

文章编号: 1000- 6524 (2002) 03- 0218- 05

## 高温高压实验产物中出现的流动构造 及其岩石学意义

李福春<sup>1,2</sup>, 饶冰<sup>2</sup>, 朱金初<sup>2</sup>, 吴志强<sup>3</sup>

(1. 南京农业大学 资源与环境科学学院, 江苏 南京 210095; 2. 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; 3. 华东有色金属地质勘查局, 江苏 南京 210041)

**摘要:** 在高温高压实验产物中发现了长石和云母定向排列以及球粒被拉长并定向排列的现象。这种与野外常见的地质事实相一致的现象说明, 某些花岗岩体边部钾长石的定向排列可能是岩浆流动造成的。

**关键词:** 流动构造; 花岗岩; 高温高压实验

**中图分类号:** P583 **文献标识码:** A

### Flow structure discovered in high $t-p$ experimental products and its petrological significance

LI Fu\_chun<sup>1,2</sup>, RAO Bing<sup>2</sup>, ZHU Jin\_chu<sup>2</sup> and WU Zhi\_qiang<sup>3</sup>

(1. College of Resource and Environment Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China;  
2. Department of Earth Sciences, State Key Laboratory for Research of Mineral Deposits, Nanjing University,  
Nanjing 210093, China; 3. East China Bureau of Geology and Exploration of Nonferrous Metals, Nanjing  
210041, China)

**Abstract:** The authors discovered directional arrangement of feldspar and mica microcrystals and elongated spherulite in the high  $t-p$  experimental products. This phenomenon is consistent with the geological fact. It is hence considered that the directional arrangement of potash feldspars in the peripheral part of some granitoids might have resulted from magma flowing.

**Key words:** flow structure; granitoid; experiment under high  $t-p$  conditions

在自然界中, 一些花岗岩体边部存在钾长石等长条状矿物定向排列的现象。例如, 广东韶关地区鲁溪岩体中巨斑状钾长石定向排列(图 1- a), 且随着接触带走向的变化而变化; 湖南香花岭岩中显微针状黄玉近似平行于脉体方向排列(黄蕴慧等, 1988); 山东郭家岭岩体中暗色闪长质包裹体的长轴总体走向与主岩体的流动构造方向一致(曲晓明等, 1997)。这

收稿日期: 2001- 04- 20; 修订日期: 2001- 07- 10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(49873017); 高校博士点基金资助项目(1999028420)

作者简介: 李福春(1964- ), 男, 博士, 地球化学专业。

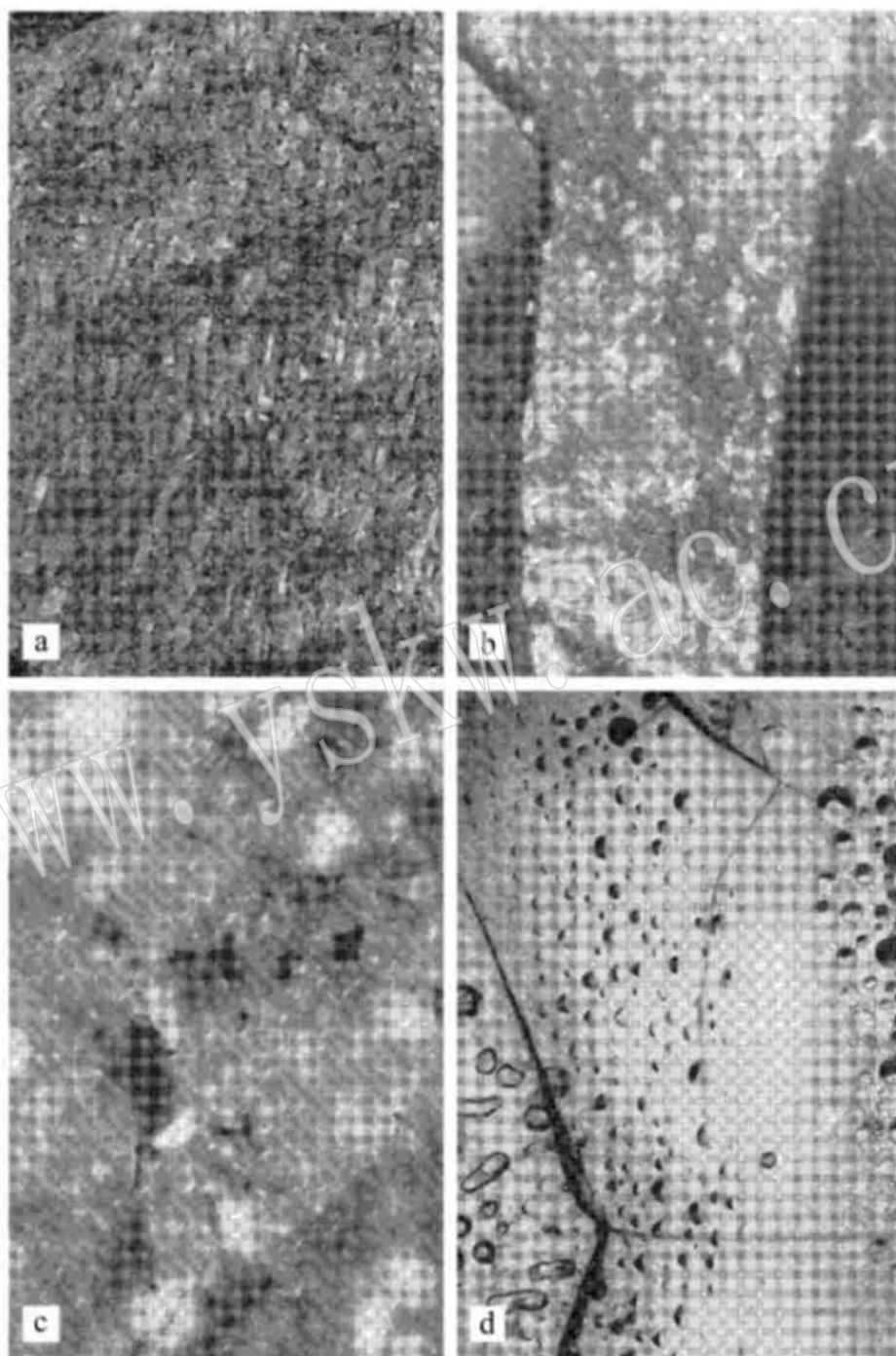


图1 自然界及实验产物中的流动构造

Fig. 1 Flow structures in experiment products and nature

a—广东韶关鲁溪岩体钾长石斑晶定向排列,  $\times 3.8$ ; b—E107号样品中长石和石英的分布特征, 单偏光,  $\times 35$ ;  
c—E107号样品中石英一端显微长石和云母定向排列, 单偏光,  $\times 170$ ; d—J01号样品中球粒形态及分带特征,  
单偏光,  $\times 35$

种现象早已引起地质学家的注意,并进行了详细的野外研究,对其成因存在两种对立的看法:一种看法认为属于构造面理,另一种认为是岩浆流面构造。

要了解这种定向排列现象的形成机理,必须首先弄清含晶体岩浆的流体动力学性质及其流变学性质。天然岩浆是熔体和晶体的悬浮液,其粘度可根据晶体/熔体质量比和各自的粘度来计算(赖绍聪,1999)。但是,这种悬浮液的流变学性质不同于纯液体。纯的硅酸盐熔体具有牛顿流体的性质,而晶体-熔体悬浮液的性质要复杂得多,可能具有宾厄姆液体的性质(Pitcher,1979; Paterson *et al.*, 1989)。地质学家对不含晶体的花岗质岩浆的性质、流动及其定位机制有一定程度的认识,但是对含晶体花岗质岩浆的流变学的认识还十分肤浅。

模拟流动构造的形成过程,进而解释花岗岩流动构造的成因,是构造地质学家和实验岩石学家责无旁贷的任务。然而,有关这方面的实验研究鲜见报道。早在 10 年前,饶冰就在实验过程中发现了淬火玻璃中被拉长的玻璃球粒定向排列现象(饶冰,1991),但并未引起足够重视。最近,笔者在进行结晶动力学和熔化-结晶实验过程中意外地发现,不仅玻璃球粒被拉长并定向,而且长条状矿物也出现定向排列现象,对其成因的探讨对于理解花岗岩流动构造的形成机制有重要意义。

## 1 实验方法和结果

实验在内冷式快速淬火高温高压装置上进行。实验压力为  $1 \times 10^8$  Pa, 结晶温度为 580 ~ 750 °C, 温度和压力的测量误差分别为  $\pm 3$  °C 和  $\pm 3$  MPa。初始试料为湖南香花岭钾长石钠长石花岗岩和香花铺钠长石花岗岩粉末,其化学成分及实验条件见表 1。实验体系中 F 含量 2%。将实验初始物装入黄金管中焊封,焊前焊后以及实验后均通过称量法检查焊封质量。在 840 °C  $1 \times 10^8$  Pa 条件下恒定 24 小时以保证产生均一的含 F 和 H<sub>2</sub>O 的熔体,然后在压力不变的情况下将温度降至设定值,恒定 4~6 天后淬火。把实验产物制成探针片,用 JXA-8800M 电子探针测定结晶相和熔体相成分,结果列于表 2。

表 1 实验条件和产物

Table 1 Experimental conditions and results

实验号	初始物样号	初始物岩性	t/ °C	加 F 方式	固/液	t/h	淬火产物
J01	XHP-8	Ab-花岗岩	750	NaF	20:1	122	Q+玻璃
E107	XHL-29	Kf-Ab-花岗岩	660	HF	1:1	96	Q+Kf+Mi+Flu+玻璃+微量流体

注: 实验压力  $1 \times 10^8$  Pa; 体系中 F 含量 2%; Q—石英; Kf—钾长石; Ab—钠长石; Mi—云母; Flu—萤石。

在笔者完成的 50 多个实验中,仅在几个实验产物中发现了流动构造。本文以 J01 和 E107 为例进行描述和分析。在 J01 中仅结晶出细小的石英晶体, E107 实验产物的矿物组合为石英+碱性长石+云母+萤石。

## 2 流动构造的特征

J01 中仅有少量细小的石英结晶,而玻璃球粒异常发育。按球粒粒径的不同可将其分

为球粒和乳滴,球粒粒径在 0.3 mm 左右,乳滴粒径在 0.1 mm 左右。每一个球粒周围均匀地分布着几个至十几个乳滴。球粒的形状变化明显,而乳滴的形状变化不大。按球粒的形态可将 J01 固相产物分成 3 个带,从上(淬火时朝上一端定义为上)到下依次为:①A 带,球粒浑圆形;②B 带,球粒的上部为圆形,下部则有石钟乳样的尖端;③C 带,球粒玻璃被拉成长条形,且近于平行排列(图 1- d)。

表 2 实验初始物和实验产物的化学组成

 $w_B/\%$ 

Table 2 Chemical compositions of starting materials and experimental products

	F	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	MnO	FeO	TiO <sub>2</sub>	- 2F= O	总量
XHP- 8	1.00	5.15	3.97	72.46	15.76	0.12	0.14	0.10	0.64	—	- 0.42	99.54
XHL- 29	1.10	3.32	5.07	74.31	13.26	0.00	0.40	0.20	1.54	0.00	- 0.46	99.09
J01G(1)	未测	3.875	1.537	68.734	15.515	—	0.015	0.213	0.490	—	—	90.379
E107G(2)	1.158	0.131	5.180	73.388	14.605	0.030	0.248	0.113	0.228	0.012	0.487	95.007
碱性长石(1)	0.012	0.781	15.136	65.105	18.131	—	0.016	—	0.066	0.027	- 0.005	99.287
石英(4)	0.020	0.010	0.018	93.910	0.032	0.007	0.004	0.012	0.021	—	0.008	94.088
云母(1)	2.369	0.148	10.483	35.968	27.068	0.565	—	0.923	20.230	0.023	0.997	96.883

初始物(XHP- 8 和 XHL- 29)成分由化学分析测定,其中 F 用离子选择性电极法测定;实验产物由电子探针测定;GI 代表残余熔体;括号内为测点数;—表示低于检测限。

E107 号样品中,石英一般为半自形-自形,半自形的粒度约为 0.8 mm × 1.2 mm,自形者略小。碱性长石大部分以放射状集合体的形式出现,少部分为板状单晶。云母呈显微针状、片状,偶尔可见到六边形切面。在实验产物的定向薄片,明显可见 3 个不同的部分:一端以石英为主,另一端以碱性长石为主,中间为过渡带(图 1- b)。在以碱性长石为主的一端,长条形矿物定向性不明显;在以石英为主的一端,定向性明显,显微针状长石和云母在熔体中定向排列(图 1- c),其长轴方向平行于黄金管的延长方向。

### 3 流动构造形成的机理及其岩石学意义

国内外许多学者进行过高温高压实验研究,为什么他们没有发现或注意到这种流动构造?我们可以从淬火装置的特点中找到答案。以往的高温高压实验大部分在外淬火装置上进行,淬火过程是:将高压釜从炉中取出、平移并迅速放入冷却水中。这一淬火过程对于熔体来说是“静态”过程。我们的实验是在内淬火高压装置上进行的。该装置的特点是,在实验过程中高压釜平卧,实验结束时将高压釜旋转 90°进行淬火,黄金管从反应釜掉入淬火釜,熔体瞬间冷却。一般情况下,黄金管的温度可在几秒钟内降至室温。淬火过程中,熔体处于“动态”过程。在黄金管掉入淬火釜的过程中,长条状矿物记录下了熔体流动的痕迹。那么,为什么流动构造只是在极个别的样品中出现?我们认为,它的形成可能与实验过程中的偶然因素有关。淬火期间,在重力大于粘滞力的情况下,体系处于力的非平衡状态,于是产生流动。但由于淬火过程一般在瞬间即可完成,所以熔体还来不及流动便已固结,不会留下流动的痕迹。如果黄金管局部被压扁或扭曲,在淬火过程中可能被卡在反应釜内而不是直接掉入淬火釜,则熔体将有相对较充分的时间形成流动构造。长条形矿物与熔体流动方向平行时才能满足动力平衡条件,并且流速最快。因此,长条形矿物长轴方向平行于黄金管

延长方向,同时,熔体中的球粒被拉长。

综上所述,可以认为,在模拟实验过程中形成的流动构造是冷却速度相对较慢造成的结果。因此,无论实验温度位于液相线之上还是之下,只要熔体在固结成玻璃之前的短时间内受到不均衡力的作用,就有可能形成流动构造。前一种情况出现球粒玻璃被拉长并定向排列的现象,后一种情况则出现长条形矿物定向排列的现象。

除与动力有关外,流动构造的形成与否还与熔体粘度有关。粘度在一定程度上决定着岩浆的迁移和侵位方式。熔体的粘度与多种因素有关,如温度、晶体/液体比、熔体成分、挥发分含量、熔体结构等。 $H_2O$ 、 $F$  和  $CO_2$  等挥发分浓度是决定硅酸盐熔体粘度的关键因素(朱永峰等, 1997)。水含量降低、温度降低以及晶体或气泡的出现都会使粘度升高。晶体/液体比值增大,则粘度也增大(Geist *et al.*, 1998; March, 1998)。当晶体含量增加到  $80\% \pm 10\%$  时,粘度的增加变得特别迅速,体系从固体/液体混合物转变成假塑性体(Pitcher, 1979)。

在岩浆完全固结前,构造作用也可能使长条状矿物定向排列。很难区分一个特定岩体的流动构造是原始岩浆构造还是岩浆期后构造。但是,我们的实验结果足以证明,岩浆固结前形成流动构造是完全可能的,尽管其形成机理还有待于进一步研究。

岩浆物理性质和流体动力学是当前国际火成岩岩石学的前沿课题之一,是研究岩浆作用的重要方面,对于探讨火成岩中长期以来存在的一些疑难问题具有重要意义。本文的实验结果为花岗岩中流动构造属于原生构造的解释提供了重要的实验依据,同时为岩浆流体动力学研究提供了有用的信息。需要说明的是,本文描述的是我们在结晶动力学和熔化-结晶实验过程中意外发现的现象。笔者对于流动构造的认识十分有限,因此讨论是粗浅的,甚至有可能是错误的,希望能得到有关专家的批评意见,以促进流动构造形成机理的进一步研究。

## Reference

- Geist D, Naumann T, Larson P. 1998. Evolution of Galapagos magmas: mantle and crustal fractionation without assimilation [J]. *Journal of Petrology*, 39(5): 953~ 971.
- Huang Yunhui, Du Shaohua and Zhou Xiuzhong. 1988. Xianghualing rocks, mineral deposits and minerals[M]. Beijing: Beijing Science and Technology Press, 4~ 25 (in Chinese).
- Lai Shaocong. 1999. Advances in the physics process research on magmatism[J]. *Advance in Earth Sciences*, 14(2): 153~ 158 (in Chinese with English abstract).
- March B D. 1998. On the interpretation of crystal size distribution in magmatic systems[J]. *Journal of Petrology*, 39(4): 553 ~ 599.
- Paterson S R, Vernon R H and Tobisch O T. 1989. A review of criteria for the identification of magmatic and tectonic foliations in granitoids[J]. *Journal of Structural Geology*, 11(3): 349~ 363.
- Pitcher W S. 1979. The nature of ascent and emplacement of granitic magmas[J]. *Journal of Geological Society*, 136: 627~ 662.
- Ou Xiaoming, Wang Henian and Rao Bing. 1997. A study on the genesis of dioritic enclaves in Guoialing granite II. *Acta Mineralogica Sinica*, 17(3): 302~ 309 (in Chinese with English abstract).

(下转第 230 页)(to be continued on p. 230)

(上接第 222 页)(Continued from p. 222)

- Rao Bing. 1991. Experiment research on liquid immiscibility of granite- LiF- NaF- H<sub>2</sub>O system[ D]. Guangzhou Institute of Geochemistry, CAS (in Chinese With English abstract).
- Zhu Yongfeng. 1997. A theoretical method for calculation viscosity of NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub>melt[ J]. Acta Petrologica Sinica, 13(2): 173 ~ 179(in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

- 黄蕴慧, 杜绍华, 周秀仲. 1988. 香花岭岩石矿床与矿物[ M]. 北京: 北京科学技术出版社, 4~ 25.
- 赖绍聪. 1999. 岩浆作用的物理过程研究进展[ M]. 地球科学进展, 14(2): 153~ 158.
- 曲晓明, 王鹤年, 饶冰. 1997. 郭家岭花岗闪长岩岩体中闪长质包体的成因研究[ J]. 矿物学报, 17(3): 302~ 309.
- 饶冰. 1991. 花岗岩- LiF- NaF- H<sub>2</sub>O 体系液相不混溶的实验研究[ D]. 中国科学院广州地球化学研究所.
- 朱永峰, 赵永超, 郭光军. 1997. 一种计算 NaAlSi<sub>3</sub>O<sub>8</sub> 熔体粘度的理论方法[ J]. 岩石学报, 13(2): 173~ 179.