

基于 DEM-CFD 耦合的谷物多级风选模拟研究^{*}

郭柄江, 马学东, 赵磊, 于海川

(辽宁科技大学机械工程与自动化学院, 辽宁鞍山, 114051)

摘要:为提高谷物风选效率,强化谷物风选效果,得到最佳风选参数,设计一款多级风选装置,采用离散单元法(DEM)与计算流体力学(CFD)耦合的方法,对多级风选过程进行仿真,并引入谷粒体积浓度来量化风选结果,讨论风速和吹风倾角对谷粒体积浓度的影响。结果表明,经过多级风选之后,谷粒体积浓度可达97.18%,相对初始混合状态而言,提高50.97%,并测得谷粒损失率为4.72%。风速和吹风倾角对风选结果有很大影响,风速为8 m/s,吹风倾角为0°时,可以得到较高的谷粒体积浓度,同时有较小的损失率。

关键词:谷物分离;多级分选;DEM-CFD 耦合

中图分类号:S23 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553 (2019) 10-0096-07

郭柄江, 马学东, 赵磊, 于海川. 基于 DEM-CFD 耦合的谷物多级风选模拟研究[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(10): 96-102

Guo Bingjiang, Ma Xuedong, Zhao Lei, Yu Haichuan. Simulation research of grain multi-stage wind selection based on DEM-CFD coupling [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(10): 96-102

0 引言

谷物分级、筛分、清选是农业生产中重要的操作过程,谷物分级所用设备为簸箕,筛分主要靠各类振动筛实现,而清选装置一般有两种,包括风选装置和风筛装置^[1-3]。风选装置是根据谷粒与茎秆的质量差来完成工作,而风筛装置是靠吹风与振动筛相结合达到清选目的^[4-5]。风筛装置虽然分离效果好,但该装置结构复杂,振动筛的存在不仅增加了装置整体质量,而且振动过程中存在冲击,驱动振动筛运动的电机也会消耗电能,而风选装置可以弥补这些缺陷,从而降低能耗,节约成本^[6-7]。

关于谷物清选,Yuan等^[8]研究了水稻粒籽与茎秆在风和圆筒筛共同作用下的运动行为和筛分特性,采用DEM-CFD耦合的方法,讨论了入口风速、圆筒筛转速和圆筒筛直径对筛分效率的影响,得出最佳入口风速为9.67 m/s。王立军等^[9]运用DEM-CFD耦合的方法模拟了玉米收获机清选装置的工作过程,其目的是提高筛面利用率、籽粒清洁率,降低籽粒损失率,最终得出入口风速为12.8 m/s,入口方向角为25°时,清选装置可达国家标准要求。

目前,学者和工程师皆是对风筛式清选装置进行研究,关于风选式清选装置的研究较少,而对多级风选装置的研究更是未见报道,理论研究的滞后严重制约了风选设备与工艺的发展,所以对风选装置的研究有极大的学术意义和农业应用价值^[10]。

离散单元法(DEM)是用来研究离散系统动力学的一种方法,EDEM是研究颗粒动力学行为的专业软件^[11-13]。计算流体力学(CFD)是用来分析流体流动、热交换、分子运输的一种方法,FLUENT是一款CFD常用的商业软件^[14-16]。近年来,EDEM软件与FLUENT软件耦合的方法逐渐成为研究流固两相流问题的重要手段^[17-19]。汤庆等通过对清选技术研究现状的总结,指出DEM-CFD耦合技术是未来谷物清选模拟研究的方向。蒋恩臣等^[20]模拟了收获机分离室内谷物的运动行为,并通过试验进行了证明,表明DEM-CFD耦合方法模拟谷物清选过程是可行的。

本研究运用DEM-CFD耦合的方法,模拟了多级风选过程中谷粒与茎秆的运动行为,并讨论了风速和吹风倾角对风选结果的影响,为谷物清选提供新设备与方法。

收稿日期:2019年3月11日 修回日期:2019年4月12日

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(51775258);辽宁省自然科学基金重点项目(20170540458);精密与特种加工教育部重点实验室基金(B201703)

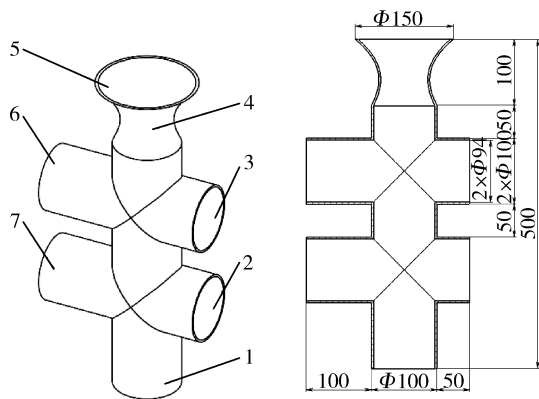
第一作者:郭柄江,男,1994年生,山西忻州人,硕士研究生;研究方向为农业颗粒物动力学。E-mail: guobingjiang0612@163.com

通讯作者:马学东,男,1965年生,内蒙古赤峰人,博士,教授;研究方向为颗粒物动力学。E-mail: madong912@126.com

1 模型描述

1.1 几何模型

本研究采用图 1 所示的多级风选机, 材质为钢, 运用软件 SolidWorks 建立, 其特征在于: 进料口为 $\Phi 150$ mm 的敞口, 便于谷粒和茎秆进入风选机; 进料口下部为喉管, 其直径最小处为 80 mm, 喉管的存在使谷粒和茎秆分布集中, 防止颗粒与风选机内壁接触; 喉管下部为一级风选区, 风由一级进风口吹入, 从一级茎秆出料口吹出; 一级风选区下部为二级风选区, 风由二级进风口吹入, 从二级茎秆出料口吹出; 二级风选区下部为谷粒出料口。



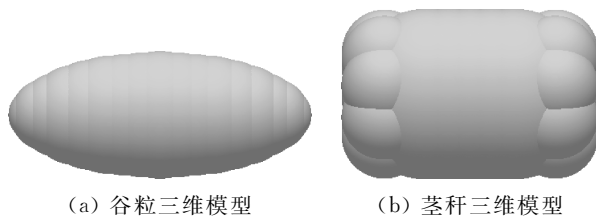
(a) 多级风选机三维模型 (b) 多级风选机截面尺寸

图 1 多级风选机结构及尺寸

Fig. 1 Structure and size of multi-stage wind sorter

1. 谷粒出料口 2. 二级茎秆出料口 3. 一级茎秆出料口 4. 喉管
5. 进料口 6. 一级进风口 7. 二级进风口

采用图 2 所示的谷粒与茎秆, 在 EDEM 中由多个球形颗粒叠加而成。谷粒为椭球体, 长轴为 7 mm, 短轴为 3 mm; 茎秆近似为圆柱体, 长为 6 mm, 圆直径为 4 mm。



(a) 谷粒三维模型

(b) 茎秆三维模型

图 2 谷粒—茎秆三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model of rice-stalk

1.2 数学模型

在 DEM-CFD 耦合过程中, 气相采用纳维—斯托克斯 (Navier Stokes) 方程进行求解, 其连续性方程^[21-23]

$$\frac{\partial(\epsilon_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon_g \rho_g \mathbf{u}_g) = 0 \quad (1)$$

式中: ϵ_g —— 气体体积分数;

ρ_g —— 气体密度, kg/m^3 ;

\mathbf{u}_g —— 气体流速, m/s ;

∇ —— 哈密顿微分算子;

t —— 时间, s 。

动量守恒方程

$$\frac{\partial(\epsilon_g \rho_g \mathbf{u}_g)}{\partial t} + \nabla \cdot (\epsilon_g \rho_g \mathbf{u}_g^2) = -\epsilon_g \nabla P +$$

$$\epsilon_g \nabla \tau + \epsilon_g \rho_g \mathbf{g} - R_{gp}$$

式中: P —— 气体微元体上的压力, Pa ;

\mathbf{g} —— 重力加速度, m/s^2 ;

R_{gp} —— 动量源项;

τ —— 气体动力黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

动力源项 R_{gp} 表示在网格单元格内气流所受阻力的总和, 其方程式

$$R_{gp} = \frac{\sum_{i=1}^n F_i}{V_c} \quad (3)$$

式中: F_i —— 颗粒 i 对气体的阻力作用, N ;

V_c —— 网格单元的体积, m^3 。

DEM-CFD 耦合过程中, 固相颗粒采用力学平衡方程进行求解^[24]。

$$m_i \frac{d\mathbf{v}_i}{dt} = m_i \mathbf{g} + F_w \sin \theta + \sum_{j=1}^{n_i} (F_{n,ij} + F_{t,ij}) \quad (4)$$

$$F_w = \frac{1}{2} \rho_g S v_g^2 \quad (5)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^{n_i} (T_{t,ij} + T_{r,ij}) \quad (6)$$

式中: m_i —— 颗粒的质量, kg ;

I_i —— 颗粒的转动惯量, $\text{kg} \cdot \text{m}^2$;

\mathbf{v}_i —— 颗粒的速度, m/s ;

ω_i —— 颗粒的角速度, rad/s ;

\mathbf{g} —— 重力加速度, m/s^2 ;

θ —— 吹风倾角;

S —— 受风面积, m^2 ;

ρ_g —— 气体密度, kg/m^3 ;

\mathbf{v}_g —— 气体流速, m/s ;

$F_{n,ij}$ —— 法向力, N ;

$F_{t,ij}$ —— 切向力, N ;

$T_{t,ij}$ —— 切向力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$;

$T_{r,ij}$ —— 摩擦力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$ 。

法向力、切向力、切向力矩和摩擦力矩均可由离散元法基本原理求得^[25-26]。

2 方法简介及仿真过程描述

2.1 DEM-CFD 耦合方法简介

DEM-CFD 方法即软件 EDEM 与 FLUENT 的耦合, 其流程如图 3。首先运用 SolidWorks 对气流流经区域进行建模, 导入 ANSYS Workbench 设置 Physics

Preference 为 CFD,Relevance 为 50 完成网格划分,并对进风口和出风口进行定义,如图 4 所示。然后将划分好的网格导入 EDEM,根据马学东等研究^[28-30],按照表 1、表 2 设置风选机参数和颗粒参数,并设定谷粒生成速率为 5 000 个/s,茎秆生成速率为 2 500 个/s,设置 EDEM 仿真时间步长为 8×10^{-6} s,仿真时间为 5 s。最后将网格导入 FLUENT 设置流场参数:时间为瞬态(Transient),重力为 -9.81 m/s^2 ,选择粘性(Viscous-k-epsilon)模型,连接软件 EDEM 后,设置空气密度为 1.225 kg/m^3 ,钢密度为 $7\,861\text{ kg/m}^3$;设定边界条件,入口为速度入口(velocity-inlet),出口为压力出口(pressure-outlet);给定初始条件后,设置时间步长为 8×10^{-4} s,步数为 6 250,最大迭代次数为 1,点击 Calculate 即可开始计算。

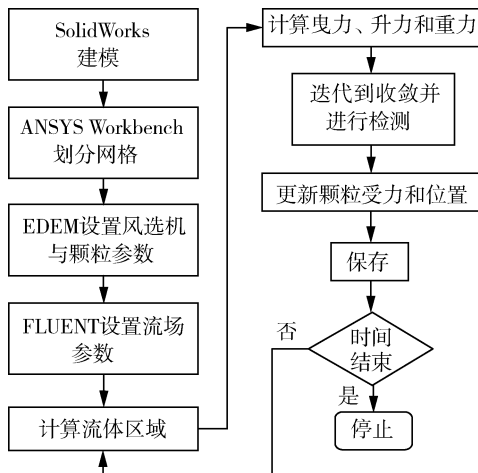


图 3 DEM-CFD 耦合流程图
Fig. 3 Flow chart of DEM-CFD coupling

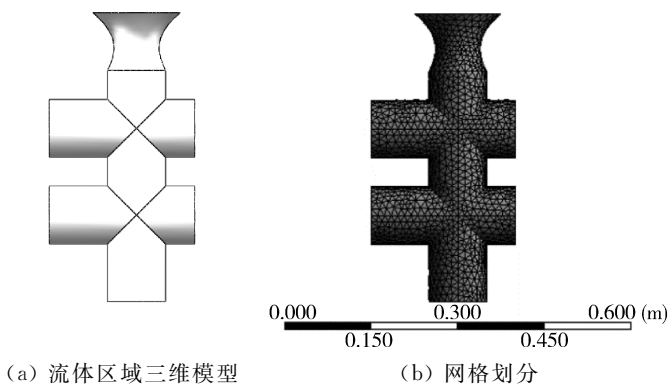


图 4 DEM-CFD 耦合过程模型建立

Fig. 4 Model establishment of DEM-CFD coupling process

表 1 材料物理参数

Tab. 1 Physical parameters of materials

物理参数	钢	谷粒	茎秆
泊松比	0.3	0.3	0.4
剪切模量/Pa	7.992×10^{10}	2.6×10^6	1×10^6
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 861	1 350	50

表 2 材料之间接触参数

Tab. 2 Contact parameters among materials

接触系数	弹性恢复系数	静摩擦系数	滚动摩擦系数
钢—谷粒	0.5	0.58	0.01
钢—茎秆	0.2	0.8	0.01
谷粒—谷粒	0.2	1	0.01
谷粒—茎秆	0.2	0.8	0.01
茎秆—茎秆	0.2	0.7	0.01

2.2 风选仿真过程描述

按 2.1 完成 EDEM-FLUENT 耦合后,仿真开始进行,以风速为 8 m/s 仿真为例,图 5 为多级风选原理示意图。由图 5(a)可以看出:谷粒和茎秆由颗粒工厂产生,之后自由下落进入风选机,当颗粒经过流体区域时,质量较轻的茎秆会随着气流运动,从茎秆出料口吹出,而质量较重的谷粒会由于重力作用继续下落,最终从谷粒出料口流出,从而实现谷粒与茎秆的分离。

图 5(b)为 FLUENT 中气流速度矢量图,从图 5(b)中可知:在吹风口和茎秆出料口之间的通道内气流速度较大,为茎秆能从出料口吹出提供条件。当颗粒处于气流通道时会挡住气流,导致茎秆出料口风速大于进风口风速。

图 5(c)可以更加直观的观察到的风选过程中颗粒的运动轨迹,代表谷粒的棕黄色迹线为斜线,可见谷粒会受到风的影响发生水平方向位移,但不足以运动至茎秆出料口;代表茎秆的灰色迹线为弧线,表示茎秆受风的作用非常明显,茎秆随风运动,从出料口吹出。为对风选机进行分区研究,在 EDEM 中划分出三个网格,其长、宽、高分别为 100 mm、100 mm、50 mm,Ⅰ区为喉管区域,Ⅱ区为一级风选完成区域,Ⅲ区为二级风选完成区域。

为准确衡量风选结果的好坏,运用谷粒体积浓度 C_r 作为衡量标准。

$$C_r(s,t) = \frac{V_r(s,t)}{V_t(s,t)} \tag{7}$$

式中: $C_r(s,t)$ ——空间 s 内 t 时刻谷粒体积浓度;
 $V_r(s,t)$ ——空间 s 内 t 时刻谷粒总体积, m^3 ;
 $V_t(s,t)$ ——空间 s 内 t 时刻谷粒和茎秆总体积, m^3 。

依据图 5(c)进行网格划分,记录Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ区谷粒体积浓度(图 6),从图中可以看出,经过两级风选之后,谷粒体积浓度有了明显的提高。Ⅰ区谷粒体积浓度在 0~5 s 内的平均值为 47.65%,Ⅱ区为 64.52%,Ⅲ区为 97.18%,经过一级风选后,谷粒体积浓度提高 26.15%;经过二级风选后,谷粒体积浓度提高 50.97%。

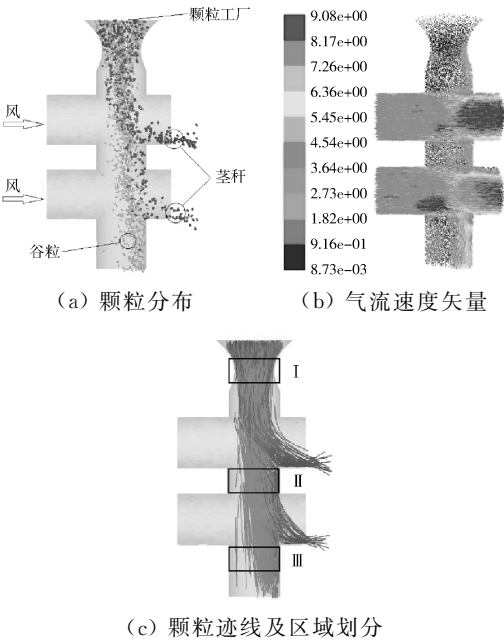


图 5 多级风选原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of multi-stage wind selection

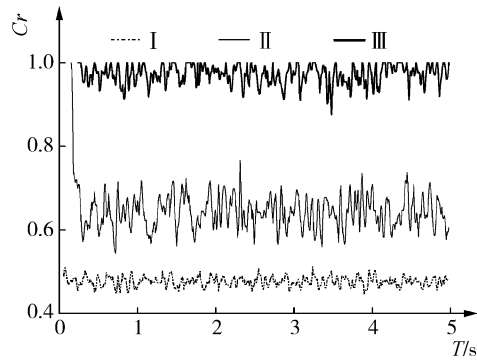


图 6 各区域谷粒体积浓度

Fig. 6 Rice volume concentration in every area

3 参数讨论

3.1 风速对风选结果的影响

为讨论风速对风选结果的影响,采用控制变量法,保证其他条件相同,分别对风速为 6 m/s、8 m/s、10 m/s 时风选过程进行仿真。图 7 为不同风速下气流速度矢量图,可知不同风速下气流速度矢量除数值外无明显差异,可见风速不同不会导致流场分布不同,影响风选结果的只是风对颗粒的作用力大小。

从图 8 的颗粒分布图可以看出,风速为 6 m/s 时,谷粒出料口处仍有较多的茎秆掺杂,谷粒与茎秆分离程度较低;风速为 8 m/s 时,谷粒出料口处混杂茎秆已经很少,谷粒与茎秆分离程度相对较高;风速为 10 m/s 时,谷粒出料口处几乎无茎秆混杂,但会观察到在二级茎秆出料口处有大量谷粒被吹出,导致了较大的损失率。通过记录从茎秆出料口吹出的谷粒个数来计算损失率,得到风速为 6 m/s 时,损失率为 1.62%;风速为 8 m/s 时,损失率为 4.72%;

风速为 10 m/s 时,损失率为 12.93%。

为定量分析三种风速下谷粒与茎秆的分离程度,运用谷粒出料口区域的谷粒体积浓度(图 9)进行分析。图 9(a)是风速为 6 m/s 和 8 m/s 时,谷粒在 0~5 s 内的体积浓度曲线,风速为 6 m/s 时,谷粒体积浓度曲线波动较大,其平均值为 86.29%,标准差为 0.051;风速为 8 m/s 时,谷粒体积浓度平均值为 97.18%,标准差为 0.027。图 9(b)是风速为 8 m/s 和 10 m/s 时,谷粒在 0~5 s 内的体积浓度曲线,风速为 10 m/s 时,谷粒体积浓度平均值为 98.98%,标准差为 0.026。根据曲线和数据可知,在不考虑损失率的前提下,增大风速能够强化风选效果。

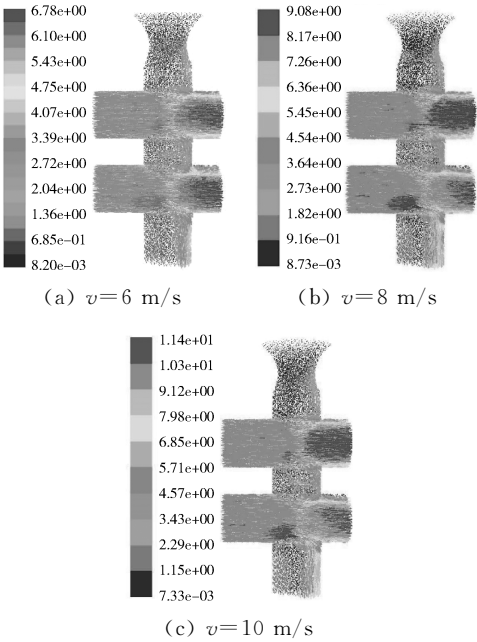


图 7 不同风速下气流速度矢量分布

Fig. 7 Distribution of airflow velocity vector at different wind velocity

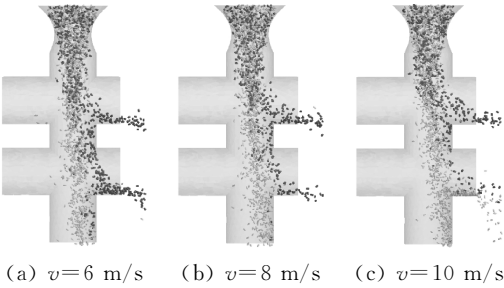


图 8 不同风速下颗粒分布

Fig. 8 Particle distribution at different wind velocity

由以上对比分析可知,增大风速,可以提高谷粒与茎秆的分离程度,但会导致风力加大,谷粒从茎秆出料口吹出的缺陷。综合考虑,选择既有较高分离程度,又有较小损失率的吹风速度,即风速为 8 m/s 时可得到最佳分离效果。

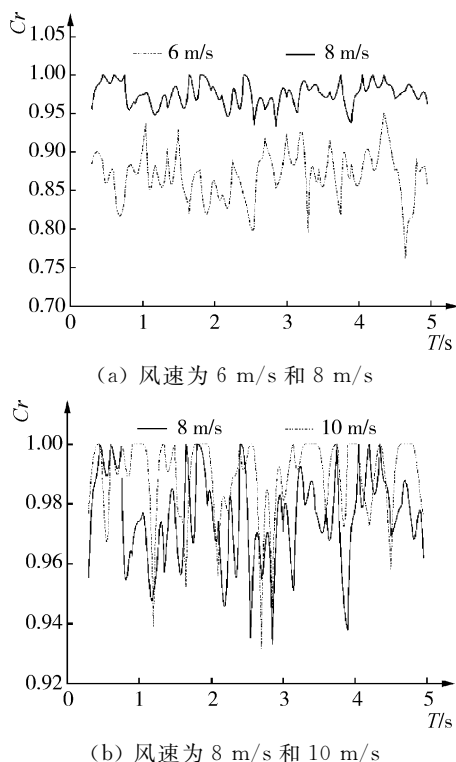


图 9 不同风速下谷粒体积浓度

Fig. 9 Rice volume concentration in different wind velocity

3.2 吹风倾角对风选结果的影响

采用与 3.1 同样的方法,控制风速为 8 m/s,保证其他条件相同,对吹风倾角为 -10° 、 0° 和 $+10^\circ$ 的风选过程进行仿真。图 10 为不同吹风倾角下气流速度矢量图。

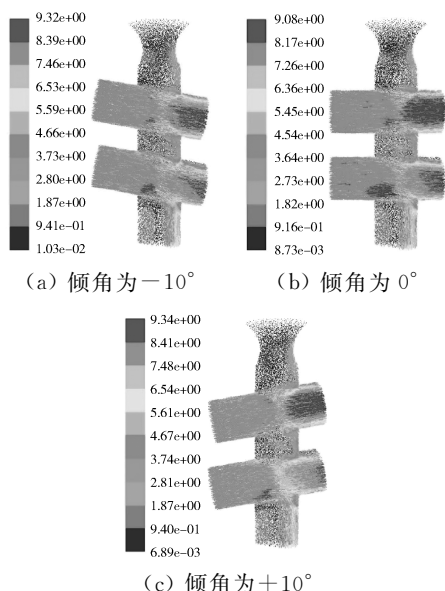


图 10 不同吹风倾角下气流速度矢量分布

Fig. 10 Distribution of airflow velocity vector under different blowing angle

图 11 为不同吹风倾角下颗粒分布图,从气流速度矢量可知,改变吹风倾角对流场影响较小,影响风选结果的是风力角度。结合颗粒分布图,可知吹风倾角

为 -10° 时,在二级出料口处谷粒有较多的损失,通过计算,损失率为 5.32%;吹风倾角为 $+10^\circ$ 时,谷粒损失率为 4.25%,谷粒和茎秆在出料口处产生堆积,容易造成堵塞。

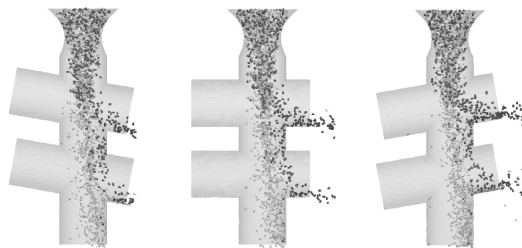
(a) 倾角为 -10° (b) 倾角为 0° (c) 倾角为 $+10^\circ$

图 11 不同吹风倾角下颗粒分布

Fig. 11 Particle distribution under different blowing angle

采用与 3.1 同样的方法,导出三种条件下的谷粒出料口处谷粒体积浓度来对风选结果进行评估,发现三种条件下所得到的谷粒体积浓度差异较小,倾角 -10° 时为 96.97%,倾角 $+10^\circ$ 时为 97.01%,均略小于倾角为 0° 时的 97.18%。

综上所述,风速为 8 m/s 时,选用吹风倾角为 0° 可以获得较高的谷粒体积浓度,同时有较小的损失率,为最佳风选参数。

4 结论

1) 本研究设计的多级风选机能够完成谷粒与茎秆分离,最终获得的谷粒体积浓度达到 97.18%,损失率为 4.72%。

2) 风速对风选结果有很大影响,在风速为 6~10 m/s 内,如果不考虑损失率,风速越大,最终所获谷粒体积浓度越高,风速为 10 m/s 时,谷粒体积浓度可达 98.98%。若考虑损失率,则风速为 8 m/s 时可获得最佳风选结果。

3) 吹风倾角对风选结果有很大影响,吹风倾角为 -10° 时,谷粒损失率较高;吹风倾角为 $+10^\circ$ 时,二级茎秆出料口形成积料,不利于风选;吹风倾角为 0° 时,可获得相对较好的风选结果。

4) DEM-CFD 耦合方法是研究谷物风选的有效方法。

参考文献

- [1] 宁新杰,金诚谦,印祥,等. 谷物联合收割机风筛式清选装置研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(9): 5-10.
Ning Xinjie, Jin Chengqian, Yin Xiang, et al. Research status and development trend of air-and-screen cleaning device for cereal combine harvesters [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(9): 5-10.

- [2] 张猛, 耿爱军, 张智龙, 等. 谷物收获机智能监测系统研究现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(9): 85—90.
- Zhang Meng, Geng Aijun, Zhang Zhilong, et al. Research status and development trend of intelligent monitoring system for grain harvester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(9): 85—90.
- [3] Lei X, Liao Y, Liao Q. Simulation of seed motion in seed feeding device with DEM-CFD coupling approach for rapeseed and wheat [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2016, 131: 29—39.
- [4] 江涛, 吴崇友, 伍德林. 基于 FLUENT 的联合收割机风筛选流场仿真分析[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(3): 26—29.
- Jiang Tao, Wu Chongyou, Wu Delin. Simulation analysis of wind screen flow field for combine harvester based on FLUENT [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(3): 26—29.
- [5] Adewumi B A, Ogunlowo A S, Ademosun C O. Investigating particle trajectory as a parameter for selecting the dimensions of cross flow grain classifier [J]. Agricultural Engineering International: CIGR Journal, 2006.
- [6] 肖星星, 李骅, 吴崇友, 等. 基于 DEM-CFD 两种早稻品种圆筒筛清选过程的运动分析[J]. 机械设计, 2018, 35(10): 32—37.
- Xiao Xingxing, Li Hua, Wu Chongyou, et al. Motion analysis on two early-rice varieties screened in a cylindrical sieve by means of the DEM-CFD methods [J]. Journal of Machine Design, 2018, 35(10): 32—37.
- [7] Ren B, Zhong W, Chen Y, et al. CFD-DEM simulation of spouting of corn-shaped particles [J]. Particuology, 2012, 10(5): 562—572.
- [8] Yuan J, Wu C, Li H, et al. Movement rules and screening characteristics of rice-threshed mixture separation through a cylinder sieve [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2018, 154: 320—329.
- [9] 王立军, 李义博, 郑招辉, 等. 玉米收获机清选装置内杂余抛送器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(1): 1—13.
- Wang Lijun, Li Yibo, Zheng Zhaohui, et al. Design and experiment of mechanism of throwing impurity in cleaning device of maize harvester [J]. Transactions of the CSAM, 2019, 50(1): 1—13.
- [10] 肖梦华. 新型谷物清选装置中气鼓两相流的数值模拟和试验研究[D]. 浙江: 浙江理工大学, 2012.
- Xiao Menghua. Numerical simulation and experiment of gas-solid two-phase flow in a novel grain separation unit [D]. Zhejiang: Zhejiang Sci-Tech University, 2012.
- [11] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010.
- [12] 李磊. 离散元法在农业工程中的研究现状及展望[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(5): 345—348.
- Li Lei. Research progress and prospects of DEM in agricultural engineering application [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(5): 345—348.
- [13] Fleissner F, Gaugele T, Eberhard P. Applications of the discrete element method in mechanical engineering [J]. Multibody system dynamics, 2007, 18(1): 81.
- [14] 丁欣硕, 刘斌. FLUENT 17.0 流体仿真从入门到精通[M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.
- [15] Koivisto J, Korhonen M, Alava M, et al. Friction controls even submerged granular flows [J]. Soft matter, 2017, 13(41): 7657—7664.
- [16] 周珂, 王瑞华, 孙海亭, 等. CFD 模拟两种风机位置的苹果冷藏库温度场[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(7): 75—79, 105.
- Zhou Ke, Wang Ruihua, Sun Haiting, et al. Simulation on the temperature field of the two fan solution in cool store based on CFD [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(7): 75—79, 105.
- [17] 韩丹丹, 张东兴, 杨丽, 等. 基于 EDEM-CFD 耦合的内充气式排种器优化与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 43—51.
- Han Dandan, Zhang Dongxing, Yang Li, et al. Optimization and experiment of inside-filling air-blowing seed metering device based on EDEM-CFD [J]. Transactions of the CSAM, 2017, 48(11): 43—51.
- [18] 丁力, 杨丽, 武德浩, 等. 基于 DEM-CFD 耦合的玉米气吸式排种器仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 48—57.
- Ding Li, Yang Li, Wu Dehao, et al. Simulation and experiment of corn air suction seed metering device based on DEM-CFD coupling method [J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49(11): 48—57.
- [19] Jiang M, Shen Z, Zhou W, et al. Coupled CFD-DEM method for undrained biaxial shear test of methane hydrate bearing sediments [J]. Granular Matter, 2018, 20(4): 63.
- [20] 蒋恩臣, 孙占峰, 潘志祥, 等. 基于 CFD-DEM 的收获机分离室内谷物运动模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45(4): 117—122.
- Jiang Enchen, Sun Zhanfeng, Pan Zhixiang, et al. Numerical simulation based on CFD-DEM and experiments of grain moving laws in inertia separation chamber [J]. Transactions of the CSAM, 2014, 45(4): 117—122.
- [21] 陆永光, 胡志超, 林德志, 等. 基于 CFD-DEM 花生荚果管道输送过程数值模拟[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(6): 104—109.
- Lu Yongguang, Hu Zhichao, Lin Dezhi, et al. Numerical simulation of peanuts particles conveying in pipeline using CFD-DEM coupled approach [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(6): 104—109.
- [22] Zhou L, Zhang L, Bai L, et al. Experimental study and transient CFD/DEM simulation in a fluidized bed based on

- different drag models [J]. RSC Advances, 2017, 7(21): 12764—12774.
- [23] Liu P, LaMarche C Q, Kellogg K M, et al. Dense versus dilute fluidization of cohesive particles: Reverse sensitivity to friction and restitution coefficient [J]. Physical Review Fluids, 2017, 2(5): 054302.
- [24] 杨航, 刘芳, 李加祥, 等. 基于 CFD-DEM 耦合的气吸式三七播种器工作参数仿真分析[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(1): 22—25.
- Yang Hang, Liu Fang, Li Jiaxiang, et al. Simulation analysis of working parameters of Panax notoginseng seeder based on CFD-DEM coupling [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(1): 22—25.
- [25] 高筱钧, 徐杨, 杨丽, 等. 基于 DEM-CFD 耦合的文丘里供种管供种均匀性仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(S1): 92—100.
- Gao Xiaojun, Xu Yang, Yang Li, et al. Simulation and experiments of uniformity of venturi feeding tube based on DEM-CFD coupling [J]. Transactions of the CSAM, 2018, 49(S1): 92—100.
- [26] Shi C, Li D, Xu W, et al. Discrete element cluster modeling of complex mesoscopic particles for use with the particle flow code method [J]. Granular Matter, 2015, 17(3): 377—387.
- [27] Ma X D, Zhang Y B, Liu Y, et al. Simulation of grain separation under horizontal collisions [J]. Granular Matter, 2016, 18(8): 1—6.
- [28] 马学东, 李亚运, 李玲玲, 等. 水平摆振下谷物偏析效果的离散元模拟研究[J]. 河南农业大学学报, 2017, 51(5): 687—692.
- Ma Xuedong, Li Yayun, Li Lingling, et al. Discrete element simulation of grain segregation effect under horizontal pendulum oscillations [J]. Journal of Henan Agricultural University, 2017, 51(5): 687—692.
- [29] 李洪昌, 李耀明, 唐忠, 等. 基于 EDEM 的振动筛分数值模拟与研究[J]. 农业工程学报, 2011, 27(5): 117—121.
- Li Hongchang, Li Yaoming, Tang Zhong, et al. Numerical simulation and analysis of vibration screening based on EDEM [J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(5): 117—121.

Simulation research of grain multi-stage wind selection based on DEM-CFD coupling

Guo Bingjiang, Ma Xuedong, Zhao Lei, Yu Haichuan

(School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan, 114051, China)

Abstract: In order to improve the efficiency of grain wind selection, strengthen the selection effect, and obtain the best wind selection parameters, a multi-stage wind selection device is designed, and the method of coupling discrete element method (DEM) and computational fluid dynamics (CFD) is adopted. The multi-stage wind selection process is simulated, and the rice volume concentration is introduced to quantify the wind selection results. The effects of wind speed and wind blowing angle on rice volume concentration are discussed. The results show that after multi-stage wind selecting, rice volume concentration can reach 97.18%, which is 50.97% higher than initial mixing state, and the rice loss rate is 4.72%. The wind speed and blowing angle have great influences on wind selection results. When wind speed is 8 m/s and blowing angle is 0°, a higher rice volume concentration can be obtained, and there is a smaller loss rate.

Keywords: segregation of grain; multi-stage wind selection; DEM-CFD coupling