

# 大陆裂谷区幔源矿物橄榄石在不同 应变阶段的位错构造及位错滑移系研究

——以法国中央地块及中国汉诺坝新  
生代玄武岩的二辉橄榄岩包体为例

周梅馨

许志琴 陈方远

(中国地质科学院矿床地质研究所) (中国地质科学院地质研究所)

**关键词:** 位错; 位错滑移系; 柏格斯矢量  $\vec{b}$ ; 上地幔高温蠕变; 地壳低温应变

**提 要:** 利用透射电子显微术 (TEM) 对两个新生代裂谷区的碱性玄武岩 (法国中央地块克莱蒙菲朗及中朝板块北部河北万全) 中幔源矿物橄榄石的位错亚构造进行研究, 通过位错类型、衍射花样、柏格斯矢量  $\vec{b}$  及位错滑移系的分析及计算, 判断了深源包体从上地幔进入地壳的动力学过程——经历了高温 ( $>1000^{\circ}\text{C}$ ) 蠕变、低温 ( $<600^{\circ}\text{C}-800^{\circ}\text{C}$ ) 应变及后期局部温度回升阶段, 确定了高温滑移系以  $\{0kl\}[100]$  及  $(001)[100]$  为主, 并存在由  $(010)[001]$  及  $(100)[001]$  滑移系组成的高温位错网络, 计算了低温应变的滑移系为  $(110)[001]$  及  $(010)[001]$ 。

上地幔流变学研究的进展表明, 位于岩石圈最深部位的上地幔已不再是岩石学家、矿物学家及地球物理学家说了算, 构造地质学家也有发言权了。通过大陆裂谷区来自深部超镁铁质包体及古山链中板块缝合带上的超镁铁质岩体的微区构造研究来探讨上地幔流变机制已成了岩石圈板块动力学研究中的新课题。为此做出杰出贡献的是法国的构造物理学家尼古拉 (Nicolas, A.) 教授<sup>[1-3]</sup>。在国内, 近年来亦开展了该领域的工作<sup>[4-9]</sup>, 并取得了一定进展。特别是何永年、金振民等利用氧化缀饰法对中国东部大陆裂谷区的幔源橄榄石包体的高温位错构造进行了卓有成效的工作。

大陆裂谷区中碱性玄武岩所包含的超镁铁质包体是在拉伸条件下伴随玄武岩岩浆从上地幔向地壳转移, 经历了高温至低温的蠕变过程而侵位于地表。这一历史进程是要在上地幔岩石 (及所包含的幔源矿物) 中留下痕迹的, 这是因为在上地幔高温蠕变中确有位错构造存在, 而高温位错构造又不会被后期叠加的地壳中的低温应变所消除。

本文主要通过透射电子显微术对幔源矿物橄榄石的位错类型、倒易矢量  $\vec{g}$ 、柏格斯矢量  $\vec{b}$  及滑移系的确定来分析橄榄石所经历不同应变阶段的热动力条件。选择标本为法国中央地块克莱蒙菲朗 (Klémonférent) 南第四纪玄武岩的二辉橄榄岩包体及中国东部河北万全北新第三纪汉诺坝玄武岩二辉橄榄岩包体。

## 一、研究方法

透射电子显微术的位错构造研究主要包括以下步骤：薄晶试样的制作，透射电镜的形貌观察，形貌照相及衍射花样照相，衍射斑点指数  $g$  及柏格斯矢量  $\vec{b}$  的确定，滑移系的推算，不同应变类型位错构造的判别及应变参数的估算。

上述工作是研究上地幔流变机制的基础。

### 1. 形貌观察

透射电子显微镜的明场象提供了各类位错构造的图象：位错线、位错壁、亚晶粒、堆垛层错、显微双晶、液态包体及新晶粒等。位错线又具有多种形貌，如：平直位错线、短位错线、弓弯位错、位错环等。位错运动产生交叉滑移，塞积群；位错壁又分为位错倾斜壁及位错扭转壁（即位错网络）两种。

### 2. 衍射花样及 $\vec{g}$ 矢量的计算

电子衍射花样可看成是一种接近平面的过原点的倒易点阵截面，它能直观地显示倒易阵的一个二维截面及晶体的几何学特征。最明显的几何特征是：电子衍射斑点一般都排列在一个规则的二维网格的结点处，不但这些斑点的几何配置显示对称性，而且它们的强度分布也是这样，据此可以确定相应的倒易点阵平面或正点阵中的晶带对称特征。由此可见，晶带和相应的倒易点阵平面是分析和标定电子衍射图的基础。

在晶体点阵已确定的情况下，根据电子衍射花样的几何特征，标定电子衍射图的方法是：取衍射花样中距中心最近且不在一个方向上的两个衍射斑点的距离  $R$  及夹角  $\phi$ ，根据公式  $d = \frac{L\lambda}{R}$  进行计算（ $L\lambda$  是相机常数，在不同的加速电压下， $L\lambda$  的值不同， $d$  是晶面间距）。根据  $d$  值查该物质的 ASTM 卡片，再根据消光规律及结晶学知识，推算出衍射斑点指数  $(h_1 k_1 l_1)$  及  $(h_2 k_2 l_2)$ 。求得两个不平行的倒易矢量  $\vec{g}_1$  和  $\vec{g}_2$  的指数，就可以确定电子束的方向  $B$ ，也即确定与衍射花样一致的倒易面。任何倒易矢量  $g$  的大小等于实际晶体中与之相对应的晶面间距的倒数，即： $|g| = \frac{1}{d}$ 。

### 3. 位错的柏格斯 (Burgers) 矢量 $\vec{b}$

Frank 把在非完整晶体中围绕着位错的闭路定为柏格斯迴路，而将在参考晶体中从相当于柏格斯迴路最后的一点到开始的一个原子的矢量叫柏格斯矢量。

柏格斯矢量是位错特征的标志，是确定滑移量及滑移方向的矢量。根据位错线的方向和柏格斯矢量可以确定位错类型。

柏格斯矢量的测量方法是：在双束条件下依次用不同的衍射矢量使位错成象，以确定在哪个矢量时位错无衬度（对于刃型位错和混合位错应达到最小衬度）。通常能够从一个或几个象消失条件来鉴定柏格斯矢量的方向， $b$  的大小通常假设为所测得的方向上该晶体结构的最小点阵矢量。

## 二、研究区橄榄石的位错构造及滑移系

河北万全汉诺坝晚第三纪中新世玄武岩是由拉斑玄武岩及碱性玄武岩组成的大陆裂谷型玄武岩,  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 初始值 0.7042—0.7048 表明玄武岩浆来源于上地幔, 且未受地壳物质混杂<sup>[10]、[11]</sup>。法国中央地块呈南北向线形分布的第四纪碱性玄武岩亦为大陆裂谷产物。

研究区中碱性玄武岩内所含二辉橄榄岩幔源包体均由橄榄石、斜方辉石及单斜辉石组成, 为粒状变晶结构, 颗粒大小相似, 形态为等轴状。大部分橄榄石晶体内存发现条带状波状消光, 这种波状消光现象实为晶体分融为许多亚晶粒的光性反映<sup>[6]、[12]</sup>, 图 1 表示了在法国中央地块克莱蒙菲朗南第四纪玄武岩包体中的一个橄榄石晶体内存发育的 7 个亚晶粒, 它们的每个结晶方位 ( $Ng$ ,  $Np$ ,  $Nm$  结晶轴) 之间具有一个很小的偏角, 形成截然的消光分界, 又称为扭折。

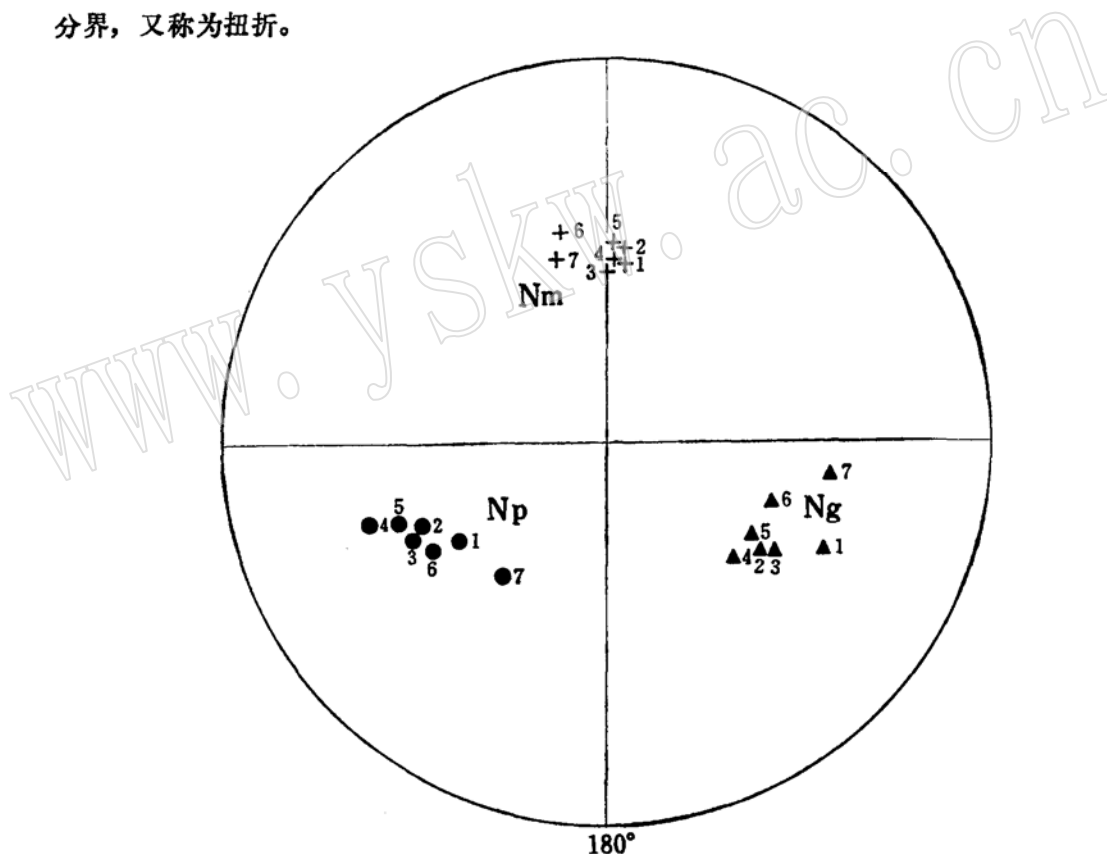


图 1 橄榄石晶体内存 7 个亚晶粒的结晶方位偏差

(法国中央地块克莱蒙菲朗南的第四纪玄武岩包体)

Fig.1. Deviation in crystallization orientation of seven crystal grains within the olivine crystal (inclusions from Quaternary basalt in Klémonféran of the central massif in France)

经离子轰击制成的 8 个橄榄石薄片样品 (法国中央地块 4 个, 中国河北万全 4 个) 在

EM—400T型、120kV的透射电镜下获得丰富多样的位错图象。

### 1. 自由位错线

在图象中表现为孤立的位错线,分布极不均匀,位错密度最大处不超过 $1.8 \times 10^5 \text{ cm}^{-2}$ 。位错线中大部分为短位错线,少量为长位错线,根据 $\vec{b}$ 矢量方向确定了样品中自由位错的类型。在图版 I—A、B、C中发育的自由位错线分别为螺位错、刃位错及混合位错,位错线方向分别为 $[100]$ 、 $[010]$ 及 $[012]$ ,柏格斯矢量均为 $[100]$ ,滑移系分别为 $(012)[100]$ 、 $(001)[100]$ 及 $(021)[100]$ ;在图版 I—D、F中,长位错线 $[001]$ 及 $[121]$ 切割了早期形成的亚晶粒构造,根据其柏格斯矢量 $\vec{b}$ 为 $[001]$ ,判断滑移系分别为 $(110)[001]$ 及 $(010)[001]$ 。

### 2. 弓弯位错

弓弯位错是自由位错在某一平面上滑动受阻而形成的不完全的位错环构造,根据位错弓弯的突出方向可确定滑动的 $\vec{b}$ 矢量。如在图版 I—C中,根据弓弯位错 $d_1$ 及 $d_2$ 可确定两个近于直交的 $\vec{b}$ , $\vec{b}_1$ 平行于 $[010]$ , $\vec{b}_2$ 平行于 $[012]$ ,并获得 $(100)[010]$ 及 $(100)[012]$ 的滑移系。在图版 II—C中,可见到一系列的弓弯位错,在其交接部位形成位错环,并为液态包体所充填。

### 3. 位错排

位错排是由一系列平行短位错线排列而成位错倾斜壁。在测试样品中,观察到三种类型的位错排:(1)短位错线方向与位错排方向垂直,如:图版 II—B中,位错线方向为 $[010]$ ,位错排方向为 $[201]$ , $\vec{b}$ 平行于 $[100]$ ,滑移系为 $(001)[100]$ ; 2)短位错线方向与位错排斜交,如:图版 II—F; 3)位错排方向发生弯曲,如:图版 I—D中的 $[110]$ 短位错线自左向右排列在沿 $[001]$ 至 $[111]$ 逐渐变化方向的位错排内,其 $\vec{b}$ 平行于 $[001]$ ,滑移系为 $(110)[001]$ 。

### 4. 位错网络

是由两组螺位错线交织而成的位错扭转壁(排),在图版 II—A、II—D及 I—E中十分典型。图版 II—A中的位错排表现为由 $[012] \rightarrow [120] \rightarrow [0\bar{1}2]$ 方向的突然转折,每一组方向的位错排由两组螺位错—— $[010]$ 和 $[012]$ 、 $[010]$ 和 $[120]$ 及 $[010]$ 和 $[0\bar{1}2]$ 组成菱形位错网络。图版 II—D的位错扭转壁却表现为 $[021]$ 向 $[121]$ 渐变形式,由 $[100]$ 和 $[021]$ 及 $[100]$ 和 $[121]$ 两组螺位错交织而成。图版 I—E中的位错网络呈现菱形( $N_1$ )及矩形( $N_2$ )两种类型,分别由 $[010]$ 和 $[110]$ 、 $[100]$ 和 $[010]$ 两组螺型位错交织, $\vec{b}$ 平行于 $[001]$ ,判断滑移系可能为 $(010)[001]$ 及 $(100)[001]$ 。

### 5. 亚晶粒

在偏光镜下表现为条带状消光,其两侧为位错排所限。在位错图象中观察到两种类型的亚晶粒:矩形亚晶粒及环形亚晶粒。矩形亚晶粒构造在样品中多见,图版 I—F及图版 II—E为典型代表,前者短位错线方向与位错排直交, $[100]$ 短螺位错线沿 $[021]$ 位错排方向排列, $\vec{b}$ 平行于 $[100]$ ,滑移系为 $(012)[100]$ ;后者为斜交, $[010]$ 位错线沿 $[100]$ 位错排方向排列,没有测定滑移系。图版 I—F中的亚晶粒及其 $(012)[100]$ 滑移系是Guéguen<sup>[13][14]</sup>曾指出的典型的高温蠕变的 $[100]$ 位错组织。图版 II—D中的亚晶粒是由混合位错形成的特殊的环形亚晶粒。

此外,在位错图象中还发育高位错密度带,位错交叉滑移等构造,图版 II—F中可见

到较大位错密度的老晶粒(Og)被新晶粒(Ng)所吞食的情景,新晶粒内亚构造不发育,仅在边部出现稀疏短位错及位错排。

表1列出了研究区橄榄石位错图象的位错类型、位错方向、位错排方向、衍射矢量 $\vec{g}$ 、

表1 橄榄石的位错类型及位错滑移系表

Table 1 Dislocation type and slip system of olivine

| 图版<br>编号 | 标本<br>产地                                | 位 错 类 型                                                                                    | 位错线方向                                  | 位错排方向                     | 衍射矢量<br>$\rightarrow g$ | 柏格斯矢量<br>$\rightarrow b$     | 滑移系                      | 推测温度<br>( $^{\circ}\text{C}$ )                     |
|----------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|---------------------------|-------------------------|------------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------|
| I-A      | 法国<br>中央<br>地块<br>克<br>莱<br>蒙<br>菲<br>朗 | 短螺型位错(d)                                                                                   | [100]                                  |                           | (100)                   | [100]                        | (012)[100]               | $>1000^{\circ}\text{C}$                            |
| I-B      |                                         | 短刃型位错、长位错(d)<br>位错交叉滑移(c)                                                                  | [010]                                  |                           | (030)                   | [100]                        | (001)[100]               | $>1000^{\circ}\text{C}$                            |
| I-C      |                                         | 长位错(d)                                                                                     | [012]                                  |                           |                         | [100]                        | (021)[100]               | $>1000^{\circ}\text{C}$                            |
|          |                                         | 弓弯位错( $d_1, d_2$ )                                                                         | [012]<br>[010]                         |                           | (030)                   | $b_1//[010]$<br>$b_2//[012]$ | (100)[010]<br>(100)[012] | $<800^{\circ}\text{C}$                             |
| I-D      |                                         | 位错线( $d_1$ )                                                                               | [110]                                  |                           |                         |                              | (110)[001]               |                                                    |
|          |                                         | 长位错线( $d_3$ )                                                                              | [001]                                  |                           | (111)                   |                              |                          |                                                    |
|          |                                         | 弓弯位错( $d_2$ )                                                                              |                                        |                           |                         | [001]                        | (110)[001]               | $<600^{\circ}\text{C}$                             |
| I-E      |                                         | 位错排(Sj)                                                                                    | [110]                                  | [111] $\rightarrow$ [001] |                         |                              |                          |                                                    |
|          |                                         | 菱形位错网络( $N_1$ )<br>短形位错网络( $N_2$ )<br>包体(v)                                                | [010], [110]<br>[100], [010]           |                           | (100)                   | [001]                        | (100)[001]<br>(010)[001] | $1000^{\circ}\text{C}$                             |
| I-F      |                                         | 亚晶粒( $S_g$ )位错排<br>长位错(d)                                                                  | [100]<br>{[121]<br>[100]}              | [021]                     | (100)                   | [100]<br>[001]               | (021)[100]<br>(010)[001] | $>1000^{\circ}\text{C}$<br>$<800^{\circ}\text{C}$  |
| II-A     | 中<br>国<br>河<br>北<br>万<br>全              | 位错网络扭折(N)<br>(两组螺位错交织)                                                                     | [010][012]<br>[010][120]<br>[010][012] | [012]<br>[120]<br>[012]   | (040)                   |                              |                          | $>1000^{\circ}\text{C}$                            |
| II-B     |                                         | 位错排(Sj)<br>(由短位错线排列)                                                                       | [010]                                  | [012]                     | (122)                   | [100]                        | (001)[100]               |                                                    |
| II-C     |                                         | 位错环<br>弓弯位错( $d_1$ )包体(v)                                                                  | [100]<br>[021]                         |                           | (200)                   |                              |                          |                                                    |
| II-D     |                                         | 长位错线(d)                                                                                    | [121]                                  |                           |                         |                              |                          | $>1000^{\circ}\text{C}$                            |
|          |                                         | 位错网络(N)<br>环形亚晶( $S_g$ )                                                                   | [100]与<br>[021]                        | [121] $\rightarrow$ [021] | (021)                   |                              |                          | $>1000^{\circ}\text{C}$<br>$>1000^{\circ}\text{C}$ |
| II-E     |                                         | 亚晶粒( $S_g$ )                                                                               | [010]                                  | [100]                     |                         |                              |                          |                                                    |
| II-F     |                                         | 老晶粒(Og): 亚晶( $S_g$ )<br>位错网络(N)<br>交叉滑移(c)<br>位错线(d)<br>变形带(A)<br>新晶粒(Ng): 位错排Sj<br>位错线(d) | [010], [012]                           | [010]                     | (040)                   |                              |                          | 高温+低温+温度回升                                         |

柏格斯矢量 $\vec{b}$ 及滑移系。

### 三、不同应变阶段的橄榄石位错类型

大量橄榄石的变形实验所提供的温度、压力、应变速率与橄榄石的滑移系的关系<sup>[15]</sup>表明橄榄石在上地幔条件下是以高温蠕变方式运动的,位错构造以 $\vec{b}$ 为 $[100]$ 的螺型位错线、位错环、位错网络及亚晶粒为主要特征,位错滑移系为 $\{0kl\}[100]$ (1000—1200℃)及 $(001)[100]$ (>1200℃);而在地壳的低温(<800℃)条件下,以出现长位错线及高密度位错缠结为主要特征,位错滑移系为 $(110)[001]$ (800—400℃)及 $(100)[001] + (100)[010]$ (<400℃)。

综上所述,研究区橄榄石位错特征可以根据其形成条件划分为以下两类位错构造:

#### 1、上地幔高温蠕变阶段形成的位错构造

由 $(100)$ 及 $\{0kl\}$ 围限的位错壁所组成的矩形亚晶粒是此阶段位错亚构造的典型代表,因为根据衍射花样及柏格斯矢量所计算的滑移系 $(021)[100]$ (图版 I—F)是在大于1000℃的上地幔蠕变过程中形成的,由混合位错围限的环形亚晶粒(图版 II—D)估计也是此阶段的产物。Phakey et al.<sup>[6]</sup>曾认为位错网络是1250℃下的两组螺位错交织而成的位错亚构造类型(滑移系未测),在笔者所研究的位错图象中出现多种位错网络的类型(矩形及菱形网络,位错排扭折及弯曲的网络),并推断滑移系为 $(010)[001]$ 及 $(100)[001]$ 。在所观察的三种类型中,计算了第一种类型(短位错线方向与位错排垂直)及第三种类型(位错排方向弯曲)的滑移系分别为 $(001)[100]$ 及 $(110)[001]$ ,前者无疑为高温产物,后者曾被Phakey<sup>[6]</sup>认为可能为1000℃的滑移系,而Nicolas及Poirer<sup>[10]</sup>则认为是在小于1000℃条件下形成的。在位错图象中还广泛出现短的螺型、刃型自由位错线,据计算位错线的方向为 $[100]$ 、 $[010]$ 及 $[012]$ , $\vec{b}$ 为 $[100]$ ,滑移系分别为 $(012)[100]$ 、 $(001)[100]$ 及 $(021)[100]$ ,表明亦为上地幔高温蠕变所引起的。

#### 2、低温应变阶段形成的位错构造

橄榄石中出现的某些长位错线为后期叠加的低温应变的位错构造,如在图版 I—D及图版 I—F中, $[001]$ 螺位错线及 $[121]$ 位错线切割了早期高温的具 $\{0kl\}[100]$ 滑移系的亚晶粒,并具有 $(110)[001]$ 及 $(010)[001]$ 位错滑移系,此外,还见 $[111]$ 及 $[021]$ 位错线切割早期高温亚构造。

由于弓弯位错形成于自由位错与位错环之间的过渡阶段,在图版 I—D中见弓弯位错与位错排相接,并被 $[001]$ 低温位错线相切,在图版 I—C中据弓弯位错( $d_1$ 及 $d_2$ )的滑移系分别为 $(100)[010]$ 及 $(100)[012]$ ,说明并非高温蠕变的产物。

至于图版 II—F中老晶粒被新晶粒所吞食现象可作如下解释:老晶粒(Og)中包含两种类型的位错亚构造——高温蠕变形成的亚晶粒(Sg)和位错网络(N)以及低温应变叠加的变形条带(A)、高密度位错线(d),由于后期温度回升,新晶粒(Ng)形成并不断吞食老晶粒,温度升高使变形机制由低温位错滑移变成粒向滑移,因此,在新晶粒边界形成位错排及短位错。这种温度回升可能与地壳内剪切应变所造成的局部熔融有关。

## 结 论

法国中央地块克莱蒙菲朗 (Klémonférent) 及中国河北万全北新第三纪汉诺坝玄武岩中二辉橄榄岩包体内橄榄石的位错构造的透射电子显微术的研究提供了以下的信息:

(1) 研究区幔源矿物均经过上地幔的高温蠕变,地壳的低温应变及后期温度回升阶段。

(2) 橄榄石具高温应变阶段的亚晶粒、位错排、位错网络、位错环及大部分短的螺旋型和刃型自由位错线等位错类型及低温应变阶段的长位错线与弓弯位错等位错构造。前者为上地幔高温蠕变的产物,其显微机制为位错攀移及晶界或亚晶界的滑移,后者为地壳中低温应变产物,其显微机制为位错滑移,后期的温度回升表现为新晶粒的形成。

(3) 根据柏格斯矢量计算的高温蠕变阶段位错构造的滑移系以  $\{0kl\}[100]$  及  $(001)[100]$  为主,并推测存在  $(010)[001]$  及  $(100)[001]$  滑移系组成的高温位错网络;计算了低温应变的滑移系为  $(110)[001]$  及  $(010)[001]$ 。

## 参 考 文 献

- [1] Nicolas, A. & Poirier, J.P. 1976. Crystalline plasticity and solid state flow in metamorphic rocks. Wiley, New York.
- [2] Mercier, J.C. & Nicolas, A. 1975. Textures and fabric of upper mantle derived peridotites as illustrated by xenolith from basalt, Jour. petrol., vol. 16.
- [3] Boudier, F., Nicolas, A. & Boucher, J.L. 1982. Kinematics of oceanic thrusting and subduction from basal sections of ophiolites Nature, vol. 296, no. 5860, p. 825-828.
- [4] 何永年. 1980, 我国东部若干二辉橄榄岩包体的流动构造及流动应力. 中国科学, 第6期.
- [5] 何永年. 1983, 我国东部几个上地幔流变学参数推导初试. 科学通报, 第17期.
- [6] 何永年、林传勇、史兰斌编著, 1988, 构造岩石学基础. 地质出版社.
- [7] 许志琴, 1988, 韧性推覆剪切带及喜马拉雅山链的形成机制, 喜马拉雅岩石圈构造演化总论. 地质出版社, p. 121-139.
- [8] 许志琴、卢一伦、汤耀庆、张治兆, 1988, 东秦岭复合山链的形成. 中国环境出版社.
- [9] 金振民, 1988年, 橄榄石位错构造及其上地幔流变学意义——以河北省大麻坪二辉橄榄岩为例. 地球科学(中国地质大学学报), 13(4), p. 365-374.
- [10] 丛柏林、张儒媛, 1983, 华北断块区新生代玄武岩系及其形成的大地构造环境. 地质论评, 第1期, 40-49页.
- [11] 邱家骧等, 1986, 汉诺坝玄武岩的板块构造环境及岩浆成因机理的分析. 岩石学报, 第3期, 1-12页.
- [12] 刘瑞询, 1989, 显微构造地质学. 北京大学出版社.
- [13] Guequhen, Y., 1979. Dislocation in naturally deformed terrestrial olivine: classification, interpretation, applications, Bull. Mineral. 102: 178-183.
- [14] Guequhen, Y., 1980. Microstructures and stresses in naturally deformed peridotites, Rock Mechanics, suppl. 9: 159-172.
- [15] Avéalléman, H.G., Mercier, J.-C., Carter, N.L., and Ross, J.V., 1980, Rheology of the upper mantle: inferences from peridotite Xenoliths, Tectonophysics, 70 (85-113).
- [16] Raleigh, C.B., 1986. Mechanisms of plastic deformation of olivine, Journal of Geophysical Research 5391-5406.

Study on Dislocation Structure and Slip System  
of Mantle-derived olivine at Different Strain  
Stages in Continental Rift

—As Exemplified by Lherzolitic Inclusions from  
Cenozoic Basalts in the Central Massif of France and  
Hannoba of China

Zhou Meixin

(Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences)

Xu Zhiqin, Chen Fangyuan

(Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences)

**Key words:** Dislocation; slip system; Burgers vector  $\vec{b}$ ; high-temperature creep of upper mantle; low-temperature strain of the crust

**Abstract**

Using the TEM technique we have studied the dislocation substructures of mantle-derived olivine from the alkali-basalts situated in two Cenozoic rifts, i. e. Klémonférent of the central massif in France and Wanquan of Hebei on the northern margin of Sino-Korean plate.

Based on the analysis of dislocation type, diffractive pattern, diffractive vector  $\vec{g}$ , Burgers vector  $\vec{b}$  and dislocation slip system, we conclude that the deep-source olivine-bearing inclusions first underwent high-temperature (over 1000°C) creep stage in upper mantle characterized by subgrains, dislocation walls, dislocation ring,  $[100]$  screw and edge-free dislocation and dislocation net as well as  $\{0kl\}[100]$  and  $(001)[100]$  dislocation slip systems of high temperature creep. Then as the deep-source inclusions moved from upper mantle to the crust, they experienced low-temperature (lower than 600°C—800°C) strain manifested by long dislocation line and  $(110)[001]$  and  $(010)[001]$  slip systems. The presence of new crystals suggests that they also suffered local rising of temperature later.

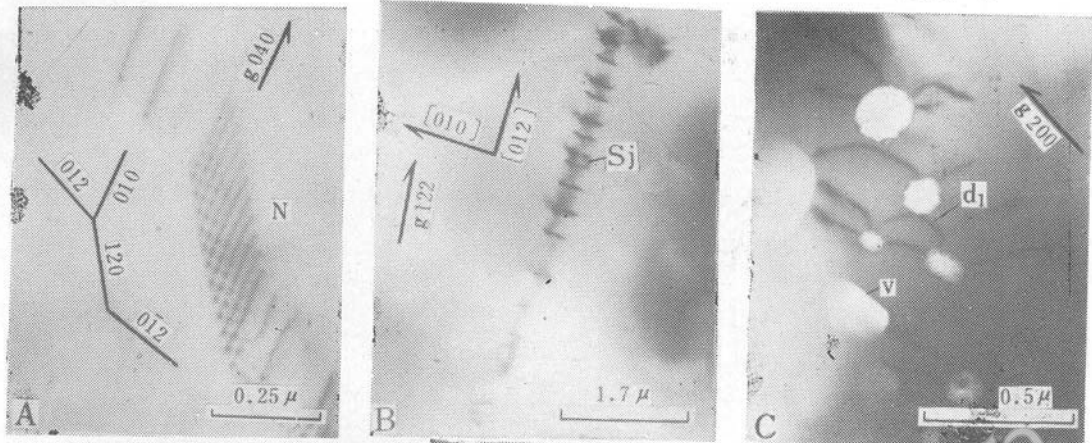
图版 I



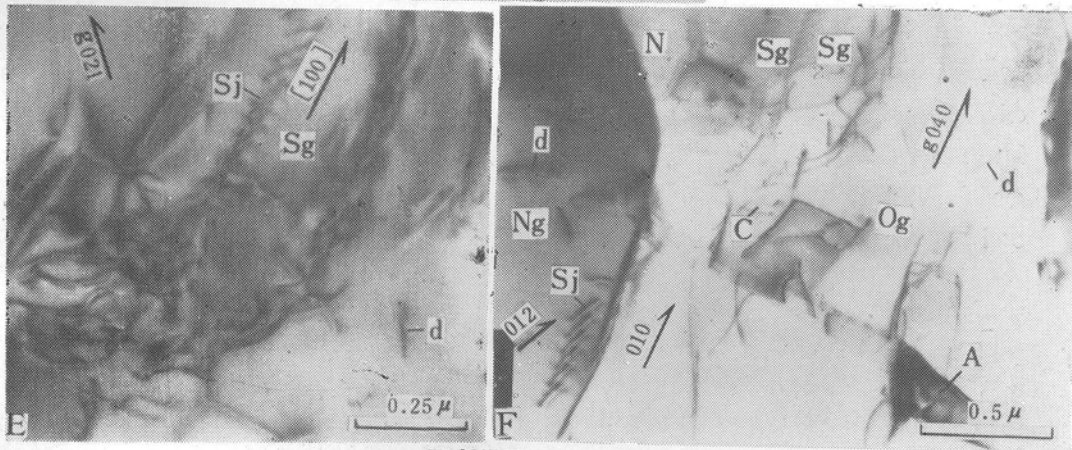
图版说明

图版 I

- A. 平形 $\{100\}$ 的矩螺型位错(d)
- B. 平形 $\{010\}$ 的矩刃型位错, 长位错(d)及位错交叉滑移(c)
- C. 平形 $\{012\}$ 的矩位错(a)和布氏矢量为 $\{010\}$ 及 $\{012\}$ 的弓弯位错( $d_1, d_2$ )
- D. 弓弯位错( $d_1, d_2$ ),  $\{001\}$ 长位错( $d_3$ )及由 $\{110\}$ 短位错组成的位错排( $S_j$ )
- E. 菱形位错网络( $N_1$ )及矩形位错网络( $N_2$ )
- F. 亚晶粒(Sg),  $\{121\}$ 及 $\{100\}$ 长位错(d),  $\{100\}$ 短位错及铬尖晶石晶体(Cr)



图版2



图版说明

图版 II

- A. 由两组螺位错交织 $[010]$ 及 $[012]$ 、 $[010]$ 及 $[120]$ 、 $[010]$ 及 $[0\bar{1}2]$ 形成的位错网络扭折
- B. 由 $(010)$ 短位错线组成位错排 (Si)
- C. 弓弯位错( $d_1$ ), 直位错及包体 (V)
- D. 长位错线d, 由 $[100]$ 、 $[121]$ 及 $[100]$ 与 $[021]$ 组成位错网络(N), 由混合位错围限的环形亚晶 (Sg)
- E. 亚晶粒 (Sg)
- F. 右边为老晶粒(Og), 内含亚晶 (Sg), 位错网络 (N), 交叉滑移 (C)及位错线(d); 左边为新晶粒 (Ng), 边部发育位错排 (Si)及垂直晶界短位错线 (d)