

栾家河花岗岩体中的矿物包裹体研究*

曲晓明

王鹤年 王海芹

(中国地质科学院矿床地质研究所, 北京 100037) (南京大学地球科学系, 南京 210093)

主题词 熔融包裹体 花岗质熔体 粘度 含水量

提 要 根据熔融包裹体的均一温度和均一过程的时间, 利用熔融包裹体的扩散率公式 ($D_H = r^2/4t$)、Eyring 方程 ($D_N = K_B T/\eta \lambda$) 以及不同含水量花岗质熔体的 $\ln D_H - 1/T$ 实验图解, 计算了胶东金矿区内与金矿形成关系密切的栾家河岩体中包裹体熔体的粘度和含水量。结果表明, 熔融包裹体均一温度为 970°C , 粘度为 $3.8 \times 10^6 \text{ Pa s}$, 含水量为 2.5%; 流体熔融包裹体的均一温度为 855°C , 粘度为 617.7 Pa s , 含水量为 5.8%, 反映出花岗岩浆在结晶过程中含水量不断增高, 粘度不断降低, 到结晶作用晚期, 流体相接近饱和状态。

岩浆的粘度和含水量是表征岩浆性质和分异演化特点的重要物理化学参数, 对与岩浆形成机制有关的分凝作用、混合作用、结晶分离作用、流体出溶以及岩浆上升速度都具有重要影响。正确估算硅酸盐熔体的粘度和含水量成为近十几年来蓬勃兴起的岩浆动力学研究的迫切要求。

侵入岩和喷出岩中的熔融包裹体是岩浆固结过程中捕获的原始成岩介质, 因此, 具有丰富的岩浆形成及其演化的信息。多年来, 在人们的不懈努力下, 将现代分析技术用于熔融包裹体研究, 成功地获得了岩浆原始成分、流体组成及含量等重要成岩作用信息。对于从熔融包裹体直接估算熔体粘度和含水量, 人们则寄予了更大的期望。Johannes^[1]根据硅酸盐熔体中化学组分的扩散系数, 通过实验确定了组分扩散率与包裹体大小及平衡时间之间的关系。Thomas^[2]通过实验研究和热力学计算, 论证了熔融包裹体的均一温度、组分扩散率与熔体粘度和含水量之间的关系, 并取得了令人满意的结果。

栾家河花岗岩体是胶东金矿区内的一个重要岩体, 招平断裂带上的台上、阜山、尹格庄、夏甸等多个大型、特大型金矿都与该岩体有关。该岩体中矿物包裹体十分发育, 包裹体类型齐全, 个体大(一般为几微米至几十微米), 不但有熔融包裹体(照片 1, 2)和流体包裹体(照片 4), 也有介于二者之间的流体熔融包裹体(照片 3)。流体包裹体中以大量发育富 CO_2 三相包裹体为特点。这些都为包裹体研究创造了十分有利的条件。本文借助于近年来有关包裹体熔体粘度和含水量计算的最新方法, 利用栾家河岩体内熔融包裹体发育的有利条件, 对熔体粘度和含水量的估算做了尝试, 以期从包裹体方面对该岩体的岩浆性质和分异演化特点提出制

* 第一作者简介 曲晓明, 男, 1960年11月出生, 博士, 地球化学专业。
收稿时间 1997-12-10, 改回时间 1998-03-26

约。

1 包裹体的显微测温

样品是采自栾家河岩体的新鲜岩石,对包裹体片,经显微镜观察后进行显微测温。测温是在南京大学成岩成矿作用国家重点实验室包裹体研究室中进行的。流体包裹体测温用的是英国产 Linkam THMS-600 型冷热台。该装置的设计温度区间为 $-196^{\circ}\text{C} \sim +600^{\circ}\text{C}$ 。测温前用蒸馏水 (0.00°C) 和重铬酸钾 (394°C) 做了温度校正,前者偏差为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$,后者为 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。熔融包裹体测温是在 Leitz-1350 型热台上进行的,测温前分别用重铬酸钾和氯化钠 (801°C) 做了温度校正,前者偏差为 $\pm 6^{\circ}\text{C}$,后者为 $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 。对于 H_2O 二相包裹体,首先降温至 -50°C ,然后缓慢升温,观测冰的消融温度(冰点)和完全均一温度。对于 CO_2 三相包裹体,则先降温至 -100°C ,一般在 -90°C 之后出现结冰现象,然后缓慢升温,观测记录 CO_2 的冰点、 CO_2 水合物的融化点、 CO_2 的部分均一温度以及包裹体的完全均一温度。

熔融包裹体的均一化过程如下:(1)熔融包裹体(照片1), 330°C 时,气体沿裂缝扩张,变粗变黑; 680°C ,右端的小玻璃块颜色开始变暗; 970°C ,玻璃变成浅褐色,随着时间的增长,颜色不断加深,约15分钟后熔体达到完全均一。(2)流体熔融包裹体(照片3), 345°C 时,流体相均一化; 580°C ,下面的两个粒状晶体内部出现裂纹(石英的相变反应: α 石英 $\xrightarrow{573^{\circ}\text{C}}$ β 石英); 780°C ,柱状晶体大部分熔化,粒状晶体变小; 855°C ,晶体完全熔化,约8分钟后包裹体达到完全均一。包裹体测温结果见表1。

表1 栾家河岩体矿物包裹体的显微测温结果及其物理化学参数

Table 1 Microthermometrical results and related parameters of mineral inclusions of Luanjiahe granite

样品编号	类型	照片号	CO_2 (vol%)		CO_2 冰点 ($^{\circ}\text{C}$)	均一温度 ($^{\circ}\text{C}$)		冰点 ($^{\circ}\text{C}$)	水合物分解点	压力 (10^5Pa)	盐度 (wt% NaCl)	密度 (g/cm^3)
			气	液		完全	部分					
B95-01	气液二相					242		-2.6		500	4.3	0.85
B95-01	气液二相					257		-1.8		495	3.0	0.83
B95-03	气液二相					223		-2.2		580	3.7	0.88
B95-01	CO_2 三相		35	20	-56.8	360.3	32.9		-2.8	600	18.8	
B95-02	CO_2 三相		30	30	-56.4	365.8	31.9		-4.8	400	20.8	
B95-03	CO_2 三相	4	20	50	-55.3	324	31.6		6.0	500	8.0	
B95-08	熔融包裹体	1				970						
B95-02	流体熔融包裹体	3				855						

2 包裹体熔体粘度和含水量的估算

熔融包裹体的均一化过程,归根到底是一个不同化学组分的扩散过程。而熔体的粘度和含水量又是影响组分扩散率的两个最重要的因素,这就是通过观测熔融包裹体的均一化行为估算熔体粘度和含水量的理论依据。Johannes 通过对硅酸盐熔体中扩散系数的研究给出

了包裹体熔体扩散系数的计算公式^[1]:

$$D_H = r^2/4t \quad \dots \dots (1)$$

式中, r 为包裹体的半径(cm); t 为包裹体在液相线温度下不均匀组分通过扩散达到均一所需的时间(秒); D_H 为包裹体中流体相(主要是 H_2O) 的扩散率。

熔体含水量的计算依据是阿伦尼乌斯方程:

$$D_H = D_0 \exp(-E_p/RT) \quad \dots \dots (2)$$

式中, D_0 是指数前系数, 也就是当 $1/T=0$ 时的扩散率(D); E_p 为熔体发生扩散时的活化能。这两个参数都与熔体酸度(SiO_2 含量)和含水量有关, 可以通过实验获得。 R 为气体常数; T 为均一温度($^{\circ}K$)。对(2)式取对数后则有直线方程:

$$\ln D_H = -E_p/RT + \ln D_0 \quad \dots \dots (3)$$

Thomas 通过实验给出了花岗质熔体($SiO_2 = 65\% \sim 75\%$)不同含水量的 $\ln D_H - 1/T$ 图解(图1)^[2]。根据包裹体测温得到的均一温度 T_H 和由(1)式求得的扩散率 D_H (表2), 就可以从图中求得含水量。结果是, 熔融包裹体的含水量为 2.5%(图1中的D点); 流体熔融包裹体的含水量为 5.8%(图1中的A点)。

表2 熔融包裹体的粘度和含水量及其有关计算参数

Table 2 Viscosity, water content and related parameters of melt inclusions

类型	组成	照片号	半径 r (cm)	均一温度 $T_H(^{\circ}C)$	时间 t (秒)	扩散率 D_H (cm^2)	含水量 (%)	粘度 η (Pa s)
熔融包裹体	15% 气体 + 85% 玻璃	1	12.5×10^{-6}	970	900	4.44×10^{-14}	2.5	3.8×10^6
流体熔融包裹体	20% 气体 + 40% 液体 + 40% 晶体	3	22×10^6	855	480	2.52×10^{-13}	5.8	617.7

关于液体介质的粘度与组分扩散率之间的关系有两个著名的方程: 一个是斯托克斯-爱因斯坦方程; 另一个是 Eyring 方程。研究表明, 斯托克斯-爱因斯坦方程不能正确地反映

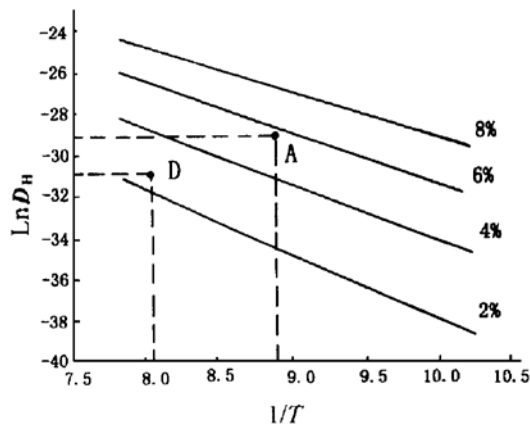


图1 不同含水量花岗质熔体的 $\ln D_H - 1/T$ 图
(据 R. Thomas, 1994)

Fig. 1 $\ln D_H - 1/T$ diagram of granitic melt with different water contents (from R. Thomas, 1994)

硅酸盐熔体粘度与组分扩散率之间的关系^[3]。Shimizu 和 Kushiro 通过氧在硅酸盐熔体中的扩散率研究^[4], 证实了 Eyring 方程的有效性。Baker 则在花岗质熔体($SiO_2 = 65\% \sim 75\%$)中证明了 Eyring 方程能够成功地预测 Si、Al 等非碱组分的扩散率^[5]。在该方程中, 扩散率与熔体粘度的关系为:

$$D_N = K_B T / \eta \lambda \quad \dots \dots (4)$$

式中, K_B 为玻兹曼常数; T 为均一温度($^{\circ}K$); η 为熔体粘度(Pa s); λ 为扩散组分的跳跃距离。根据硅酸盐熔体中 Si—O 和 Al—O 键的 X 射线资料和理论计算, λ 值可以取 1×10^{-8} (cm)^[6]。另外需要指出的是, (4)式中的 D_N 指的是非碱组分(Si、Al、Fe、Ca、Mg 等)的扩散率。实验研究表明, 在硅酸盐熔体

中, H_2O 的扩散速度比 Si 要快得多, 两者大约相差两个数量级^[7]。因此, 在用(4)式求熔体粘度时, 还须将 H_2O 的扩散率 D_H 转换成 Si 的扩散率 D_N , 即 $D_N = D_H \times 10^{-2}$ 。这样, 根据表 2 的 D_H , 由(4)式可以得到: 熔融包裹体的熔体粘度为 $3.8 \times 10^6 Pa \cdot s$, 流体熔融包裹体的熔体粘度为 $617.7 Pa \cdot s$ 。

3 讨论与结论

栾家河岩体内熔融包裹体的均一温度分别为 $970^\circ C$ 和 $855^\circ C$; CO_2 三相包裹体的均一温度在 $324^\circ C \sim 365.8^\circ C$ 之间(表 1)。根据 CO_2 包裹体(照片 4)的充填度、 CO_2 相密度及完全均一温度可以从 Swenberg 的图解^[8]中求得包裹体的捕获压力为 $(400 \sim 600) \times 10^5 Pa$ 。据 Potter 压力与均一温度的校正图解^[8], 这一压力范围可以对均一温度造成 $40 \sim 70^\circ C$ 的偏差。由此推算, 该岩体岩浆结晶作用的温度区间应该在 $400 \sim 900^\circ C$ 之间。由两个熔融包裹体得出的资料显示出, 岩浆结晶早期含水量是低的(2.5%), 粘度较大($3.8 \times 10^6 Pa \cdot s$)。随着结晶作用的进行, 残余岩浆中流体不断富集, 到晚期含水量达到 5.8%, 已接近硅酸盐熔体的饱和度($6\% \pm$)^[9]。该岩体中大量发育 CO_2 三相包裹体, 含水矿物除了黑云母之外, 还出现相当多的白云母($2\% \pm$), 以及明显偏高的 $^{87}Rb/^{87}Sr$ 和 $^{87}Sr/^{86}Sr$ 同位素比值(分别为 2.57888 和 0.7180)^[10], 这些都说明该岩体成岩过程中有较多的流体活动。按 $(400 \sim 600) \times 10^5 Pa$ 的捕获压力推算, 岩浆的侵位深度大体在 1.3~2km 之间, 说明该岩体是一种浅侵位花岗岩。

参 考 文 献

- 1 Johannes W. The significance of experimental studies for the formation of migmatites. *J. Geol.*, 1985, 92: 120~151.
- 2 Thomas R. Estimation of the viscosity and the water content of silicate melts from melt inclusion data. *Eur. J. Mineral.*, 1994, 6: 511~535.
- 3 Hofmann A W. Diffusion in natural silicate melts: a critical review. in physics of magmatic processes. Princeton University Press, 1980, 385~417.
- 4 Shimizu N, Kushiro I. Diffusivity of oxygen in jadeite and diopside melts at high pressure. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1984, 48: 1295~1303.
- 5 Baker D R. Estimation of diffusion coefficients during interdiffusion of geologic melts: application of transition state theory. *Chemical Geol.*, 1992, 98: 11~21.
- 6 Navrotsky A, Geisinger K L, McMillan P et al. The tetrahedral framework in glasses and melts-inferences from molecular orbital calculations and implications for structure, thermodynamics, and physical properties. *Phys. Chem. Miner.*, 1985, 11: 284~298.
- 7 Koyaguchi T. Chemical gradient at diffusive interfaces in magma chambers. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1989, 103: 143~152.
- 8 卢焕章等. 包裹体地球化学. 北京: 地质出版社, 1990.
- 9 Holtz F, Behrens H, Dingwell D B et al. Water solubility in aluminosilicate melts of haplogranite composition at 2 kbar. *Chemical Geol.*, 1992, 96: 289~302.
- 10 王鹤年等. 胶东中元古代玲珑花岗岩及其后期叠加改造的地质地球化学证据. *南京大学学报(地球科学)*, 1988, (1): 105~118.

A Study of Mineral Inclusions from Luanjiahe Granite Body

Qu Xiaoming

(Institute of Mineral Deposits, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037)

Wang Henian Wang Haiqin

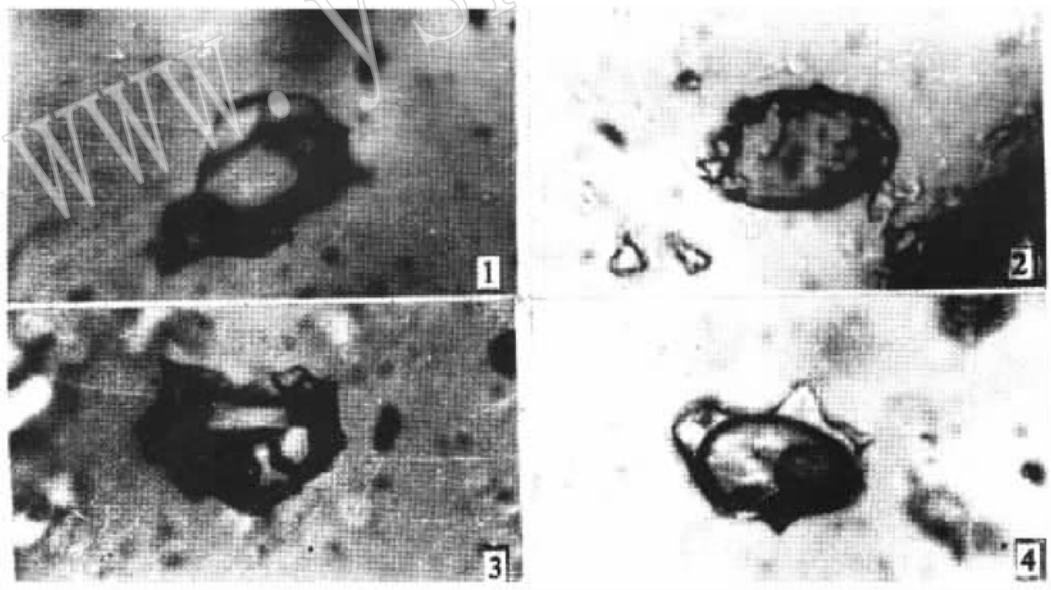
(Department of Earth Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093)

Key words: melt inclusion; granitic melt; viscosity; water content

Abstract

Based on homogenization temperature and duration of homogenization process obtained from Johannes ($D_H = r^2/4t$) and Eyring equations ($D_N = K_B T/\eta \lambda$), the authors calculated the viscosity of a melt inclusion at homogenization. The water content of the inclusion melt was estimated from the experimental diagram $\ln D_H - 1/T$ for granitic melt with different water contents. The study on mineral inclusions from Luanjiahe granite in Jiaodong gold zone indicates that the melt inclusion has a homogenization temperature of 970°C, viscosity of 3.8×10^6 Pa s and water content of 2.5%, whereas the fluid-melt inclusion has a homogenization temperature of 855°C, viscosity of 617.7 Pa s and water content of 5.8%, suggesting that during the crystallization of granitic magma water content increased while viscosity decreased continuously, and at the late stage of crystallization the fluid was close to the saturation state.

曲晓明等: 栾家河花岗岩体中的矿物包裹体研究



图版说明

- 照片 1 玻璃质熔融包裹体, 玻璃体内有条纹, 黑色者为气体 单偏光 $\times 500$
照片 2 玻璃质熔融包裹体, 气体在一端聚集 单偏光 $\times 500$
照片 3 流体熔融包裹体, 柱粒状子晶为石英 单偏光 $\times 500$
照片 4 富 CO_2 三相包裹体 单偏光 $\times 500$