

# 贯流式谷物清选装置气固两相流数值模拟与试验

杜小强<sup>1</sup>, 肖梦华<sup>1</sup>, 胡小钦<sup>1</sup>, 陈建能<sup>1</sup>, 赵 匀<sup>1,2</sup>

(1. 浙江理工大学机械与自动控制学院, 杭州 310018; 2. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘 要:** 为解决现有谷物风选装置存在的流场不均匀、宽度受限等问题, 该文设计了一种以贯流风机作为风源的贯流式谷物清选装置。基于气相  $K-\varepsilon$  湍流模型和颗粒离散相模型, 对清选室内气固两相流特征进行数值模拟计算。通过建立气相数学模型和边界条件模拟气体流动, 同时利用双向耦合拉格朗日法追踪颗粒, 得到了气相速度分布和颗粒相的运动轨迹。计算结果表明清选室内的气流场存在一定的水平分层现象, 具体表现为靠近清选室上下壁板附近流速低、中部流速高, 但在层内流场分布平稳, 没有明显涡流产生, 而且谷物中不同组分颗粒在清选室内的运动轨迹有很大差异。最后, 在自制的贯流式谷物清选试验台上采用高速摄像技术拍摄了谷物在清选室内的运动轨迹, 验证了数值模拟结果, 表明该贯流式清选装置可有效分离脱出谷物的不同成分。

**关键词:** 粮食; 高速摄像; 农业机械; 谷物清选; 贯流风机; 气固两相流; 运动轨迹

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2014.03.004

中图分类号: S220.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2014)-03-0027-08

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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(3): 27-34. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

农业中常用的物料清选方法有风选和筛选, 其中风选是最主要的一种谷物清选方法, 利用待清选谷物中各种成分在悬浮速度等空气动力学性质方面的差异, 完成籽粒与茎秆、杂质等的分离清选<sup>[1-3]</sup>。目前国内外在设计谷物风选装置时大多假设清选室内气流场均匀稳定<sup>[4-8]</sup>, 但传统风选装置采用离心风机作为风源<sup>[9-11]</sup>, 存在气流紊乱、风速不均匀等问题, 导致谷物理论运动轨迹与实际情况偏差较大, 由此造成较大的清选损失和含杂率的增加, 不适用于清选要求较高的作业场合。

贯流风机出风口气流沿轴向分布较均匀, 且具有较高的压力系数和流量系数, 能以较小的直径和较低的转速满足谷物清选所要求的均匀气流速度, 同时还可以满足大宽幅谷物联合收割机的清选作业要求<sup>[12-13]</sup>。因此, 本文设计了一种以贯流风机作为风源的谷物清选装置。在该清选装置内物料的流

动属于气固两相流, 很难通过现有测试手段实现两相流动特征的精确测量<sup>[14-15]</sup>, 作者通过建立该清选室内气相  $K-\varepsilon$  湍流模型和颗粒离散相模型, 对清选室内气固两相流的运动规律进行数值模拟计算。最后, 在搭建的清选试验台上进行试验, 通过高速摄像技术获得了物料的运动轨迹, 对数值模拟结果进行验证。

## 1 贯流式谷物清选装置

### 1.1 贯流式谷物清选装置结构

贯流式谷物清选装置主要由贯流风机(FFD10-55-B型)、气流扩展通道、喂料斗、喂料辊和清选室等组成, 如图1a所示, 清选装置整体水平放置。由于目前市场上贯流风机多为小功率风机, 主要用于冷却散热、通风换气等场合, 出风口高度小, 无法形成足够高度的吹风面, 因此, 设计的清选装置中采用2个贯流风机上下倾斜安装, 增加吹风面高度。同时, 为了进一步增加气流场对物料的作用高度, 在风机出风口处设置一个喇叭形气流扩展通道, 其横向长度为400 mm。根据贯流风机有效安装角度要求(出风口扩张角度小于 $12^\circ$ )<sup>[16]</sup>, 风机出风口处通道高度设计成175 mm, 落料处通道高度为390 mm。为了弥补通道高度扩展引起风速降低, 该扩展通道垂直于风机轴的2个侧壁设计成向内收缩, 风机出风口处宽度为580 mm, 落料处宽

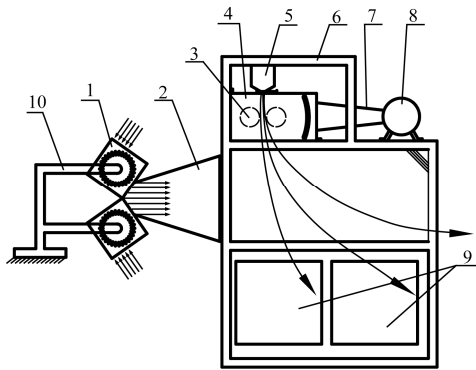
收稿日期: 2013-06-25 修订日期: 2013-12-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51005215); 浙江省钱江人才计划(2012R10055); 浙江省留学人才科技活动择优资助项目(浙人社函[2012]323号); 浙江理工大学科研启动基金项目(0803814-Y); 浙江理工大学科研创新团队专项资助(13020049-Y)

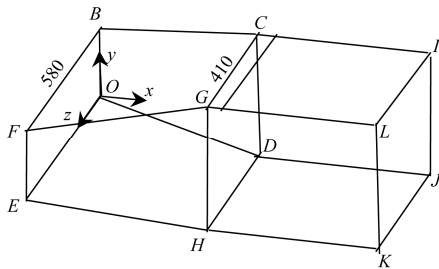
作者简介: 杜小强(1978—), 男, 福建福清人, 副教授, 主要从事农业机械设计方面的研究。杭州 浙江理工大学, 310018。

Email: xqiangdu@zstu.edu.cn

度为 410 mm, 如图 1b 所示。清选室有效清选区域为横向长度 600 mm、高度 390 mm、纵向宽度 410 mm 的矩形空间。在清选室上方装有喂料斗, 使待清选谷物集中落入由电机驱动相向转动的 2 个喂料辊间隙中, 喂料辊将物料挤压成薄层状, 并以一定速度送入清选室, 实现薄层清选。为了便于分析讨论, 对该清选装置设定笛卡尔坐标系, 如图 1b 所示, 以扩展通道进风口处  $O$  点为坐标原点, 垂直于扩展通道进风口面方向为  $x$  轴正方向,  $y$  轴与重力加速度方向相反, 即  $y$  轴正方向由  $O$  点指向  $B$  点,  $z$  轴平行于贯流风机轴向, 正方向由  $O$  点指向  $E$  点。



a. 贯流式谷物清选装置组成  
a. Configuration of cross-flow grain cleaning device



b. 气流扩展通道与清选室的三维结构简图  
b. Three-dimensional diagram of cleaning chamber and airflow expansion channel

1. 贯流风机 2. 气流扩展通道 3. 喂料辊 4. 喂料辊支撑板 5. 喂料斗 6. 清选室机架 7. B 型皮带 8. 三相异步电机 9. 集料斗 10. 贯流风机支撑架  
1. Cross-flow blower 2. Airflow expansion channel 3. Feeding roller 4. Feeding roller frame 5. Feeding hopper 6. Cleaning chamber frame 7. Belt 8. Electric motor 9. Collecting trays 10. Cross-flow blower frame  
注:  $OBCDEFGH$  为气流扩展通道;  $CDGHLKIJ$  为清选室有效清选区域;  $O$  为坐标原点;  $Ox$  为  $x$  轴正方向;  $Oy$  为  $y$  轴正方向;  $Oz$  为  $z$  轴正方向  
Note:  $OBCDEFGH$  is the airflow expansion channel;  $CDGHLKIJ$  is the effective cleaning zone in the cleaning chamber;  $O$  is the origin of cartesian coordinate system;  $Ox$  is the positive direction of  $x$ -axis;  $Oy$  is the positive direction of  $y$ -axis;  $Oz$  is positive direction of  $z$ -axis.

图 1 贯流式谷物清选装置简图

Fig.1 Sketch of cross-flow air separation unit for grain

## 1.2 清选室的网格划分

如图 1b 所示, 气流扩展通道和清选室是轴对称的规则三维结构体, 应用 Gambit 软件将气流扩展通道和清选室的物理模型转化为非结构化四面体网格体, 总共生成节点 41 092 个, 单元 40 826

个。贯流风机出风口处气流均匀平稳, 因此将清选室模型入口边界设定为速度入口边界。清选室出口处为完全敞开的轻质杂余出口, 因此模型出口边界设定为出流边界。其余边界设定为壁面。

## 2 谷物清选装置中气固两相流模型

### 2.1 气相数学模型

该清选装置中气体流动的速度比较低, 因此清选室内气体的密度几乎不变, 这里假设气体密度为常数。假设清选室内气流为 Euler 流场, 由于固相载荷比较高, 不但要考虑气相对颗粒的影响, 还要考虑颗粒对气相的影响, 即采用双向耦合拉格朗日法, 主要体现在颗粒相存在时带来的附加源项, 此时气相瞬时输运公式如下<sup>[17]</sup>:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \bar{u}_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}(\Gamma_\phi \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}) + S_\phi + S_\phi^p \quad (1)$$

式中:  $\Gamma_\phi = \mu_\varepsilon / \sigma_\phi$ ;  $\mu_\varepsilon = \mu_T + \mu = \rho(v_T + \nu)$ ;

$$\nu_T = C_\mu K^2 / \varepsilon$$

湍流动能  $K$  和耗散率  $\varepsilon$  由以下 2 个微分方程求出:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho K) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_g \rho \bar{u}_j K) = \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\frac{\alpha_g \mu_\varepsilon}{\sigma_k} \cdot \frac{\partial K}{\partial x_j}) + \alpha_g G_k - C_D \alpha_g \rho \varepsilon$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_g \rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\alpha_g \rho \bar{u}_j \varepsilon) = \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\frac{\alpha_g \mu_\varepsilon}{\sigma_\varepsilon} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}) + \frac{\varepsilon}{K} \alpha_g (C_1 G_k - C_2 \rho \varepsilon)$$

$$\text{式中: } G_k = \mu_T (\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}) \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i}.$$

式中:  $\bar{u}_i$ 、 $\bar{u}_j$  分别代表  $x$ 、 $y$  方向的速度分量, m/s;  $t$  为时间, s;  $\Gamma_\phi$  为输运系数;  $S_\phi$  为流体相本身的源项;  $S_\phi^p$  为颗粒相存在时带来的附加源项;  $\sigma_\phi$  为湍流 Prandtl 数;  $C_D$  为单颗粒曳力系数;  $\rho$  为空气密度, kg/m<sup>3</sup>;  $\mu$  为流体剪切黏度, kg/(m·s);  $\nu$  为运动黏度, m<sup>2</sup>/s;  $\mu_T$  为湍流黏度, kg/(m·s);  $G_k$  是湍流动能发生率;  $\alpha_g$  为气体的体积分数;  $C_\mu$  为黏度系数, 取 0.09。部分常数值为:  $C_1=1.44$ ,  $C_2=1.92$ ,  $\sigma_k=1.0$ ,  $\sigma_\varepsilon=1.3$ 。

### 2.2 颗粒相数学模型

谷物颗粒在清选室的气固两相流场中受力情况复杂, 影响因素多, 因此要客观反映颗粒运动, 必须考虑颗粒受力的各种因素。谷物清选室内的气固两相流属于稀相气固两相流, 所以可以忽略颗粒之间的相互作用<sup>[18]</sup>。联合收割机中待清选谷物主要

包含小石子、饱满谷粒、瘪谷和短茎秆，密度分别为 3 000、1 200、320 和 150 kg/m<sup>3</sup>。对这些颗粒组分作以下假设：1) 所有颗粒采用当量球形模拟；2) 颗粒之间没有相互作用力；3) 颗粒和气相之间没有热量及质量的传递。基于以上假设，根据牛顿第二定律建立颗粒的微分控制方程<sup>[19]</sup>，并通过模拟计算获得颗粒的运动轨迹。

$$m_i \frac{d\vec{u}_{pi}}{dt} = \vec{F}_i \quad (4)$$

式中： $m_i$  表示颗粒  $i$  的质量，kg； $\vec{u}_{pi}$  表示颗粒  $i$  的运动速度，m/s； $\vec{F}_i$  表示颗粒  $i$  所受到的合力，N，主要包括曳力、虚假质量力、Basset 力、Magnus 力、Saffman 力和压力梯度力等<sup>[20]</sup>，但是在大多数情况下，除了曳力、压力梯度力和自身的重力，其他的力都可以忽略不计。因此，颗粒的运动微分方程可以用下式进一步表达。

$$\frac{d\vec{u}_{pi}}{dt} = \vec{F}_d(\vec{u}_g - \vec{u}_{pi}) + \vec{g}(\rho_{pi} - \rho) / \rho_{pi} + \left(\frac{\rho}{\rho_{pi}}\right) \vec{u}_{pi} \frac{\partial \vec{u}_g}{\partial \vec{n}} \quad (5)$$

式中： $F_d$  可由以下方程求出：

$$F_d = \frac{18\nu}{\rho_{pi} d_{pi}^2} \frac{C_{di} Re_{pi}}{24} \quad (6)$$

$$Re_{pi} = \frac{\varepsilon_i \rho \vec{u}_g - \vec{u}_{pi} d_{pi}}{\nu} \quad (7)$$

$$C_{di} =$$

$$\begin{cases} 24(1 + 0.15(Re_{pi})^{0.687}) / Re_{pi} & \dots\dots Re_{pi} \leq 1000 \\ 0.44 & \dots\dots Re_{pi} > 1000 \end{cases} \quad (8)$$

式中： $\vec{u}_g$  为气流速度，m/s； $\rho$  为空气密度，kg/m<sup>3</sup>； $\rho_{pi}$  为颗粒  $i$  的密度，kg/m<sup>3</sup>； $\vec{g}$  为重力加速度，m/s<sup>2</sup>； $F_d(\vec{u}_g - \vec{u}_{pi})$  为颗粒  $i$  单位质量所受到的曳力，N； $\varepsilon_i$  为颗粒  $i$  的空隙率； $Re_{pi}$  为相对雷诺数； $d_{pi}$  为颗粒  $i$  的直径，m； $C_{di}$  为颗粒  $i$  的曳力系数； $\vec{n}$  为方向向量。

### 3 谷物清选装置中气固两相流数值模拟与讨论

#### 3.1 气流场的运动和变化规律

根据谷物清选的有效气流速度范围<sup>[21-22]</sup>，设定风机出风口气流的速度为 7 m/s，以此作为初始边界条件，利用 Fluent 软件对网格化后谷物清选室内气流场进行模拟计算，得到了清选室内气流的运动和变化规律。图 2 是清选室内整体气流运动的速度矢量图，表明气流速度在清选室前后两侧附近最大，达到了 10.1 m/s，而在上下两侧附近最小，仅

为 5.0 m/s，整个清选室内气流场分别沿  $y$  方向中心平面 ( $y=87.5$  mm) 和  $z$  方向中心平面 ( $z=290$  mm) 成对称分布。图 3 是清选室  $z$  方向中心平面 ( $z=290$  mm) 的气流速度矢量图，从图中可以看出，由于扩展通道上下两板向外扩张，导致清选室上下两侧气流速度明显低于中间气流速度，存在一定的水平分层现象，这一速度分布特征会影响谷物在气流场中的运动轨迹，但由于清选室内最小气流速度 (5.0 m/s) 满足谷物清选的有效气流速度范围 (4.1~16.6 m/s)，所以其对谷物分离效果的影响不大。图 4 是清选室  $y$  方向中心平面 ( $y=87.5$  mm) 的气流速度矢量图，由于扩展通道前后两板向内收缩，导致清选室前后两侧的气流速度略高于中间气流速度，两侧壁板附近的气流速度最高，总体上在平行于  $x-z$  平面内气流比较平稳，不存在涡流。

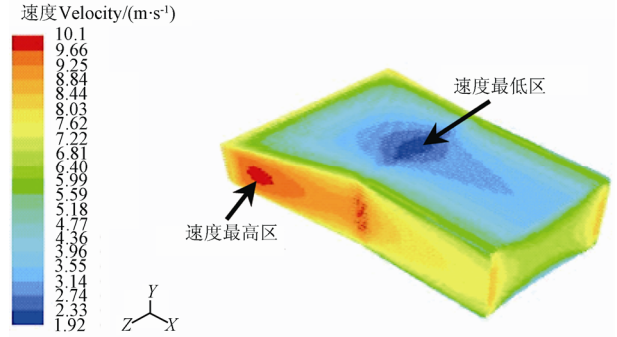


图 2 清选室整体气流场的速度矢量图

Fig.2 Vectorgraph of airflow velocity in cleaning chamber

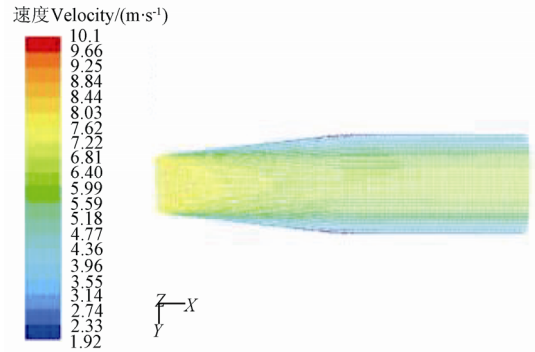


图 3  $z=290$  mm 纵向平面内气流场速度矢量图

Fig.3 Vectorgraph of airflow velocity in plane of  $z=290$  mm

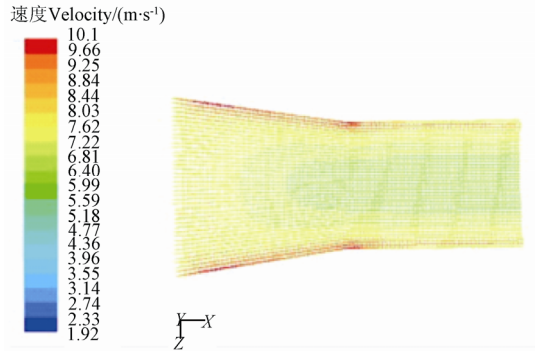


图 4  $y=87.5$  mm 横向平面内气流场速度矢量图

Fig.4 Vectorgraph of airflow velocity in plane of  $y=87.5$  mm

### 3.2 待清选谷物颗粒的运动轨迹

根据喂料辊设计与转速, 设定待清选谷物颗粒从喂料辊间隙以 2 m/s 的竖直向下初始速度进入清选室。根据谷物脱出物中各成分所占的比例, 将小石子、饱满谷粒、瘪谷和短茎秆的质量流率分别设定为 0.004、0.08、0.002 和 0.005 kg/s。在气流作用下, 各组颗粒的运动轨迹可以由式 (1)、式 (5), 采用 SIMPLE 算法<sup>[23]</sup>进行模拟计算得到。图 5 为通过模拟计算得到的各组颗粒在清选室内的运动轨迹。模拟计算结果表明, 在气流和重力的作用下, 各组颗粒的运动轨迹完全不同, 其中小石子几乎是垂直落下, 而饱满谷粒相对小石子在清选室底部向  $x$  正方向偏离 56 mm, 瘪谷相对饱满谷粒向  $x$  正方向偏离 182 mm, 短茎秆则直接飞离出清选室。图 6 中 4 种颗粒掉落在清选室底部出口都呈弧状分布, 这是由于气流扩展通道前后侧板向内收缩导致清选室前后两侧气流速度高、中间气流速度低。因此, 靠近清选室前后两侧壁板的颗粒在高速气流作用下横向运动距离大, 而清选室中部颗粒受较低速气流作用, 横向运动距离小, 这给收集物料带来一定难度。同时, 模拟计算结果也表明, 不同颗粒掉落在清选室出口所形成的弧状分布区域彼此相隔一定距离, 不同物料被有效分离开来。为了进一步提高清选效果和降低收集难度, 可对气流扩展通道进行改进, 增加分流板, 使气流均匀分布, 避免各物料在清选室出口形成弧状分布。

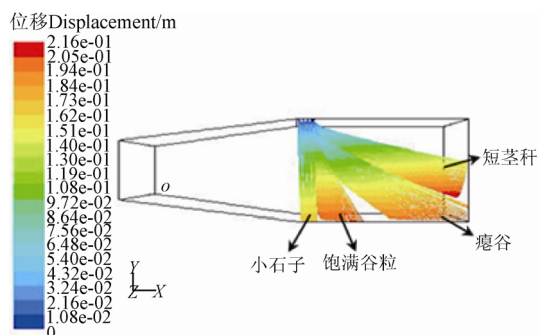


图 5 谷物中各组颗粒的运动轨迹

Fig.5 Traces of grain components

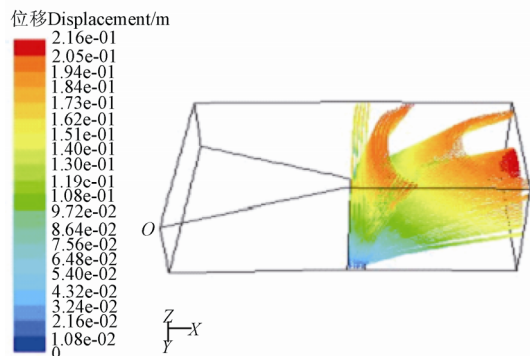


图 6 谷物中各组颗粒的弧状出口分布图

Fig.6 Distribution of grain components at landing area

### 4 贯流式谷物清选试验

为了验证本文建立的贯流式谷物清选气固两相流模型的数值模拟结果, 搭建了贯流式谷物清选试验台, 如图 7 所示。试验地点位于浙江理工大学农业机械实验室, 试验时间是 2012 年 10 月, 试验对象为联合收割机田间作业时收集的未经清选的糯稻脱出物, 试验物料组成及特性参数如表 1 所示。



图 7 贯流式谷物清选试验台实物图

Fig.7 Photo of test rig of cross-flow grain cleaning device

表 1 贯流式谷物清选试验物料组成及特性参数

Table 1 Components and parameters of experiment material in cross-flow grain cleaning test

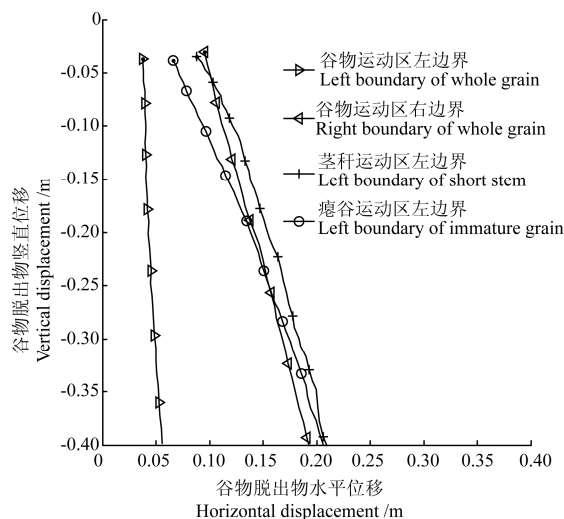
成分 Component	饱满谷粒 Whole grain	短茎秆 Short stem	瘪谷 Immature grain
比例 Percentage/%	89.2	6.9	3.9
湿度 Moisture content/%	15~20	42~65	23~26
悬浮速度 Suspension velocity/(m·s <sup>-1</sup> )	7.2	3.6	5.5

将贯流风机的驱动电机工作频率分别设定为 40、50、60 Hz, 此时风机出风口处气流平均速度分别为 5.44、6.45、7.91 m/s, 其中风机工作频率为 60 Hz 时与仿真设置参数基本一致。喂料辊的驱动电机工作频率设定为 40 Hz, 此时物料初速度为 2.26 m/s。为方便提取物料运动轨迹, 将谷物脱出物手工分拣成谷粒、短茎秆和瘪谷, 在每个风机转动频率下对试验物料进行 3 组重复风选试验, 每次试验物料总喂入量为 2.5 kg。高速摄像技术在农业工程领域中已广泛应用<sup>[24-27]</sup>, 在本文每次试验时, 采用 Photron Fastcam Super 10K 高速摄像系统分别记录谷粒、短茎秆、瘪谷的运动图像, 拍摄速率为 250 fps, 通过分析软件得出各自的运动区。试验中样本取自联合收割机中未经清选的脱出物, 其中石子数量很少, 无法做样本拍摄, 因此未作分析。拍摄得到 3 组风机转速下谷物脱出物运动图像如图 8a、9a、10a 所示。



谷物 Whole grain      短茎秆 Short stem      瘪谷 Immature grain

a. 40 Hz 风机频率下高速摄像  
a. High-speed photograph at 40Hz blower speed

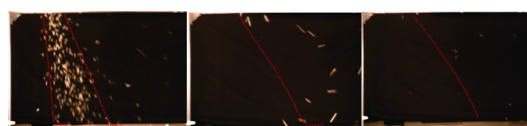


b. 40 Hz 风机频率下谷物脱出物运动区边界

b. Boundary of the threshed crop material at 40Hz blower speed

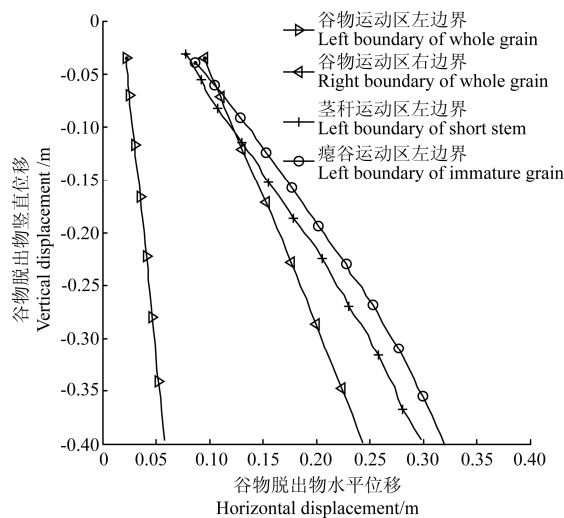
图8 40 Hz风机频率下贯流清选室内谷物脱出物实测运动区

Fig.8 Moving area of threshed crop material in cross-flow grain cleaning chamber at 40 Hz blower speed



谷物 Whole grain      短茎秆 Short stem      瘪谷 Immature grain

a. 50 Hz 风机频率下高速摄像  
a. High-speed photograph at 50 Hz blower speed

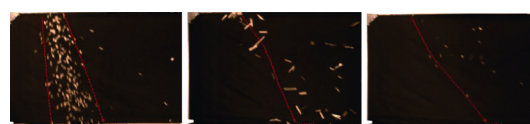


b. 50 Hz 风机频率下谷物脱出物运动区边界

b. Boundary of threshed crop material at 50 Hz blower speed

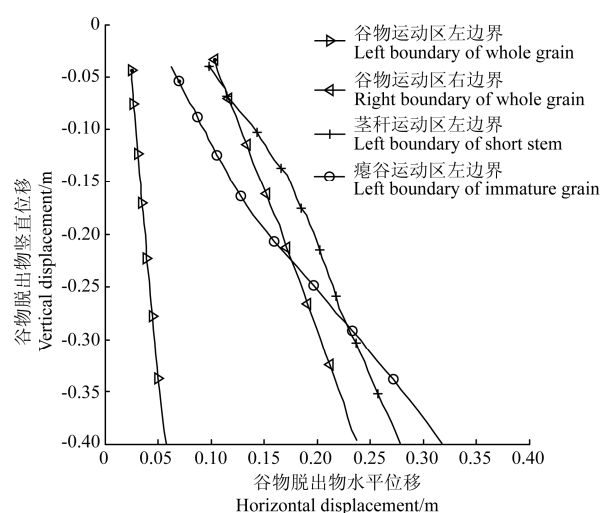
图9 50 Hz风机频率下贯流清选室内谷物脱出物实测运动区

Fig.9 Moving area of threshed crop material in cross-flow grain cleaning chamber at 50 Hz blower speed



谷物 Whole grain      短茎秆 Short stem      瘪谷 Immature grain

a. 60 Hz 风机频率下高速摄像  
a. High-speed photograph at 60 Hz blower speed



b. 60 Hz 风机频率下谷物脱出物运动区边界

b. Boundary of threshed crop material at 60 Hz blower speed

图10 60 Hz风机频率下贯流清选室内谷物脱出物实测运动区

Fig.10 Moving area of threshed crop material in cross-flow grain cleaning chamber at 60Hz blower speed

由图8~图10可得,在所设定的风机转速与喂料辊转速下,贯流清选室内饱满谷粒与杂质的运动区不重合,其中饱满谷粒的横向移动距离最短且分布在一个集中区域内,谷物与杂质分离明显。试验结果表明,所设计的贯流式谷物清选装置可实现较好的清选效果,验证了谷物清选气固两相流数值模拟结果。对比试验和仿真结果,可以发现实测得到的短茎秆与瘪谷的运动区有部分重合,不同于仿真结果。其原因主要在于,在气固两相流模型中采用当量球形模拟短茎秆,而实际上短茎秆为短圆柱体,其悬浮速度随着迎风面的变化而不同<sup>[28]</sup>。

试验过程中,物料下落时分散成一定宽度的物料带,其中,谷粒带相对比较集中,而短茎秆、瘪谷的分布比较分散,且超出高速摄像的拍摄区域。因此,在提取谷粒运动区时跟踪谷粒带最左侧和最右侧的轨迹清晰的谷粒,则这2条谷粒运动轨迹线之间可近似看作谷粒的下落区域。而对于短茎秆和瘪谷,只能跟踪拍摄区域内最左侧的特征颗粒,其运动轨迹线右侧可近似看作各自的下落区域。实测得到的各风机转速下谷物脱出物运动区如图8b、9b、10b所示。

## 5 结 论

1) 建立了贯流式谷物清选室内气固两相流模型, 仿真结果表明当风机出风口气流的速度为 7 m/s 时, 清选室前后两侧附近的气流速度最高, 达到了 10.1 m/s, 而在上下两侧附近最小, 仅为 5.0 m/s, 但仍满足谷物清选的有效气流速度范围; 整个清选室内气流场存在一定的水平分层现象, 表现为清选室上下两侧气流速度明显低于中间气流速度, 但层内流速平稳流畅, 无明显涡流产生。

2) 颗粒运动轨迹模拟计算结果表明在气流和重力的作用下, 谷物脱出物各组分颗粒的运动轨迹差异明显, 可实现有效分离, 其中小石子几乎是垂直落下, 饱满谷粒水平位移较近, 瘪谷水平位移较远, 短茎秆则直接飞离出清选室。由于气流扩展通道前后侧板向内收缩导致清选室前后两侧气流速度高、中间气流速度低, 因此谷物脱出物掉落在清选室底部出口时呈弧状分布。

3) 搭建了贯流式谷物清选试验台, 当物料初速度为 2.26 m/s, 风机出风口处气流平均速度分别为 5.44、6.45、7.91 m/s 时, 采用高速摄像获得谷物脱出物在清选室内的运动轨迹, 结果表明贯流清选室内饱满谷粒与杂质的运动区不重合, 其中饱满谷粒的横向移动距离最短且分布在一个集中区域内, 谷物与杂质分离效果明显, 验证了谷物清选气固两相流的数值模拟结果。

### 【参 考 文 献】

- [1] 邓春香, 陶栋材, 高英武. 谷物清选机的研究现状和发展趋势[J]. 农机化研究, 2005(2): 5—7.  
Deng Chunxiang, Tao Dongcai, Gao Yingwu. Research situation and development trend on grain sorting machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2005(2): 5—7. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王庆祝, 郭建春, 刘荣昌. 农业物料高速气流清选的试验研究[J]. 农机化研究, 2004(3): 124—126.  
Wang Qingzhu, Guo Jianchun, Liu Rongchang. Experimental study on high speed air cleaning in agricultural materials[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2004(3): 124—126. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李银海, 丁启朔, 罗海兵, 等. 微型联合收割机气流式清选装置的仿真研究[J]. 农机化研究, 2009(1): 85—87, 93.  
Li Yinhai, Ding Qishuo, Luo Haibing, et al. Simulation on pneumatic cleaning mechanism for mini-combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009(1): 85—87, 93. (in Chinese with English abstract)
- [4] Frarran I G, Macmillan R H. Grain-chaff separation in a vertical air stream[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1979, 24(2): 115—129.
- [5] Gorila B Y, O'Callaghan J R. Separation of grain from straw in a vertical air stream[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1991, 48(2): 111—122.
- [6] Gorila B Y, O'Callaghan J R. Separation of particles in a horizontal air stream[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1991, 49(2): 273—284.
- [7] 盖玲, 赵匀. 谷物扬场机分离过程物料的空间运动学和动力学分析[J]. 农业工程学报, 1998, 14(2): 94—98.  
Gai Ling, Zhao Yun. Dynamics analysis on grain-chaff separation of winnowing machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 1998, 14(2): 94—98. (in Chinese with English abstract)
- [8] 李革, 赵匀, 俞高红. 倾斜气流清选装置中物料的动力学特性、轨迹和分离研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(6): 22—25.  
Li Ge, Zhao Yun, Yu Gaohong. Dynamical property, loci and separating of materials in inclined airflow device[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2001, 17(6): 22—25. (in Chinese with English abstract)
- [9] Adewumi B A, Ademosun O, Ogunlowo A. Preliminary investigation on the distribution and spread pattern of cowpea in a cross flow grain separator[J]. Agricultural Engineering International: The CIGR Ejournal, 2006, 8: 1—12.
- [10] 李洪昌, 李耀明, 徐立章, 等. 风筛式清选装置气流场的数值模拟与分析[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2010, 31(4): 378—382.  
Li Hongchang, Li Yaoming, Xu Lizhang, et al. Numerical simulation and analysis on flow field of air-and-screen cleaning mechanism[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2010, 31(4): 378—382. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李洪昌, 李耀明, 唐忠, 等. 基于神经网络的风筛式清选装置研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊): 65—68.  
Li Hongchang, Li Yaoming, Tang Zhong, et al. Air-and-screen cleaning device based on neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(supple): 65—68. (in Chinese with English abstract)
- [12] 邱先钧. 贯流风机在联合收割机中的应用及其设计[J]. 农业工程学报, 2003, 19(1): 110—112.

- Qiu Xianjun. Design and application of cross flow blower in combines[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2003, 19(1): 110—112. (in Chinese with English abstract)
- [13] 吕明杰, 孙伟, 常建国. 谷物联合收割机清选横流风机的设计[J]. 农机化研究, 2012(8): 90—92, 97.
- Lü Mingjie, Sun Wei, Chang Jianguo. Design of grain combine harvester cleaning overflow fan[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012(8): 90—92, 97. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王立军, 蒋恩臣, 孙占峰, 等. 联合收获机惯性沉降分离室内籽粒运动规律[J]. 农业机械学报, 2007, 38(8): 90—92.
- Wang Lijun, Jiang Enchen, Sun Zhanfeng, et al. Study on grain trajectory in the grain inertia deposition-separation chamber of combine harvester threshing prior to cutting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 90—92. (in Chinese with English abstract)
- [15] 蒋恩臣, 王立军, 刘坤, 等. 联合收获机惯性分离室内气固两相流数值模拟[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2006, 27(3): 193—196.
- Jiang Enchen, Wang Lijun, Liu Kun, et al. Numerical simulation of gas-particle flow in inertia separation chamber of stripper combine harvester[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2006, 27(3): 193—196. (in Chinese with English abstract)
- [16] 孙研. 通风机选型使用手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [17] 欧阳洁, 李静海, 崔俊芝. 颗粒轨道模型中相间耦合关系及曳力计算的研究[J]. 动力工程, 2004, 24(6): 857—862.
- Ouyang Jie, Li Jinghai, Cui Junzhi. On the coupling relationship between phases and drag calculation in particle-trajectory models[J]. Power Engineering, 2004, 24(6): 857—862. (in Chinese with English abstract)
- [18] Wang Q, Melaaen M Chr, Silva S R De. Investigation and simulation of a cross-flow air classifier[J]. Powder Technology, 2001, 120(3): 273—280.
- [19] 张政, 谢灼利. 流体-固体两相流的数值模拟[J]. 化工学报, 2001, 52(1): 1—12.
- Zhang Zheng, Xie Zhuoli. Numerical simulation of fluid-solid two-phase flows[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2001, 52(1): 1—12. (in Chinese with English abstract)
- [20] 岑可法, 倪明江, 严建华, 等. 气固分离理论及技术[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1996.
- [21] 成芳. 清选物料群的分离气流速度测定[J]. 农机与食品机械, 1998(6): 8—9.
- [22] 陈霓, 黄东明, 张建荣. 非均匀气流清选风机的研究与应用[J]. 机电工程, 2008, 25(4): 108—110.
- Chen Ni, Huang Dongming, Zhang Jianrong. Research and application of cleaning fan with non-uniformly distributed air flow[J]. Mechanical and Electrical Engineering Magazine, 2008, 25(4): 108—110. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李文科. 工程流体力学[M]. 中国科学技术大学出版社, 2007.
- [24] 王静, 廖庆喜, 田波平, 等. 高速摄像技术在我国农业机械领域的应用[J]. 农机化研究, 2007(1): 184—186.
- Wang Jing, Liao Qingxi, Tian Boping, et al. The present and development tendency of high-speed photography applied on agricultural machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(1): 184—186. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王立军, 蒋恩臣, 李瑰贤. 4ZTL-1800 收获机惯性沉降分离室工作机理[J]. 农业工程学报, 2008, 24(9): 108—110.
- Wang Lijun, Jiang Enchen, Li Guixian. Working mechanism of inertia deposition separation chamber of 4ZTL-1800 harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(9): 108—110. (in Chinese with English abstract)
- [26] 张文斌, 李耀明, 徐立章, 等. 应用高速摄像技术研究清选筛面上物料的运动[J]. 农机化研究, 2008(5): 21—24.
- Zhang Wenbin, Li Yaoming, Xu Lizhang, et al. Study the motion law of material on air-and-screen by high-speed video camera[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008(5): 21—24. (in Chinese with English abstract)
- [27] 周福君, 张巍. 高速摄像技术在两相流场籽粒运动测量中的应用[J]. 东北农业大学学报, 2008, 39(4): 22—24.
- Zhou Fujun, Zhang Wei. Application of high speed video camera system in grain motion measurement at gas-solid two phase flow[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2008, 39(4): 22—24. (in Chinese with English abstract)
- [28] 赵学笃, 张魁学, 张振京. 短茎秆的气动特性及其在气流中的运动[J]. 农业机械学报, 1982, 13(2): 55—65.
- Zhao Xuedu, Zhang Kuixue, Zhang Zhenjing. The aerodynamic properties of short stems and their behavior in the air flow[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1982, 13(2): 55—65. (in Chinese with English abstract)

## Numerical simulation and experiment of gas-solid two-phase flow in cross-flow grain cleaning device

Du Xiaoqiang<sup>1</sup>, Xiao Menghua<sup>1</sup>, Hu Xiaoqin<sup>1</sup>, Chen Jianneng<sup>1</sup>, Zhao Yun<sup>1,2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China;

2. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

**Abstract:** The airflow pressure field in the cleaning chamber of the traditional grain winnowing device is irregular, and is not applicable on occasions where high cleaning efficiency is required. Meanwhile, the centrifugal blower is hard to use to obtain a wide and steady wind source. Therefore, a cross-flow grain cleaning device was designed by employing the cross flow blower that is theoretically distributed evenly in the direction parallel to the blower shaft no matter how wide the blower is. And a horn-shaped airflow expansion channel was designed to increase the height of the blowing area. A feeding hopper and two feeding rollers were installed above the cleaning chamber to extrude the materials into a thin layer and accelerate the material layer to a certain speed. Based on the standard  $K-\varepsilon$  turbulent model and particle dispersed phase model, the characteristics of a gas-solid two-phase flow in the developed cleaning chamber were numerically simulated. The airflow model was developed by setting the inlet of the airflow expansion channel as the velocity inlet boundary, the outlet of the cleaning chamber as the outflow boundary, and the others as wall boundaries. The unstructured tetrahedral grid was applied to mesh the cleaning chamber model in Gambit. And by making the assumptions on the grain components which mainly consisted of gravel, whole grain, immature grain, and short stems: 1) All particles were modeled as equivalent spheres; 2) There was no interaction between particles; 3) There was neither heat nor mass transmission between particles and the gas phase, and the bidirectional coupling Lagrangian scheme was utilized to trace the particles' movement. Finally, the distribution of airflow velocity and the particle trajectory was simulated after setting the airflow velocity at the blower outlet and the material parameters. The simulation results indicated that the airflow in the cleaning chamber presented a certain delamination where the airflow near the top and bottom walls had lower velocity than that passing through the mid-chamber and the airflow distribution in each layer was stable without an obvious vortex. Each grain component had respective particle trajectory and was distributed at the bottom of the cleaning chamber in different arc-shaped areas which should be due to the high airflow velocity near the front and back sides and low airflow velocity in the middle of the cleaning chamber caused by the inward-incline of the front and back side boards of the airflow expansion channel. A test rig of the cross-flow grain cleaning device was built to verify the numerical simulation results of the gas-solid two-phase flow in the cross-flow grain cleaning device. A high-speed photographing system was used to record the motion graphics of the whole grains, short stems, and immature grains at a rate of 250 fps respectively. Then the trajectory of each component was identified by the graphic processing. The experiment results showed that the distribution area of the whole grain in the cleaning chamber did not overlap with that of the impurities. The trajectories of the short stems and immature grain were found to partly overlap in the experiment that was different from the simulation. The main reason for this phenomenon was that the short stems were modeled as an equivalent sphere in the gas-solid two-phase flow model. However both simulation and experiment results demonstrate that the whole grain could be separated from the impurities effectively in the developed cross-flow grain-cleaning device.

**Key words:** grain; high speed photography; agricultural machinery; grain cleaning; cross flow blower; gas-solid two-phase flow; trajectory

(责任编辑: 刘丽英)