

内置滤袋旋风器的设计及数值模拟

李亚龙,段红燕,陈鹏飞,田宏伟
(兰州理工大学 机电工程学院,甘肃 兰州 730050)

摘要:为改善普通旋风器的分离效率,提出一种内置滤袋旋风器。通过对该模型不同滤袋尺寸下内部气固两相流场的模拟,观察其不同截面处的速度和压力云图得出:当滤袋直径与旋风器排气口直径相同且开始逐渐增大,设备的性能趋好;直到滤袋侧面与旋风器进气口内侧壁在俯视图投影中即将相切时,旋风器性能最为稳定;滤袋长度到达旋风器锥体时设备表现更稳定。

关键词:旋风分离器;滤袋;数值模拟

中图分类号:TP391.9 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)04-0144-04

Design and Numerical Simulation of Cyclone with Built-in Filter Bag

LI Yalong, DUAN Hongyan, CHEN Pengfei, TIAN Hongwei

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: To improve the separation efficiency of ordinary cyclones, a cyclone with a built-in filter bag is proposed. when the diameters of both filter bag and cyclone exhaust port are the same and enlarging gradually, the performance of the equipment tends to improve. When the side of the filter bag and the inner wall of the cyclone inlet are about to be tangent in the top view projection, the cyclone performance is very stable, and even more stable when the length of the filter bag reaches the cone of the cyclone.

Keywords: cyclone separator; filter bag; numericalsimulation

0 引言

旋风分离器作为一种用于石油、环保等行业起净化分离作用的设备,是利用旋转流产生离心力将流体中不同密度的杂质从流体中分离出来的除尘装置,具有结构简单、耐高温、耐高压、性能稳定、分离效率高的优点^[1-2]。旋风器在处理 10 μm 以上的含尘气体时效果十分明显,然而空气质量指标在 10 μm 以下粒径的粉尘却很难通过普通旋风器分离出来^[3]。在大型矿井开挖、隧道掘进等工作现场粉尘粒径低于 10 μm 的粉尘占总粉尘比例 70%左右。因此,设计分离范围更广的新型结构旋风除尘器是十分必要的。

为实现粉尘粒径在 10 μm 以下微米级含尘气体的净化,ZEVENHOVEN C^[4]研发了耦合静电作用的连续逆流式移动床过滤器,用于加压流化床燃烧过程中高温高压气体净化。SIBANDA V 等^[5]通过在进气口设置陶瓷过滤器,待净化气体通过陶瓷过滤器进行部分分离后再经过旋风分离器分离。中国石油大学高思鸿等^[6]提出了一种新型旋流场-颗粒床耦合分离设备。将旋风分离器离心分离和移动床过滤分离有机结合,实现一个设备两级净化过程,提高了旋风器的分离能力,为气体净化技术提供了一种新的思路。

根据前人研究经验,为处理 10 μm 以下含尘气体并提高旋风器的分离能力,本文设计一款适用于处理粉尘粒径

为 5 μm 左右的内设滤袋的新型结构旋风分离器。

1 物理模型的建立

以隧道爆破、矿山掘进施工工况所产生尘浓度和数量为例。本文设计的内设滤袋旋风器结构如图 1 所示。该装置分为 6 部分:进气口、圆柱体、圆锥体、滤袋、排气口、排尘口。含尘气体从旋风器入口切向进入后,从入口的直线运动变为旋转运动。在重力和离心力的作用下,粉尘在不断地旋转过程中粒径在 10 μm 以上的得到分离并从排尘口排除;在传统旋风器中 10 μm 以下的粉尘大多数会被空气带出排气口很难得到分离。新型内设滤袋式旋风器中 10 μm 以下的粉尘经过滤袋出排尘口的过程中,会被滤袋再次分离。为了使滤袋更好地服务于旋风器,在滤袋长度 β 为 44 mm 恒定情况下,直径 α_i 为变量形成 B_i 模型;在滤袋直径 α 为 45 mm 恒定情况下,设长度 β_i 为变量形成模型 C_i(表 1)。在不同变量下对各旋风器的性能进行比较,建立物理模型 B_i 和 C_i(i=1,2,3,4;其中 B₂=C₁)见图 2。

表 1 几何模型参数 单位:mm

参数	B _i 模型			C _i 模型		
	B ₁	B ₃	B ₄	C ₁	C ₂	C ₃
α	35	50	60	45	45	45
β	44	44	44	44	88	132

第一作者简介:李亚龙(1989—),男,甘肃渭源人,硕士研究生,研究方向为工业机器人,2775547374@qq.com。

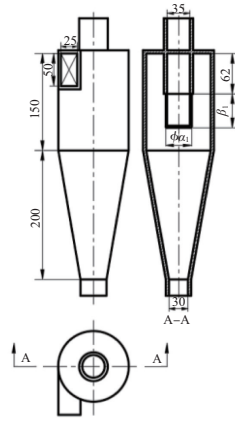


图1 内置滤袋旋风器的结构尺寸

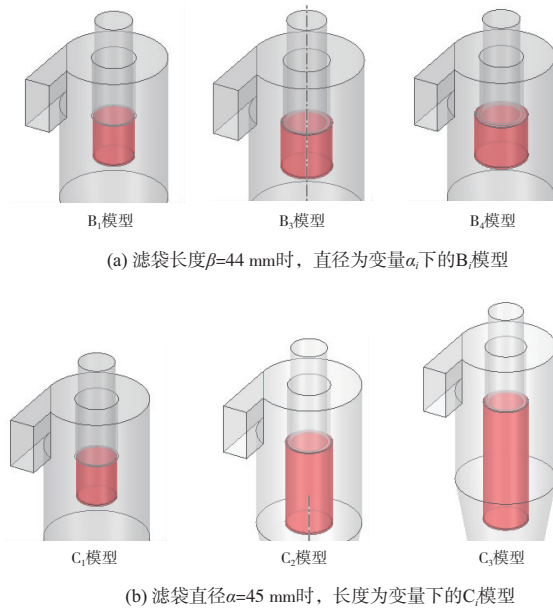


图2 内置滤袋尺寸不同的各旋风器物理模型

2 数值模拟

2.1 数学模型

采用流体分析软件对内置滤袋旋风器结构型旋风除尘器内流场进行数值模拟分析。三维黏性流动不可压缩流体的 Navier-Stokes 方程为

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \tau} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \mathbf{v} + \mathbf{F} \quad (1)$$

式中: ρ 为流体密度; \mathbf{v} 为速度矢量; P 为压力; μ 为动力黏度; \mathbf{F} 为体积力; 数学符号 ∇ 为哈密顿算子。压力速度耦合采用 SIMPLEC 算法, 压力梯度采用 PRESTO! (pressure staggering option) 方法, 各项流采用 QUICK 差分格式, 湍流模型采用能反映强旋流动各向异性的雷诺应力湍流模型 (reynolds stress model, RSM)。

2.2 网格划分及无关性验证

用 ICEM 对内置滤袋旋风器 C_i型和 B_i型进行结构网

格的划分。经过节点数和网格数量调整后使网格质量大于 0.35。以旋风器压降作为参考值进行网格无关性验证。当网格数达到 28.3 万时, 网格数量的增加对压降无明显影响。网格数对模拟结果的影响可以忽略不计。

2.3 边界条件及计算条件

内置滤袋旋风器 C_i和 B_i的入口设为速度入口 (velocity inlet), 入口速度为 20 m/s, 水里直径为 0.033 m。排气口设置为压力出口 (pressure outlet), 水里直径为 0.035 m。排尘口设置为捕获 (trap)。滤袋壁面设置为多孔跳跃边界 (porous jump)^[7], 其筒体面渗透率设置为 $5 \times 10^{-11} \text{ m}^2$, 厚度设置为 2 mm; 筒体底面渗透率为 $5 \times 10^{-7} \text{ m}^2$, 压力阶系数为 0。

两相流中, 气体相设置为空气。固体相设置为无烟煤粉 (anthracite) 密度为 1800 kg/m^3 。采用罗辛-拉姆勒分布函数对粉尘粒径分布进行描述, 粉尘最小粒径为 $1 \times 10^{-6} \text{ m}$, 最大粒径设为 $1 \times 10^{-5} \text{ m}$, 平均粒径为 $5 \times 10^{-6} \text{ m}$ 。含尘气体的进入方式设置为沿入口面切向喷射进入。

3 数值模拟结果与分析

内置滤袋旋风器流场的特性, 通过对比旋风器内 $x=0$ 截面上 $z=115 \text{ mm}$ 、 $z=170 \text{ mm}$ 、 $z=215 \text{ mm}$ 、 $z=240 \text{ mm}$ 这 4 个位置的速度来分析各模型的内部流场关系。另外, 通过压力分布云图来整体确定分离器的性能。

3.1 滤袋直径对旋风器速度流场的影响

由图 3 B_i型分离器不同截面处的速度分布曲线图可知, 各模型内气体速度在靠近旋风器轴心处为最低, 由轴心向外速度不断增大, 在距离壁面 10 mm 左右速度达到最大, 然后随着半径的增大逐渐减小, 整体曲线图成“M”型分布。

从图 3(a)—图 3(c) 可以看出内置滤袋旋风器 B₁、B₂、B₃、B₄ 模型内部流线基本相似, 但 B₁、B₂ 模型整体速度较 B₃、B₄ 更高; 从图 3(a) 来看 B₁ 模型相对 B₂ 模型来说速度流线整体更佳, 图 3(b) 两流线基本重合很难区分速度高低, 然而从图 3(c) 来看 B₂ 模型又比 B₁ 模型整体速度更高。所以在截面 $z=115 \text{ mm}$ 、 $z=170 \text{ mm}$ 、 $z=215 \text{ mm}$ 很难区分 B₁ 和 B₂ 模型哪一个速度更佳。

从图 3(d) 可知在 $z=240 \text{ mm}$ 截面处, 模型 B₁ 较模型 B₂ 速度更高, 但是模型 B₂ 较模型 B₁ 对称稳定性更好, 其因为在有滤袋的截面上, 滤袋对内部流场速度的影响很明显, 在有滤袋的范围内 4 种模型速度升降变化尺度大。相较其他 3 个模型 B₂ 最为稳定。

3.2 滤袋长度对旋风器速度流场的影响

由图 4 C_i型旋风器不同截面处的速度分布曲线图可知, 速度曲线走向和 B_i 大体相似, 都是在轴心位置速度达到最低, 由轴心向外逐渐增大在靠近旋风器壁面时又逐渐减小。

由图 4(a) 可知, 在截面 $z=115 \text{ mm}$ 处, 3 个 C 模型的

速度流线图基本重合没有太大差异。由图 4(b)可知在截面 $z=170\text{ mm}$ 处, C_3 模型较其他两个模型速度曲线差异性很大, 这是由于模型 C_3 的滤袋已处于该截面处。由

图 4(c)—图 4(d)可知, 在截面 $z=215\text{ mm}$ 、 $z=240\text{ mm}$ 处 C_3 模型较 C_1 、 C_2 速度更高, 另外, 在 $z=170\text{ mm}$ 和 $z=240\text{ mm}$ 处 C_3 模型比其他两个模型速度变化更为平稳。

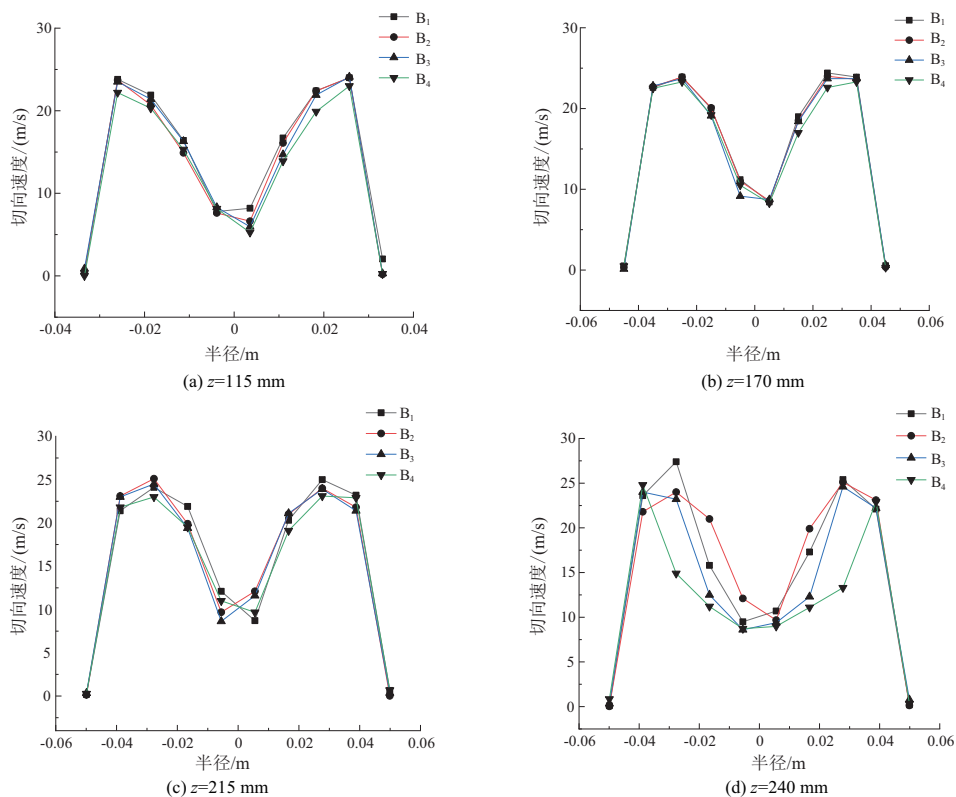


图 3 B_i型旋风器在不同截面上的速度对比

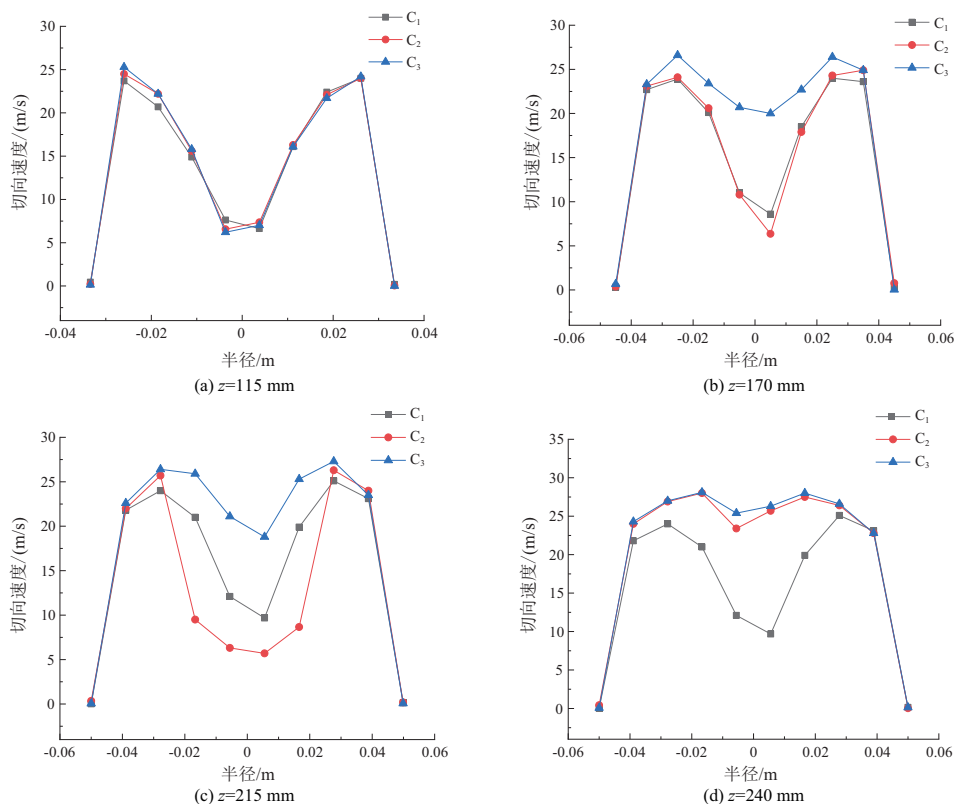


图 4 C_i型旋风器在不同截面上的速度对比

3.3 滤袋直径对旋风器静压分布的影响

从图 5 可知,模型 B₁、B₂、B₃、B₄在 x=0 截面上的静压分布大体相似,都是由旋风器轴心向内壁逐渐增大,到达旋风器壁面时静压达到最大。由于内置滤袋的直径不同,所以各模型压降有明显的不同,主要表现在压降的大小方面。在压降升降方面 B₂和 B₄表现比其他两个模型更为优越。相较 B₂和 B₄,B₃的压差比 B₂小,但是 B₂模型产生的负压更小,表现更为稳定。

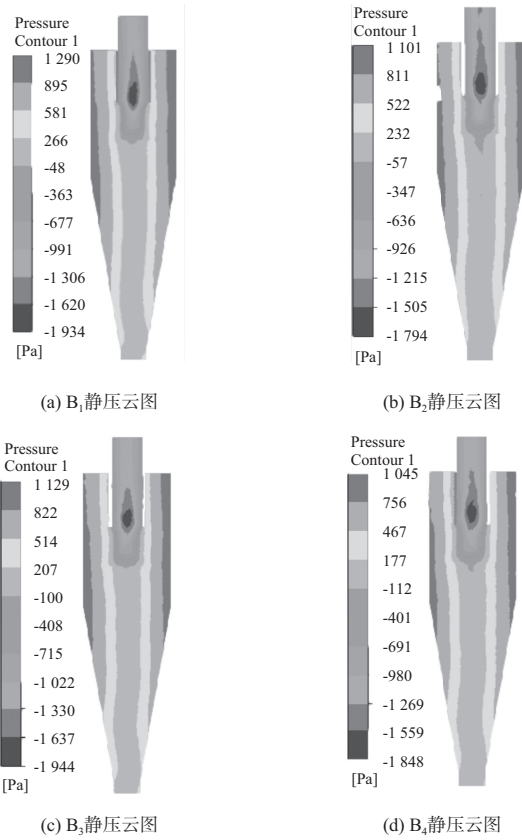


图 5 B_i模型在 x=0 截面上的静压云图

3.4 滤袋长对旋风器静压分布的影响

由图 6 可知,模型 C₁、C₂、C₃在 x=0 截面上的静压分布规律基本相似,在旋风器轴心附近 C₃所受的压力比 C₁、C₂明显小。这是因为在模型 C₃下滤袋长度和面积更大,滤袋两侧的压差会变小。3 个模型在整体内部压差上没有太大的差别,小范围来说 C₁和 C₃较 C₂静压差更小,性能更好一点。

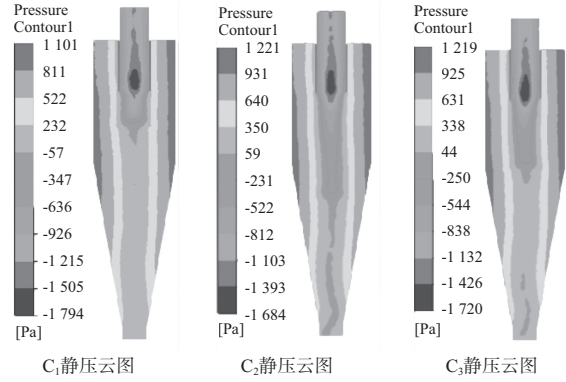


图 6 C_i模型在 x=0 截面上的静压云图

4 结语

1) 在普通旋风器中设置一定大小的滤袋,在数值模拟过程中是收敛的。所以内置滤袋旋风器工作过程中是可以实现旋风除尘和过滤除尘两种工作机理。

2) 在滤袋直径与旋风器排气口直径相同并逐渐增大的过程中,性能越来越好,直到内置滤袋旋风器滤袋侧面与旋风器排气口内侧壁投影线在 xz 平面投影中相切时滤袋所达到的直径为滤袋最佳直径。结合滤袋的速度流线和静压云图可知,当滤袋超过旋风器圆柱体 1/8 左右的锥体距离时,内置滤袋旋风器各方面性能更好。

3) 内置滤袋旋风器可以实现对粉尘粒径为 5 μm 左右含尘气体的分离净化,且分离效率高。

参考文献:

[1] PRABHANSU, KARMAKAR M K, CHANDRA P, et al. A review on the fuel gas cleaning technologies in gasification process[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2015, 3(2): 689-702.

[2] ASADULLAH M. Biomass gasification gas cleaning for downstream applications;a comparative critical review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 40: 118-132.

[3] 陈建义. 切流反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.

[4] ZEVENHOVEN C. Particle charging and granular bed filtration for high temperature application[D]. Dutch Delft: Delft University of Technology, 1992.

[5] SIBANDA V, GREENWOOD R W, SEVILLE J P K. Particle separation from gases using cross-flow filtration[J]. Powder Technology, 2001, 118(1/2): 193-202.

[6] 高思鸿,刘培学,范怡平,等. 新型旋流场-颗粒床耦合分离设备静压分布[J]. 化工学报, 2020, 71(2): 516-525, 904.

[7] 聂荣琦,谭志洪,熊桂龙,等. 双层结构滤袋除尘器的效能分析与结构优化[J]. 南昌大学学报(工科版), 2018, 40(4): 329-334.

收稿日期:2022-01-05