

文章编号: 1001-1455(2005)02-0180-03

# 地下爆炸地震强度与当量的比例关系\*

钟放庆, 李山林, 孙恒仲, 周建清, 王文学, 邹祖军

(91388 部队, 广东 湛江 542022)

**摘要:** 为了研究爆炸地震耦合强度与爆炸当量的关系, 针对某一硬岩介质, 在相同爆炸深度条件下, 进行了系列不同爆炸当量的小当量化学爆炸试验, 爆炸源附近的介质特性相同。应用近场地表记录的其中两次爆炸当量相差一倍的试验数据, 比较研究了他们的爆炸震源函数折合速度势振幅谱比, 得到他们的地震耦合强度地震矩  $M_0$  比值近似等于 2, 与他们的爆炸当量比值相等, 因此得到同爆炸深度的地下爆炸地震强度与爆炸当量成正比的结论。

**关键词:** 爆炸力学; 地震耦合; 折合速度势; 地下爆炸

**中图分类号:** O382.2

**国标学科代码:** 130·35

**文献标志码:** A

## 1 引言

在核爆炸地震学中, 爆炸震源强度通常用地震矩  $M_0$  表示, 它是描述地下爆炸震源函数的重要参数。爆炸地震强度的研究通常有两种不同的方法: 一种是反演方法, 即应用近区地表测试数据, 假定地球介质速度结构模型为水平分层, 通过理论地震图全波人工拟合方法, 来反演地下爆炸震源参数<sup>[1]</sup>, 或假定地球介质为无限半空间, 通过去除地表响应函数方法来反演震源参数; 另一种是相对标定方法, 即通过试验的方法, 在相同的试验地点, 进行两次爆炸当量不同的试验, 在相同的一系列测点位置对其爆炸震动信号进行测量, 通过求他们的震源函数比值可得到爆炸震源参数与爆炸当量比例关系, 这种方法的优越性是其结果比较准确。爆炸地震耦合强度  $M_0$  与爆炸当量的关系的问题一直是爆炸地震最关心的问题。本文中应用同一地点爆炸的两次事件测试信号, 计算它们的爆炸震源函数比值, 得到震源函数的震源强度相对比结果, 分析其与爆炸当量的关系。

## 2 地下爆炸震源函数相对比的计算原理

引入位移势函数  $\phi(r, t)$ , 可得自由场径向位移  $D(r, t)$  和用位移势函数  $\phi$  表示的波动方程; 对于一维球对称扰动, 引入折合位移势  $\Psi(\tau)$ , 可得折合位移势  $\Psi(\tau)$  与弹性区内自由场径向位移  $D(r, t)$  的关系。折合速度势是折合位移势的微分, 在频率域中, 通常用折合速度势  $\gamma(\omega)$  来表示爆炸震源函数。

### 2.1 Helmberger & Hadley 震源函数理论模型

D. V. Helmberger 等<sup>[2]</sup> 针对美国的帕休特(Pahute Mesa)和安奇特卡(Amchitka)两个不同介质特性的试验场, 应用大量的核爆炸试验数据, 对爆炸震源函数进行了研究, 给出了爆炸震源函数的理论模型<sup>[2]</sup> 及爆炸震源参数与爆炸当量  $Y$  和埋深  $h$  的关系。震源函数理论模型为

$$\gamma(s) = \Psi_{\infty} \frac{as + b^4}{(s + b)^4} \quad (1)$$

式中:  $b = \eta, s = i\omega, a = (6B + 1)\eta^3$ 。震源函数的 3 个震源参数是频率特征参数  $\eta$ 、低频稳态值  $\Psi_{\infty}$  和过冲特征因子  $B$ 。其中低频稳态值  $\Psi_{\infty}$  是指当频率趋近于零时的低频极限值。它与爆炸地震强度  $M_0$  关系为<sup>[2]</sup>:  $M_0 = 4\pi\rho a^2 \Psi_{\infty}$ ,  $\rho$  为爆炸源处的介质密度。爆炸震源参数与爆炸当量及爆炸深度的关系为<sup>[2]</sup>

\* 收稿日期: 2004-05-31; 修回日期: 2004-10-15

基金项目: 国家 973 计划项目

作者简介: 钟放庆(1964—), 男, 副研究员。

帕尤特试验场  $\Psi_{\infty} = 672Y/h^{0.27}, \quad \eta = 4.04h^{0.42}/Y^{0.33}, \quad B = 1 \quad (2)$

安奇特卡试验场  $\Psi_{\infty} = 950Y/h^{0.27}, \quad \eta = 4.70h^{0.42}/Y^{0.33}, \quad B = 1 \quad (3)$

式中： $\Psi_{\infty}$ 、 $Y$ 、 $h$  和  $\eta$  的单位分别为  $m^3$ 、 $kt$ 、 $m$  和  $H_z$ 。在地下核试验中，为了保证核爆炸不产生开腔泄漏，密封式爆炸的爆炸深度是按  $Y$  的比例关系设定的，即爆炸深度与  $Y$  成三分之一次方关系。按照这一关系可推算爆炸耦合强度  $M_0$  与  $Y$  成大约 0.9 次方，频率特征因子与  $Y$  大约成 -0.19 次方。

2.2 地下爆炸折合速度势振幅谱比计算方法

在相同爆炸深度情况下的硬岩介质中进行了系列小当量化学爆炸试验，测量了他们的近场地表运动数据，应用同一地震台站记录的同一地点爆炸的两次不同当量的数据，通过计算他们的折合速度势振幅谱比  $\gamma_1(\omega)/\gamma_2(\omega)$ ，可得到爆炸地震耦合强度  $M_0$  与爆炸当量  $Y$  的比例关系。

事件  $i$  在第  $k$  个地震台站记录  $j$  分量的地震波速度谱函数为

$$v_{kji}(r, \omega) = \gamma_i(\omega)G_{kji}(r, \omega)C_k(\omega) \quad (4)$$

式中： $\gamma_i(\omega)$  为  $i$  爆炸震源函数振幅谱， $G_{kji}(r, \omega)$  为爆炸震源  $i$  到  $k$  台站  $j$  ( $j=1, 2, 3$ ) 分量信号的路径效应因子， $C_k(\omega)$  为  $k$  台站响应因子。对于爆炸事件 1 和事件 2 在同一台站记录的速度谱函数比为

$$\frac{v_{kj1}(r, \omega)}{v_{kj2}(r, \omega)} = \frac{\gamma_1(\omega)G_{kj1}}{\gamma_2(\omega)G_{kj2}} \quad (5)$$

对所有台站各记录分量的速度谱比的总和为

$$\sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^3 \frac{v_{kj1}(r, \omega)}{v_{kj2}(r, \omega)} = \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^3 \frac{\gamma_1(\omega)G_{kj1}}{\gamma_2(\omega)G_{kj2}} \quad (6)$$

式中： $k$  为台站数， $j$  为记录份量。当爆炸事件 1 和 2 爆炸地点相同，信号记录的台站也相同时，可将他们的路径效应认为等效，因此有

$$\frac{\gamma_1(\omega)}{\gamma_2(\omega)} = \frac{1}{3N} \sum_{k=1}^N \sum_{j=1}^3 \frac{v_{kj1}(r, \omega)}{v_{kj2}(r, \omega)} \quad (7)$$

由于实际爆炸点的位置不完全一致，相差有十几米，路径效应略有偏差，经过上述处理后，可以降低路径效应偏差，得到比较准确的震源函数振幅谱比  $\gamma_1(\omega)/\gamma_2(\omega)$ 。对于同一爆炸地点，介质的密度和压缩波速度都相同，则爆炸事件 1 和 2 的地震耦合强度的比为

$$\frac{M_0^{(1)}}{M_0^{(2)}} = \frac{\Psi_{\infty}^{(1)}}{\Psi_{\infty}^{(2)}} = \lim_{\omega \rightarrow 0} \left| \frac{\gamma_1(\omega)}{\gamma_2(\omega)} \right| \quad (8)$$

3 地表运动测试数据

(1) 在 3~12 km 的近场范围内的不同震中距和方位角，布设了 5 个三分向地表运动测点，来记录小当量化学爆炸 hb3 和 hb2 的地表运动数据，hb3 的爆炸当量为 hb2 的两倍。图 1 为测点分布的示意图，S01~S05 分别为 5 个地表运动测量点。

(2) 图 2 为 hb3 和 hb2 小当量化学爆炸在 S01 和 S02 两测点的地表运动加速度垂向波形。

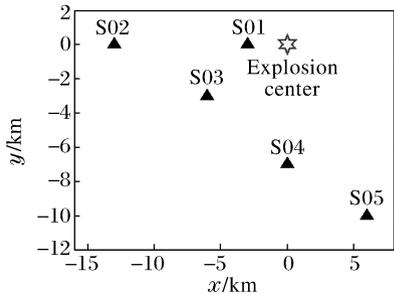


图 1 化爆地表运动测点布设示意图  
Fig. 1 The recording site plot for chemical explosion

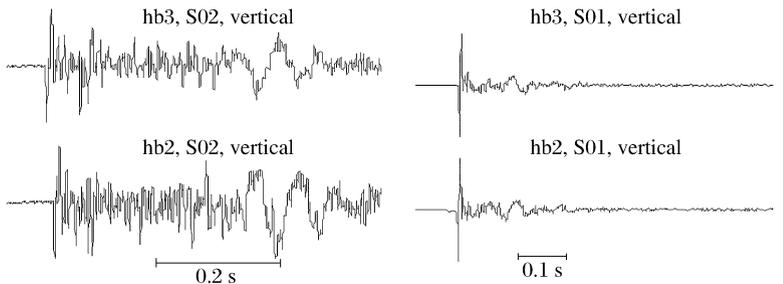


图 2 hb2、hb3 在测点 S01 和 S02 的垂向分量地表运动加速度记录数据  
Fig. 2 The  $z$  component acceleration data of hb2 and hb3 at S01 site and S02 site

## 4 结果与分析

图 3 为小当量化学爆炸 hb3 和 hb2 震源函数折合速度振幅谱比  $|\gamma_3(\omega)/\gamma_2(\omega)|$  计算结果, 图 3(a) 为测点 S01 测试数据得到的计算结果, 图 3(b) 为近场所有测点的所有记录分量计算得到的平均结果。结果表明: 在低频段 ( $\omega \rightarrow 0$  时),  $\Psi_{\infty}^{(1)}/\Psi_{\infty}^{(2)}$  的比值近似等于 2, 与他们的爆炸当量比值相等, 表明相同爆炸深度下的爆炸地震耦合强度与爆炸当量近似成正比。另外由于测试系统的频率响应范围为 0.1~50 Hz, 而小当量的爆炸震源频率上限远高于 50 Hz, 故计算结果只能得到低频稳态值的比值结果, 即爆炸地震耦合强度的比值结果, 而没有得到高频情况下比值结果, 因此不能给出爆炸震源函数的频率特征参数与爆炸当量的关系。

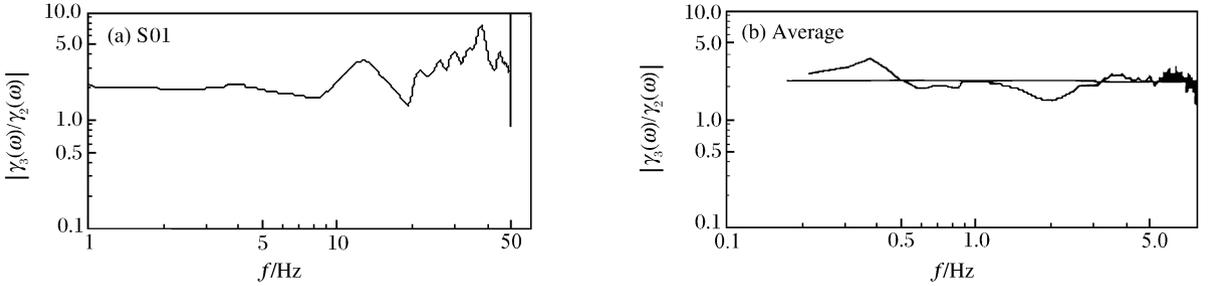


图 3 hb3 与 hb2 折合速度势振幅谱比值

Fig. 3 The ratio of RVP spectrum magnitude

## 参考文献:

- [1] 钟放庆, 靳平, 李孝兰, 等. 地下爆炸地震波的数值模拟及震源函数的研究[J]. 爆炸与冲击, 2001, 21(1): 53—56.  
ZHONG Fang-qing, JIN Ping, LI Xiao-lan, et al. Seismic wave modeling and seismic function obtained for underground explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2001, 21(1): 53—56.
- [2] Helmberger D V, Hadley D M. Seismic source function and attenuation from local and teleseismic observations of the NTS Event Jorum and Handley[J]. Bull Seism Soc Am, 1981, 71: 51—67.

## Study on seismic coupling of underground explosion in rock

ZHONG Fang-qing<sup>\*</sup>, LI Shan-lin, SUN Heng-zhong,  
ZHOU Jian-qing, WANG Wen-xue, ZOU Zu-jun  
(91388 Unit, Zhanjiang 524022, Guangdong, China)

**Abstract:** Series of small yield chemical explosion tests, which media were uniform near the explosion sources, were performed in a certain hard rock to investigate the relationship between explosion seismic coupling intensity and yield in the same buried depth. The magnitude spectra of explosion seismic function reduced velocity potential for two chemical explosions which yield ratio was two, were compared with the ground motion data to obtain that the seismic coupling ratio is approximately equal to two. Therefore, it was concluded that underground explosion seismic intensity be directly proportional to yield in the same explosion depth.

**Key words:** mechanics of explosion; seismic coupling; reduced velocity potential; underground explosion

\* Corresponding author: ZHONG Fang-qing  
E-mail address: zjzfq@126.com  
Telephone: 0759-3159723