

钚及其裂变产物钯、银、镉、锡、锑、锆的系统分离方法

余振华, 王秀凤, 丁有钱, 宋志君, 杨素亮, 杨志红, 张生栋

中国原子能科学研究院 放射化学研究所, 北京 102413

摘要: 描述了钚及其 6 种裂变产物钯、银、镉、锡、锑、锆的系统分离方法: 在强碱性阴离子交换树脂柱上将盐酸介质的辐照靶溶解液中的这些元素分为 5 组, 然后再针对各组目标元素进行分离和纯化, 可简便快速地从同一份靶溶解液中分离以上 7 种元素。采用辐照铀靶对分离方法进行了验证, 结果表明, 分离流程对 6 种裂变产物的化学回收率均大于 70%, 对 γ 谱仪测量干扰的主要核素去污因子均大于 1.0×10^3 , 可满足 ^{239}Pu 裂变谷区核素裂变产额测量对化学分离的要求。

关键词: 钚; 裂变产物; 系统分离

中图分类号: O615.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9950(2019)06-0537-07

doi: 10.7538/hhx.2019.YX.2019010

A Systematic Separation Procedure for Plutonium and Its Fission Products Palladium, Silver, Cadmium, Tin, Antimony and Zirconium

YU Zhen-hua, WANG Xiu-feng, DING You-qian, SONG Zhi-jun,
YANG Su-liang, YANG Zhi-hong, ZHANG Sheng-dong

China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275(126), Beijing 102413, China

Abstract: In this work, a process of systematic separation for Pu and its fission products Pd, Ag, Cd, Sn, Sb and Zr was established. Firstly, these elements in the solution of hydrochloric acid medium were divided into five groups on strong basic anion resin. Then the target elements were separated and purified for each group. The method is simple, rapid and can separate the above 7 elements from the solution of one target. The separation method was verified by using irradiated uranium target. The results show that the chemical yields of the separation process are more than 70% for the 6 fission products, and the decontamination factors of the main interfering nuclides for the gamma spectrometry measurement are more than 1.0×10^3 . The separation process can meet the requirements of chemical separation for fission yield measurement of valley nuclides from ^{239}Pu fission.

Key words: plutonium; fission product; systematic separation

收稿日期: 2019-01-22; 修订日期: 2019-04-10

作者简介: 余振华(1984—), 男, 安徽合肥人, 硕士, 助理研究员, 从事放射化学研究, E-mail: yzhlovehh@126.com

网络出版时间: 2019-11-07; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2045.TL.20191107.1029.010.html>

裂变产额是某一核素或某一质量链在裂变过程中产生的概率,它表征裂变过程中生成的某一裂变产物核素(或质量链)与总裂变数之间的关系,通常用每一百次核裂变所产生的该裂变产物原子数来表示。迄今已经发展了包括放化法、质谱法和直接 γ 能谱法等多种测量裂变产额的技术。其中直接 γ 能谱法只能测量裂变产额较高的核素,质谱法需要辐照大量易裂变核、长时间冷却且对仪器要求较高。因此测量质量链中谷区核素的产额采用放化法比较合适。谷区核素中 ^{109}Pd 、 ^{111}Ag 、 ^{115}Cd 、 ^{125}Sn 和 ^{127}Sb 的 γ 射线能量比较适合高纯锗 γ 谱仪测量,但由于其产额低,在测量前需要进行分离和纯化以满足测量要求。采用相对法测量谷区核素的产额时,需要一个峰区核素来参考计算裂变数,由于 ^{97}Zr 或 ^{95}Zr 的产额数据精度高,因此选择 ^{97}Zr 或 ^{95}Zr 比较合适。同时由于高丰度 ^{239}Pu 十分珍贵,因此在放化分离时,希望从一个靶中同时获取尽可能多的裂片元素并回收铀。这就要求对铯、钡、银、镉、锡、锑和锆进行系统分离。

对于铯、银、镉、锡、锑、锆的单独分离和提纯的方法有很多。沉淀法、萃取法、离子交换法^[1-11]均可实现它们的单独分离,但对它们系统分离的研究相对较少。Mathews^[12]利用 HCl -阴离子交换树脂分离了供质谱测量的无载体的裂变产物镉、锡。他首先用7 mol/L盐酸将辐照靶溶解,用亚硝酸钠将铀氧化至4价,过 HCl -阴离子交换柱,然后用7 mol/L盐酸-0.1 mol/L碘化氢解吸铀;用1 mol/L硝酸-0.1 mol/L盐酸解吸锡;用极稀的硝酸解吸镉。张春华等^[13]在分离铀及某些裂变产物时采用沉淀法结合离子交换法,同时分离了铯、锶、钡、稀土、锆、钼、锡、锑、碲、银、镉和钡等裂变产物元素,此分离方法已用于3 MeV中子诱发 ^{238}U 裂变产额的测定中。方法首先采用氯化银沉淀分离出银,再将盐酸介质溶解液蒸干并转化成硝酸介质进行组分离。

本工作拟根据铯、钡、银、镉、锡、锑和锆的化学性质,建立一种无需对铀靶溶解液进行蒸干的分离方法,实现从一个辐照后的铀靶中将它们分离出,为铀裂变的谷区核素 ^{109}Pd 、 ^{111}Ag 、 ^{115}Cd 、 ^{125}Sn 和 ^{127}Sb 的产额测量提供一种安全、易于操作的分离纯化方法。

1 实验部分

1.1 试剂与仪器

HZ201 阴离子交换树脂,粒径0.125~0.210 mm,

华正公司;N256 阴离子交换树脂,粒径0.074~0.105 mm,北京晨曦勇创科技有限公司;001 $\times$ 7强酸性阳离子交换树脂,粒径0.125~0.177 mm,华正公司; α -安息香肟/ $\text{SiO}_2\text{-P}$,粒径0.074~0.149 mm,本实验室自制^[14];浓硝酸 BV-Ⅲ、浓盐酸 BV-Ⅲ、浓氨水 BV-Ⅲ,北京化学试剂研究所;钯(GSB04-1743-2004)、银(GBW(E)082781-1)、镉(GBW(E)082822-1)、锡(BW30009-1000-C-50)、锑(BW30017-1000-NC-50)和锆(GBW(E)080359)标准溶液,北京坛墨质检科技有限公司; ^{239}Pu 示踪剂,比活度 1.1×10^4 Bq/g,4 mol/L硝酸介质,中国原子能科学研究院提供;高纯铝箔,纯度99.999%,北京伊诺凯科技有限公司;其它化学试剂均为国药集团化学试剂有限公司产品,纯度均为分析纯以上。

Tri-Carb 3170 TR/SL 型低本底液闪谱仪,美国PerkinElmer公司,0~292 keV区间的本底计数率为 10 min^{-1} ;BE3830型宽能HPGe γ 探测器,能量分辨率1.8 keV,相对效率30%,CANBERRA公司;X Series II型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS),美国Thermo Fisher Scientific公司。

1.2 实验方法

(1) 混合载体溶液的配制

采用减重法,首先将银标准溶液滴加到浓盐酸中,然后再滴加钯、镉、锡、锑和锆标准溶液,最后稀释至7.5 mol/L盐酸介质。

(2) 分析定量

将分离出的铯、银、镉、锡、锑和锆制备成10 mL的液体源,在BE3830型宽能HPGe γ 探测器5 cm位置测量。主要分析 ^{109}Pd 、 ^{111}Ag 、 ^{115}Cd 、 ^{125}Sn 、 ^{127}Sb 和 ^{95}Zr 对应的 γ 射线88、342、336、1 067、473、724 keV附近的干扰核素,并计算去污因子。铯、银、镉、锡、锑和锆的化学回收率测量采用电感耦合等离子体质谱(ICP-MS),铀的回收率测量采用液闪谱仪。

2 结果和讨论

2.1 组分离方法的建立

在6.0 mol/L以上盐酸溶液中,银、锆、铝、稀土、碱金属和碱土金属在强碱性阴离子树脂上不吸附,而铯、镉、钡、锡和锑吸附,故可在此条件下将裂变产物银和锆从辐照靶的溶解液中分离出来。在小于2.5 mol/L盐酸介质下,四价铀在强碱性阴离子树脂上不吸附,而镉、钡、锡和锑吸附,

所以可用低浓度盐酸将钷从强碱性阴离子树脂上解吸下来。浓盐酸介质下,钷和镉在强碱性阴离子树脂上分配系数小^[15],故可用浓盐酸将钷和镉同时从强碱性阴离子树脂上解吸下来。再采用不同解吸剂,分别解吸锡和锑,从而实现用一根强碱性阴离子树脂柱对钷及其6种裂变产物钷、银、镉、锡、锑、锆进行组分离。

由于钷靶需要采用高纯铝箔进行包裹,因而钷靶的最终溶解液中含有铝。为此采用5.0 mL 8.7 mol/L 盐酸溶解少量的高纯铝箔,然后加入5.0 mL 7.5 mol/L 盐酸溶液。滴加少量浓硝酸后,在表面温度100℃电热板上加热20 min,冷却后滴加少量²³⁹Pu指示剂(含²³⁹Pu 644.5 Bq),然

后上HZ201阴离子交换树脂柱(φ3 mm,柱体积V_c=1.0 mL),用5.0 mL 7.5 mol/L 盐酸淋洗,再用8.0 mL 1.0 mol/L 盐酸解吸²³⁹Pu。经液闪测量,解吸液中含²³⁹Pu 644.4 Bq,说明该方法可直接将靶溶解液中²³⁹Pu分离出。

称取少量的高纯铝箔,用5.0 mL 8.7 mol/L 盐酸溶解,然后加入5.0 mL 混合载体溶液。滴加少量浓硝酸后,在表面温度100℃电热板上加热20 min。冷却后上HZ201阴离子交换树脂柱(φ3 mm,V_c=1.0 mL),然后分别采用5.0 mL 7.5 mol/L 盐酸、8.0 mL 1.0 mol/L 盐酸淋洗。再用浓盐酸、8.0 mol/L 硝酸、0.5 mol/L 氨水解吸钷、钷和镉、锡、锑。实验结果列于表1和图1、2。

表1 HZ201 阴离子交换树脂柱上钷和镉的解吸

Table 1 Desorption of Pd and Cd from HZ201 anion exchange column

No.	浓盐酸 解吸体积/mL	加入量/μg		解吸液中量/μg		回收率Y/%	
		Pd	Cd	Pd	Cd	Pd	Cd
1	30.0	40.3	40.5	38.5	37.9	95.5	93.5
2	30.0	40.8	40.7	40.5	40.4	99.3	99.3

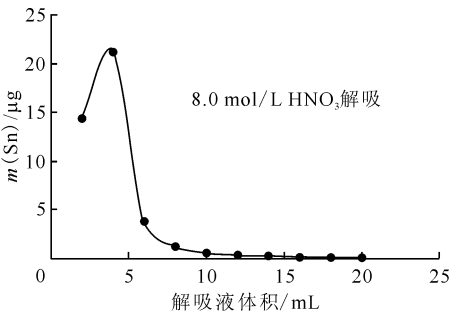


图1 锡解吸曲线

Fig.1 Desorption curve of Sn

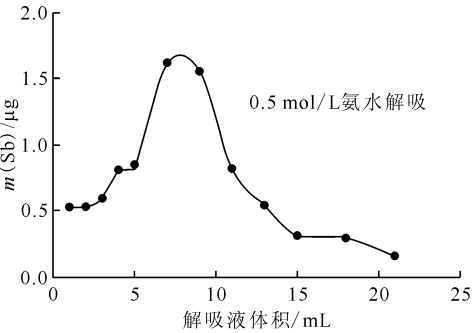


图2 锑的解吸曲线

Fig.2 Desorption curve of Sb

从以上实验结果可以看出,采用8.0 mL 1.0 mol/L盐酸,30.0 mL 浓盐酸,15.0 mL 8.0 mol/L 硝酸,15.0 mL 0.5 mol/L 氨水可实现钷,钷、镉、锡、锑的顺序解吸。根据实验结果给出组分离流程,示于图3。此组分离流程可避免含钷溶液的蒸发、降低操作的危险性及四氯化锡的挥发问题,并且所采用的解吸剂不含有机物,有利于质谱测量化学回收率。

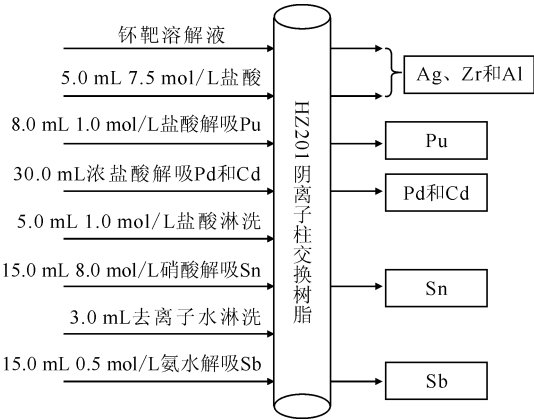


图3 组分离流程图

Fig.3 Flow chart of group separation

2.2 各组分的分离纯化

(1) 银和锆的纯化

从组分离中分离出的银、锆组分中含大量铝。采用氨水沉淀时,银与铵根离子形成银铵离子存在溶液中,而微量的氢氧化锆会被大量的氢氧化铝沉淀载带出。

往组分离出的银、锆和铝中加入 5.0 mL 浓硝酸(防止蒸发时形成二氧化锆),蒸发至近干。用去离子水溶解,转入离心管,并调至约 0.5 mol/L 氨水介质,离心。上清液中银采用 001 阳离子柱纯化。沉淀中的锆用 0.5 mol/L 硝酸溶解后,

采用硅胶柱纯化。图 4 为银、锆纯化流程。整个分离纯化流程对银和锆的回收率分别为 74% 和 76%。

(2) 钯和镉的纯化

将组分离出的钯和镉溶液转化成 0.1 mol/L 硝酸介质,此条件下镉在 N256 树脂上不吸附,而钯吸附,再采用浓盐酸解吸钯从而实现钯和镉的分离。最后再用 001 阳离子柱对钯和镉进行纯化,进一步去除钼和钨等裂变核素。整个分离、纯化流程对钯和镉回收率分别为 78% 和 85%。图 5 为钯和镉的纯化流程。

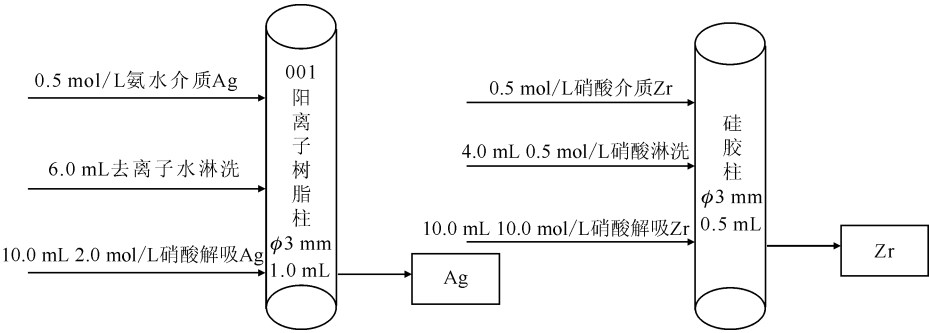


图 4 银和锆纯化流程
Fig. 4 Purification process for Ag and Zr

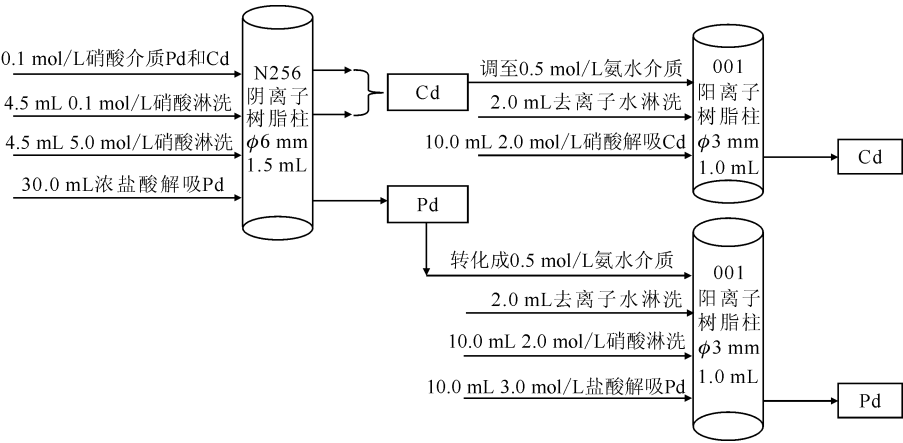


图 5 钯和镉的纯化流程
Fig. 5 Purification process for Pd and Cd

(3) 锡的纯化

组分离过程,虽然在解吸锡之前采用 1 mol/L 盐酸淋洗去除了部分钼,但在锡组分中仍然含有钼影响¹²⁵Sn的 γ 测量,因此需要对组分离出的锡进行进一步的纯化。α-安息香肟是一种能对钼特效萃取的络合剂,选择性极好,能在低浓度的盐酸和硝酸介质中定量萃取钼。因此选择 α-安息香

肟色层柱对锡进行纯化,提高对钼的去污因子。图 6 为盐酸浓度对 α-安息香肟柱(φ4 mm, V_c = 0.4 mL)分离锡和钼的影响,综合锡的回收率及对钼的去污,选择 0.5 mol/L 盐酸介质,在 α-安息香肟色层柱上纯化锡。

将组分离出的锡组分,转化成 0.5 mol/L 盐酸介质,并采用 α-安息香肟柱进行纯化,整个分

离纯化流程对锡的回收率为 77%。

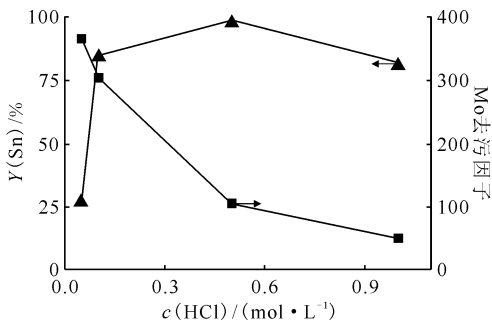


图6 盐酸浓度对 α -安息香肟树脂分离锡和钼的影响

Fig. 6 Effect of hydrochloric concentration on separation of Sn and Mo by α -benzoin oxime resin

2.3 推荐分离流程

根据以上研究结果,给出钚及其裂变产物钍、银、镉、锡、锑、锆的系统分离推荐流程如下:

(1) 组分离

① 配制钍、银、镉、锡、锑和锆的混合载体,各元素质量浓度均为 8.0 mg/L,介质为 7.5 mol/L 盐酸;② 靶溶解:用 5.0 mL 8.7 mol/L 盐酸溶解辐照、冷却后的靶;③ 往靶溶液中加入 5.0 mL 混合载体溶液和 0.8 mL 浓硝酸,100 °C 电热板上加热 20 min,促进同位素交换平衡(根据文献[13],此条件下可实现同位素交换平衡);④ 将上述溶液上 HZ201 阴离子树脂柱($\phi 3$ mm, $V_c = 1.0$ mL);⑤ 5.0 mL 7.5 mol/L 盐酸淋洗并与上柱流出液收集在一起,作为组分 1,主要含有银和锆溶液;⑥ 8.0 mL 1.0 mol/L 盐酸解吸钍,作为组分 2,含钍溶液;⑦ 30.0 mL 浓盐酸解吸钍和镉,作为组分 3,含镉和钍溶液;⑧ 5.0 mL 1.0 mol/L 盐酸淋洗;⑨ 15.0 mL 8.0 mol/L 硝酸解吸锡,作为组分 4,含锡溶液;⑩ 3.0 mL 去离子水淋洗;15.0 mL 0.5 mol/L 氨水解吸锑,作为组分 5,含锑溶液。

(2) 纯化

银和锆的相互分离及纯化:① 将组分离出的组分 1——银和锆蒸发至近干,并用去离子水溶解,用浓氨水调至 0.5 mol/L 氨水介质,离心;② 清液上 001 阳离子树脂柱($\phi 3$ mm, $V_c = 1.0$ mL),6.0 mL 去离子水淋洗,10.0 mL 2.0 mol/L 硝酸解吸银;③ 沉淀用 0.5 mol/L 硝酸溶解,溶液上硅胶柱($\phi 3$ mm, $V_c = 0.5$ mL),4.0 mL 0.5 mol/L

硝酸淋洗;10.0 mL 10.0 mol/L 硝酸解吸锆。

钍和镉的相互分离及纯化:① 将组分离出的钍和镉溶液转化成 0.1 mol/L 硝酸介质,上 N256 树脂柱($\phi 6$ mm, $V_c = 1.5$ mL),4.5 mL 0.1 mol/L 硝酸淋洗镉(与上柱流出液收集在一起,为镉组分),4.5 mL 5.0 mol/L 硝酸淋洗,30.0 mL 浓盐酸解吸钍;② 往镉组分中加入 0.1 mL 3.0 mol/L 氯化铵溶液,用浓氨水调至 0.5 mol/L 氨水介质,上 001 阳离子树脂柱($\phi 3$ mm, $V_c = 1.0$ mL),2.0 mL 去离子水淋洗,10.0 mL 2.0 mol/L 硝酸解吸镉;③ 将浓盐酸解吸的钍转化成 0.5 mol/L 氨水介质,上 001 阳离子树脂柱($\phi 3$ mm, $V_c = 1.0$ mL),2.0 mL 去离子水淋洗,10.0 mL 2.0 mol/L 硝酸淋洗,10.0 mL 3.0 mol/L 盐酸解吸钍。

锡纯化:含锡溶液(组分 4)中加入 5.0 mL 浓盐酸,110 °C 下蒸发至近干,用 5.0 mL 0.5 mol/L 盐酸溶解,溶液上 α -安息香肟树脂柱($\phi 4$ mm, $V_c = 0.4$ mL),5.0 mL 0.5 mol/L 盐酸淋洗(与上柱流出液收集在一起,为锡产品)。

锑介质转化:将组分离出的锑溶液蒸发至近干,用 1.0 mol/L 盐酸溶解。

2.4 分离流程的验证

由于辐照后的靶中含有大量裂变产物,致使²³⁹Pu的测量有困难,为此采用模拟料液来验证流程对²³⁹Pu的回收率。称取 0.123 g 高纯铝箔至 100 mL 烧杯中,加入 5.0 mL 8.7 mol/L 盐酸溶解,然后加入 5.0 mL 混合载体溶液。滴加少量浓硝酸后,在表面温度为 100 °C 电热板上加热 20 min。冷却后,加入 353.8 Bq ²³⁹Pu 指示剂。溶液上 HZ201 阴离子交换树脂柱($\phi 3$ mm, $V_c = 1.0$ mL),5.0 mL 7.5 mol/L 盐酸淋洗,8.0 mL 1.0 mol/L 盐酸解吸²³⁹Pu。解吸液经液闪测量含²³⁹Pu 353.6 Bq,即对²³⁹Pu的回收率约为 100%。

用辐照铀靶代替辐照钍验证其它核素的分离纯化。采用减重法称取 211.8 μg ²³⁵U,滴加到高纯铝箔上,在红外灯下烘干后,包裹好,密封于石英管中,在西安脉冲反应堆跑兔系统中辐照 1 h。冷却 1 d 后夹碎石英靶,将高纯铝箔包裹的铀靶,置于 100 mL 烧杯中,加入 5.0 mL 8.7 mol/L 盐酸溶解,然后加入 5.0 mL 混合载体溶液。再滴加少量浓硝酸,在表面温度为 100 °C 电热板上加热 20 min。按照推荐的分离流程进行分离。分离出的各产品首先在高纯锆 5 号位置(与探头相距 7 cm)测量,并用裂变产生的量除以产品中测量

得到的相应核素的活度,即为去污因子;然后将分离出的各产品稀释,用 ICP-MS 测量其中目标元素的含量,用测量出的各产品中目标元素的量除以分离前加入的量,即为化学回收率。结果列入表 2 和表 3。从表 2、表 3 数据可看出,该分离流程对钯、银、镉、锡、铈和锆的化学回收率均大于 70%,且对干扰 HPGe γ 测量的核素的去污因子大于 1.0×10^3 ,满足谷区核素¹⁰⁹Pd、¹¹¹Ag、¹¹⁵Cd、¹²⁵Sn和¹²⁷Sb的累积产额测量对化学分离的要求。

表 2 分离流程的化学回收率			
Table 2 Chemical recovery rate of separation process			
元素	加入量/ μg	分离出量/ μg	回收率/%
钯	40.0	31.0	77.5
银	40.0	30.0	75.0
镉	40.0	33.8	84.5
锡	40.0	30.9	77.3
铈	40.0	28.4	71.0
锆	40.0	31.5	78.8

表 3 分离流程对主要核素的去污因子						
Table 3 Decontamination factors of separation process for main nuclides						
核素	钯产品	银产品	镉产品	锡产品	铈产品	锆产品
¹⁴³ Ce	$>1.79 \times 10^6$	$>1.53 \times 10^6$	$>1.53 \times 10^5$	$>8.56 \times 10^5$	$>9.61 \times 10^4$	$>2.70 \times 10^5$
¹³¹ I	$>5.17 \times 10^5$	$>4.37 \times 10^5$	$>6.52 \times 10^4$	3.48×10^3	1.27×10^3	$>7.39 \times 10^4$
¹⁴⁷ Nd	$>6.28 \times 10^4$	$>4.50 \times 10^4$	$>1.85 \times 10^4$	$>1.77 \times 10^4$	$>3.38 \times 10^3$	$>4.76 \times 10^3$
¹⁴¹ Ce	$>2.67 \times 10^5$	$>1.51 \times 10^5$	$>1.96 \times 10^4$	$>6.43 \times 10^4$	$>1.15 \times 10^4$	$>3.11 \times 10^4$
¹⁴⁰ Ba	$>2.78 \times 10^5$	5.05×10^3	$>1.30 \times 10^5$	$>6.43 \times 10^4$	$>1.26 \times 10^4$	$>2.05 \times 10^4$
¹⁰⁵ Rh	1.44×10^4	8.74×10^3	2.13×10^4	1.36×10^3	3.96×10^3	$>1.96 \times 10^5$
¹⁴⁰ La	$>4.92 \times 10^6$	7.07×10^3	$>3.59 \times 10^6$	3.53×10^5	1.48×10^5	$>2.97 \times 10^6$
¹³¹ Te ^m	$>2.67 \times 10^5$	$>1.45 \times 10^5$	$>9.86 \times 10^4$	$>1.43 \times 10^5$	9.13×10^3	$>8.28 \times 10^4$
⁹¹ Sr	$>4.53 \times 10^4$	$>1.06 \times 10^6$	$>1.87 \times 10^5$	1.22×10^3	$>1.18 \times 10^5$	$>6.89 \times 10^5$
⁹³ Y	$>1.82 \times 10^5$	$>1.67 \times 10^5$	$>1.82 \times 10^4$	$>6.57 \times 10^4$	$>1.02 \times 10^4$	$>2.78 \times 10^4$
¹³⁷ Cs	$>6.91 \times 10^5$	3.70×10^2	$>3.08 \times 10^5$	$>1.62 \times 10^5$	$>2.75 \times 10^4$	$>4.28 \times 10^5$

3 结 论

本工作建立了银和钯、钷、钯和镉、锡、铈在阴离子交换柱 HZ201 上的组分离流程,及银和钯的相互分离和纯化,钯和镉的相互分离及纯化,锡的纯化方法。所建立的分离纯化流程操作简单,且避免了含钷溶液的蒸发。整个分离流程可实现钷的定量回收,对钯、银、镉、锡、铈和锆的化学回收率大于 70%,对主要干扰 HPGe 测量的核素去污因子大于 1.0×10^3 ,能够满足谷区核素¹⁰⁹Pd、¹¹¹Ag、¹¹⁵Cd、¹²⁵Sn和¹²⁷Sb的累积产额测量对化学分离的要求。

参考文献:

[1] 靳新娣,朱和平. 电感耦合等离子体质谱法测定地

质样品中的铂、钯、铑、铱和金[J]. 分析化学,2001, 29(6):653-656.

[2] Flynn K. Radiochemical procedures and techniques, ANL-75-24[R]. US: Argonne National Laboratory, 1975.

[3] 胡晓斌. 共沉淀分离富集-石墨炉原子吸收光谱法测定水中痕量铅和镉[J]. 理化检验:化学分册,2009, 45:1080-1082.

[4] Lee S H, Jung C H, Shon J S, et al. Separation of palladium from a simulated radioactive liquid waste by precipitation using ascorbic acid[J]. Sep Sci Technol, 2000, 35(3): 411-420.

[5] Hasegawa Y, Kobayashi I, Yoshimoto S. Extraction of palladium(Ⅱ) and platinum(Ⅳ) as chloro-complex acids into basic organic solvents[J]. Solv Extr Ion Exch, 1991, 9(5): 759-768.

- [6] Shimojo K, Goto M. Solvent extraction and stripping of silver ions in room-temperature ionic liquids containing calixarenes[J]. *Anal Chem*, 2004, 76: 5039-5044.
- [7] Rizvi G H, Mathur J N, Murali M S, et al. Recovery of fission product palladium from acidic high level waste solutions[J]. *Sep Sci Technol*, 1996, 31(13): 1805-1816.
- [8] Pappas A C, Wiles D R. New short-lived isotopes of tin found in fission[J]. *J Inorg Nucl Chem*, 1956, 2(1): 69-78.
- [9] Kraus K A, Nelson F. Anion exchange studies of the fission products[C]//*Proc Intern Conf Peaceful Use Atomic Energy: Vol 7*. Geneva: UN, 1955: 113-125.
- [10] Kraus K A, Michelson E C, Nelson F. Adsorption of negatively charged complexes by cation exchanges[J]. *J Amer Chem Soc*, 1959, 81(13): 3204-3207.
- [11] Riveros P A, Cooper W C. The extraction of silver from cyanide solutions with ion exchange resins[J]. *Solv Extr Ion Exch*, 1985, 3(3): 357-375.
- [12] Mathews C K. Fission yields in the symmetric region: yields of the stable isotopes of tin and cadmium in the thermal neutron fission of ^{235}U and ^{239}Pu [J]. *Phys Review C*, 1977, 15(1): 344-351.
- [13] 张春华, 崔安智, 张素静, 等. 铀及某些裂变产物的组分离[J]. *原子能科学技术*, 1984, 18(4): 434-440.
- [14] 丁有钱. 安息香脒固相分离材料的制备方法及其对钼的分离性能研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2014.
- [15] 张春华, 崔安智, 张红娣. 铀及某些裂变产物元素在 HCl-阴离子交换树脂体系中的分配系数测定[J]. *原子能科学技术*, 1990, 24(2): 67-68.