

文章编号:0253-9950(2006)02-0080-06

硅胶对锆钚(IV)吸附的研究

梁俊福¹, 樊晓强², 刘青山¹

1. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 102201;

2. 兰州核燃料厂, 兰州 732850

摘要:为了去除乏燃料溶解液和高放废液中的 Zr, 研究了酸性条件下硅胶对 Zr 的静态吸附和对 Zr, Pu 的动态吸附。研究结果表明, 在 25 °C 和 1 mol/L HNO₃ 时, 硅胶对 Zr 的静态吸附容量约为 0.225 mmol/g, 随着料液酸度的降低、硅胶粒度的减小、Zr 浓度及固液比的升高, 硅胶吸附 Zr 的能力增大; 在 4 mol/L HNO₃ 溶液中, 硅胶吸附 Zr 而几乎不吸附 Pu(IV), 因此可用硅胶吸附法使 Zr 与 Pu(IV) 分离。用 2 个柱体积的 0.2 mol/L H₂C₂O₄ 可将吸附在硅胶上的 Zr 解吸下来, 洗脱率可达 99.2%。硅胶再次吸附 Zr 时, 吸附性能曲线和吸附容量均无明显变化, 硅胶可重复使用。

关键词: 硅胶; Pu(IV); Zr; 吸附

中图分类号: O614.823 文献标识码: A

Adsorption of Zirconium and Plutonium(IV) From Acid Solution on Silica Gel

LIANG Jun-fu¹, FAN Xiao-qiang², LIU Qing-shan¹

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

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

2. Lanzhou Nuclear Fuel Factory, Lanzhou 732850, China

Abstract: The static adsorption of Zr and dynamic adsorption of Zr and Pu(IV) on silica gel in HNO₃ solution were studied. The study results show that adsorptive capacity of Zr is about 0.225 mmol/g. Adsorption of Zr increase with decrease of HNO₃ concentration and silica gel size, likewise with increase of the rate of liquid to solid and Zr concentration. Zr is adsorbed but Pu(IV) is not adsorbed on silica gel column in 4 mol/L HNO₃ solution so it is possible to separate Zr and Pu(IV) from acid solution by adsorption on silica gel. The adsorbed Zr on the silica gel can be efficiently eluted with 2 column volume of 0.2 mol/L oxalic acid, the elutriation reaches to 99.2%, and the silica gel can be used repeatedly.

Key words: silica gel; Pu(IV); Zr; adsorption

反应堆乏燃料后处理以及分离法处理高放废液过程中, Zr 的去除一直是要解决的难题之一。Zr 是 U, Pu 裂变中高产额裂变产物之一, 裂变产

额分别达 6.2%, 5.1%。乏燃料溶解液中 Zr 的浓度为 1~2 g/L, Zr 在水溶液中会生成一系列的配合物, Zr 的存在会使液-液萃取体系发生乳化,

产生第三相及界面污物等,给萃取过程造成困难,严重的甚至使萃取无法进行。

目前乏燃料溶液和高放废液中去除 Zr 的方法主要有:沉淀分离法、萃取法和离子交换法^[1-3]。在低酸度下使 Zr 生成氢氧化物沉淀除 Zr 是最常用的方法。利用沉淀法来处理乏燃料溶液和高放废液有很多缺点,如整个操作过程繁琐,生产不能连续进行以及除 Zr 不完全等。利用萃取法从乏燃料溶液和高放废液中分离 Zr 时,由于其溶液组分复杂,放射性强,同时,Zr 在溶液中易发生水解、聚合、配合等许多复杂的化学反应,因此很难在不损失 U、Pu 等成分的情况下将 Zr 完全分离。

采用硅胶作吸附剂除 Zr,由于硅胶对酸性复杂体系中的 Zr 强烈吸附,对 Pu 少量吸附外,对其它成分基本上不吸附,具有很高的选择性^[2,6]。世界各国积极研究用硅胶吸附法从乏核燃料溶液和高放废液中除 Zr。本文拟对 Zr 的硅胶静态和动态吸附、钚的动态吸附、Zr 的解吸和硅胶的重复利用进行研究,为乏燃料后处理工艺流程中的锆钚分离提供基础数据。

1 实验部分

1.1 试剂和仪器

硝酸锆,华北特种化学试剂开发中心生产;硅胶,柱层析用,上海试剂五厂生产;水相闪烁液:取 5 g PPO,0.3 g POPOP,60 g 萘溶于 600 mL 二甲苯与 400 mL 曲拉通 X-100 的混合液中;10%尿素-10%盐酸胍水溶液。其它试剂皆为分析纯。

IRIS Advantage 型等离子体光谱仪,美国 Thermo Jarrell Ash 公司产品;TRI-CARB 2200CA 型液闪分析仪,美国 PACKARD 公司产品;SHA-B 型恒温振荡器,常州国华电器有限公司产品;微量取样器:1 000 μL ,100 μL ,芬兰;离子交换柱: $\phi 6.44 \text{ mm} \times 160 \text{ mm}$ 。

1.2 实验方法

1.2.1 硅胶预处理 在 85~90 $^{\circ}\text{C}$ 烘干,用称重法测得硅胶含水率约为 55%。用吸氮法测得其比表面积为 330 m^2/g 。孔径分布 1~60 nm,其中,90%以上为 8~10 nm,平均值为 10.1 nm。用筛分法选取不同粒度的硅胶,分别用去离子水漂洗至水相清澈,然后置于 5% HNO_3 溶液中煮沸 5 h,再用去离子水洗至中性,在 100 $^{\circ}\text{C}$ 下干燥 20 h,使硅胶既不含夹带的酸也没有多余的水。置于干燥器内备用。

经试验测定,25 $^{\circ}\text{C}$ 该硅胶的湿视密度 $\rho_s = 0.624 \text{ g/mL}$;湿真密度 $\rho_s = 1.603 \text{ g/mL}$,床层空隙率 $\epsilon = 61.07\%$,含水率 $w = 0.81\%$ 。

1.2.2 分析方法 硝酸溶液中 Zr 的分析采用 ICP-AES 法。硅胶的氢氧化钠溶解液中的 Zr 采用分光光度法^[3] 分析。Pu(IV)的分析采用液体闪烁计数法,准确移取 50 μL 或 100 μL 样品到一装有 10 mL 闪烁液的液闪瓶中,在液体闪烁计数器上进行测量。

1.2.3 钚的价态调整 取 Pu 溶液 100 μL ,加 0.5 mL 4.0 mol/L 的 NaNO_2 ,混匀,放置 30 min,此时 Pu 以 Pu(IV)存在。

1.2.4 Zr 的静态吸附

1.2.4.1 静态吸附率随时间的变化 准确称取 0.5 g 0.149~0.177 mm(80~100 目)的硅胶,置于 100 mL 三角瓶中,分别加入 50 mL HNO_3 浓度为 0.1,1.0,2.0,3.0,4.0 mol/L 的含 Zr 溶液,用封口膜封口,在恒温振荡器上振荡,当吸附 12,24,36,48,60,72 h 后,测定料液中 Zr 的浓度,计算在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下不同时间的吸附量 Q_{ads} (mg/g)。

1.2.4.2 静态吸附容量随硝酸浓度的变化 称取 0.5 g 0.149~0.177 mm(80~100 目)的硅胶,置于 100 mL 三角瓶中,分别加入 50 mL HNO_3 浓度为 0.1,1.0,2.0,3.0,4.0 mol/L 的含 Zr 溶液(液固比为 100 mL/g),用封口膜封口,在恒温振荡器上振荡,当吸附 50 h 后,取样并用 ICP-AES 法测定料液中 Zr 的浓度,计算在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下不同硝酸浓度的吸附容量 Q_{eq} 和分配比 D 。

1.2.4.3 静态吸附容量随硅胶粒度的变化 分别称取 < 0.42 mm(< 40 目),0.25~0.42 mm(40~60 目),0.177~0.25 mm(60~80 目),0.149~0.177 mm(80~100 目),0.100~0.147 mm(100~140 目)的硅胶 0.5 g,置于 100 mL 三角瓶中,加入 50 mL HNO_3 浓度为 2.0 mol/L 的含 Zr 溶液(液固比为 100 mL/g),用封口膜封口,在恒温振荡器上振荡,当吸附 50 h 后,取样并用 ICP-AES 法测定料液中 Zr 的浓度,计算在 25 $^{\circ}\text{C}$ 下不同粒度硅胶的吸附容量。

1.2.4.4 静态吸附容量随溶液中 Zr 浓度的变化 称取 0.2 g 0.149~0.177 mm(80~100 目)的硅胶,置于 150 mL 三角瓶中,分别加入 100 mL 2.0 mol/L HNO_3 下不同 Zr 浓度的溶液(液固比为 500 mL/g),用封口膜封口,在恒温振荡器上振荡,当吸附 50 h 后,取样测定料液中 Zr 的浓度,

计算在 25 °C 下不同 Zr 浓度的吸附容量。

1.2.4.5 草酸解吸 称取 0.2 g 0.149~0.177 mm(80~100 目)的硅胶,置于 150 mL 三角瓶中,分别加入 100 mL 含不同 Zr 浓度的 2.0 mol/L HNO₃ 溶液(液固比为 500 mL/g),用封口膜封口,在 25 °C 下恒温振荡器上振荡,达到吸附平衡后,分析计算硅胶中 Zr 的吸附量。然后将吸附了 Zr 的硅胶抽滤烘干并称量,取 2 份,每份 0.10 g。一份用 4 mL 0.2 mol/L H₂C₂O₄ 连续解吸 5 次,过滤后取滤液。由于草酸根的存在严重干扰 ICP-AES 对 Zr 的测定,因此用浓硝酸转型^[5],测定溶液中 Zr 的浓度。另一份用 20 mL 3 mol/L NaOH 加热至硅胶刚好溶解,溶液接近澄清时取样,并用分光光度法测定料液中 Zr 的浓度。计算在 25 °C 不同 Zr 浓度下的草酸解吸率。

1.2.5 动态吸附实验 动态吸附实验所采用的硅胶柱参数为:内径 $\phi = 0.644$ cm,内截面 $S = 0.3255$ cm²,高 $h = 15.4$ cm,床层体积 $V = 5.01$ cm³,流速控制在 0.3~0.4 mL/(min·cm²)。当流出液浓度为料液 5% 浓度时的体积为穿透体积,由此计算的吸附量为穿透容量^[7]。当流出液浓度为料液 50% 浓度时的体积为工作体积,由此计算的吸附量为工作容量。在穿透条件下,硅胶对离子的吸附量与穿透体积中该离子总量的比值为动态吸附率。3 次实验的误差在 7% 以内。

1.2.5.1 Zr 的穿透曲线的测定 分别用 HNO₃ 浓度为 0.1, 4.0 mol/L 的含 Zr 料液上柱,流出液每隔 4 mL 取一个样品,用 ICP-AES 法测定流出液中 Zr 的含量。以穿透率 C/C_0 对流出液体积 V (mL) 作图。

1.2.5.2 Pu(IV) 的穿透曲线的测定 取 Pu 溶液 100 μ L,调至 Pu(IV) 状态,分别用 HNO₃ 浓度为 0.1, 4.0 mol/L 的含钚料液上柱,流出液每隔 1 mL 取一个样品,用液闪计数器于 20~700 keV 范围内测量计数。用相应浓度的 HNO₃ 15 mL(3 个柱体积)淋洗硅胶柱,用 0.2 mol/L H₂C₂O₄ 洗脱被硅胶吸附的 Pu(IV),用液闪计数器测量计数。以穿透率 C/C_0 对流出液体积 V (mL) 作图。

1.2.5.3 Zr 的动态洗脱实验 把吸附有 Zr 的硅胶柱先用 4.0 mol/L HNO₃ 15 mL 洗涤,然后用 0.2 mol/L H₂C₂O₄ 洗脱,淋洗流速为 0.3~0.4 mL/(min·cm²),流出液每隔 1 mL 取一个样品。破坏草酸后再用 ICP-AES 法测定流出液中 Zr 的含量,以 Zr 含量对流出液的体积作图,即可

得到 Zr 的草酸洗脱曲线。把草酸洗脱后的硅胶用 3 mol/L NaOH 加热溶解,分析动态洗脱时硅胶上残留的 Zr 含量。

1.2.5.4 硅胶柱对 Zr 的重复吸附实验 把经吸附和解吸后的硅胶柱先用 8.0 mol/L HNO₃ 15 mL 洗涤,除去残存在硅胶柱中的草酸,然后用 4.0 mol/L HNO₃ 15 mL 洗涤,洗涤流速为 0.3~0.4 mL/(min·cm²),平衡硅胶柱的酸度,最后用 HNO₃ 浓度为 4.0 mol/L 的含 Zr 料液上柱,流出液每隔 4 mL 取一个样品,用 ICP-AES 法测定流出液中 Zr 的含量。以穿透率 C/C_0 对流出液体积 V (mL) 作图。

2 结果和讨论

2.1 Zr 的静态吸附

2.1.1 Zr 的吸附率随时间的变化 在不同硝酸浓度下,Zr 的吸附率随时间的变化示于图 1。5 次平行实验的相对标准偏差小于 5%。从图 1 可以看出,硅胶在不同酸度的溶液中吸附 Zr 时,静态吸附时间在大于 50 h 时,基本达到平衡;且吸附率随料液酸度的升高而下降。实验选择的吸附时间为 50 h。

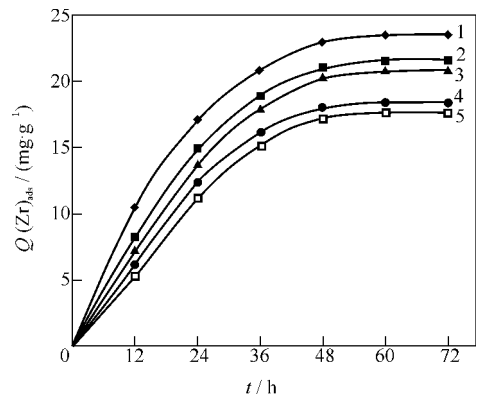


图 1 Zr 的吸附量随时间的变化曲线

Fig. 1 Relation of Zr adsorption and time $c(\text{HNO}_3)$: 1—0.1 mol/L, 2—1.0 mol/L, 3—2.0 mol/L, 4—3.0 mol/L, 5—4.0 mol/L

2.1.2 静态吸附容量 硅胶对 Zr 的静态吸附容量随料液酸度、Zr 浓度、硅胶粒度的变化列入表 1~3。根据表 1,作 $\lg D-c(\text{HNO}_3)$ 曲线并示于图 2。

从表 1~3 可以看出,在本实验条件下硅胶对 Zr 的吸附率较高,静态吸附容量约为 0.163~0.373 mmol/g。其中,料液酸度、硅胶粒度、Zr 浓

表 1 Zr 的静态吸附容量随硝酸浓度的变化

Table 1 Effect of HNO₃ concentration on the static adsorption capacity of Zr

$c(\text{HNO}_3)/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$Q(\text{Zr})_{\text{eq}}/(\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1})$	$D(\text{Zr})/(\text{mL} \cdot \text{g}^{-1})$
0.1	0.242	29.39
1.0	0.225	25.17
2.0	0.209	23.43
3.0	0.196	21.32
4.0	0.188	20.31

表 2 Zr 的静态吸附容量随硅胶粒度的变化

Table 2 Effect of silica gel size on the static adsorption capacity of Zr

d/mm	$Q(\text{Zr})_{\text{eq}}/(\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1})$
无硅胶(No silica gel)	0.034
<0.42	0.163
0.25~0.42	0.174
0.177~0.256	0.189
0.149~0.177	0.209
0.100~0.147	0.234

表 3 Zr 的静态吸附容量随 Zr 浓度的变化

Table 3 Effect of Zr ion concentration on the static adsorption capacity of Zr

$\rho(\text{Zr})/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$Q(\text{Zr})_{\text{eq}}/(\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1})$
0.8	0.221
1.0	0.234
1.2	0.247
1.6	0.280
2.0	0.329
2.5	0.345
5.0	0.373

度的变化均对硅胶吸附 Zr 有很大影响。随着料液酸度的降低、硅胶粒度的减小、料液 Zr 浓度的升高,硅胶吸附 Zr 的能力明显增大。由表 2 可以看出,玻璃容器对 Zr 也有一定的吸附能力。玻璃表面硅烷化处理后,仍有微量的 Zr 吸附,为此在计算时进行了校正。多次实验表明,Zr 静态吸附容量测量的相对标准偏差在 5% 以内。

从表 1 及图 2 可以看出,随着溶液酸度的升高,Zr 的静态吸附分配比和吸附容量均降低,硅

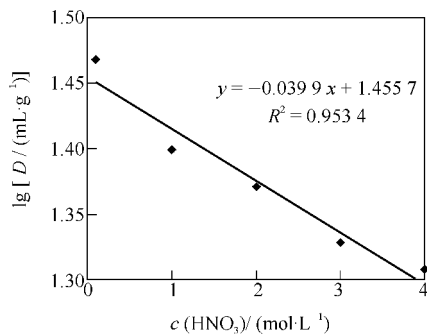


图 2 Zr 的分配曲线

Fig. 2 Distribution ratio of Zr in HNO₃ solution

胶对 Zr 的吸附分配比的对数 $\lg D$ 与介质酸度成线性关系。根据 Milonjic^[6] 报道,在水溶液酸度大于 1 mol/L 时,Zr 的存在形式按以下顺序递减: $\text{Zr}^{4+} > \text{Zr}(\text{OH})^{3+} > \text{Zr}(\text{OH})_2^{2+} > \text{Zr}(\text{OH})_3^+ > \text{Zr}(\text{OH})_4$ 。随酸度升高,前面高价阳离子比例加大,易被吸附的 Zr 的水解形式 $\text{Zr}(\text{OH})_4$ 和 $\text{Zr}(\text{OH})_3^+$ 等减少,故分配比和吸附容量均随 H^+ 浓度的增大而减少。

2.1.3 草酸解吸 Zr 用 NaOH 溶解法得到的硅胶吸附 Zr 量和水溶液差减法的计算结果很好吻合,物料衡算一致。为此草酸解吸的 Zr 量与氢氧化钠溶解法比较求得草酸解吸率 Y 。

研究了不同浓度 $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 从硅胶柱上解吸 Zr 的情况。结果表明:0.1~0.6 mol/L $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 都可以使 Zr 从硅胶中解吸,浓度越高,解吸越完全。考虑到工程应用,选用 0.2 mol/L $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 从硅胶中解吸 Zr,结果列入表 4。从表 4 看出,Zr 解吸率 $Y(\text{Zr}) \geq 99.3\%$ 。

表 4 0.2 mol/L $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ 对硅胶吸附 Zr 的解吸Table 4 Elution rate of Zr by 0.2 mol/L $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$ as elution solution

$\rho(\text{Zr})/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$		$Y(\text{Zr})/\%$
$\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4$	NaOH	
0.083 4	0.083 6	99.76
0.090 2	0.090 8	99.34
0.102 1	0.102 7	99.42
0.109 1	0.109 7	99.45
0.128 5	0.129 3	99.38
0.141 8	0.142 3	99.65
0.148 9	0.149 6	99.53

2.2 Zr 和 Pu(IV) 的动态吸附

2.2.1 Zr 和 Pu(IV) 的动态吸附对比 表 5 和图 3 给出了在不同浓度硝酸溶液中硅胶柱对 Zr 和 Pu(IV) 的动态吸附情况。从表 5 和图 3 可以看出,硅胶对 Zr 的动态吸附量比 Pu(IV) 大得多。溶液酸度降低,硅胶对 Zr, Pu(IV) 的吸附量变大。在 0.1 mol/L HNO₃ 时, Zr 的穿透容量为 0.112

mmol/g, 在此条件下吸附, 则 Pu(IV) 的吸附量为 4.88 mg/g。在 4.0 mol/L HNO₃ 时, Zr 的穿透容量为 0.041 5 mmol/g, 此值比文献[2]的高约 30%。此时 Pu(IV) 的吸附量为 2.96 mg/g。选择在 4.0 mol/L HNO₃ 时用硅胶吸附的方法可使 Zr 与 Pu(IV) 得到有效分离。

表 5 Pu(IV) 和 Zr 在硅胶柱上的动态吸附

Table 5 Dynamic adsorption of Pu(IV) and Zr in the silica gel column

$c(\text{HNO}_3)/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$A(\text{Pu(IV)})/(\text{min}^{-1} \cdot \text{mL}^{-1})$	$V_{\text{work}}/\text{mL}$	$A(\text{Pu(IV)})/\text{min}^{-1}$	$Q_{\text{ads}}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$	
0.1	28 106.4	1.168	32 832.0	4.88	
4.0	54 849.4	0.265	14 535.1	2.96	
$c(\text{HNO}_3)/(\text{mol} \cdot \text{L}^{-1})$	$\rho(\text{Zr})/(\text{g} \cdot \text{L}^{-1})$	$V_{\text{B-t}}/\text{mL}$	$m(\text{Zr})_{\text{ads}}/\text{mg}$	$Q(\text{Zr})_{\text{B-t}}/(\text{mmol} \cdot \text{g}^{-1})$	$Q_{\text{ads}}/(\text{mg} \cdot \text{g}^{-1})$
0.1	1.345	23.92	31.85	0.112	99.3
4.0	1.331	8.96	11.81	0.041 5	99.1
4.0*	1.331	8.93	11.77	0.041 3	99.0

注 (Note): * 指硅胶柱再生后第 2 次吸附 (Second adsorption after the silica gel column regeneration)

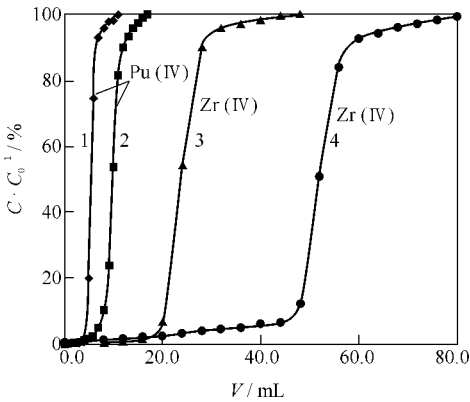


图 3 Zr(IV) 和 Pu(IV) 在硅胶柱上吸附曲线

Fig. 3 Adsorption curves of Zr(IV) and Pu(IV) on the silica gel column in HNO₃ solution

$c(\text{HNO}_3)$: 1, 3—4.0 mol/L, 2, 4—0.1 mol/L

2.2.2 Zr 的草酸洗脱 Zr 的草酸洗脱曲线示于图 4。从图 4 可以看出, 2 个柱体积的 0.2 mol/L 草酸可以很有效地从硅胶柱上解吸被吸附的 Zr。用 NaOH 溶解硅胶后测定得知, 草酸洗脱后残留在硅胶(干)柱上的 Zr 为 33 $\mu\text{g}/\text{g}$ 。说明草酸可以把吸附在硅胶柱上的 99.2% 的 Zr 洗脱下来。

2.2.3 草酸洗脱后硅胶柱对 Zr 的二次吸附 Zr 的两次吸附曲线示于图 5。从图 5 和表 5 中可以看出, 0.2 mol/L H₂C₂O₄ 解吸后的硅胶柱, 在 4.0 mol/L HNO₃ 下 Zr 的二次吸附曲线与 Zr 的一次

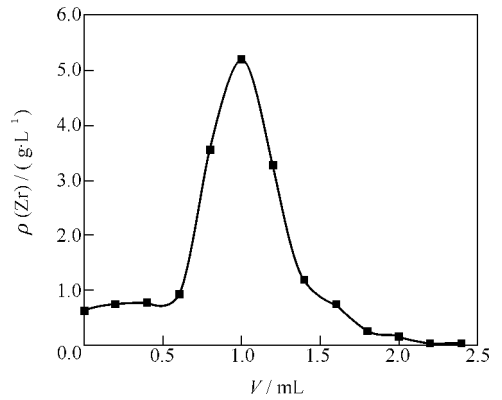


图 4 Zr 的草酸洗脱曲线

Fig. 4 Elution curve of Zr with oxalic acid solution

吸附的曲线相差不大, 且对 Zr 的吸附容量也很相近, 因此, 在用硅胶除 Zr 时, 硅胶可以反复使用。

进行了硅胶复用 5 次的实验, 结果和二次吸附相同。这样, 硅胶除 Zr 在工程上应用时, 可大大压缩硅胶固体废物量。

3 结 论

(1) Zr 的硅胶吸附速率较慢, 需大于 50 h 才能达到吸附平衡。

(2) 硅胶对 Zr 的吸附率较高, 25 $^{\circ}\text{C}$ 时静态吸附容量约为 0.186~0.373 mmol/g。

(3) 硅胶对 Zr 的吸附分配比的对数 $\lg D$ 与

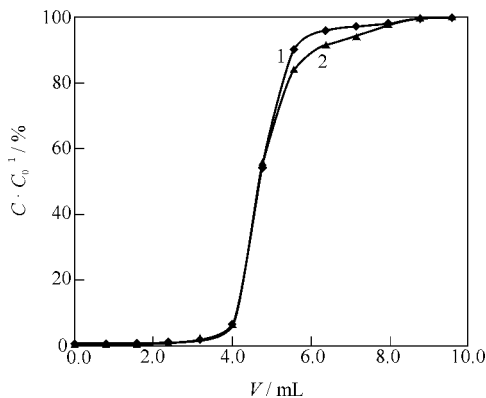


图 5 Zr 的两次吸附穿透曲线

Fig. 5 Twice adsorption curves
of Zr on silica gel column

1——一次吸附(First time), 2——二次吸附(Second times)

介质酸度成线性关系。

(4) Pu(IV) 的硅胶吸附穿透曲线与 Zr 的硅胶吸附穿透曲线相距较远,说明可以用硅胶吸附的方法在合适的条件下把 Zr 与 Pu 分离开。

(5) 用 2 个柱体积的 0.2 mol/L $H_2C_2O_4$ 可以从硅胶上把 Zr 解吸下来,洗脱率可达 99.2%。

(6) 硅胶重复吸附 Zr 时,吸附性能曲线和吸附容量均相近。硅胶可以反复使用。

参考文献:

- [1] 黄凯,宋崇立,梁俊福. 硅胶吸附去除高放废液中 Zr 的研究进展[J]. 核科学与工程, 2002, 22(4): 343-348.
- [2] 张裕卿,姜云鹏,王林双,等. SiO_2 纳米干硅胶对锆的动态吸附[J]. 原子能科学技术, 2001, 35(增刊): 46-49.
- [3] 张裕卿,王榕树,林灿生,等. 高吸附活性硅胶对模拟高放废液中锆分离行为的研究[J]. 核化学与放射化学, 2000, 22(3): 156-160.
- [4] 陈国珍,黄贤智,刘文远,等. 紫外-可见分光光度法(下册)[M]. 北京:原子能出版社, 1987: 539-541.
- [5] 郭一飞,梁俊福,惠宏彦,等. HNO_3 氧化法去除 Np - Pu 反萃液中的 $H_2C_2O_4$ [J]. 原子能科学技术, 2000, 34(4): 359-363.
- [6] Milonjic S K, Boskovic M R, Ceranic T S. Adsorption of Uranium(VI) and Zirconium(IV) From Acid Solution on Silica Gel[J]. Sep Sci Technol, 1992, 27(12): 1643-1645.
- [7] 陆九芳,李总成,包铁竹. 分离过程化学[M]. 北京:清华大学出版社, 1993: 185.