

万永革, 盛书中, 许雅儒等. 不同应力状态和摩擦系数对综合 P 波辐射花样影响的模拟研究. 地球物理学报, 2011, 54(4): 994~1001, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.04.014

Wan Y G, Sheng S Z, Xu Y R, et al. Effect of stress ratio and friction coefficient on composite P wave radiation patterns. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2011, 54(4): 994~1001, DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.04.014

不同应力状态和摩擦系数对综合 P 波辐射 花样影响的模拟研究

万永革^{1,2}, 盛书中^{1,2}, 许雅儒³, 吴逸民⁴

1 防灾科技学院, 河北三河 065201

2 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081

3 中央研究院地球科学研究所, 台北 115

4 台湾大学地质系, 台北 10617

摘 要 为研究不同应力状态(包括主应力相对大小)和摩擦系数对大量地震 P 波初动辐射花样(综合 P 波辐射花样)的影响, 首先给出了不同应力状态下的剪应力、摩擦应力和库仑破裂应力在断层面法向上的三维分布, 表明即使在不考虑摩擦的情况下, 剪应力在不同取向断层面上分布也有很大差别, 摩擦应力也在不同取向断层面上造成一定影响. 其次, 根据库仑破裂应力与单个地震产生的 P 波辐射花样大小成比例的原则, 假定地震断层面均匀取整个方向空间, 将各种取向断层面产生的 P 波辐射花样叠加, 给出了不同应力状态和摩擦系数情况下产生的大量地震综合 P 波辐射花样的空间分布. 发现主应力的相对大小和摩擦系数同时影响综合 P 波辐射花样的空间形态, 在一定程度上, 辐射花样从一种形态改变为另一种形态可通过改变任一参数进行, 表明同时反演此两种参数是困难的. 但通过其他手段确定摩擦系数后, 可以采用 P 波初动信息得到较为合理的应力相对大小. 该研究为考虑摩擦系数、采用大量 P 波初动资料精确确定应力场提供了新的思路.

关键词 应力相对大小, 摩擦系数, 库仑破裂应力, 综合 P 波辐射花样

DOI:10.3969/j.issn.0001-5733.2011.04.014

中图分类号 P315

收稿日期 2010-03-15, 2011-02-01 收修定稿

Effect of stress ratio and friction coefficient on composite P wave radiation patterns

WAN Yong-Ge^{1,2}, SHENG Shu-Zhong^{1,2}, HSU Ya-Ju³, WU Yih-Min⁴

1 *Institute of Disaster Prevention, Hebei Sanhe 065201, China*

2 *Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 10081, China*

3 *Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taipei 115, Taiwan, China*

4 *Department of Geosciences, National Taiwan University, Taipei 10617 Taiwan, China*

Abstract In order to study the impact of stress ratio and friction coefficient on P-wave radiation patterns from a large number of earthquakes, we present how the shear stress, friction stress and Coulomb failure stress of the fault varies as a function of its orientation with respect to different stress ratios. The results show that the shear stress on the fault plane with various orientations indicates larger differences comparing to friction stress variations for different fault orientations. Assuming the spatial distribution of Coulomb failure stress is relevant to the P wave radiation

基金项目 国家自然科学基金项目(41074072, 40874022)、地震行业专项(200808053)和中国地震局教师科研基金项目(20100101)资助.

作者简介 万永革, 男, 1967 年生, 中国地震局研究员, 主要从事地震学和地球动力学方面的研究.

E-mail: wanyongge217217@vip.sina.com; wanyongge8@gmail.com

pattern, and fault plane orientations are randomly distributed over the whole space, we superpose P wave radiation patterns from all fault orientations, and illustrate the characteristics of composite P wave radiation pattern in terms of different stress ratio and friction coefficient. We find that the stress ratio and friction coefficient both affect the composite P wave radiation pattern. To some extent, the shape of the composite P wave radiation can be changed by varying any of the two parameters, indicating the difficult to solve both of the parameters independently. However, if the friction coefficient can be determined by other methods, we can obtain a reasonable stress ratio by using P wave first motions. This work provides new idea to accurately determine stress field considering friction coefficient by large number of P first motion polarity data.

Keywords Relative stress magnitude (stress ratio), Frictional coefficient, Coulomb failure stress, Composite P wave radiation pattern

1 引言

目前采用地震波数据确定地壳应力场大体可分为两种方法:(1)先确定地震的震源机制,然后采用多个地震的震源机制确定应力场的方向和相对大小^[1,2]。(2)采用一个地区多个地震的大量 P 波初动确定应力场^[3~7]。采用第一种方法必须首先确定研究区域的多个震源机制,假定这些震源机制的空间取向是随机的,然后根据震源机制确定该区域的地壳应力场。目前确定震源机制的常规方法包括利用 P 波初动信息^[8]、P/S 振幅比信息^[9~13]和波形信息^[14~17],然而震源机制解目前仍然存在很大的不确定性^[18],而且能够确定震源机制的地震数目有限,这就使得地壳应力场的求解存在较大的不确定性。采用第二种确定地壳应力场的方法虽然只利用 P 波初动信息,但它可以利用大量地震(同样假定震源机制的空间取向是随机的),且包括只有少量地震观测资料而无法确定其震源机制的小震观测信息,数据量大大增加使得应力场求解结果比较稳定。

虽然目前利用大量地震的 P 波初动信息已经求得某些地区的地壳应力场^[6,7],但是目前采用 P 波初动信息求解应力场的方法仅考虑了应力方向导致的大量地震产生的 P 波初动的辐射花样^[6](以下简称综合 P 波辐射花样),并没有考虑到产生地震的应力场主应力值的相对大小(即假定应力场主应力值等差排列,仅考虑某一应力状态下的最大剪切应力的平面为破裂面)及与地震错动有关的摩擦系数(假定摩擦系数为零)的影响。

应力相对大小可以根据震源机制或断层滑动资料求得^[1,2,19],是解释地球动力学模型的重要参

数^[20]。摩擦系数也是影响地震滑动的一项重要参数^[21~24]。这两个参数会影响地壳中位错破裂的空间形态,进而影响大量地震产生的综合 P 波辐射花样。欲研究根据大量 P 波初动资料确定地壳应力方向、应力相对大小及摩擦系数问题,必须先研究应力方向及其相对大小和摩擦系数对综合 P 波辐射花样的影响。

本研究拟通过模拟方式给出不同应力场状态和摩擦系数导致大量均匀取向断层破裂产生的综合 P 波辐射花样的空间模式,以期在 P 波初动资料足够的情况下,研究是否能同时确定应力场主应力的相对大小和摩擦系数。

2 剪应力、摩擦力和库仑破裂应力的空间分布

为了探讨应力场对综合 P 波辐射花样的影响,首先研究给定应力场在均匀取向断层面上剪应力、摩擦力和库仑破裂应力的分布。由于库仑破裂应力(摩擦系数为零时退化为剪应力,这时又称为粘聚力)表示了断层滑动的可能性及与研究区域的地震活动性相联系^[25,26]同时被地质断层活动状态所验证^[27],因此可将按照库仑破裂准则破裂的地震产生的 P 波辐射花样(辐射花样大小与库仑破裂应力大小成正比)叠加得到研究区域综合 P 波辐射花样。

假定地壳应力场的最大主应力、中间主应力和最小主应力分别为 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, 拉张为正。在由地震震源机制解求取应力场方向时还可以得到相对应力大小 R , Gephart 和 Forsyth^[1]给出的 R 定义式为

$$R = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \quad (1)$$

通常很难确定地下的绝对应力^[28],在研究地壳应力场和地震破裂的关系时通常假定 $\sigma_3 = -1$,这里考虑的是应力各分量的相对值,忽略单位.则根据(1)式可得^[29]

$$\sigma_1 = \frac{2-R}{R+1}, \quad (2)$$

$$\sigma_2 = R(\sigma_1 + 1) - 1. \quad (3)$$

在该应力场作用下,假定各种空间取向断层均可能发生破裂.断层面法向与 σ_3 轴夹角呈 δ ,与 σ_1 轴夹角呈 ϕ 的方向(图1)可表示为

$$\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3) = (\cos\phi\sin\delta, \sin\phi\sin\delta, \cos\delta). \quad (4)$$

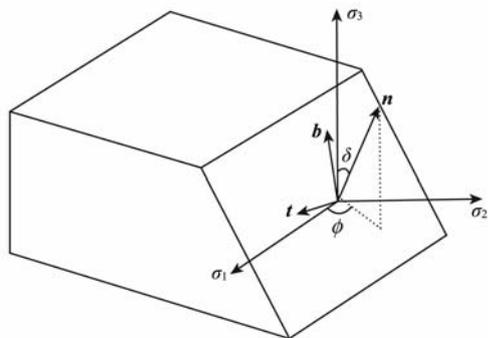


图1 地震断层和应力方向示意图

Fig. 1 Sketch map of seismic fault and stress direction

应力在此断层面上产生的剪切应力方向为

$$\mathbf{t} = (t_1, t_2, t_3) = (\cos\phi\cos\delta, \sin\phi\cos\delta, -\sin\delta), \quad (5)$$

与 \mathbf{n} 和 \mathbf{t} 垂直的方向为

$$\mathbf{b} = (b_1, b_2, b_3) = (-\sin\phi, \cos\phi, 0). \quad (6)$$

应力张量在法向为 \mathbf{n} 的地震断层面上的应力矢量 (s_1, s_2, s_3) 计算公式为^[30]

$$\begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \\ s_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

法向应力 p_v 的计算公式为

$$p_v = (s_1 \quad s_2 \quad s_3) \cdot \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{pmatrix}, \quad (8)$$

在 \mathbf{t} 方向上产生的剪切应力 p_t 为

$$p_t = (s_1 \quad s_2 \quad s_3) \cdot \begin{pmatrix} t_1 \\ t_2 \\ t_3 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

在 \mathbf{b} 方向上产生的剪切应力 p_b 为

$$p_b = (s_1 \quad s_2 \quad s_3) \cdot \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

则应力场在此断层面上产生的合成剪切应力为

$$p_{\text{shear}} = \sqrt{p_b^2 + p_t^2}, \quad (11)$$

应力场在此断层面上产生的摩擦应力为

$$p_f = \mu p_v, \quad (12)$$

此处, μ 为摩擦系数.则此断层面上产生的库仑破裂应力为

$$\text{CFS} = p_{\text{shear}} + p_f = \sqrt{p_b^2 + p_t^2} + \mu p_v, \quad (13)$$

按照上面的计算步骤,计算了 $R=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ 五种情况下的剪应力、摩擦应力和库仑破裂应力的空间分布.将剪应力、摩擦应力和库仑破裂应力的大小表示在空间取向断层面的法向方向上.注意这里的应力量为相对大小,摩擦系数取0.6.可以看到,在 $R=0.0$ (即 $\sigma_2 = \sigma_3$)的情况下,剪应力在法向与 σ_1 轴夹角相同的断层面上大小相同,因此具有相同的破裂可能性(图2a);同时,由于 $\sigma_2 = \sigma_3 = -1$ (压应力),此时法向在 $\sigma_2\sigma_3$ 平面上断层面的摩擦应力均为负,阻碍了断层面破裂(图2b).计算的库仑破裂应力关于 σ_1 轴对称,法向在 $\sigma_2\sigma_3$ 平面及其邻域内的断层面上,由于摩擦应力的存在,破裂不可能发生,而在法向与 σ_1 轴(张轴)夹角约 30° 的断层面上(断层面与 $\sigma_2\sigma_3$ 平面夹角约 60°)库仑破裂应力最大,这可以根据摩擦系数为0.6时与压轴夹角的计算公式 $\frac{1}{2}\tan^{-1}(1/\mu) = 29.5^\circ$ ^[31]所验证.随着 R 的增大(σ_2 值逐渐远离 σ_3 值),剪应力逐渐呈现四象限分布,摩擦应力逐渐表现为在 σ_1 轴上达到最大值,在 σ_3 轴上达到最小值.到 $R=0.5$ ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 等差排列)时剪应力达到完全四象限分布,此时剪应力最大的断层面与 σ_1, σ_3 轴夹角为 45° (图2g),库仑破裂应力最大的断层面与 σ_3 轴的夹角为 60° (法向与 σ_3 轴的夹角约 30° ,图2i).随着 R 的进一步增大(σ_2 逐渐靠近 σ_1),剪应力、摩擦应力和库仑破裂应力逐渐变为以 σ_3 为对称轴的轴对称分布(图2j,k,l),到 $R=1.0$ ($\sigma_1 = \sigma_2$)时,剪应力(图2m)、摩擦应力(图2n)和库仑破裂应力(图2o)在断层面法向上的分布完全以 σ_3 轴对称.

由此分析可知,在三轴应力状态下,断层面破裂的可能情况不仅与三轴的空间方位有关,而且与三轴应力的相对大小有关,通常情况下所说的最大剪应力分布在与 σ_1 和 σ_3 轴夹角为 45° 的断层面上,只有在理想情况下($\sigma_1 < \sigma_2 < \sigma_3$)才是完全正确的.在 $\sigma_1 = \sigma_2$ 或 $\sigma_2 = \sigma_3$ 的情况下最大剪应力或库仑破裂应力分布在一个环形圆周上(图2a,c和m,o).在分析地球内部处于三轴应力状态时要特别注意.

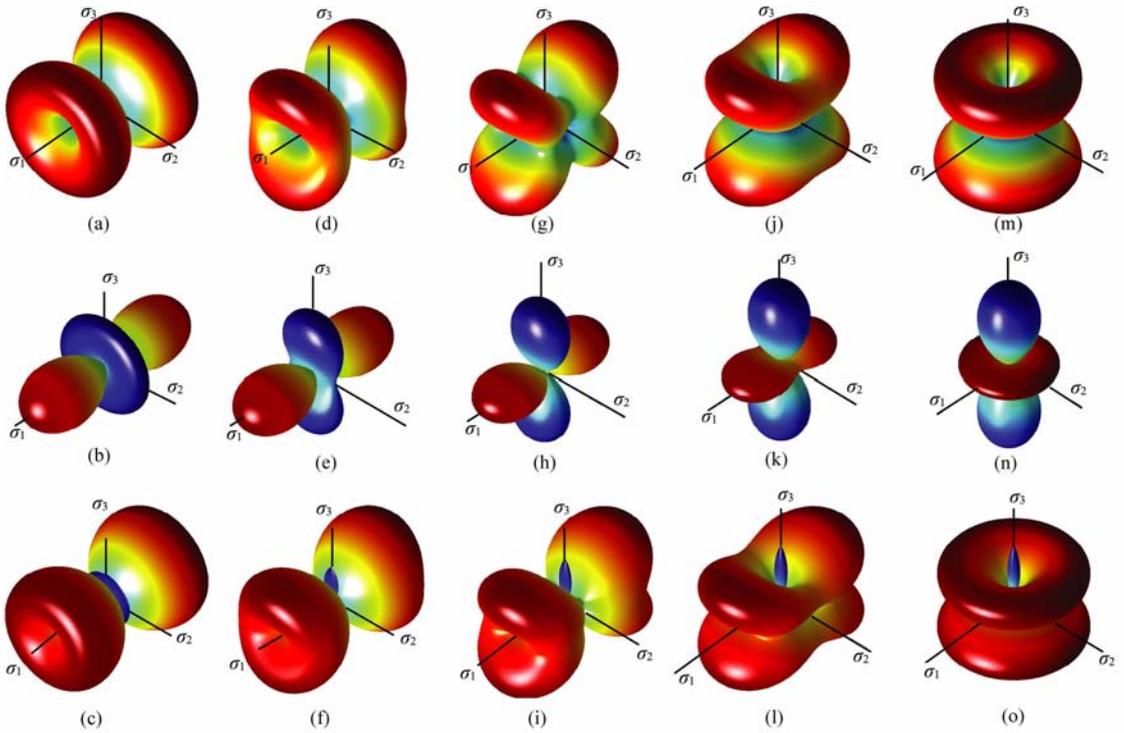


图 2 典型应力状态($R=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$)下的剪应力、摩擦系数为 0.6 的摩擦应力和库仑破裂应力的空间分布。应力相对大小表示在所取断层面的法向上。(a)、(d)、(g)、(j)、(m) 分别为 $R=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ 情况下的剪应力空间分布；(b)、(e)、(h)、(k)、(n) 分别为 $R=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ 的摩擦应力空间分布；(c)、(f)、(i)、(l)、(o) 分别为 $R=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ 的库仑破裂应力空间分布。蓝色到绿色表示应力为负，绿色到红色表示应力为正。

Fig. 2 The spatial distribution of the shear stress, friction stress (The friction coefficient is choose as 0.6) and the Coulomb failure stress of the fault varies as a function of its orientation with respect to different stress ratios ($R=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$)

The relative stress magnitude is expressed on the normal direction of the fault plane. Figures (a), (d), (g), (j) and (m) show shear stress distributions correspond to $R=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ respectively; Figures (b), (e), (h), (k) and (n) show the spatial friction stress distributions correspond to $R=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ respectively; Figures (c), (f), (i), (l) and (o) are the spatial coulomb failure stress distributions correspond to $R=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ respectively. Blue to green express the negative stress, green to red express the positive stress.

3 不同应力状态和摩擦系数下综合 P 波辐射花样的空间分布

根据以上应力状态可以给出每个断层的破裂可能性，库仑破裂应力(剪应力可看成摩擦系数为零的库仑破裂应力)越大的断层破裂的可能性越大，单个地震产生的 P 波辐射花样越大。将地震断层面在空间均匀取样，求取每个断层面的库仑破裂应力大小从而确定单个地震断层面滑动的 P 波辐射花样大小，将单个地震断层面产生的辐射花样叠加得到综合 P 波辐射花样的空间分布，研究其在空间的变化。

球坐标系 ϕ 在 $0 \sim 360^\circ$ 范围内均匀取样， δ 在 $0 \sim 180^\circ$ 范围内均匀取样可以得到覆盖整个断层面

取样空间的应力状态分布。然而，这样取值导致了 δ 趋近 0 或 180° 时取值较密集，而 δ 趋近 90° 取值较稀疏^[32]，断层面空间取向取值不均匀，从而使综合 P 波辐射花样出现偏差。为了改善这种情况，我们采用在不同的 δ 取不同的 ϕ 采样间隔： $d\phi/\sin\delta, d\phi$ 为取样间隔。这样可使得断层面空间取向的均匀。

将第 2 节求得的 p_b, p_i 及摩擦系数 μ ，求得剪应力或库仑破裂应力的大小，其方向均按照(14)式计算：

$$\hat{p} = \frac{p_b \mathbf{b} + p_i \mathbf{t}}{\sqrt{p_b^2 + p_i^2}} \quad (14)$$

给出每个地震断层面错动产生的相对于主轴的立体辐射花样^[33]，按其大小与库仑破裂应力数值成比例的方式在某一方向进行叠加，可得到综合 P 波辐射花样(图 3)。

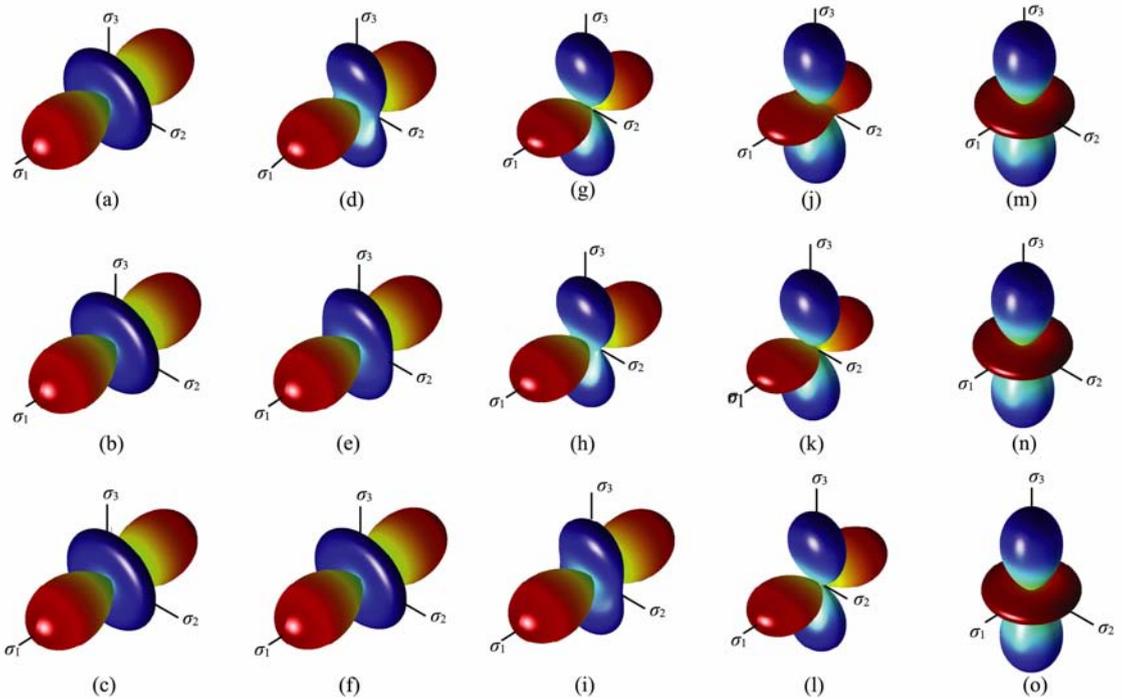


图 3 均匀空间取向的单个断层面错动产生的 P 波辐射花样叠加得到的综合 P 波辐射花样。

(a), (d), (g), (j), (m) 分别为 $R=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ 、摩擦系数为零(即剪应力)产生的综合 P 波辐射花样; (b), (e), (h), (k), (n) 分别为 $R=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ 、摩擦系数为 0.6 产生的综合 P 波辐射花样; (c), (f), (i), (l), (o) 分别为 $R=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ 、摩擦系数为 1.2 产生的综合 P 波辐射花样。蓝色到绿色表示 P 波初动为负, 绿色到红色表示 P 波初动为正。

Fig. 3 The composite P wave radiation patterns by superposition of the individual P wave radiation patterns with a uniform orientation distribution of fault planes.

Figure (a), (d), (g), (j) and (m) are the composite P wave radiation patterns correspond to $R=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ respectively, with the friction coefficient is 0; Figure (b), (e), (h), (k) and (n) are the composite P wave radiation patterns correspond to $R=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ respectively, with the friction coefficient is 0.6; Figure (c), (f), (i), (l) and (o) are the composite P wave radiation patterns correspond to $R=0.0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0$ respectively, with the friction coefficient is 1.2; Blue to green express the negative P wave first motion, green to red express the positive P wave first motion.

由图 3(a, b, c)可知, 在 $R=0(\sigma_2=\sigma_3)$ 时库仑破裂应力产生的 P 波辐射花样在 σ_1 轴及其周围为正, 且随着远离 σ_1 轴逐渐减少, 在与 σ_1 轴夹角为 45° 的圆周上减少至零, 以后随着逐渐靠近 $\sigma_2\sigma_3$ 平面, P 波振幅逐渐增大, 但极性为负, 在 $\sigma_2\sigma_3$ 平面上极性为负的振幅达到最大。 $R=0$ 的综合 P 波辐射花样很难识别出摩擦应力所起的作用, 即 $\mu=0.0$ (a), 0.6 (b), 1.2 (c) 产生的综合 P 波辐射花样看不出有明显的模式变化。随着 R 值的增大 (σ_2 值逐渐远离 σ_3 值), 库仑破裂应力产生的综合 P 波辐射花样有所区别, 表现为 P 波初动振幅在 σ_2 上的分布不同和远离 σ_3 轴和 σ_2 轴的振幅衰减情况不同。 $R=0.5$ ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 等差排列)、摩擦系数为零产生的综合 P 波辐射花样呈现完全的四象限分布(图 3g), 但 $\mu=0.6$ (图 3h) 和 1.2 (图 3i) 产生的综合 P 波辐射花样在 σ_2 上具有负振幅初动(振幅大小随摩擦系数的增大而增大)。随着 R 的进一步增大 (σ_2 值逐渐靠近 σ_1 值), 摩擦系

数为零的库仑破裂应力产生的综合 P 波辐射花样在 σ_2 轴上逐渐呈现正振幅初动, 振幅大小随 R 的增大而增大。在 $R>0.5$ 的情况下, 摩擦应力使得 σ_2 轴上正初动振幅减小(图 3k, l)。当 $R=1.0(\sigma_2=\sigma_1)$ 时, 库仑破裂应力产生的综合 P 波辐射花样在 σ_3 轴及其周围为负, 且随着远离 σ_3 轴逐渐减少, 在与 σ_3 轴夹角为 45° 的圆周上减少至零, 以后随着逐渐靠近 $\sigma_1\sigma_2$ 平面, 正极性的 P 波振幅逐渐增大, 在 $\sigma_1\sigma_2$ 平面上极性为正的振幅达到最大, 呈现以 σ_3 轴为对称轴的轴对称分布, 并且不同摩擦系数产生的综合 P 波辐射花样没有明显变化, 因此在这种情况下, 也无法看出摩擦系数的影响。

综合考虑图 3 的各种情况可以看到, R 值和摩擦系数均会对综合 P 波辐射花样产生影响, 在 $R=0.0$ 和 $R=1.0$ 的情况下看不出摩擦系数导致的综合 P 波辐射花样的差别, 即看不出摩擦系数产生的影响。当 R 值处于两者之间时, 摩擦所起的作用不

可忽略.但在这里需要注意的是,虽然 R 值和摩擦系数均对 P 波综合辐射花样造成影响,但是同时精确确定这两个参数却是困难的,例如,图 3g 和图 3l 分别为 $R=0.5, \mu=0.0$ 和 $R=0.75, \mu=0.6$ 时产生的综合 P 波辐射花样没有明显变化,即使稍微有变化也可以通过调整摩擦系数或 R 值而达到完全一致,图 3c 和图 3f、图 3e 和图 3i 也具有类似情况.如果将 $R=0.5, \mu=1.2$ 情况下的摩擦系数增大(图 3i),则库仑破裂应力产生的辐射花样会逐渐趋近于 $R=0.25, \mu=0.6$ 的综合 P 波辐射花样(图 3e).这说明,在一定的允许范围内, R 值的减小和摩擦系数的增大具有相同的效应,仅仅根据 P 波辐射花样完全确定 R 值和摩擦系数是困难的.

4 结论与讨论

为研究不同应力状态下综合 P 波辐射花样的空间形态以及摩擦系数对综合 P 波辐射花样的影响,我们确定了空间任意取向断层上的剪应力、摩擦应力和库仑破裂应力相对大小,并绘制了三维图形.结果表明在三轴应力下,剪应力、摩擦应力和库仑破裂应力的空间分布随 R 值的不同有很大不同,并且摩擦系数在库仑破裂应力分布中也起了一定作用.

根据不同应力状态下的剪应力和库仑破裂应力大小,假定地震在各个断层取向上均匀发生,我们给出了考虑摩擦系数的不同应力状态下的综合 P 波辐射花样.研究发现综合 P 波辐射花样随 R 值和摩擦系数不同而有较大的差别.综合 P 波辐射花样只有在特定情况下才呈现规则的四象限分布(如 $R=0.5, \mu=0.0$).在 $R=0.0$ 和 1.0 情况下产生的综合 P 波辐射花样分别以 σ_1 轴和 σ_3 轴为对称轴的轴对称分布,并且不能识别出摩擦系数对 P 波综合辐射花样的影响.在其他情况下摩擦系数和 R 值同时影响 P 波辐射花样,并且 R 值的增大和摩擦系数的增大具有相同的效应.这说明仅根据 P 波初动符号完全确定 R 值和摩擦系数是困难的.这也说明了前人根据综合 P 波初动确定应力场假定 $R=0.5, \mu=0.0$ ^[3~6] 的相对合理性.要完全确定应力相对大小和摩擦系数,还需要其他资料,如岩石力学实验资料的约束.虽然如此,摩擦是岩石力学实验所验证的一种因素^[31],如果相对合理的假定摩擦系数大小(如 $\mu=0.4$ ^[34]),则可以根据综合 P 波初动资料识别出应力相对大小 R 值,这是我们下一步的工作.

本研究假定地震在各个方位取向断层面上均匀

发生,如果地震沿均一断层面破裂,本研究摩擦系数对 P 波综合辐射花样影响的结论将不成立.然而,目前的观测表明,即使大震破裂后的余震区,小地震震源机制也呈现非常大的多样性^[35,36],如果对于没有大地震破裂的地区,地震更可能在各个取向断层面上均匀破裂.这可能是由于地球内部具有很大压力,致使地震在各个取向断层面上均可发生的缘故.

本研究将空间取向断层面上的单个地震破裂产生的 P 波辐射花样按照库仑破裂应力大小进行加权,叠加得到综合 P 波辐射花样,这只是考虑到一个统计平均.其实,也许地震并不是库仑破裂应力越大,产生的地震越大,但这里考虑的综合效应是断层面上库仑破裂应力越大,发生同等地震的概率越大,同样会得到对该断层面上地震的 P 波辐射花样加权大的效果,本模拟结果不会因此而改变.

Xu 等^[6]在综合震源机制确定平均 P 、 T 轴的模拟研究中假定断层上的剪应力超过最大剪应力的一半时才会使断层破裂,进而根据大量地震的 P 波初动信息反推平均 P 、 T 轴.本研究没有考虑此假定.如果考虑此假定,需要研究剪应力究竟达到多大才会发生地震,目前这个问题还没有定论.这里考虑较小的库仑破裂应力的地震破裂会产生较小的 P 波辐射花样,其叠加的效果也不会由于考虑了 Xu 等^[6]的假定而明显改变本研究的模拟结果.

本文的模拟结果为采用大量地震产生的 P 波初动信息反演应力场提供了考虑摩擦系数和应力相对大小的思路.随着地震资料的积累和地震台站的加密,越来越多的 P 波初动资料可用于应力场反演,为本文模拟结果的应用提供了广阔的应用前景.基于此模拟结果编制考虑摩擦系数的应力场(包括相对应力大小)反演程序,进而用于精确应力场的反演是我们下一步的工作目标.

参考文献(References)

- [1] Gephart J W, Forsyth D W. An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: application to the San Fernando earthquake sequence. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**: 9305~9320
- [2] Michael A J. Determination of stress from slip data: faults and folds. *J. Geophys. Res.*, 1984, **89**: 11517~11526
- [3] 李钦祖,王泽皋,贾云年等.由单台小地震资料所得两个区域的应力场. *地球物理学报*, 1973, **16**: 49~61
Li Q Z, Wang Z G, Jia Y N, et al. Stress field obtained for two regions from weak earthquake data recorded at a single station. *Chinese J. Geophys. (in Chinese)*, 1973, **16**: 49~61

- [4] 许忠淮,刘玉芬,张郢珍. 京津唐张地区地震应力场的方向特征. 地震学报, 1979, **1**(2):121~132
Xu Z H, Liu Y F, Zhang Y Z. On the characteristic of direction of the earthquake stress field around the Beijing area. *Acta Seismologica Sinica* (In Chinese), 1979, **1**(2): 121~132
- [5] 许忠淮,阎明,赵仲和. 由多个小地震推断的华北地区构造应力场的方向. 地震学报, 1983, **5**(3): 268~279
Xu Z H, Yan M, Zhao Z H. Evaluation of the direction of tectonic stress in North China from recorded data of a large number of small earthquakes. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1983, **5**(3): 268~279
- [6] Xu Z H, Wang S Y, Huang Y R, et al. Tectonic stress field of China inferred from a large number of small earthquakes. *J. Geophys. Res.*, 1992, **97**: 11867~11877
- [7] Robinson R, McGinty P J. The enigma of the Arthur's Pass, New Zealand, earthquake 2. The aftershock distribution and its relation to regional and induced stress fields. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**(B7): 16139~16150
- [8] Reasenber P A, Oppenheimer D. FPFIT, FPLOT, and FPPAGE: Fortran computer programs for calculating and displaying earthquake fault-plane solutions. U. S. Geol. Surv. Open-File Rept, 1985, 85~739
- [9] Kisslinger C, Bowman J R, Koch K. Procedures for computing focal mechanisms from local (SV/P) z data. *Bull. Seis. Soc. Amer.*, 1981, **87**(6):1719~1730
- [10] Snoko J A, Munsey J W, Teague A G, et al. A program for focal mechanism determination by combined use of polarity and SV-P amplitude ratio data. *Earthquake Notes*, 1984, **55**(3):15
- [11] 梁尚鸿,李幼铭,束沛镒等. 利用区域地震台网P、S振幅比资料测定小震震源参数. 地球物理学报, 1984, **27**(3):249~256
Liang S H, Li Y M, Shu P Y, et al. On the determination of source parameters of small earthquakes by using amplitude ratios of P and S from regional network observations. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1984, **27**(3):249~256
- [12] 吴大铭,王培德,陈运泰. 用SH波和P波振幅比确定震源机制解. 地震学报, 1989, **11**(3):275~278
Wu F T, Wang P D, Chen Y T. Determination of focal mechanism using SH to P amplitude ratio. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1989, **11**(3): 275~278
- [13] Hardebeck J L, Shearer P M. Using S/P amplitude ratios to constrain the focal mechanisms of small earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 2003, **93**:2434~2444
- [14] Udias A. Source parameters of earthquakes from spectra of Rayleigh waves. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 1971, **51**(3): 401~435
- [15] 倪江川,陈运泰,王鸣等. 云南禄劝地震部分余震的矩张量反演. 地震学报, 1991, **13**(4): 412~419
Ni J C, Chen Y T, Wang M, et al. Moment tensor inversion of some aftershocks of the April 18, 1985, Luquan, Yunnan, China, earthquake. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1991, **13**(4): 412~419
- [16] 吴忠良,臧绍先. 用体波合成地震图方法确定渤海、永善两大地震的震源参数. 地震学报, 1991, **13**(1): 1~7
Wu Z L, Zang S X. Source parameters of Bohai earthquake of July 18, 1969 and Yongshan earthquake of May 11, 1974 from synthetic seismogram of body waves. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1991, **13**(1): 1~7
- [17] 马淑田,姚振兴,纪晨. 用长周期面波波形拟合及P波初动方向估计中等地震的震源机制. 地球物理学报, 1999, **42**(6): 785~799
Ma S T, Yao Z X, Ji C. To estimate focal mechanisms of moderate earthquakes using a long period surface waveform fitting method as well as first motion signs of P waves. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 1999, **42**(6):785~799
- [18] 万永革,吴忠良,周公威等. 中国地震震源机制测定结果的比较. 地震地磁观测与研究, 2001, **22**(5):1~15
Wan Y G, Wu Z L, Zhou G W, et al. China seismic mechanisms comparison for different determination. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research* (in Chinese), 2001, **22**(5):1~15
- [19] 许忠淮. 用滑动方向拟合法反演唐山余震区的平均应力场. 地震学报, 1985, **7**(4): 349~362
Xu Z H. 1985. Mean stress field in Tangshan aftershock area obtained from focal mechanism data by fitting slip direction. *Acta Seismologica Sinica* (in Chinese), 1985, **7**(4): 349~362
- [20] 杜兴信,邵辉成. 由震源机制解反演中国大陆现代构造应力场. 地震学报, 1999, **21**(4): 354~360
Du X X, Shao H C. Modern tectonic stress field in the Chinese mainland inverted from focal mechanism solutions. *Acta Seismologica Sinica*, 1999, **12**(4):390~397
- [21] Wan Y, Wu Z, Zhou G. Focal mechanism dependence of static stress triggering of earthquakes. *Tectonophysics*, 2004, **390**: 235~243
- [22] Mizoguchi K, Takahashi M, Tanikawa W, et al. Frictional strength of fault gouge in Taiwan Chelungpu fault obtained from TCDP Hole B. *Tectonophysics*, 2008, **460**:198~205
- [23] Mizoguchi K, Hirose T, Shimamoto T. High-velocity frictional behavior and microstructure evolution of fault gouge obtained from Nojima fault, southwest Japan. *Tectonophysics*, 2009, **471**: 285~296
- [24] Cattin R, Chamot-Rooke N, Pubellier M, et al. Stress change and effective friction coefficient along the Sumatra-Andaman-Sagaing fault system after the 26 December 2004 ($M_w=9.2$) and the 28 March 2005 ($M_w=8.7$) earthquakes. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2009, **10**, Q03011, doi:10.1029/2008GC002167.
- [25] Morris A, Ferrill D A, Henderson D B. Slip-tendency analysis and fault reactivation. *Geology*, 1996, **24**: 275~278
- [26] Collettini C, Trippetta F. A slip tendency analysis to test mechanical and structural control on aftershock rupture

- planes. *Earth and Planetary Science Letters*, 2007, **255**: 402~413
- [27] Lisle R J, Srivastava D C. Test of the frictional reactivation theory for faults and validity of fault-slip analysis. *Geology*, 2004, **32**: 569~572
- [28] Aki K, Richards P G. *Quantitative Seismology: Theory and Methods*. Vol 1&2, W H Freeman, San Francisco, 1980. 932
- [29] 万永革,沈正康,刁桂苓等. 利用小震分布和区域应力场确定大震断层面参数方法研究及其在唐山地震序列中的应用. *地球物理学报*, 2008, **51**(3): 793~804
Wan Y G, Shen Z K, Diao G L, et al. An algorithm of fault parameter determination using distribution of small earthquakes and parameters of regional stress field and its application to Tangshan earthquake sequence. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(3): 793~801
- [30] 万永革. “地震静态应力触发”问题的研究[博士论文]. 北京:中国地震局地球物理研究所, 2001
Wan Y G. Research on “seismic static stress triggering” problem. [Ph. D. thesis] (in Chinese). Beijing: Institute of Geophysics, China Seismological Bureau, 2001
- [31] Jaeger J G, Cook G W. *Fundamentals of Rock Mechanism* (Third ed). London: Chapman and Hall, 1979
- [32] 俞春泉,陶开,崔效锋等. 用格点尝试法求解 P 波初动震源机制解及解的质量评价. *地球物理学报*, 2009, **52**(5): 1402~1411
Yu C Q, Tao K, Cui X F, et al. P wave first motion focal mechanism solutions and their quality evaluation. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2009, **52**(5): 1402~1411
- [33] 万永革. 地震辐射花样的立体表示. *防灾技术高等专科学校学报*, 2001, **3**(4): 35~40
Wan Y G. 3-D representation of seismic source radiation pattern. *Journal of College of Disaster-Prevention Technique* (in Chinese), 2001, **3**(4): 35~40
- [34] King G C P, Stein R S, Lin J. Static stress changes and the triggering of earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Amer.*, 1994, **84**: 935~953
- [35] Hauksson E. Crustal structure and seismicity distribution adjacent to the Pacific and North America plate boundary in Southern California. *J. Geophys. Res.*, 2000, **105**: 13875~13903
- [36] 胡幸平,俞春泉,陶开等. 利用 P 波初动资料求解汶川地震及其强余震震源机制解. *地球物理学报*, 2008, **51**(6): 1711~1718
Hu X P, Yu C Q, Tao K, et al. Focal mechanism solutions of Wenchuan earthquake and its strong aftershocks obtained from initial P wave polarity analysis. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2008, **51**(6): 1711~1718

(本文编辑 汪海英)