

文章编号:0253-9993(2013)02-0209-06

# 煤矿岩巷毫秒延期爆破振动测试与控制技术研究

韩 博,马芹永

(安徽理工大学 矿山地下工程教育部工程研究中心,安徽 淮南 232001)

**摘 要:**为了提高煤矿硬岩巷道掘进爆破效果、降低爆破振动效应,对毫秒延期爆破参数进行优化及实施,实测爆破振动速度。分析了爆破参数与爆破振动信号特征之间的关联性,针对电雷管存在延期误差,应用小波变换时-能密度法识别确定毫秒爆破中实际延期时间,提出了降低爆破振动效应的技术措施。研究表明:采用合理的毫秒延期爆破参数方案,可以取得良好的爆破效果;垂直方向爆破质点峰值振速可以作为煤矿岩巷的安全判据;时-能密度法能够有效地识别出各段雷管的起爆时刻,确定实际延期时间。

**关键词:**毫秒延期爆破;振动效应;振动监测;延期时间;时-能密度分析法

中图分类号:TD235.4 文献标志码:A

## Research on testing and controlling techniques of millisecond delay blasting vibration in coal mine rock roadway

HAN Bo, MA Qin-yong

(Engineering Research Center of Mining Underground Engineering, Ministry of Education, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

**Abstract:** In order to improve the blasting effect and reduce the blasting vibration in hard rock roadway, the millisecond delay blasting parameters were optimized and implemented, and the velocity of blasting vibration was measured. The correlation between blasting parameters and characteristics of blasting vibration signal was analyzed. For delay errors of electric detonators, the method of time-energy density analysis based on wavelet transform was adopted to identify the real delay time in millisecond blasting, and technical measures for reducing the blasting effect were put forward. The results show that a good blasting effect could be obtained by using reasonable millisecond delay blasting parameters, and the vertical peak particle velocity of blasting vibration can be taken as safety criterion for rock roadway. The method of time-energy density analysis can identify the blasting moment of detonators and ascertain the real delay time effectively.

**Key words:** millisecond delay blasting; vibration effect; vibration monitoring; delay time; method of time-energy density analysis

煤矿井下地质条件复杂、地应力高,岩石巷道掘进爆破产生的振动效应容易造成巷道周边岩体裂隙延伸、开裂和变形,围岩结构失稳甚至发生冒顶、坍塌破坏,严重影响巷道稳定性和生产安全。毫秒延期爆破是在爆破过程中,以毫秒时间间隔控制群药包起爆顺序的爆破技术。通过减小单段起爆最大药量,降低

爆破地震波的振动速度峰值;选取合理延期时间,弱化各段起爆产生的爆破振动子波间的叠加效应,实现对爆破振动效应的控制<sup>[1-3]</sup>。然而影响爆破振动效应的因素很多,尚无统一而精确的计算公式,爆破参数的选取主要依靠工程经验。刘泽等<sup>[4]</sup>在分析岩石爆破机理的基础上,得出影响硬岩巷道爆破效率的主

收稿日期:2012-10-15 责任编辑:许书阁

作者简介:韩 博(1985—),男,河北石家庄人,博士研究生。Tel:0554-6631528, E-mail:hanbo\_0427@163.com;通讯作者:马芹永(1964—),男,安徽宿州人,教授,博士生导师,博士。E-mail:qyma@aust.edu.cn

要因素,并对硬岩条件下的巷道爆破参数进行优化设计并用于工程实践。赵明生等<sup>[5]</sup>将实测单段信号进行不同延期间隔叠加,利用 AOK 时频分布与小波分析相结合的方法研究段数对爆破振动信号时频特性的影响。

在毫秒延期爆破的设计与施工中,均采用雷管的标称延期时间。常规毫秒延期电雷管依靠化学延期药剂的反应实现延期功能<sup>[6]</sup>,其延期时间存在正负误差,缺乏稳定性,导致实际延期时间得不到准确控制,无法满足复杂环境下精细爆破技术的要求<sup>[7]</sup>。凌同华等<sup>[8]</sup>利用基于小波变换的模极大值法确定了毫秒爆破中所用雷管的实际延期时间;张义平等<sup>[9]</sup>提出了基于信号局部特征分析的爆破延时的 EMD 识别法。通过对毫秒爆破实际延期时间的识别确定,评价雷管延期误差及起爆网络的可靠性,分析研究其对爆破效果和振动效应的作用及影响。

本文以煤矿井底车场硬岩巷道掘进爆破为例,对毫秒延期爆破参数进行设计及实施,取得了较好的爆破效果;进行爆破振动现场监测,探讨爆破参数和爆破振动信号特征的相关性;运用基于小波变换的时-能密度法识别确定毫秒爆破中实际延期时间;提出降低爆破振动效应的技术措施。对进一步改善爆破效果、降低爆破振动效应具有重要的现实意义,为系统地进行爆破参数优化提供理论和技术基础。

## 1 毫秒延期爆破施工与监测

### 1.1 工程概况

朱集西煤矿-962 m 水平井底车场副井进车线巷道设计长度 172.42 m,为矿井永久服务巷道。自副井马头门混凝土浇筑停头位置(距离副井中心线 24.784 m)向前继续施工,0.3% 上坡施工副井进车线变断面 13.761 m,无坡度施工 84.847 m;0.2% 上坡施工副井进车线 73.812 m。永久腰线距离轨面 1 200 mm。巷道设计为半圆拱直墙断面,净宽 5 800 mm,净高 4 900 mm,净断面积 24.804 m<sup>2</sup>;掘进宽 5 980 mm,掘进高 4 990 mm,掘进面积 25.996 m<sup>2</sup>。具体环境如图 1 所示。

采用锚网喷支护,喷射混凝土厚度 90 mm,混凝土强度等级 C20。岩层主要为细砂岩(K3 砂岩),呈浅灰白色,成分以石英为主,次为长石。坚固性系数  $f = 8 \sim 12$ ,实测岩石的物理力学性能见表 1。水文地质条件相对简单,主要充水水源为砂岩裂隙水,以静储量为主,水量一般为 0~1.6 m<sup>3</sup>/h。

根据现用爆破方案进行施工,存在炮眼利用率低( $\eta = 75\%$ )、巷道超挖、成型不好等问题,单纯增加炮

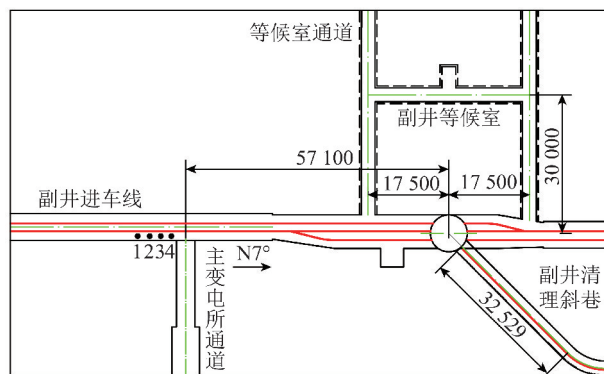


图 1 巷道现场环境

Fig. 1 The circumstance in roadway field

1,2,3,4—测点

眼深度或装药量后,整体效果无明显改善,却延长了钻眼时间、影响正规循环,增大了雷管和炸药的消耗量以及对围岩的振动损伤。因此,对原爆破方案进行优化,提高巷道掘进速度、保证巷道施工质量具有现实意义。

表 1 岩石的物理力学性能

Table 1 Physical and mechanical properties of rock

密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	单轴抗压 强度/MPa	抗拉强 度/MPa	弹性模 量/GPa	泊松比
2 498	111.323	3.370	28.105	0.268

### 1.2 爆破方案优化

充分利用现有装备条件,采用 YT-28 型凿岩机,配长度 2.2,2.6 m 的钻杆及  $\phi 32$  mm 的一字型钻头。三级煤矿许用岩石水胶炸药:药卷  $\phi 27$  mm,长 430 mm,重 310 g,密度 0.95~1.25 g/cm<sup>3</sup>,殉爆距离大于 20 mm,爆速大于 2 500 m/s,猛度大于 10 mm。根据《爆破安全规程》(GB6722-2003)<sup>[10]</sup>和现场实际情况,选用 1~4 段毫秒延期电雷管。

爆破方案的优化主要体现在掏槽眼、周边眼爆破参数以及起爆药量控制方面。将原有斜眼掏槽改为二阶不等深微差楔形掏槽方式,如图 2 所示。中间炮眼为直眼,比掏槽眼深 300 mm,装 2 卷炸药,其余长度用水炮泥和黏土炮泥封堵,起爆雷管为 2 段。此方法可以保证在掏槽眼先爆基础上,进一步将槽腔底部破碎的残岩抛出,增加掏槽的有效深度。较原方案改进周边眼爆破参数,实施光面爆破,保证巷道成型规整,减少围岩的位移、松动和破坏。崩落眼均匀布置于掏槽眼和周边眼之间。减少一次爆破总药量,并且使各段起爆药量基本相同,从而降低爆破振动产生的危害。优化爆破参数见表 2。全断面分两次装药、连线和起爆,采用正向连续装药结构,串并联起爆网路,

FD200Z 煤矿用电容式发爆器,起爆顺序为:掏槽眼—辅助掏槽眼—崩落眼—周边眼。

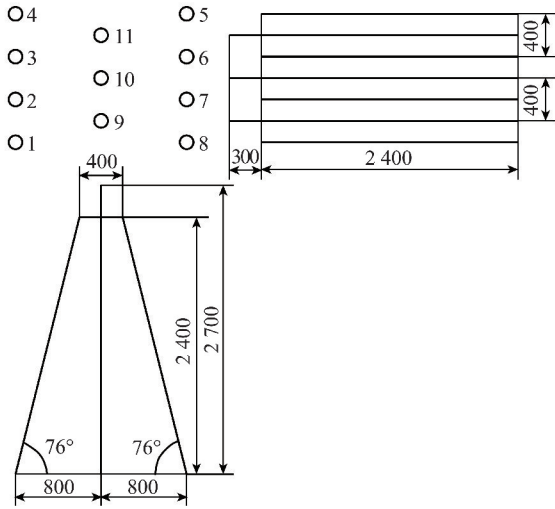


图 2 掏槽方式  
Fig. 2 Cutting mode

### 1.3 爆破振动监测

由图 1 可见,副井进车线巷道掘进工作面临近副井井筒和马头门,周边有已成巷的副井等候室及通道,与其垂直的主变电所通道也在同期施工。由于井巷结构较多而且爆破作业频繁,故控制掘进爆破产生的振动效应显得尤为重要。为确保井底车场及其硐室所处围岩与支护结构的稳定安全,需进行现场爆破振动监测,得到实际施工条件下的爆破地震波的振幅特性,采取降低爆破振动效应的措施,在保证施工进度度的同时确保井巷结构的安全<sup>[11-12]</sup>。

采用四川拓普测控科技有限公司研制的 UBOX-5016 爆破振动智能监测仪及配套的 TP3V-4.5 三维速度传感器,对副井进车线巷道全断面分次(上下部)爆破时不同距离处的振动进行监测。根据沿线布点原则,以爆源为中心,将测点在已开挖支护巷道紧贴侧壁的底板基岩上布置成一条测线,且处于岩性相同、标高一致的区段,如图 1 所示。测振前,需将测

表 2 爆破参数优化

Table 2 The optimization of blasting parameters

炮眼名称	眼数/个		眼深/mm	眼间距/mm	炮眼角度/(°)	炸药/卷	药量/kg		起爆顺序
	拱部	墙部					拱部	墙部	
掏槽眼	8		2 400	400	76(向内)	4	9.92		I
辅助掏槽眼	3		2 700	400	90	2	1.86		II
崩落眼	16	18	2 200	600	90	3	14.88	16.74	II
崩落眼	14	16	2 200	600	90	3	13.02	14.88	III
周边眼	21	22	2 200	350	87(向外)	2	13.02	13.64	IV

点表面清理干净,用黄油或石膏固定好传感器,并将传感器上的箭头指向爆心。做好测试仪器的防护,避免被爆破飞石砸坏。以质点振动速度作为衡量爆破振动强度的标准,同一测点采集水平纵向、水平横向和垂直方向 3 个速度分量。信号数据的传输与提取通过仪器自带的 BM View 软件实现。两次爆破的使用总药量和单段最大起爆药量均不同,爆破参数和监测参量见表 3,其中 x1 测点未监测到数据。典型实测爆破振动速度时程曲线如图 3 所示。在爆破振动测试中,采集参数设置了负延时,长度为-25.6 ms,用于记录触发前的数据,可以使速度时程曲线更加完整,避免触发时刻信息丢失。

## 2 爆破效果及振动测试结果分析

### 2.1 爆破效果

根据巷道断面、岩石性质以及钻爆器材等因素,设计了较为合理的毫秒延期爆破参数方案。现场实

施结果表明,采用二阶不等深微差楔形掏槽方案,有利于克服岩石的夹制作用,顺利形成槽腔,增加掏槽的有效深度,为崩落眼创造自由面及岩石碎胀空间,爆破后掘进工作面基本在同一平面,炮眼利用率提高到 90%;光面爆破后巷道围岩壁面光滑、平整,有效地控制了超、欠挖,提高施工质量;爆堆较为集中,岩石块度均匀,大块率低,无爆破根底出现,巷道开挖达到设计要求。同时,爆区周围岩体、支护结构及设施均未受到损坏。

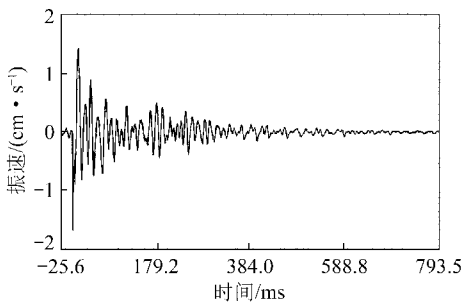
### 2.2 爆破参数和振动信号特征的相关性

根据表 3 和图 3,可以得出:在监测区域(测点距爆心 60~65 m)内,巷道底板质点振动从开始到基本稳定所持续的时间在 400 ms 左右;振动全过程包括初振相、主振相和余振相 3 个作用阶段;爆破参数和爆破振动信号特征之间存在一定的关联。① 质点振动速度峰值变化趋势与各段起爆药量具有相关性:最大段药量越大,质点振速峰值越大,且两者呈对应

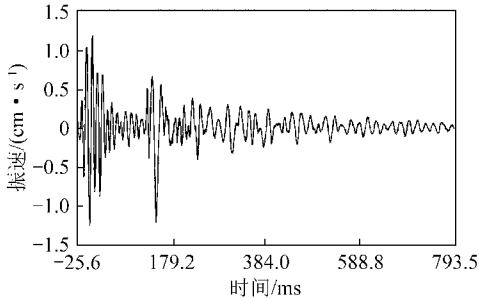
表 3 爆破振动测试点的爆破参数和监测参量

Table 3 Blasting parameters and monitoring parameters at measuring points for blasting vibration

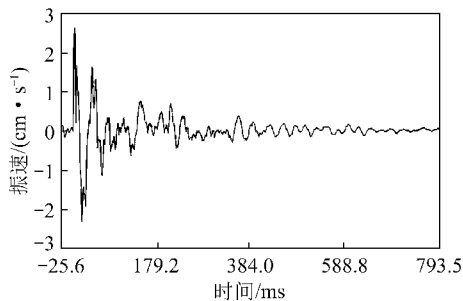
测点编号	爆破类型	爆心距/m	最大段药量/kg	总药量/kg	雷管段数(毫秒延期)	峰值振动速度/(cm·s <sup>-1</sup> )		
						水平纵向	水平横向	垂直方向
s1	拱部	61.29	16.74	51.77	1,2,3,4	1.846	2.397	6.835
s2		62.29				1.132	1.397	2.503
s3		63.29				1.203	1.465	2.623
s4		64.29				1.505	1.269	2.609
x1	墙部	61.39	18.60	57.04	1,2,3,4	1.487	1.334	3.974
x2		62.39				2.296	1.153	3.205
x3		63.39				1.681	1.482	2.969
x4		64.39				1.681	1.482	2.969



(a) 水平纵向(x4)



(b) 水平横向(s4)



(c) 垂直方向(s3)

图 3 实测爆破振动速度时程曲线

Fig. 3 The velocity-time curves of measured blasting vibration signals

关系,即最大段药量起爆后产生的地震波的峰值最大。② 质点振速极值对应时间与各分段雷管起爆时间具有相关性:各段别雷管起爆间隔为 25 ms,实测爆破振动速度时程曲线中的波峰间隔与之几乎相等,本文采用小波分析时-能密度法对爆破振动信号进

行局部特征分析,识别和提取出各分段实际延期时间。③ 在岩巷底板布点测试:质点垂直方向振动速度大于水平方向振动速度,纵向及横向水平振速分别为垂直振速的 27.0% ~ 71.6% 和 33.6% ~ 55.9%,垂直速度分量对爆破振动起控制作用。

### 3 基于小波变换的时-能密度法分析毫秒爆破延期时间

#### 3.1 延期时间的识别原理

在煤矿岩巷毫秒延期爆破中,每一段别雷管的起爆就是一次能量的突然加载,表现为爆破振动信号在时程曲线上的一次突变<sup>[9]</sup>。因此,可以采用小波变换时-能密度法,选取适当的积分上、下限,计算爆破振动信号在主频带内的能量密度,得出其时-能密度图,分析突峰位置信息识别发生突变时刻,得到各段别雷管的起爆时刻,从而确定实际的延期时间。

#### 3.2 小波变换时-能密度分析法

根据内积定理(Moyal 定理)<sup>[13]</sup>,将式  $f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{R^+} \int_R \frac{1}{a^2} W_f(a, b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db$  (连续小波变换的逆变换)两边平方,有:

$$\frac{1}{C_\psi} \int_R \frac{da}{a^2} \int_R |W_f(a, b)|^2 db = \int_R |f(t)|^2 dt \quad (1)$$

式(1)表明,小波变换幅度平方的积分同被分析信号的能量成正比<sup>[14-15]</sup>。可以将  $|W_f(a, b)|^2/a^2 C_\psi$  看作  $(a, b)$  平面上的能量密度函数,将  $|W_f(a, b)|^2 \Delta a \Delta b/a^2 C_\psi$  看作以尺度  $a$  和时间  $b$  为中心的、尺度间隔为  $\Delta a$ 、时间间隔为  $\Delta b$  的能量。根据能量密度的概念,式(1)<sup>[16]</sup>可以改写成:

$$\int_R |f(t)|^2 dt = \int_R E(b) db \quad (2)$$

式中

$$E(b) = \frac{1}{C_{\psi}} \int_R \frac{1}{a^2} |W_f(a, b)|^2 da \quad (3)$$

由于小波变换中尺度  $a$  在一定意义上对应于频率( $\omega$ ),因此式(3)给出了信号所有频带的能量随时间  $b$  的分布情况,称为时-能密度函数。

### 3.3 毫秒爆破实际延期时间的确定

#### 3.3.1 小波基的选择及小波变换尺度的确定

为提高时间分辨率,更加准确地确定毫秒爆破中每一段别雷管起爆的时间点,对信号进行时-能密度分析时关键是要选择好小波基函数以及尺度范围<sup>[17]</sup>。小波基的选择与被分析信号的性质、特征密切相关<sup>[18]</sup>,尺度的确定主要取决于爆破振动监测仪的最小工作频率及所监测信号的主频带。根据上述原则及本文中爆破振动信号的特点,选用 db5 作为小波基函数,并取尺度下限为 1,上限为 20。

#### 3.3.2 实际延期时间的确定

以图 3 中垂直方向的 s3 信号为例进行时-能密度分析,得到时-能密度曲线如图 4 所示。从图 4 可以清晰地分辨出曲线中出现了 4 组突峰,表明该爆破振动信号是由 4 次毫秒延期起爆产生的振子波叠加而成,与爆破试验中使用了 4 段别雷管对应一致。突峰出现的时刻分别为 3.4, 26.0, 43.8, 82.2 ms,即各段雷管的起爆时刻,则实际延期时间分别为 22.6, 17.8 和 38.4 ms。

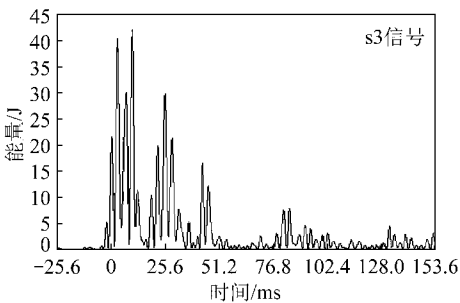


图 4 爆破振动信号的时-能密度曲线

Fig. 4 Time-energy density curve of blasting vibration signal

实际延期时间与设计延期时间的偏差,对实现爆破预期起着至关重要的作用。通过比较可知本次爆破试验中雷管的实际延期时间均处在设计的延期时间范围内,属正常引爆,性能可靠,可以满足毫秒延期爆破参数设计的要求,实现预期的爆破效果以及降低振动效应。

## 4 爆破振动效应控制措施

### (1) 控制最大起爆药量。

严格控制单段起爆药量和一次起爆总药量。将安全最大段起爆药量  $Q_{\max}$ , 作为爆破施工中使用的最

大起爆药量。对于大断面硬岩巷道,若全断面起爆的设计药量大于安全允许药量,在没有其他降振措施时,应减小一次爆破规模,采用分台阶分部掘进,从而控制单段起爆药量和总药量,将爆破振动效应控制在较低水平。

### (2) 控制爆破延时间隔。

对于大断面硬岩巷道,一次爆破炮眼数量较多,应尽可能分多段顺序起爆。在总药量及其他条件相同的情况下,段数越多、单段起爆药量越小,振动效应降低越明显。考虑煤矿井下岩巷存在瓦斯,为确保爆破施工安全,最后一段雷管延时不应超过 130 ms,宜选用 1~5 段毫秒延期电雷管。

### (3) 爆破振动监测。

爆破施工过程中的振动监测对爆破参数的设计优化非常重要。通过现场监测,找出爆破振动传播及衰减的规律特点,调整爆破方案控制振动效应,制定降振技术措施。当岩石性质、爆破方案改变时,应及时监测爆破振动强度的变化。

## 5 结 论

(1) 现场应用表明,采用优化的毫秒延期爆破设计方案,具有爆破整体效果好、爆破振动效应小、爆破安全性高以及提高采装效率等特点。

(2) 针对煤矿硬岩巷道爆破振动对井底车场围岩及硐室结构稳定性的危害问题,根据现场实际情况布设爆破振动监测点,制定监测方法并进行实测。分析表明,质点振动速度峰值及时刻与各段起爆的药量和延时具有相关性,垂直速度分量对爆破振动起控制作用,采用综合降振技术措施可以有效地控制爆破振动效应。

(3) 基于小波变换的时-能密度法,能够根据实测的爆破振动信号,有效识别毫秒延期爆破中各段雷管的起爆时刻,进而确定实际延期时间。对于设计优化爆破方案、降低爆破振动效应、深入研究爆破机理具有重要意义。

## 参考文献:

- [1] 史秀志,陈寿如. 爆破振动信号时频特征的微差时间效应[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版),2008,23(3):10-13.  
Shi Xiuzhi, Chen Shouru. Delay time interval effect for the time-frequency characteristic of blast vibration signal[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2008, 23(3): 10-13.
- [2] 赵明生,张建华,易长平. 基于单段波形叠加的爆破振动信号时频分析[J]. 煤炭学报,2010,35(8):1279-1282.  
Zhao Mingsheng, Zhang Jianhua, Yi Changping. Time-frequency

- analysis based on single-stage addition of waveforms of blasting vibration signals[J]. Journal of China Coal Society, 2010, 35(8): 1279-1282.
- [3] 娄建武, 龙源, 卢云. 毫秒延时爆破段延时间隔效果研究[J]. 爆破器材, 2006, 35(1): 26-29.  
Lou Jianwu, Long Yuan, Lu Yun. Study on the intervals of millisecond delay blasting[J]. Explosive Materials, 2006, 35(1): 26-29.
- [4] 刘泽, 朱川曲, 谢东海, 等. 小断面硬岩巷道爆破参数优化设计与实践[J]. 采矿与安全工程学报, 2007, 24(1): 55-61.  
Liu Ze, Zhu Chuanqu, Xie Donghai, et al. Optimized design and practice of blasting parameters for hard rock roadway with small cross-section[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2007, 24(1): 55-61.
- [5] 赵明生, 梁开水, 余德运, 等. 段数对爆破振动信号的时频特性影响分析[J]. 煤炭学报, 2012, 37(1): 55-61.  
Zhao Mingsheng, Liang Kaishui, Yu Deyun, et al. Effect of segments on time frequency characteristics of blasting vibration signals[J]. Journal of China Coal Society, 2012, 37(1): 55-61.
- [6] 马芹永. 冻土爆破性与可钻性试验及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 176-178.  
Ma Qinyong. Test of blastability and drillability of frozen soil and its application[M]. Beijing: Science Press, 2007: 176-178.
- [7] 高文学, 杨军, 肖鹏飞, 等. 基于精确延期的深孔控制爆破技术[J]. 煤炭学报, 2011, 36(S2): 386-390.  
Gao Wenxue, Yang Jun, Xiao Pengfei, et al. Deep-hole controlled blasting technology based on precise time delay[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(S2): 386-390.
- [8] 凌同华, 李夕兵. 用小波变换识别微差爆破中的实际延迟时间[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2004, 19(2): 21-23.  
Ling Tonghua, Li Xibing. Using wavelet transform to identify practical time of delay in millisecond blasting[J]. Journal of Hunan University of Science & Technology(Natural Science Edition), 2004, 19(2): 21-23.
- [9] 张义平, 李夕兵, 赵国彦. 爆破微差延时的 EMD 识别法[J]. 地下空间与工程学报, 2006, 2(3): 488-490.  
Zhang Yiping, Li Xibing, Zhao Guoyan. The method of using EMD to identify time of delay in millisecond blasting[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2006, 2(3): 488-490.
- [10] GB6722-2003, 爆破安全规程[S]. 2004.  
GB6722-2003, Safety regulations for blasting[S]. 2004.
- [11] 马芹永, 王长柏, 徐辉东, 等. 立井人工冻结巨厚砾岩层爆破快速掘进技术[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(8): 1-3.  
Ma Qinyong, Wang Changbo, Xu Huidong, et al. Blasting rapid excavation technology for freezing thick gravel stratum of mine shaft[J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(8): 1-3.
- [12] 宗琦, 汪海波, 周胜兵. 爆破地震效应的监测和控制技术研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(5): 938-945.  
Zong Qi, Wang Haibo, Zhou Shengbing. Research on monitoring and controlling techniques considering effects of seismic shock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(5): 938-945.
- [13] Dhakal R P, Pan T C. Response characteristics of structures subjected to blasting-induced ground motion[J]. International Journal of Impact Engineering, 2003, 28(8): 813-828.
- [14] Tabaru T, Shin S. Relation between spectrum density and wavelet transform of correlation function[J]. Trans. of SICE, 2003, 39(5): 425-431.
- [15] 凌同华, 李夕兵. 基于小波变换的时-能分布确定微差爆破的实际延迟时间[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(13): 2266-2270.  
Ling Tonghua, Li Xibing. Time-energy analysis based on wavelet transform for identifying real delay time in millisecond blasting[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(13): 2266-2270.
- [16] 于德介, 程军圣. 基于小波变换的时-能密度分析[J]. 振动工程学报, 2001, 14(1): 109-112.  
Yu Dejie, Cheng Junsheng. Time-energy density analysis based on wavelet transform[J]. Journal of Vibration Engineering, 2001, 14(1): 109-112.
- [17] 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: 66-70.  
Li Xibing, Ling Tonghua, Zhang Yiping. Analysis of blast vibration signals-theories and methods[M]. Beijing: Science Press, 2009: 66-70.
- [18] 何岭松. 小波函数性质及其对小波分析结果的影响[J]. 振动工程学报, 2000, 13(1): 143-146.  
He Lingsong. Characters of wavelet and its affection to the result of wavelet transform[J]. Journal of Vibration Engineering, 2000, 13(1): 143-146.