

# 国内首次发现的束磷钙铀矿的矿物学特征

范光<sup>1</sup>, 于阿朋<sup>1</sup>, 葛祥坤<sup>1</sup>, 马立奎<sup>2</sup>, 王全涛<sup>2</sup>

(1. 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 2. 核工业290研究所, 广东 韶关 512026)

**摘要:** 国内首次发现的粤北下庄铀矿田竹筒尖矿床产出的束磷钙铀矿, 在空间上与微晶石英和变钙铀云母紧密共生。该矿物多为纤维状、束状和放射状集合体, 亮黄色, 玻璃光泽, 透明, 条痕为浅黄色, 摩氏硬度约为3; 其具有一组平行于{010}的完全解理及平行于{100}和{001}的两组解理, 贝壳状断口呈油脂光泽; 单偏光下, 该矿物为淡黄色; 正交偏光下, 具有鲜艳的高级干涉色。光性特征为对称消光, 二轴晶负光性, 正延性。电子探针分析显示, 矿物主要由U、P、Ca这3种元素组成, 其平均含量分别为 $UO_3$  68.64%、 $P_2O_5$  11.70%、CaO 9.21%和杂质0.28%, 另有 $H_2O$  9.25%, 总量99.26%。按 $O=16$ 计算的经验化学式可写为 $(Ca_{2.02}, K_{0.05}, Mg_{0.01})_{2.08}(UO_2, TiO_2, PbO)_{2.97}O_{1.97}(PO_4)_{2.03} \cdot 6.32 H_2O$ 。X射线粉晶衍射分析表明, 该矿物属于正交晶系, 空间群为 $Pbca$ , 晶胞参数:  $a = 1.7423(5)$  nm,  $b = 1.6032(4)$  nm,  $c = 1.3599(2)$  nm;  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ,  $V = 3.79864$  nm<sup>3</sup>, 强衍射线有7.994 Å和4.003 Å等。矿物的红外吸收光谱强峰主要为3427.10、1622.05、1062.62、973.26和890.91 cm<sup>-1</sup>等。上述特征与已知的束磷钙铀矿极其类似。

**关键词:** 束磷钙铀矿; 矿物特征; X-射线衍射; 电子探针成分; 红外光谱; 下庄铀矿田

中图分类号: P578.92

文献标识码: A

文章编号: 1000-6524(2014)01-0095-07

## Mineralogy of phurcalite discovered for the first time in China

FAN Guang<sup>1</sup>, YU A-peng<sup>1</sup>, GE Xiang-kun<sup>1</sup>, MA Li-kui<sup>2</sup> and WANG Quan-tao<sup>2</sup>

(1. Beijing Research Institute of Uranium Geology, CNNC, Beijing, 100029, China; 2. No. 290 Research Institute, Bureau of Geology, CNNC, Shaoguan 512026, China)

**Abstract:** Phurcalite found in the Zhutongjian deposit of the Xiazhuang uranium ore field in northern Guangdong Province is associated with microcrystal quartz and meta-autunite in space. The mineral occurs as fibrous, fascicular and radiating aggregates and is bright yellow and transparent with vitreous luster. Its streaks are light yellow in color. The Mohs' hardness is about 3. Phurcalite has a perfect cleavage on {010}, good cleavages on {100} and {001}, and greasy luster conchoidal fracture. Under plainlight, phurcalite is light yellow, and it assumes high order bright interference color under crossed nicols. Phurcalite is a symmetrical extinction, biaxial negative, and positive elongation mineral. The chemical composition of phurcalite (EPMA, average of 15 points) is  $UO_3$  68.64%,  $P_2O_5$  11.70%, CaO 9.21% and impurity 0.28%, with  $H_2O$  9.25%, totaling 99.26%. According to the data  $O = 16$ , the empirical formula should be  $(Ca_{2.02}, K_{0.05}, Mg_{0.01})_{2.08}(UO_2, TiO_2, PbO)_{2.97}O_{1.97}(PO_4)_{2.03} \cdot 6.32 H_2O$ . On the basis of the analyses of XRD, the system of phurcalite is orthorhombic, the space group is  $Pbca$ , and the unit cell parameters are  $a = 1.7423(5)$  nm,  $b = 1.6032(4)$  nm,  $c = 1.3599(2)$  nm;  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ , and  $V = 3.79864$  nm<sup>3</sup>. Furthermore, the maxima (in cm<sup>-1</sup>) of the

收稿日期: 2013-03-06; 修订日期: 2013-08-05

基金项目: 国防科技工业局技术基础项目(J012011A004)

作者简介: 范光(1966-), 男, 高级工程师(研究员级), 主要从事矿物学研究, E-mail: fanguang2008@163.com。

网络出版时间: 2013-11-19; 网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.1966.P.20131119.1053.001.html>

obtained infrared-absorption spectrum were observed: 3 427.10, 1 622.05, 1 062.62, 973.26 and 890.91. These features are very similar to those of the known phurcalite.

**Key words:** phurcalite; physical properties; XRD; EPMA; infrared-absorption spectrum; Xiazhuang uranium ore field

由 Deliens 和 Piret(1978)在德国发现的束磷钙铀矿(Phurcalite),得名于矿物的主要组分(即 P、U、Ca 组合,提供的晶体化学式为  $\text{Ca}_2(\text{UO}_2)_3(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (Deliens and Piret, 1978))。此前,巴西学者 Camargo 曾在该国圣保罗 Perus 电气石伟晶岩中发现过一种未名的铀磷酸盐矿物,认为其化学式为  $\text{Mg}_2(\text{UO}_2)(\text{PO}_4)(\text{OH})_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ (转引自 Fleischer, 1974)。这种未名矿物其实与后来发现的束磷钙铀矿同种(Deliens & Comblain, 1978)。之后,不同学者分别于扎伊尔(Deliens & Comblain, 1978)、美国加利福尼亚州 Kern(Pemberton, 1983; Braithwaite *et al.*, 1989)和 Riverside(Chew, 1982)以及英国(Braithwaite *et al.*, 1989)等地陆续发现了该矿物并进行了研究。直到上世纪 90 年代初,通过研究前述未名铀磷酸盐矿物同一产出地质体的束磷钙铀矿,才将该矿物的晶体结构进行了比较到位的剖析,并且将该矿物的理想晶体化学式厘定为  $\text{Ca}_2(\text{UO}_2)_3\text{O}_2(\text{PO}_4)_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (Antencio and Neumann, 1991),并得到学界认可(Jambor and Grew, 1992; Back & Mandarino, 2008)。前些年, Frost 等(2006)对产于德国、澳大利亚的 3 个束磷钙铀矿样品进行了详细拉曼光谱和红外光谱研究。Phurcalite 的中文名称主要是根据矿物的主要化学成分和常呈束状集合体的特点而译为束磷钙铀矿(新矿物及矿物命名委员会, 1984; 何明跃, 2007)。新近,笔者在我国粤北下庄铀矿田发现一种罕见的呈鲜艳黄色的次生铀矿物,系统的矿物学研究表明,该矿物应为国内首次发现的束磷钙铀矿。

## 1 地质背景

下庄铀矿田是我国南岭铀-多金属成矿带中主要的铀成矿区之一,也是我国花岗岩型富铀矿床的主要产地之一。在大地构造位置上,矿区处于华夏古陆西缘及闽赣后加里东隆起西南缘与湘、桂、粤北海西-印支拗陷的结合部。该区已查明或基本查明的 18 个矿床中,除新桥东和坪田为外带型热液铀矿床,其余均为花岗岩内带矿床。后者还可细分为硅

化带型、交点型、碱交代碎裂岩型和群脉型矿体(吴烈勤等, 2004)。

本文研究的束磷钙铀矿样品产出下庄铀矿田竹筒尖矿床。该矿床位于下庄铀矿田西部,在成因上隶属于碱交代碎裂岩型铀矿床。它的发现与勘察实现了碎裂岩型铀矿床的突破,在整个下庄矿田的勘查、开采中具有非常重要的意义。该矿床出露的岩石有中粒斑状黑云母花岗岩、中细粒二云母花岗岩、细粒白云母花岗岩和少量石英正长岩,矿化受蚀变碎裂带控制,位于北北东向龟尾山石英断裂带、大帽峰东西向复杂构造带与白水寨补体相交接复合部位。矿体产于北东向的强烈破碎的粘土化蚀变花岗岩带中;富矿体多赋存在蚀变碎裂石英正长岩内。矿体规模小,但数量多、密集成群;铀主要以显微细脉状沥青铀矿和吸附状态呈微细浸染状存在于碎裂蚀变岩中(黄宏坤, 2010)。

## 2 物理性质及光学性质

本文研究的样品取自竹筒尖矿床民采坑道中构造破碎带内微晶石英脉中。空间上,该矿物与微晶石英和次生铀矿物——变钙铀云母密切共生(图 1a、1b、1c)。共生的石英为烟灰色、肉红色或者白色,部分石英晶簇发育良好,表面呈红褐色,束磷钙铀矿紧密生长于石英基底上;变钙铀云母为黄绿色,片状,解理发育,覆盖于束磷钙铀矿之上(图 1b、1c)。

据肉眼和立体显微镜观察,束磷钙铀矿呈亮黄色,玻璃光泽,透明,条痕为浅黄色,多为纤维状、束状、放射状集合体(图 1d),集合体粒径可达数毫米,在手标本上易与其它共生矿物区别。摩氏硬度约为 3。立体显微镜下观察,该矿物具有一组平行{010}的完全解理和两组平行于{100}和{001}的解理,贝壳状断口呈油脂光泽。紫外光下,该矿物发淡黄色弱荧光。

偏光显微镜下观察显示,该矿物晶体为自形,单晶呈针状至板状,集合体为纤维状或放射状(图 2a、2b);光性特征为对称消光,二轴晶负光性,正延性,较高突起。单偏光下为淡黄色,正交偏光下具有鲜艳的高级干涉色(图 2b)。

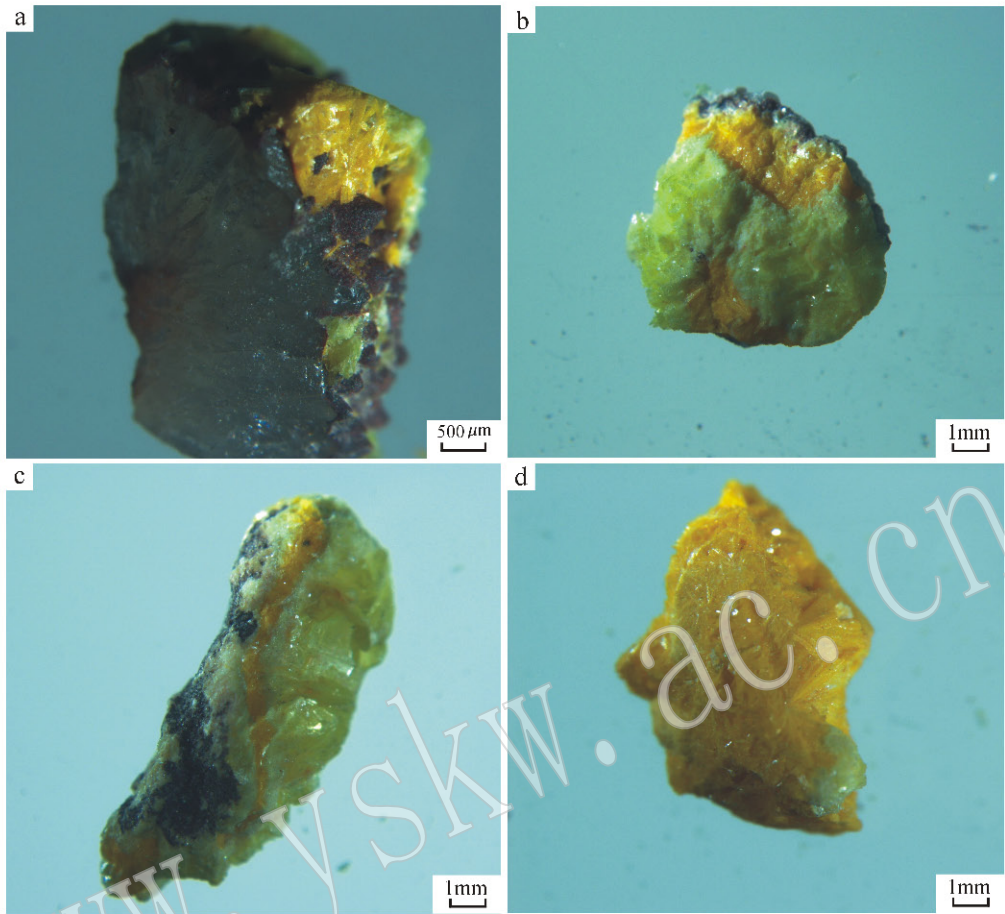


图1 竹筒尖矿床束磷钙铀矿的立体显微照片

Fig. 1 Stereo microphotographs of phurcalite from the Zhutongjian deposit

a—生长于烟灰色石英晶簇基底上的束磷钙铀矿；b—表面覆盖有变钙铀云母的束磷钙铀矿；c—夹于石英和变钙铀云母之间的束磷钙铀矿脉；d—呈放射状集合体的束磷钙铀矿

a—phurcalite on the smoky gray drusy quartz; b—phurcalite under metaautunite; c—phurcalite vein between quartz and metaautunite; d—radiating phurcalite aggregate

该区束磷钙铀矿与变钙铀云母密切共生, 常规矿物分离方法很难将这两种矿物分开。为了进行含水量、X射线衍射、红外光谱分析、差热分析等测试工作, 采用顺磁重液法分离出了束磷钙铀矿单矿物。其基本流程是先在双目镜下挑选相对纯净的黄色束磷钙铀矿颗粒, 用玛瑙研钵压碎至 0.074 mm 以下, 使束磷钙铀矿与变钙铀云母完全解离; 然后将矿物粉末加入氯化镁饱和溶液分离液中, 用电磁液体分离仪通过调节磁力强度将束磷钙铀矿与变钙铀云母完全分离。这样获得的束磷钙铀矿单矿物经显微镜、荧光、X射线衍射检查, 纯度大于 99%, 保证了单矿物测试结果的可靠性。

### 3 化学成分

束磷钙铀矿的化学成分分析在核工业北京地质研究院分析测试研究所电子探针实验室完成, 所用样品为束磷钙铀矿单颗粒磨制成的砂光片, 利用日本电子生产的 JEOL JXA-8100 型电子探针上进行了矿物形态的背散射电子像观察和成分定量分析。仪器的工作条件: 加速电压 20 kV, 加速电流 10 nA, 束斑直径为 5  $\mu\text{m}$ , 所有测试数据都进行了 ZAF 处理。大部分元素的特征峰测量时间为 20 s, 为降低其检测限, 稀土元素的特征峰测量时间为 40 s。定量分

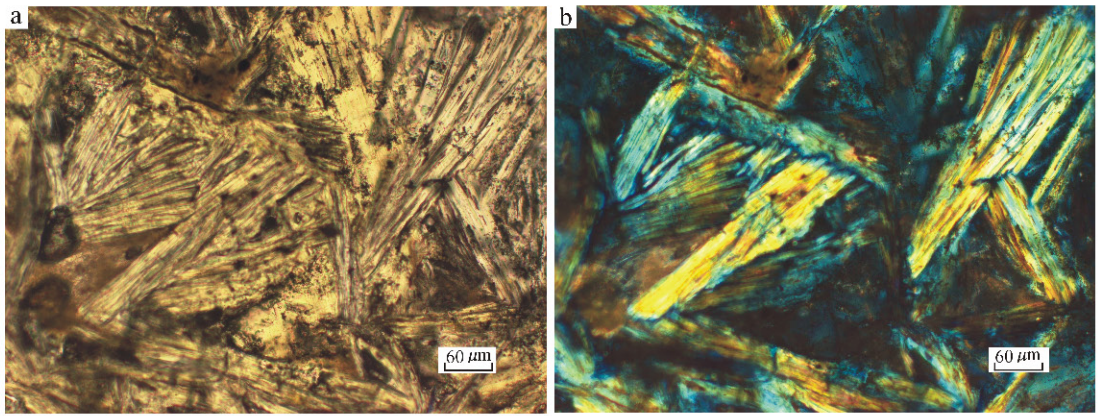


图2 竹筒尖矿床束磷钙铀矿的单偏光(a)和正交偏光(b)显微照片

Fig. 2 Petrographic microscope photographs under single polars (a) and crossed polars (b) of phurcalite from Zhutongjian

析时所使用标样大多为美国 SPI 的矿物标样: 铁铝榴石 (Si、Al、Fe、Mg)、黑云母 (K)、钙蔷薇辉石 (Mn)、钛闪石 (Ti)、斜长石 (Na)、独居石 (P、La、Ce)、赤铅矿 (Pb), 少部分为合成标样:  $UO_2$  (U) 和  $ThO_2$  (Th), 稀土元素所用标样为五磷酸盐稀土矿物标样。

背散射电子像观察显示, 束磷钙铀矿多为自形至半自形的针状、板状晶体, 常沿一个方向延伸。该矿物的颗粒大小不一, 可分为大颗粒和细小颗粒两种: 大颗粒晶体粒径为几十微米至几百微米, 细小颗粒粒径仅为几微米甚至更小, 常沿集合体边部分布 (图 3a)。该矿物在背散射电子像下可见 3 组很好的完全解理, 其放射状集合体特征明显 (图 3b), 少量晶体内部具有微弱的环带变化 (图 3b)。系统的电子探针成分分析 (表 1) 显示, 束磷钙铀矿成分主要由 U、

P、Ca 这 3 种元素和  $H_2O$  组成。此外, 还含有少量的 K、Na、Mg、Pb 和稀土元素 La、Ce, 含量仅为  $n \times 10^{-4} \sim n \times 10^{-3}$ 。该成分与德国、英国和巴西所产的束磷钙铀矿的化学成分非常类似 (Deliens and Piret, 1978; Braithwaite *et al.*, 1989; Antencio and Neumann, 1991)。

根据前人研究结果可知, 束磷钙铀矿的水含量为 8.5%~11.62% (Antencio and Neumann, 1991)。本文样品水含量的测试工作在核工业北京地质研究院分析测试中心完成, 所用仪器为意大利 Euro vector 公司生产的 Euro EA3000 元素分析仪。仪器条件为: 炉温: 980℃, 柱温: 114℃, He 流量: 120 mL/min。通过测 H 含量换算该矿物的水含量为 9.25% (9 次测试结果的平均值), 结合电子探针成分平均值, 按

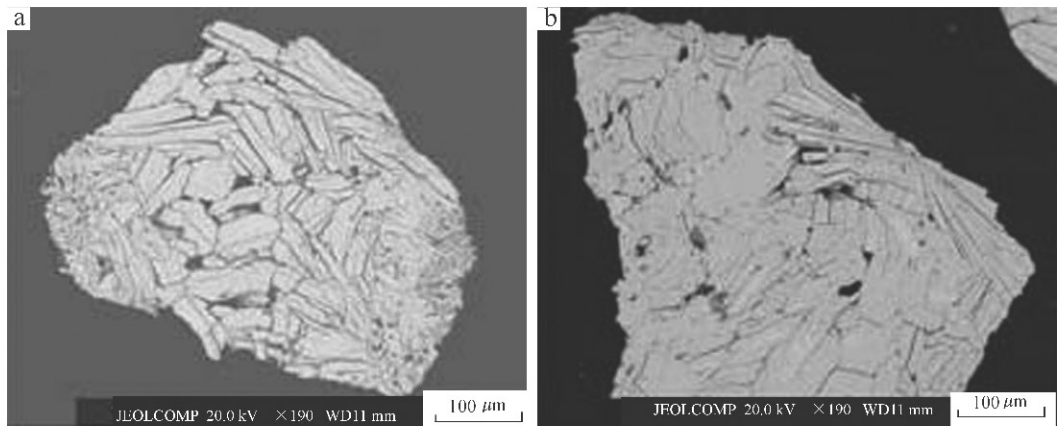


图3 竹筒尖矿床束磷钙铀矿的电子探针背散射电子像

Fig. 3 Back-scattered electron images of phurcalite from the Zhutongjian deposit

a—小颗粒束磷钙铀矿沿较大颗粒的集合体边部分布; b—放射状集合体及微弱的环带构造

a—fine grains of phurcalite around aggregates of larger grains; b—radiating aggregates and indistinct zonal structure

表 1 竹筒尖矿床中束磷钙铀矿的电子探针成分(  $w_B/\%$  )及其 apfu 计算

Table 1 Electron microprobe analyses(  $w_B/\%$  ) and calculated apfu of phurcalite from the Zhutongjian deposit

元素	1	2	3	4	5	平均( $N=15$ )	A	B
CaO	9.38	9.15	9.10	9.05	9.25	9.21	9.06	9.4
UO <sub>3</sub> *	70.24	68.61	68.41	69.84	68.76	68.64	69.30	69.88
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	11.03	11.99	11.44	11.24	11.28	11.70	11.48	11.52
TiO <sub>2</sub>	—	0.06	0.05	—	0.08	0.04	—	n. a.
ThO <sub>2</sub>	—	—	—	—	—	—	—	n. a.
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	—	—	0.01	0.01	0.01	—	n. a.
La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07	—	—	0.06	—	0.03	—	n. a.
Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	—	0.04	—	—	—	—	—	n. a.
MgO	0.02	0.06	—	0.04	—	0.02	—	n. a.
MnO	0.08	0.07	—	—	—	0.02	—	n. a.
FeO*	—	—	—	0.02	0.06	0.02	—	n. a.
PbO	0.10	0.06	0.01	0.08	0.58	0.12	—	n. a.
Na <sub>2</sub> O	—	—	—	—	—	—	—	n. a.
K <sub>2</sub> O	0.19	0.20	0.22	0.23	0.22	0.20	—	—
总量	91.11	90.24	89.23	90.57	90.24	90.01	89.84	90.80
H <sub>2</sub> O	—	—	—	—	—	9.25 <sup>#</sup>	10.18	11.62
以 16 个氧为基础计算 1/8 单位胞内的阳离子数								
Ca	2.063	1.990	2.018	1.994	2.043	2.019	2.000	2.04
U	3.029	2.926	2.975	3.018	2.978	2.950	2.999	2.975
P	1.917	2.060	2.005	1.957	1.969	2.026	2.002	1.976
Ti	—	0.009	0.008	—	0.012	0.006	—	—
Th	—	—	—	—	—	—	—	—
Al	—	—	—	0.002	0.002	0.002	—	—
La	0.005	—	—	0.005	—	0.002	—	—
Ce	—	0.003	—	—	—	—	—	—
Mg	0.006	0.018	—	0.012	—	0.006	—	—
Mn	0.014	0.012	—	—	—	0.003	—	—
Fe	—	—	—	0.003	0.010	0.003	—	—
Pb	0.006	0.003	—	0.004	0.032	0.007	—	—
Na	—	—	—	—	—	—	—	—
K	0.050	0.052	0.058	0.060	0.058	0.052	—	—
Sum	7.090	7.073	7.064	7.055	7.104	7.076	7.001	6.991

“ — ”: 低于检测限 n. a. : 未分析; “ \* ”: 以 UO<sub>3</sub> 表示的为全铀, 以 FeO 表示的为全铁; “ # ”: 用 EA3000 多元素分析仪测 H 换算; A: 按理想化学式 Ca<sub>2</sub>(UO<sub>2</sub>)<sub>2</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>2</sub>·7H<sub>2</sub>O 计算的束磷钙铀矿的理论化学成分( Antencio and Neumann, 1991 ); B: 巴西圣保罗 Perus 的束磷钙铀矿( Antencio and Neumann, 1991 )。

O=16 计算其单位分子式中阳离子数( 简称 apfu )并得出该矿物的经验化学式为( Ca<sub>2.02</sub>, K<sub>0.05</sub>, Mg<sub>0.01</sub> )<sub>2.08</sub>( UO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, PbO )<sub>2.97</sub>O<sub>1.97</sub>( PO<sub>4</sub> )<sub>2.03</sub>·6.32 H<sub>2</sub>O( 表 1 )。该式 H<sub>2</sub>O 的分子数与束磷钙铀矿的理论值稍有差别。

### 4 X 射线粉晶衍射分析

束磷钙铀矿的 X 射线衍射分析在核工业北京地质研究院分析测试研究所完成。将单矿物粉末样品在无污染条件下用玛瑙研钵粉碎至 0.074 mm 以下, 放到带凹槽的玻璃薄片上, 压制使其与玻璃表面平行且表面光滑平整, 然后进行 XRD 分析。测试工作所

用仪器为荷兰帕纳科公司生产的 PANalitical X 'pert PRO。测试条件为连续扫描, 铜靶, 扫描范围为 5°~90°, 工作电压和工作电流分别为 40 kV 和 40 mA, 步长为 0.013 度/步, 每步停留时间为 40 ms。所得 X 射线粉晶衍射图上出现的几组强峰的  $d$  值分别为 7.994, 4.549, 4.003, 3.839, 3.391, 2.885 和 2.617 Å。这与束磷钙铀矿的 PDF 53-0907 非常一致( 表 2 和图 4 )从而进一步确定该矿物为束磷钙铀矿无疑。

根据粉末衍射数据, 用 X 'pert highscore plus 软件进行晶体结构 Rietveld 分析显示, 该矿物为斜方晶系, 空间群为  $Pbca$ , 晶胞参数为:  $a = 1.7423(5)$  nm,  $b = 1.6032(4)$  nm,  $c = 1.3599(2)$  nm;  $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ ,  $V = 3.79864$  nm<sup>3</sup>。

表 2 束磷钙铀矿 X 射线粉晶衍射数据(主要衍射峰)

Table 2 X-ray powder diffraction data of phurcalite (main diffraction peaks)

面网指数 <i>hkl</i>	实测值			PDF : 53-0907		
	$2\theta/^\circ$	$d/nm$	$I/\%$	$2\theta/^\circ$	$d/nm$	$I/\%$
200	9.977	0.886 6	0.4	9.972	0.886 3	3
020	11.068	0.799 4	100	11.031	0.801 4	100
210	11.593	0.763 4	3.3	11.561	0.764 8	3
230	19.516	0.454 9	3.0	19.477	0.455 4	2
040	22.209	0.400 3	20.1	22.161	0.400 8	15
041	23.169	0.383 9	6.2	23.120	0.384 4	4
024	28.584	0.312 3	3.2	28.513	0.312 8	3
502	28.840	0.309 6	3.9	28.776	0.310 0	3
522	30.969	0.288 5	4.1	30.906	0.289 1	3

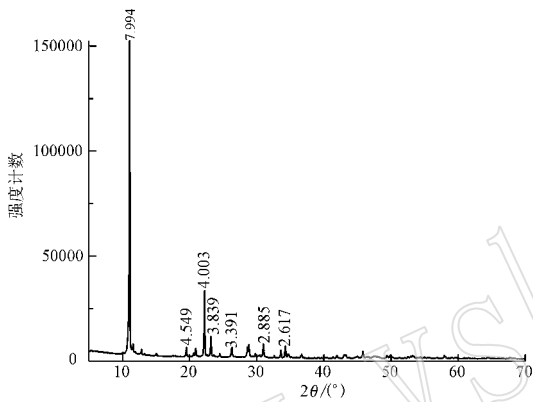


图 4 竹筒尖矿床束磷钙铀矿的 X 射线粉晶衍射图  
Fig. 4 X-ray powder diffraction pattern of phurcalite from the Zhutongjian deposit

## 5 热分析

束磷钙铀矿的差热分析(DTA)和热重分析(TGA)在中国科学院地质与地球物理研究所完成,所使用仪器为日本岛津公司生产的差热-热重同步测定装置 DTG-50H。测试条件为:以  $\alpha$ -氧化铝为参比物,单矿物粉末 18.20 mg 放入铂金坩埚中,在  $N_2$  气氛下进行,测试温度范围为:室温~1 200℃,控制升温速率为 20℃/min。

根据差热曲线可知,300℃以下有 1 个最大的吸热峰(154.45℃)和 2 个小吸热峰,这均与样品的脱水有关,热重曲线在最大吸热峰处急剧的失重的表现正好与此吻合。根据这两条曲线,初步估算该矿物的含水量约为 8.4%。由于差热-热重同步测定装置在采集数据的过程中具有一定的滞后性,因此根据峰谷转换的切线估算的失重部分(即水含量)低于元素分析仪所测水含量。直到 900℃附近,差热

曲线出现迅速吸热的过程,然而热重曲线并未发生明显变化,显示样品开始发生熔融作用。这与巴西产的束磷钙铀矿的热分析曲线非常相似(Antencio and Neumann, 1991)。

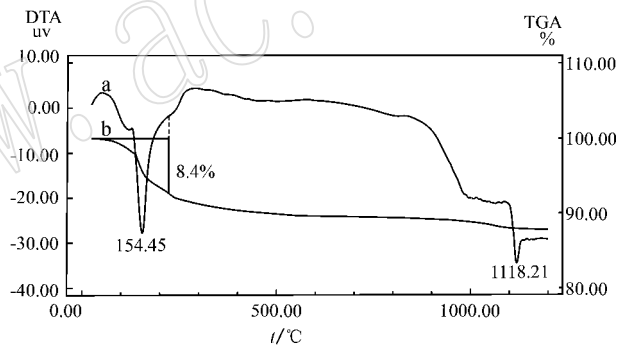


图 5 竹筒尖矿床束磷钙铀矿的热分析曲线  
Fig. 5 Thermal analysis data of phurcalite from the Zhutongjian deposit  
a—差热分析; b—热重分析  
a—differential thermal analysis; b—thermal gravity analysis

## 6 红外光谱分析

束磷钙铀矿的红外光谱分析在核工业北京地质研究院分析测试研究所完成。其测试过程为:将单矿物样品在无污染条件下用玛瑙研钵将其与 KBr 一起研磨至 0.074 mm 以下,将样品放到样品台上压制成片后进行测试。测试工作所用仪器为 Thermo Fisher 公司生产的 Thermo Nicolet(显微傅里叶变换红外光谱仪)。测试条件为:扫描范围为 350~4 000  $cm^{-1}$ ,干涉仪速度为 0.474 7  $cm/s$ ,所用光栅为 100  $\mu m$ ,128 次扫描,分辨率为 4。根据谱图(图 6)可知:较强的吸收峰主要为 3 427.10、1 622.05、1 152.06、1 062.62、973.26、890.91、581.98、543.82 和 382.92  $cm^{-1}$ 。其中很宽的 2 个峰 3 427.10 和

$1622.05\text{ cm}^{-1}$ , 分别由层间水的伸缩振动和弯曲振动引起; 位于  $960$  和  $1160\text{ cm}^{-1}$  之间的峰显示了  $(\text{PO}_4)^{3-}$  的存在, 而峰  $890.91\text{ cm}^{-1}$  显示了  $(\text{UO}_2)^{2+}$  的存在。这与巴西产 (Antencio and Neumann, 1991) 和英国产 (Braithwaite *et al.*, 1989) 束磷钙铀矿的红外光谱特征非常相近。

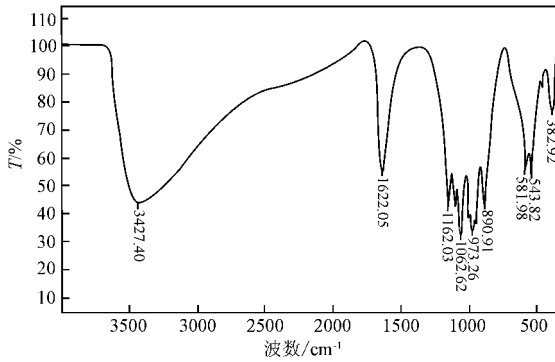


图 6 竹筒尖矿床束磷钙铀矿的红外吸收光谱图

Fig. 6 Infrared-absorption spectrum of phurcalite from the Zhutongjian deposit

## 7 结论

束磷钙铀矿是一种典型的次生铀矿物。次生铀矿物常形成于铀矿床的次生氧化带, 多为原生铀矿物或含铀岩石中的铀被溶解, 经地下水搬运后, 再以六价铀矿物的形式沉淀出来 (王德荫等, 1981)。竹筒尖矿床中发现的束磷钙铀矿, 属我国首次发现这种次生铀矿物。它在光学性质、物理性质、化学成分、晶体结构和红外光谱特征均与已知的束磷钙铀矿可完全类比。束磷钙铀矿在我国的首次发现, 一方面丰富了我国的铀矿物研究资料; 另一方面, 该矿物是一种  $\text{UO}_3$  含量高达 70% 的富铀矿物, 其颜色非常鲜艳, 在野外环境中醒目易被发现, 可作为一种行之有效的找矿标志, 同时它也是提取铀的非常重要的矿石矿物之一。

已报道的该矿物水含量变化范围较大, 本次我们通过化学分析和热分析所得的水含量也存在一定差别, 这可能是两种方法不同造成的, 同时, 我们知道, 矿物的层间水具有结晶水和沸石水双重性。也就是说, 在一定范围内, 水的逸出和进入, 尚不会破坏矿物的结构。束磷钙铀矿中, 水分子和  $\text{Ca}$  离子一道位于  $(\text{UO}_2\text{PO}_4)_n^-$  层间 (Antencio and Neumann, 1991)。换言之, 束磷钙铀矿的水属层间水, 因此, 它的水分子数应允许有所变化。结合拙文实例等, 建

议束磷钙铀矿的晶体化学式宜改进为  $\text{Ca}_2(\text{UO}_2)_3\text{O}_2(\text{PO}_4)_2 \cdot (5 \sim 7)\text{H}_2\text{O}$ 。

致谢 感谢核工业北京地质研究院朱荆富高级工程师在单矿物分离方面的帮助, 感谢核工业北京地质研究院夏晨光、邱林飞工程师在矿物水含量分析、红外光谱分析方面的帮助。

## References

- Atencio D and Neumann B. 1991. Phurcalite from Perus, São Paulo, Brazil, and redetermination of its crystal structure [J]. Canadian Mineralogist, 29: 95~105.
- Back M E & Mandarin J A. 2008. Fleischer's Glossary of Mineral Species [M]. Tucson: The Mineralogical Record Inc., 183.
- Braithwaite R S W, Paar W H & Chisholm J E. 1989. Phurcalite from Dartmoor, southwest England, and its identity with "nisaite" from Portuga [J]. Mineral. Mag., 53: 583~589.
- Chew R T III. 1982. Phurcalite, Riverside County [J]. California Geol., 35: 246~247.
- Committee for New Mineral and Mineral Named. 1984. English-Chinese Glossary of Mineral Species [M]. Beijing: Science Press, 99 (in Chinese).
- Deliens M & Comblain G. 1978. Une occurrence de phurcalite à Shinkolobwe (Shaba, Zaire) [J]. Bull. Soc. Belge Géol., E7: 225~226.
- Deliens M & Piret P. 1978. La phurcalite,  $\text{Ca}_2(\text{UO}_2)(\text{PO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ , nouveau minera [J]. Bull. Mineral., 101: 356~358 (in French with English abstract).
- Fleischer M. 1974. New mineral names [J]. Am. Mineral., 39: 208~212.
- Frost R L, Weier M L, Martens W, *et al.* 2006. The Structure of purcalite—a vibrational spectroscopic study [J]. Vibrational Spectroscopy, 41(2): 205~212.
- He Mingyue. 2007. New English-Chinese Glossary of Mineral Species [M]. Beijing: Geological Publishing House, 138 (in Chinese).
- Huang Hongkun. 2010. Simple explanation on the controlling factors and regularity of mineralization in Xiazhuang uranium ore field [J]. Western Ore Exploration Project, 6: 132~135 (in Chinese).
- Jambor J L & Grew E S. 1992. New Mineral Names [J]. Am. Mineral., 77: 213.
- Pemberton H E. 1983. Minerals of California [M]. New York: Van Nostrand Reinhold.
- Wang Deyin and Fu Yongquan. 1981. Uranium Mineralogy [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 34~35 (in Chinese).
- Wu Lieqin and Tan Zhengzhong. 2004. Discussion on prospecting potential for rich uranium deposits in Xiazhuang uranium ore field, northern Guangdong [J]. Uranium Geology, 20(1): 10~15 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

- 何明跃. 2007. 新英汉矿物种名称 [M]. 北京: 地质出版社, 138.
- 黄宏坤. 2010. 浅谈下庄矿田控矿因素与铀成矿规律 [J]. 西部探矿工程, 6: 132~135.
- 王德荫, 傅永全. 1981. 铀矿物学 [M]. 北京: 原子能出版社, 34~35.
- 吴烈勤, 谭正中. 2004. 粤北下庄铀矿田富铀矿找矿前景探讨 [J]. 铀矿地质, 20(1): 10~15.
- (中国) 新矿物及矿物命名委员会. 1984. 英汉矿物种名称 [M]. 北京: 科学出版社, 99.