

doi:10.3799/dqkx.2013.096

碧溪岭石榴异剥橄榄岩的显微构造及成因机制

韦 博¹, 金振民^{1,2}, 章军锋^{1,2}

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

摘要: 对超高压变质带中橄榄岩变形显微构造的研究, 有助于了解板块边界构造环境中地幔物质的流变性质和变形机制, 进而探讨其在深俯冲/折返过程中的地球动力学过程的作用。采用光学显微镜、电子探针、红外光谱、电子背散射衍射(EBSD)、位错氧化缀饰等多种方法系统研究了来自中国大别碧溪岭的石榴异剥橄榄岩中的变形显微构造。研究表明: (1) 碧溪岭石榴异剥橄榄岩发育较好的形状优选方位, 但只有单斜辉石显示了强晶格优选方位, 而橄榄石晶格优选方位很弱, 与常见上地幔橄榄岩中单斜辉石组构弱而橄榄石组构强的特点差异显著, 反映了单斜辉石经历位错蠕变而橄榄石经历位错调节的颗粒边界滑移变形; (2) 碧溪岭异剥橄榄岩中单斜辉石和橄榄石均含有一定量的结构水, 其中单斜辉石含水量 $124 \times 10^{-6} \sim 274 \times 10^{-6}$, 橄榄石含水量 $38 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$, 高于常见造山带橄榄岩中各矿物的含水量, 可能反映了壳源物质混染引起的高含水量变形环境; (3) 橄榄石中发育显著位错显微构造, 根据位错显微构造计算的变形差异应力为 230~600 MPa, 高于正常上地幔稳态流变应力, 反映了俯冲带中的相对低温变形环境。综合分析研究表明, 超高压变质带中的高压、低温、高差异应力和高结构水含量是形成碧溪岭相对独特的橄榄石、单斜辉石变形显微构造的原因。

关键词: 石榴异剥橄榄岩; 晶格优选方位; 位错; 结构水; 差异应力; 显微构造。

中图分类号: 545

文章编号: 1000-2383(2013)05-0983-12

收稿日期: 2012-07-28

Deformation Microstructures and Mechanism of Ultrahigh-Pressure Garnet Wehrlite from Bixiling, Dabie Mountains

WEI Bo¹, JIN Zhen-min^{1,2}, ZHANG Jun-feng^{1,2}

1. Faculty of Earth Sciences, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: Studies of deformed microstructures of peridotite in ultrahigh-pressure metamorphic belt are conducive to understand rheological property and deformation mechanism of mantle materials derived from plate boundary, then further to explore the effect of microstructures during geodynamic process of the deep subduction and exhumation. Deformed microstructures of garnet wehrlite from Bixiling, Dabie Mountains are systematically studied through optical microscope, electron probe, infrared spectroscopy, electron back scattered diffraction (EBSD) technique and the method of oxidation decoration. Results show that: (1) garnet wehrlite from Bixiling with strong shape preferred orientation (SPO), but only clinopyroxene with strong lattice preferred orientation (LPO) and olivine with weak lattice preferred orientation, which is obviously different from the common characteristics of mantle peridotite which exhibits the stronger fabric in olivine than in clinopyroxene and in addition, reflects that clinopyroxene deforms through dislocation creep but olivine through grain boundary sliding with the adjustment of dislocation; (2) certain content of structural water are contained in clinopyroxene and olivine of garnet wehrlite from Bixiling, clinopyroxene with $124 \times 10^{-6} \sim 274 \times 10^{-6}$ and olivine with $38 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$, which are higher than that in minerals of general peridotite in orogenic belt and may reflect the environment with high water content caused by the contamination of crust material; (3) significant dislocation microstructures developed in olivine and 230–600 MPa of differential stress calculated by the dislocation microstructures which is higher than the steady flow stress of normal upper mantle and indicates that our samples once have experienced the relative low-temperature deforming environment in subduction zone. Comprehensive study shows

基金项目: 国家自然科学基金项目 (Nos. 41174076, 41002068).

作者简介: 韦博 (1986—), 女, 硕士研究生, 构造地质学专业. E-mail: bow_1986@163.com

that the relatively special deforming microstructures in olivine and clinopyroxene from Bixiling attribute to the high pressure, low temperature, high differential stress and structural water content in ultrahigh-pressure metamorphic belt.

Key words: garnet wehrlite; lattice preferred orientation(LPO); dislocations; structural water; differential stress; microstructures.

地球内部的动力学和演化过程与其内部物质的流变性质息息相关,譬如地幔对流、山脉和高原隆升都与地球深部高温高压条件下矿物和岩石的流变性质相关,地球内部流变性质是现代构造地质学和地球动力学的研究重点之一.由于地球深部的不可及性,除少量火山岩包体样品之外,地球内部物质组成和物理化学性质很难被直接研究.目前对地球深部流变性质的认识和探讨主要通过地球物理深部探测和高温高压实验的方法.除此之外,超高压变质带也是地球深部研究的重要突破口之一.已有的科学研究表明,超高压变质带中出露的某些壳幔片段来自地下 90~120 km 深处 (Smith, 1984; Wang *et al.*, 1989; Xu *et al.*, 1992), 甚至 300 km 以下 (Van Roermund and Drury, 1998; Ye *et al.*, 2000). 因此,超高压变质是研究地球深部过程的重要天然实验室,其中超高压变质带中出露的橄榄岩是了解大陆俯冲带环境中地幔动力学过程的重要窗口.橄榄石是上地幔的主要组成矿物,橄榄石的组构被广泛认为与其产出环境有紧密联系.目前,高温高压实验中橄榄石组构的成因机制,特别是 B{[001][010]}类组构和 C{[001][100]}类组构的成因解释存在很大争议,还有待天然岩石研究的进一步对比和佐证 (Jung and Karato, 2001; Mainprice *et al.*, 2005; Jung *et al.*, 2006; Raterron *et al.*, 2007; Ohuchi *et al.*, 2011).

大别—苏鲁超高压造山带是世界上规模最大、保存最好的超高压变质带,它形成于中朝和扬子板块多期俯冲碰撞折返过程中 (许志琴等, 2003; 郑永飞, 2008). 碧溪岭岩体是大别造山带中最大的含柯石英石榴橄榄岩—榴辉岩超高压岩体,石榴橄榄岩中一系列指示高压环境的出溶体,如橄榄石中定向含钛铬磁铁矿出溶体及普通辉石中的易变辉石出溶体 (金振民等, 1998; Liu *et al.*, 2007), 表明碧溪岭石榴橄榄岩可能经历了 >300 km 的超高压变质作用.相比深入且较丰富的岩石学和地球化学研究,碧溪岭石榴异剥橄榄岩的变形显微构造研究较少,研究程度较低.宋衍茹等 (2007) 和焦述强等 (1999) 采用费氏台初步研究了橄榄岩中橄榄石和单斜辉石组构;韩勇等 (2009) 采用透射电镜观察了橄榄岩中橄榄石的位错,据此推测了样品的变形历史和机制.碧溪岭橄榄岩中各矿物的结构水含量研究也是一个空

白.本文采用更可靠、先进的观测手段对碧溪岭石榴橄榄岩中各矿物的显微组构、结构水含量及橄榄石中的位错显微构造进行了系统研究.

1 碧溪岭橄榄岩岩石学特征

碧溪岭岩体以榴辉岩为主,几十条条带状或透镜状的超镁铁质岩 (包括石榴二辉橄榄岩、石榴异剥橄榄岩、石榴橄榄二辉岩) 分布于碧溪岭榴辉岩体之中,呈 NE 分布,长一般几米到几十米,宽约 1~5 m.碧溪岭岩体中的石榴橄榄岩属于壳源寄主橄榄岩,是在俯冲前被楔入大陆壳的超美铁质岩体.前人研究提出,它曾经历了 4 个阶段的作用:初始形成阶段、峰期超高压变质作用 ($T=800\sim 1\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$, $P=35\sim 60\text{ kbar}$)、麻粒岩相及角闪岩相退变质作用、绿片岩相退变质作用 (Zhang *et al.*, 1995; Zhang and Liou, 1998). 石榴异剥橄榄岩呈灰绿色,具块状构造和面理 (图 1a),主要由橄榄石、单斜辉石 (主要为透辉石)、石榴石、蛇纹石、蛇纹石化后残余的不透明矿物,还有少量包裹在石榴石和单斜辉石中的斜硅镁石组成.斜硅镁石在单偏光镜下为红褐色且颗粒较小 ($80\sim 150\text{ }\mu\text{m}$) (图 1c, 1d). 橄榄石为镁橄榄石,其牌号为 $\text{Fo}=84\sim 85$. 单斜辉石为透辉石, $\text{Di}=69\sim 75$. 石榴石以镁铝榴石为主, $\text{Pyr}=55\sim 57$ (表 1). 样品发生了蛇纹石化,其中, BXL-2 的蛇纹石化较轻微 (图 1b), 仅少量 (10% 左右) 橄榄石被蛇纹石化. 不同样品中矿物含量不同,在样品 BXL-1、BXL-10、BXL-14 中,橄榄石占 5%~10%,单斜辉石占 24%~33%,石榴石占 21%~30%,蛇纹石占 15%~20%,铁质占 10%~15%,斜硅镁石少于 1%;而在 BXL-2 中,橄榄石占 40%,单斜辉石占 17%,石榴石占 21%,蛇纹石占 10%,铁质占 11%,斜硅镁石少于 1%. 橄榄石被蛇纹石切割为若干部分,正交镜下它们的干涉色及消光一致,且颗粒间显示出耦合性 (图 1e, 1f); 橄榄石颗粒周边分布着大量磁铁矿,为蛇纹石化作用之后的残余 (图 1c); 蛇纹石在单偏光镜下为正低突起,无色,正交镜下为一级灰干涉色,呈长片状,波状消光,且与橄榄石及单斜辉石沿同一方向平行分布 (图 1f). 单斜辉石中包裹有小粒单斜辉石,同一单斜辉石在正交镜下有波状消光

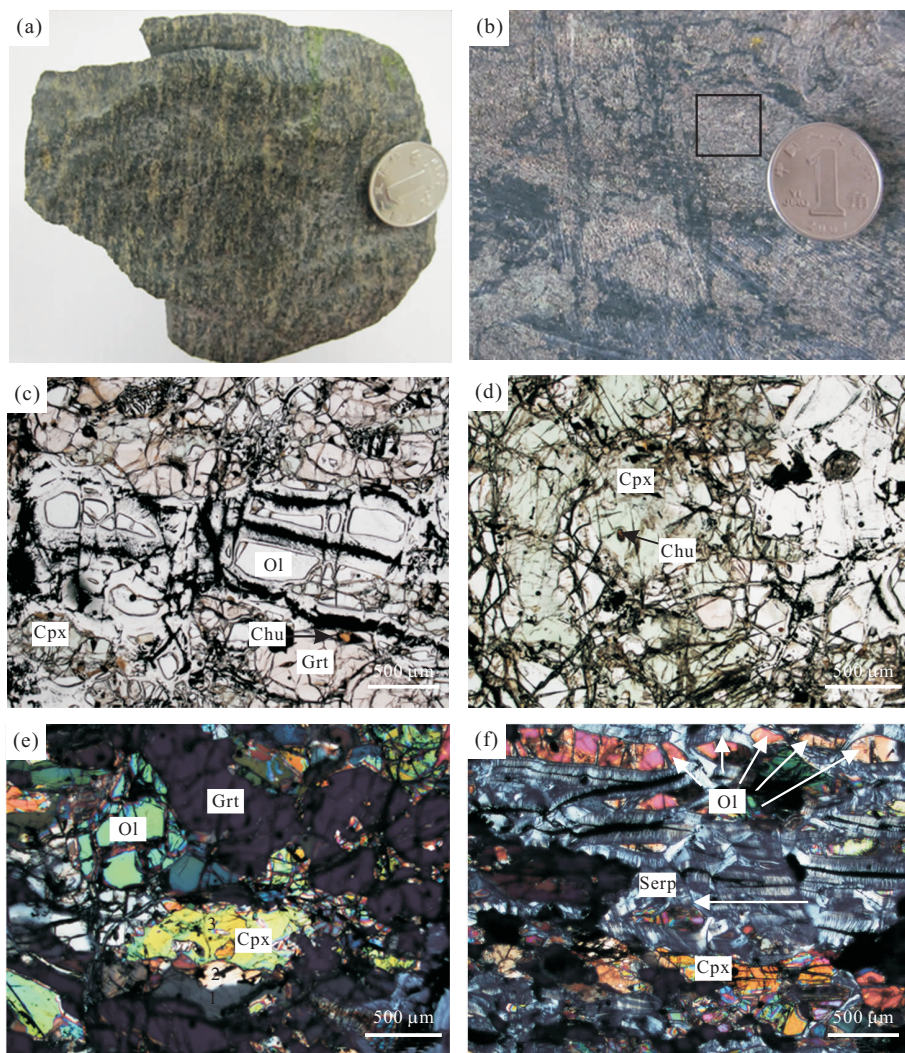


图1 碧溪岭石榴异剥橄榄岩岩石学特征

Fig.1 Petrographic characteristics of the garnet wehrlite from Bixiling

a.样品 BXL-1 手标本,显示面理和蛇纹石化作用;b.样品 BXL-2 标本,黑色方框中为蛇纹石化较轻微区域;c.被蛇纹石隔离成孤岛状的橄榄石和石榴石中的钛斜硅镁石包裹体;d.单斜辉石和其中的钛斜硅镁石包裹体;e.发生了亚颗粒化的单斜辉石;f.样品 BXL-10 中显示强形状优选方位的单斜辉石和橄榄石,同一橄榄石被蛇纹石切割为若干小颗粒;Ol,橄榄石;Cpx,单斜辉石;Grt,石榴石;Serp,蛇纹石;Chu,钛斜硅镁石

(图 1e).橄榄石、单斜辉石及石榴石的粒状集合体在垂直面理(S)和平行线理(L)方向上显示有较好的形状优选方位(图 1f).由于橄榄石的蛇纹石化现象不均一,使得橄榄石颗粒粒度变化较大,长轴约 0.3~1.2 mm,纵横比 2:1~3:1;辉石的形状优选方位程度最高,长轴约 1.1~2.6 mm,纵横比为 3:1~5:1;石榴石多呈聚集体产出,单个颗粒直径约 0.1~0.3 mm.

2 样品制备及分析方法

本文分析的样品(BXL-1、BXL-2、BXL-10、BXL-14)为蛇纹石化的石榴异剥橄榄岩.为了研究

样品的显微构造特征,将变形样品沿 XZ 方向(即平行线理,垂直面理)切开,双面抛光,得到 30 μm 厚的定向薄片.位错显微构造的研究采用氧化缀饰法,其基本原理是:橄榄石中沿着位错分布的 FeO 在样品加温至 900 °C 的过程中被氧化,生成棕红色赤铁矿或磁铁矿,缀饰了位错,使其更易被观察(金振民等,1991).样品制备方法是:将样品单面抛光,置于高温炉中,逐渐加热至 850~900 °C,1 h 之后将其取出,待自然冷却之后制成光学薄片,再采用光学显微镜和扫描电镜观察位错.结构水红外光谱分析的样品是磨制成厚度为 0.15~0.30 mm 的薄片,置于丙酮中浸泡>24 h,去除树脂胶,确保样品与载玻片分离,用无水乙醇及清水将样品清洗干净后再置于

表 1 碧溪岭石榴异剥橄榄岩中主要矿物化学成分平均值(%)

Table 1 The averaged chemical composition of major constituent minerals in the garnet wehrlite from Bixiling

样品号	矿物	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	总量	
BXL-1	Ol	39.906	0.031	0.034	0.001	13.895	0.057	45.690	0.005	0.005	0.008	99.632	Fo=85 Di=75 Pyr=57
	Cpx	54.665	0.050	1.977	0.735	5.601	0.031	14.082	18.915	3.314	0.001	99.370	
	Grt	39.686	0.056	21.388	1.208	17.672	0.550	15.084	3.863	0.015	0.004	99.526	
	Mt	0.081	0.833	1.332	5.210	84.587	0.180	0.392	0.000	0.012	0.005	92.633	
	Serp	42.730	0.031	0.832	0.001	3.298	0.006	37.939	0.045	0.011	0.003	84.895	
BXL-10	Ol	40.109	0.031	0.035	0.002	13.995	0.063	45.453	0.002	0.012	0.010	99.712	Fo=84 Di=69 Phy=55
	Cpx	49.160	0.148	8.834	0.410	6.613	0.078	19.791	10.262	2.188	0.387	97.420	
	Grt	39.760	0.054	20.849	1.601	17.960	0.607	14.513	4.168	0.023	0.011	99.545	
	Mt	0.082	0.905	1.665	6.152	82.900	0.124	0.791	0.000	0.017	0.004	92.640	
	Serp	43.172	0.029	0.801	0.002	3.311	0.019	38.107	0.036	0.022	0.009	85.507	
BXL-14	Ol	39.818	0.031	0.023	0.001	14.715	0.062	45.077	0.005	0.001	0.001	99.733	Fo=84 Di=69 Pyr=55
	Cpx	54.960	0.061	2.696	0.841	6.070	0.032	12.937	17.775	4.024	0.036	99.434	
	Grt	39.585	0.057	21.581	1.073	18.038	0.631	14.553	3.980	0.017	0.009	99.524	
	Mt	0.081	0.816	1.213	5.234	84.472	0.076	0.752	0.000	0.016	0.004	92.664	
	Serp	43.268	0.033	0.830	0.001	2.782	0.003	38.283	0.049	0.011	0.009	85.267	
	Chu	37.537	4.119	0.057	0.041	14.296	0.071	43.578	0.015	0.056	0.026	99.796	

注:样品中各矿物的的电子探针成分分析(%);Fo.橄榄石镁值, $Mg^{\#}=100\times Mg/(Mg+Fe)$;Di.单斜辉石中透辉石成分, $Di=100\times [Ca-(Al-Na-K+Fe^{3+})/2]$;Pyr.石榴石镁铝质成分, $Pyr=100\times Mg/(Fe^{2+}+Ca+Mn+Mg)$;Ol.橄榄石;Cpx.单斜辉石;Grt.石榴石;Mt.磁铁矿(Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 同时存在);Serp.蛇纹石;Chu.钛斜硅镁石.测试单位为中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室电子探针实验室,仪器型号为JXA-8100.

90 ℃的烘箱中,干燥至少 12 h 以除去样品表面和裂隙中的吸附水,将样品置于红外光谱仪下,尽量选择透明、未发生蚀变且无裂隙和包裹体的颗粒中间部位进行分析.

本研究的所有分析测试工作是在中国地质大学(武汉)地质过程与矿产资源国家重点实验室(GPMR)完成的.组构测量采用的电子背散射衍射(EBSD)系统为丹麦 HKL 公司生产的 Nordlys-II & Channel 5.0 型号仪器,在 FEI Quanta 450 场发射到扫描电镜中进行分析,测试条件为 20 kV 加速电压,25 mm 左右的工作距离,样品倾斜 70°,有效束流~6 nA.测试采用人机交互模式对 4 块样品的定向薄片中的单斜辉石及橄榄石的晶格优选方位进行测量.红外光谱测量使用美国 ThermoFisher 科技公司生产的 Nicolet Continuum Microscope & Nicolet 6700 红外光谱仪,使用 MCT(用液氮冷却)探头,收集和处理光谱使用 OMNIC 8.0 软件,波数测定范围为 7 800 ~ 600 cm^{-1} ,分辨率高于 0.09 cm^{-1} .测试使用非偏振光,选择 25 $\mu m\times 25 \mu m$ 的束斑,采集波数范围为 1 000~4 000 cm^{-1} ,测试室温条件为 22 ℃,相对湿度 44%.每分析一次样品后再扫描背景以扣除本底,样品及背景的扫描次数为 256 次,分辨率设置为 4 cm^{-1} .测试过程中,对同一样品内每种矿物采用了多颗粒(10~30)测量,并用其含水量的平均值作为该样品中此矿物含

水量.考虑到高温高压条件下的矿物组构组合和体积含量,本研究中组构和含水量只分析了橄榄石和单斜辉石这两种矿物.

矿物含水量计算采用 Paterson (1982)总结的 Beer-Lamber 定律,以下为修改后的 Beer-Lamber 定律的积分形式:

$$C=\frac{1}{I\gamma}\int_2^1K(v)dv$$

式中: C 代表结构水的含量($\times 10^{-6}$); I 为积分摩尔或积分比吸收系数,橄榄石为 $5.319\times 10^6\text{ cm}^{-2}$ (Bell *et al.*, 2003)、单斜辉石为 $7.09\times 10^6\text{ cm}^{-2}$ (Bell *et al.*, 1995); $K(v)$ 是单位厚度的吸收强度与频率(v)的关系.对于样品中各矿物厚度,因为磨制薄片时尽量使样品各部厚度均匀,因此,取多点测量的平均值;由于 NAMs 中 OH 吸收峰较为复杂,所以采用积分吸收强度 $\int_2^1K(v)dv$ 来代替线性吸收量 A ; γ 是 Paterson(1982)引入以解释 OH 含量沿不同极化方向变化的方向因子,由于采用非偏振光测量,橄榄石和单斜辉石的方向因子为 1/3.

3 橄榄岩组构特征

样品中单斜辉石和橄榄石的组构测量结果如图 2 所示,所有样品中单斜辉石的晶格优选方位基本

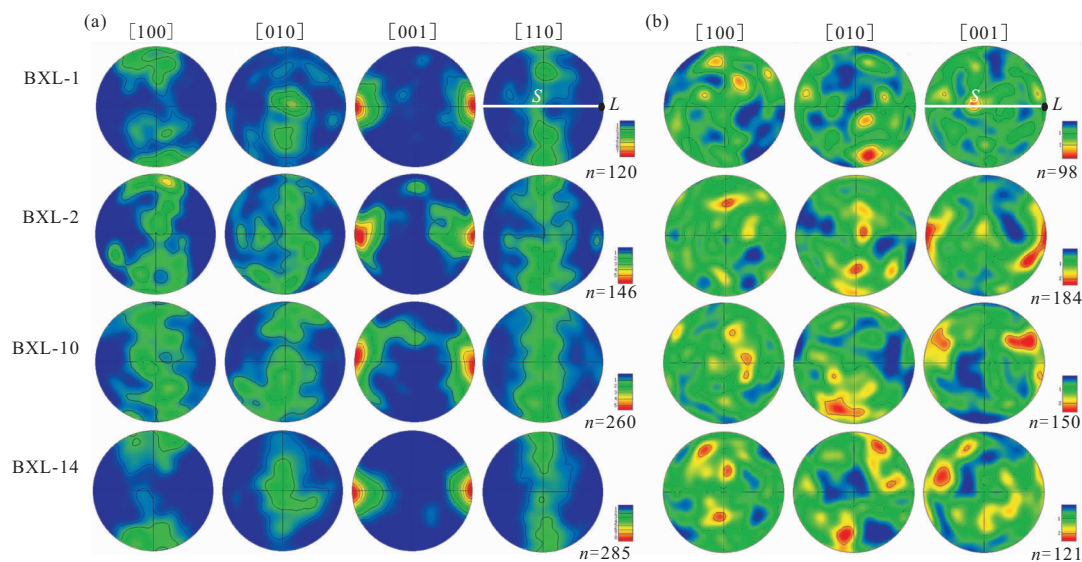


图 2 碧溪岭石榴异剥橄榄岩中单斜辉石(a)和橄榄石(b)的晶格优选方位
Fig.2 Lattice preferred orientation of clinopyroxene (a) and olivine (b) in the Bixiling garnet wehrlite
n 表示 EBSD 采集的矿物颗粒点数;彩色标尺表示数据点密度;L:线理(东西向);S:面理(东西向垂面);等面积下半球投影

相同,即[001]轴沿线理方向形成强极密,[110]轴则沿垂直线理方向形成大圆环带;而[100]和[010]轴优选方位存在少许差异,样品 BXL-2 和 BXL-10 的 [100]和[010]轴沿垂直线理方向形成大圆环带,而 BXL-1 和 BXL-14 的(100)面平行面理面,[010]轴近平行于 Y 轴(⊥L, //S)(图 2a)。相比单斜辉石,橄榄石组构较弱,并未形成显著组构类型,相对而言,样品 BXL-2、BXL-10、BXL-14 中橄榄石的[001]轴有在线理方向上形成弱极密的趋势(图 2b)。

4 橄榄岩含水量

红外分析结果显示,单斜辉石和橄榄石皆在 OH 的红外吸收域内出现了典型的特征谱峰,其代表性红外谱线见图 3。图 3a 显示,单斜辉石在 3 440 cm⁻¹、3 532 cm⁻¹、3 610 cm⁻¹、3 623 cm⁻¹处出现红外谱峰且最大谱峰位于 3 623 cm⁻¹附近,其谱峰大致可分为 3 组:3 610~3 623 cm⁻¹、3 525~3 532 cm⁻¹和 3 440 cm⁻¹。橄榄石谱峰主要位于 3 450~3 640 cm⁻¹的范围内,且最强红外谱峰出现在 3 571 cm⁻¹附近,而其他谱峰位于 3 482 cm⁻¹、3 524 cm⁻¹、3 596 cm⁻¹、3 639 cm⁻¹(图 3b)。

碧溪岭石榴异剥橄榄岩样品中各矿物含水量计算结果见表 2。各样品(BXL-1, BXL-2, BXL-10, BXL-14)中单斜辉石结构水含量均值分别为 236×10⁻⁶、124×10⁻⁶、274×10⁻⁶、174×10⁻⁶;橄榄石结构水含

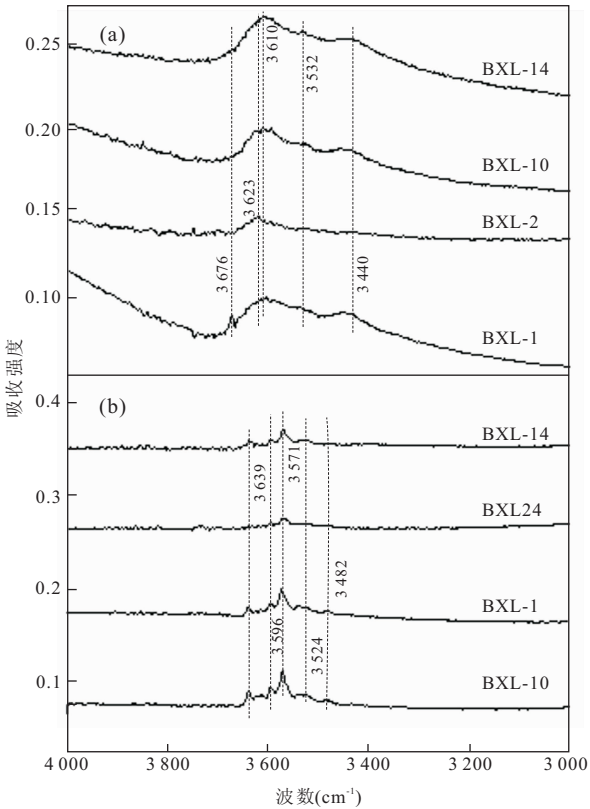


图 3 碧溪岭石榴异剥橄榄岩中单斜辉石(a)和橄榄石(b)的代表性红外吸收光谱谱线
Fig.3 Representative IR spectra of clinopyroxene (a) and olivine (b) in the garnet wehrlite from Bixiling

量少于单斜辉石,各样品中橄榄石结构水含量均值分别为 70×10⁻⁶、38×10⁻⁶、80×10⁻⁶、54×10⁻⁶。

表 2 碧溪岭石榴异剥橄榄岩中橄榄石和单斜辉石的含水量
Table 2 Water contents of olivine and clinopyroxene in the garnet wehrlite from Bixiling

样品号	矿物种类	颗粒数	含水量(10^{-6})		
			最大值	最小值	平均值
BXL-1	Ol	13	196	11	70
	Cpx	24	501	31	236
BXL-2	Ol	15	66	17	38
	Cpx	13	369	30	124
BXL-10	Ol	27	136	34	80
	Cpx	25	539	92	274
BXL-14	Ol	12	127	16	54
	Cpx	14	407	59	174

注:Ol.橄榄石;Cpx.单斜辉石.

5 橄榄石位错显微构造及差异应力估算

氧化缀饰位错研究结果显示,橄榄石中发育有丰富的位错显微构造,包括自由位错、位错壁、位错弓弯、位错网和位错环.样品中位错特征的描述如下:(1)自由位错:自由位错是尚未被编进位错壁中的单个游离位错.SEM下自由位错呈点状随机分布且不同颗粒间和同一颗粒内部的位错密度分布不均匀(图 4a, 4b),说明样品中橄榄石局部受力不均.经统计得出,自由位错密度为 $5.9 \times 10^6 \sim 1.0 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$,平均值为 $2.9 \times 10^7 \text{ cm}^{-2}$.(2)位错壁:样品中位错壁非常发育,位错壁是自由位错在滑移面上经滑移和攀移排列起来的一种低能量位错组态,它是晶体中的一种面缺陷.样品中的位错壁多由点状位错排列而成(图 4c),位错壁间距 $0.27 \sim 13.85 \mu\text{m}$.(3)位错弓弯:在样品中较为发育,位错弓弯是自由位错在某一平面上滑动受阻而形成的弓状位错构造,位错弓弯一般开始形成于 800°C 以上.SEM下观察到橄榄石位错弓弯方向一致(图 4d).(4)位错网:位错网是由两组螺型位错通过交叉滑移而形成的面状网络,它是一种位错扭转壁.样品中的位错网多呈矩形(图 4e).(5)位错环:是样品中较为发育的一种位错组态.样品中的位错环多为非活动型位错环,是由位错偶极子破裂而成(图 4f).

橄榄石样品中位错壁尤为发育,本文主要选取蛇纹石化较轻微的 BXL-2 样品中的位错壁间距初步估算差异应力,位错壁间距参数取对数后发现其近似服从正态分布(图 5),反映了橄榄石的位错壁间距存在最佳取值(几何平均值)(金振民等, 1989;王永锋等,2005).样品中橄榄石的位错壁间距算术

平均值为 $5.19 \mu\text{m}$,几何平均值 $4.36 \mu\text{m}$.差异应力的计算结果见表 3,取位错壁间距几何平均值计算差异应力,同时以算术平均值计算结果作为参考,样品的差异流动应力为:230~600 MPa,这超出了正常上地幔稳态流变应力值的范围($10 \sim 50 \text{ MPa}$)(金振民等,1989).

6 讨论

6.1 橄榄石的变形机制

橄榄石 A{[100](010)}类组构常见于蛇绿岩中的橄榄岩和火山岩中的橄榄岩包体中(Ben and Mainprice,1998);B{[001](010)}类组构出现在高含水量和高应力的俯冲带上地幔橄榄岩中(Mizukami *et al.*, 2004);C{[001](100)}类组构主要在造山带橄榄岩,如 Aple Arami 橄榄岩(Möckel,1969)、Cima di Gagnone 橄榄岩(Frese *et al.*, 2003)中发现;D{[100](0kl)}类组构形成于高剪切应变和低含水量环境(Boullier and Nicolas,1975);而 E{[100](001)}类组构形成于中等含水量和较低应力环境(Mercier,1985;Katayama *et al.*, 2004;Sawaguchi, 2004).高温简单剪切变形实验表明差异应力(Jung *et al.*, 2006)、压力(Mainprice *et al.*, 2005;Raterron *et al.*, 2007, 2009)、温度(Carter and Avé Lallemant, 1970;Katayama and Karato, 2006;Skemer *et al.*, 2006)、含水量(Jung and Karato, 2001;Jung *et al.*, 2006)和部分熔融(Karato, 1986;Hirth and Kohlstedt, 1995a, 1995b; Holtzman *et al.*, 2003;Scott and Kohlstedt, 2006)对橄榄石组构发育均具有重要影响,其中 A 类组构主要形成于低压、低应力和低含水量条件下,而 B、C 类组构则出现于高压、高应力或高含水量的构造环境中(Mainprice *et al.*, 2005; Raterron *et al.*, 2007; Ohuchi *et al.*, 2011),橄榄石中存在的少量结构水可以显著减弱其蠕变强度(Mackwell *et al.*, 1985;Mei and Kohlstedt, 2000a, 2000b;Hirth and Kohlstedt, 2003).

本文研究结果表明:(1)橄榄石具有一定的形态优选方位,说明橄榄石发生了塑形变形;(2)橄榄石内部发育有相当丰富的位错(包括自由位错、位错弓弯、位错环及大量的位错壁),表明位错蠕变在橄榄石中起到了调节塑形变形的作用;(3)橄榄石的变形优选方位较弱,说明位错蠕变可能不是橄榄石发生塑性变形的主导变形机制.一般来说,矿物和岩石发生塑性变形的机制主要有位错蠕变、扩散蠕变和颗粒边界滑移(Poirier, 1985;胡玲等, 2009).位错蠕

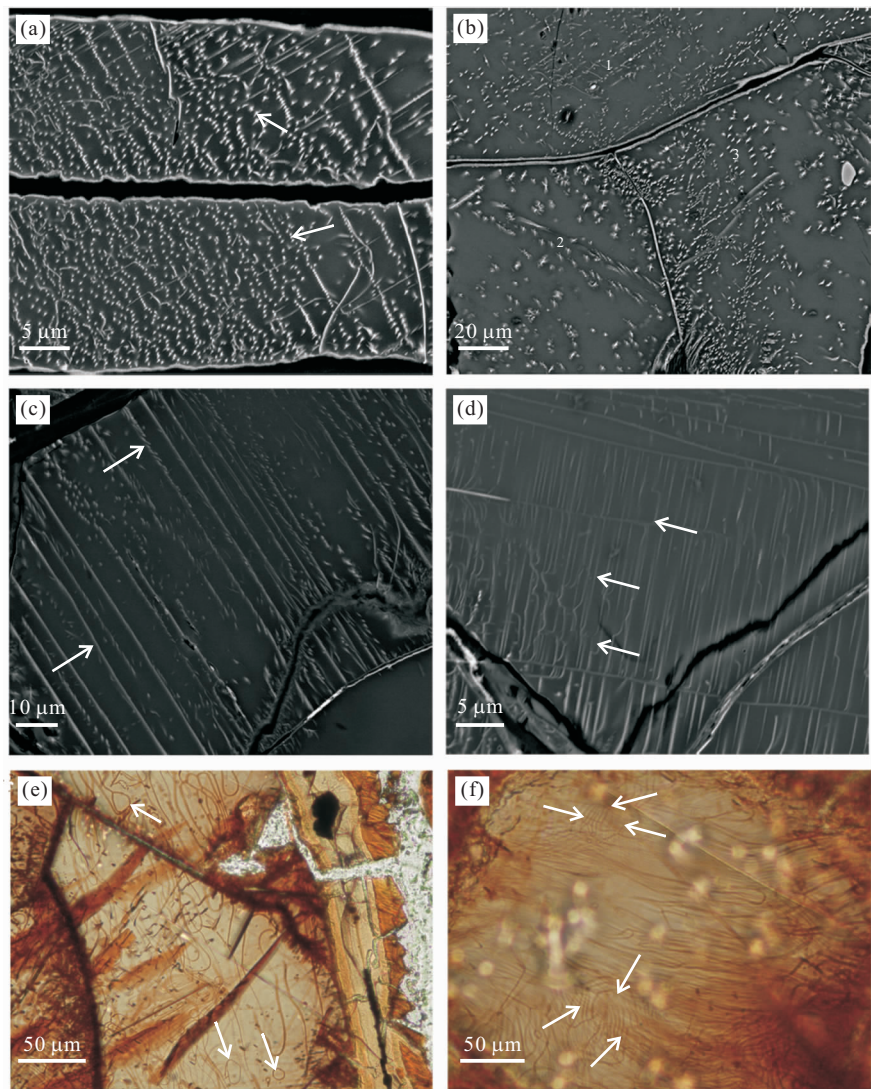


图 4 碧溪岭石榴异剥橄榄岩中橄榄石位错的背散射(a~d)及透射光(e~f)图像

Fig.4 Backscattered electron (a~d) and optical (e~f) transmission images of dislocation structures in olivine from the Bixiling garnet wehrlite

a. 自由位错,呈点状,不同颗粒间分布不均匀;b.自由位错,呈点状,同一颗粒内分布不均匀;c.位错壁;d.位错弓弯,弓弯方向相同;e.位错环;f.位错网络,呈矩形网

表 3 碧溪岭石榴异剥橄榄岩中橄榄石差异应力计算

Table 3 Calculations of differential stress on olivine in the garnet wehrlite from Bixiling

取值	位错壁间距 $d(\mu\text{m})$	差异应力 $\sigma(\text{MPa})$			
		$\sigma=1\,000/d$	$\sigma=(d/280)^{-1/0.67}$	$\sigma=100\times(d/15)^{-1/0.69}$	$\sigma=1\,462.5/d$
几何平均值	4.36	230 ± 17	499 ± 57	600 ± 66	336 ± 25
算术平均值	5.19	193 ± 12	384 ± 38	465 ± 44	282 ± 18
计算公式来源		Durhanm <i>et al.</i> , 1977	Karato <i>et al.</i> , 1980	Ross <i>et al.</i> , 1980	Toriumi, 1979

变一般会形成强晶格优选方位,而扩散蠕变和颗粒边界滑移不形成强晶格优选方位(王永锋和金振民, 2001; Hansen *et al.*, 2011). 当然,早期的强变形优选方位也可以被后期的变形和变质作用干扰而变弱.碧溪岭石榴橄榄岩中辉石的强变形组构排除了

后期变形和变质作用干扰形成弱橄榄石组构的可能性.蛇纹石化过程只是将大颗粒橄榄石变成孤岛状橄榄石,但并没有影响橄榄岩中橄榄石先存晶体方位,说明橄榄石的弱晶格优选方位形成于蛇纹石化之前的高温高压条件下,这就排除了位错蠕变作为

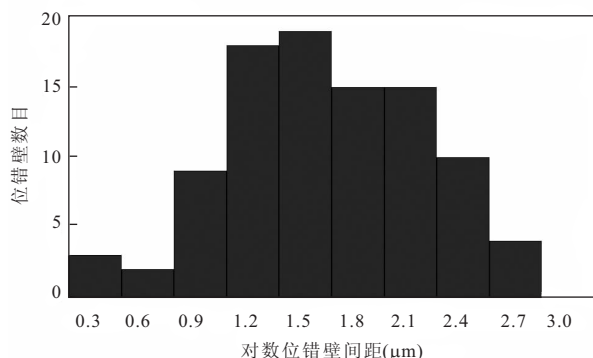


图 5 碧溪岭石榴异剥橄榄岩中橄榄石对数位错壁间距频数分布

Fig.5 Representative histograms displaying the number of dislocation walls versus logarithm of the wall spacing in olivine of the garnet wehrlite from Bixiling

橄榄石发生塑性变形的的主导变形机制。另外,橄榄石中发育的位错显微构造反过来也证明扩散蠕变对塑性变形的作用可能有限,这也与碧溪岭橄榄岩相对较低的峰期变质温度(800~1 000 °C)(Zhang *et al.*, 1995; Zhang and Liou 1998)是相一致的。因此,笔者认为导致碧溪岭橄榄石弱组构的变形机制可能是位错辅助颗粒边界滑移过程。实验研究表明,通过位错辅助颗粒边界滑移过程变形的橄榄石中可以形成弱晶格优选方位(Hansen *et al.*, 2011),与本文天然研究观察结果接近。

6.2 橄榄石与单斜辉石组构强度对比及其形成机制和意义

在常见的上地幔包体型橄榄岩中,通常橄榄石和斜方辉石发育较强的变形优选方位,而单斜辉石发育较弱的变形优选方位,反映橄榄岩在上地幔高温条件下所有的矿物都经历了位错蠕变变形,一般这也是判断和分析上地幔地震波速各向异性起源的重要依据(Karato *et al.*, 2008; Tommasi *et al.*, 2008; Jung, 2009; Michibayashi *et al.*, 2012)。高温高压实验研究表明,橄榄石相对单斜辉石具有较低的流变强度,因此上地幔高温条件下,橄榄石相对单斜辉石具有强变形晶格优选方位(Raterron and Jaoul, 1991; Hirth and Kohlstedt, 2003)。与之形成显著对比的是,碧溪岭石榴异剥橄榄岩中单斜辉石的组构要远比橄榄石的组构强。样品 BXL-1 和 BXL-14 中单斜辉石的[001]轴平行线理且[100]轴垂直面理,反映了以(100)[001]为主的位错蠕变变形机制。单斜辉石和橄榄石组构强度相对正常地幔橄榄岩组构发生了反转,本文认为更多的应该是反

映了两者变形机制的不一致,即橄榄石主要通过位错调节的颗粒边界滑移变形,而单斜辉石主要通过位错蠕变变形。在这种情况下,单斜辉石将取代橄榄石主导橄榄岩的地震各向异性特征。

前人岩石学研究成果表明,碧溪岭橄榄岩的峰期变质压力为 3.5~6.0 GPa (Zhang *et al.*, 1995)甚至可能更高(金振民等, 1998; Liu *et al.*, 2007),高压是橄榄石变形机制的决定因素之一。另外,红外光谱的研究结果表明,碧溪岭石榴橄榄岩中橄榄石和单斜辉石均具有一定量的结构水,其中橄榄石的结构水含量($38 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$)要明显多于常见造山带橄榄岩中橄榄石的结构水含量($13 \times 10^{-6} \pm 13 \times 10^{-6}$)(Wang, 2010),属于相对富水的橄榄石。高结构水含量可以有效促进橄榄石在造山带环境中相对低温条件下位错的发育和运移,从而降低橄榄石的力学强度并形成塑性应变(Mackwell *et al.*, 1985; Mei and Kohlstedt, 2000a, 2000b; Hirth and Kohlstedt, 2003; Chen *et al.*, 2006)。碧溪岭橄榄石中的相对高结构水含量可能反映了其与低结构水造山带橄榄岩的不同起源。Zhang and Liou(1998)根据全岩地球化学特征将大别—苏鲁造山带的橄榄岩分成两类:A类是从地幔楔中直接被超高压地体折返带来地表,发生过部分熔融的、以地幔特征为主的橄榄岩;B类是经历了相对完整的俯冲和折返过程的、受表壳岩石混染程度较高的橄榄岩。碧溪岭橄榄石属于B类橄榄岩,橄榄石的镁值较低,估计是在受表壳岩石混染过程中导致了含水量的升高和地球化学元素的异常。俯冲带中的相对低温环境(800~1 000 °C)可能是造成橄榄石中差异应力(230~600 °C MPa)较高的主因。综上所述,高压、低温、高差异应力和高结构水含量构成了形成碧溪岭相对独特的橄榄石、单斜辉石变形显微构造的构造和化学环境背景。

7 结论

通过对大别碧溪岭超高压石榴异剥橄榄岩光学显微构造、组构、含水量、位错的分析,本文主要得出以下几点认识和结论:

(1)光学显微构造研究表明,石榴橄榄岩中单斜辉石、石榴石的粒状集合体和橄榄石均发育较强的形态优选方位,其中辉石的形态优选方位程度最高,晶内塑性变形特征最为显著。矿物化学成分研究表明橄榄石成分受到了地壳物质的混染。

(2)氧化缀饰法研究表明,橄榄石中含有丰富的位错组态类型,对应的高差异应力(230~600 MPa)显示位错在橄榄石变形过程中起到了一定的调节作用,同时反映了俯冲带的低温变形环境。

(3)组构研究表明,样品中单斜辉石发育强晶格优选方位而橄榄石组构较弱,并未形成显著组构类型。可能反映了两者的变形机制不同,单斜辉石通过位错蠕变变形而橄榄石通过位错调节的颗粒边界滑移机制变形。

(4)含水量研究结果显示,单斜辉石中含有 $124 \times 10^{-6} \sim 274 \times 10^{-6}$ 结构水,橄榄石中含有 $38 \times 10^{-6} \sim 80 \times 10^{-6}$ 结构水,高于常见造山带橄榄岩的含水量,可能反映了地壳物质混染导致的高含水量变形环境。

综上所述,本文提出大别碧溪岭石榴异剥橄榄岩的变形显微构造形成于超高压变质带中的高压、低温、高差异应力和高结构水的构造环境和背景。

致谢:感谢刘祥文教授、吴耀副教授、徐海军副教授、史锋博士、张艳飞博士在样品制备、薄片观察、实验测试、数据处理及成文过程中给予的帮助及提出的宝贵意见。

References

Bell, D. R., Ihinger, P. D., Rossman, G. R., 1995. Quantitative Analysis of Trace OH in Garnet and Pyroxenes. *American Mineralogist*, 80(5): 465—474. doi: 10.1029/2001JB000679

Bell, D. R., Rossman, G. R., Maldener, J., et al., 2003. Hydroxide in Olivine: A Quantitative Determination of the Absolute Amount and Calibration of the IR Spectrum. *Journal of Geophysical Research*, 108(B2): 2105. doi: 10.1029/2001JB000679

Ben, I. W., Mainprice, D., 1998. An Olivine Fabric Database: An Overview of Upper Mantle Fabrics and Seismic Anisotropy. *Tectonophysics*, 269(1—2): 145—157. doi: 10.1016/S0040—1951(98)00141—3

Boullier, A. M., Nicolas, A., 1975. Classification of Textures and Fabrics of Peridotite Xenoliths from South African Kimberlites. *Physics and Chemistry of the Earth*, 9: 467—475. doi: 10.1016/0079—1946(75)90034—8

Carter, N. L., Avé Lallemant, H. G., 1970. High Temperature Flow of Dunite and Peridotite. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 81(8): 2181—2202. doi: 10.1130/0016—7606(1970)81[2181:HTFODA]2.0.CO;2

Chen, S., Hiraga, T., Kohlstedt, D. L., 2006. Water Weakening of Clinopyroxene in the Dislocation Creep Regime.

Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 111(B8): 1—14. doi: 10.1029/2005JB003885

Durham, W. B., Goetze, C., Black, B., 1977. Plastic Flow of Oriented Single Crystals of Olivine 2, Observation and Interpretation of the Dislocation Structure. *Journal of Geophysical Research*, 82(36): 5755—5770. doi: 10.1029/JB082i036p05755

Frese, K., Trommsdorf, V., Kunze, K., 2003. Olivine [100] Normal to Foliation: Lattice Preferred Orientation in Prograde Garnet Peridotite Formed at High H₂O Activity, Cima di Gagnone (Central Alps). *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 145(1): 75—86. doi: 10.1007/s00410—002—0434—x

Han, Y., Lu, F. X., Yang, S. W., 2009. Microstructure Characteristics of Olivines from Nanshanlong Peridotite and Bixiling Peridotite, Dabie Mountains. *Journal of Chinese Electron Microscopy Society*, 28(4): 371—379 (in Chinese with English abstract).

Hansen, L. N., Zimmerman, M. E., Kohlstedt, D. K., 2011. Grain Boundary Sliding in San Carlos Olivine: Flow Law Parameters and Crystallographic Preferred Orientation. *Journal of Geophysical Research*, 116(B8): 1—16. doi: 10.1029/2011JE008220

Hirth, G., Kohlstedt, D., 2003. Rheology of the Upper Mantle and the Mantle Wedge: A View from the Experimentalists. *Geophys. Monogr. Ser.*, 138: 83—105. doi: 10.1029/138GM06

Hirth, G., Kohlstedt, D. L., 1995a. Experimental Constraints on the Dynamics of the Partially Molten Upper Mantle: Deformation in the Diffusion Creep Regime. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B2): 1981—2001. doi: 10.1029/94JB02128

Hirth, G., Kohlstedt, D. L., 1995b. Experimental Constraints on the Dynamics of the Partially Molten Upper Mantle: 2. Deformation in the Dislocation Creep Regime. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B8): 15441—15449. doi: 10.1029/95JB01292

Holtzman, B. K., Kohlstedt, D. L., Zimmerman, M. E., et al., 2003. Melt Segregation and Strain Partitioning: Implications for Seismic Anisotropy and Mantle Flow. *Science*, 301(5637): 1227—1230. doi: 10.1126/science.1087132

Hu, L., Liu, J. L., Ji, M., et al., 2009. Atlas of Identifying Microstructures Deformed. Geological Press, Beijing (in Chinese).

Jiao, S. Q., Wang, Q., Tan, Z. S., 1999. Rheological Research into Bixiling Ultrahigh-Pressure Peridotite in Dabie Mountains. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 24(6): 595—600 (in Chinese with

- English abstract).
- Jin, Z. M., Green II, H. W., Borch, R. S., 1989. Microstructures of Olivine and Flow Stresses in the Upper Mantle beneath Eastern China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 14 (Supl.): 69—79 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z. M., Green II, H. W., Chen, X. H., 1991. A Study of Dislocation in Olivine Using a Scanning Electron Microscope. *Acta Petrologica et Mineralogical*, 10 (1): 44—47 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z. M., Jin, S. Y., Gao, S., et al., 1998. Whether the Formation Depth of Ultrahigh-Pressure Rocks in Dabie were Limited in 100—150 km? Discovery of Needle Magnetite Containing Titanium and Chrome and the Consideration of its Dynamic Implication. *Chinese Science Bulletin*, 43 (1): 767—771 (in Chinese).
- Jung, H., 2009. Deformation Fabrics of Olivine in Val Malenco Peridotite Found in Italy and Implications for the Seismic Anisotropy in the Upper Mantle. *Lithos*, 109 (3—4): 341—349. doi: 10.1016/j.lithos.2008.06.007
- Jung, H., Karato, S., 2001. Water-Induced Fabric Transitions in Olivine. *Science*, 293 (5534): 1460—1463. doi: 10.1126/science.1062235
- Jung, H., Katayama, I., Jiang, Z., et al., 2006. Effect of Water and Stress on the Lattice Preferred Orientation of Olivine. *Tectonophysics*, 421: 1—22. doi: 10.1016/j.tecto.2006.02.011
- Karato, S., 1986. Does Partial Melting Reduce the Creep Strength of the Upper Mantle? *Nature*, 319: 309—310. doi: 10.1038/319309a0
- Karato, S., Jung, H., Katayama, I., et al., 2008. Geodynamic Significance of Seismic Anisotropy of the Upper Mantle: New Insights from Laboratory Studies. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 36: 59—95. doi: 10.1146/annurev.earth.36.031207.124120
- Karato, S., Toriumi, M., Fujii, T., 1980. Dynamic Recrystallization of Olivine Single Crystals during High-Temperature Creep. *Geophys. Res. Lett.*, 7 (9): 649—652. doi: 10.1029/GL007i009p00649
- Katayama, I., Jung, H., Karato, S., 2004. A New Type of Olivine Fabric from Deformation Experiments at Modest Water Content and Low Stress. *Geology*, 32 (12): 1045—1048. doi: 10.1130/G20805.1
- Katayama, I., Karato, S. I., 2006. Effect of Temperature on the B- to C-Type Olivine Fabric Transition and Implication for Flow Pattern in Subduction Zones. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 157 (1—2): 33—45. doi: 10.1016/j.pepi.2006.03.005
- Liu, X. W., Jin, Z. M., Green, H. W., 2007. Clinostatite Exsolution in Diopside Augite of Dabieshan: Garnet Peridotite from Depth of 300 km. *American Mineralogist*, 92 (4): 546—552. doi: 10.2138/am.2007.2232
- Mackwell, S. J., Kohlstedt, D. L., Paterson, M. S., 1985. The Role of Water in the Deformation of Olivine Single Crystals. *J. Geophys. Res.*, 90 (B13): 11319—11333. doi: 10.1029/JB090iB13p11319
- Mainprice, D., Tommasi, A., Couvy, H., et al., 2005. Pressure Sensitivity of Olivine Slip Systems and Seismic Anisotropy of Earth's Upper Mantle. *Nature*, 433: 731—733. doi: 10.1038/nature03266
- Mei, S., Kohlstedt, D. L., 2000a. Influence of Water on Plastic Deformation of Olivine Aggregates: 1. Diffusion Creep Regime. *Journal of Geophysical Research*, 105 (B9): 21457—21469. doi: 10.1029/2000JB900179
- Mei, S., Kohlstedt, D. L., 2000b. Influence of Water on Plastic Deformation of Olivine Aggregates: 2. Dislocation Creep Regime. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 105 (B9): 21471—21481. doi: 10.1029/2000JB900180
- Mercier, J. C. C., 1985. Olivine and Pyroxenes. In: Wenk, H. R., ed., Preferred Orientation in Deformed Metals and Rocks: An Introduction to Modern Texture Analysis. Academic Press, New York, 407—430.
- Michibayashi, K., Kusafuka, Y., Satsukawa, T., et al., 2012. Seismic Properties of Peridotite Xenoliths as a Clue to Imaging the Lithospheric Mantle beneath NE Tasmania, Australia. *Tectonophysics*, 522—523: 218—223. doi: 10.1016/j.tecto.2011.12.002
- Mizukami, T., Wallis, S. R., Yarnamoto, J., 2004. Natural Examples of Olivine Lattice Preferred Orientation Patterns with a Flow Normal a-Axis Maximum. *Nature*, 427: 432—436. doi: 10.1038/nature02179
- Möckel, J. R., 1969. Structural Petrology of the Garnet Peridotite of Alpe Arami (Ticino Switzerland). *Leidse Geol. Med.*, 42: 61—130.
- Ohuchi, T., Kawazoe, T., Nishihara, Y., et al., 2011. High Pressure and Temperature Fabric Transitions in Olivine and Variations in Upper Mantle Seismic Anisotropy. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 304 (1—2): 55—63. doi: 10.1016/j.epsl.2011.01.015
- Paterson, M. S., 1982. The Determination of Hydroxyl by Infrared Absorption in Quartz, Silicate Glasses and Similar Materials. *Bulletin de Mineral.*, 1: 20—29.
- Poirier, J. P., 1985. Creep of Crystals. Cambridge Univ. Press, New York.
- Raterron, P., Amiguet, E., Chen, J. H., et al., 2009. Experi-

- mental Deformation of Olivine Single Crystals at Mantle Pressures and Temperatures, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 172(1–2): 74–83. doi: 10.1016/j.pepi.2008.07.026
- Raterron, P., Chen, J., Li, L., et al., 2007. Pressure-Induced Slip System Transition in Forsterite: Single Crystal Rheological Properties at Mantle Pressure and Temperature. *American Mineralogist*, 92(8–9): 1436–1445. doi: 10.2138/am.2007.2474
- Raterron, P., Jaoul, O., 1991. High-Temperature Deformation of Diopside Single Crystal: 1. Mechanical Data. *J. Geophys. Res.*, 96(B9): 14277–14286. doi: 10.1029/91JB01205
- Ross, J. V., Avè-Lallemant, H. G., Carter, N. L., 1980. Stress Dependence of Recrystallized-Grain and Subgrain size in Olivine. *Tectonophysics*, 70(1–2): 39–61. doi: org/10.1016/0040-1951(80)90020-7
- Sawaguchi, T., 2004. Deformation History and Exhumation Process of the Horoman Peridotite Complex, Hokkaido, Japan. *Tectonophysics*, 379(1–4): 109–126. doi: 10.1016/j.tecto.2003.10.011
- Scott, T., Kohlstedt, D. L., 2006. The Effect of Large Melt Fraction on the Deformation Behavior of Peridotite. *Earth and Planetary Science Letters*, 246(3–4): 177–187. doi: 10.1016/j.epsl.2006.04.027
- Skemer, P., Katayama, I., Karato, S. I., 2006. Deformation Fabrics of the Cima di Gagnone Peridotite Massif, Central Alps, Switzerland: Evidence of Deformation at Low Temperatures in the Presence of Water. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 152(1): 43–51. doi: 10.1007/s00410-006-0093-4
- Smith, D. C., 1984. Coesite in Clinopyroxene in the Caledonides and its Implications for Geodynamics. *Nature*, 310: 641–644. doi: 10.1038/310641a0
- Song, Y. R., Jin, S. Y., Ye, K., 2007. Olivine Fabric in Garnet Iherzolite from Rongcheng and Bixiling of Sulu-Dabie Ultrahigh-Pressure (UHP) Metamorphic Belt, Eastern China. *Acta Petrologica Sinica*, 23(5): 1153–1159 (in Chinese with English abstract).
- Tommasi, A., Vauchez, A., Ionov, D. A., 2008. Deformation, Static Recrystallization, and Reactive Melt Transport in Shallow Subcontinental Mantle Xenoliths (Tok Cenozoic Volcanic Field, SE Siberia). *Earth Planet. Sci. Lett.*, 272(1–2): 65–77. doi: 10.1016/j.epsl.2008.04.020
- Toriumi, M., 1979. Relation between Dislocation Density and Subgrain Size in Naturally Deformed Olivine in Peridotite. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 68(2): 181–186. doi: 10.1007/BF00371899
- Van Roermund, H. L. M., Drury, M. R., 1998. Ultrahigh Pressure ($P > 6$ GPa) Garnet Peridotites in Western Norway: Exhumation of Mantle Rocks from > 185 km Depth. *Terra Nova*, 10(6): 295–301. doi: 10.1046/j.1365-3121.1998.00213.x
- Wang, Q., 2010. A Review of Water Contents and Ductile Deformation Mechanisms of Olivine: Implications for the Lithosphere-Asthenosphere Boundary of Continents. *Lithos*, 120(1–2): 30–41. doi: 10.1016/j.lithos.2010.05.010
- Wang, X., Liou, J. G., Mao, H. K., 1989. Coesite Bearing Eclogite from the Dabie Mountains in Central China. *Geology*, 17(12): 1085–1088. doi: 10.1130/0091-7613(1989)017<1085:CBEFTD>2.3.CO;2
- Wang, Y. F., Jin, Z. M., 2001. Diffusion Creep of Rocks and Its Implication. *Geological Science and Technology Information*, 20(4): 5–11 (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. F., Zheng, Y. F., Jin, Z. M., 2005. Microstructures and Rheology of Harzburgite from Dongqiao, Northern Tibet. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 30(1): 52–60 (in Chinese with English abstract).
- Xu, S., Su, W., Liu, Y. C., et al., 1992. Diamond from the Dabie Shan Metamorphic Rocks and Its Implication for Tectonic Setting. *Science*, 256(5053): 80–82. doi: 10.1126/science.256.5053.80
- Xu, Z. Q., Zhang, Z. M., Liu, F. L., et al., 2003. Exhumation Structure and Mechanism of the Sulu Ultrahigh-Pressure Metamorphic Belt, Central China. *Acta Geologica Sinica*, 77(4): 433–450 (in Chinese with English abstract).
- Ye, K., Cong, B., Ye, D., 2000. The Possible Subduction of Continental Material to Depths Greater than 200 km. *Nature*, 407: 734–736. doi: 10.1038/35037566
- Zhang, R. Y., Liou, J. G., 1998. Dual Origin of Garnet Peridotites of the Dabie-Sulu UHP Terrane, Eastern-Central China. *Episodes*, 21(4): 229–234.
- Zhang, R. Y., Liou, J. G., Cong, B. L., 1995. Talc-, Magnesite- and Ti-Clinohumite Bearing Ultrahigh-Pressure Meta-Mafic and Ultramafic Complex in the Dabie Mountains, China. *J. Petrology*, 36(4): 1011–1037. doi: 10.1093/petrology/36.4.1011
- Zheng, Y. F., 2008. Progress of Study on Ultrahigh-Pressure Metamorphism and Collision of Continents: A Case Study from Dabie-Sulu Orogenic Belt. *Chinese Science Bulletin*, 53(18): 2129–2152 (in Chinese).

附中文参考文献

韩勇,路凤香,杨善武,2009.大别山碧溪岭及南山岭两岩体中橄榄石的显微构造特征.电子显微学报,28(4):371—379.

胡玲,刘俊来,纪沫,等,2009.变形显微构造识别图册.北京:地质出版社.

焦述强,王强,谭子珊,1999.碧溪岭超高压石榴橄榄岩的流变学研究.地球科学——中国地质大学学报,24(6):595—600.

金振民,Green,H.W.,Borch,R.S.,1989.橄榄石显微构造和中国东部上地幔流动应力.地球科学——中国地质大学学报,14(S1):69—79.

金振民,GreenII,H.W.,Chen,X.H.,1991.橄榄石位错构造的扫描电子显微镜研究.岩石矿物学杂志,10(1):43—49.

金振民,金淑燕,高山,等,1998.大别山超高压岩石形成深度局限于 100~150 km 吗?——针状含钛铬磁铁矿的发现及动力学意义的思考.科学通报,43(1):767—771.

宋衍茹,金淑燕,叶凯,2007.苏鲁一大别山超高压变质带迟家店和碧溪岭石榴二辉橄榄岩橄榄石组构.岩石学报,23(5):1153—1159.

王永锋,金振民,2001.岩石扩散蠕变及其地质意义.地质科技情报,20(4):5—11.

王永锋,郑有业,金振民,2005.西藏东巧方辉橄榄岩的显微构造特征及其流变学意义.地球科学——中国地质大学学报,30(1):52—60.

许志琴,张泽明,刘福来,等,2003.苏鲁高压—超高压变质带的折返构造及折返机制.地质学报,77(4):433—450.

郑永飞,2008.超高压变质与大陆碰撞研究进展:以大别—苏鲁造山带为例.科学通报,53(18):2129—2152.

2014 年期刊论文作者姓名汉语拼音字母拼写规则

正式的汉语人名由姓和名两个部分组成.姓和名分写,姓在前,名在后,姓和名之间用空格分开.姓有 3 种:①单姓.汉语中只有一个字的姓,如张、王、刘、李;②复姓.汉语中不止一个字(一般由 2 个字构成)的姓,如欧阳、司马;③双姓.汉语中由两个姓(单姓或复姓)并列而成的姓氏组合,如郑李、欧阳陈、周东方等.根据 GB/T 28039-2011《中国人名汉语拼音字母拼写规则》,以下分别举例介绍这 3 种情形的姓名对应的汉语拼音字母拼写规则:

(1)单姓姓名:姓和名的开头字母大写,中间以空格分开.

Wang Fang 王 芳 Yang Weimin 杨为民
Lu Lue 吕 略 Zhao Ping'an 赵平安

(2)复姓姓名:姓连写,姓和名的开头字母大写,中间以空格分开.

Sima Xiangnan 司马相南 Ouyang Wen 欧阳文

(3)双姓姓名:双姓(并列姓氏)中间加连接号,每个姓氏开头字母大写,名的开头字母大写,姓和名之间以空格分开.

Liu-Yang fan 刘杨帆 Zheng-Li Shufang 郑李淑芳
Dongfang-Yuefeng 东方岳峰 Xiang-Situ Wenliang 项司徒文良

从 2014 年起,我刊的文章作者姓名汉语拼音字母拼写采用以上规则拼写.