

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2025.04.001

# 朱仙庄三水平水仓巷道钻孔卸压合理参数确定

王雨婷<sup>1, 2</sup>, 吴德义<sup>1, 2</sup>, 胡孟寒<sup>1, 2</sup>

(1. 安徽建筑大学 土木工程学院, 安徽 合肥 230601;

2. 建筑健康检测与灾害预防技术国家地方联合工程实验室, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 钻孔卸压使最大主应力向深部转移并降低巷道周边一定范围围岩应力, 是控制深部巷道围岩稳定的有效途径。针对淮北朱仙庄三水平水仓巷道工程实际, 采用数值模拟方法分析安徽两淮矿区深部巷道不同卸压钻孔直径(50, 80, 100, 150, 200 mm)、不同卸压钻孔长度(3, 6, 8, 10, 15, 18, 20 m)、不同钻孔间排距布置(单排孔、间排距为1.5 m×1.5 m、1.0 m×1.0 m、0.5 m×0.5 m)时巷道围岩典型部位最大主应力和巷道围岩表面位移分布特征。得出了该巷道合理钻孔卸压参数, 应用于工程实际, 取得了较好的效果。

**关键词:** 数值模拟; 围岩最大主应力; 围岩表面位移; 钻孔卸压合理参数

**中图分类号:** TD324

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1673-9833(2025)04-0001-09

**引文格式:** 王雨婷, 吴德义, 胡孟寒. 朱仙庄三水平水仓巷道钻孔卸压合理参数确定[J]. 湖南工业大学学报, 2025, 39(4): 1-9.

## Determination of Reasonable Parameters for Drilling and Pressure Relief in the Three Horizontal Water Storage Tunnels in Zhuxianzhuang

WANG Yuting<sup>1, 2</sup>, WU Deyi<sup>1, 2</sup>, HU Menghan<sup>1, 2</sup>

(1. College of Civil Engineering, Anhui Jianzhu University, Hefei 230601, China; 2. National and Local Joint Engineering Laboratory of Building Health Detection and Disaster Prevention Technology, Hefei 230601, China)

**Abstract:** As an effective way to control the stability of the surrounding rock in deep tunnels, drilling pressure relief can transfer the maximum principal stress to the deep part and reduce the surrounding rock stress in a certain range around the tunnel. On the basis of the actual situation of the three horizontal water storage tunnel project in Zhuxianzhuang, Huaibei, numerical simulation methods are adopted to for an analysis of the distribution characteristics of the maximum principal stress and surface displacement of typical parts of the tunnel surrounding rock under different pressure relief borehole diameters (50, 80, 100, 150, 200 mm), different pressure relief borehole lengths (3, 6, 8, 10, 15, 18, 20 m), and different borehole spacing arrangements (single row holes, spacing of 1.5 m×1.5 m, 1.0 m×1.0 m, 0.5 m×0.5 m) in the deep roadway of Anhui Lianghuai mining area, thus obtaining the reasonable drilling and pressure relief parameters for the tunnel, which can be applied in practical engineering, so as to achieve good results.

**Keywords:** numerical simulation; maximum principal stress of the surrounding rock; surface displacement of surrounding rock; reasonable parameters for drilling pressure relief

## 0 引言

安徽两淮及全国大部分矿区煤炭开采<sup>[1-3]</sup>进入深

部, 仅通过增加支护强度<sup>[4-6]</sup>难以保持深部巷道围岩稳定, 使最大主应力向深部转移并降低巷道周边一定范围围岩应力是控制深部巷道围岩稳定的有效途径,

收稿日期: 2024-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(51374009, 51674005)

作者简介: 王雨婷, 女, 安徽建筑大学硕士生, 主要研究方向为地下结构理论计算与施工技术, E-mail: 778190428@qq.com

通信作者: 吴德义, 男, 安徽建筑大学教授, 博士生导师, 主要研究方向为地下结构理论计算与施工技术,

E-mail: wudeyi136@163.com



是实现巷道围岩稳定性控制的关键<sup>[6-10]</sup>。采用钻孔卸压并合理选择钻孔长度、钻孔直径以及钻孔间排距,可有效减少巷道周边一定范围内的围岩应力,并使最大主应力向深部转移,可有效降低围岩松动破碎,保持深部巷道围岩稳定<sup>[10-15]</sup>。

本文以朱仙庄三水平水仓巷道为工程背景,采用Flac3D软件数值模拟分析围岩岩性为砂质泥岩,卸压钻孔直径分别为 $d=50, 80, 100, 150, 200$  mm,卸压钻孔长度分别为 $L=3.0, 6.0, 8.0, 10.0, 15.0, 18.0, 20.0$  m,钻孔布置为单排孔,间排距分别为 $a \times b=1.5$  m $\times$ 1.5 m、1.0 m $\times$ 1.0 m、0.5 m $\times$ 0.5 m的最大主应力分布及巷道表面位移,以此分析卸压钻孔参数对巷道围岩最大主应力大小、分布以及围岩表面位移的影响,在此基础上,选择该巷道合理的卸压钻孔参数,应用于工程实际,取得了明显的效果。

## 1 工程概况

淮北矿业集团朱仙庄三水平水仓巷道埋深约为 $H=800$  m,巷道断面形状尺寸及支护如图1所示。

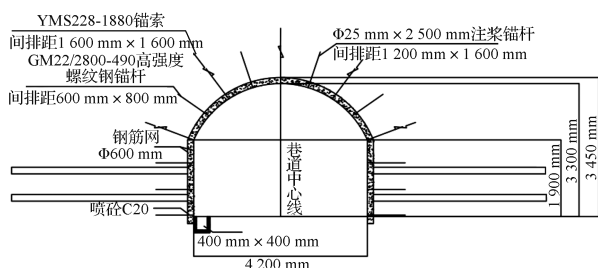


图1 巷道支护断面图

Fig. 1 Section diagram of the roadway support

选择直径 $D=22$  mm、长度 $L=2800$  mm的无纵筋螺纹钢金属锚杆,间排距为 $a \times b=600$  mm $\times$ 800 mm;直径 $D=25$  mm、长度 $L=2500$  mm的注浆锚杆,间排距为 $a \times b=1200$  mm $\times$ 1600 mm;直径 $D=22$  mm、长度 $L=8000$  mm的YMS锚索,间排距为 $a \times b=1600$  mm $\times$ 1600 mm。

巷道掘进过程中围岩岩性为砂质泥岩,实测围岩力学性能参数如表1。

表1 岩石力学性能参数测定及本构关系

Table 1 Determination of rock mechanical property parameters and its constitutive relationship

黏聚力 $c$ / MPa	内摩擦角 $\varphi$ /°	弹性模量 $E$ /GPa	泊松比 $\lambda$	峰后强度衰减方程
1.5	28	1.5	0.35	$c = 1.0 + 0.5e^{-\frac{\varepsilon^{ps}}{0.003}}$ $\varphi = 25.0 + 3.0e^{-\frac{\varepsilon^{ps}}{0.005}}$

表中:  $\varepsilon^{ps}$  为塑性参数。

## 2 钻孔卸压效果数值模拟及分析

### 2.1 数值计算模型

#### 2.1.1 计算模型尺寸

针对朱仙庄煤矿三水平巷道工程实际,根据图1所示,巷道断面宽度 $w=4200$  mm、高度 $h=3450$  mm,考虑到巷道开挖后影响范围 $x$ 轴方向为巷道宽度6~8倍、 $z$ 轴方向为巷道高度6~8倍、 $y$ 轴方向为锚杆(索)排距,故计算模型中 $x$ 轴方向尺寸为60 m、 $z$ 轴方向尺寸为60 m、 $y$ 轴方向尺寸为0.8 m。

#### 2.1.2 边界条件

通过zone gridpoint fix命令对模型底部及两侧施加位移约束限制;通过zone face apply命令对模型顶部施加原岩应力 $P_0$ ,根据巷道埋深 $H=800$  m,取 $P_0=16$  MPa。

#### 2.1.3 材料参数及本构关系

巷道开挖后周边围岩黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 随围岩破碎而衰减,考虑围岩碎胀,本构关系选择应变软化模型。实验可得围岩弹性模量 $E$ 、泊松比 $\lambda$ 、黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 等力学参数。应变软化模型中黏聚力 $c$ 和内摩擦角 $\varphi$ 随塑性参数 $\varepsilon^{ps}$ 衰减回归方程如表1所示。

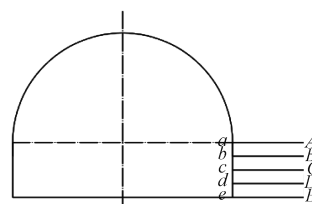
#### 2.1.4 锚杆(索)及钻孔布置

通过cable单元模拟锚杆(索)支护,并对cable单元进行自由段、锚固段划分。使用group命令对钻孔进行命名编组,并赋予null(空模型)模拟卸压钻孔开挖。

#### 2.1.5 网格划分

巷道围岩10 m范围内加密网格,六面体网格尺寸为0.2 m,其余范围的网格尺寸为0.8 m;采用ABAQUS辅助建模,采用高密度网格对卸压钻孔附近围岩进行网格划分,FLAC3D调用该网格划分;单根锚杆(索)网格划分为25段,其中锚固段为10段,自由段为15段。

如图2a,首先分析未布置卸压钻孔时拱基线 $aA$ 方向、帮部上1/4处 $bB$ 方向、帮部中点 $cC$ 方向、帮部下1/4处 $dD$ 方向以及帮底 $eE$ 部位的最大主应力分布,并以此确定合理的钻孔部位。如图2b及图2c,对双排及单排卸压钻孔,比较分析不同钻孔长度、钻孔直径以及钻孔间排距的围岩最大主应力大小及分布和巷道直墙表面位移,确定钻孔卸压合理参数。



a) 不开卸压钻孔布置

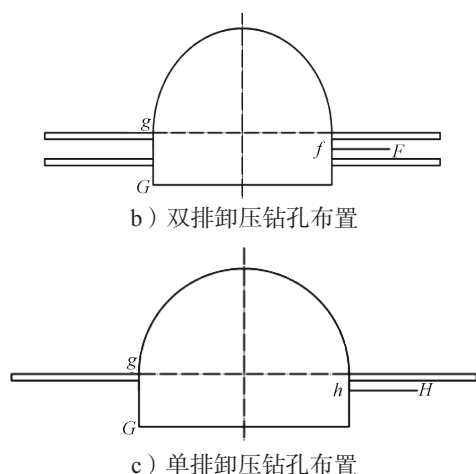


图2 卸压钻孔布置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of pressure relief drilling layout

## 2.2 卸压钻孔开孔合理部位选择

巷道开挖后, 未布置卸压钻孔, 巷道围岩最大主应力分布云图如图3所示。

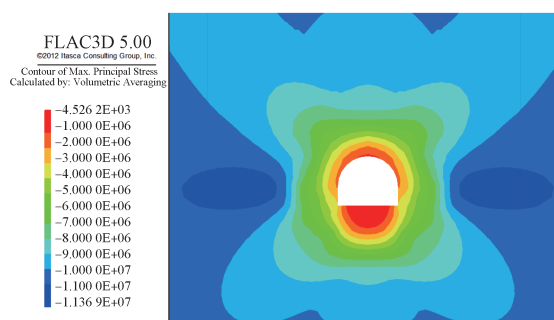


图3 巷道开挖后围岩最大主应力分布图

Fig. 3 Maximum main stress distribution diagram of the surrounding rock after tunnel excavation

$aA$  方向、 $bB$  方向、 $cC$  方向、 $dD$  方向和  $eE$  方向最大主应力随距巷道表面距离的变化如图4所示。

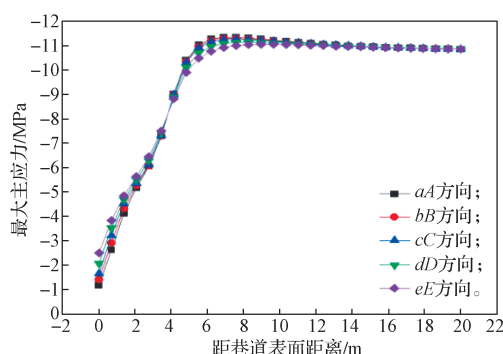


图4 巷道开挖后围岩直墙表面最大主应力分布

Fig. 4 Map of the maximum main stress distribution on the surface of the surrounding rock straight wall after tunnel excavation

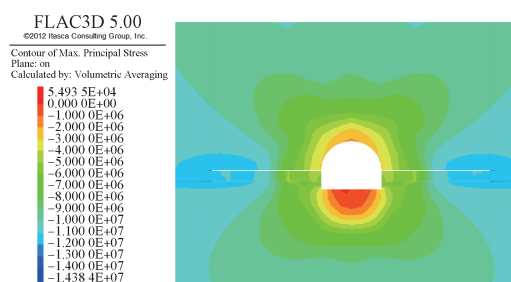
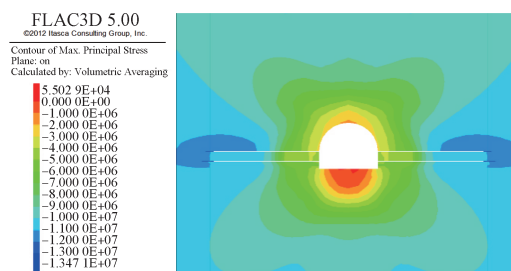
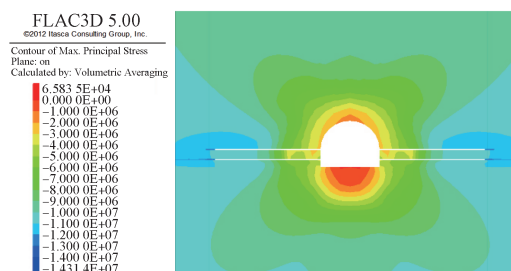
由图4可知,  $aA$  方向、 $bB$  方向、 $cC$  方向最大主应力峰值位于距离巷道直墙表面  $r=7.36$  m;  $dD$  方

向、 $eE$  方向最大主应力峰值分别位于距离巷道直墙表面  $r=8.28, 8.97$  m; 与巷道直墙下部  $dD$  方向、 $eE$  方向围岩最大主应力峰值位置比较, 巷道直墙上部  $aA$  方向、 $bB$  方向、 $cC$  方向范围围岩最大主应力峰值距巷道表面距离减少  $\Delta r=0.92, 1.61$  m。  $aA$  方向、 $bB$  方向、 $cC$  方向、 $dD$  方向和  $eE$  方向, 最大主应力峰值分别为  $\sigma=-11.35, -11.31, -11.27, -11.15, -11.06$  MPa。巷道直墙上部围岩最大主应力峰值距巷道表面较近。为了充分发挥钻孔卸压的效果, 最大主应力峰值向深部围岩转移, 降低巷道附近一定范围内围岩应力。应在巷道直墙上帮部位置进行卸压钻孔布置, 具体为:  $aA$  方向布置卸压钻孔, 根据卸压钻孔间排距再确定后排卸压钻孔位置, 分析合理的卸压钻孔参数及布置。

## 2.3 不同钻孔卸压参数数值模拟及分析

### 2.3.1 不同钻孔直径钻孔卸压效果分析

为了分析卸压钻孔直径对卸压效果影响, 取卸压钻孔长度为  $L=10$  m、间排距  $a \times b=1.0$  m  $\times$  1.0 m、卸压钻孔直径分别为  $d=50, 80, 100, 150, 200$  mm, 进行数值模拟, 得到不同卸压钻孔直径巷道围岩的主应力分布云图, 如图5所示。

a)  $d=50$  mmb)  $d=80$  mmc)  $d=100$  mm

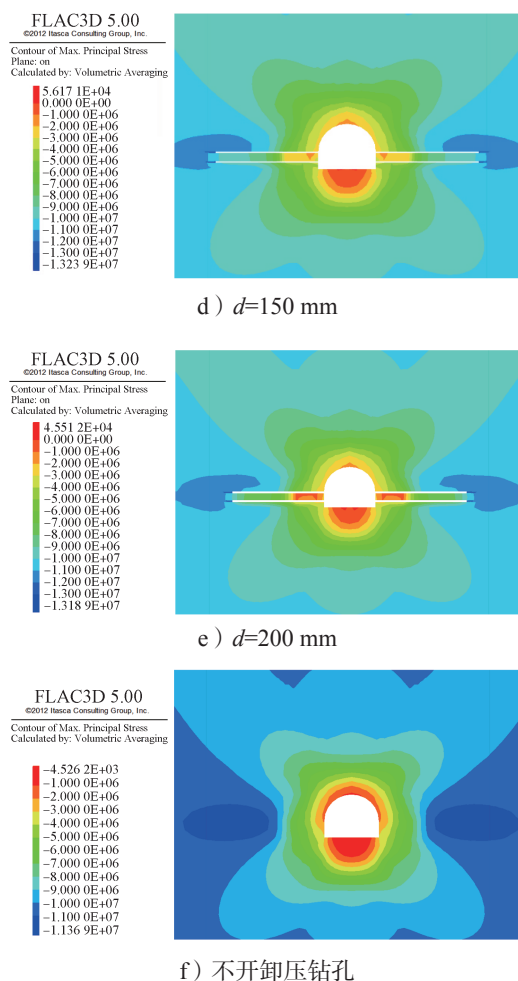


图5 不同卸压钻孔直径的围岩最大主应力分布云图

Fig. 5 Diagram of the maximum principal stress distribution of the surrounding rock with different pressure relief borehole diameters

图6为不同卸压钻孔直径巷道围岩一定范围的最大主应力分布。

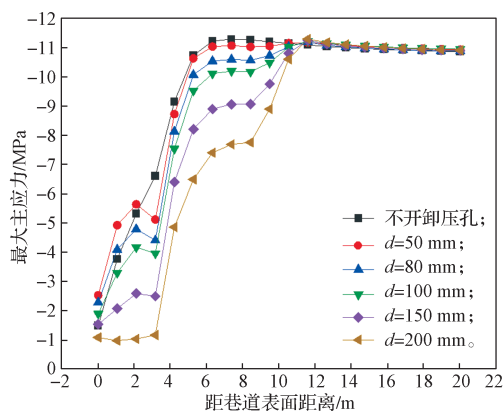


图6 不同卸压钻孔直径巷道围岩一定范围最大主应力分布

Fig. 6 Maximum main stress distribution in a certain range of the tunnel surrounding rock of different pressure relief drilling diameter

由图6可知,不开卸压钻孔时,巷道开挖后在帮部两侧形成椭圆形应力集中区。 $d=50$  mm时,两卸压钻孔之间存在较大的应力集中; $d=80$  mm时,两卸压钻孔之间的应力转移不明显;钻孔直径分别取 $d=100, 150, 200$  mm时,两卸压钻孔之间没有出现应力集中现象,并且发生明显的应力转移。

取如图2b所示巷道直墙 $fF$ 部位,不同卸压钻孔直径巷道围岩最大主应力随距离增加上升至峰值后缓慢降低趋于稳定。与不开卸压钻孔比较, $d=50$  mm时,最大主应力峰值由距巷道表面 $r=8.60$  m推移至 $r=8.64$  m,推移距离 $\Delta r=0.04$  m,效果不明显;最大主应力峰值由 $\sigma=-11.30$  MPa变化为 $\sigma=-11.08$  MPa,变化幅度 $\Delta\sigma=0.22$  MPa。钻孔直径 $d=80, 100, 150, 200$  mm时,最大主应力峰值由距巷道表面 $r=8.6$  m分别推移至 $r=10.56, 11.57, 11.57, 11.57$  m,推移距离 $\Delta r=1.96, 2.97, 2.97, 2.97$  m;最大主应力峰值由 $\sigma=-11.26$  MPa变化为 $\sigma=-11.03, -11.23, -11.25, -11.30$  MPa,变化幅度 $\Delta\sigma=0.23, 0.03, 0.01, 0.04$  MPa;原最大主应力峰值位置最大主应力变化幅度 $\Delta\sigma=1.13, 1.48, 2.58, 3.92$  MPa。当卸压钻孔直径 $d=80$  mm增加至 $d=200$  mm时,最大主应力峰值有效地向深部推移;卸压钻孔直径 $d=80$  mm增加至 $d=150$  mm时,围岩最大主应力峰值向深部推移尤为显著。

取如图2b所示第二排钻孔位置,该位置距拱基线距离1.0 m,巷道表面位移最为明显。不同卸压钻孔直径巷道直墙表面位移 $u$ 分布如图7所示,卸压钻孔直径 $d=50$  mm增加至 $d=80, 100$  mm时,位移由 $u=143$  mm减少至 $u=123, 112, 98$  mm,随着卸压钻孔直径 $d$ 增大而减小。当卸压钻孔直径由 $d=100$  mm增加至 $d=150, 200$  mm时,由 $u=98$  mm增加至 $u=107, 109$  mm位移增加 $\Delta u=9, 11$  mm。当 $d \geq 150$  mm时,产生了过度卸压的效果,略微增加了巷道的位移量。

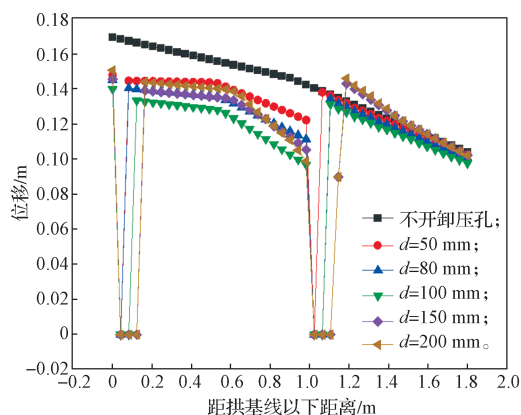


图7 不同卸压钻孔直径巷道直墙表面位移分布

Fig. 7 Surface displacement distribution of straight walls of different pressure relief drilling diameters

卸压钻孔直径  $d=100$  mm 时, 钻孔卸压不仅可以使围岩最大主应力峰值向围岩深部明显转移而且可以有效控制巷道围岩松动破碎变形。

### 2.3.2 不同卸压钻孔长度卸压效果分析

巷道开挖后, 在巷道的两帮一定距离处会形成应力集中区, 这个区域距离直墙表面距离  $r \approx 8$  m, 模拟分析卸压钻孔直径  $d=100$  mm、间排距  $a \times b=1.0$  m  $\times$  1.0 m, 卸压钻孔长度分别为  $L=3, 6, 8, 10, 15$  m 的钻孔卸压效果。不同卸压钻孔长度围岩最大主应力分布云图如图 8 所示。

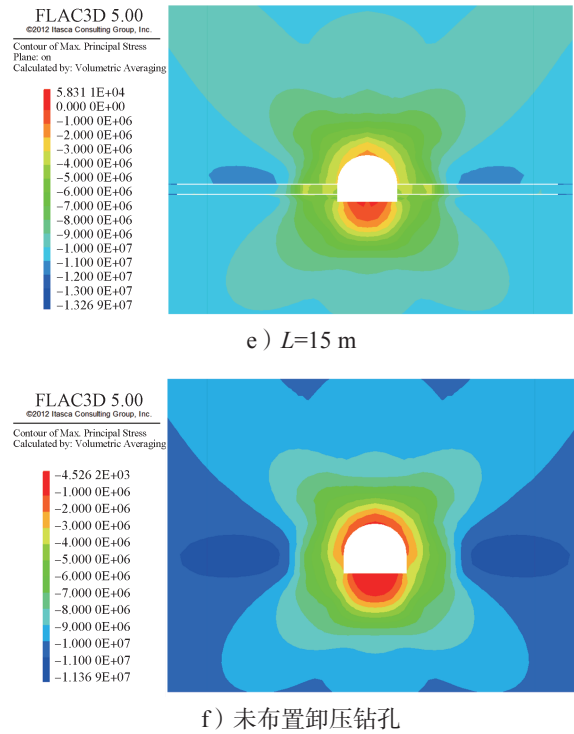
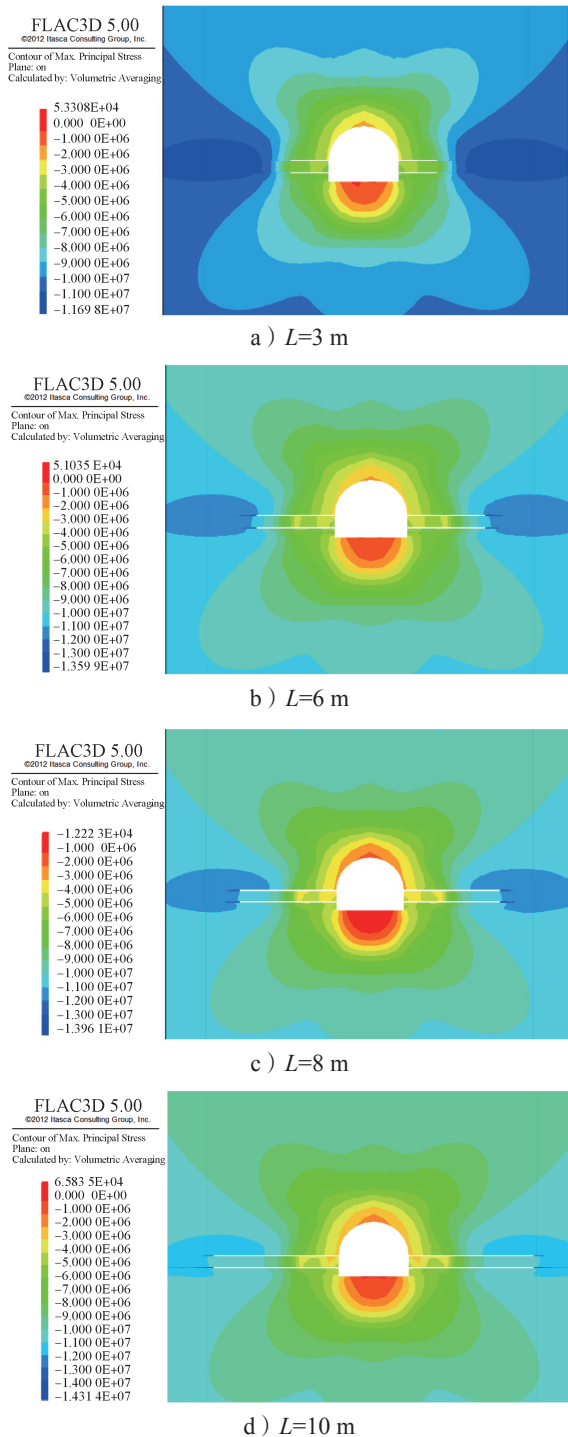


图 8 不同卸压钻孔长度的围岩最大主应力分布云图

Fig. 8 Cloud diagram of the maximum main stress distribution of the surrounding rock of different pressure relief drilling lengths

不同卸压钻孔长度巷道围岩最大主应力分布如图 9 所示。由图 9 可知, 不开卸压钻孔时, 巷道开挖后在帮部两侧形成椭圆形应力集中区。 $L=3$  m 时, 应力转移不明显;  $L=6$  m 时, 卸压钻孔的端部刚好接触到巷道两侧的应力集中区, 应力集中区发生较小的应力转移;  $L=8, 10$  m 时, 应力集中区依次向更远处推移, 应力转移效果明显;  $L=15$  m 时, 两卸压孔之间应力集中区消失, 卸压钻孔端部和第一排卸压钻孔深入应力集中区处出现一定范围的应力集中, 钻孔间应力集中不明显。

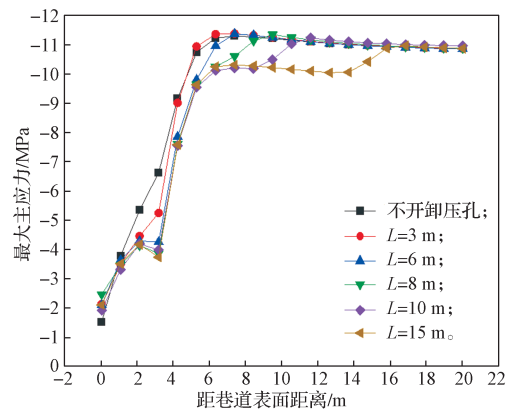


图 9 不同卸压钻孔长度巷道围岩最大主应力分布

Fig. 9 Maximum main stress distribution of the tunnel surrounding rock with different pressure relief drilling lengths



取如图 2b 所示巷道直墙  $fF$  部位, 不同钻孔长度巷道围岩最大主应力随距离增加上升至峰值后缓慢降低, 趋于稳定。与不开卸压孔时相比,  $L=3$  m 时均在 7.36 m 处, 最大主应力峰值  $\sigma=-11.30$  MPa;  $L=6$  m 时, 最大主应力峰值距巷道表面距离不变, 最大主应力峰值由  $\sigma=-11.30$  MPa 降低为  $\sigma=-11.37$  MPa, 效果不明显;  $L=8, 10, 15$  m 时, 最大主应力峰值由距巷道表面  $r=7.36$  m 推移至  $r=9.47, 11.57, 16.84$  m, 推移距离  $\Delta r=2.11, 4.21, 9.48$  m; 最大主应力峰值由  $\sigma=-11.30$  MPa 变化至  $\sigma=-11.34, -11.23, -10.97$  MPa, 应力转移效果较为明显。随着卸压钻孔长度  $L$  增加, 围岩最大主应力峰值向围岩深部转移, 效果明显。

图 10 给出了不同卸压钻孔长度的巷道直墙表面位移分布。

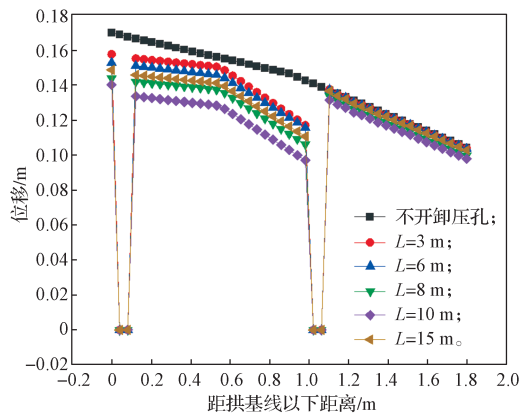


图 10 不同卸压钻孔长度的巷道直墙表面位移分布

Fig. 10 Surface displacement distribution of straight wall of the tunnel with different pressure relief drilling lengths

取如图 2b 所示第二排钻孔位置, 该位置距拱基线距离 1 m, 巷道表面位移最为明显。与不开卸压钻孔相比, 卸压钻孔长度由  $L=3$  m 增加至  $L=6, 8, 10$  m 时, 表面位移由  $u=143$  mm 分别减少至  $u=118, 116, 106, 97$  mm, 表面位移减少量  $\Delta u=25, 27, 37, 46$  mm。卸压钻孔长度在  $L=8\sim 10$  m 范围内表面位移减少明显, 控制巷道直墙位移效果明显。继续增加卸压钻孔长度  $L$ , 控制巷道直墙表面位移效果不明显。因此, 卸压钻孔合理长度宜在  $L=10$  m 左右。

### 2.2.3 卸压钻孔间排距对巷道稳定性影响分析

不同卸压钻孔间排距  $a \times b$  对钻孔卸压巷道围岩稳定性的影响, 模拟分析卸压钻孔直径为  $d=100$  mm、长度为  $L=10$  m, 卸压钻孔沿帮部直墙布置分别为单排孔、间排距  $a \times b=1.5$  m  $\times$  1.5 m、 $a \times b=1.0$  m  $\times$  1.0 m、 $a \times b=0.5$  m  $\times$  0.5 m 时钻孔卸压效果, 如图 11 所示。

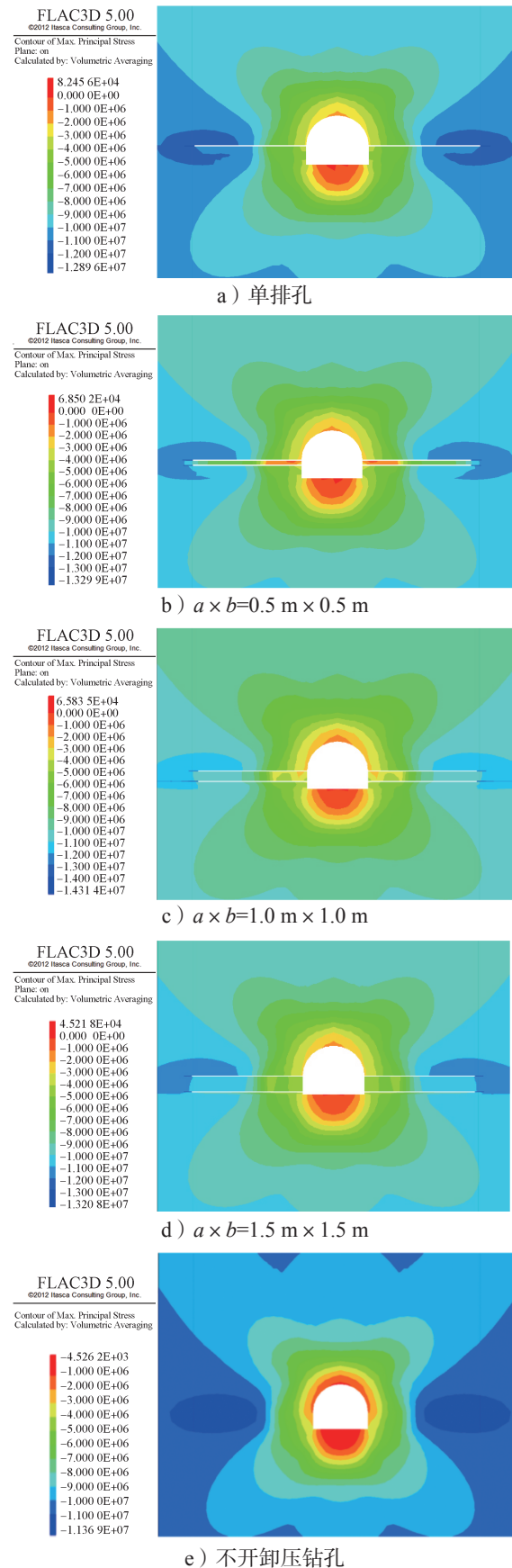


图 11 不同卸压钻孔间排距  $a \times b$  围岩最大主应力云图

Fig. 11 Map of maximum main stress cloud of different pressure relief holes

图12为不同卸压钻孔间排距 $a \times b$ 巷道围岩一定范围最大主应力 $\sigma$ 分布图。如图12所示,不开卸压钻孔时,巷道开挖后在帮部两侧形成椭圆形应力集中区;卸压钻孔为单排孔时,由于单排孔形成卸压区的影响范围有限,因此应力集中区只有少部分发生转移;卸压钻孔间排距 $a \times b = 0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 时,间排距较为密集,致使两孔形成的卸压区过度叠加覆盖,应力集中区的转移范围更大。卸压钻孔间排距 $a \times b = 1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 时,椭圆形的应力集中区大范围推移至端部一定距离,卸压效果进一步改善。卸压钻孔间排距 $a \times b = 1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 时,两卸压孔之间的应力集中区相比 $a \times b = 1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 时要离巷道直墙表面更近。

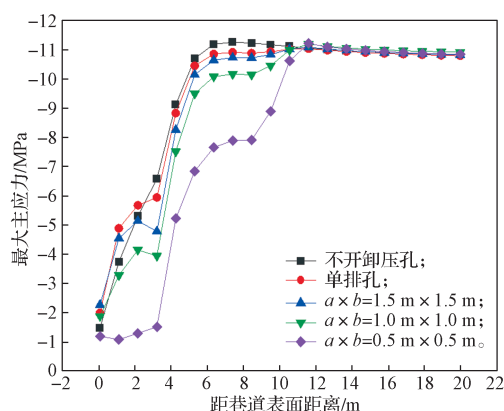


图12 不同卸压钻孔间排距 $a \times b$ 巷道围岩一定范围最大主应力分布图

Fig. 12 Distribution diagram of maximum main stress of  $a \times b$  tunnel surrounding rock between different pressure relief boreholes

图13为不同卸压钻孔间排距 $a \times b$ 巷道直墙表面位移分布图。

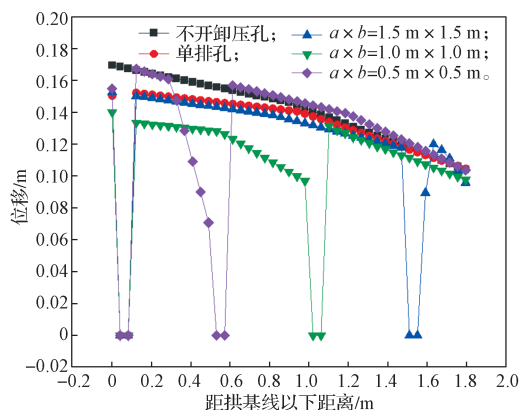


图13 不同卸压钻孔间排距 $a \times b$ 巷道直墙表面位移分布图

Fig. 13 Displacement of straight wall of  $a \times b$  tunnel between different pressure relief boreholes

如图13所示,取如图3b所示巷道直墙 $fF$ 部位,不同卸压钻孔间排距,巷道围岩最大主应力随距巷

道直墙表面距离增加至最大峰值后缓慢降低,趋于稳定。与不开卸压钻孔时相比,卸压钻孔为单排孔、间排距 $a \times b = 1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 时,巷道最大主应力峰值由距巷道表面 $r = 7.36 \text{ m}$ 推移至 $r = 11.57 \text{ m}$ ,最大主应力峰值由 $\sigma = -11.30 \text{ MPa}$ 改变至 $\sigma = -11.07, -11.12 \text{ MPa}$ ;间排距分别为 $a \times b = 1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 、 $a \times b = 0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 时,最大主应力峰值由距巷道表面 $r = 7.36 \text{ m}$ 均推移至 $r = 11.57 \text{ m}$ ,最大主应力峰值由 $\sigma = -11.30 \text{ MPa}$ 改变至 $\sigma = -11.23, -11.26 \text{ MPa}$ ;原最大主应力峰值位置处的最大主应力分别降低 $\Delta\sigma = 0.35, 0.55, 1.13, 3.4 \text{ MPa}$ 。随着卸压钻孔间排距减小,钻孔长度范围内围岩最大主应力值降低效果越显著。

与不开卸压钻孔相比,卸压钻孔为单排孔时,拱基线处变化最为明显,减少量 $\Delta u = 14 \text{ mm}$ ;间排距为 $a \times b = 1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 、距拱基线下 $1.5 \text{ m}$ 处位移变化明显,位移减少量 $\Delta u = 16 \text{ mm}$ ;间排距为 $a \times b = 1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 时,距拱基线下 $1.0 \text{ m}$ 处位移变化明显,位移减少量 $\Delta u = 45 \text{ mm}$ 。卸压钻孔为单排孔时,距拱基线以下 $1 \text{ m}$ 处直墙表面位移 $u$ 与不开卸压孔时基本相同,与卸压钻孔间排距 $a \times b = 1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 比较,仅增大 $\Delta u = 6 \text{ mm}$ 。当卸压钻孔间排距 $a \times b = 1.5 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ 时,位于两卸压孔之间的位置处 $u$ 与卸压钻孔为单排钻孔时相比较为接近,最大相差 $\Delta u = 6 \text{ mm}$ ,但在第二排孔下方产生过度卸压。当卸压钻孔间排距 $a \times b = 1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 时,与其他3种情况比较,巷道直墙表面位移减少量 $\Delta u$ 分布均匀。卸压钻孔间排距为 $a \times b = 0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 时,仅在第二排孔以上 $0.2 \text{ m}$ 范围,位移减少 $\Delta u = 86 \text{ mm}$ ,位移降低较为明显,在巷道直墙其他部位位移与不卸压相比基本不变。

间排距 $a \times b = 0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$ 时,两卸压钻孔间产生过度叠加效果,导致卸压过度,削弱了围岩稳定性,不利于控制直墙表面位移。因此,合理的卸压钻孔间排距宜在 $a \times b = 1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 左右。

### 3 工程应用

根据以上分析结果,朱仙庄三水平水仓巷道钻孔卸压合理参数选择如下:卸压钻孔直径 $d = 100 \text{ mm}$ 、卸压钻孔长度 $L = 10 \text{ m}$ 、卸压钻孔间排距 $a \times b = 1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ ,卸压钻孔应布置在巷道直墙上帮部,具体卸压钻孔布置如图14所示。

#### 3.1 钻孔卸压前后数值模拟结果比较

比较采取钻孔卸压与未采取钻孔卸压效果,围岩最大主应力云图比较如图11c和图11e。取如图2b所示两卸压钻孔中间 $fF$ 部位,围岩最大主应力随距

巷道表面距离变化如图 12, 最大主应力峰值向深部推移  $\Delta r=4.21$  m。

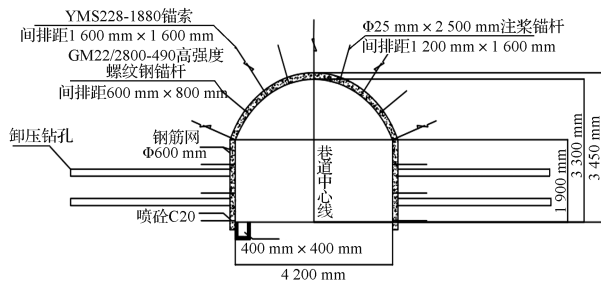


图 14 卸压钻孔布置图

Fig. 14 Layout of pressure relief drilling holes

### 3.2 钻孔卸压工程实测结果比较

如图 15 所示, 巷道开挖后立即在巷道帮部进行钻孔卸压, 并分别在巷道帮部两孔正中间布置 1 号、2 号多点位移计, 锚爪 A、B、C、D 距巷道直墙表面距离分别为  $r=1.0, 8.0, 0.7, 4.0$  m, 并在如图 15b 所示未采取钻孔卸压措施巷道同位置布置 3 号、4 号多点位移计。实测距巷道直墙表面距离  $r=0.0, 0.7, 1.0, 4.0$  m 围岩不同部位位移。

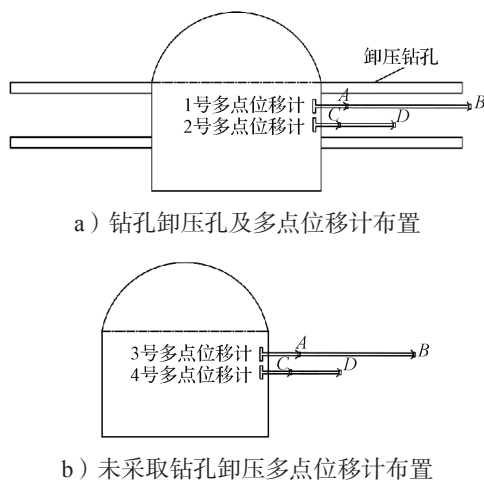


图 15 钻孔卸压及多点位移计布置图

Fig. 15 Layout of drilling pressure relief and multi-point displacement gauge

钻孔卸压前后巷道  $fF$  部位, 围岩位移对比如图 16 所示。

巷道未钻孔卸压时,  $fF$  部位距巷道直墙表面距离分别为  $r=0.0, 0.7, 1.0, 4.0$  m 的巷道围岩位移数值模拟计算结果分别为  $u=165, 111, 93, 22$  mm; 工程实测结果分别为  $u=160, 120, 90, 10$  mm。巷道钻孔卸压时,  $fF$  部位距巷道直墙表面距离分别为  $r=0.0, 0.7, 1.0, 4.0$  m 的巷道围岩位移数值模拟计算结果分别为  $u=141, 96, 83, 22$  mm; 工程实测结果分别为  $u=140, 100, 80, 20$  mm。工程实测结果与数值模拟结果基本一致, 说明数值模拟结果较好地符合工程实际。

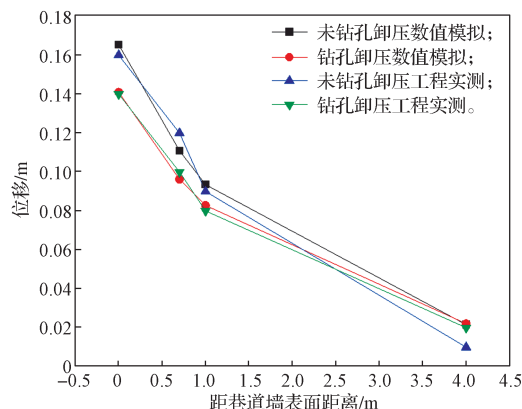


图 16 钻孔卸压效果前后对比

Fig. 16 Comparison of the pressure relief effect before and after drilling

实施钻孔卸压措施后,  $fF$  部位巷道表面位移降低  $\Delta u=24$  mm、距拱基线 1.0 m 处巷道表面位移降低  $\Delta u=45$  mm, 钻孔卸压取得较好的效果。

## 4 结论

本文结合朱仙庄三水平水仓巷道工程实际, 开展了合理卸压钻孔布置及参数研究, 得出了如下结论:

1) 卸压钻孔宜布置在巷道直墙上帮部位置, 使最大主应力峰值位置向深部有效推移。

2) 卸压钻孔直径宜选择  $d=100$  mm, 取卸压钻孔长度  $L=10$  m, 卸压钻孔间排距  $a \times b=1.0$  m  $\times$  1.0 m, 与不开卸压钻孔相比,  $fF$  部位的最大主应力峰值向围岩深部推移  $\Delta r=2.97$  m, 原最大主应力峰值位置  $\Delta \sigma=1.48$  MPa, 距拱基线 1.0 m 位置巷道表面位移降低最为明显, 降低  $\Delta u=45$  mm。

3) 钻孔卸压长度宜选择  $L=10$  m, 取  $d=100$  mm, 卸压钻孔间排距  $a \times b=1.0$  m  $\times$  1.0 m, 与不开卸压孔相比,  $fF$  部位最大主应力峰值向围岩深部推移  $\Delta r=4.21$  m, 原最大主应力峰值位置  $\Delta \sigma=1.10$  MPa, 距拱基线 1.0 m 位置巷道表面位移降低最为明显, 降低  $\Delta u=46$  mm。

4) 钻孔卸压间排距  $a \times b=1.0$  m  $\times$  1.0 m, 取钻孔卸压长度  $L=10$  m, 卸压钻孔间排距  $a \times b=1.0$  m  $\times$  1.0 m, 与不开卸压孔、单排孔相比,  $fF$  部位最大主应力峰值向围岩深部推移  $\Delta r=4.21$  m, 距拱基线 1.0 m 位置巷道表面位移降低最为明显, 降低  $\Delta u=45$  mm。

5) 针对朱仙庄三水平水仓巷道工程, 取钻孔卸压直径  $d=100$  mm,  $L=10$  m,  $a \times b=1.0$  m  $\times$  1.0 m, 与不开卸压孔相比,  $fF$  部位最大主应力峰值向围岩深部推移  $\Delta r=4.21$  m,  $fF$  部位巷道表面位移降低  $\Delta u=24$  mm、距拱基线 1.0 m 处巷道表面位移降低  $\Delta u=45$  mm。

mm, 有效地使围岩最大主应力向深部转移、控制围岩松动变形。

#### 参考文献:

- [1] 章磊. 两淮矿区煤矿深部开采设计研究[J]. 煤炭科技, 2022, 43(1): 9-12, 16.  
ZHANG Lei. Discussion on Design of Deep Mining in Huainan and Huaibei Mining Area[J]. Coal Science & Technology Magazine, 2022, 43(1): 9-12, 16.
- [2] 李治祥, 王福奇, 田斌, 等. 大柳煤矿深部软岩巷道支护技术数值模拟研究[J]. 中国煤炭, 2022, 48(5): 20-26.  
LI Zhixiang, WANG Fuqi, TIAN Bin, et al. Numerical Simulation Study on Support Technology of Soft Rock Roadway in Daliu Coal Mine[J]. China Coal, 2022, 48(5): 20-26.
- [3] 康红普, 王国法, 姜鹏飞, 等. 煤矿千米深井围岩控制及智能开采技术构想[J]. 煤炭学报, 2018, 43(7): 1789-1800.  
KANG Hongpu, WANG Guofa, JIANG Pengfei, et al. Conception for Strata Control and Intelligent Mining Technology in Deep Coal Mines with Depth More than 1000 m[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(7): 1789-1800.
- [4] 左建平, 文金浩, 刘德军, 等. 深部巷道等强支护控制理论[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(2): 148-159.  
ZUO Jianping, WEN Jinhao, LIU Dejun, et al. Control Theory of Uniform Strength Support in Deep Roadway[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2021, 6(2): 148-159.
- [5] 高一朝. 深部巷道底板开槽卸压数值模拟分析[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2021, 31(3): 39-43.  
GAO Yichao. Numerical Simulation Analysis of Pressure Relief in Deep Roadway Floor by Grooving[J]. Journal of Luoyang Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 31(3): 39-43.
- [6] 刘天啸. 高应力巷道钻孔卸压机理及让压支护技术研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.  
LIU Tianxiao. Study on Pressure Relief Mechanism and Yield Support Technology of Drilling in High Stress Roadway[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019.
- [7] 刘红岗, 贺永年, 徐金海, 等. 深井煤巷钻孔卸压技术的数值模拟与工业试验[J]. 煤炭学报, 2007, 32(1): 33-37.  
LIU Honggang, HE Yongnian, XU Jinhai, et al. Numerical Simulation and Industrial Test of Boreholes Destressing Technology in Deep Coal Tunnel[J]. Journal of China Coal Society, 2007, 32(1): 33-37.
- [8] XIANG Z, ZHANG N, XIE Z Z, et al. Cooperative Control Mechanism of Long Flexible Bolts and Blasting Pressure Relief in Hard Roof Roadways of Extra-Thick Coal Seams: A Case Study[J]. Applied Sciences, 2021, 11(9): 4125.
- [9] 柏建彪, 侯朝炯. 深部巷道围岩控制原理与应用研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(2): 145-148.  
BAI Jianbiao, HOU Chaojiong. Control Principle of Surrounding Rocks in Deep Roadway and Its Application[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2006, 35(2): 145-148.
- [10] 谢军, 李刚, 姜安琪. 变直径卸压钻孔卸压参数模拟研究[J]. 煤矿安全, 2023, 54(7): 85-92.  
XIE Jun, LI Gang, JIANG Anqi. Simulation Study on Pressure Relief Parameters of Variable-Diameter Pressure-Relief Drilling[J]. Safety in Coal Mines, 2023, 54(7): 85-92.
- [11] 娄嵩. 高应力软岩巷道围岩开槽卸压及参数优化[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2017.  
LOU Song. Slotting Pressure Relief and Parameter Optimization of Surrounding Rock in High Stress Soft Rock Roadway[D]. Huainan: Anhui University of Science & Technology, 2017.
- [12] 汪学清, 吴帅军, 唐红平, 等. 深部巷道钻孔卸压对巷道稳定性的影响及钻孔参数确定[J]. 矿冶工程, 2023, 43(3): 1-5, 10.  
WANG Xueqing, WU Shuaijun, TANG Hongping, et al. Impact of Pressure-Relief Borehole on Stability of Deep Roadway and Determination of Drillings Parameters[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2023, 43(3): 1-5, 10.
- [13] SHANG Z J, WANG Z F, CHENG Z H, et al. Permeability Enhancement Technology for Soft and Low-Permeability Coal Seams Combined with Hydraulic Perforation and Hydraulic Fracturing[J]. Geofluids, 2022, 2022(1): 7958712.
- [14] CHEN L, FAN G W, ZHANG D S, et al. Numerical Simulation of Crack Initiation and Propagation Evolution Law of Hydraulic Fracturing Holes in Coal Seams Considering Permeability Anisotropy and Damage[J]. Minerals, 2022, 12(4): 494.
- [15] YUE X Z, TU M, LI Y F, et al. Stability and Cementation of the Surrounding Rock in Roof-Cutting and Pressure-Relief Entry Under Mining Influence[J]. Energies, 2022, 15(3): 951.

(责任编辑: 申剑)