

doi:10.3969/j.issn.1007-7545.2020.09.022

响应曲面法优化铝电解废阴极碱熔提纯工艺

袁杰¹, 李松¹, 肖劲²

(1. 六盘水师范学院, 贵州 六盘水 553004;

2. 中南大学 冶金与环境学院, 长沙 410083)

摘要:通过响应曲面法优化铝电解废阴极碱熔提纯工艺过程。基于 Box-Behnken Design(BBD)设计, 研究了温度、时间、初始碱料比对废阴极碱熔除杂效果的影响, 获得了影响因素与碱熔渣碳含量之间的二次数学模型, 确定了碱熔脱杂最优工艺参数: 碱熔温度 550 ℃、碱熔时间 180 min、初始碱料比 2, 此条件下碱熔渣碳含量 95.47%, 与预测值相差 0.61 个百分点。试验值与模型预测值相近, 表明该模型可用于优化废阴极碱熔提纯过程。

关键词:铝电解废阴极; 碱熔; 提纯; 响应曲面法

中图分类号: X758

文献标志码: A

文章编号: 1007-7545(2020)09-0120-07

Optimization of Alkali Fusion Purification of Spent Cathode Carbon from Aluminum Electrolysis by Response Surface Methodology

YUAN Jie¹, LI Song¹, XIAO Jin²

(1. Liupanshui Normal University, Liupanshui 553004, Guizhou, China;

2. School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Alkali fusion purification process of spent cathode carbon from aluminum electrolysis was optimized by response surface method(RSM). Based on Box-Behnken Design(BBD), effects of temperature, time, and initial mass ratio of alkali to material on purification effect by alkali melting were studied. Secondary mathematical model between factors and carbon content was obtained. Residue carbon content is 95.47%, with 0.61 percent point different from predicted value, under the optimum conditions including temperature of 550 ℃, time of 180 min, and mass ratio of alkali to material of 2. Experimental results are similar to those predicted by the model, indicating the model can be used to optimize purification process of spent cathode carbon.

Key words: spent cathode carbon from aluminum electrolysis; alkali fusion; purification; response surface methodology

铝工业是国民经济不可或缺的重要支柱之一。铝电解槽运行过程中槽内衬受高温熔盐、铝液、金属钠等物质的持续侵蚀, 在运行 3~10 年^[1]后需要停

槽大修, 排放出大量废阴极^[2]。资料表明, 每生产 1 t 原铝会产生 7~15 kg 废阴极。废阴极是铝电解工业排放量持续增长且不可避免的固体废弃物^[3-4]。

收稿日期: 2020-03-29

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51904150); 贵州省科技计划项目(黔科合基础[2020]1Y225); 贵州省普通高等学校科技拔尖人才项目(黔教合 KY 字[2019]056); 六盘水市科技计划项目(52020-2019-05-09)

作者简介:袁杰(1985-), 男, 山东潍坊人, 博士, 副教授

铝电解废阴极中炭含量为50%~80%、石墨化度高于85%;废阴极中富含高品质石墨资源,具有极高的回收价值。受高温熔体、复杂碱性化合物的持续侵蚀,废阴极中组分复杂,除主要成分炭质材料外,还包含约三分之一的氟化物、0.2%~1%的氰化物以及少量 AlN 、 Al_4C_3 、铝硅酸盐等杂质,严重威胁环境生态安全^[5],2016年颁布实施的《国家危险废物名录》中将铝电解废旧阴极列为危险废物,禁止未经处理露天堆存或无保护填埋。

当前铝电解废阴极处理工艺主要集中在综合利用方面。赵洪亮等^[6]采用废阴极炭块替代工业煤作还原剂实现对含钴转炉渣的还原熔炼,铜和钴回收率分别达到97.3%和99.3%。陈喜平^[7]将废阴极、石灰石及粉煤灰按一定比例混合后加入回转窑,通过900~1100℃高温煅烧,实现可溶氟化物的固定与氰化物的无害化分解。XIE等^[8]提出了一种处理废阴极炭块的联合温度真空控制工艺,综合考察了温度、真空度、停留时间等因素对废阴极脱毒效果的影响,结果表明:可溶性氟含量可降低到3.5 mg/L,氰化物完全分解,在最佳控制条件下处理后炭粉固定碳含量为97.89%。CHAOUKI等^[9]采用基于气体和离散相模型(DPM)和概率密度函数/混合组分湍流非预混燃烧模型的计算流体动力学分析方法,测试了废阴极燃烧性能和污染物排放,结果表明:处理后的废阴极可作为水泥工业的替代燃料,能够有效减少水泥工业燃烧室的污染物排放。力拓加拿大铝业公司(RTA)^[10]研发了名为Low Caustic Leaching and Liming(LCL&L)铝电解废阴极综合处理工艺,其主要产品炭粉可用于替代燃料、返回制备铝电解阴极/阳极、或用于钢铁冶炼的增碳剂/还原剂。

LISBONA等^[11]通过多种溶液浸出提纯铝电解废阴极以回收有价值组分,纯化后炭粉杂质含量高于5%。WANG等^[12]采用真空蒸馏法(VDP)分离回收铝电解废阴极炭块,结果表明:真空蒸馏法能有效地分离出 Na_3AlF_6 、 NaF 和金属钠,在1200℃的蒸馏温度下,分离率可达80%以上,炭粉含碳量在91%以上,杂质主要为 CaF_2 和 Al_2O_3 。任昊晔^[13]通过浮选法对铝电解废阴极进行分离提纯,在充气量0.25 m³/h、矿浆浓度15%、刮板速度20 r/min、粒径0.105~0.125 mm、主轴转速2200 r/min浮选条件下实现碳回收率78.18%。LI等^[14]采用三步分离法分离废阴极中冰晶石以获得有价值的炭。该工艺包括用水从嵌入电解液中浸出 NaF ,酸性阳极

氧化废水浸出 Na_3AlF_6 、 CaF_2 和 $\text{NaAl}_{11}\text{O}_{17}$,混合滤液中沉淀电解液组分;在最佳试验条件下炭纯度达到95.5%、冰晶石回收率和硫酸钠晶体纯度分别为98.4%和92.0%。

既有工艺可以实现废阴极的资源化综合处理,但所得炭粉纯度不尽如人意,难以高值化利用。本文选择国内某电解铝厂排放的废阴极为原料,参考前人碱熔^[15]、盐熔^[16]分离提纯研究,拟采用氢氧化钠低温碱熔工艺脱除废阴极中复杂多相固体废弃物,借助响应曲面法对碱熔过程主要参数进行优化,着重考查碱熔参数对石墨品位的影响规律,以期获得最佳纯化条件。

1 试验

1.1 原料表征

试验原料为国内某电解铝厂排放的废阴极,元素分析结果(%):C 64.93、F 12.94、Na 7.85、Al 6.38、O 4.93、Si 0.47、Ca 1.22、K 0.61、Fe 0.39、其他0.28。XRD谱见图1。废阴极除主要成分碳外,还包含大量的 NaF 以及冰晶石、氧化铝、铝硅酸盐等杂质。将原料破碎球磨,过0.074 mm筛得到粉料,在干燥箱中(105±1)℃下烘干4 h备用。废阴极的TGA-DSC测试结果见图2,可知,原料在空气中加热到500~800℃时发生燃烧反应。碱熔试验所用碱为分析纯氢氧化钠,水为自制去离子水。

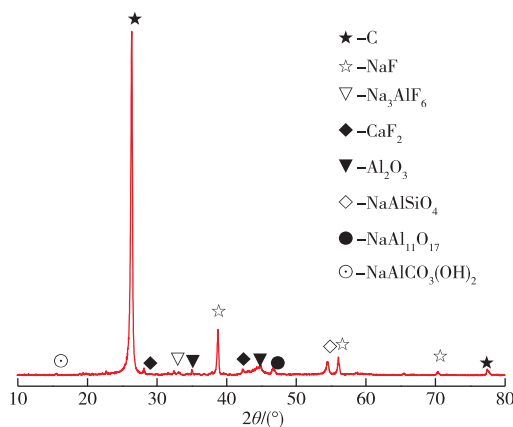


图1 原料XRD谱

Fig. 1 XRD pattern of sample

1.2 试验步骤

浸渍:将废阴极粉料与氢氧化钠按一定比例混合均匀后,加去离子水和表面改性剂酒精搅拌均匀,静置3 h;浸渍过程中去离子水与废阴极液固比为3(mL/g),酒精添加量与废阴极液固比为0.1(mL/g)。

蒸干:静置后矿浆在电炉上加热蒸干水分。

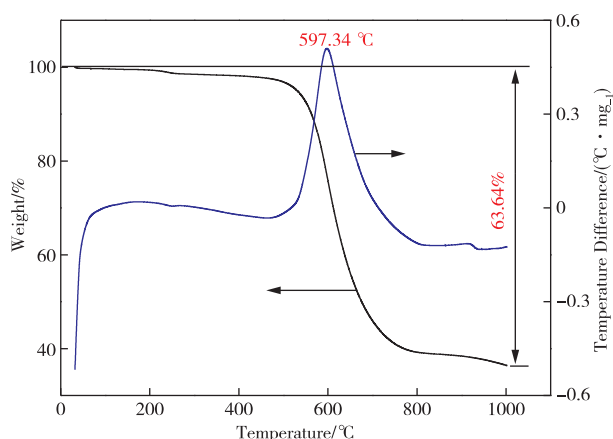


图2 原料 TGA-DSC 曲线

Fig. 2 TG-DSC curve of sample

碱熔: 蒸干后混合料在刚玉坩埚中放入气氛炉, 炉温升到预定值后保温一定时间, 在惰性气氛中加热进行碱熔试验。

水洗: 碱熔物料冷却后进行水洗, 水洗过程在超声波场中保温 60 °C 进行, 重复水洗-过滤, 直至水洗液中性后固液分离。

检测: 滤渣置于鼓风烘箱中 105 °C 烘干 4 h, 检测含碳量。为提高试验效率、降低试验复杂度, 含碳量可采用空气气氛中 800 °C 保温 4 h 烧灰烧损率表示, 计算公式为:

$$\eta_c = (1 - \frac{m_a}{m_s}) \times 100\% \quad (1)$$

式中, η_c 为碳含量(%); m_a 为 800 °C 保温 4 h 后灰分质量(g); m_s 为烧灰前浸出渣质量(g)。

1.3 试验设计

在探索性单因素试验基础上选择响应曲面法优化碱熔提纯工艺。选取影响较显著的三个因素进行 3 因素 3 水平响应曲面优化试验设计。选取温度 (X_1)、时间 (X_2)、初始碱料比 (X_3) 为考查变量, 碱熔浸出渣中碳含量 Y 为响应值, 采用 BBD 试验设计方案优化铝电解废阴极碱熔过程工艺参数, RSM 试验方案和数据通过软件 Design-Expert 进行设计和处理, 并预测了试验响应值; 共设计试验点 17 组, 因素与水平见表 1, 试验设计与结果见表 2。

表1 因素与水平

Table 1 Factors and levels

编码	因素	水平		
		-1	0	1
X_1	温度/°C	350	450	550
X_2	时间/min	60	120	180
X_3	初始碱料质量比	1	1.5	2

响应曲面法中有一阶、二因子交互效应、二阶、三阶等模型, 考虑所有的一次项、二次项和两两交互项, 响应曲面方程可表示为:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i k_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} k_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=k+1}^k \beta_{ij} X_i X_j + e \quad (2)$$

式中, Y 为目标函数或响应; X_i 为 i 因素; β_i 、 β_{ii} 、 β_{ij} 分别为一次项、二次项、交互作用项回归系数; k 为影响因数的数量; e 为误差, 包括试验误差和拟合不足误差。

2 结果与讨论

2.1 模型建立与方差分析

根据 BBD 试验设计, 响应试验结果见表 2。通过软件 Design-Expert 进行模型间比较与分析, 由表 3 模型汇总结果可以确定选择响应曲面二阶模型描述废阴极碱熔过程, 回归拟合得到了响应值碳含量 Y 与各变量之间的二次回归方程为:

$$Y = 93.26 + 1.89X_1 + 1.1X_2 + 1.21X_3 + 0.3X_1X_2 + 1.23X_1X_3 + 0.5X_2X_3 - 1.04X_1^2 - 0.42X_2^2 - 1.34X_3^2 \quad (3)$$

表2 BBD 试验设计及结果

Table 2 BBD design and experimental results

序号	温度/°C	时间/min	碱料比	碳含量/%
1	450	60	2	91.1
2	450	120	1.5	93.0
3	450	120	1.5	93.3
4	450	120	1.5	93.1
5	550	120	1.5	95.3
6	550	180	1	94.9
7	350	120	1	88.9
8	450	120	1.5	93.3
9	450	180	2	94.4
10	350	60	1.5	89.3
11	550	120	1	90.5
12	450	60	1	89.6
13	350	120	2	88.8
14	450	120	1.5	93.6
15	350	180	1.5	90.8
16	450	180	1	90.9
17	550	60	1.5	92.2

表3 模型汇总结果

Table 3 Model summary statistics results

项目	标准 Dev.	R^2	校正 R^2	预测 R^2	备注
线性	1.30	0.695 6	0.625 3	0.482 4	
交互项	1.20	0.798 1	0.677 0	0.460 1	
二次式	0.24	0.994 5	0.987 4	0.954 7	建议项
三次式	0.23	0.997 0	0.988 2		

ANOVA 方差分析是一种统计方法,能够从一系列数集中细分出模型中各个自变量对模型假设检验变异的主要影响,Fisher 统计检验能够反映各自变量对模型的影响。对模型进行方差分析,结果列于表 4。

表 4 铝电解废阴极碱熔模型方差分析
Table 4 ANOVA of alkali-fusion model

项目	平方和	df	均方值	F 值	P 值	
模型	71.41	9	7.93	140.78	<0.000 1	显著
A-温度	28.50	1	28.50	505.73	<0.000 1	
B-时间	9.68	1	9.68	171.76	<0.000 1	
C-碱料比	11.76	1	11.76	208.69	<0.000 1	
AB	0.36	1	0.36	6.39	0.039 4	
AC	6.00	1	6.00	106.51	<0.000 1	
BC	1.00	1	1.00	17.74	0.004 0	
A ²	4.58	1	4.58	81.20	<0.000 1	
B ²	0.73	1	0.73	13.02	0.008 6	
C ²	7.59	1	7.59	134.65	<0.000 1	
残差	0.39	7	0.056			
失拟值	0.18	3	0.061	1.15	0.431 7	不显著
纯误差	0.21	4	0.053			

表 4 中 P 值是对应 F 值下的概率值, P 的大小表明拟合得到模型的显著性,也表明影响因素对响应值的显著性。一般地, $P \leq 0.05$ 说明显著。当某因素的 $P > 0.05$ 时,意味着该因素的影响程度小于 95% 置信区间,因素的标准偏差远大于回归系数,会导致 P 接近于 1,从而表明该因素对目标函数影响不显著^[17]。

模型 F 值 = 140.78 和“ $\text{Pro} > F$ ”值小于 0.05 说明模型是显著的,本试验中“ $\text{Pro} > F$ ”值 $< 0.000\ 1$ 表明模型高度显著。比较各项对应的 F 值大小可以得出各项对响应值浸出渣中碳含量 Y 的影响显著性依次为 $X_1 > X_3 > X_2 > X_3^2 > X_1 X_3 > X_1^2 > X_2 X_3 > X_2^2 > X_1 X_2$ 。从交互作用项的符号来看, $X_1 X_2$ 之间、 $X_1 X_3$ 之间、 $X_2 X_3$ 之间均呈正相关。“Lack of Fit”失拟对应的 F 值 1.15, $P = 0.4317 > 0.05$ 表示失拟项不显著,说明在整个研究范围内回归方程的拟合情况较好。失拟平方和 0.18 较小,说明数据中没有异常点,不需要引入更高次项,模型选择恰当。较大的 F 值(140.78)、高的信噪比(34.189)、失拟项($P < 0.05$)不显著,这些均表明,在该响应过程中,过程变量可以很好地由回归方程描述,可以用于对实际结果的预测。

2.2 模型可信度分析

通过模型方程(3)得出的预测值和试验实际值列于图 3,进一步验证二次多项式回归模型与废阴

极碱熔除杂工艺过程的拟合状态。由图 3 可知,试验实测值和预测值近似为直线,均落在拟合曲线上或分布在拟合线两侧,这说明预测值和试验实测值数据相近,模型预测值和试验值的契合度较好,该模型可以有效优化废阴极碱熔纯化工艺,同时也进一步表明了方差分析的可信度和回归模型的有效性。

图 3 中碱熔纯化渣中含碳量的回归方程相关性调整值 $R^2_{\text{adj}} = 0.988$,非常接近 1,说明模型具有较高的准确性及良好的吻合性。同时由模型可信度分析结果(平均值 91.94%、C.V.% = 0.26、 $R^2 = 0.994\ 5$ 、 $R^2_{\text{adj}} = 0.987\ 4$ 、 $\text{Pre-}R^2 = 0.954\ 7$)可知,所列数据预测值相关性平方值 $\text{Pre-}R^2$ 与 R^2 仅相差 0.039 8,表明试验数据和模型吻合得较好,两者间的相对误差较小,该模型能够解释响应值随因素变化导致的总变异,再次验证了响应曲面法优化铝电解废阴极碱熔纯化工艺的可行性。变异系数 C.V.% 表示二次多项式模型预测值得到试验点的散射情况。若 C.V.% 值较高,说明在平均值水平上存在着极端变化,不能有效证明该模型的充分性。本次试验中,C.V.% 值为 0.26,很低的数值表明了试验获得的模型具有很高的可靠性和精确度。

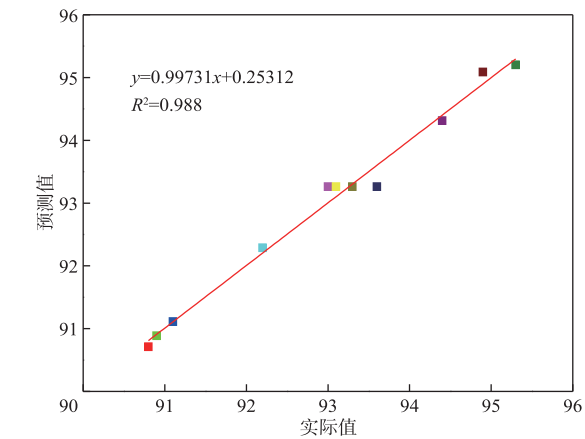


图 3 碱熔渣碳含量的模型预测值与试验值对比
Fig. 3 Comparison of predicted and actual alkali-fusion residue carbon content

2.3 交互作用影响

因素间交互作用对浸出渣碳含量的影响结果如图 4~6 所示。由图 4 可知,温度与时间曲面呈双曲面形,等高线呈椭圆形,交互作用显著。当初始碱料比 1.5 时,增大温度和时间均对废阴极炭粉碱熔脱杂过程有促进作用。当碱熔时间 180 min 时,随着温度从 350 ℃ 升高到 550 ℃,碱熔水洗渣中碳含量

从 90.8% 增大到 94.9%, 说明温度的升高可以有效提高废阴极中杂质与熔融氢氧化钠发生反应生成可溶性新相。这是因为, 温度升高, 熔融碱液中粒子活性增强, 内扩散阻力降低, 固液相间反应条件改善, 复杂无机盐与熔融碱反应概率升高。而且, 根据热力学计算结果可知, 废阴极中部分无机盐如 $\beta\text{-Al}_2\text{O}_3$ 等在常温氢氧化钠溶液中不易发生反应, 但可与熔融碱反应生成可溶性偏铝酸钠。温度升高有利于铝电解废阴极中难处理无机盐与熔融氢氧化钠发生反应。同样, 当反应温度 550 °C 时, 随着碱熔时间从 60 min 延长到 180 min, 碱熔水洗渣中碳含量从 92.2% 增大到 94.9%, 碱熔时间的延长有利于杂质脱除率的提高。

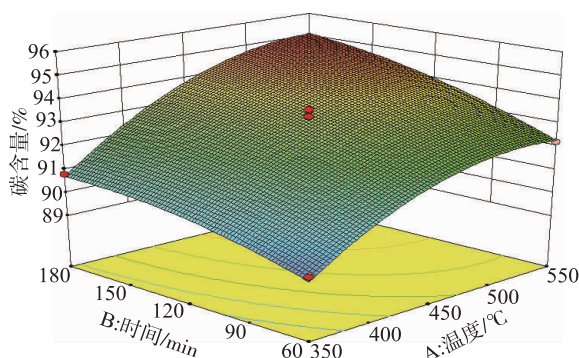


图 4 温度与时间交互作用对碱熔渣碳含量的影响(初始碱料比 1.5)

Fig. 4 3D response surface plot of interaction between temperature and time on alkali-fusion residue carbon content (initial mass ratio of alkali to material of 1.5)

由图 5 可知, 随着温度和初始碱料比的增大, 碱熔水洗渣中碳含量变化趋势相同。温度的升高可以促进杂质的有效提纯, 当初始碱料比为 2 时, 碱熔水洗渣中碳含量从 350 °C 时的 88.8% 增大到 550 °C 时的 95.3%; 当温度 550 °C, 初始碱料比为 1 时碱熔水洗渣含碳量 90.5%, 初始碱料比 2 时碱熔水洗渣含碳量 95.3%。根据方差分析表 4 中数据, 温度与初始碱料比的交互作用显著。温度的升高可以促进氢氧化钠由固态向液态转化(氢氧化钠熔点 318 °C)并有利于熔融碱液的流动; 另一方面, 碱料比的增大使得参与反应的氢氧化钠量增多, 废阴极中复杂难处理无机盐相与熔融碱的接触几率增高, 温度的升高促进了碱液的流动及其内部粒子的布朗运动。温度与碱料比对废阴极碱熔脱杂结果具有显著的协同促进作用。

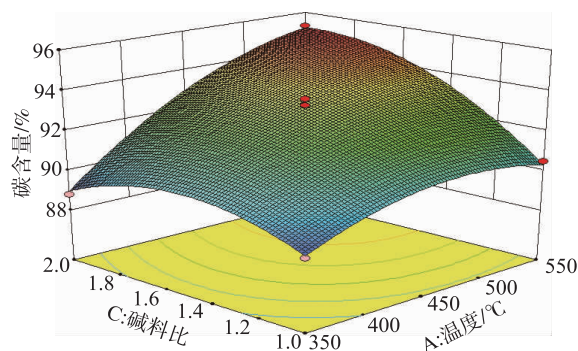


图 5 温度与初始碱料比交互作用对碱熔渣碳含量的影响(时间 120 min)

Fig. 5 3D response surface plot of interaction between temperature and initial mass ratio of alkali to material on alkali-fusion residue carbon content (reacting time of 120 min)

图 6 中, 时间与初始碱料比的交互作用显著, 曲面呈双曲面形。时间的延长和碱料比的增大均显著促进了碱浸水洗渣中碳含量的增长。

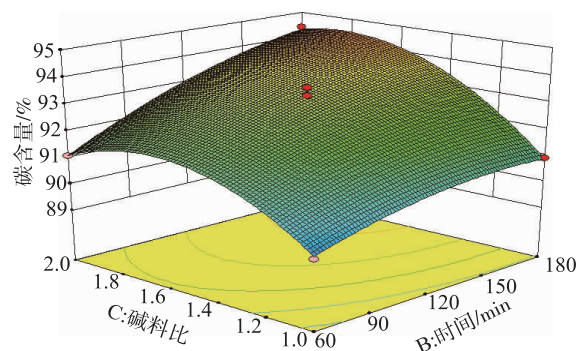


图 6 时间与初始碱料比交互作用对碱熔渣碳含量的影响(温度 450 °C)

Fig. 6 3D response surface plot of interaction between time and initial mass ratio of alkali to material on alkali-fusion residue carbon content (temperature of 450 °C)

由图 4~6 可知, 理论上, 初始碱料比在一个合适的点, 温度越高、时间越长, 废阴极中杂质的脱除率越高, 但高温和长时间是对试验设备和循环周期的一个挑战, 因此, 需要优化试验参数, 得到最优浸出条件。

2.4 条件优化与试验验证

选取废阴极碱熔提纯试验参数为: 温度 350~550 °C、时间 60~180 min、碱料比 1~2, 以碱熔水洗渣碳含量 100% 为目标值, 通过 Design Expert 软件进行预测分析, 获得各因素参数最优值为: 温度

550 ℃、时间 180 min、初始碱料比 2, 碱熔水洗渣含碳量预测值 96.08%。选择最优参数进行重复试验, 考查预测值与试验实测值的差异。3 次重复试验碳含量试验值分别为 95.59%、95.23%、95.62%, 平均 95.47%, 重复试验结果与软件预测值之间相差 0.61 个百分点, 表明该拟合模型很好地实现了废阴极碱熔脱杂过程的数据拟合。

3 结论

1) 废阴极碱熔水洗渣中碳含量与碱熔温度、时间、初始碱料比之间的关系可通过二次方程进行表述:

$$Y = 93.26 + 1.89X_1 + 1.1X_2 + 1.21X_3 + 0.3X_1X_2 + 1.23X_1X_3 + 0.5X_2X_3 - 1.04X_1^2 - 0.42X_2^2 - 1.34X_3^2$$

2) 废阴极碱熔除杂模型方差分析结果表明, 过程参数如碱熔温度、时间、初始碱料比对模型拟合方程的一次项与二次项影响显著, 影响因子中初始碱料比对碱熔除杂效果影响最大, 时间影响最小。

3) 软件优化并试验验证得到了废阴极碱熔提纯最优工艺参数为: 温度 550 ℃、180 min、碱料比 2, 重复试验得到了碱熔纯化后炭粉中含碳量 95.47%。

参考文献

- [1] 刘庆生, 曾少军, 张丹城, 等. 基于细观结构铝电解阴极炭块的力学行为研究[J]. 有色金属工程, 2017, 7(4): 1-6.
LIU Q S, ZENG S J, ZHANG D C, et al. Research on the mechanical behavior based on the microstructure of the aluminum electrolytic carbon block cathode[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2017, 7(4): 1-6.
- [2] 李楠. 浮选法综合回收利用低碳品位废阴极工艺研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015.
LI N. Study on comprehensive recovery and utilization of low carbon grade spent cathode carbon by flotation[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015.
- [3] OSPINA G, HASSAN M I. Spent pot lining characterization framework[J]. The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 2017, 69(9): 1639-1645.
- [4] 赵俊学, 张博, 鲍龙飞, 等. 铝电解槽废旧阴极氯化物的浸出研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2015(3): 30-32.
ZHAO J X, ZHANG B, BAO L F, et al. Fluoride leaching test from spent pot lining of aluminum electrolysis cell[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2015(3): 30-32.
- [5] PALMIERI M J, ANDRADE-VIEIRA L F, CAMPOS J M S, et al. Cytotoxicity of spent pot liner on *Allium cepa* root tip cells: A comparative analysis in meristematic cell type on toxicity bioassays[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, 133: 442-447.
- [6] 赵洪亮, 洪爽, 刘伟, 等. 电解铝废槽衬还原提取铜转炉渣中铜钴的试验[J]. 有色金属(冶炼部分), 2019(9): 53-57.
ZHAO H L, HONG S, LIU W, et al. Experiment on reduction and extraction of copper and cobalt from copper converter slag by spent pot-lining from aluminum smelters[J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2019(9): 53-57.
- [7] 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. Study on pyro-process for spent potlining and its heat transfer analyzing[D]. Changsha: Central South University, 2009.
- [8] XIE W M, ZHOU F P, LIU J Y, et al. Synergistic reutilization of red mud and spent pot lining for recovering valuable components and stabilizing harmful element[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 243: 118624. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118624>.
- [9] CHAOUKI G, ABRAR I, ABDALLAH S, et al. Combustion and emissions analysis of spent pot lining (SPL) as alternative fuel in cement industry[J]. Science of the Total Environment, 2019, 684: 519-526.
- [10] HAMEL G, BREAUULT R, CHAREST G, et al. From the “low caustic leaching and liming” process development to the Jonquière spent potlining treatment pilot plant start-up, 5 years of process up-scaling, engineering and commissioning[C]//Bearn G. Light Metals 2009, The Minerals, Metals & Materials Society, 2009: 921-925.
- [11] LISBONA D F, SOMERFIELD C, STEEL K M. Leaching of spent pot-lining with aluminium nitrate and nitric acid: Effect of reaction conditions and thermodynamic modelling of solution speciation[J]. Hydrometallurgy, 2013, 134-135(3): 132-143.
- [12] 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]. The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 2018, 70(9): 1877-1882.
- [13] 任昊晔. 铝电解废旧阴极中碳和电解质的分离及回收

- 利用[D]. 兰州:兰州交通大学,2018.
- REN H Y. Separation and recycling of carbon and electrolyte in spent cathode carbon from aluminum electrolysis[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.
- [14] LI X M, YIN W D, FANG Z, et al. Recovery of carbon and valuable components from spent pot lining by leaching with acidic aluminum anodizing wastewaters[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2019, 50(2):914-923.
- [15] 蹇兴文, 黄晶, 张一敏, 等. 氢氧化钠碱熔焙烧对页岩提钒过程的影响[J]. 有色金属: 冶炼部分, 2018(3): 30-34.
- JIAN X W, HUANG J, ZHANG Y M, et al. Effect of NaOH molten roasting on vanadium extraction from black shale [J]. Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy), 2018(3):30-32.
- [16] 叶标, 郁青春, 邓攀, 等. 粉煤灰与氯化钙焙烧提取氧化铝的动力学[J]. 有色金属工程, 2019, 9(6):36-42.
- YE B, YU Q C, DENG P, et al. Kinetics of alumina extraction by calcination of coal fly ash and calcium chloride [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2019, 9(6):36-42.
- [17] DEMIR F, DERUN E M. Response surface methodology application to fly ash based geopolymer synthesized by alkali fusion method[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2019, 524:119649. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2019.119649>.
-
- (上接第 119 页)
- [10] REIG L, TASHIMA M M, BORRACHERO M V, et al. Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste [J]. Construction and Building Materials, 2013, 43:98-106.
- [11] 陶敏龙, 张召述, 卓瑞锋. 利用赤泥制备 CBC 复合材料的研究[J]. 有色金属(冶炼部分), 2009(4):45-48.
- TAO M L, ZANG Z S, ZHUO R F. Study on CBC composite material made from red mud[J]. Nonferrous Metals(Extractive Metallurgy), 2009(4):45-48.
- [12] 史迪, 叶家元, 张鹏, 等. 蒸汽养护对赤泥基碱激发胶凝材料性能及微观结构的影响[J]. 混凝土, 2017(10):87-89, 92.
- SHI D, YE J Y, ZHANG P, et al. Effect of steam curing on properties and microstructure of red mud-based alkali-activated cementitious materials [J]. Concrete, 2017(10):87-89, 92.
- [13] 洪景南, 孙俊民, 许学斌, 等. 活性硅酸钙高温相变历程研究[J]. 硅酸盐通报, 2016, 35(3):736-742, 747.
- HONG J N, SUN J M, XU X B, et al. High-temperature phase change of active calcium silicate[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2016, 35(3):736-742, 747.