

文章编号: 1001-1455(2007)01-0018-08

# 花岗岩介质中地下爆炸震源函数研究\*

周 钟, 王肖钧, 肖卫国, 赵 凯

(中国科学技术大学力学和机械工程系, 安徽 合肥 230026)

**摘要:** 结合地震反演方法和数值计算方法, 研究了地下爆炸震源函数的特征以及介质特性对震源函数的影响。从水饱和花岗岩地下爆炸波数值模拟计算出发, 重点分析了含水量对震源函数特性的影响。结果表明, 含水量会提高地下爆炸的耦合强度, 对于震源函数的稳态值, 干岩要比水饱和岩石低, 且稳态值随含水量的增大而增大; 拐角频率随含水量的增大而降低; 在水饱和花岗岩中, 震源函数的高频衰减指数高于  $f^{-2}$ ; 而过冲特性并不明显。

**关键词:** 爆炸力学; 震源函数; 理论反演; 地下爆炸; 花岗岩; 数值计算

**中图分类号:** O382

**国标学科代码:** 130·35

**文献标志码:** A

## 1 引言

在震害学领域, 通常将地下封闭式爆炸近似为球对称等效震源模型, 该模型的基本思想是, 地下爆炸引起的地震效应可以通过一有限空间里的震源所引起的震动效应来描述。对于无限介质中的封闭式地下爆炸, 震源被等价为一个球对称的弹性边界上, 作用着均匀分布的径向应力, 弹性响应区和非弹性响应区的球对称分界面称为等效空腔或等效辐射体, 其半径叫做弹性半径。在爆心距大于或等于弹性半径处, 地下爆炸产生的扰动满足线弹性规律, 震源激发的地震波特性和作用在弹性半径球表面上压力脉冲的性质<sup>[1]</sup>。地下爆炸和天然地震的根本区别在于它们的震源特性不同。

地下爆炸震源特性的研究内容包括震源机制、震源函数等方面, 其中震源机制描述震源的空间特征, 主要体现在地下爆炸激发的地震波各主要震相的相对激发特征和地震波辐射空间方向性特征; 而震源函数描述震源的时间特征, 包括地震波的频率特征和强度特征等。本文中主要研究震源的时间特征, 即震源函数, 以及介质特性对震源函数的影响。

## 2 地下爆炸震源函数

地下爆炸震源函数是从地震学角度研究地下爆炸地震效应的重要工具, 它通过时域里的折合位移势(RDP: reduced displacement potential)  $\Psi(\tau)$  和频域里的折合速度势(RVP: reduced velocity potential)  $\gamma(\omega)$  对震源强度和震源特性进行描述。震源函数有4个典型特征: (1) 稳态值  $\Psi_{\infty}$ :  $\tau \rightarrow \infty$  时  $\Psi(\tau)$  的值, 反映了爆炸引起的介质的永久性变形; (2) 过冲特性: RDP中超过稳态值的部分, 反映了爆炸空腔的回弹特性; (3) 高频衰减特性: 振幅谱的高频端幅值随频率的衰减速率; (4) 拐角频率  $\omega_c$ : 振幅谱的低频渐近线与高频渐近线的交点频率。

地下爆炸震源函数的研究通常有两条技术途径:

一是根据现场地震测试数据, 利用地震学中的反演方法推算震源函数, 这是震源函数研究中的一种重要方法。早期的研究又主要依赖于自由场的质点速度和径向应力的测量, 但是自由场的测试要求和测试技术难度很大, 其结果的可信度往往受到质疑。因此众多学者利用近场地表地震数据对震源函数进行分析, 提出了不同形式的震源函数理论模型<sup>[2]</sup>, 如Haskell的四阶模型、Mueller & Murphy的二阶模

\* 收稿日期: 2005-10-10; 修回日期: 2005-12-14

基金项目: “十五”人防重点项目

作者简介: 周 钟(1977—), 男, 博士。

型、von Seggern & Blandford 的二阶模型、Helmberger & Hadley 的三阶模型等,通过这些理论模型对爆炸源进行研究,这便是地震学中的反演方法。

另一条途径是运用爆炸力学的理论和方法,采用数值计算直接求解爆炸引起的地应力波,进而求得震源函数。在球对称爆炸的条件下,假定介质是各向同性的均匀介质,折合位移势  $\Psi(\tau)$  和折合速度势  $\gamma(\tau)$  为<sup>[3-4]</sup>

$$\Psi(\tau) = -c_e r \exp(-c_e \tau / r) \int_0^\tau \xi(r, t) \exp(c_e t / r) dt \quad (1)$$

$$\gamma(\tau) = -c_e r \exp(-c_e \tau / r) \int_0^\tau u(r, t) \exp(c_e t / r) dt \quad (2)$$

式中:  $r$  为质点位置,  $t$  为时间,  $c_e$  是弹性纵波波速,  $\xi(r, t)$  是径向位移,  $u(r, t)$  是质点速度,  $\tau = t - (r - r_{el}) / c_e$  是从弹性波到达  $r$  起开始计算的时间,  $r_{el}$  为弹性区半径。因此,如果通过数值方法求得弹性区里的质点位移或速度波形,即可获得  $\Psi(\tau)$  和  $\gamma(\tau)$ , 且有  $\gamma(\tau) = \dot{\Psi}(\tau)$ 。对于填实爆炸或者部分解耦球形空腔爆炸,弹性半径以内的区域,介质的响应是非弹性的,而在爆心距大于弹性半径的区域,介质响应则是线弹性的。在弹性区,一维球对称弹性波方程可以通过位移势表示成

$$\ddot{\Psi}(\tau) + \frac{4G}{c_e r_{el} \rho_0} \dot{\Psi}(\tau) + \frac{4G}{r_{el}^2 \rho_0} \Psi(\tau) = \frac{r_{el}}{\rho_0} \sigma_r(r_{el}, t) \quad (3)$$

式中:  $\rho_0$  为介质密度,  $G$  为介质的弹性剪切模量,由剪切波速度  $c_s = \sqrt{G/\rho_0}$ , 并令  $\eta = c_s / c_e$ , 本征频率  $\omega_e = 2c_s / r_{el}$ , 代入上式并进行拉氏变换求解可得

$$\bar{\Psi}(s) = \frac{r_{el} \bar{\sigma}_r(r_{el}, s)}{\rho_0 (s^2 + 2\eta\omega_e s + \omega_e^2)} \quad (4)$$

$$\bar{\gamma}(s) = s \bar{\Psi}(s) = \frac{r_{el} s \bar{\sigma}_r(r_{el}, s)}{\rho_0 (s^2 + 2\eta\omega_e s + \omega_e^2)} \quad (5)$$

且  $\bar{\gamma}(s) = \Psi(\tau) = \Psi_\infty$  (6)

式中:  $s = i\omega$  为拉氏变量,  $\bar{\sigma}_r(r_{el}, s)$  是径向应力的拉氏变换。式(4)和式(5)是在频域内建立的 RDP、RVP 和弹性边界径向应力波形之间的关系,并且  $\bar{\gamma}(s)$  与 RDP 的稳态值  $\Psi_\infty$  是等价的。 $s \rightarrow 0$  对应于频率  $\omega \rightarrow 0$ , 此时  $\bar{\gamma}(s)$  趋近于一个有限值,而  $\bar{\Psi}(s)$  会出现无穷大,因此在频域中通常只对 RVP 进行频谱响应分析,由于  $\bar{\gamma}(s)$  (即  $s \bar{\Psi}(s)$ ) 确定后,远场地震波幅度及频谱特征即可确定,因此通常又将  $\bar{\gamma}(s)$  称为震源函数。由于弹性半径及弹性边界应力波形的确定很困难,因此通过数值模拟方法计算出爆炸冲击波从非弹性区到弹性区的传播规律,由此确定  $r_{el}$  及  $\sigma_r(r_{el}, t)$ , 从而分析爆炸震源函数的特性。

本文中结合数值计算方法和地震反演方法,研究地下封闭式填实爆炸的震源函数特征以及花岗岩的介质特性对震源函数的影响。

### 3 地下爆炸震源函数的数值计算和理论反演

文献[5]提出了一个适用于水饱和花岗岩地下爆炸波传播规律数值研究的岩石本构模型,本文中即以该模型为基础,以含水量 2% 的水饱和花岗岩介质为例,对当量 62 kt、爆室空腔比例半径 1.5 m/kt<sup>1/3</sup> 的地下填实爆炸开展数值模拟计算,研究震源函数的特性。采用如下两种方法进行对比研究:(1)通过对数值计算得到的自由场质点速度和位移波形,由式(1)和式(2)直接获得折合位移势  $\Psi(\tau)$  和折合速度势  $\gamma(\tau)$ ; (2)通过计算确定弹性区边界  $r_{el}$  及边界的  $\sigma_r(r_{el}, t)$ , 结合地震学中的理论模型通过式(5)研究震源函数。

#### 3.1 由质点位移、速度波形计算 RDP 和 RVP

图 1 是计算的不同爆心距处的质点位移波形和速度波形,其中弹性半径  $r_{el} = 1586$  m。图 2 是由图 1(a)的位移波形积分得到的折合位移势  $\Psi(\tau)$ , 从图中可以看出计算的震源函数都具有稳态值  $\Psi_\infty$ 。

不同爆心距处质点位移波形计算得到的  $\Psi_\infty$  存在差异,是因为 470 m 和 628 m 位于非弹性区,在这一区域  $\Psi_\infty$  随爆心距的增大而增大;1 586 m 之外的区域属于弹性区,它们给出了相同的稳态值  $\Psi_\infty = 1.4 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,这验证了地下爆炸震源函数的一个典型特征:具有稳态值  $\Psi_\infty$ ,且在弹性半径以外  $\Psi_\infty$  保持恒定值。图 2 没有表现出明显的过冲特性,实际上,近区的位移势才有明显的过冲,而在爆心距  $r$  很大的远区,往往只出现由空腔推动引起的永久位移,过冲很小。

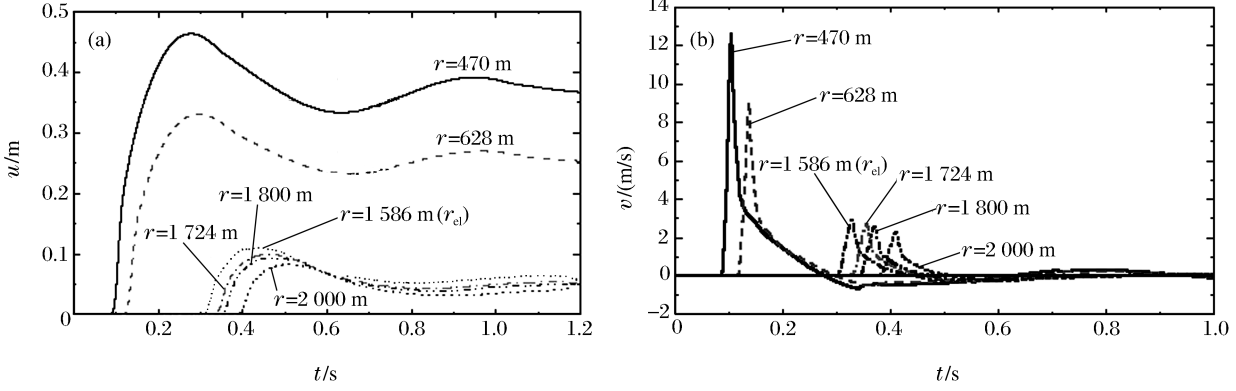


图 1 不同爆心距质点的位移与速度波形

Fig. 1 Displacement and velocity waves at different position

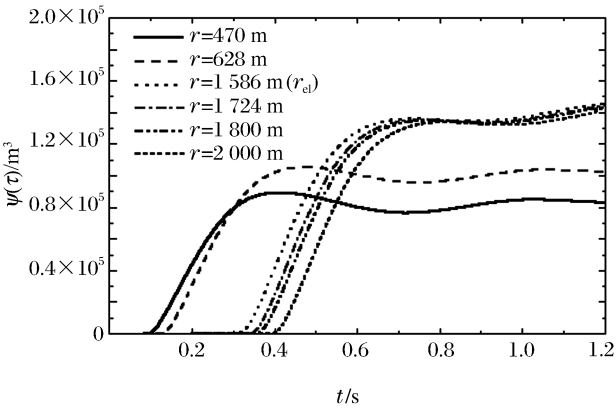


图 2 由图 1(a)得到的折合位移势

Fig. 2 Integrated RDP by displacements in Fig. 1 (a)

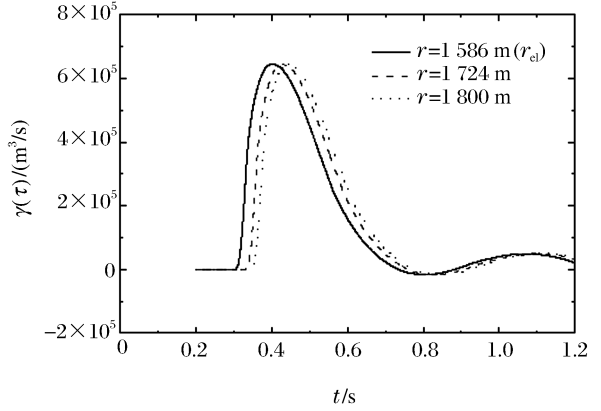


图 3 由图 1(b)得到的折合速度势

Fig. 3 Integrated RVP by velocities in Fig. 1 (b)

图 3 是由图 1(b)的速度波形积分得到的折合速度势  $\gamma(\tau)$ ,对弹性半径处的  $\gamma(\tau)$ 作离散傅立叶变换,可得震源函数的幅频曲线,如图 4 所示。由式(6),振幅谱  $\gamma(\omega)$ 的低频稳态值应该等于折合位移势的稳态值  $\Psi_\infty$ ,图 4 中给出的低频稳态值为  $1.8 \times 10^5 \text{ m}^3$ ,这与图 2 给出的  $\Psi_\infty = 1.4 \times 10^5 \text{ m}^3$  是相当接近的。从图 4 还可以观察到震源函数的另外两个典型特征:  $\gamma(\omega)$ 高频端的幅值随频率成指数式衰减,而拐角频率  $\omega_c$  约为 1.5 Hz。

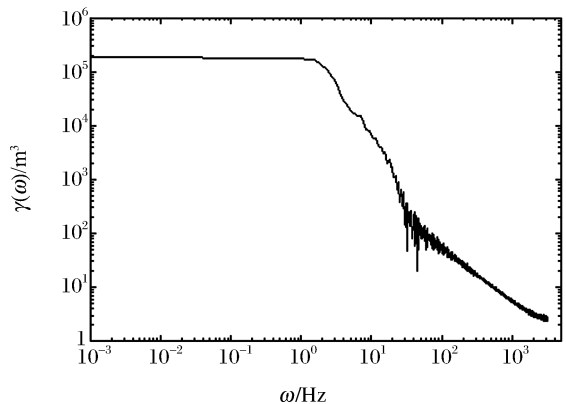


图 4 RVP 的振幅谱

Fig. 4 Amplitude spectrum of RVP at elastic radius

### 3.2 由 Mueller & Murphy 二阶震源函数模型反演得到的震源函数

根据 Mueller & Murphy<sup>[6-7]</sup>的二阶震源函数模型,作用在弹性半径上的径向应力可以假定为一个亥维赛阶跃函数  $H(\tau)$  加上一个指数衰减项

$$-\sigma_r(\tau) = [\sigma_0 \exp(-\omega_1 \tau) + \sigma_{0c}]H(\tau) \quad (7)$$

计算得到弹性边界上的应力波形如图 5 中实线所示,虚线是采用式(7)对计算曲线拟合的结果。其中稳态应力  $\sigma_{0c} = 2.9 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_0 = 36.4 \text{ MPa}$ , 峰值  $\sigma_{0s} = \sigma_0 + \sigma_{0c} = 39.3 \text{ MPa}$ , 衰减指数  $\omega_1 = 44.3 \text{ Hz}$ 。对式(7)作拉氏变换,代入式(5)即可得到震源函数

$$\bar{\gamma}(s) = -\frac{r_{el}}{\rho_0} \frac{s\sigma_{0s} + \omega_1\sigma_{0c}}{(s^2 + 2\eta\omega_e s + \omega_e^2)(s + \omega_1)} = -\frac{r_{el}}{\rho_0} \frac{\sigma_{0c}(s\sigma_{0s}/\sigma_{0c} + \omega_1)}{(s^2 + 2\eta\omega_e s + \omega_e^2)(s + \omega_1)} \quad (8)$$

式中:  $r_{el} = 1586 \text{ m}$ ,  $\rho_0 = 2.588 \text{ g/cm}^3$ ,  $c_s = 2.44 \text{ km/s}$ ,  $c_e = 4.56 \text{ km/s}$ ,  $\omega_e = 2c_s/r_{el} = 3.077 \text{ Hz}$ ,  $\eta = c_s/c_e = 0.535$ 。复数频域内的  $\bar{\gamma}(i\omega)$  为

$$\bar{\gamma}(i\omega) = -\frac{r_{el}}{\rho_0} \frac{\sigma_{0c}(i\omega\sigma_{0s}/\sigma_{0c} + \omega_1)}{(\omega_e^2 - \omega^2 + 2i\eta\omega_e\omega)(i\omega + \omega_1)} \quad (9)$$

$$\gamma(\omega) = |\bar{\gamma}(i\omega)| = \frac{r_{el}\sigma_{0c}}{\rho_0} \frac{\sqrt{\omega_1^2 + (\sigma_{0s}/\sigma_{0c})^2\omega^2}}{\sqrt{(\omega_e^2 - \omega^2)^2 + 4\eta^2\omega_e^2\omega^2}\sqrt{\omega_1^2 + \omega^2}} \quad (10)$$

式(10)即是震源函数的幅频响应关系,振幅谱如图 6 中实线所示,作为对比,图中虚线是直接计算的折合速度势获得的振幅谱,即图 4。可见,两者的低频稳态值是接近的,前者为  $2.1 \times 10^5 \text{ m}^3$ , 比直接计算值  $1.4 \times 10^5 \text{ m}^3$  略高;拐角频率  $\omega_e = 3 \text{ Hz}$ , 比直接计算的  $1.5 \text{ Hz}$  也高;因为理论反演采用的是二阶震源模型,所以高频衰减特征为  $f^{-2}$ , 从图 6 可以看出理论反演的振幅谱要比直接计算的衰减趋势慢,因此可以认为在含水量为 2% 的水饱和和花岗岩中,震源函数的高频衰减特征应该是高于  $f^{-2}$  的。

通过以上两种方法的对比分析,可知两者的结论是基本一致的,说明它们用于研究地下爆炸震源函数的特性都是有效的,而且结果也基本可信。

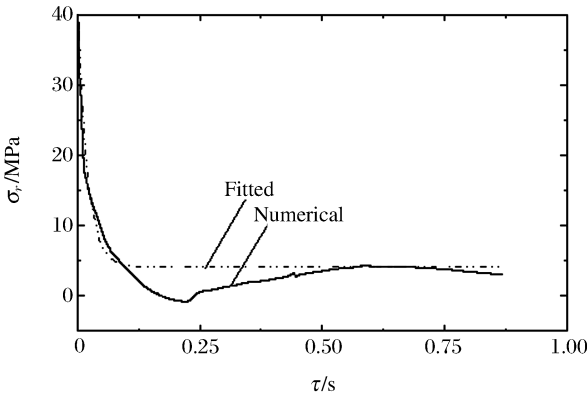


图 5 计算的径向应力波形及拟合的应力函数  
Fig. 5 Numerical and fitted radial stress at elastic radius

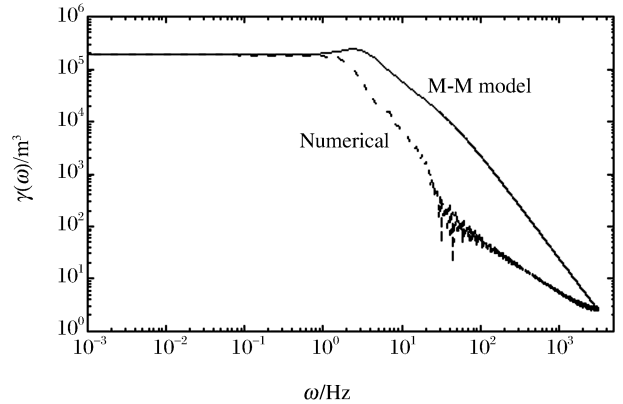


图 6 理论反演的振幅谱  
Fig. 6 Amplitude-frequency spectrum by M-M model

### 4 花岗岩含水量对震源函数特性的影响

地下爆炸的爆室空腔半径  $r_c$  和弹性半径  $r_{el}$  在震源函数研究中具有重要的意义,它们与折合位移势的稳态值  $\Psi_\infty$  和表征地下爆炸地震耦合强度的地震矩  $M_0$  有如下的经验公式<sup>[8]</sup>

$$\begin{cases} \Psi_\infty = r_c^3/3 \\ M_0 = 4\pi\rho c_e^2 r_c^3/3 \end{cases} \quad (11)$$

因此也可以通过空腔半径和弹性区半径研究爆炸震源特性。

采用有限差分方法对地下爆炸波的传播过程进行数值模拟,结果得到爆室空腔半径随花岗岩含水

量  $\Phi_f$  的变化趋势如图 7 所示(空腔初始半径均为 6 m)。含水量的增大使空腔半径增大,从干岩的 39.2 m 增至  $\Phi_f=0.1$  时的 45.8 m,而且当  $\Phi_f \geq 0.02$  之后这种增长趋势基本上是线性的,可用关系式

$$r_c/r_{c,0} = r_c(\Phi_f) = 1 + 0.0138\Phi_f \quad (12)$$

拟合,弹性半径同样可用线性关系式

$$r_{el}/r_{el,0} = r_{el}(\Phi_f) = 1 + 0.134\Phi_f \quad (13)$$

拟合,式中:  $r_{c,0}$  和  $r_{el,0}$  分别表示干岩空腔半径和弹性区半径。

空腔半径和弹性半径  $\Phi_f$  的变化如图 8 所示。

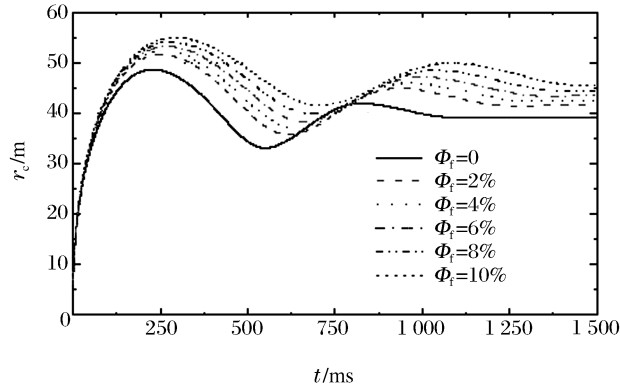


图 7 含水量对空腔边界运动的影响

Fig. 7 Cavity radius of different water content

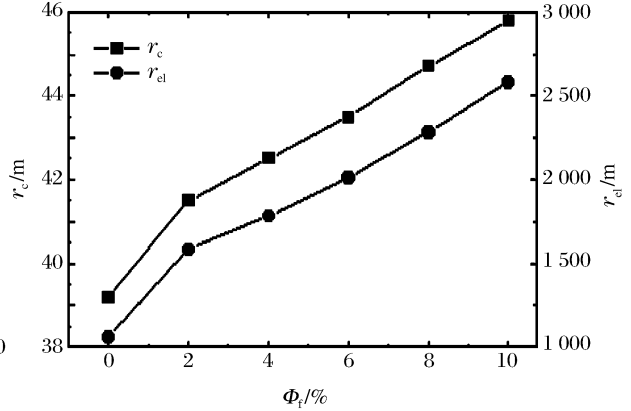


图 8  $r_c$ ,  $r_{el}$  随含水量的变化

Fig. 8 Cavity radius and elastic radius versus water content

由表 1 中的空腔半径,根据经验公式(11)可以

得到震源函数的稳态值  $\Psi_\infty$  和地震矩  $M_0$ 。通过有限差分程序对地下爆炸波传播过程的数值模拟,可以得到弹性边界质点的位移波形,再由公式(1)即可积分求得折合位移势,图 9 便是不同含水量时计算的折合位移势,其相应的稳态值列于表 1。可见,经验公式算得的  $\Psi_\infty$  和数值计算得到的  $\Psi_\infty$  都随含水量的增大而增大,但是它们之间相差不小,最大可达一个量级。这种差异可能与经验公式(11)是把介质看成弹性介质而导出的,物理模型过于粗糙有关。

图 10 是计算的不同含水量下弹性边界上的径向应力波形  $\sigma_r(r_{el}, t)$ 。采用 Mueller & Murphy 的二阶震源理论模型式(7)对图中的波形进行拟合(拟合参数见表 2),则由图 10 以及表 2 可看出,随着含水量的增大,作用在弹性边界上的应力脉冲的峰值应力  $\sigma_{0s}$  和稳态值  $\sigma_{0c}$  都降低,但是  $\sigma_{0s}/\sigma_{0c}$  增大,同时应力脉冲的衰减变慢,即  $\omega_1$  降低。

将拟合的应力函数作拉氏变换,代入式(8)即可得到不同含水量的震源函数,进而通过式(10)可以得到振幅谱  $\gamma(\omega)$ ,如图 11 所示。计算中除了表 2 给出的  $\sigma_{0s}$ ,  $\sigma_{0c}$ ,  $\sigma_0$ ,  $\omega_1$  外,有关的其他参数见表 3,其中弹性半径  $r_{el}$  取自表 1 中的值。图 11 中的实线表示干花岗岩的  $\gamma(\omega)$ ,其他虚线代表不同含水量花岗岩的  $\gamma(\omega)$ 。据此,可以分析介质的含水量对地下爆炸震源函数的影响:

(1) 振幅谱的低频稳态值  $\gamma(\omega \rightarrow 0)$ : 即折合位移势的稳态值  $\Psi_\infty$ , 随含水量的提高而增加。干岩的稳态值  $\Psi_\infty$  明显低于水饱和岩石,或者说相同爆炸条件下干岩的地震耦合强度比水饱和岩石低;含水量的增大导致地震耦合强度提高,但增长幅度随含水量的增加而趋缓。

(2) 拐角频率  $\omega_c$ : 水饱和岩石的拐角频率比干岩低,而且随含水量增大,拐角频率也逐渐降低。D. B. Larson<sup>[9-10]</sup> 的实验室微药量的化爆实验研究指出,拐角频率是受介质的剪切强度控制的,事实上,含水量的增大使岩石介质的宏观强度降低,因此上述计算结果与 D. B. Larson 给出的结论是一致的。

(3) 高频衰减特性: 因为采用了 Mueller & Murphy 二阶模型进行反演,所以图 11 给出的干岩和水饱和岩石的振幅谱的高频部分基本上是重合的,都是  $f^{-2}$ 。前文指出,水饱和花岗岩中,震源函数的高频衰减特征应高于  $f^{-2}$ ,所以关于高频衰减特性的研究,还需要作进一步分析。

表 1 计算的空腔半径和弹性半径

Table 1 Cavity radius and elastic radius

$\Phi_t/\%$	$r_c/m$	$r_{el}/m$	$\Psi_\infty/m^3$ (式(11))	$M_0/(kg \cdot m^2/s^2)$ (式(11))	$\Psi_\infty/m^3$ (数值计算)
0	39.2	1060	$2.0 \times 10^4$	$1.81 \times 10^{16}$	$6.6 \times 10^4$
2	41.5	1586	$2.4 \times 10^4$	$1.62 \times 10^{16}$	$13.5 \times 10^4$
4	42.5	1784	$2.6 \times 10^4$	$1.57 \times 10^{16}$	$17.6 \times 10^4$
6	43.5	2014	$2.8 \times 10^4$	$1.56 \times 10^{16}$	$23.3 \times 10^4$
8	44.7	2282	$3.0 \times 10^4$	$1.57 \times 10^{16}$	$31.0 \times 10^4$
10	45.8	2584	$3.2 \times 10^4$	$1.59 \times 10^{16}$	$39.8 \times 10^4$

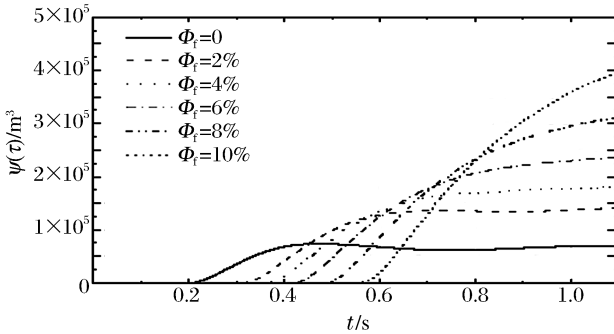


图 9 含水量对计算的 RDP 的影响

Fig. 9 RDP obtained numerically

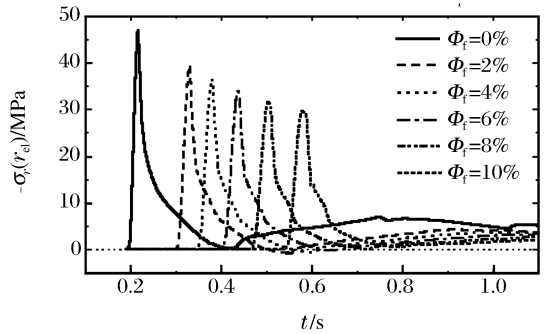


图 10 弹性边界的径向应力波形

Fig. 10 Radial stress at elastic radius versus water content

表 2 径向应力函数(-σr(τ)=σ₀exp(-ω₁τ)+σ₀c) 的相关拟合参数

Table 1 Fitted parameters of radial stress function

$\Phi_t/\%$	$\sigma_{0s}/MPa$	$\sigma_0/MPa$	$\sigma_{0c}/MPa$	$\sigma_{0s}/\sigma_{0c}$	$\omega_1/Hz$
0	46.9	42.0	4.9	9.57	47.8
2	39.3	36.4	2.9	13.55	44.3
4	36.3	33.8	2.5	14.52	41.7
6	33.8	31.6	2.2	15.36	38.5
8	31.5	29.8	1.7	18.53	33.9
10	29.5	28.1	1.4	21.07	29.1

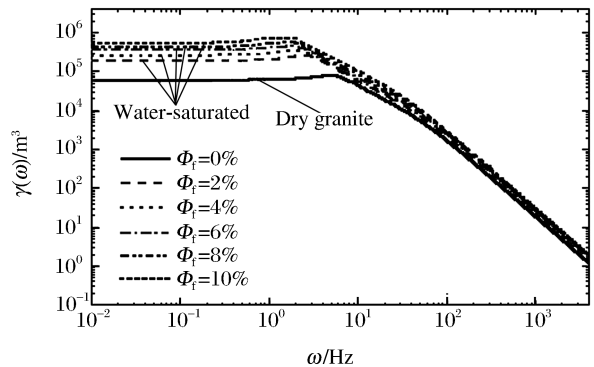


图 11 含水量对振幅谱的影响

Fig. 11 Effect of water content on RVP

表 3 震源函数相关的参数

Table 3 Correlative parameters in formula (11)

$\Phi_t/\%$	$\rho_0/(g/cm^3)$	$r_{el}/m$	$c_e/(km/s)$	$c_s/(km/s)$	$\omega_e/Hz$	$\eta$
0	2.620	1060	5.24	3.07	5.79	0.586
2	2.588	1586	4.56	2.44	3.08	0.535
4	2.555	1784	4.34	2.32	2.60	0.535
6	2.523	2014	4.19	2.24	2.22	0.535
8	2.490	2282	4.09	2.19	1.92	0.535
10	2.458	2584	4.01	2.15	1.66	0.535

表4给出了由弹性边界应力波形反演获得的震源参数。比较表1和表4,可见,直接积分位移波形得到的震源函数与采用二阶震源模型获得的震源函数是接近的。虽然这两者与经验公式结果相比依然有不大的差别,但是通过努力,包括计算方法的优化、岩石本构模型的改进以及全面而充分地考虑实验条件的影响等等,采用数值方法预测震源函数的前景依然是光明的。

## 5 结论

通过数值计算方法并结合地震反演方法,即直接积分自由场质点速度波形和通过弹性边界应力波形理论反演获得震源函数,研究了地下爆炸震源函数的基本特征以及介质特性对震源函数的影响。虽然两者的结果尚有一些差异,但是结论却是一致的,说明这两种方法用于研究地下爆炸震源函数的特性都是有效的,而且结果也基本可信。同时还通过爆炸波传播过程的数值模拟,获得了对震源函数研究具有重要意义的填实地下爆炸的空腔半径和弹性区半径,以及介质的含水量对它们的影响。重点分析了花岗岩含水量对震源函数特性的影响,结果表明,对于震源函数的稳态值,干岩要比水饱和和岩石低许多,含水量的增大会使稳态值也随之增大;水饱和岩石的拐角频率比干岩要低,而且随含水量增大,拐角频率也降低。这说明水饱和和岩石会使爆炸耦合强度提高。

## 参考文献:

- [1] Denny M D, Goodman D M. A case study of the seismic source function: Salmon and Sterling reevaluated[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1990,95:19705-19723.
- [2] Denny M D, Johnson L R. The explosion seismic source function: Models and scaling laws reviewed[C]// Taylor S R, Patton H J, Richards P G, et al. *Explosion Source Phenomenology*, Geophysical Monograph 65, AGU, Washington DC, 1991.
- [3] 李孝兰. 空腔解耦爆炸实验研究的基础理论(I)[J]. *爆炸与冲击*, 2000,20(2):186-192.  
LI Xiao-lan. Basic theory of decoupled explosions in cavities(I)[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000,20(2):186-192.
- [4] 李孝兰. 空腔解耦爆炸实验研究的基础理论(II)[J]. *爆炸与冲击*, 2000,20(3):283-288.  
LI Xiao-lan. Basic theory of decoupled explosions in cavities(II)[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2000,20(3):283-288.
- [5] 周钟,王肖钧,赵凯,等. 水饱和岩石中爆炸应力波传播的数值模拟[J]. *爆炸与冲击*, 2005,25(4):296-302.  
ZHOU Zhong, WANG Xiao-jun, ZHAO Kai, et al. Numerical simulation for blast wave in water-saturated rock [J]. *Explosion and Shock Waves*, 2005,25(4):296-302.
- [6] Mueller R A, Murphy J R. Seismic characteristics of underground nuclear detonations, Part I. Seismic spectrum scaling[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1971,61:1675-1692.
- [7] Murphy J R, Mueller R A. Seismic characteristics of underground nuclear detonations, Part II. Elastic energy and magnitude determinations[J]. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1971,61:1693-1704.
- [8] Murphy J R. Free-field seismic observations from underground nuclear explosions[C]// Taylor S R, Patton H J, Richards P G, et al. *Explosion Source Phenomenology*, Geophysical Monograph 65, AGU, Washington DC, 1991.
- [9] Larson D B. Explosive-induced wave propagation in nugget sand-stone[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1984, 89:9415-9424.
- [10] Larson D B. Seismic coupling of nuclear explosions[R]. UCRL-21086, 1993.

表4 震源参数对比

Table 4 Characteristic parameters of seismic source function

$\Phi_1/\%$	$\Psi_\infty/\text{m}^3$	$\omega_c/\text{Hz}$	高频渐近线
0	$5.90 \times 10^4$	5.2	$f^{-2}$
2	$1.87 \times 10^5$	3.0	$f^{-2}$
4	$2.58 \times 10^5$	2.7	$f^{-2}$
6	$3.56 \times 10^5$	1.9	$f^{-2}$
8	$4.23 \times 10^5$	1.6	$f^{-2}$
10	$5.34 \times 10^5$	1.3	$f^{-2}$

## Study on the main characteristics of underground explosion seismic source function in granite

ZHOU Zhong, WANG Xiao-jun, XIAO Wei-guo, ZHAO Kai

(Department of Mechanics and Mechanical Engineering,  
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, Anhui, China)

**Abstract:** The main characteristics of seismic source function in underground explosion are studied by seismological method and numerical method. Especially, the influence of water content on seismic source function is studied, and it reveals that the coupling energy of underground explosion increases with the increase of the water content. The steady-state value of RDP in water-saturated granite is higher than that in dry granite, and correspondingly, the value increases with the increase of water content. However, the corner frequency of RVP's amplitude spectrum of water-saturated granite is lower than that in dry granite, and its value decreases with the increase of water content. The asymptotic behavior of RVP at high frequencies, or roll-off, is thought to be steeper than  $f^{-2}$ . The overshoot of RDP at the far-field is not obvious.

**Key words:** mechanics of explosion; seismic source function; seismological method; underground explosion; granite; numerical simulation

\* Corresponding author: ZHOU Zhong  
E-mail address: zhouz@mail.ustc.edu.cn  
Telephone: 86-551-3606734

### 第六届全国工程结构安全防护学术会议通知

中国力学学会爆炸力学专业委员会、中国土木工程学会防护工程分会和中国岩石力学与工程学会岩石动力学专业委员会拟定于2007年8月7~9日在洛阳举办“第六届全国工程结构安全防护学术会议”。会议由总参工程兵科研三所承办,欢迎国内相关学科的专家、学者和工程技术人员踊跃投稿并参加会议。

**一、会议主题:** (1) 钻地武器破坏效应、毁伤评估及防护技术; (2) 强动载作用下介质与结构相互作用; (3) 强动载下结构局部破坏与整体破坏; (4) 介质(岩、土、混凝土)变形与破坏; (5) 强动载下材料动态响应及测试技术; (6) 强动载下工程隔震与抗震技术; (7) 深地下工程岩石力学及工程灾害控制; (8) 建筑结构耐久性与防灾研究; (9) 特种设备安全性评估; (10) 城市生命线工程安全防护与对策; (11) 反恐防爆结构安全对策与技术等。

**二、征文要求:** (1) 2007年3月30日前提交摘要,2007年5月30日前提交全文;  
(2) 论文篇幅限6000字以内,格式与要求见《防护工程》征稿简则;  
(3) 论文内容不得涉密,保密审查请作者所在单位负责。

**三、日程安排:** 8月7日报到,晚上召开工程结构安全防护专业组工作会议;  
8月8日会议开幕式、专题报告;  
8月9日学术报告、闭幕式;  
8月10日会后考察。

**四、组织机构:** 大会主席:钱七虎; 组委会主任:任辉启; 副主任:李海波、沈俊、秦有权;  
秘书处:王明洋、冯进技、刘瑞朝

**五、联系方式:** 联系人:盛宏光、王亚利; 通讯地址:471023 河南洛阳总参工程兵科研三所科技处  
电话:0379-65986357(地), 0438-76357(军); 手机:13526968188, 13838845950;  
传真:0379-65981191(地), 0438-76358(军); E-mail: fhgcfh@163.com