

# 贺兰山北段孔兹岩系脱水熔融实验II\*

## ——岩石结构对变质反应的制约

刘建忠<sup>1</sup> 卢良兆<sup>2</sup> 谢鸿森<sup>1</sup> 欧阳自远<sup>1</sup> 刘喜山<sup>2</sup>

1. (中国科学院地球化学研究所 贵阳 550002)

2. (长春科技大学地球科学院 长春 130026)

**提 要** 贺兰山北段孔兹岩系中最有代表性的两类岩石: 变粒岩及富铝片麻岩天然块状样品的脱水熔融实验研究表明, 在不同的温度压力条件, 两类岩石产生明显不同的变质反应, 其中变粒岩类在所有的实验条件下均产生  $Bt+Pl+Qz \rightarrow Hy+Kf+M$  (熔体) 的反应, 而富铝片麻岩在不同压力下出现不同的变质反应: 0.4GPa条件下发生:  $Bt+Pl+Qz \rightarrow Hy+Kf+M$ ; 0.6GPa条件下发生:  $Bt+Qz \rightarrow Si+Kf+M$ ; 0.8GPa条件下发生:  $Br \rightarrow Cu+Kf+M$ 。本文认为制约变质反应的主要因素是岩石的结构构造, 因此在讨论高级变质作用时更要强调压力的重要性。

**键 词** 孔兹岩系 脱水熔融实验 岩石结构 变质反应

## 1 引 言

变质岩石是原岩的化学组分 (bulk chemical composition) 在变质作用物化条件的变化下所形成的矿物集合体 (变质矿物组合)。自 20 年代以来, 很多学者如 Becke, Goldschmidt, Eskola<sup>[1]</sup> 等人都从事这一方面的工作, 特别 50 年代以来变质反应实验研究的广泛开展, 实验技术方法和测试精度的不断提高, 使得以热力学多相平衡原理为指导的变质作用研究有了长足的发展<sup>[2,3]</sup>, 他们把岩石看成是热力学的多相体系内部的变化, 通过在不同状态下的化学组分和矿物相之间的变化关系的研究来恢复这些矿物组合形成时的物化环境, 其中温度、压力及化学活动性流体是岩石学家们最为关注的因素。80 年代以来随着  $p-T-t$  轨迹概念的提出<sup>[4,5]</sup>, 使得越来越多的学者认识到时间维在变质反应过程中的重要性<sup>[6]</sup>, 而对于岩石结构构造对变质反应的制约却鲜有人问津, 这是因为建立在粉末样品高温高压实验基础上的变质反应不能涉及到岩石结构的影响。而对于块状样品的实验研究由于受传统平衡理论的束缚在实验岩石学领域里并不流行, 近年来随着“新三论” (耗散结构、协同论、突变论) 和“新新三论” (混沌论、分形论、孤波论) 在地质学中的迅速应用, 使得传统认识中非平衡必定向平衡转化的观念受到挑战, 稳定不一定平衡! 这样才使块状样品的实验研究工作得到广泛的重视, 使得对变质反应中岩石结构构造的制约作用的研究成为可能。

ISSN 1000-4734 1998年11月收稿 1999年5月改回

第一作者简介 刘建忠 男 1968年生 博士后 岩石学及地球化学专业

\* 中国科学院重点项目 (批准号: KZ952-J1-413) 和国家自然科学基金项目 (批准号: 49573194) 联合资助

## 2 实验样品及实验过程

实验样品分别采自贺兰山北段阿楞呼都格 (H013黑云母变粒岩) 和柳树沟地区 (H029-夕线堇青石榴片麻岩), 其中黑云母变粒岩具等粒粒状变晶结构、块状构造, 而夕线堇青石榴片麻岩具斑状变晶结构、片麻状条带状构造。其矿物组成及化学成分一并列于表 1

实验是在中国科学院地球化学研究所地球深部物质科学研究所 YJ-3000t 型紧装式四滑座六面顶压力机上进行的。首先把上述的两种样品分别磨制成高为 10.0mm, 直径为 8.8mm 的圆柱体, 因为每种岩石的实验样品均利用同一块标本, 且在制样过程中均垂直标本的片麻理磨制, 因此可以认为它们具有相同的岩石学和显微构造特征。把磨制好的圆柱体放入干燥箱内, 恒温 110°C 至少 24h 后放入纯铜入传压介质叶蜡石中 (图 1)。样品的加压由单板计算机自动控制, 误差在 0.02GPa 以内, 样品的加热由通过三层不锈钢片的电流控制, 其温度则用热电偶实测的加热电功率与温度曲线进行换算, 误差在 5°C 内。每次实验在加温之前首先加压至 1.0GPa 以上, 使铜管与铜堵头紧密结合在一起, 从而使体系封闭, 然后降压到实验要求值再加温。本次实验采用两种方法: 其一是恒压的温度跃迁, 其二是恒温的压力跃迁。实验温度、压力如表 2

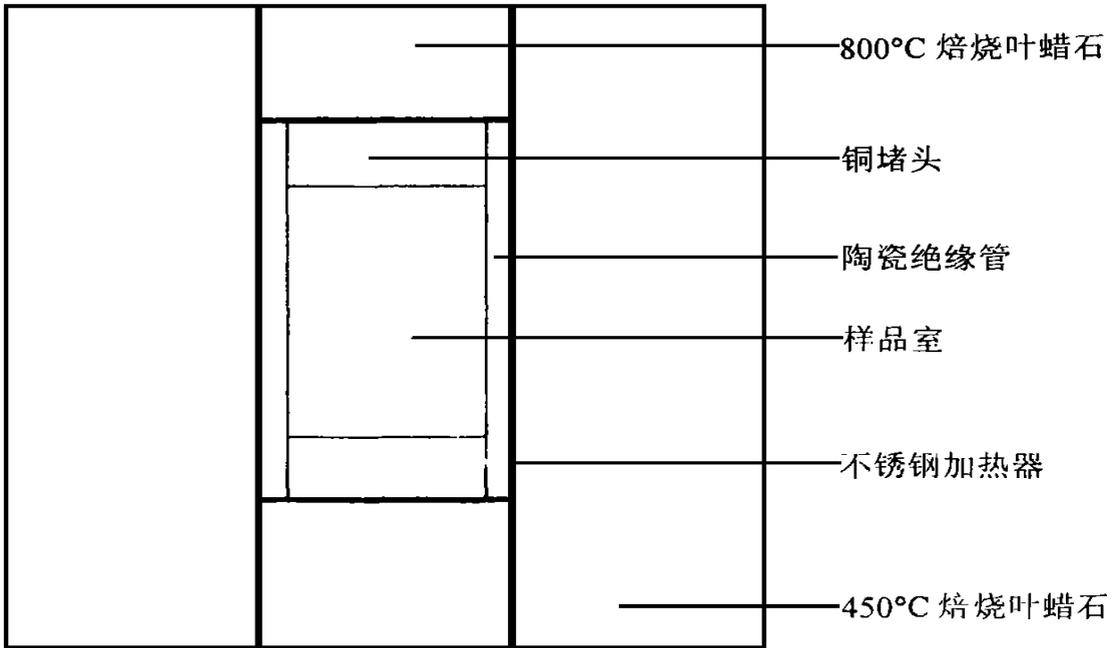


图 1 样品组装图

Fig. 1. Sketch showing specimen assemblage.

所有的样品经过断电淬火后仍是圆柱体, 可供薄片及电镜光片的磨制。在利用西德产 OP-TON 偏光显微镜进行岩相学研究的基础上, 本文利用长春地质学院电子显微镜室的分析型高分辨电子显微镜 (JEM-2000FX) 的扫描模式进行了样品表面图像观察, 同时配用能谱仪 (TN-5500) 进行矿物微区成分的分析。

表 1 实验样品的化学成分及实际矿物含量

Table 1. Chemical composition and mineral norms of the experimental samples

常量元素 $w_B / \%$		稀土元素 $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$		微量元素 $(\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1})$		实际矿物含量 $\varphi_B / \%$					
样品号		样品号		样品号		样品号					
H029	H013	H029	H013	H029	H013	H029	H013				
SiO <sub>2</sub>	53.81	62.02	La	55.19	47.87	Sr	140	275	Bt	10	20
TiO <sub>2</sub>	0.74	0.76	Ce	117.8	103.6	Ba	856	479	Pl	24	60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.26	17.64	Pr	13.87	12.01	Cr	188	78	Qz	25	15
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.69	2.34	Nd	52.43	45.01	Co	27	20	Mus	5	
FeO	5.60	3.58	Sm	9.65	8.06	Ni	77	50	Gt	15	
MnO	0.10	0.10	Eu	1.18	1.26	Zr	203	239	Sil	8	
MgO	3.44	2.35	Gd	7.58	6.90	Rb	182	150	Kf	12	
CaO	2.55	3.13	Tb	1.08	0.98				Cord	5	
Na <sub>2</sub> O	1.84	4.47	Dy	5.74	5.17						
K <sub>2</sub> O	4.47	2.32	Ho	1.22	1.09						
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.24	0.28	Er	3.03	2.67						
总计	99.79	99.17	Tm	0.46	0.41						
			Yb	2.62	2.33						
			Lu	0.40	0.38						
			Y	27.59	24.71						

注: 由北京大学地质学系测试

### 3 实验结果与讨论

陆壳岩石的部分熔融, 可以产生花岗质熔浆, 而留下的难熔残余就形成了麻粒岩相岩石的矿物组合, 这已在许多学者间达成共识<sup>[7-12]</sup>, 而且上述学者对于残余难熔物的温度、压力效应作了较为详细的研究, 本文的实验结果也得出相似的结论。根据电子显微镜的镜下观察(图 2)及能谱仪的分析, 可以发现在实验过程中, 黑云母变粒岩与粉末样品的实验结果相似, 均为 Bt 与 Pl Qz 等矿物反应生成 Hy+ Kf+ M 而夕线堇青石榴子石片麻岩却与粉末样品的实验结果有明显的区别, 在低压 (0.4 GPa) 条件下与粉末样品相似, 主要生成短柱状的紫苏辉石, 但在 0.6 GPa 条件下 Bt 不是与 Pl Qz 等矿物反应生成 Hy+ Kf+ M, 而是与 Qz 反应生成毛发状的夕线石, 而在高压 (0.8 GPa) 条件下, Bt 主要发生分解生成毛发状的刚玉晶体, 表 2 列出了本次实验过程中的主要变质反应。本次实验中 Gt 的反应较为微弱, Mus 主要与 Cord 反应生成 Sil + Kf+ M, 因其含量较少, 对实验结果的影响较小, 这里不作进一步的阐述。

从上述的描述中可见, 在黑云母变粒岩系列中变质反应  $Bt + Pl + Qz \rightarrow Hy + Kf + M$  (熔体) 在 800~850°C 及 0.4~0.8 GPa 的范围内均可发生, 在夕线榴片麻岩中不同压力下出现不同的变质反应:

0.4 GPa 条件下发生:  $Bt + Pl + Qz \rightarrow Hy + Kf + M$

0.6 GPa 条件下发生:  $Bt + Qz \rightarrow Sil + Kf + M$

0.8 GPa 条件下发生:  $Bt \rightarrow Cord + Kf + M$

而在相同压力不同温度下的变质反应基本相同。为什么会如此大的差异, 本文认为, 这与岩石的结构构造密切相关, 因变粒岩具有粒状变晶结构和块状构造, 故其成分在各个“质点”上均相似, 因此反应不受周围“环境”不同的影响, 反应只是温度、压力以及氧逸度、水逸度等的函数, 尤其是温度的函数。而富铝片麻岩具有条带状和片麻状构造, 所以成分在各个“质点”上

表 2 脱水熔融实验条件及变质反应

Table 2 The dehydration melting experimental conditions and metamorphic reaction

序号	温度 / $^{\circ}\text{C}$	压力 /GPa	时间 /h	变质反应	
				H029	H013
1	800	0.6	12	Bt+ Qz= Kf+ Sil+ M	Bt+ Pl+ Qz= Hy+ Kf+ M
2	850	0.6	12	Bt+ Qz= Kf+ Sil+ M	Bt+ Pl+ Qz= Hy+ Kf+ M
3	800	0.4	12	Bt+ Pl+ Qz= Hy+ Kf+ M	Bt+ Pl+ Qz= Hy+ Kf+ M
4	850	0.4	12	Bt+ Pl+ Qz= Hy+ Kf+ M	Bt+ Pl+ Qz= Hy+ Kf+ M
5	800	0.8	12	Bt= Cud+ Kf+ M	Bt+ Pl+ Qz= Hy+ Kf+ M
6	850	0.8	12	Bt= Cud+ Kf+ M	Bt+ Pl+ Qz= Hy+ Kf+ M

注:表中矿物代号分别表示:Hy,紫苏辉石,Bt,黑云母,Qz,石英,Kf,钾长石,Sil,夕线石,Pl,斜长石,Cud,刚玉,M,熔体

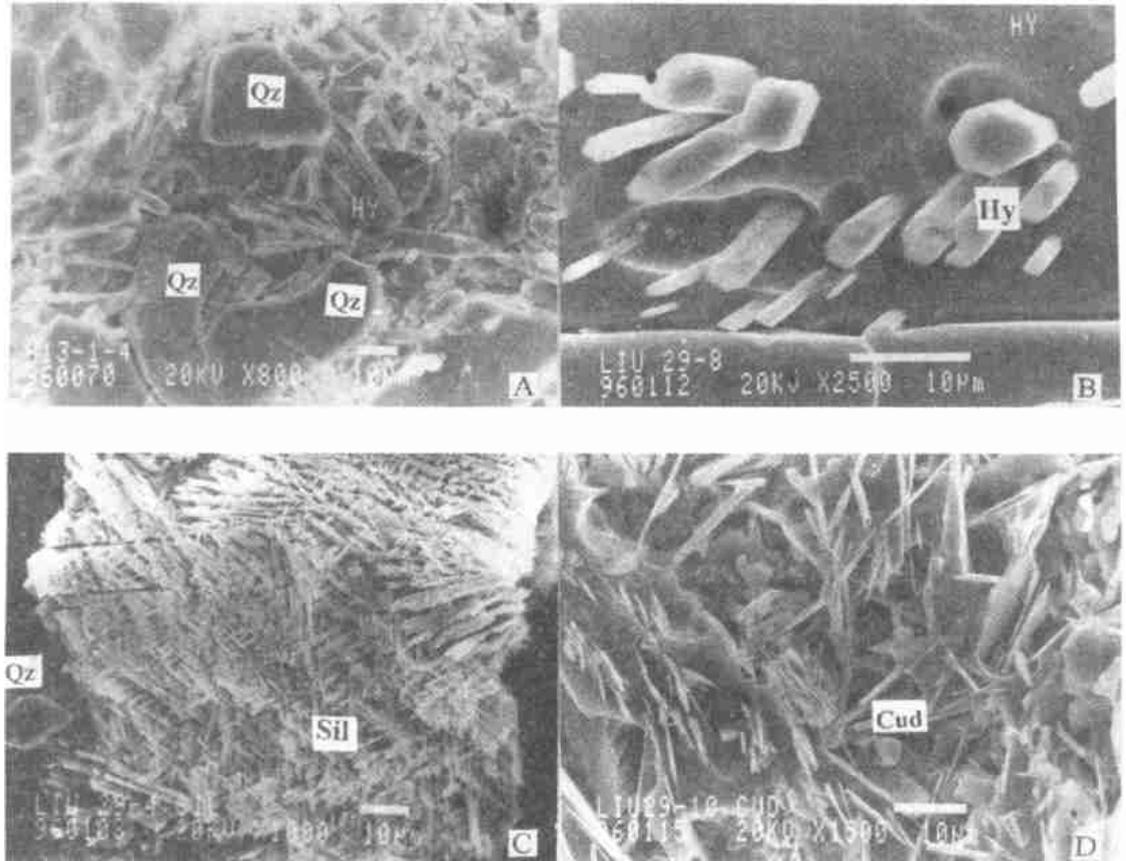


图 2 脱水熔融实验中的变质反应

Fig. 2. Metamorphic reactions in dehydration melting experiment.

- A. 黑云母变粒岩中 Bt+ Pl+ Qz反应生成 Hy B. 夕线堇青石榴片麻岩在 0.4GPa, 850 $^{\circ}\text{C}$ 时反应生成 Hy  
C. 夕线堇青石榴片麻岩在 0.6GPa, 850 $^{\circ}\text{C}$ 时反应生成 Sil D. 夕线堇青石榴片麻岩在 0.8GPa, 850 $^{\circ}\text{C}$ 时反应生成 Cud

差异,由于元素的扩散反应受到矿物相的控制,故其反应的进行除受温度制约外,还受控于元素的运动方式。在低压下,由于元素的扩散、对流速率要高于高压条件,因此反应物会涉及较多,在该实验中形成了 Hy+ Kf组合,0.6GPa次之,则形成 Sil+ Kf组合,而在较高压力下(0.8GPa)元素的扩散较慢,反应物只涉及 Bt,从而形成 Cud+ Kf组合。如前所述,黑云母变粒

岩与粉末样品实验有相似的变质反应发生, 与其粒度较为细小, 且矿物的分布较为均匀, 呈块状构造紧密相关。而变泥质岩石具条带状构造, 故出现了上述反应的差异。这也说明, 块状样品与粉末样品由于其结构构造的不同, 其实验结果会有很大差异。

本文的实验结果表明, 由于扩散作用、对流作用及局部平衡体系的影响, 在块状样品反应中更应注意压力效应, 特别是在矿物分布不均匀的岩石中, 由于元素在不同压力下迁移速度的差异可引起反应物和生成物的不同, 因此在讨论高级变质作用时, 应特别注意压力对变质反应的影响。

### 参 考 文 献

- 1 穆克敏, 李树勋. 结晶岩岩石物理化学. 北京: 地质出版社, 1984. 197~ 216
- 2 温克勒 G H. 著, 张旗, 等译. 变质岩成因. 北京: 地质出版社, 1980. 1~ 76
- 3 费农 R H. 著, 游振东, 等译. 变质反应与显微构造. 北京: 地质出版社, 1976. 1~ 220
- 4 England P C and Richardson S W. The influence of erosion upon the mineral facies rocks from different metamorphic environments. *J. Geol. Soc. London.*, 1977, 134: 201~ 213
- 5 England P C and Thompson A B. Pressure-temperature-time paths of regional metamorphism I. Heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust. *J. Petrol.*, 1984, 25: 894~ 928
- 6 都城秋穗. 时间是控制变质作用的一个主要因素. 左祖发, 译. 地质科学译丛, 1993, 10(3): 25~ 29
- 7 吴宗絮, 邓晋福, Wyllie P J, 等. 冀东黑云母片麻岩在 1 GPa 压力下脱水熔融实验. 地质科学, 1995, 30(1): 12~ 18
- 8 Carrington D P and Harley S L. Partial melting and phase relations in high-grade metapelitic: an experimental petrogenetic grid in the KFM-ASH system. *Contrib. Mineral Petrol.*, 1995, 120: 270~ 291
- 9 Patino Doucel A E and Johnson D. Phase equilibria and melt productivity in the pelitic system: implications for the origin of peraluminous granitoids and aluminous granulites. *Contrib. Mineral Petrol.*, 1991, 107: 202~ 218
- 10 Vielzeuf D and Montel J M. Partial melting of metagrey wackes Part 1: Fluid-absent experiments and phase relationships. *Contrib. Mineral Petrol.*, 1994, 117: 375~ 393
- 11 Vielzeuf D and Holdaway D H. Experimental determination of the fluid-absent melting relations in the pelitic system. *Contrib. Mineral Petrol.*, 1988, 98: 257~ 276
- 12 Wolf M B and Wyllie P J. Dehydration-melting of amphibolite at 10 GPa: the effects of temperature and time. *Contrib. Mineral Petrol.*, 1994, 115: 369~ 383

## DEHYDRATION-MELTING EXPERIMENT ON THE KHONDALITE SERIES IN NORTHERN SEGMENT OF HELAN MOUNTAIN—— STRUCTURE CONSTRAINTS ON METAMORPHIC REACTIONS IN ROCKS

Liu Jianzhong<sup>1</sup> Lu Liangzhao<sup>2</sup> Xie Hongsen<sup>1</sup> Ouyang Ziyuan<sup>1</sup> Liu Xishan<sup>2</sup>

1. (Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002)

2. (Changchun University of Science and Technology, Changchun 130026)

**Abstract** Based on the solid sample experiments of Al-rich gneiss (H029) and biotite granulite (H013), the structure of rock can constrain the proceeding of metamorphic reaction. This paper discusses the mechanism and emphasizes the significance of pressure in metamorphism. The results of dehydration-melting experiments indicate that in biotite granulite can be produced metamor-

phic reaction  $Bt + Pl + Qz \rightarrow Hy + Kf + M$  at all experimental conditions of temperature and pressure, but the case is different for Al-rich gneiss. The reaction  $Bt + Pl + Qz \rightarrow Hy + Kf + M$  can appear only at 0.4 GPa (Table 2 and Fig. 2). Metamorphic reactions are different at different pressures. Reaction  $Bt + Qz \rightarrow Kf + Sil + M$  can occur at 0.6 GPa, but at 0.8 GPa reaction  $Bt \rightarrow Cud + Kf + M$  can be observed. Differences in structure of rock are the main reason for different metamorphic reactions because biotite granulite is provided with massive structure and granular texture, thus its mineral and chemical compositions are homogeneous in the whole rock. So the reaction cannot be influenced by structure and texture of the rock. But Al-gneiss exhibits striped or gneissic structure, thus its chemical and mineral compositions are heterogeneous. Metamorphic reaction is constrained not only by pressure and temperature, but also by the kinetical style of an element. At lower pressure, the diffusion rate and convection rate are higher than those at high pressure, so more reactants would be involved in reaction. As a result,  $Hy + Kf$  is formed, but at higher pressure (0.8 GPa), only little mineral would be involved in metamorphic reaction to produce  $Cud + Kf$ .

The experimental results show that the reactants and products are different in the rock whose mineral composition is unhomogeneous at different pressures. The role of pressure should be emphasized in the study of metamorphism.

**Key words** khondalite series; dehydration-melting experiment; structure of rock; metamorphic reaction