



引用格式:刘亚莉,张潍然,张永海,等. 喷油螺杆压缩机用油气分离器滤芯出口孔径对分离特性的影响[J]. 轻工学报,2018,33(4):50-56.

中图分类号:TQ051 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2018.04.007

文章编号:2096-1553(2018)04-0050-07

# 喷油螺杆压缩机用油气分离器滤芯出口孔径对分离特性的影响

## Influence on the outlet aperture size of the filter element of the oil gas separator on the separation characteristics of the fuel injection screw compressor

**关键词:**

喷油螺杆压缩机; 油气分离器滤芯; 出口孔径; 大涡模拟; Rosin-Rammler 函数; 离散相模型

刘亚莉,张潍然,张永海,陈宇慧,王会林,董华东

LIU Yali, ZHANG Weiran, ZHANG Yonghai, CHEN Yuhui, WANG Huilin, DONG Huadong

**Key words:**

fuel injection screw compressor; filter element of oil gas separator; outlet aperture size; large eddy model; Rosin-Rammler function; discrete phase model

郑州轻工业学院 能源与动力工程学院, 河南 郑州 450002

College of Energy and Power Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China

**摘要:**采用大涡模拟分三种出口孔径的模型,对喷油螺杆空压机用油气分离器滤芯的一次分离筒内的流场进行了对比分析.结果表明:出口孔径的尺寸对切向速度和轴向速度分布有一定的影响;对自由涡和强制涡区域、上行流下行流的数值、二次流的程度和油滴的分布等均产生一定的影响;综合各项因素可知,2 mm 出口孔径有较好的分离效果.

收稿日期:2017-10-24;修回日期:2018-01-06

基金项目:河南省科技攻关计划项目(152102210148);河南省高等学校重点科研项目(16A530015);郑州轻工业学院研究生科技创新基金项目(2016044)

作者简介:刘亚莉(1964—),女,河北省唐山市人,郑州轻工业学院教授,主要研究方向为化工过程机械.

**Abstract:** The large eddy simulation model was divided into three outlet apertures. The flow field in the primary separation cylinder of the oilgas separator filter element for the fuel injection screw air compressor was compared and analyzed. The results showed that the outlet aperture size was tangential speed and axis. It had a certain influence on the velocity distribution; it had certain influence on the free vortex and the forced vortex region, the value of the upstream flow, the degree of the secondary flow and the distribution of the oil droplets. Based on various factors, the 2 mm aperture outlet had a good separation effect.

## 0 引言

油气分离是一种非均相物系的分离,是石油、化工和环保等工程中重要的单元操作之一<sup>[1]</sup>。在喷油螺杆空压机系统中,油气分离器主要由外分离筒和滤芯两部分组成,其中滤芯又包括多出口金属挡板和内部过滤材料两部分。在分离过程中,多出口金属挡板和外分离筒组成一次分离筒,一次分离的效果对内部过滤材料的二次分离效果有重要影响。由于分离器内部流动复杂,用试验或解析的方法研究流动状况非常困难,近年来,随着计算机硬件和 CFD 技术的不断进步<sup>[2-3]</sup>,在该方面的研究更加便捷。

油气分离器内部的旋转流场中,切向速度产生的离心力是分离的基本前提,轴向速度定义了分离空间<sup>[4]</sup>,径向速度则是分离过程的一个次要因素<sup>[5]</sup>。以流场湍流数值模拟为主,研究分离器内流体的流动规律,进而优化分离器的结构,具有重要的工程应用价值<sup>[6]</sup>。X. Gao 等<sup>[7-8]</sup>通过数值模拟研究表明,进口速度和出气筒长径比对分离效率有一定的影响,进口速度和长径比越大,分离效率越高。袁惠新等<sup>[9]</sup>对比了不同进口流量下分离器对不同粒径石蜡液滴的分离效率,进口流量增加,分离效率也增加。马欣等<sup>[10]</sup>研究了排气管外延伸长度对旋风分离器性能的影响,随着排气管外延伸长度的增加,分离器内压降随之减小,有利于分离。疏志勇等<sup>[11]</sup>研究了二次风风速对分离效果的影响,二次风可有效削减二次流现象,二次风风速增

加,分离效率增大。目前,对影响油气分离器分离性能的因素之研究主要集中在进口速度、流量排气管长度等方面,而对于出口孔径的研究很少。现有的湍流数值模拟方法有直接数值模拟、雷诺平均模拟和大涡模拟。大涡模拟在复杂流动的模拟中被广泛认为是一种非常有前景的湍流数值模拟方法<sup>[12]</sup>。J. J. Derksen 等<sup>[13-14]</sup>对分离器进行大涡模拟计算,得到了比较准确的平均流场和速度场脉动。周力行<sup>[15]</sup>分别用大涡模拟和雷诺平均模拟对旋流两相流切向速度和脉动速度进行了模拟分析,结果表明大涡模拟更加接近实验值。

本文拟采用大涡模拟对不同出口孔径的三种喷油螺杆压缩机用油气分离器的内部流场进行研究,通过对流场速度和油滴颗粒分布的分析,得到出口孔径尺寸对分离特性的影响,为优化一次分离筒的设计提供一定的参考依据。

## 1 结构模型

滤芯示意图如图 1 所示。图 2 为多出口一次分离筒结构模型,该模型为 32 个出口孔径相同的出口直排模型。本文将建立孔径分别为 1.5 mm, 2 mm, 4 mm 的三种出口直排模型,并对其进行分离特性的研究。油气分离器一次分离装置结构由外分离筒、进气管和内置隔筒组成。外分离筒高度 195 mm,直径 65 mm;内置隔筒高度 65 mm,直径 32.5 mm。油气混合物从进气管进入分离器,在重力、惯性和离心力的作用下,油滴绕着内置隔筒做圆周运动,从而被分离出来。



图1 滤芯示意图

Fig.1 Filter element diagram

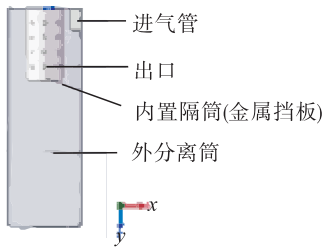


图2 多出口一次分离筒结构模型

Fig.2 Structure model of multiple outlet primary separation cylinder

## 2 数值模拟方法

### 2.1 大涡模拟控制方程

大涡模拟的控制方程,即滤波后的 Navier-Stokes 方程为

$$\frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho} \bar{u}_i) = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\bar{\rho} \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\bar{\rho} \bar{u}_i \bar{u}_j) =$$

$$- \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

$\sigma_{ij}$  为因分子黏性而产生的应力张量

$$\sigma_{ij} = \left[ \mu \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} \delta_{ij} \right]$$

亚格子 SGS(sub-grid scale) 应力封闭模型为

$$\tau_{ij} = \bar{\rho} \overline{u_i u_j} - \bar{u}_i \cdot \bar{u}_j$$

在涡黏模型中,亚格子应力张量  $\tau_{ij}$  与滤波

后的应变速率张量  $\bar{S}_{ij}$  关系为

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\mu_t \bar{S}_{ij}$$

其中,  $\mu_t$  为亚格子涡黏系数,  $\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ .

在计算时采用 Smagorinsky-Lily 模型,  $\mu_t = \rho L_s^2 |\bar{S}|$ ,  $L_s$  为网格的混合长度,  $|\bar{S}| = \sqrt{2 \bar{S}_{ij} \bar{S}_{ij}}$ .

在 Fluent 中  $L_s = \min(\kappa d, C_s V^{1/3})$ , 其中  $\kappa$  为 von Kármán 常数,  $d$  为到最近壁面的距离, Smagorinsky 常数  $C_s = 0.1$ <sup>[16]</sup>,  $V$  为计算单元的体积.

### 2.2 模拟条件设置

1) 模型选择: 压缩空气作为气相连续相采用大涡模型, 油滴作为液相离散相采用离散相模型.

2) 边界条件: 油气混合物进口采用 velocity-inlet 边界, 进口速度设为 14.4 m/s, 水力直径设为 0.013 m, 湍流强度设为 4.9%, 油气混合物出口设为 outflow 边界. 油气分离器进口壁面和出口壁面边界设为 escape 边界条件, 进口管壁面和内筒壁面采用 reflect 边界条件, 外筒壁面和底面采用 trap 边界条件.

3) 油滴分布设置: 油滴分布设置采用 Rosin-Rammler 分布函数. 油滴粒径分布如表 1 所示, max diameter 设为 50  $\mu\text{m}$ , min diameter 设为 1  $\mu\text{m}$ , mean diameter 设为 30  $\mu\text{m}$ .

4) 时间步长设置为  $1 \times 10^{-4}$  s<sup>[17]</sup>.

表1 油滴粒径分布

Table 1 Distribution of oil droplet size

粒径范围/ $\mu\text{m}$	1 ~ 10	10 ~ 20	20 ~ 30	30 ~ 40	40 ~ 50
占总颗粒数的比例/%	6.0	24.0	33.2	24.0	12.8

### 3 结果与讨论

#### 3.1 不同孔径模型的切向速度分布

图3给出了 $x=0$ 截面切向速度分布云图。由图3可以看出,分离器漩涡的轴心与其几何轴心并不完全重合,这反映了分离器流场由于入口的不对称而表现出流场的不对称性。图4给出了三种孔径模型在 $x=0$ 截面和 $z=0.11\text{ m}$ 截面交线上的切向速度分布图,切向速度满足一般油气分离器的准自由涡规律:从壁面开始沿半径减小,切向速度缓慢增大,在某一径向位置达到最大值,然后急剧降低。图4表明,三种模型的切向速度均为负值,因为,切向速度正方向是由“右手定则”来判断的:当四指指向气流旋转方向时,大拇指的指向即为切向速度的方向。由此得出切向速度的方向与轴负方向一致,故大部分流体切向速度为负值。三种模型的最大切向速度和最大切向速度的位置、自由涡区域同强制涡区域有所不同,其中,2 mm 出口孔径的模型最大切向速度较大,数值为7.8 m/s,1.5 mm 和4 mm 出口孔径模型分别为6.5 m/s 和7.0 m/s。2 mm 出口孔径模型的切向速度产生的强制涡区域也较广,有助于颗粒的分离。

#### 3.2 不同孔径模型的轴向速度分布

三种孔径模型(沿径向的)轴向速度分布如图5所示。轴向速度的方向平行于 $z$ 轴,轴向速度等于0的截面称为零值面,零值面把流动区域分为上行流和下行流。图5中正值为下行流,负值为上行流。下行流会对油滴产生一个向下的作用力,有利于油滴的分离;上行流会造成二次流现象,影响油滴的分离效果。其中,2 mm 孔径的上行流轴向速度整体数值较小,最大值为1.5 m/s,而1.5 mm 和4 mm 孔径模型的上行流轴向速度最大值分别为2.3 m/s 和2.5 m/s,因此,三种出口孔径模型中,2 mm 孔径模型相较于其他两种孔径不易出现二次流现象,有利于油滴的沉降。与传统的旋风分离器排气管出口位置不同,本装置的排气挡板底部为筒壁,当气流的负向速度卷起油滴向上运动时,会碰到滤芯金属挡板的底部壁面,这有助于油滴被分离出来。

#### 3.3 不同孔径模型的压力分布

油气分离器内的压力分布包括动、静压的转换和压力损失两个方面。压力损失主要包括压缩空气与分离器壁面接触产生的摩擦能量损

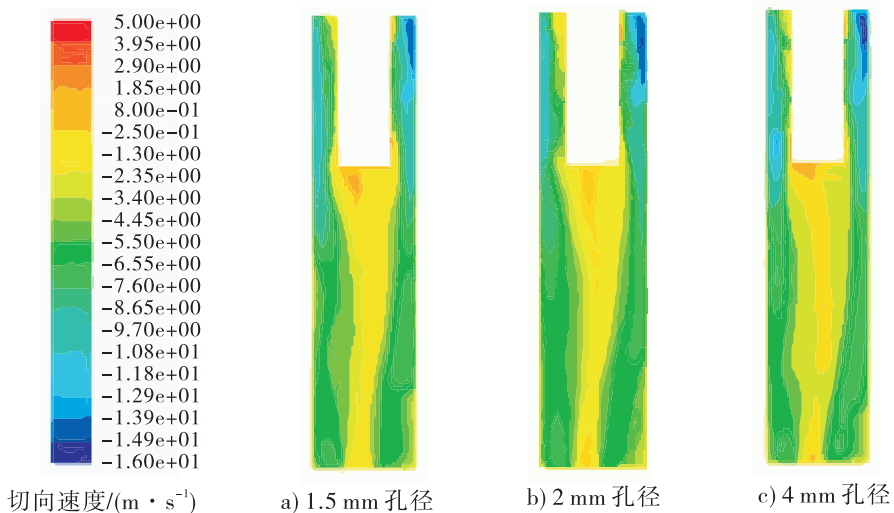


图3  $x=0$  截面切向速度分布云图

Fig. 3 Contours of tangential velocity in  $x=0$  section

失和旋转运动造成的能量损失. 压力损失不是设计时需要参考的一个指标, 在很多情况下, 在对能耗没有太大的要求时, 则可以忽略压力损失, 而主要考虑分离器的分离性能. 图6为三种孔径模型总压分布云图, 从中可以看出不同孔径模型压力分布有较大的不同, 4 mm孔径模型的压力分布较小. 压力一般不作为油气分离器设计的参考.

### 3.4 不同孔径模型的油滴颗粒分布

图7为三种孔径模型内部不同时刻停留的油滴分布. 从图7可以看出, 油滴直径对分离有

一定影响: 在0.03 s时, 不同直径的油滴都有分布而且数量较多, 说明大部分油滴还没有被分离, 在0.10 s时, 分离筒内剩余的油滴数量减少, 直径也明显减小, 说明大直径的油滴较容易被分离; 油滴分布的位置也有所不同, 在0.03 s时, 大部分油滴都集中在内置隔筒周围, 随着分离进行, 在0.10 s时, 不同模型中油滴数量明显少了许多, 油滴分布的位置也发生了变化. 其中, 2 mm孔径模型在分离末段油滴颗粒相对较少, 所以分离效果相对较好.

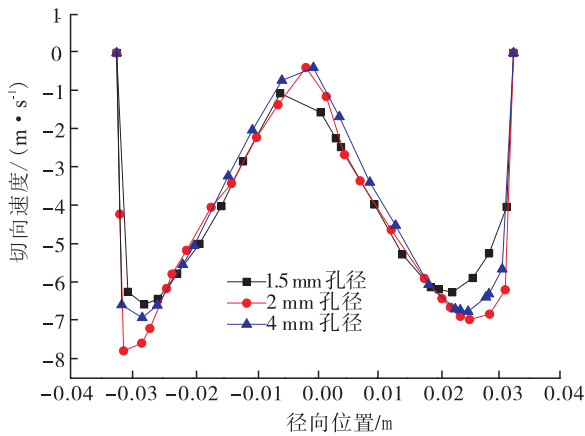


图4 三种孔径模型(沿径向的)切向速度分布图( $x=0, z=0.11\text{ m}$ )

Fig.4 Tangential velocity profiles of three aperture models(along the meridional direction) ( $x=0, z=0.11\text{ m}$ )

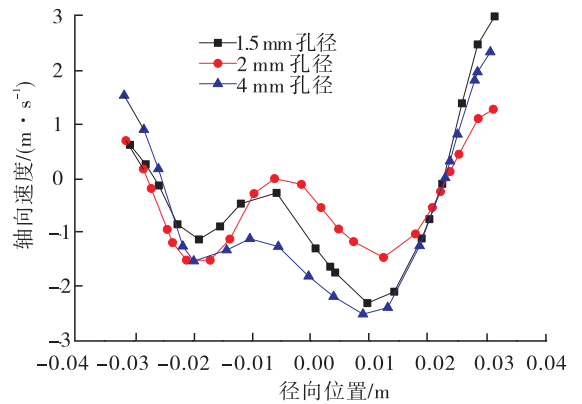


图5 三种孔径模型(沿径向的)轴向速度分布图( $x=0, z=0.11\text{ m}$ )

Fig.5 Axial velocity profiles of three aperture models(along the meridional direction) ( $x=0, z=0.11\text{ m}$ )

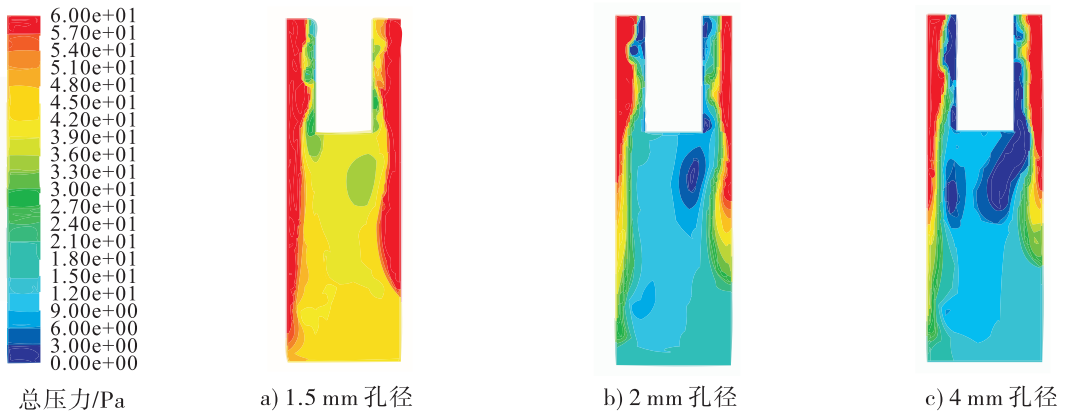


图6 三种孔径模型总压分布云图( $x=0$ 截面)

Fig.6 Contours of total pressure of three aperture models( $x=0$  section)

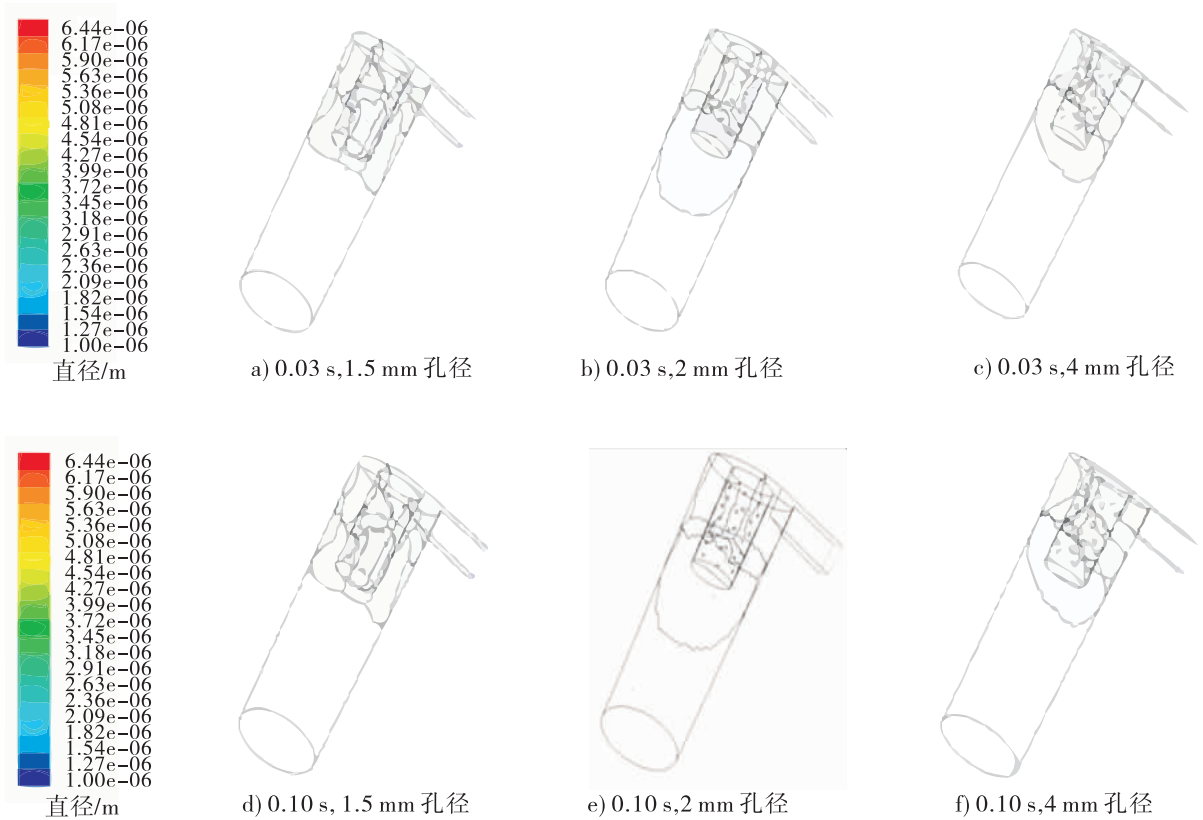


图7 三种孔径模型不同时刻颗粒分布图

Fig. 7 Trajectories of oil droplets at different times of three aperture models

## 4 结论

本文采用大涡模拟对喷油螺杆压缩机用油气分离器滤芯不同出口孔径大小的三种模型的切向速度、轴向速度和油滴颗粒分布的模拟数据进行分析,得出以下结论。

1) 切向速度分布体现了自由涡和强制涡的特点,中心的强制涡区有利于分离油滴;外部的自由涡区易于捕捉分离出来的油滴.不同出口孔径的最大切向速度及其位置略有不同,导致自由涡和强制涡区域也略有差异,对分离的效果产生一定的影响。

2) 轴向速度对二次流影响较大,其中,上行流容易造成二次流现象,不利于油滴的分离;下行流对油滴沉降起到很好的作用,有利于油滴的分离。

3) 压力分布对油气分离性能影响不大,在

油气分离器设计中不作为参考指标。

4) 分离初始阶段,不同直径油滴分布较多,分离末段,油滴分布数量减少,大直径油滴基本被完全分离;在分离末段,不同出口孔径的分离器中油滴颗粒的分布数量和停留位置也有不同。

综合切向、轴向速度和颗粒分布,出口孔径大小对分离效果影响不是太明显,2 mm 出口孔径相较于其他两种孔径模型对一次分离的效果略有提高.一次分离效果的提高,易使较多的油滴在进入二次分离材料前被分离,可减轻二次分离的负担。

## 参考文献:

- [1] 戚俊清,刘亚莉,许培援,等.斜板沉降器板间距对处理负荷的影响[J].郑州轻工业学院学报,1999,14(4):51.



- [2] 王瑞金,张凯,王刚. Fluent 技术基础与应用实例[M]. 北京:清华大学出版社,2007.
- [3] 李文静. 天然气旋流气液分离器的数值模拟[D]. 北京:中国石油大学,2009.
- [4] WANG Z, YI M A, JIN Y. Droplet coalescence and breakup and its influence factors in vane-guided hydrocyclone [J]. *Ciesc Journal*, 2011, 62(2):399.
- [5] BERGSTRÖM J, VOMHOFF H. Experimental hydrocyclone flow field studies [J]. *Separation & Purification Technology*, 2007, 53(1):8.
- [6] 王海刚,刘石. 用雷诺应力模型计算旋风分离器中气-固两相流动[J]. *工程热物理学报*, 2004(S1):191.
- [7] GAO X, CHEN J, FENG J, et al. Numerical and experimental investigations of the effects of the breakup of oil droplets on the performance of oil-gas cyclone separators in oil-injected compressor systems [J]. *International Journal of Refrigeration*, 2013, 36(7):1894.
- [8] GAO X, CHEN J, FENG J, et al. Numerical investigation of the effects of the central channel on the flow field in an oil-gas cyclone separator [J]. *Computers & Fluids*, 2014, 92(9):45.
- [9] 袁惠新,方毅,付双成. 天然气脱蜡旋风分离器分离效率的模拟[J]. *化工进展*, 2014, 33(1):43.
- [10] 马欣,徐洋洋,徐洋,等. 排气管外延伸长度对旋风分离器性能的影响[J]. *过程工程学报*, 2016, 16(6):915.
- [11] 疏志勇,钱付平,郭旺. 基于 OpenFOAM 模拟二次风对旋风分离器性能的影响[J]. *过程工程学报*, 2017, 17(2):217.
- [12] 张兆顺. 湍流大涡数值模拟的理论和应用[M]. 北京:清华大学出版社,2008.
- [13] DERKSEN J J. Separation performance predictions of a Stairmand high-efficiency cyclone [J]. *Aiche Journal*, 2010, 49(6):1359.
- [14] GRONALD G, DERKSEN J J. Simulating turbulent swirling flow in a gas cyclone: A comparison of various modeling approaches [J]. *Powder Technology*, 2011, 205(1/3):160.
- [15] 周力行. 旋流气粒两相流动的研究[J]. *工程热物理学报*, 2015, 36(5):1028.
- [16] 王福军. 计算流体动力学分析[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [17] CHUAH T G, GIMBUN J, CHOONG T S Y. A CFD study of the effect of cone dimensions on sampling aerocyclones performance and hydrodynamics [J]. *Powder Technology*, 2006, 162(2):126.