

# 浅埋隧道掘进爆破的地表震动效应试验研究

张继春<sup>1</sup>, 曹孝君<sup>1</sup>, 郑爽英<sup>2</sup>, 郭学彬<sup>3</sup>

(1. 西南交通大学 土木工程学院, 四川 成都 610031; 2. 西南交通大学 环境科学与工程学院, 四川 成都 610031;

3. 西南科技大学 环境与资源学院, 四川 绵阳 621002)

**摘要:** 以渝怀铁路人和场浅埋隧道工程为背景, 进行掘进爆破的地表震动效应试验。通过测量掘进爆破引起的不同位置处的地表振动速度波形, 研究地表震动特性及其变化规律。试验与分析结果表明: (1) 掏槽孔爆破产生的地震效应最强烈, 其震动强度是其他各类炮孔爆破的2倍以上; (2) 辅助孔、崩落孔和周边孔爆破引起的地表振动速度并不总是随着其单段装药量的增加而增大; (3) 浅埋隧道开挖区将造成掘进爆破产生的地表震动出现“空洞效应”; (4) 掘进前方的爆破地震效应可用萨道夫斯基公式进行预测, 掘进后方的爆破地震波则不符合这一衰减规律。人和场隧道掘进前方的地震波衰减参数为  $K = 232.8$ ,  $\alpha = 1.90$ 。

**关键词:** 爆破工程; 浅埋隧道; 地表震动; 空洞效应

**中图分类号:** TV 542

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000 - 6915(2005)22 - 4158 - 06

## EXPERIMENTAL STUDY ON VIBRATION EFFECTS OF GROUND DUE TO SHALLOW TUNNEL BLASTING

ZHANG Ji-chun<sup>1</sup>, CAO Xiao-jun<sup>1</sup>, ZHENG Shuang-ying<sup>2</sup>, GUO Xue-bin<sup>3</sup>

(1. *School of Civil Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;*

2. *School of Environmental Science and Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;*

3. *School of Environment and Resource, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621002, China)*

**Abstract:** Taking the project of Renhechang shallow tunnel for Chongqing—Huaihua railway as the background, the field experiments of vibration effects of the ground in tunneling blasting have been done. Based on the measurement of the waveforms of the vibration velocity in different distances away from the tunneling blasting sources on the ground, the vibration characteristic of the ground and its varying laws are studied. Four blasting experiments for the shallow tunnel were carried out and twenty-seven waveforms of measured point vibration were obtained. The results of the tests and analysis show that: (1) the seismic effect of cutting hole blasting is the most intensive and its vibration intensity is over two times greater than that of the other blast-holes blasting; (2) the vibration velocities of the ground resulting from relief, breast and trim holes blasting do not always become greater with the increase of their single period charges; (3) the excavation region of the shallow tunnel may cause the hollow effect of ground vibration in tunneling blasting; and (4) the blasting vibration effect along the tunneling direction can be forecasted by Sadoy's formula, but the formula is not suited to the forecast of the opposite direction. Moreover, for Renhechang shallow tunnel, the attenuation parameters of seismic waves along the tunneling direction are  $K = 232.8$  and  $\alpha = 1.90$ .

**Key words:** blasting engineering; shallow tunnel; ground vibration; hollow effect

**收稿日期:** 2004 - 05 - 13; **修回日期:** 2004 - 08 - 16

**作者简介:** 张继春(1963 -), 男, 博士, 1984年毕业于重庆大学采矿工程专业, 现为教授、博士生导师, 主要从事爆破工程、岩土工程结构的动力特性与防护技术等方面的教学与研究。E-mail: jc Zhang2004@126.com。

## 1 引言

随着城市地下工程建设的增多, 开挖爆破对地表建筑物、构筑物产生的震动危害愈来愈受到人们的重视。目前对隧道爆破的震动效应研究多集中于对衬砌的影响和临近隧道的动力作用分析<sup>[1~5]</sup>, 并提出了隧道爆破地震波衰减规律应按照掌子面上不同的炮孔爆破类型来描述的观点和方法<sup>[6]</sup>。为控制爆破震害, 工程上多采用震动监测来了解爆破的震动强度, 分析爆破地震对地表建筑物安全的影响程度<sup>[7~10]</sup>。同时, 还针对具体的爆破环境条件, 提出了限制最大单段装药量的短进尺微差爆破技术措施<sup>[11, 12]</sup>。然而, 过小的单循环进尺又会降低施工效率, 影响工程进度, 使工程成本增大。因此, 如何正确处理爆破震害控制与工程效率之间的矛盾, 已成为市区内隧道爆破施工的关键问题之一。

事实上, 要从根本上解决这个问题, 必须先弄清楚隧道掘进爆破引起的地表震动特性及其影响范围。特别是对于埋深小于 30 m 的浅埋隧道施工, 由于已开挖的洞身改变了浅层岩体的整体结构, 使掘进爆破产生的地震效应造成的危害更大, 其地表震动特性更复杂。因此, 只有明确了地表的震动效应特点, 才能提出合理可行的减震爆破技术, 达到既控制爆破震害, 又提高工程效率的目的。

本文以渝怀铁路人和场浅埋隧道工程为背景, 通过对现场爆破试验实测震动数据的分析, 研究其地表震动特性及其变化规律, 讨论地表震动强度与爆破装药量之间的相互关系。

## 2 爆破条件与试验方案

### 2.1 爆破条件

现场试验选择在渝怀铁路十大控制性工程之一的人和场隧道工点进行, 该隧道位于重庆市江北区人和镇, 全长 4 734 m, 其中, DK16+100~DK16+575 区段从人和场立交桥及地表公路下穿过。隧道拱顶至地表的距离为 27~29 m, 该段隧道为单行浅埋隧道, 断面形状为马蹄型, 开挖断面高为 9 m, 最宽为 6.28 m。

隧道围岩多属 IV, V 级, 岩性以泥岩夹砂岩为主。岩石的韧性较大, 普氏系数  $f$  为 6~10, 可爆性较好。岩层为单斜构造, 岩层倾角为 10°~25°, 有 3 组同向延伸的节理较发育。

人和场隧道在非闹市区采用全断面掘进爆破施工, 因一次开挖断面较大, 单段最大装药量在 20 kg 以上, 爆破地震效应较大。在隧道下穿立交桥及地表公路时, 为降低爆破震动, 保证地表建筑物的安全, 在该区段采用上、下断面分部开挖方案, 即: 上断面掘进爆破, 下断面水平孔拉槽爆破。上断面开挖高度为 5.2 m, 断面面积为 27 m<sup>2</sup>, 下断面开挖面积为 23 m<sup>2</sup>。

现场震动效应试验在隧道穿越立交桥的 200 m 范围内进行, 该区域的地势较平坦, 相距 10 m 的高差小于 0.5 m。考虑到掘进爆破的地震效应大于拉槽爆破, 本次试验主要观测研究上断面掘进爆破的地表震动特性。上断面采用垂直楔形掏槽(掏槽孔与掌子面的夹角为 60°~65°)的一次掘进爆破成形施工方法, 单循环进尺控制在 1.5~2.7 m。

### 2.2 试验方案

已有的监测结果<sup>[13]</sup>表明, 隧洞口的爆破震动比隧洞内的顶部强烈。考虑到隧道成形后, 改变了岩体的整体结构, 有可能在成洞区引起地表振动速度的放大。为全面了解浅埋隧道爆破引起的地表震动效应, 现场试验中以掘进掌子面(爆区)为中心, 在地表沿隧道轴线对称布置震动测点, 测点间距为 5 m。每次爆破在掘进的正反 2 个方向各布置 4 个测点, 掌子面上方布置 1 个测点, 其布置形式如图 1 所示。

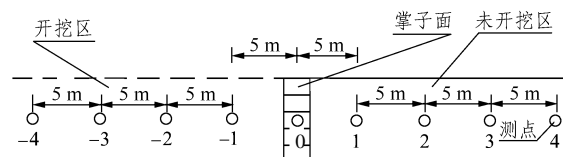


图 1 振动速度测点的平面布置形式

Fig.1 Plane layout of measuring points for vibration velocity

由于测点位于爆破点上方, 地表质点的垂直向振动速度一般要大于其水平向振动速度<sup>[14]</sup>。因此, 本次试验只测量地表的垂直向振动速度波形。此外, 为了解隧道掘进时各段爆破(不同作用的炮孔爆破)的地震效应强弱, 防止相邻段的地震波叠加, 要求爆破试验中各段的微差时间一般不小于 200 ms。

### 2.3 测量方法

震动测量系统由拾振器、记录仪和笔记本电脑组成。采用四川动态测试研究所生产的 EXP2850 型 2 通道爆破震动分析仪记录震动信号。该仪器的最

高采样频率为 50 K，可分 4 段记录数据，每段存储深度为 16 K，采样延时为 0~12 K，分为内触发和外触发 2 种形式，输入满量程为 ±10 mV~±40 V。拾振器采用 SD-1 型速度传感器，其自振频率为 10 Hz，灵敏度为 0.35~0.37 V/(cm·s<sup>-1</sup>)。

为控制爆破产生的地表震动效应，避免出现安全事故，要求试验中的单段装药量不大于 20 kg。鉴于试验区岩体为砂岩和泥岩夹砂岩，完整性较好，参照同类岩体的爆破地震波衰减系数  $K = 200 \sim 300$ 、衰减指数  $\alpha = 1.70 \sim 2.00$  进行估算，爆破引起的地表质点振动速度将小于 4 cm/s，传感器的输出电压不大于 1.5 V。为保证记录到完整的振动速度波形，将分析仪的量程设定为 1~2 V，延时设为 -4 K，采样频率设为 10 K，采用内触发方式。

### 3 震动试验的测量结果分析

因岩体呈单斜构造，为排除岩层对地表震动特性的影响，在隧道贯通前的 200 m 内，分别在 2 个相对的掘进方向各进行了 2 次爆破震动试验。试验中采用非电导爆管雷管微差方式起爆，各次爆破参数列于表 1 中。

表 1 地表震动试验爆破参数

Table 1 Blasting parameters for ground vibration experiment

试验号	段别	炮孔类型	装药量/kg	试验号	段别	炮孔类型	装药量/kg	
1	1	掏槽孔	18.0	3	1	掏槽孔	14.4	
	9	一排辅助孔	6.3		9	一排辅助孔	10.8	
	13	二排辅助孔	16.8		13	二排辅助孔	15.0	
	15	底板孔	7.0		15	底板孔	7.0	
	17	崩落孔	13.6		17	崩落孔	11.6	
	19	周边孔	13.0	20	周边孔	12.6		
2	1	掏槽孔	10.8	4	1	掏槽孔	18.0	
	5	一排辅助孔	7.2		9	一排辅助孔	8.1	
	9	二排辅助孔	10.8		13	二排辅助孔	12.2	
	13	一排崩落孔	15.0		15	底板孔	5.3	
	15	底板孔	7.0		17	崩落孔	11.6	
	17	二排崩落孔	11.6	20	周边孔	9.6		
	20	周边孔	12.6					

#### 3.1 地表震动特性分析

4 次爆破震动试验中共布置了 36 个测点，除 9

个测点因记录仪未触发没有采集到数据外，其余 27 个测点都记录到了完整的震动波形。图 2, 3 分别为第 3 次试验中测点 1, -1 处的振动速度波形，图 4 为第 4 次试验中测点 0 处的振动速度波形。

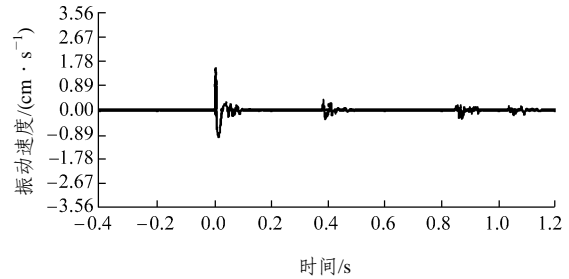


图 2 第 3 次试验中测点 1 处的振动速度波形

Fig.2 Vibration velocity waveform of measured point No.1 in the third experiment

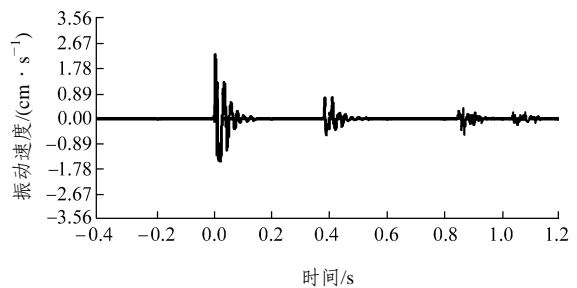


图 3 第 3 次试验中测点 -1 处的振动速度波形

Fig.3 Vibration velocity waveform of measured point No.-1 in the third experiment

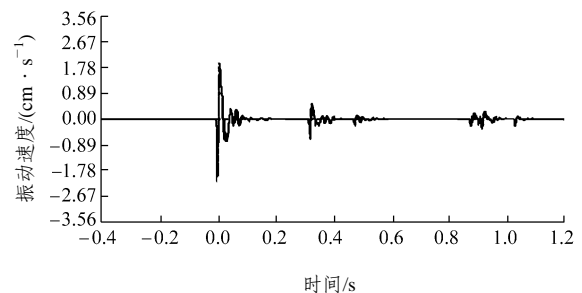


图 4 第 4 次试验中测点 0 处的振动速度波形

Fig.4 Vibration velocity waveform of measured point No.0 in the fourth experiment

从图 2, 3 可以看出，掏槽孔、辅助孔、崩落孔和周边孔爆破形成的地震波基本没有产生叠加，能判断出各段装药爆破所对应的地表振动速度幅值，其余测点的波形与此相似。

对比同一测点各波形段的记录时刻可知：底板孔产生的震动效应最小，在波形图上几乎难以反映出来，这与底板孔的自由面在上方有关；掏槽孔爆

破产生的地震效应最强烈，其地表振动速度幅值是其其他各类炮孔爆破的 2 倍以上，这是由于掏槽孔的轴线与爆破自由面的夹角较大，使岩体爆破的夹制作用增大，因而爆破地震强烈的缘故。这表明浅埋隧道掘进中，不同类型炮孔的自由面条件对地表震动效应影响较大。

从第 3 次试验的地震波形可以看出，尽管辅助孔的单段装药量(15.0 kg)大于掏槽孔装药量(14.4 kg)，但前者引起的地表振动速度(0.51 cm/s)只为后者(1.55 cm/s)的 1/3，崩落孔、周边孔的单段装药量与掏槽孔相近(分别为 11.6, 12.6 kg)，但其产生的地表振动速度(0.30 cm/s)还小于掏槽孔的 1/4，其他 3 次爆破测得的震动波形也反映出这一相同的结果。因此，在分析钻孔爆破的震动效应时，必须要考虑爆破方式和自由面条件，不能只以单段装药量的大小来判断震动的强弱，即对于隧道掘进爆破的震动控制，首先是限制掏槽孔爆破的单段装药量，而对于辅助孔、崩落孔和周边孔的单段装药量则完全可以大于掏槽孔，究竟大多少则由掏槽孔的单段装药量、隧道埋置深度、岩体性质、炮孔的自由面条件以及装药集中度确定。

此外，对于辅助孔、崩落孔和周边孔爆破引起的地表振动速度并不总是随着单段装药量的增加而增大。在第 4 次试验中，崩落孔的单段装药量为 11.6 kg，与辅助孔的装药量(8.2, 12.2 kg)相近，但前者形成的地表振动速度约为后者的一半。第 3 次试验的崩落孔、辅助孔爆破引起的震动强度也反映出与此相同的特点。

如上所述，掏槽孔爆破的震动效应控制是降低或消除浅埋隧道爆破震害的关键，研究其地表震动的变化特征尤为重要。表 2 列出了 4 次掏槽孔爆破试验引起的地表振动速度幅值及其相应段装药量和测点至爆源的距离。

对比表 2 中掌子面前后各对称测点的地表振动速度发现，在 4 次爆破试验中，有 3 次是已开挖区上部紧邻掌子面的测点(-1 点)振动速度大于掌子面上方(测点 0)的地表振动速度；而在隧道掘进的正前方，除第 4 次试验的测点 2 外，地表各测点的振动速度都小于掌子面上方的地表振动速度。图 5, 6 绘出了第 1, 4 次爆破试验中各测点振动速度的变化特征，从图中可以看出，以掌子面正上方地表震动测点为转折点，沿隧道掘进前方的各测点地表振动速度均小于已开挖区上部对应测点的地表振动速度。这表明隧道开挖区形成的空洞已改变了隧道上

表 2 爆破试验引起的地表振动速度幅值

Table 2 Peak values of ground vibration velocity induced by blasting experiment

测点号	18.0 kg		10.8 kg		14.4 kg		18.0 kg	
	振动速度 / (cm · s <sup>-1</sup> )	距离 / m	振动速度 / (cm · s <sup>-1</sup> )	距离 / m	振动速度 / (cm · s <sup>-1</sup> )	距离 / m	振动速度 / (cm · s <sup>-1</sup> )	距离 / m
-4	2.92	32.0	1.67	32.8			3.05	33.6
-3	3.18	29.6	1.71	30.5			3.36	31.3
-2	4.15	27.9	2.29	28.8	2.81	29.3		
-1	4.37	27.0	2.05	28.0	2.47	28.4	3.65	28.8
0	3.05	27.0	2.30	28.0	2.21	28.4	2.29	28.8
1	2.85	28.0	1.56	28.8	1.55	29.2	1.58	29.6
2	2.81	29.7					2.69	31.2
3	2.05	32.2			1.23	33.2	1.87	33.5
4					1.22	41.1		

注：表中 18.0, 10.8, 14.4 kg 指装药量。

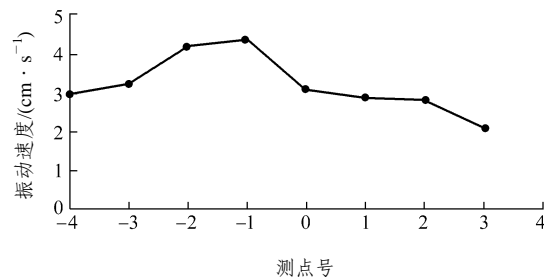


图 5 第 1 次爆破试验中各测点振动速度的变化特征  
Fig.5 Varying character of vibration velocities for the first experiment

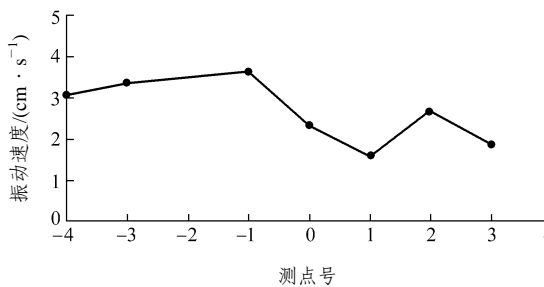


图 6 第 4 次爆破试验中各测点振动速度的变化特征  
Fig.6 Varying character of vibration velocities for the fourth experiment

方浅层岩体的完整结构，导致地表振动速度存在区域性变化的特点，这里可定义为“空洞效应”，即已开挖区形成的空洞导致其上部地表振动速度大于未开挖部分振动速度的现象。因此，对于浅埋隧道施工爆破，在隧道已通过被保护区后，对爆破震动效应的控制应以已开挖区上部的震动监测为准。

空洞效应引起的地表振动速度的增大量与测点至掌子面的距离有关。若按照掌子面前后各对称测点的振动速度对比计算,在所进行的4次爆破试验中,空洞效应对地表震动强度的增大倍数为1.3~2.3。

空洞效应对震动的增强作用、存在条件(如隧道断面尺寸与埋深的关系、这二者与岩性的关系等)以及产生空洞效应的力学机制等问题正是笔者近2a来的研究重点,其相关成果将另文介绍。

### 3.2 地表震动衰减规律

由地表震动特性的分析结果可知,浅埋隧道掘进爆破引起的地表震动存在区域特点,不能用单一的震动衰减参数来描述。为此,以爆破掌子面前后的地表振动速度实测数据为基础,分别确定相应的地震波衰减参数。通常,爆破地震波衰减多用萨道夫斯基公式描述,即

$$V = K \left( \sqrt[3]{Q} / R \right)^\alpha \quad (1)$$

式中: $V$ 为测点振动速度(cm/s), $Q$ 为最大单段装药量(kg), $R$ 为测点与爆源间的距离(m)。

因掌子面上方的地表属于非空洞区,可将测点0~4的振动速度作为掘进正向的地震波传播数据,将测点-1~-4的振动速度作为掘进反向的地震波传播数据,分别确定这2个方向的地震波衰减参数。按照表2中的数据回归计算得到掘进前方的衰减参数为 $K = 232.8$ ,  $\alpha = 1.90$ ;掘进后方的衰减参数为 $K = 2445.7$ ,  $\alpha = 2.72$ 。显然,掘进后方的爆破地震波不符合萨道夫斯基公式给出的衰减规律,这正是由于空洞效应影响所致。而在掘进前方的震动效应可用萨道夫斯基公式预测,并以此作为控制单段最大装药量的基础。

在相同装药量条件下,辅助孔、崩落孔和周边孔爆破形成的地震波在地表产生的震动强度并不相同,究其原因,主要与这些炮孔的自由面条件和装药集中度有关,因而也不能直接用萨道夫斯基公式描述其地震波衰减规律。

## 4 结 论

(1) 浅埋隧道掘进爆破中,不同类型炮孔的自由面条件对地表的震动效应影响较大,掏槽孔爆破产生的地震效应最强烈,其地表振动速度幅值是其其他各类炮孔爆破的2倍以上。

(2) 对于浅埋隧道掘进爆破的震动控制,首先

是限制掏槽孔爆破的单段装药量,而对于辅助孔、崩落孔和周边孔的单段装药量则完全可以大于掏槽孔的单段装药量。

(3) 辅助孔、崩落孔和周边孔爆破引起的地表振动速度并不总是随着单段装药量的增加而增大。

(4) 浅埋隧道开挖区形成的空洞改变了隧道上方浅层岩体的完整结构,使掘进爆破产生的地表震动存在“空洞效应”的特点,即已开挖区形成的空洞导致其上部地表振动速度大于未开挖部分的振动速度。

(5) 浅埋隧道掘进前方的爆破地震效应可用萨道夫斯基公式预测,掘进后方的爆破地震波则不符合这一衰减规律。对于人和场隧道掘进前方的地震波衰减参数为 $K = 232.8$ ,  $\alpha = 1.90$ 。

### 参考文献(References):

- [1] 谭忠盛, 杨小林, 王梦恕. 复线隧道施工爆破对既有隧道的影响分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 281 - 285. (Tan Zhongsheng, Yang Xiaolin, Wang Mengshu. Effect of blast on double line tunnel existing tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 281 - 285. (in Chinese))
- [2] 刘勇, 张兴明, 朱永全. 双跨连拱隧道爆破振动测试[J]. 石家庄铁道学院学报, 1998, 11(2): 63 - 66. (Liu Yong, Zhang Xingming, Zhu Yongquan. Blasting vibration measurement for continuous-double-arch tunnel[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 1998, 11(2): 63 - 66. (in Chinese))
- [3] 吴浩艺, 刘慧, 史雅语, 等. 邻近侧向爆破作用下既有隧道减震问题分析[J]. 爆破, 2002, 19(2): 74 - 76. (Wu Haoyi, Liu Hui, Shi Yayu, et al. Analysis of the vibration reduction in tunnel contour induced by adjacent side blasting[J]. Blasting, 2002, 19(2): 74 - 76. (in Chinese))
- [4] 赵明阶, 许锡宾, 刘绪华, 等. 朝东岩隧道爆破掘进中围岩振动测试与分析[J]. 重庆交通学院学报, 2002, 21(2): 21 - 24. (Zhao Mingjie, Xu Xibin, Liu Xuhua, et al. Measurement and analysis of the surrounding rock vibration during blasting excavation of the Chaodongyan tunnel[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 2002, 21(2): 21 - 24. (in Chinese))
- [5] 郭俊涛. 与既有电气化铁路超近距隧道微振动控爆、监测施工技术[J]. 铁道标准设计, 2000, 20(8): 40 - 42. (Guo Juntao. The micro-vibration blasting technique and its monitoring construction of tunnel under the super short space with existing electric railway[J]. Railway Standard Design, 2000, 20(8): 40 - 42. (in Chinese))
- [6] Berta G G. Blasting-induced vibration in tunneling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 1994, 9(2): 175 - 187.
- [7] 张世雄, 胡建华, 阳生权, 等. 地下工程爆破振动监测与分析[J]. 爆

- 破, 2001, 18(2): 49 - 52.(Zhang Shixiong, Hu Jianhua, Yang Shengquan, et al. Monitoring and analysis of blast vibration in underground engineering[J]. *Blasting*, 2001, 18(2): 49 - 52.(in Chinese))
- [8] 方俊波, 崔天麟. 浅埋地铁区间爆破振动对地表建筑物的影响[J]. *世界隧道*, 2000, (5): 28 - 31.(Fang Junbo, Cui Tianlin. The effect of blasting on ground buildings in shallow subway tunneling[J]. *World Tunnel*, 2000, (5): 28 - 31.(in Chinese))
- [9] 魏晓林. 爆破震动对临近建筑物的危害影响[J]. *爆破*, 1998, 15(1): 48 - 54. (Wei Xiaolin. Study on destructive effect of blasting near building[J]. *Blasting*, 1998, 15(1): 48 - 54.(in Chinese))
- [10] 李孝林. 井下深孔爆破对地面建筑物的影响[J]. *爆破*, 1997, 14(4): 29 - 31. (Li Xiaolin. Effect of underground deep-hole blasting on ground buildings[J]. *Blasting*, 1997, 14(4): 29 - 31.(in Chinese))
- [11] 周春锋. 城市浅埋隧道开挖减震控制爆破技术[J]. *工程爆破*, 2001, 7(1): 57 - 61. (Zhou Chunfeng. Vibration-reducing controlled blasting technology for excavation of urban shallow tunnel[J]. *Engineering Blasting*, 2001, 7(1): 57 - 61.(in Chinese))
- [12] 郝庆桃. 隧道爆破震动控制技术[J]. *爆破*, 1998, 15(4): 83 - 87. (Xi Qingtao. Control measures for explosive vibration in tunnel[J]. *Blasting*, 1998, 15(4): 83 - 87.(in Chinese))
- [13] 林学文, 王兰民. 隧洞的爆破地震动效应问题[J]. *岩石力学与工程学报*, 1997, 16(3): 274 - 278.(Lin Xuewen, Wang Lanmin. The effect of blast vibration on tunnels[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 16(3): 274 - 278.(in Chinese))
- [14] 李玉民, 倪芝芳. 地下工程开挖爆破的地面振动特征[J]. *岩石力学与工程学报*, 1997, 16(3): 274 - 278. (Li Yumin, Ni Zhifang. Ground vibration characteristics of excavation blasting for underground engineering[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 1997, 16(3): 274 - 278.(in Chinese))

(上接第 4150 页)

## 《岩石力学与工程学报》2005 年增 1 被 EI 收录论文(119 篇)题录(V)

No.	论 文 题 目	作 者 名	页 码
91	渠道衬砌抗冻胀问题研究	张伯平 牟过斌 刘海军	5 130 - 5 135
92	岩石多裂纹剪切断裂数值试验研究	张后全 常 旭 唐春安等	5 136 - 5 140
93	综放异形煤柱沿空留巷锚网支护与加固技术研究	韦文兵 王金安 冯锦艳	5 141 - 5 145
94	ANSYS 软件在注水并套损预测中的应用	黄小兰 冒海军 刘建军等	5 146 - 5 150
95	层状岩层裂纹饱和现象的数值模拟研究	常 旭 张后全 唐春安等	5 151 - 5 156
96	水下隧道覆土层安全厚度设计预测数学模型研究	程亚鹏 凌贤长 王宣青等	5 157 - 5 163
97	采动覆岩离层的数值模拟研究	赵德深 陈 雄 覃丽坤等	5 164 - 5 167
98	岩石力学参数随钻评价模型研究	李永平 葛洪魁 苏新亮	5 168 - 5 172
99	含孔洞试件破坏过程的红外试验与数值试验对比分析	刘向峰 王来贵 何 峰	5 173 - 5 177
100	动力基础系统的双曲线滞回模型及 Fourier 级数解	鲍文博 常明飞 孙晓燕等	5 178 - 5 182
101	相似方法在冻土低温三轴压缩试验研究中的应用	王丽霞 凌贤长 顾全宇等	5 183 - 5 188
102	近井眼裂缝控制技术研究现状	徐云龙 葛洪魁	5 189 - 5 193
103	桩 - 土间无厚度轴对称滑动面单刚矩阵的一种闭合解	孙斌堂 胡庆立 王宣青等	5 194 - 5 197
104	矿井支护系统可靠熵研究	孙广义 马云东 肖福坤	5 198 - 5 201
105	阜新矿区深部高瓦斯矿井冲击地压研究	潘一山 李忠华 唐 鑫	5 202 - 5 205
106	断层冲击地压的影响因素与震级分析	李忠华 潘一山	5 206 - 5 210
107	吸附和降解耦合对填埋场污染物运移过程的影响	张金利 栾茂田 杨 庆	5 211 - 5 216
108	新型钉式双锚头压环锚杆锚固机理及工程应用	李常文 赵兴东 张永彬等	5 217 - 5 220
109	与扁宽地梁组合的墩式基础的设计和分析	王利群 赵 文	5 221 - 5 225
110	基于遗传算法边坡稳定分析临界滑移面的搜索	周圆 π 李守巨 刘迎曦等	5 226 - 5 230
111	爆破挤淤法处理山区沟谷软基的试验研究	崔 激 闫澍旺 周宏杰等	5 231 - 5 236
112	薄煤层底板采动影响深度规律研究	董青红	5 237 - 5 242
113	边坡稳定性主客观权重模糊模式识别分析	王旭华 陈守煜 陈 雄	5 243 - 5 247
114	公路隧道岩体分级的神经网络方法	郝 哲 王来贵 王振伟等	5 248 - 5 255
115	CFG 桩在苏通大桥 B2 标箱梁预制厂地基加固中的应用	万 华 周 伟 段爱华	5 256 - 5 261
116	基桩多信号完整性检测的研究	于世海 徐 涛 杨绪普等	5 262 - 5 266
117	土钉墙稳定性的一种简化分析方法	冯志焱 唐 竞	5 267 - 5 270
118	综合检测法在采空区注浆效果检测中的应用	吴圣林 丁陈建	5 271 - 5 274
119	岩性弱结构巷道围岩的塑性区与松动圈形态	樊克恭 蒋金泉	5 275 - 5 280