

# 环形流化床生物质热裂解反应器的传热分析

王霄, 司慧, 程琦

北京林业大学工学院, 北京 100083

**摘要** 环形流化床热裂解反应器结构紧凑, 热效率较高, 具有良好的应用前景。本研究对环形流化床内传热过程进行分析。利用解析法, 构建了环形反应器稳态传热的计算模型, 并用 C 语言进行编程和求解, 得出了反应器各参数随流化气速变化的关系。同时, 应用数值法得出相应流化气速下反应器热量损失与壁面温度, 并与解析法进行对比。结果显示, 反应器在流化气速为 0.02~0.24m/s 下工作时, 随着流化气速的升高, 总传热系数上升, 燃烧室外壁面温度降低, 保温层表面温度升高, 单位长度上的热损失呈上升趋势。与传统流化床反应器相比, 环形流化床反应器的热损失较低。解析法与数值法得出的结果具有较高吻合性, 对于流化床反应器内传热效果的分析具有指导性意义。

**关键词** 环形流化床反应器; 快速热裂解; 生物质; 稳态传热; 数值模拟

**中图分类号** TQ021.3

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2013.14.004

## Heat Transfer Analysis of Annular Fluidized Bed Biomass Pyrolysis Reactor

WANG Xiao, SI Hui, CHENG Qi

School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

**Abstract** Annular fluidized bed reactor possesses a compact structure and higher thermal efficiency, having a good application prospect. The analysis on the heat transfer inside annular fluidized bed is presented. First, the analytic method has been used. In order to study steady heat transfer in the reactor, a kind of computational model is established. And then the C Language is used for programming and solving the process. As the result, the relationship between various parameters of reactor and fluidized gas velocity is carried out. With the numerical method, the heat loss per unit length and temperatures on the each wall of the reactor are obtained by simulation. These values are related with the speeds used in the analytic method, respectively. These results have been compared with the analytic one. The results show that the heat transfer coefficients increase with the rise of fluidized gas velocity. The temperature on the outer wall of combustion chamber decreases, meanwhile the temperature on the outer wall of insulation layer increases. The heat loss per unit length is also on the rise. All above results are obtained with the fluidized gas velocity ranged from 0.02m/s to 0.24m/s. Comparing with the conventional reactor, the heat loss of an annular fluidized bed reactor is much lower. And the results of both methods are consistent with each other. These two methods provide useful guidance for analyzing the effect of heat transfer in a fluidized bed reactor.

**Keywords** annular fluidized bed reactor; fast pyrolysis; biomass; steady heat transfer; simulation

### 0 引言

快速热裂解技术可以将低品质的生物质转换为高品质的生物油, 用于制取燃料或化工产品, 是开发利用生物质能源的有效途径。该技术的研究基础和关键是开发高效以及稳

定的反应设备<sup>[1-3]</sup>。目前, 用于生物质快速热裂解的反应器有多种类型, 按裂解原理可分为流化床、旋转锥、循环流化床、引流床、喷动床、烧蚀反应器、真空移动床<sup>[4-6]</sup>。在所有反应器类型中, 流化床反应器因其结构简单、传热传质性能良好、操

收稿日期: 2013-01-11; 修回日期: 2013-02-22

基金项目: 国家林业局 948 引进项目(2012-04-19); 科技部农业科技成果转化资金项目(2010GB23600654)

作者简介: 王霄, 博士研究生, 研究方向为生物质能源化利用技术, 电子信箱: wx\_dykm@126.com; 司慧(通信作者), 副教授, 研究方向为生物质能源化利用技术、机械设计及理论, 电子信箱: sihui@bjfu.edu.cn

作简便、易于工业化生产等特点,正逐渐受到国内外众多研究者的关注<sup>[7]</sup>。

传统流化床反应器的加热部件位于反应器的外围,使得热源与大气直接接触,造成热量损失。而且,加热部分占用额外空间,加大了体积。相比之下,笔者设计的新颖的环形流化床反应器内置圆筒形燃烧室,使反应区为反应器外壁与燃烧室外壁之间的环形区域。热裂解过程中,燃烧室产生的热能由内向外直接传递,避免了热源与外界的直接接触,既降低能耗,又节省空间。加拿大西安大略大学的可移动热裂解装置用到了类似的环形反应器<sup>[8]</sup>,但并未说明其传热效果。

本文采用解析法和数值法,对环形流化床反应器的整体传热过程进行分析,构建了传热模型,得出了流化气速与反应器各个参数的关系,并对传热过程进行了分析,以期对环形流化床热裂解反应器的设计提供参考。

### 1 解析法求解

#### 1.1 物理模型建立

图1为环形流化床结构示意图,反应器外壁结构为高1000mm,半径250mm的圆筒。燃烧室位于流化床反应器内部,其结构与反应器外壁同轴、高度相等、半径110mm的圆筒。器壁厚度均为4mm,材料为不锈钢。反应器外壁包裹有石棉纤维材料保温层,厚度为50mm。假设燃烧室内部燃烧温度为恒定值1273K,气体平均流速为1m/s;反应区入口温度为473K;外界环境温度为293K。

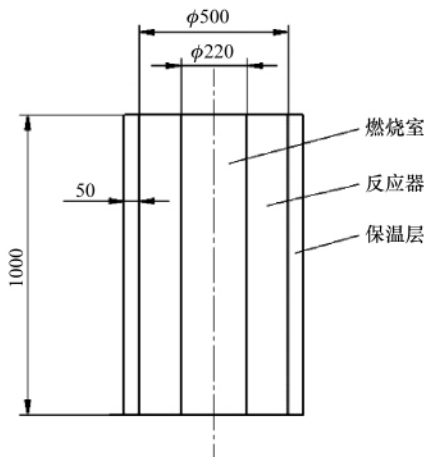


图1 环形流化床结构示意图(单位:mm)

Fig. 1 Scheme of annular fluidized reactor (unit: mm)

图2为反应器的传热模型示意图。其中 $r_1, r_2, r_3, r_4, r_5$ 分别为燃烧室内径、燃烧室外径、反应器内径、反应器外径、保温层外径; $T_{n1}, T_{n2}, T_{n3}$ 分别为燃烧室内平均温度、反应区平均温度、外界温度; $T_{w1}, T_{w2}, T_{w3}, T_{w4}$ 分别为燃烧室内壁温度、燃烧室外壁温度、反应器内壁温度、保温层表面温度。由于燃烧室为热源,故反应器各部分温度由内到外逐渐降低。

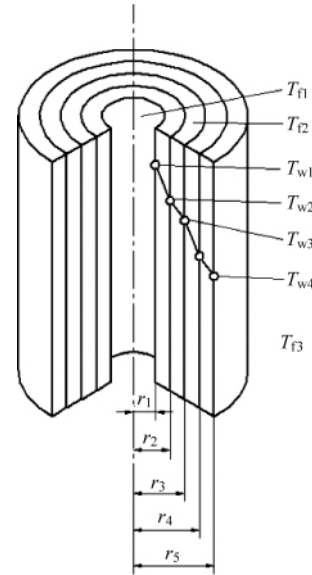


图2 反应器传热模型示意图

Fig. 2 Scheme of reactor heat transfer model

设计过程中,温度、传热效率以及能源利用率是评价反应器性能的重要指标。因此,为分析反应器的传热特性,拟设立以下3个问题:(1)求反应器各器壁的温度;(2)求总传热系数;(3)计算单位长度上的热损失,并通过求该问题对环形反应器的传热效果进行分析。

#### 1.2 数学模型的建立

由上文可知, $T_{n1}=1273K, T_{n3}=293K, r_1=0.110m, r_2=0.114m, r_3=0.250m, r_4=0.254m, r_5=0.304m$ 。

为研究稳定工况下环形反应器传热规律,本文中对反应器做稳态导热过程的计算。在不考虑有物料投入的情况下,即没有能源消耗,做如下假设:

- (1) 反应器内的流体流速不变;
- (2) 燃烧室内流体温度不变;
- (3) 用匀速流动的流体代替燃烧室内因燃料燃烧而产生的高温气体。

为方便求解,反应区、燃烧室内气体都选用空气。其中,反应区中流体形式为气固两相流。固体颗粒选用石英砂,设初始堆积高度为反应器总高的15%。当有流体(此处为空气)以一定流速通过石英砂颗粒层时,石英砂颗粒便被流化,并具有部分流体特性<sup>[9]</sup>,因此反应区内流体为气固混合流体。

反应器的热传递分为两个阶段:1)燃烧室与反应区之间的热传递,其中热流体为燃烧室内的高温流体,冷流体为反应区内混合流体;2)反应区与外界的热传递,其中热流体为反应区内混合流体,冷流体为大气。传热过程以对流换热为主。因燃烧室内温度较高,不可忽略辐射作用的影响。

燃烧室内高温气体对器壁辐射换热的表面传热系数 $a_r$ 可由式(1)计算<sup>[9]</sup>:

$$a_r = \frac{1 + \epsilon_w}{2} \sigma \frac{(\epsilon_g T_{n1}^4 - \alpha_g T_{w1}^4)}{T_{n1} - T_{w1}} \quad (1)$$

其中,  $\varepsilon_w$  为器壁发射率;  $\varepsilon_g$  为气体发射率;  $\alpha_g$  为吸收比。根据  $T_{fl}$  查得相关参数值<sup>[9]</sup>:  $\varepsilon_w=0.85, \varepsilon_g=0.15, \alpha_g=0.2$ 。

由于  $T_{w1}$  未知, 此处采用试凑迭代法, 并将算法用编程实现。假设第 1 次迭代的  $T_{w1}$  初值为  $T_{w1}^{(0)}=773K$ , 则由式(1)可求得第 1 次迭代相应结果  $a_r^{(1)}$ 。

在已知冷、热流体流速和流体物性的条件下, 可计算出各部分流体的普朗特常数  $Pr$  和雷诺数  $Re$ <sup>[10]</sup>。

$$Pr = \frac{c_p \mu}{\lambda} \quad (2)$$

$$Re = \frac{d_H \omega \rho}{\mu} \quad (3)$$

其中,  $d_H$  为管道水力直径;  $\omega$  为平均流速;  $c_p$  为等压比热容;  $\mu$  为黏度;  $\lambda$  为导热系数;  $\rho$  为密度。

由于反应区温度未知, 故假设出口温度为  $T_c=773K$ , 则反应区内定性温度为

$$T_{f2} = \frac{T_c + T_r}{2} = 623K \quad (4)$$

根据  $T_{fl}, T_{f2}, T_{f3}$ , 可查得空气在不同温度下的相关物性<sup>[9]</sup>, 具体数值见表 1。

表 1 干燥空气物性  
Table 1 Properties of dry air

温度/K	定压比热容 (kJ·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	黏度/10 <sup>6</sup> (kg·s·m <sup>-2</sup> )	导热系数/10 <sup>2</sup> (W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	密度 (kg·m <sup>-3</sup> )
293	1.00	18.1	2.59	1.205
623	1.06	31.4	4.19	0.566
1273	1.18	49.0	8.07	0.277

对气固两相流需求得气体与固体颗粒综合物性。本文选用按体积比 623K 系数求和方法, 得出反应区内流体物性近似值。温度为 623K 时石英砂颗粒物性为:  $c_p=1.0908kJ/(kg \cdot K)$ ,  $\mu=1.7 \times 10^{-5}(kg \cdot s)/m^2$ ,  $\lambda=4.885W/(m \cdot K)$ ,  $\rho=2320kg/m^3$ 。可得到燃烧室、反应区内流体的普朗特常数 ( $Pr_1, Pr_2$ ) 和雷诺数 ( $Re_1, Re_2$ )。

根据以下公式可求得各部分流体的努赛尔数  $Nu$ <sup>[10]</sup>

$$Nu = 1.86 \left( Pr \cdot Re \frac{d}{l} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_l}{\mu_w} \right)^{0.14} \quad Re < 2200 \quad (5)$$

$$Nu = 0.022 Pr^{0.5} \cdot Re^{0.8} \quad 2200 < Re < 10^4 \quad (6)$$

$$Nu = \frac{Re Pr \left( \frac{C_f}{2} \right)}{1.07 + 12.7 (Pr^{2/3} - 1) \sqrt{\frac{C_f}{2}}} \quad Re > 10^4 \quad (7)$$

其中,  $d$  为管道截面直径;  $l$  为管道长度;  $\mu_l$  与  $\mu_w$  分别为温度为  $T_l$  和  $T_w$  时流体动力黏度;  $C_f$  为摩擦系数, 其表达式为

$$\frac{C_f}{2} = (2.236 \ln Re - 4.639)^{-2} \quad (8)$$

反应器与外界的换热形式可视为大空间恒壁温自然对流换热, 关联式为

$$Nu = 0.0292 (Gr \cdot Pr_3)^{0.39} \quad (9)$$

其中  $Gr$  为格拉晓夫数, 计算公式为

$$Gr = \frac{g \alpha (T_{w4} - T_{f3}) (2r_5)^3}{\nu^2} \quad (10)$$

式中,  $g$  为重力加速度;  $\alpha$  为空气膨胀系数;  $\nu$  为空气运动黏度。因  $T_{w4}$  未知, 故假设为 383K, 则定性温度  $T_m$  为

$$T_m = \frac{T_{w4} + T_{f3}}{2} = 338K \quad (11)$$

根据  $T_m$  查得空气相关物性<sup>[9]</sup>:  $\nu=19.5 \times 10^{-6}m^2/s$ ;  $\alpha=1/383K$ ;  $Pr_3=0.695$ 。由此可得到与 4 个壁面相接触的流体的努赛尔数 ( $Nu_1, Nu_2, Nu_3, Nu_4$ )。

根据如下公式可求得对流换热的表面传热系数  $\alpha$ <sup>[10]</sup>:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d} \quad (12)$$

利用式(12)可求得燃烧室内壁面以及另外 3 个壁面传热系数  $\alpha_c, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ 。且由上文可得燃烧室内壁面复合传热系数为  $\alpha_1 = \alpha_c + \alpha_{r,c}$ 。

由于各个传热层均为圆筒壁, 因此第 1、第 2 阶段的总传热系数  $k_1$  和  $k_2$  计算公式为

$$k_1 = \frac{1}{\frac{r_2 \ln \frac{r_2}{r_1}}{r_1 \alpha_1} + \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (13)$$

$$k_2 = \frac{1}{\frac{r_5 \ln \frac{r_4}{r_3}}{r_3 \alpha_3} + \frac{1}{\lambda_1} + \frac{r_5 \ln \frac{r_5}{r_4}}{\lambda_2} + \frac{1}{\alpha_4}} \quad (14)$$

其中,  $\lambda_1, \lambda_2$  为不锈钢和石棉的导热系数,  $\lambda_1=17.5W/(m \cdot K)$ ,  $\lambda_2=0.11W/(m \cdot K)$ 。

根据能量守恒, 可以求得 4 个壁面温度:

$$\begin{aligned} T_{w1}^{(1)} &= T_{fl} - \frac{k_1 (T_{fl} - T_{f2})}{\alpha_1} & T_{w2} &= \frac{k_1 (T_{fl} - T_{f2})}{\alpha_2} + T_{f2}; \\ T_{w3} &= T_{f2} - \frac{k_2 (T_{f2} - T_{f3})}{\alpha_3} & T_{w4} &= \frac{k_2 (T_{f2} - T_{f3})}{\alpha_4} + T_{f3} \end{aligned} \quad (15)$$

其中,  $T_{w1}^{(1)}$  为第 1 次迭代得出的  $T_{w1}$  值。至此, 第 1 轮迭代结束, 以  $\frac{T_{w1}^{(1)} + T_{w1}^{(0)}}{2}$  代替初值进行下一轮迭代计算并不断循环。若

$\frac{|T_{w1}^{(n-1)} - T_{w1}^{(n)}|}{T_{w1}^{(n)}} \leq 5\%$ , 其中  $T_{w1}^{(n-1)}$  为第  $n-1$  次迭代的结果,  $T_{w1}^{(n)}$  为第  $n$  次迭代的结果, 则认为结果收敛, 并取  $T_{w1}^{(n)}$  为最终结果, 同时得到  $k_1^{(n)}, k_2^{(n)}, T_{w2}, T_{w3}, T_{w4}$  (经过  $n$  次迭代)。

单位长度上热损失  $q$  可由式(16)求得<sup>[10]</sup>

$$q = 2\pi \cdot r \cdot k_2 (T_{f2} - T_{f3}) \quad (16)$$

将以上计算过程用 C 语言编程, 并以燃烧室内壁温度  $T_{w1}^{(0)}$ 、流化气速  $v$  作为整个流程的输入量; 各个器壁温度、传热系数、单位长度上的热量损失为输出量。程序流程如图 3 所示。

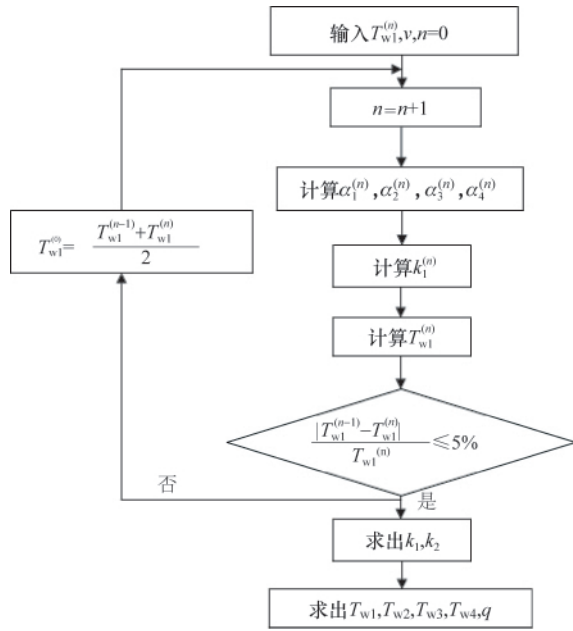


图3 计算程序流程

Fig. 3 Flowchart of calculation procedure

## 2 数值法求解

### 2.1 控制方程

基本控制方程组共 3 种,形式为<sup>[11]</sup>

(1) 连续方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V) = 0$$

(2) 运动方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho V) + \nabla \cdot (\rho V \cdot V) = \nabla \cdot \sigma + \rho f$$

式中,  $\rho$  为密度;  $t$  为时间;  $V$  为速度;  $\sigma$  为应力张量;  $f$  为体积力。

在直角笛卡儿坐标系  $(x, y, z)$  中,则有

$$x \text{ 方向: } \frac{\partial}{\partial t} (\rho V) + \nabla \cdot (\rho u V) = \nabla \cdot (\mu \nabla u) - \frac{\partial p}{\partial x} + S_1 + \rho f_1$$

$$y \text{ 方向: } \frac{\partial}{\partial t} (\rho V) + \nabla \cdot (\rho v V) = \nabla \cdot (\mu \nabla v) - \frac{\partial p}{\partial y} + S_2 + \rho f_2$$

$$z \text{ 方向: } \frac{\partial}{\partial t} (\rho V) + \nabla \cdot (\rho w V) = \nabla \cdot (\mu \nabla w) - \frac{\partial p}{\partial z} + S_3 + \rho f_3$$

式中,  $S_i (i=1, 2, 3)$  的表达式为

$$S_i = \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_i} \cdot (\mu' \nabla \cdot V)$$

式中,  $\mu'$  为第二动力黏度;  $u, v, w$  为  $x, y, z$  方向上速度  $V$  的分速度。

(3) 能量方程

$$\frac{\partial (\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho h V) = -k p \nabla \cdot V + \Phi + \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q_v$$

式中,  $h$  为焓;  $p$  为压力;  $\Phi$  为耗散函数;  $T$  为温度;  $q_v$  为能量释

放率;  $k$  为流体的比热容。

在流动与传热问题中,通常采用如下通用形式:

$$\frac{\partial (\rho \phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V \phi) = \nabla \cdot (\Gamma_\phi \nabla \phi) + S_\phi$$

式中,  $\phi$  和  $\varphi$  为通用变量,它可以表示  $u, v, w, T$  等求解变量;  $\Gamma_\phi$  为广义扩散系数;  $S_\phi$  为广义源项。

### 2.2 几何建模及网格划分

利用 Fluent 软件完成分析,并用其附属软件 Gambit 完成实物的三维建模及其网格划分。为简化计算,将模型化简为反应区实体与保温层实体两部分结构,分别设置为 Fluid 和 Solid 两种类型。

综合考虑初始化时间、计算花费和数值耗散等因素,将该反应器模型划分为非结构化六面体随机性网格 (Hex & Cooper),如图 4 所示。其中,网格总数量为 29750,平面数为 97095,节点数为 37740。经检查,无负体积。

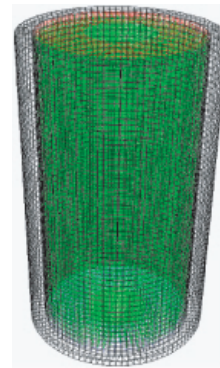


图4 反应器实体网格划分

Fig. 4 Mesh partition of the reactor

### 2.3 边界条件及初始化设置

初始条件设定。由于反应区内的流体雷诺数适中,故选择 RNG  $k-\epsilon$  双方程模型。同时选择欧拉两相流模型,主相为流化载气,第 2 相为固体颗粒,并采用 Syamlal-O'Brien 拽力定律。算法选用基于交错网格的 Simple 算法<sup>[11]</sup>。反应区内的物质包含固体颗粒和流化载气。固体颗粒为石英砂;流化载气为空气。颗粒堆积高度  $l=15\%H$  ( $H$  为反应器高度)。燃烧室温度 1273K;反应区入口温度 473K;外界温度 293K。

边界条件:反应区入口和出口分别设置为速度入口和出口流动边界条件。回流条件的设置采用湍流强度和水力直径。壁面边界条件选择复合换热,材料定义为不锈钢。动量、湍动能、湍动能耗散率、动能的离散均为二阶迎风<sup>[12]</sup>。

## 3 结果分析与讨论

启动程序,并分别求出流化气速为 0.02、0.04、0.06、0.08、0.1、0.12、0.14、0.16、0.18、0.2、0.22、0.24m/s 时,反应器的传热系数、各个壁面上的温度和单位长度上的热量损失,并对结果进行分析。

### 3.1 流化气速对传热系数的影响

图 5 为解析法求得的结果。总体上,随着流化气速的增加,第一阶段的总传热系数有明显的上升趋势,说明流化气速的增加有利于反应器内热传递。而第二阶段总传热系数的变化趋势基本维持一条水平线,说明受流化气速影响较小,传热效率比较稳定。从图中可以明显看出  $k_1$  远大于  $k_2$ , 主要是因为反应区内流体为流化载气与石英砂颗粒的混合流体,石英砂的加入将大幅度提高混合流体的传热效率。其次,燃烧室内温度较高(1273K),使得辐射传热的作用较强,也将在很大程度上提高  $k_1$ 。相比之下,反应器外壁温度较低,更接近环境温度,辐射作用有所下降。同时,反应器外裹有导热系数较低的石棉保温层也将降低  $k_2$ 。此外,传热系数的变化趋势与 Ozkaynak 等<sup>[13]</sup>得出的实验结果较为吻合,说明解析法计算过程较为可靠,有一定应用价值。

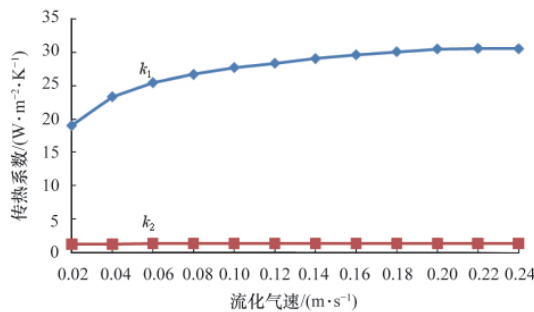


图 5 传热系数与流化气速的关系

Fig. 5 Relationship between heat transfer coefficient and fluidized gas velocity

### 3.2 流化气速对热量损失的影响

将数值法结果进行间接计算可得出反应器热量损失,并与解析法结果进行对比。如图 6 所示,  $q_A$ 、 $q_S$  分别为解析法和数值法得出的反应器热量损失。可以看出,随着流化气速的增加,单位长度上的热量损失呈整体上升的趋势,这是因为流化气速的提高会促进反应区的对流传热,使热量散失到外界空气的速率提高。在 0.02~0.24m/s 这个流化气速范围内,反

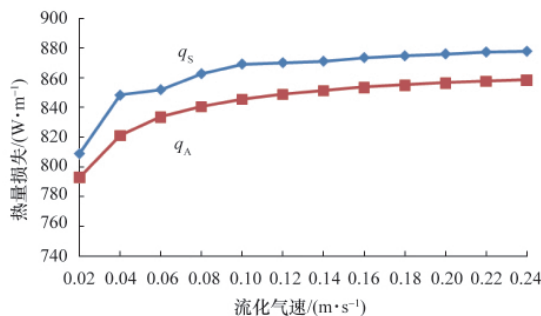


图 6 单位长度上的热量损失与流化气速的关系

Fig. 6 Relationship between heat loss per unit length and fluidized gas velocity

应器的热量损失不会超过 900W/m, 明显低于传统的流化床反应器<sup>[14-16]</sup>,说明环形流化床反应器有较高的热能利用效率,发展前景较好。另外,数值法结果高于解析法,经分析,原因如下:(1) 解析法将流化载气(空气)与床料(石英砂)视为混合流体,并未考虑气固两相之间的流动性差异;(2) 数值法忽略了反应器壁厚度对热传递的影响。这两方面问题需要在今后的研究中改进。

### 3.3 器壁温度结果对比

图 7 为解析法和数值法得出的燃烧室外壁面温度和保温层外表面温度。两种方法得出的结果非常相近,说明数值法结果有一定的参考价值。

随着流化气速的逐渐增加,  $T_{w2}$  整体呈下降趋势,而  $T_{w4}$  有略微的上升趋势。这是因为流化气速的提高促进了固体壁面两侧流体的对流换热效率。对于燃烧室外壁面,流化气速的上升加速了燃烧室的热量散失,使得  $T_{w2}$  下降;对于保温层外表面,流化气速的上升加速了保温层的热量获取,使得  $T_{w4}$  上升。由图 7 可看出随着流化气速增高,  $T_{w4}$  基本维持在 383K,相比燃烧室内 1273K 的高温有明显的下降,说明环形流化床热能利用率较高,而且热传递过程较稳定。而消耗的这部分能量主要用于加热反应区内的流化载气。

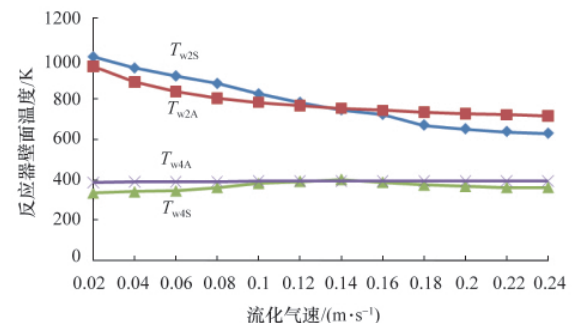


图 7 反应器壁面温度与流化气速的关系

Fig. 7 Relationship of reactor wall temperatures and fluidized gas velocities

## 4 结论

通过解析法和数值法对环形流化床反应器传热过程进行初步分析,并得出以下结论。

(1) 流化气速的变化对反应器热量损失影响较小,环形流化床反应器的工作比较稳定。

(2) 随着流化气速的增加,反应区传热系数增加,与 Ozkaynak 等<sup>[13]</sup>得出的实验结果相似。而且燃烧室与反应区的传热系数大于反应区与外界空气的传热系数。

(3) 该环形流化床反应器热量损失不高于 900W/m,比传统同等规模的反应器热能利用率高<sup>[14-16]</sup>。

(4) 随着流化气速逐渐增加,燃烧室外壁面温度下降,而保温层外表面温度基本恒定在 383K。

(5) 两种方法得出的结果有着较高的吻合性,说明数值

模拟方法基本接近理论值,有一定的实用价值;此外两种方法都存在缺陷,需在今后研究中改进。

可以看出,环形流化床反应器的工作过程较平稳,且热能利用率较高,该结构形式可为流化床热裂解反应器的设计提供参考。

### 参考文献 (References)

- [1] 任学勇, 常建民, 王鹏起, 等. 喷动循环流化床生物质快速热解设备的特性分析与发展研究综述[J]. 林产化学与工业, 2009, 29(5): 122-126.  
Ren Xueyong, Chang Jianmin, Wang Pengqi, et al. Chemistry and Industry of Forest Products, 2009, 29(5): 122-126.
- [2] 王鹏起, 常建民, 杜洪双, 等. 喷动流化床在生物质快速热解技术中的应用[J]. 北华大学学报: 自然科学版, 2007, 8(1): 92-96.  
Wang Pengqi, Chang Jianmin, Du Hongshuang, et al. Journal of Beihua University: Natural Science Edition, 2007, 8(1): 92-96.
- [3] 杜洪双, 常建民, 王鹏起, 等. 木质生物质快速热解生物油产率影响因素分析[J]. 林业机械与木工设备, 2007(3): 5-20.  
Du Hongshuang, Chang Jianmin, Wang Pengqi, et al. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2007(3): 5-20.
- [4] 姜年勇, 王述洋, 刘世锋. 生物质快速热解装置主反应器的研究现状[J]. 林业机械与木工设备, 2006(8): 21-23.  
Jiang Nianyong, Wang Shuyang, Liu Shifeng. Forestry Machinery & Woodworking Equipment, 2006(8): 21-23.
- [5] 刘荣厚, 牛卫生, 张大雷. 生物质热化学转换技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 188-228.  
Liu Ronghou, Niu Weisheng, Zhang Dalei. Biomass thermochemical conversion technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005: 188-228.
- [6] 原振宏, 吴创之, 马隆龙. 生物质能利用原理与技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 289-299.  
Yuan Zhenhong, Wu Chuangzhi, Ma Longlong. The principle of biomass energy utilization and its technology [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 289-299.
- [7] 刘守新, 张世润. 生物质的快速热解[J]. 林产化学与工业, 2004, 24(3):

95-101.

- Liu Shouxin, Zhang Shirun. Chemistry & Industry of Forest Products, 2004, 24(3): 95-101.
- [8] Berruti F, Briens C. Apparatus and process for the pyrolysis of agricultural biomass: WO, 130977[P]. 2006-12-14.
  - [9] 张弈. 传热学[M]. 南京: 东南大学出版社, 2004: 224-291.  
Zhang Yi. Heat transfer theory [M]. Nanjing: Southeast University Press, 2004: 224-291.
  - [10] 王保国. 传热学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 194-199.  
Wang Baoguo. Heat transfer theory [M]. Beijing: China Machine Press, 2009: 194-199.
  - [11] 钱才富, 高宏宇, 孙海阳. 曲面弓形折流板换热器壳程流体流动与传热[J]. 化工学报, 2011, 62(5): 1233-1238.  
Qian Caifu, Gao Hongyu, Sun Haiyang. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2011, 62(5): 1233-1238.
  - [12] 何兆红. 矩形管束换热器的传热与流阻研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.  
He Zhaohong. Study on flow resistance and heat transfer in rectangle tube bundle heat exchanger [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2012.
  - [13] Ozkaynak T, Chen J C. Emulsion phase residence time and its use in heat transfer models in fluidized bed [J]. AIChE Journal, 1980, 26(4): 544-553.
  - [14] 冯伟, 刘翠云, 崔元臣. 并流下行循环流化床反应器的气固传热模型[J]. 河南大学学报: 自然科学版, 2001, 31(2): 59-64.  
Feng Wei, Liu Cuiyun, Cui Yuanchen. Journal of Henan University: Natural Science Edition, 2001, 31(2): 59-64.
  - [15] 王焱鹏. 循环流化床固-固换热系统传热规律研究[D]. 大庆: 东北石油大学, 2006.  
Wang Yanpeng. Research on solid-solid heat transfer in circulating fluidized bed [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2006.
  - [16] Xi Z C, Zheng H L, Wei C Y, et al. Three-dimensional CFD-PBM coupled model of the temperature fields in fluidized-bed polymerization reactors[J]. AIChE Journal, 2011, 57(12): 3351-3366.

(责任编辑 王媛媛)

### · 学术动态 ·



## 中国数字科技馆

中国数字科技馆(www.cdstm.cn)是国家科技基础条件平台项目之一。

2005年12月,中国数字科技馆项目正式启动,由中国科协、教育部、中国科学院共同建设。

2009年9月28日,中国数字科技馆项目通过科技部项目验收。

2010年起,中国科学技术馆全面负责中国数字科技馆常态化运行管理工作。

中国数字科技馆汇集了丰富的图片、动漫、音像、报告、展品等数字化科普资源,为社会各界的科普创作和科普工作提供资源共享服务。

中国数字科技馆致力于提高公民科学素质。通过集成和分享国内外优质科普资源,开展以网络为主要平台的科技教育,促进全社会参与科学传播,从而达到提升公民科学素质、加快网络科普发展的目标。

中国数字科技馆是公众学习科学知识、讨论科学问题、发表科学见解的平台;中国数字科技馆是科普工作者和科普机构获取科普资源、交流科普经验、了解科普市场的平台。