

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.079

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 减振孔减振效应的数值模拟研究

赵蕊<sup>1</sup>, 李雅诗<sup>1</sup>, 王建新<sup>2</sup>, 彭琦<sup>2</sup>, 唐超华<sup>2</sup>, 朱建波<sup>1</sup>

(1. 天津大学 建筑工程学院; 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300350;

2. 深圳市市政设计研究院, 广东 深圳 518029)

**摘要:**利用显式动力有限元软件 AUTODYN 研究了减振孔对岩石地下洞室爆破产生的爆炸应力波传播与衰减以及对地表和邻近地下洞室动态响应的影响与规律。通过与爆破模型试验结果进行对比,验证了 AUTODYN 模拟地下洞室爆炸过程和应力波传播的有效性和准确性。通过数值模拟分析了不同减振孔参数对邻近洞室和地表的质点峰值振动速度(PPV)和减振孔屏障前后测点的隔振率的影响,揭示了减振孔参数变化对减振效果的影响规律。数值模拟结果表明:减振孔直径、孔间距、孔距爆源距离及孔排数均会对邻近地下洞室和地表的 PPV 及减振孔屏障前后测点的隔振率产生影响。随着减振孔直径、减振孔排数的增大,或者减振孔间距、减振孔距爆源距离的减小,邻近地下洞室和地表测点的 PPV 呈现减小趋势,减振孔屏障前后测点的隔振率呈现显著增大趋势,即减振孔减振效果增强。此外,随减振孔参数变化,减振孔前后和减振孔间岩体前后测点的隔振率呈现显著的差异性,前者明显大于后者,两者差值随孔直径的增加先增大后减小,随爆心距的增加迅速减小,随孔排数的增加没有明显变化。减振孔间距变化会影响测点与减振孔的相对位置,从而影响测点的隔振率大小。

**关键词:**爆破;减振孔;质点峰值振动速度;隔振率

**中图分类号:**TU94 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2021)02-0049-11

## Numerical study on vibration reduction effect of barrier holes

ZHAO Rui<sup>1</sup>, LI Yashi<sup>1</sup>, WANG Jianxin<sup>2</sup>, PENG Qi<sup>2</sup>, TANG Chaohua<sup>2</sup>, ZHU Jianbo<sup>1</sup>

(1. School of Civil Engineering; State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300350, P. R. China; 2. Shenzhen Municipal Design and Research Institute, Shenzhen 518029, Guangdong, P. R. China)

**Abstract:** The explicit dynamic FEM-based code AUTODYN was used to study the effect and law of barrier holes on blast-induced stress wave propagation and attenuation, as well as the dynamic responses of adjacent underground opening and ground. First of all, compared with the results of blasting model test, the effectiveness and accuracy of AUTODYN to simulate the process of underground opening explosion and stress wave propagation are verified. Then, the effects of different barrier hole parameters on peak particle velocity (PPV) of the adjacent chamber and ground, and the vibration-isolation rates of measuring points

**收稿日期:**2020-03-20

**基金项目:**国家重点研发计划(2018YFC0407002);国家自然科学基金(51974197)

**作者简介:**赵蕊(1993-),女,主要从事岩体波传播研究,E-mail:zhaoruibet@163.com.

朱建波(通信作者),教授,博士生导师,E-mail:jbzhu@tju.edu.cn.

**Received:**2020-03-20

**Foundation items:**National Key Research and Development Program (No. 2018YFC0407002); National Natural Science Foundation of China (No. 51974197)

**Author brief:**ZHAO Rui (1993-), main research interest: wave propagation in rock mass, E-mail: zhaoruibet@163.com.  
ZHU Jianbo (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: jbzhu@tju.edu.cn.

before and after barrier hole screen were analyzed through the numerical simulation method, and the pattern of varying barrier hole parameters on vibration reduction effect is revealed. The simulated results indicated that barrier hole diameter, hole spacing, the distance between hole and explosion center, and hole row have effects on PPVs of adjacent underground opening and ground and the vibration-isolation rates of measuring points before and after barrier hole screen. With increasing barrier hole diameter and barrier hole row, or decreasing barrier hole spacing and distance between barrier hole and explosion center, PPVs of the adjacent underground opening and ground show a decreasing trend and vibration-isolation rates of measuring points before and after barrier hole screen show a great increasing trend, that is, the vibration reduction effect of barrier hole is enhanced. In addition, with change of barrier hole parameters, the vibration-isolation rates of the measuring points before and after barrier hole and the measuring points before and after rock mass between barrier holes show significant differences. The former is obviously larger than the latter, and the difference between the two increases first and then decreases with increase of hole diameter, and decreases rapidly with increase of the distance between hole and explosion center. But it doesn't change significantly with the increase of barrier hole row. The change of barrier hole spacing could affect the relative position of the measuring point and the barrier hole, thus determining the vibration-isolation rate of the measuring point.

**Keywords:** blasting; barrier hole; peak particle velocity (PPV); vibration-isolation rate

工程爆破作为主要的施工手段被广泛应用于矿山开采、隧道开挖、基础设施建设等工程领域,与此同时,也带来了诸多负面效应。炸药在岩石中爆炸产生的能量主要用于对周围介质做功,另有部分能量以应力波的形式向外传播<sup>[1-2]</sup>。爆炸应力波的传播对爆破施工场地附近的建(构)筑物、边坡、邻近地下洞室等会产生严重危害<sup>[3-6]</sup>。因此,如何在不影响工程质量、工期的前提下利用减振技术降低爆破振动对周边的影响,一直是工程爆破亟待解决的关键问题。

天然岩体中存在如断层、节理、层理等不连续面。爆炸应力波在岩体中传播时,在不连续面处会发生反射、折射,导致波的能量减少、幅值减小、振动速度变小<sup>[7-9]</sup>。通过改变传播介质的物理性质,影响爆炸应力波在岩体中的传播与衰减,是目前地下工程爆破施工中行之有效的减振手段之一。依据此减振机理,在震源和被保护体之间设置减振孔,可以加速爆炸应力波的衰减,减小爆破振动对周围构筑物造成的影响。减振孔钻孔既不会产生额外振动,也不受开挖岩体条件的限制,具有施工工艺简单、布置方式灵活、对环境破坏小等优点,现已广泛应用于基坑、矿山、边坡、隧道爆破开挖、人防工程等领域<sup>[10-12]</sup>。

许多学者通过试验分析和数值模拟对减振孔的减振效果及影响因素进行研究。试验分析方面,徐亮<sup>[13]</sup>通过现场试验研究减振孔布置对地表振动的

影响。结果发现,布置减振孔可明显减小水平切向爆破能量,而对水平径向和垂直向的能量分布无明显影响。Uysal 等<sup>[14]</sup>进行了 3 排减振孔的现场爆破试验,与孔前测点 PPV 相比,孔后测点 PPV 降低了 18%。郑文富<sup>[15]</sup>通过模型试验发现,增加减振孔排数可导致径向主频增大,而对切向和垂直向主频影响不大。

数值模拟研究方面,Lei 等<sup>[16]</sup>通过 LS-DYNA 数值模拟发现,增大减振孔直径和减小孔间距,可以明显提高减振率,扩大振动屏蔽范围。杨典光<sup>[17]</sup>通过数值模拟研究发现,增加减振孔直径和孔排数可以有效降低振动速度,但并未进一步探究机理。Bian 等<sup>[18]</sup>采用离散元 UDEC 模拟研究减振孔对爆破地表振动的影响,通过对比水平振速和垂直振速发现,减振孔参数变化对垂直方向振速影响更大。Dohyun<sup>[19]</sup>通过 AUTODYN 进行隧道爆破施工时减振孔对地表振动的减振研究,对减振率随孔参数变化进行曲线拟合,提出安全系数 1.2。惠峰等<sup>[20]</sup>通过数值模拟研究了小净距隧道爆破中减振孔排数和爆心距对爆破应力波衰减的影响,但参数设置较少。

目前,减振孔减振效果的研究大多局限于爆破施工过程中减振孔对地表振动的影响,而对于岩石地下洞室爆破中减振孔对邻近洞室的动态响应以及对减振孔屏障前后测点的 PPV 影响规律的认识不

足。鉴于此,通过对减振孔的地下洞室爆破进行数值模拟,系统研究了不同孔参数对地下邻近洞室和地表振动响应的影响规律,探究了减振孔减振机理及减振孔减振效果机制,深入分析了减振孔屏障前后不同位置测点隔振率随孔参数变化的差异性。

## 1 数值模拟方法及其试验验证

AUTODYN 是一种显式动力有限元分析软件,用来解决固体、流体、气体及其相互作用的高度非线性动力学问题<sup>[21]</sup>。由于其具有界面友好、集成方便、材料库完善、求解复杂问题快速、求解精度高等特点,现已广泛应用于军工、航空、岩土、化学、汽车等领域。

### 1.1 试块制作

模型试验中长方体水泥砂浆试块模型如图 1(a)、(b)所示,试块尺寸为 800 mm×600 mm×400 mm,模型相似比例为 1:20。两个洞室直径为 200 mm,净间距为 200 mm,洞室顶部距离试块上表面为 200 mm,长 400 mm,贯通试块。左边为爆炸洞室,右边为邻近洞室。在两个洞室之间设置 1 排减振孔,减振孔间距为 50 mm,减振孔距爆源距离为 150 mm,减振孔直径分别为 5、10、15 mm,每种直径减振孔模型设置两次平行试验。

砂浆试块采用普通硅酸盐水泥(PC32.5)和细黄砂配制而成。在制备砂浆试块的同时,用相同的混合物浇筑 5 块 100 mm×100 mm×100 mm 的标准试样。用 CTS-25 非金属超声波检测仪测得标准试样的纵波速度。用 TJW-1000 型电液伺服岩石多功能试验机对其进行单轴压缩试验,测得其抗压强度和弹性模量。在计算出试块的密度、纵波速度、弹性模量之后,由式(1)求出试块的泊松比。取 5 个试块所测数据的平均值,最终得到砂浆试块的物理力学参数,如表 1 所示。

$$C_p = \sqrt{\frac{E(1-\mu)}{\rho(1+\mu)(1-2\mu)}} \quad (1)$$

表 1 砂浆试块物理力学参数

Table 1 Physico-mechanical parameters of mortar block

配比(水泥:黄砂:水)	密度 $\rho/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	纵波速度 $C_p/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
1:2:0.6	1 878	3 160
抗压强度/MPa	弹性模量 $E/\text{GPa}$	泊松比 $\nu$
30.6	2.99	0.47

试验所用炸药组成为含 5% 石墨的 2 g 黑索金

(RDX)粉末和含 1 g RDX 的雷管,见图 1(c)。玻璃管内径为 15 mm,RDX 粉末装入玻璃管后高 13.5 mm,RDX 装药密度为 1 260 kg/m<sup>3</sup>。用纸板将 RDX 药柱卡于爆破洞室中央,洞室两端用黄泥填堵密实,使剩余洞室空腔长 10 cm,则 RDX 装载密度为 0.95 kg/m<sup>3</sup>。装载密度为炸药总质量与爆破洞室体积之比<sup>[2]</sup>。

### 1.2 试验测试系统

由于爆破测振传感器难以预埋于试块内部,许多学者<sup>[22-23]</sup>在进行爆破模型试验时通常采用预埋应变片的方式来监测试块的爆破振动情况。基于此,对水泥砂浆试块进行超动态应变测试。测试系统主要由应变片、桥盒、LK2107A 型超动态应变仪、TST3406 动态测试分析仪(含采集卡)、特制静电屏蔽线组成,用于监测试块中由爆炸应力波引起的应变变化情况,该测试系统示意图如图 1(d)、(e)所示。

1)试验中采用型号为 BE120-3AA(11)、120  $\Omega$  的箔式环氧酚醛类电阻应变片。其敏感栅尺寸为 2.8 mm×2 mm,基底尺寸为 6.4 mm×3.5 mm,灵敏系数为 2.11%±1%,引线为 4 cm 镀银铜线。每块模型预埋 3 个应变砖,如图 1(b)所示,分别位于邻近洞室左侧壁 1、减振孔前方 2 和减振孔后方 3。应变砖尺寸为 20 mm×20 mm×10 mm,应变砖埋深为 300 mm,每个应变砖上粘贴 1 个径向应变片,如图 1(f)所示,用来记录测点沿  $x$  方向的应变(图 1(b))。应变砖与水泥砂浆试块的材料配比相同,以保持两者的弹性模量、波阻抗等一致,在应变片表面涂抹环氧树脂进行防潮绝缘处理后,浇筑于水泥砂浆试块中。

2)LK2107A 型超动态应变仪能够测量材料及结构发生任意变形时产生的动态应变,可进行动力强度研究及试验应力分析。

在测量中,为防止周围电磁干扰,影响监测结果,将测量导线与电源线绞扭,测量导线方向垂直于电源线方向,使得每一绞的感应电流与下一绞的感应电流相反,在绞扭线的外面采用较厚的铜金属屏蔽套包裹,并将屏蔽套两端接地。对信号电路采用一点接地方式,即仪器的外壳和铜金属屏蔽套在同一点接地<sup>[23]</sup>。

### 1.3 AUTODYN 数值模型

将爆破模型试验简化为一个 2D 平面应变问题,基于 AUTODYN 程序,建立减振孔直径变化时 RDX 炸药爆炸的 2D 仿真模型,模型尺寸及测点布置和试验相同,如图 1(b)所示。模型长 800 mm,高 600 mm。在模型水平中轴线处布置 3 个测点,测点 1 位于邻

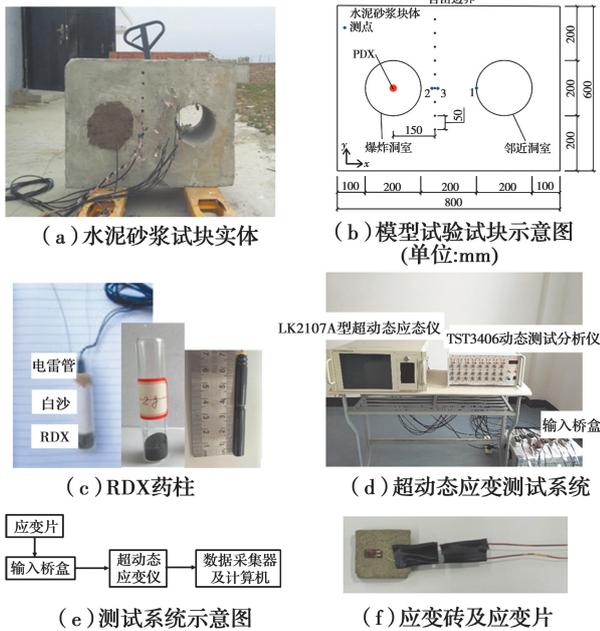


图 1 水泥砂浆试块及测试系统组成

Fig. 1 Cement mortar block and test system composition

近洞室左侧壁,测点 2 位于减振孔屏障前方,测点 3 位于减振孔屏障后方。模型边界设为自由边界。建立的 AUTODYN 模型材料包括岩石、炸药 (RDX) 和空气。岩石简化为均匀、各向同性的弹性材料,材料参数选取爆破模型试验中水泥砂浆试块的物理力学参数,如表 1 所示。空气材料从软件自带的材料库中选择。RDX 能量方程满足 JWL (Jones - Wilkins - Lee) 状态方程<sup>[21]</sup>

$$P = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega}{V} E \quad (2)$$

式中:  $P$  为爆轰产物的压力;  $V$  为爆轰产物的相对体积;  $E$  为 C-J (Chapman-Jouguet) 初始比内能;  $A$ 、 $R_1$ 、 $B$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为材料常数。RDX 各参数见表 2<sup>[24]</sup>。

表 2 AUTODYN 模拟 RDX 炸药参数值

Table 2 Values of parameters of RDX used in AUTODYN

密度/( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	$A/\text{GPa}$	$B/\text{GPa}$	$R_1$	$R_2$
1 260	334.77	9.500 9	6.71	1.26
$\omega$	C-J 爆速/( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	$E/(10^6 \text{kJ} \cdot \text{m}^{-3})$	C-J 爆压/GPa	
0.21	6 558.7	9.396	15.94	

空气和 RDX 炸药选用多材料 Euler 算法模拟,岩石材料用 Lagrange 算法模拟。岩石材料和空气材料通过 Lagrange-Euler 耦合实现接触, Lagrange-Euler 耦合是解决流固气耦合建模问题常用的有效方法。模型网格采用渐变网格,在炸药和减振孔处网格划分较密,远离此处,网格逐渐增大。最小网格

为 0.3 mm,最大网格为 3 mm,大约 25 万个网格单元,提高计算速度的同时也保证了计算精度。模型网格如图 2 所示。在 AUTODYN-2D 模型中,认为炸药沿爆破洞室空腔长度方向均匀分布,则装载密度可以简化为式(3)<sup>[2]</sup>。

$$S_{\text{RDX}} = \frac{\rho_{\text{load}} \cdot S_{\text{chamber}}}{\rho_{\text{RDX}}} \quad (3)$$

式中:  $\rho_{\text{load}}$ 、 $\rho_{\text{RDX}}$  分别为炸药装载密度和 RDX 炸药装药密度;  $S_{\text{chamber}}$ 、 $S_{\text{RDX}}$  分别为 AUTODYN 模型中洞室面积和 RDX 炸药面积。由于  $\rho_{\text{load}} = 0.95 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_{\text{RDX}} = 1 260 \text{ kg/m}^3$ , 则 AUTODYN 模型中 RDX 半径为 2.7 mm。

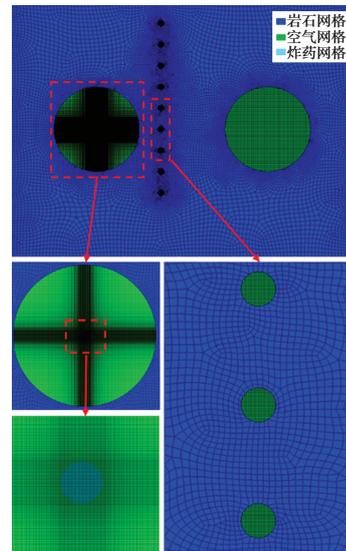


图 2 数值模型网格图

Fig. 2 Configuration of AUTODYN model grid

#### 1.4 对比验证

通过对比分析地下洞室爆炸中不同减振孔直径下岩石测点的隔振率和邻近洞室的峰值应变模型试验结果和数值模拟结果(表 3),验证 AUTODYN 软件模拟本研究的有效性和准确性。图 1(b)中,减振孔屏障前后的两个对称测点 2 和 3 组成一组,测得其峰值应变,通过式(4)求得该组测点的隔振率,作为表征减振孔减振效果的一种方法。

$$f = \frac{V_{\text{前}i} - V_{\text{后}i}}{V_{\text{前}i}} \quad (4)$$

式中:  $f$  为隔振率;  $V_{\text{前}i}$  为减振孔屏障前测点峰值应变或 PPV (质点峰值振动速度,单位为  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );  $V_{\text{后}i}$  为减振孔屏障后测点峰值应变或 PPV。

当孔径为 5 mm 时,试验和模拟所得测点 1、2、3 的应变时程曲线如图 3 所示。测点的峰值应变取曲线的首波峰值(第一峰值应变)。图中显示爆炸产生

的应力波在砂浆介质中传播时,在测点位置首先产生压缩应变;随着应力波的传播,遇到孔隙或块体边界等自由面时,生成反射拉伸波,产生拉伸应变;随后压应变和拉应变交替出现,形成小的波形波动。模拟和试验得到的首波峰值接近,但试验测得的首个反射拉伸波峰值大于数值模拟的结果。这可能与试验中水泥砂浆试块的非均质性和多相多孔性有关,其存在导致应力波多次反射后叠加产生较高幅值的反射拉伸波,从而生成较大的拉伸应变。

表 3 试验和数值模拟结果

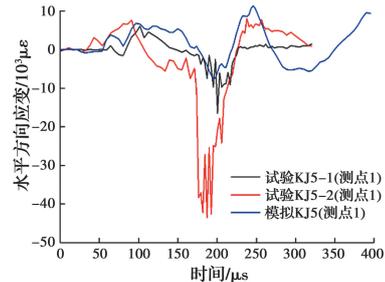
Table 3 Results of tests and numerical simulations

减振 孔直 径/mm	数值类别	水平方向第一峰值应变/ $10^3 \mu\epsilon$			隔振 率/%
		邻近洞室左 壁测点 1	孔前测 点 2	孔后测 点 3	
5	KJ5-1 试验结果	6.11	9.77	9.17	6.10
	KJ5-2 试验结果	7.68	/	/	/
	试验结果平均值	6.90	-	-	6.10
	数值模拟结果	6.82	8.77	8.20	6.50
10	KJ10-1 试验结果	5.70	19.30	15.69	18.70
	KJ10-2 试验结果	7.22	11.39	9.21	19.10
	试验结果平均值	6.46	-	-	18.90
	数值模拟结果	6.70	8.24	7.11	13.71
15	KJ15-1 试验结果	5.60	17.08	12.55	26.50
	KJ15-2 试验结果	/	14.86	9.54	35.80
	试验结果平均值	5.60	-	-	31.20
	数值模拟结果	6.14	12.80	9.14	28.59

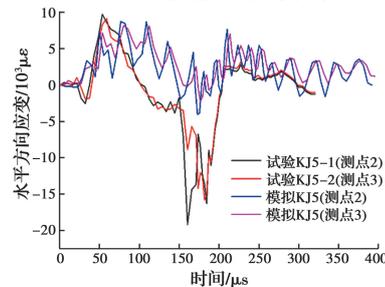
注:“/”表示此处数据缺失,可能由于外部干扰等原因导致试验仪器未测到;“-”表示此处不需要计算平均值;“KJ”表示“孔径”。

图 4 和图 5 分别为随减振孔直径变化时,邻近洞室左壁测点 1 水平方向第一峰值应变和隔振率的试验与模拟结果对比图。可以看出,随着减振孔直径的增加,邻近洞室左壁测点 1 的第一峰值应变逐渐减小,减振孔屏障前后测点的隔振率逐渐增大。这表明减振孔对爆炸应力波有屏蔽作用,且当减振孔直径增大时,爆炸应力波通过减振孔时能量消耗增大,隔振效果增强。

对比数值结果和试验结果可以看出,两者变化趋势一致,大小相近。但邻近洞室左壁测点 1 的第一峰值应变的数值模拟结果大于试验结果,隔振率的数值模拟结果小于试验结果。主要原因可能是:1)试样存在不均匀分布的问题,且由于搅拌不均而含有大量孔隙,从而导致爆炸应力波衰减;2)在有限元软件模拟



(a) 孔径 5 mm 时测点 1 的应变-时间曲线



(b) 孔径 5 mm 时测点 2、3 的应变-时间曲线

图 3 孔径 5 mm 时测点的应变-时间曲线

Fig. 3 Strain-time curve of measuring point when the barrier hole diameter is 5 mm

时,忽略了岩石材料(水泥砂浆介质)本身阻尼对应力波的衰减作用。因此,数值计算得出的邻近洞室的应变峰值大于试验结果,相应的隔振率小于试验结果。

表 4 为模拟与试验结果对比的误差分析。由表 4 可以看出,相对误差大多在 20% 以内,属于工程允许范围。当孔径为 10 mm 时,隔振率的相对误差超过了 20%,这可能是由于该次模型试验测量仪器误差或模型试块非均匀性较高,从而导致爆炸应力波通过减振孔时衰减较大。

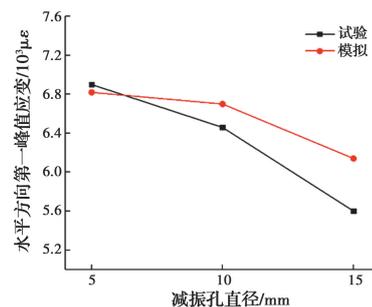


图 4 邻近洞室左壁测点 1 水平方向第一峰值应变随孔径变化试验与模拟对比

Fig. 4 The first-peak strain in horizontal direction at measuring point 1 on the left wall of adjacent opening with different barrier hole diameter from explosion test and AUTODYN modeling

综上所述,有限元软件 AUTODYN 可有效、准确地模拟地下洞室爆炸、爆炸应力波传播以及减振孔减振效果等问题。

表 4 模拟与试验结果对比误差分析

Table 4 Error analysis of comparison between simulation and test results

数值类别	水平方向第一峰值应变/ $10^{-3}$				隔振率/%			
	孔径 5 mm	孔径 10 mm	孔径 15 mm	平均值	孔径 5 mm	孔径 10 mm	孔径 15 mm	平均值
试验值	6.90	6.46	5.60		6.10	18.90	31.20	
模拟值	6.82	6.70	6.14		6.50	13.71	28.59	
相对误差/%	1.16	3.70	9.64	4.83	6.56	27.46	8.36	14.13

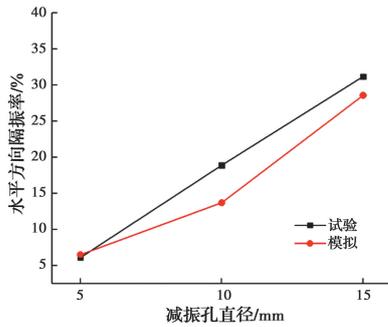


图 5 隔振率随孔径变化的试验与模拟对比

Fig. 5 Vibration-isolation rate with different barrier hole diameter from explosion test and AUTODYN modeling

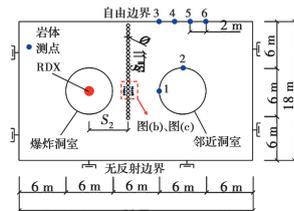
## 2 减振孔减振效应的数值模拟

利用 AUTODYN 建立含减振孔的 2D 爆破隔振效应模型,分别探讨了减振孔直径、孔间距、孔距爆源距离和孔排数对爆炸应力波的传播和衰减的影响。

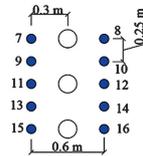
### 2.1 数值模型

采用的数值模型如图 6 所示,模型尺寸为  $30\text{ m} \times 18\text{ m}$ ,两个圆形地下洞室直径为  $6\text{ m}$ ,洞室顶部距离模型上表面为  $6\text{ m}$ ,两个洞室净间距为  $6\text{ m}$ ,左侧洞室为爆炸洞室,右侧为邻近洞室。在两个洞室之间布设减振孔。共布置 16 个测点,其中测点 1 和测点 2 位于右侧邻近洞室左侧壁和顶部,用于监测邻近洞室的动态响应过程。测点 3 至测点 6 位于邻近洞室上方的地表,间距为  $2\text{ m}$ ,测点 3 位于邻近洞室左侧壁正上方,用于监测地表的动态响应过程。在减振孔屏障前后各布置了 5 个测点,测点 7-8、11-12、15-16 位于减振孔前后,测点 9-10、13-14 位于减振孔间岩体前后,用于监测爆炸应力波通过减振孔前后的能量变化。

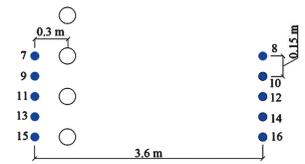
为了避免模型四周反射的应力波影响数值结果的准确性,对模型左右及下边界进行人工无反射处理,模型上边界是地表,为自由边界。岩石参数见表 5<sup>[8]</sup>,炸药采用模型试验中的 RDX 参数,见表 2。炸



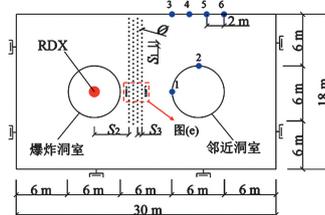
(a)  $\Phi, S_1, S_2$ 变化时数值模型



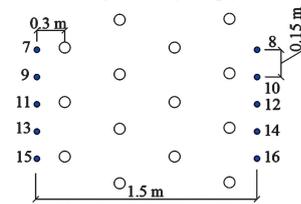
(b)  $\Phi, S_1$ 变化时减振孔屏障前后测点分布



(c)  $S_2$ 变化时减振孔屏障前后测点分布



(d)  $n$ 变化时数值模型



(e)  $n$ 变化时减振孔屏障前后测点分布

注:  $\Phi$ 为减振孔直径;  $S_1$ 为孔间距;  $S_2$ 为孔距爆源距离;  $S_3$ 为排间距;  $n$ 为孔排数。

图 6 AUTODYN 数值模型图

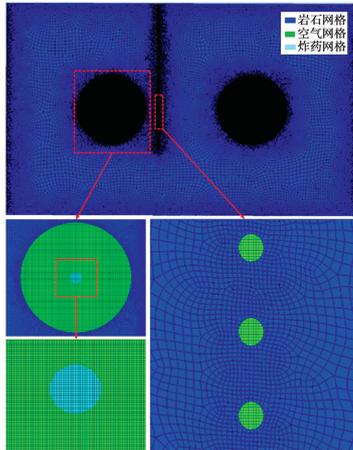
Fig. 6 Configuration of AUTODYN model

药装载密度取  $15\text{ kg/m}^3$ ,由式(3)算得,RDX 炸药半径为  $327\text{ mm}$ 。模型网格采用渐变网格,由炸药和减振孔向外,网格由密变疏,最小网格为  $1\text{ cm}$ ,最大网格为  $17.5\text{ cm}$ ,大约 18 万个网格单元。模型网格如图 7 所示。

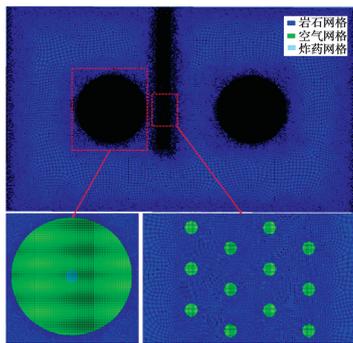
表 5 岩石参数表

Table 5 Parameters of rock used in AUTODYN

密度/(kg · m <sup>-3</sup> )	弹性模量/GPa	泊松比
2 120	27. 878	0. 298 7
体积模量/GPa	剪切模量/GPa	
23. 082	10. 733	



(a) 单排孔时数值网格图



(b) 多排孔时数值网格图

图 7 数值模型网格图

Fig. 7 Configuration of AUTODYN model grid

### 2.2 减振孔直径对减振效果的影响

数值模型如图 6(a) 所示,  $S_1$  为 0.5 m,  $S_2$  为 4 m,  $n$  为 1 排。

图 8(a)、(b)、(c) 分别为对应不同减振孔直径下地下洞室测点 1-2 处 PPV、地表测点 3-6 处 PPV、减振孔屏障前后测点 7-16 处隔振率变化曲线。从数值模拟结果可以看出, 测点 1-2(邻近洞室左侧壁和洞顶)和测点 3-6(地表)处 PPV 均随着减振孔直径的增加呈明显的减小趋势, 说明大直径减振孔可更有效衰减爆炸应力波, 与试验结论相同。对此分析认为, 爆炸应力波传播至减振孔时, 会产生反射、透射和绕射现象。由于减振孔中空气的存在, 部分应力波能量发生耗散, 其余波能以反射波和绕射波的形式继续在块体中传播。当减振孔直径增大时, 一

方面, 入射波波能耗散增加, 使得绕射进入减振孔后方的应力波减少, 并且由于绕射路径的增长, 绕射传播过程中, 应力波的衰减增加; 另一方面, 减振孔间的净间距减小, 使得直接通过孔间介质传播的应力波减少, 从而亦导致应力波衰减增大。

随着减振孔直径的增加, 隔振率呈明显的增大趋势, 与试验结果一致。当减振孔直径从 0.1 m 增大到 0.4 m 时, 隔振率从大约 10% 增大到 50%, 说明减振孔直径变化对减振孔减振效果影响显著。从图 8(c) 中可以看出, 隔振率大小呈现明显的两种分布: 位于减振孔前后的测点 7-8、11-12、15-16 隔振率大小接近, 而位于减振孔间岩体前后的测点 9-10、13-14 隔振率大小接近, 前者明显大于后者。两者差值随减振孔直径增加逐渐增大, 在孔径为 0.3 m 时达到最大, 之后逐渐缩小。这是因为, 相比于孔间岩体, 减振孔对爆炸应力波的削弱作用更强。并且, 与位于孔间岩体前后的测点相比, 位于孔前后的测点距减振孔更近, 因此, 可以获得更好的隔振效果。但当孔径增大至 0.4 m 时, 孔间隙变得很小, 减振孔可近似看作连续屏障, 因此, 两者差值缩小。

### 2.3 减振孔间距对减振效果的影响

数值模型如图 6(a) 所示,  $\Phi$  为 0.1 m,  $S_2$  为 4 m,  $n$  为 1 排。

图 9(a)、(b)、(c) 分别为减振孔间距变化时, 对应的地下洞室壁测点 1-2 处 PPV、地表测点 3-6 处 PPV、减振孔屏障前后测点 7-16 处隔振率的变化曲线。从数值模拟结果可以看出, 测点 1-2 处 PPV 随着减振孔间距的增加呈缓慢增加趋势, 测点 3-6 处 PPV 随减振孔间距的增加呈明显增加趋势, 说明随减振孔间距的增大, 减振效果减弱。这是由于减振孔间距变大时, 一方面, 更多的爆炸应力波可直接从减振孔间的介质传播到减振孔后方, 另一方面, 减振孔离散性变大, 使得减振孔对爆炸应力波的整体屏蔽作用变差。因此, 在实际工程中, 建议在爆源和保护区之间布设较密集的减振孔, 可以得到更好的减振效果, 减小爆炸应力波对保护区的破坏作用。

图 9(c) 中, 测点 7-16 处隔振率随减振孔间距的增加呈明显的减小趋势, 当减振孔间距由 0.2 m 增大到 0.5 m 时, 隔振率由大约 22% 减小到 8%。另外, 5 组测点与减振孔的相对位置会随减振孔间距的变化而变化。当孔间距较小时(0.2 m 或 0.3 m), 减振孔整体更接近连续屏障, 5 组测点的隔振率大

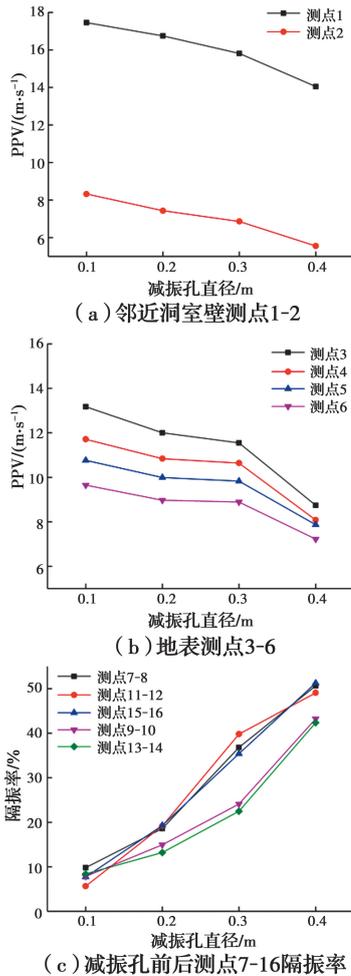


图 8 PPVs 及隔振率随减振孔直径的变化

Fig. 8 PPVs and vibration-isolation rate vary with barrier hole diameter

小相近;当孔间距较大时(0.4 m 或 0.5 m),减振孔之间离散性增加,5 组测点的隔振率大小呈现差异性。

#### 2.4 减振孔距爆源距离对减振效果的影响

数值模型如图 6(a) 所示,  $\Phi$  为 0.1 m,  $S_1$  为 0.3 m,  $n$  为 1 排。

减振孔距爆源距离变化对减振孔减振效果影响变化规律见图 10 所示。由图 10(a) 可以看到,随着减振孔与爆源之间距离的增大,测点 1-2(邻近洞室左侧壁和洞顶)处 PPV 呈现缓慢增大的变化规律。由图 10(b) 可以看到,随着减振孔与爆源之间距离的增大,测点 3-6(地表)处 PPV 呈现明显增大的变化规律,说明减振孔减振效果随爆心距的增加而减弱。分析认为,应力波随着传播距离的增加而逐渐衰减。当减振孔距离爆源较近时,波的能量较大,减振孔的存在可以有效阻隔大部分爆炸应力波的传

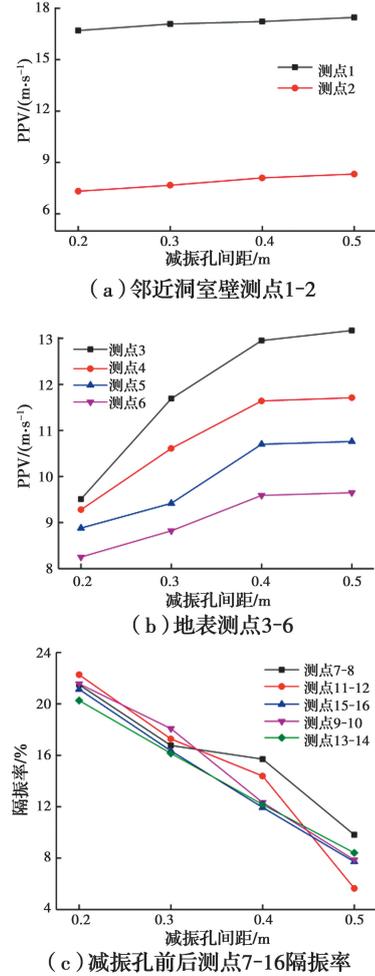


图 9 PPVs 及隔振率随减振孔间距的变化

Fig. 9 PPVs and vibration-isolation rate vary with barrier hole spacing

播;而当减振孔距爆源较远时,相较于前者,更多的波能在经过减振孔之前,发生传播耗散,减振孔对爆炸应力波的屏蔽作用变小,从而减振效果减弱。因此,在实际工程中,为了增强减振效果,更好地屏蔽爆炸应力波的传播,建议在距爆源较近的位置布设减振孔。

由图 10(c) 可以看到,随减振孔与爆源之间距离的增大,隔振率呈现明显减小的变化规律,且当减振孔距离爆源较近时(爆心距为 4~5 m),隔振率减幅大,爆心距的变化对减振孔的减振效果影响程度大;而当减振孔距离爆源较远时(爆心距为 5~7 m),隔振率减幅变小,爆心距的变化对减振孔的减振效果影响程度变小。另外,位于减振孔前后的 3 组测点 7-8、11-12、15-16 的隔振率大于减振孔间岩体前后的 2 组测点 9-10、13-14 的隔振率,且差距随爆心距的增加而减小,当爆心距大于 5 m 时,5 组测点的隔振率大小基本相同。

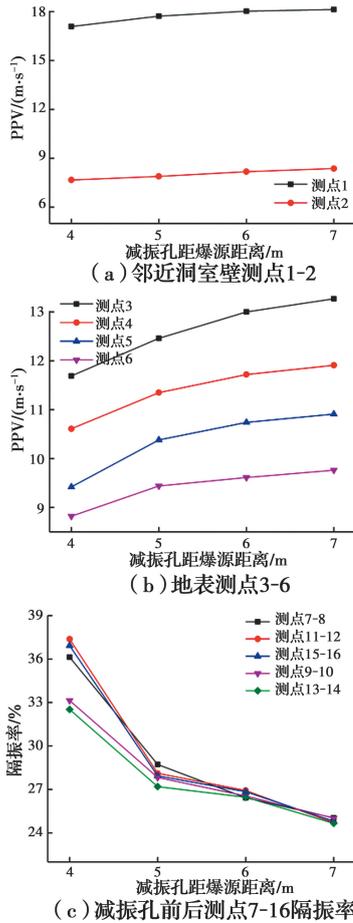


图 10 PPVs 及隔振率随减振孔距爆源距离变化

Fig. 10 PPVs and vibration-isolation rate vary with distance between barrier hole and explosion center

### 2.5 减振孔排数对减振效果的影响

数值模型如图 6(d)所示,  $\Phi$  为 0.1 m,  $S_1$  为 0.3 m,  $S_2$  为 4 m,  $S_3$  为 0.3 m。

减振孔排数变化对减振孔减振效果影响的数值模拟结果见图 11 所示。由图 11(a)、(b)可以看出, 测点 1-2(邻近洞室左侧壁和洞顶)处 PPV 和测点 3-6(地表)处 PPV 均随减振孔排数的增大明显减小。这主要是由于爆炸应力波通过更多排数的减振孔时会发生多次透、反射和绕射, 传播方向被干扰, 传播路径增长, 使得爆炸应力波能量发生更多的耗散, 从而导致通过减振孔的应力波幅值减弱。因此, 在实际工程中, 在一定范围内合理布设多排减振孔可以起到更好的减振效果。

由图 11(c)可以看出, 随着减振孔排数的增加, 这 5 组测点的隔振率均明显增大。孔前后和孔间岩体前后得到的结果依然表现出较明显的差异, 总体上前者的隔振率更大, 隔振效果更好。随孔排数增加, 两者变化幅度一致, 差值没有明显变化。

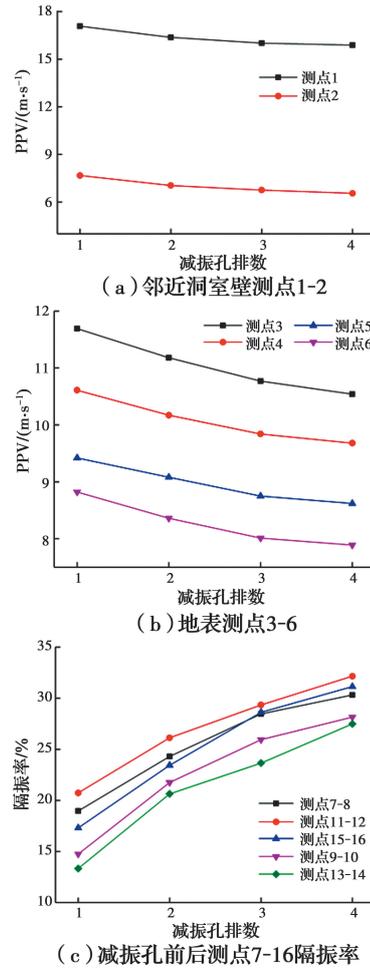


图 11 PPVs 及隔振率随减振孔排数变化

Fig. 11 PPVs and vibration-isolation rate vary with barrier hole row

此外, 对比图 8(a)、图 9(a)、图 10(a)、图 11(a) 可以看出, 当减振孔直径变化时, 邻近洞室 PPV 变化比较明显; 而当减振孔间距、孔距爆源距离及孔排数变化时, 邻近洞室 PPV 虽有增大或减小的趋势, 但变化不明显。而对比图 8(c)、图 9(c)、图 10(c)、图 11(c) 可以看出, 减振孔参数变化时, 减振孔屏障前后测点的隔振率大小均有明显变化。其中, 减振孔直径变化时, 隔振率的变化幅度最大。邻近洞室 PPV 变化不明显的原因可能是由于邻近洞室离爆源较远, 爆炸应力波到达此处时, 大部分能量已经耗散, 所以, 邻近洞室的振动绝对值变化不明显。相比而言, 减振孔屏障前后测点的隔振率变化比较明显, 主要是由于减振孔参数变化对靠近减振孔测点的 PPV 影响较大。

## 3 结论

针对地下岩体工程中的爆破减振问题, 通过有

限元数值模拟软件 AUTODYN 建立了含减振孔的数值模型,经爆破试验验证后,系统地分析了在爆炸作用下地下洞室不同参数减振孔对邻近洞室和地表的动态响应特性的影响,探究了减振孔参数对减振孔减振效果的影响规律。主要结论如下:

1)减振孔尺寸、位置和排列的变化均会对减振孔减振效果产生影响。随着减振孔直径和孔排数的增加,或者随着孔间距和孔距爆源距离的减小,地下邻近洞室和地表的 PPV 减小,减振孔屏障前后测点的隔振率明显增大,减振效果更显著。

2)减振孔直径变化时,不同位置测点的隔振率大小呈现如下两种分布:减振孔前后测点的隔振率大小接近,而减振孔间岩体前后测点的隔振率大小接近。且前者明显大于后者,两者差值随孔直径的增大先增大后缩小。

3)减振孔距爆源距离变化时,减振孔前后的 3 组测点隔振率大于减振孔间岩体前后的 2 组测点隔振率,两者差值随爆心距的增加迅速缩小。减振孔排数变化时,隔振率大小呈现同样的分布,但两者差值随孔排数增加没有明显变化。

4)减振孔间距变化会影响测点与减振孔的相对位置。当孔间距较小时,5 组测点的隔振率大小相近;而当孔间距较大时,5 组测点的隔振率大小呈现差异性。

5)减振孔直径对邻近洞室振动和隔振率的影响程度最大,而孔间距、减振孔距爆源距离和孔排数等的影响程度相对较小。

#### 参考文献:

- [1] 杨仁树,丁晨曦,王雁冰,等. 爆炸应力波与爆生气体对被爆介质作用效应研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2016, 35(Sup2): 3501-3506.  
YANG R S, DING C X, WANG Y B, et al. Action-effect study of medium under loading of explosion stress wave and explosion gas [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2016, 35(Sup2): 3501-3506. (in Chinese)
- [2] DENG X F, CHEN S G, ZHU J B, et al. UDEC-AUTODYN hybrid modeling of a large-scale underground explosion test [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2015, 48(2): 737-747.
- [3] ZHU J B, LI Y S, WU S Y, et al. Decoupled explosion in an underground opening and dynamic responses of surrounding rock masses and structures and induced ground motions: A FEM-DEM numerical study [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2018, 82: 442-454.
- [4] DENG X F, ZHU J B, CHEN S G, et al. Numerical study on tunnel damage subject to blast-induced shock wave in jointed rock masses [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2014, 43: 88-100.
- [5] LI H B, XIA X, LI J C, et al. Rock damage control in bedrock blasting excavation for a nuclear power plant [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2011, 48(2): 210-218.
- [6] LI X B, LI C J, CAO W Z, et al. Dynamic stress concentration and energy evolution of deep-buried tunnels under blasting loads [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 104: 131-146.
- [7] DENG X F, ZHU J B, CHEN S G, et al. Some fundamental issues and verification of 3DEC in modeling wave propagation in jointed rock masses [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2012, 45(5): 943-951.
- [8] ZHU J B, DENG X F, ZHAO X B, et al. A numerical study on wave transmission across multiple intersecting joint sets in rock masses with UDEC [J]. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2013, 46(6): 1429-1442.
- [9] LI J C, LI N N, CHAI S B, et al. Analytical study of ground motion caused by seismic wave propagation across faulted rock masses [J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 2018, 42(1): 95-109.
- [10] 孙崔源, 薛里, 刘世波, 等. 深基坑减震孔降震效果试验和数值模拟研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(Sup1): 237-242.  
SUN C Y, XUE L, LIU S B, et al. Experimental and numerical simulation on vibration reduction effect of damping holes for deep foundation pits [J]. Acta Armamentarii, 2017, 38(Sup1): 237-242. (in Chinese)
- [11] 孙振, 谢事臻, 张宪堂, 等. 减震孔在小间距隧道爆破开挖中的降振效应[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2019, 38(1): 25-31, 39.  
SUN Z, XIE S Z, ZHANG X T, et al. Vibration reduction effect of damping holes in blasting excavation of tunnels with small spacing [J]. Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 38(1): 25-31, 39. (in Chinese)

- [12] 黄富强, 张大岩, 夏祥. 核电站核岛基础爆破开挖减震控制[J]. 土工基础, 2012, 26(1): 30-32.  
HUANG F Q, ZHANG D Y, XIA X. Blasting vibration control of foundation pit excavation in nuclear unit at a nuclear power plant [J]. Soil Engineering and Foundation, 2012, 26(1): 30-32. (in Chinese)
- [13] 徐亮. 多排密集钻孔爆破减振理论及设计方法研究[D]. 福建 泉州: 华侨大学, 2014.  
XU L. Study of the blasting damping theory and the design method of multi-row drilling holes [D]. Quanzhou, Fujian: Huaqiao University, 2014. (in Chinese)
- [14] UYSAL O, ERARSLAN K, CEBI M A, et al. Effect of barrier holes on blast induced vibration [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2008, 45(5): 712-719.
- [15] 郑文富. 减振孔参数对降振效率影响研究[D]. 湖南湘潭: 湖南科技大学, 2016.  
ZHENG W F. Study of damping hole parameters influence on blasting vibration reduction [D]. Xiangtan, Hunan: Hunan University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [16] LEI Z, KANG Q, ZHAO M S, et al. Numerical simulation and experimental study on vibration-decreasing function of the barrier holes [J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 602/603/604/605: 53-59.
- [17] 杨典光. 减震孔对爆破地震的隔振效果研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2015.  
YANG D G. The study of vibration isolation mechanism and effect of damping hole in blasting seismic [D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2015. (in Chinese)
- [18] BIAN K F, LI H B, LIU Y Q. Numerical simulation for the damping effect of empty holes on blasting vibration [J]. Advanced Materials Research, 2014, 936: 1490-1495.
- [19] PARK D. Reduction of blast-induced vibration intunnelling using barrier holes and air-deck [C]// Proceedings of the 12th ISRM Congress, October 18-21, 2011, Beijing, International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering, 2011: 17-26.
- [20] 惠峰, 李志龙, 徐全军, 等. 空孔对爆破地震波减震作用的数值模拟分析[J]. 爆破, 2012, 29(4): 58-61, 116.  
HUI F, LI Z L, XU Q J, et al. Numerical simulation on effect of empty hole on damping of blasting vibration [J]. Blasting, 2012, 29(4): 58-61, 116. (in Chinese)
- [21] AUTODYN User Manual [M]. Version 6. 1, Century dynamics, 2005.
- [22] 高祥涛, 解北京. 岩石中爆炸应变波信号测试与分析[J]. 爆破, 2013, 30(2): 41-46.  
GAO X T, XIE B J. Analysis and measurement of blasting strain wave signal in rock [J]. Blasting, 2013, 30(2): 41-46. (in Chinese)
- [23] LIU F, GUO Z R, LV H, et al. Test and analysis of blast wave in mortar test block [J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2018, 108: 80-85.
- [24] 项大林, 荣吉利, 李健, 等. 基于KHT程序的RDX基含铝炸药JWL状态方程参数预测研究[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(3): 239-243.  
XIANG D L, RONG J L, LI J, et al. JWL equation of state parameters prediction of RDX-based aluminized explosive based on KHT code [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(3): 239-243. (in Chinese)

(编辑 王秀玲)