

福建明溪大洋窠幔源包体橄榄石的位错结构特征*

董火根 闵茂中** 张富生 洪建明

(南京大学地球科学系, 南京 210008) (南京大学现代分析中心)

关键词 幔源包体 橄榄石 位错结构 透射电镜术

提要 本文介绍了采用透射电子显微镜观察研究福建明溪大洋窠上第三系玻基玄武岩中的包体橄榄石的位错结构。研究表明, 该地幔源包体橄榄石中存在位错壁、自由位错、位错弓弯和位错环等, 它们是该橄榄石在上地幔的高温低应力条件下发生复杂蠕变的产物。根据该地包体橄榄石中自由位错密度(统计值为 $2.0 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$) 和共生辉石的化学成分, 估算出福建明溪大洋窠玻基玄武岩中幔源包体的变形条件为: 温度(T)为 1070°C ; 压力(P)为 2480MPa ; 深度(Z)为 79.3km ; 流变应力($\sigma_1 - \sigma_3$)为 136MPa ; 流变速率($\dot{\epsilon}$)为 $7.6 \times 10^{-13} \text{s}^{-1}$; 粘稠度(η)为 0.8×10^{20} poise。

橄榄石包体是来自上地幔的“使者”, 根据其某些微结构特征, 可以获得上地幔的某些地球物理信息。在这方面, 国外一些学者已采用氧化缀饰法进行了有益的研究^[1-4]; 在我国, 何永年、郑伯让、金振民等人也曾采用不同方法对中国东部某些地区幔源包体橄榄石中的位错结构进行过一些研究^[5-8], 积累了部分资料。本文作为研究典型实例之一, 采用日本产 JEM-200 CX 型透射电子显微镜, 研究了福建明溪大洋窠玻基玄武岩中包体橄榄石的位错特征, 进而结合有关统计资料估算了该幔源包体的变形条件。

1 幔源包体概况

本文所研究的样品是尖晶石二辉橄榄岩包体, 样品采自福建明溪大洋窠玻基(橄榄)玄武岩中, 后者属上第三系佛昙群(Nft^3), 其钾-氩法地质年龄为 $5.2 \times 10^6 \text{a}$ (上新世)。尖晶石二辉橄榄岩包体在玻基玄武岩中一般呈浑圆状、不规则次棱角状产出, 包体大小(直径)长约 $3-5 \text{cm}$, 个别达 $5-10 \text{cm}$ 。

玻基玄武岩呈灰黑色, 具气孔状、杏仁状构造, 斑状结构; 基质(约占 $80\%-92\%$)为玻璃质, 部分脱玻化和沸石化, 形成球粒状构造; 斑晶(约占 $8\%-20\%$)主要为大小不等的橄榄石、普通辉石、斜长石、尖晶石、石榴石、钛铁矿等矿物捕虏晶。尖晶石二辉橄榄岩包体主要呈粒状变晶结构, 其次为残斑状结构和原始粗粒结构。包体的矿物组成: 橄榄石 58% ; 顽火辉石 19% ; 透辉石 22% ; 尖晶石 1% 。橄榄石呈半自形或它形, 在正交镜下, 常

* 国家自然科学基金资助课题(地85079)

** 执笔者

本文于1992年3月3日收到, 11月11日改回。

呈现环带状消光。将玻基玄武岩、尖晶石二辉橄榄岩包体和包体橄榄石的化学成分列于表1。

表1 大洋窠玻基玄武岩、尖晶石二辉橄榄岩包体和包体橄榄石的化学成分
Table 1 Chemical composition of vitrobasalt, lherzolite xenolith
and xenolithic olivine from Dayangke, Mingxi County, Fujian Province

成分(%) 岩石或矿物	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	烧失量	总量
玻基玄武岩(3)	43.04	2.08	9.30	5.43	6.70	0.19	15.23	11.10	0.70	1.68	1.04	3.37	99.86
尖晶石二辉橄榄岩(3)	45.42	0.23	1.87	1.27	7.18	0.12	40.20	1.94	0.20	0.12	—	0.80	99.35
橄榄石(2)	39.85	—	—	—	10.66	0.15	48.98	0.03	—	—	—	—	99.67

注：括号中为分析样品数；样品由南京大学地球科学系中心实验室分析。

2 包体橄榄石的位错组态

采用透射电镜观察研究大洋窠幔源包体橄榄石，可以见有以下几种位错组态：

2.1 自由位错

在包体橄榄石中常出现离散的位错，即自由位错（照片1、3、5、6），这类位错线的走向较杂乱，它们未构成诸如位错壁等任何位错群。

采用计数单位面积（cm²）内自由位错线出露的端点数，以 ρ （位错密度）= $2N/S$ 公式来计算自由位错平均密度（式中： N ——自由位错线出露端点数， S ——统计面积，cm²）。经过对本地区6个包体橄榄石样品在透射电镜下拍摄的76张明场像照片统计，包体橄榄石中自由位错近似平均密度的统计结果为： $\rho = 2.0 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 。由6个包体橄榄石样品中分别计算的自由位错密度的原始数据见表2。

表2 福建明溪大洋窠幔源包体橄榄石中自由位错密度
Table 2 Dislocation densities of xenolithic olivine from Dayangke,
Mingxi County, Fujian Province

样品号	M-1	M-2	M-3	M-4	M-5	M-6
明场照片拍摄数量(张)	15	13	18	10	7	13
透射电镜照片放大倍数	1.0万 — 3.0万					
自由位错密度变化范围(cm ⁻²)	5.1 × 10 ⁷ — 1.1 × 10 ⁹	2.1 × 10 ⁷ — 3.1 × 10 ⁸	0.8 × 10 ⁸ — 2.2 × 10 ⁹	0.7 × 10 ⁸ — 3.5 × 10 ⁸	4.2 × 10 ⁷ — 0.3 × 10 ⁹	2.6 × 10 ⁷ — 1.8 × 10 ⁸
自由位错平均密度(cm ⁻²)	1.8 × 10 ⁸	0.9 × 10 ⁸	2.9 × 10 ⁸	2.1 × 10 ⁸	3.1 × 10 ⁸	1.2 × 10 ⁸

2.2 位错壁

位错壁是大量位错按一定方式排列（位错列）而成的一种低能量位错组态，最简单的一种位错壁是由同类刃型位错通过滑移和攀移后以等间距排列而成的倾侧型晶界。福建大洋窠包体橄榄石中出现的主要是由〈100〉刃型位错所构成的位错壁（照片2、6）。位错壁的出现是矿物经历高温稳态流动过程的典型标志。

位错壁两侧的晶体取向存在小角度偏转时,便形成亚晶粒,它是以位错壁作边界的结晶颗粒。在橄榄石中常出现的带状消光现象,经研究,与低角度亚晶粒边界有关^[5],亚晶粒的出现是矿物发生高温流变的重要标志。

2.3 位错弓弯和位错环

单个位错在其延长方向上发生弯曲,便生成位错弓弯或位错环,这是位错在稳态条件下发生移动的结果,一般当温度超过 800℃ 时即开始形成,因而这是主矿物发生高温塑性流变的典型标志。在研究地区的包体橄榄石中,位错弓弯和位错环组态较为常见(照片 1、3)。

此外,在该包体橄榄石中还存在少量堆垛层错(照片 4)。

位错是矿物晶体发生塑性变形的产物,处于塑性变形不同阶段的矿物可生成不同特征的位错组态;反之,可利用位错组态特征反推矿物所处的塑性变形阶段。塑性变形可分为三个阶段:淬火阶段——矿物中出现高密度位错结构;回复阶段——位错开始滑移、攀移,形成亚晶界、位错弓弯和位错环等;重结晶阶段——晶粒长大,位错减少。根据福建明溪大洋窠包体橄榄石中出现较多亚晶粒(“多边化”作用)、位错弓弯和位错环等,推断该地包体橄榄石的塑性变形已进入回复阶段(第二阶段),部分已进入重结晶阶段(第三阶段)。

经测定,该地包体橄榄石中位错以(010)[100]高温滑移系类型为主,根据相应的电子衍射花样可以测定位错柏氏矢量(\vec{b})为[100]。如照片 3 所示 $\vec{g} = 200$ 和照片 5 上所示 $\vec{g} = 011$, \vec{g} 是根据电子衍射花样指标化所确定的倒易矢量(照片 3、5)。

3 幔源包体形成的平衡温度、压力和应力估算

3.1 平衡温度(T)、压力(P)

根据 Nehru-Wyllie^[9]的地质温压计算公式,利用大洋窠幔源包体中辉石的化学成分(化学分析样品 5 个,电子探针分析样品 6 个,分别测定其中顽火辉石和透辉石矿物对的化学成分),算得福建明溪大洋窠尖晶石二辉橄榄岩包体形成的平衡温度(T)为 965—1130℃,平均温度为 1070℃;平衡压力(P)为 2340—2600 MPa,平均压力为 2480 MPa。辉石化学成分的电子探针原始数据列于表 3。

表 3 福建明溪大洋窠幔源包体中辉石化学成分的电子探针分析结果
Table 3 Electron microprobe analyses of pyroxene in mantle xenoliths from Dayangke, Mingxi County, Fujian Province

样号	矿物	化 学 成 分 (%)										总量
		SiO ₂	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Al ₂ O ₃	FeO	Cr ₂ O ₃	MnO	TiO ₂	
M-1	顽火辉石	54.52	33.06	0.61	0.05	—	3.87	7.21	0.50	0.15	0.02	99.99
	透辉石	53.13	14.99	22.46	0.95	—	4.78	2.58	0.93	0.09	0.13	100.04
M-2	顽火辉石	55.86	31.97	0.54	0.09	—	4.07	6.92	0.47	0.12	0.14	100.18
	透辉石	52.22	15.09	20.92	1.81	—	5.61	2.93	0.85	0.09	0.48	100.00
M-3	顽火辉石	55.72	33.15	0.35	0.02	—	3.11	7.03	0.29	0.10	0.04	99.81
	透辉石	51.95	16.67	20.48	1.04	—	4.60	3.02	0.89	0.14	0.12	98.91

分析者:冶金工业部马鞍山矿山研究院电子探针室。

3.2 深度(Z)

根据以上算得的压力值, 利用 Avéllamant 等^[10] 的公式计算幔源包体的深度(Z):

$$Z = 4.2 + 3.03 \times P$$

式中: Z ——包体形成深度(km); P ——平衡压力(MPa)。算得本研究地区尖晶石二辉橄榄岩包体的形成深度为 79.3 km。

3.3 流变应力值($\sigma_1 - \sigma_3$)

包体橄榄石的变形显微构造参数(自由位错密度、亚晶粒度和位错壁间距以及动态重结晶颗粒粒度), 反映了造成岩石稳态蠕变的古应力大小, 因而可利用这些参数估算上地幔深度所承受的流变应力($\sigma_1 - \sigma_3$)大小。本文采用橄榄石自由位错密度(ρ)计算流变差异应力($\sigma_1 - \sigma_3$)的经验公式为:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 9.35 \times 10^{-5} \cdot \rho^{0.5} \quad (\text{Twiss et al., 1978})^{[11]}$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2 \times 10^{-5} \cdot \rho^{0.6} \quad (\text{Durham et al., 1977})^{[3]}$$

$$\sigma_1 - \sigma_3 = K G b \rho^{0.5} \quad (\text{Torium, 1979})^{[12]}$$

式中: $K = 3$ (无量纲系数); $G = 0.65 \times 10^{11} \text{ Pa}$ (橄榄石刚度); $b = 5 \times 10^{-8} \text{ cm}$ (橄榄石中位错柏氏矢量大小); ρ ——位错密度(cm^{-2})。经计算, 大洋窠上地幔所承受的流变差异应力($\sigma_1 - \sigma_3$)分别为 125.7 MPa 和 136.1 MPa。该两值大于一般上地幔稳态流变应力值(22—50 MPa), 这可能表明福建明溪大洋窠包体橄榄石曾位于上地幔底辟体边缘并遭受强烈剪切变形流动^[8]。这种具有强烈剪切变形特征的较密集型位错在我国其它地区的橄榄石包体、金伯利岩包体和阿尔卑斯型橄榄石中也有出现^[7]。

3.4 流变速率($\dot{\epsilon}$)和粘滞度(η)

透射电镜位错结构特征的研究, 可确定大洋窠幔源包体橄榄石塑性流变的主要机制是位错蠕变, 因此, 可以根据 Avéllamant 等^[10] 的公式计算其流变速率($\dot{\epsilon}$)和粘滞度(η):

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

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

式中: P ——压力; R ——理想气体常数(=1.987 卡/分子·°K); T ——温度(绝对温标); σ ——流变应力值。经计算, 本区包体橄榄石在上地幔的平均流变速率($\dot{\epsilon}$)为 $7.6 \times 10^{-13}/\text{s}$; 粘滞度(η)为 $0.8 \times 10^{20} \text{ poise}$ 。

4 结论与讨论

(1) 福建明溪大洋窠尖晶石二辉橄榄岩包体的结构主要为粒状变晶结构, 其次为残碎斑状结构和原始粗粒结构。第一、二种结构类型反映了上地幔高温条件下的流变; 第三种结构类型接近上地幔的原始状态。

(2) 该地包体橄榄石中, 由高压透射电镜所揭示的自由位错、位错壁、位错弓弯和位错环等位错组态, 也表明该地包体橄榄石曾经历过高温流变状态。

(3) 该地包体橄榄石的自由位错密度平均为 $2.0 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$, 由此可估算出该地区上地幔稳态流变应力值($\sigma_1 - \sigma_3$)为 126—136 MPa, 略高于正常上地幔稳态流变应力值(20—50 MPa), 这可能表明该处包体橄榄石曾处于上地幔底辟边缘的强剪切变形环境。

(4) 该地幔源包体的变形条件为: 温度(T)—1070°C; 压力(P)—2480 MPa; 深度

(Z)—79.3 km; 流变应力 ($\sigma_1 - \sigma_3$)—130.9 MPa; 流变速率 ($\dot{\epsilon}$)— $7.6 \times 10^{-13} \text{s}^{-1}$; 粘滞度 (η)— 0.8×10^{20} poise。

(5) 该地包体橄榄石中同时存在晶体物质于塑性变形不同阶段产生的不同位错结构特征, 即既存在于淬火阶段(第一阶段)产生的自由位错, 又存在于回复阶段(第二阶段)产生的位错壁、亚晶粒等位错组态, 还存在于高温重结晶阶段(第三阶段)产生的重结晶结构(例如: 橄榄石晶体其颗粒边界结合互呈 120° 夹角的结构, 便是一种重结晶结构)。本文研究的包体橄榄石中自由位错密度属低密度范畴, 因而推测, 处于高温流变状态的该地橄榄石中原有的自由位错密度应大于现测定值 ($2.0 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$), 在此后的晶体塑性变形回复阶段、重结晶阶段, 橄榄石中原有的位错结构部分地消失(“愈合”)。因此, 现今观察到具有各类位错组态的橄榄石曾经历了较复杂的塑性变形过程。

本研究曾得到何永年、林传勇两位研究员的热情指导, 南京大学地球科学系季寿元教授、南京大学物理系微结构重点实验室李齐教授对本文初稿提出了宝贵的修改意见, 在此一并致谢。

参 考 文 献

- 1 Green II H W, Plasticity of olivine in peridotite. In: *Electron microscopy in mineralogy*. Springer-Verlag, Berlin, New York, 1976. 443—464.
- 2 Gueguen Y. Dislocations in mantle peridotite nodules. *Tectonophysics*, 1977, 39: 231—254.
- 3 Durham W, Goetze C, Blacke B. Plastic flow of oriented single crystals of olivine: Observations and interpretations of the dislocation structures. *J. Geophys. Res.* 1977, 32: 5755—5770.
- 4 Zeuch D, Green II H. Naturally decorated dislocation in olivine from peridotite xenoliths. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1977, 62: 140—170.
- 5 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.
- 6 何永年. 我国东部几个上地幔流变学参数推导初探. *科学通报*, 1983, (17): 1058—1061.
- 7 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.
- 8 金振民. Green II H, Chen Xinhua. 橄榄石位错构造的扫描电子显微镜研究. *岩石矿物学杂志*, 1991, 10 (1): 43—47.
- 9 Nehru C Wyllie P. Electron-microprobe measurement of pyroxenes coexisting with H_2O -undersaturated liquid in the join $\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$ - $\text{Mg}_2\text{Si}_2\text{O}_6$ - H_2O at 30 Kbar with application to geothermometry. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1974, 48: 221—228.
- 10 Avéllamant H, Mercier J C, Carter N, Ross J. Rheology of the upper mantle: inferences from peridotite xenoliths. *Tectonophysics*, 1980, 70: 85—113.
- 11 Twiss R, Sellars C. Limits of applicability of the recrystallizes grain size geopiezometer. *Geophys. Res. Lett.* 1978, 5: 337—348.
- 12 Torium M. Relation between dislocation density and subgrain size of naturally deformed olivine in peridotites. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1979, 68: 181—186.

Dislocation Microstructures of Mantle-Derived Olivine from Dayangke, Mingxi County, Fujian Province

Dong Huogen, Min Maozhong

(Department of Earth Sciences, Nanjing University 210008)

Zhang Fusheng, Hong Jianming

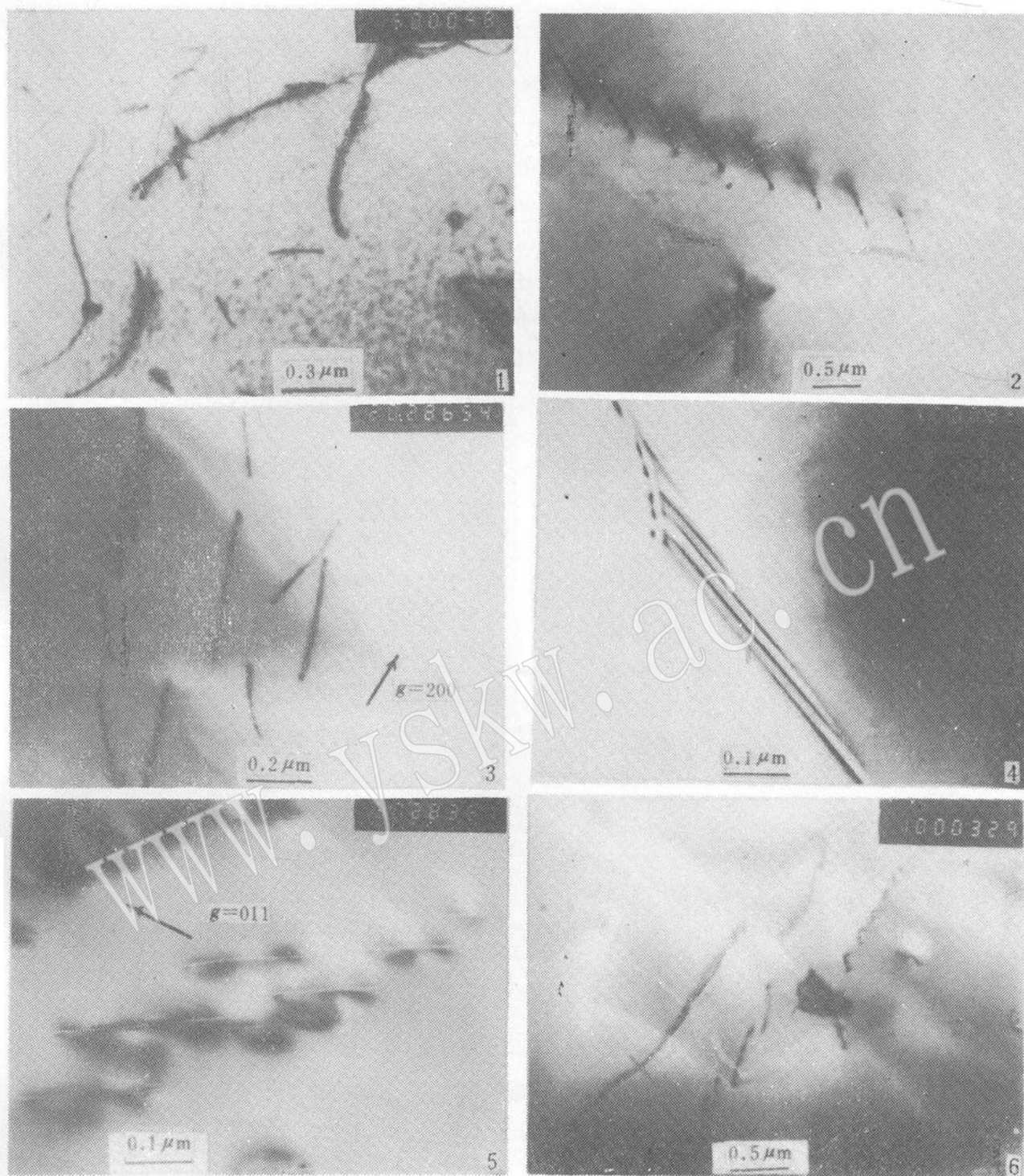
(Modern Analytical Center, Nanjing University)

Key words: mantle xenolith; olivine; dislocation microstructure; transmission electron microscope

Abstract

In this paper dislocation microstructures of olivine xenoliths in vitrobasalt from Dayangke, Mingxi County, Fujian Province are studied by means of transmission electron microscope, and the result shows that there are several kinds of dislocations in the mantle-derived olivine, such as dislocation walls, free dislocations, dislocation bows and dislocation loops. These dislocation microstructures resulted from complex creep of olivine in the process of high temperature plastic flow in upper mantle. Different types of dislocations indicate different phases of plastic deformation that host minerals experienced. Based on average free-dislocation density of mantle-derived olivine ($2.0 \times 10^8 \text{cm}^{-2}$) and chemical composition of pyroxene associated with olivine in mantle xenoliths, it is estimated that the deformation of mantle-derived xenoliths in Dayangke vitrobasalt took place under the following conditions: temperature (T) 1070°C , pressure (P) 2480MPa ; depth (Z) 79.3 km , stress ($\sigma_1 - \sigma_3$) 136 MPa , flow strain rate ($\dot{\epsilon}$) $7.6 \times 10^{-13}\text{s}^{-1}$, and viscosity (η) 0.8×10^{20} poise.

董火根、闵茂中等：福建明溪大洋窠幔源包体橄榄石的位错结构特征



图版说明

- 照片 1 明溪大洋窠包体橄榄石的自由位错和位错弓弯
 照片 2 明溪大洋窠包体橄榄石的位错壁和自由位错
 照片 3 明溪大洋窠包体橄榄石的自由位错和位错环。g 为倒易矢量 (= 200)，以箭头表示
 照片 4 明溪大洋窠包体橄榄石的堆垛层错
 照片 5 明溪大洋窠包体橄榄石的位错壁和自由位错。g 为倒易矢量 (= 011)，以箭头表示
 照片 6 明溪大洋窠包体橄榄石的位错壁和自由位错