

罗桂纯、胡平、王治国等, 2012, 炸药震源的地震安全性野外实验研究, 中国地震, 28 (2), 214 ~ 221。

# 炸药震源的地震安全性野外实验研究

罗桂纯<sup>1,2)</sup> 胡平<sup>2)</sup> 王治国<sup>2)</sup> 王飞<sup>2)</sup>

1) 中国地震局地球物理研究所, 北京市海淀区民族大学南路 5 号 100081

2) 北京市地震局, 北京市海淀区苏州街 28 号 100080

**摘要** 选定一块场地, 针对相同井深、不同药量的情况, 进行炸药震源的地震安全性野外实验, 用 Etna 数字强震动加速度仪记录每次爆破时房屋振动的加速度。在选定房屋结构的地基、窗台、屋顶等 3 个位置分别布设了仪器, 记录结构响应的加速度波形。为了与《爆破安全规程》的参考标准对应, 将加速度值转换成速度值, 并对位于屋顶的结构响应速度峰值进行分析。通过对结构响应、安全距离、频率的研究, 分析建筑物结构对每次爆破的响应, 并对其安全性进行讨论。

**关键词:** 炸药震源 加速度 速度峰值 安全距离

[文章编号] 1001-4683 (2012) 02-0214-08 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

从 19 世纪 20 年代至今, 炸药震源一直是地震勘查、地球物理研究的主要常规震源 (张智等, 2003)。实践证明, 在地震勘查、石油勘探中使用炸药震源具有良好的效果, 其突出的优点是这种震源具有较强的能量 (陆基孟, 1993)。但是, 随着石油勘探、地震勘查区域的不断拓展, 勘探范围已由原来的人口稀少区深入到乡镇、城市等人口密集的复杂地表区域。在这些区域的勘探生产过程中, 除了要达到较好的勘探效果, 还要考虑对周围居民住宅和企事业单位等房屋建筑的影响。因此, 炸药震源对房屋建筑的地震安全性分析, 已成为各方面密切关注的焦点。振幅、频率、安全距离等是研究炸药震源的地震安全性的重要参数。炸药震源地震波的振幅和频率是表征炸药震源地震安全性的直接指标, 安全距离是表征炸药震源地震安全性的间接指标。

为了检测炸药震源对房屋建筑的地震安全性影响, 我们选定了一块场地进行实验。实验场地地势平坦, 地表条件为第四系泥沙交互沉积, 潜水面为 3 ~ 6m, 激发条件较好。实验场地内有一幢一层红砖坡顶瓦房, 砌筑砂浆为普通泥浆。整栋房屋坐北朝南, 北向后墙中间有一个窗户。由于 30m 是勘探中常用的爆破深度, 因此, 此次实验的主要目的是检测在相同的地质条件下, 30m 相同井深时, 不同药量的炸药震源在不同距离处对房屋建筑的地震安全性影响, 以给出参考安全距离。

[收稿日期] 2011-09-09

[项目类别] 北京市地震局任务性科技专项 (JZX-201205) 资助

[作者简介] 罗桂纯, 女, 1980 年生, 在读博士, 主要从事震源和震害防御研究。E-mail: gchluo@163.com

本次实验采用美国 Kinemetrics 公司制造的 Etna 数字强震动加速度仪,观测记录炸药震源引起的房屋振动。该仪器的频率响应范围为 DC 到 80Hz,灵敏度为  $\pm 1.25\text{V/g}$ 。此次采用的仪器为 3 分量记录器, $a_x$  为东西向分量, $a_y$  为南北向分量, $a_z$  为垂直向分量,每次以 200sps 的采样率连续记录房屋振动的加速度波形。将 3 台仪器分别放置在房屋的地基、窗台、屋顶等 3 个位置,观测不同药量的炸药震源爆破时房屋的振动响应,观测系统如图 1 所示。此次的炸药震源为常用的 TNT 炸药,实验共有 4 次爆破,都位于与房屋垂直向北的一条直线上,井深都是 30m,药量分别是 1、2、3、4kg,与房屋的距离分别是 5、30、80、132m,对应信息如表 1 所示。

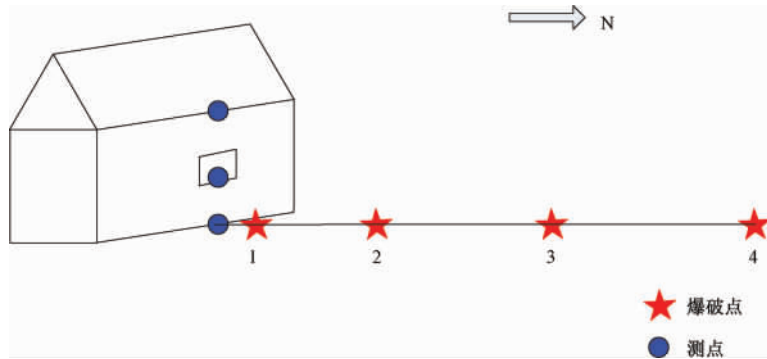


图 1 实验观测系统示意图

描述炸药震源震动效应的参数较多,如振动速度、加速度、位移以及频率等。对于采用何种参数作为评判炸药震源地震安全性的标准,意见各不相同。目前,国外评判标准已经发展到以多参数为判据,如瑞典的评判标准综合考虑了振动速度、频率、位移和加速度等多项指标;美国矿务局、德国和芬兰的判据引入振动速度和频率两个指标。现在大多数研究者认为,振动速度和频率两项指标作为判据是必要的(李孝林等,2001;罗忆等,2010;曾晟等,2008)。本研究中,将用加速度、速度峰值、安全距离、频率等参数对炸药震源的地震安全性进行分析。

表 1 炸药震源实验参数表

炮眼序号	井深 (m)	药量 (kg)	距离 (m)
1	30	1	5
2	30	2	30
3	30	3	80
4	30	4	132

## 1 房屋结构响应分析

本次实验选定的房屋为一层红砖坡顶瓦房,高度为 3.5m,砌筑砂浆为普通泥浆。由于是 30m 的深孔爆破,根据《爆破安全规程》(GB6722-2003 代替 GB6722-1986 等)(以下简称《爆破安全规程》)(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2003),应取主振频率 10~50Hz,安全允许振动速度 2.3~2.8cm/s。据此,根据房屋的实际情况和参考文献的经验总结(吴克刚等,2007),我们取安全允许振动速度峰值为 2.5cm/s,并且以此作为建筑结构对炸药震源响应的安全性分析依据。

表 2

爆破振动安全允许标准

(据《爆破安全规程》(GB6722-2003 代替 GB6722-1986 等  
(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 2003)))

序号	保护对象类别	安全允许振速 (cm/s)		
		< 10Hz	10 ~50Hz	50 ~100Hz
1	土窑洞、土坯房、毛石房屋	0.5 ~1.0	0.7 ~1.2	1.1 ~1.5
2	一般砖房、非抗震的大型砌块建筑物	2.0 ~2.5	2.3 ~2.8	2.7 ~3.0
3	钢筋混凝土结构房屋	3.0 ~4.0	3.5 ~4.5	4.2 ~5.0
4	一般古建筑与古迹	0.1 ~0.3	0.2 ~0.4	0.3 ~0.5

位于地基、窗台、屋顶等 3 个位置的 Etna 数字强震动加速度仪, 分别记录了每次爆破时房屋的 3 个位置的振动加速度波形。根据实际情况和以往的经验, 屋顶的振动和反应比地基和窗台的都大, 更能充分显示结构响应的放大效应。因此, 以屋顶仪器记录到的数据作为分析处理对象。记录的原始数据是仪器的电压值, 经过仪器灵敏度等参数换算得到加速度值。首先对每条加速度记录进行零偏校正和基线校正, 图 2 为校正后的 4 次爆破的屋顶振动响应加速度波形。

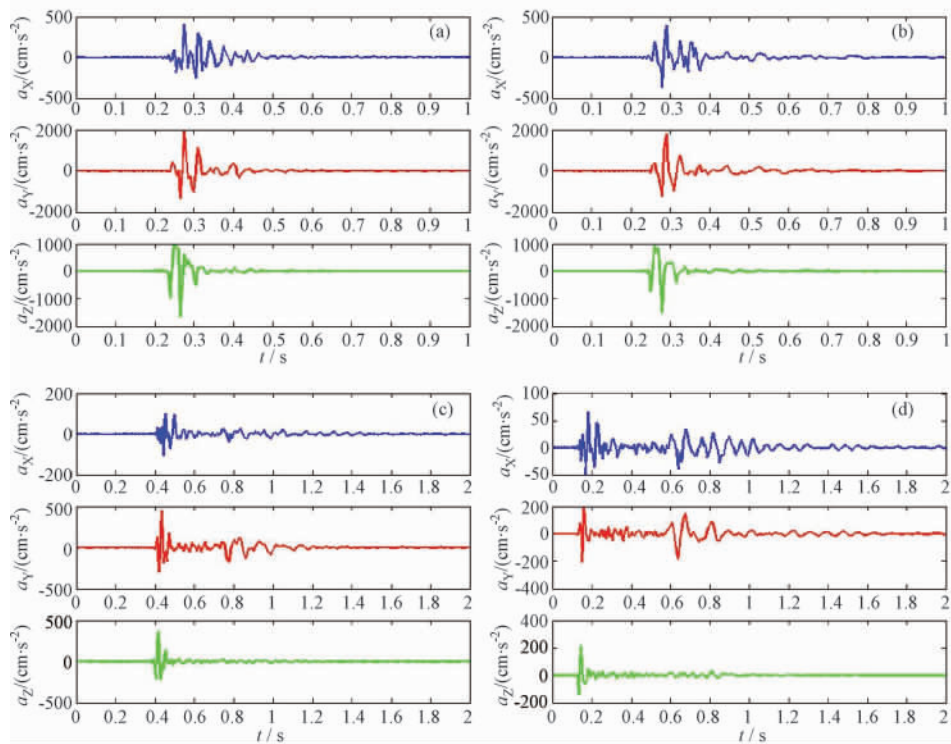


图 2 1~4 炮屋顶振动加速度波形

大量实测资料表明, 采用质点振动速度作为衡量和描述炸药震源产生地震振动强度的标准, 比采用位移和加速度更有利于排除土壤因素的影响, 并且与建筑物和构筑物的破坏特征的相关性更好。多年来, 我国一直采用振动速度表示振动强度, 这是因为质点的振动速度是一个比较稳定的物理量, 不会随土壤介质的改变而发生大的变化(吴立等, 1999)。为了

与《爆破安全规程》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2003)的分类标准相对应,对加速度时程进行积分,将振动加速度值转换成速度值,再对速度波形的速度峰值进行分析。表3为4次爆破的屋顶振动响应的速度峰值。

表3 屋顶振动3分量速度峰值

炮眼 序号	速度峰值 (cm/s)		
	$v_x$	$v_y$	$v_z$
1	1.45080	5.5399	-5.33730
2	1.34280	5.0165	-5.13840
3	0.46115	2.0090	-1.31920
4	0.37532	2.2075	-0.64554

从表3的速度峰值表中可以看到,由于所有爆破点与建筑物的连线呈南北向,正好与 $v_y$ (南北向)方向一致,因此 $v_y$ 能量最强,振幅峰值最大。但是由于第1次爆破距离房屋结构太近,波形发育不全, $v_y$ 和 $v_z$ 振幅峰值大小非常接近。第2次爆破和第1次爆破的各分量峰值衰减很少, $v_y$ 峰值和 $v_z$ 峰值也非常接近。第3次爆破的速度峰值衰减明显,尤其是 $v_x$ 和 $v_z$ 。第4次爆破的 $v_x$ 、 $v_y$ 振幅峰值与第3次爆破的 $v_x$ 、 $v_y$ 振幅峰值几乎相当,但是 $v_z$ 随着距离的增大,衰减明显。从以上的速度峰值分析可以看出,第1、2次爆破,虽然药量很小,但是因为距离很近,振动速度峰值都超过了《爆破安全规程》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2003)允许的安全振动速度2.5cm/s,对房屋的安全性能应该会产生一定的影响。第3、4次爆破,振动速度峰值都小于安全振动速度,对房屋的安全性能应该没有影响。但是速度峰值的衰减关系并不是线性关系,因此,不能单靠增加距离来减小振动。

炸药震源对房屋结构的影响,与持续时间有密切关系。爆破地震波持续时间越长,对建筑物的作用也越大(王俊平等,2005)。在实践工作中,经常会遇到这样的情况,距爆破点较近的居民没有抱怨爆破震动过大,而距离爆破点较远处的居民却反映爆破震动十分强烈。这是由于距离近,爆破地震波的持续时间很短,而随着距离的增加,持续时间增长,对建筑物结构的作用时间也增长。如图2所示,持续时间变化非常明显,第1次爆破的持续时间不到0.3s,第2次约为0.3s,第3次延长到0.6s,而第4次超过了1s。但是此次研究的持续时间受到距离和药量的双重影响,不好判断距离和药量对持续时间的影响程度分别是多少。在以后的工作中,将进一步开展这方面的研究。

对于上述房屋结构,在上述地质条件下,1、2、3、4kg的不同药量在30m井深时爆破,由振动速度峰值可以发现,沿爆破点连线的方向,能量最强。因此,可以根据勘探需要和减小房屋结构振动两方面考虑,来选择爆破点的排列方向。虽然距离越远,速度峰值越小。但是,速度峰值的衰减与距离并不成线性关系,因此,不能单靠增大距离来减小振动。振动的持续时间越长,对房屋结构的作用时间也越长。因此,速度振幅和持续时间,是一对相互影响的参数。在实际操作中,需综合考虑,不能单一考虑某一个参数。但是,在30m井深时,不同药量的安全距离到底是多少米,还需要进一步分析和计算。

## 2 炸药震源安全距离分析

安全距离是指爆破时所产生的地震效应不至于引起建筑物或构筑物破坏的最小距离

(叶洲元等, 2005), 是表征炸药震源对房屋建筑的地震安全性的一个重要参数, 也是爆破设计中必须明确指出和解决的问题之一。

为了求得在该场地条件下的爆破安全距离, 我们必须先计算出此场地条件下的速度峰值衰减关系。因此, 我们还在该场地附近的自由场进行了 14 次爆破(这 14 次爆破, 包括不同炸药类型和不同井深的爆破, 将在后续研究文章中给出不同炸药类型和不同井深的对比研究结果), 并在不同距离  $R$  处布设了 20 台仪器记录每次爆破的振动加速度波形, 挑选出其中震源为普通 TNT 炸药、井深为 30m 的 3 次爆破, 其药量分别为 1、2、3kg(为了与前面的 4 次爆破区别开来, 将这 3 次爆破药量标为 1+, 2+, 3+)。根据衰减关系

$$\log V = -\alpha \log R + b \quad (1)$$

其中  $V$  是不同距离  $R$  处的速度峰值,  $\alpha$  为衰减系数,  $b$  为截距。根据每次爆破 20 台仪器的记录数据, 处理得到不同距离  $R$  处的速度峰值  $V$ , 代入(1)式, 可得到(1)式的衰减关系参数(表 4)。

表 4 爆破衰减关系参数表

井深(m)	药量(kg)	$\alpha$	$b$
30	1+	1.45	2.52
30	2+	1.45	2.67
30	3+	1.46	2.80

根据《爆破安全规程》、房屋的实际情况和参考文献的经验总结(吴克刚等, 2007), 我们取此场地的安全允许振动速度峰值 2.5cm/s, 将此值代入(1)式, 根据表 4 中 3 次爆破的衰减关系参数, 得到 3 次爆破的安全距离(表 5)。

表 5 爆破振动安全距离表

井深(m)	药量(kg)	安全距离(m)
30	1+	29
30	2+	37
30	3+	44

根据《爆破安全规程》中安全距离计算公式

$$R = \left( \frac{K}{V} \right)^{\frac{1}{\alpha}} \cdot Q^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

式中,  $R$  为爆破振动安全允许距离, 单位为 m;  $Q$  为炸药量, 齐发爆破为总药量, 延时爆破为最大一段药量, 单位为 kg;  $V$  为保护对象所在地质点振动安全允许速度, 单位为 cm/s;  $K$ 、 $\alpha$  分别为与爆破点至计算保护对象间的地形、地质条件有关的系数和衰减指数, 可按表 6 选取, 或通过实验现场确定(何鹤等, 2008)。

表 6 爆破区不同岩性的  $K$ 、 $\alpha$  值

岩性	$K$	$\alpha$
坚硬岩石	50 ~ 150	1.3 ~ 1.5
中硬岩石	150 ~ 250	1.5 ~ 1.8
软岩石	250 ~ 350	1.8 ~ 2.0

表 6 是一般情况下的参考值,此次实验场地为第四系泥沙交互沉积,与表中所列岩性不同,因此需要根据具体实验场地,来确定具体的计算值。根据表 4 中  $\alpha$  值以及  $V$  取安全允许振动速度峰值  $2.5\text{cm/s}$ ,将每种药量及对应的安全距离代入式(2),可以得到 3 次爆破的  $K$  值分别为 330、336、367,取平均值,则  $K$  为 344; $\alpha$  取 3 次爆破的平均值,代入计算公式(2),可得到第 4 次爆破的安全距离为 47m。

根据表 5 的计算结果,在该实验研究的地质条件下进行 30m 井深的爆破,1kg 的药量,安全距离为 29m,2kg 的为 37m,3kg 的为 44m,4kg 的为 47m。对比表 5 的安全距离值,在此次实验中,1、2kg 药量的爆破距离都小于安全距离,为不安全爆破;3、4kg 药量的爆破距离都大于安全距离,为安全爆破。这与振动速度振幅值得到的结果一致。从计算结果可以看出,小药量爆破,不一定就是安全生产;大药量爆破,不一定就是不安全生产。在爆破深度一定时,这主要取决于爆破距离。而且,安全距离的增加受药量大小的影响变化并不大,因为根据公式(2),安全距离的增加,只和药量的 1/3 次方成正比。因此,在平时的地震勘查和石油勘探中,只要在安全距离之外,仅靠增加药量来提高探测效果不是理想的做法。

1kg 药量在 5m 处爆破,屋顶 Y 方向的最大振动速度达到了  $5.5399\text{cm/s}$ ,远远超过了  $2.5\text{cm/s}$  的安全允许振动速度;2kg 药量在 30m 处爆破,屋顶 Z 方向的最大振动速度达到了  $5.1384\text{cm/s}$ ,对房屋建筑的安全性能,可能产生裂缝、装饰层掉落等影响,是我们应该避让的爆破距离。3、4kg 药量的爆破,爆破点都位于安全距离之外,3 个方向的最大振动速度都小于  $2.5\text{cm/s}$ ,小于《爆破安全规程》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2003)中的安全允许振动速度。因此,本研究结果在以后的实际爆破操作中,可以作为爆破作业参考距离值。

### 3 炸药震源的频率分析

爆破振动可以看成不同频率谐波分量的叠加,它们在作用于同一建筑物时,由于各自频率的不同,对应的放大系数也不同,只有与建筑物固有频率接近的谐波分量才会得到最大程度的放大;而频率相对较低的谐波分量会基本上维持自身的振幅,频率比建筑物固有频率高的谐波分量可能会削弱。这种建筑物对不同谐波分量的响应特征,可以理解为建筑物对爆破振动中不同频率能量成分的选择放大效应(李洪涛等,2010)。

本次实验所选的房屋为一层红砖坡顶瓦房,高度为 3.5m,砌筑砂浆为普通泥浆。根据结构层数估算结构自振周期的经验公式如下

$$T = 0.1n \quad (3)$$

式中  $T$  是结构的自振周期, $n$  是结构的层数。由本次实验数据,可以得到所选房屋的自振频率为 10Hz 左右。

本次实验选定的房屋,在不同药量 30m 井深的爆破振动下,其主振频率如图 3 所示。第 1 炮由于距离太近,波形的频率发育还不完整,高频成分丰富,主要是 20~90Hz。第 2 炮波形发育充分,频率成分更加丰富,主要集中在 10~90Hz。第 3 炮高频成分已经开始衰减,主频集中在 5~60Hz。第 4 炮高频成分继续衰减,主频集中在 5~40Hz。对于安全距离之内的爆破,由于距离和持续时间都很短,30Hz 成分占主要;对于安全距离之外的爆破,随着距离的增加,高频成分逐渐衰减,低频成分也逐渐减弱,只有与房屋自振频率一致的 10Hz 左

右的成分得到放大,成为主要的振动频率,这一现象在Y方向表现最为明显。这一结果与自振周期经验公式估算的结果一致,也很好地反映了建筑物对爆破振动的共振放大效应。

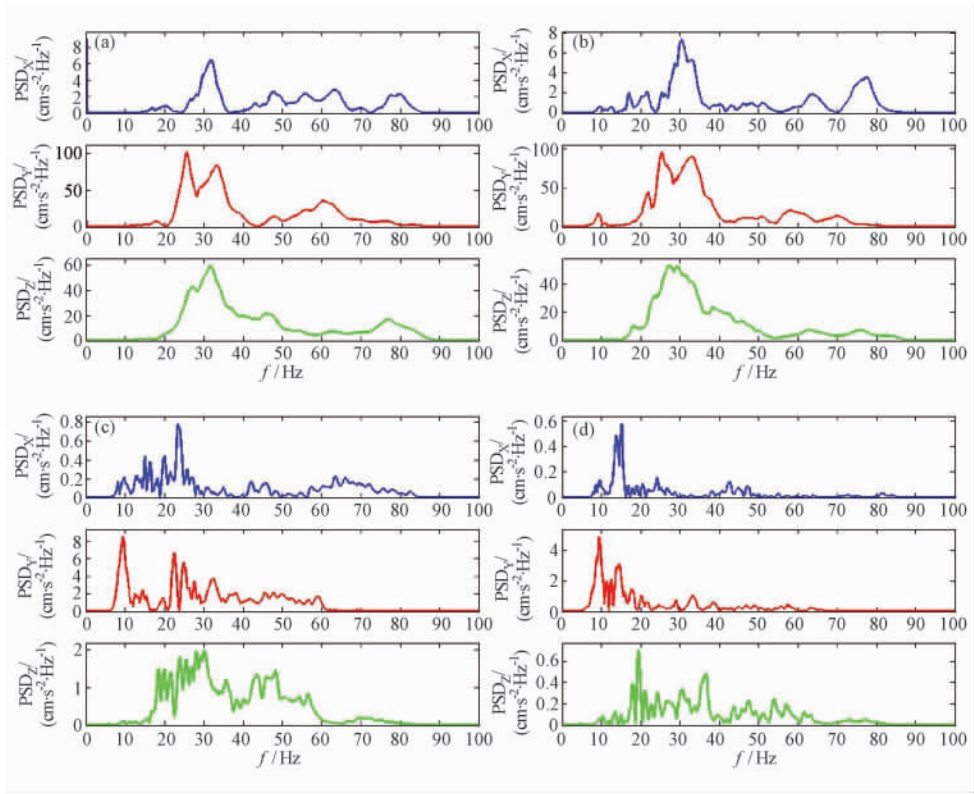


图3 1~4炮屋顶振动加速度的功率谱密度(PSD)

## 4 结语

为了既充分发挥炸药震源的探测效果,又能最大程度地降低爆破振动的危害,必须重视爆破振动对建筑物的地震安全性影响研究,通过小型爆破实验和观测结果综合确定爆破地震安全距离。本文通过对炸药震源引起的房屋振动响应的分析得到,距离越远,速度峰值越小,但是持续时间越长;沿爆破点连线方向的振动最大。因此,药量、距离、方向等都是决定振动大小的因素。同时确定了30m井深时不同药量爆破的安全性;通过安全距离计算得到每次爆破的安全距离;通过频率分析得到爆破振动频率与房屋自振频率之间的关系。本文的研究工作可为今后的野外操作提供对比和参考。

目前国内主要对速度幅值、持续时间、安全距离和频率的影响进行研究,而国外的爆破振动安全判据考虑了振动速度、频率、位移和加速度等多项指标。实际上,炸药震源本身的炸药类型、埋深和距离等,与炸药震源的地震安全性有密切的关系,与振动的幅值、频率、持续时间和场地条件以及结构本身的振动特性等综合因素都有关系,爆破振动持续时间增长,必然引起相应的结构动力学特征的改变。因此,以后应该着重开展多因素的系统研究。

**致谢:**本项工作的野外实验得到了北京市地震局母红旺、郭士军、张杰、刘影、阎婷及胜利油田的参与和支持,在此一并致谢!

## 参考文献

- 吴立、陈建平、舒家华,1999,爆破地震效应的实质及安全距离和破坏标准,地质勘探安全,2,21~23。
- 陆基孟,1993,地震勘探原理,东营:中国石油大学出版社。
- 吴克刚、傅光明,2007,爆破拆除建筑物时的安全距离影响因素分析,采矿技术,7(3),122~124。
- 罗忆、卢文波、陈明等,2010,爆破振动安全判据研究综述,爆破,27(1),14~22。
- 曾晟、杨仕教、谭凯旋等,2008,爆破振动对地表建筑稳定性影响实验,采矿与安全工程学报,25(2),176~179。
- 叶洲元、周志华,2005,爆破震动安全距离的优化计算,中国安全科学学报,15(3),57~60。
- 何鹤、顾月兵,2008,爆破震动对附近民房影响情况的分析,西部探矿工程,1,136~138。
- 李洪涛、舒大强、卢文波等,2010,建筑物对爆破振动中不同频率能量成分响应特征,振动与冲击,29(2),154~158。
- 张智、刘财、邵志刚,2003,地震勘探中的炸药震源药量理论与实验分析,地球物理学进展,18(4),724~728。
- 李孝林、穆太升、董鑫等,2001,频率在爆破震害中的作用及其影响因素分析,工程爆破,7(3),15~18。
- 王俊平、陈宝心,2005,爆破地震波作用下建筑物的动力响应分析方法,西部探矿工程,9,134~139。
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,2003,爆破安全规程(GB6722-2003代替GB6722-1986等),北京:中国标准出版社。

## A field experiment study of seismic safety with explosive source

Luo Guichun<sup>1,2)</sup> Hu Ping<sup>2)</sup> Wang Zhiguo<sup>2)</sup> Wang Fei<sup>2)</sup>

1) Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China

2) Earthquake Administration of Beijing Municipality, Beijing 100080, China

**Abstract** There is a widespread concern over the study of seismic safety with explosive source as time goes on. As far as explosive source itself is concerned, the selection of charge size and well depth has the much effect on excitation energy and frequency. So in the view of the same well depth and different charge sizes, we selected a site for a field experiment to study the seismic safety with explosive source. Accelerograms of every explosion were observed by acceleration meter. Measurements were conducted with the accelerometers that were laid on the basement, windowsill, and rooftop. Acceleration was transformed to velocity in order to correspond with the Safety Regulations for Blasting, and analysis was conducted to the measured data that was acquired from the rooftop. It presents the analysis of structural response, safe distance, vibration frequency in explosive source to study the structural response. We discussed the seismic safety and offered references, which can help direct field-seismic gathering, increase seismic safety and minimize economic expenditure.

**Key words:** Explosive source Acceleration Velocity peak Safe distance