

LiCl-KCl 熔盐体系中 Ce(Ⅲ) 在液态 Ga 电极上的电化学反应行为

林如山¹, 王有群², 何 辉¹, 叶国安^{1,*}

1. 中国原子能科学研究院 放射化学研究所, 北京 102413;

2. 东华理工大学 核科学与工程学院, 江西 南昌 330013

摘要:采用循环伏安法(CV)、方波伏安法(SWV)和计时电位法(CP)等暂态电化学方法研究了 LiCl-KCl 熔盐体系中 Ce(Ⅲ)在液池 Ga 和液膜 Ga 电极上的电化学反应行为。以高纯 Al₂O₃ 包覆的石墨棒作对电极,以 Ag/AgCl(*x*=2%)为参比电极,结果表明,在液池 Ga 电极上,Ce(Ⅲ)可一步还原为 αGa₆Ce; Ce(Ⅲ)+3e+6Ga=αGa₆Ce,该反应为不可逆过程,并受扩散控制;Ce(Ⅲ)的扩散系数与温度的关系式为:ln *D*=2.88-10 118.4/*T*;Ce(Ⅲ)/αGa₆Ce 的半波电位与温度的关系式为:*E*=-1.701+5.472×10⁻⁴*T*。此外,在 Ga 液膜电极上,Ce(Ⅲ)可发生欠电位沉积,形成至少三种金属间化合物。

关键词:Ce(Ⅲ);液态 Ga 电极;电化学反应;LiCl-KCl;干法后处理

中图分类号:TL241.2 **文献标志码:**A **文章编号:**0253-9950(2019)06-0530-07

doi:10.7538/hhx.2019.YX.2018031

Electrochemical Behavior of Ce(Ⅲ) on Liquid Ga Electrode in LiCl-KCl Eutectic

LIN Ru-shan¹, WANG You-qun², HE Hui¹, YE Guo-an^{1,*}

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

2. School of Nuclear Science and Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, China

Abstract: The electrochemical behavior of Ce(Ⅲ) on the both liquid Ga pool and film Ga electrode is investigated by the various transient methods including of cyclic voltammetry (CV), square wave voltammetry(SWV), and chronopotentiometry(CP). The results show that Ce(Ⅲ) is reduced into αGa₆Ce by one step process on liquid Ga pool cathode: Ce(Ⅲ)+3e+6Ga=αGa₆Ce, and the reaction is irreversible and diffusion-controlled. The relationship between the diffusion coefficient of Ce(Ⅲ) and the temperature can be calculated as: ln *D*=2.88-10 118.4/*T*. The temperature dependence of the half-wave potential for Ce(Ⅲ)/αGa₆Ce is determined to be: *E*=-1.701+5.472×10⁻⁴*T*. On the film Ga electrode, at least three kinds of intermetallic compounds are observed.

收稿日期:2018-04-10;修订日期:2018-09-05

作者简介:林如山(1981—),男,福建长汀人,博士,研究员,从事核化工研究,E-mail: lrsh3@163.com

* 通信联系人:叶国安(1964—),男,安徽南陵人,博士,研究员,从事核化工研究,E-mail: yeguano@ciae.ac.cn

网络出版时间:2019-05-31;网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2045.TL.20190531.1338.006.html

Key words: Ce(III); liquid Ga electrode; electrochemical behavior; LiCl-KCl; dry reprocessing

先进快堆核能系统(快堆及其闭式燃料循环)可大幅提高铀资源利用率和减少放射性废物,是核能可持续发展的必由之路,代表了先进核能的发展方向。因此快堆燃料的后处理是先进快堆燃料循环必不可少的环节之一。

快堆乏燃料因燃耗深、Pu 含量高、比活度强,采用传统的 PUREX 流程水法后处理技术时易造成不溶残渣多、溶剂辐解严重、第三相生成等问题,而熔盐电解干法后处理技术采用具有良好辐照稳定性的无机盐作为介质,在处理快堆乏燃料,特别是未来金属型快堆乏燃料方面具有显著的优势,受到美、日、俄等核能大国的高度重视^[1]。在熔盐电解干法后处理过程中,铀钚的回收及其与裂片元素的分离是其中的关键步骤。美国阿贡国家实验室发展了一种熔盐电解精炼流程^[2],分别采用固体阴极和液态 Cd 阴极(LCC)先后回收大部分的铀和剩余的锕系元素。由于镧系元素和锕系元素离子在 Cd 阴极上的还原电位差较小,仅约 85 mV,回收产品中通常含有少量的镧系元素。为了提高镧系与锕系元素的分离效果,有学者开展了 Al^[3-4]、Bi^[5]、Ga^[6]等阴极的应用基础研究,结果表明:镧系元素和锕系元素离子在 Al 阴极上的还原电位差远大于 Cd 阴极,但金属 Al 熔点较高(660 °C),难以实现液态阴极的应用。考虑到 Ga 是一种低温液态金属(熔点 29.8 °C),与 Al 位于同一主族,具有相似的化学特性,有望替代 Cd 作为液态金属阴极。镧系/锕系元素在液态 Ga 阴极上的电化学性质是采用熔盐电化学方法进行分离的基础。目前,关于液态 Ga 阴极上锕系或镧系元素的电化学研究报道较少^[7]。因此,本工作拟采用循环伏安法(CV)、方波伏安法(SWV)和计时电位法(CP)等暂态电化学方法研究 LiCl-KCl 熔盐体系中 Ce(III)在液态 Ga 阴极上的电化学行为,并推导 Ce(III)的扩散系数和还原电位及其随温度的变化关系等相关参数,以期为液态金属 Ga 在熔盐电解干法后处理工艺中的应用提供基础参数。

1 实验部分

1.1 试剂和仪器

盐酸、丙酮、KCl(纯度为 99.5%)、AgCl(纯

度为 99.5%),均为分析纯,国药集团化学试剂有限公司;LiCl,纯度为 99.0%,上海中锂有限公司;无水氯化铈、无水氯化镱、Ag 丝(1 mm,纯度为 99.99%)、W 丝(0.5 mm,纯度为 99.95%),Alfa-aesar(中国)有限公司;高纯度 Al₂O₃ 包覆的石墨棒,直径 3 mm,上海炭素厂;氧化铝坩埚(95 mm×60 mm 和 12 mm×20 mm)分别作为 LiCl-KCl 熔盐和液态 Ga 的容器,唐山市开平盛兴瓷厂。

Reference 3000 电化学工作站,配有 Echem 分析软件,美国 Gamry 公司。

1.2 电化学系统

电化学实验在高纯度氩气手套箱(图 1)中进行,其中 H₂O 和 O₂ 的体积分数均低于 10⁻⁶。手套箱底部安装井式炉以供热,并将氧化铝套管热电偶插入熔盐中以控制温度。使用 LiCl-KCl 混合盐(摩尔比为 59:41)作为电解质,使用前置于 200 °C 烘箱干燥 24 h 以除去 H₂O。

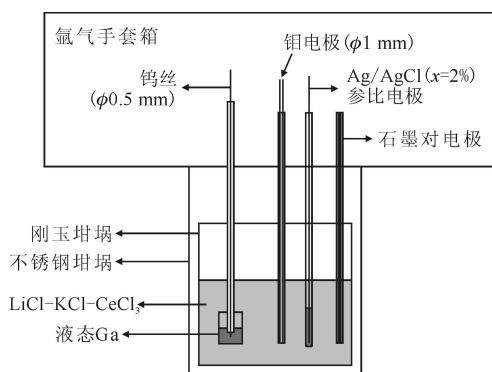


图 1 液态 Ga 电极上 Ce(III)于 LiCl-KCl 熔盐中的电化学实验装置示意图

Fig. 1 Experimental setup for electrochemistry measurement of Ce(III) on liquid Ga electrode

采用三电极系统研究 Ce(III)于 Ga 阴极上的电化学行为。工作电极分别为液池 Ga 电极和液膜 Ga 电极。液池 Ga 电极的制作为将液态 Ga 置于 12 mm×20 mm 的氧化铝坩埚中,使用 Al₂O₃ 保护的 W 线(1 mm)作为导线(液体电极的表面积 S=1.13 cm²)。将 Ga(III)与 Ce(III)同时加入 LiCl-KCl 共晶熔盐中,由于 Ga(III)的还原电位较正,可先于 Mo 电极上沉积,因此可得到表面涂

覆 Ga 膜的电极。参比电极采用 Ag/AgCl 电极,以 Pyrex 玻璃管(内径为 4 mm)作为隔膜,在 AgCl($x=2\%$)熔体中浸入直径为 1 mm Ag 丝,高温陶瓷胶封口后即可得到参比电极。以高纯度 Al_2O_3 包覆的石墨棒作为对电极。

实验过程:将 100 g LiCl-KCl 熔盐混匀后加入氧化铝坩埚(95 mm×60 mm),加热熔融后,插入参比电极、Mo 电极和石墨电极后,恒电位预电解去除熔盐中的杂质。

液池 Ga 电极:预电解后,加入 0.8 g 无水氯化铈于 LiCl-KCl 混合盐中溶解,然后将工作电极转为液池 Ga 阴极。

液膜 Ga 电极:预电解后,先后加入 0.8 g Ga(III)和 Ce(III)于熔盐中,将工作电极转为另一根 Mo 电极。

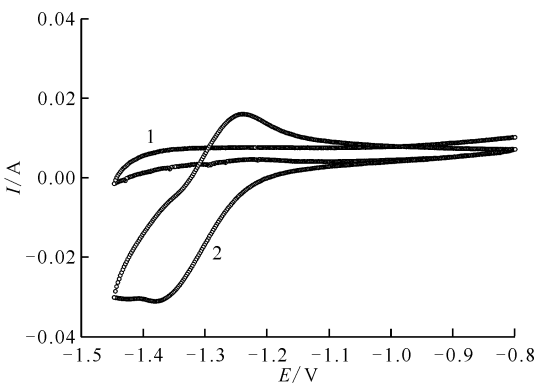
使用配备 Echem 分析软件的恒电位仪/恒电流仪用于记录和分析实验的电化学信号。采用的暂态电化学方法包括循环伏安法、方波伏安法和计时电位法。

2 结果与讨论

2.1 液池 Ga 电极

(1) 循环伏安法

753 K 时,添加 Ce(III)前后 LiCl-KCl 共晶熔盐于液池 Ga 电极上的循环伏安曲线示于图 2。由图 2 可知:电位范围为 $-1.000 \sim 1.450$ V 时, LiCl-KCl 于 -1.450 V 时出现阴极峰,该峰应为 Li^+ 于 Ga 电极上还原引起的。由 LiCl-KCl 熔盐中加入 $w=0.79\%$ Ce(III)后的循环伏安曲线可知,除



$v=20$ mV/s, $T=753$ K, $S=1.13$ cm²
 $w(\text{Ce(III)})$: 1—0.2—0.79%

图 2 Ce(III)于液池 Ga 电极上的 CV 曲线
 Fig. 2 Cyclic voltammograms of Ce(III) on liquid Ga pool electrode

了 -1.450 V 处的阴极还原峰外, -1.345 V 和 -1.234 V 出现了一对明显氧化还原峰。这一现象归因于 Ce(III)于 Ga 阴极上还原生成 Ce(Ga)合金和 Ce(Ga)合金氧化为 Ce(III)的反应。此外,由于 Ce(III)于液池 Ga 电极上的 CV 曲线中仅观察到一对氧化还原峰,因此液池 Ga 电极上 Ce(III)还原为合金反应转移的电子数(n_e)为 3。

Ce 和 Ga 的相图示于图 3^[8]。由图 3 可知:随着 Ce 含量的升高,Ce 和 Ga 存在 5 种金属间化合物,即 $\alpha\text{Ga}_6\text{Ce}$ 、 Ga_2Ce 、 GaCe 、 Ga_2Ce_3 和 GaCe_3 。由于使用液池 Ga 电极,扫描时间内 Ce 摩尔分数小于 30%,因此在 -1.345 V 出现的还原峰对应生成的金属间化合物为 $\alpha\text{Ga}_6\text{Ce}$,即该处发生的还原反应为:

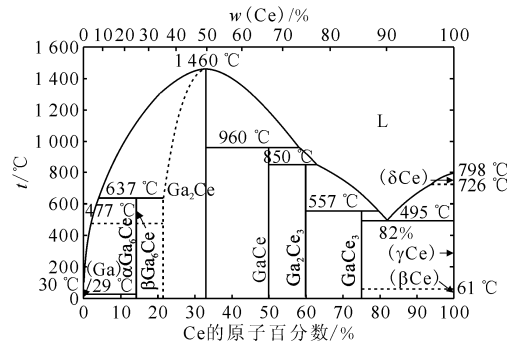
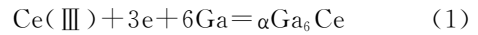
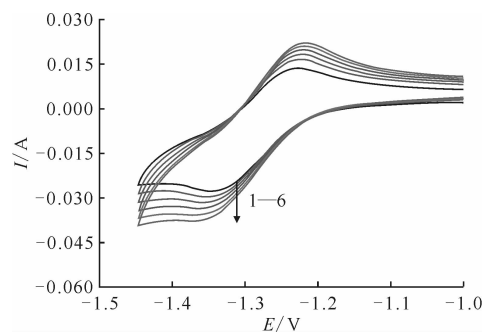


图 3 Ce-Ga 的相图^[8]

Fig. 3 Phase diagrams of Ce-Ga^[8]

扫描速率(v)为 $20 \sim 70$ mV/s 时,Ce(III)于液池 Ga 电极上的循环伏安曲线示于图 4。由



$T=753$ K, $S=1.13$ cm², $c=5.15 \times 10^{-5}$ mol/cm³,
 $w(\text{Ce(III)})=0.79\%$

v , mV/s: 1—20, 2—30, 3—40, 4—50, 5—60, 6—70
 图 4 Ce(III)于液池 Ga 电极上不同扫速时的 CV 曲线
 Fig. 4 CV curves of Ce(III) on liquid Ga pool electrode under various scan rate

图 4 可知,随着扫描速率由 20 mV/s 升高至 70 mV/s 时,阴极峰电位从 -1.345 V 负移至 -1.372 V,阴极峰电位发生了明显变化。同时,峰电流由 -27.6 mA 降低至 -37.5 mA。由阴极峰电位($E_{p,c}$)与扫描速率的对数值($\lg v$)的关系(图 5)可知,Ce(III)还原为 $\alpha\text{Ga}_6\text{Ce}$ 为不可逆反应^[9]。

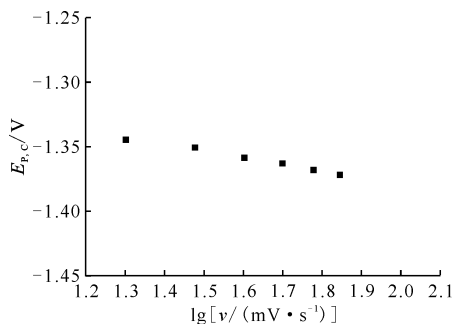


图 5 LiCl-KCl 熔盐中 Ce(III)于液池 Ga 电极上的阴极峰电位($E_{p,c}$)与扫描速率的关系
Fig. 5 Dependence of cathodic peak potentials($E_{p,c}$) on scan rate onto liquid Ga pool electrode in LiCl-KCl eutectic

对于不可逆系统,电子传递系数(α)值可根据式(2)^[10]计算。

$$E_{p,c} - E_{p/2,c} = -1.86 \frac{RT}{\alpha n_a} \quad (2)$$

式中: $E_{p/2,c}$,半峰电位。得到的 αn_a 值列入表 1。

表 1 Ce(III)于液池 Ga 电极上的阴极峰电位、半峰电位和 αn_a 值

Table 1 Values of cathodic peak potential($E_{p,c}$), half-peak potential($E_{p/2,c}$) and αn_a

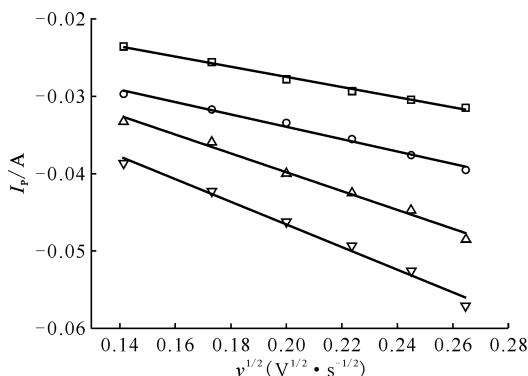
$v/(\text{mV} \cdot \text{s}^{-1})$	$E_{p,c}/\text{V}$	$E_{p/2,c}/\text{V}$	$E_{p/2,c} - E_{p,c}/\text{V}$	αn_a
20	-1.345	-1.262	0.083	1.45
30	-1.351	-1.266	0.085	1.42
40	-1.358	-1.268	0.090	1.34
50	-1.363	-1.270	0.093	1.30
60	-1.368	-1.274	0.094	1.28
70	-1.372	-1.276	0.096	1.26

LiCl-KCl 熔盐中 Ce(III)的扩散系数(D , cm^2/s)可用式(3)推导计算^[11]。

$$I_p = -0.495 8n_a F S c D^{1/2} v^{1/2} \left(\frac{\alpha n_a F}{RT} \right)^{1/2} \quad (3)$$

其中: I_p 是阴极峰值电流, A; F 是法拉第常数, 96 485 C/mol; S 是液池 Ga 电极的表面积, cm^2 ; c 为 LiCl-KCl 熔盐中 Ce(III)的摩尔浓度, mol/

cm^3 ; R 是气体常数, 8.314 J/(mol · K); T 为热力学温度, K。不同温度(717、753、789、825 K)时,峰电流与扫描速率平方根的关系示于图 6。由图 6 可知,峰电流值与扫描速率的平方根成线性关系,表明 Ce(III)还原为 $\alpha\text{Ga}_6\text{Ce}$ 过程中的质量传输受扩散控制^[12], 计算得到 717、753、789、825 K 下的扩散系数分别为 1.41×10^{-5} 、 2.21×10^{-5} 、 5.40×10^{-5} 、 $8.17 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$ 。



$v=20\sim70 \text{ mV/s}$, $S=1.13 \text{ cm}^2$, $c=5.15 \times 10^{-5} \text{ mol/cm}^3$
T: \square —717 K, \circ —753 K, \triangle —789 K, ∇ —825 K

图 6 液池 Ga 电极上,Ce(III)的循环伏安曲线中峰电流与扫描速率平方根的关系

Fig. 6 Relationship between square root of scan rate and cathodic peak current of Ce(III) at different temperature on liquid Ga pool electrode

Ce(III)扩散进入液池 Ga 电极的活化能由 Arrhenius 公式得到:

$$\ln D = \ln D_0 = -E_a/RT \quad (4)$$

由上述关系得到的扩散系数与温度的关系示于图 7。由图 7 可知:Ce(III)于液池 Ga 阴极的扩散

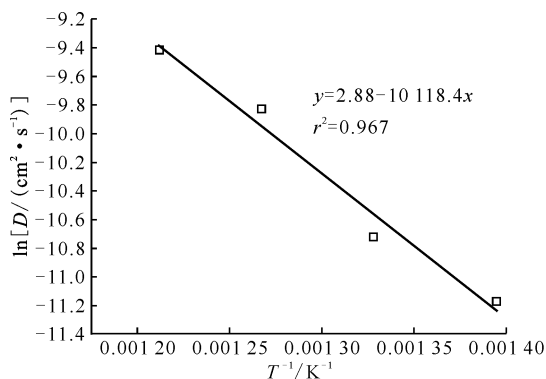


图 7 Ce(III)于液池 Ga 电极上的扩散系数与温度的关系
Fig. 7 Relationship of diffusion coefficient of Ce(III) with temperature on liquid Ga pool electrode

系数与温度的关系式为:

$$\ln D = 2.88 - 10118.4/T \quad (5)$$

由图 7 中线形拟合曲线的斜率得到的扩散活化能为 84.1 kJ/mol。

Ce(III)于液池 Ga 电极上的氧化还原电位可由半波电位 $E_{1/2}$ 计算出来,即为阴极峰电位 ($E_{P,C}$)和阳极峰电位($E_{P,A}$)的平均值^[5]:

$$E_{1/2} = \frac{E_{P,C} + E_{P,A}}{2} \quad (6)$$

表 2 和图 8 总结了不同温度时(717、753、789、825 K)Ce(III)的半波电位。由图 8 可知,Ce(III)/ $\alpha\text{Ga}_6\text{Ce}$ 的半波电位随温度线性增加,与温度的表达式为:

$$E_{1/2} = -1.701 + 5.472 \times 10^{-4} T \quad (7)$$

表 2 Ce(III)于液池 Ga 电极上的 CV 中阴极峰电位、阳极峰电位、半峰电位($E_{P/2,C}$)和半波电位

Table 2 Cathodic and anodic peak potentials, cathodic half-peak potential($E_{P/2,C}$), and half-wave potential of Ce(III) on liquid Ga pool electrode

T/K	$E_{P,C}/V$	$E_{P,A}/V$	$E_{1/2}/V$	$E_{P/2,C}/V$
717	-1.386	-1.237	-1.311	-1.306
753	-1.357	-1.219	-1.288	-1.273
789	-1.336	-1.194	-1.265	-1.243
825	-1.330	-1.177	-1.253	-1.230

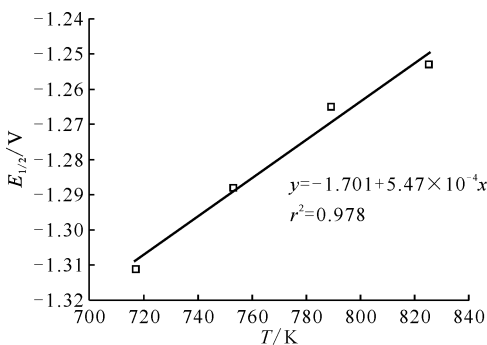


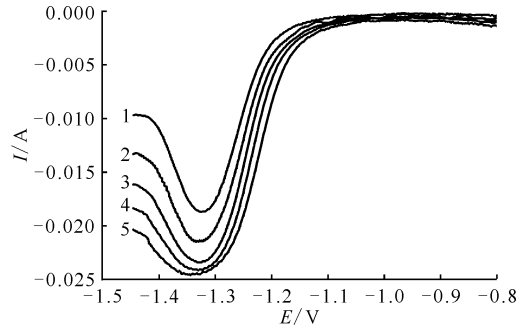
图 8 Ce(III)于液池 Ga 电极上的半波电位与温度的关系

Fig. 8 Relationship between temperature and half-wave potential of Ce(III) on liquid Ga pool electrode

(2) 方波伏安法

方波伏安法(SWV)具有可消除电容和残留电流、而呈现高灵敏度的优点^[12],已广泛应用于熔盐中镧系和铈系元素的电化学行为研究。不同频率(10~50 Hz)时,Ce(III)于液池 Ga 电极上的

方波伏安曲线示于图 9。由图 9 可知:-0.800 V 至-1.450 V 范围内仅出现一个还原峰,这表明 Ce(III)还原为 $\alpha\text{Ga}_6\text{Ce}$ 为一步转移 3 个电子的过程。同时,由图 9 可知,随着频率由 10 Hz 升高至 50 Hz,还原峰电位由-1.323 V 偏移至-1.347 V,表明 Ce(III)还原为 $\alpha\text{Ga}_6\text{Ce}$ 为不可逆反应。



$T=753\text{ K}, S=1.13\text{ cm}^2, c=5.15 \times 10^{-5}\text{ mol/cm}^3$
 $f, \text{Hz}: 1-10, 2-20, 3-30, 4-40, 5-50$

图 9 Ce(III)于液池 Ga 电极上的 SWV 曲线

Fig. 9 SWV curves of Ce(III) on liquid Ga pool electrode under various frequencies

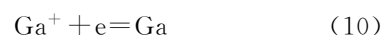
2.2 液膜 Ga 电极

(1) 循环伏安法

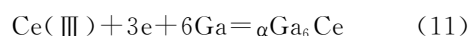
由于液池 Ga 电极上只得到一对氧化还原峰,为进一步确定 Ce(III)于 Ga 电极上的电化学行为,对比了液膜 Ga 电极和 Mo 电极上 Ce(III)的电化学行为,其中液膜 Ga 电极是通过 LiCl-KCl 共晶熔盐中加入 Ga(III),并于 Mo 电极上电沉积 Ga 而得。LiCl-KCl 共晶熔盐中 Ce(III)和 Ga(III)-Ce(III)于 Mo 电极上的循环伏安图示于图 10。由图 10 可知,熔盐体系中仅存在 Ce(III)时,只出现一对氧化还原峰(A'1 和 C'1),即 Ce(III)还原成金属 Ce 的反应:



当 Ga(III)加入 LiCl-KCl 熔盐体系时,有六对氧化还原峰。其中,0.5 V 附近出现的两个阴极还原峰为 Ga^{3+} 分两步还原为金属 Ga 的反应^[7]:

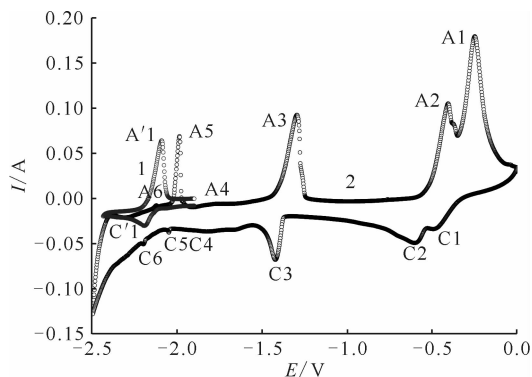
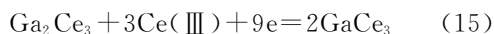
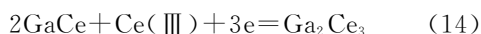
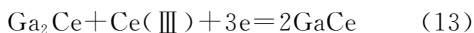


A3 和 C3 在 1.421 V 处的峰与液池 Ga 电极上的结果一致,如式(11)所示。



A4 和 C4、A5 和 C5、A6 和 C6 的氧化还原对可能与 Ga(III)在 LiCl-KCl 共晶熔盐中的相图和电化

学行为的反应有关(式(12)–(15))。



$v = 20 \text{ mV/s}, T = 753 \text{ K}, S = 0.34 \text{ cm}^2$

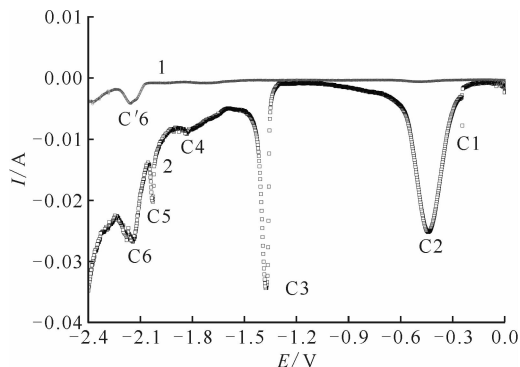
1—Ce(III), 2—Ga(III)-Ce(III)

图 10 Ce(III)和 Ga(III)-Ce(III)于 Mo 电极上的循环伏安曲线

Fig. 10 Cyclic voltammograms of Ce(III) and Ce(III)-Ga(III) on Mo cathode

(2) 方波伏安法

Ce(III)和 Ga(III)-Ce(III)于 Mo 电极上的方波伏安曲线示于图 11。由图 11 可知:与对应的循环伏安图相同,Mo 电极上 Ce(III)仅出现一个还原峰,而 Ce(III)-Ga(III)出现了 6 个还原峰,表明 Ce(III)-Ga(III)中 Ga(III)还原后生成 Ga, Ce(III)欠电位电沉积生成了 3 种金属间化合物。



$f = 10 \text{ Hz}, T = 753 \text{ K}, S = 0.34 \text{ cm}^2$

1—Ce(III), 2—Ga(III)-Ce(III)

图 11 Ce(III)和 Ga(III)-Ce(III)于 Mo 电极上的方波伏安曲线

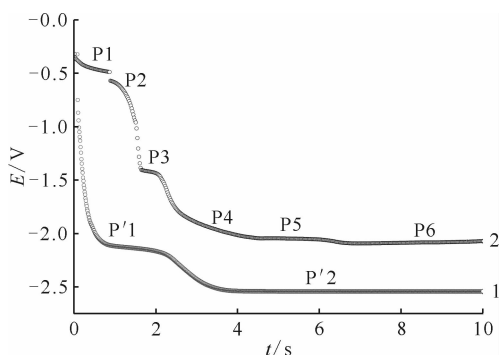
Fig. 11 Square wave voltammograms of Ce(III) and Ce(III)-Ga(III) on Mo cathode in LiCl-KCl eutectic

(3) 计时电位法

Ce(III)和 Ga(III)-Ce(III)在 Mo 电极上的计时电位曲线示于图 12。由图 12 可知,Ce(III)体系中电位从 0 V 直接下降至 -2.133 V,并出现平台(P'1),这表明 Ce(III)于 Mo 电极上一步还原为 Ce 金属。随着电流继续增加,于 -2.531 V 附近出现平台 P'2,该平台对应的反应为 Li^+ 还原成金属 Li:



在 Ga(III)-Ce(III)的计时电位曲线中出现了 6 个平台,约 -0.502 V 处的两平台(P1 和 P2)分别对应于 Ga^{3+} 还原成 Ga^+ 和 Ga^+ 还原为 Ga 的反应, -1.422 V 出现的平台为生成 $\alpha\text{Ga}_6\text{Ce}$ 的反应。计时电位法的结果与循环伏安法和方波伏安法的结果基本一致。



$I = 50 \text{ mA}, T = 753 \text{ K}, S = 0.34 \text{ cm}^2$

1—Ce(III), 2—Ga(III)-Ce(III)

图 12 Ce(III)和 Ga(III)-Ce(III)于 Mo 电极上的计时电位曲线

Fig. 12 Chronopotentiograms of Ce(III) and Ce(III)-Ga(III) on Mo cathode

3 结论

采用循环伏安、方波伏安和计时电位等暂态电化学方法研究了 Ce(III)于液池和液膜 Ga 电极上的电化学行为。液池 Ga 电极上的研究表明,Ce(III)可一步还原成 $\alpha\text{Ga}_6\text{Ce}$: $\text{Ce}(\text{III}) + 3\text{e} + 6\text{Ga} = \alpha\text{Ga}_6\text{Ce}$ 。该反应为不可逆反应且受扩散控制。液池 Ga 电极上 Ce(III)的扩散系数与温度的关系为: $\ln D = 2.88 - 10118.4/T$ 。此外,Ce(III)/ $\alpha\text{Ga}_6\text{Ce}$ 的半波电位与温度的表达式为: $E = -1.701 + 5.472 \times 10^{-4} T$ 。采用 GaCl_3 沉积于 Mo 电极,制备了 Ga 液膜电极。CV、CP 和 SWV 的研究结果表明,Ce(III)在 Ga 液膜电极上可发

生欠电位沉积生成多种金属间化合物。

参考文献:

- [1] Pyrochemical separations in nuclear applications, a status report[M]. OECD/NEA, 2004: 81-89.
- [2] Koyama T, Iizuka M, Shoji Y, et al. An experimental study of molten salt electrorefining of uranium using solid iron cathode and liquid cadmium cathode for development of pyrometallurgical reprocessing[J]. J Nucl Sci Technol, 1997, 34(4): 384-393.
- [3] Slater S A, Raraz A G, Willit J L, et al. Electrochemical separation of aluminum from uranium for research reactor spent nuclear fuel applications[J]. Sep Purif Tech, 1999, 15: 197-205.
- [4] Soucek P, Cassayre L, Malmbeck R, et al. Electrorefining of U-Pu-Zr-alloy fuel onto solid aluminium cathodes in molten LiCl-KCl[J]. Radiochim Acta, 2008, 96: 315-322.
- [5] Shirai O, Uozumi K, Iwai T, et al. Electrode reaction of the Np^{3+}/Np couple at liquid Cd and Bi electrodes in LiCl-KCl eutectic melts[J]. J Appl Electrochem, 2004, 34(3): 323-330.
- [6] Smolenski V, Novoselova A, Osipenko A, et al. Thermodynamics of separation of uranium from neodymium between the gallium-indium liquid intermetallic compound and the LiCl-KCl molten salt phases[J]. Electrochim Acta, 2014, 133: 354-358.
- [7] Pang J W, Liu K, Liu Y L, et al. Electrochemical properties of lanthanum on the liquid gallium electrode in LiCl-KCl eutectic[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2016, 163(14): D750-D756.
- [8] Thaddeus B. Binary alloy phase diagrams second edition[M]. Ohio: American Society for Metals, 1990.
- [9] Serp J, Lefebvre P, Malmbeck R, et al. Separation of plutonium from lanthanum by electrolysis in LiCl-KCl onto molten bismuth electrode[J]. J Nucl Mater, 2005, 340(2): 266-270.
- [10] Matsumiya M, Takagi R, Fujita R. Recovery of caesium using liquid metallic cathodes in molten fluoride system[J]. J Nucl Sci Technol, 1998, 35(2): 137-147.
- [11] Matsumiya M, Takagi R, Fujita R. Recovery of Eu^{2+} and Sr^{2+} using liquid metallic cathodes in molten NaCl-KCl and KCl system[J]. J Nucl Sci Technol, 1997, 34(3): 310-317.
- [12] Castrillejo Y, Bermejo M R, Barrado A I, et al. Electrochemical behaviour of dysprosium in the eutectic LiCl-KCl at W and Al electrodes[J]. Electrochim Acta, 2005, 50(10): 2047-2057.