

# 萃取液闪 $\alpha$ 能谱法分析高放废液中的 $\alpha$ 核素

冯孝贵<sup>1</sup>, 何千舸<sup>1</sup>, 罗素军<sup>2</sup>, 韩雪梅<sup>2</sup>, 郭建锋<sup>2</sup>

(1. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 102201; 2. 中核四〇四有限公司第二分公司, 甘肃 兰州 732850)

**摘要:** 萃取液闪 $\alpha$ 能谱法是一种将萃取法、液闪法和 $\alpha$ 能谱法的优点有机结合在一起的新方法, 用该方法分析 $\alpha$ 核素, 操作简单易行, 可避免冗长的放化分离过程和复杂的 $\alpha$ 源制备程序。本文利用该方法分析了真实高放废液中的 $\alpha$ 核素, 分析结果与历史数据符合良好。针对真实高放废液的特殊性, 即大量 $^{90}\text{Y}$ 干扰 $\alpha/\beta$ 甄别的问题, 提出了两种方案来降低待测样品中 $^{90}\text{Y}$ 的活度以消除 $^{90}\text{Y}$ 的干扰, 即推迟测量和稀释, 实际应用时可根据具体情况进行选择。

**关键词:** 萃取; 液闪;  $\alpha$ 能谱;  $\alpha$ 核素; 高放废液

中图分类号: O615.11; O615.13

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2011)05-0528-06

## Determination of $\alpha$ Nuclides in High Level Liquid Waste by Combining Extraction, Liquid Scintillation Counting, and $\alpha$ Spectrometry

FENG Xiao-gui<sup>1</sup>, HE Qian-ge<sup>1</sup>, LUO Su-jun<sup>2</sup>, HAN Xue-mei<sup>2</sup>, GUO Jian-feng<sup>2</sup>

(1. *Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University,*

*P. O. Box 1021, Beijing 102201, China;*

*2. The Second Filial Company of 404 Company Limited, CNNC, Lanzhou 732850, China)*

**Abstract:** The approach combining solvent extraction, liquid scintillation counting (LSC), and  $\alpha$  spectrometry has taken advantages of high counting efficiency (nearly 100%) of LSC for  $\alpha$  radiation and high energy resolution of  $\alpha$  spectrometry. Since the extraction processes are much shorter than those reported and no complicated procedures are required for preparation of  $\alpha$  plate source, the new approach is easy to be used to determine  $\alpha$  nuclides in mixed solution. Good agreements are achieved for real samples of high level liquid waste (HLLW) between accepted data and those obtained by this new approach. To deal with the interference with  $\alpha/\beta$  discrimination from large amount of  $^{90}\text{Y}$  in HLLW, two ways were proposed to decrease the radioactivity of  $^{90}\text{Y}$  in sample, i. e. delaying measurement or diluting the sample, which can be used under different circumstances.

**Key words:** extraction; liquid scintillation counting;  $\alpha$  spectrometry;  $\alpha$  nuclides; high level liquid waste

高放废液中 $\alpha$ 核素分析的主要对象是超铀元素 Np、Pu、Am 等,可采用的分析方法有:辐射测量法、电化学法、质谱法和各种光谱法等<sup>[1]</sup>。其中,以辐射测量法的 $\alpha$ 能谱法最为灵敏,应用也较普遍<sup>[2-4]</sup>,但此方法通常需采用复杂的方法制备薄而均匀的样品<sup>[5]</sup>,而且回收率不易控制,测量结果的重现性不好。因此,人们开始研究用液闪法分析超铀元素。其优点是:避免了 $\alpha$ 能谱法中最棘手的样品几何条件与标准源不一致和测量源自吸收的问题,大幅提高了探测效率和测量准确度,并可实现 $4\pi$ 立体角测量,对 $\alpha$ 粒子的探测效率接近100%<sup>[6]</sup>。不过液闪法对 $\alpha$ 粒子的能量分辨能力很弱,这就要求对各超铀元素进行完全的分离,因此,出现了将萃取分离法与液闪法相结合的方法,即萃取液闪法<sup>[1,7-8]</sup>,但因该法对分离要求很高,分离流程依然过于繁琐。针对这种情况,本文作者提出一种将萃取液闪法和 $\alpha$ 能谱法相结合的方法,即萃取液闪 $\alpha$ 能谱法<sup>[9]</sup>。该法利用萃取法消除<sup>90</sup>Sr、<sup>137</sup>Cs等核素(在高放废液中这两种核素是 $\beta$ 放射性的主要来源)以及大量盐分的影响,利用液闪法测量样品中总 $\alpha$ 活度,利用 $\alpha$ 能谱法测量各 $\alpha$ 核素之间的比例,进而得到各 $\alpha$ 核素的含量,同时还关注 $\alpha$ 能谱法中拖尾的问题。该法只要用最简单的液滴法制备样品的 $\alpha$ 源,同时对各超铀核素并不要求进行完全的分离,所以,分离过程也很简单。文献<sup>[9]</sup>仅针对模拟高放废液进行了研究,但未涉及真实高放废液中的一些特殊情况。因此,本文重点针对真实高放废液的特殊性(主要是大量<sup>90</sup>Y的影响),来介绍萃取液闪 $\alpha$ 能谱法在高放废液 $\alpha$ 核素分析中的应用。

## 1 实验

### 1.1 实验试剂与仪器

<sup>237</sup>Np、<sup>238-241</sup>Pu、<sup>241</sup>Am、<sup>90</sup>Sr/<sup>90</sup>Y和<sup>137</sup>Cs溶液:放射性纯度>99%,由中国原子能科学研究院提供。使用前,<sup>238-241</sup>Pu和<sup>241</sup>Am按文献<sup>[1]</sup>方法进行纯化。

Hisafe3 闪烁液:来源于美国 PE 公司;三烷基氧膦(TRPO):来源于 Cytec 公司,将其配制成 30% TRPO-二甲苯溶液;噻吩甲酰三氟丙酮(TTA):来自于百灵威化学技术有限公司,

将其配制成 0.5 mol/L TTA-二甲苯溶液。其它试剂均为分析纯。

模拟高放废液:1.0 mol/L HNO<sub>3</sub> 介质,另外含有的主要金属离子 Na、Fe、Al、Ni、Nd 和 U 的浓度依次为 18.3、6.0、5.7、2.9、1.5 和 1.6 g/L。

真实高放废液:来自于中国西北某厂。

由于模拟和真实高放废液的分析分别在清华大学和中核四〇四有限公司进行,因此,所采用的分析仪器有两套。

分析模拟高放废液采用的仪器如下:美国 PE 公司型号 1220 Quantulus 的液闪仪;美国 Canberra 公司型号 Alpha Analyst 7200 的 $\alpha$ 能谱仪,其探头为 300 mm<sup>2</sup> PIPS 探测器。

分析真实高放废液采用的仪器如下:美国 PE 公司型号 Wallac 1414 的液闪仪;美国 ORTEC 公司的 $\alpha$ 能谱仪,其探头为 50 mm<sup>2</sup> PIPS 探测器。

### 1.2 实验方法

萃取实验在室温(约 20 °C)下进行,等体积的有机相和水相(通常为 1 mL : 1 mL)置于 10 mL 萃取管中,两相充分振荡 10~60 min,然后离心分相。萃取、反萃、洗涤次数根据具体情况而定。

样品分析在液闪仪和 $\alpha$ 能谱仪上进行。闪烁样品的制备方法是:将 0.1 mL 有机相或水相样品加入到 20 mL 聚乙烯闪烁瓶中,然后加入 10 mL Hisafe3 闪烁液,摇匀后备测。 $\alpha$ 源的制备方法是:采用液滴法,将约 20  $\mu$ L 有机相样品滴加在不锈钢圆盘内,直接烘干后再灼烧片刻即可。

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 分析思路

本文研究对象来自中国西北某厂的高放废液,其 $\alpha$ 放射性主要来源于<sup>241</sup>Am(约占 70%~80%)和<sup>238-240</sup>Pu(约占 20%),而<sup>237</sup>Np 的活度很低(<1%)<sup>[4]</sup>。按 $\alpha$ 能量由低到高排列,依次分为 3 个区域:<sup>237</sup>Np(4.771、4.788 MeV)为第 1 区;<sup>239</sup>Pu(5.143、5.155 MeV)和<sup>240</sup>Pu(5.123、5.168 MeV)为第 2 区;<sup>241</sup>Am(5.443、5.486 MeV)和<sup>238</sup>Pu(5.456、5.498 MeV)为第 3 区。如果高、低能区的核素活度比值太大,在

$\alpha$  谱图中将会产生严重的拖尾干扰,在这种情况下就需对样品进行适当的分离。

本文和文献[9]均采用 TTA 和 TRPO 萃取剂进行萃取分离。TTA 是一种常用的萃取剂,它可从 0.4~1 mol/L  $\text{HNO}_3$  溶液中定量萃取  $\text{Np}(\text{IV})$  和  $\text{Pu}(\text{IV})$ ,而基本不萃取  $\text{Np}(\text{V})$ 、 $\text{Pu}(\text{III})$ 、 $\text{Pu}(\text{VI})$ 、 $\text{Am}(\text{III})$ 、 $\text{Sr}(\text{II})$  和  $\text{Cs}(\text{I})$ 。TRPO 是用于对高放废液进行非  $\alpha$  化的萃取剂,它可从 0.3~0.5 mol/L  $\text{HNO}_3$  中定量萃取  $\text{Np}(\text{IV})$ 、 $\text{Pu}(\text{III})$ 、 $\text{Pu}(\text{IV})$ 、 $\text{Pu}(\text{VI})$  和  $\text{Am}(\text{III})$ ,而基本不萃取  $\text{Sr}(\text{II})$  和  $\text{Cs}(\text{I})$ ,对  $\text{Np}(\text{V})$  的萃取能力也很低。 $\text{Am}(\text{III})$  可用 5.5 mol/L  $\text{HNO}_3$  从 TRPO 负载有机相中反萃下来。

从前文叙述可看出, $\text{Np}$  和  $\text{Pu}$  的萃取性能

与它们的价态有很大关系,因此,萃取过程中需进行相应的调价。本文和文献[9]用  $\text{NaNO}_2$  将  $\text{Np}(\text{IV})$  氧化为  $\text{Np}(\text{V})$ ,将  $\text{Pu}(\text{III})$  氧化为  $\text{Pu}(\text{IV})$ ,以便于 TTA 只萃取  $\text{Pu}$ ;用抗坏血酸将  $\text{Np}(\text{V})$  还原为  $\text{Np}(\text{IV})$ ,以便于 TRPO 对  $\text{Np}$  的萃取,当然  $\text{Pu}(\text{IV})$  也在该过程中被还原为  $\text{Pu}(\text{III})$ 。

文献[9]已针对模拟高放废液中  $\alpha$  核素分析进行了详细报道,本文简要介绍有关的主要结果。针对待测样品的  $\alpha$  谱图中可能有拖尾影响和肯定无拖尾影响两种情况,文献[9]分别给出了完整版和简化版萃取分离流程,完整的萃取分离流程如图 1 所示。图中,下标“H”和“L”分别表示“大量的”和“少量的”。

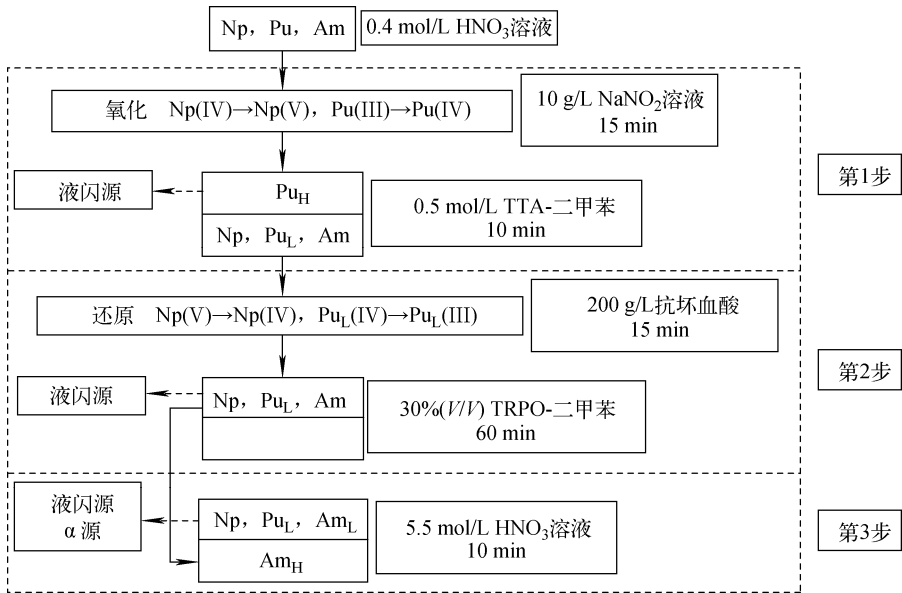


图 1 萃取分离流程示意图

Fig. 1 Synoptic scheme of separation process

图 1 中,待测样品的酸度调至 0.4 mol/L 后,再经 3 步萃取或反萃过程:第 1 步用  $\text{NaNO}_2$  氧化调价,再用 TTA 萃取  $\text{Pu}(\text{IV})$ ;第 2 步用抗坏血酸还原调价,再用 TRPO 萃取  $\text{Np}(\text{IV})$ 、 $\text{Am}(\text{III})$  和少量的各种价态的  $\text{Pu}$ ;第 3 步用高酸反萃  $\text{Am}(\text{III})$ 。第 1 步的目的是避免  $\alpha$  谱中大量  $\text{Pu}$  的拖尾对少量  $\text{Np}$  的干扰,第 3 步是为了避免  $\alpha$  谱中大量  $\text{Am}$  的拖尾对少量  $\text{Pu}$  和  $\text{Np}$  的干扰。经该萃取流程,一方面可解决  $\alpha$  谱中的拖尾问题,同时还可实现  $\alpha$  核素

与  $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  等核素(在高放废液中这两种核素是  $\beta$  放射性的主要来源)以及大量盐分的分离,从而降低这些核素和盐分对分析的干扰。

对图 1 中的 3 个有机相取样在液闪仪上进行分析,可分别得到 3 个有机相样品中的总  $\alpha$  活度(依次用 LSC1、LSC2 和 LSC3 表示);另外,从第 3 个有机相样品的  $\alpha$  谱可得到第 3 个有机相样品中  $^{237}\text{Np}$ 、 $^{238\sim 240}\text{Pu}$  和  $^{241}\text{Am}$  所占的比例  $r(\text{Np})$ 、 $r(\text{Pu}_L)$  和  $r(\text{Am}_L)$ 。

结合 LSC1、LSC2、LSC3、 $r(\text{Np})$ 、 $r(\text{Pu}_L)$

和  $r(\text{Am}_L)$ , 可得到样品中  $^{237}\text{Np}$ 、 $^{238\sim 240}\text{Pu}$  和  $^{241}\text{Am}$  的活度  $A(\text{Np})$ 、 $A(\text{Pu})$  和  $A(\text{Am})$  为:

$$A(\text{Np}) = \text{LSC3} \times r(\text{Np})$$

$$A(\text{Pu}) = \text{LSC1} + \text{LSC3} \times r(\text{Pu}_L)$$

$$A(\text{Am}) = \text{LSC2} - \text{LSC3} + \text{LSC3} \times r(\text{Am}_L)$$

由于  $^{238}\text{Pu}$  和  $^{241}\text{Am}$  在α谱中的峰几乎是叠加在一起的, 均在第3区。为得到样品中  $^{238}\text{Pu}$  和  $^{241}\text{Am}$  各自的计数, 需设法预先知道样品中  $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$  的比值, 而该比值可按如下方法得到: 由于 TTA 对 Pu(IV) 和 Am(III) 有非常高的分离系数, 经萃取和洗涤, 很容易得到不含 Am 的 Pu 样品, 该样品在α谱中的第3区和第2区计数之比即为  $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$  的比值。如果待测样品来自于同一废液罐, 那么其中  $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$  的比值都是相同的, 因此, 该比值对所有来自于该废液罐的样品均是适用的。这样, 从待测样品的α谱和  $^{238}\text{Pu}/^{239+240}\text{Pu}$  的比值, 即可得到样品中  $^{237}\text{Np}$ 、 $^{238\sim 240}\text{Pu}$  和  $^{241}\text{Am}$  所占的比例。

### 2.2 α/β 甄别问题及 $^{90}\text{Y}$ 的影响

当α放射性活度与β放射性活度之比在一定范围内时, 本文采用的两种液闪仪(1220 Quantulus 液闪仪和 Wallac 1414 液闪仪)均可对α和β进行同时测量, 从而降低了对样品的分离要求。这是因为这两种液闪仪均具有脉冲形状甄别(PSA)功能, 均可利用不同粒子产生的荧光在衰减时间上的差别, 来实现β粒子和α粒子之间的甄别。液闪仪对β和α粒子的甄别效果主要由 PSA 值决定。

1220 Quantulus 液闪仪和 Wallac 1414 液闪仪关于 PSA 值的定义是不同的。1220 Quantulus 液闪仪的着眼点是归一化的脉冲长度与脉冲幅度的关系, 而 Wallac 1414 液闪仪的着眼点是荧光中慢组分与快组分的比例。正是因为这种定义上的差别, 两者 PSA 值的含义是不同的, 因此, 各自的最优 PSA 值也是不同的。

1220 Quantulus 液闪仪对α和β的甄别效果参见文献[9]。Wallac 1414 液闪仪对α和β的甄别效果如图2所示。

图2中的“误计率”定义为: 对于α核素, 是指其在β-MCA(多道分析器)中的误计数与其在α-MCA和β-MCA中总计数之比; 对于β核素, 是指其在α-MCA的600~800道(与淬灭

水平较低时的α峰位相对应)中的误计数与其在α-MCA和β-MCA中总计数之比。从图2可看出, 样品的误计率是随着 PSA 值而变化的, PSA 值存在一最佳范围, 在该范围内, 液闪仪对α和β核素的误计率均较低。对于图2中除 19.6 kBq  $^{241}\text{Am}$  以外的样品, 当 PSA 值设置在 24~30 之间时, 误计率均小于 1%。本文在测量正式样品时设置的 PSA 值均为 25。

另外从图2还可看出, 样品活度对误计率也有影响。样品中放射性活度不能太高, 否则误计率会显著增加, 如对 19.6 kBq  $^{241}\text{Am}$  样品, 误计率均在 10% 以上。不过, 只要满足一定的条件, 如α核素的活度小于 2.0 kBq(另外的实验结果表明, 此条件可放宽到 6.0 kBq), β核素的活度小于 16.0 Bq, 且样品的淬灭水平较低时, 设置合适的 PSA 值, 即可得到较为满意的甄别效果。

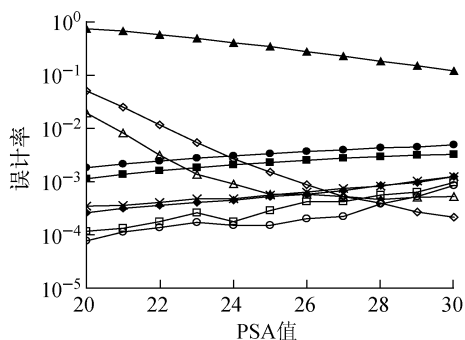


图2 PSA 值对误计率的影响(Wallac 1414)  
Fig. 2 Effects of PSA level on ratio of misidentified counts (Wallac 1414)

- △——0.387 kBq  $^{241}\text{Am}$ ; ◇——1.93 kBq  $^{241}\text{Am}$ ;
- ▲——19.6 kBq  $^{241}\text{Am}$ ; ○——0.334 kBq  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ;
- ×——1.64 kBq  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ; ●——16.2 kBq  $^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$ ;
- 0.148 kBq  $^{137}\text{Cs}$ ; ◆——0.756 kBq  $^{137}\text{Cs}$ ;
- 7.36 kBq  $^{137}\text{Cs}$

对于文献[9]中的模拟高放废液, 由于其中只加入了  $^{237}\text{Np}$ 、 $^{238\sim 241}\text{Pu}$ (混合 Pu)、 $^{241}\text{Am}$  等核素, 未加入  $^{90}\text{Sr}$ 、 $^{137}\text{Cs}$  等, 所以, 并未对混合样品的α/β甄别效果进行验证。而对于真实高放废液, 由于其中  $^{90}\text{Sr}$  和  $^{137}\text{Cs}$  的β放射性活度较总α高约 3~4 个数量级, 尽管利用萃取分离方法可从待测样品中除去绝大部分的  $^{90}\text{Sr}$  和  $^{137}\text{Cs}$ , 但由于  $^{90}\text{Sr}$  的子体  $^{90}\text{Y}$  在 TRPO 萃取流程中的

行为与 $^{241}\text{Am}$ 的很相似,大量 $^{90}\text{Y}$ 的存在不可避免地将会对 $\alpha$ 核素的分析产生不可忽视的干扰。

图3a为TRPO从真实高放废液中进行萃取后负载有机相样品的液闪谱,图中 $\alpha$ -MCA1和 $\beta$ -MCA1是第1次测量(萃取后约2 h)时 $\alpha$ -MCA和 $\beta$ -MCA中的谱, $\alpha$ -MCA2和 $\beta$ -MCA2是第2次测量(萃取后约40 d)时 $\alpha$ -MCA和 $\beta$ -MCA中的谱。由于图3a纵坐标采用绝对计数,而各MCA的计数相差很大,为了清楚表达全部4个谱,因此,图3a的数据同时在图3b中以相对计数进行表示。

从图3a可看出,在第1次测量时,样品中含有大量的 $^{90}\text{Y}$ ,其大部分被记录在谱 $\beta$ -MCA1中,而剩余的一小部分被误计入谱 $\alpha$ -MCA1中。由于样品中 $^{90}\text{Y}$ 的活度过高(约为50.0 kBq),

导致大量的 $\beta$ 被误计为 $\alpha$ (参见图2中 $\alpha/\beta$ 甄别效果),又因总 $\alpha$ 活度很低(约30 Bq),因此, $\alpha$ 峰在 $\alpha$ -MCA1中几乎被淹没(图3b中675~775道的位)。但在第2次测量时,样品中的 $^{90}\text{Y}$ 已由于衰变降低了3个数量级以上( $^{90}\text{Y}$ 的半衰期为64.1 h),因此,从 $\alpha$ -MCA2中可看到非常清晰的 $\alpha$ 峰(图3b中675~775道的位)。需说明的是, $\beta$ -MCA2的计数已基本与 $^{90}\text{Y}$ 无关,据推测大概与其它放射性稀土元素有关。

图3表明,在时间许可的情况下,对于 $^{90}\text{Y}$ 含量过高的样品,最好放置10个半衰期以上,待 $^{90}\text{Y}$ 降低3个数量级后再测量。如需快速测量,则可采用稀释的办法来降低 $\alpha/\beta$ 甄别的误计率(图4)。图4a为前述TRPO负载有机相稀释10倍后测量的结果(萃取后约4 h),图4b则为纵坐标改为相对计数后的谱。

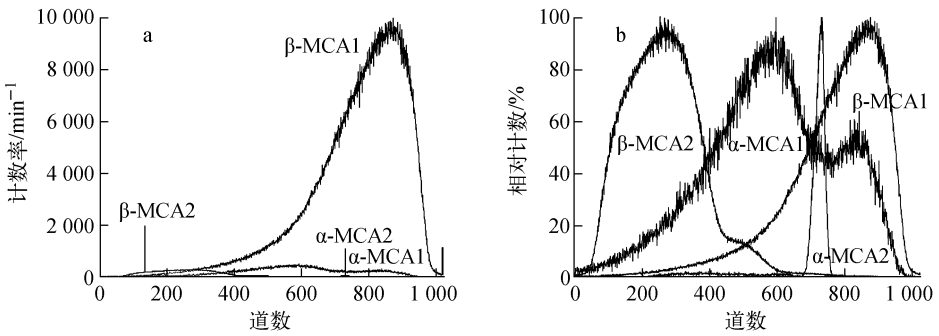


图3  $^{90}\text{Y}$ 对 $\alpha$ 测量的影响随着时间的变化

Fig. 3 Effect of  $^{90}\text{Y}$  on  $\alpha$  measurement at different time

a——绝对计数;b——相对计数

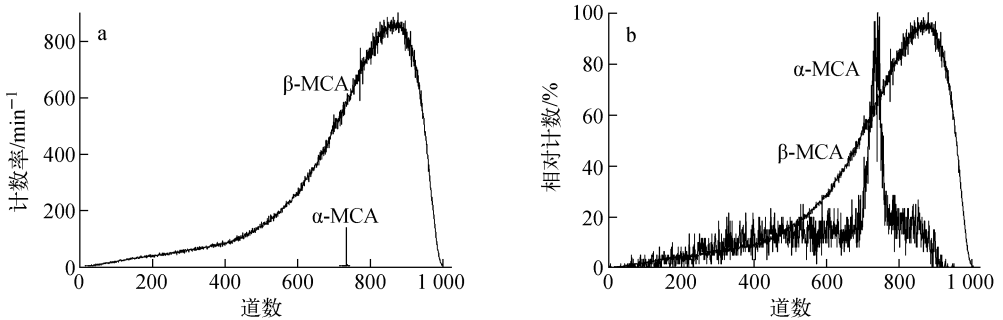


图4 样品稀释后 $^{90}\text{Y}$ 对 $\alpha$ 测量的影响

Fig. 4 Effect of  $^{90}\text{Y}$  on  $\alpha$  measurement for a diluted sample

a——绝对计数;b——相对计数

从图4可看出,尽管 $^{90}\text{Y}$ 与总 $\alpha$ 的比例基本未改变,但由于 $^{90}\text{Y}$ 的活度已降低了1个数

量级,从而使 $\alpha/\beta$ 甄别的误计率明显降低,因此,在图4b的 $\alpha$ -MCA可看到明显的 $\alpha$ 峰。当

然,由于 $^{90}\text{Y}$ 与总 $\alpha$ 的比例过于悬殊,需用解谱的方法(如梯形法等)扣除误计入 $\alpha$ -MCA中的 $^{90}\text{Y}$ 的影响。虽然解谱会带来一定的误差,但对于总 $\alpha$ 活度足够高,且需快速得到结果的情况仍是一较好的选择。

### 2.3 真实高放废液中 $\alpha$ 核素测量结果

采用图1所示的分离流程,分析了中国西北某厂真实高放废液中 $^{237}\text{Np}$ 、 $^{238\sim 240}\text{Pu}$ 和 $^{241}\text{Am}$ 的活度,并与1996年的历史数据进行了对比(表1)。从表1知,采用本文的分析方法得到的结果与1996年的历史数据吻合。

表1 真实高放废液中 $\alpha$ 核素活度对比

Table 1 Comparison of activity of  $\alpha$  nuclides in real HLLW

核素	相对误差 <sup>1)</sup> /%
$^{237}\text{Np}$	-5.0
$^{238\sim 240}\text{Pu}$	1.3
$^{241}\text{Am}$	-1.6

注:1)以1996年历史值为基准

### 3 小结

萃取液闪 $\alpha$ 能谱法是一种结合萃取法、液闪法和 $\alpha$ 能谱法的优点而建立起来的分析 $\alpha$ 核素的新方法,本文用该方法分析了真实高放废液中的 $\alpha$ 核素,分析结果与历史数据符合良好。针对真实高放废液的特殊性,即大量 $^{90}\text{Y}$ 干扰 $\alpha/\beta$ 甄别的问题,本文提出了推迟测量或稀释的解决方案,实际应用时可根据具体情况进行选择。

### 参考文献:

[1] 杨大助. 萃取-液闪法测定铈、钚、镅的研究及其在高放废液分析中的应用[D]. 北京:清华大学, 1991.

[2] 乔盛忠,刘亨军,佟伯庭,等. 高放废液中钚、镅含量及总 $\alpha$ 放射性活度的测定[J]. 原子能科学技术, 1992, 26(5): 61-65.

QIAO Shengzhong, LIU Hengjun, TONG

Boting, et al. Determination of Pu, Am and total  $\alpha$  activity for high-level liquid waste[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1992, 26(5): 61-65(in Chinese).

- [3] 田国新,梁俊福. TRPO处理高放废液过程中 $\alpha$ 核素的分离、测定方法[J]. 核化学与放射化学, 1996, 18(2): 122-128.
- TIAN Guoxin, LIANG Junfu. The solvent extraction separation for analysing  $\alpha$ -nuclides in HLLW[J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 1996, 18(2): 122-128(in Chinese).
- [4] 郭建锋,韩巧玲,施建祖. 溶剂萃取法分离测定高放废液中的 $\alpha$ 核素[J]. 原子能科学技术, 2001, 35(增刊): 83-88.
- GUO Jianfeng, HAN Qiaoling, SHI Jianzu. Solvent extraction separation and determination for  $\alpha$  nuclides in high-level liquid waste [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2001, 35(Suppl.): 83-88(in Chinese).
- [5] LALLY A E, GLOVER K M. Source preparation in alpha spectrometry [J]. Nucl Instrum Methods Phys Res, 1984, 223: 259-265.
- [6] McKLVEEN J W, McDOWELL W J. Liquid scintillation alpha spectrometry techniques [J]. Nucl Instrum Methods Phys Res, 1984, 223: 372-376.
- [7] YANG D Z, ZHU Y J, JIAO R Z. Determination of Np, Pu and Am in high level radioactive waste with extraction-liquid scintillation counting [J]. J Radioanal Nucl Chem: Articles, 1994, 183(2): 245-260.
- [8] DACHEUX N, AUPIAIS J. Determination of uranium, thorium, plutonium, americium, and curium ultratraces by photon electron rejecting  $\alpha$  liquid scintillation [J]. Anal Chem, 1997, 69(13): 2 275-2 282.
- [9] FENG X G, HE Q G. Simultaneous determination of  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{238\sim 240}\text{Pu}$  and  $^{241}\text{Am}$  in  $\text{HNO}_3$  solution by combining extraction, liquid scintillation counting, and  $\alpha$  spectrometry [J]. Nucl Instrum Methods Phys Res A, 2009, 609: 165-171.