

浙江新昌石榴石二辉橄榄岩 包体的流变特征及其地质意义

Rheological Features of Garnet Lherzolite Xenoliths from Xinchang, Zhejiang Province, China and their Geological Implications

林传勇 史兰斌 陈孝德 张小鸥

Lin Chuanyong, Shi Lanbin, Chen Xiaode and Zhang Xiao'ou

(国家地震局地质研究所 北京 100029)

(*Institute of Geology, State Seismological Bureau, Beijing, 100029*)

徐义刚 J-C. C. Mercier

Xu Yigang and J-C. C. Mercier

(法国巴黎第七大学岩石物理实验室)

(*Laboratoire Petrologie Physique, Universite Paris-7, France*)

J. V. Ross

(加拿大不列颠哥伦比亚大学地质科学系)

(*Dept. Of Geological Sciences, University of British Columbia, Canada*)

摘 要 浙江新昌的石榴石二辉橄榄岩包体以残斑结构为主,并有向粒状变晶结构过渡的趋势。橄榄石组构以[010]呈点极密型式,而[100]和[001]呈大圆环带为特征。橄榄石的位错亚构造以反映高温位错蠕变的位错壁、亚晶粒构造和滑动位错环为主要特征。利用新的地质温压计计算的平衡温度和压力分别为1150℃~1210℃和2.1~2.4GPa。利用显微构造应力计计算流动应力为22~30MPa,利用橄榄岩高温

• 本文于1994年1月10日收到,1994年5月8日改回。

国家自然科学基金资助项目,中国-法国-加拿大国际合作资助项目。

第一作者简介:林传勇 男 1940年出生 研究员 构造岩石学专业

流变律计算的应变速率和等效粘滞度分别为 $10^{-14} \sim 10^{-13} \text{s}^{-1}$ 和 $10^{19} \sim 10^{20} \text{Pa} \cdot \text{s}$, 上述数据均已达到软流圈的数值。结合其流变特征认为该区的石榴石二辉橄榄岩代表软流圈的物质, 其来源深度为 68~78km。它反映在新生代时期本区存在有软流圈的底辟, 它可能控制了该区新生代大地构造的特征及地质演化。

Abstract The peridotite xenoliths in Cenozoic basalts in Xinchang, Zhejiang Province, China comprise both spinel and garnet lherzolites. The deformation features of Garnet lherzolites, such as textures, fabrics, and dislocation substructures have been described in detail in this paper. They all reflect high temperature deformation under upper mantle conditions dominated by dislocation creep mechanism. The equilibrium temperature and pressure of the garnet lherzolite as calculated using newly-developed geothermobarometers are $1150^{\circ}\text{C} \sim 1210^{\circ}\text{C}$, and 2.1~2.4GPa, respectively, indicating that the depth of origin of the xenoliths is 68~78km. The differential stress calculated using microstructural piezometer is within the range of 22~30MPa, while the strain rate and equivalent viscosity inferred from the power law creep of peridotite are $10^{-14} \sim 10^{-13} \text{s}^{-1}$ and $10^{19} \sim 10^{20} \text{Pa} \cdot \text{s}$, respectively. It is suggested that the garnet lherzolites should be representative of the asthenosphere in this region, and there should be an asthenospheric diapir during Cenozoic.

主题词 幔源包体 石榴石二辉橄榄岩 上地幔流变 浙江

Key words: Mantle xenolith; Garnet lherzolite; Upper mantle rheology; Zhejiang

分类号: P588.33; P542.5; P588.125

Classific. code: P588.33; P542.5; P588.125

中国东部的幔源包体主要为尖晶石相的二辉橄榄岩, 石榴石相二辉橄榄岩仅见于少数几个地点, 而且数量很少(刘若新等 1985)。因此, 长期以来对石榴石二辉橄榄岩包体流变特征尚未进行深入的研究。本文重点研究浙江新昌蔡家湾的石榴石二辉橄榄岩包体的变形特征及其所反映的上地幔流变学意义。

1 包体的结构和组构

浙江新昌是我国少有的几个石榴石二辉橄榄岩包体产地之一。该类包体一般呈椭球状, 其大小在 10cm(最大直径)以下。它由橄榄石、单斜辉石、斜方辉石和石榴石等矿物组成。有时可以见到尖晶石和石榴石相共存的过渡类型。本文研究的主要是典型的石榴石二辉橄榄岩。

目前一般将幔源包体的结构划分为三大类(何永年, 林传勇 1981): 原生粒状(或粗粒)、残碎斑状和粒状变晶(或等粒)结构。原生粒状结构反映包体在上地幔条件下未经受变形作用, 而后两种结构则反映上地幔条件下的不同程度变形。此外, 我们还发现糜棱结构的幔源包体, 它们是上地幔剪切带的产物(林传勇等 1990)。镜下观测表明, 本区的石榴石二辉橄榄岩包体以残斑结构为主, 并见有向板状等粒结构过渡的趋势。其中的石榴石切面呈近圆形, 粒度约为 2mm。在薄片上一般只有 3~5 个颗粒, 含量较少。其明显特征是普遍发育有反应边, 它是由纤维状矿物组成。在氧化薄片中发现石榴石发育有扭折带(照 1)。橄榄石残斑呈等轴状或板状两种形态, 粒度在 2mm 以下。其中呈板状的颗粒长轴可达 2.8mm, 而短轴则只有 1mm, 长宽比达 3:1, 带状消光发育。斜方辉石和单斜辉石呈不规则状或拉长的板状,

粒度与橄榄石类似，但长宽比有的可达 5:1。这些矿物的新变晶(重结晶颗粒)多呈拉长状，粒度在 0.3~0.8mm 之间。由于拉长的颗粒显示一定的定向排列，因此包体结构显示了由残斑向等粒板状结构的过渡(照 2)。上述结构特征表明了上地幔条件下的变形作用或流变。

利用旋转台测定了三个样品中橄榄石的优选方位，结果如图 1 所示。由图可见，三个样品得到的结果基本一致。橄榄石的[010]轴趋向于形成点极密型优选方位(极密部密度大于 10%)。

极密部所对应的平面与包体中发育不完全的叶理面基本一致。[100]和[001]轴则趋向于在[010]极密部所对应的大圆内形成大圆环带，[001]大圆环带的中心有一极密部。总的说来，橄榄石的活动滑移系为(010)[100]。这一活动滑移系属于橄榄石的高温滑移系(>1000℃)(尼可拉斯等 1985)，表明上地幔条件下的高温流变。

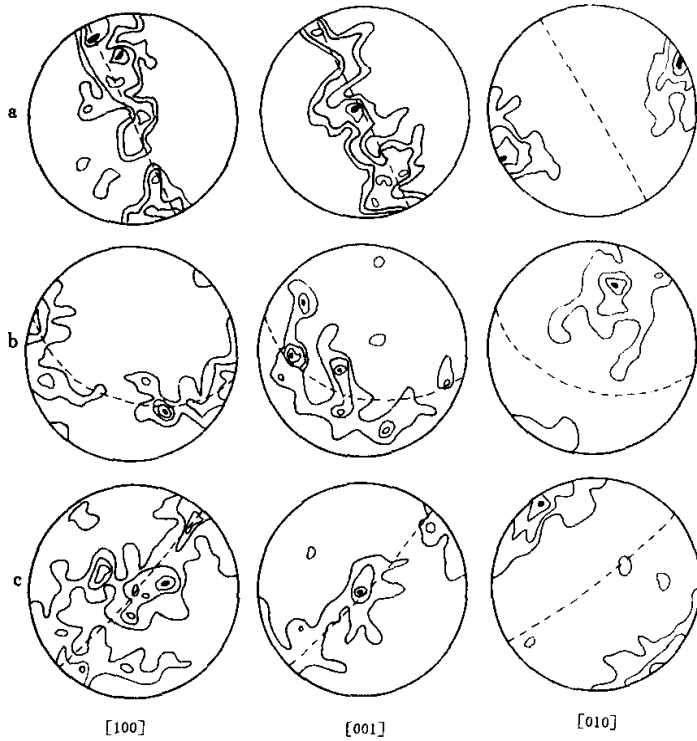


图 1 石榴石二辉橄榄岩包体橄榄石的优选方位

a. ZXC-1 样品，等密线间距，[100]为 1.5-3.0-4.5-6%，[001]为 1.5-3.0-4.5-6.0%，[010]为 2-6-10-14%；b. ZXC-8 样品，等密线间距，[100]为 1.5-3.5-5.5-7.5%，[001]为 2-3.5-5-6.5%，[010]为 1.5-5.5-8.5-11.5%；c. ZXC-14 样品，等密线间距，[100]为 1-2.5-4-5.5%，[001]为 1.5-4.5-7.5-10.5%，[010]为 1.5-4.5-8.0-11.5%。下半球等积投影，150 个颗粒测定结果

Fig. 1 Preferred orientation of olivine in garnet ilherzolite xenoliths

2 包体中橄榄石的位错亚构造

采用氧化锩饰法揭示橄榄石的位错亚构造,在光学显微镜下观测。观测结果表明,所研究的石榴石二辉橄榄岩包体的橄榄石中发育有以下的位错亚构造。

2.1 (100)位错壁

它是样品中橄榄石最为普遍发育的位错亚构造。其特征是位错壁平行(100)面,间隔紧密(一般都在 $10\mu\text{m}$ 左右)(照3)。在高倍镜下可以见到许多少许弯曲的位错线(可能为螺型位错)连接相邻的位错壁(照4)。位错壁两侧的自由位错密度呈明显的反差,在位错密度低的部位,见到有位错的螺旋(照5)。位错壁间距是一种应力计(Toriumi 1979),假如根据样品中的位错壁间距估算差异应力则将得到150MPa的高应力值,这与由动态重结晶颗粒粒度估算的应力值有很大的差异(见下文),同时也与同一地点尖晶石二辉橄榄岩包体中的结果有明显的差别。我们怀疑位错壁间距压力计是否适用于这种高温的样品。

2.2 亚晶粒构造

它也是较为发育的位错亚构造之一,由(100)位错壁和时有发育的(001)位错壁围限而成,普遍呈长方形(照6、7)。不同的亚晶粒中,自由位错密度差异较大。样品中亚晶粒构造的显著特征是非常细小,只有在很高倍数下才能观测到。一般认为亚晶粒构造是退火作用的产物,但在一些条件下,(001)位错壁也可以是变形作用的产物(Gueguen 1979)。

2.3 滑动位错环

滑动位错环在样品中较普遍发育。它是由螺型位错段和刃型位错段两个部分组成,外形呈曲别针状(照8)。滑动位错环所在的平面应是滑动面,旋转台测定表明该面为(010)面。照片中可见,位错环的短段应为螺型位错段,因此 $b=[100]$ 。由此可以得出,橄榄石变形时的活动滑移系为(010)[100],这与上一节由优选方位推测的活动滑移系完全一致。

总的说来,石榴石二辉橄榄岩包体中,橄榄石的位错亚构造比较简单。除了非常细密之外,与尖晶石二辉橄榄岩包体橄榄石的高温位错构造基本相同。最近的实验结果(Quan Bai and Kohlstedt 1992)表明,在高温蠕变体制下,位错构造的型式不随温度而变化。同时还发现,在14~180MPa的差异应力范围内,由变形作用产生的位错构造型式与应力大小无关。位错构造型式的变化,只取决于橄榄石幂律流变律的变化。因此,本区石榴石相二辉橄榄岩包体具有与尖晶石相包体类似的位错构造便不难解释了。

3 平衡温度、压力的计算

目前包体平衡温度和压力的估算主要是根据包体中矿物的化学成分。因此,可靠的温压数据的获得,取决于化学成分分析数据的可靠性、化学成分的均一性、以及矿物是否处于平衡状态。本文的矿物化学成分是在法国巴黎第六大学分析中心,利用 Camebax 和 SX-50 电子探

针来测定的。在测试过程中,我们不仅在样品中的不同部位对同一种矿物进行测定,而且还注意在矿物颗粒的边沿和中心分别进行测定。结果发现这些矿物的化学成分是基本均一的。此外,还注意了矿物的平衡问题。代表性的分析数据列于表 1 和表 2 中。表 2 列出了同一地点尖晶石相包体的矿物化学成分分析数据,以便进行对比。

表 1 浙江新昌石榴石二辉橄榄岩包体矿物电子探针分析结果

Table 1 Microprobe analysis of garnet lherzolite from Xinchang, Zhejiang Province

氧化物	XC-1				XC-8				XC-14			
	Ol	En	Di	Gt	Ol	En	Di	Gt	Ol	En	Di	Gt
SiO ₂	41.57	54.51	53.02	42.82	41.10	54.66	52.36	41.92	40.81	54.92	52.97	42.28
TiO ₂	0.00	0.21	0.55	0.22	0.02	0.18	0.48	0.20	0.03	0.21	0.59	0.24
Al ₂ O ₃	0.03	4.91	6.72	23.31	0.05	5.11	6.59	24.51	0.02	4.80	6.55	24.79
Cr ₂ O ₃	0.04	0.61	1.22	1.31	0.06	0.70	1.22	1.57	0.07	0.53	1.07	1.37
FeO	9.85	6.49	3.68	8.63	9.79	6.27	3.46	8.72	11.22	6.74	3.62	6.66
MgO	49.37	32.39	15.91	19.60	49.14	32.24	15.83	19.53	48.13	31.89	15.74	17.91
CaO	0.08	1.05	17.74	5.48	0.08	1.10	17.56	5.89	0.09	0.98	18.18	6.49
Na ₂ O	0.01	0.19	1.96	0.35	0.02	0.02	1.88	0.42	0.00	0.17	1.87	0.56
MnO	0.16	0.11	0.16	0.26	0.09	0.11	0.07	0.26	0.26	0.13	0.10	0.24
总量	101.51	100.63	99.90	99.90	100.72	100.67	99.50	100.49	100.77	100.48	100.72	100.84
Si	1.004	1.880	1.893	3.036	1.001	1.882	1.895	2.962	0.999	1.895	1.897	3.008
Ti	0.000	0.005	0.015	0.012	0.000	0.005	0.013	0.010	0.001	0.005	0.016	0.013
Al	0.001	0.199	0.283	1.948	0.001	0.208	0.281	2.042	0.001	0.195	0.276	2.069
Cr	0.001	0.017	0.034	0.073	0.001	0.019	0.035	0.088	0.001	0.014	0.030	0.077
Fe	0.199	0.187	0.110	0.512	0.199	0.180	0.105	0.381	0.230	0.194	0.108	0.394
Mg	1.778	1.665	0.846	2.072	1.784	1.654	0.854	2.067	1.757	1.641	0.840	1.890
Ca	0.002	0.039	0.679	0.416	0.002	0.040	0.681	0.446	0.002	0.036	0.700	0.492
Na	0.000	0.013	0.135	0.048	0.001	0.014	0.132	0.057	0.000	0.012	0.130	0.077
Mn	0.003	0.003	0.005	0.016	0.002	0.003	0.002	0.016	0.005	0.004	0.003	0.014

目前已经提出的可适用于幔源包体的地质温压计不下数十种。近来, Carswell and Gibb (1987) 认为, Bertrand and Mercier (1985) 的二辉石温度计和 Nickel and Green (1985) 根据与石榴石相共存的斜方辉石中 Al 建立的压力计, 可以构成计算石榴石二辉橄榄岩平衡温度、压力的最为理想的一对温压计。但最近 Brey and Kohler (1990) 指出, Bertrand and Mercier (1985) 的温度计低估了 1200°C 以下的平衡温度, 并提出了修改意见。同时, 他们自己也提出了新的温压计。因此, 这里采用经修正的 Bertrand and Mercier (1985) 的温度计和 Nickel and Green (1985) 的压力计, 以及 Brey and Kohler (1990) 的温压计来计算石榴石二辉橄榄岩包体的平衡温压。尖晶石相包体的平衡温度也用上述温度计来计算, 但是目前还没有一种适用于尖晶石相包体的理想压力计。虽然, 最近 Kohler and Brey (1990) 提出了根据 Ca 在橄榄石和单斜辉石中的分配建立的压力计, 但橄榄石中微量 Ca 含量电子探针往往难于测定, 因此我们未能采用。计算结果列于表 3 中。

表2 浙江新昌尖晶石二辉橄榄岩包体矿物电子探针分析结果
Table 2 Microprobe analysis of spinel lherzolite from Xinchang, Zhejiang Province

氧化物	XC-15				XC-18				XC-13			
	En	Di	Ol	Sp	En	Di	Ol	Sp	En	Di	Ol	Sp
SiO ₂	56.15	53.44	41.25	0.03	54.97	52.37	41.55	0.10	55.74	52.47	41.24	0.03
TiO ₂	0.11	0.41	0.01	0.11	0.15	0.45	0.03	0.25	0.13	0.60	0.01	0.12
Al ₂ O ₃	4.42	6.32	0.00	53.77	5.58	6.81	0.03	53.18	4.52	6.70	0.00	57.99
Cr ₂ O ₃	0.52	1.15	0.01	15.84	0.57	0.92	0.02	13.42	0.34	0.73	0.01	9.78
Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	1.52	0.00	0.00	0.00	3.04	0.00	0.00	0.00	1.56
FeO	6.10	2.47	9.54	9.18	5.89	3.24	9.37	8.59	6.51	2.65	10.16	9.34
MnO	0.15	0.08	0.13	0.11	0.11	0.10	0.13	0.11	0.16	0.06	0.18	0.12
NiO	0.10	0.05	0.41	0.36	0.10	0.05	0.39	0.28	0.09	0.04	0.38	0.38
MgO	33.61	15.17	49.95	20.58	32.49	16.19	49.77	20.66	32.94	14.74	48.31	20.14
CaO	0.64	20.07	0.04	0.00	1.04	18.69	0.09	0.00	0.62	20.22	0.05	0.01
Na ₂ O	0.10	1.93	0.00	0.00	0.16	1.49	0.01	0.01	0.01	1.83	0.01	0.02
总量	101.90	101.10	101.34	101.51	101.06	100.31	101.40	99.74	101.08	100.04	100.95	99.80
Si	1.9014	1.8853	0.9973	0.0008	1.8775	1.8656	1.0024	0.0026	1.9055	1.8735	1.0086	0.0008
Ti	0.0028	0.0109	0.0002	0.0021	0.0039	0.0121	0.0005	0.0049	0.0033	0.0161	0.0002	0.0023
Al	0.1764	0.2628	0.0000	1.6403	0.2246	0.2859	0.0009	1.6466	0.1821	0.2819	0.0000	1.7652
Cr	0.0139	0.0321	0.0002	0.3242	0.0154	0.0259	0.0004	0.2787	0.0092	0.0206	0.0002	0.1997
Fe3	0.0000	0.0000	0.0000	0.0296	0.0000	0.0000	0.0000	0.0601	0.0000	0.0000	0.0000	0.0303
Fe2	0.1727	0.0729	0.1929	0.1987	0.1682	0.0965	0.1890	0.1887	0.1861	0.0791	0.2078	0.2017
Mn	0.0043	0.0024	0.0027	0.0024	0.0032	0.0030	0.0027	0.0024	0.0046	0.0018	0.0037	0.0026
Ni	0.0027	0.0014	0.0080	0.0075	0.0027	0.0014	0.0076	0.0059	0.0025	0.0011	0.0075	0.0079
Mg	1.6967	0.7978	1.8003	0.7942	1.6544	0.8598	1.7900	0.8092	1.6788	0.7846	1.7614	0.7871
Ca	0.0232	0.7585	0.0010	0.0000	0.0381	0.7133	0.0023	0.0000	0.0227	0.7735	0.0013	0.0003
Na	0.0066	0.1320	0.0000	0.0000	0.0106	0.1029	0.0005	0.0005	0.0007	0.1267	0.0005	0.0010

由表3可见,两种方法计算的石榴石二辉橄榄岩包体的平衡温度和压力基本一致,表明结果是可靠的。平衡温度为1150℃~1210℃,而平衡压力为2.1~2.4GPa,其来源深度大致为67~78km。尖晶石相包体的温度为950℃~1150℃,其来源深度应小于67km。

4 流变状态参数的推导

包体在上地幔条件下发生变形时的差异应力可利用显微构造应力计来估算。本文采用的是目前公认较为可靠的动态重结晶颗粒粒度应力计,所用公式为Ross(1980)提出的:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 4.81D^{-0.787}$$

式中, $\sigma_1 - \sigma_3$ 为差异应力,以GPa为单位; D 为橄榄石动态重结晶颗粒粒度,以 μm 为单位。粒度测定结果所作的直方图表明,动态重结晶颗粒粒度不均匀,但基本上都显示单峰分布特征(图2)。峰值应反映差异应力的平均值,可以作为该包体变形时的差异应力值(表4),其范围大致为22~30MPa。

表 3 浙江新昌二辉橄榄岩包体的平衡温度、压力计算结果

Table 3 Calculations of equilibrium temperature and pressure for lherzolite xenoliths from Xinchang, Zhejiang Province

标本号	T (°C)	P (GPa)	D (km)	计算方法
石榴石相				
ZXC-1	1170	2.28	73	1
	1183	2.20	71	2
ZXC-8	1177	2.18	70	1
	1185	2.20	71	2
ZXC-14	1150	2.45	78	1
	1165	2.40	77	2
ZN-8*	1153	2.40	77	1
	1177	2.40	77	2
ZN-20*	1197	2.39	77	1
	1212	2.30	74	2
ZN2-12*	1131	2.13	69	1
	1159	2.06	67	2
尖晶石相				
ZXC-15	980			1
	1025			2
ZXC-16	1126			1
	1165			2
ZXC-13	940			1
	980			2

1. Bertrand and Mercier (1985) 二辉石温度计/Nickel and Green (1985) 压力计; 2. Brey and Kohler (1990) 温压计; 3. 上角* 号的电子探针数据引自樊祺诚(1989)。

表 4 由石榴石二辉橄榄岩包体推导的上地幔流变参数

Table 4 Rheological parameters of the upper mantle inferred from garnet lherzolite xenoliths

标本号	T (°C)	P (GPa)	D (km)	σ (MPa)	$\dot{\epsilon}$ (s^{-1})	η ($Pa \cdot s$)
ZXC-1	1170	2.28	73	25	1.728×10^{-13}	4.823×10^{19}
ZXC-8	1177	2.18	70	30	4.324×10^{-13}	2.312×10^{19}
ZXC-14	1150	2.45	78	22	4.946×10^{-14}	1.483×10^{20}
ZN-8	1153	2.42	77	29	1.367×10^{-13}	6.338×10^{19}
ZN2-12	1131	2.13	69	27	7.274×10^{-14}	1.237×10^{20}
ZN-20	1197	2.39	76	25	3.579×10^{-13}	2.329×10^{19}

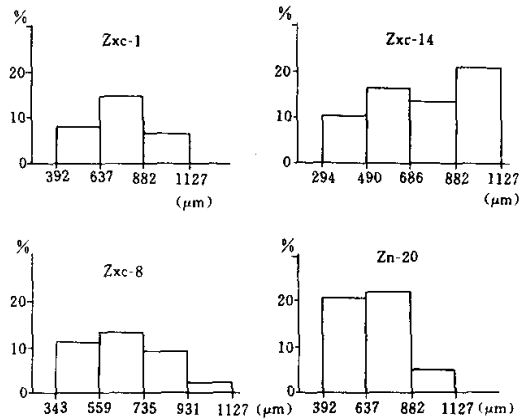


图 2 动态重结晶颗粒粒度分布直方图

Fig. 2 Histogram of the distribution of dynamically recrystallized grain sizes

平衡温度、压力和差异应力确定之后, 便可根据橄榄岩的高温流变律来推导流变过程中的应变速率和等效粘滞度。本文采用 Cabanes and Briquieu (1987) 所采用的高温流变律:

$$\dot{\epsilon} = 2.69 \times 10^{12} \exp[-(63000 + 1610P)/T] \sigma^{3.2}$$

式中, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率, 以 s^{-1} 为单位; T 为开氏温度; P 为压力, σ 为差异应力, 均以 GPa 为单位。根据应变速率和等效粘滞度的关系 $\eta = \sigma / 3\dot{\epsilon}$, 可计算出等效粘滞度的数值。所有计算结果都列于表 4 中。由表中可见, 应变速率为 $10^{-14} \sim 10^{-13} s^{-1}$, 等效粘滞度为 $10^{19} \sim 10^{20} Pa \cdot s$ 。

5 上地幔流变特征的讨论

根据上述结果,可以对本区上地幔的流变特征进行讨论。本区上地幔在60km以下的深度主要由石榴石二辉橄榄岩组成,尖晶石二辉橄榄岩出现在石榴石二辉橄榄岩的上面。根据所获平衡温度和压力数据,可以探讨本区上地幔的热结构。作者最近曾重建中国东部上地幔的古地温线^①。本区石榴石二辉橄榄岩的数据点落在该地温线尖晶石/石榴石转换线以下部分的附近(图3)。该地温线的显著特征是在60km深度附近有一明显的转折,转折点恰好与尖晶石/石榴石转换线相交。推测此处存在有上地幔流变状态的转变。

前面已经提到,本区石榴石二辉橄榄岩包体的差异应力为22~30MPa,应变速率为 $10^{-14} \sim 10^{-13} \text{s}^{-1}$,等效粘滞度为 $10^{19} \sim 10^{20} \text{Pa} \cdot \text{s}$,这些数据与尖晶石相包体的数据有明显的差异(林传勇等1990)。一般认为,软流圈的应变速率为 10^{-14}s^{-1} ,等效粘滞度为 $10^{20} \text{Pa} \cdot \text{s}$ (Cabanès and Briquieu 1987),本区石榴石二辉橄榄岩包体均已超过这些数值。结合它们的流变特征以及上地幔热结构的特征,我们有理由认为,本区石榴石二辉橄榄岩包体代表软流圈的物质。由此,可以推测本区岩石圈和软流圈的界面大致在65km附近。这表明在新生代时期,本区曾存在有软流圈的底辟作用。

6 结论

综上所述,我们可以得出以下的结论:

(1)本区石榴石二辉橄榄岩包体的结构以残碎斑状为主,并显示了向等粒板状结构的过渡。包体橄榄石具有较强烈的组构,组构特征反映的活动滑移系为(010)[100]。上述特征反映了上地幔条件下的高温流变。

(2)包体中橄榄石的位错亚构造以广泛发育有(100)位错壁、亚晶粒构造和滑动位错环为

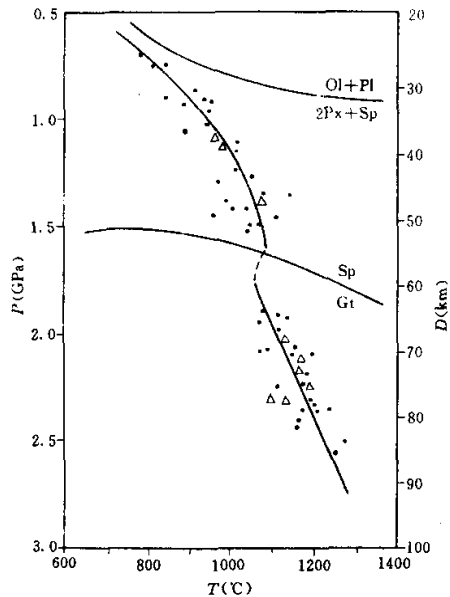


图3 由幔源包体平衡温度、压力重建的中国东部上地幔古地温线*
图中的三角点为本区石榴石二辉橄榄岩包体的数据点;其它符号为其他地区的数据点

Fig. 3 Paleogeotherm of the upper mantle beneath eastern China constructed based on the equilibrium temperature and pressure of mantle xenoliths

^① 徐义刚、林传勇等. 中国东部上地幔古地温线及其地质意义(待刊).

特征。它们的另一显著特征是这些位错构造非常细密。橄榄石变形时以位错蠕变为主的变形机制。位错亚构造再次表明活动滑移系为(010)[100]。

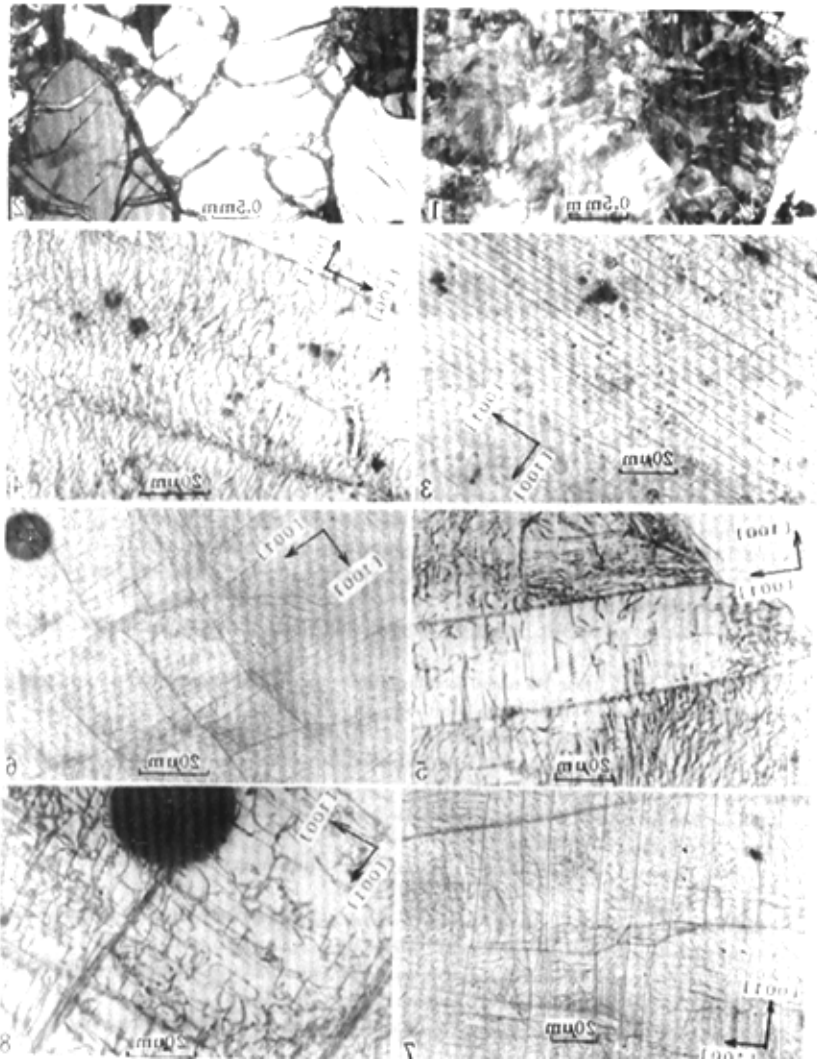
(3)本区包体平衡温度为1150℃~1210℃,平衡压力为2.1~2.4GPa,差异应力为22~30MPa,应变速率为 10^{-14} ~ 10^{-13} s $^{-1}$,等效粘滞度为 10^{19} ~ 10^{20} Pa·s。这些数值符合软流圈的特征。

(4)本区软流圈深度大致在65km左右,由此认为在新生代时期,本区存在有软流圈的底辟作用,它对本区的大地构造环境具有重要的意义。

致谢 本项目得到国家自然科学基金会的资助,同时也是中国-法国-加拿大国际合作资助项目。本文的室内分析是在法国巴黎第七和第六大学进行的。从柏林研究员审阅了初稿。作者在此一并致谢。

参 考 文 献

- 尼可拉斯,泊利埃著.林传勇,史兰斌译.1985.变质岩的晶质塑性和固态流变.北京:科学出版社.189~194
- 刘若新,樊祺诚,孙建中.1985.中国几个地方的石榴石二辉橄榄岩捕虏体的研究.岩石学报,(4):24~33
- 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):41~49
- 林传勇,何永年,史兰斌.1990.糜棱岩型橄榄岩幔源包体及其地质意义.国际大陆岩石圈构造演化与动力学讨论会论文集.北京:科学出版社,165~172
- 林传勇,史兰斌,何永年.1990.华北地区上地幔流变学特征初探.中国上地幔特征与动力学论文集.北京:地震出版社,93~102
- Bertrand P and Mercier J-C C. 1985. The mutual solubility of coexisting ortho- and clinopyroxene; toward an absolute geothermometer for the natural system? Earth Planet. Sci. Lett., 77: 109~122
- Brey G P and Kohler T. 1990. Geothermobarometry in four phase lherzolite. Jour. Petrol. 31: 1353~1378
- Cabanes N and Briquieu L. 1987. Hydration of an active shear zone: interaction between deformation, metasomatism and magmatism. Earth Planet. Sci. Lett. 81: 233~244
- Carswell D A and Gibb F G F. 1987. Evaluation of mineral thermometers and barometers applicable to garnet lherzolite assemblages. Contrib. Mineral. Petrol. 95: 499~511
- Gueguen Y. 1979. Dislocation in naturally deformed terrestrial olivine: classification, interpretation and applications. Bull. Mineral. 102: 178~183
- Kohler T and Brey G P. 1990. Calcium exchange between olivine and clinopyroxene calibrated as a geothermobarometer for natural peridotites from 2~60kb. with applications. Geochim. Cosmochim. Acta, 54: 2375~2388
- Nickel H G and Green D H. 1985. Empirical geothermobarometry for garnet peridotites and implications for the nature of the lithosphere, kimberlites and diamonds. Earth Planet. Sci. Lett. 73: 158~170
- Quan B and Kohlstedt D L. 1992. High temperature creep of olivine single crystal; 2. Dislocation structures. Tectonophys. 206: 1~29
- Ross J V, Ave Lallemand H G and Carter N L. 1980. Stress dependence of recrystallized grain and subgrain sizes in olivine. Tectonophys. 70: 39~61
- Toriumi M. 1979. Relation between dislocation density and subgrain-size of deformed olivine in peridotites. Contrib. Mineral. Petrol. 68: 181~186



照片说明 1. 石榴石中发育的扭折带, ZXC-1 氧化薄片, 正交偏光; 2. 残斑结构, ZXC-8 薄片, 正交偏光; 3. 间隔紧密的(100)位错壁, ZXC-1 氧化薄片, 单偏光; 4. (100)位错壁, ZXC-14 氧化薄片, 单偏光; 5. (100)位错壁, 其间发育有位错螺旋, ZXC-14 氧化薄片, 单偏光; 6. 亚晶粒构造, ZXC-8 氧化薄片, 单偏光; 7. 亚晶粒构造, ZXC-8 氧化薄片, 单偏光; 8. 滑动位错环, ZXC-8 氧化薄片, 单偏光.