

文章编号:1671-6833(2011)04-0076-05

## 径向直叶片湿式风机内气固两相流的数值模拟

卜英勇, 康新库, 吴 晟

(中南大学 机电工程学院, 湖南 长沙 410083)

**摘 要:** 利用 FLUENT 软件中离散相模型(DPM)和混合模型对径向直叶片湿式风机内部三维两相流场进行模拟. 分析风机内部的气固二相的浓度、体积分数、速度矢量和压力等参数的分布, 比较两模型在此次模拟中的优缺点. 模拟结果表明, 在入口粉尘浓度很低的情况下, 固相颗粒的浓度分布与气流流向大致相符. DPM 模型颗粒相浓度分布和混合模型颗粒相体积分数分布的趋势基本一致. DPM 模型在反映浓度局部分布时更加精确, 而混合模型在描述整个流场的浓度分布时更加完整. 模拟结果对径向直叶片湿式风机气、液、固三相流场和除尘机理的研究有指导意义.

**关键词:** 径向直叶片湿式风机; DPM 模型; 混合模型; 气固两相流

**中图分类号:** X701

**文献标志码:** A

### 0 引言

径向直叶片湿式旋流除尘器属机械诱导雾化式除尘器, 它利用湿式风机除尘是对湿式除尘的一大创新. 特别是专门设计的径向直叶片湿式风机, 它产生的离心力和强力扰动迫使细微粉尘与水混合、凝并而除尘. 依靠风机净化含尘气体是其最大特点, 它解决了通常风机怕水怕尘进入的难题, 是任何其他的湿式除尘器无法比拟的. 该设备已经替代其他各类除尘器, 在国内各大矿山广泛应用. 然而, 由于该风机内气、液、固三相流动非常复杂, 在实验中许多参数测量非常困难, 如喷嘴喷出气流速度、雾滴大小、运动轨迹、碰壁和蒸发的情况, 烟气中粉尘颗粒在流场中的运动轨迹, 粉尘颗粒与雾滴的黏合情况等等. 国内对其内部流场和具体的除尘机理研究尚属空白, 导致在使用过程中除尘器的效能不能充分发挥, 耗水量大, 造成资源的浪费. 随着计算流体力学的发展, 数值模拟方法成为研究复杂流场的重要手段. 作者着重研究径向直叶片湿式风机内气固二相流动: 速度场、压力场、粉尘颗粒浓度场分布情况. 分别用拉格朗日和欧拉 2 种方法, 对其内部流场进行气固二相流的模拟, 分析各自在模拟中的优缺点. 为径向

直叶片湿式除尘机理研究提供了重要的理论依据和研究经验.

### 1 物理模型

除尘机组由上筒体、下筒体、锥体、风机等部分组成见图 1 和图 2. 含尘气体沿切线方向进入下筒体, 离心作用使气、尘初步分离; 接着, 含尘气体和经过充分雾化的水一起进入风机, 在高速旋转的风机叶轮作用下, 水雾与粉尘剧烈地碰撞、聚合, 使得粉尘被水捕捉; 干净气体及泥浆沿切线方向进入上筒体, 泥浆下流至锥体经排污口排出; 干净气体在上筒体脱水后经出风口排出. 在风机入口处设有特别喷嘴, 该喷嘴使水呈雾状喷向风机入口, 与尘粒接触产生粘附和凝并, 在风机高速旋转下, 它所产生的离心力和强力扰动迫使细微粉尘与水混合、凝并从而达到除尘效果<sup>[1]</sup>.

### 2 理论模型

计算流体力学的发展为深入了解多相流动提供了基础. 目前有两种数值计算的方法处理多相流: 欧拉-拉格朗日方法和欧拉-欧拉方法<sup>[2]</sup>.

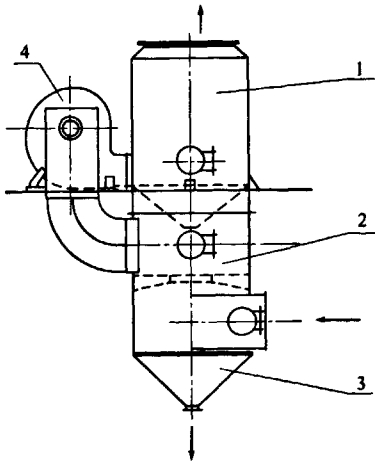
#### 2.1 分散相模型(DPM)

在由流体和分散相组成的弥散多相流体系

收稿日期: 2011-01-19; 修回日期: 2011-04-30

基金项目: “十一五”国家支撑计划资助项目(2008BAB32B02).

作者简介: 卜英勇(1944-)男, 安徽芜湖人, 中南大学教授, 博士生导师, 主要研究领域为设备故障诊断, 设备管理, 除尘脱硫设备的研制. E-mail: byy39@yahoo.cn.



1—上筒体; 2—下筒体; 3—锥体; 4—湿式风机

图1 径向直叶片湿式旋流除尘器简图

Fig.1 Schematic diagram of radial-straight-blade wet Scrubber

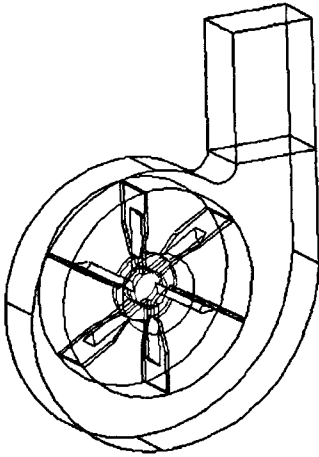


图2 径向直叶片湿式风机简图

Fig.2 Schematic diagram of radial-straight-blade wet fan

中,将流体视为连续介质,分散相视作离散介质处理,这种模型称为分散颗粒群轨迹模型或分散相(Discrete Phase Model, DPM)模型。其中,连续相的数学描述采用欧拉方法,分散相采用拉格朗日方法描述,通过对大量质点的运动方程进行积分运算得到其运动轨迹。因此这种模型属欧拉—拉格朗日模型。其颗粒的运动方程用颗粒作用力微分方程来求解。颗粒的作用力平衡方程(颗粒惯性=作用在颗粒上的各种力)在笛卡尔坐标系下的形式( $x$ 方向)为:

$$\frac{du_p}{dt} = f_D(u - u_p) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + f_x \quad (1)$$

式中: $f_x$ 为附加加速度项(单位颗粒质量的力);等号右边第二项为单位颗粒质量的重力与浮力的合力; $f_D(u - u_p)$ 为单位颗粒质量受到的阻力。 $u$

为连续相速度; $u_p$ 为颗粒速度; $\rho$ 为连续相密度; $\rho_p$ 为颗粒密度<sup>[3-5]</sup>。

模拟旋转参考坐标系下的流动时会引起附加作用力。定义围绕 $x$ 轴旋转,在笛卡尔坐标系下, $y$ 和 $z$ 轴方向的附加作用力分别为:

$$f_y = (1 - \frac{\rho}{\rho_p})\Omega^2 y + 2\Omega(u_{z,p} - \frac{\rho}{\rho_p}u_z) \quad (2)$$

$$f_z = (1 - \frac{\rho}{\rho_p})\Omega^2 z + 2\Omega(u_{y,p} - \frac{\rho}{\rho_p}u_y) \quad (3)$$

式中: $u_{y,p}$ ,  $u_y$ 分别为颗粒、流体在 $y$ 轴方向的速度; $u_{z,p}$ ,  $u_z$ 分别为颗粒、流体在 $z$ 轴方向的速度。

笔者的连续相为空气,分散相为粉尘颗粒。

## 2.2 混合模型

Fluent 共有 3 种 Euler-Euler 型模型:VOF 模型,混合(Mixture)模型和 Euler 模型。笔者采用的混合模型可以模拟 $n$ 相,通过求解混合相的动量、连续性和能量方程,第二相的 Volume Fraction 方程,以及相对速度的代数表示<sup>[6]</sup>。

混合模型的连续方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \bar{v}_m) = 0 \quad (4)$$

这里 $\bar{v}_m$ 是质量平均速度; $\rho_m$ 是混合密度。

混合模型的动量方程可以通过对所有相各自的动量方程求和来获得。它可表示为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \bar{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \bar{v}_m \bar{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu_m(\nabla v_m + \nabla \bar{v}_m^T)] + \quad (5)$$

$$\rho_m g + F + \nabla \cdot \left( \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k v_{dr,k} \bar{v}_{dr,k} \right)$$

这里 $n$ 是相数; $F$ 是体积力; $\mu_m$ 是混合黏性; $v_{dr,k}$ 是第二相 $k$ 的漂移速度:

混合模型的能量方程采用如下形式:

$$\frac{\partial}{\partial t} \sum_{k=1}^n (\alpha_k \rho_k E_k) + \nabla \cdot \sum_{k=1}^n \alpha_k v_k (\rho_k E_k + p) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T) + S_E \quad (6)$$

式中: $k_{eff}$ 是有效热传导率( $k + k_i$ ,这里 $k_i$ 是紊流热传导率,根据使用的紊流模型定义)。式(6)右边的第一项代表了由于传导造成的能量传递; $S_E$ 包含了所有的体积热源。

从第二相 $p$ 的连续方程,可以得到第二相 $p$ 的体积分数方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p v_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \bar{v}_{dr,p}) \quad (7)$$

## 3.1 几何模型的建立

笔者按照实际尺寸在 PRO/E 中建立几何模

型,在 GAMBIT 中划分网格.因为进出口为流场突变的区域,为了给流场一个平稳的发展空间,建模时对进出口的管道进行了加长.考虑到流道形状的复杂性和风机各部尺寸的不同,为提高网格质量,笔者在划分网格时将风机分成了 4 个部分,分别是入口段、叶轮区、蜗壳区以及出口段.根据区域的形状和不同大小采用不同类型和大小的网格,在进、出口段采用结构网格,在叶轮区和蜗壳区采用非结构网格.全风机一共划分为 568 517 个网格.如图 3 所示.

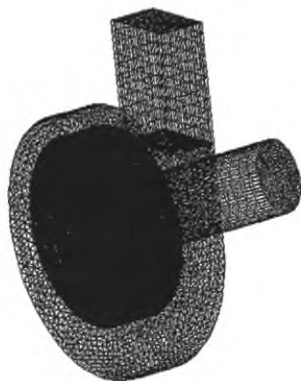


图 3 风机网格结构图

Fig. 3 Grid of radial-straight-blade wet fan

### 3.2 求解器和边界条件的设置

笔者采用  $RNG\kappa-\varepsilon$  湍流模型和壁面函数法<sup>[7]</sup>,应用压力速度耦合的 Simple 算法<sup>[8]</sup>,叶轮区因为有旋转运动,所以采用的是动坐标系.进口边界条件为速度入口,风速为 30 m/s,出口边界条件为压力出口,出口压力 0 Pa.气流相固壁边界满足无滑移条件,近壁处应用壁面函数.对于固相颗粒,壁面采用无损失碰撞条件,入口速度给定,与气流速度相同.计算用颗粒密度为  $1\,500\text{ kg/m}^3$ .粒径采用单一的  $10\text{ }\mu\text{m}$ ,质量流量为  $0.942\text{ g/s}$ .

### 3.3 单向流场的模拟

根据 fluent 软件计算由简单到复杂的特点,笔者首先在没有加入粉尘的情况下对风机进行三维湍流模拟,并给出  $x=0$  截面的速度矢量图和压力场分布图.如图 4,5 所示.可以观察到烟气的流动在进气管道内得到充分发展和稳定后,进入蜗壳内,与叶轮直接碰撞发生绕流,由轴向运动转变为径向运动进入叶道内,再碰到蜗壳后壁产生了明显的回流和漩涡.而后在叶轮旋转的作用下,被迫转为周向运动,并在叶轮的推动下,沿蜗壳流向风机出口.在此过程中形成了两个高速区,一个在轮盘附近,由于气流进入蜗壳后与叶轮撞击发生绕流产生的高速区,一个在叶尖附近,由于叶片高

速旋转带动附近气流产生的高速区.就整个风机叶轮的速度分布来说,在靠近蜗壳出口处的叶轮通道内的速度分布与其他部分的叶轮通道内速度分布明显不同.在蜗壳四周壁面附近,由于气流速度变小,静压上升,所以总压较高.在叶片顶端位置,气流在叶片的带动下,高速流动,动压很高,在局部形成了一个压力较高的区域.另外,风机出口的总压分布与速度分布很类似,越靠外侧压力越高.同时在风机的喉部形成了一个面积不大的漩涡.综上所述,从数值模拟的结果来看,风机内部的流场十分复杂.例如在叶轮通道中存在多个方向的漩涡;在风机的蜗壳内部存在气流的螺旋运动以及风机入口处的回流等.

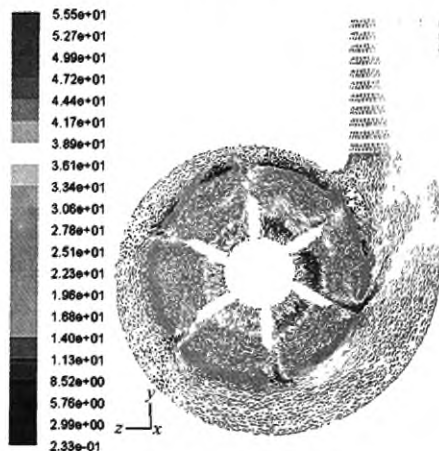


图 4  $x=0$  速度矢量的分布图

Fig. 4 Gas velocity distribution of portrait section  $x=0$

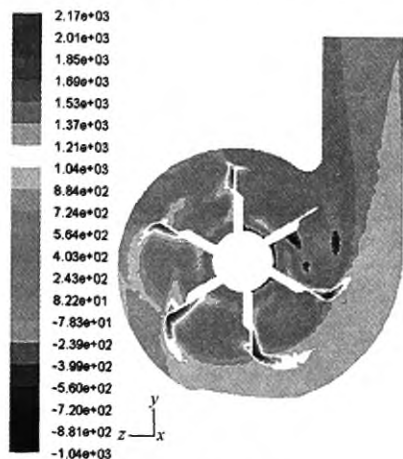


图 5  $x=0$  总压分布云图

Fig. 5 Gas pressure distribution of portrait section  $x=0$

### 3.4 多相流场的模拟

图 6 和图 7 分别为  $x=0$  截面 DPM 模型颗粒相浓度场等值线分布图和混合模型颗粒相体积分

数分布图.由图中可以观察到,颗粒相在入口管段分布很均匀,进入风机蜗壳后受到叶轮的撞击和叶片旋转作用的影响,质量浓度分布发生了复杂的变化.

两个模型在  $x=0$  的截面上出现了三个高浓度的区域,一在蜗壳的周边.气流中的颗粒在离心力的作用下,出现了向蜗壳周边浓聚的趋势.二出现在轮壳附近的扰流区域,对应气流的一个高速区.三是由于黏性切应力(称为摩擦阻力)的作用,沿叶片的压力面上风尘的浓度也比较高.在出口管段,虽然气流有足够的发展空间,流动比较稳定,但是受到惯性的作用,大部分颗粒主要集中在出口管的下表面处.

虽然整个风机内部颗粒相的分布比较复杂,但仍然可以看出固相颗粒的浓度分布与气流的流向大致相符.出现这样的情况,作者认为有两方面的原因:一是模拟计算中按照实际工况设定的颗粒相浓度很低,仅为  $0.001 \text{ kg/m}^3$ ,颗粒之间的碰撞,摩擦等相互作用十分微弱,气相对其的影响是主要作用;二是模型中使用的颗粒粒径仅为  $0.01 \text{ mm}$ ,颗粒惯性小,对气相的跟随性较好.

两种模型在模拟粉尘在离心风机内的质量浓度和体积分数分布,其分布趋势上是大致相同的.进口段粉尘分布比较均匀,蜗壳壁面、轮壳附近和叶片的压力面粉尘浓度较高,在出口管下底面粉尘质量浓度相对较高,有积灰.

两个模型模拟的不同之处:①DPM 模拟粉尘在蜗壳周边壁、面和叶片等高浓度处的质量浓度分布比欧拉模型的体积分数分布层次感更强,更精细.这几处可以明显地观察到粉尘质量浓度的分布非常复杂,而欧拉模型在这些区域的体积分数分布则不是很复杂.而混合模型在反应整个流场的分布上,则更加完整.②在叶轮流道到蜗壳壁的广大空间内,DPM 模型基本上没有反映出浓度分布的差别;而混合模型在很好的描述了粉尘颗粒在叶轮流道漩涡附近分布情况.颗粒在有漩涡的区域受气相涡团黏性与惯性力基本相同,一般分布于强度较弱的涡核边缘<sup>[9-10]</sup>.

#### 4 结论

(1)气流分别在轮壳和叶片顶端附近形成了两个高速区.在叶轮流道中和蜗壳喉部形成了大小不等的漩涡和回流,增加了烟气的停留时间,提高了粉尘与水雾结合的概率.

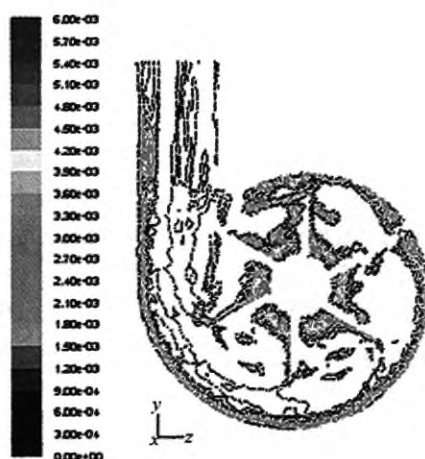


图6 颗粒相的质量浓度分布图

Fig.6 particle phase mass concentration distribution of portrait section  $x=0$

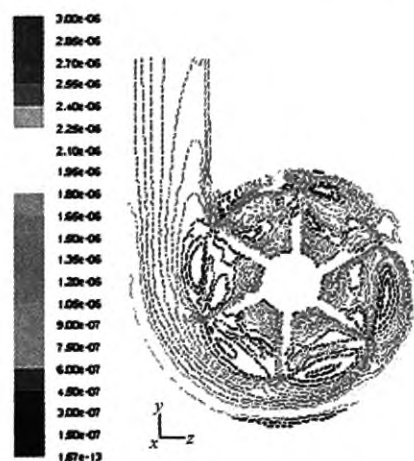


图7 颗粒相体积分数分布图

Fig.7 contours of volume fraction of particle phase  $x=0$

(2)颗粒相在蜗壳周边壁面和轮壳附近浓度较高.出口管段,大部分颗粒主要集中在出口管的下表面处.结果为下一步研究径向直叶片湿式风机内水的雾化和液滴分布指明了方向.

(3)DPM 模型颗粒相浓度分布和混合模型颗粒相体积分数分布,趋势大体一致. DPM 模型更容易收敛,在反映浓度分布时更加精确.而混合模型在描述整个流场的浓度分布时更加完整.

#### 参考文献

- [1] 北京恩菲科技产业集团.湿式三效除尘器[P].中国:00259070.0,2001.8.22.
- [2] 李进良.精通 Fluent6.3 流场分析[M].北京:化学工业出版社,2004:225-228.

- [3] 潘应康. 离心风机叶轮内气固两相流动的理论及数值解法[J]. 华东工业大学学报, 1996, 19(18): 24 - 27.
- [4] 胡桂荣, 李意民, 贾晓娜. 离心风机内气固两相流的数值模拟[J]. 煤矿机械 2008, 25(29): 38 - 39.
- [5] 潘海波, 郭宏伟, 虞维平, 等. 离心除尘风机气固两相流动的数值模拟[J]. 流体机械, 2005, 33(6): 11 - 13.
- [6] 谢艳芳. 多相流混合模型应用于低含沙水流的数值模拟研究[D]. 西安: 西安理工大学水利水电学院, 2005: 47 - 50.
- [7] 李建锋. 排粉风机内部气固两相流动特性研究[D]. 北京: 清华大学热能工程系, 2006: 58 - 60.
- [8] 陶文铨. 计算传热学的近代发展[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001: 353 - 362.
- [9] 王大勇, 李彩亭, 曾光明, 等. 伞罩型除尘脱硫塔内气固二相流数值模拟分[J]. 化学工程, 2008, 33(10): 30 - 32.
- [10] 于明州, 金哈辉, 陈丽华, 等. 粉尘粒子运动扩散特性的大涡模拟研究[J]. 环境科学学报, 2005, 25(7): 891 - 895.

## Simulation of the Gas-solid Turbulent Flow of Centrifugal Radial-straight-blade Wet Fan

BU Ying-yong, KANG Xin-ku, WU Sheng

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China)

**Abstract:** Mixture model and discrete phase model (DPM) in the FLUENT6.3 were used to simulate three-dimensional Gas-solid two-phase flow in the new type radial-straight-blade wet fan. The distributions of the gas-solid volume fractions, particles concentration, velocity and pressure at cross section were analyzed. Two models in the simulation were compared. The simulation results show that the concentration distribution of solid particles almost follows the flow of air when fly-ash concentration is very low. DPM model of particle concentration distribution and the mixed model the distribution of particle volume fraction have a similar trend. DPM model is more accurate in the local and the mixture model is more complete in the whole flow field. The results of simulation are helpful for the study of radial-straight-blade wet fan dedust mechanism and gas-liquid-solid three-phase flow simulation.

**Key words:** radial-straight-blade wet fan; DPM model; mixture model; gas-solid two-phase flow