

DOI: 10.11779/CJGE20220451

# 深部冲击地压煤层水射流割缝卸压参数优化研究

胡 阳<sup>1,2</sup>, 曹安业<sup>2,3</sup>, 秦续峰<sup>4,5</sup>, 薛成春<sup>2</sup>, 郭文豪<sup>2</sup>, 刘耀琪<sup>2</sup>, 彭雨杰<sup>2</sup>

(1. 云南煤矿安全技术中心有限公司, 云南 昆明 650000; 2. 中国矿业大学矿业工程学院, 江苏 徐州 221116; 3. 中国矿业大学江苏省矿山地震监测工程实验室, 江苏 徐州 221116; 4. 山东新河矿业有限公司 山东 济宁 272499; 5. 内蒙古仲泰能源伊旗分公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017200)

**摘 要:** 为确定深部冲击地压煤层高压水射流割缝卸压最优参数, 采用数值模拟、理论推导剖析了高压水射流割缝卸压防冲原理, 构建了钻孔间距、割缝半径等 4 个因素的参数优化理论模型, 以某矿 730 采区集中巷为研究对象, 基于动静载叠加原理, 研究揭示了集中巷冲击地压机理, 获得了各影响因素的理论参数值, 并揭示了不同理论参数下应力、塑性区及冲击危险指数的异同。研究结果表明: 各影响因素对高压水射流割缝卸压效果均有较大影响, 且各因素之间存在显著的交互作用; 采用卸压后平均垂直应力、弹性能密度、冲击危险指数及卸压成本为卸压参数的有效性及经济性指标, 评估了不同参数卸压效果的优劣, 获得该煤层物理力学性质下高压水射流割缝卸压最优参数; 研究成果在 730 采区#3 联络巷应用后, 现场微震频次、总能量及微震空间集中度均大幅降低, 为工作面安全回采提供了技术保障。

**关键词:** 冲击地压; 煤矿巷道; 水射流割缝; 参数优化; 数值模拟

中图分类号: TU43; TD713 文献标识码: A 文章编号: 1000-4548(2023)07-1509-08

作者简介: 胡 阳(1995—), 男, 云南玉溪人, 硕士, 主要从事冲击地压方面的研究工作。E-mail: 1598826049@qq.com。

## On optimization of pressure-relief parameters of water jet slots in deep rockburst coal seams

HU Yang<sup>1,2</sup>, CAO Anye<sup>2,3</sup>, QIN Xufeng<sup>4,5</sup>, XUE Chengchun<sup>2</sup>, GUO Wenhao<sup>2</sup>, LIU Yaoqi<sup>2</sup>, PENG Yujie<sup>2</sup>

(1. Yunnan Coal Mine Safety Technology Center Co., Ltd., Kunming 650000, China; 2. School of Mining Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Jiangsu Mine Earthquake Monitoring Engineering Laboratory, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 4. Shandong Xinhe Mining Co., Ltd., Jining 272499, China; 5. Inner Mongolia Zhongtai Energy Yiqi Branch, Ordos 017200, China)

**Abstract:** In order to determine the optimal parameters of pressure relief by high-pressure water jet slotting in deep rockburst coal seams, the principles of pressure relief and impact prevention are analyzed through numerical simulation and theoretical deduction. The theoretical model for parameter optimization for four factors, such as drilling spacing and slot radius, is established. Based on the principles of dynamic and static load superpositions, the mechanism of rockburst in the concentrated roadway in mining area No. 730 of a mine is studied, the theoretical parameter values of each influencing factor are obtained, and the similarities and differences of stress, plastic zone and impact risk index under different theoretical parameters are revealed. The results show that all the influencing factors have a great influence on the pressure-relief effects of high-pressure water jet slotting, and there is a significant interaction between the factors. The average vertical stress after pressure relief, elastic energy density, impact danger index and pressure relief cost are used as the effectiveness and economic indexes of pressure-relief parameters, and the advantages and disadvantages of the pressure-relief effects of different parameters are evaluated so as to obtain the optimal pressure-relief parameters of high-pressure water jet slotting under the physical and mechanical properties of the coal seam. After the application of the research results in the contact lane No. 3 of the mining area No. 730, the frequency, total energy and spatial concentration of microearthquakes in the site are greatly reduced, which provides technical support for the safe mining of the working face.

**Key words:** rockburst; coal mine roadway; water jet slot; parameter optimization; numerical simulation

## 0 引 言

随着中国煤炭生产重心向深部转移, 煤矿巷道冲击地压灾害风险日益增加<sup>[1]</sup>, 成为制约矿井安全高效

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U21A20110, 51734009); 山东省重大科技创新工程项目 (2019SDZY02)

收稿日期: 2022-04-18

\*通信作者 (E-mail: caoanye@163.com)

生产的主要灾害之一<sup>[2-3]</sup>。高压水射流割缝卸压技术降低巷道高应力已成为深部开采煤层防治冲击地压的重要研究方向<sup>[4-5]</sup>。如何科学合理地确定高压水射流割缝卸压参数,对保证巷道整体稳定性及最大限度的降低巷道冲击地压风险等方面尤为重要。

高压水射流割缝卸压技术以高压水为动力在煤体内部进行冲击,在缝槽周围产生一定的卸压、弱化区域,对于煤体内部高应力释放有较好的应用效果<sup>[6]</sup>。国内外众多学者采用试验及数值模拟的方法开展了对高压水射流割缝卸压技术不同参数条件下卸压效果的研究。潘俊锋等<sup>[7]</sup>研究表明岩石缝槽的深度特征指数与喷嘴横移速度呈负相关关系;刘生龙等<sup>[8]</sup>针对内含不同空间模式下割缝孔的煤体开展了单轴压缩数值模拟研究,确定了最优的水力割缝空间分布模式;张永将等<sup>[9]</sup>建立了高压水射流环形割缝深度理论模型,分析了不同参数下水射流冲击破煤的应力变化规律;林柏泉等<sup>[10]</sup>研究了割缝孔周围裂纹在不同侧压系数下的扩展模式,发现动能峰值随侧压系数的增大呈线性增加。然而高压水射流割缝过程较为复杂,上述研究侧重于水射流割缝过程破坏机制及卸压效果分析,较少涉及应用于现场的割缝参数优化预测模型,煤层割缝参数依靠经验判断,尚未形成定量分析。

鉴于以上问题,本文以某矿 730 采区集中巷为研究对象,针对巷道所实施的高压水射流割缝卸压技术,通过构建卸压参数优化理论模型,采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟方法对不同理论参数值进行模拟分析,综合应力、能量、冲击危险指数及卸压成本等多项指标评估获得最优卸压参数,并经由现场工程实例验证了高压水射流割缝卸压参数优化理论计算模型的准确性。

## 1 研究背景

### 1.1 工作面概况

某矿 730 采区主采煤层为 3 煤,为强冲击倾向性煤层,顶底板弱冲击倾向性。煤层厚度 8.9~10.6 m,平均 10.2 m,埋深 930~1300 m,平均 1115 m。730 采区集中巷布置在煤层底板,两条集中巷之间间距 60 m,以 3 条联络巷进行连通,巷道平均埋深约为 1080 m。在经过断底施工、底煤置换及钻孔卸压等防冲措施后,对集中巷区域进行震动波 CT 反演分析,存在 A、B、C 三个明显高波速异常区,如图 1 所示。

### 1.2 采区集中巷冲击地压发生机理

#### (1) 冲击地压危险性影响因素分析

在两翼工作面采掘扰动应力作用下采区集中巷多处区域出现了高应力集中现象,针对煤岩自重应力场、开采活动及地质构造等因素分析如下:①采区集中巷所属 3 煤抗压强度为 21.1 MPa,直接顶、低岩层均为

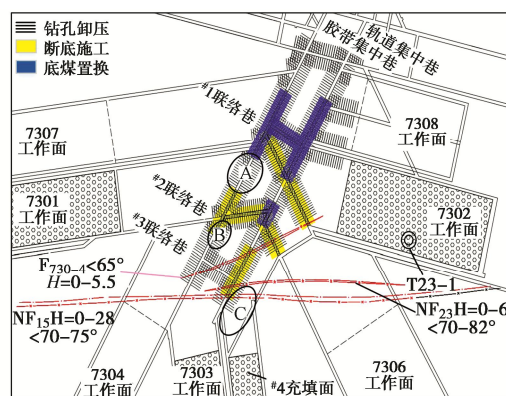


图 1 730 采区集中巷布置图

Fig. 1 Layout of centralized roadway in mining area No. 730

泥岩,平均抗压强度为 28.6 MPa,强度应力比值较小,导致巷道开挖后极易发生破坏并向围岩深部发展;②采区集中巷自重应力约为 27.0 MPa,已超过了煤体自身的抗压强度,煤体内集聚的弹性能随采深大幅增加;③7301、7302 及 7303 等工作面已回采结束,集中巷保护煤柱不仅受顶板岩层的重力载荷,且受采空区暴露的关键层弯曲下沉所带来的部分岩层载荷作用,应力集中程度较高;④采区集中巷区域揭露了  $F_{730-4}$ 、 $NF_{15}$  及  $NF_{23}$  三条断层落差均较大,断层对巷道失稳破坏的危险性较高。

#### (2) 冲击地压发生理论模型

基于以上 730 采区集中巷冲击地压危险性影响因素的分析,730 采区集中巷高应力区冲击地压发生机理可阐述为,集中巷煤柱区在超千米埋深下形成的高自重应力场、断层与褶曲所形成的构造应力场及两翼工作面回采后形成的支承压力场影响下处于应力、能量动态稳定状态,此时两翼采空区暴露的关键层破断下沉后突然释放的大量弹性能,导致巷道围岩系统应力、能量的增加,若其超过巷道围岩系统动力失稳的临界值,则易诱发冲击地压。

## 2 高压水射流割缝卸压防冲原理分析

### 2.1 高压水射流割缝对煤体应力分布的影响

为探究高压水射流割缝卸压前后巷道围岩的应力演化规律,对某一参数下的高压水射流割缝卸压后应力分布情况进行数值模拟分析。

卸压前后的垂直应力变化规律如图 2 所示,巷道帮部煤体垂直应力曲线由卸压前“单峰型”转变为卸压后的外低内高“双峰型”,卸压前后的应力峰值关系为:  $\sigma_a > \sigma_c > \sigma_b$ ,可分为 3 个区域:区域 I-I 为未割缝区域,为维护巷帮支护结构的稳定性不对支护区域割缝,在确保支护体稳定的情况下最大限度的对巷帮煤体进行卸压工作,未割缝长度  $H-L$  应小于巷道煤

壁至煤体内应力峰值距离。区域II-II为割缝区域, 缝槽的形成使巷帮煤体松动形成较大的破坏区域, 该区域煤体内无法形成永久的屈服变形, 使得卸压区域煤体应力集中程度大大降低; 区域III-III为割缝影响区域, 受钻孔底部缝槽影响, 应力升高后恢复至原岩应力值, 应力峰值 $\sigma_c$ 分布于距离钻孔孔底3 m左右的区域。

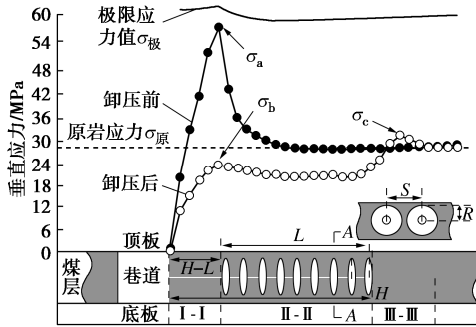


图2 卸压前后应力变化规律图

Fig. 2 Variation of stress before and after pressure relief

## 2.2 高压水射流割缝对煤体能量释放的影响

在进行高压水射流割缝卸压后, 钻孔周围的集中应力值大于煤体本身固有的强度值时, 钻孔周围煤体将会产生塑性变形, 从而在钻孔周边煤体中形成一定范围的塑性变形区。其塑性变形区的煤体仍可视为处于弹性状态<sup>[11]</sup>, 当煤岩体所受应力和应变满足线性关系时, 可将单位体积弹性应变能密度表示为

$$U_s = \frac{\sigma_{s1}^2 + \sigma_{s2}^2 + \sigma_{s3}^2 - 2\mu_s \cdot \sigma_{s1} \cdot \sigma_{s2} - 2\mu_s \cdot \sigma_{s2} \cdot \sigma_{s3} - 2\mu_s \cdot \sigma_{s1} \cdot \sigma_{s3}}{2E_s} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_{s1}$ ,  $\sigma_{s2}$ ,  $\sigma_{s3}$  为塑性破坏区应力场主导下单元体最大、中间及最小主应力;  $\mu_s$  为塑性破坏区煤体泊松比;  $E_s$  为塑性破坏区煤体的弹性模量。

卸压前后巷帮煤体能量变化规律如图3所示。考虑到巷道顶板未进行割缝卸压, 存在能量集聚区域, 呈“环形”分布。巷帮煤体在进行割缝卸压后, 能量释放效果明显, 大幅降低了巷帮煤体的能量集聚程度。

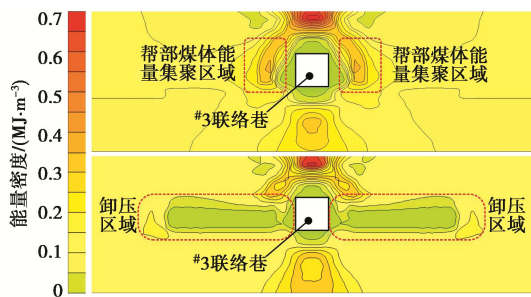


图3 卸压前后能量变化规律图

Fig. 3 Variation of energy before and after pressure relief

## 3 高压水射流割缝卸压参数理论模型

### 3.1 钻孔间距-割缝半径参数优化理论模型

高压水射流割缝卸压技术所形成的缝槽由内向外可分为破碎区、塑性区及弹性区3类<sup>[12]</sup>, 相邻钻孔的缝槽分区如图4所示。

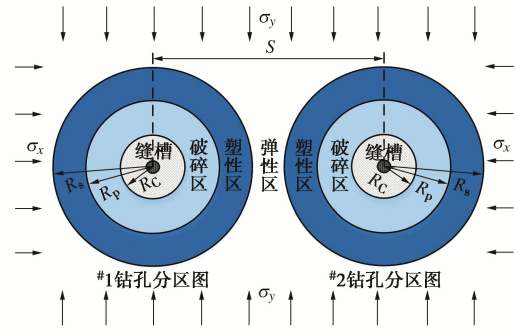


图4 钻孔间距-割缝半径理论模型图

Fig. 4 Theoretical model for drilling spacing and slot radius

在计算割缝半径 $R_c$ 时, 根据缝槽坍塌前后煤体体积不变原则, 可得到缝槽破碎区半径 $R_p$ 、最终破碎区半径 $R_{p1}$ 与割缝半径 $R_c$ 的关系为<sup>[13]</sup>

$$P\pi(R_p^2 - R_c^2) = \pi R_{p1}^2 \quad (2)$$

式中,  $P$  为缝槽塌落区的煤体碎胀系数, 通常取值为1.2~1.5。

在计算中, 认为原裂隙区半径不随缝槽塌孔区煤体裂隙的增大而增大, 即 $R_p = R_{p1}$ , 由式(2)可得

$$R_p = \sqrt{P/(P-1)} R_c \quad (3)$$

假设缝槽区域的煤体破坏遵循斜直线型库仑准则, 且煤体中含有大量随机裂隙使实际塑性区半径要更大, 修正后的缝槽塑性区半径 $R_s$ 为<sup>[14]</sup>

$$R_s = \left\{ \frac{[\sigma_y(1+\lambda) + 2c \cot \varphi](1 - \sin \theta)}{2c \cot \varphi} \right\}^{\frac{1 - \sin \theta}{2 \sin \theta}} \cdot \left\{ 1 + \frac{\sigma_y(1-\lambda)(1 - \sin \theta \cos 2\theta)}{[\sigma_y(1+\lambda) + 2c \cot \varphi] \sin \varphi} \right\} n R_p \quad (4)$$

式中:  $R_s$  为缝槽塑性区半径 (m);  $\sigma_y$  为煤层水平的垂直应力 (MPa);  $\lambda$  为侧压系数;  $c$  为煤体内聚力 (MPa);  $\varphi$  为煤体内摩擦角 (°);  $\theta$  为环向角度 (°);  $n$  为修正系数, 通常为1.1~1.3。

综上, 高压水射流割缝卸压技术钻孔间距 $S$ 小于或等于2倍的缝槽塑性区半径 $R_s$ 时卸压效果更佳, 考虑到钻孔间距 $S$ 小于2倍的割缝半径 $R_c$ 时, 会产生切割覆盖区, 为避免此种情况, 高压水射流割缝卸压技术钻孔间距 $S$ 应满足

$$2R_c \leq S \leq 2R_s \quad (5)$$



3.2 钻孔深度-割缝长度参数优化理论模型

假设本文所研究的地层均为各向同性且均质，在煤层矩形巷道（ $m, n$  分别为巷道宽度及高度）中进行高压水射流割缝卸压，巷道处于平面应变状态时，其受力模型如图 5 所示。

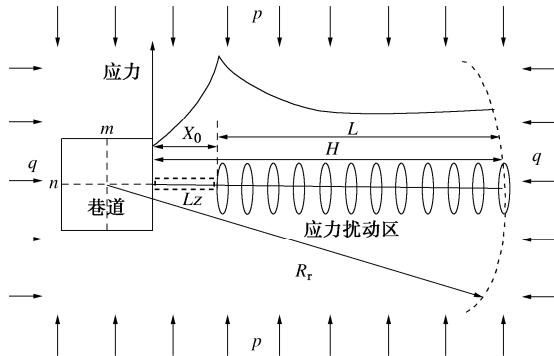


图 5 钻孔深度-割缝长度理论模型图

Fig. 5 Theoretical model for drilling depth and slot length

巷道在开挖后应力重新分布，巷道周围形成了应力扰动区，高压水射流割缝技术钻孔深度  $H$  应覆盖扰动区范围  $R_r$ 。考虑到实际情况下各种应力集中的影响，应力扰动区范围应比按原岩应力计算的值要大，取系数为 1.2，则巷道应力扰动范围为<sup>[15]</sup>

$$R_r = 4.47a\varpi = 5.364a \quad (6)$$

式中： $R_r$  为应力扰动区半径； $a$  为巷道等效半径， $a = (m + n) / \pi$ ， $m, n$  分别为矩形巷道的宽度和高度； $\varpi$  为应力扰动区计算修正系数，此处取值为 1.2。

高压水射流割缝卸压技术从钻孔底部开始割缝，割缝长度  $L$  应覆盖至巷道帮部煤体极限强度区域（即支承应力峰值区域）。其中，巷帮到煤体极限强度区域的距离  $X_0$  可用下式进行计算<sup>[16]</sup>：

$$X_0 = \ln \left[ \frac{\lambda(2.729(\eta\sigma_c)^{0.729} \cos \alpha \tan \phi + 2c - M\gamma_0 \sin \alpha)}{\lambda(2c - M\gamma_0 \sin \alpha) + 2P_x \tan \phi} \right] \cdot \frac{M\lambda}{2 \tan \phi} \quad (7)$$

式中： $M$  为开采煤层厚度（m）； $\lambda$  为侧压系数； $\alpha$  为煤层倾角（°）； $\phi$  为煤层与顶底板界面处的摩擦角（°）； $c$  为煤体内聚力（MPa）； $\gamma_0$  为煤体平均体积力（MPa）。 $\eta$  为煤岩流变系数， $\sigma_c$  为煤岩体的单轴抗压强度（MPa）。

综上，高压水射流割缝卸压技术割缝长度  $L$  大于或等于  $H - X_0$  时卸压效果更佳，考虑到维护巷帮支护结构稳定性不对支护区域  $L_z$  进行割缝，故高压水射流割缝技术钻孔深度  $H$  及割缝长度  $L$  可表示为

$$\left. \begin{aligned} H &\geq 5.364a, \\ H - X_0 &\leq L \leq H - L_z \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

3.3 高压水射流割缝卸压参数理论计算值

730 采区 3 煤内聚力  $c$  为 1.0 MPa，内摩擦角  $\phi$  为

32°，煤层倾角  $\alpha$  为 8°，煤体抗压强度  $\sigma_c$  为 21.10 MPa，流变系数  $\eta$  为 0.5，侧压系数  $\lambda$  取 0.47，环向角度  $\theta$  为 45°，碎胀系数  $P$  取值 1.35，修正系数  $n$  为 1.2，巷帮锚杆长度为 2.4 m，平均体积力  $\gamma_0$  为 0.014 MPa。将以上煤体参数代入高压水射流割缝卸压参数优化理论模型中，分别计算出各卸压参数理论计算值为：①割缝半径  $R_c$  为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 m 时，钻孔间距理论计算值  $S$  分别为 1.0~3.0, 2.0~7.0, 3.0~10.0, 4.0~14.0；②钻孔深度理论计算值  $H \geq 14.16$  m，割缝长度  $L$  理论计算值  $H - 5.58 \leq L \leq H - 2.4$ 。

4 高压水射流割缝参数数值模拟分析

4.1 数值模型构建及模拟方案设计

(1) 数值模型构建

本次数值模拟以 730 采区集中巷地质条件为基础，以#3 联络巷为研究对象，巷道埋深约 1080 m，巷宽及巷高分别为 5.0, 4.0 m。为了较为真实地反映现场巷道“掘进-支护-卸压”全过程，以便于更加准确地得到卸压后巷帮垂直应力、弹性能密度、冲击危险指数等指标的演化特征，在采用 FLAC<sup>3D</sup> 软件进行数值模拟时，对巷道进行锚杆锚索支护，且考虑到现场实际施工中巷道围岩的稳定，在#3 联络巷两端留设 15 m 的保护煤柱。根据 730 采区地质钻孔图岩性特点及实验室测定结果，数值模型及卸压区域如图 6 所示，煤层及顶底板岩体物理力学性质如表 1 所示。

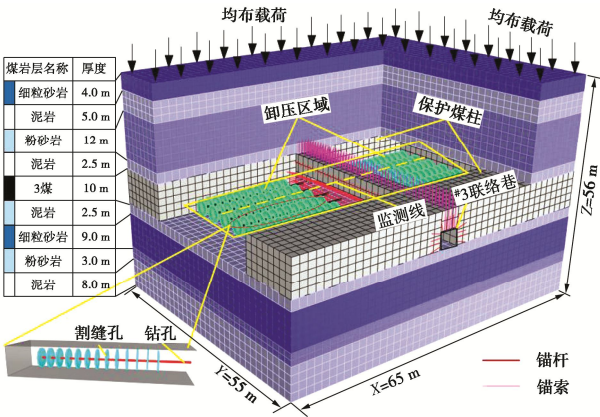


图 6 三维数值模型及卸压区域示意图

Fig. 6 3D numerical model and schematic diagram of pressure-relief area

表 1 煤岩层物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of coal strata

煤岩名称	体积模量/GPa	剪切模量/GPa	密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	内摩擦角/(°)	内聚力/MPa
#3 煤	2.41	0.98	1400	32	1.0
泥岩	3.55	1.82	2380	38	2.2
粉砂岩	5.22	3.38	2446	38	8.0
细粒砂岩	6.44	3.35	2600	36	8.5

## (2) 数值模拟方案

结合3.3节分析结果, 分别针对钻孔间距-割缝半径及钻孔深度-割缝长度4种因素对巷道卸压效果展开研究, 模拟方案如下:

钻孔间距-割缝半径因素: 构建钻孔间距-割缝半径为 0.5-1.0 m~0.5-3.0 m, 1.0-2.0 m~1.0-7.0 m, 1.5-3.0 m~1.5-10.0 m 及 2.0-4.0 m~2.0-14.0 m 共 28 种数值模型。

钻孔深度-割缝长度因素: 构建钻孔深度-割缝长度为 15-10 m, 17-12 m, 19-14 m, ..., 27-22 m 及 15-12 m, 17-14 m, 19-16 m, ..., 27-24 m 共 14 种数值模型。

本文采用卸压后垂直应力、弹性能密度、冲击危险指数及卸压成本作为评估高压水射流割缝卸压效果优劣的指标。根据岩体动力破坏的最小能量原理<sup>[17]</sup>, 煤岩体破坏真正消耗的能量总是单向应力状态的能量, 即

$$U_{\min} = \frac{\sigma_c^2}{2E} \quad (9)$$

式中, 3 煤抗压强度  $\sigma_c = 21.1$  MPa, 弹性模量  $E = 3490$  MPa, 故  $U_{\min}$  约为 0.0638 MJ。

定义卸压后的弹性能大小与发生动力破坏所需最小能量的比值为冲击危险指数  $K$  值:

$$K = \frac{U_s}{U_{\min}} \quad (10)$$

## 4.2 钻孔间距-割缝半径参数数值模拟分析

以割缝半径-钻孔间距 2.0-4.0~6.0 m 为例, 对卸压后煤体应力场、塑性区及能量场变化规律进行分析。

### (1) 应力场变化规律

卸压后巷帮煤体应力场变化规律如图 7, 8 所示, 割缝区域 II、III 及 IV 阶段有效卸压区域范围较大, 随钻孔间距的增大, 范围明显减小。钻孔间距 4.0~6.0 m 时卸压区域平均垂直应力分别为 9, 13, 16.8 MPa, 应力集中系数分别为 0.33, 0.48, 0.62, 随钻孔间距的增大, 卸压效果逐渐降低。

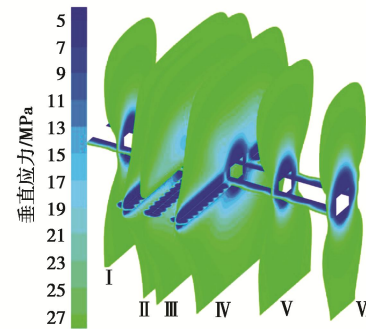
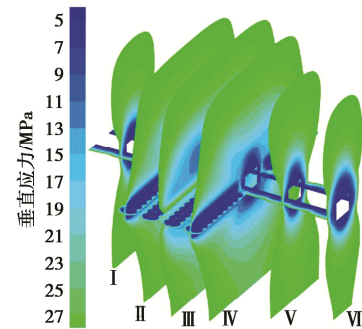
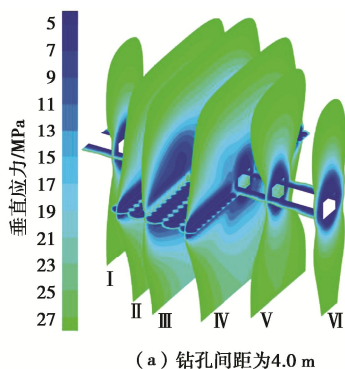


图 7 巷帮煤体有效卸压区域图

Fig. 7 Effective pressure-relief areas of roadway coal

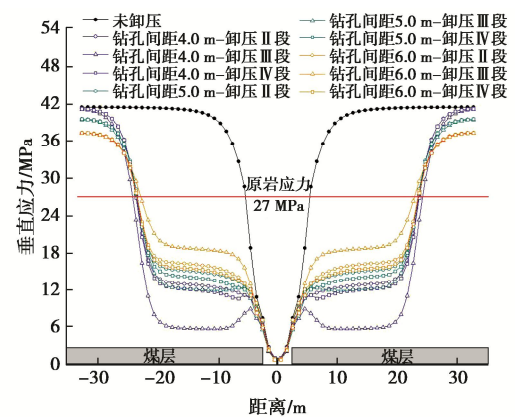


图 8 巷帮煤体应力场变化规律图

Fig. 8 Variation of stress field of roadway coal

### (2) 塑性区变化规律

塑性区变化规律如图 9 所示, 缝槽周围煤体为剪切破坏,  $x$  方向宽度约为 1.5 m,  $z$  方向宽度约为 0.5 m, 巷帮以里约为 0.6 m 及顶板以里约 1.2 m 范围内为张拉及剪切破坏共存。随着钻孔间距的增大, 卸压区域塑性区范围逐渐降低。

### (3) 巷道冲击危险指数评定

冲击危险指数云图如图 10 所示, 钻孔间距为 4.0~6.0 m 时卸压区平均弹性能密度分别降低至 0.048, 0.063, 0.084 MJ, 相较于卸压前平均弹性能密度 0.132 MJ, 降低率分别为 63.6%, 52.3%, 36.4%, 平均冲击危险性指数  $K$  值分别为 0.75, 0.98, 1.32,



随钻孔间距的增大而增大。

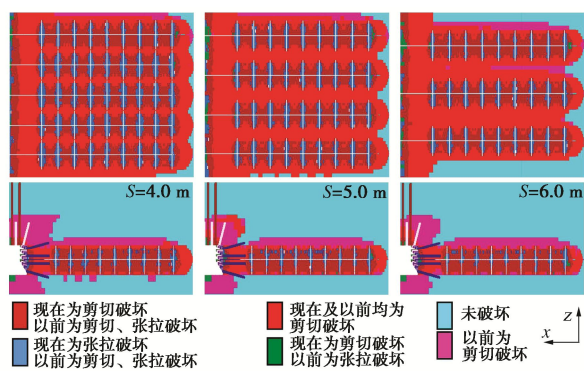


图 9 塑性区变化规律图

Fig. 9 Variation of plastic zone

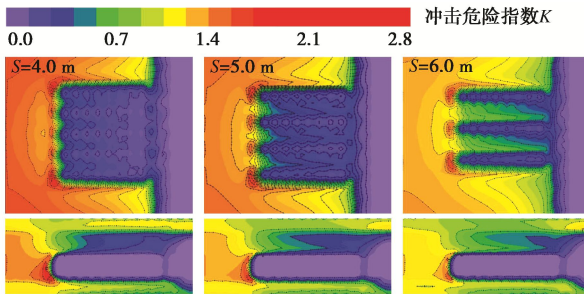


图 10 冲击危险指数  $K$  值变化规律图

Fig. 10 Variation of  $K$  value of shock risk index

(4) 最优钻孔间距-割缝半径

综上分析可得,不同的钻孔间距-割缝半径参数对卸压效果的高低影响较大,总体上,割缝半径越大卸压效果越高,钻孔间距越大卸压效果越低。其中,方案 10、18 及 19,即钻孔间距-割缝半径分别为 3.0-1.5, 4.0-2.0, 5.0-2.0 m 时卸压效果较好。以上 3 种方案卸压效果评估如表 2 所示,在综合考虑巷道卸压后煤体平均垂直应力、弹性能密度、冲击危险指数  $K$  值及卸压成本预估(每 20 m 长度巷道) 4 个指标后,确定钻孔间距-割缝半径为 5.0~2.0 m 时卸压效果最佳。

表 2 钻孔间距-割缝半径参数条件下卸压效果数据表

Table 2 Data of pressure-relief effects under drilling spacing and slot radius

钻孔间距 $S/\text{m}$	割缝半径 $R/\text{m}$	平均垂直应力 $/\text{MPa}$	平均弹性能密度 $/\text{MJ}$	巷道冲击危险指数	卸压成本预估
3.0	1.5	11	0.053	0.82	70 个割缝槽
4.0	2.0	9	0.048	0.75	50 个割缝槽
5.0	2.0	13	0.063	0.98	40 个割缝槽

4.3 钻孔深度-割缝长度因素模拟结果分析

以钻孔深度-割缝长度 23.0-18.0, 25.0-20.0, 27.0-22.0 m 为例,对卸压后煤体应力场、塑性区及能量场变化规律进行分析。

(1) 应力场变化规律

应力场变化规律如图 11,各钻孔深度条件下,巷道卸压后卸压区域内垂直应力均降低至巷道层位原岩

应力 27 MPa 以下,平均垂直应力为 15 MPa,应力集中系数为 0.56。仅在距巷帮 5.0 m 附近区域存在应力集中现象,平均垂直应力为 16.5 MPa。

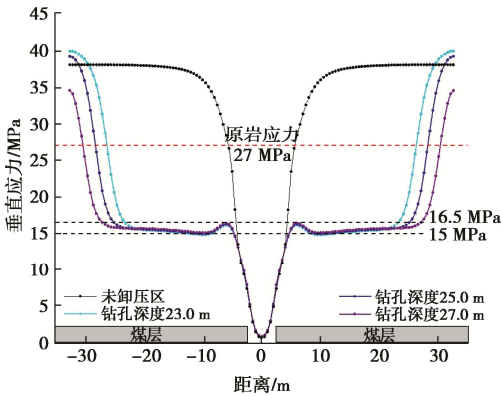


图 11 应力场变化规律图

Fig. 11 Variation of stress field

(2) 塑性区变化规律

塑性区变化规律如图 12,缝槽周围煤体为剪切破坏,  $X$  方向宽度约为 1.5 m,  $Z$  方向宽度约为 0.3 m,巷帮以里约为 0.6 m 范围内为张拉破坏及剪切破坏共存。随钻孔深度的增大,卸压区域塑性区范围逐渐增大。

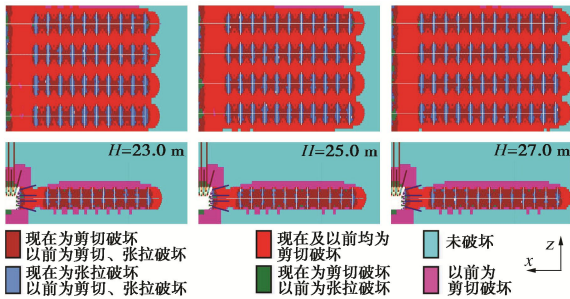


图 12 塑性区变化规律图

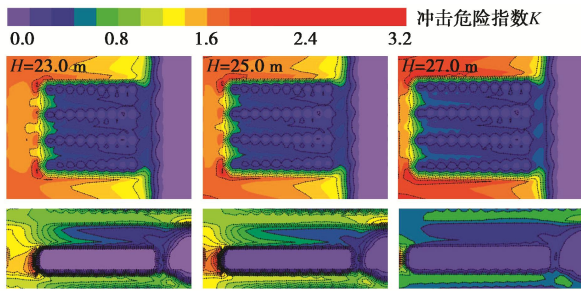
Fig. 12 Variation of plastic zone

(3) 巷道冲击危险指数评定

冲击危险指数云图为图 13 所示,钻孔深度 23.0, 25.0, 27.0 m 时卸压区平均弹性能密度分别降低至 0.069, 0.070, 0.072 MJ,相较于卸压前平均弹性能密度 0.132 MJ,降低率分别为 47.7%, 47.0%, 45.5%。冲击危险性指数  $K$  平均值分别为 1.08, 1.10, 1.12,随着钻孔深度的增大而增大。

(4) 最优钻孔深度-割缝长度

综上分析可得,不同钻孔深度-割缝长度参数对卸压效果的高低影响较大,总体上,钻孔深度越大,所形成的卸压带就越大,卸压效果越高,但钻孔深度不可能无限长,当  $H=25$  m 时已能够使巷帮以里 20 m 范围内煤体垂直应力降低到原岩应力以下,应力集中系数为 0.56。就割缝长度而言,当未割缝长度为 3.0 及 5.0 m 条件下卸压区域的垂直应力均可降至原岩应力以下,卸压效果均显著。考虑到卸压效果最大化且保证巷道整体的稳定性,确定钻孔深度-割缝长度为 25.0-20.0 m 时卸压效果最佳。

图13 冲击危险指数  $K$  值变化规律图Fig.13 Variation of  $K$  value of shock risk index

## 5 工程实例验证

### 5.1 卸压方案设计

在#3联络巷帮部煤体实施高压水射流割缝卸压措施,共实施割缝钻孔6对,钻孔位置距离巷道底板1.5 m,钻孔直径113 mm,钻孔垂直于巷道帮部,与煤层倾角一致。具体的试验方案如图14所示。

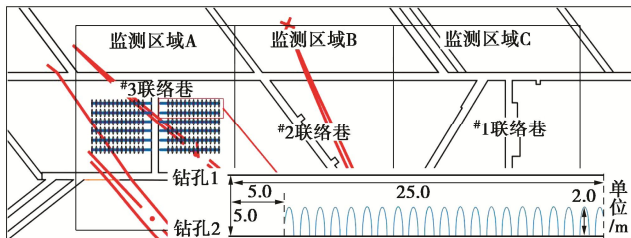


图14 水射流割缝卸压布置图

Fig. 14 Layout of pressure relief by water jet slotting

### 5.2 卸压效果检验

鉴于730采区集中巷使用期间无 $10^4$  J以上的能量,故分别将能量 $E \geq 10^3$  J,  $E < 10^3$  J的微震事件定义为高能级、低能级事件。对730采区#3联络巷帮部煤体高压水射流割缝卸压前后微震情况进行统计。在卸压前一周内采区集中巷区域共发生28次微震事件,总能量为 $2.49 \times 10^4$  J,微震日频次为4次/d,高能级微震发生频率较低,占比25.0%;6月20日在3#联络巷两帮进行了高压水射流割缝卸压后,接下来的第一、二周时间内,分别发生了19次、13次微震事件,微震频次大幅度下降,总能量分别为 $1.52 \times 10^4$ ,  $9.88 \times 10^3$  J,相较于卸压前降低了38.96%, 60.32%;微震日频次分别为2.71, 1.86 d,相较于卸压前下降了32.25%, 53.50%;高能级微震事件占比明显下降,为15.79%, 23.08%,卸压效果明显。

对采区集中巷不同区域卸压前后的高、低能级微震空间集中度进行统计分析,如图15所示。对比#3联络巷高压水射流割缝卸压前后A、B及C区域的高、低能级的微震空间集中度,卸压前06-14—06-20时间段内高能级的微震空间集中度最高在B区域为0.01,卸压后06-21—06-27时间段内B区域的微震空间集中度降低了40%,06-28—07-04时间段内B区域的微震空间集中度为0。卸压前06-14—06-20时间段内低能

级的微震空间集中度最高在A区域为0.027,卸压后06-21—06-27、06-28—07-04时间段内A区域的微震空间集中度分别降低了44.4%, 66.7%。对比C区域,卸压后06-21—06-27、06-28—07-04时间段内的高能级的微震空间集中度较卸压前06-14—06-20时间段均降低了57.1%;C区域卸压后低能级的微震空间集中度较卸压前分别降低了21.7%, 34.8%。

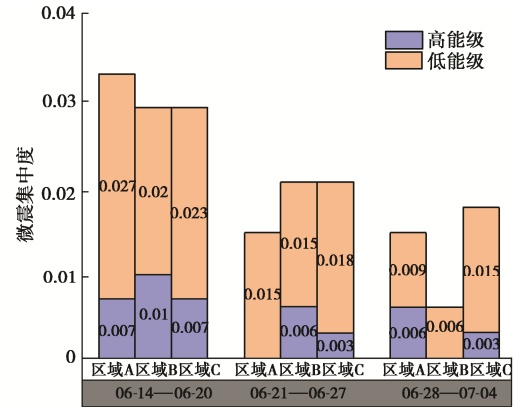


图15 微震空间集中度统计图

Fig. 15 Statistical map of spatial concentration of microseism

## 6 结论

(1)研究揭示了730采区集中巷冲击地压发生机理,基于应力分布影响及能量释放特征揭示了高压水射流割缝卸压防冲原理,构建了钻孔间距-割缝半径及钻孔深度-割缝长度参数优化理论模型。

(2)研究揭示了不同理论参数下应力场、塑性区、弹性变形能及冲击危险指数的变化规律,综合了卸压后垂直应力等四项指标后,获得了最优卸压参数为:钻孔间距-割缝半径为5.0 m-2.0 m,钻孔深度-割缝长度为25 m-20 m。

(3)现场工程实例表明,采用最优参数卸压后采区集中巷高、低能级的微震频次、总能量及空间集中度均有明显下降,卸压效果明显,验证了参数优化理论模型的可靠性,本文研究可为深部冲击地压煤层高压水射流割缝技术卸压参数的设计提供借鉴。

### 参考文献:

- [1] 窦林名,田鑫元,曹安业,等.我国煤矿冲击地压防治现状与难题[J].煤炭学报,2022,47(1):152-171. (DOU Linming, TIAN Xinyuan, CAO Anye, et al. Present situation and problems of coal mine rock burst prevention and control in China[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(1): 152-171. (in Chinese))
- [2] XUE C C, CAO A Y, GUO W H, et al. Mechanism and energy evolution characteristics of coal burst in mining thick, deep, and large inclined coal seams: a case study from a Chinese coal mine[J]. Geofluids, 2022, 2022: 1-18.

- [3] 王高昂, 朱斯陶, 姜福兴, 等. 高应力厚煤层大巷孤立煤体蠕变失稳冲击机理及防治研究[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(9): 1689-1698, 9. (WANG Gaoang, ZHU Sitao, JIANG Fuxing, et al. Creep instability rock burst mechanism and prevention technology of isolated coal mass in roadways of high-stress thick coal seam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(9): 1689-1698, 9. (in Chinese))
- [4] 袁 亮, 林柏泉, 杨 威. 我国煤矿水力化技术瓦斯治理研究进展及发展方向[J]. 煤炭科学技术, 2015, **43**(1): 45-49. (YUAN Liang, LIN Baiquan, YANG Wei. Research progress and development direction of gas control with mine hydraulic technology in China coal mine[J]. Coal Science and Technology, 2015, **43**(1): 45-49. (in Chinese))
- [5] 周新超, 马小晶, 廖翔云, 等. 磨料水射流冲击孔隙岩体的SPH模拟研究[J]. 岩土工程学报, 2022, **44**(4): 731-739. (ZHOU Xinchao, MA Xiaojing, LIAO Xiangyun, et al. Numerical simulation of abrasive water jet impacting porous rock based on SPH method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2022, **44**(4): 731-739. (in Chinese))
- [6] YANG Z, DOU L, LIU C, et al. Mechanism of rock burst in roadway side wall and the application of water jet pressure relief technology in deep mine[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2017, **34**(4): 670-677, 729.
- [7] 潘俊锋, 马文涛, 刘少虹, 等. 坚硬顶板水射流预制缝槽定向预裂防冲技术试验[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, **40**(8): 1591-1602. (PAN Junfeng, MA Wentao, LIU Shaohong, et al. A prevention technology of rock burst based on directional presplitting of water jet prefabricated slot in hard roof[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, **40**(8): 1591-1602. (in Chinese))
- [8] 刘生龙, 朱传杰, 林柏泉, 等. 水力割缝空间分布模式对煤层卸压增透的作用规律[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, **37**(5): 983-990. (LIU Shenglong, ZHU Chuanjie, LIN Baiquan, et al. The effect of spatial distribution mode of hydraulic slotting on pressure relief and permeability enhancement of the coal seam[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, **37**(5): 983-990. (in Chinese))
- [9] 张永将, 郭寿松. 高压水射流环形割缝深度理论模型及应用[J]. 煤炭学报, 2019, **44**(增刊 1): 126-132. (ZHANG Yongjiang, GUO Shousong. Theoretical model of annular slotting depth for high pressure water jet and its application[J]. Journal of China Coal Society, 2019, **44**(S1): 126-132. (in Chinese))
- [10] 林柏泉, 刘厅, 邹全乐, 等. 割缝扰动区裂纹扩展模式及能量演化规律[J]. 煤炭学报, 2015, **40**(4): 719-727. (LIN Baiquan, LIU Ting, ZOU Quanle, et al. Crack propagation modes and energy evolution within slotting disturbed zone[J]. Journal of China Coal Society, 2015, **40**(4): 719-727. (in Chinese))
- [11] 镐振, 郭林峰, 赵希栋, 等. 回采巷道围岩冲击破坏能量特征分析[J]. 煤炭学报, 2020, **45**(12): 3995-4005. (HAO Zhen, GUO Linfeng, ZHAO Xidong, et al. Analysis of burst failure energy characteristics of mining roadway surrounding rock[J]. Journal of China Coal Society, 2020, **45**(12): 3995-4005. (in Chinese))
- [12] 贾传洋, 蒋宇静, 张学朋, 等. 大直径钻孔卸压机理室内及数值试验研究[J]. 岩土工程学报, 2017, **39**(6): 1115-1122. (JIA Chuanyang, JIANG Yujing, ZHANG Xuepeng, et al. Laboratory and numerical experiments on pressure relief mechanism of large-diameter boreholes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, **39**(6): 1115-1122. (in Chinese))
- [13] 刘少虹. 动载冲击地压机理分析与防治实践[D]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2014. (LIU Shaohong. The Study on the Mechanism and Prevention of Dynamic-Loading Rockburst[D]. Beijing: China Coal Research Institute, 2014. (in Chinese))
- [14] 李云鹏, 张宏伟, 朱志洁, 等. 冲击危险煤层卸压钻孔安全参数研究[J]. 中国安全科学学报, 2018, **28**(11): 122-128. (LI Yunpeng, ZHANG Hongwei, ZHU Zhijie, et al. Study on safety parameters of pressure relief borehole in rockburst coal seam[J]. China Safety Science Journal, 2018, **28**(11): 122-128. (in Chinese))
- [15] 王志强, 王 鹏, 石 磊, 等. 基于沿空巷道围岩应力分析的防冲机理研究[J]. 中国矿业大学学报, 2020, **49**(6): 1046-1056. (WANG Zhiqiang, WANG Peng, SHI Lei, et al. Research on prevention of rock burst based on stress analysis of surrounding rock of gob-side entry[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2020, **49**(6): 1046-1056. (in Chinese))
- [16] 李 铀, 袁 亮, 刘冠学, 等. 圆形巷道围岩扰动区及其临界破坏深度的确定[J]. 采矿与安全工程学报, 2016, **33**(5): 795-799. (LI You, YUAN Liang, LIU Guanxue, et al. Determination of disturbed region and critical failure depth of surrounding rock in circular roadway[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2016, **33**(5): 795-799. (in Chinese))
- [17] 赵阳升, 冯增朝, 万志军. 岩体动力破坏的最小能量原理[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, **22**(11): 1781-1783. (ZHAO Yangsheng, FENG Zengchao, WAN Zhijun. Least energy principle of dynamical failure of rock mass[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, **22**(11): 1781-1783. (in Chinese))