

文章编号:1000-582X(2008)11-1290-06

城市大跨度公路隧道光面爆破设计与优化

姜德义,李付胜,滕宏伟,任松

(重庆大学西南资源开发及环境灾害控制工程教育部重点实验室,重庆400030)

摘要:在建筑物密集的城市繁华地带的地下,进行大跨度隧道的开挖,只有结合实际情况制定合理的开挖方案才能使地面建筑物免受爆破振动的危害。针对嘉华隧道的实际情况,根据理论分析及现场试验,研究相应的爆破方案,提出在加宽段A采用上下台阶开挖,在加宽段B、C、D、E采用上导坑开挖的合理爆破方案。同时,给出隧道光面爆破参数的选取原则和加宽段B的施工布置。通过对爆破地震波的监测及结果分析,确立其传播衰减规律,以此从最大装药量、非电毫秒雷管段别、相邻段位的时差、掘进进尺等4个方面提出爆破参数优化措施,现场实施后取得满意效果。其对隧道工程开挖爆破施工和保证地面建筑物安全起到指导作用。

关键词:隧道开挖;公路隧道;大跨度;光面爆破;参数选择;振动监测

中图分类号:U459.2;TD235

文献标志码:A

Smooth blasting design and optimization of large-span urban highway tunnels

JIANG De-yi, LI Fu-sheng, TENG Hong-wei, REN song

(Key Laboratory for Exploitation of China Southwestern Resources and Environmental Disaster Control Engineering, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, P. R. China)

Abstract: Vibration-resistance can be incorporated into blasting designs to avoid damages caused by the excavation of large-span tunnels in busy urban areas, but only by basing excavation design schemes on actual situations. In view of the actual situation in the Jahua tunnel in Chongqing, P. R. China, research was conducted to identify a relevant explosion scheme. The research was based on theoretical analysis and in-situ testing. Face step excavation was considered in the broadening band A, and upper drift excavation was adopted in broadening bands B, C, D and E. We simultaneously proposed selection criteria for smooth blasting parameters and the construction layout of broadening band B. Based on a regression analysis of the blasting vibration monitoring results, a spread orderliness of blasting vibration was drawn. Explosion parameters optimization measures were put forward, selected from the maximum charge quantity, millisecond blasting, reasonable blasting time difference, and the excavation plan. Field testing achieved satisfactory results. These findings will play an important role in guiding excavation blasting construction of tunnel projects and assuring the safety of ground buildings.

Key words: tunnel excavation; highway tunnel; large-span; smooth blasting; parametric selection; vibrations monitoring

收稿日期:2008-06-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50674108);国家创新研究群体基金资助项目(50621403)

作者简介:姜德义(1962-),男,重庆大学教授,博士生导师,主要从事岩土工程稳定性、安全技术与工程方向的研究,

(Tel)023-65105640;(E-mai)deyij@cqu.edu.cn.

欢迎访问重庆大学期刊网 <http://qks.cqu.edu.cn>

根据目前新奥法隧道施工理论的要求,隧道开挖施工应采用光面爆破的施工工艺。光面爆破是按照隧道断面的设计轮廓线合理布置周边眼而进行的一种控制爆破,实质上就是爆破光面层,而实施爆破之后,在隧道周边形成一个光滑平整的边壁,使隧道断面既符合设计轮廓要求,又要使围岩不产生损伤,从而保持围岩的完整和自身承载能力,以便达到快捷、高效、优质的施工目的^[1-2]。

光面爆破分为全断面一次爆破和预留光面层 2 种。对于断面较小的巷道可采用全断面一次爆破法,对于断面较大的隧道应采用预留光面层爆破法。针对大跨度隧道具有断面跨度大,围岩稳定性差;爆眼数目多,一次爆破炸药用量大,对围岩的扰动大;使用年限长;断面规格控制严格等特点,以嘉华隧道大跨度小净距段开挖施工为研究对象,对隧道工程开挖施工的光面爆破施工技术进行系统研究。

1 工程概况

嘉华隧道是重庆市城市总体规划中南北快速干道——嘉华大桥及南北引道工程的一部分。嘉华大桥及南北引道工程位于重庆市主城区内,行经渝北区、江北区、渝中区及九龙坡区,是重庆市城市总体规划中的南北快速干道。隧道全长 1 427 m,隧道左右线标准段为双线双洞三车道隧道,在出口段为了与黄沙溪立交相接,从主线里程 K6+992 起内轮廓逐渐加宽,渐变为四车道。

嘉华隧道加宽段的洞室埋深为 24~55 m,地表为居民小区,建筑物密集,人口众多,使得施工难度增大,施工过程中会对周围环境的安全产生影响。地表建筑物为钢筋混凝土结构房屋,其具有大型地下车库,根据《爆破安全规程》(GB 6722—2003)的规定要求,选择合理的开挖爆破方案,并在施工爆破掘进该隧道建筑群段的过程中,需要对其房屋地面质点振动速度进行监测,在监测数据的指导下进行爆破施工作业。此次监测的建筑群段的隧道围岩情况如表 1 所示^[3]。

表 1 加宽带情况

类型	隧道净宽/m	隧道边界 间距/m	隧道长度/m	围岩 类别
加宽带 A	15.35	21.8	左线 66、右线 56	Ⅲ
加宽带 B	16.95	18.8	左线 45、右线 30	Ⅲ
加宽带 C	17.55	14.8	左线 106、右线 98	Ⅳ
加宽带 D	18.25	14.4	左线 7、右线 9.5	Ⅳ
加宽带 E	18.84	13.9	左线 6.2、右线 7.2	Ⅳ

2 隧道施工爆破技术

2.1 开挖方案

根据围岩的实际情况、结合现有施工经验及工期目标的要求,针对出口加宽段采用以下施工方法进行施工^[3]。

1) 加宽段 A 与标准段相比,加宽宽度仅为 1.8 m,因此采用与标准段相同的开挖方法:即上、下台阶分部开挖。

2) 加宽段 B、C、D、E,综合考虑设计规范、施工经验和实际情况(跨距较大,隧道拱顶上方有一建筑群),采用上导坑法开挖。

3) 先将加宽段上导坑贯通后,再从进口和出口双向进行上台阶扩挖及下台阶和仰拱开挖。

4) 施工中遵循“短进尺,弱爆破,强支护,早封闭,勤量测”的原则。

2.2 爆破参数的选择

影响爆破效果的主要参数是^[4-13]:周边炮眼间距 E 、周边眼密集系数 M 、最小抵抗线 W 、不偶合系数 D 、装药集中度 Q 。实践证明这些参数是共同起作用的,只有这些参数都在正确的范围内时,爆破效果才是最理想的。

1) 炮眼直径 D_b 。

对于隧道开挖现场常用的炮眼直径为 35~45 mm。

2) 周边眼间距 E 。

周边眼间距和最小抵抗线是光面爆破的 2 个重要参数。隧道开挖施工爆破可按式(1)确定周边眼炮间距 E

$$E = (12 \sim 20)D_b \quad (1)$$

对于隧道光面爆破的周边眼间距可取 600~700 mm,若开挖面曲率较大,岩石对爆破的夹制作用较强,炮眼间距可缩小至 450~500 mm,导向空眼和装药眼之间的间距一般不小于 400 mm。

3) 最小抵抗线 W 。

最小抵抗线即光面层厚度,光面爆破效果的好坏,除受周边眼间距和周边眼装药结构参数的影响外,更主要受最小抵抗线的影响,光面层厚度不仅影响周边眼间裂纹的形成,而且还影响光面层的破碎和开挖后隧道围岩的稳定。因此,确定合理的光面层厚度,对提高光面爆破效果有积极作用。

经验表明,对于大跨度隧道一般取 $W = 700 \sim 800$ mm,拱顶部位的厚度应随跨度的增加而相应加大。另外最小抵抗线与岩石性质及地质构造有关,硬

岩可取 500~600 mm。松软岩石取 800~900 mm, 对于小跨度隧道可减为 600~700 mm。

4) 炮眼密集系数 M 。

炮眼密集系数也称炮眼邻近系数, 它表达了炮眼间距 E 与最小抵抗线 W 之间的关系即 $W = \frac{E}{M}$, 是光面爆破参数确定中的一个关键值。目前, 在工程施工中, 光面层厚度的确定, 一般情况下, 周边眼间距 E 与光面层厚度 W 的比值为 0.5~1.0。

5) 每循环爆破单孔最大装药量的确定。

$$V = K \left(\frac{\sqrt[3]{Q}}{R} \right)^\alpha, \quad (2)$$

其中: Q 为单段最大装药量 (kg); R 为爆破振动的安全距离 (m); V 为保护对象所在地质点振动安全允许速度 (cm/s); K, α 分别为与爆破点至计算保护对象间的地形, 地质条件有关的系数和衰减指数, 其取值范围如表 2 所示^[1]。

表 2 爆区不同岩性的 K, α 值

岩性	K	α
坚硬岩石	50~100	1.3~1.5
中硬岩石	150~250	1.5~1.8
软岩石	250~350	1.8~2.0

表 3 爆破部分参数

围岩级别	炮眼直径 D_0/mm	周边眼间距 E/mm	最小抵抗线 W/mm	炮眼密集系数 M/mm	周边炮眼药卷 直径 d_c/mm	K	α	装药集中度 $/(kg \cdot m^{-1})$
Ⅲ级	38	400	700	0.57	25	200	1.85	0.12
Ⅳ级	38	450	800	0.56	25	200	1.85	0.12

2.3 施工工序及爆破布置

由于加宽段 A 与标准段相同的开挖方法, 即上、下台阶分步开挖和加宽段 B、C、D、E 段采用相同的开挖方法, 即上导坑开挖, 所以下文对加宽段 B 的施工工序及爆破布置给予介绍, 其它加宽段根据情况做适当的修改。

2.3.1 加宽段 B 开挖断面布置及开挖步骤

1) 先进行上导坑开挖, 上导坑开挖高度为 6 m, 宽度为 12 m。

2) 对上导坑拱顶围岩按设计进行支护, 两侧拱墙按临时支护方式进行临时支护。

3) 上台阶左右侧分别扩挖, 扩挖后的轮廓和设计轮廓相同; 对扩挖的边墙, 按照设计进行初期支护。

4) 下台阶左右分幅开挖, 对开挖出的半幅进行初期支护; 开挖轮廓、初期支护方式按设计进行。

6) 不耦合系数 D 。

炮眼直径与药包直径的比值称为不耦合系数。当不耦合系数 $D=1$ 时, 表示药包与孔壁紧密接触。当 $D>1$ 时, 表示药包与孔壁之间存在着空气间隙。研究表明, 当炮眼直径为 32~45 mm 时, 不耦合系数 $D=1.5\sim 2.0$ 。

7) 光面爆破炮眼数目的计算。

由于光面爆破的周边眼距小, 周边眼装药量少, 因此, 根据这一特点先求出周边眼数目, 然后按平均装药量原则计算出其它炮眼数目。

周边眼数目 N_1

$$N_1 = (B_L - B)/a + 1, \quad (3)$$

其中: B 为隧道掘进宽度 (m); B_L 为隧道掘进周长 (m)。

掏槽眼、辅助眼和底眼数目 N_2 值按一次爆破所需要的总装药量减去周边眼装药量, 使剩余的药量平均分配在 N_2 内来计算, 则工作面炮眼总数 $N=N_1+N_2$ 。

根据工程的特点、地质条件、施工机具以及对光面爆破的质量要求, 并参照国内外的一些类似工程资料, 初步选定光爆层的厚度、孔距以及装药量等一些主要参数, 然后在施工实践中通过试验逐步完善。表 3 为本工程中所采用的光面爆破参数。

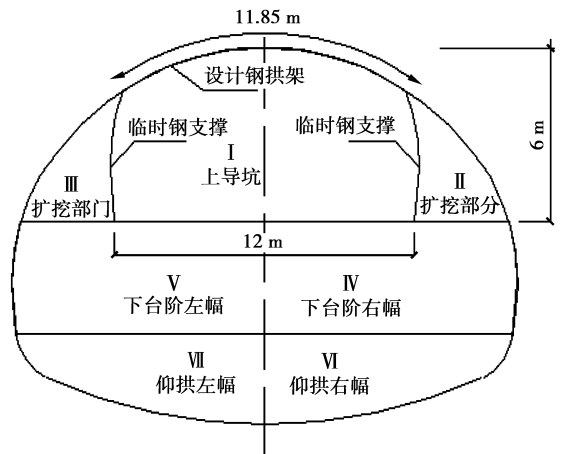


图 1 加宽段 B 开挖方法

5) 仰拱分幅开挖及清底。

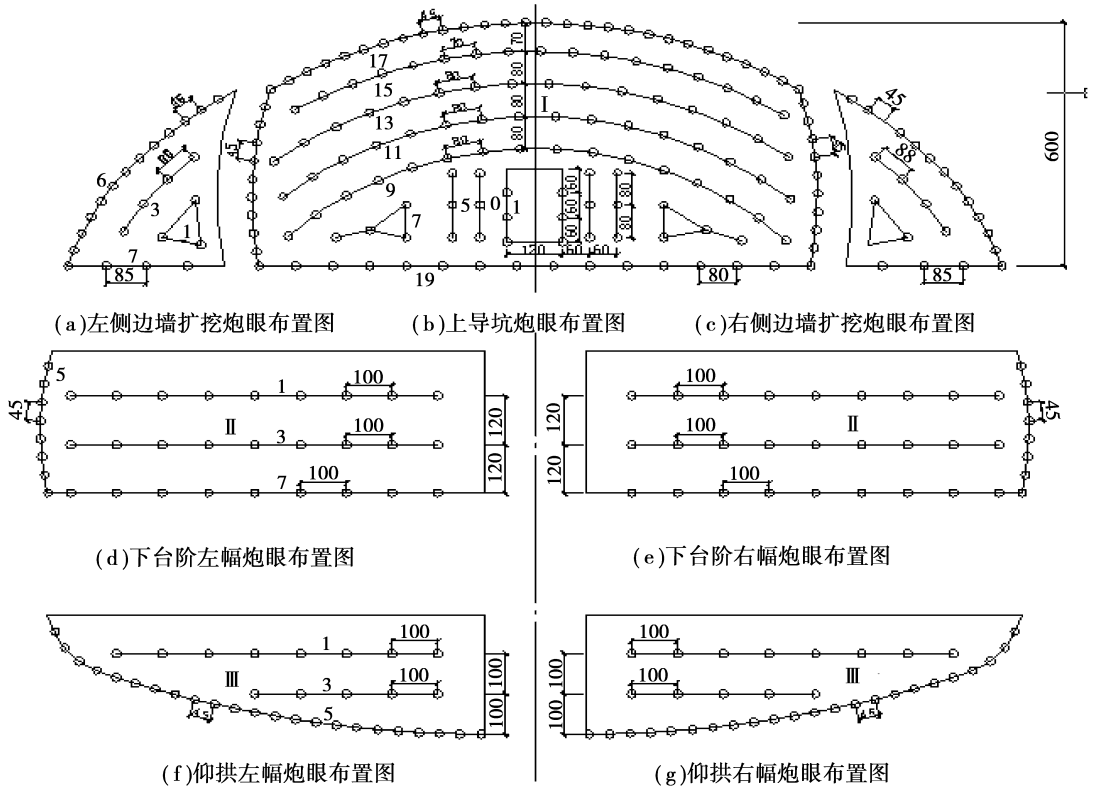


图 2 加宽段 B 炮眼布置示意图

2.3.2 加宽段 B 炮眼布置

表 4 加宽段 B 上台阶断面炮眼药量分配表

序号	雷管段别	炮眼名称	眼数/个	眼深/m	炸药直径/mm	单孔装量/kg	小计/kg
1	1	掏槽眼	8	1.6	32	1.500	12.0
2	3	掏槽眼	6	3.2	32	2.00	12.0
3	5	掏槽眼	6	3.5	32	2.000	12.0
4	7	扩槽眼	8	3.5	32	1.200	9.6
5	9	掘进眼	16	3.5	32	1.000	16.0
6	11	掘进眼	16	3.5	32	1.000	16.0
7	13	掘进眼	16	3.5	32	1.000	16.0
8	15	内圈眼	17	3.5	32	0.700	11.9
9	17	周边眼	48	3.5	25	0.375	18.0
10	19	底板眼	14	3.5	32	1.200	16.8
合计			155				140.3

注:每循环进尺 3.0 m,爆破方量 196 m³,单位体积量 140.3 kg/196 m³=0.72 kg/m³。

3 爆破设计优化及爆破效果

洞内爆破设计要根据洞外监测结果不断地优化,在保证安全的前提下使爆破作业达到最佳的效果。针对不同的地质条件,爆破引起的振动效应不会完全相同,特别是振速要求比较高时更为突出。因此,对爆破引起的振速进行了跟踪监测,依此对爆破参数进行调整。

3.1 爆破振动监测仪器和方法

该工程的振动监测采用拾振器、INV306 型数据采集仪、DASP-VIB 分析软件、笔记本电脑、打印机等部件组成测试系统。

由于爆破震动波在岩层中传播具有衰减性,为了测得每次爆破振动最大值,测点基本上选择离爆心最近的位置。每次测量结束后,立即对测试数据进行处理分析,并及时反馈给各参建方。

3.2 监测点的布置

根据建筑群与隧道的空间位置及距离,随着爆破里程的进度而逐次在建筑群房屋地面共布置了 25 个监测点,测点直接布置在隧道正上方的地表,如图 3 所示^[12]。

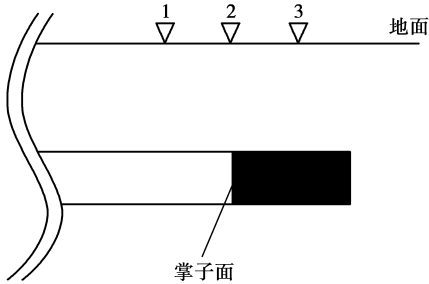


图 3 振动测点布置示意图

3.3 爆破振动监测结果

在爆破施工之前,先要进行试验爆破,针对不同周围环境,爆破引起的振动效应不会完全相同。因此,对爆破引起的振动进行了跟踪监测,共获 40 组数据,其中右洞部分数据统计如表 5 所示。

3.4 监测回归结果与分析

根据我国《爆破安全规程》(GB 6722—2003)及国内外的一些研究成果,在中国和前苏联地区爆破振动传播与衰减规律普遍都采用萨道夫斯基的经验公式,如式(2)。

根据现场爆破振动波监测数据,利用最小二乘法回归分析的原理进行线性回归,求得: $K = 165$, $\alpha = 1.7303$ 。故可得出右洞掌子面爆破时振动速度沿不同方向传播衰减规律,如下

表 5 爆破参数和振动速度监测结果

测点	与爆心的 高程差 H/m	爆心与测点 的水平距离 L/m	爆破参数		振动速度		
			总装药量/kg	段最大装 药量 Q/kg	最大垂直 分量/ $(cm \cdot s^{-1})$	最大水平径向 分量/ $(cm \cdot s^{-1})$	最大水平切向 分量/ $(cm \cdot s^{-1})$
1	32	65	171	16.0	1.140	1.438	0.865
2	48	67	171	16.0	1.170	1.476	0.803
3	35	73	150	12.8	1.391	0.849	1.234
4	43	67	150	12.8	1.226	0.799	1.114
5	36	88	150	12.8	0.951	1.277	1.124
6	31	96	135	12.0	0.549	0.946	0.834
7	48	62	135	12.0	0.366	0.732	0.982
8	30	86	125	11.0	0.448	0.748	0.854
9	28	97	125	11.0	0.607	0.530	0.561
10	52	95	130	12.0	0.802	0.733	0.621
11	53	108	130	12.0	0.637	0.701	0.511
12	35	84	130	12.0	0.756	0.854	1.024
13	40	93	130	12.0	0.746	0.871	0.931
14	43	97	130	12.0	0.578	0.652	0.895
15	30	83	130	12.0	1.028	1.040	0.879

$$V = 165 \left(\frac{Q}{R} \right)^{1.7303}$$

同理可以得出左洞的掌子面爆破时振动速度沿不同方向传播衰减规律,如下

$$V = 162 \left(\frac{Q}{R} \right)^{1.6837}$$

应用振动测试分析程序对监测结果进行数据提取和分析。可以从分析中得出如下结论:1)相邻段振动波是否有叠加;2)振速波峰相隔时间是否较均匀,其个数多少即毫秒雷管段别的多少;3)爆破时差是否合理;4)最大与单段装药量是否合理;5)施工掘进进尺是否合理。

3.3 爆破参数优化调整

根据数据分析调整爆破参数采用以下方法:减

小最大段装药量 Q 值;增加非电毫秒雷管段别,保证总装药量,保证爆破施工的效果;增加相邻段位的时差,从而减小地震波的叠加;减少掘进进尺,从而可以减少总装药量的单段药量。

3.4 爆破效果

按照优化后的爆破设计,爆破引起的振动大幅度减少,隧道爆破后对爆破效果进行检测评价:

- 1)爆破后围岩稳定无剥落现象;
- 2)爆破后围岩扰动深度小于 0.5 m;
- 3)平均线性超挖量小于 10 cm;
- 4)最大超挖量小于 20 cm;
- 5)两炮间台阶最大尺寸小于 15 cm;
- 6)炮眼痕迹保存率等于或大于 80%;
- 7)炮眼利用率达到 90%以上;

8) 爆破振速基本控制在 1.5 cm/s 以内。

控制爆破振动对围岩的影响取决与振动速度的大小,首先,经过现场测试分析可知,隧道掘进中围岩最大爆破振动速度应控制在 1.5 cm/s 以内为宜。然后,通过爆破监测的信息反馈,并及时对数据进行回归分析,逐渐调整装爆破参数使在建筑群房屋地面测得的振动速度值均小于 1.5 cm/s,达到了预期效果。其信息化爆破施工监测较好地指导了后续阶段隧道的爆破作业。

4 结 语

在嘉华隧道施工过程中,通过对城市大跨度小净距段光面爆破技术进行的系统研究,可以得到以下初步认识。

1) 根据理论分析及现场试验,提出了在加宽段 A 采用上、下台阶分部开挖、加宽段 B、C、D、E 采用上导坑法开挖的合理爆破方案,并对爆破参数进行了优化设计。

2) 通过采用光面爆破技术,安全顺利的通过了加宽段围岩,实现工程进度的要求,同时还能达到不打搅周围居民的要求,取得了一定的经济效益和良好的社会效益。

3) 隧道开挖实施光面爆破后,在隧道周边形成一个光滑平整的边壁,使隧道断面既符合设计轮廓要求,又使隧道围岩不产生损伤,从而保持围岩的完整性和自身承载能力,有利于隧道的维护。

4) 避免了隧道施工时欠挖和超挖现象的产生,于是减少了欠挖处理的时间和超挖所需的填料,有利于后续工作的实施,加快了施工进度,保证了工程质量,降低了成本。

5) 由于采用光面爆破技术,减少了爆破对隧道围岩的扰动,保持了隧道围岩的稳定性,达到了安全施工的目的。

6) 经过现场测试分析,提出在隧道掘进中对围岩最大爆破振动速度应控制在 1.5 cm/s 以内为宜。对实施效果加强监测,及时进行信息反馈不仅可以及时调整爆破参数使其达到优化,而且可以积累经验以指导类似隧道的爆破作业。

参考文献:

- [1] 张志呈. 定向断裂控制爆破[M]. 重庆:重庆出版社,2000.
- [2] 张志呈. 爆破原理与设计[M]. 重庆:重庆大学出版社,1992.
- [3] 重庆市设计院. 重庆嘉华嘉陵江大桥工程大坪隧道工程施工设计[R]. 重庆:重庆市设计院,2005.
- [4] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB6722-

2003, 爆破安全规程[S]. 北京:中国标准出版社,2004.

- [5] 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.
CHENG QING, WANG HONG-TU, HU GUO-ZHONG, et al. Monitoring and controlling technology for blasting vibration induced by tunnel excavation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2005,26(6):964-967.
- [6] XU Y L, CHEN B. Iterated vibration anotrol and health monitoring or building structures using semi-active dampers: part I -methodology [J]. Engineering Structures, 2008, 30(7):1789-1801.
- [7] LEE Y Z, SCHUBERT W. Detemination of the round length for tunnel excavation in weak rock [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2008, 23(3):221-231.
- [8] 顾义磊,李晓红,杜云贵,等. 隧道光面爆破合理爆破参数的确定[J]. 重庆大学学报:自然科学版,2005,28(3):95-97.
GU YI-LEI, LI XIAO-HONG, DU YUN-GUI, et al. Reasonable smooth blasting factor used in tunnel [J]. Journal of Chongqing University: Natural Science Edition, 2005, 28(3):95-97.
- [9] 唐果良. 繁华城区浅埋大断面隧道减震爆破技术[J]. 现代隧道技术,2006,43(2):54-58.
TANG GUO-LIANG. Shock absorption techniques for the blasting excavation of a shallow tunnel with large cross-section in urban area [J]. Modern Tunneling Technology,2006,43(2):54-58.
- [10] FERKL L, MEINSMAN G. Finding option ventilation control for highway tunnels[J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2007, 22(2):222-229.
- [11] DIMMOCK P S, MAIR R J. Effect of building stiffness on tunneling-induced ground moment [J]. Tunneling and Underground Space Technology, 2008, 24(3):438-450.
- [12] 张友勇. 隧道浅埋地段控制爆破技术[J]. 隧道建设, 2004,4:58-60.
ZHANG YOU-YONG. The controlled blasting technology for excavation of urban shallow tunnel [J]. Tunnel Construction, 2004, 4:58-60.
- [13] 齐景岳. 隧道控制爆破技术[J]. 铁道标准设计,2006, 11:72-81.
QI JING-YUE. The controlled blasting technology of tunnel [J]. Railway Standard Design, 2006, 11:72-81.
- [14] 张继春. 工程控制爆破[M]. 成都:西南交通大学出版社,2001.
- [15] CHATTERJEE. Vibration control by recursive time-delayed acceleration feedback [J]. Journal of Sound and Vibration, 2008, 317(1-2):67-90.

(编辑 赵 静)