

旋风分离器两相三维流场仿真

高印寒¹,陈王锋²,程 鹏¹,李振雷²,池俊成³,李 强³

(1. 吉林大学 测试科学实验中心,长春 130022;2. 吉林大学 机械科学与工程学院,长春 130022;3. 中国人民解放军装甲兵技术学院 车辆工程系,长春 130052)

摘要:使用商业 CFD 软件 STAR-CD,建立了排气管插入深度不同的三种切向进口式旋风分离器内部流场 $k-\epsilon$ 双方程湍流模型,对切向进口式旋风分离器内部流场进行了模拟。通过分析排气管插入深度对旋风分离器流场的影响,得出了旋风分离器中的压力和速度分布,以及粒径为 $20 \mu\text{m}$ 和 $2 \mu\text{m}$ 的 SiO_2 尘粒运动轨迹,为旋风分离器的设计和优化提供了重要的理论依据。

关键词:工程热物理;旋风分离器;两相三维流场;湍流模型;尘粒轨迹

中图分类号:TK413.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2008)Sup.-0085-05

Two-phase three dimension flow field simulation in a cyclone separator

Gao Yin-han¹,Chen Wang-feng²,Cheng Peng¹,Li Zhen-lei²,Chi Jun-cheng³,Li Qiang³

(1. Center of Test Science and Experiment, Jilin University, Changchun 130022, China; 2. College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China; 3. College of Automotive Engineering, Academy of Armored Force Technology of PLA, Changchun 130052, China)

Abstract: The $k-\epsilon$ double equation turbulent flow model of three cyclone separators with different inserting depth of vent-pipe was built using commercial computational fluid dynamics (CFD) software STAR-CD, and the flow field in the cyclone separators was simulated. Through analyzing the effects on the flow field in the three cyclone separators, which is with different dimension vent-pipe. The distribution of pressure and velocity, and moving track of SiO_2 particles with dimension of $20 \mu\text{m}$ and $2 \mu\text{m}$ in the cyclone separators were obtained, which is an significant theoretic reference for cyclone separator design and optimization.

Key words: engineering thermophysics; cyclone separator; two-phase three dimension flow field; turbulent flow model; particle track

旋风分离器内部的分离、收集过程是一个非常复杂的三维、两相湍流运动,至今仍无法全面掌握旋风滤清除尘装置气体和尘粒的运动规律,这给理论和实验研究带来了很大的困难^[1]。

虽然对于旋风分离器的流场和尘粒的运动轨迹已有一些研究^[2-4],但是两相三维流场研究较

少,而且通过数值模拟得出的尘粒轨迹并没有考虑气流湍流脉动的影响,也没有得出集尘斗内尘粒的轨迹。因此,通过模拟分析旋风分离器内部的两相三维流场,找出其中气、固两相的运动规律,对于旋风分离装置的设计、改进以及与其他分离器组合结构的设计有重大意义。

收稿日期:2007-04-25.

基金项目:吉林省科技发展计划项目(20030527);吉林省科技发展计划重点项目(20060315).

作者简介:高印寒(1951-),男,教授,博士生导师. 研究方向:虚拟制造. E-mail:yinhan@jlu.edu.cn

1 流场模型及边界条件

1.1 流场模型

本文取圆柱筒体直径 $D_0 = 160 \text{ mm}$, 按照整体结构尺寸较小的 Buell 旋风分离器设计比例, 设计出了排气管插入深度 $h_c = 0.482D_0 \approx 80 \text{ mm}$ 的旋风分离器(如图 1), 并建立了流场模型, 流场模型图和网格划分图如图 2、图 3 所示。由于常用旋风分离器的设计比例为 $h_c = (0.3 \sim 0.75) D_0$, 故本文在不改变其他结构参数的条件下, 取 $h_c = 0.75D_0 = 120 \text{ mm}$ 及 $h_c = 200 \text{ mm}$ (排气管下沿接近圆台部分上沿时)建立流场模型, 模型图及网格划分图与图 2、图 3 相似, 见文献[5], 这里不再赘述。

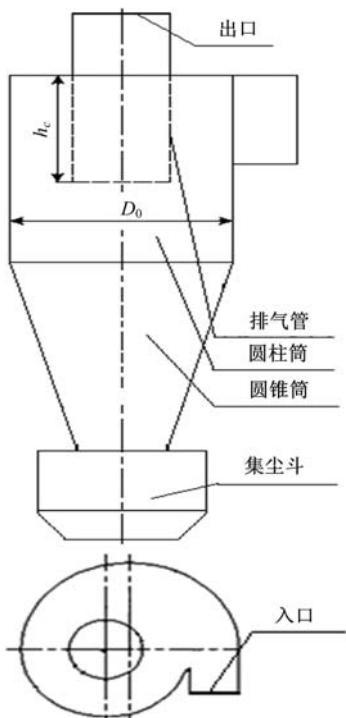


图 1 旋风分离器的结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of cyclone separator

1.2 边界条件

温度为 297 K, 气体和尘粒的入口初始速度: (模型中入口速度方向为 +y 向), 即 $u=0 \text{ m/s}$, $v=20 \text{ m/s}$, $w=0 \text{ m/s}$ 。

气相: 入口处空气压力为 $1 \times 10^5 \text{ Pa}$, 密度为 1.205 kg/m^3 , 分子黏度为 $1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 比热为 $1006.0 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, 热传导率为 $2.637 \times 10^{-2} \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。

固相: SiO_2 颗粒粉尘, 密度为 $2.64 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 质量流量为 $2.25 \times 10^{-5} \text{ kg/s}$, 粒径分别取为

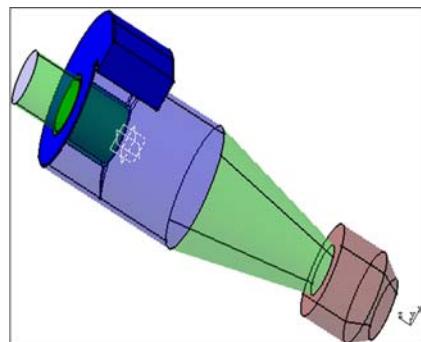


图 2 流场模型 ($h_c = 80 \text{ mm}$)

Fig. 2 Model of flow field ($h_c = 80 \text{ mm}$)

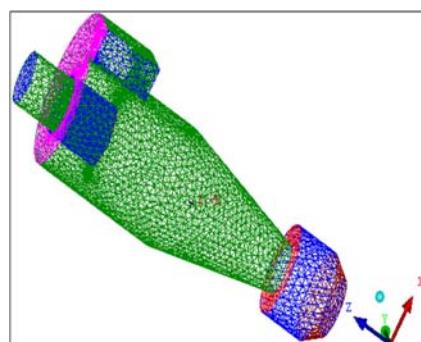


图 3 流场网格模型 ($h_c = 80 \text{ mm}$)

Fig. 3 Mesh of flow field ($h_c = 80 \text{ mm}$)

$20 \mu\text{m}$ 和 $2 \mu\text{m}$ 。

壁面: SiO_2 颗粒黏性较小, 因此, 壁面采用无滑移条件, 弹性起主导作用。

假设气、固两相流为三维不可压缩流体, 雷诺数计算公式^[6]为

$$Re = \frac{\rho H v}{\mu} \quad (1)$$

将流体密度 $\rho = 1.205 \text{ kg/m}^3$, 入口高度 $H = 0.1 \text{ m}$, 入口速度 $v = 20 \text{ m/s}$, 分子黏度 $\mu = 1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 代入式(1)可得, $Re = 1.33 \times 10^5$ 。显然, 本文中的空气流动模式属于高湍流。

采用基于有限容积算法的通用流体计算软件 STAR-CD^[7,8]进行流场仿真。基于各向同性的标准 $k-\epsilon$ 双方程模型, 适合用于高雷诺数的湍流流动区域。颗粒在气、固两相流中的存在可以用欧拉法和拉格朗日法来描述。拉格朗日法可模拟很多离散单颗粒的运动轨迹, 并通过统计平均求得有关的固相参数。因此, 本文选用双方程的 $k-\epsilon$ 高雷诺数湍流稳态模型, 应用拉格朗日法进行计算。

湍流动能 k 和湍流动能耗散率 ϵ 的计算公式^[9]为

$$k = 0.05 v^2 \quad (2)$$

$$\epsilon = C_\mu^{0.75} \times \frac{k^{1.5}}{0.03 D_0} \quad (3)$$

将入口速度 $v=20$ m/s、无量纲系数 $C_\mu=0.09$ 、旋风滤清装置筒体直径 $D_0=0.16$ m 代入式(1), (2)可得, $k=20$, $\epsilon=3054.5$ 。

2 仿真结果及分析

2.1 压力分布图

三种旋风分离器中,过排气管轴心并平行于入口平面的压力切片图($-y$ 向视图)如图4所示。由压力切片图可以看出,分离器上部进口蜗旋部分压力最大,出口处压力最小;集尘斗内压力分布均匀;圆柱和圆锥区域中,靠近壁面区域的压力普遍小于内部区域的压力;而在排气管中,正好相反,靠近壁面区域的压力普遍大于内部区域的压力。随着排气管插入深度的增加,大面积高压区域向下移动。而旋风分离器的阻力为进出口的

压力差,即

$$\Delta p = p_{\text{outlet}} - p_{\text{inlet}} \quad (4)$$

由图4可得出三种不同旋风分离器内的阻力分别为1070 Pa、1155 Pa、1350 Pa。显然,这种结构旋风分离器内的阻力随着排气管插入深度的增加而逐渐增大。

2.2 uvw 合速度矢量图

过排气管轴心并平行于入口平面的 uvw 合速度矢量切片图($-y$ 向视图)如图5所示。可以看出,三种分离器的入口和排气管下沿交汇处都没有出现短路流。空气在排气管入口处速度最高,在集尘斗内速度最低。随着排气管插入深度的增加,集尘斗内大部分区域的速度升高;图5(a)中,在集尘斗内, xy 切面上出现绕 y 轴逆时针方向旋转的偏心涡流。图5(c)中,在集尘斗内, xy 切面上出现绕 y 轴顺时针方向旋转的偏心涡流。图5(b)中,在集尘斗内,流体在 xy 切面上没有出现涡流。

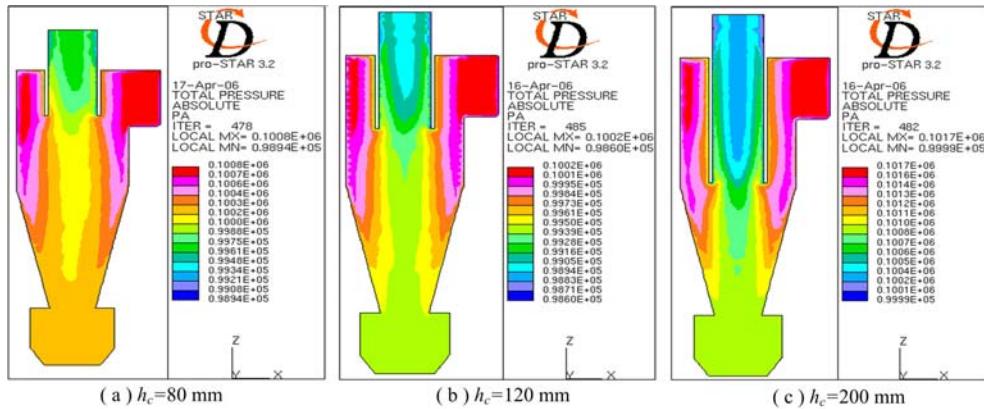


图4 流场压力切片图

Fig. 4 Pressure distribution on the slice of the flow field

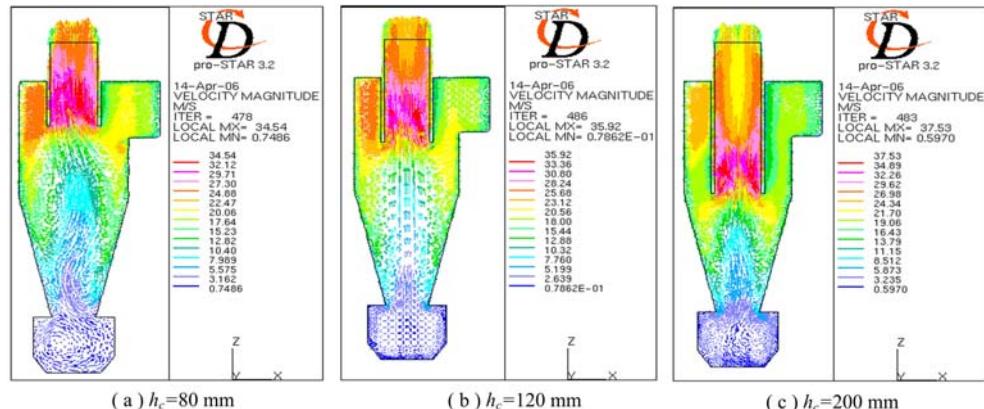


图5 流场 uvw 合速度矢量切片图

Fig. 5 Resultant of uvw velocity vector on the slice of the flow field

2.3 尘粒运动轨迹图

(1) 粒径 $d_p = 20 \mu\text{m}$ 的少量尘粒在不同 h_c 的三种旋风分离器中的典型轨迹图如图 6 所示。可以看出,这三种分离器都能滤除粒径为 $20 \mu\text{m}$ 的尘粒。在 $h_c=80 \text{ mm}$ 分离器中,出现两种典型

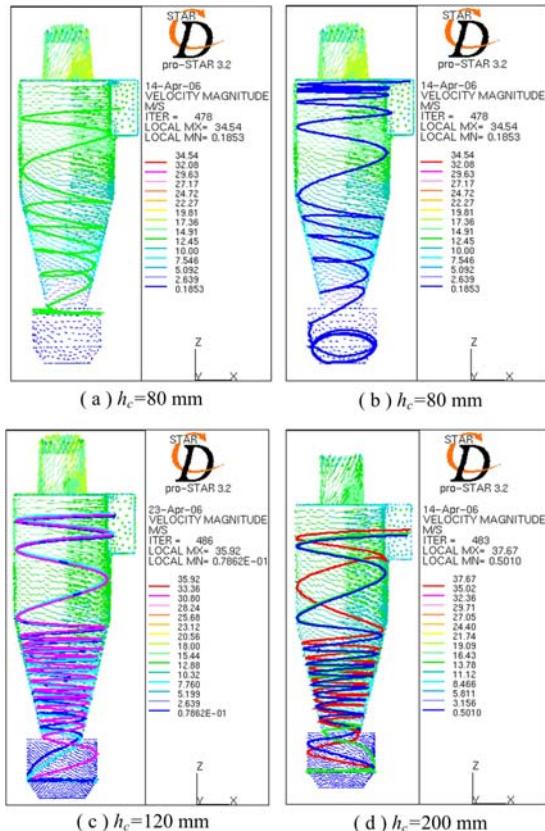


图 6 尘粒在流场中的运动轨迹

Fig. 6 Moving track of particles in the flow field

的尘粒运动轨迹,如图 6(a),(b)所示。而 $h_c=120 \text{ mm}$ 和 $h_c=200 \text{ mm}$ 分离器中,各有一种典型的尘粒运动轨迹,如图 6(c),图 6(d)所示。而且尘粒运动规律相似,最终都沿集尘斗圆台的上沿在 xy 平面上作平面圆周运动。

(2) 粒径 $d_p=2 \mu\text{m}$ 的少量尘粒在不同 h_c 的三种旋风分离器中的典型轨迹分别见图 7、图 8 和图 9 所示。

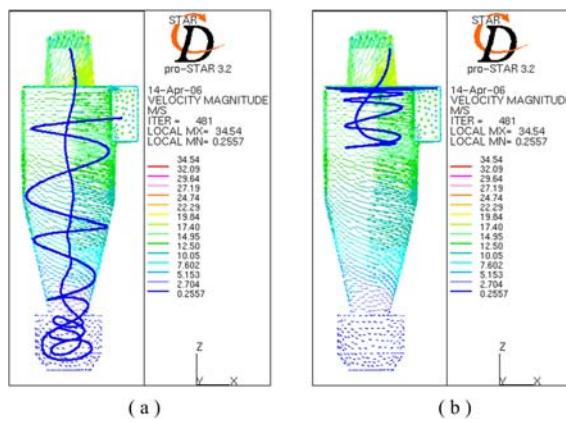


图 7 尘粒在流场中的运动轨迹($h_c=80 \text{ mm}$)

Fig. 7 Moving track of particles in the flow field
($h_c=80 \text{ mm}$)

可以看出,入口位置的不同,尘粒的运动轨迹也不同。随着尘粒从入口上沿往下沿的移动,尘粒运动轨迹的最低位置也随着向下移动,在分离器中的运动时间也随之增加,但 $2 \mu\text{m}$ 的尘粒最终都随气流从排气管排出。

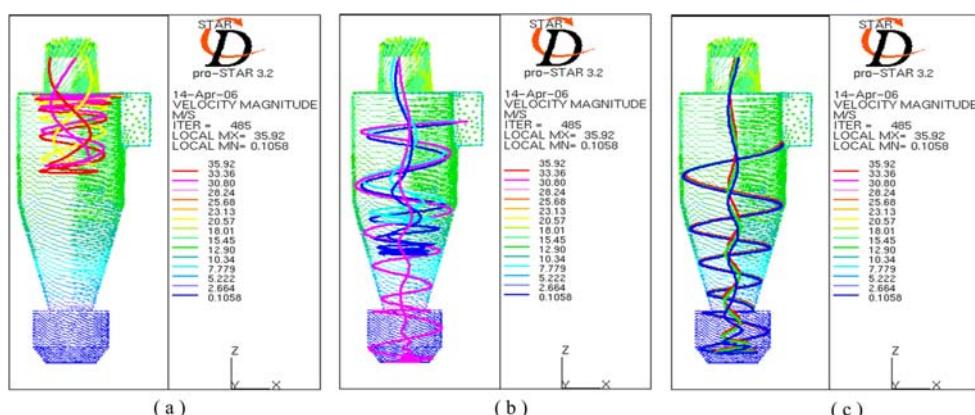


图 8 尘粒在流场中的运动轨迹($h_c=120 \text{ mm}$)

Fig. 8 Moving track of particles in the flow field($h_c=120 \text{ mm}$)

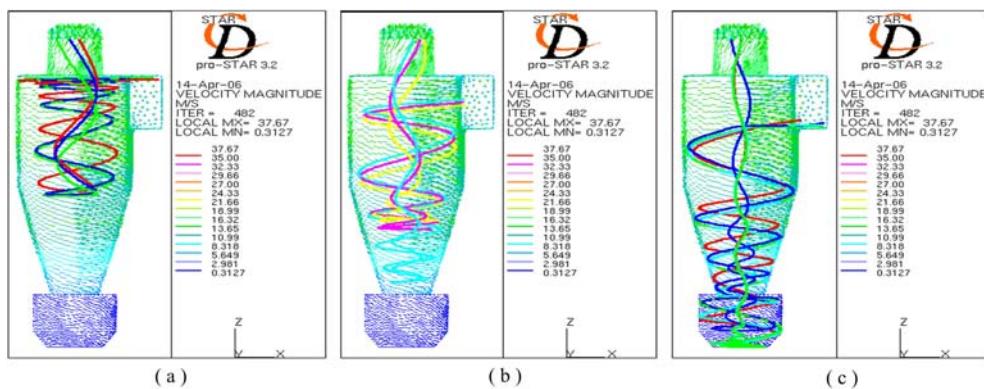


图 9 尘粒在流场中的运动轨迹($h_c=200$ mm)

Fig. 9 Moving track of particles in the flow field($h_c=200$ mm)

3 结 论

(1) 旋风分离器的阻力随着排气管插入深度的增加而逐渐增大。

(2) 虽然 $h_c=80$ mm 的旋风分离器入口下沿低于排气管入口下沿,但是在旋风分离器入口与排气管入口交汇区域,气流并没有出现严重的短路流。随着排气管插入深度的增加,集尘斗内大部分区域的速度随之上升。排气管插入深度的变化可能导致集尘斗内的气流出现偏心涡流。

(3) 三种分离器都能滤除粒径 $d_p=20\ \mu\text{m}$ 的尘粒。而且,适宜的排气管插入深度可以使 $d_p=20\ \mu\text{m}$ 尘粒在平行于集尘斗底面的平面上作平面圆周运动而不飞出。但是,三种分离器对于粒径 $d_p=2\ \mu\text{m}$ 的尘粒很难滤除,尘粒即使进入集尘斗也可能再次飞出,即二次扬尘。

(4) 从进气口不同位置进入旋风分离器的尘粒,随着进入位置从入口上沿向入口下沿的移动,尘粒运动轨迹的最低位置也随着向下移动,在分离器中的运动时间也随之增加。在旋风分离器的设计中,如果集尘斗内设置合理的抑尘装置而使进入集尘斗的灰尘立即被收集,那么,适当下调进气口的位置,有利于提高旋风分离器捕集细尘的效率。

参考文献:

[1] 唐敬麟,张禄虎. 除尘装置系统及设备设计选用手册 [M]. 北京:化学工业出版社,2004.

[2] 陈海娥,李康,刘金玉,等. 旋风除尘 CFD 分析[J]. 汽车技术,2003(4):13-16.

Chen Hai-e, Li Kang, Liu Jin-yu, et al. CFD analysis of cyclone dust removal[J]. Automobile Technology, 2003(4):13-16.

[3] 李济吾,蔡伟建. 旋风静电除尘器单相三维流场数值模拟[J]. 化工学报,2005,56(8):1433-1438.

Li Ji-wu, Cai Wei-jian. Numerical simulation of flow field in cyclone with electrostatic excitation[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2005,56(8):1433-1438.

[4] 吴小林,时铭显. 旋风分离器内颗粒运动规律的数值模拟[J]. 化工机械,1994, 21(6):333-336.

Wu Xiao-lin, Shi Ming-xian. Numerical simulation of particle motion laws in cyclones[J]. Chemical Engineering & Machinery, 1994,21(6):333-336.

[5] 陈王锋. 旋风静电空气滤清器的设计及流场仿真 [D]. 长春:吉林大学机械科学与工程学院, 2006.

Chen Wang-feng. Design & flow field simulation of a cyclone electrostatic air filter [D]. Changchun: College of Mechanical Science and Engineering, Jilin University, 2006.

[6] [STAR-CD Tutorial Manual Tutorial 1~Tutorial 10 Version 3.22]. CD adapco Group, 2004.

[7] [STAR-CD User Guide Version 3.22]. CD adapco Group, 2004.

[8] [STAR-CD Methodology Version 3.22]. CD adapco Group, 2004.

[9] Patankar Suhas V. Numerical Heat Transfer and Fluid Flow[M]. Amsterdam: John Benjamins Publishing Company, 1980.