

轴流式旋风分离器结构与分离特性数值模拟

陈思敏¹, 孙士荣², 刘振峰³, 熊桂龙¹

(1. 南昌大学 资源环境与化工学院, 江西 南昌 330031; 2. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300130;
3. 宜春万申制药机械有限公司, 江西 宜春 336000)

摘要:依据轴流式旋风分离器的基本结构建立分析模型,通过CFD-DEM耦合计算获得运行时内部流场主要参数以及颗粒分布,提取了影响分离性能的主要结构参数,研究其不同在不同粒径、不同进口速度下与分离效率和压降的关系,并给出了分离效率与各参数的拟合关系式。结果表明:叶片出口角和排气管直径对轴流式旋风分离器的分离效率有显著影响,随着叶片出口角减小,静压逐渐增大,切向速度增大,同时分离效率提高;排气管直径增大,静压减小,当其为分离器筒体直径的0.6~0.7倍时分离效果最好;流速为20 m/s时,对4 μm的颗粒分离效率可达到92.3%,10 μm及以上颗粒可实现100%分离;并使用加权方法给出了在粒径 $d_p \geq 4 \mu\text{m}$,进口风速为4~20 m/s的工况下适用的分离效率计算模型。

关键词:轴流式旋风分离器;分离效率;正交实验法;数值模拟

中图分类号:TQ051.8 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.11.014

[引用本文格式]陈思敏,孙士荣,刘振峰,等.轴流式旋风分离器结构与分离特性数值模拟[J].热能动力工程,2021,36(11):100-106. CHEN Si-min, SUN Shi-rong, LIU Zhen-feng, et al. Numerical simulation of structure and separation characteristics of axial flow cyclone separator[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(11): 100-106.

Numerical Simulation of Structure and Separation Characteristics of Axial Flow Cyclone Separator

CHEN Si-min¹, SUN Shi-rong², LIU Zhen-feng³, XIONG Gui-long¹

(1. School of Resources, Environmental and Chemical Engineering, Nanchang University, Nanchang, China, Post Code: 330031; 2. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin, China, Post Code: 300130; 3. Yichun Wanshen Pharmaceutical Machinery Co. Ltd., Yichun, China, Post Code: 336000)

Abstract: The analysis model was established according to the basic structure of the axial flow cyclone separator, the main parameters and particle distribution of the internal flow field during operation were obtained through the CFD-DEM coupling calculation, the main structural parameters affecting the separation performance were extracted, the relationships among them with the separation efficiency and pressure drop under different particle sizes and inlet velocities were studied, and the fitting equations of separation efficiency and various parameters were given. The results show that the blade outlet angle and exhaust pipe diameter have significant influence on the separation efficiency of the axial cyclone separator. With the decrease of blade outlet angle, the static pressure gradually increases, the tangential velocity increases, and the separation efficiency increases. With the increase of the diameter of the exhaust pipe, the static pressure decreases, so the separation effect is the best when it is 0.6 to 0.7 times of the diameter of the separator.

收稿日期:2020-12-18;修订日期:2021-01-23

基金项目:国家自然科学基金(2014MS107);江西省自然科学基金重点项目(20171ACB21008);江西省自然科学基金青年项目(20161BAB216112)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (2014MS107); Key Project of Natural Science Foundation of Jiangxi Province (20171ACB21008); Youth Project of Natural Science Foundation of Jiangxi Province (20161BAB216112)

作者简介:陈思敏(1996-),女,山西高平人,南昌大学硕士研究生。

通讯作者:熊桂龙(1981-),男,江西丰城人,南昌大学副教授。

rator cylinder. When the flow rate is 20 m/s, the particle separation efficiency of 4 μm can reach 92.3%, and the particle separation efficiency of 10 μm and above can reach 100%. The calculation model of separation efficiency under the conditions of particle size d_p of no less than 4 μm and inlet wind speed of 4 to 20 m/s is given by the weighting method.

Key words: axial flow cyclone separator, separation efficiency, orthogonal experimental method, numerical simulation

引 言

含尘气流高效分离是工业生产的重要工艺过程。现有的主流分离技术,有过滤式、静电式^[1]、湿式和机械式^[2]。其中,机械式分离设备包括惯性分离器、重力沉降室和旋风分离器等。按照含尘气流的主流流动方向,旋风分离器又可分为逆流式和轴流式。与逆流式相比,轴流式旋风分离器基本不改变气体主流方向,且运行阻力低。

已有的研究,多是对轴流式旋风分离器的结构设计进行优化及内部流场仿真分析^[3]。研究表明:合理改进排尘口结构以及排尘环隙面积可减小压降和排尘口处的二次涡流^[4];导流叶片形状和出口角度对轴流式旋风分离器的性能有重要影响^[5];导流叶片、排气口直径等对分离效率、压力损失有重要影响,分离效率与气流切向速度正相关^[6-8]。部分文献对其内部流场进行了测量和分析,轴流式分离器主筒体区的内部流场是典型的 Rankine 组合涡,切向速度始终保持较高值,而轴向速度呈马鞍型^[9];入口速度对轴流式旋风分离器的分离效率也会产生影响^[10-11]。

本文为分析轴流式旋风分离器分离效率与影响因素之间的相互关系,提升效率并拓展其应用领域,通过正交实验法,基于 CFD-DEM 耦合数值计算的方法,对轴流式旋风分离器的性能进行研究,得到了不同结构参数、不同粒径和进口速度下分离器内部压力场、速度场以及分离效率等的技术特征描述和结论。

1 数值计算模型和方法

1.1 工作原理及模型建立

如图 1 所示,轴流式旋风分离器的结构主要由导流叶片、叶轴、筒体和排气管组成。运行时,粉尘颗粒在轴向旋转气流离心作用下贴向管壁,导致气

粒分层,粉尘颗粒经过排尘环隙后实现沉降或被其他结构捕集,分离出来的洁净气体作为主流则通过气流出口排出。

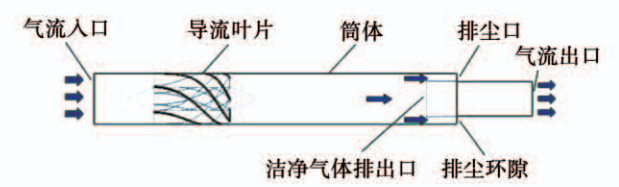


图 1 轴流旋风分离器结构示意图
Fig. 1 Structural diagram of axial flow cyclone separator

基于轴流式旋风分离器的主要结构建立模型^[12],如图 2 所示,部分参数取值如表 1 所示。分离器筒体直径, $D = 200\text{ mm}$, D_1 为叶片轴直径 D_2 为排气管直径, β 为叶片出口角, N 为叶片数。采用四面体网格进行划分,网格总数约为 80 万。壁面 y^+ 数值范围在 10 ~ 140 之间,经检验网格数量对计算没有影响。

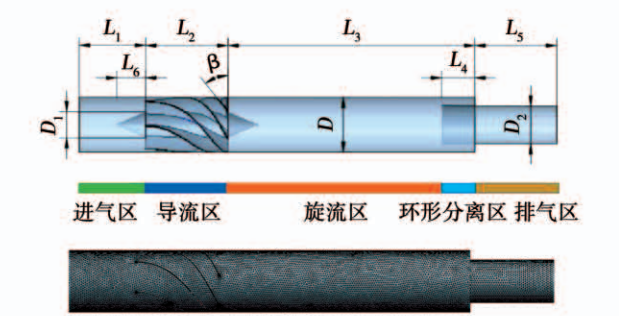


图 2 轴流式旋风分离器几何模型及网格图
Fig. 2 Geometric model and grid diagram of axial flow cyclone separator

1.2 数值计算方法

采用计算流体动力学(CFD)和离散元(DEM)耦合方法求解气体和颗粒相的运动^[13],该方法结合了 CFD 和 DEM 的优势,DEM 方法考虑了颗粒之间接触碰撞的影响,在牛顿第二定律的基础上求解颗粒相的运动。旋风分离器内部流体流动符合强旋转

流场的特点^[14],选用雷诺应力模型(RSM)作为湍流模型。分离器进口设置为速度进口,排气口设置为出口。

表 1 轴流旋风分离器主要结构设计参数表
Tab. 1 Design parameter table of main structure
of axial flow cyclone separator

影响因素	比值
L_1/D	1.2
L_2/D	1.5
L_3/D	4.5
L_4/D	0.6
L_5/D	3
D_1/D	0.5
L_6/D	0.6
N	6

为验证边界条件和耦合算法的准确性,基于已有文献中的实验模型以及工况条件进行耦合计算^[12],将计算结果与文献中的实验结果进行对比,在细颗粒粒径 $d\geq 4\text{ }\mu\text{m}$ 时,耦合计算结果与实验结果的平均误差为 5.8%,如图 3 所示。

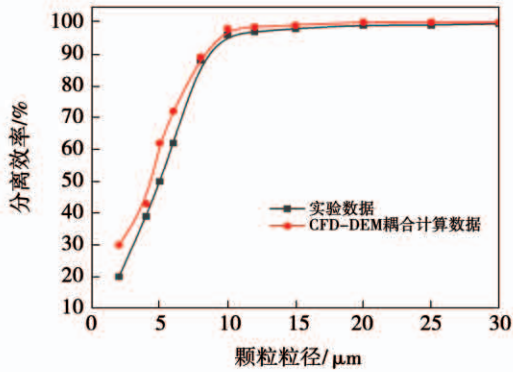


图 3 数值计算数据与实验数据的对比
Fig. 3 Comparison of numerical and experimental data

1.3 正交实验设计

以某生产过程为例,利用实际粉尘数据进行计算。选取木薯淀粉为研究对象,颗粒密度 $\rho_p=1\text{ }600\text{ kg/m}^3$,进口质量浓度 $c=0.075\text{ g/m}^3$ 。文献表明其粒径处于 $4\sim 35\text{ }\mu\text{m}$ 之间,较大粒径的颗粒除尘效率较高,可不作为主要研究对象,因此选取了 $4\sim 15\text{ }\mu\text{m}$ 粒径的小颗粒进行不同粒径的分离规律研究。

结构参数中叶片轴直径 D_1 对分离效率影响很

小^[5],故选取导流叶片出口角 β 、排气管直径 D_2 以及进口速度 v_i 、颗粒粒径 d_p 4 个直接影响旋风分离器分离效果的因素为变量,如表 2 所示。

表 2 影响因素的取值
Tab. 2 The values of the influence factors

参 数	1	2	3	4	5
叶片出口角 $\beta/^\circ$	30	40	45	50	60
排气管直径 D_2	$0.5D$	$0.6D$	$0.7D$	$0.8D$	$0.9D$
进口速度 $v_i/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	4	8	12	16	20
颗粒粒径 $d_p/\mu\text{m}$	4	6	8	10	15

考虑各因素之间的交互作用,减少实验次数,基于正交实验法,给出了轴流式旋风分离器包含 4 个因素、5 种水平的正交实验方案,如表 3 所示。

表 3 正交设计表
Tab. 3 Orthogonal design table

序号	$\beta/(^\circ)$	D_2/D	$v_i/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$d_p/\mu\text{m}$	$\eta/\%$
1	30	0.5	4	4	82.8
2	40	0.6	4	6	96.4
3	45	0.7	4	8	96.7
4	50	0.8	4	10	98.1
5	60	0.9	4	15	75.9
6	60	0.6	8	8	90.3
7	50	0.7	8	6	91.0
8	45	0.8	8	4	71.4
9	40	0.9	8	15	99.9
10	30	0.9	8	10	99.9
11	30	0.8	12	6	99.8
12	40	0.7	12	4	92.3
13	45	0.9	16	6	96.8
14	50	0.5	12	8	98.4
15	60	0.6	12	10	99.8
16	60	0.5	20	6	99.99
17	50	0.6	20	15	99.9
18	45	0.8	12	15	99.99
19	40	0.9	20	8	99.99
20	30	0.7	16	15	99.99
21	30	0.6	16	8	99.9
22	40	0.8	16	10	99.9
23	45	0.5	20	10	99.99
24	50	0.9	16	4	82.8
25	60	0.7	20	4	78.0
26	60	0.8	20	4	75.7
27	60	0.7	16	10	99.9
28	30	0.9	20	10	99.99
29	60	0.9	12	10	73.4
30	60	0.5	16	10	99.9

2 结果与分析

2.1 结构参数对压降的影响

旋风分离器的总压降主要包括进气口压力损失、分离过程压力损失和灰斗集尘处压力损失 3 部分。图 4 中由上自下的 3 个分段分别给出了导流叶片表面,旋转流面以及排尘环隙面的静压云图,有助于轴流旋风分离器的可视化。

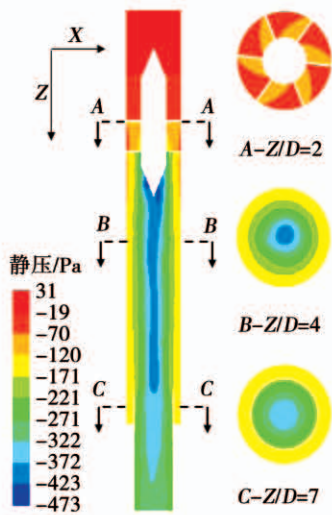


图 4 $D=200\text{ mm}, v_i=8\text{ m/s}$ 静压分布

Fig.4 Static pressure distribution diagram at $D=200\text{ mm}, v_i=8\text{ m/s}$

由图 4 可知,分离器内部流场沿径向和轴向有明显的压力梯度。沿轴向方向静压减小,当气流流过叶片时(A-A 面, $Z/D=2$),有较大的压力梯度,这是因为气流通过导流叶片时流通面积减小,速度增大,静压部分转换为动能。在旋流区域(B-B 面, $Z/D=4$)和排尘环隙处(C-C 面, $Z/D=7$),径向方向上静压从中心到内壁逐渐增加。

叶片出口角和排气管直径对轴流式旋风分离器的压降均有影响,如图 5 所示。在相同进口速度下,压降随叶片出口角的增大而减小;随排气管直径增大,分离器阻力减小,且风速越高阻力越大,增加幅度也更大。因此,虽然较小的叶片出口角及排气管直径会产生较好的分离效率,但压降过大,参数设计时应综合考虑。

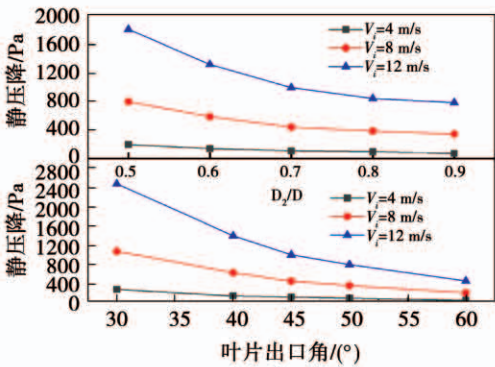


图 5 不同进气速度下静压降与结构参数的关系

Fig.5 Relationship between static pressure drop and structural parameters at different intake velocities

2.2 结构参数对分离效率的影响

分离效率是评估分离器性能的重要指标。轴流式旋风分离器的分离效率计算式:

$$\eta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \times 100\% \tag{1}$$

式中: η —分离器的分离效率; n_1 —入口处颗粒总数目; n_2 —出口处逃逸的颗粒数; $(n_1 - n_2)$ —分离器收集的颗粒数^[15]。

速度场分布对轴流式旋风分离器的分离性能有重要影响,改变结构参数可直接对含尘气流的速度进行调控。因此,首先研究分离器内速度场分布以及结构参数对流场的影响规律。

如图 6 所示,沿轴向方向分离器内部气流的切向速度在不断增大,在叶片出口处达到最大值,表明导流叶片有很好的预旋作用;在旋流区,切向速度由于运动摩擦有所减小,但仍保持较高速度旋转前进;旋流区径向方向上切向速度从中心到内壁呈先增大后减小的趋势,表明大量气流绕中心旋转向前运动。轴向速度在叶片出口处的叶轴附近达到最大值,约为进口速度的 2.2 倍,此时旋风分离器内已形成具有较大切向速度的旋转气流,增大的轴向速度使气流在保持转动量的同时尽快排出,实现分离。径向方向上轴向速度在近壁区域最大,向内逐渐减小,中心部分出现回流,表明旋转气流以较大的轴向速度沿壁面前进。

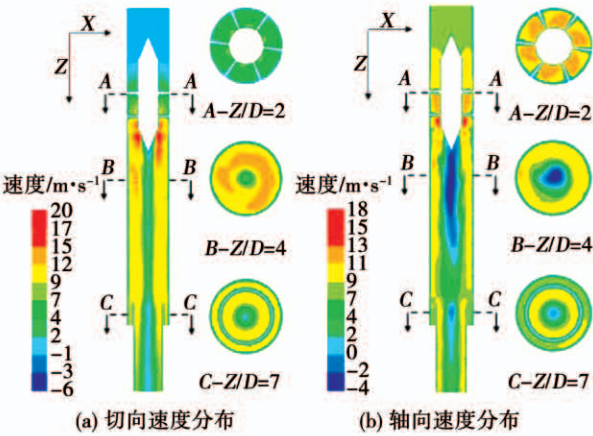


图 6 $D = 200\text{ mm}$, $v_i = 8\text{ m/s}$, 速度分布云图
Fig. 6 Velocity distribution nephogram at $D = 200\text{ mm}$, $v_i = 8\text{ m/s}$

图 7 表明,叶片出口角增大,切向速度的最大值明显减小。在进口速度为 4 m/s 时,叶片出口角由 30° 增大到 60° , 对应的分离效率下降了 $13\% \sim 20\%$ 。分离效率与切向速度成正相关。轴流式旋风分离器排尘气流与洁净气流在同侧排出,共同占有旋风分离器筒体的截面面积。假设叶片出口角为 45° ,分析排气管直径为 $0.5D, 0.6D, 0.7D, 0.8D$ 和 $0.9D$ 时对分离效率的影响,如图 8 所示。环隙分离区与排气区因流通面积急剧变化导致轴向速度增大。当排气管直径过小时,排尘环隙面积增大,过大的轴向速度易产生回流,影响分离;而排尘环隙过小时,排尘气流流通面积变小,故分离效率降低,排气管直径为 $0.6D \sim 0.7D$ 时更有利于分离。

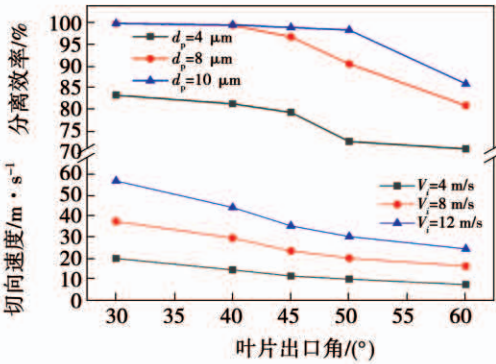


图 7 叶片出口角对切向速度和分离效率的影响
Fig. 7 Influence of blade outlet angle on tangential velocity and separation efficiency

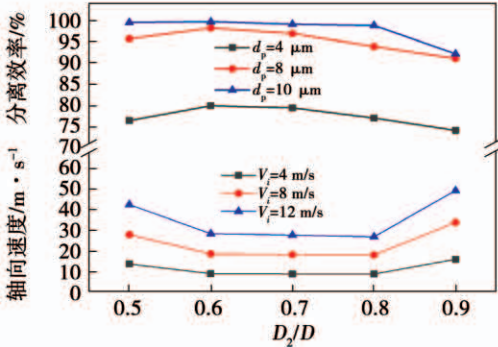


图 8 排气管直径对轴向速度和分离效率的影响
Fig. 8 Influence of exhaust pipe diameter on axial velocity and separation efficiency

2.3 分离效率及模型

分离效率的影响参数如表 4 所示。

表 4 分离效率的影响参数

Tab. 4 Influence parameters of separation efficiency

参 数	符号
气体密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	ρ_g
气体粘度/ $\text{Pa} \cdot \text{s}$	μ_g
颗粒密度/ $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	ρ_p
颗粒直径/ μm	d_p
进口风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	v_i
叶片出口角/ $^\circ$	β
分离器直径/ m	D
D_2/D	n

基于 Hoffmann^[16]理论的简化和假设:与离心力相比,重力极小,可忽略其对含尘气流的影响;忽略壁面粗糙度对颗粒运动的影响;忽略运动过程中颗粒的团聚与破碎。

进行简化后,轴流式旋风分离器的分离效率 $\eta(d_p)$ 表示为:

$$\eta(d_p) = f(\rho_g, \rho_p, \mu_g, v_i, d_p, D, \beta, n) \tag{2}$$

通过量纲分析获得 4 个非特定量:

$$\eta(d_p) = f(Re, stk, \theta, n) \tag{3}$$

式(3)中:

$$Re = \frac{D v_i \rho_g}{\mu_g} \tag{4}$$

$$stk = \frac{(\rho_p - \rho_g) d_p^2 v_i}{18 \mu_g D} \tag{5}$$

$$\theta = \frac{\beta\pi}{180} \quad (6)$$

$$n = \frac{D_2}{D} \quad (7)$$

在轴流式旋风分离器中,分离效率通常与无因次数的指数函数有关^[17],因此,可将其写为:

$$\eta(d_p) = (1 - e^{aRe^b stk^c \theta^d n^m}) \times 100\% \quad (8)$$

其中, a, b, c, d, m 为待定的系数。通过数值计算,可得到不同结构参数和工况条件下,分离器的分离效率(见表 3),通过加权算法对数据进行分析,可拟合得到如下的分离效率计算模型:

$$\eta(d_p) = (1 - e^{-6.922Re^{0.068} stk^{0.466} \theta^{-1.154} n^{-0.864}}) \times 100\% \quad (9)$$

根据式(9)可以计算出不同条件下,高分离效率时轴流旋风分离器结构叶片出口角或者排气管直径的大小范围,为分离器的设计提供参考。将计算结果 E_c 与实验结果 E_e 进行对比,当粒径范围为 4 ~ 30 μm 时,两者平均误差为 2.61%,最大误差为 8.69%。

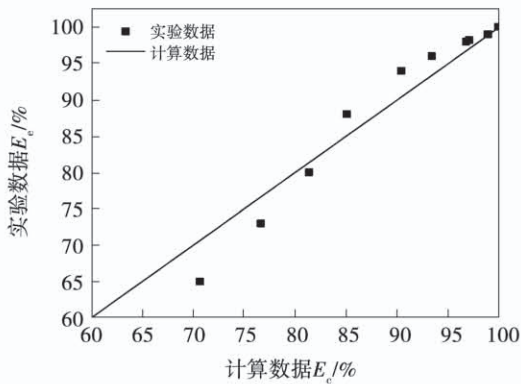


图 9 分离效率模拟结果与实验结果对比

Fig. 9 Comparison of the simulated and experimental data of separation efficiency

3 结 论

(1) 轴流式旋风分离器气流通过出口角为 45° 的叶片后,切向速度增长值为起始值的 20 倍,轴向速度为进口速度的 2.25 倍;导流叶片的出口角越小,分离器内气流的切向速度越大,分离效率越高;排气管直径通过影响环隙分离区以及排气区的流场影响分离效率,排气管直径为 $0.6D \sim 0.7D$ 时,分离

效果较好。

(2) 叶片出口角和排气管直径影响分离器进出口压降,可通过调节该参数来控制压降。增大叶片出口角或增加排气口直径均可达到降低压降的效果;叶片出口角为 $40^\circ \sim 50^\circ$,排气管直径为 $0.6D \sim 0.7D$ 区间时,分离器内部压降较低。

(3) 本模型对粒径为 4 μm 的微细颗粒可达到 92.3% 的分离效率,10 μm 以上的颗粒则可实现 100% 的分离;针对粒径 $d_p \geq 4 \mu\text{m}$,进口风速为 4 ~ 20 m/s 的工况给出了分离效率计算模型, $d_p \geq 4 \mu\text{m}$ 时平均误差为 2.61%。

参考文献:

- [1] CALLE C I, BUHLER C R, MCFALL J L, et al. Particle removal by electrostatic and dielectrophoretic forces for dust control during lunar exploration missions [J]. Journal of Electrostatics, 2009, 67 (2): 89–92.
- [2] CALISKAN M E, KARAGOZ I, AVCI A, et al. An experimental investigation into the particle classification capability of a novel cyclone separator [J]. Separation and Purification Technology, 2019, 209: 908–913.
- [3] XIONG Z, JI Z, WU X. Development of a cyclone separator with high efficiency and low pressure drop in axial inlet cyclones [J]. Powder Technology, 2014, 253: 644–649.
- [4] 王建军, 陆文龙, 高文山, 等. 直流导叶式旋风分离器内气相流动的数值模拟 [J]. 石油化工设备, 2011, 40 (5): 13–16.
WANG Jian-jun, LU Wen-long, GAO Wen-shan, et al. Numerical simulation of gas phase flow in a direct current guide vane cyclone separator [J]. Petrochemical Equipment, 2011, 40 (5): 13–16.
- [5] MAO Y, PU W, ZHANG H, et al. Orthogonal experimental design of an axial flow cyclone separator [J]. Chemical Engineering and Processing-Process Intensification, 2019, 144: 107645.
- [6] 王 峥. 导流式旋风分离器分离性能的数值模拟研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
WANG Zheng. Numerical simulation study on separation performance of diversion cyclone [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [7] 林秀丽, 曹亚平, 夏祉君, 等. 轴流旋风分离器特性的数值模拟 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2019, 40 (9): 1360–1364.
LIN Xiu-li, CAO Ya-ping, XIA Zhi-jun, et al. Numerical simulation of the characteristics of axial flow cyclone [J]. Journal of Northeastern University (Natural Sciences), 2019, 40 (9): 1360–1364.
- [8] ZHOU W, E C, FAN Y, et al. Experimental research on the separa-

- tion characteristics of a gas-liquid cyclone separator in WGS[J]. Powder Technology, 2020:372.
- [9] 宗润宽,姜正良,卢泽胡,等.直筒型导叶直流式三相旋流器排气管上部内流场的实验研究[J].环境污染治理技术与设备. 2004(12):96-98.
- ZONG Run-kuan,JIANG Zheng-liang,LU Ze-hu,et al. Experimental study on the flow field in the upper part of the exhaust pipe of a straight tube type guide vane three-phase cyclone[J]. Environmental Pollution Control Technology and Equipment, 2004 (12): 96-98.
- [10] ZHU Y,LEE K W. Experimental study on small cyclones operating at high flow rates[J]. Journal of Aerosol Science, 1999, 30 (10):1303-1315.
- [11] 任欢,赵兵涛,王东荣,等.颗粒负荷对小型旋风分离器性能影响的模拟分析[J].化工进展. 2020,39(3):882-889.
- REN Huan,ZHAO Bing-tao,WANG Dong-shen,et al. Simulation analysis of the effect of particle load on the performance of small cyclone[J]. Progress in Chemical Engineering, 2020, 39 (3): 882-889.
- [12] LI J,WANG T,ZHANG L,et al. Multi-objective optimization of axial-flow-type gas-particle cyclone separator using response surface methodology and computational fluid dynamics[J]. Atmospheric Pollution Research, 2020, 11(9).
- [13] CHU K,WANG B,XU D,et al. CFD-DEM simulation of the gas-solid flow in a cyclone separator[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(5):834-847.
- [14] 蒋梦婷,王博,陈言信,等.旋风分离器内高速旋转流场的数值计算方法选择[J].环境工程学报, 2012, 6 (8): 2736-2744.
- JIANG Meng-ting,WANG Bo,CHEN Yan-xin,et al. Selection of numerical calculation method for high-speed rotating flow field in cyclone separator[J]. Journal of Environmental Engineering, 2012, 6(8):2736-2744.
- [15] XIONG Z,JI Z,WU X. Development of a cyclone separator with high efficiency and low pressure drop in axial inlet cyclones[J]. Powder Technology, 2014:253.
- [16] C H A,E S L. Gas cyclones and swirl tubes: principles, design and operation[M]. Springer, Berlin, Heidelberg, 2007.
- [17] 陈建义.切流返转式旋风分离器分离理论和优化设计方法的研究[D].北京:中国石油大学, 2007.
- CHEN Jian-yi. Research on separation theory and optimal design method of tangent-flow reverse-rotation cyclone separator[D]. Beijing: China University of Petroleum, 2007.

(金圣迪 编辑)