

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2023.02.017

高温焙烧法处理铝电解废旧阴极炭块

周流舟¹, 陈毅¹, 李历棋¹, 张恭文¹, 罗国超¹, 姚桢^{1,2}

(1. 贵州师范大学材料与建筑工程学院, 贵阳 550025;

2. 贵州省铝电解炭素材料工程技术研究中心, 贵阳 550025)

摘要: 废旧阴极炭块的无害化与资源化已成为制约铝电解行业绿色可持续发展的资源环境难题。利用高温焙烧法处理废旧阴极炭块, 基于不同粒度废旧阴极炭块的工业成分和浸出毒性, 探索骨料粒度和焙烧温度对高温焙烧处理效果的影响。结果表明, 随着骨料粒度的增大和焙烧温度的提高, 回收炭材料碳含量逐渐提高, 可溶性氟化物含量大幅降低。在最佳高温焙烧参数下, 回收炭材料的碳含量由 65.21% 提高至 94.52%, F^- 浸出浓度由 4 018.55 mg/L 降至 7.63 mg/L。同时利用化学沉淀法对气态冷凝产物进行固化处理, 提取高纯度的 CaF_2 产品, 避免高浓度含氟烟气二次污染。通过高温焙烧法处理铝电解废旧阴极炭块具备技术可行性。

关键词: 铝电解; 废旧阴极炭块; 高温焙烧; 回收炭材料; 浸出毒性

中图分类号: TF821; X758

文献标志码: A

文章编号: 1007-7545(2023)02-0111-06

Treatment of Aluminum Electrolytic Spent Carbon Cathode via High-temperature Roasting

ZHOU Liu-zhou¹, CHEN Yi¹, LI Li-qi¹, ZHANG Gong-wen¹, LUO Guo-chao¹, YAO Zhen^{1,2}

(1. School of Materials and Architectural Engineering, Guizhou Normal University, Guiyang 550025, China;

2. Guizhou Engineering Research Center for Carbon Materials Aluminum Electrolysis, Guiyang 550025, China)

Abstract: The harmless resource utilization of spent carbon cathodes has become an environmental problem restricting the green and sustainable development of aluminum industry. Based on the industrial composition and leaching toxicity of spent carbon cathodes with different aggregate particle sizes, effects of aggregate particle size and roasting temperature on high-temperature roasting treatment of spent carbon cathodes were explored. The results show that with the increase of aggregate particle size and roasting temperature, the carbon content of recovered carbon material rises continuously and soluble fluoride content drops greatly. Under the optimal high-temperature roasting parameters, carbon content of the recovered carbon material rises from 65.21% to 94.52%, and the fluorine ion concentration drops from 4 018.55 mg/L to 7.63 mg/L. Meanwhile, the condensed gas product was cured by chemical precipitation method and extracted high purity CaF_2 product to avoid secondary pollution of high concentration fluorine-containing flue gas. It is feasible to treat spent carbon cathodes of aluminum electrolysis via high-temperature roasting.

Key words: aluminum electrolysis; spent carbon cathodes; high temperature roasting; recovered carbon; leaching toxicity

收稿日期: 2022-10-08

基金项目: 贵州省科学技术基金(黔科合基础-ZK[2022]一般 321); 贵州省科技计划项目(黔科合支撑[2020]4Y036 号; 贵州省大学生创新创业训练计划项目(S202110663038))

作者简介: 周流舟(2000-), 女, 本科生; 通信作者: 姚桢(1987-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师

铝电解槽大修会不可避免地产生大量蕴含优质石墨炭资源的废旧阴极炭块,同时含有20%~30%的氟化物(Na_3AlF_6 、 CaF_2 、 NaF)和0.2%~1%的氰化物(NaCN 、 $\text{Na}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ 、 $\text{Na}_4\text{Fe}(\text{CN})_6$)^[1-2]。铝电解废旧阴极炭块中可溶氟/氰化物的浸出浓度远超国家标准(GB 5085.3—2007)的排放限值,已在2021年被列入国家危险废物名录^[3]。相关研究表明^[4-6],露天堆放的废旧阴极炭块会污染土壤和水体,导致严重的氟/氰污染,还会造成植物大量死亡和变异,与水反应还会产生大量有害气体,对于生态环境和人类健康具有严重威胁。因此,废旧阴极炭块已成为铝电解工业绿色发展的限制性难题,必须在最大限度减少其环境污染的同时回收优质石墨炭和高值氟化盐等有价值资源。

鉴于此,国内外学者开发了多种废旧阴极炭块无害化与资源化回收技术,其中最典型的为湿法处理和火法处理。湿法处理包括浮选法、碱-酸浸出法、石灰水浸泡法等,火法处理包含回转窑焙烧法、真空蒸馏法、超高温石墨化法等^[7-10]。

李楠^[11]利用浮选法回收废旧阴极炭块中的电解质和碳,在最佳浮选条件下,精矿碳品位为82.3%,碳回收率为88.5%,尾矿碳含量为6.8%,电解质回收率为89.3%。李伟^[12]通过碱酸两步联合浸出法处理废旧阴极炭块,同时将浸出液中所含高价电解质组分进行回收利用,回收炭纯度达96.4%,经沉降回收得到纯度为95%的冰晶石和氟化钙产品。上述湿法处理手段充分利用了废旧阴极炭块所含组分的润湿性与溶解性差异进行无害化与资源化处理,但存在处理成本高、耗时长,且会产生HCN、HF等毒性气体,存在二次污染风险,同时会对设备造成严重腐蚀。相较而言,火法处理具有工艺流程简单、单位时间处理量大、毒性物质有效消除等技术优势^[13-14]。LI等^[15]通过真空蒸馏法处理废旧阴极炭块,回收氟化物(Na_3AlF_6 、 NaF 、 LiF),同时有效改善了废旧阴极炭块阴极炭块的含碳量。WANG等^[16]利用真空蒸馏法处理废旧阴极炭块,发现真空蒸馏法可将废旧阴极炭块中 Na_3AlF_6 、 NaF 和金属Na有效分离,提高废旧阴极炭块碳含量,碳含量可达91.20%以上,杂质主要是 CaF_2 和 Al_2O_3 。但目前关于常压状态下火法处理废旧阴极炭块的研究相对较少。亟需开发一种适用于铝电解废旧阴极炭块清洁处置与资源回收的火法处理工艺。

因此,本文利用高温焙烧工艺处理废旧阴极炭

块,探索工艺参数对废旧阴极炭块高温焙烧处理效果的影响规律,并通过添加含钙固化剂对冷凝产物进行无害化处置,回收含氟有价值产品,从而实现废旧阴极炭块中碳和氟化盐等有价值组分的综合回收。研究成果有望为铝电解废旧阴极炭块的清洁处置与资源回收提供理论依据。

1 试验

1.1 试验原料

试验所用铝电解废旧阴极炭块取自某公司400 kA破损电解槽。

1.2 试验流程

试验流程主要分为原料制备、高温焙烧及气态冷凝产物处理三个环节。

原料制备:对废旧阴极炭块进行粗碎处理,称取一定质量粗碎后的废旧阴极炭块置于制样粉碎机(FM-1)中进行细碎,随后通过振动筛分机(ZBSX-92A)筛取-5+3、-3+1、-1+0.15、-0.15 mm四种粒度区间的样品,并放入电热鼓风干燥箱在 (110 ± 10) °C干燥24 h备用。

高温焙烧:称取8 g废旧阴极炭块放入带盖石墨坩埚,随后将石墨坩埚置于高温管式炉(GSL-1750X-KS),设置相应的焙烧温度(1 200、1 300、1 400、1 500、1 600 °C)和保温时间(3 h)进行高温焙烧,并用锥形瓶在高温管式炉出气端收集尾气;待高温焙烧结束后,取出焙烧试样进行干燥,用于碳含量和浸出毒性测定。

气态冷凝产物处理:取出少量气态冷凝产物溶于水溶液进行氟离子浓度检测,并将50 mL滤液加入100 mL烧杯,在 $\text{pH}=10$ 、 $\text{Ca}^{2+}/\text{F}^{-}=8$ (质量比)、搅拌时间30 min、搅拌速率300 r/min、静置时间24 h的条件下对气态冷凝产物进行固化处理,随后用砂芯过滤装置进行固液分离,滤渣干燥后用于XRD检测,滤液进行氟离子浓度检测。

1.3 分析测试

碳含量测定:称取一定质量的废旧阴极炭块或焙烧试样放入刚玉方舟(100 mm×60 mm)并均匀铺平,将其置于马弗炉(SX-10-12),在 (800 ± 10) °C灼烧4 h,灼烧结束后取出放入干燥皿中冷却,称量残余灰分质量,计算原料和焙烧试样的碳含量。

浸出毒性测定:按照《固体废物浸出毒性浸出方法—硫酸硝酸法》(HJ/T 299—2007)标准制备浸出液,用移液管移取1 mL浸出液至50 mL容量瓶,随后用胶头滴管加入1滴溴甲酚绿溶液,待其变蓝后,

再加入一滴硝酸溶液(1:1),待其变黄后加入20 mL TISAB溶液,溶液恢复为蓝色,加入去离子水定容,摇匀后倒入烧杯,通过离子浓度计搭配氟离子选择电极(PXSJ-216F)测定废旧阴极炭块焙烧前后的 F^- 浸出浓度。

物相组成和元素含量分析:利用X射线衍射仪(XRD)测定废旧阴极炭块高温焙烧处理前后和提取 CaF_2 产品的物相组成,利用X射线荧光光谱仪(XRF)测定废旧阴极炭块高温焙烧处理前后的元素含量。

2 结果与讨论

2.1 废旧阴极炭块的工业成分与浸出毒性分析

2.1.1 废旧阴极炭块的工业成分分析

按照《铝用炭素材料检测方法》相关标准对不同粒度(-5+3、-3+1、-1+0.15、-0.15 mm)的废旧阴极炭块进行水分、灰分、挥发分及固定碳含量分析,结果如图1所示。从图1可以看出,随着颗粒粒度的降低,废旧阴极炭块的水分、挥发分及灰分含量均呈现逐渐增大的变化趋势。其中灰分含量的增加主要是由于废旧阴极炭块所含石墨碳具有润滑性难以粉碎,导致电解质组分更易在破碎过程中发生细化优先进入小颗粒^[17]。挥发分物质通常被包裹在颗粒内部,随着粒度的减小,有利于挥发性物质与焙烧环境充分接触,缩短气态迁移距离,从而造成挥发分含量增加^[18-19]。对于水分,主要是由于粒度降低会增加废旧阴极炭块的比表面积,同时会导致亲水性灰分含量增加,疏水性石墨炭含量减小,均会提高其与储存环境中水分的接触与吸附机率。

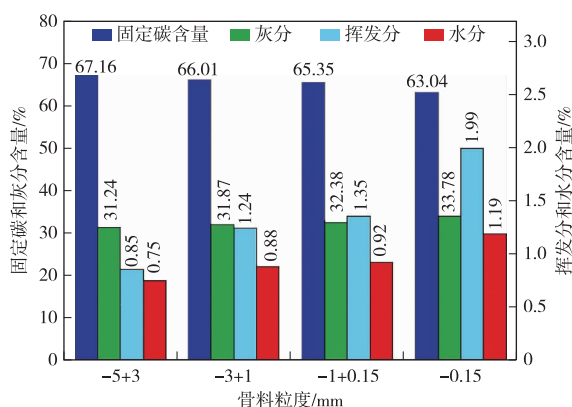


图1 废旧阴极炭块的工业成分分析

Fig. 1 Industrial compositions analysis of spent carbon cathodes

2.1.2 废旧阴极炭块的浸出毒性

不同粒度废旧阴极炭块的 F^- 浸出毒性测定结果表明,当骨料粒度分别为-5+3、-3+1、-1+0.15、-0.15 mm时, F^- 浸出浓度分别为2 591.97、2 994.92、3 574.14、4 018.55 mg/L。可以看出,随着骨料粒度的降低,废旧阴极炭块中 F^- 浸出浓度不断增大,与图1中灰分含量随骨料粒度的变化规律相一致,这是由于废旧阴极炭块的 F^- 浸出毒性来源于所含氟化钠遇水溶解。一方面,骨料粒度减小,灰分含量增加,导致氟化钠含量增加, F^- 浸出毒性增加;另一方面,骨料粒度减小有利于废旧阴极炭块内部嵌布的氟化钠暴露和剥离,从而促进其在浸出毒性测定过程中的充分溶解。此外,-0.15 mm颗粒的 F^- 浸出浓度最高,达到4 018.55 mg/L,远超过国家安全排放标准(100 mg/L),必须进行无害化处置以消除严重的环境污染风险。

2.2 高温焙烧处理废旧阴极炭块的工艺参数优化

2.2.1 骨料粒度对高温焙烧处理效果的影响

在焙烧温度为1 500 ℃、保温时间3 h、 Ar_2 气氛条件下,研究骨料粒度(-5+3、-3+1、-1+0.15、-0.15 mm)对废旧阴极炭块碳含量和 F^- 浸出浓度的影响,结果如图2所示。从图2可以发现,随着骨料粒度的增大,废旧阴极炭块的碳含量增加,当骨料粒度为-5+3 mm时,碳含量达到峰值92.16%。结合工业成分分析结果可知,骨料粒度越小,灰分含量越高,当焙烧条件相同时,高温焙烧体系提供的热量相同,灰分含量越低,更有利于非碳杂质的相态转化与热解逸出。此外,骨料粒度对于回收炭材料 F^- 浸出浓度影响较小,其中最高值为12.54 mg/L,最低值为9.23 mg/L,均远低于国家安全排放标准。图3为骨料粒度对回收炭材料物相组成的影响。可以看出,不同骨料粒度回收炭材料的XRD谱主要含有C和 CaF_2 的特征衍射峰,与其它骨料粒度相比较,粒度-0.15 mm的废旧阴极炭块经过高温焙烧处理后仍含有明显的 Al_2O_3 衍射峰,且在该粒度条件下,回收炭材料碳含量也仅为83.77%。因此,综合考虑最佳粒度为-5+3 mm。

2.2.2 焙烧温度

在骨料粒度为-5+3 mm、保温时间3 h、 Ar_2 气氛的条件下,研究焙烧温度对废旧阴极炭块中碳含量、 F^- 浸出浓度和物相组成的影响,结果如图4、图5所示。从图4可以看出,随着焙烧温度的升高,回收炭材料的碳含量逐渐增大, F^- 浸出浓度不断降低;结合图5可知,当焙烧温度为1 200 ℃时,回收

炭材料的 XRD 谱仍存在明显的 NaF 衍射峰,随着焙烧温度提高至 1 300 ℃时,NaF 特征衍射峰消失, F⁻ 浸出浓度也相应地由 2 477.56 mg/L 急剧降低至 276.82 mg/L。当焙烧温度继续提高至 1 600 ℃时,回收炭材料的碳含量和 F⁻ 浸出浓度均达到最佳值,分别为 94.52%、7.63 mg/L。上述结果表明,升高焙烧温度能够有效去除废旧阴极炭块中的氟化物,这是由于焙烧温度过低时(<1 200 ℃),焙烧过程中提供的热量不足以实现绝大多数氟化物的相态转化与热解逸出,而随着焙烧温度继续提高,高温焙烧体系能够提供充足的热量,且 XIE 等^[20]发现提高焙烧温度能够降低氟化物去除所需的表观活化能。因此,确定最佳焙烧温度为 1 600 ℃。

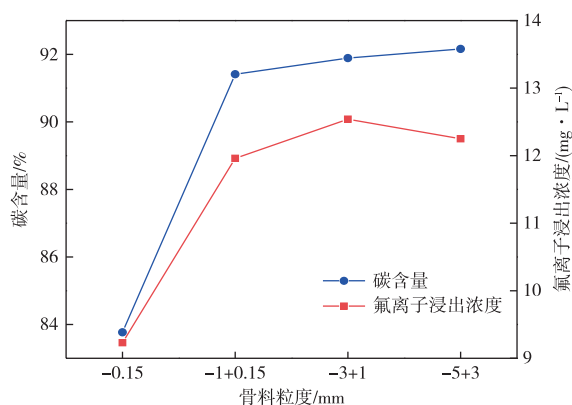


图2 骨料粒度对废旧阴极炭块高温焙烧处理效果的影响

Fig. 2 Effects of aggregate particle size on high-temperature roasting treatment of spent carbon cathodes

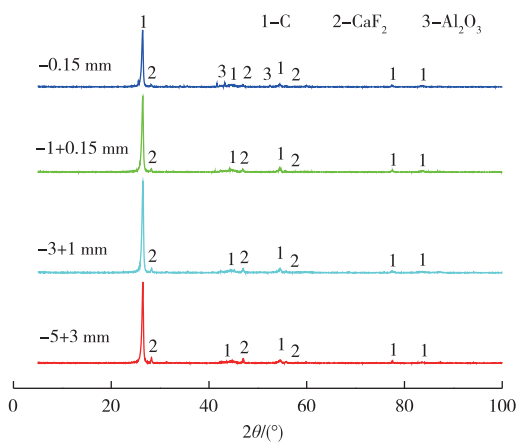


图3 骨料粒度对回收炭材料物相组成的影响
Fig. 3 Effects of aggregate particle size on phase composition of recovered carbon materials

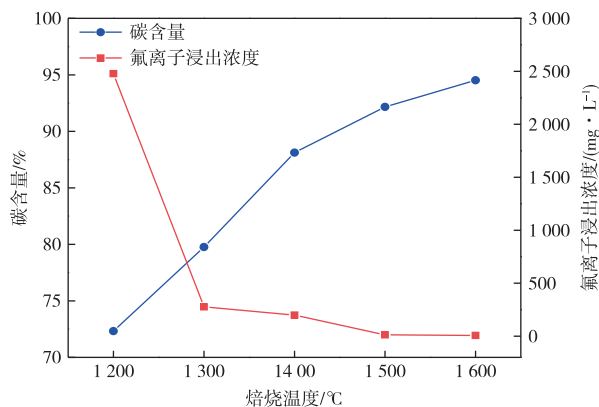


图4 焙烧温度对废旧阴极炭块高温焙烧处理效果的影响

Fig. 4 Effects of roasting temperature on high-temperature roasting treatment of spent carbon cathodes

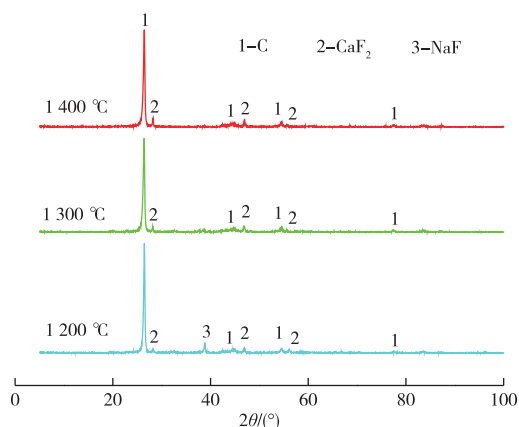


图5 焙烧温度对废旧阴极炭块物相组成的影响
Fig. 5 Effects of roasting temperature on phase composition of spent carbon cathodes

2.3 回收炭材料的表征

对未处理的废旧阴极炭块和最佳高温焙烧参数(骨料粒度-5+3 mm、焙烧温度 1 600 ℃、保温时间 3 h)下回收的炭材料进行 XRD 和 XRF 分析,结果分别如图 6、表 1 所示。从图 6 可以看出,未处理废旧阴极炭块的主要物相包括 C、CaF₂、NaF、Na₃AlF₆、Al₂O₃、NaAl₁₁O₁₇,经过高温焙烧处理后,Na₃AlF₆、NaF 的衍射峰消失,说明通过高温焙烧可将废旧阴极炭块中大部分无机物去除,但 CaF₂ 的特征衍射峰仍然存在,这是由于 CaF₂ 沸点高达 2 500 ℃,在非真空条件下难以去除^[21]。此外,由表 1 可知,废旧阴极炭块经过高温焙烧处理后,碳含量大幅度上升,F、Na、Al 元素含量明显降低,与 XRD 分析结

果一致,进一步说明通过高温焙烧处理可以有效脱除废旧阴极炭块所含电解质组分。

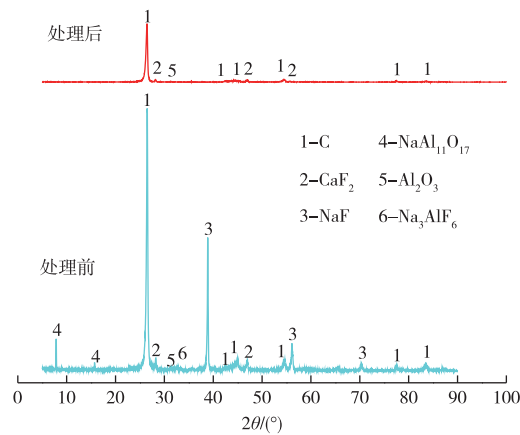


图6 未处理废旧阴极炭块和回收炭材料的物相组成对比

Fig. 6 Phase compositions of spent carbon cathodes and recovered carbon cathodes

表1 原料与回收炭材料元素含量

Table 1 Element contents of spent carbon cathodes and recovered carbon materials /%

元素	原料含量	提纯炭含量
C	65.88	94.52
O	21.84	4.99
F	6.33	0.05
Na	3.12	0.01
Al	1.52	0.07
Fe	0.09	0.06
Si	0.10	0.06
Ca	0.76	0.21
其它	0.36	0.03

2.4 气态冷凝产物处理

废旧阴极炭块所含氟化物在高温焙烧处理过程中以气态形式挥发逸出,具有严重的二次污染风险。因此,针对高温焙烧处理过程中产生的气态冷凝产物,采用化学沉淀法进行固化处理,具体条件为:CaCl₂为沉淀剂、pH=10、Ca²⁺/F⁻=8、搅拌时间30 min、搅拌速率300 r/min、静置时间24 h,并对处理前后的F⁻浓度进行测定。结果表明,经过固化处理,气态冷凝产物F⁻浓度由2 300.89 mg/L降低至22.85 mg/L。此外,将处理后的尾液进行固液分离可得到CaF₂产品,其XRD谱如图7所示。从图7可以看出,使用化学沉淀法提取CaF₂产品,与PDF标准卡片(PDF#75-0097)匹配度较高,未发现明显的杂质衍射峰,说明产品具有较高的纯度和结晶程度,具备循环利用的潜力。

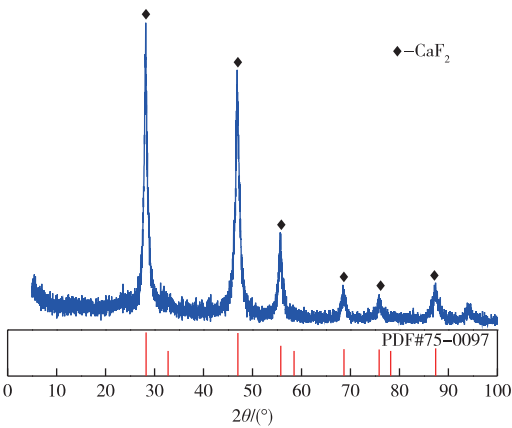


图7 固化产物的XRD谱

Fig. 7 XRD pattern of solidified products

3 结论

- 1)在骨料粒度为-5+3 mm、焙烧温度1 600 ℃、保温时间3 h的最佳条件下对废旧阴极炭块进行高温焙烧处理,回收炭材料的碳含量达到94.52%,F⁻浸出浓度仅为7.63 mg/L。
- 2)升高焙烧温度有利于促进非碳杂质的相态转化与热解逸出,增强含氟毒性物质气相迁移的驱动力,并且能够在颗粒(-5+3 mm)条件下实现废旧阴极炭块中氟化物的有效去除。
- 3)利用化学沉淀法,在pH=10、Ca²⁺/F⁻=8、搅拌时间30 min、搅拌速率300 r/min、静置时间24 h的条件下,能够实现气态冷凝产物的无害化处置,并回收高纯度的CaF₂产品,可以避免高浓度含氟烟气的二次污染。

参考文献

[1] 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 Y, HU G Y, SUN W, et al. Progress in comprehensive utilization of carbonaceous solid waste in aluminum electrolyzer [J]. Mineral Protection and Utilization,2021,41(1):166-171.

[2] 熊凤,田景卉,刘文芳,等. 高压碱浸法处理铝电解废旧阴极炭块[J]. 有色金属(冶炼部分),2022(7):30-37.
XIONG F, TIAN J H, LIU W F, et al. Treatment of spent carbon cathodes from aluminum electrolysis by high pressure alkali leaching [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy),2022(7):30-37.

[3] 陈喜平. 铝电解废槽衬火法处理工艺研究与热工分析[D]. 长沙:中南大学,2009.
CHEN X P. Research and thermal analysis of aluminum electrolytic waste tank fire lining treatment[D]. Changsha:

- Central South University, 2009.
- [4] 申士富,王金玲,牛庆仁,等. 电解铝固体废弃物的环境危害及处理技术研究现状[C]//中国环境科学学会. 2010 中国环境科学学会学术年会论文集, 上海: 中国环境科学出版社, 2010: 270-276.
SHEN S F, WANG J L, NIU Q R, et al. Research status of environmental hazards and treatment technology of electrolytic aluminum solid waste[C]//Chinese Society for Environmental Sciences. 2010 Academic Conference Proceedings of Chinese Society for Environmental Sciences, Shanghai: China Environmental Science Press, 2010: 270-276.
- [5] 陈顺智. 电解铝生产中废旧阴极炭块的火法处理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2017.
CHEN S Z. Study on pyrotechnics of waste cathode carbon block in electrolytic aluminum production[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2017.
- [6] 刘凤琴, 杨新, 张拥军, 等. 铝电解废阴极炭块中氟化钠浸出动力学研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2021(2): 93-98.
LIU F Q, YANG X, ZHANG Y J, et al. Study on leaching kinetics of sodium fluoride in waste cathodes of aluminum reduction cells[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2021(2): 93-99.
- [7] 魏应伟, 谷万铎, 王兆文. 中西部第五届有色金属工业发展论坛在长沙举行[J]. 采矿技术, 2012, 12(6): 94.
WEI Y W, GU W D, WANG Z W. The 5th Nonferrous Metal Industry Development Forum in Central and Western China was held in Changsha [J]. Mining Technology, 2012, 12(6): 94.
- [8] 陈喜平, 周子民, 李旺兴, 等. 铝电解废槽衬回转窑焙烧过程热平衡分析[J]. 冶金能源, 2010, 29(6): 29-32.
CHEN X P, ZHOU J M, LI W X, et al. Heat balance analysis of aluminum electrolytic waste tank lining rotary kiln roasting process[J]. Metallurgical energy, 2010, 29(6): 29-32.
- [9] ZHANG Q X, YANG G H. Kinetics of pressured hydrolysis reaction of cyanides in wastewater and the optimization of reaction conditions[J]. Industrial Water Treatment, 2003, 23(3): 33-36.
- [10] 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 X Y, LI J, YU Z L. Experimental study on recovery and utilization of carbon slag by flotation[J]. Light Metals, 2016(4): 28-30.
- [11] 李楠. 浮选法分离铝电解废旧阴极中的碳和电解质的工艺研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2013.
- LI N. Study on separation of carbon and electrolyte from waste cathode of aluminum electrolysis by flotation[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2013.
- [12] 李伟. 碱酸法处理铝电解废旧阴极的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
LI W. Study on the treatment of aluminum electrolytic waste cathode by alkaline acid method[D]. Shenyang: Northeastern University, 2011.
- [13] ZHAO H L, LIU F Q, XIE M Z, et al. Recycling and utilization of spent potlining by different high temperature treatments[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 289: 125704. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.125704.
- [14] YANG K, GONG P Y, TIAN Z L, et al. Recycling spent carbon cathode by a roasting method and its application in Li-ion batteries anodes[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 261: 121090. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121090.
- [15] LI N, JIANG Y, LU X, et al. Vacuum distillation-treated spent potlining as an alternative fuel for metallurgical furnaces[J]. JOM, 2019, 71(9): 2978-2985.
- [16] WANG Y W, PENG J P, DI Y Z. Separation and recycling of spent carbon cathode blocks in the aluminum industry by the vacuum distillation process[J]. JOM, 2018, 70(9): 1877-1882.
- [17] XIAO J, YUAN J, TIAN Z, et al. Comparison of ultrasound-assisted and traditional caustic leaching of spent cathode carbon (SCC) from aluminum electrolysis[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 40: 21-29.
- [18] 袁威, 金自钦, 杨毅. 铝电解废旧阴极的工艺矿物学研究[J]. 云南冶金, 2012, 41(6): 64-68.
YUAN W, JIN Z Q, YANG Y. Process mineralogy of waste cathode in aluminum electrolysis [J]. Yunnan Metallurgy, 2012, 41(6): 64-68.
- [19] 谢刚. 铝电解废炭素阴极利用现状及发展趋势[J]. 云南冶金, 2012, 41(5): 44-47.
XIE G. Utilization status and development trend of waste carbon cathode in aluminum electrolysis [J]. Yunnan Metallurgy, 2012, 41(5): 44-47.
- [20] XIE M Z, ZHAO H L, WU Z G, et al. Study on kinetics of vacuum heat treatment process of the spent cathode carbon blocks from aluminum smelters [J]. Journal of Sustainable Metallurgy, 2020, 6(4): 715-723.
- [21] XIE M, LI R, ZHAO H, et al. Detoxification of spent cathode carbon blocks from aluminum smelters by joint controlling temperature-vacuum process[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 249: 119370. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119370.