

文章编号: 1001-1455(2009)01-0035-06

# 基于小波分析的建(构)筑物爆破振动安全评估\*

中国生<sup>1,2</sup>, 房莹光<sup>1</sup>, 谷任国<sup>1</sup>, 赵奎<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广东 广州 510641;

2. 江西理工大学资源与环境工程学院, 江西 赣州 341000)

**摘要:** 基于现场实测爆破振动数据, 采用小波分析技术对爆破振动信号的能量特征进行分析, 得到了信号不同频带上的能量分布, 根据受控结构体对爆破振动动态响应特征, 探索建立了能考虑爆破振动的强度、频率和持续时间以及受控建(构)筑物本身的动态响应特性(固有频率和阻尼比)等因素的综合安全判据——响应能量判据, 并用工程实例验证了该判据的可行性和可靠性。响应能量判据能准确地描述爆破振动对受控建(构)筑物的影响程度, 较现行的速度-频率安全判据, 更能全面地反映爆破振动对建(构)筑物危害的本质。

**关键词:** 爆炸力学; 安全判据; 小波变换; 爆破振动; 固有频率; 阻尼比; 响应能量

**中图分类号:** O381; TD 235.47

**国标学科代码:** 130 · 3520

**文献标志码:** A

## 1 引言

在矿山开采、岩土爆破开挖和城市爆破拆除等爆破工程中, 爆破振动会对周围的建筑造成很大的损坏, 爆破工程中因爆破振动造成的结构失稳、开裂和变形等问题或事故时有发生。大量的工程事例显示<sup>[1-2]</sup>, 爆破振动监测数据超过甚至严重超过允许值的情况下, 却未对爆破环境中的受控建(构)筑物产生任何威胁; 而在有些情况下, 强度因子(质点振动的位移、速度和加速度)远低于允许值的时候, 受控建(构)筑物却发生了严重破坏。虽然目前国内外都制定了振动速度和频率相结合的爆破振动安全标准, 使安全评价标准更加科学化和合理化, 但现行的爆破安全标准仍未将爆破振动的持时和受控建(构)筑物本身的固有特性(固有频率和阻尼比)考虑在内, 因而不可避免地存在一定的缺陷和不足<sup>[3-4]</sup>。因此有必要进一步研究爆破振动效应的相关理论, 探讨爆破振动的安全判据, 建立多因素的综合安全判据。本文中运用小波分析技术, 从爆破振动信号能量和结构动力响应出发, 探讨能考虑振动的强度、频率和持续时间, 以及受控建(构)筑物动态响应特性等因素综合的安全判据, 以期对多因素综合安全判据的研究提供参考。

## 2 爆破振动信号的小波频带能量

### 2.1 小波变换

设  $\psi(t)$  是平方可积函数, 即  $\psi(t) \in L^2(R)$  ( $L^2(R)$  为能量有限的信号空间), 若其 Fourier 变换  $\hat{\psi}(\omega)$  满足容许条件

$$C_\psi = \int_R \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (1)$$

则称  $\psi(t)$  为一个基本小波。将基本小波  $\psi(t)$  进行伸缩和平移后, 就可得到一个小波序列

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in R; a \neq 0 \quad (2)$$

式中:  $a, b$  分别为伸缩因子和平移因子。

对于任意信号  $f(t)$  ( $f(t) \in L^2(R)$ ) 的连续小波变换为

$$Wf(a, b) = \langle f, \psi_{a,b} \rangle = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (3)$$

式中:  $\langle f, \psi_{a,b} \rangle$  表示  $f(t)$  与  $\psi_{a,b}$  的内积,  $\psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right)$  为  $\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$  的共轭函数。

根据 Mallat 算法可知<sup>[5]</sup>, 信号  $f(t)$  小波变换的分层分解关系可以表示为

\* 收稿日期: 2007-10-29; 修回日期: 2007-12-13

基金项目: 中国博士后科学基金项目(20080430836); 江西省教育厅科技项目(GJJ09515)

作者简介: 中国生(1974—), 男, 博士后, 副教授。

$$f(t) = A_1 f + D_1 f = A_2 f + D_2 f + D_1 f = \cdots = A_n f + D_n f + D_{n-1} f + \cdots + D_1 f \quad (4)$$

## 2.2 爆破振动信号各频带的能量表征

在小波多分辨率分析条件下,根据式(4),爆破振动信号  $s(t)$  满足如下分层分解关系

$$\begin{aligned} s(t) &= f_1(t) + g_1(t) = f_2(t) + g_2(t) + g_1(t) = \cdots = \\ &= f_N(t) + g_N(t) + g_{N-1}(t) + \cdots + g_1(t) = f_N(t) + \sum_{i=1}^N g_i(t) \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $f$  表示爆破振动信号  $s(t)$  小波分解的低频部分,  $g$  表示爆破振动信号  $s(t)$  小波分解的高频部分, 下标表示对应的分解层次。为使表达简洁, 令  $g_0(t) = f_N(t)$ , 则式(5)可以表达为

$$s(t) = \sum_{i=0}^N g_i(t) \quad (6)$$

如果将爆破振动信号  $s(t)$  进行层次为  $N$  的小波分解和重构, 根据式(6)可得信号的总能量

$$E = \int_{-\infty}^{+\infty} s^2(t) dt = \sum_{i=0}^N \int_{-\infty}^{+\infty} g_i^2(t) dt + \sum_{m \neq n} \int_{-\infty}^{+\infty} g_m(t) g_n(t) dt \quad (7)$$

由小波函数的正交性可知, 上式的第 2 部分为零。因此, 式(7)又可以简化为

$$E = \sum_{i=0}^N \int_{-\infty}^{+\infty} g_i^2(t) dt = \sum_{i=0}^N E_i \quad (8)$$

式中:  $E_i$  为爆破振动信号各频带的能量, 即

$$E_i = \int_{-\infty}^{+\infty} g_i^2(t) dt \quad (9)$$

## 3 基于小波分析的爆破振动安全响应能量判据

### 3.1 结构体对爆破振动响应分析

爆破地震波可以看成是由一系列正弦波分量叠加合成的, 即有

$$A(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \quad (10)$$

式中:  $A_i$  为第  $i$  个正弦波分量的振幅值,  $\omega_i$  为第  $i$  个正弦波分量的频率,  $\varphi_i$  为第  $i$  个正弦波分量的初相位。

为简化计算, 通常将结构体系假设为单自由度系统, 根据力的平衡原理可得

$$\ddot{x} + 2\xi\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 x = \frac{F_i}{m} \sin(\omega_i t) \quad (11)$$

式中:  $\omega_0 = \sqrt{k/m}$  为结构体系的固有频率,  $\xi_0 = c/(2m\omega_0)$  为结构体系的阻尼比。

由结构动力学理论可知<sup>[6-7]</sup>, 在爆破振动荷载分量  $F_i \sin(\omega_i t)$  的作用下, 结构体系位移的放大系数

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2/\omega_0^2)^2 + 4\xi_0^2(\omega^2/\omega_0^2)}} \quad (12)$$

式中:  $\omega$  为爆破振动的激励频率,  $\omega_0$  为结构体的固有频率,  $\xi_0$  为结构体的阻尼比。

由此可知, 放大系数  $\beta$  即为结构体在爆破振动作用下的响应系数, 是一个量纲一的物理量。由式(12)可知, 受控建(构)筑物的振动响应系数与其本身的固有频率和阻尼比密切相关。当爆破振动的激励频率越接近结构体的固有频率以及结构体的阻尼比越小时, 振动响应系数越大, 即振动响应越大; 反之, 振动响应越小。因此, 根据结构体的振动响应系数, 便可求得该结构体的频带响应系数。

### 3.2 结构体小波频带响应系数的确定

将爆破振动信号进行小波分解时, 分解的层数取决于具体信号及采用的爆破振动记录仪的工作频带。本文的爆破振动测试, 采用成都中科动态仪器有限公司研制的 IDTS3850 爆破振动记录仪, 最小工作频率为 1 Hz。由于爆破振动信号的主频一般在 200 Hz 以下, 根据香农(Shannon)采样定理<sup>[8]</sup>, 采样频率一般应高于被采信号主频的 10 倍以上, 才能保证所测试的波形不至于失真, 则其奈奎斯特(Nyquist)频率为 1 kHz。本次爆破振动监测时, 信号的采样率设置为 2 kHz, 根据小波分解原理<sup>[9]</sup>, 8 个频带宽度分别为: 0~7.812 5、7.812 5~15.625、15.625~31.25、31.25~62.5、62.5~125、125~250、250~500、500~1 000 Hz。

设爆破振动的激励频率为  $\omega$ , 结构体的固有频率和阻尼比分别为  $\omega_0$ 、 $\xi_0$ , 根据式(12)可得, 受控结构体小波分解 8 个频带的频带响应系数分别为

$$\epsilon_1 = \frac{1}{7.8125} \int_0^{7.8125} \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2/\omega_0^2)^2 + 4\xi_0^2\omega^2/\omega_0^2}} d\omega \quad (13)$$

$$\epsilon_2 = \frac{1}{7.8125} \int_{7.8125}^{15.625} \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2/\omega_0^2)^2 + 4\xi_0^2 \omega^2/\omega_0^2}} d\omega \quad (14)$$

$$\epsilon_3 = \frac{1}{15.625} \int_{15.625}^{31.25} \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2/\omega_0^2)^2 + 4\xi_0^2 \omega^2/\omega_0^2}} d\omega \quad (15)$$

$$\epsilon_4 = \frac{1}{31.25} \int_{31.25}^{62.5} \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2/\omega_0^2)^2 + 4\xi_0^2 \omega^2/\omega_0^2}} d\omega \quad (16)$$

$$\epsilon_5 = \frac{1}{62.5} \int_{62.5}^{125} \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2/\omega_0^2)^2 + 4\xi_0^2 \omega^2/\omega_0^2}} d\omega \quad (17)$$

$$\epsilon_6 = \frac{1}{125} \int_{125}^{250} \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2/\omega_0^2)^2 + 4\xi_0^2 \omega^2/\omega_0^2}} d\omega \quad (18)$$

$$\epsilon_7 = \frac{1}{250} \int_{250}^{500} \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2/\omega_0^2)^2 + 4\xi_0^2 \omega^2/\omega_0^2}} d\omega \quad (19)$$

$$\epsilon_8 = \frac{1}{500} \int_{500}^{1000} \frac{1}{\sqrt{(1 - \omega^2/\omega_0^2)^2 + 4\xi_0^2 \omega^2/\omega_0^2}} d\omega \quad (20)$$

### 3.3 响应能量判据的提出

爆破引起的地表振动对建(构)筑物破坏的一个重要因素,就是地震动输入到结构体中的振动能量。由于爆破振动信号是一种宽带的非平稳随机信号,采用小波分析将爆破振动速度信号在时频域上展开,通过计算该信号在各个频带的小波频带能量,再根据爆破地震波不同频率成分对受控建(构)筑物响应程度的不同,将各个频带的小波频带能量乘以相应频带的频带响应系数后累加,即可得到某结构体的响应能量,用  $E_R$  表示,并称为响应能量判据。

设  $E_i$  为爆破振动信号的第  $i$  频带的小波频带能量,则受控建(构)筑物的响应能量

$$E_R = \sum_{i=1}^N E_i \epsilon_i \quad (21)$$

式中:  $\epsilon_i$  为受控建(构)筑物的第  $i$  频带的频带响应系数,  $N$  为频带数。

由文献[10]可知,小波频带能量能同时反映爆破振动的强度、频率和持续时间的作用影响。而频带响应系数又能反映受控建(构)筑物本身的固有特性对爆破振动的响应程度。因此,在此基础上建立的响应能量判据,必将能考虑振动的强度、频率和持续时间以及受控建(构)筑物的动态响应特性等综合因素,能准确、全面地描述爆破振动对受控建(构)筑物的影响程度。

## 4 工程实例分析

### 4.1 爆破振动测试

为了验证爆破振动响应能量判据的准确性和实用性,在某露天金属矿进行了爆破振动现场测试,矿区爆源采用微差起爆方式,最大段起爆药量为 2.05 t,矿区周围建筑物分布较为密集,在爆源前方 700 m 范围内,有矿区公房和办公楼等公共设施以及少量民房,均为砖混或砖石结构,在爆源后方 1 km 范围内,有大量民房和一幢厂房,民房为土坯结构或砖石结构,厂房为框架结构。为了能分析爆破振动对不同类型建筑物的影响,特别选取了厂房、办公楼、公房和民房为爆破振动的监测对象,分别代表了框架、砖混、砖石和土坯等 4 类建筑结构。爆破振动前受控建筑物的状况如表 1 所示。

表 1 爆破振动前受控建筑物状况和爆破振动监测结果

Table 1 The state of the controlled structures before blasting vibration and the results from blasting vibration monitoring

测点 编号	受控 建筑物	结构类型	建筑物 层数	爆心距/m	爆破前状况	$v_p$ /(cm/s)	$f_k$ /Hz	爆破后状况
1	民房 A	土坯	1	约 750	完好无损	0.760	9.685	墙体出现细微裂缝
2	民房 B	土坯	1	约 700	完好无损	1.356	16.563	未发现任何破坏
3	民房 C	砖石	2	约 650	完好无损	2.372	25.854	未发现任何破坏
4	公房	砖混	2	约 500	完好无损	2.886	30.497	未发现任何破坏
5	办公室	砖混	3	约 600	完好无损	3.352	42.629	未发现任何破坏
6	厂房	框架	1	约 600	完好无损	4.879	35.675	未发现任何破坏

大量实测资料表明<sup>[10-11]</sup>,采用质点振动速度作为衡量和描述爆破振动强度的标准,比采用位移和加速度更有利于排除土壤因素的影响,并且与受控建(构)筑物的破坏特征相关性更好,因此本次振动测试选择质点振动速度作为监测的物理量。爆破振动监测时,各测点的拾振器均布置在受控建筑物的基岩上,振动测试的结果如图 1 和表 1 所示。由表 1 中

的测试结果可知,由于受控建筑物处于爆源的不同方向,因而爆破地震波从爆源到各测点的传播路径是不相同的,爆破地震波经不同传播介质的滤波及衰减后,尽管有些测点距离爆源大致相同,但其监测信号的幅值和主频仍会相差较大。

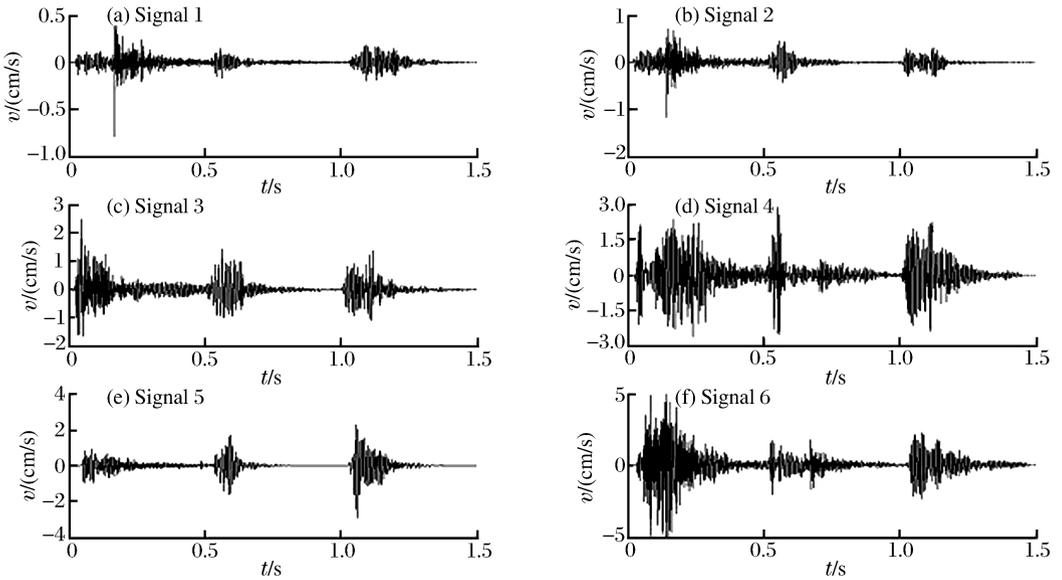


图 1 实测爆破振动速度时程曲线

Fig. 1 The velocity history of blasting vibration monitoring

## 4.2 爆破振动安全响应能量判据评价

### 4.2.1 采用现行的《爆破安全规程》(GB6722-2003)(即速度-频率安全判据)分析

根据《爆破安全规程》(GB6722-2003)<sup>[12]</sup>(以下简称《规程》),可以得出以下结论:(1)在本次爆破振动中,第 3~6 测点的监测结果均在《规程》规定的范围之内,这 4 个测点处的建筑物没有受到爆破振动的破坏,这是因为《规程》是建立在大量建(构)筑物爆破振动的调查统计基础上,具有重要的参考价值。(2)第 1 测点的监测结果尽管符合《规程》的规定,但该处的民房 A 仍然受到了破坏,第 2 测点处的监测结果虽然超过《规程》的规定,但该处的民房 B 并没有受到破坏。因此,《规程》在工程应用方面还存在一定的局限和不足。(3)《规程》虽然充分考虑了爆破振动频率对受控建筑物的影响,但忽视了振动持时和受控建(构)筑物本身的固有特性(固有频率和阻尼比)对爆破振动效应的影响,因此,不可避免会出现上述情况。

### 4.2.2 计算受控建筑物的响应能量

采用响应能量判据进行分析,首先必须获得 6 幢受控建筑物在爆破振动作用下的响应能量,可按下列步骤计算求得:(1)应用脉冲法和振动分析,可求得 6 幢受控建筑物的结构动态响应特性参数,如表 2 所示。(2)根据式(5)~(9),使用 MATLAB 语言编制计算程序,可求得 6 个测点爆破振动信号的小波频带能量,如表 3 所示。(3)根据式(13)~(20),利用表 2 中的动态响应特性参数,使用 MATLAB 语言编程计算,可得到 6 幢受控建筑物的频带响应系数,如表 3 所示。(4)按式(21)计算,可求得 6 幢受控建筑物的响应能量,如表 3 所示。

### 4.2.3 响应能量判据评价的结果

分析表 3 中 6 幢建筑物的响应能量,可以得出以下结论:(1)根据现行的速度-频率安全标准可知,民房 A 应该没有被爆破振动破坏,民房 B 被爆破振动破坏。按响应能量判据分析可知,民房 A 和民房 B 均为土坯结构,民房 A 的响应能量  $8.66 \times 10^{-2} (\text{cm/s})^2$  大于民房 B 的响应能量  $2.11 \times 10^{-2} (\text{cm/s})^2$ ,因而民房 A 受到爆破振动的影响比民房 B 大,因为民房 A 的响应能量大于土坯结构响应能量的破坏阈值。因此,民房 A 受到了爆破振动的破坏。由此可知,响应能量判据分析的结果与实际爆破振动的监测结果相符合,响应能量判据比速度-频率判据更能反映爆破振动对受控建(构)筑物的响应程度。(2)在本次爆破振动中,民房 B、民房 C、公房和办公楼、厂房均未受到爆破振动的破坏,说明民房 B、民房 C、公房和办公楼、厂房的响应能量均小于相应结构类型(土坯、砖石、砖混和框架)响应能量的破坏阈值。因此,这 5 幢建

表 2 受控建筑物的动态响应特性参数

Table 2 Parameters of dynamic response property for the controlled structures

受控建筑物	结构类型	层数	$\omega_0/\text{Hz}$	阻尼比
民房 A	土坯	1	9.5	0.035
民房 B	土坯	1	8.0	0.041
民房 C	砖石	2	6.0	0.044
公房	砖混	2	4.5	0.046
办公楼	砖混	3	4.0	0.045
厂房	框架	1	3.5	0.050

筑物都没受到爆破振动的破坏。(3)由表3的计算结果可知,厂房(框架结构)的响应能量 $2.21 \times 10^{-1} (\text{cm/s})^2$ 大于公房和办公楼(砖混结构)的响应能量(分别为 $5.37 \times 10^{-2}$ 、 $1.34 \times 10^{-1} (\text{cm/s})^2$ ),公房和办公楼(砖混结构)的响应能量大于民房C(砖石结构)的响应能量( $3.99 \times 10^{-2} (\text{cm/s})^2$ ),民房C(砖石结构)的响应能量大于民房B(土坯结构)的响应能量( $2.11 \times 10^{-2} (\text{cm/s})^2$ )。在结构体没有被爆破振动破坏的前提下,结构体承受的响应能量越大,其抗震性能越强。在实际的建筑物中,框架结构和砖混结构的抗震能力均大于砖石结构和土坯结构。因此,响应能量分析结果与工程实际情况是相符合的。

表3 受控建筑物的频带能量、频带响应系数和响应能量

Table 3 Frequency band energy, frequency response coefficient and response energy of the controlled structures

$f/\text{Hz}$	民房 A		民房 B		民房 C	
	$E_i/(\text{cm/s})^2$	$\epsilon_i$	$E_i/(\text{cm/s})^2$	$\epsilon_i$	$E_i/(\text{cm/s})^2$	$\epsilon_i$
0~7.812 5	$3.25 \times 10^{-3}$	1.76	$4.76 \times 10^{-3}$	2.13	$1.03 \times 10^{-2}$	3.43
7.812 5~15.625	$2.31 \times 10^{-2}$	3.49	$3.82 \times 10^{-3}$	2.05	$2.92 \times 10^{-3}$	$4.67 \times 10^{-1}$
15.625~31.25	$2.52 \times 10^{-4}$	$2.37 \times 10^{-1}$	$1.79 \times 10^{-2}$	$1.55 \times 10^{-1}$	$4.02 \times 10^{-2}$	$8.07 \times 10^{-2}$
31.25~62.5	$1.83 \times 10^{-4}$	$4.89 \times 10^{-2}$	$8.79 \times 10^{-3}$	$3.41 \times 10^{-2}$	$2.94 \times 10^{-3}$	$1.88 \times 10^{-2}$
62.5~125	$1.09 \times 10^{-4}$	$1.17 \times 10^{-2}$	$4.29 \times 10^{-3}$	$8.27 \times 10^{-3}$	$5.69 \times 10^{-4}$	$4.63 \times 10^{-3}$
125~250	$1.64 \times 10^{-5}$	$2.90 \times 10^{-3}$	$4.01 \times 10^{-3}$	$2.05 \times 10^{-3}$	$3.49 \times 10^{-4}$	$1.15 \times 10^{-3}$
250~500	$1.91 \times 10^{-6}$	$7.23 \times 10^{-4}$	$4.06 \times 10^{-4}$	$5.12 \times 10^{-4}$	$2.40 \times 10^{-5}$	$2.88 \times 10^{-4}$
500~1 000	$2.67 \times 10^{-7}$	$1.81 \times 10^{-4}$	$7.91 \times 10^{-4}$	$1.28 \times 10^{-4}$	$2.19 \times 10^{-5}$	$7.20 \times 10^{-5}$
$E_R/(\text{cm/s})^2$	$8.66 \times 10^{-2}$		$2.11 \times 10^{-2}$		$3.99 \times 10^{-2}$	
$f/\text{Hz}$	公房		办公楼		厂房	
	$E_i/(\text{cm/s})^2$	$\epsilon_i$	$E_i/(\text{cm/s})^2$	$\epsilon_i$	$E_i/(\text{cm/s})^2$	$\epsilon_i$
0~7.812 5	$2.15 \times 10^{-2}$	2.31	$6.20 \times 10^{-2}$	2.01	$1.78 \times 10^{-1}$	1.13
7.812 5~15.625	$1.53 \times 10^{-2}$	$2.07 \times 10^{-1}$	$3.91 \times 10^{-2}$	$1.55 \times 10^{-1}$	$1.27 \times 10^{-1}$	$1.14 \times 10^{-1}$
15.625~31.25	$1.83 \times 10^{-2}$	$4.36 \times 10^{-2}$	$7.95 \times 10^{-2}$	$3.41 \times 10^{-2}$	$1.13 \times 10^{-1}$	$2.58 \times 10^{-2}$
31.25~62.5	$7.52 \times 10^{-3}$	$1.05 \times 10^{-2}$	$4.75 \times 10^{-2}$	$8.27 \times 10^{-3}$	$2.17 \times 10^{-1}$	$6.32 \times 10^{-3}$
62.5~125	$6.47 \times 10^{-3}$	$2.60 \times 10^{-3}$	$2.80 \times 10^{-2}$	$2.05 \times 10^{-3}$	$8.12 \times 10^{-2}$	$1.57 \times 10^{-3}$
125~250	$2.75 \times 10^{-4}$	$6.49 \times 10^{-4}$	$4.30 \times 10^{-2}$	$5.12 \times 10^{-4}$	$1.52 \times 10^{-2}$	$3.92 \times 10^{-4}$
250~500	$3.62 \times 10^{-5}$	$1.62 \times 10^{-4}$	$3.76 \times 10^{-4}$	$1.28 \times 10^{-4}$	$2.96 \times 10^{-3}$	$9.80 \times 10^{-5}$
500~1000	$5.58 \times 10^{-5}$	$4.05 \times 10^{-5}$	$8.05 \times 10^{-5}$	$3.20 \times 10^{-5}$	$1.69 \times 10^{-3}$	$2.45 \times 10^{-5}$
$E_R/(\text{cm/s})^2$	$5.37 \times 10^{-2}$		$1.34 \times 10^{-1}$		$2.21 \times 10^{-1}$	

## 5 结 论

基于爆破振动信号不同频带的能量分布和受控结构体对爆破振动动态响应特征,探索建立了能考虑振动的强度、频率和持续时间以及受控结构体对爆破振动动态响应特性等多因素综合的安全判据——响应能量判据。并通过工程实例对响应能量判据进行了验证,得出的主要结论如下:(1)我国现行的《爆破安全规程》虽然充分考虑了振动频率对受控建(构)筑物的影响,但忽视了振动持时以及受控建(构)筑物本身的固有特性(固有频率和阻尼比)对爆破振动效应的影响。因而,现行的速度-频率判据存在不完善的地方。(2)基于小波分析的响应能量判据能同时反映爆破振动的强度、频率和持续时间以及受控建(构)筑物固有振动响应特性等因素的综合影响,能准确地描述爆破振动对建(构)筑物的影响程度。因此,响应能量判据比现行的速度-频率安全判据更加科学和合理。但各种结构类型建(构)筑物响应能量的破坏阈值,尚需通过大量爆破振动实测数据加以确定。(3)爆破振动安全响应能量判据的建立需要大量的、各行业爆破振动实测资料支持。本文所做的研究工作可为最终构建完整的、科学的爆破振动多因素综合安全判据奠定理论和技术基础。

## 参考文献:

- [1] 阳生权,廖先葵,刘宝琛. 爆破地震安全判据几个问题的探讨[J]. 矿冶工程,2001,21(3):24-27.  
YANG Sheng-quan, LIAO Xian-kui, LIU Bao-chen. Toward some problems of safety criteria of blasting vibration [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2001,21(3):24-27.
- [2] 李仲奎,王爱民,李送成. 某地下厂房施工过程中突发性破坏的分析及对策[J]. 岩土工程学报,1997,19(5):74-79.  
LI Zhong-kui, WANG Ai-min, LI Song-cheng. Analysis for a triggered collapse in construction of a underground

- powerhouse[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 1997,19(5):74-79.
- [3] 阳生权,廖先葵,刘宝琛.爆破地震安全判据的缺陷与改进[J].爆炸与冲击,2001,21(3):223-228.  
YANG Sheng-quan, LIAO Xian-kui, LIU Bao-chen. Default of the judging standard of blasting vibration safety abstract[J]. Explosion and Shock Waves, 2001,21(3):223-228.
- [4] 中国生,徐国元,熊正明.基于小波变换的爆破地震信号能量分析法的应用研究[J].爆炸与冲击,2006,26(3):222-227.  
ZHONG Guo-sheng, XU Guo-yuan, XIONG Zheng-ming. Application research of the energy analysis method for blasting seismic signals based on wavelet transform[J]. Explosion and Shock Waves, 2006,26(3):222-227.
- [5] Mallat S. A theory for multiresolution signal decomposition: The wavelet representation[J]. IEEE Transactions Pattern Anal Machine Intell, 1989,11(7):674-693.
- [6] 俞载道.结构动力学基础[M].上海:同济大学出版社,1987.
- [7] Dowding C H. Construction vibration[M]. Prentice Hall, 1996.
- [8] 邹云屏,李潇.信号变换与处理[M].武汉:华中理工大学出版社,1993.
- [9] 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,1999.
- [10] 中国生.基于小波变换爆破振动的应用基础研究[D].长沙:中南大学,2006.
- [11] 吴立,陈建平,舒家华.论爆破地震效应[J].爆破器材,1999,28(5):24-27.  
WU Li, CHEN Jian-ping, SHU Jia-hua. Seismic effect by blasting[J]. Explosive Materials, 1999,28(5):24-27.
- [12] GB6722-2003,爆破安全规程[S].

## Safety assessment of structures by blasting vibration based on wavelet analysis

ZHONG Guo-sheng<sup>1,2,\*</sup>, FANG Ying-guang<sup>1</sup>, GU Ren-guo<sup>1</sup>, ZHAO Kui<sup>2</sup>

(1. School of Civil & Transportation, South China University of Technology,  
Guangzhou 510641, China;

2. School of Resources & Environmental Engineering, Jiangxi University of Science  
and Technology, Ganzhou 341000, China)

**Abstract:** According to the existing blasting vibration live data, the different-frequency-band energy distribution of the blasting vibration signals was attained by the wavelet analysis technology. Based on the characteristics of dynamic response from the controlled structures by blasting vibration, a multi-factor blasting vibration safety criterion was proposed, also called the response energy criterion, in which taking the total influence of the intensity, frequency and duration of vibration and the characteristics (natural frequency and damping ratio) of dynamic response from the controlled structures themselves into account. The feasibility of the proposed criterion was validated by the engineering examples. Results show that this response energy criterion can describe accurately the effect degree of blasting vibration on the controlled structures, and that it can reflect the essence of blasting vibration damage to the structures more comprehensively than the actual velocity-frequency safety criterion.

**Key words:** mechanics of explosion; safety criterion; wavelet transform; blasting vibration; natural frequency; damping ratio; response energy

\* Corresponding author: ZHONG Guo-sheng  
Telephone: 86-20-87114038

E-mail address: zgs1001@163.com