

## 麦秆热解机理研究

李小民, 李永平, 邓权威, 林其钊

(中国科学技术大学热科学与能源工程系, 安徽合肥 230026)

**摘要:**采用热重法对不同加热速率、氮气气氛条件下的麦秆失重行为进行了研究. 研究发现, 麦秆失重主要由水分析出、有机物热解和无机物分解等3个阶段组成, 其中在无机物分解阶段还伴随有轻微的炭化; 此外, 随着加热速率增加, 有机物分解的初始温度、终了温度、峰值失重速率对应温度等相应增加. 利用双外推法推断了麦秆中有机物热解的最概然机理函数, 发现麦秆热解可以用二级反应机理进行模化, 同时, 确定了麦秆热解的活化能、指前因子等反应动力学参数. 对利用双外推法得到的模型计算结果与实验结果进行了对比. 结果表明, 两者之间符合较好, 但仍存在一定偏差. 对引起偏差的原因进行了分析.

**关键词:** 生物质; 热解; 热重分析; 双外推法

**中图分类号:** TK6      **文献标识码:** A      doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2012.04.009

**引用格式:** 李小民, 李永平, 邓权威, 等. 麦秆热解机理研究[J]. 中国科学技术大学学报, 2012, 42(4): 318-324.  
Li Xiaomin, Li Yongping, Deng Quanwei, et al. Research on mechanisms of pyrolysis of wheat straw [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2012, 42(4): 318-324.

## Research on mechanisms of pyrolysis of wheat straw

LI Xiaomin, LI Yongping, DENG Quanwei, LIN Qizhao

(University of Science and Technology of China, Department of Thermal Science and Energy Engineering, Hefei 230026, China)

**Abstract:** A thermogravimetric experiment was performed to investigate the mass loss of wheat straw in inertial ambience of nitrogen. The results show that, in the process of mass loss, there exist three stages: preheat drying, pyrolysis and thermal decomposition of inorganic components, accompanying mild carbonization in the third stage. At the same time, the characteristic parameters, such as onset temperature, final temperature and peak temperature, increase along with the increase of heating rate. Furthermore, the dual extrapolation method was utilized to obtain appropriate kinetic mechanisms to model the pyrolysis of wheat straw. It was concluded that the mechanisms of pyrolysis for wheat straw follow second-order reaction. In addition, the parameters of chemical kinetics, such as activation energy and frequency factor, were obtained as well. The preliminary comparisons between the model and the experimental data validate the reliability of the kinetic mechanisms as a whole. Finally, the causes of the discrepancy were analyzed.

**Key words:** biomass; pyrolysis; thermo-gravimetric analyse; dual extrapolation method

收稿日期: 2011-07-18; 修回日期: 2011-10-14

基金项目: 国家重点基础研究发展(973)计划(2010CB227300)资助.

作者简介: 李小民, 男, 1971年生, 博士生. 研究方向: 秸秆生物质利用. E-mail: lixmin@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 林其钊, 博士/教授. E-mail: qlin@ustc.edu.cn

## 0 引言

热解是生物质热化学转换的初始反应,对热化学转换装置的效率、运行水平等具有重要影响<sup>[1]</sup>.热重法是生物质热解研究的常用方法<sup>[1-4]</sup>.刘乃安等<sup>[2]</sup>利用热重法对林木的热解进行了研究,认为可以使用二级反应动力学模型对其进行模化.Nassar等<sup>[3]</sup>利用热重法研究了稻壳热解,使用的是准一级反应模型.张晓东等<sup>[4]</sup>利用热重法研究了玉米秸秆的热解,采用的反应机理为一级反应.孔晓英等<sup>[5]</sup>利用热重法对麦秆和蔗渣的热解进行了比较研究,分析了加热速率对麦秆和蔗渣热解特性的影响.Vuthaluru<sup>[6]</sup>利用热重法对麦秆/煤混合物的热解特性进行了研究,分析了不同比例混合物的热解特性.众所周知,在热解动力学研究中,由于反应活化能和指前因子的补偿效应,使很多机理函数都能有一个良好的线性结果<sup>[7-8]</sup>.这使研究得到的同一物质的动力学参数出入很大.Vuthaluru<sup>[6]</sup>在麦秆热解研究中,当反应级数取0.8时,计算得到的活化能为80.2 kJ/mol,指前因子为 $1.6 \times 10^7 \text{ min}^{-1}$ ;而当反应级数取0.52时,计算得到的活化能为114.8 kJ/mol,指前因子为 $4.7 \times 10^9 \text{ min}^{-1}$ .这是由于选择的机理函数与实际发生的动力学过程之间存在差异造成的,故选择最概然机理函数非常重要.最概然机理函数的推断方法很多,如双外推法、Satava法、Bagchi法、Malek法等<sup>[9]</sup>.王明峰等<sup>[7]</sup>利用Malek法推断了玉米秸秆热解的机理函数,认为玉米秸秆热解服从随机成核随后生长机理.任庚坡等<sup>[10]</sup>利用双外推法对元宝山褐煤的热解机理进行了推断,认为其热解服从Anti-Jander的三维扩散机理.本文首先利用热重法,对麦秆热解进行了实验研究.然后利用双外推法,确定了麦秆中有机物热解的最概然机理函数.最后,将模型计算结果与实验结果进行了对比,验证了模型结果的可靠性,并对造成二者之间存在的偏差的原因进行了分析.

## 1 实验方法

### 1.1 实验原料

本文利用热重法对麦秆热解进行了研究.为了消除颗粒粒径对反应的影响,采用的试样粒度为100~120  $\mu\text{m}$ .麦秆试验样品的主要性质参数如表1所示.

### 1.2 实验仪器与实验条件

使用日本岛津的热分析装置DTG-60H得到了麦秆样品的热重分析(TGA)曲线和微分热重分析(DTG)曲线;采用DSC-60得到了差热分析(DTA)曲线,参比物为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ .实验时加热炉由室温加热到1 273 K,升温速率分别为5, 10, 20, 40 K/min,加热炉通入的氮气流速为50 mL/min,每次实验使用的样品约为10 mg.为了消除系统误差,每个实验结束后作一个相同条件下的空白实验.

## 2 结果与讨论

### 2.1 麦秆热解失重行为

实验得到的4种加热速率条件下的热重分析曲线如图1所示,微分热重曲线如图2所示,差热分析曲线如图3所示.

从图1、图2和图3可以看出,麦秆失重主要经历3个阶段.首先是水分析出阶段,主要是麦秆中自

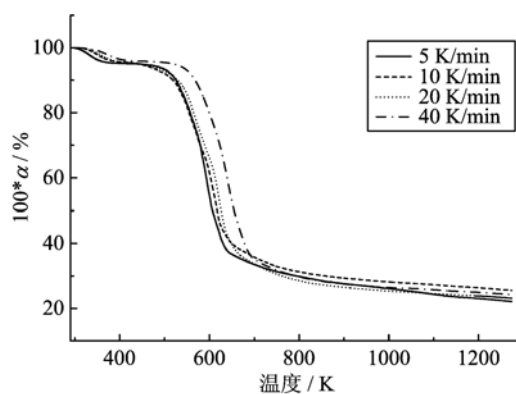


图1 热重(TG)曲线

Fig. 1 Weight loss curve from thermogravimetry analysis

表1 麦秆元素分析与工业分析

Tab. 1 Ultimate analysis and proximate analysis of wheat straw

元素分析					工业分析				
质量分数/%					质量分数/%				低热值/(kJ·kg <sup>-1</sup> )
C <sub>daf</sub>	H <sub>daf</sub>	O <sub>daf</sub>	N <sub>daf</sub>	S <sub>daf</sub>	FC <sub>ar</sub>	V <sub>ar</sub>	M <sub>ar</sub>	A <sub>ar</sub>	Q <sub>dw</sub>
46.7	7.2	45.1	0.6	0.4	14.0	64.1	8.3	13.6	16 560

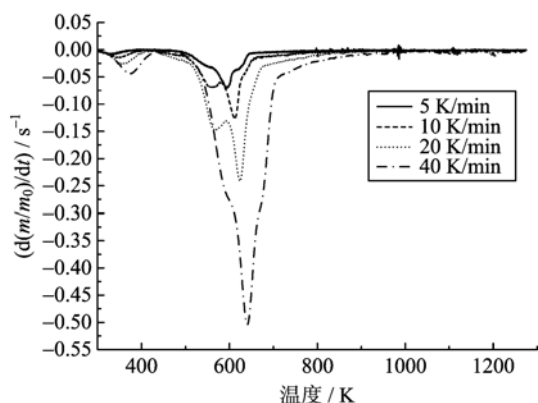


图 2 微分热重(DTG)曲线

Fig. 2 Derivative thermogravimetry curve of wheat straw

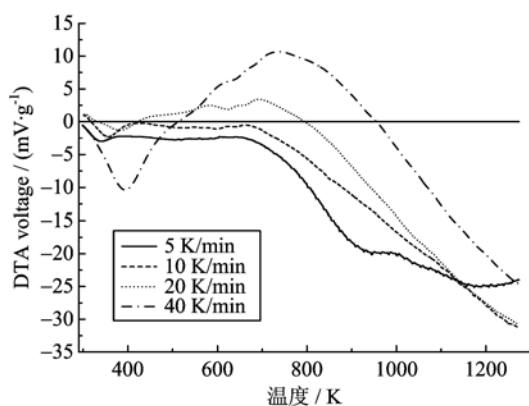


图 3 差热分析(DTA)曲线

Fig. 3 DTA curve of wheat straw at different heating rates

由水、结晶水和吸附水的析出。水分析出阶段的主要特征参数如表 2 所示,随着加热速率的增加,水分析出的终了温度  $T_f$ 、峰值失重速率对应温度  $T_{max}$  均相应增加。这表明提高加热速率将引起水分析出滞后,这是由于材料内部传热需要一定时间造成的。其次是麦秆中的有机物热解阶段,其失重曲线的主要特征参数如表 2 所示,随着加热速率的增加,挥发份析出的终了温度  $T_f$ 、峰值失重速率对应温度  $T_{max}$  均相

应增加。这表明提高加热速率也会导致挥发份析出滞后,原因也是材料内部传热需要一定时间。此外,如图 2 所示,当加热速率为 10 K/min 和 20 K/min 时,DTG 曲线上出现了台阶,这是由于麦秆中纤维素的热解初始温度较高引起的。麦秆是由半纤维素、纤维素和木质素组成的混合物。Yang 等<sup>[11]</sup>曾对各组分的独立热解过程进行了研究。结果表明,木质素和半纤维素的热解过程为放热过程,其中前者的热解初始温度约为 160 °C,后者约为 220 °C;纤维素的热解为吸热过程,且其热解初始温度最高,约为 315 °C。根据图 3,当加热速率为 5 K/min 和 10 K/min 时,热解过程总体表现为吸热过程,这表明半纤维素和木质素热解放出的热量不足以维持纤维素热解所需热量,而须补充外加热量以维持热解的进行。第三阶段是无机物的分解,并伴随有轻微的炭化过程。根据廖翠平等<sup>[12]</sup>的研究,麦秆中的无机元素主要是 K, Ca, Mg, Al, 由这些元素组成的无机物分解为吸热反应。由图 3 的 DTA 曲线可以看出,当加热速率为 20 和 40 K/min 时,放热分别在 707 K 和 746 K 达到峰值,表明此时木质素热解已趋结束,而无机物分解开始占据优势。图 2 的 DTG 曲线中的小失重峰就对应着某种无机物的分解,如  $\text{CaCO}_3$  在 950 K 左右的分解。此外,该阶段还存在轻微的炭化过程。由图 3 的 DTA 曲线可以看出,当加热速率分别为 20 和 40 K/min 时,仍存在放热峰。考虑到麦秆中的无机物分解是吸热反应,故放热峰的存在一定是由某种其他物质发生放热反应造成的。根据 Yang 等<sup>[11]</sup>的研究结果,木质素热解为放热反应,热解温度范围较宽(约为 160~900 °C),因此该阶段的放热是由木质素热解造成的。进一步,结合图 2 的 DTG 曲线,该阶段的失重速率很小,在 DTG 曲线上近似为一条直线,表明在无机物分解阶段尽管存在炭化,但已经不明显。

表 2 麦秆热解失重曲线的特征参数

Tab. 2 The characteristic parameters of the TG-DTG curves of pyrolysis of wheat straw

热解步骤	$\beta/(\text{K} \cdot \text{min}^{-1})$	初始温度 $T_i/\text{K}$	终了温度 $T_f/\text{K}$	峰值失重速率对应温度 $T_{max}/\text{K}$	峰值失重速率 $/(s^{-1})$	失重率 $\%$
水分析出	5	298	439	342	-0.008 5	4.96
	10	298	455	367	-0.014 9	4.64
	20	298	471	378	-0.026 5	4.80
	40	298	476	411	-0.044 0	4.27
有机物热解	5	437	646	594	-0.067 6	59.08
	10	455	724	625	-0.125 5	62.59
	20	472	745	640	-0.240 0	63.88
	40	477	749	653	-0.503 8	66.49

## 2.2 热解反应机理研究

### 2.2.1 双外推法原理

多相反应的动力学方程式为

$$d\alpha/dt = k(T)f(\alpha). \quad (1)$$

式中,  $\alpha$  为转化率, 其定义为  $\alpha = [m_0 - m(t)] / (m_0 - m_\infty)$ ,  $m_0$  为试样初始时刻的质量,  $m(t)$  为试样在  $t$  时刻时的质量,  $m_\infty$  为试样热解完成后的最终质量;  $t$  为反应时间;  $k(T)$  为反应速率常数;  $f(\alpha)$  为反应机理函数. 确定速率常数  $k(T)$ , 需要选择合适的  $f(\alpha)$  形式. 多相反应动力学模型的主要研究方法如表 3 所示<sup>[13]</sup>.

表 3 非均相反应动力学模型研究方法

Tab. 3 The model methods of kinetics on heterogeneous reaction

序号	基本思想	研究方法
I	基于 Arrhenius 定律的表达式	微分法 积分法
II	使用其他形式的 $k(T)$ 表达式	H-E 公式: $k(T) = BT^m$ B-H 公式: $Ce^{DT}$
III	直接使用式(1)	NPK 方法

表 3 中方法 II 和方法 III 的优点是其拟合公式与数据符合较好, 但诸如  $B$ 、 $m$ 、 $C$ 、 $D$  等参数却缺乏明确的物理意义. 而方法 I 中, 反应活化能  $E$  和指前因子  $A$  等动力学参数的物理意义却分别有碰撞理论和活化络合物理论的诠释<sup>[9]</sup>, 故在此使用方法 I 进行研究. 从数学处理方法上来看, 方法 I 可分为积分法和微分法. 较之微分法受限于实验数据噪声的影响, 积分法更具优势<sup>[13]</sup>. 由式(1)积分得到

$$G(\alpha) = \int_0^\alpha \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{\beta} \int_0^T \exp\left[-\frac{E}{RT}\right] dT. \quad (2)$$

式中,  $G(\alpha)$  为机理函数;  $\beta = dT/dt$  为加热速率;  $A$  为指前因子;  $E$  为活化能;  $R$  为通用气体常数. 从式(2)可以看出, 其右端的积分部分没有解析表达式, 因此积分法的难点在于其温度积分的求解. 温度积分式的求解主要有解析法和数值方法, 其中解析法的使用较多, 如 Coats-Redfern, Flynn-Wall-Ozawa 等<sup>[9]</sup>. 众所周知, 由于反应活化能和指前因子的补偿效应, 使很多机理函数都可能呈现良好的线性结果<sup>[7, 9]</sup>. 这使得在相同实验条件下, 不同研究者得到的同一物质的反应动力学参数出入很大. 显然, 这是由于选择的机理函数形式与实际发生的动力学过程之间的差异造成的<sup>[9]</sup>, 故选择最概然机理函数对增强模型的通用性显得尤其重要.

最概然机理函数推断有双外推法、Satava 法、Bagchi 法、Malek 法等<sup>[9]</sup>. 其中, 双外推法是指将加热速率  $\beta$  和转化率  $\alpha$  双双外推为零以得到样品在热平衡状态下的  $E_{\beta \rightarrow 0}$  及原始状态下的  $E_{\alpha \rightarrow 0}$ , 然后根据两者之间的差异大小而确定最概然机理函数. 其基本思想是认为固体样品在一定加热速率的温度场中的受热过程是非定温过程, 样品本身的热传导造成了样品本身以及样品与温度场之间处于非热平衡状态, 故在此基础上得到的反应机理及动力学参数与真实情况有偏离; 加热速率越大, 偏离就越大. 显然, 如果将加热速率外推到零, 就可以获得样品处于热平衡状态时的动力学参数, 它将反映过程的真实状况. 同时, 当样品在不同转化率时, 其表观活化能也将呈现规律性的变化. 因此, 如果获得转化率为零时的动力学参数, 就可认为是体系处于原始状态时的参数<sup>[9]</sup>. 双外推法的步骤是:

首先, 由 Cotas-Redfern 积分式:

$$\ln[G(\alpha)/T^2] = \ln(AR/\beta E) - E/(RT). \quad (3)$$

固定加热速率  $\beta$ , 由  $\ln[G(\alpha)/T^2]$  与  $1/T$  之间的直线关系, 求出反应的表现活化能和指前因子. 在某固定加热速率下, 选择多个线性关系极佳的  $G(\alpha)$ , 由式(3)确定动力学参数, 进而由下述两式外推而分别得到  $E_{\beta \rightarrow 0}$  和  $A_{\beta \rightarrow 0}$ :

$$E = a_1 + b_1\beta + c_1\beta^2 + d_1\beta^3, \quad E_{\beta \rightarrow 0} = a_1, \quad (4)$$

$$\ln A = a_2 + b_2\beta + c_2\beta^2 + d_2\beta^3, \quad (\ln A)_{\beta \rightarrow 0} = a_2. \quad (5)$$

然后, 根据 Ozawa 积分式:

$$\lg \beta = \lg[AE/R \cdot G(\alpha)] - 2.315 - 0.4567E/(RT), \quad (6)$$

当转化率  $\alpha$  固定, 则  $G(\alpha)$  一定, 这样由  $\lg \beta$  与  $1/T$  的直线关系, 求出一定  $\alpha$  时的表观活化能. 然后按照下述方程将  $\alpha$  外推到零而得到无任何副反应干扰、体系处于原始状态下的  $E_{\alpha \rightarrow 0}$ :

$$E = a_3 + b_3\alpha + c_3\alpha^2 + d_3\alpha^3, \quad E_{\alpha \rightarrow 0} = a_3. \quad (7)$$

将选定的几个  $G(\alpha)$  式的  $E_{\beta \rightarrow 0}$  与  $E_{\alpha \rightarrow 0}$  相比较, 其中相同或相近者, 即为该反应的最概然机理函数.

### 2.2.2 推断过程与结果

双外推法的第一次外推是根据式(3)进行的, 要求所选择的机理函数  $G(\alpha)$  使  $\ln[G(\alpha)/T^2] \sim 1/T$  之间的关系曲线具有极佳的直线性. 目前的异相反应机理函数主要有反应级数模型、相界面模型、扩散机理模型和随机成核模型等<sup>[14]</sup>. 由于试算时后 3 种模型的直线关系较差, 故在此选择反应级数模型, 如

表 4 所示.

表 4 采用的机理函数

Tab. 4 The several mechanisms adopted in this paper

反应级数 $n$	$G(\alpha)$	$f(\alpha)$
$n=1$	$-\ln(1-\alpha)$	$(1-\alpha)$
$n=2,3,4$	$(1-(1-\alpha)^{1-n})/(1-n)$	$(1-\alpha)^n$

根据实验得到的加热速率  $\beta$  分别为 5, 10, 20, 40 K/min 的热重曲线, 由式(3)得到的动力学参数, 即活化能  $E$  和指前因子  $A$  如表 5 所示. 同时表 5 也给出了由公式(4)和(5)外推得到的  $E_{\beta \rightarrow 0}$  和  $A_{\beta \rightarrow 0}$ , 该次外推在表 5 中由“外推 1”标记.

另一个外推是根据 Ozawa 公式和式(7)进行的. 首先根据一定的转化率  $\alpha$ , 得到不同加热速率下的体系温度, 进而根据式(6)得到该转化率时的活化能. 计算中所选定的转化率, 一定转化率、不同加热速率时的体系温度, 以及根据 Ozawa 公式计算得到的活化能如表 6 所示. 然后将得到的活化能根据式(7)外推得到  $E_{\alpha \rightarrow 0}$ . 最终得到  $E_{\alpha \rightarrow 0} = 111\ 236.12$  J/mol. 将  $E_{\alpha \rightarrow 0}$  与表 4 给出的一次外推得到的活化

能  $E_{\beta \rightarrow 0}$  比较发现, 麦秆热解的机理函数为二级反应, 相应的动力学参数为  $E = 1.17 \times 10^5$  J/mol 和  $A = 1.27 \times 10^8$  s<sup>-1</sup>.

### 2.3 结果可靠性验证与误差分析

利用双外推法, 得到麦秆中有机物热解为二级反应机理, 活化能  $E$  为  $1.17 \times 10^5$  J/mol、指前因子  $A$  为  $1.27 \times 10^8$  s<sup>-1</sup>. 为了验证该模型的可靠性, 将其与 4 种加热速率下的实验结果进行了比较. 二级反应的机理函数为

$$G(\alpha) = (1 - \alpha)^{-1} - 1. \quad (8)$$

这样由式(3)得到的麦秆热解理论计算式为

$$\alpha = 1 - \frac{1}{1 + \frac{ART^2}{\beta E} \exp\left[-\frac{E}{RT}\right]}. \quad (9)$$

式中,  $E = 1.17 \times 10^5$  J/mol;  $A = 1.27 \times 10^8$  s<sup>-1</sup>;  $R = 8.314$  J/(mol · K);  $\beta$ /(K · s<sup>-1</sup>) 为加热速率. 图 4 给出了按照式(9)得到的理论曲线与实验数据的比较, 其中加热速率  $\beta$  分别为 5, 10, 20 和 40 K/min.

从图 4 可以看出, 理论曲线与实验数据符合较好. 但二者之间仍有一定偏差, 并且不同加热速率下

表 5 Cotas-Redfern 公式得到的对应于不同机理函数的动力学参数

Tab. 5 The parameters of kinetics from Cotas-Redfern formula corresponding to several mechanisms

$\beta$ /(K · min <sup>-1</sup> )	反应级数 $n$							
	1		2		3		4	
	$E$ /(kJ · mol <sup>-1</sup> )	$A$ /(s <sup>-1</sup> )	$E$ /(kJ · mol <sup>-1</sup> )	$A$ /(s <sup>-1</sup> )	$E$ /(kJ · mol <sup>-1</sup> )	$A$ /(s <sup>-1</sup> )	$E$ /(kJ · mol <sup>-1</sup> )	$A$ /(s <sup>-1</sup> )
5	8.86E+04	1.66E+05	1.11E+05	5.62E+07	1.40E+05	7.42E+10	1.71E+05	1.93E+05
10	8.04E+04	2.24E+04	1.11E+05	4.49E+07	1.51E+05	6.05E+11	1.93E+05	1.71E+16
20	8.09E+04	3.05E+04	1.14E+05	8.70E+07	1.57E+05	1.82E+12	2.03E+05	8.20E+16
40	8.68E+04	1.40E+05	1.19E+05	2.67E+08	1.60E+05	3.36E+12	2.05E+05	8.79E+16
外推 1	1.05E+07	1.14E+07	1.17E+05	1.27E+08	1.21E+05	1.95E+09	1.32E+05	4.07E+10

表 6 Ozawa 公式得到的不同转化率时的活化能

Tab. 6 The parameter of activation energy from Ozawa formula at different conversion ratio

$\alpha$	加热速率/(K · min <sup>-1</sup> )				$E$ /(kJ · mol <sup>-1</sup> )
	5	10	20	40	
	T/K	T/K	T/K	T/K	
0.10	528.73	541.83	555.61	571.16	1.17E+05
0.20	548.00	561.12	576.26	592.05	1.21E+05
0.30	562.89	578.43	593.43	608.81	1.23E+05
0.40	576.24	591.58	607.31	622.91	1.26E+05
0.50	585.04	601.26	617.68	634.07	1.24E+05
0.60	592.77	609.31	626.08	643.47	1.24E+05
0.70	600.18	618.06	635.41	653.15	1.22E+05
0.80	609.72	631.17	649.19	666.76	1.17E+05
0.90	622.86	648.29	666.33	683.83	1.15E+05

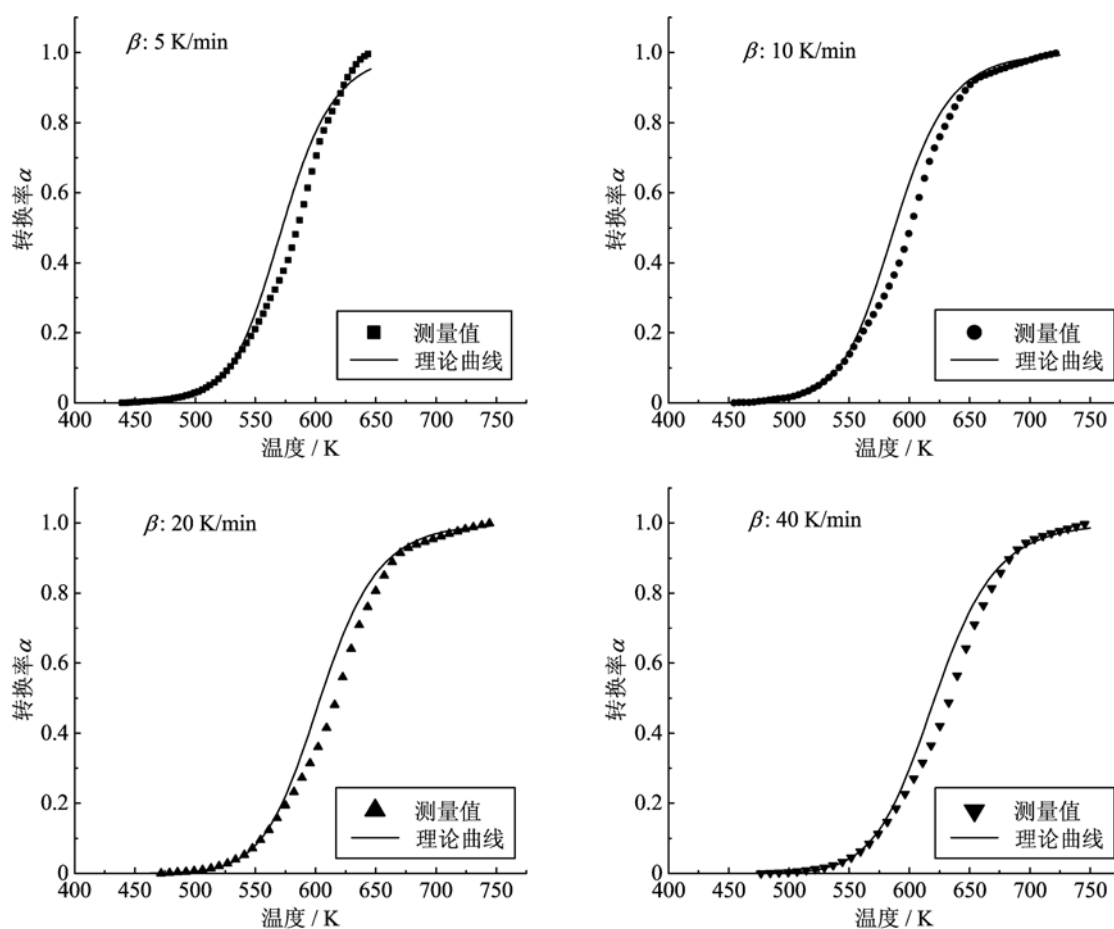


图4 理论曲线与实验数据的对照

Fig. 4 The preliminary comparisons between the model and the experimental data

产生偏差的大小与位置也不相同. 现对此进行简单分析: ①热重实验中, 影响麦秆热解的因素既有动力学方面的作用, 也有传热、传动量、传质等方面的作用, 单纯动力学模型研究无法对其作出准确描述, 结果造成计算值与测量值之间的偏差. ②麦秆是由半纤维素、纤维素以及木质素组成的混合物. 首先, 实际热解过程中, 随着加热速率发生变化, 由于材料内部传热需要一定时间, 导致各组分的热解初始温度、终了温度、峰值温度等均会发生变化; 其次, 各组分的析出产物也不同, 如半纤维素热解主要析出  $\text{CO}_2$ 、纤维素主要析出  $\text{CO}$ 、木质素热解主要析出  $\text{CH}_4$  和  $\text{H}_2$ <sup>[11]</sup>, 同时, 挥发份中各组分的扩散系数也不相同; 第三, 热解过程中半纤维素等3种组分之间还会存在相互影响, 结果使测量值与计算值之间出现的偏差大小与位置也不相同.

### 3 结论

(I) 麦秆在惰性气氛下的失重过程主要由水

分析出、有机物热解和无机物分解等阶段组成, 其中在无机物分解阶段还伴随有轻微的炭化过程.

(II) 根据得到的理论计算式与实验结果的对比情况, 表明采用二级反应机理模拟麦秆中的有机物热解具有一定的可靠性.

(III) 麦秆中有机物热解的活化能为  $1.17 \times 10^5$  J/mol, 指前因子为  $1.27 \times 10^8 \text{ s}^{-1}$ .

#### 参考文献 (References)

- [1] Vuthaluru H B. Thermal behavior of coal/biomass blends during co-pyrolysis [J]. Fuel Processing Technology, 2003, 85: 141-155.
- [2] Liu Naian, Wang Haihui, Xia Dunhuang, et al. Modelling the thermal decomposition of wood and leaves [J]. Journal of University of Science and Technology of China, 1998, 28(1): 40-48.  
刘乃安, 王海晖, 夏敦煌, 等. 林木热解动力学模型研究 [J]. 中国科学技术大学学报, 1998, 28(1): 40-48.
- [3] Nassar M N. Thermal analysis of kinetics of

- bagasse and rice straw[J]. Energy Sources, 1999, 21: 131-137.
- [4] Zhang Xiaodong, Xu Min, Sun Rongfeng, et al. Study on the kinetics of corn stalk pyrolysis by TG-DTG analysis [J]. Journal of Fuel Chemistry and Technology, 2006, 31(1): 123-125.  
张晓东,许敏,孙荣峰,等.玉米秸热解动力学研究[J].燃料化学学报,2006,31(1):123-125.
- [5] Kong Xiaoying, Ma Longlong, Wu Chuangzhi, et al. Comparison of thermogravimetry characteristics about wheat and basage [J]. Renewable Energy, 2003, 112(6): 12-14.  
孔晓英,马隆隆,吴创之,等.麦草与蔗渣基本热解特性的比较[J],可再生能源,2003,112(6):12-14.
- [6] Vuthaluru H B. Thermal behaviour of coal/biomass blends during co-pyrolysis [J]. Fuel Processing Technology, 2003, 85:141-155.
- [7] Wang Mingfeng, Jiang Enchen, Zhou Ling. Kinetic analysis of corn stalk pyrolysis [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(2): 204-207.  
王明峰,蒋恩臣,周岭.玉米秸秆热解动力学分析[J].农业工程学报,2009,25(2):204-207.
- [8] Liu Naian, Wang Binghong, Fan Weicheng. Kinetic compensation effect in biomass thermal decomposition [J]. Fire Safety Science, 2002, 11(2): 63-69.
- [9] 胡荣祖,史启祯.热分析动力学[M].北京:科学出版社,2001:113-115.
- [10] Ren Gengpo, Zhang Chaoqun, Wei Lihong, et al. Pyrolysis characteristics of super-fine pulverized lignite and its pyrolysis mechanism [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2005, 20(4): 407-410.  
任庚坡,张超群,魏砾宏,等.超细褐煤粉的热解特性及其热解机理[J].热能动力工程,2005,20(4):407-410.
- [11] Yang Haiping, Yan Rong, Chen Hanping, et al. Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis [J]. Fuel, 2007, 86: 1 781-1 788.
- [12] Liao Cuiping, Wu Chuangzhi, Yanyongjie, et al. Chemical elemental characteristics of biomass fuels in China [J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 27: 119-130.
- [13] Chen Haixiang, Liu Naian. Approximation expressions for the temperature integral[J]. Progress in Chemistry, 2008, 20(7/8): 1 015-1 020.  
陈海翔,刘乃安.温度积分近似式研究[J].化学进展,2008,20(7/8):1 015-1 020.
- [14] Ran Jingyu, Zeng Yan, Zhang Li, et al. Pyrolysis and kinetics characteristics of typical crop biomass [J]. Journal of Chongqing University, 2009, 32(1): 76-81.  
冉景煜,曾艳,张力,等.几种典型农作物生物质的热解及动力学特性[J].重庆大学学报,2009,32(1):76-81.