

•专题研究•

广东佛冈花岗杂岩体中乌石闪长岩-角闪辉长岩的结晶条件

鲁为敏, 徐夕生, 耿红燕, 范钦成

(南京大学地球科学系 成矿作用国家重点实验室, 江苏 南京 210093)

摘要: 佛冈花岗杂岩体是南岭地区最大的晚中生代岩基, 乌石闪长岩-角闪辉长岩是佛冈钙碱性系列花岗岩中最基性的端员。乌石闪长岩-角闪辉长岩和周围佛冈黑云母花岗岩、含角闪石花岗闪长岩同属于高钾钙碱性系列岩石。本文系统地总结并对比了多种角闪石压力计和角闪石-斜长石温度计, 针对中酸性钙碱性岩浆, 提出了改进的角闪石 ALTi 温压曲线格子, 并将其运用到乌石闪长岩-角闪辉长岩的结晶条件估算中。估算结果显示, 乌石闪长岩-角闪辉长岩中角闪石结晶温度为 820 ± 20 °C, 压力为 70~ 130 MPa, X_{H_2O} 为 0.7 ± 0.1 , 其结晶条件代表岩体侵位时的物理环境。花岗闪长岩中的角闪石结晶温度约为 820 °C, 压力约为 260 MPa, 是在较深的岩浆房中结晶的。

关键词: 角闪石-斜长石温度计; 角闪石 ALTi 温压格子; 乌石闪长岩-角闪辉长岩; 广东佛冈

中图分类号: P588. 12⁺ 2; P581

文献标识码: A

文章编号: 1000- 6524 (2005) 03- 0161- 12

Crystallization conditions of Wushi diorite_hornblende gabbros in Fogang granitoid complex, Guangdong Province

LU Wei_min, XU Xi_sheng, GENG Hong_yan and FAN Qin_cheng

(Key State Laboratory for Mineral Deposits Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

Abstract: The Fogang granitoid complex is the largest Late Mesozoic batholith in Nanling region, and the Wushi diorite_hornblende gabbros are the most basic end_member of Fogang calc_alkaline series rocks. Both the Wushi diorite_hornblende gabbros and the surrounding granite_granodiorites belong to high_K calc_alkaline series. Based on a systematic comparison of different AL_in_hornblende geobarometers and hornblende_plagioclase geothermometers, the authors have proposed an improved temperature and pressure grid of AL_Ti in hornblende and applied it to estimating crystallization conditions of Wushi diorite_hornblende gabbros. Hornblendes in Wushi diorite_hornblende gabbros crystallized at 820 ± 20 °C and 70~ 130 MPa, with a X_{H_2O} of 0.7 ± 0.1 . The hornblendes in surrounding granodiorites crystallized at 820 °C and 260 MPa.

Key words: hornblende_plagioclase geothermobarometer; T_p grid of AL_Ti in hornblende; Wushi diorite_hornblende gabbros; Fogang in Guangdong Province

岩浆的演化过程、结晶条件、固结时间是广大地质学家长期关注的问题 (Tuttle and Bowen, 1958; Yoder, 1979; Piether, 1993; Petford *et al.*, 2000)。有关岩浆结晶条件的估算, 矿物学家和岩石学家进行

了大量温压计经验和实验标定工作及矿物相平衡实验 (Anderson, 1996; Devine, 2003; Rutherford, 2003; Nekvasil *et al.*, 2004; Barclay *et al.*, 2004), 并对内部一致矿物热力学数据库 (internally_consistentther_

收稿日期: 2004-09-29; 修订日期: 2004-12-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40132010, 40125007)

作者简介: 鲁为敏 (1982-), 男, 硕士研究生, 矿物学岩石学矿床学专业, 现从事火成岩石学研究。联系作者: 徐夕生, E-mail: xxsx@nju.edu.cn。

modynamic dataset) 进行了多次更新和校订 (Berman, 1988; Holland and Powell, 1990; Gottschalk, 1997; Holland and Powell, 1998), 为准确估计岩石结晶条件提供了良好的基础。

广东佛冈花岗质杂岩体出露总面积约 5 000 km², 是南岭地区规模最大的复式岩基。其主体为粗粒斑状黑云母花岗岩、中粒黑云母二长花岗岩, 局部为含角闪石的花岗闪长岩和中性闪长岩, 构成一个钙碱性系列。此外, 少量碱性正长岩 (刘昌实等, 2002) 和 A 型碱长花岗岩 (刘昌实等, 2003) 构成了一个碱性系列。主体钙碱性系列岩石出露面积约占杂岩体总面积 90% 以上。对于钙碱性系列岩石的成因类型划分, 认识很不一致, 不同研究者以不同依据将其划分为: A 型 (肖振宇等, 1998; 包志伟等, 2003) S 型 (赵子杰等, 1986; 陈小明等, 2002) 和 I 型 (庄文明等, 2000)。中基性岩石对认识岩石成因类型、阐明壳幔相互作用、岩浆分异或混合、区域构造运动等问

题有重大作用 (Tepper *et al.*, 1993; Xu *et al.*, 1999), 显然, 在对该钙碱性系列岩石的研究中, 应重视其中的闪长岩。乌石闪长岩-角闪辉长岩是已发现的佛冈钙碱性系列岩石中最基性的端员, 对它的研究可深化对佛冈钙碱性系列岩石成因的认识。本文在新获得的岩石地球化学和矿物电子探针成分数据的基础上, 利用角闪石-斜长石温压计和改进过的温压曲线格子, 参照相同成分的岩浆体系中矿物相平衡实验结果 (Rutherford *et al.*, 1985, 1988, 1993, 2003), 结合矿物相平衡热力学计算结果 (Berman, 1991), 探讨了乌石岩体的岩浆结晶条件。

1 岩体地质和岩石地球化学

乌石岩体位于佛冈花岗杂岩体中心位置, 出露面积约 4 km² (图 1)。它与佛冈主体黑云母花岗岩、二长花岗岩直接接触。



图 1 乌石岩体地质简图

Fig. 1 Schematic geological map of Wushi diorite-hornblende gabbros pluton

乌石岩体主体为闪长岩, 具中细粒结构, 矿物组成为角闪石 (20% ~ 25%)、黑云母 (5% ~ 15%)、石英 (5% ~ 15%)、斜长石 (35% ~ 55%, 多数为中拉长石, 环带发育) 和少量钾长石 (< 5%)。此外, 乌石岩体局部地区可见少量与闪长岩呈过渡关系的角闪辉长岩。与闪长岩相比, 角闪辉长岩粒度更细, 颜色更深, 含更多的铁镁质矿物, 其矿物组成为辉石 (2% ~ 5%, 以斜方辉石为主, 也含单斜辉石)、角闪石 (25% ~ 35%)、黑云母 (5% ~ 10%)、石英 (5% ~ 10%) 和斜长石 (35% ~ 55%, 多数为中拉长石, 环带发育)。

乌石闪长岩和局部的角闪辉长岩的差别主要在矿物比例上, 此外, 闪长岩中不含辉石, 但有钾长石, 而角闪辉长岩含辉石, 无钾长石。

与乌石岩体接触的黑云母花岗岩具粗粒似斑状结构, 矿物组成为黑云母 (3% ~ 8%)、石英 (25% ~ 35%)、斜长石 (25% ~ 35%, 更长石) 和钾长石 (25% ~ 35%)。乌石岩体周围的含角闪石花岗闪长岩具中粒结构, 矿物组成为黑云母 (5% ~ 15%)、角闪石 (< 5%)、石英 (25% ~ 35%)、斜长石 (30% ~ 40%, 中长石) 和钾长石 (15% ~ 25%)。

表 1 乌石闪长岩-角闪辉长岩及周围佛冈花岗岩的主量元素含量

w_B/%

Table 1 Major element contents of Wushi diorites_hornblende gabbros and surrounding Fogang granites

岩性 样品号	角闪辉长岩	闪长岩		花岗闪长岩			花岗岩		
	FG32	FG31_2	Ws_H	FG33_2	FG22_1	FG34_2	FG_zh24	FG24_5	FG27
SiO ₂	48.96	54.71	54.77	68.27	66.72	67.46	73.17	70.97	71.85
TiO ₂	2.29	1.14	1.07	0.58	0.65	0.63	0.26	0.51	0.31
Al ₂ O ₃	16.32	16.39	17.14	14.25	15.06	14.64	13.32	13.70	13.45
Fe ₂ O ₃	3.86	9.32	1.60	1.29	1.25	4.60	0.71	1.14	0.85
FeO	8.69	-	6.50	3.10	3.59	-	1.76	2.37	2.27
MnO	0.18	0.18	0.19	0.07	0.08	0.11	0.06	0.06	0.06
MgO	4.86	4.32	4.34	0.90	1.44	0.98	0.45	0.87	0.34
CaO	10.26	7.63	7.72	2.74	3.12	2.92	1.44	2.58	1.44
Na ₂ O	1.81	2.53	2.27	3.10	2.58	3.47	2.96	3.18	2.71
K ₂ O	0.86	2.21	1.72	4.27	4.60	4.12	4.81	3.41	5.52
P ₂ O ₅	0.60	0.25	0.32	0.16	0.21	0.16	0.07	0.17	0.09
灼失量	0.75	1.56	1.88	0.95	0.61	0.66	0.65	0.78	0.79
总和	99.44	100.24	99.52	99.68	99.91	99.75	99.66	99.74	99.68
ALK	2.67	4.74	3.99	7.37	7.18	7.59	7.77	6.59	8.23
NK/A	0.24	0.40	0.33	0.68	0.61	0.69	0.76	0.65	0.78
ACNK	0.72	0.80	0.87	0.97	1.01	0.95	1.05	1.01	1.03
σ	1.20	1.92	1.35	2.15	2.17	2.36	2.00	1.55	2.35

主量元素成分由南京大学现代分析中心采用 XRF 方法测定, 二价铁采用湿化学法测定。— 未进行分析测定, FG 样品为本文所测, Ws_H 引自黄有义等(2000), FG_zh24 引自庄文明(2000)中 24 个佛冈主体花岗岩平均值; ALK=(Na₂O+ K₂O)/Al₂O₃(摩尔数比); ACNK= Al₂O₃/(Na₂O+ K₂O+ CaO)(摩尔数比); σ 为里特曼指数。

乌石闪长岩-角闪辉长岩及周围花岗岩主量元素分析结果如表 1。乌石闪长岩 SiO₂ 含量为 54% 左右, ALK((Na₂O+ K₂O)/Al₂O₃) 为 4.0% ~ 4.7%; 乌石岩体中角闪辉长岩 SiO₂ 含量更低(49%), 但 TiO₂ 高达 2.3%, FeO+ MgO 高达 18.4%。乌石岩体周围的含角闪石花岗闪长岩 SiO₂ 含量为 67% 左右, ALK 为 7.2% 左右, ACNK 值为 0.95~ 1.01。24 个佛冈主体花岗岩的主量元素化学成分平均值(庄文明等, 2000) 结果表明, 黑云母花岗岩 SiO₂ 含量为 73% 左右, ALK 为 7.8% 左右, ACNK 值为 1.05 左右。

乌石闪长岩-角闪辉长岩和周围花岗岩的里特曼指数都小于 3, 是典型的钙碱性岩石。在 K₂O - SiO₂ 图(图 2) 上, 除了乌石岩体中 SiO₂ 含量最低的角闪辉长岩属于钙碱系列外, 其他样品都落在高钾钙碱系列区间。

2 矿物学特征和矿物化学

乌石闪长岩-角闪辉长岩及周围花岗岩中主要造岩矿物成分电子探针分析结果如表 2。矿物的命名、晶体化学式、阳离子占位率计算按国际矿物学会(IMA) 命名委员会提出的方案进行(辉石—Morimoto *et al.*, 1988; 长石—Deer *et al.*, 1992; 角闪石—

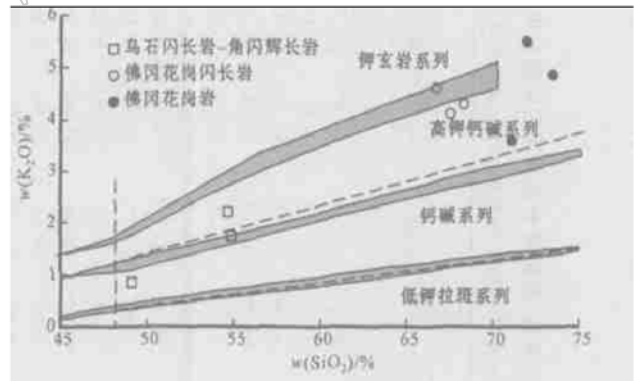


图 2 乌石闪长岩-角闪辉长岩和周围佛冈花岗岩的 K₂O - SiO₂ 图解

Fig. 2 K₂O- SiO₂ diagram for Wushi diorite_hornblende gabbros and surrounding Fogang granites

Leake *et al.*, 1997; 黑云母—Rieder *et al.*, 1998)。乌石岩体中闪长岩的角闪石、黑云母、斜长石与相伴产出的角闪辉长岩中这些矿物成分十分相似。

2.1 辉石

乌石岩体中角闪辉长岩含紫苏辉石(Hyperssthene)和次透辉石(Salite), 大多数辉石为紫苏辉石。辉石颗粒较小, 很多颗粒周边有一圈角闪石反应边, 表明辉石早于角闪石结晶。紫苏辉石 Mg[#][Mg/(Mg+ Fe)](摩尔数) 为 0.68~ 0.72, Al₂O₃

表 2 乌石闪长岩-角闪辉长岩及周围花岗岩中主要造岩矿物电子探针分析数据
Table 2 Electron microprobe analyses of major rock-forming minerals in Wushi diorites-hornblende gabbros and surrounding granites

矿物 岩性 样品号	斜方辉石				角闪石				黑云母				钾长石				斜长石	$x_{H_2O}/\%$	
	角闪辉长岩 FG32	角闪辉长岩 FG32	角闪辉长岩 FG32	角闪辉长岩 FG32	角闪辉长岩 FG22-1	角闪辉长岩 FG31-1	角闪辉长岩 FG32	角闪辉长岩 FG31-1	角闪辉长岩 FG18-L	角闪辉长岩 FG31-1	角闪辉长岩 FG18-L	角闪辉长岩 FG22-1	角闪辉长岩 FG32	角闪辉长岩 FG31-1	角闪辉长岩 FG18-L	角闪辉长岩 FG22-1			角闪辉长岩 FG18-L
SiO ₂	52.65	51.29	49.70	49.16	41.19	47.41	45.10	34.67	36.20	36.92	35.30	35.76	63.53	64.38	57.34	64.19	53.98	53.32	53.32
TiO ₂	0.14	0.10	0.22	0.28	1.46	1.23	1.97	4.77	3.16	3.12	2.96	4.96	0.01	0.00	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	1.25	0.61	0.75	0.70	10.01	6.79	9.22	13.49	16.16	14.50	15.13	14.83	19.35	18.82	27.31	22.60	28.77	29.65	29.65
FeO	12.39	11.95	29.57	29.57	24.37	16.21	16.01	25.46	22.10	22.48	22.13	20.70	0.28	0.18	0.18	0.36	0.23	0.19	0.19
MnO	0.36	0.51	0.87	0.87	0.62	1.13	0.21	0.29	0.08	0.50	0.09	0.12	0.00	0.00	0.01	0.03	0.02	0.00	0.00
MgO	12.30	12.44	17.39	17.39	7.35	11.15	11.09	7.61	9.62	8.37	10.83	10.39	0.19	0.07	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
CaO	22.47	22.59	1.63	1.63	10.80	11.48	11.57	0.06	0.02	0.41	0.03	0.13	0.01	0.06	7.72	2.87	11.18	11.16	11.16
Na ₂ O	0.21	0.29	0.01	0.01	1.52	0.80	1.17	0.09	0.10	0.14	0.13	0.09	0.63	0.88	7.22	9.50	5.39	4.91	4.91
K ₂ O	0.03	0.01	0.00	0.00	1.50	0.47	0.94	9.98	8.95	8.62	8.20	8.52	15.69	15.22	0.12	0.14	0.16	0.15	0.15
Total	101.80	99.80	99.60	99.60	98.80	96.67	97.28	95.81	96.36	95.06	95.80	95.50	99.68	99.61	99.90	99.70	99.77	99.38	99.38
Si	1.96	1.96	1.93	1.93	6.28	7.02	6.65	5.49	5.51	5.72	5.45	5.47	11.81	11.92	10.28	11.35	9.80	9.69	9.69
Al ^{IV}	0.04	0.03	0.03	0.03	1.73	0.98	1.35	2.51	2.49	2.26	2.55	2.53	4.24	4.11	5.77	4.71	6.15	6.35	6.35
Al ^{VI}	0.02	0.00	0.00	0.00	0.08	0.17	0.26	0.01	0.42	0.37	0.20	0.15							
Ti	0.04	0.11	0.15	0.09	0.17	0.07	0.22	0.50	0.36	0.36	0.34	0.57							
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.01	0.01	0.85	0.58	0.65												
Fe ²⁺	0.34	0.27	0.81	0.81	2.26	1.65	1.33	3.38	2.81	2.91	2.86	2.65	0.04	0.03	0.03	0.05	0.03	0.03	0.03
Mn	0.01	0.02	0.03	0.03	0.08	0.14	0.03	0.04	0.01	0.07	0.01	0.02							
Mg	0.68	0.71	1.02	0.89	1.67	2.52	2.44	1.80	2.18	1.93	2.39	2.37							
Ca	0.90	0.92	0.07	0.07	1.76	1.76	1.75	0.01	0.00	0.07	0.09	0.02	0.00	0.01	1.48	0.54	2.17	2.17	2.17
Na	0.02	0.02	0.00	0.00	0.55	0.20	0.25	0.03	0.03	0.04	0.04	0.03	0.23	0.32	2.51	3.26	1.89	1.73	1.73
K					0.30	0.07	0.20	2.02	1.73	1.70	1.81	1.66	3.72	3.60	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04
Total	4.01	4.03	4.04	4.04	15.73	15.16	15.13	15.78	15.55	15.46	15.76	15.46	20.04	19.98	20.10	19.94	20.08	20.01	20.01
Mg ²⁺	0.67	0.72	0.58	0.56	0.35	0.53	0.55	0.65	0.56	0.60	0.53	0.53							
W ₀	45.0	45.1	3.3	2.8															
En	34.3	34.6	49.1	43.9															
Fs	19.9	19.3	47.6	53.2															
An																			
Ab																			
Or																			

矿物成分分析在南京大学生态地质国家重点实验室的 JECOL JXA-8800M 型电子探针仪上完成。

< 0.75%, 次透辉石 $Mg^{\#}$ 为 0.48 ~ 0.58, Al_2O_3 < 1.25%, 不具备幔源岩浆中辉石高镁、高铝的特征。

2.2 角闪石

按照 IMA 1997 的角闪石分类方案, 乌石闪长岩-角闪辉长岩中角闪石都属于钙质角闪石亚类中的普通角闪石(Hornblende)。无论是作为包裹大量辉石和斜长石的角闪石主晶, 还是孤立的自形角闪石晶体, 成分差异不大, 与 Elliott(2001) 对芬兰奥长环斑花岗岩中角闪石的分析结果相似。但角闪石成分的差异会显著影响角闪石-斜长石温压计的估算结果(Elliott *et al.*, 2001)。

乌石岩体中角闪石 Al_2O_3 含量为 6.63% ~ 9.65%, 平均为 8.05%, $Mg^{\#}$ 为 0.55 左右; 而佛冈杂岩体中的花岗闪长岩中角闪石 Al_2O_3 含量为 9.82% ~ 10.65%, 平均为 10.10%, $Mg^{\#}$ 为 0.35 左右。

处理电子探针分析数据时, 角闪石晶体化学式中 Fe^{2+} 值常采用经验公式获得, 而 Fe^{2+} 估算值与真实值的误差直接影响温压估计结果。为消除这种误差, 乌石闪长岩-角闪辉长岩中角闪石和黑云母 Fe^{2+} 数据采用湿化学法分析获得, 并用于校验经验公式 Fe^{2+} 估算值与真实值之间的差异。

2.3 黑云母

从花岗岩、花岗闪长岩到闪长岩-角闪辉长岩, 尽管其岩石主量元素成分呈规律性变化(SiO_2 含量下降、 $FeO+MgO$ 含量上升), 但岩石中黑云母的成分差异不大, $Mg^{\#}$ 变化很小(0.35~0.47)。按 Foster(1960) 的分类方案, 所有样品都属于铁质黑云母。

2.4 长石

花岗岩和花岗闪长岩中的钾长石成分靠近钾长石端员, 其 Or 含量大于 90%, 而 An 含量小于 1%。从花岗岩、花岗闪长岩到闪长岩-角闪辉长岩, 岩石中 CaO 含量逐渐增加, 斜长石 An 值逐渐增高(An 平均值分别为: 0.15、0.35 和 0.55)。

花岗岩和花岗闪长岩中斜长石成分均一。乌石岩体中斜长石成分变化较大, 大多具正常环带(An 值为 0.45~0.55)。结晶条件估算需要配对的平衡矿物组合, 所以应选取与角闪石毗邻的斜长石边缘进行电子探针成分分析。

3 结晶条件估算

3.1 改进的角闪石 Al-Ti 温压曲线格子

岩石学家很早就发现, 岩浆结晶温度和压力的

变化能显著地影响角闪石成分(Al、Ti、Na、K)(Engel *et al.*, 1962; Spear, 1981a, 1981b, 1982), 但真正利用角闪石准确估算温度、压力的工作起始于 Hammarstrom 和 Zen(1986) 提出的角闪石 Al 压力计。此后, 角闪石 Al 压力计和角闪石-斜长石温度计的大量实验研究工作(Johnson *et al.*, 1989; Schmidt, 1992; Thomas *et al.*, 1990) 为利用角闪石成分进行温压估算打下了坚实的基础。温度、压力、熔体成分、水逸度、氧逸度是影响岩浆结晶的 5 个重要参数, 它们之间存在着强烈的相互制约关系。成功的结晶条件估算, 要求除了获得大量可靠的矿物成分数据和选取好的温压估计方法外, 还要考虑上述 5 个参数的制约关系。

先获得岩浆结晶温度, 再估算结晶压力, 最后讨论水逸度和氧逸度及熔体成分, 是正确估算钙碱性岩浆结晶条件的步骤(Anderson, 1996)。Blundy 和 Holland(Blundy and Holland, 1990; Holland and Blundy, 1994) 先后提出了 3 个利用角闪石中 Al^{IV} 和斜长石中 Ab 构成的温度计, 即 BH90, HB94a 和 HB94b。BH90 由于热力学模型过于理想化, 受到了强烈批评(Hammarstrom *et al.*, 1992; Rutherford *et al.*, 1992; Poli *et al.*, 1992)。HB94b 受压力影响小, 在变质岩和火成岩中的应用效果都较好(Stone, 2000; Faryad *et al.*, 2003), 可信度最高(Anderson, 1996; Bachmann *et al.*, 2002; Ernst, 2002)。

角闪石 Al 压力计自 Hammarstrom 和 Zen(1986) 提出后, 经过了两次经验上和两次实验上的校正(Hammarstrom and Zen, 1986; Hollister *et al.*, 1987; Johnson *et al.*, 1989; Schmidt, 1992), 共获得了 4 个不考虑温度影响的角闪石 Al 压力计, 即 Ham86、Holl87、John89 和 Sch92。这些角闪石 Al 压力计的适用条件中最重要前提是, 只有岩浆结晶温度靠近一个几乎不变的熔体固相线温度时(如花岗岩岩浆, 670 °C), 结晶压力才和角闪石中的 Al 呈线性相关。Anderson(1995) 利用这 4 个 Al 压力计和其他一些角闪石相平衡实验资料(Thomas *et al.*, 1990) 对角闪石 Al 压力计做了关于温度的校正和外推(即 Ander95), 此外, Anderson 也给出了在一些低氧逸度情况下(FMQ 缓冲)角闪石 Al 压力计估算值明显偏高的例子。尽管 Ander95 给出的只是不成熟的外推公式, 但由于它是经过温度校正的惟一的压力计算公式, 所以该公式成了使用最广泛的角闪石 Al 压力计。

Ernst 等(1998)给出了玄武质岩浆在高压情况下角闪石中 Al_2O_3 和 TiO_2 随温度、压力同时变化的曲线格子(即 Ernst98),它可用于半定量估算温度和压力,也得到了广泛应用。但研究者在使用 Ernst98 和 Ander95 时(Bachmann *et al.*, 2002; Pal, 2001)往往会碰到下面3个问题:Ernst98 是否适合于花岗闪长岩体系?这种半定量方法的精确度如何?估算结果相互冲突时,如何进行取舍?

本文结合 Anderson(1995)和 Ernst(1998)的工作,补充了大量角闪石相平衡实验成果(Binn, 1965a, 1965b; Helz, 1973, 1976; Hietanen, 1974; Spear, 1981a, 1981b, 1982; d'Arco *et al.*, 1981; Whitney *et al.*, 1985; Johnson, 1989; Schmidt, 1992),针对中酸性钙碱性岩浆结晶的温压区间(0~8 MPa, 600~850 °C),构筑了新的 Al 压力格子(图3)。依照相平衡实验数据,采用内插法获得的 Al 压力曲线群中, Al^{T} 为 1.4 的曲线与实验数据非常吻合,可作曲线群的基准线。由 Ander95 和 Ernst 98 推演出的 Al 温压曲线在 Al^{T} 为 1.8(即 $\text{Al}_2\text{O}_3 = 10\%$)时,在高温区间(750~850 °C)能较好吻合,而在低温区间(650~750 °C)存在着明显差异。 Al^{T} 为 1.8 时,曲线随温度的变化更靠近 Ander95,说明新的 Al 压力格子比 Ander95 比较适合压力估算。

角闪石中 TiO_2 含量能粗略估计温度,图3中角闪石 Ti 温度格子是在对比了 Ernst(1998)的温度格

子和 Otten(1984)的半定量温度计的基础上,采用等比内插方法得到的曲线群。角闪石 Ti 温度格子往往误差较大,仅供参考。利用角闪石单个矿物同时获得温压信息,从热力学原理上看是不可能精确的;从实验分析角度看,因解理缝附近和颗粒边缘的 Ti 易丢失,准确分析角闪石中 TiO_2 含量存在着困难,因此至少推荐 15 个以上的角闪石成分数据,可对 TiO_2 含量较低的成分数据进行剔除(Ernst, 2002; Ague, 1997)。

3.2 乌石闪长岩-角闪辉长岩的结晶条件估算

乌石岩体中 19 组配对的角闪石-斜长石成分数据及佛冈杂岩体中的花岗闪长岩中 4 组配对的角闪石-斜长石成分数据见表 3。处理角闪石成分数据时,选择合适的晶体化学式计算方法能较大幅度提高温压估算的准确度(Holland and Blundy, 1994; Bachmann *et al.*, 2002)。IMA(1997)提供的角闪石分类方案(Leake *et al.*, 1997)中,详细地说明了角闪石通用的晶体化学式计算方法(Schumacher, 1997)。其基本原理是:用一组(含 3 个) r_{max} 估算公式获得 R_{MAX} ,用一组(含 3 个) r_{min} 估算公式获得 R_{MIN} ,选取介于 R_{MAX} 和 R_{MIN} 之间的任何一个值,在理论上都是合理的,但取 R_{MAX} 和 R_{MIN} 的平均值是大量角闪石数据处理时常用的简单办法。乌石岩体中的角闪石 Fe^{2+} 使用湿化学法测定的 R 值($\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{\text{T}}$)为 0.627,非常接近 R_{MAX} 和 R_{MIN} 的平均 R 值(0.656),黑云母

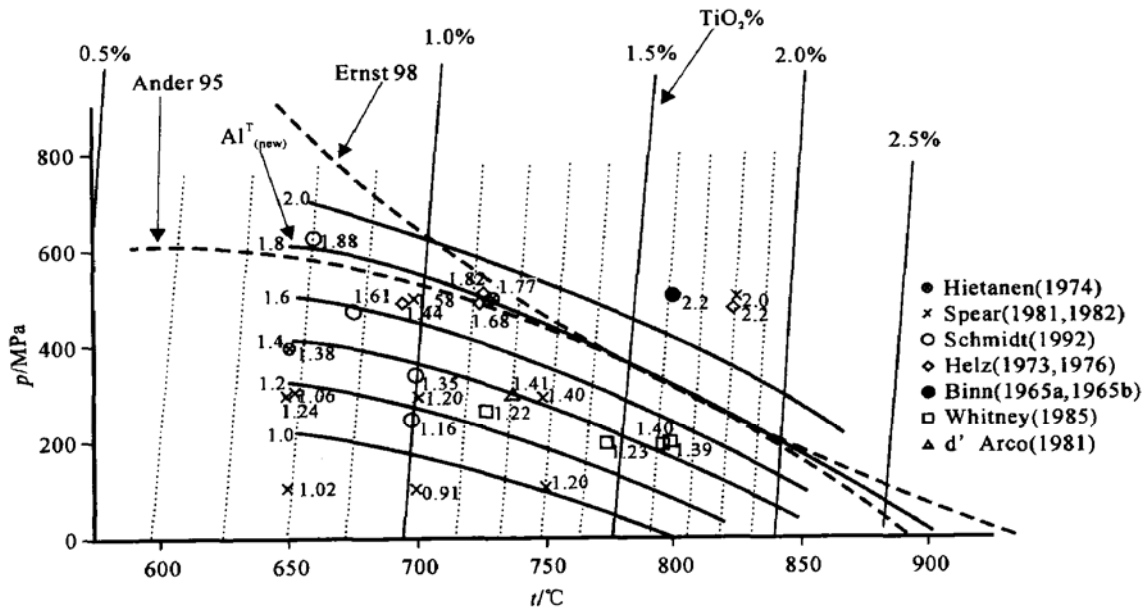


图3 改进的角闪石 AlTi 温压曲线格子

Fig. 3 Improved temperature and pressure grid of AlTi in hornblende

表 3 乌石闪长岩-角闪辉长岩和周围花岗岩中角闪石、斜长石电子探针分析数据 (w_B%) 及角闪石-斜长石温压计估算结果
Table 3 Electron microprobe analyses of hornblendes and plagioclases and *T*-*p* estimates of Wushi diorites-hornblende gabbros and surrounding granodiorites

样品号	FG31-1(闪长岩)															FG22-1(花岗岩)														
	角闪石							角闪石								角闪石							角闪石							
SiO ₂	45.38	46.91	45.50	45.32	44.50	46.03	46.06	44.53	44.63	45.55	43.20	45.10	43.65	46.39	44.99	43.69	45.11	47.98	47.41	41.19	39.97	42.31	41.10							
TiO ₂	1.58	1.38	1.56	1.37	1.36	1.53	1.44	1.54	1.29	1.14	1.88	1.97	1.85	0.54	1.22	1.98	1.05	0.66	1.23	1.46	1.74	1.51	1.75							
Al ₂ O ₃	8.17	7.43	7.63	7.42	8.26	8.03	8.01	8.00	7.65	8.22	9.13	9.22	9.65	7.25	7.64	8.70	8.15	6.63	6.79	10.01	10.65	9.86	9.82							
FeO	19.32	18.81	17.75	17.42	18.98	19.92	18.53	19.23	20.33	18.87	18.00	16.01	19.31	17.85	19.89	17.52	18.75	18.25	16.21	24.37	24.01	22.96	24.22							
MnO	0.44	0.34	0.38	0.29	0.51	0.23	0.43	0.36	0.46	0.44	0.31	0.21	0.33	0.49	0.43	0.34	0.58	1.15	1.13	0.62	0.71	0.63	0.58							
MgO	11.06	11.13	11.34	11.81	11.05	10.19	11.10	11.83	11.14	10.72	11.36	11.09	8.86	11.29	10.91	11.26	10.72	11.53	11.15	7.35	6.65	7.05	6.30							
CaO	11.14	11.39	11.62	11.52	11.73	11.05	11.45	11.43	11.31	11.18	11.16	11.57	11.67	11.80	11.17	11.30	11.59	11.20	11.48	10.80	11.70	11.06	9.81							
Na ₂ O	1.01	0.88	1.17	0.95	0.89	1.08	1.01	1.14	0.97	1.00	1.18	1.17	1.13	0.94	1.22	1.40	0.90	0.70	0.80	1.52	1.52	1.54	1.71							
K ₂ O	0.69	0.68	0.81	0.68	0.64	0.79	0.76	0.79	0.69	0.62	0.86	0.74	1.10	0.63	0.79	0.92	0.47	0.36	0.47	1.50	1.62	1.56	1.37							
Total	98.80	98.93	97.74	96.78	97.92	98.83	98.78	98.84	98.46	98.02	97.09	97.28	97.55	97.17	98.26	97.11	97.30	96.10	96.67	98.80	98.55	98.47	96.72							
Al ^T	1.41	1.28	1.33	1.30	1.44	1.40	1.39	1.40	1.35	1.43	1.61	1.6	1.71	1.27	1.34	1.54	1.43	1.14	1.19	1.80	1.93	1.76	1.80							
Ti	0.17	0.15	0.17	0.15	0.15	0.17	0.16	0.17	0.15	0.13	0.21	0.22	0.21	0.06	0.14	0.22	0.12	0.07	0.14	0.17	0.20	0.17	0.20							

样品号	FG31-1(闪长岩)															FG22-1(花岗岩)														
	斜长石							斜长石								斜长石							斜长石							
SiO ₂	53.32	54.86	53.39	54.05	54.56	54.04	54.22	52.51	52.87	52.72	52.64	52.41	56.33	53.53	55.56	53.86	53.98	53.43	53.66	59.33	56.79	57.34	58.34							
TiO ₂	0.00	0.02	0.02	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.04	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00							
Al ₂ O ₃	29.65	27.43	29.55	29.40	28.79	29.87	28.90	30.08	30.01	28.62	30.12	30.23	27.68	29.22	27.79	29.32	28.77	29.81	28.97	26.72	27.18	27.31	27.02							
FeO	0.19	0.16	0.13	0.16	0.38	0.32	0.32	0.15	0.12	0.20	0.14	0.15	0.18	0.30	0.24	0.22	0.23	0.19	0.23	0.17	0.28	0.18	0.18							
MnO	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.01	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01							
MgO	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.02	0.00	0.07	0.00	0.10	0.09	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01							
CaO	11.16	11.46	11.96	11.04	10.22	10.71	10.33	11.86	11.86	11.91	11.84	11.76	9.45	11.40	9.26	10.84	11.18	11.51	11.09	7.6	7.82	7.72	7.66							
Na ₂ O	4.91	5.40	4.83	4.20	6.04	4.37	5.42	4.73	4.91	5.93	4.77	4.63	5.45	4.74	6.09	4.84	5.39	4.70	5.18	7.29	7.67	7.22	7.26							
K ₂ O	0.15	0.15	0.10	0.16	0.16	0.17	0.18	0.16	0.21	0.19	0.19	0.16	0.19	0.11	0.28	0.16	0.16	0.16	0.18	0.18	0.17	0.12	0.15							
Total	99.38	99.52	99.98	99.03	100.15	99.51	99.36	99.49	100.07	99.56	99.71	99.34	99.38	99.42	99.59	99.26	99.72	99.85	99.32	101.3	99.90	99.90	100.60							
An	0.55	0.54	0.57	0.59	0.48	0.57	0.51	0.58	0.56	0.52	0.57	0.58	0.48	0.57	0.45	0.55	0.53	0.57	0.54	0.36	0.35	0.37	0.37							
<i>t</i> /°C	848	848	833.7	825.2	820.5	803.5	814.9	794.2	809.5	819.8	819.9	824.8	839.2	794.7	821.7	817.9	813.9	751.1	783.5	832.2	814.8	811.4	819.7							
<i>p</i> /MPa	30	140	50	60	120	150	120	170	120	220	150	70	30	180	190	140	150	110	220	330	270	260	260							

矿物成分分析在南京大学生命地质研究所国家重点实验室的 JEOJXA-8800M 型电子探针仪上完成; 乌石闪长岩中角闪石、斜长石二价铁湿化学法分析结果为: 角闪石 Fe²⁺/Fe^T = 0.627, 斜长石 Fe²⁺/Fe^T = 0.635; 温度、压力估算值由 HB94b 温度计和 Ander95 压力计联立获得。

和角闪石的 R 值反映结晶时氧逸度为 $NNO+1$ 左右 (Borodina *et al.*, 1999), 在该氧逸度区间角闪石 Al 压力计是适用的。Al' meev 等 (2003) 在研究 Bezymyannyi 安山岩中的角闪石时, 同时用 Mossabur-re 方法和湿化学法分析了角闪石 Fe^{2+} 值, 结果一致, 表明了这种取 R_{MAX} 和 R_{MIN} 平均值的方法用于钙碱性岩浆中进行角闪石晶体化学式的计算是合理的。

选取乌石闪长岩-角闪辉长岩中最具代表性的角闪石成分平均值和斜长石 An 平均值 ($An=53$), 分别使用 BH90、HB94a、HB94b 温度计, 得到 3 条温度随压力变化的斜线 (图 4)。乌石闪长岩-角闪辉长岩中角闪石低 Al_2O_3 特征 ($\approx 8.0\%$) 反映了角闪石结晶压力较低。在低压力区间 (1 MPa 左右), HB94a 和 BH90 给出的外推温度明显高出 HB94b 的估算温度 50 °C 或更多。此外, 在运用 3 个温度计 (BH90、HB94a、HB94b) 对乌石闪长岩-角闪辉长岩 19 组配对的角闪石-斜长石进行温度估算时, HB94a 和 BH90 给出的估算温度变化很大 (700~1000 °C), 而 HB94b 的估算温度变化很小 (760~840 °C), 这再次证实了 HB94a 和 BH90 估算值受压力影响大, 可信

度低 (Bachmann *et al.*, 2002; Ernst, 2002)。因此, 本文选取 HB94b 作为温度估算方法。

取乌石闪长岩-角闪辉长岩中 19 组角闪石-斜长石成分数据的平均值, 使用 HB94b 和 Ander95 的联立方程给出温压估算值为 820 °C、160 MPa, 其中最靠近平均值的 10 组成分数据给出的温度 820 ± 10 °C、压力 30~170 MPa 的估算结果是最可能的结晶温压范围 (图 4)。而使用 HB94b 和新的 Al 压力格子来计算这 19 组成分数据, 则得出了 820 ± 20 °C、30~210 MPa 的温压范围 (图 4)。Ernst98 虽然误差较大, 但是根据其中的 13 组具较高 TiO_2 含量的角闪石数据计算出来的温压范围是 820 ± 40 °C、60~250 MPa (图 4), 也很接近上述两种方法的计算结果。因此, 乌石闪长岩-角闪辉长岩中角闪石的结晶温压范围应该是 820 ± 20 °C、30~210 MPa。因为, 压力在 200 MPa 以下时, 熔体固相线的温度会急剧变化, 角闪石中 Al 含量和结晶压力将失去线性相关性, 所以, 利用角闪石 Al 压力计对于 200 MPa 以下的压力无法进行准确估算。

4 个角闪石 Al 压力计 (Ham86、Holl87、John89 和 Sch92) 利用 Al^T 估算出的压力值不随温度而改

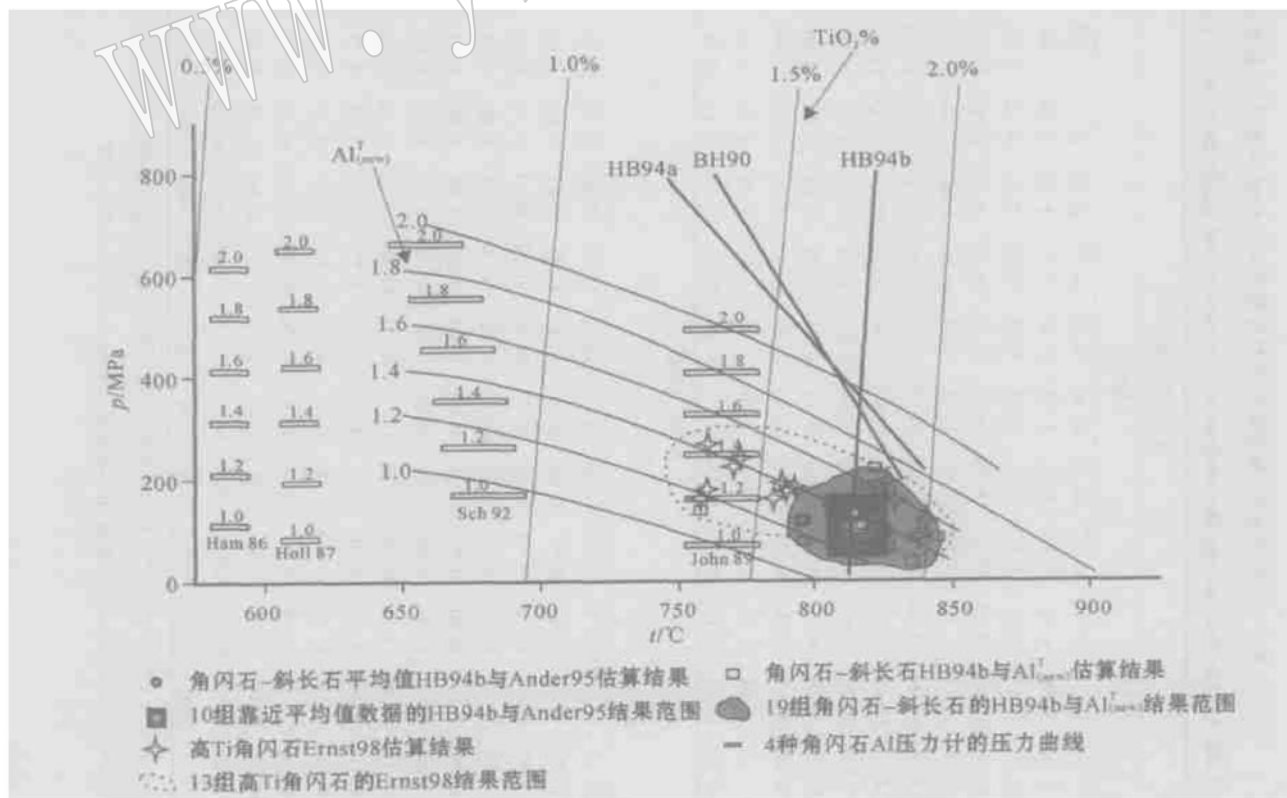


图 4 乌石闪长岩-角闪辉长岩温压计和温压曲线格子温压估算结果

Fig. 4 $T-p$ estimates of Wushi diorite-hornblende gabbros obtained by geothermobarometer and $T-p$ grid

变, 它们的 Al^T 压力曲线格子为水平线(图 4)。乌石闪长岩-角闪辉长岩中角闪石 Al_2O_3 的平均值为 8% (即 Al^T 为 1.4), 4 种压力计(Ham86 Holl87 John89 和 Sch92) 给出的估算结果依次为: 310 MPa、320 MPa、360 MPa、260 MPa, 明显高于做过温度校正的压力计(Ander95) 和新的 Al 压力格子估算结果。

矿物相平衡分析是一种计算复杂体系中矿物相平衡 PTX 条件(压力、温度、水活度)的方法。TWQ 程序(Berman, 1991) 和 THERMOCALC(Powell and Holland, 1998) 是目前常用的热力学相平衡计算软件, 其程序中包含了各种矿物的内部一致热力学数据库(Berman, 1988; Holland and Powell, 1990; Mader and Berman, 1992; Berman and Aranovich, 1996; Holland and Powell, 1998)。在含斜方辉石的乌石角闪辉长岩中, 可通过矿物相平衡反应 1(Phlogopite+3Quartz=3Enstatite+Sanidine+H₂O), 利用斜方辉石、黑云母、钾长石的矿物电子探针成分数据和 TWQ 程序(Auge, 1997) 得到一组 X_{H_2O} 为 0.4、0.6、0.8 和 1.0 的相平衡 $p-T$ 线(图 5)。利用 Kerrick (1972) 的方法, 对闪长岩浆的固相线做一组 X_{H_2O} 为 0.4、0.6、0.8 和 1.0 的外推线(Cotkin *et al.*, 1993), 两组线的交点连线 KK' 即为不同水含量下乌石闪长质岩浆结晶 $p-T$ 演变轨迹线。

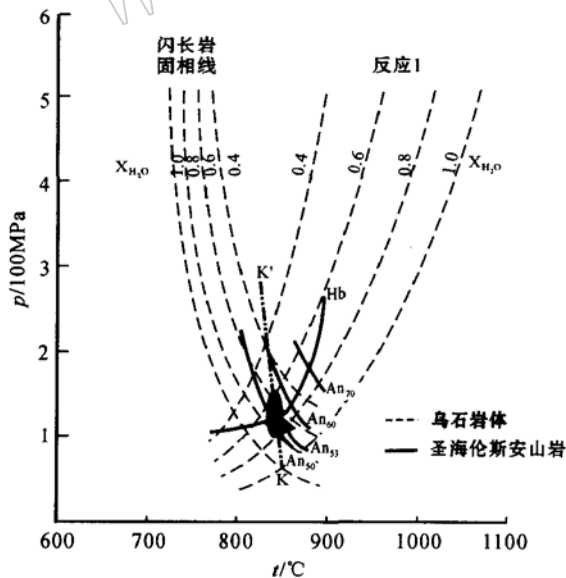


图 5 TWQ 方法估算的乌石岩体结晶温度压力及圣海伦斯安山岩浆相平衡实验结果

Fig. 5 $T-p$ estimates of Wushi pluton obtained by the TWQ method and the phase equilibrium experimental result of St. Helens andesitic magma

对 Mexico 钙碱性安山岩浆的实验相平衡研究(Moore *et al.*, 1998; Blatter and Carmichael, 1998, 2001; Carmichael ISE, 2002) 揭示, 从岩石的结晶度和斜长石成分及斑晶组合规律来看, 安山岩是从水饱和的较浅位的岩浆房中喷发出来的。闪长质岩浆体系中水含量的问题, 最近引起了广大实验岩石学家的兴趣(Holtz *et al.*, 1996, 2000; Martel *et al.*, 1999)。结晶实验表明, 对闪长质岩浆体系而言, 水含量小于 2% 往往需要结晶温度高于 900 °C, 水含量大于 4% 时, 则岩浆从地壳较深处上升过程中就开始结晶(Wyllie, 1976; Whitney, 1988)。

Brown 大学的工作小组在研究圣海伦斯的安山岩和英安岩时, 进行了大量相平衡实验(Devine *et al.*, 2003; Couch *et al.*, 2003; Rutherford *et al.*, 2003)。Rutherford 等(2003) 利用角闪石的相平衡稳定线和斜长石成分线准确地限定了其安山岩的岩浆房深度(误差小于 20 MPa) 和温度(误差小于 20 °C)。Rutherford 的相平衡实验中的安山质岩浆成分和乌石闪长质岩浆成分具有很好的可比性。乌石岩体中斜长石的 An 平均值为 53, 该斜长石成分线、角闪石的相平衡稳定线及结晶 $p-T$ 演变轨迹线 KK' 正好交会于一处(图 5)。交汇点附近的温度、压力、水含量区间是乌石岩体最可能的结晶条件。结合上述角闪石-斜长石温度计、角闪石 $AlTi$ 温压曲线格子及相平衡实验资料, 得到的结论是: 乌石岩体的结晶温度为 820 ± 20 °C, 压力为 70~130 MPa, X_{H_2O} 为 0.7 ± 0.1 。

对佛冈杂岩体中的花岗闪长岩, 利用 4 组矿物成分数据, 通过角闪石-斜长石温压计和角闪石 $AlTi$ 温压曲线格子获得的温压估算结果几乎一致: 角闪石的结晶温度约为 820 °C, 压力约为 260 MPa。特别值得注意的是, 花岗闪长岩和乌石闪长岩-角闪辉长岩在时间和空间上伴生, 但为何具有明显不同的结晶压力呢?

岩相结构可有效地判断岩浆中矿物的结晶次序(Flood and Vernon, 1989)。在乌石闪长岩-角闪辉长岩中, 角闪石为主晶包裹细小斜长石的现象十分普遍, 这种嵌晶结构表明角闪石是岩浆晚期结晶的产物, 所以角闪石 Al 压力计给出的压力估算值对应着岩浆结晶晚期的压力, 即乌石岩体侵位的深度。佛冈杂岩体中的花岗闪长岩中的角闪石颗粒小、晶体自形、被黑云母包裹表明在结晶序列中角闪石是岩浆早期结晶的产物, 所以角闪石压力计给出的估

算值对应着岩浆早期结晶的压力环境。因此,佛冈杂岩体中的花岗闪长岩中早期结晶的角闪石晶体的形成过程和圣海伦斯安山岩中出现的角闪石晶体形成过程十分相似(Rutherford *et al.*, 2003),即在较深的岩浆房(9 km左右,即260 MPa)中结晶出少量角闪石,并被残余岩浆携带上升侵位或喷出。

4 结论

获取含角闪石的钙碱性岩浆结晶条件信息,应综合使用角闪石-斜长石温度计、角闪石- $AlTi$ 温压曲线格子,并参考实验相平衡结果、矿物相平衡热力学计算方法。通过这种逐步逼近的方法获得的结论是:乌石闪长岩-角闪辉长岩的结晶温度为 820 ± 20 °C,压力为70~130 MPa, X_{H_2O} 为 0.7 ± 0.1 。

乌石岩体周围的花岗闪长岩中角闪石结晶条件约为:820 °C、260 MPa。乌石闪长岩-角闪辉长岩中角闪石结晶压力代表岩浆固结侵位的压力环境,而周围花岗闪长岩中的角闪石是岩浆早期在较深岩浆房中结晶出来的。

References

- Al'meev R. B., Arinkin A. A., Ozerov A. Y., *et al.* 2003. Problems of the stoichiometry and thermobarometry of magmatic amphiboles: An example of hornblende from the andesites of Bezymnyanyi Volcano, Eastern Kamchatka [J]. *Geochemistry International*, 40(8): 723~738.
- Anderson J. L. 1995. The effects of temperature and f_{O_2} on the Al_{in} -hornblende barometer [J]. *American Mineralogist*, 80: 549~559.
- Anderson J. L. 1996. Status of thermobarometry in granitic batholiths [J]. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, 87: 125~138.
- Ague J. J. 1997. Thermodynamic calculation of emplacement pressures for batholithic rocks, California: Implications for the aluminum-in-hornblende barometer [J]. *Geology*, 25 (6): 563~566.
- Bachmann O and Dungan M. A. 2002. Temperature-induced Al zoning in hornblendes of the Fish Canyon magma, Colorado [J]. *American Mineralogist*, 87(8~9): 1062~1076.
- Bao ZhiWei and Zhao ZhenHua. 2003. Geochemistry and tectonic setting of the Fugang aluminous A-type granite, Guangdong Province, China—a preliminary study [J]. *Geology Geochemistry*, 31(1): 52~61 (in Chinese with English abstract).
- Barclay J and Carmichael I S E. 2004. A hornblende basalt from western Mexico: Water-saturated phase relations constrain a pressure-temperature window of eruptibility [J]. *Journal of Petrology*, 45 (3): 485~506.
- Berman R G. 1988. Internally-consistent thermodynamic data for minerals in the system $Na_2O-K_2O-CaO-MgO-FeO-Fe_2O_3-Al_2O_3-SiO_2-TiO_2-H_2O-CO_2$ [J]. *Journal of Petrology*, 29(2): 445~522.
- Berman R G. 1991. Thermobarometry using multiequilibrium calculations: a new technique, with petrological applications [J]. *The Canadian Mineralogist*, 29: 833~855.
- Berman R G and Aranovich L Y. 1996. Optimized standard state and solution properties of minerals. 1. Model calibration for olivine, orthopyroxene, cordierite, garnet, ilmenite in the system $FeO-MgO-CaO-Al_2O_3-TiO_2-SiO_2$ [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 126 (1~2): 1~24.
- Binns R A. 1965a. The mineralogy of metamorphosed basic rocks from the Wilyama Complex, Broken Hill district, New South Wales. II. Pyroxenes, garnets, plagioclases, and opaque oxides [J]. *Mineralogical Magazine*, 35: 561~587.
- Binns R A. 1965b. The mineralogy of metamorphosed basic rocks from the Wilyama Complex, Broken Hill district, New South Wales. I. hornblendes [J]. *Mineralogical Magazine*, 35: 306.
- Blatter D L and Carmichael I S E. 1998. Plagioclase-free andesites from Zitacuaro (Michoacan), Mexico: petrology and experimental constraints [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 132 (2): 121~138.
- Blatter D L and Carmichael I S E. 2001. Hydrous phase equilibria of a Mexican high-silica andesite: A candidate for a mantle origin? [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65 (21): 4063~4065.
- Blundy J D and Holland T J B. 1990. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 104: 316~328.
- Borodina N S., German B F and Votyakov S. 1999. The Oxidation ratio of iron in coexisting biotite and hornblende from granitic and metamorphic rocks: the role of P, T and f_{O_2} [J]. *The Canadian Mineralogist*, 37: 1423~1429.
- Carmichael I S E. 2002. The andesite aqueduct: perspectives on the evolution of intermediate magmatism in west-central (105-99 degrees W) Mexico [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 143 (6): 641~663.
- Chen Xiaoming, Wang Rucheng, Liu Changshi, *et al.* 2002. Isotopic dating and genesis for Fogang biotite granites of Conghua area, Guangdong Province [J]. *Geological Journal of China Universities*, 8(3): 293~307 (in Chinese with English abstract).
- Cotkin S and Medaris G L. 1993. Evaluation of the crystallization conditions for the calc-alkaline Russian peak intrusive complex, Klamath mountains, North California [J]. *Journal of Petrology*, 34: 543~571.
- Couch S, Harford C L, Sparks R S J, *et al.* 2003. Experimental constraints on the conditions of formation of highly calcic plagioclase microlites at the Soufriere Hills Volcano, Montserrat [J]. *Journal of Petrology*, 44 (8): 1455~1475.
- Deer W A, Howie R A, Zussman J, *et al.* 1992. *An Introduction to Rock-Forming Minerals* [M]. New York: Longman Press, 1~696.
- Devine J D, Rutherford M J, Norton G E, *et al.* 2003. Magma storage region processes inferred from geochemistry of Fe-Ti oxides in andesitic magma, Soufriere Hills Volcano, Montserrat [J]. *Journal of Petrology*, 44 (8): 1375~1400.
- d'Arco P, Maury R C and Westercapm D. 1981. Geothermometry and geobarometry of a cummingtonite-bearing dacite from Martinique, Lesser Antilles [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 77: 177~184.
- Elliott B A. 2001. Crystallization conditions of the Wiborg rapakivi batholith, SE Finland: an evaluation of amphibole and biotite mineral chemistry [J]. *Mineralogy and Petrology*, 72 (4): 305~324.
- Engel A E J and Engel C G. 1962. Hornblendes formed during progressive metamorphism of amphibolites, northwest Adirondack Mountains, New York [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 73

- (12): 1499~1514.
- Ernst W G. 2002. Paragenesis and thermobarometry of Ca-amphiboles in the Barcroft granodioritic pluton, central White Mountains, eastern California [J]. *American Mineralogist*, 87(4): 478~490.
- Ernst W G and Liu J. 1998. Experimental phase-equilibrium study of Al- and Ti-contents of calcic amphibole in MORB—A semi-quantitative thermobarometer [J]. *American Mineralogist*, 83 (9~10): 952~969.
- Faryad S W and Hoinkes G. 2003. $p-T$ gradient of Eo-Alpine metamorphism within the Austroalpine basement units east of the Tauern Window (Austria) [J]. *Mineralogy and Petrology*, 77(1~2): 129~159.
- Flood R H and Vernon R H. 1989. Microstructural evidence of orders of crystallization in granitoid rocks [J]. *Lithos*, 21: 237~245.
- Foster M D. 1960. Interpretation of the composition of trioctahedral micas [A]. U. S. Geological Survey Professional Paper [C], 354B: 11~49.
- Gottschalk M. 1997. Internally consistent thermodynamic data for rock-forming minerals [J]. *European Journal of Mineralogy*, 9(1): 175~223.
- Hammarstrom J M and Zen E. 1986. Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer [J]. *American Mineralogist*, 71: 1297~1313.
- Hammarstrom J M and Zen E. 1992. Discussion of Blundy and Holland's (1990) "Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer" [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 111: 264~266.
- Helz R T. 1973. Phase relations of basalts in their melting range at $P_{H_2O} = 5$ kb as a function of oxygen fugacity; Part 1. Mafic phases [J]. *Journal of Petrology*, 14: 249~302.
- Helz R T. 1975. Phase relations of basalts in their melting ranges at $P_{H_2O} = 5$ kb. Part 1. Melt compositions [J]. *Journal of Petrology*, 17: 139~193.
- Hietanen A. 1974. Amphibole Pairs, Epidote Minerals, Chlorite, and Plagioclase in Metamorphic Rocks, Northern Sierra Nevada, California [J]. *American Mineralogist*, 59: 22~40.
- Holland T J B and Blundy J D. 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116: 433~447.
- Holland T J B and Powell R. 1990. An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: 2. Data and results [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 3: 343~370.
- Holland T J B and Powell R. 1998. An internally consistent thermodynamic data set for phases of petrological interest [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 16(3): 309~343.
- Hollister L S, Grissom G C, Peters E K, et al. 1987. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons [J]. *American Mineralogist*, 72: 231~239.
- Holtz F and Johannes W. 1994. Maximum and minimum water contents of granitic melts; implications for chemical and physical properties of ascending magmas [J]. *Lithos*, 32(1~2): 149~159.
- Holtz F, Johannes W, Tamic N, et al. 2001. Maximum and minimum water contents of granitic melts generated in the crust: a reevaluation and implications [J]. *Lithos*, 56(1): 1~14.
- Huang Youyi, Zhuang Wenming, Chen Shaoqian, et al. 2000. Geological and geochemical characteristics and ages of the Wushi pluton of Guangdong [J]. *Guangdong Geology*, 15(3): 13~19 (in Chinese with English abstract).
- Johnson M C and Rutherford M J. 1989. Experimental calibration of the aluminium in hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks [J]. *Geology*, 17: 837~841.
- Kerrick D M. 1972. Experimental determination of muscovite+ quartz stability with $P_{H_2O} < P(\text{total})$ [J]. *American Journal of Science*, 272: 946~958.
- Leake B E, Woolley A R, Arps C E S, et al. 1997. Nomenclature of amphiboles; report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names [J]. *The Canadian Mineralogist*, 35: 219~246.
- Liu Changshi, Chen Xiaoming, Wang Rucheng, et al. 2002. Mineralogical characteristic and genesis for Shiling sodalite-syenite, Nanling area, south China [J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 22(3): 261~269 (in Chinese with English abstract).
- Liu Changshi, Chen Xiaoming, Wang Rucheng, et al. 2003. Origin of Nankunshan aluminous A-type granite, Longkou County, Guangdong Province [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22(1): 1~10 (in Chinese with English abstract).
- Mader U K and Berman R C. 1992. Amphibole thermobarometry: A thermodynamic approach [A]. Geological Survey of Canada [C]. 393~400.
- Martel C, Pichavant M and Holtz F. 1999. Effect of f_{O_2} and H_2O on andesite phase relations between 2 and 4 kbar [J]. *Journal of Geophysical Research*, 104(12): 29453~29470.
- Moore G, Vennemann T and Carmichael I S E. 1998. An empirical model for the solubility of H_2O in magmas to 3 kilobars [J]. *American Mineralogist*, 83(1~2): 36~42.
- Morimoto N. 1988. Nomenclature of pyroxenes (International Mineralogical Association) [J]. *American Mineralogist*, 73: 1123~1133.
- Nekvasil H, Dondolini A, Horn J, et al. 2004. The origin and evolution of silica-saturated alkalic suites: an experimental study [J]. *Journal of Petrology*, 45(4): 693~721.
- Otten M T. 1984. The origin of brown hornblende in the Artfjaellet gabbro and dolerites [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 86: 189~199.
- Pal N, Pal D C, Mishra B, et al. 2001. The evolution of the Palim granites in the Bastar tin province, Central India [J]. *Mineralogy and Petrology*, 72(4): 281~304.
- Petford N, Cruden A R, McCaffrey K J W, et al. 2000. Granites magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust [J]. *Nature*, 408(6831): 669~673.
- Pitcher W S. 1993. The Nature and Origin of Granites [M]. London: Blackie Academic and Professional Press, 183~184.
- Poli S and Schmidt M W. 1992. A comment on "Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer" by J. D. Blundy and T. J. B. Holland [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 111: 273~277.
- Powell R and Holland T J B. 1988. An internally consistent thermodynamic dataset with uncertainties and correlations: 1. method and a worked example [J]. *Journal of Metamorphic Geology*, 6: 173~204.
- Powell R and Holland T J B. 1994. Optimal geothermometry and geobarometry [J]. *American Mineralogist*, 79: 120~133.
- Rieder M, Cavazzini G, D'Yakonov Y S, et al. 1998. Nomenclature of the micas [J]. *The Canadian Mineralogist*, 36: 905~912.

- Rutherford M J. 1993. Magma ascent rates from amphibole breakdown: an experimental study applied to the 1980~ 1986 Mount St. Helens eruptions [J]. *Journal of Geophysical Research*, 98: 19 667 ~ 19 685.
- Rutherford M J and Devine J D. 1988. The May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens, III. Stability and chemistry of amphibole in the magma chamber [J]. *Journal of Geophysical Research*, 93: 11 949 ~ 11 959.
- Rutherford M J and Devine J D. 2003. Magmatic Conditions and Magma ascent as indicated by hornblende phase equilibria and reactions in the 1995~ 2002 soufriere hills magma [J]. *Journal of Petrology*, 44(8): 1 433~ 1 454.
- Rutherford M J and Johnson M C. 1992. Comment on Blundy and Holland's (1990) "Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer" [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 111: 266~ 268.
- Rutherford M J, Sigurdsson H, Carey S, *et al.* 1985. The May 18, 1980 eruption of Mount St. Helens, 1. Melt compositions and experimental phase equilibria [J]. *Journal of Geophysical Research*, 90: 2 929.
- Rutter M J, Van der Lann S R and Wyllie P J. 1989. Experimental data for a proposed empirical igneous geobarometer: Aluminum in hornblende at 10kbar pressure [J]. *Geology*, 17: 897~ 900.
- Schmidt M W. 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al_{in} hornblende barometer [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 110: 304~ 310.
- Schumacher J C. 1997. The estimation of ferric iron in electron microprobe analysis of amphiboles [J]. *The Canadian Mineralogist*, 35: 312~ 321.
- Spear F S. 1981a. Amphibole-plagioclase equilibria: an empirical model for the relation albite+ tremolite = edenite+ 4quartz [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 77(4): 355~ 364.
- Spear F S. 1981b. An experimental study of hornblende stability and compositional variability in amphibolite [J]. *American Journal of Science*, 281(6): 697~ 734.
- Spear F S. 1982. Phase equilibria of amphibolites from the Post Pond Volcanics, Mt. Cube Quadrangle, Vermont [J]. *Journal of Petrology*, 23(3): 383~ 426.
- Stone D. 2000. Temperature and pressure variations in suites of Archean felsic plutonic rocks, Berens River area, northwest Superior Province, Ontario, Canada [J]. *The Canadian Mineralogist*, 38: 455~ 470.
- Tepper J H, Nelson B K and Bergantz G W. 1993. Petrology of the Chilliwack batholith, North Cascades, Washington: generation of calc_alkaline granitoids by melting of mafic lower crust with variable water fugacity [J]. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113: 333~ 351.
- Thomas W M and Ernst W G. 1990. The Aluminum content of hornblende in calc_alkaline granitic rocks: A mineralogical barometer calibrated experimentally to 12kbar [A]. Spencer R J, Chou I M. Fluid_mineral interactions: a tribute to H. P. Eugster. *Geochemical Society Special Publication* [C]. 2: 59~ 63.
- Tuttle O F and Bowen N L. 1958. Origin of Granites in the Light of Experimental Studies in the System NaAlSi₃O₈- KAlSi₃O₈- SiO₂- H₂O [M]. New York: Wavely Press, 89~ 126.
- Whitney J A and Stormer J C. 1985. Mineralogy, petrology, and magmatic conditions from the Fish Canyon Tuff, central San Juan volcanic field, Colorado [J]. *Journal of Petrology*, 26: 726~ 762.
- Whitney J A. 1988. The origin of granites: the role and source of water in the evolution of granitic magmas [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 100: 1 886~ 1 897.
- Wyllie P J, Huang W L, Stern C R, *et al.* 1976. Granites magmas: possible and impossible sources, water, contents, and crystallization sequences [J]. *Canadian Journal of Earth Science*, 13(8): 107~ 1019.
- Xiao Zhenyu, Wang Liming, Yang Xueming, *et al.* 1998. Petrological Characteristics of Shiling alkaline complex, Conghua, Guangdong province, and its geological implications [J]. *Geological Journal of China Universities*, 4(3): 133~ 138 (in Chinese with English abstract).
- Xu X S, Dong C W, Li W X, *et al.* 1999. Late Mesozoic intrusive complexes in the coastal area of Fujian, SE China: the significance of the gabbro- diorite- granites association [J]. *Lithos*, 46(2): 299~ 315.
- Yoder H S. 1979. *The Evolution of the Igneous Rocks* [M]. Princeton: Princeton University Press, 439~ 482.
- Zhao Zijie, Ma Daqian, Lin Huikun, *et al.* 1986. The geochemical characteristics and geological setting of the formation of Longwo and Fogang granitoid batholith, Guangdong province [A]. *Selected Papers for Investigations of Geology and Mineral Resource in Nanjing Area* [C]. Wuhan: Geological College Press, 28~ 67 (in Chinese).
- Zhuang Wenming, Chen Shaoqian and Huang Youyi. 2000. Geological and geochemical characteristics of Fogang composite pluton and its source rock [J]. *Guangdong Geology*, 15(3): 1~ 12 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 包志伟, 赵振华. 2003. 佛冈铝质 A 型花岗岩的地球化学及其形成环境初探 [J]. *地质地球化学*, 31(1): 52~ 61.
- 陈小明, 王汝成, 刘昌实, 等. 2002. 广东从化佛冈(主体)黑云母花岗岩定年和成因 [J]. *高校地质学报*, 8(3): 293~ 307.
- 黄友义, 庄文明, 陈绍前, 等. 2000. 广东乌石岩体的地质地球化学特征及形成年代 [J]. *广东地质*, 15(3): 13~ 19.
- 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 等. 2002. 广东从化石岭方钠石正长岩矿物学特征及成因 [J]. *矿物学报*, 22(3): 261~ 269.
- 刘昌实, 陈小明, 王汝成, 等. 2003. 广东龙口南昆山铝质 A 型花岗岩的成因 [J]. *岩石矿物学杂志*, 22(1): 1~ 10.
- 肖振宇, 汪礼明, 杨学明, 等. 1998. 广东从化石岭碱性杂岩的岩石学特征及其地质意义 [J]. *高校地质学报*, 4(3): 133~ 138.
- 赵子杰, 马大拴, 林惠坤, 等. 1986. 广东龙窝、佛冈花岗岩体地球化学特征及其地质背景 [A]. *南岭地质矿产科研报告集(第一辑)* [C]. 武汉: 武汉地质学院出版社, 28~ 67.
- 庄文明, 陈绍前, 黄友义. 2000. 佛冈复式岩体地质地球化学特征及其成岩源岩 [J]. *广东地质*, 15(3): 1~ 12.