

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2025.04.008

铁路隧道机械化装药掏槽爆破参数的优化*

高轩^{①②} 尹训江^{①②} 王帅帅^{①②} 苗龙刚^{①②} 郭亚斌^{①②}

①中交第二公路工程局有限公司(陕西西安,710065)

②中交集团山区长大桥隧建设技术研发中心(陕西西安,710199)

[摘要] 为实现隧道智能爆破技术的研发及应用,开展了铁路隧道机械化装药掏槽爆破参数优化的研究。通过理论计算,确定了中空孔与中心掏槽孔间距的范围。运用 LS-DYNA 数值模拟软件,对理论计算取值范围内中心掏槽孔与中空孔间距为 12.5、22.5、42.5 cm 的爆破方案进行模拟研究。对各模拟方案下孔底截面、距起爆中心 1/2 炮孔长度截面、孔口截面的有效应力、损伤演化及爆破振动等进行分析。结果表明:随着中心掏槽孔与中空孔间距的增大,峰值有效应力及掏槽区域损伤面积呈先增大、后减小的变化趋势,平均爆破振速整体呈减小的变化趋势,槽腔贯通性逐渐变差。对 3 种爆破模型综合分析后,确定中心掏槽孔与中空孔间距为 22.5 cm。将优化后的爆破参数应用于现场爆破后发现,岩石的大块率显著下降,平均线性超挖降低了 19.23%,爆破效果良好。

[关键词] 混装炸药;空孔与掏槽孔间距;空孔效应;数值模拟;有效应力

[分类号] TD235; U455.4

Parameter Optimization of Mechanized Charging Cut Blasting in Railway Tunnel Construction

GAO Xuan^{①②}, YIN Xunjiang^{①②}, WANG Shuaishuai^{①②}, MIAO Longgang^{①②}, GUO Yabin^{①②}

① CCCC Second Highway Engineering Co., Ltd. (Shaanxi Xi'an, 710065)

② Research and Development Center on Construction Technology of Long Bridge and Tunnel in Mountain Areas, CCCC (Shaanxi Xi'an, 710199)

[ABSTRACT] In order to realize the application of intelligent blasting technology in tunnels, parameter optimization of mechanized charging cut blasting in railway tunnel blasting construction was studied. The range of spacing between the hollow hole and the central of the hollow hole has been determined through theoretical calculations. Using LS-DYNA numerical simulation software, simulation studies were conducted on blasting schemes with a distance of 12.5, 22.5 cm and 42.5 cm between the center of the hollow hole and the hollow hole within the theoretical range. Effective stress, damage evolution, and blasting vibration of the bottom cross section of the hole, cross section at a distance of 1/2 of the length of the blast hole from the detonation center, and the cross section at the orifice in each simulation scheme were analyzed. The results show that as the distance between the central hollow hole and the hollow hole increases, the peak effective stress and the damage area in the cutting area show a trend of first increasing and then decreasing, and the average blasting vibration velocity shows a decreasing trend. The the slot penetration gradually becomes worse. After comprehensive analysis of three blasting models, the distance between the center cut hole and the hollow hole was determined to be 22.5 cm. After applying the optimized blasting parameters to on-site blasting, it was found that the rock fragmentation rate significantly decreased, with an average linear over excavation reduction of 19.23%. The blasting outcome was good.

[KEYWORDS] mixed explosive; distance between empty holes and cavity holes; porosity effect; numerical simulation; effective stress

* 收稿日期:2024-06-12

基金项目:中交第二公路工程局有限公司重点研发项目(2021X-4-17)

第一作者:高轩(1990—),男,硕士,工程师,主要从事隧道爆破工程方面的研究。E-mail: washgx@163.com

通信作者:尹训江(1998—),男,硕士,工程师,主要从事隧道工程设计方面的研究。E-mail: 1374639271@xauat.edu.cn

0 引言

钻爆法因高效、经济的优点而被广泛应用于我国山岭隧道的建设中,但相较目前已经实现机械化或通过5G技术远程操作机器实现自动化、智能化的通风、支护、装碴、运输等工序,装药、爆破工序仍以人工作业为主。为实现隧道全工序智能化施工,可采用乳化炸药隧道智能装药车对山岭铁路隧道进行钻爆开挖。而在钻爆法中,掏槽爆破是隧道爆破的核心,既决定着光爆效果,又控制着施工成本。因此,合理优化机械化装药的爆破参数,对隧道智能爆破技术的发展具有重要意义。

目前,国内外学者对爆破参数设计开展了大量工作。理论计算方面,Yang等^[1]提出了爆破载荷下围岩的损伤本构模型;Park等^[2]研究了间隔装药与爆破振动的关系;王从银^[3]根据直眼掏槽破岩机理,提出了空孔与装药孔间距的理论计算公式;戴俊等^[4-5]提出了高应力条件下原岩定向断裂爆破技术的设计方法;谢泰极^[6]基于隧道爆破掏槽技术,推导了直孔掏槽炮孔中心至空孔中心距离的计算公式。数值模拟方面,陈亮^[7]、张奇等^[8]通过有限元软件分析并优化了掏槽孔的布孔形式及爆破参数,并通过现场试验进行了验证;郑彦涛等^[9]利用有限元模拟软件,得到了空气间隔装药对爆破振动的减弱作用;秦桂芳等^[10]通过LS-DYNA有限元软件对径向不耦合装药系数及周边眼间距等爆破参数进行了优化,获取了优化参数条件下的爆破成型预测结果。爆破损伤方面,唐海等^[11]建立了不同等爆源距数值模型,提出了爆破振速放大效应与围岩损伤结合的模型;刘阳等^[12]研究发现了静水地应力工况下地应力对岩石爆破损伤演化的抑制作用。综上所述,国内外学者对乳化炸药药卷的爆破参数、破岩机理、布孔形式、爆破效果等方面进行了广泛、深入的研究,而对铁路隧道直孔掏槽混装炸药爆破参数的研究较为匮乏。

以西藏某在建铁路隧道工程为研究背景,根据三臂智能凿岩台车的钻孔速度、掘进工序确定空孔及掏槽孔的孔径、孔深及间距,通过智能装药车输药

参数确定装药长度、装药密度等爆破参数;进而采用LS-DYNA软件建立多孔毫秒延迟爆破条件下,空孔与掏槽孔不同间距的直眼掏槽光面爆破模型,量化分析不同掏槽参数下硬岩的动态应力、围岩振动响应、爆炸应力云图、损伤云图、槽腔扩展过程等;并在现场进行相关试验,最终为硬岩爆破参数的确定提供参考。

1 工程概况

1.1 工程地质

某铁路隧道所在区域的地形、地貌受到区域地质构造的控制,山脉总体走向与构造线一致,隧址区地势总体为北高南低。试验地段隧址区底层岩性以片麻状花岗闪长岩、花岗岩等侵入岩体为主,整体性好,致密坚固,隧道围岩主要为III级和IV级围岩,岩石的物理力学参数如表1所示。

1.2 机械化装药施工

该工程采用的混装炸药制备工艺为:根据硝酸铵炸药配比,在制备站将硝酸铵水溶液、燃料油及乳化剂混合制成乳胶基质;待炸药及智能装药车入场后,将乳胶基质输送至装药车储罐内;再将敏化剂输送至敏化剂储罐内,通过伺服混装系统调节混装炸药的密度,进而得到成品乳化炸药;最终,由伺服电机驱动,将乳化炸药泵送至炮孔中。

装药流程工艺如图1(a)所示。

当现场完成钻孔、排险等工序后,隧道智能装药车进入工作面进行装药。混装炸药含水量较高,爆炸感度较低。因此,将单卷2#岩石乳化炸药作为起爆药包,与雷管一起装入炮孔底部;然后,通过输药管将混装炸药泵送至炮孔内。

装药流程如图1(b)所示。

2 中空孔直眼掏槽爆破关键参数的计算

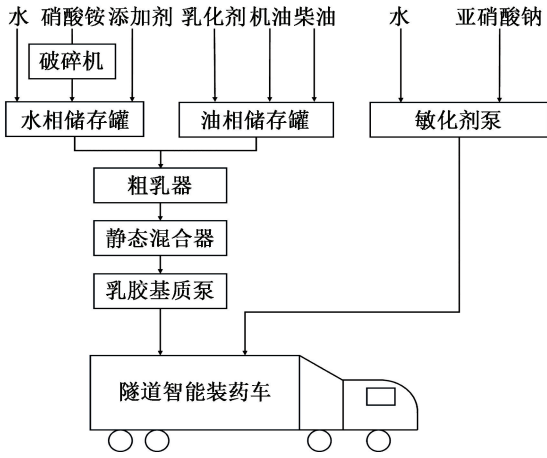
2.1 空孔效应分析

在掏槽爆破中,空孔会引起周边岩石应力场发生变化,进而增强掏槽孔的爆破作用,此即为空孔效

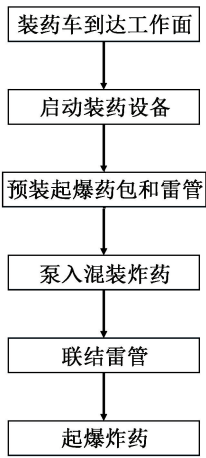
表1 岩石的物理力学参数

Tab.1 Physical and mechanical parameters of rocks

密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率/ %	单轴抗压强度/ MPa	单轴抗拉强度/ MPa	纵波波速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	弹性模量/ GPa	泊松比
2.71	0.07	83.23	4.68	3 445.59	36.31	0.21



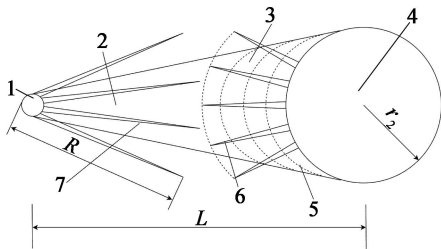
(a) 隧道智能装药车炸药生产



(b) 机械化装药
图 1 工序流程图

Fig. 1 Process flow chart

应,如图 2 所示。空孔效应分为空孔卸压效应、自由面效应、应力集中效应以及碎胀空间效应^[13]。



1 - 炮孔; 2 - 裂隙区; 3 - 拉伸破坏区; 4 - 空孔;
5 - 环向裂隙; 6 - 径向裂隙; 7 - 爆生裂纹。

图 2 空孔掏槽区岩石破坏情况

Fig. 2 Rock damage in hollowed-out areas

2.2 掏槽孔与空孔间距

根据弹性力学理论,得到空孔孔壁处最大反射拉应力为

$$\sigma_{\text{emax}} = \left(\frac{r_b}{L - r_2} \right)^\alpha (1 + 3\lambda)p. \quad (1)$$

式中: L 为炮孔中心与空孔中心的间距; r_2 、 r_b 分别为空孔半径及炮孔半径; λ 、 α 分别为侧应力系数和应力波衰减系数; p 为炮孔孔壁处的投射压力。

为保证岩石能被破坏,需满足 $\sigma_{\text{emax}} \geq \sigma_e$,由此可得

$$L \leq r_b \left[\frac{(1 + 3\lambda)p}{\sigma_e} \right]^{\frac{1}{\alpha}} + r_2. \quad (2)$$

式中: σ_e 是岩石抗拉强度。

该工程中,混装乳化炸药实测爆速为 4 200 m/s,炮孔直径为 48 mm,将各参数代入式(2),计算得出 $L \leq 580$ mm。

3 数值模拟分析

3.1 计算模型

根据现场爆破设计方案,提取掏槽区域炮孔布设位置,如图 3 所示。以图 3 为基本设计,根据 2.2 节建立 3 个模型。

模型 1:掏槽孔①与中空孔②间距为 12.5 cm;中空孔②与掏槽孔③间距为 37.5 cm;掏槽孔③与掏槽孔④间距为 100.0 cm;掏槽孔④与掏槽孔⑤间距为 115.2 cm。

模型 2:掏槽孔①与中空孔②间距为 22.5 cm;中空孔②与掏槽孔③间距为 37.5 cm;掏槽孔③与掏槽孔④间距为 100.0 cm;掏槽孔④与掏槽孔⑤间距为 105.2 cm。

模型 3:掏槽孔①与中空孔②间距为 42.5 cm;中空孔②与掏槽孔③间距为 37.5 cm;掏槽孔③与掏槽孔④间距为 100.0 cm;掏槽孔④与掏槽孔⑤间距为 85.2 cm。

建立尺寸为 1 200 cm × 1 318 cm × 370 cm 的数值模型。岩体采用 Lagrange 网格。炸药和空气采用 Euler 网格。岩体和空气采用流-固耦合算法,设置关键字 * Spc_Set 和 * Non_Reflecting,在模型纵向前、后施加法相约束,其余面设置无反射边界条件。现场通过智能装药车调整混装乳化炸药的药量,最终设计掏槽孔的单孔药量为 5.46 kg,扩槽孔的单孔药量为 4.26 kg,炸药起爆点设置于炮孔底部。如图 4 所示。

3.2 材料参数

模型采用 3 种材料。

岩石材料选用 * Mat_Johnson_Holmquist_Ceramics 本构模型,损伤状态分为线弹性区加载和卸载状态、塑性过渡区加载和卸载状态、完全密实区加载和卸载状态。损伤演化模型方程:

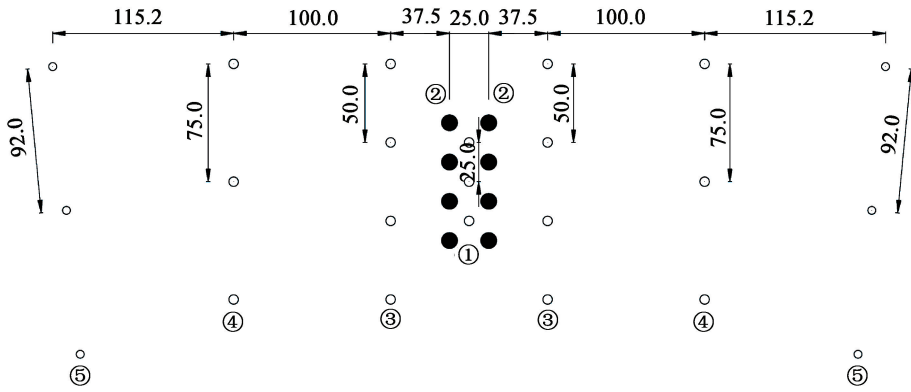


图3 中空孔直孔掏槽布置(单位:cm)

Fig.3 Arrangement of hollow straight holes (unit: cm)

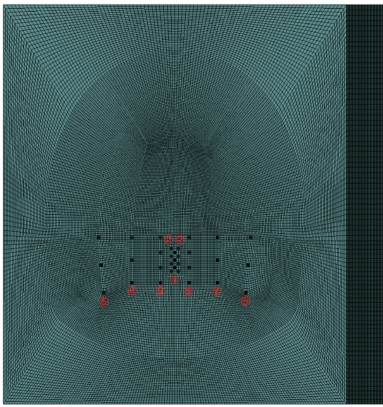


图4 计算模型

Fig.4 Computational model

$$\begin{cases} D = \sum \frac{\Delta \varepsilon_p + \Delta \mu_p}{\varepsilon_p^f + \mu_p^f}; \\ \varepsilon_p^f + \mu_p^f = D_1 (p^* + T^*)^{D_2} \geq \varepsilon_{pmin}. \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\Delta \varepsilon_p$ 和 $\Delta \mu_p$ 分别为等效塑性应变增量和塑性体积应变; $\varepsilon_p^f + \mu_p^f$ 为常压破坏时的塑性应变; p^* 为标准化净水压力; T^* 为材料所能承受最大标准化抗拉强度; D_1 和 D_2 为材料损伤因子; ε_{pmin} 为材料发生断裂时最小塑性应变。

岩石的状态方程参数如表2所示。

炸药选用 * Mat_High_Explosive_Burn 本构模型, 采用 EOS_JWL 状态方程, 即

$$p = A \left(1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_2 V} + B \left(1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega E_0}{V}. \quad (4)$$

式中: p 是爆轰产物内部压力; V 是相对体积; A 、 B 、 R_1 、 R_2 和 ω 都是炸药相关常数; E_0 是初始比内能。

现场混装乳化炸药材料和状态方程参数如表3^[14]所示。

表2 花岗片麻岩 HJC 本构模型参数

Tab.2 Parameters of HJC constitutive model for granitic gneisses

$\rho_0 / (g \cdot cm^{-3})$	A	B	C	S_{Fmax}
2.71	0.78	0.65	0.02	0.35
G/MPa	T/MPa	D_1	D_2	N
0.1906	2.92×10^{-4}	0.001	1.150	0.45
K_1/MPa	K_2/MPa	K_3/MPa	F_s	
0.31	7.00	56.50	0.0	

空气选用 * Mat_Null 模型, 采用 * EOS_Linear_Polynomial 状态方程, 即

$$p = C_0 + C_1 \delta + C_2 \delta^2 + C_3 \delta^3 + (C_4 + C_5 \mu + C_6 \mu^2) e_2. \quad (5)$$

式中: δ 为体积比系数, $\delta = 1/V - 1$; p 为压力; e_2 为单位体积空气内能; $C_0 \sim C_6$ 为相关参数。

在模拟中, 假设空气为理想气体, 主要参数如表4所示。

4 模拟结果及分析

4.1 有效应力分析

计算后, 可得到3个模型的力学参数及 Mises 有效应力云图。图5为模型1中孔底截面(0-0截面)、距起爆中心1/2炮孔长度截面(1-1截面)、孔口截面(2-2截面)对应时刻的二维 Mises 有效应力云图。

根据图5可知: 在掏槽孔起爆后, 0-0截面有效应力沿径向迅速增大; 随着后段炸药的起爆, 最大有效应力呈现先骤增至峰值、后逐渐减小的变化趋势; 在600ms时, 整个截面有效应力呈均匀分布。而

表 3 炸药材料及状态方程参数

Tab. 3 Material parameters and state equation parameters of explosives

$\rho_0/(g \cdot cm^{-3})$	$D/(cm \cdot \mu s^{-1})$	A/MPa	B/MPa	R_1	R_2	ω
1.50	0.42	6.253	0.232 9	5.25	1.60	0.28

表 4 空气材料及状态方程参数

Tab. 4 Material parameters and state equation parameters of air

$\rho_0/(g \cdot cm^{-3})$	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	比体积 V	比内能 μ/MPa	初始相对体积 V_0
0.001 2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	0	2.5×10^{-6}	0

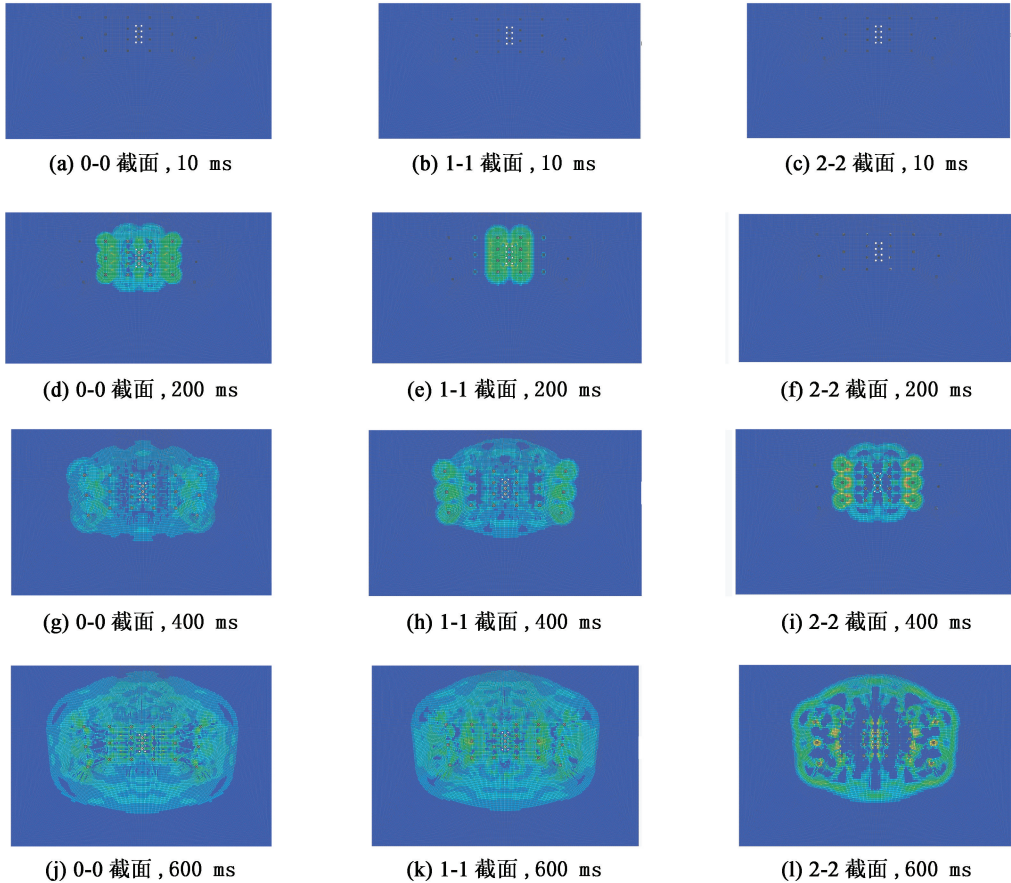


图 5 模型 1 垂直剖面上掏槽区域的有效应力云图

Fig. 5 Effective stress cloud map of the cutting area on the vertical section of Model 1

1-1 截面和 2-2 截面分别在 200 ms 和 400 ms 时, 截面有效应力开始增大; 但随着与起爆中心距离增加, 掏槽区域的有效应力迅速衰减。

图 6 为 3 个模型起爆中心截面的有效应力曲线。由图 6 可知, 模型 2 的掏槽孔①和中空孔②间距为 22.5 cm, 掏槽爆破过程中有效应力在 200 ms 时达到峰值, 为 1 102.62 MPa; 模型 1 和模型 3 掏槽孔①和中空孔②间距分别为 12.5 cm 和 42.5 cm, 峰值有效应力出现在 300 ms 时刻, 分别为 1 020.30 MPa 和 952.25 MPa, 变化幅度较模型 2 分别减小 7.47% 和 13.64%。

因此, 无论掏槽孔与中空孔间距为多少, 截面

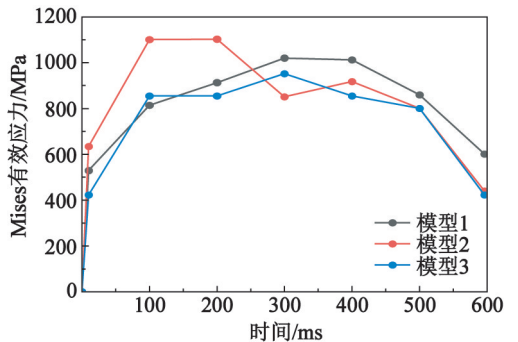


图 6 不同间距下 3 种模型起爆中心截面的有效应力

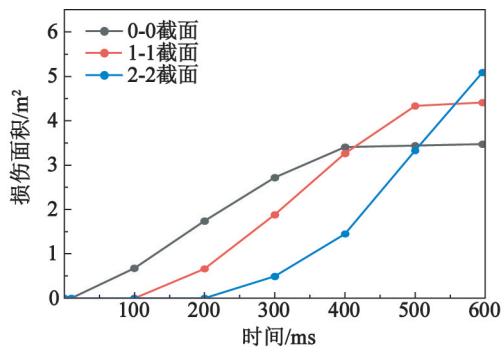
Fig. 6 Effective stress of the cross-section of the detonation center of three models at different distances

Mises 有效应力均与时间呈二次函数关系;峰值有效应力及变化速率随掏槽孔与中空孔间距的增大呈先增大、后减小的变化趋势。故在理论上,掏槽孔与中空孔存在最佳间距。

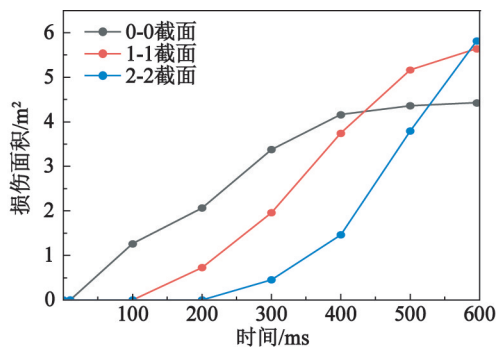
4.2 损伤区的产生及扩展

将计算得到的损伤云图导入 ImageJ 图像处理软件,分割 RGB(红绿蓝像素)通道,提取损伤区域的 ROI(记录位置选区),降噪后得到各截面的损伤区面积如图 7 所示。

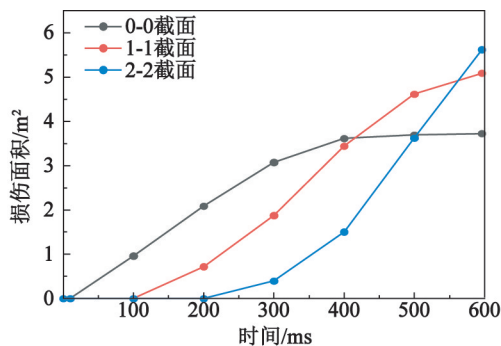
由图 7 可得,3个模型的损伤面积由大到小的次序均为:2-2截面、1-1截面、0-0截面。在0~600 ms内,3个截面损伤面积的增长趋势有所差别:0-0



(a) 模型 1



(b) 模型 2



(c) 模型 3

图 7 不同间距下 3 种模型各截面损伤面积的变化曲线
Fig. 7 Variation curves of the damage area of each section of three models at different distances

截面随爆破时间的增加呈对数型增长;1-1 截面随爆破时间的增加先呈幂指关系增长、后呈对数型增长;2-2 截面随爆破时间的增加呈幂指关系增长。因此,采用反向起爆(起爆点位于炮孔底部)时,爆破损伤分布形如正漏斗,孔口岩体损伤范围要大于孔底位置,由此证明爆炸能量会偏向爆轰波传播的正向运输。

统计得到 600 ms 时 3 个模型各截面的损伤面积如图 8 所示。

由图 8 可知,各截面的损伤面积随着中心掏槽孔与中空孔间距的增大呈现先增、后减的变化趋势。当掏槽孔①和中空孔②间距为 22.5 cm 时,模型 2 的 0-0 截面、1-1 截面和 2-2 截面的损伤面积分别为 4.36 m²、5.64 m² 和 5.82 m²,较模型 1 分别增大了 20.41%、21.88% 和 12.50%,较模型 3 分别增大了 14.62%、9.89% 和 3.45%。由于中空孔直孔掏槽岩体的损伤主要与爆炸应力入射波与空孔孔壁处的反射波叠加有关,当中心掏槽孔与中空孔的间距超过某一阈值后,应力波叠加区域会迅速衰减,导致岩体爆破后的大块率增加。但这并不会降低掏槽的效果。实际上,掏槽区的大块岩石会因自重而掉落。

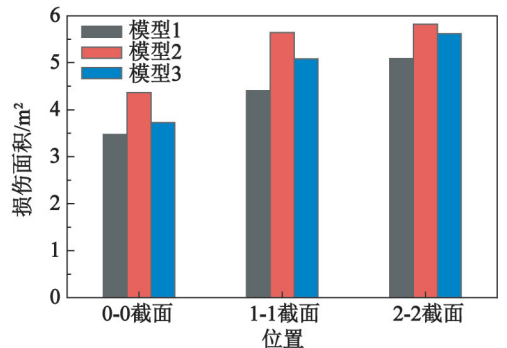


图 8 600 ms 时 3 个模型的截面损伤面积

Fig. 8 Section damage areas of three models at 600 ms

4.3 爆破振动规律分析

爆破产生的地震波由远及近逐渐由体波转化为面波,并向外传播。为探究不同断面处地震波造成的岩体振动变化规律,选取距离起爆中心 0(0-0 截面)、1.85 m(1-1 截面)和 3.70 m(2-2 截面)处隧道轮廓的峰值振速的分布规律,如图 9 所示。

根据图 9 可得,隧道掏槽区爆破时,在拱顶和拱腰处地震波振速较小,而在拱脚和底板处地震波振速较大。这是由于开挖的隧道为三心圆结构,在隧道的拱脚处产生应力集中。根据应力波理论,某点应力与波阻抗成正比关系,故而拱脚处的峰值振速较大;而底板处由于爆破开挖导致应力重分布,出现卸荷回弹现象,底板应力波的传播被一定程度放大,

故底板处质点的振速较大。

3 个模型各截面特征位置处振速的变化规律如表 5 所示。随着中心掏槽孔与中空孔间隔距离的增大,拱脚处 0-0 截面的振速变化不大;拱脚处 1-1 截面振速呈先骤减、而后趋于平稳的变化趋势;拐点位置出现在掏槽孔和空孔间距为 22.5 cm 时(模型 2)。由此说明,爆破振速与掏槽炮孔和中空孔间距整体成反比关系。模型 2 中,由于爆破产生了较大的破碎区域,导致应力释放速度加快,从而振速衰减较快。

经过不同中心掏槽孔与中空孔间距的有效应力分析、损伤分析和爆破振动分析,确定了铁路隧道机械化装药中心掏槽孔和中空孔的最优炮孔参数为 22.5 cm。

5 现场爆破效果验证

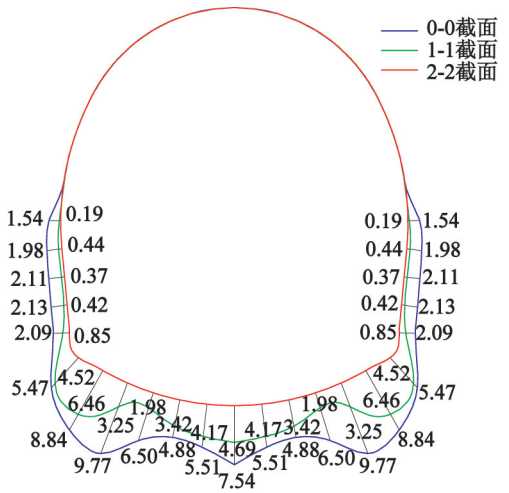
施工现场通过调整 Boomer E3C 三臂智能凿岩台车的钻孔速度及掘进压力,精确控制空孔及掏槽孔的孔径、孔深及间距。以此为基础,将数值模拟得到的最优爆破参数应用至现场隧道爆破施工中,与原爆破参数产生的爆破效果进行对比,深入分析中空孔直孔掏槽爆破参数的优化对隧道爆破开挖效果的影响。具体爆破参数如表 6 所示。

在隧道右洞和隧道左洞分别采用原爆破参数和优化后的爆破参数进行 5 个循环进尺的爆破开挖,获得爆破开挖断面。爆破工序结束后,采用三维激光扫描开挖轮廓面,如图 10 所示。可以看出,通过调整中心掏槽孔与中空孔间距等优化措施,破碎岩体的大块率显著下降。

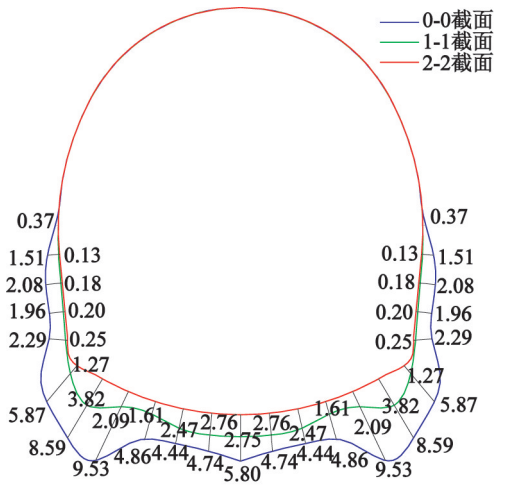
5 个进尺循环掌子面的超挖、欠挖数据见表 7 和表 8。由表 7、表 8 可知:采用原设计的光面爆破参数,隧道断面平均超挖面积为 3.567 m²,平均线性超挖为 17.58 cm;优化后隧道断面平均超挖面积为 2.876 m²,平均线性超挖为 14.20 cm。对比原设计,隧道断面平均超挖面积降低了 19.37%,平均线性超挖降低了 19.23%,爆破效果良好。同时,优化后的爆破参数能有效降低破碎岩体的大块率,减少围岩扰动等,充分发挥了围岩的强度和自稳能力,确保了施工安全。

6 结论

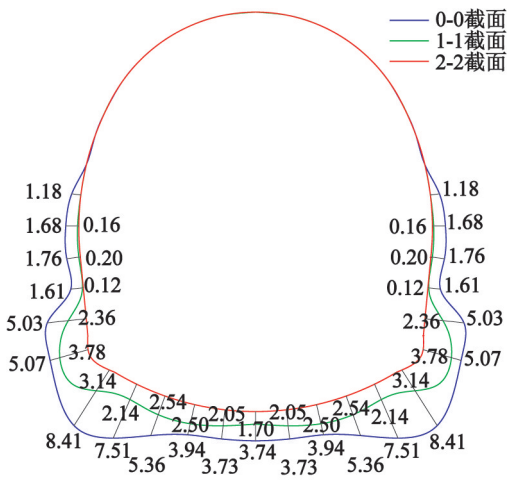
以某铁路隧道机械化装药施工为背景,基于空



(a) 模型 1



(b) 模型 2



(c) 模型 3

图 9 3 个模型的不同隧道断面的峰值振速分布 (单位: m/s)

Fig.9 Peak vibration velocity distribution of different tunnel sections in three models (Unit: m/s)

表5 各模型特征位置的振速

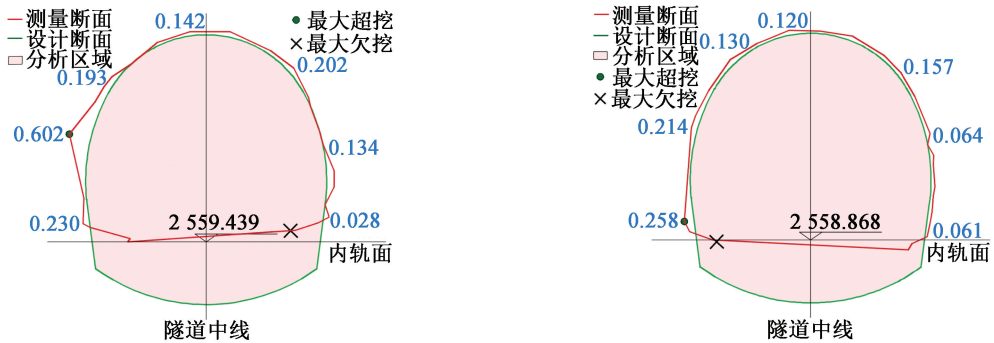
Tab.5 Vibration velocity of the characteristic positions of each model

位置	模型1		模型2		模型3	
	0-0 截面	1-1 截面	0-0 截面	1-1 截面	0-0 截面	1-1 截面
拱腰	1.54	0.19	1.51	0.13	1.68	0.16
拱脚	8.84	6.46	8.59	3.82	8.41	3.14
底板	7.54	4.59	5.80	2.75	3.74	1.70

表6 光面爆破参数

Tab.6 Parameters of smooth blasting

爆破参数	围岩等级	中心掏槽孔与中空孔间距/cm	掏槽孔深/cm	最小抵抗线/cm	混装总装药量/kg	炮眼密度/(个·m ⁻²)	炸药单耗/(kg·m ⁻³)
优化前	III级	12.5	3.7	70	416.6	1.69	1.73
优化后	III级	22.5	3.7	70	416.6	1.69	1.73



(a) 隧道右洞 DyK1125 + 901 处

(b) 隧道左洞 DyK1125 + 901 处

图10 三维激光扫描开挖轮廓断面图(单位:m)

Fig.10 Cross section of excavation contour obtained by 3D laser scanning (Unit: m)

表7 爆破参数优化前掌子面的超挖、欠挖数据

Tab.7 Over excavation data and under excavation data of the palm face before the optimization of blasting parameters

设计面积/m ²	超挖面积/m ²	欠挖面积/m ²	最大超挖/m	最大欠挖/m	平均线性超挖/m	标准差/m
74.233	3.355	1.584	0.817	0.759	0.166	0.173 0
74.233	3.389	2.216	0.828	0.899	0.171	0.178 2
74.233	3.576	2.856	0.864	0.258	0.176	0.183 2
74.233	3.570	3.665	0.783	0.458	0.180	0.193 7
74.233	3.946	1.515	0.362	0.819	0.186	0.062 2

表8 优化爆破参数后掌子面的超挖、欠挖数据

Tab.8 Over excavation data and under excavation data of the palm face after the optimization of blasting parameters

设计面积/m ²	超挖面积/m ²	欠挖面积/m ²	最大超挖/m	最大欠挖/m	平均线性超挖/m	标准差/m
74.233	2.646	0.484	0.457	1.634	0.114	0.098 4
74.233	2.598	0.297	0.379	1.031	0.128	0.092 5
74.233	2.900	1.143	0.244	0.655	0.139	0.043 9
74.233	2.935	0.264	0.619	1.900	0.154	0.142 7
74.233	3.299	1.035	0.689	1.548	0.175	0.140 4

孔效应分析,根据弹性力学理论,计算得到中心掏槽孔与中空孔的最大理论间距。通过 LS-DYNA 有限元数值模拟方法,分析了掏槽孔和中空孔间距对隧道爆破效果的影响,得出的主要结论如下:

1)随着中心掏槽孔与中空孔间距的增大,Mises 峰值有效应力及变化速率呈先增大、后减小的变化趋势。中心掏槽孔与中空孔的间距为 22.5 cm 时,掏槽爆破过程中,有效应力在 200 ms 时达到峰值,为 1 102.62 MPa。

2)隧道掏槽区爆破时,在拱顶和拱腰处,地震波振速较小;而在拱脚和底板处,地震波振速较大。随着中心掏槽孔与中空孔间距的增大,拱脚处 1-1 截面爆破振速呈先骤减、后平稳的变化趋势;而底板处爆破振速均匀减小。

3)采用混装乳化炸药进行钻爆施工时,当中心掏槽孔与中空孔的间距为 22.5 cm 时,隧道断面的超挖面积降低了 19.37%,平均线性超挖降低了 19.23%;同时,有效降低了破碎岩体的大块率,减少了围岩扰动等,充分发挥了围岩的强度和自稳能力。

总体上,对铁路隧道机械化装药中心掏槽孔和中空孔间距等爆破参数进行了优化。将研究结果应用于现场实际工程中,得到较好的爆破效果。对隧道爆破参数设计具有一定的指导作用。但由于隧道现场工程地质的复杂性,还需对不同围岩条件下隧道的爆破情况进行进一步研究,以满足现场需求。

参 考 文 献

- [1] YANG R, BAWDEN W F, KATSABANIS P D. A new constitutive model for blast damage [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, 1996, 33(3): 245-254.
- [2] PARK D, JEON S. Reduction of blast-induced vibration in the direction of tunneling using an air-deck at the bottom of a blasthole [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2010, 47(5): 752-761.
- [3] 王从银. 直眼掏槽的破岩机理及掏槽设计[J]. 爆破, 1995, 12(2): 51-55.
- [4] 戴俊. 深埋岩石隧洞的周边控制爆破方法与参数确定 [J]. 爆炸与冲击, 2004, 24(6): 493-498.
- DAI J. The controlled contour blasting technique and its parameter determination for rock tunnel at depth [J]. Explosion and Shock Waves, 2004, 24(6): 493-498.
- [5] 戴俊, 杨永琦. 三角柱直眼掏槽爆破参数研究 [J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(4): 364-368.

- DAI J, YANG Y Q. Researches on blasting parameters of triangle burn cut [J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(4): 364-368.
- [6] 谢泰极. 隧道爆破与直眼掏槽 [J]. 爆破器材, 1997, 26(3): 23-27.
- XIE T J. Tunnelling blasting and straight-in hole cutting [J]. Explosive Materials, 1997, 26(3): 23-27.
- [7] 陈亮. 深孔直眼掏槽爆破一次成井技术研究及应用 [D]. 长沙: 中南大学, 2014.
- CHEN L. Research and application on the technology of one time deep hole raise blasting with burn cut [D]. Changsha: Central South University, 2014.
- [8] 张奇, 王小林, 杨永琦, 等. 含空孔直眼掏槽爆破效果分析模型 [J]. 工程爆破, 2001, 7(1): 1-6.
- ZHANG Q, WANG X L, YANG Y Q, et al. A model for analysis of the blasting effect of parallel cut [J]. Engineering Blasting, 2001, 7(1): 1-6.
- [9] 郑彦涛, 周虎生, 刘德峰, 等. 贵州息烽磷矿巷道掘进爆破参数优化与实践 [J]. 爆破, 2022, 39(1): 68-74, 174.
- ZHENG Y T, ZHOU H S, LIU D F, et al. Optimization of blasting parameters and its practice for roadway excavation in Xifeng Phosphate Mine in Guizhou Province [J]. Blasting, 2022, 39(1): 68-74, 174.
- [10] 秦桂芳, 曾灿, 徐间锋, 等. 基于 HJC 损伤本构模型的灰岩隧道光面爆破数值模拟及工程验证 [J]. 爆破器材, 2022, 51(6): 45-51.
- QIN G F, ZENG C, XU J F, et al. Numerical simulation and engineering verification of smooth blasting in limestone tunnel based on HJC damage constitutive model [J]. Explosive Materials, 2022, 51(6): 45-51.
- [11] 唐海, 马谕杰, 夏祥, 等. 不同位置爆源作用下洞室围岩损伤规律的数值模拟研究 [J]. 爆破, 2023, 40(2): 180-189.
- TANG H, MA Y J, XIA X, et al. Numerical simulation of damage law of chamber surrounding rock mass under different blasting sources [J]. Blasting, 2023, 40(2): 180-189.
- [12] 刘阳, 徐业鹏, 黄丹. 不同地应力条件下楔形掏槽爆破的岩石损伤演化过程研究 [J]. 隧道建设(中英文), 2022, 42(12): 2096-2104.
- LIU Y, XU Y P, HUANG D. Evolution of rock damage caused by wedge cut blasting under different ground stress conditions [J]. Tunnel Construction, 2022, 42(12): 2096-2104.
- [13] 李祥龙, 张志平, 王建国, 等. 双空孔间距对爆破槽腔断面大小的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2022, 42(11): 115201.

responses of a coupled tunnel system with transverse passage under construction blasting load [J]. Yangtze River, 2023, 54 (11): 126-133.

[14] 孙均,候学渊. 地下结构[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 696-697.

[15] 阳生权. 小线间距施工隧道爆破地震影响下既有隧道围岩线性动力分析[J]. 工程爆破, 1998, 4(1): 1-6.

YANG S Q. Linear dynamic analysis on rock-media of old tunnel affected by blasting vibration of new tunnel with small line-clearance [J]. Engineering Blasting, 1998, 4(1): 1-6.

[16] 梁庆国, 李德武, 朱宇, 等. 临近隧道爆破施工振动控制技术[M]. 北京: 科学出版社, 2015.

[17] 刘国华, 王振宇. 爆破荷载作用下隧道的动态响应与抗爆分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2004, 38(2): 204-209.

LIU G H, WANG Z Y. Dynamic response and blast-resistance analysis of a tunnel subjected to blast loading [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2004, 38(2): 204-209.

[18] 赵东平, 王明年. 小净距交叉隧道爆破振动响应研

究[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(1): 116-119.

ZHAO D P, WANG M N. Study on influence of blasting vibration on cross tunnels with small clearance[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(1): 116-119.

[19] 王思敬, 吴志勇, 董万里, 等. 水电工程岩体的弹性波测试[M]. 北京: 科学出版社, 1980.

[20] 中交规划设计院. 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范: JTG D62—2004 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2004.

CCCC Highway Consultants Co., Ltd. Code for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts: JTG D62—2004 [S]. Beijing: China Communication Press, 2004.

[21] 蒋楠, 周传波, 罗钢, 等. 铁路隧道混凝土衬砌爆破振动安全判据[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(7): 2746-2750.

JIANG N, ZHOU C B, LUO G, et al. Blasting vibration safety criterion of railway tunnel concrete lining [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2012, 43(7): 2746-2750.

(上接第 54 页)

LI X L, ZHANG Z P, WANG J G, et al. Influence of double empty hole spacing on section size of blasting chamber [J]. Explosion and Shock Waves, 2022, 42(11): 115201.

[14] 刘福高. 现场混装乳化炸药爆破参数优化及数值模

拟研究[D]. 武汉: 武汉科技大学, 2015.

LIU F G. Blasting parameter optimization and numerical simulation research of the site mixing-loading emulsion explosive[D]. Wuhan: Wuhan University of Science and Technology, 2015.

版 权 声 明

1、本刊对发表的文章拥有出版电子版、网络版版权,并拥有与其他网站交换信息的权利。本刊支付的稿酬已包含以上费用。

2、本刊文章版权所有,未经书面许可,不得以任何形式转载。

《爆破器材》编辑部