

西藏南部若干变质橄榄岩体 橄榄石的组构特征*

崔军文

(中国地质科学院岩石圈研究中心)

主题词: 组构; 叶理; 线理; 塑性流变; 结构; 位错滑动;

提 要: 藏南变质橄榄岩的橄榄石组构可划分为三个主要类型: [100]、[010]和[001]组构。橄榄石[100]组构反映洋壳下部—上地幔上部的高温粘性流变和高温塑性流变, 橄榄石[010]和[001]组构基本上是构造侵位阶段陆壳中低温塑性流变结果。变质橄榄岩中橄榄石组构转化具有明显的规律性, 在岩体变形过程中, 总的显示由高温的[100]组构逐渐转化为低温的[001]、[010]组构。高温塑性流变组构影响和制约低温塑性流变组构的发育, 叠加变形有利于橄榄石[100]极密的加强和[100]组构向[010]、[001]组构的转化。

地球物理资料和高温高压实验研究结果揭示岩石圈下部的变形是借助于晶格位错运动而实现的一种连续的永久变形, 因此, 在七十年代国际上地幔计划执行期间, 对地幔岩的主要组成矿物橄榄石的实验变形研究得到了迅速发展。借助于橄榄石晶体塑性流变的研究, 获得了大量实验数据, 从而使人们对岩石圈板块运动学和动力学的研究成为可能。本文重点研究雅鲁藏布江蛇绿岩带罗布莎、日喀则和泽当等地变质橄榄岩橄榄石的组构特征、成因及其转化, 试图为研究印度板块与欧亚板块的碰撞及青藏高原的形成和演化提供一些实际素材。

一、变质橄榄岩的微构造特征

罗布莎等变质橄榄岩体位于雅鲁藏布江蛇绿岩套底部, 其主要矿物为橄榄石(50-75%)、顽火辉石和透辉石(22-48%), 副矿物为铬尖晶石。橄榄石 $Fo = 90 - 95$, 为镁橄榄石。橄榄石、辉石和铬尖晶石普遍显示平行片理面的压扁和剪切, 压扁面(X-Y面)平行片理面(S面)或与片理面(S面)斜交, 在铬尖晶石相对富集部位常出现轴面平行XY面的微弱剪切褶皱。岩石的片理化、糜棱岩化强烈, 镜下可明显区分为两期叶理和线理。早期叶理(S_1)表现为由一向或二向延伸的橄榄石、顽火辉石残碎斑晶和重结晶颗粒平行相间而组成的构造条带。残碎斑晶边界呈锯齿状, 偶见晶粒旋转现象。晚期叶理(S_2)由压扁的橄榄石、辉石和铬尖晶石颗粒呈定向排列而成, 沿叶理方向分布的重结晶橄榄石颗粒条带, 具平直的剪切边界, 残碎斑晶外形浑圆, 常见外部旋转现象, 发育平行橄榄石[100]轴的变形纹。线理主要表现为橄榄石、辉石和铬尖晶石颗粒的定向排列(早期和晚期线理分别以 L_1 和 L_2 表示)。两期叶理和线理以高角度相交, 并普遍被后期脆性破裂切割。

* 国家自然科学基金委员会资助项目, 地矿部“七五”重点攻关课题研究论文。

二、橄榄石晶体的塑性流变现象 和主要结构类型

藏南变质橄榄岩体橄榄石晶体普遍经历了高温塑性流变和低温塑性流变。常见的高温塑性流变现象有：次颗粒、位错壁（照片1）、变形条带和同构造重结晶（照片2）；低温塑性流变现象有：压扁拉长（照片3）、畸变、变形纹和扭折^[1]。岩体的微构造特征表明低温塑性流变是叠加于高温塑性流变的后期变形^[2]。

根据矿物晶体（主要为橄榄石，其次为辉石和铬尖晶石）的塑性流变现象，藏南变质橄榄岩的结构可归纳为三个组七个主要结构类型^[2]：原生结构组（弱应变相）——原生粒状结构、原生板状结构（照片4），变晶结构组（中等应变相）——粒状变晶结构（照片5）、板状变晶结构，糜棱结构组（强应变相）——残碎斑状结构、糜棱结构（照片6）和超糜棱结构。各结构类型特征见参考文献^[3]。

原生结构和糜棱结构是在洋壳下部—上地幔上部高温粘性流动和高温塑性流动的产物，形成 S_0 叶理、 L_0 线理（照片4）和 S_1 叶理、 L_1 线理（照片6），变晶结构则是构造侵位阶段于陆壳中发生的低温塑性流动的结果，形成 S_2 叶理、 L_2 线理*（照片5）。

三 橄榄石的组构分析

（一）坐标的选择

由于变质橄榄岩遭受强烈构造侵位和后期脆性破裂，显观流变构造形迹不易辨别，而且野外所见的构造线方位并不代表原始构造线方位和应变轴。因此，组构分析中 X、Y、Z 坐标的选择，除少数低温塑性流变形迹依据野外标志将片理面（S 面）和线理（L）分别定为 XY 面和 X 方向外，绝大部分将薄片中的显微叶理面和矿物长轴定为 XY 面和 X 方向，垂直叶理面方向定为 Z 轴。根据藏南变质橄榄岩体橄榄石的应变特征，对不同结构类型的岩石选择不同变形标志（表1）。由于切面不严格垂直叶理面和线理，因此，组构图中的 S 和 L，一般为叶理和线理在圆平面上的投影（视叶理和视线理）。

表 1 本文所采用的坐标系

Table 1. Coordinate system adopted in this paper

XY面—叶理面(S)		X—线理(L)		变形阶段	
S_0	辉石流层、铬尖晶石流层和流带组成的火成层理（照片4）	L_0	自形的板状橄榄石晶体长轴（照片4）	高温	粘性—准粘性流动
S_1	橄榄石、顽火辉石残碎斑晶和重结晶颗粒组成的构造条带（照片6）	L_1	橄榄石残碎斑晶长轴		塑性流动
S_2	压扁的橄榄石和辉石颗粒的扁平面及其与重结晶颗粒条带组成的层状构造（照片5）	L_2	压扁的橄榄石、辉石和铬尖晶石颗粒的定向排列（照片5）	低温	塑性流动

* 崔军文，1987，蛇绿岩套中变质橄榄岩的流动构造及其成因分类和研究意义，岩石圈基本理论和方法（待刊）。

(二) 岩组分析方法

在罗布莎等藏南变质橄榄岩体系统显微构造研究基础上,选择有代表性的、不同结构类型薄片,用X光衍射仪测量橄榄石{130}晶面,绘制{130}晶面极图。根据{130}晶面夹角为 $71^{\circ}8'$ 和[100](Ng)轴平分该晶面夹角,并垂直于{130}晶轴,求出橄榄石[100](Ng)、[001](Nm)和[010](Np)极点,绘制相应的组构图^[4]。

(三) 主要组构类型

根据岩石中的微构造和组构发育特征,将变质橄榄岩的组构(表2)归纳为下列三种类型(图1)。

类型 I 橄榄石[100]组构

为变质橄榄糜棱岩(照片6)的主要组构类型(图1,G)。其主要特征:

- (1) 橄榄石[100]具强烈优选方位,呈位于 S_1 面的强极密;
- (2) 橄榄石[001]呈长轴平行 S_2 、与 L_2 夹角 40° 的拉长的强极密;
- (3) 橄榄石[010]呈长轴平行 S_2 、接近 S_1 面极点拉长的大圆。

残碎斑状结构具大致相同的极密类型,但极密程度明显减弱(图1,F):

- (1) 橄榄石[100]呈位于 S_1 、平行 L_1 的中等极密;
- (2) 橄榄石[001]呈与 S_1 夹角 10° - 20° 的稀疏极密;
- (3) 橄榄石[010]呈接近 S_1 面极点,比[001]更为分散的稀疏极密。

原生粒状、板状结构(照片4),橄榄石[100]组构演化为(图1,A、B):

(1) 橄榄石[100]呈与 S_0 夹角 6° - 8° 的中等极密。当薄片中出现 L_0 线理时,橄榄石[100]极密接近于 L_0 (图1,B);

(2) 橄榄石[001]呈大致垂直 S_0 面的环带,环带内主极密与 S_0 极点夹角 10° - 22° 。在编号为83-1样品中,橄榄石[001]主极密与 L_2 夹角 42° ;

(3) 橄榄石[010]呈垂直 S_0 的环带,环带内主极密与 S_0 夹角 2° - 14° 。

类型 II 橄榄石[001]组构

为粒状变晶结构变质橄榄岩的主要组构类型。

编号为78-2128的薄片,橄榄石[001]组构的特征(图1,C):

- (1) 橄榄石[100]呈接近 S_2 面的强极密;
- (2) 橄榄石[001]呈接近 S_2 面、与 L_2 夹角 18° 的强极密,次极密接近 S_2 面极点;
- (3) 橄榄石[010]呈与 S_2 面极点夹角 27° 强极密,次极密接近 L_2 。

编号为77-2179的薄片,橄榄石[001]组构表现为(图1,D):

- (1) 橄榄石[100]呈接近 S_2 面的强极密;
- (2) 橄榄石[001]呈垂直于 S_2 面的环带,环带内主极密与 S_2 面夹角 26° ;
- (3) 橄榄石[010]呈主极密与 S_2 面极点夹角 27° 的、垂直 S_2 面的环带。

类型 III 橄榄石[010]组构

在分析的全部样品中,仅在样品编号78-27的薄片中出现该类型组构(图1,E)。其特征是:

- (1) 橄榄石[100]呈位于 S_1 面的中等极密;

表2 变质橄榄岩中橄榄石的组构特征
Table 2. Fabric characteristics of olivine in metaperidotite

编号 (样品号)	结构类型	叶理(S)	线理(L)	[100] (Ng轴)	[001] (Nm) 轴	[010] (Np) 轴
A (10)	原生粒状结构	S ₀ : 辉石流层	L ₂ : 铬尖晶石颗粒 长轴	呈与S ₀ 面夹角22°的拉长的中等极密, 极密散布范围70°-110°, 长轴垂直S ₀ 面	呈与S ₀ 面夹角80°的环带, 环带内主极密与S ₀ 面极点夹角10°	呈大致垂直S ₀ 面的环带, 环带内主极密位于S ₀ 面
(2128)	原生粒状结构	不清楚	不清楚	呈中等极密, 极密散布范围80°-90°	呈环带型式	呈环带型式
(103-1)	原生粒状结构	不清楚	不清楚	呈中等极密, 极密散布范围约90°	呈不完全环带型式	呈不完全环带型式
B (2023)	原生板状结构	S ₀ : 板状橄榄石颗粒定向面	L ₀ : 板状橄榄石颗粒长轴	呈与S ₀ 面夹角6°的中等极密型式, 极密散布范围90°	呈与S ₀ 面夹角70°左右的环带型式, 环带内主极密与S ₀ 极点夹角22°	呈垂直S ₀ 面的环带型式, 环带内主极密位于S ₀ 面
C (2128)	粒状变晶结构	S ₂ : 压扁的橄榄石颗粒的压扁面	L ₂ : 压扁的铬尖晶石颗粒的长轴	呈与S ₂ 面夹角10°的强极密, 极密散布范围约60°	呈接近S ₂ 面、与L ₂ 夹角18°的强极密, 极密散布范围约60°	呈与S ₂ 面极点夹角27°的强极密, 极密散布范围约50°
D (2179)	粒状变晶结构	S ₂ : 压扁的橄榄石颗粒的压扁面	L ₂ : 压扁的橄榄石颗粒的长轴	呈平行S ₂ 面的强极密, 极密散布范围约70°	呈垂直于S ₂ 面的环带, 环带内主极密与S ₂ 面夹角26°	呈垂直于S ₂ 面的环带, 环带内主极密与S ₂ 面极点夹角27°
E (27)	粒状变晶结构	S ₁ : 橄榄石残碎斑晶与重结晶颗粒组成的构造条带	L ₂ : 压扁的铬尖晶石颗粒的长轴	呈位于S ₁ 面的中等极密型式, 极密散布范围80°-90°	呈与S ₁ 面极点夹角25°的拉长的强极密, 极密散布范围约80°×120°, 长轴垂直S ₁	呈接近S ₁ 面、与L ₂ 夹角27°的拉长的强极密, 极密散布范围70°×110°, 长轴垂直S ₁
F (2125)	残碎斑状结构	S ₁ : 橄榄石残碎斑晶与重结晶颗粒组成的构造条带	L ₁ : 橄榄石残碎斑晶的长轴	呈位于S ₁ 面、平行L ₁ 的中等极密型式, 极密散布范围80°-90°	呈与S ₁ 面夹角约15°的分散的极密, 极密散布范围约110°-120°	呈接近S ₁ 面极点的分散的极密型式, 极密散布范围120°-130°
G (604)	糜棱结构	S ₁ : 橄榄石构造条带 S ₂ : 橄榄石的压扁面 S ₁ ∧S ₂ = 46°	L ₂ : 压扁的橄榄石和铬尖晶石颗粒的长轴	呈位于S ₁ 面的强极密, 极密散布范围约50°	呈与L ₂ 夹角46°的拉长的强极密, 极密散布范围50°×70°, 长轴平行S ₁ 面	呈接近S ₁ 面极点的拉长的强极密, 极密散布范围60°×80°, 长轴平行S ₂ 面

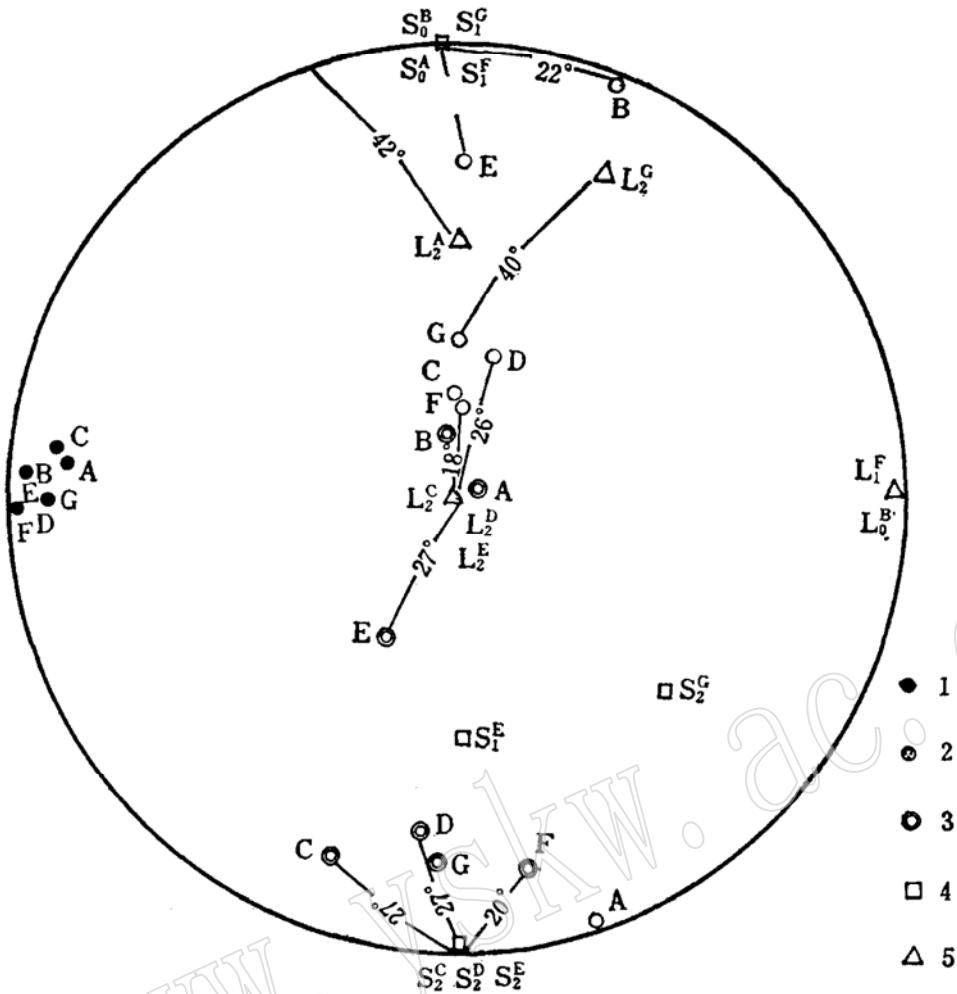


图 1 不同结构类型变质橄辉岩橄辉石结晶轴与叶理、线理方位关系

Fig 1. Relationship between orientation of crystallographic axis of olivine and foliation, lineation in metaperidotite massifs with various textures

1—橄辉石〔100〕轴，2—橄辉石〔001〕轴，3—橄辉石〔010〕轴，4—叶理面极点，5—线理，其它说明见表2。橄辉石结晶轴方位据X光岩组分析资料。S为叶理面极点，L为线理。

- (2) 橄辉石〔001〕呈长轴平行〔100〕面的拉长的强极密，与 S_2 面极点夹角 25° ；
- (3) 橄辉石〔010〕呈与 L_2 夹角 27° 、拉长的强极密，长轴平行橄辉石〔100〕面。

四、组构转化和成因

藏南变质橄辉岩体橄辉石的组构发育具有明显的规律性：

(1) 橄辉石〔100〕轴具稳定的组构类型，即以极密型式为主，它不随变形条件而变，但极密程度明显依赖应变，总的显示随着应变增强橄辉石〔100〕极密愈趋强烈；

(2) 由原生结构→糜棱结构→变晶结构，橄辉石〔001〕轴由环带型式逐渐转化为极密型式，环带内主极密方位由接近 S_0 面极点逐渐转变为位于 S_2 面，并平行 L_2 （表2，图1）；

(3) 橄榄石〔010〕轴和〔001〕轴具有相似的变化规律,但〔010〕轴方位,在原生结构组中位于 S_0 面,糜棱结构中接近于 S_2 面极点,位于 S_2 面,至变晶结构中绝大部分接近 S_2 面极点,个别接近 S_2 面、平行 L_2 线理(表2,图1);

(4) 橄榄石〔100〕极密程度与〔001〕、〔010〕组构和叶理、线理的发育密切相关,总的显示:① 随着〔001〕和〔010〕由环带型式向极密型式的转化,〔100〕极密逐渐增强;② 当岩石中出现 S_1 和 S_2 两组叶理时,〔100〕极密远较仅出现一组叶理(S_1 或 S_2)时强烈。

以上说明橄榄石组构的形成与变形条件(流动应力、温度和应变速率)、变形机制和变形历史密切相关。变形对组构的影响一般表现为流动面垂直于缩短轴(Z),流动方向平行于拉长轴(X)。因此,叶理面为岩石中的主要流动面,线理为主要流动方向^[5]。

晶格方位排列是位错运动结构,当位错获得一定能量,就沿晶格内特定晶面和晶轴方向迁移。由于位错能量和 b^2 (b —柏氏矢量)成比例,因此,滑动一般沿布格矢量最短方向发生^[6]。橄榄石晶体单位晶胞参数是:〔100〕=4.76 Å,〔010〕=10.21 Å,〔001〕=5.99 Å,以〔100〕方向位错能量最小。因此,橄榄石晶体位错滑动的主要方向在高温低应变速率条件下为〔100〕,在低温高应变速率条件下为〔001〕,而〔010〕方向滑动只有在高应变条件下才有可能^[6,7,8]。

实验表明,〔100〕优选方位的产生是〔100〕笔状滑动(pencil glide)结果,主要滑动面为平行〔100〕的柱面,尤以平行最大分解剪应力的晶面滑动最发育^[6,9]。原生结构〔100〕极密和〔010〕主极面位于 S_0 面,表明其主要滑动面为(001),其次为(010)。因此,在粘性流动阶段橄榄石晶体的主要滑动系是(001)〔100〕,其次为(010)〔100〕。

高温塑性流动阶段,橄榄石仍以〔100〕柱面滑动为主,但〔100〕、〔001〕极密位于 S_1 面和糜棱结构中变形纹极点接近于橄榄石〔010〕轴^[3],说明滑动面已由粘性流动阶段以(001)面为主转化为以(010)面为主。因此,橄榄石的主要滑动系为(010)〔100〕,其次为(001)〔100〕。残碎斑状-糜棱结构组 S_1 和 L_1 线理的出现及〔100〕强极密接近于 L_1 线理,表明剪切流动是橄榄石〔100〕组构发育的主要原因。

变晶结构中叶理和线理的形态及组构特征反映低温塑性流动的主要机制是压扁和剪切作用。在分析的三个样品中,编号77-2179和77-2128样品,橄榄石(010)面接近 S_2 面和大多数变形纹^[3],〔001〕接近 L_2 方向,因此,橄榄石的主要滑动面为(010),滑动系为(010)〔001〕;编号78-27样品中,橄榄石〔001〕和〔010〕呈平行(100)面的拉长的极密型式,〔010〕方位接近 L_2 。由于〔001〕在变形过程中,呈现为从环带型式到在压扁面上拉长的极密型式^[5],因此,推测岩石中的主要压扁面接近于橄榄石的(100)面(薄片中的 S_2 面为视叶理), (100)面为橄榄石晶体中的主要滑动面,主要滑动系为(100)〔010〕。可见,橄榄石〔001〕和〔010〕组构的形成是垂直(010)面或(100)面压扁和平行(010)或(100)面剪切共同作用的结果。

橄榄石晶体经过高温粘-塑性流动,获得〔100〕方位排列后,沿〔001〕和〔010〕方向的位错滑动要比橄榄石晶体处于随机分布状态下容易实现。同时,由于岩体中 S_2 面普遍与 S_1 面近于正交(照片3),橄榄石〔001〕和〔010〕沿 S_2 面位错滑动时,〔100〕轴始终处于平行 σ_1 (编号78-27样品)或垂直 $\sigma_3(x)$ 位置(编号77-2179、78-28(2)样品),即处于稳定方位,因此,在变质橄榄岩体的整个变形过程中,〔100〕极密保持不变^[5]。对比其中分析的七个样品,当岩

体中发育有 S_2 面时, 橄榄石的三个结晶轴一般都呈极密型式, 叶理和线理愈清晰, 其极密愈强烈, 而且〔100〕极密随着〔001〕和〔010〕由环带型式向极密型式转化, 由弱-中等极密转为强极密。说明橄榄石〔100〕方位的优选除与高温塑性流动阶段沿〔100〕方向的位错滑动有关之外, 还取决于〔001〕和〔010〕方向位错滑动。因此, 叠加塑性变形比一次变形有利于〔100〕组结构的形成及〔100〕组结构向〔010〕和〔001〕组结构的转化。

五、结 论

通过对变质橄榄岩橄榄石组构特征的研究, 可以得出下列几点认识:

(1) 变质橄榄岩橄榄石〔100〕极密的普遍存在和〔100〕轴垂直于 S_2 面 (平行缩短轴 Z), 反映橄榄石一旦造成〔100〕晶格方位排列, 就获得了稳定的晶格和形态方位, 它不因后期低温塑性流变的叠加而消失。相反, 〔100〕极密将由于〔001〕和〔010〕方位的位错滑动而得到加强。因此, 叠加塑性变形比一次变形更有利于橄榄石〔100〕、〔001〕和〔010〕组结构的发育;

(2) 在变质橄榄岩的渐进应变过程中, 橄榄石总的显示由〔100〕组构和平行〔100〕的形态方位排列逐渐转化为〔001〕、〔010〕组构和平行〔001〕、〔010〕的形态方位排列, 高温粘-塑性流动形成的晶格和形态方位排列制约和影响低温塑性流动阶段晶格和形态方位排列;

(3) 橄榄石的形态特征和主要滑动方向〔100〕、〔001〕和〔010〕与线理 (L) 方向的夹角 (依次为 $6^\circ-22^\circ$ 、 $18^\circ-26^\circ$ 和 27°) 表明, 高温粘-塑性流动和低温塑性流动的主要机制分别为剪切作用和剪切-压扁作用。

参 考 文 献

- [1] Christie, J. M., Cowley, J. M. etc., 1976, *Electron Microscopy in Mineralogy*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York.
- [2] 崔军文, 1986, 雅鲁藏布江断裂带内阿尔卑斯型橄榄岩体的变形。地质学报, 第1期 (第60卷)。
- [3] 崔军文, 1987, 藏南超基性岩的塑性流变。中国地质科学院院报, 第17号。
- [4] 姜光焘, 1982, 测量岩组的X射线方法。地质力学论丛, 第6号。
- [5] Buiskool Toxopeus, J. M. A., 1977, Fabric Development of Olivine in a peridotite Mylonite. *Tectonophysics*, vol. 39, no. 1/3, pp. 57-60.
- [6] Nicolas, A., Poivier, J. P., 1976, *Crystalline plasticity and Solid state flow in Metamorphic Rocks*, John Wiley & Sons.
- [7] Raleigh, C. B., 1968, Mechanisms of Plastic Deformation of olivine. *J.G.R.* vol. 73, no. 14, July 15, pp. 5391-5406.
- [8] Willie, P. J., 1967, *Ultramafic and Related Rocks*. John Wiley & Sons, Inc.,
- [9] Carter, N. L., Raleigh, C. B., 1969, Principal Stress Directions from Plastic Flow in Crystals. *Geo. Soc. Amer. Bull.*, 1969, vol. 85, pp. 1231-1264.

Fabric Characteristics of Olivine in Some Metaperidotite Massifs in Southern Tibet

Cui Junwen

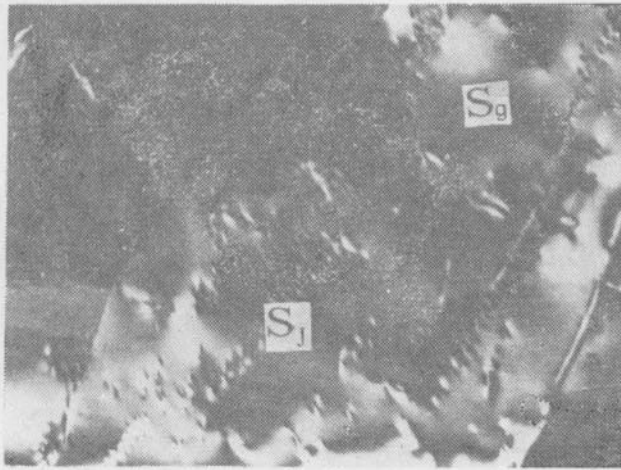
(Lithosphere Research Center, Chinese Academy of Geological Sciences)

Key words: fabric, foliation, lineation, plastic deformation, texture, dislocation movement

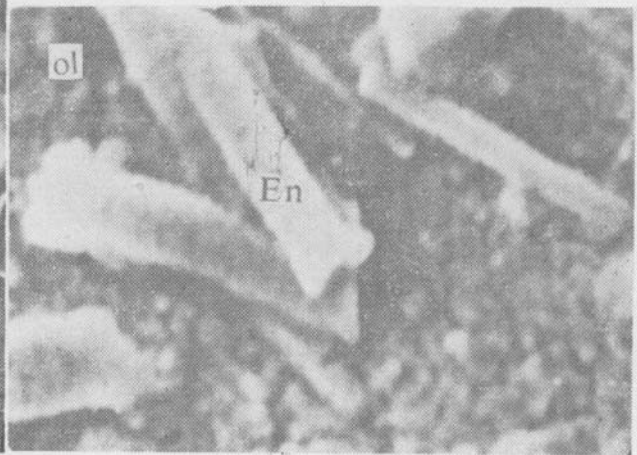
Abstract

Metaperidotite occurring at the bottom of the Yaluzanbujiang ophiolite suite has extensively experienced strong deformation. According to main characteristics of plastic deformation in the studied massifs and X-ray fabric analysis, the fabrics of olivine can be classified into three main types: [100], [010] and [001], which all assume the maximum pattern and are respectively parallel to lineation. The development of fabrics closely related to deformation conditions (such as flow stress, temperature and strain rate), deformation mechanism and deformation evolution results from dislocation movement.

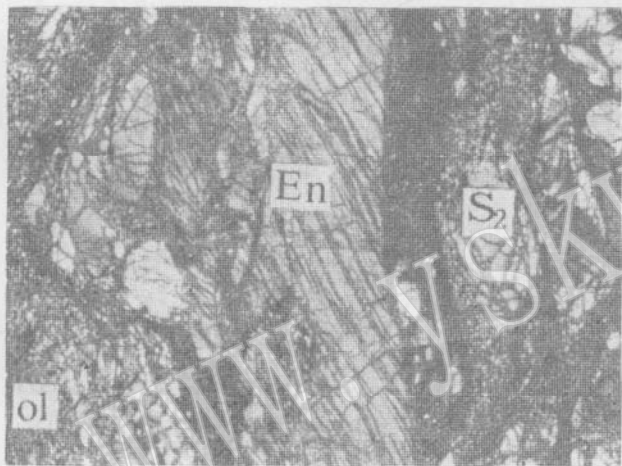
The fabric transformation of olivine in metaperidotite shows obvious regularity. In general, there is a progressive transition from high temperature [100] fabric to low temperature [010] and [001] fabrics in the process of deformation. The high temperature plastic flow fabrics affect and restrict the development of low temperature ones, and the overprinted deformation is favorable for the formation of [100] preferred orientation and the transformation from [100] fabric to [001] and [010] fabrics.



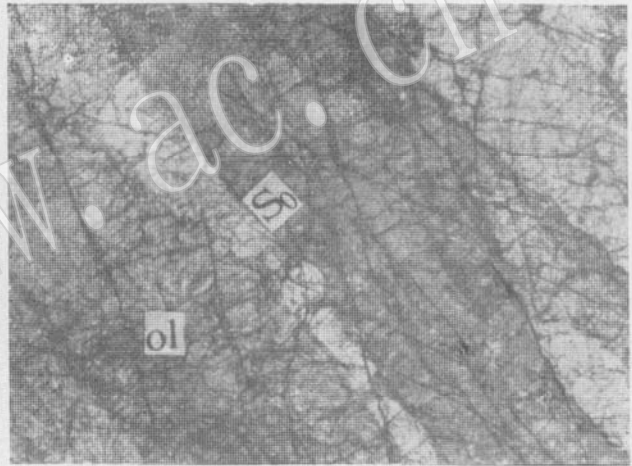
照片1 橄榄石残碎斑晶中的位错壁(S₁)和次颗粒(S_g)构造。76—604, TEM, ×65000



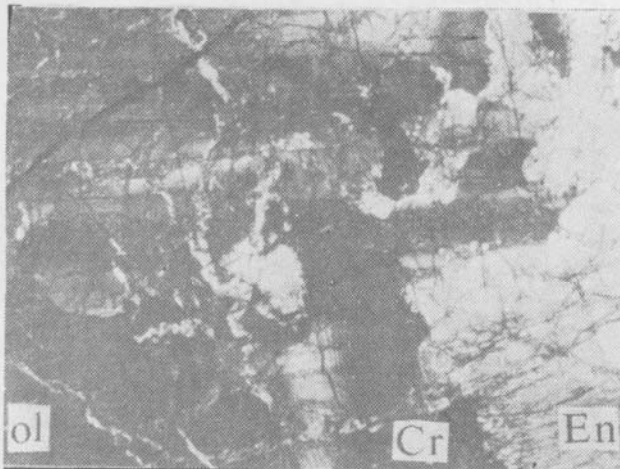
照片2 糜稜结构中,同构造重结晶橄榄石(Ol)和顽火辉石(En)颗粒。76—604, 扫描电镜, ×7500



照片3 由层状构造显示的S₂叶理。Ol—橄榄石, En—顽火辉石。78—10, 正交偏光, ×36



照片4 原生板状结构中自形的板状橄榄石颗粒定向排列而组成的S₀叶理。Ol—橄榄石。77—2032, 正交偏光, ×25



照片5 粒状变晶结构中两组正交的叶理(分别平行图框)和橄榄石晶体中的变形纹(平行晶体长轴)。Ol—橄榄石, En—顽火辉石, Cr—铬尖晶石。28—2106, 正交偏光, ×25



照片6 糜稜结构中,由构造条带和层状构造显示的S₁和S₂叶理。Ol—橄榄石。76—604, 正交偏光, ×36