

喷雾干燥过程的 CFD 模型

吴中华 刘相东

(中国农业大学机械工程学院)

摘要 应用气-粒两相流理论和计算流体力学(CFD)知识,结合喷雾干燥的特点,建立了模拟喷雾干燥室内气体-颗粒两相湍流流动的 CFD 模型。讨论了该类模型的数值求解过程,并结合实际脉动燃烧喷雾干燥过程进行数值模拟,得到了喷雾干燥室内气流的温度、湿度分布图,气体流线和颗粒相的运动轨迹图。模拟结果表明该 CFD 模型可用于对喷雾干燥过程的模拟。

关键词 喷雾干燥; 气粒两相流; 模型; CFD

中图分类号 S 226.6

CFD Model for Simulating Spray Drying of Pulse Combustor

Wu Zhonghua, Liu Xiangdong

(College of Machinery Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract A CFD model for predicting the turbulent, two-dimensional transfer phenomena inside the spray dryer was developed and analyzed. The model consists of the system of partial differential equations that describe the conservation of mass, momentum and heat in the drying chamber. The standard $k-\epsilon$ model was used to describe turbulence in addition to the governing conservation equations. The two-phase theory and the Computational Fluid Dynamics technology are used. The detailed information of gas-particle phase in every computational cell of the drying chamber is predicted by the numerical models.

Key words spray drying; gas-particle flow; model; CFD

由于喷雾干燥对流传质速度高,干燥时间短,因而在食品、化工、制药等行业获得了广泛的应用。多年来,国内外研究人员提出了许多数学模型,对喷雾干燥过程进行数值模拟,但模拟结果均不能给出干燥室内气体的流动状态和各种热力学参数的分布信息,而这些信息对喷雾干燥器的设计和优化具有重要意义。随着计算技术和流体力学的发展,近年来,出现了一门新的交叉学科即计算流体力学(CFD),为解决该问题提供了一种新思路。笔者应用气-粒两相流理论和 CFD 知识,结合喷雾干燥的特点,建立了模拟喷雾干燥室内气体-颗粒两相湍流流动的 CFD 模型,并对实验室脉动燃烧喷雾干燥过程进行了数值模拟。

1 喷雾干燥的 CFD 模型

1.1 气相控制方程组

空气比湿方程建立的原理是单位体积、单位时间内水汽质量的增加等于流入和流出的水

收稿日期: 2001-09-17

国家自然科学基金资助项目

吴中华,北京清华东路 17 号 中国农业大学(东校区)215 信箱, 100083

汽质量之差。对于湍流情况,采用标量系数来拟和湍流输运项,可以得到轴坐标下的空气比湿方程

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_{v,x}Y) + \frac{\partial}{r\partial r}(r\rho_{v,r}Y) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_c \frac{\partial Y}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{r\partial r}\left(r \frac{\mu_c}{\sigma_Y} \frac{\partial Y}{\partial r}\right) - N \dot{m}_k \quad (1)$$

其中: Y ——空气比湿,即干燥室单位体积内,水汽质量占湿空气(干燥介质)质量的百分率, %。

ρ ——湿空气密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

t ——模拟时间, s。

σ_Y ——经验常数。

x, r ——轴坐标系中的轴向、径向坐标, m。

v_x, v_r ——气体轴向、径向速度分量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

N_k ——干燥室单位体积内液相颗粒的数目, $\text{个}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

\dot{m}_k ——单个颗粒单位时间质量的变化, $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

μ_c ——湍流有效黏性系数, $\text{kg}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$, 其值等于分子黏性系数 μ 和湍流黏性系数 μ_t 之和。 $\mu = 2.4988 \times 10^{-5} + 2.35553 \times 10^{-8} \cdot T$, 式中 T 为湿空气的温度, K; $\mu_t = 0.09k^2/\epsilon$, 其中 k 为湍流动能, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$; ϵ 为湍流耗散率, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-3}$ 。

式(1)左边第1项为非定常项,对于传统喷雾干燥过程,如果各种操作条件比较稳定,可以看成定常问题,此时非定常项为零。但对于脉动燃烧喷雾干燥,由于湿空气进口速度呈正弦函数波动,故该干燥过程为非定常问题,需要考虑非定常项。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汽质量的变化。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水汽质量的变化。右边第3项为源项,包括气相本身和两相间产生的水汽质量,该项表示单位体积内所有颗粒由于水的蒸发而向湿空气(干燥介质)传递的水汽质量。湿空气中的水汽并不存在状态变化,可不考虑气相本身的水汽源产生的质量。同理,考虑干燥室单位体积内湿空气的质量、动量及能量守恒,可以得到气相质量、速度、温度方程。

湿空气质量方程

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_{v,x}) + \frac{\partial}{r\partial r}(r\rho_{v,r}) = - N \dot{m}_k \quad (2)$$

轴向速度分量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_{v,x}v_x) + \frac{\partial}{r\partial r}(r\rho_{v,r}v_x) &= \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_c \frac{\partial v_x}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{r\partial r}\left(r\mu_c \frac{\partial v_x}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_c \frac{\partial v_x}{\partial x}\right) + \\ &\frac{\partial}{r\partial r}\left(r\mu_c \frac{\partial v_r}{\partial r}\right) - \frac{\partial P}{\partial x} - v_x N \dot{m}_k + \rho_k/\Gamma_k(v_x - v_{x,k}) \end{aligned} \quad (3)$$

其中: P 为湿空气的总压力, Pa; ρ_k 为颗粒密度, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$; Γ_k 为颗粒驰豫时间, s; $v_{x,k}$ 为颗粒轴向速度分量, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

径向速度分量方程

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_{v,x}v_r) + \frac{\partial}{r\partial r}(r\rho_{v,r}v_r) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_c \frac{\partial v_r}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{r\partial r}\left(r\mu_c \frac{\partial v_r}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial x}\left(\mu_c \frac{\partial v_x}{\partial x}\right) +$$

$$\frac{\partial}{r\partial r}\left(r\mu_c \frac{\partial v_r}{\partial r}\right) - \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(v_r N \dot{m}_{k+} + \rho_k/\Gamma_k (v_r - v_{r,k}) \right) \quad (4)$$

其中: $v_{r,k}$ 为颗粒径向速度分量, $m \cdot s^{-1}$ 。

湿空气温度方程

$$\frac{\partial cT}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \alpha} (\rho v_x cT) + \frac{\partial}{r\partial r} (r\rho v_r cT) = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{\mu_c}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial \alpha} \right) + \frac{\partial}{r\partial r} \left(r \frac{\mu_c}{\sigma_T} \frac{\partial T}{\partial r} \right) - N \dot{m}_{k+} cT - N_k Q_k \quad (5)$$

其中: c 为湿空气的比热容, $J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$; σ_T 为经验常数; Q_k 为单位体积内, 单个颗粒在单位时间内从气相中吸收的热量, $J \cdot s^{-1}$ 。

式(1)~(5)构成了湍流情况下的 Navier-Stokes 方程组。由于采用了变量系数 μ_c 来拟和湍流输运项, 造成了方程的不封闭, 故该方程组不足以解 $\rho, Y, v_x, v_r, T, P, \mu_c$ 7 个变量。为保持方程组的封闭, 采用表征湍流性质的湍流动能 k 和湍流耗散率 ϵ 来封闭方程组, 因而在工程模拟上也常常称为 $k-\epsilon$ 模型, 湍流动能和耗散率方程具体形式如下。

湍流动能方程

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \alpha} (\rho v_x k) + \frac{\partial}{r\partial r} (r\rho v_r k) = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{\mu_c}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial \alpha} \right) + \frac{\partial}{r\partial r} \left(r \frac{\mu_c}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial r} \right) + G_k - \rho \epsilon \quad (6)$$

其中: σ_k 为经验常数; G_k 为由于剪切作用而产生的湍流动能, $kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-3}$

$$G_k = \mu \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial v_x}{\partial \alpha} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v_r}{r} \right)^2 \right] + \left(\frac{\partial v_x}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial \alpha} \right)^2 \right\}$$

湍流耗散率方程

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \alpha} (\rho v_x \epsilon) + \frac{\partial}{r\partial r} (r\rho v_r \epsilon) = \frac{\partial}{\partial \alpha} \left(\frac{\mu_c}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial \alpha} \right) + \frac{\partial}{r\partial r} \left(r \frac{\mu_c}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial r} \right) + \frac{\epsilon}{k} (C_1 G_k - C_2 \rho \epsilon) \quad (7)$$

其中: σ_ϵ, C_1 和 C_2 为经验常数。

方程(1)~(7)即构成了描述湿空气(干燥介质)速度、温度、比湿、压力、湍流动能和湍流耗散率的封闭方程组。气相控制方程组中与流体流型相关的经验常数, 依据所模拟工程流体流型的不同而有所区别, 具体情况可参照前人模拟案例, 也可以用试差法找到最佳值^[1]。对于喷雾干燥, 可以使用以下常数^[2]。

表 1 气相方程组的常数表

常数	α	σ_k	σ_ϵ	C_1	C_2
取值	1.0	1.3	1.0	1.44	1.92

1.2 颗粒轨道模型

对于气体-颗粒两相流动系统, 考虑作用在颗粒上的各种力, 运用牛顿第二定律, 可得到在拉格朗日坐标下的颗粒运动方程。喷雾干燥过程中, 颗粒的轴向速度方程

$$\frac{dv_{x,k}}{dt} = \Gamma_k (v_x - v_{x,k}) + g_x (\rho_k - \rho) + F_x \quad (8)$$

其中: g_x 为重力加速度轴向分量, $m \cdot s^{-2}$; F_x 为其他力与颗粒质量的比值, $m \cdot s^{-2}$; 颗粒弛豫时间 Γ_k 为

$$\Gamma_k = \frac{\rho d_k^2}{18\mu C_d Re} \quad (9)$$

式中: d_k 为颗粒直径, m; C_d 为气体-颗粒间阻力因数; Re 为颗粒的雷诺(Reynolds)数。若定义颗粒雷诺数 $Re = \rho d_k |v - v_k| / \mu$ (v 为气体速度, v_k 为颗粒速度, $m \cdot s^{-1}$), 则对应于不同的 Re 范围, 有下述不同的气体-颗粒阻力系数 C_d 的表达式。

$$\begin{aligned} \text{Newton 公式} & \quad C_d = 0.44 \quad Re < 1000 \\ \text{Wallis - kliachko 公式} & \quad C_d = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{1}{6} Re^{2/3} \right) \quad 1 < Re < 1000 \\ \text{Stokes 公式} & \quad C_d = \frac{24}{Re} \quad Re < 1 \end{aligned}$$

式(8)中, 右边第1项为气体-颗粒间的阻力; 第2项为重力; 第3项为其他力, 包括浮力, 斯坦福(Staff)力, 磁力等。对于喷雾干燥, 由于颗粒直径较小, 颗粒跟随气相而运动, 因而两相间的力主要体现为阻力, 也可以考虑重力和浮力, 其他力相对较小, 可忽略。

同时, 根据速度的定义, 可以得到颗粒的运动轨迹方程。以轴向为例, 颗粒沿轴向的运动轨迹方程为

$$\frac{dx}{dt} = v_{x,k} \quad (10)$$

利用该方程可以追踪颗粒沿轴向的运动轨迹。对于喷雾干燥, 经喷嘴所雾化的颗粒具有不同的颗粒初始直径, 形成了不同直径的颗粒群, 因而在采用颗粒轨道模型追踪颗粒运动轨迹时, 有以下假定:

- 1) 颗粒为与流体有滑移的离散群(即颗粒与流体具有不同的速度和温度)。
- 2) 在最初的颗粒轨道模式中不考虑颗粒的湍流扩散、黏性及导热。
- 3) 颗粒按初始尺寸分组, 各组有其自身的质量变化, 互不相干; 相同尺寸组的颗粒在尺寸不断减小的任何时刻都具有相同的速度及温度。
- 4) 各组颗粒由一定的初始位置出发沿各自的轨道运动, 互不相干, 沿轨道可以追踪颗粒质量、温度及速度变化。
- 5) 颗粒作用于流体的质量、动量和能量源均匀地分布于流体单元。颗粒轨道模型在拉氏坐标中考察颗粒的行为。

1.3 气粒两相间热质传递模型

气粒两相间的热质传递过程模型是模拟喷雾干燥过程的重点, 考虑颗粒的半径非常小, 认为颗粒的温度均匀分布, 即内部热量传递不予考虑。以下为干燥过程中气体-颗粒的热质传递模型。

- 1) 当颗粒温度 T_k 小于颗粒表面蒸发温度(湿球温度) T_v 时, 颗粒处于升温阶段, 没有质量变化。

$$Q_k = hA_k(T - T_k) \quad (11)$$

其中: A_k 为颗粒表面积, m^2 ; h 为热传递系数, $W \cdot (m^2 \cdot K)^{-1}$, 可从下式算出

$$\frac{hd_k}{\lambda} = 2.0 + 0.6Re^{0.5}Pr^{0.33} \quad (12)$$

其中: λ 为颗粒的热导率, $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$; Pr 为普朗特(Prandtl)数。

2) 当颗粒含有未蒸发的水并且温度未达到沸点, 即 $T_k < T_b$ 且 $m_k > (1-f)m_{k,0}$ 时, 颗粒中水的蒸发速率

$$N = k_c(C_s - C) \quad (13)$$

其中: T_b 为沸腾温度(此处指质量分数为 10% 的 NaCl 溶液的沸腾温度), K 。 $m_{k,0}$ 为颗粒初始质量, kg, m_k 为颗粒质量, kg, f 为颗粒中水的质量分数, k_c 为对流质量传递系数, 可从式 $k_c D / D = 2.0 + 0.6 R e^{0.5} S c^{0.33}$ 算出; 式中, D 为湿空气的扩散率, $m^2 \cdot s^{-1}$; $S c$ 为施密特 (Schmidt) 数, C_s 为颗粒表面湿空气中水汽的质量浓度, $kg \cdot m^{-3}$, $C_s = P_{st} / (R T_k)$; 式中: P_{st} 为颗粒温度为 T_k 时水汽的饱和蒸汽压, Pa; R 为气体常数, $J (mol \cdot K)^{-1}$ 。 C 为湿空气中水汽的质量浓度, $kg \cdot m^{-3}$; $C = Y P / R T$ 。 此时

$$\dot{m}_k = N A_w M \quad (14)$$

$$Q_k = h A_k (T - T_k) + \dot{m}_k h_f \quad (15)$$

其中: M 为水分子的摩尔质量, $kg \cdot kmol^{-1}$; h_f 为颗粒中水的蒸发潜热, $kJ \cdot kg^{-1}$ 。

3) 当颗粒温度大于沸点并且颗粒内部有未蒸发的水, 即 $T_k > T_b$ 且 $m_k > (1-f)m_{k,0}$ 时, 有

$$\dot{m}_k = \frac{2\pi d_k \lambda}{c} (1 + 0.23 \sqrt{Re}) \ln \left[1 + \frac{c(T - T_k)}{h_f} \right] \quad (16)$$

上述气相控制方程组、颗粒轨道模型和气体-颗粒热质传递模型构成了模拟喷雾干燥过程的 CFD 模型。气相控制方程组用于描述干燥室内湿空气的性质, 如气流的温度、湿度、速度及压力; 颗粒轨道模型用于追踪颗粒在干燥室内的运动轨迹; 气体-颗粒热质传递模型用于描述两相之间质量、动量变换, 能量的转移和耗散。3 个模型之间相互联系, 因而必须用迭代法求解整个 CFD 模型。

2 数值模拟

2.1 数值模拟过程

首先对各方程中的对流项和扩散项用混合差分格式离散, 对源项用中心差分与负斜率线性化离散, 将各变量的微分方程离散成差分方程。本文中所用的差分方法为控制容积有限差分法。各变量的差分方程用沿主流方向逐线扫描的 TDMA (追赶法) 低松弛迭代求解。气相控制方程组用 SIMPLER 有限差分算法求解^[3]。颗粒运动方程的求解建立在气相方程组的解之上, 但同时颗粒相的解又作为气相方程组求解的条件, 两相的解互为求解条件, 因而必须用迭代法求解。先假定一个初始气相流场, 然后依次求解颗粒运动方程, 气体-颗粒热质交换方程和气相控制方程组, 两相反复迭代直至收敛^[3]。

2.2 脉动燃烧喷雾干燥的模拟结果

用所建立的 CFD 模型模拟脉动燃烧喷雾干燥系统的干燥过程。脉动燃烧喷雾干燥系统采用 Helmholtz 型脉动燃烧器, 其燃烧室体积 1962.5 cm^3 , 热负荷 25 kW , 脉动频率 83 Hz 。干燥室进口处气体速度 $23 + 59 \sin(521.24t)$, $m \cdot s^{-1}$, 温度 337 。料液用质量分数为 10% 的 NaCl 水溶液, 其流量 $5.8 \text{ g} \cdot s^{-1}$, 温度 23 。料液经脉动气流直接雾化后, 其索特平均直径为 $44.02 \mu\text{m}$ 。喷雾干燥室长 1.5 m , 直径 0.3 m , 锥底部分长 0.4 m , 出口直径 0.12 m 。对于周期性脉动的气体, 时间步长取脉动周期的 $1/40 \sim 1/50$, 本文中取脉动周期的 $1/48$, 即时间步长为 $2.5 \times 10^{-4} \text{ s}$ 。图 1 给出了模拟所用的非结构化网格。图 2 为 $t = 1 \text{ s}$ 时, 干燥室内气体湿度和温度的

分布。图3为该时刻干燥室内气体的流线和颗粒群的运动轨迹。

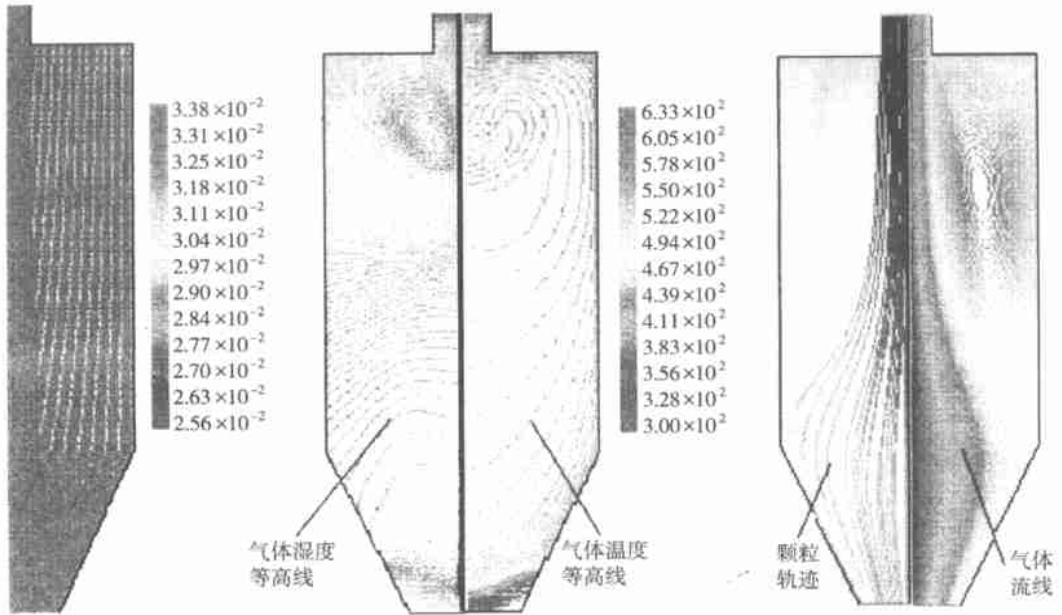


图1 干燥器的非结构化网格 图2 气体温度和湿度等高线 图3 干燥室内气体流线和颗粒轨迹

模拟结果表明,在干燥室轴向距入口0.957m处,99.4%的颗粒已被完全干燥;颗粒最终含水率约为1.6%,接近其平衡含水率。颗粒干燥时间非常短,在干燥器内的停留时间最长约0.1s。颗粒出口温度为150。以进口风温377计,蒸发单位质量水所需能量为3300kJ·kg⁻¹。整个干燥室的蒸发速率为217.3kg·(m³·h)⁻¹,与传统喷雾干燥器的蒸发速率1~30kg·(m³·h)⁻¹的上限相比至少可提高6.24倍。

3 结束语

运用喷雾干燥的CFD模型,实现了脉动燃烧喷雾干燥过程的数值模拟。模拟结果具有详细、直观的特点。模拟得到的喷雾干燥室内气相流场和各种热力学参数的分布信息,可为喷雾干燥器的设计,干燥过程的优化提供参考。

参 考 文 献

- 1 Markatos N C. The mathematical modeling of turbulent flows Applied Mathematical Modeling, 1986, 10: 190~ 220
- 2 Zbicinski I Modeling and verification of heat and mass transfer in the flow field generated by pulse combustor: [PH. D. Thesis], Poland: Technical University of Lodz, 1999
- 3 Launder B E, Spalding D B. The numerical computation of turbulence flows Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1974, 3: 269~ 289
- 4 Southwell D B, Langrish A G, Fletcher D F. Process intensification in spray dryers by turbulence enhancement Trans Icheme, 1999, 77(A): 189~ 205