

冀中坳陷滑脱构造动力的数值模拟^{*}

张东宁 曾融生

(中国北京 100081 国家地震局地球物理研究所)

摘 要

根据地质资料及新近完成的临城—巨鹿深地震反射剖面的分析结果,初步断定冀中坳陷地壳内存在低角度滑脱构造.利用有限元数值模拟方法,分析地幔热物质侵入到地壳内,对华北新生代盆地构造运动方式的影响.着重讨论坳陷西侧太行山稳定地壳的阻挡作用与滑脱构造发育的关系.模拟结果显示:①地幔热物质的侵入在冀中坳陷上地壳造成张应力区,随时间推移,上地壳的拉张应力状态基本不变,与坳陷区上地壳现代正断层活动形迹基本一致;②中生代曾经活动过的逆冲断层的存在与太行山的阻挡,可以形成滑脱构造;③随着地幔热物质侵入时间的推移,侵入体上方中地壳承受的水平向压应力逐渐加强,随水平向压应力的集中,在侵入体上方的中地壳可能孕育走滑断层的地震.

主题词 坳陷;滑脱构造;地壳构造;有限元模拟

1 冀中坳陷区的地壳结构特点

深地震测深结果显示在冀中坳陷 10 km 左右深度有一明显的速度间断面,与临城—巨鹿深地震反射剖面的解释结果基本一致,可以初步断定冀中坳陷地壳内存在低角度滑脱构造(图 1a,b).这些证据说明在该深度可能存在低角度的滑脱构造.上述研究同时显示,在滑脱面上发育有铲式断层.断层的倾角随深度的增加而逐渐变小,消失于滑脱构造面之上.冀中坳陷区表层的拉张减薄受上述构造的控制.总结邢台地震的一系列研究成果可以知道(曾融生等,1991),1966 年 3 月 8 日强震的断层面解为近于铅直方向的右旋走滑断层,断层走向北北东.3 月 22 日 7.2 级强震的断层面解也为北北东走向的走滑断层.可见邢台地震震源处(深度为 10 km)构造应力场的最大主应力和最小主应力方向均在水平方向,它和地壳表层拉张构造反映出的张性构造应力场完全不同.

2 滑脱构造的可能动力机制

Brown(1986)根据大陆地震反射剖面资料,发现岩石圈板块内部存在着大型的近于水平的滑脱面,地壳表层沿滑脱面发生大规模的逆冲或伸展.通常认为滑脱构造上下岩

^{*} 国家地震局地球物理研究所论著 95A0113.
1994 年 8 月 8 日收到初稿,1994 年 9 月 30 日决定采用.

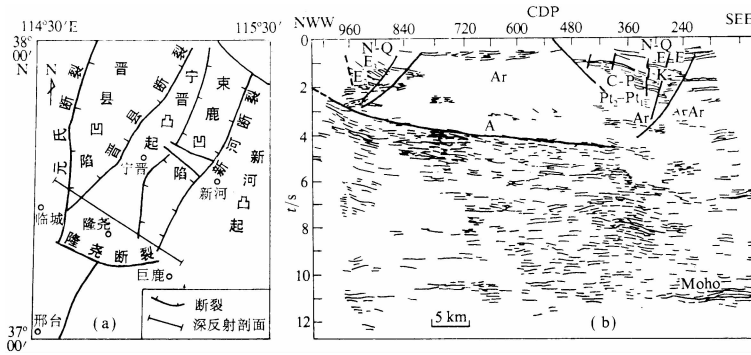


图 1(a) 冀中拗陷西南部浅部构造分布图(王椿镛等, 1994)

(b) 临城—巨鹿深地震反射剖面解释剖面图(王椿镛等, 1994)

层的水平向相对位移很大. 产生滑脱构造的内在条件, 是存在有解耦层和滑脱面. 它可以是断层, 或壳内高导低速层. 岩体自重作用是产生滑脱构造的可能外在原因(Merle, 1986). 但是在地势比较平缓的冀中拗陷, 自重作用不大可能是产生滑脱构造的主要外在动力. 曾融生等(1991)在讨论唐山地震的动力来源时, 注意到地幔热物质侵入到地壳内部的可能性. 他们认为, 由于一些尚待明确的机制(如地幔顶部在横向上的温度不均匀, 或地壳受水平向构造应力作用而破裂), 莫霍界面出现断裂现象. 热物质自莫霍面的断裂处上升到地壳中, 在华北盆地侵入体上升到 20 km 深度处. 岩浆侵入体的温度通常比周围地壳介质的温度高, 热物质的侵入使地壳内温度场受到扰动, 而形成新的温度场. 各处温度的前后差异导致地壳物质的变形, 产生附加的热应力. 热物质的上升使地壳中的温度和应力受到扰动, 在地壳上部产生附加的张应力, 而在地壳中部和下部产生附加的水平剪切应力(曾融生等, 1991). 王椿镛等(1994)给出的临城—巨鹿深地震反射剖面, 在 6—10.5 秒深度上有明显向东倾斜的反射事件(宽度为 15 km 左右). 该特征可能对应于新生代发生的地幔热物质的底蚀作用, 且热物质已侵入到下地壳内. 对形成滑脱构造的动力机制, 王椿镛等提出一种解释: 华北盆地由于上地幔岩浆侵入到地壳内, 热物质侵入引起的拉伸作用部分地增补伸展应力场. 已有研究成果认为, 地幔热物质侵入地壳是控制铲状断层发育、滑脱构造活动及导致邢台地区地壳中部走滑断层强地震活动的统一机制(曾融生等, 1991; 王椿镛等, 1994).

在分析形成滑脱构造的动力机制时, 本文作者注意到冀中拗陷低角度滑脱构造的西端为地壳构造活动相对稳定的太行山, 因而提出如下设想: 在地幔热物质侵入地壳造成盆地扩张的同时, 稳定的山区地壳可能对冀中拗陷的伸展运动起阻碍作用. 笔者认为盆地的扩张与山区的阻挡共同作用, 是形成新生代滑脱构造运动的综合机制. 利用有限元方法, 定量地分析上述条件与低角度滑脱构造之间的关系, 是本文的主要目的.

3 地幔物质侵入引起温度场变化的数值模拟

地幔侵入体除对周围地壳物质施加压力作用外, 随着地幔侵入物质在地壳内逐渐上

升,造成的局部高温在地壳内会造成温度异常,侵入体周围温度的升高可能在上地壳形成水平的拉张应力区. 计算侵入体对地壳的作用,应该考虑地壳温度场的变化.

3.1 模型剖面位置

模型剖面基本上对应临城-巨鹿深地震反射剖面(图 1a). 反射剖面总长为 55 km,为减小模型边界对计算结果的影响,在建立有限元模型时选取了一个 420 km 长的二维剖面,剖面顶部为地表面,剖面深度 35 公里(莫霍面深度). 图 2 为计算应力场和温度场的有限元网格,共有 1134 个节点,1060 个二维 4 节点有限单元.

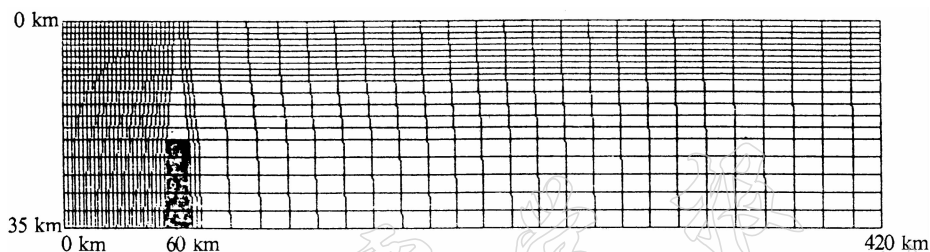


图 2 计算温度场和应力场模型有限元网格. 深色区域代表地幔侵入体

3.2 温度场模型边界条件

根据吴乾蕃等(1985)对华北大地热流资料的分析研究,华北地区莫霍面的平均温度为 800°C 左右. 本文选取该值为背景温度场模型的地壳底部边界值;地表温度值定为 0°C . 当考虑岩浆侵入体时,地幔侵入体顶界面的温度定为 800°C ;在 35 km 深度处地幔侵入体温度定为 1200°C . 根据王椿镛等(1994)发表的临城-巨鹿深地震反射剖面的解释结果,滑脱构造东端下部深度为 20 公里左右处,存在一个向上凸起的弧形反射界面,其宽度在 10—15 km 左右. 这可能大致反映了上地幔岩浆侵入体的几何形状(见图 1b). 图 3 为考虑地幔物质侵入的温度场计算结果.

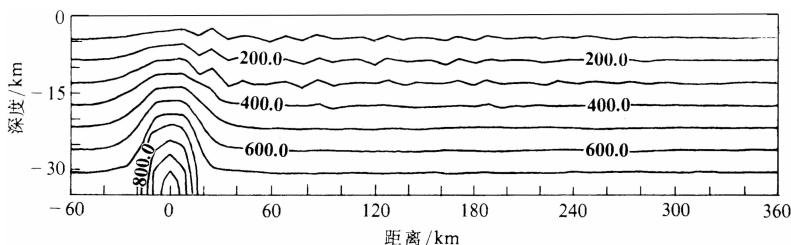


图 3 考虑地幔物质侵入的温度场计算结果. 图中数值的单位为 $(^{\circ}\text{C})$

4 构造应力场及位移变化的数值模拟

在本文的模拟计算中,假定由层状均匀岩层的自身重力引起的应力场,经漫长的地质时期已达到三轴主应力相同的静岩压力平衡状态. 计算时只考虑偏离此状态的构造应力场,即地幔物质侵入的附加压力和温度引起的构造应力场,以及华北区域构造应力场

北东东向的水平向主压应力在近东西向的模型剖面上的投影值，而不考虑应力场中的静岩压力部分。在模型中单元均不引入体力计算。由于上述假定，在计算岩浆侵入体对地壳物质的挤压力时，需扣除相应深度的静岩压力。同样，考虑温度引起的膨胀效应时，亦应减去无异常温度分布时的背景温度场。

利用前面介绍的模型，计算了地幔物质侵入地壳造成的位移和构造应力场分布。根据计算结果可以判断出冀中坳陷西部滑脱构造的形成与地幔物质侵入有什么关系。同时，还可以知道太行山区对坳陷区地壳物质扩张的阻挡，是否为滑脱构造的生成提供了必要的构造条件。计算工作采用 ADINA 程序包中的热弹塑性和蠕变本构关系及相应计算软件(Bathe, 1981)。

4.1 模型参数的确定

二维有限单元模型内部代表不同构造层的杨氏模量的选取，主要参照地震波速度随深度变化的剖面分布。这种分布曲线反映出地壳不同深度物质对地震波的弹性响应能力。根据公式(1)和公式(2)利用速度结构可以计算出杨氏模量和泊松比

$$E = [(1 + \nu)(1 - 2\nu)/(1 - \nu)]\rho\alpha^2 \tag{1}$$

$$E = 2(1 + \nu)\rho\beta^2 \tag{2}$$

式中， E 为杨氏模量， ν 为泊松比， ρ 为密度， α 为 P 波速度， β 为 S 波速度。

根据曾融生等(1988) 给出的华北地区地壳构造及力学性质的分层，计算出地壳介质的弹性系数。根据 Stacey(1977) 给出的地球热模型可以计算出地壳的平均热膨胀系数(线膨胀系数)，具体数值参见表 1。

大量的高温高压岩石实验结果说明(Carter, 1976)，岩石在高温高压条件下，蠕变速率和差应力之间的关系为非线性的幂次关系，如公式(3)所示

$$\dot{\epsilon} = A\exp(-H/RT)(\Delta\sigma)^n \tag{3}$$

其中， $\dot{\epsilon}$ 是蠕变速率，单位是 s^{-1} ； A 是温度和压力的函数； H 是活化能； R 是普适气体常量； T 是绝对温度； $\Delta\sigma$ 是差应力，单位是 MPa。 A 、 H 和 n 在模型中不同深度处的取值参见表 1，选自 Carter(1976)和 Shelton 等(1981)给出的数值。

表 1 模型材料系数

深度 km	杨氏模量 $\times 10^5$ MPa	泊松比	热膨胀系数 $\times 10^{-5}/^\circ\text{C}$	A $\text{MPa}^{-n} \cdot \text{s}^{-1}$	H kJ/mol	n
0—5	5.0	0.25	1.0	3.0×10^{-19}	0.0	1.00
5—10	7.0	0.25	1.0	1.3×10^{-3}	251.0	2.44
10—20	8.7	0.28	1.0	1.3×10^{-3}	251.0	2.86
20—35	9.6	0.30	1.0	1.3×10^{-3}	251.0	2.86

4.2 考虑 ΔT 对应力场影响的意义

温度场变化的差值，是影响地壳应力场的一个因素。物体内部温度的变化会引起物体膨胀和收缩。如果物体的体应变受到约束，则温度变化就会改变物体内部的应力场。考虑热物质侵入对现代构造活动的影响，应考虑地温梯度的变化。在冀中地区，这种因地幔物质侵入地壳引起的温度场变化，可能是形成地壳内滑脱构造的一个动力来源。

4.3 岩浆侵入体压力的估计

Roberts(1970) 估计来源于深度 50—60 km 的岩浆体，在下地壳的超压约为 100

MPa. 本文考虑岩浆体对地壳物质的压力时, 采用 100 MPa(扣除静岩压力).

4.4 模型边界条件的确定

冀中拗陷区西部太行山区稳定地壳及增厚的山根, 与冀中拗陷区张性构造活动特点完全不同, 山区岩石圈可能对拗陷区扩张趋势起到阻挡作用. 在计算因地幔物质侵入地壳对地壳内构造应力场的扰动时, 采用两种可能的边界条件: ① 考虑太行山区地壳的阻挡作用: 模型中对应太行山区的北西西边界的水平方向被刚性固定, 而南东东边界可以自由移动, 计算结果见图 4—图 6; ② 不考虑太行山区地壳的阻挡作用, 模型北西西侧边界可以自由移动(位移计算结果见图 7). 对比两组边界条件的位移计算结果, 就可以估计出太行山区地壳对冀中拗陷伸展运动的阻挡, 与滑脱构造的形成有什么关系. 为避免

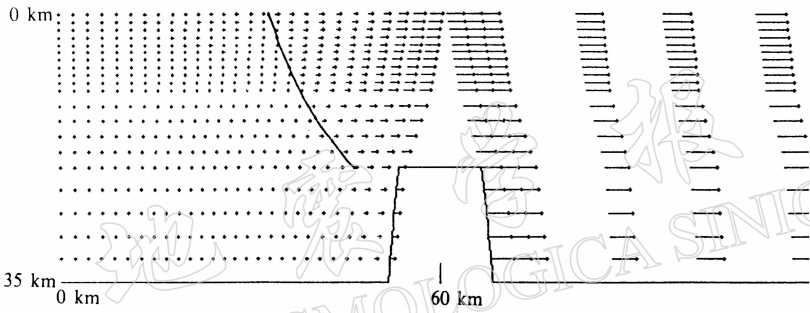


图 4 考虑太行山区阻挡时, 地壳物质位移的计算结果(图中未给出垂直向位移)

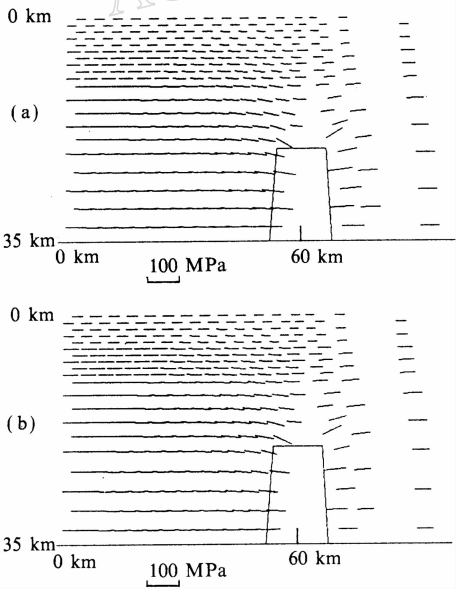


图 5 只考虑地幔侵入体的压力作用时, 主压应力变化计算结果
(a) 初始加载时刻, (b) 加载一百万年以后

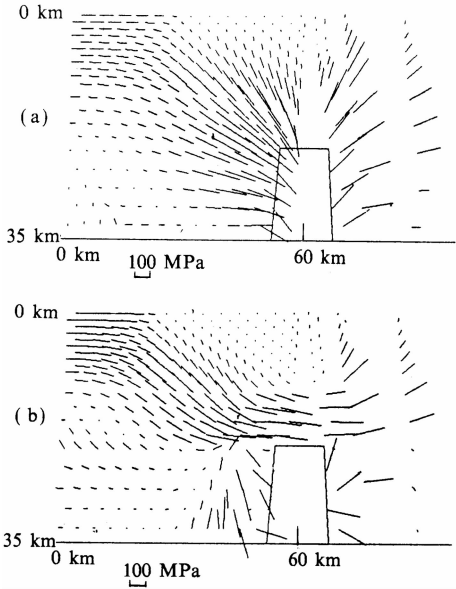


图 6 考虑地幔侵入体的压力和温度作用时, 主压应力变化计算结果
(a) 初始加载时刻, (b) 加载一百万年以后

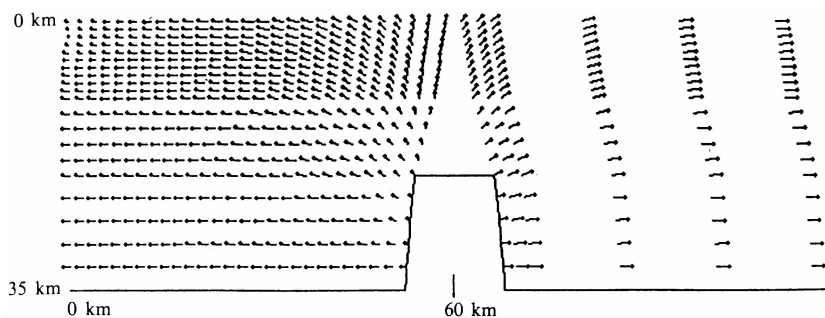


图7 不考虑太行山区阻挡时,地壳物质位移的计算结果

求解位移方程组的不定性,在模型底部至少有一端的节点为刚性固定点.采用这种边界条件,可体现出紧邻莫霍界面的地幔物质较其上部的下地壳物质而言,强度和杨氏模量均要高一些,而流动性则要低一些.此外,华北地区区域构造应力场北东东向的水平最大主压应力在近东西方向模型剖面的投影值,亦被施加到模型的两端.根据笔者已有的模拟工作(张东宁、许忠淮,1994),并考虑到板块边界作用力在向华北传递过程中的衰减,模型两侧边界载荷的数值取为 50 MPa.

5 讨论与结论

通过对模型西端选取不同的边界条件,可以分析太行山区地壳对冀中拗陷伸展运动的阻挡与滑脱构造的关系.从考虑地幔热物质上侵造成的压力和温度影响的数值模拟结果看,在模型边界条件中如果施加了太行山的阻挡作用,则位移计算结果(图4)与冀中拗陷存在滑脱构造的运动趋势相一致.边界条件存在太行山区阻挡时,计算结果(图4)显示出,有山区阻挡时地壳位移存在一条由陡变缓的分界线(图中水平位移方向相反的节点的分界线.为使分界线平滑,个别节点的位移方向予以忽略),变缓趋势不十分明显,在分界线两侧物质有明显的拉张运动趋势.这和冀中拗陷地区存在滑脱构造是一致的,只是分界线的倾角要陡一些.如果完全由地幔侵入形成的应力状态发育出新的断层活动,只能是倾角较陡的铲状断层,破碎带不可能是缓倾角的滑脱构造.解释这个矛盾,可以参考王椿镛等(1994)的设想:滑脱构造作为新生代正断层可能利用了中生代的逆冲断层,较年轻的伸展断层系叠加到这个在伸展之前由逆冲断层作用过的地体上.模拟结果证实:如果冀中拗陷地区过去曾有过逆冲断层活动,那么,在地幔侵入体作用造成的现代应力状态下,伸展运动利用已有的薄弱构造层发育出滑脱构造是可能的.已有人工地震测深工作和大地电磁的观测结果(刘国栋等,1984;孙武城等,1988)认为华北地区在中地壳普遍存在低速层和高导层.由较低的速度结构可推测,在这一深度地壳物质的杨氏模量和剪切模量可能偏低,有利于上下层水平向相对运动,由于低速高导层的上界面对应于可能的滑脱构造深度,同样可以认为起层间解耦作用的低速高导层有利于滑脱构造的发育,王椿镛等(1994)对此问题进行了比较详细的讨论.因本文着重讨论地幔热物质上侵对冀中拗陷地壳物质水平运动的影响,并想突出图4中的水平运动方向的分界线,所以在本文图4中未给出垂直运动的结果.受篇幅所限,关于地幔热物质上侵对地

壳垂直运动的影响将在另文中讨论。

对比上述存在山区阻挡的计算结果,在图 7 中给出了不存在太行山区阻挡作用的位移计算结果。从图 7 可以看出,如果不存在太行山区的阻挡作用,位移计算结果没有显示出与滑脱构造活动一致的位移趋势。据此可以断定,太行山区地壳的阻挡作用,有助于滑脱构造的发育。

图 5、图 6 分别给出了单独考虑地幔侵入体压力作用和同时考虑压力和温度作用的主压应力方向计算结果。比较图 5、图 6 可以看出,在加载初期同时考虑侵入体的压力作用和温度作用,在侵入体上部形成了拉张应力区;而只考虑压力作用的计算结果则没有产生拉张应力区,这说明地幔物质侵入体的温度影响,对其上部的地壳发育出张性应力状态是必不可少的。构造应力场的计算结果和曾融生等(1991)及王椿镛等(1994)的推测是完全一致的。随着加载时间的推移,考虑温度与压力作用的应力计算结果(图 6),在靠近模型西端的上地壳局部区域,出现水平向压应力集中现象;而随时间推移,图 6 中地幔热物质侵入体上方 0—10 km 的上地壳内拉张应力状态基本不变,与坳陷区上地壳现代正断层活动基本一致。

邢台地震的构造应力场最大主应力和最小主应力方向均在水平方向,和地壳表层张性构造应力场完全不同。在本文的二维计算结果中,如果假定垂直于模型剖面的构造主应力为地壳构造应力场中的最小主压应力,分析最大主压应力随着深度的变化:图 6b 显示的是地幔侵入体压力和温度加载作用一百万年以后,主压应力的分布,可以看出,在侵入体上方,最大主压力的方向已由初始加载时刻的垂直方向转为水平方向分布,这样在 10—20 km 深度范围内,就发育出走滑断层构造应力状态,且最大主压应力的数值较初始加载时刻亦有所增加,显示出应力集中的趋势。上述应力变化过程表明,地幔侵入初期整体呈拉张状态的地壳内部,随时间的推移,可能在地幔侵入体上方的地壳中部发育出局部的走滑断层性质应力状态,当应力聚集到一定程度就可能发生走滑断层地震。

参 考 文 献

- 刘国栋、史书林、王宝钧, 1984. 华北地区壳内高导层及其与地壳构造活动性的关系. 中国科学(B 辑), 9, 439—448.
- 孙武城、祝治平、张利, 1988. 对华北地壳上地幔的探测与研究. 中国大陆深部构造的研究与进展, 19—37. 地质出版社, 北京.
- 王椿镛、张先康、吴庆举、祝治平, 1994. 华北盆地滑脱构造的地震学证据. 地球物理学报, 37, 613—619.
- 吴乾蕃、谢毅真、祖金华、王都, 1985. 华北大地热流与地震活动性. 现代地壳运动研究, 1, 133—141. 地震出版社, 北京.
- 曾融生、陆涵行、丁志峰, 1988. 从地震折射和反射剖面结果讨论唐山地震成因. 地球物理学报, 31, 383—398.
- 曾融生、朱露培、何正勤、丁志峰、孙为国, 1991. 华北盆地强震的震源模型兼论强震和盆地成因. 地球物理学报, 34, 288—301.
- 张东宁、许忠淮, 1994. 青藏高原现代构造应力状态及构造运动的三维弹粘性数值模拟. 中国地震, 10, 2, 136—143.
- Bathe, K. J., 1981. ADINA/ADINAT/ADINA-PLOT A Finite Element Program for Automatic Dynamic Increment Nonlinear Analysis (of temperature). Report AE81—1, AE81—2, AE81—3, 1—310. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, September.

- Brown, L. , 1986. The First decade of COCORP: 1974—1984, Reflection seismology: a global perspective, ed. by Barazangi and Brown, L. A. , A. G. U. , W. D. C.
- Carter, N. L. , 1976. Steady state flow of rocks. *Rev. Geophys. and Space Phys* , **14** , 3, 301—360.
- Merle, O. , 1986. Patterns of stretch trajectories and strain rates within spreading gliding nappes. *Tectonophysics* , **124** , 211—222.
- Roberts, J. L. , 1970. The intrusion of magma into brittle rocks. *Mechanism of Igneous Intrusion* . 223—287. Gallery Press, London.
- Shelton, G. , and J. Tullis, 1981. Experimental flow laws for crustal rocks. *EOS Trans. A. G. U.* , **62** , p396.
- Stacey, F. D. , 1977. A thermal model of the earth. *Phys. Earth. Planet. Int.* , **15** , 341.

地震学报
ACTA SEISMOLOGICA SINICA