# LiCl-KCl 共晶熔盐的纯化

张 凯1,王有群2,肖益群1,林如山1,贾艳虹1,何 辉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,江西 南昌 330013

摘要:氯化锂-氯化钾共晶熔盐是电解精炼干法后处理中最常用的电解质,其含有的杂质直接影响电流效率和 产物纯度。本研究分别采用高温处理、HCl气体鼓泡和恒电位电解等方法依次去除了熔盐中的易挥发物质、 氧离子和金属离子等杂质,获得了较高纯度的熔盐。采用热重分析(TGA)、电化学和电感耦合等离子体原子 发射光谱(ICP-AES)等方法对比了纯化前后熔盐中各杂质的含量。研究结果表明:去除易挥发杂质的最佳处 理温度范围为 450~650 ℃;去除杂质金属离子时最佳电解电位为一2.3 V vs. Ag/AgCl(摩尔分数 2%),恒 电位电解 800 s 后杂质金属离子总量低于 1.5×10<sup>-6</sup> g/g(盐)。以上研究结果表明,采用高温处理、HCl气体 鼓入和恒电位电解可获得纯度较高的 LiCl-KCl 共晶熔盐。

关键词:LiCl-KCl熔盐;纯化;电解精炼;干法后处理

中图分类号:TL241.2 文献标志码:A 文章编号:0253-9950(2018)06-0382-06 doi:10.7538/hhx.2018.YX.2018018

# Purification of Lithium Chloride-Potassium Chloride Eutectic

ZHANG Kai<sup>1</sup>, WANG You-qun<sup>2</sup>, XIAO Yi-qun<sup>1</sup>, LIN Ru-shan<sup>1</sup>, JIA Yan-hong<sup>1</sup>, HE Hui<sup>1,\*</sup>

China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275(26), Beijing 102413, China;
East China University of Technology, Nanchang 330013, China

Abstract: Lithium chloride-potassium chloride eutectic is the most commonly used electrolyte in electrorefining dry reprocessing, and its impurities directly affect current efficiency and product purity. In this study, high-temperature calcination, HCl gas bubbling, and potentialstat electrolysis were used to remove the volatile, oxygen ions, and metal ions impurity in molten salt in sequence, and to obtain higher purity molten salt. Thermogravimetric analysis (TGA), electrochemical and inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES) were used to compare the contents of impurities in molten salt before and after purification. The results show that the optimal calcining temperature range for removal of volatile impurities is 450-650 °C; the optimal electrolytic potential for removing metal ions impurity is -2.3 V vs. Ag/AgCl(x=2%), and the total metal ion concentration after constant potential electrolysis for 800 s is less than  $1.5 \times 10^{-6}$  g/g (salt). Based on the above results, higher purity LiCl-KCl eutectic can be obtained by high-temperature calcina-

收稿日期:2018-03-05;修订日期:2018-04-11

作者简介:张 凯(1984—),男,北京房山人,博士研究生,助理研究员,从事干法后处理研究,E-mail: 15810116091@163.com \* 通信联系人:何 辉(1972—),男,陕西武功人,博士,研究员,从事核燃料后处理研究,E-mail: hehui@ciae.ac.cn 网络出版时间:2018-09-30;网络出版地址:http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2045.TL.20180929.1427.002.html

tion, HCl gas bubbling, and constant potential electrolysis.Key words: LiCl-KCl molten salt; purification; electrorefining; dry reprocessing

快堆是实现我国核能可持续发展的关键技术 之一<sup>[1]</sup>。然而,快堆产生的乏燃料具有燃耗深 (120~150 GW・d/t)、放射性强、释热率高(大于 25 kW/t)等特点。由于有机萃取剂在强辐射条 件下易分解,因此传统水法后处理工艺难以胜任 快堆乏燃料后处理的任务<sup>[2]</sup>。以无机物作为电解 质的高温熔盐电解干法后处理工艺有良好耐辐 照<sup>[3-5]</sup>的特点,可更好地处理这类乏燃料。

熔盐电解干法后处理技术主要包括电化学沉 积<sup>[6]</sup>和电解精炼<sup>[7-10]</sup>,其中电解精炼流程具有设 备简单、操作温度低(500°C)的优点而日益受到 重视。电解精炼流程中主要采用LiCl-KCl共晶 熔盐(59%(摩尔分数,下同)LiCl-41%KCl)作为 常用的反应介质<sup>[11-14]</sup>,主要原因为:(1)熔点低 (约 355°C)<sup>[15]</sup>;(2)电化学窗口宽,可直接电沉积 得到锕系和镧系金属或合金;(3)与氟盐相比,对结 构材料的腐蚀小<sup>[16]</sup>;(4)对Ln和An等氯化物的溶 解度较高<sup>[16]</sup>。然而,LiCl-KCl熔盐极易吸湿<sup>[17]</sup>并含 有一定量的金属离子等杂质。由于上述杂质等可与 电解产物发生副反应从而导致产物的纯度和电流效 率下降<sup>[18]</sup>,同时可影响Ag/AgCl参比电极的稳定 性<sup>[19]</sup>,因此在电解前有必要去除这些杂质。

通常熔盐中去除杂质离子纯化的方法包括电 解<sup>[18]</sup>和真空蒸发冷凝<sup>[20-21]</sup>等。真空蒸发冷凝需 要专门复杂的设备,适合大规模熔盐的处理;电解 法更适合于实验室中少量熔盐的纯化。本工作拟 采用高温处理、HCl 鼓泡和恒电位电解依次除去 LiCl-KCl 熔盐中的易挥发物质、氧离子和金属离 子杂质(主要为 Fe、Ca 和 Mg)等,以得到高纯度 共晶熔盐,并通过热重分析(TGA)、电化学方法 和电感耦合等离子体原子发射光谱法(ICP-AES) 等对比共晶熔盐中杂质的含量。

# 1 实验部分

#### 1.1 试剂和仪器

无水氯化锂,纯度 99.0%,上海中锂股份有限公司;氯化钾,分析纯,西陇化工有限公司;盐酸、丙酮,分析纯,国药集团上海有限公司。 AgCl、Mo丝(直径1 mm,纯度 99.99%)、Ag丝(直径1 mm,纯度 99.99%),Alfa-aesar(天津)有限公司;石墨棒,光谱纯,直径4 mm,北京电碳 厂。氩气,北京氙禾玉气体技术有限公司,纯度为 99.9996%, $H_2O$ 体积分数均小于2×10<sup>-6</sup>。采 用 DMAR-3型氩气净化机(大连光明中科机电设 备有限公司)进一步净化氩气,净化后的 $H_2O$ 体 积分数均小于 0.5×10<sup>-6</sup>。

石墨棒、Mo 丝和银丝使用前均预处理:石墨 棒用 2000 目砂纸打磨光滑,然后于体积分数为 5%HCl 溶液中煮沸1h后用蒸馏水清洗、干燥备 用;金属丝使用前先后用 200 #、1000 #和 2000 # SiC 砂纸打磨抛光,去除表面氧化层后放置于稀 HCl 溶液(0.1 mol/L)中浸泡数分钟,然后用丙酮 进行超声清洗至锃亮,烘干备用。参比电极为自制 Pyrex 隔膜 Ag/AgCl 电极,AgCl 摩尔分数为 2%。

Optima 7000DV ICP-AES,美国 Perkin-Elmer 公司;TG 209F3 热重分析仪,德国 NETZSCH 公司; Furnace 1000 马弗炉,天津中环实验电炉厂;SG-3-12 井式电炉,弗恩森(北京)电炉有限公司;Satorius BSA224S 电子天平,精度 0.000 1 g,德国赛多利斯集 团;Reference 3000 电化学工作站,美国 Gamry 公司。

# 1.2 实验装置

LiCl-KCl 共晶熔盐的电解去除杂质装置示 于图 1。该装置主要由 HCl 气体供应系统、加热 系统、电解系统、手套箱和尾气处理系统等部分组 成,可开展熔盐的氢氯化和电解等工作。



#### 1.3 实验过程

处理过程:将 LiCl 和 KCl 分别置于马弗炉中 于 450 ℃除水和易挥发杂质后,按质量比 45:55 混合(1 # 样品)。取 1 # 样品 100 g 置于坩埚中, 待熔融后通入 HCl 气体 30 min,再用高纯 Ar 鼓 泡带走残余的 HCl,冷却至室温得到 2 # 样品。 将相同质量的 1 # 和 2 # 样品置于刚玉坩埚中插 入电极恒电位电解,分别得到样品 3 # 和 4 # 。

#### 1.4 表征和分析

热重分析:取 15 mg上述样品于刚玉坩埚 中,以 № 为保护气,置于热重分析仪中测定失重 曲线。以 5 ℃/min 的升温速率测定样品于 50~ 800 ℃的失重曲线。

电化学测量和电解:采用三电极体系即 Mo 丝为工作电极,自制 Pyrex 隔膜 Ag/AgCl 电极为 参比电极,以光谱纯石墨棒为对电极进行测量和 电解。实验使用 Reference 3000 型电化学工作站 记录熔盐的电化学信号。

ICP-AES分析:取1gLiCl或KCl和1#--4#样品溶于去离子水中,采用Optima 7000DV ICP-AES测定。待测元素及谱线分别为 Ba 233.527 nm、Ca 317.933 nm、Fe 238.204 nm 和 Mg 285.213 nm。

## 2 结果与讨论

#### 2.1 高温处理

易挥发的物质如 H₂O 等直接影响熔盐中离 子的性质和电解并且会加速对不锈钢容器的腐 蚀<sup>[17]</sup>,因此需要去除这些易挥发物质。高温处理 前的 LiCl 和 KCl 于 50~800 ℃的失重曲线示于 图 2。由图 2 可知,50~200 ℃之间 LiCl 和 KCl



图 2 高温处理前 LiCl 和 KCl 的 TGA 曲线 Fig. 2 TGA curves of LiCl and KCl before high-temperature calcining

的失重率为 0.47%和 0.17%,为两种无机盐中吸 附的 H<sub>2</sub>O 挥发引起的。随后,LiCl 于 228 ℃时 出现失重,质量分数从 99.53%降至 99.30%,这 一失重为 LiCl 中其他杂质如 FeCl<sub>3</sub> 挥发或铵盐 分解引起的。因此,LiCl 中易挥发杂质质量分数 约为 0.70%。然而,KCl 于 403 ℃时失重急速下 降,质量分数由 99.83%降至 98.51%。因此, KCl 中易挥发物质如 H<sub>2</sub>O、碘化物、溴化物、氨等 杂质总质量分数为 1.49%。

当温度高于 700 ℃时,LiCl 和 KCl 均有明显的 失重,这是由于 LiCl 和 KCl 在温度高于 700 ℃时饱 和蒸汽压显著增大(图 3)<sup>[22]</sup>引起的。由 LiCl 和 KCl 的失重曲线可知,可采用高温(450 ℃*<θ*<700 ℃) 处理除去 LiCl 和 KCl 中易挥发的物质。



# 2.2 HCI 鼓泡

Hajime 等<sup>[17]</sup>研究表明高温(约 200 ℃)条件 下 LiCl-KCl 共晶熔盐仍有少量 H<sub>2</sub>O,同时熔融 过程中会发生水解易生成 LiOH:

 $LiCl+H_2O=LiOH+HCl$  (1)

水解产生的 OH<sup>-</sup>可与金属氯化物或金属反应从 而影响电化学行为的测定或电解效果。Hajime 等<sup>[17]</sup>对比了 Cl<sub>2</sub> 和 HCl 鼓泡法对去除 OH<sup>-</sup>的效 果,结果表明 HCl 鼓泡法可有效地去除熔盐中的 LiOH,而 Cl<sub>2</sub> 鼓泡法则易生成 LiOCl,反应如下:

 $LiOH + HCl = LiCl + H_2O$  (2)

 $LiOH+Cl_2 = LiOCl+HCl$  (3)

在高温条件下,LiOH 与 HCl 发生中和反应生成

的 H<sub>2</sub>O 可挥发为气体,因此采用 HCl 鼓泡法可 去除熔盐中含氧杂质,同时避免产生 LiOCl。

将高温处理和高温处理-HCl 鼓泡的样品于 手套箱中研成粉末后置于热重分析仪中分析。热 重分析结果示于图 4。图 4 表明,温度区间为 100~ 650 ℃时,1 ♯ 和 2 ♯ 样品的总失重量分别为 0.54%和0.32%,表明通过 HCl 鼓入法可去除更 多的易挥发物。这是由于 HCl 通入熔盐后会载 带较多的易挥发物质,从而降低了熔盐中易挥发 物质含量。同时,当温度由 650 ℃升高至 800 ℃ 时,高温处理和高温处理-HCl 鼓泡样品的质量分 数分别下降 4.4%和 5.1%,表明以 LiCl-KCl 作 为熔盐介质时,使用温度不宜高于 650 ℃。



Fig. 4 TGA curves of LiCl-KCl eutectic after high-temperature calcining and calcining-HCl bubbling

将 LiCl 和 KCl 溶于去离子水中,采用 ICP-AES 测定金属元素杂质的种类和含量,结果列于表 1。由表 1 可知,LiCl 和 KCl 中主要含有 Ba、Ca、Fe 和 Mg 等杂质离子,与申森<sup>[18]</sup>测定 LiCl-KCl 熔盐中含有 Ca、Mg 等杂质离子结果相似。此外,LiCl 中主要杂质金属元素总量(29.9× $10^{-6}$  g/g(盐))约为 KCl 的 8 倍。LiCl-KCl 共晶熔盐(摩尔比为 59:41)中总的杂质金属元素总量为 15.55× $10^{-6}$  g/g(盐)。

高温处理和高温处理-HCl 鼓泡处理的 LiCl-KCl 混合熔盐的循环伏安(CV)曲线示于图 5。 由图 5 可知,仅采用高温处理的混合熔盐中阴极 峰电位依次为-0.5 V、-2.0 V和-2.4 V,分别 为 Fe([])<sup>[22]</sup>、Mg([])<sup>[23]</sup>和 Ca([])<sup>[18]</sup>于 Mo 电 极上还原引起的,其中-2.0 V 时峰电流约为 -19 mA,表明杂质 Mg([])含量高。高温处理- HCl 鼓泡处理的 LiCl-KCl 熔盐,曲线平滑,最大 峰电流仅为-7 mA,表明 HCl 处理可明显降低 金属离子杂质含量。这是由于采用 HCl 鼓入时, HCl 可将熔盐中的少量氧化物 FeO、MgO 或 CaO 转化为对应的氯化物 (FeCl<sub>2</sub>、MgCl<sub>2</sub> 和 CaCl<sub>2</sub>)。与上述氧化物相比,氯化物的饱和汽压 要小得多,可随 HCl 鼓泡载带转化为气体,从而 降低这些金属离子杂质。ICP-AES 测定 HCl 通 入前后 LiCl-KCl 中共存离子的结果列于表 1,由 表 1 可知,Ba 含量基本不变,而 Ca、Fe 和 Mg 含 量明显减少,表明采用 HCl 处理后的熔盐中的杂 质离子由 12.45×10<sup>-6</sup> g/g (盐)降低至 4.98×  $10^{-6}$  g/g (盐),与 CV 曲线的结果基本一致。

表 1 无水 LiCl、KCl、高温处理和高温处理-HCl 鼓泡 处理 LiCl-KCl 中主要金属元素的含量 Table 1 Concentration of main metal elements in anhydrous LiCl, KCl and LiCl-KCl eutectic after high-temperature calcining and calcining-HCl bubbling

元素	$10^{6}w/(g \cdot g^{-1}(4))$			
	LiCl	KCl	1#	2 #
Ba	4.49	0.46	1.32	1.44
Ca	11.05	1.51	4.29	0.48
Fe	2.26	1.00	1.96	0.83
Mg	12.14	0.81	4.88	2.23
总量	29.94	3.78	12.45	4.98

注:1 #,高温处理的 LiCl-KCl 熔盐;2 #,高温处理-HCl 鼓泡 处理的 LiCl-KCl 熔盐





Fig. 5 Cyclic voltammograms of LiCl-KCl eutectic after high-temperature calcining and calcining-HCl bubbling

#### 2.3 恒电位电解

由图 5 可知, Fe(Ⅱ)和 Mg(Ⅱ)的还原峰电

位均小于一2.3 V,而 Ca(II)的还原峰电位 (-2.4 V)与Li<sup>+</sup>较为接近,为避免电解还原产生 大量金属锂,因此选择一2.3 V 作为最佳电解电 位。图 6 为高温处理和高温处理-HCI 鼓泡处理后 的熔盐的恒电位(-2.3 V)电解曲线。由图 6 可 知,未经 HCI 鼓泡处理熔盐的初始电流约为 -15 mA,表明杂质离子含量较高。此外,该电解 曲线不平滑,至少需约 4 000 s 电流方可减小至 -2 mA。经高温处理-HCI 鼓泡处理熔盐的初始 电流约为 4 mA,表明熔盐中杂质离子总含量小,同 时电解电流仅需约 800 s 即可达到-2 mA 以下。



of LiCl-KCl eutectic after high-temperature calcining and calcining-HCl bubbling

根据法拉第方程和电解消耗的电量(Q,C) 可估算 HCl 气体处理前后的熔盐中杂质的总量:

$$Q = \int_{0}^{t} I_{t} \mathrm{d}t = nZF \tag{4}$$

式中: $I_t$  为电解过程中的瞬时电流,A;t 为电解时间,s;n 为杂质离子的摩尔量,mol;Z 为电解过程中转移的电子数;F 为法拉第常数,一般取 96 485 C/mol。由于在 LiCl-KCl 熔盐体系中主要杂质元素Fe 和 Mg 等均呈+2 价,因此转移电子数 Z=2。电解曲线积分可计算总电量 Q,未处理熔盐中恒电位电解的电量为 24.77 C,而 HCl 处理后的熔盐电解的电量为 3.31 C,表明经过 HCl 鼓泡处理熔盐中总杂质离子含量下降了 86.6%。

恒电位电解后,高温处理和 HCl 处理的 LiCl-KCl 熔盐于 Mo 电极上的 CV 曲线示于 图 7。由图 7 可知,HCl 鼓泡和仅高温处理熔盐 的 CV 曲线中 Mg(I)/Mg(0)的峰电流分别为 -3 mA和-1.5 mA,而 Fe(0)/Fe(Ⅱ)峰电流由 1.5 mA 降至 0.5 mA,表明 Mg 和 Fe 含量明显 降低。ICP-AES 测定电解 HCl 鼓泡和仅高温处 理后熔盐的分析结果列于表 2。如表 2 所示,采 用 HCl 处理电解后的 LiCl-KCl 共晶熔盐中 Ba 含量略有减小,而 Mg、Ca 和 Fe 电解后的含量均 显著下降,对它们的去除率高于 90%,熔盐中主 要的杂质离子的总量为 1.53×10<sup>-6</sup> g/g(盐)。



 $S_{\pm kb} = 0.96 \text{ cm}^2, T = 751 \text{ K}$ 

图 7 恒电位电解后 LiCl-KCl 熔盐的 CV 曲线

Fig. 7 Cyclic voltammograms of LiCl-KCl eutectic after high-temperature calcining and calcining-HCl bubbling



LiCl-KCl 熔盐中各元素的含量对比 Table 2 Concentration of main metal elements in LiCl-KCl eutectic after high-temperature calcining and after potentialstat electrolysis at -2.3 V

元素	$10^{6}w/(g \cdot g^{-1}(盐))$				
	1 #	3 #	4 #		
Ba	1.32	1.12	1.02		
Ca	4.29	0.42	0.22		
Fe	1.96	0.23	0.14		
Mg	4.88	0.35	0.15		
总量	12.45	2.12	1.53		

注:1 #,高温处理后的 LiCl-KCl;3 #,高温处理电解后的 LiCl-KCl;4 #,高温处理-HCl 鼓泡处理并电解后的 LiCl-KCl

# 3 结 论

本研究分别采用高温处理、HCl 气体鼓泡和 恒电位电解依次去除 LiCl-KCl 共晶熔盐中的易 挥发物质、氧离子和杂质金属离子。TGA 分析结 果表明未处理的 KCl 和 LiCl 分别含有约 1.49% 和 0.70%易挥发物质,并确定了最佳的高温处理 范围为 450~650 ℃。电化学和 ICP-AES 分析结 果表明 LiCl-KCl 盐中含有 Ca、Fe 和 Mg 等杂质 金属元素。循环伏安法确定的最佳电解电位为 -2.3 V(参比电极 Ag/AgCl(摩尔分数 2%))。 经高温处理-HCl 鼓泡-恒电位电解净化后杂质金 属离子总量由 15.55×10<sup>-6</sup> g/g(盐)降至 1.53× 10<sup>-6</sup> g/g(盐);杂质峰的含量下降。以上结果表 明,采用高温处理-HCl 鼓泡-恒电位电解可显著 降低熔盐中易挥发杂质和金属离子的含量,可获 得纯度较高的 LiCl-KCl 熔盐。

#### 参考文献:

- [1] 徐銤. 快堆和我国核能的可持续发展[J]. 中国核电, 2009,2(2):106-110.
- [2] 顾忠茂.我国先进核燃料循环技术发展战略的一些 思考[J].核化学与放射化学,2006,28(1):1-10.
- [3] de Angelis G, Fedeli C, Tiranti G, et al. Facilities for pyrochemical process studies at ENEA[R]. US: American Nuclear Society, 2013.
- [4] Inoue T, Koyama T, Myochin M, et al. Pyroprocessing technology development in Japan[R]. US: American Nuclear Society, 2007.
- [5] Nawada H P, Fukuda K. Role of pyro-chemical processes in advanced fuel cycles[J]. J Phys Chem Solids, 2005, 66(2-4): 647-651.
- [6] Nagai T, Uehara A, Fujii T, et al. In-situ measurement of UO<sub>2</sub><sup>2+</sup> concentration in molten NaCl-2CsCl by differential pulse voltammetry[J]. J Nucl Sci Technol (Tokyo, Jpn), 2006, 43(12): 1511-1516.
- [7] Reddy B P, Vandarkuzhali S, Subramanian T, et al. Electrochemical studies on the redox mechanism of uranium chloride in molten LiCl-KCl eutectic[J]. Electrochim Acta, 2004, 49(15): 2471-2478.
- [8] Ghosh S, Vandarkuzhali S, Gogoi N, et al. Anodic dissolution of U, Zr and U-Zr alloy and convolution voltammetry of Zr<sup>4+</sup> |Zr<sup>2+</sup> couple in molten LiCl-KCl eutectic[J]. Electrochim Acta, 2011, 56(24): 8204-8218.
- [9] Masset P, Bottomley D, Konings R, et al. Electrochemistry of uranium in molten LiCl-KCl eutectic[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2005, 152(6): A1109-A1115.
- [10] Lee J H, Kang Y H, Hwang S C, et al. Electrodeposition characteristics of uranium in molten LiCl-KCl eutectic and its salt distillation behavior[J]. J Nucl Sci Technol(Tokyo, Jpn), 2006, 43(3): 263-269.
- [11] Kuznetsov S A, Hayashi H, Minato K, et al. De-

termination of uranium and rare-earth metals separation coefficients in LiCl-KCl melt by electrochemical transient techniques[J]. J Nucl Mater, 2005, 344(1-3): 169-172.

- [12] Iizuka M, Koyama T, Sakamura Y, et al. Development of pyro-processing technology at CRIEPI for carving out the future of nuclear fuel cycle[R]. US: American Nuclear Society, 2013.
- [13] Zhang J. Electrochemistry of actinides and fission products in molten salts: data review[J]. J Nucl Mater, 2014, 447(1-3): 271-284.
- [14] Kim G Y, Yoon D, Paek S, et al. A study on the electrochemical deposition behavior of uranium ion in a LiCl-KCl molten salt on solid and liquid electrode[J]. J Electroanal Chem, 2012, 682: 128-135.
- [15] Bockris J O M, Hills G J, Inman D, et al. An all-glass reference electrode for molten salt systems[J]. Journal of Scientific Instruments, 1956, 33(11): 438.
- [16] Fukasawa K. Systematic study on the thermodynamic stability of lanthanides and actinides in molten alkali and alkaline earth chlorides[D]. Kyoto: Kyoto University, 2012.
- [17] Hajime K, Clint A S, Iain M, et al. Behaviour of moisture in LiCl-KCl eutectic for pyrochemical process[C]. Proceedings of GLOBAL 2005, Tsukuba, Japan, Oct 9-13, 2005.
- [19] 李国熏,张树玲,乔芝郁,等.用于 LiCl-KCl-NaCl 熔 盐系长时间稳定的银-氯化银参比电极[J].北京科 技大学学报,1983(4):97-105.
- [20] Lee J H, Kang Y H, Hwang S C, et al. Electrodeposition characteristics of uranium in molten LiCl-KCl eutectic and its salt distillation behavior[J]. J Nucl Sci Technol(Tokyo, Jpn), 2006, 43(3): 263-269.
- [21] Eun H C, Yang H C, Lee H S, et al. Distillation and condensation of LiCl-KCl eutectic salts for a separation of pure salts from salt wastes from an electrorefining process[J]. J Nucl Mater, 2009, 395(1-3): 58-61.
- [22] Khalaghi B, Kvalheim E, Tokushige M, et al. Electrochemical behaviour of dissolved iron chloride in KCl+LiCl+NaCl melt at 550 °C[J]. ECS Transactions, 2014, 64(4): 301-310.
- [23] Ye K, Zhang M L, Chen Y, et al. Electrochemical codeposition of Al-Li-Mg alloys at solid aluminum electrode from LiCl-KCl-MgCl<sub>2</sub> molten salt system[J]. Metall Mater Trans B, 2010, 41(3): 691-698.