

# 基于多重扫描速率法的 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 煅烧动力学研究<sup>①</sup>

邹婷<sup>1,2</sup>, 李中林<sup>1,2</sup>, 王丁<sup>1,2</sup>, 吕凤程<sup>1,2</sup>, 张伟光<sup>1,2</sup>, 李义兵<sup>1,2</sup>, 蒋学先<sup>3</sup>

(1. 桂林理工大学材料科学与工程学院, 广西 桂林 541000; 2. 桂林理工大学有色金属及材料加工新技术教育部重点实验室, 广西 桂林 541000; 3. 桂林理工大学(南宁分校)冶金与资源工程学院, 广西 南宁 530000)

**摘要:** 以氢氧化铝粉体为原料, 探究氢氧化铝煅烧为 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 过程中的相转变与微观组织变化, 利用多重扫描速率法对其煅烧过程进行动力学模拟计算。结果表明, 氢氧化铝煅烧为 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的优化条件为: 煅烧温度 1 200 °C、煅烧时间 2 h、升温速率 5 °C/min。氢氧化铝煅烧过程出现 3 个吸热峰, 对应 3 个失重阶段: 第一阶段反应机理函数为  $G(\alpha) = [(1-\alpha)^{-1/3} - 1]^2$ , 反应平均活化能为 91.16 kJ/mol, 指前因子  $17.00 \times 10^9 \sim 44.03 \times 10^9 \text{ min}^{-1}$ ; 第二阶段反应机理函数为  $G(\alpha) = \alpha^2$ , 反应平均活化能为 106.2 kJ/mol, 指前因子  $7.70 \times 10^9 \sim 18.60 \times 10^9 \text{ min}^{-1}$ ; 第三阶段反应机理函数为  $G(\alpha) = \alpha^{1/4}$ , 反应平均活化能为 235.42 kJ/mol, 指前因子  $39.94 \times 10^9 \sim 50.79 \times 10^9 \text{ min}^{-1}$ 。

**关键词:** 氢氧化铝; 氧化铝; 煅烧; 相变;  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; 热分析; 动力学; 多重扫描速率法

中图分类号: TF046

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.0253-6099.2024.02.026

文章编号: 0253-6099(2024)02-0106-06

## Calcination Kinetics of $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ by Multiple Scanning Method

ZOU Ting<sup>1,2</sup>, LI Zhonglin<sup>1,2</sup>, WANG Ding<sup>1,2</sup>, LYU Fengcheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Weiguang<sup>1,2</sup>, LI Yibing<sup>1,2</sup>, JIANG Xuexian<sup>3</sup>  
(1. School of Materials Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541000, Guangxi, China; 2. Key Laboratory of New Processing Technology for Nonferrous Metals and Materials, Ministry of Education, Guilin University of Technology, Guilin 541000, Guangxi, China; 3. School of Metallurgical and Resources Engineering, Guilin University of Technology at Nanning, Nanning 530000, Guangxi, China)

**Abstract:** With aluminum hydroxide powder as raw material, aluminum hydroxide was roasted into  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , and the phase transformation and microstructure change during the process were investigated. Then, the kinetics of the calcination process was calculated by simulation with multiple scanning method. It is found that the optimum conditions for aluminum hydroxide calcinated into  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  are as follows: calcination temperature of 1 200 °C, time of 2 h, heating rate of 5 °C/min. Three endothermic peaks can be observed during the calcination process of aluminum hydroxide, corresponding to three weightlessness stages. In the first stage of reaction, the function of mechanism is  $G(\alpha) = [(1-\alpha)^{-1/3} - 1]^2$ , the average activation energy is 91.16 kJ/mol and the pre-exponential factor is between  $17.00 \times 10^9$  and  $44.03 \times 10^9 \text{ min}^{-1}$ . In the second stage of reaction, the function of mechanism is  $G(\alpha) = \alpha^2$ , the average activation energy is 106.2 kJ/mol and the pre-exponential factor is between  $7.70 \times 10^9 \text{ min}^{-1}$  and  $18.60 \times 10^9 \text{ min}^{-1}$ . In the third stage of reaction, the function of mechanism is  $G(\alpha) = \alpha^{1/4}$ , the average activation energy is 235.42 kJ/mol, and the pre-exponential factor is between  $39.94 \times 10^9$  and  $50.79 \times 10^9 \text{ min}^{-1}$ .

**Key words:** aluminum hydroxide; aluminum oxide; calcination; phase transformation;  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; thermal analysis; kinetics; multiple scanning method

氧化铝是位于元素周期表中第ⅢA族元素铝的稳定氧化物。已有研究证明, 不同温度下煅烧得到的氧

化铝会呈现不同晶型, 共计有 10 多种同质异晶体<sup>[1-2]</sup>。晶型结构差异使得氧化铝物理化学性质不同, 从而运

① 收稿日期: 2023-11-01

基金项目: 广西科技计划项目(重大专项)(2022JBGSA01)

作者简介: 邹婷(1999—), 女, 湖南娄底人, 硕士研究生, 主要研究方向为有色金属冶炼。E-mail: zou1123ting1999@163.com

通信作者: 李义兵(1973—), 男, 湖南郴州人, 博士, 教授级高级工程师, 主要研究方向为有色金属冶炼。E-mail: lybgems@126.com

用于不同领域,目前应用比较广泛的3种氧化铝晶型为 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 型<sup>[3]</sup>,其中 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 化学性质极其稳定,是其他过渡晶型的最终转化形式<sup>[4-6]</sup>。 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 因其特殊的结构,具有高稳定性、高机械强度、高熔点及优良的光学性能和高温性能,已广泛应用于陶瓷材料、耐火材料、抛光打磨材料等领域<sup>[7-10]</sup>。

程序控制温度条件下,测定物质的某一物性参数随时间或温度变化关系的技术称为热分析技术<sup>[11-12]</sup>。热分析动力学就是利用热分析技术对材料热作用下的动力学行为进行研究,确定动力学的三要素:最概然机理函数、反应活化能、指前因子<sup>[13]</sup>,从而为理论研究和工业生产评定材料的稳定性和可靠性提供依据。关昕<sup>[14]</sup>等利用Popescu法研究薄水铝石向 $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 转变的脱水过程的动力学机理函数、活化能和指前因子,并将实验结果应用于工业生产中,得到高性能氧化铝粉。本文以中铝广西分公司平果铝厂生产的氢氧化铝粉为原料,使用固相煅烧法对氢氧化铝焙烧为 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 过程中的相转变过程及微观结构变化进行探究,并利用多重扫描速率法对氢氧化铝煅烧过程进行动力学模拟计算,此法不带任何假设条件,可信度高,研究结果对工业生产具有实际指导意义。

## 1 实验部分

### 1.1 实验原料与仪器

实验原料工业氢氧化铝由广西某铝业公司生产,平均粒度 $0.28\ \mu\text{m}$ ,其组成成分见表1。

表1 工业氢氧化铝组成成分(质量分数) %

$\text{Al}(\text{OH})_3$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SiO}_2$	$\text{Na}_2\text{O}$
97.38	1.59	0.67	0.36

工业氢氧化铝物相分析结果见图1。由图1可见, $\text{Al}(\text{OH})_3$ 晶型主要为三水铝石和拜耳石。

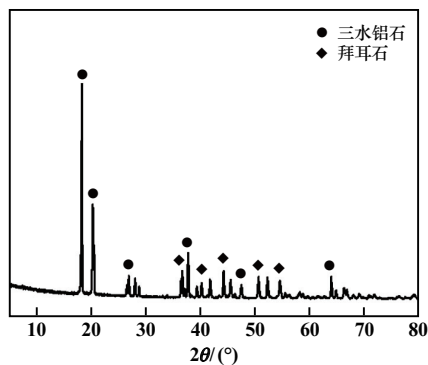


图1 工业氢氧化铝物相分析结果

主要实验仪器包括马弗炉、超声波清洗机、恒温磁力搅拌器、电热恒温鼓风干燥箱、电子天平等。

### 1.2 实验原理及方法

可以通过煅烧工业氢氧化铝得到 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。在煅烧初期,首先脱除氢氧化铝表面附着水和内部结晶水;升温至 $500\ ^\circ\text{C}$ ,氢氧化铝发生相转变,生成 $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;温度继续升高, $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 向其他过渡相氧化铝转变;温度达到 $1100\ ^\circ\text{C}$ 时, $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 开始成核,少量 $\theta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 转变为 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ; $1200\ ^\circ\text{C}$ 以后,中间过渡相氧化铝转变为稳定的 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ <sup>[15]</sup>。

称取 $1.0\ \text{g}$ 工业氢氧化铝粉体试样置于马弗炉中,设置不同温度,随炉加温焙烧得到不同晶型的氧化铝。

### 1.3 实验测试与表征

使用STA-449F5型综合热分析仪对氢氧化铝煅烧为氧化铝过程进行热重和差示扫描量热分析;利用X'Pert PRO型X射线衍射仪分析焙烧后氢氧化铝的物相;采用S-4800型场发射扫描电子显微镜分析粉体试样的微观形貌;采用Morphologi 4型马尔文粒度分析仪分析粉体粒度。

### 1.4 热分析动力学计算

Popescu提出测定不同升温速率下的一组热重曲线的多重扫描速率法,简单处理动力学积分式之后得到式(1)<sup>[16]</sup>。一定 $\alpha$ 和 $\beta$ 范围内, $f(\alpha)$ 和 $k(T)$ 均保持不变, $G(\alpha)$ 与 $1/\beta$ 的关系就是一条通过原点的直线,此时的 $G(\alpha)$ 为能反映真实化学过程的反应机理函数。

$$G(\alpha) = \frac{\int_{\alpha_m}^{\alpha_n} d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{1}{\beta} \int_{T_m}^{T_n} k(T) dT \quad (1)$$

式中 $G(\alpha)$ 为积分形式的反应机理函数; $f(\alpha)$ 为微分形式的反应机理函数; $\alpha$ 为转化率; $\beta$ 为升温速率, $\text{K}/\text{min}$ ;  $T$ 为温度, $\text{K}$ ;  $k(T)$ 为速率常数。

假定升温速率保持在 $\alpha$ 和 $\beta$ 之间,同时选取 $T_m$ 、 $T_n$ 两个温度并做一条垂线交叉到不同升温速率线上,得到多组关于温度不变时的 $(\alpha_m, \alpha_n)$ 值。因为不同的升温速率对应的 $T_m$ 、 $T_n$ 值相同,将以上数据结合机理函数代入动力学计算,将得到的不同 $G(\alpha)$ 值对 $1/\beta$ 作图,选择截距趋向于0的机理函数。之后,根据式(2)~(3)计算得到反应活化能和指前因子。

$$\ln \frac{\beta}{T_n - T_m} = \ln \left( \frac{A}{G(\alpha)_{mn}} - \frac{E}{RT\xi} \right) \quad (2)$$

$$T\xi = \frac{T_m + T_n}{2} \quad (3)$$

式中 $E$ 为反应活化能, $\text{kJ}/\text{mol}$ ;  $R$ 为气体常数, $R = 8.314\ \text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ;  $A$ 为指前因子, $\text{s}^{-1}$ 。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 样品表征

#### 2.1.1 X射线衍射分析

采用等温梯度法煅烧氢氧化铝,找出相转变温度区间,最后确定适宜的煅烧温度,氢氧化铝在不同煅烧温度下所得产物的XRD分析结果如图2所示。可以看出,300~900℃煅烧,氢氧化铝不能转化为氧化铝;1100℃煅烧,煅烧产物的衍射峰主要是 $\theta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,只存在少量 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的衍射峰;随着温度不断升高, $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量逐渐增加,其衍射峰不断增强,温度升高至1200℃时,只存在 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 衍射峰,此时 $\theta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 全部转化成了 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 。由此可知,氢氧化铝样品煅烧为氧化铝的适宜温度为1200℃。

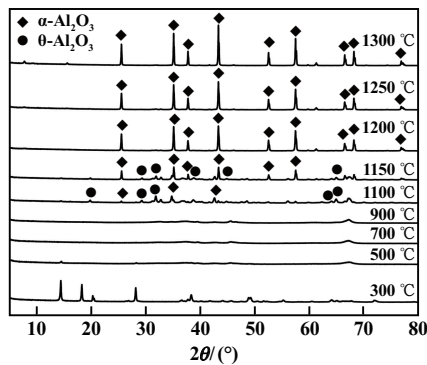


图2 氢氧化铝在不同煅烧温度下所得产物的XRD图谱

氢氧化铝在不同煅烧制度下所得产物的XRD图谱见图3。

煅烧温度1200℃、升温速率5℃/min,煅烧时间2h和4h所得样品的XRD衍射峰强度基本一样,但煅烧时间越长,能耗越高。适宜的煅烧时间为2h。

煅烧时间均为2h,煅烧温度相同时,升温速率5℃/min、10℃/min的2组图谱峰形及衍射峰强度基本一样,但随着煅烧温度降低,升温速率10℃/min样品的图谱中出现微弱杂峰,煅烧不完全。由此可知,升温速率5℃/min优于10℃/min。

煅烧时间2h、升温速度5℃/min,煅烧温度1200℃和1180℃时,用含极少量赤泥的坩埚煅烧氢氧化铝能有效降低氢氧化铝转变为 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的相变温度,且煅烧后产物没有杂峰,纯度更高。

综上所述,氢氧化铝煅烧为 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的适宜条件为:煅烧温度1200℃、煅烧时间2h、升温速率5℃/min。

#### 2.1.2 产物 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粒度分析

测量适宜煅烧条件下得到的产物粒度,结果如图4所示。由图4可知,产物 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 粒度大部分位于亚微米级内,90%颗粒粒径小于2.30 $\mu\text{m}$ , $D_{50}=0.82\mu\text{m}$ 。

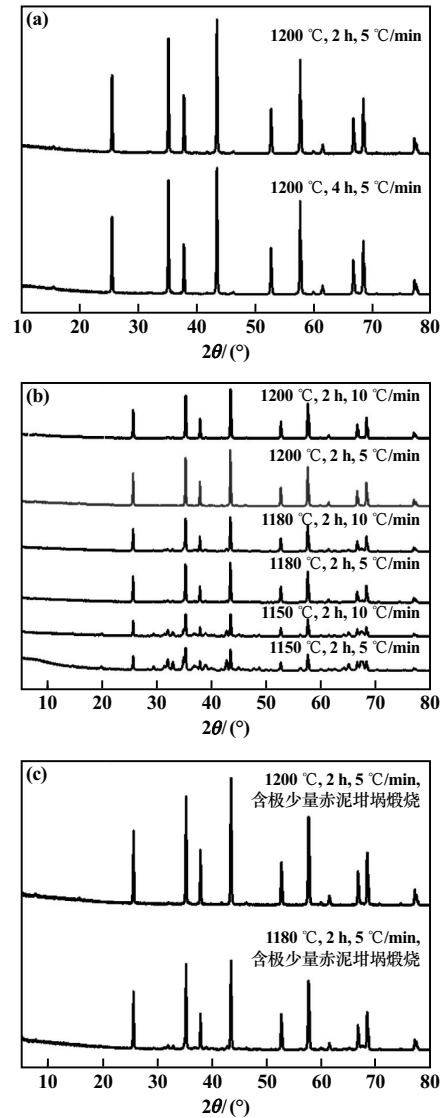


图3 氢氧化铝在不同煅烧制度下所得产物的XRD图谱

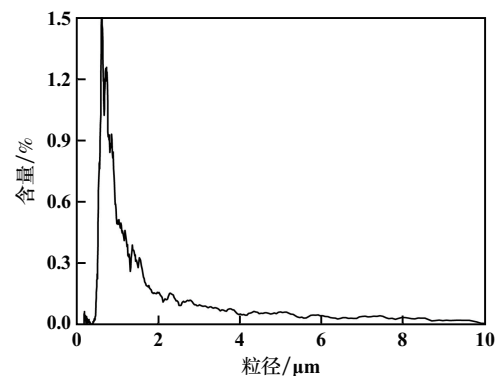
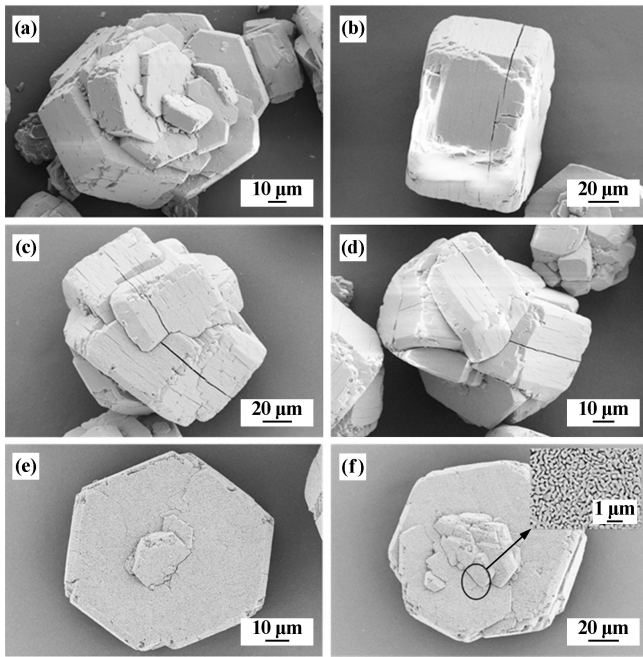


图4 适宜煅烧制度下所得产物的粒度分析结果

#### 2.1.3 焙烧产物形貌分析

煅烧时间2h、升温速率5℃/min,氢氧化铝在不同煅烧温度下煅烧后所得产物的显微结构见图5。从图5可以看出,氢氧化铝经不同温度煅烧后,其形状都

为六方柱体层状结构。500 °C 煅烧后开始出现裂纹,原因是此时氢氧化铝脱水形成  $\gamma$ - $\text{AlOOH}$ , 体积收缩; 900~1 100 °C 煅烧时裂纹加深, 这是由于氧化铝在此温度区间内发生了晶型转变, 体积密度小的  $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  和  $\gamma$ - $\text{AlOOH}$  分解为  $\eta$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\gamma$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 体积收缩变大; 1 200 °C、1 300 °C 煅烧时, 样品表面观察到蠕虫状晶粒, 这是因为此煅烧温度下存在稳定的物相  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 由于焙烧温度远低于其熔点 (2 050 °C), 此时晶体生长及能量转换的主要形式是固相传质, 多个细小颗粒间通过蒸汽压及能量结合的方式不断接触、融合, 从而呈现蠕虫状结构<sup>[15]</sup>。



(a) 300 °C; (b) 500 °C; (c) 900 °C;  
(d) 1 100 °C; (e) 1 200 °C; (f) 1 300 °C

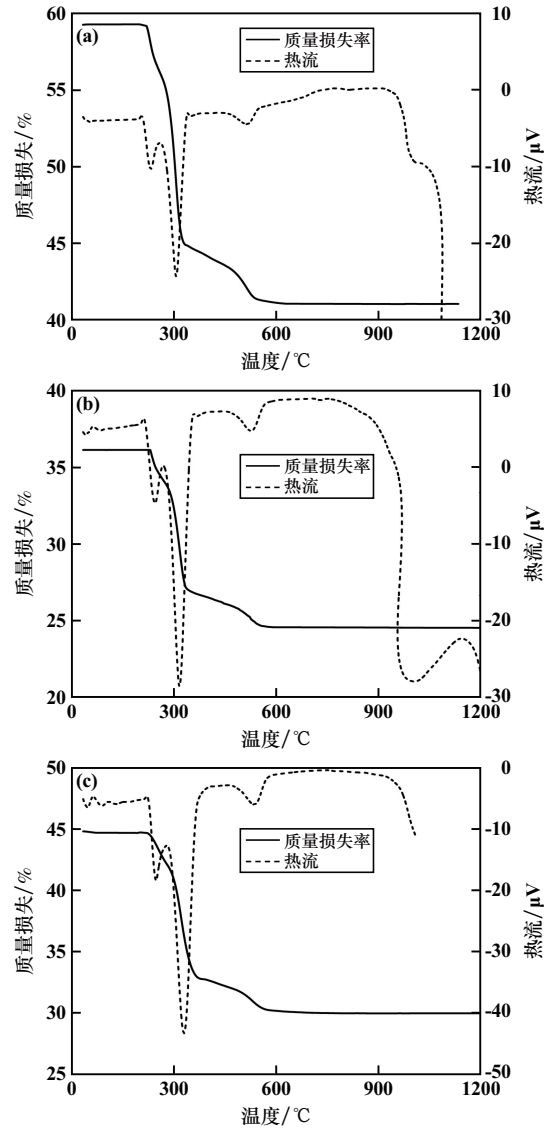
图 5 氢氧化铝在不同煅烧温度下所得产物的显微结构

## 2.2 动力学模拟分析

### 2.2.1 氢氧化铝在不同升温速率下煅烧时的 TG-DSC 分析

将氢氧化铝粉置于马弗炉中, 在氮气气氛中以不同升温速率从室温升温到 1 200 °C, 不同升温速率下氢氧化铝的 TG-DSC 曲线如图 6 所示。由图 6 可知, 第一阶段是氢氧化铝的脱水过程, 发生在 214~270 °C, 平均质量损失为 5.5%, 主要是氢氧化铝失去附着水和部分结晶水变成羟基氧化铝 ( $\text{AlOOH}$ ) 所致; 第二阶段发生吸热反应, 吸热峰出现在 270~370 °C, 发生反应  $\text{Al}(\text{OH})_3 \rightarrow \text{AlOOH} + \text{H}_2\text{O}$ , 导致失重曲线迅速下降, 平均失重约 20.0%; 第三阶段吸热峰出现在 465~569 °C, 平均失重约 4.0%, 发生反应  $\text{AlOOH} \rightarrow \delta\text{-Al}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O}$ ,

失重主要归因于分解蒸发的水; 另外, 在 1 000 °C 有微弱吸热峰, 主要原因是  $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$  转变为  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ , 且随着反应的进行,  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  相含量不断增加; 900 °C 出现微弱放热峰的原因是  $\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$  发生反应, 转变为  $\theta\text{-Al}_2\text{O}_3$ ; 从室温升高到 1 200 °C 的过程中总失重约 29.5%。



(a) 5 °C/min; (b) 10 °C/min; (c) 15 °C/min

图 6 不同升温速率下氢氧化铝的 TG-DSC 曲线

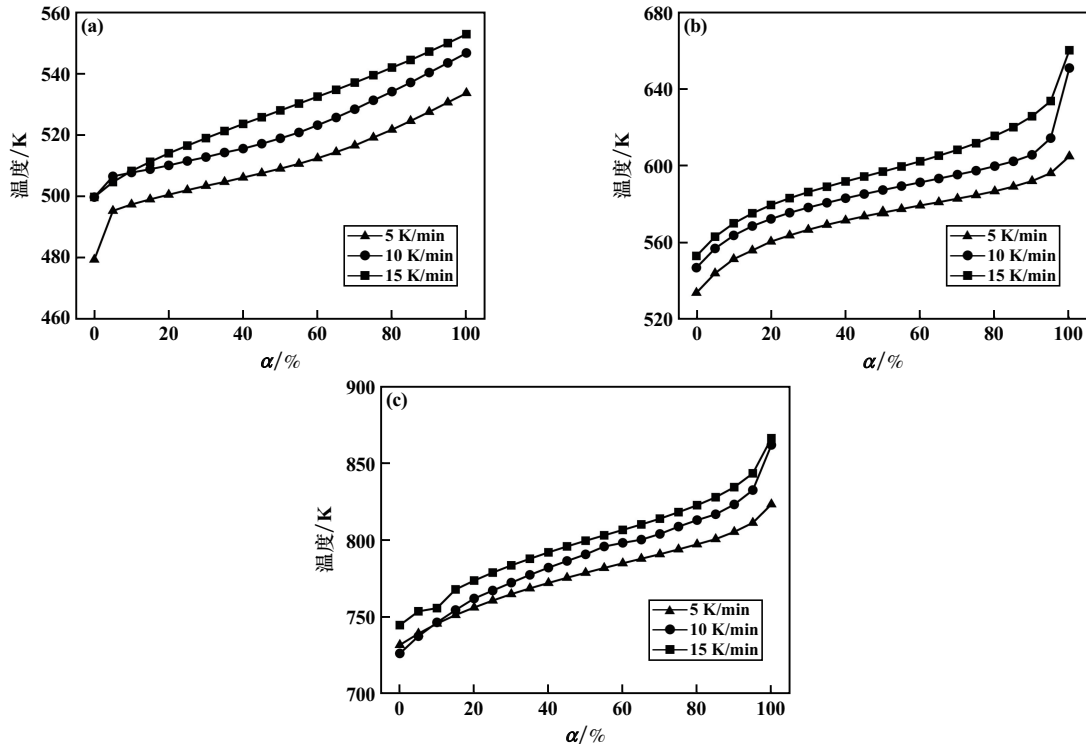
### 2.2.2 拟合最概然机理函数模型及求解活化能 $E$ 和指前因子 $A$

以不同升温速率下的 3 个吸热峰为研究对象, 将其对应的质量损失看作一个单位 (质量损失可看出反应进行的程度), 以 0.05 个单位为间隔, 分别求质量损失从 0.05~0.95 时对应的温度, 作出不同升温速率下氢氧化铝的  $\alpha$ - $T$  曲线, 如图 7 所示。

选取升温速率 5 K/min、反应度 0.95 时对应的温度为  $T_n$ ; 升温速率 15 K/min、反应度 0.05 时对应的温

度为  $T_m$ , 之后找到  $T_m$ 、 $T_n$  对应的不同升温速率下的反应度, 如表 2 所示。利用多重扫描速率法得到相应的  $\beta_i$ 、 $\alpha_m$  和  $\alpha_n$  值, 根据  $G(\alpha)$  与  $\beta$  的关系确定拟合最概然机理函数模型, 如表 3 所示。由表 2~3 可知, 氢氧

化铝第一吸热阶段描述的是固体进行三维扩散时的反应模型; 第二吸热阶段描述的是固体进行一维扩散时的模型; 第三吸热阶段描述的是幂函数法则  $P_1$ ,  $n=1/4$  的加速型  $\alpha$ - $T$  曲线。



(a) 第一反应阶段; (b) 第二反应阶段; (c) 第三反应阶段

图 7 不同反应阶段不同升温速率下的  $\alpha$ - $T$  曲线

表 2 不同升温速率下的反应度数据

升温速率/ ( $K \cdot \text{min}^{-1}$ )	反应度					
	第一阶段		第二阶段		第三阶段	
	$T_n$ (531 K)	$T_m$ (505 K)	$T_n$ (596 K)	$T_m$ (563 K)	$T_n$ (531 K)	$T_m$ (505 K)
5	0.95	0.35	0.95	0.25	0.95	0.18
10	0.75	0.05	0.72	0.10	0.75	0.15
15	0.55	0.05	0.50	0.05	0.66	0.05

表 3 各阶段反应机理函数及拟合结果

反应阶段	$G(\alpha)$	相关系数( $R^2$ )	截距
第一阶段	$[(1-\alpha)^{-1/3}-1]^2$	0.964 6	-11.1
第二阶段	$\alpha^2$	0.995	-1.37
第三阶段	$\alpha^{1/4}$	0.999 9	0.64

选定反应度分别为 0.3, 0.5, 0.7, 得到不同升温速率在同一反应度下对应的温度值, 代入式 (2)、式 (3) 中, 以  $1/(T\xi)$  为横坐标,  $\ln[\beta/(T_n - T_m)]$  为纵坐标作图, 根据图形斜率求  $E$ 、截距求  $A$ , 结果如表 4 所示。由表 4 可知, 氢氧化铝第一失重阶段的活化能随着反应的进行而升高, 活化分子数所占比例越来越小, 产物活性逐渐变小, 同时指前因子随着反应进行不断减小, 碰

撞效应随着时间增加而减小, 使得反应速率越来越慢; 第二失重阶段的活化能随着反应进行而降低, 指前因

表 4 各反应阶段活化能、指前因子线性回归结果

反应阶段	$\alpha_n - \alpha_m$	$E/(kJ \cdot \text{mol}^{-1})$	$A/(10^9 \text{ min}^{-1})$
第一阶段	0.3~0.5	78.78	44.03
	0.5~0.7	103.54	17.00
	平均	91.16	30.52
第二阶段	0.3~0.5	129.85	18.60
	0.5~0.7	82.55	7.70
	平均	106.20	13.15
第三阶段	0.3~0.5	241.38	39.94
	0.5~0.7	229.46	50.79
	平均	235.42	45.36

子随着反应进行不断减小,但是根据阿伦尼乌斯公式: $K=Ae^{-E_a/(RT)}$ ,速率常数 $K$ 与活化能是指数关系,与指前因子是线性关系,因此反应速率是逐渐增大的;第三失重阶段的活化能随着反应进行而降低,指前因子随着反应进行不断增大,反应速率逐渐增大。

### 3 结 论

1) 氢氧化铝煅烧为 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的适宜条件为:煅烧温度 $1200\text{ }^\circ\text{C}$ 、煅烧时间 $2\text{ h}$ 、升温速率 $5\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ ;在含极少量赤泥的坩埚中煅烧氢氧化铝能有效降低 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 相变温度。

2) TG-DSC 分析结果表明,氢氧化铝煅烧为 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 的整个过程失重约 $29.5\%$ ,其间经历了 $\delta$ 、 $\gamma$ 、 $\eta$ 、 $\theta$ 、 $\alpha$ 多种晶型转变,发生 $\gamma$ 转变时,脱水严重,表面开始产生裂纹,比表面积达到最大值,焙烧而成的 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 呈六棱柱片状结构, $D_{50}=0.82\text{ }\mu\text{m}$ 。

3) 利用多重扫描速率法求解了氢氧化铝煅烧各阶段符合的动力学模型,通过 $\ln[\beta/(T_n - T_m)]$ 与 $1/(T\xi)$ 的图形斜率和截距得出反应的活化能和指前因子。第一阶段反应机理函数为 $G(\alpha)=[(1-\alpha)^{-1/3}-1]^2$ ,描述的是固体进行三维扩散时的反应模型,反应平均活化能为 $91.16\text{ kJ/mol}$ ,指前因子 $17.00 \times 10^9 \sim 44.03 \times 10^9\text{ min}^{-1}$ ;第二阶段反应机理函数为 $G(\alpha)=\alpha^2$ ,描述的是固体进行一维扩散时的模型,反应平均活化能为 $106.2\text{ kJ/mol}$ ,指前因子 $7.70 \times 10^9 \sim 18.60 \times 10^9\text{ min}^{-1}$ ;第三阶段反应机理函数为 $G(\alpha)=\alpha^{1/4}$ ,描述的是幂函数法则 $P_1, n=1/4$ 的加速型 $\alpha$ - $T$ 曲线,反应平均活化能为 $235.42\text{ kJ/mol}$ ,指前因子 $39.94 \times 10^9 \sim 50.79 \times 10^9\text{ min}^{-1}$ 。

#### 参考文献:

[1] 赵淋,车洪生,李波,等.  $\alpha$ -氧化铝标准样品晶胞参数的测定研究[J]. 轻金属, 2022(8):13-16.

- [2] 侯欣怡,黄灏彬,李一凡,等. 稳定与多变— $\alpha$ -氧化铝:从性质、合成到应用[J]. 中国陶瓷工业, 2022,29(5):30-38.
- [3] 邱枫,孙果宋. 氧化铝的分类及应用[J]. 化工技术与开发, 2016(1):23-27.
- [4] 侯焕焕,胡博强,王建立,等.  $\alpha$ -氧化铝结晶形态对研磨性能的影响[J]. 轻金属, 2022(6):13-15.
- [5] 范志平,雷占昌,费发源,等. 某三水铝石型铝土矿溶出试验研究[J]. 矿冶工程, 2022,42(5):115-118.
- [6] 徐敬尧,周小丽,卿培林. 高温固相法制备片状 $\alpha$ 氧化铝粉体的工艺研究[J]. 广东化工, 2021,48(15):18-19.
- [7] YANG H B, LI L, LI Y Y, et al. Unveiling exceptional sinterability of ultrafine  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanopowders[J]. Journal of Materiomics, 2021, 7(4):837-844.
- [8] 徐平坤. 我国耐火纤维的发展进程及应用前景[J]. 耐火与石灰, 2022,47(5):1-4.
- [9] HU H, LUO L. Fabrication and flexural strength of porous  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics with  $\text{Li}_2\text{CO}_3$  and  $\text{Y}_2\text{O}_3$  as sintering additives[J]. Journal of Central South University, 2020,27(9):2548-2556.
- [10] 李有奇,王冰伟,张宇翠,等. 工业氧化铝粉粒度对制备活性 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 微粉的影响[J]. 耐火材料, 2020,54(3):214-218.
- [11] 邹涛,赵瑾,郭姝,等. 浅谈国内热分析技术的发展与应用[J]. 分析仪器, 2019(6):9-12.
- [12] 康顺吉. 热分析动力学在不同领域应用的研究[J]. 科技创新与应用, 2019(16):157-158.
- [13] 任宁,王昉,张建军,等. 热分析动力学研究方法的新进展[J]. 物理化学学报, 2020,36(6):12-18.
- [14] 关昕,王晶,史忠祥. 水热法制备薄水铝石粉体及其脱水动力学分析[J]. 大连交通大学学报, 2018,39(4):77-82.
- [15] 陈玮.  $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 形成过程显微结构演变及其调控[D]. 长沙:中南大学, 2010.
- [16] LIU Zheng-gen, WANG Zheng, TANG Jue, et al. Non-isothermal thermal decomposition kinetics of high iron gibbsite ore based on Popescu method[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2015,25(7):2415-2421.

引用本文: 邹婷,李中林,王丁,等. 基于多重扫描速率法的 $\alpha$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ 煅烧动力学研究[J]. 矿冶工程, 2024,44(2):106-111.