

# 基于 CFD - DEM 的收获机分离室内谷物运动模拟与试验\*

蒋恩臣 孙占峰 潘志洋 王立军

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 采用计算流体力学与离散元耦合的方法对割前摘脱稻麦联合收获机惯性分离室内谷物的运动进行数值模拟。仿真结果表明: 籽粒和短茎秆在气流作用下能够实现分离, 分离室入口气体速度增加, 有助于提高分离室初清选谷物的性能, 但入口气体速度增加使得分离室后部气体湍流现象加重, 且能耗也随之增加; 不饱满籽粒能在分离室内实现沉降。对仿真结果进行了试验验证, 结果表明利用 CFD - DEM 对分离室内谷物运动进行数值模拟是可行的。

**关键词:** 谷物清选 惯性分离室 计算流体力学 离散元 数值模拟 试验

**中图分类号:** S225 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)04-0117-06

## 引言

计算流体力学 (Computational fluid dynamics, CFD) 和离散元法 (Discrete element method, DEM) 已广泛应用于农业领域。Mekonnen 等利用 CFD 研究了不同涡旋壁位置对联合收获机横流风机流场的影响<sup>[1]</sup>。左彦军等利用 Fluent 软件对不同窝眼的气吸滚筒排种器进行数值模拟, 认为半球型滚筒窝眼更为合适<sup>[2]</sup>。张敏等利用 Fluent 软件对吸盘式水稻育秧播种器进行了数值模拟, 获得了吸孔周围的流场分布<sup>[3]</sup>。陈进等利用 EDEM 对种盘水稻种群运动规律进行研究, 获得了种盘吸种的最佳参数组合<sup>[4]</sup>。于建群等利用离散元法对开沟器工作阻力进行了分析<sup>[5]</sup>。邱白晶等利用离散元法对水稻籽粒流对承载板的冲击过程进行了分析<sup>[6]</sup>。Chu 等利用 CFD - DEM 对旋风分离器的气固流动情况进行了模拟<sup>[7]</sup>。李洪昌等利用 CFD - DEM 耦合方法对风筛式水稻清选装置进行了研究<sup>[8]</sup>。

东北农业大学研制的 4TZL - 2000 型割前摘脱稻麦联合收获机采用气流吸运系统, 通过惯性分离室对谷物实现沉降初清选。惯性分离室初清选谷物是复杂的气固两相流过程。王立军等利用 Fluent 对惯性分离室的结构和机理进行了初步研究<sup>[9-10]</sup>, 并运用离散相模型分析了水稻在分离室内的运动规律<sup>[11]</sup>, 但未真实模拟谷物的形状, 忽略颗粒间的相互作用, 未详细设计颗粒与壁面及运动部件间的碰撞关系, 且未对不同密度的籽粒沉降情况进行详细

研究。

为了充分了解谷物在惯性分离室内的运动规律, 本文建立籽粒和短茎秆模型, 采用 CFD - DEM 耦合方法对谷物在分离室内运动进行数值模拟, 并进行试验验证。

## 1 惯性分离室模型

惯性分离室主要结构参数为长 1 800 mm, 宽 560 mm, 高 900 mm, 隔板安装高度 570 mm, 隔板长 725 mm。由于分离室在宽度方向上对称, 为了减少计算量, 选定宽度方向为 200 mm, 长度和高度方向与实际尺寸相一致建立模型。其网格结构模型如图 1 所示。

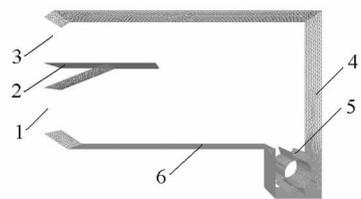


图 1 惯性分离室模型简图

Fig. 1 Structure of inertia separation chamber model

1. 入口 2. 隔板 3. 出口 4. 垂直输送带 5. 排料叶轮 6. 水平输送带

## 2 数学模型

### 2.1 流体相控制方程

惯性分离室内气体流动属于不可压缩气体湍流运动, 且颗粒相体积分小于 10%, 可忽略颗粒相

收稿日期: 2013 - 05 - 27 修回日期: 2013 - 06 - 27

\* 国家自然科学基金资助项目(51005045)和黑龙江省自然科学基金资助项目(E201153)

作者简介: 蒋恩臣, 教授, 主要从事农业机械化工程研究, E-mail: ecjiang@sina.com

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

的体积分数,气体的体积分数近似为1,因此气体连续性方程和动量守恒方程分别表示为

$$\nabla u = 0 \quad (1)$$

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

式中  $u$ ——流体速度  $\rho$ ——流体密度  
 $t$ ——流体运动时间  $p$ ——流体压强  
 $\eta$ ——流体动力粘度  $g$ ——重力加速度  
 $S$ ——动量汇

气流对颗粒的影响主要为曳力, Saffman 升力和 Basset 力数量级远小于曳力可以忽略不计。通过计算气流对颗粒曳力的动量汇  $S^{[12]}$  可以实现气固两相间的耦合, 动量汇  $S$  表达式为

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n F_{d,i}}{\Delta V} \quad (3)$$

其中  $F_{d,i} = 0.5 C_D \rho A |u - u_p| (u - u_p)$  (4)

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

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

式中  $F_{d,i}$ ——第  $i$  颗粒所受流体阻力, N  
 $\Delta V$ ——网格单元体积,  $m^3$   
 $C_D$ ——曳力系数  
 $A$ ——颗粒投影面积,  $m^2$   
 $u_p$ ——颗粒速度,  $m/s$   
 $Re$ ——雷诺数  $d_p$ ——颗粒直径,  $m$

## 2.2 颗粒接触碰撞模型

EDEM 软件已成功应用于研究物料筛分、输送等领域。本文采用 Hertz-Mindlin 无粘结接触模型, 颗粒间碰撞视为软球接触, 分离室壁面、排料叶轮表面和输送带视为半径无穷大的球体。颗粒的法向力  $F_n$ 、法向阻尼力  $F_n^d$ 、切向力  $F_t$ 、切向阻尼力  $F_t^d$  [13] 分别为

$$F_n = \frac{4}{3} E^* R^* \alpha^{3/2} \quad (7)$$

$$F_n^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \sqrt{S_n m^* u_n^{rel}} \quad (8)$$

$$F_t = -S_t \delta \quad (9)$$

$$F_t^d = -2 \sqrt{\frac{5}{6}} \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}} \sqrt{S_t m^* u_t^{rel}} \quad (10)$$

式中  $E^*$ ——等效弹性模量, Pa  
 $R^*$ ——等效颗粒半径,  $m$   
 $\alpha$ ——法向重叠量,  $m$   $e$ ——恢复系数  
 $S_n$ ——法向刚度,  $N/m$   
 $m^*$ ——等效质量,  $kg$   
 $u_n^{rel}$ ——相对速度的法向速度,  $m/s$   
 $S_t$ ——切向刚度,  $N/m$   
 $\delta$ ——切向重叠量,  $m$   
 $u_t^{rel}$ ——相对速度的切向速度,  $m/s$

## 2.3 运动平面接触模型

因惯性分离室内由输送带输送谷物运动, EDEM 中可采用运动平面接触模型模拟输送带运动, 即在 Hertz-Mindlin 接触模型基础上代入新增加的切向重叠量来计算颗粒与输送带接触力 [13]。其切向重叠量增量为

$$\Delta \delta = |u_{t\_new}^{rel} - u_{t\_old}^{rel}| \Delta T \quad (11)$$

其中  $u_{t\_new}^{rel} = u_{new}^{rel} - \mathbf{n}(\mathbf{n} u_{new}^{rel})$  (12)

$$u_{t\_old}^{rel} = u_{old}^{rel} - \mathbf{n}(\mathbf{n} u_{old}^{rel}) \quad (13)$$

$$u_{new}^{rel} = u_p - (u_G + u_M) \quad (14)$$

$$u_{old}^{rel} = u_p - u_G \quad (15)$$

式中  $u_{t\_new}^{rel}$ ——碰撞后相对速度的切向速度,  $m/s$   
 $u_{t\_old}^{rel}$ ——碰撞前相对速度的切向速度,  $m/s$   
 $\Delta T$ ——颗粒模拟时间步长,  $s$   
 $u_{new}^{rel}$ ——碰撞后颗粒和输送带相对速度,  $m/s$   
 $u_{old}^{rel}$ ——碰撞前颗粒和输送带相对速度,  $m/s$   
 $u_G$ ——输送带速度,  $m/s$   
 $u_M$ ——输送带的速度增量,  $m/s$   
 $\mathbf{n}$ ——颗粒碰撞时接触点的法向单位矢量

## 3 颗粒模型与参数设置

### 3.1 颗粒模型

分离室内的谷物包括断穗、籽粒、短茎秆和茎叶等。由于断穗、茎叶极少, 为了减少计算量, 选取收获实验分离室出口收集的籽粒和短茎秆作为研究对象, 籽粒为椭球形, 长径为 7 mm, 短径为 3 mm。依据摘穗脱粒收获后主要杂余短茎秆长度在 20 ~ 50 mm 范围内, 因此选取最短茎秆长度为 20 mm, 直径为 3 mm 进行建模。图 2 为用球形颗粒填充好的籽粒和短茎秆模型。

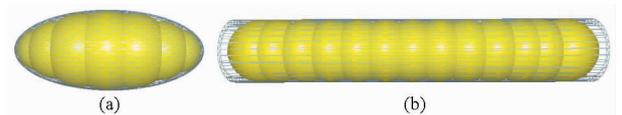


图 2 物料颗粒模型

Fig. 2 Models of material particles

(a) 籽粒 (b) 短茎秆

各材料的力学特性参数如表 1 所示。各材料之间的恢复系数: 籽粒与籽粒之间为 0.2, 籽粒与短茎秆之间为 0.2, 籽粒与输送带之间为 0.5, 籽粒与壁面之间为 0.2, 短茎秆与输送带之间为 0.2, 短茎秆与壁面之间为 0.2。各材料之间静摩擦因数: 籽粒与籽粒之间为 1, 籽粒与短茎秆之间为 0.8, 籽粒与壁面之间为 0.58, 籽粒与输送带之间为 0.5, 短茎秆与壁面之间为 0.8, 短茎秆与输送带之间为 0.8。各材料间的滑动摩擦因数均为 0.01<sup>[14-15]</sup>。

表 1 材料的力学特性

Tab. 1 Mechanical properties of material

材料	泊松比	剪切模量/MPa	密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )
籽粒	0.3	2.6	1 300
短茎秆	0.4	1	100
输送带(橡胶)	0.45	1	9 100
壁面(钢)	0.3	700	7 800

### 3.2 参数设置

为真实模拟谷物在分离室内运动, 先在 Fluent 中选用标准的  $k-\varepsilon$  湍流模型计算使得分离室流场达到收敛状态, 再与 EDEM 采用欧拉-拉格朗日方法进行耦合计算。设定输送带速度为 2 m/s, 排料叶轮转速为 150 r/min。颗粒工厂位于分离室入口处, 用于动态产生籽粒和短茎秆。根据割前摘脱稻麦联合收获机割台收获谷物的谷草比在 4:1 ~ 5:1 之间, 设定籽粒产生速率为 2 000 个/s, 短茎秆产生速率为 500 个/s, 颗粒产生时间为 1 s, 总仿真时间为 3 s。短茎秆在气流作用下被携带出惯性分离室, 在惯性分离室谷物出口处设有统计短茎秆数量的盒子。EDEM 会自动计算雷利时间步, 由于谷物间的碰撞次数比较少, 选取雷利时间 38% 为时间步长, Fluent 时间步长为 EDEM 时间步长的 100 倍。

## 4 结果分析

### 4.1 谷物在分离室内的分布

在分离室入口气体速度分别为 10、12、14、16 和 18 m/s 的情况下, 谷物以 0 m/s 初速度进入分离室, 对谷物在分离室内运动情况进行数值模拟。由于 CFD-DEM 耦合是在气流流场收敛稳定的情况下才开始进行, 因此从  $t=0$  s 时起 EDEM 仿真数值模拟已接近惯性分离室的工况。图 3 为入口气体速度为 14 m/s, 仿真时间  $t=1$  s 时, 分离室内的谷物分布和气流流场分布。

由图 3 知, 气流对短茎秆作用明显, 部分短茎秆在气流作用下沿分离室上壁被带出分离室, 未被气流带出的短茎秆在分离室后部大致呈涡旋状态, 说明分离室后部存在明显的湍流现象, 这与气流流场

分布一致。处于分离室后部的短茎秆在竖直输送带的作用下强制向下运动, 而落入到水平输送带上的短茎秆能够在水平输送带的作用下随着水平输送带一起向排料叶轮运动。气流对籽粒作用并不明显, 籽粒在重力作用下落在水平输送带前端实现沉降。籽粒落到水平输送带上时, 与水平带输送带经过一次或多次碰撞最终能够随水平输送带一起向排料叶轮运动。

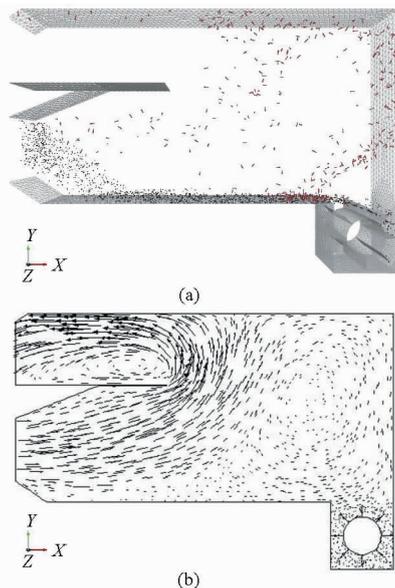


图 3 分离室内的谷物分布和流场分布

Fig. 3 Grain and airflow distributions in chamber

(a) 谷物分布 (b) 气流流场分布

### 4.2 谷物运动速度

由于仿真时籽粒和短茎秆数据量比较大, 因此选取有代表性的部分籽粒从生成到离开水平输送带这段时间进行结果分析, 对短茎秆从生成到离开分离室这段时间进行结果分析。由于分离室在 Z 方向(宽度方向)对称, 仿真结果也说明籽粒和短茎秆的 Z 方向速度基本没有变化, 因此本文仅对籽粒和短茎秆的 X 方向(长度方向)速度和 Y 方向(高度方向)速度进行分析。

#### 4.2.1 籽粒在分离室内运动速度

在分离室入口不同气体速度条件下, 籽粒在 X 和 Y 方向上的速度随时间的变化曲线如图 4 所示。

由图 4 可知, 在  $t=0 \sim 0.25$  s 时间内, 籽粒在气流作用下进入分离室内, 随运动时间延长籽粒速度逐渐增大, 且籽粒速度随入口气体速度的增大而增大。在  $t=0.28$  s 左右, 籽粒在 X 方向和 Y 方向的速度发生了突变, 这是由于籽粒在重力作用下与水平输送带发生了碰撞。

在入口气体速度为 10、12 和 14 m/s 的情况下, 籽粒在与输送带碰撞时并未达到水平输送带的速度 2 m/s, 因此碰撞瞬间籽粒与输送带间的摩擦力作为

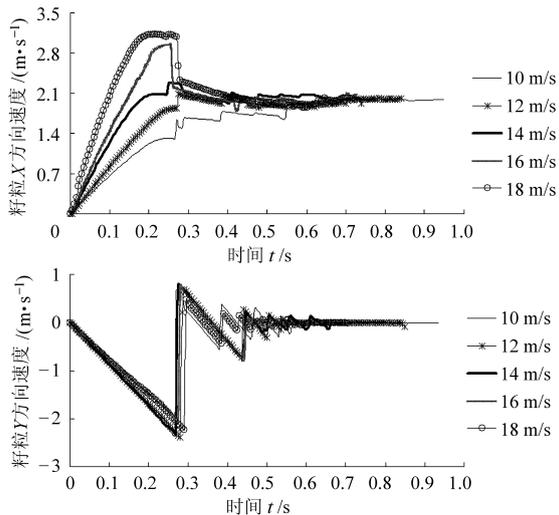


图4 籽粒运动速度随时间的变化曲线

Fig.4 Velocities of grain particles

动力使得籽粒的  $X$  方向速度增大,而在入口气体速度在 16 和 18 m/s 时,籽粒的速度超过 2 m/s,碰撞瞬间籽粒与输送带间的摩擦力作为阻力使得籽粒的  $X$  方向速度减小。籽粒与输送带在碰撞时对其  $Y$  方向速度影响比较大,碰撞后速度减小很多。在  $t = 0.3$  s 以后,不同入口气体速度对籽粒速度影响并不大,籽粒通过与输送带的多次碰撞最终在其  $X$  方向速度和输送带速度达到一致,其  $Y$  方向速度为零。说明籽粒能够在水平输送带的作用下向排料叶轮运动。

籽粒在入口气体速度为 10 ~ 18 m/s 的范围内能够实现沉降。当入口气体速度为 14 m/s,籽粒到达水平输送带上的  $X$  方向速度接近 2 m/s,能够短时间内实现在摩擦力作用下随水平输送带一起运动。

#### 4.2.2 短茎秆在分离室内运动速度

在入口不同气体速度条件下,短茎秆在  $X$  和  $Y$  方向上的速度随时间的变化曲线如图 5 所示。

由图 5 可知,短茎秆进入分离室后在气流作用下,瞬时加速到一定速度,当入口气体速度为 14 m/s 时,对短茎秆在分离室内的运动情况进行分析。当  $t = 0.085$  s 时,短茎秆以一定速度运动到隔板末端。当  $t = 0.12$  s 时, $X$  方向速度为零, $Y$  方向速度达到最大,说明此时短茎秆在气流作用下已经绕过隔板末端。当  $t = 0.155$  s 时,短茎秆在  $X$  负方向速度增大,说明此时短茎秆在气流作用下向分离室出口运动,短茎秆在  $Y$  方向的速度减小为零,短茎秆到达分离室上壁。当  $t = 0.19$  s 时,短茎秆在  $X$  负方向速度进一步增大,此后短茎秆将沿着分离室上壁向分离室出口运动,直至短茎秆离开分离室。

入口气体速度越大,气流携带短茎秆作用越强,

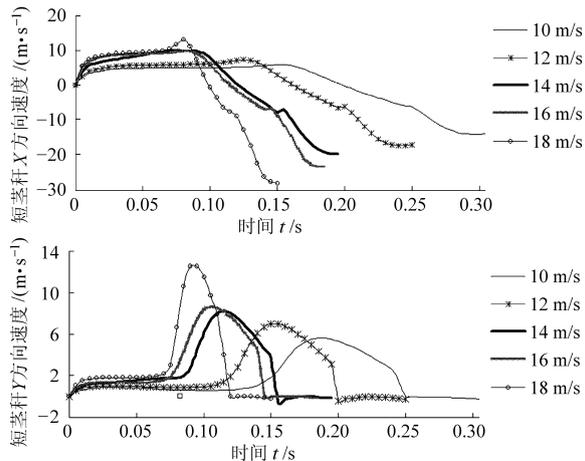


图5 短茎秆运动速度随时间的变化曲线

Fig.5 Velocities of short straw

短茎秆在分离室内停留的时间越短。

#### 4.3 不同密度籽粒运动轨迹

实际收获作业中有饱满籽粒(密度  $1300 \text{ kg/m}^3$ )、瘪壳(密度  $500 \text{ kg/m}^3$ )和不饱满籽粒等,当分离室入口气体速度为 14 m/s 时,分离室内气体运动参数接近收获机田间作业工况,因此本文对该条件下不同密度籽粒在分离室内的运动进行模拟,其运动轨迹如图 6 所示。

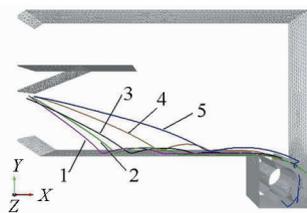


图6 不同密度粒子运动轨迹

Fig.6 Particles trajectories of different densities in charmer

1. 密度为  $1300 \text{ kg/m}^3$
2. 密度为  $1100 \text{ kg/m}^3$
3. 密度为  $900 \text{ kg/m}^3$
4. 密度为  $700 \text{ kg/m}^3$
5. 密度为  $500 \text{ kg/m}^3$

由图 6 可知,密度比较大的饱满籽粒能够在分离室内很快沉降到水平输送带上,在水平输送带的作用下输送到排料叶轮处如图 6 中轨迹 1、2 所示;密度较小的不饱满籽粒落到水平输送带中部,如图 6 中轨迹 3、4 所示;瘪壳则在气流作用下落到水平输送带后端,如图 6 中轨迹 5 所示。仿真结果还显示更轻杂物有的被携带到竖直输送带,在输送带的作用下被带至排料叶轮处并被收集。仿真结果表明不饱满籽粒在惯性分离室也能实现沉降,从而避免了清选损失。

#### 5 试验验证

验证试验在东北农业大学割前摘脱惯性分离室试验台架上进行。谷物喂入量为  $4 \text{ kg/s}$ ,谷草比选定

4:1,在分离室入口速度为10、12、14、16和18 m/s情况下,谷物以0 m/s的初速度在分离室入口喂入。分离室的性能指标为籽粒沉降效率,谷物清洁率和能耗。将试验测量数据与模拟数据进行对比,如表2所示。

表2 分离室性能指标对比

Tab.2 Performance indexes comparison of chamber

入口气体速度 /( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	清洁率/%		沉降效率/%		能耗/Pa	
	仿真	试验	仿真	试验	仿真	试验
10	80.09	81.84	100	100	132.35	129.64
12	83.27	82.32	100	100	191.49	183.05
14	84.34	83.02	100	100	257.64	270.70
16	86.73	85.32	100	100	336.43	352.82
18	88.67	87.88	100	100	426.64	407.79

由表2知,当入口气体速度在10~18 m/s范围内籽粒能实现100%沉降,仿真结果与试验结果均为随着分离室入口气体速度的增加,谷物清洁率增加,但分离室能耗也增加。仿真与试验结果对比,清

洁率最大误差为1.62%,能耗最大误差为4.42%。试验结果与仿真结果基本一致,验证了CFD-DEM仿真结果的正确性。

## 6 结论

(1)建立了惯性分离室内流体相控制方程,气固两相耦合的动量汇,基于EDEM建立颗粒接触碰撞数学模型,模拟输送带运动的运动平面接触模型和谷物的颗粒模型。

(2)采用CFD-DEM耦合方法对谷物在分离室内的运动进行数值模拟,获得了分离室内谷物分布和气流流场分布、籽粒和短茎秆速度变化规律和不同密度籽粒在分离室内的运动轨迹。

(3)随着入口气体速度的增加,分离室清选性能获得提高,但分离室后部气体湍流现象加重,能耗增加。通过试验验证发现试验结果与模拟结果基本一致,表明采用CFD-DEM耦合方法模拟研究分离室的初清选性能是可行的。

## 参 考 文 献

- Mekonnen Gebreslasie Gebrehiwot, Josse de Baerdemaeker, Martine Baelmans. Numerical and experimental study of a cross-flow fan for combine cleaning shoes[J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(4): 448-457.
- 左彦军,马旭,玉大略,等.水稻芽种窝眼窄缝式气吸滚筒排种器流场模拟与试验[J].农业机械学报, 2011, 42(2): 58-62. Zuo Yanjun, Ma Xu, Yu Dalu, et al. Flow field numerical simulation of suction cylinder-seeder for rice bud seed with socket-slot[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 58-62. (in Chinese)
- 张敏,吴崇友,张文毅.吸盘式水稻秧播种器吸孔气流场仿真分析[J].农业工程学报, 2011, 27(7): 162-167. Zhang Min, Wu Chongyou, Zhang Wenyi. Airflow field simulation on suction nozzle of cupule-type disseminator for rice seedling[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 162-167. (in Chinese)
- 陈进,周韩,赵湛,等.基于EDEM的振动种盘中水稻种群运动规律研究[J].农业机械学报, 2011, 42(10): 79-83, 100. Chen Jin, Zhou Han, Zhao Zhan, et al. Analysis of rice seeds motion on vibrating plate using EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(10): 79-83, 100. (in Chinese)
- 于建群,钱立彬,于文静,等.开沟器工作阻力的离散元法仿真分析[J].农业机械学报, 2009, 40(6): 53-57. Yu Jianqun, Qian Libin, Yu Wenjing, et al. DEM analysis of the resistances applied on furrow openers[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(6): 53-57. (in Chinese)
- 邱白晶,姜国微,杨宁,等.水稻籽粒流对承载板冲击过程离散元分析[J].农业工程学报, 2012, 28(3): 44-49. Qiu Baijing, Jiang Guowei, Yang Ning, et al. Discrete element method analysis of impact action between rice particles and impact-board[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(3): 44-49. (in Chinese)
- Chu K W, Wang B, Xu D L, et al. CFD-DEM simulation of the gas-solid flow in a cyclone separator[J]. Chemical Engineering Science, 2011, 66(5): 834-847.
- 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): 79-84. 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 CSAM, 2012, 43(2): 79-84. (in Chinese)
- 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, 2008, 24(9): 108-110. (in Chinese)
- 王立军,蒋恩臣,李名家.惯性沉降分离室内三维定常气流流动数值计算[J].农业机械学报, 2007, 38(4): 58-61. Wang Lijun, Jiang Enchen, Li Mingjia. Numerical simulation of steady airflow in the inertia deposition-separation chamber of combine harvester threshing prior to cutting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(4): 58-61. (in Chinese)
- 王立军.割前摘脱稻麦联合收获机分离清选装置物料运动模拟[J].农业机械学报, 2011, 42(增刊): 62-64. Wang Lijun. Separation and initial cleaning chamber in grain-wheat combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 62-64. (in Chinese)

- 12 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.
- 13 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.
- 14 Li Hongchang, Li Yaoming, Gao Fang, et al. CFD – DEM simulation of material motion in air-and-screen cleaning device[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2012, 88(10):111 – 119.
- 15 朴香兰, 王国强, 张占强, 等. 水平转弯颗粒流的离散元模拟[J]. 吉林大学学报:工学版, 2010, 40(1):98 – 102.  
Piao Xianglan, Wang Guoqiang, Zhang Zhanqiang, et al. Discrete element method simulation of granular flow on horizontal turn [J]. *Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition*, 2010, 40(1):98 – 102. (in Chinese)

## Numerical Simulation Based on CFD – DEM and Experiment of Grain Moving Laws in Inertia Separation Chamber

Jiang Enchen Sun Zhanfeng Pan Zhiyang Wang Lijun

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

**Abstract:** In order to obtain grain moving laws in inertia separation chamber of combine harvester threshing prior to cutting, grains motion was simulated by using computational fluid dynamics and discrete element coupled methods. Simulation results showed that grain particles were separated from short straw through airflow and the performance of chamber separating and cleaning grain was improved with the increasing of airflow velocity, while the turbulence phenomenon in the rear of chamber got more serious and airflow pressure drop was increased. Not full grain particles also deposited in chamber. In order to verify the validity of simulation results, the experimental test was conducted. Experimental results and simulation results were basically accord, which showed that the simulation of grain motion in inertia separation chamber based on CFD – DEM was feasible. The results would be a better basis to improve the performance of inertia separation chamber to separate and clean grain.

**Key words:** Cleaning grain Inertia separation chamber Computational fluid dynamics Discrete element method Numerical simulation Experiment

(上接第 109 页)

## 3-D Simulation for Airflow Field and Droplets Deposition of Hanging Cold Sprayer

Li Hui<sup>1</sup> Qi Lijun<sup>1</sup> Wang Pei<sup>2</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Department of Weed Science, University of Hohenheim, Stuttgart 70599, Germany)

**Abstract:** In order to understand the airflow speed field and deposition distribution rules and characters of a designed hanging cold sprayer, several numerical spraying models for that based on CFD technology were established. Beside that, the verification experiments were conducted. The simulation results indicate that the effective blowing distance is positively related to the blowing speed of the cold sprayer. The cold sprayer gets the minimum blowing distance at the height of 1.5 m. The model gets larger ground mass-flow rate under the blowing speed of 5 m/s and 25 m/s. The model gets better uniformity under blowing speed greater than 20m/s and height greater than 2.0 m. The consequences of simulation and verification experiments show that, in the cold sprayer's blowing area, the relative deviation of modeling air flow field is between 10% ~ 35%, and the relative deviation of droplets' deposition model is between 15% ~ 35%. As the consequence, both of the models can forecast the cold sprayer's air flow field and the droplets' deposition distribution correctly.

**Key words:** Cold sprayer Computational fluid dynamics Airflow speed field Deposition distribution