

在塑性变形过程中辉长岩部分熔融的熔体特征

周永胜¹ 何昌荣¹ 桑祖南^{2,3} 金振民³

1 中国地震局地质研究所, 中国地震局构造物理开放实验室, 北京 100029

2 中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

3 中国地质大学, 武汉 430074

摘要 采用透射电镜对辉长岩塑性变形过程中产生的熔体进行了研究, 结果表明, 在 950 ~ 1000 °C 时出现初熔, 初熔熔体呈薄膜状分布于两个斜长石边界, 或者呈三角形分布于 3 个斜长石之间. 这种早期熔体的 SiO₂ 含量在 60 % 左右. 在 1050 °C 时, 熔融程度增加, 熔体不仅出现在斜长石之间, 也出现在斜长石与辉石或磁铁矿之间. 熔体的 SiO₂ 含量低于 50 %. 斜长石之间的熔体薄膜随熔体含量增加而变宽, 把孤立的熔体三角形贯通, 形成彼此连通且定向排列的熔体三角形. 这可能是在构造差应力作用下熔体向应力小的方向运移和聚集的结果. 这些熔体中有许多均匀分布的 0.1 ~ 0.2 μm 的暗色“小球”, 暗色“小球”周边的硅酸盐熔体富硅贫铁, SiO₂ 含量超过 70 %, 而暗色“小球”成分富铁贫硅, SiO₂ 含量低于 40 %, 这表明熔体发生了分异. 其中富铁贫硅熔体局部发生了结晶作用, 形成了树枝状磁铁矿雏晶. 熔体成分分异使富铁成分从玄武岩浆中分离, 这对磁铁矿富集成铁矿起到重要作用.

关键词 部分熔融 熔体分布 差应力 辉长岩

文章编号 0001-5733(2003)04-0482-06 **中图分类号** P584 **收稿日期** 2002-02-25, 2003-04-15 **收修定稿**

MELT CHARACTERS OF PARTIAL MELTED GABBRO UNDER PLASTIC DEFORMATION CONDITION

ZHOU YONGSHENG¹ HE CHANGRONG¹ SANG ZUNAN^{2,3} JIN ZHENMIN³

1 Institute of Geology and Tectonophysics Laboratory, CSB, Beijing 100029, China

2 Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

3 China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

Abstract The microstructure and chemical composition of melt formed in process of plastic deformation of gabbro are studied using the transmission electron microscope (TEM). The result shows that initial melt occurs at 950 ~ 1000 °C in a film-like shape along the boundary between two plagioclase grains or in the tubules of triangle between three plagioclase grain section. SiO₂ content of the early melt is about 60 %. At 1050 °C, with increasing melting degree, the melt appears not only between boundaries of plagioclases, but also between boundaries of plagioclase and pyroxene or magnetite, and its SiO₂ content is lower than 50 %. The melt films between boundaries of plagioclase grains are widened with increasing melt, and connectd the isolated melt tubules of triangle into local connected network which is oriented melt tubules of triangles in cross section. Maybe this is a result of migration of melt toward the place of lower stress under the differential stress. Many dark “small balls” about 0.1 ~ 0.2 μm in diameter are evenly distributed in the melt. Silicate melt around the dark “small balls” is rich in SiO₂ and poor in FeO, whose SiO₂ content is higher than 70 %. But the dark

基金项目 国家重点基础发展规划项目 (G1998040704)、国家自然科学基金和中国地震局构造物理开放实验室基金共同资助项目 (40002020).
中国地震局地质研究所论著号: 2002B0059.

作者简介 周永胜, 男, 生于 1969 年, 博士, 副研究员. 主要从事高温高压实验研究. E-mail: zhouysh@eqigf.ac.cn

“small balls” are poor in SiO_2 and rich in FeO , whose SiO_2 content is lower than 40%. It indicates that the melt is differentiated. The FeO -rich and SiO_2 -poor melt was locally crystallized and formed dendritic small magnetite crystallites. The separation of iron from the melt is an important factor for formation of high grade magnetite ore.

Key words Partial melt, Melting distribution, Differential stress, Gabbro.

1 引言

根据吉布斯自由能平衡理论,在液固两相平衡体系中,液体相有 3 种分布形态^[1]:(1)液体完全湿润颗粒边界,熔体二面角为 0° ;(2)液体沿 3 个颗粒边界形成内部连通的三维网络结构,液体三联点的二面角在 0° 与 60° 之间;(3)液体仅局限于 4 个颗粒构成的孤立空间中,液体二面角大于 60° 。对地质上 3 种重要岩浆体系(橄榄岩体系、玄武岩体系及花岗岩体系)进行的静态部分熔融实验研究表明,在非平衡态体系中,熔体可能出现上述各种分布方式,但在静态平衡体系中熔体的主要分布方式为上述第二种情况^[1]。部分熔融对岩石物理力学性质的影响主要取决于熔体的空间分布特征,熔体只有以前两种分布方式,部分熔融作用才能对岩石物理力学性质有显著影响,比如,促进岩石流变,引起岩石的电导率和波速异常等^[1-3]。地幔橄榄岩部分熔融实验中熔体的形态分布研究表明,在静态熔融中,熔体主要呈三角形管状分布于 3 个矿物颗粒之间,局部出现矿物边界平直的熔体薄膜,连通三角形管状熔体;在动态熔融中,熔体三角形边界变弯曲,部分或全部矿物边界含有薄膜状熔体,把三角形熔体连通^[4]。此外,动态熔融比静态熔融形成三维网络状分布所需要的时间大大缩短^[4]。显然,差应力在其中起了重要作用,这是因为在静态条件下,自然界熔体的迁移主要依靠熔体相与固体相之间的密度差来驱动,实验中熔体与固体两相间的能量分布(熔体表面张力)趋于平衡是主要的驱动力;而在差应力条件下对人工合成辉石进行部分熔融表明,差应力和化学扩散成为熔体迁移的主要驱动力^[1]。含差应力条件的动态部分熔融实验研究主要集中在地幔橄榄岩^[4-6]和花岗岩^[7-11],缺少对辉长岩的动态部分熔融研究。在国内仅有在静高压下进行辉长岩部分熔融实验的报道^[12]。本文介绍在含差应力的塑性变形条件下攀枝花辉长岩部分熔融中的熔体分布和成分特征。

2 实验条件和实验样品

实验在中国地震局地质研究所构造物理开放实验室的 Griggs 型固体压力容器三轴实验系统上完成。实验条件为:围压 450 ~ 500MPa、温度 900 ~ 1200、应变速率 $1 \times 10^{-4} \sim 3.1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ 、差应力多数为 70 ~ 900MPa(表 1),传压介质为氯化钠。实验样品采自四川省攀枝花钛铁矿底部边缘带的细粒辉长岩,呈细粒粒状结构,块状构造,无明显各向异性;主要组成矿物为斜长石(50%)和单斜辉石(40%)、角闪石(5%)、磁铁矿和钛铁矿(4%)、绿泥石(1%)。斜长石为板柱状,长轴平均值为 0.192mm,短轴平均值为 0.064mm,辉石长轴平均值为 0.224mm,短轴平均值为 0.096mm,长短轴分布无优选方位。实验样品为高 20mm 直径 10mm 的圆柱。样品在装样前放入烘箱内在 150 下干燥 24 ~ 48h。实验首先根据预先标定的比例按静岩压力施加轴压和围压,在达到设定值时各自进入恒压控制状态(由

表 1 辉长岩部分熔融实验条件

Table 1 The conditions for experiment on partial melting of gabbro

样品号	温度 ($^\circ\text{C}$)	围压 (MPa)	差应力 (MPa)	应变速率 (s^{-1})	熔融 程度
20a - 32	900	450	1317.35	1×10^{-4}	无熔体
			1079.17	2.5×10^{-5}	
			921.80	6.3×10^{-6}	
			834.04	3.1×10^{-6}	
20a - 18	950	450	897.09	1×10^{-4}	电镜下 发现初 熔点
			703.92	2.5×10^{-5}	
			516.90	6.3×10^{-6}	
20a - 34	1000	500	731	1×10^{-4}	熔体 < 0.5 %
			549	2.5×10^{-5}	
			366	6.3×10^{-6}	
20a - 37	1050	500	567.3	1×10^{-4}	熔体 < 1 %
			410.5	2.5×10^{-5}	
20a - 17	1150	500	141.6	1×10^{-4}	熔体 < 5 %
			102.1	2.5×10^{-5}	
			71.5	6.3×10^{-6}	

位移控制切换到压力控制,升温引起的膨胀不会使轴压增加,确保样品在加载前处于静岩压力状态。系统稳定后开始加温,温度达到设定值之后,保持 10min,固定围压和温度,在位移控制下按照等应变速率增加轴压。因此,在达到稳态流变前差应力逐渐增加,进入稳态流变后差应力基本保持不变。根据材料相变压力标定,由于摩擦引起的围压修正量在本研究范围内小于 70MPa,标本中最大温度梯度约为 11 K/mm。

3 实验结果

3.1 熔体分布特征

通过光学显微镜和透射电镜研究发现,900 时没有熔体产生。在 950 ~ 1000 时光学显微镜下没有发现熔体,但在透射电镜下发现初熔现象,由于出现的熔体很有限,估计含量小于 0.5%,熔体出现在两个斜长石边界,呈薄膜状分布(图 1a);或者出现于 3 个斜长石之间,呈三角形分布,其三联点二面角接近 60°,熔体从三联点呈薄膜状向斜长石接触边界延伸(图 1b)。在 1050 时,在偏光显微镜和透射

电镜下都观察到了熔体(图 1c ~ h,图 2),根据熔体所占面积比计算,熔体含量达到 0.5% ~ 1%。在电镜下发现,熔体不仅出现在斜长石之间(图 1c、d),斜长石与辉石两相矿物边界都有熔体出现(图 1e,图 2),甚至斜长石、辉石和磁铁矿三相矿物之间也有熔体存在。斜长石之间的熔体薄膜随熔体含量增加而增厚,把孤立的熔体三角形贯通,局部形成彼此连通且定向排列的熔体三角形,三角形的边界弯曲,其三触点二面角小于 60°(图 1c、d)。熔体这种定向排列分布方式与静态条件下橄榄石^[4]和花岗岩^[13]中熔体分布不同,这可能是在构造差应力作用下熔体向应力小的方向运移和聚集的结果。这些熔体中有许多均匀分布的 0.1 ~ 0.2 μm 的暗色“小球”(图 1f),局部发生了结晶作用,形成了树枝状磁铁矿微晶(图 1e ~ g)。温度升高到 1150 ~ 1200,熔体含量接近 5%左右,大部分矿物边界都出现熔体薄膜,基本形成了连通的熔体网络。上述熔体分布特征表明,在辉长岩的部分熔融中,斜长石是最早参与熔融的矿物,只有在熔融程度比较高的情况下辉石等矿物才参与熔融。

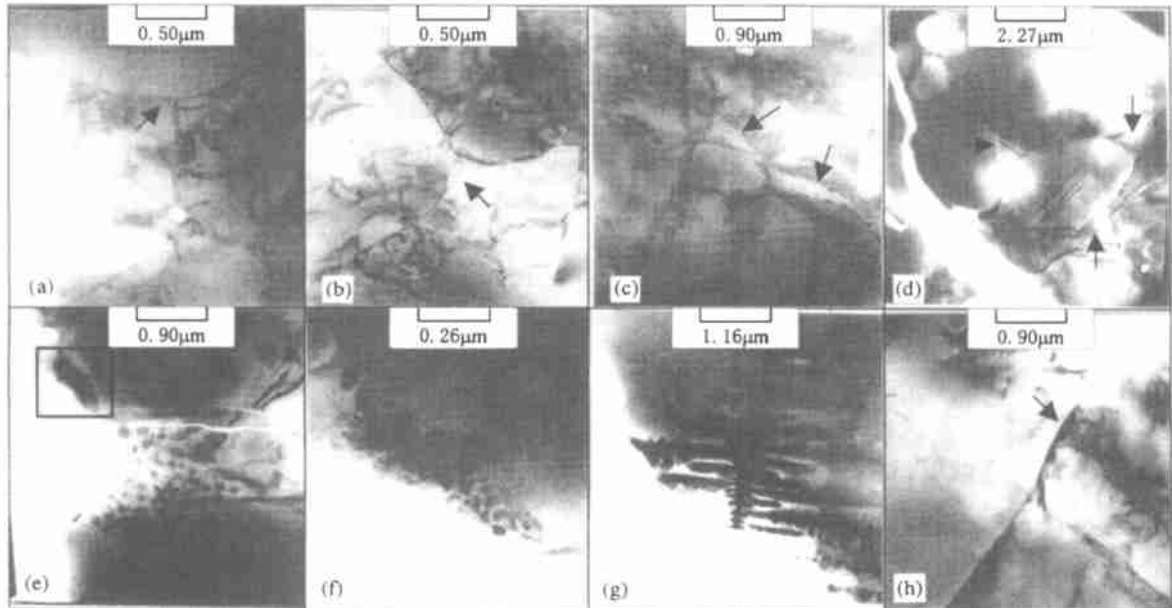


图 1 在塑性变形条件下辉长岩部分熔融的熔体结构特征

(a) 20b - 27(500MPa, 950 °C); (b) 20a - 34(500MPa, 1000 °C); (c ~ h) 20a - 37(500MPa, 1050 °C)。

Fig. 1 Microstructure of partial melted gabbro at plastic deformation condition

3.2 熔体成分特征

采用透射电镜能谱对熔体和熔融残留组分进行了化学分析(表 2),结果表明,出现在斜长石之间的熔体(图 3,实心圆), SiO₂ 含量接近斜长石,在 60%

左右,但 FeO 含量比斜长石偏高,而 Al₂O₃ 偏低。部分熔融早期主要是斜长石发生熔融,但其熔体成分与斜长石不完全相同,这是因为斜长石中的微晶磁铁矿包裹体(小于 0.01 μm)与斜长石一起参与熔融。

出现在斜长石与辉石之间的熔体(图 3,实心三角形)与出现在斜长石之间的熔体比较,其成分中 SiO_2 含量降低,低于 50%, FeO 含量增高, Al_2O_3 基本不变. 随着熔融程度增加,熔体中有许多均匀分布的约 $0.1 \sim 0.2\mu\text{m}$ 的暗色“小球”(图 1f). 电镜能谱分析表明(图 3),这些暗色“小球”周边的硅酸盐熔体成分(图 3,实心菱形)比早期熔体成分 SiO_2 含量更

高,超过 70%, FeO 含量偏低, Al_2O_3 含量略有降低,这种成分接近于酸性岩浆成分;而暗色“小球”成分(图 3,实心方框)普遍比实验样品全岩化学成分富 FeO 而贫 SiO_2 和 Al_2O_3 , SiO_2 含量低于 40%,部分暗色“小球”中 FeO 含量超过 60%(表 2). 这表明熔体发生分异,形成富铁贫硅的区域和相对贫铁富硅的区域. 熔体中富 FeO 区域在局部发生了结晶作用,

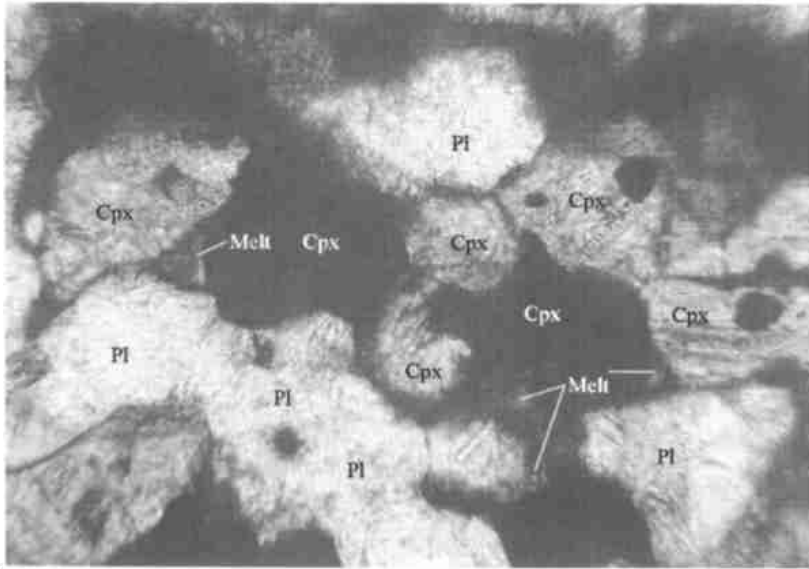


图 2 在 1050 下辉长岩部分熔融的熔体分布
图中,Cpx 单斜辉石;Pl 斜长石;Melt 熔体(正交偏光).

Fig. 2 Distribution of melt in gabbro at 1050

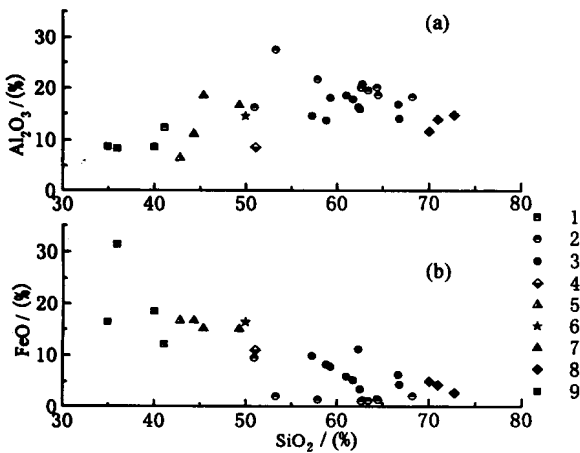


图 3 熔体主要成分 Al_2O_3 - SiO_2 (a)、 FeO - SiO_2 (b) 变化图

- 1 全岩化学成分;2 斜长石成分;3 斜长石之间的熔体成分;
- 4 辉石成分;5 角闪石成分;6 斜长石边界上的杂质成分;
- 7 斜长石与辉石之间的熔体成分;8 熔体分异出的富硅成分;
- 9 熔体分异出的富铁成分.

Fig. 3 Variation of major components, Al_2O_3 、 FeO - SiO_2 in melt

形成了树枝状磁铁矿雏晶(图 1e ~ g). 显然, FeO 大量出现在熔体中与磁铁矿和辉石参与熔融有关.

此外,在温度超过 950 时,在光学显微镜和透射电镜下都发现斜长石边界出现不透明物质(图 1h)^[14-16]. 能谱分析表明,这些不透明物质成分(图 3,五角星)接近于出现在斜长石与辉石之间的熔体成分,相对斜长石而言,富 FeO 而贫 SiO_2 和 Al_2O_3 . Boland^[17] 在单斜辉石脆延性转变的实验中也观察到同样的现象. 它们是原始样品中富铁的不透明杂质(包括磁铁矿和钛铁矿微晶包裹体)在变形过程中重新分布的结果,这表明在差应力条件下有某种杂质扩散作用存在,通过这种含铁杂质的扩散和聚集也能形成相对富铁的区域. 另外,在电镜中发现了少量角闪石,表明在塑性变形和部分熔融过程中,角闪石没有分解,即其中的结构水没有彻底脱出.

表 2 样品和熔体的主要化学成分表

Table 2 The main chemical composition of sample and melt

编号	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO *	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	MnO	TiO ₂	成分位置	温度
00	41.09	12.26	12.03	6.58	10.75	2.44	0.18	0.23	5.19	全岩分析	
01	66.69	16.57	6.03	4.46	2.40	1.62	0.63	0.82	1.80	斜长石间熔体	950
02			78.46	0.24	1.59			2.88	14.72	磁铁矿	
03	68.22	18.03	1.98	3.12	6.57	2.13	0.15		0.18	斜长石	
04	51.06	8.47	10.90	14.84	12.07	2.84	0.22	0.67	1.19	辉石	
05	42.81	6.37	16.62	3.45	14.05		0.48	1.03	4.09	角闪石	1000
06	45.38	18.46	15.08	7.72	4.20	7.23	0.20	0.92	1.84	斜长石与辉石间熔体	
07	61.02	18.38	5.75	4.59	6.43	2.86	0.68	0.27	0.73	斜长石间熔体	1050
08	61.77	17.62	5.04	5.53	5.53	2.06	1.25	0.51	0.82	斜长石间熔体	
09	70.97	13.67	4.06	4.09	2.75	2.07	1.26	0.46	0.73	熔体中富硅的部分	
10	34.91	8.66	16.44	11.82	6.57	7.97	1.65	1.39	6.60	熔体中富铁成分	
11	35.94	8.27	31.35	9.55	1.89	6.22	0.76	1.26	7.12	熔体中富铁成分	
12	57.26	14.42	9.69	5.16	3.35	6.54	1.16	0.58	3.20	斜长石间熔体	
13	39.98	8.53	18.45	11.06	6.66	6.93	0.68	1.15	5.46	熔体中富铁成分	
14	49.97	14.42	16.31	8.62	6.66		0.30	1.27	5.05	斜长石边缘富铁物质	
15	62.80	20.59	1.15	3.48	8.88	3.50				斜长石	
16	64.38	19.92	1.41	3.52	8.90	1.99		0.11	0.23	斜长石	
17	63.42	19.33	1.07	3.60	9.36	3.32		0.12		斜长石	
18	62.65	19.87	1.00	4.36	8.42	3.57		0.11	0.36	斜长石	
19	57.89	21.53	1.33	3.86	11.97	2.94	0.29	0.09	0.38	斜长石	
20	58.83	13.52	8.04	6.45	3.48	5.01	0.54	0.53	1.89	斜长石间熔体	
21	64.52	18.44	1.21	1.72	11.33	2.08	0.60	0.18	0.26	斜长石	
22	53.31	27.37	2.00	1.36	13.84	1.43	0.32		0.37	斜长石	
23	1.64	0.42	75.04		1.86		0.26	2.55	15.91	磁铁矿雏晶	
23-1	12.26	5.11	63.20		1.91		0.35	2.33	12.79	磁铁矿雏晶	
24	70.03	11.40	4.72	4.47	5.05	1.50		0.31	0.87	熔体中富硅成分	
25	50.96	16.13	9.33	6.60	5.73	3.41	0.74	0.88	2.36	斜长石	
26	62.34	16.07	10.98	6.81	0.63	2.87	0.76	0.61	1.28	斜长石间熔体	
27	59.29	17.92	7.60	4.72	6.87		1.45	0.47	3.00	斜长石间熔体	
28	72.76	14.49	2.58	3.38	1.79	2.15		0.21	1.57	熔体中富硅成分	
29	49.31	16.54	14.95	9.26	1.05	5.15	4.24	0.76	1.60	斜长石与辉石间熔体	
30	62.52	15.70	3.43	3.12	3.48	3.14	7.77	0.25	0.91	斜长石间熔体	
33	66.81	13.81	4.16	3.11	4.70	3.08	2.74	0.36	1.26	斜长石间熔体	
34	44.32	11.00	16.61	7.58	7.15	2.71	0.51	1.26	3.28	斜长石辉石间熔体	1000

* FeO 为全铁, 编号 00 为全岩化学分析(测试单位: 原地矿部分分析测试中心); 01 ~ 34 为透射电镜能谱分析成分(测试单位: 中国地质大学(武汉)测试中心)。其中编号 16 ~ 19 的斜长石成分是从颗粒中心到边缘连续测试, 其余矿物成分为颗粒中心成分。

4 结 论

在静态条件下对黑云母斜长片麻岩部分熔融研究表明, 熔体含量低于 4% ~ 5% 时, 熔体不能形成连通的网路结构^[13]。本实验中, 熔体含量在 1% 时, 就在局部形成连通的熔体网路, 在熔体含量接近 5% 时, 熔体基本形成了定向的连通网路。由此推测, 在

构造差应力作用下熔体向应力小的方向发生了运移和聚集, 显然, 构造差应力为熔体迁移和形成连通的网路结构提供了较好的驱动力。熔体化学成分分离导致了熔体中富硅成分与富铁成分分离, 这种分离是玄武岩浆结晶过程中辉长岩与磁铁矿分离形成铁矿的基本方式。含铁杂质在差应力作用下通过扩散而富集, 为辉长岩与磁铁矿的进一步分离及铁矿的形成起到重要作用。

参考文献

- [1] Cooper R F. Differential stress-induced melt migration: an experimental approach. *J. Geophys. Res.*, 1990, **95** (B5): 6979 ~ 6992
- [2] Shankland T J, R J O Connell, H S Waff. Geophysical constraints on partial melt in the upper mantle. *Rev. Geophys.*, 1981, **19**: 394 ~ 404
- [3] Cooper R F, D L Kohlstedt. Solution-precipitation enhanced diffusional creep of partially molten olivine-basalt aggregates during hot-pressing. *Tectonophysics*, 1984, **107**: 207 ~ 233
- [4] Jin zhen-ming, H Green, Y Zhou. Melt topology in partially molten mantle peridotite during ductile deformation. *Nature*, 1994, **372**: 164 ~ 167
- [5] Hirth G, D L Kohlstedt. Experimental constraints on the dynamics of the partially molten upper mantle. 1: Deformation in the diffusion creep regime. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**: 1981 ~ 2001
- [6] Hirth G, D L Kohlstedt. Experimental constraints on the dynamics of the partially molten upper mantle, 2: Deformation in the dislocation creep regime. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**: 15441 ~ 15450
- [7] Paquet J, P Francois. Experimental deformation of partial melted granitic rocks at 600 ~ 900 and 250MPa confining pressure. *Tectonophysics*, 1980, **68**: 131 ~ 146
- [8] Paquet J, P Francois, A Nedelec. Effect of partial melting on rock deformations: experimental and nature evidences on rocks of granitic compositions. *Tectonophysics*, 1981, **78**: 545 ~ 565
- [9] Dell angelo L N, J Tullis, R A Yund. Transition from dislocation creep to melt-enhanced diffusion creep in fine-grained granitic aggregates. *Tectonophysics*, 1987, **139**: 325 ~ 332
- [10] Dell angelo L N, J Tullis. Experimental deformation of partially melted granitic aggregates. *J. Metamorphic. Geol.*, 1988, **6**: 495 ~ 515
- [11] Rutter E H, D H K Neumann. Experimental deformation of partially molten Westerly granite under fluid-absent conditions, with implications for the extraction of granitic magmas. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**(B8): 15697 ~ 15715
- [12] 王岳军, 韩吟文, 林轲等. 辉长岩的高压部分熔融实验研究. *岩石学报*, 1998, **14**(1): 71 ~ 81
WANG Yuejun, HAN Yinwen, LIN Ke et al. An Experimental study on partial melting of gabbro at high pressure. *Acta Petrologica Sinica*, 1998, **14**(1): 71 ~ 81
- [13] Yang Xiaosong, Jin Zhenmin, E Huenges et al. Genesis of granulite in Himalayan lower crust: Evidence from experimental study at high temperature and high pressure. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(6): 448 ~ 454
- [14] 周永胜, 桑祖南, 何昌荣. 在差应力条件下辉长岩部分熔融过程中铁的富集方式. 见: 中国地球物理学会编. 中国地球物理学会年刊. 昆明: 云南科技出版社, 2001, 271
ZHOU Yongsheng, SANG Zunan, HE Changrong. The enrichment of iron ion during partial melting of gabbro under differential stress. In: Chinese Geophysical Society ed. Annual of the Chinese Geophysical Society. Kunming: Science and Technology of Yunnan Press, 2001, 271
- [15] ZHOU Yongsheng, HE Changrong, SANG Zunan. High-temperature deformation and flow laws of Panzhihua gabbro, Lagariaspei Joint Scientific Assembly, Hanoi, Vietnam. 2001, 380
- [16] 何昌荣, 周永胜, 桑祖南. 攀枝花辉长岩半脆性—塑性流变的实验研究. *中国科学*, 2002, **32**(9): 717 ~ 726
HE Changrong, ZHOU Yongsheng, SANG Zunan. An experimental study on semi-brittle and plastic rheology of Panzhihua gabbro. *Science in China*, 2002, **32**(9): 717 ~ 726
- [17] Boland J N, T E Tullis. Deformation behavior of wet and dry clinopyroxenite in the brittle to ductile transition region. In: B E Hobbs, H C Heard, eds. Mineral and Rock Deformation Laboratory Studies, Geophys. Monogr. Ser. Vol 36. AGU, Washington D C 1986, 35 ~ 50