

# Research on Controlled Blasting Construction and Vibration Monitoring Technology for Super Large Section Shallow Tunnel Group

Zimao Wang<sup>1</sup>, Hongjing Guo<sup>2</sup>, Xiaojun Li<sup>1</sup>

<sup>1</sup>The 2nd Engineering Co. Ltd. of China Railway Tunnel Group, Yanjiao Hebei

<sup>2</sup>Luoyang Luxing Highway Engineering Test Co. Ltd., Luoyang Henan

Email: 1429466249@qq.com

Received: Nov. 19<sup>th</sup>, 2019; accepted: Dec. 16<sup>th</sup>, 2019; published: Dec. 23<sup>rd</sup>, 2019

---

## Abstract

Based on the blasting excavation of Tencent Qixing Data Center Tunnel Group in Gui'an New District, Guizhou Province, the paper studies the vibration monitoring and control technology of tunnel engineering excavation blasting earthquake. The research results show that: 1) The construction of the shallow buried tunnels of this project using the CD method can effectively control the impact of blasting on the surrounding environment; 2) The technical measures such as selecting a reasonable trenching form, determining the appropriate cycle footage and step length can effectively control the impact of blasting vibration on tunnel stability; 3) The tendency of the main vibration frequency of the surface monitoring points to decrease with increasing distance is not obvious, indicating that the blasting vibration has a significant impact on the reinforced concrete sleeve arch structure; 4) According to the monitoring data in the tunnel, it is known that the convergence displacement on both sides of the rock is small and the displacement of the arch top is large. The shallow buried tunnel should focus on meeting the vertical force requirements.

## Keywords

Shallow Burial, CD Method Construction, Controlled Blasting, Displacement Monitoring

---

# 特大断面浅埋隧道群控制爆破施工与震动监测技术研究

王子茂<sup>1</sup>, 郭红静<sup>2</sup>, 李晓军<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中铁隧道局集团二处有限公司, 河北 燕郊

<sup>2</sup>洛阳市路星公路工程试验检测有限公司, 河南 洛阳  
Email: 1429466249@qq.com

收稿日期: 2019年11月19日; 录用日期: 2019年12月16日; 发布日期: 2019年12月23日

## 摘要

文章以贵安新区腾讯七星数据中心隧道群为研究对象, 对隧道工程开挖施工爆破的控制技术进行了研究并对爆破振动波进行了监测。研究结果表明: 1) 本项目浅埋隧道群采用CD法施工可有效控制爆破对周边环境的影响; 2) 选择合理的掏槽形式、确定合适的循环进尺和台阶长度等技术措施, 能有效控制爆破震动效应对隧道稳定性的影响; 3) 地表监测点主振频率随着距离的增加而减少的趋势并不明显, 说明爆破振动对钢筋混凝土套拱结构影响显著; 4) 通过隧道内监测数据可知, 岩石的两侧收敛位移较小, 拱顶沉降位移较大, 浅埋隧道应着重满足竖直方向受力要求。

## 关键词

浅埋, CD法施工, 控制爆破, 位移监测

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着我国基础工程建设的快速发展, 大型工程建设的技术与经验已经趋于成熟。在我国的特大浅埋隧道开挖方法中, 现在主要采用采用钻爆法施工[1]。一般来说, 岩质隧道洞口段, 围岩比较破碎, 且通常伴有浅埋、偏压等特点, 围岩自稳能力差, 承载能力低。同时, 隧道开挖过程中爆破产生爆破冲击波会延岩石向深处传播和反射, 在岩石破裂面产生应力集中效应和张拉作用, 造成岩体内部裂隙的产生, 使得围岩整体稳定性降低, 降低隧道的安全性[2] [3]。因此, 在采用爆破法施工的同时, 我们需要选择合理的爆破参数, 并采取相应的控制措施, 降低爆破队周围岩体的振动效应, 保证施工的安全性。

目前, 国内外学者对爆破产生的振动波已经进行了广泛研究, 并获得了大量的研究成果[4] [5] [6]。这些研究通过爆破振动试验, 获得振动波的传播规律, 并建立相关分析系统, 以减少爆破振动带来的地震危险。然而, 这些研究主要集中在深埋隧道或者中深孔爆破效应, 对浅埋隧道爆破开挖振动效应的研究还不够, 尤其是爆破过程中浅埋隧道和拱形隧道地震动传播规律及振动控制技术的研究并不多。工程实践表明, 浅埋隧道在开挖爆破过程中, 爆破产生的振动效应不仅使周围岩石产生破坏, 并且对地面有重大影响。同时, 浅部爆破振动波的传播规律与深部不同, 因此应该进行进一步的研究其机制[7] [8] [9] [10]。

本文以贵州省贵安新区腾讯七星数据中心隧道群为例, 通过采用合理的施工技术和有效的爆破控制技术, 结合对隧道开挖段爆破振动的监测和数据分析, 得到浅埋隧道群爆破开挖的表面振动特征及变化规律, 为类似工程提供借鉴。

## 2. 工程概况

贵州省贵安新区腾讯七星数据中心隧道群分为五个主要隧道和其他隧道联合组成, 均为复合式衬砌

结构。该隧道群在施工区域的山体中并排布置 B1~B5 隧道，纵向布置 A1、A2 隧道。A1~B6 隧道拱顶埋深 0~63 m，隧道平面布置如图 1 所示。由地质工程报告得知，隧址区围岩主要白云岩，风化程度严重，岩体节理发育，呈碎裂状结构，岩体质量分级结果显示围岩等级为 V 级。

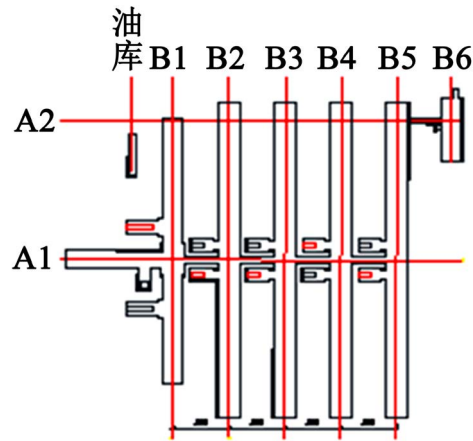


Figure 1. Plan of the tunnel group  
图 1. 隧道群平面布置图

### 3. 隧道爆破施工方案

综合腾讯七星数据中心隧道群施工环境及围岩地质条件，全隧采用 CD 法施工。左、右两侧导坑平行施工，掌子面错开长度不得小于 50 m，每侧导坑分四步台阶开挖，上台阶 5 m，中上台阶 3 m，中下台阶 3 m。待上台阶进尺 5 m 后，开始同步施工中上台阶，待中上台阶进尺 3 m 后，同步施工中下台阶，待中下台阶进尺 3 m 后，同步进行上、中上、中下、下台阶施工，每循环进尺 0.5 m，具体施工顺序见图 2 所示。

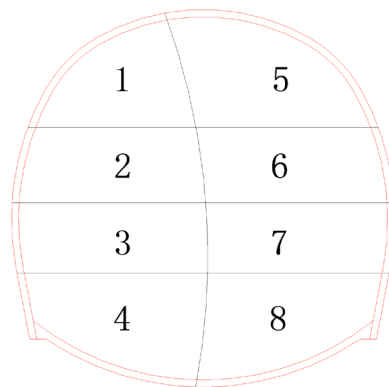


Figure 2. Section blasting sequence  
图 2. 断面爆破顺序

开挖必须采用控制爆破，施工中应按照设计并严格控制断面爆破药用量，同时钻孔必须采取空间错位，不得对相邻隧道采取同时爆破施工作业，相邻隧道掌子面应错开 50 m 以上。对于距离竖井位置的超短距离段，应采用微差控制爆破或机械钻孔方法，并应根据振动试验确定每段的爆炸时间。通过理论计算炸药装药量与炮孔间排距，得到隧道断面的炮孔布置图，如图 3 所示，具体施工参数见表 1 所示。

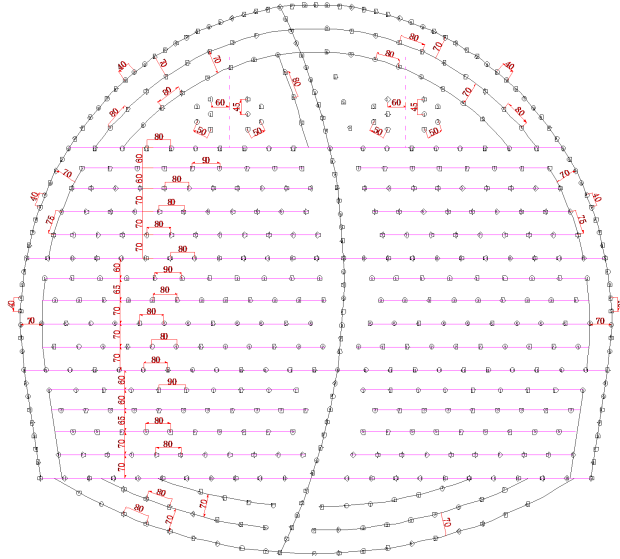


Figure 3. Schematic layout of the gun hole (Unit: cm)

图 3. 炮孔布置示意(单位: cm)

Table 1. Table of blasting construction parameters (partial)

表 1. 爆破法施工参数表(部分)

断面	炮眼名称	数量	炮眼深度(m)	间距(cm)	单眼药量(kg)	总装药量(kg)	起爆顺序	装药结构	合计	炸药单耗	毫秒雷管单耗
2 步	1 层眼	9	0.7	90	0.2	1.8	1	连续	17.3	1.09	2.14
	2 层眼	11	0.7	80	0.3	3.3	3	连续			
	3 层眼	11	0.7	80	0.3	3.3	5	连续			
	4 层眼	12	0.7	80	0.3	3.6	7	连续			
	周边眼	17	0.5	40	0.1	1.7	9	间隔			
	底板眼	12	0.5	80	0.3	3.6	11	间隔			
6 步	1 层眼	8	0.7	90	0.2	1.6	1	连续	13.6	1.01	1.76
	2 层眼	9	0.7	80	0.3	2.7	3	连续			
	3 层眼	9	0.7	80	0.3	2.7	5	连续			
	4 层眼	9	0.7	80	0.3	2.7	7	连续			
	周边眼	9	0.5	40	0.1	0.9	9	间隔			
	底板眼	10	0.5	80	0.3	3	11	间隔			

#### 4. 浅埋隧道爆破控制技术

钻爆法施工产生振动载荷对围岩, 衬砌结构及周边环境的冲击影响较大, 必须在施工中给予控制。结合贵州省贵安新区腾讯七星数据中心隧道工程建设, 提出浅埋隧道爆破控制措施:

1) 精细爆破设计。实际施工过程中, 应根据现有爆破器材, 现场地质条件, 合理设计炮孔间距和炮孔深度, 并合理布置炮孔排列方式, 精细设计提高爆破破岩效率。

2) 爆破参数优化。对施工全过程的爆破振动进行监测，基于监测结果，不断调整和优化爆破参数，保证隧道掘进爆破效果的良好爆破方案。

3) 控制掘进进尺，隧道掘进循环进尺主要受钻孔设备能力、工程进度和岩石特性等的影响，需要进行综合考虑确定，选择合理的循环进尺。

## 5. 隧道爆破震动监测与分析

### 5.1. 地表测点布置

为了监测掘进爆破振动对周围建筑物的影响，取掌子面地表距贵州电子科技职业学院，民房，山顶移动基站作为振动监测点进行振动监测，各测点布置如图 4 所示。

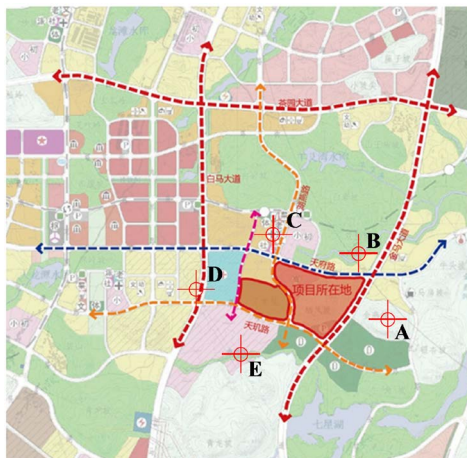


Figure 4. Arrangement of each measuring point  
图 4. 各测点布置图

### 5.2. 监测结果

在现场监测期间，每个测量点基本上是固定的，随着工作面到测量点距离的变化，可以监测和分析爆破地震波传播规律。图 5，图 6 显示了不同监视点震速峰值特征和测点震速峰值特征的变化规律，具体的振速数据见表 2。

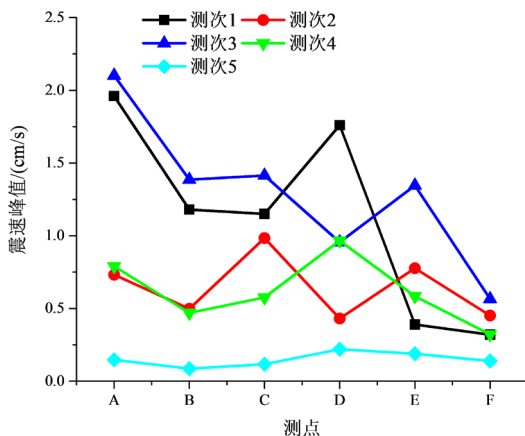


Figure 5. Peak velocity curve of each test  
图 5. 各测次震速峰值特征曲线

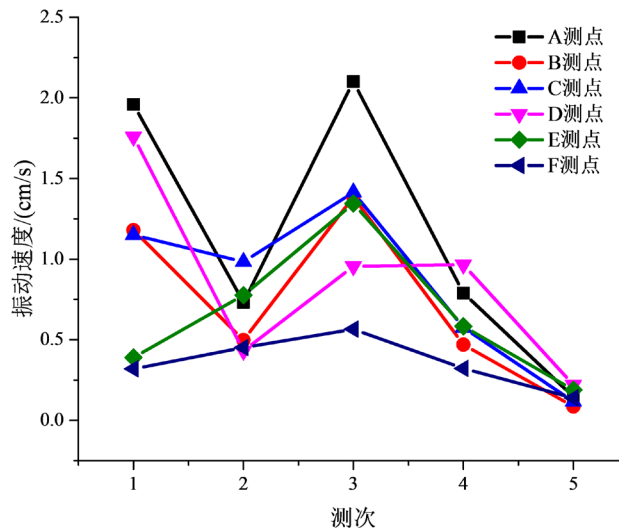


Figure 6. Peak velocity curve of each measurement point  
图 6. 各测次测点震速峰值特征曲线

Table 2. Typical monitoring data table of surface vibration speed  
表 2. 地表振速典型监测数据表

测点	与掌子面水平距离(m)	峰值振速(cm/s)	主振频率(Hz)	最大值时刻 s
A	319.14	0.732	10.2	0.665
B	332.06	0.498	6.3	0.504
C	353.35	0.984	15.9	0.403
D	380.72	0.431	58.6	0.412
E	419.21	0.777	18.8	0.161

### 5.3. 监测结果分析

通过爆破振动监测及其变化规律分析，可以得出以下爆破振动传播规律：

1) 沿隧道纵向，A 点、B 点、C 点振动速度分别为 0.732 cm/s、0.498 cm/s、0.984 cm/s，其主要受隧道埋深、掌子面位置等影响。监测表明，振动速度自开挖面向未开挖区域呈现递减趋势，体现了浅埋隧道的特征。

2) 由于沿隧道横截面反射的应力波的作用，爆炸振动对钢筋混凝土拱结构产生重大影响，尤其是在拱结构的端部。测量点的最小振动速度中间最小，两侧最大。其中测点 C 的振速  $V_C = 0.984 \text{ cm/s}$ ，明显高于测点 D 的振速  $V_D = 0.431 \text{ cm/s}$ 。

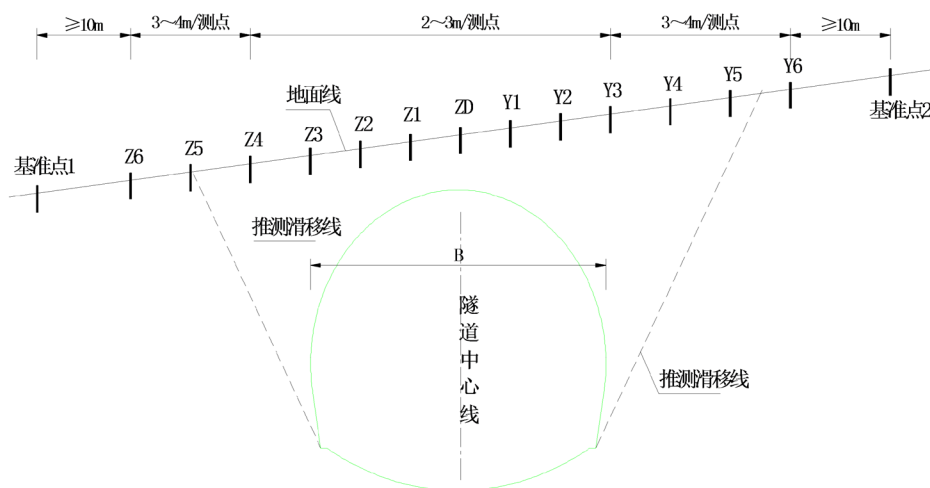
3) 爆破振动随着距离的增加而降低，因此在进洞时应严格控制单响药量，减少循环进尺。待开挖到一段距离后，可根据围岩情况，适当增加循环进尺。

4) 采用 CD 法开挖，降低了装药量。监测发现，各段波峰基本按照设计的微差间隔时间分隔开，动峰值没有明显的重叠，爆炸冲击效应大大降低。

## 6. 隧道监测方案

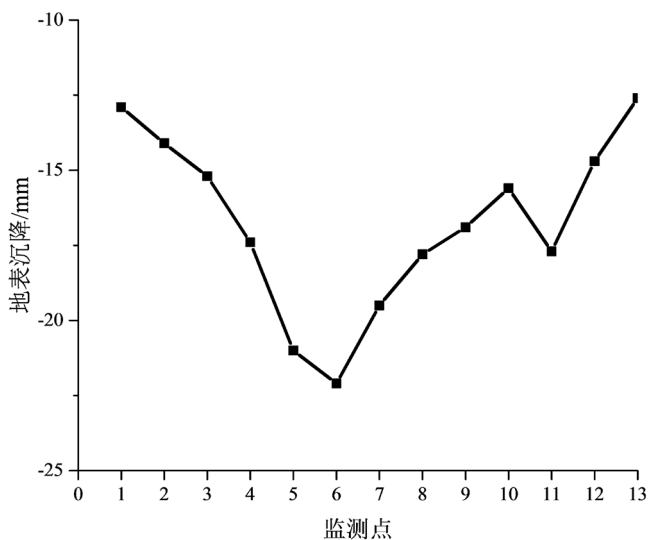
### 6.1. 隧道地表监测

以 B2 隧道为具体研究对象，其中沿隧道轴线布置 13 个地表沉降测点，测点布置如图 7 所示。



**Figure 7.** The layout of monitoring points on the surface  
**图 7.** 洞口监控量测点布置图

在隧道开挖前未对地表产生影响时，将监测点布置于地表处，测得地表的位移测量初始值，隧道施工完成后，产生的地面沉降如图 8 所示。图 8 显示最大沉降值位于拱顶上方地表，沉降值为 22.1 mm，并控制在可接受的范围内(小于 30 mm)。



**Figure 8.** Measured surface subsidence curve  
**图 8.** 实测地表沉降曲线图

## 6.2. 隧道位移监测

隧道掘进后，围岩位移是围岩和支护效果的最直接，最明显的反映。监控隧道围岩岩壁的收敛和拱顶沉降，可以掌控围岩位移信息，并及时指导施工。针对本文中的隧道开挖断面监测点布置如图 9 所示，监测点的沉降规律如图 10、图 11 所示。根据隧道围岩的测量结果可知，隧道周围的岩石和支护结构变形较小，在 5 m 以内的围岩的水平收敛最大值只有 5.6 mm。隧道拱顶沉降通常小于 15 mm，最大值为 17.6 mm，小于控制指标(35 mm)，并且围岩和初期支护结构处于安全状态。隧道的变形明显受到开挖过程的影响，拱顶下沉稳定值约为 15 mm 左右。

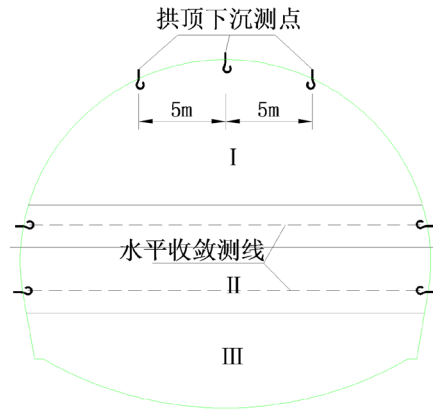


Figure 9. Layout of tunnel monitoring points  
图 9. 隧道监测点布置图

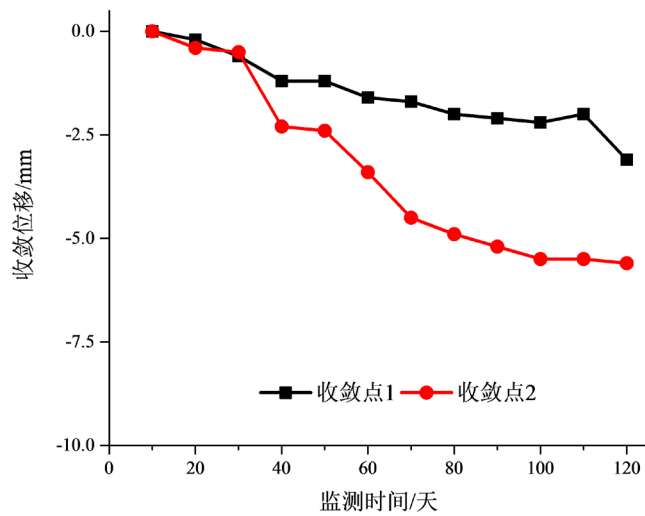


Figure 10. Convergence of two tunnels over time  
图 10. 隧道两帮随时间的收敛规律

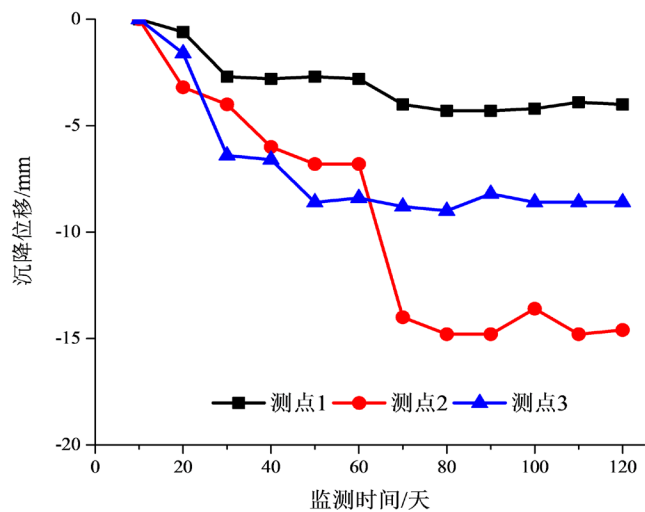


Figure 11. Settlement law of tunnel vault over time  
图 11. 隧道拱顶随时间的沉降规律



## 7. 结论

- 1) 本项目浅埋隧道群采用 CD 法施工可有效控制爆破对周边环境的影响。
- 2) 选择合理的掏槽形式、确定合适的循环进尺和台阶长度等技术措施,能有效控制爆破震动效应对隧道稳定性的影响。
- 3) 地表监测点主振频率随着距离的增加而减少的趋势并不明显,说明爆破振动对钢筋混凝土套拱结构影响显著。
- 4) 通过隧道内监测数据可知,岩石的两侧收敛位移较小,拱顶沉降位移较大,浅埋隧道应着重满足竖直方向受力要求。

## 参考文献

- [1] 张继春,曹孝君,郑爽英,等.浅埋隧道掘进爆破的地表震动效应试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(22):4158-4163.
- [2] 陈庆,王宏图,胡国忠,等.隧道开挖施工的爆破振动监测与控制技术[J].岩土力学,2005,26(6):964-967.
- [3] 孙西濛,高文学,李志星,等.浅埋偏压隧道开挖爆破振动与控制技术[J].施工技术,2011,40(3):51-53.
- [4] 申玉生,高波,王志杰,等.复线隧道施工爆破对既有隧道结构的影响分析[J].地下空间与工程学报,2009,5(5):980-984.
- [5] 李利平,李术才,张庆松,等.浅埋大跨隧道施工爆破监测与减震技术[J].岩土力学,2008,29(8):2292-2296.
- [6] 王成,高超.市区暗挖轻轨车站爆破振动监测与控制研究[J].地下空间与工程学报,2011,7(S2):1688-1691.
- [7] 王红生.小净距隧道群控制爆破技术[J].现代隧道技术,2011,48(5):139-142.
- [8] 郑升宝,蒋树屏,王晓雯,文栋良.公路隧道减震模型试验及数值模拟[J].现代隧道技术,2011,48(4):59-64.
- [9] 方俊波,崔天麟.浅埋地铁区间爆破震动对地表建筑物的影响[J].世界隧道(现代隧道技术),2000(5):28-31.
- [10] 魏晓林.爆破震动对邻近建筑物的危害影响[J].爆破,1998,15(1):48-54.