

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.03.014

泥岩交错地质条件露天铝土矿爆破参数优化研究^{*}

贾本超¹, 孙定瑜¹, 程震¹, 田兴朝²

(1. 贵州成黔矿产有限公司, 遵义 563131; 2. 贵州理工学院 土木交通水利学院, 贵阳 550025)

摘要: 泥岩交错地质条件下, 炮孔距泥层距离、间距、排距及延期间隔时间对露天铝土矿爆破的炸药能量利用率和爆破效果具有重要影响。为确定泥岩交错地质露天台阶爆破的最优参数, 首先对矿区研究段岩石取样加工, 开展静力学试验, 测定基本力学参数。然后采用 LS-DYNA 建立泥岩交错单孔爆破仿真模型, 对炮孔底部距泥层不同距离 L 下的损伤特性和有效应力峰值进行分析, 确定最优距离 L 。其次, 建立泥岩交错多孔爆破仿真模型, 对不同炮孔间距 d_1 、排距 d_2 及延期间隔时间 T 下的损伤特性、有效应力峰值和峰值振速进行系统分析, 确定最优的 d_1 、 d_2 、 T 。最后结合现场爆破试验, 对研究结果进行了验证。结果表明: 炮孔距泥层较近时, 炸药能量流失严重, 炮孔底部距泥层的最优距离为 1 m。泥岩交错地质条件下炮孔的最优间距、排距及延期间隔时间分别为 3 m、2 m、50 ms, 爆破效果好、振害低。研究结果可为类似泥岩交错露天矿山的精细化爆破参数设计提供参考。

关键词: 泥岩交错; 露天铝土矿; 炸药能量; 爆破损伤; 爆破振动

中图分类号: TD87 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2026)03-0138-13

Optimization of Blasting Parameters for Open-pit Bauxite Mine under Interbedded Mudstone Geological Conditions

JIA Ben-chao¹, SUN Ding-yu¹, CHENG Zhen¹, TIAN Xing-chao²

(1. Guizhou Chengqian Minerals Co., Ltd., Zunyi 563131, China;

2. College of Civil Engineering, Transportation and Water Conservancy,
Guizhou Institute of Technology, Guiyang 550025, China)

Abstract: In mudstone interbedding geological formations, critical blasting parameters including the distance between blast holes and mud layers, borehole spacing, row spacing, and initiation delay intervals significantly impact explosive energy utilization efficiency and overall blasting performance in open-pit bauxite mining operations. To identify optimal blasting parameters for bench blasting in interbedded mudstone geology, representative rock samples were systematically collected from the target mining area, processed under standardized conditions, and subjected to comprehensive static mechanical testing to characterize fundamental geomechanical properties. Subsequently, a single-hole blasting simulation model for interbedded mudstone was developed using LS-DYNA to analyze damage charac-

收稿日期 (Date of reception): 2026-01-14

网络首发日期 (Published online): 2026-02-09

作者简介: 贾本超 (1987-), 男, 贵州遵义人, 学士、工程师, 从事非金属矿山开采方面的研究, (E-mail) 405363586@qq.com。

通信作者: 田兴朝 (1993-), 男, 湖北巴东人, 博士、讲师, 从事矿山安全高效采掘方面的研究, (E-mail) xctian1002@163.com。

基金项目: 贵州省科技支撑计划项目 [黔科合支撑 (2026) 一般 305]; 贵州省科技计划项目 [黔科合基础 QN (2025) 223]; 贵州理工学院高层次人才科研启动项目 (2025GCC023)

About the author: JIA Ben-chao (1987-), male, born in Zunyi city, Guizhou province, bachelor, engineer, engaged in research on non-metallic mine mining, (E-mail) 405363586@qq.com.

Corresponding author: TIAN Xing-chao (1993-), male, born in Badong city, Hubei province, Ph. D, lecturer, engaged in research on the safe and efficient mining of mines, (E-mail) xctian1002@163.com.

Fund Programs: Science and Technology Support Program of Guizhou Province [Qiankehe Support (2026) General 305], Science and Technology Program of Guizhou Province [Qiankehe Basic QN (2025) 223], Scientific Research Startup Project for High-level Talents, Guizhou Institute of Technology (2025GCC023)

teristics and peak effective stress at varying distances(L) between the bottom of the blast hole and the mudstone interlayer, thereby determining the optimal L value. Furthermore, a multi-hole blasting simulation model for interbedded mudstone was established to extend the investigation. A comprehensive analysis was performed to evaluate damage characteristics, peak effective stress distribution, and peak vibration velocity under varying blast hole spacing(d_1), burden(d_2), and delay interval(T) configurations, ultimately identifying optimal parameter combinations. Field blasting experiments were subsequently conducted to validate the simulation findings. The results demonstrate that explosive energy dissipation becomes significant when blast holes are positioned near mud layers, with the optimal vertical distance from the hole bottom to the mud layer set at 1 m. For interbedded mudstone formations, the ideal blasting parameters are 3 m hole spacing, 2 m burden, and a 50 ms delay interval, achieving both effective rock fragmentation and minimized vibration impacts. These findings provide valuable guidance for precision blasting design in comparable open-pit mining operations with similar interbedded mudstone geological conditions.

Key words: interbedded mudstone; bauxite open-pit mine; explosive energy; blasting damage; blasting vibration

露天台阶爆破基于冲击波、应力波及爆炸气体的耦合协同作用实现岩土体的破碎与抛掷^[1-5]。然而,泥岩交错地质条件下,岩层被泥层分割,呈现显著的非均质性,严重影响爆破破岩效果。开展泥岩交错地质条件露天铝土矿爆破参数优化研究,确定炮孔底部距泥层的最优距离以及炮孔的最优间距、排距和延期间隔时间,对提高炸药能量利用率和爆破效果具有重要意义。

目前,学者们对土岩地层条件下的爆破工程进行了探讨。蒙贤忠等针对土-岩地层地下爆破工程开展了爆破模型试验^[6],分析了爆破振动传播规律。徐赞等研究了土-岩地层地铁隧道的爆破振动特性^[7]。张茂晨等对上土下岩地层条件下地铁站的爆破振动特性进行了分析^[8]。朱明等建立了土岩复合地层条件下的爆破振速衰减模型^[9]。林炳潮等对土岩交错地层条件下隧道爆破的围岩振动特性开展了系统研究^[10]。上述研究尚未涉及泥岩交错地质条件下的露天矿山爆破。

爆破参数优化方面,王文韬等研究了压渣厚度对爆破应力分布、岩石损伤和运动规律及爆堆形态的影响^[11]。黄永辉等提出了采用 SPH 法构建缩比例抛掷爆破模型的方法^[12],从爆破块度分布、累计质量通过率、评价指标和分形维数等方面探讨了爆破破碎块度随单耗的变化规律。余业清以爆破振动、爆破飞石、爆破冲击波和爆破噪音的安全允许距离为指标^[13],对爆破效果进行了分析评价。孟佳乐等根据经验公式对现场台阶爆破方案进行了参数优化^[14],建立了不同孔间距下的光滑颗粒流体动力学数值仿真模型,分析了深部岩体损伤情况。叶海旺等构建了符合现场节理裂隙分布的节理三维数值模型^[15],对裂隙岩体爆破参数进行了优化研究。崔年生等提出了压渣爆破技术方案,确定了最佳台阶爆破参数^[16]。Zhang 等针对露天矿山台阶爆破中后排

原岩易拉裂问题^[17],提出了三孔同时爆破技术,减少了飞石和集中爆堆。Wang 等研究了不同孔径与孔距下的应力波传播规律及岩体破坏特征^[18],提出了孔网优化公式。上述研究成果对爆破参数优化设计具有重要指导意义,但泥岩交错地质条件下的露天矿山爆破参数优化还鲜有研究报道,泥岩交错地质露天矿山最优爆破参数亟需进一步开展系统探讨。

为此,本文采用力学参数测试、数值仿真与现场试验相结合的方法,开展泥岩交错地质条件露天铝土矿爆破参数优化研究。首先,在矿区研究段对岩石进行取样,加工成标准试样,开展静力学试验,测定基本力学参数,为数值仿真提供支撑。然后,结合 LS-DYNA 软件,建立泥岩交错单孔爆破仿真模型,对炮孔底部距泥层不同距离 L 下的损伤特性和有效应力峰值进行分析,确定最优距离 L 。其次,建立泥岩交错多孔爆破仿真模型,对不同炮孔间距 d_1 、排距 d_2 及延期间隔时间 T 下的损伤特性、有效应力峰值和峰值振速进行系统分析,确定最优的 d_1 、 d_2 、 T 。最后结合现场爆破试验,对研究结果进行验证。研究结果可为类似泥岩交错露天矿山的精细化爆破参数设计提供参考。

1 工程背景

1.1 工程概况

213 矿 101 采场位于遵义市播州区团溪、茅栗和尚嵇镇,行政区划属于团溪、茅栗和尚嵇镇管辖。采场岩性由石灰岩、粘土岩、粉砂岩、泥岩等组成。土层是岩石经长期风化、剥蚀后的残积、坡积物,厚度一般在 0~15.0 m,最厚达 42.2 m。土质多为碎石土、砂土、粘土,呈松散或半固结状,透水性较好,强度较弱。

101 采场研究区存在复杂泥岩交错地质,如图 1 所示。在此类泥岩交错地质条件下进行矿山开采

时,炮孔距泥层距离、间距、排距及延期间隔时间均对爆破开采效果具有重要影响。研究区前期已开展了爆破开采,但效果不佳,炸药能量利用率低,爆渣

块度大,爆破后仍主要依靠机械二次破碎,影响开采效率。

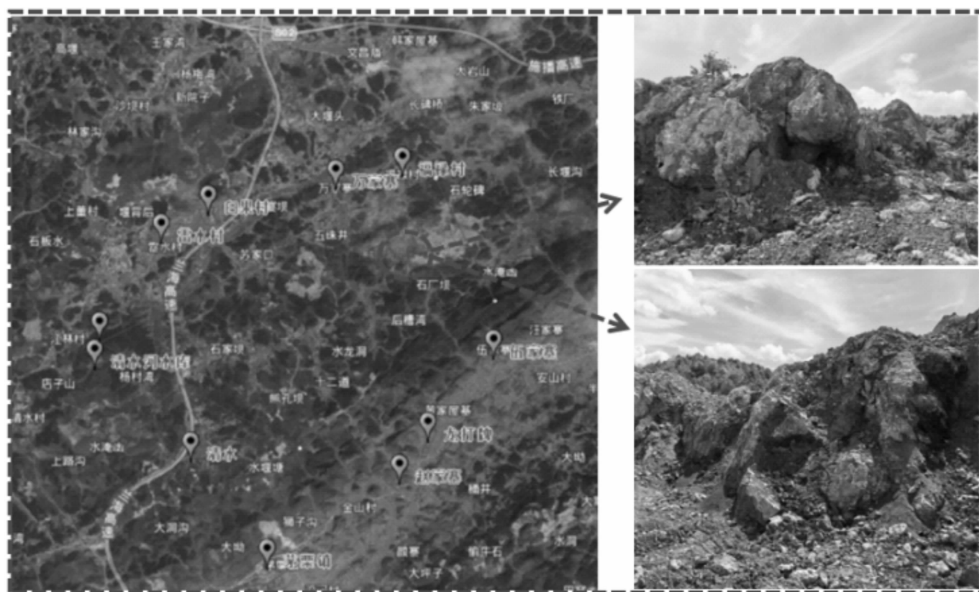


图 1 研究区泥岩交错地质条件

Fig. 1 Geological conditions of interbedded mudstone in the study area

泥岩交错地质条件下,若炮孔底部距泥层距离过近,炸药能量会从底部泥层中大量流失,降低破岩效果;若炮孔底部距泥层距离过远,台阶开挖深度不足,影响开采效率。此外,炮孔周围泥层错综复杂,爆破损伤特性、有效应力峰值及振动传播规律均显著区别于均质岩体条件。因此,迫切需要对炮孔底部距泥层距离、间距、排距及延期起爆时间进行系统研究,优化爆破参数,提高爆破效果。

1.2 岩石力学参数测试

研究区岩石的基本力学参数测试是开展数值仿真和现场试验的基础。从 ZKTW0319、ZKTW0705、ZKTW1108 处提取岩石试样,加工成标准试样,开展静力学试验。根据国际岩石动力学委员会推荐的试样尺寸,单轴压缩试验和三轴压缩试验岩样加工为 $50\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的圆柱体,巴西劈裂试验岩样加工为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 的圆柱体。试样不平整度和不垂直度均小于 0.02 mm ,端面法线偏差小于 0.25° 。静力学标准岩石试样如图 2 所示。

静力学试验在 TAJW-2000 微机控制电液伺服岩石三轴试验系统上开展,该系统由压力机系统、轴压围压控制系统、油泵控制系统以及电脑控制系统组成,试验过程中采用等位移速率加载控制方式,如图 3 所示。

岩石试样的单轴压缩试验和巴西劈裂试验应力

应变曲线如图 4、图 5 所示。需要说明的是,文章静力学试验采用的标准试件,是采用 110 mm 孔的钻机深度钻芯,然后加工成直径 50 mm 的标准圆柱形试样。由于研究段是泥岩交错复杂地质条件,所取芯样间并非连续,不同段之间的岩石存在差异性,故而导致静力学试验结果存在较大离散性。为降低静力学试验结果离散性导致的误差,最终采用平均值进行分析。



图 2 静力学标准岩石试样

Fig. 2 Static standard rock specimen

由图 4(a)可知,ZKTW0319 岩石试样的平均静态抗压强度为 64.78 MPa ,平均静态弹性模量为

6.83 GPa,平均静态泊松比为 0.32。由图 4(b)可知 ZKTW0705 岩石试样的平均静态抗压强度为 51.84 MPa,平均静态弹性模量为 5.00 GPa,平均静

态泊松比为 0.35。由图 4(c)可知,ZKTW0705 岩石试样的平均静态抗压强度为 62.66 MPa,平均静态弹性模量为 6.73 GPa,平均静态泊松比为 0.33。

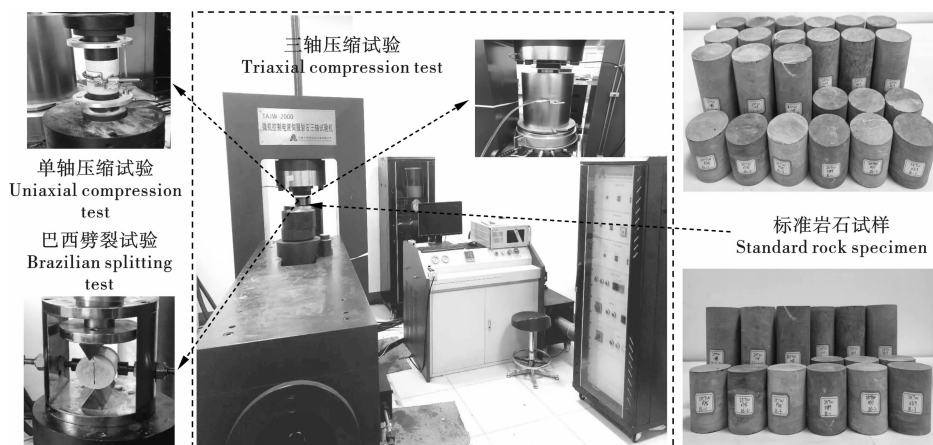


图3 TAJW-2000 微机控制电液伺服岩石三轴试验系统

Fig. 3 TAJW-2000 Microcomputer controlled electro hydraulic servo rock triaxial testing system

由图 5(a)可知,ZKTW0319-DZ-1、ZKTW0319-DZ-2、ZKTW0319-DZ-3 的抗拉强度分别为 5.58 MPa、6.50 MPa、4.89 MPa,平均抗拉强度为 5.66 MPa。ZKTW0705-DZ-2、ZKTW0705-DZ-3 的试验数据异常,作剔除处理,由图 5(b)可知,ZK-

TW0705-DZ-1 的抗拉强度为 4.92 MPa。由图 5(c)可知,ZKTW0319-DZ-1、ZKTW0705-DZ-2、ZKTW1108-DZ-3 的抗拉强度分别为 7.31 MPa、8.16 MPa、8.06 MPa,平均抗拉强度为 7.84 MPa。

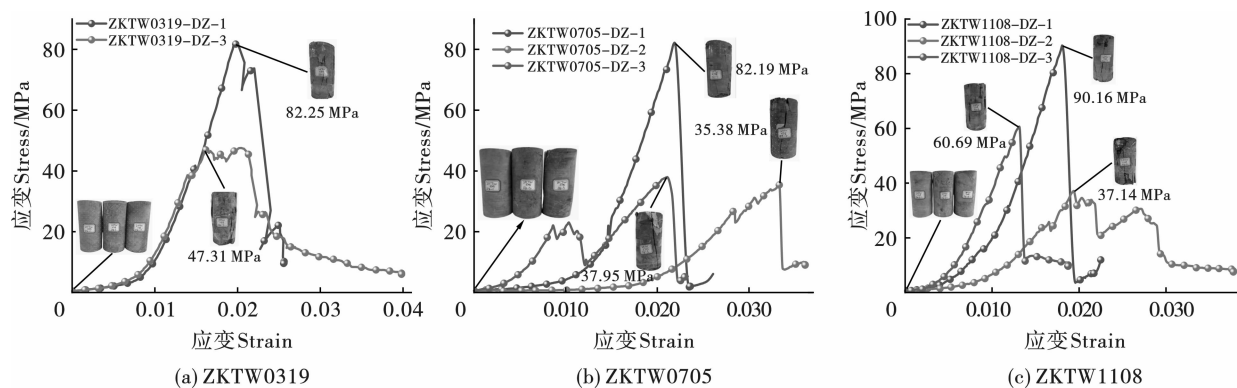


图4 单轴压缩试验结果

Fig. 4 Results of uniaxial compression test

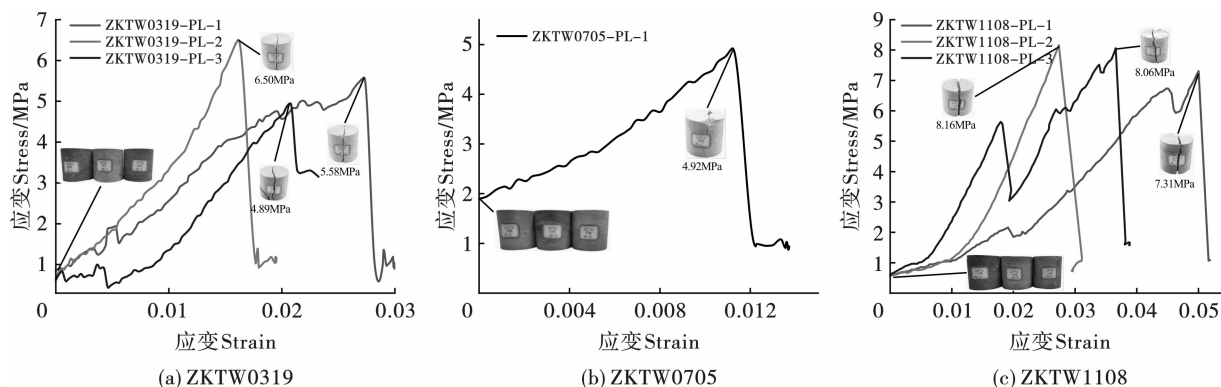


图5 巴西劈裂试验结果

Fig. 5 Results of Brazilian Splitting test

综上, ZKTW0319-DZ-1、ZKTW0705-DZ-2、ZKTW1108-DZ-3 处岩石试样的基本力学参数如表 1 所示。

表 1 静力学参数
Table 1 Static parameters

岩石类型 Rock type	密度 Density/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	单轴抗压强度 Uniaxial compressive strength/MPa	弹性模量 Elastic modulus/GPa	泊松比 Poisson's ratio	抗拉强度 Tensile strength/MPa
ZKTW0319	2.67	64.78	6.83	0.32	5.66
ZKTW0705	2.59	51.84	5.00	0.35	4.92
ZKTW1108	2.64	62.66	6.73	0.33	7.84

2 数值仿真模型与参数

213 矿 101 采场研究区泥岩交错环境十分复杂,为有效进行爆破参数优化,将模型进行简化,采用 LS-DYNA 软件建立规则的泥岩交错台阶爆破模型,如图 6 所示。台阶爆破模型整体尺寸为 $16.0 \text{ m} \times 8.5 \text{ m} \times 7.0 \text{ m}$,炮孔孔径为 100 mm 。岩体采用 8 节点 SOLID164 单元,最大单元尺寸 4 cm 。为探明炮孔底部与泥层距离变化对爆破效果的影响规律,从台阶爆破模型中提取泥层包裹岩层的单孔爆破模型,模型尺寸为 $3.0 \text{ m} \times 3.0 \text{ m} \times 7.0 \text{ m}$ 。

目前,LS-DYNA 软件常采用 Holmquist-Johnson-Cook (HJC) 模型、Riedel-Hiermaier-Thoma (RHT) 模型和 JH 系列模型三种损伤本构模型模拟岩体爆破损伤^[19,20]。与其他模型相比,RHT 模型能有效地描

述岩石在动载荷作用下的拉、压损伤演化过程。因此,本文的岩土体材料采用 RHT 模型。

基于岩石基本材料参数,确定岩层和泥层 RHT 模型参数如表 2、表 3 所示^[21]。

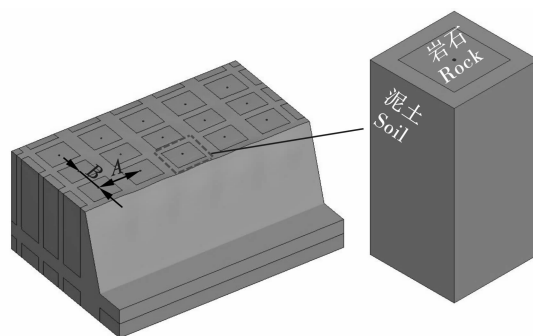


图 6 泥岩交错露天台阶爆破仿真模型
Fig. 6 Simulation model for open-pit bench blasting with mudstone interbedding

表 2 岩层 RHT 模型参数
Table 2 Parameters of the RHT model for rock layers

参数 Parameters	取值 Value	参数 Parameters	取值 Value	参数 Parameters	取值 Value
ρ	$2.63 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$	f_c	59.76 MPa	β_t	0.0095
p_{el}	127.22 MPa	β_c	0.0068	A_3	94.93 GPa
A_1	92.45 GPa	A_2	155.32 GPa	T_1	92.45 GPa
B_0	0.9	B_1	0.9	$\dot{\varepsilon}^C$	$3.0\text{e}22 \text{ ms}^{-1}$
T_2	0.0 GPa	G	24.3 GPa	f_s^*	0.38
$\dot{\varepsilon}_0^C$	$3.0\text{e}-8 \text{ ms}^{-1}$	$\dot{\varepsilon}_0^I$	$3.0\text{e}-9 \text{ ms}^{-1}$	g_c^*	0.4
$\dot{\varepsilon}^I$	$3.0\text{e}22 \text{ ms}^{-1}$	D_2	1.0	ε_p^m	0.012
B	0.05	g_t^*	0.7	p_{comp}	0.06
A_0	3.08	n_2	0.729		
f_t^*	0.02	Q_0	0.68		
ξ_1	0.5	D_1	0.052		
A_f	1.62	n_f	0.6		
N	3	α_0	1.0		

表 3 泥层 RHT 模型参数
Table 3 Parameters of the RHT model for soil layers

参数 Parameters	取值 Value	参数 Parameters	取值 Value	参数 Parameters	取值 Value
ρ	1.42 g · cm ⁻³	f_c	24.6 MPa	β_t	0.0095
p_{cl}	127.22 MPa	β_c	0.0068	A_3	94.93 kPa
A_1	6.712 kPa	A_2	0.2054 kPa	T_1	92.45 kPa
B_0	0.9	B_1	0.9	$\dot{\epsilon}^C$	3.0e22 ms ⁻¹
T_2	0.0 GPa	G	2.4 GPa	f_s^*	0.38
$\dot{\epsilon}_0^C$	3.0e-8 ms ⁻¹	$\dot{\epsilon}_0^I$	3.0e-9 ms ⁻¹	g_C^*	0.4
$\dot{\epsilon}^I$	3.0e22 ms ⁻¹	D_2	1.0	ϵ_p^m	0.012
B	0.05	g_t^*	0.7	p_{comp}	0.06
A_0	3.08	n_2	0.729		
f_t^*	0.02	Q_0	0.68		
ξ_1	0.5	D_1	0.052		
A_f	1.62	n_f	0.6		
N	3	α_0	1.0		

现场的炸药类型为 2 号岩石乳化炸药,采用 MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN 模型^[22],结合 JWJ 状态方程描述爆轰过程中爆压与比容的关系,即

$$P_J = A_J(1 - \omega/R_1V)e^{-R_1v} + B_J(1 - \omega/R_2V)e^{-R_2v} + \omega E_J/V \quad (1)$$

式中: P_J 为爆压; V 为体积; E_J 为初始内能; A_J 、 B_J 、 R_1 、 R_2 、 ω 为 JWJ 状态方程参数。炸药材料密度为 1300 kg · m⁻³,爆速为 4000 m · s⁻¹,泊松比为 0.33,爆压 P_{CJ} = 0.22 GPa。

堵塞材料采用 MAT_SOIL_AND_FOAM 模型^[23],材料密度为 1800 kg · m⁻³,弹性模量为 3.3 GPa,泊松比为 0.33,屈服强度为 0.65 MPa。

空气材料采用 MAT_NULL 模型^[24],状态方程选用 LINEAR_POYNOMIAL 方程。相关参数分别为 $C_1 = C_2 = C_3 = 0$, $C_4 = C_5 = 0.4$, $E_0 = 0.25$ MPa, $V_0 = 1$,其中 E_0 为初始内能, V_0 为初始体积。

3 结果分析

3.1 泥岩交错地质单孔爆破结果分析

为确定泥岩交错地质条件下露天台阶爆破的最优炮孔深度,改变炮孔底部距泥层的距离 L ,分析内部损伤及有效应力峰值演化规律。炮孔底部距泥层的距离 L 分别设置为 0 m、0.5 m、1.0 m、1.5 m、2.0 m。

(1) 损伤分析

不同间距 L 条件下的损伤云图如图 7 所示。由图 7 可知,当 $L = 0$ m 时,炮孔底部出现大范围损伤,这是因为炸药从炮孔底部爆炸,所产生的能量贯穿底部泥层,使得爆炸的能量大部分流失,上部岩石所

获破岩能量较少,无法破碎。当 $L = 0.5$ m 时,炮孔底部同样存在部分能量流失,导致在岩石底部未能充分破碎。当 $L = 1.0$ m 时,炮孔底部泥层范围未出现损伤,且岩石顶部区域损伤 $D \geq 0.7$,炸药能量利用率较高,爆破效果较好。当 $L = 1.5$ m 时,虽然炮孔底部炸药未对泥层造成损伤,但岩石底部同时出现未损伤区域,表明该部分岩石未能充分破碎,开采深度角度。 $L = 2.0$ m 时,炮孔底部岩石出现大面积未损伤区域,严重影响开采效率,同时顶部岩石损伤严重,过于粉碎,爆破飞石等安全隐患高。

(2) 有效应力分析

进一步分析不同间距 L 条件下的有效应力峰值演化规律,如图 8 ~ 图 12 所示。

如图 8(a) 可知,岩石顶部测点 A、B、C、D、E 的有效应力峰值分别为 11.69 MPa、18.24 MPa、21.60 MPa、23.82 MPa、26.22 MPa,这是因为 $L = 0$ m 时炸药离测点位置较远,且由于底部爆炸产生的能量流失,导致岩石顶部五个监测点的有效应力均小于岩石的抗压强度。如图 8(b) 可知,泥层测点 A、B、C、D、E 的有效应力峰值分别为 159.43 MPa、129.03 MPa、100.28 MPa、66.28 MPa、41.01 MPa,这是由于泥层离炸药较近,故有效应力值较大。

如图 9(a) 可知,岩石顶部测点 A、B、C、D、E 的有效应力峰值分别为 26.95 MPa、30.29 MPa、33.97 MPa、38.35 MPa、43.42 MPa,这是因为 $L = 0.5$ m 条件下炮孔虽未完全接近泥层,但炸药所产生的损伤致使泥层出现微裂隙,爆炸能量流失,故岩石顶部五个监测点的有效应力均小于岩石的抗压强

度。如图 9(b)可知,泥层测点 A、B、C、D、E 的有效应力峰值分别为 78.68 MPa、59.05 MPa、46.33 MPa、36.21 MPa、28.49 MPa,此时的泥层测点有效应力峰

值均小于 $L=0$ m,但其产生的能量导致泥层出现微裂隙,爆炸能量未能充分利用。

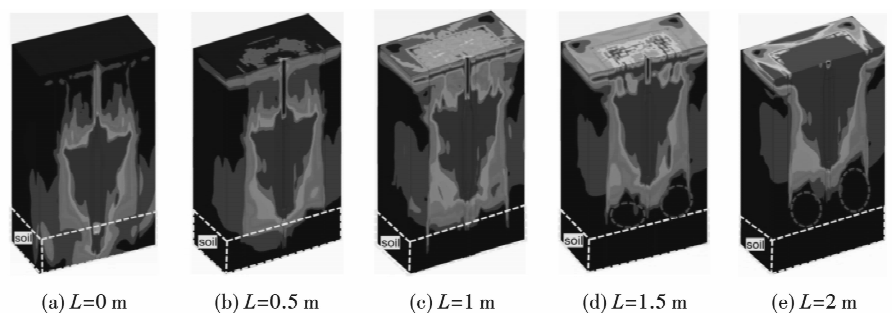


图 7 不同间距 L 条件下的损伤云图

Fig. 7 Damage contour maps under different spacing conditions of L

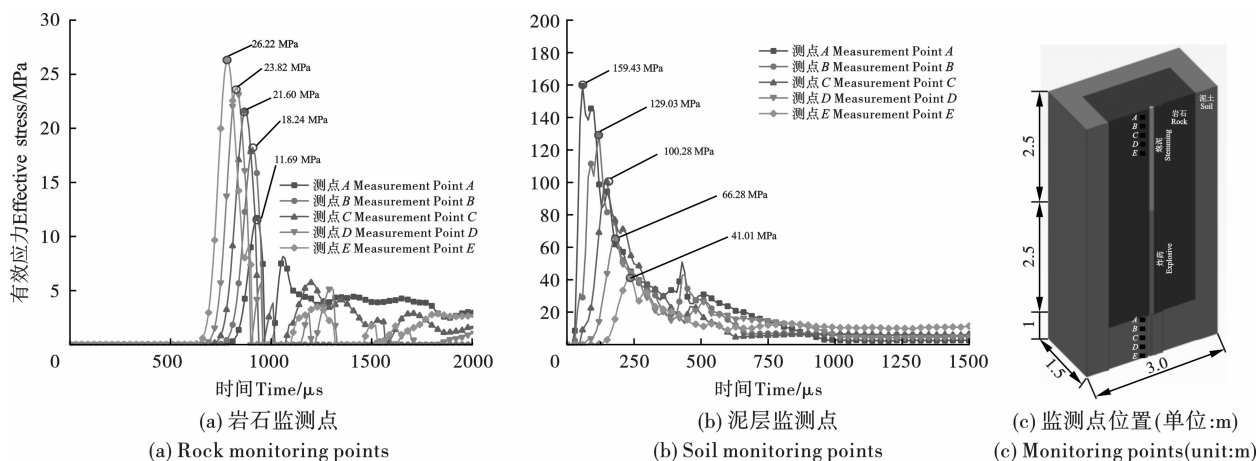


图 8 间距 0 m 条件下有效应力峰值演化规律

Fig. 8 Evolution law of effective stress peak when $L=0$ m

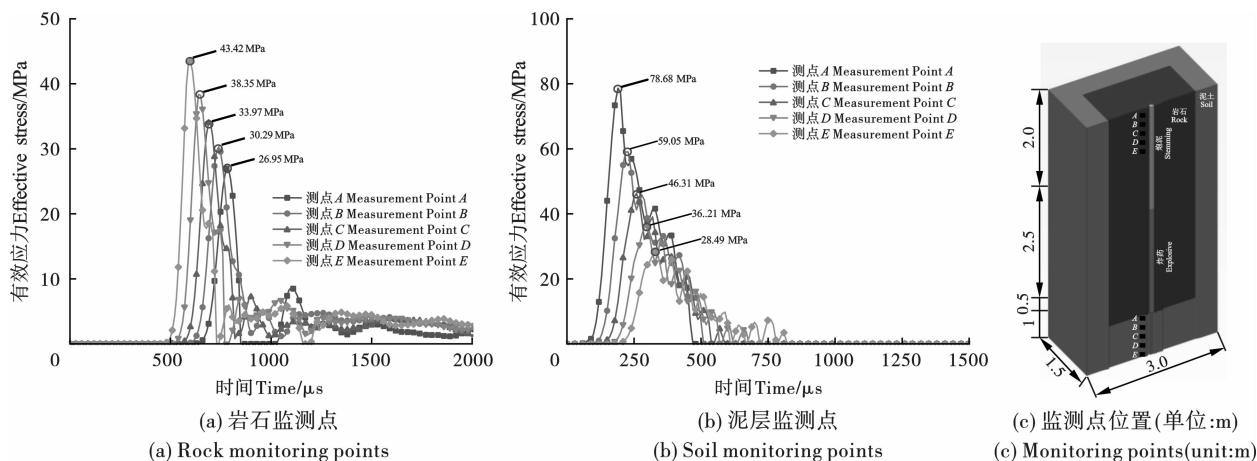


图 9 间距 0.5 m 条件下有效应力峰值演化规律

Fig. 9 Evolution law of effective stress peak when $L=0.5$ m

如图 10(a)可知,岩石顶部测点 A、B、C、D、E 的有效应力峰值分别为 67.98 MPa、75.45 MPa、85.15 MPa、92.13 MPa、107.31 MPa,此时的有效应力峰值得到大幅度上升,是由于炸药与泥层较远,且

未使泥层出现破坏,炸药所产生的能量得到充分地利用。如图 10(b)可知,泥层测点 A、B、C、D、E 的有效应力峰值分别为 44.21 MPa、29.89 MPa、25.36 MPa、21.06 MPa、15.69 MPa,有效应力峰值

下降,且未使泥层破坏,对炸药形成有效封堵,炸药能量得到充分利用。

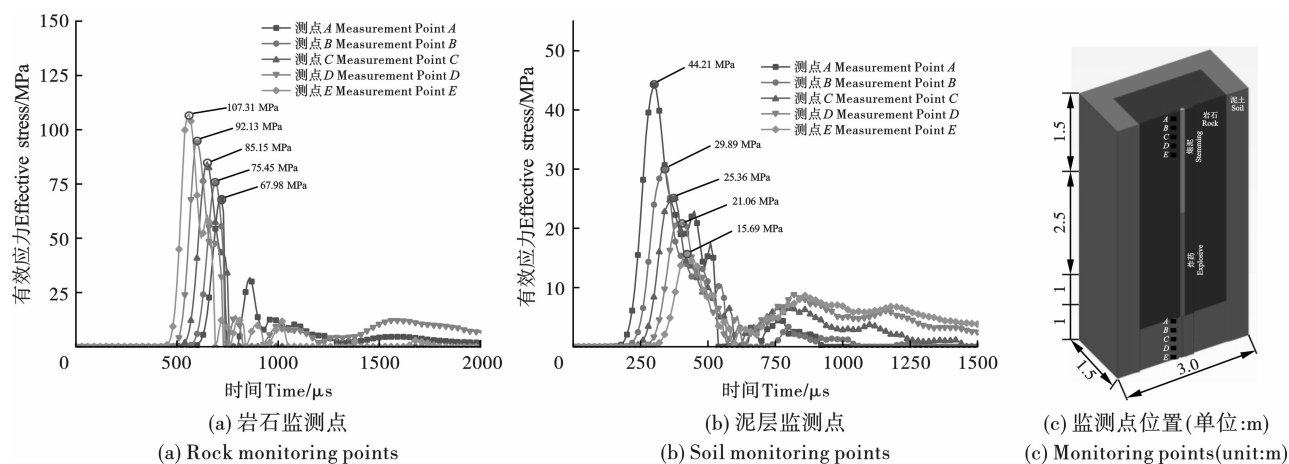


图 10 间距 1.0 m 条件下有效应力峰值演化规律

Fig. 10 Evolution law of effective stress peak when $L = 1.0$ m

如图 11(a)可知,岩石顶部测点 A、B、C、D、E 的有效应力峰值分别为 94.16 MPa、105.44 MPa、119.04 MPa、127.66 MPa、139.18 MPa,此时的有效应力峰值足以使测点处岩石完全破碎。如图 11(b)可知,泥层测点 A、B、C、D、E 的有效应力峰值分别

27.26 MPa、25.11 MPa、22.72 MPa、15.61 MPa、9.85 MPa,此时的有效应力虽未对泥层造成损伤,但炮孔底部岩石未出现损伤,导致炮孔底部岩石未能得到开采。

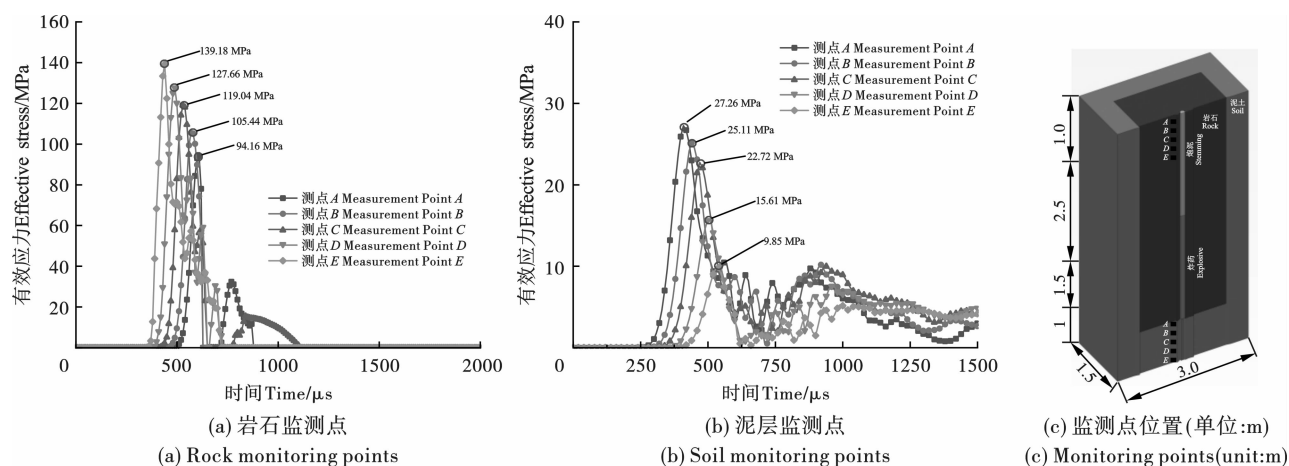


图 11 间距 1.5 m 条件下有效应力峰值演化规律

Fig. 11 Evolution law of effective stress peak when $L = 1.5$ m

如图 12(a)可知,岩石顶部测点 A、B、C、D、E 的有效应力峰值分别为 117.37 MPa、128.76 MPa、137.93 MPa、149.45 MPa、164.03 MPa,此时的有效应力峰值足以使测点处岩石完全破碎。如图 12(b)可知,泥层测点 A、B、C、D、E 的有效应力峰值分别 17.15 MPa、16.44 MPa、15.31 MPa、10.41 MPa、7.77 MPa,由于炸药离泥层更远,导致炮孔底部未损伤岩石的范围进一步扩大,炮孔底部岩石未能得到开采,严重影响开采效率。

综上所述,当 $L = 0$ m 时,炸药与泥层距离较近,

对泥层造成破坏,炸药产生的能量流失严重,炮孔顶部岩石未能得到破碎。当 $L = 0.5$ m 时,炸药爆炸能量尚致使泥层出现微裂隙,爆炸能量流失,导致岩石顶部五个监测点的有效应力均小于岩石的抗压强度。当 $L = 1.0$ m 时,泥层未破坏,炸药能量得到充分利用,炮孔顶部岩石有效应力峰值均大于岩石的抗压强度,破岩效果较好。当 $L = 1.5$ m 和 2.0 m 时,炮孔底部岩石均出现未损伤区域,致使该部分岩石未能得到有效的开采,严重影响开采效率。因此,当 $L = 1.0$ m 时,炸药能量利用率高,爆破破岩效果好。

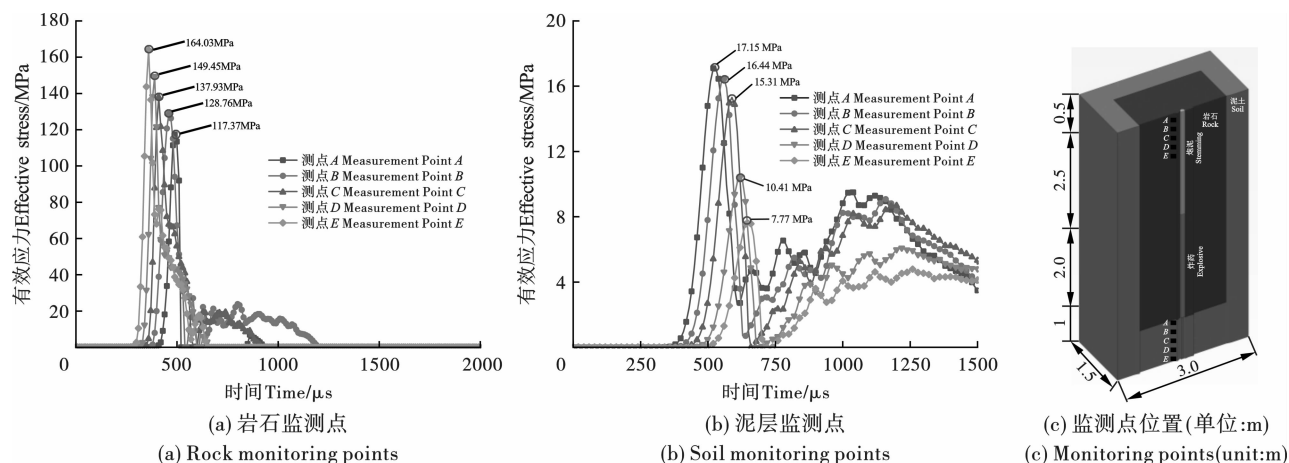


图 12 间距 2.0 m 条件下有效应力峰值演化规律

Fig. 12 Evolution law of effective stress peak when $L = 2.0$ m

3.2 泥岩交错台阶爆破结果分析

基于 4.1 节研究结果,将炮孔底部距泥层间距设置为 1.0 m,进一步分析炮孔间距 $d_1 = 2$ m、3 m、4 m,排距 $d_2 = 2$ m、3 m、4 m,延期间隔时间 $T =$

70 μ s、140 μ s、210 μ s 条件下的内部损伤及有效应力峰值演化规律,确定最优炮孔间距、排距和延期间隔时间,损伤云图如图 13 ~ 图 16 所示。

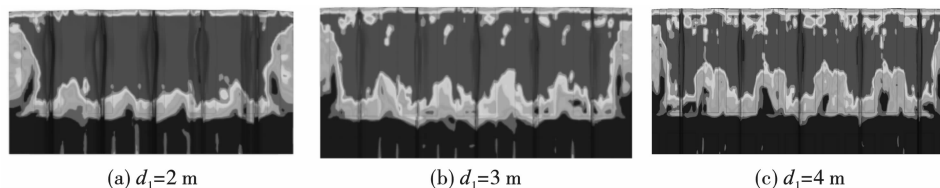


图 13 不同炮孔间距下的爆破损伤云图

Fig. 13 Damage contour maps of blasting under different blast hole spacings

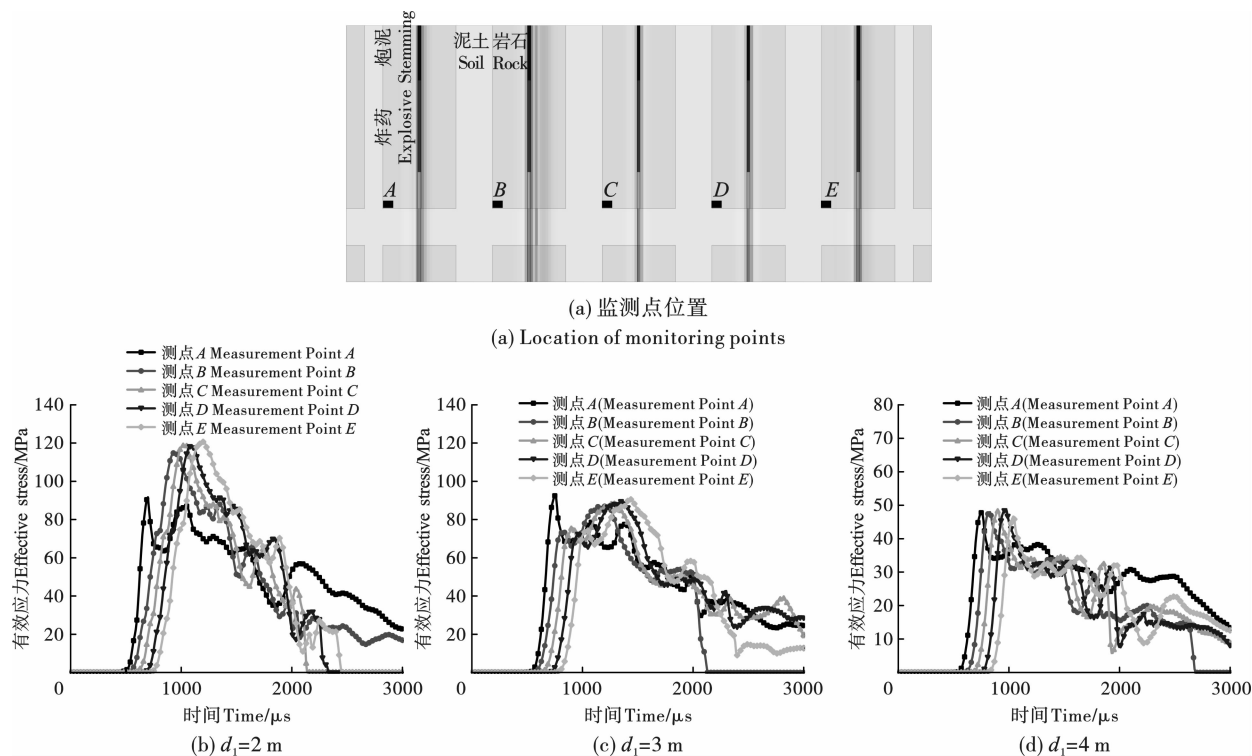


图 14 有效应力测点布设及演化规律

Fig. 14 Layout and evolution law of effective stress measuring points

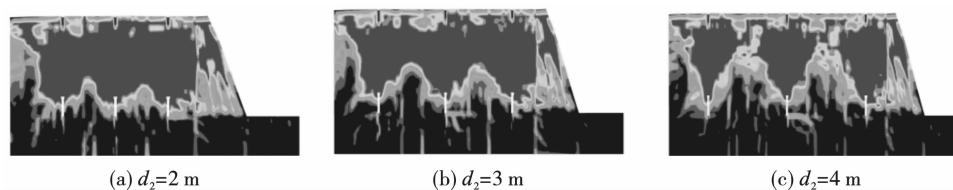


图 15 不同炮孔排距下的爆破损伤云图

Fig. 15 Damage contour maps of blasting under different blast hole row spacings

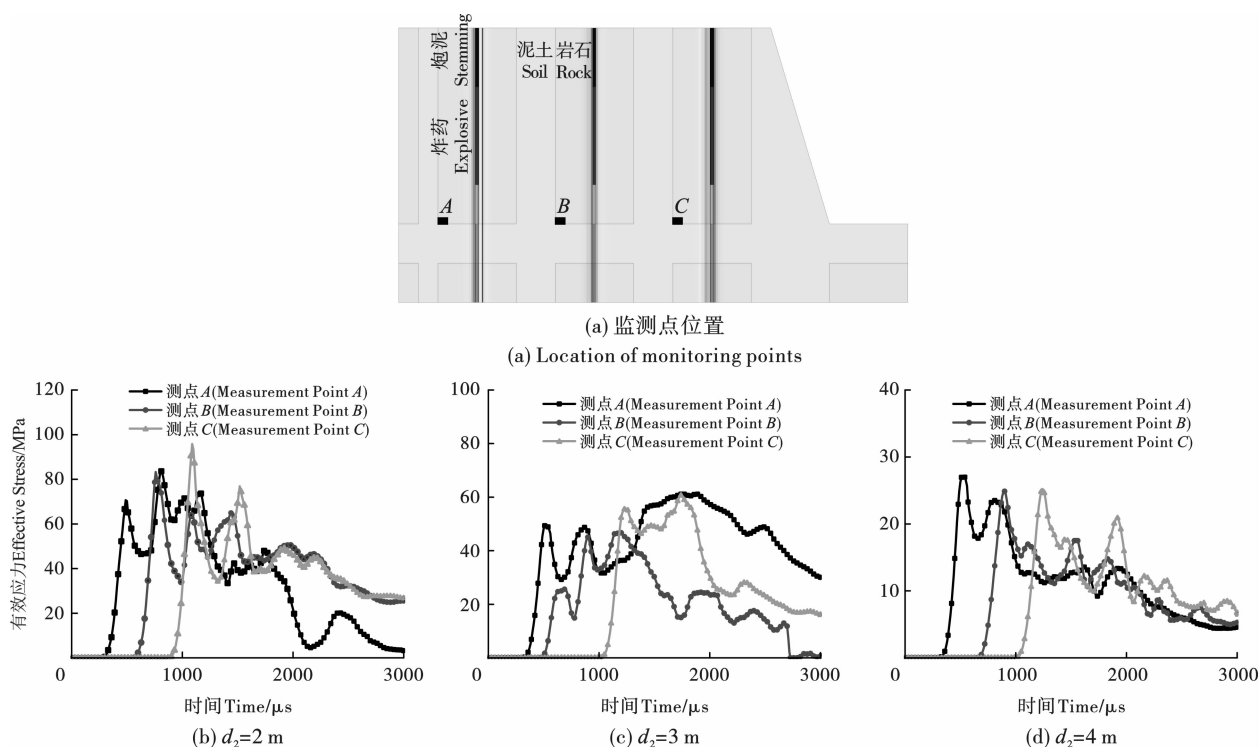


图 16 有效应力测点布设及演化规律

Fig. 16 Layout and evolution law of effective stress measuring points

由图 13 可知,当 $d_1 = 2 \text{ m}$ 时,泥层上部区域出现大范围损伤,损伤值 $D = 1.0$,说明该范围岩石得到有效破碎。当 $d_1 = 3 \text{ m}$ 时,岩石区域均出现损伤,损伤值 $D = 1.0$,岩石得到破碎。当 $d_1 = 4 \text{ m}$ 时,虽然炮孔顶部岩石均得到破碎,但炮孔底部未能得到充分的破碎,开采深度受到较大影响。

为进一步分析炮孔底部岩石是否能够有效破碎,在不同孔间距模型的炮孔底部布设 5 个监测点 A、B、C、D、E,分析有效应力演化规律。

由图 14 可知,当 $d_1 = 2 \text{ m}$ 时,测点 A、B、C、D、E 有效应力峰值分别为 90.43 MPa、114.93 MPa、118.63 MPa、118.35 MPa、120.66 MPa。当 $d_1 = 3 \text{ m}$ 时,测点 A、B、C、D、E 有效应力峰值分别为 92.95 MPa、87.12 MPa、87.91 MPa、89.63 MPa、90.73 MPa。当 $d_1 = 4 \text{ m}$ 时,测点 A、B、C、D、E 有效应力峰值分别为 47.84 MPa、47.93 MPa、48.11 MPa、48.69 MPa、46.64 MPa。分析可知, $d_1 = 4 \text{ m}$ 时,有效应力峰值均低于岩石抗压强度,无法对岩石造成

有效地破碎。 $d_1 = 2 \text{ m}$ 和 3 m 时,有效应力峰值均大于岩石的抗压强度,使岩石得到充分的破碎。在同等装药条件下, $d_1 = 3 \text{ m}$ 能够在保证破岩效果的同时扩大开采范围。因此,泥岩交错地质条件下该露天铝土矿爆破的最优炮孔间距为 3 m 。

在最优炮孔间距为 3 m 的条件下,进一步优选最优排距。由图 15 可知,当 $d_2 = 2 \text{ m}$ 时,炮孔底部及泥岩交错区域,均出现损伤,损伤值 $D = 1.0$,该部分岩石得到充分破碎。当 $d_2 = 3 \text{ m}$ 时,炮孔底部周围岩石未出现损伤,岩石未能有效破碎,开采效率降低。当 $d_2 = 4 \text{ m}$ 时,炮孔底部大范围岩石未损伤,这是由于炮孔排距过大,使得炸药能量未能充分破坏岩石。

由图 16 可知,当 $d_2 = 2 \text{ m}$ 时,测点 A、B、C 有效应力峰值分别为 83.58 MPa、83.27 MPa、95.81 MPa。当 $d_2 = 3 \text{ m}$ 时,测点 A、B、C 有效应力峰值分别为 61.18 MPa、46.73 MPa、60.63 MPa。当 $d_2 = 4 \text{ m}$ 时,测点 A、B、C 有效应力峰值分别为

27.19 MPa、24.87 MPa、25.22 MPa。分析可知, $d_2 = 3\text{ m}$ 和 4 m 时, 爆炸能量叠加增强效应未被充分利用, 破岩效果较差。 $d_2 = 2\text{ m}$ 时, 测点 A、B、C 的有效应力峰值均大于岩石的抗压强度, 岩石得到有效破碎, 损伤范围覆盖了炮孔底部周围岩石, 爆炸能量得以充分利用。因此, 泥岩交错地质条件下该露天铝土矿爆破的最优炮孔排距为 2 m 。

在最优炮孔间距和排距分别为 3 m 、 2 m 的条件下, 进一步优选延期间隔时间, 不同延期间隔时间下的损伤云图如图 17 所示。需要说明的是, 考虑到计算机性能和计算时间的限制^[25], 数值仿真中延期间隔时间的单位为 μs 。由图 17 可知, 当 $T = 70\text{ }\mu\text{s}$ 时, 炮孔周围岩石损伤值 D 均达 1.0 , 且范围大于 $T = 140\text{ }\mu\text{s}$ 、 $210\text{ }\mu\text{s}$ 。这是因为 $T = 70\text{ }\mu\text{s}$ 时, 逐孔起爆条件下爆炸能量充分叠加, 有效破碎岩石。而 $T = 140\text{ }\mu\text{s}$ 、 $210\text{ }\mu\text{s}$ 时, 炮孔间的起爆间隔时间较长, 爆炸能量未充分叠加, 甚至存在干扰相消现象, 故岩石损伤范围较小, 开采效率较低。因此, 泥岩交错地质条件下此露天铝土矿爆破的最优延期间隔时间 T 为 $70\text{ }\mu\text{s}$ 。

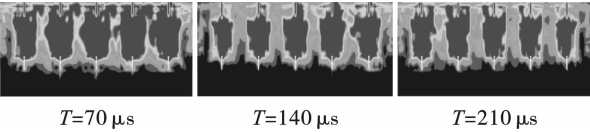


图 17 不同延期间隔时间下的爆破损伤云图
Fig. 17 Damage contour maps of blasting under different delay intervals

综合 4.1 和 4.2 节的研究结果, 泥岩交错地质条件下此露天铝土矿的最优爆破参数如表 4 所示。

表 4 泥岩交错地质条件下的最优爆破参数
Table 4 Optimal blasting parameters under the geological condition of mudstone interbedding

L/m	d_1/m	d_2/m	$T/\mu\text{s}$
1	3	2	70

表 5 爆破振动监测结果(单位: cm/s)

Table 5 Monitoring results of blasting vibration(unit: cm/s)

爆破方案 Blasting scheme	试验次数 Number of test	测点 1 Measuring point 1	平均值 Average value	测点 2 Measuring point 2	平均值 Average value	测点 3 Measuring point 3	平均值 Average value
优化前 Before optimization	1	2.35		1.68		1.33	
	2	2.13	2.23	1.84	1.70	1.03	1.16
	3	2.22		1.59		1.11	
优化后 After optimization	1	1.76					
	2	1.61	1.75	未触发 Not triggered		未触发 Not triggered	
	3	1.87					

4 现场试验验证

为验证数值仿真结果的科学性, 在 213 矿 101 采场研究区开展爆破试验, 对爆破效果及爆破振动进行监测。现场爆破试验的基本参数如下: 炮孔间距 3 m 、排距 2 m 、孔深 $3\sim 5\text{ m}$, 每孔装药 $12\sim 14\text{ kg}$, 总药量 2400 kg , 采用逐孔起爆方式, 孔间延期时间 50 ms 。在爆区周围布设 TC-4850 爆破测振仪, 对爆破振动进行监测, 如图 18 所示。测点 1、测点 2、测点 3 距爆区的距离分别约为 60 m 、 100 m 、 120 m 。

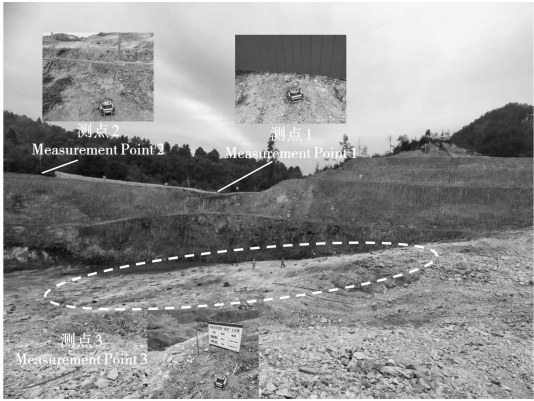


图 18 测振仪布设位置
Fig. 18 Layout position of vibration monitor

爆破完成后, 爆渣的大块率较低。爆破参数优化前后的振动监测数据如表 5 所示。由表 5 可知, 爆破参数优化前, 测点 1 处的平均振动峰值为 2.23 cm/s , 超过了《爆破安全规程》GB 6722—2014 的安全允许标准(频率小于 10 Hz 时, 一般民用建筑物的爆破振动安全允许标准为 2.0 cm/s)。爆破参数优化后, 测点 1 处的平均振动峰值为 1.75 cm/s , 降低 21.5% , 且在规范允许范围内。另外, 优化调整爆破参数后, 测点 2、测点 3 处的测振仪未触发, 表明爆破振动控制效果较好。现场爆破试验结果表明, 本文的研究成果对提高泥岩交错地质条件下露天矿山的爆破效果具有重要指导意义。

5 结论

(1)泥岩交错复杂地质条件对爆破能量耗散具有重要影响。炮孔底部距离泥层较近时,泥层对爆炸能量具有导向作用,炸药能量易从泥层中流失从而影响破岩效果。泥岩交错单孔爆破仿真结果表明,炮孔底部距泥层的最优距离为1 m。

(2)炮孔间距、排距及延期间隔时间对泥岩交错地质露天台阶爆破效果具有重要影响。数值仿真结果表明,泥岩交错地质条件下露天台阶爆破的最优间距、排距及延期间隔时间分别为3 m、2 m、70 μs 。

(3)现场爆破试验结果表明,本文的研究成果对提高泥岩交错地质条件下露天矿山的爆破效果具有重要指导意义。爆破参数优化后,现场试验的最优间距、排距及延期间隔时间分别为3 m、2 m、50 ms,爆渣大块率低,平均爆破振动峰值降低21.5%,满足规范要求。

参考文献 (References)

- [1] 康普林,雷涛,李立峰.考虑药包爆破动-静时序作用的漏斗形成机理[J].爆炸与冲击,2025,45(5):142-158.
- [1] KANG Pu-lin, LEI Tao, LI Li-feng. Mechanism of crater formation considering dynamic-static sequential effects of charge blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 2025, 45(5):142-158. (in Chinese)
- [2] 许鹏,杨仁树,陈程,等.岩石爆破基础理论研究进展与展望Ⅲ—波纹关系[J].工程科学学报,2025,47(1):1-12.
- [2] XU Peng, YANG Ren-shu, CHEN Cheng, et al. Research progress and prospect of basic theory of rock blasting Ⅲ—corrugation relationship[J]. Journal of Engineering Science, 2025, 47(1):1-12. (in Chinese)
- [3] 杨仁树,丁晨曦,杨立云,等.岩石爆破基础理论研究进展与展望Ⅱ—动静关系[J].工程科学学报,2024,46(12):2133-2146.
- [3] YANG Ren-shu, DING Chen-xi, YANG Li-yun, et al. Research progress and prospect of basic theory of rock blasting Ⅱ—dynamic-static relationship[J]. Journal of Engineering Science, 2024, 46(12):2133-2146. (in Chinese)
- [4] 杜军,花良奎,厉美杰,等.露天采场台阶爆破萨道夫斯基公式的线性回归分析[J].爆破,2024,41(4):181-186,204.
- [4] DU Jun, HUA Liang-kui, LI Mei-jie, et al. Linear regression analysis of the Sadovsky formula for bench blasting in open-pit mines[J]. Blasting, 2024, 41(4):181-186, 204. (in Chinese)
- [5] 史涵虚,周传波,张升,等.基于CWM和CM的长滩露天矿深孔台阶爆破岩体可爆性评价[J].爆破,2024,41(1):51-59,119.
- [5] SHI Han-xu, ZHOU Chuan-bo, ZHANG Sheng, et al. Blastability evaluation of rock mass for deep-hole bench blasting in changtan open-pit mine based on CWM and CM[J]. Blasting, 2024, 41(1):51-59, 119. (in Chinese)
- [6] 蒙贤忠,夏宇馨,周传波,等.土-岩地层水平孔爆破诱发振动传播特征及预测[J].岩石力学与工程学报,2025,44(3):737-751.
- [6] MENG Xian-zhong, XIA Yu-qing, ZHOU Chuan-bo, et al. Propagation characteristics and prediction of vibration induced by horizontal hole blasting in soil-rock strata[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2025, 44(3):737-751. (in Chinese)
- [7] 徐赞.土岩复合地层地铁隧道爆破振动与环境噪声传播特性[J].工程爆破,2025,31(2):139-147.
- [7] XU Zan. Propagation characteristics of blasting vibration and environmental noise in metro tunnels in soil-rock composite strata[J]. Engineering Blasting, 2025, 31(2):139-147. (in Chinese)
- [8] 张茂晨,路世伟,周传波,等.上土下岩地层中柱面SH波的传播特性分析[J].工程爆破,2023,29(4):35-42.
- [8] ZHANG Mao-chen, LU Shi-wei, ZHOU Chuan-bo, et al. Analysis on propagation characteristics of cylindrical sh waves in soil-over-rock strata[J]. Engineering Blasting, 2023, 29(4):35-42. (in Chinese)
- [9] 朱明,胡鑫涛,冯志威,等.土岩复合地层条件下爆破振速衰减模型优选[J].科学技术与工程,2021,21(10):4211-4218.
- [9] ZHU Ming, HU Xin-tao, FENG Zhi-wei, et al. Optimization of blasting vibration velocity attenuation model under the condition of soil-rock composite strata[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(10):4211-4218. (in Chinese)
- [10] 林炳潮,邓镔,孟亚锋,等.土岩交错地层隧道施工爆破围岩振动特性研究[J].公路工程,2019,44(6):154-160.
- [10] LIN Bing-chao, DENG E, MENG Ya-feng, et al. Study on surrounding rock vibration characteristics induced by blasting in tunnel construction of soil-rock interbedded strata[J]. Highway Engineering, 2019, 44(6):154-160. (in Chinese)
- [11] 王文韬,王尹军,吴春平,等.某大型露天铀矿压渣爆破数值模拟研究[J].工程爆破,2024,30(6):79-86.
- [11] WANG Wen-tao, WANG Yin-jun, WU Chun-ping, et al. Numerical simulation study on pressure slag blasting of a large open-pit uranium mine[J]. Engineering Blasting, 2024, 30(6):79-86. (in Chinese)
- [12] 黄永辉,李永杰,杨阳,等.露天爆破中炸药单耗对岩石破碎块度的数值模拟研究[J].工程科学学报,2024,46(6):973-981.

- [12] HUANG Yong-hui, LI Yong-jie, YANG Yang, et al. Numerical simulation study on the effect of explosive consumption on rock fragmentation in open-pit blasting[J]. Journal of Engineering Science, 2024, 46(6): 973-981. (in Chinese)
- [13] 余业清. 某石灰岩矿露天台阶爆破设计 & 安全分析[J]. 中国矿业, 2024, 33(9): 186-194.
- [13] YU Ye-qing. Design and safety analysis of open-pit step blasting in a limestone mine[J]. China Mining, 2024, 33(9): 186-194. (in Chinese)
- [14] 孟佳乐, 黄永辉, 张智宇, 等. 基于 SPH 露天台阶的爆破优化[J]. 有色金属工程, 2024, 14(5): 120-129.
- [14] MENG Jia-le, HUANG Yong-hui, ZHANG Zhi-yu, et al. Optimization of blasting based on SPH open air steps[J]. Nonferrous Metal Engineering, 2024, 14(5): 120-129. (in Chinese)
- [15] 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.
- [15] YE Hai-wang, WEI Wen-peng, ZHOU Han-hong, et al. Fine grained numerical model construction and blasting simulation of fractured rock mass[J]. Blasting, 2023, 40(4): 44-51. (in Chinese)
- [16] 崔年生, 楼晓明. 露天矿山深孔台阶压渣爆破参数优化研究[J]. 矿冶工程, 2023, 43(4): 44-47.
- [16] CUI Nian-sheng, LOU Xiao-ming. Research on parameter optimization of deep hole step slag blasting in open pit mines[J]. Mining and Metallurgy Engineering, 2023, 43(4): 44-47. (in Chinese)
- [17] ZHANG Xiao-jun, LI Zhuo, WEI Zheng, et al. Experimental and numerical study on the effect of three-hole simultaneous blasting technology on open-pit mine bench blasting[J]. Applied Sciences, 2024, 14(5): 2169.
- [18] WANG Zi-yi, WU Gui-yi, ZHOU Lang. Optimization of pre-splitting blasting hole network parameters and engineering applications in open pit mine[J]. Applied Sciences, 2022, 12(10): 4930.
- [19] JOHNSON GR, COOK WH. A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1983, 21: 541-548.
- [20] 刘江超, 高文学, 王林台, 等. 水封爆破装药结构优化数值分析及其应用[J]. 振动与冲击, 2020, 39(9): 57-62, 96.
- [20] LIU Jiang-chao, GAO Wen-xue, WANG Lin-tai, et al. Numerical analysis and application of optimization of water sealed blasting charge structure[J]. Vibration and Shock, 2020, 39(9): 57-62, 96. (in Chinese)
- [21] 张文杰, 邓龙胜, 于 渤, 等. 爆破作业下黄土围岩的破碎特征及响应规律[J/OL]. 爆破; 1-17. [2026-02-05]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1164.tj.20251024.1644.004>.
- [21] ZHANG Wen-jie, DENG Long-sheng, YU Bo, et al. The fragmentation characteristics and response laws of loess surrounding rock under blasting operations[J/OL]. Blasting; 1-17. [2026-02-05]. <https://link.cnki.net/urlid/42.1164.tj.20251024.1644.004>. (in Chinese)
- [22] 王 平. 大断面隧道楔形掏槽爆破参数的优化[D]. 南宁: 广西大学, 2020.
- [22] WANG Ping. Optimization of blasting parameters for wedge-shaped excavation of large section tunnels[D]. Nanning: Guangxi University, 2020. (in Chinese)
- [23] 王 玮, 怀平生, 降世良. 大断面隧道空孔直线掏槽爆破高效掘进方法[J]. 爆破, 2022, 39(3): 76-81.
- [23] WANG Wei, HUAI Ping-sheng, JIANG Shi-liang. An efficient driving method for large-section tunnel with empty-hole linear cut blasting[J]. Blasting, 2022, 39(3): 76-81. (in Chinese)
- [24] 陈 鑫, 张 泽, 李东庆. 水泥土强度特性和损伤本构模型研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(7): 109-119.
- [24] CHEN Xin, ZHANG Ze, LI Dong-qing. Research on strength characteristics and damage constitutive model of cement soil[J]. Journal of Hunan University(Natural Science Edition), 2020, 47(7): 109-119. (in Chinese)
- [25] YI Chang-ping, SJOBERG J, JOHANSSON D, et al. A numerical study of the impact of short delays on rock fragmentation[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2017, 100: 250-254.

(上接第 87 页)

- [23] WERNER Riedel, KLAUS Thoma, S Hiermaier, et al. Penetration of reinforced concrete by BETA-B-500 numerical analysis using a new macroscopic concrete model for hydrocodes[C]//9th International Symposium, Interaction of the Effects of Munitions with Structures, Germany, 1999, 3-7 May: 315-322.
- [24] ZHANG Xiang-yu, YAN Peng, LUO Sheng, et al. Numerical investigation of blasting damage characteristics and optimization of fan-pattern boreholes in deep mining[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2022, 15(19): 1560.
- [25] 冷振东, 卢文波, 胡浩然, 等. 爆生自由面对边坡微差爆破诱发振动峰值的影响[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(9): 1815-1822.
- [25] LENG Zhen-dong, LU Wen-bo, HU Hao-ran, et al. Studies on influence of blast-created free face on ground vibration in slope blasts with millisecond-delays[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2016, 35(9): 1815-1822. (in Chinese)