菱形地震活动性图像与地层屈曲

安镇文　许绍燮
（中国地震局地球物理研究所，北京 100081）

摘要 本文根据我国板内地震分布的特点，提出了我国地震空间分布的一种理论模型。应用弹性力学的板壳理论，假定矩形薄板在受到横向压应力和均匀剪应力联合作用下，探讨了各向异性板的稳定性，推导了各向异性板的理论解，求解了失稳时临界最大应力的分布。同时，对均匀各向同性板，得到了薄板临界失稳的半波长，并对其稳定性进行了讨论。

关键词：地震活动性；地层屈曲；菱形分布；各向异性；稳定性

1 引言

迄今，对地震发生、固体破裂的机理以及破裂空间分布的规律还远远未被认识，但它一直是地震学和固体科学的热门课题，也是一个非常重要和复杂的科学难题。许绍燮等人[1−3]在对大地震空间分布的研究中，曾提出地震间空间距离存在着 5°及其倍数特征间距的分布。同时，他还提出了地球壳层在受到扭转和压力的作用后，其表面存在着网格状菱形与圆环状弧形变形的几何特征。特别，他指出大地震活动的分布，多集中在地球表面网格菱形变形的节点上。这一论断已在川滇和邢台－唐山地区得到了验证。丁国瑜[4，5]指出，在中国大陆内部有许多资料表明，新的断裂活动在平面上的分布有不受区域构造单元的控制，且在大范围内呈现出规则的几何组合图像的特点，特别是地震活动反映出的地壳现代破裂具有大范围规则的网络性特点。梅世蓉等人[6-7] 研究了我国 7 级以上大地震的空间分布，发现大地震活动的分布结构多表现为环形或椭圆形的分布趋势。

近年来，随着科学的进步和计算机技术的发展，地震发生机理和时空分布复杂性的研究正在成为地震学研究的热点。Aki[8]　最近研究了地震过程和孕震结构的多尺度关系。Ohnaka[9]　研究了地震尺度及其成核带大小的物理标度关系。为根据基础物理学阐明地震成核的机理，他提出了非均匀断层地震成核的具体模型。Pook[10] 研究了失稳裂纹路径的确定性分布。借助于线弹性断裂力学，他研究了二维和三维裂纹路径的稳定性和薄壳中斜裂纹的生长和发展。虽然，上述研究提供了应力场与成核带的描述，但仍未涉及到地震空间分布特征尺度的定量研究。

本文应用中国地震局地震台站观测数据，探讨了华北与西南地区地震空间活动间距的分布特征。同时，应用矩形薄板物理模型模拟了华北板内地震构造格局，根据弹性力学观点，探讨了模型受力后屈曲的稳定性以及失稳时的半波长分布。

2 地震活动特征分析

应用我国板内地震活动的资料，研究了其时空分布特征，发现我国地震活动特征常常呈现网格状的分布图像。中小地震常常集中在某些网格的内部或周边，而大地震则易位于网格的节点上。网格有时呈正方形或菱形。中小地震构成的菱角是大地震易发生的场所。这是基于地震能干层受到挤压与剪切多种应力作用导致的结果。大陆板内地震的发震层在深度上展布非常有限，通常仅约为 15km 左右；但水平方向却可以数百、数千公里的尺度延伸。因此，能发生地震的能干层实际上是一种宽厚比为非常大的薄壳结构。薄壳结构在受到挤压或剪切

地震科学联合基金会资助，103053

作用时极易形成屈曲。耗能最小的屈曲图像，亦即最易产生的屈曲图像是正方形网格，而当存在有剪切应力作用时，则这种正方形结构将变形成菱形图像。为了定量地研究这种特征，我们将用弹性板壳理论研究这种分布的机理。

3 理论模型与计算结果

地球壳层在垂直径向上分层，在水平横向上分块。层块的运动是可以受到对流中的剪切应力和板块推挤正交于边缘压应力的作用，为此，我们假定地震构造块体可以简化为各向异性，具有简支边支撑的矩形薄板，其长边两侧受到均匀分布的横向力，周边则受到均匀分布的剪应力作用。从弹性板壳理论知道，对于正交各向异性板的挠曲面方程为[11]：

$$D_1\frac{\partial^4 w}{\partial x^4}+2D_3\frac{\partial^4 w}{\partial x^2\partial y^2}+D_2\frac{\partial^4 w}{\partial y^4}+\sigma h\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+2\tau h\frac{\partial^2 w}{\partial x\partial y}=0 \qquad (1)$$

这里 D_1，D_3 分别为抗挠刚度和抗扭刚度，h 为板的厚度。其中 D_3 为

$$D_3=D_1\nu_2+2D_k \qquad （2）$$

ν_2 为泊松系数。为寻找上述问题的解答，， 假定矩形板变形的挠度方程为：

$$w=A\sin\frac{\pi y}{b}\sin\frac{\pi(x-y\tan\varphi)}{s} \qquad （3）$$

这里 A 为振幅,b 为所研究块体的宽度，s 为不稳定节点距。我们将（3）式代入方程（1）式左端，然后将结果乘以

$$\sin\frac{\pi y}{b}\sin\frac{\pi(x-y\tan\varphi)}{s}dxdy, \qquad （4）$$

然后，对 y 从 0 到 b 积分，x 从 0 到 s 积分，特别注意：

$$\int_0^b\int_0^s\sin\frac{\pi y}{b}\cos\frac{\pi y}{b}\sin\frac{\pi(x-y\tan\varphi)}{s}\cos\frac{\pi(x-y\tan\varphi)}{s}dxdy=0 \qquad （5）$$

最后，我们得到剪应力的表达式：

$$\tau=\pi^2\frac{\sqrt{D_1D_2}}{2hkb^2}\left\{\sqrt{\frac{D_1}{D_2}}\xi+\frac{2D_3}{\sqrt{D_1D_2}}\left(1+\xi k^2\right)+\sqrt{\frac{D_2}{D_1}}\left(\frac{1}{\xi}+6k^2+\xi k^4\right)\right\}-\frac{\sigma}{2k}\left(\frac{1}{\xi}+k^2\right) \qquad （6）$$

令 k=tanφ，为节线的斜度，并令 $\xi=\frac{b^2}{s^2}$。为求其临界值，由（6）式得到：

$$\frac{\partial\tau}{\partial\xi}=0,\qquad \frac{\partial\tau}{\partial k}=0 \qquad （7）$$

因此，我们得到正应力 σ 和 ξ 的表达式：

$$\sigma=\frac{\pi^2\sqrt{D_1D_2}}{hb^2}\left\{\sqrt{\frac{D_2}{D_1}}-\left(\sqrt{\frac{D_1}{D_2}}+\frac{2D_3}{\sqrt{D_1D_2}}k^2+\sqrt{\frac{D_2}{D_1}}k^4\right)\xi^2\right\} \qquad （8）$$

$$\xi_c=\frac{\left(D_1-D_2k^4\right)\pm\sqrt{\left(D_2k^4-D_1\right)^2-k^2\left(5D_2k^2-2D_3\right)\left(D_1+2D_3k^2+D_2k^4\right)}}{k^2\left(D_1+2D_3k^2+D_2k^4\right)} \tag{9}$$

由（9）式，我们便可得到各向异性板非稳定时的半波长：

$$s_c=\frac{kb\sqrt{D_1+2D_3k^2+D_2k^4}}{\sqrt{\left(D_1-D_2k^4\right)\pm\sqrt{\left(D_2k^4-D_1\right)^2-k^2\left(5D_2k^2-2D_3\right)\left(D_1+2D_3k^2+D_2k^4\right)}}} \tag{10}$$

由（10）式可见，s_c 是依赖于介质刚度和作用挠度角度的繁杂函数。将（9）和（10）式代入（6）和（8）式，即可得到各向异性板临界剪应力和正应力的表达式：

$$\tau_c=\pi^2\frac{\sqrt{D_1D_2}}{2hkb^2}\left\{\sqrt{\frac{D_1}{D_2}}\xi_c+\frac{2D_3}{\sqrt{D_1D_2}}\left(1+\xi_ck^2\right)+\sqrt{\frac{D_2}{D_1}}\left(\frac{1}{\xi_c}+6k^2+\xi_ck^4\right)\right\}-\frac{\sigma_c}{2k}\left(\frac{1}{\xi_c}+k^2\right)$$

$$\sigma_c=\frac{\pi^2\sqrt{D_1D_2}}{hb^2}\left\{\sqrt{\frac{D_2}{D_1}}-\left(\sqrt{\frac{D_1}{D_2}}+\frac{2D_3}{\sqrt{D_1D_2}}k^2+\sqrt{\frac{D_2}{D_1}}k^4\right)\xi_c{}^2\right\} \tag{11}$$

为简单起见，我们仅考虑均匀各向同性介质的情况，我们有：

$$\xi_0=\frac{\left(1-k^2\right)\pm\sqrt{1-4k^4}}{k^2\left(1+k^2\right)},\qquad s_0=b\sqrt{\frac{k^2\left(1+k^2\right)}{\left(1-k^2\right)\pm\sqrt{1-4k^4}}} \tag{12}$$

将（12）式分别代入（6）和（8）式，便可得到均匀各向同性板的τ_c和σ_c的临界表达式。

解不等式，从（12）式中分别得到k和ξ_0的取值范围是：

$$\sqrt{\frac{2}{5}}<k_0\le\sqrt{\frac{1}{2}}\ ,\qquad\qquad \frac{2}{3}\le\xi_0\le\frac{15}{7} \tag{13}$$

以及均匀各向同性板不稳定的半波长 s 的取值范围是：

$$\sqrt{\frac{7}{15}}b\le s_0\le\sqrt{\frac{3}{2}}b \tag{14}$$

将（13）式分别代入（6）和（8）式，即可得到均匀各向同性板的临界剪应力和正应力：

$$\sigma_0=0\,,\qquad\qquad \tau_0=\frac{4\sqrt{2}D\pi^2}{hb^2} \tag{15}$$

由此可见，块体不稳定结点的分布依赖于所研究块体的宽度。也就是说，块体不稳定的半波长不仅与块体的横纵比有关，而且也与半波长节线的角度有关。由此可知，块体的稳定性，依赖于块体受力的几何学特征。

4 结果讨论

以上我们初步研究了板内大地震空间分布的格局特征，同时，提出了这种分布的力学模型。为了寻找板内大地震空间尺度分布的规律，我们推导了各向异性和各向同性板的稳定性及其破裂失稳的半波长。初步结果揭示出，当板内的应力达到其临界值时，则板将产生不稳定，其不稳定的波长为板宽度的０．７～1.22 倍，见（14）式，而且，不稳定性还与节线的角度有关。我们看到，当块体承受最大剪应力时，块体同时也受到较高的压应力作用，若压应力减弱，则在较小的剪应力作用下也可失稳。极端情况下，即由压应力为零时的理论结果看，板块介质不稳定点的大小与（15）式一致。这与各向同性薄板在纯剪切时的情况相同[12].

块体受剪、压力作用后，有没有不稳定点？发生在什么位置？这不仅关系到地震的预测问题，而且也关系到观测台网的布局和烈度的区划问题。虽然，这里给出了某些理论研究果，然而，这些研究结果却是很初步的，许多问题还有待深入的研究和进一步的探索。

参考文献

[1] 许绍燮,沈佩文.1980. 北京周围地区地震的分布特点与地壳屈曲,地震学报,2,2,153－167

[2] Shaoxie Xu and Peiwen Shen.1981,Seismicity patterns in China［J］.Reprinted from Earthquake Predicition ,117-125

[3] 许绍燮,沈佩文. 1982,地震活动性图像,地震学报,4,3,239-249

[4] 丁国瑜，李永善.我国地震活动与地壳现代破裂网络,地质学报 1979,**53**(1): 22－34

Ding G y, Li y S. Seismicity and the recent fracturing pattern of the earth crust in China.Acta GeologicaSinica［J］ (in Chinese),1979,**53**(1): 22-34

[5] 丁国瑜.中国内陆活动断裂基本特征的探讨,(中国活动断裂),地震出版社,1982,1-9

Ding G Y. A discussion on the basic characteristics of the active faults in the Chinese continent［J］,(in Chinese),Earthquake Press,1982,1-9

[6] 梅世蓉,冯德益,张国民,朱岳清,高旭,张肇诚.1993,中国地震预报概论,地震出版社,pp498

[7] 梅世蓉,宋治平,薛艳.1996,中国巨大地震前地震活动的环形分布图象与规律,地震学报,18,4,413－419

[8] Aki,K.2000,Scale-dependence in earthquake processes and seismogenic structure［J］. Pure appl.geophys.,157,2249-2258

[9] Ohnaka,M.2000.A physical scaling relation between the size of an earthquake and its nucleation zone size［J］,Pure appl.geophys.,157,2259-2282

[10] Pook, L,P. 1997, Determination of fatigue crack path［J］, International Journal of Bifurcation and Chaos,7,2,469-475

[11] 列赫尼茨基，各向异性板，胡海昌译，科学出版社，1955，pp331

[12] 黄克智,夏之熙,薛明德,任文敏.1988.板壳理论,清华大学出版社,pp407

THE RHOMBIC SEISMICITY PATTERN AND STRATIGRAPHIC BUCKLING

AN Zhen-Wen　XU Shao-Xie

（Institute of geophysics,CSB,Beijing,100081）

Abstract Based on the monitoring data of seismic events, in this paper, the distribution characteristics for grate earthquakes in space in China are analysed. In particular, the rhombic pattern network characteristic for grater earthquake distribution in China is suggested. It is pointed out that since the seismic events of continental China due to under the control of the focal depth limitation, the competent layer of earthquake genesis is in fact a thin shell structure that the ratio between its width and thickness is very large. During the structure under the action of shear stress, it will very easy produce a rhombic pattern buckling deformation. A physical model of seismic distributions within plate is suggested by the characteristic of seismic distribution in space in China. The stability of the anisotropy plates which action by the union action of the lateral compress stress and uniform shear stress is explored and its theoretical solutions as well as critical stress for unstability are derived. In the same time, the half wavelength of homogeneous plate for unstability is also obtained.

Key words: Seismicity, Strata buckling, Rhombic pattern distribution, Anisotropy, Stability