

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2026.02.016

基于 S-ALE 算法的巷道孤石光面爆破 围岩损伤规律研究*

黄永辉¹, 荆蕊¹, 张译尹¹, 段强坤¹, 曹永炜²

(1. 昆明理工大学 电力工程学院, 昆明 650500; 2. 四川省应急救援总队, 成都 610000)

摘要: 巷道孤石是地下工程中的重大安全隐患, 针对爆破法处理孤石的效果及对围岩损伤的影响开展研究, 采用光面爆破理论和近年来刚产生的 S-ALE 算法, 依托云南某地下金属矿山巷道工程, 构建等比例三维数值仿真模型, 系统地分析研究了光面爆破技术处理巷道孤石时的围岩损伤随不同线装药密度和炮孔间距的变化规律。研究结果表明: 孤石光面爆破围岩损伤度随爆心距增大呈“反 S”型下降; 围岩的最大损伤深度随线装药密度增加呈线性增大变化, 随炮孔间距增大呈波动变化, 且在炮孔间距为 0.36 m 和 0.40 m 时分别达到最大值和最小值; 围岩损伤变化对线装药密度的敏感性远大于炮孔间距, 在考虑爆破效果和炸药使用量的情况下, 最优爆破参数为线装药密度 0.30 kg/m (装药不耦合系数 1.43) 和炮孔间距 0.40 m; 由于孤石大临空面积的特性, 与常规光面爆破相比其围岩最大损伤深度明显偏小, 这与垂直洞轮廓线临空方向和沿洞轮廓线临空方向的塑性应变下降率基本一致。相关研究结果能够为实际工程提供技术指导。

关键词: 线装药密度; 炮孔间距; 围岩损伤; 数值模拟; S-ALE 算法

中图分类号: O389 文献标识码: A 文章编号: 1001-487X(2026)02-0160-10

Study on Surrounding Rock Damage in Roadway Smooth Blasting Using S-ALE Algorithm

HUANG Yong-hui¹, JING Rui¹, ZHANG Yi-yin¹, DUAN Qiang-kun¹, CAO Yong-wei²

(1. School of Electric Power Engineering, Kunming University of Technology, Kunming 650500, China;
2. Sichuan Emergency Rescue Department, Chengdu 610000, China)

Abstract: Isolated boulders in roadways present substantial safety risks in mining operations. This research investigates the efficacy of blasting techniques for isolated boulder removal and their influence on adjacent rock damage, utilizing smooth blasting principles and the innovative S-ALE computational method. A precisely scaled 3D numerical model was developed based on a roadway project in a Yunnan underground metal mine to comprehensively examine how surrounding rock damage varies with different linear charge densities and borehole spacing configurations during smooth blasting of isolated boulders. The results indicate that: (1) surrounding rock damage follows an “inverse S-shaped” attenuation pattern with increasing distance from the blast center; (2) maximum damage depth demonstrates linear growth with higher linear charge density but shows fluctuating behavior with borehole spacing var-

收稿日期 (Date of reception): 2025-09-12

网络首发日期 (Published online): 2025-10-31

作者简介: 黄永辉 (1981-), 男, 河北石家庄人, 博士、副教授, 主要从事工程爆破理论及数值模拟研究, (E-mail) 8176309@qq.com。

通信作者: 曹永炜 (1983-), 男, 四川成都人, 硕士、高级工程师, 主要从事自动化技术; 安全科学与灾害防治研究, (E-mail) 199292570@qq.com。

基金项目: 国家自然科学基金 (52164009, 52574148)

About the author: HUANG Yong-hui (1981-), male, born in Shijiazhuang city, Hebei province, Ph. D., associate professor, mainly engaged in the research of engineering blasting theory and numerical simulation, (E-mail) 8176309@qq.com.

Corresponding author: CAO Yong-wei (1983-), male, born in Chengdu city, Sichuan province, master's degree, senior engineer, mainly engaged in the research of automation technology, safety science, and disaster prevention, (E-mail) 199292570@qq.com.

Fund Programs: National Natural Science Foundation of China (52164009, 52574148)

iations, peaking at 0.36 m and reaching minimum at 0.40 m spacing; (3) rock damage exhibits substantially greater sensitivity to linear charge density adjustments compared to borehole spacing modifications. The optimal parameters balancing blasting efficiency and explosive consumption are determined to be a linear charge density of 0.30 kg/m (decoupling coefficient 1.43) and a borehole spacing of 0.40 m. The extensive free surface of isolated boulders results in a significantly shallower maximum damage depth than with conventional smooth blasting, consistent with observed reductions in plastic strain both perpendicular to and along the tunnel contour toward the free face. These results offer practical technical references for field applications.

Key words: linear charge density; blasthole spacing; surrounding rock damage; numerical modeling; S-ALE algorithm

随着我国基础设施建设的持续深入,巷(隧)道爆破开挖过程中频繁出现欠挖凸起形成的孤石或浮石,尤其在金属矿山领域,处理此类孤石时极易引发重大安全事故,造成人员伤亡与设备损毁。当前亟待系统研究的关键问题是:在高地应力环境为代表的深部开采条件下,如何选择一种既能高效破碎孤石和浮石,又能最大限度控制围岩损伤范围的爆破工艺。这一问题的解决对保障矿山安全生产、提升巷道施工质量具有重大现实意义。

近年来针对孤石的爆破处理方式、光面爆破及围岩损伤方面,国内外学者做了相应研究。在孤石爆破处理方面,宋威采用 ALE 算法进行孤石深孔爆破的数值模拟^[1],优化孤石爆破孔网参数;衣利伟等采用深孔爆破的方法对孤石进行预处理^[2];ZHANG Zhi-qian 等为满足施工安全^[3],研究了减振措施下孤石及邻近建筑物的振动特性;MIAO Yu-song 等提出了一种新型对称双线性起爆(SBI)技术来处理孤石^[4];孙非凡通过 ALE 算法模拟研究了孤石强度、尺寸与炸药单耗和最小安全距离的关系^[5];在光面爆破方面,申涛、邓永兴等分别采用切缝药包和螺线管聚能药包研究光面爆破机理和优化爆破参数^[6,7];付玉华等为优化光面爆破效果^[8],对损伤条件下深部岩体巷道光面爆破参数进行研究;YANG Ren-shu、范勇等研究了地应力对光面爆破裂纹扩展、损伤以及应力场分布的影响^[9,10];高启栋、夏文俊等分别研究了水平光面爆破中的地震波特性成分和损伤质点峰值振速安全阈值^[11,12];满轲研究了光面爆破中围岩损伤和振动速度随空孔效应的变化规律^[13];FENG Xiao-mei、罗光志等研究了炮孔间距、光爆层厚度和不耦合系数对光面爆破的影响^[14,15];LI Xin-ping 等采用时序控制法和数值模拟研究了不同起爆炮孔形状对光面爆破的影响^[16];WANG Jian-xiu 等基于杭黄高速铁路紫高洞隧道工程^[17],研究了岩体结构对光面爆破质量的影响;陈玉等采用数值模拟方法^[18],研究了砂岩隧道全断面光面爆破一次成形技术,并在实际工程得到验证。

在围岩损伤方面,唐红梅等对爆破围岩进行分区研究^[19],得到不同分区对应的损伤阈值;褚怀保等通过模拟试验^[20],揭示了煤体爆破损伤断裂过程与机理;许梦飞等针对隧道爆破围岩损伤计算^[21],建立了考虑循环爆破效应的 Hoek-brown 弹塑性损伤模型;TIAN Xing-chao 等提出了地应力和节理共同作用下的爆破应力波衰减方程和孔距计算方法^[22];陈大勇等研究了超深孔爆破对巷道顶板位置围岩稳定性的影响^[23];马泗洲等研究了在初始地应力下岩体的爆破损伤特性和破裂机理^[24]。

众多研究中普遍采用 LS-DYNA 软件中的 ALE 算法对爆破模型进行数值模拟计算,而在 2015 年 Hao Chen 博士引入了结构化拉格朗日欧拉算法即 S-ALE(Structured-ALE)算法。相比传统的 ALE 算法,S-ALE 算法中改变了网格的划分方式,减少了计算时求解器对内存的读取,大大提升了计算效率。

虽然光面爆破技术被广泛地运用到隧道和巷道的开挖中,但对于孤石的处理,大多还是通过打垂直孔的深孔爆破方法,或者裸露药包爆破的方法,而采用光面爆破的方式很少。基于此,本文采用 S-ALE 算法并将光面爆破技术引入孤石的处理中来,把光面爆破技术对围岩损伤小、适用性强等特性与孤石大面积临空、强度大等特点相结合,可以有效地处理掉顽固的孤石,对于解决隧道中孤石问题具有重要意义^[25]。

1 数值计算模型的建立及模拟方案

1.1 S-ALE 算法简介

传统的 ALE 流固耦合算法被广泛的运用到爆破领域数值模拟中,但近十年来,ALE 计算模型的单元数量从百万级增加到千万级,读写的文件尤为庞大,流体网格划分复杂,修改计算文件费时。S-ALE 算法中则将规则网格的划分通过程序内部生成,而非用户自己创建。在算法理论上,S-ALE 和传统的 ALE 基本一致,但这样可以使得模型的创建更加高效,并且降低耗存和计算时间,比传统 ALE 算法节约了 20%~40% 计算时间^[26]。

1.2 工程背景及地址条件

大红山铜矿巷道掘进过程中顶板及边帮存在光面爆破成型效果不好情况,部分区域出现了孤石。这些孤石体积大,强度高,大多呈圆型,具体情况见图 1,根据地下矿山实际情况,从爆破对顶板和边帮围岩损伤程度尽量小的角度考虑,决定采用地下光面爆破技术处理孤石。见图 2。

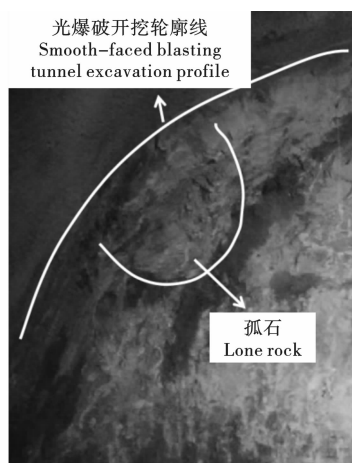


图 1 巷道光面爆破工程中孤石分布
Fig. 1 Distribution map of boulder in smooth blasting tunnel projects

大红山铜矿隧道附近岩体成分较为复杂,主要以含铜、铁性的沉积岩和变质岩为主。孤石区域主要由火山强烈作用期中溢出的岩浆形成。对该区域取样并进行岩石力学基础参数试验,具体参数见表 1。

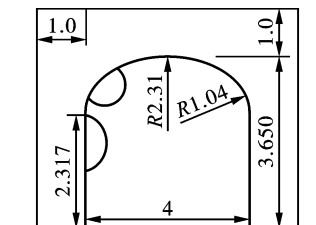


图 2 巷道中孤石分布示意图(单位:m)

Fig. 2 Distribution diagram of boulder in the roadway (unit: m)

1.3 数值试验方案及建模

对边帮位置的孤石开展光面爆破数值模拟,根据现场施工情况和钻孔条件,采用连续装药的方式,炮孔直径为 4 cm,炮孔中心位于设计开挖轮廓线上,炮孔中心到孤石轮廓的最小抵抗线为 0.4 m。现场大多孤石的宽度为 1.0 ~ 1.5 m,采用双孔爆破,考虑到数值模拟条件,对数值模型进行简化处理,数值模型建模见图 3,具体尺寸见图 4。

表 1 岩石基础力学参数

Table 1 Mechanical parameters of rock foundation

岩石类别 Rock category	单轴抗压 Uniaxial compressive strength/MPa	纵波波速 Longitudinal wave velocity/(m · s ⁻¹)	弹性模量 Elastic modulus/GPa	剪切模量 Shear modulus/GPa	泊松比 Poisson's ratio	密度 Density/(kg · m ⁻³)
I 号矿带	88.0	5021	100.5	41.5	0.22	2900

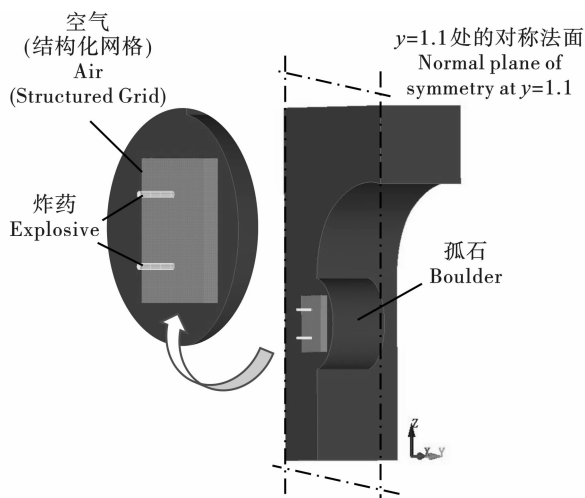


图 3 数值模型建模示意图
Fig. 3 Numerical model diagram

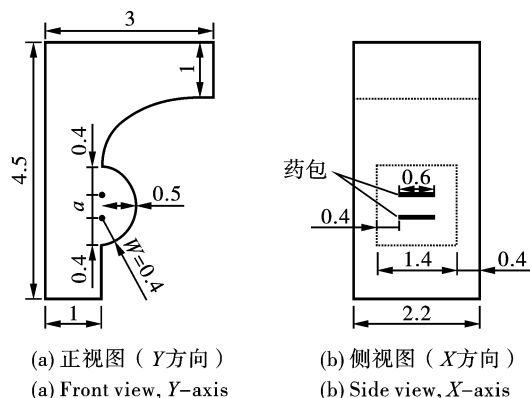


图 4 数值计算模型尺寸图(单位:m)

Fig. 4 Size diagram of numerical calculation model (unit: m)

采用 ANSYS/LS-DYNA 软件和 S-ALE 算法,开展孤石在不同线装药密度 ρ_l (或装药不耦合系数 K) 和不同孔距 a 条件下的正交数值模拟试验,其中不

同的线装药密度通过改变药卷直径来实现。线装药密度和装药不耦合系数分别为:0.20 kg/m (1.75)、0.25 kg/m (1.57)、0.30 kg/m (1.43)、0.35 kg/m (1.33) 和 0.40 kg/m (1.24),炮孔间距分别为:0.28 m、0.32 m、0.36 m、0.40 m 和 0.44 m。

1.4 岩石材料本构及参数

根据上述的大红山铜矿某隧道的围岩物理力学特性,岩石采用 RHT 本构方程,在 ANSYS/LS-DYNA 软件中以关键字 *MAT_RHT 来定义,岩石基本力学参数见表 1。

1.5 炸药本构及参数

根据施工情况,炸药选用 2 号岩石乳化炸药,以 ANSYS/LS-DYNA 软件内嵌的粘性颗粒炸药材料模型“*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN”来模拟炸药,并利用 JWL 状态方程来模拟炸药的爆炸过程,

其爆轰压力与比容的关系为

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

式中: A、B、R₁、R₂、ω 为炸药 JWL 状态方程相关参数; V 为比容; E₀ 为初始比内能。炸药材料和 JWL 状态方程参数见表 2。

1.6 空气材料本构及参数

空气模型采用 ANSYS/LS-DYNA 软件内嵌的 *MAT_NUL 材料,状态方程采用 *EOS_LINEAR_POLYNOMIAL,表达式为

$$P = C_0 + C_1\mu + C_2\mu^2 + C_3\mu^3 + (C_4 + C_5\mu + C_6\mu^2)E$$
 (2)

式中: P 为压力; μ 为比体积; C₀ ~ C₆ 为多项式方程参数; E₀ 为单位体积内能。空气材料和状态方程参数见表 3。

表 2 炸药材料和状态方程参数
Table 2 Explosive material parameter

含义 Meaning	符号/单位 Symbols/unit	值 Value	含义 Meaning	符号/单位 Symbols/unit	值 Value
爆轰压力 Detonation pressure	$P/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1150	方程参数 Equation parameters	R_1	4.16
爆轰速度 Detonation velocity	$D/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	3500	方程参数 Equation parameters	R_2	0.96
炸药爆压 Explosive pressure	P_{CJ}/GPa	4.0	方程参数 Equation parameters	ω	0.15
方程参数 Equation parameters	A/GPa	214	比内能 Specific internal energy	$E/(\text{GJ} \cdot \text{m}^{-3})$	4.19
方程参数 Equation parameters	B/GPa	0.18	比容 Specific volume	V_0	1

表 3 空气材料和状态方程参数
Table 3 Air material parameter

含义 Meaning	符号/单位 Symbols/unit	值 Value	含义 Meaning	符号/单位 Symbols/unit	值 Value
密度 Density	$\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1.29	方程参数 Equation parameters	C_4	0.4
方程参数 Equation parameters	C_0	0	方程参数 Equation parameters	C_5	0.4
方程参数 Equation parameters	C_1	0	方程参数 Equation parameters	C_6	0
方程参数 Equation parameters	C_2	0	体积内能 Volume internal energy	$E_0/(\text{J} \cdot \text{m}^{-3})$	2.5×10^5
方程参数 Equation parameters	C_3	0			

2 光面爆破围岩损伤分区及判定

2.1 光面爆破机理初探

爆破破岩是一个高度复杂的动态过程。大量工程实践与理论研究均表明,“爆生气体-应力波反射拉伸”耦合作用理论较其他理论更能准确描述该过程的物理机制,与实际情况更为吻合。在光面爆破中,相邻炮孔间应力波的相互叠加与反射拉伸效应尤为显著,是实现平滑破裂面的关键因素。为此,本研究基于光面爆破设计方案,对巷道孤石的光面爆破作用机理开展初步数值模拟研究。模拟采用流固耦合算法,以精确刻画爆生气体的准静态压力作用及其与岩体的相互作用过程。

从图 5 模拟结果可以初步探究出:炸药爆炸产生的冲击波作用在孔壁,随着爆炸应力波在岩石介质中的传递,当岩石的动态抗拉强度低于应力波产生的切向拉应力,则会逐渐产生径向裂纹,形成裂隙区;当应力波传递到孔中距位置,发生切向应力叠加和反向拉伸作用,此时孔中距位置的岩石将受到拉伸破坏并产生裂纹;当应力波传递到孤石自由表面后,产生反射现象,位于孤石表面的岩石产生反射拉伸破坏裂纹。而爆炸产生的气体,在整个过程中,随着裂纹进入岩体中充当“气楔”作用,裂纹在气体膨胀的过程中逐渐扩展,加速孤石的破碎。

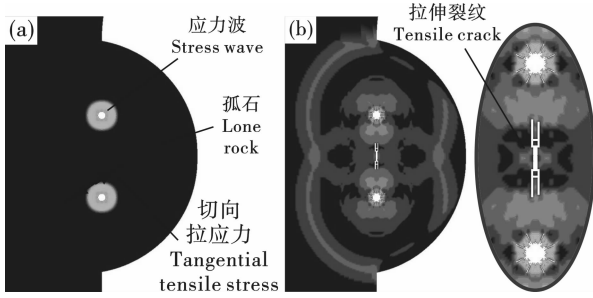


图 5 孤石光面爆破破碎过程图

Fig. 5 Boulder smooth blasting crushing process diagram

2.2 围岩损伤分区与判定

从上述可以知道,由于应力波在岩石中衰减传递,岩石的损伤程度将随爆心距的增大而减小,从而按照岩石的不同损伤程度分为粉碎区、碎裂区和弹性振动区。

在 LS-DYNA 软件中,RHT 本构方程引用了参数 D 来描述岩石的损伤程度,具体定义为

$$D = \sum \left(\frac{\Delta \varepsilon_p}{\varepsilon_p^*} \right) \quad (3)$$

材料发生塑性变形是导致材料破坏的主要原因,将岩石材料的峰值强度所对应的损伤值作为临

界损伤参量 D_{cr} ,因此可以用公式(1)来描述岩石塑性应变与 D_{cr} 的关系

$$D_{cr} = \frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_{\max}} \quad (4)$$

取大红山岩石刚开始压碎和完全压实时的应力状态作为判定岩石弹性振动区、碎裂区和粉碎区的阈值,对公式(1)和 RHT 内嵌的损伤本构函数进行整理,可得

$$\varepsilon_p = \frac{p^* - f_c R_3 \left(\frac{\pi}{6} \right) F_r g_c^*}{3G\zeta} \quad (5)$$

$$\varepsilon_{\max} = D_1 [P^* - (1 - D_{cr}) P_t^*] \quad (6)$$

$$P_t^* = \frac{F_r Q_2 f_s^* f_t^*}{3(Q_1 f_s^* - Q_2 f_t^*)} \quad (7)$$

公式(3)~(6)中: $\Delta \varepsilon_p$ 为失效塑性应变和当前塑性应变之差; ε_p^f 为失效时塑性应变; ε_p 为塑性应变; $\varepsilon_{\max}$ 为峰值应变或极限应变; P^* 为抗压强度参数归一化压力; f_c 为单轴抗压强度; R_3 为描述剪、拉子午线强度折减因素; F_r 为动态增量因数; g_c^* 为压缩屈服面参数; G 为剪切模量; ζ 为硬化缩减因子; D_1 为初始损伤值; P_t^* 为失效截止压力; Q_1 、 Q_2 分别为拉伸子午线依赖系数和剪切子午线依赖系数; f_s^* 、 f_t^* 分别为相对剪切强度和相对拉伸强度。

将 RHT 本构参数和应力状态值代入公式(3)~(7)可以得出岩石的临界损伤阈值 $D_{cr} = 0.11$,具体公式的推导过程和相关参数取值本人已在文献[25]中给出。

3 孤石光面爆破围岩损伤规律

3.1 孤石光面爆破效果

选用线装药密度为 0.4 kg/m、孔距为 0.40 m,运用 LS-prepost 软件,给出不同时刻的爆破效果,详见图 6~图 7。

从图 6~7 可知道,采用基于 S-ALE 算法的数值模拟方法,可以较好地模拟巷道孤石的光面爆破,其孤石的光面爆破效果和破碎情况较好,并通过数值模拟结果反馈到巷道光面爆破工程中后,不仅处理了巷道壁面上存在的孤石,还在爆破后保留了较为清晰的半孔痕,取得了较好的光面爆破效果,如上图 8 所示。

3.2 围岩损伤随爆心距变化规律

为了研究围岩损伤随爆心距变化规律,分别先后控制变量炮孔间距为 0.40 m、线装药密度为 0.40 kg/m。运用 LS-prepost 软件,提取过炮心且与围岩垂直的爆心距和围岩损伤度,并绘制曲线。由

于围岩损伤随爆心距的增大呈现“反 S”型分布,采用公式(8)进行拟合,拟合曲线见图 9~10,拟合参数见表 4。

$$D = \frac{a}{1 + e^{-m+nl}} + b \tag{8}$$

式中: D 为损伤度; L 为爆心距; a 、 b 、 m 和 n 为拟合参数。

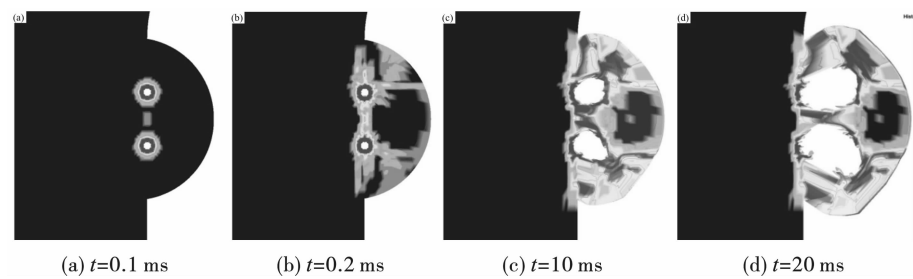


图 6 不同时刻的损伤云图
Fig. 6 Damage at different times

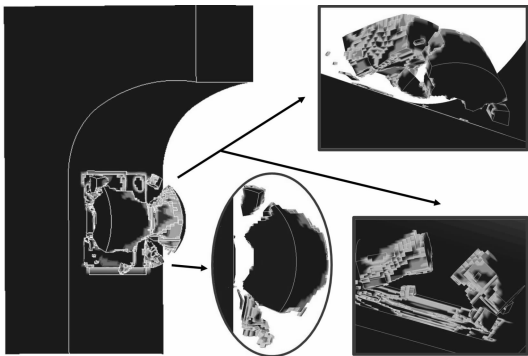


图 7 光面爆破破碎效果图
Fig. 7 Smooth blasting crushing effect

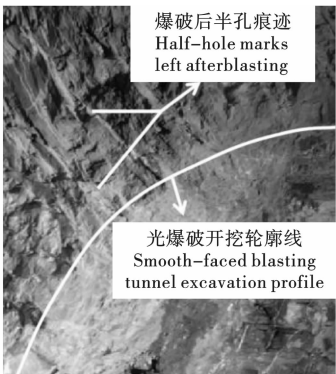


图 8 巷道内部光面爆破效果图
Fig. 8 Roadway internal glossy blasting effect

表 4 曲线拟合参数
Table 4 Curve fitting parameters

孔径 Hole spacing/m	线状药密度 Linear density/(kg · m ⁻¹)	a	m	n	b	R^2
0.40	0.20	0.98	-10.50	164.68	0.064	0.99
	0.25	1.08	-7.82	124.67	0.056	0.99
	0.30	1.16	-7.52	109.31	0.050	0.99
	0.35	1.11	-7.20	101.39	0.053	0.99
	0.40	1.23	-8.19	112.46	0.057	0.99
0.28	0.40	1.12	-7.25	80.94	-0.013	0.99
0.32		1.12	-8.19	83.55	0.006	0.99
0.36		0.94	-9.40	101.61	0.078	0.99
0.40		1.04	-9.17	119.31	0.069	0.99
0.44		1.25	-4.75	58.20	0.033	0.99

各拟合曲线的 R^2 均等于 0.99,表明拟合结果正确可行,损伤度随爆心距变化呈现明显的“反 S 型”,在靠炮孔近端和远端的岩石损伤程度下降速率更慢,在靠炮孔中部位岩石损伤程度下降速率更快。

3.3 围岩损伤深度随线密度和炮孔间距变化规律
由于材料发生破坏是主要由塑性变形引起的^[27],从 RHT 本构内嵌的损伤参数 D 的定义中可以知道,岩石材料在弹性振动阶段不会发生损伤和破坏,因此以 $D=0.11$ 作为岩石损伤判定阈值。当

损伤值大于 0.11 时,岩石局部或者全部发生破坏,反之,岩石未受到破坏。

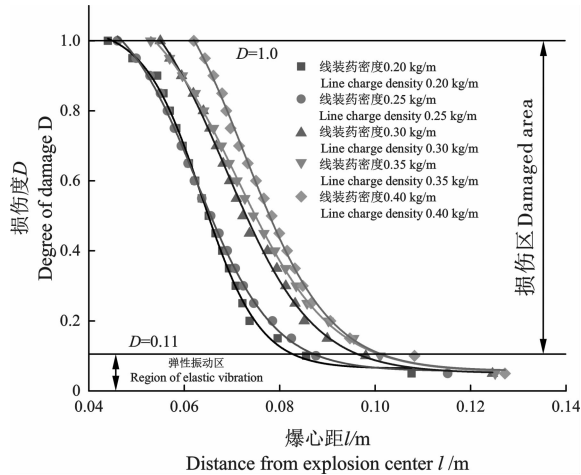


图9 不同线装药密度下围岩损伤 D 随爆心距分布曲线
Fig. 9 Distribution curve of surrounding rock damage D with detonation distance l under different linear charges conditions

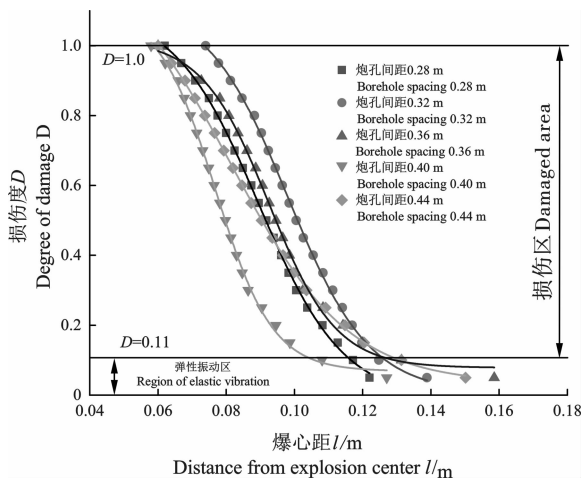


图10 不同孔距下围岩损伤 D 随爆心距分布曲线
Fig. 10 Distribution curve of surrounding rock damage D with detonation distance l under different borehole spacing conditions

运用 LS-prepost 内嵌的 History variable# 功能,以 $D=0.11$ 作为围岩的最大损伤深度判定依据,提取在不同线装药密度和孔距下的损伤深度数据并绘制曲线,详见图 11~12。

从围岩最大损伤深度与线装药密度散点分布情况可以知道,随着线装药密度从 0.20~0.40 kg/m 增大,围岩最大损伤深度呈线性增加,因此采用线性函数进行拟合,具体拟合曲线见图 11。围岩最大损伤深度随着线装药密度的增大而增大,这是由于线装药密度增加,装药不耦合系数减小,爆炸产生的冲击波和作用在岩石介质中的应力波增大,从而影响

应力波的衰减传递距离,增大对围岩的损伤破坏作用和深度。从图 12 可以知道,随着炮孔间距从 0.28~0.44 m 增大,各线装药密度条件下的围岩最大损伤深度呈现先增大,后减小,再增大的上下波动变化规律,在炮孔间距为 0.36 m 左右时达到波峰,在炮孔间距为 0.40 m 时达到最小值。

在工程实际中,围岩损伤深度、炸药量的使用(即成本)和爆破效果都是必须要权衡的因素,从图 12 中的结果知道,当炮孔间距为 0.40 m 时围岩达到最小损伤深度,因此在控制炮孔间距为 0.40 m 的情况下,考虑爆破效果和炸药使用量,并绘制相应曲线,详见图 13,图中爆破效果为爆后 10 ms。

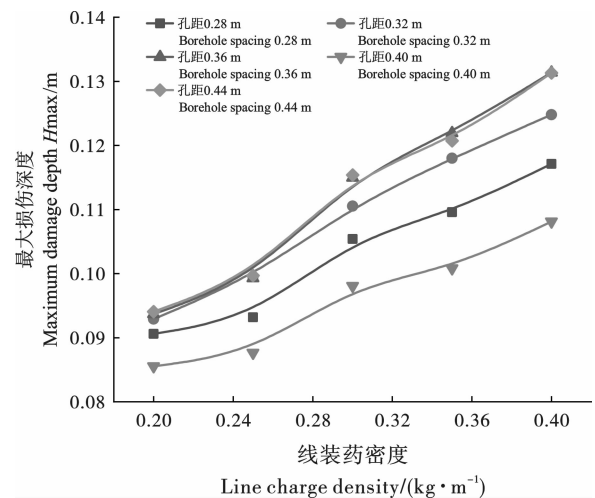


图11 不同孔距条件下最大损伤深度
随线装药密度变化曲线

Fig. 11 Maximum damage depth varies with linear charge density curve under different borehole spacing conditions

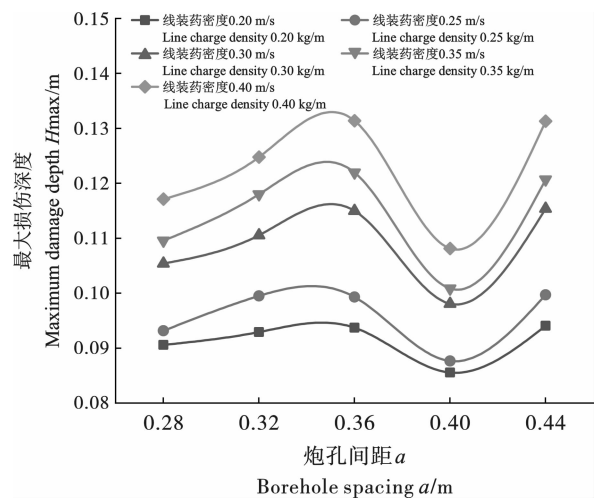


图12 不同线装药密度条件下最大损伤
深度随孔距变化曲线

Fig. 12 Maximum damage depth varies with linear charge density curve under different linear charges conditions

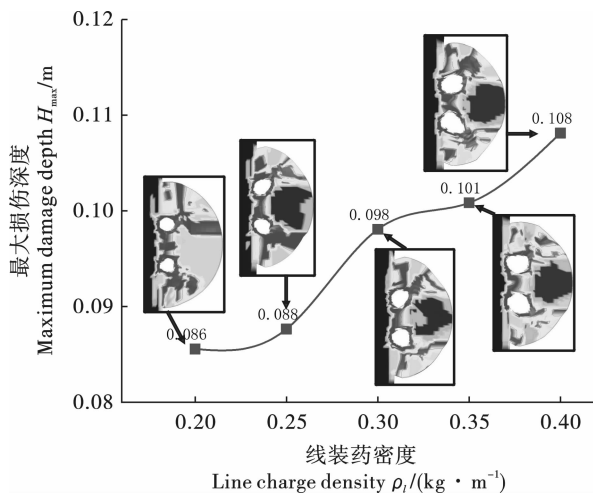


图 13 最大损伤深度随线装药密度变化曲线

Fig. 13 Maximum damage depth varies with linear charge density curve

从图 13 可以知道,在孔距为 0.40 m 条件下,当线装药密度从 0.20 kg/m 增至 0.40 kg/m 时,围岩最大损伤深度从 0.086 m 增加到 0.108 m,但当线装药密度为 0.20 kg/m 和 0.25 kg/m 时,孤石与围岩轮廓线上的破碎光面效果较差,而当线装药密度为 0.30 kg/m、0.35 kg/m 和 0.40 kg/m 时,破碎光面效果较好,在考虑到炸药使用成本尽量低的情况,选用炮孔间距为 0.40 m、线装药密度为 0.30 kg/m (装药不耦合系数为 1.43) 为最优爆破参数,该数值模拟结果可为实际工程提供参考依据。

3.4 线装药密度和炮孔间距对围岩损伤深度的敏感性分析

由上述可得,围岩最大损伤深度随线装药密度的增大呈现线性增大趋势,随炮孔间距的增大呈现波动变化趋势,且线装药密度对围岩损伤深度的影响范围大于炮孔间距,而材料损伤由塑性变形引起,为进一步探究线装药密度和炮孔间距对围岩损伤影响的敏感性,提取如图 14 所示 $-X$ 方向上 G 点 (距离炮孔 0.1 m) 处的有效塑性应变 (取最大损伤出现的孔距 0.36 m,最优爆破线装药密度 0.30 kg/m),并绘制其随线装药密度和炮孔间距变化曲线,详见图 15。

从图 15 可以知道,有效塑性应变随线装药密度和孔距的变化趋势和围岩最大损伤深度变化趋势基本一致,证明了后者变化规律的正确性。当线装药密度从 0.20 kg/m 增至 0.40 kg/m 时,有效塑性应变从 0.0027 m 增加至 0.0169 m,其增长率 R_{ep} 为 525.9%;当炮孔间距从 0.28 m 增至 0.44 m 时,有效塑性应变波动变化,其中最大值为 0.0093 m,最小值为 0.0059 m,其增长率 R_{ea} 为 57.6%。

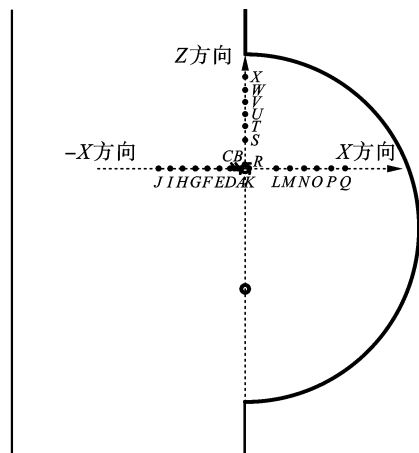


图 14 特征点位置示意图

Fig. 14 Feature point location diagram

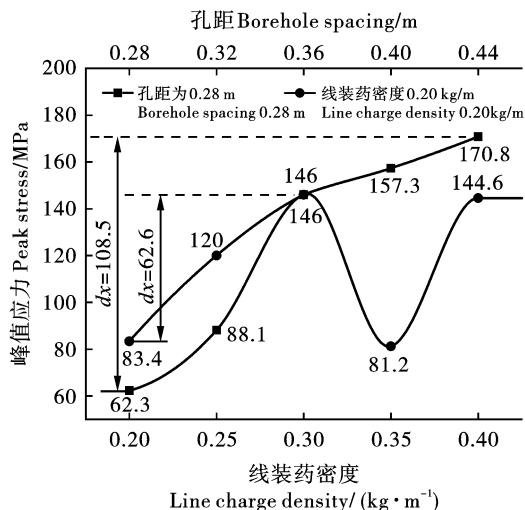


图 15 有效塑性应变随线装药密度和炮孔间距变化曲线

Fig. 15 Effective plastic strain curve with linear charge density and hole spacing

引入经济学中的敏感性系数来描述线装药密度和炮孔间距对围岩最大损伤深度的影响敏感程度^[28],经过整理后可得线装药密度敏感系数 S_{ep} 和炮孔间距敏感系数 S_{ea} 的计算公式为

$$S_{ep} = \frac{R_{ep}}{\Delta\rho_l/\rho_l} \quad (9)$$

$$S_{ea} = \frac{R_{ea}}{\Delta a/a} \quad (10)$$

式中: $\Delta\rho_l$ 为线装药密度变化量; Δa 为炮孔间距变化量。

将 $\Delta\rho_l = 0.2$ kg/m、 $\Delta a = 0.16$ m、 $\rho_l = 0.2$ kg/m、 $a = 0.28$ m 代入公式可计算出 $S_{ep} = 5.26$, $S_{ea} = 1.01$ 。线装药密度敏感系数 S_{ep} 远大于炮孔间距敏感系数 S_{ea} ,说明了围岩最大损伤深度对线装药密度敏感性远大于对炮孔间距的敏感性,结合工程实际,孤石爆破方案中应该更加注重炸药量的使用。

3.5 孤石光面爆破的最大损伤深度对比验证

在线装药密度 0.20、0.25、0.30、0.35、0.40 kg/m 和孔距 0.28、0.32、0.36、0.40、0.44 m 的正交数值模拟试验中,孤石光面爆破围岩的最大损伤 0.131 m 出现在线装药密度为 0.40 kg/m、炮孔间距为 0.36 m。这与隧洞开挖光面爆破的最大围岩损伤深度 0.28 ~ 0.76 m 相比^[29,30],下降了 53% ~ 82%,因此针对孤石大面积临空的特点,提取如图 13 所示 A ~ Y 点三个方向的有效塑性应变,并绘制其随爆心距变化曲线,详见图 16。

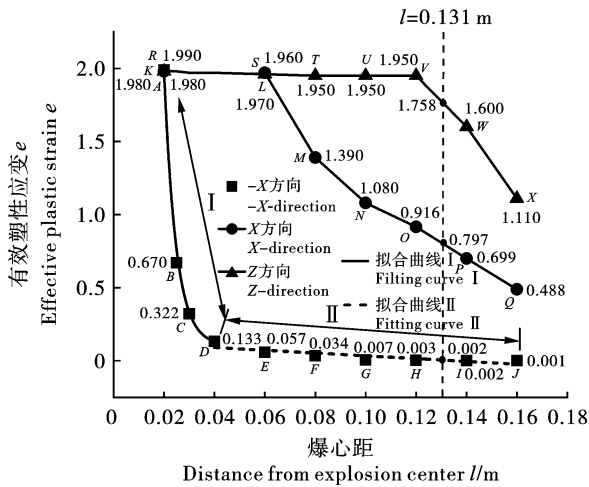


图 16 有效塑性应变随三向爆心距变化曲线

Fig. 16 Effective plastic strain variation curve with detonation center distance in three way

从图 16 中可以知道,随着爆心距增加,有效塑性应变呈现降低趋势。在 $-X$ 方向(垂直洞壁朝向围岩侧)的有效塑性应变呈现两个阶段,第一个阶段:爆心距 0.02 ~ 0.04 m,塑性应变呈指数函数迅速下降,拟合函数见公式(11);第二个阶段:爆心距 0.04 ~ 0.16 m,塑性应变呈线性函数缓慢下降,拟合函数见公式(12)。在 Z 方向(沿洞壁线朝向临空侧)和 X 方向(垂直洞壁朝向临空侧)的有效塑性应变先趋于平稳后快速下降。

$$e_1 = 0.11 + 128 \times 2.37l_1 \quad (11)$$

$$e_2 = 0.13 - 0.95l_2 \quad (12)$$

总体 Z 方向有效塑性应变 $> X$ 方向有效塑性应变 $>> -X$ 方向有效塑性应变,这是由于,孤石光面爆破与传统隧洞光面爆破相比,多了沿洞壁轮廓线方向上的临空面,而爆生产物更倾向于往抵抗小的方向作用,因此有效塑性应变在 Z 方向上最大,在 $-X$ 方向最小。

从能量角度看,塑性应变越大,消耗的能量越大,爆炸产生总能量不变,在朝向临空面 Z 和 X 方

向消耗的能量更多,而在 $-X$ 方向消耗的能量小,导致对围岩的损伤作用小。以围岩最大损伤 0.131 m 为标准,可以从图 16 曲线上反推出 $e - x = 0.002$, $ex = 0.797$, $ez = 1.758$,从而可以计算出 Z 方向对 X 方向的有效塑性应变下降率为 54.7%,这与常规隧洞光面爆破对孤石光面爆破最大围岩损伤深度下降率 53% ~ 82% 基本一致。

4 结论

基于 S-ALE 算法,开展不同线装药密度和炮孔间距对孤石光面爆破围岩损伤的正交数值模拟试验,可以得出如下主要结论:

(1) 孤石的围岩损伤程度随爆心距增大呈现“反 S”型下降,并给出相应拟合公式,这与常规的光面爆破围岩损伤分布规律基本一致。

(2) 围岩最大损伤深度随线装药密度呈线性增大变化,并给出相应的拟合公式,而围岩最大损伤深度随炮孔间距呈波动变化,分别在孔距为 0.36 m 和 0.40 m 达到最大值和最小值;围岩损伤变化对线装药密度的敏感性远高于对炮孔间距;在考虑爆破效果和炸药量的情况下,给出了最优的爆破参数:线装药密度为 0.30 kg/m(装药不耦合系数 1.43)、炮孔间距为 0.40 m。

(3) 从塑性应变分析知道,靠围岩方向的塑性应变随爆心距增大呈现两个下降阶段:指数下降阶段和线性缓慢下降阶段;由于孤石大临空面积的特性,围岩最大损伤深度比常规光面爆破更小,其下降率 53% ~ 82%,而常规光面爆破朝临空面方向的塑性应变对沿洞轮廓线朝临空面方向的塑性应变下降率为 54.7%,两者对比基本一致。

参考文献 (References)

- [1] 宋 威. 地铁隧道孤石深孔爆破效果评估及孔网参数优化方法[D]. 北京:北京交通大学,2020.
- [1] SONG Wei. Evaluation of boulder deep hole blasting effect and optimization method of hole network parameters in metro tunnel [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [2] 衣利伟,黄两宜,曹 勇,等. 微动探测技术结合深孔爆破在处理盾构孤石中的应用[J]. 地下空间与工程学报,2021,17(S2):884-891.
- [2] YI Li-wei, HUANG Liang-yi, CAO Yong, et al. Application of fretting detection technology combined with deep hole blasting in treatment of shield soulder[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(S2):884-891. (in Chinese)

- [3] ZHANG Zhi-qiang, LI Yong-long, WANG Shuo, et al. Assessing and controlling of boulder deep-hole blasting-induced vibrations to minimize impacts to a neighboring metro shaft[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2021, 21(2): 1-20, 66.
- [4] MIAO Yu-song, LI Xiao-jie, KONG Liang, et al. Study on the symmetric bilinear initiating technique of deep-hole boulder blasting in the TBM tunnel excavation[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2021, 111(5): 103871.
- [5] 孙非凡. 盾构施工隧道孤石爆破法处理研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [5] SUN Fei-fan. Research on boulder blasting treatment of shield tunnel[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2023. (in Chinese)
- [6] 申涛, 罗宁, 戚福州, 等. 切缝药包岩石巷道光面爆破数值模拟与优化研究[J]. 采矿与安全工程学报, 2020, 37(4): 674-680.
- [6] SHEN Tao, LUO Ning, QI Fu-zhou, et al. Numerical simulation and optimization of smooth blasting in rock roadway with split-tube charge holder[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2020, 37(4): 674-680. (in Chinese)
- [7] 邓永兴, 张中雷, 管志强, 等. 螺旋管聚能药包根底光面爆破机理研究及应用[J]. 爆炸与冲击, 2020, 40(1): 92-99.
- [7] DENG Yong-xing, ZHANG Zhong-lei, GUAN Zhi-qiang, et al. Research and application of root smooth blasting mechanism of shaped charge in spiral tube[J]. Explosion and Shock Waves, 2020, 40(1): 92-99. (in Chinese)
- [8] 付玉华, 李夕兵, 董陇军. 损伤条件下深部岩体巷道光面爆破参数研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(5): 1420-1426.
- [8] FU Yu-hua, LI Xi-bing, DONG Long-jun. Analysis of smooth blasting parameters for tunnels in deep damaged rock mass[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(5): 1420-1426. (in Chinese)
- [9] YANG Ren-shu, FANG Shi-zheng, YANG Ai-yun, et al. In situ stress effects on smooth blasting: model test and analysis[J]. Shock and Vibration, 2020, 2020: 1-14.
- [10] 范勇, 孙金山, 贾永胜, 等. 高地应力硐室光面爆破孔间应力相互作用与成缝机制[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(6): 1352-1365.
- [10] FAN Yong, SUN Jin-shan, JIA Yong-sheng, et al. Stress interaction and crack penetration mechanism between smooth blasting holes for tunnel excavation under high in-situ stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2023, 42(6): 1352-1365. (in Chinese)
- [11] 高启栋, 卢文波, 杨招伟, 等. 水平光面爆破激发地震波的成分及衰减特征[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(8): 170-182.
- [11] GAO Qi-dong, LU Wen-bo, YANG Zhao-wei, et al. Components and attenuation of seismic waves induced by horizontal smooth blasting[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(8): 170-182. (in Chinese)
- [12] 夏文俊, 卢文波, 陈明, 等. 白鹤滩坝址柱状节理玄武岩爆破损伤质点峰值振速安全阈值研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S1): 2997-3007.
- [12] XIA Wen-jun, LU Wen-bo, CHEN Ming, et al. Study on safety threshold of peak particle velocity about blasting damage of columnar jointed basalt rock mass in Baihetan dam site[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1): 2997-3007. (in Chinese)
- [13] 满轲, 刘晓丽. 周边空孔效应对爆破振速及围岩损伤的影响研究[J]. 工程力学, 2020, 37(11): 127-134, 184.
- [13] MAN Ke, LIU Xiao-li. The effect of surrounding empty holes on the blasting velocity and damaged zones[J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(11): 127-134, 184. (in Chinese)
- [14] FENG Xiao-mei, ZHUANG Jin-zhao, JU Jin-san, JU J, et al. Smooth blasting hole spacing and smooth surface layer depth optimization[J]. Advanced Science Letters, 2011, 4(8-10): 2703-2707.
- [15] 罗志光, 张长亮, 陈力华, 等. 公路隧道不耦合装药光面爆破现场试验[J]. 地下空间与工程学报, 2017, 13(S2): 578-584.
- [15] LUO Zhi-guang, ZHANG Chang-liang, CHEN Li-hua, et al. Field trial of uncoupled charge smooth blasting for highway tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2017, 13(S2): 578-584. (in Chinese)
- [16] LI Xin-ping, LV Jun-lin, HUANG Jun-hong, et al. Numerical simulation research of smooth wall blasting using the timing sequence control method under different primary blast hole shapes[J]. Shock and Vibration, 2019, 2019: 1-16.
- [17] WANG J, CAO A, LIU J, et al. Numerical simulation of rock mass structure effect on tunnel smooth blasting quality: A Case Study[J]. Applied Sciences, 2021, 11(22): 10761-10761.
- [18] 陈玉, 黄国栋, 马龙浩, 等. 砂岩隧道全断面光面爆破一次成形技术研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(S1): 283-290.
- [18] CHEN Yu, HUANG Guo-dong, MA Long-hao, et al. Study on one-time forming technology of full-face smooth blasting in sandstone tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2021, 17(S1): 283-290. (in Chinese)