

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.09.018

# 贯流风筛清选装置内玉米脱出物运动规律研究\*

王立军 李洋 梁昌 马继卿 周文秀

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 为减少玉米籽粒收获机作业时籽粒清选损失率, 利用 EDEM 建立了玉米脱出物各成分颗粒模型, 采用 CFD-DEM 耦合的方法对玉米脱出物在贯流式风筛清选装置中的运动进行了数值模拟。仿真结果表明, 透筛杂质为玉米芯且集中在清选装置后部; 随着清选装置入口气体速度的提高清选装置清选获得的籽粒清洁率提高, 但玉米籽粒清选损失率增加, 仿真结果与台架试验结果基本一致。在玉米脱出物喂入量 3 kg/s 条件下, 研究确定清选装置入口气体速度低于 11.72 m/s, 清选装置清选损失率小于 2%, 符合玉米籽粒联合收获机正常作业性能要求。

**关键词:** 玉米籽粒收获机 贯流式风筛 玉米脱出物 运动规律

中图分类号: S225.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2015)09-0122-06

## Motion Law of Maize Mixture in Cross Air-and-screen Cleaning Device

Wang Lijun Li Yang Liang Chang Ma Jiqing Zhou Wenxiu

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** In view of the loss of maize cleaned out of maize harvester, models of maize mixture were founded by using EDEM software. Computational fluid dynamics and discrete element method (CFD-DEM) were coupled to simulate the motion of maize in cross air-and-screen cleaning device. The distribution of airflow and the trajectories and velocities of maize moving in the device were obtained, which reveal the work mechanism of the device. The results also showed that the debris of maize only included maize cob and main concentrated in the middle and at the rear of the device. And the performance of the device cleaning debris was enhanced with rises of inlet airflow velocities in the device, but the loss of maize was increased. The experimental results and simulation results consisted well. In order to meet the performance requirement of maize harvester, the loss rate of maize should be lower than 2%, the inlet velocity of airflow was ascertained and should be lower than 11.72 m/s under the condition of the normal feed quantity of maize mixture of 3 kg/s. Based on this, the rotating speed of the cross fan in maize harvester should be lower than 911 r/min.

**Key words:** Maize threshing harvester Cross air-and-screen Maize mixture Motion law

### 引言

农业物料在清选装置中的运动是复杂的两相流过程, 既存在着固相对固相的影响, 又存在气相对固相的影响, 国内外众多学者采用了仿真与试验的方

法对此类问题进行了研究。杜小强等<sup>[1]</sup>应用 Fluent 软件的气固两相流模拟了水稻籽粒与茎秆在纯风选清选装置中的运动轨迹。李耀明等<sup>[2]</sup>通过 Fluent 计算风场, 并应用 EDEM 软件模拟了水稻与茎秆在单层振动筛清选装置中筛下物料分布情况。蒋恩臣

收稿日期: 2014-11-18 修回日期: 2015-01-12

\* 国家自然科学基金资助项目(51475090)、黑龙江省高校新世纪优秀人才支持计划资助项目(1254-NCET-003)和哈尔滨市青年科技创新人才研究专项资金资助项目(2014RFQXJ142)

作者简介: 王立军, 教授, 主要从事农业机械研究, E-mail: wljszf@163.com

等<sup>[3]</sup>基于 Fluent 与 EDEM 软件耦合的方法研究了水稻收获机分离室内部水稻籽粒与茎秆的运动规律。Gebrehiwot 等<sup>[4-5]</sup>针对水稻联合收获机离心风机横向气流开口对其性能的影响进行了 CFD 模拟和试验研究。杜文勇等<sup>[6]</sup>利用 ANSYS 软件的 FLOTRAN-CFD 模块对油菜收获机清选机构内气体流场进行了数值分析。李骅等<sup>[7]</sup>应用 Fluent 软件研究了在没有物料的情况下风筛式清选装置中鱼鳞筛夹角及风机转速倾角变化对其内部风场的影响。陈翠英等<sup>[8]</sup>对油菜脱出物的摩擦特性进行了测定,并应用 Adams 软件对油菜收获机振动筛参数进行了优化。

玉米籽粒外形不规则,且玉米脱出物中存在玉米芯这种有别于茎秆的杂质,目前还没有研究玉米脱出物在清选装置中运动规律的相关报道。本文通过 EDEM 建立玉米脱出物的颗粒模型并利用 CFD-EDEM 耦合的方法研究不同气体速度条件下玉米脱出物在清选装置内部的运动规律,揭示清选装置的工作原理,并利用试验装置对其性能进行验证研究。

## 1 玉米脱出物及清选装置模型

### 1.1 玉米脱出物成分及其模型

玉米脱出物是指玉米经玉米籽粒收获机摘穗、喂入、输送和脱粒后,最终落入清选装置内的混合物。为了获取玉米脱出物成分及各成分占玉米脱出物总量的质量百分比,在黑龙江省赵光农场对 6 行玉米籽粒联合收获机田间作业进行调研,得到玉米脱出物的成分及不同成分的质量比,其中玉米籽粒、茎秆、芯和轻杂质所占的质量百分比分别为 73.3%、17.6%、8.7% 和 1.4%。玉米茎秆可以看成小圆柱体,其长度分布如图 1 所示,选取主要长度 28、36、44、52 mm 进行建模,质量百分比分别为 13.9%、32.2%、30% 和 23.9%。为了建立玉米籽粒模型,选取 200 个玉米籽粒,对玉米籽粒的三维尺寸进行测量,将玉米籽粒分为锥形、球形和矩形 3 类,所占质量百分比分别为 74.5%、15.2% 和 10.3%。玉米芯主要分为四分之一、二分之一及整个圆柱体,所占质量百分比分别为 50%、20.7% 和 29.3%。根据测量的玉米脱出物三维尺寸在 CATIA 软件中进行建模,将其保存成 IGS 格式导入到 EDEM 软件中进行小球填充,玉米脱出物及其模型如图 2 所示。

### 1.2 风筛式清选装置模型

6 行玉米籽粒联合收获机清选装置主要参数为长度 1 850 mm,高度 925 mm,上筛为贝壳筛,长度为 1 360 mm,筛面安装倾角 3.5°,筛面中部与顶端的垂

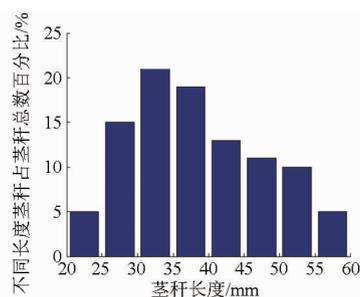


图 1 玉米茎秆长度分布

Fig. 1 Probability distribution of straw length

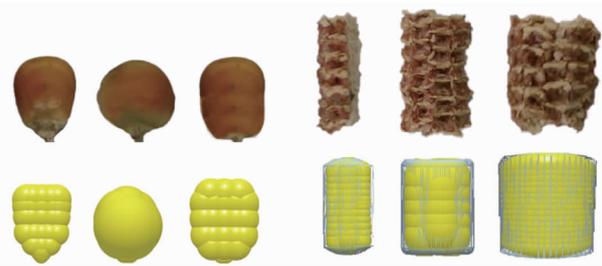


图 2 玉米籽粒、芯及其模型

Fig. 2 Maize and its cobs as well as their models

直距离为 320 mm。下筛为圆孔筛,长度和安装倾角与上筛完全相同,两筛之间的垂直距离为 340 mm。鉴于清选装置在宽度方向上完全对称,并考虑到计算机计算能力,选取宽度方向 100 mm 进行建模,清选装置模型如图 3 所示。

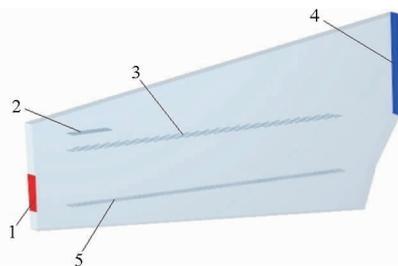


图 3 风筛式清选装置简图

Fig. 3 Schematic diagram of air-and-screen cleaning device

1. 气体入口 2. 物料喂入位置 3. 贝壳筛 4. 杂余出口 5. 圆孔筛

## 2 数学模型

### 2.1 气体相控制方程

气体的流动过程满足质量守恒定律和动量守恒定律。气体相连续性方程和动量方程为<sup>[3]</sup>

$$\frac{\partial(\varphi\rho)}{\partial t} + \nabla(\varphi\rho u) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial(\varphi\rho)}{\partial t} + \nabla(\varphi\rho u) = -\nabla p + \nabla(\eta\varphi\nabla u) - \varphi\rho g - S \quad (2)$$

式中  $\varphi$ ——气体所占体积分数

$t$ ——时间, s  $\rho$ ——气体密度, kg/m<sup>3</sup>

$u$ ——气体速度, m/s  $p$ ——气体压强, Pa

$g$ ——重力加速度,  $\text{m/s}^2$

$\eta$ ——气体粘度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$

$S$ ——阻力动量汇

气体相与颗粒相之间的耦合通过计算阻力动量汇实现。动量汇  $S$  的表达式为<sup>[13]</sup>

$$S = \frac{\sum_i^n F_{D_i}}{V} \quad (3)$$

其中  $F_D = 0.5 C_D \rho A |u - u_p| (u - u_p)$  (4)

$$C_D = \begin{cases} \frac{24}{Re} & (Re < 0.5) \\ \frac{24(1.0 + 0.25Re^{0.687})}{Re} & (0.5 \leq Re \leq 1000) \\ 0.44 & (Re > 1000) \end{cases} \quad (5)$$

$$Re = \frac{\rho d_p |u_p - u|}{\eta} \quad (6)$$

式中  $F_D$ ——颗粒所受流体阻力,  $\text{N}$

$V$ ——网格单元体积,  $\text{m}^3$

$C_D$ ——曳力系数

$A$ ——颗粒投影面积,  $\text{m}^2$

$u_p$ ——颗粒速度,  $\text{m/s}$

$Re$ ——雷诺数  $d_p$ ——颗粒直径,  $\text{m}$

## 2.2 颗粒碰撞模型

本文采用 Hertz-Mindlin (no-slip) 接触模型, 计算颗粒接触时的基本作用力。该模型已成功应用于农业物料的筛分与运输领域<sup>[9]</sup>。壁面及筛子看成半径与质量无穷大的球体, 玉米脱出物与壁面及筛子碰撞视为颗粒间碰撞, 碰撞时玉米脱出物不会对筛子及壁面的运动情况造成影响, 玉米脱出物之间的碰撞视为软球碰撞<sup>[10]</sup>。

## 2.3 参数设置

### 2.3.1 气相参数

鉴于清选装置入口气体速度是影响籽粒清洁率与籽粒清选损失率的关键因素, 根据 6 行玉米籽粒联合收获机田间作业贯流风机转速范围 (750 ~ 1240  $\text{r/min}$ ), 换算清选装置入口气体平均速度范围为 9.6 ~ 16  $\text{m/s}$ 。

### 2.3.2 颗粒相参数

各材料的力学特性如表 1 所示<sup>[11-12]</sup>。试验测得各材料之间的恢复系数: 玉米籽粒之间 0.31, 玉米籽粒与玉米芯之间 0.25, 玉米籽粒与玉米茎秆之间 0.27, 玉米籽粒与壁面及筛子之间 0.54, 玉米茎秆与玉米芯之间 0.22, 玉米茎秆之间 0.21, 玉米茎秆与壁面及筛子之间 0.29, 玉米芯之间 0.22, 玉米芯与壁面及筛子之间 0.33。测量得各材料之间的

静摩擦因数: 玉米籽粒之间 0.79, 玉米籽粒与玉米茎秆之间 0.71, 玉米籽粒与玉米芯之间 0.68, 玉米籽粒与壁面及筛子之间 0.48, 玉米芯之间 0.78, 玉米芯与玉米茎秆之间 0.68, 玉米芯与壁面及筛子之间 0.7, 玉米茎秆之间 0.65, 玉米茎秆与壁面及筛子之间 0.62。滚动摩擦因数均取默认值 0.01<sup>[13]</sup>。

表 1 材料的力学特性

Tab.1 Mechanical properties of materials

材料	泊松比	剪切模量/MPa	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
玉米籽粒	0.4	1.27	1197
玉米茎秆	0.42	1	112
玉米芯	0.45	1.09	330
筛面(钢)	0.3	700	7800

调研发现 6 行玉米籽粒联合收获机以正常收获速度 1.5  $\text{m/s}$  前进 3  $\text{m}$  时落入清选装置内部的脱出物总质量为 6.017  $\text{kg}$ , 玉米脱出物的实际喂入量约为 3  $\text{kg/s}$ , 以 0  $\text{m/s}$  的初速度从上筛前端喂入。

### 2.3.3 耦合物理模型参数设置

设定筛子的振动频率 5.15  $\text{Hz}$ ,  $X$  方向振幅为 14  $\text{mm}$ ,  $Y$  方向振幅为 13  $\text{mm}$ , 上筛的振动方向角为 136.6°, 下筛的振动方向角为 43.4°。玉米脱出物喂入位置位于上筛前部, 距离上筛 230  $\text{mm}$ 。

## 3 结果分析

在 Fluent 软件中选用标准的  $k-\varepsilon$  湍流模型计算, 在 Fluent 中将风场计算收敛后再与 EDEM 耦合, 耦合方法选用欧拉-欧拉方法。

### 3.1 清选装置内气流场分布

图 4 为清选装置入口气体速度为 12.8  $\text{m/s}$  (依据玉米收获机中风机出口倾角为 20°, 装置入口气流方向角设为 20°), 玉米脱出物以 0  $\text{m/s}$  的初速度进入清选装置, 仿真时间为 1  $\text{s}$  的气体速度分布情况。

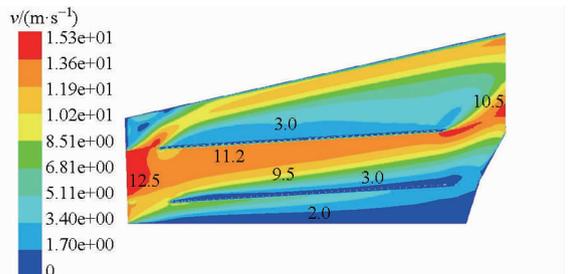


图 4 清选装置内气体速度分布

Fig.4 Velocities distribution of airflow in cleaning device

由图 4 可知, 上筛与下筛贴近筛面部位存在低速区域, 速度为 3  $\text{m/s}$ 。上筛与下筛之间气体速度较大, 在上筛和下筛之间气体速度出现分层现象且沿着气体流动方向逐渐减小; 清选装置下筛下部为

低速区域,有利于透筛的玉米籽粒迅速沉降,清选装置出口处气体速度较高,有利于清除运动到清选装置后端的玉米芯与玉米茎秆。

### 3.2 玉米脱出物运动规律

#### 3.2.1 玉米脱出物运动轨迹

为减少计算量,本文仿真研究中玉米脱出物喂入量设定为 0.3 kg/s,各种成分质量比例按前文进行设定,追踪部分玉米脱出物在清选装置中的运动过程。图 5 为玉米脱出物在 XY 平面内运动的轨迹(红色、蓝色、黑色和绿色轨迹线分别代表玉米籽粒、28 mm 长玉米茎秆、52 mm 长玉米茎秆、玉米芯的轨迹)。

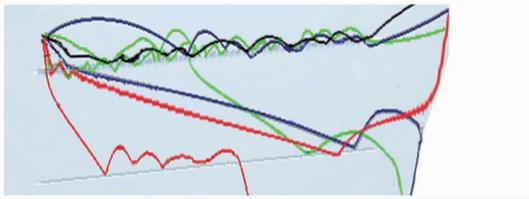


图 5 玉米脱出物在 XY 平面内的运动轨迹

Fig. 5 Trajectories of maize mixture in XY plane

由图 5 红色曲线可知,大多数玉米籽粒透过上筛后落到下筛中部,最后透过下筛被收集,少数玉米

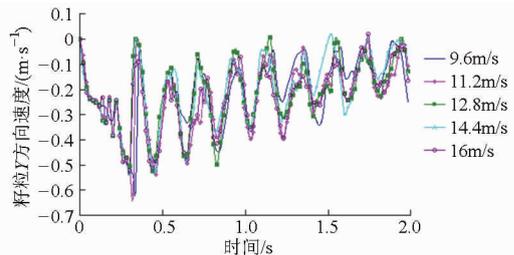
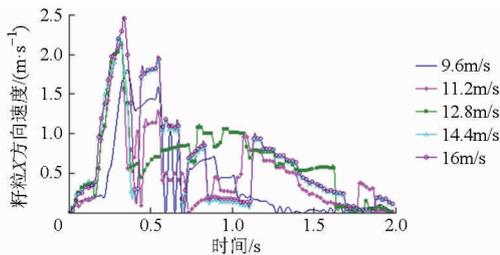


图 6 籽粒运动速度随时间变化规律

Fig. 6 Velocities of maize moving with increase of time

由图 6 可知,入口气体速度为 9.6 m/s 时,玉米籽粒 X 方向速度达到最大值(1.68 m/s)所需时间为 0.35 s,随着气体速度的增加玉米籽粒的 X 方向速度最大值增大,且达到最大速度的时间缩短。玉米籽粒 Y 方向速度随气体速度变化不明显,随着筛子的运动透筛速度为负值。玉米籽粒在 0~0.2 s 刚进入清选装置其水平方向速度增加缓慢,但当玉米籽粒在 0.2 s 左右开始从上筛透筛后,由于气体速度增加(见图 4),风力对玉米籽粒的携带作用加强,玉米籽粒的水平速度与竖直速度迅速增大,在 0.3~0.4 s 玉米籽粒水平速度与竖直速度均产生突变,是与下筛碰撞造成的,玉米籽粒在下筛上跳动多次后落入清选装置下部。

不同气体速度造成的玉米脱出物中籽粒清选损失情况如表 2 所示。如图 5 中玉米籽粒轨迹所示,部分籽粒在从上筛掉落

后由于较强的气体携带作用运动到下筛尾部并被排出清选装置造成清选损失;大多数玉米茎秆不透筛直接被排出清选装置,极少数玉米茎秆从上筛前端透筛,由于上筛下部气体速度高,其被迅速携带到清选装置尾部,与下筛碰撞后反弹到清选装置后壁,最终落入清选装置;大部分玉米芯随着上筛的运动向后推移,在筛子尾端,气体对玉米芯的携带作用增强,最终排出清选装置,极少数玉米芯会从上筛透筛,即使从上筛透筛,圆孔下筛的尺寸也不利于玉米芯的透筛,与下筛碰撞后向清选装置后端运动,与后壁发生碰撞后有少数落入清选装置,如图 5 绿色曲线所示。

前期仿真试验表明,气体速度的变化对玉米脱出物 Z 方向的速度影响微小,因此选取玉米脱出物在 X 方向(长度方向)与 Y 方向(竖直方向)速度进行分析。并考察不同气体速度对玉米脱出物群体运动的影响。

#### 3.2.2 玉米籽粒在清选装置内部的运动

在清选装置入口不同气体速度条件下,玉米籽粒在 X 方向与 Y 方向上的速度随时间变化的规律如图 6 所示。

带作用运动到下筛后部,当与下筛碰撞后正好处于清选装置尾部,在气体的作用下,该部分玉米籽粒被排出清选装置。

表 2 清选装置性能

Tab. 2 Performance of cleaning device %

入口气体速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	玉米籽粒清洁率		玉米籽粒清选损失率	
	仿真	试验	仿真	试验
9.6	82.94	83.42	0.82	1.02
11.2	85.63	84.74	1.43	1.51
12.8	86.72	85.66	2.24	2.72
14.4	88.74	87.79	2.95	3.34
16.0	92.65	89.58	3.72	4.11

#### 3.2.3 玉米茎秆在清选装置内部的运动

在清选装置入口不同气体速度条件下,玉米茎秆在 X 方向与 Y 方向上的速度随时间变化的规律如图 7 所示。

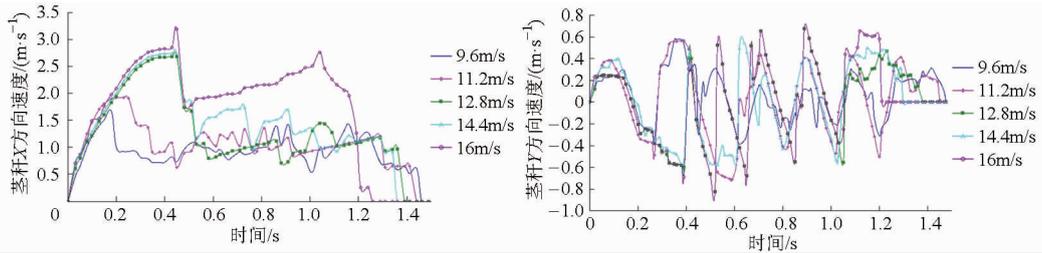


图7 玉米秸秆运动速度随时间变化规律

Fig. 7 Velocities of straw moving with increase of time

由图7可知,气体对玉米秸秆的携带作用强。在入口气体速度为11.2 m/s时,玉米秸秆X方向速度在0.25 s达到最大值(1.8 m/s);气体速度高于12.8 m/s时,玉米秸秆在0.38 s速度达到最大值。玉米秸秆的Y方向速度有正有负,表明玉米秸秆在清选装置内部竖直方向上存在上下浮动。且随着气体速度的增加,玉米秸秆在清选装置中停留的时间变短,入口气体为16 m/s时玉米秸秆在清选装置停留的最短时间为1.25 s,且玉米秸秆在上筛上方加速,当玉米秸秆与上筛发生碰撞时,X方向与Y方向

的速度发生了突变,碰撞后受到筛子作用速度产生上下变化。不同气体速度条件下,由于玉米秸秆的形状,其几乎不透筛。

### 3.2.4 玉米芯在清选装置内部的运动

在清选装置入口不同气体速度条件下,玉米芯在X方向与Y方向上的速度随时间变化的规律如图8所示。

由图8可知,0~0.2 s内,由于风力的携带作用玉米芯X方向速度增大,在0.2 s左右,玉米芯与上筛发生碰撞,碰撞后其X方向速度增加加快(如图8

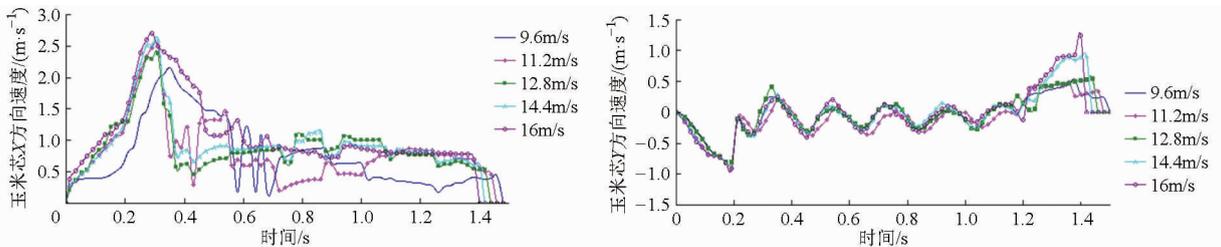


图8 玉米芯运动速度随时间变化规律

Fig. 8 Velocities of maize cob moving with increase of time

玉米芯X方向速度在0.2 s的拐点所示);在0.3~0.4 s内,玉米芯X方向速度达到最大值,并且随着气体速度的增加,玉米芯达到最大速度的时间变短;在0.4~1.0 s内,玉米芯X方向速度逐渐趋于稳定;在1.0~1.4 s内其X方向速度基本稳定;在1.4 s之后玉米芯的X方向速度变为零,表明其已经排除清选装置与出口处收集脱出物的盒子相撞。玉米芯Y方向速度在0~0.2 s内作类平抛运动,在0.2 s左右速度达到最小值(-1.0 m/s),与上筛碰撞后速度由最小值开始增大;在0.2~1.2 s内速度在-0.5 m/s与0.5 m/s之间随上筛运动呈周期性变化;在1.2 s之后玉米芯Y方向运动速度迅速增大。结果表明随着风力的增加清选装置对玉米芯的清选能力增强,其在清选装置中的运动时间变短。

不同气体速度条件下,由清选装置收集获得的玉米籽粒清洁率如表2所示。

## 4 性能台架试验验证

为了验证玉米脱出物群体在清选装置内的运

动,即玉米脱出物的收集和清除情况,在东北农业大学贯流式风筛清选装置试验台架(图9)上进行验证试验。按表2设定清选装置贯流风机出口速度,通过变频器调节清选装置试验台的贯流风机转速。参照GB/T8097—2008《收获机械 联合收割机 试验方法》进行试验,试验重复3次取平均值。



图9 清选装置试验台

Fig. 9 Experimental system of cleaning device

由表2可以得出,由清选装置收集获得的玉米籽粒清洁率随着气体速度的增加而增加,玉米籽粒清选损失率随着气体速度的增大而增大,试验与仿真获得的结果基本一致。根据玉米收获机质量评价技术规范规定玉米籽粒联合收获机清选损失率小于

(等于)2%<sup>[14]</sup>,及玉米籽粒联合收获机在作业时风机转速可调,现以入口气体速度为因素,玉米籽粒清选损失率为性能指标对气体速度进行优选。根据表2中入口气体速度与玉米籽粒的清洁率及玉米籽粒的清选损失率之间拟合获得的关系,确定当玉米籽粒的清选损失率小于(等于)2%时,气体速度应低于11.72 m/s(贯流风机转速低于911 r/min),清选装置性能满足清选要求,由清选装置收集获得的玉米籽粒清洁率为85.2%。

## 5 结论

(1) 试验确定了玉米脱出物成分及各成分质量百分比,并建立了不同成分的仿真模型。

(2) 上筛与下筛之间气体速度较大,沿着气体流动方向逐渐减小;下筛下部为低速区域有利于透筛的玉米籽粒沉降,装置出口处气体速度较高,有利于清除运动到装置后端的玉米芯和玉米茎秆。

(3) 随着清选装置入口气体速度的增加,脱出物在清选装置内的运动时间变短。玉米籽粒在下筛中后部基本完成透筛,玉米茎秆不透筛,玉米芯即使从贝壳上筛透筛,也不易从下筛圆孔透筛。

(4) 随着清选装置入口气体速度的增大,清选获得籽粒清洁率增高,但籽粒损失率也随之增加。为满足清选装置清选损失率小于(等于)2%的性能要求,确定贯流风机作业转速应低于911 r/min。

## 参 考 文 献

- 1 杜小强,肖梦华,胡小钦,等. 贯流式谷物清选装置气固两相流数值模拟与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(3):27-34. Du Xiaoqiang, Xiao Menghua, Hu Xiaoqin, et al. Numerical simulation and experiment of gas-solid two-phase flow in cross-flow grain cleaning device[J]. Transactions of the CSAE, 2014,30(3):27-34. (in Chinese)
- 2 李洪昌,李耀明,唐忠,等. 风筛式清选装置振动筛上物料运动 CFD-DEM 数值模拟[J]. 农业机械学报,2012,43(2):80-84. Li Hongchang, Li Yaoming, Tang Zhong, et al. Numerical simulation of material motion on vibrating screen of air-and-screen cleaning device based on CFD-DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012,43(2):80-84. (in Chinese)
- 3 蒋恩臣,孙占峰,王立军,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):118-122. Jiang Enchen, Sun Zhanfeng, Wang Lijun, et al. Numerical simulation based on CFD-DEM and experiment of grain moving laws in inertia separation chamber[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4):118-122. (in Chinese)
- 4 Mekonnen Gebreslasie Gebrehiwot, Josse De Baerdemaeker, Martine Baelmans, et al. Numerical and experimental study of a cross-flow fan for combine cleaning shoes[J]. Biosystems Engineering, 2010,106(4):448-457.
- 5 Mekonnen Gebreslasie Gebrehiwot, Josse De Baerdemaeker, Martine Baelmans, et al. Effect of a cross-flow opening on the performance of a centrifugal fan in a combine harvester [J]. Computational and Experimental Study, 2010, 105(2):247-256.
- 6 杜文勇,黄海东,樊啟洲. ANSYS 在油菜联合收割机清选机构气流场中的应用[J]. 农机化研究,2007,29(10):174-178. Du Wenyong, Huang Haidong, Fan Qizhou. Application of ANSYS in the flow field in the cleaning device of a rape's combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007,29(10):174-178. (in Chinese)
- 7 李骅,张美娜,尹文庆,等. 风筛式清选装置气流场优化[J]. 农业机械学报,2013,44(增刊):12-16. Li Hua, Zhang Meina, Yin Wenqing, et al. Optimization of air flow field on air-and-screen cleaning device based on CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(Supp.):12-16. (in Chinese)
- 8 陈翠英,王志华,李青林. 油菜脱出物物理机械特性及振动筛参数优化[J]. 农业机械学报,2005,36(3):61-63. Chen Cuiying, Wang Zhihua, Li Qinglin. Mechanophysical properties of rape extractives and parametrical optimization of vibration sieve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3):61-63. (in Chinese)
- 9 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.
- 10 王国强. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安:西北工业大学出版社,2010.
- 11 Coşkun M B, Ibrahim Yalçın, Cengiz Özarslan. Physical properties of sweet corn seed (*Zea mays saccharata Sturt*) [J]. Journal of Food Engineering, 2006, 74(4):523-528.
- 12 ASAE S368.4—2000. Compression test of food materials of convex shape[S]. ASAE Standards 2002: Standards Engineering Practices, 2002, 49:592-599.
- 13 心男. 基于 EDEM-FLUENT 耦合的气吹式排种器工作过程仿真分析[D]. 长春:吉林大学,2013. Xin Nan. Simulation analysis of working process of air-blowing seed-metering device based on coupled EDEM-FLUENT [D]. Changchun: Jilin University, 2013. (in Chinese)
- 14 NY/T 645—2002 玉米收获机质量评价技术规范[S]. 2002.