

文章编号:0253-9950(2008)03-0178-06

铀产品中镎和钚的分离与测定方法

刘权卫, 吴继宗, 肖国平, 杨大亭, 张永震

中国原子能科学研究院 放射化学研究所, 北京 102413

摘要:为了提高分离效果,避免测量过程中铀基体的干扰,满足核燃料后处理质量控制分析的要求,建立了氩气加压排空阴离子交换系统用于铀产品中 Np 和 Pu 的同时分离与测定的方法。模拟样品分离与测定结果表明:采用该系统可快速有效实现铀产品中 Np 和 Pu 的分离, Np 和 Pu 对铀的去污系数平均值分别为 8.6×10^4 , 9.6×10^4 , 避免了测量过程中铀基体的干扰, Np 和 Pu 的平均回收率分别为 78% ($n=6$) 和 86% ($n=6$)。

关键词:铀产品; 钚; 镎; 分离

中图分类号: O614.352 文献标志码: A

Separation and Determination of Neptunium and Plutonium in the Uranium Product

LIU Quan-wei, WU Ji-zong, XIAO Guo-ping, YANG Da-ting, ZHANG Yong-zhen

China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275(88), Beijing 102413, China

Abstract: Simultaneous separation and determination of plutonium and neptunium from the simulated uranium product specimen were developed for the requirement of uranium product quality control in nuclear fuel reprocessing. An argon pressurized anion-exchange evacuated column system was established for separation of plutonium and neptunium from the simulated uranium product specimen. After separation, neptunium and plutonium were measured with a large area grid ionization chamber-alpha spectrometry. The results show that determination of Np, Pu in uranium product with above-mentioned separation and measurement method meet the requirement of uranium product quality control in nuclear fuel reprocessing. The average decontamination factors are 8.6×10^4 , 9.6×10^4 respectively for the uranium with respect to neptunium and plutonium. The average recoveries of neptunium and plutonium are 78% ($n=6$) and 86% ($n=6$) respectively.

Key words: uranium product; Pu; Np; separation

镎和钚是极毒元素,核燃料后处理铀产品中对镎和钚的控制要求非常严格,由于核燃料后处理铀线尾端样品和铀产品样品中,镎和钚的含量非常低,铀镎和铀钚的含量比值非常高,不仅现有

的分析方法不能直接准确测定,即使经过分离,用现代仪器测量时,铀的基体干扰也不可忽视。国内核燃料后处理铀线尾端样品中以及铀产品样品中镎和钚测定方法中的主要问题是去除铀基体的

分离流程长、技术难度大、不能同时测定铀产品中的镅和钷^[1],很难满足后处理厂铀产品质量控制中现场分析对镅、钷测定的准确性、时效性和稳定性的要求,而国外对此类方法都不予报道。

在超铀元素分离中广泛采用的方法有萃取色层、离子交换等方法。由于离子交换法,特别是阴离子交换法,在超铀元素分离中具有很好的分离效果,能够分离富集微量及痕量的元素,同时又具有操作简单、易于实现等优点,在核工业领域被广泛采用。到二十世纪七十年代,高压离子交换色谱(high pressure ion exchange chromatography, HPIEC)使经典离子色谱(classical ion exchange chromatography, CIEC)发生了深刻的变革,从而进入了现代色谱的新阶段^[2]。和经典离子色谱相比,高压离子色谱具有 6 个优点:(1)速度快、效率高;(2)解决了升温操作及强放物质的释气问题;(3)设备小型化;(4)减少了试剂的消耗和废液量;(5)结果稳定可靠,重现性好,操作方便;(6)灵敏度高。但是对于需要强酸的无机元素分离体系,高压离子色谱装置的造价很高,对于大批量的分析测试任务难以胜任,因此发展新的高效廉价的分离技术具有重要意义。龚治湘等^[3-4]于 1994 年开始使用一种“减压微色谱柱技术”的方法,用于铀的富集,效果良好。然而减压操作需要在一定的真空条件下进行,实现批量操作和自动化比较困难。在此基础上郭冬发等^[5]设计了一种脉冲增压毛细管分离富集系统。该系统分离效果良好,装置更加简便,易于实现批量操作和自动化。同时由于装柱过程简单,同经典离子交换法基本相同,可以方便的采用不同要求的离子交换树脂,因此比高压离子色谱更加灵活、适应性更强。本工作拟将脉冲增压毛细管分离富集系统和高压离子交换色谱的优点相结合,自行设计加压排空离子交换系统,为核燃料后处理铀产品及铀线尾端铀样品中钷和镅的同时分离及测定建立一个有效方法,可用于核燃料后处理铀线的质量控制。

1 加压排空阴离子交换系统的原理

根据随步理论,总的理论塔板高度由纵向扩散、液流中的传质、涡流扩散、粒内扩散引起的理论塔板高度组成。高压离子色谱在很小的微粒树脂情况下,湿树脂的半径很小,由于由粒内扩散引起的理论塔板高度和湿树脂半径的平方成正比,

因此粒内扩散过程可以忽略;同时床的空隙系数很小,而纵向扩散引起的理论塔板高度和空隙系数成正比,因此纵向扩散引起的理论塔板高度也可以忽略,则塔板高度主要决定于液流传质和涡流扩散的耦合。这就是高压离子色谱比普通的离子交换理论塔板高度小、理论塔板数大、柱效高的原因。本工作设计的加压排空柱系统尽管其所用的树脂半径和柱子的空隙系数都不如离子色谱那么小,但是同普通的离子交换相比仍然降低了很多,因而仍然有效地降低了由纵向扩散和粒内扩散引起的理论塔板高度。

由于普通的离子交换和高压离子色谱是通过液流的重力和后方液流的压力推动液流前进,而柱壁和树脂颗粒对液体的阻力较大,随着液流在树脂颗粒间的前进,后面局部液流的流速变化越来越大,则产生的推动力变化也越来越大,造成前方液流的流速变化越来越大,前方溶液中质点的涡流效应和横向扩散效应越来越大。在加压排空柱系统中,液流是通过氩气压力推动,在氩气推动液流前进的过程中阻力很小,其流速变化很小,各局部液流推动前方液流前进的推动力基本相同。而且在加压排空柱系统操作过程中,溶液是间歇式加入,即氩气只推动很小体积的液流前进,造成液流束之间的速率差异很小,因此涡流效应和质点的横向扩散效应很小,从而降低了由液流中传质引起的理论塔板高度。这样由于液流中传质引起的理论塔板高度的降低而使总理论塔板高度进一步降低,从而增加了理论塔板数,提高了柱子的分离效果。

2 实验部分

2.1 仪器和试剂

²⁴¹Am 标准溶液,国防科工委放射性计量站提供,标定日期为 1991 年 3 月 20 日;Pu 标准溶液,采用恒电位库仑法定值后准确稀释;²³⁷Np 标准溶液,国家放射性活度标准溶液(GBW04328);Y701 树脂,弱碱性阴离子交换树脂,结构为 R-NH₂,粒度约 75 μm,核工业北京化工冶金研究院提供;氢氟酸、亚硝酸钠,分析纯,北京化工厂;氯化铁,分析纯,天津市耀华化工厂;其他试剂均为分析纯。

300 cm² 大面积屏栅电离室 α 谱仪,自制,仪器本底,0.2 h⁻¹,灵敏度,1.2×10⁻⁴ Bq,分辨率,50 keV,探测效率 45%;加压排空阴离子交换柱

系统,自制,色谱系统示意图示于图 1,该系统采用国产流通阀(北京历元公司),国产聚四氟乙烯管连接,其它部分为自行加工,不锈钢排空柱容量约为 15 mL,阴离子交换柱柱长为 10 cm,柱内径约 3 mm,树脂粒度约为 $75\ \mu\text{m}$,工作柱压强为 0.7 MPa,流速为 1 mL/min。

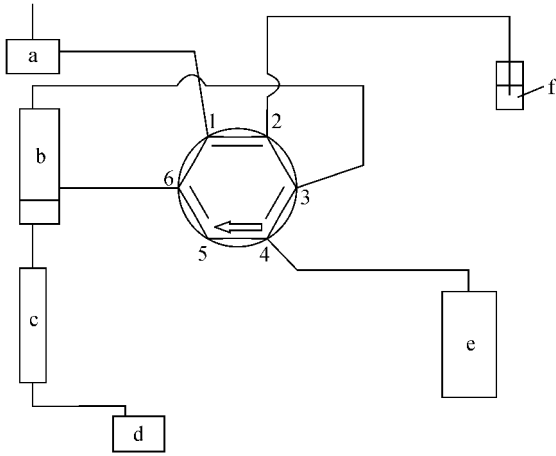


图 1 加压排空阴离子交换色谱系统

Fig. 1 Argon pressurized anion-exchange evacuated column system

- a——进液口(Ingress orifice), b——储液罐(Reservoir),
c——排空柱(Evacuated column),
d——出液口(Ejection orifice),
e——进气口(Argon ejection orifice),
f——排气口(Argon ingress orifice),
1—6——阀门节点(Nodes of the valve)

2.2 分析程序

2.2.1 调价调酸 取模拟样品 10 mL,加入 0.2 mL 0.5 mol/L 盐酸羟胺溶液和 0.1 mL 1.0 mol/L 氨基磺酸亚铁溶液,搅匀后,85 °C 水浴 25 min 后,静置待凉后加入少量的亚硝酸钠,再加适量浓硝酸使硝酸浓度约为 7.6 mol/L。

2.2.2 平衡柱 将六通阀置于单线通状态,用于 7.6 mol/L 硝酸溶液 1 mL 上柱从进液口加入,溶液从进液口通过六通阀节点 1 和节点 6 进入储液罐,并用空进样器从进液口注入空气使样品完全进入储液罐,氩气通过节点 4 而停止于节点 5。转动六通阀使其处于双线通状态,则氩气通过六通阀节点 4 和节点 3 进入排空柱上端将溶液从储液罐压入离子交换柱流出并进入废液瓶中。按上述方法重复 5 次。

2.2.3 进样 在进样时,将六通阀置于单线通状态,样品从进液口通过六通阀节点 1 和节点 6 进

入储液罐,并用空进样器从进液口注入空气使样品完全进入储液罐,氩气通过节点 4 而停止于节点 5。转动六通阀使其处于双线通状态,则氩气通过六通阀节点 4 和节点 3 进入排空柱上端将样品从储液罐压入离子交换柱并流出。

2.2.4 洗涤 将六通阀置于单线通状态,取淋洗液 7.6 mol/L 硝酸溶液 1 mL,从进液口加入,通过六通阀节点 1 和节点 6 进入储液罐,并用空进样器从进液口注入空气使淋洗液完全进入储液罐,氩气通过节点 4 而停止于节点 5。转动六通阀使其处于双线通状态,则氩气通过六通阀节点 4 和节点 3 进入将淋洗液从储液罐压入离子交换柱洗涤后流出。再取等量淋洗液淋洗,反复淋洗至淋洗完全。

2.2.5 洗脱 将六通阀置于单线通状态,取 0.35 mol/L HNO_3 -0.01 mol/L HF 溶液 1 mL,将洗脱液从进液口加入,通过六通阀节点 1 和节点 6 进入储液罐,并用空进样器从进液口注入空气使洗脱液完全进入储液罐,氩气通过节点 4 而停止于节点 5。转动六通阀使其处于双线通状态,则氩气通过六通阀节点 4 和节点 3 进入将洗脱液从储液罐压入离子交换柱洗涤后流出。再取等量洗脱液洗脱至洗脱完全。

2.2.6 柱保护 洗脱结束后,用 10 mL 二次水按上述进样排空过程淋洗交换柱,以避免该色谱柱系统被腐蚀。

3 结果和讨论

3.1 大面积屏栅电离室 α 谱仪的刻度

用减量法称取 ^{241}Am 标准溶液(400.5 kBq/g) 0.0863 g 转入 25 mL 容量瓶中,用 1 mol/L 硝酸定容至满刻度,以此溶液作为刻度大面积屏栅 α 谱仪的标准,于 2004 年 11 月 3 日进行刻度。根据放射性衰变定律计算可得该标准当日的比活度为 391.9 kBq/g,则稀释后的放射性标准溶液活度浓度为 1 353 Bq/mL。该 300 cm^2 大面积屏栅 α 谱仪所刻度的探测效率平均为 40.04% ($n=6$)。

3.2 铀的淋洗以及加压排空阴离子交换系统的分离效果检验

为了解样品的分离情况,在淋洗铀以及镓、钷的洗脱液中都要用铀激光荧光仪测量铀的浓度,在测量镓和钷的洗脱液中,为了避免镓和钷对铀荧光测量产生干扰,采用标准加入法。

为了解该系统的淋洗效果,称取硝酸铀酰后

用浓硝酸加热溶解后定容,铀溶液的质量浓度约为 102.4 g/L。取上述铀溶液 2.5 mL,加入 2.5 mL 二次水,混匀后取 3 mL 上柱。则上柱铀溶液的质量浓度约为 51.2 g/L。用 7.6 mol/L 硝酸淋洗,每 1 mL 排空 1 次,分别收集第 10, 15, 18, 20, 22 mL,用大面积屏栅电离室 α 谱仪进行测量。铀的淋洗曲线示于图 2,由图 2 可知,铀溶液的质量浓度随淋洗体积的增加快速下降,淋洗越来越困难,当铀的质量浓度为 0.5 mg/L 时,再继续淋洗已没有实际应用价值。当淋洗体积为 20 mL 时,铀的质量浓度从 51.2 g/L 降低到 0.48 mg/L,降低了十万倍以上。采用同样的离子交换柱而不进行加压排空操作,则当淋洗体积为 20 mL 时,铀的质量浓度只降低约 1 000 倍。由此可见,加压离子交换系统要比普通离子交换的分离效果好得多。加压排空离子交换系统对于铀产品及铀线尾端铀样品的分离,对铀的去污系数远高于普通离子交换分离法,能够满足测量时铀基体不干扰的要求。

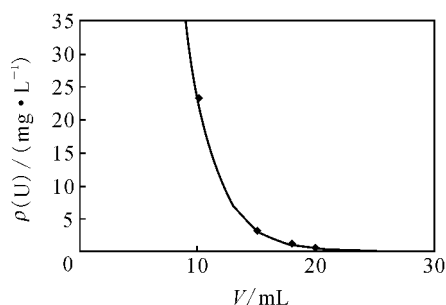


图 2 铀的淋洗曲线

Fig. 2 Elution curve of uranium

3.3 溶液中镅钷的价态调整

用阴离子交换分离镅或钷的文献^[6-8]较多,其基本原理都是将钷或者镅的价态调整到四价,在硝酸体系(酸度大于 7 mol/L)中形成硝酸和钷或者镅的络合阴离子,在阴离子交换色谱柱上被交换吸附,由于在低酸情况下,硝酸和钷或者镅的络合阴离子解离成阳离子或者络合阳离子,而不被阴离子交换树脂吸附,因此采用低酸(酸度低于 0.5 mol/L)可将钷或者镅从树脂上洗脱,而镅的阴离子交换原理同钷的基本相同。要想从同一样品中分离镅和钷,必须将镅和钷同时调整为四价。为此首先将镅还原至 Np(IV),钷还原至 Pu(III),再将钷氧化至 Pu(IV),尽管从热力学的角度分

析,在将三价钷氧化至四价钷的同时也能将四价镅氧化至五价^[9]。但是从动力学的角度分析,氧化 Np(IV)至 Np(V)速度很慢,该反应属延迟过程类型,因为这个反应需要进行四价镅离子及其水化层结构的重组^[9]。而在酸性溶液中用亚硝酸氧化三价钷至四价即使在室温下其反应的速度也很快^[10]。因此可利用此动力学差异,使溶液中的 Pu(III)氧化至 Pu(IV)而镅基本保持四价。综合分析,将溶液中的镅和钷都调整至四价是可行的。

取²³⁷Np 标准溶液(486 μg/L)10 L,钷标准溶液(12.47 mg/L)0.3 mL,调整酸度约为 1 mol/L,加入 0.2 mL 盐酸羟胺溶液和 0.1 mL 氨基磺酸亚铁溶液,搅匀,85 ℃水浴 25 min 后,使镅被还原至 Np(IV),钷被还原至 Pu(III)。静置待凉后再加入适量硝酸(颜色变成黄色的浓硝酸可不加亚硝酸钠,否则加入少量的亚硝酸钠)。此时溶液中钷被氧化至 Pu(IV),酸度约为 7.6 mol/L。将该溶液全部上加压阴离子交换系统,并收集穿透液,用大面积屏栅 α 谱仪进行测定。结果表明,该穿透液中没有镅和钷,表明溶液中镅和钷同时调整到四价切实可行。

3.4 钷的分离

阴离子交换法分离钷的理论和方法都比较成熟。大部分实验表明,硝酸浓度在 7.6~7.8 mol/L,钷能有效形成 $\text{Pu}(\text{NO}_3)_5^-$ 和 $\text{Pu}(\text{NO}_3)_6^{2-}$;硝酸浓度小于 7.6 mol/L 则由于钷形成 $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ 或者钷与硝酸络合成正离子而影响上柱效果;如果硝酸的浓度大于 7.8 mol/L 则又能形成 $\text{H}_2\text{Pu}(\text{NO}_3)_6$ 影响上柱效果,因此采用 7.6 mol/L 的硝酸作为四价钷的底液上柱。钷的洗脱方法主要有稀酸洗脱、还原洗脱、稀硝酸和氢氟酸联合洗脱。对所拟定的镅钷同时分离法,由于还原洗脱可能造成还原剂的遗留,不利于氧化法洗脱镅。而在稀酸洗脱的方法中,文献^[10]表明,硝酸浓度在 0.30~0.38 mol/L 时,洗脱效果最佳,这是由于过低的硝酸浓度会使四价钷水解,因此用于钷洗脱的硝酸浓度为 0.35 mol/L。尽管稀硝酸和氢氟酸联合洗脱的方法也被采用,但是没有具体的文献比较其和稀硝酸洗脱效果的差异,本工作将通过实验对二者的洗脱效果进行比较,从而选择最佳的洗脱方式。

取钷标准溶液(12.47 mg/L)0.3 mL,调整酸度约 1 mol/L,加入 0.2 mL 盐酸羟胺溶液和 0.1 mL 氨基磺酸亚铁溶液,搅匀,85 ℃水浴 25 min

后,静置待凉后加入少量的亚硝酸钠,再加入适量硝酸。此时溶液中钚为四价,酸度约为 7.6 mol/L。将该溶液全部上柱,收集穿透液,用 7.6 mol/L 硝酸淋洗 10 mL,再用 0.35 mol/L 硝酸洗脱 5 mL,每 1 mL 排空一次,并分别收集;在同样情况下,用 0.35 mol/L 硝酸和 0.01 mol/L 氢氟酸的混合液洗脱,每 1 mL 排空一次,并分别收集,用大面积屏栅 α 谱仪对穿透液和洗脱液进行测定。结果表明,该穿透液中没有钚。由于只有四价钚在硝酸溶液中和硝酸根形成络阴离子而被阴离子交换树脂吸附,因此可以判定该溶液中用的钚已被调整为四价。钚的洗脱曲线示于图 3,由图 3 可知,采用 0.35 mol/L HNO_3 -0.01 mol/L HF 的洗脱效果远优于用 0.35 mol/L HNO_3 进行洗脱。对于钚溶液(浓度标准)上柱后的总量进行活度转换后进行计算,结果表明,采用 0.35 mol/L HNO_3 -0.01 mol/L HF 的混合液进行洗脱,钚的标准回收率为 102% ($n=6$)。

根据色谱理论和钚的洗脱曲线可知,基线宽度 $W_b=2.32$ mL,保留体积 $V_R=2.46$ mL,根据理论塔板数的计算公式,则理论塔板数为 18。而本工作采用的离子交换柱的柱长为 10 cm,理论塔板高度为 $\text{HETP}=10/18=0.56$ cm。如果只从理论塔板高度来看,采用加压离子交换系统分离效果似乎并不高,但事实上由于超铀元素分离非常困难,这是因为钚在洗脱过程中的行为较复杂,其中的具体化学理论过程现在仍有争议。目前的塔板理论还不能处理因化学反应因素而引起的理论塔板高度。对于钚的离子交换分离,加压排空柱系统理论塔板数为 18,和阴离子交换法相比,分离效果得到显著提高。

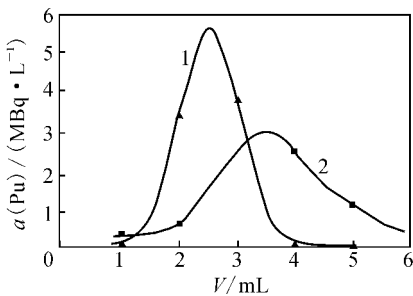


图 3 钚的洗脱曲线

Fig. 3 Elution curve of plutonium

1—0.35 mol/L HNO_3 +0.01 mol/L HF,

2—0.35 mol/L HNO_3

3.5 镱的分离

取 Np 标准溶液(486 $\mu\text{g/L}$)10 mL,加入 0.2 mL 盐酸羟胺溶液和 0.1 mL 氨基磺酸亚铁溶液,搅匀,85 $^{\circ}\text{C}$ 水浴 25 min 后,静置待凉后加入少量亚硝酸钠,再加入硝酸约 8 mL。此时溶液中镱为四价,酸度约为 7.6 mol/L。将该溶液全部上柱,收集穿透液,用 7.6 mol/L 硝酸淋洗 10 mL,用 0.35 mol/L 硝酸和 0.01 mol/L 氢氟酸的混合液洗脱,每 1 mL 排空一次,并分别收集,用大面积屏栅 α 谱仪对穿透液和洗脱液分别进行测定。穿透液的测定结果表明其中没有镱。由于只有四价镱在硝酸溶液中和硝酸根形成络阴离子而被阴离子交换树脂吸附,因此可以判定该溶液中的镱已被调整为四价。结果表明,采用 0.35 mol/L 硝酸和 0.01 mol/L 氢氟酸的混合液进行洗脱,镱的标准回收率为 93% ($n=6$)。

3.6 模拟铀产品中镱和钚的分离与测定

3.6.1 模拟铀产品的配制 称取硝酸铀酰 26.5 g 后,用约 100 mL 2 mol/L 硝酸加热溶解,待凉后加入 60 mL 酸度为 1.0 mol/L 的镱标准溶液(486 $\mu\text{g/L}$),再加入 7 μL 钚标准溶液(12.47 mg/L),搅拌均匀后转入 250 mL 容量瓶中定容,则该溶液中铀的质量浓度约为 50.3 g/L,镱的质量浓度为 117 $\mu\text{g/L}$,钚的质量浓度为 0.35 $\mu\text{g/L}$,即每克铀中镱质量为 2.33×10^{-6} g,钚质量为 7.00×10^{-9} g。上述模拟铀产品样品和后处理厂铀产品的标准近似。

3.6.2 模拟铀产品中镱钚的分离效果 取 10 mL 上述铀产品模拟样品,调价调酸后上柱,收集穿透液,用大面积屏栅电离室 α 谱仪测量镱和钚的含量,结果表明穿透液没有镱和钚。

用 7.6 mol/L 硝酸淋洗,每淋洗 1 mL 排空一次,共淋洗 20 mL,再用 0.3 mol/L 硝酸和 0.01 mol/L 氢氟酸混合液同时洗脱镱和钚,共洗脱 5 mL,用激光荧光仪测量洗脱液中铀含量,再用大面积屏栅电离室 α 谱仪测量镱和钚的含量,测量结果列入表 1,由表 1 可计算出镱的平均回收率为 78%,镱对铀的平均去污系数为 8.6×10^4 ;钚的平均回收率为 86%,钚对铀的平均去污系数为 9.6×10^4 ,测定结果能够满足质量控制的要求。从镱和钚的分离结果还可以看出,加压排空阴离子交换系统稳定性也很好。

表1 样品分离后的测量结果

Table 1 Results of measurement after separation of simulated specimen

No	$\rho(\text{U})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$a(\text{Np})/(\text{kBq} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Np})/(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	$a(\text{Pu})/(\text{kBq} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Pu})/(\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$
1	0.77	4.9	0.19	1.4	0.62
2	1.20	5.1	0.20	1.3	0.57
3	0.93	4.3	0.16	1.3	0.57
4	0.83	5.2	0.20	1.5	0.66
5	0.87	4.5	0.17	1.3	0.57
6	0.95	4.7	0.18	1.4	0.62

4 结 论

建立了铀产品以及铀线尾端样品中同时分离和测定镎和钚的新方法,该方法可满足核燃料后处理铀产品和铀线尾端样品中对分析准确性、稳定性和时效性的要求,对核燃料后处理厂铀线质量控制将有积极的促进作用。自行设计和加工的加压阴离子交换系统采用气液路结合的方式,对离子交换分离方法作了进一步的探索,有效提高了分离效果和分离速度,解决了释气等问题,对于其他领域的离子交换分离也有一定的借鉴作用。

参考文献:

- [1] 王孝荣,林灿生,刘峻岭,等. 铀中微量 ^{237}Np 的分析[J]. 核化学与放射化学,2002, 24(1): 16-20.
- [2] Saari-Nordhaus R, Anderson Jr J M. Recent Advances in Ion Chromatography Suppressor Improve Anion Separation and Detection[J]. J Chromatogr, A, 2002, 956: 15-22.
- [3] 龚治湘,宋金如. 减压色谱柱分离富集铀的性能研究[J]. 高等学校化学学报,1994, 15(8): 1 128.
- [4] 龚治湘,宋金如. 减压色谱柱技术在分析化学中的应用研究[C]//核工业地质分析测试技术与质量

管理研讨会论文集. 北京:核工业北京地质研究院,2002.

- [5] 郭冬发,崔建勇,武朝晖,等. 脉冲增压毛细管分离富集 ID-ICP-MS 测定地质样品中微量锂的方法研究[J]. 质谱学报,2002, 23(4): 193-199.
- [6] 刘权卫,肖国平,吴继宗,等. 废 TBP 煤油中钚和总 α 的测定[J]. 核化学与放射化学,2004, 26(4): 234-237.
- [7] Van Loon L R, Hummel W. Radiolytic and Chemical Degradation of Strong Acidic Ion-Exchange Resins: Study of Ligands Formed [J]. Nucl Technol, 1999, 128(3): 359-401.
- [8] Wei Y Z, Arai T, Kumagai M, et al. An Advanced Ion Exchange Process for Reprocessing Spent Nuclear Fuels - Electrolytic Reduction of U(VI) to U(IV) and Separation of U(IV) From FPs[C]// Proc of GLOBAL'2001, (2001) Int Conf on Back-End of the Fuel Cycle. Paris, France, 2001.
- [9] 鲍林,卡列林. 铜系元素氧化还原热力学[M]. 朱永贻,丛进阳,焦荣洲,等译. 北京:原子能出版社,1980: 107-109.
- [10] 罗文宗,张文清. 钚的分析化学[M]. 北京:原子能出版社,1991: 31-34.