

DOI: 10.11883/bzycj-2024-0254

马蹄形隧道拱脚周边孔爆破围岩的损伤特征*

徐帮树¹, 杜念伟¹, 王帅帅², 周 韧¹, 高 轩², 张万志^{1,3}

(1. 山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南 250000;

2. 中交第二公路工程局有限公司设计研究总院, 陕西 西安 710100;

3. 西华大学建筑与土木工程学院, 四川 成都 610039)

摘要: 为解决隧道拱脚周边孔爆破难成形以致超挖和掌子面底部欠挖问题, 研究了马蹄形隧道拱脚周边孔爆破围岩的损伤特征。依托方山隧道, 建立了拱脚周边孔的三维数值模型, 模拟了拱脚处围岩的损伤情况, 分析了爆破效果与自由面形状、装药量以及空孔偏转角的映射关系, 并通过现场试验进行了验证。结果表明: 自由面形状显著影响围岩的损伤范围和炸药的能量利用率, 相较于平直自由面, 凹形自由面的损伤范围小, 岩石的夹制作用更大, 炸药爆破难以有效破碎围岩, 能量利用率仅为 78%; 爆破效果随着装药量的增加呈先增大后减小的趋势, 当拱脚周边孔的线装药密度为 0.624 kg/m 时, 爆破效果最佳; 此外, 通过布设空孔和调整空孔偏转角, 可以改善拱脚周边孔的爆破效果。采用优化后的爆破参数, 拱脚处最大线性超挖量降低了 53.1%, 隧道轮廓成型平整。

关键词: 隧道爆破; 围岩损伤; 拱脚周边孔; 凹形自由面; 空孔偏转角

中图分类号: U455.41

国标学科代码: 1303520

文献标志码: A

Blasting damage characteristics of surrounding rock around the arch foot of horseshoe tunnel

XU Bangshu¹, DU Nianwei¹, WANG Shuaishuai², ZHOU Ren¹, GAO Xuan², ZHANG Wanzhi^{1,3}

(1. School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan 250000, Shandong, China;

2. CCCC-SHEC Design & Research Institute General, Xi'an 710100, Shaanxi, China;

3. School of Architecture and Civil Engineering, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan, China)

Abstract: To address the issues of over-excavation at the tunnel arch foot due to the difficulty of forming the perimeter hole blasting and under-excavation at the tunnel face bottom, the damage characteristics of surrounding rock caused by perimeter hole blasting at the arch foot of a horseshoe-shaped tunnel were studied through a combination of theoretical calculations and numerical simulations. On the theoretical level, an in-depth analysis of the stress distribution and crack radius in the arch foot area was conducted based on the principles of blasting mechanics, and the theoretical charge length for the perimeter holes at the arch foot was derived. Building on this, a 3D numerical model of the perimeter holes at the arch foot was established through numerical simulation. During the modeling process, the damage evolution in the surrounding rock during blasting was simulated by introducing an appropriate damage model, and post-blast damage cloud maps were generated. By comparing the damage cloud maps under different conditions, the relationship between blasting effectiveness and parameters such as free surface shape, charge amount, and void deflection angle was analyzed, further revealing the mechanisms by which these parameters influence the blasting formation results, which were validated through field experiments. The research results indicate that the shape of the free surface significantly impacts the extent of surrounding rock damage and the energy

* 收稿日期: 2024-07-24; 修回日期: 2024-09-03

基金项目: 国家自然科学基金(50909056, 52379102); 山东省自然科学基金(ZR2014EEM014)

第一作者: 徐帮树(1974—), 男, 博士, 副教授, xubangshu@sdu.edu.cn

通信作者: 杜念伟(2000—), 男, 硕士研究生, 1070735015@qq.com

utilization efficiency of explosives. A concave free surface results in a smaller damage range compared to a flat free surface, with greater rock confinement, making it difficult for the explosives to effectively fracture the surrounding rock, leading to an energy utilization rate of only 78%. The blasting effectiveness shows a trend of first increasing and then decreasing with the increase in charge amount, with the optimal blasting effectiveness achieved when the linear charge density of the perimeter holes at the arch foot is 0.624. Additionally, by setting voids and adjusting the void deflection angle, the blasting effectiveness of the perimeter holes at the arch foot can be improved. With the optimized blasting parameters, the maximum linear over-excavation at the arch foot was reduced by 53.1%, resulting in a smooth tunnel contour. The research outcomes are engineeringly feasible and provide valuable insights for similar projects.

Keywords: tunnel blasting; unrounding rock damage; perimeter holes at the foot of the arch; concave free surface; deviation angle of the uncharged hole

马蹄形隧道作为主要的隧道断面形式, 具备受力性能好、空间利用率高等优点, 然而, 它也存在施工难度大、成本高、对地质条件适应性差等缺点^[1-2]。在实际的现场爆破中, 受限於地质条件、爆破参数、钻孔精度等因素, 隧道拱脚处的超欠挖问题突出。为了有效控制拱脚处超欠挖, 有必要对拱脚周边孔的爆破破岩机理展开深入的研究, 并采取相应的技术措施。因此, 明确拱脚周边孔爆破围岩损伤特征, 对提高爆破效果尤为重要^[3-5]。

目前, 针对周边孔爆破围岩损伤范围较大的问题, 国内外学者从装药参数、空孔布设两方面展开了研究, 并取得了丰硕的研究成果。在装药参数方面, 马乐等^[6]基于隧道爆破后拱脚位置出现的超欠挖和盲炮问题, 提出了减小周边眼间距、增加内圈眼数量等周边孔优化措施, 解决了边墙超欠挖、盲炮等问题。杨赛群等^[7]、赵晓明等^[8]采用数值模拟的方法, 分析了光爆层厚度对光面爆破效果的影响, 优化了光爆层厚度和周边孔设计方案, 并将其运用于现场试验验证。周磊等^[9]基于不同方位的节理和裂隙对围岩强度的影响, 研究了隧道拱脚处裂纹缺陷对围岩稳定性的影响, 发现隧道拱脚处裂纹对围岩稳定性的影响最为显著。Chaboche^[10]提出了宏观连续力学损伤模型, 用于研究岩石的塑性和损伤的弹塑性理论。李盟等^[11]针对隧道周边孔不同位置的径向裂纹扩展和原生裂纹的止裂作用进行了研究, 得到了炮孔裂纹的扩展规律。汪海波等^[12]针对立井掘进施工中爆破效率低的问题, 提出了立井爆破参数的改进方法, 并通过数值计算验证了参数的合理性。杨仁树等^[13]采用动态焦散线的实验方法, 研究了不同孔径下爆生裂纹的扩展轨迹和扩展速度的变化规律。在空孔布设方面, Cho 等^[14]发现切口和圆形导向孔对控制爆破裂纹扩展都是有效的, 但切口导向孔的裂纹生成时间更早且断裂面更平滑。蒲传金等^[15]模拟研究了不同孔距下空孔对爆破裂纹扩展的影响, 探讨了双孔爆破裂纹的扩展规律。牛永朕等^[16]分析了空孔对裂纹扩展的作用机理, 为裂纹的扩展规律提供了理论支撑。

目前, 针对拱脚周边孔爆破的围岩损伤特征, 国内外还缺乏系统性的研究。鉴于此, 本研究依托方山隧道工程, 结合数值模拟和现场试验, 研究隧道拱脚周边孔爆破围岩损伤与自由面形式、装药量和空孔偏转角的关系, 提出适用于大断面爆破的拱脚周边孔爆破参数。通过对比爆破前后的围岩损伤范围, 验证所提出的爆破参数的适用性, 以期为类似的隧道爆破提供参考。

1 周边孔装药参数计算方法

考虑到针对拱脚周边孔的研究较少, 本研究结合爆破裂纹和炮孔参数, 提出了一种周边孔装药量的计算方法。拱脚周边孔的单孔装药量可以通过柱状药包的单位长度质量乘以炮孔的装药长度计算:

$$Q = \frac{\pi d_c^2 \rho}{4} l_c \quad (1)$$

式中: Q 为拱脚周边孔单孔装药量, l_c 为装药长度, d_c 为装药直径, ρ 为密度。由式 (1) 可知, 当装药直径 d_c 和炸药密度 ρ 确定后, 可通过优化装药长度 l_c 来改变拱脚周边孔装药量。

爆破荷载作用于孔壁的最大初始压力^[17]为:

$$p_0 = \frac{\rho D^2}{8} \left(\frac{d_c}{d_b} \right)^6 n \quad (2)$$

式中: p_0 为最大初始压力; D 为炸药爆速; d_b 为炮孔直径; n 为压力增大系数, 一般取 8~11。

假定空气完全充满炮孔后作用于孔壁的压力为空气段的应力峰值(p_{s0})^[18], 则:

$$p_{s0} = p_0 \left(\frac{l_c}{l} \right)^{\frac{4}{3}} = \frac{\rho D^2 n}{8} \left(\frac{d_c}{d_b} \right)^6 \left(\frac{l_c}{l} \right)^{\frac{4}{3}} \quad (3)$$

式中: l 为炮孔长度。

当采用不耦合装药且不耦合系数较小时, 裂隙圈半径 R_2 为^[19]:

$$R_2 = r_b \left(\frac{p_0 A}{\sqrt{2} \sigma_{cd}} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \left(\frac{\sigma_{cd}}{\sigma_{td}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (4)$$

式中: r_b 为炮孔半径; σ_{td} 、 σ_{cd} 分别为岩石单轴的动态抗拉和抗压强度; α 为冲击波衰减指数, $\alpha=2+\mu_d/(1-\mu_d)$, μ_d 为岩石的动态泊松比; β 为应力波衰减指数, $\beta=2-\mu_d/(1-\mu_d)$ 。 A 可表示为:

$$A = [(1+\lambda)^2 + (1+\lambda) + 2\mu_d(1-\mu_d)(1-\lambda)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

式中: λ 为侧压力系数, $\lambda=\mu_d/(1-\mu_d)$ 。

为了保证炸药起爆后产生的裂纹能够相互贯通, 拱脚处相邻周边孔的裂隙圈半径应该相交, 即满足 $2R_2 > b$, 其中 b 为周边孔孔距, 则装药长度可表示为:

$$l_c > \eta l \left\{ \frac{8\sqrt{2}\sigma_{cd}}{\rho D^2 n A} \left(\frac{d_b}{d_c} \right)^6 \left[\frac{b}{2r_b} \left(\frac{\sigma_{td}}{\sigma_{cd}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \right]^{\alpha} \right\}^{\frac{3}{4}} \quad (6)$$

式中: η 一般取 1~2。当围岩为极软岩时, η 取 1; 当围岩为坚硬岩时, η 取 2^[20]; 对于其他情况, η 可根据岩石的坚硬情况和破碎程度线性插值确定。

2 数值模拟

2.1 爆破问题分析

试验段 K93+842.3 至 K93+857.2 的岩体为中风化花岗闪长岩, 属 IV 级围岩, 岩石坚硬且节理裂隙发育。隧道施工采用上下台阶法, 上台阶爆破的周边孔参数见表 1。采用表 1 所示的爆破参数, 爆破开挖 6 次, 出渣完成后发现隧道拱脚处围岩较破碎, 围岩平整度差, 轮廓线不规则, 如图 1 所示。可见, 左拱脚边墙超挖量过大, 最大线性超挖值为 15.4 cm, 右拱脚存在局部欠挖现象, 最大线性欠挖为 7.3 cm。考虑到拱脚处爆破效果与装药量、自由面形状密切相关, 以上述试验为基础开展数值模拟。

2.2 模型建立

为精确模拟爆破效果, 采用 ANSYS 软件进行数值模拟, 将拱脚弧形自由面简化为多边形凹形自由面(图 2(a)), 将非拱脚直线形自由面简化成平直自由面(图 2(b))。针对不同的空孔位置,

表 1 隧道的爆破参数

Table 1 Tunnel blasting parameters

炮孔分类	段别/段	孔距/m	孔数	单孔装药量/kg
周边孔	11	0.6	30	0.60
拱脚周边孔	13	0.6	2	1.65

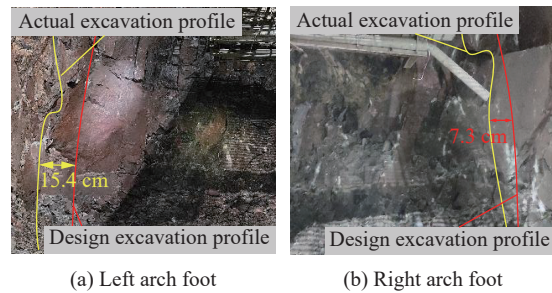


图 1 原爆破方案下隧道爆后围岩特征分布
Fig. 1 Tunnel surrounding rock characteristics under original blasting scheme

在凹形自由面的基础上, 设置了空孔偏转角 γ ^[21], 空孔对称布置在水平线两侧(图 2(c))。凹形自由面模型尺寸为 2.4 m×2.4 m×3.0 m, 平直自由面模型尺寸为 1.8 m×2.4 m×3.0 m。炮孔长度为 2.4 m, 炮孔直径为 42 mm, 炸药直径为 32 mm, 单个药卷质量为 0.3 kg。图 2 中, 红色线条区域为反射边界, 黑色线条区域为无反射边界。

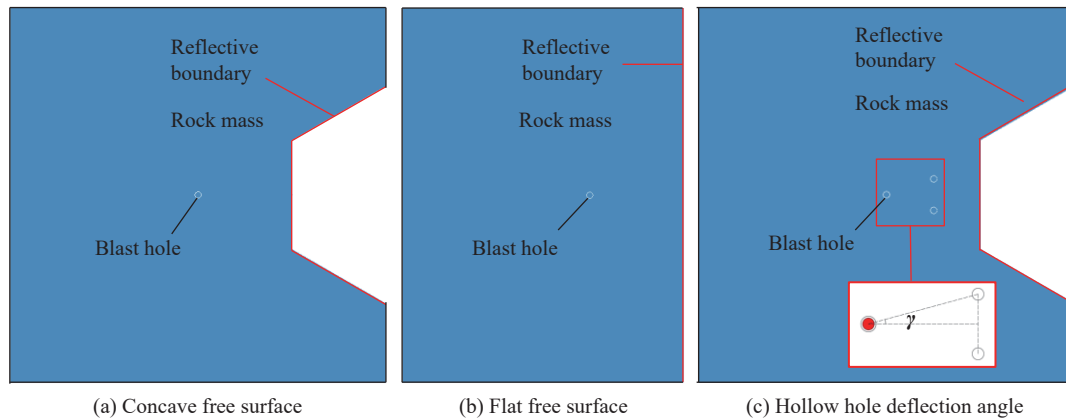


图 2 爆破的数值模型

Fig. 2 Numerical models of blasting

2.3 模型材料

RHT(Riedel-Hiermaier-Thoma)模型是由 Riedel 等^[22]基于 HJC(Holmquist-Johnson-Cook)模型提出的一种拉-压损伤模型, 与 HJC 模型不同, RHT 模型引入了 3 个极限面, 即弹性极限面、失效面及残余强度面, 以描述弹性极限、失效强度及残余强度与静水压的关系。

岩石的 RHT 模型参数、炸药的材料参数和空气的材料参数参考文献 [23], 具体的取值如表 2~4 所示, 其中: A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为 JWL 方程的状态参数, E_0 为能量密度, $C_0 \sim C_6$ 为空气状态方程的系数。

表 2 岩石的材料参数

Table 2 Material parameters of rock

密度/(kg·m ⁻³)	初始裂隙度	压碎压力/MPa	压实压力/GPa	弹性剪切模量/GPa	静态抗压强度/GPa	拉压强度比	剪压强度比
2600	0	125	6	21.9	167.8	0.04	0.21
压缩屈服面参数	拉伸屈服面参数	参考压缩应变率/s ⁻¹	参考拉伸应变率/s ⁻¹	失效压缩应变率/s ⁻¹	失效拉伸应变率/s ⁻¹	压缩应变指数	拉伸应变指数
0.53	0.7	3×10 ⁻⁵	3×10 ⁻⁶	3×10 ²⁵	3×10 ²⁵	0.026	0.007

表 3 炸药的材料参数

Table 3 Material parameters of explosive

ρ /(kg·m ⁻³)	D /(m·s ⁻¹)	A /GPa	B /GPa	R_1	R_2	ω	E_0 /(MJ·m ⁻³)
1200	3000	373	3.74	4.15	0.9	0.15	4.192

表 4 空气的材料参数

Table 4 Material parameters of air

C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	ρ /(kg·m ⁻³)	E_0 /(MJ·m ⁻³)
0	0	0	0	0.4	0.4	0	1.29	2500

2.4 模拟工况

根据式 (6), 得到装药量 $Q > 1004$ g。拱脚周边孔的单孔装药量为 900、1200、1500 和 1800 g, 装药形式采用自孔底连续装药, 孔口未堵塞。具体工况设计参数如表 5 所示, 共 9 组工况。

表 5 工况的设计参数

Table 5 Design parameters of working conditions

工况	孔深/m	装药量/kg	自由面形式	$\gamma/(\circ)$
1	2.4	1.5	平直自由面	
2	2.4	1.5	凹形自由面	
3	2.4	0.9	凹形自由面	
4	2.4	1.2	凹形自由面	
5	2.4	1.8	凹形自由面	
6	2.4	1.5	凹形自由面	0
7	2.4	1.5	凹形自由面	15
8	2.4	1.5	凹形自由面	30
9	2.4	1.5	凹形自由面	45

3 数值模拟结果分析

由于岩石损伤在空间上的不均匀性, 为了更直观地查看岩石内部的损伤情况, 通过 LS-PrePost 内置的切片功能切取 A、B、C 三个方向的截面, 如图 3 所示。通过研究这 3 个截面的损伤, 分析核心区域的损伤情况, 通过对比不同截面的损伤程度, 确定爆破效果。

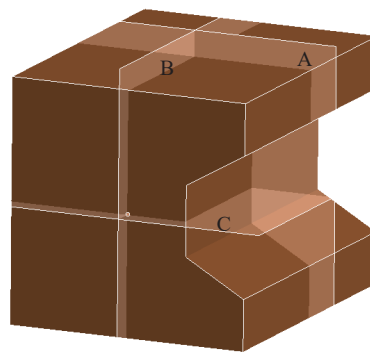


图 3 切片截面

Fig. 3 Sliced cross-section

3.1 自由面条件下围岩损伤分析

图 4 和图 5 分别显示了凹形自由面和平直自由面条件下不同截面的爆破围岩损伤云图。从图 4 可以看出: 在炮孔附近, 受冲击波的影响, 围岩损伤变量接近 1, 表明岩石已完全损伤并形成破碎区; 在自由面处, 裂纹主要向着有限的自由面方向扩展, 受反射拉伸波的作用, 自由面处的损伤范围较大。相比之下, 图 5 中的平直自由面破碎区的范围与凹形自由面相近, 但裂纹分布显著不同。在自由面处, 裂纹向整个自由面方向扩展, 造成较大的损伤范围, 且由于反射拉伸波较强, 远离自由面的围岩也受到显著损伤。图 6 对比了不同自由面条件下的围岩损伤面积, 可以看出, 凹形自由面条件下的损伤面积明显小于平直自由面。这表明凹形自由面受到围岩的夹制作用更大, 从而减少了围岩的损伤面积。因此, 自由面形状对围岩的损伤分布和范围影响显著, 凹形自由面由于面积较小, 使得岩石受拉伸作用的区域较小,

岩石的夹制效应大, 爆炸能量利用率较低; 而平直自由面能够更均匀地分散应力, 使裂纹向整个自由面方向扩展, 损伤范围更大, 从而实现较好的破碎效果。

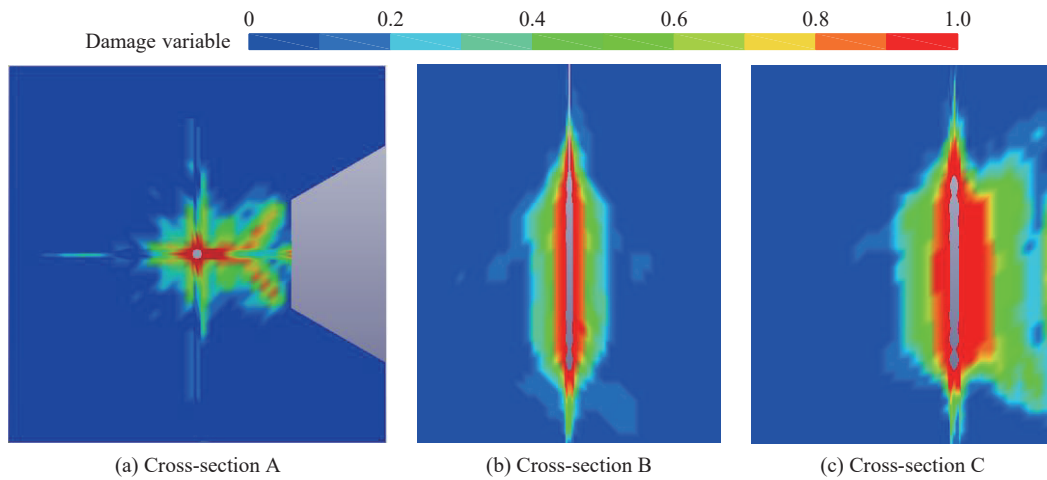


图 4 凹形自由面条件下不同截面损伤云图

Fig. 4 Damage nephogram of different sections under concave free surface condition

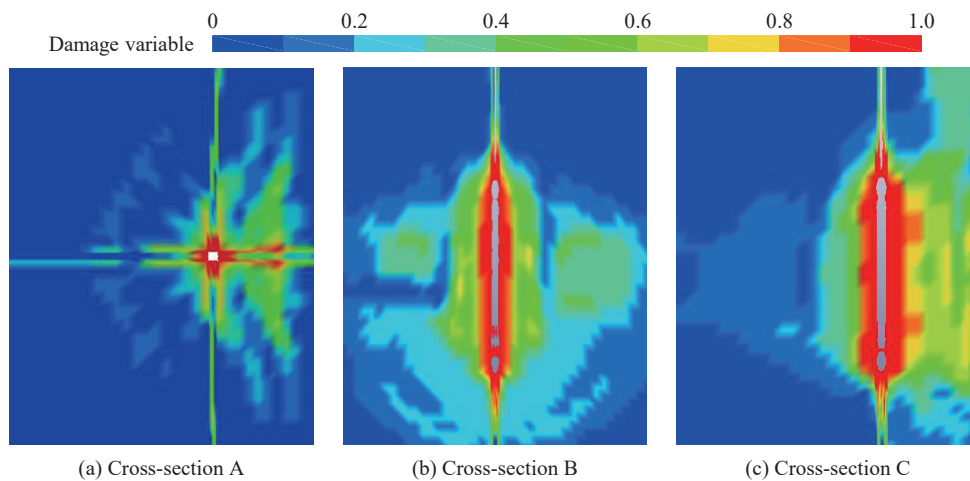


图 5 平直自由面条件下不同截面损伤云图

Fig. 5 Damage nephogram of different sections under flat free surface condition

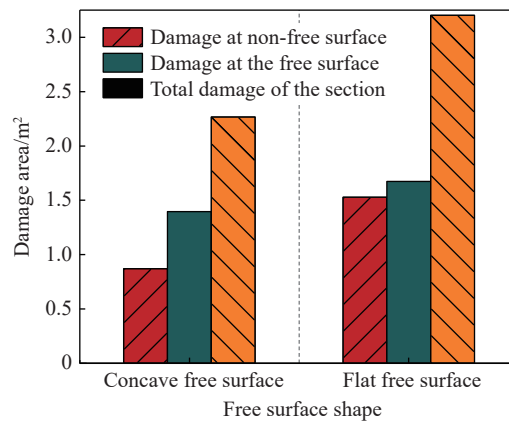


图 6 不同自由面条件下的损伤面积

Fig. 6 Damage area under different free face conditions

3.2 不同装药量条件下围岩损伤分析

为简化装药的建模过程, 前处理中并未建立炸药模型, 而是通过后处理中的初始体积分数法^[24]进行装药量修改。

图 7~9 显示了不同装药量下围岩截面 A~C 的损伤云图。随着装药量的增加, 围岩破碎区范围逐渐扩大, 裂隙区向炮孔周边扩展, 最终形成贯通裂纹。当装药量小于 1.2 kg 时, 尽管在炮孔附近产生了显著的破碎区, 但炮孔与自由面之间仍存在损伤变量小于 0.1 的区域, 裂隙未完全贯通。当装药量达到 1.8 kg 时, 裂隙区与自由面相交, 损伤区也显著扩大。如图 10 所示, 装药量对围岩损伤面积有显著影响。随着装药量的增加, 损伤面积逐渐增大, 当装药量为 1.8 kg 时, 岩体损伤面积达到最大, 但非自由面

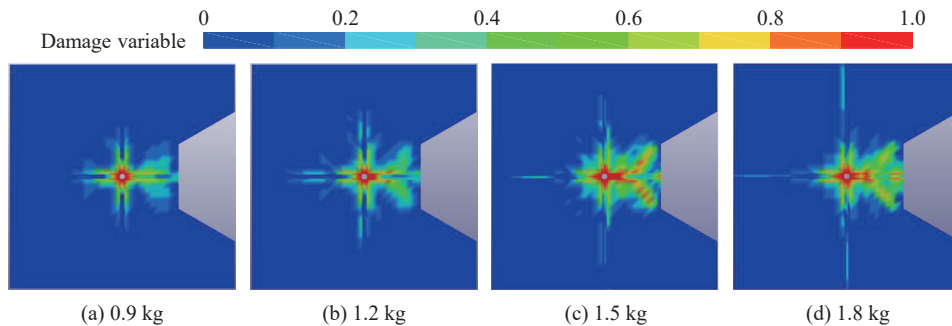


图 7 不同装药量条件下截面 A 的损伤云图

Fig. 7 Damage nephogram of cross-section A under different charge conditions

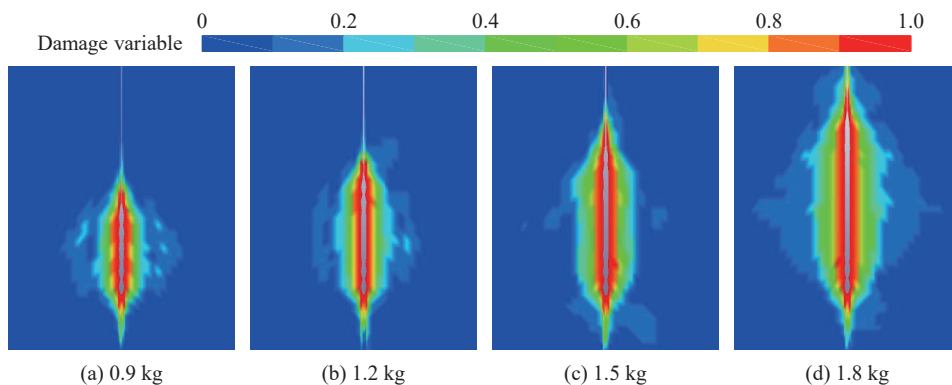


图 8 不同装药量条件下截面 B 的损伤云图

Fig. 8 Damage nephogram of cross-section B under different charge conditions

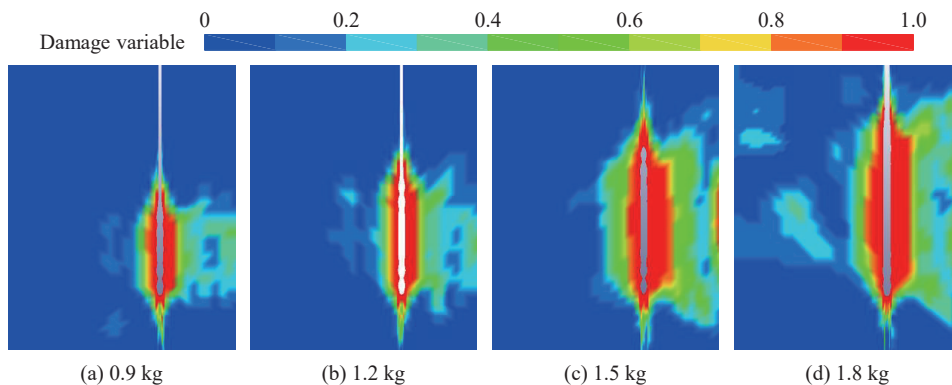


图 9 不同装药量条件下截面 C 的损伤云图

Fig. 9 Damage nephogram of cross-section C under different charge conditions

处的损伤面积为 1.2 kg 时的 2 倍, 容易出现较大超挖。因此, 装药量是决定破碎效果的关键因素。通过合理控制装药量, 可以优化围岩的破碎效果, 减少不必要的围岩扰动, 提高能量利用率。

3.3 不同空孔偏转角条件下围岩损伤分析

图 11~13 显示了在不同空孔偏转角条件下围岩截面 A~C 的损伤云图。可以看出, 空孔对裂纹的扩展具有显著的导向作用。由于空孔周围应力集中, 裂纹优先沿着炮孔与空孔连线方向扩展, 在空孔附近, 裂纹发生转向, 增加了自由面处的围岩损伤。随着空孔偏转角 γ 的逐渐增大, 自由面处的围岩损伤相应增加, 但当空孔偏转角增大到一定程度时, 空孔的导向作用开始减弱, 围岩损伤减小。

这表明适当调整空孔偏转角度可以优化自由面处的损伤分布, 从而提高爆破效果。不同空孔偏转角条件下的围岩损伤面积如图 14 所示, 随着空孔偏转角的增加, 自由面处围岩损伤有所增加, 但当偏转角度超过 30° 时, 损伤面积开始减小。因此, 选择合适的偏转角度能够最大化自由面处的损伤面积, 进而提升爆破效果。通过对比图 10 和图 14 可以发现, 增设空孔后, 改善了自由面处围岩的损伤情况, 非自由面处损伤面积略有减小, 进一步提升了拱脚区域的爆破效果。因此, 围岩损伤随空孔偏转角的增加呈现出先增大后减小的趋势, 合理利用空孔的导向作用, 可以进一步优化拱脚处破碎效果。

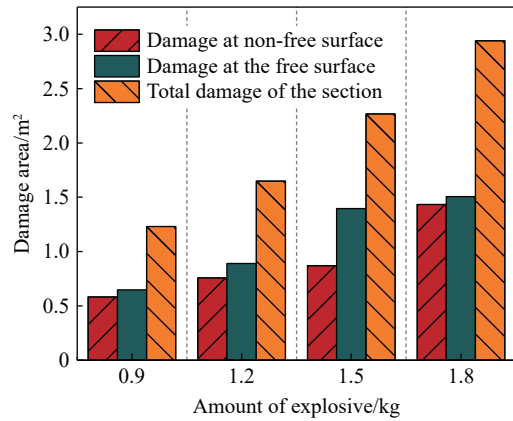


图 10 不同装药量条件下的损伤面积

Fig. 10 Damage area under different charge conditions

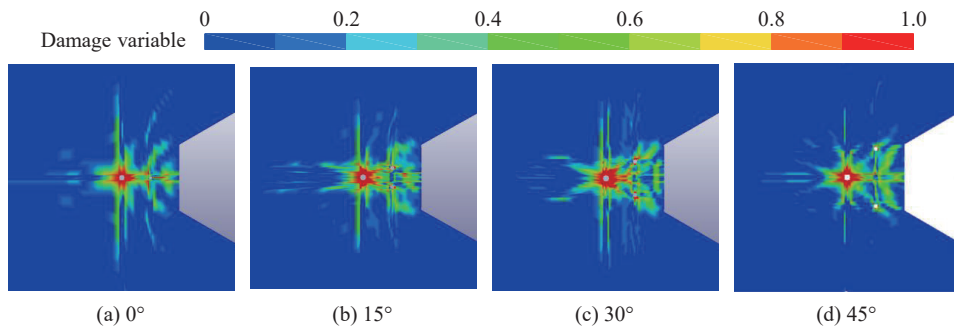


图 11 不同空孔偏转角条件下截面 A 的损伤云图

Fig. 11 Damage nephogram of section A under various hollow hole deflection angle conditions

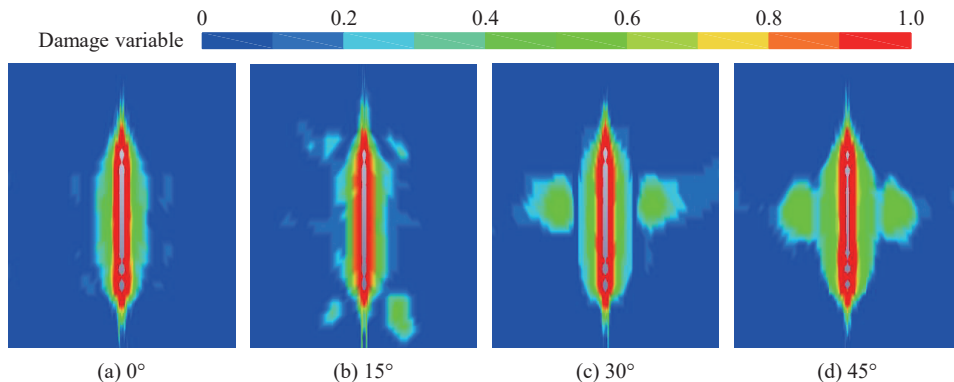


图 12 不同空孔偏转角条件下截面 B 的损伤云图

Fig. 12 Damage nephogram of section B under various hollow hole deflection angle conditions

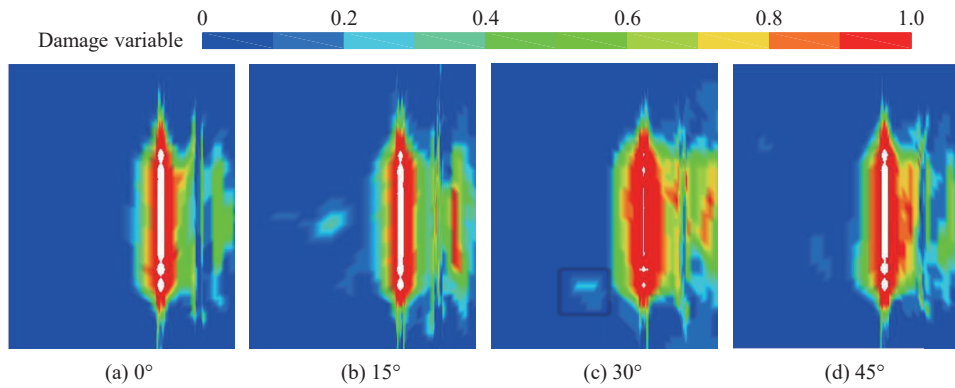


图 13 不同空孔偏转角条件下截面 C 的损伤云图

Fig. 13 Damage nephogram of section C under various hollow hole deflection angle conditions

综上所述, 不同形状的自由面对围岩损伤效果有显著影响, 特别是凹形自由面具有明显的夹制作用。随着装药量的增加, 炮孔周围和自由面处围岩的损伤逐渐变大, 围岩破碎程度更充分, 但过大的装药量会导致非自由面处围岩损伤显著增加。在炮孔长度为 2.4 m 时, 选取 1.5 kg 的炸药, 即拱脚周边孔线装药密度为 0.624 kg/m, 可以充分利用爆破应力波的拉伸破坏, 同时避免对围岩造成过大的损伤。为了进一步提高爆破效果, 可在炮孔与周边孔连线上增设空孔。空孔对爆破裂纹的扩展具有明显的导向作用, 能增大空孔及自由面处围岩的损伤范围。当空孔偏转角为 30° 时, 爆破效果最佳, 因此, 选择 30° 作为最佳空孔偏转角, 并进行现场验证。

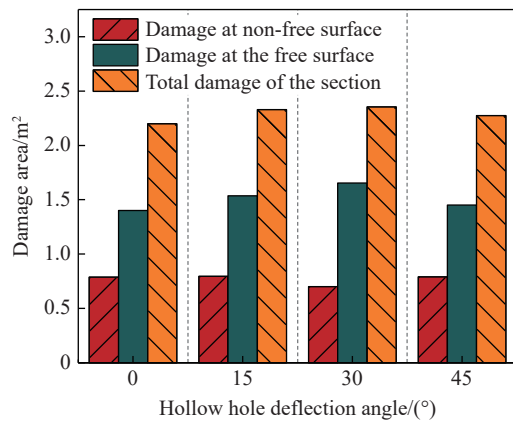


图 14 不同空孔偏转角条件下的损伤面积

Fig. 14 Damage area under different hole deflection angle conditions

4 现场应用与分析

4.1 工程概况

方山隧道进口位于临沂市平邑县方山村以南约 800 m 处。隧道施工采用上下台阶法, 内部为单向坡。左线起讫桩号 ZK93+322~ZK94+188, 全长 866 m; 右线起讫桩号 K93+323~K94+153, 全长 830 m; 隧道最大埋深 106 m, 最小埋深 8 m; IV 级围岩断面尺寸为 11.50 m×5.0 m, 断面面积约为 110.66 m², 形状为马蹄形, 如图 15 所示。隧址区属变质岩裂隙含水区, 场区地形较陡, 水文地质条件简单, 为低山丘陵地貌区, 地表植被发育一般, 但大部分区域基岩埋深较浅, 地表风化侵蚀严重。通过地勘资料和现场实际调研, 发现主要试验段岩性是中风化花岗闪长岩, 节理裂隙发育, 岩体较完整, 岩体基本质量指标 BQ 值在 267.5~337.5 之间, 属于较硬的岩石类型。

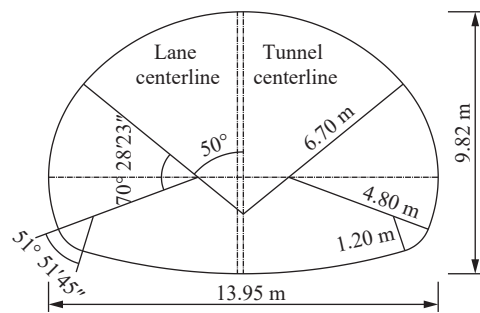


图 15 IV 级围岩隧道标准断面(单位: m)

Fig. 15 The standard cross section of tunnel in class IV rock mass (unit: m)

4.2 爆破方案优化

基于隧道试验段的爆破破坏机理和数值模拟结果, 优化了原有爆破方案的周边孔参数。优化内容包括将周边孔孔距从 60 cm 减小至 55 cm, 并将拱脚周边孔的装药量从 1.65 kg 减少至 1.5 kg。此外, 在拱脚处增设空孔, 空孔的深度和直径与装药孔保持一致。图 16 为优化后具体的爆破方案。为确保试验的一致性, 钻孔前测量员严格按照炮孔布置图进行定位, 并严控打孔过程, 以减少其他因素引起的误差。

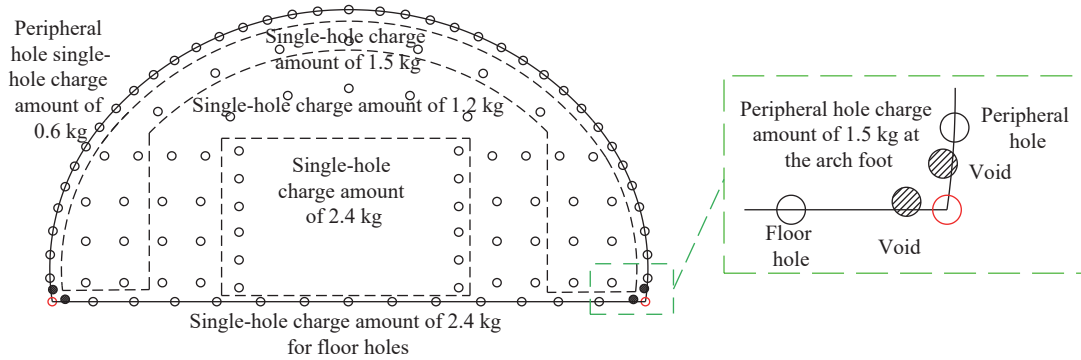
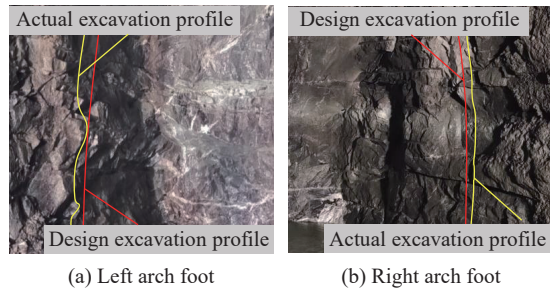


图 16 炮孔布置

Fig. 16 Layout of blasthole

4.3 爆后围岩特征

在试验段 K93+859.6~K93+880 采用优化的拱脚处爆破参数, 掘进开挖 8 次, K93+869.6 断面爆后拱脚处的围岩特征如图 17 所示。对比图 1 和图 17 可见, 优化后的爆破参数显著提升了爆破效果。爆后拱脚处轮廓成型较好, 围岩平整度和半孔率显著提高, 破碎程度有所减弱, 但受节理裂隙的影响, 仍存在少量超挖。总体而言, 尽管受一些不可避免的因素影响, 但优化后的爆破参数显著改善了爆破效果, 提高了工程的安全性和稳定性。



(a) Left arch foot (b) Right arch foot

图 17 爆后围岩情况

Fig. 17 Surrounding rock condition after blasting

通过对 3 次典型爆破开挖实例的分析, 图 18

显示了各断面在爆破后的毛洞超欠挖情况。结果表明, 采用优化后的掘进爆破参数, 断面的最大线性超挖及超挖面积均显著减小。具体来说, 优化后的 3 次典型实例中, 拱脚处的最大线性超挖分别为 8.1、7.9 和 7.6 cm, 与原爆破参数下的拱脚超欠挖值相比, 其均值减少了 53.1%。拱肩处最大线性超欠挖分别为 12.3、12.1 和 11.6 cm, 与原爆破方案相比, 其均值减小了 43.7%。3 次爆破的超欠挖面积分别为 3.89、3.34 和 3.51 m², 与原爆破参数下断面超挖面积相比, 其均值减小了 48.9%。

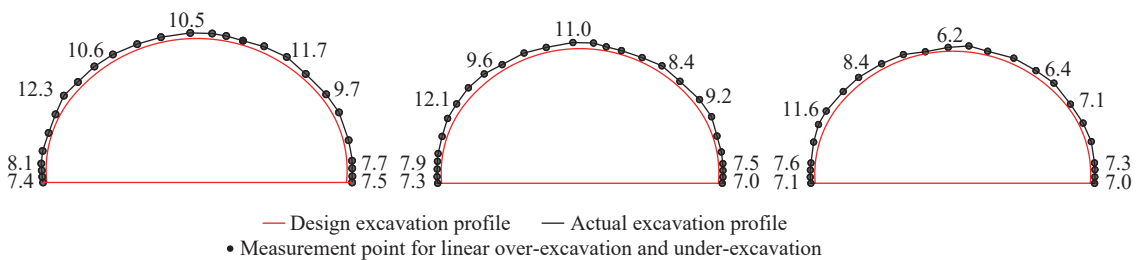


图 18 爆后断面的超欠挖(单位: cm)

Fig. 18 Over-excitation of the blasting face (unit: cm)

5 结 论

(1) 针对方山隧道试验段在原爆破参数下存在隧道爆破难成形、超挖、掌子面底部欠挖及轮廓线不平整等工程问题, 采用数值模拟、理论分析和现场试验的方法进行了深入研究, 分析了马蹄形隧道拱脚周边孔爆破围岩损伤特征, 并优化了拱脚周边孔的爆破参数。现场掘进试验验证了优化后参数在实际应用中的适用性。

(2) 通过爆破围岩的损伤分析, 自由面形状对围岩损伤范围存在显著影响。相比于平直自由面, 凹形自由面的损伤范围较小, 夹制作用较大, 能量利用率较低。装药量是影响爆破效果的重要因素, 装药量的增加显著扩大了损伤范围, 但过大的装药量也导致了能量浪费, 合理控制装药量是优化爆破效果的关键。此外, 随着空孔偏转角度的增加, 围岩损伤表现出先增后减的趋势, 空孔的设置有助于引导裂纹扩展, 增大自由面处的围岩损伤, 进一步改善爆破效果。

(3) 采用优化后的爆破参数进行现场验证, 试验段隧道拱脚处围岩平整度显著提高, 最大线性超挖均值减小了 53.1%, 断面超挖面积均值减小了 48.9%。

研究结果对类似工程具有重要的参考价值, 为进一步优化隧道爆破设计提供了有益的指导。

参考文献:

- [1] 潘强, 张继春, 石洪超, 等. 单孔不耦合装药爆破的岩体损伤分布特征研究 [J]. *振动与冲击*, 2019, 38(18): 264–269. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.18.037.
PAN Q, ZHANG J C, SHI H C, et al. Distribution characteristics of the rock mass damage caused by single-hole decoupling charge blasting [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2019, 38(18): 264–269. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2019.18.037.
- [2] 王新宇, 邵珠山. 马蹄形隧道初期支护内力反演分析的理论研究 [J]. *现代隧道技术*, 2014, 51(6): 83–88. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2014.06.014.
WANG X Y, SHAO Z S. Theoretical research on the inverse analysis of the internal force of the primary support in a horseshoe tunnel [J]. *Modern Tunnelling Technology*, 2014, 51(6): 83–88. DOI: 10.13807/j.cnki.mtt.2014.06.014.
- [3] 徐帮树, 张万志, 石伟航, 等. 节理裂隙层状岩体隧道掘进爆破参数试验研究 [J]. *中国矿业大学学报*, 2019, 48(6): 1248–1255. DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.001080.
XU B S, ZHANG W Z, SHI W H, et al. Experimental study of parameters of tunneling blasting in jointed layered rock mass [J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2019, 48(6): 1248–1255. DOI: 10.13247/j.cnki.jcumt.001080.
- [4] 李启月, 魏新傲, 郑静, 等. IV 级围岩大断面隧道全断面开挖轮廓控制研究与应用 [J]. *公路交通科技*, 2020, 37(3): 88–95. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.03.011.
LI Q Y, WEI X A, ZHENG J, et al. Study and application of profile control for full section excavation of large section tunnel in grade IV surrounding rock [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2020, 37(3): 88–95. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0268.2020.03.011.
- [5] 龚斌, 唐春安. 马蹄形隧道围岩非线性变形破坏的数值模拟研究 [J]. *水利与建筑工程学报*, 2019, 17(3): 28–32, 54. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1144.2019.03.004.
GONG B, TANG C A. Numerical simulation of the nonlinear deformation and failure of surrounding rocks around horseshoe tunnel [J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2019, 17(3): 28–32, 54. DOI: 10.3969/j.issn.1672-1144.2019.03.004.
- [6] 马乐, 张万志, 刘成龙, 等. III 级硬岩隧道全断面光面爆破试验研究 [J]. *爆破*, 2023, 40(3): 46–51, 67. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2023.03.007.
MA L, ZHANG W Z, LIU C L, et al. Experimental study on full face smooth blasting of tunnel in class III hard rock [J]. *Blasting*, 2023, 40(3): 46–51, 67. DOI: 10.3963/j.issn.1001-487X.2023.03.007.
- [7] 杨赛群, 李洪伟, 吴立辉, 等. 影响光面爆破效果和空孔处能量分布的试验研究 [J]. *工程爆破*, 2022, 28(6): 58–65. DOI: 10.19931/j.EB.20210311.
YANG S Q, LI H W, WU L H, et al. Experimental study on effect of smooth blasting and energy distribution at empty

- hole [J]. *Engineering Blasting*, 2022, 28(6): 58–65. DOI: 10.19931/j.EB.20210311.
- [8] 赵晓明, 杨玉民, 蒋楠, 等. 深埋引水隧洞光面爆破周边孔装药结构优化试验研究 [J]. *高压物理学报*, 2022, 36(4): 045301. DOI: 10.11858/gywlxb.20220503.
- ZHAO X M, YANG Y M, JIANG N, et al. Optimization of charging structure of surrounding holes in smooth blasting of deep diversion tunnel [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2022, 36(4): 045301. DOI: 10.11858/gywlxb.20220503.
- [9] 周磊, 朱哲明, 刘邦, 等. 马蹄形隧道拱脚裂纹对围岩稳定性的影响 [J]. *岩土工程学报*, 2020, 42(1): 91–99. DOI: 10.11779/CJGE202001010.
- ZHOU L, ZHU Z M, LIU B, et al. Influence of arch foot crack on stability of surrounding rock mass in horseshoe-shaped tunnels [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2020, 42(1): 91–99. DOI: 10.11779/CJGE202001010.
- [10] CHABOCHE J L. Development of continuum damage mechanics for elastic solids sustaining anisotropic and unilateral damage [J]. *International Journal of Damage Mechanics*, 1993, 2(4): 311–329. DOI: 10.1177/105678959300200401.
- [11] 李盟, 朱哲明, 肖定军, 等. 煤矿岩巷爆破掘进过程中周边眼对裂纹扩展止裂机理 [J]. *煤炭学报*, 2017, 42(7): 1691–1699. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.1226.
- LI M, ZHU Z M, XIAO D J, et al. Mechanism of crack arrest by peripheral holes during mine rock roadway excavation under blasting [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(7): 1691–1699. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2016.1226.
- [12] 汪海波, 宗琦, 赵要才. 立井大直径中空孔直眼掏槽爆炸应力场数值模拟分析与应用 [J]. *岩石力学与工程学报*, 2015, 34(S1): 3223–3229. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0296.
- WANG H B, ZONG Q, ZHAO Y C. Numerical analysis and application of large diameter cavity parallel cut blasting stress field in vertical shaft [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2015, 34(S1): 3223–3229. DOI: 10.13722/j.cnki.jrme.2014.0296.
- [13] 杨仁树, 陈程, 王煦, 等. 不同直径空孔对爆生裂纹扩展行为影响规律的实验研究 [J]. *煤炭学报*, 2017, 42(10): 2498–2503. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.0240.
- YANG R S, CHEN C, WANG X, et al. Experimental investigation on the influence of different diameter empty holes on the crack growth behavior of blasting [J]. *Journal of China Coal Society*, 2017, 42(10): 2498–2503. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2017.0240.
- [14] CHO S H, NAKAMURA Y, MOHANTY B, et al. Numerical study of fracture plane control in laboratory-scale blasting [J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008, 75(13): 3966–3984. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2008.02.007.
- [15] 蒲传金, 杨鑫, 肖定军, 等. 爆炸载荷下双孔裂纹扩展的数值模拟研究 [J]. *振动与冲击*, 2022, 41(15): 300–311. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2022.15.037.
- PU C J, YANG X, XIAO D J, et al. Numerical simulation of double-hole crack propagation under explosion load [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(15): 300–311. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2022.15.037.
- [16] 牛永朕, 苏需洋, 李智深, 等. 空孔对裂纹扩展行为影响规律研究 [J]. *煤炭技术*, 2023, 42(9): 134–139. DOI: 10.13301/j.cnki.ct.2023.09.027.
- NIU Y Z, SU P Y, LI Z S, et al. Research on influence law of hollow holes on crack propagation behavior [J]. *Coal Technology*, 2023, 42(9): 134–139. DOI: 10.13301/j.cnki.ct.2023.09.027.
- [17] 戴俊. 岩石动力学特性与爆破理论 [M]. 2 版. 北京: 冶金工业出版社, 2013.
- DAI J. Dynamic behaviors and blasting theory of rock [M]. 2nd ed. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2013.
- [18] 朱红兵, 卢文波, 吴亮. 空气间隔装药爆破机理研究 [J]. *岩土力学*, 2007, 28(5): 986–990. DOI: 10.16285/j.rsm.2007.05.025.
- ZHU H B, LU W B, WU L. Research on mechanism of air-decking technique in bench blasting [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(5): 986–990. DOI: 10.16285/j.rsm.2007.05.025.
- [19] 戴俊. 柱状装药爆破的岩石压碎圈与裂隙圈计算 [J]. *辽宁工程技术大学学报 (自然科学版)*, 2001, 20(2): 144–147. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0562.2001.02.005.
- DAI J. Calculation of radii of the broken and cracked areas in rock by a long charge explosion [J]. *Journal of Liaoning Technical University (Natural Science)*, 2001, 20(2): 144–147. DOI: 10.3969/j.issn.1008-0562.2001.02.005.
- [20] 张万志, 徐帮树, 葛颜慧, 等. 隧道拱部穿越页岩爆破开挖方法及参数试验研究 [J]. *振动与冲击*, 2022, 41(15): 90–98. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2022.15.012.

- ZHANG W Z, XU B S, GE Y H, et al. Blasting excavation method and parametric tests for tunnel arch crossing shale [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(15): 90–98. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2022.15.012.
- [21] 余绍山, 王薇, 李姚伟奇. 周边眼偏位空孔爆破设计优化研究与应用 [J]. *铁道科学与工程学报*, 2024, 21(4): 1509–1520. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20230931.
- YU S S, WANG W, LI Y W Q. Research and application of offset hole for peripheral blasting design and optimization [J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2024, 21(4): 1509–1520. DOI: 10.19713/j.cnki.43-1423/u.T20230931.
- [22] BORRVALL T, SWEDEN L, RIEDEL W. The RHT concrete model in LS-DYNA [C]//Proceedings of the 8th European LS-DYNA Users Conference. Strasbourg, 2011.
- [23] 皇新宇, 纪强, 张宪堂, 等. 地应力作用下四孔掏槽爆破破岩机理数值模拟研究 [J]. *山东科技大学学报 (自然科学版)*, 2022, 41(2): 60–69. DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2022.02.007.
- HUANG X Y, JI Q, ZHANG X T, et al. Numerical simulation research on rock breaking mechanism of four-hole cut blasting under ground stress [J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2022, 41(2): 60–69. DOI: 10.16452/j.cnki.sdkjzk.2022.02.007.
- [24] 毕程程, 王志亮, 石高扬, 等. 初始体积分数法在爆炸模拟中的应用 [J]. *工程爆破*, 2017, 23(4): 26–33, 38. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2017.04.006.
- BI C C, WANG Z L, SHI G Y, et al. The application of initial volume fraction method in explosion simulation [J]. *Engineering Blasting*, 2017, 23(4): 26–33, 38. DOI: 10.3969/j.issn.1006-7051.2017.04.006.

(责任编辑 王晓双)