

文章编号: 1001-1455(2009)02-0182-07

地应力对爆破过程中围岩振动能量分布的影响^{*}

严 鹏¹, 卢文波¹, 李洪涛², 陈 明¹, 周创兵¹

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要: 对高地应力条件下隧洞爆破开挖过程中围岩振动信号进行小波包分析, 得到了振动信号不同频带上的能量分布。实测资料分析结果表明, 爆破开挖时, 初始地应力动态卸载诱发的围岩振动的频率范围和爆破荷载诱发的围岩振动频率范围基本相同, 但地应力卸载诱发的振动中, 低频能量占较大的比例; 开挖面上的卸载应力值的大小和卸载面的大小共同决定卸载效应的强弱, 而这两个因素均与开挖面上的炮孔布置和起爆网络的连接有关。

关键词: 爆炸力学; 能量分布; 小波包分析; 围岩振动; 爆破开挖; 地应力

中图分类号: O329 **国标学科代码:** 130·35 **文献标志码:** A

1 引 言

一般条件下, 爆破过程中围岩振动是由装入地下的炸药爆炸产生的冲击波通过岩土介质传播到远距离处衰减而引起的弹性振动。然而, 深埋于地下的岩体中存在初始地应力场。爆破开挖时, 围岩轮廓面上的法向应力瞬间变为零, 这必然会在围岩中产生强烈的应力调整。卢文波等^[1]、易长平等^[2]、严鹏等^[3]的研究表明, 该初始地应力的卸载是 1 个与常规准静态卸载不同的高速动态卸载过程, 它将在掌子面附近的岩体中激起动态卸载振动。因此, 在高地应力地区进行爆破施工时, 爆破过程诱发的围岩振动是由爆炸荷载诱发的振动和开挖轮廓面上初始应力瞬间释放诱发的振动二者的叠加^[4]。进一步研究^[5]表明, 在岩体初始地应力较低条件下, 隧洞钻爆开挖过程中围岩振动主要由爆炸荷载引起; 而高地应力条件下, 开挖荷载动态卸荷诱发的振动可能超过爆破振动而成为围岩振动的主要因素。因此, 研究高地应力条件下隧洞开挖过程中诱发的围岩振动特性具有重大的理论意义和工程应用价值。

传统的爆破过程中围岩振动分析的方法是将其简化为平稳信号(伪平稳)问题, 通过 Fourier 变换来处理, 然而爆破过程中的围岩振动是一个短时非平稳随机过程, 具有明显的持时短、突变快等特点。小波变换具有处理非平稳信号的优势, 但目前利用小波变换处理爆破振动信号还处于起步阶段^[6-7]。凌同华等^[8]利用小波理论, 分析了无初始地应力作用或者初始地应力量级不高情况下爆破振动信号的能量分布和时频特性, 验证了该方法的可靠性。

本文中对高地应力条件下地下工程围岩振动信号进行小波包分析, 以期得到在地应力量级较高地区进行爆破施工时围岩振动信号的某些特征。

2 小波包分析原理

小波分析是把信号分解成低频和高频 2 部分。在分解中, 低频部分失去的信息由高频部分捕获。下一步将低频部分继续分解, 而高频部分不再被分解。而在小波包分解中, 高频部分也像低频部分一样被分解成 2 部分。在一维情况下, 它产生一个完整的二叉树。小波包分解能根据信号特性和分析要求, 自适应地选择相应的频带与信号频谱相匹配, 是一种比小波分解更精细的分解方法。

2.1 振动信号的小波包分解

采用的振动波形记录仪的采样频率为 2 kHz, 根据 Nyquist 采样定理^[7], 该记录仪所采信号的最高频率为 1 kHz。

* 收稿日期: 2007-09-20; 修回日期: 2007-12-04

基金项目: 国家自然科学基金委员会-雅砻江水电开发联合基金项目(50639100);

国家杰出青年科学基金项目(50725931); 国家自然科学基金面上项目(50779050);

湖北省自然科学基金杰出青年人才项目(2007ABB026)

作者简介: 严 鹏(1981—), 男, 博士研究生。

对振动信号进行 5 层小波包分解,最低频带为 0.00~31.25 Hz。分解后得到 32 个第 5 层小波包重构信号,分别对应 32 个频率带,依次为 0.00~31.25、31.25~62.50、...、968.75~1 000.00 Hz,每个重构信号的频带宽都是 31.25 Hz。

2.2 各频带的能量表征

将爆破振动信号分解到第 5 层,设 $s_{5,j}$ 对应的能量为 $E_{5,j}$,则有^[8]

$$E_{5,j} = \int |s_{5,j}(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^N |\chi_{j,k}|^2 \tag{1}$$

式中: N 为离散信号的采样点数, $\chi_{j,k}$ ($j = 0, 1, 2, \dots, 2^5 - 1; k = 1, 2, \dots, N$) 为重构信号 $s_{5,j}$ 的离散点的幅值。

被分析信号的总能量 E_0 可以写成

$$E_0 = \sum_{j=0}^{2^5-1} E_{5,j} \tag{2}$$

各频带能量占被分析信号总能量的比例为

$$E_j = E_{5,j} / E_0 \tag{3}$$

这样,由式(1)~(3)可以得到信号经小波分解后不同频带的能量。

3 爆区地应力估算

在建的瀑布沟水电站,装机容量为 3.3 GW,位于长江流域岷江水系的大渡河中游,地处四川省西部汉源和甘洛两县境内。该工程地下厂房群由主厂房、主变室、尾水闸门室、母线洞、交通洞、尾水隧洞和压力引水管道等纵横交错的洞室组成复杂的地下空间结构,位于坝轴线下游左岸花岗岩山体中,上覆岩体厚 220~360 m。6 条压力引水管道平行布置,中心间距为 28.86 m,隧洞断面为圆形,开挖直径为 10.7 m。

前期的研究^[9]表明,该电站地下厂房区域的地应力场是一个以构造应力为主,由构造和自重综合影响而构成的中等偏高的地应力场。为了对比监测初始应力场的存在对围岩振动的影响,选取了 2# 引水隧洞的 2 次典型的爆破,开挖掌子面桩号分别为 0+44 和 0+100,洞口的桩号为 0+20,如图 1 所示。这 2 次开挖爆破相隔 20 d。

掌子面 0+44 距离洞口仅 24 m,洞顶覆盖层厚 20~30 m,该部位的地应力值较小,主要为自重应力,大小为 0.5~0.7 MPa,因此这一部位地应力对爆破振动的影响可以忽略。掌子面 0+100 距洞口 80 m,附近有一地应力测点,实测地应力值约 10 MPa,属中等地应力水平^[9]。

引水施工区的围岩主要为 IV、V 类围岩,因此采用断面分部法施工,一次开挖进尺 1.5 m,其上半部分爆破设计简图如图 2 所示。采用手风钻造孔,孔径为 45 mm。光爆孔的孔距为 50 cm,光爆层厚 80 cm,崩落孔孔距为 70 cm,排距为 85 cm,采用 2# 岩石乳化炸药和非电毫秒微差雷管。周边孔采用竹片和导爆索分节间隔装药,爆破孔采用柱状连续装药。

当开挖区域存在地应力,按图 2 所示的方案进行爆破施工时,每一段炮孔起爆都将引起周围岩体中初始地应力场的变化和调整,都将存在初始力的动态卸载效应。与隧洞分段微差起爆顺序对应的岩体分步开挖荷载(即炮孔中心上的初始地应力值),可利用外径为无穷大的厚壁圆筒远场受压条件下的弹性应力公式计算

$$\sigma_r = (1 - r_0^2 / r^2) p_0 \tag{4}$$

式中: r_0 为圆柱体的内径, r 为即将起爆的炮孔中心连线的半径, p_0 是岩体的远场均匀初始应力。

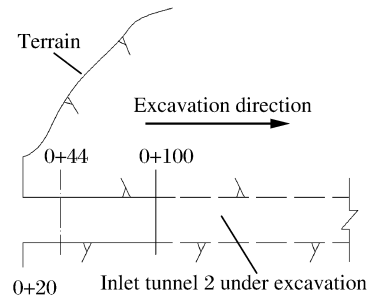


图 1 引水隧洞开挖爆破掌子面示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of the working face of inlet tunnels under excavation

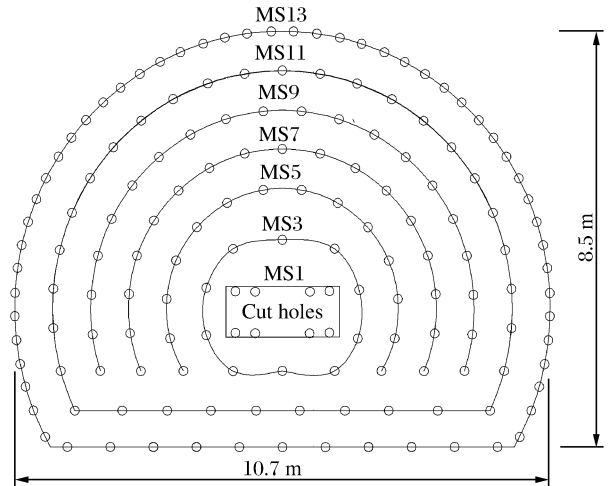


图 2 引水隧洞开挖钻爆设计

Fig. 2 The blasting design for inlet tunnel excavation

r_0 与 r 之间的岩体为本段炮孔起爆需要爆掉的岩体,设崩落孔的排距或者光爆层厚度 $\Delta d = r - r_0$,则式(4)变为

$$\sigma_r = [2\Delta d/r - (\Delta d/r)^2]p_0 \tag{5}$$

式(5)说明,爆破场区的远场地应力确定后,炮孔的布置,即崩落孔的排距和崩落孔距掌子面中心的距离决定开挖面上的地应力的大小。

考虑到开挖掌子面上的炮孔是一圈圈由里往外起爆,与某一圈炮孔起爆对应的分步开挖荷载为前一圈炮孔起爆后在该圈炮孔处形成的二次应力。如图 3 所示,在第 MS9 圈炮孔起爆前,第 MS1、MS3、MS5 和 MS7 圈炮孔均已起爆,并已形成了具有一定内径的圆筒体,与第 MS9 圈炮孔对应的开挖荷载即为炮孔所处部位的围岩二次分布应力。当远场地应力值取 10.0 MPa 时,由式(4)计算得到的分步开挖荷载 σ_r 见表 1,其中 r 为地应力卸载半径。

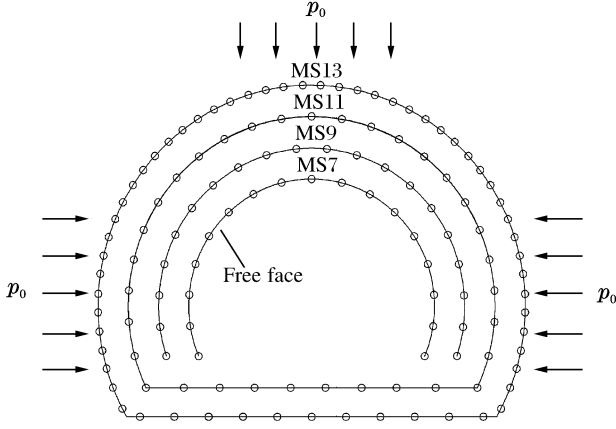


图 3 开挖荷载的确定

Fig. 3 Determination of excavation load

表 1 与不同微差起爆对应的开挖荷载
Table 1 Excavation loads corresponding to different blast delays

起爆延迟	炮孔类型	r/m	σ_r/MPa
MS1	掏槽孔	0.60	10.00
MS3	掏槽孔	1.15	7.28
MS5	崩落孔	2.00	6.69
MS7	崩落孔	2.85	5.08
MS9	崩落孔	3.70	4.07
MS11	缓冲孔	4.55	3.39
MS13	光爆孔	5.35	2.77

4 实测围岩振动资料分析

4.1 围岩振动测试情况

为保证施工过程中施工人员的安全及相邻隧洞围岩的动力稳定,引水隧洞开挖中规定,相邻隧洞爆破开挖至少要错开 50 m。隧洞开挖和振动监测的布置见图 4。

爆破测试采用重庆地质仪器厂生产的 CDJ 系列传感器,波形记录仪器为 MCS-2000 瞬态波形存储自记仪。图 5 给出了 2#引水隧洞 0+44 桩号和 0+100 桩号处两次开挖爆破的实测围岩质点振动速度时程曲线,图 5(a)为 0+100 桩号处的围岩振动曲线,图 5(b)为 0+44 处的围岩振动曲线,简写为信号 1 和 2。

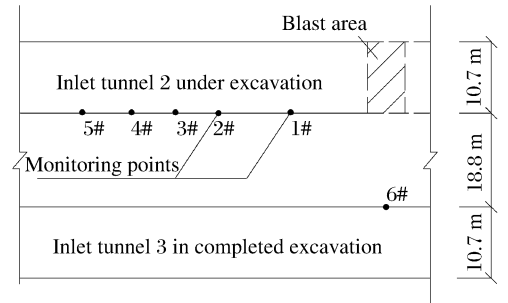


图 4 爆破振动测点布置示意图

Fig. 4 Arrangement of vibration monitoring points

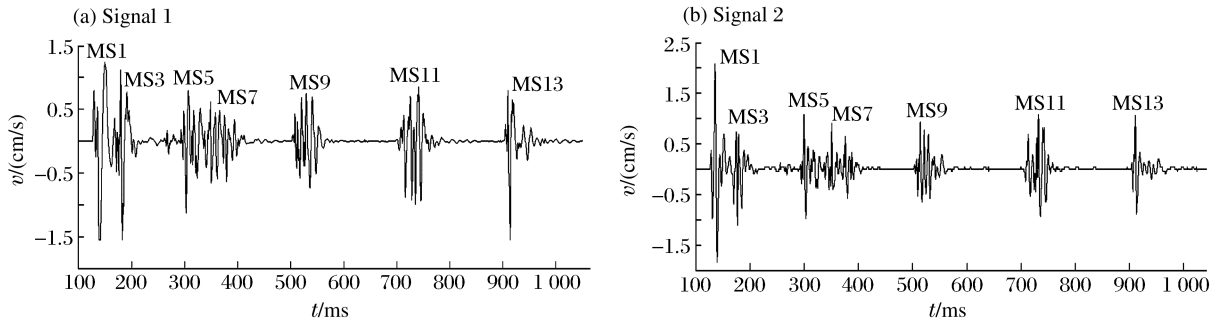


图 5 2#引水隧洞爆破振动实测波形

Fig. 5 Monitored vibration velocity versus time in inlet tunnel 2

为了排除 Rayleigh 波的干扰,这里仅给出在其邻洞正对开挖部位边墙上布置的测点(6#测点)测得的正对爆源方向的振动信号,这样爆炸荷载和初始应力动态卸载诱发的振动经岩体直达振动传感器,便于进一步分析。这 2 次开挖爆破采用了完全相同的爆破设计,分 7 段起爆,具体爆破及测试参数见表 2。

表 2 测试点的爆破条件
 Table 2 Blast conditions of measuring points

信号	地应力/MPa	爆心距/m	最大段药量/kg	总药量/kg	爆破分段	测点布置
1	10.0	23	34	141	7	临洞
2	0.5~0.7	23	30	130	7	临洞

4.2 围岩振动信号的能量分布

对信号进行小波包分析,首要问题是确定小波基,因为用不同的小波基分析同一个信号会产生不同的结果^[6]。Daubechies 小波系列具有较好的紧支撑性、光滑性及近似对称性,已被成功地应用于分析包括爆破地震在内的非平稳信号问题。该小波系列按正整数 N 具有不同的序列(dbN),图 6 给出了几种 db 小波基函数。

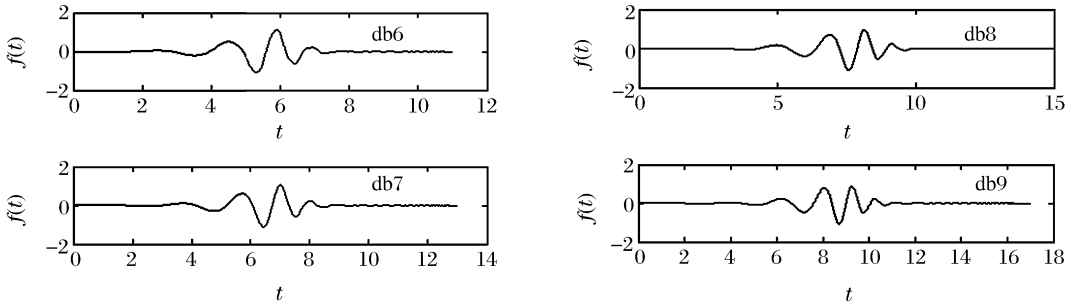


图 6 几种常用于爆破振动信号分析的小波函数

Fig. 6 Common wavelet functions for blast vibration analysis

目前爆破振动信号处理中用得最多的是 db8,本文中选用 db8 小波基。在 Matlab7.0 的 Wavelet Toolbox 中利用 db8 将图 5 所示的爆破振动信号分别进行了 5 层小波包分解,再根据式(1)~(3)分别得到了这 2 个振动波形各频带的能量分布,如图 7 所示,其中频带宽度为 31.25 Hz, n 为频带序号。

从图 7 可以看出,信号 1 和 2 的能量基本都在 1~7 频带(0.00~218.75 Hz)以内。虽然 2 组信号的能量分布频带相同,但信号 1 的低频能量比重明显高于信号 2。信号 1 的 2、3、4 等 3 个频带的能量均占信号总能量的 15%以上,3 个频带(62.50~125.00 Hz)的能量之和占总能量的 70%,而信号 2 中大于总能量 15%的 3 个频带为 3、4、5,3 个频带(93.75~156.25 Hz)的能量之和占总能量的 72%。

这 2 次爆破的爆破设计及装药结构基本一样(因为洞口岩体条件稍差,故每孔的装药量适当减少),测试条件也相同,差别最大的就是这 2 个断面处的地应力水平。这说明地应力对爆破过程中围岩振动的能量分布影响较大,使振动信号中低频能量的比例增加。

这种现象在理论上也容易得到解释。爆破开挖时,炮孔内的爆炸荷载作用历时数百微秒,而岩石爆破现场高速摄影资料^[10]表明:爆破破岩过程中,被爆落岩体从母岩上脱离并发生抛掷运动的时间为几十毫秒。因此,岩体爆破开挖过程中,地应力动态卸载的时间大于爆破荷载的作用时间,因而和爆炸荷载产生的围岩振动相比,地应力动态卸载产生的围岩振动含有较多的低频能量。

4.3 动态卸载效应的影响因素

在应力波波阵面上,动应力与质点振动速度存在如下关系

$$\sigma_r = \rho c_p v \tag{6}$$

式中: ρ 为岩石的密度, c_p 为岩体中的纵波波速, v 为质点峰值振动速度, σ_r 为波阵面上的应力。

因此,动态荷载在岩体中诱发的质点峰值振动速度的衰减规律^[11]可以表示为

$$v = k \frac{\bar{p}_0}{\rho c_p} \left(\frac{r}{d} \right)^\alpha \tag{7}$$

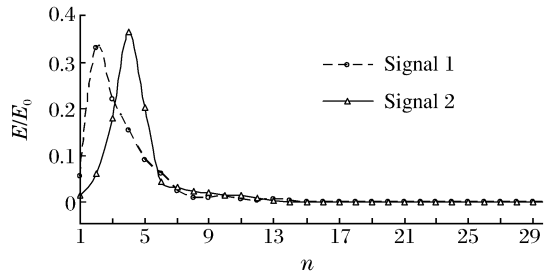


图 7 爆破振动波形各频带上的能量分布

Fig. 7 Energy distribution of frequency bands for the blast vibration signals

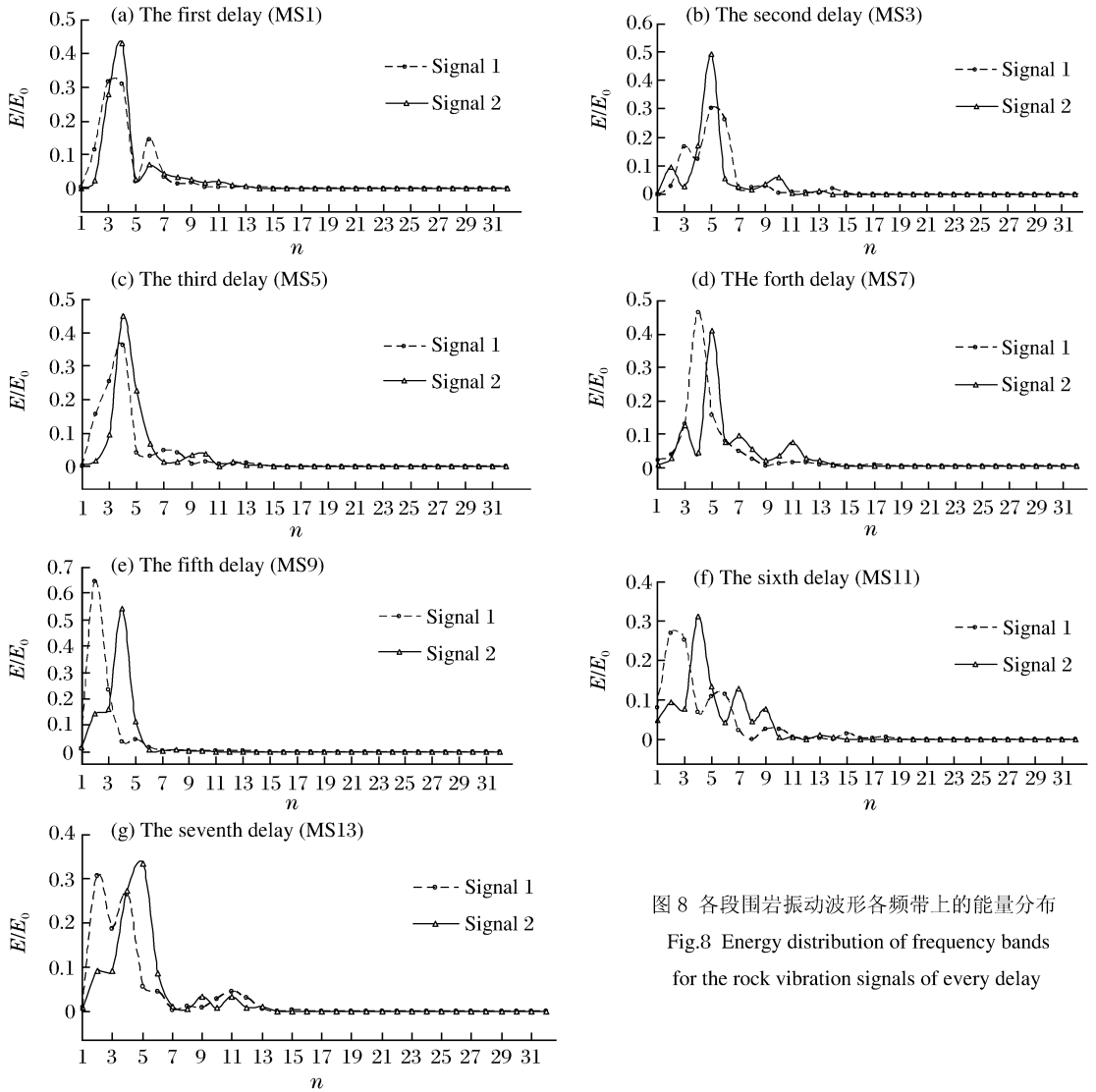


图 8 各段围岩振动波形各频带上的能量分布
Fig.8 Energy distribution of frequency bands for the rock vibration signals of every delay

式中： \bar{p}_0 表示开挖面上地应力的平均值， r 表示荷载所作用的圆面的半径， d 表示测试点到荷载作用面的距离， r/d 表示荷载相对作用距离。

式(7)表明，若不考虑测试场地条件(即波阻抗 ρc_p)的影响，开挖面上的卸载应力值的大小和卸载面的大小共同决定卸载效应的强弱。

将式(5)带入式(7)，可得

$$v = k \frac{\bar{p}_0}{\rho c_p} \left[\frac{2\Delta d}{r} - \left(\frac{\Delta d}{r} \right)^2 \right] \left(\frac{r}{d} \right)^\alpha \tag{8}$$

由式(8)可知，当地应力水平 \bar{p}_0 和波阻抗 ρc_p 一定时，地应力的动态卸载诱发的围岩质点峰值振动速度由炮孔的相对排距 $(\Delta d/r)$ 与荷载相对作用距离 (r/d) 共同决定。而 $\Delta d/r$ 和 r/d 均与开挖面上的炮孔布置和起爆网络的连接有关。

由表1和式(5)、(8)可知： $\Delta d/r$ 从MS1~MS13段依次增大，而 r/d 则依次减小，因此可以预知，在引水隧洞开挖过程中，动态卸载效应最强的不在MS1段和MS13段，而在中间 $\Delta d/r$ 和 r/d 两个因素的综合作用最大的某段。

利用前文提到的小波包分析的方法对每一段波形都进行了分析。图8给出了信号1和2中每个爆破分段诱发的振动波形的能量在各个频段上分布的情况，图中 n 为频段序号，带宽为31.25 Hz。

从图8可以看到，如同整个波形的能量分布规律(见图7)一样，振动信号1和2的每一段波形的能量都集中在1~7频段(0.00~218.75 Hz)内，这说明初始地应力动态卸载诱发的振动的频率范围和爆破荷载诱发的振动的频率范围基本相同，都在0.00~250.00 Hz之间。

除第1段和第2段外，信号1的其余各段振动波形的低频能量比例都明显大于信号2的各段波形的。为了更明确

地体现信号 1 和 2 中低频能量的关系,定义低频能量集中因数

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n E_i^A K_i}{\sum_{i=1}^n E_i^B K_i} \tag{8}$$

式中: E_i^A 、 E_i^B 分别表示信号 A 和 B 各个频段上的能量百分比, K_i 为加权因数,这里 $K_i = 1/i$, n 为进行小波包分析时最底层的小波包个数。显然, K 表示了被比较的 2 个信号中低频能量相对含量的多少,当 $K \geq 1$ 时,表示信号 A 中低频能量的比例大于信号 B 中低频能量的比例。

利用式(9)计算了信号 1 和 2 的每一段振动波形低频能量成分的相对含量比值,计算结果见图 9,其中 n_d 表示爆破延迟段数。

如图 9 所示,信号 1 和 2 的每一段振动波形低频能量的比值 K 都大于 1,这表明信号 1 的其余各段振动波形的低频能量比例都大于信号 2 的各段波形的,这也说明初始地应力动态卸载效应对围岩振动的能量分布影响很大。

从图 9 还可以看到,第 5 段(MS9)波形的 K 最大,说明在这一段中地应力动态卸载效应最强,第 5 段炮孔起爆时,炮孔连线上的地应力值和荷载相对作用半径都不是最大,这一现象是这 2 种因素共同作用的结果。

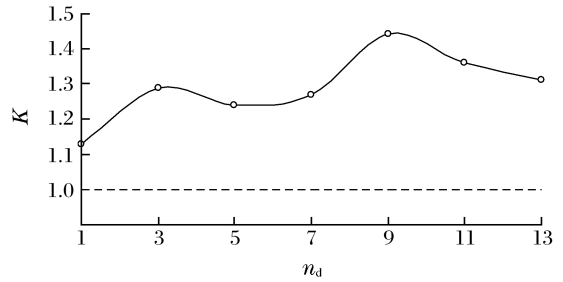


图 9 各段围岩振动波形各频带上的低频能量比较
Fig. 9 Low-frequency energy comparison of the rock vibration signals between different delays

5 结 论

对高地应力条件下地下工程爆破振动信号进行多层次的小波包分解,得到了爆破振动信号不同频段上的能量分布。分析能量分布规律,得到如下结论。

(1) 在高地应力地区进行爆破施工时,地应力的动态卸载效应是影响爆破地震能量分布的重要因素之一。地应力的动态卸载效应会增加围岩振动信号中的低频成分,提高低频能量在总振动能量中的比重,由于工程结构的自振频率一般较低,因此这种效应不利于地下工程中构筑物的安全。

(2) 若不考虑测试场地条件的影响,开挖面上的卸载应力值的大小和卸载面的大小共同决定卸载效应的强弱,而这两个因素均与开挖面上的炮孔布置和起爆网络的连接有关。

(3) 地应力动态卸载诱发的振动的频率范围和爆破荷载诱发的振动的频率范围基本相同,二者主要的振动能量都集中在 0.00~250.00 Hz 之间。

本文中所得到的结论只是地应力对围岩振动的影响研究的初步结果,对爆破开挖时,初始地应力动态卸载诱发的振动的机理,以及爆炸荷载诱发的振动与开挖卸荷诱发振动间的分离与识别等重要问题尚需开展深入研究。

参考文献:

[1] 卢文波,金李,陈明,等. 节理岩体爆破开挖过程的动态卸载松动机理研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(1): 4653-4657.
 LU Wen-bo, JIN Li, CHEN Ming, et al. Study on the mechanism of the loosening of the jointed rock mass caused by the dynamic unloading of initial stress during rock blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24(1):4653-4657.

[2] 易长平,卢文波,许红涛,等. 岩体开挖过程初始应力的动态卸荷效应研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(1): 4750-4754.
 YI Chang-ping, LU Wen-bo, XU Hong-tao, et al. The dynamic unloading effect study of initial stress field in excavation process of large-scale rock mass structure[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005,24 (1):4750-4754.

[3] 严鹏,卢文波,许红涛. 高地应力条件下隧洞开挖动态卸荷的破坏机理初探[J]. 爆炸与冲击,2007,27(3):283-288.
 YAN Peng, LU Wen-bo, XU Hong-tao. A primary study to damage mechanism of initial stress dynamic unloading when excavating under high geostress condition[J]. Explosion and Shock Waves, 2007,27(3):283-288.

[4] 张正宇,张文焯,吴新霞,等. 现代水利水电工程爆破[M]. 北京:中国水利水电出版社,2003.

[5] 卢文波,陈明,严鹏,等. 高地应力条件下隧洞开挖诱发围岩震动特性研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(1):

3329-3334.

LU Wen-bo, CHEN Ming, YAN Peng, et al. Study on the characteristics of vibration induced by tunnel excavation under high in-situ stress[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007,26(1):3329-3334.

- [6] Wickerhauser M V, Large-rank approximate principle component analysis with wavelets for signal feature discrimination and the inversion of complicated maps[J]. Journal of Chemical Information and Computer Science, 1994,34(5):1036-1046.
- [7] 胡昌华,张军波,夏军,等. 基于 MATLAB 的系统分析与设计——小波分析[M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2000:6-266.
- [8] 凌同华,李夕兵. 地下工程爆破振动信号能量分布特征的小波包分析[J]. 爆炸与冲击,2004,24(1):63-68.
LING Tong-hua, LI Xi-bing. The features of energy distribution for blast vibration signals in underground engineering by wavelet packet analysis[J]. Explosion and Shock Waves, 2004,24(1):63-68.
- [9] 苏鹏云. 瀑布沟地下厂房优化设计和洞室群围岩稳定数值模拟分析[D]. 武汉:武汉大学,2004.
- [10] Preece D S, Evans R, Richards A B. Coupled explosive gas flow and rock motion modeling with comparison to bench blast field data[C]//Proceedings of the 4th International Symposium on Rock Fragmentation by Blasting. Vienna, Austria, 1993:239-246.
- [11] LU Wen-bo, Hustrulid W. The Lu-Hustrulid approach for calculating the peak particle velocity caused by blasting [C]//Proceedings of the 2nd World Conference on Explosive and Blasting Technique. Prague, Czech, 2003:486-488.

Influences of geo-stress on energy distribution of vibration induced by blasting excavation

YAN Peng^{1*}, LU Wen-bo¹, LI Hong-tao², CHEN Ming¹, ZHOU Chuang-bing¹

(1. *State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China;*

2. *School of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China*)

Abstract: Adopting the wavelet packet analysis technique, the energy distribution of the vibration, which was induced in the process of tunnel blasting excavation under the high in-situ stress conditions, was obtained. Analysis on the test data shows that the frequency ranges of the vibration induced by the transient unloading of the in-situ stress(VI) and the vibration induced by blast load(VB) are almost the same, but the proportion of the low frequency energy in VI is higher than that in VB. The effect of the transient unloading depends on the magnitude of the in-situ stress for the transient unloading and the size of the unloading area, both of which are determined by the distribution of the blast holes and explosive circuit.

Key words: mechanics of explosion; energy distribution; wavelet packet analysis; rock mass vibration; blasting excavation; geo-stress

* Corresponding author; YAN Peng
Telephone: 86-571-56738877

E-mail address: yansd034@yahoo.com.cn