

基于等转化率法的煤焦-CO₂ 气化动力学研究

曾梅^{1,2}, 赵蒙^{1,2}, 徐红东^{1,2}, 郑亚兰^{1,2}, 张瑜^{1,2}, 贺根良^{1,2}, 门长贵^{1,2}

(1. 西安元创化工科技股份有限公司, 陕西 西安 710061; 2. 西北化工研究院, 陕西 西安 710061)

摘要:为获得可靠的煤焦-CO₂ 气化反应动力学参数,采用 Flunm-Wall-Ozawa (FWO) 等转化率法进行煤焦-CO₂ 气化动力学研究。在3个不同升温速率下进行了煤焦-CO₂ 气化热重试验,计算不同碳转化率下的反应活化能,用主曲线法分析了气化机理模型,并采用拟合法对等转化率法的结果进行验证。结果表明,气化主反应区不同碳转化率下(α 为0.2~0.8)活化能的变化较小,为(228.25 ± 5.22) kJ/mol。煤焦-CO₂ 气化反应为均相模型,该模型标准曲线与试验曲线重合度较好,并符合目前常用的煤气化动力学模型。拟合法计算的活化能仅与等转化率法相差0.74 kJ/mol,说明等转化率法研究煤焦-CO₂ 动力学可行。

关键词:等转化率法;煤焦;气化;动力学;热重

中图分类号:TQ520.1

文献标志码:A

文章编号:1006-6772(2017)03-0033-06

Study on gasification kinetics of char-CO₂ reaction by iso-conversional method

Zeng Mei^{1,2}, Zhao Meng^{1,2}, Xu Hongdong^{1,2}, Zheng Yalan^{1,2}, Zhang Yu^{1,2}, He Genliang^{1,2}, Men Changgui^{1,2}

(1. Xi'an Origin Chemical Technologies Co., Ltd., Xi'an 710061, China; 2. The Northwest Research Institute of Chemical Industry, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to obtain the reliable kinetics parameters of char-CO₂ gasification, the kinetics were evaluated by Flunm-Wall-Ozawa (FWO) iso-conversional method. A series of gasification experiments were carried out at three different heating rates of TG. The reaction activation energy were calculated under different carbon conversion ratio, the gasification mechanism was analyzed by using principal curve, and the data obtained from the iso-conversional method were examined by fitting method. Results show that the variation of the gasification activation energy present little change ((228.25 ± 5.22) kJ/mol) at different carbon conversion rate (α ranges from 0.2 to 0.8). This paper suggests that char-CO₂ gasification process is homogeneous model, and the experimental curves are close to the model curve. The model is satisfying with the kinetics model commonly used in coal gasification. The difference of the gasification activation energy between fitting method and iso-conversional method is 0.74 kJ/mol, therefore, the iso-conversional method is feasible for kinetics study of char-CO₂ gasification.

Key words: iso-conversional method; char; gasification; kinetics; thermogravimetric

0 引言

近年低阶煤热解制取焦油、煤气、半焦的煤化工产业发展迅速,由此产生的大量半焦因利用途径有限而堆积,不仅浪费了不可再生的碳氢资源,占用了宝贵的土地资源,更对空气、水、土壤造成严重污染,半焦大规模有效利用成为煤热解技术发展的瓶颈,因此半焦清洁、高效、资源化利用成为亟待解决的问题

题^[1]。干法气流床气化技术具有操作温度高、生产能力大、气化指标好等优点,适合半焦等活性较低、灰含量较高的原料转化^[2],西北化工研究院提出利用干法气化制合成气技术来实现半焦有效合理利用^[3]。煤气化技术的选择与原料煤的组成、特性有很大关系,通常采用煤炭与CO₂的反应特性作为气化反应的评价指标^[4],研究煤焦-CO₂ 气化反应动力学,可为新型煤焦气化反应器开发与优化工艺条

收稿日期:2016-11-24;责任编辑:白娅娜 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.2017.03.007

基金项目:陕西省科技统筹创新工程计划资助项目(2015KTZDGY05-04-01)

作者简介:曾梅(1985—),女,陕西蓝田人,工程师,从事煤化工研究工作。E-mail: zengmeimay@163.com

引用格式:曾梅,赵蒙,徐红东,等.基于等转化率法的煤焦-CO₂ 气化动力学研究[J].洁净煤技术,2017,23(3):33-38.

Zeng Mei, Zhao Meng, Xu Hongdong, et al. Study on gasification kinetics of char-CO₂ reaction by iso-conversional method[J]. Clean Coal Technology, 2017, 23(3): 33-38.

件提供理论支持。热重分析广泛应用于煤气化特性及动力学研究,热重动力学分析方法分为拟合法和等转化率法。拟合法在进行动力学参数计算时需要引入模型函数,通过对试验曲线拟合的方式选取最可能的机理函数,但对于一个反应,经常会有数个模型函数符合,模型函数选择不当或假设不合理会对计算结果造成不利影响。等转化率法避免了动力学计算过程中模型函数对结果的影响,能更好地描述反应历程,在不引入模型函数的情况下获得可靠的活化能 E 的数值,并且根据 E 在反应过程中的变化进行反应机理分析更加直观^[5-7]。因此,等转化率法是动力学研究的热点,已被学者们广泛应用于煤/油页岩/生物质热解^[8-10]及煤炭燃烧^[11]等领域,但是等转化率法在煤气化领域的研究较少,陈钢等^[12]、陈鸿伟等^[13]在研究煤/煤焦气化动力学时,等转化率法仅用于与模型拟合法对比确定动力学模型。为了获得可靠的煤焦-CO₂反应动力学参数,避免模型函数选择的困扰,笔者采用程序升温热重等转化率法研究煤焦-CO₂反应动力学,以期获得可靠的煤焦-CO₂气化反应动力学参数。

1 试验

1.1 原料

试验煤焦以陕北低温半焦为原料,将半焦磨细到 0.18 mm 以下,装入带盖坩埚中,放入马弗炉隔绝空气进行加热,由室温升至 900 °C,保温 1 h,制得煤焦。

1.2 试验装置与方法

采用美国 TA 公司的 SDT Q600 同步热分析仪进行煤焦-CO₂气化反应试验。热分析试验使用刚玉坩埚,以空坩埚作为参比;每次试验样品质量约 20 mg;以一定浓度的 CO₂ 作为反应气(剩余为 N₂,气流速度为 50 mL/min)。试验分为程序升温热重法和等温热重法。

程序升温热重法分别以 10、20、30 °C/min 的升温速率由室温持续升温至 1 300 °C,以浓度 99.9% 的 CO₂ 作为反应气,煤焦在不同加热速率下进行气化反应,试验过程中煤焦质量随温度变化的数据由工作站采集记录。

等温热重法升温阶段以 N₂ 作为载气,以 30 °C/min 的升温速率升温到设定温度,恒温 3 min,待温度稳定后,将 N₂ 切换为浓度 50% 的 CO₂ 作为反应气,进行煤焦气化反应,恒温温度分别为 950、

1 000、1 050 °C,试验过程中煤焦质量随时间变化的数据由工作站采集记录。

热分析仪记录得到煤焦失重曲线(TG)和失重速率曲线(DTG),由式(1)和式(2)分别计算煤焦与 CO₂ 反应的碳转化率 α 和反应速率 r 。

$$\alpha = \frac{m_0 - m}{m_0 - m_\infty} \quad (1)$$

$$r = \frac{dm}{(m_0 - m_\infty) dt} \quad (2)$$

式中, m_0 为试验煤焦初始质量,mg; m 为反应时间 t 时煤焦质量,mg; m_∞ 为反应结束煤焦剩余质量,mg。

2 结果与讨论

2.1 程序升温热重法

2.1.1 升温速率对碳转化率和反应速率的影响

以 99.9% 的 CO₂ 为气化剂,不同升温速率下煤焦-CO₂ 气化反应碳转化率和反应速率随温度的变化如图 1 所示。由图 1 可知,升温速率对碳转化率和反应速率有明显影响。随着升温速率提高,碳转化率曲线、反应速率曲线及反应速率峰均向高温区偏移。碳转化率曲线中升温速率越大,相同反应温度下,碳转化率越低,这是由于反应温度增加越快,煤焦在各反应温度的停留时间越短,煤焦未充分反应就进入更高温度。反应温度对煤焦-CO₂ 气化影响显著,升温速率越大,煤焦到达一定温度所需时间越短,因此升温速率越高,反应速率越快,反应速率

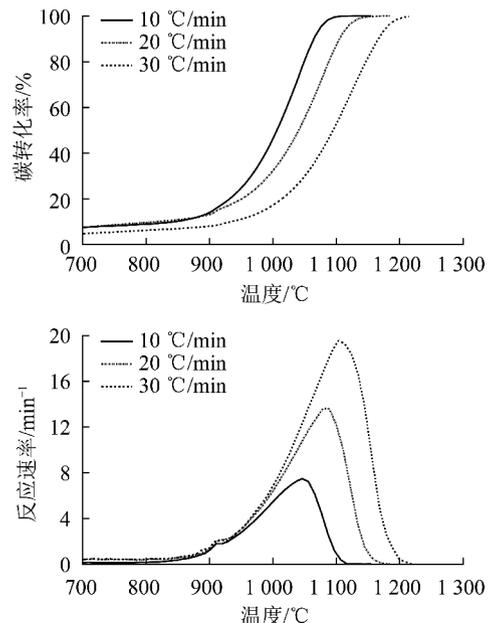


图 1 升温速率对煤焦-CO₂ 气化反应的影响

Fig. 1 Effect of heating rates on char-CO₂ gasification

峰顶温度越高,最大反应速率越大,高温有利于气化反应进行。

2.1.2 基于等转化率法的动力学计算

采用非模型动力学等转化率法对不同加热速率下得到的多条碳转化率曲线主反应区进行动力学分析,选取各碳转化率曲线上相同转化率 α 处的温度 T 进行动力学计算。本文选用 Flunm-Wall-Ozawa (FWO)公式计算,具体如下:

$$\ln \beta = \ln [AE/RG(\alpha)] - 5.3308 - 1.0516E/RT \quad (3)$$

式中, β 为升温速率, $^{\circ}\text{C}/\text{min}$; A 为指前因子, s^{-1} ; R 为气体常数,为 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为温度, K ; $G(\alpha)$ 为反应机理函数的积分形式。

设定转化率 α ,则 $\ln [AE/RG(\alpha)]$ 是常数, $\ln \beta - 1/T$ 是直线关系,对 $\ln \beta - 1/T$ 作图,用最小二乘法进行线性回归,从直线斜率可求出碳转化率为 α 时的 E 值。取 α 为 $0.2 \sim 0.8$,结果如图2所示。

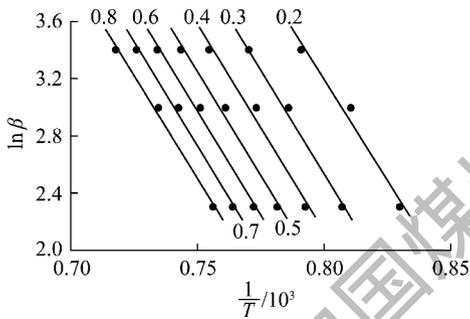


图2 不同转化率下煤焦-CO₂ 气化升温速率与温度的关系
Fig. 2 Relationship between the heating rate and corresponding temperature at different conversion rate of char-CO₂ gasification

由图2可知, α 为 $0.2 \sim 0.8$ 时,各碳转化率下拟合的直线基本平行,说明煤焦-CO₂ 气化反应过程活化能变化很小, E 值计算结果见表1,计算得到 $E = (228.25 \pm 5.22) \text{ kJ}/\text{mol}$ 。试验中计算得到的活化能在主反应区的变化与王擎等^[9]采用等转化率法研究油页岩热解活化能,以及张海涛等^[10]采用等转化率法研究玉米芯热解活化能的结果一致,活化能在不同转化率下变化较小。不同的是张海涛等^[10]采用同种方法研究花生壳热解活化能,发现与玉米芯的结果不同,在主反应区花生壳在不同转化率下活化能变化较大;魏兴海等^[8]研究发现氮气气氛下煤样热解活化能在主反应区随煤转化率增大呈下降趋势。采用等转化率法研究不同物质动力学时,活化能与转换率的关系表现不同,是因为研究物

质均为结构复杂的混合物,且具有丰富的孔结构,孔结构和物质组成在反应过程中均发生改变,对吸附和反应产生影响。因此,采用等转化率法进行动力学研究,可提供反应物活化能随反应进程变化的趋势,用以分析反应机理。由表1可知,本试验活化能在不同转化率下基本不变,表明煤焦-CO₂ 气化反应遵循单一的动力学机理。

表1 不同转化率下煤焦-CO₂ 气化活化能
Table 1 Activation energy of char-CO₂ gasification at different conversion rate

碳转化率	$E/(\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$	相关系数
0.2	223.03	0.988
0.3	228.87	0.996
0.4	229.10	0.990
0.5	229.75	0.994
0.6	229.62	0.996
0.7	230.27	0.997
0.8	227.10	0.997

2.1.3 主曲线法判断机理函数

等转化率法提供了可靠的碳转化率-活化能关系,为了准确描述热分解反应过程,采用主曲线法判定动力学模型机理函数。热分解反应机理函数的积分形式为

$$G(\alpha) = \int_0^T \left(\frac{A}{\beta} \right) \exp\left(-\frac{E}{RT} \right) dT = \left(\frac{AE}{\beta R} \right) P(u) \quad (4)$$

其中, $P(u)$ 为温度积分, $u = E/RT$, $P(u)$ 以温度积分近似表达式 I (式(5))代替。

$$\int_0^T \left(e^{-\frac{E}{RT}} \right) dT = \frac{RT^2}{1.00198882E + 1.87391198RT} e^{-\frac{E}{RT}} \quad (5)$$

由式(4)知,对于合理的机理函数,则

$$G(\alpha)/G(\alpha_{0.5}) = P(u)/P(u_{0.5}) \quad (6)$$

式中, $G(\alpha_{0.5})$ 和 $P(u_{0.5})$ 分别为 $\alpha = 0.5$ 时的 $G(\alpha)$ 和 $P(u)$ 值。

本文选用常见的固体热分解动力学模型机理函数 $G(\alpha)$ (表2),分别以 $G(\alpha)/G(\alpha_{0.5}) - \alpha$ 作图得到一系列标准曲线,将计算得到的活化能平均值和各转化率 α 对应的 T 值代入温度积分公式中(式(5)),对 $P(u)/P(u_{0.5}) - \alpha$ 作图得到不同升温速率下的3条试验曲线(图3),图中序号分别对应表2编号。如果曲线相互重合,并与某一标准曲线重叠或相近,则认为该标准曲线对应的动力学模型函数 $G(\alpha)$ 为试验曲线的动力学模型函数。

表2 常见动力学模型函数
Table 2 Functions of common kinetics models

编号	函数名称	机理	函数 $G(\alpha)$	函数 $f(\alpha)$
1	Jander 方程	二维扩散, 2D, $n=2$	$[1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{2}}]^2$	$(1 - \alpha)^{\frac{1}{2}} [1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{2}}]^{-1}$
2	Jander 方程	三维扩散, 球形对称, 3D, $n=2$	$[1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{3}}]^2$	$\frac{3}{2}(1 - \alpha)^{\frac{2}{3}} [1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{3}}]^{-1}$
3	G-B 方程	三维扩散, 球形对称, 3D	$1 - \frac{2}{3}\alpha - (1 - \alpha)^{\frac{2}{3}}$	$\frac{3}{2}[(1 - \alpha)^{-\frac{1}{3}} - 1]^{-1}$
4	反 Jander 方程	三维扩散, 3D	$[(1 + \alpha)^{\frac{1}{3}} - 1]^2$	$\frac{3}{2}(1 + \alpha)^{\frac{2}{3}} [(1 + \alpha)^{\frac{1}{3}} - 1]^{-1}$
5	Avrami-Erofeev 方程	随机成核和随后生长, $n = \frac{1}{2}$	$[-\ln(1 - \alpha)]^{\frac{1}{2}}$	$2(1 - \alpha) [-\ln(1 - \alpha)]^{\frac{1}{2}}$
6	Avrami-Erofeev 方程	随机成核和随后生长, $n = \frac{2}{3}$	$[-\ln(1 - \alpha)]^{\frac{2}{3}}$	$\frac{3}{2}(1 - \alpha) [-\ln(1 - \alpha)]^{\frac{1}{3}}$
7	Avrami-Erofeev 方程	随机成核和随后生长, $n = \frac{3}{4}$	$[-\ln(1 - \alpha)]^{\frac{3}{4}}$	$\frac{4}{3}(1 - \alpha) [-\ln(1 - \alpha)]^{\frac{1}{4}}$
8	Avrami-Erofeev 方程	随机成核和随后生长, $n = 1$	$-\ln(1 - \alpha)$	$1 - \alpha$
9	Avrami-Erofeev 方程	随机成核和随后生长, $n = \frac{3}{2}$	$[-\ln(1 - \alpha)]^{\frac{3}{2}}$	$\frac{2}{3}(1 - \alpha) [-\ln(1 - \alpha)]^{-\frac{1}{2}}$
10	收缩球体(体积)	相边界反应, 球形对称	$1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{3}}$	$3(1 - \alpha)^{\frac{2}{3}}$
11	收缩圆柱体(面积)	相边界反应, 圆柱体对称	$1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{2}}$	$2(1 - \alpha)^{\frac{1}{2}}$
12	反应级数	$n = \frac{1}{3}$	$3[1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{3}}]$	$(1 - \alpha)^{\frac{2}{3}}$
13	反应级数	$n = \frac{1}{2}$	$2[1 - (1 - \alpha)^{\frac{1}{2}}]$	$(1 - \alpha)^{\frac{1}{2}}$
14	反应级数	$n = 2$	$1 - (1 - \alpha)^2$	$\frac{1}{2}(1 - \alpha)^{-1}$
15	反应级数	$n = 3$	$1 - (1 - \alpha)^3$	$\frac{1}{3}(1 - \alpha)^{-2}$

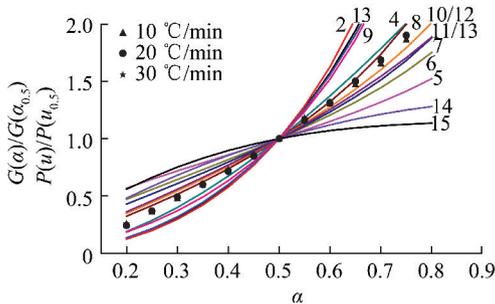


图3 动力学模型函数对应的标准曲线与煤焦-CO₂ 气化试验结果

Fig. 3 Theoretical master-plots of kinetic model and the experimental master-plots of char-CO₂ gasification at different heating rates

由图3可知,碳转化率为0.2~0.8时,不同升温速率下的3条试验曲线重合较好,因此煤焦-CO₂ 气化反应可用单一机理函数描述。图中试验曲线不

与任何一条标准曲线完全重合,但试验曲线的趋势和标准曲线8、10、12相同,且部分与标准曲线8重合,8、10、12三条标准曲线对应的模型函数可用 $f(\alpha) = (1 - \alpha)^n$ 通式表述,与文献[14]中煤焦-CO₂ 动力学模型函数一致。

$f(\alpha) = (1 - \alpha)^n$ 模型函数中, $n=1$ 时属于均相反应模型(与标准曲线8对应); $n=2/3$ 时属于缩核反应模型(与标准曲线10、12相对应); n 不等于1或2/3,称为混合反应模型。本试验中 n 接近1时,模型函数与试验曲线重合较好,因此选取 $f(\alpha) = 1 - \alpha$ 为本试验机理函数。对 $G(\alpha) - EP(u)/\beta R$ 作图,用最小二乘法进行线性拟合,斜率即为指前因子 A , $A = (8.59 \pm 0.13) \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ 。

2.2 等温热重法

以50% CO₂ 为气化剂,不同反应温度下煤焦-

CO₂ 反应曲线如图 4 所示。由图 4 可知,温度对气化反应影响显著,气化温度越高,相同反应时间,煤焦碳转化率越高,且煤焦完全反应所需时间越短;气化温度越高,反应速率峰顶出现时间越短,反应速率峰窄且高,说明气化温度越高,反应速率越快。

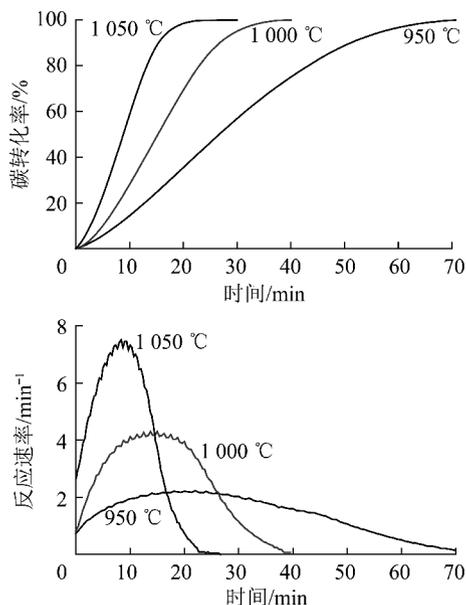


图 4 反应温度对煤焦-CO₂ 气化反应的影响

Fig. 4 Effect of temperature on char-CO₂ gasification

由主曲线法得到煤焦-CO₂ 气化反应动力学模型函数为 $f(\alpha) = (1-\alpha)^n$, 则气化反应速率方程为

$$\frac{d\alpha}{dt} = k(1-\alpha)^n \quad (7)$$

对式(7)两边取对数为

$$\ln \frac{d\alpha}{dt} = \ln k + n \ln(1-\alpha) \quad (8)$$

式中, n 为反应级数; k 为速率常数。

将式(8)中 $\ln \frac{d\alpha}{dt} - \ln(1-\alpha)$ 作图得到一条直线,斜率为反应级数 n ,截距为 $\ln k$ 。 k 与 T 的关系用阿伦尼乌斯经验公式表示,代入式(8)得

$$\ln k = -\frac{E}{RT} + \ln A \quad (9)$$

在一定温度范围内,反应机理不变,活化能是固定值, $\ln k - 1/T$ 是一条直线,斜率为 $-E/R$,截距为 $\ln A$,结果如图 5 所示。计算得到活化能 $E = 229.09 \text{ kJ/mol}$, $A = 1.54 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ 。

对比等转化率法和拟合法计算得到的煤焦-CO₂ 气化动力学参数,2 种方法得到的 E 值非常接近,程序升温法得到的平均活化能仅与等温热重法

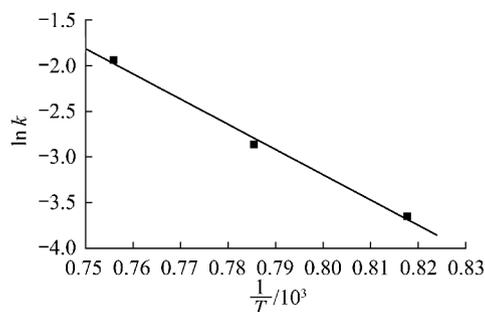


图 5 煤焦-CO₂ 气化反应的 Arrhenius 图

Fig. 5 Arrhenius curve of char-CO₂ gasification

相差 0.74 kJ/mol ,证实了等转化率法非模型动力学能获得可靠的活化能参数,通过对不同转化率下活化能变化分析可获得合理的动力学机理函数模型。但是 2 种方法对应的 A 差别较大,这是由于指前因子 A 与煤焦结构有关,等温热重与程序升温热重在气化过程中煤焦结构变化不同导致的^[15]。

3 结 论

1) 煤焦-CO₂ 气化动力学研究中,选用等转化率法避免了动力学分析中模型函数的选择,通过计算得到不同碳转化率下的活化能,发现主反应区 (α 为 $0.2 \sim 0.8$) 活化能随碳转化率的变化很小, $E = (228.25 \pm 5.22) \text{ kJ/mol}$ 。

2) 由活化能与碳转化率的变化关系得知,气化反应遵循单一机理模型,运用主曲线法判断煤焦-CO₂ 气化动力学模型,得到主反应区气化机理模型函数为均相反应模型, $f(\alpha) = 1-\alpha$ 。

3) 将等转化率法得到的动力学模型带入拟合法中,并对其进行验证,得到煤焦-CO₂ 气化活化能 $E = 229.09 \text{ kJ/mol}$ 。2 种动力学方法得到的 E 值非常接近,因此程序升温等转化率法是一种可靠的动力学分析方法。

参考文献 (References):

- [1] 张兴刚. 煤炭分级利用: 产品链经济性临考[J]. 化工管理, 2016(3): 70-74.
- [2] 汪寿建. 现代煤气化技术发展趋势及应用综述[J]. 化工进展, 2016, 35(3): 653-664.
Wang Shoujian. Development and application of modern coal gasification technology[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2016, 35(3): 653-664.
- [3] 刘军, 邹涛, 初莱, 等. 褐煤及其热解产品利用现状[J]. 洁净煤技术, 2014, 20(5): 97-100.
Liu Jun, Zou Tao, Chu Mo, et al. Utilization status of lignite and py-

- rolysis products [J]. Clean Coal Technology, 2014, 20 (5): 97-100.
- [4] 黄于益,何璐,解强.煤(焦)气化反应活性评价研究进展[J].煤炭转化,2013,36(4):84-89.
Huang Yuyi, He Lu, Xie Qiang. Evaluation of coal/char gasification reactivity [J]. Coal Conversion, 2013, 36(4): 84-89.
- [5] 胡荣祖,史启祯.热分析动力学[M].北京:科学出版社,2001.
- [6] 任宁,张建军.热分析动力学数据处理方法的研究进展[J].化学进展,2006,18(4):410-416.
Ren Ning, Zhang Jianjun. Progress in datum treatment methods of thermal analysis kinetics [J]. Progress in Chemistry, 2006, 18(4): 410-416.
- [7] 席国喜,宋世理,刘琴.热分析动力学研究进展[J].河南师范大学学报(自然科学版),2004,32(4):78-82.
Xi Guoxi, Song Shili, Liu Qin. New progress in thermal analysis kinetics studies [J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science), 2004, 32(4): 78-82.
- [8] 魏兴海,顾永达,沈平,等.在三个升温速率下用热天平研究煤的热解及其反应动力学[J].燃料化学学报,1993,21(4):430-434.
Wei Xinghai, Gu Yongda, Shen Ping, et al. Thermogravimetry study on pyrolysis and pyrolytic reaction kinetics of coal with three heating rates [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 1993, 21(4): 430-434.
- [9] 王擎,徐峰,孙伯仲,等.采用等转化率法研究油页岩热解的动力学特性[J].中国电机工程学报,2007,27(26):35-39.
Wang Qing, Xu Feng, Sun Baizhong, et al. Study on characteristics in pyrolysis process of oil shales by isoconversional method [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2007, 27(26): 35-39.
- [10] 张海涛,于庆波,秦勤,等.等转化率法对生物质热解动力学的研究[J].热力发电,2014,43(1):57-60.
Zhang Haitao, Yu Qingbo, Qin Qin, et al. Kinetic study on biomass pyrolysis by iso-conversional method [J]. Thermal Power Generation, 2014, 43(1): 57-60.
- [11] 何威,曹立勇,何榕,等.用等转化率法研究煤焦在化学动力学控制区燃烧过程中比表面积的变化[J].清华大学学报(自然科学版),2012,52(1):77-80.
He Wei, Cao Liyong, He Rong, et al. Iso-conversion method to measure specific area changes during char combustion in the chemically controlled regime [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2012, 52(1): 77-80.
- [12] 陈刚,卢桑,王莉萍,等.元堡长焰煤煤焦-二氧化碳气化特性研究[J].煤炭科学技术,2014,42(7):107-110.
Chen Gang, Lu Shen, Wang Liping, et al. Research on CO₂ gasification characteristics of Yuanbao candle coal char [J]. Coal Science and Technology, 2014, 42(7): 107-110.
- [13] 陈鸿伟,穆兴龙,王远鑫,等.准东煤气化动力学模型研究[J].动力工程学报,2016,36(9):690-696.
Chen Hongwei, Mu Xinglong, Wang Yuanxin, et al. Study on kinetic models for Zhundong coal gasification [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(9): 690-696.
- [14] 向银花,王洋,张建民,等.煤气化动力学模型研究[J].燃料化学学报,2002,30(1):21-26.
Xiang Yinhua, Wang Yang, Zhang Jianmin, et al. A study on kinetic models of char gasification [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2002, 30(1): 21-26.
- [15] 周志杰,范晓雷,张薇,等.非等温热重分析研究煤焦气化动力学[J].煤炭学报,2006,31(2):219-222.
Zhou Zhijie, Fan Xiaolei, Zhang Wei, et al. Char gasification kinetics using non-isothermal TGA [J]. Journal of China Coal Society, 2006, 31(2): 219-222.