

偏移速度对旋风分离器内饲草颗粒轨迹影响的模拟

李春阳

(辽宁工程技术大学, 辽宁 阜新 123000)

摘要:在农业应用中,饲草的干燥分离经常会用到旋风分离器,由于饲草颗粒的运动方向及速度都会对它的轨迹产生影响,进而影响分离及干燥的效率。为此,根据旋风分离器的工作原理,通过介绍离散相颗粒模型,气固两相流中固体颗粒的受力分析,最后基于 fluent 模拟,分析偏移速度对饲草颗粒运动轨迹的影响。结果表明偏移速度的改变对稀相固体颗粒运行轨迹的影响不大。模拟的结果起到避免陷入研究误区的作用,对农业中饲草的干燥及分离具有一定的指导和借鉴意义。

关键词:旋风分离器;偏移速度;饲草颗粒运行轨迹

中图分类号:TQ021

文献标识码:A

文章编号:1002-2767(2011)09-0136-03

旋风分离器作为一种主要的气固两相分离设备已经广泛应用于农业、电力和机械等领域^[1]。旋风分离器有很多优点,如成本低、无运动部件、具有较好的自适应性等。因此,旋风分离器从申请专利到投入运转已有 100 多年历史^[2]。在农业中,它也广泛用于饲草的干燥及分离^[3]。最近几年,由于对气固两相流研究和模拟的不断深入,人们越来越关注旋风分离器内固体颗粒的运行轨迹。无论是研究旋风分离器分离特性还是固体颗粒的受力分析,都离不开对颗粒运行轨迹的影响。然而,到目前为止,这一方面的文献还寥寥无几。现首先介绍两相流的数学模型及固体颗粒的受力,最后基于 fluent 模拟研究偏移速度对旋风分离器内饲草颗粒运行轨迹的影响。

1 模型介绍

1.1 离散相颗粒模型

随着 CFD 技术的不断发展,数值模拟作为研究的工具越来越得到关注。对于气固两相流的研究,国外许多学者把流体运动学的两大方法有机结合,对气相采用欧拉法,对固相采用拉格朗日法。欧拉法着眼于整个流场中各空间点流动参数随时间的变化;拉格朗日法着眼于整个流场中各个流体质点的流动参数随时间的变化^[4]。在描述气场时,根据颗粒浓度的高低分别采用双向耦合或单相耦合两种方法。有文献认为气固两相流中颗粒容积浓度大于 5.5% 时,应采用双向耦合的模拟方法^[5]。单相耦合只考虑气场对颗粒相的影

响,忽略了固体颗粒的存在对气相湍流的影响,对于极稀的气固两相流基本符合情况。但当颗粒相浓度超过一定界限时,固体颗粒自身由于摩擦、碰撞会影响气相湍流结构,此时,单向耦合模型所计算出的气相场会偏离实际气体的流场,使模型失去意义^[6]。双向耦合模型同时考虑了气固两相的相互作用,弥补了单相耦合的不足。

1.2 气固两相流中固体颗粒受力分析

气固两相流动的特殊性使得流场中固体颗粒的受力很复杂。清华大学张文斌教授提出浓相颗粒,不但受外部流场作用力还受颗粒间相互作用力,具体包括颗粒间通过流体发生的间接相互作用和范德华力、静电力、液体桥力、碰撞力和摩擦力等颗粒间直接作用力^[7]。对于稀相颗粒,则只受外部流场作用力,忽略颗粒间相互作用力。外部流场作用力主要有 8 种:阻力、重力、浮力、压力梯度力、虚假质量力、Basset 力、Magnus 升力和 Saffman 升力等^[8]。

岑可法曾对旋风分离器内固体颗粒的各种受力给出了定量分析^[9]:

表 1 不同颗粒中各种力的分析

各种力	颗粒/ μm		
	1	10	100
阻力	0.59×10^{-12}	0.15×10^{-9}	0.82×10^{-7}
压力梯度力	0.15×10^{-15}	0.15×10^{-12}	0.15×10^{-9}
Saffman 升力	0.26×10^{-16}	0.28×10^{-12}	0.33×10^{-9}
虚假质量力	0.53×10^{-15}	0.64×10^{-13}	0.72×10^{-10}
热泳力	0.19×10^{-14}	0.20×10^{-13}	0.20×10^{-12}
重力	0.77×10^{-14}	0.77×10^{-11}	0.77×10^{-8}
Magnus 升力	0.82×10^{-14}	0.82×10^{-11}	0.82×10^{-8}

由表 1 可知,Magnus 升力和重力在 3 种颗粒直径下均为同一数量级,它使颗粒能在管道中

收稿日期:2011-04-30

作者简介:李春阳(1986-),女,辽宁省鞍山市西丰县人,在读硕士,从事热能工程研究。E-mail:lchy0418@yeah.net。

安全输送而不会沉降,压力梯度力、Saffman 升力和虚假质量力的数量级都很小,热泳力对 $d_p Z \geq 10 \mu\text{m}$ 的颗粒和重力相比也很小。阻力是作用于颗粒上的最大力,起着加速颗粒的作用。

2 数学模型

2.1 气相输运方程

旋风分离器内气相流动都是湍流的,采用 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型,这种模型又可分为标准 $k-\epsilon$ 模型、重振化 $k-\epsilon$ 模型和可实现性 $k-\epsilon$ 模型。考虑到该模型气相流动带有漩涡,故采用重振化 $k-\epsilon$ 模型。

$$2.1.1 \text{ 连续方程 } \frac{\partial(\varphi\rho)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\varphi\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

式中: i, j 为坐标方向, $i, j = 1, 2, 3$; ρ 为气体密度; u_j 为气体速度。

$$2.1.2 \text{ 动量方程 } \frac{\partial(\varphi\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\varphi\rho u_i u_j) = -\varphi \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\varphi\tau_{ij}) + \varphi\rho g \quad (2)$$

$$2.1.3 \text{ 湍流动能方程 } \frac{\partial k}{\partial t} + \mu_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \epsilon \quad (3)$$

$$2.1.4 \text{ 耗散率 } \epsilon \text{ 输运方程 } \frac{\partial \epsilon}{\partial t} + u_j \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} + C_1 \frac{\epsilon}{k} G_k - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} - \frac{\eta(1-\frac{\eta}{\eta_0})}{1+\beta\eta^3} \frac{\epsilon}{k} G_k \quad (4)$$

式中: G_k 为湍流生成项; $G_k = 2\nu_T \overline{S_{ij}S_{ij}}$

S_{ij} 为应变力张量; $\overline{S_{ij}S_{ij}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$

$\sigma_k, \sigma_\epsilon$ 分别为 k 和 ϵ 的普朗特常数。

2.2 颗粒相运动方程

2.2.1 颗粒的动量方程

$$\frac{du_p}{dt} = F_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (5)$$

式中: $F_D(u - u_p)$ 为气相阻力; $\frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} +$

F_x 为重力(包括浮力); F_x 为其它作用力。

2.2.2 颗粒的拉格朗日型运动方程

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{du_p}{dt} = \frac{1}{\tau_t} (\overline{u_g} + u'_g - u_p) + \frac{\sum F_x}{m_p} \quad (6)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{dv_p}{dt} = \frac{1}{\tau_t} (\overline{v_g} + v'_g - v_p) + \frac{\sum F_y}{m_p} \quad (7)$$

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = \frac{d\omega_p}{dt} = \frac{1}{\tau_t} (\overline{\omega_g} + \omega'_g - \omega_p) + \frac{\sum F_z}{m_p} \quad (8)$$

式中: $\sum F_z, \sum F_y, \sum F_x$ 是 x, y, z 颗粒所受力之和; u_p, v_p, ω_p 是颗粒的运动速度; $\overline{u_g}, \overline{v_g}, \overline{\omega_g}$ 是气相时均速度; u'_g, v'_g, ω'_g 是气流的随机脉动速度。 $\tau_t = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu f}, f = \frac{C_D}{Re}, C_D$ 为湍流脉动下的

颗粒阻力系数; d_p 为颗粒的直径。

3 数值模拟与结果分析

应用 fluent 6.3 进行数值模拟,气相速度 $35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,偏移速度 v' 为气固两相速度之差。饲草颗粒与空气同时进入旋风分离器,颗粒密度为 $1100 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,饲草直径取有代表性的 3 组,分别为 $1, 30, 100 \mu\text{m}$ 。每组颗粒均以 $0.05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的质量流率射入。气相湍流流动采用重振化 $k-\epsilon$ 模型,颗粒相采用离散相模型,非耦合计算。采用分割多面体方法,划分多块六面体结构化网格,共 16 734 个。基本思路是先计算出稳定的气相流场,再将颗粒相附加,交替求解,直至收敛。

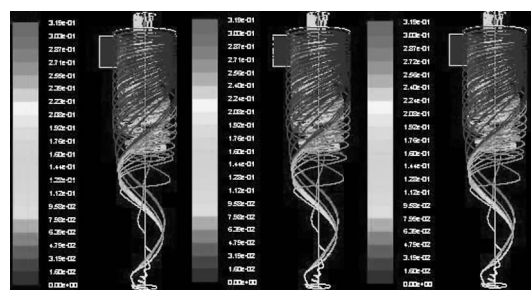


图 1 $d=1 \mu\text{m}, v'=0, 18, 35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时颗粒的运动轨迹

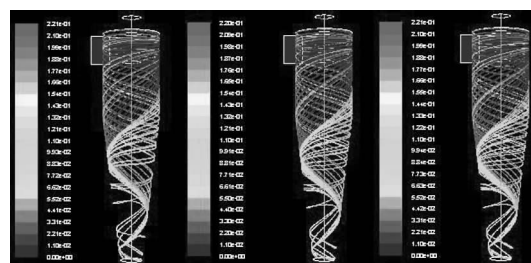


图 2 $d=30 \mu\text{m}, v'=0, 18, 35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时颗粒的运动轨迹

从图 1~图 3 中可以看出,因为直径最小,颗粒受到的阻力和重力也最小,因此追随性最好的是 $d=1 \mu\text{m}$ 的饲草颗粒,它能随主气流旋转向下运动,部分颗粒到达底部后又被卷入内涡螺旋上

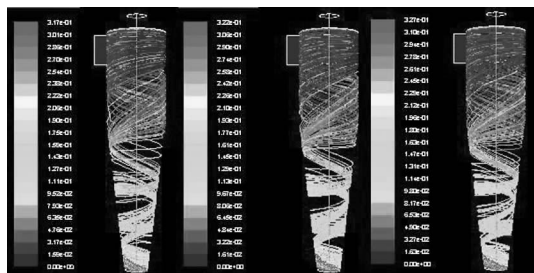


图3 $d=100\ \mu\text{m}$, $v'=0, 18, 35\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 时颗粒的运动轨迹
升,直至排出,然而大部分颗粒没有到达底部就被卷入内涡,随气流上升,直接排出。在整个过程中,无论是旋转向下还是螺旋上升运动都是在主气流的牵引下,表现出了极佳的追随性。同样是由于属于直径很小的稀相运动,受作用力很小,当偏移速度改变时,颗粒轨迹受影响很小,可以近似认为不受影响。

对于 $d=30\ \mu\text{m}$ 和 $d=100\ \mu\text{m}$ 的两种颗粒,由于受到较大的离心作用而被甩向壁面,这两种粒径接触壁面后会沿壁面下滑至底部,它们不被内部上升的气流牵引至排气口。当偏移速度改变时,颗粒的轨迹受到的影响仍然很小,但颗粒轨迹的迭代时间随 v' 的增加而逐渐增加。分析原因,由于是稀相的固体颗粒,气相运动速度也不是很大,对固体颗粒的影响也就不大,模型采用非耦合计算,忽略颗粒间作用力,因此,即使颗粒速度为 $0\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,饲草颗粒被气流拽入分离器内,运行轨迹也不会受到很大影响。当颗粒粒径增大时,离心力变大,增大的阻力会阻止饲草颗粒被气流带

入,因而迭代时间会增长。

4 结论

饲草的干燥分离过程中,经常会用到旋风分离器。由于饲草颗粒的运动方向及速度都会对它的轨迹产生影响,进而影响分离及干燥的效率。该研究应用数值模拟技术分析这种现象,但结果表明:偏移速度的改变只会影响到迭代时间,对饲草颗粒运行轨迹的影响不大,实验结果和理论分析相符合。可见,任何企图通过改变偏移速度的方法来达到提高稀相固体颗粒分离效率的目的都是不可行的。

参考文献:

- [1] 赵兵涛,沈恒根.旋风分离器内气固分离模型的研究进展[J].中国粉体技术,2003(3):45-47.
- [2] 王博.旋风分离器内气固两相运动的数值仿真研究[D].西安:西安建筑科技大学,2003.
- [3] 马文杰.旋风分离器在饲草干燥设备中的应用[J].农机化研究,2006(8):166-168.
- [4] 孔珑.流体力学[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [5] Gad Hetsnoni.多相流动和传热手册[M].鲁仲琪,等译.机械工业出版社,1993.
- [6] 熊源泉,章名耀.气固喷射器内气固两相流动三维数值模拟[J].中国电机工程学报,2005(6):77-82.
- [7] 张文斌.固体颗粒在流化床中的全受力分析[C].武汉:中国工程热物理学会,中国工程热物理学会燃烧学学术会议论文集,2000.
- [8] 杨柳.煤粉燃烧器的改造与研究[D].阜新:辽宁工程技术大学,2008.
- [9] 岑可法,樊建人.工程气固多相流动的理论及计算[M].杭州:浙江大学出版社,1990.

Simulation of Influence of Cyclone Separator Migration Velocity on Forage Grass Particle Trajectory

LI Chun-yang

(Liaoning Technical University, Liaoning Fuxin 123000)

Abstract: In the agriculture application, drying separation of forage grass often uses cyclone separator. As a result of forage grass particles motion direction and speed will have influence on its trajectory, and further influence the efficiency of separation and drying. Therefore, according to the operating principle of the cyclone separator, the discrete particle model was introduced, the stress of solid particles in gas-solid two phase flow was analyzed, finally, based on the Fluent simulation, the influence of migration velocity on forage grass particle trajectory was analyzed. The results showed that the change of migration velocity has little effect on dilute phase particle trajectory. The results of simulation could avoid the misunderstanding of the research, forage grass drying and separation has certain guidance and reference significance in the agriculture.

Key words: cyclone separator; migration velocity; forage grass particle trajectory