

# 高压下旋风分离器进行气液分离的模拟与优化

肖北辰<sup>1</sup>, 张鹏飞<sup>1\*</sup>, 刘兆利<sup>1</sup>, 侯建龙<sup>2</sup>

(1. 天津大学化工学院, 天津 300350; 2. 赛鼎工程有限公司, 山西 太原 030032)

**摘要:** 对大尺寸的工业级旋风分离器在高压下的气液分离过程进行了研究, 运用数值模拟的方法研究了高压工况下旋风分离器内部流场分布。同时对结构进行改进, 在旋风分离器内的不同位置设置多孔板以及在进气口位置设置挡板, 比较结构改进前后分离性能的变化。模拟结果表明, 对称入口有利于流场对称分布, 在分离器内设置多孔板和进口挡板均能提高分离效率, 综合改进后的旋风分离器在不增加分离器的压力损失前提下, 能完全分离粒径大于 5  $\mu\text{m}$  的液滴, 对于小于 5  $\mu\text{m}$  的液滴分离效率比传统分离器提高了 24.60%。

**关键词:** 旋风分离器; 气液两相流; 分离; 数值模拟; 高压系统; 模型优化

中图分类号: TQ051.8

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2018)11-0226-04

DOI: 10.16606/j.cnki.issn.0253-4320.2018.11.049

## Simulation and optimization for gas-liquid separation by cyclone separator under high pressure

XIAO Bei-chen<sup>1</sup>, ZHANG Peng-fei<sup>1\*</sup>, LIU Zhao-li<sup>1</sup>, HOU Jian-long<sup>2</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

2. SEDIN Engineering Co., Ltd., Taiyuan 030032, China)

**Abstract:** The gas-liquid separation under high pressure is studied by a large-scale industrial cyclone separator and numerical simulation method is used to analyze the flow field distribution within cyclone separator under high pressure. The structure of cyclone separator is modified through arranging perforated plates at different positions in the cyclone separator and installing a baffle at the inlet position. The separation performances before and after arranging perforated plate are compared. The simulation results show that the symmetrical inlets facilitate the symmetrical distribution of the flow field. Perforated plates and baffle both can improve the separation efficiency in the separator. After a comprehensive improvement, the cyclone separator can separate completely the droplets with particle size larger than 5  $\mu\text{m}$  without increasing pressure loss of the separator, and the separation efficiency of the droplets with particle size less than 5  $\mu\text{m}$  increases 24.60%.

**Key words:** cyclone separator; gas-liquid two-phase flow; separation; numerical simulation; high pressure system; model optimization

旋风分离器是一种传统的工业两相分离设备, 具有设计简单、制造廉价、维护成本低、适应工况范围广等优点, 被广泛应用于化工、石油、冶金、环保等领域。但由于旋风分离器对于尺寸小于 5  $\mu\text{m}$  的颗粒分离效果不理想, 所以提高小粒径的分离效率是目前的研究重点。

Azadi 等<sup>[1]</sup>对比了 3 个不同尺寸的旋风器模型的分离效率, Demir<sup>[2]</sup>对旋风器的筒体高度、锥体高度和排气管高度对于压降的影响进行了研究, Karagoz 等<sup>[3]</sup>考察了不同入口尺寸对于压降的影响, 然而众多的研究表明, 进行结构尺寸的优化仅能改善压力损失, 对于分离效率的提高并不明显, 所以在旋风器内部添加额外部件成为重点的研究方向。Kepa<sup>[4]</sup>在旋风分离器内部安装了一个反锥体, Su 等<sup>[5]</sup>在旋风分离器入口处增设挡板, 于洲等<sup>[6]</sup>在旋风分离器中心轴处安装了一个旋转叶片, 潘传九等<sup>[7]</sup>在旋风分离器内部增设螺旋导流装置和防返混装置, 陈海焱<sup>[8]</sup>在分离器排气管处增设了旋转涡轮, 这些增设的额外部件改善了旋风器内流动情况,

提高了分离效率。

目前, 对于旋风分离器在高压工况下的研究比较少, 主要因为高压条件下气液密度差变小, 使得分离过程推动力变小, 所以分离效率较低。本文中通过 FLUENT 软件模拟大尺寸旋风器在高压工况下的分离性能以及流场变化, 同时提出旋风分离器结构的改进方案, 以提高在高压工况下的分离性能, 并且为工业级的旋风分离器设计提供了依据。

## 1 模型建立

### 1.1 几何建模及网格划分

本文中对直径 3.8 m 的工业级旋风分离器进行建模。Lim 等<sup>[9]</sup>和葛坡等<sup>[10]</sup>研究发现, 对称多进口旋风分离器能改善单一进口旋风分离器内部流场的不对称性, 因此本文中采用对称双进口结构, 结构简图及网格划分如图 1 所示。采用 Cooper 法对计算区域进行结构性网格划分, 在入口形成的尖角处用非结构网格加密, 最后绘制出 10 万~80 万个网格。经过网格无关性校验, 最终确定的总网格个数约为

收稿日期: 2018-04-28; 修回日期: 2018-09-08

作者简介: 肖北辰(1994-), 男, 硕士生; 张鹏飞(1964-), 副研究员, 研究方向为化工传质与分离, 通讯联系人, zhangpf@tju.edu.cn。

42 万个(扭曲度小于 0.4 的占 97.81%)。具体结构参数如表 1 所示。

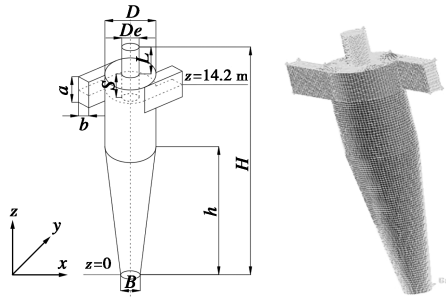


图 1 旋风分离器的结构模型及网格划分

表 1 旋风分离器主要结构参数

结构参数	D	De	H	h	B	S	L	a	b
尺寸	3.8	1.28	17.2	9.5	1.45	1.9	2.0	1.9	0.76

### 1.2 模拟方法

#### 1.2.1 模型选择和边界条件

选择 RNG  $k-\epsilon$  模型和 RSM 模型耦合的方式进行数值模拟,使用二阶迎风格式对计算区域离散化,采用 PERSTO 格式进行压力插值计算,结合 SIMPLEC 算法。而边界条件设定为进气口为速度进口,排气口为自由出口,壁面采用无滑移边界条件。

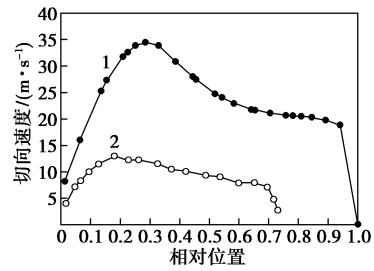
#### 1.2.2 模型验证

由于模拟的旋风分离器为工业级尺寸,建造一个尺寸相同的分离器进行实验的难度较高,因此本节拟从旋风分离器放大规律出发,降低放大过程带来的误差和影响。

Butte 等<sup>[11]</sup>通过实验证明,2 个具有相似尺寸的旋风分离器,若其无因次数积  $I [I = (Stk)^{1/2} (Re)^{1/3} (D_i/D_e)^{2/3}]$  相同,也应该具有相近的分离效率和分离器内部运动情况。张学旭<sup>[12]</sup>在此基础上利用颗粒雷诺数  $Rep$  将旋风器内部流动情况细化为层流区和过渡区。

本文中使用的模型为筒体直径  $D=3\ 800\text{ mm}$  的旋风分离器(进气速度为  $35\text{ m/s}$ )与  $D=190\text{ mm}$  旋风分离器(进气速度为  $15\text{ m/s}$ )具有相似的流场。因此将模拟结果与文献[13]中的实验数据进行对比,由于筒体直径不同,采用半径的相对位置( $r/R$ )作为横坐标,对比结果如图 2 所示。

从图 2 中可以看出,模拟结果与实验结果变化趋势大致相同,变化峰值出现的位置也较为接近,数值大小的不同是由于进气速度不一样,因此可以认为模拟结果与实验结果的误差可以接受,模型可以用于后续研究。



1—模拟结果;2—实验数据

图 2 切向速度沿径向分布

## 2 模拟结果与分析

### 2.1 旋风分离器内部速度场分析

图 3(a)和(b)分别为旋风分离器内  $x=0\text{ m}$  截面和  $z=14.2\text{ m}$  截面处的速度矢量图。从图(a)可以看出,流场具有良好的对称性,分离器内部流场由一个从入口螺旋向下的外旋流和一个从锥底螺旋向上的外旋流组合而成,二者旋转方向一致,有明显的分界面。但少部分气体在进入旋风分离器后,会直接进入内部旋流,从出气口排出,这部分气体携带的液滴无法得到有效的分离。

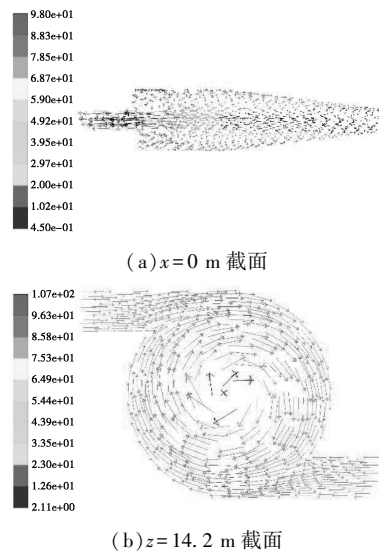


图 3 不同截面速度矢量图

### 2.2 旋风分离器内结构优化

旋风分离器内部会形成“上灰环”和“排气管短路流”等现象是影响分离器效率的不利因素,“上灰环”是由于少部分颗粒在分离器顶部的死区聚集而形成的;“排气管短路流”是指颗粒在进入分离器主体部分前被上升气流直接夹带而出。本文中拟分别采用设置多孔板和设置挡板以抑制 2 种现象的形成。

#### 2.2.1 设置多孔板

考察 2 种多孔板的设置方式对旋风分离器内流

场的影响。假设多孔板的开孔率为 50%，孔径为 4 mm，多孔板的厚度为 6 mm。2 种多孔板的设置方式如图 4 所示，图(a)所示的多孔板设置在 X-Y 平面的 0~90°和 180~270°区域内；图(b)所示的多孔板设置在 X-Y 平面的 90~180°和 270~360°区域内。

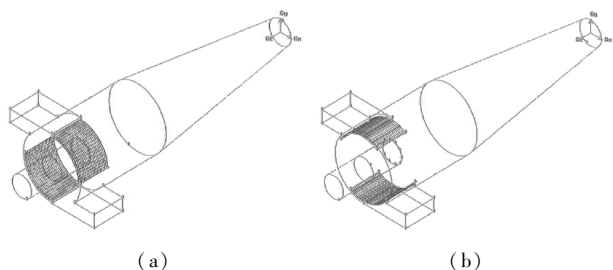
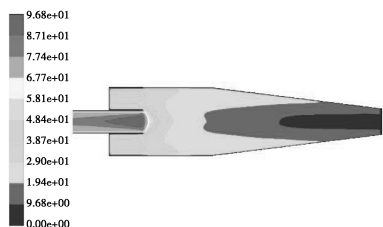
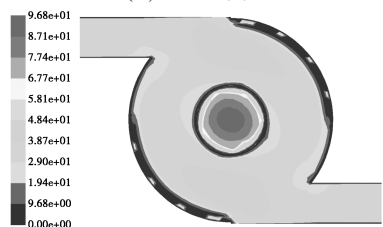


图 4 2 种多孔板设置方式

图 5 和图 6 显示了旋风分离器设置 2 种位置多孔板后  $x=0$  m 截面和  $z=14.2$  m 截面处的速度分布

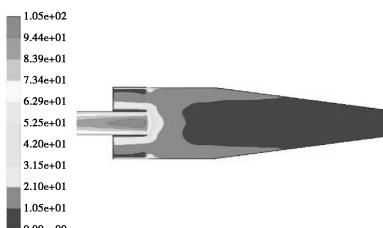


(a)  $x=0$  m 截面

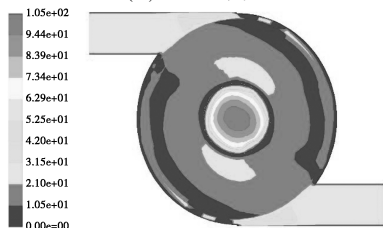


(b)  $z=14.2$  m 截面

图 5 多孔板-a 在  $x=0$  m 和  $z=14.2$  m 截面速度云图



(a)  $x=0$  m 截面

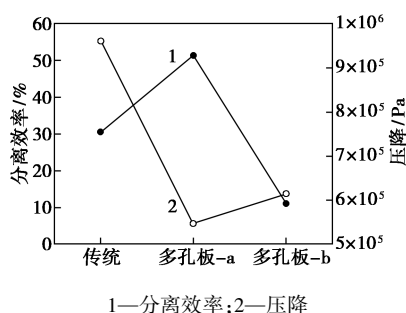


(b)  $z=14.2$  m 截面

图 6 多孔板-b 在  $x=0$  m 和  $z=14.2$  m 截面速度云图

云图。由图可以看出，设置多孔板后，气体在穿过多孔板后会有较大的速度梯度。用第一种方式设置的多孔板，液滴通过孔道后速度大幅降低，可以很顺利进入灰斗。而用第二种方式设置的多孔板，气体在进入旋风器后受到多孔板的阻力使得速度大大降低，容易从排气管直接排出，使得气液分离大部分在多孔板上发生。

通过对比 2 种多孔板设置方式的旋风分离器的分离效率和压降(如图 7 所示)，多孔板设置方案 b 的分离效率比传统分离器的分离效率还要低，而多孔板设置方案 a 的分离效率和压降都要优于传统分离器。



1—分离效率;2—压降

图 7 不同旋风分离器分离效率和压降对比

### 2.2.2 设置进口挡板

在旋风分离器进口处设置挡板位置如图 8 所示，挡板长度 1.6 m，宽度 1.9 m，与进气管截面夹角为 75°。

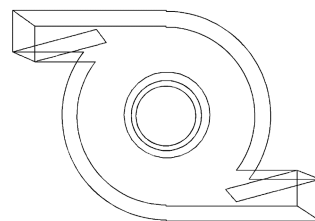


图 8 挡板设置位置示意图

图 9(a)和(b)是安装挡板后旋风器分离分别在  $x=0$  m 截面和  $z=14.2$  m 截面处的速度分布云图。通过对比可以发现，安装挡板后，气体在进入旋风器分离时具有较大的切向速度，液滴更容易被甩出气流主体。但挡板与进气管构成了一个三角形的“死区”，会有少部分液体在此区域累积，不过该区域体积较小，造成的误差在可接受范围。

### 2.2.3 旋风分离器结构综合改进

在旋风分离器内同时设置多孔板和进口挡板，保持操作条件相同，研究分离器结构综合改进后的分离效率和压降变化。从图 10 和图 11 可以看出，对于不同结构的旋风分离器，分离效率均随液滴粒

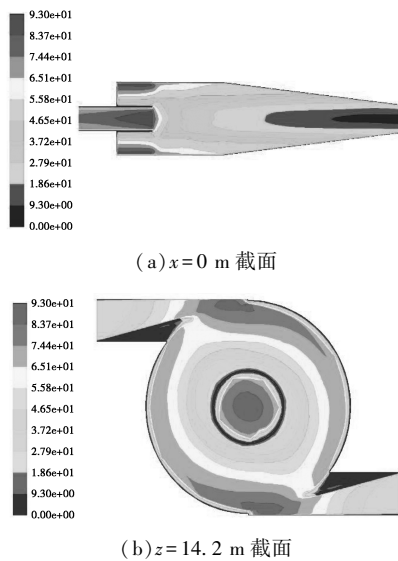
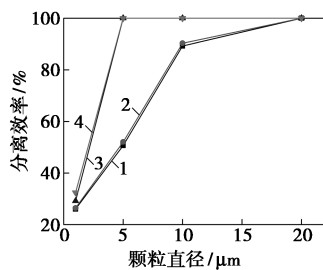


图 9 不同截面速度云图



分离器类型:1—传统;2—多孔板;3—挡板;4—综合

图 10 不同结构旋风分离器级效率曲线

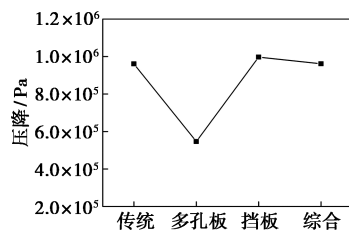


图 11 不同结构旋风分离器压降对比

径的增大而提高。在旋风分离器内部增设额外部件,均促进旋风分离器分离性能的提高。在旋风分离器内部设置挡板后,对于粒径大于  $5 \mu\text{m}$  的液滴均能完全分离,但分离器压降增大,而设置多孔板能有效减低分离器的压力损失。因此,进行综合改进的旋风分离器不仅能完全分离粒径大于  $5 \mu\text{m}$  的液滴,而且旋风分离器压降并没有较大变化。

### 3 结论

利用 Fluent 软件对高压工况下旋风分离器的流场、性能和结构进行了研究,得出了以下结论。

(1) 对称入口的旋风分离器在高压下流场分布

具有良好的对称性,气流运动符合一般旋风分离器的双旋流运动,切向速度分布有明显的驼峰。

(2) 在旋风分离器内的 2 个不同位置(a: X-Y 平面的  $0 \sim 90^\circ$  和  $180 \sim 270^\circ$  区域内;b: X-Y 平面的  $90 \sim 180^\circ$  和  $270 \sim 360^\circ$  区域内)设置多孔板,多孔板位于 a 位置的分离器性能要优于传统分离器,而多孔板位于 b 位置的分离器性能比传统分离器还要差。

(3) 在进气口位置设置挡板后,直径在  $5 \mu\text{m}$  以上的液滴颗粒能够全部分离,而分离器进出口的压力损失仅增加了 3.81%。

(4) 旋风分离器结构进行综合改进后,在操作压力 6.5 MPa,进气速度 30 m/s 条件下,粒径大于  $5 \mu\text{m}$  的液滴颗粒能够全部分离,粒径为  $1 \mu\text{m}$  的液滴颗粒的分离效率为 32.43%,与传统分离器相比提高了 24.60%,但旋风分离器整体压降基本不变。

### 参考文献

- [1] Azadi M, Azadi M, Mohebbi A. A CFD study of the effect of cyclone size on its performance parameters [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 182(1/2/3): 835-841.
- [2] Demir S. A practical model for estimating pressure drop in cyclone separators: An experimental study [J]. Powder Technology, 2014, 268: 329-388.
- [3] Karagoz I, Avci A. Modelling of the pressure drop in tangential inlet cyclone separators [J]. Aerosol Science and Technology, 2005, 39(9): 857-865.
- [4] Kepa A. The efficiency improvement of a large-diameter cyclone-The CFD calculations [J]. Separation and Purification Technology, 2013, 118(43): 105-111.
- [5] Su Y X, Zheng A Q, Zhao B T. Numerical simulation of effect of inlet configuration on square cyclone separator performance [J]. Powder Technology, 2011, 210(3): 293-303.
- [6] 于洲, 马春元. 动态旋风分离装置分离效率的理论与实验研究 [J]. 现代化工, 2014, 34(6): 122-125.
- [7] 潘传九, 靳兆文, 冯秀. 旋风分离器的螺旋导流和防返混 [J]. 化工进展, 2012, 31(6): 1215-1219.
- [8] 陈海淼. 涡轮除尘技术 [J]. 现代化工, 2003, 23(1): 49-51.
- [9] Lim K S, Kwon S B, Lee K W. Characteristics of the collection efficiency for a double inlet cyclone with clean air [J]. Journal of Aerosol Science, 2003, 34(8): 1085-1095.
- [10] 葛坡, 袁惠新, 付双成. 对称多入口型旋风分离器的数值模拟 [J]. 化工进展, 2012, 31(2): 296-299.
- [11] Butter H, Ebert F. Particle collection in small laboratory cyclones as basis for the design of large-scale cyclones [J]. Chemical Engineering and Technology, 1989, 12: 295-301.
- [12] 张学旭. 旋风分离器的模型试验方法 [J]. 中国粉体技术, 2000, 6(3): 12-14.
- [13] Fraser S M, Abdel-Razek A M, Abdullah M Z. Computational and experimental investigations in a cyclone dust separator [J]. Journal of Process Mechanical Engineering, 1997, 211(4): 247-256. ■