

特约稿件



牟宗龙(1979—)男,山东胶州人,中国矿业大学采矿工程博士(学校和企业联合培养博士后),中国矿业大学矿业工程学院教授,博士生导师,江苏省矿山地震监测工程实验室主任,中国矿业大学青年学术带头人,德国 TH Georg Agricola 大学联合培养研究生及中国科学院力学研究所和英国利物浦大学访问学者。担任国内多个学术组织及煤矿企业技术咨询专家。发表学术论文 80 余篇,专利 10 余项,出版各类著作 10 余部,获各类科研、教学奖励 20 余项。主持国家自然科学基金等多项纵向课题以及企业科研合作等项目。长期从事冲击地压、采矿地球物理领域的教学与研究工作,完成的博士论文《坚硬顶板诱发冲击的冲能原理及应用》被评为江苏省优秀博士学位论文,带领的研究团队在冲击地压动载诱冲机理、冲击影响因素、构造区冲击地压规律及防治、冲击危险评价、冲击危险监测、矿山地震监测及动力灾害防治等方面开展了系列研究,培养研究生 40 余名。提出了顶板岩层结构特征、力学属性及运动状态对冲击地压危险性的影响机理,建立了顶板型冲击地压的诱冲关键层理论及防治原理,形成了包括煤层开采防冲优化设计、冲击危险性评价、冲击危险监测方案设计、钻孔卸压和顶板致裂参数设计在内的整套冲击地压防治实用技术体系,研究成果广泛应用于山东、江苏、甘肃、陕西等冲击地压矿井实践,解决了多项冲击地压防治难题,保障了矿井安全生产。多次参与冲击地压领域相关标准的制定工作,发明的专利“综合指数法”、“多因素耦合叠加法”等冲击地压危险性评价方法,被行业推荐为优先使用的冲击危险性主要评价方法,在全国冲击地压矿井得到了广泛应用。

文章编号:1008-3731(2021)02-0010-14

## 深部孤岛工作面强卸压技术应用

牟宗龙<sup>1,2</sup> 杨景<sup>1,2</sup> 焦建行<sup>1,2</sup> 张玉臣<sup>1,2</sup> 李忠孝<sup>1,2</sup> 王占硕<sup>1,2</sup> 尹子霆<sup>1,2</sup>

(1. 江苏省矿山地震监测工程实验室 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 矿业工程学院 江苏 徐州 221116)

**摘要:**张双楼煤矿 7121 工作面采深超 1 000 m,两侧采空,为典型的深部孤岛工作面。采用理论分析、数值模拟等方法综合确定了该工作面具有较高的冲击危险性。高支承应力、煤岩冲击倾向性、地质构造等为冲击危险的主要影响因素。采动应力演化的数值模拟结果显示,工作面推进过程中存在多个重点危险区域。在对围岩进行加强支护的基础上,对各重点区域实施了针对性的煤体卸压、顶板预裂等强卸压措施。通过微震监测和钻屑法对工作面回采期间的卸压效果进行检验,发现各项卸压措施有效降低了矿震强度及冲击危险性,保证了工作面安全回采完毕。该项技术对其他类似工作面的冲击矿压防治具有借鉴意义。

**关键词:**深部孤岛工作面;冲击影响因素;强卸压措施;冲击矿压防治

**中图分类号:**TD324 **文献标志码:**A

### Application of strong pressure relief technology in deep isolated coal face

收稿日期:2020-10-31; DOI:10.19896/j.cnki.mtkj.2021.02.002

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51974302,51934007,51874292);中央高校基础研究经费资助项目(2019CXNL06)

作者简介:牟宗龙(1979—)男,山东胶州人,教授,博士生导师,现任江苏省矿山地震监测工程实验室主任,主要从事采矿工程、矿山压力、冲击矿压、采矿地球物理和采场顶板控制及监测等领域的教学与研究工作。

引用格式:牟宗龙,杨景,焦建行,等.深部孤岛工作面强卸压技术应用[J].煤炭科技,2021,42(2):10-23.

MU Zong-long, YANG Jing, JIAO Jian-hang, et al. Application of strong pressure relief technology in deep isolated coal face [J]. Coal Science & Technology Magazine, 2021, 42(2): 10-23.

MU Zong-long<sup>1,2</sup>, YANG Jing<sup>1,2</sup>, JIAO Jian-hang<sup>1,2</sup>,  
ZHANG Yu-chen<sup>1,2</sup>, LI Zhong-xiao<sup>1,2</sup>, WANG Zhan-shuo<sup>1,2</sup>, YIN Zi-ting<sup>1,2</sup>

(1. Jiangsu Engineering Laboratory of Mine Earthquake Monitoring and Prevention Xuzhou 221116, China;

2. School of Mines, China University of Mining and Technology Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** The mining depth of 7121 coal face in Zhangshuanglou Coal Mine is over 1 000 m, with mined-out on both sides, which is a typical deep isolated coal face. In this paper, theoretical analysis, numerical simulation and other methods were used to comprehensively determine that the coal face had a high coal-burst risk. High abutment stress, coal rock bursting liability and geological structure are the main factors affecting the coal-burst risk. The numerical simulation results of stress evolution in mining showed that there are several dangerous areas in the process of mining coal face. On the basis of strengthening the surrounding rock support, the coal pressure relief measures, such as roof pre-cracking and so on, have been implemented in the key areas. Through micro-seismic monitoring and drilling cuttings method to check the pressure relief effect during the coal face mining, it was found that the pressure relief measures can effectively reduce the mine mine earthquake intensity and coal-burst risk, which ensured the safety of the coal face during mining. This technology can be used as a reference for other similar coal faces to prevent and control the rock burst.

**Keywords:** deep island coal face; impact factors of coal-burst; strong pressure relief measures; coal-burst prevention and control

**CLC number:** TD324

**Document identification:** A

煤炭资源开采时,由于工作面采掘接替规划不合理,在采区回采末期极易形成孤岛工作面。孤岛工作面通常指工作面周围两侧或者两侧以上采空区的回采工作面,由于周围存在采空区,使得孤岛工作面应力集中系数相对较高。同时,随着采深的不断增加,地应力也在持续升高,再加上断层和褶曲等地质构造的影响,在这些深部孤岛工作面采掘期间极易诱发冲击矿压<sup>[1-3]</sup>。

目前针对孤岛工作面冲击矿压研究主要集中在孤岛工作面覆岩运动、应力分布规律、冲击监测预警及防控等方面。侯玮等<sup>[4]</sup>研究三面采空孤岛采场岩层运动规律,揭示了工作面开采初期和开采期间岩层运动诱发动力灾害规律。李东等<sup>[5]</sup>采用理论分析、现场监测等方法,研究了煤柱一侧采空孤岛工作面诱发冲击地压的机理。王高昂等<sup>[6]</sup>采用现场调研、理论分析和数值模拟等方法,研究了不同大巷间距的煤体支承压力的分布状态,建立了大巷围岩卸压后整体失稳冲击力学模型,揭示了深井大巷孤立煤体整体失稳冲击机理。胡绍勇等<sup>[7]</sup>采用理论分析、现场监测等方法研究了煤柱一侧工作面回采完毕,煤柱另一侧工作面回采时,诱发冲击地压的机理,建立了煤柱两侧采空区上覆岩层对煤柱加载的理论计算模型,并对煤柱整体冲击危险性进行了判定。谢建军等<sup>[8]</sup>以常村煤矿为数值模拟背景,得到孤岛型边角煤工作面顶、底板及护巷煤柱应力演化规律。朱广安<sup>[9]</sup>等利用 FLAC<sup>3D</sup> 中的 Fish 语言进行二次开发,探究了临近断层处孤岛工作面开采时断层滑移失稳致灾机理,系统地提出一种孤岛工作面

推进过程中采动诱发断层滑移失稳的数值模拟方法。王同旭等<sup>[10]</sup>模拟了孤岛工作面侧向支承压力的分布规律,并利用雷达探测研究了塑性破坏区沿倾斜方向的变化规律。郭忠华<sup>[11]</sup>采用理论分析、数值模拟和现场实测方法,研究孤岛工作面应力分布规律,揭示了巷道钻孔卸压机理,进行了钻孔卸压参数优选。贾传洋<sup>[12]</sup>采取 FLAC 数值模拟分析不同影响参数(埋深、水平应力、煤层厚度及工作面宽度)条件下孤岛工作面围岩应力分布规律,模拟结果对孤岛工作面冲击地压防治具有指导意义。左凌云<sup>[13]</sup>利用综合指数法和可能性指数法对工作面冲击地压危险性进行了宏观评价,采用考虑覆岩运动以及采空区煤柱等多因素的耦合分析方法划分了工作面的冲击地压危险区域,并针对不同危险区域提出了大直径钻孔卸压和煤体爆破卸压的防治方案,取得了良好的防治效果。窦林名等<sup>[14]</sup>针对孤岛工作面的特点,提出了冲击矿压危险监测预报及控制的技术,为孤岛工作面的冲击矿压防治提供了技术支撑。

基于众多专家、学者对孤岛工作面的研究成果,本文将采用理论分析、数值模拟及现场实践等方法,对张双楼煤矿 7121 深部孤岛工作面的冲击地压防治开展研究,这将为类似工作面的冲击矿压防治提供借鉴和指导。

## 1 工程背景

7121 工作面采掘工程平面如图 1 所示。张双楼 7121 工作面回采煤层为 7 煤,采深 885.8 ~ 961.7

m,煤厚1.5~5.0 m,平均煤厚3.68 m,煤层倾角18°~30°,平均21°。工作面两侧为7119和7123采空区,回采期间揭露DF<sub>2</sub>断层,落差0~10 m,倾角

70°。因此,7121工作面是一个受地质构造影响的典型深部孤岛工作面。7121工作面综合柱状如图2所示。

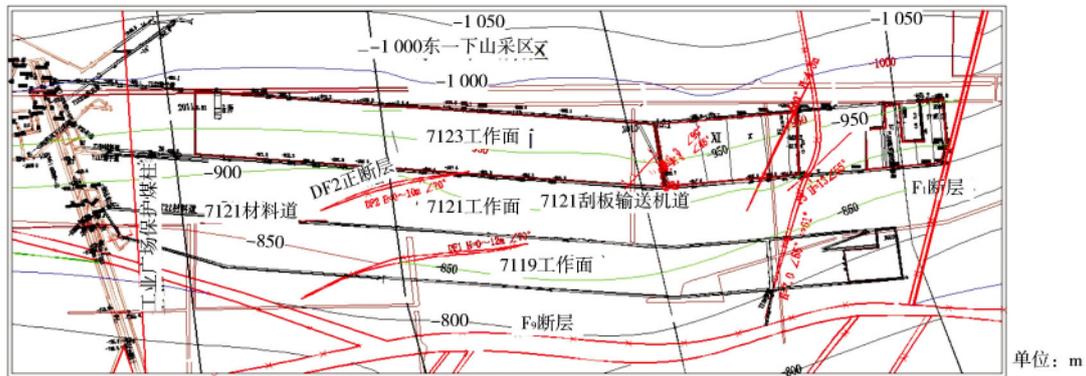


图1 7121工作面采掘工程平面示意

Fig.1 7121 working face excavation engineering plan

柱状	层厚/m	累积厚/m	岩石名称	岩性描述
	2.11	87.28	细砂岩	深灰色夹灰白色, 细粒, 以石英、长石为主, 含白云母及暗色矿物, 局部粒度变粗
	3.58	90.86	砂质泥岩	深灰色, 致密块状, 含大量植物化石及黄铁矿薄膜
	2.50	93.36	细砂岩	灰白色, 成分以石英、长石为主, 含暗色矿物, 上部钙质胶结, 下部泥质胶结
	1.98	95.34	泥岩	灰黑色, 致密性脆, 遇到水容易膨胀, 含植物化石
	3.37	98.71	细砂岩	灰白色, 成分以石英、长石为主, 含暗色矿物
	4.62	103.33	泥岩	灰黑色, 致密性脆, 遇到水容易膨胀
	3.68	107.01	7煤	黑色, 呈油脂光泽或暗淡光泽, 鳞片状及厚薄不等的条带状构造, 条痕黑褐色, 参差状断口, 内生裂隙发育, 性脆易碎
	2.03	109.04	砂质泥岩	深灰色, 块状, 致密, 性脆, 砂泥质胶结
	24.33	133.37	细砂岩	灰白色, 成分以石英、长石为主, 含较多暗色矿物, 泥质胶结, 水平层理

图2 7121工作面综合柱状

Fig.2 7121 working face integrated column

## 2 7121工作面冲击危险诱因分析

(1) 近千米深采孤岛工作面。7121工作面埋深近千米, 两侧采空形成孤岛工作面。如图3所示, 7121孤岛工作面四周覆岩均已发生断裂, 上覆顶板会形成短臂对称“T”形覆岩结构, 工作面开采后四周覆岩与工作面顶板岩层将协同运动、相互影响, 导致孤岛工作面支承压场峰值高、扰动远、变化快, 覆岩运动强烈<sup>[15]</sup>。同时, 7121工作面煤层埋深在885.8~961.7 m, 近千米埋深使得工作面承受较高的静载荷。工作面静载荷如下:

$$\sigma_s = \sigma_v + \sigma_H = \sum_{i=1}^n \gamma_i h_i + \sigma_H \quad (1)$$

式中,  $\sigma_v$  为煤层上方自重应力;  $\sigma_H$  为水平应力,

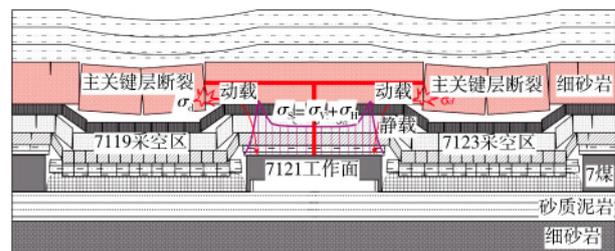


图3 7121工作面覆岩结构

Fig.3 Overburden structure of 7121 working face

$\gamma_i$  为第  $i$  层岩层体积力  $h_i$  为第  $i$  层岩层厚度。

上覆岩层运动会产生动载荷  $\sigma_d$ , 当传递到7121工作面煤体, 根据煤矿冲击矿压动静载叠加原理可知<sup>[2]</sup>, 当煤体承受的动载荷和静载荷之和大于煤体抗压强度时, 就会发生冲击矿压, 即:

$$\sigma_s + \sigma_d \geq \sigma \quad (2)$$

式中  $\sigma$  为煤体抗压强度。

因此, 7121工作面煤层在较小的动载扰动下就会诱发冲击矿压灾害。

(2) 坚硬顶板难破断。7121工作面基本顶为厚3.37 m的细砂岩顶板, 属厚层坚硬顶板。工作面动静载叠加如图4所示, 由于顶板较硬、难破断, 造成顶板暴露面积逐步加大。在顶板破断前, 暴露的顶板弯曲下沉会对工作面前方煤体不断挤压, 造成工作面煤体应力集中和能量积蓄; 破断后, 会产生较大的震动波, 传递到工作面后会形成对高静载煤体的动载扰动, 动静载叠加诱发冲击矿压。

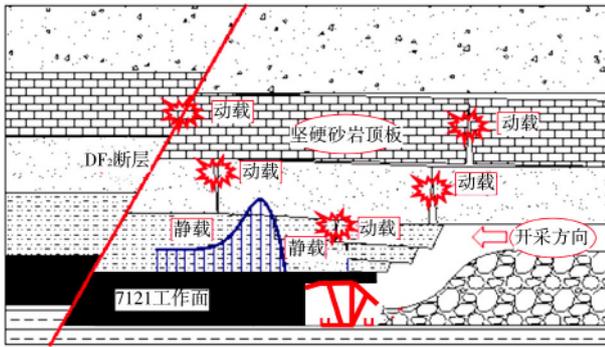


图 4 工作面动静载叠加示意  
Fig. 4 Superposition of dynamic and static loads in working face

(3) 采掘过程揭露多个断层。7121 工作面两巷在掘进期间共揭露 17 条小断层, 落差均在 1~3 m。工作面中间存在 1 条落差 1~10 m 的 DF<sub>2</sub> 断层。如图 4 所示, 当工作面推进至断层附近时, 工作面超前支承压力和上覆岩层破断产生动载扰动会使得断层面由静摩擦变为滑动摩擦, 产生滑移。断层滑移会产生矿震, 矿震传递到处于高静载的 7121 工作面, 在动静载叠加效应下超过煤(岩)体强度就会诱发冲击矿压灾害。当工作面接近断层时, 断层会影响到工作面超前支承压力分布范围、分布形式和应力峰值, 加之上覆顶板破断产生大量动载, 7121 工作面两巷及工作面在采掘过程中会以较高的风险因断层滑移发生冲击矿压。

(4) 7 煤层具有强冲击倾向性。7 煤层煤样经实验室物理力学检测鉴定的结果如下: 动态破坏时间 47 ms; 弹性能指数 9.2; 冲击能指数 4.13; 单轴抗压强度 17.4 MPa; 冲击倾向性等级为强冲击倾向性。

结果显示 7 煤层具有强冲击倾向性煤层。7 煤层煤质硬、强度大、脆性强, 在同等载荷作用下变形小, 更容易积蓄弹性能。所以 7 煤层更容易积蓄能量, 在破坏时耗能少, 释放的能量大, 发生冲击矿压时破坏更严重。

上述因素是影响 7121 工作面回采期间冲击危险程度的主要诱因, 经综合指数法评定, 工作面整体冲击危险指数为 0.87, 属强冲击危险。因此, 回采期间必须对整个工作面加强监测, 在围岩破碎区加强支护, 特别是在各个应力集中区实施强卸压技术手段, 才能保证工作面的安全推进。

### 3 7121 工作面采动应力演化规律

7121 工作面冲击危险诱因的分析确定了该工

作面的危险程度, 但是对于工作面回采期间的冲击高风险区域却没有做出精细划分。因此需采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件, 分析 7121 工作面回采期间的超前支承压力变化及影响因素, 以确定工作面回采期间的冲击高风险区域<sup>[16-17]</sup>。

#### 3.1 数值模型的建立

三维数值模型以 7121 工作面的综合地质柱状图及 7121 工作面布置平面图为基础, 并对条件进行适当简化。其中, DF<sub>2</sub> 正断层倾角为 70°, 落差 10 m, 数值模型倾斜长度为 500 m, 其中 7121 工作面的长度为 120 m, 走向长度为 1 460 m。对煤层部分进行细化, 具体模型如图 5 所示, 共设置 171 136 个单元、239 183 个节点。

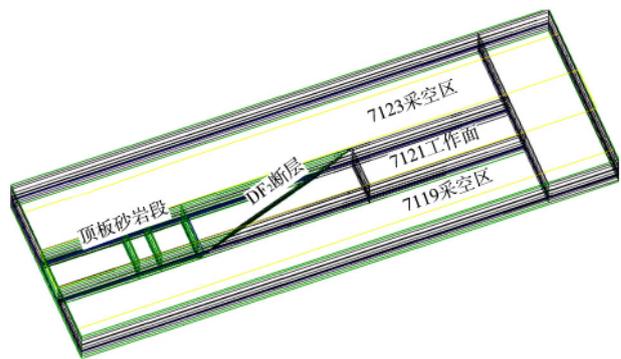


图 5 工作面三维数值模型  
Fig. 5 Three dimensional numerical model of working face

#### 3.2 超前支承压力演化规律

7121 工作面回采期间超前支承压力变化情况如图 6 所示。

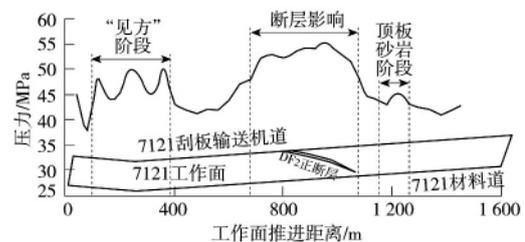


图 6 回采期间超前支承压力曲线  
Fig. 6 Advance abutment pressure curve during mining

从图 6 中可以看出, 7121 工作面回采期间均受到两侧采空区的影响, 工作面超前支承压力峰值均超过 40 MPa, 应力集中系数超过 2.0。在工作面回采至 40 m 处, 基本顶初次来压, 超前支承压力为 45

MPa。40 ~ 80 m 段 ,超前支承压力逐渐降低 ,此时基本顶初次来压基本结束。100 ~ 380 m 段 ,工作面依次经过“单工作面见方”、“双工作面见方”、“三工作面见方” ,该阶段内出现 3 次逐级升高的峰值点。675 ~ 1 095 m 段 ,工作面过断层期间超前支承压力逐渐增大 ,应力峰值最高达到 54 MPa ,过断层后逐渐降低。1 160 ~ 1 275 m 段 ,顶板逐渐变成坚硬砂岩 ,基本顶周期来压步距增长 ,引发超前支承压力峰值升高。

基于工作面超前支承压力演化规律 ,确定了工作面回采期间强冲击危险区域在基本顶初次来压阶段、工作面三次“见方”区域、过断层区域、顶板坚硬砂岩区域。这些区域需要实行强卸压措施 ,以降低应力集中系数。

#### 4 7121 工作面强卸压技术实践

基于理论分析及数值模拟结果 ,确定了 7121 工作面回采期间强冲击危险区域及影响因素。因此 ,7121 工作面的冲击矿压防治需要针对各危险区域的影响因素采取针对性的强卸压措施 ,并配以实时微震监测预警和高强度巷道支护 ,才可以保证工作面的安全回采。

(1) 基本顶初次来压区域。切眼切顶预裂爆破示意如图 7 所示 ,回采初期为避免初采期间采空区大面积悬顶 ,需要在切眼位置朝工作面方向施工小孔径顶板爆破孔。其目的是为了减小基本顶初次破断步距 ,减小采空区顶板悬露面积 ,降低顶板对工作面煤体挤压力 ,从而降低应力集中系数和能量累积量。同时 ,也能降低顶板破断时产生的动载。

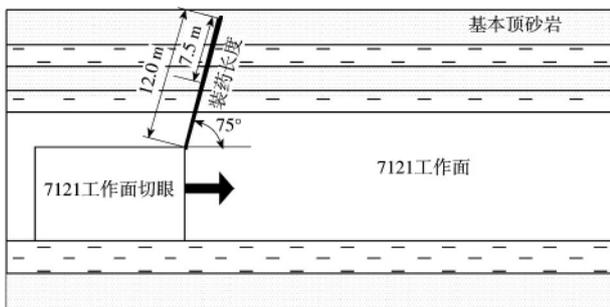


图 7 切眼切顶预裂爆破示意

Fig. 7 Pre splitting blasting of cut and top cutting

(2) 工作面“见方”和断层区域。7121 工作面回采期间 ,在工作面前方会出现应力集中 ,特别是顶板“见方”区和断层影响区 ,应力集中系数更明显。

因此 ,需要在工作面前方 300 m 范围内 ,实施从切眼向外在两道实体煤侧布置大直径钻孔进行预卸压。具体参数如图 8 所示 ,通过大直径钻孔预卸压 ,使得两巷附近实体煤的应力集中程度和能量累计值降低。卸压孔会使高应力、高能量向煤体深部转移 ,极大地降低了巷道附近煤体的冲击危险性。

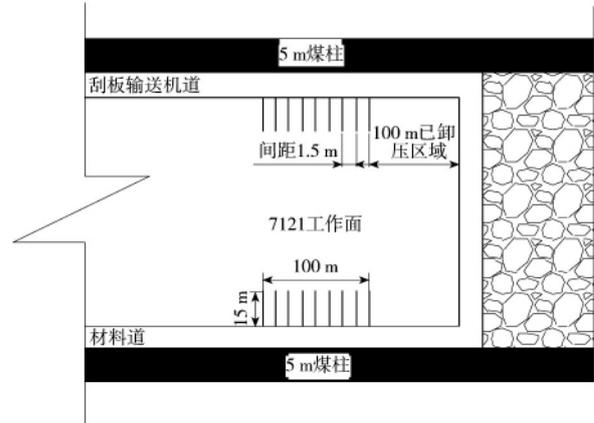


图 8 大直径钻孔卸压示意

Fig. 8 Pressure relief of large diameter drilling

(3) 顶板坚硬砂岩区域。7121 工作面回采至顶板坚硬砂岩难破断区域 ,会造成大面积悬顶 ,增加冲击风险 ,因此 ,需要两巷道朝向顶板实施顶板深孔爆破 ,以减小悬顶面积 ,加速顶板破断 ,降低顶板破断时的冲击能量。具体参数如图 9 所示。

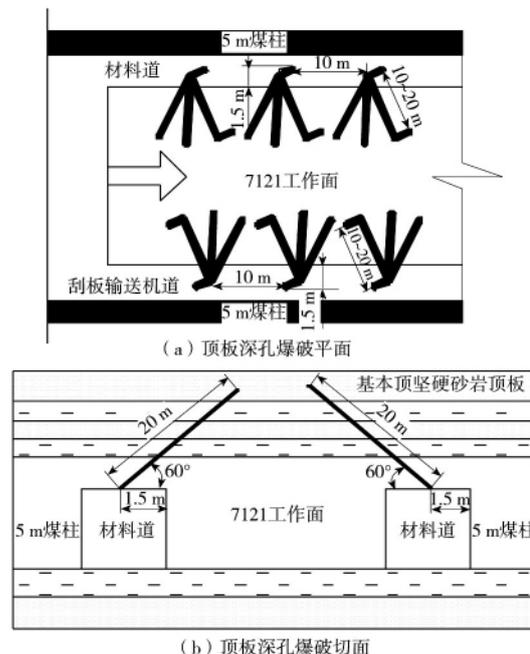


图 9 顶板深孔爆破示意

Fig. 9 Schematic diagram of deep hole blasting of roof

(4) 煤层高冲击倾向性。7121 工作面煤层属于强冲击煤层, 需要在工作面回采期间对超前 20 ~ 100 m 开展注水工作, 软化煤层, 使得脆性煤体变为塑性体, 降低煤层强度, 减弱其能量蓄积能力。这样在大直径钻孔卸压和注水软化煤层的措施下, 煤层应力集中系数会显著降低。

### 5 7121 工作面强卸压技术效果检验

7121 工作面回采期间, 分别在各冲击高风险区域实施了针对性的卸压措施。为了检验卸压效果, 此次采用微震监测和钻屑法进行效果检验。

#### 5.1 掘进期间矿震活动规律

在 7121 两巷掘进(微震数据选取时间区间 2012 年 1 月—12 月)期间, 工作面监测区域共监测到 2 465 个微震事件, 震动能量分级统计见表 1。由震动能量分级统计表可见, 震动能量主要集中在  $10^2 \sim 10^3$  J 及  $10^3 \sim 10^4$  J, 数量为 1 998 个。其中  $10^4$  J 以下的震动次数占总次数的 90.10%,  $10^4$  J 以上

的震动次数占总次数的 9.90%。

表 1 掘进期间震动能量分级统计

Tab. 1 Statistics of vibration energy classification during excavation

能量分级/J	震动次数/次	所占比例/%
$0 \sim 10^2$	223	9.05
$10^2 \sim 10^3$	1 040	42.19
$10^3 \sim 10^4$	958	38.86
$10^4 \sim 10^5$	244	9.90
$> 10^5$	0	0.00

7121 两巷掘进期间大能量矿震震源空间位置分布如图 10、图 11 所示。由大能量矿震( $\geq 10^4$  J)平面和剖面定位图可以看出, 在巷道掘进过程中, 大能量矿震主要集中在  $DF_2$  断层区域和终采线附近, 同时在坚硬砂岩顶板区域, 煤层上覆岩层 100 m 范围内震源分布集中多个大能量矿震。这些区域在 7121 工作面回采期间应当重点监测和进行卸压措施效果检验。

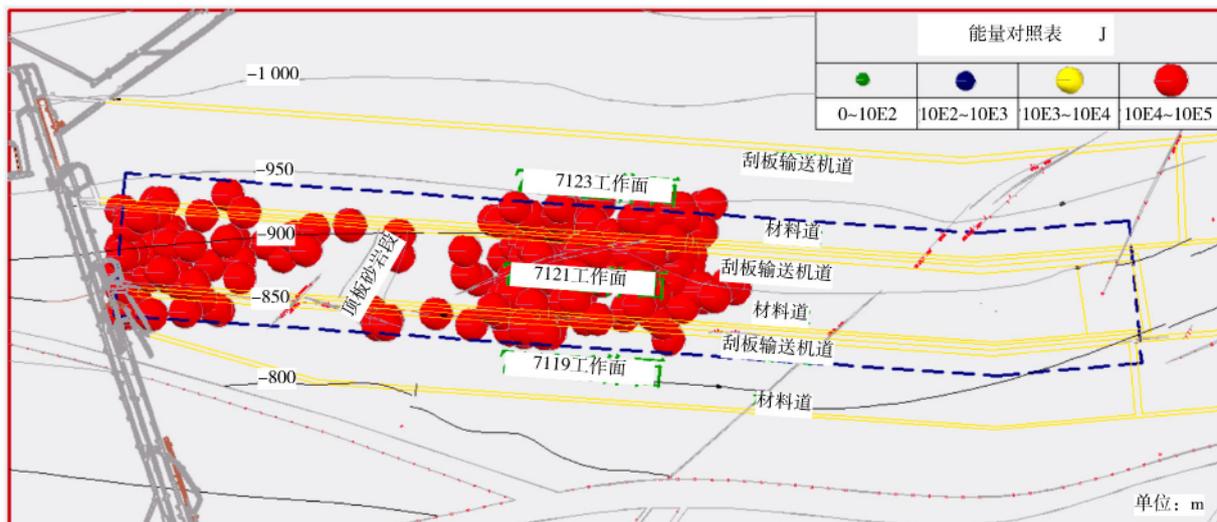


图 10 能量大于  $10^4$  J 震源定位平面

Fig. 10 Source location plane with energy greater than  $10^4$  J

2012 年 3 月 20 日至 4 月 6 日, 微震监测系统监测到 7121 工作面震动能量与频次呈升降交替趋势, 且维持在较高水平, 冲击危险性上升。掘进区域与震源定位如图 12 所示, 微震趋势如图 13 所示。由图可知, 高能量矿震集中出现的原因是巷道掘进至断层附近, 尤其是刮板机道掘进至  $DF_2$  断层附近, 在  $DF_2$  断层附近监测到大量高能量矿震。由此可见, 7121 工作面掘进期间, 大能量矿震伴随着巷道的掘进发生,

且在地质构造复杂区域, 尤其是  $DF_2$  断层区域、终采线附近和坚硬砂岩顶板区域, 大能量矿震频繁发生。

#### 5.2 回采期间卸压效果检验

7121 工作面回采期间分别实施回采前切眼切顶预裂爆破卸压、坚硬顶板段深孔爆破卸压、全阶段煤层注水软化卸压和大直径钻孔卸压的针对性卸压措施。回采期间, 工作面监测区域共监测到 5 851 个微震事件, 震动能量分级统计见表 2。

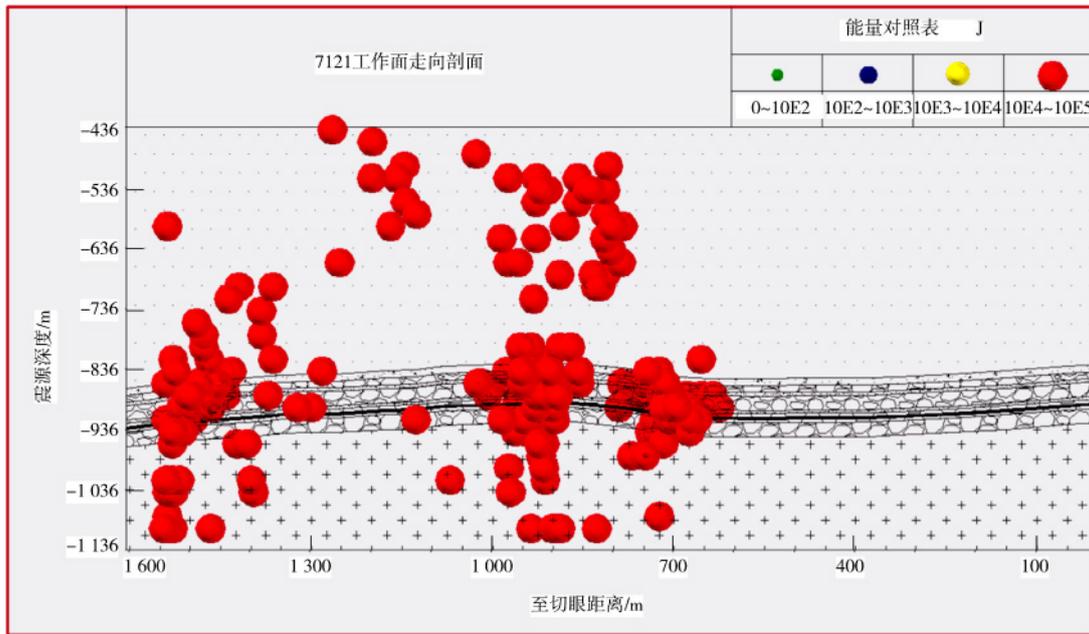


图 11 能量大于  $10^4$  J 震源定位剖面

Fig. 11 Seismic source location profile with energy greater than  $10^4$  J

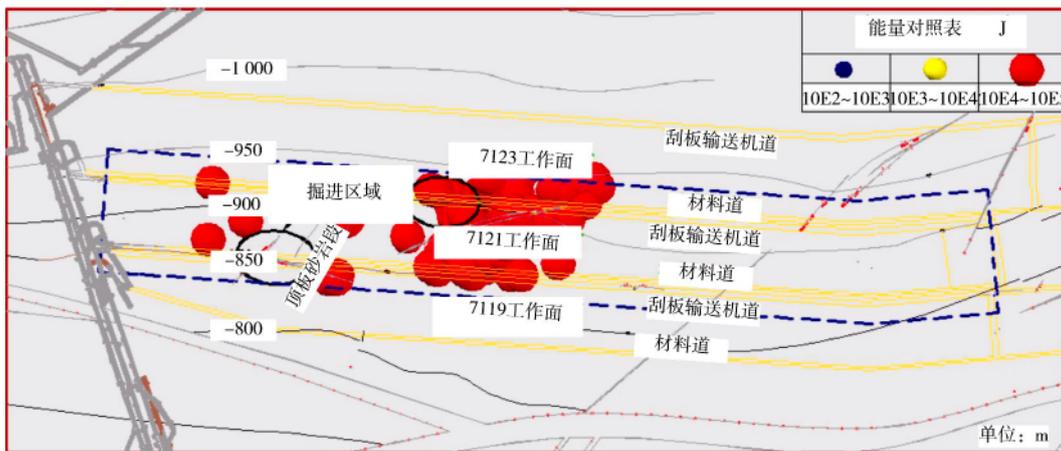


图 12 掘进区域与大能量矿震震源定位

Fig. 12 Driving area and the location of earthquake source of large energy mine

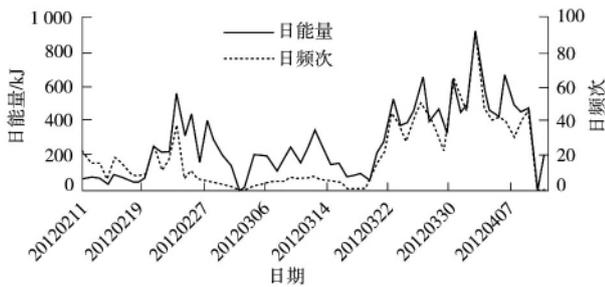


图 13 掘进期间微震趋势

Fig. 13 Microseismic trend during excavation

表 2 回采期间震动能量分级统计表

Tab. 2 Classification statistics of vibration energy during mining

能量分级/J	震动次数/次	所占比例/%
$0 \sim 10^2$	1 052	17.98
$10^2 \sim 10^3$	2 534	43.31
$10^3 \sim 10^4$	2 239	38.27
$10^4 \sim 10^5$	19	0.32
$> 10^5$	7	0.12

由震动能量分级统计可知,震动能量主要集中在

在  $10^2 \sim 10^3$  J 及  $10^3 \sim 10^4$  J 数量达到 4 773 次。其中,  $10^4$  J 以下的震动次数占总次数的 99.56%,  $10^4$  J 以上的震动次数占总次数的 0.44%。所以在实施针对性卸压措施后, 小能量矿震数量占比上升, 大能量矿震数量占比明显少于掘进期间, 说明相关的卸压措施显著降低了煤体应力集中系数。

7121 工作面回采期间矿震震源空间位置分布如图 14、图 15 所示。从震源空间位置分布可以看出, 在开采初期震动较少, 能量也较小, 这表明回采

初期的切眼切顶预裂爆破卸压和坚硬顶板段深孔爆破卸压措施效果显著。随着开采范围的扩大, 前方也出现较多震动, 并出现几次能量较高的强矿震事件, 但是数量明显小于掘进期间, 表明上覆岩层受回采扰动的影响已经开始出现大范围的破断运动; 能量大于  $10^4$  J 的震动主要沿着  $DF_2$  断层分布, 顶板砂岩段和设计终采线附近也出现了大能量的震动, 这也验证了掘进期间矿震发生的规律。

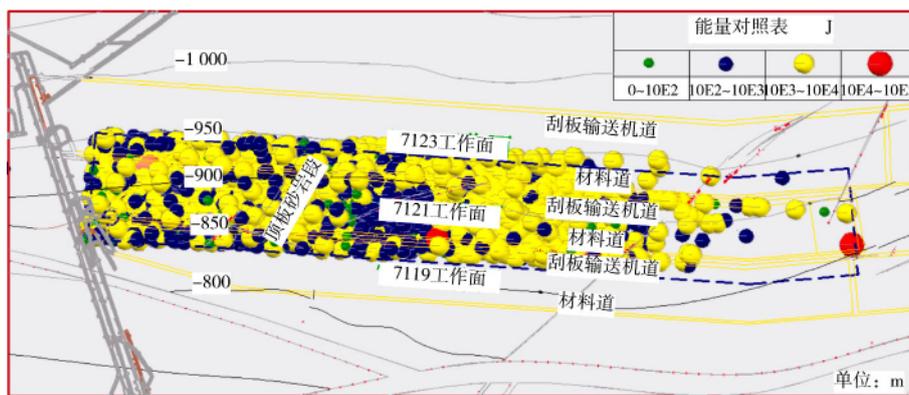


图 14 回采期间震源定位平面

Fig. 14 Focal location plane during coal winning

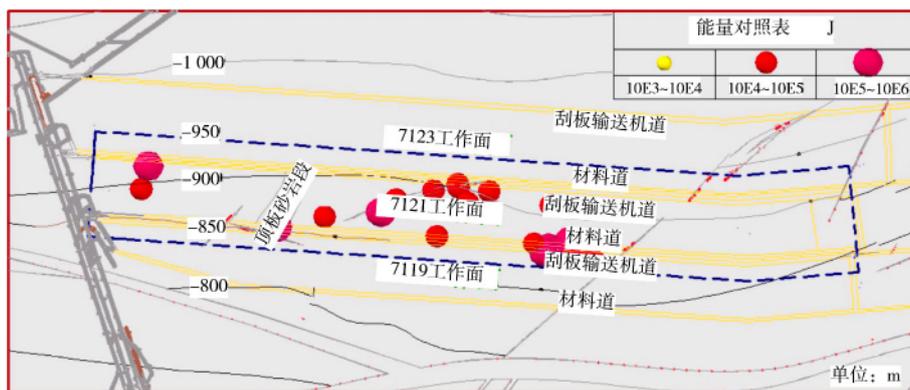


图 15 回采期间大能量矿震震源定位平面

Fig. 15 Focal location plane of high energy mine earthquake during coal winning

掘进期间, 由于地质构造复杂的断层区域、坚硬顶板砂岩区域和终采线附近矿震频生, 所以选取 7121 工作面回采接近  $DF_2$  断层期间微震数据(2013 年 7 月 1 日至 10 月 31 日的微震监测数据), 从时间序列分析工作面过  $DF_2$  断层的微震情况以检验卸压效果。工作面回采位置及矿震分布情况如图 16—图 27 所示。从震源空间位置的分布和演化趋势可见, 震源集中区域比较明显, 且随着工作面的推

进向前移动。从平面定位结果还可看出, 震动多数集中在  $DF_2$  断层附近, 随着工作面的推进向前移动, 并沿着断层的走向分布, 断层靠近两侧巷道的位置虽多次出现矿震, 但能量均比掘进期间小, 说明卸压措施有效地降低了矿震能量, 降低了冲击危险性。

2013 年 4 月 16 日与 2013 年 4 月 18 日, 7121 工作面材料道接连监测到 2 次能量大于  $10^5$  J 的矿震, 震源定位如图 28 所示。

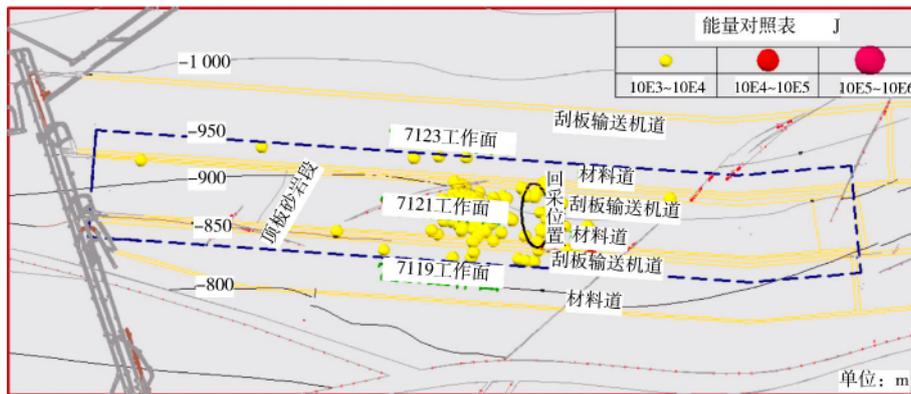


图 16 震源定位平面示意(7月1日—10日)

Fig. 16 Schematic diagram of focal location plane ( July 1—10)



图 17 震源定位平面(7月11日—20日)

Fig. 17 Schematic diagram of focal location plane ( July 11—20)



图 18 震源定位平面图(7月21日—31日)

Fig. 18 Schematic diagram of focal location plane ( July 21—31)

因此在该区域进行了大直径钻孔卸压和煤层注水软化等措施,同时在卸压措施后进行钻屑量检测(表3)。钻屑量都在正常范围内,说明卸压措施有效,降低了煤体应力集中系数,有效防止了冲击矿压的发生。

在7121工作面实施回采前切眼切顶预裂爆破卸压、坚硬顶板段深孔爆破卸压、全阶段煤层注水软化卸压和大直径钻孔卸压的针对性卸压措施,通过微震监测和钻屑法检验发现工作面应力集中系数和矿震能量显著降低。目前该工作面已经安全回采完

毕 回采过程中未发生冲击地压事故, 这表明针对 冲击矿压防治提供借鉴。  
7121 工作面的各项卸压措施可以为类似工作面的

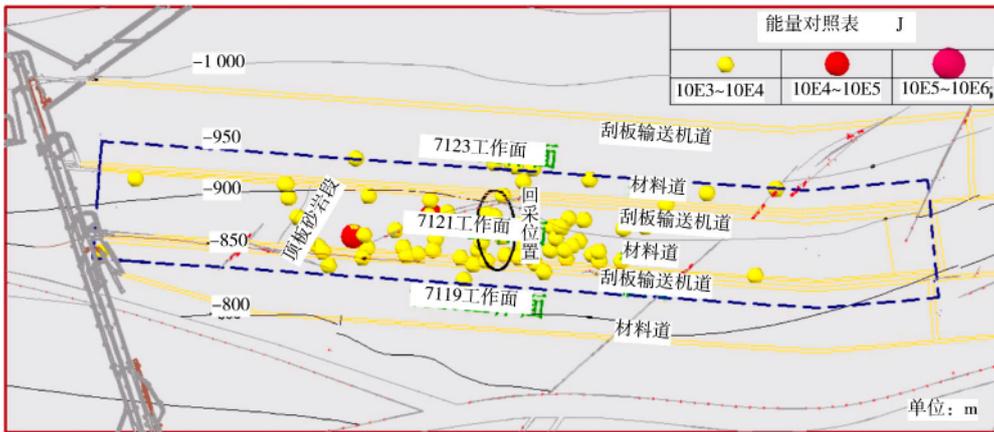


图 19 震源定位平面图(8月1日—10日)

Fig. 19 Schematic diagram of focal location plane( August 1—10)

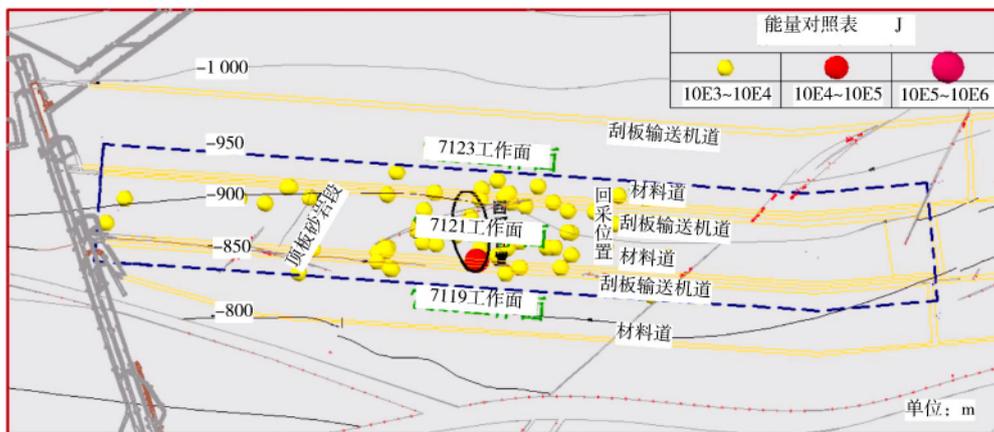


图 20 震源定位平面图(8月11日—20日)

Fig. 20 Schematic diagram of focal location plane( August 11—20)



图 21 震源定位平面图(8月21日—31日)

Fig. 21 Schematic diagram of focal location plane( August 21—31)

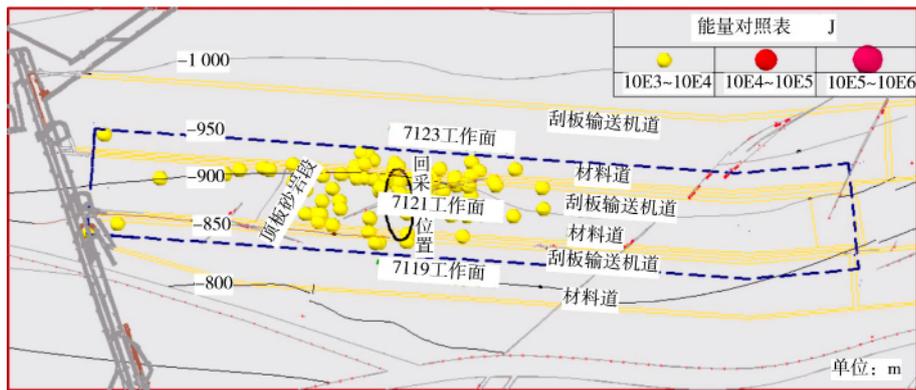


图 22 震源定位平面图(9月1日—10日)

Fig. 22 Schematic diagram of focal location plane( September 1—10)



图 23 震源定位平面图(9月11日—20日)

Fig. 23 Schematic diagram of focal location plane( September 11—20)



图 24 震源定位平面图(9月21日—30日)

Fig. 24 Schematic diagram of focal location plane( September 21—30)

## 6 结论

(1) 理论分析了影响 7121 工作面冲击危险强度的因素, 确定了 7121 工作面强冲击危险主要是由近千米采深孤岛工作面、坚硬砂岩顶板、断层及煤层

具有强冲击倾向性等因素造成的。

(2) 基于数值模拟分析了 7121 工作面支承压力演化规律, 确定了工作面冲击高风险区域主要是在基本顶初次破断区域、工作面“见方”区域、断层区域以及坚硬顶板砂岩区域。

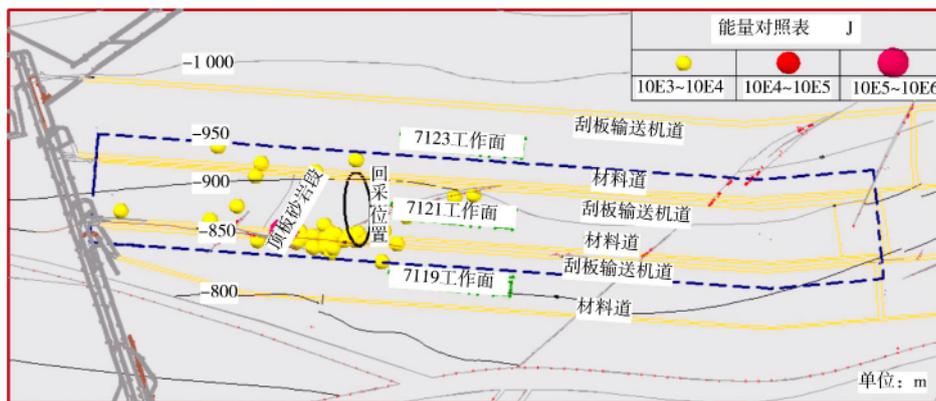


图 25 震源定位平面图(10月1日—10日)

Fig. 25 Schematic diagram of focal location plane(October 1—10)

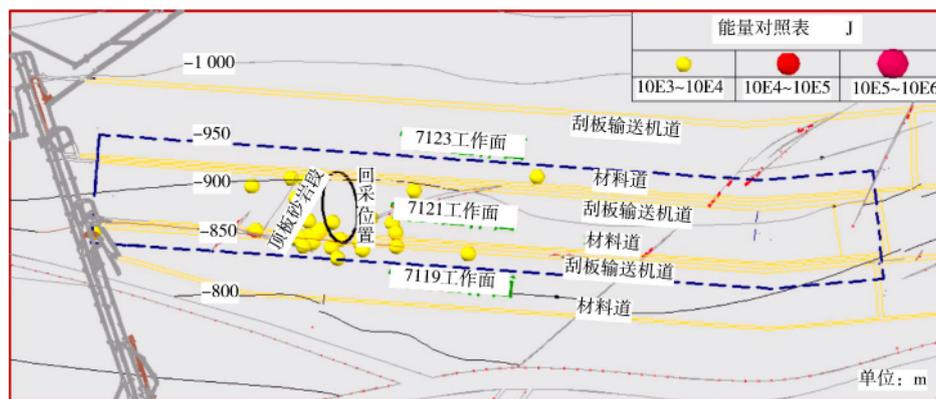


图 26 震源定位平面图(10月11日—20日)

Fig. 26 Schematic diagram of focal location plane(October 11—20)

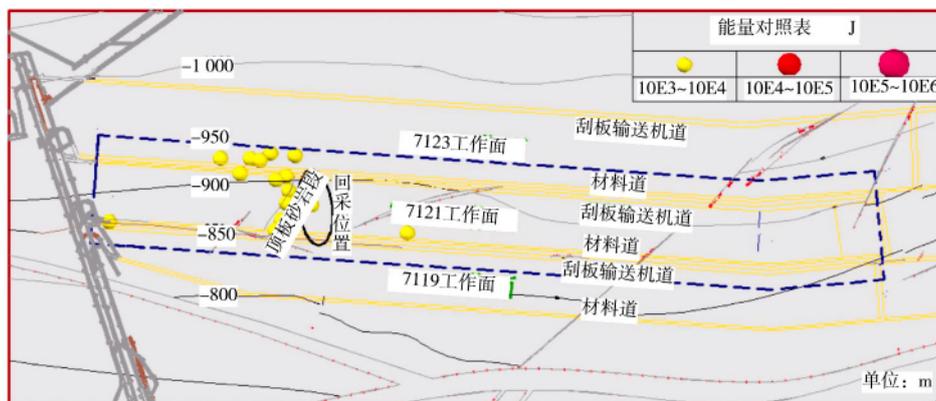


图 27 震源定位平面图(10月21日—31日)

Fig. 27 Schematic diagram of focal location plane(October 21—30)

(3) 通过微震监测和钻屑法检验发现,7121 工作面在各冲击危险区域实施针对性的卸压措施后,矿震能量显著降低,钻屑量正常,应力集中系数降低,保证了工作面的安全回采。目前该工作面已经

安全回采完毕,回采过程中未发生冲击地压事故,这对于张双楼煤矿其他工作面的冲击矿压防治具有一定的指导和借鉴意义。



图 28 大能量矿震定位平面图(4月16日、4月18日)

Fig. 28 Large energy mine earthquake location plan ( April 16 April 18)

表 3 材料道钻屑量监测情况

表 3 Monitoring of cuttings in material track

钻孔编号	钻孔位置	煤粉量/( kg · m <sup>-1</sup> )									
		2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m	8 m	9 m	10 m	
4月16日	407	1.6	1.7	1.9	1.9	煤粉潮湿					
	408	1.9	1.7	1.9	煤粉潮湿						
	409	1.9	1.7	2.0	2.3	2.5	2.7	2.4	2.6	2.3	
	410	2.0	1.7	2.0	2.2	2.4	2.5	2.9	2.6	2.3	
	钻屑量临界值/( kg · m <sup>-1</sup> )	2.8	2.9	2.9	4.0	4.1	6.2	6.3	9.5	11.6	
4月17日	413	1.9	1.7	1.7	煤粉潮湿						
	414	2.0	1.7	1.9	煤粉潮湿						
	钻屑量临界值/( kg · m <sup>-1</sup> )	2.8	2.9	2.9	4.0	4.1	6.2	6.3	9.5	11.6	
4月18日	417	2.0	2.3	1.8	2.0	煤粉潮湿					
	418	1.7	2.0	2.2	1.8	煤粉潮湿					
	钻屑量临界值/( kg · m <sup>-1</sup> )	2.8	2.9	2.9	4.0	4.1	6.2	6.3	9.5	11.6	

参考文献(References):

[1] 牟宗龙, 巩思园, 刘广建等. 深部矿井冲击地压灾害防治研究[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2016.

[2] 窦林名, 何江, 曹安业, 等. 煤矿冲击矿压动静载叠加原理及其防治[J]. 煤炭学报, 2015, 40(7): 1469-1476.  
DOU Lin-ming, HE Jiang, CAO An-ye, et al. Rock burst prevention methods based on theory of dynamic and static combined load induced in coal mine [J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(7): 1469-1476.

[3] 牟宗龙, 曲延伦. 深部工作面冲击矿压危险分析及防治[J]. 中国煤炭, 2013, 39(12): 100-103, 132.  
MU Zong-long, QU Yan-lun. Analysis of rock burst risk at deep working face and its control [J]. China Coal, 2013, 39(12): 100-103, 132.

[4] 侯玮, 霍海鹰. “C”型覆岩空间结构采场岩层运动规律及动压致灾机理[J]. 煤炭学报, 2012, 37(S2): 269-274.  
HOU Wei, HUO Hai-ying. Stope rock movement rule of C-shaped of overlying strata spatial structure and disaster-causing mechanism of dynamic pressure [J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(S2): 269-274.

[5] 李东, 史先锋, 赵丞, 等. 一侧采空间隔煤柱采场回采时冲击地压发生机理研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(6): 1213-1221.  
LI Dong, SHI Xian-feng, ZHAO Cheng, et al. Study on the mechanism of impact ground pressure in stope of one side mining space coal separation pillar [J]. Journal of Mining and Safety Engineering, 2020, 37(6): 1213-1221.

[6] 王高昂, 朱斯陶, 姜福兴, 等. 千米深井大巷孤立煤体整体失稳冲击机理及防治研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2019, 36(5):

- 968-976.
- WANG Gao-ang ,ZHU Si-tao ,JIANG Fu-xing ,et al. Research on mechanism and prevention of whole instability and impact of isolated coal body in kilometer deep roadway [J]. Journal of Mining and Safety Engineering 2019 36(5) : 968-976.
- [7] 胡绍勇,张辉.常村煤矿冲击危险性评价及防治研究[J].能源与环境 2019 41(6) : 15-18 23.
- HU Shao-yong ,ZHANG Hui. Research on rockburst risk assessment and prevention techniques in Changcun Coal Mine [J]. China Energy and Environmental Protection 2019 41(6) : 15-18 23.
- [8] 谢建军,刘志明.孤岛型边角煤工作面矿压显现规律及防治对策[J].煤炭技术 2020 39(9) : 6-10.
- XIE Jian-jun ,LIU Zhi-ming. Appearance law and prevention countermeasure of rock pressure in isolated island coal face [J]. Coal Technology 2020 39(9) : 6-10.
- [9] 朱广安,窦林名,王红胜,等.临断层孤岛面冲击危险与断层滑移数值反演——以朝阳煤矿3108工作面为例[J].煤炭学报,2020 45(2) : 533-541.
- ZHU Guang-an ,DOU Lin-ming ,WANG Hong-sheng ,et al. Back analysis of rock burst risk and fault slip due to mining in the island panel along fault: a case study of island panel 3108 in Chaoyang Coal Mine [J]. Journal of China Coal Society 2020 45(2) : 533-541.
- [10] 王同旭,刘传孝,王小平.孤岛煤柱侧向支承压力分布的数值模拟与雷达探测研究[J].岩石力学与工程学报,2002(S2) : 2484-2487.
- WANG Tong-xu ,LIU Chuan-xiao ,WANG Xiao-ping. FLAC<sup>3D</sup> numerical simulation and radar detection of lateral abutment pressure distribution of isolated coal pillar [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2002(S2) : 2484-2487.
- [11] 郭忠华.孤岛工作面巷道钻孔卸压机理及关键参数确定[J].太原理工大学学报 2020 51(6) : 906-911.
- GUO Zhong-hua. Borehole destressing mechanism and key parameters determination of roadway in isolated working face [J]. Journal of Taiyuan University of Technology 2020 51(6) : 906-911.
- [12] 贾传洋.孤岛工作面应力分布影响因素数值模拟[J].煤炭技术 2018 37(5) : 32-35.
- JIA Chuan-yang. Numerical simulation of influence factors of stress distribution in isolated working face [J]. Coal Technology 2018 , 37(5) : 32-35.
- [13] 左凌云.基于多因素分析的孤岛工作面冲击地压危险性预测[J].煤炭工程 2019 51(12) : 96-100.
- ZUO Ling-yun. Rock burst risk prediction in island working face based on multi-factor analysis [J]. Coal Engineering ,2019 ,51(12) : 96-100.
- [14] 窦林名,何焯,张卫东.孤岛工作面冲击矿压危险及其控制[J].岩石力学与工程学报,2003(11) : 1866-1869.
- DOU Lin-ming ,HE Ye ,ZHANG Wei-dong. Hazards of rock burst in island coal face and its control [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2003(11) : 1866-1869.
- [15] 窦林名,贺虎.煤矿覆岩空间结构OX-F-T演化规律研究[J].岩石力学与工程学报,2012 31(3) : 453-460.
- DOU Lin-ming ,HE Hu. Study of OX-F-T spatial structure evolution of overlying strata in coal mines [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering 2012 31(3) : 453-460.
- [16] 沈志平,姚桥煤矿中央采区下山煤柱区冲击危险防治对策研究[J].煤炭科技 2020 41(5) : 58-61.
- SHEN Zhi-ping. Study on prevention and control measures of coal pillar impact in Yaoqiao coal mining area [J]. Coal Science & Technology Magazine 2020 41(5) : 58-61.
- [17] 姚尧.大倾角综放孤岛工作面矿压显现规律分析[J].煤炭科技 2020 41(3) : 26-28.
- YAO Yao. Analysis on law of strata behaviors in isolated island face with large inclined angle fully-mechanized caving [J]. Coal Science & Technology Magazine 2020 41(3) : 26-28.