

高温高压下花岗闪长质熔体的斜长石 结晶作用实验研究

夏伟奔^{1,2}, 唐红峰¹, 朱成明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研究室, 贵州 贵阳 550002;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100049

【摘要】 对花岗闪长质熔体在 500 MPa~2 000 MPa, 650 °C~750 °C 和一定水含量条件下结晶作用实验的结果表明, 斜长石在 500 MPa 和水饱和条件下的结晶温度为 675 °C, 斜长石的结晶及其成分明显受温度、压力和熔体水含量影响。花岗闪长质熔体有斜长石结晶时残余熔体的 SiO₂ 含量高于无斜长石结晶的情况。花岗闪长质熔体发生角闪石、黑云母和斜长石结晶后的残余熔体在主量元素组成上与典型的 A 型花岗岩基本一致, 也与初始物产地的 A 型花岗岩接近。因此, 实验研究初步从主量元素上证明, 东准噶尔 A 型花岗岩浆可以来源于花岗闪长质岩浆的分异结晶作用。

【关键词】 花岗闪长质熔体; 斜长石结晶作用; 残余熔体; 实验研究

中图分类号: P578; P968 文献标识码: A

文章编号: 1001-6872(2010)01-0022-04

0 引言

斜长石是火成岩最重要的造岩矿物, 它在一定条件下发生的分异结晶作用, 对残余岩浆的化学组成(包括主量元素和微量元素)有重要影响。最近的几十年中对硅酸盐熔体的斜长石结晶作用的实验证明, 初始熔体成分、H₂O 含量、温度、压力是影响斜长石在液相线 An 含量的重要参数^[1,2]。然这些有关斜长石的结晶作用实验研究一般都针对多组分的合成体系^[3], 而以天然岩石作为初始物的结晶作用实验研究较少^[4], 如 Takagi 等^[5] 探讨在 100 MPa~500 MPa 压力条件下, 以低碱拉斑玄武岩为初始物的含水体系的斜长石结晶温度, 证明结晶斜长石的

钙长石含量随着熔体中水含量的增加而增加, 而体系中 CaO/Na₂O 和 Al₂O₃/SiO₂ 比值的变化对斜长石成分的影响不大。Housh 等^[6] 研究在 100 MPa~400 MPa 压力条件下, 分别以玄武岩和安山岩为初始物, 探讨了基性和中性硅酸盐熔体中斜长石与残余熔体之间的平衡关系, 得出斜长石-残余熔体之间的平衡与体系的水含量密切相关, 并给出了利用温度与斜长石-熔体成分之间的关系估算熔体中水含量的公式。

新疆北部东准噶尔地区广泛发育 A 型花岗岩, 由于 A 型花岗岩具有独特的地球化学特征^[7,8], 其形成机制到目前为止还存在明显的分歧。研究认为, 东准噶尔地区的 A 型花岗岩浆有可能来源于花岗闪长质岩浆的分异结晶作用^[9,10]。为了对这一成

岩机制进行检验,希望通过花岗闪长质熔体中斜长石结晶作用的初步实验研究,探讨一定条件下花岗闪长质熔体的斜长石结晶作用与温度、压力和含水量的关系。

1 实验方法

1.1 实验初始物

实验初始物选用采自新疆东准噶尔的天然花岗

闪长岩,其矿物组成主要是斜长石、钾长石、石英,次要矿物有角闪石和黑云母,副矿物有磷灰石、锆石等,其中斜长石为中长石($An \approx 34$)。初始物的主量元素组成如表1。

1.2 实验过程和分析方法

首先将花岗闪长岩碎样,并经过手工研磨成细于200目的粉末,然后将样品放入铂金管,再加入一定量的超纯水后密封。本次实验在中国科学院地球化学研究所深部室的JL-3600 t压机上进行,实验的

表1 实验初始物的主量元素组成, $w(B)/\%$

Table 1 Major-element compositions of starting material (in percentage)

样品	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ *	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	烧失量	总量
实验初始物	64.89	0.52	15.12	4.54		0.07	1.64	3.41	3.86	3.08	1.24	98.37
初始物玻璃	64.92	0.58	15.75		3.23	0.08	1.49	3.68	4.26	2.87		96.86

注:实验初始物.天然花岗闪长岩,其主量元素组成由XRF分析;初始物玻璃.花岗闪长岩粉末样品(细于200目)在1250℃下恒温30 min后淬火得到的成分均一的玻璃,其主量元素组成由EPMA分析,总量不足表明‘初始物玻璃’有一定的挥发分,与‘实验初始物’一致;Fe₂O₃*和FeO*分别为以Fe₂O₃和FeO表示的全铁

压力和温度范围分别是500 MPa~2000 MPa、650℃~750℃(表2)。实验时先升压到目标压力,然后分阶段升温。先升温到1250℃,并恒温0.5 h使岩石样品完全熔融,然后降至设定的结晶温度,降温速率为60℃/h。为了验证样品在1250℃下处于完全熔融状态,对未加水的样品开展了在1250℃恒温30 min后淬火的实验,镜下观察发现实验产物为均一的玻璃,其电子探针分析结果与天然花岗闪长岩的主量元素组成一致(表1),证明样品在该温度下已处于完全熔融状态。参考前人对低压条件下斜长石从玄武质熔体中结晶达到平衡所需时间的资料^[11],采用了延长恒温时间的方法来使反应体系的矿物-熔体之间尽可能地接近平衡。实验在目标温度的恒温时间设在70 h以上,实验9为中途断电淬火产物。

表2 实验条件和产物的相组成

Table 2 Experimental conditions and phase compositions of products

实验编号	温度/℃	压力/MPa	恒温时间/h	含水量/%	实验产物的相组成
1	650	500	72	3.1	Amp, Gl
4	700	500	70	5.7	Amp, Gl
5	725	500	80	3.1	Amp, Gl
6	750	500	72	3.1	Amp, Gl
7	675	500	80	6.4	Amp, Pl, Bt, Gl
8	675	1000	72	7.0	Amp, Pl, Bt, Gl
9	675	2000	32	7.3	Amp, Mus, Gl

注:Amp.角闪石;Pl.斜长石;Gl.残余熔体;Bt.黑云母;Mus.白云母;含水量是初始物的烧失量与实验前加水重量百分数的总和

将实验产物制成光薄片,首先在偏光显微镜下进行详细的岩相学观察,然后在中国科学院地球化学研究所矿床地球化学国家重点实验室的EPMA-1600电子探针上开展了产物图像和各相主量元素组成分析。分析条件为加速电压25 kV,电流10 nA,矿物测试的束斑3 mm~10 mm,玻璃相测试的束斑10 mm~20 mm。

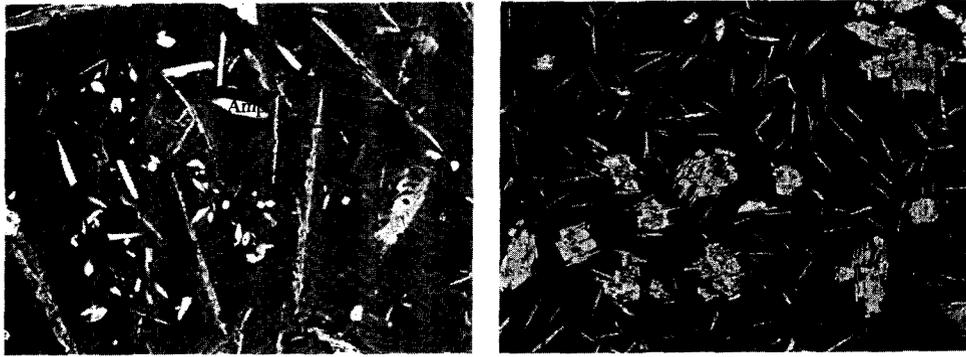
2 实验结果与讨论

2.1 实验产物的相组成

从实验产物的相组成(表2)中可见,在500 MPa压力和水饱和的条件下,斜长石在675℃时开始结晶。角闪石在含水饱和、不饱和的体系中均有出现,这也说明了角闪石的开始结晶的温度较高。在压力为500 MPa、温度为650℃时,实验1中并没有斜长石结晶,表明了在水不饱和的条件下,含水量的减少,斜长石从熔体中结晶的液相线温度升高。在体系压力较高(2000 MPa)条件下,实验9中出现了白云母。从样品的背散射图(照片1)中可以看到,在温度相同和含水量接近的条件下,随着压力的升高,在相同的恒温时间内,实验产物中结晶的斜长石和角闪石的颗粒变粗,自形程度变好。实验结果还显示,在650℃~750℃范围内,未加水的实验没有斜长石的结晶,而只在水饱和的体系中,温度为675℃时就有斜长石的结晶,表明熔体水含量的变化对斜长石结晶的液相线温度有重要影响。

2.2 斜长石的成分

实验产物的斜长石成分见表3。这些斜长石是在水饱和及压力分别为500 MPa、1000 MPa条件下结晶的。将实验结晶的斜长石与原岩中的斜长石投入Ab-An-Or图(图1)可以看到,结晶的斜长石与原岩中的斜长石成分相比,更加富Ab而贫An。结晶的斜长石成分富Ab的主要原因可能是,随着熔体中水含量的增加,斜长石结晶的液相线温度降低,结晶的温度靠近斜长石液相线的较低温度端,所以结晶形成的斜长石富Ab。两个不同压力下结晶斜长石的成分对比(图2)显示,在温度不变和熔体



照片1 实验产物的背散射电子图像
a. 500 MPa, 675 °C 和水饱和条件; b. 1 000 MPa, 675 °C 水饱和条件; Amp. 角闪石; Pl. 斜长石; Bt. 黑云母; Gl. 残余熔体
Photo 1 BSE images of representative products

水饱和的条件下,随着压力的升高,斜长石的 An 组分增加。

表3 实验产物的斜长石电子探针分析结果. w(B)/%
Table 3 EPMA results of plagioclases in products (in percentage)

点号	07-1	07-2	07-3	08-1	08-2	08-3	08-4
SiO ₂	62.57	63.09	63.44	62.53	59.87	59.09	63.82
TiO ₂	0.00	0.00	0.14	0.00	0.08	0.00	2.75
Al ₂ O ₃	22.90	22.41	21.36	22.99	23.96	24.56	20.41
FeO*	0.18	0.24	0.52	0.14	0.25	0.09	1.62
MnO	0.00	0.03	0.02	0.10	0.00	0.01	0.16
MgO	0.03	0.02	0.12	0.02	0.02	0.00	0.01
CaO	4.71	4.98	4.75	5.35	6.67	6.14	4.82
Na ₂ O	8.96	7.44	8.27	8.02	7.86	8.23	7.20
K ₂ O	0.70	0.92	1.22	1.27	1.02	1.17	0.96
总量	100.05	99.13	99.84	100.42	99.73	99.29	101.75
Ab	74.73	69.13	70.90	68.11	64.58	66.64	68.82
An	21.43	25.25	22.22	24.79	29.9	27.13	25.14
Or	3.84	5.62	6.88	7.10	5.51	6.23	6.04

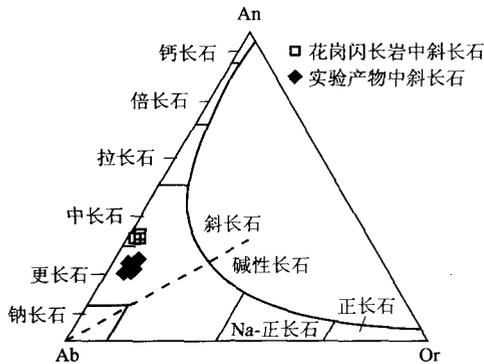


图1 斜长石成分的 Ab-An-Or 图解
Fig. 1 An-Ab-Or ternary diagram of plagioclases

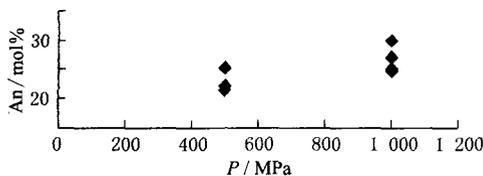


图2 斜长石组成(An)与压力(P)的关系
Fig. 2 The relationship between composition of plagioclase (An) and pressure (P)

2.3 残余熔体成分

对花岗闪长质熔体在650 °C ~ 750 °C 范围内发

生矿物结晶作用后残余熔体的电针探针分析表明(表4), w(SiO₂)/% 总体在 68.93~75.27 范围内变化。本次实验所得到的残余熔体中,有斜长石结晶的两次实验的残余熔体,其 SiO₂ 的质量分数是最高

表4 实验产物的残余熔体主量元素组成. w(B)/%
Table 4 Major element compositions of residual melts in products (in percentage)

实验号	1	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	71.64	71.64	71.15	68.93	73.64	75.27	72.68
TiO ₂	0.58	0.39	0.49	0.43	0.17	0.00	0.47
Al ₂ O ₃	15.57	16.96	16.3	16.74	16.54	16.30	17.51
FeO*	1.56	0.92	0.56	1.74	0.93	0.78	0.69
MnO	0.00	0.06	0.04	0.04	0.06	0.08	0.05
MgO	0.59	0.23	0.04	0.63	0.11	0.08	0.09
CaO	2.05	2.34	3.07	2.98	2.65	2.12	1.22
Na ₂ O	3.97	4.03	4.35	5.23	2.65	1.24	3.77
K ₂ O	3.99	3.44	3.02	3.29	3.25	4.13	3.64
总量	97.62	93.9	98.41	95.78	90.56	86.14	89.41

注:主量元素氧化物含量是根据电子探针数据(5~7 个点平均值),按照无水重新计算的结果(即主量元素氧化物总量标准化到 100%), FeO* 是以 FeO 表示的全铁,总量为电子探针初始数据

的,而在水不饱和条件下经矿物结晶后(没有斜长石结晶)形成的残余熔体 SiO₂ 的质量分数低。这显示了随着斜长石的结晶,熔体中的 SiO₂ 含量增加。因此,斜长石的结晶对残余熔体的 SiO₂ 含量有明显影响。

残余熔体与初始物产地的 A 型花岗岩在 SiO₂ 含量上一致。在 (Na₂O + K₂O - CaO), FeO/(FeO + MgO) 分别与 w(SiO₂) 的协变图(图 3)上,残余熔体

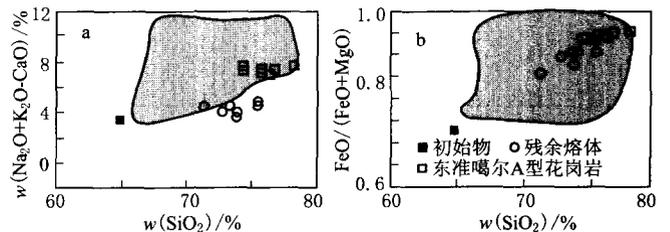


图3 残余熔体和花岗岩类的 w(Na₂O + K₂O - CaO) (a) 和 FeO/(FeO + MgO) (b) 与 w(SiO₂) 的协变图(据 Frost et al, 2001^[12])

阴影区为澳大利亚 Lachlan 褶皱带的 A 型花岗岩类
Fig. 3 w(Na₂O + K₂O - CaO) (a) and FeO/(FeO + MgO) (b) versus w(SiO₂)

基本落入典型的A型花岗岩区,也与初始物产地的A型花岗岩很接近(图3)。其中,残余熔体的($\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}$)值较初始物产地A型花岗岩的偏低,这很可能是由于结晶的斜长石成分富Ab而贫An导致的。

3 结 论

3.1 在花岗闪长质熔体中,先结晶的矿物为角闪石和黑云母。斜长石只在特定条件下晶出。水含量的

变化对熔体中斜长石矿物结晶有重要影响,水含量的增加能大幅度降低斜长石的结晶温度。在温度不变和水饱和条件下,随着压力的增加,结晶出的斜长石其An组分增加。

3.2 随着斜长石的结晶,残余熔体中 SiO_2 含量更高,且随着斜长石中An组分的增加,残余熔体的 SiO_2 含量增加。本文的初步实验研究表明,从主量元素组成上看,花岗闪长质熔体在一定温度、压力和水含量条件下发生角闪石、黑云母和斜长石等矿物的分异结晶作用,可以形成A型花岗岩浆。

参考文献

- [1] Longhi J, Fram M S, Auwera J V, *et al.* Pressure effects, kinetics, and rheology of anorthositic and related magmas[J]. *American Mineralogist*, 1993, 78: 1 016-1 030.
- [2] Sisson T W, Grove T L. Experimental investigations of the role of H_2O in calc-alkaline differentiation and subduction zone magmatic arcs from basalt at Galunggung, Indonesia[J]. *Nature*, 1993a, 391: 883-886.
- [3] Johannes W. Melting of plagioclase in the system Ab-An- H_2O and Qz-Ab-An- H_2O at $\text{PH}_2\text{O}=5$ kbar, an equilibrium problem[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 1978, 66: 264-303.
- [4] Panjasawatwong Y, Danyushevsky L V, Crawford A J, *et al.* An experimental study of the effect of melt composition on plagioclase-melt equilibria at 5 and 10 kbar: implications for the origin of magmatic high-An plagioclase[J]. *Contrib Mineral petrol*, 1995, 118: 420-432.
- [5] Takagi D, Sato H, Nakagawa M. Experimental study of a low-alkali tholeiite at 1-5 kbar: optimal condition for the crystallization of high-An plagioclase in hydrous tholeiite[J]. *Contrib Mineral Petrol*, 2005, 149: 527-540.
- [6] Housh T B, Luhr J F. Plagioclase-melting equilibria in hydrous systems[J]. *American Mineralogist*, 1991, 76: 477-492.
- [7] 邢雪芬, 唐瑞清. 康滇地轴中断印支—燕山期花岗岩岩石特征及成因探讨[J]. *矿物岩石*, 1990, 10(1): 52-60.
- [8] 吴锁平, 王梅英, 戚开静. A型花岗岩研究现状及其述评[J]. *岩石矿物学杂志*, 2007, 26(1): 57-66.
- [9] 苏玉平. 新疆准噶尔A型花岗岩的年代学和地球化学研究[D]. 中国科学院研究生院, 2007.
- [10] 赵振华, 王中刚, 邹天人, 等. 新疆乌伦古富碱侵入岩成因探讨[J]. *地球化学*, 1996, 25(3): 205-220.
- [11] Brugger C R, Johnston A D, Cashman K V. Phase relations in silic systems at one-atmosphere pressure[J]. *Contrib Mineral petrol*, 2003, 146: 356-369.
- [12] Frost B R, Barnes C G, Collins W J, *et al.* A geochemical classification for granitic rocks[J]. *Journal of Petrology*, 2001, 42(11): 2 033-2 048.

EXPERIMENTAL STUDY ON CRYSTALLIZATION OF PLAGIOCLASES FROM A GRANODIORITIC MELT AT HIGH TEMPERATURE AND HIGH PRESSURE

XIA Wei-ben^{1, 2}, TANG Hong-feng¹, ZHU Cheng-ming¹

{ 1. Laboratory for Study of the Earth's Interior and Geofluids, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China;
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China }

Abstract: The results of crystallization experiments of a granodioritic melt, at conditions of 500 MPa~2 000 MPa, 650 °C~750 °C and H_2O -unsaturated or-saturated, showed that, at 500 MPa and H_2O -saturated, the plagioclases began to crystallize at 675 °C, and that pressure, temperature and H_2O content had obvious impact on the crystallization and composition of plagioclases. The SiO_2 contents in residual melt with crystallization of plagioclases were higher than those without the present of plagioclases. Major element compositions of residual melts after the crystallization of amphibole, biotite and plagioclase were basically consistent with those of typical A-type granites, and also nearly close to those of the A-type granites in the region from which the starting material was collected. Therefore, the preliminary experimental study on the major element compositions suggested that the A-type granitic magma in East Junggar could be derived from the crystallization differentiation of the granodioritic magma in the same region.

Key words: granodioritic melt; plagioclase crystallization; residual melt; experimental study

ISSN 1001-6872(2010)01-0022-04; CODEN: KUYAE2

Synopsis of the first author: Xia Weiben, male, 28 years old, a Ms of geochemistry. Now he is engaged in the research of lithochemistry.