

巴尔哲超大型稀有稀土矿床富晶体的流体包裹体初步研究*

牛贺才 单强 罗勇 杨武斌 于学元

NIU HeCai, SHAN Qiang, LUO Yong, YANG WuBin and YU XueYuan

中国科学院广州地球化学研究所, 广州 510640

Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China

2008-04-02 收稿, 2008-07-08 改回.

Niu HC, Shan Q, Luo Y, Yang WB and Yu XY. 2008. Study on the crystal-rich fluid inclusions from the Baerzhe super-large rare elements and REE deposit. *Acta Petrologica Sinica*, 24(9): 2149–2154

Abstract Baerzhe Deposit is a super-large rare element and REE deposit. It is controlled by Baerzhe alkaline granite body, occurring in the albite alkaline granite within the upper part of the body. Abundance of crystal-rich fluid inclusions are found in the quartz of the albite alkaline granite, and investigated by Raman spectroscopy and micro-temperature measurements. Unlike the commonly observed salt rich triple-phase fluid inclusions, the crystal-rich fluid inclusions found in the Baerzhe deposit contain mostly the silicate minerals (such as feldspar, mica, etc), and the REE minerals. The results suggest that the genesis of the ore-bearing albite alkaline granite was directly related to the magmatic-hydrothermal transition process, and provide a new idea for explaining the geochemical characteristics of REE and oxygen isotope of the Baerzhe body. The extensive distribution of the REE minerals also indicates that the REE had already been enriched enough in the alkaline granite during the magmatic-hydrothermal stage of magma evolution for a REE ore deposit, and the REE mineralization was constrained by the fluid derived from this stage.

Key words Baerzhe super-large deposit; Crystal-rich fluid inclusions; Alkaline granite; Magmatic-hydrothermal transition stage; Rare and rare earth elements

摘要 巴尔哲矿床是一个超大型稀有稀土多金属矿床,它受巴尔哲碱性花岗岩体(株)控制,稀有稀土矿体分布在巴尔哲岩体上部的钠长石碱性花岗岩中。本文在钠长石碱性花岗岩的石英中发现了大量的富晶体的流体包裹体,并对其进行了初步的激光拉曼光谱和显微测温研究。与一般含盐类晶体矿物的三相流体包裹体不同,巴尔哲富晶体的流体包裹体的晶体不是盐类矿物,而是长石、云母等硅酸盐矿物;同时,该类包裹体内还广泛分布着稀土碳酸盐矿物。富晶体的流体包裹体的发现从微观角度揭示了巴尔哲含矿钠长石碱性花岗岩的形成与岩浆—热液过渡阶段有直接的成因联系,并为阐述巴尔哲岩体稀土元素及氧同位素的地球化学特征提供了新思路。稀土碳酸盐矿物在富晶体的流体包裹体中广泛地分布则充分说明,巴尔哲碱性花岗岩演化到岩浆—热液过渡阶段体系内的稀土元素已经达到足以形成独立稀土矿物的富集程度,其稀土元素矿化受岩浆—热液过渡阶段的制约。

关键词 巴尔哲超大型矿床;富晶体的流体包裹体;碱性花岗岩;岩浆—热液过渡阶段;稀有稀土元素

中图分类号 P588.121; P618.7

1 引言

巴尔哲超大型矿床位于内蒙古哲里木盟扎鲁特旗境内,矿体产在燕山期巴尔哲碱性花岗岩体(株)中。巴尔哲矿床

为 REE-Zr-Be-Nb-Ta 多金属矿床,其中锆和稀土元素的储量已达超大型矿床规模,具有重要的经济价值。巴尔哲矿床是一个典型的与幔源碱性花岗岩有关的超大型稀有稀土矿床,其矿床类型独特,对该矿床进行系统的矿床学、地球化学研究将进一步揭示稀有稀土元素富集规律,具有重要的理论意

* 国家重点基础研究发展规划项目(项目编号 2006CB403504)资助。

第一作者简介:牛贺才,男,1963年生,研究员,博士生导师,地球化学专业, E-mail: niuhc@gig.ac.cn

义。此外,在巴尔哲矿区周边还分布着十多个碱性花岗岩岩株,巴尔哲矿床成矿机制的研究对于评估周边碱性花岗岩株的成矿潜力和指导区域找矿具有积极的借鉴意义。因此,对巴尔哲矿床进行系统的矿床学及地球化学研究具有重要的理论和实际意义。

王一先和赵振华(1997)研究发现,巴尔哲碱性花岗岩是岩浆强烈分异的产物,巴尔哲碱性花岗岩岩体稀土元素表现为明显的M型四分组效应。王一先和赵振华(1997)研究还发现,在巴尔哲碱性花岗岩体,稀土元素明显富集在上部的钠长石碱性花岗岩中,他们初步认为上部岩石稀土元素含量的明显增加受钠长石化作用的制约。袁忠信等(2003)通过氧同位素的系统研究,发现巴尔哲碱性花岗岩与其它碱性花岗岩一样,明显亏损 ^{18}O 和D,但巴尔哲碱性花岗岩 $\Delta^{18}\text{O}_{\text{石英-长石}} = 10.40\text{‰} \sim 14.58\text{‰}$,显著大于岩浆结晶分离的同位素分馏值,不能用正常的岩浆结晶分离作用来解释,Jahn *et al.* (2001)认为该现象可能与演化晚期岩浆/流体作用有关。袁忠信等(2003)研究还发现,巴尔哲碱性花岗岩 $\delta^{18}\text{O}$ 具有明显的垂直分带性,岩体顶部明显亏损 ^{18}O 。

已有的研究从岩石学、元素地球化学及同位素地球化学角度探讨了巴尔哲碱性花岗岩的成因及地球化学特征,为进一步研究奠定了坚实的基础。但也有一些问题值得进一步研究:巴尔哲碱性花岗岩顶部稀土元素明显富集的机制,控制O同位素垂直分带的地质地球化学因素等问题,而这些问题解决直接影响对巴尔哲岩体形成、演化及巴尔哲矿床成矿机制的认识。

近年来,随着激光拉曼探针、LA-ICP-MS和PIXE等分析技术的发展,包裹体被广泛应用于各类与岩浆活动有关的矿床研究中(El Habaak, 2004; Fan *et al.*, 2006; 范宏瑞等, 2003; Frezzotti, 2001; Hack and Mavrogenes, 2006; Harris *et al.*, 2003; Heinrich *et al.*, 1992, 2003, 2004; Heinrich, 2005; Kamenetskiy *et al.*, 2004; Kamenetskiy *et al.*, 2002; Ni *et al.*, 2006; 倪培等, 2003; 倪培和王一刚, 2007; Redmond *et al.*, 2004; Xie *et al.*, 1996; Xu *et al.*, 2001; 张连昌和姬金生, 2000)。通过单个包裹体物质组成的研究,确定了不同成矿阶段流体中成矿及相关元素的含量,并结合显微测温研究探讨了岩浆—热液体系流体的物质组成及演化;通过包裹体组合的研究,发现岩浆—热液体系中广泛存在不混溶过程,并探讨了该过程对成矿流体形成、演化及成矿元素传输、富集的制约;通过人工合成包裹体的研究,探讨了不同物理化学条件下成矿流体中成矿元素含量变化及其在不同相态中的分配。通过包裹体的系统研究,特别是新技术、新方法的广泛应用,取得了一系列新成果,尤其是在岩浆热液形成、演化及岩浆热液矿床的成矿机理等方面有取得了突破性进展。

在巴尔哲超大型稀有稀土矿床中作者发现了富晶体的流体包裹体,该类包裹体主要分布在伟晶岩块(壳)、晶洞的石英及矿化岩石的斑状石英中。与一般含盐类晶体矿物的三相流体包裹体不同,巴尔哲富晶体的流体包裹体的晶体不

是盐类矿物,而是长石、云母等硅酸盐矿物。富晶体的流体包裹体的发现,为进一步探讨巴尔哲超大型稀有稀土元素矿床的成因提供了新的研究思路和技术手段。

2 矿床地质概况

在巴尔哲矿床矿区区内中生代断裂构造及火山岩十分发育,北东向黄岗梁—甘珠尔庙—乌兰浩特断裂带是区内主要控矿构造,矿区北侧有次一级的近东西向霍林河断裂通过。矿区围岩为侏罗系、白垩系及第四系地层,它们分别是:上侏罗统玛尼吐组(J_3mn),它由安山岩、安山质晶屑凝灰岩、安山质角砾岩、安山质凝灰岩组成;上侏罗统白音高老组(J_3b),该组由英安质凝灰岩、流纹岩、中酸性火山碎屑岩组成;下白垩统梅勒图组(K_1m),在该地层的底部有一层凝灰质砾岩,它不整合在上侏罗统底层之上,其上为流纹岩。梅勒图的上部为安山岩、安山质凝灰岩(图1)。

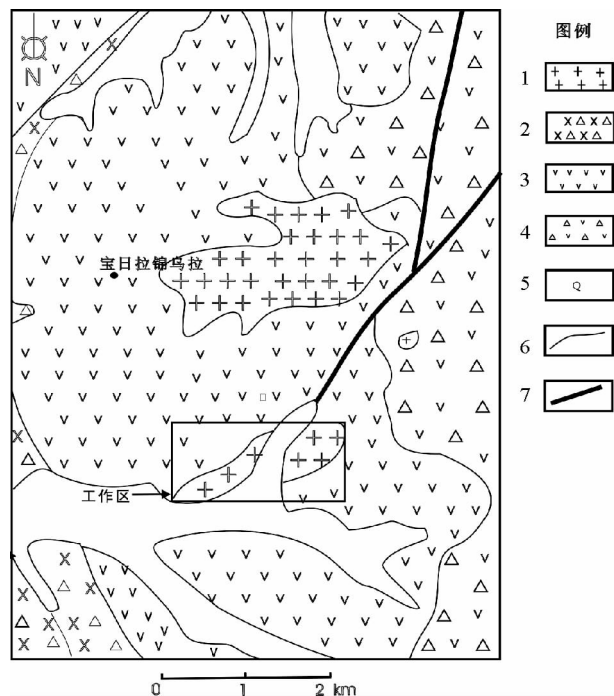


图1 巴尔哲超大型稀土矿床地质简图(据程立人等^①, 2008 修改)

1-碱性花岗岩; 2-上侏罗统玛尼吐组(J_{3mn}); 3-上侏罗统白音高老组(J_{3b}); 4-下白垩统梅勒图组(K_{1m}); 5-第四纪; 6-地质界线; 7-断层

Fig. 1 Simplified geological map of the Baerzhe super-large rare elements and REE deposit 2008

1-Alkaline Granite; 2-Upper Jurassic Manitu Formation (J_{3mn}); 3-Upper Jurassic Baiyingaolao Formation (J_{3b}); 4-Lower Cretaceous Meiletu Formation (K_{1m}); 5-Quaternary; 6-Boundary; 7-Fault

^① 程立人等. 2008. 内蒙古通辽市图布钦等四幅 1:5 万矿产调查报告

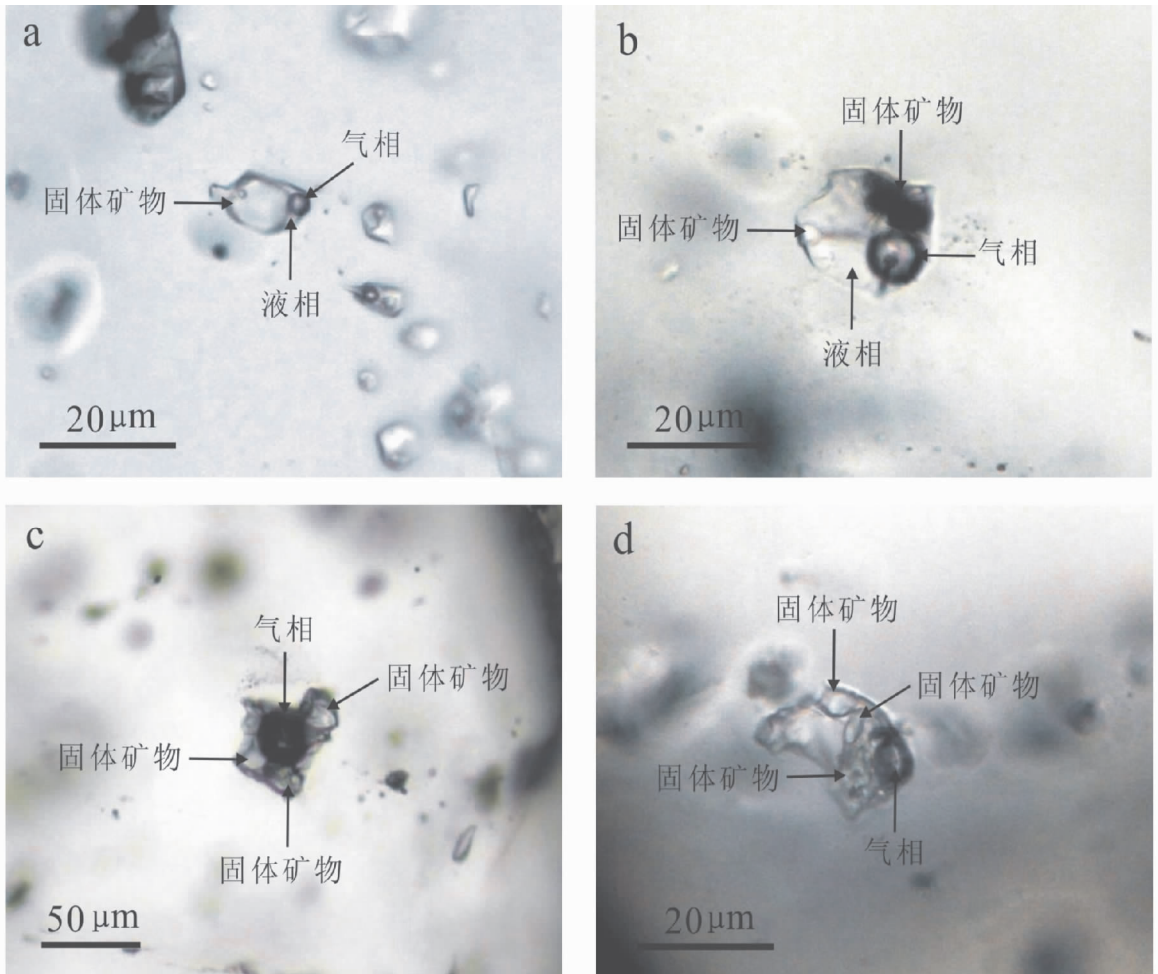


图2 巴尔哲矿床富晶体的流体包裹体

Fig.2 Crystal-rich fluid inclusions in Baerzhe deposit

巴尔哲超大型稀有稀土金属矿床严格受巴尔哲碱性花岗岩体(株)的控制(图1)。碱性花岗岩体与区内白音高老呈侵入接触关系,二者的岩石化学组成及氧同位素值相近,它们可能是同源不同产状或不同期次的岩浆活动产物(袁忠信等,2003)。

巴尔哲碱性花岗岩呈岩瘤产出,分成东、西两个岩株,其中东岩株出露面积 0.3km^2 ,西岩株出露面积 0.11km^2 ,两个岩株向下连为一体。根据造岩矿物的组成可以将巴尔哲碱性花岗岩体分为上下两个岩相带:下部为钠闪石碱性花岗岩岩相带(以下称钠闪石碱性花岗岩),主要组成矿物为微斜长石、微斜条纹长石、钠闪石及石英;岩体上部为富钠长石的碱性花岗岩岩相带(以下称钠长石碱性花岗岩),其内广泛发育晶洞和伟晶岩块(壳)。钠长石碱性花岗岩岩相带组成矿物为钠长石和石英,而微斜长石和微斜条纹长石明显减少,稀有稀土矿化分布在该岩相带内。巴尔哲超大型矿床稀有稀土元素主要赋存在兴安石、铌铁矿、烧绿石和锆石中,矿石品位高,易分选。矿石矿物呈面型分布在钠长石碱性花岗岩中,且矿化程度与钠长石和石英的含量呈正相关。由于东

岩株钠长石和石英更发育,因此在东岩株是巴尔哲超大型稀有稀土矿床的主体。

3 富晶体的流体包体地球化学特征

3.1 富晶体的流体包裹体的基本特征

本文对巴尔哲超大型矿床石英中的包裹体进行初步了研究,除了已报道的熔融包体和流体包裹体外^①,还在矿化的钠长石碱性花岗岩中发现了大量的富晶体的流体包裹体(图2)。该类包裹体主要分布在伟晶岩块(壳)、晶洞的石英及矿化岩石的斑状石英中。该类包裹体以椭圆状和不规则状为主,大小在 $20\mu\text{m} \times 10\mu\text{m} \sim 30\mu\text{m} \times 20\mu\text{m}$ 之间。该类包裹体的气相含量变化较大,低者一般不超过 $8\text{vol}\%$,高者可达 $20\text{vol}\%$;结晶相和流体相含量变化也较大,结晶相含量一般不低于 $40\text{vol}\%$,最高可达到 $70\text{vol}\%$ 。结晶相的矿物组成

① 地质部矿床地质研究所. 1981. 内蒙“八〇一”碱性花岗岩斑岩型稀有金属矿床的矿物和地球化学

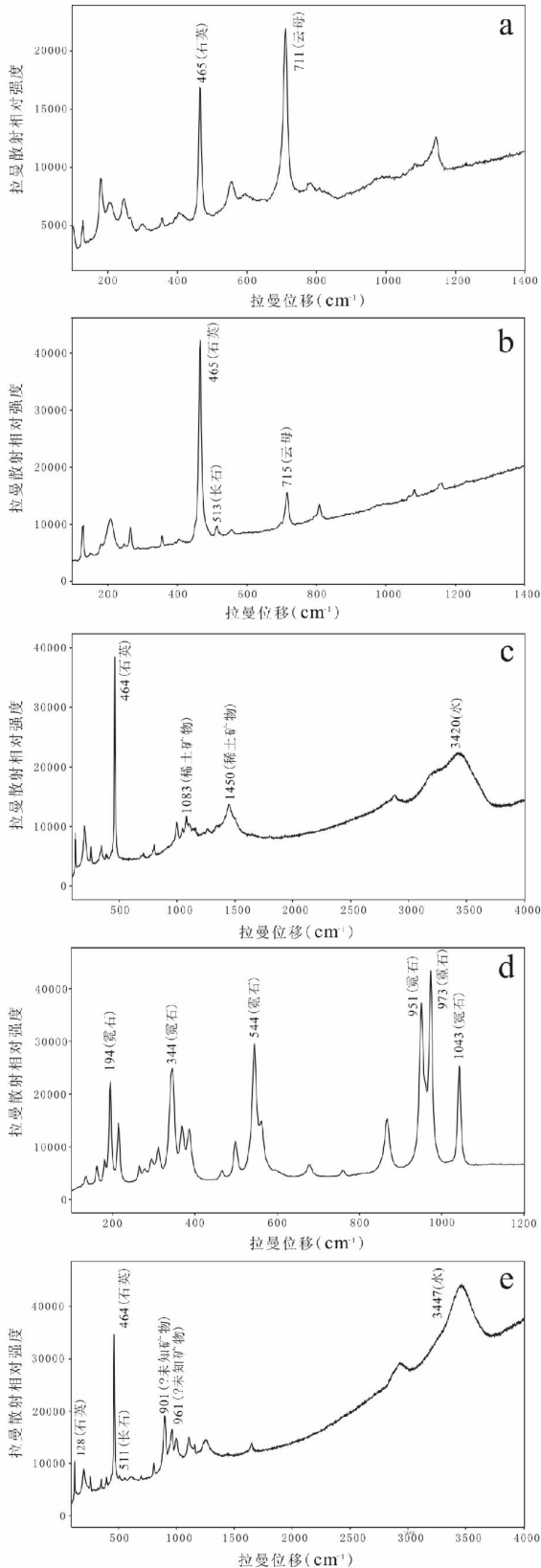


图3 巴尔哲矿床富晶体的流体包裹体晶体矿物的激光拉曼谱图

Fig. 3 Laser Raman spectra of the minerals in crystal-rich fluid inclusions in Baerzhe deposit

较复杂:有的为立方体的无色透明均质矿物,其含量一般不超过 15vol%,可能是盐类矿物,但并不是所有的都含有盐类晶体矿物,这在一定程度上说明该类包裹体所捕获的流体在组成上有一定的差异;有的为晶型不明显的透明矿物,具有明显的干涉色,其含量最高可达 30vol%;还有一种结晶相为长柱状矿物,也具有明显的干涉色,其含量最高可达 50vol%;在该类包裹体中还存在着一种暗色矿物(图 2b),其含量在 10vol% 左右。需要指出的是,在伟晶岩块(壳)、晶洞的石英及矿化岩石的斑状石英中还存在着含氯化钠子晶的三相流体包裹体、气液两相流体包裹体和少量的熔融包裹体。

3.2 富晶体的流体包裹体的激光拉曼光谱特征

本文利用英国 Renishaw 公司生产的 RM-2000 型显微激光拉曼光谱仪对巴尔哲超矿床的进行了单个包裹体的激光拉曼光谱研究,旨在揭示该类包裹体的物质组成。激光光源为 514nm Ar 激光器,激光束斑大小 1 μ m,光谱分辨率 2 cm^{-1} 。

激光拉曼分析显示,的晶体矿物组成的确十分复杂,它不但含有长石(图 3b)、云母(图 3a、b)和其它硅酸盐矿物(图 3e),还含有碱性硅酸盐矿物霓石(图 3d)。同时,本文在该类包裹体发现了稀土碳酸盐矿物(图 3c),其激光拉曼光谱特征与白云鄂博矿床流体包裹体中稀土碳酸矿物的光谱特征相似(范宏瑞等,2003)。流体相则以水为主(图 3c、e),未发现 CO_2 、 CO 和 CH_4 等气体的激光拉曼特征峰。

3.3 富晶体的流体包裹体的显微测温结果

本文利用 LinkamTHMS600 冷台对巴尔哲矿床进行了初步的显微测温研究。在加热过程中的晶体矿物表现出两种变化形式:一类是盐类矿物,它们随着温度的升高逐渐溶解并最终消失,在降温过程该类晶体矿物又重新出现。测温结果显示,不同包裹体其盐类矿物消失的温度有一定的差别,但均落在 109 ~ 233 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,显示含盐类矿物的流体盐度也有一定的差别,这进一步说明该类包裹体所捕获的流体在组成(盐度)上确实存在着差异;另一类则是硅酸盐类矿物,它们随着温度的升高逐渐熔融,但始终作为一个物相存在,并不溶解到流体相中。测温结果显示,巴尔哲硅酸盐完全熔融的温度一般为 440 ~ 460 $^{\circ}\text{C}$ 及其以上(由于 LinkamTHMS600 的有效工作的温度上限为 550 $^{\circ}\text{C}$,而有些包裹体内硅酸盐矿物在 550 $^{\circ}\text{C}$ 以下没有完全熔融)。由于富晶体的流体包裹体内硅酸盐矿物为长石、云母、霓石,同时还可能出现石盐晶体,因此该类熔体应为富碱和挥发份的硅酸盐熔体,其固相线温度较低。

与一般的流体包裹体不同,在加热过程中的流体首先表现为气泡收缩,甚至消失,而后气泡又重新出现,最终的流体相均一成汽相。初步测温结果显示,气泡消失的温度范围为 295 ~ 390 $^{\circ}\text{C}$,气泡重新出现的温度范围为 420 ~ 505 $^{\circ}\text{C}$,流体相均一成汽相的温度范围为 510 ~ 530 $^{\circ}\text{C}$ 及其以上(因为有些

包裹体的流体相在 550 °C 以下没有完全均一)。在加热过程中,富晶体的流体包裹体气泡的变化与该类形成机制有关。富晶体流体的包裹体捕获的是超临界流体与硅酸盐熔体,随着温度的降低包裹体内的硅酸盐熔体结晶成长石、云母及霓石等硅酸盐矿物,低密度的超临界流体则冷凝成高密度的水溶液,并在包裹体内形成空腔,它主要由水蒸气充填,这就是常温条件下所观察到的气泡。富晶体的流体包裹体气泡的内压受常温下水饱和和蒸压的控制,较低。随着温度升高高密度的水溶液膨胀,使内压较低的气泡收缩,甚至消失;当温度继续升高时,部分水溶液转变超临界流体,使流体内又重新出现气泡,随温度升高逐渐增大超临界流体的比例逐渐增大,气泡也随之逐渐增大;当温度接近包裹体捕获温度时,水溶液转变为超临界流体,流体相均一成汽相。

4 讨论

4.1 富晶体的流体包裹体的成岩指示意义

伟晶岩和晶洞出现是岩浆体系进入到岩浆—热液过渡阶段的岩石学证据 (Bakker and Elburg, 2006)。巴尔哲超大型矿床含矿的钠长石碱性花岗岩内分布着数量众多的晶洞和伟晶岩岩块(壳),说明它的形成与岩浆—热液过渡阶段熔体有直接的成因联系。的发现从微观角度进一步证实巴尔哲含矿钠长石碱性花岗岩的形成与岩浆—热液过渡阶段有直接的成因联系。

袁忠信等(2003)研究显示,巴尔哲矿床的碱性花岗岩 $\delta^{18}\text{O}$ 具有明显的垂直分带性,在东岩体 297m 深以下 $\delta^{18}\text{O}$ 大于 -0.90‰ ,而在 129m 深以上 $\delta^{18}\text{O}$ 值则均小于 -3.02‰ ,他们初步认为这种现象可能是岩石与大气降水或地下水热液间氧同位素交换的产物。但是巴尔哲矿床(岩体)上部主要发育钠长石化和硅化,这种蚀变是典型自交代作用的产物(王一先和赵振华,1997),该岩体并不发育后期的次生蚀变(如粘土化等),后期大气降水及地下水热液与岩石反应的特征并不明显;同时,巴尔哲矿床(岩体)上部广泛发育晶洞和伟晶岩块(壳),这说明岩体在固结时体系是一个相对封闭系统,外部流体很难渗入。因此,大气降水及地下水热液与岩石反应导致巴尔哲矿床(岩体)上部明显亏损 ^{18}O 的可能性很小。富晶体的流体包裹体的广泛存在充分说明,在巴尔哲矿床(岩体)上部岩石固结时,岩浆体系内水流体已经达到过饱和程度,存在着单独的水流体。因此,本文作者认为,巴尔哲矿床(岩体)上部岩石明显亏损 ^{18}O 的机制与高流体/熔体比的流体-熔体作用有关。Jahn *et al.* (2001) 认为巴尔哲矿床碱性花岗岩 $\Delta^{18}\text{O}_{\text{石英-长石}}$ 显著大于岩浆结晶分离的同位素分馏值也是高温流体-熔体作用的结果。

4.2 富晶体的流体包裹体的成矿指示意义

王一先和赵振华(1997)研究发现,在巴尔哲矿床(岩体)稀土元素明显富集在上部的钠长石碱性花岗岩中,其中

东岩体 ZK002 钻孔 60m 深处钠长石碱性花岗岩稀土含量是 300m 处钠闪石花岗岩的 9 倍,他们初步认为上部岩石稀土元素含量的明显增加受钠长石化作用的制约。钠长石的稀土元素分配系数相对较小,很难理解巴尔哲岩体上部的稀土元素的超常富集是强钠长石化作用的产物。富晶体的流体包裹体的发现为揭示巴尔哲矿床(岩体)上部钠长石花岗岩稀土元素超常富集机制提供了新的思路。Audetat and Pettke (2003) 利用熔融和流体包裹体对美国新墨西哥两个花岗岩体的岩浆—热液演化过程进行了深入探讨。他们研究发现,当熔体的结晶度达到 30% 时,该岩浆体系内流体相已经达到饱和状态;当熔体结晶度达到 90% 时,该体系内流体已经达到过饱和状态,并分离出单独的流体相。这种流体饱和或过饱和的高演化岩浆往往堆积在岩浆房的顶部。他们的研究同时还显示,随着熔体的结晶和流体相的分离,稀有元素 Cs 在岩浆—热液过渡阶段熔体内得到超常富集。据此,有理由推测巴尔哲矿床(岩体)上部钠长石花岗岩中稀土元素的超常富集应当与岩浆体系进入岩浆—热液过渡阶段有关。稀土碳酸盐矿物在富晶体的流体包裹体中广泛地分布则充分证明,巴尔哲碱性花岗岩演化到岩浆—热液过渡阶段体系内的稀土元素已经达到足以形成独立稀土矿物的富集程度,也就是说,巴尔哲矿床稀土元素的矿化受岩浆—热液过渡阶段的制约。

5 结论

(1) 富晶体的流体包裹体的研究结果显示,巴尔哲矿床(岩体)上部钠长石碱性花岗岩应是流体(水)过饱和碱性花岗质岩浆(岩浆—热液过渡阶段熔体)固结的产物。巴尔哲矿床的碱性花岗岩 $\delta^{18}\text{O}$ 具有明显的垂直分带与岩浆—热液过渡阶段流体/熔体相互作用有关;

(2) 稀土碳酸盐矿物在富晶体的流体包裹体中广泛地分布则表明,碱性花岗岩演化到岩浆—热液过渡阶段体系内的稀土元素已经达到了超常富集程度,巴尔哲矿床稀土元素的矿化明显受岩浆—热液过渡阶段的制约。

致谢 在研究过程中得到王一先、赵振华、白正华及袁愉卓研究员的热心指导与帮助,在此一并表示感谢。

References

- Audetat A and Pettke T. 2003. The magmatic-hydrothermal evolution of two barren granites: A melt and fluid inclusion study of the Rito del Medio and Canada Pinabete plutons in northern New Mexico (USA). *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 67: 97–121
- Bakker RJ and Elburg MA. 2006. A magmatic-hydrothermal transition in Arkaroola (northern Flinders Ranges, South Australia): From diopside-titanite pegmatites to hematite-quartz growth. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 152: 541–569
- El Habaak GH. 2004. Pan-African skarn deposits related to banded iron

- formation, Um Nar area, central Eastern Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 38: 199 – 221
- Fan HR, Hu FF, Yang KF, *et al.* 2006. Fluid unmixing/immiscibility as an ore-forming process in the giant REE-Nb-Fe deposit, Inner Mongolian, China: Evidence from fluid inclusions. *Journal of Geochemical Exploration*, 89: 104 – 107
- Fan HR, Tao KJ, Xie YH, *et al.* 2003. Laser Raman spectroscopy of typical rare-earth fluoro-carbonate minerals in Bayan Obo REE-Fe-Nb deposit and identification of rare-earth daughter minerals hosted in fluid inclusions. *Acta Petrologica Sinica*, 19: 169 – 172 (in Chinese with English abstract)
- Fan HR, Xie YH, Wang KY, *et al.* 2004. Methane-rich fluid inclusions in skarn near the giant REE-Nb-Fe deposit at Bayan Obo, Northern China. *Ore Geology Reviews*, 25:301 – 309
- Frezzotti ML. 2001. Silicate-melt inclusions in magmatic rocks: Applications to petrology. *Lithos*, 55: 273 – 299
- Hack AC and Mavrogenes JA. 2006. A synthetic fluid inclusion study of copper solubility in hydrothermal brines from 525 to 725 °C and 0.3 to 1.7 GPa. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 70: 3970 – 3985
- Harris AC, Kamenetsky VS, White NC, *et al.* 2003. Melt inclusions in veins: Linking magmas and porphyry Cu deposits. *Science*, 302: 2109 – 2111
- Heinrich CA. 2005. The physical and chemical evolution of low-salinity magmatic fluids at the porphyry to epithermal transition: A thermodynamic study. *Mineralium Deposita*, 39: 864 – 889
- Heinrich CA, Driesner T, Stefansson A, *et al.* 2004. Magmatic vapor contraction and the transport of gold from the porphyry environment to epithermal ore deposits. *Geology*, 32: 761 – 764
- Heinrich CA, Pettke T, Halter WE, *et al.* 2003. Quantitative multi-element analysis of minerals, fluid and melt inclusions by laser-ablation inductively-coupled-plasma mass-spectrometry. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 67: 3473 – 3497
- Heinrich CA, Ryan CG, Mernagh TP, *et al.* 1992. Segregation of ore metal between magmatic brine and vapor - A fluid inclusion study using PIXE microanalysis. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 87:1566 – 1583
- Kamenetsky VS, Naumov VB, Davidson P, *et al.* 2004. Immiscibility between silicate magmas and aqueous fluids: A melt inclusion pursuit into the magmatic-hydrothermal transition in the Omsukchan Granite (NE Russia). *Chemical Geology*, 210: 73 – 90
- Kamenetsky VS, van Acherbergh E, Ryan CG, *et al.* 2002. Extreme chemical heterogeneity of granite-derived hydrothermal fluids: An example from inclusions in a single crystal of mirolitic quartz. *Geology*, 30: 459 – 462
- Jahn BM, Wu FY, Capdevila R, *et al.* 2001. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: The Woduhe and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China. *Lithos*, 59: 171 – 198
- Ni P, Ding JY and Rao B. 2006. In situ cryogenic Raman spectroscopic studies on the synthetic fluid inclusions in the systems H₂O and NaCl-H₂O. *Chinese Science Bulletin*, 51: 108 – 114
- Ni P, Rao B, Ding JY, *et al.* 2003. Studies on the synthetic fluid inclusions and their application to laser Raman spectrum analysis field. *Acta Petrologica Sinica*, 19: 319 – 326 (in Chinese with English abstract)
- Ni P and Wang YG. 2007. Experimental study on synthetic oil (hydrocarbon)-bearing inclusions. *Acta Petrologica Sinica*, 23: 2033 – 2038 (in Chinese with English abstract)
- Redmond PB, Einaudi MT, Inan, EE, *et al.* 2004. Copper deposition by fluid cooling in intrusion-centered systems: New insights from the Bingham porphyry ore deposit, Utah. *Geology*, 32: 217 – 220
- Wang YX and Zhao ZH. 1997. Geochemistry and origin of the Baerzhe REE-Nb-Be-Zr superlarge deposit. *Geochimica*, 26: 24 – 35 (in Chinese with English abstract)
- Xie YH, Wang YG and Zhang RF. 1996. A discovery of REE minerals in fluid inclusions in the Bayan Obo REE-Fe-Nb ore deposit. *Chinese Science Bulletin*, 41:401 – 404
- Xu JH, Xie YL, Li JP, *et al.* 2001. Discovery of Sr-bearing and LREE daughter minerals in fluid inclusions of Maoniuping REE deposit, Sichuan Province. *Progress in Natural Science*, 11: 833 – 837 (in Chinese with English abstract)
- Zhang LC and Ji JS. 2000. Geochemical characteristics and source of two-type ore-forming fluids in Kanggultage gold ore belt, east Tianshan. *Acta Petrologica Sinica*, 16: 535 – 541 (in Chinese with English abstract)
- Yuan ZX, Zhang M and Wan DF. 2003. A discussion on the perogenesis of ¹⁸O-low alkali garnet-A case study of Baerzhe alkali garnet in Inner Mongolia. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 22:119 – 124 (in Chinese with English abstract)

附中文参考文献

- 范宏瑞, 陶克捷, 谢奕汉等. 2003. 白云鄂博 REE-Fe-Nb 矿床氟碳酸盐矿物激光拉曼光谱特征及流体包裹体内稀土子矿的鉴定. *岩石学报*, 19:169 – 172
- 倪培, 饶冰, 丁俊英等. 2003. 人工合成包裹体的实验研究及其在激光拉曼探针测定方面的应用. *岩石学报*, 19:319 – 326
- 倪培和王一刚. 2007. 人工合成烃类包裹体的灾难研究. *岩石学报*, 23:2033 – 2038
- 王一先和赵振华. 1997. 巴尔哲超大型稀土铈铍矿床地球化学和成因. *地球化学*, 26: 24 – 35
- 张连昌和姬金生. 2000. 东天山康古尔塔格金矿带两类的成矿流体地球化学特征及流体来源. *岩石学报*, 16:535 – 541
- 袁忠信, 张敏, 万德芳. 2003. 低¹⁸O 碱性花岗岩成因讨论——以内蒙巴尔哲碱性花岗岩为例. *岩石矿物学杂志*, 22: 119 – 124