

松树沟蛇绿岩中橄榄石位错构造 及其流变学意义

董云鹏 周鼎武 刘良

(西北大学地质系, 西安 710069)

关键词 东秦岭 松树沟蛇绿岩 橄榄石 位错构造 流变差异应力

提要 在对东秦岭松树沟蛇绿岩的变质橄榄岩进行详细构造解析和显微构造研究的基础上, 本文运用透射电子显微镜法着重对橄榄石位错构造进行了研究。结果表明, 橄榄石主要位错类型为自由位错、位错壁和亚颗粒、位错弓弯和位错环等, 它们是橄榄石在上地幔高温低应变速率条件下发生复杂蠕变的结果。统计自由位错平均密度约为 $2.51 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$, 相应的流变差异应力为 151.3 MPa, 流变速率为 $1.17 \times 10^{-15} \text{ /s}$, 粘滞度为 $4.31 \times 10^{23} \text{ Pas}$; 亚晶粒度平均约为 $1.636 \mu\text{m}$, 相应的流变差异应力为 113.0 MPa, 流变速率为 $1.307 \times 10^{-9} \text{ /s}$, 粘滞度为 $2.88 \times 10^{17} \text{ Pas}$; 动态重结晶平均粒度约为 $0.89 \mu\text{m}$, 相应的流变差异应力为 15.8 MPa, 流变速率为 $9.89 \times 10^{-8} \text{ /s}$, 粘滞度为 $5.3 \times 10^{14} \text{ Pas}$ 。反映了松树沟蛇绿岩形成与演化过程中不同阶段的变形及其流变状态。

1 引言

近 20 余年来, 为了认识上地幔的塑性流动规律和板块构造运动驱动机理, 许多地质学家在幔源橄榄石的位错超显微构造研究方面作了大量工作^[1-10]。但是, 这些工作主要集中于对大洋和大陆碱性玄武岩中二辉橄榄岩包体的研究, 而对大陆造山带中蛇绿岩的上地幔岩——变质橄榄岩的位错构造研究相对较少。蛇绿岩中的变质橄榄岩代表了洋壳的上地幔岩石单元, 其中赋存有洋盆形成与演化过程中地幔演变的重要信息。而对主要造岩矿物——橄榄石位错超显微构造的研究, 则是揭示其变形特征的有效手段。

本文利用透射电子显微镜, 研究了东秦岭松树沟蛇绿岩的变质橄榄岩中橄榄石的位错特征。据此估算该蛇绿岩形成与演化过程中不同阶段的上地幔稳态流变差异应力值及其流变速率和粘滞度, 并探讨了其构造意义。

2 变质橄榄岩的地质特征

东秦岭松树沟蛇绿岩是构造就位于早元古代秦岭变质杂岩之上的外来逆冲岩片, 代表了秦岭带中一晚元古代古洋壳残片, 主要由超镁铁质岩和镁铁质岩两大岩类组成。超镁铁

• 国家自然科学基金资助项目 (49290100)

本文于 1995 年 8 月 30 日收到, 1995 年 10 月 27 日改回。

质岩呈多个规模悬殊的透镜状、饼状无根岩块,以构造关系裹挟于镁铁质岩石中。其中,最大的松树沟超镁铁质岩块呈 NWW 向平行于区域构造线展布,长达 18.5 km,面积约为 20 km²,是研究松树沟蛇绿岩上地幔单元的主要对象。岩石学及地球化学特征研究表明其主要为变质橄榄岩,主要由中粗粒纯橄岩、纯橄质糜棱岩及少量方辉橄岩等岩类组成。岩块整体普遍遭受变形变质作用的改造,内部发育韧性—脆韧性变形构造,广布网状交织的糜棱岩带。由于受到后期强烈片理化作用的改造,岩块现今主要表现为近于平行糜棱面理的片理极为发育,片理走向为 295°—325°,倾向 SW,倾角为 55°—85°。对比岩块内部与边部的塑性变形构造可见,在岩块内部产状比较稳定,而在岩块边部其产状则有一定的变化,表明变质橄榄岩岩块与玄武岩之间存在有发生于深层次的构造作用,预示了壳幔拆离作用的存在。

在筛除晚期脆性碎裂变形作用叠加改造的基础上,笔者通过大量定向薄片的显微镜下观察研究,获得了丰富的橄榄石塑性变形的信息,确定其运动学坐标系为: X 轴为沿片理面向上的方向, Y 轴为沿片理面水平向右的方向, Z 轴为垂直于片理面(XY 面)的方向。在 XZ 切面和 YZ 切面中,橄榄石的应变差很大,前者中橄榄石呈板条状或条带状,定向性极好;而后者中橄榄石多为等轴粒状。综合研究各个方向切片中橄榄石矿物颗粒大小及晶质流变特征,可见松树沟变质橄榄岩的结构主要为糜棱结构和斑状结构。

糜棱结构 主要发育于变质橄榄岩岩块的强应变带中,由残碎斑晶和糜棱基质组成。残碎斑状橄榄石约占 5%—15%,斑晶轮廓多为浑圆状,边界参差不齐,并常被细粒基质橄榄石包围,其形状多为椭圆状或条带状,长轴定向,平行或近于平行糜棱面理,橄榄石残碎斑晶内部具扭折带、波状消光、带状消光等塑性变形特征;糜棱基质主要由橄榄石亚颗粒和动态重结晶颗粒组成,含量约为 85%—95%。在 YZ 面薄片中,基质橄榄石为近等轴粒状,定向性不明显;在 XZ 面薄片中,糜棱面理和矿物定向性极为发育,糜棱基质橄榄石为板条状或条带状,长短轴之比可达 10:1,平均约为 5:1,其长轴严格定向,并平行于糜棱面理,显示强烈的塑性变形特征。这一特征表明动态重结晶作用是以拉长型应变为主,推测其可能发生于洋盆扩张阶段。

斑状结构 主要发育于变质橄榄岩岩块的弱应变域中,几乎全由斑状橄榄石及少量辉石组成,橄榄石有微弱定向,波状消光发育,是塑性变形的标志。

为了探讨变质橄榄岩的变形特征,并进而反演其形成与演化过程,本文主要对纯橄质糜棱岩中残碎斑晶橄榄石的位错构造特征进行了详细研究。

3 橄榄石位错构造特征

松树沟蛇绿橄榄岩经历了上地幔高温塑性流动以及蛇绿岩形成与演化过程中复杂的构造变形,从而形成了一系列能反映上地幔物质固态流变特征的构造信息,即位错构造。研究表明,橄榄石基本位错类型有刃型位错、螺型位错和混合型位错,其组合形成以下几种位错组态:

3.1 自由位错

自由位错是一些单个游离位错,在蠕变过程中尚未结合形成位错壁构造。松树沟蛇绿橄榄岩中橄榄石自由位错多为刃型位错,其形态为长短不一的直线状(照片 1, 2)。根据人

工变形实验证实,在应变速率为 $10^{-5}/s-10^{-6}/s$,温度为 $600-700^{\circ}C$ 条件下,橄榄石的自由位错以直线型为主^[1]。据此推断松树沟蛇绿橄榄岩中橄榄石直线型自由位错(直位错)是低温蠕变的标志。

3.2 位错弓弯和位错环

位错弓弯是单个位错在其延长方向上发生弯曲,是位错在稳态条件下移动的结果,一般在 $800^{\circ}C$ 以上开始形成。位错环是位错在更高温度条件下发生移动的产物^[11],它是位错形成之后,在持续高温和低应变速率条件下,发生攀移、滑动的结果,是稳态条件下位错移动的表现。位错环的存在,表明橄榄石在高于 $1000^{\circ}C$ 温度条件下经历了以位错蠕变为机制的塑性流动,是橄榄石高温位错的典型标志^[10]。

松树沟蛇绿橄榄岩的橄榄石中,位错弓弯和位错环组态的存在(照片3,4,5)表明其经历了高温塑性流变过程。

3.3 位错壁

位错壁是由于众多的自由位错按一定方式在滑移面上移动排列而成的一种低能量位错组态,是晶体中的一种面缺陷。松树沟蛇绿橄榄岩中橄榄石位错壁主要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位错倾斜壁(照片6)。同时还出现位错网(照片7)。许志琴等研究认为,松树沟蛇绿橄榄岩中橄榄石位错壁构造的滑移系为 $(010)[100]$,是典型的高温 $[100]$ 体系^[12]。这些位错壁构造是橄榄石在高温稳态流动过程中,通过位错滑移和攀移形成的典型构造。

3.4 亚晶粒

亚晶粒是以位错壁为边界的晶体颗粒,它本身经过晶格恢复,不具有波形消光。亚晶粒内部位错很少,位错集中在亚晶壁上。光学显微镜下所看到的亚晶粒是在矿物中由延伸较长的位错壁围成的较大区域。在松树沟蛇绿橄榄岩的橄榄石中,这种由位错壁围成的亚晶粒在透射电子显微镜下清晰可见,亚晶粒形态具有明显的多边形轮廓。

另外,在透射电子显微镜下可见橄榄石动态重结晶结构。对天然和实验变形橄榄石的研究表明,橄榄石只能在高温、高压条件下($T>100^{\circ}C, P>1000MPa$)才发生动态重结晶作用,在地表或地壳中不具备橄榄石发生动态重结晶的条件^[1]。松树沟蛇绿橄榄岩中动态重结晶作用的存在是其高温固态流变的又一佐证。

综上所述,松树沟蛇绿橄榄岩中发育有橄榄石低温位错和高温位错。低温位错组态主要为直线型自由位错(直位错);高温位错组态则以位错弓弯和位错环、位错壁和亚晶粒构造为其典型标志。同时,有明显的直位错切割位错弓弯、位错环的现象(照片3,4,5),这是低温位错改造高温位错的标志,而且,还出现位错弓弯,位错环相互交切的现象(照片3,4,5),表明存在位错的增殖和构造的叠加。据此推断,松树沟蛇绿橄榄岩先后经历了高温固态流变和低温固态流变。综合分析认为,松树沟蛇绿橄榄岩中橄榄石的高温位错组态形成温度高于 $1000^{\circ}C$,代表了上地幔环境以位错蠕变为机制的塑性流动;而低温位错组态形成温度大约为 $600-900^{\circ}C$,代表了上地幔顶部一下地壳底部的变形环境,主要是以位错滑移为机制的塑性流动变形。

4 上地幔流变学参数及其意义

在稳态变形过程中,流变差异应力与变形岩石中产生的自由位错密度、亚晶粒度(位

错壁间距) 及动态重结晶粒度之间存在有一定的函数关系。因此, 可以利用橄榄石自由位错密度、亚晶粒度 (位错壁间距) 和动态重结晶粒度估算松树沟蛇绿橄榄岩形成与演化过程中不同阶段的流变差异应力, 并进而估算不同阶段的流变速率和粘滞度。

卡特和阿维·拉勒芒 (1970) 提出高温蠕变律^[13]:

$$\dot{\epsilon} = A \cdot \delta^n \cdot \exp(-\Delta H/RT) \quad (1)$$

式中, $A=6.2 \times 10^6$ (无量纲系数), $n=2.4$ (无量纲系数), $R=1.987 \text{ Cal} \cdot \text{mole}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ (理想气体常数), ΔH 为激活能。对于橄榄石 $\Delta H=120$ 千卡/克分子^[13]。于是, (1) 式可写为:

$$\dot{\epsilon} = 6.2 \times 10^6 \cdot \delta^{2.4} \cdot \exp[-(120 \text{ 千卡/克分子})/RT] \quad (2)$$

4.1 自由位错密度

4.1.1 流变差异应力 ($\delta_1 - \delta_3$)

矿物晶体内自由位错密度取决于作用力的大小, 它几乎只依赖于差异应力, 而剪切模量和伯格斯矢量对位错密度仅是通过温度产生很小的影响^[14]。其基本函数关系式为:

$$\delta_1 - \delta_3 = K \cdot G \cdot b \cdot \rho^n$$

式中, K 为无量纲材料系数, G 为矿物剪切模量, b 为矿物中位错的伯格斯矢量, ρ 为自由位错密度, n 为无量纲系数。根据实验得出以下两个经验公式:

$$\delta_1 - \delta_3 = 9.35 \times 10^{-3} \rho^{0.5[15]} \quad (3)$$

$$\delta_1 - \delta_3 = K \cdot G \cdot b \cdot \rho^{0.5[16]} \quad (4)$$

(4) 式中, $K=3$, $G=6.5 \times 10^4 \text{ MPa}$, $b=5 \times 10^{-8} \text{ cm}$ 。

松树沟蛇绿岩中橄榄石自由位错密度及其均值统计于表 1。

表 1 松树沟蛇绿岩中橄榄石自由位错密度

Table 1 Free dislocation densities of olivine from Songshugou ophiolite

样品号	X-1	X-2	X-4	X-6
明场照片数	4	4	7	4
透射电镜放大倍数	$(2.5-3.8) \times 10^4$	$(2.5-3.25) \times 10^4$	$(2-5) \times 10^4$	$(2.1-2.75) \times 10^4$
自由位错密度变化范围 (cm^{-2})	1.51×10^8 -2.487×10^8	2.001×10^8 -3.983×10^8	2.15×10^8 -7.75×10^8	1.18×10^8 -2.72×10^8
自由位错平均密度 (cm^{-2})	1.88×10^8	3.0×10^8	3.375×10^8	1.785×10^8

对松树沟蛇绿橄榄岩 4 个样品在透射电镜下拍摄的 19 张自由位错明场照片统计结果获得, 橄榄石自由位错的近似平均密度为 $\rho=2.51 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ 。代入前述 (3) 和 (4) 两个应力计公式计算得自由位错形成时稳态流动差异应力分别为 148.1 MPa 和 154.5 MPa, 平均为 151.3 MPa。

4.1.2 流变速率 ($\dot{\epsilon}$) 和粘滞度 (η)

根据松树沟蛇绿橄榄岩中橄榄石自由位错特征, 推测其变形温度为 700°C 左右, 将 $T=973 \text{ K}$ 、 $\delta=151.3 \text{ MPa}$ 代入稳态蠕变律公式 (2), 得自由位错形成时的流变速率 ($\dot{\epsilon}$) 为

1. 17×10^{-15} /s, 把 $\delta = 151.3$ MPa 和 $\dot{\epsilon} = 1.17 \times 10^{-15}$ /s 代入公式 $\eta = \delta/3\dot{\epsilon}$, 求得相应的粘滞度 (η) 为 4.31×10^{23} Pas。

4.2 亚晶粒度

4.2.1 流变差异应力 ($\delta_1 - \delta_3$)

Releigh 等^[9]和 Twiss^[1]先后提出亚晶粒度与差异应力之间函数关系的两个经验公式:

$$\delta_1 - \delta_3 = 190 \cdot d^{-1} \quad (5)$$

$$\delta_1 - \delta_3 = 180 \cdot d^{-1} \quad (6)$$

对松树沟蛇绿橄榄岩 4 个样品中 120 个橄榄石亚晶粒度进行统计, 其平均值为 $1.636 \mu\text{m}$, 代入公式 (5) 和 (6), 求得差异应力分别为 110 MPa 和 116.1 MPa, 平均为 113.0 MPa。

4.2.2 流变速率 ($\dot{\epsilon}$) 和粘滞度 (η)

橄榄石亚晶粒形成温度约为 1000° 左右, 将 $T = 1273^\circ\text{K}$, $\delta = 113$ MPa 代入稳态蠕变律公式 (2), 得亚晶粒形成时的流变速率 ($\dot{\epsilon}$) 为 1.307×10^{-9} /s, 把 $\delta = 113$ MPa 和 $\dot{\epsilon} = 1.307 \times 10^{-9}$ /s 代入公式 $\eta = \delta/3\dot{\epsilon}$, 求得粘滞度 (η) 为 2.88×10^{17} Pas。

4.3 动态重结晶粒度

4.3.1 流变差异应力 ($\delta_1 - \delta_3$)

动态重结晶作用试验结果表明, 动态重结晶粒度 (D) 与差异应力 ($\delta_1 - \delta_3$) 呈反相关关系, 一般表达式为:

$$\delta_1 - \delta_3 = A \cdot D^{-m}$$

Twiss 对比金属与矿物的物理性质资料, 给定橄榄石的常数 A 、 m 值分别为 14.6 和 0.68^[15]。于是, 上式可写为:

$$\delta_1 - \delta_3 = 14.6 \cdot D^{-68} \quad (7)$$

式中, ($\delta_1 - \delta_3$) 的单位为 MPa, D 的单位为 μm 。

对松树沟蛇绿橄榄岩 4 个样品中 100 个动态重结晶橄榄石粒度进行统计, 其平均值为 $0.89 \mu\text{m}$, 代入 (7) 式计算得流变差异应力值为 15.8 MPa。

4.3.2 流变速率 ($\dot{\epsilon}$) 和粘滞度 (η)

橄榄石动态重结晶所要求的温度一般约在 1200°C 以上, 将 $T = 1473^\circ\text{K}$, $\delta = 15.8$ MPa 代入稳态蠕变律公式 (2), 得橄榄石动态重结晶时的流变速率 ($\dot{\epsilon}$) 为 9.89×10^{-8} /s, 把 $\delta = 15.8$ MPa 和 $\dot{\epsilon} = 9.89 \times 10^{-8}$ /s 代入公式 $\eta = \delta/3\dot{\epsilon}$, 求得粘滞度 (η) 为 5.3×10^{14} Pas。

4.4 流变学意义

依据松树沟蛇绿岩中橄榄石的自由位错密度、亚晶粒度及动态重结晶粒度进行估算, 共得到三组稳态流变差异应力、流变速率和粘滞度, 分别代表蛇绿橄榄岩不同演化阶段的流变状态。(1) 由动态重结晶粒度估算的差异应力值 (15.8 MPa) 较接近于一般上地幔稳态流变应力值 (22—50 MPa), 结合动态重结晶作用所要求的高温条件, 推断动态重结晶作用主要发生于松树沟洋盆形成的初始阶段, 其地幔流变应力值为 15.8 MPa, 流变速率为 9.89×10^{-8} /s, 粘滞度为 5.3×10^{14} Pas。(2) 亚晶粒、位错壁、位错弓弯、位错环等是典型的高温位错构造, 其形成温度高于 1000°C , 是上地幔环境的产物, 这些位错构造可能形成于上地幔部分熔融残余体——变质橄榄岩岩块底辟侵位于上覆玄武岩之初期阶段, 依据亚晶粒度估算的流变差异应力 113 MPa、流变速率 1.307×10^{-9} /s 及粘滞度 2.88×10^{17} Pas, 代表

了这一阶段的上地幔流变状态。(3) 松树沟蛇绿橄榄岩中自由位错为直线型, 是典型的低温位错, 其形成温度约为 $600-700^{\circ}\text{C}$, 应是相对于动态重结晶及亚晶粒形成层次更浅的构造层次。推测它可能形成于上地幔部分熔融残余体——变质橄榄岩岩块底辟侵位于上覆玄武岩的后期阶段以及蛇绿岩构造就位的过程中, 流变差异应力 151.3 MPa 、流变速率 $1.17 \times 10^{-15}/\text{s}$ 及粘滞度 $4.31 \times 10^{23}\text{ Pas}$ 代表了这一阶段的流变状态。

5 结论

(1) 东秦岭松树沟蛇绿橄榄岩中广泛发育网状交织的糜棱岩带, 岩石结构主要为糜棱结构和残斑结构, 分别发育于强应变带和弱应变域中。

(2) 松树沟蛇绿橄榄岩的橄榄石中发育有高温位错和低温位错。高温位错组态主要为位错壁、亚晶粒、位错弓弯和位错环, 反映了上地幔环境高温塑性流变的特征, 这种塑性流变主要是位错攀移(形成位错壁和亚晶粒)和位错滑动(形成位错弓弯和位错环)的结果; 低温位错组态主要为直线型自由位错(直位错)。

(3) 松树沟蛇绿橄榄岩中橄榄石位错构造出现直位错(低温位错)切割位错弓弯或位错环(高温位错)以及位错弓弯、位错环相互交切的现象, 表明存在有位错增殖和构造叠加作用, 应是高温塑性流变和低温塑性流变的表现。

(4) 在松树沟蛇绿岩形成与演化过程中, 其上地幔变质橄榄岩经历了三期主要的固态流变作用的改造: ① 第一期塑性变形主要是橄榄石动态重结晶作用, 发生于松树沟洋盆形成初期的扩张阶段, 相应的上地幔流变差异应力为 15.8 MPa , 流变速率为 $9.89 \times 10^{-8}/\text{s}$, 粘滞度为 $5.3 \times 10^{14}\text{ Pas}$ 。② 第二期塑性变形主要形成橄榄石高温位错构造, 即位错弓弯、位错环、位错壁和亚晶粒, 是上地幔部分熔融残余体——变质橄榄岩岩块底辟侵位于玄武岩中的初期阶段的产物。相应的上地幔流变差异应力为 113 MPa , 流变速率为 $1.307 \times 10^{-9}/\text{s}$, 粘滞度为 $2.88 \times 10^{17}\text{ Pas}$ 。③ 第三期塑性变形形成橄榄石低温位错, 即直线型自由位错, 发生于蛇绿橄榄岩底辟侵位之后期阶段以及蛇绿岩构造就位过程中。相应的流变差异应力为 151.3 MPa , 流变速率为 $1.17 \times 10^{-15}/\text{s}$, 粘滞度为 $4.31 \times 10^{23}\text{ Pas}$ 。

致谢 本文承蒙张国伟教授审阅, 并提出了宝贵的修改意见, 在此致以诚挚的谢意!

参 考 文 献

- 1 董火根、闵茂中、张富生等. 江苏六合方山幔源包体橄榄石的位错构造研究. 地质论评, 1993, 39(5): 459-464.
- 2 董火根、闵茂中、张富生等. 福建明溪大洋窠幔源包体橄榄石的位错构造特征. 岩石矿物学杂志, 1993, 12(1): 45-50.
- 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 peridotite, in Electron Microscopy in Mineralogy. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1976, 443-464.
- 5 何永年. 我国东部二辉橄榄岩团块的构造及流动应力计. 中国科学(B辑), 1980, 6: 569-575.
- 6 何永年. 幔源包体橄榄石的位错构造研究及上地幔塑性流动. 构造地质论丛(5), 1985, 15-25.
- 7 何永年、林传勇、陈孝德等. 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(3), 北京: 地质出版社, 1983, 67-76.

- 8 金振民, Green I H W. 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, 1988, 13 (4): 365—374.
- 9 Raleigh B, Kirby S. Creep in the upper mantle. Mineral Soc. Amer. Spec. Pap., 1970, 3: 113—121.
- 10 郑伯让、金振民、金淑燕等. 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. 矿物岩石学论丛 (4), 北京: 地质出版社, 1988, 1—9.
- 11 Phyakey P, Dollinger G, Christic J. In flow and fracture of rocks. Am. Geophys Union, Washington, 1972, 139—156.
- 12 许志琴、卢一伦、汤耀庆等. 东秦岭复合山链的形成——变形、演化及板块动力学. 北京: 中国环境科学出版社, 1988.
- 13 A. 尼可拉斯, J. P. 泊利埃. 变质岩的晶质塑性和固态流变. (林传勇等译), 北京: 科学出版社, 1985.
- 14 Kolhstedt D, Weathers M. Deformation-induced microstructures paleopiezometer and differential stresses in deeply eroded fault zones. J. Geophys Res., 1980, 85 (11): 6267—6285.
- 15 Twiss R J, Sellars C M. Limits of applicability of the recrystallized grain size geopiezometer. Geophys. Res. Lett., 1978, 5: 337—340.
- 16 Torium M. Relation between dislocation density and subgrain size of naturally deformed olivine in peridotites. Contrib. Mineral. Petrol., 1979, 68: 181—186.
- 17 Twiss R J. Theory and application of a recrystallized grainsize paleopiezometer. Pure Appl. Geophys., Vol. 15, 227—244.

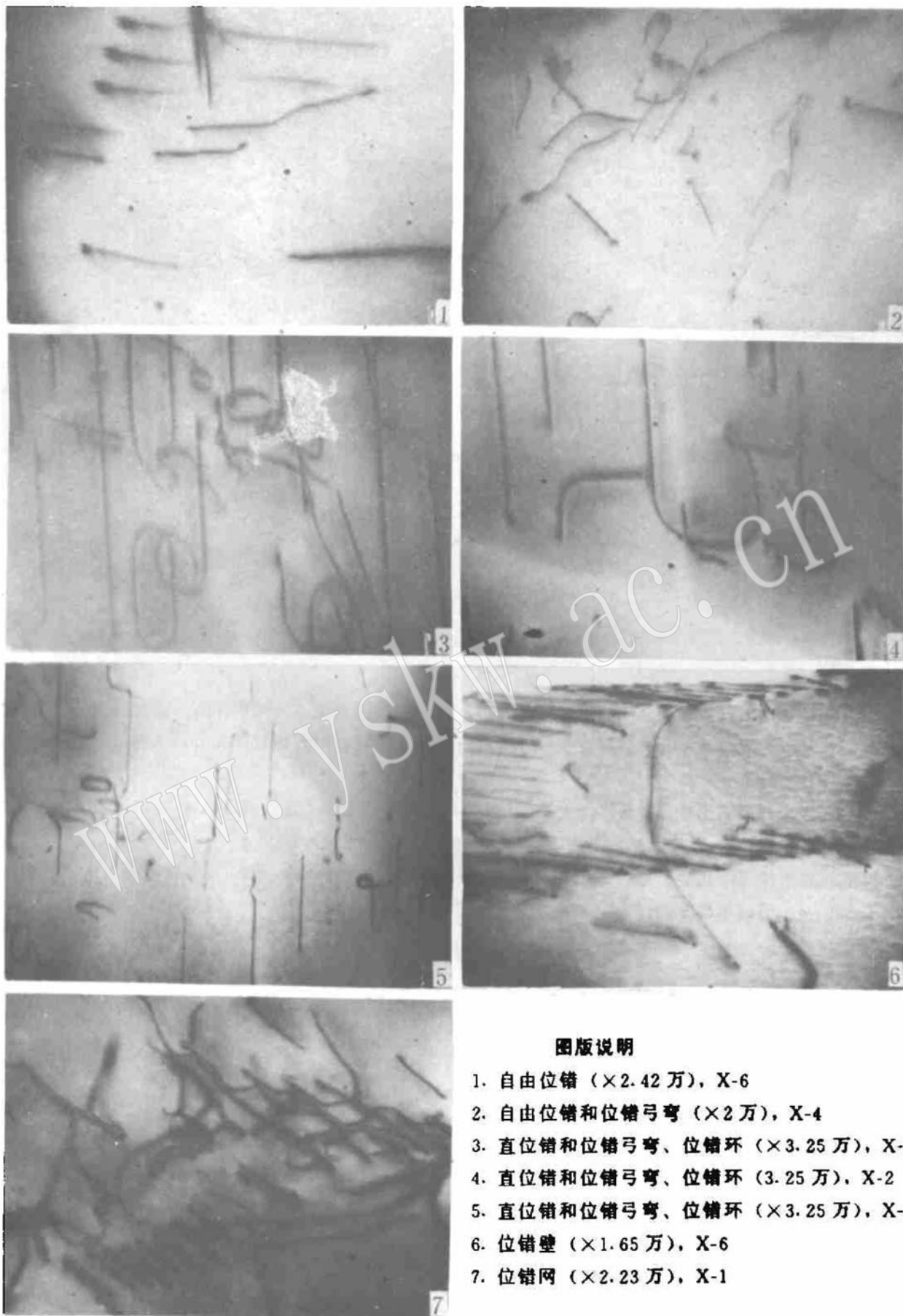
Dislocation Microstructures of Olivine from Songshugou Ophiolite and Their Rheological Implications

Dong Yunpeng, Zhou Dingwu, Liu Liang
(Department of Geology, Northwest University, Xi'an 710069)

Key words: eastern Qinling; ophiolite; olivine; dislocation microstructure; flow stress

Abstract

Dislocation microstructures of olivine from metaperidotite of Songshugou ophiolite in eastern Qinling were studied by means of transmission electron microscope (TEM), and the result shows that there exist several kinds of dislocations, such as free dislocations, dislocation walls, subgrains, dislocation bows and dislocation loops. These dislocation microstructures resulted from complex creep of olivine in the process of high temperature plastic flow in the upper mantle. According to the average free dislocation density of olivine ($2.51 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$) and the average size of subgrains ($1.636 \mu\text{m}$), their flow stresses ($\delta_1 - \delta_3$), flow strain rate ($\dot{\epsilon}$) and viscosity (η) should be 151.3 MPa, $1.17 \times 10^{-15} \text{ s}$, $4.31 \times 10^{23} \text{ Pas}$ and 113.0 MPa, $1.307 \times 10^{-9} \text{ s}$, $2.88 \times 10^{17} \text{ Pas}$, respectively. Based on the average size of recrystallizations ($0.89 \mu\text{m}$), it is estimated that the flow stress of the upper mantle is about 15.8 MPa, the flow strain rate about $9.89 \times 10^{-8} \text{ s}$, and the viscosity about $5.3 \times 10^{14} \text{ Pas}$. These different types of dislocations suggest the different phases of plastic deformation that the host mineral experienced.



图版说明

1. 自由位错 ($\times 2.42$ 万), X-6
2. 自由位错和位错弓弯 ($\times 2$ 万), X-4
3. 直位错和位错弓弯、位错环 ($\times 3.25$ 万), X-2
4. 直位错和位错弓弯、位错环 (3.25 万), X-2
5. 直位错和位错弓弯、位错环 ($\times 3.25$ 万), X-2
6. 位错壁 ($\times 1.65$ 万), X-6
7. 位错网 ($\times 2.23$ 万), X-1