

doi:10.3963/j.issn.1001-487X.2022.04.024

## 废旧炮弹爆炸销毁实践及其振动特性分析

赵宏伟<sup>1</sup>, 刘忠民<sup>1</sup>, 吴小刚<sup>2</sup>, 曹小龙<sup>2</sup>, 李利刚<sup>2</sup>, 康永全<sup>3</sup>

(1. 北京市公安局治安管理总队, 北京 100088; 2. 北京市公安局密云分局, 北京 101500;  
3. 北京铁科特种工程技术有限公司, 北京 100081)

**摘要:** 为消除废旧爆炸物品的安全隐患, 确保首都公共安全, 北京市公安机关对收缴的 198 枚废旧炮弹进行集中销毁。对废旧爆炸物品的甄别及其销毁方法、销毁场地的选择和爆炸坑设计、销毁爆破参数设计、废旧炮弹的装卸与运输等关键环节进行分析与评估, 通过现场振动监测得到销毁爆破的振动传播规律, 并利用 HHT 法对实测振动数据进行时频特性分析。结果表明, 预估废旧炮弹的等效 TNT 当量为 47.72 kg, 废弃矿坑作为废旧炮弹爆炸销毁场地具有天然的地形条件优势, 紧邻边坡岩壁合理布置爆炸坑, 采用坑间 5 ms 延时爆破方式, 确保了销毁爆破安全顺利完成和有害效应限界控制; 销毁爆破产生的地震波具有传播速度小、衰减慢、频率低的特点, 与地下钻孔爆破相比, 浅埋深爆破条件下的  $K$ 、 $\alpha$  明显偏小, 优势频率主要分布在 4~20 Hz 低频段, 主振频率随着距离的增加有微弱减小的趋势, 空气冲击波容易引起近爆区测点的振动波形的振幅和频率产生突变现象。此次销毁爆破设计施工及振动监测分析, 可为类似工程提供借鉴与参考。

**关键词:** 废旧炮弹; 爆炸销毁; 传播规律; 时频特性; HHT 变换

**中图分类号:** TD235.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-487X(2022)04-0164-07

## Practice of Explosion Destruction of Waste Shells and Vibration Characteristics Analysis

ZHAO Hong-wei<sup>1</sup>, LIU Zhong-min<sup>1</sup>, WU Xiao-gang<sup>2</sup>, CAO Xiao-long<sup>2</sup>, LI Li-gang<sup>2</sup>, KANG Yong-quan<sup>3</sup>

(1. Public Security Management Office of Beijing Municipal Public Security Bureau, Beijing 100088, China; 2. Miyun Branch of Beijing Municipal Public Security Bureau, Beijing 101500, China; 3. Beijing Tieke Special Engineering Technology Corporation Limited, Beijing 100081, China)

**Abstract:** In order to eliminate the potential hazards of waste explosives and ensure the public safety of the capital, the Beijing public security organs have conducted a centralized destruction of 198 waste shells. The key destruction procedures, including the screening and destruction method of waste explosives, the selection of destruction site, the design of destruction blasting parameters and explosion pit, the stevedoring and transportation of waste shells, are analyzed and assessed. The propagation law of the destruction blasting vibrations is obtained through on-site monitoring and time-frequency analysis by HHT (Hilbert-Huang transform) method. The results show that the equivalent TNT weight of the waste shells is 47.72 kg. An abandoned mine pit has topographical advantages to be selected as the explosion destruction site for waste shells. And the explosion pits are located close to the rock slope in a reasonable layout. By using a delay time of 5 ms, the safe and successful completion of destruction blasting and the limit control of harmful effects are ensured. The seismic waves generated by the destruction blasting have the characteristics of low propagation speed, slow attenuation, and low frequencies. Compared with the underground blasting vibrations,  $K$  and  $\alpha$  is smaller obviously under the condition of shallow buried blasting. The dominant frequency of the destruction

收稿日期: 2022-07-04

作者简介: 赵宏伟(1972-), 男, 高级工程师、本科, 主要从事爆炸防控技术方面的研究, (E-mail) 13911577695@139.com。

通讯作者: 康永全(1990-), 男, 助理研究员、硕士, 从事爆破技术开发与应用方向研究, (E-mail) 675090722@qq.com。

blasting vibrations is mainly distributed in the low frequency band of 4 ~ 20 Hz, and the main vibration frequency decreases slightly with the increase of distance. The air shock wave can easily cause sudden changes of the amplitudes and frequencies of the measured vibration waveforms near the explosion area. The design, construction, and vibration monitoring and analysis of the destruction blasting can provide a reference for similar projects.

**Key words:** waste shells; explosive destruction; propagation law; time frequency characteristics; HHT transform

北京作为“首善之都”,安全无小事,事事连政治。为确保首都地区公共安全及和谐社会的稳定局面,消除废旧爆炸物品的安全隐患,北京市公安机关在全市范围内开展废旧爆炸物品的收缴工作。这些废旧爆炸物品主要在施工工地现场被发现和收缴,还有一些市民主动上缴的疑似爆炸物品。其特点是大小不一,形状各异,且年代久远,表面锈迹斑斑,大多已经变形,标识已经模糊不清,无法准确评判其爆炸性能和安全属性,可以说是一颗移动的“不定时”炸弹。集中储存的废旧爆炸物品由于内部结构不确定,触发条件不确定,爆炸威力不确定,如果处理不当或选择的销毁方法不适合,会引起较严重的爆炸事故,废旧爆炸物品的处置是一项技术复杂、危险性极大的工作,需要公安机关组织专业技术力量,进行周密部署,对废旧爆炸物品进行定期集中销毁。国内众多文献结合废旧炮弹爆炸销毁的工程实例<sup>[1-4]</sup>,主要从销毁的实施过程、爆破参数设计、安全管理要求及技术措施等方面进行重点分析和阐述,鲜有对销毁爆破振动特性的研究和报道。本文针对北京某次废旧炮弹在废弃的矿坑中进行爆破销毁的特点,对销毁设计和实施过程中的关键环节和步骤进行分析和评估,并结合现场振动监测,分析销毁爆破振动的传播特性和时频特性,以期对同类销毁爆破工程的安全设计和校核提供参考。

## 1 销毁方案设计与组织实施

### 1.1 废旧爆炸物品的甄别及其销毁方法

废旧爆炸物品的销毁方法主要有燃烧法、爆炸法、化学分解法和拆解法等几种,不同种类的废旧爆炸物品对应不同的销毁方法,需要结合其特点并考虑安全性和经济性进行选择。本次拟销毁的废旧爆炸物品主要包括废旧炮弹、地雷、手雷、手榴弹、动能弹、信号弹及其他疑似爆炸装置,共计 198 枚,见图 1。因废旧炮、炸弹属不同时期的爆炸物品,内部装药感度已降低,部分弹体腐蚀、引信功能失效,但大部分仍具有爆炸能力,在排除这些废旧炮弹为非生化类和非放射性炮弹后,决定采用坑内爆炸法对其进行诱爆销毁。爆炸销毁具有处理彻底、操作简单、

对环境污染小的特点。



图 1 待销毁废旧炮弹

Fig. 1 Waste shells to be destroyed

在进行销毁方案设计前,首先应确定待销毁炮弹的装药量,由于无法辨别具体弹型,也无法确定炮弹主装药的现状条件,可根据经验公式计算废旧炮弹的等效 TNT 当量<sup>[5]</sup>

$$Q = \frac{\pi d^2}{4} (L - L_r) \beta \gamma$$

式中:  $Q$  为等效 TNT 当量, kg;  $d$  为弹径, cm;  $L$  为弹体长, cm;  $L_r$  为弹头长, cm;  $\beta$  为当量系数,对于炮弹:口径 175 mm 以下榴弹取 1.35,其他取 1.00;  $\gamma$  为装药换算系数,对于炮弹、榴弹取 0.99,穿甲弹取 0.26。

由于废旧炮弹大小千差万别,年代较久且部分装药失效或感度降低,只能粗略估算其等效 TNT 当量作为参考装药量,拟销毁废旧炮弹的数量及装药量如表 1 所示,其中其他类为疑似 6 枚,动能弹 1 枚,信号弹 8 枚,发烟弹 2 枚。

表 1 拟销毁废旧爆炸物品明细

Table 1 Details of waste explosives to be destroyed

| 序号 | 类别  | 数量/枚 | 装药量/kg |
|----|-----|------|--------|
| 1  | 炮弹  | 67   | 27.20  |
| 2  | 手雷  | 38   | 2.85   |
| 3  | 手榴弹 | 69   | 5.17   |
| 4  | 地雷  | 7    | 12.50  |
| 5  | 其它  | 17   | —      |
| 6  | 总计  | 198  | 47.72  |

### 1.2 销毁场地的选择和爆炸坑设计

采用爆炸法选择销毁场地时,要充分考虑空气

冲击波、个别碎片飞石飞散、爆破地震波及诱发火灾等方面的有害效应。根据《废火药、炸药、弹药、引信及火工品处理、销毁与贮运安全技术要求》(GJB5120—2002)规定,爆炸销毁废旧弹药场地的选择应远离重要的建构筑物,距居民点不小于2000 m。经过场地比选和实地勘察,销毁地点选在北京市密云区某废弃露天采场矿坑内,见图2,该场地位于山谷之中、地势低洼,上下平台高差70余 m,矿坑直径约500 m,利于爆炸飞散物及空气冲击波控制,远离居民区,周边无重要保护设备设施,只有一条道路出入便于警戒,且矿坑中停用的矿石运输通道可作为起爆站,环境良好,满足销毁场地要求。



图2 爆炸销毁场地

Fig. 2 Explosive destruction site

为了减少碎片的飞散和空气冲击波的作用范围,采用坑内式被覆爆炸法,即将废旧炮弹埋在事先开挖好的爆炸坑中,上覆诱发药包,利用炸药的爆炸能量诱爆、炸毁废旧炮弹。本次销毁作业共开挖4个爆炸销毁坑,爆炸坑尺寸:长1.2~1.3 m,宽1.2 m,深1.5~1.6 m。爆炸坑设置在矿坑西侧,临近矿坑边坡,利于爆炸飞散物控制。

废旧炮、炸弹装坑时,把炸药量大和威力大的弹头放在上层,装药量小的弹头放在坑周围和下层,以充分利用弹内炸药,有效地克服炸毁不完全现象,并能节约引爆药的用量。置坑作业完成后,采用袋装细沙对爆炸物表面进行覆盖,以减小爆破冲击波及个别飞散物的危害。

### 1.3 爆破参数设计

爆炸法销毁炮弹采用接触装药,其引爆药量应根据销毁炮弹的种类和数量来确定,可按表2进行计算,若炸弹为榴炮弹、穿甲弹和航弹,所需引爆药量应增加一倍。考虑炸药来源和现场实际条件,使用2号岩石乳化炸药为销毁用药,2号岩石乳化炸

药的TNT当量系数为0.65<sup>[6]</sup>,本次待销毁炮弹122 cm口径的有4枚,其余均小于76 mm,因此,销毁用乳化炸药量经计算为 $4 \times 3 / 0.65 + 63 \times 2 / 0.65 = 212$  kg,考虑部分炮弹主装药失效或感度降低,销毁地点爆破环境良好,最终确定用药量为216 kg。

表2 销毁炮弹引爆药量(TNT当量)<sup>[7]</sup>  
Table 2 Explosive quantity of destructed shells  
(TNT equivalent)

| 序号 | 炮弹直径/<br>mm | 单发引爆<br>药量/kg | 成堆引爆<br>药量/kg |
|----|-------------|---------------|---------------|
| 1  | 36~76       | 0.2           | 0.8~2.0       |
| 2  | 80~105      | 0.4           | 1.6~2.5       |
| 3  | >105~150    | 0.6           | 2.0~3.0       |
| 4  | >150~200    | 0.6~1.0       | 3.0~3.5       |
| 5  | >200~300    | 1.0~2.0       | 3.5~4.0       |
| 6  | >300~400    | 2.0~3.0       | /             |
| 7  | >400        | >3.0          | /             |

本次销毁采用电子雷管起爆,每个坑放置6~8个电子雷管,坑内雷管同时起爆,为降低爆破振动对周边岩石高边坡的影响,坑间设置5 ms延时逐坑起爆。

### 1.4 废旧炮弹的装卸与运输

为保证待销毁爆炸物品在运输过程中的安全,对危险性较高的弹体和其它弹体分别装箱:带有引信和装药外露的弹药要做好防护,单独固定装箱;教练弹药单独固定装箱;体积较大弹体,做好保护后单独装车。待销毁爆炸物品装车时,由专业技术人员现场指导,为防止发生意外碰撞、挤压、跌落,待销毁炮弹必须采用人工搬运,轻拿轻放。

运输废旧炮弹的车辆,选用爆破危险物品专用车辆运输,本次销毁作业使用3辆爆破器材运输车,其中1辆运输待销毁的废旧炮弹,1辆运输乳化炸药,1辆运输电子雷管。待销毁爆炸物品要进行装箱运输,装箱的爆炸物品要装稳卡牢,箱内要用棉纱、沙子等物品固定卡牢,箱体码放规范,带引信的弹药,在箱内应装有稳固作用的挡板或引信护罩,车内废旧弹药箱体覆盖防爆毯。运输前,提前规划运输路线,尽量避开车流量大的道路和人员聚集的村庄,对矿坑内的临建道路进行清理和平整,边坡陡峭的路段,爆炸物品运输车进行实地演练,确保车辆动力性能满足要求。

### 1.5 销毁爆破效果

爆炸销毁场地位于矿坑中,上下高差超70 m,四周山体形成了自然屏障,个别飞散物、冲击波及地

震波的影响范围基本限于坑内,因此本次销毁作业的安全警戒为距离 600 m(直线距离),在此范围内的所有人员和车辆,起爆时必须撤离。经过周密部署和严格施工,此次废旧炮弹销毁爆破作业取得圆满成功,经爆后检查未发现炮弹碎片,说明被覆炸药将炮弹进行了粉碎性破坏,彻底消除了安全隐患,根据现场视频监控画面分析可知:销毁爆炸起爆后形成黑色的蘑菇云,历时 3.22 s,高度大概为 50 m,见图 3,之后爆破激起的烟尘继续向上空扩散,到达矿坑上部时,很快随风吹散,爆破个别飞石主要为爆炸坑口附近的小石块,大部分散落在距爆源 77 m 范围内,根据石块在空中滞留的时间,可估算飞石的高度约为 45 m,此次销毁爆破作业未对抗外环境造成不利影响。

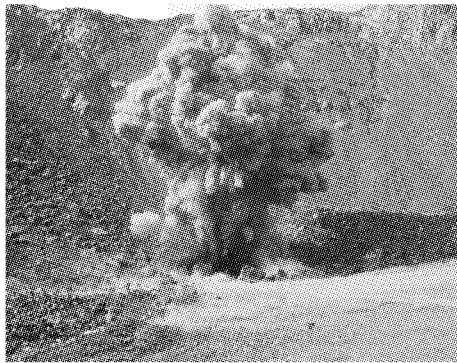


图 3 废旧炮弹销毁爆破效果

Fig. 3 Blasting effect of waste shells destruction

## 2 销毁爆破振动特性分析

### 2.1 爆破振动测试

为分析浅埋深类似地面接触爆破的振动传播规律和振动时频特性,为类似工程爆破振动安全校核和振动影响评估提供参考,在爆破施工过程中,距爆源不同距离(37 m、52 m、69 m、104 m、130 m)处布置 5 台爆破测振仪,监测该测线方向爆破振动三个分量的爆破振动特征信息,测振仪选用中科测控 TC-4850 型爆破测振仪,采样频率为 4000 Hz,采样时长为 2 s,触发方式为内触发,传感器的安装尽量选在地面裸露岩石上,并清除表面浮土和杂物,确保石膏硬化进行牢固连接,爆破振动测点布置如图 4 所示,通过振动监测,得到地面 5 个测点径向、切向、垂向三个方向的振动测试数据。

### 2.2 地震波传播与衰减

根据互相关函数的定义和性质,对不同距离测点的振动测试数据采用互相关分析的方法可计算出地震波在介质中的传播速度<sup>[8]</sup>。测点 1 和测点 4 相

距 67 m,采用 MATLAB 程序对其垂向振动信号进行相关分析,得到两列信号的归一化相关系数随偏移量的变化曲线,如图 5 所示,在  $m = -337$  处,两列振动信号的相关系数达到峰值,对于 4000 Hz 的采样频率,对应的偏移时间为 84.25 ms,爆破地震波在两测点间的传播速度为 795 m/s,同样方法对径向和切向的振动信号进行互相关分析,得到传播速度分别为 748 m/s 和 776 m/s,因此地震波的平均传播速度为 773 m/s,与文献[9]中砂型覆土层场地实测的纵波波速为 600 m/s 大致相同,验证了此方法的可行性。这表明销毁爆破振动能量主要以瑞利波的形式沿地面传播,地震波的传播特性与覆盖层的物理力学性质密切相关。

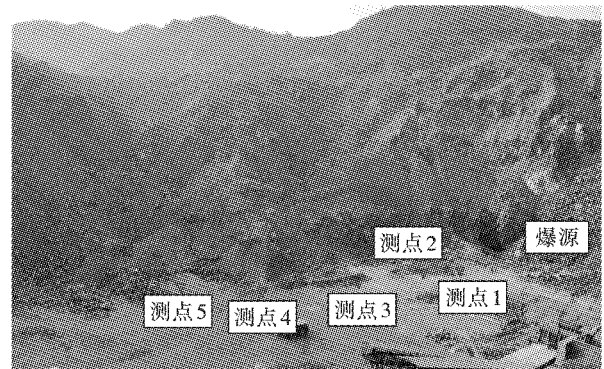


图 4 爆破振动测点布置

Fig. 4 Layout of blasting vibration measuring points

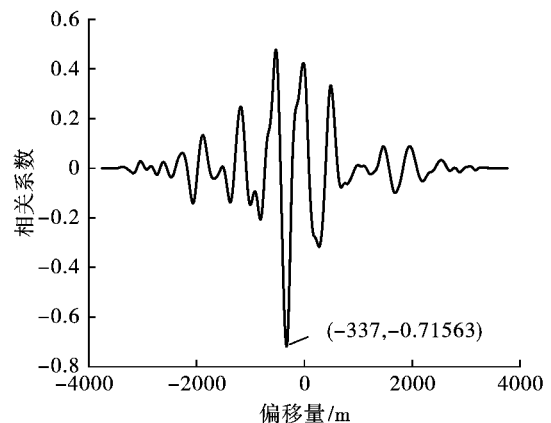


图 5 两个相距 67 m 测点的互相关函数

Fig. 5 Cross correlation function of two measuring points 67 m apart

对监测点质点振速峰值进行回归拟合,得到径向( $X$ 方向)、切向( $Y$ 方向)、垂向( $Z$ 方向)三个方向的比例距离公式,见图 6。分析可知, $X$ 方向的质点振速峰值大于其他两个方向,且 $X$ 方向的振动衰减较慢,和地下钻孔爆破相比,销毁爆破的 $K$ 、 $\alpha$ 明显偏小,究其原因,由于销毁爆破作业抵抗线较小,近似于地面裸露爆破,爆破夹制作用弱得多工作,因

此  $K$  明显偏小; 销毁场地上覆一层夹杂矿石的土层, 销毁爆破产生的爆炸能量大部分转化成空气冲击波, 一小部分形成地震波沿地层表面以面波的形式传播, 面波频率低, 传播距离远, 因此  $K$  值也偏小。由此可见, 销毁爆破在进行爆破振动安全校核时, 直接套用规程中的  $K$  值是有待商榷的<sup>[10]</sup>, 在对振动控制有严格要求的销毁作业场地, 销毁爆破实施前宜进行爆破试验确定场地条件的衰减系数。

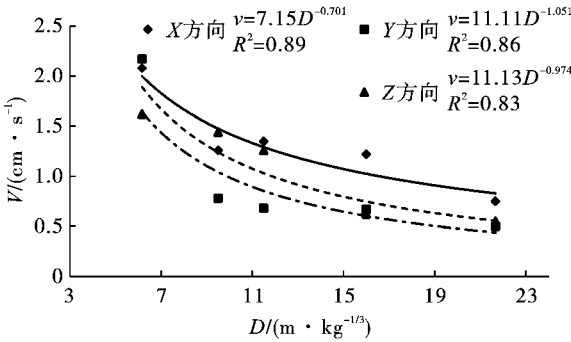


图6 爆破振动三分量衰减曲线

Fig. 6 Three component attenuation curve of blasting vibration

根据《爆破安全规程》(GB 6722—2014), 爆破振动安全允许距离按下式计算<sup>[11]</sup>

$$R = \left( \frac{K}{v} \right)^{\frac{1}{\alpha}} Q^{\frac{1}{3}}$$

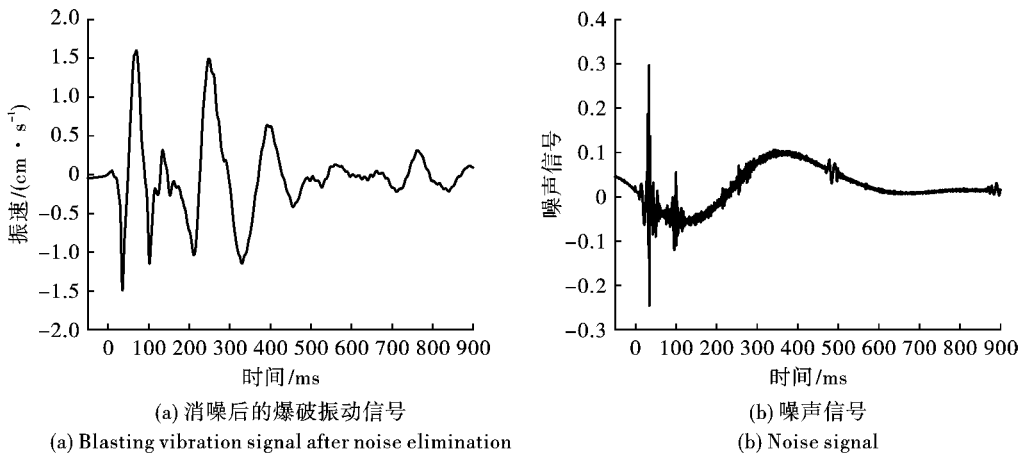


图7 基于EMD分解法的波形消噪

Fig. 7 Waveform denoising based on EMD decomposition

对测点1垂向爆破振动信号进行EMD分解, 由于  $imf2$  分量振动速度较大, 振幅变化明显, 对原始振动信号的贡献最大, 对其进行 Hilbert 变换, 并提取其包络曲线, 见图8, 分析可知, 由于坑间5 ms 延时极短, 难以识别出每个爆炸坑起爆引起的波峰突变, 但包络图中存在3个极值点的现象可以说明短延时爆破振动信号仍存在着干扰叠加, 起到了一定的降振效果, 在矿坑高边坡坡顶布置的振动监测点

式中:  $v$  为保护对象所在地安全允许质点振速, 取  $1.5 \text{ cm/s}$ ;  $R$  为爆破振动安全允许距离,  $m$ ;  $Q$  为最大单段药量, 取  $216 \text{ kg}$ ;  $K, \alpha$  为与爆破点至保护对象间的地形、地质条件有关的系数和衰减指数。

根据数据拟合回归出三个方向的  $K, \alpha$  计算爆破振动安全允许距离分别为  $55 \text{ m}, 63 \text{ m}, 47 \text{ m}$ , 本次销毁工作的安全距离完全满足要求。

### 2.3 爆破振动时频特性分析

HHT法是一种具有自适应性的时频局域化分析方法<sup>[12,13]</sup>, 适合处理爆破振动这种非平稳随机时变信号, 它包括经验模态分解(EMD)和Hilbert变换两部分, 振动信号经EMD分解后, 每一个IMF分量都具有不同的时间特征尺度, 体现了EMD方法的多分辨率特性。对测点1的垂向振动信号进行EMD分解, 得到  $imf1 \sim imf8$  和  $residue$  共9个分量, 分量  $imf1$  表现高频随机噪声,  $residue$  为信号本身微弱的趋势或仪器的“漂零”, 将这两项分量去除后, 再把其他分量进行组合得到消噪后的振动信号及噪声干扰信号, 见图7, 由于销毁爆破埋深浅, 空气冲击波和噪声等信号干扰因素严重, 导致原始信号中不可避免地存在突峰畸变信号和仪器本身存在的趋势项, 结果表明基于EMD方法的带通滤波具有良好的消噪效果, 为后续振动信号处理分析奠定了基础。

显示振速峰值为  $0.13 \text{ cm/s}$ , 确保了岩石高边坡的稳定性。

根据HHT变换的原理, 编制MATLAB程序得到测点1垂向振动信号的Hilbert三维能量谱和不同距离测点(测点1、3、5)的Hilbert边际谱, 见图9和图10。三维能量谱直观地显示了振动的时-频率-能量辅助的分布特征, 图中颜色的暖冷表示能量的大小, 颜色越暖(偏红)能量越大, 颜色越冷(偏

蓝)能量越小。由图9可知,能量主要集中在5~30 Hz频段和0~0.4 s时段,结合爆破延时可以控制每个时刻能量的输出大小。

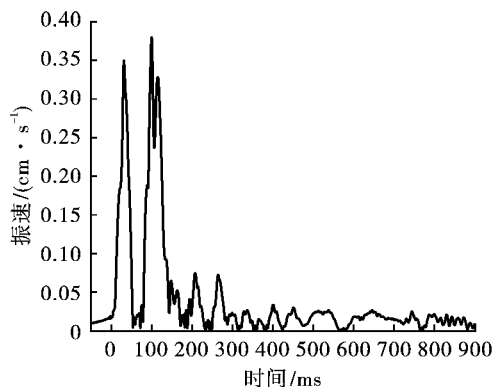


图8 imf2分量的包络

Fig. 8 Envelope of imf2 component

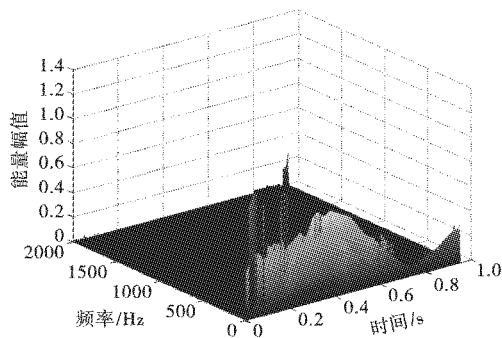


图9 Hilbert 三维能量谱

Fig. 9 Hilbert three-dimensional energy spectrum

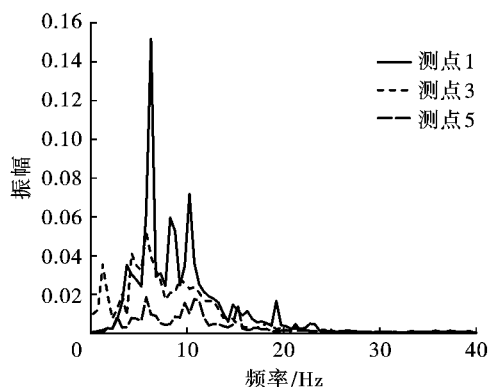


图10 不同距离测点 Hilbert 边际谱

Fig. 10 Hilbert marginal spectrum of different distance measuring points

边际谱是 Hilbert 谱对时间的积分,它直观反映了能量随频率的变化情况,由图9中不同距离振动信号的边际谱可以得到:相比于地下爆炸地震波的频谱特征,浅埋深爆破条件下的频率范围相对较窄,主要分布在4~20 Hz,优势频段则为7.38~

14.28 Hz;测点1 边际谱中存在一个幅值很高但分布较窄的阶跃振动分量,该振动分量随距离增加迅速衰减,并在69 m(测点3)以后基本消失,出现这种频率分布特征的基本原因在于距离较近时爆破冲击波的压力较大,它所引起的振动和地震波在传播过程中叠加干扰,使振动速度的频谱出现较尖锐的峰值;如果将优势频段的中心点作为主振频率,那么随着距离的增加,主振频率呈现出逐渐减小的微弱趋势。

### 3 结论

废旧炮弹的处置销毁是一项技术复杂、危险性极大的工作,经过精心设计、周密部署,北京市公安机关成功销毁收缴的198枚废旧炮弹,取得了预期目标,并对其振动特性进行了分析,得到以下结论:

(1)废旧炮弹的甄别尤为重要,是采用爆炸法销毁的前提,废弃的矿坑是废旧炮弹销毁的理想场地,基本可以将爆破有害效应限制在矿坑内。由于矿坑临建道路崎岖陡峭,废旧炮弹的下坑运输是关键的一环,对废旧炮弹的摆放位置和车辆的动力性能进行实地演练是非常有必要的。

(2)废旧炮弹装坑时,把炸药量大和威力大的弹头均匀布置于每个爆炸坑的上层,装药量小的弹头分布在坑周围,确保销毁炸药整齐密实地覆盖所有炮弹。采用电子雷管短延时逐坑起爆的方式,可达到殉爆和降振的目的。

(3)销毁爆破与地下钻孔爆破的振动效应明显不同,销毁爆破产生的地震波具有传播速度小、衰减慢、频率低的特点,其爆破条件近似于裸露爆破,振动衰减系数 $K$ 、 $\alpha$ 值偏小。按照规程中的经验 $K$ 、 $\alpha$ 值进行爆破振动安全校核时有失偏颇,条件允许的情况下,尽量通过现场试验确定衰减系数。

(4)基于HHT法的振动时频特性分析表明,浅埋深爆破条件下的频率范围主要分布在4~20 Hz低频段,主振频率随着距离的增加有微弱减小的趋势,由于空气冲击波作用,近爆区测点的振动波形的振幅和频率都有突变的现象,振动信号分析时应采取必要的消噪滤波措施。

### 参考文献 (References)

- [1] 张 炜. 爆炸法销毁废旧炮弹的实施过程及效果[J]. 工程爆破, 2019, 25(5): 87-90.
- [1] ZHANG Wei. Implementation process and effect of waste artillery bombs destruction by explosive method[J]. Engineering Blasting, 2019, 25(5): 87-90. (in Chinese)
- [2] 张治国, 留越伟, 蒋跃飞, 等. 废旧炮弹销毁工程及安全措施[J]. 工程爆破, 2018, 24(6): 85-90.
- [2] ZHANG Zhi-guo, LIU Yue-wei, JIANG Yue-fei, et al. Safety

- management and destruction project of discarded bombs[J]. *Engineering Blasting*, 2018, 24(6): 85-90. (in Chinese)
- [3] 闫国斌, 于亚伦. 销毁废旧弹药的技术探讨[J]. *工程爆破*, 2011, 17(3): 91-94.
- [3] YAN Guo-bin, YU Ya-lun. Technical exploration of destruction discarded ammunitions [J]. *Engineering Blasting*, 2011, 17(3): 91-94. (in Chinese)
- [4] 周晓光, 董恒超, 何泽, 等. 销毁废旧炮弹及危险爆炸物品的设计与实践[J]. *爆破*, 2020, 37(4): 132-136.
- [4] ZHOU X G, DONG H C, HE Z, et al. Design and practice of destroying waste cannonballs and dangerous explosives [J]. *Blasting*, 2020, 37(4): 132-136. (in Chinese)
- [5] 章克凌, 徐春. 废旧航、炮弹的辨识与销毁当量估算[J]. *爆破*, 2003, 20(2): 80-83.
- [5] ZHANG K L, XU X. Discrimination and equivalent charge estimation of bygone aero-bomb and shell [J]. *Blasting*, 2003, 20(2): 80-83. (in Chinese)
- [6] 钱武铭. 销毁炮弹最小药量试验与分析[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2014.
- [6] QIAN W M. The test and analysis of minimum charge quantity of destruction of the shell [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2014. (in Chinese)
- [7] 中国兵器工业总公司. GJB5120—2002 废火药、炸药、弹药、引信及火工品处理、销毁与贮运安全技术要求[S]. 北京: 兵器工业出版社, 2002.
- [7] China Weapons Industry Corporation. GJB5120—2002 Technical requirements for the safety of disposal, destruction and storage of waste propellants, explosives, ammunition, fuses and pyrotechnics [S]. Beijing: Weapons Industry Publishing House, 2002. (in Chinese)
- [8] 龙源, 冯长根, 徐全军, 等. 爆破地震波在岩石介质中传播特性与数值计算研究[J]. *工程爆破*, 2000, 6(3): 1-7.
- [8] LONG Y, FENG C G, XU Q J, et al. Study on propagation characteristics of blasting seismic waves in a rock medium and numerical calculation [J]. *Engineering Blasting*, 2000, 6(3): 1-7. (in Chinese)
- [9] 林大超, 白春华. 爆炸地震效应[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [10] 方向荣, 汪良忠, 周珉. 废旧炮弹销毁设计与实践[J]. *工程爆破*, 2019, 25(1): 85-90.
- [10] FANG X R, WANG G Z, ZHOU M. Design and practice of destruction of abandoned projectiles [J]. *Engineering Blasting*, 2019, 25(1): 85-90. (in Chinese)
- [11] 国家安全生产监督管理总局. GB6722—2014 爆破安全规程[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [11] State Administration of Work Safety. GB6722—2014 Safety regulations for blasting [S]. Beijing: China Standards Press, 2015. (in Chinese)
- [12] 关晓磊, 颜景龙. 爆破振动信号的 HHT 时频能量谱分析[J]. *爆炸与冲击*, 2012, 32(5): 535-541.
- [12] GUAN X L, YAN J L. HHT time-frequency energy spectrum analysis of blasting vibration signal [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2012, 32(5): 535-541. (in Chinese)
- [13] 郭云龙, 孟海利, 孙崔源, 等. 基于 HHT 方法对隧道施工爆破振动信号的分析[J]. *铁道建筑*, 2017, 57(11): 69-72.
- [13] GUO Y L, MENG H L, CUN C Y, et al. Analysis of blasting vibration signal in tunnel construction based on HHT method [J]. *Railway Engineering*, 2017, 57(11): 69-72. (in Chinese)

英文编辑: 黄刚

(上接第 152 页)

- [6] 林谋金, 石文才, 郑炳旭, 等. 应用于火区爆破的耐火隔热套筒设计[J]. *爆破*, 2017, 34(4): 133-136.
- [6] LIN Mou-jin, SHI Wen-cai, ZHENG Bing-xu, et al. Designing of refractory insulating sleeve for fire area blasting [J]. *Blasting*, 2017, 34(4): 133-136. (in Chinese)
- [7] 林谋金, 郑炳旭, 李战军, 等. 全孔蓄水法在高温火区爆破中的应用[J]. *爆破*, 2016, 33(3): 114-117.
- [7] LIN Mou-jin, ZHENG Bing-xu, LI Zhan-jun, et al. Application of impounding water blasthole method in fire area blasting [J]. *Blasting*, 2016, 33(3): 114-117. (in Chinese)
- [8] 林谋金, 刘畅, 马宏昊, 等. 水浴加热对乳化炸药爆炸威力的影响[J]. *含能材料*, 2016, 24(12): 1214-1218.
- [8] LIN Mou-jin, LIU Chang, MA Hong-hao, et al. Effect of water-bath heating on explosion performance of emulsion explosives [J]. *Chinese Journal of Energetic Materials*, 2016, 24(12): 1214-1218. (in Chinese)
- [9] 林谋金, 郑炳旭, 李战军, 等. 防护下的导爆索在高温火区爆破中的应用[J]. *爆破*, 2016, 33(4): 123-126.
- [9] LIN Mou-jin, ZHENG Bing-xu, LI Zhan-jun, et al. Application of protected detonating cord in fire area blasting [J]. *Blasting*, 2016, 33(4): 123-126. (in Chinese)
- [10] 倪欧琪. 粉状乳化炸药微观结构研究[J]. *爆破器材*, 1998(3): 6-8.
- [10] NI Ou-qi. The research of microstructure of powdery emulsion explosive [J]. *Explosive Materials*, 1998(3): 6-8. (in Chinese)

英文编辑: 黄刚