顶周期破断时的悬空跨度;  $L_{gz}$  为关键层周期破断步距。

由式(1)~式(4)可知, 顶板破断释放能量大小主要取决于顶板关键岩块的厚度、硬度以及顶板的悬臂长度。

### 3.2 典型矿震发生概况

2021年7月21日, 61617工作面回采过程中发生一起2.1级矿震事件(未安装监测设备, 震源点具体位置未知), 矿震事件发生时在采的61617工作面两巷无顶板下沉、鼓帮、底鼓现象, 井下矿

压显现正常, 地表无明显塌陷痕迹, 但地表建筑物有轻微晃动。

2024年1月12日, 61607工作面回采期间发生一起2.1级矿震事件, 微震监测系统显示事件能量为12.223 kJ。震源点位于相邻侧的61605工作面采空区, 平面位置距离正在开采的61607工作面主运顺槽约89 m, 超前工作面150 m, 垂向位置位于煤层底板上方148.59 m处, 61607工作面轻微震感, 巷道无破坏, 设备无损坏, 地面有轻微震感。

2025年8月24日, 61612工作面发生一起1.6级矿震事件, 微震监测系统监测到该起矿震事件能量为8.962 kJ, 震源点位于61612工作面前方120.70 m, 距离辅运顺槽161.63 m, 距离工作面底板高度为220.38 m, 工作面仅有轻微震感, 巷道无破坏, 设备无损坏, 但地面建筑物晃动明显。

### 3.3 矿震诱发主控因素分析

#### (1) 岩层厚度变化

以61612工作面为例, 该工作面煤层底板至下石河子组岩层, 两钻孔岩层岩性及地层厚度差距不大, 但工作面底板164 m以上岩层差异较为明显。工作面走向地层岩性变化见图5。沿工作面推进方向选取0902、0702、0603、0503及0404钻孔, 分析工作面上覆岩层厚度变化情况。0702钻孔主要为砂岩、泥岩互层, 其中砂岩占比73.5%, 最厚砂岩层厚度为46 m, 0603钻孔则以砂岩为主, 砂岩占比94.8%, 砂岩层最大厚度为138.92 m。

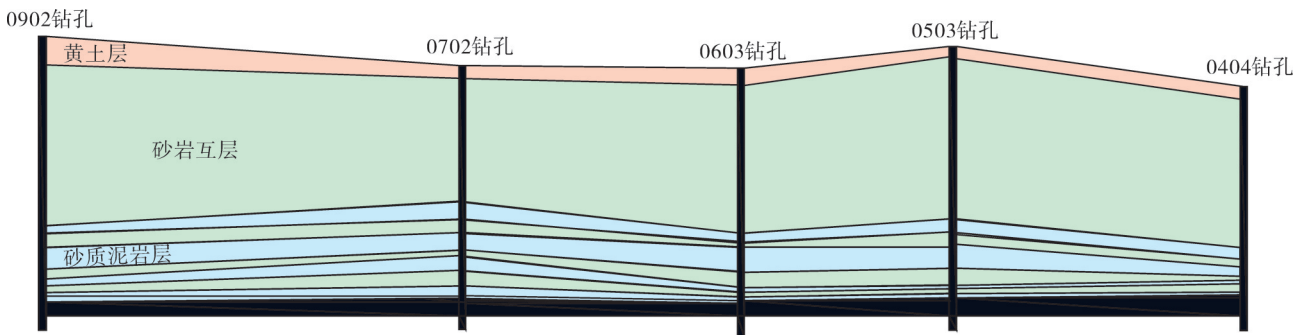


图5 61612工作面走向地层岩性变化

Fig.5 changes in lithology of the strata along the strike of 61612 working face

根据现场微震监测情况可知, 微震事件主要分布在底板以上200 m内(标高682~882 m), 底板以下微震事件仅有9次, 占比为0.56%。标高682~782 m的微震事件有1 246次(底板以上66.52 m处存在厚度为13.38 m的粗砂岩, 底板以上82.7 m处存在厚度为23.13 m的粗砂岩), 占比达到77.92%。标高782~882 m的微震事件有299次(底板以上137.1 m处存在一层厚度为13.62 m的细

砂岩, 底板以上189.1 m处存在一层厚度为29.95 m的细砂岩), 占比达到18.71%。标高大于882 m的微震事件仅有45次(存在多层单层厚度超20 m的泥岩-砂岩互层), 占比为2.81%。微震事件多集中分布在关键岩层附近, 关键层位计算结果见表1, 其中厚度为13.38 m的粗砂岩为亚关键层一, 厚度为23.13 m的粗砂岩为亚关键层二, 厚度为29.95 m的细砂岩为亚关键层三。

表 1 关键层位计算  
Tab.1 calculation of key strata

| 序号 | 岩性   | 厚度/m  | 序号 | 岩性   | 厚度/m  |
|----|------|-------|----|------|-------|
| 1  | 煤    | 16.78 | 15 | 泥岩   | 2.80  |
| 2  | 碳质泥岩 | 0.62  | 16 | 粗砂岩  | 23.13 |
| 3  | 粗砂岩  | 2.10  | 17 | 泥岩   | 6.27  |
| 4  | 泥岩   | 5.80  | 18 | 粗砂岩  | 3.41  |
| 5  | 粗砂岩  | 5.80  | 19 | 泥岩   | 6.90  |
| 6  | 泥岩   | 4.08  | 20 | 粗砂岩  | 3.30  |
| 7  | 碳质泥岩 | 0.30  | 21 | 砂质泥岩 | 11.39 |
| 8  | 泥岩   | 0.40  | 22 | 细砂岩  | 13.62 |
| 9  | 煤    | 1.00  | 23 | 砂质泥岩 | 13.24 |
| 10 | 泥岩   | 0.25  | 24 | 粗砂岩  | 3.82  |
| 11 | 碳质泥岩 | 1.17  | 25 | 砂质泥岩 | 21.32 |
| 12 | 粗砂岩  | 5.10  | 26 | 细砂岩  | 29.95 |
| 13 | 泥岩   | 8.70  | 27 | 砂质泥岩 | 39.74 |
| 14 | 粗砂岩  | 13.38 |    |      |       |

随着工作面向前推进,上部高位岩层由砂、泥岩互层逐步演化为以砂岩层为主的坚硬岩层。2024年1月12日矿震事件显示,工作面上覆山西组砂岩厚度从初采期的10.14 m增至34.00 m,与6号煤层的层间距从56 m增大至78 m,高位砂岩层的周期破断诱发矿震事件。

(2) 周期来压  
据不完全统计,61612、61617及南翼61610工作面回采期间分别发生大能量有感矿震40次、23次、5次,其中周期来压期间分别发生24次、14次、3次。

(3) 推采速度  
大能量有感矿震事件发生频次与工作面推采速度密切相关,事件发生时,工作面推进速度均存在不同程度的增减现象。以2025年8月61612工作面矿震为例,8月5日工作面推进速度为2.55 m/d,

8月6日增加至6.55 m/d,推进速度增幅156.86%,8月7日又减少至3.85 m/d,推进速度降幅41.22%,8月13日工作面推进速度为6.75 m/d,8月14日至8月15日工作面推进速度稳定在4.8 m/d,而8月16日工作面推进速度降至了3.3 m/d,最大降幅51.11%。

(4) 其他因素  
工作面“见方”、过断层、构造异常区、应力集中区等区域也有概率诱发矿震事件。

4 防震减震治理措施

4.1 治理方案

研究发现,矿井发生矿震的直接原因是开采速度过快,造成上覆坚硬顶板损伤时间不充分。每次周期来压时,悬顶结构的长度与面积增大,使得顶板积聚的能量显著提升。为降低矿震发生次数及危害程度,同时维持接替期间的正常生产,须采取顶板预裂卸压措施,提前处理顶板,通过人工干预的方式改变来压步距,弱化悬顶结构并提前释放能量,从源头上减少矿震发生频次及危害程度。通过现场评估及关键层计算,提出“煤矿井下顺槽顶板水力压裂+定向长钻孔分段水力压裂+地面深孔爆破”为一体的技术体系,研发井上下协同卸压、高中低位立体治理的关键技术。

(1) 低位顶板水力压裂技术  
根据现场微震监测及关键层位计算可知,工作面上方的粗砂岩层(厚度为8.48 m)、粗砂岩层(厚度为13.91 m)、砂质泥岩层(厚度为12.19 m)、粗砂岩层(厚度为10.14 m)、砂质泥岩层(厚度为14.07 m)是需要重点治理的岩层,钻孔的终孔位置须进入厚度为14.07 m的砂质泥岩层中。

61607工作面低位顶板水力压裂方案见图6。

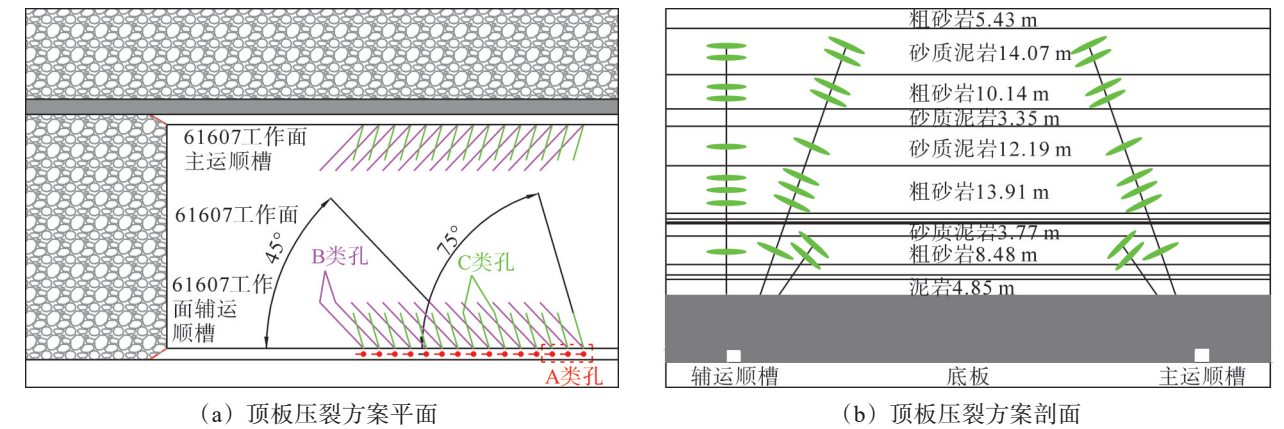


图6 顺槽顶板水力压裂钻孔布置  
Fig.6 layout plan of hydraulic fracturing boreholes in gateway roof

工作面设计 A、B、C 三类钻孔, A 类钻孔压裂时间不低于 30 min, 压力不低于 30 MPa, 钻孔间距为 15 m, 钻孔深度为 106 m, 钻孔倾角为 60°, 钻孔方位角朝工作面采空区方向, 工作面侧走向夹角为 0°; B 类钻孔压裂时间不低于 30 min, 压力不低于 30 MPa, 钻孔间距为 15 m, 钻孔深度为 106 m, 钻孔倾角为 50°, 钻孔方位角朝工作面采空区方向, 工作面侧走向夹角 45°; C 类钻孔压裂时间不低于 30 min, 压力不低于 30 MPa, 钻孔间距为 15 m, 钻孔深度为 41 m, 朝工作面采空区方

向, 工作面侧走向夹角 75°。

(2) 中位顶板定向长钻水力压裂技术

61607 工作面中位顶板定向长钻水力压裂方案见图 7。定向钻压裂钻场位于 61607 工作面的回撤通道, 累计施工低位钻孔 3 个(编号为 H1-1、H1-2、H1-3), 处理工作面上方 70 m 处厚度为 10.14 m 的粗砂岩层, 施工高位钻孔 3 个(编号为 H1-4、H1-5、H1-6), 处理工作面上方 130 m 处厚度为 15.67 m 的细砂岩。

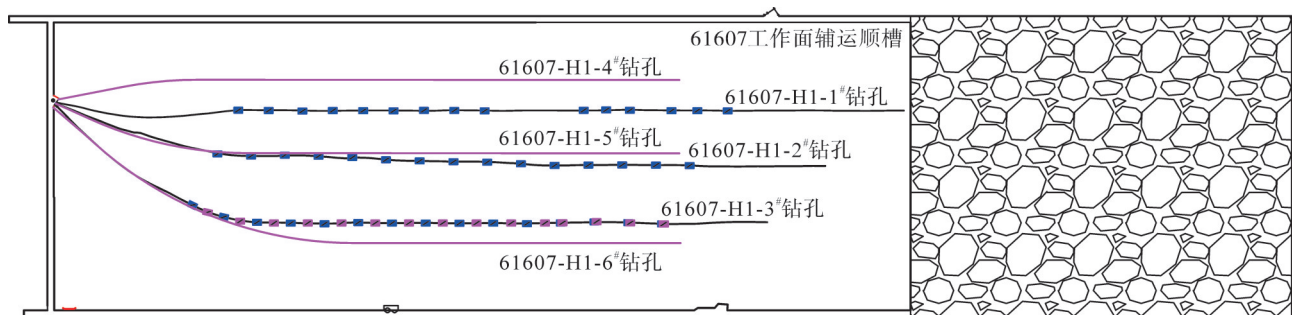


图 7 定向长钻孔水力压裂示意

Fig.7 schematic of directional long-hole hydraulic fracturing

(3) 高位顶板地面深孔爆破技术

爆破孔优化参数见表 2。

61607 工作面高位顶板地面深孔爆破方案见图 8,

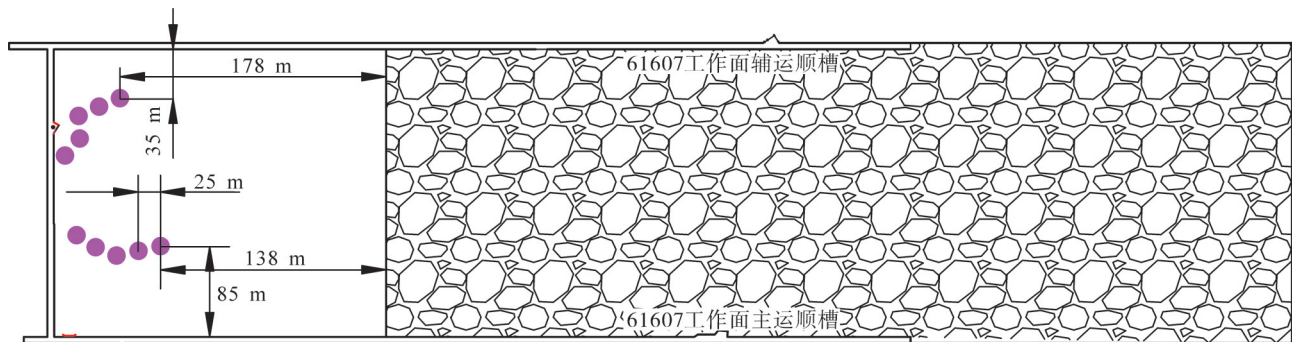


图 8 地面深孔爆破布置

Fig.8 layout of ground deep hole blasting

表 2 61607 工作面爆破孔优化参数

Tab.2 optimized parameters for blasting holes for 61607 working face

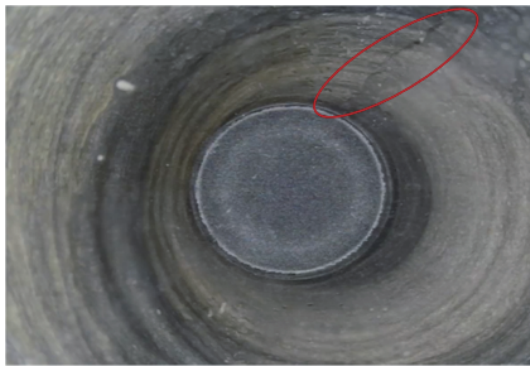
| 钻孔编号 | 孔深/m  | 孔径/mm | 装药质量/kg | 装药长度/m | 封孔长度/m |
|------|-------|-------|---------|--------|--------|
| 1    | 180   | 170   | 1 440   | 120    | 60     |
| 2    | 182   | 170   | 1 464   | 122    | 60     |
| 3    | 185   | 170   | 1 488   | 124    | 61     |
| 4    | 185   | 170   | 1 488   | 124    | 61     |
| 5    | 189   | 170   | 1 512   | 126    | 63     |
| 6    | 156   | 170   | 1 248   | 104    | 52     |
| 7    | 164   | 170   | 1 320   | 110    | 54     |
| 8    | 170   | 170   | 1 368   | 114    | 56     |
| 9    | 179   | 170   | 1 440   | 120    | 59     |
| 10   | 185   | 170   | 1 488   | 124    | 61     |
| 总计   | 1 775 |       | 14 256  | 1 188  | 587    |

地面关键岩层爆破设计 10 个钻孔, 钻孔深度为 220 m, 钻孔间距为 25 m。沿工作面推进方向, 靠近辅运顺槽侧, 离工作面最近的爆破孔距工作面 178 m, 距辅运顺槽为 35 m; 靠近主运顺槽侧, 离工作面最近的爆破孔距工作面 138 m, 距主运顺槽 85 m, 爆破孔单孔装药量为 1.2~1.4 t, 处理工作面上方累厚 148.25 m 的主关键岩层。

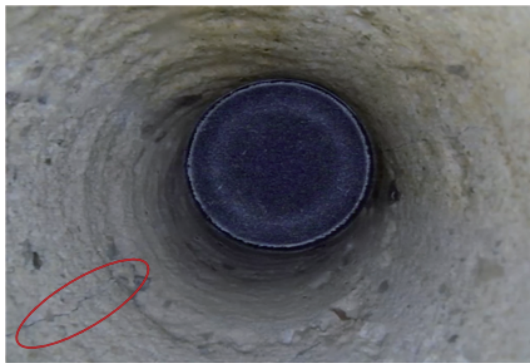
4.2 效果分析

(1) 钻孔窥视

通过观测钻孔压裂后孔壁岩体裂隙分布情况(见图 9)可知, 压裂后孔壁出现明显的裂隙扩展, 围岩的完整性遭到明显破坏。



(a) 1#观测孔



(b) 2#观测孔

图9 钻孔窥视结果

Fig.9 drilling inspection results

## (2) 周期来压

61607工作面压裂前后来压步距见图10。工作面进入压裂区域前累计周期来压37次,周期来压步距平均值为17.32 m,压力持续长度平均值为8.56 m,进入压裂区域之后累计周期来压37次,周期来压步距平均值为14.81 m,压力持续长度平均值为7.66 m。

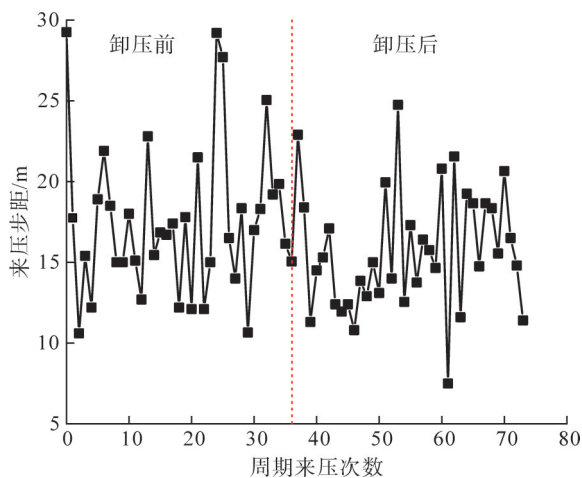


图10 工作面压裂前后来压步距

Fig.10 pressure step distance before and after fracturing on the working face

将61607工作面与相邻61605工作面相同进尺区间内来压情况进行对比,见图11。61607工作面平均来压步距为16.64 m,61605工作面平均来压步距为22.08 m。采取压裂措施后,工作面周期来压步距减小5.44 m,降幅达到24.63%。支架压力显现变化见图12。61607工作面来压时最大压力显现平均值为48.76 MPa,而61605工作面为49.9 MPa,压力减小1.14 MPa,支架动载系数也由1.66降至1.63。

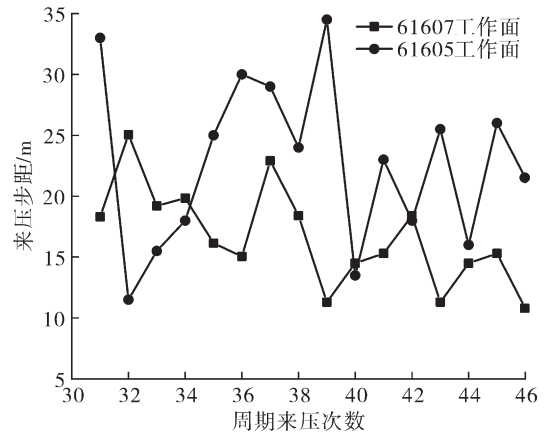


图11 相邻面来压步距

Fig.11 pressure step distance between adjacent working faces

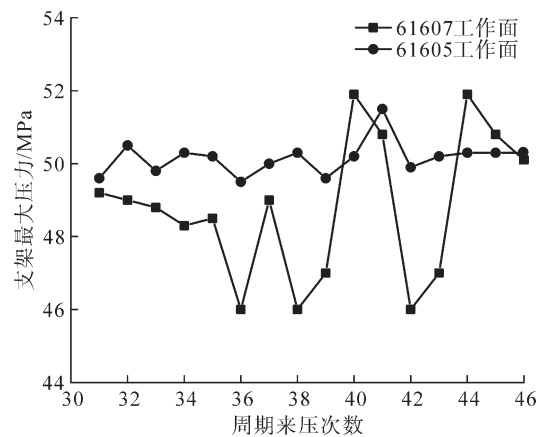


图12 相邻面支架压力

Fig.12 support pressure between adjacent working faces

## (3) 支架阻力

工作面未采取卸压减震措施前,支架工作阻力集中分布在中部区域及靠近辅运顺槽侧区域,且支架最大工作阻力超过50 MPa。采取卸压减震措施后,液压支架工作阻力明显分散,应力得到有效释放,支架最大工作阻力低于50 MPa。

## (4) 微震监测

选取2023年8月至2024年1月共计6个月的微震数据进行分析,微震频次分布见图13。工作面采取“常规钻压裂+定向钻压裂+地面深孔爆破”措施后,微震事件发生频次大幅增加,主要以低

能量微震事件为主。微震事件月度发生总频次从8月份的185次增至1 902次,增幅达9.28倍,其中低能量微震事件由58次增加至1 342次,增幅达22.14倍,呈现出典型的“高频+低能”分布特征。

从单日数据看,采取卸压减震措施后,监测到工作面最大微震能量为9.955 kJ,最小微震能量为3.906 kJ,能量低于8.000 kJ的微震事件占比达到73.2%,呈现出明显的“低能”分布规律。

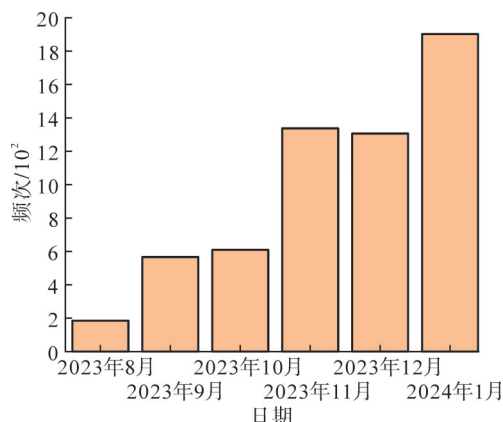


图13 微震频次分布

Fig.13 distribution of microseismic frequency

#### (5) 现场验证

现场情况见图14。工作面在采取卸压减震措施后,超前50 m范围内底鼓及两帮移进得到有效控制,顺槽断面及煤帮均无明显变形,锚杆(索)退锚失效现象减少,顶板未出现明显下沉,同时工作面大震顶现象也有所缓解。



(a) 工作面顺槽



(b) 煤帮部

图14 现场观测

Fig.14 on-site observation

## 5 结论

(1) 顶板破断诱发的矿震具有明显的宏观破坏特征,高静载应力、强动载扰动和工作面支护强度是此类矿震的主要影响因素。

(2) 随着采空区面积的逐步扩大,矿震诱发风险持续上升,矿震事件频次相应增加,震源主要分布在工作面上覆多层厚硬关键岩层内。

(3) 基于顶板破断诱发矿震机制,提出针对工作面上覆不同层位组合关键岩层的断顶卸压方案,形成了“井上下协同卸压、高中低位立体治理”的关键技术。

### 参考文献(References):

- [1] 袁亮. 我国深部煤与瓦斯共采战略思考[J]. 煤炭学报, 2016, 41(1): 1-6.  
YUAN Liang. Strategic thinking of simultaneous exploitation of coal and gas in deep mining[J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(1): 1-6.
- [2] 赵斌, 王寅, 赵善坤, 等. 特厚煤层综放工作面矿震诱发机理及防控技术: 以龙王沟煤矿为例[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(29): 12451-12457.  
ZHAO Bin, WANG Yin, ZHAO Shankun, et al. Mechanism and prevention and control technology of mine earthquake in fully mechanized top coal caving face in extra thick seam: taking Longwanggou coal mine as an example[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(29): 12451-12457.
- [3] 李江, 赵斌. 特厚煤层工作面强矿压显现及治理技术研究[J]. 煤炭工程, 2025, 57(4): 75-81.  
LI Jiang, ZHAO Bin. Research on strong mine pressure behavior and the control technology in an extra-thick coal seam working face [J]. Coal Engineering, 2025, 57(4): 75-81.
- [4] 曹安业, 窦林名, 白贤栖, 等. 我国煤矿矿震发生机理及治理现状与难题[J]. 煤炭学报, 2023, 48(5): 1894-1918.  
CAO Anye, DOU Linming, BAI Xianxi, et al. State-of-the-art occurrence mechanism and hazard control of mining tremors and their challenges in Chinese coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2023, 48(5): 1894-1918.
- [5] 窦林名, 马小涛, 边戈, 等. 深部厚顶煤巷道矿震诱发冒顶复合灾害机理及其控制[J]. 采矿与安全工程学报, 2025, 42(1): 85-96.  
DOU Linming, MA Xiaotao, BIAN Ge, et al. Mechanism and control of roof collapse induced by mining tremors in deep thick-top-coal roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2025, 42(1): 85-96.
- [6] 罗生虎, 闫壮壮, 解盘石, 等. 基于结构动力学理论的矿震机理分析[J]. 煤炭学报, 2025, 50(6): 2881-2891.  
LUO Shenghu, YAN Zhuangzhuang, XIE Panshi, et al. Analysis of mining earthquakes mechanism based on structural dynamics theory [J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(6): 2881-2891.
- [7] 周坤友, 窦林名, 曹安业, 等. 矿震诱发高应力巷道厚顶煤动力失

- 稳机制[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(10): 25-35.
- ZHOU Kunyou, DOU Linming, CAO Anye, et al. Mechanisms behind mine earthquake-induced dynamic instability of thick top coals in high-stresses roadways[J]. Coal Geology & Exploration, 2024, 52(10): 25-35.
- [8] 杨金诺, 李国墙, 张军徽. 矿震诱发冲击地压机理研究[J]. 煤炭科技, 2024, 45(4): 126-133, 140.
- YANG Jinnuo, LI Guoqiang, ZHANG Junhui. Study on mechanism of rock burst induced by mine quake[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2024, 45(4): 126-133, 140.
- [9] 张田录. 非煤保护层工作面能量应力演化规律及顶底板结构对强矿震的影响[J]. 煤矿安全, 2024, 55(6): 126-133.
- ZHANG Tianlu. Study on energy stress evolution law of non-coal protective layer working face and effect of roof and floor structure on strong mine earthquake[J]. Safety in Coal Mines, 2024, 55(6): 126-133.
- [10] GONG Y Q, GUO G L, WANG L P, et al. Numerical study on the surface movement regularity of deep mining underlying the super-thick and weak cementation overburden: a case study in western China[J]. Sustainability, 2022, 14(3): 1855.
- [11] ZHANG Q, ZOU J P, CHI M B, et al. Strong mining-induced earthquakes produced by the fracturing of key strata during deep coal mining[J]. International Journal of Geomechanics, 2024, 24(5): 04024080.
- [12] MENDECKI M J, SZCZYGIEL J, LIZUREK G, et al. Mining-triggered seismicity governed by a fold hinge zone: the Upper Silesian Coal Basin, Poland[J]. Engineering Geology, 2020, 274: 105728.
- [13] WEI J B, WANG S M, SONG S J, et al. Experiment and numerical simulation of overburden and surface damage law in shallow coal seam mining under the gully[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2022, 81(5): 207.
- [14] 杨耀, 曹安业, 刘耀琪, 等. 联合震源破裂信息反演解析巨厚覆岩强矿震应力触发机制[J]. 煤炭学报, 2025, 50(4): 2077-2090.
- YANG Yao, CAO Anye, LIU Yaoqi, et al. Stress triggering mechanism of strong mine earthquake in huge thick strata revealed by inversion of joint source rupture information[J]. Journal of China Coal Society, 2025, 50(4): 2077-2090.
- [15] 邹俊鹏, 周祝, 焦玉勇, 等. 深部采煤诱发矿震的覆岩关键层破断特征研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(增刊1): 3140-3150.
- ZOU Junpeng, ZHOU Zhu, JIAO Yuyong, et al. On the fracture characteristics of overlying key strata related to the seismicity under deep coal mining[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(Suppl.1): 3140-3150.
- [16] 窦林名, 曹晋荣, 曹安业, 等. 煤矿矿震类型及震动波传播规律研究[J]. 煤炭科学技术, 2021, 49(6): 23-31.
- DOU Linming, CAO Jinrong, CAO Anye, et al. Research on types of coal mine tremor and propagation law of shock waves[J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(6): 23-31.
- [17] 张明. 厚硬岩层矿井矿震与冲击复合动力灾害防控研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017:18-25.
- [18] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林, 等. 岩层控制的关键层理论[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2003:32-38.
- [19] 王书文, 智宝岩, 杜涛涛, 等. 厚硬顶板潜在矿震风险地面压裂预控技术[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(11): 1-11.
- WANG Shuwen, ZHI Baoyan, DU Taotao, et al. Ground fracturing pre-control technology for potential mine seismic risk of thick and hard roof[J]. Coal Science and Technology, 2023, 51(11): 1-11.
- [20] 朱建波, 马斌文, 谢和平, 等. 煤矿矿震与冲击地压的区别与联系及矿震扰动诱冲初探[J]. 煤炭学报, 2022, 47(9): 3396-3409.
- ZHU Jianbo, MA Binwen, XIE Heping, et al. Differences and connections between mining seismicity and coal bursts in coal mines and preliminary study on coal bursts induced by mining seismicity[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(9): 3396-3409.
- [21] 年宾, 张宇, 张明, 等. 覆岩离层注浆弱化顶板型防冲机理研究[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2025, 44(5): 528-537.
- NIAN Bin, ZHANG Yu, ZHANG Ming, et al. Research on the mechanism of impact prevention through roof weakening by overburden separation layer grouting[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2025, 44(5): 528-537.