

# 高应力巷帮阶梯型卸压孔合理参数研究

宋代福<sup>1</sup>, 马志涛<sup>1</sup>, 崔永强<sup>2</sup>, 卢可玉<sup>1</sup>

(1. 山东科技大学 能源与矿业工程学院, 山东 青岛 266590;

2. 中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580)

**摘要:**为减少常规大直径卸压孔对巷帮稳定性扰动, 针对阶梯型钻孔卸压方法, 利用 ABAQUS 建立数值模型, 综合考虑巷道围岩变形、垂直应力降低和应力峰值转移等因素, 对比分析相同条件下常规大直径钻孔卸压和阶梯型钻孔卸压效果, 讨论了阶梯型卸压孔不同组合长度、直径和钻孔间距等合理钻孔布置参数。结果表明: 阶梯型钻孔卸压能很好降低巷帮附近围岩垂直应力, 将应力峰值向深部转移, 还能有效降低钻孔对围岩变形的影响, 提高巷道结构稳定性。采用阶梯型钻孔卸压时, 靠近巷帮小直径段的孔径不宜大于 0.10 m, 钻孔长度应小于应力降低区宽度; 而深部大直径段的孔径宜大于 0.30 m, 且钻孔长度不小于围岩应力集中区宽度。卸压孔单排布置时, 孔间距小于 1.00 m 时卸压效果明显。

**关键词:**阶梯型卸压孔; 围岩变形; 钻孔参数; 数值模拟

**中图分类号:**TD322

**文献标志码:**A

## Research on reasonable parameters of stepped pressure relief holes in high stress roadway

SONG Daifu<sup>1</sup>, MA Zhitao<sup>1</sup>, CUI Yongqiang<sup>2</sup>, LU Keyu<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Mining Engineering, Shandong University of Science and Technology,

Qingdao, Shandong 266590, China;

2. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum, Qingdao, Shandong 266580, China)

**Abstract:** In order to reduce the disturbance of large-diameter pressure relief holes to roadway stability, a new type of drilling pressure relief method, the stepped pressure relief hole method, was proposed. A numerical model considering such factors as roadway surrounding rock deformation, vertical stress reduction and stress peak transfer was first established by using the FEM software ABAQUS. Then, the pressure relief effects of conventional large-diameter boreholes and stepped pressure relief holes under the same conditions were compared and analyzed. Finally, the reasonable drilling parameters such as drilling length, drilling diameter and the hole space were discussed. The results show that the stepped pressure relief holes can not only greatly reduce the vertical stress of surrounding rock near the roadway wall and transfer the stress peak to the deep rock, but they can also effectively reduce the influence of boreholes on surrounding rock deformation and improve the stability of roadway structure. When stepped boreholes is adopted for pressure relief, the diameter of the boreholes in the small-diameter section near the roadway should not be greater than 0.10 m and the length should be less than the width of the stress reduction zone; but the diameter of the boreholes in the deep large-diameter section should be greater than 0.30 m and the length of the borehole should not be less than the width of the surrounding rock stress concentration area. When the stepped

收稿日期: 2021-08-09

基金项目: 山东省自然科学基金项目(ZR2019QEE015)

作者简介: 宋代福(1996—), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事矿山岩层稳定性控制研究。

马志涛(1974—), 男, 山东烟台人, 副教授, 博士, 主要从事矿山岩石力学及岩层稳定性控制研究, 本文通信作者。

E-mail: sdustmzt@163.com

pressure relief holes are arranged in a single row, the pressure relief effect is obvious if the hole spacing is less than 1.00 m.

**Key words:** stepped pressure relief hole; deformation of rock mass; drilling parameters; numerical simulation

冲击地压是煤岩采动诱发高强度弹性能瞬间释放,引起相应采动空间煤岩强烈震动和冲击挤出的动力现象,是我国煤矿常见的重大灾害事故<sup>[1]</sup>。众多学者已对冲击地压发生机理、冲击地压预测及防治方法等开展了系统研究<sup>[2-4]</sup>。目前,钻孔卸压是我国防治矿井冲击地压最常用、最有效的方法之一,对于钻孔卸压机理,马斌文等<sup>[5]</sup>基于冲击地压应力控制理论,推导了钻孔卸压区的边界方程,分析了煤体性质、钻孔直径及应力环境对钻孔卸压区分布的影响;袁红辉等<sup>[6]</sup>从围岩破裂面与主应力夹角、围岩峰值强度和弹性模量变化角度,分析了卸压孔对围岩整体力学性能的影响;李生舟<sup>[7]</sup>通过理论分析和FLAC<sup>3D</sup>数值模拟获得了扩孔卸压后煤体破坏形态、塑性区范围及应力分布规律;谭云亮等<sup>[8]</sup>研究了深部煤巷帮部不同破坏类型的能量释放特征,揭示了深部煤巷帮部“卸-固”协同控制机理,研发了深部煤巷帮部失稳“卸-固”协同控制技术;宋希贤等<sup>[9]</sup>采用RFPA<sup>2D</sup>-Dynamic数值软件研究动力扰动下深部巷道卸压孔与锚杆联合支护作用机理;赵振华等<sup>[10]</sup>对含卸压孔的辉长岩试样进行应力松弛试验,获得了其峰前应力松弛特性、松弛模型和超声波变化规律,揭示了应力松弛过程的卸压孔作用机制。卸压孔参数研究方面,李东印等<sup>[11]</sup>用FLAC<sup>3D</sup>模拟分析了高应力煤巷卸压孔的形状参数对其卸压效果的影响,发现卸压区范围随卸压孔孔径的增大而增大,随钻孔深度的增加而减小;王俊铭等<sup>[12]</sup>借助COMSOL模拟软件分析了扩孔卸压后煤体所受应力变化和渗透率变化情况,发现扩孔挖出煤量越大,扩孔孔洞周边煤体的径向位移形变量也越大;耿敏敏等<sup>[13]</sup>采用数值模拟法对不同卸压孔布置方式的卸压效果进行计算和对比分析,发现卸压孔五花布置时卸压效果最为明显;齐燕军等<sup>[14]</sup>通过含预制卸压孔的煤柱模型相似试验,分析了卸压孔直径对煤柱破坏特征、强度特征及声发射特性的影响,确定了卸压孔直径的合理取值范围;高永格等<sup>[15]</sup>利用数值模拟和现场试验对不同孔径周围应力分布规律进行研究,发现相同地质条件下适当增大钻孔直径可有效增加钻孔周围塑性区半径,从而提高钻孔卸压效果。

上述研究表明,钻孔卸压法非常有效,钻孔参数对卸压效果影响较大,孔径越大、孔间距越小,卸压效果越明显。但也有研究表明,大直径钻孔会弱化巷道围岩力学性能,对破碎围岩造成较大扰动,使巷道围岩变形过大,降低巷道稳定性支护控制。如黄文等<sup>[16]</sup>采用ABAQUS有限元模拟,对扩孔段的成孔效果和最大扩孔直径进行分析,发现扩孔段直径与围岩强度和围压均呈负相关关系;顾士坦等<sup>[17]</sup>也发现在钻孔卸压施工过程中,为保证卸压效果,经常会出现卸压过度的现象,对巷道浅部围岩承载结构造成破坏,围岩变形剧烈,使开挖扰动后已发生破碎的巷道浅部围岩更加破碎,大大增加了后期支护难度和支护成本。因此,如何既能保证钻孔卸压效果,又能降低卸压孔对巷道浅部围岩扰动是钻孔卸压法亟待解决的问题。

本研究利用ABAQUS有限元软件建立数值仿真模型,对阶梯型钻孔卸压技术进行模拟,比较分析卸压效果和对围岩扰动的影响,探讨钻孔长度、直径和钻孔间距等参数的影响。

## 1 钻孔卸压机理分析

如图1所示,钻孔卸压是在高应力煤体内施工大直径钻孔,使周围煤体破裂变形,释放煤体内弹性应变能,降低煤体应力。图中, $\sigma$ 、 $L$ 、 $s$ 分别为应力、钻孔长度、钻孔与巷帮距离。当卸压孔布置合理,卸压孔周围破碎区相互连通,便可形成大范围的卸压区,使得巷道煤壁附近的高应力集中区向煤体深部转移,从而起到防治冲击地压的目的<sup>[18]</sup>。

钻孔卸压效果主要取决于钻孔周边煤体破坏程度,煤体破坏范围越大,卸压效果越明显。假定煤岩为弹塑性体,卸压孔周边弹塑性区及围岩单元体受力状态如图2所示。其中, $r_0$ 为钻孔半径, $R_p$ 为塑性区半径, $R_e$ 为弹性区半径且趋于无穷远, $p_0$ 为围岩地应力, $\sigma_r$ 、 $\sigma_\theta$ 分别为单元体径向和环向正应力, $\tau_{r\theta} = \tau_{\theta r}$ 为单元体切向应力。根据岩体弹塑性理论<sup>[19]</sup>,由轴对称应力问题,可得钻孔周边弹性区应力和位移如式(1)所示:

$$\begin{cases} \sigma_r^e = p_0 \left(1 - \frac{R_p^2}{r^2}\right) + p_{ep} \frac{R_p^2}{r^2}, \\ \sigma_\theta^e = p_0 \left(1 + \frac{R_p^2}{r^2}\right) - p_{ep} \frac{R_p^2}{r^2}, \\ u^e = \frac{R_p^2}{2Gr} (p_0 - p_{ep}). \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\sigma_r^e$  为弹性区围岩径向应力, MPa;  $\sigma_\theta^e$  为弹性区围岩环向应力, MPa;  $u^e$  为弹性区围岩径向位移, m;  $G$  为围岩剪切模量, GPa;  $p_{ep}$  为塑性区岩体反作用力, kN。

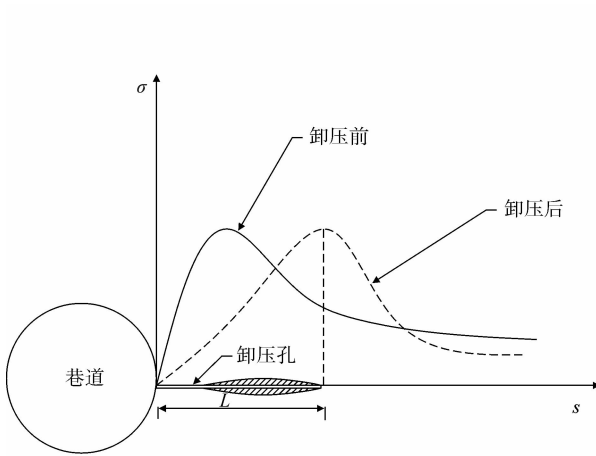


图1 钻孔卸压机理示意图

Fig. 1 Mechanism of drilling pressure relief

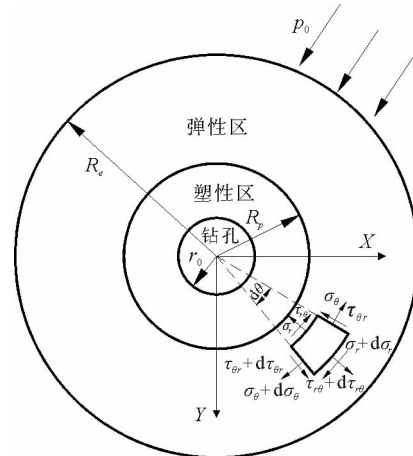


图2 卸压孔周边岩体单元受力模型

Fig. 2 Support pressure distribution on both sides of the pressure relief hole

对于钻孔周围塑性区,联合平衡微分方程和 Mohr-Coulomb 准则,可得塑性区应力为:

$$\begin{cases} \sigma_r^p = (p_i + C \cot \varphi) \left(\frac{r}{r_0}\right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - C \cot \varphi, \\ \sigma_\theta^p = (p_i + C \cot \varphi) \left(\frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}\right) \left(\frac{r}{r_0}\right)^{\frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}} - C \cot \varphi. \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\sigma_r^p$  和  $\sigma_\theta^p$  分别为钻孔围岩塑性区径向应力和环向应力, MPa;  $p_i$  为钻孔周边支护阻力,对于卸压孔取  $p_i = 0$ ;  $C$  为岩体内聚力, MPa;  $\varphi$  为岩体内摩擦角,  $^\circ$ 。

根据弹性区和塑性区完全接触边界条件,有:

$$\sigma_r^e = \sigma_r^p, \sigma_\theta^e = \sigma_\theta^p. \quad (3)$$

联立式(1)、(2)和(3),可得塑性区半径  $R_p$ 、弹性区边界径向位移  $u^e$  分别为:

$$R_p = r_0 \left[ \frac{(p_0 + C \cot \varphi)(1 - \sin \varphi)}{C \cot \varphi} \right]^{\frac{1 - \sin \varphi}{2 \sin \varphi}}, \quad (4)$$

$$u^e|_{r=R_p} = \frac{R_p}{2G} (p_0 \sin \varphi + C \cos \varphi). \quad (5)$$

由式(4)和(5)可知,当原岩应力和围岩力学参数一定时,卸压孔围岩塑性区半径  $R_p$  与卸压孔大小  $r_0$  成正比,卸压孔越大,卸压效果越明显,但也导致孔周围弹性区径向位移  $u^e$  增大。因此,实际工程中,卸压孔过大会导致巷道围岩产生较大的竖向变形,不利于巷道稳定性控制,为解决上述问题提出阶梯型扩孔卸压技术。

2 阶梯型钻孔卸压分析

2.1 数值模型

根据某矿开采实际情况,煤岩体物理力学参数如表 1 所示,利用 ABAQUS 有限元软件,建立数值模型如图 3 所示。模型尺寸(长×宽×高)为 60 m×10 m×39 m,巷道宽 4 m,高 3.2 m,采用 Mhor-Coulomb 准则,模型周边法向位移约束,底部固支。设煤层埋深 800 m,顶部施加均布荷载 20 MPa。

模拟步骤:首先进行初始地应力平衡计算,再进行巷道开挖,并进行第二次静态平衡计算;然后,在巷道右侧距巷道底板 1.5 m 处,模拟不同工况卸压孔开挖,计算围岩垂直应力和变形,分析比较卸压效果。

表 1 岩层物理力学参数表

Tab. 1 Physical and mechanical parameters of rock stratum

岩层名称	密度/(kg/m <sup>3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
砂岩	2 600	10.07	0.23	3.3	37
砂质泥岩	2 300	6.20	0.24	1.2	26
煤	1 600	4.58	0.23	1.1	27
泥岩	1 900	8.30	0.23	2.0	31
灰岩	2 500	9.60	0.21	2.6	36

2.2 卸压效果比较

取常规大直径卸压孔的孔径为 0.3 m, 钻孔长度为 20 m;阶梯型卸压孔在巷帮浅部为小直径钻孔,孔径 0.1 m,长度 2.5 m,深部采用大直径钻孔,孔径 0.3 m,长度 17.5 m。着重比较卸压孔范围内煤岩体垂直应力和巷道围岩变形情况,结果如图 4、图 5 所示。比较可知,在钻孔范围内,两种形式钻孔均能有效降低围岩垂直应力,将应力峰值向煤体深部转移,起到卸压作用。由于阶梯型卸压孔在巷帮围岩浅部采用 0.1 m 小直径钻孔,相比常规大直径钻孔,巷道顶板和两帮的最大位移量分别降低了约 70%和 63%,有效降低了围岩变形量,更有利于巷道稳定性控制。

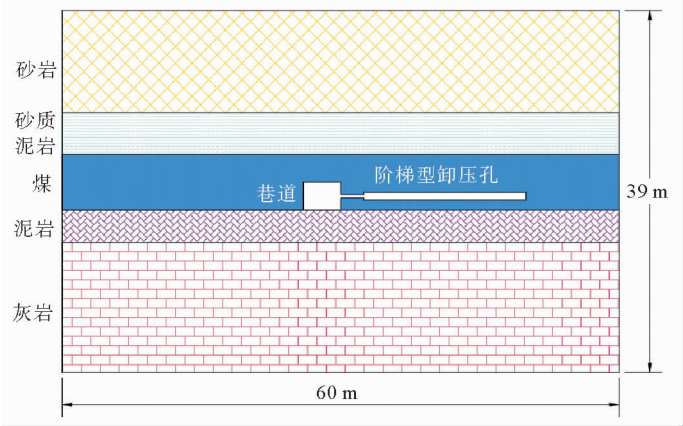


图 3 阶梯型钻孔卸压数值模型

Fig. 3 Numerical model of stepped bore hole pressure relief

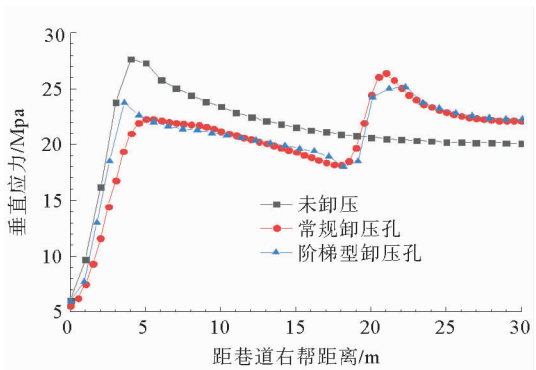


图 4 不同卸压方式围岩垂直应力变化  
Fig. 4 Vertical stress variations of different pressure relief methods

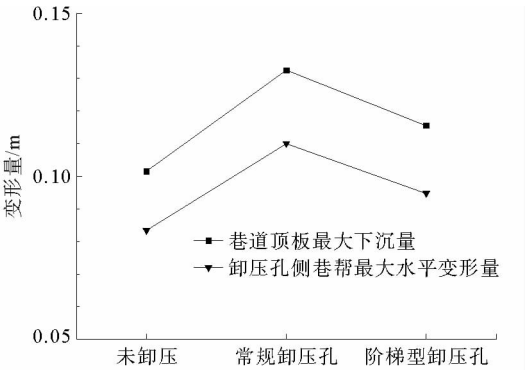


图 5 不同卸压方式围岩变形量  
Fig. 5 Surrounding rock deformation of different pressure relief methods

### 3 阶梯型钻孔卸压合理参数分析

#### 3.1 卸压孔直径

取孔径分别为 0.1、0.2 和 0.3 m 三种常规卸压孔,单排布置,孔间距 0.6 m,孔长度 20 m。图 6 为钻孔卸压后围岩垂直应力分布。从图中可以看出,当孔径为 0.1 m 时,围岩应力没有降低,应力峰值几乎没有向深处转移,无卸压效果;当孔径为 0.2 m 时,垂直应力开始降低,应力峰值转移不明显,卸压效果微弱;孔径增至 0.3 m 时,垂直应力显著降低,比原岩应力降低约 22%,应力峰值向围岩深部转移明显,卸压效果显著。因此,对于阶梯型卸压孔,靠近巷帮小直径段的孔径不宜大于 0.1 m,而深部大直径段的孔径宜大于 0.2 m,大于 0.3 m 时卸压效果显著。

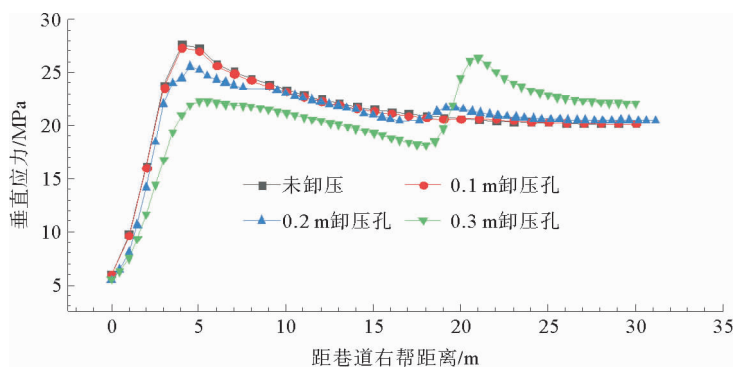


图 6 不同孔径卸压孔围岩垂直应力比较

Fig. 6 Vertical stress distribution of different diameter pressure relief holes

#### 3.2 卸压孔长度

阶梯型卸压孔长度  $L$  由小直径段长度  $L_1$  和大直径段长度  $L_2$  组成。一般情况,  $L_1$  不大于巷帮应力降低区的宽度,  $L_2$  则应大于应力集中影响区域宽度,如图 7 所示。以埋深 800 m,宽 4.0 m,高 3.2 m 的巷道为例,不考虑巷道支护阻力,模拟开挖后巷道围岩支承压力及原岩应力如图 8,可见距巷帮 0~3 m 范围为应力降低区,3~20 m 为应力集中区,应力峰值距巷帮约 5 m,故取阶梯型卸压孔总长度  $L=20$  m,其中  $L_1$  和  $L_2$  长度按表 2 取值;取卸压孔小直径段的孔径为 0.10 m,大直径段孔径为 0.30 m,钻孔间距 0.60 m,单排布置。则卸压效果如图 9 和图 10 所示。

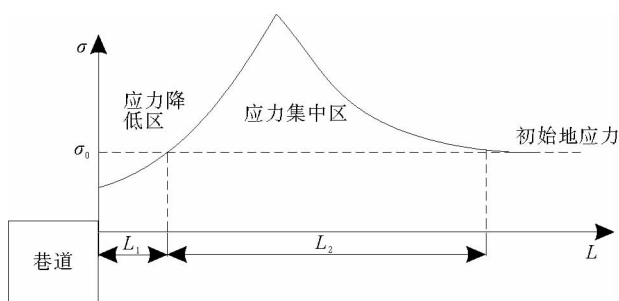


图 7 钻孔长度确定示意图

Fig. 7 Schematic diagram of drilling length determination

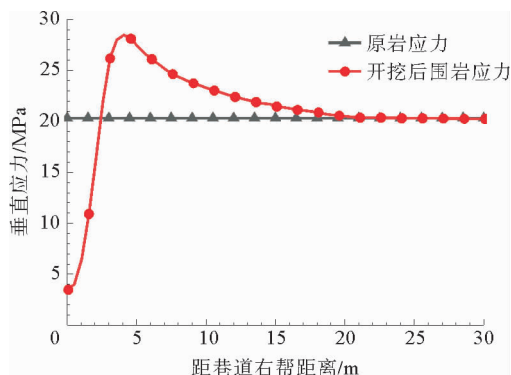


图 8 巷道围岩支承压力及原岩应力

Fig. 8 Supporting pressure and original stress of roadway surrounding rock

表 2 阶梯型卸压孔长度组合方案

Tab. 2 Length combination scheme of stepped drilling and pressure relief drilling m

方案	孔径		钻孔长度 $L$		间距
	小直径段	大直径段	小直径段长度 $L_1$	大直径段长度 $L_2$	
方案 1			0	20.0	
方案 2			2.5	17.5	
方案 3	0.10	0.30	3.0	17.0	0.60
方案 4			4.0	16.0	
方案 5			5.0	15.0	

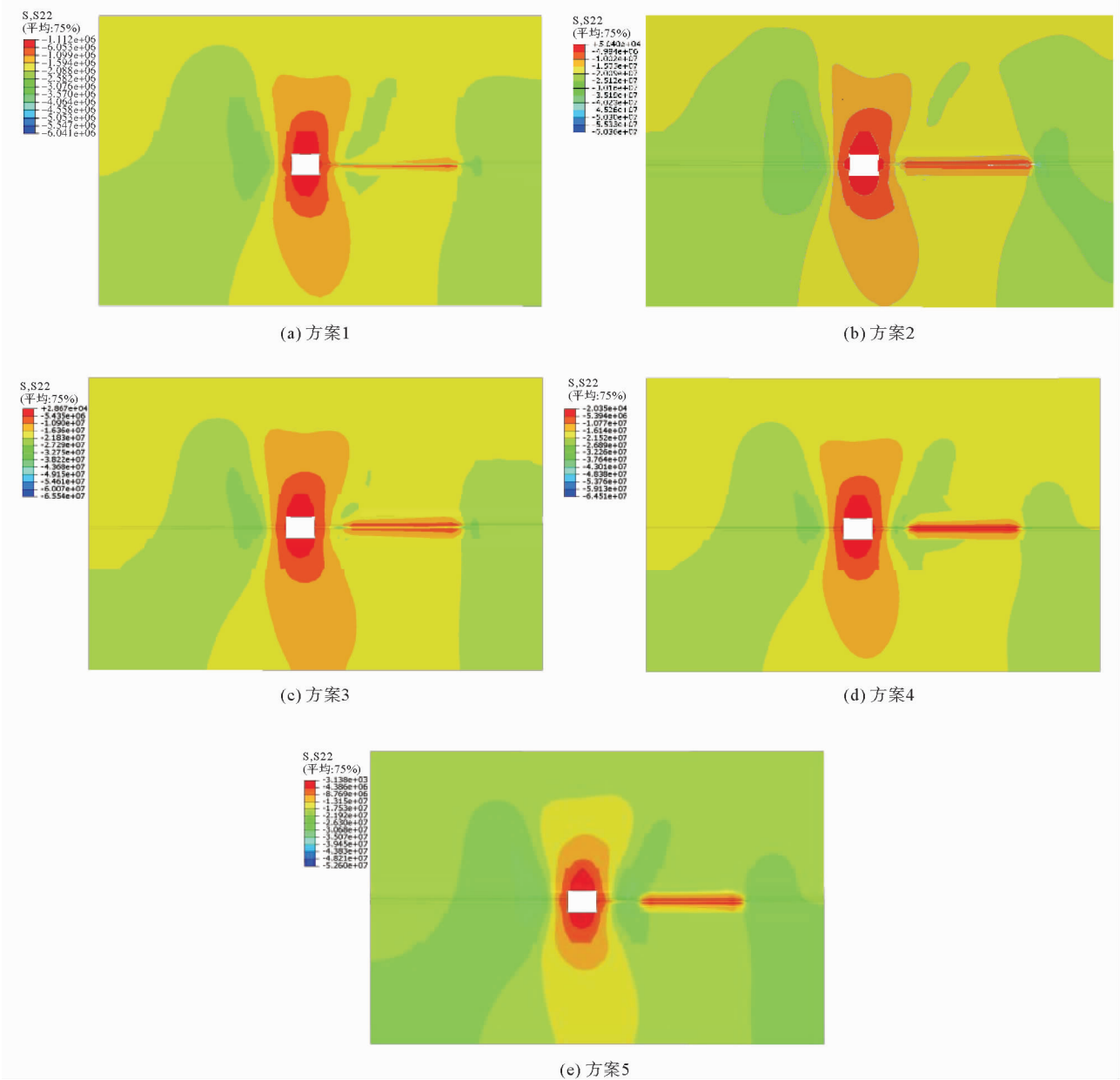


图 9 不同长度组合阶梯型卸压孔垂直应力云图

Fig. 9 Vertical stress of stepped pressure relief holes with different length combinations

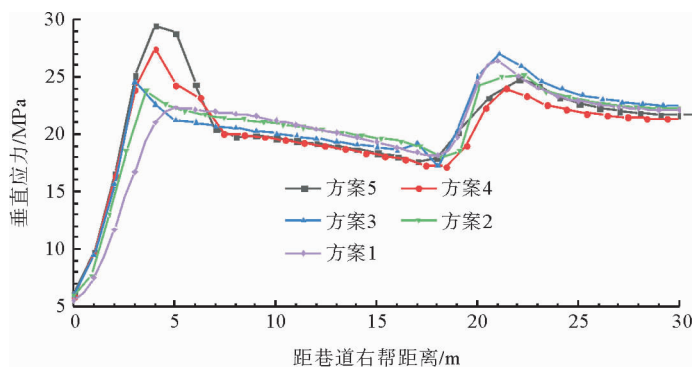


图 10 不同长度组合阶梯型卸压孔垂直应力分布

Fig. 10 Vertical stress distribution curve of stepped pressure relief holes with different length combinations

图 9、图 10 分别为巷道围岩垂直应力云图和沿卸压孔轴线方向的变化曲线。可看出,当浅部小直径段钻孔长度  $L_1 \leq 3$  m 时(方案 1~3),在钻孔总长度 20 m 范围内围岩垂直应力明显降低,钻孔底部应力峰值向深部转移,整体卸压效果明显;当  $L_1 = 4$  m 或 5 m 时(方案 4、方案 5),虽然巷道右侧 7~20 m 区域内卸压明显,但 3~6 m 范围内仍存在较高应力集中现象,卸压效果不理想。结果表明上述阶梯型卸压孔小直径段长度  $L_1$  和大直径段长度  $L_2$  的确定原则较为合理。

### 3.3 卸压孔间距

设巷道埋深 800 m,取阶梯型卸压孔小直径段的孔径为 0.10 m,长度  $L_1 = 2.50$  m,大直径段的孔径为 0.30 m,长度  $L_2 = 17.50$  m;卸压孔单排布置,孔间距分别为 0.60、0.80、1.00 和 1.50 m。模拟所得钻孔围岩塑性破坏和垂直应力变化分别如图 11 和图 12 所示。

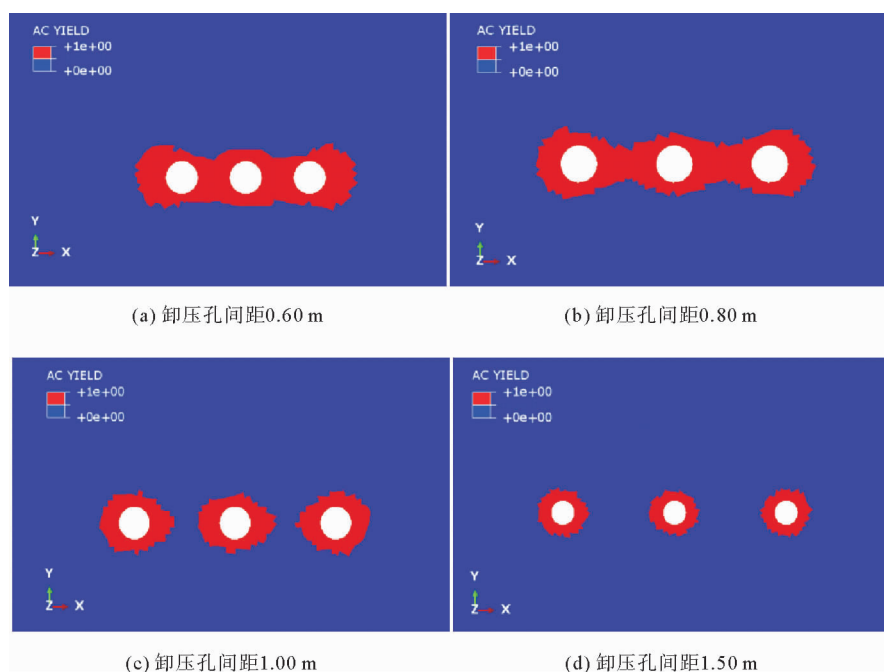


图 11 不同间距卸压孔围岩塑性破坏

Fig. 11 Rock plastic failure of pressure relief holes with different spacing

由图 11 可以看出,当孔间距小于 1.00 m 时,孔间岩体的塑性破坏贯通,有利于提高钻孔整体卸压效果;



而随孔间距增大,孔间岩体存在未破坏弹性区,则会降低卸压效果。由图 12 也可以看出,当孔间距大于 1.00 m 时,沿钻孔长度方向,围岩垂直应力的降低和应力峰值向深部转移都不明显,表明卸压效果不理想。但当孔间距小于 1.00 m 时,应力降低和转移效果非常明显。由此可见,对于阶梯型单排卸压孔,孔间距小于 1.00 m 较为合适。

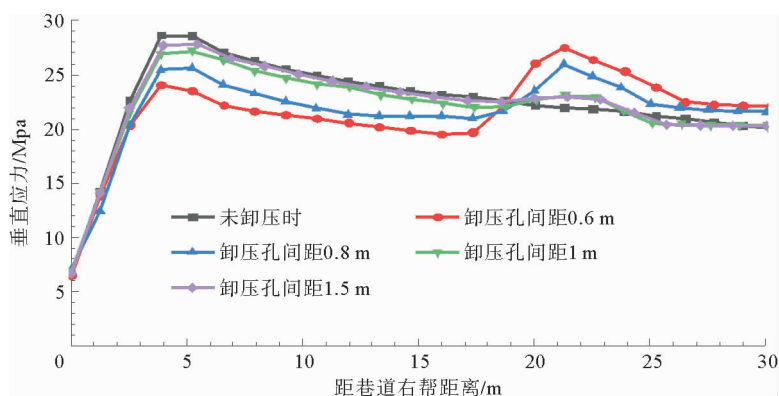


图 12 不同间距卸压孔围岩垂直应力分布

Fig. 12 Rock vertical stress of pressure relief holes with different spacing

#### 4 结论

1) 阶梯型钻孔具有良好卸压效果,可有效降低钻孔对巷帮围岩扰动。对比 0.30 m 常规大直径钻孔,当巷帮浅部采用 0.10 m 小直径阶梯型钻孔时,巷道顶板最大下沉量减少约 70%,钻孔侧巷帮水平位移量减少约 63%,更有利于控制巷道稳定性。

2) 对于阶梯型卸压孔,巷帮浅部小直径段的孔径不宜大于 0.10 m,钻孔长度应小于巷帮围岩应力降低区的宽度;巷帮深部大直径段的孔径宜大于 0.30 m,钻孔长度应大于围岩应力集中影响区宽度。

3) 对于单排布置卸压孔,以 0.30 m 孔径为例,当孔间距小于 1.00 m 时,孔间岩体塑性破坏能完全贯通,整体卸压效果明显。

#### 参考文献:

- [1]宋振骥,卢国志,彭林军,等.煤矿冲击地压事故预测控制及其动力信息系统[J].山东科技大学学报(自然科学版),2006,25(4):1-5.  
SONG Zhenqi, LU Guozhi, PENG Linjun, et al. Forecast and control of rock burst in collieries and its dynamic information system[J]. Journal of Shandong University of science and Technology (Natural Science), 2006, 25(4): 1-5.
- [2]姜耀东,潘一山,姜福兴,等.我国煤炭开采中的冲击地压机理和防治[J].煤炭学报,2014,39(2):205-213.  
JIANG Yaodong, PAN Yishan, JIANG Fuxing, et al. State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China[J]. Journal of China coal society, 2014, 39(2): 205-213.
- [3]王同旭,刘文杰,刘钊,等.冲击地压现场监测方法分析与选择原则[J].山东科技大学学报(自然科学版),2014,33(3):43-47.  
WANG Tongxu, LIU Wenjie, LIU Fan, et al. Analysis and selection principle of rock burst field monitoring methods[J]. Journal of Shandong University of science and Technology (Natural Science), 2014, 33(3): 43-47.
- [4]秦忠诚,陈光波,李谭,等.冲击地压“能量关键层”确定实验研究[J].山东科技大学学报(自然科学版),2018,37(6):1-10.  
QIN Zhongcheng, CHEN Guangbo, LI Tan, et al. Experimental study on determining “key strata of energy” of rock burst [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2018, 37(6): 1-10.
- [5]马斌文,邓志刚,赵善坤,等.钻孔卸压防治冲击地压机理及影响因素分析[J].煤炭科学技术,2020,48(5):35-40.  
MA Binwen, DENG Zhigang, ZHAO Shankun, et al. Analysis on mechanism and influencing factors of drilling pressure relief to prevent rock burst[J]. Coal Science and Technology, 2020, 48(5): 35-40.



- [6]袁红辉,季相栋,杜泽文,等.深部巷道钻孔卸压围岩力学性能研究[J].煤炭技术,2022,41(3):39-43.  
YUAN Honghui,JI Xiangdong,DU Zewen,et al.Study on mechanical properties of surrounding rock in deep roadway after drillholes destressing[J].Coal Technology,2022,41(3):39-43.
- [7]李生舟.地应力主导型突出危险煤巷水力扩孔卸压防突技术研究[J].煤炭工程,2020,52(4):97-102.  
LI Shengzhou.Pressure relief and outburst prevention technology of hydraulic punching in geostress-oriented coal roadway[J].Coal Engineering,2020,52(4):97-102.
- [8]谭云亮,郭伟耀,赵同彬,等.深部煤巷帮部失稳诱冲机理及“卸-固”协同控制研究[J].煤炭学报,2020,45(1):66-81.  
TAN Yunliang,GUO Weiyao,ZHAO Tongbin,et al.Coal rib burst mechanism in deep roadway and "stress relief-support reinforcement" synergetic control and prevention[J].Journal of China Coal Society,2020,45(1):66-81.
- [9]宋希贤,左宇军,王宪.动力扰动下深部巷道卸压孔与锚杆联合支护的数值模拟[J].中南大学学报(自然科学版),2014,45(9):3158-3165.  
SONG Xixian,ZUO Yujun,WANG Xian.Numerical simulation of pressure-released hole combined support with rockbolt in deep roadway with dynamic disturbance[J].Journal of Central South University(Science and Technology),2014,45(9):3158-3165.
- [10]赵振华,张晓君,李晓程.含卸压孔硬岩应力松弛特性试验研究[J].岩土力学,2019,40(6):2192-2199.  
ZHAO Zhenhua,ZHANG Xiaojun,LI Xiaocheng.Experimental study of stress relaxation characteristics of hard rocks with pressure relief hole[J].Rock and Soil Mechanics,2019,40(6):2192-2199.
- [11]李东印,代治国,李志勇.高应力煤巷卸压孔参数数值模拟分析[J].煤炭工程,2014,46(9):80-82.  
LI Dongyin,DAI Zhiguo,LI Zhiyong.Numerical simulation analysis on parameters of pressure releasing borehole in high stress seam gateway[J].Coal Engineering,2014,46(9):80-82.
- [12]王俊铭,刘擎,宝坤.水力扩孔扰动下穿层抽采钻孔串孔致因研究[J].中国安全科学学报,2019,29(11):164-170.  
WANG Junming,LIU Qing,BAO Kun.Study on causes of string hole in gas extraction cross seam under disturbance of hydraulic reaming[J].China safety Science Journal,2019,29(11):164-170.
- [13]耿敏敏,马占国,龚鹏,等.高应力煤巷卸压孔布置方式对卸压效果影响分析[J].中国安全生产科学技术,2012,8(11):5-10.  
GENG Minmin,MA Zhanguo,GONG Peng,et al.Analysis of the effect on pressure relief by the pressure relieving hole layouts in high stress coal roadway[J].Journal of Safety Science and Technology,2012,8(11):5-10.
- [14]齐燕军,靖洪文,孟波,等.卸压孔尺寸效应的模型试验研究[J].采矿与安全工程学报,2018,35(3):538-544.  
QI Yanjun,JING Hongwen,MENG Bo,et al.Experimental modelling on size effect of pressure relief hole[J].Journal of Mining & Safety Engineering,2018,35(3):538-544.
- [15]高永格,靳志新,孟晓强,等.钻孔孔径及布置方式对煤巷卸压效果的影响[J].煤炭技术,2017,36(1):138-140.  
GAO Yongge,JIN Zhixin,MENG Xiaoqiang,et al.Effects of hole diameter and arrangement on tunneling surface relief effect[J].Coal Technology,2017,36(1):138-140.
- [16]黄文,张辉,李国盛.不同围岩条件下松软煤岩体锚固孔底扩孔力学特征模拟分析[J].煤炭技术,2018,37(11):51-53.  
HUANG Wen,ZHANG Hui,LI Guosheng.Simulation analysis on mechanical characteristics of hole bottom hole in soft coal rock under different surrounding rock conditions[J].Coal Technology,2018,37(11):51-53.
- [17]顾士坦,邹通,韩传磊,等.大直径钻孔卸压锚固层局部充填强化技术探究[J].矿业研究与开发,2022,42(3):174-178.  
GU Shitan,ZOU Tong,HAN Chuanlei,et al.Research on local filling and strengthening technology of pressure relief anchor layer in large diameter borehole[J].Mining Research and Development,2022,42(3):174-178.
- [18]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.
- [19]罗晓青.基于围岩弹塑性理论的立井井壁厚度设计研究[J].煤炭工程,2017,49(3):4-7.  
LUO Xiaoqing.Study on the thickness design of shaft lining based on elastic-plastic theory of surround rock[J].Coal Engineering,2017,49(3):4-7.