

磷酸三异戊酯、磷酸三仲丁酯对 U(VI)、 Th(IV) 的萃取性能

刘春霞, 李瑞芬, 何淑华, 李 峰, 罗 艳, 李晴暖, 张 岚*

中国科学院 上海应用物理研究所, 核辐射与核能技术重点实验室, 上海 201800

摘要:研究了磷酸三异戊酯(TiAP)、磷酸三仲丁酯(TsBP)的正十二烷溶液从硝酸介质中萃取 U(VI)、Th(IV) 的性能及 Th(IV) 的萃取容量, 并在相同条件下与磷酸三丁酯(TBP)的萃取性质进行了比较。结果表明: TiAP 对 Th(IV)、U(VI) 的萃取性能与 TBP 相近, 相同酸度情况下, 分配比均略高于 TBP; TsBP 萃取 U(VI) 的分配比高于 TBP, 而萃取 Th(IV) 的分配比低于 TBP。随着水相硝酸浓度的增大, 两种萃取剂对 Th(IV)、U(VI) 的萃取分配比增大, 但在较高酸度下则相反; 同时比较了 TiAP、TsBP、TBP 对 Th(IV) 的萃取容量。

关键词: TiAP; TsBP; Th(IV); U(VI); 萃取; 萃取剂

中图分类号: O645.16 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9950(2014)05-0282-07

doi: 10.7538/hhx.2014.36.05.0282

Extraction Behavior of U(VI) and Th(IV) by Tri-Iso-Amyl Phosphate and Tri-Sec-Butyl Phosphate

LIU Chun-xia, LI Rui-fen, HE Shu-hua, LI Zheng, LUO Yan,
LI Qing-nuan, ZHANG Lan*

Key Laboratory of Nuclear Radiation and Nuclear Energy Technology,
Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

Abstract: This paper reports the data on the extraction of U(VI) and Th(IV) from different concentration of nitric acid, and the extraction capacity of thorium by tri-iso-amyl phosphate (TiAP), tri-sec-butyl phosphate (TsBP) in n-dodecane solution, at the same time, provides a comparison of their extraction behavior with that of tri-n-butyl phosphate (TBP). The results indicate that extraction properties of U(VI) and Th(IV) by TiAP are similar to TBP, and the distribution ratios are slightly higher than that of TBP; while the distribution ratio of U(VI) by TsBP is higher than that of TBP, but the distribution ratio for Th(IV) is lower. The distribution ratios of thorium and uranium by the two kinds of extractants are increasing with the increase of nitric acid concentration in aqueous phase, then decreasing under the higher acid concentration.

收稿日期: 2014-01-22; 修订日期: 2014-04-29

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDA02030000)

作者简介: 刘春霞(1982—), 女, 山东潍坊人, 硕士, 助理研究员, 放射化学专业

* 通信联系人: 张 岚(1974—), 男, 安徽淮南人, 博士, 研究员, 放射化学专业, E-mail: zhanglan@sinap.ac.cn

Key words: TiAP; TsBP; Th(IV); U(VI); extraction; extractant

钍-铀燃料后处理的溶剂萃取工艺流程一般采用磷酸三丁酯(TBP)为萃取剂的“Thorex”流程。尽管 TBP 有很多的优点,但也有缺点或不足,如 TBP 萃取较高浓度的 Th(IV)时,容易达到饱和出现三相^[1-4]等,从而影响钍-铀产品纯度及 TBP 的复用。为从根本上改进溶剂萃取流程,我国也进行了钍-铀循环燃料后处理中新萃取剂的研究^[5-7]。从 20 世纪 80 年代起,磷酸三异戊酯(TiAP)开始受到重视,和 TBP 相比,它在水中的溶解度小,具有更好的物理化学性质及辐照稳定性。俄罗斯已经用 TiAP 处理快堆乏燃料元件^[8]。焦荣洲等^[9]对 TiAP 萃取 U(VI)的性能进行了研究,发现 TiAP 和 TBP 一样对 U(VI)有较好的萃取性能,有望成为工业上能代替 TBP 的一种萃取剂。用 TiAP——直链烷烃溶液萃取 Th(IV)时不易出现三相。印度在 21 世纪初曾研究过磷酸三仲丁酯(TsBP)作萃取剂用于 U/Th 分离,并用混合澄清槽进行了验证,证明铀产品对 Th(IV)的分离因子达到 2.5×10^4 ^[10]。盛怀禹等^[11]对 TsBP 的辐照稳定性进行了研究,研究结果表明其辐照稳定性明显优于 TBP。与 TBP 相比,TiAP 碳链长度的增加使其萃取硝酸钍的容量增加,同时减少了其在水中的溶解度;而 TsBP 在 α 碳上引入甲基使得钍铀分离系数增加,碳链长度的增加或 α 位引入甲基均可增加其辐照稳定性^[12]。因此研究开发具有良好耐辐照性能的新萃取剂非常必要。本工作拟比较三种萃取剂 TiAP、TsBP 与 TBP 的物理性质及其对硝酸钍、硝酸铀酰的萃取性能,为 TiAP、TsBP 在钍-铀燃料循环后处理流程中的应用提供参考。

1 实验部分

1.1 试剂和仪器

TBP, 化学纯, 北京化工厂; TiAP、TsBP, 四川大学化学学院提供, 纯度高于 98%, 使用前依次经 5% (质量分数) Na_2CO_3 、0.1 mol/L HNO_3 及蒸馏水洗除酸性杂质, 按要求与稀释剂正十二烷混合后使用; 硝酸, 分析纯, 国药集团化学有限公司; 正十二烷, 分析纯, Alfa 试剂有限公司; 硝酸铀酰、硝酸钍, 分析纯, 湖北楚盛威化工有限公司。

电感耦合等离子体原子发射光谱(ICP-AES),

美国 PerkinElmer 公司; Vortex-genie 2 型旋涡混合器, 美国 Scientific Industries 公司; TDZ4-WS 型离心机, 湘仪离心机仪器有限公司。

1.2 实验方法

萃取实验在带塞的磨口离心试管中进行。将一定体积的含不同浓度 HNO_3 的水溶液与相同体积的萃取剂——正十二烷溶液在 25 ℃下进行萃取平衡。为使水相达到预定的平衡酸度,要进行 3 次预平衡,每次皆弃去水相,加入 HNO_3 浓度相同的新鲜水溶液, 涡旋混合 2 min。取水相和有机相等体积萃取, 离心分相, 用 ICP-AES 测定水相中 U(VI) 的浓度, 用 EDTA 络合滴定法分析水相及有机相中 Th(IV) 的浓度, 有机相中 U(VI) 的浓度用差减法计算求得。分配比 D 为有机相与水相中元素浓度之比, c_0 表示水相初始浓度。

实验选择铀回收及钍、铀回收常用的萃取剂浓度分别为 0.18、1.1 mol/L, 将硝酸铀酰、硝酸钍及硝酸配制成一定浓度的水相溶液与 0.18 mol/L TiAP/TsBP/TBP-正十二烷和 1.1 mol/L TiAP/TsBP/TBP-正十二烷进行萃取实验。

U(VI)、Th(IV) 分离系数($\beta_{\text{U}/\text{Th}}$)由 U(VI) 的分配比 $D(\text{U})$ 与 Th(IV) 的分配比 $D(\text{Th})$ 比值求得。

2 结果与讨论

2.1 物理性质的比较

TiAP、TsBP 与 TBP 萃取剂的结构式示于图 1。三种萃取剂的基本物理性质相近, 在常温条

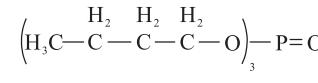
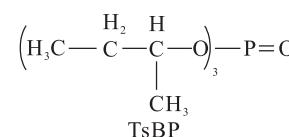
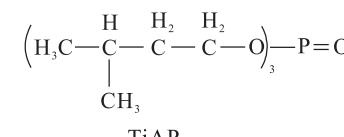


图 1 TiAP、TsBP、TBP 的结构

Fig. 1 Structure of tri-iso-amyl phosphate, tri-sec-butyl phosphate and tri-n-butyl phosphate

件下均为无色透明液体,与正十二烷有良好的互溶性,稀释后的溶液为无色。表1列出了TiAP、TsBP与TBP的物性。由表1可知,TiAP、TsBP的密度均小于TBP,沸点稍低于TBP,而粘度三者相近,由文献[13-14]可知,TBP在水中的溶解度较大,而TiAP在水中的溶解度只有TBP在水中溶解

度的1/19.5,可改善TBP的不足之处。而TsBP在水中溶解度比TBP约大三倍。

2.2 萃取平衡时间对Th(IV)、U(VI)分配行为的影响

图2、3为0.18、1.1 mol/L TiAP/TsBP/TBP-正十二烷萃取硝酸铀酰、硝酸钍时萃取时间

表1 TiAP、TsBP与TBP萃取剂物性的比较

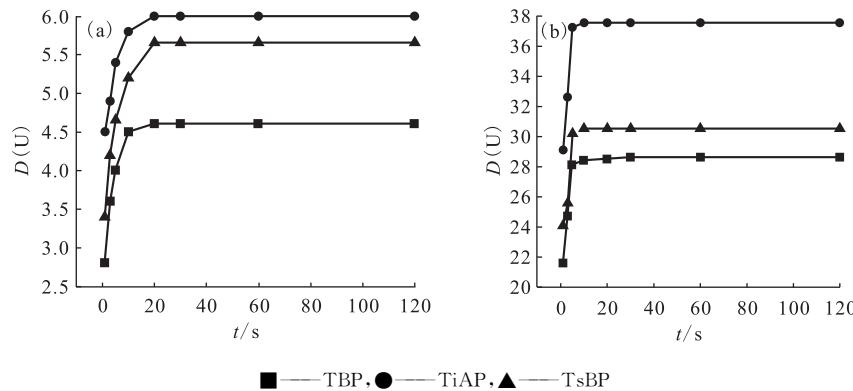
Table 1 Comparison of physical properties of TiAP and TsBP in water with those of TBP

萃取剂(Extractants)	$\rho/(g \cdot cm^{-3})$	粘度(Viscosity) η^{25}/cP	沸点(Boiling point)/℃	水中溶解度(Solubility in water)/(g · L ⁻¹)
TBP	0.973	3.32	161 ¹⁾	0.39
TiAP	0.952	3.54	143~146 ²⁾	0.02
TsBP	0.968	3.41	119~129 ³⁾	1.50

注(Notes):1) $p=2.0$ kPa;

2) $p=9.5 \times 10^2$ Pa;

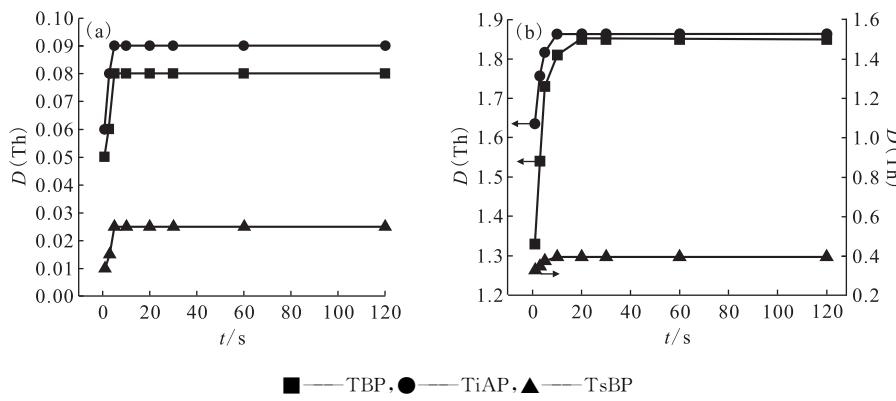
3) $p=1.1 \sim 1.6$ kPa



$c_0(UO_2^{2+})=2 \times 10^{-3}$ mol/L, $c_0(HNO_3)=3$ mol/L, $\theta=25$ ℃, 相比(Phase ratio, A : O)1 : 1

图2 0.18 mol/L(a)、1.1 mol/L(b) TiAP/TsBP/TBP-正十二烷萃取硝酸铀酰时萃取时间对分配行为的影响
Fig. 2 Effect of extraction time on distribution behaviour of U(VI)

by 0.18 mol/L(a) and 1.1 mol/L(b) solution TiAP/TsBP/TBP in n-dodecane



$c_0(Th^{4+})=2 \times 10^{-1}$ mol/L, $c_0(HNO_3)=3$ mol/L, $\theta=25$ ℃, 相比(Phase ratio, A : O)1 : 1

图3 0.18 mol/L(a)、1.1 mol/L(b) TiAP/TsBP/TBP-正十二烷萃取硝酸钍时萃取时间对分配行为的影响
Fig. 3 Effect of extraction time on distribution behaviour of Th(IV)

by 0.18 mol/L(a) and 1.1 mol/L(b) solution TiAP/TsBP/TBP in n-dodecane

对分配行为的影响,实验结果表明,TiAP、TsBP萃取Th(IV)、U(VI)和TBP一样,很快达到萃取平衡,仅30 s左右。以下的萃取实验均取萃取平衡时间为1 min。

2.3 硝酸浓度对U(VI)分配比的影响

TiAP、TsBP和TBP都属于中性磷类萃取剂^[4,15-17],其特点为被萃取组分是中性分子,萃取剂本身也是中性分子,萃取剂与被萃取组分结合成为中性溶剂络合物而进入有机相^[17]。本工作研究了不同硝酸浓度时两种萃取剂浓度(0.18、1.1 mol/L)下TiAP、TsBP和TBP对硝酸铀酰的萃取,实验结果示于图4。从图4可看出,在相同实验条件下,三种萃取剂萃取U(VI)的能力为TiAP>TsBP>TBP,且萃取能力的变化趋势相同,酸度对D(U)的影响有一个先上升后下降的过程。在低酸度(<3 mol/L)时,D(U)随着酸度

的增加而增加,TiAP、TsBP和TBP的萃取能力迅速增加;当硝酸浓度达到5 mol/L时,萃取分配比达到最大值;随后分配比出现了下降趋势。

在硝酸浓度较低条件下D(U)的上升是由于硝酸根浓度随着硝酸浓度的增加而增加,盐析效应有利于U(VI)的萃取。当硝酸浓度进一步加大时,萃取剂对硝酸本身的萃取也相应增加,由于形成HNO₃·TBP化合物^[18],NO₃⁻与TBP的有效浓度反而降低,故酸度的增加反而导致分配比的降低。另外,高酸度下硝酸解离度的降低也是导致萃取U(VI)分配比下降的原因之一。

2.4 硝酸浓度对Th(IV)分配比的影响

本工作研究了不同硝酸浓度时TiAP、TsBP和TBP对硝酸钍的萃取,实验结果示于图5。由图5可看出,在相同实验条件下,三种萃取剂萃取

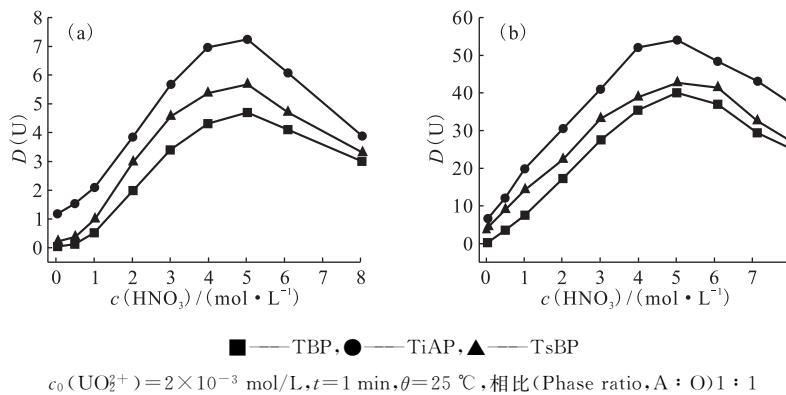


图4 0.18 mol/L(a)、1.1 mol/L(b) TiAP/TsBP/TBP-正十二烷萃取硝酸铀酰时硝酸浓度对分配比的影响

Fig. 4 Effect of concentration of nitric acid on distribution ratios of U(VI)

by 0.18 mol/L(a) and 1.1 mol/L(b) solution TiAP/TsBP/TBP in n-dodecane

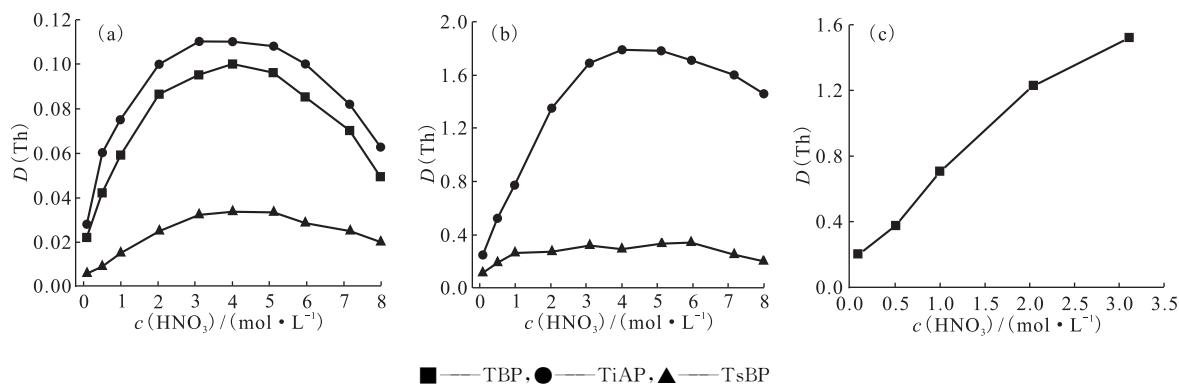


图5 硝酸浓度对0.18 mol/L(a)、1.1 mol/L(b, c) TiAP/TsBP/TBP-正十二烷萃取Th(IV)分配比的影响

Fig. 5 Effect of concentration of nitric acid on distribution ratios of Th(IV)

by 0.18 mol/L(a) and 1.1 mol/L(b, c) solution TiAP/TsBP/TBP in n-dodecane

Th(IV)的能力为: TiAP>TBP>TsBP,且萃取能力的变化趋势相同,酸度对D(Th)的影响有一个先上升后下降的过程。在硝酸浓度较低($<5\text{ mol/L}$)时,硝酸钍的分配比随酸度的增加而升高,这是由于硝酸自身的盐析效应所致;在硝酸浓度较高($>5\text{ mol/L}$)时,Th(IV)的分配比随酸度的增加反而减小,由于硝酸浓度较高时,萃取剂对硝酸的萃取能力增加,使得自由萃取剂浓度降低,因而Th(IV)的分配比减小。

由图4、5可见,TiAP、TsBP萃取硝酸钍的能力与TBP相当,而TsBP萃取硝酸钍的分配比明显较小,由此可见,TsBP更有利于Th(IV)、U(VI)分离。

1.1 mol/L TiAP萃取硝酸钍的分配比随酸度的增加而增加($<4\text{ mol/L}$),当在较高硝酸浓度下($>4\text{ mol/L}$),Th(IV)的分配比反而减小,结果示于图5(b)。1.1 mol/L TBP萃取Th(IV)很容易形成三相,为了避免三相的形成选择硝酸浓度低于3 mol/L进行实验,结果示于图5(c)。在较低酸度下,硝酸钍的分配比随酸度的增加而升高,这是由于硝酸自身的盐析效应所致;当 $c_0(\text{Th}^{4+})=2\times10^{-1}\text{ mol/L}$ 、硝酸浓度较高($>3\text{ mol/L}$)时,形成三相。

2.5 Th(IV)、U(VI)分离系数比较

本工作研究了不同硝酸浓度时TiAP、TsBP和TBP对Th(IV)、U(VI)的分离性能,实验结果示于图6。由图6可看出,在相同实验条件下, $\beta_{U/\text{Th}}$ 随酸度的增加而增加, $\beta_{U/\text{Th}}(\text{TsBP})$ 是 $\beta_{U/\text{Th}}(\text{TiAP}, \text{TBP})$ 的四倍左右;TsBP萃取Th(IV)、

U(VI)的分离系数明显优于其他两种萃取剂,而TiAP略优于TBP,具有支链烷基化合物的U(VI)分配比一般要高于相应的直链酯烷基磷酸酯,在 α -位上(即邻酯氧原子)具有仲碳原子的烷基酯尤为显著,这可能是由于这类化合物的结构空间效应有利于与铀氧离子形成热力学稳定的络合物所致。若在近酯氧原子引入甲基(如TsBP),由于空间阻碍不利于与Th(IV)形成稳定络合物,故对Th(IV)的萃取分配比明显下降。

2.6 TBP、TiAP和TsBP萃取Th(IV)的容量研究

在钍、铀燃料后处理工艺流程中,在一定的工艺条件下,为了提高Th(IV)的生产能力和对裂片的去污,希望提高Th(IV)在有机相中的饱和度,但由于Th(IV)的萃合物在煤油等稀释剂中溶解度有限,当有机相中Th(IV)浓度($\rho_0(\text{Th})$)超过一定值以后,开始形成较重的第二有机相,即第三相。它会导致萃取设备中水力学平衡的破坏,影响萃取设备的正常运行,也会使Th(IV)、U(VI)收率及去污因子降低,因此操作规程中需要避免三相的形成。所以,萃取容量也是衡量萃取剂优劣的标准之一。本试验研究了TiAP和TsBP对Th(IV)的萃取容量,并与TBP做了比较,试验结果列于表2。由表2可知,1.1 mol/L萃取剂萃取硝酸钍时,萃取容量依次为TiAP>TsBP≈TBP。在相比(A:O)1:1、硝酸浓度为3 mol/L和4 mol/L、 $\rho_0(\text{Th}^{4+})<200\text{ g/L}$ 时,TiAP萃取Th(IV)不易形成三相,而在 $\rho_0(\text{Th}^{4+})=300\text{ g/L}$ 时,萃取两次出现分相难;当Th(IV)浓度较高时,分配比随着水相Th(IV)浓度的增加而明显降低,随之有机相中Th(IV)浓度也有所降低;有机相中Th(IV)

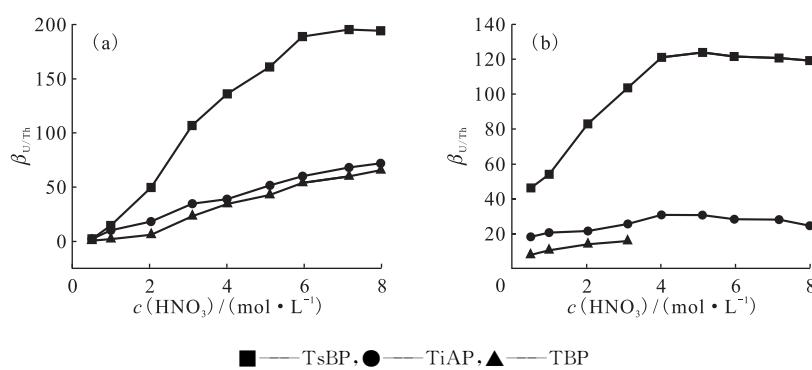


图6 0.18 mol/L(a)、1.1 mol/L(b) TiAP/TsBP/TBP-正十二烷萃取Th(IV)、U(VI)分离系数的比较

Fig. 6 Comparison of data on U/Th separation by 0.18 mol/L(a) and 1.1 mol/L(b) solution TiAP/TsBP/TBP in n-dodecane

表2 TiAP、TsBP与TBP-正十二烷溶液萃取硝酸钍容量的比较

Table 2 Comparison of Th extraction capacity
of 1.1 mol/L solution TiAP/TsBP in n-dodecane with that of TBP

萃取剂 (Extractants)	$\rho_0(\text{Th}^{4+}) = 50.7 \text{ g/L}$			$\rho_0(\text{Th}^{4+}) = 180 \text{ g/L}$			$\rho_0(\text{Th}^{4+}) = 300 \text{ g/L}$		
	$c_0(\text{HNO}_3)/$ (mol · L ⁻¹)	$\rho_0(\text{Th})/$ (g · L ⁻¹)	D(Th)	$c_0(\text{HNO}_3)/$ (mol · L ⁻¹)	$\rho_0(\text{Th})/$ (g · L ⁻¹)	D(Th)	$c_0(\text{HNO}_3)/$ (mol · L ⁻¹)	$\rho_0(\text{Th})/$ (g · L ⁻¹)	D(Th)
TBP	3.11	30.22 ¹⁾	1.47	3.21	三相(3 rd phase)		2.99	三相(3 rd phase)	
	4.01	32.47 ¹⁾	1.79	3.97	三相(3 rd phase)		3.97	三相(3 rd phase)	
TsBP	3.11	16.45	0.12	3.21	30.46 ¹⁾	0.20	2.99	三相(3 rd phase)	
	4.01	20.75	0.16	3.97	35.41 ¹⁾	0.25	3.97	三相(3 rd phase)	
TiAP	3.11	42.37	0.72	3.21	70.23	0.63	2.99	54.48	0.22
	4.01	44.62	0.79	3.97	73.55	0.71	3.97	55.40	0.24

注(Notes):1) 加入 1.1 mol/L TBP/TsBP(与 3.11、4.01 mol/L 的硝酸平衡后),使第二有机相刚好消除时有机相中的 Th 浓度(The concentration of Th in organic phase, at the point of elimination of the second organic phase after adding 1.1 mol/L TBP/TsBP(prequilibrium with 3.11 and 4.01 mol/L HNO₃) into organic phase)

的保留量随着萃取剂烷基碳链长度的增加而增加,这是由于随着萃取剂烷基碳链长度的增加,萃合物的亲有机性增加,因而增加了其在稀释剂中的溶解性。在相比(A : O)1 : 1、硝酸浓度为3 mol/L 和 4 mol/L、 $\rho_0(\text{Th}^{4+}) = 200 \text{ g/L}$ 时,TsBP 萃取 Th(IV)两次出现三相;但在 $\rho_0(\text{Th}^{4+}) = 50.7 \text{ g/L}$ 时,TBP 萃取 Th(IV)两次就出现三相;TsBP 和 TBP 萃取硝酸钍有机相中的保留量相当,由此可见,萃取剂烷基链支链化并没有影响萃合物在稀释剂中的溶解性。

3 结 论

(1) 从萃取剂的物理特性方面考虑,上述三种萃取剂,TiAP 在水中溶解度小于 TBP,而 TsBP 在水中溶解度比 TBP 大三倍;且 TiAP 和 TsBP 的密度都小于 TBP。

(2) TiAP、TsBP 与 TBP 结构相似,萃取硝酸钍和硝酸铀酰的趋势相似。在较广酸度范围内,TiAP、TsBP 对硝酸铀酰的萃取能力较强,TiAP 萃取硝酸钍的能力与 TBP 相当,但 TsBP 萃取硝酸钍的能力明显弱于 TBP,因此,二者对 Th(IV)、U(VI)的分离性能均优于 TBP,TsBP 对 Th(IV)、U(VI)的分离性能更好。

(3) TiAP 萃取容量大于 TBP,不易形成三相;而 TsBP 的萃取容量与 TBP 相当。

本研究为²³³U 的提取流程和 U/Th 分离流

程工艺条件的优化提供了重要的参考数据,基于以上参考数据将对 U(VI)提取工艺流程进行冷串级实验研究。

参 考 文 献:

- [1] Vasudeva R P R, Kolarik Z. A review of third phase formation in extraction of actinides by neutral organophosphorus extractants[J]. Solvent Extr Ion Exch, 1996, 14(6): 955-993.
- [2] Kolarik Z. The formation of a third phase in the extraction of Pu(IV), U(IV) and Th(IV) nitrates with tributyl phosphate in alkane diluents[C]. Proc Int Solvent Extraction Conference, Toronto 1977, CIM Special Vol. 21, The Canadian Institute of Minig and Metallurgy, 1979: 178-182.
- [3] Healy T V, Mckay H A C. The extraction of nitrates by tri-n-butyl phosphate(TBP), Part 2: the nature of the TBP phase[J]. Trans Faraday Soc, 1956, 52: 633-642.
- [4] Srinivasan T G, Ahmed M K, Shakila A M, et al. Third phase formation in the extraction of plutonium by tri-n-butyl phosphate[J]. Radiochim Acta, 1986, 40: 151-154.
- [5] 沈朝洪,包亚之,包伯荣,等. 钇-铀燃料后处理中新萃取剂研究 I: 双取代酰胺类的研究及其结构与性能的关系[J]. 核化学与放射化学, 1992, 14(2): 94-99.
- [6] 曹正白,沈朝洪,包伯荣,等. 钇-铀燃料后处理中新

- 萃取剂研究Ⅱ:N-正辛基己内酰胺萃取铀和钍[J].
核化学与放射化学,1993,15(2):76-81.
- [7] 沈朝洪,包伯荣,王高栋,等. 钍-铀燃料后处理中新萃取剂的研究Ⅳ:N-正辛基己内酰胺对主要裂片元素的萃取及 γ 辐照对萃取行为的影响[J]. 核化学与放射化学,1993,15(2):82-87.
- [8] Danilov N A, Korpusor G V, Vtkina O B. Regularities of the extraction of rare element with triisoamyl phosphate[C]// Proceeding of ISEC 88, Moscow: USSR, 1988: 326-329.
- [9] 焦荣洲,韩升印. 磷酸三异戊酯萃取U、Np、Pu性能的研究[J]. 原子能科学技术,1995,29(2):161-166.
- [10] Suresh A, Srinivasan T G, Vasudeva Rao P R, et al. U/Th separation by counter-current liquid-liquid extraction with tri-sec butyl phosphate by using an ejector mixer-settler[J]. Sep Sci Technol, 2004, 39 (10): 2477-2496.
- [11] 盛怀禹,李方琳,向才立. 萃取剂的辐射稳定性研究Ⅳ:磷酸三异丁酯和磷酸三仲丁酯辐解产物的研究[J]. 原子能科学与技术,1965,7(8):693-698.
- [12] 程倩,张晓岚,包伯荣,等. γ 辐照对磷酸三异戊酯(TiAP)萃取铀(VI)的性能影响[J]. 辐射研究与辐射工艺学报,2004,25(5):285-288.
- [13] Shoun R R, Thompson M C. Chemical properties and reactions[C]// Science and Technology of Tributyl Phosphate. Schulz W W, Navratil J D, Talbot A E, Eds. Boca Raton, Florida, USA: CRC Press, 1984, I : 137-160.
- [14] Barney G S, Cooper T D. The chemistry of tributyl phosphate at elevated temperature in the plutonium finishing plant process vessels, WHC-EP-0737[R]. Richland, WA Washington, USA: Westinghouse Hanford Co., 1994.
- [15] 姜圣阶,任凤仪. 核燃料后处理工学[M]. 北京:原子能出版社,1995:133-134.
- [16] 李洲. 液-液萃取过程和设备[M]. 北京:原子能出版社,1993:14-38.
- [17] N. 尼科洛托娃, H. A. 卡尔塔绍娃. 萃取手册:第一卷:用中性有机化合物的萃取[M]. 北京:原子能出版社,1981:26-463.
- [18] Srinivasan T G, Suresh A, Prasanna R, et al. Metal-solvate stoichiometry evaluation in extractions by solvating type neutral extractants: a novel approach[J]. Solvent Extr Ion Exch, 1996, 14(3): 443-458.