

文章编号: 1001-1455(2005)02-0176-04

应用地运动数据反演地下爆炸震源函数*

钟放庆, 李山林, 孙恒仲, 周建清, 邹祖军, 王文学

(91388 部队, 广东 湛江 542022)

摘要: 应用近场(震中距为几公里至几十公里)的地表地运动测试数据来研究爆炸震源特性, 将近场地震波传播介质近似为均匀半空间模型, 通过去除地表响应, 反演了硬岩介质中的地下爆炸震源函数—折合速度势 RVP(reduced velocity potential), 得到了描述地下爆炸震源的折合速度势 RVP 振幅谱及其参数稳态值 Ψ_∞ 、特征频率 η 、过冲特征量, 通过回归分析, 得到稳态值 Ψ_∞ 和特征频率 η 与爆炸当量的关系。

关键词: 爆炸力学; 震源函数; 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

地震台站记录地震波信号的性质主要取决于震源特性和传播路径效应, 震源特性包括震源空间机制和震源时间函数特性, 如果已知地震波的传播路径效应, 则应用地表台站记录的地震信号, 通过扣除路径因素可得到震源特性。在核爆炸地震学研究中, 通常将爆炸震源考虑为球对称等效震源模型, 这种震源模型被定义为: 在一个球对称的弹性边界上, 作用着均匀分布的径向应力, 弹性响应区与非弹性响应区的球对称分界面叫做等效辐射体^[1], 其半径叫做弹性半径 r_{el} , 在爆心距大于或等于弹性半径处, 核爆炸产生的扰动满足线弹性规律。对于各向同性均匀介质中的球对称爆炸, 通过弹性波动方程和弹性本构方程, 可以得到震源的折合速度势 RVP 与自由场测量的粒子速度关系。

关于地下爆炸震源特性问题过去进行过大量的研究, 提出了多种震源函数理论模型, 其中 Haskell 模型^[2]、Mueller & Murphy 模型^[3]、von Seggern & Blandford 模型^[4]和 Helmberger & Hadley 模型^[5]具有代表性。

2 地下爆炸震源函数 RVP 的描述

引入位移势函数 $\phi(r, t)$, 自由场径向位移 $D(r, t)$ 可以表示为: $D(r, t) = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (-\phi(r, t))$, 用位移势函数 ϕ 表示的波动方程为

$$\nabla^2 \phi(r, t) = \frac{1}{\alpha^2} \frac{\partial^2 \phi(r, t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

式中: α 为压缩波速度。对于一维球对称扰动, 波动方程(1)的通解可表示为 $\phi(r, t) = \Psi(\tau)/r$, $\Psi(\tau)$ 称为折合位移势 RDP(reduced displacement potential), τ 称为折合时间, $\tau = t - (r - r_{el})/\alpha$ 。折合位移势 $\Psi(\tau)$ 与弹性区内自由场径向位移 $D(r, t)$ 的关系可表示为

$$D(r, t) = \frac{\partial}{\partial r} \left(-\frac{\Psi(\tau)}{r} \right) = \frac{1}{r^2} \Psi(\tau) + \frac{1}{\alpha r} \frac{d\Psi(\tau)}{d\tau} \quad (2)$$

在频率域中, 通常用折合速度势来表示爆炸震源函数。引入折合速度势 $\gamma(\tau)$, 它与自由场记录的径向速度 $v(r, t)$ 的关系为: $v(r, t) = -\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\gamma(\tau)}{r} \right) = \frac{\gamma(\tau)}{r^2} + \frac{\dot{\gamma}(\tau)}{\alpha r}$, 对它进行 Fourier 变化, 并考虑到介质的非

* 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。

弹性吸收,可得到

$$\hat{v}_r(i\omega) = \hat{\gamma}(i\omega) \left(\frac{1}{r^2} + \frac{i\omega}{\alpha r} \right) \exp\left(-\frac{r\omega}{2\alpha Q}\right) \quad (3)$$

式中:Q 为介质非弹性吸收的品质因子。对地面加速度记录来说,需要对记录作自由表面响应的校正,同时对时间积分,将加速度波形转换成速度波形。图 1 为自由场的地震波射线经自由表面的反射、透射示意图,图中 P_i 表示入射 P 波信号, P_r 为反射 P 波, S_r 为转换波 PS。通过应用自由表面应力为零的边界条件及反射定律,入射 P 波信号 $A(t)$ 引起的自由表面地震波信号径向和垂向分量信号分别为

$$a_r(t) = \frac{4\alpha p}{\beta^2} \frac{\cos i}{\alpha} \frac{\cos j}{\beta} \frac{A(t)}{R(p)} \quad (4)$$

$$a_v(t) = -\frac{2\alpha}{\beta^2} \frac{\cos i}{\alpha} \left(\frac{1}{\beta^2} - 2p^2 \right) \frac{A(t)}{R(p)} \quad (5)$$

$$\tan 2j = \frac{a_r(t)}{a_v(t)} \quad (6)$$

式中: i 为 P 波的入射角, j 为 S 波的反射角, $p = \sin i / \alpha$, β 为剪切波速度。 $R(p) = \left(\frac{1}{\beta^2} - 2p^2 \right)^2 + 4p^2 \cdot \frac{\cos i \cos j}{\alpha \beta}$ 。因此,由已知地表记录的爆炸地震 P 波信号 $a_r(t)$ 、 $a_v(t)$ 及传播介质的特性,可得到自由场的入射 P 波信号 $A(t)$ 。再由(3)式就可计算折合速度势振幅谱 $\gamma(\omega)$ 。

3 测试数据

收集整理了同一地点 5 次硬岩介质中地下爆炸的近场地表加速度测试数据,爆炸当量从 20 kg 到几千吨 TNT,其中 hb1~hb4 为化学爆炸,当量小于 1 t,NE6 为大当量非化学爆炸。利用这些数据来研究硬岩介质的爆炸震源函数特性,并分析了震源参数与爆炸当量的关系模型。各爆炸事件的测点爆心距见表 1,图 2 为部分爆炸部分测点加速度测试波形,其他的测试数据波形在此省略,图中表明了测点的震中距和测量分量。

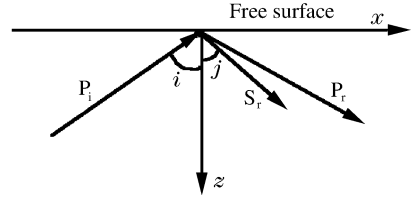


图 1 自由表面入射和反射示意图
Fig. 1 The schematics of free surface reflection and transmission

表 1 测点的震中距

Table 1 Recording distance of events

事件	r/km			
	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4
NE6	8.20	13.7	17.4	
hb1	0.04	0.06	0.08	0.116
hb2	0.05	0.10	0.22	0.320
hb3	0.08	0.12	0.23	0.330
hb4	0.04	0.08	0.12	0.190

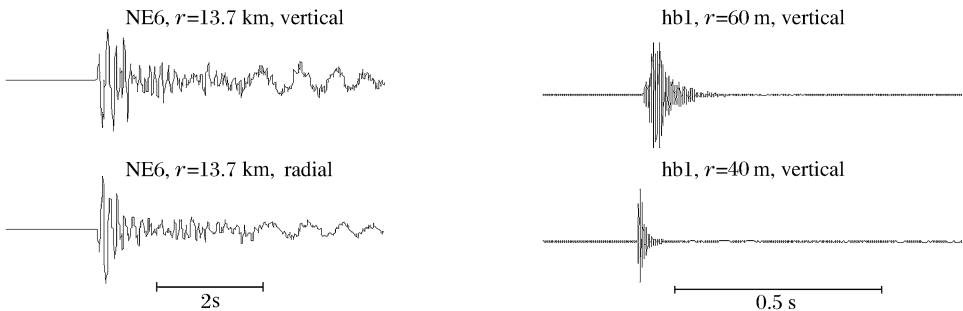


图 2 地下爆炸近场部分测点加速度波形

Fig. 2 The close-in acceleration waveform of underground explosion

4 计算结果与结论

运用上述方法,由各个测点数据计算了 5 次爆炸事件的折合速度势振幅谱 $\gamma(\omega)$,图 3、图 4 分别为由 NE6 测点 1、hb1 测点 1 计算得到的相应的爆炸震源函数折合速度势 $\gamma(\omega)$ 振幅谱。通过对计算结果分析得到以下结论。

(1)硬岩地下爆炸的震源函数计算得到的 $\gamma(\omega)$ 可用 Helmberger & Hadley 理论模型进行较好的拟合, Helmberger & Hadley 震源函数模型的数学形式为

$$\gamma(s) = s\bar{\Psi}(s) = \Psi_{\infty} \frac{as + b^4}{(s + b)^4} \tag{7}$$

式中: $b = \eta$, η 为震源频率特征参数, Ψ_{∞} 为震源强度参数,它与地震矩 M_0 的关系为^[6]: $M_0 = 4\pi\rho\alpha^2\Psi_{\infty}$, B 为震源过冲特征参数, $a = (6B + 1)\eta^3$, Laplace 变量 $s = i\omega$ 。

(2)通过对计算得到的爆炸震源函数折合速度势 $\gamma(\omega)$ 振幅谱进行理论拟合,得到了 5 次地下爆炸的震源函数参数(见表 2)。震源强度参数 Ψ_{∞} 随爆炸当量增大而增大,频率特性因子 η 随爆炸当量增大而减少,过程特性参数 B 与爆炸当量没有明显关系,但对于不同类型爆炸观测到描述过程特性的参数 B 值不同,NE6 大当量的非化学爆炸与其他小当量的化学爆炸 B 值存在明显的差异,表明这两类爆炸震源的应力加载性质可能存在差异。

(3)通过回归得到硬岩地下爆炸震源参数 M_0 、 η 与爆炸当量 Y 的关系,图 5 为回归的结果,结果表明震源参数与爆炸当量满足指数关系。

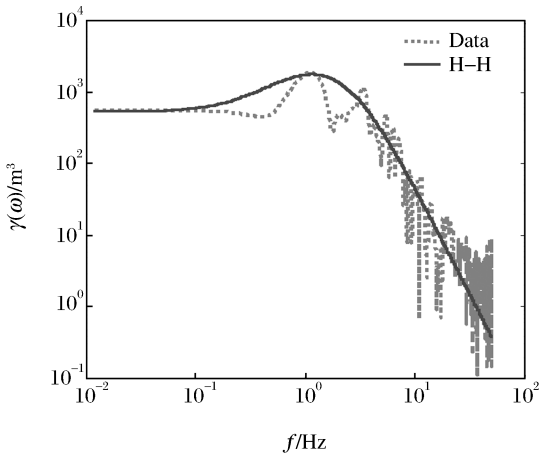


图 3 NE6 测点 1 折合速度势振幅谱

Fig. 3 The RVP spectrum magnitude of NE6 calculating from recording No. 1

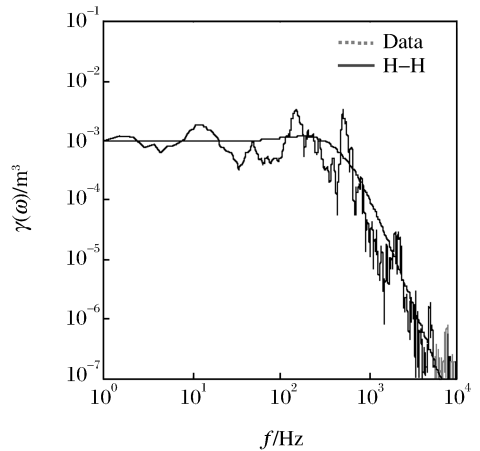


图 4 hb1 测点 1 折合速度势振幅谱

Fig. 4 The RVP spectrum magnitude of hb1 calculating from recording No. 1

表 2 震源参数

Table 2 The parameters of seismic source

测点	NE6			hb1			hb2			hb3			hb4		
	M_0 / PNm	B	η / Hz	M_0 / μ Nm	B	η / kHz	M_0 / μ Nm	B	η / kHz	M_0 / μ Nm	B	η / kHz	M_0 / μ Nm	B	η / kHz
1	0.18	1.5	15	0.50	0.5	2.0	13	0.5	0.9	21	0.5	0.65	63	0.5	0.50
2	0.22	1.5	18	0.40	0.5	2.0	16	0.5	0.9	26	0.5	0.65	63	0.5	0.50
3	0.19	1.5	14	0.40	0.5	1.0	13	0.5	0.9	26	0.5	0.60	47	0.5	0.45
4				0.40	0.5	1.0	13	0.5	0.9	21	0.5	0.60	47	0.5	0.45

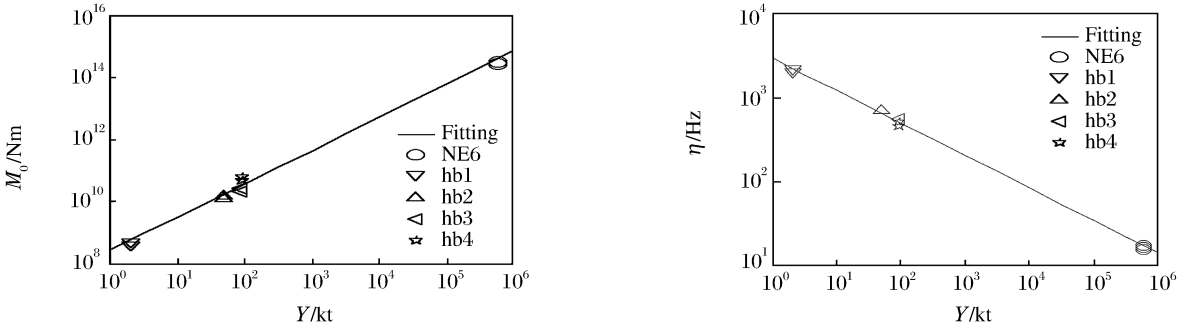


图 5 震源参数 M_0 、 η 与当量 Y 的回归关系

Fig. 5 The relationship between seismic source parameter and yield

参考文献：

[1] Sharpe J A. The production of elastic waves by explosion pressures: I , Theory and empirical observations[J]. Geophysics, 1942,7:144-154.

[2] Haskell N A. Analytic approximation for the elastic radiation from a contained underground explosion[J]. J Geophys Res, 1967,72:2583.

[3] Mueller R A, Murphy J R. Seismic characteristics of underground nuclear detonations: Part I , Seismic spectrum scaling[J]. Bull Seism Soc Am, 1971,61:1675-1692.

[4] von Seggern D H, Blandford R R. Source time functions and spectra for underground nuclear explosions[J]. Geophys J, 1972, 31:83-97.

[5] 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.

[6] Denny M D, Johnson L R. The explosion seismic source function: Models and scaling laws reviewed[A]. Explosion Source Phenomenology[C]. Washington D C: American Geophysical Union Monograph 65, 1991:1-24.

Seismic source function for an underground explosion

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

Abstract: The characteristics of explosive seismic source has been investigated with close-in ground motion data. On the assumption of half space model, the underground explosion seismic source function, i. e. reduced velocity potential (RVP), has been obtained deducting the ground surface response. The spectrum magnitude of RVP and its parameters including steady state value Ψ_∞ , frequency factor η and overshoot B were obtained. The relationship between yield and source parameters of Ψ_∞ and η were obtained as well.

Key words: mechanics of explosion; seismic source function; reduced velocity potential; underground explosion

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