

间作模式下小麦联合收获机清选装置 CFD-DEM 气固耦合仿真与试验验证

张克平¹,樊宏鹏¹,孙步功¹,柴强²

(1.甘肃农业大学机电工程学院,甘肃兰州730070;2.甘肃农业大学农学院,甘肃兰州730070)

摘要:为了提高间作模式下小麦联合收获机清选性能,研究旋风分离筒内流场和颗粒的运动状态,探索分离筒的最佳工作参数组合,运用离散元法和计算流体力学耦合的方法分析了气流与颗粒的相互作用,以喂入速度、吸杂压强、筒体高度、下椎体角度为试验因素对清选过程进行了仿真正交试验,对最佳清选参数组合完成了田间试验验证。结果表明:气流在分离筒内形成内、外旋涡,内漩涡的运动使短茎秆进入吸杂管道,籽粒在外旋涡的作用下滑落到集粮盘;仿真试验的最佳参数组合为喂入速度 $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 、吸杂压强 -1800 Pa 、筒体高度 350 mm 、下椎体的角度 65° ,得到的清洁率和损失率分别为 92.18% 和 1.99% ,与田间试验的误差分别为 2.947% 和 7.428% 。

关键词:间作模式;小麦联合收获机;旋风分离筒;CFD-DEM 耦合仿真;清选性能

中图分类号:S225.3 文献标志码:A

The CFD-DEM gas-solid coupling simulation and experimental verification of cleaning device of wheat combine harvester for intercropping system

ZHANG Ke-ping¹, FAN Hong-peng¹, SUN Bu-gong¹, Chai Qiang²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: In order to improve the cleaning performance of wheat combine harvester for wheat/maize intercropping system, we studied the motion states of the flow field and particles in the cyclone separator and investigated the optimal working parameter combination of the separator. In this study, airflow and particle interaction was analyzed by using the coupling simulation of discrete element method and computational fluid dynamics. The factors of the cleaning process simulation orthogonal experiment used were feeding speed, the outlet pressure, the cylinder height, and the lower vertebral angle. The simulation was validated in the field. The results showed that: the inner and outer vortex was formed by the movement of airflow in the separator; the short stems were sucked into suction pipe by inner vortex movement; the seeds fell into the set plate by the effect of outside vortex. The optimal parameter combination of simulation were $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ of the feeding speed, -1800 Pa of the outlet pressure, 350 mm of the cylinder height, and 65° of the lower vertebral angle resulting in cleanliness and loss rate of 92.18% and 1.99% , respectively, and the errors were 2.947% and 7.428% , respectively compared with the field observation. Therefore, the results can provide a theoretical basis for optimizing design of small combine harvester.

Keywords: intercropping system; wheat combine harvester; cyclone separator; CFD-DEM coupling simulation; cleaning performance

小麦、玉米间作种植模式因其能够充分利用地力、光能、热力等农业资源^[1],在我国西北干旱、半干旱地区被广泛采用,但由于其带状型狭窄的作业

空间,导致早熟作物小麦的收获无法利用大型联合收获机完成。当利用小型半喂入式联合收获机收割小麦时,需要保障不过度破坏间作玉米的茎叶,因

而对收获机各部件的空间布局要求极高。清选装置是决定联合收获机作业清洁率和损失率的核心部件,旋风分离筒是其最重要的构成部分^[2]。优化旋风分离筒的结构参数与操作参数,是改善间作模式下小麦的联合收获质量及效率的主要途径之一。

离散元法和计算流体力学已广泛运用于农业机械领域。Sakaguchi 等^[3]通过对糙米和稻谷建立离散元模型,对其振动和分离过程进行离散元仿真模拟;敬志臣等^[4]通过 Fluent 软件对旋风分离筒的分离过程进行了仿真分析;李兴凯等^[5]利用 EDEM 软件对小区小麦联合收获机脱粒装置进行了仿真分析;廖庆喜等^[6]利用 CFD-EDEM 气固耦合方法仿真分析了油麦兼用型气送式集排器增压管;汤庆等^[7]利用 CFD-EDEM 耦合模拟技术将气流场和振动筛分作为一个系统研究了清选室中气流场、振动筛和物料的相互作用。但利用离散元法和计算流体力学耦合方法,对间作模式这一特殊工况下小麦收获过程中的清选装置进行参数优化,尚未见文献报道。

本文以课题组研发的适用于间作模式下小型半喂入式小麦联合收获机清选装置为研究对象,基于 CFD(计算流体力学)-EDEM(离散单元法)耦合理论,模拟旋风分离筒内的流场和颗粒运动场,完成主要结构参数、操作参数的优化,并对仿真优化结果进行了田间试验验证。

1 旋风分离筒结构及气固两相流数学模型

1.1 清选装置结构

间作模式下小麦联合收获机的清选装置结构如图 1 所示,主要由吸杂风机、集粮斗、旋风分离筒、吸杂管道和扬谷器等组成。工作过程中,籽粒、短茎秆的混合物被扬谷器以一定的速度通过气流带入分离筒在分离筒内做旋转运动,吸杂口给以负压强使得杂质的速度接近悬浮速度被气流带走,籽粒在经过复杂的螺旋运动后落入集粮盘,达到分离的效果。

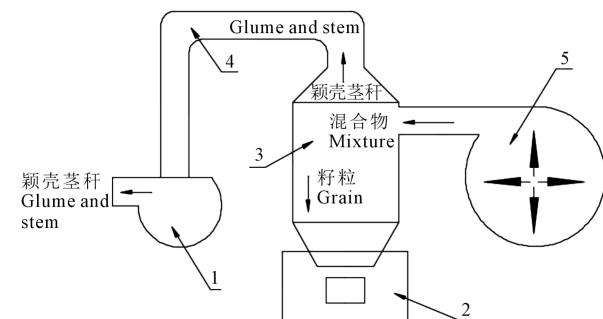
1.2 旋风分离筒结构及工作参数

旋风分离筒是小麦联合收获机清选装置的关键部件,如表 1、图 2 所示,影响清选效果的结构参数主要有吸杂口直径、上椎体的角度、直筒直径、直筒高度、下椎角度、出风口直径和进风口大小等^[8],操作参数主要有喂入速度、吸杂口的负压强等。

依据农业机械设计手册^[9]及间作种植模式收获作业需求,设计计算相关结构参数如表 1 所示。

1.3 气固两相流的数学模型

利用计算流体力学和离散元法进行气固两相流的分析,使研究颗粒在流场中的相互作用的同时,能够兼顾气流的力学特性。旋风分离筒内作旋转运动的流场可以看作不可压缩的湍流,遵守质量



1.吸杂风机;2.集粮斗;3.旋风分离筒;4.吸杂管道;5.扬谷器

1.suction fan;2.grain collection box;3.cyclone separator;

4.chaff suction pipe;5.winnnow

图 1 清选装置结构

Fig.1 Schematic design of cleaning device

表 1 旋风分离筒的结构参数

Table 1 The structural parameters of cyclone separator

参数 Parameter	尺寸 Size
筒体直径 D/mm Diameter of cylinder	380
入口尺寸 $a \times b/\text{mm}$ Size of the inlet	65×100
吸杂口直径 D_1/mm Diameter of the outlet	130
落粮口直径 D_2/mm Diameter of the outlet	200
直筒体高度 H/mm Height of cylinder	430
上椎体角度 $\alpha/^\circ$ Angle of the upper vertebral	45
入口高度 h/mm Height of inlet	180

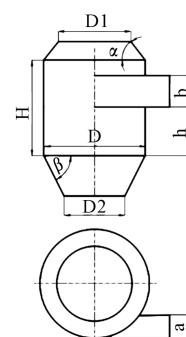


图 2 旋风分离筒的结构及主要参数

Fig.2 The parameters and design of cyclone separator

守恒和动量守恒定律。在流体力学中对应的方程为连续性方程和 Navier-Stokes 方程^[10]。

$$\frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g)}{\partial t} + \nabla \times (\varepsilon_g \rho_g v_g) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\varepsilon_g \rho_g v_g)}{\partial t} + \nabla \times (\varepsilon_g \rho_g v_g \otimes v_g) = \\ - \varepsilon_g \nabla \times p + \varepsilon_g \nabla \times \tau + \varepsilon_g \rho_g g - R_{gp} \end{aligned} \quad (2)$$

其中

$$R_{gp} = \sum_{i=1}^n F_{p,i} / \Delta V \quad (3)$$

式中, ε_g 为气相体积百分比(%), ρ_g 为空气密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$), v_g 为风速($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), t 为时间(s); p 为气相压强(Pa), τ 为粘性应力张量, R_{gp} 为单位网格颗粒相与气相之间的动量交换量, g 为重力加速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$), $F_{p,i}$ 为颗粒 i 上作用的合力(N), n 为特定网格内的颗粒数量, ΔV 为网格的体积(m^3)。

R 气流在旋风分离筒中做螺旋向上的运动从而形成内涡流, 构建了一个有速度梯度的流场, 由于其两侧流速的差异, 产生了由低速向高速方向的 Saffman 升力, 同时固体颗粒在流场中自身旋转产生一个与流场流动方向垂直的有逆流指向顺流侧方向的 Magnus 升力^[6]。

$$F_{Sa} = 1.615 d_p \mu_g C_{Sa} Re_s^{0.5} [|v_g - v_p| \times \omega_g] \quad (4)$$

$$F_{Ma} = \frac{\pi}{8} d_p^3 \rho_g (\omega_g - \omega_p) (v_g - v_p) \quad (5)$$

其中:

$$Re_s = \frac{\rho_g d_p^2 |\omega_g|}{\mu_g} \quad (6)$$

式中, C_{Sa} 为剪切升力系数, Re_s 为颗粒的剪切流雷诺数, d_p 为颗粒直径(m), μ_g 为气体粘度($\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$), v_p 为颗粒速度($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), ω_g 为空气角速度($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$), ω_p 为颗粒的角速度($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)。

$$\begin{aligned} C_{Sa} = \{ (1 - 0.3314 \gamma^{0.5}) e^{-Re_p/10} + 0.3314 \gamma^{0.5} (Re_p \leq 40) \\ 0.0524 (\gamma Re_p)^{0.5} (Re_p > 40) \end{aligned} \quad (7)$$

式中, γ 为颗粒剪切流雷诺数与颗粒雷诺数比值。

$$\gamma = \frac{Re_s}{2Re_p} \quad (8)$$

2 谷物混合物运动状态的数值模拟

2.1 CFD-EDEM 耦合仿真方法

旋风分离筒工作过程中, 谷物混合物和气流以一定的初速度沿分离筒切向进入, 在筒壁周围做螺旋向下的运动, 逐渐形成外旋流。籽粒在向下运动

的过程中受到各种相互作用力, 随着能量消耗, 速度逐渐降低, 最后在重力的作用下进入集粮盘。而在分离筒的中心轴附近, 向上旋转的气流柱形成内旋流, 茎秆、颖壳等杂质在内旋流的作用下向上运动并排出筒外。

本研究采用 Fluent 16.0 和 EDEM 2.7 进行耦合模拟, 分析谷物混合物在分离筒内的运动状态。耦合过程中, 分离筒中的气体为不可压缩的旋转运动流体, 采用湍流模型。首先利用 CFD 求解器对流场进行求解, 迭代至收敛, 然后更新颗粒位置、速度和受力, 将控制权移交 EDEM 求解器仿真, 进行迭代运算一次或若干次。结束后 CFD 收回仿真控制权进行下一个循环, 直至结束。

2.2 物理建模

在 SolidWorks 中建立分离筒的三维模型, 导入 workbench 完成网格划分。气相流进口设置为 inlet, 速度方向设置为分离筒切线方向; 气流出口为排杂口, 设置为 outlet 1, 出粮口设置为 outlet 2, 并且均设置出口压力。根据田间试验过程分析, 进入分离筒的谷物混合物的主要成分为籽粒、短茎秆和颖壳, 落入集粮斗中的谷物混合物主要以短茎秆为主, 故而影响清洁率的主要因素是短茎秆。为了提高耦合的效率、减少计算量, 本文以籽粒与短茎秆为研究对象建立三维颗粒模型。小麦籽粒模型根据甘肃农业大学绿洲农业科研试验教学基地提供的永良 4 号建立, 随机选取 200 粒无虫害、饱满、无损伤的永良 4 号籽粒, 利用游标卡尺对籽粒三轴进行测定, 计算平均值获得小麦的几何尺寸(长为 7.20 mm、高为 3.31 mm、宽为 3.01 mm)。小麦籽粒外表光滑, 简化为具有同体性质的、均匀的线弹性材料, 形状为椭球型, 在 EDEM 中利用圆形颗粒对其进行填充建立三维模型^[11]。同样选择 200 个短茎秆进行测量, 计算平均值获得几何尺寸(长为 22.02 mm、内径为 2.00 mm、外径为 3.00 mm), 由于 EDEM 中建立颗粒模型只能利用颗粒填充的方式, 故将其等效成实心柱体, 建立的小麦籽粒及短茎秆离散元模型如图 3 所示。小麦籽粒、短茎秆及分离筒材料的力学特性如表 2 所示^[5]。

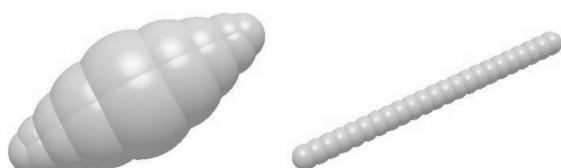


图 3 颗粒离散元模型

Fig.3 Discrete element model of particles

表 2 物料的力学特性

Table 2 Mechanical property of materials

物料 Material	泊松比 Poisson ratio	剪切模量/MPa Shear modulus	密度/(kg·m ⁻³) Density
籽粒 Grain	0.3	2.6	1350
短茎秆 Short stem	0.4	1	100
钢 Steel	0.3	700	7800

2.3 仿真参数的选择

在 EDEM 中接触模型是基础参数,其实质是静态下颗粒固体的接触力学弹塑性分析结果^[12],由于分离筒中的物料混合物小麦籽粒和短茎秆表面光滑且无粘性,籽粒是由圆形颗粒叠加而成的椭球形,短茎秆是柱状体,故本仿真选择 Hertz-Mindlin 无滑动接触模型^[13]。颗粒间的恢复系数、静摩擦因素和滚动摩擦系数如表 3 所示。本研究中小麦、玉米间作模式下的半喂入式联合收获机的喂入量为 $0.4 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,草谷比为 1:10,仿真中颗粒工厂每秒生成小麦籽粒 2 000 粒,生成短茎秆 200 个。时间步长的选择很重要,时间步长过长,颗粒可能会穿透几何模型,过短又会增加计算量,本仿真选取雷利时间步长的 25% 作为模拟的时间步长。为了让仿真与实际更加吻合,使分离筒内的流场稳定,籽粒从 0.5 s 以后开始生成。

表 3 物料间的仿真参数

Table 3 Simulation parameters among materials used

接触形式 Contact form	恢复系数 Coefficient of restoration	静摩擦系数 Coefficient of static friction	滚动摩擦系数 Coefficient of rolling friction
籽粒-籽粒 Grain-grain	0.2	1.00	0.01
籽粒-短茎秆 Grain-short stem	0.2	0.80	0.01
籽粒-钢 Grain-steel	0.5	0.58	0.01
短茎秆-短茎秆 Short stem-short stem	0.2	0.90	0.01
短茎秆-钢 Short stem-steel	0.2	0.80	0.01

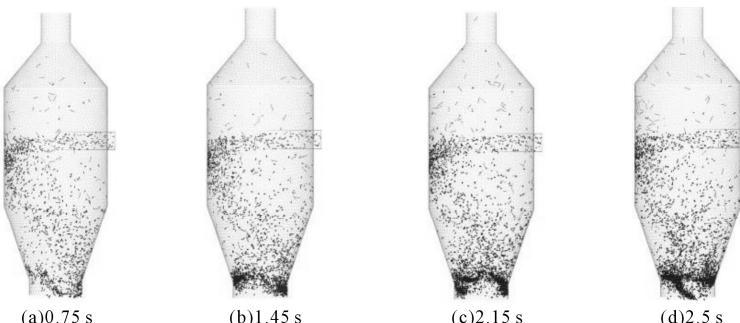


图 4 清选分离过程仿真

Fig.4 Simulation of cleaning process

分离筒所需要的流场主要由气流提供,运动形式以旋流为主,故而在 Fluent 软件中湍流模型选择 RNGK-ε 模型。流场实质是空气,密度为 $1.29 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$,粘度系数为 $1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。Fluent 的时间步长是 EDEM 的 100 倍,设置为 $2 \times 10^{-4} \text{ s}$ ^[14]。

3 仿真过程与分析

3.1 分离过程可视化

旋风分离筒中的气流分布规律决定了物料混合物的运动状态以及清选效果,为了清晰观察物料的运动状态及清选过程,设置旋风分离筒的模型以 Mesh 形式显示,完成可视化的清选分离仿真过程如图 4 所示。

由图 4 可以看出颗粒在各个时间点的运动状态,0.75 s(图 4a 所示)颗粒从颗粒工厂产生进入旋风分离筒,籽粒沿筒壁切向运动,短茎秆由于受到吸杂口的负压强一部分向上运动。当仿真到 1.45 s(图 4b 所示),籽粒沿筒壁螺旋向下在重力的作用下滑落到集粮斗,短茎秆一部分在筒体中心轴附近向上运动。2.15 s(图 4c 所示)分离进入稳定状态,籽粒在筒体底部有短暂的堆积现象。2.5 s(图 4d 所示)颗粒工厂停止产生颗粒。通过可视化的仿真过程可以看出,由于受到气流场的影响,籽粒在筒体底部有短暂的堆积现象,导致籽粒进入集粮斗的时间增加,影响分离效率。

3.2 速度分布分析

在 Fluent 仿真过程中截取端面、轴面以及不同截面的速度分布如图 5 所示。

由图 5 可以看出,分离筒内的气流场速度主要分布在 X 轴和 Y 轴两个方向上,物料混合物以一定的初速度沿 X 轴进入分离筒并被抛向筒壁,随即沿着筒壁做切向旋转运动,在阻力、摩擦力等载荷作用下,能量被逐渐消耗,速度逐渐减小。进一步分析可得到:1)在分离筒中存在高速区和低速区。高速区位于筒壁与中心轴之间,带动籽粒和一部分茎

秆向下作旋转运动,到达下椎体部分时,随着能量消耗,速度逐渐降低,在重力的作用下籽粒滑出分离筒;低速区在中心轴附近的柱状范围内,当高速区的气流碰撞到下椎体后以一定的速度向上旋转,密度小、悬浮速度低的茎秆、颖壳、瘦弱的麦粒随着向上的气流通过吸杂口被带出分离筒。2)由于受到入口气流的影响,气流场的速度呈不对称分布。在高速区域气流向下旋转运动形成外涡流,速度沿着Y轴负方向逐渐降低,当气流运动到椎体时,由于壁面碰撞产生了相反的流场使得一部分籽粒产生了沿Y轴正方向的加速度,向上运动一段时间后又落回出粮口;在低速区气流向上旋转运动形成了内涡流,再上升到排杂口附近出现了轻微的摆尾现象,这种现象是由于流场的偏心造成的。

通过EDEM后处理功能,输出籽粒平均速度-时间、单个籽粒速度-时间数据以CSV格式保存,将其导入origin软件中绘制速度时间折线图如图6所示。

图6(a)是籽粒平均速度时间图,从图中可以看出,籽粒在刚进入分离筒时速度最大,达到 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

s^{-1} ,随着能量的消耗,速度逐渐降低,在1.5 s时趋近于稳定。图6(b)是单个籽粒速度时间图,单个籽粒的速度波动较大,在 $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 左右时产生显著上下跳动现象,说明籽粒在筒体下部和下椎体部分速度有较大波动。

3.3 压力分布分析

在Fluent中获得分离筒内压力分布云图如图7所示。

由图7可以看出,分离筒内的压力相对于中心轴近似对称,外壁的压强大于中心轴附近的压强,中心轴附近的低压区近似呈柱状,从筒壁向中心轴形成压力差,由上向下形成压力差。在分离筒内造成压力差的主要原因有:1)在气流进入的过程中气流与进口壁面、分离筒壁面的摩擦造成的能力损失;2)气流在旋风分离筒内作旋转运动时对能量的消耗;3)内外旋流交界面、进气管与排杂管静压造成的损失。压强降的产生有助于提高分离效率,为籽粒和短秆的分离提供能量。故而吸杂口的压强和直筒体的高度是决定分离效果的重要因素。

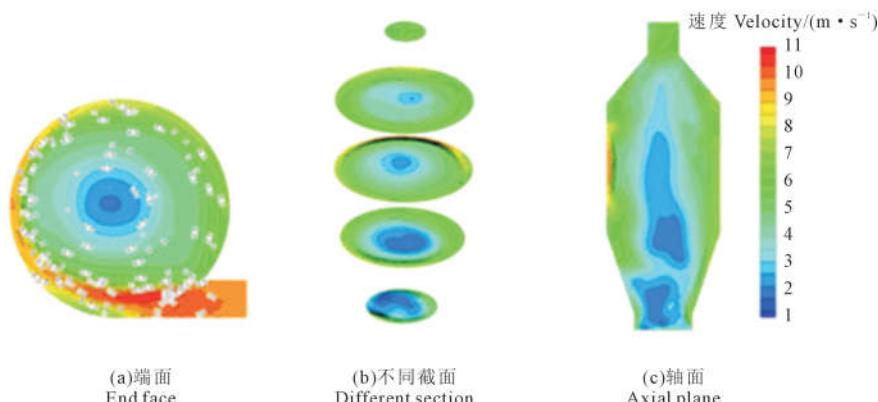


图5 不同截面在1.5 s时的速度云图
Fig.5 Velocity distribution of different section at 1.5 s

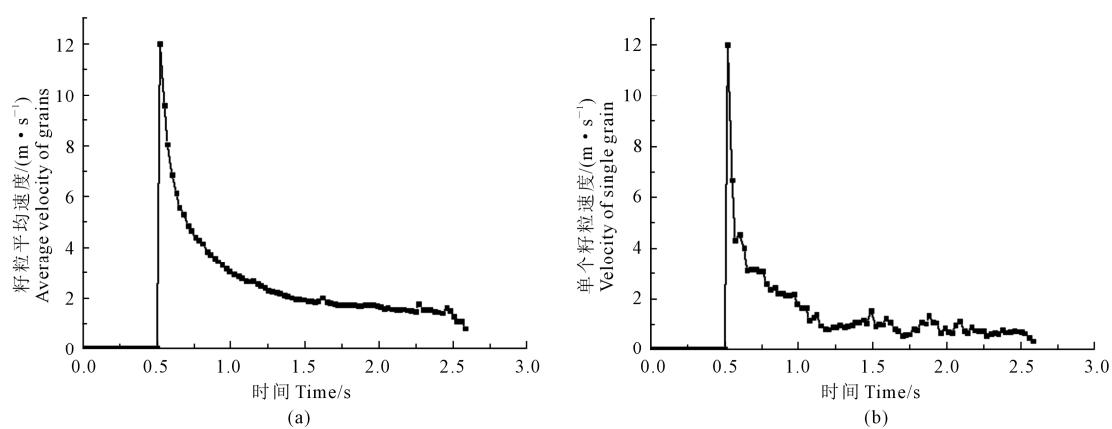


图6 清选过程中籽粒速度-时间图
Fig.6 Relationship of particles velocity and time in cleaning process

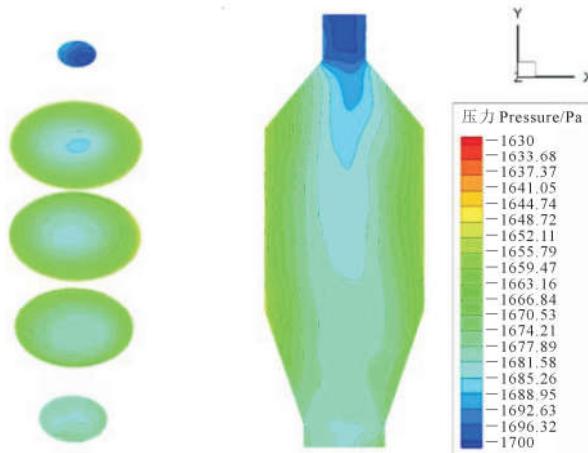


图 7 清选过程压力分布云图

Fig.7 Pressure distribution during cleaning process

4 仿真实验

与传统的大型收获机不同,玉米、小麦间作模式下小型半喂入式小麦联合收获机对其清选装置有更高的要求,本研究通过仿真实验优化分离筒的结构参数和运动参数,获得最佳的分离效果。用于表征清选系统分离效果最主要的指标是清洁率(Y_q)和损失率(Y_s):

$$Y_q = \frac{W_2}{W_1} \times 100\% \quad (9)$$

$$Y_s = \frac{W_3}{W_1 + W_3} \times 100\% \quad (10)$$

式中, W_1 为模拟过程中出粮口捕捉到的总的颗粒数量; W_2 为模拟过程中出粮口捕捉到的籽粒数量; W_3 为模拟过程中吸杂口捕捉到的籽粒数量。

进口喂入速度、吸杂出口压强是影响分离效果的主要运动参数^[2],下椎体角度、直筒体高度是影响分离效果的主要结构参数,本文分别对其设计了三个水平进行正交试验,试验因素水平如表4所示。

按照上述因素水平,选择L9(3⁴)正交试验,利用计算机流体力学和离散元耦合来进行仿真实验,试验过程中统计经过出粮口的颗粒数和籽粒数,计算仿真实验的清洁率和损失率,试验方案和结果见表5所示。对试验结果进行极差分析如表6所示。

由极差(R)可知,清洁率(Q)的指标越大则清选效果越好,故确定各影响因素主次顺序依次为D>B>C>A;对于损失率(S)指标(R)值越小越好,即各影响因素主次顺序依次为B>A>C>D。按清洁率确定各因素最佳水平组合为A₂B₃C₁D₂,损失率各因素最佳水平组合为A₂B₃C₁D₃,可见喂入速度、吸杂压强、筒体高度性能指标的最佳水平均为A₂B₃C₁,即

表 4 试验因素水平

Table 4 Factors and levels of the test

水平 Level	因素 Factor			
	喂入速度 A Feeding speed /(m·s ⁻¹)	吸杂口压强 B Pressure of the outlet/Pa	筒体高度 C Height of cylinder/mm	下椎体角度 D Angle of lower vertebral/°
1	10	-1200	350	25
2	12	-1500	390	45
3	14	-1800	430	65

表 5 正交试验结果

Table 5 Results of the orthogonal test

序号 Number	因素 Factor				清洁率 Y_q Cleanliness rate/%	损失率 Y_s Loss ratio/%
	A	B	C	D		
1	1	1	1	1	69.38	3.15
2	1	2	2	2	76.34	4.36
3	1	3	3	3	83.56	3.69
4	2	1	2	3	79.21	2.15
5	2	2	3	1	66.37	2.89
6	2	3	1	2	93.29	2.48
7	3	1	3	2	83.15	5.46
8	3	2	1	3	78.26	2.06
9	3	3	2	1	73.30	2.95

喂入速度为12 m·s⁻¹,吸杂压强为-1 800 Pa,筒体高度为350 mm时清洁率最佳,损失率最低。在农业生产的实践中,当损失率与清洁率不能同时保证时,需先保证损失率,再考虑清洁率^[15]。因此在本研究中,下椎体角度的选择以损失率为主要考核指标,即65°为最优参数。

对最优组合A₂B₃C₁D₃进行仿真实验获得清洁率和损失率分别为92.18%和1.99%。

5 试验验证

为了验证仿真实验的准确性,2016年7月10日在武威市凉州区黄羊镇甘肃农业大学绿洲农业科研试验教学基地(37°52'20"N,102°50'50"E),该试验站地处河西走廊东端,海拔1 581 m,典型的内陆荒漠气候区。试验田小麦、玉米间作种植,小麦带和玉米带宽均为800 mm。玉米垄作种植,小麦平作种植。小麦种植6行,行距120 mm,播种密度为37 500万株 hm⁻²。采用课题组研制的间作模式下半喂入式小麦联合收获机,留茬300 mm,割幅700 mm,机进速度1.2~1.5 km·h⁻¹。设置旋风分离筒的参数:喂入速度12 m·s⁻¹,吸杂压强-1 800 Pa,筒体高度350 mm,下椎体角度65°进行试验。为保证试验参数的可靠性,对以上试验参数进行9组试验,试验数据如表7所示。由表7可以看出,9组试验清洁率和损失率的平均值分别为89.47%和2.13%,与正交仿真实验的误差分别为2.947%和7.428%。

表6 正交试验的极差分析

Table 6 Extreme analysis of orthogonal test

水平 Level	清洁率 Q Cleanliness rate/%				损失率 S Loss ratio/%			
	A	B	C	D	A	B	C	D
k_1	76.427	77.247	80.310	69.360	3.733	3.587	2.563	2.997
k_2	79.623	73.657	75.960	84.260	2.507	3.103	3.153	4.100
k_3	77.913	83.060	77.693	80.343	3.490	3.040	4.013	2.633
R	3.196	9.403	4.350	14.900	1.226	0.547	1.450	1.467



图8 田间试验

Fig.8 Field testing

表7 试验结果及误差

Table 7 Experiment results and error

试验序号 Experiment number	清洁率 Q Cleanliness rate/%	清洁率误差 Error of cleanliness rate	损失率 S Loss ratio /%	损失率误差 Error of loss ratio
1	89.96	2.408	2.07	4.020
2	90.65	1.660	2.18	9.547
3	89.75	2.636	2.09	5.025
4	90.98	1.302	2.13	7.035
5	89.56	2.842	2.17	9.045
6	91.24	1.020	2.21	11.055
7	87.23	5.478	2.05	3.015
8	89.57	2.831	2.19	10.050
9	86.33	6.346	2.15	8.040
平均值 Average	89.47	2.947	2.13	7.428

6 结 论

1)运用CFD-DEM气固耦合的方法对小麦、玉米间作模式下半喂入式联合收获机的旋风分离筒装置进行了数值模拟研究,对气流和谷物在分离筒中的运动和压力分布进行了分析,在研究颗粒在流场中相互作用的同时,兼顾了气流的力学特性,为进一步提高旋风分离筒的清选效率提供依据。

2)以清洁率和损失率为评价指标,以气流的运动参数和分离筒的结构参数为因素,设计正交试验,利用EDEM软件和Fluent软件耦合完成仿真试验。以损失率更低兼顾清洁率更高为原则获得最优组合即喂入速度 $12\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,吸杂压强 -1 800 Pa ,筒体高度 350 mm ,下椎体的角度 65° 。

3)完成田间验证试验,得到洁净率和损失率的平均值分别为89.47%和2.13%,与仿真试验对比误差分别为2.947%和7.428%,二者在数值上有所偏差,但基本规律大体保持一致。

参 考 文 献:

- [1] 柴强,杨彩红,黄高宝.交替灌溉对西北绿洲区小麦间作玉米水分利用的影响[J].作物学报,2011,37(9):1623-1630.
- [2] 刘师多,张利娟,师清翔,等.微型小麦联合收获机旋风分离清选系统研究[J].农业机械学报,2006,37(6):45-48.
- [3] Sakaguchi E, Suzuki M. PH—postharvest technology: Numerical simulation of the shaking separation of paddy and brown rice using the discrete element method [J]. Journal of Agricultural Engineering Research,2001,79(3):307-315.
- [4] 敬志臣,韩正晟,高爱民,等.小区小麦联合收获机清选系统的仿真分析[J].甘肃农业大学报,2010,45(3):140-144.
- [5] 李兴凯,韩正晟,戴飞,等.基于EDEM的小区育种小麦脱粒装置作业参数仿真研究[J].干旱地区农业研究,2016,34(4):292-298.
- [6] 雷小龙,廖宜涛,张闻宇,等.油麦兼用气送式集排器输种管道气固两相流仿真与试验[J].农业机械学报,2017,48(3):57-68.
- [7] 汤庆,吴崇友,吴俊,等.谷物清选CFD-DEM耦合模拟研究[J].农机化研究,2015,(1):35-38.
- [8] 伊文静.微型谷物联合收割机旋风分离清选系统工况及结构运动参数研究[D].洛阳:河南科技大学,2012.
- [9] 陈志.农业机械设计手册[M].北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- [10] Akhshik S, Behzad M, Rajabi M. CFD - DEM approach to investigate the effect of drill pipe rotation on cuttings transport behavior[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2015, 127:229-244.
- [11] 张克平,黄建龙,杨敏,等.冬小麦籽粒受挤压特性的有限元分析及试验验证[J].农业工程学报,2010,26(6):352-356.
- [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] 廖庆喜,张朋玲,廖宜涛,等.基于EDEM的离心式播种器播种性能数值模拟[J].农业机械学报,2014,45(2):109-114.
- [14] 王国强,郝万军,王继新.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.
- [15] 廖庆喜,万星宇,李海同,等.油菜联合收获机旋风分离清选系统设计与试验[J].农业工程学报,2015,31(14):24-31.