

铀的离子交换反应

II. 硫酸和盐酸介质中铀(VI)在阳离子交换树脂上的化学状态

陶祖貽 赵爱民 佟文功

(兰州大学现代物理系)

本文用红外光谱法和当量计算法研究了在硫酸、盐酸介质中铀(VI)在阳离子交换树脂上的化学状态及其含量。结果表明,在阳离子交换树脂上,铀(VI)除了以 UO_2^{2+} 外,还可以 $(UO_2HSO_4)^+$ 和 $(UO_2Cl)^+$ 存在,但当酸的浓度低于 $0.5N$ 时,其量可忽略不计。即使在酸浓度相当大($2-3N$)时, $(UO_2HSO_4)^+$ 和 $(UO_2Cl)^+$ 也只占树脂交换容量的很小一部分。因此,在通常用的阳离子交换色层法富集铀同位素的工作中,可以按照阳离子交换树脂上只有 UO_2^{2+} 来考虑同位素效应及计算分离因数。

关键词 铀酰, 阳离子交换树脂, 当量计算法, 红外光谱, 硫酸, 盐酸。

一、引言

用离子交换色层法富集铀同位素的研究工作已有不少报道^[1,2]。然而,到目前为止,对讨论同位素效应和计算分离因数^[3]所必须的关于铀在树脂上的化学状态的研究,却未得到应有的重视。

铀(VI)与两个氧相结合生成线性铀酰离子 $(O-U-O)^{2+}$ ($D_{\infty h}$)^[4]。其电子结构决定了它很牢固,并具有很强的配位能力^[4,5]。最常见的配位数是6。生成的配位化合物呈六角双锥体,六个单齿配体或三个双齿配体与铀原子处在同一平面上,两个氧分别在此平面的上下方^[6]。因此,在硫酸和盐酸的水溶液中,除了 UO_2^{2+} 外,必然还存在铀酰与硫酸根或氯离子的各级配位化合物。Heitner-Wirguin^[6,7]根据红外光谱的研究,断定在硫酸和盐酸介质中,铀(VI)在阳离子交换树脂上的化学状态分别是 UO_2^{2+} 、 $(UO_2HSO_4)^+$ 和 UO_2^{2+} 、 $(UO_2Cl)^+$ 。不过,根据文献[6]、[7]的红外光谱研究,仅仅表明在阳离子交换树脂上有 $(UO_2HSO_4)^+$ 和 $(UO_2Cl)^+$ 存在,而并未确定在其实验条件下,树脂上究竟是以 UO_2^{2+} 为主,还是以 $(UO_2HSO_4)^+$ 或 $(UO_2Cl)^+$ 为主。在文献[6]、[7]中,作者还将 H_2SO_4 和 Li_2SO_4

1981年10月4日收到。

溶液的当量浓度相同时, H_2SO_4 溶液中树脂上铀酰负载率大于 Li_2SO_4 溶液中树脂上的负载率, 也作为判断树脂上存在 $(\text{UO}_2\text{HSO}_4)^+$ 的依据。我们认为这种方法值得商榷。鉴于此, 本文用红外光谱法和当量计算法进一步研究了铀(VI)在阳离子交换树脂上的化学状态, 并估算了其含量。

二、实验部分

含铀(VI)的树脂的红外光谱, 是用 DIGILAB FTS-15C 傅里叶红外光谱仪测定的。测定范围是 $400\text{--}4000\text{cm}^{-1}$ 。用于测定红外光谱的树脂, 用与文献[8]相同的实验方法制备, 但在测定之前, 将其在玻璃砂漏斗上用少量水在负压下快速洗三次^[9], 并在空气中晾干(48h)。用 KBr 压片法制样。树脂与 KBr 的重量比为 1/400。

当量计算法的实验步骤、所用仪器和材料与文献[8]相近。但树脂上氢离子的量, 是通过直接测定树脂的洗脱液得到的, 而不是如文献[8]那样用差减法来求得。含有较高浓度铀酰的硫酸溶液中的氢离子浓度, 是先将此溶液流经氢式离子交换柱以除去 UO_2^{2+} , 然后进行测定^[10]。

实验温度为 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 。所有实验中, 树脂的量(g)与溶液体积(ml)之比为 3:100。

三、结果和讨论

1. **红外光谱法** 铀酰离子具有三种特征频率: 对称伸缩频率 $\nu_1(\Sigma_g^+)$, 在 $780\text{--}900\text{cm}^{-1}$ 之间; 非对称伸缩频率 $\nu_3(\Sigma_g^-)$, 在 $800\text{--}1000\text{cm}^{-1}$ 之间; 弯曲振动频率 $\nu_2(\Pi_u)$, 在 200cm^{-1} 附近^[5,11-13]。 ν_1 和 ν_3 之所以可以在很广的范围内变动, 是由于在与 O—U—O 轴相垂直的平面上或其附近有配体与铀形成配位键。线性 UO_2^{2+} 离子 ($D_{\infty h}$) 的 ν_1 不是红外活性的, 而 ν_3 是红外活性的。如果有配位作用, 则对称性降低, ν_1 可成为红外活性的^[5]。红外光谱法可用于确定离子交换树脂上离子的化学状态^[14,15]。文献[6,7,16]曾报道了用此法对离子交换树脂上铀(VI)的化学状态的研究结果。

虽然除了远红外区的 ν_2 外, 铀酰离子在中红外区还有 ν_1 和 ν_3 两种特征频率, 但由于强酸性苯乙烯阳离子交换树脂本身在 $700\text{--}900\text{cm}^{-1}$ 区间有复杂的红外吸收光谱, 而铀酰的 ν_1 虽然可能成为红外活性的, 但一般很弱, 所以本文只讨论 ν_3 。

分别在不同浓度的 HNO_3 、 HCl 、 H_2SO_4 溶液中制备测红外谱用的树脂。详细的制备条件及样品号列于表 1。相应树脂的红外光谱分别示于图 1 中 (a)、(b)、(c)。N001、C1001 和 S000 样品都分别只在 945.3 或 949.2cm^{-1} 处有强的吸收。因为在制备这三个样品时, 酸的浓度都很小, 所以这些吸收只能归属于 UO_2^{2+} 。波数与文献[5,12,16]报道的很接近。当提高酸的浓度时, 则无论是在哪一种介质的酸中, 都是在 902.9 或 906.6cm^{-1} 处出现新的吸收, 而且这种新的吸收随着酸浓度的逐步增加而增强。与此同时, 原来归属于 UO_2^{2+} 的峰则相应地减弱。在不同介质的酸中, 随着酸浓度的提高, 都出现新的逐渐增强的吸收峰, 且其波数位置相互很近。这一结果表明, 这种新的吸收峰应归属于 UO_2^{2+} 与一个一价负离子形成的络合离子 $(\text{UO}_2\text{X})^+$ ($\text{X}=\text{NO}_3^-$, Cl^- , HSO_4^-)。而且其波数与氯化铀酰饱和溶液的 ν_3 相近^[5]。因此, 我们认为, 用这种方法确定吸收峰的归属更为可靠。

表1 制备树脂的条件和谱带的归属*

样品号	介质	$C_{UO_2}^0, M$	C_{UO_2}, M	C_H^0, N	C_H, N	$UO_2^{2+} \nu_3, cm^{-1}$	$(UO_2X)^+ \nu_3, cm^{-1}$
N001	HNO ₃	0.035	0.0029	<0.01	0.07	945.3(s)	
N002		0.035	0.030	2.7	2.7	926.1(w)	902.9(w)
Cl001	HCl	0.056	0.017	<0.01	0.08	945.3(s)	
Cl002		0.056	0.049	1.1	1.1	941.5(w)	902.9(w)
Cl003		0.056	0.054	2.1	2.1	941.5(vw)	902.9(m)
S000	H ₂ SO ₄	0.048	0.017	<0.01	0.07	949.2(s)	
S001		0.055	0.052	1.1	1.1	949.2, 926.1(w)	
S002		0.055	0.054	2.0	2.0	941.5, 929.9(vw)	906.6(vw)
S003		0.055	0.055	3.0	3.0	941.5, 929.9(vw)	902.9(m)

* s——强峰; m——中等强度峰; w——弱峰; vw——极弱峰; C⁰——起始浓度; C——平衡液浓度。

尽管由红外光谱证明了在高酸度溶液中树脂上有 $(UO_2X)^+$ 存在, 但是很难判断其含量, 即其占树脂交换容量的百分数。从红外光谱可以肯定, 当酸浓度小于 $0.5N$ 时, 不可能出现 902.9 或 $906.6cm^{-1}$ 的吸收峰, 所以在此条件下, 可以忽略 $(UO_2X)^+$ 的存在。提高酸度后, UO_2^{2+} 的 ν_3 谱带的分裂及位移现象, 在文献[5,12]中也报道过, 并讨论过产生的原因。

应该指出, 文献[6]的文字部分在两处都说, 树脂上的 $(UO_2HSO_4)^+$ 的 ν_3 为 $910cm^{-1}$, 而该文表2上却列为 $950cm^{-1}$ 。在文献[7]中, 作者认为树脂上 $(UO_2Cl)^+$ 的 ν_3 为 $945cm^{-1}$ 。我们认为, ν_3 仅从 958 到 950 或 $945cm^{-1}$ 这样的位移, 是很难作为判断树脂上存在 $(UO_2HSO_4)^+$ 或 $(UO_2Cl)^+$ 的根据的^[17]。

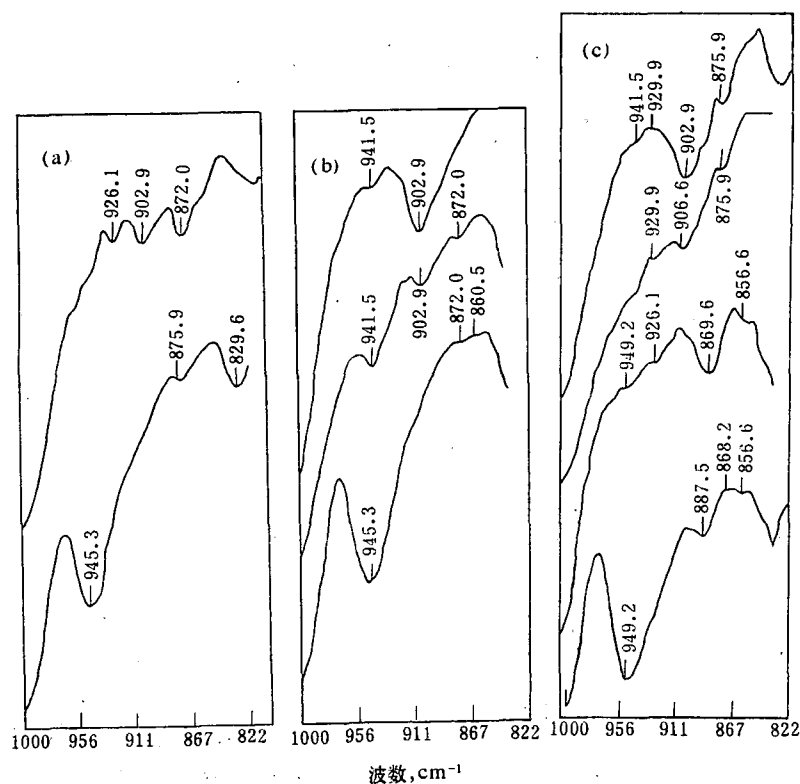


图1 不同介质中制备的含铀(VI)树脂的红外光谱图
(a)——HNO₃介质; (b)——HCl介质; (c)——H₂SO₄介质。

2. 当量计算法 当量计算法^[18]可以用来研究铀(VI)在阳离子交换树脂上的化学状态及其含量。前人^[18]是在树脂的交换位置完全被所研究金属离子及其络合离子占据的条件下,

进行当量计算的。本文则是在 UO_2^{2+} 及其络合离子只占据树脂的部分交换位置, 而其余仍被氢离子所占的条件下进行当量计算的。计算时忽略铀(VI)的非交换吸入^[16]。并认为树脂上有铀和没有铀时, 酸的非交换吸入量没有差别, 从而通过树脂与相应浓度纯酸水溶液达到非交换吸入平衡的实验, 确定有铀时非交换吸入的酸量。由总的所测氢离子中扣除非交换吸入的量, 得到占据交换位置的氢离子量。然后按照树脂的交换位置上的铀(VI)是带两个正电荷的 UO_2^{2+} 和氢是一个正电荷的 H^+ 的毫克当量数之和与交换容量的比值, 确定铀(VI)在树脂上的化学状态, 并估算其含量。

实验数据和计算结果列于表2。表中 C_H^0 和 $C_{\text{UO}_2}^0$ 是起始溶液的浓度, C_H 和 C_{UO_2} 是平衡溶液的浓度, m_{UO_2} 是按测得的每个铀酰占据两个交换位置而计算得的每克干树脂上铀(VI)所占的毫克当量数, m_H 是测得的每克干树脂上氢离子的总毫克当量数, m_Y 是非交换吸入每克干树脂的酸的毫克当量数, $m_H - m_Y$ 表示每克干树脂上按每个氢占据一个交换位置而计算的氢的毫克当量数, Q 是每克干树脂的交换容量 (4.96毫克当量), $\eta = (m_{\text{UO}_2} + m_H - m_Y) / Q$ 。显然, 如果从树脂上洗下的每个铀酰占据两个交换位置、每个氢占据一个交换位置, 则 η 应等于1。如果树脂上除 UO_2^{2+} 外, 还有 $(\text{UO}_2\text{Cl})^+$ 或 $(\text{UO}_2\text{HSO}_4)^+$, 则由于它们只占据一个交换位置, 而且在 $(\text{UO}_2\text{HSO}_4)^+$ 中还含有一个氢, 所以按上述方法所得之 η 必然大于1。由表2可见, 在本文的实验条件下, 无论是在 H_2SO_4 还是在 HCl 介质中, η 值总是等于1或略小于1。由此可以作出结论, 即使树脂上存在 $(\text{UO}_2\text{Cl})^+$ 或 $(\text{UO}_2\text{HSO}_4)^+$, 也只占很小一部分交换容量, 其量当在实验误差范围以内。可以肯定, 在酸度低于1N时, 树脂上的铀(VI)绝大部分以 UO_2^{2+} 存在。酸浓度愈低, 树脂上的 $(\text{UO}_2\text{Cl})^+$ 和 $(\text{UO}_2\text{HSO}_4)^+$ 当然也愈少。因此, 在常用的小于0.5N酸度的条件下, 完全可以按照树脂上只有 UO_2^{2+} 来考虑同位素效应及计算分离因数。

表2 当量计算法的实验数据和计算结果

	C_H^0 , N	C_H N	C_{UO_2} , M	m_{UO_2} , meq	m_H , meq	m_Y , meq	$m_H - m_Y$, meq	$\varphi, \%$	η	$\lg D$
HCl $C_{\text{UO}_2}^0 = 0.054M$	0.086	0.15	0.020	3.40	1.41	0.00	1.41	69	0.97	1.93
	0.26	0.31	0.028	2.53	2.45	0.03	2.42	51	1.00	1.65
	0.62	0.62	0.039	1.47	3.49	0.08	3.41	30	0.98	1.28
	0.70	0.70	0.041	1.33	3.74	0.10	3.64	27	1.00	1.18
	0.90	0.90	0.044	0.96	4.05	0.12	3.93	19	0.99	1.04
	1.1	1.1	0.046	0.78	4.28	0.20	4.08	16	0.98	0.93
	1.3	1.3	0.047	0.69	4.53	0.24	4.29	14	1.00	0.87
	2.0*	2.0	0.054	0.37	5.10	0.53	4.57	7	1.00	0.53
H_2SO_4 $C_{\text{UO}_2}^0 = 0.056M$	0.21**	0.24	0.038	2.42	2.39	0.00	2.39	49	0.97	1.50
	0.34	0.38	0.039	1.68	3.22	0.00	3.22	34	0.99	1.34
	0.50	0.51	0.045	1.28	3.64	0.05	3.59	26	0.98	1.15
	0.76	0.78	0.048	0.75	4.11	0.08	4.03	15	0.96	0.89
	1.3	1.3	0.053	0.37	4.74	0.17	4.57	7	1.00	0.54
	1.7	1.7	0.054	0.25	4.95	0.25	4.70	5	1.00	0.36
	2.2	2.2	0.055	0.17	5.16	0.36	4.80	3	1.00	0.19
	3.0	3.0	0.056	0.10	5.20	0.51	4.69	2	0.97	-0.05

* — $C_{\text{UO}_2}^0 = 0.056M$, ** — $C_{\text{UO}_2}^0 = 0.062M$.

3. 铀(VI)在两相的分配 铀(VI)在树脂相和溶液相之间的分配比 D 用每克干树脂和每毫升溶液中铀(VI)的量之比表示, $D = \bar{m}_{UO_2} / 2 \times C_{UO_2}$ 。以 $\lg D$ 对 C_H^0 作图(图2)可见, 在 HCl 和 H_2SO_4 的当量浓度相等时, HCl 介质中的 D 值始终比 H_2SO_4 介质中的大。其原因是: (1) 铀酰与 SO_4^{2-} 所生成的配位化合物比与 Cl^- 生成的更稳定^[19]; (2) 铀酰与 SO_4^{2-} 所生成的第一级络合物已不带正电荷, 不能占据交换位置。至于与 HSO_4^- 所生成的 $(UO_2HSO_4)^+$, 在水溶液中尚未观测到。

应当指出, 在水溶液中还存在可以与 UO_2^{2+} 相竞争而占据交换位置的游离氢离子, 因硫酸是二元酸, 有相当量的 H_2SO_4 仅离解为 HSO_4^- ^[20], 所以在相同当量浓度下, HCl 中的氢离子当然比硫酸中多。如果仅就这一点来考虑, 则当两种酸浓度相等时, HCl 介质中的树脂上铀酰的量应比 H_2SO_4 介质中的低。然而, 本文所得的 D 或负载率 φ 的结果却与此相反。这说明, 与上述两原因相比, 两种酸当量浓度相等时, 游离氢离子的多少对 D 或 φ 不起主要作用。

C. Heitner-Wirguin^[6]等人测得了溶液分别为 0.1 N UO_2SO_4 -2N H_2SO_4 和 0.1N UO_2SO_4 -2N Li_2SO_4 时, Dowex 50×8 Li^+ 式树脂上铀酰的负载率之比为 1.4:1。并将此作为 H_2SO_4 介质中树脂上存在 $(UO_2HSO_4)^+$ 的依据之一。我们认为, 虽然 H_2SO_4 和 Li_2SO_4 的浓度均为 2N, 但由于这时 H_2SO_4 有 2/3 强只解离为 HSO_4^- ^[20], 所以在溶液中可以与 UO_2^{2+} 相竞争的 H^+ 和 Li^+ 的量实际上是不相等的。况且, H^+ 和 Li^+ 对树脂的亲合力也不相同^[21]。因此, 仅从上述条件下铀酰在树脂上的负载率的差别, 是不能推断出在 H_2SO_4 介质中的树脂上有 $(UO_2HSO_4)^+$ 存在的。

根据以上所述可以作出结论: 在阳离子交换树脂上, 铀(VI)除了以 UO_2^{2+} 存在外, 还可以 $(UO_2HSO_4)^+$ 和 $(UO_2Cl)^+$ 存在, 但当酸浓度低于 0.5N 时, 其量可忽略不计。即使在酸浓度为 2—3N 时, $(UO_2HSO_4)^+$ 和 $(UO_2Cl)^+$ 也只占很小一部分树脂的交换容量。C. Heitner-Wirguin^[6,7] 等人证明存在 $(UO_2HSO_4)^+$ 和 $(UO_2Cl)^+$ 的光谱数据值得怀疑, 其实验方法也值得商榷。

致谢: 红外光谱由甘肃省测试中心周炎如和侯文乐同志代测; 在定稿时兰州化物所刘惠德和顾文华同志曾提出宝贵意见, 特此致谢。

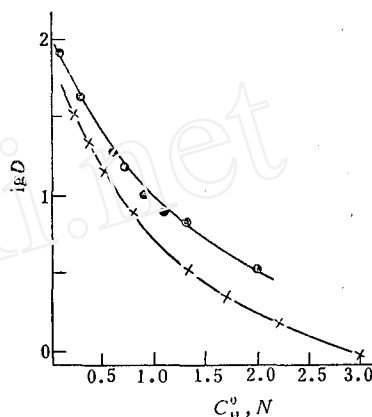


图2 $\lg D - C_H^0$ 图

●—HCl, ×— H_2SO_4 。

参 考 文 献

- [1] Б. Н. Ласкорин и др., Успехи химии, 44, 761 (1975).
- [2] T. M. Florence, G. E. Batley et al., J. Inorg. Nucl. Chem., 37, 1961 (1975).
- [3] H. Kakihana, Maso Aido, Bull. Tokyo Inst. Technol., 116, 39 (1973).
- [4] В. И. Спицын и др., Радиохимия, 22, 473 (1980).
- [5] H. Bist et al., Indian J. Pure Appl. Phys., 2, 107 (1964).
- [6] C. Heitner-Wirguin et al., J. Inorg. Nucl. Chem., 35, 3341 (1973).

- [7] C. Heitner-Wirguin et al., *Isr. J. Chem.*, **12**, 723 (1974).
- [8] 陶祖貽等, 科学通报, **19**, 1168 (1981).
- [9] C. Heitner-Wirguin et al., *J. Phys. Chem.*, **71**, 2556 (1967).
- [10] S. K. Sarpal et al., *Indian J. Chem.*, **16A**, 55 (1978).
- [11] S. P. McGlynn et al., *J. Chem. Phys.*, **35**, 105 (1961).
- [12] A. N. Richard et al., *Infrared Spectra of Inorganic Compound*, Academic Press, New York and London, 1971, p. 145, p. 245.
- [13] Kazuo Nakamoto, *Infrared and Raman Spectra of Inorganic and Coordination Compounds*, 3rd. ed., John Wiley & Sons, New York, 1978, pp. 3-67.
- [14] C. Heitner-Wirguin, *Ion Exchange and Solvent Extraction*, Vol. 7, New York, 1977, pp. 116-152.
- [15] Ф. И. Лобанов и др., *Успехи Химии*, **48**, 1448 (1979).
- [16] В. С. Пахолков и др., *Радиохимия*, **22**, 534 (1980).
- [17] Ю. Я. Харитонов и др., *ЖФХ.*, **44**, 577 (1970).
- [18] Y. Marcus et al., *Ion Exchange and Solvent Extraction of Metal Complexes*, Wiley-Interscience, London, 1969, pp. 323-326.
- [19] Lars G. Sillen et al., *Stability Constants of Metal Complexes*, 2rd, ed., London, 1964, p. 239, p. 278.
- [20] T. F. Young et al., *The Structure of Electrolytic Solution*, N. Y., Wiley, 1959, p. 35.
- [21] O. O. Bonner et al., *J. Phys. Chem.*, **61**, 326 (1957).

ION EXCHANGE OF URANIUM

II. URANYL SPECIES SORBED ON CATION EXCHANGER FROM SULFURIC AND HYDROCHLORIC ACID

TAO ZUYI ZHAO AIMIN TONG WENGONG

(Department of Modern Physics, Lanzhou University, Lanzhou)

ABSTRACT

Uranyl species sorbed on cation exchanger from H_2SO_4 and HCl solution are thoroughly studied by IR spectra and equivalent accounting. The spectra are recorded with DIGILAB FTS-15C infrared spectrometer. The asymmetric stretch, ν_3 of the uranyl group is infrared active. UO_2^{2+} and $(UO_2HSO_4)^+$ from H_2SO_4 solution and UO_2^{2+} and $(UO_2Cl)^+$ from HCl solution are found to be sorbed on the cation resin. The species sorbed on cation exchanger shows only a single band at $945.3cm^{-1}$ or $949.2cm^{-1}$ when the equilibrium is carried out in the solution with very low concentration of H_2SO_4 or HCl respectively. The species should be UO_2^{2+} . However, a new band at $902.9cm^{-1}$ or $906.6cm^{-1}$ is found when the equilibrium is carried out in the solution with high concentration of H_2SO_4 or HCl respectively. With increasing the acidity of the equilibrium solution the gradual increase of intensity of the new band and the gradual decrease of intensity of the original one can be observed. As a cation exchanger selectively sorbs cation, the species now sorbed should be either $(UO_2HSO_4)^+$ or $(UO_2Cl)^+$. But the amount of $(UO_2HSO_4)^+$ or $(UO_2Cl)^+$ on the cation exchanger can be ignored with a concentration of acids less than 0.5 N.

The equivalent accounting method is applied to the resin loaded with uranyl ion and hydrogen ion, together with cation uranyl complex species, under the conditions of negligible invasion of uranyl species. A known amount of resin in hydrogen form is equilibrated in a batch process with a solution containing uranyl and sulfuric acid (or hydrochloric acid) at various ratios. It is found experimentally that the amount of $(\text{UO}_2\text{HSO}_4)^+$ or $(\text{UO}_2\text{Cl})^+$ sorbed on exchanger is so low that they can not be observed by the method within experimental errors.

It may be concluded that the $(\text{UO}_2\text{HSO}_4)^+$ or $(\text{UO}_2\text{Cl})^+$ sorbed on cation exchanger can be overlooked under the general conditions of the experiment.

Key words Uranyl, Cation exchange resin, Equivalent accounting method, Infrared spectra, Sulfuric acid, Hydrochloric acid.

核放消息 1 西德正在研究一种利用高压水射流切割核燃料元件的新方法,用模拟元件进行的实验已取得良好结果。所用切割条件是:水压4000bar;喷嘴材料为金刚石;喷嘴孔径0.1mm;切割时间(在空气中)50s;耗水量1 l。与一般机械切割方法相比,此法的优点是切口整齐,包壳不会被挤压变形,而且切割可以在水下进行,比较方便又不需外加冷却。[*Atomkernenergie-Kerntechnik*, 41(2), 75 (1982)]。

核放消息 2 美国杜邦公司的科技人员按照ISO静态浸出测定方法对于含有萨凡那河工厂放射性废物的硼硅酸盐玻璃进行了长期浸出率的测试,结果如下: ^{90}Sr , ^{137}Cs 的浸出率在蒸馏水中为 $0.01-0.03\mu\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{d}$;在pH7缓冲液中为 $0.01-0.3\mu\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{d}$;在pH9缓冲液中为 $0.3-0.7\mu\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{d}$;在pH4缓冲液中为 $7-80\mu\text{g}/\text{cm}^2\cdot\text{d}$ 。钚的浸出率在蒸馏水及pH9缓冲液中的结果与锶、铯相似,而在pH7及pH5缓冲液中则比锶、铯小一个数量级。浸出率在200-900d之间几乎是恒定的。[*Nucl. Chem. Waste Management*, 3(2), 91 (1982)]。

核放消息 3 在日本进行的研究表明,用草酸胍 $(\text{N}_2\text{H}_5)_2\text{C}_2\text{O}_4$ 代替碳酸钠或碳酸胍洗涤后处理用过的TBP-煤油,去除DBP和MBP的效率相同,而且具有下列好处:和碳酸钠相比,洗涤剂可分解为气体,减少废物量。和碳酸胍相比,易于制备和储存,前者在25℃下一天后就显著分解,而后者在25-40℃在三周内皆是稳定的。在洗涤时,此法产生的沉淀物、乳化物和气体也较少。[*Nucl. Technology*, 59(1), 51(1982)]。