

# 偶氮胂 III 快速比色法测定二氧化钍 溶解液中的 Th(IV)

赵鹏飞, 吴久伟, 王宇, 李勇, 官国英

(中国原子能科学研究院, 核技术综合研究所, 北京 102413)

**摘要:** ThO<sub>2</sub> 经加速器轰击后可以产生多种核素, 如<sup>225</sup>Ac、<sup>223</sup>Ra、<sup>99</sup>Mo、<sup>131</sup>I、<sup>90</sup>Sr 等。钍等重元素的测量方法众多, 但大多操作复杂。分光光度法具有制样简单、操作难度小的优点, 可作为钍等重元素的定量分析手段。采用 HNO<sub>3</sub>/HF 体系对 ThO<sub>2</sub> 进行溶解, 以偶氮胂 III 为显色剂定量分析 ThO<sub>2</sub> 溶解液中 Th(IV) 的浓度。在 2 mol/L 盐酸溶液和 0.1 g/L 偶氮胂 III 溶液的环境下, 确定了在本法所确定的实验条件下偶氮胂 III 与 Th(IV) 的配位比为 5 : 2, 显色前后的最大吸收波长分别为 534.0 nm 和 663.2 nm, 对比度为 129.2 nm。该方法在 0.2~5.0 mg/L 符合朗伯-比尔定律, 标准曲线方程为  $y=0.06641x+0.00176$ ,  $R^2=0.99981$ , 摩尔吸光系数为  $1.64\times 10^4$ , 方法检出限为 0.31  $\mu\text{g/L}$ , 定量限为 0.97  $\mu\text{g/L}$ 。该方法在 4 h 以内稳定, 回收率为 97.33%~104.03%, 最大标准偏差为 0.32%。本方法与 GB/T 12690.12-2003 相比, 流程简化且测定结果基本一致。

**关键词:** 偶氮胂 III; 二氧化钍; 定量分析

中图分类号: TL99; O657.32

文献标志码: A

文章编号: 1000-7512(2024)02-0146-07

doi: 10.7538/tws.2024.37.02.0146

## Rapid Determination of Th(IV) in Thorium Dioxide Solution by Arsenazo III

ZHAO Pengfei, WU Jiuwei, WANG Yu, LI Yong, GUAN Guoying

(Department of nuclear technology and application, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** ThO<sub>2</sub> can produce many nuclides after accelerator bombardment, such as Actinium-225, Radium-223, Molybdenum-99, Iodine-131, Strontium-90, etc. There are many methods for measuring heavy elements such as thorium, but most of them are complicated to operate. Spectrophotometry has the advantages of simple sample preparation and low operation difficulty, and can be used as a quantitative analysis method for thorium and other heavy elements. ThO<sub>2</sub> was dissolved with nitric acid and hydrogen fluoride, and the concentration of Th(IV) in ThO<sub>2</sub> solution was quantitatively analyzed with Arsenazo III as the chromogenic agent. Under the environment of 2 mol/L hydrochloric acid solution and 0.1 g/L Arsenazo III solution, the coordination ratio of Arsenazo III and Th(IV) is 5 : 2 under the experimental conditions. The maximum absorption wavelength before and after color development is 534.0 nm and 663.2 nm, respectively, and the contrast is 129.2 nm. The method in 0.2-5.0 mg/L is in accordance with Lambert-Beer's law, the standard curve equation  $y=0.06641x+0.00176$ ,  $R^2=0.99981$ . The molar absorption coefficient of  $1.64\times 10^4$ . Method detection limit is 0.31  $\mu\text{g/L}$ , and quantitative limit is 0.97  $\mu\text{g/L}$ . The method is

stable within 4 h. The recovery is 97.33%-104.03%, and the largest standard deviation is 0.32%. The method was compared with GB/T 12690.12-2003, the process was simplified and the results were basically consistent.

**Key words:** arsenazo III; thorium dioxide; quantitative analysis

ThO<sub>2</sub> 是钍唯一的稳定氧化物, 可以作为轻水堆、重水堆和液态金属冷却快中子增殖堆的核燃料, 同时也是钍生产工艺中的重要中间产品, 通过它可以制得钍的卤化物和金属钍。二氧化钍是一种稳定的陶瓷材料, 即使加热到接近其熔点(3370 °C)的温度, 它的组成和结构也不会受到严重破坏<sup>[1]</sup>。ThO<sub>2</sub> 经加速器轰击后可用于生产不同核素, 例如<sup>232</sup>Th(p, x)<sup>223</sup>Ra<sup>[2]</sup>、<sup>232</sup>Th(p, xn)<sup>228/232/230</sup>Pa<sup>[3]</sup>、<sup>232</sup>Th(p, xn)<sup>225/227</sup>Ac<sup>[4]</sup>、<sup>232</sup>Th(p, f)<sup>99</sup>Mo<sup>[2]</sup>等。在轰击结束后需要对靶件进行溶解, 再将原相中大量的钍基分离出来进行回收, 常用的分离方法有沉淀法和离子交换法<sup>[5-6]</sup>。为了减少加速器制备核素时目标核素因分析时间过长而衰变损失, 同时减少操作人员的吸收剂量, 在分离钍时需要对其含量进行快速定量分析。

目前, Th 的定量分析技术有很多, 除《稀土金属及其氧化物中非稀土杂质化学分析方法 钍量的测定 偶氮胂 III 分光光度法和电感耦合等离子体质谱法》(GB/T 12690.12-2003)外, 还有许多其他分析技术, 包括飞秒激光击穿光谱技术、激光剥蚀电感耦合等离子体质谱技术、阴离子交换分离-电感耦合等离子体质谱技术、能量色散 X 射线荧光光谱技术、气相萃取色谱技术等。激光诱导击穿光谱技术<sup>[7]</sup>需将含有<sup>232</sup>Th 的粉末与石墨粉末混合压制成直径 20 mm, 厚度约为 2.5 mm 的固体样品, 不适用于对溶靶液体中钍的分析测定。激光剥蚀电感耦合等离子体质谱技术<sup>[8]</sup>利用激光对固体表面进行剥蚀, 剥蚀后经氦气吹扫进电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)进行分析, 同样也不适用于对溶靶液体中钍的分析测定。阴离子交换分离-电感耦合等离子体质谱技术<sup>[9]</sup>利用 ICP-MS 对钍进行定量分析, 具有准确度高的优点, 但在溶靶后进行初步分离时, 钍的含量约为 10<sup>2</sup> g/L, 若将测量样品稀释至 ICP-MS 可进样的浓度(μg/L 水平), 则会大大提高放射性废液的体积。能量色散 X 射线荧光光谱技术<sup>[10]</sup>需要将含 Th(IV) 的溶

液放在金属圆片上烘干约 12 h, 耗时较长, 不利于放化分离中放射性核素的提取。气相萃取色谱技术<sup>[11]</sup>利用有机溶剂萃取后经气相色谱进行分析, 需要引入额外的气源(氦气), 且气相色谱仪本身设备费用较高, 在一定程度上提高了分离成本。

以上方法均存在测量成本高、测量时间长、在热室中不易操作等问题。GB/T 12690.12-2003 中介绍了两种钍的测定方法, 一种是电感耦合等离子体质谱法, 另一种是偶氮胂 III 分光光度法。其中电感耦合等离子体质谱法在前文中已有介绍, 国标法介绍的偶氮胂 III 分光光度法使用不同种类和浓度的无机酸以及有机萃取剂对待测试样进行纯化分离, 最终得到较纯含钍溶液。但在放化分析中, 目标核素半衰期较短, 不宜长时间对某个单一元素进行测定, 因此需要对国标法进行一定程度优化。实验以国标法为基础, 在不降低测定精度的情况下, 简化操作流程, 同时研究了<sup>232</sup>Th(p, x)<sup>225</sup>Ac 反应中产生的金属离子对 Th(IV)测定的干扰情况。

## 1 实验部分

### 1.1 仪器与试剂

二氧化钍(ThO<sub>2</sub>, ≥99.5%)、四水合硝酸钍(Th(HNO<sub>3</sub>)<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O, ≥99.99%): 晶世纪; 硝酸(HNO<sub>3</sub>, GR): 北京通广; 氢氟酸(HF, GR): 沪试试剂; 盐酸(HCl, MOS): 北京化学试剂研究所; 偶氮胂 III(C<sub>22</sub>H<sub>18</sub>As<sub>2</sub>N<sub>4</sub>O<sub>14</sub>S<sub>2</sub>, AR): SAITONG; 实验用水为超纯水(电阻率≥18.2 MΩ·cm), 其余试剂均为分析纯。

电子天平: 超泽衡器设备有限公司, *d*=1 mg; 紫外-可见分光光度仪: SHIMADZU, UV-2450。

### 1.2 实验方法

**1.2.1 ThO<sub>2</sub> 溶解液的制备** 称量 2.003 g ThO<sub>2</sub> 固体于反应器中, 加入 8 mL 8 mol/L HNO<sub>3</sub> 和 0.16 mL 2 mol/L HF, 于 95 °C 下反应 10 h 后冷却至室温。

**1.2.2 ThO<sub>2</sub> 溶解液的预处理** 取 0.1 mL 含有 Th(IV) 的溶解液, 于 60 °C 下加热至干进行赶酸

处理,冷却后再用 5000 mL 水溶解,得到 Th(IV) 待测液。其浓度约为 4.2 mg/L,溶液 pH 近中性。

**1.2.3 标准曲线的绘制** 分别配制 0.0 mg/L、0.2 mg/L、0.5 mg/L、1.0 mg/L、2.0 mg/L 和 5.0 mg/L 的 Th(IV) 溶液。比色皿中 Th(IV) 溶液的体积均为 1 mL,再加入 1 mL 2 mol/L HCl、0.8 mL 0.1 g/L 的偶氮胍 III 溶液和 0.2 mL 超纯水,经显色后在 663.2 nm 处测定其吸光度并绘制标准曲线。

**1.2.4 含 Th(IV) 样品浓度的测定** 向比色皿中加入 1 mL Th(IV) 待测液,再加入 1 mL 2 mol/L HCl、0.8 mL 0.1 g/L 的偶氮胍 III 溶液和 0.2 mL 超纯水。测定待测样品的吸光度,根据绘得的标准曲线,确定在此吸光度下 Th(IV) 的浓度,并与国标法测得值进行比较。

**1.2.5 共存离子干扰程度评价** 向两支比色皿中分别加入 0.2 mL 一定浓度的单元素溶液和 0.2 mL 超纯水,经标准曲线测定两只比色皿的浓度值分别为  $c_1$  和  $c_2$ ,当满足  $|(c_1 - c_2)/c_2| \leq 0.05$  时,则认为所加入的元素对此浓度及以上 Th(IV) 的测定不构成干扰。

## 2 结果与讨论

### 2.1 测定波长

配得 5 mg/L 的 Th(IV) 溶液,使用试剂空白(仅不含 Th(IV))为参比池。用紫外-可见分光光度仪在 400~800 nm 范围内扫描,结果示于图 1。

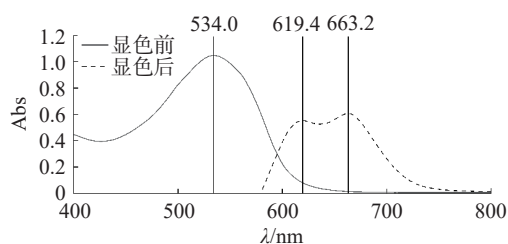


图 1 偶氮胍 III 与 Th(IV) 显色后的可见光吸收光谱  
Fig.1 Visible light absorption spectrum of Arsenazo III and Th(IV) before and after color development

在此实验条件下,偶氮胍 III 的最大吸收波长  $\lambda$  为 534.0 nm,与 Th(IV) 显色后的最大吸收波长为 619.4 nm 和 663.2 nm。这是由偶氮胍 III 分子中的两个偶氮基引起。根据偶氮基和 Th(IV) 配合能力的强弱,这两个吸收峰会存在一定差异,一般选取吸光度较高且没有(或较低)本底

干扰的峰作为测定波长。定义显色前后最大吸收峰之间的波长差为对比度,则对比度分别为 85.4 nm 和 129.2 nm,因显色后曲线在 619.4 nm 处有偶氮胍 III 的背景干扰,故选用 663.2 nm 作为测定波长。

### 2.2 盐酸浓度对吸光度的影响

使用盐酸维持体系酸度,可以去除体系中的 Pb(II)、Ag(I) 等离子,以减少对 Th(IV) 测定的干扰。配制 5 种不同浓度的盐酸溶液,在最大吸光波长处 663.2 nm 测定其吸光度,结果示于图 2。由图 2 可知,所有曲线相关系数均满足  $R^2 > 0.999$ 。随着盐酸酸度增大,曲线的分辨能力虽然有了一定提高,但同时也会显著提高放射性废液的酸度,且不符合绿色化学的理念。因此,确定盐酸浓度为 2 mol/L。

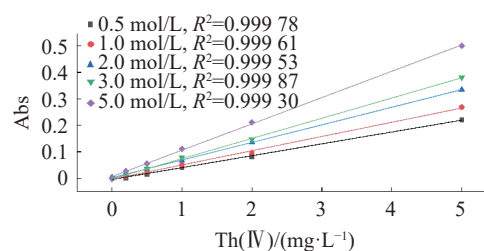


图 2 盐酸浓度对吸光度的影响

Fig.2 Effect of chloride acid on absorbance

### 2.3 显色剂的加入量对吸光度的影响

显色剂偶氮胍 III 用量会影响络合配位反应速率。保持总体积为 3 mL,盐酸浓度为 2 mol/L,改变显色剂加入量,在 663.2 nm 处测定吸光度,结果示于图 3。由图 3 可知,当显色剂用量为 0.8 mL 时,分辨能力较高,由此确定显色剂偶氮胍 III 加入量为 0.8 mL。

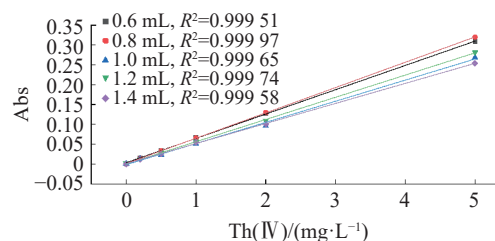
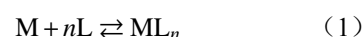


图 3 显色剂加入量对吸光度的影响

Fig.3 Effect of the Arsenazo III adding on absorbance

### 2.4 配位比的确定

中心离子 M 与配体 L 存在以下配位平衡:



其稳定常数为,

$$K_{\text{稳}} = \frac{[\text{ML}_n]}{[\text{M}][\text{L}]^n} \quad (2)$$

则有,

$$\lg \frac{[\text{ML}_n]}{[\text{M}]} = \lg K_{\text{稳}} + n \lg [\text{L}] \quad (3)$$

当M最大限度地被L配合成 $\text{ML}_n$ 时,此时的吸光度为 $A_{\text{max}}$ ,当M未能最大限度地被L配合成 $\text{ML}_n$ 时,反应达到平衡,则未被配合的M的吸光度相当于 $A_{\text{max}} - A_i$ ( $A_i$ 为该条件下溶液的吸光度),则,

$$\frac{[\text{ML}_n]}{[\text{M}]} = \frac{A_i}{A_{\text{max}} - A_i} \quad (4)$$

即,

$$\lg \frac{A_i}{A_{\text{max}} - A_i} = n \lg [\text{L}] + \lg K_{\text{稳}} \quad (5)$$

以 $\lg[\text{Arsenazo}]$ 为横坐标, $\lg \frac{A_i}{A_{\text{max}} - A_i}$ 为纵坐标作图,直线的斜率即为偶氮胂III与Th(IV)的配位比<sup>[12]</sup>。

保持Th(IV)浓度为5 mg/L,改变偶氮胂III溶液的加入体积,测定不同加入体积下的吸光度,其最大值即为 $A_{\text{max}}$ ,采用上述方法确定偶氮胂III与Th(IV)的配位比,计算结果列于表1。配位比直线方程示于图4,由图4可见,偶氮胂III与Th(IV)在此条件下的配位比为2.45,近似为5:2。

表1 有限对数法的计算结果

$V[\text{Arsenazo}]/\text{mL}$	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
$A$	0.0713	0.1467	0.2003	0.2205	0.2247	0.2305	0.2358
$\lg [\text{Arsenazo}]$	-7.890	-7.589	-7.413	-7.288	-7.191	-7.112	-7.045
$\lg \frac{A_i}{A_{\text{max}} - A_i}$	-0.374	0.197	0.705	1.058	1.173	1.394	1.770

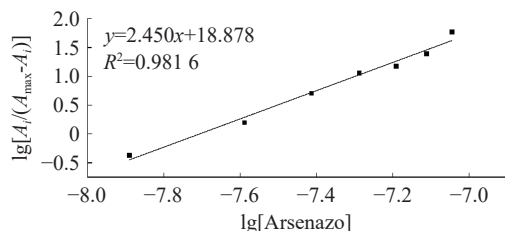


图4 Th(IV)与偶氮胂III配位比的测定

Fig.4 Coordination ratio of Th(IV) and Arsenazo III

## 2.5 标准曲线

比色皿中加入1 mL不同浓度的Th(IV)溶液,再加入1 mL 2 mol/L HCl、0.8 mL 0.1 g/L的偶氮胂III溶液和0.2 mL超纯水,测定各自在663.2 nm波长时的吸光度,结果列于表2,以Th(IV)溶液浓度为横坐标,吸光度为纵坐标,绘制的曲线示于图5,为该方法的标准曲线。

## 2.6 方法检出限与定量限

测定20次不含Th(IV)的空白样本作为噪声( $N$ )结果列于表3。检出限(DL)与定量限(QL)的计算公式分别为,

$$\text{DL} = 3.143\sigma_N \quad (6)$$

$$\text{QL} = 10\sigma_N \quad (7)$$

表2 标准点的测定结果

序号	不同浓度 Th(IV)溶液/(mg·L <sup>-1</sup> )					
	0.0	0.2	0.5	1.0	2.0	5.0
1	0.0004	0.0147	0.0403	0.0665	0.1337	0.3333
2	0.0004	0.0158	0.0353	0.0677	0.1337	0.3349

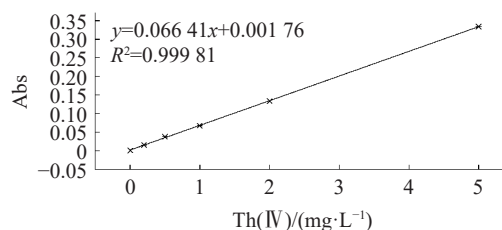


图5 Th(IV)与偶氮胂III标准曲线

Fig.5 Standard curve of Th(IV) and Arsenazo III

式中, $\sigma_N$ 为空白值的标准偏差。

经计算,该方法的检出限为0.31  $\mu\text{g/L}$ ,定量限为0.97  $\mu\text{g/L}$ 。

## 2.7 稳定性

将绘制标准曲线的比色皿放置4 h后,重新绘制标准曲线,并对0.2 mg/L、1.0 mg/L和4.0 mg/L三个质控点进行测定,结果列于表4,可见该方法在4 h以内能够保持稳定。

表3 噪声测定值

Table 3 Noise value

噪声测定值/(mg·L <sup>-1</sup> )									
0.0017	0.0019	0.0017	0.0020	0.0019	0.0019	0.0018	0.0018	0.0019	0.0017
0.0019	0.0019	0.0019	0.0017	0.0019	0.0019	0.0017	0.0019	0.0020	0.0018

表4 稳定性

Table 4 Stability test

放置时间	标准曲线与相关系数	测定点/(mg·L <sup>-1</sup> )	测定值/(mg·L <sup>-1</sup> )	相对误差/%
0 h	y=0.06641x+0.00176 R <sup>2</sup> =0.99981	0.2	0.203	1.50
		1.0	0.986	-1.40
		4.0	3.999	0.02
4 h	y=0.06340x+0.00051 R <sup>2</sup> =0.99980	0.2	0.210	4.81
		1.0	0.979	-2.07
		4.0	4.020	0.51

## 2.8 准确度

对已知 Th(IV) 浓度的 ThO<sub>2</sub> 溶解液样品进行测定, 结果列于表 5, 测得加标回收率在 99.10%~100.50%, 符合质量控制要求。

表5 准确度

Table 5 Accuracy test

加入量/(mg·L <sup>-1</sup> )	测定值/(mg·L <sup>-1</sup> )	回收率/%
0.2	0.201	100.50
1	0.991	99.10
4	4.009	100.23

## 2.9 精密度

对已知 Th(IV) 浓度的 ThO<sub>2</sub> 溶解液样品平

表6 精密度

Table 6 Precision test

序号	测定值/(mg·L <sup>-1</sup> )	平均值/(mg·L <sup>-1</sup> )	标准偏差	RSD/%
1	0.194, 0.203, 0.198, 0.196, 0.201 0.195, 0.203, 0.199, 0.198, 0.194	0.198	3.21×10 <sup>-3</sup>	1.62
2	0.980, 0.983, 0.978, 0.980, 0.981 0.990, 0.977, 0.987, 0.978, 0.981	0.982	4.00×10 <sup>-3</sup>	0.41
3	3.970, 4.009, 4.024, 4.012, 3.994 4.020, 4.017, 3.992, 3.980, 4.020	4.004	1.76×10 <sup>-2</sup>	0.44

表7 共存离子干扰

Table 7 Coexisting ion interference experiment

共存离子	共存浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	Th(IV)加入量/(mg·L <sup>-1</sup> )	Th(IV)测定值/(mg·L <sup>-1</sup> )	回收率/%
Li	400	0.1419	0.1375	96.90
Na	400	0.1419	0.1398	98.52
Al	300	0.1419	0.1401	98.73
K	400	0.1419	0.1364	96.12
Ca	100	0.0956	0.0977	102.20

行测定 10 次, 计算平均值、标准偏差和相对标准偏差(RSD), 结果列于表 6, 计算相对标准偏差在 0.41%~1.62%, 符合质量控制要求。

## 2.10 共存离子干扰

由 FLUKA 模拟计算了 70 MeV, 200 μA 质子辐照氧化钍靶 48 h 时的情况, 确定了原相中存在各元素的种类和含量, 在去除了放射性元素(核素)后, 得到了如表 7 所示的元素清单。在 663.2 nm 波长处测定分别加入表中一定浓度共存离子后 Th(IV) 的浓度, 测定加入前与加入后的吸光度, 经标准曲线得到对应的浓度。当 Th(IV) 溶液中其他离子的浓度低于表 7 所列的共存浓度时, 可以保证本方法的回收率在实际值的±5% 之间。

在以 <sup>232</sup>Th、<sup>232</sup>ThO<sub>2</sub> 为靶材的核反应中, 对原相进行分离时, 钍占绝大部分, 因此在稀释后进行 Th(IV) 浓度测定时, 共存离子浓度将会远低于表 7 所列出的限值, 此时可以不考虑共存离子对其测定的影响。当钍的含量经处理后降低至与其他离子相近的水平时, 则应采取适当方法先将其分离出来, 再按本法进行测定, 常用的分离方法有离子交换法和萃取法等。

表7 续表

共存离子	共存浓度/(mg·L <sup>-1</sup> )	Th(IV)加入量/(mg·L <sup>-1</sup> )	Th(IV)测定值/(mg·L <sup>-1</sup> )	回收率/%
Sc	0.02	0.0726	0.0760	104.68
Fe	0.1	0.0627	0.0623	99.36
Co	400	0.1419	0.1426	100.49
Ni	0.2	0.0600	0.0588	98.00
Cu	25	0.1090	0.1088	99.82
Zn	100	0.0956	0.0949	99.27
Ga	25	0.1090	0.1060	97.25
Ge	0.2	0.0600	0.0604	100.67
Y	10	0.0629	0.0641	101.91
Zr	0.05	0.0708	0.0680	96.50
Mo	25	0.1090	0.1092	100.18
Ru	5	0.0629	0.0632	100.48
Rh	50	0.0761	0.0728	95.66
Cd	25	0.1090	0.1062	97.43
In	50	0.0761	0.0733	96.32
Sb	0.2	0.0600	0.0604	100.67
Te	1	0.0519	0.0505	97.30
Cs	200	0.1419	0.1470	103.59
Ba	25	0.1090	0.1036	95.05
La	1	0.0519	0.0517	99.61
Ce	0.1	0.0627	0.0639	101.91
Nd	1	0.0519	0.0544	104.82
Sm	0.1	0.0627	0.0639	101.91
Eu	0.05	0.0708	0.0705	99.58
Gd	1	0.0519	0.0507	97.69
Yb	5	0.0629	0.0643	102.23
Lu	0.1	0.0627	0.0627	100.00
Re	0.05	0.0708	0.0722	101.98
Pt	50	0.0761	0.0751	98.69
Pb	50	0.0761	0.0788	103.55
Bi	25	0.1090	0.1065	97.71

### 2.11 方法学对照

取 1 mL ThO<sub>2</sub> 待测液, 将其稀释至不同水平。使用本法及 GB/T 12690.12-2003 描述的方法对清液中 Th 的含量分别进行测定, 结果列于表 8, 可见本法与国标法相比误差在较低水

平, 符合实验测定需要。在操作步骤上, 国标法在溶液配制与制样环节需要较多时间, 约需要 3~5 h, 而本法从试剂准备到完成测定在 1 h 内即可结束, 极大减少了操作人员的吸收剂量。

表8 方法学对照

Table 8 Comparison of two methods

样品号	理论值/(mg·L <sup>-1</sup> )	本方法/(mg·L <sup>-1</sup> )	相对误差	国标法(比色法)/(mg·L <sup>-1</sup> )	相对误差/%
1	4.1027	4.1897	2.12	3.9722	-3.18
2	2.6514	2.5758	-1.52	2.6142	-0.05
3	0.1468	0.1457	-0.77	0.1467	-0.09

### 3 结论

本研究建立了一种适用于放化分离过程中对Th(IV)进行快速测定的分光光度分析检测方法,线性范围为0.2~5.0 mg/L。该方法仅需对样品进行简单处理,配合2 mol/L HCl和0.1 g/L偶氮胂III即可完成浓度测定。方法准确度与精密度良好,且与国标法相比误差保持在较低水平。该方法减少了前期分离过程中的分析时间,有利于保留更多的短半衰期核素(如 $^{99}\text{Mo}$ 、 $^{223}\text{Ra}$ 、 $^{225}\text{Ac}$ 等),也有利于减少热室操作人员的吸收剂量。

#### 参考文献:

- [1] 吴华武. 核燃料化学工艺学[M]. 北京: 原子能出版社, 1989.
- [2] 彭述明, 杨宇川, 杨夏. 医用放射性同位素及药物[M]. 北京: 科学出版社, 2022: 76-81.
- [3] Griswold J R, Jost C U, Stracener D W, et al. Production of  $^{229}\text{Th}$  for medical applications: Excitation functions of low-energy protons on Th232 targets[J]. *Physical Review C*, 2018, 98(4): 044607.
- [4] Robertson A K H, McNeil B L, Yang H, et al.  $^{232}\text{Th}$ -spallation-produced  $^{225}\text{Ac}$  with reduced  $^{227}\text{Ac}$  content[J]. *Inorganic Chemistry*, 2020, 59(17): 12156-12165.
- [5] Boll R A, Malkemus D, Mirzadeh S. Production of actinium-225 for alpha particle mediated radioimmunotherapy[J]. *Applied Radiation and Isotopes*, 2005, 62(5): 667-679.
- [6] Apostolidis C, Molinet R, Rasmussen G, et al. Production of Ac-225 from Th-229 for targeted alpha therapy[J]. *Analytical Chemistry*, 2005, 77(19): 6288-6291.
- [7] 刘小亮, 王澜, 彭玲玲, 等. 飞秒激光诱导击穿光谱技术对石墨中钍的定量分析[J]. *中国光学*, 2023, 16(1): 103-112.
- [8] 赵令浩, 孙冬阳, 胡明月, 等. 激光剥蚀电感耦合等离子体质谱小激光斑束线扫描定量分析技术[J]. *分析化学*, 2018, 46(6): 931-937.  
Zhao Linghao, Sun Dongyang, Hu Mingyue, et al. Line scanning quantitative analysis by laser ablation inductively coupled plasma mass spectrometry with small laser beam[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2018, 46(6): 931-937 (in Chinese).
- [9] 宋茂生, 张鑫, 范鹏飞, 等. 阴离子交换分离-电感耦合等离子体质谱法测定钛铁矿中的铀、钍[J]. *理化检验-化学分册*, 2020, 56(6): 650-654.  
Song Maosheng, Zhang Xin, Fan Pengfei, et al. ICP-MS determination of uranium and thorium in ilmenite with separation by anion-exchange[J]. *Physical Testing and Chemical Analysis (Part B (Chemical Analysis))*, 2020, 56(6): 650-654 (in Chinese).
- [10] Meor Yusoff M S, Masliana M, Sarimah M. 取样技术对马来西亚锡渣废料中铀和钍定量分析的影响[J]. *冶金分析*, 2009, 29(9): 6-9.
- [11] 方丹, 新兵.  $\beta$ -二酮螯合物在铀、钍定量分析方面的应用[J]. *世界核地质科学*, 1975(4): 65-68.
- [12] 陈泽盛. 用分光光度法测定杂多酸根离子的配位比[J]. *湘潭矿业学院学报*, 1996, 11(1): 59-62.  
Chen Zesheng. Determination of coordination ratio of heteropoly acid radical ions by spectrophotometry[J]. *Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition)*, 1996, 11(1): 59-62 (in Chinese).