我国东部几个上地幔流变学参数推导初试

何 永 年

（国家地震局地质研究所，北京）

近年来，在超镁铁质包体的矿物学、岩石学和地球化学深入研究的基础上，通过对变形构造特征及固态流动机制的实验研究综合出了推导上地幔动力学条件新的方法．这对深入探讨岩石圈板块的驱动机制及上地幔对流具有重要意义，也是对由单纯地球物理方法获得的深部信息的重要补充和印证．

一、幔源包体概况

这里所研究的包体均为尖晶石二辉橄榄岩，大多数样品具残碎斑状结构，少数为原粒结构和粒状变晶结构．样品的产地、产状见表1．

表1 尖晶石二辉橄榄岩包体样品的分布与产状

编号	产 地	围岩及产状	包体大小(直径)
1	辽宁宽甸黄椅山	新第三-第四纪橄榄玄武岩岩筒	平均10—20cm，最大达1m
2	河北建平骆驼峰	白垩纪白榴碱玄角砾岩及霞石玄武岩岩筒	2—50cm不等
3	河北万全大麻坪	新第三纪橄榄玄武岩岩流	平均30—40cm，最大>1m
4	山西五台东台沟	同上	常见3—7cm
5	山东临朐尧山	同上	常见5—6cm
6	山东蓬莱红石山	第四纪橄榄玄武岩岩筒	常见1—2cm，大者4—5cm
7	安徽怀宁金拱	新第三纪橄榄玄武岩岩流	平均10cm，大者30—40cm
8	安徽嘉山女山	第四纪火山熔渣	常见2—3cm
9	浙江龙游西珑	新第三纪霞石玄武岩岩流	平均7—8cm，大者20—30cm

二、包体橄榄石的位错构造

本文主要是采用氧化缀饰法[1]和化学浸蚀法[2]来揭示橄榄石中的位错构造*．发育在我国东部一些幔源包体橄榄石中的主要位错构造如下：

(1) 自由位错，即离散的单个位错，它们没有被“编织”进任何位错组织中．(2)位错壁构造：这是位错沿某一结晶学方向整齐地排列并引起两侧晶格方位发生小角度偏离的一种亚构造，叫做位错壁．这里包体橄榄石中见到的主要是(100)和(001)位错倾斜壁和(010)位错扭转壁(位错网格)．它们是高温下通过刃型位错的攀移和螺型位错的交叉滑动形成的．此外，还有长而直的[100]螺型位错线构成的倾斜壁，这也是一种典型的高温蠕变的产物．(3)亚晶粒构造：所谓亚晶粒构造是指“一个晶粒内由晶格方位有小角度（$\theta < 15°$）偏离的区域所构成的多边化亚构造，它们之间被低角度亚晶界，即位错壁所分隔”[3]．这里常见的是被（100）和

本文1982年11月16日收到．

* 通常，位错构造在光学显微镜下是不可见的，经过氧化或浸蚀处理，便可以在光学显微镜下观察到清晰的位错图象．

(001)位错壁所围限的矩形亚晶粒，在正交偏光下表现为条带状消光．亚晶粒构造是回复作用的重要标志．(4)滑动位错环和位错弓弯构造：常见为(010)滑动位错环和位错弓弯，它们是高温稳态流动时位错滑动的产物．以上位错构造表示在图1和图2内．

总之，这里包体橄榄石中显示的各种位错亚构造很好地反映了它们的高温位错蠕变和回

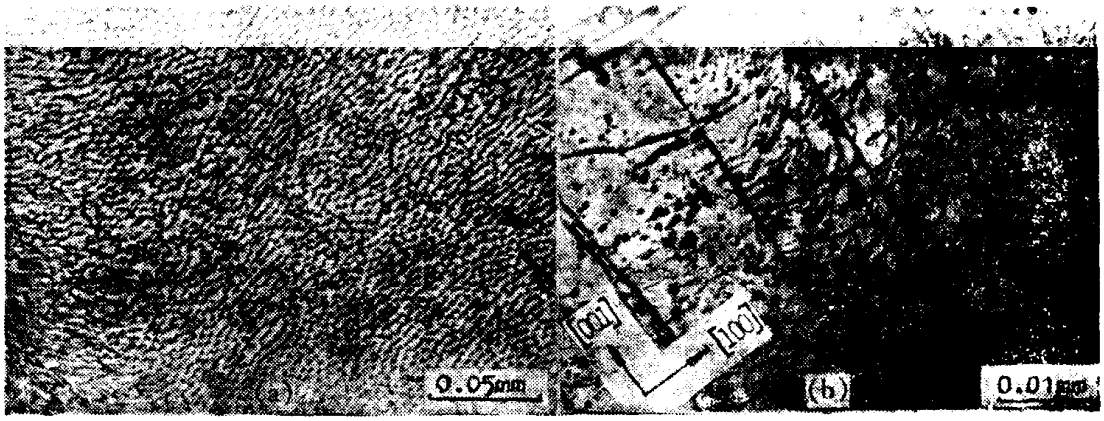

图1　包体橄榄石中的位错构造

(a) 自由位错，氧化法，单偏光，黄椅山；
(b) (100)位错倾斜壁及其所围限的矩形亚晶粒构造．浸蚀法，反光，女山

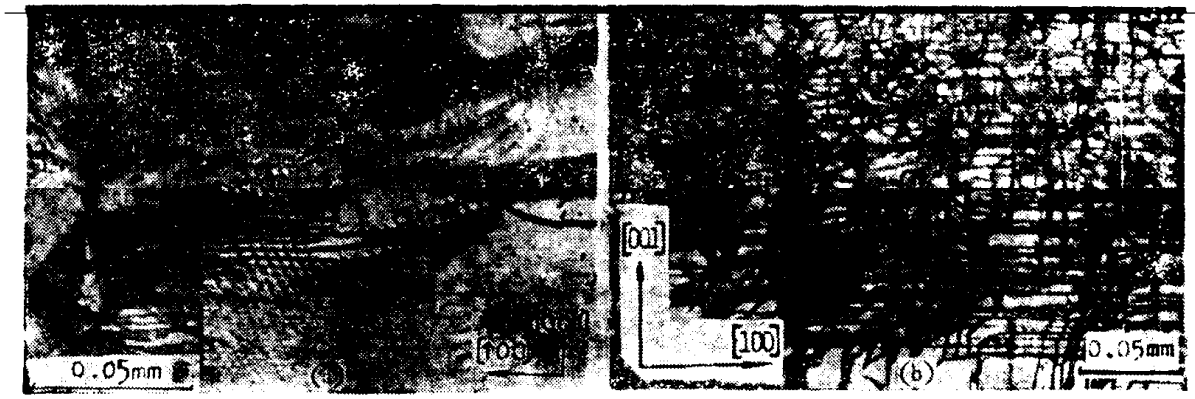

图2　包体橄榄石中的位错构造

(a) (010)位错扭转壁构造(位错网格)，氧化法，单偏光，大麻坪；
(b) (010)滑动位错环构造．氧化法，单偏光，东台沟

复的成因环境，具有稳态流动的特征[4,5]．因此，上述自由位错的密度、亚晶粒大小，位错壁间距等*都可以用作古应力计来估算它们形成时的流动应力[6]．

三、上地幔某些流变学参数的估算

1.温度与压力　这里，采用了 Mercier[7] 提出的辉石地质温度计和地质压力计来计算包体的平衡温度和压力．笔者在本文中所用的温度、压力资料一部分是在 A. Finnerty 博士帮助下完成的(包括黄椅山、大麻坪、尧山、红石山、金拱和女山包体)**；另外两个(骆驼峰和西珑包

* 常用的还有动态重结晶颗粒的粒度．

** A. Finnerty 现在美国加州理工学院喷气推进实验室 (J. P. L) 工作；电子探针分析是在加州理工学院地球及行星科学系完成的．温、压数据的计算方法据 Mercier (1980) 等．

体)的温、压资料援引自他人;东台沟包体的温、压数据系笔者等据 Mercier 的方法计算的. 所有的数据列在表 2 中.

2. 深度　根据压力 P, 利用 Avélallemant 等[8]的公式换算深度值 Z:

$$Z = 4.2 + 3.03 \times P \quad (\text{深度单位: km}).$$

3. 流动应力　上面提到, 利用橄榄石显微构造古应力计可以估算流动应力的大小. 对不同的古应力计的可靠性尚有不同的看法. 这里笔者选用位错壁间距作古应力计来估算流动应力的原因有二: (1)位错壁可以加上结晶学方向来限定,易于对比使用. (2) 幔源包体橄榄石中,(100)位错壁最为发育;所以这里采用(100)位错壁间距来估算流动应力. 其计算公式如下:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = KGbd_s^{-1}[9],$$

式中 K 为无量纲系数 (=45); G 为橄榄石的刚度 ($=0.65\times10^6$ 巴); b 为橄榄石中位错的柏格斯矢量 ($=5\times10^{-8}$cm); d_s 为(100)位错壁间距 (cm); $\sigma_1-\sigma_3$ 为流动应力(巴). 有关(100)位错壁间距数据及计算得到的流动应力结果见表 2.

4. 流动速率及粘滞度　上面已经论述过幔源包体橄榄石的变形机制是高温位错蠕变, 即服从高温流动律. 流动律构成了流动速率 $\dot{\varepsilon}$、流动应力 σ、温度 T、压力 P 以及材料的粘滞度 η 之间的函数关系, 所以可以利用橄榄石的流动律资料来计算流动速率和粘滞度. 这里采用 AvéLallemant 等的公式:

$$\dot{\varepsilon} = 1.7\times10^9\times\exp[-(125200+320P)/RT]\sigma^{3.2}$$

和

$$\eta = 0.2\times\exp[(125200+320P)/RT]\sigma^{-2.2},$$

式中 R: 理想气体常数 (=1.987 卡/分子·°K),温度是绝对温标. 计算结果表示在表 2 中.

表 2　由幔源包体获得的上地幔各项流变学参数

包体产地	温度 T (℃)	压力 P (kb)	深度 Z (km)	古应力计及流动应力		流动速率 $\dot{\varepsilon}$ (/s.)	粘滞度 η (poise)	备注
				(100)位错壁间距 (cm)	流动应力 σ (bar)			
黄椅山	1007	22.4	72	3.5×10^{-3}	415	1.8×10^{-13}	1.4×10^{20}	
骆驼峰	1050	21.5	69.3	3.7×10^{-3}	400	1.3×10^{-14}	9.9×10^{20}	*
大麻坪	1143	26.5	84.5	3.75×10^{-3}	390	1.7×10^{-13}	6.8×10^{20}	
东台沟	990	18.0	58.7	6.5×10^{-3}	225	2.5×10^{-16}	3.1×10^{23}	**
老　山	1121	30.8	97.5	3.7×10^{-3}	400	0.6×10^{-14}	2.25×10^{21}	
红石山	985	23.9	76.6	3.45×10^{-3}	420	1.0×10^{-15}	1.6×10^{23}	
金　拱	1057	27.8	88.4	2.9×10^{-3}	490	1.5×10^{-13}	1.0×10^{22}	
女　山	1013	26.8	85.4	2.5×10^{-3}	570	4.6×10^{-14}	6.6×10^{21}	
西　现	1150	22.0	70.9	6.3×10^{-3}	250	1.0×10^{-14}	8.6×10^{21}	***

* 温压资料据樊祺诚,国家地震局地质研究所研究生论文,1982.

** 温压资料据何永年等,中国东部新生代玄武岩及其深源包体学术讨论会论文,1982.

*** 温压资料据张儒瑗等,中国东部新生代玄武岩及其深源包体学术讨论会论文,1982.

四、小　结

根据幔源包体的辉石地温计、地压计、橄榄石显微构造古应力计以及橄榄石高温流动律资料，我们估算了相当于幔源包体所在深度(上地幔)的各项流变学参数. 虽然，这里的数据很不够，但仍然大略地可以看出，在我国华北范围内出现一个上地幔流动速率较高、粘滞度较低的区域，反映出那个区域之下的上地幔物质的运动相对剧烈，这与根据地球物理手段推断的我国华北地区上地幔隆起及出现上地幔高导-低速层的范围和深度也是接近的[10]. 此外，根据包体围岩的时代推论，这种上地幔隆起和上地幔高导-低速层的出现应当是从新生代中期甚至是更早的时候就开始了.

参　考　文　献

[1] Kolhstedt, D. et al., *Science*, 1976, 191: 1045—1046.
[2] Wegner, M. & Christie, J., *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1974, 43: 195—212.
[3] Nicolas, A. & Poirier, P., *Crystalline Plasticity and Solid State Flow in Metamorphic Rocks*, John Wiley & Sons, New York, 1976.
[4] Gueguen, Y. & Nicolas, A., *Ann. Rev. Earth Planet Science*, 1980, 8: 119—144.
[5] 何永年，中国科学，1980，6: 569—575.
[6] Twiss, R., *Pageoph.*, 1977. 115: 227—244.
[7] Mercier, J., *Tectonophysics*, 1980, 70: 65—113.
[8] AvèLallemant, H. et al., *Tectonophysics*, 1980, 70: 65—113.
[9] Toriumi, M., *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1979, 68: 181—186.
[10] 顾群等，地震地质，2(1980)，2: 21—29.