

氰胺生产废渣焚烧过程的活化能研究

刘森森¹, 王萌菲¹, 高琪¹, 张云飞², 葛保鑫³, 张大磊¹, 齐元峰^{1,*}

(1. 青岛理工大学 环境与市政工程学院, 青岛 266525;

2. 浙江坚膜科技有限公司, 衢州 324102; 3. 中化环境设备工程(江苏)有限公司, 无锡 214000)

摘要: 采用反卷积法对氰胺废渣焚烧过程数值拆分, 对比研究微分、积分 2 种算法对其活化能求解的差异。结果表明: 基于氰胺废渣焚烧全过程热重/微分热重(TG/DTG)分析数据, 采用高斯函数可反卷积拆分为代表 2 个独立反应的 TG/DTG 数据组。对于这 2 个独立反应, Friedman 算法得到的活化能分别为 172.75 和 126.38 kJ/mol, Flynn-Wall-Ozawa(FWO)算法得到的活化能分别为 164.55 和 138.13 kJ/mol。偏差分析发现 Friedman 算法和 FWO 算法均能获得准确的活化能数值。

关键词: 活化能; 热动力学分析; 氰胺废渣; 固体废物

中图分类号: X786 文献标志码: A 文章编号: 1673-4602(2025)03-0079-08

Study on the activation energy of the incineration process of waste residue from cyanamide production

LIU Sensen¹, WANG Mengfei¹, GAO Qi¹, ZHANG Yunfei², GE Baoxin³, ZHANG Dalei¹, QI Yuanfeng^{1,*}

(1. School of Environmental and Municipal Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao 266525, China;

2. Zhejiang Jianmo Technology Co., Ltd., Quzhou 324102, China;

3. Sinochem Environment Equipment Engineering (Jiangsu) Co., Ltd., Wuxi 214000, China)

Abstract: Deconvolution method was employed to separate the thermal data of cyanamide waste incineration, and the discrepancy between the differential and integral algorithms in calculating the activation energy was studied. The results indicated that the Gaussian function was efficient in deconvolving the TG/DTG data of cyanamide waste incineration into two independent TG/DTG data groups. The mean activation energies of the two deconvolved reactions obtained through differential Friedman algorithm were 172.75 and 126.38 kJ/mol, and the activation energies calculated via Flynn-Wall-Ozawa (FWO) algorithm were 164.55 and 138.13 kJ/mol, respectively. Error analysis shows that both Friedman algorithm and FWO algorithm can obtain accurate activation energy values.

Key words: activation energy; thermal kinetic analysis; cyanamide waste residue; solid waste

收稿日期: 2023-11-29

基金项目: 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)(2020CXGC011204); 泰山学者工程专项经费项目(tsqn202306235); 浙江省省级工业新产品开发立项计划(202304A00727); 江山市竞争性科技攻关-碳达峰碳中和专项(2023C05); 江山市竞争性科技攻关-科技型小微企业创新专项(JS2022K12)

作者简介: 刘森森(1999—), 男, 山东潍坊人。硕士, 研究方向为固体废物的资源化利用。E-mail: liusenseny@163.com。

* 通信作者: 齐元峰(1985—), 男, 山东淄博人。博士, 副教授, 主要从事高浓度精细化工废水处理技术研究与工程实施、环保催化剂研发与应用和环境 AI 智能运营模型等方面的研究。E-mail: qi yuanfeng@qut.edu.cn。

氰胺作为精细化工、农药等行业的重要原料,需求量呈现逐年递增的趋势^[1]。氰胺生产不可避免地会排放大量的固体废渣,其主要成分为水、少量残留的氰胺类含氮化合物、碳酸钙和炭黑等物质^[2],如果不进行有效且安全地处置,将直接对环境生态以及人类生活健康造成很大的负面影响^[3-4]。

富氧焚烧是氰胺废渣安全、经济、有效的热处理方法。随着焚烧温度的逐渐升高,氰胺废渣中残存的水分在低温阶段通过蒸发实现去除;所含的炭黑组分在中温环境下焚烧并释放能量,进一步降低了整体焚烧费用。焚烧的高温阶段可以实现对碳酸钙组分的精制,伴随着温度的继续升高,这些碳酸钙将进一步转化为氧化钙同时释放出二氧化碳。此外,废渣中的氰胺类含氮化合物在中温以及高温环境下实现了彻底的脱除^[5-6],焚烧剩余残渣满足普通建筑原材料的基本要求^[7]。因此氰胺废渣的非等温焚烧过程既可以最大程度利用焚烧产生的能量,又可实现对产物的最终资源化利用。然而,氰胺废渣成分复杂,加之非等温的焚烧过程加剧了描述焚烧行为的复杂性,因此对氰胺废渣焚烧反应的动力学描述相对匮乏。根据国际热分析协会(ICTAC)建议^[8-9],采用热分析技术获取的热性质数据(例如 TG、DTG 等),基于不同的算法开展活化能的计算是实现氰胺废渣复杂焚烧过程分析的一种途径。然而 ICTAC 提出的诸多算法都是针对单步反应的,对于复杂多步反应而言,基于高斯函数的反卷积法是实现多步反应变成单步反应的一种方法,然而这种反卷积分析方法尚未用于描述氰胺废渣焚烧过程。

为此,本研究通过开展模拟焚烧实验获取热分析曲线,采用高斯函数对微分热重曲线进行反卷积拆分,从而求得氰胺废渣焚烧过程的活化能,对比考察 Friedman 和 FWO 2 种算法对活化能求解的差异。本研究可以为氰胺废渣的合理处置和资源化利用提供参考。

1 材料与实验方法

1.1 实验材料和仪器

本实验所用废渣取自河北某化工制药企业石灰氮生产氰胺排放的残渣。将上述氰胺废渣放入 105 °C 恒温鼓风干燥箱烘干 24 h 至恒重,随即研磨粉碎至 200 目(74 μm)并放置在玻璃瓶中密封保存。氰胺废渣焚烧使用的合成空气购自青岛伟滨特种气体有限公司,其所含氧气(纯度 99.99%)与氮气(纯度 99.99%)的体积比为 21:79。氰胺废渣的模拟焚烧实验使用热失重分析仪(TG/DTG,上海皆准仪器设备有限公司),质量精度 0.1%;样品制样使用 YPJ-II 坩埚压片机(上海皆准仪器设备有限公司)。

1.2 非等温焚烧数据的收集与反卷积处理

氰胺废渣非等温焚烧实验的具体流程为:首先称取(80±0.2)mg 烘干后的氰胺废渣,制备为直径 5 mm 的样品片并放置于热失重分析仪分析台;随后设定升温速率(β_i)为 3.5、4.5、5.5 和 6.5 K/min,温度阈值 300~1273 K,气体流量为 0.2 L/min,开展模拟焚烧,并对整个焚烧过程的温度-质量-时间数值进行实时收集。数据收集密度为 10 个/min。每种升温速率重复测试 2 次,并取平均值。

用 Origin 2021 中自带的高斯函数对 DTG 数据进行反卷积拆分处理,高斯函数的密度方程如式(1)所示:

$$y = y_0 + \frac{A}{w\sqrt{\frac{\pi}{2}}} e^{-2\frac{(x-x_c)^2}{w^2}} \quad (1)$$

式中: y_0 为基线高度; A 为积分面积; w 为峰宽; x_c 为中心峰值点(峰值点温度)。

1.3 数值计算

通过式(2)对 TG 曲线进行归一化处理,并采用式(3)计算焚烧反应程度:

$$TG = \frac{W_t/W_0}{W_e/W_0} \times 100\% \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{W_0 - W_t}{W_0 - W_e} \quad (3)$$

式中: α 为反应程度; W_0 为样本在反应初始的质量; W_t 为样本在 t 时刻的瞬时质量; W_e 为样本在反应结束时的最终质量。

采用 Friedman 算法和 Flynn-Wall-Ozawa(FWO)算法对氰胺废渣富氧焚烧过程发生的 2 个反应的活化能进行计算,如式(4)和式(5)所示:

$$\ln\beta_i \frac{d\alpha}{dT} = \ln A_{\alpha} f(\alpha) - \frac{E_{\alpha}}{RT_{\alpha,i}} \quad (4)$$

$$\ln\beta_i = \ln \left[\frac{A_{\alpha} R}{E_{\alpha} g(\alpha)} \right] - 5.311 - 1.052 \frac{E_{\alpha}}{RT_{\alpha,i}} \quad (5)$$

式中: α 为反应程度; T 为反应温度,K; β_i 为升温速率,K/min; E_{α} 为反应进行到 α 时的活化能,kJ/mol; A_{α} 为 α 情况下的指前因子, min^{-1} 或 s^{-1} ;R 为普适常数,8.314 J/(K·mol); $T_{\alpha,i}$ 为升温速率为 β_i 时反应达到 α 的温度,K; $f(\alpha)$ 、 $g(\alpha)$ 为反应模型。

Friedman 算法通过拟合 $\ln\beta_i \frac{d\alpha}{dT}$ 与 $\frac{1}{T}$ 之间的线性关系达到求解活化能 E_{α} 的数值;FWO 算法则是通过 $\ln\beta_i$ 与 $\frac{1}{T}$ 拟合的线性关系实现活化能 E_{α} 的求解。上述算法的计算结果精确到小数点后 2 位。

2 结果与分析

2.1 氰胺废渣富氧焚烧过程质量行为曲线分析

当升温速率 $\beta_i \in [3.5, 4.5, 5.5, 6.5]$ 时,氰胺废渣富氧焚烧热重/微分热重(TG/DTG)曲线如图 1(a)(b)所示。可以看出,随着温度从 400.00 K 升高到 1067.20 K, TG 整体呈现出 50%左右的质量损失,并且在 TG 曲线上出现 2 个质量损失的台阶,第 1 个台阶出现在 720~900 K;第 2 个台阶发生在 900~1100

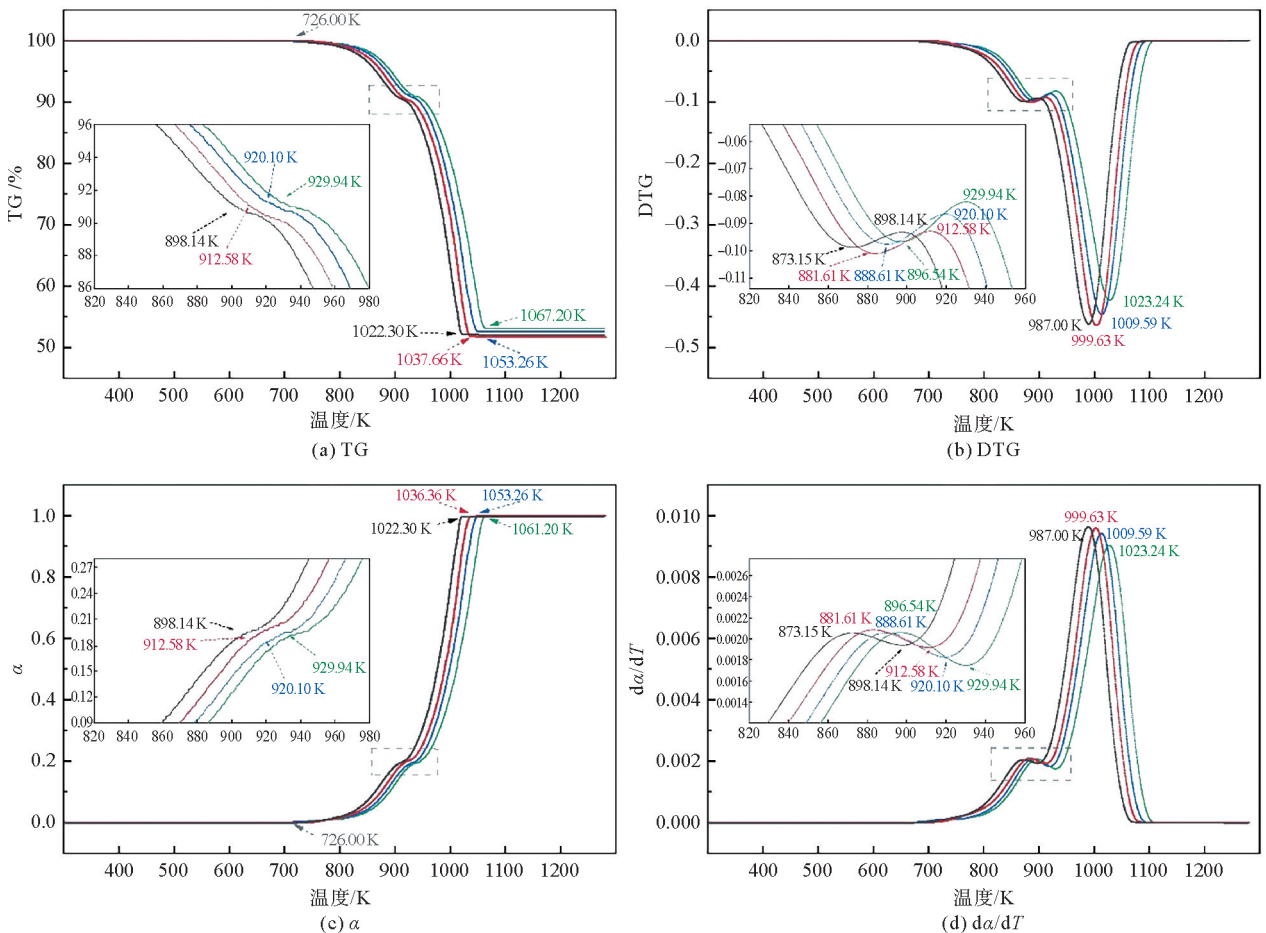


图1 氰胺废渣焚烧过程的曲线

— $\beta=3.5$ K/min; — $\beta=4.5$ K/min; — $\beta=5.5$ K/min; — $\beta=6.5$ K/min

K。尤其需要注意的是, TG 2个台阶之间的拐点随着升温速率的升高逐渐右移; DTG 曲线的2个峰值也随着升温速率的升高呈现出逐渐右移的现象。这种随着升温速率的升高热分析曲线逐渐右移的现象,是由于温度热滞后效应导致的。通过 TG 曲线的拐点与2个对应的 DTG 曲线峰可以看出,在氰胺废渣的焚烧过程中出现了2个连续的反应,并且这2个反应的交叉点出现在 TG 的拐点处,也就是 DTG 曲线的峰肩位置。以温度范围结合废渣成分进行分析,第1段的降重是由炭黑的焚烧^[10-11]引起的,第2阶段的降重则是由碳酸钙分解^[12]导致的。

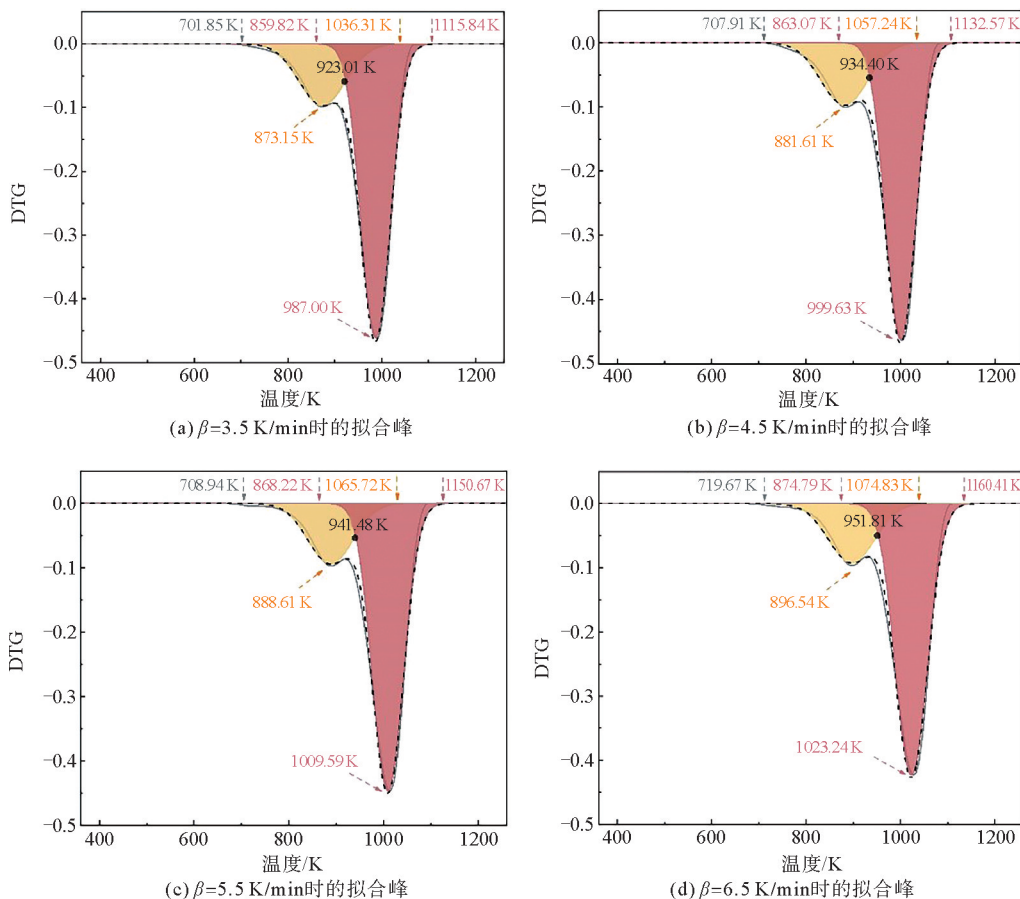
从图 1(c)的转化率曲线可以看出,氰胺废渣的焚烧过程主要发生在 700~1100 K,并且转化率曲线与 TG 曲线呈现相同的规律;相应的, $d\alpha/dT$ 曲线也呈现 2 个转化率的峰,并且每个具体的升温速率下的峰值位置都与 DTG 曲线中的一一对应。

2.2 氰胺废渣焚烧过程的反卷积拆分

数据的拆分在 Origin 2021 软件中开展,具体操作如下:根据式(1)首先设定基线高度 y_0 为 0;其次中心峰值点 x_c 选取 DTG(图 1(b))中的具体峰值温度点进行固定,与升温速率 β_i 为 3.5、4.5、5.5、6.5 K/min 相对应,第 1 个峰的峰值点 x_{c1} 依次为 873.15、881.61、888.61、896.54 K,第 2 个峰的峰值点 x_{c2} 依次设定为 987.00、999.63、1009.59、1023.24 K。在 4 种升温速率($\beta_i = 3.5、4.5、5.5、6.5$ K/min)下,通过高斯函数对 DTG 曲线进行反卷积拆分-拟合的结果如图 2(a)~(d)所示,具体拆分-拟合的参数如表 1 所示。

可以看出,在固定峰值情况下拟合得到的 R^2 都在 99% 以上,因此高斯函数非常适合于氰胺废渣焚烧过程 DTG 曲线拆分。高斯函数可以完整地 从氰胺废渣焚烧过程中拆出 2 个反应,并且拆分得到的反应也符合温度热滞后现象。

从图 2(a)~(d)可以看出,对于拆分得到的第 1 个反应初始温度和截止温度从 701.85 和 1036.31 K 分别升高到 719.67 和 1074.83 K;第 2 个反应的初始温度和截止温度则是从 859.82 和 1115.84 K 分别



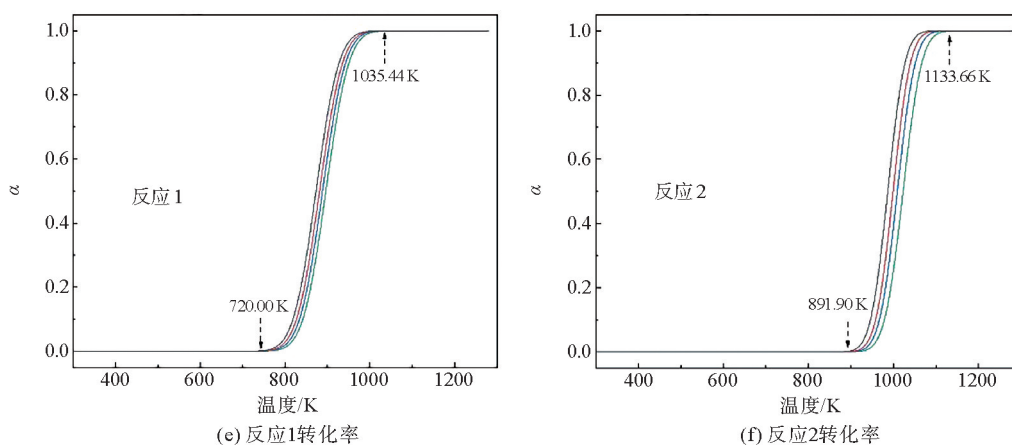


图2 基于高斯函数进行反卷积拆分的DTG拟合峰和2个反应的转化率 α 曲线

——DTG; ■拟合峰1; ■拟合峰2; - - - -总拟合峰; ——— $\beta=3.5$ K/min; ——— $\beta=4.5$ K/min; ——— $\beta=5.5$ K/min; ——— $\beta=6.5$ K/min

表 1 反卷积拆分-拟合结果

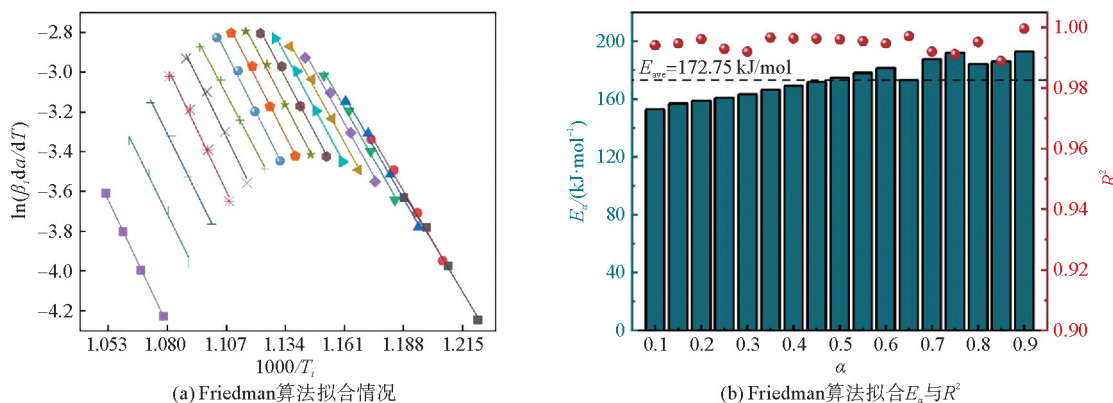
$\beta_i / (\text{K} \cdot \text{min}^{-1})$	y_0	x_{c1} / K	ω_1	A_1	x_{c2} / K	ω_2	A_2	$R^2 / \%$
3.5	0	873.15	99.16	-12.01	987.00	62.89	-36.28	99.71
4.5		881.61	99.44	-12.17	999.63	63.25	-36.67	99.62
5.5		888.61	95.47	-11.25	1009.59	65.42	-36.61	99.53
6.5		896.54	98.37	-11.40	1023.24	67.91	-36.06	99.37

升高到 874.79 和 1160.41 K;不仅如此,这 2 个反应的交叉点也从 923.01 K 提高到 951.81 K,呈现出明显的右移趋势,因此氰胺废渣焚烧过程是发生了 2 个反应。对这 2 个 DTG 拆分曲线进行反向积分能够得到每个反应的转化率曲线。从图 2(e)(f)可以看出,第 1 个反应的温度转化范围在 720.00~1035.44 K;第 2 个反应的范围是 891.90~1133.66 K,积分后的转化率曲线同样出现明显的热滞后效应。

2.3 反应 1 和反应 2 的活化能求解

为避免反应在进展初期($\alpha < 0.1$)和末期($\alpha > 0.9$)会伴随发生诸如熔化、结晶等物理性变化带来的影响^[13],选取反应程度 $\alpha = 0.1 \sim 0.9$ 的过程进行各个阶段活化能 E_a 的求解,步长间隔采用 0.05。基于式(4)和式(5)进行氰胺废渣焚烧过程 2 个反应的线性拟合情况和活化能 E_a 的求解情况如图 3 和图 4 所示。

采用 Friedman 算法求解反应 1 的活化能结果如图 3(a)(b)所示,其中图 3(b)代表的是当步长为 0.05 时, α 从 0.1~0.9 共计 17 个在等转化率下拟合得到的活化能 E_a 计算结果。可以看到随着转化率 α 的升高,活化能均呈现升高的趋势。活化能 E_a 在 158.88~192.88 kJ/mol,并且平均值 E_{ave} 为 172.75 kJ/mol;对应的,从图3(c)(d)可以看出,采用FWO算法求得反应1的活化能在146.49~185.17 kJ/mol,



(a) Friedman算法拟合情况

(b) Friedman算法拟合 E_a 与 R^2

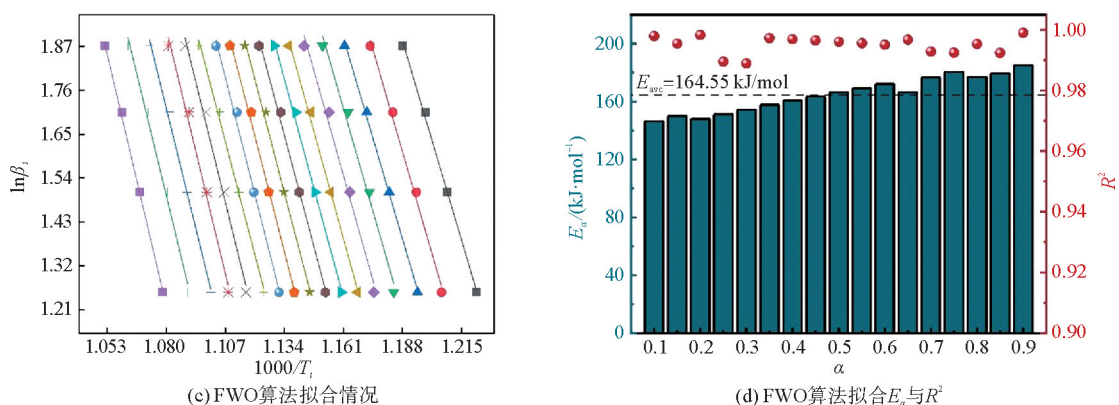


图3 反应1采用2种算法的拟合情况及活化能

■ $\alpha=0.10$; ● $\alpha=0.15$; ▲ $\alpha=0.20$; ▼ $\alpha=0.25$; ◆ $\alpha=0.30$; ◀ $\alpha=0.35$; ▶ $\alpha=0.40$; ● $\alpha=0.45$; ★ $\alpha=0.50$;
 ○ $\alpha=0.55$; ● $\alpha=0.60$; + $\alpha=0.65$; × $\alpha=0.70$; * $\alpha=0.75$; - $\alpha=0.80$; † $\alpha=0.85$; ▨ $\alpha=0.90$; ■ E_a ; ● R^2

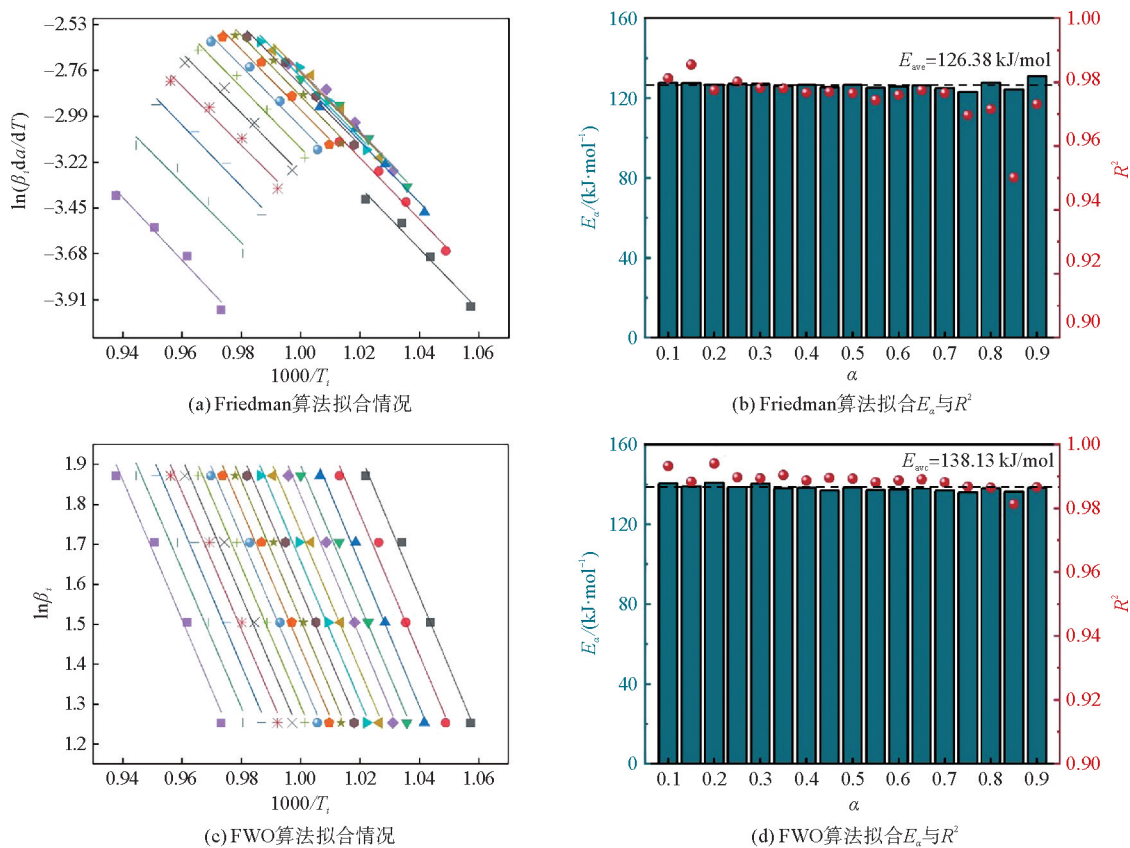


图4 反应2采用2种算法的拟合情况及活化能

■ $\alpha=0.10$; ● $\alpha=0.15$; ▲ $\alpha=0.20$; ▼ $\alpha=0.25$; ◆ $\alpha=0.30$; ◀ $\alpha=0.35$; ▶ $\alpha=0.40$; ● $\alpha=0.45$; ★ $\alpha=0.50$;
 ○ $\alpha=0.55$; ● $\alpha=0.60$; + $\alpha=0.65$; × $\alpha=0.70$; * $\alpha=0.75$; - $\alpha=0.80$; † $\alpha=0.85$; ▨ $\alpha=0.90$; ■ E_a ; ● R^2

平均值为 164.55 kJ/mol, 并且活化能数值也整体上呈现上升趋势。这 2 种方法求解活化能的线性拟合度 R^2 均大于 98%, 因此这 2 种方法均可以求解出氰胺废渣焚烧过程的活化能值。

从图 4(a)(b)可以得知, 对于反应 2 而言, 采用 Friedman 算法对 $\ln\beta_i \frac{d\alpha}{dT}$ 与 $\frac{1}{T}$ 进行线性拟合的拟合优度 R^2 基本在 97% 以上, 求得的活化能范围为 123.16~131.14 kJ/mol, 活化能均值为 126.38 kJ/mol; 而通过图 4(c)(d)可以看出, FWO 算法 $\ln\beta_i$ 与 $\frac{1}{T}$ 拟合的 R^2 均在 98% 以上, 求得的活化能范围为 136.02~

140.77 kJ/mol,活化能均值为138.13 kJ/mol。

综合对比以上2个反应活化能的求解情况可以得出,2种算法求得的活化能变化都很小,对于反应1而言,Friedman算法求得的活化能均值大于FWO算法求得的均值,两者拟合优度 R^2 都在98%以上(图3(b)(d)),且活化能均值均符合谢广录等^[14]对于炭黑焚烧过程活化能的报道;第2阶段Friedman算法求得的活化能均值小于FWO法求得的均值,但数值上都符合肖立柏等^[15]对于碳酸钙分解过程活化能的报道,虽然FWO算法的拟合优度 R^2 在数值上略优于Friedman算法,但就活化能数值求解的准确性而言差别不大(图4(b)(d))。所以说,2种算法均可以用于氰胺废渣焚烧过程活化能的求解。

2.4 2种算法求解活化能的偏差分析

一个反应的复杂程度,即属于简单的单步反应还是复杂的多步反应,可以通过不同 α 下求得的活化能与整个反应过程的活化能均值之间的偏差程度来判断。为此,采用活化能变化率 σ 进一步评估反应的复杂程度,其表达式如式(6)所示,计算结果如图5所示。

$$\sigma = \frac{E_{\alpha} - E_{ave}}{E_{ave}} \quad (6)$$

式中: E_{α} 为反应进行到 α 时所对应的活化能,kJ/mol; E_{ave} 为整个反应的活化能均值,kJ/mol。

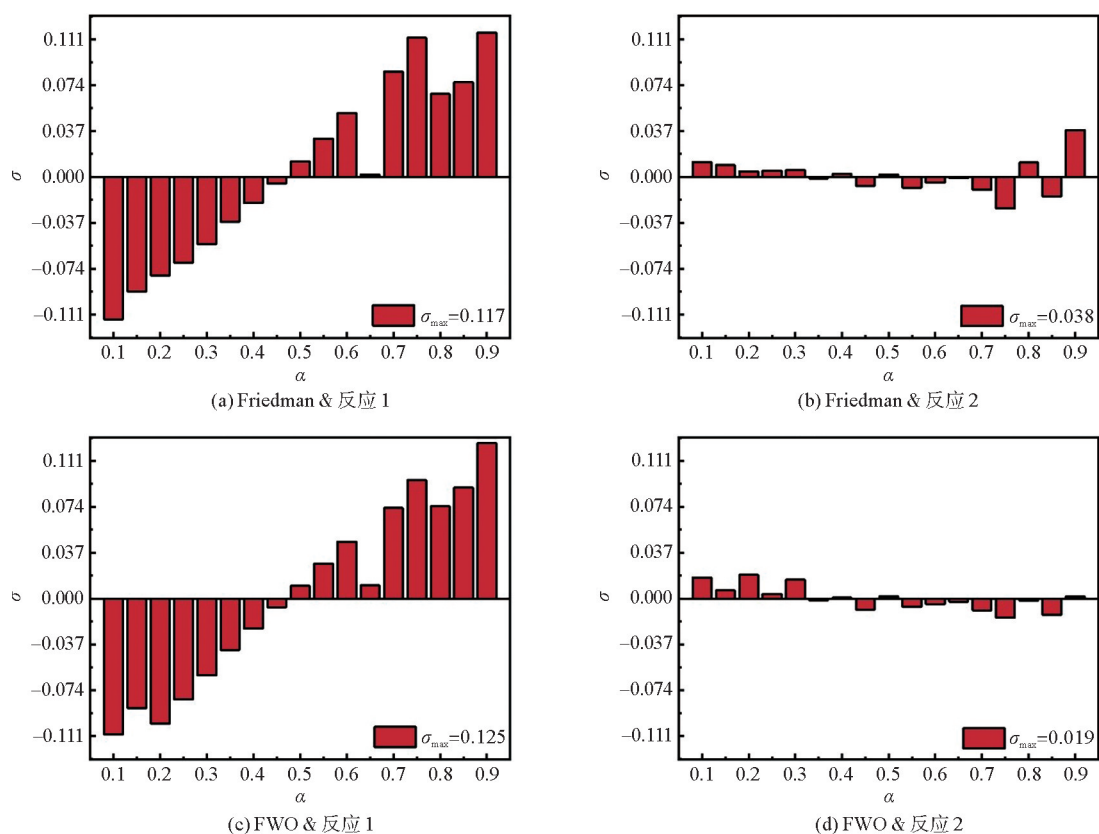


图5 Friedman算法和FWO算法求解的活化能变化率

对于一个反应而言,当 $\sigma > 20\%$ 时代表该反应是一个多步反应;当 $\sigma \leq 20\%$ 时代表该反应具备单步反应的特征^[16-17]。从图5中可以看出,对于反应1而言, σ 的值都在13%以内,反应2中 σ 值都在4%以内,这也从热动力学参数角度说明了整个氰胺废渣焚烧过程是由2个反应组成的。

从偏差分析角度而言,反应1采用Friedman算法求解过程中活化能变化率 σ 的最大值是11.7%,FWO算法的则是12.5%,都在13%以内;相比较反应1来说,反应2中 σ 的值要小得多,Friedman算法得到的活化能变化率 σ 的最大值是3.8%,FWO算法求得的仅有1.9%。尽管2种算法在2个反应活化能变化率的数值上存在一定的差异,就反应1而言Friedman算法求得的变化率更低;反应2中FWO算法得到的变化率反而低于Friedman算法。但就氰胺废渣焚烧过程中2个反应的活化能求解的过程而言

区别不大,都能够得到准确的活化能数值。

3 结论

基于热重数据进行氰胺废渣焚烧过程活化能求解得知,氰胺废渣在 400~1100 K 的富氧焚烧过程中出现 50%左右的降重,TG 曲线出现 2 个明显的台阶,DTG 曲线出现 2 个明显的反应峰。

采用高斯函数对 DTG 曲线进行拆分得到 2 个反应,第 1 个反应即炭黑焚烧过程的温度区间为 720.00~1035.44 K;第 2 个反应即碳酸钙分解反应的范围是 891.90~1133.66 K。

根据拆分结果采用 2 种算法对 2 个反应进行活化能的拟合求解,Friedman 算法求得第 1 个反应和第 2 个反应活化能均值分别为 172.75 和 126.38 kJ/mol;FWO 算法求得的 2 个阶段活化能均值分别为 164.55 和 138.13 kJ/mol。对于第 1 个反应而言,Friedman 算法和 FWO 算法求得的活化能相对变化率最大值分别为 11.7%和 12.5%;第 2 个反应则分别为 3.8%和 1.9%,差别不大。所以说,采用 Friedman 算法和 FWO 算法都可以准确求出氰胺废渣焚烧过程的活化能数值。

参考文献(References):

- [1] 康健,吴明霞. 双氰胺废渣资源的利用现状及发展前景[J]. 广州化工,2018,46(23):121-123.
KANG Jian, WU Mingxia. Utilization status and development prospect of dicyandiamide waste residue resources[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2018, 46(23): 121-123.
- [2] 李守博,杨雪昊,刘彩云,等. 基于单氰胺废渣制备过氧化钙的研究[J]. 现代盐化工,2019,46(5):12-14.
LI Shoubo, YANG Xuehao, LIU Caiyun, et al. Study on preparation of calcium oxide based on monocyanamide waste residue[J]. Modern Salt and Chemical Industry, 2019, 46(5): 12-14.
- [3] 肖祖菊. 含氰化工废渣的毒性研究及健康风险评估[D]. 重庆:重庆大学,2010.
XIAO Zuju. Identification of the toxicity and healthy risk assessment of the cyanide in chemical industry[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [4] 于秀珍,于清池. 选矿尾矿干堆场内含氰废水、废渣的治理[J]. 现代矿业,2013,29(4):131-132.
YU Xiuzhen, YU Qingchi. Treatment of cyanide containing wastewater and waste residue in the dry dump of mineral processing tailings[J]. Modern Mining, 2013, 29(4): 131-132.
- [5] 罗劲松,任雪娇. 含氰废渣高温焚烧处置技术研究[J]. 环境科学导刊,2021,40(2):75-77.
LUO Jinsong, REN Xuejiao. Disposal technology of waste with cyanide by high temperature incineration[J]. Environmental Science Survey, 2021, 40(2): 75-77.
- [6] 刘俊良,马效民,吕春梅. 含氰废渣灼烧除氰研究[J]. 哈尔滨建筑大学学报,1995(6):65-70.
LIU Junliang, MA Xiaomin, LV Chunmei. A study on the cyanogen removed from the waste containing cyanogen compound by burning[J]. Journal of Harbin University of Civil Engineering and Architecture, 1995(6): 65-70.
- [7] 杨英杰. 双氰胺废渣制备活性氧化钙的工艺研究[D]. 银川:宁夏大学,2016.
YANG Yingjie. Study on the process of preparation of active calcium oxide slag derived from dicyandiamide[D]. Yinchuan: Ningxia University, 2016.
- [8] KOGA N, VYAZOVKIN S, BURNHAM A K, et al. ICTAC Kinetics Committee recommendations for analysis of thermal decomposition kinetics[J]. Thermochimica Acta, 2022, 719: 179384.
- [9] 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(1/2): 1-19.
- [10] 覃子涵. 基于热重分析仪的炭黑颗粒氧化特性研究[D]. 成都:西华大学,2021.
QIN Zihan. Oxidation characteristics of carbon black particles based on thermogravimetric analyzer[D]. Chengdu: Xihua University, 2021.
- [11] 内田贤一,李章辉,王静,等. 用热重分析法研究炭黑分解温度[J]. 橡胶科技,2017,15(5):44-48.
UCHIDA Kenyichi, LI Zhanghui, WANG Jing, et al. Study on decomposition temperature of carbon black by thermogravimetric analysis[J]. Rubber Science and Technology, 2017, 15(5): 44-48.
- [12] 卢尚青,吴素芳. 碳酸钙热分解进展[J]. 化工学报,2015,66(8):2895-2902.
LU Shangqing, WU Sufang. Advances in calcium carbonate thermal decomposition[J]. CIESC Journal, 2015, 66(8): 2895-2902.
- [13] QI Y F, WANG W, QUAN X, et al. Blockchain-like E_a analysis strategy for two distinct "White-Box" modeling methodologies to simulate the incineration of oily sludge[J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 384: 135678.