

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2014.11.004

# 旋风分离器在不同工况下分离效率的仿真分析

吕 智, 吴晓明\*

(厦门大学 机电工程系, 福建 厦门 361005)

**摘要:** 针对旋风分离器的适用性问题, 研究了不同工况条件下各工作参数对分离效率的影响。选择了环境参数为固体颗粒粒径和密度, 分离器工作参数为进口速度, 基于 FLUENT 运用 RNG  $k-\epsilon$  模型模拟旋风分离器内气相紊流, 采用了离散相模型(DPM)模拟固相流场颗粒轨迹。由于粒径、密度和进口速度分别变化具有多种组合, 为此引入了正交试验法以图减少仿真的次数。讨论了在不同颗粒粒径和颗粒物密度条件下旋风分离器的进气口速度与分离效率之间的关系。研究表明, 在不同工作环境下旋风分离器工作参数对分离效率有着重要的影响。

**关键词:** 旋风分离器; 离散相模型; 正交试验法

中图分类号: TH111; TH122

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2014)11-1390-06

## Simulation analysis of separation efficiency of cyclone separator under different conditions

LV Zhi, WU Xiao-ming

(Department of Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

**Abstract:** Aiming at the cyclone separator's applicability, the separation efficiency affected by working conditions was studied. The solid particle size and density were selected as environment parameters and the inlet velocity as working parameters. Based on FLUENT, the RNG  $k-\epsilon$  model and discrete phase model(DPM) were used to simulate the turbulent flow of gas phase and particle trajectory of solid phase respectively in cyclone separator. Because the particle size, density and inlet velocity change respectively will produce a variety of combinations, the orthogonal test method was introduced to reduce the number of simulation. The relationship between the cyclone separator inlet velocity and separation efficiency was discussed under different particle size and density. The results indicate that working parameters of cyclone separator has significant influence on the separation efficiency in different environment.

**Key words:** cyclone separator; discrete phase model(DPM); orthogonal test

## 0 引 言

旋风分离器利用气-固两相流旋转运动,使固体颗粒在离心力作用下从气流中分离出来,其具有结构简单、造价低廉及维修方便等优点,被广泛应用于石油化工、煤炭等领域<sup>[1]</sup>。早期旋风分离器的研究基于颗粒动力学方程的解析理论<sup>[2]</sup>或者实验研究总结分离效率及压降的半经验公式<sup>[3]</sup>。随着计算科学的发展,以多相流体动力学为基础的数值模拟在旋风分离器的

研究中占有重要的地位。基于数值模拟的分离器筒体长度<sup>[4]</sup>、入口结构<sup>[5]</sup>和排尘结构<sup>[6]</sup>的变化对分离效率的影响以及结构参数优化业界已经有较多的讨论与研究,但针对某种固定旋风分离器结构,其在不同工作环境和参数下的分离效率讨论较少,而这方面的研究对于分离器的适用性,以及对可控工作参数进行调整以提高分离效率具有较为重要的指导意义。

本研究讨论的工作环境为固相颗粒半径、密度,分离器可控工作参数为入口速度共 3 个变化参数,运用

收稿日期: 2014-06-12

作者简介: 吕 智(1987-),男,湖北黄梅人,主要从事结构动力学方面的研究。E-mail: lvzhi.2000@163.com

通信联系人: 吴晓明,男,博士,副教授。E-mail: xmwxm@xmu.edu.cn

FLUENT 数值模拟旋风分离器内固相颗粒的运动轨迹并进而研究旋风分离器分离效率。由于 3 个参数在一定范围变化构成相对较多的变化组合,为此本研究引入正交试验法,将仿真模拟计算次数控制在一个合理范围,在此基础上分析所得到的数值模拟数据,讨论固相颗粒半径、密度和入口速度对分离效率的影响,为分离器的适用性以及在不同工作环境下工作参数的选择提供依据。

## 1 模型的建立

### 1.1 数学模型的选择

旋风分离器中气相旋流数值模拟的计算模型主要有标准  $k-\varepsilon$  模型、RNG 模型<sup>[7]</sup>、雷诺应力模型(RSM)<sup>[8]</sup>以及代数应力模型(ASM)<sup>[9-10]</sup>。标准  $k-\varepsilon$  模型具有简单、计算速度快等优点,但是它基于各向同性假设,对于各向异性湍流的强湍流分离器流场的模拟偏差较大。代数应力模型(ASM)虽然能够模拟湍流各向异性,但是对各向异性特征的描述能力有限。RSM 模型适合求解各向异性湍流运动且与试验值吻合较好,但是该模型对计算机硬件配置要求高,计算时间长而且难以收敛。Ma 等人<sup>[11]</sup>对上述几种湍流模型的对比讨论发现,RNG  $k-\varepsilon$  模型计算精度较好,计算方法比较简单,在模拟强旋流场具有优越性;文献[12-13]对传统的上排气旋风分离器运用 RNG  $k-\varepsilon$  模型进行流场的数值计算,并且将结果与实验结果对比,表明 RNG  $k-\varepsilon$  模型能够较好地模拟旋风分离器内的气相流动特性。因此本研究采用 RNG  $k-\varepsilon$  双方程湍流模型进行模拟。

RNG  $k-\varepsilon$  湍流模型的控制方程<sup>[14]</sup>:

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - \rho \varepsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho U_j \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \frac{\mu_{\text{eff}}}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + \rho \left( C_{\varepsilon 1} G_k - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} \right) \quad (2)$$

耗散方程中:

$$C_{\varepsilon 1} = 1.42 - \eta(1 - \eta/\eta_0) / 1 + \beta\eta^3 \quad \eta = Sk/\varepsilon \quad S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}} \quad \eta_0 = 4.28 \quad \beta = 0.015 \quad C_{\mu} = 0.085 \quad C_{\varepsilon 2} = 1.68 \quad \sigma_k = 0.7179 \quad \sigma_\varepsilon = 0.7179$$

该模型与标准湍流模型的主要区别有:①方程中的常数使用理论推导而不是用实验方法确定;②耗散方程系数  $C_{\varepsilon 1}$  体现了平均应变率对耗散项的影响。

旋风分离器内固相相对于气相来说是非常稀疏的,所以本模拟采用 Euler-Lagrange 方法,固相颗粒采用随机轨道模型。颗粒在 Lagrange 坐标系下的运动方程为:

$$m \frac{du_p}{dt} = F_D + mg \quad (3)$$

式中:  $m$ —颗粒的质量,  $u_p$ —颗粒的速度,  $F_D$ —颗粒受

到的气相施加的流动阻力,  $g$ —重力加速度。

对于球型颗粒,阻力可表示为:

$$F_D = m \frac{18\mu}{\rho_p D_p^2} C_D \frac{R_{ep}}{24} (u - u_p) \quad (4)$$

式中:  $D_p$ —颗粒直径,  $\rho_p$ —颗粒密度,  $u$ —气相速度分量,  $\mu$ —气相分子粘性系数,  $R_{ep}$ —颗粒雷诺数。且:

$$R_{ep} = \frac{\rho D_p}{\mu} |u - u_p| \quad (5)$$

式中:  $C_D$ —阻力系数,一般表示为雷诺数的函数<sup>[15]</sup>:

$$C_D = a_1 + \frac{a_2}{R_{ep}} + \frac{a_3}{R_{ep}^2} \quad (6)$$

式中:系数  $a_1$   $a_2$   $a_3$ —由  $R_{ep}$  的范围决定。

### 1.2 物理模型

某种旋风分离器的结构如图 1 所示。该分离器由进气管道、上部圆柱形筒体、中部圆锥体、底部圆柱形收集腔和排气管道组成。

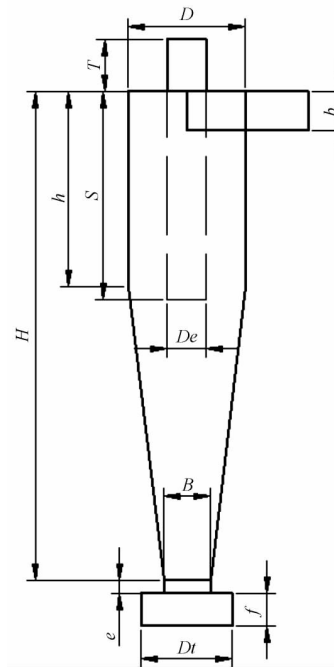


图 1 旋风分离器模型

分离器具体的模型尺寸如表 1 所示。

表 1 旋风分离器结构尺寸(单位:mm)

| D   | T  | S   | H   | h   | De | B  | Dt  | a  | b  | e  | f  |
|-----|----|-----|-----|-----|----|----|-----|----|----|----|----|
| 180 | 80 | 400 | 750 | 300 | 60 | 72 | 140 | 40 | 60 | 20 | 50 |

本研究利用 FLUENT 前处理软件 Gambit,建立旋风分离器几何模型,并对模型进行网格划分和边界条件的设置。首先将整个模型分成 6 个子块,然后利用 Cooper 方法生成非结构化网格,整个总网格单元数为 226 518 个,其中最大网格体积为  $2.78 \times 10^{-7} \text{ m}^3$ ,最小网格体积为  $2.67 \times 10^{-9} \text{ m}^3$ 。

旋风分离器计算网格如图 2 所示。



图 2 计算区域网格划分

### 1.3 边界条件

在该模拟中,边界条件采取如下设置:

(1) 入口边界。取入口为常温下的空气,密度为  $1.205 \text{ kg/m}^3$  黏度为  $1.81 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$  固体颗粒物流量为  $0.1 \text{ g/s}$  沿入口截面法向速度入口,湍流强度为 10%。

(2) 出口边界。此处设出口处流动已经充分发展,因此出口处为自由出口边界条件。

(3) 壁面边界。固体颗粒黏性较小,因此壁面采用无滑移边界条件,弹性起主导作用。

### 1.4 计算方法

本研究利用 RNG  $k-\varepsilon$  模型来进行稳态计算,差分格式采用 First Order Upwind 格式;压力梯度项插补格式采用适合高速旋转流动的 PRESTO 格式;计算方法采用能提高迭代收敛性的 SIMPLEC 算法。将连续性方程的收敛标准设置成  $10^{-5}$ ,其他方程设置成  $10^{-3}$ ,然后进行迭代计算。

## 2 数值仿真计算结果

以被分离的颗粒物密度为  $1500 \text{ kg/m}^3$ ,粒径为  $11 \mu\text{m}$  进口速度  $10 \text{ m/s}$  为例,本研究在 FLUENT 中模拟分离器中的流场和粒子轨迹,计算结果如下:

$X=0$  剖面上的切向速度分布云图如图 3 所示。切向速度在轴心处接近于 0。 $Z=0$  截面上的速度矢量图如图 4 所示。从图 4 中可以看出,在旋风分离器内部,气流大致可分为 2 个区域,即外旋转气流和内旋转气流。旋风分离器内粒子的运动轨迹图如图 5 所示。颗

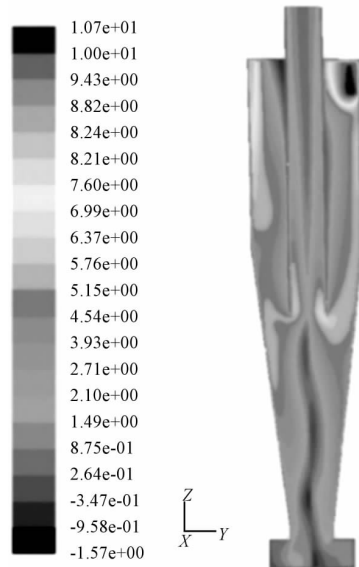


图 3  $X=0$  剖面上的切向速度分布

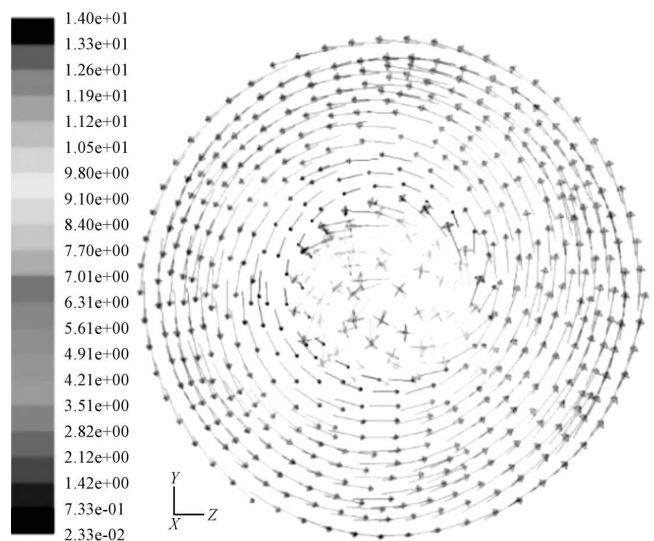


图 4  $Z=0$  圆柱和圆锥交界面上的速度矢量

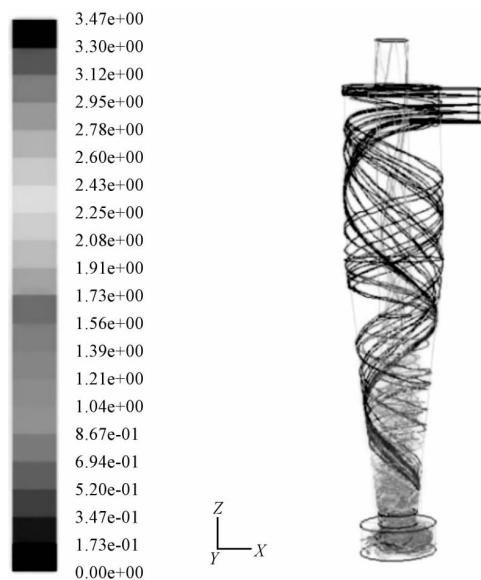


图 5 粒子运动轨迹

粒在旋风分离器中的运动状况非常复杂,且带有很大的随机性,其运动轨迹随着颗粒的进口速度、粒径的不同而不同。

$X=0$  剖面上压力分布云图如图 6 所示。从图中可以看出,剖面上压力由轴心向壁面方向不断增大,存在明显的径向梯度,这是由旋流中离心力造成的。

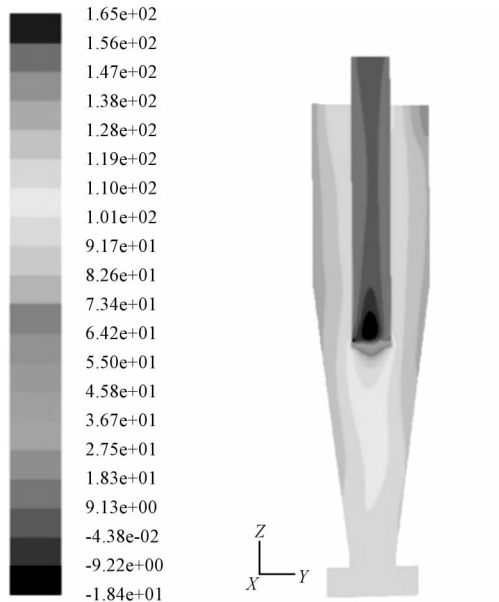


图 6  $X=0$  剖面上压力分布

通过追踪 480 个固体颗粒数,计算结果表明,被捕集腔捕获的颗粒数为 243 个,分离效率为捕集数与追踪总数之比,即在该条件下的分离效率为:  $\eta = 243 / 480 = 50.6\%$ 。

### 3 正交试验法分离效率研究

由于颗粒物密度、粒径、进口速度 3 个参数在一定范围变化构成相对较多的变化组合,为了减少数值模拟次数,本研究引入正交试验法。该方法的引入能将仿真模拟计算次数控制在一个合理范围内。

#### 3.1 正交试验法

正交试验法<sup>[16-17]</sup>是利用正交表科学地安排与分析多因素试验的方法,正交试验设计方法包括两个部分:试验设计和数据处理。试验设计首先挑选因素,确定水平,然后选正交表,进行表头设计,最后进行试验得出试验结果。

#### 3.2 因素水平确定

现对旋风分离器的分离效率进行仿真,进口速度有 6 m/s、8 m/s、10 m/s 3 个水平,需被分离的颗粒物密度和粒径分别有 1 500 kg/m<sup>3</sup>、2 000 kg/m<sup>3</sup>、2 500 kg/m<sup>3</sup>

和 5  $\mu\text{m}$ 、8  $\mu\text{m}$ 、11  $\mu\text{m}$  3 个水平,因素水平如表 2 所示。

表 2 因素水平

| 项目 | 因素                              |                                  |                           |
|----|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------|
|    | A 进口速度<br>/(m·s <sup>-1</sup> ) | B 颗粒密度<br>/(kg·m <sup>-3</sup> ) | C 颗粒粒径<br>/ $\mu\text{m}$ |
| 水平 | 1                               | 6                                | 1 500                     |
|    | 2                               | 8                                | 2 000                     |
|    | 3                               | 10                               | 2 500                     |

#### 3.3 合适正交表的选用

从因素水平表看,为 3 因素 3 水平,可选用  $L_9(3^4)$  正交表<sup>[18]</sup>。本研究选取前 3 列的水平组合作为本次试验的参数组合,总计试验次数 9 次。笔者在 FLUENT 中分别设置上述 9 组参数,作 9 次仿真分析,记录每次仿真的追踪颗粒数和捕集颗粒数,然后计算出捕集率。试验仿真结果如表 3 所示。

表 3 试验仿真结果

| 项目     | 因素                     |                         |                  | 捕集率/(%) |      |
|--------|------------------------|-------------------------|------------------|---------|------|
|        | A/(m·s <sup>-1</sup> ) | B/(kg·m <sup>-3</sup> ) | C/ $\mu\text{m}$ |         |      |
| 水<br>平 | 1                      | 1(6)                    | 1(1 500)         | 1(5)    | 17.3 |
|        | 2                      | 1(6)                    | 2(2 000)         | 2(8)    | 27.9 |
|        | 3                      | 1(6)                    | 3(2 500)         | 3(11)   | 58.8 |
|        | 4                      | 1(8)                    | 1(1 500)         | 2(8)    | 29.0 |
|        | 5                      | 2(8)                    | 2(2 000)         | 3(11)   | 61.1 |
|        | 6                      | 2(8)                    | 3(2 500)         | 1(5)    | 21.1 |
|        | 7                      | 2(10)                   | 1(1 500)         | 3(11)   | 50.6 |
|        | 8                      | 1(10)                   | 2(2 000)         | 1(5)    | 17.3 |
|        | 9                      | 1(10)                   | 3(2 500)         | 2(8)    | 44.6 |

#### 3.4 仿真结果分析

##### 3.4.1 用极差分析法分析因素的影响大小

设  $K_{jm}$  为第  $j$  列因素  $m$  水平所对应的试验指标之和,  $\bar{K}_{jm}$  是  $K_{jm}$  的平均值,  $R_j$  为第  $j$  列因素水平下的指标值的最大值与最小值之差:

$$R_j = \max(\bar{K}_{j1}, \bar{K}_{j2}, \dots, \bar{K}_{jm}) - \min(\bar{K}_{j1}, \bar{K}_{j2}, \dots, \bar{K}_{jm})$$

$R_j$  反映了第  $j$  列因素的水平变动时,试验指标的变动幅度,  $R_j$  值越大,说明该因素对试验指标的影响越大。

极差计算结果如表 4 所示。

表 4 实验数据极差分析表

| 指标          | A/(m·s <sup>-1</sup> ) | B/(kg·m <sup>-3</sup> ) | C/ $\mu\text{m}$ |       |
|-------------|------------------------|-------------------------|------------------|-------|
| 捕<br>集<br>率 | $K_{j1}$               | 104                     | 96.9             | 55.5  |
|             | $K_{j2}$               | 111.2                   | 106.1            | 101.5 |
|             | $K_{j3}$               | 112.3                   | 124.5            | 170.5 |
|             | $\bar{K}_{j1}$         | 34.7                    | 32.3             | 18.5  |
|             | $\bar{K}_{j2}$         | 37.1                    | 35.4             | 33.8  |
|             | $\bar{K}_{j3}$         | 37.4                    | 41.5             | 56.8  |
|             | $R_j$                  | 2.7                     | 9.2              | 38.3  |

由表 4 可知,影响分离效率的顺序为:颗粒粒径,颗粒密度,进气口速度。

### 3.4.2 可控的分离器进口速度对分离效率的影响

在 Matlab 中对上述 9 组数据进行拟合,绘出粒径 - 速度和密度 - 速度与分离效率之间的三维曲面如图 7 图 8 所示。

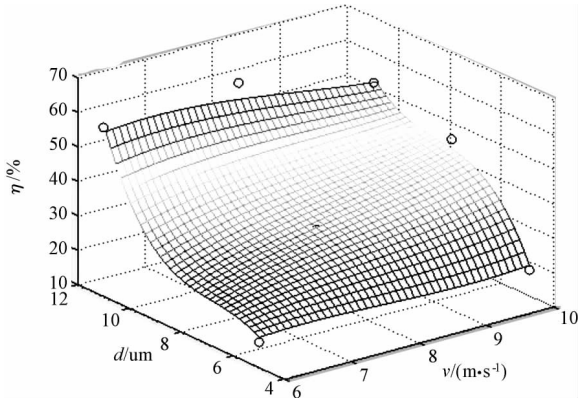


图 7 粒径和进口速度与分离效率关系图

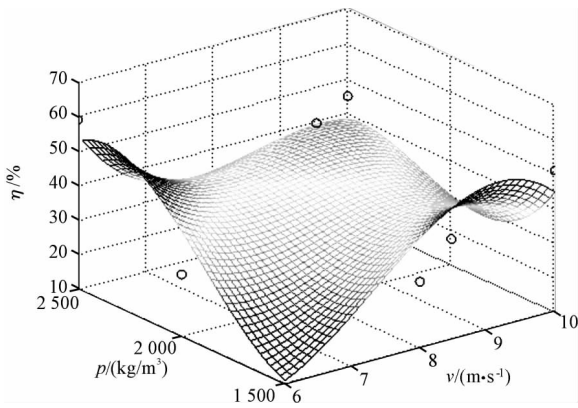


图 8 密度和进口速度与分离效率关系图

在图 7 中,粒径为 7 μm、10 μm 的曲线如图 9 所示。

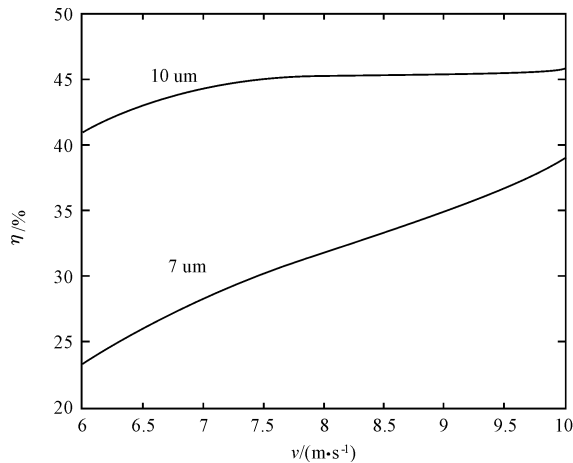


图 9 不同粒径下速度 - 效率曲线

在图 8 中,密度分别为 1 600 kg/m<sup>3</sup>、2 400 kg/m<sup>3</sup> 的曲线如图 10 所示。

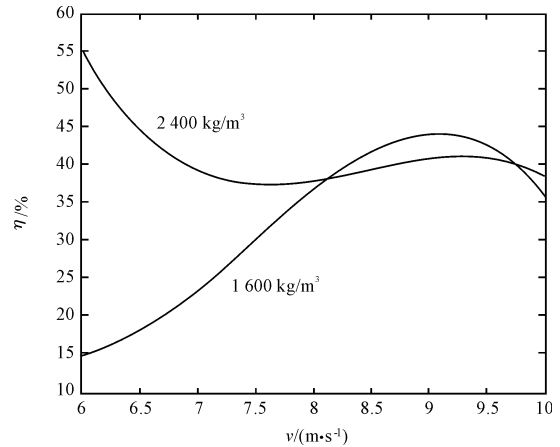


图 10 不同密度下速度 - 效率曲线

从中可以看出,颗粒物粒径的分离效率与进口速度正相关。而颗粒物密度与进口速度的关系比较复杂,对小密度颗粒物存在最佳进口速度。大密度颗粒物的分离效率对进口速度相对不敏感。

## 4 结束语

本研究采用时间耦合的随机轨道模型,在拉格朗日坐标下对旋风分离器内颗粒的运动行为进行了模拟,在 3 个工况参数:颗粒物密度、粒径、进口速度变化情形下,研究了分离器的分离效率。主要结论如下:

(1) 旋风分离器的分离效率受工作环境因素固体颗粒粒径、密度和可控参数进口速度的相互影响,其中颗粒粒径影响最大,颗粒物密度次之。

(2) 对不同的颗粒粒径,加大分离器进口速度能够提高分离效率,并且粒径较小时分离效率受进口速度的影响较显著。

(3) 颗粒物密度与进口速度的关系不是正相关的,在颗粒物密度较小时,旋风分离器存在最佳进口速度。在进口速度相同的条件下,颗粒密度越大分离效率越高。

该项研究有助于了解旋风分离器的适用性,为分离器在不同工作环境下工作参数的选择提供参考。

### 参考文献 (References) :

- [1] 张 波,文建军. 旋风除尘器流场仿真分析[J]. 计算机辅助工程, 2011, 20(2): 100-103.
- [2] SINCLAIR J L, JACKSON R. Gas-particle flow in a vertical pipe with particle-particle interaction[J]. *AICHE Journal*, 1989, 35(9): 1473-1486.
- [3] SHEPPERD C B, LAPPLE C E. Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors[J]. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1939, 31(8): 972-984.
- [4] 王乐勤,郝宗睿. 筒体长度对旋风分离器内流场影响的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2009, 30(2): 223-226.
- [5] 田晓庆,何宏舟. 旋风分离器入口结构影响的研究现状与

- 进展[J]. 过滤与分离 2013 23(2):4-8.
- [6] 钱付平,章名耀. 不同排尘结构旋风分离器的分离特性[J]. 燃烧科学与技术 2006 12(2):169-174.
- [7] 龚智立,马贵阳,郑平. 旋风分离器内湍流模型的研究与发展[J]. 重庆科技学院学报 2006 8(3):70-73.
- [8] 刘淑艳,张雅,王保国. 用 RSM 模拟旋风分离器内的三维湍流场[J]. 北京理工大学学报 2005 25(5):377-379.
- [9] BOYSAN F, AYERS W, SWITENBANK J. Fundamental mathematical modeling approach to cyclone design [J]. **Trans. Instn. Chem. Engrs.** 1982 60(4):222-230.
- [10] HOFFMAN A C, DE G M, HOSPERS A. The effect of the dust collection system on the flow pattern and separation efficiency of a gas cyclone [J]. **The Canadian Journal of Chemical Engineering** 1996 74(4):464-470.
- [11] MA L, INGHAM D B, WEN X. Numerical modeling of the fluid and particle penetration through small sampling cyclones [J]. **Journal Aerosol Science** 2000 31(9):1097-1119.
- [12] 黄兴华. 旋风分离器中气相流动特性及颗粒分离效率的数值研究[J]. 动力工程 2004 24(3):436-441.
- [13] 王海刚. 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.
- [14] CHARLES S. G, THOMAS G B, NEASSAN F. An analysis of RNG-based turbulent models for homogeneous shear flow [J]. **Physics of Fluids** 1991 3(9):2278-2281.
- [15] GRIFFITH W D, BOYSAN F. Computational fluid dynamics (CFD) and empirical modeling of the performance of a number of cyclone samples [J]. **Journal Aerosol Science** 1996 27(2):281-304.
- [16] 王水纯,占细峰. 基于 CFD 的搅拌反应罐内部流场的数值模拟[J]. 轻工机械 2013 31(1):9-14.
- [17] 栾军. 试验设计的技术与方法[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 1987.
- [18] 徐仲安,王天保,李常英,等. 正交试验设计法简介[J]. 科技情报开发与经济 2002 12(5):148-150.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

吕 智, 吴晓明. 旋风分离器在不同工况下分离效率的仿真分析[J]. 机电工程 2014 31(11):1390-1395.

LV Zhi, WU Xiao-ming. Simulation analysis of separation efficiency of cyclone separator under different conditions [J]. Journal of Mechanical &amp; Electrical Engineering, 2014 31(11):1390-1395.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 1382 页)

该研究为车厢可卸式垃圾车拉臂系统的进一步结构优化提供了可靠依据,对于产品设计开发、结构性能改进具有较为重要的指导意义。

## 参考文献 (References):

- [1] 孟祥德,詹隽青,李立顺. 自装卸系统虚拟样机设计与仿真分析[J]. 现代制造工程 2007(1):47-49.
- [2] 王承,吴森,汪新云,等. 基于虚拟样机技术的自卸车举升机构仿真与优化[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版 2003 25(3):78-80.
- [3] 陈佑方. 柔性多体系统动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
- [4] 仲昕,杨汝清,徐正飞,等. 多柔体系统动力学建模理论及其应用[J]. 机械科学与技术 2002 21(3):387-389.
- [5] LIU A Q, LIEW K M. Non-linear substructure approach for dynamic analysis of rigid-flexible multibody system [J]. **Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering** 1994 114(3):379-396.
- [6] 李富柱,郭玉琴,何成文,等. 装载机工作装置刚柔耦合运动学动力学分析[J]. 计算机仿真 2007 24(10):304-306.
- [7] 赵丽娟,马永志. 刚柔耦合系统建模与仿真关键技术研究[J]. 计算机工程与应用 2010 46(2):243-248.
- [8] 刘楷安,李秋菊,姜学寿. 刚柔耦合的提梁机主梁结构仿真研究[J]. 现代制造工程 2011(5):76-80.
- [9] 陈露丰,宁晓斌. 液压挖掘机工作装置的动态强度仿真分析[J]. 机电工程 2013 30(8):924-928.
- [10] SAKAI M, AMAZAKI Y, EIYAMAGUCHI S, et al. Mechanical analysis of organic flexible devices by finite element calculation [J]. **Physica Status Solidi (a)** 2014, 211(4):795-799.
- [11] 白丽平. 基于 ADAMS 的机器人动力学仿真分析[J]. 机电工程 2007 24(7):74-77.
- [12] 陈峰华. ADAMS 2012 虚拟样机技术从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社 2013.

[编辑:张 豪]