

爆炸余震波形持时和余震事件频度模型^{*}

李学政 刘文学 沈旭峰

(中国西安 710024 西北核技术研究所)

摘要 封闭爆炸发生后常常产生大量的余震事件, 本文对 3 次爆炸余震进行了分析和研究. 结果显示, 余震波形持时很短, 70% 以上的余震波形持时在 2~7 s 之间, 持时频度衰减指数约为 -1.6. 幂函数模型较好地描述了余震序列频度的整体变化特征, 爆炸后约两星期内, 余震序列的频度衰减较快, 衰减指数约为 -1.0. 早期余震以群发式为主, 后期余震以单发式为主. 对于同强度的爆炸, 因介质和地质构造的差异产生的余震数量相差几倍; 对于一次里氏震级为 5.5 级的爆炸, 爆炸后约一个月内, 余震事件频度就接近了本底, 此后仍有少量的余震发生.

关键词 封闭爆炸 余震序列 数学模型

中图分类号: P315.3 **文献标识码**: A

引言

早在 19 世纪末地震学者就开始了余震序列的研究. 地震学家 Omori(1894)曾提出余震频度 $N(t)$ 服从幂函数衰减模型; Utsu(1961)指出余震频度 $N(t)$ 按双曲线衰减; 茂木清夫(Mogi, 1962)指出, 主事件发生后, 不同时间段余震频度衰减规律是不同的. 此后, 地震学者基于这几种模型, 研究了许多地震余震序列. 自 1966 年邢台地震以来, 我国地震学者几乎对所有的强地震序列都进行了研究. 王碧泉和王春珍(1983)研究了我国的邢台(1966)、渤海(1970)、云南通海(1970)、四川炉霍(1973)、云南永善(1974)、辽宁海城(1975)、云南龙陵(1976)、河北唐山(1976)和四川松潘(1976)共 9 次 $M_s \geq 7$ 的地震余震序列的时空特征, 认为: 在主事件后 1 000 天之内, 余震序列的频度符合随时间呈幂函数衰减关系; 根据衰减特征, 余震序列可分为两类: 第一类衰减较快, 衰减指数为 1.13. 第二类衰减较慢, 衰减指数为 0.85. 前者适合我国东部, 后者适合我国西部.

自人们认识到封闭爆炸能够激发余震现象以来, 就开始了爆炸余震序列的研究. Boucher 和 Jones(1969)分析了内华达试验场代号为 Faultess 和 Boxcar 两次爆炸余震序列的特征. 同年, Ryall 和 Savage(1969)进行了爆炸余震的频度衰减分析. Hamilton 等(1972)对爆炸余震序列的特征进行了研究, 对不同爆炸当量的余震序列频度进行了对比, 指出: 爆炸余震序列的时间长短与当量有关, 当量大, 余震序列持时就长; 当量小, 余震序列持时就短. 余震震级很小, 则余震震源主要分布在爆心周围. Ogata(1983)、Reasenbergs 和 Jones(1990)、Davis 和 Frohlich(1991)利用最大似然法研究了余震模型. 一些学者将天然地震余震模型研究手段用于爆炸余震序列. Gross(1996)采用余震事件间隔内余震发生

^{*} 2003-03-05 收到初稿, 2004-01-17 收到修改稿并决定采用.

速率最大化的方法,对 7 次爆炸余震序列及 4 次天然地震序列进行了修正的大森模型及伸展指数模型的估计,并对二者模型参数实施了比较,指出:封闭爆炸余震序列的衰减比大多数天然地震余震序列的衰减快得多,其衰减参数类似于浅的天然地震余震衰减参数.

本文基于爆炸余震的实际测量数据,研究不同余震序列的波形持时分布特征,然后分析余震序列频度的衰减规律,针对爆炸余震序列的频度变化特征,建立描述余震序列频度的数学模型.

1 爆炸余震数据来源

既然人们已经认识到爆炸能够引起余震,那么观测爆炸余震相对于观测地震余震有很大优势——可以在爆炸前布设一些合理的观测台站及台网.因为事先已知爆炸源的位置,而爆炸源的体积或者线度相对于同震级的天然地震体积或者线度小得多,因此,可以靠近爆炸源处布设合理的余震台网,更加有利于众多弱小爆炸余震信号记录.

我们在我国西部地区,对编号分别为 1 号、2 号和 3 号里氏震级约为 5.5 级的 3 次爆炸余震序列进行了监测,通过监测获得了大量的爆炸余震数据.测量中采用了短周期拾震器,固有频率为 2 Hz,整个地震记录系统的响应频带为 0.5~40 Hz.为了提高对信号的检测能力,拾震器均安装在地坑中的基岩上.对每次爆炸前都进行数天的地震记录,目的是测量本底噪声和本底小地震的数量.爆炸后持续近 40 天的爆炸余震监测,获得了大量的爆炸余震模拟地震图(图 1)和丰富的爆炸余震数字记录(图 2).

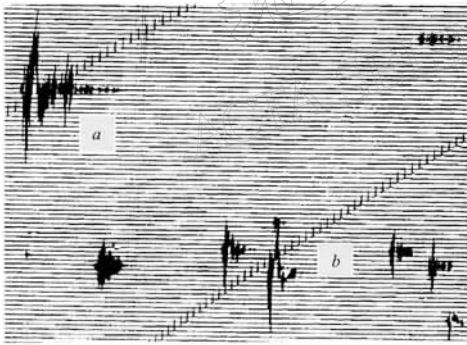


图 1 爆炸余震图(a 为单发式; b 为群发式)

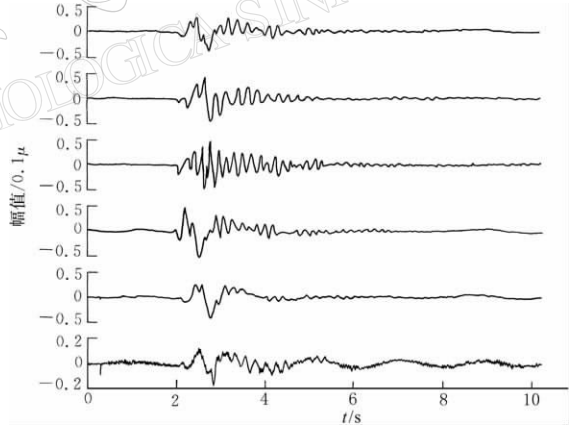


图 2 爆炸余震数字记录图

2 爆炸余震事件发生方式与波形持时

2.1 事件的发生方式

爆炸余震事件很多,余震频度是随时间衰减的,但不是均匀减小.事件之间的时间间隔也是变化的,一些事件之间时间间隔仅为几十秒,甚至为几秒,而另一些事件之间时间间隔为几十分钟,甚至为几小时.根据余震事件之间的时间间隔,可将余震发生方式分为两类:

第一类:单发式.单发式是指在一定时间内只发生一次余震(图 1 中 a).通过对余震事

件之间的时间间隔分析可以发现, 这类余震事件之间的时间间隔较长, 数十分钟甚至几个小时发生一次。

第二类: 群发式。群发式是指在一定时间内连续发生两次或两次以上的余震。这类余震事件之间的时间间隔较短, 几分钟甚至几十秒内发生多次余震。在群发式余震波形中, 常出现串珠状波形, 少者, 三几个波形串联在一起; 多者, 在 1~2 分钟时间内, 十几个波形串联在一起(图 1 中 b)。

余震的单发式和群发式反映了岩石的两种破裂过程。前者, 反映破裂是孤立的, 介质发生小破裂, 释放了弹性能, 又恢复到稳定状态, 这类余震可能发生在介质相对均匀、构造相对简单的地区; 后者, 反映岩石破裂是一个相对复杂的过程, 较短的时间内事件接连不断地发生, 岩石破裂并不是一次完成, 而是通过多次位错实现较大的破裂或通过多次小微震完成异常地应力区应变能释放, 这类余震可能发生在介质各向异性显著、岩石相对破碎和构造相对复杂的地区。这两种类型的余震始终伴随着爆炸余震的发生过程, 早期以群发式为主, 后期以单发式为主。

2.2 爆炸余震波持时统计分析

爆炸余震实测表明, 余震事件相当多, 特别是爆炸当日, 余震事件数百次, 甚至上千次, 事件发生次数随时间不均匀地衰减; 大多数爆炸余震波形幅值小, 仅为几个纳米; 信噪比很低, 几个分贝甚至负十几个分贝; 波形持续时间(简称持时)很短, 多数在 10 s 以内, 大部分事件的震级都很小, 余震数据处理工作量很大。在此采取下列方法处理: 首先, 对事件进行提取, 把余震事件从众多的噪声中筛选出来(李学政等, 2001), 然后再对余震波形和事件进行处理和分析。

爆炸余震波形持时在台站记录图上的长短与事件强度有关, 同时与震源和台站之间的距离也有关。一般地, 事件强度愈大, 初始振幅就愈大, 衰减到同等本底水平上, 所需的时间就长, 即波形持时愈长; 事件强度愈小, 则波形持时愈短。当距离增大时, 地震射线途径的介质复杂, 穿过的界面就越多, 那么出现的震相也就越多, 致使地震波形持时变长。

1 号和 2 号爆炸余震序列事件波形持时统计分析表明: 余震事件的波形持时主要在 30 s 之内, 而大多数余震事件波形持时在 2~7 s 之间。1 号爆炸, 波形持时在 2~7 s 范围内的事件约占总数的 73%, 而持续时间大于 30 s 的事件约占总数的 14%。对于 2 号爆炸, 波形持时在 2~7 s 范围内的事件约占总数的 76%, 波形持时大于 30 s 的事件约占总数的 16%。图 3 和图 4 表明: 绝大部分余震主要是一些波形持时小于 10 s 的事件。

为了研究余震波形持时长短与余震事件的联系, 在此提出持时频度概念。所谓的频度是指在某一标度下单位尺度内事件发生(对应)的次数。持时频度是指以波形持续时间为标度, 尺度为 1 s, 计算不同波形持时相应的余震事件。在持续时间 0~30 s 范围内, 按照 1 s 的间隔, 分成 30 个区段, 统计各次级区段的事件数, 绘制了振动持续时间频度柱状图和随时间的衰减曲线(图 3, 4)。

图 3 和图 4 显示: 波形持时频度柱状图曲线具有一个特征点, 特征点左侧持时频度是上升段, 特征点右侧持时频度是下降段。由于第一段数据点少, 不易统计处理。在此对下降段进行了回归。计算结果如下:

$$1 \text{ 号爆炸} \quad \lg N(t) = -1.861 \lg t + 2.65 \quad (1)$$

$$2 \text{ 号爆炸} \quad \lg N(t) = -1.421 \lg t + 1.99 \quad (2)$$

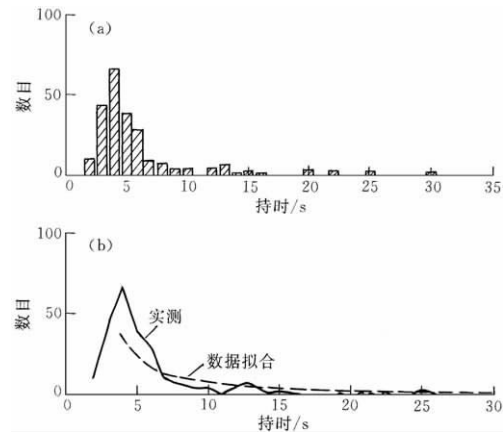


图 3 1 号爆炸余震事件波形持时分布
(a) 持时频度柱状图; (b) 持时频度曲线

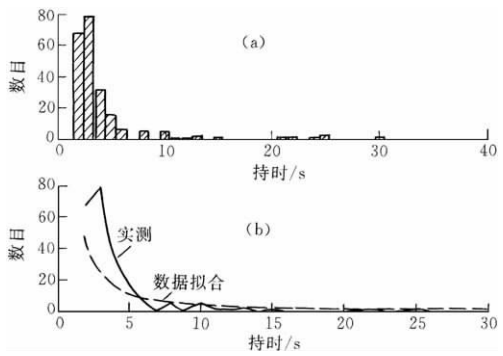


图 4 2 号爆炸余震事件波形持时分布
(a) 持时频度柱状图; (b) 持时频度曲线

式中, $N(t)$ 为波形持时频度, t 为波形持时.

1 号爆炸余震事件衰减指数为 -1.86 , 2 号爆炸余震事件衰减指数为 -1.42 . 1 号和 2 号相关系数分别是 -0.87 和 -0.78 . 回归结果表明, 波形持时频度与波形持续时间是相关的.

3 爆炸余震序列数学模型

根据 3 次爆炸余震序列事件的统计, 1 号爆炸当日记录到了较大的余震 60 多次, 小的爆炸余震 150 多次, 共记录了 220 多次余震事件, 爆炸后 10 日, 余震数量降为 14 次; 2 号爆炸当日余震次数为 150 多次, 爆炸后 4 日急降为 44 次, 爆炸后 10 日余震为 18 次, 尽管余震次数不断减少, 但是衰减很慢; 3 号爆炸当日发生的大小余震累计达 800 余次, 爆炸余震的数目随时间推移愈来愈少, 爆炸后 10 日余震为 150 多次. 爆炸余震频度的显著特征是当日很高, 随着时间而逐渐减少.

物理上爆炸余震的次数与爆炸当量、地质条件等因素有关. 然而, 这 3 次爆炸强度相当, 爆炸当日余震次数以及整个序列事件的次数相差很大. 例如, 爆炸当日, 余震数量相差几倍. 这种现象说明源区的介质和地质构造对爆炸余震的次数影响更大.

爆炸余震除具有衰减特征外, 在衰减过程中还有高峰期. 例如, 爆炸后半个月, 余震明显增多, 但余震序列频度总趋势是衰减的. 不同余震序列当日持续时间差别较大, 对于一次里氏震级约为 5.5 级的爆炸地震, 一般情况下, 爆炸后一个月内余震数目就接近了本底(图 5), 不过此后仍有少量的余震发生.

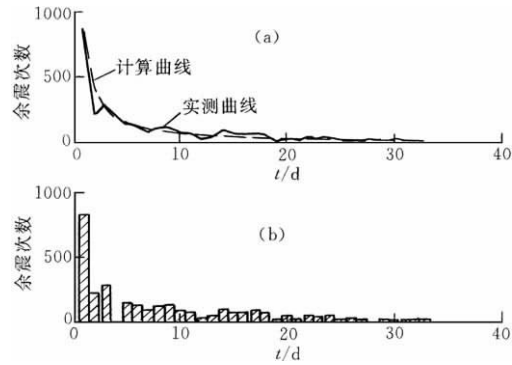


图 5 3 号爆炸余震事件频度图
(a) 频度拟合曲线图; (b) 频度柱状图

余震数量在爆炸后的早期较多和晚期较少的定性描述不能完全反映序列的变化. 因此, 地震学者很早就进行了余震序列的模型研究, 并且已做了许多工作. 由于爆炸余震序列变化受多种因素的影响, 先后提出许多数学模型. 其代表性的模型有幂函数模型, 茂木清夫模型, 以及 Gross 提出的伸展指数模型. 宏观上, 爆炸余震具有天然强地震余震的一些特征. 对此, 依据实测数据和处理结果, 进行爆炸余震序列模型研究.

3.1 幂函数模型

地震学者早就发现地震序列的频度随着时间迅速减小. Omori(1894)指出, 地震频度 $N(t)$ 服从指数衰减规律. Utsu(1961)指出, 地震频度按双曲线衰减, 即

$$N(t) = \frac{A}{(t + C)^P} \tag{3}$$

式中, $N(t)$ 为地震频度, t 为时间, P 为衰减指数; A, C 为常数; 不同的地震序列 C 值不同.

主震后不长的时间内, 余震逐渐增加而达到峰值, 由于常数 C 值很小, 于是式(3)可以简化为 (吕培玲, 1983; Gross, 1996; 傅征祥, 1997)

$$N(t) = \frac{A}{t^P} \tag{4}$$

本研究基于地震频度 $N(t)$ 服从幂函数模型, 对 3 次爆炸余震序列进行统计分析.

1 号爆炸 $N(t) = 141t^{-0.72}$ (5)

2 号爆炸 $N(t) = 73t^{-0.41}$ (6)

3 号爆炸 $N(t) = 855t^{-1.10}$ (7)

从上面回归结果可以看出: 1 号和 2 号衰减指数分别为 -0.72 和 -0.41 , 相关系数分别是 0.64 和 0.49 . 1 号爆炸余震序列频度随时间迅速减少, 幂函数模型基本上反映了爆炸余震序列频度变化; 2 号爆炸模型曲线显示(图 6), 初始的频度数和实测相差很大, 这种模型所反映余震序列的动态变化与实际存在较大误差, 但能够反映余震序列总体状态; 3 号爆炸余震的衰减指数、相关系数不同于 1 号和 2 号. 3 号爆炸余震序列的衰减指数为 -1.10 , 其相关系数约为 -0.91 . 3

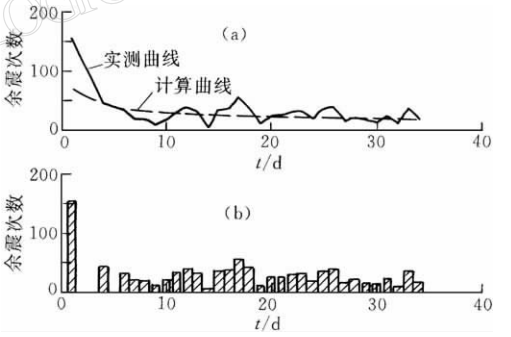


图 6 2 号爆炸余震事件频度
(a) 频度拟合曲线; (b) 频度柱状

号爆炸余震序列完全服从幂函数模型, 余震频度与时间相关性很强, 拟合曲线与实测曲线吻合性很好(图 5). 上述计算分析表明, 一般地, 爆炸余震序列服从幂函数模型.

3.2 分段幂函数模型

Mogi(1962)研究了许多地震序列后提出: 余震频度在不同时间内遵循不同的变化规律, 早期衰减较快, 服从幂函数衰减. 晚期衰减较慢, 服从指数函数衰减. 其数学表达式为

$$\begin{cases} N(t) = n_1 t^{-h} & 0 \leq t \leq t_0 \\ N(t) = n_2 e^{-Pt} & t_0 < t \leq t_1 \end{cases} \tag{8}$$

式中, t 为距主震的时间; n_1, n_2, h, P 为常数; $t_0 = 100$ 日.

根据 3 次爆炸余震测量结果分析得出：爆炸余震序列频度具有明显的分段特征，前后两段频度衰减是不同的。于是，采用分段幂函数模型

$$\begin{cases} N(t) = a_1 t^{-k_1} & 0 \leq t \leq t_0 \\ N(t) = a_2 t^{-k_2} & t_0 < t \leq t_1 \end{cases} \quad (9)$$

式中， a_1, a_2 为常数； t 为时间； k_1, k_2 为衰减指数。

对 1 号、2 号和 3 号以爆炸后 12 日、10 日和 13 日作为分界点，进行分段回归，计算结果如下：

1 号爆炸
$$\begin{cases} N(t) = 10^{2.35} t^{-1.07} & 0 < t \leq 12 \\ N(t) = 10^{2.45} t^{-0.89} & 12 < t \leq 35 \end{cases} \quad (10)$$

2 号爆炸
$$\begin{cases} N(t) = 10^{2.21} t^{-1.06} & 0 < t \leq 10 \\ N(t) = 10^{1.91} t^{-0.40} & 10 < t \leq 35 \end{cases} \quad (11)$$

3 号爆炸
$$\begin{cases} N(t) = 10^{2.85} t^{-1.03} & 0 < t \leq 13 \\ N(t) = 10^{4.40} t^{-2.18} & 13 < t \leq 35 \end{cases} \quad (12)$$

式中， t 为时间(单位：日)。

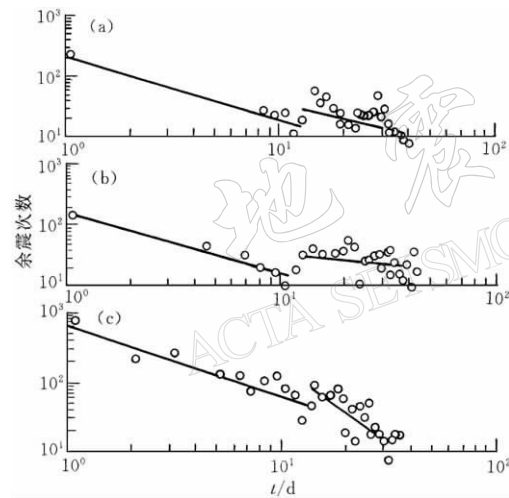


图 7 爆炸余震序列分段回归曲线
(a)、(b)和(c)为 1 号、2 号 3 号爆炸余震序列

通过对爆炸余震序列的分段回归，各次爆炸的余震序列事件频度变化又表现出另一些特征。1 号、2 号爆炸余震序列，第一段衰减较快，第二段衰减较慢；3 号爆余震序列恰恰相反，第一段衰减较慢，第二段衰减较快。余震序列分段以后，3 个序列在第一段其相关系数都有不同程度地增大，表明余震序列早期与时间相关性更强，衰减指数为 1.00 左右。但是，第二段余震序列频度相关系数变小，方差增大。由此可见，约以爆炸后两个星期为界，将爆炸余震序列分为两段：第一段符合幂函数衰减，且衰减较快；第二段变化比较复杂。对于 1 号和 2 号序列，余震数量随时间跳跃性大，序列不符合幂函数衰减模型；3 号序列完全不同于 1 号

和 2 号序列。分段后，两段均服从幂函数模型。这种分段模型对余震序列早期的变化描述比较好，对于某些序列晚期余震描述依然是不适应的(图 7)。

4 结论

1) 爆炸余震事件波形持续时间很短。70% 以上的事件波形持续时间在 2~7 s 之间，持续时间大于 30 s 的事件约占 15%，持时频度衰减指数约为 -1.6。

2) 爆炸余震频度随时间衰减具有分段性，约以爆炸后两个星期为界，一般地，早期衰减较快，衰减幂指数约为 1.0 左右，晚期衰减较慢；幂函数模型较好地描述了余震序列频度的整体变化特征。早期余震以群发式为主，晚期余震以单发式为主。

3) 源区的介质和地质构造对爆炸余震的频度影响较大, 对于同强度的爆炸, 因介质和地质构造的差异产生的余震数量相差几倍; 对于一次里氏震级为 5.5 级的爆炸, 爆炸后约一个月内, 余震数目就接近了本底, 此后仍有少量的余震发生。

参加本工作的还有褚玉成、周青云和范广超同志; 胡毓良研究员指导了本文的写作, 在此一并表示谢意。

参 考 文 献

- 傅征祥编著. 1997. 中国大陆地震活动性力学研究[M]. 北京: 地震出版社, 238~249
- 李学政, 杨选辉, 胡毓良. 2001. 噪声水平的爆炸余震信号提取[J]. 地震地磁观测与研究, **22**(1): 9~17
- 吕培苓. 1983. 大地震后短时间内余震活动时空分布的某些研究[J]. 地震学报, **5**(1): 39~45
- 王碧泉, 王春珍. 1983. 余震序列的时空特征[J]. 地震学报, **5**(4): 383~395
- Boucher G, Jones E. 1969. Earthquakes associated with underground nuclear explosions[J]. *Geophys J R astr Soc*, **74**(15): 3 808~3 822
- Davis D, Frohlich C. 1991. Single-link cluster analysis of earthquake aftershocks decay laws and regional variations[J]. *Geophys J R astr Soc*, **96**: 6 335~6 350
- Gross S J. 1996. Aftershocks of nuclear explosions compared to natural aftershocks[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **86**(4): 1 054~1 060
- Hamilton R M, Smith B E, Fischer F G. 1972. Earthquakes caused by underground nuclear explosions on Pahute Mesa, Nevada test site[J]. *Bull Seism Soc Amer*, **62**(5): 1 319~1 341
- Mogi K. 1962. On the time distribution of after shocks accompanying the recent major earthquakes in and near Japan[J]. *Bull Earthq Res Inst, Tokyo Univ*, **40**: 107~124
- Ogata Y. 1983. Estimation of the parameters in the modified omori formula for aftershock sequences by the maximum likelihood procedure[J]. *J Phys Earth*, **31**: 115~124
- Omori F. 1894. On the aftershocks of earthquake[J]. *J Coll Sci Imp Tokyo*, **7**: 171~200
- Ryall A, Savage W U. 1969. A comparison of seismological effects for the Nevada underground test Boxcar with natural earthquakes in the Nevada region[J]. *Geophys J R astr Soc*, **74**(17): 4 281~4 289
- Reasenberg P A, Jones L M. 1990. California aftershock hazard forecasts[J]. *Science*, **247**: 345~356
- Utsu T. 1961. A statistical study on the occurrence of aftershocks[J]. *Geophysical Magazine*, **3**(3): 710~724

MODELS OF WAVE DURATION AND EVENT FREQUENCY OF EXPLOSION AFTERSHOCKS

Li Xuezheng Liu Wenxue Shen Xufeng

(Northwest Nuclear Technology Institute, Xi'an 710024, China)

Abstract: The contained underground explosion (CUE) usually generates huge number of aftershocks. This kind of aftershocks induced by three CUEs were investigated in this paper. The conclusions show that the duration of aftershock waveforms are rather short, 70 percent of them range from 2 to 7 s; the occurrences of the aftershocks conform to negative power function, which has the power of -1.6 . The aftershock sequence attenuates a little bit faster, with power of -1.0 , within two weeks of post-explosions. During the early stage of post-explosions the aftershocks show up clusteringly, however, they usually show up individually during the late stage of post-explosions. The number of aftershocks generated by the compatible explosions differs by several times because of different medium and geological structure; within one month after an explosion with Richater magnitude of 5.5, the number of aftershocks attenuate to the background. Hereafter there are still tiny number of aftershocks.

Key words: contained underground explosion; aftershock sequences; mathematical model