Dec. 2020

DOI: 10. 3969/j. issn. 1674-1951. 2020. 12. 007

基于CFD-DPM的旋风分离器性能参数影响研究

Influence on performance parameters of cyclone separators based on CFD-DPM

彭丽,石战胜,董方,敬旭业,马治安 PENG Li,SHI Zhansheng, DONG Fang, JING Xuye, MA Zhian

(华电电力科学研究院有限公司,杭州 310030)

(Huadian Electric Power Research Institute Company Limited, Hangzhou 310030, China)

摘 要:采用计算流体力学-颗粒轨道模型(CFD-DPM)方法,对旋风分离器内气固两相流动特性进行数值模拟研究,重点考察操作条件以及结构参数对旋风分离器性能的影响。研究发现,在入口气流速度为8,16 m/s 时,采用CFD-DPM模型预测的分离效率均与试验值吻合较好,说明采用该模型能较为准确地预测旋风分离器分离性能。分离效率和压降随入口气流速度的增大呈近似"指数型"和"抛物线型"增长趋势。在考察结构参数对旋风分离器性能的影响中发现,入口宽度、入口高度、排气管直径、插入深度、旋风分离器长度5个结构参数对其性能有显著影响。随着入口高度和入口宽度、排气管直径和插入深度的增加,压降和分离效率均呈下降趋势。增加旋风分离器长度会降低压降,但对分离效率影响不大。中心简高度和排尘口直径对压降和分离效率的影响可忽略不计。

关键词: 旋风分离器; 结构参数; 分离效率; 压降; 计算流体力学; 离散元方法

中图分类号:TK 05 文献标志码:A 文章编号:1674-1951(2020)12-0043-06

Abstract: In the numerical simulation on gas-solid two-phase flow dynamic characteristics of a cyclone separator taking CFD-DPM (Computational Fluid Dynamics-Discrete Particle Model), the effects of operation conditions and geometrical parameters on the separator's performance were mainly investigated. The CFD-DPM was validated against experimental data with respect to the separation efficiency under the air inlet velocity of 8 and 16 m/s, and acceptable consistency were achieved between the simulated results and the experimental data. It indicates that CFD-DPM could accurately predict the performance of cyclone separators. With the increase of air inlet velocity, the separation efficiency and pressure drop show approximately exponential growth and parabolic growth. In the research on cyclone separator's performance, there were five significant geometrical factors which were inlet width, inlet height, diameter and penetration depth of the exhaust pipe, and length of the separator. With the increase of the height and width of inlet, as well as the diameter and penetration depth of exhaust pipe, the pressure drop and separation efficiency decreased. Though increasing the cyclone separator's height would reduce the pressure drop, it had little effect on the separation efficiency. The influence of the vortex finder's height and dust discharge diameter on the pressure drop and separation efficiency was negligible.

Keywords: cyclone separator; geometrical parameters; separation efficiency; pressure drop; computational fluid dynamics; discrete particle model

0 引言

旋风分离器是目前国内外最常用的颗粒去除设备之一,用于气固体系或者液固体系的分离。旋风分离器具有制造相对简单、操作成本低、对极端恶劣条件如高压、高温环境适应性强等优点,被广泛应用于电力、化工、水泥、钢铁、冶金等工业领域。旋风分离器的作用原理相对简单,主要是靠气流切向引入造成的旋转运动,使具有较大惯性离心力的

收稿日期:2020-06-03;修回日期:2020-06-28 基金项目:中国华电集团科技项目(CHDKJ-16-01-10) 固体颗粒或液滴甩向外壁面,从气流中分离出来。 然而,如何优化旋风分离器性能,使其在满足分离 效率的基础上尽可能降低压降一直是旋风分离器 结构设计的重点与难点。

分离效率和压降是设计优化旋风分离器结构 以及评价旋风分离器性能的重要指标。目前,旋风 分离器的压降模型可分为3类[1]:理论模型和半经 验模型,统计模型,计算流体力学(Computational Fluid Dynamics,CFD)模型。

理论模型或半经验模型^[2-8]是由物理描述和数 学方程推导出来的,需要非常详细地了解旋风分离 器内部气流中的气体流动结构和能量耗散机制。例如 Stairmand 模型^[9],通过动量平衡获得速度分布,并结合旋风分离器内部气流中静压的损失,估算进口和出口压降损失。该模型的主要缺点是:(1)忽略入口损失,假设入口区域进口速度没有变化;(2)假设摩擦系数恒定;(3)不考虑颗粒质量载荷对压降的影响。MM模型^[10]克服了上述缺点,并能考虑以下因素对旋风分离器性能的影响:(1)壁面粗糙度,由于材料表面的物理粗糙度和材料表面固体颗粒的存在而造成的壁面粗糙度;(2)质量载荷和雷诺数对旋风分离器性能的影响;(3)进入旋风分离器后气流速度的变化。由于不同理论或半经验模型是基于不同假设和简化条件提出的,导致不同模型的预测结果、同一模型的预测结果与测量结果之间均存在显著差异。

统计模型早在1980年就被作为计算旋风分离器压降的另一种方法。例如,由 Casal 等[11]以及Dirgo等[12]基于不同结构旋风分离器的压降数据,采用多元回归分析方法建立统计模型。虽然统计模型能够预测旋风分离器的压降,但在当时有限的计算统计软件和人工算法的情况下,很难确定最合适的相关函数来对试验数据进行拟合。

近年来,随着计算机计算能力的发展,CFD数值模拟作为多相流系统分析的有效工具,为旋风分离器建模提供了一种新的方法。例如,Gimbun等[13] 采用 CFD 数值模拟成功地预测并考察了温度和进口速度对旋风分离器内气体压降的影响。

本文采用计算流体力学-颗粒轨道模型 (Computational Fluid Dynamics-Discrete Particle Model, CFD-DPM)方法,对旋风分离器进行三维建 模以及模型验证,考察人口气流速度、结构参数对 压降及分离效率的影响,为提高旋风分离器的分离 效率、改进结构和优化尺寸提供理论参考。

1 模拟对象和参数设置

模拟的旋风分离器几何结构及尺寸如图 1 所示。其中,人口高度 h_a 为 145.0 mm,人口宽度 b 为 58.0 mm,人口管长度 L_a 为 290.0 mm 筒体直径 D 为 290.0 mm,中心筒高度 h 为 435.0 mm,排气管插入深度 L_a 为 145.0 mm,排尘口直径 D_c 为 107.3 mm,排气管直径 D_x 为 145.0 mm,旋风分离器长度 L 为 1 160.0 mm,排气管高度 h_c 为 145.0 mm。

对旋风分离器中湍流行为的准确描述是 CFD 成功模拟的关键,因此湍流模型的选择至关重要。Hoekstra 等[14]对比不同湍流模型的模拟结果发现,雷诺应力(RSM)模型较基于粘性涡假设的标准 $k-\varepsilon$

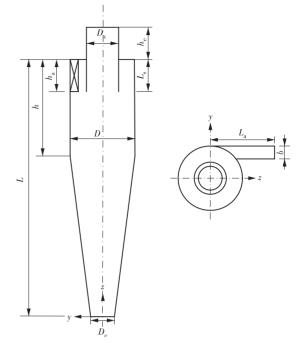


图1 旋风分离器模拟几何结构示意

Fig. 1 Schematic of the cyclone separator

模型和 RNG k-ε模型能更准确地预测组合涡的结构,在求解各项异性尤其是旋转流场方面优势明显,适用于气旋流场的计算。后续所涉及的模拟工况中其雷诺数均大于 10 000,气流处于湍流状态。因此,本文采用 RSM 模型。控制方程采用有限体积法离散,通过 SIMPLEC 算法求解压力与速度耦合。人口气流速度分别为 8,16 m/s,气、固出口边界条件为压力出口,具体见表 1,其他的模拟参数参考 Khairy 等[15]的研究。

颗粒粒径的累积分布采用式(1)来描述

$$F(d) = 1 - \exp \left[-\left(\frac{d}{4.28}\right)^{2.48} \right],$$
 (1)

式中:d为颗粒粒径,F(d)为颗粒粒径累积分布函数。

表 1 模拟参数以及初始和边界条件

Tab. 1 Simulation parameters and initial and boundary conditions

项目	参数	项目	参数
颗粒密度/(kg·m ⁻³)	1.205	颗粒粒径/μm	0.5~10.0
气体运动黏度/(Pa·s)	101.325	出口压力/kPa	101.325
气、固相温度/K	293.0	模拟时间/s	20.0
人口气流速度/ $(m \cdot s^{-1})$	4.0~24.0	时间步长/s	1.0×10^{-4}
气体密度/(kg·m ⁻³)	1.79×10 ⁻⁵		

2 CFD-DPM 模型

本研究采用基于欧拉-拉格朗日框架下的 CFD-DPM方法对旋风分离器进行数值模拟研究。 在 CFD-DPM 方法中, 气相被视为连续流体, 采用 Navier-Stocks 方程进行描述; 气固相间作用力采用 Morsi 等[16]提出的曳力模型描述; 离散相通过追踪颗粒运动轨迹求解, 颗粒运动方程见式(2)—(5)[17]

$$\frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{p}i}}{\mathrm{d}t} = F_{\mathrm{D}}\left(u_{i} - u_{\mathrm{p}i}\right) + \frac{g_{\mathrm{p}i}\left(\rho_{\mathrm{p}} - \rho_{\mathrm{g}}\right)}{\rho_{\mathrm{p}}},\tag{2}$$

$$\frac{\mathrm{d}s_{\mathrm{p}i}}{\mathrm{d}t} = u_{\mathrm{p}i},\tag{3}$$

$$F_{\rm D} = \frac{18\mu}{\rho_{\rm p} d_{\rm p}^2} \frac{C_{\rm D} R e_{\rm p}}{24},\tag{4}$$

$$Re_{p} = \frac{\rho_{p} d_{p} \left| u_{g} - u_{p} \right|}{\mu}, \tag{5}$$

式中: u_p 及 u_{pi} 分别为颗粒的速度和第i个颗粒的速度,m/s; u_s 和 u_i 分别为气相速度和第i个颗粒的气相速度,m/s;t为时间,s; C_D 为单颗粒的曳力系数, s^{-1} ; F_D 为颗粒群的曳力系数, s^{-1} ; g_{pi} 为第i个颗粒的重力加速度, m/s^2 ; ρ_p 为颗粒的密度, kg/m^3 ; ρ_g 为气体的密度, kg/m^3 ; s_{pi} 为颗粒移动的距离,m; F_D ($u_i - u_{pi}$)是指单位质量颗粒的曳力, m/s^2 ; μ 为气体黏度, $Pa \cdot s$; d_p 为颗粒粒径, μm ; Re_D 为颗粒的雷诺数。

3 结果与讨论

3.1 模型验证

分离效率可分为总分离效率和分级效率。在工业过程中,总分离效率通常是最常用的评价指标。本文采用CFD-DPM模拟计算的分离效率均是指总分离效率,通过在旋风分离器入口释放一定数量的单分散颗粒,监测从出口逃逸的颗粒数量获得。为了验证数学模型的准确、可靠性,对比了旋风分离器入口气流速度分别为8,16 m/s时,分离效率随粒径变化的模拟结果和试验数据如图2—3所示。可知,在气流速度为16 m/s时,采用CFD-DPM模型获得的分离效率预测曲线与试验曲线以及熊攀等[18]的预测曲线在局部存在一定偏差。这主要是当气流速度较大时,气体的湍动作用加剧,现有湍流模型描述的湍动作用与旋风分离器中实际湍动作用存在一定偏差所致。但总体而言,该模型可以较为准确地预测旋风分离器的分离性能。

3.2 入口气流速度影响

人口气流速度是旋风分离器的重要操作条件之一。对于高浓度的工业用旋风分离器,典型的人口速度一般在15~18 m/s^[19]之间。人口气流速度对旋风分离器的压降和分离效率的影响如图4所示。由图4可知,当人口气流速度在4~24 m/s范围内时,分离效率和压降随人口气流速度的增大呈近似"指

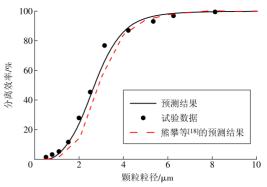


图 2 入口气流速度为 8 m/s 时分离效率对比

Fig. 2 Separation efficiencies obtained by experiment and simulation with an admission velocity at 8 m/s

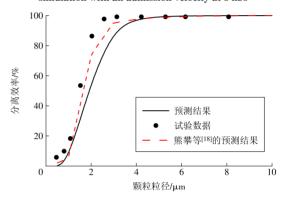


图3 入口气流速度为16 m/s 时分离效率对比

Fig. 3 Comparison of separation efficiency with an admission velocity at 16 m/s

数型"和"抛物线型"增长趋势。随着人口气流速度由 4 m/s增加到 24 m/s,压降增加了 7.75 倍,分离效率提高了 41%。这是由于人口速度增大后,切向速度增大,使得分离效率增大。

3.3 结构参数影响

本节采用 CFD-DPM 模型, 在旋风分离器人口气流速度为 16 m/s 时, 考察旋风分离器的主要结构参数对压降和分离效率的影响。为了展示研究结果的普适性,将人口高度 h_a 、人口宽度 b、排气管直径

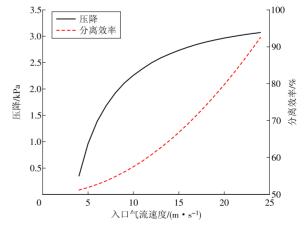


图4 入口气流速度对压降和分离效率的影响

Fig. 4 Influence of admission velocity on pressure drop and separation efficiency

 D_x 、排气管插入深度 L_s 、旋风分离器长度L、中心筒高度h、排尘口直径 D_e ,分别除以筒体直径D得到无量纲结构参数: h_a/D ,b/D, D_s/D , L_s/D ,L/D,h/D, D_e/D 。因此,下文所述结构参数均指无量纲结构参数。

3.3.1 入口高度和宽度

旋风分离器的切向人口结构通常采用横截面为矩形的流道。矩形的高度和宽度分别对应旋风入口的高度和宽度。图5—6分别显示了入口高度 (h_a/D)和宽度(b/D)对压降和分离效率的影响。由图 5—6可知,随着 h_a/D和 b/D分别由 0.30和 0.15增加到 0.75和 0.40,分离效率分别降低了 18.71%和 82.56%。在相同的入口气流速度下,入口高度或者宽度增加均会使入口面积增大,单位时间内进入旋风分离器的气体量增加,使含尘气体由于旋转而产生的动能及动量均增加,有利于颗粒分离。然而,切向速度增大后,旋风分离器边壁处的速度梯度增大,造成边壁处速度剪切层内的微涡增加,边壁处沉积颗粒容易被卷扬,不利于分离。上述两者相互作用,共同影响,使得分离效率随着入口高度和宽度的增加而下降。

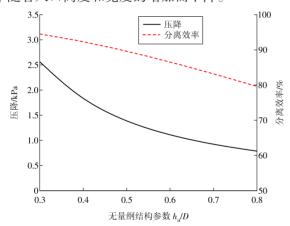


图 5 入口高度对压降和分离效率的影响

Fig. 5 Influence of inlet height on pressure drop and separation efficiency

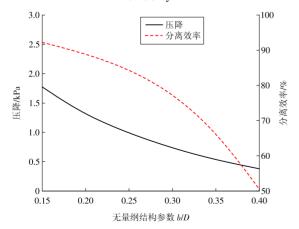


图 6 入口宽度对压降和分离效率的影响

Fig. 6 Influence of inlet width on pressure drop and separation efficiency

此外,由图5—6可知,随着 h_a/D和 b/D分别由 0.30和 0.15增加到 0.80和 0.40,压降分别降低了 69.23%和 77.78%。这主要是由于进气量增加后会引起旋转速度增加,造成流体内摩擦阻力以及流体与器壁间摩擦阻力增大,降低内旋涡的旋转速度,进而使压降降低。这也与曹晴云等 [20] 的研究结果一致。

3.3.2 排气管直径和插入深度

排气管是一个简单的空心圆筒体,与其外面的旋风分离器筒体同轴布置。作为旋风分离器的核心部分,其作用是将分离后的净气输送至旋风分离器顶部排出。因此,压降和分离效率与排气管直径和插入深度密切相关。图7为排气管直径(D,/D)对压降和分离效率的影响。

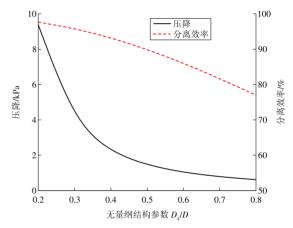


图 7 排气管直径对压降和分离效率的影响

Fig. 7 Influence of exhaust pipe diameter on pressure drop and separation efficiency

由7图可知,随着 D,/D 由 0.75 减小到 0.20,分离效率提高了 26.85%。一方面,切向速度增大,最大切向速度点的径向位置向中心移动,外旋流区变大;另一方面,分离空间的下降流量增加,可使含尘空气在旋风分离器内的停留时间增长,这两点均有利于作高速旋转运动颗粒的分离。此外,由图 7可知,随着 D,/D 由 0.8 减小到 0.20,压降增大了 19倍。这主要是由于 D,/D 减小引起排气管人口处径缩效应程度增大,致使湍流强度增加,压降增大。

图 8 为排气管插入深度(L_s/D)对压降和分离效率的影响。由图 8 可知,当人口高度与直径比 h_s/D 为 0. 5 时,随着 L_s/D 由 0. 4 增加到 2. 0,分离效率降低了 37. 5%,然而,压降受 L_s/D 取值变化影响不大。Hoffmann等[10]也指出,较好的设计原则是将排气管插入深度延伸至人口底板的位置,可同时兼顾制造和维修费用,以及应力、压力损失、短路等问题。

3.3.3 旋风分离器长度

旋风分离器长度也是影响旋风分离器分离性

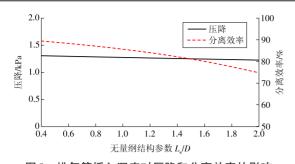


图 8 排气管插入深度对压降和分离效率的影响

Fig. 8 Influence of exhaust pipe's penetration depth on pressure drop and separation efficiency

能的主要因素之一。图 9 为旋风分离器长度(L/D)对压降和分离效率的影响。由图 9 可知,在 L/D 取值为 3.0~7.0 时,增加 L/D,将能逐渐降低压降。这是由于长度增加后,器壁面积会随之增加,器壁对气固流动所产生的摩擦力会增大。摩擦力的增大会降低内旋涡的旋转速度,进而造成压降降低。这也与 Stairmand 模型和 Barth 模型以及 Boysan 等[21]的 CFD模拟计算结果一致。此外,由图 9 可知,在一定范围内,增加 L/D 会提高分离效率。然而,当 L/D 达到 5.0 时,长度变化对分离效率的影响可忽略不计。Hoffmann等[10]研究报道中也指出旋风分离器长度的变化对分离效率的影响比较复杂。

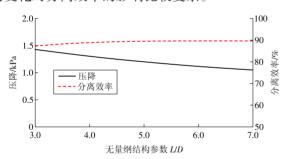


图 9 旋风分离器长度对压降和分离效率的影响

Fig. 9 Influence of cyclone separator's total height on pressure drop and separation efficiency

3.3.4 中心筒高度和排尘口直径

图 10 为中心简高度(h/D)对压降和分离效率的影响。由图 10 可知,在 h/D 取值为 1.0~2.0 时, h/D 的变化对压降和分离效率的影响不大。

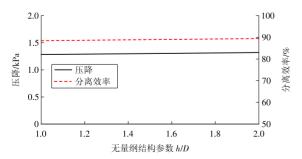


图 10 中心筒高度 h 对压降和分离效率的影响 Fig. 10 Influence of vortex finder's heigh on pressure drop and separation efficiency

旋风分离器排尘口结构和尺寸的设计影响旋风分离器的工作状态。为此,考察了排尘口直径 (D_c/D)对压降和分离效率的影响,如图11所示。由图11可知,在D_c/D取值为0.2~0.4时,D_c/D对分离效率影响不大;压降随着D_c/D增大,略有下降。这也与曹晴云等^[20]的研究结论一致。此外,曹晴云等^[20]经过研究也发现,过大或过小的D_c/D均不利于颗粒分离。这是由于当D_c/D过大时,不稳定的内旋流会把已分离出的聚集在器壁处的粗颗粒重新夹带到旋涡中,造成颗粒严重返混;而当D_c/D过小时,进入灰斗的气量过多,造成灰斗返气夹带加剧,降低分离效率。

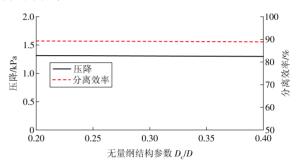


图 11 排尘口直径对压降和分离效率的影响

Fig. 11 Influence of dust discharge diameter on pressure drop and separation efficiency

4 结论

采用CFD-DPM方法,耦合RSM湍流模型,研究了旋风分离器操作条件以及结构参数对其性能的影响,结论如下。

- (1)当人口气流速度为8,16 m/s 时,采用CFD-DPM预测的分离效率均与试验值吻合较好,说明采用该模型能较为准确地预测旋风分离器性能。
- (2)当人口气流速度取值为4~24 m/s时,压降和分离效率随人口气流速度的增大呈近似"指数型"和"抛物线型"增长趋势。
- (3)考察的7个结构参数中,最关键的参数为人口宽度、人口高度、排气管直径、排气管插入深度、旋风分离器长度。随着人口高度和人口宽度、排气管直径和插入深度的增加,压降和分离效率均呈现下降趋势。增加旋风分离器长度会降低压降,但对分离效率影响不大。中心简高度和排尘口直径对压降和分离效率的影响可忽略不计。
- (4)在后续进行旋风分离器结构优化设计过程中,需重点关注旋风分离器的人口宽度、人口高度、排气管直径、排气管插入深度、旋风分离器长度的几何结构和尺寸设计。
 - (5)无量纲入口高度、入口宽度、排气管直径、

排气管插入深度、旋风分离器长度、中心筒高度、排尘口直径取值分别处于 0.30~0.80, 0.15~0.40, 0.20~0.80, 0.3~2.0, 3.0~7.0, 1.0~2.0, 0.2~0.4范围内, 旋风分离器分离性能可作为同类设计参考。

参考文献:

- [1]ZHAO B. Modeling pressure drop coefficient for cyclone separators: A support vector machine approach [J]. Chemical Engineering Science, 2009, 64(19):4131-4136.
- [2]SHEPHERD C B, LAPPLE C E. Flow pattern and pressure drop in cyclone dust collectors cyclone without intel vane [J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1940, 32 (9): 1246-1248.
- [3]STAIRMAND C J. The design and performance of cyclone separators [J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1951, 29:356-383.
- [4]BARTH W.Design and layout of the cyclone separator on the basis of new investigations [J]. Brennstow Wäerme Kraft, 1956,8(4):1-9.
- [5] AVCI A, KARAGOZ I. Theoretical investigation of pressure losses in cyclone separators [J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2001, 28(1): 107-117.
- [6]ZHAO B. A theoretical approach to pressure drop across cyclone separators [J]. Chemical Engineering Technology, 2010,27(10):1105-1108.
- [7]KARAGOZ I, AVCI A. Modelling of the pressure drop in tangential inlet cyclone separators [J]. Aerosol Science and Technology, 2005, 39(9):857-865.
- [8] CHEN J, SHI M. A universal model to calculate cyclone pressure drop [J]. Power Technology, 2007, 171(3): 184-191.
- [9]STAIRMAND C J.Pressure drops in cyclone separators [J]. Industrial & Engineering Chemistry, 1949, 16(B): 409-411.
- [10] HOFFMANN A C, STEIN L E. Gas cyclones and swirl tubes: Principles, design and operation [J]. Applied Mechanics Reviews, 2007, 56(2): B28.
- [11] CASAL J, MARTINEZ-BENET J M. A better way to calculate cyclone pressure drop [J]. Chemical Engineering, 1983, 90(2):99-115.
- [12]DIRGO J. Relationship between cyclone dimensions and performance [D].USA; Harvard University, 1988.
- [13] GIMBUN J, CHUAH T G, FAKHRU A, et al. The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop:

- A CFD study [J]. Chemical Engineering & Processing Process Intensification, 2005, 44(1):7-12.
- [14] HOEKSTRA A J, DERKSEN J J, AKKER H. An experimental and numerical study of turbulent swirling flow in gas cyclones [J]. Chemical Engineering Science, 1999, 54(S13-14):2055-2065.
- [15] ELSAYED K, LACOR C. Optimization of the cyclone separator geometry for minimum pressure drop using mathematical models and CFD simulations [J]. Chemical Engineering Science, 2010, 65(22):6048-6058.
- [16] MUSCHELKNAUTZ E. Die berechnung von zyklonabscheidern für gase [J]. Chemie Ingenieur Technik, 1972, 44;63–71.
- [17]ZHAO B, SU Y, ZHANG J. Simulation of gas flow pattern and separation efficiency in cyclone with conventional single and spiral double inlet configuration [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2006, 84:1158-1165.
- [18]熊攀,鄢曙光,刘玮寅.基于响应曲面法的旋风分离器结构优化[J].化工学报,2019,70(1):164-170. XIONG Pan, YAN Shuguang, LIU Weiyan. Structure optimization of cyclone based on response surface method [J].Journal of Chemical Industry and Engineering(China), 2019,70(1):164-170.
- [19]AC 霍夫曼,LE 斯坦因.旋风分离器:原理、设计和工程 应用[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [20] 曹晴云.CFB锅炉旋风分离器内气固两相流动的数值模拟[D].青岛:中国石油大学,2008.
- [21]BOYSAN F, SWITHENBANK J, AYERS W H. Mathematical modeling of gas-particle flows in cyclone separators [J]. Encyclopedia of Fluid Mechanics, 1986, 4 (6):1307-1329.

(本文责编:惠忻)

作者简介:

彭丽(1988—),女,安徽庐江人,工程师,博士,从事多相流分离技术研究及应用工作(E-mail: pengxy0412@foxmail.com)。

石战胜(1982—),男,河南周口人,高级工程师,博士,从事多相流分离技术研究及应用工作。

董方(1987一),女,河南南阳人,工程师,硕士,从事多相流分离技术研究及应用工作。

敬旭业(1986—),男,河北衡水人,工程师,博士,从事多相流分离技术研究及应用工作。

马治安(1971一),男,河南南阳人,高级技工,从事多相流分离技术研究及应用工作。