

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

江苏六合方山幔源包体橄榄石的 位错构造研究

董火根 闵茂中 张富生 洪建明

(南京大学地球科学系) (南京大学现代分析中心)



本研究采用光学显微镜(氧化蚀饰)法和透射电子显微镜法,首次查明江苏六合方山玄武岩的包体橄榄石中存在自由位错、位错壁、位错弓弯、位错环、亚晶粒和位错扭折条带等显微、超显微构造,它们是包体橄榄石在上地幔高温、高压条件下发生塑性蠕变的产物,不同位错形态反映主矿物塑性变形的不同状态。根据橄榄石中自由位错密度和包体中辉石的化学成分,估算江苏六合方山地区上地幔某些流变学参数为:温度(t)为1052℃;压力(P)为2060MPa;深度(Z)为66.6 km;流动应力($\sigma_1-\sigma_3$)为51.3MPa;流动速率($\dot{\epsilon}$)为 $3.6 \times 10^{-14}/s$;粘稠度(η)为 5.7×10^{21} ,这些参数值与中国东部其它地区上地幔的同类参数值相接近。

关键词 幔源包体 玄武岩 橄榄石 位错 塑性流变

幔源包体矿物包含有上地幔的某些重要信息。因此,近二十余年来,许多地质学家为了深入认识上地幔流动特征和板块被驱动机理,竞相研究幔源包体橄榄石的位错超显微构造^[1-4]。迄今为止,国内主要采用氧化蚀饰法和化学侵蚀法,在普通光学显微镜下研究包体橄榄石的位错构造^[1,5,6]。本文介绍试用日产JEM-200CX型透射电子显微镜,结合普通光学显微镜,研究江苏六合方山幔源包体橄榄石的位错构造,并据此估算该地区上地幔的某些流变学参数。

江苏六合方山玄武岩是我国研究较早、研究程度较高的火山岩类之一。但是,对其中包体橄榄石的位错构造研究,国内较少报导。

1 包体产出的地质概况

本文所研究的尖晶石二辉橄榄岩包体采自江苏六合方山下玄武岩(碱性橄榄玄武岩)中,后者的喷出时代为上新世(N_2)。尖晶石二辉橄榄岩包体在下玄武岩中呈数厘米至数十厘米大小不等的椭球体或扁长体产出,包体的矿物成分为:镁橄榄石,56%;顽火辉石,17.8%;透辉石,25%;铬尖晶石,1.1%;另有少量磁铁矿等。包体矿物主要呈粒状变晶结构,其次呈残碎斑状结构和原始粗粒结构(图版I-1,2)。包体的化学成分列于表1。

包体橄榄石呈浅黄色或浅黄绿色,半自形或它形,粒径为1—3mm,大者可达5mm。 $N_g=1.682$, $N_m=1.663$, $N_p=1.650$; $N_g-N_p=0.03$; $22V(+)=86^\circ$ 。用此重瓶法测得其相对密度 $D=3.295$; X射线粉晶法测得 $d_{130}=2.772 \times 10^{-10}m$ 。由此确定该橄榄石为镁橄榄石^[7],其 与表

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号地85079)。
本文1991年7月收到,12月改回,刘淑春编辑。

表 1 六合方山玄武岩及其中尖晶石二辉橄榄岩包体的化学成分

Table 1 The chemical compositions of the basalt and spinel lherzolite xenolith from Fangshan, Jiangsu Province

成分 (%)	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	NiO	P ₂ O ₅	烧失量	总量
玄武岩 (3)	47.10	2.33	14.93	1.91	8.68	0.15	7.04	9.78	2.24	4.16	0.04	0.04	0.53	1.01	99.94
包体 (3)	44.77	0.11	2.77	0.82	7.00	0.11	2.37	39.55	0.14	0.35	0.32	0.29	0.02	1.28	99.90

注: 括号内为分析样品数。分析者: 南京大学地球科学系实验室。

表 2 六合方山玄武岩中包体橄榄石的化学成分

Table 2 The chemical compositions of the olivine xenolith in basalt from Fangshan, Jiangsu Province

成分 (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	Cr ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅	总量
化学分析结果 (1)	40.08		1.80	7.28	0.14	49.93					0.02	99.25
电子探针分析结果 (1)	40.36	0.05		11.14	0.07	49.42	0.04	0.03	0.08			101.19

注: 括号内数字为分析样品数。电子探针分析者: 冶金部马鞍山矿山研究院电子探针室。

2 列出的橄榄石化学成分相吻合。经计算得出六合方山包体橄榄石的矿物分子式为 $\text{Mg}_{1.83}\text{Fe}_{0.15}^{2+}\text{Fe}_{0.02}^{3+}(\text{SiO}_4)$ 。

2 包体橄榄石的位错构造

2.1 自由位错

自由位错是未进入位错壁(亚晶界)的单个游离位错。六合方山包体橄榄石中的部分自由位错呈长短不一的直线状(图版 I-3, 5, 9), 其排列有一定方向性。据人工变形试验证实, 在应变速率为 10^{-5} — 10^{-8} /s、温度为 600—700℃ 条件下, 橄榄石的自由位错通常以直线型为主。

2.2 位错弓弯、位错环

在被研究的橄榄石中出现一定数量的位错弓弯和位错环(图版 I-4, 5, 9)。位错环是位错在高温下发生移动的产物^[8], 当一个位错形成后, 若继续处于高温和很低的应变速率状态, 该位错便发生攀移、滑动, 形成位错环。位错弓弯也是位错在稳态条件下移动的结果, 其一般在 800℃ 以上开始形成。位错环的存在, 表明橄榄石在高于 1000℃ 温度条件下确实经过以位错蠕变为机制的塑性流动, 它是橄榄石高温位错的典型标志^[3]。

2.3 位错壁

位错壁是众多位错按一定方式排列成(位错列)的一种低能量位错组态, 它标志晶体中的一种面缺陷。位错壁内各个位错排列整齐(有时发生交叉现象), 其间距大致相等(图版 I-4, 6, 7)。这类由刃型位错构成的位错倾斜壁, 是矿物在高温稳态流动过程中形成的典型构造。

2.4 亚晶粒

亚晶粒是以位错壁为边界的结晶矿物颗粒, 它与相邻晶体的结晶方位有较小夹角(5° — 10°), 故在正交偏光镜下显示不同消光方位, 波状消光即为母晶分离成许多亚晶粒的光性反映。亚晶

粒在高倍镜下形态清晰 (图版 I-7), 它的出现是晶体发生高温流变的重要标志。多量的电镜研究结果表明, 六合方山包体橄榄石中的亚晶粒极少见到, 因此无法统计其平均宽度等参数。

2.5 位错扭折条带

在普通光学显微镜下, 于幔源包体橄榄石中常可见到大致平行的差异消光条带 (在正交偏光下) (图版 I-8), 这一现象曾被称作阶梯状消光带^[10], 俗称膝折带(kink bank)。经研究表明, 这些条带是高角度亚晶粒边界^[11], 由位错积累、迁移形成的^[11]。位错扭折条带在宏观上可呈平行直线状, 或呈不规则状等。

对六合方山包体橄榄石 5 个样品在电镜下拍摄的 85 张明场像照片统计, 采用计数单位面积 (cm^2) 内自由位错线出露端点数, 以 ρ (位错密度) = $2N/S$ 公式计算自由位错平均密度 (式中 N 为自由位错线出露端点数; S 为统计面积, cm^2), 统计结果: $\rho = 2.67 \times 10^7 / \text{cm}^2$ 。

柏格斯矢量 (b) 是描述位错特征的一个重要参数。笔者利用电子衍射图谱和倾斜样品等方法, 经反复测定, 测得六合方山包体橄榄石中自由位错的柏氏矢量 $b = [001]$, 与 Wenk H. R.^[12] 在 1000°C 高温下, 对天然橄榄石晶体所进行的人工变形 (压缩) 实验结果一致 (出现柏氏矢量为 $[001]$ 之位错)。

3 上地幔流变学参数的估算

上地幔流变学参数包括温度、压力、深度、流动应力、流动速率和粘滞度。

1. 温度 (t)、压力 (P)

根据 3 个尖晶石二辉橄榄岩包体中共存的透辉石、顽火辉石化学成分 (表 3), 采用 Mercier 的方法^[13], 计算出包体的平均平衡温度为 1052°C , 形成平均压力为 2060 MPa 。

2. 深度 (Z)

根据以上计算出的压力值, 利用 Avé Lallemant (1980) 的公式计算包体形成深度:

$$Z = 4.2 + 3.03 \times P \quad (\text{km})$$

得出六合方山玄武岩中幔源包体形成深度为 66.6 km 。

3. 流动应力值 ($\sigma_1 - \sigma_3$)

流动应力大小可利用橄榄石位错壁间距、亚晶粒平均粒度、新变晶粒度、自由位错密度等显微构造古应力计进行估算。对于六合方山包体橄榄石来说, 由于其亚晶粒、新生变晶数量较少, 若统计它们的平均粒度, 误差较大, 故采用自由位错统计密度估算上地幔深度所承受的流动应力值。利用以下 3 个经验公式计算流动应力 ($\sigma_1 - \sigma_3$):

$$(1) \quad \sigma_1 - \sigma_3 = 9.35 \times 10^{-5} \cdot \rho^{0.5} [14]$$

$$(2) \quad \sigma_1 - \sigma_3 = 2 \times 10^{-5} \cdot \rho^{0.6} [15]$$

$$(3) \quad \sigma_1 - \sigma_3 = K G b \rho^{0.5} [16]$$

式中: $K=3$ (无量纲系数); $G=0.65 \times 10^{11} \text{ Pa}$ (橄榄石刚度); $b=5 \times 10^{-8} \text{ cm}$ (橄榄石中位错的柏格斯矢量); $\rho=2.67 \times 10^7 / \text{cm}^2$ (橄榄石中自由位错密度实测值)。经计算, 六合方山地区上地幔深度所承受的流动应力 (按以上 3 个公式计算) 分别为 46.5 MPa 、 57.2 MPa 和 50.3 MPa 。

4. 流动速率 ($\dot{\epsilon}$) 和粘滞度 (η)

根据六合方山包体橄榄石的位错特征, 表明该橄榄石塑性流动的主要机制为位错蠕变, 其变化特征服从高温流动律, 故可按下列经验公式计算流动速率 ($\dot{\epsilon}$) 和粘滞度 (η):

$$\dot{\epsilon} = 1.7 \times 10^9 \text{ eXP}[-(125200 + 320P)/RT] \sigma^{3.2}$$

$$\eta = 0.2 \times \text{eXP}[125200 + 320P/RT] \sigma^{-2.2}$$

表 3 六合方山幔源包体中辉石的化学成分
Table 3 The chemical compositions of the pyroxene in mantle
xenolith from Fangshan, Jiangsu Province

样 品 号		F-1		F-2		F-3	
矿 物		顽火辉石	透辉石	顽火辉石	透辉石	顽火辉石	透辉石
含 量 (%)	SiO ₂	56.76	52.76	54.85	52.44	54.26	50.12
	Al ₂ O ₃	3.64	5.07	3.74	5.28	5.29	7.42
	TiO ₂	0.10	0.25	0.10	0.37	0.23	0.85
	MgO	33.42	15.66	31.63	14.89	31.60	15.22
	CaO	0.81	18.86	0.66	20.79	0.97	17.33
	FeO	7.04	3.63	6.93	2.46	7.43	4.24
	Na ₂ O	0.12	1.98	0.30	1.73	0.19	1.95
	Cr ₂ O ₃	0.67	1.31	0.61	1.19	0.39	0.69
	MnO	0.09	0.07	0.15		0.07	0.69
	总量	102.65	99.59	98.97	99.15	100.43	98.51

样品由冶金部马鞍山矿山研究院电子探针室测试。

式中： P —压力； $R=1.987 \times 4.1868 \text{ J/mol} \cdot ^\circ\text{K}$ （理想气体常数）； T —温度（ $^\circ\text{K}$ ）； σ —流动应力值； eXP 为以 e 为底的指数函数符号。经计算，得出六合方山地区上地幔平均流动速率 $\dot{\epsilon} = 3.6 \times 10^{-14} \text{ /s}$ ，粘滞度 $\eta = 5.7 \times 10^{21}$ 。

六合方山幔源包体的上述变形参数与我国东部其它地区的同类参数接近^[6]。

4 讨论

1. 六合方山包体橄榄石中发育有种类多样的稳态位错构造，表明它经历了高温蠕变阶段。据计算出的有关参数及地质产状，证明该包体橄榄石为幔源物质。

2. 在理论上，晶体物质的塑性变形可分为 3 个阶段：冷加工（硬化）阶段，该阶段的外应力增大，晶体物质的塑性变形增强，物质内部的位错数量增加；热加工（回复）阶段，当温度超过物质熔化温度的 0.35 倍时，变形晶体中的位错开始攀移、运动，形成亚晶粒等，这是高温流变的重要标志；重结晶（软化）阶段，晶体物质中的位错因物质重结晶而部分地“愈合”，逐渐减少。

笔者根据研究结果，认为六合方山幔源包体橄榄石经历稳态流变阶段后，曾经历过一定程度的回复阶段和重结晶阶段，也即目前所见到的该地区橄榄石位错特征，已不再完全代表它在上地幔条件下的原始状态：橄榄石中出现典型的重结晶结构；尖晶石二辉橄榄岩包体主要呈现粒状变晶结构，而其原有的原始粗粒结构仅局部残留；橄榄石中的位错构造出现位错弓弯、位错壁、位错环等，它们最常出现在物质塑性变形的第二（回复）阶段；尖晶石二辉橄榄岩包体中的顽火辉石，从形态和结构上可分为 2 类，一类顽火辉石的解理较发育，另一类顽火辉石则解理不发育，而其中的透辉石细密出溶叶片多见（图版 I-10），这表明该 2 类顽火辉石是不同阶段的产物。

根据天然和实验变形的橄榄石研究表明，橄榄石只能在高温、高压条件下（ $>1000^\circ\text{C}$ ， $>1000 \text{ MPa}$ ）才发生重结晶作用，在地表或地壳中不具备橄榄石发生动态重结晶的条件。

3. 采用氧化缀饰法制作的样品，在普通光学显微镜下见其位错的群体构造较清晰，而对位错的个体形迹因放大倍数不足而不易被详细研究。采用电子显微镜观察则相反，对位错个体形迹的研究较详尽、清晰，而对位错群体构造因视域过小而难以研究。若将这 2 种方法结合起来研究，

则可获得更多、更准确的位错研究资料。将氧化锕饰法薄片置于电子显微镜下观察研究, 可望更深刻揭示铁染位错形迹的生成机理。

本研究曾得到国家地震局何永年, 林傅勇研究员的指导和帮助, 在此深表感谢。

参 考 文 献

- 1 何永年. 我国东部若干二辉橄榄岩团块的流动构造及流动应力估计. 中国科学, B 辑, 1980, (6): 569—575.
- 2 Raleigh B, Kirby S. Creep in the upper mantle. Mineral Soc. Amer. Spec. Pap. 1970, 3: 113—121.
- 3 Goetze D. et al., Laboratory study of dislocation climb and diffusion in olivine. J. Geophys. Res., 1970, 78: 5691—5791.
- 4 Green H W. Plasticity of olivine in peridotites, in Electron Microscopy in Mineralogy. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 1976. 443—464.
- 5 何永年, 林傅勇, 陈孝德, 史兰斌. 五台山东台沟深源包体橄榄石的位错构造研究. 岩石学研究 (第三辑), 北京: 地质出版社, 1983. 67—76 页.
- 6 何永年. 我国东部几个上地幔流变学参数推导初试. 科学通报, 1983, (17): 1058—1061.
- 7 周新民, 陈图华. 南京附近新生代玄武岩火山锥及其喷发特征. 南京大学学报 (自然科学版), 1980, (2): 83—103.
- 8 Phakey P, Dollinger G, Christie J. In flow and fracture of rocks. Am. Geophys. Union, Washington, 1972. 139—156.
- 9 郑伯让, 金振民, 金淑燕, 吕反修. 河北省大麻坪幔源包体橄榄石位错特征的透射电子显微镜研究. 矿物学岩石学论丛. 第四辑, 北京: 地质出版社, 1988. 1—9 页.
- 10 周新民, 陈图华. 江苏及皖东新生代玄武岩岩石化学和矿物化学. 南京大学学报 (自然科学版), 1978, (3): 92—111.
- 11 刘瑞珣. 显微构造地质学. 北京大学出版社, 1988. 93 页.
- 12 Wenk H R. Electron Microscopy in Mineralogy. Springer-Verlag, 1976. 393—398.
- 13 Mercier J C C. Single-pyroxene geothermometry and geobarometry. Amer. Miner., 1976, 61(78): 603—615.
- 14 Twiss R J, Sellars C M. Limits of applicability of the recrystallized grain size geopiezometer. Geophys. Res. Lett., 1978, 5: 337—340.
- 15 Durham W B, Goetze C, Blacke B. Plastic flow of oriented single crystals of olivine, Part II, Observations and interpretations of the dislocation structures. J. Geophys. Res., 1977, 82: 5755—5770.
- 16 Toriumi M. Relation between dislocation density and subgrain size of naturally deformed olivine in peridotites. Contrib. Mineral. Petrol., 1979, 68: 181—186.

图 版 说 明

1. 幔源包体橄榄石的粒状变晶结构 (正交偏光)。重结晶橄榄石的颗粒边界平直, 三连点成 120° 夹角。江苏六合方山。
2. 玄武岩中尖晶石二辉橄榄岩包体的粗粒结构 (正交偏光)。江苏六合方山。
3. 幔源包体橄榄石中的直线型自由位错。江苏六合方山。
4. 幔源包体橄榄石中的位错弓弯和位错壁。江苏六合方山。
5. 幔源包体橄榄石中的直线型自由位错和位错环。江苏六合方山。
6. 幔源包体橄榄石中的位错壁。江苏六合方山。
7. 幔源包体橄榄石中的位错壁和亚晶粒。江苏六合方山。
8. 幔源包体橄榄石中的位错扭折条带 (正交偏光)。江苏六合方山。
9. 幔源包体橄榄石中的直线型自由位错和位错环。江苏六合方山。
10. 幔源包体的顽火辉石中之透辉石细密出溶叶片 (正交偏光)。江苏六合方山。

DISLOCATIONS IN MANTLE-DERIVED OLIVINE XENOLITHS FROM FANGSHAN, JIANGSU PROVINCE

Dong Huogen and Min Maozhong

(Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing)

Zhang Fusheng and Hong Jianming

(Modern Analytical Center, Nanjing University, Nanjing)

Abstract

In the paper the following dislocation structures in olivine xenoliths of basalt from Fangshan, Jiangsu Province, are firstly revealed by means of the transmission electron microscope (TEM) and optical microscope: free dislocations, dislocation walls, dislocation bows, dislocation loops, subgrains and kind bands. Those dislocation structures result from plastic creep of olivine xenoliths under the conditions of high temperatures and high pressures in the upper mantle. According to the average free dislocation density of olivine xenoliths and chemical composition of pyroxene which is associated with olivine in mantle xenoliths, some rheological parameters of the upper mantle for the Fangshan region have been calculated as follows: temperature (t), 1052°C; confining pressure (P), 2060MPa; depth (Z), 66.6km; flow stress ($\sigma_1 - \sigma_3$), 51.3MPa; strain rate ($\dot{\epsilon}$), $3.6 \times 10^{-14}/s$; viscosity (η), 5.7×10^{21} .

Key words: mantle-derived xenolith, basalt, olivine, dislocation, plastic creep

作 者 简 介

董火根, 1938年2月生, 1962年毕业于南京大学地质系构造地质专业, 1965年研究生毕业于南京大学地质系构造地质专业。现为南京大学地球科学系副教授, 长期从事构造地质学方面的研究。通讯处: 南京大学地球科学系。邮政编码: 210008。

