

球状晶质铀矿形成条件的 模拟实验*

沈才卿 赵凤民

(北京铀矿地质研究所)

球状晶质铀矿是我国主要的工业铀矿物之一,也是核工业的主要原料之一。因此研究球状晶质铀矿的形成条件、成矿机制有着重要意义。球状晶质铀矿的水热合成是进行上述研究的重要手段。人们已从不同的角度进行了大量实验^{[1][2]},实验的数据曾为解决铀成矿地质问题起了很好的作用。但随着铀矿地质工作的不断深入,以往的实验资料已不能满足地质研究的需要:一方面是发现了一些新的地质现象,如热液成因含钍球状晶质铀矿的发现;另一方面,过去一些研究者对元素在水热体系演化过程中的变化注意不够,从而导致某些解释的不够合理。基于这些原因,笔者又在前人实验的基础上,进行了不同条件下球状晶质铀矿的合成实验,及其他模拟实验。通过三百余次实验的大量数据的综合分析,现就其中几个问题阐述于下。

一、实验方法简述

100℃以下的实验均在玻璃安瓿中进行,通常用自动控温仪器控制的水浴锅加热,少数在高温电炉中进行^[3];100℃以上的实验在“冷风自紧式高压釜”中进行,反应腔用黄金衬套与不锈钢胴体隔离,高压釜放入由自动控温仪表控制的高温电炉恒温区内加热,到达实验时间后,立即将高压釜取出,放入淬火池中用流动自来水淬火,半小时后取出擦干打开,吸出溶液进行剩余溶液pH测定及其它化学分析,冲洗出固体,经过滤后用红外灯烤干或自然干燥,得到产品进行各项岩矿鉴定。

加入高压釜的铀或钍溶液均是标准溶液,有硝酸介质、硫酸介质和碳酸介质;还原剂有的是粒径1—2mm固体黄铁矿,有的是能放出H₂S气体的有机还原剂;有些实验曾向反应腔内倒入液氮或通入CO₂、H₂气体以驱赶体系中的氧。

二、球状晶质铀矿形成的物理化学条件

球状晶质铀矿的实验室模拟有一定的局限性,最主要的是不可能像漫长的地质历史那样进行长时间的低浓度反应。然而,就笔者的实验范围来看,其形成的物理化学条件也是相当广泛的(表1)。值得指出的是:表1中温度、压力、时间、铀浓度的上限仅是实验室

* 新矿物及矿物命名委员会审订的《英汉矿物种名称》(1984年版)取消沥青铀矿名称。该书第100页、131页规定:Pitchblende = massive Uraninite. 因此,笔者将本文中所论述的沥青铀矿改名为晶质铀矿。又据笔者在电子显微镜下观察到的原沥青铀矿合成产品均为球状,故称之为“球状晶质铀矿”。

表 1. 能形成球状晶质铀矿的物理化学条件

Table 1. Physicochemical conditions of formation for the globular uraninite

实验变化条件	实验变化范围	能形成球状晶质铀矿范围
pH值	1.20—10.41	1.20—10.41
温度 (°C)	17—600	17—600
压力 (10^5Pa)	0.02—2000	0.02—2000
时间	1分钟—130天	8分钟—130天
铀浓度 (mg/ml)	0.238—119	2.38—119

已作的条件, 如果继续提高的话, 估计还能上升; 温度与压力的下限由于设备问题没有继续往下做, 估计还能下降。球状晶质铀矿形成的物理化学条件的这种广泛性, 是球状晶质铀矿在热液矿床中广泛发育的根本原因。

三百多次实验的统计规律告诉我们, 除了表 1 中所列的条件以外, 还有一个重要的成矿因素——氧化还原环境: 对于六价铀溶液来说, 形成球状晶质铀矿必须出现一个较强的还原环境; 四价铀溶液形成球状晶质铀矿则需要一个极弱的氧化环境, 若过强则会形成六价铀的化合物。

三、球状晶质铀矿的形成机制

球状晶质铀矿的形成机制是人们长期争论的问题。为了探明其形成过程, 我们将相同物理化学条件下不同反应时间所形成的球状晶质铀矿的形态、成份、结构等进行了系统的研究。首先发现在酸性介质体系中, 球状晶质铀矿的晶胞参数(轴长)随加热时间增长而增大(图1), 在最初的20小时内轴长增加很快, 到一定时间后(约60小时)轴长增加缓慢,

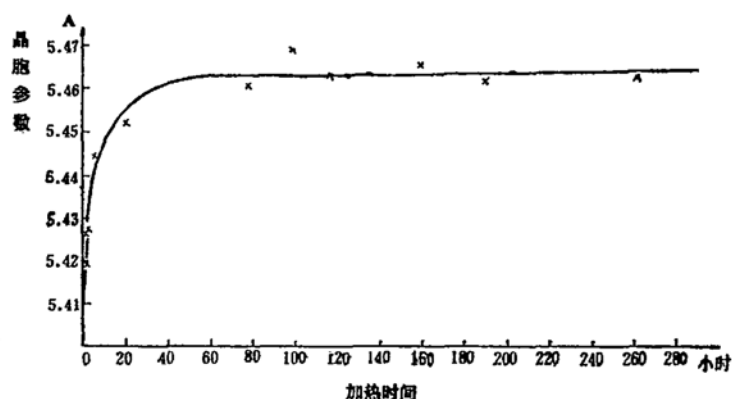


图 1. 合成球状晶质铀矿的晶胞参数与加热时间关系曲线

($T = 300^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 2.45$, $P = 85.9 \times 10^5\text{Pa}$)

Fig. 1. The relation curve of cell parameter and heating time for the synthetic globular uraninite

并趋于稳定。而通过扫描电镜照相可知,球状晶质铀矿的轴长大小表示着球形大小的不同,可由初步的棉絮状,经过小球粒到较大的球粒或球粒状集合体(照片1、2、3),它们的X射线粉晶分析数据见表2。

部分合成产品还进行了四价铀、六价铀及热重分析(表3),表明随着球状晶质铀矿结

表 2. 照片1、2、3中球状晶质铀矿的X射线粉晶数据

Table 2. X-ray powder diffraction data of the globular uraninite shown in photographs 1, 2, and 3

实验编号	81—20—1		81—19—3		82—13		82—4	
X射线粉晶数据	<i>I</i>	<i>d</i>	<i>I</i>	<i>d</i>	<i>I</i>	<i>d</i>	<i>I</i>	<i>d</i>
	10	3.10	10	3.10	10	3.13	10	3.10
	7	2.70	7	2.69	8	2.71	6	2.69
	9	1.92	9	1.900	10	1.92	9	1.91
	9	1.63	9	1.630	10	1.64	9	1.63
	以下为弥散线条		5	1.238	8	1.251	5	1.245
			5	1.205	7	1.220	4	1.213
			4	1.102	8	1.114	7	1.105
			4	1.020	8	1.050	8	1.042
轴长(Å)			5.398		5.460		5.419	

分析者: 谭发兰、李瑞卿

表 3. 合成球状晶质铀矿中U(IV), U(VI) 及水的含量

Table 3. Content of U(IV), U(VI) and water in the synthetic globular uraninite

样 号	U ⁴⁺ %	U ⁶⁺ %	H ₂ O%	含氧系数	晶胞参数(Å)
81—21—2	21.020	48.70		2.6985	5.376
82—29	26.077	52.104		2.6661	5.379
81—19—3	29.296	45.200		2.5870	5.398
83—22	31.143	33.032		2.5147	5.417
82—7	42.976	26.574	13.0	2.3821	5.427
81—14—2	42.719	31.921		2.427	5.427
81—23—3	60.480	21.331		2.2607	5.436
81—10	63.334	20.070		2.2406	5.45
82—13	72.382	12.688		2.1491	5.46
82—15	73.416	8.633	1.9	2.1053	5.469

晶程度的增高,其中四价铀含量相应增高,而水含量则随之减少(共作热重分析样品10个,能列入表3的样品仅2个)。对于部分产品还进行了红外图谱分析,图2为照片1、2、3、几个样品的红外光谱图。我们可以看到,除了UO₂、UO₂²⁺和H₂O的震动吸收带外,还在900—1200cm⁻¹处有一个吸收峰,这是[OH]⁻的弯曲震动吸收带。另外在3400cm⁻¹处还可见到[OH]⁻的伸缩震动引起的吸收峰,而且这些吸收峰随着反应时间的增长而变得不明显。另外,热重分析表明有序度很差的样品含水量可达17.3%,有序度高的样品的含水量

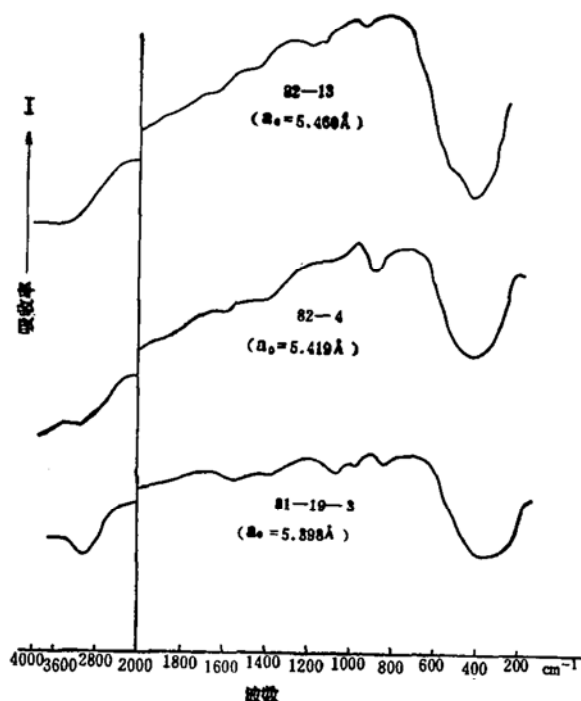
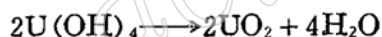
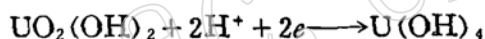


图 2. 合成球状晶质铀矿红外谱线图

Fig. 2. IR spectrum line for the synthetic globular uraninite

仅为1.3%。样品的失重一般在400℃,个别在400℃以上才能完全脱水,这也证明合成产品中的水部分为 $[\text{OH}]^{-1}$ 。

根据以上的资料,笔者认为球状晶质铀矿的形成过程如下:含六价铀酰络合物的水溶液在外界物理化学条件改变时(主要是出现还原环境),水溶液里的 UO_2^{2+} 或铀酰络合物分解出来的 UO_2^{2+} 被还原而形成晶质的 UO_2 和 $\text{U}(\text{OH})_4$,以及由六价铀组成的 $\text{UO}_2(\text{OH})_2$ 等,它们共同在一起组成似胶状的混合物,其形态呈棉絮状。随着反应的进一步进行,水溶液中的 UO_2^{2+} 被还原成 UO_2 ,同时胶状物里 $\text{UO}_2(\text{OH})_2$ 中的六价铀也不断被还原成 UO_2 和 $\text{U}(\text{OH})_4$ 其反应过程如下:



这样,合成物中的六价铀不断被还原,结晶的 UO_2 不断增加,而水则不断被排出;这些棉絮状的物质在聚合力的作用下逐渐地变为球状体。与此同时,化合物的有序度增高,导致晶胞变大,含水量下降。球粒形成的先后不同,获得 UO_2 的机率也不同,所以具有不同的直径。这些球粒相互结合,从而形成各种球粒集合体。

四、 U_3O_8 不是球状晶质铀矿的过渡产物

球状晶质铀矿在形成过程中是否经过 U_3O_8 阶段也是人们探讨较多的问题。前些人从矿物形状曾发现有柱状晶质铀矿而推测有 U_3O_8 阶段;有些人从含氧系数出发,计算出 U_3O_8 含氧系数为2.667,介于 UO_3 和 UO_2 之间,认为是过渡产物。

实验证明,球状晶质铀矿与八氧化三铀是两种不同的化合物,它们有不同的结构,表4为几个不同合成物的X射线粉晶数据,均为 U_3O_8 。通过电子显微镜观察,球状晶质铀矿为球粒状(照片1、2、3),八氧化三铀为柱状和板状,它们的电子衍射图也不一样(照片4、5、6)。

由于球状晶质铀矿是由六价铀还原得到的,如果还原得不彻底,则球状晶质铀矿中既有四价铀,又有六价铀;反之,已经形成的球状晶质铀矿由于有氧的作用及本身射线辐射作用而氧化,所以球状晶质铀矿的含氧系数是指球状晶质铀矿的氧化程度或六价铀与四价铀的比例关系,它与 U_3O_8 计算的含氧系数是不同的。

实验证实,球状晶质铀矿能在广泛的物理化学条件下形成,而八氧化三铀仅在较苛刻的条件下形成。笔者在300余次实验中,只有五次产品出现了 U_3O_8 ,它们的形成条件列于表5。表5反映出下列几点共性:(1)它们的形成温度都在300℃以上。(2)都形成于弱的

表 4. 合成 U_3O_8 的X射线粉晶数据
Table 4. X-ray powder diffraction data for the aynthetic U_3O_8

实 验 编 号	石3—1		沥3—2		81—10—1		U_3O_8 标准	
	<i>I</i>	<i>d</i>	<i>I</i>	<i>d</i>	<i>I</i>	<i>d</i>	<i>I</i>	<i>d</i>
X 射 线 粉 晶 数 据	10	4.11	3	4.10	6	4.15	8	4.14
	10	3.40	10	3.40	9	3.40	10	3.41
	9	2.62	6	2.62	9	2.62	9	2.636
	5	2.07			7	2.07	5	2.081
	6	1.940	7	1.945	6	1.940	6	1.966
	10	1.760	7	1.760	10	1.770	10	1.778
	4	1.700	4	1.702			2	1.702
	5	1.585	4	1.575	3	1.585	4 k	1.575
	6	1.415	2	1.420	3	1.425	4 k	1.430
	2	1.370					2	1.389
	4	1.315	2	1.320	2	1.325	3	1.321
	1	1.300						
	7	1.280	3	1.280	3	1.285	5	1.286

分析者：谭发兰、李瑞卿

表 5. 合成 U_3O_8 的实验条件
Table 5. Experimental condition for the synthetic U_3O_8

实验编号	配 方	实 验 条 件			
		温度 (°C)	压力 (10^5Pa)	pH	加热时间 (小时)
沥3—2	6ml UO_2SO_4	300	85.9	3.8	142
83—3	10ml $U(SO_4)_2$	300	200	2~3	72
83—122	9ml $U(SO_4)_2$	450	1200—1300	3.70	89
石3—1	8ml $UO_2(NO_3)_2$ 220mg Na_2SiO_3 46.4mg FeS_2	350	150—200	2.8	32
81—10—1	8ml $UO_2(NO_3)_2$ 活性炭118mg	300	85.9	2.9	113

还原条件下，因为在强还原条件下极易形成 UO_2 ；若在强氧化条件下易形成六价铀的化合物。（3）它们都形成于酸性条件下。综上所述，八氧化三铀形成的条件是高温、酸性和弱还原。

另外，实验证明所形成的 U_3O_8 是十分稳定的，并没有因反应时间加长 而转化为沥青铀矿。所以，笔者的结论是：八氧化三铀与球状晶质铀矿是二种不同的化合物，八氧化三铀不是球状晶质铀矿形成过程中的过渡产物。

五、黄铁矿在球状晶质铀矿形成过程中的作用

许多铀矿地质工作者都认为二价铁、特别是黄铁矿在铀成矿过程中有着重要的作用，

指出在热液铀矿床中球状晶质铀矿和所伴随的赤铁矿是黄铁矿中二价铁和铀酰溶液相互作用的结果。有一些地质工作者对这种观点提出了异议。为了搞清这一问题,笔者也以黄铁矿作还原剂与铀酰溶液进行反应,结果表明确实在一定条件下获得了球状晶质铀矿(表6),但可以看出:(1)球状晶质铀矿的形成不是与加入黄铁矿的量成正比的,也不是与溶液中 $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ 与 FeS_2 的比值成正比的。(2)球状晶质铀矿的形成与黄铁矿的氧化程度

表 6. 以黄铁矿作还原剂条件下合成晶质铀矿的基本数据

Table 6. Basic data of the synthetic uraninite under the condition of using pyrite as a reductant

顺序号	实验号	溶液 pH		加热温度 (°C)	主要配料含量		$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ FeS ₂ (比值)	合成铀矿物及晶胞参数
		实验前	实验后		$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$	FeS ₂		
1	晶1—1	2.65	6	450	341.4	160	2.14	$\text{UO}_{2.14}$ $a_0 = 5.46 \text{ \AA}$
2	晶1—2	4.63	8.20	450	301.6	317.5	0.96	$\text{UO}_{2.14}$ $a_0 = 5.46 \text{ \AA}$
3	晶2—1	3.80	7.69	450	401.6	86.2	4.68	$\text{UO}_{2.14}$ $a_0 = 5.46 \text{ \AA}$
4	晶2—2	10.41	9.90	450	301.6	127.1	2.37	$\text{UO}_{2.37}$ $a_0 = 5.425 \text{ \AA}$
5	晶3—1	6.80	11.50	450	301.6	112.5	2.67	$\text{UO}_{2.45}$ $a_0 = 5.41 \text{ \AA}$
6	晶3—2	8.72	8.42	450	301.6	118.0	2.55	$\text{UO}_{2.13}$ $a_0 = 5.462 \text{ \AA}$
7	晶4—1	3.82	8.70	450	45.18	86.3	1.85	UO_{2+x} 结晶差*
8	晶4—2	3.86	3.58	450	4.52	86.2	1.85	无
9	沥2—2	3.8	—	300	301.6	—	—	无
10	沥3—2	3.8	3.30	300	301.6	—	—	U_3O_8
11	沥5—1	2.71	2.60	150	451.8	99.0	4.57	无
12	沥5—2	2.71	2.92	200	451.8	101.2	4.47	无

* 结晶程度差是指粉晶分析仅见几条主要谱线。

无关。例如实验11和12号中的黄铁矿遭受强烈氧化形成大量皮壳状和尘状赤铁矿,后者将溶液染成赤红色,但在产品中未见球状晶质铀矿形成,经化学分析,90%以上的铀仍然在溶液中,并根据溶液为黄绿色可推断铀仍呈六价铀酰存在。这些都说明二价铁的氧化并不意味着还原 UO_2^{2+} 。

为了确定二价铁的还原作用如何,笔者又用二价铁的化学试剂与六价铀溶液一起密封在高压釜中进行实验,条件与大部分实验相同,结果在实验规定的时间内,二价铁无论在何种pH介质中都不能还原 UO_2^{2+} 成球状晶质铀矿(表7)。

当笔者考察黄铁矿中另一组份 S^{2-} 时,用 H_2S 气体还原 UO_2^{2+} 很容易获得球状晶质铀矿。并且形成温度很低,可在17℃时合成球状晶质铀矿^[3],高温时更易形成。

那末,黄铁矿作还原剂合成球状晶质铀矿时为什么会出现赤铁矿呢?众所周知,固态黄铁矿是不能起还原作用的,必须转入溶液中成为离子态才能起还原作用。 Fe^{3+} 是在体系氧逸度比较高时, Fe^{2+} 进入溶液时形成的。 Fe^{2+} 与 S^{2-} 同时进入溶液,同时与游离氧作用,形成 Fe^{3+} 与 SO_4^{2-} ,消耗氧后,体系逐渐变成氧逸度低的还原环境,此时 S^{2-} 对 UO_2^{2+} 起还原作用形成球状晶质铀矿。这个过程只要压碎产品看一看就知道了,往往在低温时,内核仍为黄铁矿,稍外为赤铁矿,最外层为黑色球状晶质铀矿层;高温时(350℃以上)常见内核全为赤铁矿,外层为晶胞参数大于5.45 Å的晶质铀矿,有时,其中还夹杂有方铁矿。当还

表 7. Fe^{2+} 对 UO_2^{2+} 的还原作用实验

Table 7. An experiment for UO_2^{2+} using Fe^{2+} as a reductant

$T = 300^\circ\text{C}$ $P = 85.9 \times 10^5\text{Pa}$ $t = 90 - 95$ 小时

加入 Fe^{2+} 试 剂	实 验 结 果		
	酸性 ($\text{pH} = 2.65$)	中性 ($\text{pH} = 6.70$)	碱性 ($\text{pH} = 9.00$)
硫酸亚铁 FeSO_4	①赤红色、紫黑色赤铁矿 ②没有球状晶质铀矿	①肉色细粒状晶体 ②没有球状晶质铀矿	①赤铁矿与少量磁铁矿 ②没有球状晶质铀矿
碳酸铁 FeCO_3	①硝酸铀酰结晶 ②赤铁矿 ③没有球状晶质铀矿	①硝酸铀酰结晶 ② Na_2UO_4 粉末 ③赤铁矿 ④没有球状晶质铀矿	①硝酸铀酰结晶 ②赤铁矿 ③结晶良好的磁铁矿 ④没有球状晶质铀矿
氯化亚铁 FeCl_2	①赤铁矿 ②少量黄金粒* ③没有球状晶质铀矿	①赤铁矿 ②中等量黄金粒 ③没有球状晶质铀矿	①赤铁矿 ②大量大粒黄金粒 ③没有球状晶质铀矿

* 黄金来自高压釜反应腔中的黄金衬套。

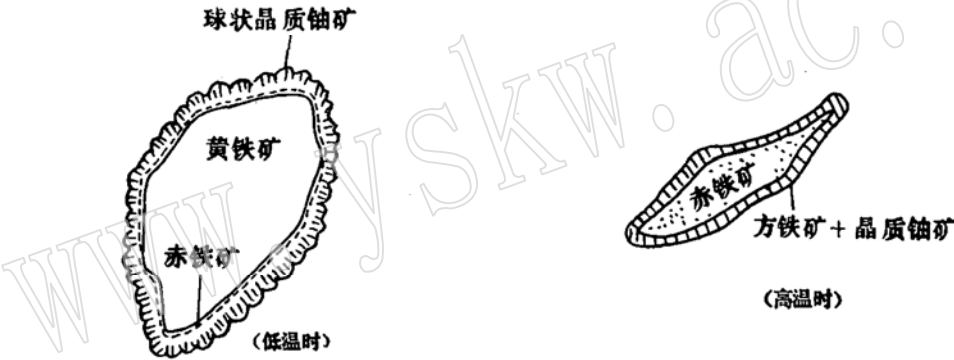


图 3. 黄铁矿、赤铁矿、晶质铀矿、方铁矿空间关系图

Fig. 3. Space relation among pyrite, hematite, uraninite and wustite

表 8. 不同条件下黄铁矿和铀酰溶液反应产品组合表

Table 8. Grouping table showing the products of reaction of pyrite with uranyl solution under different conditions

反 应 组 份	溶液酸碱度	产 品 组 合	
		150 $^\circ\text{C}$	450 $^\circ\text{C}$
$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ (液) FeS_2 (固)	酸 性	赤铁矿 U_3O_8	球状晶质铀矿、八面 体型晶质铀矿、磁铁 矿、黄铁矿、方铁矿
$\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$ (液) FeS_2 (固) Na_2CO_3 (液)	碱 性	赤铁矿 Na_2UO_4	球状晶质铀矿、 黄铁矿、磁黄铁 矿
价态变化特征		铁铀都呈高价	铁铀都呈低价

原环境很强时,还能见到新生的白铁矿或黄铁矿,它们的特点是晶面发育、表面干净,无球状晶质铀矿或其他矿物沉淀其上。它们的空间关系如图3所示。

上述实验中还有一个规律,即在黄铁矿和铀酰溶液这一反应体系中,铁铀两个变价元素在水热体系演化过程中所形成的产物内,各自的价态变化具有同步特点,即高价铀化合物和高价铁化合物共生,低价铁化合物和低价铀矿物共生(表8)。

可见,我们在分析实验结果或者研究地质现象时都必须从演化的观点出发。热液成因的赤铁矿—球状晶质铀矿共生组合是热液演化过程中不同阶段的产物。赤铁矿形成于水热体系演化的早期阶段,表明水热体系具有较高的氧逸度;球状晶质铀矿形成于水热体系演化的后期,表示水热体系氧逸度降低,处于还原阶段。如果氧逸度很低,则可能进一步将早期氧化的 Fe^{3+} 还原成 Fe^{2+} ,形成新生的黄铁矿或方铁矿等。

六、含钍球状晶质铀矿的水热合成模拟实验

热液成因的含钍球状晶质铀矿被发现^[4],引起人们对其形成条件的关心。为此,我们进行了室内模拟实验。实验条件基本上与矿物产地的地质条件及对矿物鉴定得出的温度、成分等相同。实验方法与合成球状晶质铀矿相同,仅把标准溶液改成含不同克分子浓度比例的铀钍混合溶液。

实验结果表明:(1)在150—200℃范围内,低压、酸性条件下极易形成含钍球状晶质铀矿。从反应后实验溶液的剩余铀钍含量看,铀与钍绝大部分均已进入固相(表9)。(2)

表9. 合成含钍球状晶质铀矿的实验条件与结果

Table 9. Experimental conditions and results for the synthetic globular thorium-bearing uraninite

(加入铀含量23.8mg/ml, 钍含量23.2mg/ml × n%, H_2S 还原剂200mg)

样号	钍/铀 (克分子比)	温度 (℃)	压力 10^5Pa	时间 (小时)	pH值变化		剩余溶液中含量		晶胞参数 (Å)
					实验前	实验后	铀 (mg/ml)	钍(10^{-3} mg/ml)	
83—10	2%	150	4.76	87.5	2.90	4.60	0.21	—	5.427
83—9	2%	200	15.59	75	2.90	4.50	0.12	—	5.427
82—64	5%	150	4.76	149	2.74	4.15	0.095	0.2	5.431
82—58	5%	200	15.59	72	2.74	2.41	0.045	2.3	5.430
82—65	10%	150	4.76	149	2.71	4.50	0.105	0	5.433
82—66	15%	150	4.76	149	2.61	4.23	0.08	6	5.438
82—59	15%	200	15.59	72	2.70	2.57	0.04	1.9	5.439
82—60	20%	200	15.59	72	2.61	2.42	0.48	0	5.441

合成物晶胞参数(轴长)随钍含量的增加而明显地增大,这表明钍是以类质同象形式进入到球状晶质铀矿的格架中,代替 U^{4+} 的位置,(3)从实验角度出发,笔者在表9的实验条件下增加钍含量到20%后就不能再形成含钍球状晶质铀矿了,然而增加还原剂用量后,仍能得到含钍球状晶质铀矿,晶胞参数(轴长)仍然随含钍量增加,但增长的斜率与20%含钍量前的斜率不一样(图4)。(4)产品的电子显微镜分析表明,含钍球状晶质铀矿的形态为分散的鱼子状(照片7),“鱼子”的中心部位颜色较浅,好象是中心空的一个球。电子

衍射图与球状晶质铀矿的电子衍射图基本相同(照片8)。

由上可见,热液成因的球状晶质铀矿的形成关键不在于沉淀时的条件,而在于铀和钍能否存在于同一溶液中。如果铀钍在中低温下能共存于同一溶液,那么不需要任何特殊条件,只要有还原环境存在,就能形成含钍球状晶质铀矿。

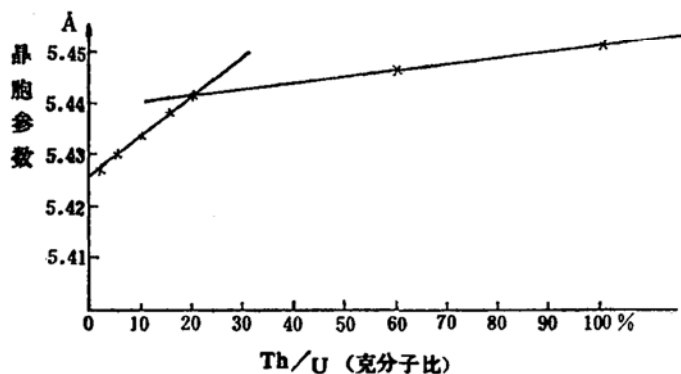


图4. 含钍球状晶质铀矿晶胞参数值随钍含量增加的斜率
Fig. 4. The slope of cell parameter with increasing content of thorium for the globular thorium-bearing uraninite

最后,笔者想强调,虽然人工合成和模拟实验的条件比较简单,属于分解自然界复杂因素中的单因素或复合因素,与自然界的实际情况尚有很大的差别,但实验结果提供的数据,对于探讨自然界的现象及其演化过程,仍可提供十分有益的信息。

参考文献

- [1] Рафальский Р. П., 1963. Физико-химическое исследование условий образования урановых руд. Москва.
- [2] 程汝楠等, 1981, 低温低压下沥青铀矿合成实验研究。放射性地质, 第6期, p. 496。
- [3] 沈才卿、赵凤民, 1985, 17—115℃沥青铀矿的人工合成及其结晶速度的实验研究。铀矿地质, 第一卷, 第3期, p. 1—10。
- [4] 陈肇博等, 1982, 含钍沥青铀矿的发现及其意义。岩矿测试, 第1卷, 第1期, p. 52—60。

图版说明

- 照片1. 球状晶质铀矿电镜像
(81—20—1 $\times 2200$ 仅其几条主要谱线)
- 照片2. 球状晶质铀矿电镜像
(81—19—3 $\times 2200$ $a_0 = 5.398 \text{ \AA}$)
- 照片3. 球状晶质铀矿电镜像
(82—13 $\times 2200$ $a_0 = 5.460 \text{ \AA}$)
- 照片4. 球状晶质铀矿电子衍射像
($T = 300^\circ\text{C}$ 合成, 80kV)
- 照片5. U_3O_8 电镜像(沥3—2 $\times 400$)
- 照片6. U_3O_8 电子衍射像(沥3—2, 80kV)
- 照片7. 含钍球状晶质铀矿电镜像
(82—59 $\times 20000$)
- 照片8. 含钍球状晶质铀矿电子衍射像
(82—59, 80kV)

Simulating Experiment on the Conditions of Formation of Globular Uraninite

Shen Caiqing Zhao Fengmin

(Beijing Research Institute of Uranium Geology)

Abstract

From more than three hundred experiments we have confirmed that the physicochemical conditions of formation of globular uraninite are variable in a wide range and put forward a new mechanism of its formation. U_3O_8 is not a transition product during the synthesis of globular uraninite. When pyrite reduces UO_2^{3+} to form globular uraninite, the valence state of Fe and U has a synchronous relationship both in growth and in decline. Hematite and globular uraninite are two products of different stages in process of evolution, and the former precipitates earlier than the latter. The globular thorium-bearing uraninite crystallizes out within the range of 150—200°C. Thorium is substituted in the form of isomorphism for U^{4+} in crystal lattice. The thorium content of globular thorium-bearing uraninite increases with the strengthening of reducing field.

