

# 考虑达西流的颗粒状生物质热解模拟

齐国利<sup>1</sup>, 董 芑<sup>2</sup>, 管 坚<sup>1</sup>,

(1. 中国特种设备检测研究院, 北京 100029; 2. 哈尔滨工业大学能源科学与工程学院, 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 建立生物质热解及液体产物高温热裂解的化学反应动力学模型, 该热解模型根据液体产物的特点将可凝挥发分分为生物质油和焦油。将化学反应动力学方程和能量方程耦合, 通过数值模拟, 分析温度、停留时间、粒径和压力等参数对生物质热解及焦油高温热裂解的影响, 并将计算结果与文献中的实验数据进行对比。模拟结果表明: 热解反应的吸热效应对温度场和反应进程有较大影响, 大颗粒在靠近中心的几层在热解反应区出现一段温度近似维持恒定的水平段, 在该阶段前后则是纯物质受热升温物理过程中常见的指数温升曲线, 生物质油和焦油的质量析出规律不同。

**关键词:** 高温热解; 可凝挥发分裂解数值模拟; 达西流; 热解模型

**中图分类号:** TK6

**文献标识码:** A

## 0 引 言

热解就是在缺氧或无氧条件下固体颗粒热降解产生大量化学成分的热化学转化过程。目前普遍认为反应产物包括不可凝气体(轻质气体)、可凝挥发分(生物质油和焦油)和木炭<sup>[1]</sup>。生物质热解的反应产物均来自初始热解和可凝挥发分的二次裂解反应, 二次反应使可凝的有机产物进一步分解为低分子量的气体和木炭。大量因素会影响生物质热解的产量、反应速率、产物组分和反应特性。温度、压力和热解速率是首要操作参数, 此外, 生物质的化学组分、灰分含量、颗粒尺寸和形状、密度等特性也至关重要。不可凝气体包括  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$  和低分子量的碳氢化合物<sup>[2]</sup>。

可凝挥发物的组成依赖热解温度和停留时间以及木炭层的存在。因此, 需要关注生物质热解反应过程中温度、传递现象和化学反应对产物产量和组成的影响。生物质颗粒在高温环境中, 热量通过对流和辐射换热传递到固体颗粒表面, 而在颗粒内部, 温度从颗粒表面传到颗粒内部的过程是导热。随着热量不断从颗粒表面传递到内部, 颗粒内部温度逐步升高, 温度的升高导致发生化学反应, 产生挥发分和固体残炭。反应过程中产生的热量和反

应生成的挥发分在颗粒内部的流动会影响颗粒内部的热量传递。由于固体颗粒温度的传递过程是从外表面到内层的逐步传递, 因此可将生物质颗粒热解过程分为 3 个区域: 第 1 个区域是固体颗粒外层热解反应完成; 第 2 个区域是正在发生热解反应的颗粒中间层; 第 3 个区域是未发生热解反应的区域。可凝挥发分发生二次热裂解反应改变了热解产物的组成, 由于颗粒外部和内部的温度差异所导致的扩散效应对热解产物的分布产生影响, 实际上热解反应过程的吸热和放热也影响热解温度。

基于以上分析可知, 生物质热解过程本身的复杂性为全面而深入的模拟带来了极大困难, 既需要热化学平衡的基础, 又要建立化学反应动力学模型, 也需要对颗粒内部的传热传质现象进行模拟。

## 1 化学反应动力学模型

对于大颗粒热解模型, 由于颗粒内部和外部温差所导致的扩散效应在很大程度上会影响热解生成物的分布<sup>[3,4]</sup>, 同时热解反应过程中的吸热和放热也会影响热解温度。对于大颗粒热解模型而言, 全方位的模拟是非常困难的。但在工业应用中, 将大颗粒粉碎成小颗粒在经济性上不可行, 因而对于大颗粒热解过程的模拟日益重要。大颗粒热解模型

收稿日期: 2016-01-07

基金项目: 国家科技支撑计划(2014BAA02B02)

通信作者: 齐国利(1975—), 男, 博士、高级工程师, 主要从事生物质能利用和煤的洁净燃烧技术方面的研究。wenyuhe0616@126.com

既要考虑颗粒热解过程中的物理和化学变化,也要考虑颗粒特性在此过程中的变化。试验测量表明:一次热解是明显的吸热过程,即生物质热解生成不凝气体和可凝挥发分的过程是明显的吸热过程,而挥发分发生二次裂解反应的过程是放热过程。

对于大颗粒热解模型,需知各种物性参数,如导热系数、比热容、表观密度、孔隙率、黑度、生成物的平均分子量、粘度和质量扩散系数等。文献中所提供的数据比较分散。由于不同的热解模型所采用的假设不同,并且简化了化学反应动力学特性,到目前为止还尚未形成一个适用于不同用途(生物质热解制油和高温热解)的模型来预测大范围温度条件下的热解规律。

生物质热解生成不可凝气体、可凝挥发分和固体。对于一种成功的生物质产气系统而言,可凝挥发分的控制和转化是至关重要的。1998年在布鲁塞尔举行的焦油测量检测会议上,专家一致把焦油定义为分子量大于苯的有机污染物<sup>[5]</sup>。参照焦油定义的方法,本文把生物质热解过程中所产生的低分子量的碳氢或碳氢氧化合物,即分子量小于苯的碳氢或碳氢氧化合物(包含苯酚)定义为生物质油。生物质油的主要成分为酸类、呋喃类、醇类、苯酚和烷烃类等低分子量的碳氢化合物,低分子量的碳氢化合物可用于燃气轮机或发动机<sup>[6]</sup>,其生成的温度在约 500 °C 时最多。

基于焦油和生物质油的定义,本文把生物质热解所产生的液体分为焦油和生物质油两大类。这样既能模拟以制油为目的的生物质热解反应过程,又能模拟在高温条件下生物质热解气化过程中焦油生成量和温度的关系。细节描述见图 1。

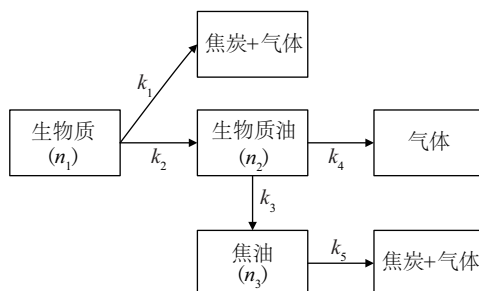


图1 生物质热解的化学动力学方案

Fig. 1 Chemical kinetic scheme of biomass pyrolysis

生物质热解的复杂化学反应经两步包括初始

反应和二次裂解反应最终完成热解。初始热解反应( $k_1, k_2$ )描述了生物质热解转化为气体及焦炭、生物质油的过程。二次反应假设为一级反应并且温度特性为 Arrhenius 形式。可凝挥发分中的生物质油在高温条件下可聚合成焦油以及裂解为不可凝气体,可凝挥发分中的焦油在更高温度条件下可进一步裂解为不可凝气体和焦炭。

基于图 1 生物质热解的化学反应动力学方案( $k_1 \sim k_5$ ),每种组分的生成和消耗为:

$$\frac{\partial \rho_B}{\partial t} = -k_1 \rho_B - k_2 \rho_B \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_C}{\partial t} = k_1 \rho_B + \varepsilon k_5 \rho_T \quad (2)$$

$$\frac{\partial \varepsilon \rho_{BO}}{\partial t} = k_2 \rho_B - \varepsilon k_3 \rho_{BO} - \varepsilon k_4 \rho_{BO} \quad (3)$$

$$\frac{\partial \varepsilon \rho_T}{\partial t} = \varepsilon k_3 \rho_{BO} - \varepsilon k_5 \rho_T \quad (4)$$

$$\frac{\partial \varepsilon \rho_G}{\partial t} = k_1 \rho_B + \varepsilon k_4 \rho_{BO} + \varepsilon k_5 \rho_T \quad (5)$$

$$k_i = A_i \exp[-(E_i/RT)], i = 1, 5 \quad (6)$$

$$\rho_B = M_B/V \quad (7)$$

$$\rho_C = M_C/V \quad (8)$$

$$\rho_{BO} = M_{BO}/V_g = M_{BO}/(\varepsilon V) \quad (9)$$

$$\rho_T = M_T/V_g = M_T/(\varepsilon V) \quad (10)$$

$$\rho_G = M_G/V_g = M_G/(\varepsilon V) \quad (11)$$

$$\varepsilon = V_g/V \quad (12)$$

式中,  $M_B$  和  $M_C$  ——生木炭质量;  $V$  ——总颗粒体积;  $\rho_B$  和  $\rho_C$  ——生物质和木炭的表观密度;  $M_{BO}$ 、 $M_T$  和  $M_G$  ——挥发性生物质油、焦油和不凝气体质量;  $V_g$  ——气体和挥发分所占有的颗粒体积;  $\rho_{BO}$ 、 $\rho_T$  和  $\rho_G$  ——可凝气体生物质油、焦油和不凝气体的质量浓度;  $\varepsilon$  ——介质的孔隙率。

## 2 数学模型

生物质热解过程可被分为两步:第一步是初始反应,第二步是二次热裂解反应。生物质燃烧和气化都有热解反应过程。机理为热量通过辐射、对流首先传递到颗粒的表面,然后进一步通过导热传递到颗粒内部。颗粒中的温度升高导致预热解,进而发生热解反应。化学反应和相变导致热量变化,热解反应过程中温度是时间的函数。挥发分和气体产物流动通过颗粒孔隙并参与在传热过程中。热解反应速率依赖于颗粒所处的环境温度。在研究

过程中未考虑焦油的凝结,进一步假设如下:

1)当生物质颗粒经历热解时每种物质所占有的体积未发生变化,热膨胀和收缩被忽略,即颗粒体积是常数;

2)气体和固体处于局部热平衡,即气体温度和固体温度相等;

3)在热解反应过程中挥发分物中无扩散流,即不考虑分子扩散引起的能量变化,只有达西流;

4)颗粒为球形或柱状均匀颗粒;

5)热流是一维的;

6)由于干燥过程是物理过程,对热解反应不会产生实质影响,因此假设物料不含水分。

## 2.1 质量守恒方程

$$h \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{h_g}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_g u) = h_g \omega_g - h_s \omega_g = \omega_g (h_g - h_s) = \omega_g \Delta h \quad (13)$$

详细推导过程见文献[7,8]。

## 2.2 达西定律

当预测多孔介质的气体速度时,可用达西定律代替完整的动量守恒方程。达西定律表达式为:

$$u = -\frac{\kappa}{\mu} \frac{\partial p}{\partial r} \quad (14)$$

$$p = \rho_g R_g T / M_g \quad (15)$$

$$\rho_g = \sum_{i=1}^{n_g} \rho_i \quad (16)$$

式中,  $p$ ——气体压力,用理想气体状态方程计算;  
 $M_g$ ——气相物种的平均分子量;  $\rho_g$ ——气体密度,是所有气相物种之和。

## 2.3 能量守恒方程

$$\left[ \rho_c c_c + \rho_b c_b + \varepsilon \rho_g c_g \right] \frac{\partial T}{\partial t} = \left( -\rho_g c_g u + k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial r} \right) + q \omega_g \quad (17)$$

详细的推导过程见文献[7,8]。

## 2.4 能量守恒方程的边界条件

初始条件:

$$t = 0, T = T_0, \rho_b = \rho_{b0}, \rho_c = \rho_T = \rho_G = \rho_{b0} = 0, u = 0 \quad (18)$$

固体在初始条件下处于大气压下的静止环境。

边界条件:

$$t > 0, r = 0; \left( \frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=0} = 0; u = 0 \quad (19)$$

$$t > 0, r = R; -k_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial r} = \alpha_0 \sigma (T_f^4 - T^4) + h(T_f - T); p = p_0 \quad (20)$$

方程(20)考虑了表面处对流和辐射传递。

## 2.5 颗粒状生物质热解模型的数值解

颗粒状生物质的模拟对象见图2所示。给定颗粒的初始密度、温度和压力。颗粒热解的边界条件见式(18)~式(20)。能量方程和初始、边界的无量纲化及计算过程见文献[7,8]。

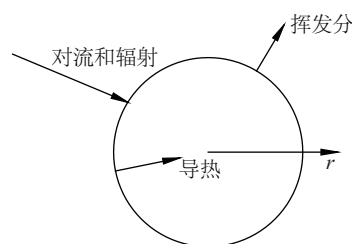


图2 颗粒状生物质计算模型的几何结构

Fig. 2 Geometry of the simulation of granular biomass

## 3 模型验证和比较

基于离散方程组<sup>[7]</sup>,利用 Fortran 语言编程进行数值计算,对所得模拟数据和 Pyle 等<sup>[9]</sup>的实验数据进行比较。Pyle 等<sup>[9]</sup>研究了圆柱形木头的热解行为,在恒定温度环境中考察了木材颗粒的质量随径向温度、时间的分布规律。试验中选用松木物料,直径分别为 0.6、1.5、2.2 cm,长度为 6~9 cm,可忽略轴向的热传导过程<sup>[10]</sup>。在温度范围为 623~780 K 的加热炉中进行生物质热解,记录质量和温度变化历程。计算中使用的动力学参数见表1和表2,其中的活化能  $E_3 \sim E_5$ ,指前因子  $A_3 \sim A_5$  来源于计算值和实验对比后的线性回归值。

表1 生物质热解的化学反应动力学数据

Table 1 Kinetic data of biomass pyrolysis

$A/s^{-1}$	$E/J \cdot \text{mol}^{-1}$	取值来源
$A_1 = 5.16 \times 10^6$	$E_1 = 88600$	文献[11]
$A_2 = 1.48 \times 10^{10}$	$E_2 = 112700$	文献[11]
$A_3 = 4.28 \times 10^5$	$E_3 = 138000$	文献[12]
$A_4 = 1.48 \times 10^{10}$	$E_4 = 120000$	文献[12]
$A_5 = 4.28 \times 10^7$	$E_5 = 133000$	文献[12]

表2 数值模拟中所用的物性参数

Table 2 Values used in the mathematic model

物性参数	参数值	来源
生物质初始密度 $\rho_{b0}/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	650	文献[13]
生物质比热容 $c_b/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	$1112.0 + 4.85(T - 273)$	文献[13]
木炭的比热容 $c_c/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	$1003.2 + 2.09(T - 273)$	文献[13]
气体的比热容 $c_g/\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$	$A + BT + CT^2 + DT^3 + ET^4 + FT^5$	文献[14]
有效导热系数 $k/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	$\eta k_b + (1 - \eta)k_c + \varepsilon k_g + \sigma T^3 d/\omega$	文献[15]
生物质导热系数 $k_b/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	$0.13 + 0.0003(T - 273)$	文献[13]
木炭导热系数 $k_c/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	$0.08 - 0.0001(T - 273)$	文献[13]
气体导热系数 $k_g/\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$	$25.8 \times 10^{-3}$	文献[16]
孔隙直径 $d/\text{m}$	$2 \times 10^{-5}$	文献[14]
发射黑度 $\omega$	0.9	文献[17]
反应热 $\Delta H/\text{J}\cdot\text{kg}$	-255000	文献[13]
动力粘度 $\mu/\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$	$4.847 \times 10^{-7} T^{0.64487}$	文献[18]
挥发分子量 $M_g/\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$	30.0	文献[19]
本征穿透率 $\kappa_b$	$1.0 \times 10^{-5}$	文献[20]
本征穿透率 $\kappa_c$	10	文献[20]

图3是生物质质量转化率随时间的变化曲线。热解条件:颗粒直径为6 mm、热解初始温度为303 K、热解终温为780 K。

从图3可看出,0~1.2 min内,文献的实验数据和模拟数据基本对应;在1.2~1.8 min内,文献的实验数据高于模拟数据的生物质转化率;1.8 min后,二者逐渐趋于一致,总体趋势上实验数据与模拟结果一致。

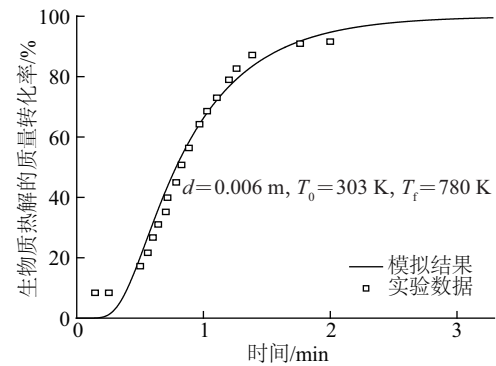


图3 生物质热解质量转化率随时间的关系曲线

Fig. 3 Temperature as functions of conversion yield of biomass

## 4 数值模拟结果

### 4.1 颗粒中心温度与环境温度的关系

图4是颗粒直径为4 mm的生物质热解过程中心温度在不同环境温度下的变化规律。环境温度分别取为873、1073 K。

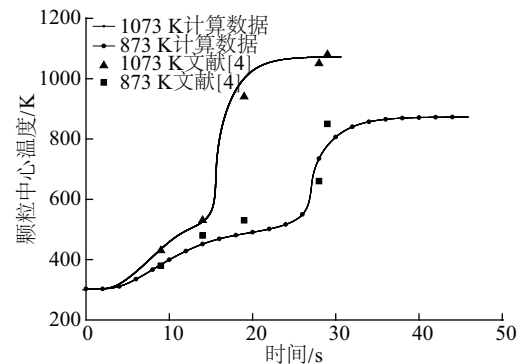


图4 颗粒中心温度随环境温度的变化规律

Fig. 4 Center of the particle temperature with the ambient temperature variation

从图4可看出,颗粒所处的环境温度越高,曲线越陡,结果表明环境温度越高热解所需的时间越少。873 K曲线在303~470 K区间是颗粒升温阶段,记为第1阶段;470~530 K区间为第2阶段,这个阶段曲线的斜率小于颗粒升温阶段的斜率,这是由于在此阶段热解过程是吸热反应,这也是温升较第1阶段减慢的缘故;从530 K到热解反应结束为第3阶段,该阶段可凝挥发分发生二次裂解反应,是放热过程,因此曲线斜率较第1阶段陡峭。Koufofonos等<sup>[13]</sup>在热解的固体颗粒内部研究了温度随时间的变化规律,发现热解过程初始是吸热反



应,之后是弱放热反应,这与本文分析基本一致。随着环境温度的升高,第2阶段所需的时间越来越短,这说明反应温度对热解过程的能量学的影响。Lee等<sup>[21]</sup>认为低辐射热流条件下,热解过程是吸热的,高辐射热流条件下,热解过程是完全放热的。本文的模拟结果很好地证明了这种情况。

## 4.2 生物质热解颗粒内部压力的变化

图5是颗粒粒径为4 mm、初始温度为303 K,环境温度为1473 K时生物质热解过程中,停留时间150 s下,压力随径向位置的分布规律。虽然颗粒内部的压力受众多因素的影响,但气相热解产物的生成是导致颗粒内部压力升高的主要原因,压力驱动气相物质通过颗粒内的多孔介质向外界逃逸则是压力降低的主要原因。在反应与未反应相邻的边界,由于很低的本征穿透率导致压力分布出现最大值。尽管在此区域温度很低,但由于气相产物的浓度值比未热解区大,因此压力最大值立即出现。

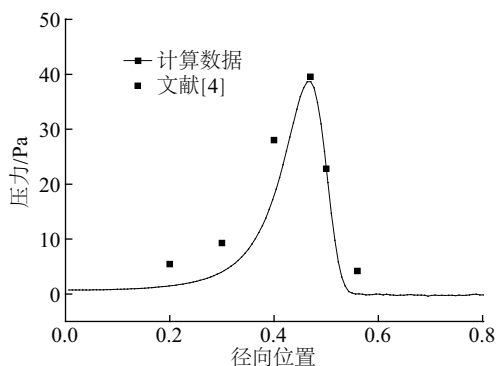


图5 不同时间下温度随径向位置的分布

Fig. 5 Overpressure as functions of radial distance under different time

介质的本征穿透率低、孔隙率小、对流扩散几乎为零、一次热解的量小,导致压力分布中出现峰值。另外,尽管在未热解生物质区存在明显的压力梯度,但由于本征穿透率较低,造成计算出的表观气体速度较低。随着时间的推移,最大压力有所增大,这是因为质量流量的增大,使孔隙中的流动阻力也增大。热解过程所产生半焦的本征穿透率比生物质原料大6个数量级,一旦有少量半焦生成,气相产物向表面流动过程的阻力就会减小,从而使颗粒内积累的气相热解产物以较快的速度流出,颗粒内部压力迅速降低,随着气相热解产物生成量的增大,导致孔隙逐渐增大,在高本征穿透率条件下,

颗粒内部压力逐渐减小,最终降为零。

## 4.3 可凝和不可凝挥发分的生成规律

图6是颗粒直径为15 mm、初始温度为303 K,环境温度取为1073、1273、1473 K的生物质热解气体质量份额、生物质油质量份额、焦油质量份额随时间的变化规律。生物质油和焦油二次裂解的影响从图6中可看出。生物质油和焦油达到最大值后开始下降,这意味着当生物质油和焦油向热表面流动时,生物质油分子被消耗。气体质量份额曲线有两个峰:第1个峰值是由于生物质油在773 K之后发生二次裂解转化为不凝气体和焦油所致;第2个峰值并不明显,这是由焦油质量份额不高所致。然而当温度超过1073 K后,焦油逐渐开始发生裂解,但量很少,当温度达到1473 K时,焦油质量份额为0.01% (kg/kg 干物料),即焦油含量约为8 mg/Nm<sup>3</sup>,文献[7]中焦油含量为11.7 mg/Nm<sup>3</sup>,两者相差不大,即焦油几乎完全裂解为不凝气体,而且气体质量份额有少量增加。另外,环境温度越高,生物质油和焦油的二次裂解时间均相应提前,而且峰值减小。

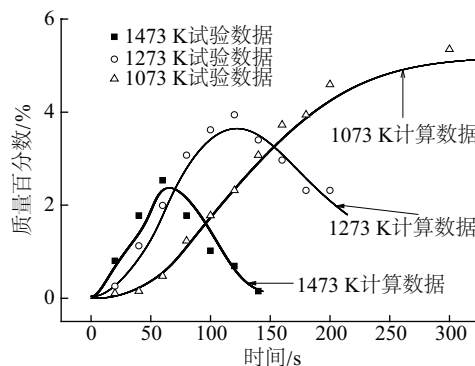


图6 不同时间下焦油生成率随径向位置的变化关系

Fig. 6 Tar production rate as functions of radial distance for conversion time

## 5 结 论

1)建立了生物质高温热解模型,该热解模型根据生物质热解的液体产物的特点将可凝挥发分分为生物质油和焦油。把化学反应动力学方程和传热方程耦合,对生物质热解过程进行了模拟。模型中考虑了温度、粒径、停留时间、速度和压力等参数对生物质热解及焦油高温热裂解的影响,通过与实验数据的对比,证明本模型基本能预测生物质热解

过程及焦油的高温热裂解过程。

2)热解反应的吸热效应对温度场和反应进程有影响。低辐射热流条件下,热解过程是吸热的;高辐射热流条件下,热解过程是完全放热的。

3)在热解反应与未反应相邻的边界,压力分布出现最大值。热解过程所产生半焦的本征穿透率比生物质原料大6个数量级,颗粒内积累的气相热解产物以较快的速度流出,颗粒内部压力迅速降低,随着气相热解产物生成量的增加,导致孔隙逐渐增大,高本征穿透率条件下,颗粒内部压力逐渐减小,最终压力降为零。

4)热解气体质量份额曲线有2个峰,第1个峰值是生物质油发生裂解转化为不凝气体和焦油,第2个峰值是焦油在高温下裂解为不凝气体和焦炭;环境温度提高,生物质油和焦油的二次裂解时间都相应提前,而且峰值减小。

#### 符号表

$\varepsilon$	黑度
$\sigma$	波尔兹曼常数, $W/(m^2 \cdot K^4)$
$\rho$	密度, $kg/m^3$
$T$	温度, $^{\circ}C$
$r$	颗粒半径, $m$

#### [参考文献]

- [1] Di Blasi C. Modeling chemical and physical processes of wood and biomass pyrolysis[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2008, 34(6): 47—90.
- [2] Piskorz J, Majerski P, Radlein D, et al. Fast pyrolysis of sweet sorghum and sweet sorghum bagasse [J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 1998, 46(1): 15—29.
- [3] Di Blasi C. Modeling and simulation of combustion processes of charring and non-charring solid fuels [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 1993, 19(1): 71—104.
- [4] Di Blasi C. Analysis of convection and secondary reaction effects within porous solid fuels undergoing pyrolysis[J]. Combustion Science and Technology, 1993, 90(5-6): 315—340.
- [5] Maniatis K, Beenackers A A C M. Tar protocols[J]. Iea Bioenergy Gasification Task, 2000, 18(1): 1—4.
- [6] Li Chunshan, Suzuki K. Tar property, analysis, reforming, mechanism and model for biomass gasification-an overview[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009, 13(3): 594—604.
- [7] 齐国利. 生物质热解及焦油热裂解的实验研究和数值模拟[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
- [7] Qi Guoli. Experimental research and numerical simulation of biomass pyrolysis and tar thermal cracking [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010.
- [8] 齐国利, 董 芑, 张 玉, 等. 大颗粒生物质高温热解模型的建立及数值模拟[J]. 太阳能学报, 2011, 32(7): 1058—1063.
- [8] Qi Guoli, Dong Peng, Zhang Yu. Construction of large biomass high temperature pyrolysis model and numerical simulation [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2011, 32(7): 1058—1063.
- [9] Pyle D L, Zaror C A. Heat transfer and kinetics in the low temperature pyrolysis of solids[J]. Chemical Engineering Science, 1984, 39(1): 147—158.
- [10] van Berkel A I. Dynamics of thermal particle conversion with application to biomass conversion in a circulating fluidised bed[D]. Netherlands: Technische Universiteit Eindhoven, 2004.
- [11] Di Blasi C. Heat, momentum and mass transport through a shrinking biomass particle exposed to thermal radiation [J]. Chemical Engineering Science, 1996, 51(7): 1121—1132.
- [12] Guan Jian, Qi Guoli, Dong Peng. A granular-biomass high temperature pyrolysis model based on the Darcy flow[J]. Frontiers of Earth Science, 2015, 9(1): 114—124.
- [13] Koufopoulos C A, Papayannakos N, Maschio G, et al. Modelling of the pyrolysis of biomass particles[J]. Studies on Kinetics, Thermal and Heat Transfer Effects, 1991, 69(4): 907—915.
- [14] 冯俊凯, 沈幼庭, 杨瑞昌. 锅炉原理及计算(第三版) [M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [14] Feng Junkai, Shen Youting, Yang Ruichang. Boiler principle and calculation (3rd Ed.) [M]. Beijing: Science Press, 2003.
- [15] Babu B V, Chaurasia A S. Heat transfer and kinetics in the pyrolysis of shrinking biomass particle[J]. Chemical Engineering Science, 2004, 59(10): 1999—2012.
- [16] Gronli M G, Melaaen M C. Mathematical model for wood pyrolysis-comparison of experimental measurements with model predictions [J]. Energy & Fuels, 2000, 14(4): 791—800.
- [17] Melaaen M C. Numerical analysis of heat and mass

- transfer in drying and pyrolysis of porous media[J]. Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, 1996, 29(4): 331—355.
- [18] Hagge M J, Bryden K M. Modeling the impact of shrinkage on the pyrolysis of dry biomass[J]. Chemical Engineering Science, 2002, 57(14): 2811—2823.
- [19] Kansa E J, Perlee H E, Chaiken R F. Mathematical model of wood pyrolysis including internal forced convection[J]. Combustion and Flame, 1977, 29(3): 311—324.
- [20] Di Blasi C. Modelling the fast pyrolysis of cellulosic particles in fluid-bed reactors[J]. Chemical Engineering Science, 2000, 55(24): 5999—6013.
- [21] Lee K C, Chaiken R F, Singer J M. Charring pyrolysis of wood in fires by laser simulation[J]. Symposium (International) on Combustion, 1976, 16(1): 1459—1470.

## PYROLYSIS SIMULATION OF GRANULAR BIOMASS CONSIDERING DARCY FLOW

Qi Guoli<sup>1</sup>, Dong Peng<sup>2</sup>, Guan Jian<sup>1</sup>

(1. China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China;

2. School of Energy Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** A chemical reaction kinetics model of biomass pyrolysis with liquid product pyrolysis at high temperature was established. The pyrolysis model could divide the condensable volatile into tar and biomass oil based on the characteristics of liquid products. The chemical reaction kinetics equation was coupled with energy equation to analyze the effects of temperature, residence time, particle size, pressure and other parameters on biomass pyrolysis and tar oil pyrolysis at high temperature through numerical simulation, and the computation results were compared with experimental data in literature. The simulation results showed that the endothermic effect of pyrolysis reaction on temperature field and reaction process is great; an approximately constant horizontal section of temperature is appeared in the pyrolysis reaction zone for the several layers near the center of large biomass particles; before or after this phase is the common exponential temperature rise curve in the physical process of pure substance by heating; the quantity precipitation rules for biomass oil and tar are different.

**Keywords:** high temperature pyrolysis; condensable volatile cracking simulation; Darcy flow; pyrolysis model