

# 深部巷道钻孔卸压对巷道稳定性的影响及钻孔参数确定<sup>①</sup>

汪学清<sup>1</sup>, 吴帅军<sup>1</sup>, 唐红平<sup>2</sup>, 陈博<sup>1</sup>

(1.中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院,北京 100083; 2.深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室,湖南长沙 410012)

**摘要:** 研究了大直径卸压钻孔布孔方式及钻孔参数对深部巷道稳定性的影响。结果表明,与单排钻孔方式相比,双排钻孔能较好地转移应力和控制巷道变形;与未布置卸压钻孔相比,单排钻孔和双排钻孔巷道帮部变形量分别减小了6.05%和15.44%,原最大应力处的应力值由39.61 MPa分别降至33.50 MPa和32.70 MPa。钻孔应尽量布置在巷道帮部的中间位置;钻孔深度应穿过塑性区,达到应力最大值位置;钻孔间距选取钻孔水平方向塑性区的距离;钻孔排距不应大于钻孔上下产生的应力降低区范围。

**关键词:** 深部巷道; 巷道围岩; 钻孔卸压; 围岩控制; 应力转移; 数值模拟; 巷道变形; 巷道卸压

中图分类号: TD322

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2023.03.001

文章编号: 0253-6099(2023)03-0001-05

## Impact of Pressure-Relief Borehole on Stability of Deep Roadway and Determination of Drillings Parameters

WANG Xueqing<sup>1</sup>, WU Shuaijun<sup>1</sup>, TANG Hongping<sup>2</sup>, CHEN Bo<sup>1</sup>

(1.School of Mechanics & Civil Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 2.State Key Laboratory of Exploitation and Utilization of Deep Sea Mineral Resources, Changsha 410012, Hunan, China)

**Abstract:** The impact of large-diameter pressure-relief borehole arrangement and drilling parameters on roadway stability was studied. It is found that arrangement of boreholes in a two-row pattern, compared to boreholes in a single-row pattern, can benefit stress shift and control of roadway deformation. By adopting the arrangement of boreholes in a single-row pattern and a two-row pattern, the deformation at both sides was reduced by 6.05% and 15.44% respectively, and the original maximum stress was reduced from 39.61 MPa to 33.50 MPa and 32.70 MPa respectively. It is also found that boreholes should be arranged, as much as possible, near the center of two sides, penetrating the plastic zone to the place with the maximum stress. And the spacing between boreholes should be determined based on the horizontal distance of the plastic zone of boreholes, and the burden spacing should be less than the height of stress-relaxed zone.

**Key words:** deep roadway; roadway surrounding rock; pressure-relief borehole; surrounding rock control; stress shift; numerical simulation; roadway deformation; pressure relief for roadway

随着开采深度不断增加,巷道的围岩环境越来越复杂,围岩处于“三高一扰动”的环境中,易产生冲击地压、巷道变形等不良地质问题,严重影响井下施工安全和生产效率<sup>[1]</sup>。深部巷道开挖后有时会出现非线性大变形,经多次返修后仍不能达到使用要求<sup>[2-3]</sup>。已有研究表明,单靠提高支护强度、改善围岩性质很难解决深层巷道稳定性问题,但可通过应力转移技术减小围岩应力,人为改变围岩应力环境,将应力峰值向

深处转移,控制巷道变形,提高巷道围岩稳定性<sup>[4]</sup>。国内外学者已对钻孔、注水、卸压槽、卸压巷和卸压爆破等应力转移方式开展了研究,取得了好的应力转移和变形控制效果<sup>[5-11]</sup>。

本文采用FLAC<sup>3D</sup>数值模拟方法,系统研究单排钻孔布置和双排钻孔布置的关键参数,分析巷道变形和围岩应力分布规律,并提出钻孔关键参数的确定方法,可为深层巷道控制围岩变形和降低应力峰值提供参考。

① 收稿日期: 2022-12-06

基金项目: 深海矿产资源开发利用技术国家重点实验室开放课题(2021-HYSDDYB-001)

作者简介: 汪学清(1971—),男,山东成武人,博士(后),副教授,主要研究方向为岩石力学、矿山建设。

## 1 大直径钻孔减小巷道变形机理分析

在巷道周围设置卸压孔,可使巷道周围形成弱化区,围岩中积累的弹性能得以释放,应力集中向深处岩层转移,围岩应力降低。布置钻孔还可以提供一定的空间补偿,减小巷道帮部和顶板变形。巷道开挖后,巷帮逐渐被压实,应力通过帮部转移到底板,当应力超过底板承受最大值时,底板向巷道内挤出。通过在帮部设置钻孔、将垂直应力最大值向深处转移,可减小向底板传递的力从而降低巷道底板的底鼓量。

## 2 模型建立

采用 FLAC<sup>3D</sup> 数值模拟软件建立巷道帮部大直径钻孔卸压模型。模拟巷道位于地下 900 m 处,巷道断面形状为直墙半圆拱,巷道宽 4.8 m、高 4.4 m。建立几何模型尺寸为 54 m × 40 m × 10 m ( $x \times z \times y$ ) 的巷道模型。该模型的侧向压力系数近似选取为 1。考虑上覆土层的影响,按照容重 25 kN/m<sup>3</sup> 计算,900 m 处垂直应力为 22.5 MPa。约束条件设置为左右边界水平约束、垂直方向自由,下边界垂直方向约束、水平方向自由,顶面承受垂直应力、水平方向自由。为了体现深层巷道的大变形现象,岩石本构模拟采用应变软化模型。岩石峰前力学参数为:弹性模量 1.8 GPa,内摩擦角 30°,黏聚力 3.32 MPa,泊松比 0.28,抗拉强度 0.5 MPa,密度 2 300 kg/m<sup>3</sup>,峰后岩石软化参数见表 1。

表 1 岩石软化参数

塑性应变	峰后参数	
	黏聚力/MPa	内摩擦角/(°)
0.001	2.72	24.91
0.002	1.68	21.76
0.003	1.41	20.20
0.004	1.34	19.42
0.01	1.32	18.66
0.1	1.32	18.65

## 3 计算结果分析

### 3.1 巷道模型及单个钻孔计算结果

在岩土体中布置圆孔后,孔壁周围产生应力集中,发生破坏,产生塑性区,岩体进入塑性区致使孔周围应力降低。为分析不同孔径的钻孔塑性区和应力降低区的范围,建立 6 m × 6 m × 1 m 模型,其内部布置直径 80~240 mm 钻孔,模拟原岩应力 22.5 MPa,侧向压力系数取 1。塑性区半径取孔径塑性区水平方向距离,取钻孔径向的垂直方向、应力为原岩应力 95% 的区域作为应

力降低区。不同孔径时塑性区和应力降低区范围如图 1~2 所示。由图可知,钻孔周围塑性区半径和钻孔周围应力降低区范围与钻孔直径近似呈线性增长。考虑实际巷道钻孔孔径以及施工时间,选取钻孔孔径 200 mm,此时塑性区水平半径为 0.316 m,应力降低区高度(钻孔上部 and 钻孔下部降低区范围之和)为 2.122 m。

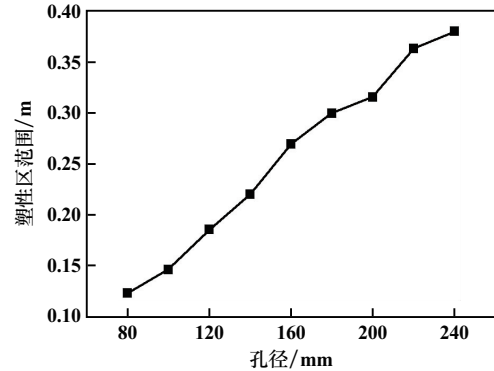


图 1 钻孔周围塑性区范围

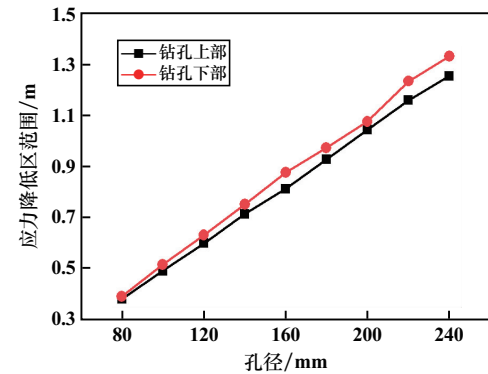


图 2 钻孔周围应力降低区范围

巷道开挖后,巷道周围发生应力重分布,同时巷道壁向内变形。巷道开挖后应力分布见图 3。模拟结果如下:巷道帮部变形量 42.590 cm、巷道顶板下沉量 54.194 cm、巷道底鼓量 41.159 cm。巷道两帮有应力集中现象,应力集中位置位于巷道拱部,应力最大值为 39.610 MPa。选取距巷道底板 2 m 处记录垂直应力,应力最大值为 31.648 MPa,距离巷道帮部 7.880 m。

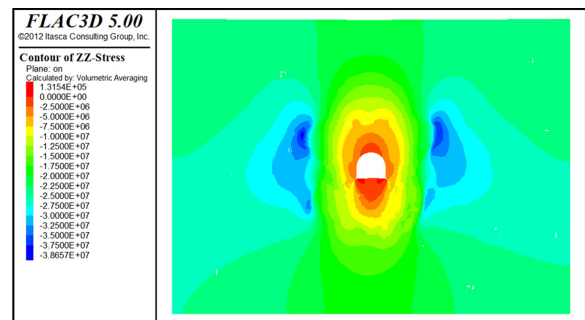


图 3 巷道开挖后应力分布

### 3.2 单排钻孔计算结果

巷道帮部设置单排钻孔, 钻孔布置在距底板 2 m 处。采用 Rhino 6 建模软件建立模型并完成对巷道布置钻孔模型的网格划分, 将网格读入 FLAC<sup>3D</sup> 进行计算, 分析不同孔深度、孔间距和孔布置位置对巷道变形的影响。

#### 3.2.1 单排钻孔孔深对巷道变形的影响

分析不同直径钻孔周围的塑性区半径和应力降低范围可知, 钻孔直径 200 mm 时塑性区半径约 0.3 m。钻孔沿巷道轴向布置的距离为间距, 取相邻钻孔孔间距 0.6 m, 孔深从 1 m 增加到 13 m, 研究不同孔深对巷道变形的影响, 结果见图 4。由图 4 可知, 巷道帮部钻孔孔深小于 4 m 时, 布置钻孔对顶板下沉和底鼓没有明显影响, 巷道帮部变形先增大后减小, 但变形量比未设置钻孔时大。钻孔孔深 4~9 m 时, 顶板下沉和底鼓变形量明显降低, 巷道帮部变形有减小趋势; 钻孔孔深 9~13 m 时, 巷道顶板下沉量开始增加, 但小于未设置钻孔时的变形量, 底鼓量小幅增长后趋于稳定, 帮部变形开始逐渐增大。钻孔孔深 8 m 时巷道变形最小, 巷道顶板下沉量为 49.899 cm, 巷道底鼓量为 31.413 cm, 巷道帮部变形量为 40.016 cm。

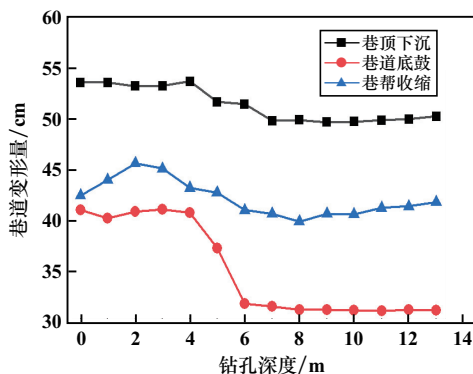


图 4 单排钻孔孔深对巷道变形的影响

取相邻钻孔中间的位置, 距离帮部不同位置处的垂直应力随钻孔深度的变化如图 5 所示。通过分析可以看出, 巷道开挖后, 岩层中应力重分布, 浅部围岩处于双向应力状态, 抗压强度降低。巷道开挖导致此处垂直应力增加, 率先进入塑性区。随着钻孔孔深增加, 巷道围岩处于三向应力状态, 承载能力逐渐增加, 在巷道帮部深处出现应力集中现象。

单排钻孔深度在巷道帮部塑性区范围内时, 巷道帮部垂直应力分布未发生明显变化, 应力集中位置仍在巷道上部; 钻孔深度达到弹性区范围时, 应力集中位置向钻孔布置位置转移, 钻孔端部产生应力集中且垂直应力明显高于未布置钻孔时的垂直应力; 单排钻

孔深度大于垂直应力最大位置时, 巷道帮部垂直应力分别在原垂直应力集中的位置和钻孔端部产生应力集中现象。钻孔深度达到最大垂直应力位置附近时, 应力最大值向钻孔端部转移, 巷道变形量开始减小, 钻孔深度达到最大应力位置时, 变形量减小量达到最大。分析得出, 单排钻孔可以减小巷道变形, 巷道布置钻孔时钻孔孔深应达到巷道周围最大垂直应力位置附近。

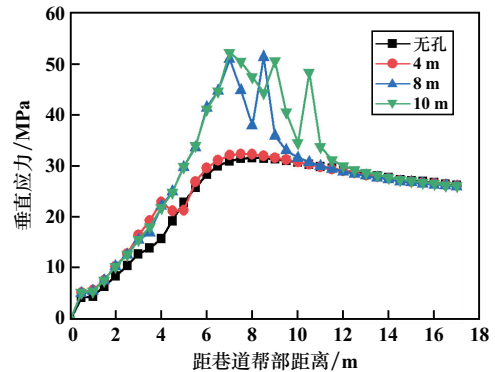


图 5 单排钻孔不同孔深时巷道周围应力分布

#### 3.2.2 单排钻孔间距对巷道变形的影响

钻孔直径 200 mm、钻孔深度 8 m, 钻孔间距对巷道的的影响见图 6。由图 6 可见, 采用单排钻孔, 孔间距 0.6~1.6 m 时, 巷道顶板、底鼓和帮部变形量逐渐增加, 在孔间距 0.6 m 时巷道变形最小。钻孔间距 2.4 m 和 3.0 m 时, 巷道变形不再随孔间距变化而变化, 巷道变形量与未设置钻孔时相同。钻孔间距较大时, 设置钻孔对巷道变形基本没有影响。

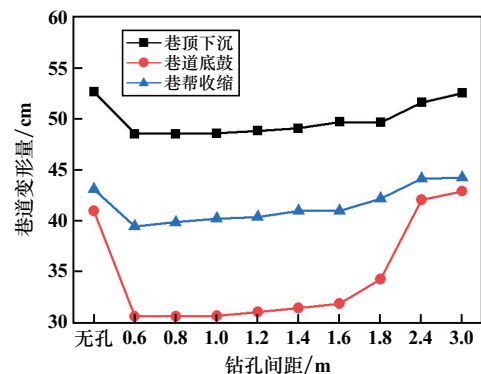


图 6 单排钻孔间距对巷道变形的影响

巷帮垂直应力分布与钻孔间距的关系如图 7 所示, 钻孔间距 0.6~1.8 m 时, 钻孔之间的应力分布由单峰向双峰过渡。钻孔间距 0.6 m、0.8 m 和 1.0 m 时, 相邻钻孔之间应力值分布形态为单峰, 垂直应力峰值分别为 50.557 MPa、56.423 MPa 和 64.257 MPa。随着孔间距增加, 峰值应力增大。孔间距大于 1.0 m 后, 相邻钻孔间垂直应力分布呈现双峰, 随着相邻钻孔间距增

加,应力值逐渐减小,直到与未开挖时相近。

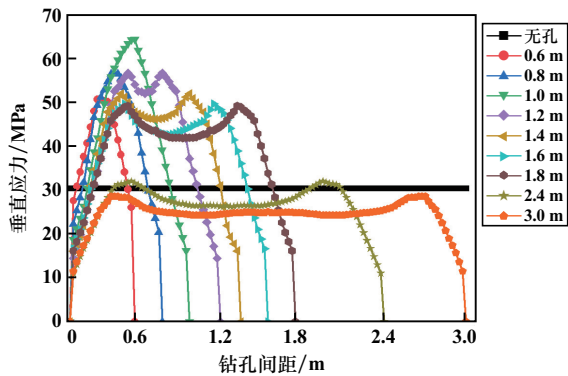


图7 单排钻孔不同间距时孔间应力分布

### 3.2.3 单排钻孔布置位置对巷道变形的影响

钻孔直径 200 mm、钻孔深度 8 m、钻孔间距 0.6 m,单排钻孔布置位置对巷道变形的影响见图 8。由图 8 可知,布置单排钻孔时,钻孔布置位置对巷道底鼓和顶板变形影响不大,对巷道帮部变形影响较明显。钻孔布置在距离底板 2 m 和 2.5 m 处时巷道帮部变形量分别为 39.350 cm 和 39.520 cm。钻孔布置在距底板 0.5 m 时,对巷道帮部变形影响较小,因此布置钻孔时应尽量布置在巷道中间位置。在帮部不同位置布置钻孔时,应力集中位置始终在钻孔端部,表明布置单排钻孔起到了转移应力的作用,随着钻孔位置上移,距未设置钻孔时应力集中的位置越来越近,端部应力集中越来越明显。

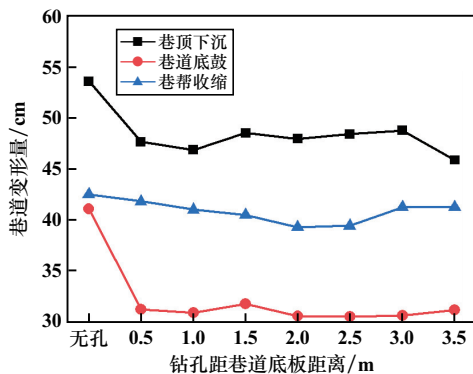


图8 单排钻孔布置位置对巷道变形的影响

### 3.2.4 小结

在巷道帮部布置单排钻孔,钻孔深度达到巷道周围最大垂直应力位置,钻孔间距选取单个钻孔时水平塑性区距离,能起到减小巷道变形和转移应力的作用。钻孔深度 8 m、钻孔间距 0.6 m 时,巷道顶板下沉量 49.899 cm、巷道底鼓量 31.413 cm、巷道帮部变形量 40.016 cm。与未布置钻孔相比,分别减小了 5.01%、23.71% 和 6.05%。巷道周围原最大应力处的应力值由 39.61 MPa 降至 33.50 MPa。

## 3.3 双排钻孔计算结果

### 3.3.1 双排钻孔孔深对巷道变形的影响

钻孔间距 0.6 m、排距 1.2 m,不同钻孔深度对巷道变形的影响见图 9。由图 9 可知,钻孔深度 0~2 m 时,对巷道顶板、底板变形量影响较小,巷道帮部变形有增加趋势。钻孔深度 2~6 m 时,巷道顶板和巷道底板变形量减小后趋于稳定,巷道帮部变形逐渐减小,钻孔深度 7 m 时巷帮变形达到最小。钻孔深度 8~13 m 时,顶板变形量有增加趋势,底鼓变形量不随深度变化而变化,巷道帮部变形量逐渐增加。钻孔深度 7 m 时,巷道顶板下沉量为 49.360 cm,底鼓下沉量为 31.796 cm,巷道帮部变形量为 37.138 cm。

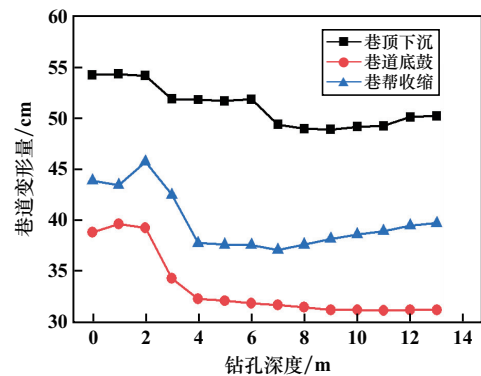


图9 双排钻孔孔深对巷道变形的影响

取相邻 4 个钻孔中间位置,距离帮部不同位置处的垂直应力随钻孔深度的变化情况见图 10。由图 10 可知,未设置钻孔时,巷帮最大垂直应力位置距离巷帮约 7 m。布置钻孔后,钻孔深度小于 7 m 时,设置钻孔对巷道周围应力分布基本没有影响;钻孔深度 7~13 m 时,巷帮垂直应力随着钻孔深度增加而增加,应力集中位置转移到钻孔端部附近,且随着深度增加,应力最大值逐渐减小;钻孔深度 7 m 时应力集中值最大,为 42.705 MPa。钻孔深度范围内应力值比未设置钻孔时应力值低,深度大于钻孔深度时,垂直应力逐渐恢复为原岩应力。

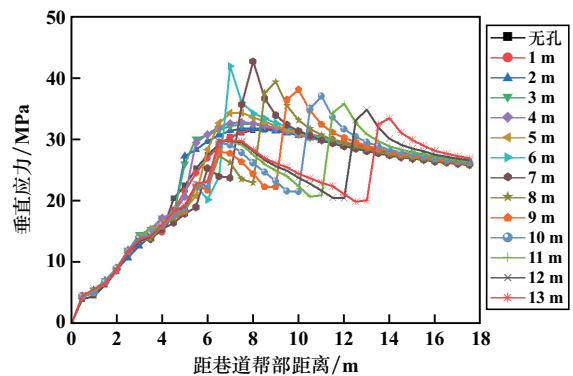


图10 双排钻孔不同孔深时巷道周围应力分布

### 3.3.2 双排钻孔排距对巷道变形的影响

钻孔直径 200 mm、钻孔深度 7 m,不同钻孔排距对巷道围岩的影响见图 11。由图 11 可知,随着双排钻孔排距增加,巷道底板变形有减小的趋势,排距 3.0 m 时,巷道底鼓量迅速增加,与未设置钻孔时的底鼓量相近;随着排距增加,巷道帮部变形逐渐增加,排距 3.0 m 时,帮部变形量明显增加,与未设置钻孔时的变形量相近;随着排距增加,巷道顶板先减小后增大,但变化不明显。

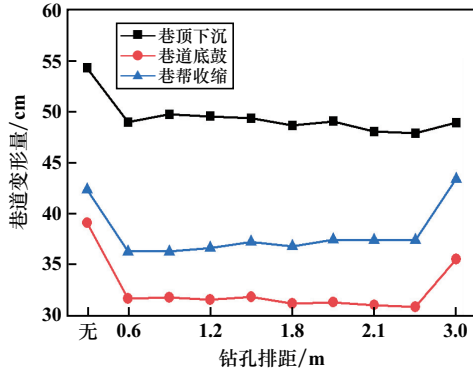


图 11 双排钻孔排距对巷道变形的影响

相邻两排钻孔之间的竖向应力分布见图 12。由图 12 可知,两排钻孔之间的竖向应力分布呈单峰形式,且中间有较大的平台。排距增大,应力集中位置的应力最大值逐渐减小。

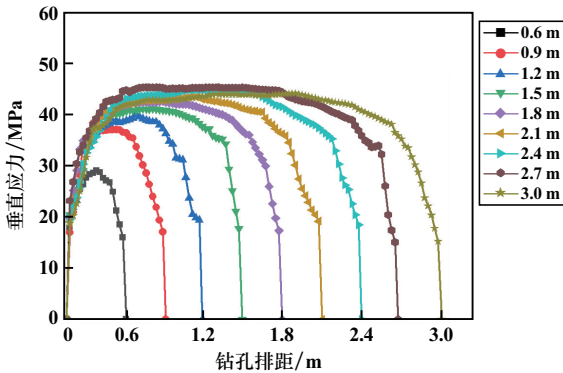


图 12 双排钻孔不同排距孔间应力分布

### 3.3.3 双排钻孔间距对巷道变形的影响

钻孔直径 200 mm、钻孔深度 7 m、排距 1.5 m,双排钻孔间距对巷道围岩的影响见图 13。由图 13 可知,钻孔间距 0.6~1.6 m 时对巷道顶板和巷道帮部变形影响较小,巷道底板略微增加;间距 1.8 m 时,巷道变形量增加;间距大于 1.8 m 后,巷道变形量与未设置钻孔时的变形量相同。

相邻钻孔之间的垂直应力见图 14。由图 14 可见,钻孔间距 0.6~0.8 m 时,两钻孔之间应力分布为单

峰形式,钻孔间距大于 0.8 m 后,应力分布呈双峰形式,且随着间距增加,应力最大值逐渐减小。

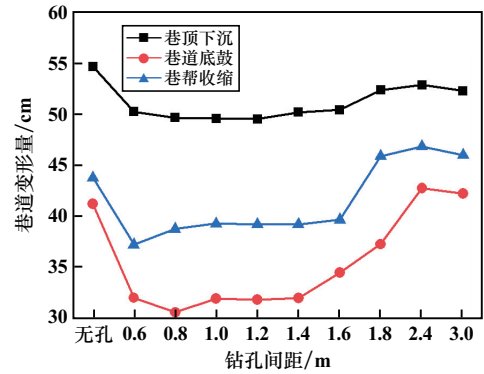


图 13 双排钻孔间距对巷道变形的影响

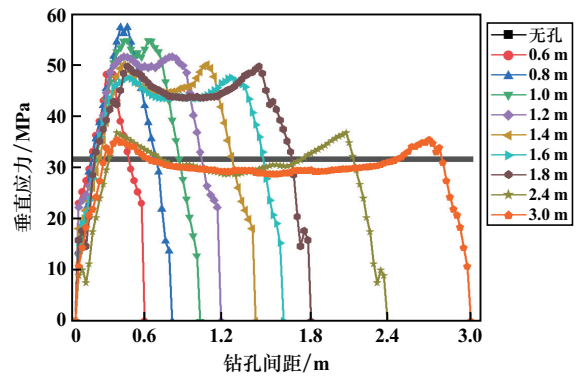


图 14 双排钻孔不同间距时孔间应力分布

### 3.3.4 小结

在巷道帮部布置双排钻孔比单排钻孔对减小巷道变形和转移应力的效果好。布置双排钻孔时,钻孔深度应达到巷道周围最大垂直应力位置,钻孔间距选取单个钻孔时水平塑性区距离,钻孔排距不应超过单个钻孔上下应力降低范围,能起到减小巷道变形和转移应力的作用。采用双排布置钻孔,钻孔深度 7 m、钻孔间距 0.6 m、钻孔排距 1.2 m 时,巷道顶板下沉量为 49.360 cm、巷道底鼓量为 31.796 cm、巷道帮部变形量为 37.138 cm。与未布置钻孔相比,分别减小了 8.92%、22.75%、15.44%。巷道周围原最大应力处的应力值由 39.61 MPa 降至 32.70 MPa。

## 4 结 论

1) 双排钻孔比单排钻孔对巷道变形控制和应力转移效果更好,单排钻孔减小巷道帮部变形量 6.05%,双排钻孔减小巷帮变形量 15.44%。单排钻孔时原应力最大值位置应力由 39.61 MPa 降为 33.50 MPa,双排钻孔时降为 32.70 MPa。

2) 基于坡面浅层滑坡反分析所得边坡岩体参数,与实际强度水平相比偏低;运用至边坡稳定性分析时,应保持工况条件一致,坡面浅层滑坡反分析的结果适于进行局部或单台阶稳定性分析,深层滑坡或由软弱结构面造成的滑坡反分析结果适于进行整体边坡稳定性分析。

3) Hoek-Brown 强度准则下的抗剪强度参数与室内大型三轴压缩试验结果接近;该准则下计算岩体强度参数具有操作性强、适用范围广、周密性好、准确度高等优点。

#### 参考文献:

- [1] 叶智英,王 滕,梅松华,等. 某长江大桥高峰岸锚碇基础边坡稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2021,41(3):11-15.
- [2] 王 鹏,周传波,郭廖武,等. 基于 FLAC 及神经网络的岩体力学参数反分析[J]. 矿冶工程, 2009,29(2):5-8.
- [3] 谭本兴,罗 荣,唐爱松,等. 川藏铁路工程破碎岩体力学参数取

值研究[J]. 长江科学院院报, 2022,39(6):76-81.

- [4] 张雅贤,侯中杰. 基于支持向量机和贝叶斯方法的岩体参数反分析[J]. 人民长江, 2022,53(6):186-192.
- [5] 杜 俊,程 涌,冯国建,等. 不同堆置状态粗粒土剪切强度试验研究[J]. 矿冶工程, 2020,40(5):28-32.
- [6] 陈雪松,刘晶辉,白富英. 露天煤矿岩土大三轴试验分析[J]. 露天采煤技术, 2000(4):6-8.
- [7] 石 熊,张家生,彭 状,等. 加筋粗粒土强度变形特性试验研究[J]. 矿冶工程, 2014,34(4):1-5.
- [8] 杜 俊,侯克鹏,程 涌,等. 高台阶排土场粒径分布特征与抗剪强度特性[J]. 矿冶工程, 2022,42(6):29-33.
- [9] 刘 春. 大冶铁矿岩体力学参数模糊综合评价研究[J]. 矿冶工程, 2005(5):24-27.
- [10] 戴 粤,戴吾蛟,余文坤. 综合地表与深部位移监测数据的滑坡多目标加权位移反分析方法[J]. 测绘学报, 2022,51(10):2149-2159.

引用本文: 刘 宏,董明华,张诏飞,等. 露天矿边坡岩体抗剪强度参数取值方法研究[J]. 矿冶工程, 2023,43(3):6-10.

(上接第5页)

2) 钻孔应尽量布置在巷道帮部的中间位置;钻孔深度应穿过塑性区,达到应力最大值位置;钻孔间距选取钻孔水平方向塑性区的距离;钻孔排距不应大于钻孔上下产生的应力降低区范围。

#### 参考文献:

- [1] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等. 深部开采岩体力学研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005(16):2803-2813.
- [2] 李向阳,韩立军,宗义江. 深埋软岩巷道破坏机理与控制技术研究[J]. 矿冶工程, 2012,32(6):21-25.
- [3] 付建军,刘泉声,赵海斌,等. 煤矿深部巷道底臌发生机理及防治对策研究[J]. 矿冶工程, 2010,30(5):21-26.
- [4] 蔡美峰,何满潮,刘东燕. 中国煤矿软岩巷道支护理论与实践[M]. 北京:科学出版社, 2002.
- [5] 李金奎,刘东生,李学彬,等. 小煤柱应力集中区钻孔卸压效果的

数值模拟[J]. 西安科技大学学报, 2009,29(5):527-530.

- [6] 赵从国. 煤层注水工艺与效果分析[J]. 煤炭科技, 2005(1):45-47.
- [7] 王建军. 袁庄矿回采巷道卸压槽技术研究及应用[D]. 淮南:安徽理工大学能源与安全学院, 2016.
- [8] 钱鸣高,石平五. 矿山压力与岩层控制[M]. 徐州:中国矿业大学出版社, 2003.
- [9] 王御宇,李学锋,李向东. 深部高应力区卸压开采研究[J]. 矿冶工程, 2005(4):4-7.
- [10] 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(1):33-37.
- [11] 张伟杰,兰思栋. 高应力下卸压巷道围岩破坏机理及卸压过程数值分析[J]. 矿冶工程, 2014,34(4):34-38.

引用本文: 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.