

文章编号: 1000-6524(2004)04-0313-05

镜泊湖地区全新世火山岩熔体结构及其与某些岩浆动力学过程关系探讨

王福生¹, 张招崇^{1,2}, 李树才³

(1. 中国地质科学院地质研究所, 北京 100037; 2. 中国地质大学, 北京 100083;
3. 黑龙江省地质科学研究所, 黑龙江 哈尔滨 150036)

摘要: 熔体结构对岩浆的物理和热力学性质起着重要的制约作用。本文以镜泊湖全新世火山为例, 讨论了熔体结构和某些火山喷发机制的关系。熔体结构的 NBO/T 值(每个四次配位阳离子所含有的非桥氧数)是基于岩浆的主要元素和挥发分含量的计算获得的。研究表明, NBO/T 值越高的岩浆, 喷发时溢流出的熔岩比例越高, 熔岩流动的距离越长, 越有利于熔岩隧道的形成, H₂O⁺ 和 F 也更富集。

关键词: 熔体结构; 岩浆动力学过程; 全新世火山; 镜泊湖

中图分类号: P588.14; P584

文献标识码: A

Melt structure of Jingpohu Holocene volcanic rocks and its relation to some magmatic dynamics

WANG Fu_sheng¹, ZHANG Zhao_chong^{1,2} and LI Shu_cai³

(1. Institute of Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China; 3. Institute of Geological Sciences of Heilongjiang Province, Harbin 150036, China)

Abstract: Melt structure plays an important role in governing physical and thermodynamic characteristics of magmas. Exemplified by Jingpohu Holocene volcanic rocks, this paper has discussed the relationship between melt structure and volcanic eruptive mechanism. The NBO/T values (the non_bridge oxygen numbers per unit of cations) are calculated on the basis of the concentrations of major elements and volatiles. The results show that the proportion of lava in the total eruptive volume and its flowing capacity increase with increasing NBO/T values. The lava with high NBO/T values is liable to generate the lava channel. Volatiles such as H₂O and F are likely to concentrate in magma with high NBO/T values.

Key words: structure of melt; dynamic process of magma; Holocene volcano; Jingpohu

熔体结构对岩浆系统的热力学性质、物理性质有重大影响, 从而影响到岩浆演化过程中的扩散作用、液态不混溶、元素在矿物-岩浆-气相之间的分配、挥发分的作用(朱永峰等, 1996)。Mysen(1988)、Neuville 和 Richet(1991)、Romano 等(2001)曾定性地探讨过岩浆的粘度与其熔体结构的关系, 袁万明

(1994)也定性地讨论了岩浆的粘度、扩散系数和岩浆上升速率与其熔体结构的关系, Zidarove 等(2001)利用实验研究了熔体结构对扩散作用的制约关系, Hess(1995)、Dingwell 等(1994)、Ventura 等(1993)测试了不同气体在不同熔体中的溶解度, 从而得出了溶解度与熔体结构的关系, Brooker 等(2001)的研

收稿日期: 2004-06-08; 修订日期: 2004-08-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40172026)

作者简介: 王福生(1964-), 男, 副研究员, 研究方向实验岩石学。

究表明 CO₂ 的溶解度受熔体结构控制。

镜泊湖火山是我国东北地区主要的休眠火山之一,火山口内以及熔岩流中各种火山喷发现象及岩浆流动过程保存完好,是天然的火山博物馆(张招崇等,2000a)。本文试图立足镜泊湖全新世火山岩研究,探讨熔体结构(NBO/T,即每个四次配位阳离子所具有的非桥氧数)对火山喷发、熔岩流动、熔岩隧道的形成及某些气体含量的影响。

1 镜泊湖地区全新世火山的地质特征

镜泊湖地区新生代火山岩位于老爷岭地块张广才岭边缘隆起的中北部,敦密断裂带的西侧(敦密断裂带为郯庐断裂带的北延部分)。从古新世—始新世—全新世,本区火山活动均很频繁,其中全新世火山集中在黑龙江省宁安县小北湖的火山口森林和蛤蟆塘两个火山区,共发现13个火山口,其中火山口森林地区有11个,蛤蟆塘地区有2个(张招崇等,2000a)。

火山口森林复式火山机构是本区火山活动的中心,其喷发物总体积和总质量分别占92.4%和95.8%。其中1号火山口是区内最大的火山口,经由该火山口流出的熔岩流长达60 km,并在其中发育了总长约10 km的熔岩隧道,是我国发育最为完整、最长的熔岩隧道。另外,在火山口内,无论是在厚层的熔岩中,还是在非常薄的熔岩中,均发育小的熔岩隧道。

蛤蟆塘火山的熔岩流规模较小,最长约6 km,无论是在火山口相的薄层熔岩中,还是在熔岩流中,均不发育熔岩隧道,这与火山口森林地区明显不同。从其火山喷发物占的总体积(4.87%)和总质量(3.18%)来看,蛤蟆塘火山机构远较火山口森林复式火山机构小,但比其他火山机构要大一些。

火山口森林地区和蛤蟆塘地区的玄武岩尽管在外表上相似,但在岩石学和矿物学上差别却很大。蛤蟆塘地区为碱玄岩, K₂O + Na₂O 含量高(>11%),含有较多的玻璃状钛角闪石、金云母和歪长石巨晶,包体为尖晶石二辉橄榄岩;火山口森林地区为碧玄岩, K₂O + Na₂O 含量相对较低(6.43%~8.91%),含大量的橄榄石和辉石斑晶,包体为方辉橄榄岩。两地区熔体的结构也明显不同。这些差异表明两地区的岩浆演化过程不尽相同(张招崇等,2000b; Zhang Zhaochong *et al.*, 2002)。

2 熔体结构特征

硅酸盐熔体中的桥氧是连接两个 Si—O 四面体的氧,非桥氧是连接一个 Si⁴⁺ 和一个非四次配位金属阳离子的氧。熔体中非桥氧比例越高,表明熔体的聚合程度越低。NBO/T 是每个四次配位阳离子所具有的非桥氧数, NBO/T 值越小,表明熔体中 3d 网络结构越多,聚合程度越高。

本文 NBO/T 的计算,采用 Mysen 等(1980)的方法,同时考虑挥发分组对 NBO/T 的影响,利用袁万明(1994)的方法进行修正,计算公式为: $NBO/T = (2A - 4 \sum M^{IV}) / \sum M^{IV}$, 其中 $\sum M^{IV}$ 为 Si(Al、Ti、P、Fe)—O 四面体中桥氧键数, 2A 代表阴离子键(包括氧离子键和各挥发分组之间的有效离子键)之和。

Fe³⁺ 的结构作用较复杂,它既可以是成网离子,也可以是变网离子。Mysen 等(1980)认为,只有碱金属离子为其平衡电荷, Fe³⁺ 才能呈四次配位。根据本文研究的岩石碱金属含量与 Al 的比值,笔者将 Fe³⁺ 全部作为变网离子处理。

样品的主要成分见张招崇等(2000b),挥发分含量和 NBO/T 计算结果列于表 1。

表 1 样品挥发分含量($w_B/10^{-2}$)和计算的 NBO/T 值
Table 1 Volatile contents and calculated NBO/T values of Jingpohu Holocene volcano

	H ₂ O ⁺	CO ₂	F	Cl	S	NBO/T
JP_2	0.50	0.27	0.66	0.048	0.02	1.08
JP_3	0.54	0.27	0.50	0.025	0.08	1.08
Ry_1	0.34	0.53	0.57	0.041	0.03	1.06
HM_3	0.46	0.35	0.24	0.045	0.02	0.50
HM_5	0.36	0.71	0.14	0.051	0.02	0.47
HM_11	0.26	0.62	0.10	0.017	0.02	0.39
DX4_8	0.44	0.89	0.091	0.053	0.03	0.89
DX4_28	0.56	0.53	0.076	0.061	0.03	0.80
DX_2	0.16	0.35	0.074	0.051	0.02	0.91
DX_10	0.28	0.53	0.54	0.048	0.02	0.97
DX_13	0.40	0.71	0.11	0.061	0.02	1.01
DX1_4	0.04	0.35	0.24	0.022	0.02	0.90
DX1_16	0.12	0.53	0.15	0.076	0.01	0.80
DX1_26	0.34	0.35	0.075	0.029	0.02	0.91
DG_7	0.26	0.35	0.072	0.065	0.02	0.85
WD2_5	0.46	0.89	0.18	0.067	0.02	0.91

注: Ry_1、JP_2、JP_3 是 1 号火山口流出的熔岩,距火山口距离分别为 5 km、45 km、50 km; DX1 和 DX 是 1 号火山口火山岩; DX4 是 IV 号火山口火山岩; WD2_5 是五道沟火山熔岩; DG_7 是大干泡火山熔岩; 分析方法: F—离子选择电解; Cl—容量法; S—燃烧法; CO₂—气体体积法; H₂O⁺—重量法。

从表1可以看出,火山口森林地区(包括大干泡、五道沟地区)的NBO/T值变化于1.08~0.80之间,蛤蟆塘地区的NBO/T值变化于0.50~0.39之间,前者明显大于后者;特别是火山口森林火山机构的I号火山口晚期流出的熔岩,NBO/T值变化于1.08~1.05之间,为本区最高。熔岩流中流动距离不同熔岩的NBO/T值也略有差别,流动距离较长的熔岩(JP_2、JP_3)具有较高的NBO/T值,距火山口较近的(RY_1),NBO/T值较低。另外,五道沟熔岩NBO/T值也高于大干泡和火山口森林复式火山机构中的IV号火山口。

3 熔体结构与某些火山喷发过程的关系

3.1 熔体结构与喷发类型的关系

镜泊湖全新世火山岩以熔岩流的溢出和喷发相间出现为特征。据实测资料计算,火山口森林地区的火山熔岩与碎屑岩的质量比约为123/1,而蛤蟆塘地区的比值不到3/1,它清楚地表明,火山口森林火山机构以溢流为主,爆发为辅;蛤蟆塘火山虽然也以溢流为主,但爆发所占比例呈数量级增加,并且在一次喷发过程中有多次短时间的喷发间断(张招崇等2000a)。

比较火山口森林和蛤蟆塘火山的喷发产物和喷发过程,可以得出如下认识:火山口森林火山喷发类型更接近于夏威夷型,蛤蟆塘火山喷发更接近于斯通博利型。玄武质岩浆是呈夏威夷型还是呈斯通博利型喷发,主要取决于岩浆中的气泡能否聚合和生长。当气泡聚合量少且喷发作用由岩浆碎化表面处的许多小气泡的爆炸控制时,就呈夏威夷型喷发;当喷发作用以岩浆表面的大气泡爆炸而呈现时,就表现为斯通博利型喷发。

气泡的聚合和生长固然与岩浆的气体含量和物化条件有关,但岩浆的粘度对其影响也十分巨大。如果岩浆粘度小,它对气泡的约束能力就差,小气泡易逃逸,在岩浆内不易聚合成大气泡,在岩浆一次喷发过程中,往往以爆发开始,随后是较长时间的溢流,如火山口森林火山。相反,粘度大的岩浆则易将小气泡约束聚合成大气泡,在一次喷发过程中,先以爆发开始,随后伴随较短时间的溢流,在岩浆房能量不足的情况下,溢流停止,气泡再次聚合,然后再爆发,周而复始,表现为多次喷发间断,如蛤蟆塘火山。

Mysen(1988)通过实验发现:

$$C_p^{\text{conf}} = A + B \cdot \text{NBO/T} \quad (1)$$

其中 C_p^{conf} 为熔体的热容,单位为(J/mol·K),A、B为常数,NBO/T为每个四面体配位阳离子所结合的非桥氧数。由式(1)可知,熔体的热容与NBO/T呈线性正相关关系。

熔体热容与其结构熵(S^{conf})存在以下关系:

$$S^{\text{conf}} = S_{T_g}^{\text{conf}} + \int_{T_g}^T C_p^{\text{conf}}/T dT \quad (2)$$

其中 $S_{T_g}^{\text{conf}}$ 为熔体冷冻到转化成玻璃温度(T_g)时的结构熵。由(2)式可知, S^{conf} 与 C_p^{conf} 也呈正相关。

Richet(1984)将热力学与流变学联系在一起,得出:

$$\log \eta = A_c + B_c / T S^{\text{conf}} \quad (3)$$

其中 η 为岩浆的粘度, A_c 为常数, B_c 为摩尔自由阻碍能。由(3)式可知,粘度 η 与结构熵呈反相关关系。

综合以上关系可知,岩浆粘度与NBO/T呈反相关,也就是说NBO/T越大,熔体中非桥氧键越多,形成的3d网络结构越少,岩浆的粘度越小。

根据上文计算,火山口森林的NBO/T值变化于1.08~0.80之间,蛤蟆塘的NBO/T值为0.39~0.50,很明显,火山口森林地区的岩浆粘度小于蛤蟆塘火山,这可以很好地解释为什么在其他条件相近的情况下,两地火山的喷发过程和产物存在着明显的差异,表明熔体结构是有显著影响的内在因素。

3.2 熔体结构与熔岩隧道形成的关系

熔岩隧道发育完整是镜泊湖全新世火山的一大特点。总体上,熔岩隧道与熔岩流的方向一致,局部呈角度相交。隧道既有单层隧道亦有双层隧道,但多数为单层隧道,有的隧道具有分支复合现象。单个隧道的横断面一般呈不规则的长方形和椭圆形,顶面呈拱形。隧道高一般1~5m,小者只有0.5~0.8m,宽一般3~6m,最大者达10~12m。隧道内流动构造十分发育。

那么为什么熔岩隧道在该火山发育,而在其他火山不发育?为什么I号火山口和五道沟火山(VI号)很发育,而在其他火山口发育差(IV号)或不发育(蛤蟆塘)?本文试图从熔体结构的角度来考虑其形成的内在机制。

熔岩隧道的形成必须满足于一个先决条件,即岩浆流动过程中因冷却而形成的隧道表壳必须足够厚,足以承受自身的重量和内部流动岩浆对其的压

力。形成熔岩表壳的厚度显然与岩浆的冷却速度有关,也就是说岩浆的热扩散系数越大,单位时间内散发的热量越多,岩浆冷却形成的表壳越厚。

根据 Nernst-Einstein 方程有:

$$\alpha = F^2 Z_i^2 D_i / (kT) \quad (4)$$

式中 α 为热扩散系数, F 为 Faraday 常数, Z_i 为运动粒子 i 的电荷, k 为 Boltzman 常数, T 为绝对温度, D_i 为粒子的扩散系数。

由 Eyring 方程可知:

$$\eta = kT / (\alpha_i D_i) \quad (5)$$

式中 α_i 为粒子的跳跃距离, η 为粘度。

联立(4)、(5)方程求解,可得:

$$\alpha = F^2 Z_i^2 \alpha_i / \eta \quad (6)$$

由(6)式可知,热扩散系数 α 与岩浆的粘度 η 呈反相关关系,综合(1)、(2)、(3)、(6)式可知,热扩散系数 α 与 NBO/T 值呈正相关。

根据上述推导, NBO/T 值较大的岩浆,其热扩散系数也大,可在相对较短的时间内形成足够厚的熔岩表壳,而形成的熔岩表壳又变成了一个导热性差的热保护层,使得内部岩浆不易冷却,造成相对封闭的环境和增高的压强,也使岩浆内的挥发分更易进一步挥发,表壳内的岩浆在重力作用下流出,从而形成了熔岩隧道。

从火山口森林火山的 I 号口溢出的熔岩,到五道沟火山的熔岩,再到蛤蟆塘火山的熔岩,它们的 NBO/T 值分别为 1.08~1.05、0.91~0.39、0.50,相对应地,熔岩隧道从十分发育到较发育再到不发育,说明了熔体结构对熔岩隧道的形成有着至关重要的影响,不同的火山熔岩中是否形成熔岩隧道,熔体结构有着决定性的影响。

3.3 熔体结构与岩浆流动的关系

火山口森林地区和蛤蟆塘地区熔岩的流动特征也存在很大区别,前者流动距离较远(达 60 km),而后者流动距离较近(约 6 km)。

熔岩流的长度与许多因素有关,最重要的当然是岩浆的溢出量、地形的坡度,但岩浆的流动性也十分重要。火山口森林地区熔岩 NBO/T 值较高(1.08~0.80),特别是 I 号火山口溢出的岩浆,其 NBO/T 值变化于 1.08~1.05 之间,为本区最高,表明其粘度最小,岩浆流动性最强。蛤蟆塘熔体的 NBO/T 值为 0.39~0.50,表明其粘度大,不利于岩浆流动。另外,在同一熔岩流中,流动距离最长的熔岩具有最高的 NBO/T 值,表明熔体结构对岩浆流动具有制约作

用。

4 熔体结构与熔体中 H_2O^+ 、F 总含量的关系

火山口森林地区和蛤蟆塘地区的火山岩中,均较富含 H_2O^+ 、F、 CO_2 等挥发分。其中, H_2O^+ 和 F 在熔体中的结构作用相同,它们与熔体中的桥氧起反应,破坏桥键(Si-O-Si),导致聚合程度降低, NBO/T 值升高;而 CO_2 与熔体中的非桥氧反应,导致 NBO/T 值降低。

表 1 的数据表明, CO_2 含量与 NBO/T 值的相关关系不明显,而 H_2O^+ 、F 的总含量与 NBO/T 值存在很好的线性相关关系(图 1)。

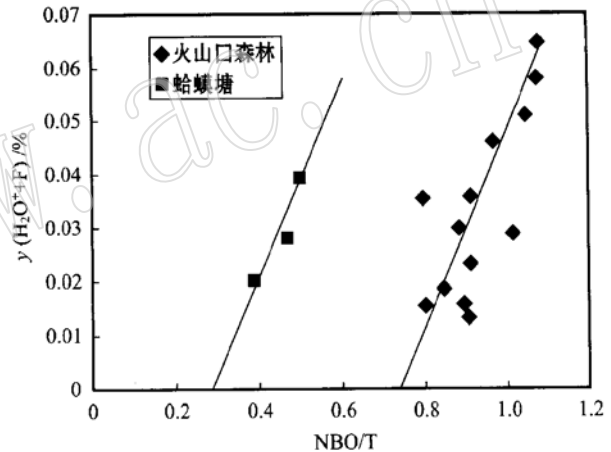


图 1 H_2O^+ 、F 总含量(摩尔分数)与 NBO/T 值的关系
Fig. 1 Diagram of H_2O^+ + F total contents (mole percent) versus NBO/T values

经回归分析,火山口森林地区火山岩中的(H_2O^+ + F)的摩尔分数 y 与 NBO/T 值的关系方程为:

$$y = 0.14 \text{ NBO/T} - 0.09 \quad (7)$$

相关系数 $r = 0.77$ 。13 个点的相关系数为 0.77,表明可信度很高。

蛤蟆塘地区火山岩中(H_2O^+ + F)的摩尔分数 y 与 NBO/T 值的关系方程为:

$$y = 0.15 \text{ NBO/T} - 0.04 \quad (8)$$

相关系数 $r = 0.94$ 。蛤蟆塘地区的分析数据少(3 个点),相关系数为 0.94,可信度稍差。

比较方程(7)、(8)可看出,两条直线具有几乎相同的斜率,表明熔体结构对(H_2O^+ + F)含量的影响在两个地区基本一致,也证明了熔体结构与挥发分

含量之间具有内在联系。熔体结构 NBO/T 值与 ($H_2O^+ + F$) 含量呈线性正相关也说明, NBO/T 值高的熔体有利于 H_2O^+ 、F 在其中的溶解, NBO/T 值低的熔体更有利于 H_2O^+ 、F 向气相分配, 这可能是造成火山口森林地区和蛤蟆塘地区的火山喷发机制不尽相同的另一重要原因。

5 结论

熔体结构是影响岩浆物理和热力学性质的内在因素, 从而影响岩浆的演化和火山喷发机制。火山口森林地区和蛤蟆塘地区的火山岩在熔体结构上有明显的差别: 火山口森林地区的火山岩 NBO/T 值高, 故其岩浆的粘度低, 火山喷发更接近于夏威夷型, 岩浆易流动, 利于熔岩隧道的形成; 蛤蟆塘地区的火山岩 NBO/T 值低, 其岩浆的粘度高, 火山喷发更接近于斯通博利型, 不利于岩浆流动和熔岩隧道的形成。在岩浆演化过程中, H_2O^+ 、F 倾向于溶解在 NBO/T 值高的岩浆中。

References

- Brooker R A, Kohn S C, Holloway J R, *et al.* 2001. Structural controls on the solubility of CO_2 in silicate melts - Part I: bulk solubility data[J]. *Chemical Geology*, 74: 225~ 239.
- Dingwell D B, Roman C and Hess K V. 1994. Water granitic melts; experimental studies of structure-property relationships[A]. *Abstracts of the International Mineralogical Associations, 16th General Meeting, Pasa, Italy*[C], 96~ 97.
- Hess P C. 1995. Thermodynamic mixing properties and the structure of silicate melts[J]. *Reviews in Mineralogy*, 32: 147~ 189.
- Mysen B O. 1988. *Structure and Properties of Silicate Melts*[M]. Amsterdam: Elsevier.
- Mysen B O, Virgo D and Scarfe C M. 1980. Relations between the anionic structure and viscosity of silicate melts; a Raman spectroscopic study[J]. *American Mineralogist*, 65: 690~ 710.
- Neuville D R and Richet P. 1991. Viscosity and mixing in molten (Ca, Mg) pyroxenes and garnets[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 55: 1 011~ 1 019.
- Richet P. 1984. Viscosity and configurational entropy of silicate melts[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48: 471~ 483.
- Romano C, Poe Brent T, Mincione V, *et al.* 2001. The viscosities of dry and hydrous $XAlSi_3O_8$ ($X = Li, Na, K, Ca 0.5, Mg 0.5$) melts[J]. *Chemical Geology*, 174: 115~ 132.
- Ventura G D, Robert J L, Beny J M, *et al.* 1993. The OH-F substitution in Ti-rich potassium richterite; Rietveld structure refinement and FTIR and micro-Raman spectroscopic studies of synthetic amphiboles in the system $K_2O - Na_2O - CaO - MgO - SiO_2 - TiO_2 - H_2O - HF$ [J]. *American Mineralogist*, 78: 980~ 987.
- Yuan Wanming. 1994. The relation between the melt structure of silicate and some geologic characteristics[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 10: 301~ 309 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhaochong, Feng Chengyou, Li Zhaonai, *et al.* 2002. Petrochemical study of the Jingpohu Holocene alkali basaltic rocks, north-eastern China[J]. *Geochemical Journal*, 36: 133~ 153.
- Zhang Zhaochong, Li Zhaonai, Li Shucai, *et al.* 2000a. The Jingpohu Holocene volcanic rocks in Heilongjiang Province[A]. *Liu Ruoxin. Active Volcanoes in China*[C]. Beijing: Seismological Press (in Chinese).
- Zhang Zhaochong, Li Zhaonai, Li Shucai, *et al.* 2000b. Geochemistry of the Jingpohu Holocene basaltic rocks, Heilongjiang Province, and discussion on their deep processes[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 16(3): 327~ 336 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Yongfeng and Zhang Chuanqing. 1996. *The Structure of Silicate Melt*[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zidarov N, Muchovski J, Marinov M, *et al.* 2001. Ion-mass transport in anhydrous basaltic melts in an electric field[J]. *Chemical Geology*, 74: 51~ 60.

附中文参考文献

- 袁万明. 1994. 硅酸盐熔体结构与某些地质特征的关系[J]. *岩石学报*, 10: 301~ 309.
- 张招崇, 李兆鼐, 李树才, 等. 2000a. 黑龙江省镜泊湖全新世火山岩[A]. 刘若新主编. *中国的活火山*[C]. 北京: 地震出版社.
- 张招崇, 李兆鼐, 李树才, 等. 2000b. 黑龙江镜泊湖地区全新世玄武岩的地球化学特征及其深部过程探讨[J]. *岩石学报*, 16(3): 327~ 336.
- 朱永峰, 张传清. 1996. *硅酸盐熔体结构学*[M]. 北京: 地质出版社.