

# 涡轮反应器气固两相流动反应 CFD 模型建立\*

孙 贇<sup>1</sup> 刘兴静<sup>1</sup> 张宏宇<sup>1</sup> 刘凤军<sup>1</sup> 张清泉<sup>1</sup> 靳 步<sup>2</sup>

(1. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083; 2. 天津出入境检验检疫局, 天津 300450)

**摘要:** 在气固两相湍流流动模型和反应动力学模型的基础上, 系统地考虑两相流动、传热、传质、反应等复杂因素, 建立了涡轮反应器三维气固两相流动反应模型, 形成了相应的数值解法, 并以此对工业涡轮反应器进行了数值模拟研究, 展示其内部流动、传热、传质及反应等细节。

**关键词:** 涡轮反应器 化学动力学模型 传热 传质 数值解法

**中图分类号:** O357.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)06-0194-07

## Development of Gas-solid Two-phase Flow-reaction CFD Model for Vortex Reactor

Sun Yun<sup>1</sup> Liu Xingjing<sup>1</sup> Zhang Hongyu<sup>1</sup> Liu Fengjun<sup>1</sup> Zhang Qingquan<sup>1</sup> Jin Bu<sup>2</sup>

(1. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

2. Tianjin Entry-Exit Inspection and Quarantine Bureau, Tianjin 300450, China)

**Abstract:** Taking the complex influences of two-phase flow, heat transfer, mass transfer, and cracking reactions into account, a 3-D gas-solid two-phase flow-reaction CFD model for vortex reactor was established based on gas-solid two-phase turbulent flow model and kinetics of reactions. Related numerical solution was formed and numerical simulation was carried out to show the details of flow, heat transfer, mass transfer and reactions in the vortex reactors.

**Key words:** Vortex reactors Chemical kinetic model Heat transfer Mass transfer Numerical solution

### 引言

近年来气固两相流混合的研究成果主要有: 气流干燥、脉动燃烧喷雾干燥、旋风分离器、流化床、提升罐反应器和旋转闪蒸干燥器。对于涡流混合、干燥和反应的研究较少。涡轮旋流技术应用于变性淀粉的研究极为有限, 没有人研究或描述实现淀粉变性的涡轮旋流反应和干燥过程机理的理论分析、传热和传质的数学模型, 对涡轮反应器内部复杂的气固两相流动的流场很难用实验方法精确测量和显示其内部气流和颗粒流动速度场。采用数值模型的方法很容易达到此目的, 同时还可以研究颗粒直径, 主轴转速以及叶轮的变化对传热、传质和反应等的影响。传统生产变性淀粉的方法存在能耗高、混合不均和反应不一致等问题, 本研究前期工作曾应用涡

流反应器进行糊精和磷酸酯淀粉的干法变性反应获得较理想的变性淀粉产物, 并且和传统的干法反应相比有诸多的优势, 为了更进一步获得涡轮反应器的工作原理以及物料在涡轮反应器内的流动、传热、传质和反应状况, 解决淀粉颗粒和化学试剂反应所需的理想条件, 需要进行理论分析和研究。

### 1 涡流技术实现淀粉变性实验验证

前期研究利用涡流技术首次将淀粉变性的化学反应机理过程置于连续流动的气-固流场中, 选择了糊精<sup>[1]</sup>和淀粉磷酸酯<sup>[2]</sup>两种代表淀粉水解和淀粉通过进一步氧化、酯化和醚化等作用来实现的产品作为实验。对实验所得的产品进行各项指标的检测, 证明该技术的有效性, 新工艺获得成功。

采用涡流装置制取糊精和淀粉磷酸酯, 完成了

混合、预干燥和反应等过程,通过实验获得了生产最佳工艺条件和参数。该工艺技术有下列优势:①工艺过程连续,易于操作。该方法的从进料到出产品的整个生产工艺是连续且封闭的过程。②反应时间短,耗能低。基于涡流技术的干法反应仅用几分钟时间即可完成传统工艺湿法和干法变性所需要的几个小时到几十个小时,此反应过程中,主要的反应阶段耗能较低,耗能较传统方法节省 80% ~ 90%,极大减少了运行成本。③无污染物排放。

## 2 物理模型

到目前为止,颗粒在气-固两相流中的模拟方法有无滑移模式、颗粒轨道模型和颗粒拟流体模型等<sup>[3]</sup>。为此,通过实验观察和理论分析,对涡流-旋流流动的情况作如下的描述和假设:①颗粒团块与高温热风开始接触之初无湍流扩散、传热,接触后在高速转子叶片强迫作用下,瞬间完成气-固两相的混合并形成了贴圆柱壳体内壁的轴对称稳态薄层圆柱流面。②由于颗粒较气相浓度稀少,忽略其颗粒间的摩擦力,颗粒按照初始尺寸,形成径向的相对分布,有其自身的质量变化,相同粒径的颗粒在流动过程中具有瞬时相同的速度及温度<sup>[4]</sup>。③颗粒与气相流体有滑移,即存在相对速度和温度差。④气-固两相存在着传热、传质,颗粒内部存在反应。

通过上述描述,原料在封闭的反应器内进行复杂的反应,同时还进行流体流动、传热和传质等过程,受检测手段的限制,涡轮反应器内重要的工艺参数无法测得,这些给生产和研究都带来了很大的不便。迄今为止,反应器的模型大致分为两类:①经验模型,即以一定数量的可靠的生产数据为基础,运用数理统计中多元回归的方法,建立变性淀粉产率和反应过程的主要影响因素之间的关联式。这类模型不能反映反应过程的本质,只能在回归范围内使用,不宜外推。②基于反应动力学的理论模型,通过求解质量、动量、能量守恒方程组,获得反应器内部反应温度、压力和固相物质运动状况,该方法对管内所发生的各种过程进行了基本的描述,与经验模型相比具有更多的理论依据。本文拟应用计算流体力学(Computational fluid dynamics, CFD)技术获得如上所述的第二类理论模型。

## 3 涡轮反应器 CFD 模型的建立

### 3.1 模拟对象

模拟对象的定义关系到所采用的模型、边界条件的确定、网格划分方法的选取、计算模型的选择、计算方法的确定等,同时确定模拟的对象亦确定了

模拟的难易程度。针对具体问题,可以将模拟的对象量化到具体几何结构和所要模拟的区域。本文模拟的对象是涡轮反应器内部气-固两相流,因此模拟的区域划定为涡轮反应器内部。考虑涡轮反应器的几何形状以及涡轮反应器内部的流场的实际流动状况,可以认为反应器内部的流动具有轴对称性,故研究的气-固两相流问题近似按轴对称处理。

整个反应系统包括:混合、干燥和反应三大过程。原料淀粉经过类似于涡轮反应器的混合器混合以后通过精确定量的螺旋输送机输送到类似涡轮反应器的干燥器中进行预干燥,干燥后的物料通过旋风分离器收集并降温,而后通过能精确定量的螺旋输送机送至涡轮反应器进行反应,经过一定时间的反应后产品通过旋风分离器分离和冷却进入调制设备进行均质化而获得成品。涡轮反应器是整个反应过程的核心部分,也是本模拟的核心部分,其结构如图 1 所示。

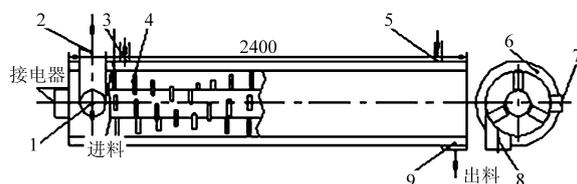


图 1 涡轮反应器结构简图

Fig. 1 Structure of vortex reactor

- 1, 7. 物料进口
2. 进气口
3. 涡轮反应器外夹套内循环热油出口
4. 涡轮内安装在轴上的浆页
5. 夹套内循环热油进口
6. 夹套
- 8, 9. 出料口

气相由进风机和引风机通过涡轮反应器、旋风分离器形成一个相对稳定体系。涡流装置内高速旋转的转子叶片排列均匀,并有足够密度数量。在同一工艺条件下叶片角度相同,且为常数。切向进风和一定角度的叶片将淀粉物料迅速形成叶片末端外浓度均匀的气-固两相圆柱流面薄层。在叶片端内形成稳定涡流流动,只有稀空气,几乎没有淀粉颗粒。

图 2 为质点运动分析图。系统在涡轮反应器内形成两大区域: $R_0 < r < r_m$  的叶片端内涡流场和  $r_m \leq r < R$  的叶片端外薄层旋转流场。 $R_0$  为反应器内转子的轴半径,  $r_m$  为转子叶片半径( $m$  为叶片末端点),  $R$  为反应器内半径,  $r$  为任意  $R_i$ 。本研究着重于  $r_m \leq r < R$  区域的分析研究。对于  $r_m \leq r < R$  的薄层区域,通过观察淀粉颗粒几乎全部在此区域,随气流旋转流动。颗粒流动速度  $v_r \approx 0$ 。所以,可以认为该流动的气流角度不变,强迫的轴对称的旋转流动,故建立轴对称圆柱坐标系如图 3 所示。

### 3.2 涡轮反应器内流场的 CFD 模型

涡轮反应器内部流场包含了流体传质、传热、化

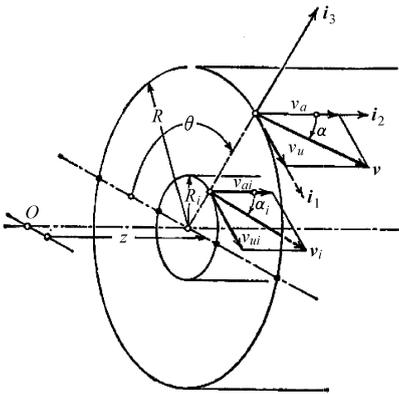


图2 涡轮反应器内质点运动分析图

Fig. 2 Analysis of movement of particle in vortex reactor

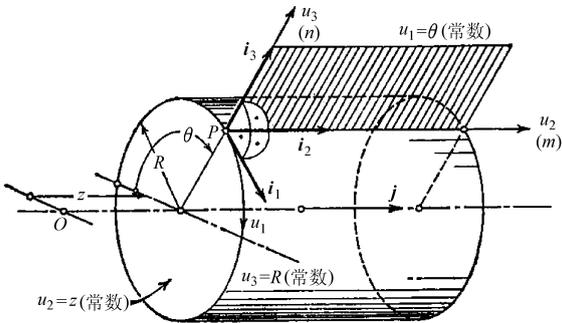


图3 轴对称圆柱坐标系的建立

Fig. 3 Establishment of column coordinate

学反应以及气固两相之间的相互作用等过程,而且各种因素互相耦合。涡轮反应器内部流体的流动除了强湍流外还有强旋流。在目前的已有的气-固两相模型中,颗粒拟流体模型可以用统一的数值方法求解气-固两相方程,在给出颗粒速度、浓度、温度分布方面具有很大的优势,同时这一模型也能较好地解决气-固两相相互作用的问题<sup>[5]</sup>。

### 3.2.1 控制方程组

根据上述对涡轮反应器的描述和假设,以及气-固两相流动反应的物理模型,从质量、动量、能量和组分守恒的原理出发可以得到涡轮反应器内两相流动反应的控制方程组。在柱坐标下三维湍流两相流的稳态控制方程组可表达如下:

#### (1) 气相控制方程组

在涡轮反应器内反应时不发生水物质的消耗和生成,故空气比湿方程建立的原理是单位体积、单位时间内水气质量的增加等于流入和流出的水气质量之差。对于湍流情况,采用标量系数来拟合湍流输运项,可以得到轴坐标下空气比湿方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho Y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u Y) + \frac{\partial}{r \partial r}(r \rho v Y) + \frac{\partial}{r \partial \theta}(\rho w Y) = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\mu_e}{\sigma_y} \frac{\partial Y}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{r^2 \partial \theta} \left( \frac{\mu_e}{\sigma_y} \frac{\partial Y}{\partial \theta} \right) + \\ \frac{\partial}{r \partial r} \left( r \frac{\mu_e}{\sigma_y} \frac{\partial Y}{\partial r} \right) - \sum n_p m_p \end{aligned} \quad (1)$$

式中  $Y$ ——空气比湿,即干燥室单位体积内水气的质量占湿空气(干燥介质)质量百分率, %

$\rho$ ——湿空气密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$

$t$ ——模拟时间, s  $\sigma_y$ ——经验常数

$x, r, \theta$ ——轴坐标系中轴向、径向和切向(周向)坐标, m

$u, v, w$ ——气体轴向、径向和切向速度分量,  $\text{m}/\text{s}$

$n_p$ ——反应器内单位体积内固相颗粒的数目,  $\text{个}/\text{m}^3$

$m_p$ ——单位体积内单个颗粒单位时间质量的变化,  $\text{kg}/\text{s}$

$\mu_e$ ——湍流有效粘性系数,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$

方程(1)左边第1项为非定常项,左边第2、3项为对流项,表示由于气相对流作用而导致单位体积内水气的变化。右边第1、2项为扩散项,表示由于气相分子扩散和湍流扩散作用而导致单位体积内所有颗粒由于水分蒸发而向湿空气(干燥介质)传递的水气,因而考虑了反应过程中由于颗粒内水分的蒸发而导致气相湿度的增加。湿空气内的水气并不存在状态的变化,可以不考虑气相本身的水气源。

同理,考虑反应器内湿空气质量、动量及能量守恒,得到气相质量、速度、温度方程。这些方程具有通用的形式<sup>[6]</sup>为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \varphi) + \frac{\partial}{r \partial r}(r \rho v \varphi) + \frac{\partial}{r \partial \theta}(\rho w \varphi) = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{r \partial r} \left( r \Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) + \\ \frac{\partial}{r^2 \partial \theta} \left( \Gamma_\varphi \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \right) + S_\varphi + S_{\varphi p} \end{aligned} \quad (2)$$

式中  $\varphi$ ——求解变量  $\Gamma_\varphi$ ——扩散系数

$S_\varphi, S_{\varphi p}$ ——两相互作用的源项

由此构成了湿空气质量的连续方程、轴向速度分量  $u_x$  的 N-S 方程、径向速度分量  $v_r$  的 N-S 方程、切向速度分量  $w_\theta$  的 N-S 方程、湿空气的能量方程等。上述方程由于考虑了湍流输运项而增加了方程的未知变量,为了封闭方程组,模拟时补充了表征湍流动能的  $k$  相和湍流耗散率  $\varepsilon$  来封闭方程组。由于涡轮反应器内部流场有强烈的湍流和旋流,故标准的  $k-\varepsilon$  模型不太合适,在这里选用了改进的 ASM 模型,改进的 ASM 模型能够反映强旋流流动的各项异性特点<sup>[7]</sup>。方程中的  $\varphi, \Gamma_\varphi, S_\varphi, S_{\varphi p}$  的含义如表1所示。上述方程的一些辅助关系式为<sup>[8]</sup>

比热容  $c_p = 2.52T + 981.0 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

导热系数  $\lambda = 5.526 \times 10^{-5} \sqrt{T} - 1.058 \times 10^{-5}$

表1 气相控制方程组  
Tab.1 Governing equations of gas-phase

方程组	$\varphi$	$\Gamma_\varphi$	$S_\varphi$	$S_{\varphi p}$
	1	0	0	$-\sum_p n_p \dot{m}_p$
x 方向动量方程	$u$	$\mu_c$	$-\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_c \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \eta \mu_c \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \mu_c \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \rho g_x$	$-\sum_p \frac{\rho_p}{\tau_{rp}} (u - u_p) - u \sum_p n_p \dot{m}_p$
r 方向动量方程	$v$	$\mu_c$	$-\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_c \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( \eta \mu_c \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \mu_c \left( \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r} \right) \right] + \rho g_r - \frac{2}{r} \mu_c \left( \frac{1}{r} \frac{\partial w}{\partial \theta} + \frac{v}{r} \right) + \frac{\rho w^2}{r}$	$-\sum_p \frac{\rho_p}{\tau_{rp}} (v - v_p) - v \sum_p n_p \dot{m}_p$
$\theta$ 方向动量方程	$w$	$\mu_c$	$-\frac{\partial p}{\partial \theta} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_c \frac{\partial w}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left[ \eta \mu_c \left( \frac{\partial v}{\partial \theta} - \frac{w}{r} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial \theta} \left[ \frac{\mu_c}{r} \left( \frac{\partial w}{\partial \theta} + 2v \right) \right] + \rho g_\theta - \frac{\mu_c}{r} \left( \frac{\partial v}{\partial \theta} + \frac{\partial w}{\partial r} - \frac{w}{r} \right) - \frac{\rho vw}{r}$	$-\sum_p \frac{\rho_p}{\tau_{rp}} (w - w_p) - w \sum_p n_p \dot{m}_p$
湍动能 $k$	$k$	$\frac{\mu_c}{\sigma_k}$	$G_k - \rho \varepsilon$	$G_p - k \sum_p n_p \dot{m}_p$
湍动能耗散率 $\varepsilon$	$\varepsilon$	$\frac{\mu_c}{\sigma_\varepsilon}$	$C_1 G_k \frac{\varepsilon}{k} - C_2 (1 - C_{gs} R_{igs}) \frac{\rho \varepsilon^2}{k}$	$\frac{\varepsilon}{k} C_1 \left( G_p - k \sum_p n_p \dot{m}_p \right)$
能量方程	$c_p T$	$\frac{\mu_c}{\sigma_h}$	$-W_s Q_s$	$n_p Q_p$

上述控制方程构成了描述湿空气速度 ( $v_x, v_r$ )、温度 ( $T$ )、比湿 ( $Y$ )、压力 ( $p$ )、湍流动能 ( $k$ ) 和湍流耗散率 ( $\varepsilon$ ) 的封闭方程组。

## (2) 颗粒相控制方程

根据上述对涡流装置内质量运动的分析, 颗粒物料随着气流作螺旋前进而形成圆柱空心薄层, 再形成均匀、稳定的中间段, 可作如下假设<sup>[9]</sup>: ①装置内同一截面上温度  $t$ 、颗粒速度  $v_p$ 、气流速度  $v_s$ 、物料湿含量  $x$  等参数保持不变, 即为稳定流动。②忽略颗粒之间相互作用, 传热表面为全部的颗粒表面之和。③装置外夹套的热油保持装置内无损失。

在涡流装置的中部取一微元环, 可以认为在此微元环中湿物料粒度均匀, 平均粒径  $d_p$ 、密度  $\rho_p$  均匀, 气相温度  $T$  均匀分布。

颗粒相模型采用双流体模型, 即在欧拉坐标系下求解颗粒相的质量守恒、动量守恒和能量守恒方程组<sup>[10]</sup>, 在柱坐标系下颗粒相控制方程组的一般表达式为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} (\rho_p u_p \varphi_p) + \frac{\partial}{\partial r} (r \rho_p v_p \varphi_p) + \frac{\partial}{\partial \theta} (\rho_p w_p \varphi_p) = \\ \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_{\varphi p} \frac{\partial \varphi_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial r} \left( r \Gamma_{\varphi p} \frac{\partial \varphi_p}{\partial r} \right) + \\ \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \Gamma_{\varphi p} \frac{\partial \varphi_p}{\partial \theta} \right) + S_{\varphi p} + S_{\varphi p, g} \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $\rho_p$ ——颗粒密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$   
 $u_p$ ——颗粒轴向速度分量,  $\text{m}/\text{s}$   
 $v_p$ ——颗粒径向速度分量,  $\text{m}/\text{s}$   
 $w_p$ ——颗粒切向速度分量,  $\text{m}/\text{s}$

式中  $\varphi_p$ 、 $\Gamma_{\varphi p}$ 、 $S_{\varphi p}$ 、 $S_{\varphi p, g}$  的具体表达式由表 2 给出。固相相方程组中的  $\varphi_p$  为求解变量,  $\Gamma_{\varphi p}$  为扩散系数,

$S_{\varphi p}$ 、 $S_{\varphi p, g}$  分别为两相相互作用的源项。由此构成了颗粒相的质量的连续方程、轴向速度分量  $u_p$  的 N-S 方程、径向速度分量  $v_p$  的 N-S 方程、切向速度分量  $w_p$  的 N-S 方程、颗粒相的能量方程。对颗粒相采用能够体现其自身湍流流动特性的颗粒相湍能输运方程  $k_p$  模型<sup>[11]</sup>。

颗粒相方程组中的辅助关系式为

$$\Gamma_{\tau p} = \frac{\rho d_p^2}{18 \mu C_D Re_p} \frac{24}{Re_p} \quad (4)$$

式中  $\Gamma_{\tau p}$ ——颗粒弛豫时间

$d_p$ ——平均粒径,  $\text{m}$

$C_D$ ——气体-颗粒间隙阻力系数

$Re$ ——雷诺数

若定义颗粒雷诺数  $Re = \rho d_p |v - v_p| / \mu$ , 则对应于不同的  $Re$  范围有不同的气体-颗粒阻力系数表达式

$$C_D = \begin{cases} 0.44 & (Re > 1000) \\ \frac{24}{Re} (1 + 0.15 Re^{0.667}) & (1 < Re < 100) \end{cases}$$

$$Q_p = \pi d_p N u_p \lambda (T_p - T)$$

$$Nu_p = 2 + 0.5 Re_p^{1.2}$$

$$Re_p = d_p |v - v_p| / \nu$$

式中  $Q_p$ ——单位体积内, 单个颗粒在单位时间内从气相吸收的热量,  $\text{J}/\text{s}$

表 1 和表 2 中的  $G_p$ 、 $G_k$ 、 $G_{pk}$ 、 $\mu_p$  和  $v_p$  的表达式如下<sup>[12]</sup>

$$G_p = \sum_p \sum_i \frac{\rho_p}{\tau_{rp}} \left( c_p^k \sqrt{kk_p} - 2k - \frac{v_{pi} - v_i}{n_p} \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial n_p}{\partial x_i} \right) \quad (5)$$

表2 颗粒相控制方程组

Tab.2 Governing equations of particle phase

方程组	$\varphi$	$\Gamma_{\varphi p}$	$S_{\varphi p}$	$S_{\varphi p, g}$
x 方向动量方程	$u_p$	$\mu_p$	$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_p \frac{\partial u_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{r \partial r} \left( \eta \mu_p \frac{\partial u_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{r \partial \theta} \left( \mu_p \frac{\partial u_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_p \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial x} \right) +$ $\frac{\partial}{r \partial r} \left( \eta \mu_p \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial r} \right) + \rho_p g_x + \frac{\partial}{r^2 \partial \theta} \left( \mu_p \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( u_p \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial x} \right) +$ $\frac{\rho_p}{\tau_{rp}} (u - u_p) + un_p \dot{m}_p$ $\frac{\partial}{r \partial r} \left( rv_p \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{r \partial \theta} \left( w_p \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial x} \right)$	
$\theta$ 方向动量方程	$w_p$	$\mu_p$	$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_p \frac{\partial w_p}{r \partial \theta} \right) - \frac{\rho_p w_p v_p}{r} + \frac{\partial}{r \partial r} \left[ \eta \mu_p \left( \frac{\partial w_p}{r \partial \theta} - \frac{w_p}{r} \right) \right] + \rho_p g_\theta + \frac{\mu_p}{r} \left( \frac{\partial w_p}{r \partial \theta} +$ $\frac{\partial w_p}{\partial r} - \frac{w_p}{r} \right) + \frac{\partial}{r \partial \theta} \left[ \frac{\mu_p}{r} \left( \frac{\partial w_p}{\partial \theta} + 2v_p \right) \right] + \frac{\partial}{r \partial r} \left( rv_p \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial r} \right) +$ $\frac{\rho_p}{\tau_{rp}} (w - w_p) + un_p \dot{m}_p$ $\frac{\partial}{r^2 \partial \theta} \left( w_p \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( w_p \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( u_p \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{r \partial \theta} \right) +$ $\frac{\partial}{r \partial r} \left( rv_p \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{r \partial \theta} \right) + \frac{\partial}{r \partial \theta} \left( w_p \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{r \partial \theta} \right) + \frac{v_p v_p}{r^2 \sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial \theta} + \frac{w_p v_p}{r \sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial r}$	
r 方向动量方程	$v_p$	$\mu_p$	$\frac{\partial}{\partial x} \left( \mu_p \frac{\partial v_p}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{r \partial r} \left( \eta \mu_p \frac{\partial v_p}{\partial r} \right) + \frac{\rho_p w_p^2}{r} + \frac{\partial}{r \partial \theta} \left[ \mu_p \left( \frac{\partial v_p}{\partial r} - \frac{w_p}{r} \right) \right] -$ $\frac{2}{r} u_p \left( \frac{\partial w_p}{r \partial \theta} + \frac{v_p}{r} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( v_p \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{r \partial r} \left( rv_p \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial x} \right) +$ $\frac{\rho_p}{\tau_{rp}} (v - v_p) + un_p \dot{m}_p$ $\frac{\partial}{r^2 \partial \theta} \left( v_p \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( u_p \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{r \partial r} \left( rv_p \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial r} \right) +$ $\frac{\partial}{r \partial \theta} \left( w_p \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial r} \right) - \frac{2}{r^2} w_p \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial \theta} + \rho_p g_r$	
能量方程	$h_p$	$\frac{\mu_p}{\sigma_p}$	0	$-n_p Q_p$
颗粒似密度连续方程	1	$\frac{v_p}{\sigma_p}$	$n_p m_p$	0
颗粒相湍动能方程	$k_p$	$\frac{\mu_p}{\sigma_p}$	$G_{pk} + \frac{\partial}{\partial x} \left( k_p \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{r \partial r} \left( rk_p \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{r^2 \partial \theta} \left( k_p \frac{v_p}{\sigma_p} \frac{\partial \rho_p}{\partial \theta} \right)$	$G_{gk}$

$$G_k = \mu_T \left( \frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} \right) \frac{\partial v_i}{\partial x_k} \quad (6)$$

$$G_{pk} = \mu_p \left( \frac{\partial v_{pk}}{\partial x_i} + \frac{\partial v_{pi}}{\partial x_k} \right) \frac{\partial v_{pi}}{\partial x_k} \quad (7)$$

$$\mu_p = \rho_p v_p = c_{\mu p} \rho_p k_p^2 / |\varepsilon_p| \quad (8)$$

$\varepsilon$  方程中的附加项  $C_{gs} R_{igs}$  为 Smith P J 修正式, 在该修正式中充分考虑了旋流及流线弯曲效应, 以便提高旋流流动预报的合理性, 其中湍流时间尺度为

$$R_{igs} = \frac{k^2 w}{\varepsilon^2 r^2} \frac{\partial}{\partial r} (rw) = \frac{k^2 w}{\varepsilon^2 r} \left( \frac{\partial w}{\partial r} + \frac{w}{r} \right) \quad (9)$$

$$C_{gs} = 0.001 \sim 0.2$$

控制方程组中与流体流型相关的经验常数根据不同的流体流型而有所区别, 可以参照前人模拟案例, 也可以用试差法找到最佳值<sup>[13]</sup>。对于涡轮反应器模拟常数如表3所示。

表3 模型参数

Tab.3 Constants of model

参数	$C_1$	$C_2$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$	$\sigma_\gamma$	$\sigma_h$	$\sigma_T$
数值	1.44	1.92	1.0	1.3	1.0	1.0	1.0

### 3.2.2 气-固两相间热质传递并伴随反应的模型

在涡轮反应器内部, 气相和固相存在热质交换过程, 但不存在反应过程, 气相给固相的反应提供热量, 故在考虑气-固两相之间的热质传递的时候, 仅考虑水分蒸发带来的质量变化、热量的传递以及反应中所需要的热量的传递即可<sup>[14]</sup>。

气-固两相间的热质传递和反应过程模型是模拟涡轮反应器的重点。考虑颗粒半径非常小, 认为颗粒的温度均匀分布, 即内部热量传递将不予考虑。涡流反应过程中气体-颗粒的热质传递模型<sup>[15]</sup>如下:

(1) 当颗粒温度  $T_p$  小于颗粒表面蒸发温度 (湿球温度)  $T_v$ 。此时颗粒处于升温阶段, 没有质量变化, 其热量传递方程为

$$Q_p = hA_p (T - T_p) \quad (10)$$

式中  $A_p$ ——颗粒表面积,  $m^2$

$h$ ——热传递系数,  $W/(m^2 \cdot K)$

热传递系数可从下式计算

$$Nu = \frac{hd_p}{k_\infty} = 2.0 + 0.6 Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (11)$$

(2) 当液相颗粒含有未蒸发的水分并且温度大于等于蒸发温度但未达到沸点  $T_b$ , 即  $T_v < T_{bp}$  和  $M_k > (1 - f_{vo})M_{po}$  时, 存在蒸发但无沸腾传质。其中  $T_b$  为沸腾温度(K) (此处指水的沸腾温度);  $M_{po}$  为颗粒的初始质量(kg);  $M_p$  为颗粒质量(kg);  $f_{vo}$  为颗粒水分质量占颗粒总质量之比(%)。

此时颗粒蒸发速率为

$$N = k_c (C'_s - C'_\infty) \quad (12)$$

其中

$$C'_s = \frac{P_{sat}(T_k)}{RT_p} \quad (13)$$

$$C'_\infty = \frac{Y_s P}{RT_\infty} \quad (14)$$

式中  $C'_s$ ——颗粒表面蒸气浓度

$P_{sat}(T_k)$ ——颗粒在温度为  $T_k$  时的饱和蒸气压, Pa

$C'_\infty$ ——相内部蒸气浓度

此时

$$Q_p = hA_p(T - T_p) + m_p h_{fg} \quad (15)$$

式中  $M_p$ ——水的分子质量, kg/mol

(3) 当  $T_p > T_{bp}$  和  $M_p < (1 - f_{vo})M_{po}$  时, 即此时温度大于沸点, 颗粒内部有未蒸发的水分, 伴有沸腾传质过程。此时, 涡轮反应器内固相物料之间发生了化学反应, 该反应需要气相提供热能  $Q_s$  (W/kg)。此时

$$M_p = \frac{2\pi d_{p\infty}}{C_{p\infty}} (1 + 0.23 \sqrt{Re}) \ln \left[ 1 + \frac{C_{p\infty} (T_\infty - T_p)}{h_{fg}} \right] \quad (16)$$

$$Q_p = hA_p(T - T_p) + m_p h_{fg} + Q_s w_s \quad (17)$$

### 3.2.3 涡轮反应器内 CFD 模型

式(1)~式(17)组成的气相和固相控制方程组与气体-颗粒热质传递模型构成了模拟涡轮反应器内部流场的数学模型。该模型不仅描述了涡轮反应器内部气体的温度、湿度、速度分布和固相干燥反应过程的速度、温度、湿含量分布的详细过程, 而且还分析了气-固两相之间质量、动量变化, 能量转移和耗散等等过程。通过对该数学模型的求解, 可以获得涡轮反应器内部各动力学、热力学参数的分布信息, 从而为涡轮反应器的设计、优化、检测、预测提供参考。

## 4 结束语

涡轮反应器内部流场为强湍流和强旋流流动, 流动过程中伴随着气-固两相间的热质传递以及固相内部的化学反应。本文对流场的模拟采用了修正的  $k - \varepsilon - k_p$  双流体模型。其中气相的模拟采用修正的  $k - \varepsilon$  模型, 考虑了强湍流的同时还考虑了强旋流, 是一种较为理想的模型。而对于固相的模拟采用双流体模型, 其中考虑了固相湍动能方程  $k_p$ , 在此基础上补充了气固两相的热质传递模型, 从而构建了涡轮反应器内部流动、传热传质和反应的完整 CFD 模型。

## 参 考 文 献

- 孙赞, 李里特. 基于涡流技术的干法制备糊精工艺[J]. 农业机械学报, 2004, 35(6): 130~133.  
Sun Yun, Li Lite. Dextrin preparation by dry process based on vortex technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(6): 130~133. (in Chinese)
- 孙赞, 李里特. 基于涡流技术的淀粉磷酸酯制备工艺[J]. 农业机械学报, 2004, 35(4): 120~123.  
Sun Yun, Li Lite. Preparation of ester phosphate of potato starch by dry process based on vortex technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(4): 120~123. (in Chinese)
- 刘雅宁. 基于 EMMS 模型的气固两相流模拟: 双流体和离散模拟[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2011.  
Liu Yaning. Simulation on air-solid two-phase flow based on EMMS model: two-fluid and simulation of flow[D]. Beijing: Graduate University of Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)
- Kemp I C, Bahu R E. Modeling agglomeration effects in pneumatic conveying dryers[C] // Proceedings of the 8th International Drying Symposium (IDS'92), 1992: 444~453.
- 邵雄飞. 旋流板塔内两相流场的 CFD 模拟与分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.  
Shao Xiongfei. Simulation and analysis on the two-phase flow fields in a rotating-stream-tray absorber by using computational fluid dynamics[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2004. (in Chinese)
- 王德武, 卢春喜, 严超宇. 提升管加床层反应器提升管段下行颗粒的分布及其对流动的影响[J]. 石油学报: 石油加工, 2011, 27(1): 69~76.  
Wang Dewu, Lu Chunxi, Yan Chaoyu. Downward particle distribution and its effects on particle flow in the riser section of riser-fluidized bed reactor[J]. Acta Petrolei Sinica: Petroleum Processing Section, 2011, 27(1): 69~76. (in Chinese)
- 张强, 杨永, 李喜乐. 基于新的描述湍流耗散方程的  $\kappa - \varepsilon$  两方程湍流模型的数值算法研究[J]. 西北工业大学学报, 2009, 27(4): 466~470.  
Zhang Qiang, Yang Yong, Li Xile. Applying robinson's new two-equation turbulence  $\kappa - \varepsilon$  model to numerically simulating turbulent flow[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2009, 27(4): 466~470. (in Chinese)

- 8 彭维明. 切向旋风分离器内部流场的数值模拟及试验研究[J]. 农业机械学报, 2001, 32(4): 20~24.  
Peng Weiming. Numerical simulation and experimental research on the flow pattern in tangential inlet cyclone[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(4): 20~24. (in Chinese)
- 9 Mushtayer V I, Timonin A S, Tyrin N V, et al. A mathematical model of a spiral dryer for fine polydisperse materials[J]. Drying, 1984; 348~349.
- 10 李文春, 胡桂林, 樊建人, 等. 气固两相平面混合层的直接数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2005, 26(3): 451~454.  
Li Wenchun, Hu Guilin, Fan Jianren, et al. Direct numerical simulation of gas-solid two-phase mixing layer[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2005, 26(3): 451~454. (in Chinese)
- 11 高国华, 李鑫钢, 姜斌, 等. 提升管反应器进料段气-固两相流的 CFD 模拟及结构优化[J]. 石油学报: 石油加工, 2010, 26(6): 959~965.  
Gao Guohua, Li Xin'gang, Jiang Bin, et al. Gas-solid flow CFD simulation and structural optimization of feed injecting zone of riser reactor[J]. Acta Petrolei Sinica; Petroleum Processing Section, 2010, 26(6): 959~965. (in Chinese)
- 12 李志强, 魏飞, 李荣先, 等. 修正的  $\kappa$ - $\varepsilon$ - $\kappa_p$  双流体模型用于模拟旋流突扩燃烧室内气固两相流动[J]. 热能动力工程, 2003, 18(5): 459~462.  
Li Zhiqiang, Wei Fei, Li Rongxian, et al. Numerical simulation of gas-solid two-phase flows in a swirling-flow combustor through the use of a modified  $\kappa$ - $\varepsilon$ - $\kappa_p$  two-fluid model[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2003, 18(5): 459~462. (in Chinese)
- 13 陈义良. 湍流计算模型[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1991.
- 14 Bandrowski J, Kaczmarzyk G. Gas-to-particle heat transfer in vertical pneumatic conveying of granular materials[J]. Chemical Engineering Science, 1978, 33(10): 1303~1310.
- 15 Matsumio S, David C T P. A mathematical analysis of pneumatic drying of grains— I. Constant drying rate [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1984, 27(6): 843~849.
- 16 韩凤琴, 王幼青, 高海鹏, 等. 涡轮出口旋流对扩大管压力恢复性能的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2012, 30(1): 25~29.  
Han Fengqin, Wang Youqing, Gao Haipeng, et al. Effect of runner outlet swirling flow on diffuser pressure recovery[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2012, 30(1): 25~29. (in Chinese)
- 17 王勇, 刘厚林, 袁寿其, 等. 离心泵内部空化特性的 CFD 模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(2): 99~103.  
Wang Yong, Liu Houlin, Yuan Shouqi, et al. CFD simulation on cavitation characteristics in centrifugal pump[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(2): 99~103. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 72 页)

- 9 Hloben P. Study on the response time of direct injection systems for variable rate application of herbicides[D]. Bonn: University of Bonn, 2007.
- 10 Vondřička J. Study on the process of direct nozzle injection for real-time site-specific pesticide application [D]. Bonn: University of Bonn, 2007.
- 11 胡开群, 周舟, 祁力钧, 等. 直注式变量喷雾机设计与喷雾性能试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 70~74.  
Hu Kaiqun, Zhou Zhou, Qi Lijun, et al. Spraying performance of the direct injection variable rate sprayer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 70~74. (in Chinese)
- 12 邓巍, 丁为民, 何雄奎. PWM 间歇式变量喷雾的雾化特性[J]. 农业机械学报, 2009, 40(1): 74~78.  
Deng Wei, Ding Weimin, He Xiongkui. Spray characteristics of PWM-based intermittent pulse variable spray[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(1): 74~78. (in Chinese)
- 13 邓巍, 何雄奎, 丁为民. 基于压力变量喷雾的雾化特性及其比较[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2009, 30(6): 545~548.  
Deng Wei, He Xiongkui, Ding Weimin. Characteristics and comparison of pressure-based variable spray [J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2009, 30(6): 545~548. (in Chinese)
- 14 陈超, 李红, 袁寿其, 等. 出口可调式变量喷头喷灌均匀性[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(6): 536~541.  
Chen Chao, Li Hong, Yuan Shouqi, et al. Irrigation uniformity of nozzle-changeable variable-rate sprinkler[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(6): 536~541. (in Chinese)