

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2024.02.008

复杂敏感环境城区隧道爆破振动及噪声控制技术*

种玉配^{①②} 李治国^{①②} 马占国^③ 刘书奎^③

①中铁隧道局集团特种高新技术有限公司(上海,201306)

②中铁隧道局集团有限公司(广东广州,511400)

③中国矿业大学力学与土木工程学院(江苏徐州,221116)

[摘要] 为了避免和减少隧道爆破振动及噪声对复杂敏感环境城区的影响,以珠海板障山新增隧道为例,采用数值模拟和现场爆破试验的方法,对不同掏槽眼延期时间下既有隧道迎爆侧进行爆破振动监测。发现掏槽眼延期时间4 ms时,既有隧道迎爆侧爆破振速最小。同时,针对隧道进口段周边建筑物繁多、爆破噪声大、飞石迸溅的问题,进行了炮孔封堵和防飞石的试验。设计发明了一种新型炮孔堵塞装置,在装药量增大情况下,爆破噪声能够控制在允许范围内。在洞口采用联合防护门帘,减少了飞石迸溅的风险。可为复杂敏感环境城区隧道爆破振动和噪声控制提供参考。

[关键词] 敏感环境;爆破振动;爆破噪声;电子雷管

[分类号] TD235;TU751.9

Research and Application of Blasting Vibration and Noise Control Technology in Complex and Sensitive Urban Area

ZHONG Yupei^{①②}, LI Zhiguo^{①②}, MA Zhanguo^③, LIU Shukui^③

①Special High-Tech Co., Ltd., China Railway Tunnel Group(Shanghai, 201306)

②China Railway Tunnel Group Co., Ltd. (Guangdong Guangzhou, 511400)

③School of Mechanics and Civil Engineering, China University of Mining and Technology (Jiangsu Xuzhou, 221116)

[ABSTRACT] In order to avoid and reduce the impact of tunnel blasting vibration and noise on complex and sensitive urban areas, taking the newly built Banzhangshan Tunnel in Zhuhai as an example, numerical simulation and field blasting tests were used to monitor the blasting vibration on the blasting side of the existing tunnel under different delay times of cut holes. When the delay time between the cut holes is 4 ms, the blasting vibration velocity on the blasting side of the existing tunnel is the smallest. At the same time, aiming at the problems of numerous buildings around the entrance section of the tunnel, high blasting noise, and flying stones splashing, experiments of gun hole plugging and anti-flying stone was carried out. A new type of gun hole plugging device was designed. When the charge increases, the blasting noise can be controlled within the allowable range. The use of joint protective door curtains at the entrance reduces the risk of flying stones splashing. It provides a reference for the control of blasting vibration and noise in urban tunnels in complex and sensitive environments.

[KEYWORDS] sensitive environment; blasting vibration; blasting noise; electronic detonator

0 引言

对于城市市区交通工程隧道和岩基类地层,以当前的技术条件,采用钻爆法开挖坚硬岩石隧道相对来说是最经济合理的施工方法,但又不可避免地

对既有隧道、周边建(构)筑物及居民生活带来不利影响。需要对城区隧道爆破振动及噪声进行控制。

在隧道爆破振动控制方面,危皓等^[1]通过优化炮孔装药量和起爆顺序,制定了预裂和光面综合爆破的大断面爆破开挖方案,对爆破振动能量有很好的衰减效果。学者们分析了预裂缝和减振孔的减振

* 收稿日期:2023-10-07

基金项目:国家自然科学基金(51608520);国家重点研发计划(2019YFE0118500);中铁隧道局集团有限公司科技创新计划(2019-12)

第一作者:种玉配(1991—),男,硕士,工程师,主要从事隧道与地下工程科研与管理工作。E-mail:815501773@qq.com

机理,对比了不同排水减振孔后的减振效果^[2-3]。王松青等^[4]通过分台阶爆破、松动爆破、直孔掏槽、周边密集减振孔、空气间隔装药等优化设计,将峰值振速控制在安全允许速度以下。宗琦等^[5]在地铁下穿砖混结构建筑物段,通过减少最大单段药量、多分段和增加上、下台阶的距离来优化爆破方案,使建筑物更为安全。李小贝^[6]研究发现,既有隧道在距离爆破点最近的断面振速达到峰值,且衬砌中迎爆侧墙腰区域的峰值振速和峰值应力最大。在爆破噪声控制方面,王武刚^[7]通过控制用药量以及信息化施工监测等措施,动态调整、控制噪声。龚伦^[8]提出覆盖爆破声源体、高精度雷管等措施,降低爆破噪声。孙燕^[9]提出了爆破噪声管理方案。

相关学者主要采用控制最大单段药量、预裂爆破和减振孔等措施进行爆破振动的控制,采用光面爆破、控制最大单段药量和覆盖爆源等措施进行爆破噪声的控制,并且爆破周边环境相对简单,保护对象单一。

本文中,针对珠海板障山新增隧道,采用掏槽眼延期时间控制和发明设计一种新型炮孔堵塞装置,辅以洞口竹胶板防护门和防护门帘,进行爆破振动、噪声和飞石的控制,以实现既对既有隧道、周边建(构)筑物的保护。

1 工程概况

板樟山新增隧道工程位于广东省珠海市香洲区,是跨越板樟山、连接香洲和拱北的重要南北向城市主干道。新增隧道围岩主要为中、微风化砂岩,岩石较破碎,围岩为Ⅱ~Ⅲ级;但隧道两端洞口处岩体风化严重,节理裂隙很发育,岩体完整性较差,围岩为Ⅴ级。新增上、下行隧道与既有隧道紧邻,最小净间距约1倍洞径。采用爆破施工,必然会对既有隧道产生一定的影响。隧道洞口周边环境复杂,建(构)筑物繁多,共计42栋,最近处房屋距离隧道口约40 m。减少隧道施工对隧道周边居民的影响是本工程的重点、难点之一。

2 既有隧道爆破振动控制

2.1 数值计算

2.1.1 材料单元的选取

在 ANSYS/LS-DYNA 中,一般采用高性能炸药材料 * Mat_High_Explosive_Burn 来模拟炸药的爆

轰;采用状态方程 * EOS_JWL 来描述爆炸时炸药材料的压力特征,同时,可以描述炸药爆炸产生的单位体积的内能、爆轰产物的压力和相对体积参数。本次模拟使用炸药的具体参数见表1。

表1中: ρ 为炸药密度; D 为爆轰速度; p_{cj} 为爆炸压力; A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 ω 为表征炸药特性的参数; E 为初始内能。

表1 炸药及状态方程的主要参数

Tab.1 Main parameters of the explosive and the state equation				
$\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	$D/$ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$p_{cj}/$ GPa	A/GPa	
1.05	4 018	18.5	216.7	
B/GPa	R_1	R_2	ω	E/GPa
0.184	4.2	0.9	0.15	4.192

一般采用 * Mat_Plastic_Kinematic 来描述岩石材料,这是一种考虑了材料失效的随动硬化、各向同性以及应变率有关的模型。砂岩的力学参数如表2所示。

表2 砂岩的材料参数

Tab.2 Material parameters of sandstone			
$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	μ	E/GPa	σ/MPa
2.6	0.32	3.8	42.68
E_1/GPa	ε	σ_1/MPa	
2	3.5	2.15	

表2中: ρ 为砂岩密度; μ 为泊松比; E 为弹性模量; σ 为初始屈服应力; E_1 为塑性硬化模量; ε 为有效塑性应变; σ_1 为切线模量。

空气和炮泥材料模型与参数见文献[10-11]。

2.1.2 数值模型建立

模型边界选取左右边界150 m,上下边界85 m,隧道埋深30 m,沿隧道轴向边界80 m。新增隧道与既有隧道间距为20 m。模型中,平行于隧道中心线的为X方向,垂直于隧道中心线并指向隧道掘进方向的为Y方向,垂直于隧道中心线并指向地表的为Z方向。模型四周设置无反射边界条件。为了简化模型,一共设置了7个掏槽孔、24个扩槽孔、10个辅助眼和10个周边眼,整个模型共划分468 925个节点,444 357个单元,数值模拟模型如图1所示。模拟中采用电子雷管的掏槽孔孔间延期时间分别为0、2、4、6、8、10 ms。

2.1.3 数值计算结果

选取既有隧道迎爆侧边墙上的点,作为爆破振

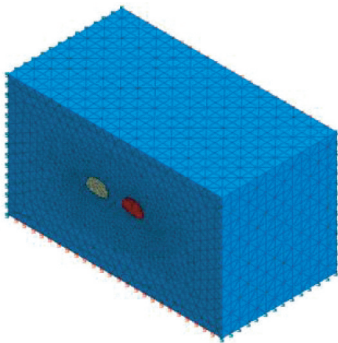


图 1 数值模型

Fig. 1 Numerical model

动测点。此处根据现场实际,只考虑延期时间 10 ms 以内。统计不同延期时间下测点的爆破峰值振速,如表 3 所示。最大振速方向为模型中平行于隧道中心线方向。

表 3 不同延期时间下测点的爆破峰值振速

Tab. 3 Peak vibration velocities of blasting at monitoring points under different delay times

质点 编号	与炮孔 水平 距离/ m	最大振速/($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)					
		0 ms	2 ms	4 ms	6 ms	8 ms	10 ms
28795	26	2.42	2.02	0.96	1.15	1.68	1.45

从表 3 可以看出,爆破峰值振动速度并不是一味随着延期时间的增大而减小。而在延期时间为 4 ms 时,爆破峰值振速最小。

2.2 现场应用

以掏槽孔延期时间 4 ms 为基准布置炮眼参数,如表 4 所示。其余各孔间延期时间分别为 0、2、6、8、10 ms。

表 4 掏槽孔延期时间 4 ms 的爆破试验参数

Tab. 4 Blasting test parameters for a delay time of

4 ms in cut holes

炮孔类型	延期时间/ms	雷管数	炮孔深度/m	总装药量/kg
掏槽孔	4	7	3.0~3.3	11.2
扩槽孔	4	24	3.0~3.3	24.8
一台掘进孔	3	6	2.7~2.8	5.4
二台掘进孔	3	7	2.7~2.8	7.0
中间掘进孔	2	33	2.7~2.8	31.0
内圈孔	2	25	2.7~2.8	20.4
周边孔	3	42	2.7~2.8	14.7
底板孔	3	11	2.7~2.8	11.6
总计		155		126.1

数码雷管炮眼布置图见图 2。

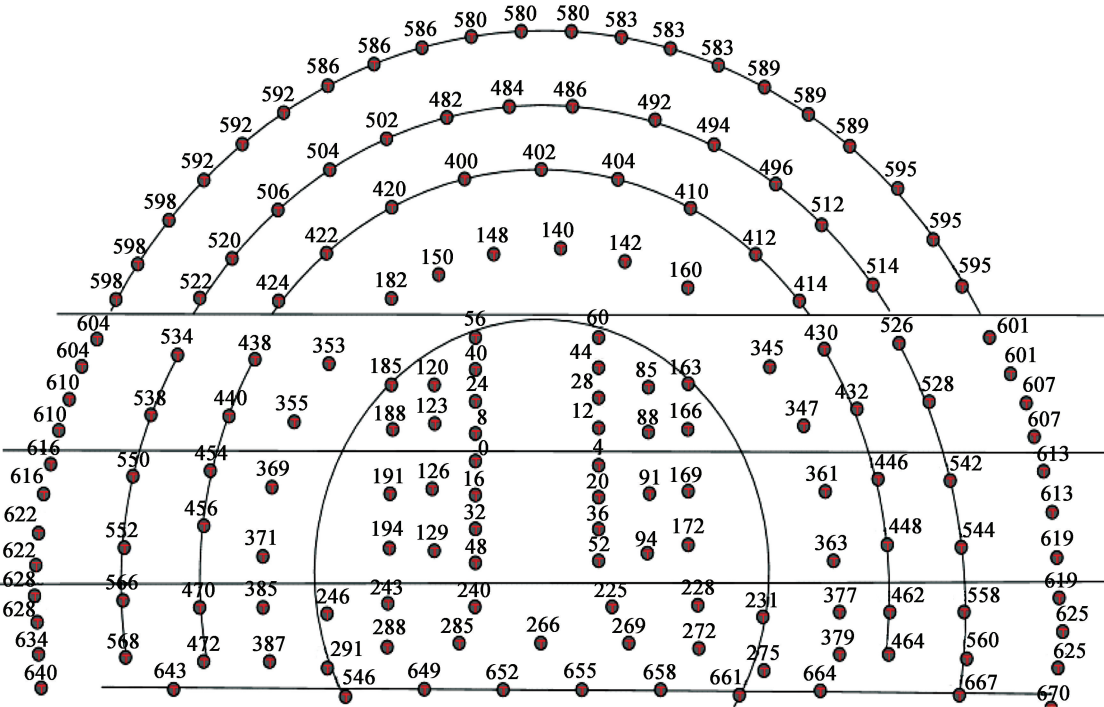


图 2 数码雷管炮眼布置图(单位:ms)

Fig. 2 Layout of boreholes for digital detonators (Unit: ms)

以掌子面到既有隧道距离最近断面为监测断面,布设爆破振动传感器,采集最大振速,结果如表5所示。

表5 不同延期时间下测点的爆破峰值振速
Tab.5 Peak vibration velocities of blasting at monitoring points with different delay times

测点位置	与炮孔水平距离/m	延期时间/ms	最大振速/(cm·s ⁻¹)
迎爆测	20	0	2.65
迎爆测	20	4	1.26
迎爆测	21	2	1.85
迎爆测	23	6	1.32
迎爆测	23	8	1.42
迎爆测	24	10	1.61

从表5可以看出,实测爆破峰值振速随着延期时间的变化规律与数值计算的基本一致。在延期时间为4 ms时,爆破峰值振速最小。

为了定量地研究不同延期时间所带来的减振效果,将质点峰值振速降低程度进行统计,并对减振效率*P*做出定义。计算公式如下:

$$P=\frac{v_1-v_2}{v_1}\times 100\%。$$

(1)

式中:*v*₁为齐发爆破时的最大振速;*v*₂为不同延期时间下的最大振速。

按照式(1)计算不同延期时间下的减振效率,如图3所示。

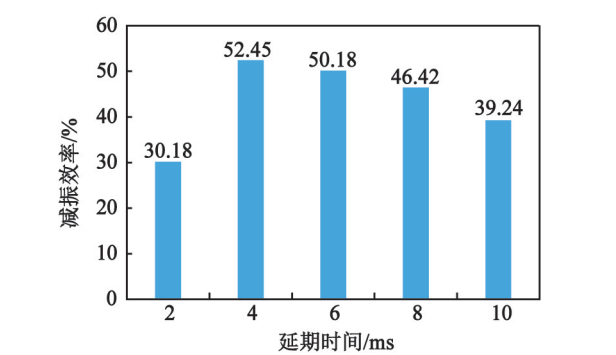


图3 不同延期时间下的减振效率

Fig.3 Vibration reduction efficiency at different delay times

当延期时间取4 ms时,爆破峰值振速相对较小,为1.26 cm/s,相比0 ms情况减小了1.39 cm/s,减振效率达52.45%。说明在该种围岩地质条件下,当延期爆破的延期时间取4 ms时,2个爆破孔先后起爆,可以实现波峰与波谷的互相影响而降低振速。

同时,采集4 ms延期时间下附近建筑物爆破振

速,最大振速如表6所示。

表6 4 ms延期时间下不同建筑物的爆破峰值振速
Tab.6 Peak vibration velocities of blasting of different buildings at a delay time of 4 ms

监测点位置	与爆破点直线距离/m	最大振速/(cm·s ⁻¹)
金钟花园	51	0.22
	60	0.23
柠溪幼儿园	110	0.07
	113	0.05
隧道管理所	40	0.37
	43	0.24

从表6可见,周边建筑物的爆破峰值振速均在0.5 cm/s以下,爆破振速控制效果较好。

3 爆破噪声和飞石的控制

3.1 新型炮孔消声装置

3.1.1 新型炮孔消声装置设计

设计了一种用于降低隧道爆破噪声的炮孔消声装置,如图4所示。整体呈圆台状,使用高弹聚酯材料,孔隙率较高,具有一定的吸声性能。后端直径为炮孔孔径35 mm;前端略小,为28 mm,方便施工过程中塞入炮孔;纵向开设4条宽度5 mm的消声槽,环向开设4条宽度5 mm的消声槽,间距15 mm。消声槽相互连通,形成连续贯通空间;其中,每个消声槽均用于传播爆破声波,以使消声装置本体充分吸收声波,进而降低爆破噪声。



图4 炮孔消声装置

Fig.4 Silencing device in borehole

3.1.2 新型炮孔消声装置现场应用

使用风钻、钻杆按照设计要求钻孔之后,在炮孔内部装填炸药雷管。在距离炮孔200 mm位置处,将炮孔消声装置本体的前端先装入炮孔内;同时,注意将脚线沿着炮孔消声装置本体的消声槽引出炮孔,直至炮孔消声装置本体的后端与炮孔口齐平,如图5所示。最后,按照设计要求起爆。

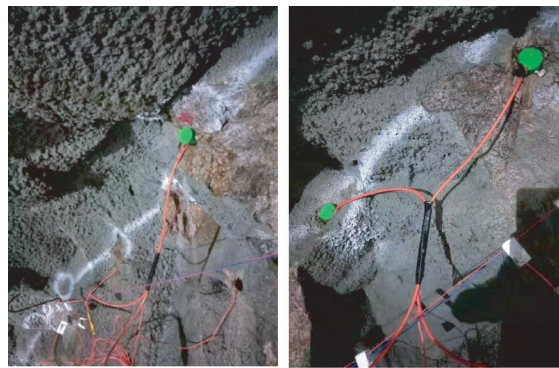


图 5 现场实施图
Fig. 5 Field implementation diagram

3.2 防护门帘
3.2.1 现场防护门帘设计

在隧道进洞段,往往由于隧道进尺长度比较小,掌子面的爆破飞石能够飞出洞外,造成一定的安全隐患。

为了将飞石阻隔在隧道内,在洞门设置竹胶板防护门和防护门帘组合形式。橡胶是高弹性的高分子材料,长链分子结构及分子间存在较弱的次级力,使橡胶材料呈现出独特的黏弹性能。竹胶板是在竹子上贴了橡胶,防护门帘也尽量使用橡胶塑料材料。不仅能够吸收爆破飞石能量,而且能够保证自身的强度安全。

竹胶板防护门的尺寸为:两侧高 7 m,宽 3 m;上部高 3 m,宽 6 m。竹胶板通过钢丝绳绑扎在型钢骨架上,型钢骨架通过钢筋与防水台车进行焊接连接。一侧竹胶板上需要开口,方便风筒穿过,口径在 600~800 mm。

防护门帘的尺寸为:高 5 m,宽 3 m。2 块防护门帘可以各自独立掀开。防护门帘通过铁丝与上部的竹胶板型钢骨架连接。现场设置如图 6 所示。



图 6 洞口飞石防护装置
Fig. 6 Protective device for flying rocks at the entrance

3.2.2 现场防护门帘的应用

噪声显示屏主要起到实时监测和现场显示环境噪声的功能。监测显示,在爆破后场区,监测的爆破噪声级为 64.2,白天不超过 70.0。

通过常规炮孔堵塞与新型堵塞装置的堵塞试验,进行噪声监测数据的对比分析。消声效果对比分析如表 7 所示。

表 7 消声效果对比分析
Tab. 7 Comparison of noise reduction outcomes

距离/m	装药量/kg	炮孔填塞方式	爆破噪声级
100	126	炮泥	110.0
100	126	炮泥	105.0
100	126	炮泥	98.0
100	130	炮泥	95.0
100	128	炮泥	88.0
100	156	消声装置	69.0
100	156	消声装置	70.0
100	160	消声装置	68.0
100	156	消声装置	66.0
100	148	消声装置	66.0

由表 7 可见,在测试距离均为 100 m 且总装药量增加的情况下,平级噪声级分别为 99.2 和 67.8。采用新型炮孔消声装置与采用普通炮泥对比发现,平均总装药量增加 22.01% 的情况下,噪声降低了 31.65%,充分说明本消声装置的可实用性。

在洞门采取竹胶板防护门和设置防护门帘组合形式后,爆破飞石大部分被阻隔在洞内。由于防护门帘的吸能阻隔,小部分飞石飞出,散落在洞口附近,飞出距离控制在 10~30 m 左右,对附近的人员设备影响比较小。随着施工里程不断增大,掌子面远离洞口,爆破飞石飞出洞口的现象很少发生。

4 结论

通过对板障山新增隧道爆破施工过程中电子雷管延期时间的数值计算和现场试验,得到了既有隧道不同电子雷管延期时间下的最大爆破振速。设计发明了一种新型炮孔消声装置及洞口防飞石装置,得到了炮泥堵塞和新型炮孔消声装置应用下的现场场区爆破噪声数据对比,主要结论如下:

1) 在掏槽眼电子雷管延期时间为 4 ms 时,既有隧道最大爆破峰值振速现场实测为 1.26 cm/s,很好地控制对既有隧道的爆破振动影响。

2) 新型炮孔消声装置设计及应用后,爆破噪声控制在标准以内。采用新型炮孔消声装置与采用普通炮泥对比:平均总装药量增加 22.01% 的情况下,噪声降低了 31.65%。充分说明本消声装置的可实用性。竹胶板防护门和设置防护门帘组合的应用,使得爆破飞石迸溅的风险降低。

参考文献

[1]

危皓,薛江龙,陈宗祥,等.大断面软弱围岩隧道爆破振动控制试验研究[J].铁道建筑,2022,62(3):136-140.

WEI H, XUE J L, CHEN Z X, et al. Experimental study on blasting vibration control of tunnel with large section and soft surrounding rock [J]. Railway Engineering, 2022, 62(3): 136-140.

[2]

孙琰,刘敬智,李吉杨芙.减振孔在缅甸某露天矿区爆破振动控制中的应用[J].中国矿业,2022,31(2):155-159.

SUN Y, LIU J Z, LI J Y F. Application of shock absorbing holes in blasting vibration control in an open mining area in Myanmar [J]. China Mining Magazine, 2022, 31(2): 155-159.

[3]

张志威,梅顶,吴建鹏.新建隧道近接既有隧道爆破施工减振措施研究[J].山西建筑,2023,49(3):168-170,185.

ZHANG Z W, MEI D, WU J P. Study on vibration reduction measures for blasting construction of new tunnel close to existing tunnel [J]. Shanxi Architecture, 2023, 49(3): 168-170, 185.

[4]

王松青,张全峰,汪海波,等.武汉地铁区间隧道下穿建筑物爆破振动控制技术研究[J].工程爆破,2020,26(1):85-90.

WANG S Q, ZHANG Q F, WANG H B, et al. Research on blasting construction technology in subway tunnel beneath buildings in Wuhan [J]. Engineering Blasting, 2020, 26(1): 85-90.

[5]

宗琦,吴杨勇,王松青,等.地铁隧道下穿砖混结构建筑物爆破振动控制[J].安徽理工大学学报(自然科学版),2019,39(3):16-22.

ZONG Q, WU Y Y, WANG S Q, et al. Blasting vibra-

tion control of subway tunnels under brick-concrete structures [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 39(3): 16-22.

[6]

李小贝.爆破施工对邻近既有隧道的振动响应研究[J].爆破,2021,38(4):149-155.

LI X B. Study on vibration response of blasting construction to adjacent existing tunnels [J]. Blasting, 2021, 38(4): 149-155.

[7]

王武刚.隧道爆破噪声控制技术研究[J].低温建筑技术,2021,43(1):142-145.

WANG W G. Research on noise control technology of tunnel blasting [J]. Low Temperature Architecture Technology, 2021, 43(1): 142-145.

[8]

龚伦.攀枝花铁矿降低爆破噪声的措施[J].工程爆破,2018,24(6):80-84.

GONG L. Measures of reducing blasting noise in Panzhihua Iron Ore [J]. Engineering Blasting, 2018, 24(6): 80-84.

[9]

孙燕.论述露天开采爆破噪声环境的影响评价[J].环境与发展,2018,30(4):28-29.

SUN Y. Discussion on impact assessment of open-pit mining blasting noise environment [J]. Environment and Development, 2018, 30(4): 28-29.

[10]

种玉配,熊炎林,齐燕军.轴向不耦合装药结构形式优化仿真研究[J].工程爆破,2018,24(2):1-7.

ZHONG Y P, XIONG Y L, QI Y J. Simulation study of optimization on the axial uncoupling charging structure [J]. Engineering Blasting, 2018, 24(2): 1-7.

[11]

熊炎林,种玉配,齐燕军,等.聚能爆破在隧道开挖成型控制中的仿真试验研究[J].爆材器材,2019,48(4):54-59.

XIONG Y L, ZHONG Y P, QI Y J, et al. Simulation test of shaped charge blasting in shaping control of excavation [J]. Explosive Materials, 2019, 48(4): 54-59.