

引文格式:段中波,文钧德,刘海锋,等. 阳极炭渣燃烧动力学研究[J]. 中国有色冶金,2024,53(3):140-146.

DUAN Zhongbo, WEN Junde, LIU Haifeng, et al. Study on the combustion dynamics of anode carbon residue[J]. China Nonferrous Metallurgy, 2024,53(3):140-146.

阳极炭渣燃烧动力学研究

段中波¹, 文钧德², 刘海锋¹, 张彦荣¹, 吴祥梓², 卜旭东², 王 胜²

(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中产生的有害固体废物,企业多通过火法工艺燃烧炭来回收其中的电解质,但处理过程存在燃烧不充分、电解质回收率低、燃烧动力学不清晰问题。本文采用 TG-DSC 分析及动力学分析研究阳极炭渣燃烧性能及动力学控制条件,分析升温速率对燃烧过程的影响规律,得到如下结论。升温速率对阳极炭渣的燃烧影响较大,当升温速率为 30 K/min,着火温度和最大失重温度分别升高至 525.79 °C 和 1 085.79 °C,最大失重速率降低至 0.22%/°C,可燃性指数 C 降低,着火指数 C_i 增加,着火时释放热量升高至 790.38 kJ/g;阳极炭渣电解质含量高,导致颗粒表面和内部温度不同步,着火模式为非均相着火,不受升温速率的影响;Coats-Redfern 积分法计算结果表明,阳极炭渣在温度 476~886 °C 的燃烧拟合结果符合化学反应函数模型 $g(\alpha) = (1-\alpha)^{-1/2}$,限制性环节主要由化学反应控制;在温度 886~1 100 °C 的燃烧拟合结果符合一维扩散积分函数模型 $g(\alpha) = \alpha^2$,限制性环节主要由扩散控制。

[关键词] 铝电解; 阳极炭渣; 火法焙烧; 燃烧动力学; 电解质回收; TG-DSC 分析; 动力学分析

[中图分类号] TF821; X758 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2024)02-0140-07

DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2024.03.017

目前世界上的原铝主要采用冰晶石-氧化铝融盐电解法生产,以碳素材料作电极。其中,碳素阳极长期与高温电解液(氟化铝、冰晶石等)接触,遭受来自热、化学、机械等方面的侵蚀,另外还存在不均匀燃烧和选择性氧化,这些情况导致骨料脱落进入电解质中形成阳极炭渣^[1-2]。阳极炭渣的浸出液中可溶性氟含量远远高于 100 mg/L 的安全排放标准,属于工业危险废弃物^[3-4];企业为减少环保成本支出,有部分企业未进行妥善处理,只是堆存或露天掩埋,这会使可溶性氟化物溶解并扩散到土壤和地下水中,对生态环境造成严重破坏^[5-7]。随着铝电解工业的快速发展,阳极炭渣的处置问题日益突出,已经成为制约铝工业发展的瓶颈问题。

随着环保要求的提高,火法高温熔炼处置阳极炭渣成为企业和学者的研究方向,主要分为焙烧法、真空冶炼法、流化床法等,以及直接作为钢铁冶炼、耐火材料、水泥等行业的辅助材料^[8-11]。火法处理虽然存在能耗高、电解质回收率低、工艺参数不可控等问题,但处理工艺流程短、占地少、处理量大、效益好等优点利于企业生产。火法工艺处理阳极炭渣存在的问题与阳极炭渣着火机理和燃烧动力学不清晰有着直接关系,本文通过对阳极炭渣燃烧特性研究,阐明了着火机理;利用 TG-DTG-DSC 曲线研究了升温速率对燃烧性能的影响规律;采用 Coats-Redfern 积分法解析阳极炭渣的燃烧动力学,为火法处理阳极炭渣的工业化应用提供数据和理论参考。

1 试验方法

1.1 燃烧特性分析

采用热重分析仪(TG/DTG)研究阳极炭渣的燃烧特性,在温度为 35~1 100 °C,空气流速为 30 mL/min,升温速率分别为 10 K/min、20 K/min、

[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方面的管理工作。

[通信作者] 王胜(1971—),男,甘肃白银人,主要研究方向为有色冶金废渣高值化再利用。

[基金项目] 嘉峪关市科技局“揭榜挂帅”项目(21-01)。

30 K/min 条件下得到的 TG 曲线和 DSC 曲线用于获取燃烧过程的相关参数,如着火温度(T_i)、最大燃烧率(R_p)、最大燃烧率温度(T_p);利用式(1)和式(2)计算燃烧性能的可燃性指数 C 和着火指数 C_i ^[12-13], t_i 和 t_p 分别代表着火时间和最大失重速率时间。

$$C = \frac{R_p}{T_i^2} \quad (1)$$

$$C_i = \frac{R_p}{t_i \times t_p} \quad (2)$$

1.2 动力学模型

阳极炭渣燃烧是一个多反应步骤过程,根据国际热分析和量热联合会(ICTAC)建议,可将燃烧过程分解成多个单一反应,进而计算不同升温速率下的动力学参数更具准确性^[14]。

表 1 常见的气固反应机理函数的微分和积分表达式

Table 1 Differential and integral expressions of common gas-solid reaction mechanism functions

序号	函数名称	积分形式	微分形式
D_1	一维扩散	α^2	$1/2\alpha$
D_2	二维扩散(柱对称)	$\alpha + (1-\alpha)\ln(1-\alpha)$	$[-\ln(1-\alpha)]^{-1}$
D_3	三维扩散(柱对称)	$1 - 2\alpha/3 - (1-\alpha)^{2/3}$	$(3/2) \{ [(1-\alpha)]^{(-1/3)} - 1 \}^{-1}$
A_1	随机核化长大($n=1$)	$-\ln(1-\alpha)$	$1-\alpha$
A_2	随机核化长大($n=2$)	$[-\ln(1-\alpha)]^{1/2}$	$2(1-\alpha)[- \ln(1-\alpha)]^{1/2}$
R_1	收缩核模型(柱对称)	$1 - (1-\alpha)^{1/2}$	$2(1-\alpha)^{1/2}$
R_2	收缩核模型(球对称)	$1 - (1-\alpha)^{1/3}$	$3(1-\alpha)^{2/3}$
C_1	化学反应模型	$(1-\alpha)^{-1/2}$	$2(1-\alpha)^{3/2}$

采用 Coats-Redfern 法确定阳极炭渣燃烧过程的动力学参数,表达式见式(3)。

$$\ln \left(\frac{g(\alpha)}{T^2} \right) = \ln \left(\frac{AR}{\beta} \left(1 - \frac{2RT}{E} \right) \right) - \frac{E}{RT} \quad (3)$$

式中: α 为转化率,% ; T 为反应温度,K; $g(\alpha)$ 代表反应机理的积分形式,见表 1; A 为指数因子, min^{-1} ; E 为反应活化能, kJ/mol; R 为通用气体常数, 8.31×10^{-3} kJ/(mol·K); β 为升温速率, $\beta = dT/dt$ 。

由于 $2RT \ll E$,以 $\ln[g(\alpha)/T^2]$ 对 $1/T$ 作图,并进行线性回归, $-E/R$ 为所得直线的斜率, $\ln(AR/\beta E)$ 为直线截距,根据拟合系数(R^2) 确定拟合函数。

2 结果与讨论

2.1 升温速率对阳极炭渣燃烧性能影响研究

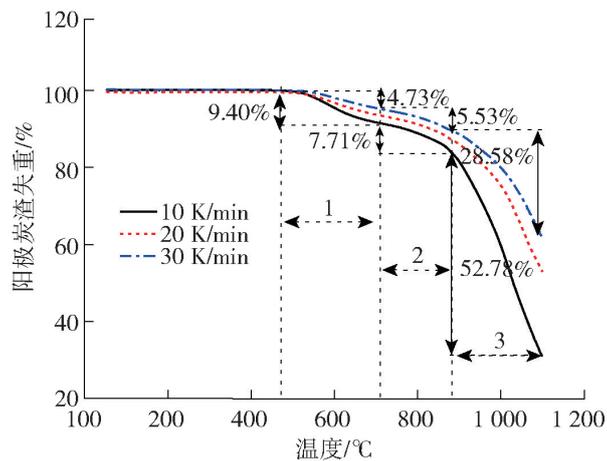
不同升温速率的 TG 和 DTG 曲线见图 1,图 1 表明阳极炭渣的燃烧过程分为 3 个阶段。阶段 1 温度为 467 ~ 713 °C,此时阳极炭渣达到燃点开始燃烧,随着升温速率的增加,DTG 峰值逐渐降低,失重量由 9.40% 降低至 4.73%;阶段 2 温度为 713 ~ 886 °C,此时部分电解质晶型改变,低熔点化合物熔化并且氟开始挥发,从而促进了碳氧之间的反应,DTG 出现失重峰,失重量由 7.71% 降低至 5.53%;

阶段 3 温度为 886 ~ 1 100 °C,此时冰晶石大量挥发,碳与氧的反应加剧,出现快速失重现象,失重量由 52.78% 降低至 28.58%。

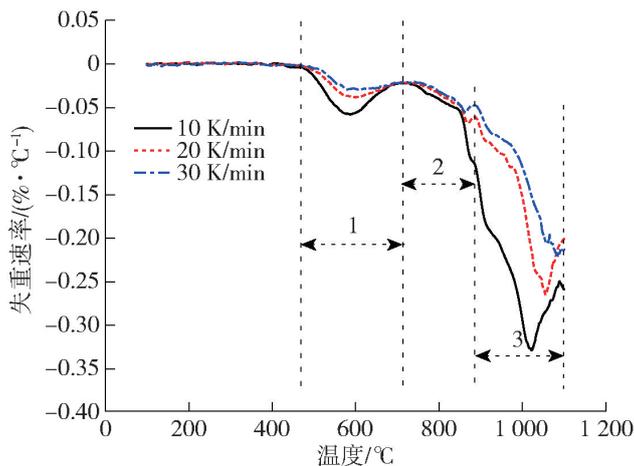
不同升温速率的具体燃烧特性见表 2。由表 2 可见,随着升温速率的增加,点火温度、最大失重温度增大,最大失重速率减小。表明增加升温速率,电解质传热效率降低,使阳极炭渣颗粒内外表面的温差较大,在较高升温速率时容易产生热滞后现象,导致燃烧过程受到抑制,挥发量和失重量变化较小^[15]。 C_i 结果表明提高升温速率有利于阳极炭渣的燃烧,而且随着温度的升高和电解质的挥发,电解质包覆的碳裸露,为后续碳的燃烧创造了有利条件。可见,升温速率的增加对气体扩散、化学反应速率及阳极炭渣内部的燃烧过程都有较大影响^[16]。

2.2 阳极炭渣的 DSC 分析

空气气氛下不同升温速率阳极炭渣燃烧的 DSC 曲线见图 2,三种不同升温速率对应的着火放热量分别为 340.90 kJ/g、693.07 kJ/g、790.38 kJ/g。由图 2 可见,阳极炭渣在着火前为氧的物理吸附,出现持续放热,燃烧过程产生 4 个放热峰。第 1 个放热峰为阳极炭渣着火放热,随着升温速率的升高,着火



(a) TG曲线



(b) DTG曲线

图1 空气气氛下阳极炭渣不同升温速率的TG曲线和DTG曲线

Fig.1 TG curve and DTG curve of anodic carbon slag under air atmosphere with different heating rates

表2 不同升温速率下阳极炭渣的特征参数

Table 2 Characteristic parameters of anode carbon slag at different heating rates

升温速率	10 K·min ⁻¹	20 K·min ⁻¹	30 K·min ⁻¹
$T_i/^\circ\text{C}$	518.80	523.88	525.79
$T_p/^\circ\text{C}$	1021.80	1055.88	1085.79
$R_p/(\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	0.33	0.26	0.22
$C \cdot 10^{-7}$	12.26	9.47	7.96
$C_i \cdot 10^{-5}$	6.92	20.92	38.65

放热峰峰宽增大;随着升温速率增加,第2个峰放热逐渐减小;热量积累使第3个峰放热增加;第4个放热峰由于电解质的大量挥发,碳与氧的反应加剧,放热峰对应的温度随着升温速率增大逐渐升高。

2.3 阳极炭渣的着火模式分析

阳极炭渣中的电解质可看做碳燃烧的灰分,大量的灰分增加了扩散传质的阻力,在恒压条件下,气

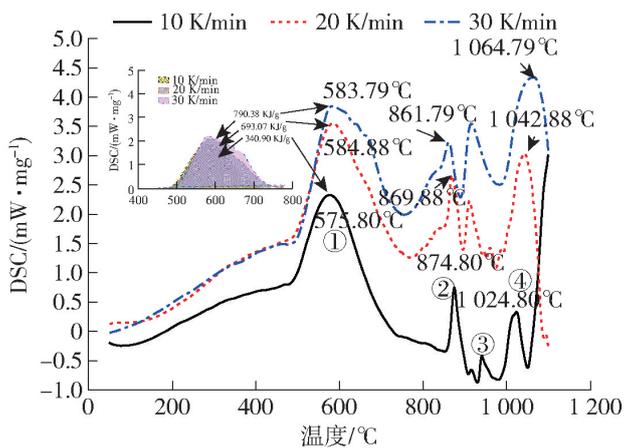


图2 空气气氛下不同升温速率的阳极炭渣的DSC曲线

Fig.2 DSC curves of anode carbon slag with different heating rates under air atmosphere

体在灰层的扩散阻力成为影响燃烧速率的主控因素。不同升温速率的阳极炭渣燃烧TG-DTG-DSC曲线见图3。由图3(a)可见,温度低于482.8 °C, TG曲线没有质量变化,表明阳极炭渣没有发生热分解反应和电解质的挥发;而温度高于482.8 °C时TG-DTG曲线出现失重,DCS曲线出现放热现象,这表明阳极炭渣着火是突然产生的,属于典型的非均相着火模式,图3(b)和(c)具有同样的规律^[17]。

2.4 阳极炭渣的着火机理分析

阳极炭渣的非均相着火模型见图4。阳极炭渣为多孔性结构,颗粒表面不均匀分布少量的碳,当阳极炭渣颗粒受热,氧气扩散到颗粒表面,颗粒与氧气发生物理吸附放出热量。随着环境温度逐渐增加,阳极炭渣颗粒无热量损失,其中大部分热量被表面碳吸收,余热向内部传递,导致表面升温,此时表面温度高于内部。当表面温度达到着火点时,碳组分起火,发生气固非均相燃烧,反应的产物从固体表面解吸向外扩散。该过程中由于颗粒表面与内部在温度上存在一定差异,非均相特征非常明显。

2.5 动力学结果分析

根据ICTAC研究表明,阳极炭渣燃烧的DTG曲线中存在阶段变化,说明有多步反应的参与^[18]。对不同升温速率下TG曲线划分的3个反应阶段进行拟合,确定R²最高的为最佳拟合积分函数,拟合结果如表3所示。

通过对比积分函数的拟合结果,由表3可知,燃烧过程中阶段1、2主要受化学反应(C₁)控制,表明提高温度,有助于阳极炭渣的充分燃烧,其机理积分

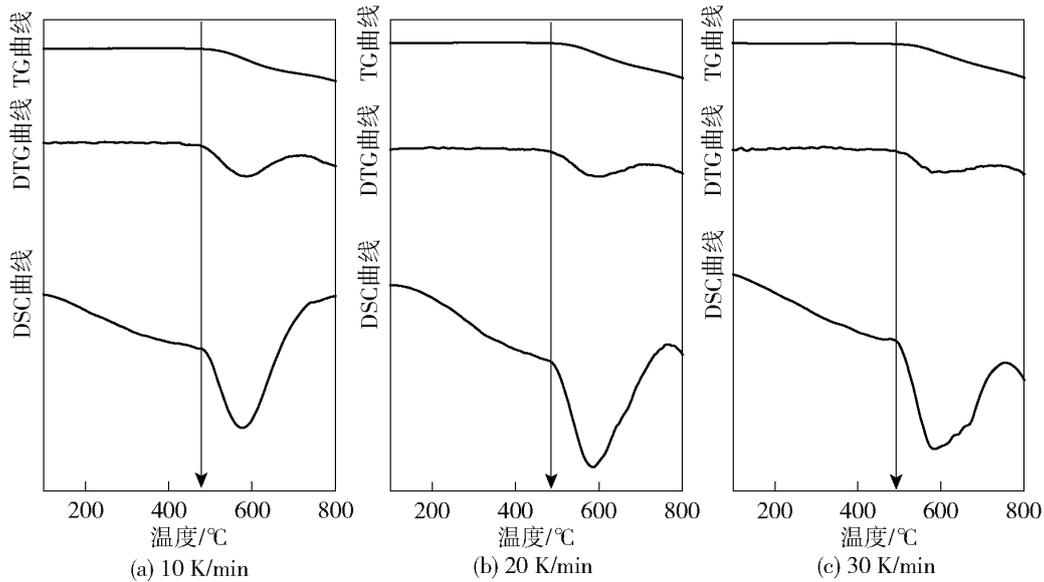


图3 阳极炭渣 TG-DTG-DSC 曲线

Fig. 3 TG-DTG-DSC curves of anode carbon residue

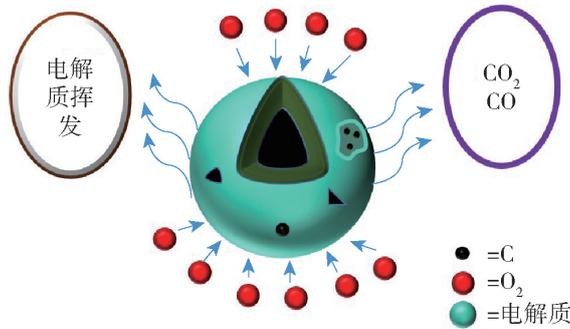


图4 阳极炭渣非均相着火机理模型

Fig. 4 Model of the non-homogeneous ignition mechanism of anode slag

函数为 $g(\alpha) = (1 - \alpha)^{-1/2}$; 阶段3 主要受一维扩散 (D_1) 控制, 表明减小原料粒度、增加氧浓度, 有助于阳极炭渣的充分燃烧, 其机理积分函数为 $g(\alpha) = \alpha^2$, 升温速率的改变对动力学控制机理没有影响。基于 TG-DTG 曲线的阳极炭渣燃烧动力学最佳积分函数拟合曲线见图5。

拟合方程、指前因子 A 和活化能 E 计算结果见表4。表中阶段1 和阶段2 阳极炭渣燃烧过程受到抑制, 活化能为负值, 随着升温速率的升高, 传热受到影响, 活化能绝对值增大^[19]。阶段3 活化能为正, 由于阶段1 和阶段2 温度较低, 高含量的电解质是阳极

表3 Coats-Redfen 积分法机理函数拟合结果

Table 3 Coats-Redfen integral method mechanism function fitting results

阶段	升温速率/ ($K \cdot \min^{-1}$)	线性相关系数 R^2							
		D_1	D_2	D_3	A_1	A_2	R_1	R_2	C_1
1	10	0.858	0.860	0.860	0.846	0.807	0.844	0.845	0.999
	20	0.981	0.982	0.982	0.978	0.963	0.977	0.977	0.999
	30	0.879	0.879	0.880	0.868	0.837	0.867	0.867	0.999
2	10	0.952	0.952	0.951	0.896	0.084	0.894	0.895	0.999
	20	0.972	0.972	0.972	0.944	0.080	0.944	0.944	0.999
	30	0.984	0.984	0.984	0.973	0.806	0.973	0.973	0.999
3	10	0.996	0.998	0.999	0.999	0.999	0.999	0.999	0.620
	20	0.937	0.932	0.930	0.887	0.682	0.897	0.893	0.976
	30	0.991	0.990	0.989	0.983	0.968	0.986	0.985	0.929

炭渣燃烧过程的主要影响因素, 随着温度的增加, 电解质挥发增大, 促使碳氧反应加强, 导致燃烧反应剧

烈, 失重速率增大; 升温速率的增加使电解质挥发提前, 活化能逐渐降低, 有利于促进阶段3 燃烧过程。

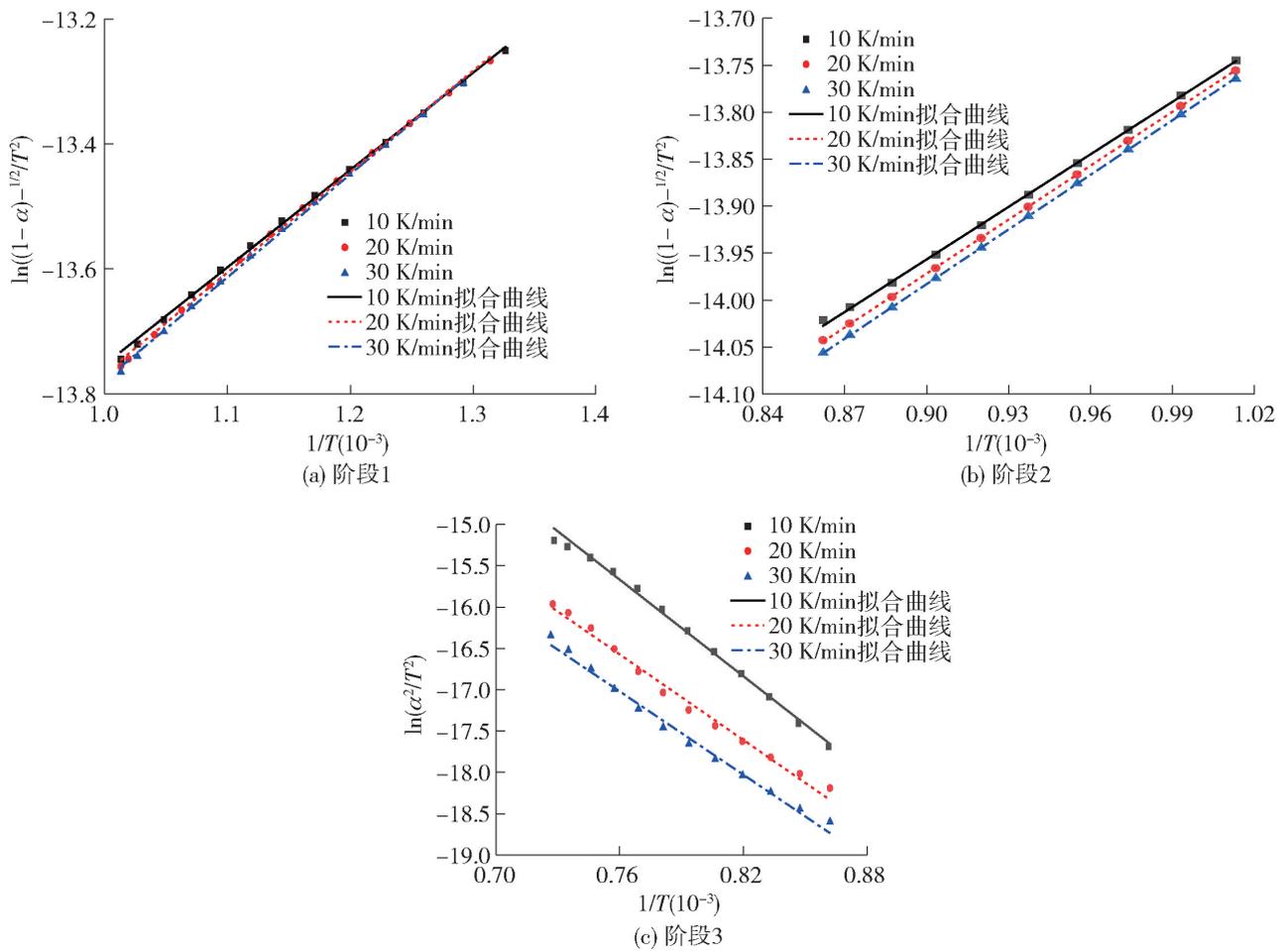


图5 Coats-Redfern 积分法最佳 R^2 积分函数模型拟合曲线

Fig. 5 Best R^2 integral function model fitting curves for the Coats-Redfern integration method

表4 不同升温速率下阳极炭渣燃烧反应动力学参数

Table 4 Kinetic parameters of the combustion reaction of anode carbon residue at different heating rates

阶段	升温速率/ $K \cdot \min^{-1}$	拟合方程	指前因子 A/\min^{-1}	活化能 $E/kJ \cdot \text{mol}^{-1}$
1	10	$y = 1\ 557.620x - 15.311$	-0.004	-12.94
	20	$y = 1\ 614.632x - 15.382$	-0.004	-12.75
	30	$y = 1\ 649.236x - 15.427$	-0.003	-13.71
2	10	$y = 1\ 863.310x - 15.634$	-0.003	-15.48
	20	$y = 1\ 913.453x - 15.694$	-0.003	-15.90
	30	$y = 1\ 938.105x - 15.727$	-0.003	-16.11
3	10	$y = -19\ 531.574x - 0.825$	84 124.094	162.08
	20	$y = -17\ 225.531x - 3.478$	5 603.936	143.67
	30	$y = -16\ 767.909x - 4.275$	2 454.609	139.85

3 结论

本文通过热分析实验和动力学分析相结合的方法探究了阳极炭渣燃烧特性着火模式和机理及影响燃烧的条件,得到以下主要结论。

1) TG-DTG-DSC 表明,在空气气氛下,阳极炭

渣燃烧情况受升温速率的影响;当升温速率为 30 K/min,着火温度和最大失重温度分别升高至 525.79 °C 和 1 085.79 °C,最大失重速率降低至 0.22%/°C,可燃性指数 C 降低,着火指数 C_i 增加,着火时释放热量升高至 790.38 kJ/g。

2) 阳极炭渣着火模式为非均相着火,不受升温

速率的影响,由于电解质含量高导致颗粒表面和内部温度不同步,使表面起火发生非均相着火。

3) Coats-Redfern 积分法计算结果表明,阳极炭渣在温度 476 ~ 886 °C 的燃烧拟合结果符合化学反应函数模型 $g(\alpha) = (1 - \alpha)^{-1/2}$,限制性环节主要由化学反应控制;在温度 886 ~ 1 100 °C 的燃烧拟合结果符合一维扩散积分函数模型 $g(\alpha) = \alpha^2$,限制性环节主要由扩散控制。

[参考文献]

- [1] LI B, ZHOU J, YAO Z, et al. Advances in the safe disposal and comprehensive utilization of spent carbon anode from aluminum electrolysis: Prospects for extraction and application of carbon resources from hazardous waste[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2021, 9:1 - 10.
- [2] 杨阳, 虎兴茂, 杨洪亮, 等. 电解铝炭渣高温焙烧熔融试验与物相分析研究[J]. *绿色矿冶*, 2024, 40(1):21 - 26.
YANG Yang, HU Xingmao, YANG Hongliang, et al. Research on high temperature melting test and phase analysis of electrolytic aluminum carbon residue[J]. *Sustainable Mining and Metallurgy*, 2024, 40(1):21 - 26.
- [3] SILVEIRA B, DANTAS A, BLASQUEZ J, et al. Characterization of inorganic fraction of spent potliners: evaluation of the cyanides and fluorides content[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2002, 89(2 - 3):177 - 183.
- [4] KONDRATEV V V, RZHECHITSKII E P, SHAKHRAI S G, et al. Recycling of electrolyzer spent carbon-graphite lining with aluminum fluoride regeneration[J]. *Metallurgist*, 2016, 60(6):571 - 575.
- [5] TURNER B D, BINNING P J, SLOAN S W. A calcite permeable reactive barrier for the remediation of fluoride from spent pot liner (SPL) contaminated groundwater[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2008, 95(3 - 4):110 - 120.
- [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] LÜ J, QIU H, LIN H, et al. Source apportionment of fluorine pollution in regional shallow groundwater at You'xi county southeast China[J]. *Chemosphere*, 2016, 158:50 - 55.
- [8] 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 Xiping, ZHAO Lin, LUO Zhongsheng. Study on recycling process for electrolyte in carbon dust from reduction cells[J]. *Light Metals*, 2009(12):21 - 25.
- [9] 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 Dengpeng, HOU Guanghui, HUANG Haibo. Experimental study on the treatment of aluminum reduction carbon residue by vacuum metallurgy[J]. *Light Metals*, 2016(4):25 - 27.
- [10] 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 Junyu, WU Chengbo, ZHANG Jiangbin, et al. Study of characteristic of carbon residue from electrolytic aluminum and its fluidization recovery [J]. *Nonferrous Metals (Extractive Metallurgy)*, 2014(12):16 - 18.
- [11] YU D, CHATTOPADHYAY K. Numerical simulation of copper recovery from converter slags by the utilisation of spent potlining (SPL) from aluminium electrolytic cells [J]. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 2016, 55(2):251 - 260.
- [12] 蒋奕锋, 王锋, 薛文华, 等. 生物质与煤混燃特性研究[J]. *能源科技*, 2022, 20(5):44 - 48.
JIANG Yifeng, WANG Feng, XUE Wenhua, et al. Study on the characteristics of biomass and coal co-combustion [J]. *Energy Technology*, 2022, 20(5):44 - 48.
- [13] LÓPEZ-GONZÁLEZ D, FERNANDEZ-LOPEZ M, VALVERDE J L, et al. Kinetic analysis and thermal characterization of the microalgae combustion process by thermal analysis coupled to mass spectrometry[J]. *Applied Energy*, 2014, 114:227 - 237.
- [14] VYAZOVKIN S, BURNHAM A K, CRIADO J M, et al. ICTAC Kinetics Committee recommendations for performing kinetic computations on thermal analysis data[J]. *Thermochimica Acta*, 2011, 520(2):1 - 19.
- [15] ZOU C, ZHANG L, CAO S, et al. A study of combustion characteristics of pulverized coal in O₂/H₂O atmosphere [J]. *Fuel*, 2014, 115:312 - 320.
- [16] NIU S, LU C, HAN K, et al. Thermogravimetric analysis of combustion characteristics and kinetic parameters of pulverized coals in oxy-fuel atmosphere [J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2009, 98(1):267 - 274.
- [17] 王新华. 煤矸石及其掺混生物质木屑的燃烧特性实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2019.
WANG Xinhua. Experimental investigation on combustion characteristics of coal gangue and coal gangue blended with sawdust[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [18] VYAZOVKIN S, BURNHAM A K, FAVERGEON L, et al. ICTAC Kinetics Committee recommendations for analysis of multi-step kinetics[J]. *Thermochimica Acta*, 2020, 689:1 - 60.
- [19] QU L N. A study on the prediction method of coal spontaneous combustion development period based on critical temperature[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2018, 25(35):35748 - 35760.

Study on the combustion dynamics of anode carbon residue

DUAN Zhongbo¹, WEN Junde², LIU Haifeng¹, ZHANG Yanrong¹, WU Xiangzi², BU Xudong², WANG Sheng²

(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 residue is a harmful solid waste generated during the aluminum electrolysis process. Enterprises often use the pyrometallurgical process to burn carbon to recover electrolytes from it. The pyrometallurgical process is a commonly used recycling process for the sustainable development of the aluminum industry, but the treatment process has problems such as insufficient combustion, low electrolyte recovery rate, and unclear combustion kinetics. This article uses TG-DSC analysis and dynamic analysis to study the combustion performance and dynamic control conditions of anode carbon slag, analyzes the influence of heating rate on the combustion process, and obtains the following conclusions. The heating rate has a significant impact on the combustion of anode carbon slag. When the heating rate is 30 K/min, the ignition temperature and maximum weight loss temperature increase to 525.79 °C and 1085.79 °C, respectively. The maximum weight loss rate decreases to 0.22%/°C, the flammability index C decreases, the ignition index C_i increases, and the heat release during ignition increases to 790.38 kJ/g. The high electrolyte content of anode carbon slag leads to asynchronous surface and internal temperatures of particles, and the ignition mode is heterogeneous ignition, which is not affected by the heating rate. The calculation results of Coats Redfern integration method show that the combustion fitting results of anode carbon slag at temperatures of 476 ~ 886 °C conform to the chemical reaction function model $g(\alpha) = (1 - \alpha)^{-1/2}$, the limiting step is mainly controlled by chemical reactions. The combustion fitting results at temperatures ranging from 886 to 1100 °C conform to the one-dimensional diffusion integral function model $g(\alpha) = \alpha^2$. The restrictive links are mainly controlled by diffusion.

Key words: aluminum electrolysis; anode carbon residue; fire roasting; combustion dynamics; electrolyte recovery; TG-DSC analysis; kinetic analysis

中铝科学院 3 项细晶锡磷青铜发明专利获授权

近日,中铝科学技术研究院有限公司(以下简称中铝科学院)3项细晶锡磷青铜发明专利获得国家知识产权局授权。

据了解,随着电子部件向小型化、微薄化方向发展,用于端子连接器的元件也向微型化发展,使元件的弯曲加工部的弯曲半径较之前弯曲半径更小,弯曲处更容易出现褶皱、橘皮和裂纹等缺陷。这要求锡磷青铜在具有更高机械强度的同时,还要具有优异的弯曲性,确保端子连接器的稳定性和使用寿命。

在中国铜业重点研发项目支持下,中铝科学院攻克了细晶锡磷青铜制备难题,开发基于晶界工程的形变热处理控制技术,制备出平均晶粒尺寸小于 1.6 μm、弯曲加工性优异的细晶锡磷青铜带材,相关成果获得 3 项发明专利授权,并在美国开展了相应的专利布局,不断增强中铝集团在铜基新材料产业链上的核心竞争力。

(资料来源:中国有色金属报)