

引用格式:段中波,文钧德,刘海锋,等. 焙烧法回收阳极炭渣中电解质试验研究[J]. 中国有色冶金, 2024, 53(2):107-113.

DUAN Zhongbo, WEN Junde, LIU Haifeng, et al. Recovery of electrolytes from anode carbon residue by roasting method [J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024, 53(2):107-113.

## 焙烧法回收阳极炭渣中电解质试验研究

段中波<sup>1</sup>, 文钧德<sup>2</sup>, 刘海锋<sup>1</sup>, 张彦荣<sup>1</sup>, 李振中<sup>1</sup>, 卜旭东<sup>2</sup>, 王 胜<sup>2</sup>

(1. 甘肃东兴铝业有限公司, 甘肃 嘉峪关 735100;

2. 兰州理工大学材料科学与工程学院, 甘肃 兰州 730050)

[摘要] 阳极炭渣是铝电解过程产出的危废,主要成分是冰晶石、亚冰晶石和碳,目前主要以堆存的方式暂存,不但污染环境,而且造成资源浪费。本文以甘肃某电解铝厂提供的阳极炭渣为原料,对其进行了表征分析,并在焙烧温度范围内热力学分析和 TG-DSC 分析的基础上,进行了单因素焙烧试验,得到以下主要结论:阳极炭渣中电解质含量较低区域,电解质附着在颗粒的表面和间隙,较高区域则包裹碳质材料;化学反应吉布斯自由能变分析表明,焙烧法回收阳极炭渣中电解质可行;单因素试验得到的较佳焙烧工艺为温度 800 °C、升温速率 5 °C/min、保温时间 1.5 h,此条件下,阳极炭渣的失重率为 24.3%,电解质碳脱除率为 96.32%,回收率为 90.63%;回收电解质中出现  $K_2NaAlF_6$  和 LiF 新相,Na、Al、F、Mg、Ca、K 元素分布均匀且含量增加,电解质初晶温度为 921.5 °C,可满足铝电解工业应用要求。

[关键词] 铝电解; 阳极炭渣; 电解质回收; 焙烧; 碳燃烧; 资源再利用

[中图分类号] TF812; X758 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2024)02-0107-07

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2024.02.014

## 0 引言

铝电解的碳阳极由于长期受到电解质熔体的化学腐蚀和侵蚀,表面骨料产生选择性氧化和非均匀燃烧,脱落到电解液中形成阳极炭渣<sup>[1]</sup>。大量阳极炭渣的存在会导致槽电压升高,能耗增加,电解质电阻增大形成热槽,对电解槽的使用寿命和稳定运行造成危害<sup>[2]</sup>。由于碳阳极材料、规格、打捞方式、使用时间等的不同,阳极炭渣的组成有很大差异,其中氟化盐含量很高,约占总量的 60%~70%。阳极炭渣的主要成分是冰晶石、亚冰晶石和碳,还有少量的  $Li_3AlF_6$ 、 $K_3AlF_6$ 、 $Na_3AlF_6$ 、NaF、 $AlF_3$ 、 $CaF_2$ 、 $SiO_2$ 、 $Al_2O_3$ 、 $MgF_2$  等<sup>[3-4]</sup>。目前阳极炭渣主要以堆存的方

式暂存,导致其中的氟化物对水和土壤产生了巨大污染,被国家列为危险固体废物<sup>[5-9]</sup>。

据统计,每生产 1 t 原铝,约产生 10 kg 的阳极炭渣,2022 年我国原铝产量为 4 021 万 t,约产出 40.21 万 t 阳极炭渣,带出 24.13 万 t 电解质,造成企业经济效益的损失<sup>[10-11]</sup>。可见,阳极炭渣的再利用是影响铝电解产业可持续绿色发展的一个限制性环节。阳极炭渣的处理方法有湿法处理和火法处理。湿法处理包括浮选法、酸浸法和碱浸法<sup>[12-15]</sup>等,均存在回收产品纯度低和二次污染的问题。火法处理主要包括焙烧法<sup>[16]</sup>、流化床燃烧法<sup>[17]</sup>和真空冶金<sup>[18]</sup>,然而流化床燃烧法和真空冶金由于成本和技术上的原因,难以实现工业化应用。焙烧法虽然浪费了碳质材料,但具有回收率高、处理量大,电解质可直接返回电解槽使用的优势<sup>[16]</sup>。

本文采用焙烧法回收阳极炭渣中的电解质,通过相关化学反应的吉布斯自由能计算,分析焙烧工艺的可行性;设计单因素焙烧实验,研究阳极炭渣焙烧的最佳工艺条件,为阳极炭渣的资源化利用提供

[收稿日期] 2023-12-10

[第一作者] 段中波(1987—),男,甘肃酒泉人,本科,工程师,主要从事铝冶炼新技术研究及科技合作管理方面的工作。

[通信作者] 王胜(1971—),男,甘肃白银人,主要从事有色冶金废渣高值化再利用研究。

[基金项目] 嘉峪关市科技局“揭榜挂帅”项目(21-01)。

技术参考。

### 1 试验介绍

#### 1.1 试验方法

试验所用阳极炭渣由甘肃某电解铝厂提供,经破碎、筛分后,留取 - 100 目 (165 μm) 颗粒,120 °C 下干燥 24 h。称取 30 g 阳极炭渣粉末放入瓷舟中置于马弗炉中,以不同升温速率 (2.5 °C/min、3 °C/min、3.5 °C/min、4 °C/min、4.5 °C/min、5 °C/min) 升温到设定的温度 (760 °C、780 °C、800 °C、820 °C、840 °C、860 °C),保温一定的时间 (0.5 h、1 h、1.5 h、2 h、2.5 h、3 h) 后随炉冷却至室温,最后称量、破碎、研磨、取样,并进行表征分析。

阳极炭渣焙烧的碳脱除率、失重率以及电解质回收率的计算分别见式 (1)、(2)、(3)。

$$\eta = \left( 1 - \frac{m_2 \omega_2}{m_1 \omega_1} \right) \times 100\% \quad (1)$$

式中:η 为碳的脱除率,% ;m<sub>1</sub> 为阳极炭渣质量,g ;m<sub>2</sub> 为焙烧后料的质量,g ;ω<sub>1</sub> 为阳极炭渣中碳的含量,% ;ω<sub>2</sub> 为焙烧后料中碳的含量,% 。

$$\beta = \frac{(W_1 - W_2)}{W_1} \times 100\% \quad (2)$$

表 1 阳极炭渣主要元素含量

Table 1 Main elemental content of anode carbon residue

成分	C	F	Al	Na	Mg	K	Ca	Li	其他
含量	16.99	42.90	11.69	19.77	0.28	1.58	2.43	0.93	3.43

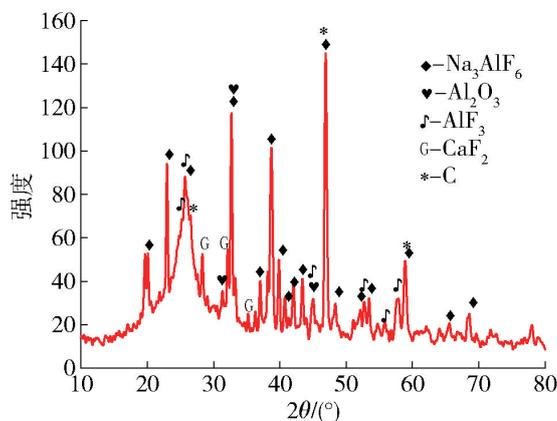


图 1 阳极炭渣的 XRD 物相分析

Fig.1 XRD physical phase analysis of anode carbon residue

由图 2 可见,电解质含量较低区域,颗粒的表面和间隙随机附着了许多明亮的含有白色颗粒的不规

式中:β 为焙烧失重率,% ;W<sub>1</sub>、W<sub>2</sub> 分别为阳极炭渣焙烧前后的质量,g。

$$\gamma = \frac{M_2}{M_1} \times 100\% \quad (3)$$

式中:γ 为电解质回收率,% ;M<sub>1</sub> 为阳极炭渣中的电解质含量,g ;M<sub>2</sub> 为焙烧后料中电解质含量,g。

#### 1.2 表征方法

元素含量采用 X 射线荧光光谱 (XRF, XRF1800,日本岛津公司) 分析;形态和元素组成采用场发射扫描电子显微镜 (SEM, MIRA3, TESCAN 有限公司,捷克共和国)-能量色散光谱仪 (EDS, X-Max20, OXFORD 仪器有限公司,英国) 分析;晶体结构采用 X 射线衍射仪 (XRD, D/Max 2500, Rigaku, 日本) 分析;热分解行为采用热重分析仪 (TG, STA-449F3, Netzsch 公司,德国) 分析。

#### 1.3 试验原料

阳极炭渣的化学成分和 XRD 分析结果见表 1 和图 1,SEM-EDS 见图 2。由表 1 可知,阳极炭渣主要由 C、F、Al、Na、K、Ca 等元素组成,其中 C 元素的质量分数接近 17%。由图 1 可知,阳极炭渣的主要成分为 C、Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub>、CaF<sub>2</sub>、AlF<sub>3</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。

则电解质,使其紧密规则的层状结构变得疏松;电解质含量较高的区域,电解质将该区域内少量碳完全包裹。

#### 1.4 热力学分析

焙烧过程可能发生的反应见式 (4) ~ (10),采用 Factsage8.1 软件的 Reaction 模块绘制反应的标准吉布斯自由能变 (ΔG<sup>θ</sup>) 和温度 (T) 之间的关系,见图 3。由图 3 可知,碳氧反应为主要反应,计算结果表明,100 ~ 1 200 °C 范围内反应 (1) 吉布斯自由能变均小于 0,而 Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> 的分解反应、NaF 和 Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> 产生 HF 气体的相关反应不满足热力学条件,含钠氟化物不会反应消耗。温度大于 831 °C 时,AlF<sub>3</sub> 与 SiO<sub>2</sub> 生成 Al<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub>,电解质体系会引入杂质,不利于电解质回收。综合上述分析,通过焙烧阳极炭渣中的碳回收电解质在热力学上是可行的。

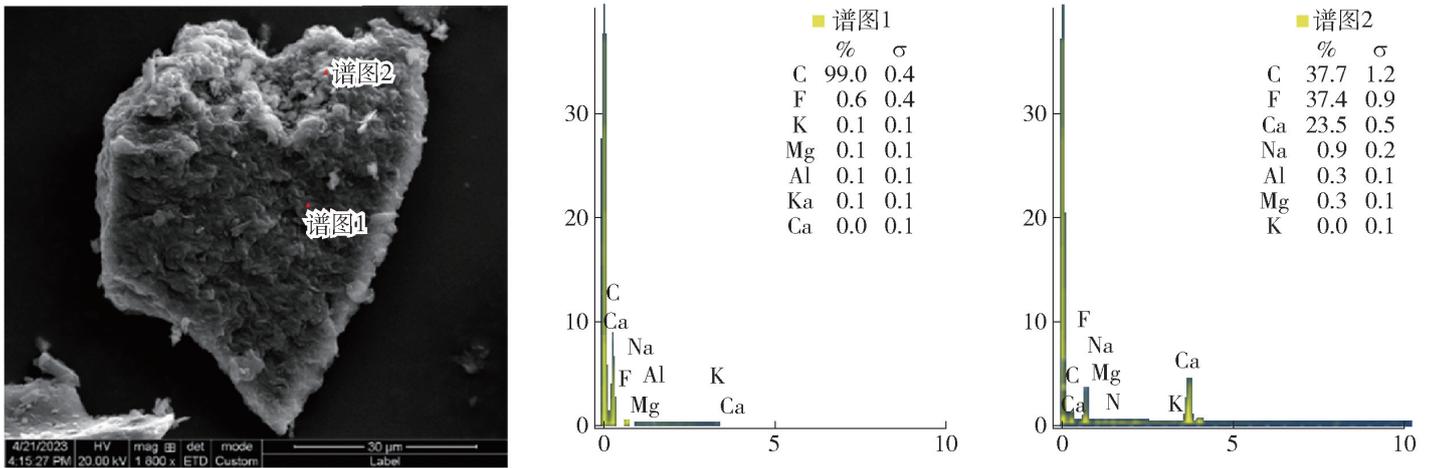
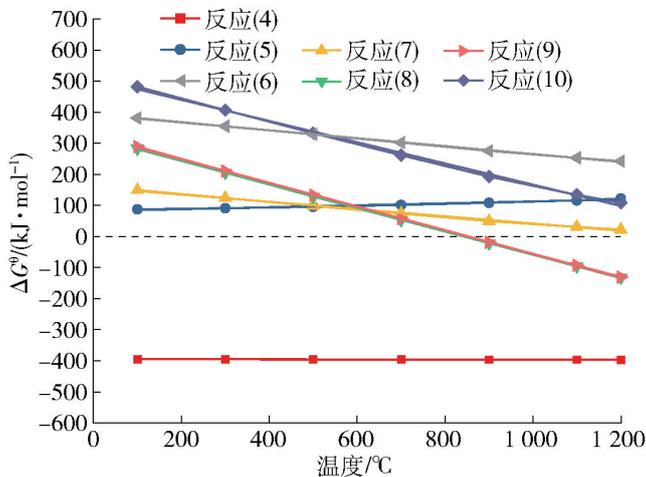
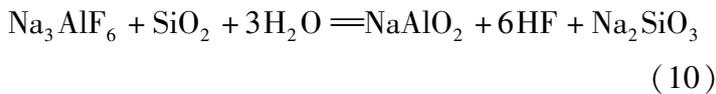
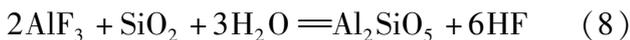
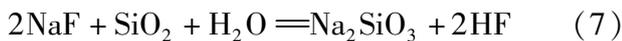


图2 阳极炭渣的SEM-EDS图

Fig. 2 SEM-EDS image of anode carbon residue

图3 焙烧过程可能的化学反应  $\Delta G_T^\theta - T$  关系Fig. 3 Possible chemical reactions during roasting  $\Delta G_T^\theta - T$  relationship

降趋势增大,失重率为 11.39%,部分电解质吸热熔化使碳氧反应放热变缓,DSC 曲线产生凹型,表明电解质对阳极炭渣焙烧存在着抑制作用;焙烧温度为 891 ~ 1 051 °C 时,质量损失变缓,DSC 出现 2 个放热峰,部分电解质熔化和挥发,释放部分被包裹的碳,发生碳氧反应形成放热峰;焙烧温度为 1 082 ~ 1 200 °C 时,阳极炭渣失重加剧,Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> 大量挥发,DSC 曲线快速上升。结合表 1 及 TG 曲线,为了使包裹碳完全燃烧,同时避免电解质的挥发,焙烧温度应低于 891 °C。TG-DTG-DSC 分析表明,焙烧温度为 760 ~ 860 °C,失重以碳氧反应为主,失重速率增加且放热最大,有利于阳极炭渣焙烧。

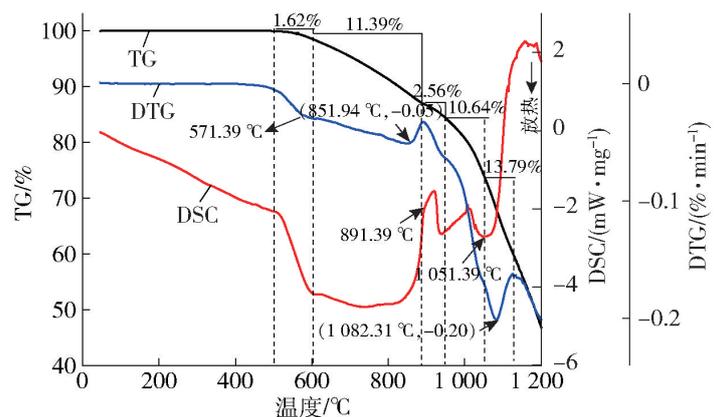


图4 阳极炭渣焙烧 TG-DTG-DSC 曲线

Fig. 4 TG-DTG-DSC curve for anode carbon slag roasting

## 2 试验结果与讨论

### 2.1 TG-DTG-DSC 分析

阳极炭渣热分解过程的 TG-DTG-DSC 曲线见图 4。由图 4 可知,焙烧温度为 500 ~ 600 °C 时,阳极炭渣质量损失为 1.62%,说明阳极炭渣达到燃点后开始燃烧;焙烧温度为 600 ~ 891 °C 时,质量损失下

### 2.2 焙烧试验研究

#### 2.2.1 焙烧温度对电解质回收影响规律研究

固定试验条件升温速率 5 °C/min、焙烧时间 1.5 h,考察不同焙烧温度对阳极炭渣失重率、回收率、碳脱离率的影响,结果见图 5。当温度由 800 °C 升高到

860 °C 时,失重率与碳脱除率随着温度的升高逐渐降低,电解质回收率维持在 90% 左右;800 °C 下碳的脱除率达到最大值 98.17%,820 °C 阳极炭渣失重率达到最大值,两者数据表现出差异是因为温度快速上升到 800 °C 以上时,部分电解质固态逐渐向液态转变,导致物料黏度增加、流动性变差,阳极炭渣焙烧受到抑制,致使碳脱除率逐渐下降。综合考虑,选择焙烧温度为 800 °C 较为适宜。

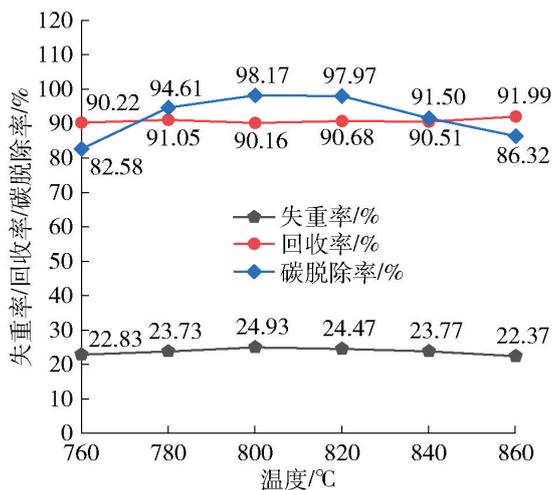


图 5 温度对失重率、回收率和碳脱除率的影响

Fig. 5 Effect of temperature on weight loss, recovery and carbon removal

### 2. 2. 2 升温速率对电解质回收影响规律研究

固定试验条件焙烧温度 800 °C、焙烧时间 1.5 h,考察不同升温速率对阳极炭渣失重率、回收率、碳脱除率的影响,结果见图 6。阳极炭渣的失重率随着升温速率的提高而逐渐降低,碳脱除率受升温速率的升高影响较小,而电解质回收率随着升温速率的增加逐渐升高。这是由于升温速率的增加,使阳极炭渣自身的温度与环境温度存在差异,即出现热滞后现象,导致阳极炭渣在焙烧过程中氟的挥发量减少<sup>[19]</sup>。高的升温速率有利于电解质回收率的提高,所以较佳升温速率选择 5 °C/min。

### 2. 2. 3 保温时间对电解质回收影响规律研究

固定试验条件焙烧温度 800 °C、升温速率 5 °C/min,考察不同保温时间对失重率、回收率、碳脱除率的影响,结果见图 7。随着保温时间的延长,保温时间为 1.5 h 时碳脱除率达到最大值 96.32%,此时电解质回收率为 90.63%;随着保温时间的增加,电解质碳脱除率基本趋于稳定,失重率呈现上升趋势,回收率逐渐降低。上述数据表明,保温时间延长会导致电解质挥发量增加,使得失重增加<sup>[20]</sup>。综合

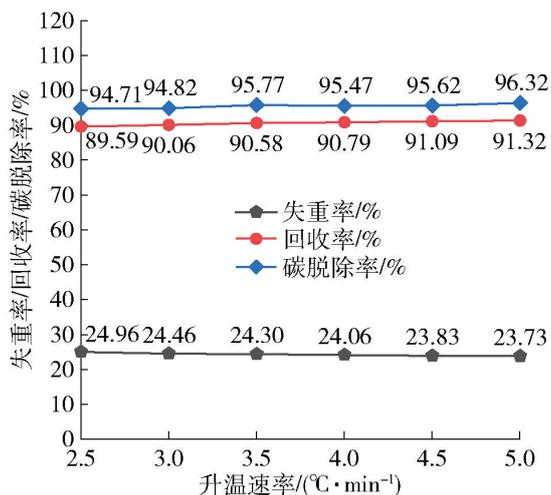


图 6 升温速率对失重率、回收率、碳脱除率的影响

Fig. 6 Effect of temperature increase rate on weight loss, recovery and carbon removal

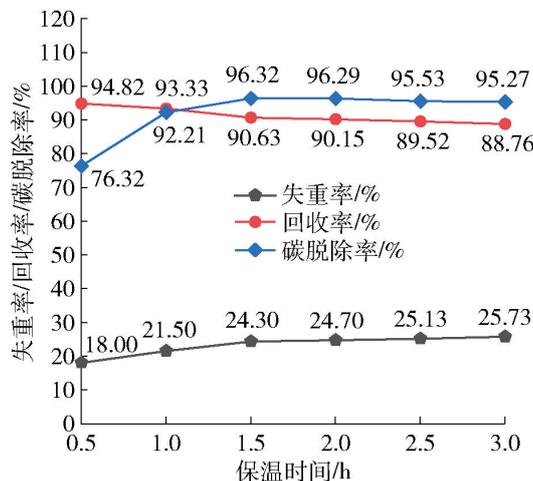


图 7 保温时间对失重率、回收率、碳脱除率的影响

Fig. 7 Effect of holding time on weight loss, recovery and carbon removal

考虑,选择较佳保温时间为 1.5 h。

### 2. 2. 4 回收电解质的表征分析

回收的电解质微观形貌分析结果见图 8。图中结果表明,高温焙烧处理后未观察到碳层,EDS 结果显示回收电解质中有 F、Al、Na、K、Ca、Mg 等元素。这些结果表明,经过高温焙烧后,阳极炭渣中与氟化物相互嵌入的碳层消失了,这说明本文焙烧工艺可以实现电解质的提纯和富集。

阳极炭渣与回收电解质的物相和元素含量的对比分析见图 9。由图 9(a)可知,阳极炭渣焙烧后,C 衍射峰被 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 衍射峰取代,CaF<sub>2</sub> 对应的衍射峰变强,AlF<sub>3</sub> 的衍射峰消失,出现了 K<sub>2</sub>NaAlF<sub>6</sub> 和 LiF 的衍射峰。这一结果与图 4(b)中的 EDS 分析一致,表明焙烧过程中可以实现各种氟化物的富集。由

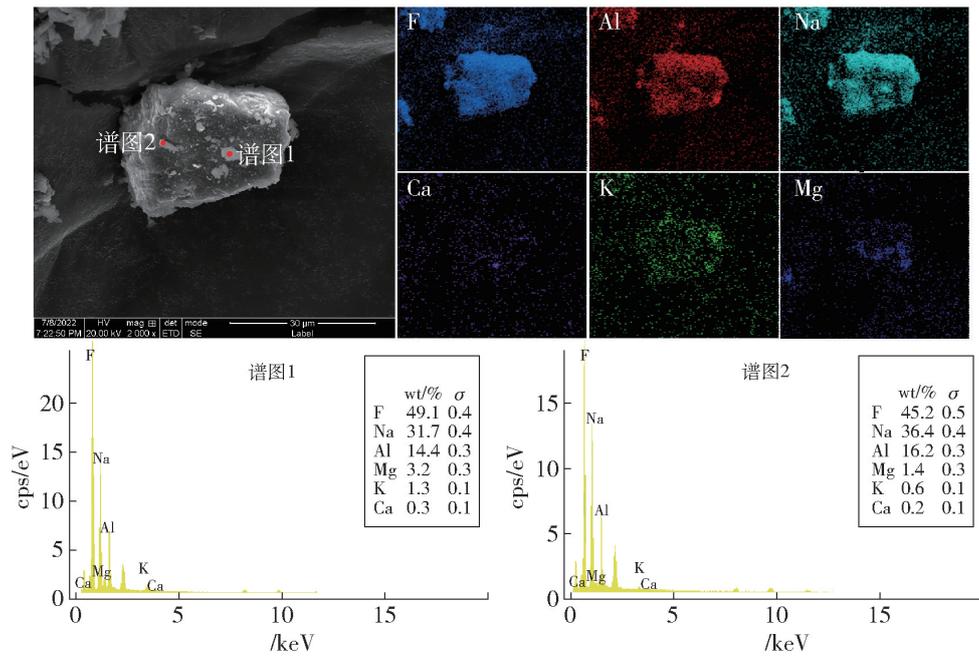


图8 回收电解质 SEM-EDS 分析

Fig. 8 Surface morphology of the recovered electrolyte

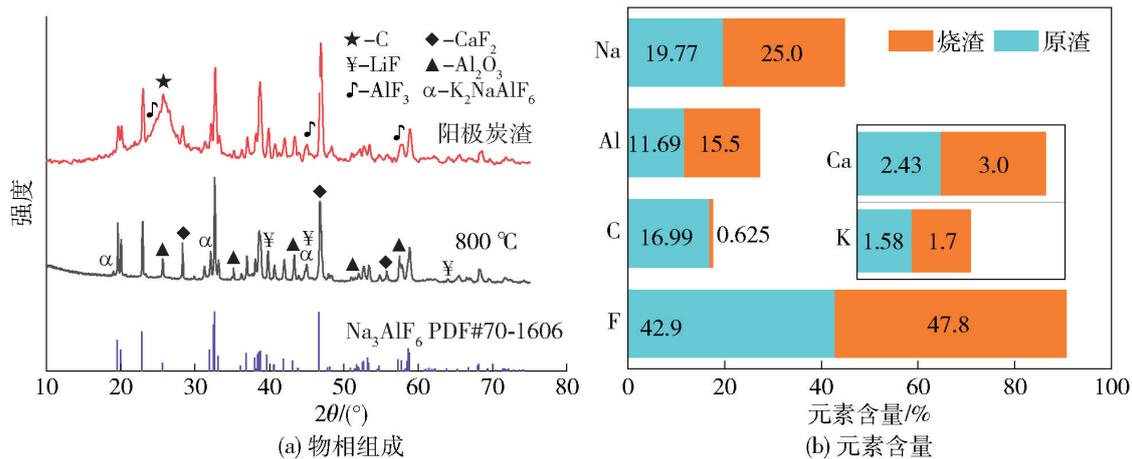


图9 阳极炭渣与回收电解质的物相组成和元素含量对比

Fig. 9 Comparison of physical phase and elemental content of the anode carbon residue with the recovered electrolyte

图9(b)可知,阳极炭渣焙烧后F、Al、Na、K、Ca的含量增加,其中K、Ca主要以 $K_2NaAlF_6$ 和 $CaF_2$ 形式存在。上述分析结果表明,焙烧工艺可有效去除阳极炭渣中的碳质材料,实现电解质的富集,其中的碳含量由16.99%降低到0.63%。

采用热分析方法测试电解质的初晶点,其中NaCl的熔点为801.5℃,理论值为801℃,结果见图10。电解质测试初晶温度为921.5℃,与工业使用电解质初晶温度924℃相差了2.5℃。这是由于阳极炭渣焙烧过程伴随着氟的挥发,导致成分组成发生变化。由于现代工业电解槽过热度为8~12℃,回收电解质的初晶温度完全满足工业应用要求。

### 3 结论

本文以甘肃某电解铝厂提供的阳极炭渣为原料,对其进行了表征分析,并在焙烧温度范围的化学反应吉布斯自由能变分析和TG-DSC分析的基础上,进行了单因素焙烧试验,得到以下主要结论。

1) 阳极炭渣主要由C、 $Na_3AlF_6$ 、 $CaF_2$ 、 $AlF_3$ 、 $Al_2O_3$ 组成。电解质含量较低区域,电解质附着在颗粒的表面和间隙;电解质含量较高的区域,电解质包裹了碳质材料。

2) 阳极炭渣焙烧过程中相关的化学反应吉布斯自由能表明,焙烧法回收其中的电解质是可行的。

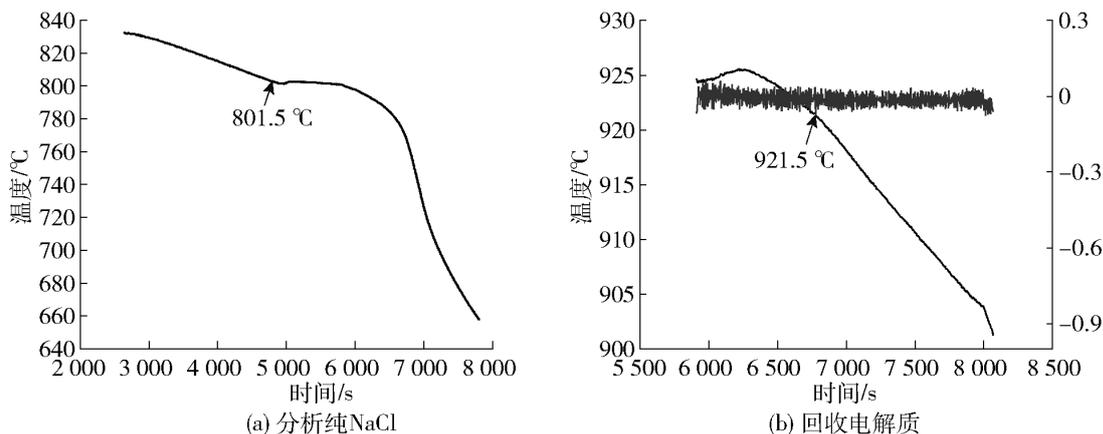


图 10 分析纯 NaCl 和回收电解质的步冷曲线

Fig. 10 Electrolyte step cooling curves for (a) analytical pure NaCl and (b) recovery

单因素焙烧研究表明,焙烧为温度 800 °C、升温速率为 5 °C/min、保温时间为 1.5 h 时,阳极炭渣的失重率为 24.3%,电解质碳脱除率为 96.32%,回收率为 90.63%。

3) 回收电解质中出现  $K_2NaAlF_6$  和 LiF 新相, Na、Al、F、Mg、Ca、K 元素分布均匀且含量增加,电解质实现纯化和富集,初晶温度为 921.5 °C,满足工业应用要求。

#### [参考文献]

- [1] HUANG P, ZHU R, ZHANG X, et al. A milliseconds flash joule heating method for the regeneration of spent cathode carbon[J]. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 2022, 57(1): 33–44.
- [2] 郭志华. 铝电解生产过程中碳渣产生的根源及应对措施[J]. *低碳世界*, 2020, 10(5): 16–17.  
GUO Zhihua. The root causes and countermeasures of carbon slag generation in aluminum electrolysis production process [J]. *Low Carbon World*, 2020, 10(5): 16–17.
- [3] MAO S, ZHANG Q. Occurrence state of carbon and electrolyte in anode carbon residue from electrolytic aluminum[J]. *Frontiers in Materials*, 2021, 8(3): 1–14.
- [4] YANG K, GONG P, TIAN Z, et al. Carbon recovered from spent carbon cathode of aluminum reduction cell towards its valorisation as negative electrodes for lithium ion batteries[J]. *Diamond and Related Materials*, 2020, 109(9): 1–6.
- [5] YONG Y, HUA W, JIAN H H. Co-treatment of electroplating sludge, copper slag, and spent cathode carbon for recovering and solidifying heavy metals [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 417(17): 1–10.
- [6] ANDRADE-VIEIRA L F, DAVIDE L C, GEDRAITE L S, et al. Genotoxicity of SPL (spent pot lining) as measured by tradescantia bioassays[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2011, 74(7): 2065–2069.
- [7] ANDRADE L F, DAVIDE L C, GEDRAITE L S. The effect of

cyanide compounds, fluorides, aluminum, and inorganic oxides present in spent pot liner on germination and root tip cells of *Lactuca sativa* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, 73(4): 626–631.

- [8] PALMIERI M J, ANDRADE-VIEIRA L F, TRENTO M V C, et al. Cytogenotoxic effects of spent pot liner (SPL) and its main components on human leukocytes and meristematic cells of *Allium cepa*[J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2016, 227(4): 1–10.
- [9] LI N, XIE G, WANG Z X, et al. Recycle of spent potlining with low carbon grade by floatation[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 881–883: 1660–1664.
- [10] 刘艳, 胡广艳, 孙伟, 等. 铝电解槽炭质固体废弃物综合利用进展[J]. *矿产保护与利用*, 2021, 41(1): 166–171.  
LIU Yan, HU Guangyan, SUN Wei, et al. Progress in comprehensive utilization of carbonaceous solid waste from aluminum electrolysis cells [J]. *Mineral Conservation and Utilization*, 2021, 41(1): 166–171.
- [11] NUNEZ P. Sustainable spent pot line management guidance[J]. *Light Metals*, 2020: 1225–1230.
- [12] LI H, WANG J, HOU W, et al. The study of carbon recovery from electrolysis aluminum carbon dust by froth floatation [J]. *Metals*, 2021, 11(1): 1–15
- [13] 梅向阳, 李俊, 于站良. 浮选法回收利用碳渣实验研究[J]. *轻金属*, 2016(4): 28–30.  
MEI Xiangyang, LI Jun, YU Zhanliang. The research on recycling carbon residue by floatation process[J]. *Light Metals*, 2016(4): 28–30.
- [14] ROBSHAW T J, BONSER K, COXHILL G, et al. Development of a combined leaching and ion-exchange system for valorisation of spent potlining waste[J]. *Waste and Biomass Valorization*, 2020, 11(2): 5467–5481.
- [15] SHI Z, WEI L I, HU X, et al. Recovery of carbon and cryolite from spent pot lining of aluminium reduction cells by chemical leaching[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22(1): 222–227.

- [16] 陈喜平, 赵淋, 罗钟生. 回收铝电解炭渣中电解质的研究[J]. 轻金属, 2009(12): 21-25.  
CHEN, X P, ZHAO, L, LUO, Z S. Study on Recycling Process for Electrolyte in Carbon Dust from Reduction Cells[J]. Light Metals, 2009(12): 21-25.
- [17] 周峻宇, 伍成波, 张江斌, 等. 电解铝炭渣的特性及流化床回收研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2014, 12:16-18.  
ZHOU J Y, WU C B, ZHANG J B, et al. Study of characteristic of carbon residue from electrolytic aluminum and its fluidization recovery. Nonferrous Met (Smelting Part), 2014(12): 16-18.
- [18] 柴登鹏, 候光辉, 黄海波. 真空冶金法处理铝电解碳渣试验研究[J]. 轻金属, 2016(4):25-27.  
CHAI D P, HOU G H, HUANG H B. Experimental study on the treatment of aluminum reduction carbon residue by vacuum metallurgy[J]. Light Metals, 2016, 4, 25-27.
- [19] ZOU C, ZHANG L, CAO S, et al. A study of combustion characteristics of pulverized coal in O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O atmosphere [J]. Fuel, 2014, 115(1):312-320.
- [20] 齐庆杰, 刘建忠, 曹欣玉, 等. 煤燃烧过程中氟析出特性与生成机理[J]. 燃料化学学报, 2003, 31(5):400-404.  
QI Qingjie, LIU Jianzhong, CAO Xinyu, et al. Fluorine release characteristics and generation mechanism during coal combustion process[J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2003, 31(5): 400-404.

### Recovery of electrolytes from anode carbon residue by roasting method

DUAN Zhongbo<sup>1</sup>, WEN Junde<sup>2</sup>, LIU Haifeng<sup>1</sup>, ZHANG Yanrong<sup>1</sup>, LI Zhenzhong<sup>1</sup>, BU Xudong<sup>2</sup>, WANG Sheng<sup>2</sup>

(1. Gansu Dongxing Aluminum Industry Co. Ltd, Jiayuguan 735100, China;

2. School of Materials Science and Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Anode carbon slag is a hazardous waste generated during the aluminum electrolysis process, mainly composed of cryolite, subglotite, and carbon. Currently, it is mainly stored in a temporary manner through stacking, which not only pollutes the environment but also causes resource waste. This article uses anode carbon slag provided by an electrolytic aluminum plant in Gansu as raw material, and conducts characterization analysis on it. Based on thermodynamic analysis and TG-DSC analysis within the calcination temperature range, a single factor calcination test is conducted, and the following main conclusions are obtained. In areas with low electrolyte content in anode carbon slag, electrolytes adhere to the surface and gaps of particles, while higher areas wrap around carbonaceous materials; The Gibbs free energy analysis of chemical reactions indicates that the roasting method is feasible for recovering electrolytes from anode carbon slag; The optimal roasting process obtained from the single factor experiment is a temperature of 800 °C, a heating rate of 5 °C/min, and a holding time of 1.5 hours. Under these conditions, the weight loss rate of anode carbon slag is 23.73%, the removal rate of electrolyte carbon is 96.17%, and the recovery rate is 91.32%; K<sub>2</sub>NaAlF<sub>6</sub> and LiF new phases appeared in the recovered electrolyte, with a uniform distribution and increased content of Na, Al, F, Mg, Ca, and K elements. The initial crystallization temperature of the electrolyte was 921.5 °C, which can meet the industrial application requirements of aluminum electrolysis.

**Key words:** aluminum electrolysis; anode carbon slag; electrolyte recovery; roasting; carbon combustion; resource reuse