

爆破地震波作用下隧道围岩动应力集中系数分析

李兴华, 龙 源, 纪 冲, 周 翔, 路 亮

(解放军理工大学野战工程学院, 江苏 南京 210007)

摘 要: 将爆破地震波进行合理近似简化, 采用波函数展开法, 推导了无限岩石介质中爆破地震波作用下隧道围岩动应力集中系数的表达式, 结合具体算例, 从理论上定量分析了围岩不同位置上爆破地震波主频和围岩物理力学指标对动应力集中系数的影响。分析结果表明: 隧道围岩迎爆侧的动应力集中系数整体上大于背爆侧, 动应力集中系数峰值偏向于迎爆侧; 在不同主频爆破地震波作用下, 动应力集中系数的影响存在最大值; 隧道围岩的弹性模量对动应力集中系数的影响较大, 而泊松比对动应力集中系数的影响较小。

关键词: 爆破地震波; 波函数展开法; 隧道围岩; 动应力集中系数

中图分类号: U451

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2013)03-0578-05

作者简介: 李兴华(1985-), 男, 河北赵县人, 博士研究生, 主要从事爆炸地震效应与防护工程等方面的研究。E-mail: xinghuali85@sina.com。

Dynamic stress concentration factor for tunnel surrounding rock under blasting seismic waves

LI Xing-hua, LONG Yuan, JI Chong, ZHOU Xiang, LU Liang

(College of Field Engineering, PLA Univ. of Sci. & Tech., Nanjing 210007, China)

Abstract: The blasting seismic waves are simplified reasonably. Based on the wave function expansion method, an equation for dynamic stress concentration factor of tunnel surrounding rock of infinite rock under the blasting seismic waves is deduced. Based on a typical case, the influences of the main frequency of the blasting seismic wave and the physico-mechanical indices of tunnel surrounding rock on the dynamic stress concentration factor at different positions are quantitatively analyzed. The results show that the dynamic stress concentration factor of tunnel surrounding rock near blasting is larger than that far away from it. The peak of dynamic stress concentration factor of tunnel surrounding rock is close to the near-blasting side. There is a peak of the dynamic stress concentration factor under different main frequencies of the blasting seismic waves. The elasticity modulus of the surrounding rock has a greater effect on the dynamic stress concentration factor, and the effect of Poisson's ratio of rock on the factor can almost be neglected.

Key words: blasting seismic wave; wave function expansion method; surrounding rock; dynamic stress concentration factor

0 引 言

随着中国国民经济的高速发展, 城市交通量越来越大。为满足日益增大的交通量需求, 大量的单线隧道需扩建为复线隧道, 或新建隧道即为平行的复线隧道, 而且这种需要将来还会进一步增长^[1]。由于受限于地域、地形、空间范围等因素, 两隧道间距一般较近。新建隧道的爆破施工产生的爆破地震波对既有隧道的围岩和衬砌结构具有较大影响^[2]。因此研究爆破地震波作用下的隧道围岩动应力集中问题具有重大的现实意义。

目前, 对新建隧道爆破施工对既有隧道影响的研究主要集中在工程监测和数值模拟方面。在工程监测方面, 主要通过爆破施工过程中的振动监测, 分析爆

破震动作用隧道围岩与衬砌质点振动速度波频谱分析与质点振动速度幅值分布情况^[3-5]; 在数值模拟方面, 毕继红等、姚勇等采用ANSYS研究了不同围岩类型、不同隧道间距爆破震动对既有隧道的动态响应问题^[6-7], 赵东平等采用FLAC^{3D}软件进行了小净距交叉隧道爆破振动响应研究^[8]; 在理论研究方面, 易长平利用波函数展开法, 推导了爆破地震波作用下圆形地下洞室围岩的应力和位移表达式, 求出了不同爆破地震波频率和不同围岩性质时围岩周围的应力和振速分布^[9]。相对于工程监测和数值模拟, 理论方面研究比较薄弱。

本文将爆破地震波进行简化, 利用波函数展开法,

基金项目: 国家自然科学基金项目(51178460, 11102233)

收稿日期: 2012-02-15

得到爆破地震波作用下的隧道围岩动应力集中系数, 结合工程实践分析隧道围岩不同位置上爆破地震波振动主频和围岩物理力学指标对动应力集中系数的影响。研究成果可以指导爆破施工, 有效减少爆破地震波对邻近爆破施工区域隧道的影响。

1 爆破地震波载荷与隧道围岩的相互作用分析

1.1 简化计算模型

炸药在岩石介质中爆炸, 在爆炸远区冲击波衰减为弹性波。若炸药为球形装药, 则爆炸应力波以球面波的形式向外传播, 当传播到一定远距离时, 在误差允许的范围内, 球面波可以近似认为平面波^[10]。因此, 在距离爆源一定距离处, 岩石中传播的爆破地震波可视为弹性平面波。对于典型的爆破振动, 其波形变化可以近似为简谐波^[11]。因此, 爆破地震波可以近似为平面简谐波。

波在无限的均匀介质中, 通常以常速度沿着固定的路线向前传播。但若有障碍物嵌入介质, 波的传播线路就会发生变化, 即发生衍射。这种障碍物可以是空穴^[12]。无限岩石介质中的隧道相当于空穴, 爆破地震波在传播过程中遇到隧道一定会发生衍射。因此爆破地震波与隧道围岩的相互作用可以等效为隧道对爆破地震波的衍射过程。

由于在岩石内部传播的爆破地震波为体波, 本文主要研究平面 P 波与隧道围岩的相互作用。爆破地震波与隧道围岩相互作用的模型如图 1 所示, 平面 P 波传播方向与隧道轴线方向正交。

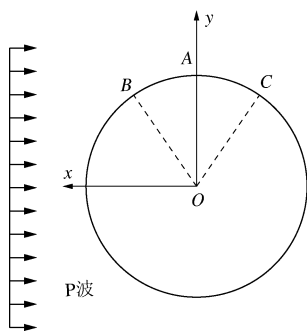


图1 爆破地震波与隧道围岩相互作用简化计算模型

Fig. 1 Simplified model of reciprocity between blasting seismic waves and tunnel surrounding rock

1.2 爆破地震波波函数展开

考虑爆破地震波中的 P 波, 则入射到隧道围岩的简谐平面 P 波可表示为

$$\varphi^{(i)} = \varphi_0 e^{i(\alpha x - \omega t)} \quad (1)$$

式中 α 为入射 P 波的波数, $\alpha = \omega / c_p$; φ_0 为入射 P 波的振幅; ω 为入射 P 波的圆频率。

利用波函数展开法, 式 (1) 可表示为

$$\varphi^{(i)} = \varphi_0 \sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon_n (i)^n J_n(\alpha r) \cos n\theta e^{-i\omega t} \quad (2)$$

式中, J_n 为第一类 Bessel 函数, 其中

$$\varepsilon_n = \begin{cases} 1 & (n=0) \\ 2 & (n \geq 1) \end{cases} \quad (3)$$

当入射 P 波作用在隧道围岩时, 将有两种波从隧道围岩表面反射出来, 一个是反射 P 波, 一个是反射 SV 波, 两个反射波可表示为

$$\varphi^{(r)} = \sum_{n=0}^{\infty} A_n H_n^{(1)}(\alpha r) \cos n\theta e^{-i\omega t} \quad (4)$$

$$\psi^{(r)} = \sum_{n=0}^{\infty} B_n H_n^{(1)}(\beta r) \sin n\theta e^{-i\omega t} \quad (5)$$

式 (4)、(5) 表示从原点发出的散射波, 式 (5) 中 β 为岩体中剪切波的波数, $\beta = \omega / c_s$, c_s 为岩体中剪切波的波速, $H_n^{(1)}$ 为第一类 Hankel 函数, 待定系数 A_n 和 B_n 由相应的边界条件确定。

1.3 隧道围岩应力分布求解

根据波的叠加理论, 隧道围岩的总位移可表示为

$$\varphi = \varphi^{(i)} + \varphi^{(r)} \quad (6)$$

$$\psi = \psi^{(r)} \quad (7)$$

根据波函数、位移和应力之间的关系, 隧道围岩中应力的表达式为

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{rr} &= \frac{2\mu}{r^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\varepsilon_n i^n \varphi_0 \varepsilon_{11}^{(1)} + A_n \varepsilon_{11}^{(3)} + B_n \varepsilon_{12}^{(3)} \right) \cos n\theta e^{-i\omega t}, \\ \sigma_{r\theta} &= \frac{2\mu}{r^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\varepsilon_n i^n \varphi_0 \varepsilon_{41}^{(1)} + A_n \varepsilon_{41}^{(3)} + B_n \varepsilon_{42}^{(3)} \right) \sin n\theta e^{-i\omega t}, \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{2\mu}{r^2} \sum_{n=0}^{\infty} \left(\varepsilon_n i^n \varphi_0 \varepsilon_{21}^{(1)} + A_n \varepsilon_{21}^{(3)} + B_n \varepsilon_{22}^{(3)} \right) \cos n\theta e^{-i\omega t}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

式中, $\varepsilon_{11}^{(1)}$, $\varepsilon_{11}^{(3)}$... 分别为各种波对应力的贡献^[13], μ 为弹性介质的Lame常数。

入射P波在隧道围岩衍射过程的边界条件为

$$\sigma_{rr}|_{r=a} = \sigma_{r\theta}|_{r=a} = 0 \quad (9)$$

将应力表达式 (8) 代入边界条件式 (9) 可求出待定系数 A_n 和 B_n , 从而可以确定隧道围岩周围的应力分布。

2 隧道围岩应力集中系数分析

2.1 应力集中系数的定义

爆破地震波在岩石介质中传播, 由于隧道的存在改变了介质中的应力分布。一个不连续区域里的最大应力与根据简单原理算出的标准局部应力的比值称作应力集中系数^[12]。它是对在一个局部区域里的应力集中严重程度的度量标准。

根据动应力集中系数的定义可得

$$K = \sigma_{\theta\theta} / \sigma_0 \quad (10)$$

式中 $\sigma_{\theta\theta}$ 为隧道围岩在 P 波作用下的切向应力; σ_0 为入射 P 波在其传播方向上的应力强度, $\sigma_0 = \mu\beta^2\varphi_0$, μ 为弹性介质的 Lamé 常数, β 为岩体中剪切波的波数, φ_0 为入射 P 波的振幅。

2.2 算例分析

南京即将新建城区北部交通干道的红山南路 K1+868—K2+008 段在地铁一号线上方仅 4 m 左右的距离内修建跨越地铁隧道结构的都市道路隧道群, 包括两个机动车隧道、一个管廊隧道及一个非机动车隧道, 其相对位置和距离关系见图 2 所示。

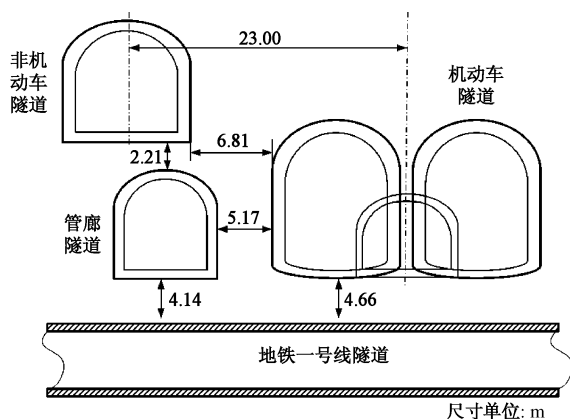


图 2 红山南路隧道群相对位置图

Fig. 2 Relative position of tunnels in Hongshan South Road

机动车隧道直径为 10 m, 沿线为闪长岩和角砾状灰岩, 主要为 III 级围岩, 围岩的物理力学指标: 围岩级别 III, 弹性模量 $E=20$ GPa, 密度 $\rho=2900$ kg/cm³, 泊松比 $\nu=0.25$, 隧道半径 $r=5$ m。

爆破地震波的振动主频一般为 0~100 Hz, 算例分析过程中平面 P 波的频率取 50 Hz。图 3 为爆破地震波作用下隧道围岩切向应力峰值分布图。图 4 为围岩周围的动应力集中系数分布图。从图 4 可以看出 A, B, C 三点动应力集中系数的顺序为 $K_A > K_B > K_C$, 并且动应力集中系数的最大值偏向于迎爆侧。

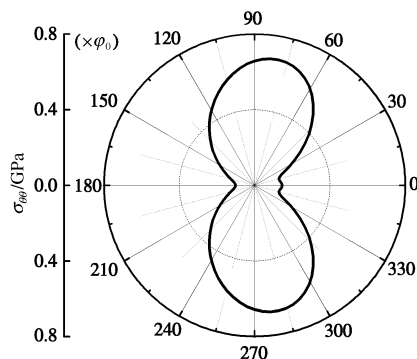


图 3 隧道围岩切向应力峰值分布图

Fig. 3 Distribution of tangential stress peak of tunnel surrounding rock

由式(8)可知隧道围岩切向应力分布呈简谐变化,

因此根据图 3 可知隧道围岩周围的最大切向拉应力。由于岩石的抗拉强度大于抗压强度, 当隧道围岩周围的最大切向拉应力大于岩石的抗拉强度时, 隧道围岩会发生破坏。围岩的动应力集中系数的变化能够体现最大切向应力的变化, 故动应力集中系数影响隧道围岩的稳定性。

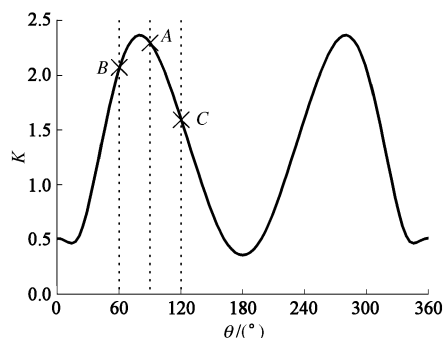


图 4 隧道围岩动应力集中系数分布

Fig. 4 Distribution of dynamic stress concentration factor of tunnel surrounding rock

3 爆破地震波振动主频对动应力集中系数的影响

图 5 为不同振动主频爆破地震波输入条件下, 图 1 中 A, B, C 三点动应力集中系数的变化曲线。从图中可以看出, 振动主频对不同位置的动应力集中系数的影响趋势大体一致, 随着振动主频的增大, 动应力集中系数先增大后减小, 中间存在一最大值, 动应力集中系数最大值对应的振动主频大约为 25 Hz; 当振动主频超过 100 Hz 时, 振动主频对动应力集中系数的影响较小, 而且整体低于低频时的动应力集中系数。在一般爆破的情况下, 岩石隧道的自振频率为 10~15 Hz^[14], 此频段范围内围岩的动应力集中系数较大, 故围岩周围的最大切向拉应力较大, 当最大切向拉应力大于岩石抗拉强度时, 隧道围岩会产生破坏。

根据以上分析, 在对爆破振动进行控制时, 当爆破振动主频较低时, 动应力集中系数较大, 有可能达到峰值, 此时应严格控制围岩的振动标准。当爆破振动主频偏高时, 可以适当放宽围岩振动控制标准。

对于围岩上不同位置, B 点的动应力集中系数整体上要大于 A 点, 即迎爆侧大于背爆侧, 因此隧道围岩的迎爆侧是爆破施工过程中的重要保护部位。

由此可见爆破地震波振动主频对隧道围岩动应力集中系数的影响较大, 但是现行爆破安全规程^[15]中对交通隧道的爆破振动安全允许标准中并没有考虑爆破振动主频的影响, 建议在对交通隧道爆破振动监测时应考虑爆破振动主频的影响。

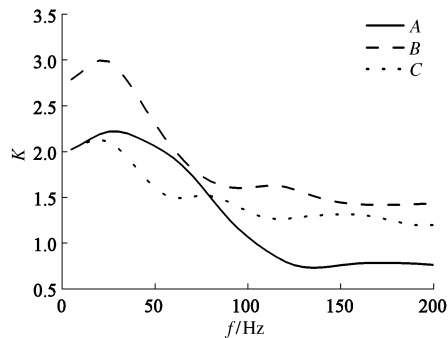


图5 爆破地震波主频与动应力集中系数关系曲线

Fig. 5 Variation curves of dynamic stress concentration factor with main frequency of blasting seismic waves

4 隧道围岩物理力学指标对动应力集中系数的影响

4.1 弹性模量对动应力集中系数的影响

弹性模量是隧道围岩重要的物理力学指标,不同级别隧道围岩对应着不同的弹性模量范围。图6为不同弹性模量条件下,图1中A, B, C三点动应力集中系数的变化曲线。从图中可以看出,随着围岩弹性模量的增大, A, B, C三点的动应力集中系数逐渐增大,且增大的幅度较大。在弹性模量较小时,弹性模量对动应力集中系数的影响存在一定的波动趋势,且增大的速度较大。当弹性模量较大时,动应力集中系数增大的速度减小,基本保持稳定。当隧道围岩的弹性模量较大时,动应力集中系数变化较小,这对于隧道围岩的保护是有利的。总之,隧道围岩的弹性模量对动应力集中系数的影响较大。

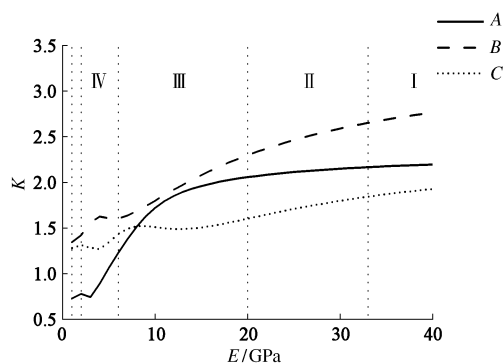


图6 隧道围岩弹性模量与动应力集中系数关系曲线

Fig. 6 Variation curves of dynamic stress concentration factor with elastic modulus of tunnel surrounding rock

4.2 泊松比对动应力集中系数的影响

图7为不同泊松比条件下,图1中A, B, C三点动应力集中系数的变化曲线。从图中可以看出, A, C两点动应力集中系数随着泊松比的增大而减小, B点动应力集中系数随着泊松比的增大而增大。但是这种

增大或减少的幅度较小,当泊松比从0.005增大到0.48时, A, B, C三点的动应力集中系数变化幅度分别为初值的3.8%, 24.8%, 29.3%。由此可见,简化的爆破地震波在隧道围岩散射时,围岩泊松比对动应力集中系数的影响不大。

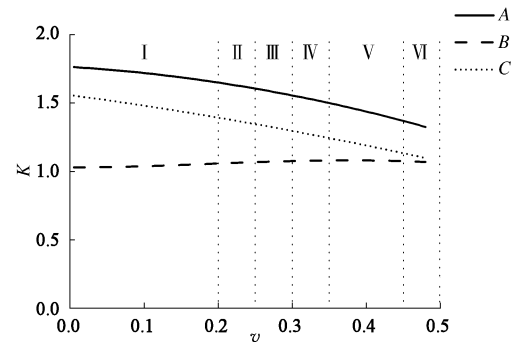


图7 隧道围岩泊松比与动应力集中系数关系曲线

Fig. 7 Variation curves of dynamic stress concentration factor with Poisson's ratio of tunnel surrounding rock

5 结 论

本文利用波函数展开法,推导了爆破地震波作用下隧道围岩动应力集中系数,结合工程实践,分析了爆破地震波主频和围岩物理力学指标对动应力集中系数的影响,主要得到以下4点结论。

(1) 将爆破地震波简化为简谐波,利用波函数展开法可以得到隧道围岩的动应力集中系数,研究动应力集中系数问题有利于邻近爆破施工区域隧道围岩的保护。

(2) 隧道围岩迎爆侧动应力集中系数大于背爆侧,并且动应力集中系数的最大值偏向于隧道围岩的迎爆侧。

(3) 爆破地震波主频对隧道围岩的动应力集中系数有较大影响,存在动应力集中系数峰值,建议制定交通隧道爆破振动安全允许标准时应考虑爆破地震波主频的影响。

(4) 隧道围岩物理力学指标对动应力集中系数的影响中,弹性模量对动应力集中系数的影响较大,而泊松比的影响较小。

参考文献:

- [1] 刘 慧. 邻近爆破对隧道影响的研究进展[J]. 爆破, 1999, 16(1): 57 - 63. (LIU Hui. Study progress of influence of nearby blasting on a tunnel[J]. Blasting, 1999, 16(1): 57 - 63. (in Chinese))
- [2] 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. (in Chinese))
- [3] 阳生权, 周 健, 刘宝琛. 爆破震动作用下公路隧道动力特性分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, **24**(增刊 2): 5803 - 5807. (YANG Sheng-quan, ZHOU Jian, LIU Bao-chen. Blasting vibration analysis of concrete lining tunnel[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, **24**(S2): 5803 - 5807. (in Chinese))
- [4] 张庆松, 李利平, 李树才, 等. 小间距隧道爆破动力特性试验研究[J]. 岩土力学, 2008, **29**(10): 2655 - 2660. (ZHANG Qing-song, LI Li-ping, LI Shu-cai, et al. Experimental study of blasting dynamic vibration of closely adjacent tunnels[J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, **29**(10): 2655 - 2660. (in Chinese))
- [5] 邓华锋, 张国栋, 王乐华, 等. 导流隧洞开挖施工的爆破振动监测与分析[J]. 岩土力学, 2011, **32**(3): 855 - 860. (DENG Hua-feng, ZHANG Guo-dong, WANG Le-hua, et al. Monitoring and analysis of blasting vibration in diversion tunnel excavation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, **32**(3): 855 - 860. (in Chinese))
- [6] 毕继红, 钟建辉. 邻近隧道爆破震动对既有隧道影响的研究[J]. 工程爆破, 2004, **10**(4): 69 - 73. (BI Ji-hong, ZHONG Jian-hui. Study on influence of blasting vibration from excavation of a new tunnel on existed tunnel[J]. Engineering Blasting, 2004, **10**(4): 69 - 73. (in Chinese))
- [7] 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. (in Chinese))
- [8] 赵东平, 王明年. 小净距交叉隧道爆破振动响应研究[J]. 岩土工程学报, 2007, **29**(1): 116 - 119. (ZHAO Dong-ping, WANG Ming-nian. Study on influence of blasting vibration on cross tunnels with small clearance[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, **29**(1): 116 - 119. (in Chinese))
- [9] 易长平, 卢文波, 张建华. 爆破振动作用下地下洞室临界振速的研究[J]. 爆破, 2005, **22**(4): 4 - 7. (YI Chang-ping, LU Wen-bo, ZHANG Jian-hua. Study on critical failure vibration velocity of underground chambers under action of blasting vibration[J]. Blasting, 2005, **22**(4): 4 - 7. (in Chinese))
- [10] 朱传云, 许桂生. 爆炸应力波近似处理的分析与研究[J]. 岩土力学, 2002, **23**(4): 455 - 458. (ZHU Chuan-yun, XU Gui-sheng. Analysis and study on dealing with blasting wave as planar-wave[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, **23**(4): 455 - 458. (in Chinese))
- [11] 肖正学. 爆破地震波动力学基础与地震效应[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 2004. (XIAO Zheng-xue. Blasting seismic wave dynamical foundation and seismic effect[M]. Chengdu: The University of Electronic Science and Technology Press, 2004. (in Chinese))
- [12] PAO Yih-hsing, MOW Chao-chow. Diffraction of elastic waves and dynamic stress concentrations[M]. Crane: Russak & Company Inc, 1973.
- [13] 钟启凯. 地下圆形组合衬砌洞室在地震波下的动力反应分析[D]. 长沙: 湖南大学, 2009. (ZHONG Qi-kai. Dynamic response analysis of underground cylindrical composite lining cavern subjected to seismic waves[D]. Changsha: Hunan University, 2009. (in Chinese))
- [14] 朱瑞赓, 李 铮. 爆破地震波作用下岩石隧道的临界振动速度[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1985. (ZHU Rui-geng, LI Zheng. Critical failure vibration velocity of rock tunnel under blasting seismic wave[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1985. (in Chinese))
- [15] GB6722—2003 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2003. (GB6722—2003 Blasting safety regulations[S]. Beijing: China Standards Press, 2003. (in Chinese))