

950 °C、1.0~3.5 GPa 下斜长角闪岩脱水熔融—— 压力和时间对结构的影响

周文戈¹, 范大伟^{1,2}, 万方^{1,2}, 邢印锁^{1,2}, 刘永刚¹, 谢鸿森¹

1. 中国科学院地球化学研究所地球深部物质与流体作用地球化学实验室, 贵州 贵阳 550002
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

Zhou Wenge¹, Fan Dawei^{1,2}, Wan Fang^{1,2}, Xing Yinsuo^{1,2}, Liu Yonggang¹, Xie Hongsen¹

1. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China
2. Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Zhou Wenge, Fan Dawei, Wan Fang, et al. Textural development of dehydration-melting in amphibolite at 1.0-3.5 GPa and 950 °C—Effect of pressure and time. Earth Science Frontiers, 2009, 16(1): 146-154

Abstract: Two sets of dehydration-melting with a natural solid amphibolite (56vol. % hornblende, 43vol. % plagioclase), collected from the Dabaineng-Leyu profile in the southern Ailaoshan orogenic belt, Honghe County, Yunnan Province, have been carried out in multi-anvil apparatus (YJ-3000t and JL-3600t) at 1.0-3.5 GPa and 950 °C for 20-300 h. One is keeping the temperature at 950 °C and the annealing time of 100 h, varying the pressure (1.0-3.5 GPa). The other is keeping the pressure at 3.0 GPa and temperature at 950 °C, varying the annealing time (20-300 h). The products are inspected with microscope and electron probe. The results indicate that at 950 °C, annealing time of 100 h, as the pressure in the range of 1.0-1.5 GPa, the mineral assemblage in the products is clinopyroxene + garnet + melt. As the pressure larger than 1.5 GPa, the mineral assemblage in the products is clinopyroxene + garnet + melt + Jadeite + SiO₂ ± kyanite. However, at 3.0 GPa and 950 °C, as the annealing time in the range of 20-100 h, the mineral assemblage of clinopyroxene + garnet + melt + Jadeite + SiO₂ ± kyanite appears successively with time in the products. As the annealing time longer than 100 h, the mineral assemblage of clinopyroxene + garnet + melt appears in the products. The distribution of the newly-formed minerals and melt is restricted by the texture of the started amphibolite. Based on the mineral distribution and assemblage in the run products at 1.0-3.5 GPa and 950 °C for 20-300 h, the textural development of amphibolite during the partial melting process, the metamorphic reaction, and the garnet corona generation are discussed.

Key words: high temperature and high pressure; dehydration-melting in amphibolite; textural development; metamorphic reaction; garnet corona

摘要: 利用 YJ-3000t 和 JL-3600t 多顶砧压力机, 以哀牢山造山带南部红河县大白能—乐育剖面上的天然块状斜长角闪岩为初始样品, 在 950 °C、1.0~3.5 GPa、恒温 20~300 h 条件下进行了两个系列的斜长角闪岩块状样品脱水部分熔融实验: (1) 保持温度 $T=950$ °C, 加热时间 $t=100$ h 不变, 改变压力 (1.0~3.5 GPa) 的实验; (2) 保持温度 $T=950$ °C, 压力 $p=3.0$ GPa 不变, 改变加热时间 (20~300 h) 的实验。结果表明, 1.0~3.5

收稿日期: 2008-12-05; 修回日期: 2008-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40873052); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KJ CX2-SW-N20) 和西部之光联合学者项目 (2008 年度)

作者简介: 周文戈 (1967—), 男, 研究员, 从事实验岩石学研究。E-mail: wengezhou@sohu.com

GPa、950 °C 恒温 100 h 的条件下,随压力升高,斜长角闪岩中依次生成了单斜辉石 + 石榴石 + 熔体的矿物组合 (1.0 ~ 1.5 GPa) 和单斜辉石 + 石榴石 + 熔体 + 硬玉 + SiO₂ 矿物 + 蓝晶石 (2.0 ~ 3.5 GPa) 的矿物组合。3.0 GPa、950 °C 条件下,随加热时间增加,实验产物中依次生成了单斜辉石 + 石榴石 + 熔体 + 硬玉 + SiO₂ 矿物 + 蓝晶石的矿物组合 (20 ~ 100 h) 和单斜辉石 + 石榴石 + 熔体的矿物组合 (150 ~ 300 h)。斜长角闪岩的原岩结构决定了实验产物中新生矿物和熔体的分布。依据实验产物的矿物组合和新生矿物的分布特征,讨论了 950 °C、1.0 ~ 3.5 GPa、恒温 (20 ~ 300 h) 条件下,斜长角闪岩部分熔融过程的结构变化、变质反应以及石榴石冠状体的成因。

关键词:高温高压;斜长角闪岩脱水熔融;结构变化;变质反应;石榴石冠状体

中图分类号:P589.1;O52 文献标志码:A 文章编号:1005-2321(2009)01-0146-09

岩石部分熔融过程中,对于岩石结构在部分熔融过程中演化的研究并不多见^[1-4]。以斜长角闪岩部分熔融的实验研究为例,高温高压条件下斜长角闪岩部分熔融的实验已经进行了广泛而深入的研究^[5-9],但是绝大多数的斜长角闪岩部分熔融实验采用粉末样品为初始实验样品,主要研究了新生矿物与熔体的成分特征,以及它们与温度和压力的关系,以此讨论太古宙 TTG 和显生宙中酸性岩浆的成因^[5-9]。采用粉末样品为初始实验样品在实验前就已经破坏了天然岩石结构,无法观察实验过程中岩石结构的变化。因此斜长角闪岩部分熔融过程中,岩石结构在部分熔融过程中的演化的研究非常少见。仅 Hacker、Wolf 等和周文戈等以天然块状斜长角闪岩为初始实验样品,在高温高压下研究了斜长角闪岩部分熔融过程中新矿物及熔体的生成、分布,成分随温度和压力的演化,以及变质反应机制,稍稍涉及了斜长角闪岩部分熔融过程中岩石结构变化的研究。初步的研究显示,斜长角闪岩的组构以及各向异性的角闪石控制着熔体的分布和连通^[1-3]。

了解岩石部分熔融过程中的结构变化对于探讨深部地质过程中岩石和岩浆的物理化学性质至关重要。部分熔融过程中岩石结构的变化或者是由于已有矿物的重新分布引起的,或者是由于产生新的矿物(或熔体)引起的。矿物的重新分布和新矿物及熔体的产生会对岩石的物理性质产生很大的影响,例如矿物优选方位的形成,将导致岩石弹性、电性及热学性质的各向异性^[10-12];熔体的产生将大大降低岩石的弹性波速度,迅速提高岩石的电导率^[13-14]。另一方面,新矿物和熔体的产生将对岩石的化学性质产生很大影响,如新矿物的生成会引起元素在不同矿物中的重新分配,而中酸性熔体的生成将会导致不相容元素在熔体中的富集^[15]。

为此,我们在 1.0 ~ 3.5 GPa、950 °C、恒温 20 ~

300 h 条件下进行斜长角闪岩块状样品脱水部分熔融实验,初步研究了压力和时间对斜长角闪岩熔融过程中结构变化的影响,讨论这一过程中的变质反应,希望能够为进一步开展这一方面的研究起到抛砖引玉的作用。

1 实验样品和方法

实验样品为哀牢山造山带南部红河县大白能—乐育剖面上的天然斜长角闪岩。样品青灰色,块状,片麻理发育(图 2A)。主要组成矿物为斜长石 (43%)、角闪石 (56%),粒度一般小于 0.5 mm;次要矿物为绿帘石 (<1%)、磁铁矿 (<1%)、榍石 (<1%),粒度小于 0.3 mm。岩石的化学成分和主要矿物成分列于表 1。用于脱水熔融实验的块状岩石样品为平行片麻理高 5.0 mm ±,直径 6.0 mm ±,底端平行的圆柱体。

实验在中国科学院地球化学研究所地球深部物质与流体作用地球化学实验室 YJ-3000t 和 JL-3600t 多顶砧压力机上进行。实验系统的详细介绍见文献^[16-17],样品的组装与朱卫国等的类似^[18]。区别在于,本次实验在封装样品的石墨管外加了焊封的金管,确保样品不与传压介质发生反应(图 1)。将圆柱状实验样品(高 5.0 mm ±,直径 6.0 mm ±)装入石墨管中,石墨管外为焊封的金管,金管外为 850 °C 煅烧的叶蜡石管。两端为经过 850 °C 煅烧的高 10.3 mm ±,直径 12.0 mm ±的叶蜡石柱。将叶蜡石柱/焊封的金管 + 叶蜡石管/叶蜡石柱放入经 750 °C 焙烧的叶蜡石立方块传压介质的中孔里。采用不锈钢片做加热器。

样品室压力采用铜熔融曲线及石英-柯石英相变方法标定,压力测量误差小于 1.5%^[19-20]。样品室的温度采用 NiCr-NiSi 热电偶测量,温度测量误差小于 ±5 °C,温度测量结果未经过压力校正,样品

表 1 斜长角闪岩化学成分和矿物成分

Table 1 Amphibolite chemistry and mineralogy

岩石及矿物	方法	w _B / %										合计	
		SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO *	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅		LOI
斜长角闪岩	XRF	50.10	0.77	16.90	9.87	0.23	5.87	10.25	3.24	0.81	0.04	1.29	99.37
斜长石 (5)	EMP	60.03	0.01	24.90	0.05	0.03	0	7.37	7.08	0.47	-	-	99.94
	SD	1.57	0.08	1.06	0.06	0.02	0	0.65	0.54	0.08	-	-	
角闪石 (5)	EMP	43.58	0.61	12.06	15.58	0.50	10.28	11.56	1.48	0.65	-	-	96.80
	SD	0.90	0.16	1.04	0.95	0.04	0.52	0.48	0.08	0.27	-	-	

注:矿物含量为斜长石 43 %,角闪石 56 %,磁铁矿 + 绿帘石 + 榍石 < 1 %。XRF: X-荧光分析;EMP:电子探针分析;SD:标准差;LOI:烧失量。

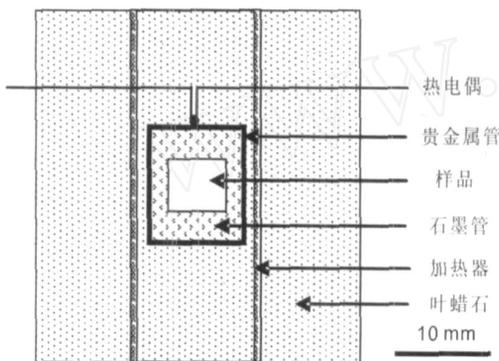


图 1 实验样品组装

Fig 1 Schematic diagram of the experimental assembly

室的温度梯度小于 15 °C。估计实验过程中的氧逸度在 QFM (石英-铁橄榄石-磁铁矿) 和 QFM-2 之间^[6,21]。

实验时首先以 4 × 10⁵ Pa/s 的速率升压至目标压力,稳定 10 min 后以 0.6 °C/s 的速率升温至 650 °C,恒温 10 min 后,再以 0.5 °C/s 的速率升温至 950 °C。恒温的时间为 20 ~ 300 h (表 2)。恒温过程中,压力波动小于 0.05 GPa,温度波动小于 ± 5 °C。

表 2 1.0 ~ 3.5 GPa、950 °C 恒温 20 ~ 300 h 实验产物的矿物组合

Table 2 Mineral assemblages of the run production at 1.0-3.5 GPa, 950 °C, and annealing time of 20-300 h

序号	实验号	t/h	矿物组合
1	L Y97-3.0-2	20	Cpx + Gt + Melt + SiO ₂ + Jd + Ky
2	L Y97-3.0-3	50	Cpx + Gt + Melt + SiO ₂ + Jd + Ky
3	L Y97-3.0	100	Cpx + Gt + Melt + SiO ₂ + Jd + Ky
4	L Y97-3.0-4	150	Cpx + Gt + Melt
5	L Y97-3.0-5	200	Cpx + Gt + Melt
6	L Y97-3.0-6	300	Cpx + Gt + Melt
7	L Y97-1.0	100	Cpx + Gt + Melt
8	L Y97-1.5	100	Cpx + Gt + Pl + Melt
9	L Y97-2.0	100	Cpx + Gt + Melt + SiO ₂ + Jd + Ky
10	L Y97-2.5	100	Cpx + Gt + Melt + SiO ₂ + Jd + Ky
11	L Y97-3.5	100	Cpx + Gt + Melt + SiO ₂ + Jd + Ky

Pl:斜长石;Cpx:单斜辉石;Jd:硬玉;Gt:石榴石;Melt:熔体;Ky:蓝晶石。

实验结束时,切断加热电源,使样品快速冷却。本次实验主要进行了两个系列的斜长角闪岩块状样品脱水部分熔融实验:(1)保持温度 T = 950 °C,加热时间 t = 100 h 不变,改变压力 (1.0 ~ 3.5 GPa) 的实验;(2)保持温度 T = 950 °C,压力 p = 3.0 GPa 不变,改变加热时间 (20 ~ 300 h) 的实验。

样品的矿物成分分析在中国科学院地球化学研究所的 JEOL 733 电子探针上完成。加速电压为 20 kV,电子电流为 200 × 10⁻⁷ A,电子束斑直径 5 μm。

2 实验结果

图 2 和图 3 为 1.0 ~ 3.5 GPa、950 °C 和恒温 20 ~ 300 h 实验产物的显微照片。从图中可以看出,在 950 °C 条件下,随压力和恒温时间不同,岩石结构发生了明显的改变。

2.1 压力对结构的影响

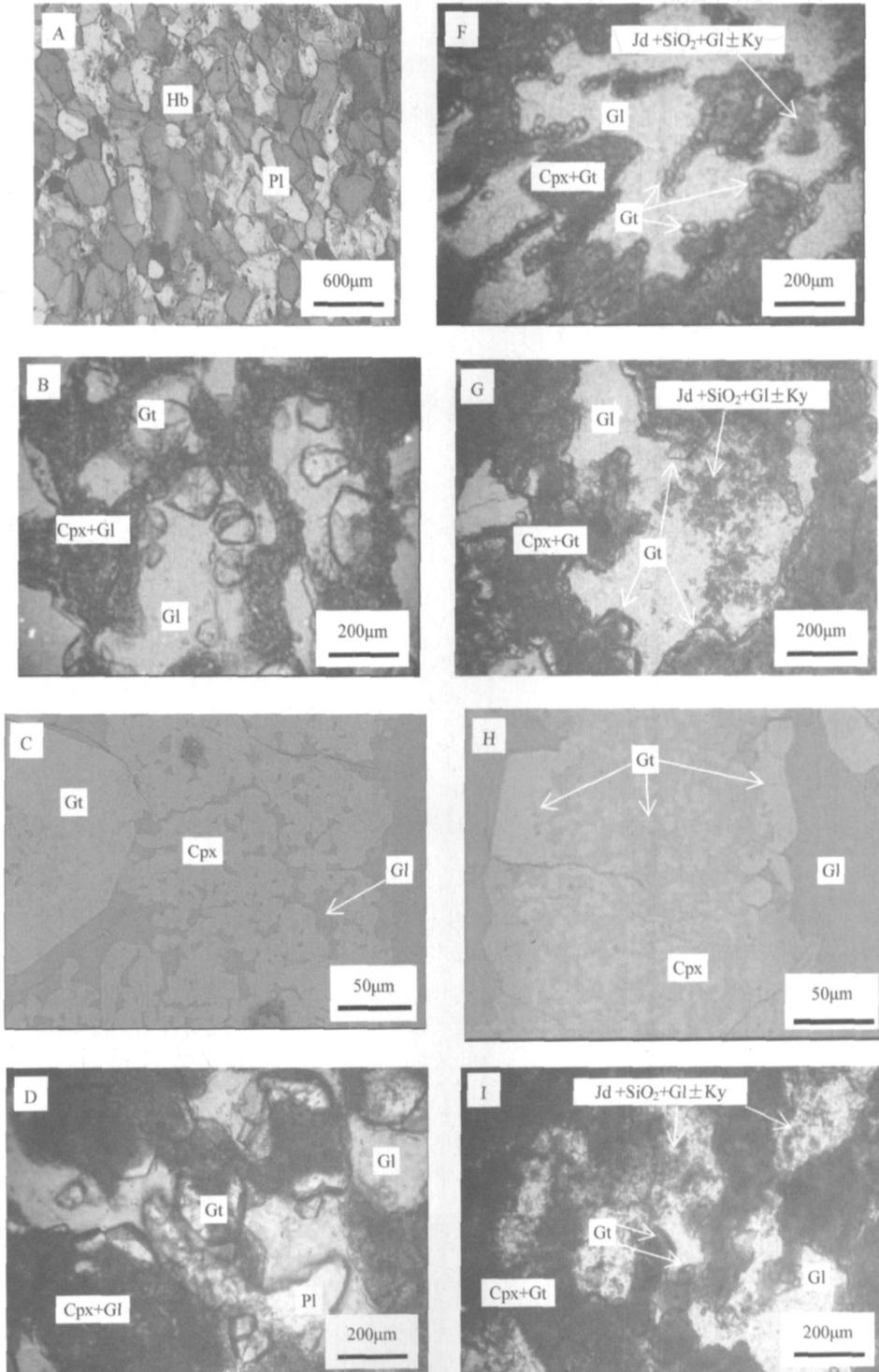
在 1.0 ~ 3.5 GPa、950 °C、恒温时间 100 h 条件下,斜长角闪岩的脱水熔融表明,随压力升高,岩石的结构发生了改变,组成岩石的矿物发生了不同的反应。

p = 1.0 GPa (图 2B),岩石中角闪石已经全部转变成了单斜辉石集合体,偏光显微镜下,单斜辉石已经具有明显的光性特征。斜长石消失,同时新生成了石榴石 (< 0.3 mm) 和熔体 (37%)。单斜辉石主要分布在原来角闪石的位置;熔体主要分布在原来斜长石的位置,部分分布在单斜辉石颗粒之间 (图 2C);石榴石主要分布在单斜辉石集合体边部或熔体中,原岩的片理结构几乎被完全改造,仅仅从新生矿物和熔体的分布形态中,略微可以识别出残存的原岩片理结构。

p = 1.5 GPa (图 2D),角闪石已经全部转变成了单斜辉石集合体,单斜辉石粒度细小,偏光显微镜下,单斜辉石的光性特征不明显。部分斜长石残留,

新生成的石榴石粒度一般小于 $< 0.1 \text{ mm}$, 新生成的熔体体积分数约为 34%。单斜辉石主要分布在原来角闪石的位置; 熔体主要分布在原来斜长石的位置, 部分分布在单斜辉石颗粒之间; 石榴石主要分布在单斜辉石集合体边部。原岩的片理结构基本被改造, 从新生矿物和熔体的分布形态中, 可以识别出残存的原岩片理结构。

$p = 2.0 \sim 3.5 \text{ GPa}$ (图 2E-J), 角闪石已经全部转变成了单斜辉石 + 石榴石集合体, 单斜辉石粒度细小, 偏光显微镜下无法鉴定, 背散射图像中清晰可见 (图 2H)。大部分斜长石已经熔融, 部分斜长石分解形成硬玉 + SiO_2 矿物 ± 蓝晶石的集合体 (图 2J)。新生成的石榴石主要分布在单斜辉石集合体内部和单斜辉石集合体与原来斜长石接触的边部,



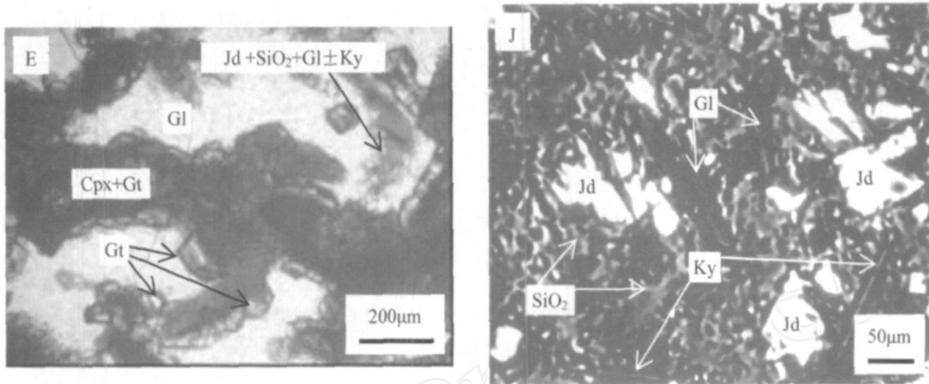


图2 原岩和1.0~3.5 GPa、950 °C、恒温时间100 h条件下实验产物的显微照片

Fig. 2 Micrographs of the started material and run products at 1.0-3.5 GPa, 950 °C and annealing time of 100 h

A—斜长角闪岩原岩; B—1.0 GPa、950 °C、恒温100 h的实验产物(单偏光); C—B中Cpx+Gl集合体的背散射电子像; D—1.5 GPa、950 °C、恒温100 h的实验产物(单偏光); E—2.0 GPa、950 °C、恒温100 h的实验产物(单偏光); F—2.5 GPa、950 °C、恒温100 h的实验产物(单偏光); G—3.0 GPa、950 °C、恒温100 h的实验产物(单偏光); H—G中Gt+Cpx的背散射电子像; I—3.5 GPa、950 °C、恒温100 h的实验产物(单偏光); J—I中Jd+SiO₂+Gl±Ky集合体的背散射电子像。矿物缩写同表2

粒度一般小于 < 0.08 mm, 新生成的熔体主要分布在原来斜长石的位置, 体积分数约为10%~27%。原岩片麻理结构仍然可以识别。

2.2 时间对结构的影响

在3.0 GPa、950 °C、恒温时间20~300 h条件下, 斜长角闪岩的脱水熔融表明, 随时间增加, 熔体的含量逐渐增加, 并相互连通, 新生的单斜辉石和石榴石逐渐长大, 准稳定的硬玉、SiO₂和辉石中的石榴石消失。

尽管仅仅恒温了20 h(图3A), 斜长角闪岩已经发生了脱水部分熔融, 熔体体积分数约为3%左右, 主要呈囊状和长条状沿片理分布于原来的角闪石和原来斜长石之间以及斜长石的内部。原岩的片理结构控制着熔体的分布。斜长石分解形成硬玉+SiO₂+熔体±蓝晶石的集合体, 角闪石脱水形成了细粒的石榴石+辉石的集合体(< 0.01 mm), 石榴石主要分布在角闪石的周围或内部。辉石粒度很小, 光性特征很不明显。这时原岩矿物的形态和片理结构仍然保留。

恒温50 h时(图3B), 原岩的片理结构仍然清晰可见。熔体含量增加, 体积分数约为7%左右, 仍然主要呈囊状和长条状分布于原来斜长石的位置, 但有部分熔体已经开始连通。部分斜长石分解形成硬玉+SiO₂+熔体±蓝晶石的集合体。新生的石榴石矿物颗粒明显增大(0.02 mm), 但辉石仍然呈细粒的集合体形态。石榴石和辉石主要分布在角闪石的周边或内部。

恒温100 h时(图2G), 原岩的片理结构可以识别。角闪石已经全部转变成了单斜辉石+石榴石集合体, 但仍然保持原来角闪石的形态。单斜辉石粒度细小, 偏光显微镜下无法鉴定, 背散射图像中清晰可见(图2H)。大部分斜长石已经熔融, 部分长石分解形成硬玉+SiO₂±蓝晶石集合体。新生成的石榴石主要分布在单斜辉石集合体内部和单斜辉石集合体与原来斜长石接触的边部, 粒度一般 < 0.03 mm, 新生成的熔体主要分布在原来斜长石的位置, 体积分数约为10%。过半数的熔体已经连通。

恒温150 h时(图3C), 原岩的结构基本被改造, 原岩中的矿物(斜长石和角闪石)完全消失。单斜辉石主要呈细粒的集合体形态, 已经具有光性。石榴石继续长大, 主要分布于熔体和辉石之间, 少量的石榴石具有完整的晶体形态。新生成的熔体主要分布在原来斜长石的位置, 单斜辉石细粒集合体中也出现了熔体。大部分熔体已经连通, 体积分数已达16%。

恒温200 h时(图3D), 原岩的结构已经被改造, 原岩中的矿物(斜长石和角闪石)完全消失。单斜辉石主要呈细粒的集合体形态, 光性特征明显。石榴石继续长大, 主要环绕单斜辉石集合体分布, 呈冠状体。部分石榴石已经具有完整的晶体形态。新生成的熔体主要分布在原来斜长石的位置, 在单斜辉石集合体的颗粒间有熔体。大部分熔体已经连通, 其体积分数已达25%。

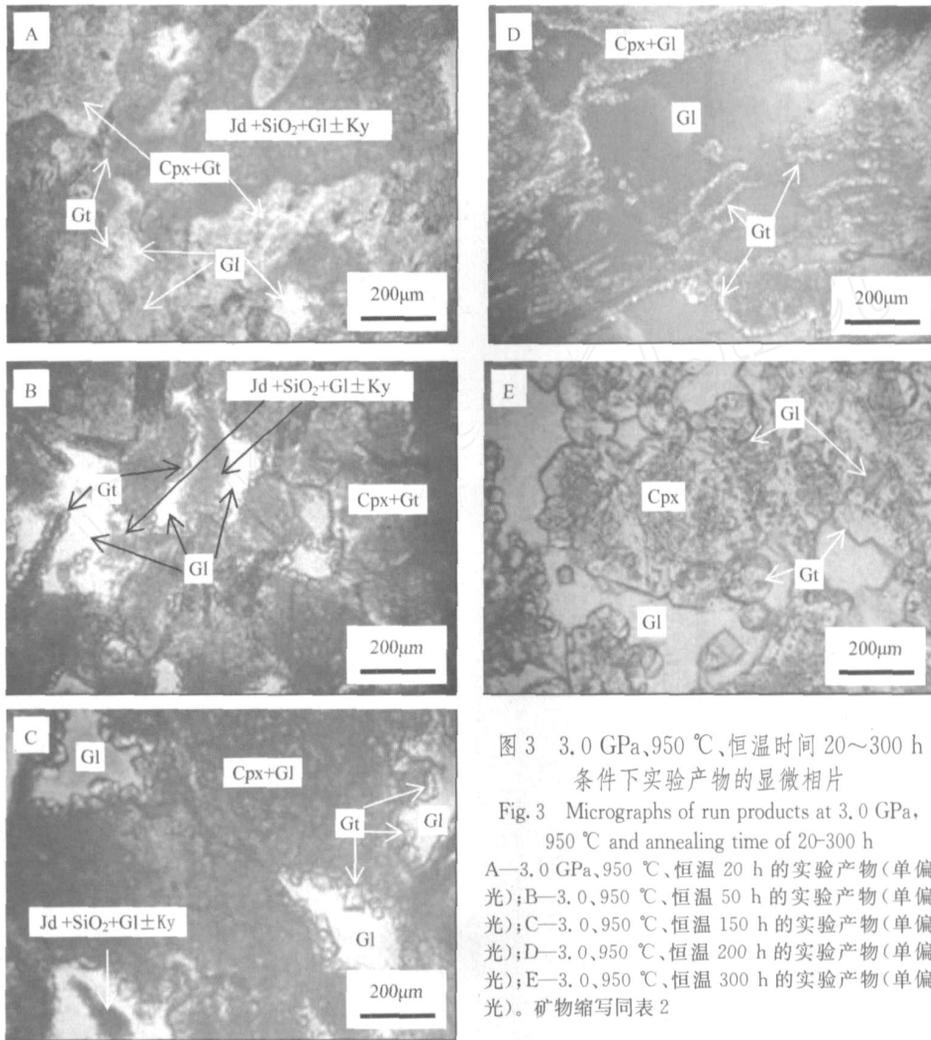


图3 3.0 GPa、950 °C、恒温时间20~300 h条件下实验产物的显微相片

Fig. 3 Micrographs of run products at 3.0 GPa, 950 °C and annealing time of 20-300 h

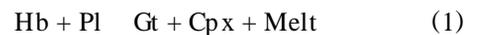
A—3.0 GPa、950 °C、恒温20 h的实验产物(单偏光); B—3.0、950 °C、恒温50 h的实验产物(单偏光); C—3.0、950 °C、恒温150 h的实验产物(单偏光); D—3.0、950 °C、恒温200 h的实验产物(单偏光); E—3.0、950 °C、恒温300 h的实验产物(单偏光)。矿物缩写同表2

恒温300 h时(图3E),原岩的结构已经被彻底改造,单斜辉石和石榴石颗粒明显增大。单斜辉石呈骨架状集合体,部分单斜辉石粒度达0.6 mm。大部分石榴石颗粒具有完整的晶体形态,主要呈冠状体环绕着单斜辉石集合体,其粒度0.5 mm左右。新生成的熔体主要分布在原来斜长石的位置,在单斜辉石集合体中有熔体,熔体完全连通,体积分数已达32%。

3 讨论

3.1 变质反应

岩石熔融的过程也就是矿物反应的过程,岩石结构在部分熔融过程中的演化主要由矿物的变质反应所控制。Percival认为,斜长角闪岩脱水部分熔融的总反应式为^[22]



前人在1.0~3.0 GPa条件下的实验结果证明了这一反应的正确性^[1-3,5,23]。但从前面的叙述中也可以看出,压力和恒温时间不同时,斜长角闪岩熔融具有非常多的中间反应。

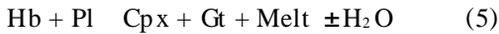
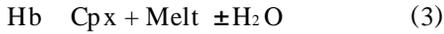
3.1.1 不同压力下的变质反应

950 °C、恒温100 h、1.0~1.5 GPa条件下斜长角闪岩的变质反应与950 °C、恒温100 h、2.0~3.5 GPa条件下的变质反应不完全相同。

950 °C、恒温100 h、1.0~1.5 GPa条件下斜长角闪岩最先发生角闪石转变为单斜辉石的脱水反应:

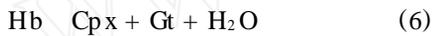


自由水的存在大大促进了角闪石的脱水熔融反应、斜长石的熔融反应和角闪石与斜长石生成单斜辉石、石榴石和熔体的反应(图2B—C):

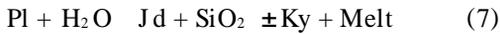


因此,在 950 °C、恒温 100 h、1.0 ~ 1.5 GPa 条件下的实验产物中观察到了在原来角闪石分布的地方出现了单斜辉石 + 熔体的集合体,在原来斜长石分布的地方出现了熔体,在原来角闪石和斜长石接触的地方出现了石榴石。

950 °C、恒温 100 h、2.0 ~ 3.5 GPa 条件下同样首先发生角闪石转变为单斜辉石的脱水反应(2)。除了发生(2)的反应外,这时还发生了形成单斜辉石 + 石榴石 + H₂O 的角闪石脱水反应(图 2H):



同时还发生了斜长石分解形成硬玉 + SiO₂ ± 蓝晶石 + 熔体的反应(图 2J):



同样,由于自由水的存在,大大促进了角闪石与斜长石生成单斜辉石、石榴石和熔体的反应(5)。

因此,在 950 °C、恒温 100 h、2.0 ~ 3.5 GPa 条件下的实验产物中,观察到了在原来角闪石分布的地方出现了单斜辉石 + 石榴石的集合体(图 2H),在原来斜长石分布的地方出现了硬玉 ± 蓝晶石 + SiO₂ + 熔体(图 2J),在原来角闪石和斜长石接触的地方出现了石榴石 + 熔体(图 2C—F)。

综合起来看,950 °C、恒温 100 h、低压(1.0 ~ 1.5 GPa)和高压(2.0 ~ 3.5 GPa)条件下斜长角闪岩熔融过程中变质反应的差别为:(1)低压(1.0 ~ 1.5 GPa)条件下,角闪石的脱水仅仅形成单斜辉石;而高压(2.0 ~ 3.5 GPa)条件下,角闪石的脱水不仅形成了单斜辉石还形成了石榴石。(2)低压(1.0 ~ 1.5 GPa)条件下,斜长石仅仅发生了熔融反应;而高压(2.0 ~ 3.5 GPa)条件下,斜长石不仅发生了熔融反应,还发生了分解反应,形成了硬玉和 SiO₂ 和蓝晶石。

3.1.2 不同恒温时间的变质反应

在 3.0 GPa、950 °C 条件下,随恒温时间不同,斜长角闪岩熔融过程中的变质反应也发生了变化。

3.0 GPa、950 °C、恒温时间小于 150 h 时,首先发生了第一阶段的反应(2)、(5)和(6)。恒温时间大于等于 150 h 时发生了第二阶段的反应,即准稳定矿物(硬玉、SiO₂ 和辉石中石榴石)的熔融反应:



因此,3.0 GPa、950 °C 条件下,块状斜长角闪岩的部分熔融过程远非总反应(1)表示的那么简单。从最初开始熔融(恒温 20 h)到接近化学平衡(300 h)这一过程中,先后发生了角闪石的脱水反应、角闪石形成单斜辉石 + 石榴石的反应、斜长石分解形成硬玉 + SiO₂ + 熔体 ± 蓝晶石的反应、角闪石与斜长石生成单斜辉石、石榴石和熔体的反应和准稳定矿物(硬玉、蓝晶石、SiO₂ 和辉石中石榴石)的熔融反应。在这一过程中,新生成的熔体成分也在不断调整:开始因为准稳定矿物硬玉和辉石中石榴石的存在,由于硬玉 Na 含量高,石榴石富集重稀土,因此熔体可能相对富 K、贫 Na、轻重稀土强烈分异;而接近平衡时,准稳定矿物完全反应了,熔体可能相对富 Na、贫 K。

3.2 石榴石冠状体的成因

在 950 °C、2.0 ~ 3.0 GPa、恒温 100 h 的实验产物中和 950 °C、3.0 GPa、恒温 50 h、150 ~ 300 h 的实验产物中,都产生了石榴石环绕单斜辉石(辉石集合体)的冠状体结构(图 2E—G,图 3B—E)。一般认为冠状体结构代表了矿物的先后生成次序,即被环绕的矿物是先生成的矿物,而环绕的矿物是由被环绕的矿物与其他矿物反应形成,如变质岩中石榴石环绕黑云母的冠状体^[24],石榴石 + 石英环绕单斜辉石的冠状体^[25],绿辉石环绕斜长石的冠状体^[26]。最近, Keller 在 1.8 GPa、900 °C、恒温 259 h 条件下,以块状橄榄辉长岩为初始物质的实验产物中观察到了在橄榄石-斜长石的接触边界形成了新生的顽火辉石 + 透辉石 + 普通辉石 + 石榴石环绕原橄榄石的冠状体,从而证实了冠状体结构代表了矿物的先后生成次序^[27]。而在我们的实验中,石榴石环绕单斜辉石(辉石集合体)的冠状体结构并不表示矿物的先后关系。从上面的描述中及图 2E—G 和图 3B—E 中可以看出,石榴石环绕单斜辉石(辉石集合体)的冠状体结构主要是由反应(5)形成的,石榴石和被环绕的单斜辉石都是这一反应的产物,尽管随时间的增加,石榴石和单斜辉石的成分可能有所调整,但是这两个矿物几乎是同时形成的,并没有明显的先后之分。因此从本次实验结果来看,石榴石环绕单斜辉石的冠状体结构并不都表示矿物的先后生成次序。

4 结论

我们在 950 °C、1.0 ~ 3.5 GPa、恒温 20 ~ 300 h

条件下进行了两个系列的斜长角闪岩块状样品脱水部分熔融实验: (1) 保持温度(950 °C)和加热时间(100 h)不变, 改变压力(1.0~3.5 GPa)的实验; (2) 保持温度(950 °C)和压力(3.0 GPa)不变, 改变加热时间(20~300 h)的实验。结果表明, 1.0~3.5 GPa、950 °C、恒温 100 h 的条件下, 随压力升高, 斜长角闪岩中依次发生了角闪石的脱水反应, 斜长石的熔融反应, 角闪石与斜长石生成石榴石和单斜辉石的熔融反应, 以及斜长石的分解反应, 实验产物中依次生成了单斜辉石 + 石榴石 + 熔体(1.0~1.5 GPa)和单斜辉石 + 石榴石 + 熔体 + 硬玉 + SiO₂ 矿物 + 蓝晶石的矿物组合。3.0 GPa、950 °C 条件下, 随加热时间增加, 斜长角闪岩中依次发生了角闪石的脱水反应, 斜长石的熔融反应, 角闪石与斜长石生成石榴石和单斜辉石的熔融反应, 斜长石的分解反应, 以及准稳定硬玉、SiO₂ 矿物和蓝晶石的熔融反应, 实验产物中依次生成了单斜辉石 + 石榴石 + 熔体 + 硬玉 + SiO₂ + 蓝晶石的矿物组合(20~100 h)和单斜辉石 + 石榴石 + 熔体的矿物组合(150~300 h)。斜长角闪岩的原岩结构决定了实验产物中新生矿物和熔体的分布特征。在 950 °C、2.0~3.0 GPa、恒温 100 h 和 950 °C、3.0 GPa、恒温 150~300 h 的实验产物中均由角闪石与斜长石反应形成了石榴石环绕单斜辉石的冠状体结构, 因此石榴石冠状体结构不一定都有指示矿物生成先后次序的意义。

References :

- [1] Hacker B. Amphibolite-facies to granulite-facies reactions in experimentally deformed, unpowered amphibolite[J]. *Am Mineral*, 1990, 75: 1349-1361.
- [2] Wolf M B, Wyllie P J. Dehydration-melting of solid amphibolite at 10 kbar: Textural development, liquid interconnectivity and application to segregation of magmas[J]. *Mineral Petrol*, 1991, 44: 151-179.
- [3] Zhou W, Xie H, Liu Y, et al. Dehydration melting of solid amphibolite at 2.0 GPa: Effects of time and temperature[J]. *Science in China: Series D*, 2005, 48(8): 1120-1133.
- [4] Zhou W G, Liu Y G, Jiang X, et al. Textural development during the biotite gneiss/eclogite transformation[M]. Du J G, Xie H S. *From the Atom Toward the Earth—Progress of the High-Pressure Geoscience*. Beijing: Seismological Press, 2007: 10-15(in Chinese).
- [5] Wolf M B, Wyllie P J. Dehydration-melting of amphibolite at 10 kbar: The effects of temperature and time[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1994, 115: 369-383.
- [6] Patiño D A E, Beard J. Dehydration-melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar[J]. *J Petrol*, 1995, 36: 707-738.
- [7] Rapp R P, Watson E B. Dehydration melting of metabasalt at 8-32 kbar: Implications for continental growth and crust-mantle recycling[J]. *J Petrol*, 1995, 36(4): 891-931.
- [8] Winther K T. An experimental based model for the origin of tonalitic and trondhjemitic melts[J]. *Chem Geol*, 1996, 127: 43-59.
- [9] Xiong X L, Adam J, Green T H. Rutile stability and rutile/melt HFSE partitioning during partial melting of hydrous basalt: Implications for TTG genesis[J]. *Chemical Geology*, 2005, 218: 339-359.
- [10] Kern H, Popp T, Gorbatshevich F, et al. Pressure and temperature dependence of v_p and v_s in rocks from the superdeep well and from surface analogues at Kola and the nature of velocity anisotropy[J]. *Tectonophysics*, 2001, 338: 113-134.
- [11] ten Grotenhuis S M, Drury M R, Spiers C J, et al. Melt distribution in olivine rocks based on electrical conductivity measurements[J]. *J Geophys Res*, 2005, 110: B12201, doi: 10.1029/2004JB003462.
- [12] Ray L, Fröster H J, Schilling F, et al. Thermal diffusivity of felsic to mafic granulites at elevated temperatures[J]. *Earth Planet Sci Lett*, 2006, 251(3-4): 241-253.
- [13] Aizawa Y, Ito K, Tatsumi Y. Compressional wave velocity of granite and amphibolite up to melting temperatures at 1 GPa[J]. *Tectonophysics*, 2002, 361(3): 255-261.
- [14] Gaillard F, Marziano G I. Electrical conductivity of magma in the course of crystallization controlled by their residual liquid composition[J]. *J Geophys Res*, 2005, 110: B06204, doi: 10.1029/2004JB003282.
- [15] Rapp R P, Shimizu N, Norman M D. Growth of early continental crust by partial melting of eclogite[J]. *Nature*, 2003, 425: 605-609.
- [16] Xie H S, Zhang Y, Xu H G, et al. A new method of measurement for elastic wave velocities in minerals and rock at high T and p and its significance[J]. *Science in China: Series B*, 1993, 36(10): 1276-1280.
- [17] Fu H F, Zhu C M. Measurement of the pressure and temperature in the sample cell used for the multi-anvil press[J]. *Physics*, 1980, 9(3): 193-195(in Chinese).
- [18] Zhu W, Xie H, Xu J, et al. Experimental studies on silicate structures of basaltic glasses quenched at 1.650 and 1.3 GPa[J]. *Chinese Sci Bull*, 1999, 44(5): 461-465.
- [19] Xie H S, Xu H G, Peng W S, et al. An experimental study on dehydration of talc under high pressure [J]. *Acta Mineral-*

- ogica Sinica, 1987, 7(2): 128-132 (in Chinese).
- [20] Xu J, Zhang Y, Hou W, et al. Measurements of ultrasonic wave velocities at high temperature and high pressure for window glass, pyrophyllite, and kimberlite up to 1 400 and 5.5 GPa[J]. High Temperature-High Pressure, 1994, 26: 375-384.
- [21] Patiño Deuce A E, Beard J. Water loss from hydrous melts during fluid-absent piston-cylinder experiments[J]. Am Mineral, 1994, 79: 585-588.
- [22] Percival J A. High-grade metamorphism in the Chapleau-Foley area, Ontario[J]. Am Mineral, 1983, 68: 667-686.
- [23] Wolf M B, Wyllie P J. Garnet growth during amphibolite anatexis: Implications of a garnetiferous restite[J]. J Geol, 1993, 101: 357-373.
- [24] Bruno M, Compagnoni R, Rubbo M. The ultra-high pressure coronitic and pseudomorphous reactions in a metagranodiorite from the Brossasco-Isasca unit, Dora Massif, western Italian Alps: A petrographic study and equilibrium thermodynamic modelling[J]. J Metamorphic Geol, 2001, 19(1): 33-43.
- [25] Ashworth J R, Sheplev V S, Bryxina N A, et al. Diffusion-controlled corona reaction and overstepping of equilibrium in a garnet granulite, Yenisey Ridge, Siberia[J]. J Metamorphic Geol, 1998, 16(2): 231-246.
- [26] Lang H M, Gilotti J A. Plagioclase replacement textures in partially eclogitised gabbros from the Sanddal mafic-ultramafic complex, Greenland Caledonides[J]. J Metamorphic Geol, 2001, 19: 495-515.
- [27] Keller L M, Wunder B, Rhede D, et al. Component mobility at 900 and 18 kbar from experimentally grown coronas in a natural gabbro[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2008, 72: 4307-4322.

参考文献:

- [4] 周文戈,刘永刚,蒋玺,等. 黑云斜长片麻岩-榴辉岩相变过程的结构变化[M] 杜建国,谢鸿森. 从原子到地球——高压地球科学研究进展. 北京:地震出版社,2007:10-15.
- [17] 傅慧芳,朱成明. 静态超高压容器中温度、压力参数的测试[J]. 物理,1980,9(3):193-195.
- [19] 谢鸿森,徐惠刚,彭文世,等. 高压下滑石的脱水实验研究[J]. 矿物学报,1987,7(2):138-132.