

秸秆炭化烟气两级除尘装置设计及数值模拟

辛明金¹ 陈天佑¹ 孟军² 邬立岩¹
焦晋康¹ 张强¹ 刘翠红¹ 宋玉秋¹ 任文涛¹

1. 沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110161; 2. 辽宁省生物炭工程技术研究中心, 沈阳 110161

摘要 为提高秸秆炭化烟气的除尘效率,在典型旋风分离器基础上,在排气管中增设回转拨指轮,构成两级除尘。利用 SolidWorks 和 ANSYS ICEM 软件对其建模和网格划分,在数值模拟软件 FLUENT 中采用 RNG $k-\epsilon$ 模型和 RSM 模型相结合的方法进行流场模拟,建立了流场理论模型。采用 DPM 模型对颗粒的分离效率进行模拟,测试在同一烟气进口速度(20 m/s)条件下,典型旋风分离器及不同回转转速(0、900、1 450、2 900 r/min)下两级式除尘装置内部烟气流场的静压、切向速度、径向速度、轴向速度分布及不同粒径颗粒的分离效率。结果表明,与传统旋风除尘器相比,回转拨指轮对除尘器内的静压有较大的影响,且静压随转速的增大而增大;回转拨指轮转速对流场切向速度亦有较大的影响,随转速提高,切向速度增大,但对径向速度和轴向速度的影响较小;两级除尘及内部回转拨指轮转速对 $1\ \mu\text{m}$ 颗粒收集无较大影响,但对于 $10\ \mu\text{m}$ 以上的颗粒,可显著提高分离效率,且随转速增大分离效率有所提高,但不同转速对分离效率的影响差异不显著。

关键词 秸秆炭化; 烟气除尘; 旋风分离器; 离心分离; 拨指轮; 分离效率

中图分类号 X 71; S 216 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2018)03-0100-08

炭化是农作物秸秆资源化利用的有效措施之一,可用于解决秸秆浪费、田间焚烧污染以及温室气体排放等问题^[1-2],但炭化过程产生的烟气中含有大量的烟尘颗粒物,如未经净化排放,会造成空气污染,严重的还会直接威胁人类健康和环境安全。作为一种重要的气固分离设备,旋风除尘器因其具有结构简单、设备紧凑、制造容易、成本较低等优点,被广泛应用于化工、冶金、煤矿、机械制造等各种需要对气体进行净化或需要对固体颗粒进行回收的工业领域^[3]。但是,传统的旋风分离器由于工作时主要依靠颗粒的惯性力作用,导致其对于细颗粒的脱除、分离效率较低,如何有效地提高旋风除尘器的性能成为当前旋风除尘器研究过程中创新和突破的难点^[4]。

国内外学者对旋风除尘器的结构优化与流场模拟进行了相关研究。关于旋风除尘器的结构优化方面,Xiong 等^[5]研究了改变轴向入口后对旋风除尘器的影响,结果表明,旋风除尘器改变轴向入口后具有更好的分离效率。王乐勤等^[6]分析了筒体长度对

旋风除尘器内流场的影响,得到了旋风除尘器的分离效率随筒体长度进行相应变化的规律。Zhu 等^[7]设计了双环形旋风除尘装置,该装置在普通旋风分离器内增设筒壁,并将排气管移至下方,排气管中上升气流变成下降气流,颗粒物在内外 2 个环形区域内都得到了分离,此装置有较高的除尘效率。Karagoz 等^[8]研究了涡流长度对除尘效率的影响,结果表明,增加长度,除尘效率提高。Hoffmann 等^[9]和 Obermair 等^[10]在锥体与接灰斗之间加设直管,并在接灰斗内部设计防混锥,结果表明灰斗中湍流明显减弱,除尘效率显著提高。有关旋风除尘器的流场模拟方面的研究结果表明, $k-\epsilon$ 模型不适合模拟高速旋转的流场^[11-13]。Pant 等^[13]通过对标准的 $k-\epsilon$ 模型、RNG $k-\epsilon$ 模型和雷诺应力模型(RSM)进行对比,结果表明,RSM 最适于模拟旋风分离器内流场。刘淑艳等^[14]采用多种湍流模型对旋风分离器内部流场进行数值模拟,并将模拟结果与实验值进行对比,结果表明雷诺应力模型更适合用于强旋流流场的数值模拟,采用雷诺应力模型得到的结果比采用

收稿日期: 2017-10-18

基金项目: 国家科技部科技支撑项目(2014BAD02B06-02); 公益性行业(农业)科技专项项目(201303095)

辛明金, 博士, 教授. 研究方向: 农业生产机械化技术及装备. E-mail: xinmj2005@163.com

通信作者: 宋玉秋, 博士, 副教授. 研究方向: 农业生产机械化技术及装备. E-mail: songyquisyau@sina.com

标准 $k-\epsilon$ 模型的结果更接近实验值。

目前的旋风除尘,主要依靠气流本身运动的离心力进行分离。为提高分离效果,本研究在典型除尘器基础上,设计两级秸秆炭化烟气除尘装置,并进行流场及除尘效率的数值模拟,为烟气高效除尘器的结构优化设计提供参考。

1 材料与方 法

1.1 两级除尘装置设计

1)工作原理。为提高除尘效率,在典型旋风除尘器基础上,在排气管中增设回转拨指轮,形成两级除尘,装置的结构如图1所示。秸秆炭化后的烟气首先切向进入旋风除尘器中,利用旋风除尘器的结构特点,在离心力和重力的作用下进行灰尘颗粒物的初步分离;一次分离后的烟气进入排气管中,在排气管中增设的回转拨指轮带动烟气高速旋转,在离心力的作用下,将灰尘甩到排气管的内壁,实现二次分离。

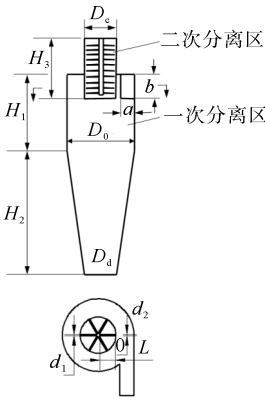


图1 物理模型

Fig.1 Physical model

2)两级除尘装置结构参数确定。设计两级除尘装置结构参数为:筒体直径 $D_0=300\text{ mm}$;排气口直径 $D_e=150\text{ mm}$;排灰口直径 $D_d=150\text{ mm}$;筒体高 $H_1=450\text{ mm}$;锥体高 $H_2=750\text{ mm}$;二级分离区高 $H_3=300\text{ mm}$;进口宽度 $a=60\text{ mm}$;进口高度 $b=150\text{ mm}$;拨指根部直径 $d_1=5\text{ mm}$;拨指外端直径 $d_2=3\text{ mm}$;拨指长度 $L=72\text{ mm}$ 。

1.2 两级除尘装置的数值模拟

1)网格划分。利用 SolidWorks 建模,并借助网格生成软件 ANSYS ICEM 进行前处理。在网格生成过程中,采取分区域网格划分,旋风除尘为静区域,排气管区域为动区域,交界面为 Interface,最后

进行网格重组。回转拨指部分采用非结构化四面体网格,网格数量为 920 万。最终生成的网格如图 2 所示。

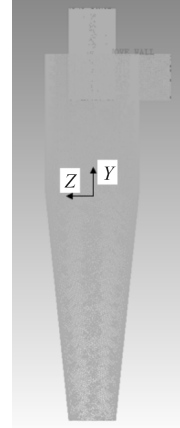


图2 网格划分

Fig.2 Grid division

2)数值计算模型。利用 ANSYS FLUENT 17.0 软件进行数值模拟,烟气的相流场模拟采用 RNG $k-\epsilon$ 模型和 RSM 模型结合的方法,固相(灰尘颗粒)与气相之间采用 DPM 模型进行模拟。

①气相流场。对于烟气的相首先选用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型,当气相达到相对稳定的状态即气相场收敛时,改用 RSM 模型计算。对于旋风分离器中无温度梯度的不可压缩流动,由于浮升力和波动膨胀所产生的湍流动能可以忽略,具体算法公式简化为式(1)和式(2)。

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[a_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[a_k \mu_{\text{eff}} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \quad (2)$$

$$\frac{\epsilon}{k} (C_{1\epsilon} G_k - C_{2\epsilon} \rho \epsilon)$$

式(1)和(2)中: u 为 x 方向的速度, m/s ; i, j 为指标符号; k 为湍动能, m^2/s^2 ; ϵ 为湍动耗散率, m^2/s^3 ; ρ 为密度, kg/m^3 ; μ_{eff} 为有效黏度, $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$, G_k 为由于平均速度梯度引起的湍动能 k 的产生项, Pa/s ; $C_{1\epsilon}, C_{2\epsilon}, a_k$ 为模型常数。

本研究采用 RSM 模型中的 LRR 模型,具体的输运方程如式(3)。

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u_i u_j}) + \frac{\partial}{\partial x_k} (\rho \overline{u_i u_j u_k}) = D_{ij} + P_{ij} + \Pi_{ij} - \epsilon_{ij} \quad (3)$$

式(3)中: D_{ij} 为湍流扩散项; P_{ij} 为剪切力产生项; Π_{ij} 为压力应变项; ϵ_{ij} 为黏性耗散项。

②固相颗粒。固相颗粒采用 DPM 模型,当气

固两相流场中的固体颗粒相的体积分数小于 10% 时,该算法模型可以较好地模拟气相场中颗粒的运动情况,流场中颗粒的受力情况遵守牛顿第二定律,如式(4)。

$$m_p \frac{du_p}{dt} = F_C + F_D + F_S + F_G \quad (4)$$

式(4)中, m_p 为颗粒的质量, kg; u_p 为速度, m/s; F_D 、 F_C 、 F_S 和 F_G 分别为曳力、离心力、萨夫曼升力和重力, N。

3) 边界条件。气相边界条件:(1)旋风除尘器内气体设为空气,密度 1.225 kg/m^3 ,黏度为 $1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$,视为不可压缩气体,并将其流动视为稳态,参照文献[15]进口气流流速 20 m/s 。(2)出口设为自由出流;壁面设为无滑移壁面;旋风器筒体与排气管接触的两个重叠面,分别设置为 Interface 面以便进行数据交换。(3)根据公式(5)~(7)计算水力直径 D_{HD} 、雷诺数 R_e 以及湍流强度 I 。

$$D_{HD} = \frac{4ab}{2(a+b)} = 0.085 \text{ m} \quad (5)$$

$$R_e = \frac{\rho v D_{HD}}{\mu} = 0.012 \quad (6)$$

$$I = 0.16 \times R_e - 1/8 = 5.2\% \quad (7)$$

式(5)~(7)中: D_{HD} 为水力直径, m; a 为入口截面宽度, m; b 为入口截面长度, m; R_e 为雷诺数; I 为湍流强度, %; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; v 为气流速度, m/s; μ 为空气黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

颗粒相边界条件:(1)颗粒相模拟采用 DPM 模型求解,入射源为速度入口,假设颗粒速度与气相速度一致(20 m/s),且具有良好的跟随性,与气相间不

存在相对速度滑移,颗粒介质采用秸秆生物炭,密度 430 kg/m^3 [2]。颗粒的质量投放密度为 0.03 kg/s 。(2)当颗粒运动到壁面和离心轴时,认为颗粒服从镜面反射原理(reflect),以此对颗粒的下一位置和速度进行计算;当颗粒运动到排气口边界时,从出口逃逸(escape),此时停止对颗粒的追踪,此颗粒没有被分离;当颗粒运动到除尘器底部时,设置除尘器底面对颗粒为捕捉(trap),故相当于被灰仓壁面捕集,此时也停止对颗粒的追踪,此颗粒被分离。

4) 差分格式及算法。采用 ANSYS FLUENT 软件三维求解器进行计算。连续性方程与动量方程之间的耦合采用 SIMPLE 算法,空间离散格式选用 QUICK 差分格式,压力插补选用 PRESTO 格式。为加快收敛,先在低进口速度下用 RNG k- ϵ 模型计算至收敛,再把计算结果作为 RSM 模型的初始流场,增加流速迭代收敛后将差分格式改为 QUICK 差分格式继续计算直至收敛。

2 结果与分析

2.1 气相

在进口速度一定(20 m/s),对传统旋风除尘器及不同离心轴转速下(900、1 450、2 900 r/min)的两级除尘器的气相进行模拟,得到 $z = 0 \text{ mm}$ 、 $y = 0 \text{ mm}$ 、 $y = 375 \text{ mm}$ 截面的压力分布(图 3)及速度分布(图 4),并对 $y = 0 \text{ mm}$ 、 $y = 375 \text{ mm}$ 的两个截面中 $z = 0 \text{ mm}$ 条线上的数据进行采集,同时绘制出对应的静压分布(图 5)、切向速度分布(图 6)、径向速度分布(图 7)及轴向速度分布(图 8)。

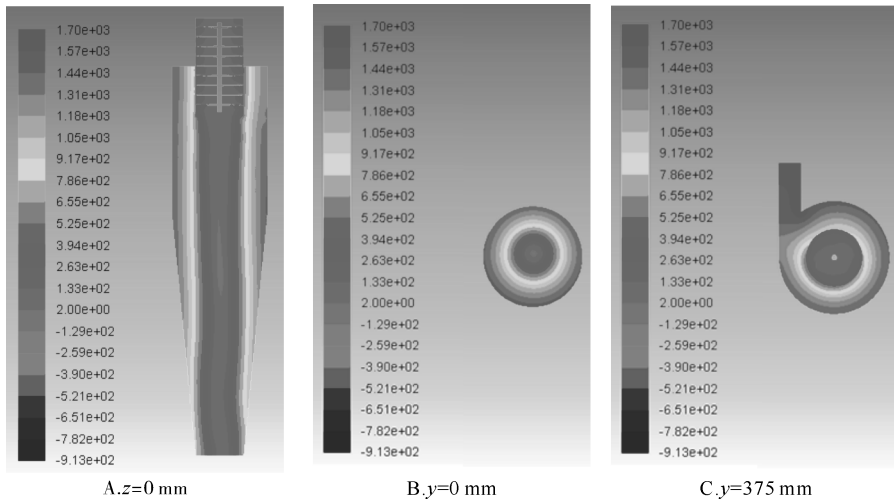


图 3 压力分布图

Fig.3 Static pressure distribution

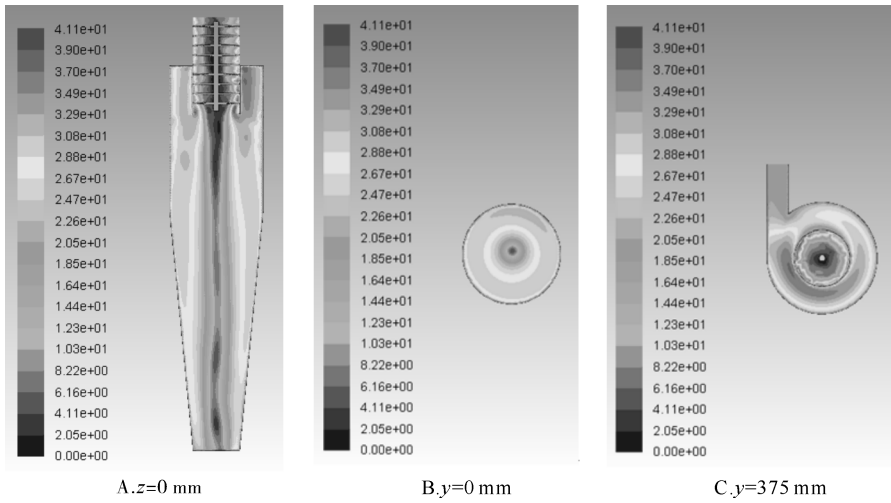
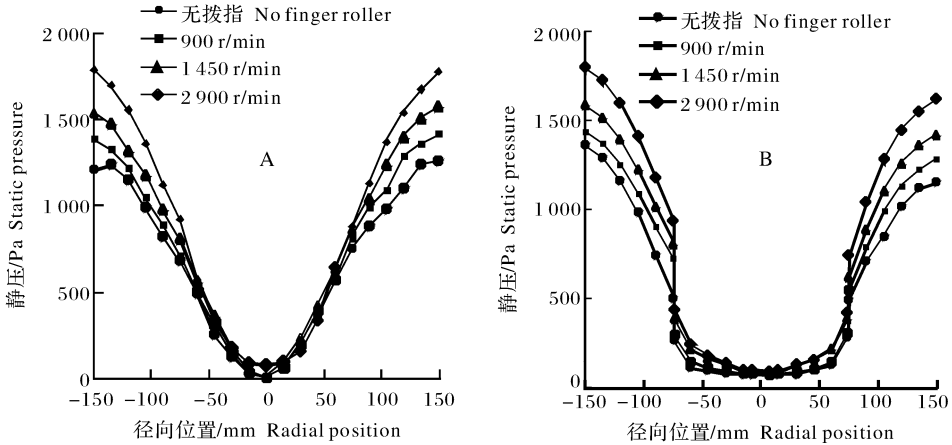


图4 速度分布图

Fig.4 Velocity distribution



A: y=0 mm; B: y=375 mm.

图5 静压分布图

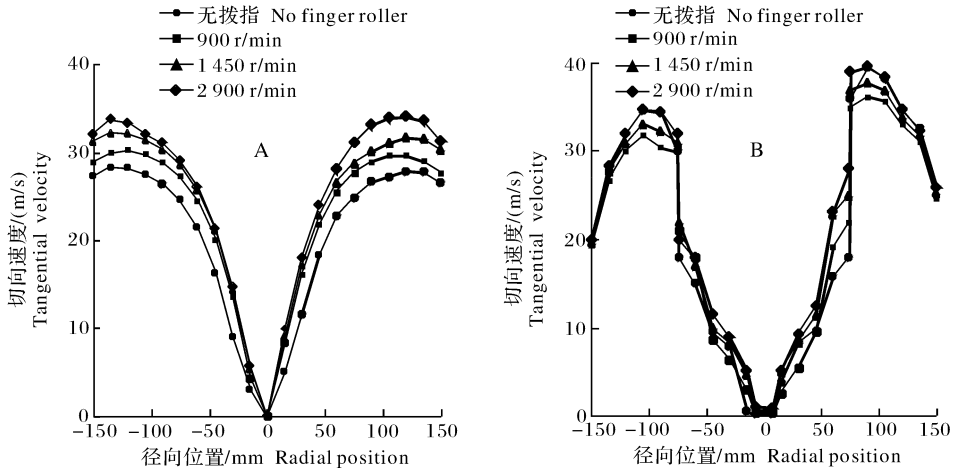
Fig.5 Static pressure distribution

1) 静压分布。由图 5A 可知, 静压力分布为由边界向中心递减, 不同转速下的静压力基本呈现对称; 在 x 为同一位置时, 随着转速的增大, 静压力随之增大, 产生原因为拨指轮转动, 抑制气体的排除, 增大了内部气流压强。由图 5B 可知, 在一次分离区域, 静压力基本呈现对称, 在 x 为负值时静压力略大于正值, 产生原因为切向进口为单向, 负值处接近切向入口; 在排气管中, 在 x 为同一位置时, 随着转速的增大, 静压力随之增大, 产生原因为拨指轮转动, 抑制气体的排除, 转速越大, 抑制气体排除能力越强, 压强随之增大。

2) 速度分布。相比于压力场, 研究旋风分离器内速度场的分布更为重要, 因为气体的流动最终决

定着颗粒的分离效果。

①切向速度。切向速度场是旋风分离器速度场中最重要的组成部分, 对颗粒物的分离占主导地位, 颗粒物在它的作用下做高速旋转运动, 在离心效应下被甩向器壁而被分离出来, 直接影响着装置对颗粒物的脱除效果。一般来说切向速度越大, 离心力越大, 分离效率越高。由图 6A 可知, 在 $y=0$ mm 处, 切向速度大小沿器壁向中心先增后减, 在中心处的速度接近 0; 不同转速下的切向速度基本呈现对称; 在 x 为同一位置时, 随着转速的增大, 切向速度随之增大, 产生原因为拨指轮的转动。由图 6B 可知, 在切向分离区域, 切向速度亦基本呈现对称, 在 x 为负值时静压力略小于正值, 产生原因为切向进



A: $y=0$ mm; B: $y=375$ mm.

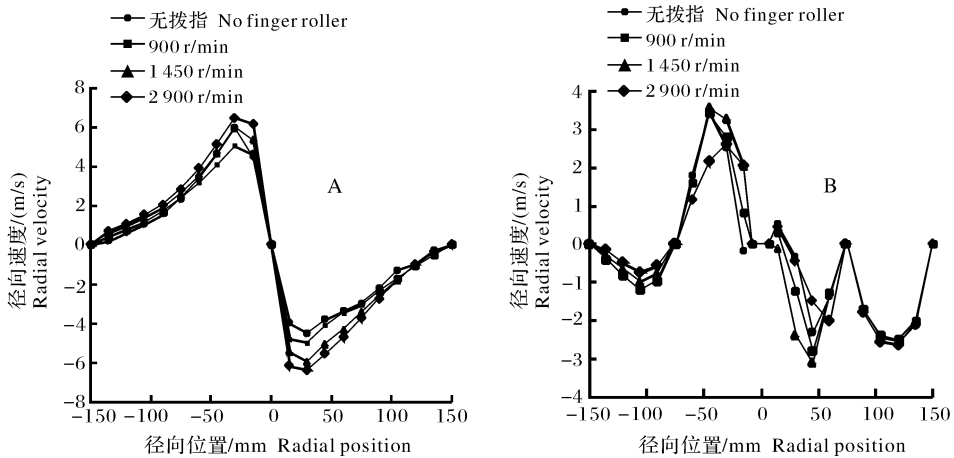
图 6 切向速度分布图

Fig.6 Tangential velocity distribution

口为单向,气流先经过 x 轴的正值部分;且在切向分离区域沿器壁到排气管壁,离心轴转速对切向速度的影响增大,产生的原因为进口速度沿切向进入;在排气管中,在 x 为同一位置时,随着转速的增大,切向速度随之增大,产生原因为拨指轮带动流体产生回转,转动速度提高,流体回转速度增大,从而切向速度增大。

②径向速度。径向速度可将颗粒推向中心,由上升流夹带排出,影响除尘效率,径向速度越小对颗粒的分离越有利。由图 7A 可知,在 $y=0$ mm 处,径向速度大小沿器壁向中心先增后减,在中心处的

速度接近 0;不同转速下的径向速度大小基本呈现对称;在 x 为同一位置时,随着拨指转速的提高,径向速度随之增大,产生原因为拨指轮的转动。由图 7B 可知,在 $y=375$ mm 处,径向速度显得较为杂乱,但明显可以看出,在排气管中气体径向速度变化较大,产生的原因是在二次分离区流场主要受拨指轮影响,拨指轮转速增大,离心力增大,从而径向速度增大,一次分离区域流场主要受进口速度等影响;在 x 轴正方向处的径向速度大于负方向,产生原因为旋风除尘器为单向进口。由图 7 可知,整体来看,离心轴转速对径向速度的影响明显小于对切向速度的影响。



A: $y=0$ mm; B: $y=375$ mm.

图 7 径向速度分布图

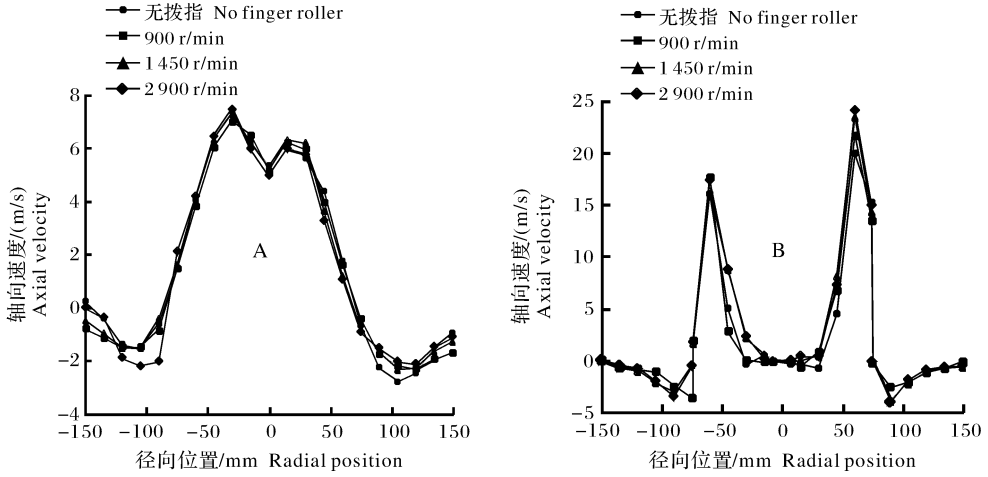
Fig.7 Radial velocity distribution

③轴向速度。轴向速度分布反映了旋风除尘器的内外旋流,气体进入旋风除尘器后旋转向下运动,

其速度逐渐减小,当到达一定位置时以相同的方向旋转向上。由图 8A 可知,在切向分离区域 $y=0$

处,轴向速度为负值,气体处在向下运动的状态,速度大小沿器壁向中心先增后减;在排气管壁面向下的延长线内侧,轴向速度为正,气体处于向上运动状态,速度大小沿器壁向中心先增后减。由图 8B 可知,在 $y = 375 \text{ mm}$ 时,气体处于切向分离区域,轴

向速度较小;在排气管中,轴向速度从器壁到中心呈现减小趋势。由图 8 可知,轴向速度关于中心轴基本呈对称分布,且离心转速对轴向速度的影响较小,原因是进口速度、面积一定时,出口流量、轴向速度无较大变化。



A: $y = 0 \text{ mm}$; B: $y = 375 \text{ mm}$.

图 8 轴向速度分布

Fig.8 Axial velocity distribution

2.2 颗粒相

灰尘颗粒粒径的大小与除尘器的分离效率直接相关。分离效率是针对特定的颗粒粒径而言的,所以某一颗粒粒径的分离效率可以充分说明分离器的分离能力。本研究对粒径分别为 $1、5、10、15、20、25、30、35$ 和 $40 \mu\text{m}$ 的颗粒进行颗粒相模拟,颗粒释放方式采用平面射流源,颗粒流初始位置设定在入口平面上。为分析颗粒的分离效果,将颗粒分离效率定义为分离出的颗粒数量与总投放颗粒数量的百分比,如公式(8)^[16]所示。

$$\eta = \frac{N_1}{N} \times 100\% \quad (8)$$

式(8)中: η 为不同灰尘颗粒粒径的除尘效率,%; N_1 为除尘器底部 trap 的数目,个; N 为除尘器进口投放颗粒的总数目,个。

根据模拟得到的各粒径的分离数量,由公式(8)计算得到各粒径的分离效率,并根据数据绘制不同离心转速下的分级除尘效率,如图 9 所示。由图 9 可知,随着粒径的增大,除尘效率增大,不同离心转速下的除尘效率不同。对于同一粒径的颗粒而言(除 $1 \mu\text{m}$ 和 $5 \mu\text{m}$ 外),随着拨指轮转速的增大,除尘效率增大,产生的原因可能为:其一,在一次分离区,拨指轮转动增大了颗粒物的切向速度,使颗粒物

被甩到除尘器壁,在重力和向下气流的作用下进入灰斗收集。其二,对于一次旋风分离器未能分离的颗粒,在上升逃逸的过程中将经过回转离心分离区域,部分颗粒将与高速回转的拨指碰撞,在重力和离心力的作用下分离,达到二次分离的效果。 $1 \mu\text{m}$ 粒径的颗粒的除尘效率不随拨指轮转速的增大而增大,甚至有减小的趋势,产生的原因可能是颗粒质量小,离心力小,而拨指转动能够增大颗粒的轴向速度,颗粒更易被气流挟带,从而降低了除尘效率。

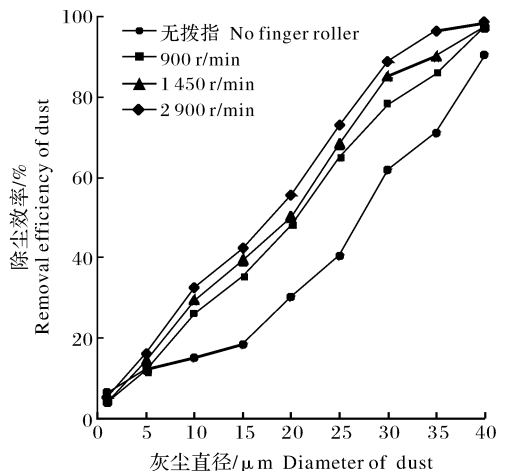


图 9 分级除尘效率

Fig.9 Removal efficiency of dust of different particle size

3 讨 论

本研究在典型旋风除尘器的基础上,在排气管中增设回转拨指轮,设计了两级除尘。气相流场选用 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型和 RSM 模型结合的方法,颗粒相采用基于欧拉-拉格朗日气固两相流耦合思想的 DPM 模型对颗粒分离效率进行模拟^[17]。结果表明,在气相流场方面,传统旋风除尘器和两级除尘器内部的静压、切向速度、径向速度、轴向速度的变化趋势相同,同一截面沿器壁到中心,静压降低,与郑建祥等^[18]及刘玄等^[19]的研究结论相同;切向速度的变化趋势为从器壁到中心先增大后减小,切向速度关于中心轴基本对称分布,该结论与段继海等^[20]和牟春宇等^[21]研究的旋风除尘器环形空间气流的运动相同;轴向速度随径向半径的增大而增大,与李仁年等^[22]研究的旋风分离器内部流场及分离效率的结论相同。与传统旋风除尘器相比,拨指轮转速对静压有较大的影响,转速增大,静压随之增大;对切向速度有较大的影响,转速增大,切向速度和径向速度均增大,对径向速度的影响小于对切向速度的影响;对轴向速度几乎无影响。

在除尘效率方面,典型除尘器随粒径的增大除尘效率明显提高,粒径为 $5\ \mu\text{m}$ 的除尘效率为 16%,粒径为 $40\ \mu\text{m}$ 时除尘效率大于 90%。本研究除尘效率与粒径大小的变化关系及不同粒径下的除尘效率与文献^[15, 22-25]的研究结论相似,但除尘效率数值有偏差,产生的原因可能为除尘器的尺寸不同、网格划分的方式和精度不同、进口速度以及颗粒物材料的选取不同等。与典型旋风除尘器相比,两级除尘及内部回转拨指轮转速对 $1\ \mu\text{m}$ 颗粒收集无较大影响;但对于 $10\ \mu\text{m}$ 以上的颗粒,可显著提高分离效率,且随转速增大除尘效率有所提高,但各转速对除尘效率的影响差异并不显著;对于 $30\ \mu\text{m}$ 及以上的颗粒,拨指轮转速为 1 450 r/min 时,除尘效率接近 80%,转速为 2 900 r/min 时,除尘效率大于 90%,明显高于典型旋风除尘器的除尘效率。然而本研究未考虑实际除尘过程中存在的小颗粒碰撞、团聚的现象,有待进一步研究。

参 考 文 献

[1] 陈温福,张伟明,孟军,等.生物炭应用技术研究[J].中国工程科学,2011,13(2):83-89.

[2] 陈天佑,孟军,辛明金,等.玉米秸秆生物炭压制成型特性研究[J].沈阳农业大学学报,2016,47(6):728-733.

[3] 汤浩,孙鹏,刘文峰.工作条件对轴流旋风分离器分离效率影响的数值研究[J].机械工程学报,2017,53(2):157-163.

[4] WU B, LIU S, WANG H. A study on advanced concept for fine particle separation[J]. Experimental thermal and fluid science, 2002, 26: 723-730.

[5] XIONG Z Y, JI Z L, WU X L. Development of a cyclone separator with high efficiency and low pressure drop in axial inlet cyclones[J]. Powder technology, 2014, 253: 644-649.

[6] 王乐勤,郝睿睿,王循明,等.筒体长度对旋风分离器内流场影响的数值模拟[J].工程热物理学报,2009,30(2):223-226.

[7] ZHU Y, KIM M C, LEE K W, et al. Design and performance evaluation of a novel double cyclone[J]. Aerosol science and technology, 2001, 34(2): 373-380.

[8] KARAGOZ I, AVCI A, SURMEN A, et al. Design and performance evaluation of a new cyclone separator [J]. Journal of aerosol science, 2013, 59: 57-64.

[9] HOFFMANN A C, JONGE R D, ARENDS H, et al. Evidence of the 'natural vortex length' and its effect on the separation efficiency of gas cyclones[J]. Filtration & separation, 1995, 32(8): 799-804.

[10] OBERMAIR S, WOISETSCHLAGER J, STAUDINGER G. Investigation of the flow pattern in different dust outlet geometries of a gas cyclone by laser Doppler anemometry[J]. Powder technology, 2003, 138(2): 239-251.

[11] DAVIDSON M R. Numerical calculation of flow in a hydrocyclone operating without an air core[J]. Applied mathematical modelling, 1988, 12(2): 119-128.

[12] BOYSAN F, AYERS W H, SWITHEENBANK J. A fundamental mathematical modelling approach to cyclone design[J]. Transactions of the institution of chemical engineers, 1982, 60(3): 222-230.

[13] PANT K, CROWE C T, IRVING P. On the design of miniature cyclones for the collection of bioaerosols[J]. Powder technology, 2002, 125(2): 260-265.

[14] 刘淑艳,张雅,王保国.用 RSM 模拟旋风分离器内的三维湍流流场[J].北京理工大学学报,2005,25(5):377-383.

[15] 沈贤锋,刘汉周,韦维.单双锥旋风分离器分离性能数值模拟[J].动力工程学报,2015,35(10):824-829.

[16] 方芳,张永东,张晓卫,等.某型旋流池分离效果的数值模拟研究[J].给水排水,2005,31(11):103-107.

[17] GONG G G, YANG Z, ZHU S. Numerical investigation of the effect of helix angle and leaf margin on the flow pattern and the performance of the axial flow cyclone separator [J]. Applied mathematical modelling, 2012, 36: 3916-3930.

[18] 郑建祥,周天鹤.旋风分离器排气管缩口半径优化的数值模拟[J].流体机械,2015,43(12):28-32.

[19] 刘玄,程树森.旋风除尘器内部流场的数值研究[J].环境工程学报,2009,3(6):1069-1072.

- [20] 段继海, 吴凯, 陈光辉, 等. 高效 Stairmand 型旋风除尘器流场导流与引流[J]. 高校化学工程学报, 2016, 30(1): 26-32.
- [21] 牟春宇, 姜大志. 旋风除尘器环形空间气流运动的数值研究[J]. 环境工程学报, 2007, 1(8): 96-100.
- [22] 李仁年, 王浩, 苏吉鑫, 等. 旋风分离器内部流场及分离效率的数值仿真[J]. 兰州理工大学学报, 2007, 32(2): 50-53.
- [23] 于洲, 马春元. 动态旋风分离器数值模拟及实验研究[J]. 化工进展, 2014, 33(7): 1684-1690.
- [24] 阮飞, 朱建华. 旋风除尘器气固相分离特性的数值仿真研究[J]. 内蒙古科技大学学报, 2017, 36(6): 51-54.
- [25] 刘栋栋, 付海明, 陈军, 等. 旋风除尘器流场及浓度场实验与模拟[J]. 环境工程学报, 2010, 4(9): 2057-2064.

Design and numerical simulation of two-stage device for dust removal from flue gas of straw carbonization

XIN Mingjin¹ CHEN Tianyou¹ MENG Jun² WU Liyan¹ JIAO Jinkang¹
ZHANG Qiang¹ LIU Cuihong¹ SONG Yuqiu¹ REN Wentao¹

1. College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China;

2. Liaoning Biochar Engineering & Technology Research Center, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China

Abstract A two-stage dust removing system was designed by setting a finger roller in the exhaust cylinder of typical cyclone to improve the dedusting efficiency from flue gas of straw carbonization. The model of the system was established in SolidWorks and meshed with ANSYS ICEM. The flow field of the system was setup through simulation of the system with combination of RNG k- ϵ model and RSM model. The particle separation efficiency was simulated with DPM model coupled of gas-solid two phase flow based on the Euler-Lagrange equation. The static pressure, tangential velocity, radial velocity, axial velocity distribution and the separation efficiency of different size particles of typical cyclone and the 2-stage dust removal system were obtained at inlet velocity of 20 m/s and finger roller rotation speed of 0 r/min, 900 r/min, 1 450 r/min and 2 900 r/min. The results showed that the rotation speed of the finger roller had a significant effect on static pressure of the dust collector and the static pressure increased with the increase of rotation speed compared with typical cyclone. The rotation speed of the finger roller had a significant influence on tangential velocity of the flow field. The tangential velocity increases with increase of the rotation speed with little effect on the radial velocity and axial velocity. Compared with typical cyclone, the 2-stage dust removing system and its rotation speed had little influence on separation of dust particles of diameter less than 1 μm . However, they had significant effects on separating dust particles of diameter larger than 10 μm , and the separating efficiency increased with the increase of rotation speed of the roller. The difference of separation efficiency of different rotation speed was not significant. It will provide reference for designing and optimizing the structure of dust removal device with high efficiency.

Keywords straw carbonization; flue gas dedusting; cyclone; centrifugalization; finger roller; separation efficiency