

西藏东巧方辉橄榄岩的显微构造特征及其流变学意义

王永锋¹, 郑有业², 金振民¹

1. 中国地质大学地球科学学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

摘要: 西藏东巧地区蛇绿岩套中橄榄岩是青藏高原出露的为数不多的地幔岩体之一, 对于揭示该地区的上地幔流变学特征具有重要意义。报道了该地区方辉橄榄岩中橄榄石的位错显微构造特征, 估算了上地幔流变学参数。显微构造研究表明, 东巧方辉橄榄岩发育残斑结构, 橄榄石中位错组态类型比较丰富, 包括自由位错、位错壁(包括宽阔型和紧密型)、位错弓弯和位错网, 表明橄榄石的主导变形机制可能为位错蠕变。该区地幔岩变形大致分为2个阶段: (1) 地幔缓慢塑性流动变形, 形成宽阔型位错壁; (2) 蛇绿岩侵位过程中的变形, 产生紧密型位错壁。根据2种位错壁估算的流动应力平均值分别为39.3 MPa(宽阔型)和113.9 MPa(紧密型), 计算结果获得东巧地区上地幔流动速率为 $1.13 \times 10^{-12} \sim 2.95 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$, 有效粘度为 $4.44 \times 10^{17} \sim 1.16 \times 10^{19} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 这些参数为东巧地区上地幔物理特征提供了流变学的约束条件。

关键词: 方辉橄榄岩; 橄榄石; 组构; 位错; 东巧。

中图分类号: P585.1

文章编号: 1000-2383(2005)01-0052-09

收稿日期: 2004-11-23

Microstructures and Rheology of Harzburgites from Dongqiao, Northern Tibet

WANG Yong-feng¹, ZHENG You-ye², JIN Zhen-min¹

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

2. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract: The peridotite section of the Dongqiao ophiolite is one of the few peridotite bodies exposed in Tibet, which may play an important role in revealing the rheological properties of the upper mantle in this area. In this paper, the microstructural and rheological characteristics of harzburgites from Dongqiao are investigated. Microstructural analysis indicates that harzburgites exhibit porphyroclastic texture and undulose extinction and kink bands are common in olivine and orthopyroxene. The oxidation decoration technique is used to examine the dislocation microstructure in olivine. The results show olivines are abundant in dislocation substructures, including free dislocation; dislocation wall, which can be subdivided further into widely and closely spaced types; and dislocation bow and net, indicating that the deformation of olivine may be dominated by dislocation creep. Following the microstructural analysis, two deformation stages are recognized. The first is deformation due to slow upper mantle flow, which results in a wide dislocation wall. The second is deformation related to the emplacement of ophiolite, which generates a closely spaced dislocation wall. The average flow stress calculated is 39.3 MPa (for the wide dislocation wall) and 113.9 MPa (for the closely spaced dislocation wall) respectively. Based on Chopra and Paterson's olivine flow law, the creep rate estimates of the upper mantle in this area are $1.13 \times 10^{-12} \sim 2.95 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ and effective viscosity estimates are $4.44 \times 10^{17} \sim 1.16 \times 10^{19} \text{ Pa} \cdot \text{s}$. All these provide fundamental constraints on the rheological properties of the upper mantle in the Dongqiao area.

Key words: harzburgite; olivine; petrofabric; dislocation; Dongqiao.

蛇绿岩中变质橄榄岩和幔源包体橄榄岩都经历了上地幔的高温塑性变形, 其中的橄榄石普遍发育晶格优选方位 (LPO) 和位错等显微构造, 它们记录了上地幔的变形机制和变形历史. 因而, 研究其显微构造特征, 特别是位错特征就可以估算上地幔流变参数 (应力、流动速率和粘度等), 推断橄榄石的流变机制 (包括蠕变控制因素) 以及揭示岩石的变形历史. 幔源包体作为来自上地幔的“使者”被其寄主岩浆快速带到地表, 来不及发生蚀变和重新平衡 (O'Reilly and Griffin, 1996), 从而可以提供有关上地幔的直接信息. 国内同行此前的工作也多集中在对幔源包体橄榄岩的流变学特征研究 (Jin *et al.*, 1989; 孙平和路凤香, 1994; 金振民等, 1995; 林传勇等, 1995), 而对蛇绿岩中变质橄榄岩体的研究相对较少 (李金铭, 1994; 李德威, 1994; 董云鹏等, 1996). 与幔源包体相比, 橄榄岩地体展示了可能在地幔中生成的流动构造的大规模露头 (尼可拉斯和泊利埃, 1985), 因此, 对橄榄岩体的研究可以提供更具代表性的上地幔流变学特征. 此外由于受后期构造事件的影响较大, 橄榄岩地体也记录了上地幔和进入地壳后的变形变质史, 从而对它们的流变学特征研究也就显得意义非凡.

青藏高原北部东巧地区蛇绿岩中出露有地幔橄榄岩体, 为研究该区上地幔流变学性质和构造演化提供了难得的机会. 过去 20 年间, 国内外地质学家对该地区蛇绿岩的岩石构造特征 (邓万明, 1984; Girardeau *et al.*, 1984; Girardeau *et al.*, 1985)、形成时代 (Alle-

gre *et al.*, 1984; Zhou *et al.*, 1997)、形成环境 (Gopel *et al.*, 1982; 汤耀庆和王方国, 1984; Girardeau *et al.*, 1984; Allegre *et al.*, 1984; 王希斌等, 1987; Zhou *et al.*, 1997) 和铬铁矿矿床地质 (孙德恕, 1983; 王希斌等, 1987; 鲍佩声等, 1999) 等进行了详细研究, 取得了丰硕成果. 有关该地区上地幔流变学特征方面的研究已有零星报道, 如鲍佩声等 (1999) 对东巧地区方辉橄榄岩中橄榄石的显微构造及流变参数进行了初步研究, 获得了橄榄石在 TEM 下的位错构造以及相应的流变参数. 本文采用氧化缀饰法研究了东巧地区方辉橄榄岩中橄榄石的位错特征, 计算了相应的上地幔流变参数, 并结合显微构造探讨了该地区橄榄岩的变形历史和变形机制.

1 地质背景和样品

青藏高原北部班公湖—怒江蛇绿岩带是青藏高原最负盛名的 2 条蛇绿岩带之一, 是羌塘地块和拉萨地块的结合带. Girardeau *et al.* (1985) 和王希斌等 (1987) 研究认为: 藏北蛇绿岩是被肢解了的蛇绿岩, 但蛇绿岩岩石序列是完整的. 根据不同地区蛇绿岩典型剖面对比, 恢复建立了该区蛇绿岩的层序 (由上至下): 基性火山岩—堆晶杂岩—变质橄榄岩. 根据与蛇绿岩共生的放射虫硅质岩中发现的放射虫确定该蛇绿岩作为洋壳的生成时代为晚侏罗世 (王希斌等, 1987). 通过与蛇绿岩伴生的变质晕中角闪石 Ar—Ar 法 (Zhou *et al.*, 1997) 和 K—Ar 法 (王

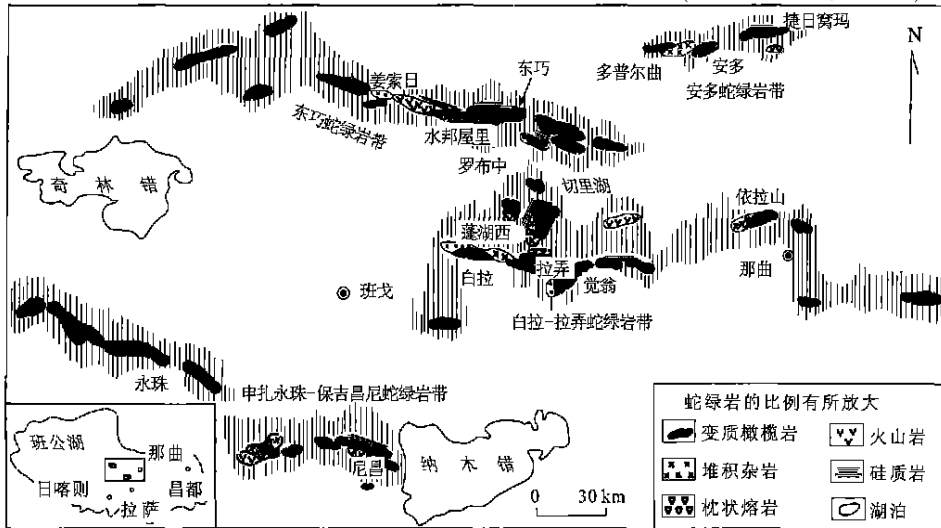


图 1 研究区 (东巧) 和西藏北部湖区蛇绿岩分布示意图 (据王希斌等, 1987 略作修改)

Fig. 1 Schematic map showing the study area (Dongqiao) and distribution of ophiolite in northern Tibet

表 1 东巧方辉橄榄岩岩石主量元素化学成分和部分主要矿物电子探针分析结果

样品	Table 1 Bulk-rock compositions and representative mineral analyses of harzburgite from Dongqiao			w _B / %			
	TD0021 *	TD0024 *	汤耀庆和王方国(1984)	TD0021		TD0024	
				Ol	Opx	Ol	Opx
SiO ₂	42.42	38.42	44.02	40.64	58.45	41.37	57.81
TiO ₂	< 0.01	< 0.01	0.01	< 0.01	0	< 0.01	0
Al ₂ O ₃	0.27	0.22	0.64	0.02	0.16	< 0.01	0.95
TFe ₂ O ₃	7.09	7.79	6.60	—	—	—	—
FeO	3.40	3.55	2.81	7.47	4.79	7.68	5.00
MnO	0.11	0.10	0.13	0.13	0.12	0.13	0.12
MgO	39.77	42.12	45.00	51.37	35.74	50.59	34.69
CaO	0.37	0.18	0.66	< 0.01	0.67	0.02	0.88
Na ₂ O	0.13	0.06	0.03	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01
K ₂ O	0.02	0.02	0.09	0.01	< 0.01	< 0.01	0
P ₂ O ₅	0.01	0.01	—	—	—	—	—
NiO	—	—	—	0.16	0.02	0.16	—
Cr ₂ O ₃	—	—	—	0.62	0.82	0.01	0.57
LOI	9.49	10.92	—	—	—	—	—
合计	99.68	99.84	99.99	100.44	100.77	99.98	100.02

测试单位: *. 西北大学地质系大陆动力学教育部重点实验室; . 中山大学测试中心.

希斌等, 1987) 定年获得了相近的结果, 分别为 175 ~ 180 Ma 和 179 Ma, 指示其构造侵位时代应在中晚侏罗世. 东巧蛇绿岩处于该带的中段, 位于安多县西 90 km (图 1). 关于东巧蛇绿岩的形成环境, 大部分观点趋于一致, 即认为东巧蛇绿岩形成于俯冲带环境中的一个小的弧后或弧间盆地 (Allegre *et al.*, 1984; 汤耀庆和王方国, 1984; 邓万明, 1984; Girardeau *et al.*, 1985; 王希斌等, 1987), 但是对于俯冲带的极性 (polarity) (潘桂棠等, 1983) 以及是否存在俯冲带 (雍永源和贾宝江, 2000) 还存在不同意见. 东巧地幔橄榄岩体侵位于上、中侏罗统的一套厚层砂岩和黑色板岩之上 (Allegre *et al.*, 1984), 被下白垩统不整合覆盖 (王希斌等, 1987), 长 17.5 km, 宽 2 ~ 4 km. 东巧地幔橄榄岩以方辉橄榄岩和纯橄榄岩为主, 岩石蛇纹石化作用明显; 纯橄榄岩完全蛇纹石化, 方辉橄榄岩则部分蛇纹石化. 因此, 本文主要研究对象为方辉橄榄岩.

2 方辉橄榄岩的岩石矿物学成分和结构特征

手标本中, 方辉橄榄岩由于蛇纹石化仅见到少量残余橄榄石颗粒, 而斜方辉石集合体的形态指示出岩石具有较明显的面理 (S) 和线理 (L). 镜下观察, 岩石由蛇纹石 (40% ~ 60%)、橄榄石 (10% ~ 20%)、斜方辉石 (15% ~ 35%) 和少量铬铁矿 (<

1%) 组成. 橄榄石均发生不同程度蛇纹石化作用, 残余的橄榄石被蛇纹石以网状穿切, 根据不同颗粒一致消光可分辨出原始的橄榄石颗粒. 橄榄石分为 2 个世代: 大残碎斑晶 (0.5 ~ 3 mm), 颗粒粗大并拉长应变, 呈半自形至他形; 后期形成的小且无应变的多边化新晶 (< 0.5 mm) 多呈他形, 分布在橄榄石残斑周围. 斜方辉石颗粒比较完整, 多构成残斑, 呈半自形至他形. 铬铁矿 (铬尖晶石) 呈小颗粒分散于岩石中, 由他形至自形变化. 橄榄石和斜方辉石斑晶中都可以看到扭折带 (图版 I, 2) 和波状消光现象, 反映岩石经历了变形和韧性剪切作用. 参照 Mercier and Nicolas (1975) 对地幔橄榄岩包体显微构造的分类将方辉橄榄岩的结构定为残斑结构 (图版 I, 1). 一般认为, 残斑结构反映岩石在上地幔条件下经受过高温流变 (尼可拉斯和泊利埃, 1985). 此外, 岩石中还可以见到丰富的斜方辉石熔融残余结构, 揭示岩石曾经历局部熔融作用 (鲍佩声等, 1992).

东巧方辉橄榄岩岩石主量元素化学成分和部分主要矿物电子探针分析结果见表 1. 方辉橄榄岩的 Mg # 值为 80 ~ 82, 与汤耀庆和王方国 (1984) 的结果相当.

3 橄榄石的组构特征

为便于研究, 我们选取了采自东巧 107 号矿体的 2 块方辉橄榄岩样品为代表, 根据手标本中拉长

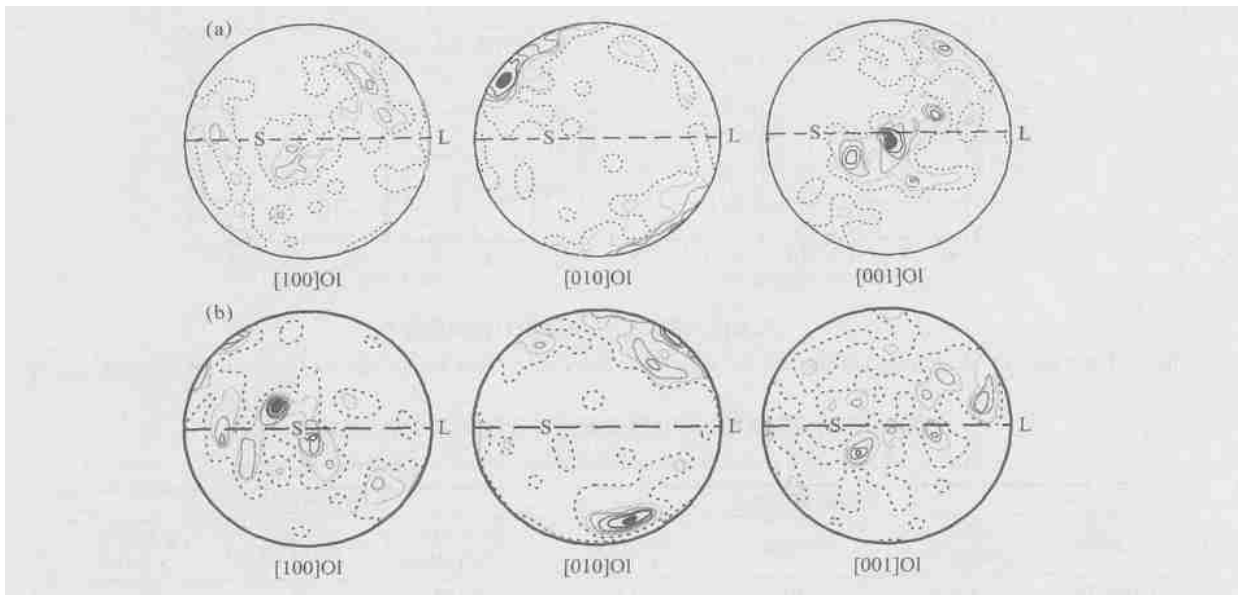


图 2 东巧地区方辉橄榄岩中橄榄石组构

Fig. 2 Petrofabric diagram of olivines

a. 样品 TD0021 共 79 颗粒; b. 样品 TD0024—86 颗粒. 下半球等面积投影, 等密线: 1%~2%~3%~4%~5%~6%; S. 面理; L. 线理

变形的斜方辉石和铬铁矿定向, 确定出面理 XY(S) 和线理 X(L), 并沿平行和垂直于线理且垂直于面理的方向分别切制定向薄片. 在费氏旋转台下测定了橄榄石的晶格优选方位(图 2). 由图中可以看出, 所测样品的晶轴具有中等强度的优选方位. 样品 TD0021(图 2a)[010] 轴极密比较明显, 靠近于面理面极点附近; [100] 轴和 [001] 轴则分别表现为与面理面相交成一定角度的完整或不完整的大圆环带, 环带中分布着一个或几个次一级点极密. 样品 TD0024[010] (图 2b) 轴极密也非常明显, 且近垂直于面理面; [100] 轴与面理面相交成 $35^{\circ} \sim 45^{\circ}$ 的大圆环带, 环带中存在一个明显点极密; [001] 轴优选方位不显著, 近于均匀分布.

显然, 这 2 个样品中橄榄石的晶格优选方位(LPO)与中国东部及世界上其他地区幔源包体橄榄石所具有的典型 LPO(滑移系为(010)(100))不同(尼可拉斯和泊利埃, 1985; 金振民等, 1994), 其成因有待进一步研究.

4 橄榄石的位错特征

位错构造研究是揭示地幔变形环境、变形机制和变形过程的有效途径. 为进一步揭示岩石的变形特征和变形历史, 我们通过氧化缀饰法研究了东巧地区 8 个方辉橄榄岩样品中橄榄石的位错亚构造特

征. 在光学显微镜下观察发现橄榄石中发育有丰富的位错组态类型. 现将各种位错亚构造特征简述如下: (1) 自由位错: 自由位错是在变形过程中未排列成倾斜位错壁的随机分布位错(金振民等, 1995). 这种亚构造在东巧地区橄榄石中很发育(图版 I, 3), 但分布相当不均匀; 其形态包括自由随机分布的刃型位错和直而平滑的螺型位错. (2) 位错壁: 它是样品中最发育的位错亚构造, 包括(100)和(001)位错壁, 并以(100)位错壁为主. 垂直于位错壁分布有密集平行排列的螺型位错. 位错壁是在塑性变形过程中橄榄石一系列刃型位错按“几何学边界需要”, 通过滑移和攀移作用形成的(金振民等, 1995). 橄榄石的(100)位错壁是地幔橄榄岩在高温流变过程中形成的典型稳态显微构造(金振民和 Green, 1988). 东巧地区橄榄石中位错壁分为宽阔型(图版, 4)和紧密型(图版, 5)2 种. (3) 位错弓弯: 这一现象在东巧地幔橄榄石中很常见(图版, 6), 它实际上是横穿(100)位错壁平行排列的螺型位错. 在塑性流动中, 由于两端被位错壁固定, 位错中部向前滑移而产生的弓形弯曲现象(金振民和 Green, 1988). 位错弓弯一般是在 800°C 以上开始形成的(郑伯让等, 1988). (4) 位错网: 这种位错亚构造在东巧地区地幔橄榄石中偶尔可以见到(图版, 7). 它由 2 组纵横交叉的螺型位错密集平行排列而成. 关于位错网的构造成因问题, 目前还不十分清楚(金振民和 Green, 1988). 此外, 橄榄石中还发

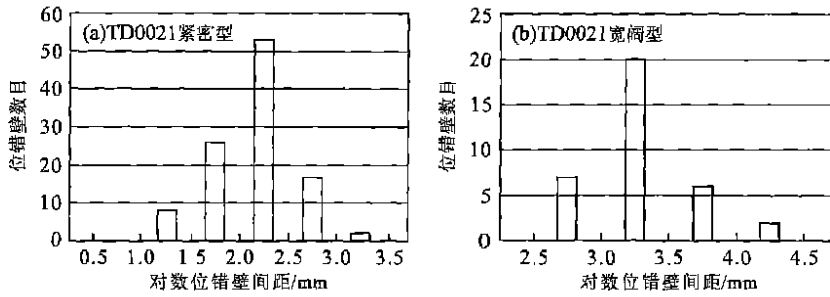


图 3 代表性橄榄石位错壁间距对数频数分布

Fig. 3 Representative histograms displaying the number of dislocation walls versus natural logarithm of the wall spacing

表 2 东巧地区橄榄石的位错壁间距统计和差异应力计算结果

Table 2 Dislocation wall spacing and differential stress of olivine in Dongqiao

样品编号	紧密型位错壁			宽阔型位错壁		
	间距几何平均值 $d/\mu\text{m}$	统计数目	差异应力 σ/MPa	间距几何平均值 $d/\mu\text{m}$	统计数目	差异应力 σ/MPa
TD0019	10.35	61	96.6	22.99	17	43.5
TD0021	8.76	106	114.2	26.80	35	37.3
TD0022	9.17	103	109.1	26.05	28	38.4
TD0024	7.37	30	135.7	26.24	7	38.1
加权平均	8.91		113.9	25.52		39.3

育一些介于自由位错与位错壁之间的亚构造, 表现为平直的刃型位错断断续续平行排列, 具有(但还未)最终形成位错壁的趋势(图版, 8)。

与鲍佩声等(1999)的研究结果不同, 我们在所研究的 8 个方辉橄榄岩样品中并没有观察到位错环亚构造。

5 上地幔流变学参数估算

5.1 差异流动应力(σ)

差异流动应力(σ)是上地幔流变状态的重要参数之一, 对于人们认识地幔对流和岩石圈板块内部变形之间的耦合联系非常关键(Jin *et al.*, 1989)。目前, 常用的橄榄石显微构造古应力计有稳态自由位错密度、亚颗粒大小(位错壁间距)和动态重结晶颗粒大小, 考虑到本区橄榄石中自由位错密度受后期变形影响较大, 同时岩石蛇纹石化作用使得动态重结晶颗粒难于分辨, 而橄榄石的位错壁是上地幔固态流动的典型稳态显微构造(Green and Jin, 1987), 并且在本区岩石中非常发育, 故采用位错壁间距进行古应力计算。

东巧地区橄榄石中发育宽阔型和紧密型 2 种位错壁亚构造, 推测二者是不同变形环境的产物, 我们

分别测定了 2 种类型位错壁间距值, 统计编制了其计数频数分布图。结果表明多数样品对数位错壁间距均呈近似正态分布(图 3)。这种分布反映了橄榄石的位错壁间距有一个最佳值(金振民等, 1989), 即其几何平均值。利用 Durham 等(1977)根据高温高压实验总结的经验公式:

$$\sigma = 10 d^{-1}$$

其中: σ 为应力(MPa); d 为亚颗粒大小或位错壁间距(μm), 分别计算了宽阔型和紧密型位错壁对应的差异应力值。计算结果显示(表 2), 东巧地区橄榄石中紧密型位错壁间距值为 8.91 μm , 对应的差异流动应力平均值为 113.9 MPa; 而宽阔型位错壁间距值为 25.52 μm , 对应的差异流动应力平均值为 39.3 MPa。后一结果与根据幔源包体计算的上地幔差异应力值(几个至几十个 MPa)相吻合, 但与鲍佩声等(1999)的结果(18~75 MPa)有所差别, 这可能是由于他们采用的是位错密度来计算古应力, 而位错密度常受到后期变形的影响。这一结果也暗示宽阔型位错壁可能是在上地幔塑性流动变形中产生的, 而紧密型则可能代表了蛇绿岩后期侵位过程中的变形产物。

5.2 流动速率(ϵ)和有效粘度(η)

考虑到紧密型位错壁可能是在侵位过程中形成

的, 故只估算了宽阔型位错壁对应的上地幔流动速率和有效粘度. 岩石的结构和显微构造表明其主要变形机制应为位错蠕变, 故采用 Chopra and Paterson (1984) 的高温幂律公式, 其流动速率计算公式为:

$$\dot{\epsilon} = A \exp(-Q/RT) \sigma^n$$

根据应变速率与有效粘度的关系 $\eta = \sigma/3 \dot{\epsilon}$, 可以计算有效粘度的数值. 上两式中: $\dot{\epsilon}$ 为应变速率 (s^{-1}); A 为物质结构参数 ($MPa^{-1} \cdot s^{-1}$); Q 为蠕变激活能 (J/mol); R 为气体常数 ($J/mol \cdot K$); T 为绝对温度 (K); σ 为应力 (MPa); n 为应力指数; η 为有效粘度 ($Pa \cdot s$). 其参数值为 $A = 10^{4.5} MPa^{-1} \cdot s^{-1}$, $Q = 535 \times 10^3 J/mol$, $n = 3.6$. 利用 Mercier (1980) 单辉石地质温度计获得研究样品的平衡温度为 $986 \sim 1072 \text{ } ^\circ C$, 这一结果与王希斌和鲍佩声 (1985) 获得的东巧岩体形成温度 ($981.66 \sim 1176.46 \text{ } ^\circ C$) 近乎一致. 在此温度范围内计算获得流动速率为 $1.13 \times 10^{-12} \sim 2.95 \times 10^{-11} s^{-1}$, 与鲍佩声等 (1999) 的结果 ($5.82 \times 10^{-12} \sim 3.58 \times 10^{-11} s^{-1}$) 比较接近; 有效粘度为 $4.44 \times 10^{17} \sim 1.16 \times 10^{19} Pa \cdot s$.

6 讨论和结论

6.1 变形机制

东巧方辉橄榄岩具有残斑结构, 暗示其是上地幔变形条件下的产物 (何永年和林传勇, 1981). 对东巧地区采集的 8 个方辉橄榄岩样品氧化缀饰法研究发现, 残斑橄榄石中发育了丰富的位错组态类型, 主要有 (100) 位错壁、位错弓弯、自由位错以及位错网等. 这些位错亚构造反映了东巧地区上地幔经历了明显塑性变形. 特别是, (100) 位错壁是橄榄石在稳态流动变形过程中通过刃型位错滑移和攀移多边化作用形成的 (金振民等, 1995). 结合橄榄石和斜方辉石中发育的扭折带, 我们认为东巧地区方辉橄榄岩所反映的上地幔塑性变形机制主要是位错蠕变占主导.

6.2 变形历史

地幔橄榄岩在塑性变形过程中产生的位错构造可以反映其变形历史. 东巧地区橄榄石位错显微构造研究揭示位错壁分为宽阔型和紧密型 2 种类型, 其平均位错壁间距值分别为 $25.52 \mu m$ 和 $8.91 \mu m$. 据此, 我们将东巧地幔岩的变形划分为 2 个阶段: (1) 地幔缓慢塑性流动变形阶段 I. 地幔橄榄岩在地幔高温塑性流动中产生变形形成宽阔型位错壁 (对应应力值为 $39.3 MPa$) 和位错弓弯. 根据前人对蛇

绿岩形成环境的研究结果, 东巧蛇绿岩产生于俯冲带之上的一个弧后或弧间的小洋盆环境. 且根据变质晕中角闪石的 Ar-Ar (Zhou *et al.*, 1997) 和 K-Ar (王希斌等, 1987) 年代学研究, 东巧地幔橄榄岩体的侵位时代应在中晚侏罗世 ($175 \sim 180 Ma$). 因此, 这一阶段变形应该是在中晚侏罗世之前的一个弧后或弧间的小洋盆上地幔中完成的. (2) 蛇绿岩侵位过程中的变形阶段 II. 中晚侏罗世 ($175 \sim 180 Ma$) 时, 东巧地幔橄榄岩体开始侵位. 在侵位过程中, 橄榄岩又经历一次变形的改造, 产生紧密型位错壁 (应力值 σ 约为 $113.9 MPa$). 与中国东部幔源包体中橄榄石位错构造 (金振民等, 1995; 林传勇等, 1998) 的比较表明, 东巧橄榄石中缺少位错环、位错缠结等代表典型高温蠕变的位错构造, 从侧面佐证了橄榄岩体受到后期侵位过程中构造变形的改造, 而幔源包体由于被岩浆快速萃取, 从而使得原有构造较少受到改造.

6.3 上地幔流变学参数

借助于橄榄石中位错壁亚构造, 我们估算了东巧地区具有代表性的上地幔流变学参数, 获得差异流动应力为 $39.3 MPa$ (根据宽阔型位错壁间距计算), 这一数值与根据幔源包体计算的上地幔差异应力值 (几个至几十个 MPa) 相吻合; 流动速率为 $1.13 \times 10^{-12} \sim 2.95 \times 10^{-11} s^{-1}$, 有效粘度为 $4.44 \times 10^{17} \sim 1.16 \times 10^{19} Pa \cdot s$. 这些参数不仅反映了东巧地区上地幔物质的构造物理特征, 也对该地区上地幔的流变性质进行了约束.

References

- Allegre, C. J., Courtillot, V., Tapponnier, P., *et al.*, 1984. Structure and evolution of the Himalaya-Tibet orogenic belt. *Nature*, 307: 17-22.
- Bao, P. S., Wang, X. B., Hao, Z. G., *et al.*, 1992. The evolution of Alpine ultramafic rocks and partial melting of the upper mantle. *Acta Geologica Sinica*, 66 (3): 227-234 (in Chinese with English abstract).
- Bao, P. S., Wang, X. B., Peng, G. Y., *et al.*, 1999. Chromite deposits in China. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Chopra, C. N., Paterson, M. S., 1984. The role of water in the deformation of dunite. *Journal of Geophysical Research*, 89: 7861-7876.
- Deng, W. M., 1984. Petrogenesis of the basic-ultrabasic rock belt along Dongqiao-Nujiang in northern Xizang (Tibet). *Himalayan Geology* II, 83-98 (in Chinese with English abstract).

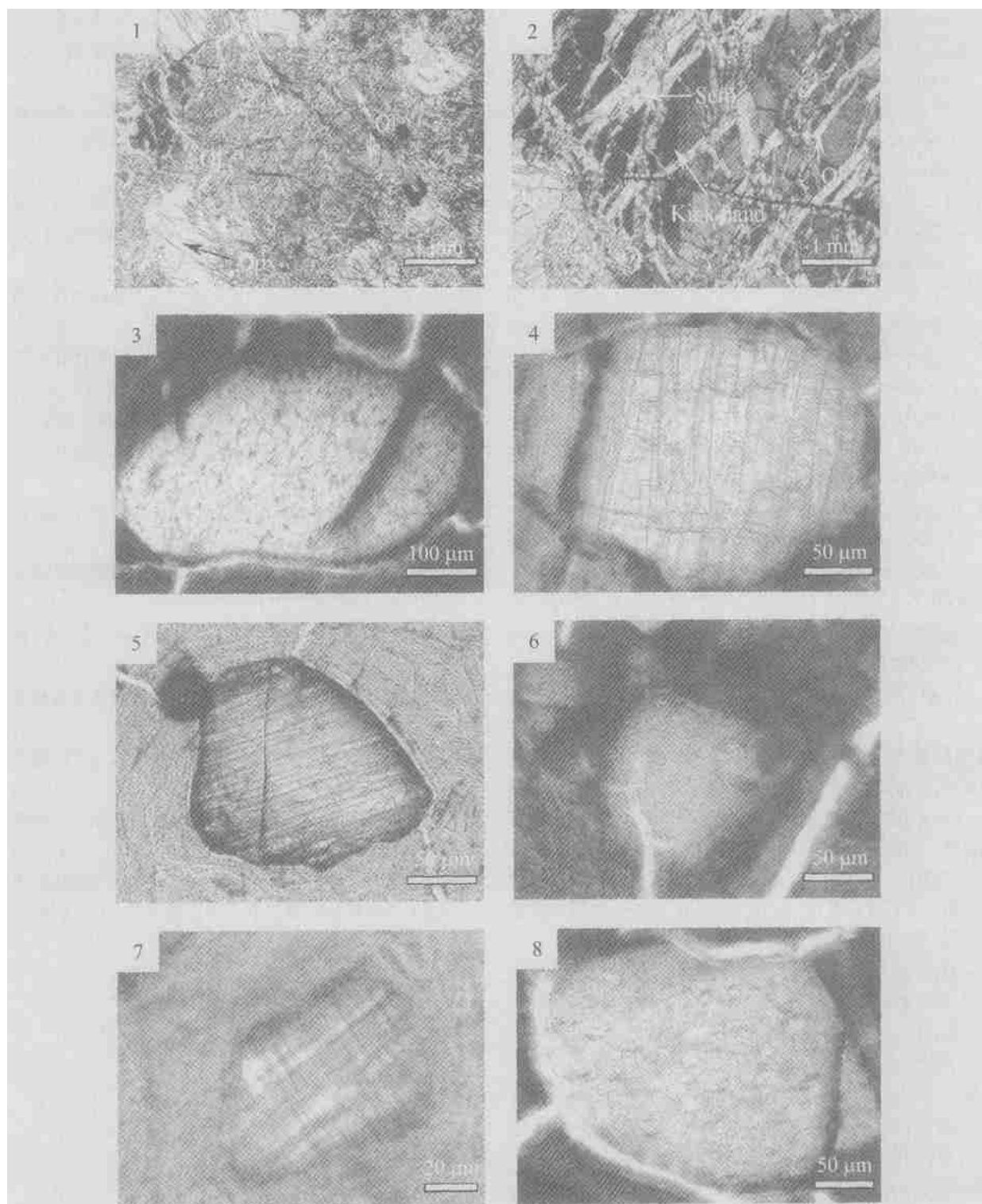
- abstract).
- Dong, Y. P., Zhou, D. W., Liu, L., 1996. Dislocation microstructures of olivine from Songshugou ophiolite and their rheological implications. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 15(1): 46—52 (in Chinese with English abstract).
- Durham, W. B., Goetze, C., Blake, B., 1977. Plastic flow of oriented single-crystal of olivine: 2, observations and interpretations of the dislocation structures. *Journal of Geophysical Research*, 82: 5755—5770.
- Girardeau, J., Marcoux, J., Allegre, C. J., et al., 1984. Tectonic environment and geodynamic significance of the Neo-Cimmerian Dongqiao ophiolite, Bangong-Nujiang suture zone, Tibet. *Nature*, 307: 27—31.
- Girardeau, J., Marcoux, J., Fourcade, E., et al., 1985. Xainxa ultramafic rocks, central Tibet, China: Tectonic environment and geodynamic significance. *Geology*, 13: 330—333.
- Gopel, C., Dupre, B., Allegre, C. J., 1982. Constraints on the origins of two Tibetan ophiolites from Pb-isotopes. *EOS*, 63: 1094.
- Green, H. W. II, Jin, Z. M., 1987. Subgrain-size distribution in olivine and differential stresses in the upper mantle beneath eastern China. *EOS*, 68: 1453.
- He, Y. N., Lin, C. Y., 1981. On the texture and fabric of some lherzolite nodules in Cenozoic basalt from eastern China. *Seismology and Geology*, 3(1): 41—50 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z. M., Green, H. W. II, 1988. The rheologic significance of dislocation substructures in olivine from spinel lherzolite xenoliths at Damaping, eastern China. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 13(4): 365—374 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z. M., Green, H. W. II, Borch, R. S., 1989. Microstructures of olivine and stresses in the upper mantle beneath eastern China. *Tectonophysics*, 169: 23—50.
- Jin, Z. M., Green, H. W. II, 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(Suppl.): 69—78 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z. M., Ji, S. C., Jin, S. Y., 1994. Lattice preferred orientation of olivines and seismic anisotropy in the upper mantle. *Acta Geophysica Sinica*, 37(4): 469—477 (in Chinese with English abstract).
- Jin, Z. M., Jin, S. Y., Green, H. W. II, et al., 1995. Rheological state of the upper mantle beneath the Taiwan strait and its tectonic significance. *Acta Geologica Sinica*, 69(1): 31—41 (in Chinese with English abstract).
- Li, D. W., 1994. Discovery of mantle ductile shear zone in ophiolite along Yarlungzangbo River, Tibet and its significance. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 19(4): 455—460 (in Chinese with English abstract).
- Li, J. M., 1994. The ultramicrostructure and fabric features of relicts of the mantle rock in Tangbale ultrabasic rockbody in the west Junggar, Xinjiang. *Northwest Geoscience*, 15(1): 1—10 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. Y., Shi, L. B., Chen, X. D., et al., 1995. Deformation features of mantle xenoliths from Paleogene basalts in eastern China and their implications of upper mantle rheology. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 14(4): 301—312 (in Chinese with English abstract).
- Lin, C. Y., Shi, L. B., Han, X. L., et al., 1998. Thermal structure and rheology of upper mantle beneath Zhejiang Province, China. *Science in China (Series D)*, 28(2): 97—104 (in Chinese).
- Mercier, J. C. C., Nicolas, A., 1975. Textures and fabrics of upper-mantle peridotites as illustrated by xenoliths from basalts. *Journal of Petrology*, 16(2): 454—487.
- Mercier, J. C. C., 1980. Single pyroxene thermobarometry. *Tectonophysics*, 70: 1—37.
- Nicolas, A., Poinier, J. P., 1985. Crystalline plasticity and solid state flow in metamorphic rocks. Translated by Lin, C. Y., Shi, L. B.. Science Press, Beijing (in Chinese).
- O'Reilly, S. Y., Griffin, W. L., 1996. 4-D lithosphere mapping: Methodology and examples. *Tectonophysics*, 262: 3—18.
- Pan, G. T., Zheng, H. X., Xu, Y. R., et al., 1983. A preliminary study on Bangong Co-Nujiang suture. Contribution to the geology of the Qinghai-Xizang (Tibet) plateau (12). Geological Publishing House, Beijing, 229—238 (in Chinese with English abstract).
- Sun, D. S., 1983. The geological characteristics of chromite deposits of Dongqiao region, Xizang (Tibet). Contribution to the geology of the Qinghai-Xizang (Tibet) plateau (6). Geological Publishing House, Beijing, 94—116 (in Chinese with English abstract).
- Sun, P., Lu, F. X., 1994. Microstructures of some peridotites from upper mantle in low Yangtze area. *Geoscience*, 8(1): 57—64 (in Chinese with English abstract).
- Tang, Y. Q., Wang, F. G., 1984. Primary analysis of tectonic environment of the ophiolite in northern Xizang (Tibet) lake district. *Himalayan Geology II*, 99—113 (in Chinese with English abstract).

- Wang, X. B., Bao, P. S., 1985. Geological comparison for two ophiolite belts in Xizang (Tibet) and its tectonic implication. *Scientific Papers on Geology for International Exchange*, 3: 23—40 (in Chinese with English abstract).
- Wang X. B., Bao, P. S., Deng, W. M., et al., 1987. Xizang (Tibet) ophiolite. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Yong, Y. Y., Jia, B. J., 2000. Shear convergence of plates and suturing of terranes: A new model for the consumption of the Meso-Tethys. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 20(1): 85—89 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, B. R., Jin, Z. M., Jin, S. Y., et al., 1988. Preliminary study of transmission electron microscope of dislocation from mantle-derived olivine at Damaping, Hebei Province. *Collection of Mineralogy and Petrology*, 4: 1—9 (in Chinese with English abstract).
- Zhou, M. F., Malpas, J., Robinson, P. T., et al., 1997. The dynamothermal aureole of the Dongqiao ophiolite (northern Tibet). *Canadian Journal of Earth Science*, 34(1): 59—65.
- 附中文参考文献**
- 鲍佩声, 王希斌, 郝梓国, 等, 1992. 阿尔卑斯超镁铁岩的演化及上地幔的局部熔融. *地质学报*, 66(3): 227—243.
- 鲍佩声, 王希斌, 彭根永, 等, 1999. 中国铬铁矿床. 北京: 科学出版社.
- 邓万明, 1984. 藏北东巧—怒江基性、超基性岩带的岩石成因. *喜马拉雅地质* II, 83—98.
- 董云鹏, 周鼎武, 刘良, 1996. 松树沟蛇绿岩中橄榄石位错构造及其流变学意义. *岩石矿物学杂志*, 15(1): 46—52.
- 何永年, 林传勇, 1981. 中国东部新生代玄武岩中二辉橄榄岩团块的结构和组构. *地震地质*, 3(1): 41—50.
- 金振民, Green, H. W. II, 1988. 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): 365—374.
- 金振民, Green, H. W. II, 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(增刊): 69—78.
- 金振民, Ji Shao-cheng, 金淑燕, 1994. 橄榄石晶格优选方位和上地幔地震波速各向异性. *地球物理学报*, 37(4): 469—477.
- 金振民, 金淑燕, Green, H. W. II, 等, 1995. 台湾海峡上地幔流变学状态及其构造意义. *地质学报*, 69(1): 31—41.
- 李德威, 1994. 雅鲁藏布江蛇绿岩中幔型韧性剪切带的发现及其意义. *地球科学——中国地质大学学报*, 19(4): 455—460.
- 李金铭, 1994. 新疆西准噶尔地区唐巴勒超基性岩体地幔岩残体的超微构造与组构特征. *西北地质科学*, 15(1): 1—10.
- 林传勇, 史兰斌, 陈孝德, 等, 1995. 中国东部早第三纪玄武岩中幔源包体的变形特征及其上地幔流变学意义. *岩石矿物学杂志*, 14(4): 301—312.
- 林传勇, 史兰斌, 韩秀玲, 等, 1998. 浙江省上地幔的热结构及流变学特征. *中国科学(D辑)*, 28(2): 97—104.
- 尼可拉斯, 泊利埃, J. P., 1985. 变质岩的晶质塑性和固态流变. 林传勇, 史兰斌, 译. 北京: 科学出版社.
- 潘桂棠, 郑海翔, 徐跃荣, 等, 1983. 初论班公湖—怒江结合带. *青藏高原地质文集*(12). 北京: 地质出版社, 229—238.
- 孙德恕, 1983. 西藏巧区铬铁矿地质特征. *青藏高原地质文集*(6). 北京: 地质出版社, 94—116.
- 孙平, 路凤香, 1994. 下扬子地区若干上地幔橄榄岩的显微构造研究. *现代地质*, 8(1): 57—64.
- 汤耀庆, 王方国, 1984. 藏北湖区蛇绿岩形成环境浅析. *喜马拉雅地质* II, 99—113.
- 王希斌, 鲍佩声, 1985. 西藏一对蛇绿岩带的对比及其构造含义. *国际交流地质学术论文集*, 3: 23—40.
- 王希斌, 鲍佩声, 邓万明, 等, 1987. 西藏蛇绿岩. 北京: 地质出版社.
- 雍永源, 贾宝江, 2000. 板块剪式汇聚加地体拼贴——中特提斯消亡的新模式. *沉积与特提斯地质*, 20(1): 85—89.
- 郑伯让, 金振民, 金淑燕, 等, 1988. 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*, 4: 1—9.

图版说明

图版 I

1. 方辉橄榄岩的残斑结构(样品 D1305/5—1)
2. 橄榄石中的扭折带(样品 TD0021)
3. 自由位错(样品 TD0012)
4. 宽阔型位错壁(样品 TD0012)
5. 紧密型位错壁(样品 TD0021)
6. 位错弓弯(样品 TD0021)
7. 位错网(样品 TD0022)
8. 自由位错,表现出将要形成位错壁的趋势(样品 TD0018)



王永锋等：西藏东巧方辉橄榄岩的显微构造特征及其流变学意义 图版 I