

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.03.002

临近隧道爆破振动的能量分布特征研究^{*}

徐振洋 杨 军 陈占扬

北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室(北京,100081)

[摘 要] 为避免公路隧道爆破施工影响邻近铁路隧道的结构稳定性,在铁路隧道内部安置爆破振动测试仪对爆破振动信号进行检测。使用 HHT(希尔伯特黄变换)方法对爆破振动信号的希尔伯特谱、三维能量谱、瞬时能量谱进行分析。结果表明:爆破振动信号频谱特征受多因素综合影响,结合场地岩石性质、起爆药量、距爆源距离等参数进行研究,爆破振动信号主要能量分布频带在 10 ~ 60 Hz 之间,避开了铁路隧道自振频率,可以有效地降低爆破振动对铁路隧道的不利影响。HHT 方法能够很好地分析隧道爆破对临近建(构)筑物振动安全影响的大小,利于指导施工。

[关键词] 隧道掘进 爆破振动 HHT(希尔伯特黄变换) 能量 频率

[分类号] TD235.1 TD235.37

引言

某条正在掘进的公路隧道临近一条建成于 70 年代的铁路隧道,因年代久远以及修建时的工艺条件,铁路隧道内壁已出现多条裂缝。正在修建的公路隧道采用双侧壁导坑法开挖施工,使用钻爆法掘进。公路隧道与铁路隧道距离最近的部位只有 85 m,而且公路隧道开口一端下部有一条通行公路,与村庄相邻。通过分析铁路隧道内部收集的爆破振动信号的频谱与能量特征,可以更好地了解公路隧道开挖时爆破作业产生的爆破地震波规律,尽量降低爆破振动对邻近的铁路隧道产生的不良影响。

HHT(希尔伯特黄变换)方法对非平稳信号的时频局域化特征变换分析更为合理,利用其自适应多分辨率分析,随机信号的时间—频率—能量变化特征可以清晰地反映出来^[1-2]。文中应用 HHT 方法对不同爆心距和不同装药量的实测信号进行了分析,求出信号的希尔伯特谱和三维能量谱,通过对现场爆破振动信号波形研究分析以及对铁路隧道的长期监测,得出了公路隧道爆破对铁路隧道无破坏性影响的结论,对公路隧道爆破施工安全提供了理论支撑。

1 隧道钻爆方案设计

1.1 工程概况

公路隧道起点位于昆明市西山区海口镇附近,起点里程为 K20 + 300,止点位于晋宁县友谊村附

近,止点里程为 K22 + 440,设计为左右幅分离的单洞三车道隧道,左幅隧道净长 688.0 m,右幅隧道净长 675.5 m。隧道围岩为灰色、灰白色中厚层块状白云岩,围岩级别为Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ级。

1.2 公路隧道钻爆方案

为减少爆破振动波对周边围岩的扰动,根据公路隧道的围岩级别,设计对相对完整的Ⅲ、Ⅳ级围岩段采用微震光面爆破方案,对洞口浅埋段、围岩破碎段及Ⅴ级围岩段则采用“震松法”爆破,药量的使用量按松动爆破要求计算。本文使用的现场采集的爆破振动信号数据均为单段电雷管起爆爆破,药量数据在施工前均做过理论安全分析。

1.3 爆破振动监测

选取隧道爆破时现场监测的 2 组典型爆破振动信号进行分析,S1 ~ S3 为装药量相同但爆心距不同的 3 个信号,S4 ~ S6 是爆心距相同装药量不同的 3 个信号,应用 HHT 法对爆破振动信号的频谱和能量特征进行分析,从而找出施工中爆破振动的一些规律。本文只对爆破振动的垂直分量进行分析,以下是两隧道位置示意及爆破振动仪器布置(图 1),爆破振动信号参数(表 1、表 2)和爆破振动信号波形(图 2)。

2 振动能量的分布特征

2.1 振动信号的希尔伯特谱和三维能量谱

振动信号的希尔伯特谱是时间和频率的变化规

* 收稿日期:2013-01-22

作者简介:徐振洋(1982~),男,博士,主要从事爆破工程理论的研究。E-mail:xuzhenyang10@foxmail.com

通信作者:杨军(1960~),男,博士后,教授,博导,主要从事爆破理论及爆破技术方面的研究。E-mail:yangj@bit.edu.cn

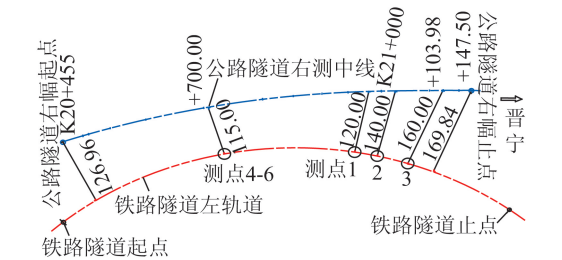


图 1 两隧道位置示意及爆破振动仪器布置(单位:m)

Fig. 1 The layout of the two tunnels signaled and blasting vibration instrument

表 1 不同爆心距爆破振动测试参数

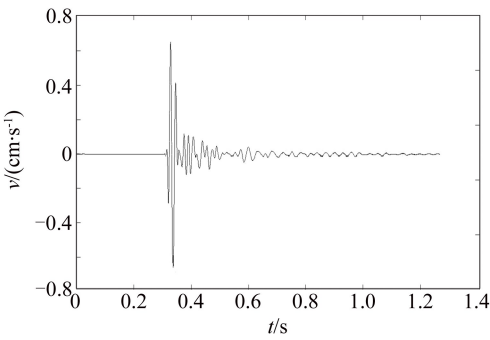
Tab. 1 The blasting vibration test parameters of different blasting center distance

信号编号	药量 /kg	距离 /m	最大振速 /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
S1	240	120	1.26
S2	240	140	0.98
S3	240	160	0.65

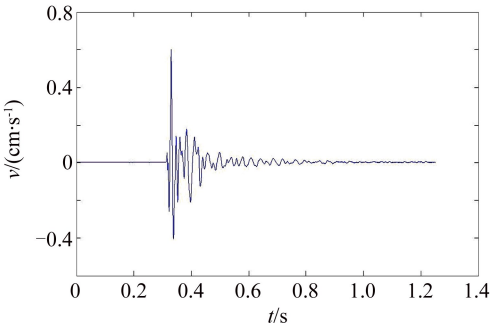
表 2 不同装药量爆破振动测试参数

Tab. 2 The blasting vibration test parameters of different charge amount

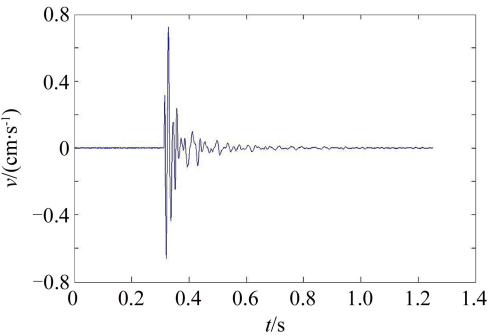
信号编号	药量 /kg	距离 /m	最大振速 /($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)
S4	84	115	0.59
S5	120	115	0.73
S6	240	115	1.43



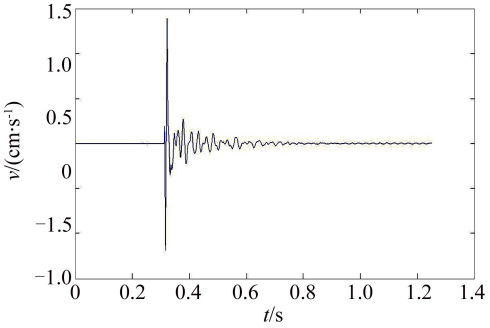
(c)



(d)



(e)



(f)

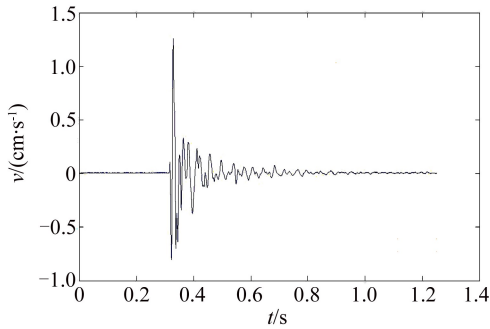
(a) 信号 S1;(b) 信号 S2;(c) 信号 S3;
(d) 信号 S4;(e) 信号 S5;(f) 信号 S6

图 2 爆破振动信号波形图

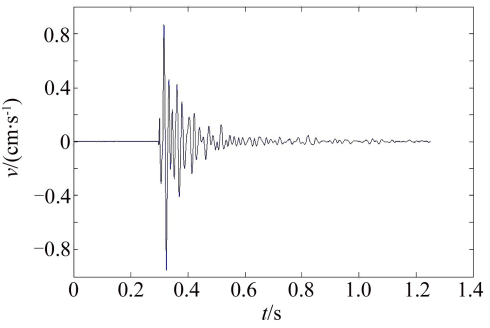
Fig. 2 Blasting vibration signal waveform

律的反映,在三维能量谱中可以直观地看到爆破振动信号时间—频率—能量的分布^[3],图 3 是振动信号 S1~S6 的希尔伯特谱和三维能量谱。

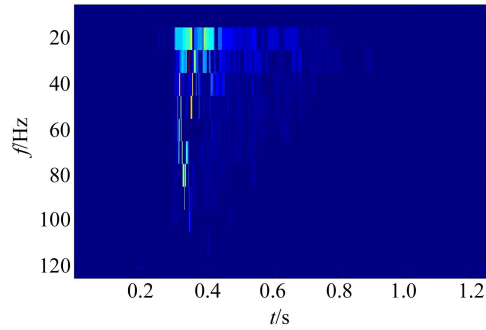
在希尔伯特谱中,横轴是时间的分布,纵轴是频



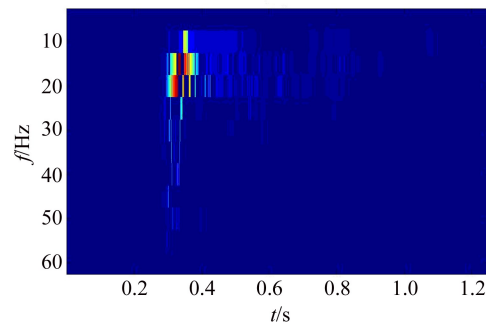
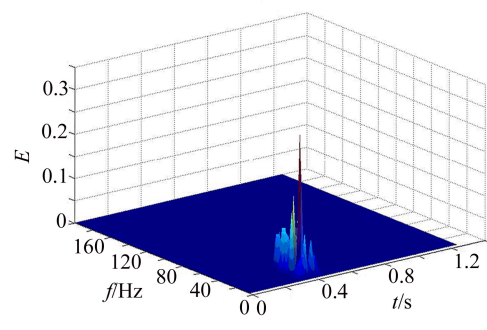
(a)



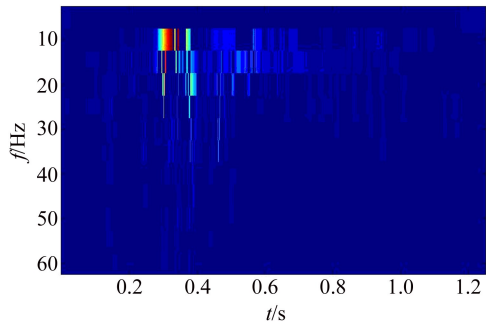
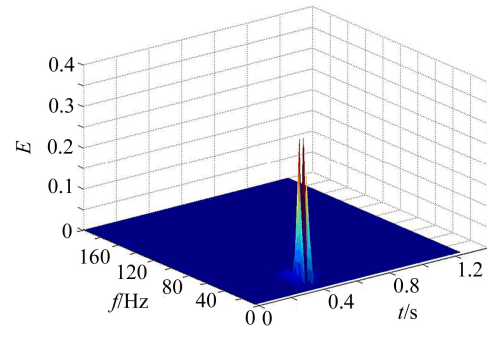
(b)



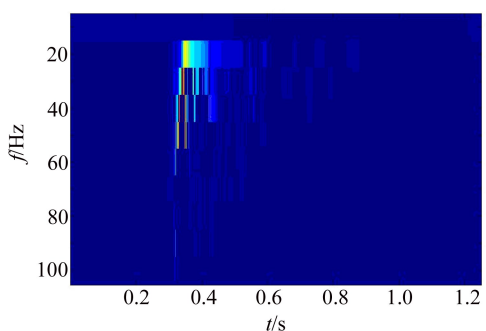
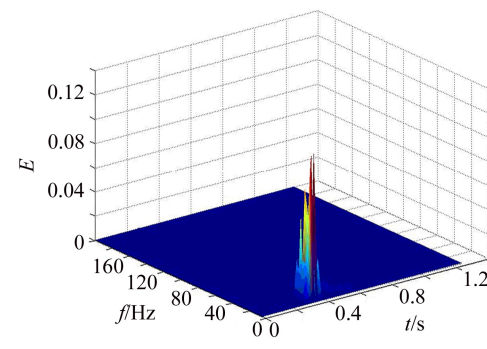
(a)



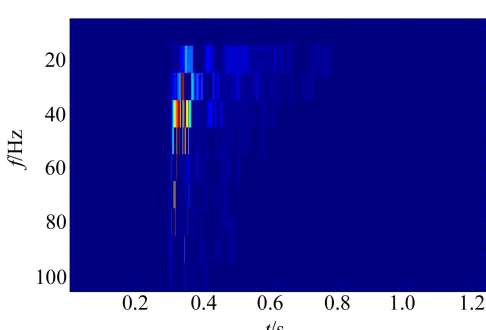
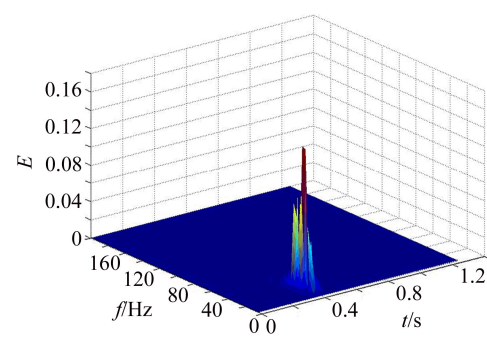
(b)



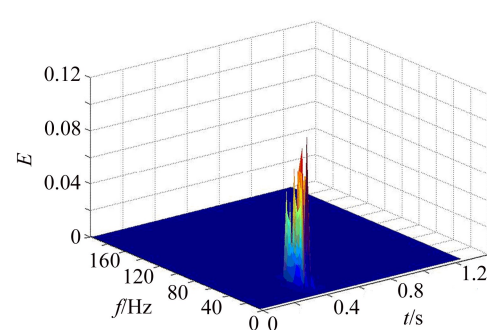
(c)

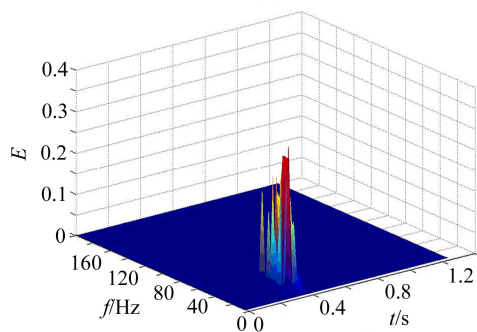
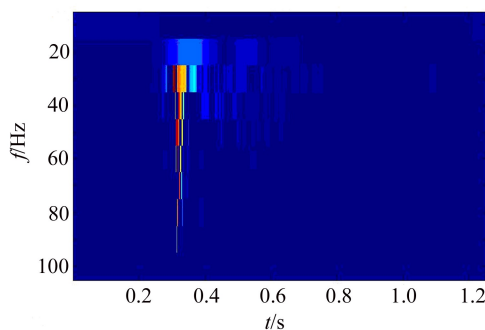


(d)



(e)





(f)

(a) S1;(b) S2;(c) S3;(d) S4;(e) S5;(f) S6

图 3 希尔伯特谱和三维能量谱

Fig. 3 Hilbert spectrum and three-dimensional energy spectrum

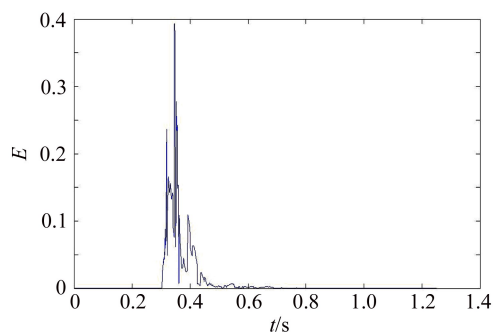
率的分布,不同的子频带表现出不同层次的带状特征,每一层的带状即表示相对的 IMF 分量在频率上的分布。每个子频带都有一个子中心,子频带的频率围绕这个中心出现了很细小的波动^[4]。在三维能量谱中,观察频率与能量的关系,可以看出 S1 能量最大值出现在 20Hz,衰减到接近横轴时为 80Hz; S2 能量最大值出现在 20Hz,在图中明显地衰减接近横轴是 90Hz; S3 能量最大和衰减到接近横轴为 30Hz、90Hz; S4 三维谱出现这两个特征的频率为 30Hz、50Hz; S5 三维谱出现这两个特征的频率为 20Hz、50Hz; S6 三维谱出现这两个特征的频率为 20Hz、80Hz。每个信号的大部分频带基本上都是集中在 60Hz 以下的区间内,超过 100Hz 的非常少。在三维能量谱中也可以看出信号主要能量都是集中分布在 0.3 ~ 0.5s 及 80Hz 以下的区间内,由此可见,爆破振动信号主要的能量都分布在低频段,且在 10 ~ 60Hz 区间内较为集中。希尔伯特谱中颜色不同的谱线代表不同频率值大小,与三维能量谱中的数值实际是一一对应的,只是用不同的表现方法只给出了时间与频率的关系,在进行 HHT 变换后的图谱中很直观地就可以看出频率和能量间的关系。

2.2 瞬时能量谱

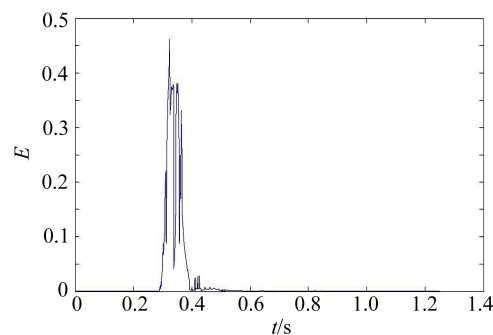
时间和能量的对应关系从瞬时能量谱中可以反映出来(图 4),一般在起始时刻 0.3 ~ 0.6s 范围内能量曲线出现起伏,能量变化总体趋势是从某一时刻开始增长,并在很短的时间内达到峰值,然后在短时间内迅速衰退。在信号振动速度最大的时刻一般并不是瞬时能量最大的时刻,而是经过一定时间的增长才达到最大值,所以使用多段延时时间爆破与控制单段最大药量是很有效的防止信号叠加的方法。信号 S1 ~ S3 振动持续时间是逐渐增大的,可见随爆心距增大,爆破振动波持续时间也在增大。

3 铁路隧道受爆破振动影响的分析

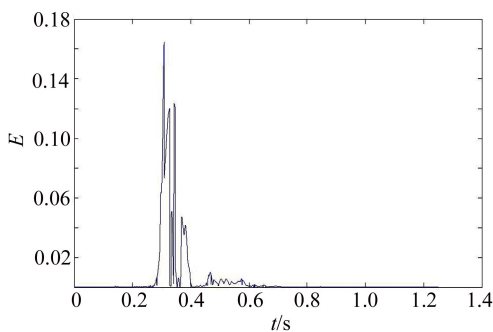
能量在传播过程中,到达爆破远区的地震波主振频率通常较低,是由于爆破地震波的低频波传播距离较远,高频波传播距离较短。通过对用量相同的 3 个爆破振动信号 S1 ~ S3 分析发现,信号的低



(a)



(b)



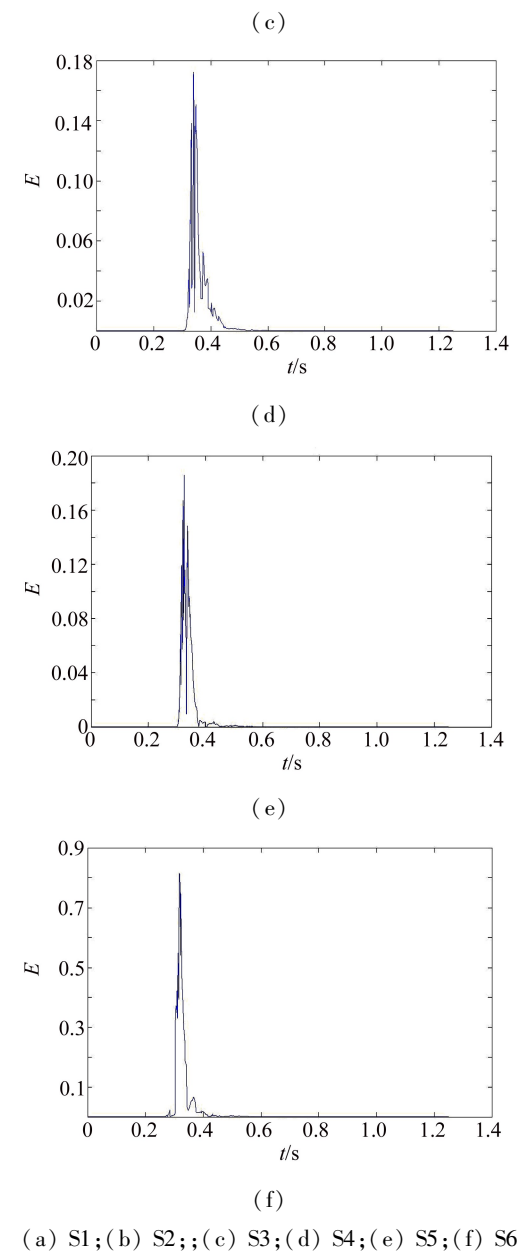


图 4 瞬时能量谱

Fig. 4 Instantaneous energy spectrum

频所占比例在爆破远区总体上呈现增加的趋势。爆破远区的爆破振动主频与建筑物的固有频率一致或接近,建筑物的自振频率一般都为低频(2~5Hz)。在爆破远区,共振作用是建筑物受损的主要方式,当爆破振动能量强度到达一定大小时,共振作用非常有可能造成建筑物的破坏。因此,在距爆破中心较远的区域内,避免爆破地震波低频成分对周围建(构)筑物的破坏更加重要^[5-6]。

对 S4~S6 信号的频谱与能量特征分析发现,在爆心距相同的情况下,爆破地震波的能量与炸药用量紧密关联,当炸药使用量增大时,信号的最大振速和能量峰值也随之增大。信号 S6 虽然高频部分增多了,但质点振速和振动能量也都在增大,所以对隧

道稳定性的影响也是在增大的。如果结构损伤的临界值较大程度地大于单次爆破瞬时输入能量值,此时爆破振动基本不可能使建(构)筑物出现直接损伤,可以认为爆破振动是安全的^[7-8]。假如爆破瞬时输入能量值虽然超过了建(构)筑物弹性变形范围,但是还未达到结构损伤的临界值,单次爆破振动对建(构)筑物的稳定性仍是有影响的^[9-10]。随着爆破次数增多,累积损伤效应使结构参数不断弱化,也导致结构损伤破坏的最大值随之降低。信号 S1~S3 随着距离增大,质点最大振速、瞬时能量最大值呈现递减趋势,其中信号 S2 的瞬时能量峰值比信号 S1 的瞬时能量峰值大,但是瞬时能量最大值出现的时间和频率都是不同的。信号 S4~S6 随着炸药使用量的增大,质点振速峰值与瞬时能量峰值都在增大,由此可以看出炸药使用量是影响爆破振动的一个重要参数^[11]。通过对爆破振动信号 S1~S6 希尔伯特谱的频率特征分析,可以看出振动信号的主频都高于 10Hz。

爆破区域场地较松软情况下,爆破地震波透过薄弱面时,对能量有吸收作用,高频地震波的衰减幅度大于低频地震波。由于爆破地震波的叠加效应,减小单次起爆药量,有利于降低爆破地震波的峰值振动速度。距离爆破震源越近,测得爆破地震波总能量也越大。爆破地震波的瞬时能量在大多数情况下决定了构(建)筑物的最大位移,且与构(建)筑物的初次损伤有关。

为了确保铁路隧道的安全性以及检验爆破振动信号分析的合理性,在公路隧道每次爆破施工后都会对铁路隧道两侧墙的裂缝长度和宽度进行监测。在隧道全长上均衡布置 30 段裂缝进行裂缝观测,分别有水平裂缝、垂直裂缝、倾斜裂缝和不规则裂缝。在长期进行的监控中,并未发现裂缝长度和宽度出现变化。

4 结论

在分析公路隧道掘进爆破地震效应对周边临近建(构)筑物的影响时,只考虑建(构)筑物接受的单次爆破输入能量是不够合理的,介质裂隙在长期的爆破振动累积作用下不仅会出现扩展,而且建(构)筑物结构强度也会逐渐弱化,稳定性与抗震性也会大幅度降低,所以对爆破振动进行能量分布的分析具有重要意义。

1) 爆破振动信号频率的变化与场地性质、使用的炸药量和其与爆源的距离等爆破参数都紧密相关,瞬时输入的能量综合地体现了爆破振动信号的时间与能量之间相互联系的特性,所以在判断爆破

地震波的影响时,应该综合考虑各个因素。

2) 使用 HHT 方法对隧道掘进爆破施工产生的爆破振动信号分析是一种合理有效的方法,可以很好地分析隧道爆破对临近建(构)筑物振动安全影响的程度,便于指导施工。

3) 公路隧道开挖时所采用的爆破施工,对临近的铁路隧道无直接明显破坏性影响,爆破振动信号主要能量分布频带在 10 ~ 60Hz 之间,避开了铁路隧道自振频率,能够有效地降低爆破振动对铁路隧道的不利影响。

参 考 文 献

- [1] 李夕兵,凌同华,张义平. 爆破震动信号分析理论与技术 [M]. 北京:科学出版社,2009:114-128.
Li Xibing, Ling Tonghua, Zhang Yiping. Analysis of blast vibration signals theories and methods [M]. Beijing: Science Press, 2009:114-128.
- [2] 公茂盛,谢礼立. HHT 方法在地震工程中的应用之初步探讨 [J]. 世界地震工程,2003,19(3): 39-43.
Gong Maosheng, Xie Lili. Discussion on the application of HHT method to earthquake engineering [J]. World Earthquake Engineering, 2003, 19(3): 39-43.
- [3] Battista B M, Knapp C, McGee T, et al. Application of the empirical mode decomposition and Hilbert-Huang transform to seismic reflection data [J]. Geophysics, 2007, 72(2): H29-H37.
- [4] 邓拥军,王伟,钱成春,等. EMD 方法及 Hilbert 变换中边界问题的处理 [J]. 科学通报,2001,46(3): 255-263.
- [5] 罗奇峰,石春香. HHT 变换理论及其计算中的问题 [J]. 同济大学学报:自然科学版,2003,31(6): 637-640.
Luo Qifeng, Shi Chunxiang. Hilbert-Huang Transform and several problems in its calculation method [J]. Jour-

nal of Tongji University: Natural Science, 2003, 31(6): 637-640.

- [6] 钟佑明,秦树人. 希尔伯特—黄变换的统一理论依据研究 [J]. 振动与冲击,2006,25(3): 40-43.
Zhong Youming, Qin Shuren. Reserch on the uniform theoretical basis for Hilbert-Hung transform (HHT) [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(3): 40 ~ 43.
- [7] 朱继梅. 非稳态振动信号分析 [J]. 振动与冲击,2000, 19(1): 86-87.
- [8] 凌同华,李夕兵,王桂尧. 爆破震动灾害主动控制方法研究 [J]. 岩土力学,2007,28(7): 1439-1442.
Ling Tonghua, Li Xibing, Wang Guiyao. A study on initiative control of blast vibration damages [J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(7): 1439-1442.
- [9] 王振宇,梁旭,陈银鲁,等. 基于输入能量的爆破震动安全评价方法研究 [J]. 岩石力学与工程学报,2010, 29(12): 2492-2499.
Wang Zhenyu, Liang Xu, Chen Yinlu, et al. Study of safety evaluation method of blasting vibration based on input energy [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2010, 29(12): 2492-2499.
- [10] 李宏男,王炳乾,林皋. 爆破地震效应若干问题的探讨 [J]. 爆炸与冲击, 1996, 16(1): 61-67.
Li Hongnan, Wang Bingqian, Lin Gao. Studies on some problems on explosion earthquake responses [J]. Explosion and Shock Waves, 1996, 16(1): 61-67.
- [11] 黄文华,徐全军,沈蔚,等. 小波变换在判断爆破地震危害中的应用 [J]. 工程爆破,2001,7(1): 24-27, 16.
Huang Wenhua, Xu Quanjun, Shen Wei, et al. Application of wavelet transform in evaluation of blasting vibration damage [J]. Engineering Blasting, 2001, 7(1): 24-27, 16.

Research on the Energy Distribution of Blasting Vibration Signals from Nearby Tunnel

XU Zhenyang, YANG Jun, CHEN Zhanyang

State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology (Beijing, 100081)

[ABSTRACT] To avoid the risk of a highway tunnel blasting construction impact on a nearby dilapidated railway tunnel, a blasting vibration tester was set up in the railway tunnel to detect the blasting and vibration signals. HHT was used to analyze the Hilbert spectrum, the three-dimensional power spectrum, and instantaneous energy spectrum of the blasting signals. The result shows that several factors affect the blasting vibration signal spectrum. Based on parameters analysis including the rock characters, the initial charge amount and the distance to the blasting resource, blasting vibration signal energy distribution is confirmed in the frequency range of 10Hz-60Hz, which is out of the inherent frequency of the railway tunnel and may effectively reduce the adverse impact on the railway tunnel. HHT can analyse whether the blast will destroy the railway tunnel, which can provide appropriate guidance to the construction work.

[KEY WORDS] tunnel boring, blasting vibration, Hilbert-Huang transform, energy, frequency