

涡轮反应器气固两相流动反应 CFD 模型数值模拟*

孙 贇¹ 林亚玲¹ 刘兴静¹ 刘凤军¹ 张清泉¹ 靳 步²

(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: 根据涡轮反应器气-固两相流动反应模型, 对涡轮反应器中流动、传热、传质和反应进行了系统的数值模拟, 得到了各种条件下的颗粒轨迹图、温度分布图、密度分布图、涡轮反应器内连续相(气固混合相)的速度矢量图、轴向速度图、径向速度图、切向速度图、湍流强度分布图和气相湿度图。模拟结果表明: 涡轮反应器内物料的运动为强湍流-涡旋流运动; 内部的温度分布非常有规律, 沿着径向和轴向均存在温度梯度; 速度分布和转子叶片的安装角度有着较大的关系, 而与热油温度无关; 在进口处的速度较大, 而后慢慢趋于平缓并达到一个稳态。

关键词: 涡轮反应器 流动反应模型 数值模型 温度场 浓度场

中图分类号: TQ027.3; TQ051.7⁺2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)08-0195-07

Numerical Simulation on Gas-solid Two-phase Flow Reaction of Vortex Reactor

Sun Yun¹ Lin Yaling¹ Liu Xingjing¹ Liu Fengjun¹ Zhang Qingquan¹ Jin Bu²

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

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

Abstract: Numerical simulation on the inner flow, heat transfer, mass transfer and cracking reaction in vortex reactors was carried out with gas-solid two-phase flow-reaction model. The detailed information of flow field, temperature field and concentration field of vortex reactor was obtained. Results showed that the motion of particles was cork screw path. The temperature in vortex reactors had certain rule and temperature gradient in axial and radial direction. The distributions of velocity had relations with different angles of rotor blade and no relations with hot oil temperature. The entrance velocity of vortex reactors was bigger and later flattens.

Key words: Vortex reactors Flow reaction model Numerical simulation Temperature field Concentration field

引言

涡轮反应器内部流场的计算流体力学(CFD)数学模型的建立给数值模拟提供了可能。由于涡轮反应器内部流动的复杂以及试验条件的限制、实验检测的困难, 目前无法对流场内部的流动状况以及传热、传质状况进行精确的实验测定, 所以应用现有的数学手段、流体力学知识、CFD 等学科的研究成果以及应用计算机技术对流场进行理论模拟, 同时可以研究颗粒直径, 主轴的转速以及叶轮的变化对传热、传质、反应等的影响, 以达到对涡轮反应器内部

流动、传热、传质以及反应情况进行定性和定量的描述, 为涡轮反应器的优化设计提供理论指导^[1-2]。本文对涡轮反应器内部状况进行数值模拟, 获得内部流场流动和速度分布。

1 涡轮反应器内流场的数值模拟

1.1 涡轮反应器的 CFD 分析特点及分析方法

涡轮反应器的 CFD 分析和其他问题类似, 必须满足基本守恒微分方程, 又有其自身的特点。目前对于涡轮反应器没有类似的 CFD 分析, 但可以借鉴带浆叶的搅拌设备、对称翼叶片轴流风机、带旋流的

突扩燃烧室等 CFD 的分析^[3]。涡轮反应器内部转子上叶片均匀分布,并以一定的速度旋转运动,可以选取适宜的旋转参考坐标系(与浆叶一起旋转)将非稳态问题转换成稳态问题,从而能够方便、容易地进行 CFD 分析^[4]。

涡轮反应器不同于带搅拌浆叶和挡板的搅拌设备,涡轮反应器内部只有高速旋转的转子叶片,而没有挡板,它的模型包含旋转的动边界和静止的静边界,因此可以将整个计算域划分成定子和转子 2 个子区域^[5]。旋转叶片和静止内壁之间的耦合采用多参考坐标系模型(Multiple reference frame, MRF)。MRF 模型的基本方法是把涡轮反应器内部流场简化为叶片在某一位置的瞬时流场,将非定常问题转换成定常问题来计算。转子区域的网格在计算时保持静止,在惯性坐标系中以作用的科氏力和离心力进行定常计算;而定子区域是在惯性坐标系里进行定常计算。2 个子区域的交界面处交换惯性坐标系下流体参数,保证了交界面的连续性,达到了定常计算来研究非定常问题的目的^[6]。

1.2 模拟区域的非结构化网格

在对传热反应问题进行数值计算时,首先要把模拟区域划分为许多互不重叠的子区域,确定节点在子区域中的位置及其所代表的容积(即控制容积),这一过程称为区域的离散化。区域离散化过程结束后,可以得到以下 4 种几何要素:① 节点,即需要求解的未知量的几何位置。② 控制容积,应用控制方程或守恒定律的最小单位。③ 界面,它规定了与各节点相对应的控制容积的分界面位置。④ 网格线,沿坐标方向联结相邻两节点而形成的曲线簇。

图 1 为本文所用的交错网格系。把节点看成是控制容积的代表,控制容积与子区域并不总是重合的。在区域离散化开始时,由一系列与坐标轴相应的直线或曲线簇所划分的小区域称为子区域。对网格的图示方法作以下规定:粗线表示网格线,虚线表示界面线,黑点表示节点。为建立节点的离散方程并进行特性分析,还对节点及有关的几何要素的命名方法作出规定。为便于讨论,采用两种命名方法。当要对离散方程进行特性分析时,采用 $i-j-n$ 表示法,即所研究的二维问题的节点位置记为 (i, j) ,与该点相邻的界面则分别为 $i+1/2, i-1/2, j+1/2$ 及 $j-1/2, n$ 表示非稳态问题的时层。在其他情形下采用 P, N, E, S, W 表示所研究的节点及相邻的 4 个节点,用 n, e, s, w 表示相应的界面值。相邻两节点间的距离,以 x 方向为例,用 δx 表示,而 Δx 表示相邻两界面间的距离。在均分的网格系统中或不强调

δx 与 Δx 的区别时,节点间距离也可以用 Δx 表示。

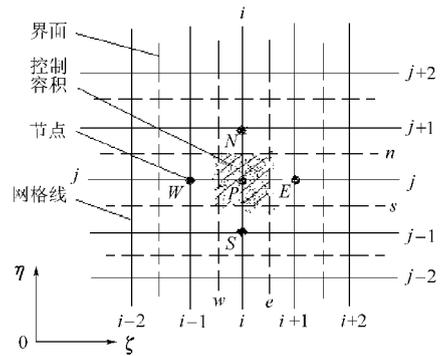


图 1 交错网格系

Fig. 1 Interleaving gridding system

应用 Gambit 2.0 软件进行网格生成,由于进行半整机计算,几何模型比较复杂,网格划分采用三维非结构化网格。相对于结构化网格,非结构化网格计算过程比较复杂,但局部加密比较容易,对不规则空间适应性比较强,易于显示流场的细微结构^[7]。

高质量的网格是实现数值模拟成功的首要条件,应该避免过密或过疏的网格。网格过疏常常会得到不精确甚至完全错误的解,在一定情况下不收敛;网格过密则会使计算量大幅增加,这不仅对计算机的硬件要求较高,而且增加了计算时间。一般情况下,对微分方程的求解给出的都是近似解,为使解更接近实际,网格节点的数目要求足够大,直到随着网格数目的增加,计算结果不再有显著的变化为止。此外,在满足网格足够细密的基础上,尽量减少网格数量以减少计算量,提高收敛的稳定性;在梯度大的地方,网格必须保证足够细密(温度梯度、速度梯度等);尽量减少网格单元的倾斜度与梯度小的地方的网格数^[8]。图 2 为经过多次调整和优化以后利用交错网格系所划分的涡轮反应器内非结构化网格图。该网格的划分考虑了在转子叶片附近加密网格数,网格的划分总数为 250 000 个网格节点。

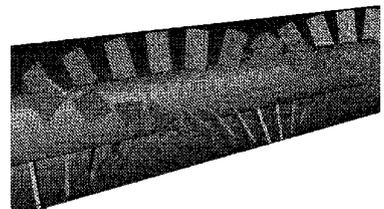


图 2 涡轮反应器内部非结构化网格图

Fig. 2 Non-frame gridding of inner vortex reactor

1.3 边界条件

边界条件是在求解区域的边界上所求解的变量或一阶导数随地点及时间的变化规律^[9]。边界条件是考虑工程问题本身所产生,而不是由数学考虑而产生的。边界条件如图 3 所示。

(1) 进口边界条件:对于气相进口边界条件,各

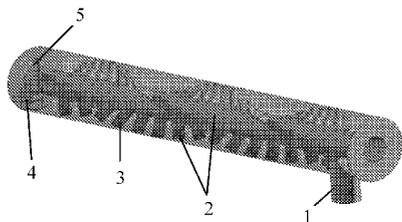


图 3 边界条件

Fig. 3 Boundary conditions

- 1. 物料和气体出口 2. 叶片和转轴 3. 固壁 4. 物料进口
- 5. 气体出口

物理量在物料进料口处切向进气时取均匀入口条件,并给定 u_s, v_s, w_s, T_s, Y_s 等。对于固相进口边界条件,在 $x=0$ 处,各物理量均取均匀入口条件,给定 $u_p, v_p, w_p, T_p, \rho_p, n_p$ 等。而对于固相物料一般要求给出物料流量、流速、颗粒的分布函数和颗粒的平均直径、物料密度等。根据上述要求,列出进口边界条件:气相进口边界条件: $u_s = 0, v_s = 0, w_s = 100 \text{ m/s}, T_s = 413 \text{ K}, Y_s = 0.025 \text{ kg/kg}$;固相进口边界条件^[10]: $u_p = 0, v_p = 0.005 \text{ m/s}, w_p = 0, T_p = 293 \text{ K}, n_p = 0.25 \text{ kg/kg}$ 。

固相进料:含水率为 25%, HCl 质量分数为 0.056% 的马铃薯淀粉物料;淀粉颗粒的粒度分布由激光粒度分析仪测得,粒度分布为 2 ~ 120 μm ,其中 50% 左右为 22 ~ 55 μm ,马铃薯淀粉中累积分布达到 50% 时粒径 D_{50} 为 36 μm ^[11]。

固相物质流量:均匀入流条件,入口流速 $v_{in} = Q_{in}/S_{in}$,其中 Q_{in} 为进口流量, S_{in} 为过流面截面积^[12]。马铃薯淀粉经由螺旋喂料器经径向喂料进入反应器 $Q_{in} = 0.042 \text{ kg/s}, v_{in} = 5.35 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,进口处淀粉流动速度 $v_0 = 0.057 \text{ m/s}$ 。固相物质密度 $\rho = 920 \text{ kg/m}^3$,淀粉比热容 $c_p = 1250 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,传热膜系数 $\alpha = 8 \times 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

(2) 出口边界条件:出口条件取充分发展流条件,并定义出口压力相对大气压力为零,即没有附加压力作用。采用第二类边界条件,用一阶外推方法确定,取 $x=L$ 处

$$\partial\phi/\partial x = 0 \quad (\phi = u, v, w, k, \varepsilon, T, Y_s)$$

$$\partial\phi_p/\partial x = 0 \quad (\phi_p = u_p, v_p, w_p, k, \varepsilon, T_p, \rho_p, k_p, n_p)$$

式中, ϕ, ϕ_p 均为求解变量。

(3) 固壁:采用固壁无滑移条件,在近壁区采用标准壁面函数,固壁与外界有热交换^[13]。

(4) 旋转边界条件:叶片为旋转边界条件,叶片的转速与转轴相同,叶片的转速为 1100 r/min,外壁面转速为零。叶片为绝缘体,无热量交换^[14]。

1.4 数值求解及模拟

在数值求解时对气相和颗粒相均采用有限差分数值解法,采用交错网格和上风差分格式,对差分方程采用 $p-v$ 修正的 SIMPLE 算法和 TDMA 逐行逐面迭代求解。

通过对 CFD 模型的解法进行理论分析,并列出各方程中变量的求解方法,然后通过应用 CFD 商业通用软件 Fluent 进行数值求解,并获得较为理想的模拟结果^[15]。

2 结果及分析

对涡轮反应器内转子叶片 3 种安装角度 $0^\circ, 15^\circ$ 和 30° 以及 2 种热油温度 413 K 和 438 K 的 6 种状况分别进行模拟。获得了各种工况下的颗粒轨迹图、温度分布图、密度分布图、涡轮反应器内连续相(气固混合相)的速度矢量图、轴向速度图、径向速度图、切向速度图、湍流强度分布图、气相湿度图和含水率分布图等。

2.1 物料颗粒运动状态

图 4 为不同叶片安装角度下不同粒径颗粒在涡轮反应器内部运动轨迹图,此处的安装角度指的是叶片平面和径向平面所成的角度。由图可知:在任一种安装角度下不同粒径的颗粒几乎有着相似的连续螺旋线型运动轨迹。颗粒沿着螺旋线紧贴内壁形成连续的圆柱形薄层,与前述的理论分析非常接近,物料为流动的薄层随气相流动,在气固两相流薄层中完成反应、传热和传质过程。叶片安装角度不同,颗粒的运动轨迹有着较大的差别,主要表现为螺旋

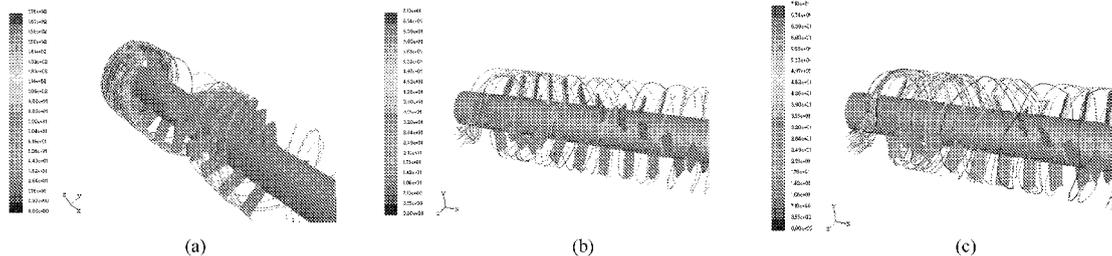


图 4 不同安装角度下颗粒轨迹图

Fig. 4 Tracks of grain at different angles

- (a) 0° (b) 15° (c) 30°

线的螺距有很大的差别,叶片安装角 0° 时螺距最大,安装角 15° 时次之,安装角 30° 时最小。螺距越大,物料在涡轮反应器内停留的时间越短;螺距越小,物料在涡轮反应器内停留的时间越长。即改变叶片安装角度可调整物料在涡轮反应器内的滞留时间。物料在反应器内的滞留时间还与气体流动速度以及轴转速有很大的关系,气流速度越大、轴转速越大,则颗粒滞留的时间越短;反之,越长。故在应用该涡轮器进行不同操作时,比如作为混合器、干燥器和反应器所选的结构参数不尽相同。由图可得,若要增加反应时间,增强混合效果,获得含水率更低的干燥物料,则转子叶片安装角度应选择稍大的结构,反之则选用安装角度稍小的结构^[16]。

2.2 反应温度分布

图5为安装角度 0° 、 15° 和 30° 情况下,热油温度413 K和438 K时的温度分布图,它反映了带物料的气流在腔体内的温度分布情况以及物料的反应

状况。转子叶片3种不同的安装角度下其温度的分布有相同的趋势,均为沿着轴向温度逐渐上升,而沿着径向存在较大的温度梯度,越靠近壁面温度越高,越靠近轴心处温度越低,其等温面为一个锥面。这是由于热是通过内壁面向内传递,壁面附近为热传导和对流传递并存的传播方式,而反应器中间部分主要热对流传递。安装角为 0° 时,温度的变化较为缓慢,在轴线方向有明显的温度梯度存在,出口处温度分别为400 K和405 K。由于438 K热油温度的物料反应较为激烈,故需要提供的热量较413 K状态时多,此时出口的温度相差不是很大。安装角度为 15° 和 30° 时,温度的变化趋势非常接近。当物料从进口处以室温进入时,在较短的空间轴向距离内即迅速达到了较高的温度,这说明该过程进行了强烈的热交换和反应^[17]。在后续的热交换过程中,温度的变化较为缓慢,热壁提供的热量主要用于物料的反应。

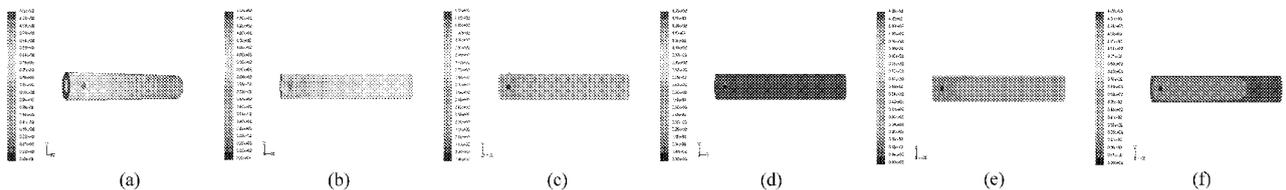


图5 不同安装角度下反应温度分布(热油413 K、438 K)

Fig. 5 Temperature distributions at different angles

(a) 0° , 413 K (b) 0° , 438 K (c) 15° , 413 K (d) 15° , 438 K (e) 30° , 413 K (f) 30° , 438 K

2.3 连续相密度分布

图6为安装角度 0° 、 15° 和 30° 情况下,热油温度为413 K和438 K时的密度分布。由图可知,在涡轮反应器内部连续相密度分布规律为沿着轴向方向,密度减小。随着转子叶片安装角度

的增大,涡轮反应器内密度增大。在较低的温度(热油413 K)时,密度大。故此,不同粒径的颗粒在反应器内的滞留时间不同,气固两相内部流场中存在着湍流-涡漩流。使反应几率大大增加。

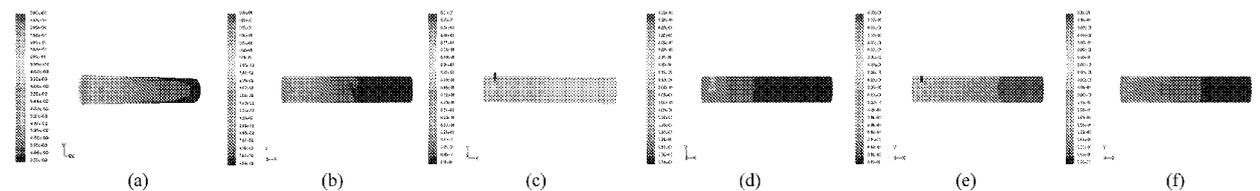


图6 不同安装角度下密度分布(热油413 K、438 K)

Fig. 6 Density distributions at different angles

(a) 0° , 413 K (b) 0° , 438 K (c) 15° , 413 K (d) 15° , 438 K (e) 30° , 413 K (f) 30° , 438 K

2.4 连续相速度分布

图7为安装角度 0° 、 15° 和 30° 情况下,热油温度413 K和438 K时的速度分布图以及切向、轴向和径向速度分布图。

由安装角度为 0° 的速度分布可知,物料在进口处与气相一接触后速度立即增大,合成速度沿着涡轮径向存在明显的梯度,靠近涡轮内壁速度较大,连续相的速度达到40~70 m/s。从切向速度分布图可

以得到切向速度分布与合成速度分布有着相同的规律,从转子叶片上观察较为明显,叶片半径越大,则切向速度越大,在靠近壁面处最大速度达到6 m/s。轴向速度的分布状况为在物料和气流交汇处达到最高,而后慢慢降低,最高可达到40 m/s。径向速度的分布状况变化非常小,只是在近壁面处有些速度,其余几乎为零,这和理论推算得到的结果相一致,证明模拟结果真实可靠。安装角度为 0° 时,热油温度对速

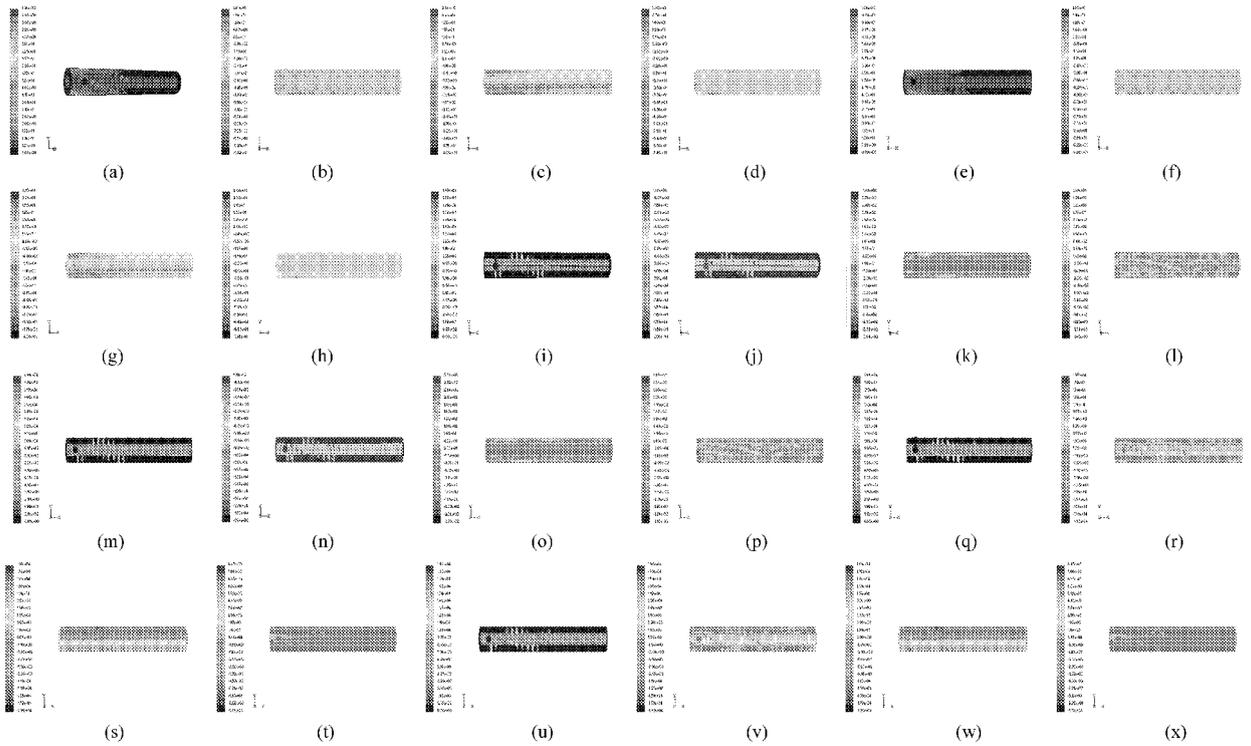


图 7 不同安装角度和热油温度下速度分布图以及切向、轴向和径向速度分布图

Fig. 7 Distributions of velocity, tangential velocity, axial velocity and radial velocity at different angles

- (a) 速度(0°, 413 K) (b) 切向速度(0°, 413 K) (c) 轴向速度(0°, 413 K) (d) 径向速度(0°, 413 K) (e) 速度(0°, 438 K) (f) 切向速度(0°, 438 K) (g) 轴向速度(0°, 438 K) (h) 径向速度(0°, 438 K) (i) 速度(15°, 413 K) (j) 切向速度(15°, 413 K) (k) 轴向速度(15°, 413 K) (l) 径向速度(15°, 413 K) (m) 速度(15°, 438 K) (n) 切向速度(15°, 438 K) (o) 轴向速度(15°, 438 K) (p) 径向速度(15°, 438 K) (q) 速度(30°, 413 K) (r) 切向速度(30°, 413 K) (s) 轴向速度(30°, 413 K) (t) 径向速度(30°, 413 K) (u) 速度(30°, 438 K) (v) 切向速度(30°, 438 K) (w) 轴向速度(30°, 438 K) (x) 径向速度(30°, 438 K)

度分布的影响不大。

由安装角度为 15°时的速度分布图可知,合成速度沿着径向方向存在较大的速度梯度,在叶片的末端速度最大,颗粒在涡轮反应器内以这样的速度沿着内螺旋的轨迹形成运动的圆柱薄层,速度沿着半径方向快速减小。连续相的切向速度和合成速度有着相似的速度分布规律,在叶片末端切向速度较大,而沿半径减小的方向速度快速减小。轴向速度在涡轮反应器内壁附近较大,而其他位置如叶片四周等位置速度非常小。径向速度在接近轴心处较大,其余位置均较小。温度的变化对速度影响很小。

由安装角度为 30°时速度分布图可知,其合成速度的分布和 15°安装角度的速度分布非常类似,只是叶片末端的速度要比 15°安装角度的速度大,速度沿径向方向的减小更显著。切向速度的分布图显示叶片末端的速度类似于合成速度,其轴的附近径向速度亦较大。轴向速度在叶片末端处最大,而接近轴处速度几乎为零。径向速度较小,这和理论分析相似,故一般可忽略径向速度的影响。温度的变化对速度的影响非常小。

由上述分析获得,安装角度 0°、15°、30°下速度分布规律类似,只是速度大小和各速度分量存在较大的差异。在选择安装角度时可根据要求来进行选择,一般用于反应的涡轮反应器需要调节颗粒在反应器内部的滞留时间和最佳温度,可以根据对轴向速度的要求来进行选择,以达到控制颗粒在反应器内部的滞留时间。对这些速度的分析以及速度分量分析结果获得颗粒在涡轮反应器内部的运动规律,最终达到理论指导实践的目的。

2.5 连续相湍流强度分布

图 8 为连续相湍流强度分布图。由图可以看出,温度对湍流强度的影响均不明显,而安装角度对其影响却较为明显。安装角度 0°时其湍流强度和 15°、30°安装角度时相比相差 2 个数量级。这是由于安装角度改变后改变了气流的受力状况,增加了混合相的湍流强度,尤其在叶片末端,安装角度 15°和 30°均有相同的规律,其末端的湍流强度相当高,由此可借助强烈的湍流使得物料在向前作螺旋运动的过程中不发生粘壁现象。图中安装角度 30°比安装角度 15°有更高的湍流强度,反应器内的物料更不会发生粘壁现象。

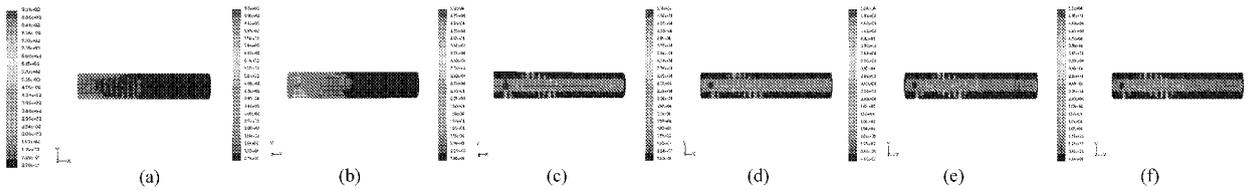


图8 不同安装角度和热油温度下湍流强度分布

Fig. 8 Turbulence intensity distributions at different angles

(a) 0°, 413 K (b) 0°, 438 K (c) 15°, 413 K (d) 15°, 438 K (e) 30°, 413 K (f) 30°, 438 K

2.6 连续相相对湿度分布

图9为不同安装角度下连续相相对湿度图。由安装角度为0°、15°和30°情况下,热油温度为413 K

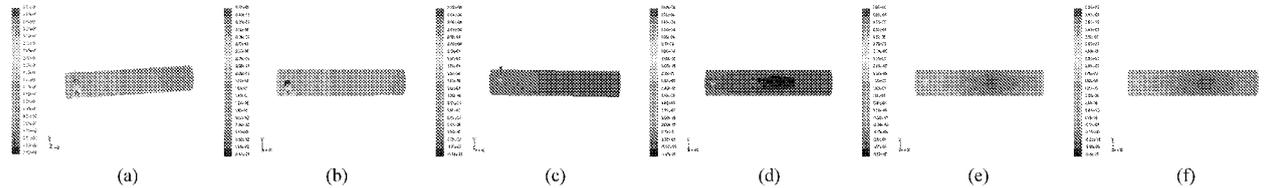


图9 不同安装角度和热油温度下相对湿度分布

Fig. 9 Relative humidity distributions at different angles

(a) 0°, 413 K (b) 0°, 438 K (c) 15°, 413 K (d) 15°, 438 K (e) 30°, 413 K (f) 30°, 438 K

高,而经过涡轮反应器的干燥和反应后,大部分的水被气体带走,此时物料的含水率降低,从而表现出连续相的相对湿度慢慢降低。相对湿度的分布状况反映干燥和反应的情况,干燥后的连续相其相对湿度降低,相对湿度在径向和轴向均存在梯度,沿着半径减小方向其相对湿度降低,沿着轴向其相对湿度降低。在径向相对湿度的降低是由于物料在涡轮内部沿内壁运动,故在轴附近物料较少而引起湿度较低,而在轴向方向是由于随着反应和干燥的进行带走水分引起湿度降低。进入反应器后轴向距离小于

和438 K时的相对湿度分布图中可获得连续相内的相对湿度分布状况。

当物料一进入反应器时,此处物料的含水率较

1 m时,物料干燥过程几乎已经达到要求,后续的过程为反应占主导的过程,由此可以确定如果利用涡轮反应器只是作为干燥器应用时,必须控制叶片的安装角度以控制物料在涡轮反应器内的滞留时间,否则混合了药液的混合物在干燥的同时将进行反应过程,这样不利于符合要求的变性淀粉的生成。以上分析表明,气相和固相存在着相对滑移。

2.7 连续相速度矢量分布

图10为安装角度0°、15°和30°情况下,热油温度413 K和438 K时的速度矢量分布图。

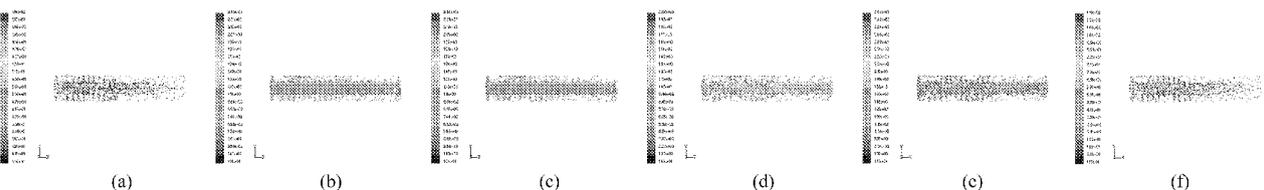


图10 不同安装角度和热油温度下速度矢量分布

Fig. 10 Velocity vector distributions of H₂O at different angles

(a) 0°, 413 K (b) 0°, 438 K (c) 15°, 413 K (d) 15°, 438 K (e) 30°, 413 K (f) 30°, 438 K

由图中得出,安装角度无论是0°、15°还是30°其进口处的速度最大,而后慢慢趋于平缓。沿着轴向速度变化不大;在径向上,靠近壁面的速度较大,尤其是叶片末端的速度最大,而轴心处速度最小。

3 结论

(1) 涡轮反应器内部的物料流动为沿着内壁作螺旋线型运动,大量的物料沿着螺旋线运动形成了运动的圆柱薄层。其螺旋轨迹和叶片的安装角度有着密切的关系,调整叶片安装角度可以控制颗粒在

反应器内的滞留时间;热油温度对涡轮反应器内颗粒运动轨迹没有影响。

(2) 涡轮反应器内部的温度分布非常有规律,沿着径向和轴向均存在温度梯度。当温度较低(热油为413 K),叶片的安装角度为0°时,物料在反应器内部滞留时间较短,温度较低,不利于进行反应;而当温度较高(热油为438 K),叶片的安装角度为15°和30°时,由于物料在反应器内部滞留时间增加,反应温度上升,物料在较短的轴向距离内即可获得反应所需温度,有利于淀粉变性反应的进行并获

得符合要求的产品。出口物料的温度达不到提供的热油温度但接近热油温度。即: 选择温度和调整转子叶片安装角度, 能够得到不同淀粉变性化学机理所需要的最佳反应时间和温度。

(3) 涡轮反应器内速度的分布和转子叶片的安装角度有着较大的关系, 而与热油温度无关。不同的叶片安装角度其速度大小, 切向、轴向和径向的速度分布有着相同的规律, 但是对于速度的大小存在较大的差别, 安装角度 0° 的涡轮反应器速度要小于安装角度为 15° , 而安装角度 15° 的要小于安装角度 30° 的涡轮反应器。

(4) 涡轮反应器内物料的运动为强湍流-涡旋流运动, 安装角的不同其湍流强度有着较大的差别, 温度对湍流情况的影响较小。无论是哪一种安装角度的涡轮反应器其转子叶片末端的湍流强度最大,

而不同的安装角度中, 安装角度 30° 最大, 15° 次之, 0° 最小。强湍流的存在, 尤其是转子叶片末端强湍流的存在保证了物料在干燥反应过程中的不粘壁。同时, 使反应几率大大增加。

(5) 涡轮反应器内连续相的相对湿度分规律反映了物料在反应器内部的干燥和反应情况, 干燥和反应同时进行, 在物料进口到轴向距离小于 1 m 时, 物料多以干燥为主, 而后续的过程以反应占主导。

(6) 涡轮反应器内部在进口处的速度较大, 而后慢慢趋于平缓并达到一个稳态。在涡轮反应器的径向上, 壁面附近的速度最大, 而轴心处的速度最小。该速度分布有利于形成气-固两相圆柱流面薄层运动的物料层, 有利于物料以最佳的方式存在于较好的反应条件中, 有利于干燥和反应。

参 考 文 献

- 高罗辉, 姚振强, 梁鑫光, 等. 旋流气力输送中水平管道管壁磨损的流体力学仿真与分析[J]. 机械设计与研究, 2012, 28(2): 88 ~ 92.
Gao Luohui, Yao Zhenqiang, Liang Xinguang, et al. Research for the wall wear of horizontal pipeline in swirling flow pneumatic transport based on the computational fluid dynamics simulation analysis[J]. Machine Design and Research, 2012, 28(2): 88 ~ 92. (in Chinese)
- 李庆扬, 王能超, 易大义. 数值分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- Gao Shuling, Wei Dezhou, Liu Wengang, et al. CFD numerical simulation of flow velocity characteristics of hydrocyclone[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(12): 2784 ~ 2789.
- Wei Zuojun, Xu Shimin, Yuan Yingjin, et al. CFD simulation of hydrodynamic characteristics in stirred reactors equipped with standard Rushton or 45° -upward PBT impeller[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2003, 11(4): 467 ~ 471.
- 许闽, 黄海, 刘辉, 等. 毛细管中泰勒流液侧传质特性及其强化机理的 CFD 模拟[J]. 化工学报, 2012, 63(1): 42 ~ 49.
Xu Min, Huang Hai, Liu Hui, et al. CFD simulations of liquid side local mass transfer characteristics and enhancement in capillaries under Taylor flow[J]. CIESC Journal, 2012, 63(1): 42 ~ 49. (in Chinese)
- 朱博, 王强, 郭慧军, 等. 基于双欧拉模型的流化床气固两相流场数值模拟[J]. 大庆石油学院学报, 2011, 35(3): 104 ~ 108.
Zhu Bo, Wang Qiang, Guo Huijun, et al. Numerical simulation of gas and solid two-phase field on the fluidized bed based on double Euler model[J]. Journal of Daping Petroleum Institute, 2011, 35(3): 104 ~ 108. (in Chinese)
- 田铨, 张欢, 由世俊, 等. 利用 Fluent 软件模拟地铁专用轴流风机的内部流场(一)——对称翼叶片轴流风机[J]. 流体机械, 2003, 31(11): 13 ~ 15.
Tian Cheng, Zhang Huan, You Shijun, et al. CFD simulation of axial-flow fan in subway by Fluent software (1)—axial-flow fan with symmetrical blade[J]. Fluid Machinery, 2003, 31(11): 13 ~ 15. (in Chinese)
- 张伟, 余运超, 陈红勋. 离心泵叶轮非设计工况下内部湍流流场的模拟[J]. 排灌机械工程学报, 2010, 28(1): 38 ~ 42.
Zhang Wei, Yu Yunchao, Chen Hongxun. Numerical simulation of flow in centrifugal pump impeller at off-design conditions[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2010, 28(1): 38 ~ 42. (in Chinese)
- 陈晋南. 传递过程原理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- 裴秀丽. 多管式旋风分离器内气固两相流动规律的数值模拟研究[D]. 东营: 中国石油大学(华东), 2012.
- 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)
- 张庆华. 液-液水力旋流器试验与数值模拟研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2002.
- 吴中华. 脉动燃烧喷雾干燥过程数值模拟[D]. 北京: 中国农业大学, 2002.
- 许辉, 邹早建. 基于 Fluent 软件的小水线面双体船粘性流数值模拟[J]. 武汉理工大学学报: 交通科学与工程版, 2004, 28(1): 8 ~ 10.
Xu Hui, Zou Zaojian. Numerical simulation of viscous flows around swath based on CFD code Fluent[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science and Engineering, 2004, 28(1): 8 ~ 10. (in Chinese)

- heat treatments [J]. *Journal of Food Science*, 1984,49(4):1 105 ~ 1 110.
- 10 Scuriatti M P, Tomas M C, Wagner J R. Influence of soybean protein isolates-phosphatidylcholine interaction on the stability of oil-in-water emulsions [J]. *Journal of the American Oil Chemists*, 2003,80(11):1 093 ~ 1 100.
- 11 Comas D I, Wagner J R, Tomás M C. Creaming stability of oil in water(O/W) emulsions: influence of pH on soybean protein-lecithin interaction [J]. *Food Hydrocolloids*, 2006,20(7):990 ~ 996.
- 12 Le T T, EL-Bakry M, Neiryck N. Hydrophilic lecithins protect milk proteins against heat-induced aggregation [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2007,60(2):167 ~ 173.
- 13 贾娜,刘宁.大豆磷脂对牛乳蛋白乳液热稳定性的影响[J]. *中国乳品工业*,2010,38(4):42 ~ 45.
Jia Na, Liu Ning. Effect of soybean phospholipid on the heat stability of milk protein emulsions [J]. *China Dairy Industry*,2010,38(4):42 ~ 45. (in Chinese)
- 14 Sorgentini D A, Wagner J R, Añón M C. Effect of thermal treatment of soy protein isolate on the characteristics and structure-function relationship of soluble and insoluble fractions [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1995,43(9): 2 471 ~ 2 479.
- 15 Nakamura R, Mizutani R, Yano M, et al. Enhancement of emulsifying properties of protein by sonicating with egg yolk lecithin [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1988,36(4): 729 ~ 732.
- 16 Chen W S, Soucie W G. Modification of surface charges of soy protein by phospholipids [J]. *Journal of the American Oil Chemists*, 1985,62(12): 1 686 ~ 1 689.
- 17 Malhotra A, Coupland J N. The effect of surfactants on the solubility, Zeta potential, and viscosity of soy protein isolates [J]. *Food Hydrocolloids*, 2004,18(1):101 ~ 108.
- 18 Jorge R W, Delia A S, Maria C A. Effect of physical and chemical factors on rheological behavior of commercial soy protein isolates: protein concentration, water imbibing capacity, salt addition, and thermal treatment [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 1992,40(10): 1 930 ~ 1 937.
- 19 Arno C A, Mireille W, Els H A H, et al. Acid-induced cold gelation of globular proteins: effect of protein aggregate characteristics and disulfide bonding on rheological properties [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2004,52(3): 623 ~ 631.
- 20 Dreja M, Heine K, Tieke B, et al. Rheological study of the pH-dependence of interactions between gelatin and anionic surfactants: flow behavior and gelation [J]. *Colloid and Polymer Science*, 1996, 274(11): 1 044 ~ 1 053.

~~~~~

(上接第 189 页)

- 23 李江阔,纪淑娟,魏宝东,等. 1-MCP 对南果梨冷藏防褐保鲜作用的初探[J]. *保鲜与加工*, 2007, 25(4): 7 ~ 11.  
Li Jiangkuo, Ji Shujuan, Wei Baodong, et al. Primary study of 1-MCP on browning-inhibiting and freshmen-keeping's mechanism of Nanguo pear during 0°C storage[J]. *Storage and Process*, 2007, 25(4):7 ~ 11. (in Chinese)
- 24 张鹏,李江阔,陈绍慧,等. 1-MCP 结合冰温贮藏磨盘柿的防褐保鲜效果[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(5): 108 ~ 113.  
Zhang Peng, Li Jiangkuo, Chen Shaohui, et al. Effect of 1-MCP combined with controlled freezing point storage on browning preventing and freshness-keeping of mopan persimmon[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(5): 108 ~ 113. (in Chinese)
- 25 Sisler E C, Alwan T, Goren R, et al. 1-substituted cyclopropenes: effective blocking agents for ethylene action in plants[J]. *Plant Growth Regulation*, 2003,40(3): 223 ~ 228.
- 26 Sisle E C, Serek M, Roh Kee-An, et al. The effect of chemical structure on the antagonism by cyclopropenes of ethylene responses in banana[J]. *Plant Growth Regulation*, 2001, 33(2): 107 ~ 110.

~~~~~

(上接第 201 页)

- 15 Virag T. Simulation of continuous drying processed by integral equations[J]. *Chemical Engineering Science*, 1989,44(7):1 529 ~ 1 538.
- 16 张德胜,施卫东,张华,等. 轴流泵叶轮端壁区流动特性数值模拟[J]. *农业机械学报*, 2012, 43(3): 73 ~ 77.
Zhang Desheng, Shi Weidong, Zhang Hua, et al. Numerical simulation of flow field characteristics in tip clearance region of axial-flow impeller[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(3): 73 ~ 77. (in Chinese)
- 17 叶晓琰,田莹莹,丁压娜,等. 高剪切匀浆泵两相流动的数值模拟[J]. *排灌机械工程学报*, 2012, 30(4): 407 ~ 411.
Ye Xiaoyan, Tian Yingying, Ding Ya'na, et al. Numerical simulation of two-phase flow in high shear pulp pump[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2012, 30(4): 407 ~ 411. (in Chinese)
- 18 孙贇,刘兴静,张宏宇,等. 涡轮反应器气固两相流动反应 CFD 模型建立[J]. *农业机械学报*,2013,44(6):194 ~ 200.
Sun Yun, Liu Xingjing, Zhang Hongyu, et al. Development of gas-solid two-phase flow-reaction CFD model for vortex reactor [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013,44(6): 194 ~ 200. (in Chinese)