

文章编号: 1001-1455(2000)01-0083-04

# 盐岩介质中空腔爆炸解耦因子的计算<sup>①</sup>

钟放庆, 李孝兰

(西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 对在美国内华达试验场盐岩介质中进行的 Salmon 地下核爆试验(填实爆炸, 当量 5.3kt, 埋深 828m), 利用近区自由场加速度测试数据, 计算了它的震源函数  $\Psi_t(\tau)$ , 并且根据一维球对称爆炸膨胀源理论, 计算了弹性响应空腔爆炸源的震源函数  $\Psi_s(\tau)$ 。由解耦理论, 得到了盐岩介质的完全解耦空腔爆炸的解耦因子 DF。

关键词: 空腔爆炸; 填实爆炸; 震源函数; 解耦因子

中图分类号: O382.2 文献标识码: A

地下核爆炸产生的巨大能量中, 只有百分之几甚至千分之几的能量耦合成地震能量传播出去, 地震能量的耦合效应取决于多方面的因素, 如介质的软硬特性、埋深及爆炸的方式(空腔或填实), 如何降低地震能量的耦合效应并确定其程度, 对地震核查技术研究极其重要。Latter<sup>[1]</sup>、Roland<sup>[2]</sup>等地球物理学家提出了“利用大空腔爆炸来降低地震能量的耦合效应”的方法, 我们计算了 Salmon 核爆震源函数, 得到了盐岩介质中空腔爆炸完全解耦因子 DF( $\omega$ )。

## 1 空腔爆炸解耦理论

解耦是指地下爆炸时降低其地震能量的耦合率。解耦因子 DF 是用来描述解耦效应的, 空腔爆炸解耦因子 DF 定义为: 在相同的爆炸点进行等当量的填实爆炸和空腔爆炸, 在相同的地震台站接收到的地震位移比。空腔解耦包括完全解耦和部分解耦, 完全解耦指空腔体积足够大, 使得空腔壁介质对冲击压力的响应为完全弹性的。地下核爆震源可以近似等效为球对称膨胀源, 从球对称震源模式出发, 核爆震源函数可用折合位移势(RDP)  $\Psi(\tau)$  来表示。引入位移势函数  $\phi$ , 与径向位移  $u_r$  的关系为  $u_r = \partial\phi/\partial r$ ,  $r$  为空间距离。用位移势函数  $\phi$  表示的波动方程为<sup>[3]</sup>

$$\Delta\phi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2\phi}{\partial t^2} \quad (1)$$

对于一维球对称情况, 弹性波动方程的通解可表示为

$$\phi(r, t) = -\frac{1}{r} \Psi(\tau) \quad (2)$$

式中:  $\tau = t - (r - r_0)/c$ ,  $c$  为弹性纵波速度,  $r_0$  为震源弹性区半径。弹性区空间场的径向位移与折合位移势的关系为

① 收稿日期: 1999-03-22; 修订日期: 1999-06-29

基金项目: 国防预研军控项目(56010380107)。

作者简介: 钟放庆(1964—), 男, 博士研究生, 助理研究员。

$$u_r(r, t) = \frac{\partial}{\partial r} \left[ -\frac{\Psi(\tau)}{r} \right]$$

$$u_r(r, t) = \frac{\Psi(\tau)}{r^2} + \frac{\dot{\Psi}(\tau)}{rc} \quad (3)$$

引入折合速度势<sup>[3]</sup>  $\chi(\tau) = \dot{\Psi}(\tau)$ , 进行 Fourier 变换  $\chi(\omega) = i\omega\Psi(\omega)$ , 解耦因子<sup>[2]</sup>

$$DF(\omega) = \left| \frac{\chi_t(\omega)}{\chi_s(\omega)} \right| = \left| \frac{i\omega\Psi_t(\omega)}{i\omega\Psi_s(\omega)} \right| \quad (4)$$

式中: 下标 t 表示填实爆炸, s 表示空腔爆炸。  $|i\omega\Psi_t(\omega)|$  可由试验数据求出; 由自由场的位移测试数据, 用(3)式差分计算出震源函数  $\Psi(\tau)$ , 可由球对称弹性空腔源理论计算  $|i\omega\Psi_s(\omega)|$ 。

## 2 盐岩中完全解耦球对称空腔爆炸源函数 $\Psi_s(\tau)$ 的计算

由一维波动方程和弹性应力应变关系, 经 Laplace 变换, 可得球对称弹性空腔爆炸源函数  $\Psi_s$  与作用在腔壁上的应力  $\sigma_R$  关系

$$\Psi_s = \frac{-R\bar{\sigma}_R}{\rho(s^2 + 2\eta\omega_s + \omega^2)} \quad (5)$$

式中:  $R$  为弹性空腔半径,  $\eta = c_t/c$ ,  $\omega_s = 2c_t/R$ ,  $c_t$  为剪切波速度,  $\rho$  为介质密度。Patterson<sup>[4]</sup> 用 SOC 方法, 计算了空腔爆炸的腔壁压力响应, 爆炸空腔壁的压力等效于一阶跃压力。并指出: 如果空腔周围的盐岩以前没有被爆炸所破坏而降低强度, 则完全解耦的条件是空腔中的静态压力  $p_0$  不大于山岩静压  $\rho gh$ 。由此准则和绝热膨胀方程, 可以确定完全解耦所需要的空腔体积  $V_s = (\gamma - 1)Y/p_0$ <sup>[1]</sup>,  $\gamma$  为绝热系数, 对于充空气爆室中的核爆  $\gamma$  取 1.2,  $Y$  为爆炸当量。由(5)式计算出完全解耦空腔爆炸的震源函数  $\Psi_s(s)$ 。

## 3 计算结果

### 3.1 震源函数 $\Psi(\tau)$ 的计算

文献[5]介绍了 Salmon 核爆炸自由场加速度测点位置, 并给出了测试波形(见图 1~2)。

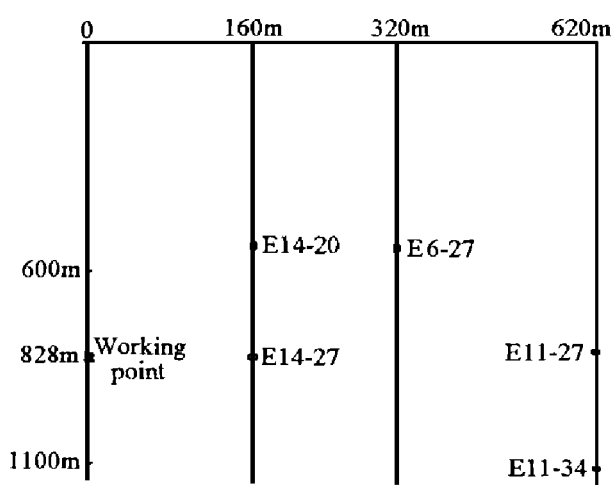


图 1 Salmon 爆心和测点位置

Fig.1 Salmon arrangement

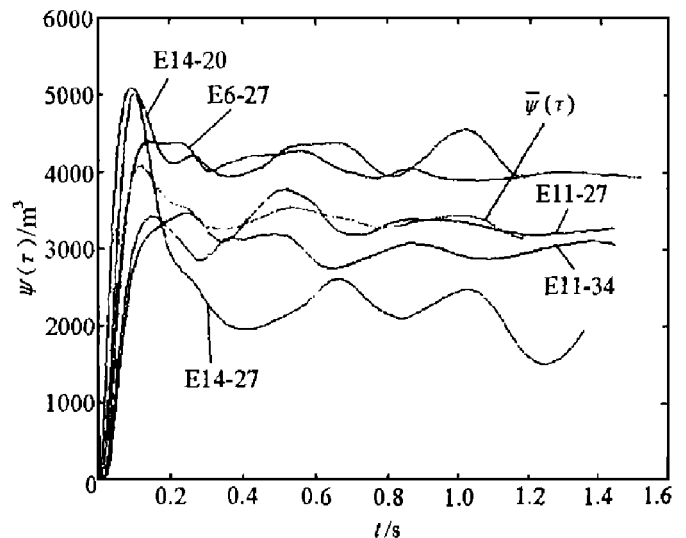


图 2 Salmon 震源函数

Fig.2 The RDP of Salmon

运用测试信号经两次积分获得的位移波形, 计算了 Salmon 试验的震源函数  $\Psi_t(\tau)$ , 其平均稳态值  $\Psi_t(\infty)$  约等于  $3200\text{m}^3$ , 其拐角频率为  $4\text{Hz}$ ; 假定压力为阶跃函数, 计算了相同当量、埋深和同一介质完全解耦空腔爆炸的  $\Psi_s(\tau)$ , 其稳态值  $\Psi_s(\infty)$  约等于  $25\text{m}^3$ , 拐角频率为  $15\text{Hz}$ 。

### 3.2 空腔爆炸完全解耦因子 DF 的计算

由所得到的震源函数  $\Psi_t(\tau)$ 、 $\Psi_s(\tau)$  (见图 3) 和 DF 的定义, 计算了  $DF(\omega)$  (如图 4 所示)。在低频部分 (频率小于 Salmon 填实爆炸拐角频率), 解耦因子 DF 为  $150 \sim 170$ , 在 Salmon 填实爆炸源拐角频率处, DF 近似等于  $180$ , 当频率高于填实爆炸源拐角频率时, DF 随  $\omega^{-3/2}$  下降, 在空腔爆炸源的拐角频率处, DF 等于  $10$ 。

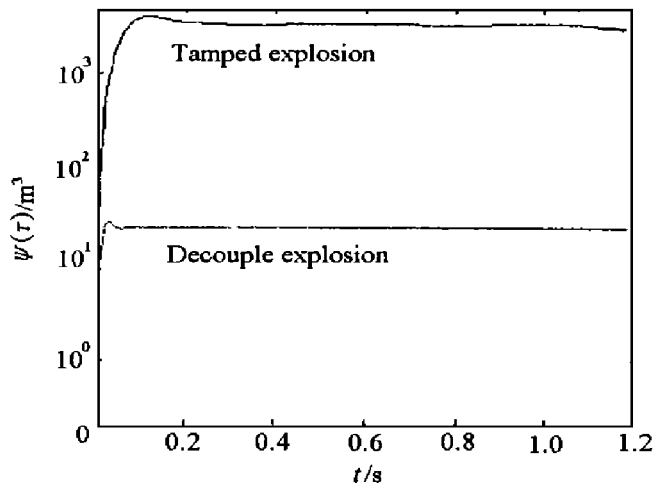


图 3 填实和空腔爆炸震源函数

Fig.3 The RDP of tamped and cavity explosion

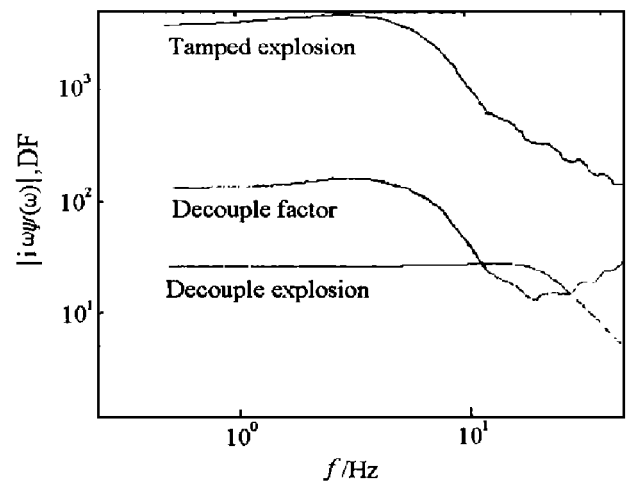


图 4 折合速度势和解耦因子

Fig.4 Reduced velocity potential and decoupling factor

## 4 结论与分析

(1) Salmon 填实爆炸震源函数  $\Psi_t(\tau)$  具有明显的“过冲”和稳态值  $\Psi_\infty$  特征,  $|i\omega\Psi(\omega)|$  的拐角频率约为  $4\text{Hz}$ , 高频衰减规律近似为  $f^{-3/2}$ 。(2) 空腔爆炸源比填实爆炸源激发信号的拐角频率更高, 约为  $15\text{Hz}$ 。(3) 解耦因子 DF 的大小与频率有关, 解耦的效果主要在低频部分 (低于 Salmon 爆炸源的拐角频率), 高频信号的解耦效应明显降低。(4) 当频率高于空腔爆炸源的拐角频率时, DF 反而增大, 其原因是因为 Salmon 填实爆炸源的高频衰减的指数小于空腔爆炸源。(5) 1966 年, 美国在 Salmon 爆炸产生的空腔中进行了当量为  $0.38\text{kt}$  的 Sterling 解耦试验, Springer 等<sup>[6]</sup> 在假定折合位移势与爆炸当量成一次方比例, 频率与当量的  $-1/3$  方成比例的前提下, 将当量为  $5.3\text{kt}$  的 Salmon 折合位移势比例成当量为  $0.38\text{kt}$  的折合位移势, 得到在  $1 \sim 2\text{Hz}$  频率范围内, Sterling 试验的解耦因子为  $70 \pm 20$ , 另外, 对于盐岩完全解耦空腔爆炸 (当量  $5.3\text{kt}$ ) 的试验, 推导了折合位移势函数, 得到在  $1 \sim 3\text{Hz}$  频率范围内, 完全解耦因子为  $120$ 。Patterson<sup>[4]</sup> 用 SOC 数值计算方法计算了岩盐介质的解耦因子, 得到盐岩介质完全解耦因子为  $170$ , 并提出: Sterling 试验为非完全解耦爆炸试验, 因为其爆炸的盐岩空腔介质在第一次爆炸后遭受了破坏, 介质的强度降低了, 因此认为  $70$  为非完全解耦因子。本文中对 Salmon 试验震源函数和岩盐介质完全解耦因子的计算结果是合理的, 计算方法可用于计算我国的地下核爆震源函数, 并可估算我国的地下空腔解耦爆炸的效率。

## 参考文献:

- [ 1 ] Latter A L, Lelevier R E. A Method of Concealing Underground Nuclear Explosions[ J ] . J Geophys Res, 1961, 66: 943 ~ 946.
- [ 2 ] Herbst R F, et al. Use of Large Cavities to Reduce Seismic Waves from Underground Explosion[ J ] . J Geophys Res, 1961, 66: 959 ~ 978.
- [ 3 ] Larson D B. Spherical Wave Propagation in Elastic Media and its Application to Energy Coupling for Tamped and Decoupled Explosion[ R ] . UCRL-52655, 1979.
- [ 4 ] Patterson D W. Nuclear Explosion Decoupling, Full and Partial[ J ] . J Geophys Res, 1966, 71: 3427 ~ 3436.
- [ 5 ] Perret W R, Bass R C. Free-field Ground Motion Induced by Underground Explosions [ R ] . SANDA74-0252, 1975.
- [ 6 ] Springer D, Denny M, Healy J, et al. The Sterling Experiment: Decoupling of Seismic Waves by a Shot Generated Cavity[ J ] . J Geophys Res, 1968, 73: 5995 ~ 6011.

## Calculation of Decoupling Factor for Nuclear Explosion in Salt Cavity

ZHONG Fang-qing, LI Xiao-lan

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

**Abstract:** The Salmon event was a 5.3kt nuclear explosion detonated in a boring hole at a depth of 828 meters within the salt dome near Hattiesburg, Mississippi, USA. In this paper the Salmon's seismic source function (reduced displacement potential) is calculated by using the acceleration measured from the free field in the near-region and the seismic source function of the cavity explosion is calculated too according to the explosion model where radial stresses are uniformly applied over the spherical surface and the material behaves elastically. Based on the decoupling theory the decoupling factor is then calculated and it shows that the decoupling factor is dependent on the frequency.

**Key words:** cavity explosion; tamped explosion; seismic source; decoupling factor