

Study on suppression effect of apex cone on secondary flow in cyclone

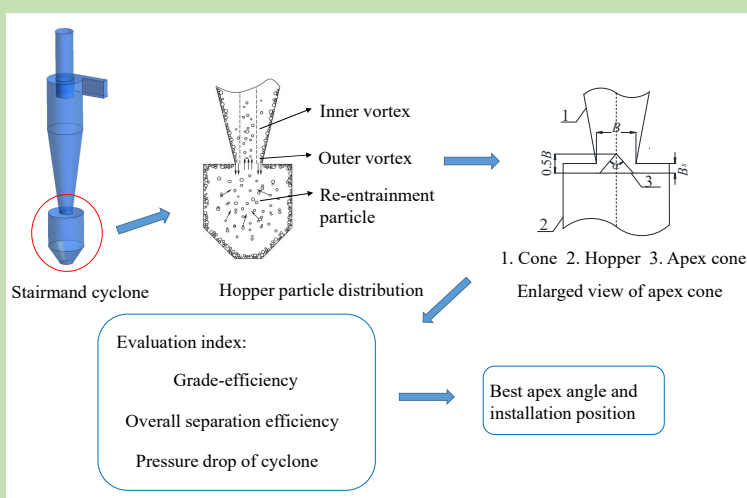
Dong LI¹, Honggang YANG^{2,3}, Yi WANG^{1,2*}, Xiaofan CAI¹, Ruming CAI¹

1. College of Construction Equipment Science and Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China
2. State Key Laboratory of Green Buildings in Western China, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China
3. College of Resources Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China

Abstract: The secondary flow effect existing in the hopper of the cyclone caused the captured particles to re-enter the airflow, which decreased the separation efficiency of the cyclone. In order to effectively suppress the secondary flow effect in the hopper, the two-phase flow numerical simulation study of the cyclone with different geometric dimensions and installation positions of the apex cone was carried out by means of built-in apex cone. The results showed that the built-in apex cone reduced the tangential, axial velocity and turbulence intensity of the flow field in the hopper, and had a significant suppression

effect on the re-entrainment caused by the secondary flow in the hopper of the cyclone. The simulation results recommend that the optimal angle of the apex cone was 80° , and the best installation position was that the vertical distance between the bottom surface and the cone section was $0.375B \leq B_s \leq 0.5B$. When the inlet velocity was 12 m/s, compared with the original structure, the overall separation efficiency was improved by 11.50%, and the pressure drop increased by 8.29%.

Key words: cyclone; particle re-entrainment; overall separation efficiency; grade-efficiency; pressure drop



收稿: 2020-01-13, 修回: 2020-03-25, 网络发表: 2020-04-03, Received: 2020-01-13, Revised: 2020-03-25, Published online: 2020-04-03

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(编号: 2018YFC0705300); 西安建筑科技大学人才科技基金资助项目(编号: RC1831)

作者简介: 李冬(1993-), 女, 吉林省白城市人, 硕士研究生, 建筑与土木工程专业, E-mail: 15590167735@163.com; 王怡, 通讯联系人, E-mail: wangyi6920@126.com.

引用格式: 李冬, 杨宏刚, 王怡, 等. 防返混锥对旋风除尘器内二次流的抑制效果研究. 过程工程学报, 2020, 20(12): 1397-1405.

Li D, Yang H G, Wang Y, et al. Study on suppression effect of apex cone on secondary flow in cyclone (in Chinese). Chin. J. Process Eng., 2020, 20(12): 1397-1405, DOI: 10.12034/j.issn.1009-606X.220020.

防返混锥对旋风除尘器内二次流的抑制效果研究

李冬¹, 杨宏刚^{2,3}, 王怡^{1,2*}, 采晓帆¹, 蔡如明¹

1. 西安建筑科技大学建筑设备科学与工程学院, 陕西 西安 710055

2. 西安建筑科技大学西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安 710055

3. 西安建筑科技大学资源工程学院, 陕西 西安 710055

摘要: 旋风除尘器下部灰斗内存在的二次流会引起被捕集颗粒重新进入气流, 进而导致旋风除尘器除尘效率下降。为有效抑制灰斗内二次流, 采用内置防返混锥的手段, 对不同防返混锥几何尺寸与安装位置的旋风除尘器进行两相流数值模拟。结果表明, 内置防返混锥减少了灰斗内流场的切向、轴向速度及湍流强度, 对旋风除尘器灰斗内二次流所引起的颗粒返混现象有显著的抑制作用。模拟结果推荐防返混锥最佳几何尺寸的顶角角度为 80° , 最佳安装位置为底面与锥口的垂直距离 $0.375B \leq B_s \leq 0.5B$ 。在入口速度为 12 m/s 时, 与原结构相比, 总除尘效率提高 11.50%, 压降增加 8.29%。

关键词: 旋风除尘器; 颗粒返混; 总除尘效率; 分级效率; 压降

中图分类号: X701.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-606X(2020)12-1397-09

1 前言

旋风除尘器是一种通过离心力的作用将颗粒从气流中分离捕集的机械式除尘装置。由于旋风除尘器具有结构设计简单、无运动部件、较低的制造和维护成本及可在极端操作条件下使用等特点, 被广泛用于工业颗粒排放控制^[1-3]。通常情况下, 旋风除尘器对细颗粒的除尘效率较低, 这对于工业颗粒的排放控制不利, 其原因极其复杂。已有研究证实, 含尘气流在旋风除尘器内由自上而下的外涡旋转为自下而上的内涡旋过程中存在二次流, 表现为灰斗内的颗粒返混现象, 是导致旋风除尘器对细颗粒除尘效率较低的主要原因之一^[4,5]。因此国内外学者对旋风除尘器内灰斗颗粒返混问题进行了大量研究。

Peng 等^[6,7]通过实验发现旋风除尘器下部灰斗内存在颗粒返混, 这是由于外涡旋尾端会延伸直至灰斗内部, 并保持旋转运动, 使灰斗内部已分离颗粒随内涡旋从排气管逃逸; 同时指出旋风除尘器设计时的关键技术之一是抑制灰斗内部二次流引发的颗粒返混。Barth 等^[8]对外涡旋尾端引起的颗粒返混进行了分析, 建议在锥口下方内置防返混锥, 通过实验研究证实内置防返混锥可有效抑制灰斗颗粒返混, 提升除尘效率。Kepa^[9,10]认为内置防返混锥抑制了涡旋尾端向下延伸至灰斗底部, 有效改善了除尘器内部二次流, 防止已分离颗粒返混, 并基于 Barth 模型通过理论推导计算防返混锥的最佳安装位置。Yoshida 等^[11,12]通过可视化泡沫实验研究

了不同几何尺寸防返混锥顶角附近的气流运动情况, 得出顶角为 70° 时切割粒径最小为 $0.825 \mu\text{m}$ 。龙蔚羽等^[13]通过数值模拟方法研究内置防返混锥对旋风除尘器内流场的影响, 得出内置防返混锥可使筒体内涡核平均偏心距降低 21.3%, 使除尘器流场趋于稳定。

已有研究表明, 内置防返混锥可有效抑制旋风除尘器内部二次流引发的灰斗颗粒返混问题, 提高除尘效率。但目前不同学者推荐的几何尺寸及安装位置存在较大异议, 且仅给出相对宽泛的范围, 不利于实际应用中几何尺寸及安装位置的确定, 本工作通过顶角角度 α 及防返混锥底面与锥口的垂直距离 B_s 两个参数确定防返混锥几何尺寸及安装位置, 考察了内置不同几何尺寸及安装位置的防返混锥对小粒径颗粒除尘效率的影响。

2 几何模型

选用逆流式 Stairmand 高效旋风除尘器为研究对象, 几何模型见图 1, 筒体直径 $D=280 \text{ mm}$ 。将其主体分为分离空间(包括锥体和筒体)和灰斗两部分, 排气管插入深度与入口高度相同。研究^[14]表明, 防返混锥的几何尺寸中本体高度 h 对旋风除尘器除尘效率的影响很小, 所以在对防返混锥几何尺寸因素进行考察时将其本体高度设为常数, $h=0.5B$ ^[11], 其中 B 为旋风除尘器锥口直径。为考察防返混锥几何尺寸及其安装位置对旋风除尘器除尘性能的影响, 通过调整顶角角度 α 实现不同防返混锥几何尺寸, $\alpha=60^\circ\sim 85^\circ$ 。通过定义防返混锥底面距锥口的垂直距离 B_s 描述防返混锥的安装位置, $B_s=$

(0~0.5)*B*，工况设置见表 1。

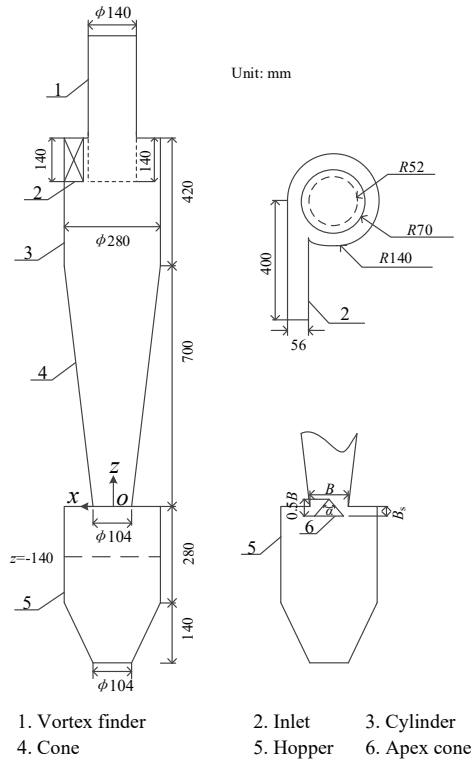


图 1 旋风除尘器的几何模型
Fig.1 Cyclone geometry model

3 数值模拟

3.1 数值模型

采用 Fluent 软件对内置防返混锥旋风除尘器内部两相流流场进行数值模拟，依据 RSM 模型求解气相雷

诺时均 N-S 方程，并采用 DPM 模型求解颗粒运动方程，压力-速度耦合采用 SIMPLEC 算法，压力梯度项采用 PRESTO! 差分格式求解，各对流项采用 QUICK 差分格式求解^[15]。气相介质为空气，密度为 1.205 kg/m³，黏度为 1.8×10⁻⁵ kg/(m²·s)，颗粒相为滑石粉，密度 $\rho=2700$ kg/m³。设定颗粒入口浓度为 9 g/m³，颗粒相体积分数小于 10%，因此仅考虑颗粒相与气相之间双向耦合，忽略颗粒之间的相互碰撞。气相与颗粒之间动量耦合传递采用单元内颗粒源法^[16]计算。

3.2 边界条件

入口条件：设置为速度入口， $U_{in}=12$ m/s^[17]，处理风量 $Q_f=338.69$ m³/h，考察颗粒相入口浓度 $C_i=9$ g/m³，颗粒粒径分别为 1.12, 3.21, 5.63, 7.34, 9.65 和 12.3 μ m 时的除尘效率。设定颗粒相与气相入口速度相同，入口处湍流脉动动能 $k=0.35$ m²/s²，湍流强度 $I=4.01\%$ 。

出口条件：设置为自由出流边界条件，所有变量在出口截面处轴向梯度为 0，颗粒相边界条件为逃逸。

壁面条件：设置为无滑移边界条件，用标准壁面函数处理近壁面网格。颗粒相在分离空间边界条件为反弹，底面边界条件为捕集。

在上述边界条件设置的基础上，对气相进行如下前提假设：

- (1) 将旋风除尘器内气相视为连续介质，由于入口速度小于 30 m/s，气相可视为不可压缩流体^[18]。
- (2) 因含尘气流在除尘器内停留时间较短，可认为整个分离过程为绝热过程，忽略旋风除尘器内温度变化。

表 1 工况设置
Table 1 Working condition settings

Variant	Apex angle/°	Vertical distance, B_s	Variant	Apex angle/°	Vertical distance, B_s
a_0	—	—	b_0	—	—
a_1	60	0	b_1	80	0
a_2	65	0	b_2	80	0.125 <i>B</i>
a_3	70	0	b_3	80	0.25 <i>B</i>
a_4	75	0	b_4	80	0.375 <i>B</i>
a_5	80	0	b_5	80	0.5 <i>B</i>
a_6	85	0			

3.3 网格独立性验证

采用 ICEM 对除尘器整体进行网格划分。为了提高网格质量，在筒体内部采用 O-block 块划分，近壁面处网格加密。为了确保 Fluent 计算结果独立于网格尺寸，完成 6 个不同网格数下旋风除尘器内部两相流流场模拟。选取压降作为目标参数，进行网格独立性验证。执行网格独立性验证的目的是保证进一步细化网格时不

会引起结果变化^[19]。图 2 为压降随网格数的变化结果。由图可知，当网格数小于 45 万时，压降随网格数增加急剧增大，而当网格数大于 45 万时，随网格数增大，压降变化趋于稳定，再增加网格数已经不会引起压降的明显变化，模拟中网格数取约 45 万。

3.4 模型验证

为验证 RSM 和 DPM 模型对旋风除尘器内两相流

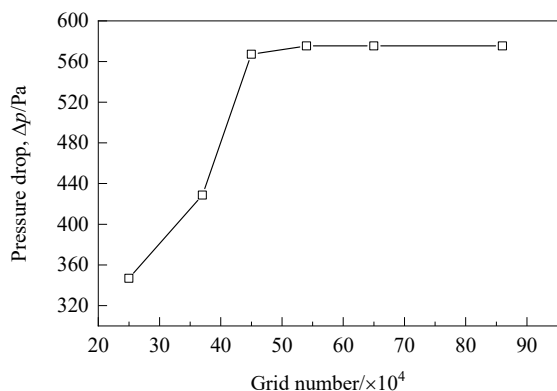
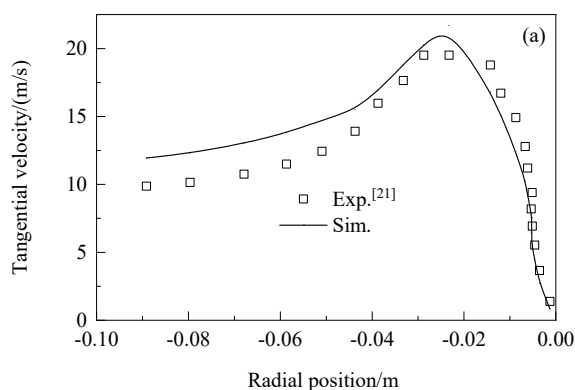


图2 不同网格数下的压降变化

Fig.2 Variation of pressure drop under different grid numbers



流场模拟结果的可靠性,对文献[20,21]的实验条件下旋风除尘器进行两相流模拟,并与实验数据进行对比。由图3可知,模拟结果与实验值的总体变化趋势基本一致,平均误差分别为17.41%和12.29%,误差在允许范围内,数值模拟与实验结果的一致性可接受,表明本工作采用的计算模型可很好地反映旋风除尘器的气固分离过程。

4 结果与讨论

4.1 防返混锥几何尺寸

为研究防返混锥几何尺寸对旋风除尘器除尘性能的影响,在防返混锥安装位置一定的情况下,通过改变其顶角角度改变防返混锥几何尺寸。

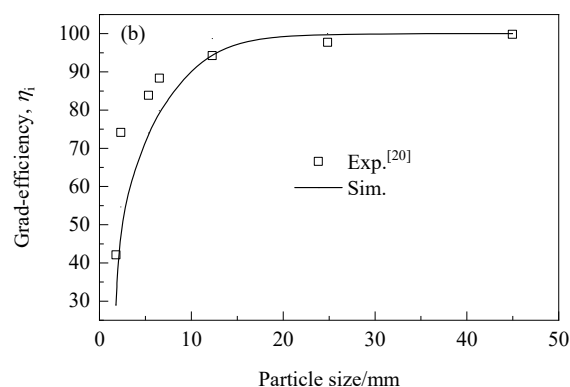
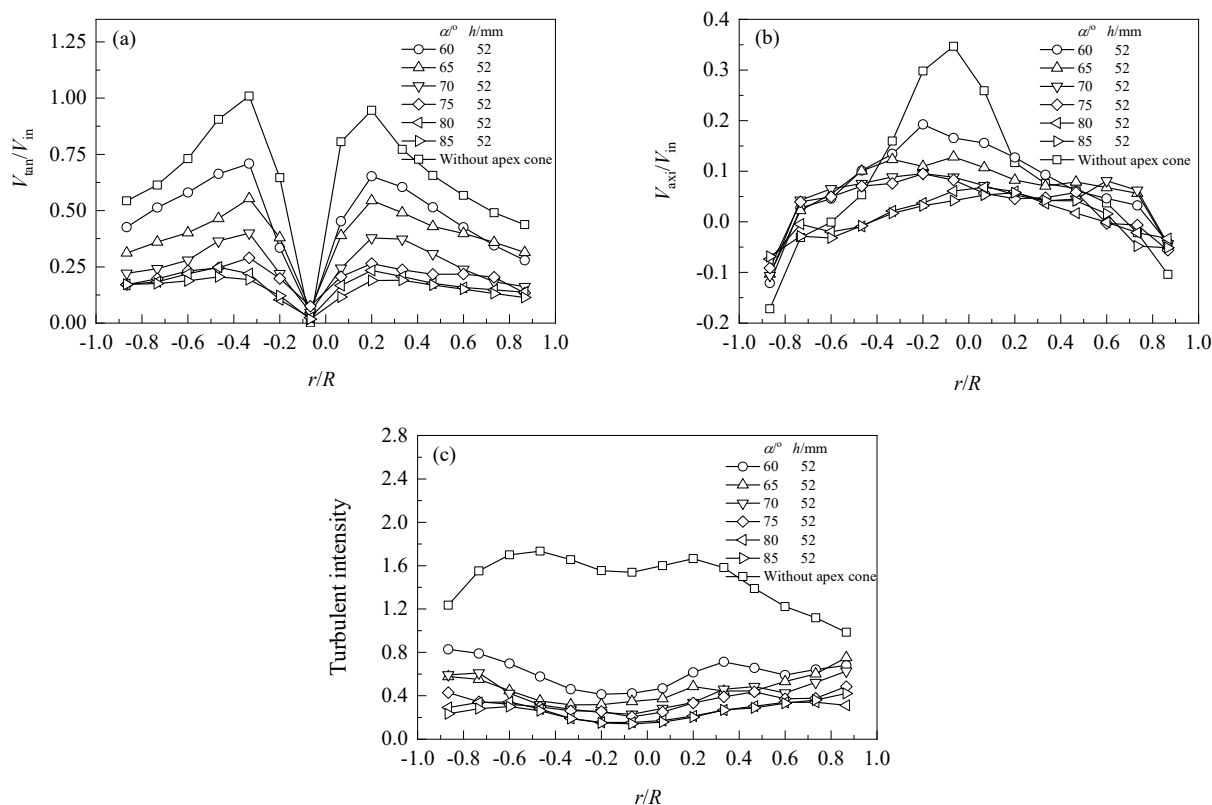
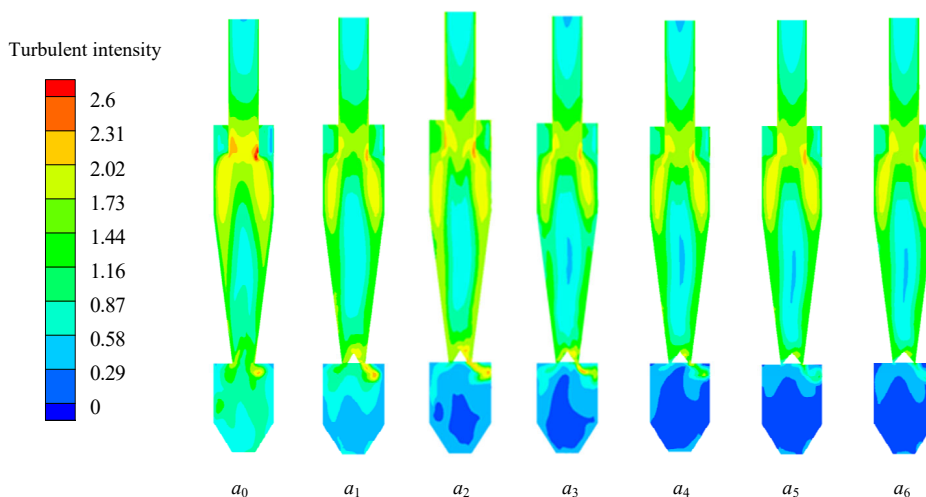
图3 实验值^[20,21]与模拟值的对比Fig.3 Comparisons of experimental^[20,21] and simulated values

图4(a)和4(b)分别为不同防返混锥顶角角度时,灰斗内 $z=-140$ mm截面 x 轴上无量纲切向与轴向速度的分布。内置防返混锥后,除尘器内仍为双旋流分布,切向速度沿径向呈“驼峰”型,以最大值为界限分为外涡旋与内涡旋,外涡旋为近似刚体转动的准自由涡;内涡旋为近似无损失涡旋的准强制涡。由图4(a)可知切向速度随顶角角度增加而逐渐减少,这是由于内置防返混锥后,进入灰斗内的下行流流量随顶角角度增加而减少,使灰斗内速度分布趋于平稳。由图4(b)可知,无防返混锥(a_0 结构)时轴向速度在径向分为中间上行流及近壁面下行流,且中间上行流的速度高于其他区域,作高速螺旋向上运动,易将灰斗内待分离颗粒卷入上行流造成颗粒返混。内置防返混锥后,上行流速度明显减小,能有效抑制灰斗内二次流,降低灰斗内折返气流对颗粒的扰动与返混夹带。

湍流强度表示脉动速度随时间的变化情况,反映了流场湍流扩散的强弱。图4(c)为 $z=-140$ mm截面 x 轴上湍流强度分布。无防返混锥时,湍流强度存在两个峰值呈M型分布,最大值为1.73。内置防返混锥后,湍流强

度明显降低,减弱了流场对颗粒的湍流扩散作用。图5为 $x=0$ 截面湍流强度云图,无防返混锥时,灰斗内折返气流做高速螺旋运动,在顶板处产生较大速度梯度形成涡旋,将边壁气流卷吸进入内涡旋,产生强烈的动量交换及湍流能量耗散,使灰斗内流场极不稳定。内置防返混锥后,锥口处气流流动发生改变,由高速螺旋向上运动变为低速绕流运动,贴附防返混锥锥面低速向上运动汇入内涡旋,湍流强度明显降低,进一步说明内置防返混锥可以提高灰斗内流场稳定性,有利于颗粒分离。

图6(a)为旋风除尘器分级效率曲线。由图可知, a_5 工况下 $3.21\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒的分级效率比无防返混锥结构增加40.9%,而 $9.65\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒的分级效率无明显增加,即内置防返混锥对粒径小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 颗粒分级效率的影响较显著。原因为颗粒在竖直方向上受气流曳力与自身重力,粒径大于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 时颗粒所受曳力小于重力,向下沉降并捕集,而粒径小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 时颗粒所受曳力大于重力,颗粒跟随气流作螺旋向上运动,最终从排气管逃逸。内置防返混锥时,灰斗内轴向速度及湍流强度减少,颗粒所受曳力减少,粒径小于 $5\text{ }\mu\text{m}$ 的颗粒跟随气流运动至锥

图 4 $z=-140$ mm 截面 x 轴无量纲速度及湍流强度分布Fig.4 Dimensionless velocity and turbulent intensity distributions along x-axis on $z=-140$ mm section图 5 $x=0$ mm 截面的湍流强度云图Fig.5 Contours of turbulent intensity on $x=0$ mm section

口，与防返混锥底面碰撞，失去部分动能，在离心力作用下甩向壁面并捕集。

在入口颗粒浓度分布相同时，总除尘效率是反映除尘器性能的综合指标。由图 6(b)可知，由于防返混锥对气流的阻碍作用随顶角角度增加而增强，压降也逐渐增加，最大增长率为 10.04%。总除尘效率随顶角角度增加

先增加后减小，在顶角角度 $\alpha=80^\circ$ 时总除尘效率最高为 0.83。这是由于顶角角度较小时，灰斗内上行流流速较高，颗粒跟随上行流进入内涡旋从排气管逃逸，除尘效率无明显增加；顶角角度较大时，锥口处可通过面积较小，阻碍颗粒下落进入灰斗，颗粒在锥口处形成高浓度区，如图 7 所示，易被此处汇入内涡旋的气流夹带从排

气管逃逸, 因此应合理选择防返混锥的尺寸。

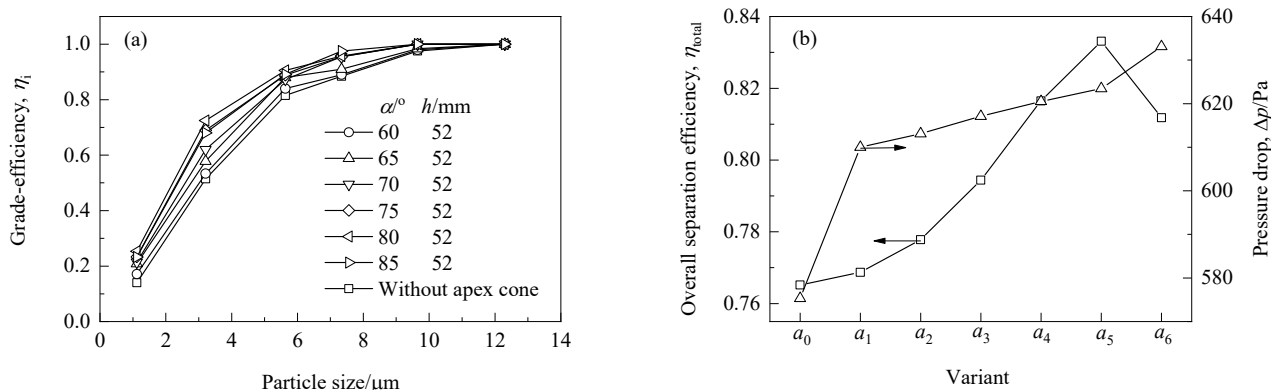


图6 不同顶角角度的旋风除尘器除尘性能参数

Fig.6 Separation performance parameters of cyclones with different apex angles

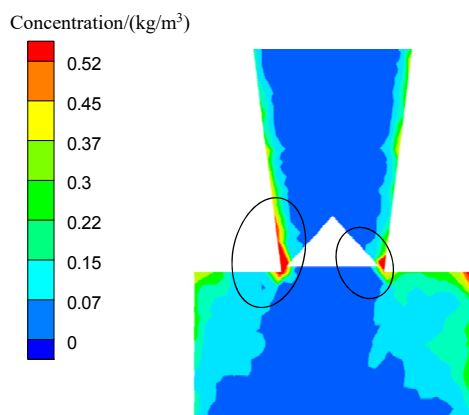


图7 $x=0$ mm 截面颗粒浓度分布云图

Fig.7 Contour of particle concentration distribution on $x=0$ mm section

4.2 防返混锥安装位置

由上述的分析可知 $\alpha=85^\circ$ 时, 锥口出现颗粒堆积, 阻碍了颗粒下落进入灰斗的过程。因此考虑防返混锥不同安装位置对除尘性能的影响, 选定 a_5 结构的防返混锥

几何尺寸, 通过改变其底面与锥口的垂直距离 B_s 来改变防返混锥安装位置, 相关工况见表1。

图8(a)为不同防返混锥安装位置下旋风除尘器的分级效率分布曲线。由图可知, 随防返混锥安装位置下移, 分级效率略有增加。这是由于 b_1 结构中防返混锥位于锥口上方, 部分气流在锥口处汇入内涡旋, 在锥体和壁面之间形成回流区如图9所示, 壁面处部分颗粒被气流夹带进入内涡旋从排气管逃逸, 因此为了减少内置防返混锥对分离空间流场的影响, 安装位置不宜位于锥口上方。图8(b)为不同安装位置总除尘效率及压降分布曲线, 随防返混锥安装位置下移, 总除尘效率逐渐增加, 当 $B_s \geq 0.375B$ 时, 总除尘效率无显著变化, 可见防返混锥底面与锥口的垂直距离 B_s 存在一个最佳的范围, 依据本模拟结果, 防返混锥底面与锥口的最佳安装距离为 $0.375B \sim 0.5B$, 此时压降比无防返混锥时增加8.03%~8.29%。

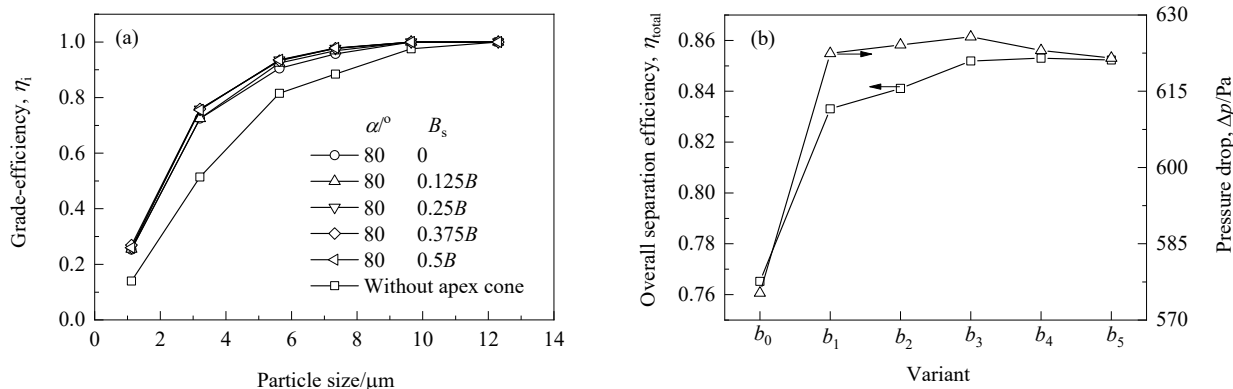
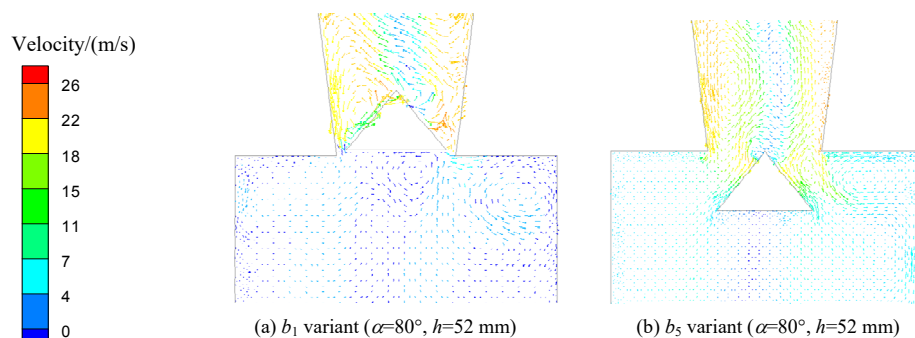


图8 不同防返混锥安装位置下的旋风除尘器除尘性能参数

Fig.8 Separation performance parameters of cyclones with different apex cone installation positions

图 9 $x=0$ mm 截面的速度矢量图Fig.9 Speed vector diagrams on $x=0$ mm section

4.3 入口速度

由上述分析可知，防返混锥位于锥口下方 $0.375B \sim 0.5B$ ，顶角角度为 80° (b_4 结构) 时除尘器具有最佳除尘性能，以 b_4 结构为研究对象，考察不同入口速度时，防返混锥对灰斗颗粒返混的抑制效果。

图 10 为不同入口速度下旋风除尘器除尘性能参数。由分级效率曲线[图 10(a)]可知，随入口速度增加，小粒径颗粒分级效率增加，但分级效率增长率却逐渐降低，入口速度为 12, 18, 24 m/s 时，总除尘效率分别比无防返混锥时增加 11.50%, 7.43%, 4.59% [图 10(b)]，增长

率随入口速度增大逐渐降低，可见在低入口速度时，防返混锥对灰斗颗粒返混的抑制效果更佳。这是由于随入口速度增加，除尘器内径向速度分量增加，由此引起的短路流等其他二次流加剧^[22]，使颗粒逃逸量增大。图 10(c) 为不同入口速度时的除尘器压降，与相同工况下无内置防返混锥的除尘器相比，分别增加 47.7, 123.41, 188.68 Pa，即内置防返混锥可在增加少量压降基础上抑制灰斗颗粒返混，提高除尘效率。入口速度为 12 m/s 时，压降比无防返混锥时增加 8.29%。

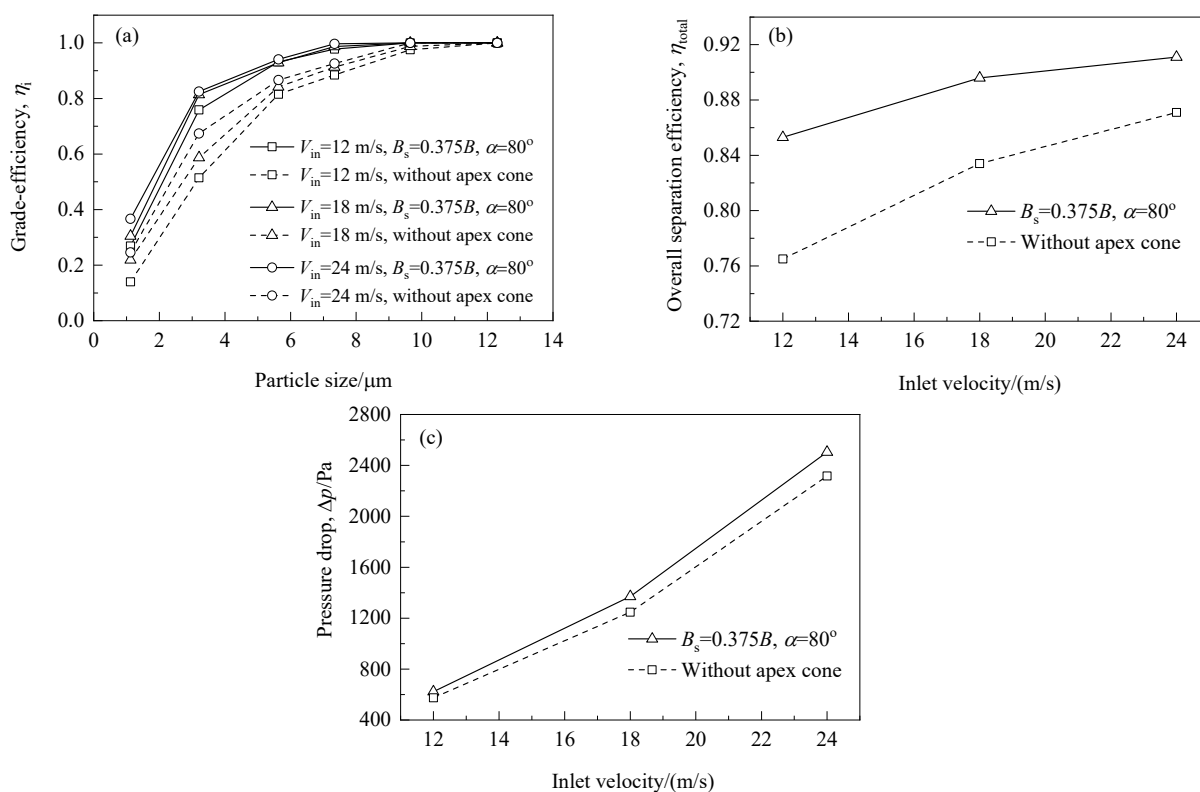


图 10 不同入口速度下的旋风除尘器除尘性能参数

Fig.10 Separation performance parameters of cyclones with different inlet velocities

5 结论

采用 Fluent 软件对内置防返混锥旋风除尘器进行两相流数值模拟研究, 分析了其内部二次流引起的灰斗颗粒返混问题, 以总除尘效率、分级效率及压降作为性能评价指标, 确定了防返混锥最佳几何尺寸及安装位置, 得出结论如下:

(1) 内置防返混锥后, 灰斗内湍流强度及速度明显降低, 防返混锥改变了锥口处气流流动形式, 使灰斗内流场趋于稳定, 有利于颗粒分离。

(2) 顶角角度较大时, 在锥口处出现颗粒高浓度区, 阻碍颗粒下落进入灰斗, 因此应合理确定防返混锥的几何尺寸, 在高度一定的条件下, 推荐最佳顶角角度 $\alpha=80^\circ$ 。

(3) 防返混锥位于锥口上方时, 在锥口处形成回流区, 壁面颗粒随气流运动汇入内涡旋, 为减少对分离空间流场的扰动和对除尘效率的影响, 防返混锥安装位置不宜过高, 推荐范围为 $0.375B\sim0.5B$ 。

(4) 内置防返混锥在增加少量压降的基础上提高了旋风除尘器的除尘效率, 且低入口速度下对灰斗颗粒返混的抑制效果更佳。

参考文献

- [1] Omid R N, Davood T, Masoud A. Effects of multi inlet guide channels on the performance of a cyclone separator [J]. Powder Technology, 2019, 356: 353–372.
- [2] Wang S Y, Hao L, Wang R C, et al. Effect of the inlet angle on the performance of a cyclone separator using CFD-DEM [J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30: 227–239.
- [3] 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): 915–921.
Ma X, Xu Y Y, Xu Y, et al. Effect of cyclone gas outlet duct length on the flow pattern and performance [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2016, 16(6): 915–921.
- [4] Sakura G B, Leung A Y T. Improvements of the cyclone separator performance by down-comer tubes [J]. Journal of Hazardous Materials, 2016, 311: 100–114.
- [5] 亓成刚. 导叶式旋风管排尘口处颗粒返混夹带的实验研究 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2011: 32–33.
Qi C G. Experimental study on the back mixing of particles in the dust exhaust of a guide vane cyclone [D]. Beijing: China University of Petroleum Beijing, 2011: 32–33.
- [6] Peng W, Hoffmann A C, Dries H W A, et al. Experimental study of the vortex end in centrifugal separators: the nature of the vortex end [J]. Chemical Engineering Science, 2005, 60(2): 6919–6928.
- [7] Peng W, Hoffmann A C, Dries H W A, et al. Neutrally buoyant tracer in gas cleaning equipment: a case study [J]. Measurement Science & Technology, 2005, 16(12): 2405–2414.
- [8] Barth W, Trunz K. Modellversuche mit wasserdurchstromten zyklonabscheidern zur vorausbestimmung der abscheideleistung [J]. ZAMM, 1950, 30(8): 255–257.
- [9] Kepa A. The effect of a counter-cone position on cyclone performance [J]. Separation Science and Technology, 2012, 47(16): 2250–2255.
- [10] Kepa A. The efficiency improvement of a large-diameter cyclone—the CFD calculations [J]. Separation and Purification Technology, 2013, 118: 105–111.
- [11] Yoshida H, Yusuke N, Fukui K, et al. Effect of apex cone shape on fine particle classification of gas-cyclone [J]. Powder Technology, 2010, 204(1): 54–62.
- [12] Yoshida H. Effect of apex cone shape and local fluid flow control method on fine particle classification of gas-cyclone [J]. Chemical Engineering Science, 2013, 85: 55–58.
- [13] 龙薪羽, 刘根凡, 谢翔. 防返混锥对旋风分离器流场影响的大涡模拟 [J]. 化工设备与管道, 2019, 56(1): 20–25.
Long X Y, Li G F, Xie X. Large eddy simulation of the effect of anti-back mixing cone on the flow field of cyclone dust collector [J]. Process Equipment Piping, 2019, 56(1): 20–25.
- [14] Farzad P, Seyyed H H, Khairy E, et al. Numerical investigation of effects of inner cone on flow field, performance and erosion rate of cyclone separators [J]. Separation and Purification Technology, 2018, 201: 223–237.
- [15] Crowe C T, Sharma M P, Stock D E. The particle-source-in cell (PSI-cell) model for gas-droplet flows [J]. Journal of Fluids Engineering, 1977, 99(6): 325–332.
- [16] 孙立强, 胡月, 王迪, 等. RSM 与 LES 模拟旋风分离器流场动态特性的对比分析 [J]. 化学反应工程与工艺, 2018, 34(4): 289–296.
Sun L Q, Hu Y, Wang D, et al. Comparative analysis of flow field dynamic characteristics of RSM and LES simulated cyclone separator [J]. Chemical Reaction Engineering and Technology, 2018, 34(4): 289–296.
- [17] 刘福顺, 谷春荣, 徐冰, 等. 旋风分离器的设计选型及工程应用 [J]. 中国环境监测, 1996, 12(5): 57–59.
Liu F S, Gu C R, Xu B, et al. Pattern design of cyclone separator and its application in engineering [J]. Environmental Monitoring in China, 1996, 12(5): 57–59.
- [18] 龙天渝, 蔡增基. 流体力学 [M]. 第三版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019: 7–10.
Long T Y, Cai Z J. Fluid mechanics [M]. 3rd Ed. Beijing: China Construction Industry Press, 2019: 7–10.
- [19] 杨宏刚, 王怡, 赵江平, 等. 基于 DPM 模型求解自由下落颗粒羽流卷吸空气量 [J]. 环境工程学报, 2017, 11(4): 2384–2390.
Yang H G, Wang Y, Zhao J P, et al. Solving plume air entrainment of free-fall particles based on DPM model [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(4): 2384–2390.
- [20] 钱付平, 章名耀. 不同排尘结构旋风分离器分离特性的研究 [J]. 燃烧科学与技术, 2006, 12(2): 169–174.
Qian F P, Zhang M Y. Separation characteristics of cyclone separators with different dust outlet geometries [J]. Journal of Combustion Science and Technology, 2006, 12(2): 169–174.
- [21] 钱付平. 不同排尘结构及操作条件旋风分离器分离特性的研究 [D]. 南京: 东南大学, 2006: 27.
Qian F P. Study on the separation characteristic of a cyclone separator with different dust outlet geometries and operating conditions [D]. Nanjing: Southeast University, 2006: 27.
- [22] 付烜, 孙国刚, 刘佳, 等. 旋风分离器短路流的估算问题及其数

值计算方法的讨论 [J]. 化工学报, 2011, 62(9): 2535–2540.

Fu X, Sun G G, Liu J, et al. Discuss on estimation difficulties and

numerical computation methods for short circuit flow in cyclone separators [J]. CIESC Journal, 2011, 62(9): 2535–2540.