

# 氨基羟基脒在 Purex 流程铀钚分离中的应用

肖松涛, 叶国安, 潘永军, 罗方祥, 杨贺, 兰天

(中国原子能科学研究院放射化学研究所, 北京 102413)

**摘要:**研究了氨基羟基脒(HSC)的硝酸水溶液对 30% TBP/煤油中 Pu(IV) 的还原反萃取行为, 考察了 HSC 浓度、两相接触时间、两相比、反萃液硝酸浓度、 $\text{NO}_3^-$  浓度、有机相 U 浓度和温度对 Pu(IV) 还原反萃的影响。结果表明: 延长两相接触时间能显著提高 Pu(IV) 的反萃率, 增加氨基羟基脒的浓度、降低反萃液酸度、降低  $\text{NO}_3^-$  浓度、增加有机相 U 浓度和升高温度也对 Pu(IV) 的反萃率有一定的提高。采用 16 级逆流反萃取实验(还原反萃段 10 级, 补充萃取段 6 级), 模拟 Purex 流程 1B 槽 U/Pu 分离工艺, 在相比(1BF : 1BX : 1BS)为 4 : 1 : 1 的条件下, U 的收率大于 99.99%, Pu 的收率大于 99.99%; 铀中去钚的分离因数  $\text{SF}_{\text{Pu/U}} = 2.8 \times 10^4$ ; 钚中去铀的分离因数  $\text{SF}_{\text{U/Pu}} = 5.9 \times 10^4$ 。HSC 作为还原反萃取剂, 可有效实现铀钚分离。

**关键词:** Pu(IV); 氨基羟基脒; 还原反萃; 铀钚分离

中图分类号: TL241

文献标志码: A

文章编号: 1000-6931(2013)01-0027-07

doi: 10.7538/yzk.2013.47.01.0027

## Application of Hydroxysemicarbazide in Separation of Pu From U in Purex Process

XIAO Song-tao, YE Guo-an, PAN Yong-jun, LUO Fang-xiang, YANG He, LAN Tian

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-26, Beijing 102413, China)

**Abstract:** The reduction stripping behavior of Pu(IV) from 30% TBP/OK with HSC was investigated under conditions of different temperatures, different concentration of HSC, concentration of  $\text{HNO}_3$ , concentration of  $\text{NO}_3^-$ , concentration of U in organic phase, various contacting-time, phase ratios, respectively. The results show that the longer phase contacting-time is, the higher reduction concentration is, the higher U concentration in organic phase is, the higher temperature is, and the lower  $\text{HNO}_3$  concentration and the  $\text{NO}_3^-$  concentration are, the higher stripping rate of Pu is. The application of HSC to separate Pu from U in the 1B contactor was studied by the 16 stages counter current experiment (in which 6 stages for supplemental extraction, 10 stages for stripping). It is shown that the recovery percentage of U reaches over 99.99% and the recovery percentage of Pu over 99.99% at phase ratio 1BF : 1BX : 1BS = 4 : 1 : 1. The separation factor of Pu from U ( $\text{SF}_{\text{Pu/U}}$ ) is  $2.8 \times 10^4$ , and the separation factor of U from Pu ( $\text{SF}_{\text{U/Pu}}$ ) is  $5.9 \times 10^4$ . The results show that HSC as a new organic reductant can

effectively achieve the separation of Pu from U.

**Key words:** Pu(IV); hydroxysemicarbazide; reduction stripping; separation of Pu from U

Purex 流程中 U/Pu 的分离是基于 TBP 对 U(VI)、Pu(IV) 和 Pu(III) 不同的萃取能力来实现的,而选择合适的还原反萃剂是实现 U/Pu 分离的重要手段之一<sup>[1-5]</sup>。通常 Pu(IV) 到 Pu(III) 的价态转换采用化学还原和电化学还原,目前最常用的还原剂是 U(VI) 和羟胺<sup>[6-7]</sup>,其中 U(VI) 可较好的还原 Pu(IV) 到 Pu(III),但其有一些弊端,如 U(VI) 需量远超过化学计量;U(VI) 和 Pu(III) 会自催化氧化;还需支持还原剂胂,其可能生成具有爆炸危险的  $N_3H$  及不利于流程的  $NH_4^+$ <sup>[8-9]</sup>。 $NH_2OH$  也是一种被广泛用于还原 Pu(IV) 到 Pu(III) 的无盐有机试剂,但其在较高酸度条件下对 Pu(IV) 还原速率较慢,只有在低酸度、较高温度(约 50 °C)和还原剂大量过量的情况下才能满足工艺要求<sup>[4]</sup>。因此选取新的还原剂以改善 U、Pu 分离工艺是 Purex 流程研究的重要内容。

氨基羟基脒是自行设计合成的一种新型的无盐有机还原剂,分子式为  $HONHCONHOH$ ,其具有良好的亲水性,可快速还原 Pu(IV) 到 Pu(III)。国内外未见其他相关应用报导<sup>[10-11]</sup>。

本文研究硝酸水溶液中 HSC 对 30% TBP/煤油中 Pu(IV) 的反萃行为,考察氨 HSC 浓度、两相接触时间、两相相比、反萃液硝酸浓度、 $NO_3^-$  浓度、有机相 U 浓度和温度对 Pu(IV) 的还原反萃的影响,并采用以 HSC 为还原剂的 16 级逆流反萃,对 Purex 流程中 1B 工艺段 U/Pu 分离工艺进行验证。

## 1 实验

### 1.1 试剂与仪器

氨基羟基脒,纯度大于 99%,中国原子能科学研究院放射化学研究所合成。其他试剂为分析纯。Pu(IV) 溶液系 Fe(II) 还原、 $HNO_2$  氧化、2606 阴离子交换树脂纯化所得,以 K 边界法及  $\alpha$  计数法测定其浓度,其  $H^+$  浓度用 pH 滴定法测定<sup>[12]</sup>。

SL6000LL 液闪仪,美国 Bechman; DC-1020 型低温恒温水浴槽,宁波新芝生物科技公司;PHS-3C 型酸度计,上海雷磁仪器厂;混合

澄清槽,自行设计加工。

### 1.2 实验方法

单级反萃取实验在离心萃取管中进行。

单级反萃取实验:将配制好的有机相料液和 HSC 还原反萃液在恒温水浴槽中恒温 0.5 h 后,按设计的相比加入萃取管中,在设定温度下,振荡至预定时间,快速离心分相,澄清后分别取有机相、水相样品并测定各组分含量。

多级逆流反萃取实验流程示意图及工艺参数示于图 1。用 16 级逆流反萃分离,模拟 Purex 流程 1B 槽 U/Pu 分离工艺。还原反萃段 10 级,补充萃取段 6 级,混合澄清槽的混合室设计混合相的停留时间为 60 s,流比(1BX : 1BF : 1BS)为 1 : 4 : 1。

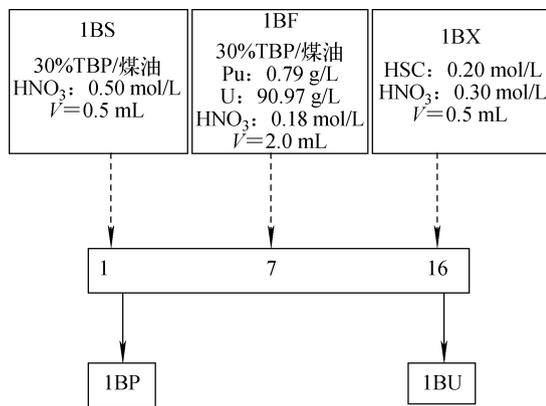


图 1 模拟 Purex 流程 1B 工艺实验流程图

Fig. 1 Flowsheet diagram of experiment for simulating 1B condition of Purex process

### 1.3 分析方法

铀浓度的分析:水相和有机相常量铀分析是将样品在 1.0 mol/L  $H_2SO_4$ 、1.0 mol/L  $HNO_3$  和 0.1 mol/L  $NH_2SO_3H$  的混合酸介质中,以过量  $TiCl_3$  还原,用  $K_2Cr_2O_7$  氧化还原滴定法测定;有机相中常量铀样品先用上述混合酸反萃,再用水相常量铀的分析方法测定。水相微量铀样品先用 TOPO 萃取, $Br_2$ PADAP 显色法测定;有机相微量铀先用等体积饱和  $Na_2CO_3$  反萃 2 次,合并水相并酸化后,再用 TOPO 萃取, $Br_2$ PADAP 显色法测定<sup>[3]</sup>。

Pu 的测定:用液闪法测定  $\alpha$  计数,效率校正后确定钚的含量<sup>[12]</sup>。

HNO<sub>3</sub>浓度的分析:水相样品中 HNO<sub>3</sub> 浓度采用饱和草酸铵络合铀钚,用标准 NaOH 进行滴定;有机相样品中 HNO<sub>3</sub> 先用去离子水反萃入水相,再以相同方法测定。

## 2 结果与讨论

### 2.1 HSC 对 Pu(IV) 单级反萃实验的影响

#### 1) 相接触时间对 Pu(IV) 反萃率的影响

在室温 21 °C 下,用  $c(\text{HSC})=0.050 \text{ mol/L}$ 、 $c(\text{H}^+)=0.40 \text{ mol/L}$ 、 $c(\text{NO}_3^-)=0.40 \text{ mol/L}$  的水相还原反萃取  $\rho_0(\text{Pu(IV)})=0.80 \text{ g/L}$  的有机相(30% TBP/煤油),在相比(o/a)为 1 : 1 和 4 : 1 条件下,改变相接触时间,Pu 的反萃率示于图 2。

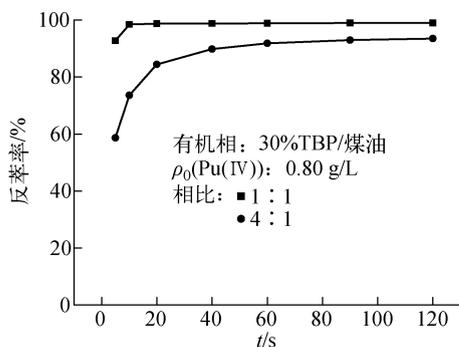


图 2 相接触时间对 Pu 反萃率的影响

Fig. 2 Variation of stripping for Pu with time of phase contact

由图 2 可知,当 HSC 还原反萃 Pu(IV) 时,Pu(IV) 的反萃率随相接触时间的增加而提高。在相比为 1 : 1 及相接触时间为 5 s 时,Pu(IV) 的反萃率为 92.8%;在相比为 4 : 1 及相接触时间为 5 s 时,Pu(IV) 的反萃率为 58.7%,20 s 时为 84.5%,60 s 时为 91.9%,此时该条件下 Pu(IV) 还原反萃基本达到平衡。可见,在相比比较大时,适当增加相接触时间可大幅提高 Pu(IV) 的反萃率。故实验采用的相平衡接触时间为 90 s。

#### 2) 相比对 Pu(IV) 反萃率的影响

在室温 21 °C,相接触时间为 90 s 时,用  $c(\text{HSC})=0.050 \text{ mol/L}$ 、 $c(\text{H}^+)=0.40 \text{ mol/L}$ 、

$c(\text{NO}_3^-)=0.40 \text{ mol/L}$  的水相还原反萃取  $\rho_0(\text{Pu(IV)})=0.80 \text{ g/L}$  的有机相,在相比为 1 : 1~6 : 1 条件下,Pu(IV) 的反萃率与相比的关系如图 3 所示。

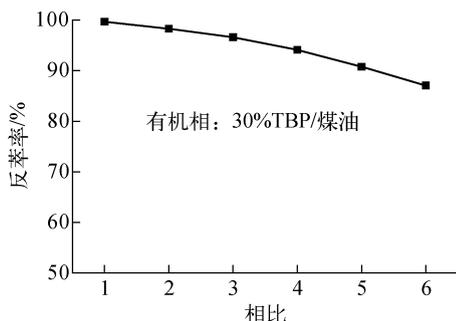


图 3 相比对 Pu 反萃率的影响

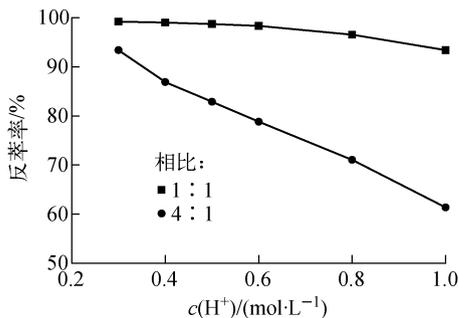
Fig. 3 Effect of phase ratio on stripping of Pu

由图 3 可知,随着相比增大,Pu(IV) 的反萃率降低。该过程中水相和有机相进行接触后,有机相中的 Pu(IV) 先被反萃进入水相,然后水相中 Pu(IV) 再与氨基羟基脒进行还原反应,使水相中的 Pu(IV) 转化为 Pu(III),然后再重复该过程,直至最终整个体系平衡。由于相比增大,使有机相中总 Pu(IV) 量和水相中总 Pu(IV) 量的比例增加,因此需更多的时间才能达到平衡。

#### 3) H<sup>+</sup> 浓度对 Pu(IV) 反萃率的影响

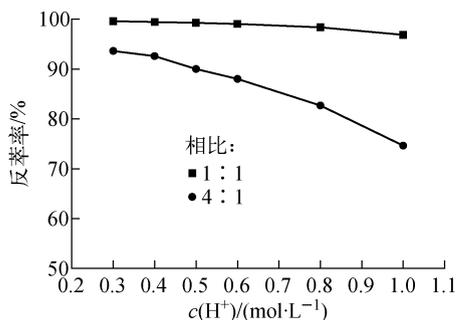
在室温为 21 °C,相接触时间为 30 s,相比为 1 : 1 和 4 : 1, $c(\text{H}^+)$  分别为 0.30、0.40、0.50、0.60、0.80、1.00 mol/L 时,用  $c(\text{HSC})=0.050 \text{ mol/L}$ 、 $c(\text{NO}_3^-)=0.40 \text{ mol/L}$  的水相还原反萃取  $\rho_0(\text{Pu(IV)})=0.80 \text{ g/L}$  的有机相,Pu(IV) 的反萃率与 H<sup>+</sup> 浓度的关系示于图 4。

由图 4 可知,随着 H<sup>+</sup> 浓度的增大,Pu(IV) 的反萃率降低。这是由于 HSC 与 Pu(IV) 的反应速率与 H<sup>+</sup> 浓度的 0.43 次方成反比<sup>[11]</sup>,增加反萃液中 H<sup>+</sup> 浓度,使得 Pu(IV) 在相同时间内还原为 Pu(VI) 的量减少,由于水相和有机相(30% TBP/煤油)中 Pu(IV) 存在快速的萃取/反萃平衡,而 Pu(VI) 几乎不被 30% TBP/煤油萃取,使得相应的反萃入水相中的 Pu(IV) 减少,从而使 Pu 还原反萃率降低。由图 4 表明:H<sup>+</sup> 浓度的增加对 Pu(IV) 的反萃率有一定的影响,当 H<sup>+</sup> 浓度增加到 1.00 mol/L

图4 两相接触 30 s 时  $\text{H}^+$  浓度对 Pu 反萃率的影响Fig. 4 Effect of  $\text{H}^+$  on stripping of Pu in contacting-time of 30 s

时(相比为 4 : 1),  $\text{Pu}(\text{IV})$  的反萃率降低到 70.7%。因此, 较低的  $\text{H}^+$  浓度有利于 HSC 对  $\text{Pu}(\text{IV})$  的反萃。

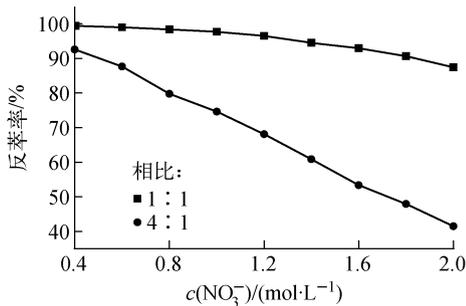
当其余反萃条件不变、反萃时间延长到 90 s 时, 结果示于图 5。由图 5 可知, 当工艺要求反萃酸度较高时, 可通过适当的延长还原反萃时间以提高  $\text{Pu}(\text{IV})$  的反萃率。

图5 两相接触 90 s 后  $\text{H}^+$  浓度对 Pu 反萃率的影响Fig. 5 Effect of  $\text{H}^+$  on stripping of Pu in contacting-time of 90 s

#### 4) $\text{NO}_3^-$ 浓度对 $\text{Pu}(\text{IV})$ 反萃率的影响

在室温为  $21\text{ }^\circ\text{C}$ , 相接触时间为 90 s, 相比为 1 : 1 和 4 : 1,  $c(\text{NO}_3^-)$  分别为 0.40、0.60、0.80、1.00、1.20、1.40、1.60、1.80 mol/L 时, 用  $c(\text{HSC})=0.050\text{ mol/L}$ 、 $c(\text{H}^+)=0.40\text{ mol/L}$  的水相还原反萃取  $\rho_0(\text{Pu}(\text{IV}))=0.80\text{ g/L}$  的有机相,  $\text{Pu}(\text{IV})$  的反萃率与  $\text{NO}_3^-$  浓度的关系示于图 6。

由图 6 可知, 随着  $\text{NO}_3^-$  浓度的增大,  $\text{Pu}(\text{IV})$  的反萃率降低。该现象有两方面原因: 1) 是由于 HSC 与  $\text{Pu}(\text{IV})$  的反应速率与  $\text{NO}_3^-$  浓度的

图6  $\text{NO}_3^-$  浓度对 Pu 反萃率的影响Fig. 6 Effect of  $\text{NO}_3^-$  on stripping of Pu

0.58 次方成反比<sup>[11]</sup>, 增加反萃液中  $\text{NO}_3^-$  浓度, 使得  $\text{Pu}(\text{IV})$  在相同时间内被还原到  $\text{Pu}(\text{III})$  的量减少, 从而使得相应的反萃入水相中的  $\text{Pu}(\text{IV})$  减少; 2) 是由于  $\text{NO}_3^-$  对  $\text{Pu}(\text{IV})$  的萃取有盐析效应和协萃效应, 当  $\text{NO}_3^-$  浓度增加,  $\text{Pu}(\text{IV})$  在 30% TBP/煤油和硝酸水溶液中的分配比增大, 也使得相应的反萃入水相中的  $\text{Pu}(\text{IV})$  减少, 从而使 Pu 还原反萃率降低。由图 6 表明:  $\text{NO}_3^-$  浓度的增加对  $\text{Pu}(\text{IV})$  的反萃率有一定的影响, 当  $\text{NO}_3^-$  浓度增加到 1.00 mol/L 时(相比为 4 : 1),  $\text{Pu}(\text{IV})$  的反萃率降低到 74.6%。因此, 较低的  $\text{NO}_3^-$  浓度有利于 HSC 对  $\text{Pu}(\text{IV})$  的反萃。

#### 5) HSC 浓度对 $\text{Pu}(\text{IV})$ 反萃率的影响

在室温为  $21\text{ }^\circ\text{C}$ , 相接触时间为 90 s, 相比为 1 : 1 和 4 : 1,  $c(\text{NO}_3^-)=0.40\text{ mol/L}$  时, 分别用  $c(\text{HSC})$  为 0.016 8、0.033 5、0.050、0.10、0.15、0.20 mol/L、 $c(\text{H}^+)=0.40\text{ mol/L}$  的水相还原反萃取  $\rho_0(\text{Pu}(\text{IV}))=0.80\text{ g/L}$  的有机相,  $\text{Pu}(\text{IV})$  的反萃率与 HSC 浓度的关系示于图 7。

由图 7 可知, 随着 HSC 浓度的增大,  $\text{Pu}(\text{IV})$

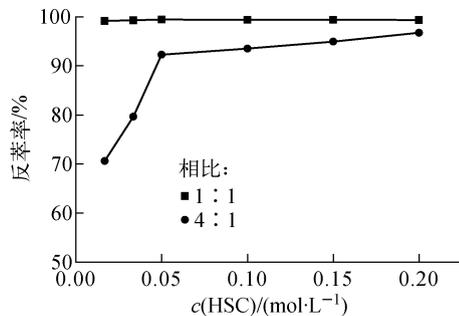


图7 HSC 浓度对 Pu 反萃率的影响

Fig. 7 Effect of HSC on stripping of Pu

的反萃率提高。在相比为 1:1 时,由于各条件下 Pu(IV)反萃率均大于 99%,因此其反萃率基本无变化;在相比为 4:1 时,在 HSC 浓度小于 0.05 mol/L 时,随着 HSC 浓度的增大, Pu(IV)的反萃率显著增加;当 HSC 浓度大于 0.05 mol/L 后, Pu(IV)的反萃率受 HSC 浓度影响较小。图 7 表明:以 HSC 作铀钚分离(1B)中 Pu(IV)的还原剂时,其浓度为 0.10 mol/L 为佳。

#### 6) 铀浓度对 Pu(IV)反萃率的影响

在室温为 21 °C,相接触时间为 30 s,相比为 1:1 和 4:1,  $c(\text{NO}_3^-) = 0.40 \text{ mol/L}$  时,用  $c(\text{HSC}) = 0.050 \text{ mol/L}$ ,  $c(\text{H}^+) = 0.40 \text{ mol/L}$  的水相分别还原反萃取  $\rho(\text{U(VI)}) = 5.0, 10.0, 20.0, 30.0, 50.0, 90.0 \text{ g/L}$ ,  $\rho_0(\text{Pu(IV)}) = 0.80 \text{ g/L}$  的有机相, Pu(IV)的反萃率与有机相中铀浓度的关系示于图 8。

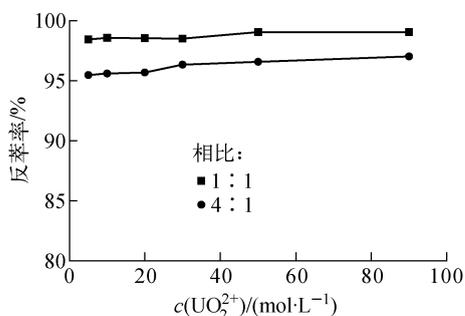


图 8 U(VI)浓度对 Pu 反萃率的影响

Fig. 8 Effect of U(VI) on stripping of Pu

由图 8 可知,随着有机相 U(VI)浓度的增大, Pu(IV)的反萃率提高。在相比为 1:1 时,由于各条件的 Pu(IV)反萃率均大于 99%,因此其反萃率基本无变化;在相比为 4:1 条件下,当有机相中只含有 U(VI) 5.0 g/L 时, Pu(IV)的反萃率提高 2%。由此可见,有机相中是否含铀对 Pu(IV)的反萃率有明显影响,有机相中含有 U(VI),有利于 Pu(IV)的反萃。原因是有机相中含有 U(VI)后,使 TBP/煤油中 U 饱和度增加,通过排挤效应使反萃到水相中的 Pu(IV)增加,最终导致 Pu(IV)的反萃率提高。

#### 7) 温度对 Pu(IV)反萃率的影响

在温度为 26.0、30.5、35.0、40.0、50.0 °C,相接触时间 90 s,相比 1:1 和 4:1,  $c(\text{NO}_3^-) = 0.40 \text{ mol/L}$  时,用  $c(\text{HSC}) = 0.050 \text{ mol/L}$ ,

$c(\text{H}^+) = 0.40 \text{ mol/L}$  的水相还原反萃取  $\rho_0(\text{Pu(IV)}) = 0.80 \text{ g/L}$  的有机相, Pu(IV)的反萃率与温度的关系示于图 9。

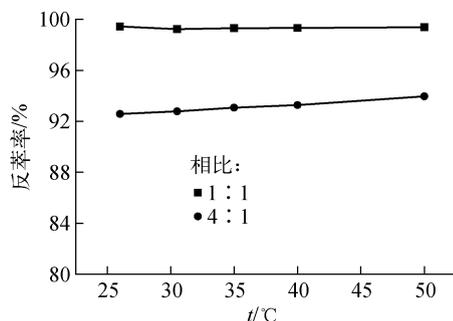


图 9 温度对 Pu 反萃率的影响

Fig. 9 Effect of temperature on stripping of Pu

由图 9 可知,随着温度升高, Pu(IV)的反萃率增加。产生该现象有两方面原因:1) 随着温度的升高, Pu(IV)的分配系数降低,导致水相中 Pu 浓度升高;2) 随着温度的升高, HSC 还原 Pu(IV)的速度明显加快,温度每升高 10 °C,氨基羧基脒还原 Pu(IV)的反应速率增加约 10 倍<sup>[11]</sup>。由图 9 表明,在进行 U/Pu 分离时,适当升高还原反萃的温度,可提高 Pu(IV)的反萃率。

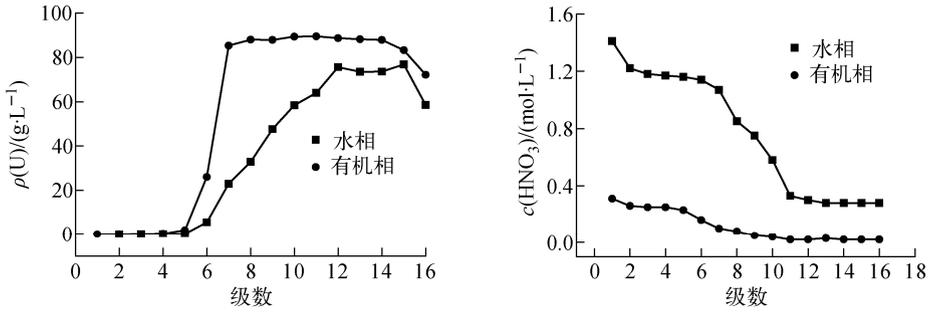
## 2.2 多级逆流反萃取实验

### 1) 多级逆流冷铀反萃实验

为了解所设定实验条件下铀和酸的各级分布情况,进行了不含 Pu(IV)料液的冷铀多级逆流反萃实验,流程示意图及工艺参数示于图 1。实验设备采用混合澄清槽,混合室体积为 3 mL,澄清室体积为 5 mL,混合澄清槽内有机相与水相比约为 1.5:1,料液流比为 1BF:1BS:1BX=4:1:1,混合室停留时间为 60 s。实验时,先以不含铀料液进行充槽 2 h,然后加入含铀料液,运行 2 h 后,每隔 0.5 h 取一瞬时样,运行 6 h 后,停槽,采用负压设备抽取各级样进行分析( $t = 28 \text{ } ^\circ\text{C}$ )。

1BU 和 1BP 瞬时样品中铀和酸的浓度分析表明,运行 2.0 后,铀酸分布已达平衡。平衡后铀酸浓度的各级分布示于图 10。

在反萃段,铀在两相中的浓度均较高;硝酸在有机相中的浓度较低,约为 0.02 mol/L。在补萃段,由于补萃剂 1BS 中硝酸浓度为

图 10 铀浓度和 HNO<sub>3</sub> 浓度的各级分布Fig. 10 Concentration profiles of U and HNO<sub>3</sub> in stages experiments

0.50 mol/L, 提高了两相的酸度, 有利于铀的萃取, 在混合澄清槽第 16 级 1BP 的出口处, 铀浓度为 6.11 mg/L, 取得了满意的结果。在冷铀实验中铀的收率大于 99.998%, 对铀的物料衡算为 99.92%, 对酸的物料衡算为 97.5%。

## 2) 多级逆流铀钚分离反萃实验

通过氨基羟基脲与含 Pu 有机相单级反萃实验表明, 氨基羟基脲可快速反萃有机相中的 Pu。铀钚分离反萃实验中, 在含 U 有机相 (1BF) 中加入 Pu, 其他操作条件与多级逆流冷铀反萃实验相同, 运行 1 h 后, 每隔 1 h 取一瞬时样, 运行 4 h 后, 每 0.5 h 取 1 个瞬时样, 运行 6 h 后, 实验结束。实验结果表明, 混合澄清槽运行 2 h 后达平衡。1BU 中的 Pu 浓度为 20 μg/L, Pu 收率大于 99.996%, 物料衡算为 98.5%。平衡后钚浓度的各级分布示于图 11。

从图 10、11 各级铀、钚、酸浓度的分布可看出: 在补萃段, 4 级补萃时水相中铀的浓度已下降到 30 mg/L, 收率已大于 99.99%, 随着补萃级数的增加, 水相中铀浓度已下降不大; 钚在

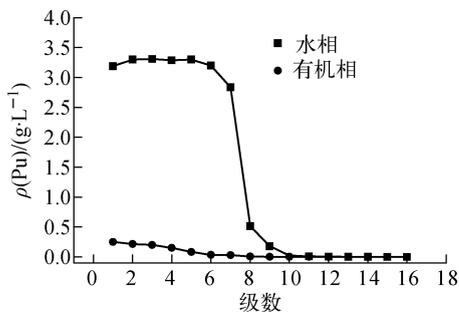


图 11 Pu 浓度的各级分布

Fig. 11 Concentration profiles of Pu in stages experiments

第 1~6 级的分配比均相近, 水相中钚浓度均在 3.2 g/L 左右, 有机相中钚浓度均在 0.2 g/L 左右, 各级间钚浓度差别很小; 硝酸在补萃段分布情况与 Pu 分布情况相似。

在反萃取段, 有机相中的铀浓度无明显变化, 第 16 级有机相出口浓度较低, 水相中的铀浓度第 7~11 级有明显增加, 在第 11~16 级铀浓度相近; 有机相中钚浓度第 7~11 级有明显降低, 在第 12~16 级钚浓度相近, 水相中钚浓度第 7~11 级有数量级梯度的降低, 在第 12~16 级钚浓度相近; 有机相中硝酸浓度第 7~13 级有明显降低, 在第 14~16 级浓度相近, 水相中硝酸浓度第 7~12 级有明显降低, 在第 13~16 级浓度相近。

根据 U/Pu 分离实验数据可计算出: 铀中除钚的分离系数  $SF_{Pu/U} = 2.8 \times 10^4$ , 钚中除铀的分离系数  $SF_{U/Pu} = 5.9 \times 10^4$ 。

## 3 结论

1) HSC 能快速将有机相中的 Pu(IV) 反萃到水相, Pu(IV) 的反萃率随相接触时间的增加而提高。

2) 延长两相接触时间、增加氨基羟基脲的浓度、降低反萃液酸度、降低 NO<sub>3</sub><sup>-</sup> 浓度、增加有机相铀浓度、升高温度和降低相比可使 Pu(IV) 的反萃率提高。

3) 采用 10 级反萃、6 级补萃的混合澄清槽进行 1B 工艺的 U/Pu 分离验证, 在 1BF : 1BS : 1BX = 4 : 1 : 1 时, 取得了良好的 U/Pu 分离效果, 铀中除钚的分离系数  $SF_{Pu/U} = 2.8 \times 10^4$ , 钚中除铀的分离系数  $SF_{U/Pu} = 5.9 \times 10^4$ 。

因此, HSC 能够实现 U、Pu 分离, 其在

Purex 流程中具有良好的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 姜圣阶,任凤仪,马瑞华,等. 核燃料后处理工学[M]. 北京:原子能出版社,1991:99-104.
- [2] 任凤仪,周振兴,袁良本. 国外核燃料后处理[M]. 北京:原子能出版社,2006:167-172.
- [3] 郑卫芳,刘黎明,常志远. 乙异羟肟酸改善 Purex 流程铀产品中 U-Pu 的分离[J]. 原子能科学技术,2000,34(2):110-115.  
ZHENG Weifang, LIU Liming, CHANG Zhiyuan. Improvement of separation of Pu from U of U-cycle in Purex process by acetohydroxamic acid[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2000, 34(2): 110-115(in Chinese).
- [4] 张先业,叶国安,肖松涛,等. 单甲基胍还原 Np(V)Purex 流程中 U-Np 分离的研究[J]. 原子能科学技术,1997,31(4):315-319.  
ZHANG Xianye, YE Guoan, XIAO Songtao, et al. Reduction of Np(V) with monomethylhydrazine: II. Studies on partition of U-Np in Purex process[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1997, 31(4): 315-319(in Chinese).
- [5] 韩清珍,张虎,叶国安,等. 乙醛肟还原钚的动力学及其在 Purex 流程铀钚分离中的应用[J]. 原子能科学技术,2007,41(1):52-55.  
HAN Qingzhen, ZHANG Hu, YE Guoan, et al. Kinetics of Pu reduction by acetaldoxime and application of acetaldoxime to separation of Pu from U in Purex process[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2007, 41(1): 52-55(in Chinese).
- [6] 何建玉,章泽甫. 普雷克斯(Purex)水法后处理中几种重要元素行为的理论探讨[J]. 核科学与工程,1999,19(2):164-173.  
HE Jianyu, ZHANG Zefu. The discussion of behavior of some important elements in Purex process[J]. Chin J Nucl Sci Eng, 1999, 19(2): 164-173(in Chinese).
- [7] 叶国安. Purex 流程中有机无盐试剂的应用分析[J]. 原子能科学技术,2004,38(2):152-158.  
YE Guoan. Review on the study and application of organic salt-free reagent in Purex process[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2004, 38(2): 152-158(in Chinese).
- [8] 周大凡,鲍崇林,姚国生,等. 在硝酸铀(IV)还原反萃钚(IV)的混合澄清槽实验中铀(IV)的稳定性研究[J]. 原子能科学技术,1980(1):82-88.
- [9] 于恩江,刘黎明,费洪澄,等. U(IV)用作 Purex 过程中 Pu(IV)还原剂的研究[J]. 核化学与放射化学,1992,14(4):209-214.  
YU Enjiang, LIU Liming, FEI Hongcheng, et al. Studies on U(IV) nitrate as reductant in U/Pu separation of Purex process[J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 1992, 14(4): 209-214(in Chinese).
- [10] 肖松涛,叶国安,刘协春,等. 氨基羟基胍与Pu(IV)的还原动力学研究[J]. 原子能科学技术,2011,45(3):286-290.  
XIAO Songtao, YE Guoan, LIU Xiechun, et al. Study on the kinetics of reaction between Pu(IV) and hydroxysemicarbazide in nitric acid solution[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(3): 286-290(in Chinese).
- [11] 肖松涛,叶国安,刘协春,等. 氨基羟基胍与 HNO<sub>2</sub> 氧化还原反应研究[J]. 原子能科学技术,2011,45(4):403-407.  
XIAO Songtao, YE Guoan, LIU Xiechun, et al. Study on kinetics of reaction between hydroxysemicarbazide and HNO<sub>2</sub> in perchloric acid solution[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2011, 45(4): 403-407(in Chinese).
- [12] 于恩江,黄怀安,周兴权,等. 硝酸羟胺在动力堆乏燃料后处理流程中钚线第三循环中的应用[J]. 原子能科学技术,1993,27(5):451-457.  
YU Enjiang, HUANG Huaian, ZHOU Xingquan, et al. Plutonium portioning in the third plutonium cycle of the Purex process with hydrazine-stabilized hydroxylamine nitrate[J]. Atomic Energy Science and Technology, 1993, 27(5): 451-457(in Chinese).