

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2015.06.003

基于精确延时的基坑开挖爆破振动控制研究*

李顺波^① 杨 军^② 李长军^③

①中国矿业大学(北京)力学与建筑工程学院(北京,100083)

②北京理工大学爆炸科学与技术国家重点实验室(北京,100081)

③融硅思创(北京)科技有限公司(北京,100144)

[摘 要] 为了控制精确延时爆破时的爆破振动,基于弹性本波理论给出了合理的毫秒延时间隔时间计算公式,并结合基坑开挖工程,对现场实测信号进行分析。结果表明:孔内毫秒延时间隔为 4 ms 和孔间毫秒延时间隔为 12 ms 时的瞬时能量较小,利于爆破振动控制。短毫秒延时间隔能够实现爆破地震波能量大幅减小,并能优化爆破振动能量分布范围,趋向于高频方向发展。

[关键词] 爆破振动;基坑开挖;电子雷管;精确延时

[分类号] TD235.37;O382+.2

引言

爆破振动是工程爆破中主要防范的危害。一定强度的爆破振动,会引起爆区周围建筑物的损伤甚至倒塌、民用及工业构筑物出现裂缝、露天边坡滑动以及地下巷道冒落等各种破坏现象,造成额外的经济损失。爆破地震波本身具有瞬时性、复杂性以及爆破介质和赋存条件的多变性等特点,从而导致爆破地震的复杂性。为了有效地降低爆破振动,毫秒延期爆破技术是经常使用的手段,特别是数码电子雷管的应用,使得通过改变毫秒延时间隔来降低爆破振动更加地便捷。

方桂富等^[1]采用导爆管雷管和电子雷管进行延时分段爆破,并进行了现场爆破试验振动监测对比。通过对比分析显示了电子雷管在降低爆破振动与提高爆破效率等方面的优势。邢光武等^[2]进行了精确延时干扰减震爆破网路的试验研究,认为随着电子雷管生产成本的降低和应用的普及,精确延时干扰减震爆破的起爆网路将会越来越简单可靠。高文学等^[3]指出在复杂环境下深孔爆破基础开挖工程中,使用高精度电子雷管精确延时技术能成功地控制爆破地震效应。

国外的毫秒延时爆破技术开始于 1940 年代,随后进行了一系列的研究和现场实践,认为爆破振动幅值的大小取决于两炮孔之间的延时间隔^[4]。Aldas^[5]利用高速摄影对土耳其的 Demir Export Kangal 露天煤矿的延期时间进行了研究,得出了此

煤矿的最佳延期间隔时间为 120 ms。最近几年开始了对精确延时的研究^[6-9],并在工程实践中取得良好的效果。爆破在硬岩开挖中具有独特的优势,但是由于以往导爆管雷管延时精度误差较大,使得通过控制毫秒延时间隔来控制爆破振动效果较差。由于在复杂环境中的爆破工程对爆破振动具有严格的要求,本文从理论分析给出合理毫秒延时间隔时间的计算方法,同时结合相关工程实践,探讨了精确延时在控制爆破振动中的应用。

1 理论分析

炸药在岩石中爆炸之后,形成压碎区、塑性区和弹性区。在远离炸药周围岩体中,爆破波以弹性波的形式向外传播。假定岩石为弹性体,弹性介质在外力的作用下处于应变状态,积累了一定的弹性势能。弹性波传播的过程其实也是能量传递的过程,一般情况下,弹性体在各个方向的力作用下处于应变状态,其总的弹性势能 E_p 可以表示为:

$$E_p = \frac{1}{2}(\sigma_{xx}\varepsilon_{xx} + \sigma_{yy}\varepsilon_{yy} + \sigma_{zz}\varepsilon_{zz} + \tau_{yz}\varepsilon_{yz} + \tau_{zx}\varepsilon_{zx} + \tau_{xy}\varepsilon_{xy}) \quad (1)$$

式中: σ_{xx} 、 σ_{yy} 、 σ_{zz} 和 τ_{yz} 、 τ_{zx} 、 τ_{xy} 分别表示应力分量和剪切力分量; ε_{xx} 、 ε_{yy} 、 ε_{zz} 、 ε_{yz} 、 ε_{zx} 、 ε_{xy} 表示应变分量。

弹性介质处于运动状态时,应力分量和应变分量随时间的改变而改变,因而弹性势能也是时间的函数。在运动的某一瞬时,介质的机械能由弹性势能和动能组成,介质的动能密度为单位体积弹性介

* 收稿日期:2015-04-10

作者简介:李顺波(1985~),男,博士,博士后研究人员,主要从事岩石爆破理论研究。E-mail:lishunbo@126.com

质所具有的动能 E_K , ρ 为密度, u 为位移函数, t 为时间, 则有:

$$E_K = \frac{1}{2} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} \right)^2. \quad (2)$$

总的弹性介质机械能密度 E 为:

$$E = E_p + E_K. \quad (3)$$

设矢量 I 为单位时间内通过与传播方向垂直的单位面积的机械能, 将其定义为机械能的能流密度。

假定弹性体内的任意体积 Ω , S 为其表面积, 矢量场 I 的通量 $\oint_S I dS$ 是单位时间内经表面积 S 散失的能量, 此处 dS 为面积元矢量。

已知弹性介质机械能密度 E , 则在单位体积 Ω 介质中包含的总机械能 E_Ω 为:

$$E_\Omega = \iiint_\Omega E d\Omega. \quad (4)$$

根据能量守恒原理, 在单位时间内总机械能的减少量 $-\frac{\partial E_\Omega}{\partial t}$ 应等于通过其表面积的机械能流矢量, 即矢量 I 的通量:

$$\oint_S I dS = - \iiint_\Omega \frac{\partial E}{\partial t} d\Omega. \quad (5)$$

根据高斯公式, 将面积积分改写为体积分:

$$\iiint_\Omega \operatorname{div} I d\Omega = - \iiint_\Omega \frac{\partial E}{\partial t} d\Omega; \quad (6)$$

因为体积具有任意性, 式(6)可以表示为:

$$\operatorname{div} I + \frac{\partial E}{\partial t} = 0. \quad (7)$$

对式(3)计算时间偏导数得:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} = & \sigma_{xx} \frac{\partial \varepsilon_{xx}}{\partial t} + \sigma_{yy} \frac{\partial \varepsilon_{yy}}{\partial t} + \sigma_{zz} \frac{\partial \varepsilon_{zz}}{\partial t} + \tau_{yz} \frac{\partial \varepsilon_{yz}}{\partial t} + \\ & \tau_{zx} \frac{\partial \varepsilon_{zx}}{\partial t} + \tau_{xy} \frac{\partial \varepsilon_{xy}}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial t} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \end{aligned} \quad (8)$$

向量函数 $u = ui + vj + \omega k$, 其中: u, v, ω 为在 x, y, z 轴上的投影位移函数; i, j, k 为 x, y, z 方向的向量。所以:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial u}{\partial t} i + \frac{\partial v}{\partial t} j + \frac{\partial \omega}{\partial t} k. \quad (9)$$

根据弹性体运动平衡微分方程, 当体力为零时, 可以写成:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = & \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) i + \\ & \left(\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) j + \left(\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} \right) k. \end{aligned} \quad (10)$$

将式(9)和式(10)进行点乘运算, 可以得到:

$$\begin{aligned} \rho \frac{\partial u}{\partial t} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = & \left(\frac{\partial \sigma_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) \frac{\partial u}{\partial t} + \\ & \left(\frac{\partial \sigma_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) \frac{\partial v}{\partial t} + \left(\frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} \right) \frac{\partial \omega}{\partial t}. \end{aligned} \quad (11)$$

将式(11)带入式(8)最后可以化简为:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} = & \frac{\partial}{\partial x} \left(\sigma_{xx} \frac{\partial u}{\partial t} + \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial t} + \tau_{xz} \frac{\partial \omega}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial t} + \right. \\ & \left. \sigma_{yy} \frac{\partial v}{\partial t} + \tau_{yz} \frac{\partial \omega}{\partial t} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial t} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial t} + \sigma_{zz} \frac{\partial \omega}{\partial t} \right). \end{aligned} \quad (12)$$

由式(12), $\frac{\partial E}{\partial t}$ 表示某一矢量 J 的散度, 即:

$$\frac{\partial E}{\partial t} = \operatorname{div} J; \quad (13)$$

$$\begin{aligned} J = & \left(\sigma_{xx} \frac{\partial u}{\partial t} + \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial t} + \tau_{xz} \frac{\partial \omega}{\partial t} \right) i + \\ & \left(\tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial t} + \sigma_{yy} \frac{\partial v}{\partial t} + \tau_{yz} \frac{\partial \omega}{\partial t} \right) j + \left(\tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial t} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial t} + \sigma_{zz} \frac{\partial \omega}{\partial t} \right) k. \end{aligned} \quad (14)$$

根据式(5)可知, 能流密度 I 与矢量 $-J$ 只差一个常数, 根据规范不变性条件, 可以取 $I = -J$ 。所以能流密度可以用应力张量和位移分量的时间导数来表示:

$$\begin{cases} I_x = - \left(\sigma_{xx} \frac{\partial u}{\partial t} + \tau_{xy} \frac{\partial v}{\partial t} + \tau_{xz} \frac{\partial \omega}{\partial t} \right); \\ I_y = - \left(\tau_{yx} \frac{\partial u}{\partial t} + \sigma_{yy} \frac{\partial v}{\partial t} + \tau_{yz} \frac{\partial \omega}{\partial t} \right); \\ I_z = - \left(\tau_{zx} \frac{\partial u}{\partial t} + \tau_{zy} \frac{\partial v}{\partial t} + \sigma_{zz} \frac{\partial \omega}{\partial t} \right). \end{cases} \quad (15)$$

由于爆炸产生的弹性波在岩石中传播复杂, 为了问题分析的简化性, 现将其简化为一维平面谐波。因此, 考察一维平面谐波纵波在传播过程中的能流密度。假定弹性介质质点按简谐规律沿 x 方向振动, 振动过程只沿 r 方向传播, A 为振幅, c_p 为纵波波速, ω 为振动圆频率, 则其位移 u 函数可以表示为:

$$u = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{c_p} \right). \quad (16)$$

在该问题中, 显然能流密度与波传播方向一致, 由于是一维问题, 因此只有一个方向分量, 取 x 方向分量 I_x , 其大小为:

$$I_x = - \sigma_{xx} \frac{\partial u}{\partial t}. \quad (17)$$

将式(16)带入式(17)可以化简为:

$$\begin{aligned} I = & A^2 \omega^2 \rho c_p \cos^2 \omega \left(t - \frac{x}{c_p} \right) = \\ & A^2 \omega^2 \rho c_p \left[\frac{1 + \cos 2\omega \left(t - \frac{x}{c_p} \right)}{2} \right]. \end{aligned} \quad (18)$$

若观测点距离两个炮孔的距离分别为 r_1 和 r_2 , I_{r_1} 、 I_{r_2} 为其能流密度,同等药量产生的能量密度之和可以表示为:

$$I = I_{r_1} + I_{r_2} = A^2 \omega^2 \rho c_p + \frac{1}{2} A^2 \omega^2 \rho c_p \left[\cos 2\omega \left(t_1 - \frac{r_1}{c_p} \right) + \cos 2\omega \left(t_2 - \frac{r_2}{c_p} \right) \right]. \quad (19)$$

对式(19)中括号内利用和差化积公式进行运算可以得到:

$$I = I_{r_1} + I_{r_2} = A^2 \omega^2 \rho c_p + A^2 \omega^2 \rho c_p \cdot \left[\cos \omega \left(t_1 + t_2 - \frac{r_1 + r_2}{c_p} \right) + \cos \omega \left(t_2 - t_1 + \frac{r_2 - r_1}{c_p} \right) \right]. \quad (20)$$

令两孔时间间隔 $\Delta t = t_2 - t_1$, 测点距离两孔之间的差值 $\Delta r = r_2 - r_1$ 。由式(20)可知,能流密度取最小值时,可得到 Δt 值为最小时间间隔,其中振动圆频率 $\omega = 2\sqrt{2}c_p/3r_0$, π 为圆周率, r_0 为空腔半径:

$$\Delta t = \left(n + \frac{1}{2} \right) \frac{3\pi r_0}{2\sqrt{2}c_p} - \frac{\Delta r}{c_p}; (n = 0, 1, 2, \dots). \quad (21)$$

根据文献[10]中单孔爆破振动波形(图1)可知,在单孔爆破最初时刻,速度峰值最大,但随着时间增加,速度波形的波长逐渐增大,其周期也随着增大,呈现周期变化规律。单个周期之间的时间间隔很短,理论上相差半个周期可以实现波峰和波谷相遇,但是这个时间微差间隔较小,目前雷管精度并不能满足其延时设定。

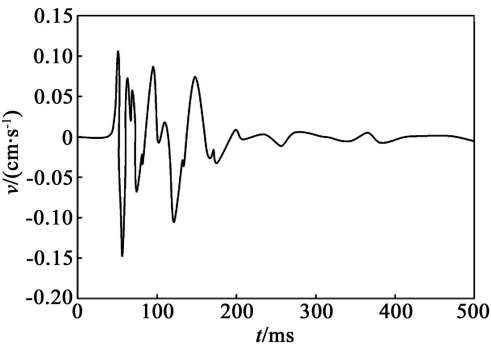


图1 单孔爆破时振动波形^[10]

Fig. 1 Vibration waveform in single hole blasting

由于受到地质条件的影响,很难实现半个周期的叠加,因此,可以使后面波的前部波形和前面波的尾部波形相叠加,同时要考虑到自由面的形成所需要的时间间隔,若都以首个周期时间为基准,取第一个峰值和第二个峰值之间的时间为 $1/2$ 周期,其值约为 12 ms,此时取 $n = 11$,处于波形的中部靠后位置处,因此式(21)可以表示为:

$$\Delta t = \frac{69\sqrt{2}\pi r_0}{8c_p} - \frac{\Delta r}{c_p}. \quad (22)$$

2 工程监测

本工程为某家属楼工程基础开挖的一部分,位于河北省张家口市赤城县西侧汤泉河北岸,属于燕山山脉的丘陵地带(主要由片麻岩组成)。根据地质资料,爆破区内岩层分布为:2 m 以上为强风化岩石;2~5 m 为中等风化岩石;5 m 以下为弱风化岩石。由于场地面积有限,需要向北侧和东西两侧山体开挖扩展。北侧表层风化岩石先由机械开挖,深部基础采用爆破施工,平均向下爆破开挖深度 7~8 m;东侧山坡岩体完整,全部采用爆破方法,开挖深度平均为 18 m。

预裂孔孔距 0.8 m。主爆区孔距 3.5 m,排距 2.5 m,炮孔直径 90 mm。孔深小于 10 m 时,采用连续装药;大于等于 10 m 时,采用孔内间隔装药,分 2~3 段延期起爆。连续装药时,孔间延期 5 ms。间隔装药,分 2 段起爆时,孔内层间延期 5 ms,孔间延时 10 ms;分 3 段起爆时(毗邻预裂孔的主爆孔),孔内层间延时 4 ms,孔间延时 12 ms。排间延时 30~60 ms。预裂孔每 3 个一组,相临组间延时 3 ms,且提前主爆孔起爆(≥ 100 ms);爆破的总药量约 3 600 kg。爆破参数见表 1。

表1 爆破参数表

Tab. 1 Blasting parameters

孔深 h/m	孔距 a/m	排距 b/m	单孔药量 Q/kg	堵塞长度/m	备注
5	2.5	2.0	7	—	
6	2.5	2.0	10	3.5	
8	2.5	2.0	15	4.0	
10	2.5	2.0	18	2.0~3.5	间隔装药
12	2.8	2.2	25	2.0~3.5	间隔装药
16	3.0	2.5	40	2.0~4.0	间隔装药
18	3.0	2.5	48	2.0~4.0	3 药包间隔装药

具体延期时间设定见图 2。

图 3 给出了爆破振动监测点的位置①~⑦,D 代表爆破区域。

图 4 中给出了爆破测点⑦的速度时间曲线,由于距离爆源较远,其波形受到延时间隔的影响可以清晰地分为 3 个部分,第三部分的波形峰值较大,最大值为 6.62 cm/s。从其频谱曲线(图 5)可以看出,其幅值较小,同时主频较大,也可以分为 3 个区域。

为了进一步分析其速度变化特征,对其速度-时

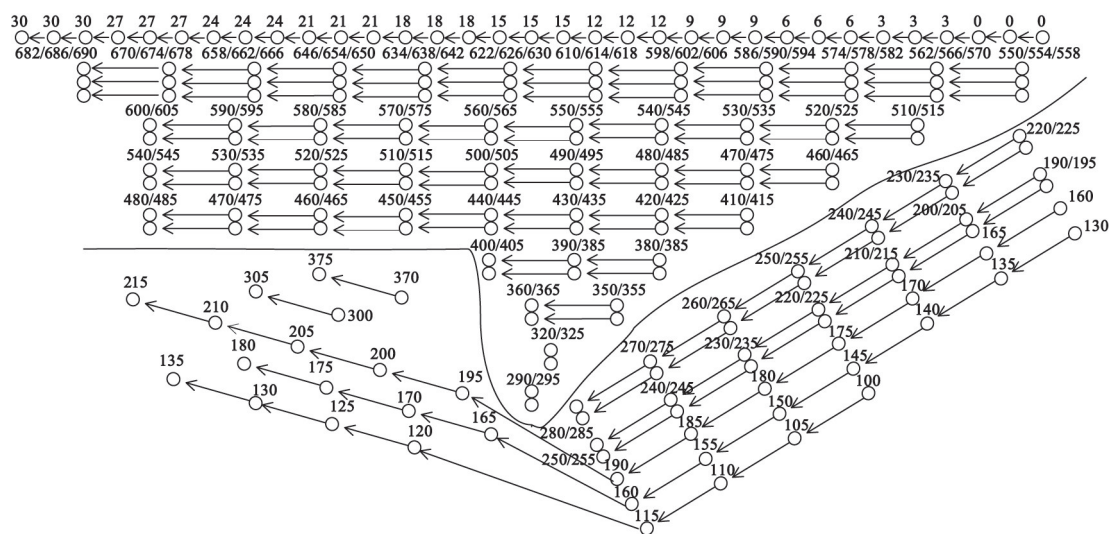


图2 毫秒延时间隔(单位:ms)

Fig. 2 Millisecond delay interval (unit: ms)

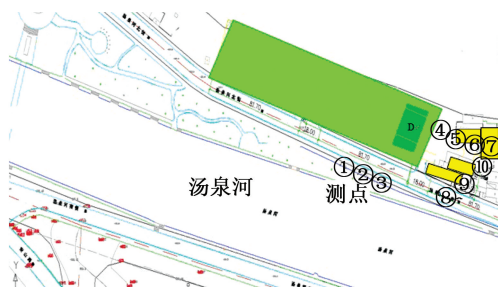


图3 测点布置图

Fig. 3 Layout plan of measuring points

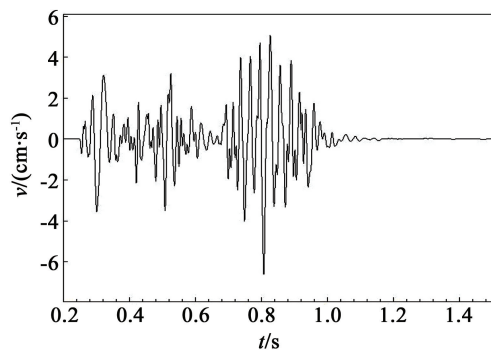


图4 测点⑦速度-时间曲线

Fig. 4 Velocity-time curve of measuring point ⑦

间曲线进行 EMD 分解和 HHT 变换。图 6 中可以看出信号从高频到低频的分解结果。

图 7 给出了 IMF 分量的瞬时能量谱,并对瞬时能量谱进行了划分,其每个区域时间可以和图 2 中的毫秒延时间隔相对应。其中 0.28 ~ 0.38 s 对应图 2 中 0 ~ 100 ms 范围内的炮孔产生的瞬时能量,即预裂孔产生的瞬时能量,同时产生的瞬时能量最大,预裂孔采用延时间隔为 3 ms,可以看出延时间隔为 3 ms 使得其产生了相互叠加增强的作用;0.38 ~

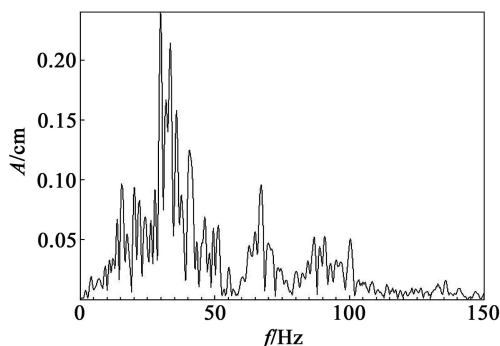


图5 测点⑦频谱曲线

Fig. 5 Frequency spectrum curve of measuring point ⑦

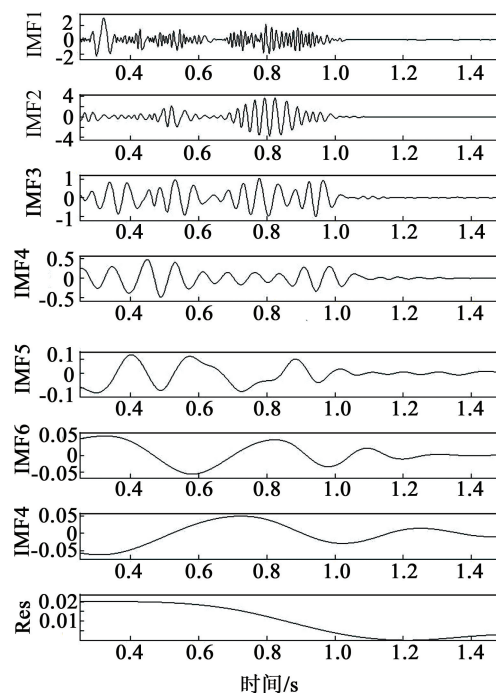


图6 测点⑦ EMD 分解结果

Fig. 6 EMD decomposition of measuring point ⑦

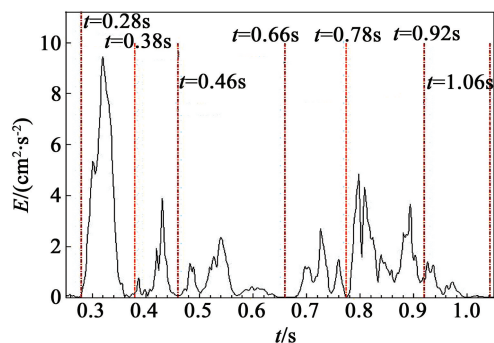


图7 测点⑦ IMF1 分量瞬时能量谱

Fig.7 IMF1 instantaneous energy spectrum of measuring point ⑦

0.46 s 对应图2中100~180 ms 区域范围炮孔产生瞬时能量,其孔间延时间隔为5 ms,排间延时间隔为30 ms,由于在第一排炮孔未全部起爆,第二排炮孔已开始起爆,所以很难分辨出两排之间炮孔区域;0.46~0.66 s 对应190~365 ms 区域范围内炮孔产生的瞬时能量,其大部分炮孔采用分段装药,炮孔内部延时间隔5 ms,孔间延时10 ms,排间延时间隔为30 ms;0.66~0.78 s 和370~485 ms 范围区域炮孔产生的瞬时能量相对应,其采取孔内分两段装药,炮孔内部延时间隔为5 ms,孔间延时间隔为10 ms,排间延时间隔为30 ms;0.78~0.92 s 可以和460~605 ms 相对应,其采用炮孔内部分两段装药(最后分两段的两排孔),炮孔内部延时间隔为5 ms,孔间延时间隔为10 ms,排间延时间隔为50 ms;0.92~1.06 s 对应550~690 ms 范围内炮孔所产生的瞬时能量,其炮孔内部分3段装药,炮孔内部延时间隔为4 ms,孔间延时间隔为12 ms。根据表1 计算可知,分3段装药区域的装药量为768 kg,分两段装药的最后两排孔,其装药量为760 kg。可以看出,孔间毫秒延时间隔为12 ms 时的装药量要大于孔间毫秒延时间隔为10 ms 时的装药量,因此,其产生瞬时能量大小的差别和毫秒延时间隔具有一定的关系。

由图8 可知,30~35 Hz 所携带能量最大,其占总能量的40.5%,25~40 Hz 频带范围能量占总能量达到73.9%,其频带能量向高频方向发展。图8 中的频带能量接近于正态分布,其能量较为合理。

3 结论

1)通过弹性波理论分析,合理设置毫秒延时间隔有利于降低爆破振动,并给出了设置合理毫秒延时间隔的公式。

2)设定孔内毫秒延时间隔和孔间毫秒延时间隔,实现爆破振动携带能量整体向高频方向发展。

3)孔内延时间隔4 ms 和孔间延时间隔为12 ms

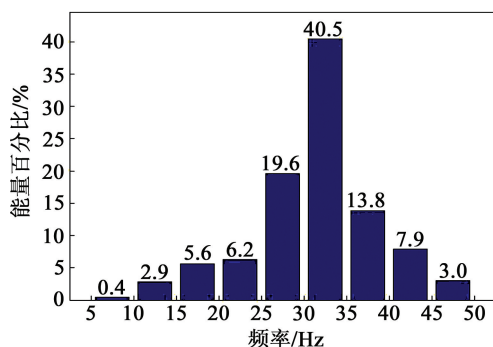


图8 测点⑦频带所占能量百分比

Fig.8 Percentage of energy band of measuring point ⑦

时,爆破振动产生的瞬时能量幅值较低,利于爆破振动控制。短毫秒延时间隔能够改善爆破振动能量分布形态,趋于正态分布。

参考文献

- [1] 方桂富,方春,高翔,等. 电子雷管在城市岩土深孔爆破中的应用[J]. 工程爆破,2011,17(2):65-69.
FANG G F, FANG C, GAO X, et al. Application of electronic detonator in geotechnical deep-hole blasting at urban district [J]. Engineering Blasting, 2011,17(2): 65-69.
- [2] 邢光武,陈清平,郑炳旭. 精确延时干扰减震爆破网路的试验研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2009,32(10):1473-1476.
XING G W, CHEN Q P, ZHENG B X. Experimental research on detonating meshwork for controlling blast-induced vibration by exact delay [J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2009, 32 (10):1473-1476.
- [3] 高文学,杨军,肖鹏飞,等. 基于精确延时的深孔控制爆破技术[J]. 煤炭学报,2011,36(增刊2):386-390.
GAO W X, YANG J, XIAO P F, et al. Deep hole controlled blasting technology based on precise time delay [J]. Journal of China Coal Society, 2011,36(Supp. 2): 386-390.
- [4] BANDA R. Electronic delay detonators-a unique solution to pertinent mining problems [C]//The Third Southern African Conference on Base Metals. Johannesburg: The South African Institute of Mining and Metallurgy, 2009: 315-320.
- [5] ALDAŞ G G U, BILGIN H A, ESEN S. Timing simulation for the selection of optimum delay time [C]//17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey. Ankara, 2001:317-322.
- [6] LARSSON B, HOLMBERG R, WESTBERG J. Super accurate detonators-a blaster's dream [C]//Proceedings of the 14th Conference on Explosives and Blasting Techniques, Society of Explosives Engineers Annual Meeting.

- Anaheim, California, 1988:44-58.
- [7] SVARD J. Possibilities with accurate delay times, results of some field tests using electronic detonators [C]//Fourth High-Tech Seminar, Blasting Technology, Instrumentation and Explosives Applications. Nashville, Tennessee, 1992:20-25.
- [8] SAKOMOTO M, YAMAMOTO M, AIKOU K, et al. A study of high accuracy delay detonator[C]//Proceedings of the 15th Annual Conference on Explosives and Blasting Techniques. New Orleans, Louisiana, 1989:185-200.
- [9] GREEN R H, GREEN M W. The effect of precise millisecond delays on fragmentation at the rock of ages quarry [C]//Proceedings of the 12th Conference on Explosives and Blasting Techniques, Society of Explosives Engineers Annual Meeting. Atlanta, Georgia, 1986.
- [10] 杨年华, 张乐. 爆破振动波叠加数值预测方法[J]. 爆炸与冲击, 2012, 32(1):84-90.
- YANG N H, ZHANG L. Blasting vibration waveform prediction method based on superposition principle[J]. Explosive and Shock Waves, 2012, 32(1):84-90.

Control of Blasting Vibration in Foundation Pit Excavation Based on the Precise Time Delay

LI Shunbo^①, YANG Jun^②, LI Changjun^③

①School of Mechanic & Civil Engineering, China University of Mining & Technology (Beijing) (Beijing, 100083)

②State Key Laboratory of Explosion Science and Technology, Beijing Institute of Technology (Beijing, 100081)

③RGSC (Beijing) Technology Co., Ltd. (Beijing, 100144)

[ABSTRACT] In order to control the blasting vibration in precise time delay blast, the elastic wave based theory gives a reasonable formula of millisecond delay interval, which applied for the onsite measured signal analysis in combination with the excavation of foundation pit engineering. The results show that: the instantaneous energy is less when the millisecond delay interval inside the holes is 4 ms and between the holes is 12 ms, which is advantageous to the vibration control of the blasting. Under short millisecond delay interval, the blasting seismic wave energy can be greatly reduced, and the blasting vibration energy distribution is optimized and tends to approach the high-frequency regions.

[KEY WORDS] blasting vibration; foundation pit excavation; electronic detonator; precise time delay

(上接第 8 页)

- [10] SU J Z, KIM A K, KANABUS-KAMINSKA M. FTIR spectroscopic measurement of halogenated compounds produced during fire suppression tests of two halon replacements[J]. Fire Safety Journal, 1998, 31(1): 1-17.
- [11] ROBIN M L. Suppression of class a fires with HFC-227ea[J]. Process Safety Progress, 1998, 17(3): 209-212.
- [12] WILLIAMS B A, L'ESPÉRANCE D M, FLEMING J W. Intermediate species profiles in low-pressure methane/oxygen flames inhibited by 2-H heptafluoropropane: comparison of experimental data with kinetic modeling [J]. Combustion and Flame, 2000, 120(1): 160-172.

Study on Thermal Pyrolysis of C₆F-ketone Fire Extinguishant at High Temperatures

CUI Fengxia^①, QIN Kuang^②, SHI Lei^②, ZHANG Pin^②, PAN Renming^②

①Nanjing Firefighting Department (Jiangsu Nanjing, 210000)

②School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science & Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

[ABSTRACT] The thermal pyrolysis of C₆F-ketone was studied in a stainless tubular reactor under atmospheric pressure and at temperatures between 500 °C and 750 °C with residence times of 2 s and 5 s. The pyrolysis gaseous products were analyzed by on-line gas chromatography (GC), gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) and KM900 hand-held combustion analyzer. The results indicate that the thermal pyrolysis of C₆F-ketone initiates at about 550 °C and becomes intense at 650 °C. As both pyrolysis temperature and residence time increase, the thermal pyrolysis of C₆F-ketone is triggered, which makes the concentration of C₆F-ketone plummet, the yields of main gaseous products perfluorobutane, hexafluoropropylene increase and 1,1,1,2,2,3,4,4,4-nonafluoro-3-(trifluoromethyl) butane decrease after its peak. Besides, highly toxic gaseous products, perfluoroisobutene and carbon monoxide, were detected in the thermal pyrolysis process.

[KEY WORDS] fire extinguishant; C₆F-ketone; pyrolysis; pyrolysis temperature; residence time; gaseous product