

# 新疆阿尔泰可可托海 3 号伟晶岩脉绿柱石 流体包裹体 SRXRF 研究

林龙华<sup>1</sup>, 徐九华<sup>1</sup>, 魏浩<sup>1</sup>, 陈栋梁<sup>2</sup>, 徐伟<sup>2</sup>, 刘泽群<sup>1</sup>, 王燕海<sup>1</sup>

(1. 北京科技大学 土木与环境工程学院, 北京 100083; 2. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100049)

**摘要:** 尝试利用北京同步辐射装置(BSRF)实验条件所产生的 4W1B 束线同步辐射 X 射线荧光微探针, 对新疆可可托海 3 号伟晶岩绿柱石中的单个流体包裹体进行原位无损成分分析, 改进了实验中显微镜照明装置而获得较好的视觉观察效果, 使探测目标选取更加快速、准确, 测试结果更加可靠。测试及研究结果表明, 新疆可可托海 3 号伟晶岩脉绿柱石中多数流体具有较高的 Zn、Sn、As 以及 REE 元素含量, 反映了其内生岩浆作用特征及流体的壳源特点, 蛛网图显示微量元素含量特征与中国中东部地壳相似, 进一步提示流体可能源自地壳。但由于测试中束斑面积较大(50  $\mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ ), 影响了测试精度, 今后可通过缩小光斑、提高射线能量及能量分辨率来进一步提高测试精度及可靠性。

**关键词:** SRXRF; 伟晶岩; 包裹体; 可可托海; 阿尔泰

中图分类号: P578.953:O657

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2012)04-0603-09

## SRXRF study of fluid inclusions in Beryl from the Kektokay No.3 pegmatite vein, Altay, Xinjiang

LIN Long-hua<sup>1</sup>, XU Jiu-hua<sup>1</sup>, WEI Hao<sup>1</sup>, CHEN Dong-liang<sup>2</sup>, XU Wei<sup>2</sup>,  
LIU Ze-qun<sup>1</sup> and WANG Yan-hai<sup>1</sup>

(1. School of Civil and Environment Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. Institute of High Energy Physics of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** This paper made a tentative in-situ nondestructive study of components of single fluid inclusions from No.3 granitic pegmatite vein in Altay of Xinjiang by SRXRF which was generated by beamline 4W1B of Beijing Synchrotron Radiation Facility (BSRF). The authors have improved micro-vidio lightning facility by which better, faster and more precise visual effects could be obtained, and the test results are more reliable. Studies show that most fluid inclusions of No. 3 granitic pegmatite vein have relatively high concentrations of Zn, Sn, As and REE which may be the characteristics of endogenous magmatism and crustal source. Spider diagram shows the similarity between Kektokay No. 3 granitic pegmatite vein and the crust in middle and east China in the concentration style of trace elements, suggesting that the source of the fluid might have been derived from the crust. The relatively large X-ray spot (50  $\mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$ ) might have affected the accuracy of the test, but it can be avoided and the test accuracy can be improved by shrinking the light spot, raising the energy of the beam and enhancing energy resolution of the facility.

**Key words:** SRXRF; pegmatite; fluid inclusion; Kektokay; Altay

同步辐射 X 射线荧光微区分析技术( $\mu$ -SRXRF)具有检测限低、光源强度高、能谱连续、单色性和准确性好以及偏振度强的特点,其检测限可低至  $10^{-6}$  甚至  $10^{-9}$  量级,作为一种无损检测技术,这种方法可广泛应用于地质学、环境科学、生物学等领域,曾被国际著名流体包裹体专家 Roedder 称为具有重要应用前景的单个流体包裹体微量元素测试方法之一(Roedder, 1984)。近年来,国内外学者对 SRXRF 技术的应用研究开展了大量的探索,在熔体包裹体、油气包裹体研究等方面都取得了一些进展(Vanko and Mavrogenes, 1998; 邬春学等, 2002; 杨春等, 2002; Koepke *et al.*, 2003; Nagaseki *et al.*, 2006; Cauzid *et al.*, 2006; 李建康等, 2008; Cherniak *et al.*, 2010),并有学者利用同步辐射光源做出了单个流体包裹体中微量元素的 2D 分布型式(Philippot *et al.*, 2000, 2001)。在金属矿床研究方面,国内也有学者开展了一些应用研究(李建康等, 2008; 连玉等, 2008)。国外学者还将这一方法与其他测试手段,如二次离子质谱(SIMS)进行了对比,对其优势及局限性进行了有益的探索和概括(Hahn *et al.*, 2005)。

新疆可可托海 3 号伟晶岩是著名的稀有金属矿床,前人开展了大量流体包裹体研究,但尚未有单个包裹体的重金属微量元素研究报道。本文利用北京同步辐射装置(BSRF)产生的 4W1B 束线,尝试对可可托海 3 号伟晶岩绿柱石中的单个流体包裹体进行微量元素组成的同步辐射 X 射线荧光(SRXRF)微束分析,以期为成矿流体性质的研究做一些探索性工作。

## 1 矿床地质特征

可可托海 3 号伟晶岩脉位于新疆富蕴县可可托海镇境内,距富蕴县城东北约 50 km,是世界级大型稀有金属伟晶岩矿床,早在上世纪 30 年代就已被发现,但直到 1953 年才开始了大规模的勘查开发,多年来,该矿出产了大量稀有金属矿产,为我国经济建设做出了巨大贡献。该矿脉以丰富的矿物种类[迄今为止已发现含变种矿物在内的 76 种矿物(许国礼, 2010)]、独特的形态特征以及近乎完美的带状构造而蜚声海内外,引起众多地质研究者的广泛兴趣。

矿床所处大地构造位置为阿尔泰造山带中部(Zhu *et al.*, 2006),区域内主要出露有高级变质

岩、大量花岗岩以及少量新元古代到志留系变质沉积岩(图 1)。矿区出露地层有中上奥陶统哈巴河群( $O_{2-3}hb$ ),主要分布于矿床西部和南部,约占矿区出露总面积的 20%,主要岩性有含十字石黑云母-斜长石-石英片岩,含红柱石黑云母-石英片岩及石英-黑云母片岩;另有中泥盆统阿勒泰组( $D_{2a}$ ),主要岩性有砂岩、大理岩及火山碎屑岩等,主要出露于矿区北部和西南部,矿区北部尚出露石炭系火山沉积岩和砂岩。

区内岩浆岩主要由未经变形变质作用的黑云母花岗岩加少量二云母花岗岩组成(Windley *et al.*, 2002),另有少量小型花岗岩侵入体及基性侵入岩发育;可可托海含稀有金属伟晶岩脉不仅产于海西期花岗岩中,在变质岩中(如晚奥陶世变质岩和加里东晚期变辉长岩中)也有产出。

矿区内构造以断裂构造和褶皱构造为主,有 3 条近北西向断裂构造发育,对矿体并未造成严重破坏。

可可托海 3 号伟晶岩脉的空间形态总体呈实心的草帽形,主要由位于上部的陡倾斜椭圆柱状岩钟和位于下部的缓倾斜板状床两部分组成,垂直延深大于 250 m,形态较为复杂。矿床具有清晰的分带特征,前人(王贤觉等, 1981; 朱金初等, 2000)将岩体归纳为 9 个共生结构带,由内向外依次分别是: I 文象-变文象伟晶岩带; II 糖粒状钠长石带; III 块体微斜长石带; IV 白云母-石英带; V 叶钠长石-锂辉石带; VI 石英-锂辉石带; VII 白云母-薄片钠长石带; VIII 锂云母-薄片钠长石带; IX 石英和微斜长石核。

## 2 包裹体特征

本次测试的包裹体均产于绿柱石中。绿柱石呈浅黄绿色,具六方短柱状。镜下岩相学研究显示,绿柱石中包裹体以气液两相(L-V)包裹体为主,其形态一般较规则,多为椭圆形、负晶形或长柱状,也有富  $CO_2$  三相包裹体。包裹体大小一般在  $5 \sim 50 \mu m$ ,个别大于  $100 \mu m$ ,包裹体分布形式有孤立存在或成群呈带状沿晶体生长带分布,形状一般多为近椭圆形,另有少量含子矿物的 L-V-S 型包裹体。本文分别选择了上述两种不同形态的包裹体进行了测试。

## 3 实验装置及测试过程

本文测试工作在北京同步辐射装置(BSRF)的

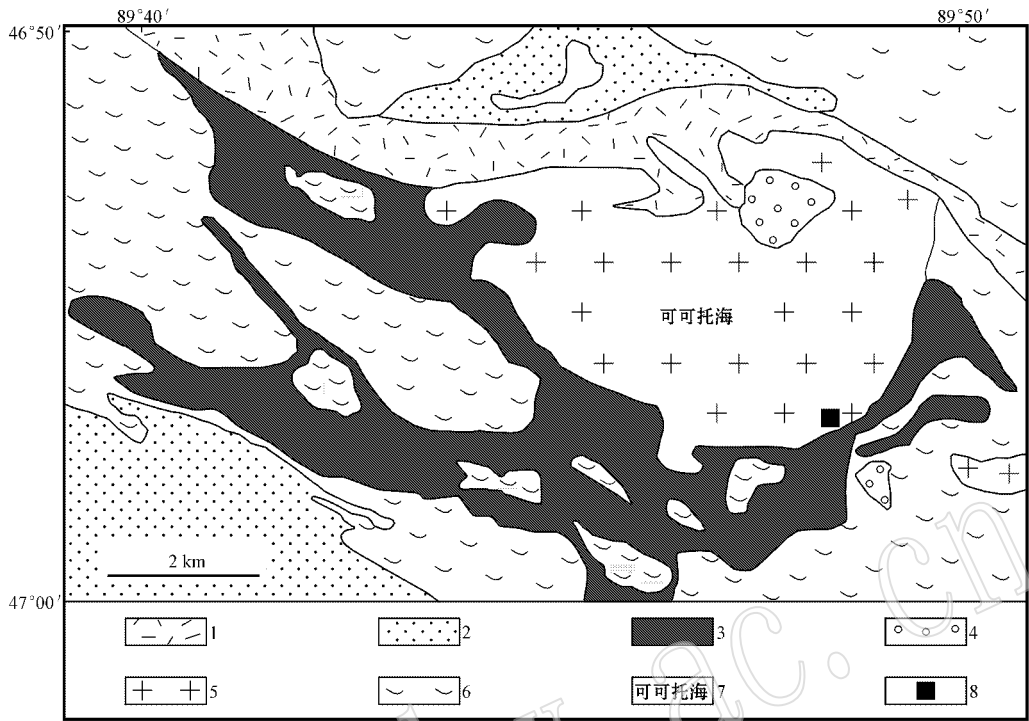


图1 可可托海花岗岩伟晶岩区域地质略图(据 Zhu *et al.*, 2006 修绘)

Fig. 1 Sketch regional geological map of Kektokay granite-pegmatite area (modified after Zhu *et al.*, 2006)

1—石炭系火山沉积岩; 2—泥盆系砂岩、大理岩及火山碎屑岩; 3—奥陶系砂岩、页岩夹斜长角闪岩; 4—二云母花岗岩; 5—黑云母花岗岩; 6—片麻状花岗岩; 7—岩体名称; 8—采样位置

1—Carboniferous volcano-sedimentary rocks; 2—Devonian sandstone, limestone and pyroclastic rocks; 3—Ordovician sandstone and shale intercalated with amphibolites; 4—two-mica granite; 5—biotite granite; 6—gneissic granite; 7—name of pegmatite body; 8—sampling location

X射线荧光微分析实验站完成。BSRF 储存环电子束能量为 2.2 GeV, 束流强度为 60~120 mA, 利用其产生的同步辐射光引出的 4W1B 束线, 在准单色光聚焦模式下其能量范围在 8~15 keV, 经毛细管聚焦镜聚焦后, 在样品处光斑尺寸的理论值可达到 15  $\mu\text{m}$  (水平)  $\times$  10  $\mu\text{m}$  (垂直)。入射 X 光与样品平面呈 45° 夹角, 所使用 Si(Li) 探测器与样品表面夹角亦为 45°, 即与入射光呈 90° 夹角, 探测器工作距离根据实验条件, 主要依据入射光强度而作适当调整, 以测试采谱时的死时间 (dead time) 控制在 35% 以下为宜, 这样可以保证取得较好的数据采集效果。

由于 BSRF 的 X 射线荧光站并非专为流体包裹体测试实验而设计, 其光学系统不能完全满足流体包裹体观测及测试的要求, 如果仅使用该实验站所配备的通用光学光路, 势必难以取得令人满意的效果。为解决该问题, 笔者对原有照明光路进行了适当调整: 于待测样品后方安装近似平行光源, 并在光路上加装长焦锥光镜结合滤光镜的方法, 将低色温

类白炽灯光转变为高色温近似白光的锥形透射光, 观测时关闭显微摄像头自带的入射照明光源, 使测试时辨识流体包裹体及目标定位更加清晰、快捷, 对包裹体的观察更方便和准确, 提高了实验数据的可靠性, 实验装置如图 2。图中探测器为 Si(Li) 探测器, 在 5.9 keV 处的能量分辨率为 133 eV, 其铍窗厚度 7.5  $\mu\text{m}$ , 显微摄像头放大倍率为 450 倍。

实验测试所用绿柱石薄片磨制方法与普通包裹体片相同, 厚度一般控制在 200  $\mu\text{m}$  左右, 两面抛光, 在显微镜下确定待测包裹体位置后, 以细记号笔圈定其所在位置, 用丙酮浸泡溶解薄片树脂, 待薄片与载玻片分离后再用乙醇或丙酮进一步清洗绿柱石薄片, 清洗完毕待薄片表面干燥后将其固定于装有 Mylar 膜的空白幻灯片上待测。

测试开始前需校准入射 X 射线中心位置, 采用通过 X 射线照射荧光纸所产生光斑位置的方法进行校准, 此过程由荧光实验站管理工作人员完成, 不再赘述。

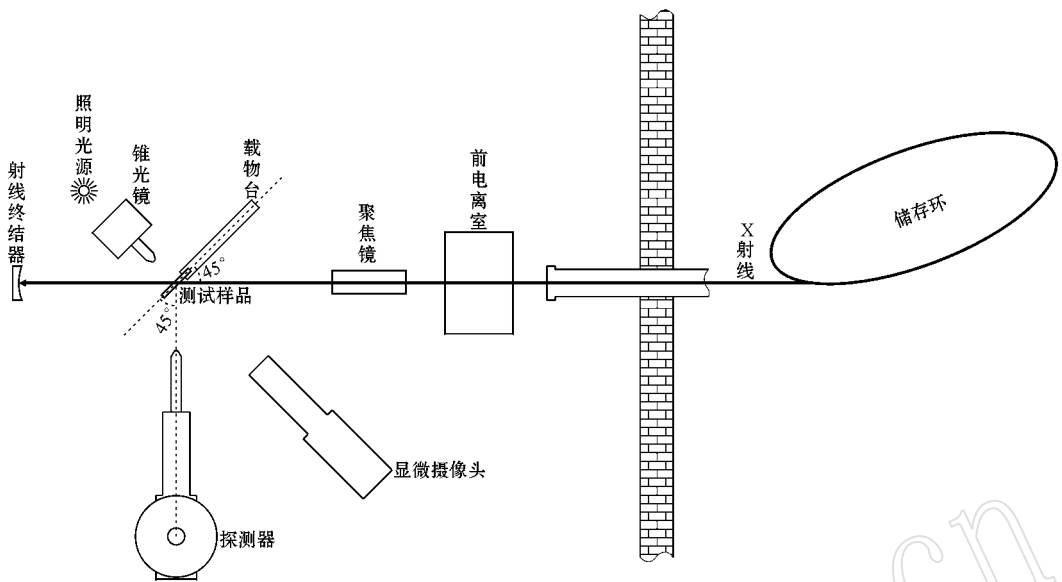


图 2 4W1B 束线  $\mu$ -SRXRF 荧光实验站装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the  $\mu$ -SRXRF microprobe at beamline 4W1B

为获得较好的观察效果,尽可能使照明光源透过锥光镜后照射到薄片上的位置与显微摄像机的焦点重合,对准方法是:首先打开显微摄像机自身照明光源,观察其投射到样片上产生光斑位置,然后调整锥光镜及其后方照明光源位置(图2),仔细调整锥光镜状态使其所产生透射光光斑中心与显微摄像机入射光斑中心重合,此时即可达到最佳对准效果。实际测试时,关闭显微摄像机自身光源,避免光线照射到样片表面产生反射光而影响包裹体观察。

## 4 测试结果及讨论

本次研究对新疆可可托海3号伟晶岩绿柱石样品中的8个流体包裹体(图3)进行了X射线荧光微探针分析,图3中的流体包裹体照片系由实际测试时显微摄像头实时获得。

测试数据处理采用欧洲同步辐射装置(ESRF)软件组开发的免费软件PyMca进行,该软件较国际原子能机构(IAEA)提供的免费软件WinQxas具有更为美观和直观的图形用户界面以及更加完善的数据输出模块等,并且能够批量处理大量测试数据,其自动化程度较高。软件的使用方法依据ESRF提供的帮助文档,首先选择两个已知元素进行能量标定,标定完成后,在软件中添加所需元素并选择合适的优化方法进行拟合。计算净峰面积时,依据BSRF所产生光子能量范围(8~15 keV),对于原子序数小

于40的元素,采用元素拟合结果中的 $K_{\alpha}$ 线净峰面积计数作为计算依据,而对于原子序数大于40的元素,则取其 $L_{\alpha}$ 线,即 $L_3M_5$ 谱线拟合面积计数;将所得流体包裹体样品及绿柱石本底的净峰面积经与标样归一化后得到的元素含量数据,扣除绿柱石本底类似步骤所得元素数据,便可得到包裹体中流体微量元素含量。其中绿柱石本底系在所测试包裹体片上选择一个不含流体包裹体的区域进行荧光测试而得到的结果。

标样选择美国国家标准局(NIST)所提供的用于痕量元素测定的标准物质(NIST SRM 612),该标准物质为一厚约3 mm,直径约10 mm的玻璃圆片,其中所含61种元素标称值为 $50 \times 10^{-6}$ ,而其实际含量则由NIST颁布的标准物质说明书(Certificate of analysis Standard Reference Materials)加以补充说明,本文在计算样品元素含量时采用说明书中的相应标量元素含量值。

通过PyMca软件对所测数据进行处理后即可得到一组包裹体及绿柱石本底的相应谱图,图4列出了软件自动生成的8个包裹体SRXRF谱图,从图4可以看出,本次研究拟合效果尚属理想。需要说明的是,图中的谱图系由PyMca软件自动生成,由于谱峰可能存在重叠乃至相互覆盖的现象(Hahn *et al.*, 2005),造成谱峰与元素间并不存在完全的一一对应关系,因而图4的谱图中并未标出元素名称,而是在拟合结果表中予以列出。

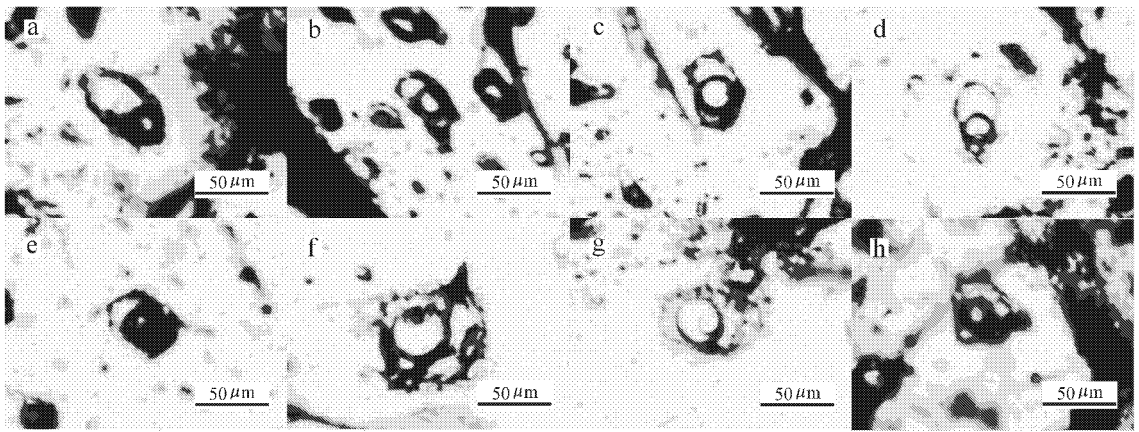


图 3 SRXRF 实测流体包裹体显微照片

Fig. 3 Microphotograph of fluid inclusions for SRXRF testing

a—椭圆形 L-V 型包裹体, KKTH02 ; b—椭圆形 L-V 型包裹体, KKTH03 ; c—略显负晶形 L-V 型包裹体, KKTH04 ; d—近椭圆形 L-V 型包裹体, KKTH05 ; e—负晶形 L-V 包裹体, KKTH06 ; f—不规则形 L-V-S 型包裹体, KKTH07 ; g—负晶形 L-V-S 包裹体, KKTH08 ; h—不规则形 L-V-S 型包裹体, KKTH09

a—elliptical L-V type FI, KKTH02 ; b—elliptical L-V type FI, KKTH03 ; c—slightly negative crystal like L-V type FI, KKTH04 ; d—nearly elliptical L-V type FI, KKTH05 ; e—negative crystal L-V type FI, KKTH06 ; f—irregular L-V type FI, KKTH07 ; g—negative crystal L-V-S type FI, KKTH08 ; h—irregular L-V-S type FI, KKTH09

最后, 利用 PyMca 软件分别计算流体包裹体以及本底中的相关元素含量, 并将扣除绿柱石本底元素含量作为本次研究流体中的元素含量值, 最后对所得各元素进行吸收校正, 校正过程采用 Philippot 等 (1998) 提出的校正方法及流程, 其基本方法是采用流体包裹体宿主矿物 (绿柱石) 密度值、质量吸收系数以及实验时测得的元素特征谱线比值 ( $K_{\alpha}/K_{\beta}$ ) 求得 X 射线穿过样品的厚度, 可避免普通光学测量方法吸收校正的误差及测试样品重定位的问题 (Philippot *et al.*, 1998)。表 1 列出了最终得到的可可托海绿柱石流体包裹体中元素含量。

前文已述及, 本次研究分别对绿柱石中的 L-V 型及 L-V-S 型流体包裹体进行了测试, 由表 1 可看出, 多数流体中的 Zn、Ga 等元素含量相对较高, 这与李建康等 (2008) 对川西伟晶岩型矿床中流体包裹体 SRXRF 的分析结果有相似之处, 作者认为以上元素的高值是内生岩浆矿床的指征之一 (李建康等, 2008), 因此, 本文测试结果可能也暗示新疆可可托海 3 号伟晶岩脉流体的内生岩浆来源; 同时还可看出, 可可托海伟晶岩脉具有相当高的 REE、Sn、As 元素含量, REE、Sn 高值可能指示流体来源可能为壳源, 而流体中 As 元素的相对高值则提示了相对强氧化环境的存在; 流体中 Tl 含量较高, 而 K 元素含量则较低, 由于 Tl 元素倾向于类质同像替换进入钾长

石中, 而流体中较低的 K 含量说明流体出溶时的岩浆未晶出大量钾长石, Tl 元素只能大量进入残余流体中, 这也与本次测试绿柱石样品采集于伟晶岩外带位置, 其矿物组合中大量斜长石、石英等的出现相呼应, 据此可推测, 绿柱石中的流体可能源自早期岩浆出溶热液, 其特征应与岩浆熔体有一定的继承性, 因而, 本文按照元素相容性逐渐增强的顺序作图后得到如图 5 的蛛网图。由图 5 可以看出, 元素蛛网图型式具有与 Gao 等 (1998) 的中国中东部大陆地壳平均组成有着较为相似的特征。冷成彪等 (2007) 通过对 3 号伟晶岩脉中流体包裹体氢、氧同位素的研究, 认为流体来源应为岩浆分异, 并通过 Sr、Pb 同位素研究, 推断 3 号伟晶岩脉可能由造山带上地壳物质重熔、岩浆分异过程 (冷成彪等, 2007) 形成。邹天人等 (1986) 的 Sr 同位素研究表明 3 号伟晶岩脉的行程主要与壳源物质重熔岩浆分异作用有关, 同时其 Pb 同位素研究也说明存在上地壳物质的混染 (邹天人等, 1986)。因此, 基于前人的研究成果, 结合本次研究, 推测流体可能主要源自地壳物质, 与 S 型花岗岩的形成有关。

本次研究属探索性研究。由于实验可受到诸多条件, 如同步辐射装置运行状态、X 射线光斑大小、流体包裹体大小以及本底测试区域选择等影响, 例如北京同步辐射装置的 4W1B 束线样品处光斑尺

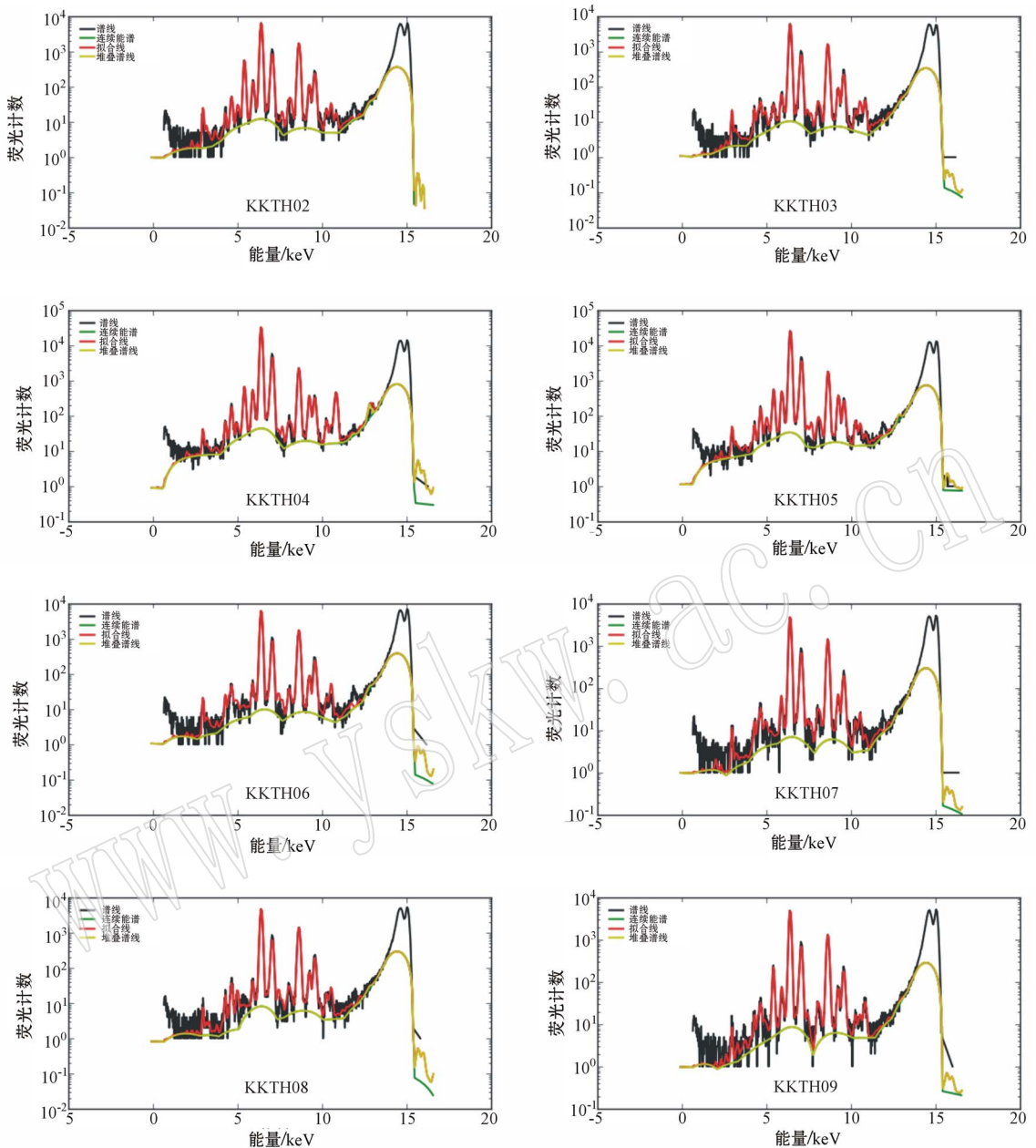


图 4 可可托海绿柱石包裹体 SRXRF 拟合谱图

Fig. 4 SRXRF fitting map of fluid inclusions from Kektokay

寸理论值为  $15 \mu\text{m}(\text{H}) \times 10 \mu\text{m}(\text{V})$ , 而本次测试时实际光斑为  $50 \mu\text{m}(\text{H}) \times 50 \mu\text{m}(\text{V})$ , 这样可能会造成测试目标包裹体周边物质乃至极微小包裹体所含元素谱峰的带入, 因而空间分辨率的不足对数据可靠性造成了不利影响; 另外, 本次研究选用了  $50 \times 10^{-6}$  标样来标定包裹体元素含量, 而相对标样含量相差很大的元素的计算结果也会引入较大不确定性, 今后测试应当选择不同含量标样进行尝试, 如选择  $500 \times 10^{-6}$  或  $5 \times 10^{-6}$  的 NIST 标准玻璃; 除上

述因素外, 拟合过程中的拟合区间选取及有关优化参数的选择尚需进一步探索。

北京同步辐射装置 X 射线荧光站的聚焦能量范围最高可达 15 keV, 因而对于元素周期表中大于 40 号的元素, 即 Zr 以后较重元素, 其特征谱线—— $K_{\alpha}$  线无法被激发, 只能通过相应元素的  $L_{\alpha}$  线来进行判断及拟合计算, 当实验装置能量分辨率较低时 (4W1B 试验站为  $< 7 \times 10^{-2}$ ), 则有可能造成有关元素  $L_{\alpha}$  线与  $K_{\alpha}$  的相互重叠, 不仅难以区分和拟合计

表 1 可可托海绿柱石流体包裹体元素含量表

 $w_B/10^{-6}$ 

Table 1 Concentrations of elements in fluid inclusions in beryl from Kektokay

元素	KKTH02	KKTH03	KKTH04	KKTH05	KKTH06	KKTH07	KKTH08	KKTH09
K	0.00	0.00	40.79	733.64	135.97	0.00	62.44	41.19
Sc	7.57	2.72	3.73	67.13	3.92	3.17	2.60	7.87
Ti	0.00	0.00	228.10	100.78	93.46	0.00	0.00	0.00
V	0.00	0.00	614.01	784.12	4.50	19.18	111.27	0.00
Cr	1 120.06	0.00	11 238.34	7 353.84	54.48	4.47	13.68	2 781.67
Mn	0.00	0.00	1 071.40	1 196.73	16.12	44.36	5.67	22.18
Fe	0.00	0.00	54 641.72	39 438.08	1 951.87	412.48	241.12	341.83
Co	0.00	0.00	285.52	278.08	17.66	0.00	1.41	0.00
Ni	0.00	1.55	3.12	12.56	1.02	0.00	1.48	0.00
Cu	2.87	0.56	35.05	43.06	3.54	1.01	0.29	1.40
Zn	334.59	289.89	1 441.15	935.36	170.16	41.88	35.09	0.00
Ga	0.00	0.00	246.62	234.08	8.35	1.28	3.39	0.64
Ge	0.94	0.14	2.08	3.23	0.10	0.37	1.14	0.22
As	6.03	6.16	21.24	20.94	10.09	5.93	5.71	2.60
Se	0.00	0.59	1.92	2.39	0.00	0.00	0.61	0.00
Sn	1 357.57	1 200.67	3 875.42	4 055.49	2 002.53	1 112.12	1 262.62	504.65
Sb	0.00	0.00	13.68	3.05	0.00	0.00	0.00	0.00
Ba	0.00	98.51	54.17	18.86	9.32	0.00	0.00	0.00
Ce	0.00	16.11	0.00	181.98	1.34	0.00	0.00	0.00
Pr	241.71	0.00	355.03	2 214.81	0.00	31.42	169.76	0.00
Sm	0.00	0.00	6 055.68	5 356.17	1 793.86	0.00	568.31	150.85
Gd	0.00	0.00	0 298.75	5 519.18	409.76	0.00	0.00	0.00
Tb	0.00	0.00	1 145.69	1 702.31	247.86	0.00	79.08	66.37
Dy	11.50	30.19	0.00	450.30	35.67	13.48	0.00	0.00
Ho	0.00	0.00	1 833.61	1 192.52	76.85	70.67	103.43	31.72
Tm	0.00	0.00	608.74	452.63	25.86	34.66	4.96	24.78
Yb	0.00	10.07	180.34	308.08	37.42	0.00	32.72	0.00
Lu	4.58	0.00	32.21	4.50	0.00	11.02	0.24	0.00
Hf	0.00	0.08	0.00	12.53	0.00	0.00	2.24	0.00
Ta	8.37	0.00	4.73	45.08	0.00	2.35	0.00	0.00
W	1.47	0.00	0.00	6.51	7.43	3.09	0.00	0.00
Tl	0.00	0.00	6.42	5.98	1.24	0.81	1.26	0.25
Pb	1.02	2.24	1.45	4.56	3.20	0.00	0.85	0.00

算,还可能造成拟合过程中的相互混淆,即软件将能量极为相近的元素特征谱线重复拟合计算,从而引起部分元素的拟合结果发生异常,通常是造成含量值奇高。另外,这一问题还给吸收校正带来了一定的困难,本文对于 40 号以后的元素采用 L 线代替 K 线进行校正,其可靠性尚需进一步研究。Hahn 等(2005)曾提出了这一问题,并指出对于测定大量元素组合含量的过程,仅凭一种测试方法难以全部准确测定(Hahn *et al.*, 2005)。对于上述问题,今后可通过选用具有高能量光源、更小光斑及更高能量分辨率的同步辐射光源来解决,目前国内已建成了具有更高能量的硬 X 射线及亚微米量级光斑的同步辐射光源。

## 5 结论

(1) 同步辐射 X 射线荧光微区分析作为一种无损分析手段,用来研究单个流体包裹体的微量元素特征等,相比其他测试手段具有独特的优势,从理论上来说可以测定其测试范围内的所有元素。但其影响因素相对复杂,目前国际地学界仍在探索,随着诸多理论和实际问题的逐步解决,可以预见,这一方法在流体包裹体研究中应用领域将有着广阔的应用前景。

(2) 研究表明,新疆可可托海 3 号伟晶岩脉绿柱石中多数流体具有较高的 Zn、Sn、As 以及 REE 元素



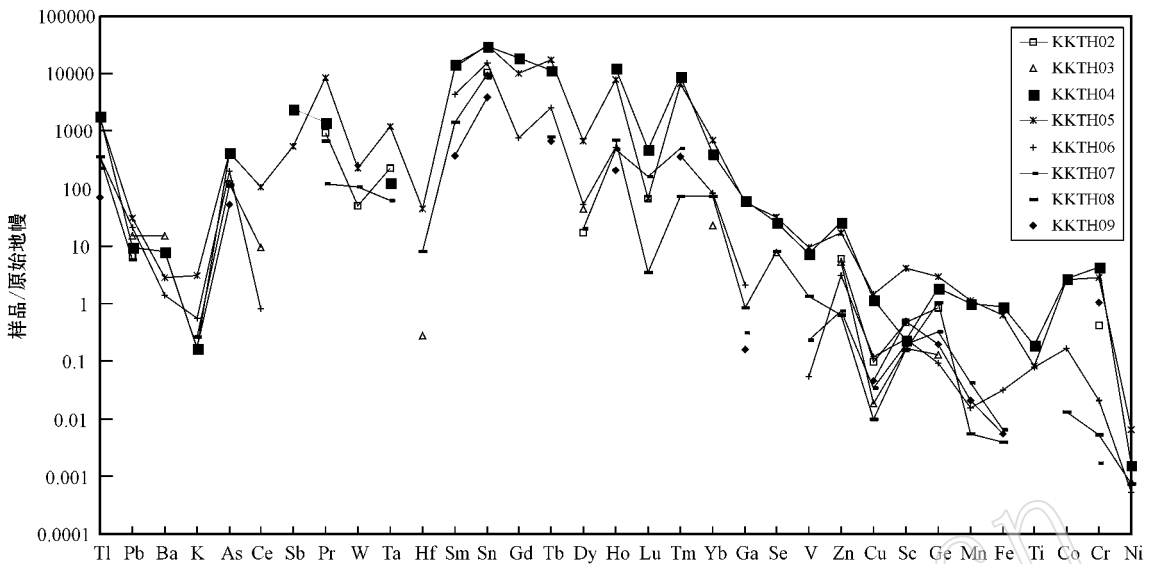


图 5 可可托海流体包裹体元素含量蛛网图 [原始地幔标准化值据 McDonough 和 Sun (1995)]

Fig. 5 Primitive mantle normalized spider diagram of element concentrations in fluid inclusions from Kektokay (primitive mantle normalized standard after McDonough and Sun, 1995)

含量,反映了其内生岩浆作用特征及流体的壳源特点,流体中微量元素含量经原始地幔标准化后的蛛网图特征显示,可能与中国中东部地壳相似,进一步提示流体的壳源特征。

致谢 本文野外工作得到了北京矿产地质研究院丁汝福教授级高级工程师、阴元军高级工程师以及卫晓锋等的大力协助,在此一并致谢!感谢审稿人对本文提出的宝贵意见和建议。

## References

Cauzid J, Philippot P, Somogyi A, *et al.* 2006. Standardless quantification of single fluid inclusions using synchrotron radiation induced X-ray fluorescence [J]. *Chemical Geology*, 227(3-4): 165-183.

Cherniak D J, Hervig R, Koepke J, *et al.* 2010. Analytical methods in diffusion studies [J]. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 72(1): 107-170.

Gao S, Luo T, Zhang B, *et al.* 1998. Chemical composition of the continental crust as revealed by studies in East China [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 62(11): 1959-1975.

Hahn M, Behrens H, Tegge-Schuring A, *et al.* 2005. Trace element diffusion in rhyolitic melts: comparison between synchrotron radiation X-ray fluorescence microanalysis ( $\mu$ -SRXRF) and secondary ion mass spectrometry (SIMS) [J]. *European Journal of Mineralogy*, 17(2): 233-242.

Koepke J, Falkenberg G, Rickers K, *et al.* 2003. Trace element diffu-

sion and element partitioning between garnet and andesite melt using synchrotron X-ray fluorescence microanalysis ( $\mu$ -SRXRF) [J]. *European Journal of Mineralogy*, 15(5): 883-892.

Leng Chengbiao, Wang Shouxu, Gou Tizhong, *et al.* 2007. A review of the research on the Kektokay No. 3 granitic pegmatite dyke, Altai, Xinjiang [J]. *Geology and Mineral Resources of South China*, (01): 14-20 (in Chinese with English abstract).

Li Jiankang, Wang Denghong, Liu Shanbao, *et al.* 2008. SRXRF Microprobe study of fluid inclusions for pegmatite deposits in western Sichuan province [J]. *Geotectonica et Metallogenia*, 32(3): 332-337 (in Chinese with English abstract).

Lian Yu, Xu Wenyi, Yang Dan, *et al.* 2008. SR-XRF studies of fluid inclusions from the Jiama and Nanmu deposits in the Gangdise copper-polymetallic metallogenic belt of Tibet [J]. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 27(3): 185-198 (in Chinese with English abstract).

McDonough W F and Sun S S. 1995. The composition of the Earth [J]. *Chemical Geology*, 120(3-4): 223-253.

Nagaseki H, Hayashi K and Iida A. 2006. Quantitative analysis of fluid inclusions by synchrotron X-ray fluorescence: calibration of Cu and Zn in synthetic quartz inclusion [J]. *European Journal of Mineralogy*, 18(3): 309-318.

Philippot P, Ménez B, Chevallier P, *et al.* 1998. Absorption correction procedures for quantitative analysis of fluid inclusions using synchrotron radiation X-ray fluorescence [J]. *Chemical Geology*, 144(1-2): 121-136.

Philippot P, Ménez B, Drakopoulos M, *et al.* 2001. Mapping trace-metal (Cu, Zn, As) distribution in a single fluid inclusion using a third generation synchrotron light source [J]. *Chemical Geology*, 173(1): 151-158.



- Philippot P, Ménez B, Simionovici A, *et al.* 2000. X-ray imaging of uranium in individual fluid inclusions[J]. *Terra Nova*, 12(2): 84~89.
- Roedder E. 1984. Fluid Inclusions[M]. *Mineralogical Society of America*, 12: 1~644.
- Vanko D A and Mavrogenes J A. 1998. Synchrotron source x-ray fluorescence microprobe: analysis of fluid inclusions(X00 ppm DL) [A]. McKibben M A, Shanks W C, Ridley & III, *et al.* Application of Microanalytical Techniques to Understanding Mineralizing Processes [C]. *Reviews in Economic Geology*, Society of Economic Geologists, 251~263.
- Wang Xianjue, Zou Tianren, Xu Jianguo, *et al.* 1981. Study of Minerals from Altai Pegmatite[M]. Beijing: Science Press, 1~140 (in Chinese).
- Windley B F, Kröer A, Guo J, *et al.* 2002. Neoproterozoic to Paleozoic geology of the Altai orogen, NW China: New zircon age data and tectonic evolution[J]. *The Journal of Geology*, 110(6): 719~737.
- Wu Chunxue, Huang Yuying, Yang Chun, *et al.* 2002. Nondestructive analysis of individual fluid inclusion based on SRXRF and its application in oil geology[J]. *Nuclear Technics*, 25(10): 793~798 (in Chinese with English abstract).
- Xu Guoli. 2010. Orebody characteristics of Kektokey No. 3 granitic pegmatite deposit and its rare metal metallogenic regularity[J]. *Xinjiang Nonferrous Metals*, (S2): 28~30 (in Chinese).
- Yang Chun, Huang Yuying, He Wei, *et al.* 2002. The progress of study of single fluid inclusion by synchrotron radiation X-ray fluorescence[J]. *Nuclear Technics*, 25(10): 864~868 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Jinchu, Wu Changnian, Liu Changshi, *et al.* 2000. Magmatic-hydrothermal evolution and genesis of Koktokay No.3 rare metal pegmatite dyke, Altai, China[J]. *Geological Journal of China Universities*, (01): 40~52 (in Chinese with English abstract).
- Zhu Y F, Zeng Y, Gu L. 2006. Geochemistry of the rare metal-bearing pegmatite No. 3 vein and related granites in the Keketuohai region, Altay Mountains, northwest China[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 27(1): 61~77.
- Zou Tianren, Zhang Xiangchen, Jia Fuyi, *et al.* 1986. The origin of No.3 pegmatite in Altayshan, Xinjiang[J]. *Mineral Deposits*, 5(4): 34~48 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 冷成彪, 王守旭, 苟体忠, 等. 2007. 新疆阿尔泰可可托海3号伟晶岩脉研究[J]. *华南地质与矿产*, (01): 14~20.
- 李建康, 王登红, 刘善宝, 等. 2008. 川西伟晶岩型矿床中流体包裹体的SRXRF分析[J]. *大地构造与成矿学*, 32(3): 332~337.
- 连玉, 徐文艺, 杨丹, 等. 2008. 西藏冈底斯甲马和南木矿床流体包裹体SR-XRF研究[J]. *岩石矿物学杂志*, 27(3): 185~198.
- 王贤觉, 邹天人, 徐建国, 等. 1981. 阿尔泰伟晶岩矿物研究[M]. 北京: 科学出版社, 1~140.
- 邬春学, 黄宇营, 杨春, 等. 2002. 基于SRXRF的单个流体包裹体无损分析及其在石油地质中的应用[J]. *核技术*, 25(10): 793~798.
- 许国礼. 2010. 可可托海花岗伟晶岩矿床3号矿脉矿体特征及稀有金属矿化规律[J]. *新疆有色金属*, (S2): 28~30.
- 杨春, 黄宇营, 何伟, 等. 2002. 同步辐射X射线荧光研究单个流体包裹体的进展[J]. *核技术*, 25(10): 864~868.
- 朱金初, 吴长年, 刘昌实, 等. 2000. 新疆阿尔泰可可托海3号伟晶岩脉岩浆-热液演化和成因[J]. *高校地质学报*, (01): 40~52.
- 邹天人, 张相宸, 贾富义, 等. 1986. 论阿尔泰3号伟晶岩脉的成因[J]. *矿床地质*, 5(4): 34~48.