

0.1 GPa 块状榴辉岩脱水部分熔融： 局部熔融体系和温度的影响

姜 杨^{1,2}, 周汉文^{1,2}, 杨启军¹, 徐学纯³, 马 瑞³

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

3. 吉林大学地球科学学院, 吉林长春 130061

摘要: 选取了湖北英山东冲河含有含水矿物黑云母和角闪石的退变质榴辉岩块状样品, 在 0.1 GPa 的恒压下, 分别进行了 750、800、850、900 °C 四个温阶、恒温加热 4 h 的开放体系的脱水部分熔融实验。熔融从含水矿物的脱水暗化开始, 850 °C 时出现玻璃质熔体。镜下观察显示, 熔体主要分布在后成合晶边界、熔融程度最高的样品顶端、石英颗粒边界及裂隙内部这 3 个局部熔融体系内。受局部体系内部物质组成的控制, 同一温阶、不同体系内的熔体成分变化很大, 呈基性、中性和酸性。随着温度的升高, 同一体系内的熔体成分均向酸性方向演化。该实验结果表明, 恒压下局部熔融体系内物质组成的不同和温度的变化是影响熔体成分的 2 个重要因素, 这为理解榴辉岩块状样品的脱水部分熔融行为及与其他基性变质岩类的熔融行为进行对比提供了实验依据。

关键词: 局部熔融体系; 温度; 脱水部分熔融; 块状样品; 退变质榴辉岩; 英山东冲河。

中图分类号: P589.1; P588.3

文章编号: 1000-2383(2006)01-0121-08

收稿日期: 2005-08-12

Dehydration Partial Melting Experiment on Solid Eclogite at 0.1 GPa: The Influence of Localized Melting System and Temperature

JIANG Yang^{1,2}, ZHOU Han-wen^{1,2}, YANG Qi-jun¹, XU Xue-chun³, MA Rui³

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

3. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China

Abstract: This study presents the open and dehydration melting experiments on solid retrograde eclogite from Dongchonghe in Yingshan, Hubei Province. The sample contains hydrous hornblende and biotite. The experiments are at 0.1 GPa and 750, 800, 850 and 900 °C. The duration time for heating is 4 h. The initial melting commences from dehydration melting of hydrous minerals, and melts appear at 850 °C. Melts are mainly in the three localized melting systems; they are the grain boundaries of symplectite, one side of sample on which is higher melting degree, and the grain boundaries and cracks of quartz. Because of different compositions of minerals in different localized melting systems, chemical compositions of melts range from basic to acid at the same temperature. And it runs to acid at the same localized melting system as increase of temperature. This study implies, at the same pressure, temperature and different compositions of minerals in different localized melting systems are the two main factors that influence compositions of melts. And it provides experimental evidences to understand dehydration melting behavior of eclogite and to contrast with other basic metamorphic rocks.

Key words: localized melting system; temperature; dehydration partial melting; solid sample; retrograde eclogite; Dongchonghe in Yingshan.

0 引言

实验岩石学领域讨论较多的是岩石含水体系的部分熔融,形成了一系列系统的理论.以花岗质岩石含水体系的部分熔融实验过程为例,随着温度的升高、岩石熔融程度的增加,岩石中含低熔点组分(如 K_2O 、 Na_2O 等)的长英质矿物长石、石英等优先熔融,含难熔组分(如 MgO 、 FeO 等)的黑云母、角闪石等随后熔融,剩下难熔的基性残留,熔体成分由酸性向基性方向演化(Brown and Fyfe, 1970; 吴福元, 1993).

自 20 世纪 70 年代起,国内外研究者开始注意有含水矿物参与的水不饱和情况下的部分熔融现象.与吸水熔融过程截然相反的是,岩石的部分熔融从暗色含水矿物(如黑云母、角闪石)的脱水熔融开始,长英质矿物石英、长石等后熔融(Thompson and Tracy, 1979; Thompson, 1982; Clemens, 1984; Rutter and Wyllie, 1988). 1991 年 Wyllie 领导的工作组将其定名为脱水部分熔融(dehydration melting),即初始物质中含有含水矿物的样品,在水不饱和的情况下,含水矿物的分解将直接导致样品的初始熔融(Wolf and Wyllie, 1991). 之后的研究者也接受并采用了这一概念(Rapp and Watson, 1995; Holland, 1996; Kar, 2002).

由于实验目的不同,部分熔融实验目前较流行的是使用粉末样品和块状样品.粉末样品的优点是熔融较易达到平衡,熔体成分较均一.块状样品的优点是较易直接观察未熔矿物与熔体之间所发生的转变反应及熔体的赋存状态(刘福来等, 1997). 到目前为止,国内外有关岩石块状样品的脱水部分熔融实验较为少见.吴福元(1993)采用块状样品进行脱水熔融,发现熔体成分主要受控于矿物边界条件,在其早期熔融过程中,熔体存在成分梯度,与原岩总体化学成分无关,据此提出了“局部熔融体系”的概念.而且,随着温度的升高,熔出的熔体由基性向酸性演化,与封闭体系的由酸性向基性方向演化的序列相反.之后,国内学者采用包括基性岩类在内的不同岩石类型进行块状样品部分熔融实验研究,亦得到了同样的结论(刘建忠等, 1998; 林强等, 1999; 杨晓松等, 2001; 周文戈等, 2005).

在国际上,基性变质岩类(斜长角闪岩、榴辉岩、绿片岩等)的脱水部分熔融实验基本上采用的是粉末样品,在不同温度、压力及无水或水不饱和的条件下,熔体成分多呈中性和酸性(Beard and Lofgren,

1989, 1991; Rapp *et al.*, 1991; Dunn, 1994; Wolf and Wyllie, 1994; Rapp and Watson, 1995; Winther, 1996; Seck, 1997; Klemme *et al.*, 2002). 基性变质岩类块状样品的脱水实验研究以斜长角闪岩为主(Wolf and Wyllie, 1991; 周文戈等, 2005), 鲜见使用天然块状榴辉岩样品的实验. 本文选择了英山东冲河含角闪石和黑云母等含水矿物的退变质榴辉岩块状样品. 已有的实验表明,与温度相比,压力对熔体成分的影响是有限的,且温压的设置多与特定的地质条件相对应,用以模拟岩石产出可能的地质温压条件(Rapp *et al.*, 1991, 1995; Dunn, 1994; 周文戈等, 2005). 本实验脱离了地质实际的限制,参考吴福元(1993)的实验结论,设置为 0.1 GPa 的恒压下开放体系脱水部分熔融实验,重点研究恒压下榴辉岩块状样品的脱水部分熔融过程、熔体成分特征,探讨恒压下控制熔体成分的主要因素. 对比本实验得到的熔体与其他基性变质岩类粉末样品或块状样品部分熔融得到的熔体成分上的异同,寻找出现异同的原因.

1 实验样品及实验、测试方法

实验样品(21BD23-1)采自大别英山东冲河,矿物组合为石榴子石(Gt)+绿辉石(Omp)+石英(Qz)+蓝晶石(Ky),副矿物有金红石、磷灰石和不透明矿物.其中部分石榴子石退变为钠长石(Ab)+黑云母(Bi)后成合晶;绿辉石基本退变为钠长石(Ab)+角闪石(Hb)的细粒蠕虫状的后成合晶,该后成合晶在单偏光下呈翠绿色(图 1a). 样品中的主要含水矿物为后成合晶中的黑云母和角闪石,岩石全岩化学成分及主要矿物成分详见表 1.

实验在吉林大学地球科学学院变质动力学开放实验室的高温高压三轴变形实验装置上进行.该装置为活塞圆筒式,里层是石墨,外隔热层是滑石,固体传压介质为滑石,采用 NiCr-NiSi 热电偶测温.实验样品加工成底面直径 20 mm、高 25 mm 的圆柱体放入圆筒内.该装置对水而言是开放体系,岩石的粒间水和结晶水在熔融过程中不断脱离体系,属脱水熔融实验.实验压力设置为恒压 0.1 GPa,实验温度设置了 4 个温阶:750、800、850 和 900 °C.每一样品在每个温阶下恒温加热 4 h 后淬火进行研究.

退变质榴辉岩岩石全岩化学成分在台湾大学地质科学系 X 荧光光谱(XRF)实验室测定.使用的仪

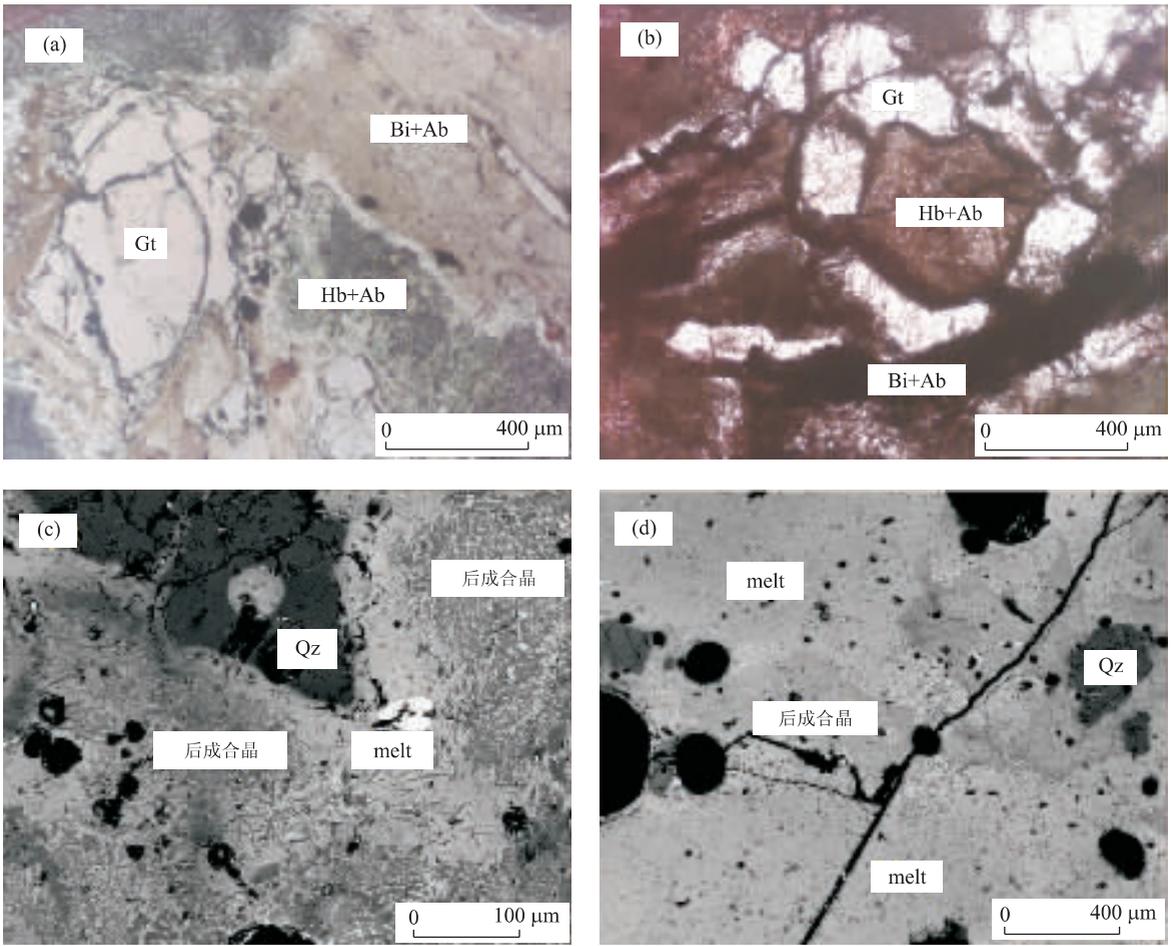


图 1 英山东冲河退变质榴辉岩原岩及其部分熔融过程的岩相学特征

Fig. 1 Characters and process of partial melting of retrograde eclogite from Dongchonghe in Yingshan

a. 原岩退变质现象明显, 单偏光; b. 750 °C 两类后成合晶 (Bi+Ab 和 Hb+Ab) 强烈脱水暗化, 单偏光; c. 850 °C 初始熔融, 熔体 (melt) 优先出现在后成合晶和石英之间, 背散射电子像; d. 900 °C 熔融程度最高的样品顶端中仅残留少量石英和后成合晶, 背散射电子像

表 1 实验样品退变质榴辉岩全岩化学成分及主要矿物化学成分

Table 1 Bulk compositions and mineral component of the experimental sample

代号	全岩	Gt	后成合晶 1		后成合晶 2	
			Ab	Hb	Ab	Bi
SiO ₂	47.65	40.45	64.43	46.47	62.65	36.84
TiO ₂	0.87	0.00	0.01	0.28	0.03	3.32
Al ₂ O ₃	16.92	21.44	22.35	10.60	24.44	16.98
FeO	10.51	20.05	0.18	10.36	0.24	11.60
MnO	0.15	0.40	0.00	0.04	0.00	0.01
MgO	8.19	10.05	0.00	13.84	0.00	15.89
CaO	10.21	6.33	3.60	12.13	5.44	0.00
Na ₂ O	2.62	0.01	8.56	1.60	7.89	0.43
K ₂ O	0.83	0.00	0.18	0.38	0.05	8.87
P ₂ O ₅	0.26	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	98.21	98.73	99.31	95.70	100.74	93.94

注: FeO. 全铁含量; Gt. 石榴子石; Ab. 钠长石; Hb. 普通角闪石; Bi. 黑云母.

器为日本 Rigaku 公司生产的 RIX2000 型 X 荧光分析仪, 加速电压为 50 kV, 加速电流为 50 mA, 测试精度可达 0.3%. 岩石矿物化学成分及实验所得的熔体成分均在中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室电子探针室 JCSA-733 型电子探针仪上测定. 分析加速电压为 25 kV, 电子束直径为 2 μm, 定量分析总量误差 ±3% 以内, 主元素相对双差 ≤5%, 检出限为 10⁻⁵ ~ 10⁻³ g.

2 部分熔融过程

由于样品是块状样品, 在加热过程中存在温度场效应, 形成了明显的温度梯度, 样品的不同部位熔融程度也出现了差异. 镜下观察发现, 样品的两端, 其中一端熔融程度最高, 另一端熔融程度最低. 为使

于下文叙述和讨论,将熔融程度最高的一端定为样品的顶端,熔融程度最低的一端定为样品的底端。下文将以样品顶端及靠近样品顶端的矿物的部分熔融过程为描述对象。

(1)750 °C,后成合晶中的黑云母和角闪石等含水矿物脱水暗化,后成合晶 Bi+Ab 呈褐黑色,后成合晶 Hb+Ab 呈较亮的墨绿色(图 1b)。由于 Bi 中的结构水比 Hb 多,导致后成合晶 Bi+Ab 的脱水暗化程度超过后成合晶 Hb+Ab,所以呈现的颜色也更暗。长石的表面发生糟化,石英变化不大,无熔体出现。

(2)800 °C,含水矿物暗化更加强烈,长石表面的糟化程度有所提高,但仍无熔体出现。

(3)850 °C,样品顶端和靠近样品顶端的少数矿物颗粒边界开始出现熔体。强烈脱水暗化的后成合晶发生分解熔融,其边界首先出现了熔体,且熔体优先出现在后成合晶与石英颗粒之间的局部熔融体系中(图 1c)。随着熔融程度的进一步提高,斜长石和石英开始参与熔融,颗粒边界变得圆滑,部分呈港湾状。熔融程度最高的样品顶端约有 15%的熔体,其中仅残留部分石英和后成合晶。

(4)900 °C时,在高温熔体的作用下,石英被熔体溶解形成多裂纹晶体,外部的熔体沿裂隙贯入。当熔融达到一定程度,各局部体系中的玻璃质熔体发生贯通和迁移,逐渐汇聚样品顶端。样品顶端矿物基本全部熔融,残留有小颗粒石英和少量后成合晶,熔体量大达 45%(图 1d)。该熔体与局部体系中迁移出来的熔体发生混合,形成的熔体相对比较独立,光性较为均一。

整个部分熔融过程中,除样品顶端有石榴子石参与熔融外,其他位置的石榴子石颗粒只在边界发生暗化,成分分析表明 Na 取代 Ca、Mg,进入了石榴子石的晶格中。另外,同种矿物之间没有熔体出现。

3 熔体成分及其制约因素

3.1 熔体分布及熔体成分

湖北英山东冲河退变质榴辉岩在 0.1 GPa 的恒压条件下,分别进行了 750、800、850、900 °C 的部分熔融实验。实验结果表明,750、800 °C 时没有熔体出熔,而 850 °C 时约有 15%的熔体出熔,900 °C 时约有 45%的熔体出熔。

镜下观察显示,熔体主要分布在以下 3 个熔融

体系:后成合晶边界、样品顶端和石英颗粒边界及裂隙内部。由于在退变质榴辉岩部分熔融过程中,2 类后成合晶中的暗色矿物(Hb 和 Bi)优先熔融,其残留无法分辨是哪一类后成合晶。从实验结果看,这 2 类后成合晶形成的熔体成分差异较小,所以将其归为一类。后成合晶和石英之间熔融程度高、熔体量大,导致该体系相对较开放,而且靠近后成合晶和靠近石英的熔体成分也存在差异,因此将其熔体分别归入更小的后成合晶边界和石英颗粒边界及裂隙内部这 2 个局部体系中,3 个局部体系的熔体成分详见表 2。

如图 2 所示,3 个局部熔融体系中熔体的 SiO₂ 含量有较宽的变化范围($w(\text{SiO}_2\%) = 45.42\% \sim 74.81\%$),熔体成分为基性—中性—酸性。后成合晶边界的熔体成分偏基性($w(\text{SiO}_2\%) = 45.42\% \sim 53.76\%$);样品顶端的熔体成分多为基—中性($w(\text{SiO}_2\%) = 49.29\% \sim 54.5\%$);而石英颗粒边界及裂隙内部的熔体成分为中—酸性($w(\text{SiO}_2\%) = 59.75\% \sim 74.81\%$)。随着温度的升高,同一体系内的熔体平均成分也发生了变化(表 3)。实验结果表明,恒压下局部熔融体系中物质组成的不同和温度的变化是导致熔体成分出现差异的直接原因。

3.2 局部熔融体系对熔体成分的影响

不同的局部熔融体系物质组成不同,在熔融过程中这些物质作为熔体的物源提供给熔体的组分也不同,因此得到的熔体成分也存在差异。而且同一局部体系内部更小的局部体系也同时影响着熔体的成分,导致个别熔体的成分出现异常。

(1)同一温度下,不同局部体系内部的熔体成分及其平均成分存在差异。在部分熔融过程中,后成合晶体系内对熔体做出贡献的主要是角闪石或黑云母及不同熔融程度的钠长石。在熔融程度最高的样品顶端,除石英和少量后成合晶外,其他矿物基本全熔,且融合了其他体系中迁移出来的熔体。石英颗粒边界及裂隙内部是一个特殊的局部熔融体系,与其他两个体系相比,最大的区别在于熔体对石英的溶解作用占主导地位,因此,这一体系内部对熔体做出贡献的主要是石英。由此可见,这 3 个局部体系内部对熔体成分做出贡献的物质组成不同,导致熔体成分及其平均也出现差异(表 2,3)。

(2)受局部体系内更小的局部体系的影响,同一体系内部的熔体个别组分的含量差异较大。石英颗粒边界及裂隙内部是一个很小的局部体系,除石英外没有其他物质的影响。其他 2 个体系相对较大,存

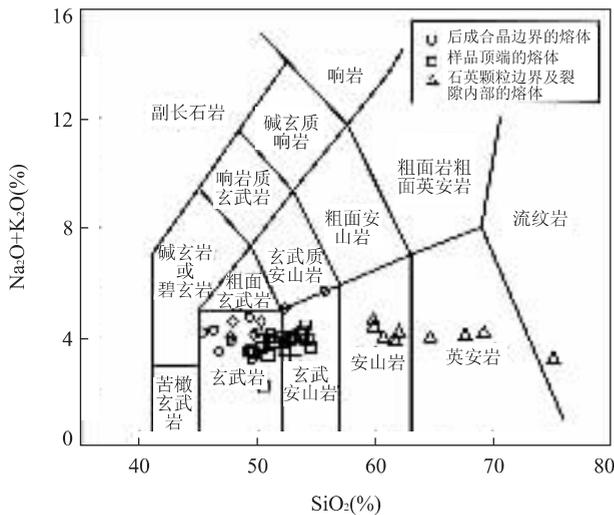


图 2 850 °C 和 900 °C 不同局部熔融体系内所有熔体成分在 TAS 岩石分类图解上的分布

Fig. 2 TAS diagram for all melts in different localized melting systems at 850 °C and 900 °C

在更小的局部体系, 不同温度下, 后成合晶边界的熔体 TiO_2 的含量基本在 0.05%~1.16% 之间, 有个别的点 TiO_2 的含量较高, 最高可达 4.18%。这是因为, TiO_2 组分主要由 Hb、Bi 和副矿物金红石提供, 局部体系内的物质成分不同, TiO_2 的含量也不确定。尤其是当含有金红石的更小的局部体系存在时, 该熔体成分的 TiO_2 含量比不含金红石的局部体系内的 TiO_2 含量高。样品顶端的熔体 TiO_2 含量在 0.53%~1.12% 之间, 变化较小。这是因为样品顶端是一个较大的局部体系, 熔体成分的均一程度要高于后成合晶体系内的熔体。

后成合晶边界的熔体成分中 MnO 的含量低于电子探针的检出限—0.19%, 平均值为 0.074%。样品顶端的熔体成分中 MnO 的含量为 0.02%~0.21%, 平均值为 0.127%。实验样品的全岩分析显示, MnO 组分主要由石榴子石提供。理论上, 在存在石榴子石的更小的局部体系里, MnO 含量会较高, 但由于石榴子石中 MnO 的含量本来就比较低 (0.40%), 加之熔体的迁移和化学平衡过程, 使其含量不会比其他区域的 MnO 含量高很多。所以, 虽然 MnO 组分的含量并没有出现像 TiO_2 组分那样明显的差异, 但局部体系对 MnO 组分的影响也是显而易见的。

3.3 温度对熔体成分的影响

温度对熔体成分的影响非常显著。随着温度的升高, 同一体系内的熔体平均成分也发生了变化。随

表 3 不同局部熔融体系熔体的平均成分

Table 3 Average compositions of melts in different localized melting systems

成分	I		II		III	
	850 °C	900 °C	850 °C	900 °C	850 °C	900 °C
SiO_2	48.713	49.587	50.821	53.240	67.353	62.935
TiO_2	0.988	1.626	0.764	1.004	0.177	0.218
Al_2O_3	17.198	17.010	17.771	19.416	11.247	12.322
FeO	9.847	8.014	5.564	1.736	5.863	7.788
MnO	0.095	0.062	0.119	0.086	0.073	0.085
MgO	6.818	6.521	8.835	7.949	3.123	3.982
CaO	9.562	11.162	10.883	11.361	4.450	6.937
Na_2O	3.570	3.195	3.113	3.024	2.403	3.110
K_2O	0.792	0.929	0.641	0.849	1.663	1.052

I. 后成合晶边界的熔体; II. 样品顶端的熔体; III. 石英颗粒边界及裂隙内部的熔体。

着温度的升高, 同一石英颗粒边界及内部的熔体中只有 SiO_2 含量升高而其他组分含量降低。因此, 温度对石英颗粒边界及裂隙内部的熔体成分的影响远小于局部体系对其的影响。对于后成合晶边界和样品顶端的熔体中 TiO_2 和 MnO 组分亦是如此。后成合晶边界的熔体平均成分随温度升高, SiO_2 、CaO、 K_2O 呈上升趋势, FeO、 Na_2O 呈下降趋势, Al_2O_3 、MgO 稍有下降。样品顶端熔体的平均成分随温度升高, SiO_2 、CaO、 K_2O 呈上升趋势, Al_2O_3 、FeO、MgO 呈下降趋势, Na_2O 稍有下降, 与后成合晶体系内熔体各组分随温度变化的趋势基本一致 (表 3)。不同体系内部的熔体成分均向酸性方向演化。

4 结论与讨论

从 20 世纪 70 年代脱水熔融实验开始以来, 前人进行了基性岩类的脱水部分熔融实验, 这些实验采用了经典的粉末样品或越来越受重视的块状样品, 在不同的温度、压力和水饱和程度下, 得到的熔体成分基本偏酸性, 多数可与 TTG 相对比 (Beard and Lofgren, 1989, 1991; Rapp *et al.*, 1991; Wolf and Wyllie, 1991, 1994; Dunn, 1994; Rapp and Watson, 1995; Winther, 1996; Seck, 1997; Klemme, 2002; 周文戈等, 2005)。这与本次实验的结果存在较大差异, 究其原因, 可以归结为以下几点:

(1) 样品初始状态的不同。本实验采用的是块状样品。由于块状样品部分熔融得到的熔体成分受到矿物边界条件的影响 (吴福元, 1993; 刘建忠等, 1998; 林强等, 1999; 杨晓松等, 2001; 周文戈等,

2005), 所以出现了 SiO_2 含量分布范围广 45.42%~74.81%), 熔体成分为基性—中性—酸性的结果。

(2) 水饱和程度的差异。Green and Ringwood (1968) 进行了榴辉岩粉末样品的部分熔融实验, 无水环境下的脱水熔融 SiO_2 含量仅达 63%, 而含水环境下的部分熔融 SiO_2 含量可达 74% (Green, 1982), 之后部分学者的实验研究也证实了这一规律 (Stern and Wyllie, 1978; Rapp *et al.*, 1991; Rapp and Watson, 1995; Yaxley and Green, 1998)。20 世纪 90 年代, Wolf and Wyllie (1994) 总结了自己和部分研究者的实验数据亦发现, 含水体系和无水体系部分熔融得到的熔体成分相比, 其 SiO_2 含量更高。

(3) 温度的影响。研究表明, 恒压、恒温加热时间相同的条件下, 随着温度的升高, 块状样品得到的熔体成分往酸性方向演化 (Wolf and Wyllie, 1991; 周文戈等, 2005), 而粉末样品得到的熔体成分会往基性方向演化 (Rapp *et al.*, 1991; Wolf and Wyllie, 1994; Dunn, 1994; Rapp and Watson, 1995; Klemme *et al.*, 2002), 这一结论与花岗质岩石的脱水部分熔融结论一致 (吴福元, 1993; 林强等, 1999)。本实验研究亦表明, 随着温度的升高, 块状样品得到的熔体成分会由基性向酸性方向演化。

(4) 恒温加热时间的影响。恒温加热的时间越长, 越有利于实验达到化学平衡。同一条件下, 加热的时间越长, 熔体的 SiO_2 含量越高 (Wolf and Wyllie, 1994; 周文戈等, 2005)。本实验采用了 4 h 的恒温加热时间, 与其他实验相比时间较短; 而且本实验采用的是块状样品, 与粉末样品相比更不易达到化学平衡。

通过对湖北英山东冲河退变质榴辉岩块状样品 0.1 GPa 恒压下进行的 750、800、850、900 °C 四个温阶的开放体系的脱水部分熔融实验, 可以得到如下认识: (1) 开放体系的脱水部分熔融从含水矿物的脱水暗化开始, 玻璃质熔体优先出现在石英和后成合晶边界。(2) 不同局部熔融体系的熔体成分为基性—中性—酸性, 受其所在局部熔融体系物质组成的控制, 与全岩化学成分无关。(3) 温度是影响熔体中各组分迁移规律的主要因素。随着温度的升高, 块状样品得到的熔体成分由基性往酸性方向演化。

致谢: 感谢中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室电子探针室刘慧芳老师的热心帮助; 感谢台湾大学地质科学系李寄嶠博士在分析样品主量元素所给予的帮助; 感谢博士生刘富为本文提出的宝贵修改意见。

References

- Beard, J. S., Lofgren, G. E., 1989. Effect of water on the composition of partial melts of greenstone and amphibolite. *Science*, 244: 195—197.
- Beard, J. S., Lofgren, G. E., 1991. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3 and 6, 9 kb. *Journal of Petrology*, 32: 365—401.
- Brown, G. C., Fyfe, W. S., 1970. Production of granitic melts during ultrametamorphism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 28: 310—318.
- Clemens, J. D., 1984. Water contents of intermediate to silicic magmas. *Lithos*, 11: 213—287.
- Dunn, T., 1994. Dehydration melting of a basaltic composition amphibolite at 1.5 and 2.0 GPa: Implications for the origin of adakites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 117: 394—409.
- Green, T. H., 1982. Anatexis of mafic crust and high pressure crystallization of andesites. In: Thorpe, R. S., ed., *Andesites; Orogenic andesites and related rocks*. Wiley, London, 465—487.
- Green, T. H., Ringwood, A. E., 1968. Genesis of the calc-alkaline igneous rock suite. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 18: 105—162.
- Holland, T. J. B., 1996. Waters phase relations of osumilite and dehydration melting in pelitic rocks: A simple thermodynamic model for the KFMASH system. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 124: 383—394.
- Kar, R., 2002. High-temperature dehydration melting and decompressive *P-T* path in a granulite complex from the Eastern Ghats, India. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143: 175—191.
- Klemme, S., Blundy, J. D., Wood, B. J., 2002. Experimental constraints on major and trace element partitioning during partial melting of eclogite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 66(17): 3109—3123.
- Lin, Q., Ge, W. C., Ma, R., et al., 1999. Experimental research on water loss melting of crustal rocks. *Journal of Changchun University of Science and Technology*, 29(3): 209—214 (in Chinese with English abstract).
- Liu, F. L., Shen, Q. H., Geng, Y. S., et al., 1997. Experimental research on the cause of formation between metamorphic reaction and dehydration melt. *Science in China (Series D)*, 27(6): 481—487 (in Chinese).
- Liu, J. Z., Lu, L. Z., Xie, H. S., et al., 1998. Dehydration-melting experiment of the Khondalite series of the northern segment in the Helan Mountains: Determina-

- tion and the significance of critical melt fraction. *Chinese Journal of Geology*, 33(4): 447—454 (in Chinese with English abstract).
- Rapp, R. P., Watson, E. B., Miller, C. F., 1991. Partial melting of amphibolite/eclogite and the origin of Archean tonalities, trondhjemites. *Precambrian Research*, 51: 1—25.
- Rapp, R. P., Watson, E. B., 1995. Dehydration melting of metabasalt at 8—32 kbar; Implications for continental growth and crust-mantle recycling. *Journal of Petrology*, 36: 891—931.
- Rutter, M. J., Wyllie, P. J., 1988. Melting of vapour-absent tonalite at 10 kbar to simulate dehydration melting in the deep crust. *Nature*, 331: 159—160.
- Seck, H. A., 1997. Partial fusion of basic granulites at 5 to 15 kbar; Implications for the origin of TTG magmas. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 127: 30—45.
- Stern, C. R., Wyllie, P. J., 1978. Phase composition through crystallization intervals in basalt-andesite-H₂O at 30 kbars with implications for subduction zone magmas. *Am. Mineral.*, 63: 641—663.
- Thompson, A. B., 1982. Dehydration melting of polytic rocks and the generation of H₂O-undersaturated granitic fluids. *American Journal of Science*, 282: 1567—1595.
- Thompson, A. B., Tracy, R. J., 1979. Model systems for anatexis of polytic rocks, II. Facies series melting and reactions in the system CaO-KAlO₂-NaAlO₂-Al₂O₃-SiO₂-H₂O. *Contribution to Mineralogy and Petrology*, 70: 429—438.
- Winther, K. T., 1996. An experimentally based model for the origin of tonalitic and trondhjemitic melts. *Chemical Geology*, 127: 43—59.
- Wolf, M. B., Wyllie, P. J., 1991. Dehydration melting of solid amphibolite at 10 kbar; Textural development, liquid interconnectivity and applications to the segregation of magmas. *Mineral Petrology*, 44: 151—179.
- Wolf, M. B., Wyllie, P. J., 1994. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar; The effects of temperature and time. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 115: 369—383.
- Wu, F. Y., 1993. The localized system and sequence of partial melting on granite. Jilin Science and Technology Publishing House, Changchun (in Chinese).
- Yang, X. S., Jin, Z. M., Huenges, E., et al., 2001. Dehydration melting experiment on biotite-plagioclase gneiss from high-Himalayas; Implications for crustal anatexis of Tibet. *Chinese Science Bulletin*, 46(3): 246—250 (in Chinese).
- Yaxley, G. M., Green, D. H., 1998. Reactions between eclogite and peridotite; Mantle refertilisation by subduction of oceanic crust. *Schweiz. Mineral. Petrol. Mitteil.*, 78: 143—255.
- Zhou, W. G., Xie, H. S., Liu, Y. G., et al., 2005. Partial melting of solid amphibolite at 2.0 GPa; Influence of time and temperature. *Science in China (Series D)*, 35(4): 320—332 (in Chinese).

附中文参考文献

- 林强, 葛文春, 马瑞, 等, 1999. 地壳岩石的失水熔融实验. 长春科技大学学报, 29(3): 209—214.
- 刘福来, 沈其韩, 耿元生, 等, 1997. 变质反应与脱水熔融成因关系的实验研究. 中国科学(D辑), 27(6): 481—487.
- 刘建忠, 卢良兆, 谢鸿森, 等, 1998. 贺兰山北段孔兹岩系脱水部分熔融实验. 地质科学, 33(4): 447—454.
- 吴福元, 1993. 花岗岩熔融的局部体系及熔融序列. 长春: 吉林科学技术出版社.
- 杨晓松, 金振民, Huenges, E., 等, 2001. 高喜马拉雅黑云斜长片麻岩脱水熔融实验; 对青藏高原地壳深熔的启示. 科学通报, 46(3): 246—250.
- 周文戈, 谢鸿森, 刘永刚, 等, 2005. 2.0 GPa 块状斜长角闪岩部分熔融——时间和温度的影响. 中国科学(D辑), 35(4): 320—332.