

山东省第四纪玄武岩中幔源包体的 变形特征及其上地幔流变学意义*

陈孝德 林传勇 张小鸥 史兰斌

(国家地震局地质研究所, 北京 100029)

主题词 山东省 幔源包体 上地幔 流变学

提 要 山东省第四纪玄武岩中含有数量、大小不等的幔源包体。这些包体主要为尖晶石二辉橄榄岩,以原生粒状和残斑结构为特征。包体中橄榄石的位错亚构造反映了上地幔高温蠕变机制。包体的平衡温度在 800—1100℃之间,压力为 0.8—2.0GPa,相应的来源深度为 28—65km。在该深度范围内,上地幔的流动应力为 13—26MPa,应变速率为 10^{-14} — 10^{-20} s⁻¹,等效粘滞度为 10^{20} — 10^{25} Pa·s,符合大陆拉张带上地幔的特征。作者认为,中国东部上地幔在早第三纪或之前开始有底辟上涌,它导致岩石圈的减薄以及地壳的拉张,造成中国东部的拉张环境和裂谷的发育。上地幔的这种运动可能在新第三纪达到高峰,而在第四纪已减弱。

1 引言

山东省境内有较广泛的新生代玄武岩出露,其中多含有幔源橄榄岩包体。对于这些玄武岩及其中的幔源包体过去曾进行过详细的研究^[1,2]。不过,对于幔源包体的研究过去只注意了新第三纪玄武岩中的包体,如临朐尧山、昌乐团山及栖霞大方山等地,而对于第四纪玄武岩中的包体则未见系统而详细的研究报导。这次笔者工作的重点是放在对第四纪玄武岩(玄武岩的时代以公开发表的文章为准)中幔源包体的研究上,以探讨这一时期上地幔的物理状态和流变学特征。为此,考察了蓬莱铜井红石山、烈士陵园、五里桥,以及无棣大山等地,发现其中均含有数量、大小不等的幔源橄榄岩包体。

铜井红石山渤海岸边第四纪玄武岩内含有数量不多、个体较小的橄榄岩包体。这些包体中,长轴最大的为 3.5cm,一般只有 1—2cm,多呈椭球状或不规则状。包体的岩石成分以尖晶石二辉橄榄岩为主,粒度中等。

蓬莱烈士陵园东侧的山坡上出露幔源包体,含量不是很多,但个体较大,一般均在 3cm 以上,大的可达 6cm。包体的岩石成分以尖晶石二辉橄榄岩为主,此外有少量的纯橄岩、方辉橄榄岩等,辉石岩类较少见。包体中矿物晶粒多为中等粒度,只有很少为粗粒(> 4mm)。

蓬莱县五里桥一带公路边,在玄武岩露头上有橄榄岩包体及辉石和长石的巨晶等。包体个体较大,一般都在 5cm 左右,但是风化较强,标本不易采集。

这次工作还考察了无棣县大山。名为大山,实为小山包,由第四纪玄武岩组成。玄武岩中

* 本项目得到地震科学联合基金会的资助(编号 94052)
本文于 1997 年 1 月 8 日收到,1997 年 3 月 5 日改回。

有少量的、个体细小的幔源包体。包体最大的只有3cm左右, 一般都在1—2cm之间。岩石成分主要为尖晶石二辉橄榄岩, 此外还有少量的纯橄岩。

在上述地点共采集幔源包体样品57件, 在室内对其中的37件样品切制了光薄片和氧化薄片, 进行了详细的观测和分析测试。

2 幔源包体的结构

我国东部幔源包体的结构可以划分为四种类型^[3,4]: 原生粒状(粗粒)结构、残斑结构、粒状变晶(等粒)结构和糜棱结构等。一般认为, 原生粒状结构代表未变形或微弱变形的上地幔, 而其他结构则依次反映变形程度和差异应力的上升。经显微镜下详细观测, 发现山东第四纪玄武岩中的幔源包体以原生粒状结构向残斑结构的过渡为主要结构类型, 未见到粒状变晶结构和糜棱结构。

所观测的包体均由橄榄石、斜方辉石(顽火辉石)、单斜辉石(透辉石)和尖晶石4种矿物组成, 可以分为粗粒和细粒两种, 前者为残斑颗粒, 后者为较细小的重结晶颗粒。残斑晶粒主要为橄榄石和辉石, 边界多为曲线状。橄榄石发育有扭折带(亚晶界), 斜方辉石常有单斜辉石的出溶页理, 单斜辉石则常有反应边, 尖晶石主要充填在这些矿物颗粒之间, 呈叶片状或不规则状。残斑晶粒的粒度一般都大于2mm, 有的可达5mm, 在样品中可占90%—95%(照片1)。重结晶颗粒边界平直, 120°“三联点”发育, 粒度最小的为0.2mm, 但只占极少数, 绝大多数在0.8—1.5mm之间。重结晶颗粒在岩石中只占5%—10%(照片2)。有时可见到残斑颗粒和重结晶颗粒的少许拉长, 但叶理并不发育。这些包体的结构属于原生粒状结构向残斑结构的过渡型, 这表明它们在上地幔条件下只经受过不十分强烈的变形作用。这一点与新第三纪玄武岩中的幔源包体成鲜明的对比, 后者常常具有所有四种结构类型, 反映它们经历了复杂的变形历史^[4]。

3 幔源包体中橄榄石的位错亚构造

采用氧化缀饰法研究了橄榄石的位错亚构造。研究表明, 这些包体橄榄石中除自由位错以外, 还发育各种各样的位错亚构造。

位错列: 由短而平直的位错线平行排列构成(照片3), 如果位错线沿着晶体的某一结晶学方向排列并形成低角度边界时, 位错列就变成位错壁。

位错壁: 位错壁有两种, 一是由刃型位错通过攀移沿晶体的某一方向排列而形成的位错倾斜壁(照片4), 位错壁间距与差异应力的大小有关, 因此可以作为地质应力计; 另一种是由螺型位错通过交叉滑移而形成的位错扭转壁, 由于其形态类似于网格, 所以又称为位错网格(照片3和照片5)。照片5所示的网格为正方形或长方形。样品中观测到的位错壁间距都较宽, 反映差异应力较低。

位错环: 常见的是滑动位错环, 它由刃型位错段和螺型位错段两个部分构成(照片6)。它所在的平面应是滑动面, 如果能够确定哪一个是刃型位错段, 哪一个是螺型位错段, 那么, 滑动方向也可以确定。

亚晶粒构造: 在平面上, 它是由两组亚晶界(位错壁)围限而成的颗粒中的小区域, 被称为亚晶粒。一般认为, 它是动态恢复作用的结果。亚晶粒的粒度与差异应力的大小有直接的关系, 因此也常作为地质应力计。在所观测的样品中亚晶粒构造不发育, 只见到初步发育的亚晶粒(照片 7), 其粒度一般都较大, 反映较低的差异应力。

滑动条带: 它是叠加在稳态亚构造背景之上的条带状构造(照片 8)。实验结果表明, 这种滑动条带是较低温、高应变速率事件的产物。

综上所述, 山东第四纪玄武岩中幔源包体的橄榄石位错亚构造, 与中国东部新第三纪玄武岩内包体中橄榄石的位错亚构造类似。这些位错亚构造反映了包体在上地幔条件下曾经历过高温蠕变。在变形过程中, 橄榄石的主要变形机制是位错蠕变。此外, 后期可能还经受过较低温、高应变速率的变形事件(滑动条带的发育是重要的证据)。但是, 这些位错亚构造所反映的差异应力较低(下面将进一步讨论), 表明这一时期的变形作用已有所减弱。

4 包体平衡温度、压力的计算

4.1 地质温压计的选择

幔源包体的平衡温度、压力对于了解上地幔的物理状态和流变学特征具有十分重要的意义。近十几年来, 随着高温高压实验手段的不断完善, 使得地质温压计的研究迅速发展。目前已经提出的可用于幔源包体的地质温度计不下 20 种, 但是对于尖晶石相包体平衡压力的计算, 目前还缺乏合理可靠的地质压力计。

上面提到的地质温压计都是根据包体的化学成分来计算平衡温度和压力的, 因此包体是否达到热平衡是问题的关键。本文样品的化学成分是在中国科学院地质研究所新引进的 Camebax 电子探针仪上进行测定的。为了了解所测矿物是否达到化学平衡, 在同一样品中的不同部位, 甚至于同一颗粒的不同部位进行了多点测定。大量的测定结果显示, 这些矿物的化学成分基本上是均匀的, 未发现有明显的成分分带现象, 这说明这些数据可以用来计算包体的平衡温度、压力。对样品中的 4 种矿物都进行了分析, 由于数据太多, 因此文中只能从略*。

如前所述, 目前已经提出的用于幔源包体的地质温压计有 20 多种, 因此选择合理可靠的地质温压计是个关键。近年来, 国内外一些学者对现有地质温压计进行了检测和评价^[5,6], 为选择合理的地质温压计提供了方便条件。徐义刚在检测了目前应用广泛的 17 种地质温度计后发现, Bertrand 和 Mercier (1985)^[7]的二辉石温度计是到目前为止最好的地质温度计, 它既可应用于石榴石相的橄榄岩包体, 也适用于尖晶石相的橄榄岩包体。此外, Witt 和 Seck (1991)^[8]、Brey 和 Kohler (1990)^[9]以及 Nickel 等(1987)^[10]的地质温度计也是较为合理的、适用于尖晶石相幔源包体的温度计。相反, 过去广泛应用于我国的 Mercier (1980)^[11]的地质温压计, 目前已被认为不可靠。本文采用了上面提到的地质温度计, 为便于对比, 文中也采用了 Mercier (1980) 的温度计。

对于尖晶石相幔源包体的平衡压力计算, 目前尚无一个较理想的地质压力计可以应用。1990 年, Kohler 和 Brey 根据 Ca 在橄榄石和单斜辉石中的分配提出了应用于尖晶石相包体的地质压力计^[12]。该方法要求橄榄石中 Ca 含量的分析数据精度较高, 为此在 Camebax 电子探

* 如读者需要了解, 请与作者联系。

针仪上采用特殊的程序来分析^[13]。分析结果也从略。

4.2 平衡温度计算结果

为了检验分析结果及温度计的可靠性,笔者用 Bertrand 和 Mercier (1985) 的温度计计算了同一样品中不同测点的分析数据。计算得到的温度数据列于表 1。由表 1 可见,所得到的温度有一些大小不等的偏差。计算它们的平均值及标准偏差,发现标准偏差最大的为 $\pm 20^{\circ}\text{C}$,最小的只有 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。这表明,这些矿物的成分在不同部位稍有变化,但变化仍在温度计算的误差范围之内(一般为 $\pm 30^{\circ}\text{C}$)。因此,取它们的平均值看来是合理的。

表 1 同一样品不同测点温度的计算结果

Table 1 Temperature estimates at different points of the same mineral grain obtained by using geothermometer proposed by Bertrand and Mercier (1985)

标本号	T ($^{\circ}\text{C}$)	$T1$ ($^{\circ}\text{C}$)	测点编号
	973.1		EN1 D11
	945.9		EN1 D12
	982.9		EN1 D13
	990.7		EN1 D14
	945.2		EN1 D15
SL- 1	989.2	970 ± 20	EN1 D16
	972.8		EN2 D11
	945.6		EN2 D12
	982.6		EN2 D13
	990.4		EN2 D14
	944.9		EN2 D15
	988.9		EN2 D16
	862.6		EN1 D11
SL- 3	864.9	864 ± 2	EN1 D12
	862.6		EN2 D11
	865.0		EN2 D12
	944.3		EN1 D11
	918.3		EN1 D12
	917.3		EN1 D13
	944.4		EN2 D11
SL- 4	918.3	926 ± 13	EN2 D12
	917.4		EN2 D13
	945.0		EN3 D11
	918.9		EN3 D12
	917.9		EN3 D13
	916.6		EN1 D11
	929.4		EN1 D12
SL- 12	917.4	923 ± 6	EN2 D11
	930.3		EN2 D12
	916.6		EN3 D11
	929.4		EN3 D12

T 为用 Bertrand 和 Mercier (1985) 地质温度计计算得到的温度;

$T1$ 为温度的平均值及标准偏差。

测点编号中 EN 为斜方辉石, DI 为单斜辉石。

表 2 列出了采用不同温度计计算得到的包体的平衡温度、压力数据。由表 2 可见,用不同地质温度计计算的结果有所不同,不过,由前面几种温度计得到的结果差别不是很大(小于 $\pm 30^{\circ}\text{C}$),在温、压计算的误差范围之内。为了更直观地对比这些温度计计算的结果,以 Bertrand 和 Mercier 地质温度计的结果为横坐标,其它三种温度计的结果为纵坐标作图(图 1)。由图 1 可见,用 Brey 和 Kohler 温度计得到的结果,有的与用 Bertrand 和 Mercier 温度计所得结果比较接近($\pm 10-20^{\circ}\text{C}$),但有些数据要低 50°C 左右。由 Witt 和 Seck 的温度计得到的结果,有的也比较接近,但有一些则要高 50°C 左右。看来这三种温度计相互之间不是系统的差异。用 Nickel 和 Green 的温度计得到的结果则比用 Bertrand 和 Mercier 温度计所得结果系统地低 $10-20^{\circ}\text{C}$ 。用 Mercier 的单斜辉石温度计计算,在低温段($< 800^{\circ}\text{C}$)常常得到不合理的结果(低 100°C 以上),在其他温度段结果还比较接近。因此,在高于 800°C 时,可以采用该温度计。但是,由其斜方辉石温度计得到的结果要偏高 100°C 左右,看来不宜采用。由表 2 可见,本区幔源包体的平衡温度在 $800-1100^{\circ}\text{C}$ 之间,范围相当宽。

4.3 平衡压力计算结果

前面已经提到,目前还没有适用于尖晶石相幔源包体的地质压力计。Kohler 和 Brey (1990) 提出了用橄榄石中钙含量计算尖晶石相包体压力的方法,但实践证明该方法有较大局限性。本文采用该方法计算山东第四纪包

表2 采用不同地质温压计计算得到的山东幔源包体的
平衡温度(°C)、压力(GPa)数据

Table 2 Pressure(GPa) and temperatures(°C) estimates for Shandong
xenoliths by using different geothermobarometers

样本号	T1	T2	T3	T4	T5	T6	P1	P2	P3
SL- 1	971	926	950	951	990	1020	1.45	1.68	1.20
SL- 3	864	860	966	839	881	1012	0.92	1.57	1.10
SL- 4	926	915	950	908	878	1000	0.66	1.74	1.50
SL- 5	884	863	909	861	894	1000	1.02	1.66	1.10
SL- 6	932	936	929	914	931	1010	1.15	1.73	1.20
SL- 7	818	822	929	803	745	975	-	1.44	0.90
SL- 12	923	947	969	906	923	1010	0.95	1.54	1.00
SL- 16	1045	1082	1090	1029	1079	1157	2.05	1.86	1.50
SL- 18	883	897	950	861	910	1037	1.10	1.85	1.10
SL- 21	919	871	951	897	847	1047	0.64	1.88	1.50
SL- 23	865	802	986	836	609	1015	-	1.55	1.50
ST- 3	1107	1109	1068	1091	1118	1131	2.00	1.54	2.00
ST- 4	1058	1077	1086	1042	1076	1107	1.94	1.76	1.90
ST- 5	846	810	812	817	874	977	1.15	2.12	1.00
ST- 8	1076	1105	1037	1060	1110	1154	2.25	2.17	2.00
ST- 9	1049	1098	1098	1032	1034	1101	1.88	1.47	1.50
ST- 15	835	753	930	799	610	985	-	1.60	1.00
ST- 16	794	730	910	753	608	986	-	1.87	0.80
SW- 2	842	847	911	815	902	1004	0.97	1.83	1.00
SW- 4	884	833	935	859	612	992	-	1.56	1.60

T1: 采用 Bertrand 和 Mercier (1985) 地质温度计; T2: 采用 Brey 和 Kohler (1990) 地质温度计;
T3: 采用 Witt 和 Seck (1991) 地质温度计; T4: 采用 Nickel 和 Green (1985) 地质温度计;
T5: 采用 Mercier (1980) 单斜辉石地质温度计; T6: 采用 Mercier (1980) 斜方辉石地质温度计;
P1: 采用 Mercier (1980) 单斜辉石地质压力计; P2: 采用 Mercier (1980) 斜方辉石地质压力计;
P3: 采用 Kohler 和 Brey (1990) 地质压力计。

体的平衡压力时,应用了大量的电子探针数据,发现同一样品的分析数据得到的结果相差很大,甚至有的结果不合理(负值或异常高的数值)。这一方面表明对分析数据的精度要求特别高,用电子探针分析尚难满足这要求,同时也表明该方法本身还不完善。计算结果列于表2。从表2还可发现,由 Mercier(1980)的单斜辉石压力计得到的压力数据,有许多与 Kohler 和 Brey 的压力计得到的数据比较接近,而由斜方辉石压力计得到的结果则要偏高很多(一般可达0.5GPa)。看来前者得到的结果尚可参考采用(往往也少许偏高),而后者误差则太大,不宜采用。由表2可见,包体的平衡压力范围在0.8—2.0GPa之间,反映其来源深度为28—65km。

5 上地幔流变参数推导

5.1 差异应力的推导

幔源包体中的变形显微构造是上地幔变形作用留下的记录,因此,利用显微构造应力计可

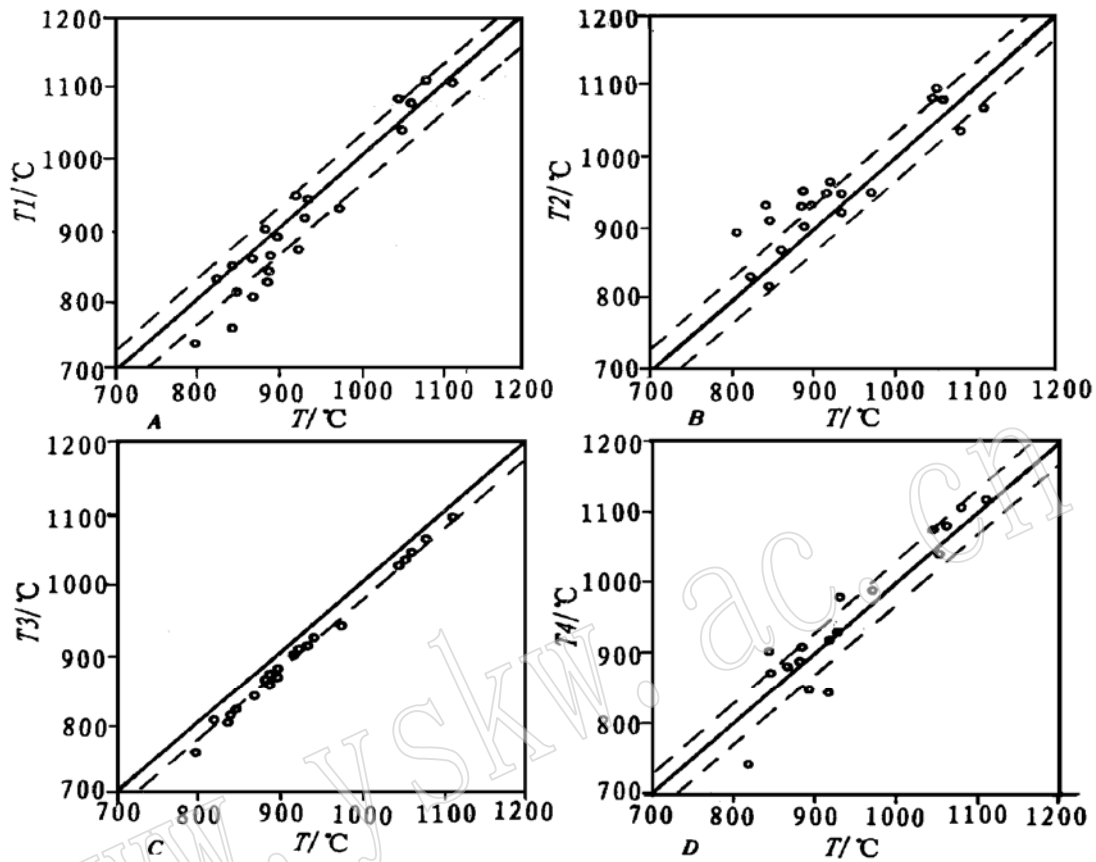


图1 用 Bertrand 和 Mercier (1985) 方法计算的平衡温度与用其他方法计算结果的对比

Fig. 1 Comparison of temperatures estimated by Bertrand &

Mercier's geothermometers and by other geothermometers

a —与用 Brey 和 Kohler 方法的对比; b —与用 Witt 和 Seck 方法的对比;

c —与用 Nickel 和 Green 方法的对比; d —与用 Mercier 单斜辉石法的对比

计算上地幔的差异应力。目前已经提出的显微构造应力计有: 亚晶粒粒度、动态重结晶晶粒粒度、自由位错密度和位错壁间距等。由于所研究的包体有的个体很小, 一个样品难以制成两个薄片(一个供电子探针分析用, 另一个供氧化缀饰法用), 只能在电子探针分析用的薄片上测量其重结晶晶粒粒度。本文统一采用目前认为较为可靠的 Ross(1980)^[14] 提出的重结晶晶粒应力计, 其公式为:

$$\sigma = 4900D^{-0.79}$$

其中, D 为重结晶晶粒粒度, 以 μm 为单位; σ 为差异应力, 以 MPa 为单位。计算结果列于表 3。差异应力变化在 13—26MPa 之间, 随温度变化的关系不十分明显。

5.2 应变速率的推导

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推导应变速率。目前较常用的流变律为^[15]:

$$\dot{\epsilon} = 1.7 \times 10^9 \exp[-(125200 + 320P)RT] \sigma^{3.2}$$

表 3 由山东幔源包体计算的上地幔流变学参数
Table 3 Rheological parameters of the upper mantle
estimated from Shandong mantle xenoliths

标本号	T (°C)	P (GPa)	Z (km)	σ (MPa)	$\dot{\epsilon}$ (s^{-1})	η ($Pa \cdot s$)
SL- 1	971	1.20	41	19	1.78×10^{-16}	3.63×10^{22}
SL- 2	882	1.00	35	17	2.95×10^{-18}	1.96×10^{24}
SL- 3	864	1.10	38	21	2.08×10^{-18}	3.44×10^{24}
SL- 4	926	1.50	50	19	1.68×10^{-17}	3.85×10^{24}
SL- 5	884	1.10	38	21	5.56×10^{-18}	1.28×10^{24}
SL- 6	932	1.20	62	20	3.87×10^{-17}	1.75×10^{23}
SL- 7	818	0.90	47	18	5.07×10^{-19}	8.30×10^{25}
SL- 12	923	1.00	36	24	6.05×10^{-17}	1.35×10^{23}
SL- 16	1045	1.50	50	18	1.95×10^{-15}	3.15×10^{21}
SL- 18	883	1.10	38	25	9.26×10^{-16}	9.18×10^{23}
SL- 21	919	1.50	50	23	2.24×10^{-17}	3.49×10^{23}
SL- 23	865	1.50	50	23	1.66×10^{-18}	4.71×10^{24}
ST- 3	1107	2.00	65	18	1.01×10^{-14}	6.06×10^{20}
ST- 4	1058	1.90	62	13	6.87×10^{-16}	6.43×10^{21}
ST- 5	846	1.00	35	20	8.20×10^{-19}	8.28×10^{24}
ST- 8	1076	2.00	65	17	2.79×10^{-15}	2.07×10^{21}
ST- 9	1048	1.50	50	20	3.05×10^{-15}	2.33×10^{21}
ST- 15	814	1.00	35	20	1.50×10^{-19}	4.54×10^{25}
ST- 16	794	0.80	28	21	7.78×10^{-20}	9.18×10^{25}
SW- 2	842	1.00	35	26	1.54×10^{-18}	5.72×10^{24}
SW- 4	884	1.40	47	23	4.90×10^{-18}	1.60×10^{24}
SW- 6	896	1.60	53	23	6.64×10^{-18}	5.89×10^{24}

SL 标本采自蓬莱烈士陵园; ST 标本采自蓬莱铜井红石山; SW 标本采自无棣大山。

其中, $\dot{\epsilon}$ 为应变速率 (s^{-1}), P 为压力, T 为温度 ($^{\circ}K$), R 为气体常数 (数值取 1.987), σ 为差异应力 (P 、 σ 的单位为 kb, 1kb= 0.1GPa)。所获结果也列于表 3。由表 3 可见, 该地区第四纪时上地幔的应变速率为 $10^{-14} - 10^{-20} s^{-1}$, 它实际上也反映上地幔的流动速率。一般认为 $10^{-14} s^{-1}$ 为软流圈的应变速率数值^[15], 所研究的样品中只有一个接近此数值。

5.3 等效粘滞度的推导

相应地, 上地幔等效粘滞度也可通过以下公式来计算:

$$\eta = 0.2 \exp[(125200 + 320P)/RT] \sigma^{-2.2}$$

式中, η 为等效粘滞度, 其单位为 Poise (= 0.1Pa·s), 其他符号同上式。所获结果也列于表 3。由表 3 可见, 山东地区上地幔在第四纪时其粘滞度在 $10^{20} - 10^{25} Pa \cdot s$ 之间。一般认为 $10^{20} Pa \cdot s$ 为软流圈的粘滞度数值, 上面提到的样品接近这一数值。

6 讨论和结论

根据上面得到的结果, 来讨论山东地区第四纪上地幔的物理状态和流变学特征。

6.1 上地幔热结构

根据幔源包体的平衡温度、压力可以建立上地幔的地温线, 了解上地幔的大地热流和热结

构。其前提是包体在被寄主玄武岩捕获之前, 已经与周围的环境达到热平衡, 其标志是包体中矿物化学成分的均匀性。前面的论证表明所研究的样品基本上符合上述条件。因此, 所获平衡温度、压力可以用来重建上地幔的热结构, 其结果如图2所示。徐义刚等^[13]曾建立中国东部上地幔的地温线(图2)。图2还表示了石榴石/尖晶石的相变曲线以及橄榄石+斜长石/尖晶石+两种辉石的相变曲线。由图2可见, 数据点绝大多数都落在徐义刚等人地温线的左侧, 只有少量样品落在右侧。大部分样品落在尖晶石的稳定区中, 但有四个样品落在了石榴石的稳定区中。徐义刚等的数据以及澳大利亚东南部的地温线中也存在这样的情况。相平衡实验表明, 橄榄岩中Cr含量的升高, 可以扩展其稳定的温压范围。这四个样品中尖晶石的Cr含量确实远高于其他样品。图2中的虚线是根据本文的数据确立的该地区上地幔的地温线。该地温线位于徐义刚等曲线的左侧, 表明它低于徐义刚等的地温线。应当指出, 徐义刚等的地温线是根据新第三纪玄武岩中的幔源包体建立的, 而本文的地温线则是根据第四纪玄武岩中的包体建立的。因此, 它们之间的差异应当反映不同时期上地幔地温线的变化。

6.2 上地幔流变参数剖面

图3画出了所计算的差异应力、应变速率和等效粘滞度随温度而变化的剖面, 实际上它反映了在理想情况下上述参数随深度而变化的剖面。差异应力显示了随温度(深度)而变小的趋势, 虽然线性关系不是十分明显。应变速率及等效粘滞度与温度有明显的线性关系, 前者随温度的升高而增大, 后者随温度的升高而降低。这些关系与Ave Lallemant等人^[15]发现的规律一致, 同时也符合他们提出的大陆拉张带和裂谷上地幔的上述参数的剖面。上述情况可以用上地幔的底辟上涌来解释, 同时也表明在第四纪时, 该地区上地幔仍符合大陆拉张带或裂谷上地幔的特征。

6.3 几点结论

根据以上论述, 可以得出以下结论:

(1) 山东第四纪玄武岩中的幔源包体以尖晶石相的二辉橄榄岩为主, 其结构为原生粒状型和原生粒状结构向残斑结构的过渡型, 未发现具有典型的残斑结构和粒状变晶结构的包体。这一结构特征与第三纪玄武岩中幔源包体的结构特征不同, 后者包括了从原生粒状结构—残斑结构—粒状变晶结构的过渡系列, 部分发育糜棱结构^[2]。这表明第四纪时期上地幔的变形作用要弱于第三纪时期。

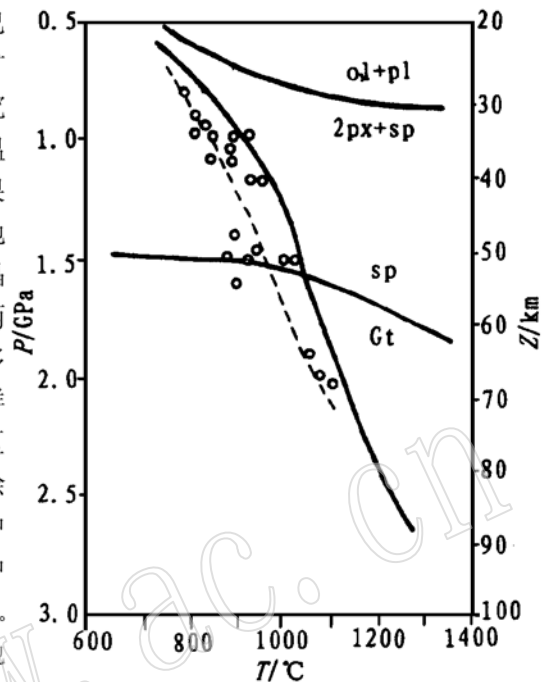


图2 山东第四纪玄武岩中包体的平衡温度、压力图
Fig. 2 $P-T$ diagram for mantle xenoliths from Quaternary basalts in Shandong Province

(图中的实线为徐义刚等建立的中国东部的上地幔地温线; 虚线为本文建立的上地幔地温线)

(The solid line in the diagram is the upper mantle geotherm constructed by Xu et al., whereas the dash line is the geotherm obtained in this study.)

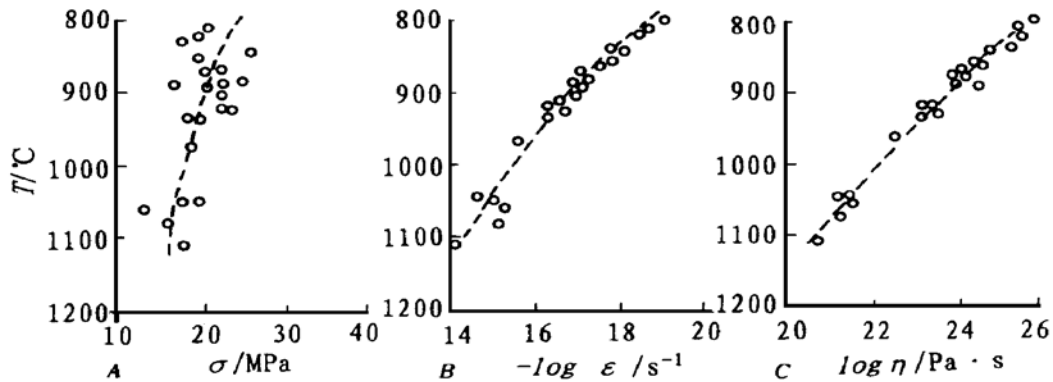


图3 差异应力、应变速率和等效粘滞度随温度而变化的剖面

Fig. 3 Differential stress (a), strain rate (b) and equivalent viscosity (c) as a function of temperature
a—差异应力剖面; b—应变速率剖面; c—等效粘滞度剖面

(2) 包体中橄榄石的位错亚构造既有反映上地幔高温位错蠕变机制的位错亚构造, 如位错倾斜壁、扭转壁、位错等, 也有反映较低温、高应变速率事件的典型构造, 如(110)[001]滑动条带。这些位错亚构造特征与第三纪包体中的类似, 这一方面表明第四纪时期变形作用的性质仍与第三纪时期一样; 另一方面则表明上地幔的变形作用至少有两期, 早期以高温蠕变为主, 后期叠加有高应变速率变形事件(可能与地震活动有关)。

(3) 所研究的包体的平衡温度范围为 800—1100 °C, 平衡压力为 0.8—2.0 GPa, 包体的来源深度为 28—65 km。本区第四纪玄武岩浆的来源深度至少为 65 km。由包体平衡温度、压力建立的第四纪时期该地区上地幔的地温线要稍低于徐义刚等人(1995)根据新第三纪玄武岩中的幔源包体确立的中国东部上地幔地温线。笔者确立的地温线反映出第四纪时期上地幔的热活动低于第三纪。这表明中国东部上地幔的底辟上涌在第四纪时期已有所减弱。

(4) 由幔源包体显微构造参数计算得到的上地幔差异应力数值在 13—26 MPa 之间, 这一数值范围要低于新第三纪时期的差异应力值^[1], 但与早第三纪时期的数值较为接近^[16]。应变速率为 10^{-15} — 10^{-19} s⁻¹, 等效粘滞度在 10^{21} — 10^{25} Pa·s 之间。上述参数随温度而变化(实际上也反映随深度的变化)的剖面, 反映出差异应力和等效粘滞度随深度而降低, 应变速率则随深度而升高。所获曲线与早第三纪的曲线非常相近。

(5) 将本区与中国东部早第三纪及新第三纪上地幔的物理状态和流变特征^[4, 16]相对比, 可以得出如下的结论: 中国东部上地幔在早第三纪时或之前开始有底辟上涌, 它导致岩石圈的减薄及地壳的拉张, 造成中国东部的拉张环境和裂谷的发育。上地幔的这种运动可能在新第三纪达到高峰, 而在第四纪又有所减弱。

参 考 文 献

- 1 鄂莫岚, 赵大升主编. 中国东部新生代玄武岩及深源岩石包体. 北京: 科学出版社, 1987, 490.
- 2 林传勇, 史兰斌, 何永年, 陈孝德. 中国东部幔源包体的变形特征及其上地幔流变学意义. 钱祥麟主编, 伸展构造研究. 北京: 地质出版社, 1994, 87—98.
- 3 何永年, 林传勇. 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, 1981, 3(1): 41—50.
- 4 林传勇, 史兰斌, 陈孝德, 何永年. 中国东部上地幔物理状态和流变特征: 幔源包体证据. 国家地震局地质研究所,

- 现今地球动力学研究及其应用. 北京: 地震出版社, 1994, 121—128.
- 5 徐义刚. 适用于幔源包体的地质温度计. 岩石学报, 1993, 9(2): 167—178.
 - 6 Carswell D A & Gibb F G F. Evaluation of mineral thermometers and barometers applicable to garnet lherzolite assemblages. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1987, 95: 499—511.
 - 7 Bertrand P & Mercier J-C C. The mutual solubility of coexisting ortho- and clinopyroxene: towards an absolute geothermometer for the natural system. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1985, 76: 109—122.
 - 8 Witt G E & Seck H A. Solubility of Ca and Al in orthopyroxene from spinel peridotite: an improved version of an empirical geothermometer. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1991, 106: 431—439.
 - 9 Brey G P & Kohler T. Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers and practical assessment of existing thermobarometers. *Jour. Petrol.*, 1990, 31: 1353—1378.
 - 10 Nickel K G, Brey G P & Kogarko L. Orthopyroxene clinopyroxene equilibria in the system CaO—MgO—Al₂O₃—SiO₂ (CMAS): New experimental results and implications for two pyroxenes thermometry. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1985, 91: 44—53.
 - 11 Mercier J C C. Single pyroxene thermobarometry. *Tectonophys.*, 1980, 70: 1—37.
 - 12 Kohler T & Brey G P. Calcium exchange between olivine and clinopyroxene calibrated as geothermobarometer for natural peridotite from 2—60 kb with applications. *Geochem. Cosmochem. Acta*, 1990, 54: 2375.
 - 13 徐义刚, 林传勇, 史兰斌, Mercier J-C C, Ross J V. 中国东部上地幔地温线及其地质意义. *中国科学*, 1995, 25(8): 874—881.
 - 14 Ross J V, Ave Lallemand H G & Carter N L. Stress dependence of recrystallized grain and subgrain size in olivine. *Tectonophys.*, 1980, 70: 39—61.
 - 15 Ave Lallemand H G, Mercier J-C C, Carter N L et al. Rheology of upper mantle: inference from peridotite xenoliths. *Tectonophys.*, 1980, 70: 85—113.
 - 16 林传勇, 史兰斌, 陈孝德, 张小鹤. 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*, 1995, 14(4): 301—312.

Deformation Features of Mantle Xenoliths from Quaternary Basalts in Shandong Province and Their Rheological Implication

Chen Xiaode Lin Chuanyong Zhang Xiaou Shi Lanbin
(Institute of Geology, State Seismological Bureau, Beijing 100029)

Key words: Shandong Province; mantle xenolith; upper mantle; rheology

Abstract

The Quaternary basalts in Shandong Province contain mantle xenoliths of varied quantities and sizes. These mantle xenoliths are mainly spinel lherzolite characterized by protogranular and porphyroclastic textures. The dislocation substructures of olivine from the xenoliths indicate a deformation process dominated by dislocation creep under the upper mantle condition. The equilibration temperature and pressure of the xenoliths are estimated to be 800—1100 °C and (下转第 159 页)

(上接第153页)

this range of depth, the differential stress of the upper mantle should be 13—26 MPa, while the strain rate and the equivalent viscosity are 10^{-14} — 10^{-20} s⁻¹, and 10^{20} — 10^{25} Pa•s respectively. The thermal structure and rheological features of the upper mantle beneath the studied area coincide with those beneath the continental extension zone and the rift. It is considered that an upper mantle diapir occurred since Early Tertiary in eastern China, giving rise to the thinning of the lithosphere and the formation of extensional environment in this area. It reached its climax in Late Tertiary and has begun weakening since Quaternary.

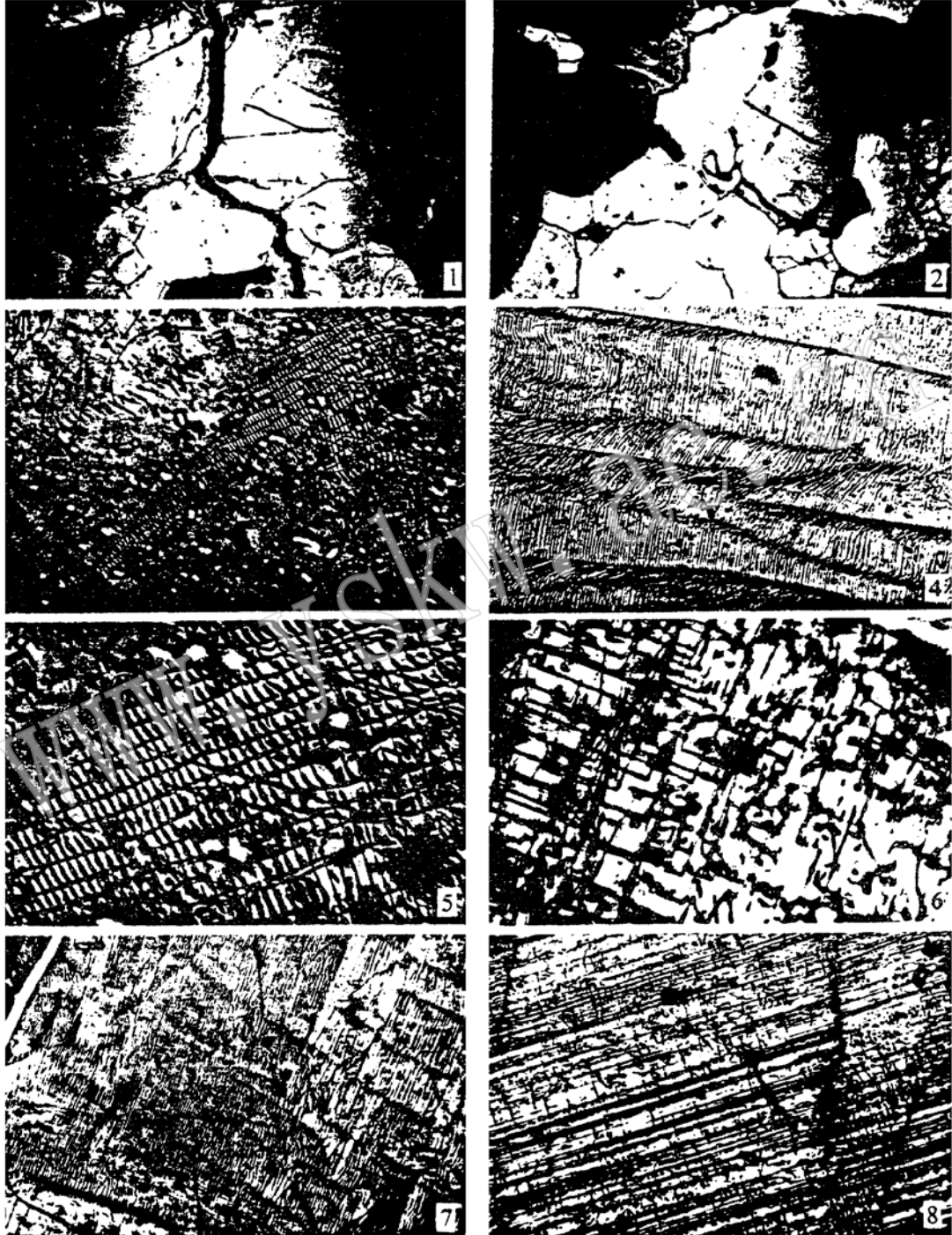


图 版 说 明

照片 1 原生粒状结构 ST-1 标本 单偏光 $\times 20$

照片 2 原生粒状结构向残斑结构的过度 ST-20 标本 正交偏光 $\times 20$

(下转第 192 页)

www.yskw.ac.cn

(上接第 190 页的图片说明)

照片 3 位错列与位错网络 SL- 5 标本 单偏光 $\times 125$

照片 4 位错倾斜壁 ST- 2 标本 单偏光 $\times 157.5$

照片 5 位错网格(扭转壁) SL- 6 标本 单偏光 504

照片 6 滑动位错环 SL- 22 单偏光 $\times 504$

照片 7 初步发育的亚晶粒构造 SL- 8 单偏光 $\times 128$

照片 8 滑动条带 SL- 12 标本 单偏光 $\times 157.5$