

N,N' -二甲基- N,N' -二辛基-3-氧杂-戊二酰胺 对 Np(IV, V, VI) 的萃取行为

周 今, 毛国淑*, 杨素亮, 马 鹏, 王秀凤, 杨志红, 岳远振

中国原子能科学研究院 放射化学研究所, 北京 102413

摘要: ^{237}Np 半衰期较长, 具有较高的生物毒性, 使其成为高放废液非 α 化过程中重点关注的核素之一。本工作采用新型的 N,N' -二甲基- N,N' -二辛基-3-氧杂-戊二酰胺 (DMDODGA) 为萃取剂, 研究了萃取剂浓度、水相初始硝酸浓度和温度等因素对 DMDODGA 萃取 Np(IV) 、 Np(V) 、 Np(VI) 的影响。结果表明: 随着 DMDODGA 浓度和水相初始硝酸浓度的增加, Np(IV) 、 Np(V) 、 Np(VI) 的分配比均增大。萃取剂浓度小于 0.005 mol/L 时, DMDODGA 与 Np(IV) 生成 1:2 型萃合物; 萃取剂浓度大于 0.005 mol/L 时, DMDODGA 与 Np(IV) 生成 1:3 型萃合物。萃取剂浓度在 0.1~1.0 mol/L 范围内, DMDODGA 与 Np(V) 、 Np(VI) 均生成 1:2 型萃合物。DMDODGA 萃取 Np(IV) 、 Np(V) 、 Np(VI) 的 ΔH 分别为 -59.55、-22.02、-31.40 kJ/mol, 3 个反应均为放热反应, 降低温度有利于反应的正向进行。

关键词: N,N' -二甲基- N,N' -二辛基-3-氧杂-戊二酰胺 (DMDODGA); Np(IV, V, VI) ; 萃取

中图分类号: O615.11 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9950(2020)05-0319-06

doi: 10.7538/hhx.2020.YX.2020056

Extraction of Np(IV, V, VI) With N,N' -Dimethyl- N,N' -Dioctyl-3-Oxa-Glutaramide

ZHOU Jin, MAO Guo-shu*, YANG Su-liang, MA Peng, WANG Xiu-feng,
YANG Zhi-hong, YUE Yuan-zhen

Chinese Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275(126), Beijing 102413, China

Abstract: ^{237}Np is one of the key nuclides in non- α process of high level liquid waste because of long half-life and high biotoxicity. In this work, the effects of extractant concentration, initial nitric acid concentration and temperature were studied for Np(IV) , Np(V) , Np(VI) extraction process. The result shows that the increasement of concentration of N,N' -dimethyl- N,N' -dioctyl-3-oxa-glutaramide (DMDODGA) and initial nitric acid can enhance the distribution ratios of Np(IV) , Np(V) , Np(VI) . When the concentration of DMDODGA is lower than 0.005 mol/L, 1:2-type complexe is found for Np(IV) . When the concentration of DMDODGA is higher than 0.005 mol/L, 1:3-type complexe is found for Np(IV) . 1:2-type complexe is found for Np(V) and Np(VI) , when the concentration of DMDODGA

收稿日期: 2020-06-18; 修订日期: 2020-07-21

作者简介: 周 今 (1993—), 女, 山西太原人, 硕士, 研究实习员, 主要从事锕系元素化学研究, E-mail: zhoujin2894@sina.cn

* 通信联系人: 毛国淑 (1972—), 女, 重庆璧山人, 博士, 研究员, 主要从事核化学与放射化学研究, E-mail: maoguoshu@sina.cn

is in the range of 0.1-1.0 mol/L. The extractions between DMDODGA and Np(IV) , Np(V) , Np(VI) are exothermic reactions. The enthalpy changes are -59.55 kJ/mol , -22.02 kJ/mol and -31.40 kJ/mol , respectively. The decrease of temperature is benefit for the reaction.

Key words: N,N' -dimethyl- N,N' -dioctyl-3-oxa-glutaramide(DMDODGA); Np(IV, V, VI) ; extraction

乏燃料后处理是实现核燃料闭式循环的关键环节。目前比较成熟的 PUREX 后处理流程产生的高放废液(HLLW)中,除了含有 99% 以上的裂变产物等非 α 核素外,还含有未被回收的少量钚(Pu)和铀(U)以及绝大部分次锕系元素镎(Np)、镅(Am)、锔(Cm)等,这些次锕系元素是高放废液中 α 放射性的主要来源^[1-3]。 ^{237}Np 是其中半衰期较长的放射性核素之一($T_{1/2} = 2.14 \times 10^6 \text{ a}$),具有较强的生物毒性,并且在环境中易迁移,因此,在高放废液非 α 化过程中倍受关注。

从 20 世纪 50 年代至今,国内外对次锕系元素的分离开展了广泛的研究,合成了许多种萃取剂,比如辛基(苯基)- N,N' -二异丁基胺甲基氧化膦(CMPO)、丙二酰胺类化合物、三烷基氧膦类化合物、2,4,6-三(2-吡啶)-1,3,5-三嗪(TPTZ)、1,2,4-三嗪-吡啶(BTBP)及其衍生物等。其中,三辛基氧膦(TOPO)在 1.0 mol/L HNO_3 溶液中对 Np(IV) 、 Np(VI) 的萃取率大于 99%^[4]。然而,在酸性溶液中,Np 主要以 NpO_2^+ 形式存在,有效电荷数较低,使得以前研发的一些萃取剂对 Np(V) 的萃取能力较差,因此 Np 的分离提取均涉及到比较难操控的价态调节,其有效分离难度较大。Np 的各个价态间易于相互转化,可同时进行歧化、氧化和还原,并且 Np(IV) 、 Np(V) 和 Np(VI) 三种价态可以共存,不同价态 Np 的萃取行为不同,因此 Np 的完全分离回收仍然是一个难题^[5]。

N,N,N',N' -四烷基-3-氧杂-戊二酰胺(即双酰胺茱萸醚)类萃取剂,对 An(III, IV, VI) 均具有良好的萃取性能,并且分子中仅含 C、H、O、N 四种原子,使用后可完全焚烧,不产生二次放射性废物,其辐解和水解产物简单,不影响萃取过程,是一种绿色环保的萃取剂^[6-8]。在 Np 的萃取上,前期研究^[9]表明, N,N,N',N' -四辛基-3-氧杂-戊二酰胺(TODGA,结构式如图 1(a)所示)对 Np(IV) 和 Np(VI) 萃取分配比较高,可以从较高酸度的 HNO_3 介质中定量回收 Np(IV) 和 Np(VI) ,而对 Np(V) 的分配比则较低,如体系中存在 Np(V)

时,必须对 Np 的价态进行调节。

在 TODGA 等对称型双酰胺茱萸醚的基础上,文献^[10-14]合成了多种具有不对称结构的双酰胺茱萸醚,如 N,N' -二辛基- N,N' -二(2-乙基己基)-3-氧杂-戊二酰胺(DOEHDGA)、 N,N' -二甲基-二己基-3-氧杂-戊二酰胺(DMDHDGA)、 N,N' -二甲基- N,N' -二辛基-3-氧杂-戊二酰胺(DMDODGA)、 N,N' -二甲基-二月桂基-3-氧杂-戊二酰胺(DMDLOGA)等,并研究了该类萃取剂从硝酸体系中萃取 An(III) 、 An(VI) 性能。结果表明,不对称型双酰胺茱萸醚萃取 U(VI) 等锕系元素的性能优于对称型双酰胺茱萸醚^[15]。目前为止,国内外对于不对称型双酰胺茱萸醚萃取不同价态 Np 的研究未见报道,因此,本工作选取不对称型双酰胺茱萸醚 DMDODGA(结构式如图 1(b)所示)为萃取剂,40% (体积分数,下同)辛醇-60% 煤油为稀释剂,研究其对 Np(IV) 、 Np(V) 、 Np(VI) 的萃取行为,以考察萃取剂浓度、水相硝酸浓度和温度等因素对萃取分配比、萃合物组成和萃取反应焓变的影响。

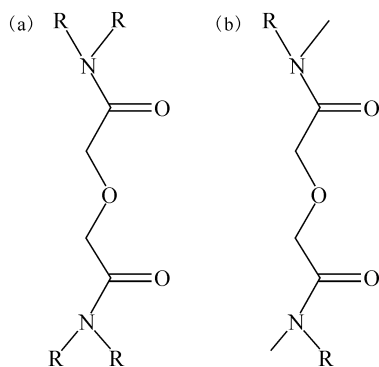


图 1 TODGA(a)和 DMDODGA(b)结构式

Fig. 1 Structure of TODGA(a) and DMDODGA(b)

1 实验部分

1.1 主要试剂与仪器

DMDODGA 由本实验室合成,经 ^1H NMR 分析,纯度均大于 98%;六水合硝酸铀酰($\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$),分析纯,西安鼎天化工有限公司;氨基磺

酸、辛醇,分析纯,国药集团化学试剂有限公司;还原铁粉,分析纯,广东汕头市西陇化工厂;二甲苯,分析纯,北京化工厂;2-噻吩甲酰基三氟丙酮(TTA),纯度 99%,北京百灵威科技有限公司;三正辛基氧膦(TOPO),纯度 98%,麦克林试剂。

Dsp-Scint 阱型 NaI 多道 γ 能谱仪,美国阿美特克奥泰克事业部;AR153CN 型分析天平,精度 0.000 1 g,奥豪斯仪器(上海)有限公司;TGL-10C 型高速台式离心机,上海安亭科学仪器厂;ZD-85 型气浴恒温振荡器,江苏金坛市金城国胜实验仪器厂。

1.2 实验方法

1) Np 示踪剂的制备

在进行 Np 的萃取实验时,通常选择的指示剂有 ^{237}Np 和 ^{239}Np 。 ^{237}Np 的子体、 β 衰变的 ^{233}Pa 半衰期仅有 27 d,样品放置半年即达长期平衡。用 ^{237}Np 作指示剂时,如果采用液闪或 NaI γ 谱仪测量,子体 ^{233}Pa 会对其产生干扰,若要研究 Np 的萃取行为,首先需要纯化 ^{237}Np 。如果采用高纯锗 γ 谱仪测量,由于 ^{237}Np 半衰期很长将导致其使用量较大。而 ^{239}Np 的子体对测量的干扰可忽略,并且半衰期为 2.35 d,便于用操作简便的 NaI γ 谱仪进行测量,因此本工作选择 ^{239}Np 作为指示剂。

^{239}Np 储备液的制备:取一定量硝酸铀酰粉末于聚乙烯管,密封后制成靶,于西北核技术研究所的脉冲反应堆中辐照。辐照后的硝酸铀酰粉末于烧杯中溶解,取一定量的溶解液,加入氨基磺酸亚铁溶液,将溶解液中的 Np 调为四价,用等体积 0.5 mol/L TTA/二甲苯溶液进行萃取,取出有机相,再用 8.0 mol/L HNO_3 进行反萃。得到的反萃液用阴离子柱纯化(阴离子树脂柱条件: N256 吡啶型阴离子树脂,粒径 0.074~0.105 mm,柱直径 3 mm,柱高 35 mm,柱体积 0.25 mL,实验前用 8.0 mol/L HNO_3 洗涤 10 个柱体积),上柱液流出后再用 8.0 mol/L HNO_3 洗涤 15 个柱体积,然后用 0.4 mol/L HNO_3 进行解吸,解吸液即为纯化的 ^{239}Np 储备液。

$Np(IV)$ 示踪剂的制备:取一定体积的 ^{239}Np 储备液于离心管中,加入 0.5 mol/L 氨基磺酸亚铁溶液,使溶液介质为 1.0 mol/L HNO_3 -0.1 mol/L 氨基磺酸亚铁,25 $^{\circ}C$ 水浴中放置 30 min 以上。用等体积的 0.5 mol/L TTA/二甲苯萃取该溶液进行检验,萃余水相中 ^{239}Np 的计数率接近 NaI γ 能

谱仪的本底计数,即说明制得了 $Np(IV)$ 溶液。每次实验使用的 $Np(IV)$ 示踪剂溶液均为现制现用。

$Np(V)$ 示踪剂的制备:取一定体积的 ^{239}Np 储备液于烧杯中,在电热板上慢慢蒸至近干,再加入浓硝酸,继续慢慢蒸至近干,如此反复 3 次,冷却后用 1.0 mol/L HNO_3 溶解,加入一定体积的 2.0 mol/L $NaNO_2$,使溶液中 $NaNO_2$ 浓度为 0.2 mol/L,放置 1 h,然后用等体积的 0.5 mol/L TTA/二甲苯萃取 1 次、0.1 mol/L TOPO/二甲苯萃取 2 次,萃余水相即为 $Np(V)$ 溶液。

$Np(VI)$ 示踪剂的制备:取一定体积的 ^{239}Np 储备液于烧杯中,在电热板上慢慢蒸至近干,再加入浓硝酸,继续慢慢蒸至近干,如此反复 3 次,用 1.0 mol/L HNO_3 溶解,再向其中加入 0.5 mol/L $K_2Cr_2O_7$ 溶液,使溶液中 $K_2Cr_2O_7$ 浓度为 0.25 mol/L,沸水浴加热 1 h,得到 $Np(VI)$ 溶液。用等体积的 0.1 mol/L TOPO/二甲苯萃取 2 次,萃余水相即为 $Np(VI)$ 溶液。每次实验使用的 $Np(VI)$ 示踪剂溶液均为现制现用。

2) 萃取实验方法

取一定体积(通常为 2 mL)的水相溶液和 ^{239}Np 示踪剂加入 15 mL 离心管中,然后加入等体积的 DMDODGA/40% 辛醇-60% 煤油溶液(实验前用相应浓度的 HNO_3 溶液进行预平衡),振荡 30 min。离心分相后,分别取 1 mL 有机相和水相用 NaI γ 谱仪测量 ^{239}Np 的计数,根据计数计算 Np 的分配比 D , D 定义为有机相计数与水相计数之比。除温度影响实验外,其余实验均在气浴恒温 25 $^{\circ}C$ 条件下进行。

3) 数据处理方法

(1) 萃取剂分子数的确定

在萃取机理尚不明确时,DMDODGA 萃取 Np 的反应方程式(1)表示为:



式中: M^{n+} 为 Np^{4+} 、 NpO_2^+ 、 NpO_2^{2+} ; L 代表萃取剂 DMDODGA;下标 o 表示有机相。

萃取反应表观平衡常数 K 为:

$$K = \frac{c_o(M(NO_3)_n \cdot mL)}{c(M^{n+})c^n(NO_3^-)c_o^n(L)} \quad (2)$$

分配比 D 为:

$$D = \frac{c_o(M(NO_3)_n \cdot mL)}{c(M^{n+})} \quad (3)$$

由于萃取剂的初始浓度远远大于 Np 的初始浓度,故可用萃取剂初始浓度($c_o(L)$)近似代替平

衡时的浓度,因此可得:

$$D = Kc^n(\text{NO}_3^-)c_0^m(\text{L}) \quad (4)$$

$$\lg D = \lg K + n\lg c(\text{NO}_3^-) + m\lg c_0(\text{L}) \quad (5)$$

在一定离子强度和温度下, K 值恒定,保持其他条件不变,改变萃取剂浓度,可以得到:

$$\lg D = A + m\lg c_0(\text{L}) \quad (6)$$

式中 A 为常数。即萃取剂浓度 $c_0(\text{L})$ 的对数与分配比 D 的对数呈线性关系,直线斜率 m 的值即为萃合物中萃取剂的分子数。

(2) 反应焓变的计算

根据热力学原理:

$$K = e^{\frac{-\Delta G}{RT}} = e^{\frac{-(\Delta H - T\Delta S)}{RT}} \quad (7)$$

萃取剂浓度和水相硝酸浓度不变时, $c_0(\text{L})$ 和 $c(\text{NO}_3^-)$ 恒定,方程(4)可以写为:

$$D = KC = e^{\frac{-(\Delta H - T\Delta S)}{RT}} C \quad (8)$$

式中 $C = c^n(\text{NO}_3^-)c_0^m(\text{L})$ 。

$$\ln D = \ln C - \frac{\Delta H - T\Delta S}{RT} = \ln C + \frac{\Delta S}{R} - \frac{\Delta H}{RT} \quad (9)$$

$$\lg D = \lg C + \frac{\Delta S}{2.303R} - \frac{\Delta H}{2.303RT} \quad (10)$$

式中 R 为摩尔气体常数, $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

以 $\lg D - T^{-1}$ 作图,直线的斜率为 $\frac{-\Delta H}{2.303R}$,可由此求得反应的焓变 ΔH 。

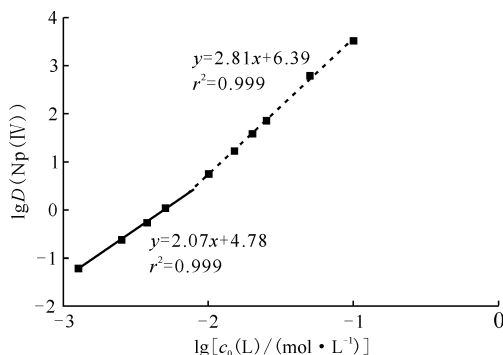
2 结果与讨论

2.1 萃取剂初始浓度对 Np 分配比及萃合物组成的影响

以 40% 辛醇-60% 煤油为稀释剂,研究了 1.0 mol/L HNO_3 溶液中 DMDODGA 初始浓度对 Np(IV)、Np(V) 和 Np(VI) 分配比的影响,结果示于图 2、图 3。

由图 2 可见,随着萃取剂初始浓度的增加,Np(IV)的分配比增加, $D(\text{Np(IV)})$ 最大可达 10^4 。在萃取剂初始浓度 $c_0(\text{L}) < 0.005 \text{ mol/L}$ 时, $\lg D(\text{Np(IV)})$ 与 $\lg c_0(\text{L})$ 呈线性关系,直线斜率为 2.07,在误差范围内可认为约等于 2,说明有 2 个 DMDODGA 分子与 Np(IV)配位,形成萃合物。当 $c_0(\text{L}) = 0.005 \sim 0.1 \text{ mol/L}$ 时, $\lg D(\text{Np(IV)})$ 与 $\lg c_0(\text{L})$ 也呈线性关系,直线斜率为 2.81,在误差范围内可认为约等于 3,即有 3 个 DMDODGA 分子与 Np(IV)配位。当 $c_0(\text{L}) = 0.2 \text{ mol/L}$ 时,Np(IV)的分配比达到 8×10^4 ,随着 DMDODGA

初始浓度继续增大,由于分配比数值过大,水相 ^{239}Np 计数与 NaI γ 能谱仪的本底计数接近,此时无法再给出分配比的具体数值。

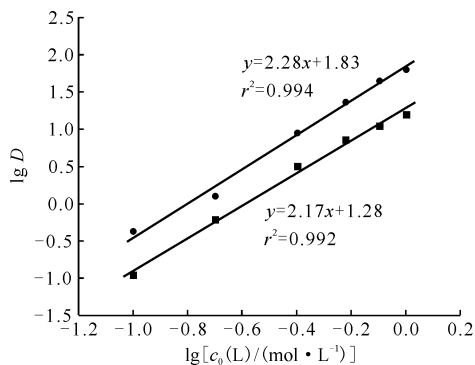


有机相:不同浓度的 DMDODGA/40% 辛醇-60% 煤油溶液;

水相:1.0 mol/L HNO_3 溶液,示踪量的 $^{239}\text{Np(IV)}$

图 2 萃取剂初始浓度对 Np(IV) 萃取分配比的影响

Fig. 2 Effect of initial extractant concentration on extraction distribution ratio of Np(IV)



有机相:不同浓度的 DMDODGA/40% 辛醇-60% 煤油溶液;

水相:1.0 mol/L HNO_3 溶液,示踪量的 $^{239}\text{Np(V)}$ 或 $^{239}\text{Np(VI)}$

■ — Np(V), ● — Np(VI)

图 3 萃取剂初始浓度对 Np(V)、

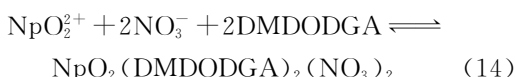
Np(VI) 萃取分配比的影响

Fig. 3 Effect of initial extractant concentration on extraction distribution ratio of Np(V), Np(VI)

由图 3 可见,在萃取剂初始浓度为 0.1 ~ 1.0 mol/L 时,Np(V)和 Np(VI)的分配比均随着 DMDODGA 初始浓度的增加而增加, $D(\text{Np(V)})$ 最大可达 15, $D(\text{Np(VI)})$ 最大可达 60,并且 $\lg D(\text{Np(V)})$ 、 $\lg D(\text{Np(VI)})$ 与 $\lg c_0(\text{L})$ 均呈线性关系,直线斜率分别为 2.17 和 2.28,在误差范围内均可认为约等于 2,即有 2 个 DMDODGA 分子与 Np(V)、Np(VI)配位,形成萃合物。由于 Np(V)和 Np(VI)均为镧酰离子,因此与萃取剂分子配位的模式是

相同的。

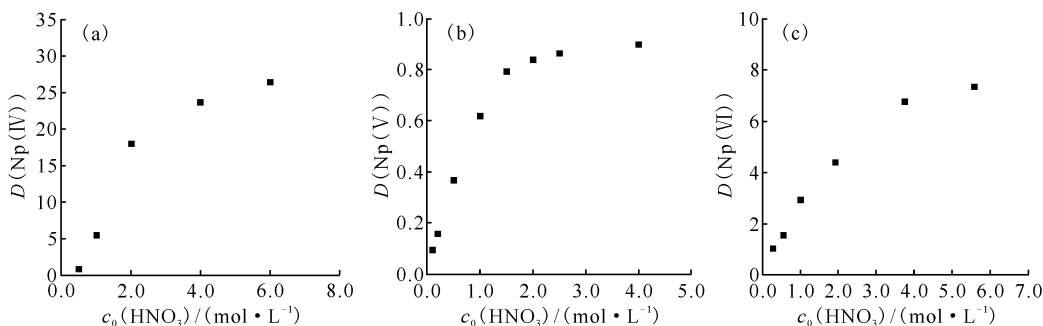
由此,可以推测 DMDODGA 萃取 Np(IV)、Np(V)、Np(VI)反应方程式分别如下:



在相同条件下,DMDODGA 萃取 Np(IV)、Np(V)、Np(VI)的分配比大小为: $D(\text{Np(IV)}) > D(\text{Np(VI)}) > D(\text{Np(V)})$ 。较 TODGA 而言,DMDODGA 萃取 Np(IV)、Np(V)、Np(VI)的分配比均大一个数量级以上,萃取效果显著提升,尤其是萃取 Np(V)分配比可达到 15,该萃取剂有望实现不调节价态而直接从 HNO_3 介质中萃取全部价态的 Np。

2.2 水相初始 HNO_3 浓度对 Np 分配比的影响

研究了水相初始 HNO_3 浓度对 DMDODGA/40% 辛醇-60% 煤油体系萃取 Np(IV)、Np(V)、Np(VI)分配比的影响,结果示于图 4。由图 4 可见,随着水相初始 HNO_3 浓度的增加,Np(IV)、Np(V)、Np(VI)的分配比均迅速增加,而随着水相初始 HNO_3 浓度继续增加,分配比增加趋势减缓,在实验初始 HNO_3 浓度范围内分配比未见下降,并且将 $c_0(\text{HNO}_3)$ 和 D 分别取对数后作图,发现 $\lg c_0(\text{HNO}_3)$ 与 $\lg D$ 不呈线性,分析原因是,初始 HNO_3 浓度较低时, NO_3^- 作为伴阴离子对萃取反应起一定促进作用,而随着水相初始 HNO_3 浓度继续增加,存在萃取剂萃取 HNO_3 的反应, HNO_3 分子参与竞争,导致 Np 分配比增加的趋势减缓。除了有 DMDODGA 与镎离子、硝酸分子的配位外,在萃取过程中还存在其他的副反应,多种反应相互竞争共同导致了分配比的这一变化趋势,但本工作暂不能阐明这一机理,该部分实验有待进一步完善。



(a)——有机相为 0.01 mol/L DMDODGA,水相为示踪量的 $^{239}\text{Np(IV)}$;
 (b)——有机相为 0.2 mol/L DMDODGA,水相为示踪量的 $^{239}\text{Np(V)}$;
 (c)——有机相为 0.2 mol/L DMDODGA,水相为示踪量的 $^{239}\text{Np(VI)}$

图 4 水相初始 HNO_3 浓度对 Np(IV, V, VI)萃取分配比的影响

Fig. 4 Effect of initial nitric acid concentration in aqueous phase on distribution ratios of Np(IV, V, VI)

2.3 温度对 Np 分配比的影响

本工作还研究了在水相 HNO_3 初始浓度为 1.0 mol/L 条件下,温度对 DMDODGA/40% 辛醇-60% 煤油萃取 Np(IV)、Np(V)、Np(VI)分配比的影响,结果示于图 5。由图 5 可见,随着温度的升高,DMDODGA 萃取 Np(IV)、Np(V)、Np(VI)的分配比均降低,以 $\lg D$ 对 $1/T$ 作图均得到一条直线,直线斜率分别为 3.11、1.15 和 1.64。根据式(10)计算得 DMDODGA 萃取 Np(IV)、Np(V)、Np(VI)的焓变 ΔH 分别为 -59.55、-22.02、

-31.40 kJ/mol,说明 DMDODGA 萃取 Np(IV)、Np(V)、Np(VI)的反应均为放热反应,降低温度有利于反应的正向进行。

3 结 论

(1) 随着萃取剂浓度的增加,DMDODGA 萃取 Np(IV)、Np(V)、Np(VI)的分配比均增大, $D(\text{Np(IV)})$ 最大可达 10^4 , $D(\text{Np(V)})$ 最大可达 15, $D(\text{Np(VI)})$ 最大可达 60。萃取剂初始浓度小于 0.005 mol/L 时,DMDODGA 与 Np(IV)生成 1:2

型萃合物,萃取剂初始浓度为 0.005~0.1 mol/L 时,DMDODGA 与 Np(Ⅳ)生成 1:3 型萃合物。萃取剂浓度为 0.1~1.0 mol/L 时,DMDODGA 与 Np(Ⅴ)、Np(Ⅵ)均生成 1:2 型萃合物。

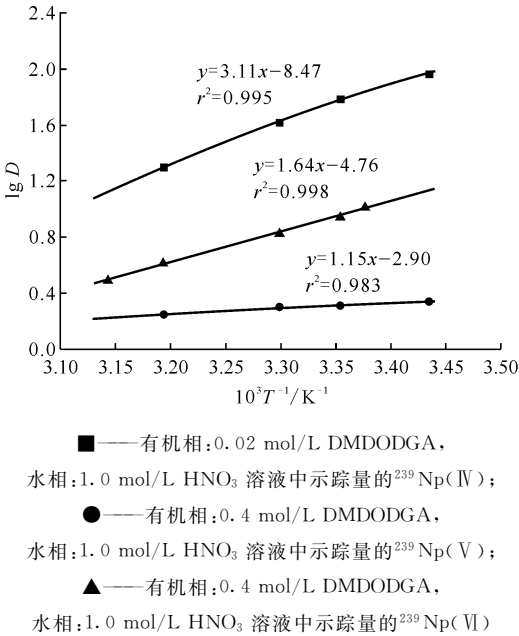


图 5 温度对 Np(Ⅳ,Ⅴ,Ⅵ)萃取分配比的影响
Fig. 5 Effect of temperature on distribution ratios of Np(Ⅳ,Ⅴ,Ⅵ)

(2) 随着水相初始 HNO₃ 浓度的增加,DMDODGA萃取 Np(Ⅳ)、Np(Ⅴ)、Np(Ⅵ)的分配比均增大,在实验研究的范围内无下降趋势。

(3) 随着温度的增加,DMDODGA 萃取 Np(Ⅳ)、Np(Ⅴ)、Np(Ⅵ)的分配比均减小,3 个反应的 ΔH 分别为-59.55、-22.02、-31.40 kJ/mol,均为放热反应,降低温度有利于反应的正向进行。

参考文献:

[1] Paiva A P, Malik P. Recent advances on the chemistry of solvent extraction applied to the reprocessing of spent nuclear fuels and radioactive wastes[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2004, 261: 485-496.
[2] Mathur J N, Murali M S, Nash K L. Actinide partitioning: a review[J]. Solvent Extr Ion Exch, 2001, 19: 357-390.
[3] 薛文静,张安运,柴之芳.用于次锕系元素萃取分离的萃取剂研究进展[J]. 中国科技论文,2012,7(9):

657-665.
[4] Sood D D, Patil S K. Chemistry of nuclear fuel reprocessing: current status[J]. J Radioanal Nucl Chem, 1996, 203(2): 547-573.
[5] 田国新. 高放废液中锕系离子分离研究进展 I: 双酰胺醚与锕系离子的配位化学[J]. 核化学与放射化学, 2015, 37(5): 276-285.
[6] Sasaki Y, Choppin G R. Extraction and mutual separation of actinide(Ⅲ), (Ⅳ), (Ⅴ) and (Ⅵ) ions by N, N'-dimethyl-N, N'-dihexyl-3-oxapentanediamide and thenoyltrifluoroacetone[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2000, 246(2): 267-273.
[7] Sasaki Y, Adachi T, Choppin G R. Solvent extraction study of actinide elements by N, N'-dimethyl-N, N'-dihexyl-3-oxapentanediamide and thenoyltrifluoroacetone[J]. J Alloys Compd, 1998, 271: 799-802.
[8] Sasaki Y, Choppin R. Solvent extraction of Eu, Th, U, Np and Am with N, N'-dimethyl-N, N'-dihexyl-3-oxapentanediamide and its analogous compounds[J]. Anal Sci, 1996, 12(2): 225-230.
[9] 朱文彬,李峰峰,叶国安,等. TODGA-DHOA 体系萃取金属离子 I: 对 Np(Ⅳ,Ⅴ,Ⅵ)的萃取[J]. 核化学与放射化学, 2012, 34(5): 8-14.
[10] Sasaki Y, Choppin R. Extraction of Np(Ⅴ) by N, N'-dimethyl-N, N'-dihexyl-3-oxapentane diamide[J]. Radiochim Acta, 1998, 80: 85-88.
[11] Narita H, Yaita T, Tamura K, et al. Solvent extraction of trivalent lathanoid ions with N, N'-dimethyl-N, N'-diphenyl-3-oxapentanediamide[J]. Radiochim Acta, 1998, 81: 223-226.
[12] Sasaki Y, Choppin R. Extraction and mutual separation of actinide(Ⅲ), (Ⅳ), (Ⅴ) and (Ⅵ) ions by N, N'-dimethyl-N, N'-dihexyl-3-oxapentanediamide and thenoyl-trifluoroacetone[J]. J Radioanal Nucl Chem, 2000, 246(2): 267-273.
[13] Ravi J, Suneesh A S, Prathibha T, et al. Extraction behavior of some actinides and fission products from nitric acid medium by a new unsymmetrical diglycolamide[J]. Solvent Extr Ion Exch, 2011, 29: 86-105.
[14] 金永东,冯立,丁颂东,等. 双酰胺醚对锕系和次锕系元素萃取性能的研究[J]. 化学研究与应用, 2002, 14(2): 174-177.
[15] 丁颂东,陈文浚,肖成建,等. 不对称醚萃取铀(Ⅵ)和稀土(Ⅲ)的研究[J]. 核化学与放射化学, 2003, 25(3): 188-192.