

<http://www.geojournals.cn/dzxb/ch/index.aspx>

河北平山阜平群两种岩石熔融过程中的 矿物相变及成分变化

贺义兴 宋书林

(长春科技大学, 130026)

内容提要 河北平山阜平群浅粒岩和黑云变粒岩—片麻岩熔融高温高压实验结果表明,在开放体系条件下两类岩石深熔作用性质有一定的独特性。主要表现为 SiO_2 不饱和的非均一局部熔融—再结晶效应。当实验温度为 680°C 时,黑云母与斜长石发生脱水熔融和部分熔融,转换成白云母、绿帘石、铁尖晶石、石英等物质成分;当温度为 $750\sim 800^\circ\text{C}$ 时,上述中间产物和残留黑云母及新生熔体进一步转变为夕线石、铁尖晶石、橄榄石、富 Ca 斜长石和钛铁晶石组合;而当温度高于 830°C 时,残留黑云母与斜长石进一步发生深熔作用,形成含单斜辉石新的矿物组合,并出现再结晶产物的分带现象。新生的矿物相 Mg、Fe、Ca 等随实验温度的升高显示出规律性的变化。该项实验对深入探讨开放体系条件下岩石的熔融行为和矿物相转变机制有着重要的科学意义。

关键词 浅粒岩 黑云变粒岩—片麻岩 橄榄石 尖晶石 富 Ca 斜长石 熔融实验

实验矿物—岩石学的研究进展程度是衡量当今地质科学研究水平的一个重要标志。我国 90 年代围绕“流体效应”比较深入地开展了变质岩高温熔融实验研究,并迅速发展成为热门课题。显然,这也是 21 世纪被广泛关注的焦点之一。

国外一些学者曾对花岗质岩石和变质岩等的某些硅酸盐矿物或矿物组合的熔融作用进行过尝试性实验研究^[1~3]。程裕淇等通过对河北平山地区阜平群 3 种变质岩类的深熔作用特点的研究,已初步揭示了矿物、岩石和地球化学等方面的某些特征及其机理,提出了一些新的认识^[4~6];同时也对其中两类(由长石砂岩变质形成的浅粒岩类和由粉砂质岩石生成的黑云变粒岩—片麻岩类)岩石开展了深熔作用的实验研究,并报道了部分初步研究成果^[7]。

本文报道是配合上述程裕淇等的两类岩石熔融实验所进行研究工作的一个侧面。主要从微区矿物学角度,把熔融实验的部分电镜—能谱观测资料和数据客观地展示出来,以便深入探讨深熔作用乃至花岗质岩浆作用的条件、环境、演化及其机理。

1 实验及观测条件

1.1 实验样品

用作实验的样品为两种:浅粒岩,以碱性长石和石英为主,含一定量的斜长石,少量($< 5\%$)黑云母,偶见其他矿物;黑云变粒岩—片麻岩,主要由斜长石和石英组成,含有一定量的黑云母和微量微斜长石。

1.2 熔融实验条件

注:本文为国家自然科学基金资助项目(编号 49872024)的部分成果。

本文 1999 年 4 月收到,8 月改回,刘淑春编辑。

实验设备:高温高压活塞圆筒式固体介质实验装置。实验条件:压力 $p=0.5$ GPa; 温度 $t=650^{\circ}\text{C}$, 680°C , 700°C , 720°C , 750°C , 780°C , 800°C , 830°C , 850°C , 880°C 。加温速率: $100^{\circ}\text{C}/20\text{min}$, 至恒温为止。每个岩石实验样品经 4 h 恒温后淬火, 磨制薄片供电子显微镜、能谱观测研究。熔融实验属开放体系。有关熔融实验条件详见文献[7]。

1.3 观测条件

观测仪器:分析型高分辨电子显微镜(JEM-2000FX)配置能谱仪(TN-5500)。观测条件:加速电压 20kV, 放大倍数 300~20000 倍;能谱分析采用国家和原地质矿产部颁布标样标定。

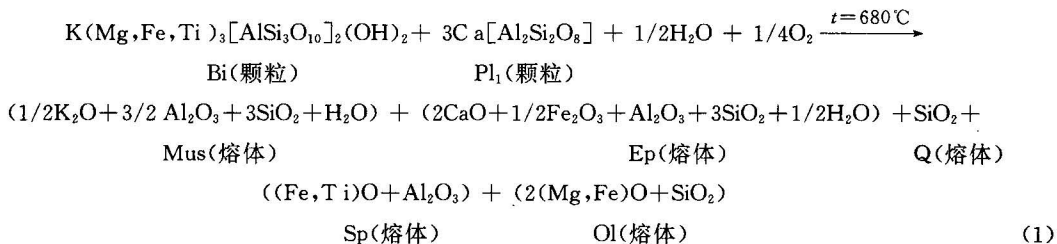
2 矿物的熔融及演变

根据同一岩石样品,在不同温度下熔融实验产物的宏观和微观研究,获得如下认识:

(1) 熔融强度随着加热温度的升高而加大。在最低温度 650°C 的实验产物中,局部开始见到呈脉状产出的熔体(图版 I-1)。熔体成分与周边物质相同,说明熔融过程中没有化学组分的远距离扩散和迁移; 680°C 以上,黑云母一般将逐渐消失。

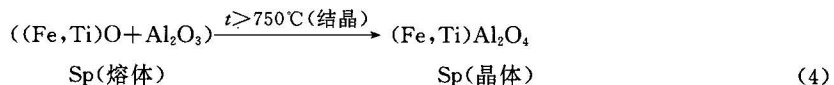
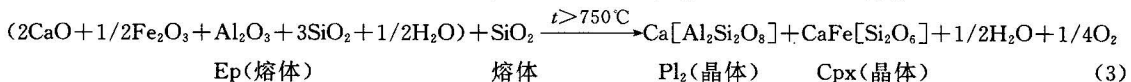
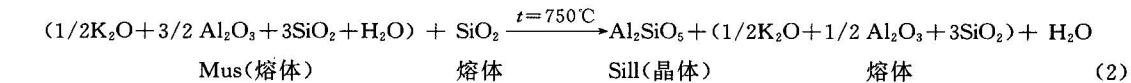
(2) 随温度升高,矿物被熔融程度的顺序(强→弱)为黑云母—斜长石、钾长石—石英;再结晶矿物显示出数量增多、颗粒变大的趋势。

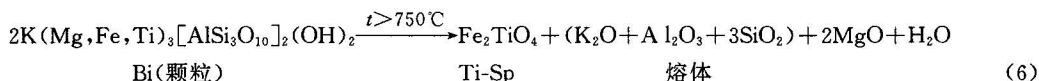
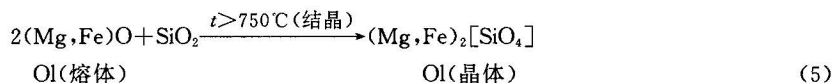
680°C 局域出现黑云母熔融,分离成白云母(Mus)、绿帘石(Ep)、铁尖晶石(Sp)、石英(Q)等成分的物质及残留黑云母(Bi)(图版 I-2)。反应过程中,反应起始物及其产物的成分复杂,同一物质的不同部位微区成分的元素含量变化大。反应式很难用实测数据表达,为了便于说明,理想地表示如下:



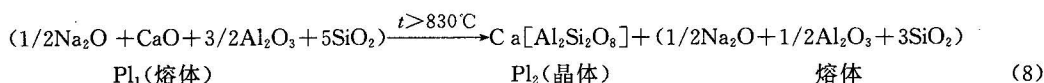
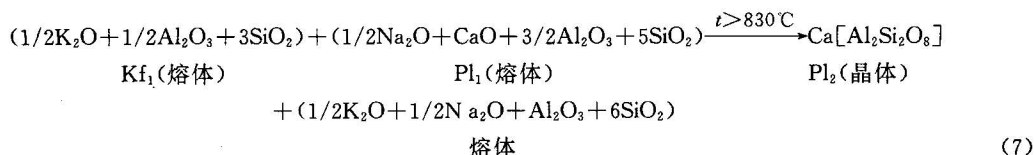
从图版 I-2 可以看出,反应产物 Mus、Ep、Q、Sp 和残余黑云母(Bi(M))均在原始黑云母颗粒的不同部位产出,除 Q 外,各产物尚无自身的再结晶晶体形态,基本上继承原始黑云母解理片的形貌特点。因而,所有产物应为未结晶成矿物晶体的熔体相。但在图版 I-2 范围内未见橄榄石(Ol)成分的物质。

750°C 以上,中间产物白云母、绿帘石、铁尖晶石等成分物质(熔体)和残留黑云母进一步转变成夕线石(Sill)(图版 I-3)、铁尖晶石(Sp)(图版 I-4)、橄榄石(Ol)(图版 I-5)、富 Ca 斜长石和钛铁晶石(Ti-Sp)等晶体:

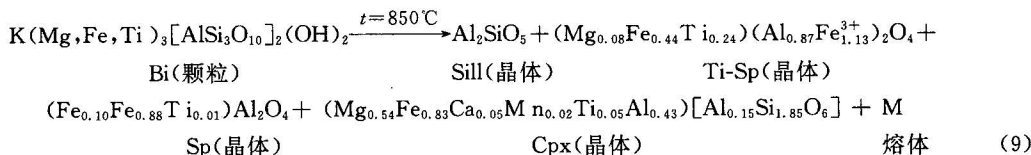




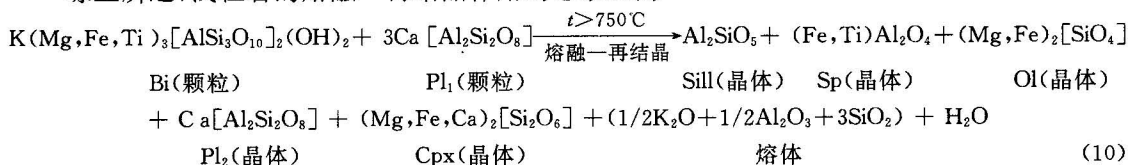
830℃以上,出现由熔体再结晶生成的富Ca斜长石晶体(Pl₂) (图版 I -6),可能反应式为:



850℃,样品中观测到黑云母再结晶产物的分带现象。沿垂直解理方向上,从边缘→中心,再结晶产物颗粒由粗→细,按矿物的展布可划分4个带(图版 I -8):①单斜辉石带,由版状单斜辉石(Cpx)和部分钛铁晶石(Ti-Sp)混杂产出,带宽5~10 μm;②钛铁晶石带,主要为散布的钛铁晶石(Ti-Sp),带宽15~20 μm;③铁尖晶石带,主要由密集的铁尖晶石晶体(Sp)组成,宽10 μm左右;④夕线石带,由夕线石和黑云母熔体构成。相邻两带之间无严格界线,表现为过渡关系,可能的反应是:



综上所述,浅粒岩的熔融一再结晶作用的总效应为:



(3) 熔融及其再结晶作用表现出非均一性特点。肉眼和偏光显微镜观察到样品的明显分带,电子显微镜下的非均一性更为详尽。石英颗粒未见明显熔融现象,偶见在石英颗粒周边颗粒间裂隙局部穿插产出的成分为SiO₂的熔融脉体。样品中不同部位熔体成分表现出差异,易熔矿物亦呈现出不同部位的不一致性熔融。例如,在正常情况下,黑云母于650℃或更低温度开始熔融,680℃出现熔融分离产物,750℃转变成晶形完好的再结晶矿物,其原始特征应面目全非;其实不然,在经880℃高温处理的样品的某些特殊部位,仍可见到局部熔融的黑云母颗粒(图版 I -7)。总之,浅粒岩在高温增温条件下,经历了固态岩石→非均一部分熔融的熔体相→再结晶成固态矿物相的过程。

同时,对黑云变粒岩进行了熔融实验对比研究,其效应与浅粒岩类似,其差别表现在相同的温压条件下,黑云变粒岩被熔融的程度、再结晶产物的数量和颗粒尺度均明显高于浅粒岩。

3 主要再结晶产物的成分变化

如上所述,浅粒岩与黑云变粒岩中矿物的熔融转变具有相同的趋势。在750℃以上生成的

表 1 夕线石晶体微区成分

Table 1 Micro-area composition of sillimanite

样品号	加热温度 (°C)	主要组成元素的原子个数							
		Na	K	Ca	Fe	Ti	Al	Si	O
Q6	750	0.05	0.01	0.01	0.04	0.01	1.94	0.99	5.00
Q7	780	0.05	0.04	0.00	0.01	0.01	1.95	0.99	5.00
B2-5	850	0.05	0.06	0.01	0.08	0.00	1.91	0.99	5.00

表 2 橄榄石晶体微区成分

Table 2 Micro-area composition of olivine

样品号	加热温度 (°C)	主要组成元素的原子个数							
		Mg	Ca	Mn	Fe	Ti	Al	Si	O
B2-6	680	1.01	0.03	0.00	0.59	0.03	0.18	1.00	4.00
B2-1	750	1.45	0.01	0.02	0.50	0.01	0.00	1.00	4.00
B2-2	780	1.57	0.00	0.01	0.39	0.02	0.00	1.00	4.00
B2-5'	850	1.32	0.00	0.00	0.68	0.00	0.00	1.00	4.00
B2-7(1)	880	1.36	0.02	0.01	0.60	0.01	0.00	1.00	4.00
B2-7(2)	880	1.42	0.01	0.02	0.54	0.00	0.00	1.00	4.00

表 3 铁尖晶石微区成分

Table 3 Micro-area composition of spinel

样品号	加热温度 (°C)	主要组成元素的原子个数						
		Mg	Ca	Mn	Fe	Ti	Al	O
Q6	750	0.10	0.00	0.00	0.87	0.04	1.93	4.00
Q7	780	0.15	0.03	0.01	0.70	0.03	1.97	4.00
B2-5	850	0.54	0.00	0.00	0.45	0.00	2.00	4.00
B2-7	880	0.39	0.01	0.00	0.67	0.04	1.90	4.00

表 4 再结晶斜长石微区成分

Table 4 Micro-area composition of recrystallization plagioclase

样品号	加热温度 (°C)	主要组成元素的原子个数							
		Na	K	Ca	Fe	Ti	Al	Si	O
B2-1	750	0.28	0.10	0.36	0.05	0.03	1.39	2.62	8.00
B2-5	850	0.19	0.09	0.55	0.02	0.02	1.45	2.55	8.00
B2-5	880	0.38	0.07	0.30	0.07	0.01	1.23	2.77	8.00

一种 SiO_2 不饱和的环境下进行。也就是说,原始岩石(酸性)中的石英组分 SiO_2 很少或没有参与反应,原因何在?

根据人造水晶(SiO_2)生产工艺,石英是在碱性介质环境中熔融一再结晶。在本实验中,实验样品与空气直接接触,属于开放体系;从反应式(1)~(10)看出,其反应为脱水作用过程,而且未见含水的最终生成产物。因而,可以推测,岩石样品在实验熔融过程中,包括水(主要是 OH)在内的挥发组分,逐步地逸出了体系,未能与黑云母和钾、钠长石等矿物转变成熔体时所解离出来的 K^+ 、 Na^+ 离子结合成有利于石英熔融的,诸如 $\text{K}(\text{OH})$ 、 $\text{Na}(\text{OH})$ 等碱性介质,石英则被置于在反应体系之外,不能为体系的熔融一再结晶作用作出应有的贡献。参与反应的黑云

具完好晶形的再结晶矿物晶体,如夕线石、橄榄石、尖晶石和斜长石类等,其成分表现较好均一性,即同一晶体的不同微区,具有确定的化学组成和相对稳定的元素含量。通过归纳,无论浅粒岩或变粒岩,再结晶矿物晶体的成分含量均随加热温度显示出一定的相关性,在此将两类岩石的再结晶产物归并在一起进行讨论。

① 夕线石主要组成元素简单,其含量随温度变化不明显(表1)。② 橄榄石主要组成元素 Mg、Fe 随温度表现出规律性变化。680°C→780°C, Mg 增高, Fe 降低; 850°C, Mg 降低, Fe 升高; 880°C, Mg 再增高,相反, Fe 则降低(表2,图1)。③ 铁尖晶石的 Mg、Fe 含量变化规律: 750°C→850°C, Mg 增高, Fe 降低; 850°C→880°C, Mg 降低, Fe 升高(表3,图2)。④ 850°C 生成的斜长石中 Ca、Al 含量似乎比 750°C 和 880°C 的结晶产物要高(表4)。

4 讨论

通过研究,发现了一些值得讨论和深入研究的特殊现象:

(1) 夕线石、橄榄石、尖晶石、富钙斜长石等矿物的产出表明,浅粒岩的熔融转变似乎是在

母和钾、钠长石等主要矿物相,只能在其自身成分 SiO_2 不饱和条件下,通过局域的自身熔融和组分重组完成整个反应过程。所以,浅粒岩熔融一再结晶生成夕线石、橄榄石、铁尖晶石、钛铁晶石、钙长石等矿物的事实,表面上是反映一种 SiO_2 不饱和的介质环境,实质上可能是开放体系少水条件、石英组分很少或未能参与反应的局熔一再结晶效应的重要表征。这一解释只是笔者在当前情况下所能提出的一种看法,是否还有其他更重

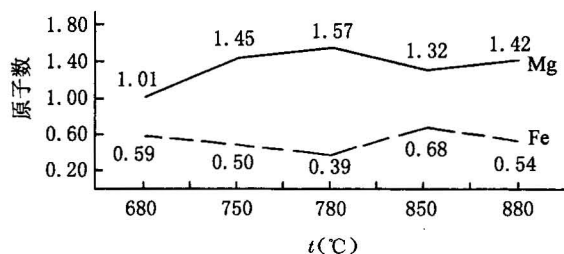


图1 橄榄石 Mg、Fe 变化曲线

Fig. 1 The distributing curves of Mg and Fe in olivine

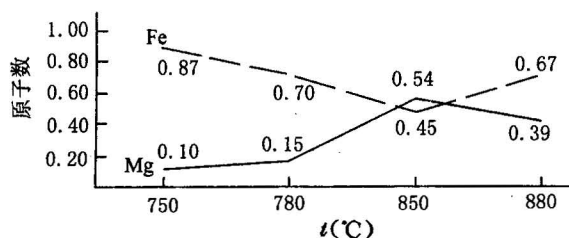


图2 铁尖晶石 Mg-Fe 变化曲线

Fig. 2 The distributing curves of Mg and Fe in spinel

要的制约因素,有待于继续探讨。

(2) 橄榄石、尖晶石和再结晶斜长石的主要组成元素含量变化趋势在 850°C 出现突变,意味着什么?

如上所述,本实验为开放体系。实验中观测到,从 680°C → 830°C 增温过程中,体系压力基本维持恒压(0.5 GPa),当向 850°C 转换时,压力出现下降现象,此时通过调压,再达到设定压力。压力降低,矿物结晶温度相应降低。橄榄石 Mg、Fe 分配特点(图1)及斜长石中 Ca、Al 含量变化(表4),或许与此温、压变化有关。尖晶石类矿物中,影响元素分配原因较复杂,其中矿物组成元素八面体择位能是个不应忽略的重要因素。铁尖晶石中,八面体结构位置基本被 Al^{3+} 充填, Mg、Fe 占据四面体位置,而钛铁晶石中,八面体择位能相对较高的 Fe^{2+} 有利进入八面体位置。研究结果表明,850°C 晶出的钛铁晶石含 Fe 量(60% FeO)高于 780°C 钛铁晶石(56% FeO)中的。因此,铁尖晶石的 Mg、Fe 变化规律(图2),直观看是受体系温度制约,本质上可能与加热进程中, Fe^{2+} 优先进入共同晶出的钛铁晶石结构的八面体位置,而不是铁尖晶石四面体位置有关。细节有待进一步讨论。此外,再结晶产物中为何不见斜方辉石? 这也是一个需要深入研究的课题。笔者认为,有必要进行相同样品的水饱和封闭体系实验,以便综合对比。

本研究是在程裕淇院士和高吉凤研究员的规划和精心指导下进行的,并得到长春科技大学“变质动力学开放实验室”和“电子显微镜测试研究室”的大力支持和协助,在此一并致谢。

参 考 文 献

- Hosockek G. Melting relations of biotite + plagioclase + quartz. *Nenes Jb. Miner. Mh.*, 1976. 2.
- Mckenzie D P. The generation and compaction of partial melts. *J. Petrol.*, 1984. 25.
- Waters D J. Partial melting and formation of granulite facies assemblages in Namaqualand, South Africa. *J. Metamorphic Geol.*, 1988. 6.
- 程裕淇,高吉凤,万渝生. 河北平山晚太古代阜平群一些主要变质岩类深熔特征的初步研究. 见:地质科学论文集. 北京:中国经济出版社,1996. 273~284.
- 高吉凤. 河北平山晚太古代阜平群一些主要变质岩类及其深熔产物的稀土地球化学初步研究. *岩石学报*, 1997, 13(3): 418~426.
- Cheng Yuqi, Gao Jifeng, Wan Yusheng. Notes on the anatexis of some metamorphic rock types of the Late Archaean Fuping

Group of Northwestern Pingshan, Hebei Province, China. Proceedings of the 30th International Geological Congress, Symposium 8~10, 1997.

- 7 程裕淇, 高吉凤, 万渝生, 马瑞. 河北平山阜平群两种岩石类型的初步熔融实验及其启示. 中国地质, 1998. 250(3): 18~22.

Phase Transition and Composition Change of Minerals from Melting Experiment of Two Kinds of Metamorphics in Fuping Group, Pingshan, Hebei Province, China

He Yixing and Song Shulin

(Changchun University of Science and Technology, Changchun, 130061)

Abstract

A high-T/high-P experiment of melting of leuco-granulite (leuco-leptite) and biotite granulite-gneiss of the Fuping Group in Pingshan, Hebei Province shows that in an open system, the two types of rocks have some unique features of anatexis. They are mainly manifested by SiO_2 -unsaturated and inhomogeneous local melting-recrystallization. At the temperature of 680°C , biotite and plagioclase became dehydrated-melted and partially melted, transformed into muscovite, epidote, hercynite, quartz, etc.; when $t=750\sim 800^\circ\text{C}$, the above intermediate products as well as the residual biotite and new-born melts were transformed into sillimanite, hercynite, olivine, Ca-rich plagioclase and ulvospinel assemblages; and when the temperature exceeded 830°C , the residual biotite and plagioclase were further melted to form new assemblages containing clinopyroxene, with the occurrence of zoning of the recrystallized products. The content of Mg, Fe and Ca in the neogenic mineral facies displayed regular variations with rising of the temperature. This experiment is of important scientific significance in further exploring into the melting behaviours of rocks and the transformation mechanism of mineral facies in an open system.

Key words: light colored granulite; biotite granulite-gneiss; olivine; spinel; plagioclase-rich Ca; melting experiment

图 版 说 明

1. 黑云母(Bi)、斜长石(Pl)、石英(Q)界面充填的熔体脉(M)及黑云母的局部熔融形貌。
2. 黑云母熔融产物: 黑云母熔体(Bi(M))、白云母(Mus)、绿帘石(Ep)、铁尖晶石(Sp)和石英(Q)等成分物质(熔体)。
3. 再结晶生长的夕线石晶簇。
4. 黑云母熔体中的铁尖晶石晶体。
5. 黑云母熔融转变的橄榄石。
6. 钾长石熔体中的富Ca斜长石晶体(Pl_2)。
7. 局熔黑云母形貌, 沿解理方向的两端熔融强烈。
8. 黑云母再结晶产物的分带现象。从左→右: ①单斜辉石带, ②钛铁晶石带, ③铁尖晶石带, ④夕线石带。

作 者 简 介

贺义兴, 男, 1942年生。1960年毕业于长春地质学院。现为长春科技大学教授, 长期从事微区矿物学研究。通讯地址: 130026, 长春科技大学。

