

喷雾干燥用旋风分离器内部流动 与分离特性数值模拟

胡 洪¹, 黄 虎¹, 宋倩倩¹, 张忠斌¹, 陈泽民²

(1. 南京师范大学 动力工程学院, 江苏 南京 210042
2. 江苏丹阳苏科空气能研究中心有限公司, 江苏 丹阳 212300)

[摘要] 对喷雾干燥过程中旋风分离器工作过程及其分离原理做了简要介绍, 给出了旋风分离器内三维流场以及颗粒轨道的数学模型, 运用雷诺应力模型(RSM)对其进行了三维数值模拟. 数值模拟得到了旋风分离器内三维气体流场以及颗粒的运动轨迹, 获得了旋风分离器在不同进口风速下的进出口压降和不同粒径下的分离效率. 模拟计算结果可供旋风分离器设计及应用提供一定的参考.

[关键词] 旋风分离器, 雷诺应力模型, 数值模拟, 颗粒轨迹

[中图分类号] TK 223 [文献标识码] A [文章编号] 1672-1292(2010)02-0030-05

Numerical Study on Flow Field and Separative Efficiency of Cyclone Separator Applicable to Spray Drying

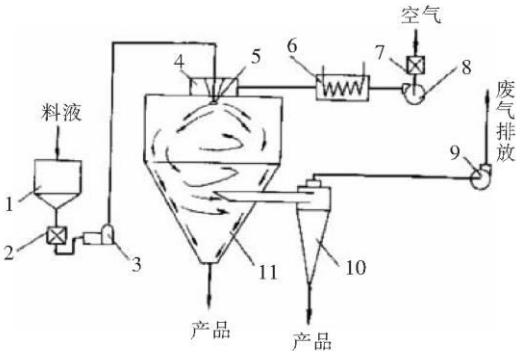
Hu Hong¹, Huang Hu¹, Song Qianqian¹, Zhang Zhongbin¹, Chen Zemin²

(1. School of Power Engineering Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China
2. Jiangsu Danyang Suke Air Source Energy Research Center Co. Ltd. Danyang 212300, China)

Abstract The working processes and principles of cyclone separator were introduced in this paper. The mathematical models of the three-dimensional flow fields and trajectory of particles in cyclone separators were established. The Reynolds Stress Model (RSM) was used to compute the field. The three-dimensional flow fields and trajectory of particles were obtained by numerical simulation. The differential pressures between inlet and outlet of cyclone separator under different inlet air velocities and separative efficiencies and different particle diameters were also obtained by numerical calculation. The results can provide a reference for designing and applications of cyclone separator.

Key words cyclone separator; Reynolds Stress Model (RSM); numerical simulation; trajectory of particles

喷雾干燥装置所处理的原料液虽然有较大差别, 所得产品也有很大不同, 但它们的流程却基本相同. 如图 1 所示为一个典型的喷雾干燥系统流程图^[1]. 料液经输料泵送入顶部雾化器被雾化为细小颗粒, 颗粒和送入的热空气在塔内进行传热传质, 颗粒失去绝大部分水份得到干燥并进入产品收集装置, 热干空气失去显热后载着湿份以一定速度离开喷雾干燥塔而进入旋风分离器. 热湿气体里面含有部分产品颗粒, 需要在旋风分离器内进行产品回收. 而对于上述过程, 旋风分离器作为产品颗粒回收的最后一道关口, 旋风分离器的颗粒分离性能就直接关系到产品的回收率. 为此, 要提高喷雾干燥粒子产品的回收率, 有必要对旋风分离器内部流场以及颗粒分离特性进行研究.



1.贮料罐;2.料液过滤器;3.输料泵;4.空气分布器;5.雾化器;6.空气加热器;7.空气过滤器;8.鼓风机;9.引风机;10.旋风分离器;11.喷雾干燥器

图 1 喷雾干燥系统流程图^[1]

Fig.1 Spray drying process flow chart

1 工作过程与分离原理

旋风分离器是一种利用气固两相流体的旋转运动,使固体颗粒在离心力的作用下从气流中分离出来的一种干式气—固分离装置.当含粒气体由进气管进入旋风分离器时,由于受到筒壁的约束,气流将由直线运动转变成圆周运动.随后,绝大部分旋转气流沿器壁成螺旋形向下,朝锥体流动,通常称为外旋流.跟随气体一起运动的粒子在旋转过程中受到与粒子质量成正比的离心力作用,这就使得一些质量较大的粒子颗粒在旋转过程中被甩向器壁,颗粒一旦与器壁接触,便失去惯性力而靠粒子此时刻的动量随外螺旋气流沿壁面下落,最终使得粒子产品得到回收.旋转向下的外旋气流在到达锥体时,因圆锥体形状的收缩,若不考虑壁面摩擦损失,根据“旋转矩”不变原理,其切向速度不断提高.另一方面,外旋流旋转过程中使周边气流压力升高,在圆锥中心部位形成低压区,由于低压区的吸引,当气流到达锥体下端某一位置时,便向分离器中心靠拢,即以同样的旋转方向在旋风分离器内部由下反转向,继续作螺旋运动,称为内旋流.最后,气流经排气管排出分离器外部,一小部分未被捕集的产品颗粒也就由此而逃逸.气体中的颗粒从跟随气流进入到排出的过程中,只要在气体旋转向上前能碰到器壁,即可沿器壁滑落到排尘口,从而达到产品粒子回收的目的.

2 物理模型

本文对在喷雾干燥过程中一种较为常用的旋风分离器进行数值模拟研究.旋风分离器的结构如图 2 所示.由进气管道、上部圆柱形筒体、下部圆锥体和排气管道组成.具体的模型尺寸见表 1.

表 1 旋风分离器结构尺寸

Table 1 Structure dimension of cyclone separator								(单位: mm)
a	b	D_c	s	h	H	B	D	m
95	38	64	95	285	760	72	190	55

在 gambit 内对旋风分离器的物理模型进行建模,并划分计算区域的网格.计算区域及网格划分如图 3 所示.

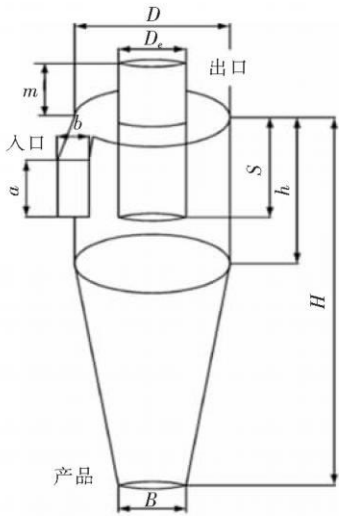


图 2 旋风分离器模型
Fig.2 Cyclone separator model



图 3 计算区域网格划分
Fig.3 Meshing for computational domain

3 数学模型及其求解

3.1 气相控制方程

旋风分离器分离过程可看做是一个等温、不可压缩的过程^[2].则器内气体流动的不可压缩连续性方

程和 N-S 方程为:

连续性方程:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

N-S 方程:

$$\rho_g u_g \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[u_g \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}, \quad (2)$$

式中, i, j, k 为常数, 且 $i, j, k = 1, 2, 3$. u_g 为气体粘滞系数; ρ_g 为气体密度; p 为压力; τ_{ij} 为雷诺应力项. 考虑到湍流的各向异性, 对动量方程中雷诺应力项写成输运方程. 描述雷诺应力输运方程为:

$$\frac{\partial}{\partial x_k} (\rho u_k \overline{u_i u_j}) = D_{ij} + P_{ij} + \pi_{ij} - \epsilon_{ij} \quad (3)$$

式中, D_{ij} 代表扩散输运项; P_{ij} 为应力产生项; π_{ij} 为压力-应力关联项; ϵ_{ij} 为耗散项.

3.2 颗粒控制方程

分散颗粒群模型是在拉格朗日坐标系下, 用跟踪颗粒运动轨迹的方法来描述颗粒的运动, 它适宜于颗粒相所占体积分数较小时的气固两相流动的数值模拟, 这与旋风分离器绝大部分空间内颗粒的运动分布情况十分接近^[3]. 忽略颗粒之间的碰撞, 考虑颗粒与气相之间的相互作用, 则颗粒在拉格朗日坐标系下的运动方程表示如下:

轴向:

$$\frac{du_p}{dt} = \frac{1}{\tau} (u_g + u'_g - u_p) - g. \quad (4)$$

径向:

$$\frac{dv_p}{dt} = \frac{1}{\tau} (v_g + v'_g - v_p) + \frac{w_p^2}{r_0}. \quad (5)$$

切向:

$$\frac{dw_p}{dt} = \frac{1}{\tau} (w_g + w'_g - w_p) - \frac{u_p w_p}{r_0}. \quad (6)$$

颗粒松弛时间:

$$\tau = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu C_D Re_p}. \quad (7)$$

式中, 下标 p, g 分别表示颗粒相与气相; r_0 为颗粒的当地径向位置; u'_g, v'_g, w'_g 为气体在 3 个方向上的随机脉动速度分量; μ 为气体分子粘性系数; C_D 为阻力系数; ρ_p, d_p, Re_p 分别表示颗粒的密度、直径和雷诺数.

3.3 求解思路及方法

流场计算采用 FLUENT 软件, 控制方程采用有限体积法进行离散^[4], 对于气相流场计算在壁面处采用无滑移边界条件, 对近壁网格点采用壁面函数法^[5]处理, 选用 SMPLEC 算法进行求解. 式(4)~(7)构成了颗粒的运动方程, 通过对颗粒运动方程进行积分, 可以方便地得到颗粒的运动轨迹.

4 模拟结果分析

图 4 给出了旋风分离器 3 个不同产品粒径下粒子的运动轨迹. 由图可知, ϕ 为 $1 \mu\text{m}$ 的颗粒对于气流的追随性很好, 先随着气流旋转向下运动, 一部分颗粒到达旋风分离器下部的锥体底部后又随着内部的上升气流螺旋上升, 进入排气管; 另一部分颗粒没有到达底部时就进入内旋流, 通过旋转气流上升, 直接进入排气芯管. 而 ϕ 为 $50 \mu\text{m}$ 的颗粒在几乎到下部锥体的中部才靠近壁面而下落. 因为越往锥体下部, 气流的旋转速度越快, 颗粒受到的离心力也就越大, 当离心力增大到一定的时候颗粒脱离气体主流轨道, 进入锥体底部. 从图中可以看出 $100 \mu\text{m}$ 粒径粒子早早就贴着壁面下落了, 因其具有较大的质量, 在同样的速度下会受到更大的离心力, 故其分离相对小粒径粒子更容易.

图 5 给出了旋风分离器上部柱体与下部锥体交接面圆上的速度矢量图. 从图中可以看出, 在旋风分离器内部, 气流大致可以分为 3 个区域, 即外旋转气流、过渡气流和内旋转气流. 外部旋转气流主要靠近旋风分离器壁面, 具有较高的速度; 而内旋转气流主要集中在旋风分离器内部一小块区域, 这部分气流的速度最大. 此时, 若是粒子进入这部分气流中, 将会被气流带出分离器. 位于两个高速旋转气流的中间为一段过渡气流区. 从图中明显可以看出过渡区域的气流具有相对较低的速度.

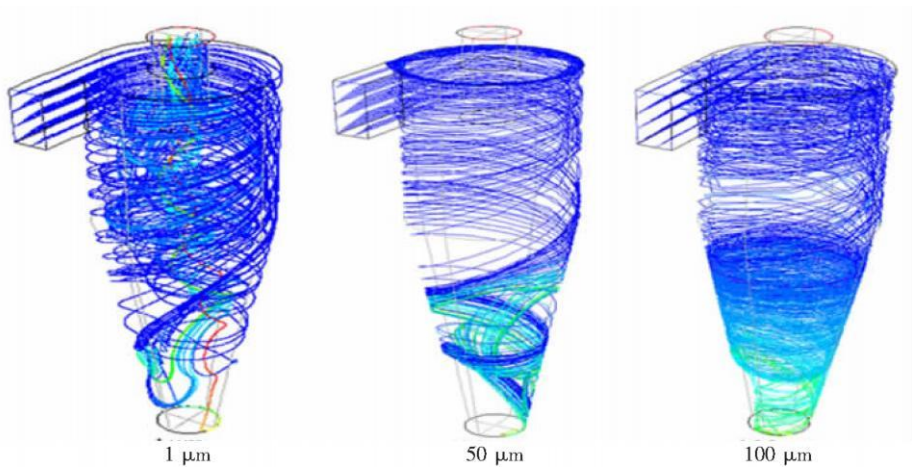


图 4 不同粒径的产品颗粒轨迹
Fig.4 Separation trajectory of particles with different sizes

图 6 中给出了不同产品粒径在风速为 30 m/s 下的分离效率. 显然, 粒子粒径增大, 其分离效率增加. 这与前面的分析得出一致的结果: 即粒子粒径增大, 粒子的质量随之增大, 在相同的气相速度场中将会受到更大的离心力作用, 使其分离相对容易.

图 7 中给出了旋风分离器进口风速与进出口压降的变化关系. 由前面的讨论可知, 速度增大也会使粒子的离心力增大使之更易于分离. 但速度的增大会导致旋风分离器进出口压降增大, 且增大的速率呈现加速趋势. 压降的急剧增大也就带来动力消耗的快速增大. 由此, 为了提高分离器的分离效率, 不能盲目地提高进口风速来实现, 这样会带来更大的动力消耗.

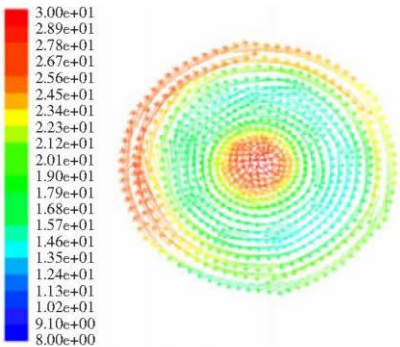


图 5 柱体与锥体交界面的速度矢量
Fig.5 Velocity vectors on the surface between cylinder and pyramid

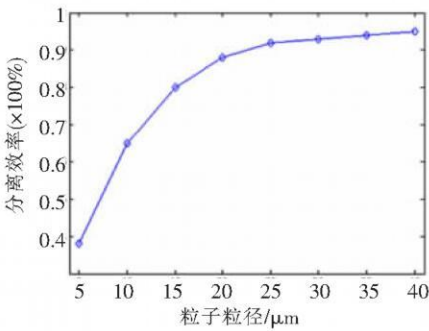


图 6 粒子直径与分离效率的关系
Fig.6 Particle diameter and separating efficiency

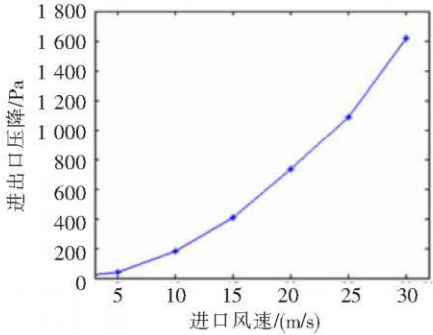


图 7 进口风速与进出口压降关系
Fig.7 Inlet velocity and pressure difference

5 结语

由前面的讨论可知,旋风分离器内部气流的流场和粒子的轨迹较为复杂.其对于产品的分离性能与诸多因素相关,如进风速度、含固体粒子直径等.对于已有的旋风分离设备,用于产品分离具有一定的粒径范围.同时,进风速度的增大有助于产品分离效率的提高,但不能盲目地增大进风速度,这样会导致更大的动力消耗,这点在实际的操作中需要予以考虑.最后,本文中只研究了一种特定的旋风分离设备,而对于旋风分离设备的研究和开发,还将涉及更多的需要考虑的因素,如进气管、排气管、圆柱体、圆锥体等的结构尺寸.

[参考文献] (References)

- [1] 王喜忠,于才渊,周才君.喷雾干燥[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2003: 286-287.
Wang Xizhong Yu Caiyuan, Zhou Caijun. Spray Drying[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 286-287 (in Chinese)
- [2] 钱付平,章名耀.温度对旋风分离器分离性能影响的数值研究[J]. 动力工程, 2006, 26(2): 253-258
Qian Fuping, Zhang Mingyao. Numerical study of the influence of temperature on separation performance of cyclone separators [J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(2): 253-258 (in Chinese)
- [3] 薛晓虎,孙国刚,时铭显.旋风分离器内颗粒浓度分布特性的数值分析[J]. 机械工程学报, 2007, 43(2): 26-33
Xue Xiaohu, Sun Guogang, Shi Mingxian. Numerical simulation on particle concentration distribution in cyclone separator [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(2): 26-33 (in Chinese)
- [4] Patankar S V. 传热与流体流动的数值计算[M]. 张政,译. 北京: 科学出版社, 1989
Patanekar S V. Numerical Calculation on Heat Transfer and Fluid Flow[M]. Zhang Zheng Translated. Beijing: Science Press, 1989 (in Chinese)
- [5] 陶文铨. 数值传热学[M]. 2版. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 353-362
Tao Wenquan. Numerical Heat Transfer[M]. 2nd ed. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001: 353-362 (in Chinese)

[责任编辑: 刘 健]