

痕量铀分析样品的预处理方法

梁 靛, 苏 涛, 谈树苹, 吴继宗

中国原子能科学研究院 放射化学研究所, 北京 102413

摘要:后处理厂运行过程中的痕量铀样品分析受到 H^+ 和 NO_3^- 干扰,严重影响其分析速度与准确度。本工作针对时间分辨荧光法分析痕量铀样品的主要干扰 H^+ 和 NO_3^- ,使用离子交换纤维建立了纤维浸泡式样品预处理方法。该方法有效消除 H^+ 和 NO_3^- 对铀酰荧光分析的干扰,处理后的样品可以使用工作曲线法测量,操作简便、准确度高,适合于手套箱中使用,满足了后处理厂痕量铀样品预处理方法急需改进的需求。经模拟样品分析 6 次测量精密度优于 5%,测量结果经 t 检验($\alpha=0.02$)证明结果准确可靠。

关键词:痕量铀;时间分辨荧光法;离子交换纤维

中图分类号:O657.4 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9950(2015)02-0077-07

doi:10.7538/hhx.2015.37.02.0077

Sample Pretreatment Method for Analysis of Trace Uranium

LIANG Liang, SU Tao, TAN Shu-ping, WU Ji-zong

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

Abstract: Some technological operational states are monitored through the analysis of trace uranium in nuclear fuel reprocessing pilot plant, so the analysis of trace uranium plays important role in the pilot plant. Time-resolved fluorescent (TRF) method is used to analyze trace uranium in the analytical laboratory of pilot plant, but the accuracy of measuring results is not very good because of the existence of some interfering ions. For accurate determination of UO_2^{2+} , a rapid and simple sample pretreatment method that can eliminate the influences is established, which can meet the demand of the trace uranium analysis in nuclear fuel reprocessing pilot plant. In this method, a new type of ion exchange materials—ion exchange fiber (IEF) has been used to remove the interfering ions. The Sr is 5% ($n=6$) in this work. The determent results are accurate and reliable by t test ($\alpha=0.02$).

Key words: trace uranium; time resolved fluorescence; ion exchange fiber

在后处理厂痕量铀的分析是铀含量测定工作中的重要内容之一,后处理厂运行过程中溶解尾气的吸收液,洗涤有机相的碱液,中放废液蒸发的冷凝水,倒空槽、供料槽和接收槽的设备清洗液等许多需要分析监测的体系,铀的含量都属于痕量

铀范围,每日需要用时间分辨荧光法分析的痕量铀样品多达约 40 个。因此建立一个简便、快捷、便于在手套箱中操作的样品预处理方法对于时间分辨荧光法的应用具有重要意义。

时间分辨荧光法是测定铀含量最灵敏的分

析方法之一^[1-2],但是易受多种干扰因素的影响。大量研究结果已经明确:溶液中的共存离子是影响时间分辨荧光法测痕量铀最主要的干扰因素^[3-4]。大部分金属离子在一定浓度范围内对痕量铀的时间分辨荧光测定基本上没有影响,但是作为后处理最常应用的硝酸,其干扰非常明显。随着硝酸和硝酸根浓度的增大,铀的荧光强度会迅速降低。文献[3]已通过大量实验证明: H^+ 的影响主要表现在对铀荧光络合物的破坏以及影响荧光寿命两方面, NO_3^- 对激发光有吸收, Fe^{3+} 会吸收激发光。其中 H^+ 对铀荧光猝灭程度最大, Fe^{3+} 在后处理工艺中的含量一般不超过铀含量的100倍,对铀的测量没有影响可以忽略(Fe^{3+} 含量在铀含量250倍以内时没有干扰^[4])。因此 H^+ 和 NO_3^- 是时间分辨荧光法测痕量铀最主要的干扰因素,预处理方法的建立主要围绕消除这两方面的干扰展开。后处理厂采用的溶剂萃取法,操作步骤多,手套箱中操作不便,需要改进。

离子交换纤维(ion exchange fiber, IEF)是一种纤维状离子交换材料,以纤维素为骨架,离子交换基团大多存在于纤丝表面,因此在离子交换过程中,纤维相对于树脂,减少了离子在树脂颗粒中的渗透过程,大大提高了离子交换的速度,且这类交换材料比表面积大(交换容量大),易洗脱,再生容易^[5-6]。本工作针对主要干扰离子 H^+ 和 NO_3^- ,拟采用离子交换纤维建立一条痕量铀样品预处理路线,利用纤维特殊的物理结构将其直接浸泡在样品溶液中进行吸附,以摆脱传统的离子交换法必须将交换材料填装在交换柱中使用的方式,方法操作简单,适合批量样品分析。

1 实验部分

1.1 试剂和仪器

铀标准溶液(GBW(E)080173),核工业北京化工冶金研究院;荧光增强剂(主要成分焦磷酸盐、磷酸盐, $pH \approx 7$),核工业北京地质研究院;碳酸钠、硝酸铁、浓硝酸,分析纯,北京化学试剂公司;碳酸铵、浓盐酸、浓硫酸,优级纯,北京化学试剂公司;Ce、Ni、Pb、Co、Zr、Fe标准溶液, HNO_3 介质,国家地质实验测试中心;Ru、Y、Al、Cr、Mg标准溶液, HCl 介质,国家地质实验测试中心。

ZB-2 强碱性阴离子交换纤维,功能基团

$-N^+(CH_3)_3Cl^-$,由聚丙烯接枝苯乙烯后接枝季氨基制得,淡黄色纤维,纤度1.7~2.3 dtex, 湿视密度0.20~0.25 kg/L,全交换容量不小于3.0 mmol/g(氯型,干纤维),含水率50%~60%,工作pH值范围0~14,可加热到(CI型)100℃,可在强酸、强碱等无机溶液中以及各种有机溶剂中正常工作,桂林正翰科技开发有限责任公司生产。

MUA型微量铀分析仪,核工业地质研究院;电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES),北京普析通用仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 离子交换纤维吸附性能研究试验

(1) 吸附平衡试验

准确称取 n 份质量为0.1 g的强碱性阴离子交换纤维于烧杯中,分别加入不同浓度的U(VI)碳酸盐溶液(铀酰与碳酸根摩尔比为1:10)25 mL,室温(25℃)静置24 h至吸附平衡。使用ICP-AES分别测定溶液中的铀浓度 ρ ,计算平衡吸附量:

$$q = (\rho_0 - \rho)V/m \quad (1)$$

其中: q 为吸附量,mg/g; ρ_0 和 ρ 分别为溶液中U(VI)的初始浓度和平衡浓度,mg/L; V 为溶液体积,L; m 为干阴离子交换纤维的质量,g。根据吸附量 q 与溶液平衡浓度 ρ 关系绘制等温曲线。

(2) 吸附动力学试验

称取0.5 g阴离子交换纤维于500 mL烧杯中,加入150 mL含铀100 $\mu\text{g/L}$ 的铀酰碳酸盐试液(铀酰与碳酸根摩尔比为1:10),在室温下立即搅拌,在约定的时间取样,使用微量铀分析仪测量溶液中残留的铀浓度。

1.2.2 工作曲线绘制 按照建立的预处理路线,定量取不同浓度的铀标准溶液进行样品预处理,使用铀分析仪测量浸取液荧光强度 F ,根据铀浓度 C 与荧光强度 F 的关系绘制工作曲线。

1.2.3 样品分析 按照建立的预处理路线处理铀样品,使用铀分析仪测量浸取液荧光强度 F ,根据工作曲线计算样品中铀的浓度。

2 结果与讨论

2.1 预处理方法选择

硝酸作为后处理中最常用的体系,在痕量铀样品中的浓度通常比较高(稀释前浓度0.1~6 mol/L),实验结果显示,在使用时间分辨荧光法测量痕量铀样品过程中,当体系硝酸浓度达到

0.037 5 mol/L 时,铀络合体系的荧光下降 74%,达到 0.075 mol/L 时,铀络合体系的荧光基本完全猝灭,无法直接测量铀的含量。如果采用直接稀释法,许多样品稀释后的铀含量低于检测下限,同样无法准确测量。因此需要采用样品预分离方法消除或降低 H^+ 与 NO_3^- 的干扰。

离子交换法作为样品预处理方法被广泛使用,本工作根据铀酰在碳酸盐体系可生成稳定的络阴离子的性质,将样品中的铀酰离子转化为三碳酸铀酰络阴离子,然后使用强碱性阴离子交换纤维进行吸附,同时碳酸盐可以与体系中的 H^+ 反应完全消除 H^+ 的干扰,再经去离子水洗涤、浸取进一步消除 NO_3^- 干扰。

2.2 预处理条件选择

2.2.1 痕量铀的吸附条件选择 为控制未来应用的成本,选用了市售常见的强碱性阴离子交换纤维(见 1.1 节描述)。为选择合适的吸附条件,研究了离子交换纤维对碳酸铀酰络合物的吸附性能,包括吸附等温线、静态饱和吸附量、静态吸附速率。

(1) 等温吸附曲线

图 1 为离子交换纤维对碳酸铀酰络合物的等温吸附曲线。如图 1 所示, $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ 浓度较低时,随着碳酸铀酰络合物平衡浓度的增加,纤维的吸附量迅速增加,达到一定量后增加变缓,在约 20 mg/g 后吸附保持不变,达到平衡。吸附符合 Langmuir 等温吸附,吸附方程为:

$$q = \frac{20.80\rho}{1 + 3.81\rho}$$

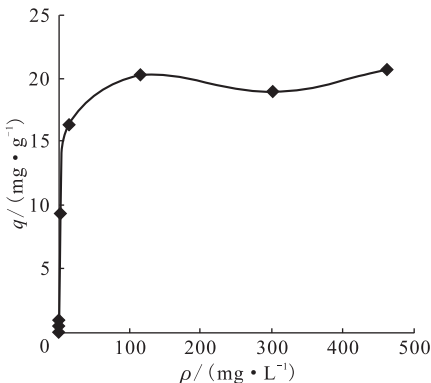


图 1 离子交换纤维对 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ 的等温吸附曲线
Fig.1 Adsorption isotherm of ion exchange fiber for $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$

(2) 静态最大吸附量

在等温吸附实验的基础上进行静态饱和和吸附量实验:将一定量的强碱性阴离子交换纤维置于具塞锥形瓶中,加入 $\text{U}(\text{VI})$ 碳酸盐溶液(铀酰与碳酸根摩尔比为 1:10) 25 mL,总铀量 15 mg,室温(25 $^{\circ}\text{C}$)下每隔一段时间取样,直至先后两次测得结果基本一致为止,此时交换达到饱和,测定静态最大吸附量为 20.8 mg/g。要满足吸附量的需求,同时不能增加在手套箱中操作的难度,将纤维的用量选定为 0.2 g。

(3) 静态吸附速率

根据吸附时间 t 与吸附率的关系作静态吸附速率曲线,结果示于图 2。如图 2 所示,离子交换纤维对碳酸铀酰络合物的吸附速率很快,在处理时间为 12 min 时,碳酸铀酰络合物离子的吸附百分率可达到 90% 以上,吸附 20 min 后即达到平衡。因此选定吸附时间 20 min。

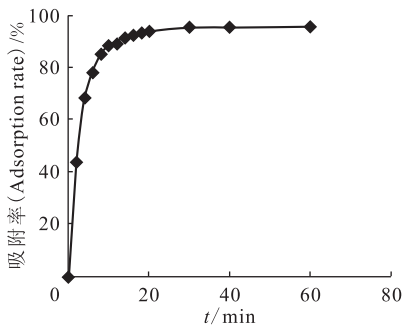
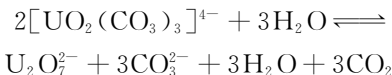


图 2 离子交换纤维对碳酸铀酰络合物的吸附速率曲线
Fig.2 Adsorption kinetic curve of ion exchange fiber for $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$

2.2.2 洗涤剂与洗涤条件选择 本工作没有采用铀矿水冶中常用的弱酸作为离子交换的洗涤剂,主要考虑 H^+ 对荧光测量的影响,通过大量实验最终选用去离子水作为洗涤剂。实验结果显示多次用去离子水洗涤已吸附铀的纤维,洗涤水中铀的含量均远低于吸附总铀量的 10%,说明铀酰基本未被洗脱。原因在于使用大量水洗涤纤维时,纤维上吸附的 $[\text{UO}_2(\text{CO}_3)_3]^{4-}$ 发生水解反应^[7]:



铀转换为 $\text{U}_2\text{O}_7^{2-}$ 形式吸附在纤维上: $(\text{R}_4-\text{N})_2(\text{U}_2\text{O}_7)$ 。样品中其它阳离子不会被阴离子纤

维吸附, 洗涤过程中与未被吸附的 NO_3^- 同被洗去。

2.2.3 浸取剂与浸取条件选择

(1) 浸取剂的选择

首先考虑铀矿水冶中常用的碳酸盐溶液浸取剂, 通过实验发现, 碳酸盐的浓度越大其浸取效果越好, 但是当 $\text{CO}_3^{2-}/\text{UO}_2^{2+}$ 质量浓度比大于 10^6 时, 铀酰离子的荧光强度骤降, 因此碳酸盐溶液作为浸取剂有一定的局限性。接着考虑荧光测量当中必须使用的荧光增强剂可否作为浸取剂, 荧光增强剂主要成分为焦磷酸盐, 焦磷酸根对铀酰具有较强的络合能力, 如果用荧光增强剂作为浸取剂还不会引入其它干扰离子。经实验验证: 荧光

增强剂浸取效果好, 可以作为浸取剂。

(2) 浸取条件选择

浸取剂浓度对铀回收率的影响列于表 1。表 1 结果表明, 当铀质量为 200 ng 时, 分别选取质量分数为 100% 和 50% 的浸取剂 10 mL, 得到铀回收率分别为 84% 和 51%。浸取剂用量对铀回收率的影响列于表 2。表 2 结果表明, 当浸取剂质量分数为 100%, 铀质量为 100、200 ng 时, 分别选用浸取剂体积为 10 mL 与 15 mL, 得到铀回收率基本相同(约 80%)。浸取时间对铀回收率的影响示于图 3。图 3 结果表明, 当铀质量分别为 100、500 ng 时, 铀的回收率均在 10 min 后趋于平稳, 20 min 可以保证铀的浸取完成。

表 1 浸取剂浓度对铀回收率的影响

Table 1 Influence of leach liquor concentration on U recovery rate

铀加入量 (U adding mass)/ng	浸取剂百分含量 (Percent of leach liquor)/%	浸取剂体积 (Volume of leach liquor)/mL	铀回收率 (U recovery rate)/%
200	100	10	84
	50	10	51

表 2 浸取剂用量对铀回收率的影响

Table 2 Influence of leach liquor quantity on U recovery rate

铀加入量 (U adding mass)/ng	浸取剂百分含量 (Percent of leach liquor)/%	浸取剂体积 (Volume of leach liquor)/mL	铀回收率 (U recovery rate)/%
100	100	10	84
		15	83
200	100	10	84
		15	82

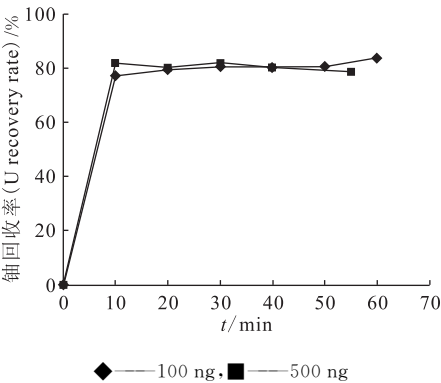


图 3 浸取时间对铀回收率的影响

Fig. 3 Influence of leaching time on U recovery rate

根据以上实验结果, 浸取剂应选用 100% 荧

光增强剂, 用量 10 mL, 浸取时间不低于 20 min。

本工作建立的痕量铀样品预处理路线: 介质转换→吸附→洗涤→浸取。该路线当中最耗时的吸附和浸取步骤只需要实验人员进行一步简单操作, 因此实际应用中可多个样品同时预处理。虽然单个样品分析时间 50 min, 但多个样品同时预处理时可在 120 min 以内分析 12 个样品, 平均到单个样品分析速度快, 能够满足多数量、多批次的样品测试需要; 由于定量操作少、采用工作曲线法, 大大降低了操作难度和工作量。

2.3 测量

2.3.1 测量方法 使用时间分辨荧光仪测量样品中的铀含量主要有两种方法: 标准加入法和工

作曲线法。针对样品的实际情况,需要采用不同的测量方法。

(1) 标准加入法 (Standard addition method)

要求测量体系中干扰离子的含量低于最小干扰浓度,当干扰离子浓度达到干扰浓度时,必须进行样品预处理。测量步骤(预处理后):测 b mL 样品的荧光读数 F_0 ,样品质量浓度 ρ 待求,加入荧光增强剂后测荧光读数 F_1 ,加入微量质量浓度为 ρ_2 (已知)的高浓度铀标液 a mL,测读数 F_2 。其中:

$$F_1 - F_0 = bk_1\rho; F_2 - F_1 = ak_2\rho_2; k_1 = k_2$$

按公式计算样品浓度 $\rho = [(F_1 - F_0)/(F_2 - F_1)] \times a \times \rho_2 / b$ 。由于标准溶液的加入量完全靠操作经验,因此经常出现加入标准后超出仪器读数范围的情况,这种情况下只能重新取样再次加标测量,因此标准加入法操作相对复杂,工作量比较大。

(2) 工作曲线法 (Working curve method)

要求测量体系中干扰离子的含量低于最小干扰浓度,当干扰离子浓度达到干扰浓度时,必须进行样品预处理。工作曲线绘制方法:定量取 6 个不同浓度(质量浓度 ρ_x)的铀标准溶液,经预处理后测量荧光强度 F_x ,根据 ρ_x - F_x 关系绘制工作曲线,得关系式: $F - F_0 = k\rho$,其中 F_0 、 k 为常数,无单位。测量步骤(预处理后):测量样品荧光读数 F ,代入工作曲线关系式直接计算样品质量浓度 $\rho = (F - F_0)/k$ 。工作曲线法测量过程简单,但是对于样品预处理要求高,处理后所有样品的体系必须统一,即所有影响因素的影响程度一致。

对于分析样品数量较少、在常规操作环境下进行操作的情况,标准加入法复杂的操作带来的工作量增加并不十分明显,但实际应用于后处理厂时,对于分析样品数量大、需要在手套箱中操作的情况,测量操作的复杂性严重影响了样品的分析速度、增加了操作人员的工作量。本工作建立的预处理路线,经介质转换→吸附→洗涤→浸取操作,特别是选用去离子水作为洗涤剂,在洗去杂质离子和干扰离子的同时,不引入任何干扰离子,使得各种体系的样品都统一到相同的测量体系,使工作曲线法得以应用。

2.3.2 工作曲线的绘制 选用硝酸体系下不同浓度的铀标准溶液,按照预处理过程进行预处理,然后直接取样读取荧光强度,根据铀质量浓度 ρ 与荧光强度 F 的关系绘制工作曲线,结果示于

图 4,拟合后 $r^2 = 0.999$,线性良好,得到工作曲线 $F = k\rho + F_0$ 。斜率 k 、 r^2 值与测量体系的统一性、铀回收率的稳定性直接相关,反映了预处理过程对干扰离子的去除情况以及方法的稳定性,因此这两个参数对于整个预处理方法的评价、以及工作曲线法能否应用具有重要意义。

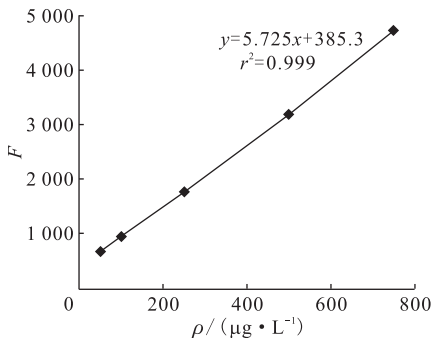


图 4 工作曲线

Fig. 4 Working curve

2.4 初始硝酸浓度的影响

2.4.1 初始硝酸浓度的影响 选择 $20 \mu\text{g/L}$ 痕量铀样品,分别取不同浓度的硝酸与硝酸盐体系,测量其荧光强度 F ,计算相对荧光强度 $A = F/F_0$ (对于 $2 \mu\text{g/L}$ UO_2^{2+} -荧光增强剂体系,荧光强度分别为 $705.8/703.0$, $A_1 = F_1/705.8$, $A_2 = F_2/703.0$)。考察 H^+ 与 NO_3^- 浓度对铀酰体系荧光强度的影响,结果示于图 5。图 5 实验结果显示,硝酸浓度在 1 mmol 时铀体系荧光强度开始下降,当硝酸浓度达到 0.1 mol 时体系荧光基本猝灭完全。后处理厂的痕量铀样品主要以硝酸体系为主,少部分为盐酸体系,而 Cl^- 不影响铀的测

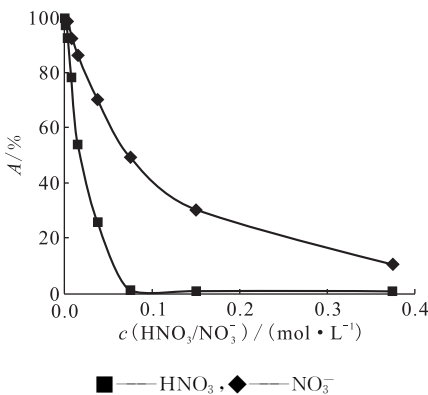


图 5 硝酸和硝酸钠体系对铀荧光强度的影响

Fig. 5 Influence of $\text{HNO}_3/\text{NO}_3^-$ concentration on uranium fluorescence intensity

量,本工作建立的预处理方法能够彻底消除体系中影响最大的 H^+ 的干扰。

2.4.2 干扰的消除 预处理后样品中的 H^+ 被彻底消除,影响相对较弱的 NO_3^- 会部分随着吸附、解吸过程进入到最终的测量体系当中。通过实验考察该方法对于硝酸干扰的消除能力,结果列于表 3(ρ_0 为初始体系配制的铀质量浓度, ρ_t 为

经预处理后测量的铀质量浓度)。表 3 结果显示,当硝酸浓度不大于 1 mol/L 时,铀回收率保持在 90% 以上,硝酸干扰可以被完全消除,将痕量铀分析对硝酸浓度的适应范围提高了 1 000 倍。后处理厂中高酸度的痕量铀样品其硝酸浓度可达到 7~8 mol/L,但是铀质量浓度也相对较高,在此条件下进行 10 倍稀释后均可测量。

表 3 预处理后测量铀的回收率 $c(\text{HNO}_3)=1\text{ mol/L}$
Table 3 Recovery rate of uranium by pretreatment $c(\text{HNO}_3)=1\text{ mol/L}$

$\rho_0/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho_t/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	回收率(Recovery rate)/%	$\bar{X}$	s	$s_r/\%$
500	495	99	93	4	4
	479	96			
	456	91			
	452	90			
	453	90			

3 样品分析

3.1 痕量铀回收率

使用本工作建立的方法对一系列铀浓度不同的样品进行测定,考察铀回收率稳定性,其中 HNO_3 浓度均为 0.5 mol/L,单个样品取样量为 1 mL,分析结果列于表 4。从表 4 结果可以看到,对于硝酸浓度为 0.5 mol/L、铀含量在 5~750 $\mu\text{g/L}$

范围的样品,铀的平均回收率均保持在 95% 以上,总体平均回收率约 102%。

在预处理条件选择实验中,样品受吸附率和浸取率的影响,铀的回收率基本在 80% 左右,由于本方法中采用了工作曲线法测量,对测量结果同时具有校正作用,因此样品最终测得的回收率均接近 100%。在稳定的预处理效果和工作曲线校正的共同作用下,有效提高了本方法的测量准确度。

表 4 回收率实验
Table 4 Recovery test

$\rho(\text{U})/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	回收率(Recovery rate)/%	$\bar{X}/\%$	平均回收率(Average recovery rate)/%
5	108,150,74	111	102±5
50	109,94,114	106	
100	92,96,105	98	
200	101,103,109	104	
500	100,98,102	100	
600	94,94,103	97	
750	101,99,88	96	

3.2 方法精密度

考察不同铀浓度下本方法的精密度。实验选择不同浓度的痕量铀样品(硝酸浓度 0.5 mol/L),各取 1 mL 进行预处理(每个浓度样品平行取 3 个),测量铀含量 ρ_x ,计算铀的回收率,各组数据

的平均值($\bar{X}$)、标准偏差(s)和相对标准偏差(s_r)列于表 5。表 5 结果说明:本方法对于 5~50 $\mu\text{g/L}$ 的痕量铀样品,方法精密度优于 50%;对于 50~750 $\mu\text{g/L}$ 的痕量铀样品,方法精密度优于 10%。后处理厂原有痕量铀分析方法对于 5~50 $\mu\text{g/L}$

的痕量铀样品,方法的精密度低于 100%;对于 50~750 $\mu\text{g/L}$ 的痕量铀样品,方法的精密度优于 50%。经比较,本工作建立的方法有效提高了痕量铀样品分析的精密度。

表 5 方法精密度实验
Table 5 Precision experiment

$\rho(\text{U})/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	$\rho_x/(\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1})$	$\bar{X}$	s	$s_r/\%$
5	5,8,4	6	2	34
50	55,47,57	53	5	10
100	92,96,105	98	7	7
200	202,206,218	208	8	4
500	500,490,510	500	10	2
600	564,564,618	582	31	5
750	758,743,660	720	53	7

3.3 模拟样品分析

后处理厂中痕量铀样品的质量浓度范围 $10^{-6}\sim10^{-3}$ g/L ,其中在 $10^{-5}\sim10^{-4}$ g/L 量级的样品最多,为此配制模拟样品的铀质量浓度选择为 2×10^{-5} g/L ,硝酸浓度选择为 0.2 mol/L ,加入 11 种杂质离子(Ce、Ni、Pb、Co、Zr、Fe、Ru、Y、Al、Cr、Mg),其质量浓度均为 2×10^{-2} g/L ,是铀浓度的 1 000 倍。平行取 6 个模拟样品样进行测量,平均回收率 94.7%(工作曲线法的校正作用),方法精密度优于 5%。测量结果经 t 检验证明无系统误差存在,说明本方法准确、可靠。

4 结 论

采用离子交换纤维,建立了一个完整的时间分辨荧光法测量痕量铀的样品预处理新路线。该路线操作简便,适于在手套箱中使用,多个样品同时分析时平均速度快,作为溶剂萃取预处理路线的替代方法,该方法已写入后处理中试厂的分析操作规程。

本方法可有效消除干扰离子 $\text{H}^+、\text{NO}_3^-$ 的影响,经模拟样品检验,方法精密度完全满足痕量样品的分析要求。

参考文献:

[1] 陈国珍. 荧光分析进展[M]. 厦门:厦门大学出版社, 1992:10.

[2] 董灵英. 铀的分析化学[M]. 北京:原子能出版社, 1991:132-143.

[3] 谈树苹. 影响 UO_2^{2+} 荧光特性的主要因素研究[D]. 北京:中国原子能科学研究院,2006.

[4] 苏涛. 时间分辨荧光法测痕量铀样品预处理方法研究[D]. 北京:中国原子能科学研究院,2007.

[5] 周绍箕. 离子交换纤维的开发及应用[J]. 纺织导报, 2009(3):53-55.

[6] 邹海峰. VS-II 型阴离子交换纤维吸附金和银性能机理及应用[J]. 岩矿测试,1999,18(1):21-24.

[7] 宋胤杰,赵爱民. 用强碱性阴离子交换树脂从碳酸盐溶液中回收铀的研究 2: U(VI) 在溶液相与树脂相的化学状态[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 1998,34(2): 52-55.