

文章编号:1673-0062(2017)01-0063-05

## 梗丝分离回收装置分离效果的数值模拟

朱德勇<sup>1</sup>,李国荣<sup>1,2\*</sup>,谢海<sup>2</sup>

(1.南华大学 土木工程学院,湖南 衡阳 421001;2.湖南核三力技术工程有限公司,湖南 衡阳 421001)

**摘要:**应用CFD(computational fluid dynamics,计算流体动力学)仿真技术对一种新型在线梗丝分离回收装置中的气流流场、烟丝和梗签颗粒轨迹与分布规律进行了数值模拟.模拟结果表明该装置中气流分布均匀、烟丝和梗签等混合物能够有效分离,风速是影响烟丝和梗签混合物分离的主要因素.较低风速可以减少回收烟丝中的含梗量,但烟丝回收率较低;风速增大时,烟丝回收率增大,但丝中含梗率也随之增大.

**关键词:**梗丝分离;数值模拟;颗粒轨迹

**中图分类号:**TS43;TP273+.5 **文献标志码:**A

## Numerical Simulation of Separation Effect about the Separation and Recovery Device Concerning Cut Tobacco and Cut Stem

ZHU De-yong<sup>1</sup>, LI Guo-rong<sup>1,2\*</sup>, XIE Hai<sup>2</sup>

(1.School of Civil Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;  
2.Hunan Sunny Technology Engineering Co., Ltd., Hengyang, Hunan 421000, China)

**Abstract:** The numerical simulation about a new on-line cut tobacco and cut stem mixture separation device was studied, where the velocity field and tobacco particle trajectory were obtained by computational fluid dynamics software. The results show: the velocity field is uniform in the duct. The mixture of cut tobacco and cut stem can be separated effectively. Velocity is the main factor affecting the separation of tobacco and stem mixture. The amount of cut stem and the recovery rate of cut tobacco can both decrease in the relatively low velocity. Conversely, the amount of cut stem and the recovery rate of cut tobacco can increase.

**key words:** tobacco-stem separation; numerical simulation; particle trajectory

CFD(computational fluid dynamics,计算流体动力学)软件方法就是利用计算机技术模拟真实

工况并用数值计算方法求解流场的控制方程. CFD可以用于烟草加工设备中的干燥膨胀、气力

收稿日期:2016-10-21

作者简介:朱德勇(1990-),男,硕士研究生,主要从事工艺风力与通风除尘技术的研究.E-mail:52811127@qq.com.

\* 通讯作者:李国荣,E-mail:lgrong2305@126.com

输送、加料加香等的数值模拟分析<sup>[1]</sup>,其主要特点是可以模拟设备中的速度、温度、湿度以及各种场之间的耦合计算,建立烟丝颗粒在流场中的运动模型<sup>[2]</sup>和传热传质模型<sup>[3-4]</sup>.近年来国内众多学者<sup>[5-8]</sup>对烟丝气力输送特性做了大量的研究,分析得出了在不同的风速下管道中气流的流动状态、管道压力的分布规律及烟丝颗粒的流动特性等.国外也有大量文献<sup>[9-12]</sup>对 CFD 软件模拟方法在气固两相流中的应用做了深入的研究,但是针对 CFD 软件对烟丝颗粒分离的模拟相关研究较少.本文通过 FLUENT 软件对梗丝分离回收装置进行了数值模拟分析,研究了气流流场与烟丝和梗签轨迹分布规律,并分析风速对梗丝分离效果的影响,为梗丝分离装置设计优化提供参考.

梗丝分离回收装置广泛用于卷包车间卷烟机梗签剔除物中烟丝的回收.本文利用 CFD 仿真模拟技术,采用离散单元法<sup>[13]</sup>研究颗粒在流场中的运动,跟踪粒子的运动信息,同时考虑了颗粒与流体之间的双向耦合<sup>[14]</sup>作用.运用 GAMBIT(CFD 前处理器软件)建立装置的物理模型,在 FLUENT 中设置求解器进行求解.通过调节分离区风速,利用悬浮分离原理将梗丝混合物分离,对梗签和烟丝在分离区内的运动轨迹进行示踪,探讨不同气流速度下梗丝分离的效果、颗粒在流场内的滞留时间及流场内的压力损失.

## 1 数值计算方法

### 1.1 离散相模型

在 FLUENT 中提供的离散相模型,基本相为连续相,第二相为离散的颗粒相.该模型中离散相为烟丝和梗签混合物,连续相为空气,其中离散相非常稀薄,体积分数小于 0.5%,质量分数小于 10%,首先计算连续相得到收敛的连续相流场,然后再加入离散相颗粒进行耦合计算,迭代计算过程中连续相每计算 5 次就将离散相代入并更新计算一次,最终得到连续相和离散相均收敛的计算结果.

### 1.2 颗粒轨道计算

颗粒在流体中的受力非常复杂,包含了重力、浮力、气动阻力、压力梯度力、附加质量力、Basst 力、Saffman 升力、Magnus 力等作用力<sup>[15-16]</sup>. FLUENT 通过对颗粒作用力微分方程积分得到离散相颗粒轨道,单位质量粒子受力平衡方程如下(以轴方向为例):

$$\frac{du_{px}}{dt} = F_D(u_x - u_{px}) + \frac{g_x(\rho_p - \rho)}{\rho_p} + F_x \quad (1)$$

$$F_D = \frac{18\mu C_D Re}{\rho_p d_p^2} \quad (2)$$

定义颗粒雷诺数:

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\mu} \quad (3)$$

式中: $u_x$  为流体在  $x$  轴方向速度, $u_{px}$  为颗粒在  $x$  轴方向速度, $\mu$  为空气动力粘度系数, $\rho$  为颗粒密度, $d_p$  为颗粒直径, $C_D$  为曳力系数, $\frac{du_{px}}{dt}$  为颗粒惯性, $F_D(u_x - u_{px})$  为单位质量曳力, $F_x$  为包含了质量附加力、压力梯度附加作用力、旋转而引起的颗粒附加作用力和热泳力在内的其它作用力,Saffman 升力只在处理亚微观尺寸粒子时才需要考虑.式(1)为单位质量颗粒在流场内的受力平衡方程,对式(1)积分即可得到颗粒在轨道上任一时刻颗粒在  $x$  方向上的速度  $u_x$ ,同理可以得到  $y$  轴和  $z$  轴方向的速度  $u_y$  和  $u_z$ ,对颗粒任意时刻的速度有:

$$u_{px} = \frac{dx}{dt} \quad (4)$$

再对式(4)进行积分,就得到颗粒在  $x$  方向上的轨道方程.同理可以得到颗粒在  $y$  轴和  $z$  轴方向上的轨道方程,这样就得到了颗粒的运动轨迹.

## 2 计算工况

### 2.1 物理模型

该装置由四部分组成,上端为出风口 c(用于收集分离出的烟丝回收物),烟丝和梗签混合物进料入口 a,下部为进风口 b,底部为料仓(用于收集分离出的梗签回收物),如图 1 所示(图中数字 1~6 分别表示截面高度位置):工作时气流从底部进风口 b 以较大初速度向上运动进入 Z 形风道,物料从上部入口 a 进入.烟丝和梗签由于密度、形状、体积的不同,所受到作用力大小也不相同:烟丝密度小,呈薄片丝状,且具有一定的弯曲,梗签密度较大,呈横截面近似圆形的棒状.烟丝受到的重力小,气流升力大,而梗签所受到的重力大,气流升力小,在特定的风速下,二者在风选区内所受到的重力与气流升力的合力方向不同,最终烟丝从上部出口 c 流出并被收集,而梗签落入下部料仓中.进风口 b 的速度为 2.5~4.0 m/s,风选区内平均气流速度在 4.2~6.6 m/s.

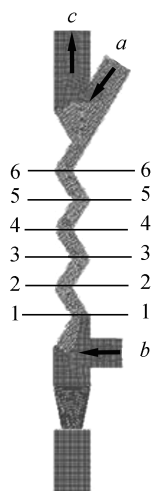


图 1 物理模型网格

Fig.1 Geometry model mesh

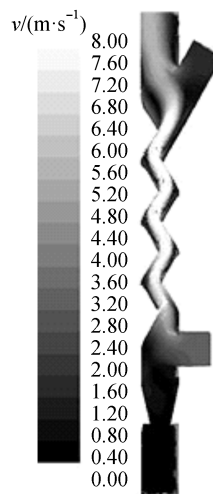


图 2  $v=2.8 \text{ m/s}$  时流场图

Fig.2 The velocity field by the inlet velocity  $v=2.8 \text{ m/s}$

## 2.2 数值模型

本文对物料入口处一定质量流量的烟丝进行了分离效率模拟,并模拟了单个烟丝和梗签的颗粒运动轨迹.用 GAMBIT 建立几何模型,划分网格.网格数量  $30 \times 10^4$  左右,在中央 Z 形风道处进行了加密处理,湍流模型选择标准  $\kappa-\varepsilon$  模型,物料颗粒的物性参数<sup>[17]</sup>如下:烟丝密度取烟丝颗粒真密度  $1.001 \text{ g/cm}^3$ ,梗签密度  $2.570 \text{ g/cm}^3$ ,梗签当量直径  $5.0 \text{ mm}$ ,烟丝当量直径为  $1.0 \text{ mm}$ .用球形系数对梗签和烟丝的形状进行修正:梗签球形系数  $0.45$ ,烟丝球形系数为  $0.20$ .数值计算残差设置为  $1 \times 10^{-6}$ ,当计算到  $1500$  步时达到收敛要求.计算结果给出了颗粒的运动轨迹,在装置内的滞留时间,Z 形风道内的压力损失.为了进一步观察颗粒轨迹,在定义颗粒进入流场时的射流源分别设置为单点射流源、组射流源和面射流源,进行了三组模拟计算.

## 3 计算结果

### 3.1 流场分析

速度场图 2 显示的是进风口风速  $v=2.8 \text{ m/s}$  时中心剖面的速度场,Z 形风道处风速在  $4.0 \sim 7.0 \text{ m/s}$  左右,由于在中心对称面,此截面上最大风速可达到  $8 \text{ m/s}$ .理论计算得到风道截面位置 1 上的平均风速为  $4.5 \text{ m/s}$ ,烟丝的悬浮速度<sup>[17]</sup>为  $2 \text{ m/s}$  左右,梗签的悬浮速度为  $4.5 \sim 6.5 \text{ m/s}$  左右.当  $v=2.8 \text{ m/s}$  时,离散相中烟丝和梗签能够较好的分离.

### 3.2 梗丝颗粒轨迹图

设置进风口不同风速,考察烟丝和梗签运动轨迹,如图 3 和图 4 所示(左侧为速度场,右侧为颗粒轨迹).烟丝和梗签以相同的初速度斜向下进入风选区,在上部第一个 Z 形风道发生分离.当进风口风速为  $2.5 \text{ m/s}$  时,烟丝在进入第一 Z 形风道向下运动一段距离后速度减为零,然后随气流一起向上运动至上部烟丝出口,而梗签颗粒继续向下运动;当增大进风口风速至  $v=3.0 \text{ m/s}$  时,烟丝和梗签在 Z 型风道入口就发生分离,烟丝向上运动至出口.

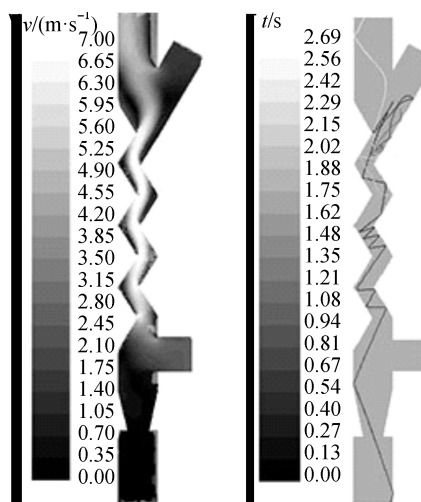


图 3  $v=2.5 \text{ m/s}$  时流场和颗粒轨迹图

Fig.3 The velocity field and particle trajectory by the inlet velocity  $v=2.5 \text{ m/s}$

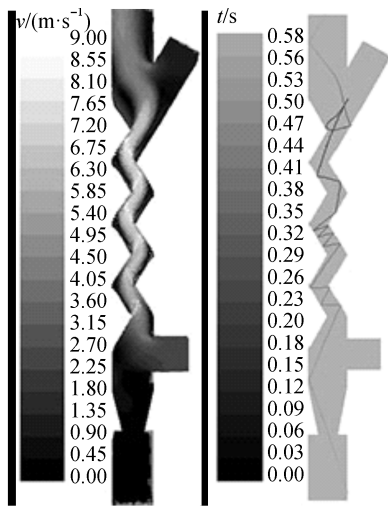


图4  $v=3.0\text{ m/s}$  时流场和颗粒轨迹图

Fig.4 The velocity field and particle trajectory by the inlet velocity  $v=3.0\text{ m/s}$

### 3.3 颗粒在装置内滞留时间

模拟物料颗粒在装置内的运动,并对颗粒在风选装置内的滞留时间进行计算.由图5中数据可以看出,颗粒的滞留时间是随着风选区内风速的变化而发生改变,当入口风速  $v=2.5\text{ m/s}$  时,烟丝滞留时间  $2.6\text{ s}$ ,梗签滞留时间为  $0.57\text{ s}$ ;当风速  $v=2.8\text{ m/s}$  时,烟丝滞留时间  $1.15\text{ s}$ ,梗签滞留时间为  $0.58\text{ s}$ ;当  $v=3.0\text{ m/s}$  时,烟丝滞留时间  $0.61\text{ s}$ ,梗签滞留时间为  $0.62\text{ s}$ ;当  $v=4.0\text{ m/s}$  时,烟丝滞留时间  $0.42\text{ s}$ ,梗签滞留时间为  $1.18\text{ s}$ .分析上述数据可知,当入口风速较小时,风选区内风速达到风选要求,即烟丝上浮,梗签下沉,但烟丝在上部出口处有一个悬浮与沉降的过程,究其原因是上部出口处开口截面较大,此区域内风速下降,部分区域风速达不到烟丝上扬的要求,气流对烟丝的上升力小于烟丝的重力,当烟丝颗粒下降至某一高度时风速变大,气流的升力大于颗粒自重,烟丝颗粒上浮.随着入口风速逐步增加,烟丝颗粒的滞留时间不断减少,并且在风速为  $2.5\sim 3.0\text{ m/s}$  的范围内滞留时间变化较快,当风速继续增大时,滞留时间变化较小,而梗签的滞留时间变化趋势则相反,在速度为  $2.5\sim 3.0\text{ m/s}$  内时间变化较小,当入口风速达到  $4\text{ m/s}$  时,梗签颗粒的滞留时间为  $1.15\text{ s}$ ,表明此时气流对梗签颗粒的沉降形成了较大的阻力.本文根据实际情况模拟了三段Z形风道的分离效果,在测试时,用两段Z形风道即可达到分离效果,三段式Z形风道适用于烟丝长度较大,含水率高,烟丝缠绕难分离的

情形.

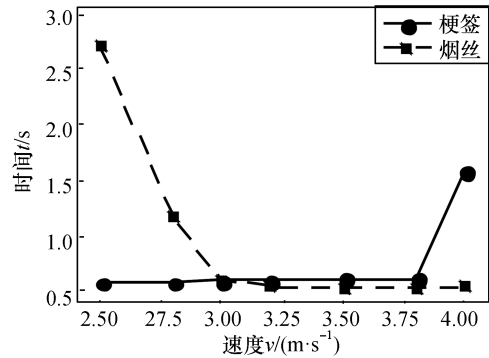


图5 颗粒滞留时间

Fig.5 Particle residence time

### 3.4 压降损失分析

在物理模型网格图上等截面处考虑压降损失,计算各截面处动压、静压、总压.如图6所示:在主风道内,动压保持平稳,根据动压与风速的关系,表明在主风道内气流流速较稳定,有利于颗粒物料的分离;静压损失随高度呈线性下降.在主风道内总压损耗均匀,气流流速平稳,局部涡流现象不明显,有利于降低风机能耗.

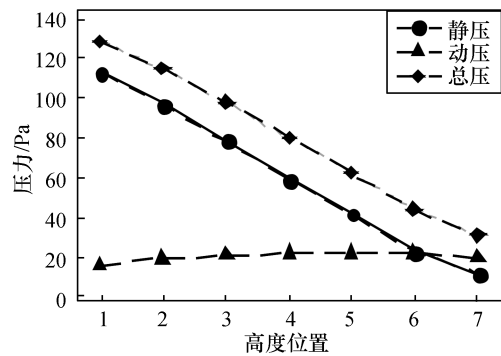


图6 压力随高度变化曲线

Fig.6 Pressure curve with height

### 3.5 梗签分离效率

对装置上部烟丝出口处收集到的烟丝回收物进行检测,得到烟丝回收物中烟丝和梗签物的含量.如图7所示为风速与烟丝回收物中含梗量的关系:在风速为  $2.9\sim 3.3\text{ m/s}$  范围内,数值模拟结果的回收物中含梗率在  $5\%$  左右;实测数据中,回收物中含梗率随风速的增加先减小后增加,分析其原因可能是当风速增大到一定范围时,梗签进入风选区遇到速度大于其悬浮速度的气流组织后,速度先降低然后沿气流方向做加速运动并随气流运动至烟丝出口,导致回收物中梗签含量增

加.当数值模拟风速增大到 3.4 m/s 时,含梗率增加量并不明显,实测数据的含梗率增加了一倍.

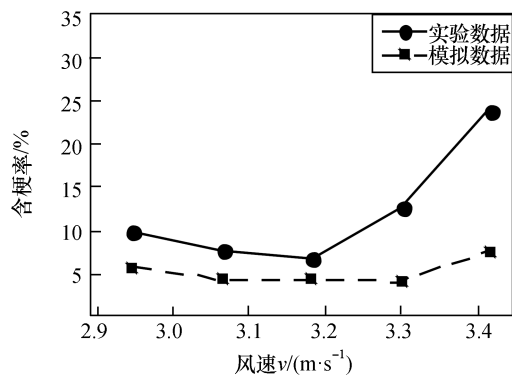


图7 气流速度与回收物中含梗率的关系

Fig.7 The relationship between inlet velocity and reclaimed material

## 4 结论

1) 数值计算在  $v=2.5$  m/s 时上部烟丝出口收集的烟丝中不含烟梗,但此时下部料仓中的梗中含丝率接近 15%.增大风速至 3.0 m/s 时,上部出口的烟丝中含梗率约为 6.71%,料仓中含丝率 11.2%.继续增大风速,上部出口的烟丝含梗率增加,而料仓中梗中含丝率则变化不明显.进风口 1 处气流速度在 2.8~3.2 m/s 时,梗丝分离效果较好,此时分离区平均截面速度为 4.6~5.3 m/s 左右.

2) 数值模拟结果表明,当风速等于 2.5 m/s 时,烟丝的滞留时间较长,烟丝在出口处有一个悬浮阶段,说明局部气流速度小于烟丝的悬浮速度,同时,涡流对烟丝颗粒的运动也有一定影响.当风速增大时烟丝颗粒滞留时间减少,而梗签滞留时间增加.当风速在 3.0~3.75 m/s 时两者滞留时间均较短,表明在此段风速内,气流既能使烟丝有效上扬,又不会对梗签颗粒造成较大的阻力.

3) 在 Z 形风道中,气流动压基本保持不变,在转角处静压损失较明显,对整个装置来说,压力损失较小,整个风道的压降损失在 100 Pa 左右.

### 参考文献:

[1] 于国锋,冯媛,崔淑强,等.CFD 在烟草工程研究中的应用与展望[J].烟草科技,2013(9):35-38.

- [2] 吴磊,胡天群,杜国锋,等.烟丝气力输送特性试验与仿真[J].水动力学研究与进展 A 辑,2011,26(1):123-128.
- [3] 江威,黎汝锦,官卫东,等.滚筒干燥和气流干燥的过程的数值模拟研究[J].干燥技术与设备,2011(6):315-320.
- [4] 冯志斌,江威,黎汝锦,等.运用 CFD 模拟滚筒干燥过程[C]//中国烟草学会工业专业委员会.中国烟草学会工业专业委员会烟草工艺 0020 学术研讨会论文集.中国烟草学会工业专业委员会,2010:3.
- [5] 韩金民.数值模拟在膨胀塔结构研究和优化设计中的应用[D].北京:华北电力大学(北京),2008.
- [6] 唐向阳,张勇,周杰,等.异物剔除机物料稳定系统的流场 CAE 分析[J].机械,2008,35(2):1-3.
- [7] 耿凡,袁竹林,王宏生,等.流化床中烟丝颗粒的流动特性[J].东南大学学报(自然科学版),2009,39(5):1012-1017.
- [8] 凌啸.烟丝气力输送系统流动特性分析[D].衡阳:南华大学,2011.
- [9] KHORASANIMOHAMMADREZAEI M, AMINIZADEH N. The impact of a ceramic wear liner on the separation efficiency of a particular cyclone dust collector[J].Procedia Engineering,2016,157:414-421.
- [10] SCHNEIDERBAUER S, HAIDER M F, Hauzenberger F, et al. A Lagrangian-Eulerian hybrid model for the simulation of industrial-scale gas-solid cyclones [J]. Powder Technology,2016,304(12):229-240.
- [11] QIAN F, HUANG Z, CHEN G, et al. Numerical study of the separation characteristics in a cyclone of different inlet particle concentrations[J].Computers & chemical engineering,2007,31(9):1111-1122.
- [12] CHU K W, YU A B. Numerical simulation of complex particle-fluid flows [J]. Powder Technology, 2008, 179(3):104-114
- [13] 任立波,韩吉田,何海澜.基于 FLUENT 软件信息传递模式的离散颗粒流动的并行算法[J].高校化学工程学报,2015,29(4):963-970.
- [14] 张尉林.FLUENT 软件与 IDEM 软件的耦合及其应用研究[D].长春:吉林大学,2013.
- [15] 施学贵,徐旭常,冯俊凯.颗粒在湍流气流中运动的受力分析[J].工程热物理学报,1989,10(3):320-325.
- [16] 蔡圃.水力旋流器内多相流动分离机制的计算研究[D].兰州:兰州大学,2014.
- [17] 卢淦.梗签剔除中梗丝分离装置的研究[D].衡阳:南华大学,2015.