

爆破振动对既有高铁隧道衬砌安全的影响分析*

郑明新,夏一鸣,胡国平,刘家桦

(华东交通大学 土木建筑学院,南昌 330013)

摘 要:在救援通道爆破掘进施工中,为了确保邻近金山顶隧道的安全,运用现场测试技术与数值法探讨了爆破振动对邻近高铁隧道衬砌结构的振动影响。其中数值分析表明既有隧道迎爆侧受水平应力波为主,径向振速明显大于垂向振速;迎爆侧从拱顶至墙脚,径向振速先增后减,墙腰处最大,拱脚处次之,墙脚处径向振速大于拱顶处;垂向振速呈现先减小后增大趋势,拱顶处最大;既有隧道衬砌墙腰处受拉应力最大,易出现拉伸破坏。最后基于动力弹性理论,依据现场测试数据振速和混凝土动应变的关系,通过线性拟合确定了爆破施工过程中隧道衬砌安全条件下爆破振动速度不大于6 cm/s。

关键词:爆破振动;高铁隧道;动力弹性理论;动应变;衬砌

中图分类号:U455.6 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2018)03-0813-06

Impact Analysis of Blasting Vibration on the Safety of Existing High Speed Tunnel Lining

Zheng MingXin, Xia Yiming, Hu Guoping, Liu Jiahua

(School of Architecture and Civil Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, P.R.China)

Abstract: In order to ensure the safety of the adjacent mountain tunnel, the vibration effect of blasting vibration on adjacent high-speed railway tunnel lining structure is discussed in order to ensure the safety of the adjacent tunnel. The numerical analysis shows that detonating side of the existing tunnel suffers mainly the horizontal stress wave, radial vibration velocity is obviously greater than vertical vibration velocity. On the detonating side from the vault to the foot of the wall, radial vibration velocity increased firstly and then decreased. The maximum occurred on the wall waist, then the arch of the foot. The radial vibration velocity at the arch of the foot is greater than that at the crown. The vertical vibration velocity decreased firstly and then increased, the maximum occurred on the vault, and the maximum tensile stress occurred on the wall waist of the existing tunnel lining, prone to tensile failure. Finally based on the dynamic theory of elasticity, and on the relationship of field test vibration velocity of concrete and the dynamic strain, through linear fitting, the result show that the blasting vibration velocity should be not greater than the 6 cm/s during the blasting construction of tunnel lining under the safety conditions.

Keywords: blasting vibration; high-speed railway tunnel; dynamic elasticity theory; dynamic strain; lining

0 引言

由于隧道工程多以钻爆法^[1]施工为主,随着高速铁路建设的快速发展,新建隧道爆破掘进对既

有邻近隧道的影响备受关注。一些学者针对上述问题开展了数值分析和现场测试,如刘玉山等^[2]对大轩岭隧道爆破振动现场监测表明,垂直振动速度可作为爆破振动的控制速度;孙艳军等^[3]结合

* 收稿日期:2017-12-01(修改稿)
作者简介:郑明新(1966-),男,陕西渭南人,博士,教授,主要从事路基与隧道边坡病害防治研究。
E-mail:492001473@qq.com
基金项目:国家自然科学基金(51568022);江西省高等学校科技落地计划项目(KJLD13036)

新柳林河隧道临近营业线爆破掘进分析表明,迎爆侧边墙偏上为最危险区,起拱处次之,底板则相对安全;耿萍等^[4]运用数值计算研究了不同工法下爆破施工对既有连拱隧道的影响;代勇等^[5]通过现场监测研究了爆破施工产生的地震波对相邻隧道衬砌受力的影响;叶培旭等^[6]通过现场实时监测,研究了近距离交叉隧洞爆破施工对既有隧道的振动影响。

鉴于现有研究多采用单一手段分析爆破振动对既有邻近隧道的影响,本文利用现场测试和数值计算相结合来探讨救援通道爆破施工对既有邻近高铁隧道衬砌结构的振动影响。

1 工程概况

合福铁路金山顶隧道(DK354+724.92~DK360+222.5),全长 5 497.58 m,隧道最大埋深为512.65 m,位于江西上饶市婺源县境内。其救援通道(XDK0+000~XDX0+597)位于金山顶隧道进口右侧平行于主洞,与主洞净距约为 30 m,设计为平导式隧道,接金山顶隧道进口段线路右侧的既有综合洞室(正交里程为 DK355+224),两者位置关系如图 1。

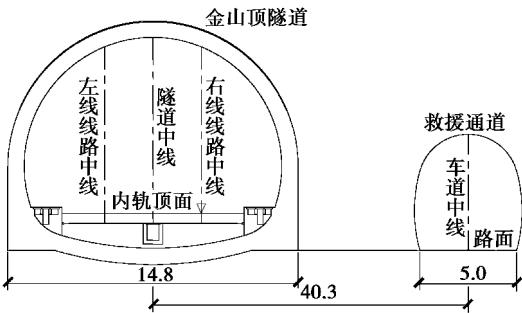


图 1 金山顶隧道与救援通道位置关系(单位: m)

Fig. 1 Position relation between Jinshanding tunnel and the rescue channel(unit: m)

救援通道围岩主要为燕山期花岗岩、中元古界板组粉砂质板岩,进口地段为强风化透镜体、岩体破碎、节理发育,洞身段围岩为花岗岩,弱风化,岩质坚硬,岩体较完整,故采用钻爆法施工。

2 数值分析

2.1 模型的建立

本文计算选取爆破影响区最不利截面 DK355+150建立二维有限元模型。救援通道平均埋深 56 m,洞径高 6 m、宽 5 m。为消除边界效应,将水平向和竖向围岩分别取洞径的 5 倍作为计算范围。针对 III 级围岩地段,采用 D-P 本构模型,其中隧道衬砌采用梁单元、围岩采用四节点等参单元;模型左右侧和底面分别采用水平向和竖向位移约束边界条件。为避免爆破地震波在边界处反射而使计算结果与实际不符,在边界面施加黏弹性人工边界。围岩及衬砌力学参数见表 1,模型如图 2。

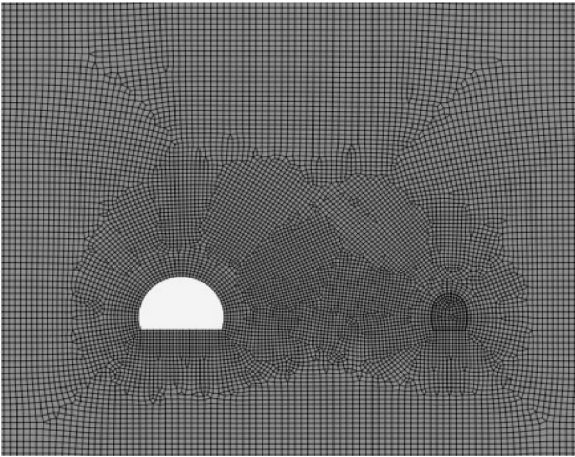


图 2 数值计算模型

Fig. 2 Numerical model

表 1 围岩及衬砌材料力学参数

Table 1 Mechanical parameters of wall rock and lining material

材料参数	重力密度/(kN·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	粘聚力/MPa	摩擦角/(°)
III 级围岩	24.7	10.4	0.36	1.4	38
C30 砼	25.0	30.0	0.25	—	—

2.2 爆破荷载

文献[7]基于圣维南原理,将爆破荷载等效施加在炮孔连心线所确定的平面上。数值模拟结果证明,爆破荷载等效施加方法在爆破近区存在一定差异,但在中远区较为一致。考虑本文主要着眼于

爆破作用下对中远区构筑物的影响,利用文献[7]确定爆破荷载的等效压力 P_e :

$$P_e = \frac{2r_0}{a}P_0$$

式中: P_0 为单个炮孔壁上作用的初始应力峰值; r_0 为炮孔半径; a 为炮孔间距。

其中单个炮孔壁上的初始应力峰值 P_0 为:

$$P_0 = \frac{1}{8} \rho_e D^2 k_d^{-6} \eta$$

式中: ρ_e 为装药密度; D 为炸药爆速; k_d 为炮孔装药不耦合系数, $k_d = \frac{R_0}{R_b}$, R_0 和 R_b 分别为炮孔直径和

等效药卷直径; η 为炸药爆炸爆轰气体膨胀碰撞炮孔壁时的压力增大系数,一般取 8~11,这里取 10,可得到爆破荷载等效压力峰值为 19.76 MPa。等效爆破荷载计算参数见表 2。

参考文献[8] 爆破荷载达到峰值压力所需的升压时间为 8~12 ms,卸荷时间为 40~120 ms。取升压时间 10 ms,卸荷时间 100 ms,总计算时间取 500 ms。

表 2 等效爆破荷载计算参数

Table 2 Equivalent blasting load calculation parameters

炮孔半径/mm	炮孔间距/mm	等效药卷直径/mm	炸药爆速/(km · s ⁻¹)	装药密度/(g · cm ⁻³)
20.00	400.00	19.57	4.80	1.00

2.3 结果分析

2.3.1 衬砌振动速度分析

考虑爆破振动对既有隧道迎爆侧影响较背爆侧较大,数值计算中重点分析迎爆侧拱顶、拱脚、墙腰和墙脚位置的振动衰减规律。选取典型位置点如图 3 所示。

限于篇幅,这里主要分析墙腰测点振动波形图,见图 5。

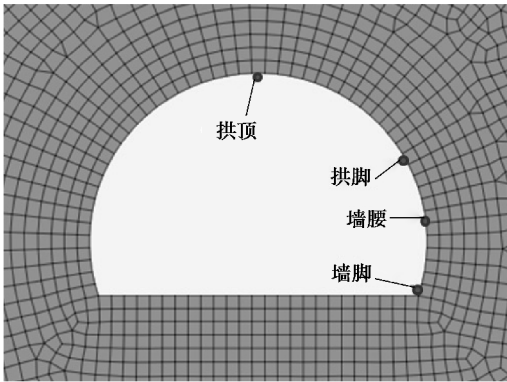


图 3 测点布置

Fig. 3 Layout of measuring points

数值计算得到的各个测点振动峰值速度如图 4 所示。

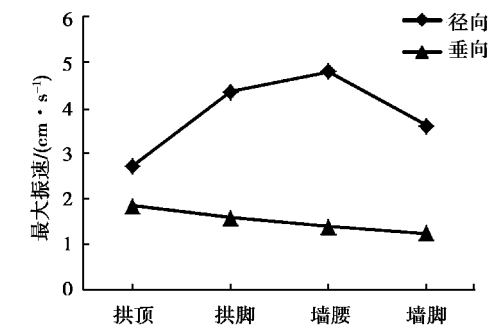


图 4 测点振动峰值

Fig. 4 Vibration peak value of measuring point

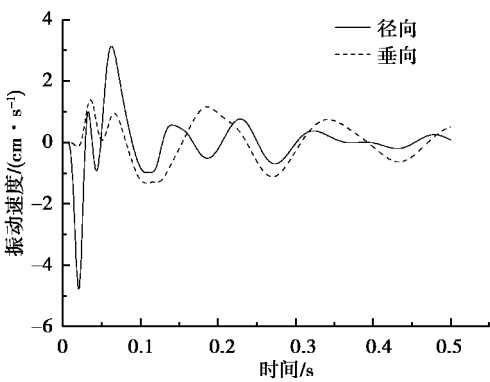


图 5 墙腰测点径向振动波形

Fig. 5 Radial vibration waveform of lining waist measurement point

衬砌振动速度云图如图 6、图 7 所示。

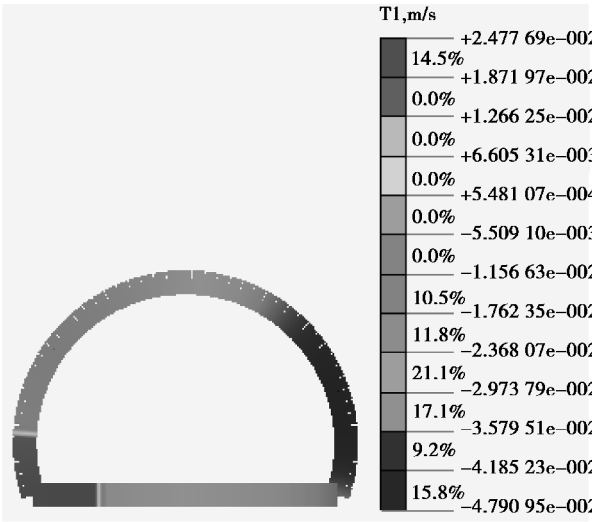


图 6 衬砌径向速度云图

Fig. 6 Radial velocity image of lining value

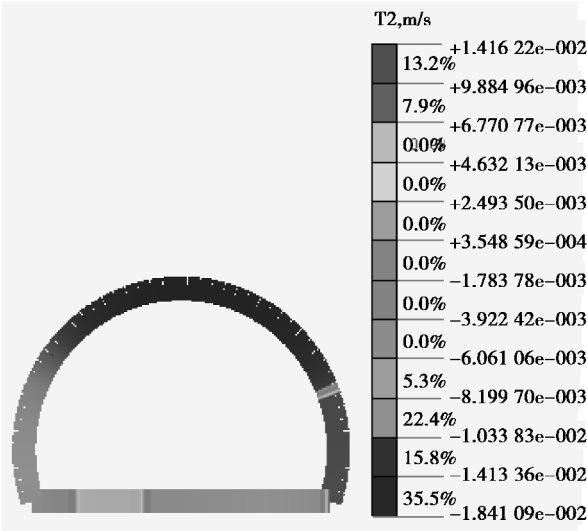


图 7 衬砌垂向速度云图

Fig. 7 Vertical velocity image of lining value

由图 4~7 可知:从拱顶到墙脚位置,径向振速呈现先增大后减小的趋势,最大振速出现在墙腰位置(4.791 cm/s),拱脚处次之(4.352 cm/s),拱顶处最小(2.724 cm/s);垂向振速呈现先减小后增大趋势,最大振速出现在拱顶位置(1.835 cm/s),墙脚处较小(1.237 cm/s);墙腰处的振动速度大于其他位置,是最危险处,此处振动若过大会导致衬砌出现裂纹,进而可能影响既有高铁隧道的运营。

2.3.2 衬砌应力分析

本节分析高铁隧道混凝土衬砌结构在爆破荷载作用下的受力情况,数值分析软件规定“拉正压负”。衬砌测点应力峰值见表 3,测点应力时程曲线如图 8。

表 3 测点应力峰值

Table 3 Stress peak value of measuring point

测点	拉应力峰值/MPa	压应力峰值/MPa
拱顶	0.18	0.87
拱脚	0.38	0.47
墙腰	0.67	0.55
墙脚	0.62	0.48

由表 3 及图 8 分析可知:在迎爆侧拱顶、拱脚、墙腰和墙脚位置中,拱顶处的压应力最大,在 27 ms 时达到 0.87 MPa;墙腰处拉应力最大,在 78 ms 时达到 0.67 MPa。可见,墙腰处属于最危险区,当衬砌拉应力超过混凝土抗拉强度时,在墙腰处出现拉伸破坏,拱脚处和拱顶处则次之。

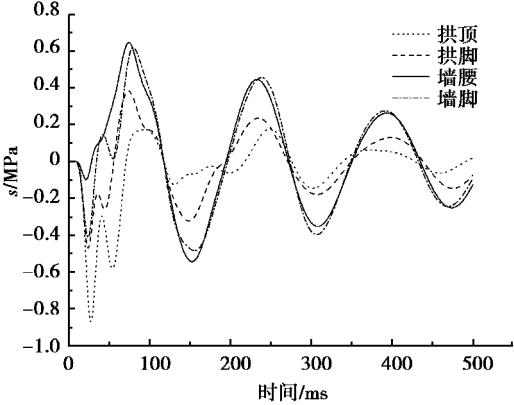


图 8 衬砌不同测点处的应力时程曲线

Fig. 8 Stress time history curve of the lining at different measuring points

3 现场振动测试

3.1 振动测试

救援疏散通道施工为全断面爆破开挖,采用人工爆破作业,至 III 级围岩段的里程为 XDX0+074,正对金山顶隧道 DK355+150 处,爆破区域及爆破影响区域如图 9。为了测试爆破施工的振动强度,在截面 DK355+150 处布设测试仪器,得到金山顶高铁隧道衬砌的表面振动速度与动应变。振动速度采用 TC-4850N 无线网络爆破测振仪,动应变监测采用振弦式混凝土表面应变计,重点测试墙腰与墙脚处的振动速度与动应变。将测振仪传感器与应变计用 502 胶水固定在衬砌表面左侧墙脚和墙腰及右侧墙脚和墙腰位置,仪器布设图如图 10 所示,部分振动测试数据见表 4。

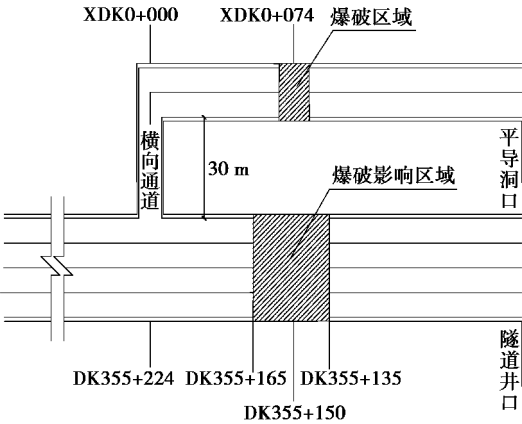


图 9 救援通道爆破区域及金山顶隧道爆破影响区域

Fig. 9 Rescue tunnel blasting area and the impact area of the peak of Jinshanding tunnel blasting

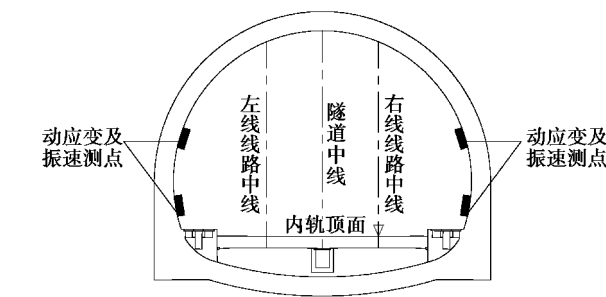


图 10 金山顶隧道衬砌表面动应变及振速测点布置

Fig. 10 Dynamic strain and vibration velocity measurement points on the surface of Jinshanding tunnel lining

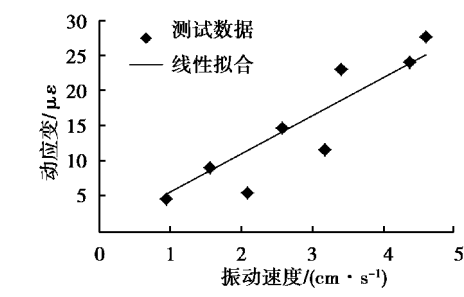


图 11 动应变与振动速度线性拟合

Fig. 11 Linear fitting of dynamic strain and vibration velocity

表 4 动应变及振动速度测试数据								
Table 4 Dynamic strain and vibration velocity test data								
测点位置	右侧墙腰		右侧墙脚		左侧墙腰		左侧墙脚	
爆破次数	1	2	1	2	1	2	1	2
动应变/ $\mu\epsilon$	27.56	14.62	23.06	11.47	23.94	5.46	8.93	4.60
振动速度/ $(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$	4.61	2.58	3.42	3.19	4.37	2.09	1.56	0.95

3.2 振动安全速度的分析

根据《爆破安全规程》^[9](GB 6722—2011),铁路交通隧道安全振动速度标准按 10~20 cm/s 控制,但依据工程具体情况和实践经验,由于隧道二衬结构为素混凝土结构,为避免爆破时产生过大振动破坏隧道衬砌结构,本文通过分析振速和混凝土动应变的关系,确定本次爆破工程的爆破振动安全速度。依据动力弹性理论,根据文献[10]可知,隧道衬砌结构中由振动产生的正应力由下式确定:

$$\sigma = \rho C_p v$$

(1)

式中: σ 为应力波在某点产生的正应力,MPa; ρ 为衬砌材料密度, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$; C_p 为纵波波速, cm/s ; v 为质点振动速度, cm/s 。

根据弹性材料的应力应变关系 $\sigma = E\varepsilon$,代入式(1)得:

$$\varepsilon = \frac{\rho C_p v}{E}$$

(2)

由式(2)可知,在爆破振动作用下,振动速度与动应变呈线性关系^[11]。依据振动测试中得到的表 2 数据进行线性拟合得到拟合曲线如图 11,振动速度与动应变的关系表达式为:

$$\varepsilon = 5.431v$$

(3)

式中: ε 为动应变, $\mu\epsilon$; v 为质点的振动速度, cm/s 。

根据文献[12]近邻施工容许拉应力增量控制

标准,既有金山顶隧道容许拉应力增量为 1.0 MPa,由 C30 混凝土弹性模量 30 GPa、极限抗拉强度 2.0 MPa,考虑 2.0 的安全系数,拉应力容许值为 1.0 MPa,故取拉应力控制值为 1.0 MPa。依据弹性材料的应力应变关系和式(2)计算可得振动速度控制值为 6.14 cm/s,故采用 6.0 cm/s 作为爆破振动安全速度。

3.3 衬砌安全状况的评价

(1)现场测试得到了振动安全速度不大于 6 cm/s(拉应力控制值为 1 MPa)条件下,衬砌结构均表现为安全。

(2)由数值分析可知,衬砌质点的振动速度与现场测试数据较为一致,且最大振速与最大拉应力分别小于振动安全速度和拉应力控制值。说明本次爆破施工参数设计合理,金山顶隧道衬砌结构刚度满足工程要求,爆破施工对衬砌影响不大。

(3)现场监测过程中振动速度相对动拉应力较易于获得数据且便于分析,动拉应力与振动速度呈现一定的相关性,建议以振动速度作为主要安全判据。

4 结论

(1)基于动力弹性理论,从振速和混凝土动应变的关系出发,运用线性拟合确定本次救援疏散通

道爆破工程的爆破振动安全速度为 6 cm/s,实践证明可行。

(2)既有隧道迎爆侧受水平应力波为主,径向振速明显大于垂向振速;迎爆侧从拱顶至墙脚,径向振速先增后减,墙腰处最大,拱脚处次之,墙脚处径向振速大于拱顶处;垂向振速呈现先减小后增大趋势,拱顶处最大。

(3)爆破施工时,衬砌墙腰处受拉应力最大,当拉应力超过混凝土的抗拉强度时,在隧道墙腰处会出现拉伸破坏。

参考文献(References)

[1] 李术才,刘斌,孙怀凤,等.隧道施工超前地质预报研究现状及发展趋势[J].岩石力学与工程学报,2014,33(6):1090-1113. (Li Shucai, Liu Bin, Sun Huaifeng, et al. State of art and trends of advanced geological prediction in tunnel construction[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33 (6):1090-1113. (in Chinese))

[2] 刘玉山,陈建平.大轩岭小净距隧道爆破振动监测与分析[J].爆破,2008,25(2):92-94. (Liu Yushan, Chen Jianping. Monitoring and analysis of blasting vibration in Daxuanling tunnel with small clear space[J]. Blasting, 2008, 25(2):92-94. (in Chinese))

[3] 孙艳军,赵亚克,张世平.新柳林河隧道掘进爆破对既有隧道的影响[J].爆破,2015,32(1):75-80. (Sun Yanjun, Zhao Yake, Zhang Shiping. Influence of excavation blasting of New Liulin River tunnel on existing tunnel[J]. Blasting, 2015, 32(1):75-80. (in Chinese))

[4] 耿萍,张征亮,汪波,等.不同工法下爆破振动对既有隧道的影响分析[J].铁道建筑,2012(3):51-54. (Geng Ping, Zhang Zhengliang, Wang Bo, et al. Analysis of blasting vibration in different construction methods under the influence on existing tunnel[J]. Railway Engineering, 2012(3):51-54. (in Chinese))

[5] 代勇,周建春.天坪岭隧道爆破振动对既有隧道衬砌受力影响监测分析[J].铁道标准设计,2011(11):97-100. (Dai Yong, Zhou Jianchun. Monitoring of the influence of blasting vibration from Tianpingling tunnel

on the behavior of an existing tunnel[J]. Railway Standard Design, 2011(11):97-100. (in Chinese))

[6] 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 Peixu, Yang Xinan, Ling Baolin, 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. (in Chinese))

[7] 张玉成,杨光华,刘鹏,等.爆破荷载在数值计算中的等效施加方法研究[J].地下空间与工程学报,2012,8(1):56-64. (Zhang Yucheng, Yang Guanghua, Liu Peng, et al. An equivalent approach for acting blasting load in dynamic numerical simulation of blasting vibration[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2012, 8(1):56-64. (in Chinese))

[8] 包德勇.小间距隧道爆破振动的影响分析[J].铁道标准设计,2008(11):89-92. (Bao Deyong. Analysis of blasting vibration in tunnel with small space[J]. Railway Standard Design, 2008(11):89-92. (in Chinese))

[9] 中国工程爆破协会.爆破安全规程(GB 6722—2011)[S].北京:中国标准出版社,2004. (China Society of Explosive and Blasting. Safety regulations for blasting (GB 6722—2011)[S]. Beijing: China Standard Press, 2004. (in Chinese))

[10] 楼晓明,郑俊杰,马建军,等.隧道微差爆破振动速度及应力场研究[J].地下空间与工程学报,2008,4(2):248-252. (Lou Xiaoming, Zheng Junjie, Ma Jianjun, et al. Study on millisecond blasting vibration velocity and stress field in tunnel[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2008, 4(2):248-252. (in Chinese))

[11] 醋经纬.小净距交叉隧道爆破振动控制技术研究[D].兰州:兰州交通大学,2014. (Cu Jingwei. Research on the control technology of small clear distance cross tunnel blasting vibration[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2014. (in Chinese))

[12] 关宝树.隧道工程施工要点集[M].北京:人民交通出版社,2011. (Guan Baoshu. Key points in tunnel construction[M]. Beijing: China Communications Press, 2011. (in Chinese))