

文章编号:1671-6833(2005)01-0057-04

# 旋风分离器流场的数值计算方法研究

魏新利<sup>1</sup>, 张海红<sup>2</sup>, 王定标<sup>1</sup>

(1. 郑州大学化工学院, 河南 郑州 450002; 2. 河南工业大学机电工程系, 河南 郑州 450052)

**摘要:** 利用计算流体力学软件 FLUENT, 分别采用  $k-\epsilon$  标准模型、 $RNGk-\epsilon$  模型和 RSM 模型湍流模型及不同离散方式对旋风分离器的流场进行了数值模拟研究. 通过模拟结果与前人实测结果的对比, 确定出了适合旋风分离器的数值计算方法. 结果表明: 湍流模型采用各向异性的 RSM 模型, 离散方式采用对流项的 QUICK 格式和压力梯度项的 PRESTO 格式, 才能获得合理的流场模拟结果. 该结论为旋风分离器流场的数值模拟及进一步的结构优化设计提供了参考依据.

**关键词:** 旋风分离器; 数值模拟; 湍流模型; 离散方式

**中图分类号:** TQ 051.8 **文献标识码:** A

## 0 引言

旋风分离器由于其结构简单、无相对运动部件、制造运行成本低廉等特点, 已成为一种最常用的分离、除尘设备, 其在工业上的应用已有百余年的历史<sup>[1]</sup>. 但是, 由于其内部流场的复杂性, 对其进行的理论研究始终落后于实践, 致使各种旋风分离器的设计开发和操作运行都带有一定的半经验性. 随着计算机应用技术及计算流体力学的发展, 为进一步提高设计的水平和质量, 人们的研究重点已逐渐深入到流动细节的研究<sup>[2,3]</sup>. 而前人在对旋风分离器的流场进行数值模拟研究时, 对湍流模型的研究比较多<sup>[3,4]</sup>, 而对各种控制方程的离散方式对计算结果的影响的研究, 却鲜见详细的报道. 笔者利用 CFD 软件 FLUENT 对旋风分离器的流场进行数值模拟研究, 通过将不同湍流模型、不同离散方式下的数值模拟结果与前人实测结果对比, 确定出最适合旋风分离器内部流场的数值模拟计算方法, 为旋风分离器流场的数值模拟及进一步的结构优化设计提供了参考依据.

## 1 数学模型

目前, 工程上的模拟主要是应用湍流模型, 其基本出发点是利用某些假设, 将 Reynolds 时均化方程中的高阶湍流脉动关联项用低阶关联项或时

均量来表达, 从而使 Reynolds 时均化方程组封闭, 所采用的湍流模型基本上是围绕雷诺应力如何模拟而展开的. 一种方法是将湍流涡团的运动与分子的热运动进行类比, 认为湍流应力即雷诺应力的产生机制与分子粘性应力产生的机制相类似, 雷诺应力也和时均速度场的变形率呈线性关系, 从而引进了涡粘性或湍流粘性的概念, 这种模型被称为湍流粘性系数模型或涡粘性系数模型. 该类模型求解简单, 计算容易收敛, 但它是以湍流各向同性为基础的. 另一种方法是直接寻找雷诺应力的输运微分方程, 即对雷诺应力进行直接模拟, 这种模型被称为雷诺应力模型(RSM). 该模型理论上较为完备, 可以较好的模拟湍流各向异性<sup>[3]</sup>.

针对旋风分离器内三维强旋转、且具有明显各向异性的湍流的特点, 本文作者利用计算流体力学软件 FLUENT, 并分别采用  $k-\epsilon$  标准模型、 $RNGk-\epsilon$  模型和 RSM 湍流模型来模拟旋风分离器的流场, 以寻找更科学合理的适用于旋风分离器的流场数值计算方法.

## 2 数值模拟

### 2.1 几何模型

笔者采用的旋风分离器的几何模型的结构如图 1 所示<sup>[4]</sup>, 其基本几何参数为:  $a = 95 \text{ mm}$ ,  $b = 38 \text{ mm}$ ,  $D = 190 \text{ mm}$ ,  $h = 285 \text{ mm}$ ,  $B = 72.5 \text{ mm}$ ,  $D_e$

收稿日期: 2004-11-10; 修订日期: 2005-01-10

基金项目: 河南省自然科学基金资助项目(0311022000)

作者简介: 魏新利(1956-), 男, 河南省辉县人, 郑州大学教授, 博士, 主要从事高效节能过程设备研究与开发.

$=64\text{ mm}, H=760\text{ mm}, S=95\text{ mm}.$

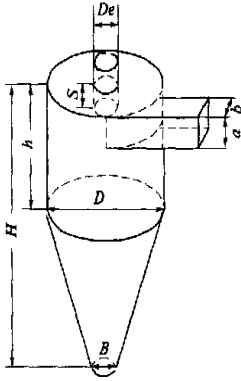


图 1 旋风分离器几何结构

Fig. 1 The configuration of cyclone separator

为了使数值模拟更接近实际情况,应将灰斗也包含在模型计算域之内.该模型的灰斗直径为 150 mm,圆锥段长 50 mm,圆柱段长 100 mm.另外,将排气管外露管段长定为 100 mm.

2.2 网格划分

网格的生成在流场数值模拟中属于前处理过程.网格质量的好坏,对模拟结果至关重要.针对旋风分离器内部流场的特性,将计算域进行区域离散化,生成三维的分区组合网格.利用边界层网格控制横截面上的面网格分布,使得网格分布与计算域的几何形状相一致,这样,能较好的捕捉边界特征,从而能够很好的给出边界信息.另外,通过控制各个边界上的网格节点分布生成非均匀网格,以使得在某些局部敏感区域和某些速度梯度过大的区域网格分布较密集,如近轴区和近壁区,其它区域网格分布可较稀疏.

利用网格生成软件 Gambit 2.1.6 进行前处理,将整个计算域分成 5 个子区域,即进口段、出口段、环形空间、圆柱段分离空间和其余空间,共划分了 344 148 个非均匀的六面体网格单元<sup>[9]</sup>.这样生成的网格,既可完整地描述流场特征,又能减少划分的网格数,减少计算内存和提高计算速度.

2.3 边界条件

(1) 入口边界:气相流体采用常温状态下的空气;因入口气流的湍流已经充分发展,故直接给出入口截面法向时均速度值,入口气流速度为 7.5 m/s;入口湍流指定方法为指定湍流强度  $I$  和水力直径  $D_H$ ,其中入口湍流强度  $I = \frac{u}{u_{avg}} = 0.16$ . ( $Re_{jin}$ )<sup>-1/8</sup>,  $u, u_{avg}, Re_{jin}$  分别表示入口湍流的平均脉动速度、主流速度和雷诺数.

(2) 排气口边界:假设出口处湍流流动已达充分发展状态,即各个变量  $\Phi$  的法向梯度为零.

这种处理方法对出口截面的选择要求比较高,为此,在计算中将出口管段适当加长,以保证湍流充分发展条件的成立.

(3) 排尘口边界:采用广大学者广泛采用的方法,即假设没有气流从排尘口流出,故设气流流通量为零.为了减少误差,将灰斗也包含在计算域之内,灰斗最底端面设为排尘口边界.

(4) 固壁边界:壁面采用无滑移边界,默认壁面粗糙度为 0.5.壁面效应是旋涡和湍流的主要来源,因此近壁区的处理对数值计算结果的准确性有显著影响.在此,采用标准壁面函数法处理边界湍流,以给出正确的壁面切应力.

2.4 数值解法

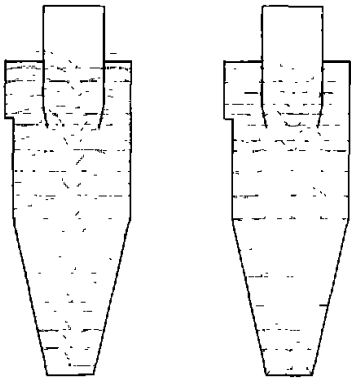
笔者采用控制容积法(有限体积法)对各控制方程进行离散,为了考察各种差分格式在该模型中的适用性,我们分别采用对流项的一阶迎风格式、二阶迎风格式和 QUICK(Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics)格式进行数值计算,并加以比较,而压力梯度项的插补分别采用 Standard、BFW(Body Force Weighted)和 PRESTO(PREssure STaggering Option)格式进行计算比较.模型的数值求解算法是采用非交错网格的 SIMPLEC<sup>[7]</sup>(Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations Consistent)算法,使用压力和速度之间的相互校正关系来强制质量守恒并获取压力场.

3 结果与讨论

旋风分离器内的流场比较典型,基本特征也比较明显.大量文献中的实测结果都表明<sup>[4,8,9]</sup>:旋风分离器内的切向速度分布呈双涡结构,以最大切向速度值为界,外部是准自由涡,中心是准强制涡;轴向速度分布以零轴速包络面为界,外部是下行流,中心是上行流,又由于轴心处有滞留或回流现象,分布出现低谷.图 2 所示是文献<sup>[8]</sup>中实验测得的轴截面上的速度分布.本文作者将以此为依据来判断所采用的数值计算方法的可行性和可靠性,以排气管下分离空间内某一位置的速度分布为代表进行分析研究.

3.1 湍流模型的评价

如图 3 所示,在切向速度的分布中,标准  $k-\epsilon$  模型的结果过分夸大了中心似固核涡——准强制涡的范围,抑制了外面位涡——准自由涡的出现;RNG  $k-\epsilon$  模型和 RSM 湍流模型都给出了较好的涡的分布.在轴向速度  $U_a$  的分布中,标准  $k-\epsilon$  模型和 RNG  $k-\epsilon$  模型都没有给出旋风分离



(a) 切向速度分布                      (b) 轴向速度分布

图 2 切向和轴向速度分布

Fig.2 The distribution of tangential velocity and axial velocity  
器中心轴向速度的低谷现象,其中RNGk-ε模型的结果最为失真——在中心处预报出了很大的轴向速度,正、负号仅代表方向,模型取向向下为轴正向,即下行流方向为正方向。只有RSM模型很好的预报出了中心轴向速度的低谷现象。因此,基于各向同性的标准k-ε模型和RNGk-ε模型在预报强旋转条件下的涡结构时不准确,只有基于各向异性的RSM模型才能较好的预报切向速度的双涡结构和强旋转下的滞留或回流现象,将它应用于旋风分离器的数值模拟是可行的。

3.2 差分格式的评价

如图 4 所示,在切向速度  $u_t$  分布中,一阶迎

风格式(first)的预报结果明显不好,没有给出外部自由涡的合理分布;而二阶迎风格式(second)和QUICK差分格式由于具有较高的计算精度,都模拟出了切向速度的双涡分布。在轴向速度  $u_a$  的分布中,一阶迎风格式和二阶迎风格式的模拟结果比较接近,都没有模拟出中心轴向速度分布的低谷现象,只有QUICK差分格式模拟出了中心轴向速度的低谷分布。因此,在各种差分格式中,一阶迎风格式不能用于旋风分离器这种复杂流场的模拟;二阶迎风格式只能在某些方面给出好的结果,在另一些方面却远偏离实际情况;只有QUICK差分格式能准确的模拟旋风分离器内的流场。

3.3 压力插补格式的评价

如图 5 所示,在切向速度  $u_t$  分布中,Standard格式和BFW格式的结果比较差,只是大致给出了中心准强制涡的结构,却都没有预报出外部准自由涡结构;PRESTO格式给出了较好的切向速度分布,模拟出了中心的准强制涡和外部的准自由涡。在轴向速度  $u_a$  的分布中,只有PRESTO格式预报结果比较合理,模拟出了中心轴向速度的低谷现象。Standard格式和BFW格式都没有模拟出中心轴向速度的低谷现象。因此,对于旋风分离器内部复杂流场的数值模拟,压力梯度项的插补采用PRESTO格式能够得到比较合理的预报结果。

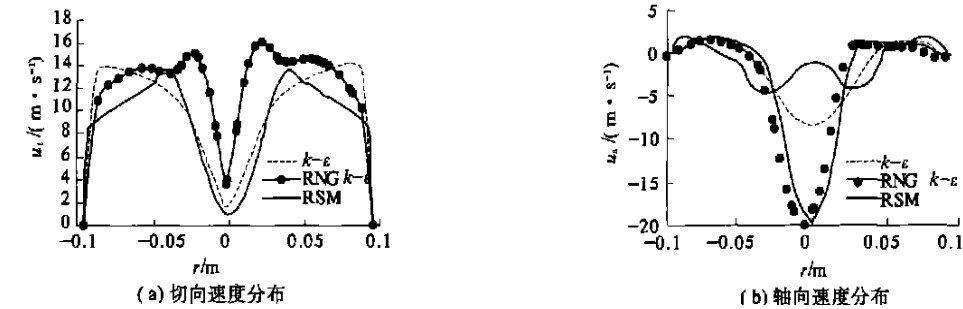


图 3 不同湍流模型的模拟结果

Fig.3 The distribution result of different turbulent models

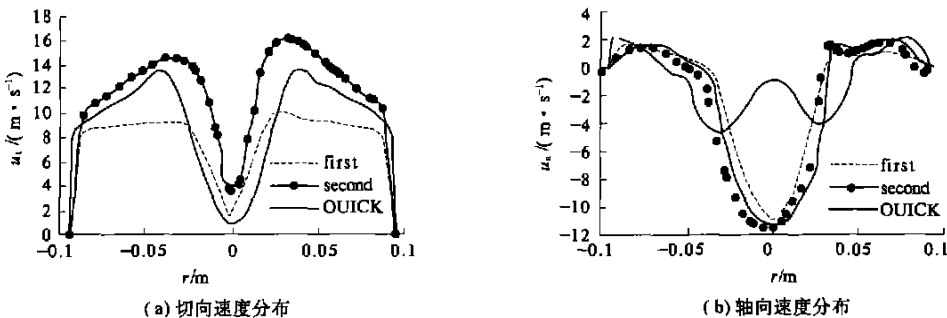


图 4 不同差分格式的模拟结果

Fig.4 The simulated result of different difference schemes

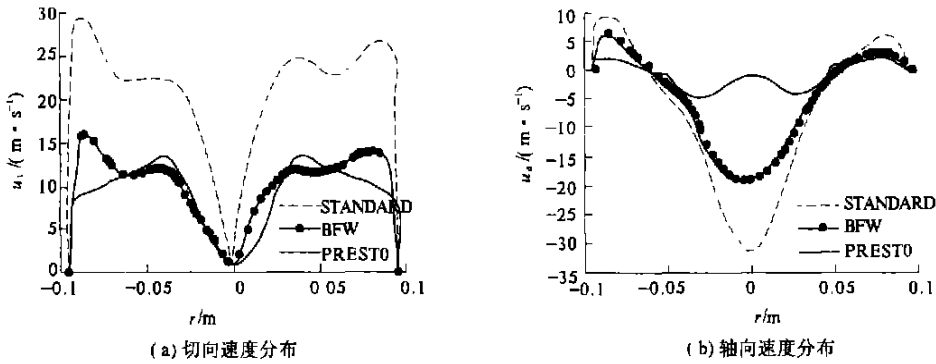


图 5 不同压力插补格式的模拟结果

Fig. 5 The simulated result of different pressure interpolation schemes

4 结论

(1) 基于各向同性的标准  $k-\epsilon$  模型模拟的切向速度和轴向速度分布均与前人实测结果存在明显偏差; RNG  $k-\epsilon$  模型模拟的切向速度分布与前人实测结果较为一致, 而轴向速度分布则不一致; 基于各向异性的 RSM 湍流模型模拟出的两个速度分布均与前人实测结果较为一致.

(2) 对流项的一阶迎风格式对两个速度分布的预报结果较差; 二阶迎风格式对切向速度分布的预报结果较好, 但是仍无法模拟强旋转下的轴向回流现象; QUICK 差分格式模拟出的两个速度分布较为符合前人实测结果.

(3) 压力梯度项的 Standard 格式和 BFW 格式对两个速度分布的预报结果均较差, 只有 PRESTO 格式的模拟结果较为理想, 能合理地反映出实际流场的基本特征.

参考文献:

[1] 刘金红. 旋风分离器的发展与理论研究现状[J]. 化

工装备技术, 1998, 19(5): 49~50.

[2] BOYSAN F, SWITENBANK J. A fundamental mathematical modeling approach to cyclone design[J]. Trans Inst Chem Eng, 1982, 60: 222~230.

[3] 陈雪莉, 周增顺, 吕术森, 等. 一种新型旋风分离器的流场与结构[J]. 华东理工大学学报, 2003, 29(4): 416~419.

[4] 王海刚, 刘石. 不同湍流模型在旋风分离器三维数值模拟中的应用和比较[J]. 热能动力工程, 2003, 18(4): 337~342.

[5] 李振国. 除油型水力旋流分离器内部流场的数值计算[D]. 大连: 大连理工大学, 2002: 11~15.

[6] 魏新利, 张海红, 王定标. 旋风分离器内颗粒轨迹的数值模拟[J]. 郑州大学学报(工学版), 2004, 25(3): 14~17.

[7] VANDOORMAAL J P, RATHBY G D. Enhancements of the SIMPLE method for predicting incompressible fluid flows[J]. Numer Heat Transfer, 1984, 7: 147~163.

[8] 时钧, 汪家鼎, 余国宗, 等. 化学工程手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 1996.

[9] 庞磊. 旋风分离器芯管结构形式优化的初步研究及性能计算[D]. 北京: 石油大学, 2001.

Numerical Method of the Flow Field in a Cyclone Separator

WEI Xin-li<sup>1</sup>, ZHANG Hai-hong<sup>2</sup>, WANG Ding-biao<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; <sup>2</sup>Department of Mechanical and Electrical Engineering, Henan University of Technology, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** The flow field in a cyclone separator is simulated with the software of computational fluid dynamics — FLUENT, using different turbulent models and difference schemes. The numerical method suitable for cyclone separator has been ascertained by comparing the simulated results with experimental results. The results indicate that the flowfield can be well simulated by adopting the anisotropy Reynolds stress model, the QUICK scheme and the PRESTO scheme. The results provides reference for the numerical simulation of flowfield and the optimizing design of the cyclone separator.

**Key words:** cyclone separator; numerical simulation; turbulent model; difference scheme