

# 互层状围岩隧道切槽爆破破岩规律研究<sup>①</sup>

熊成宇<sup>1</sup>, 张建<sup>2</sup>, 刘向阳<sup>1</sup>, 张学富<sup>3</sup>, 黄耀民<sup>1</sup>, 胡波<sup>2</sup>, 余标<sup>1</sup>, 林高宇<sup>2</sup>

(1.中交一公局第四工程有限公司, 广西 南宁 530000; 2.重庆交通大学 土木工程学院, 重庆 400074; 3.重庆交通大学 未来土木科技研究院, 重庆 400074)

**摘要:** 根据互层状围岩与周边孔的相对位置关系,对围岩互层面与两邻近周边孔连心线相对位置关系进行分类;采用 LS-DYNA 数值模拟方法,探究典型工况(围岩互层面与炮孔连心线中垂线重合)下,互层面对孔间围岩爆破裂纹扩展的影响机理;并对围岩互层面与炮孔连心线不同相对位置关系下,围岩互层面对孔间围岩爆破成形效果的影响进行了研究。结果表明,砂岩中的爆破振动波传播速度略高于砂质泥岩中的传播速度;爆破荷载下,较软岩层和互层面上围岩受损严重;两炮孔爆破振动波峰叠加加剧了围岩损伤;互层面贯穿炮孔时爆破效果欠佳,互层面位于炮孔连心线中垂线时爆破效果较理想。

**关键词:** 隧道爆破; 互层状围岩; 切槽爆破; 裂纹扩展; 互层面; 周边孔; 爆破振动; 围岩损伤

中图分类号: TD263;U455

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2024.06.003

文章编号: 0253-6099(2024)06-0011-05

## Rock Fragmentation Patterns in Tunnels with Interbedded Surrounding Rock by Blasting with Slotted Blastholes

XIONG Chengyu<sup>1</sup>, ZHANG Jian<sup>2</sup>, LIU Xiangyang<sup>1</sup>, ZHANG Xuefu<sup>3</sup>, HUANG Yaomin<sup>1</sup>, HU Bo<sup>2</sup>, YU Biao<sup>1</sup>, LIN Gaoyu<sup>2</sup>  
(1.The Fourth Engineering Co., Ltd. of CCCC First Highway Engineering Co., Ltd., Nanning 530000, Guangxi, China; 2.School of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3.Institute of Future Civil Engineering Science and Technology, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** According to the relative position between interbedded surrounding rock and the peripheral holes, the relationship between bedding planes and the connecting line of the adjacent blastholes was classified into three kinds. Mechanism for bedding planes bringing impact to crack propagation in rocks between blastholes by blasting under typical work conditions (with bedding planes on the perpendicular bisector of the connecting line of blastholes) was explored by the LS-DYNA numerical simulation; and the effect of bedding planes in a different relative position to the connecting line of blastholes on the blasting effect of surrounding rock was also studied. It is found that the propagation speed of blasting vibration waves in sandstone is slightly higher than that in sandy mudstone. Under blasting loads, the surrounding rock above both softer layer and the beddings suffer severe damage. The superposition of two-blasthole blasting vibration wave peaks intensifies the damage to the surrounding rock. The blasting effect is poor when the bedding plane penetrates the blastholes, but the blasting effect is ideal if the bedding plane is on the perpendicular bisector of the connecting line of blastholes.

**Key words:** tunnel blasting; interbedded surrounding rock; blasting with slotted blasthole; crack propagation; bedding plane; peripheral hole; blasting vibration; surrounding rock damage

岩体构造是隧道工程中影响工程质量的关键因素<sup>[1]</sup>。互层状岩体<sup>[2]</sup>由两种不同岩性的岩层交互形成,其层间胶结力差、岩体强度低。当在互层状围岩中爆破掘进隧道时,爆破能量与围岩内部的互层构造互

相作用,极易出现岩层剥落、掉块,超欠挖以及围岩损伤等情况<sup>[3-5]</sup>,严重超挖甚至会引起隧道掌子面岩体失稳、塌方等事故<sup>[6]</sup>,显著增加了施工难度与安全风险,因此,亟须开展互层状围岩爆破损伤特征研究<sup>[7]</sup>。

① 收稿日期: 2024-06-08

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2600103-01); 国家自然科学基金(52204087); 重庆市交通科技项目(CQJT-CZKJ2023-04); 重庆市教委科学技术研究项目(KJQN202200746)

作者简介: 熊成宇(1972—),男,湖南永州人,高级工程师,主要从事公路桥梁隧道技术管理方面的工作。E-mail:1391328373@qq.com

通信作者: 张学富(1970—),男,重庆合川人,博士,教授,主要从事岩石工程、桥隧工程方面的研究。E-mail:66350995@qq.com

切槽爆破技术在切槽方向上可实现应力集中,从而使爆生裂纹按预定方向发展<sup>[8-11]</sup>,为互层状围岩爆破存在的问题提供了解决思路。

目前对互层状围岩切槽爆破破岩规律研究较少,切槽爆破聚能和应力导向规律尚不清晰。本文依托某隧道工程,采用数值模拟方法,探讨互层状围岩隧道爆破施工过程中互层空间位置分布特征对爆破成形效果的影响规律,以期为类似工程提供经验借鉴。

## 1 工程概述

根据渝武高速某隧道工程实际情况,对所研究互层状围岩作出如下限定:

- 1) 围岩互层面垂直于隧道横断面。
- 2) 围岩互层厚度为每层 2 m。
- 3) 围岩岩性为砂岩-砂质泥岩互层。

图 1 为围岩互层面与周边孔连心线的位置关系,可分为垂直、斜交或平行 3 种。本文对围岩互层面与炮孔连心线垂直情况下的互层面对两邻近周边孔爆破效果的影响展开研究。

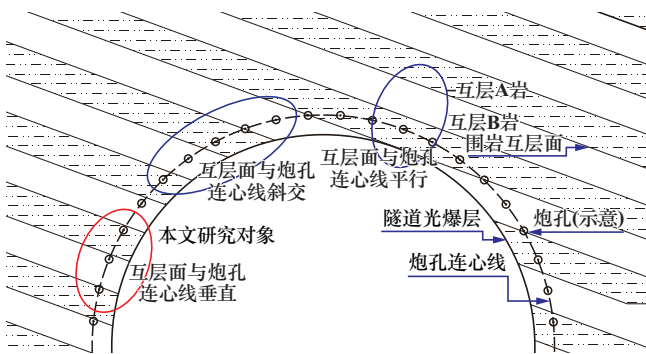


图 1 围岩互层面与周边孔连心线位置关系

## 2 数值模拟计算设计

### 2.1 材料本构参数

#### 2.1.1 岩石材料

HJC 模型是引入应变率效应而提出的一种岩石动态损伤本构模型,其中极限面描述为损伤、应变率与静水压力的函数<sup>[12]</sup>。本文选用 \* MAT\_JOHNSON\_HOLMQUIST\_CONCRETE 材料模型,砂岩与砂质泥岩的力学参数<sup>[13]</sup>见表 1。

表 1 砂岩和砂质泥岩力学参数

岩性	密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	剪切模量/ GPa	静态单轴 压缩强度/ MPa	抗拉 强度/ MPa	断裂前 应变率
砂岩	2 205	3.765	41.46	6.53	0.015 4
砂质泥岩	2 510	1.015	11.96	2.01	0.063 7

#### 2.1.2 炸药材料及状态方程

选用 2 号岩石乳化炸药,其物理力学参数如表 2 所示。炸药材料选用 LS-DYNA 内嵌高能炸药材料模型 \* MAT\_HIGH\_EXPLOSIVE\_BURN,对应的 JWLL 状态方程<sup>[14]</sup>为:

$$p = A \left( 1 - \frac{w}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{w}{R_2 V} \right) + \frac{w E_0}{V} \quad (1)$$

式中: $p$  为爆轰产物压力; $V$  为相对体积; $E_0$  为初始比内能; $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$  和  $w$  均为材料常数。

表 2 炸药材料参数

密度/ ( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	爆速/ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$	$w$	$E_0/\text{GPa}$
1 000	3 400	229	0.55	6.5	1.0	0.35	3.51

#### 2.1.3 空气材料及状态方程

采用不耦合装药结构<sup>[15]</sup>,耦合介质为空气,采用流固耦合算法,炮孔周围部分空气域与围岩耦合。采用 LS-DYNA 程序提供的空白材料模型 \* MAT\_NULL 模拟空气域,其线性多项式 \* EOS\_LINEAR\_POLYNOMIAL 状态方程为:

$$p = C_0 + C_1 u + C_2 u^2 + (C_3 u^3 + C_4 + C_5 u + C_6 u^2) E_0 \quad (2)$$

式中: $C_0 \sim C_6$  均为常数; $u$  为动态黏度。对应的参数取值见表 3。

表 3 空气材料参数

密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	$C_0$	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$E_0/\text{GPa}$
1.29	0	0	0	0	0.4	0.4	0	0.025

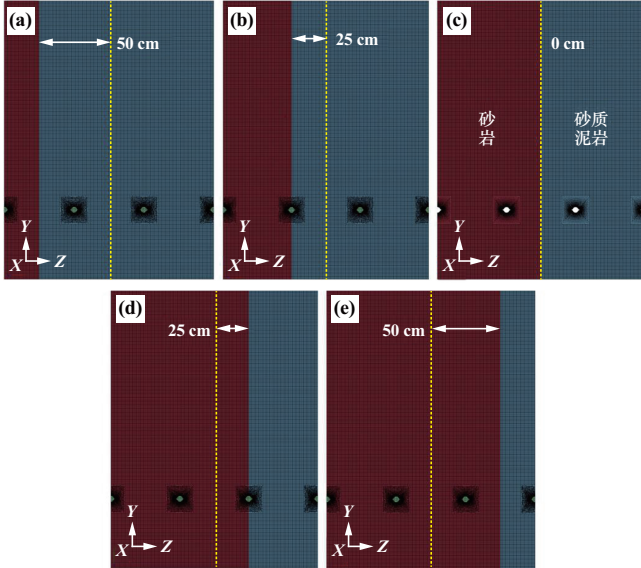
## 2.2 计算模型

为提高计算效率,采用准二维模型、装药炮孔同时起爆。根据围岩互层面与炮孔连心线相对位置关系,基于 LS-DYNA 显式有限元分析软件建立不同工况相应的计算模型,如图 2 所示。图 2 中工况模型采用相同尺寸、参数、算法,区别仅在于围岩互层面与两炮孔连心线的相对位置关系。

以工况 2(围岩互层面贯穿 2#炮孔)计算模型为例,为了避免模型边界对计算结果的影响,模型整体尺寸 150 cm × 200 cm,如图 3 所示。

围岩为砂岩-砂质泥岩互层,共 4 个周边孔,直径 42 mm,切槽深度 10 mm,角度 60°,炮孔中心间距 50 cm,光爆层厚度 50 cm,2 号岩石乳化炸药直径 32 mm,采用径向不耦合装药结构,耦合介质为空气。模型上、左、右边界均设置为无反射边界以模拟无限远的围岩;

下边界设置为自由边界以模拟光爆层。由于模型采用准二维计算模型,Z 方向划分为 1 个单元,所有网格节点施加 Z 方向位移约束,该方法可显著减小模型计算量。



(a) 工况 1; (b) 工况 2; (c) 工况 3; (d) 工况 4; (e) 工况 5

图 2 计算模型

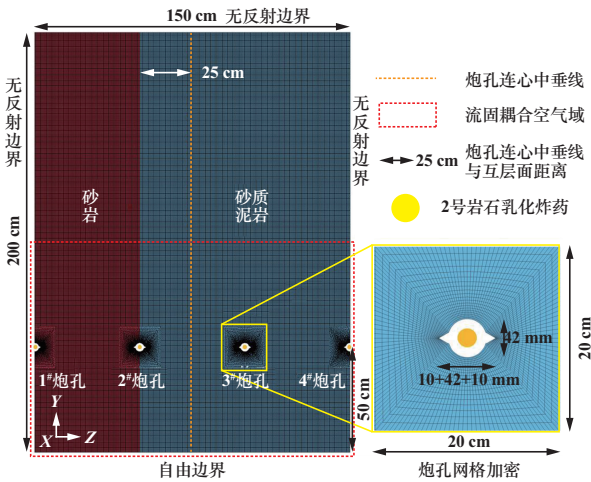


图 3 工况 2 计算模型尺寸

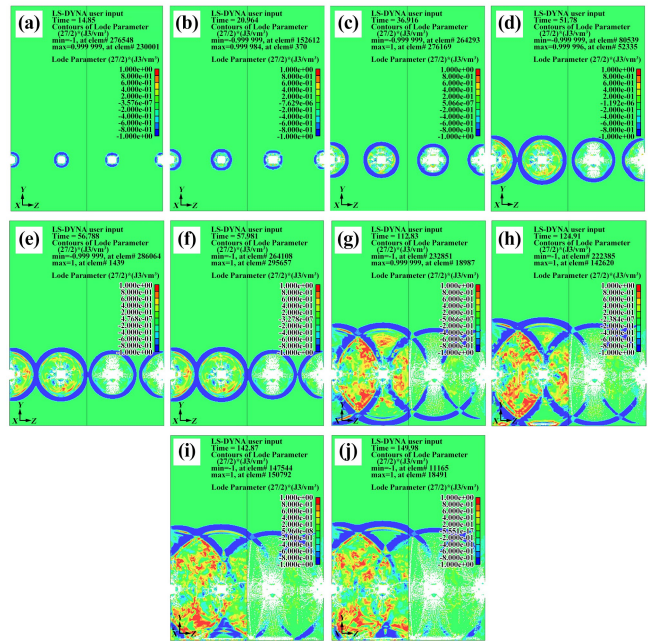
### 3 数值模拟结果与讨论

#### 3.1 典型工况爆破效果

采用 LS-DYNA 进行爆破仿真计算,并利用 LS-PREPOST 进行计算结果的显式分析。图 4 为围岩互层面与炮孔连心中垂线重合时(工况 3)起爆后围岩应力波及裂纹云图。

分析图 4 可知:炸药起爆后 15  $\mu\text{s}$  时砂岩层粉碎区形成,21  $\mu\text{s}$  时砂质泥岩层粉碎区形成,37  $\mu\text{s}$  时砂

岩层破碎区形成,52  $\mu\text{s}$  时砂质泥岩层破碎区形成;砂岩层中 1# 和 2# 炮孔振动波峰在 52  $\mu\text{s}$  时相遇叠加,互层面两侧 2# 和 3# 炮孔振动波峰在 56.8  $\mu\text{s}$  时相遇叠加,砂质泥岩层中 3# 和 4# 炮孔振动波峰在 58  $\mu\text{s}$  时相遇叠加;互层面两侧炮孔振动波传播至互层面时,有明显被互层面吸收的现象;砂岩层和砂质泥岩层炮孔振动波分别在 113  $\mu\text{s}$  和 125  $\mu\text{s}$  时传播至自由面并产生反射拉伸应力波,造成光爆层岩体受拉破坏出现层裂,对应爆破振动波在砂岩与砂质泥岩中传播速度分别为 4 424 m/s 和 4 000 m/s;143  $\mu\text{s}$  时孔间贯通裂纹形成,开挖轮廓面基本形成;150  $\mu\text{s}$  时裂纹扩展趋于稳定,裂纹区形成。以上结果表明,砂岩中爆破振动波传播速度略高于砂质泥岩中的传播速度。



(a)  $t = 15 \mu\text{s}$ ; (b)  $t = 21 \mu\text{s}$ ; (c)  $t = 37 \mu\text{s}$ ; (d)  $t = 52 \mu\text{s}$ ;  
(e)  $t = 56.8 \mu\text{s}$ ; (f)  $t = 58 \mu\text{s}$ ; (g)  $t = 113 \mu\text{s}$ ; (h)  $t = 125 \mu\text{s}$ ;  
(i)  $t = 143 \mu\text{s}$ ; (j)  $t = 150 \mu\text{s}$

图 4 工况 3 应力波及裂纹云图

图 5 为工况 3 砂岩层 2# 炮孔面(贯穿炮孔且垂直于炮孔连中线)、砂质泥岩层 3# 炮孔面、围岩互层面上超挖深度时程曲线。 $t = 0 \sim 58 \mu\text{s}$  时,砂岩层 2# 炮孔面超挖深度随时间增大至 15.5 cm, $t = 58 \sim 113 \mu\text{s}$  时缓慢增大至 19.0 cm 后停止增大; $t = 0 \sim 143 \mu\text{s}$  时,砂质泥岩 3# 炮孔面超挖深度随时间匀速增大至 49.5 cm;围岩互层面在 68  $\mu\text{s}$  时开始出现损伤,超挖深度随着两侧炮孔振动波峰的叠加迅速延伸,在 150  $\mu\text{s}$  时增大至 49.6 cm。以上结果表明,相同爆破荷载下互层围岩中较软岩层受破坏更严重,导致更大的超挖量;两炮孔振动波峰的叠加会加剧对围岩的损伤。

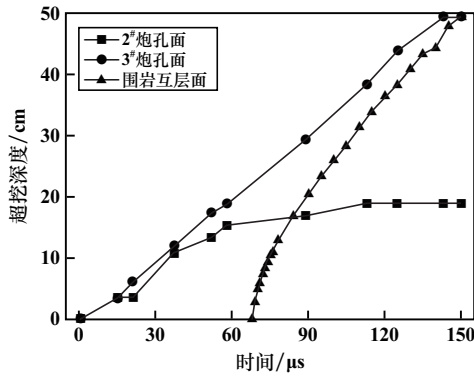
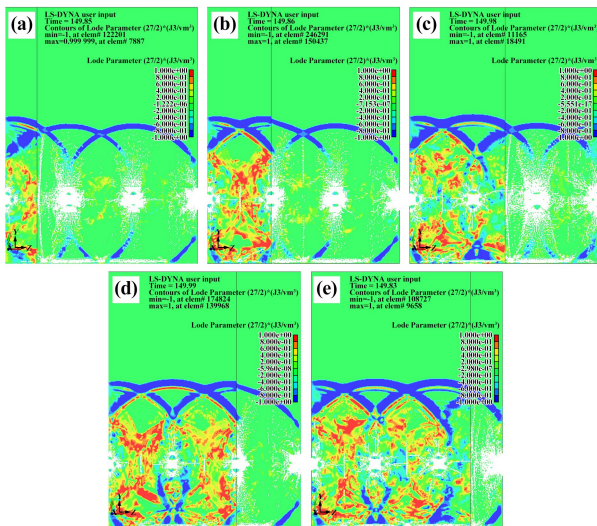


图5 工况3关键位置超挖深度历程曲线

### 3.2 不同工况爆破效果对比

图6为 $t=150\ \mu\text{s}$ 时各工况整体模型围岩应力波及裂纹扩展云图,探究互层面与炮孔连心线不同相对位置关系对2#、3#炮孔间围岩爆破效果的影响。



(a) 工况1; (b) 工况2; (c) 工况3; (d) 工况4; (e) 工况5

图6  $t=150\ \mu\text{s}$ 时各工况应力波及裂纹扩展云图

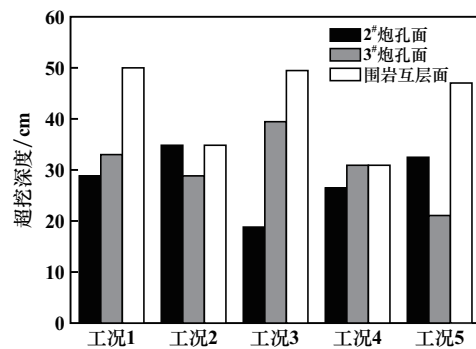
当互层面贯穿2#炮孔(工况2)时,2#、3#炮孔间为砂质泥岩,两炮孔间裂纹未贯穿且2#炮孔一侧裂纹扩展距离较短,互层面上砂质泥岩一侧超挖较为严重;互层面贯穿3#炮孔(工况4)时,2#、3#炮孔间为砂岩,两炮孔间裂纹未贯穿且在3#炮孔裂纹扩展距离较短,互层面上砂质泥岩一侧超挖较为严重。以上结果表明:互层面吸收爆破能量较多,互层面上围岩损伤严重;互层面贯穿炮孔时,爆破能量有向较软岩层一端倾斜的趋势,易导致较硬一端围岩裂纹不贯通。

2#、3#炮孔间为砂质泥岩(工况1)时,2#、3#炮孔爆破效果几乎相同,孔间裂纹基本贯通;2#、3#炮孔间为砂岩(工况5)时,2#、3#炮孔爆破效果几乎相同,炮孔间形成贯通裂纹;互层面位于2#、3#炮孔间(工况3)

时,孔间裂纹贯通。以上结果表明,互层面位于炮孔连心中垂线时,孔间爆破效果较为理想。

### 3.3 不同工况超挖量对比

图7为 $t=150\ \mu\text{s}$ 时2#炮孔面、3#炮孔面、围岩互层面的超挖深度。对比2#炮孔面、3#炮孔面超挖深度,当互层面距离2#、3#炮孔连心中垂线50 m(工况1、5)时,靠近互层面的炮孔超挖深度较低;当互层面贯穿炮孔(工况2、4)时,互层面上炮孔超挖深度较高,表明互层面对爆破能量有吸收作用;当互层面垂直2#、3#炮孔连心线(工况3)时,砂质泥岩中炮孔面超挖深度显著大于砂岩中炮孔面超挖深度,再次说明较软岩受爆破损伤更严重。

图7  $t=150\ \mu\text{s}$ 时各工况关键点超挖深度

围岩互层面上超挖深度分析结果表明,互层面上超挖深度普遍较大,且工况1、3、5的超挖深度大于工况2、4的超挖深度,再次说明2#、3#炮孔振动波峰叠加加剧了围岩的损伤。

## 4 结论

依托渝武高速某隧道工程,根据现场实际情况开展数值模拟研究,分析围岩互层面与2#、3#炮孔连心中垂线重合(工况3)时的爆破发展,分析 $t=150\ \mu\text{s}$ 时各工况应力波及裂纹扩展云图、超挖量。研究发现:

1) 砂岩中的爆破振动波传播速度略高于砂质泥岩中的爆破振动波传播速度。

2) 相同爆破荷载下互层状围岩中较软岩层受破坏更严重,导致更大的超挖量;2#、3#炮孔振动波峰叠加会加剧围岩损伤。

3) 互层面吸收爆破能量较多,互层面上围岩损伤严重;互层面贯穿炮孔时,爆破能量有向较软岩层一端倾斜的趋势,易导致较硬一端围岩裂纹不贯通;互层面位于炮孔连心中垂线时,孔间爆破效果较为理想。

### 参考文献:

[1] 王栋毅,李夕兵,黎崇金,等. 地下采矿引起地表塌陷机理研究[J].

- 矿冶工程, 2020, 40(1):16-21.
- [2] 丁祥. 互层岩体隧道爆破超欠挖控制技术[J]. 铁道工程学报, 2022, 39(3):75-80.
- [3] 赵勳, 肖明, 陈俊涛, 等. 考虑互层状岩体接触状态的地下洞室围岩稳定分析[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2022, 43(2):243-250.
- [4] 张林. 砂岩泥岩互层地质隧道变形分析及控制技术研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(增刊1):1080-1085.
- [5] 任家苇, 左宇军, 林健云, 等. 基于改进未确知测度的含软弱夹层巷道围岩稳定性评价[J]. 矿冶工程, 2023, 43(4):39-43.
- [6] 吴博文. 软岩巷道围岩裂纹演化机制与大变形控制研究[D]. 徐州:中国矿业大学, 2022.
- [7] 叶海旺, 韦文蓬, 周汉红, 等. 裂隙岩体精细化数值模型构建与爆破模拟[J]. 爆破, 2023, 40(4):44-51.
- [8] 楚博. 基于切槽孔的光爆层对边坡爆破效果的影响研究[D]. 重庆:重庆交通大学, 2024.
- [9] 林杰, 刘少光, 李广斌, 等. 基于灰色关联理论深孔切割槽爆破块度影响因素分析及参数优化[J]. 矿冶工程, 2023, 43(5):6-10.
- [10] 宋俊生, 王雁冰, 高祥涛, 等. 定向断裂控制爆破机理及应用[J]. 矿业科学学报, 2016, 1(1):16-28.
- [11] 李清, 郭洋, 刘航, 等. 切槽定向断裂控制爆破的数值模拟研究[J]. 矿业研究与开发, 2015, 35(12):79-83.
- [12] 石祥超, 陶祖文, 孟英峰, 等. 致密砂岩 Johnson-Holmquist 损伤本构模型参数求取及验证[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊2):3750-3758.
- [13] WANG Z, HUANG J, CHEN Y, et al. Dynamic mechanical properties of different types of rocks under impact loading[J]. Scientific Reports, 2023, 13(1):19147.
- [14] BORNSTEIN H, KUZNETSOV V, LU J P, et al. Characterisation and validation of the JWL equation of state parameters for PE4[J]. International Journal of Impact Engineering, 2022, 164:104190.
- [15] 刘玉丰, 方芳, 李海谦, 等. 不耦合装药结构爆炸孔壁压力分布特性的数值模拟[J]. 矿冶工程, 2022, 42(5):30-33.
- 引用本文:** 熊成宇, 张建, 刘向阳, 等. 互层状围岩隧道切槽爆破破岩规律研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(6):11-15.

(上接第5页)

- [8] 龙建辉, 赵邦强, 李坤. 顺层岩质边坡多级滑动模式及成因机理分析[J]. 中国矿业大学学报, 2016, 45(6):1156-1163.
- [9] 戴维森. 某高速公路多级边坡稳定性分析[J]. 石家庄铁道大学学报(自然科学版), 2019, 32(2):51-55.
- [10] 王玉松. 岩质高陡边坡开挖稳定性分析及支护优化设计[D]. 贵阳:贵州大学, 2021.
- [11] 李山存. 露天矿边坡稳定性分析与数值模拟[J]. 中国矿山工程, 2023, 52(3):26-33.
- [12] 李鑫, 苏有文, 王宽宽, 等. 采空区群条件下某露天矿高陡边坡稳定性分析[J]. 中国矿业, 2023, 32(4):66-71.
- [13] 李书敏. 露天矿开采过程中边坡稳定性分析[J]. 世界有色金属, 2023(7):40-42.
- [14] 彭岩岩, 宋南, 刘宇航, 等. 南芬露天铁矿边坡开挖稳定性实验研究[J]. 矿冶工程, 2022, 42(6):18-23.
- [15] 高峰, 吴晓东, 周科平. 基于主成分分析和 PSO-ELM 算法的排土场稳定性预测模型[J]. 黄金科学技术, 2021, 29(5):658-668.
- [16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 非煤露天矿边坡工程技术规范:GB 51016—2014[S]. 北京:中国计划出版社, 2015.
- [17] 邓东平, 石柱, 彭耀文. 卸荷损伤效应下开挖边坡稳定性极限平衡分析[J/OL]. 工程地质学报:1-12[2024-07-08].
- 引用本文:** 卢栋, 富国凯, 董贤阳, 等. 不同开挖状态下高陡边坡破坏特征及稳定性研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(6):1-5.

(上接第10页)

- [3] 邬长斌, 刘少军, 戴瑜. 海底多金属硫化物开发动态与前景分析[J]. 海洋通报, 2008, 27(6):101-109.
- [4] 阳宁, 王英杰. 海底矿产资源开采技术研究动态与前景分析[J]. 矿业装备, 2012(1):54-57.
- [5] JONES D O B, KAISER S, SWEETMAN A K, et al. Biological responses to disturbance from simulated deep-sea polymetallic nodule mining[J]. Plos One, 2017, 12(2):e0171750.
- [6] 岳发强, 朱永楷, 胡宪铭. 海底采矿技术的研究与进展[J]. 黄金, 2013, 34(1):35-37.
- [7] 彭建平, 李俊, 程阳锐, 等. 深海多金属结核集矿装置水力输送流场分析与试验[J]. 矿冶工程, 2024, 44(2):1-4.
- [8] 张东宽, 刘美麟, 夏建新. 深海多金属结核采集过程对沉积物扰动试验研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(3):20-23.
- 引用本文:** 吴冬华. 深海多金属结核开采过程中脱泥预处理装置研究[J]. 矿冶工程, 2024, 44(6):6-10.