

文章编号: 1000-7598(2012)12-3747-07

超小净距隧道爆破振动现场监测 及动力响应分析研究

朱正国¹, 孙明路², 朱永全¹, 孙星亮¹

(1. 石家庄铁道大学 土木工程学院, 石家庄 050043; 2. 武汉铁路局 武汉桥工段, 武汉 430000)

摘要: 以南京地铁超小净距隧道为工程背景, 结合国内外现有研究成果和规范, 研究确保小净距先行隧道安全稳定的后行隧道爆破施工控制技术。以现代信息化施工理论为依据, 充分运用现场监控量测, 对先行隧道爆破质点振动速度进行监测分析和施工中爆破采用减振和隔振两方面控制技术; 最终现场监测结果表明, 优化后的循环进尺、段最大装药量与分段爆破差等爆破参数设计合理, 该爆破设计在施工中未对先行隧道安全产生较大影响; 同时, 通过三维数值模拟计算, 得到先行隧道壁面的质点振动速度随时间的变化规律, 所得最大振速符合规范要求, 也再次验证了优化后的爆破设计是合理的。通过数据分析得出隧道边墙的切向和径向振速比拱脚相应振速大, 爆破面前方先行洞衬砌受爆破振动的影响稍大于后方衬砌, 临近爆破点的左线隧道衬砌表面振动大于远离爆破点的衬砌表面振动。该研究成果为本工程施工提供了科学依据与技术指导, 也可作为类似隧道工程的爆破掘进工程在理论和施工方法上提供参考借鉴。

关键词: 隧道工程; 小净距隧道; 爆破监测; 数值模拟

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

Field monitoring on blasting vibration and dynamic response of ultra-small spacing tunnels

ZHU Zheng-guo¹, SUN Ming-lu², ZHU Yong-quan¹, SUN Xing-liang¹

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Wuhan Bridge Section, Wuhan Railway Bureau, Wuhan 430000, China)

Abstract: Based on the background of ultra-small spacing tunnels of Nanjing Metro and combined with the existing research results as well as domestic and international codes, a method of blasting technology using in small spacing later tunnel is studied in order to keep the security and stability of the antecedent line. Using modern information technology theory as the basis and making full use of on-site monitoring, the vibration velocity of particle in antecedent tunnel can be monitored and analyzed for vibration reduction and vibration isolation during the blasting. The final results show that the blasting design parameters such as optimized footage driving cycle, the maximum loading dose and the time difference of sectional blasting are reasonable during the construction. The blasting design did not affect the safety of the antecedent tunnel. While through the three dimensional numerical simulation, after observing the variation of particle vibration in antecedent line over time, we find that the maximum vibration velocity meets the relevant codes; and the optimized blasting design is reasonable. Through numerical analysis, we find that the tangential and centripetal vibration velocity in tunnel side wall are much faster than the vibration velocity in arch springing, the effect in antecedent blasting surface is slight greater than the rear lining; and the surface vibration of lining in left tunnel which near blasting point is greater than the surface in blasting point. The research results to the construction of this protect provide a scientific basis and technical guidance for similar future tunnel blasting excavation engineering and construction methods in theory.

Key words: tunnel engineering; small spacing tunnels; blast monitoring; numerical simulation

1 引言

小净距隧道是介于普通分离式隧道与连拱隧道

的一种新型隧道结构型式, 由于它不受地形条件以及总体线路型的限制, 又较连拱隧道施工工艺简单、易于防水处治、造价易于控制, 采用的工程实

收稿日期: 2011-08-08

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 51078243); 河北省自然科学基金资助项目 (No. E2012210011)。

第一作者简介: 朱正国, 男, 1977年生, 博士, 副教授, 主要从事于岩土工程与地下工程的教学和科研工作。E-mail: myztzx@163.com

例有急速增加之势,在公路交通、铁路交通、水利以及城市地铁等工程中都出现了小净距隧道。对于小于一倍洞径的小净距隧道施工,极易导致隧道变形失稳、支护开裂、甚至二次衬砌开裂等问题^[1]。针对这些问题,国内外学者采用数值模拟和监控量测等手段对小净距隧道合理净距、支护时机、后行隧道爆破开挖对先行隧道的影响、施工方法优化、安全爆破控制方法等进行了大量的研究工作^[2-12],取得了一定的研究成果。但由于南京地铁苜蓿园站一小卫街站隧道区间 K18+773~K19+002 段中间岩柱净距为 0.309~0.580 m,长达 229 m,最小净距才 0.309 m,且该段围岩为软岩,施工过程中多次爆破开挖、多次扰动而成为受力薄弱环节,岩柱体将不可避免地形成贯通的塑性区,而且覆土地层浅、城市环境要求高,当属目前国内小净距隧道之最。本文结合南京地铁苜蓿园站一小卫街站隧道区间折返线段超小净距隧道,运用现代信息化反馈设计理论,通过对现场爆破试验实测振动数据及大量数值模拟计算,研究先行隧道壁面的振动特性及其变化规律,讨论振动强度与循环进尺、段最大装药量及分段爆破差等爆破设计参数之间的相互关系,完善设计方案,指导现场施工。本研究为本工程中超小净距后行隧道爆破施工对先行隧道影响提供了科学依据与技术指导,也可类似隧道工程的爆破掘进在理论上和施工方法上提供参考借鉴。

2 爆破振动现场监控量测

为保证既有衬砌的质量,对后行隧道爆破引起的振动进行监测,以此为依据来优化超小净距隧道工程爆破参数的设计和后续施工。

因后行隧道左侧上台阶爆破无临空面,上台阶爆破产生的振动一般较大,可以将后行隧道左侧上台阶的爆破作为监测的重点,结合工程实际,振动测试监测点以 5 m 为间距依次布置 5 个断面,为了对比分析先行洞衬砌爆破面前后方的影响规律,测点分别布置在爆破面前方和爆破面后方,如图 1 所示,每个断面各 2 个测点,即右拱脚和右边墙,每个测点布置径向和切向各 1 个拾振器。监测仪器采用北京东方振动与噪声技术研究所生产的 DASP2000 软件,拾振器由中国地震局工程力学研究所研制。由于爆破振动效应随着传播距离的增大逐渐衰弱,每次测试在爆破点较近的测点进行测试。每次测试结束后立即分析结果,这样可为优化爆破设计以及振动控制提供依据。

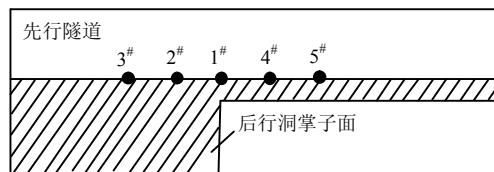


图 1 测点位于爆破面前方及后方布点示意图

Fig.1 Layout of monitoring points in blasting surface of the front and rear

2.1 相邻隧道左侧上台阶施工爆破振动

小净距左侧隧道衬砌后,相邻右线隧道爆破振动影响区最大位置为临近左线隧道导坑,其中临近左线隧道的右线上导坑爆破振动测试结果如表 1 所示。

从表 1 可看出,各监测断面边墙的切向和径向振速比拱脚相应振速大,爆破面前方先行洞衬砌受爆破振动的影响稍大于后方衬砌;不论开挖面前方和后方,临近爆破点的左线隧道衬砌表面振动大于远离爆破点的衬砌表面振动;在爆点距离 0 m 处 1#测点的边墙径向先行洞迎爆侧衬砌最大振速偶尔达到 21.2 cm/s,超过了规范规定的上限值 20 cm/s^[13],实际爆破施工中在爆破时重点监测,并对爆破设计参数进行优化。各监测断面边墙的切向和径向振速比拱脚相应振速大,这与后面小净距隧道爆破动力响应数值分析结果一致。

2.2 相邻隧道左侧下台阶施工爆破振动

小净距左侧隧道衬砌后,相邻右线隧道爆破振动影响区最大位置为临近左线隧道导坑,典型爆破振动波形取下台阶爆破距爆点 0 m 处 1#测点拱脚径向地震波如图 2 所示。

由图和计算结果可知,各爆点距离的边墙的切向和径向振速比拱脚相应振速大,爆破面前方先行洞衬砌受爆破振动的影响稍大于后方衬砌;不论开挖面前方和后方,临近爆破点的左线隧道衬砌表面振动大于远离爆破点的衬砌表面振动;在爆点距离 0 m 处 1#测点的边墙径向先行洞迎爆侧衬砌最大振速偶尔达到 20.4 cm/s,超过了规范规定的上限值 20 cm/s,实际爆破施工中在爆破时重点监测,并调整爆破设计参数;总体来看,下台阶爆破先行洞迎爆侧衬砌各测点最大振速比上台阶爆破先行洞迎爆侧衬砌各测点最大振速小,这主要由于采用 CD 法施工,上台阶爆破无临空面,上台阶爆破产生的振动一般较大,因此,可以将上台阶的爆破作为监测的重点。

表 1 上台阶爆破先行洞迎爆侧衬砌最大振速
Table 1 The maximum vibration velocity of facing blasting lining
in antecedence tunnel during upper bench blasting

测点号	测点位置	方向	2007—2008 年不同测试日期(月-日)初砌的最大振速/(cm/s)									
			11-21	11-22	11-23	12-22	12-25	12-26	3-1	3-14	3-16	3-18
1 [#]	拱脚	径向							8.2	7.7	5.0	
		切向							6.2	16.8	2.8	
	边墙	径向	10.0	8.2	12.1	11.4	3.2	1.0	12.5	6.4	9.1	7.7
		切向	17.8	10.6	18.9	9.2	1.6	0.5	10.2	20.4	9.3	11.5
2 [#]	拱脚	径向				5.7						3.7
		切向				4.7						2.6
	边墙	径向	7.3			8.2			6.8	7.4	7.3	
		切向	8.4			5.9			4.9	5.2	2.1	
3 [#]	拱脚	径向										
		切向										
	边墙	径向										2.8
		切向	1.6									2.0
4 [#]	拱脚	径向		3.8								
		切向		6.6								
	边墙	径向		6.1	6.7		0.8	0.4				
		切向		4.2	5.9		0.7	0.7				
5 [#]	拱脚	径向			2.4							
		切向			2.9							
	边墙	径向					3.2	0.6				
		切向					1.6	0.3				

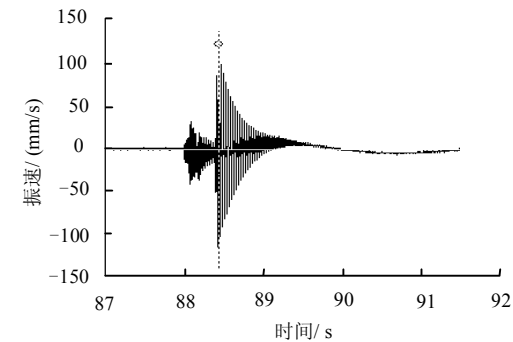


图 2 下台阶爆破 1[#]测点处拱脚径向地震波
Fig.2 The centripetal seismic wave in #1 point arch
springing during lower bench blasting

2.3 相邻隧道左侧上下台阶同时施工爆破振动

小净距左侧隧道衬砌后，相邻右线隧道爆破振动影响区最大位置为临近左线隧道导坑，其中临近左线隧道的右线上、下导坑同时爆破振动测试结果如表 2 所示。

由表可知，上、下台阶同时爆破，先行洞迎爆侧衬砌最大振速为距爆破点 0 m 的 1[#]测点处左线右拱脚衬砌混凝土径向和切向振速分别为 22.2、27.2 cm/s，均超过了规范规定的上限值 20 cm/s，所以在实际施工中应禁止上、下台阶同时爆破作业。

表 2 上下台阶同时爆破先行洞迎爆侧衬砌最大振速 (cm/s)
Table 2 The maximum vibration velocity of facing
blasting lining in antecedence tunnel during upper
and lower bench blasting

爆点距离/m	测点位置	方向	初砌的最大振速/(cm/s)
0	拱脚	径向	22.2
		切向	27.2
	边墙	径向	10.0
		切向	17.8
5	拱脚	径向	
		切向	
	边墙	径向	9.5
		切向	8.2
10	拱脚	径向	
		切向	
	边墙	径向	6.5
		切向	5.2

注：测试日期为 2008 年 3 月 2 日。

3 后行隧道控制爆破振动优化设计

根据现场监控量测分析可知，初始设计的爆破监测最大振速超过了规范规定的上限值，如果按照初始爆破设计继续爆破，将对先行隧道结构产生很大的影响。接下来的爆破即是根据前期爆破振动监控量测的结果优化爆破设计，并进行监测，为顺利完成南京地铁超小净距隧道做好准备。

根据小净距隧道相邻隧道施工扰动、地层抗力解除对先行已施工隧道安全性影响数值模拟分析,左线先行隧道衬砌后再进行相邻右线后行隧道施工对结构安全有利。根据后行隧道断面相对较大和控制爆破振动的需要,后行隧道采用 CD 法施工,并且先行施工远离左线既有隧道的外侧,对循环进尺、段最大装药量与分段爆破差等爆破参数进行优化,最终确定的右线后行隧道施工顺序及爆破优化设计如图 3 所示。

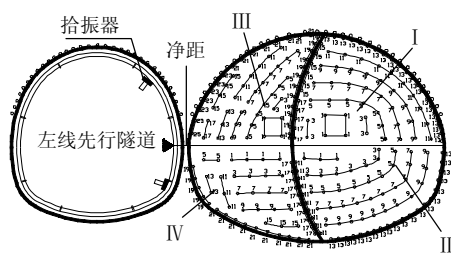


图 3 后行隧道施工顺序及爆破优化设计图

Fig.3 Construction sequence using in later tunnel and blasting design optimization chart

由于右线隧道开挖距左线隧道净距仅 0.309 m,为保护先施工左线隧道支护、衬砌结构安全,施工设计爆破控制振动速度为 20.0 cm/s,开挖顺序如图 3 中 I、II、III、IV 区,循环进尺为 0.5 m。根据围岩级别、小净距隧道净距值、爆破理论及现场实践等综合选定爆破参数:掏槽孔间距 $a = 100$ cm,排间距为 50 cm,孔深 $L = 0.6$ m;周边光爆眼间距 $a = 45$ cm,最小抵抗线 $W = 55$ cm;辅助眼孔间距 $a = 80$ cm,排间距 $b = 65$ cm,爆眼孔径 $D = 40$ mm。

通过减小循环进尺、控制段最大装药量与分段爆破差等爆破参数优化设计,最终后行隧道爆破优化设计如图 3 所示,满足左线振速控制要求下爆破设计参数如表 3 所示。I、II 区先爆破,为 III、IV 区的后续爆破创造足够好的临空面,周边做减振孔和分散装药等手段,结合超前支护小导管钻孔和预设泡沫的隔振层,使左洞 III、IV 区爆破对控制点的振速影响有所折减,与爆破点至计算保护对象间的地形、地质条件有关的系数 K 和衰减指数 α 分别从 250 降为 150、1.8 变为 2.0。

根据施工设计爆破振动控制速度和各类爆破孔距左线距离,设计该断面爆破各段位的允许药量和齐爆孔数如表 3 所示。表中最净距离指到右线衬砌最左边内表面最净距离,为各分部开挖边界距地面建筑物的最小距离,掏槽孔最大装药量根据掏槽眼距左线衬砌内表面最净距离得出,辅助眼、周边眼

最大装药量根据各分部边界距左线衬砌内表面最净距离得出。

表 3 边洞先行施工方案爆破设计参数和震动分析
Table 3 Blasting design parameters of side culvert construction program and vibration analysis

开挖区域	孔类	爆破设计参数			齐爆孔数
		最近距离 / m	允许药量 / kg	单孔药量 / kg	
I	掏槽孔	7.70	2.20	0.3	4
		6.68	1.39	0.2	4
		7.33	1.84	0.2	7
		7.77	2.19	0.2	8
		8.45	2.82	0.2	9
	辅助孔	9.09	3.51	0.2	10
		9.41	3.90	0.1	21
		7.07	1.65	0.1	6
		6.20	1.12	0.1	5
		6.70	1.40	0.3	3
II	掏槽孔	6.96	1.58	0.2	7
		7.38	1.88	0.2	8
		7.95	2.35	0.2	10
		8.64	3.02	0.2	11
		6.31	1.18	0.1	10
	辅助孔	9.21	3.65	0.1	20
		5.30	0.70	0.2	7
		4.49	2.86	0.2	6
		3.69	1.86	0.2	5
		2.89	1.07	0.2	4
III	掏槽孔	1.96	0.65	0.2	2
		5.73	3.20	0.1	13
		3.44	1.71	0.1	2
		1.32	0.41	0.1	4
		3.60	0.80	0.2	4
	辅助孔	2.09	0.79	0.2	2
		2.34	0.97	0.2	2
		3.09	1.51	0.2	3
		4.11	2.65	0.2	6
		5.06	3.03	0.2	4
IV	周边孔	6.60	4.51	0.2	2
		1.66	0.52	0.1	5
		6.08	4.11	0.1	10
		4.01	2.56	0.1	10

4 后行隧道爆破优化设计效果评价

为了更好地对左线先行隧道稳定性进行控制,确保后行隧道的顺利施工和先行隧道的结构安全,本文采用 FLAC^{3D} 软件建立三维数值模型模拟后行隧道爆破开挖过程中对先行隧道的动力响应分析。模拟过程中选取埋设监测仪器的断面处为研究对象,根据实际情况取隧道的埋深、围岩的力学参数

和初始地应力参数等。

4.1 模型及参数

(1) 计算模型

在本次计算分析中, 仍采用扩大边界范围的方式以减小边界效应的影响。计算模型的外边界: 左、右 X 方向范围为 $-75 \sim 75$ m, Y 方向 (隧道纵向) 范围为 $0 \sim 60$ m, Z 方向范围为 $-35 \sim 35$ m, 上边界取为自由边界 (地面)。而且用 FLAC^{3D} 进行动力计算, 网格剖分的尺寸受输入波动的最短波长控制, 且要求网格划分的尺寸要相对均匀。三维计算模型及网格划分如图 4 所示。

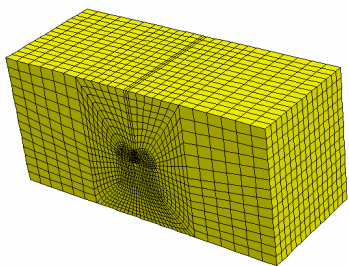


图 4 计算模型及网格划分

Fig.4 Computational model and meshing

(2) 模拟计算参数

根据本工程实际围岩情况, 围岩和支护、结构计算参数如表 4 所示, 其他爆破设计参数取值如表 3 所示。此次模拟采用理想弹塑性模型, 计算时屈服准则采用 Mohr-Coulomb 强度准则, 并设置大应变计算模式。

表 4 围岩及支护结构计算参数
Table 4 Calculation parameters of surrounding rock and support structure

材料名称	重度 /(kN/m ³)	动弹性模量 /GPa	内摩擦角 /(°)	黏聚力 /MPa	泊松比
围岩	21.5	20	55	0.45	0.325
初期支护	23.0	42	60		0.200
二衬混凝土	25.0	48	60		0.200

(3) 初始条件与边界条件

①初始地应力场: 仅按照自重应力场考虑。

②静力计算边界条件: 采用位移边界条件, 即模型的左右 (X 方向) 边界、前后 (Y 方向) 边界和底边界均施加位移约束条件、上边界取为自由边界。

③动力计算边界条件: FLAC^{3D} 求解动力问题时, 边界条件设置有远置人工边界和黏滞边界条件两种。本文采用黏滞边界条件, 在模型的左右边界、前后边界和下边界均施加黏滞边界条件, 上边界作为自由边界。

(4) 爆破荷载

根据文献[14]可知, 爆破荷载采用三角形荷载, 典型的爆破震动升压时间约为 $8 \sim 12$ ms, 卸载时间约为 $50 \sim 120$ ms。据此, 在本文中, 假定升压时间为 10 ms, 卸载时间为 100 ms, 计算时间取 600 ms。本工程采用 32 mm 直径药卷, 炮孔直径 $D = 40$ mm, 计算得耦合装药情况下炮孔内初始径向峰值压力 $P_r = 3.74$ GPa, 不耦合装药情况下炮孔初始平均压力 $P_0 = 0.98$ GPa。

4.2 计算结果分析

整个计算过程分为静力计算和动力计算。动力计算以静力计算为前提, 待静力计算完毕后, 再将速度时程施加于开挖隧道的内壁, 得到动力计算结果。

为了与现场监测结果作对比, 计算中取监测的断面包括隧道轴线方向 $Y = 20, 25, 30$ m (模型中间位置)、 $Y = 35, 40$ m 等 5 个断面, 由计算结果可知, 围岩中点的振动速度随时间的变化基本成一种谐波的形式, 且在横向爆破地震荷载作用下, 左、右 X 方向的峰值振速要远大于上、下 Z 方向的峰值振速, 因此, 这里主要以 X 方向的峰值振速为依据进行判断。对左线先行隧道各截面衬砌各关键点的 X 方向振动速度峰值进行了统计, 如表 5 所示。

表 5 左线隧道关键点 X 方向速度峰值
Table 5 Peak velocity of key point in left tunnel along X direction

截面位置 / m	X 方向速度峰值/(cm/s)				
	拱顶	左拱脚	左墙脚	右拱脚	右墙脚
20	2.1	1.4	1.1	2.9	3.8
25	4.8	3.0	2.1	7.3	9.6
30	7.2	4.8	3.2	11.4	15.4
35	5.6	3.5	2.5	8.8	11.8
40	2.5	2.1	1.6	3.3	4.2

由表可知, 迎爆侧一面的峰值振动速度均比背爆侧一面的峰值振动速度大得多; 爆破面前方先行洞衬砌受爆破振动的影响稍大于后方衬砌, 且不论开挖面前方和后方, 临近爆破点的左线隧道衬砌表面振动大于远离爆破点的衬砌表面振动; 各截面背爆侧峰值振动速度普遍比较小, 最大值只有 4.8 cm/s, 不会发生破坏, 因此, 背爆侧比较安全; 同一截面中的最大峰值振速出现在迎爆侧右墙脚位置, 这一位置是隧道截面中最危险的位置, 迎爆侧起拱线以上部分为次峰值振动区, 是隧道截面中第 2 危险位置, 模型中间截面右墙脚处 X 方向速度峰值最大, 最大振速达 15.4 cm/s, 与实测最大值 17.2 cm/s 相

差不多, 这样既保证了数值计算的安全性, 又保证了准确性, 故用数值计算来分析和预测后行隧道爆破开挖过程中对超小净距先行隧道的振动影响是可行且可靠的。

另外, 现场爆破作业严格根据上面优化的爆破设计进行, 由现场爆破振动监测结果发现, 边墙径向先行隧道迎爆侧衬砌最大振动速度为 17.25 cm/s, 小于规范规定的上限值 20 cm/s, 其他部位各方向振动速度更小, 即优化后的爆破设计后续施工未对先行隧道产生较大影响, 先行隧道结构稳定, 也再次验证了优化后的爆破设计是合理的。

5 小净距隧道施工爆破振动控制措施

针对本工程特点, 结合现场监控量测及数值计算, 施工爆破振动控制措施主要从减振和隔振两方面来实现, 在施工过程中减振方面控制措施主要采用了右线后行隧道 CD 法外侧导坑先施工; 内侧导坑台阶分部施工, 禁止上下台阶同时; 减小循环进尺至 0.5 m; 控制最大齐爆孔数或单段最大炸药量; 掏槽位置尽量偏外、掏槽眼成对分段起爆; 分段爆破差不小于 100 ms。隔振方面控制措施主要采用了周边小导管隔振 (后续施工的右线隧道临近左线隧道外侧布置环向隔振孔, 隔振孔直径为 48 mm, 中心间距为 350 mm, 孔内布置 $\phi 40$ mm 钢管); 周边孔隔孔装药; 先施工隧道支护外侧预设置 3~5 cm 泡沫隔振层。本工程通过这两方面措施综合实现爆破振动控制, 在实际工程施工中效果显著。

6 结 论

(1) 在掏槽爆破时, 相邻隧道右墙脚速度峰值较大, 在实际爆破施工中应改进掏槽爆破设计并在爆破时重点监测。

(2) 各监测断面边墙的切向和径向振速比拱脚相应振速大, 爆破面前方先行洞衬砌受爆破振动的影响稍大于后方衬砌; 临近爆破点的左线隧道衬砌表面振动大于远离爆破点的衬砌表面振动, 在实际爆破施工中在爆破时重点监测。

(3) 后行右线隧道左侧导坑下台阶爆破先行隧道迎爆侧衬砌各测点最大振速比左侧导坑上台阶爆破先行隧道迎爆侧衬砌各测点最大振速小, 可以将后行右线隧道左侧导坑上台阶的爆破作为监测的重点。

(4) 针对工程特点, 形成了小净距隧道爆破振动控制措施, 有效地指导了施工。

参 考 文 献

- [1] 刘明高, 高文学, 张飞进. 小净距隧道建设的关键技术及其应用研究[J]. 地下空间与工程学报, 2005, 1(6): 952—955.
LIU Ming-gao, GAO Wen-xue, ZHANG Fei-jin. Research on key construction technology and application of small interval tunnel[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2005, 1(6): 952—955.
- [2] 姚勇, 何川. 并设小净距隧道爆破振动响应分析及控爆措施研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(9): 2815—2822.
YAO Yong, HE Chuan. Analysis of blasting vibration response of parallel set small clear-distance tunnels and blasting control measures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(9): 2815—2822.
- [3] 杨建平, 陈卫忠, 郭小红. 小净距公路隧道支护时机对围岩稳定性影响研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(2): 483—490.
YANG Jian-ping, CHEN Wei-zhong, GUO Xiao-hong. Analysis of blasting vibration response of parallel set small clear-distance tunnels and blasting control measures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(2): 483—490.
- [4] 龚建伍, 夏才初, 朱合华, 等. 鹤上大断面小净距隧道施工方案优化分析[J]. 岩土力学, 2009, 30(1): 236—240.
GONG Jian-wu, XIA Cai-chu, ZHU He-hua, et al. Optimal analysis of construction schemes for Heshang small-space tunnels with large section[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, 30(1): 236—240.
- [5] 叶培旭, 杨新安, 凌保林, 等. 近距离交叉隧洞爆破对既有隧道的振动影响[J]. 岩土力学, 2011, 32(2): 537—541.
YE Pei-xu, YANG Xin-an, LING Bao-lin, et al. Vibration effects on existing tunnel induced by blasting of an adjacent cross tunnel[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(2): 537—541.
- [6] 夏才初, 龚建伍, 唐颖, 等. 大断面小净距公路隧道现场监测分析研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(1): 44—50.
XIA Cai-chu, GONG Jian-wu, TANG Ying, et al. Study of site monitoring of large-section highway tunnels with small clear spacing[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(1): 44—50.