

文章编号: 1001-1455(2004)03-0261-07

# 基于小波包技术的爆破地震波特征提取及预报\*

姜建武, 龙 源, 徐全军, 周 翔

(解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要: 在微风化花岗岩石场地进行了孔径为 76mm、孔深为 5m 的单孔和单段多孔爆破实验研究, 获得了该类场地爆破地震波加速度衰减规律, 加速度衰减系数为  $k=3698$ ,  $\alpha=2.046$ , 并研究了该场地基频特征。运用了小波包技术对爆破地震波测试信号特征量提取, 分析了试验所测爆破地震波不同频带下小波包系数的衰减规律。在此基础上建立了基于不同频带小波包系数的爆破地震波预报模型, 该模型在爆破地震波波形、峰值及频率预报方面均具有较高的准确度。

关键词: 爆炸力学; 爆破地震效应; 小波包; 预报; 特征提取; 折算距离

中图分类号: O389; TD235.1

国标学科代码: 130°35

文献标志码: A

## 1 引 言

爆破地震效应问题是广大爆破施工技术人员必须考虑的问题。关于爆破地震效应的研究, 主要在以下几方面进行: 爆破地震动的衰减规律研究, 这方面包含了爆破振动强度预报和振动波形时间历程研究; 爆破地震波信号的分析处理, 爆破地震效应控制以及结构物的爆破振动安全强度问题的研究<sup>[1~6]</sup>。用质点峰值振动强度预报和控制爆破振动是当前爆破振动预报的一个主要方法, 但不能提供有关爆破振动波形的内容, 如振动的时程、频谱等。在爆破地震波全历程研究方面主要有线性叠加模型<sup>[4]</sup>、建立在场地反应谱基础上的爆破振动信号模拟<sup>[7]</sup>、基于弦函数的振动波形叠加预报模型<sup>[8]</sup>。基于单孔波形的线性叠加理论认为各震源的地震波是彼此独立地依直线方向朝周围传播, 它没有考虑传播介质的影响, 从而预报波形频率完全决定于原基本单孔爆破地震波频率。只有在震源接近于正弦振动、传播介质的非线性影响不显著时, 线性叠加理论中对波形进行叠加处理才与实测结果基本相符。随着现代数学理论与其它学科交叉发展, 在爆破地震效应研究领域出现了新的分析工具, 如基于非线性算法的爆破地震预报的神经网络模型<sup>[9]</sup>, 具有自适应特征的小波和小波包技术在分析爆破地震波这种非平稳信号方面得到了很好地运用<sup>[5, 8, 10~12]</sup>。

本文中, 在获得岩石场地爆破地震波基本规律的基础上, 采用小波包技术提取出爆破地震波中不同频带下的振动分量, 研究各频带下爆破地震波分量的衰减规律, 得到不同频带下小波包重构信号振动峰值与药量和距离的关系; 在上述研究的基础上, 采用具有该试验场地典型特征的爆破地震波不同频带下的小波包系数作为预报模型的基本函数, 并将其最高峰值归一, 对它们作用一由各自峰值与折算距离关系确定的权函数, 将它们重构就可以获得某距离处的爆破地震波预报波形及该点的振动强度。

## 2 爆破震动试验数据的时频特征分析

爆破试验场地为微风化的花岗岩石, 炮孔孔径 76mm, 孔深 5m, 采用乳化炸药, 为密实偶合装药。由于试验主要研究爆破地震波在该场地传播规律, 进行了单孔或单段多孔试验; 测量爆破地震波物理量为加速度。由于炮孔深度与孔径以及单孔装药规模均与下一步将在该场地进行的场地平整与基坑开挖爆破设计类似, 因此试验地震波数据能反映该场地爆破地震波的传播规律, 达到试验研究为爆破工程设

\* 收稿日期: 2003-06-12; 修回日期: 2003-09-01

基金项目: 国家自然科学基金项目(10372117)

作者简介: 姜建武(1975—), 男, 博士研究生。

计与降震的目的。测点共四个,测点与爆源呈直线排列。表 1 中列出了本次爆破试验测试数据。图 1 为第 15 炮次(单段两孔)的功率谱。

表 1 爆破地震波试验测试参数

Table 1 Data of blasting wave experiments

No	q/kg	Point 1			Point 2			Point 3			Point 4		
		d/m	A <sub>m</sub> /(m/s <sup>2</sup> )	f/Hz	d/m	A <sub>m</sub> /(m/s <sup>2</sup> )	f/Hz	d/m	A <sub>m</sub> /(m/s <sup>2</sup> )	f/Hz	d/m	A <sub>m</sub> /(m/s <sup>2</sup> )	f/Hz
13	27	90	3.467	88	115	2.394	56	154	1.070	48	179	1.349	60
14	21	89	2.121	92	114	1.900	74	153	1.024	52	178	0.603	54
15	14	83	2.187	102	108	1.516	74	147	0.737	68	172	0.585	68
16	18	83	5.095	98	108	2.261	70	147	1.209	66	172	0.913	58
17	14	78	1.994	100	103	2.171	70	142	1.015	50	167	0.758	58
18	18	78	3.366	112	103	2.215	68	142	0.967	50	167	0.825	52
19	9	74	1.876	106	99	1.376	74	138	0.434	70	163	0.337	66
20	6	74	1.502	108	99	1.219	56	138	0.448	50	163	0.350	52
21	28	71	5.375	98	96	3.894	70	135	1.290	68	156	1.309	56
22	7	66	3.277	104	91	1.500	72	130	0.641	70	155	0.536	68

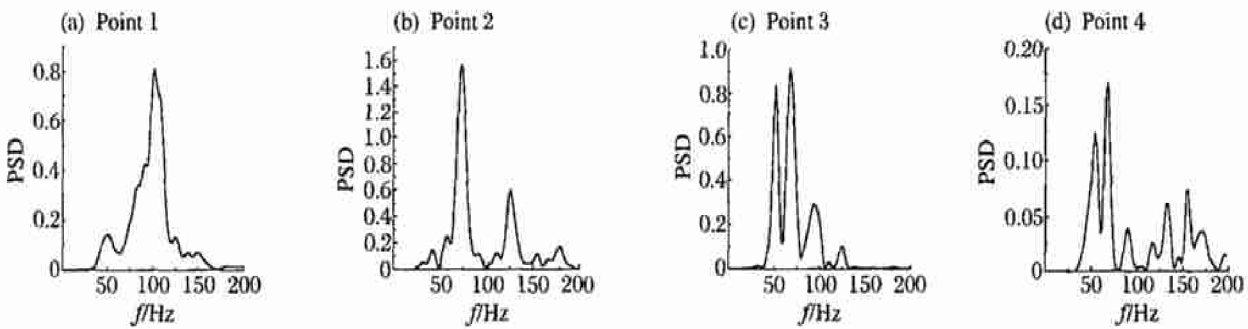


图 1 第 15 炮次各点的功率谱

Fig.1 Frequency spectrum of 15th test blasting signals

回归试验测试数据,得到该场地爆破地震波加速度峰值与折算距离的关系式

$$A = 3698 \times \left[ \frac{\sqrt{q}}{R} \right]^{2.046} \tag{1}$$

式中:  $A$  为加速度,  $m/s^2$ ;  $q$  为单段药量,  $kg$ ;  $R$  为测点与爆源距离,  $m$ 。其对数关系见图 2。试验数据回归分析的相关性较好,为 0.95 以上。从试验数据分析以及根据式(1)的计算来看,爆破地震波加速度峰值随距离增加衰减较快。根据表 1 中各测点频率分析可知,各测点的主振频率较为集中,在第 1 测点功率谱曲线峰值对应的频率范围为 88 ~ 108Hz,第 2、3、4 测点的主振频率则集中在 48 ~ 74Hz 的范围内,因而可认为该试验场地基频范围为 48 ~ 74Hz,在该频率范围内的爆破地震波主频率随距离的衰减作用不明显;爆破地震波由测点 1 传播至测点 2,其频率衰减幅度较大,达到 40Hz 左右。分析信号的频谱可知,爆破地震波在各测点的主振频率虽然比较集中,但并不表现为一个主振频带,如图 1 中第 15 炮次的测点 2、3 和 4 的功率谱所示;同时,它们的优势频带范围较宽(见图 1 中测点 1 的功率谱),而非分布在一个狭窄的频带内,从而表现为整个信号的主振动频

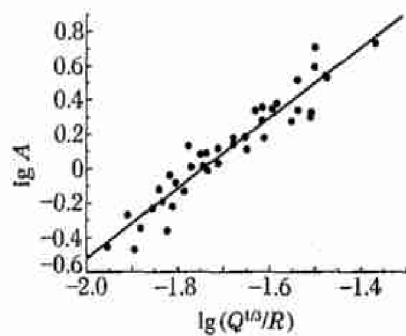


图 2 加速度峰值与折算距离的对数关系

Fig.2 Logarithmic relation between the acceleration peaks and scaled distances

率在信号能量中绝对占优。

爆破地震波振动强度随场地特征的衰减特性,以及高频衰减迅速,在达到一定频率范围(具有场地特征的主振频率)后,频率衰减缓慢的规律体现了场地对爆破地震波不同频率范围地震波分量的衰减作用是不一样的,即爆破地震波这种随距离而发生的振动强度和频率变化规律在一定程度上体现了场地特征。因而,在进行爆破振动历程研究时,在考虑了爆破地震波振动强度的同时,也应当对其频率变化规律作为一个重要考虑因素进行研究。

### 3 爆破振动信号特征的小波包提取

小波包是在小波理论的基础上发展起来的,它弥补了信号在小波分解过程中对各分解尺度获得的高频分量不再进行分解,而在下一尺度的小波分解中只对低频分量进行小波变换所带来的分析信号高频部份频率分辨率,而低频分量信号却存在时间分辨不足的问题。小波包基将频率轴分成不同大小的分离区间,通过需要  $O(N \lg(N))$  次运算的快速滤波器组算法,对长度为  $N$  的离散信号,在超过  $2^{N/2}$  个小波包基下被分解<sup>[13~14]</sup>。随着人们对爆破地震效应的关注,小波和小波包技术在该领域得到了较好地运用,研究表明它在处理爆破地震波这种非平稳信号方面具有极强的优越性<sup>[5, 8, 10~12]</sup>。

对现场爆破地震波数据分析表明,采用小波包技术对多段微差爆破地震波信号进行分析可以比较准确地获得各段药量激发和振动波形峰值出现时间。同时对爆破地震波进行小波包去噪可以大大提高信号的信噪比,为爆破地震波的峰值上升与衰减过程研究获得更加准确的信息。

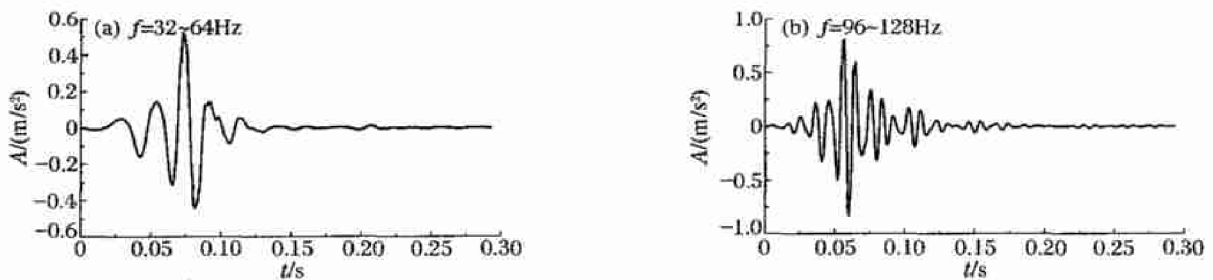


图 3 不同频带小波包重构系数细节信号波形

Fig. 3 Signals of wavelet packets in different frequency bands

爆破地震波在岩石介质中传播时,其不同频率成份的地震波分量衰减程度是各不相同的,这种衰减机制一方面取决于爆源特征,另一方面由场地性质决定。为了研究爆破地震波中不同频率成份分量在特定介质中的传播规律,必须对它们进行分别研究,从而需要将研究频率范围内的地震波信号提取出来。基于 Fourier 变换与逆变换理论的频谱特征提取技术对于爆破地震波这种非平稳信号而言,其理论基础与非平稳信号不相符。小波包基在将频率轴分成为不同大小的分离区间的基础上,成为一种有效的具有“变焦”功能的时-频分析方法,它对所分析信号有自适应性,可方便地对某频带下的信号进行有效提取。图 3 为试验中第 15 炮次测点 2 测试信号中频率范围为 32~64Hz 和 96~128Hz 的小波包重构系数细节信号。

爆破地震波信号经小波包分解并将其中不同频带下的地震波分量提取出来后,该分量的振动衰减规律与药量、距离是否与原信号一样具有某种关系,这是运用小波包技术获得爆破地震波的特定分量后所应当考虑的问题。图 4 为本次试验中各测点爆破地震波采用‘db5’小波包进行分解后,频带为 128~160Hz 的小波包系数峰值与折算距离的关系,其相关系数为 0.91。这表明爆破地

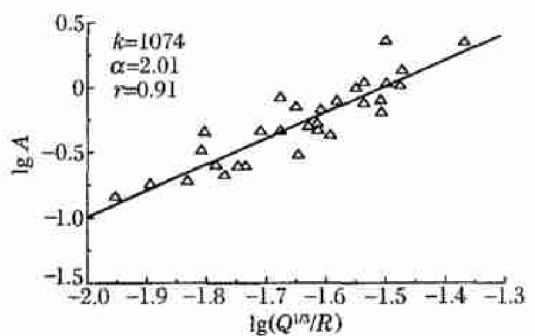


图 4 小波包系数峰值与折算距离的对数关系  
Fig. 4 Logarithmic relation between wavelet packet's peaks and scaled distances

震波经小波包分解为不同频带下的小波包分量后,各小波包信号的振动衰减规律仍与药量和距离具有良好的相关性,而它们之间的衰减系数则表明了该类场地对各频带下地震波的作用程度。

## 4 基于小波包重构系数的爆破地震效应预报

### 4.1 爆破地震波信号小波包系数峰值衰减规律研究

在已知某测点爆破地震波条件下,要对其它距离处非测点地震波进行预测,必须建立在地震波各频率成份振动分量衰减规律的基础上,所获得的预报信号才具有因场地和距离差异而带来的频谱变化规律。基于单孔爆破地震波信号的线性叠加模型,在对一典型单孔爆破地震波作用一振幅调制函数的基础上获得预报信号,其频率特征是由基本单孔波形的最初频率所决定。虽然加入时延因子后,各波形间会发生一定的振相混叠,改变合成信号波形,但它具有对基波频率选择的单一性及不可控制方面的缺乏。在文献[8]中虽然考虑了不同情况(距离和药量)下爆破地震波的主振频率,并用指数双边脉冲函数  $Ee^{-\alpha|t-\Delta t|}$  对具有该种主振频率的弦函数(正弦或余弦函数)进行振幅和频带宽的调制,其原理仍是建立在 Fourier 谱分析的基础上;对于具有多个频带且频带较宽的爆破地震波而言,它必须选取较多的弦函数,并需通过试验和计算得到各弦函数对应指数脉冲函数的衰减系数  $\alpha$ ,增加了计算难度和试验数据处理的复杂性。由于爆破地震波是一种非平稳信号,任何一种用数学函数对它的描述,将会丢失其中的许多细节。

对本次试验数据的频谱分析可知,各测点爆破地震波的主频主要集中在三个区域:50Hz~60Hz,65Hz~75Hz 以及 95Hz~110Hz,且各主频区间均具有一定的带宽,根据小波包对分析信号频率的二分法原则,在研究本次试验中爆破地震波各频带振动分量信号的衰减规律时,将主要研究 32Hz~64Hz、64~96Hz、96Hz~128Hz 频带下的小波包系数。但为不损失爆破地震波中低频分量32Hz以和 128Hz 以上地震波在原信号的影响,将 32Hz~64Hz 频带宽度扩展为 16~64Hz;同时,增加对另一频率范围为 128Hz~160Hz 的高频带小波包的分析。表 2 中给出了以上各频带地震波峰值与比例距离的衰减系数以及它们之间的相关系数。

### 4.2 基于小波包系数的爆破地震波预报

设某次爆破试验中某测点爆破地震波在上述各四个频带下的小波包系数为  $s_j(k)$ , ( $j=1, 2, 3, 4$ ;  $k=1, 2, \dots, N$ ),  $N$  为原爆破地震波数据长度;而各小波包系数峰值与折算距离 ( $r = \frac{\sqrt[3]{Q}}{R}$ ) 的关系式为  $k_j(r)^\alpha$ , ( $j=1, 2, 3, 4$ ), 衰减系数  $k$ 、 $\alpha$  的选取值见表 2。则某点爆破地震波信号  $s(t, r)$  的小波包系数预报模型为

$$s(t, r) = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^4 k_j(r)^\alpha s_j(k) \quad (2)$$

在根据上式进行爆破地震波预报时,应先各选取频带下的小波包系数  $s_j(k)$ , 对其中最高峰值归一,然后才能根据式(2)对某距离处的爆破地震波进行预报。表 3 给出了根据表 2 中各频带下小波包峰值衰减系数采用预报公式(2)对各测点处的爆破地震波加速度预报峰值与实测值的对比结果,其中所选用的小波包系数为各炮次测点 1 处的爆破地震波信号在上述四个频带下的小波包分解系数。由表 3 可知,除个别测点外,预报精度比较高,表明了基于多频带小波包系数的爆破地震波峰值预报模型具有一定的精度。图 5 为采用试验中第 14 炮次测点 1 的测试爆破地震波小波包系数对测点 2 处的信号进行预报时所获得的预报波形及其功率谱,同时也给出了该测点处原试验测试爆破地震波及功率谱。从预报波形来看,其主振峰值个数、振动持续时间、主频带个数及带宽等均与实测爆破地震波具有较好的一

表 2 各频带小波包峰值与折算距离衰减系数

Table 2 Relation parameters of wavelet packet's peaks in infferent frequency band and scaled distances

$f/\text{Hz}$	$k$	$\alpha$	$r$
16~64	70.5	1.21	0.86
64~96	1493	1.96	0.91
96~128	$1.0 \times 10^{4.87}$	3.13	0.94
128~160	1074	2.01	0.91

表 3 基于小波包系数的爆破地震波预报峰值与测试数据对比

Table 3 Contrast between predicting value and experiments' data

No	Point 1		Point 2		Point 3		Point 4	
	$A_m / (m/s^2)$	$A_p / (m/s^2)$	$A_m / (m/s^2)$	$A_p / (m/s^2)$	$A_m / (m/s^2)$	$A_p / (m/s^2)$	$A_m / (m/s^2)$	$A_p / (m/s^2)$
13	3.467	2.8751	2.394	1.8503	1.070	1.1090	1.349	0.8683
14	2.121	2.6547	1.900	1.7528	1.024	1.0267	0.603	0.7927
15	2.187	2.3380	1.516	1.5129	0.737	0.9220	0.585	0.7201
16	5.095	2.6356	2.261	1.7019	1.209	1.0347	0.913	0.8079
17	1.994	2.1647	2.171	1.3328	1.015	0.7700	0.758	0.5867
18	3.366	3.1536	2.215	1.8528	0.967	1.1005	0.825	0.8506
19	1.876	2.0439	1.376	1.4453	0.434	0.6013	0.337	0.4513
20	1.502	1.6824	1.219	0.9746	0.448	0.5296	0.350	0.3975
21	5.375	4.3794	3.894	2.4744	1.290	1.3090	1.309	1.0031
22	3.277	2.2866	1.500	1.3540	0.641	0.7694	0.536	0.5865

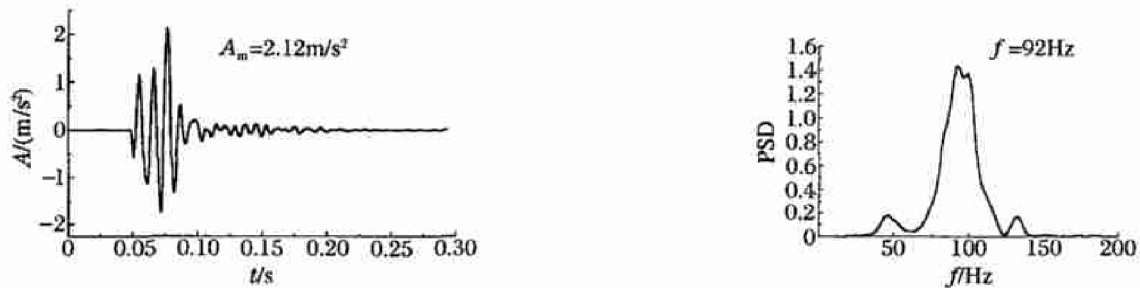


图 5(a) 测点 1 测试爆破地震波与频谱

Fig. 5(a) Blasting wave and spectrum on 1st measuring point

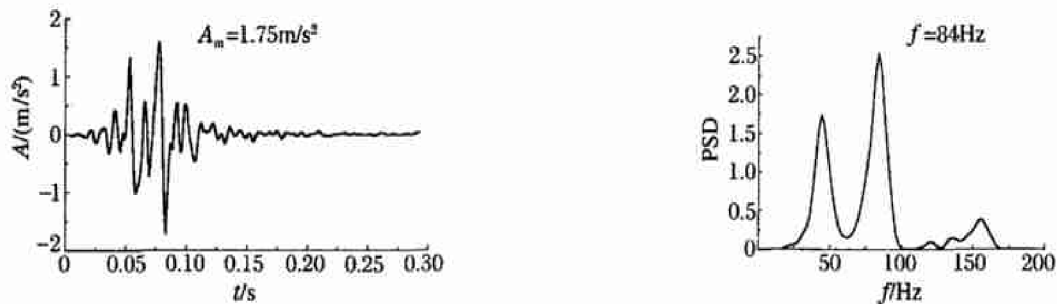


图 5(b) 测点 2 的预报信号和频谱

Fig. 5(b) Predicting signal and spectrum on 2nd measuring point

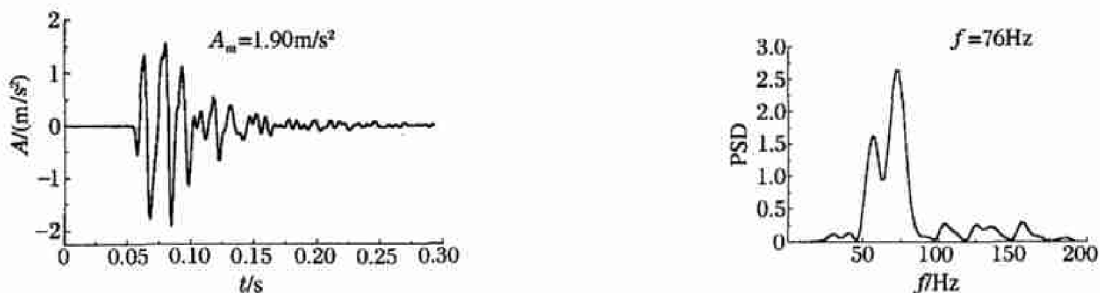


图 5(c) 测点 2 测试爆破地震波与频谱

Fig. 5(c) Testing blasting seismic wave and frequency spectrum on 2nd measuring point

致性,即使是在细节方面预报信号也表现出了较程度的相似。这是因为该预报模型在利用主频带小波包作为预报基函数的基础上,也考虑了高频带小波包系数;从预报波形的谱分析可知,它在频率预报(频率随折算距离变化特性、主振频带个数及带宽)方面也体现了良好的性能。

## 5 结 论

(1) 试验采用实际爆破施工中的爆破设计技术参数,进行了单孔和单段多孔爆破试验,得到了微风化花岗岩石场地爆破地震波加速度衰减系数  $k = 3698$ ,  $\alpha = 2.046$ ;并获得了该场地基频范围为  $48 \sim 74\text{Hz}$ 。

(2) 运用小波包技术对爆破地震波测试信号去噪、多段微差爆破段延时识别进行了研究,获得了较为清晰且更能表征爆破振动特征的分析波形。分析表明应用小波包技术研究爆破地震波信号具有较强的灵活性及对该类非平稳信号的自适应功能。

(3) 在研究了不同频带下小波包系数振动衰减规律的基础上,建立了基于小波包系数的爆破地震波预报模型。模型在波形、振动峰值及频率预报方面均具有较高的准确度。

由于该模型是对各频带下的小波包系数作用一具有衰减因子  $k$  和  $\alpha$  特征的权函数后的合成结果,而  $k$  和  $\alpha$  是具有明显场地特征及爆源特征的参数,因而该模型用于另一种特征不同的场地进行预报时,应先获得该场地的各小波包衰减系数  $k$  和  $\alpha$ ,对波形的预报才合理。

## 参考文献:

- [1] 张雪亮,黄晓棠.爆破地震效应[M].北京:地震出版社,1981.
- [2] 娄建武,龙源,方向,等.基于反应谱值分析的爆破震动破坏评估研究[J].爆炸与冲击,2003,23(1):41-46.  
LOU Jian-wu, LONG Yuan, FANG Xiang, et al. Study on blasting vibration damage based on response spectrum[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(1): 41-46.
- [3] 娄建武,龙源,徐全军,等.工程爆破中的建筑物振动监测[J].解放军理工大学学报,2000,1(5):58-62.  
LOU Jian-wu, LONG Yuan, XU Quan-jun. Measuring and analysis of structure's response vibration in engineering blasting[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2000, 1(5): 58-62.
- [4] 卢文波.岩石爆破中应力波的传播及其效应研究[D].武汉:武汉水利电力大学,1994.
- [5] 林大超,施惠基,白春华,等.爆炸地震效应的时频分析[M].爆炸与冲击,2003,23(1):31-36.  
LIN Da-chao, SHI Hui-ji, BAI Chun-hua, et al. Time frequency analysis of explosion seismic effects[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(1): 31-36.
- [6] 娄建武,龙源.普通民房在爆破地震波作用下的振动破坏分析[J].解放军理工大学学报,2001,2(2):21-25.  
LOU Jian-wu, LONG Yuan. Study on low-rise residential house's damage caused by blasting vibration[J]. Journal of PLA University of Science and Technology, 2001, 2(2): 21-25.
- [7] 娄建武,龙源,徐全军.人工模拟爆破震动信号及其频谱特性检验[J].工程爆破,2001,7(1):7-11.  
LOU Jian-wu, LONG Yuan, XU Quan-jun. Simulation of blasting vibration signal and verification of its frequency spectrum[J]. Engineering Blasting, 2001, 7(1): 7-11.
- [8] SONG Guang-min, CHEN Shou-ru, WU Cong-shi. Wavelet packets analysis models for the prediction of blasting vibration waveform[A]. The 7th international symposium on rock fragmentation by blasting [C]. Beijing, China, 2002: 311-320.
- [9] 张继春.三峡工程基岩爆破振动特性的试验研究[J].爆炸与冲击,2001,21(2):131-137.  
ZHANG Ji-chun. Vibration Characteristics of blasting in bed rock mass at Sanxia project[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(2): 131-137.
- [10] 娄建武,龙源,徐全军.小波分析在结构物爆破振动响应能量分析法中的应用[J].世界地震工程,2001,17(1):64-68.  
LOU Jian-wu, LONG Yuan, Xu Quan-jun. Application of wavelet analysis to the energy method of the structure response caused by explosion vibration[J]. World Earthquake, 2001, 17(1): 64-68.
- [11] 宋广明,曾新吾,陈寿如,等.爆破条件对爆破振动信号分析中小波包时频特征的影响[J].工程爆破,2002,8(3):5

—12.

SONG Guang-ming, ZENG Xin-wu, CHEN Shou-ru, et al. Influence of blasting condition on time-frequency characteristics of blasting vibration signals with wavelet packets analysis[J]. *Engineering Blasting*, 2002, 8(3): 5—12.

[12] 林大超, 施惠基, 白春华, 等. 爆破振动时频分布的小波包分析[J]. *工程爆破*, 2002, 8(2): 1—5.

LIN Da-chao, SHI Hui-ji, BAI Chun-hua, et al. On time-frequency distribution of blasting vibration through wavelet packet transform[J]. *Engineering Blasting*, 2002, 8(2): 1—5.

[13] Coifman R R, Wickerhauser M V. Entropy based algorithms for best basis selection[J]. *IEEE Transaction on Information Theory*, 1992, 38(2): 713—718.

[14] Stepane Mallat. A wavelet tour of signal processing[M]. 杨力华, 戴道清, 黄文良, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2002: 244—257.

## A study on the extraction and prediction of blasting seismic wave characteristics by wavelet packets technique

LOU Jian-wu<sup>\*</sup>, LONG Yuan, XU Quan-jun, ZHOU Xiang

(*Engineering Institute of Engineer Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, Jiangsu, China*)

**Abstract:** The blasting experiments have been carried out in the weakly rotten granite site and the acceleration attenuation of blasting seismic waves in the site were measured, in which the deep hole for blasting was of 76mm in diameter and 5m in depth. The attenuation parameters are  $k=3698$  and  $\alpha=2.046$ , meanwhile the base frequency characteristics of the site is acquired. With the wavelet packet analysis the blasting seismic wave characteristics are extracted, and the relationship of attenuation of wavelet packets in different frequency bands vs the scaled distance is studied. Based on the wavelet packet attenuation a model to predict the blasting seismic wave characteristics has been proposed in this paper and is of a good accuracy in predicting waveform, amplitude and frequencies of blasting seismic waves.

**Key words:** mechanics of explosion; blasting seismic effects; wavelet packet; prediction; signal's characteristics extraction; converted distance

---

\* Corresponding author: LOU Jian-wu

E-mail address: loujw@mail.china.com

Telephone: 025-84867762