

胡麻脱粒清选装置作业过程仿真与试验

徐鹏庆 戴飞 赵武云 史瑞杰 宋学锋 瞿江飞

(甘肃农业大学机电工程学院, 兰州 730070)

摘要: 针对分段收获后胡麻脱出物形状差异小、混杂程度大、清选困难等问题,设计了胡麻脱粒清选装置。为提高胡麻脱粒清选装置作业效率,探究胡麻脱粒物料气流式清选机理,以装置气流清选系统为研究对象,分别建立清选系统 CFD 模型和胡麻脱出物 DEM 模型。采用 CFD-DEM 耦合仿真技术,通过研究各组分脱出物料的运动轨迹与空间位置分布,得出清选系统内胡麻脱出物分离规律,并进行验证试验,校验仿真模型可靠性。仿真试验表明,胡麻脱粒物颗粒在清选系统内气流场的作用下表现出较好的分离清选效果,同时,通过分析模拟试验所得到的胡麻脱粒物颗粒数量和平均速度变化曲线,探明了胡麻脱粒物料在分离清选作业过程中运移的平均速度和数量的变化规律。验证试验表明,该装置在最佳工作状态下作业后胡麻籽粒的清选损失率为 2.78%,含杂率为 2.23%,与仿真模拟胡麻籽粒损失率(2.05%)、含杂率(1.56%)相比,二者试验结果分别仅相差 0.73、0.67 个百分点,实际试验结果与仿真模拟结果吻合度较高,验证了模型的可靠性。

关键词: 胡麻脱粒清选装置; 气流式; 分离清选; 物料运移; CFD-DEM 耦合

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2023)S1-0161-11

Simulation Analysis and Experiment of Operation Process of Flax Threshing and Cleaning Device

XU Pengqing DAI Fei ZHAO Wuyun SHI Ruijie SONG Xuefeng QU Jiangfei
(College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In view of the problems of small shape difference, large degree of mixture, and difficulty in sorting the flax exudate after segmented harvesting, a flax threshing sorting device was designed. In order to improve the operation efficiency of the flax threshing sorting device, the mechanism of airflow cleaning of flax threshing materials was explored, and the CFD model of the cleaning system and the DEM model of flax detachment were established with the airflow sorting system of the device as the research object. Using CFD-DEM coupling simulation technology, the separation law of flax exudate in the sorting system was obtained by studying the motion trajectory and spatial position distribution of the detached materials of each component, and verification tests were carried out to verify the reliability of the simulation model. The simulation test showed that the flax threshing particles showed a good separation and sorting effect under the action of the air flow field in the cleaning system, and at the same time, the variation curve of the number and average velocity of flax threshing particles obtained by the simulation test was analyzed, and the change law of the average speed and quantity of flax threshing materials in the process of separation and sorting was detected. The verification test showed that the removal loss rate of flax grain after operation under the best working condition of the device was 2.78%, and the impurity rate was 2.23%, which was only 0.73 and 0.67 percentage points different from the simulated flax grain loss rate (2.05%) and impurity content rate (1.56%), respectively, and the actual test results were in high agreement with the simulation results, which verified the reliability of the model.

Key words: flax threshing and cleaning device; air flow; separation and sorting; material movement; CFD-DEM coupling

0 引言

胡麻是我国西北、华北地区重要的油料作物与经济作物之一,因其具有耐寒旱、用途广、价值高的特点而被全球 50 多个国家与地区广泛种植^[1]。目前加拿大、中国、美国胡麻种植面积与产量居世界前列,其中我国近年来胡麻平均种植面积为 $3.23 \times 10^5 \text{ hm}^2$,总产量约 $3.60 \times 10^5 \text{ t}$ ^[2]。胡麻脱粒物料分离清选系统是胡麻收获机重要组成部分,其作业性能直接影响胡麻收获质量和后续精深加工^[3]。现阶段,对于谷物的分离清选方式主要有风筛式清选和气流式清选,其中风筛式清选主要通过振动筛与风机配合完成分离清选作业,常应用于小麦、玉米等作物的联合收获机具。但由于振动筛结构较为庞大,不宜作为胡麻分段收获后脱粒物料分离清选装置关键部件^[4-5]。气流式清选主要是利用各组分脱粒物料悬浮速度差异来进行分离清选作业,其核心部件旋风分离器结构紧凑、清选效果良好,常作为小型稻、麦联合收获机的清选部件^[6]。由于各组分胡麻脱粒物料小差异混杂,在分离清选过程中容易产生胡麻籽粒的夹带损失,导致胡麻脱粒物料的分离清选是胡麻机械化收获最为重要和困难的环节之一^[7]。

近年来,国内相关学者针对玉米、花生、油菜、小麦等作物研制了多种分离清选设备,同时利用计算流体力学和有限元法对分离清选过程进行仿真分析,研究脱出物料分离机理。冯鑫等^[8]采用 CFD-DEM 耦合仿真对波浪筛清选装置内气固两相运动进行了数值模拟;万星宇等^[9]基于 EDEM 开展了油菜联合收获机分离清选筛网的性能指标试验;王伯凯等^[10]采用 CFD-DEM 联合仿真技术对花生捡拾收获机风选系统流场进行了数值模拟与试验优化;张克平等^[11]采用 CFD-DEM 联合仿真技术对间作模式下小麦联合收获机清选装置进行了仿真与试验验证;随着 CFD-DEM 耦合仿真技术在农业领域广泛应用,利用该方法研究谷物脱出物料在分离清选过程中运动规律逐渐成熟,然而研究胡麻作物脱出物分离清选机理鲜有报道。为进一步提高胡麻脱粒物料的分离清选效率,探究气流式分离清选系统工作机理,本文以胡麻脱粒清选装置的清选系统为研究对象,分别建立清选系统 CFD 模型和胡麻脱出物 DEM 模型。采用 CFD-DEM 联合仿真技术,通过研究各组分脱出物料的运动轨迹与空间位置分布,得出清选系统内胡麻脱出物分离规律,并进行验证试验。以期研制胡麻机械化收获装备与研究气流式清选系统工作机理提供参考。

1 装置结构与工作原理

1.1 装置结构组成

胡麻脱粒清选装置主要由全喂入式喂料系统、脱粒系统、茎秆排料系统、杂余过滤系统、旋风分离系统、蒴果壳小杂余排料系统、控制系统、动力系统、行走轮、机架等部件组成,其结构如图 1 所示。

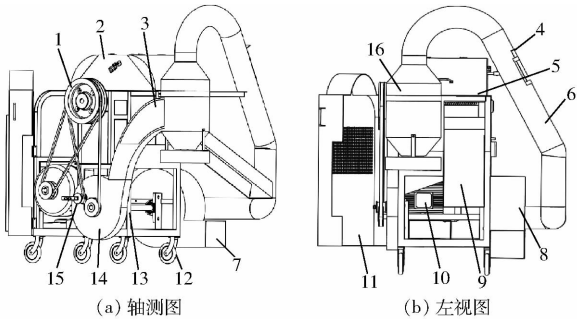


图 1 胡麻脱粒清选装置结构图

Fig. 1 Structure diagrams of flax threshing and cleaning device

1. 脱粒滚筒带轮 2. 脱粒滚筒保护罩 3. 矩形连接管观测窗
4. 吸杂管观测窗 5. 脱粒滚筒 6. 吸杂管 7. 轻杂出口 8. 吸杂风机 9. 长杂出口 10. 电机 11. 防护罩 12. 行走轮 13. 机架 14. 扬谷器 15. 张紧轮 16. 旋风分离器

脱粒系统脱粒滚筒的转速由电动机进行控制,纹杆式脱粒滚筒与栅条凹板配合,增大了茎秆与纹杆、栅条的摩擦力,使得脱粒更加充分。通过栅条凹板的筛选,使得长茎秆与蒴果壳、杂余能够分开,长茎秆通过侧置排草口排出,短茎秆、蒴果壳及胡麻籽粒被倾斜抛入旋风分离器进行分离清选作业,洁净的胡麻籽粒由旋风分离器底部排料口排出,短茎秆及杂余由吸杂风机排杂口排出。装置主要技术参数如表 1 所示。

表 1 装置主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters of operation machine	
指标	数值/形式
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 610×930×1 820
结构形式	移动式
清选形式	气流式
整机质量/kg	160
配套动力/kW	1.2
风机转速/(r·min ⁻¹)	0~2 000
脱粒滚筒转速/(r·min ⁻¹)	1 500
脱粒间隙/mm	15~22
风机变频/Hz	0~60
风机类型	离心式
生产率/(kg·h ⁻¹)	90

1.2 工作过程分析

将由割晒机收割后的长茎秆胡麻物料由进料口

喂入,胡麻物料通过纹杆式脱粒滚筒在栅条凹板、锯齿形凹板的作用下,胡麻蒴果壳受力挤压破碎,胡麻籽粒、短茎秆、蒴果壳受自身重力的作用下,通过栅条凹板进入到倾斜式漏斗中,迅速滑至扬谷器中,长茎秆在纹杆式脱粒滚筒的作用下,由侧置排杂口排出,胡麻籽粒、短茎秆、蒴果壳在扬谷器的作用下,被抛入到旋风分离器中,在吸杂风机作用下,将呈瞬时悬浮的状态,之后饱满的胡麻籽粒受到自身重力的作用,从出料口排出进入粮袋中,而胡麻干瘪破损籽粒、短茎秆、蒴果壳在吸杂风机的作用下进入吸杂管中,最后经吸杂风机从排杂口排出。

2 CFD – EDM 耦合数学模型

2.1 气相数学模型

清选装置内部为复杂的两相三维湍流流场,在 CFD – EDM 耦合计算时,气相由 Fluent 20.2 求解,固相由 EDEM 2022 求解,在计算时,由于颗粒体积分数大于 10%,因此选用 Eulerian 多相流模型^[12-13]。旋风分离器内部作旋转运动的流场可看作不可压缩的湍流,遵守质量守恒和动量守恒定律,在流体力学中对应连续性方程和 N – S 方程为

∂(ε_gρ)/∂t + ∇(ρε_gv_q) = 0 (1)

∂/∂t(ε_gρv_g) + ∇(ρε_gv_g²) = -∇p + ∇(μ_gε_gg) + ρε_gg - Q_{gp} (2)

其中 Q_{gp} = ∑_{i=1}ⁿ F_i / V (3)

- 式中 t——时间
ρ——空气密度,kg/m³
ε_g——气体体积分数
∇——哈密顿微分算子
p——气体微元体上的压力,Pa
Q_{gp}——动量源项
F_i——第 i 个颗粒对流体的作用力,N
V——网格单元体积,m³
g——重力加速度,m/s²

2.2 颗粒相数学模型

在离散元中,欧拉-拉格朗日方法是根据牛顿第二定律对固相中的每一个颗粒单独进行求解,首先确定计算域内颗粒的接触情况,由牛顿第三定律确定作用力、反作用力和位移,然后根据牛顿第二定律计算相邻颗粒之间的力和位移,从而获得颗粒运动信息^[14]。固相的运动微分方程为

du_{pi}/dt = F_{di}(u_g - u_{pi}) + g(ρ_{pi} - ρ)/ρ_{pi} + ρ/ρ_{pi}u_{pi}∂u_g/∂n (4)

其中 F_{di} = 18v C_{di}Re_{pi} / (ρ_{pi}d_{pi}² 24) (5)

Re_{pi} = ε_iρu_g - u_{pi}d_{pi} / v (6)

C_{di} = { 24(1 + 0.15Re_{pi}^{0.687}) / Re_{pi} (Re_{pi} ≤ 1 000)
0.44 (Re_{pi} > 1 000) (7)

- 式中 u_{pi}——颗粒 i 速度,m/s
F_{di}——颗粒 i 所受合力,N
u_g——气流速度,m/s
ρ_{pi}——颗粒 i 密度,kg/m³
F_{di}(u_g - u_{pi})——颗粒 i 单位质量所受到的曳力,N
ε_i——颗粒 i 空隙率
Re_{pi}——相对雷诺数
C_{di}——颗粒 i 曳力系数

3 模型建立与参数设置

3.1 模型建立和网格划分

在 SolidWorks 中对分离清选系统进行简化,剔除仿真过程无影响的部分,将三维模型以“step”的格式保存,然后在 ANSYS Workbench 中导入 Geometry 模块,并在模型上抽取流体域^[15]。将吸杂风机和扬谷器区域通过布尔运算变为旋转流体域,其他部分属于静态流体域。然后在 Mesh 模块中采用适应性较强的非结构四面体网格对清选系统模型进行网格划分,网格划分完成后检查网格质量,满足仿真要求即可^[16]。同时将气流入口壁面命名为 inlet,气流出口壁面命名为 outlet,其余壁面命名为 wall。整个模型生成 239 782 个非结构化四面体网格^[17]。清选系统 CFD 模型建立与网格划分如图 2 所示。

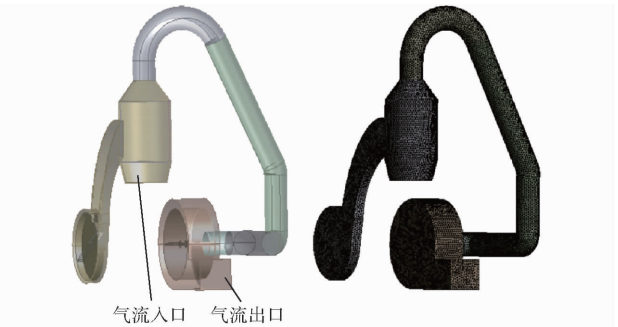


图 2 清选系统 CFD 模型与网格划分
Fig. 2 CFD model establishment and grid division of cleaning system

3.2 材料模型与参数设置

根据胡麻脱粒物料的组成(图 3a),在 EDEM 中利用圆球颗粒对胡麻各组分离脱粒物料进行填充,建立三维模型。在 EDEM 软件中用球形颗粒组合填充出近似胡麻脱粒物料各组分的形状,其中胡麻籽粒模型由 13 个球形颗粒聚合而成,其长、宽、高分别为 4.9、2.6、1.0 mm,蒴果壳模型由 9 个球形颗粒聚合而成,其长、宽、高分别为 6.0、6.0、8.0 mm,短茎秆模型由 10 个球形颗粒堆叠而成,其长、宽、高分别为 21.0、3.0、3.0 mm,粉尘颗粒由 1 个球形颗粒聚合而成,其长、宽、高分别为 4.0、4.0、4.0 mm^[18-19]。建立的胡麻颗粒、短茎秆、蒴果壳及粉尘颗粒离散元模型分别如图 3 所示。胡麻颗粒、短茎秆、蒴果壳及粉尘颗粒力学特性如表 2 所示^[20]。

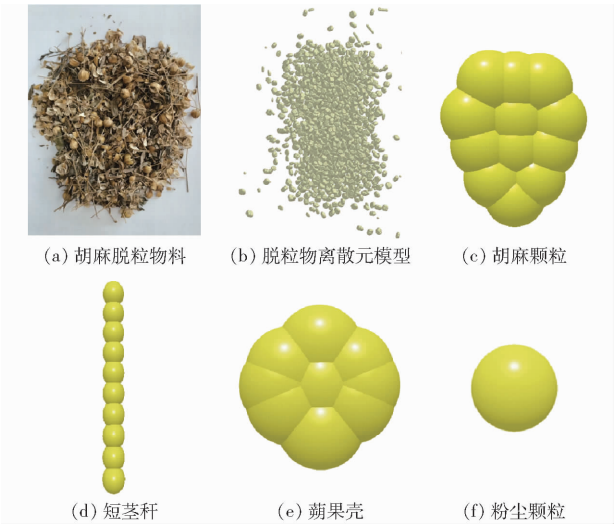


图 3 胡麻脱粒物料及各组分离散元模型
Fig. 3 Different components of flax threshing material and their discrete element models

表 2 脱粒物料力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of materials			
物料	泊松比	剪切模量/MPa	密度/(kg·m ⁻³)
胡麻籽粒	0.409	130	1 060
蒴果壳	0.25	12	100
短茎秆	0.25	100	150
粉尘颗粒	0.25	100	50
清选系统	0.30	79 000	7 800

由于在清选系统中各组分离脱粒物料表面光滑且无粘性,胡麻籽粒和蒴果壳模型是由是由圆形颗粒叠加而成的椭球形,短茎秆模型是柱状体,故在 EDEM 中 particles - particles 接触模型采用 Hertz - Mindlin (no slip)接触模型;particles - geometry 接触模型采用 Hertz - Mindlin (no slip)接触模型^[11]。各材料间的碰撞恢复系数设置为:籽粒-籽粒 0.25、籽粒-蒴果壳 0.3、籽粒-短茎秆 0.3、籽粒-粉尘颗粒

0.25、籽粒-壁面 0.5;各材料间静摩擦因数设置为:籽粒-籽粒 1、籽粒-蒴果壳 0.8、籽粒-短茎秆 0.8、籽粒-粉尘颗粒 0.7、籽粒-壁面 0.58;各材料间的动摩擦因数均设置为 0.01^[19]。设定清选系统中喂入量为 0.04 kg/s,根据胡麻各组分离脱粒物料比例,设置清选系统每秒生成胡麻籽粒 600 粒、蒴果壳 1 200 粒、短茎秆 1 300 根、粉尘颗粒 300 粒,并在 Z 轴方向添加颗粒初始速度为 1 m/s。根据前期研究结果,设置扬谷器转速为 1 450 r/min,吸杂风机转速分别为 800、1 000、1 200 r/min。

3.3 耦合参数设置

在 Fluent 中进行气相仿真,以空气为流体介质,密度为 1.2 kg/m³,粘度为 1.8 × 10⁻⁵ Pa·s,在旋风分离器内部物料为螺旋运动,因此选用适用于旋流的 RNG *k* - ϵ 模型进行瞬态计算。采用滑移网格模型对吸杂风机的旋转进行模拟,通过加载“Prof”文件控制风机叶片转速(转速与 EDEM 中设置的转速相同)。为保证旋转区域与静止区域稳定的数据交换,在 Mesh Interfaces 中设置交换接口。采用基于压力的 SIMPLE 算法求解速度场和压力场。动量项采用二阶迎风格式,残差精度为 10⁻³ s。为保证 Fluent 与 EDEM 联合仿真数据传递,二者仿真时间步长和数据保存间隔必须呈整数倍,因此计算时 EDEM 采用 Rayleigh 时间的 20.08%,时间步长为 4 × 10⁻⁷ s,数据保存间隔为 0.01 s;Fluent 中仿真时间步长为 4 × 10⁻⁵ s,每 500 个时间步长保存数据一次,计算 50 000 个时间步长,仿真时间为 2 s。Fluent 与 EDEM 仿真参数设置完后开启耦合接口,连接成功后由 Fluent 控制联合仿真,完成仿真计算^[21-22]。

4 仿真过程结果分析

4.1 清选系统内部流场

仿真结束后,将 Fluent 计算数据导入至 CFD 后处理软件 CFD - Post 中,选择气流速度入口面为轨迹的起始面,可得到清选系统气流轨迹云图(图 4),同时在 Z 轴 534 mm 处建立平行于 X - Y 面的平面,可得到清选系统的速度等值线云图(图 5)。由仿真结果可知,清选系统内气流速度方向与形态直接影响胡麻脱出物的分离清选效果,由图 4 可知,清选系统工作时容易形成气流漩涡,主要分布在扬谷器与旋风分离器之间的矩形连接管以及吸杂管弯角等位置,但各组分离脱粒物料随气流运动方向运动,并在旋风分离器内分层,分离清选效果受漩涡影响较小,可以正常地完成分离清选作业。清选系统内部气流是由扬谷器叶片和吸杂风机叶片高速旋转所产生的两部分气流共同组成。

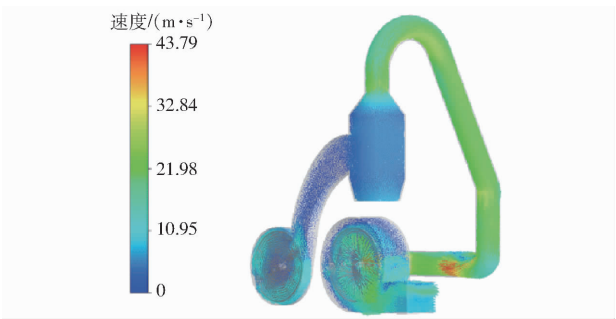


图 4 清选系统气流轨迹云图
Fig. 4 Air flow trajectory cloud diagram

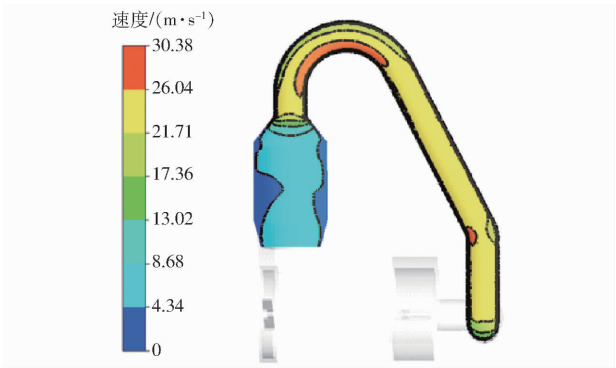


图 5 清洗系统 X-Y 截面速度的线性云图
Fig. 5 Linear cloud diagram of X-Y section velocity of cleaning system

当控制扬谷器叶片转速为 1 450 r/min,扬谷器内壁处最大气流达到 21 m/s,其出口处气流速度达 19 m/s,内部气流流速沿径向递减。扬谷器叶片旋转产生的气流与吸杂风机产生的不同速度方向气流在矩形连接管内接触,使得矩形连接管内部的气流速度由 14 m/s 降至 5 m/s,并在矩形连接管进出、口位置处产生气流漩涡,入口处中心速度为 10 m/s,出口处中心速度为 4 m/s。在旋风分离器内部存在高速区和低速区,当吸杂风机叶片转速为 1 000 r/min 时,旋风分离器入口速度达到 6.5 m/s,高速区速度为 5.5 ~ 8.1 m/s,低速区速度为 1.2 ~ 4.3 m/s,内部流场横向变化较大,纵向变化较小,在旋风分离器与矩形连接管接触位置由于气流流向不同导致该位置截面处气流速度明显下降。在吸杂管中气流速度达 25 m/s,在其弯角处最大速度达 43 m/s。

4.2 胡麻脱出物料在清选系统内的运动规律

在 EDEM 后处理模块中可得到复式清选系统工作时各组分脱出物料的速度变化过程,仿真模拟时间在 2 s 后趋于稳定,因此图 6 显示了时间段 0.1 ~ 2 s 内,胡麻脱粒物料在清选系统内运动过程及规律。

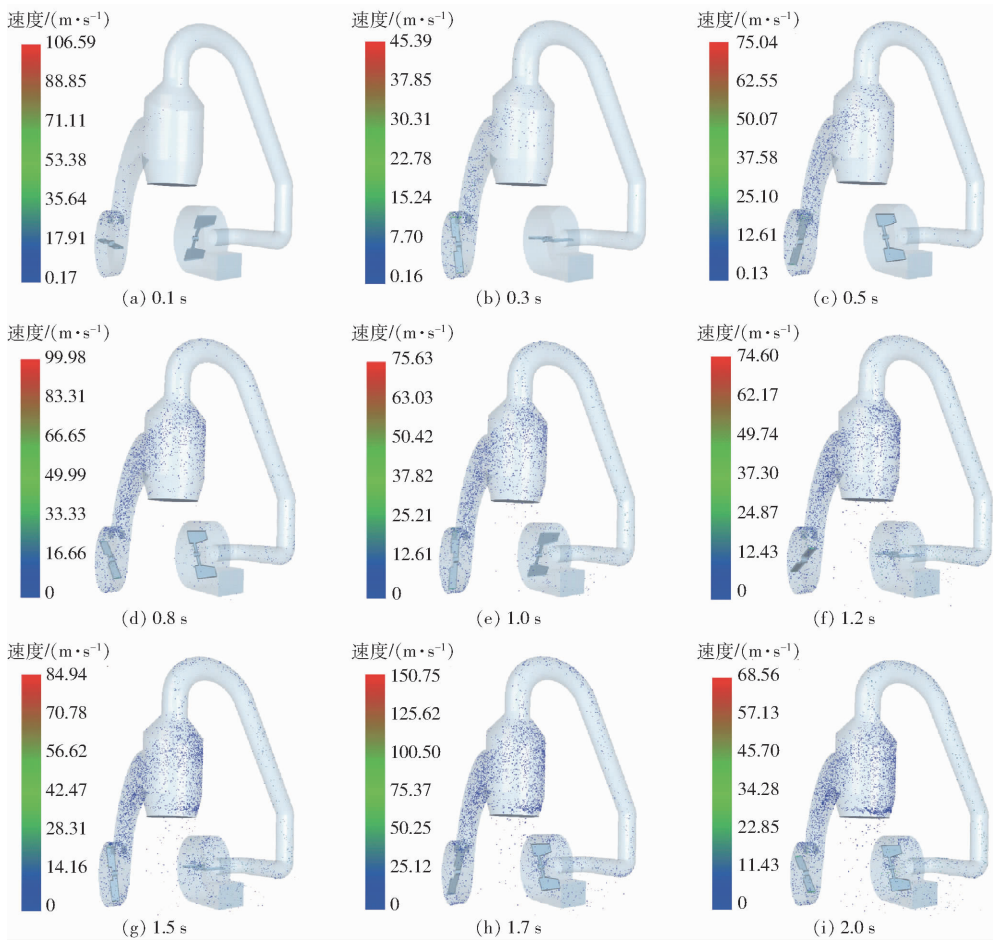


图 6 胡麻脱粒物料在分离清洗过程中的运动过程及规律
Fig. 6 Movement process and rule of threshed materials in process of separation and cleaning

由于 CFD - DEM 耦合是在流场收敛且稳定的条件下启动的,当 $t = 0\text{ s}$ 时, EDEM 数值模拟近似于胡麻脱粒物料在分离清选系统内的工作状态。当 $t = 0.1\text{ s}$ 时, 颗粒工厂以生成速率 0.03 kg/s 在 Z 轴方向以初速度 1 m/s 开始生成胡麻籽粒、短茎秆、蒴果壳及粉尘 4 种胡麻脱出物颗粒。脱出物颗粒进入扬谷器后与扬谷器叶片相接触,如图 6a 所示。当 $t = 0.3\text{ s}$ 时,脱出物颗粒在扬谷器叶片冲击带动和扬谷器内部气流场的作用下,经矩形连接管进入旋风分离器并处于悬浮状态,进入旋风分离器的脱粒物料最大速度达到 14.3 m/s 。当 $t = 0.3 \sim 0.8\text{ s}$ 时,大量的胡麻脱粒物料进入旋风分离器中,各组分脱粒物颗粒间碰撞、挤压,同时与旋风分离器内壁相互摩擦使得脱粒物速度降至 12.5 m/s 。 $t = 0.8 \sim 1.0\text{ s}$ 时,脱粒物料在旋风分离器内气流速度稳定,气流漩涡少,高速区的脱出物颗粒运动形式较为单一,低速区的脱出物颗粒运动形式较为复杂。在吸杂风机叶片旋转产生的负压气流作用下,对胡麻脱出物颗粒进行分离清选,由于胡麻籽粒的临界悬浮速度大于短茎秆、蒴果壳和粉尘的临界悬浮速度,因此,粉尘、蒴果壳和部分短茎秆在旋风分离器内随气流向其出口方向做螺旋上升运动;胡麻籽粒和部分短茎秆在重力作用下向气流入口方向做螺旋下降运动,最后经旋风分离器底部排出清选系统,在脱出物颗粒螺旋上升和下降运动过程中与旋风分离器壁面间相互作用,使得脱出物颗粒产生分层现象,各组分脱出物颗粒依次有序排除,如图 6e 所示。当 $t = 1.0 \sim 1.5\text{ s}$ 时,由旋风分离器上端排出的粉尘、蒴果壳和部分短茎秆通过吸杂管后由吸杂风机出口排除分离清选系统,由于吸杂风机旋转气流场的干扰,脱粒物颗粒在进入吸杂风机后开始翻转运动。在整个分离清选过程中脱出物颗粒主要受到重力、压力梯度力、拖曳力、旋转升力和与壁面的冲击和摩擦^[4]。当 $t = 1.5 \sim 2.0\text{ s}$ 时,分离清选系统内胡麻脱出物颗粒数量保持稳定。胡麻脱出物颗粒进入清选系统后,在气流场的作用下,可以将不同组分的胡麻脱出物颗粒进行分离清选,在仿真过程中发现,由于胡麻籽粒较轻,在吸杂风机高速旋转下,部分胡麻籽粒被带入吸杂风机,同时存在少量短茎秆掺杂在胡麻籽粒中一同排出清选系统,为明确清选系统作业指标,在清选系统气流入口和出口处分别设置 2 个传感器,分别检测从旋风分离器落下和吸杂风机排除的脱出物颗粒数量,通过传感器数据对分离清选结果进行计算分析,胡麻籽粒损失率为 1.56% ,含杂率为 2.05% ,可知胡麻脱粒物料分离清选系统清选效果较好。

4.3 脱粒物料运动轨迹

在仿真模拟中,通过调整扬谷器和吸杂风机的转速,保证清选后所有胡麻籽粒从旋风分离器底部排出,短茎秆、蒴果壳和粉尘在吸杂风机的作用下从吸杂风机出口排出。为进一步提高清选系统的性能,探究胡麻脱出物颗粒在分离清选过程中的运移规律,再标记出胡麻籽粒等脱出物料在分离清选过程中的运动轨迹,图 7a 中橘色线表示胡麻籽粒的运动轨迹,图 7b 中 3 条蓝色线条分别表示短茎秆、蒴果壳、粉尘的运动轨迹。

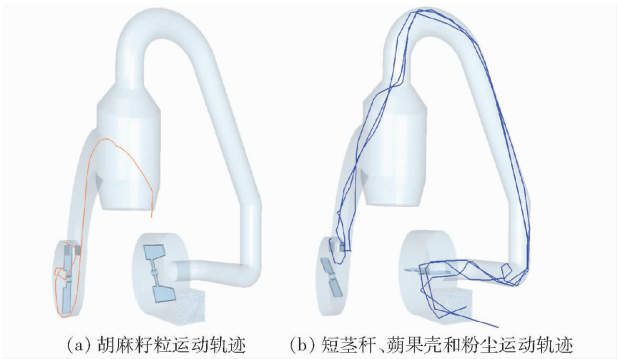


图 7 胡麻脱粒物颗粒在清选系统内的运动轨迹
Fig. 7 Movement trajectory of flax ejector particles in cleaning system

如图 7 所示,当清选系统中扬谷器和吸杂风机转速设置合适时,胡麻脱出物颗粒进入扬谷器后,由扬谷器叶片抛出,颗粒进入到旋风分离器中,在吸杂风机产生的高速气流作用下,脱粒物颗粒在旋风分离器内因悬浮速度的差异而分层,胡麻籽粒沿着筒壁下落,同时较轻的短茎秆、蒴果壳和粉尘在吸杂风机的负压吸力作用下,沿着筒壁向上移动进入吸杂管,从吸杂风机出口排出清选系统。

如图 8 所示,当清选清选中吸杂风机转速设置不合适即吸杂风机转速过高或过低时,胡麻脱粒物料的清选状态差异较大。当扬谷器转速固定,



图 8 吸杂风机转速过低、过高时清选系统内胡麻脱粒物料的运动情况
Fig. 8 Separation and cleaning state of two kinds of impurity suction fans with improper speed

吸杂风机转速过低时(图 8a),旋风分离器内气流速度加快,使得大量胡麻籽粒从吸杂风机出口排出,造成籽粒的损失。当扬谷器转速固定,吸杂风机转速过高(图 8b),旋风分离器内气流速度降低,除尘管道内没有足够的压力吸收胡麻脱粒物颗粒,导致旋风分离器内胡麻脱粒物颗粒的分层现象消失,从而大量的短茎秆、蒴果壳、粉尘伴随籽粒从旋风分离器底部落下,造成清选后籽粒含杂率高^[23]。

5 胡麻脱出物颗粒运动分离机理

5.1 整个区域内胡麻籽粒数量

在分离清选装置作业过程中,胡麻脱粒物料主要由胡麻籽粒、短茎秆、蒴果壳以及粉尘组成。当吸杂风机转速为 1 000 r/min,整个清选装置内胡麻籽粒数量变化曲线及趋势如图 9 所示。

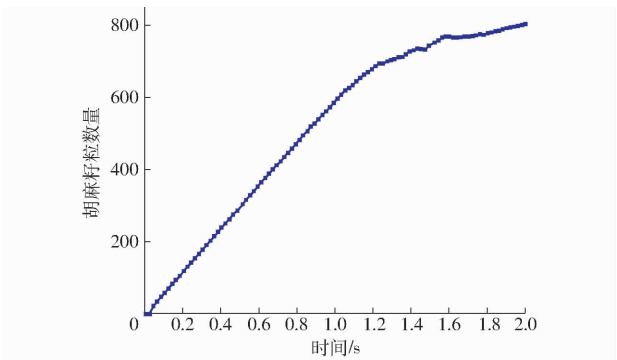


图 9 清选系统内胡麻籽粒数量变化曲线
Fig.9 Variation curve of flax seed quantity in cleaning system

由图 9 可知,当 $t = 0.03$ s 时,在颗粒工厂生成的胡麻籽粒开始进入清选系统,当 $t = 0.04 \sim 1.2$ s 时,在清选装置内的胡麻籽粒数量呈线性增长趋势,通过模拟胡麻脱粒物料在分离清选过程中的运动规律发现,胡麻籽粒主要集中在扬谷器矩形连接管和旋风分离器中,因此随着脱粒物料的不断喂入以及吸杂风机的持续运转,整个工作区域内胡麻籽粒的数量保持稳定,此时,胡麻籽粒流在重力的作用下从旋风分离器底部落下。

5.2 整个区域内胡麻籽粒速度

整个清选系统内胡麻颗粒速度随时间变化曲线如图 10 所示。由图 10 可知, $t = 0.02$ s 时,胡麻颗粒与其他脱粒物料进入清选系统。当 $t = 0.02 \sim 0.10$ s 时,胡麻颗粒在扬谷器叶片的推送作用下其平均速度大幅提升,最大速度达到 6 m/s。当 $t = 0.15$ s 时胡麻籽粒在扬谷器内沿扬谷器内壁以较高的速度做圆周运动,当到达扬谷器与矩形连接管的接触位置时,胡麻籽粒以速度 5 m/s 沿扬谷器切线抛送进入矩形连接管。当 $t = 0.15 \sim 0.40$ s 时,胡麻籽粒在矩形连接管内自下向上移动,在这过程中,胡麻籽粒受到重力

与壁面的摩擦力同时还受到旋风分离器内负压气流的作用,胡麻籽粒在矩形连接管内运移速度降低至 3.1 m/s。 $t = 0.40$ s 时,胡麻籽粒开始进入旋风分离器,由于胡麻籽粒悬浮速度大于旋风分离器内气流速度,胡麻籽粒速度较为稳定的沿着旋风分离器内壁滑落,并从其底部排出清选系统。

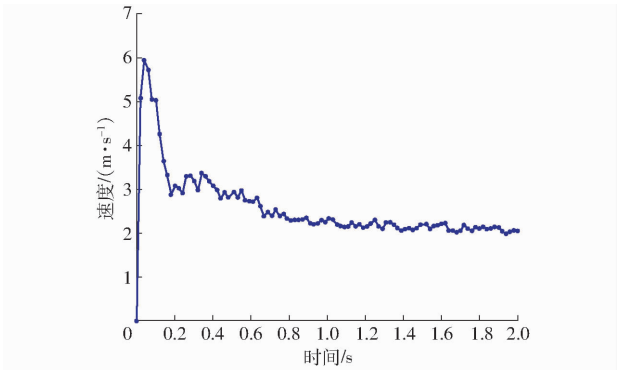


图 10 清选系统内胡麻籽粒速度变化曲线
Fig.10 Variation curve of flax seed migration rate in cleaning system

5.3 工作区域划分

为探知影响各组分胡麻脱粒物料滞留的影响因素,需要在分离清选装置内气固两相流作用下对各组分胡麻脱粒物料在区域 1 至区域 5 内的运移速度及数量变化进行分析^[24],区域分布如图 11 所示。

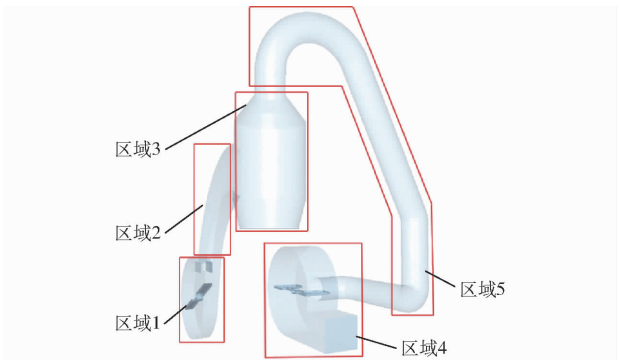


图 11 清选系统工作区域划分
Fig.11 Work area division of cleaning system

5.4 工作区域内各组分胡麻脱粒物料数量和速度

胡麻脱粒物料中胡麻籽粒、短茎秆、蒴果壳以及粉尘在不同区域内数量随时间的变化曲线如图 12 所示。如图 12a 所示,装置分离清选后,在经过 5 个不同区域时胡麻籽粒主要集中在区域 2(矩形连接管)且呈现逐步增多的趋势,但增幅逐渐减缓;同时在区域 1(扬谷器)内也有一定的残留。这是影响作业机清选损失率和降低作业效率的关键所在,在区域 4(吸杂风机)和区域 5(吸尘管)中仅有少量胡麻籽粒进入,说明装置夹带损失率低。如图 12b、12c 所示,短茎秆和蒴果壳由于二者弹性模量、密度等物性参数较为接近,二者在不同区域内数量变化趋势

基本一致,装置分离清选过程中,短茎秆和蒴果壳主要集中在区域3(旋风分离器)中,这是由于在旋风分离器中存在靠近筒壁的低速区和中心的高速区,在0.1 s时短茎秆和蒴果壳沿切线方向进入旋风分离器的低速区,在该区域气流速度与短茎秆和蒴果壳的临界悬浮速度接近,因此二者处于悬浮状态并沿着旋风分离器内壁做圆周运动,在短茎秆和蒴果壳与筒壁摩擦力的作用下,其运移速度不断降低,最

终进入高速区,被高速气流带出旋风分离器。在此过程中,随着脱粒物料的持持续喂入,在旋风分离器内短茎秆和蒴果壳的数量不断升高,当到达1.3 s时,短茎秆和蒴果壳被吸尘管吸出,此后随着脱粒物料的持持续喂入,在旋风分离器内短茎秆和蒴果壳的数量保持稳定。如图12d所示,粉尘颗粒主要积聚在区域4(吸杂风机),这是由于粉尘颗粒质量小,在吸杂管内气流漩涡作用下无法及时排出。

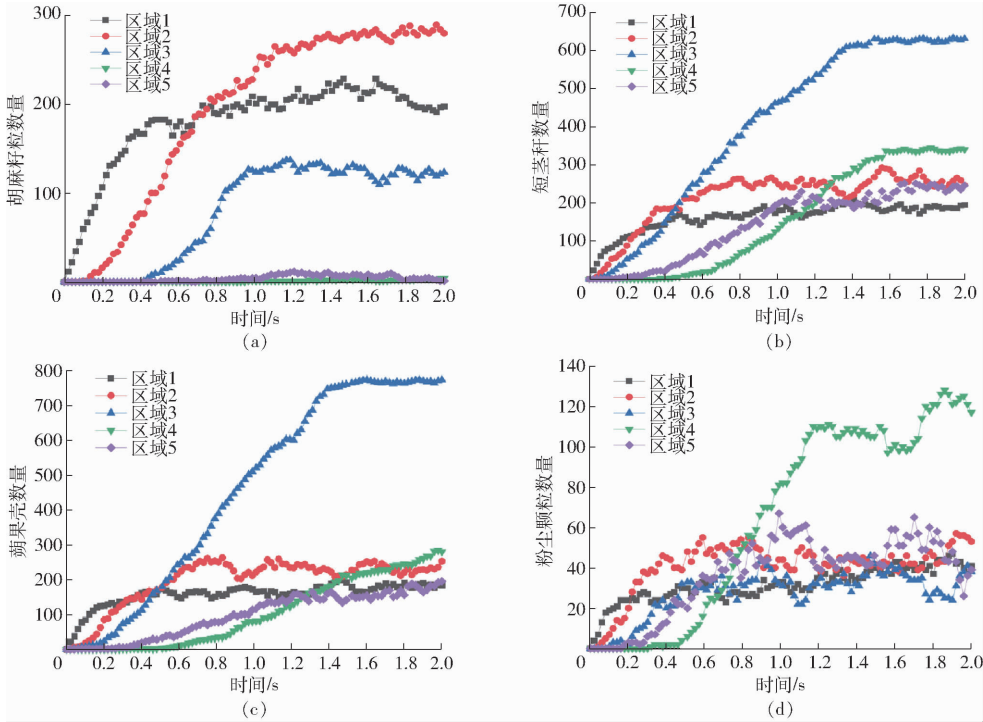


图 12 不同区域各组分胡麻脱粒物料数量随时间的变化曲线

Fig. 12 Variation curves of threshing material quantity of different components of flax in different regions with time

胡麻脱粒物料中胡麻籽粒、短茎秆、蒴果壳以及粉尘在不同区域内速度随时间的变化曲线如图13所示。由图13a可知,在区域1(扬谷器)胡麻籽粒运移速度4.5~6.0 m/s内变化,在区域2(矩形连接管)1.3~2.1 m/s内变化,在区域3(旋风分离器)1.8~2.5 m/s内变化,变化范围较小,而在区域4(吸杂风机)2.4~14 m/s内变化和区域5(吸杂管道)0.5~8.3 m/s内变化,胡麻籽粒速度变化范围较大,这是由于在区域1、区域2、区域3中胡麻籽粒数量大,使得胡麻籽粒间碰撞、挤压频率增加,同时在装置上述位置处气流速度较为稳定。而进入区域4、区域5的胡麻籽粒数量极少,较小的流速变化都会引起胡麻籽粒速度发生波动,在装置区域4、区域5位置处,流域内径尺寸变化较大,引起流场流速大范围变化。由图12b、12c可知,在脱粒物料喂入的初始阶段短茎秆和蒴果壳在区域1、区域2、区域3内速度变化规律较乱,在0.4 s后随着脱粒物料的持续喂入以及清选系统内部流场稳定,整个清选系

统内胡麻籽粒运移速度趋向稳定。由图12d可知,粉尘由于其碎小、形状不规整、质量极轻,其运移速度易受到气流波动的影响,在区域1、区域3、区域5内的运移速度波动大。

6 试验验证

图14为胡麻脱粒清选装置工作性能验证试验,试验材料选择甘肃省榆中县丘陵山地种植的品种陇亚14号胡麻,通过割晒机收割后茎秆平均长度为450 mm,单株平均生长蒴果数为22.3,单个蒴果的平均籽粒数为7.1,平均千粒质量7.8 g,单株产量为0.92 g,茎秆和蒴果含水率为9.5%。试验过程中,物料喂入量为0.2 kg/s,扬谷器转速设为1 450 r/min,吸杂风机转速设为1 000 r/min^[25]。按照样机预期优化目标,参照国家行业标准 GB/T 5262—2008《农业机械试验条件测量方法通则》、GB/T 2828.1—2012《计数抽样检测程序》所规定的试验方法进行整机的工作性能验证试验。在样机运行稳定后将收

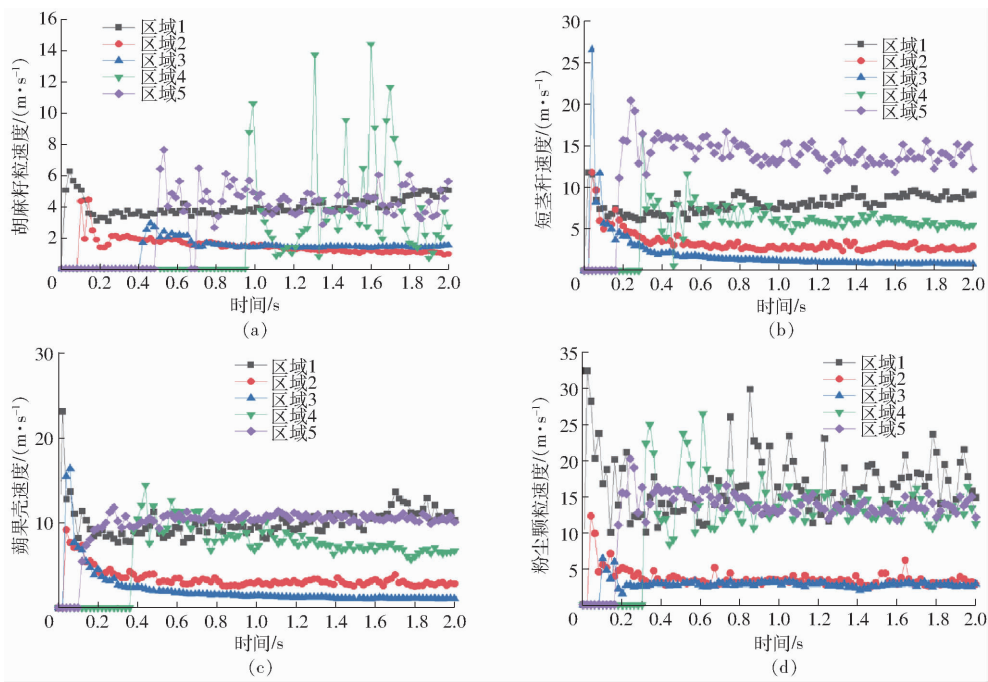


图 13 不同区域各组分胡麻脱粒物料速度随时间的变化曲线

Fig. 13 Variation curves of threshing material velocity of different components of flax in different regions with time



图 14 胡麻脱粒清洗装置样机试验过程

Fig. 14 Flax threshing cleaning device prototype test process

获期通过割晒机收割后的茎秆与蒴果喂入进料口，以籽粒含杂率和损失率作为样机工作性能的测试指标^[26-27]；同时，对样机的脱粒装置、分离清选系统、蒴果壳小杂余排料系统、控制系统以及动力系统的运行情况进行了分析。

含杂率、损失率计算公式为

$$\begin{cases} Y_1 = \left(1 - \frac{N_1}{N_z}\right) \times 100\% \\ Y_2 = \left(\frac{N - N_1}{N}\right) \times 100\% \end{cases} \quad (8)$$

式中 Y_1 ——籽粒含杂率，%
 Y_2 ——清选损失率，%
 N_1 ——清选后收集胡麻籽粒数
 N_z ——胡麻脱粒物料总颗粒数
 N ——在清选前胡麻籽粒总数

试验结果表明，样机作业后胡麻籽粒清选损失率为 2.78%，含杂率为 2.23%，能够实现对胡麻脱粒物料分离清选。与仿真模拟清选损失率（2.05%）含杂率（1.56%）相比，二者试验结果分别

仅相差 0.73、0.67 个百分点，实际试验结果与仿真模拟结果基本吻合，同时，从吸杂风机和旋风分离器底部排出的物料状态与模拟过程中相似，验证了基于 CFD-DEM 耦合的胡麻脱粒物料分离清选作业过程模拟结果的正确。

7 结论

（1）通过对胡麻分离清选装置工作过程的分析，建立了装置内颗粒相和气相的控制方程，并基于 EDEM 建立了各组分胡麻脱粒物料的离散元模型以及基于 Fluent 建立了流体计算域。然后采用 CFD-DEM 联合仿真对装置内胡麻脱粒物料的运动过程进行数值模拟，分析了清选装置内部流场的变化，探究了各组分胡麻脱粒物料的运移规律和运动轨迹同时分析了吸杂风机转速过高与过低时对装置分离清选过程的影响规律。

（2）将胡麻脱粒清选装置划分为 5 个区域，分别是扬谷器区、矩形连接管区、旋风分离器区、吸杂管道区和吸杂风机区。通过分析在气固耦合作用下，各组分胡麻脱粒物料的数量和速度在不同工作区域内随时间的变化曲线，探明了各组分胡麻脱粒物料在气流式分离清选过程中的运移规律及特性。

（3）以胡麻籽粒清洁损失率和含杂率作为样机性能指标进行了验证试验。试验结果表明，该样机作业后胡麻籽粒清选损失率为 2.78%，含杂率为 2.23%，作业指标符合胡麻机械化收获标准。各组

分胡麻脱出物料的运动轨迹与仿真试验结果基本一致,表明应用 CFD - DEM 耦合的方法模拟胡麻脱粒物料的分选过程可行,同时也验证了模型的可靠性。

参 考 文 献

[1] 王利民,张建平,党照,等. 胡麻两系杂交亲本的配合力及杂种优势分析[J]. 中国农业科学,2016,49(6):1047 - 1059.
WANG Limin,ZHANG Jianping,DANG Zhao,et al. The analysis of the parental combining ability and heterosis on two-line hybrid flax[J]. Scientia Agricultura Sinica,2016,49(6):1047 - 1059. (in Chinese)

[2] 戴飞,赵武云,史瑞杰,等. 胡麻机械化收获关键技术与装备研究进展分析[J]. 中国油料作物学报,2022,44(6):1148 - 1158.
DAI Fei,ZHAO Wuyun,SHI Ruijie,et al. Research progress analysis of key technology and equipment for mechanized harvest of flax[J]. Chinese Journal of Oil Crops,2022,44(6):1148 - 1158. (in Chinese)

[3] 戴飞,赵武云,刘国春,等. 胡麻脱粒物料分离清选机设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(8):140 - 147.
DAI Fei,ZHAO Wuyun,LIU Guochun,et al. Design and experiment of separating and cleaning machine for flax threshing material[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(8):140 - 147. (in Chinese)

[4] 史瑞杰,戴飞,赵武云,等. 丘陵山地胡麻联合收获机复式清选系统仿真优化与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(8):93 - 102,113.
SHI Ruijie,DAI Fei,ZHAO Wuyun,et al. Simulation optimization and experiment on compound cleaning system of hilly area flax combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(8):93 - 102,113. (in Chinese)

[5] DUJARDIN N,FOIS M,GRIMAU M,et al. Soft interface dynamics in flax-fabrics/epoxy composites[J]. Composite Structures,2018,202:389 - 396.

[6] JERZY M,WOJCIECH M,GRZEGORZ S,et al. Research on new technology of fiber flax harvesting[J]. Journal of Natural Fibers,2018,15(1):53 - 61.

[7] 戴飞,付秋峰,赵武云,等. 双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(4):117 - 125,247.
DAI Fei,FU Qiufeng,ZHAO Wuyun,et al. Design and test of double duct system of air-screen separating and cleaning machine for flax threshing material[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(4):117 - 125,247. (in Chinese)

[8] 冯鑫,王立军,于琨蒙,等. 玉米籽粒清选波浪筛机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(4):142 - 154.
FENG Xin,WANG Lijun,YU Kunmeng,et al. Design and experiment of mechanism of wave screen for maize grain cleaning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(4):142 - 154. (in Chinese)

[9] 万星宇,廖宜涛,袁佳诚,等. 油菜联合收获机组合式旋风分离清选参数分析与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(增刊2):202 - 211.
WAN Xingyu,LIAO Yitao,YUAN Jiacheng,et al. Parameters analysis and experiment of cyclone separation cleaning system with replaceable parts for rapeseed combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp. 2):202 - 211. (in Chinese)

[10] 王伯凯,于昭洋,胡志超,等. 花生捡拾收获机三风系风选系统流场数值模拟与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(11):103 - 114.
WANG Bokai,YU Zhaoyang,HU Zhichao,et al. Numerical simulation and experiment of flow field in three air systems of air separation system of peanut pick up harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(11):103 - 114. (in Chinese)

[11] 张克平,樊宏鹏,孙步功,等. 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[J]. 干旱地区农业研究,2019,37(1):268 - 274.
ZHANG Keping,FAN Hongpeng,SUN Bugong,et al. The CFD - DEM gas - solid coupling simulation and experimental verification of cleaning device of wheat combine harvester for intercropping system[J]. Agricultural Research in Arid Areas,2019,37(1):268 - 274. (in Chinese)

[12] DAI Fei,SONG Xuefeng,ZHAO Wuyun,et al. Simulation and test on separating cleaning process of flax threshing material based on gas-solid coupling theory[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2020,13(1):73 - 81.

[13] 舒彩霞,杨佳,万星宇,等. 联合收获油菜脱出物离散元仿真参数标定与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(9):34 - 43.
SHU Caixia,YANG Jia,WAN Xingyu,et al. Calibration and experiment of the discrete element simulation parameters of rape threshing mixture in combine harvester[J]. Transactions of the CSAE,2022,38(9):34 - 43. (in Chinese)

[14] 宋学锋,戴飞,张锋伟,等. 90°弯管内玉米颗粒气固耦合运动特性分析[J]. 中国农机化学报,2018,39(11):67 - 71.
SONG Xuefeng,DAI Fei,ZHANG Fengwei,et al. Analysis of corn granular movement characteristics in 90° elbow based on gas-solid coupling method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2018,39(11):67 - 71. (in Chinese)

[15] 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(6):111 - 119.

[16] ZHAO Zhan,LI Yaoming,LIANG Zhenwei,at al. DEM simulation and physical testing of rice seed impact against a grain loss sensor[J]. Biosystems Engineering,2013,116(4):410-419.

[17] YI He,ANDREW E B,ALI H. Coupling CFD-DEM with dynamic meshing;a new approach for fluid-structure interaction in particle-fluid flows[J]. Powder Technology,2018,325(1):620-631.

[18] DAI Fei, SONG Xuefeng, ZHAO Wuyun, et al. Motion simulation and test on threshed grains in tapered threshing and transmission device for plot wheat breeding based on CFD-DEM[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2019,12(1):66-73.

[19] 戴飞. 胡麻脱粒物料分离清选机理与关键技术研究[D]. 兰州:甘肃农业大学,2020.
DAI Fei. Study on the separating-cleaning mechanism and key technology of flax threshing material[D]. Lanzhou:Gansu Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[20] 戴飞,赵武云,付秋峰,等. 双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机参数优化与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(7):83-92.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, FU Qiufeng, et al. Parameter optimization and experiment on double duct system of air-screen separating and cleaning machine for flax threshing material[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(7):83-92. (in Chinese)

[21] JOSEPHINE M B,KINGSLY AMBROSE R P,CASADA M E,et al. Applications of discrete element method in modeling of grain postharvest operations[J]. Food Engineering Reviews,2014,6(4):128-149.

[22] ISTVAN O,FERENC S. Extension of silo discharge model based on discrete element method[J]. Journal of Mechanical Science and Technology,2015,29(9):3789-3796.

[23] WANG Jinwu,ZHOU Wenqi,TIAN Liquan, et al. Virtual simulation analysis and verification of seed-filling mechanism for dipper hill-drop precision direct rice seeder[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2017,10(6):77-85.

[24] MA Licheng, WEI Lubin, PEI Xinyu, et al. CFD-DEM simulations of particle separation characteristic in centrifugal compounding force field[J]. Powder Technology,2019,343(1):11-18.

[25] WANG Shuyan,LI Haolong,WANG Ruichen,et al. Effect of the inlet angle on the performance of a cyclone separator using CFD-DEM[J]. Advanced Powder Technology,2018,30(2):227-239.

[26] 瞿江飞,赵武云,赵一鸣,等. 全喂入胡麻脱粒清选机的设计与试验[J]. 浙江农业学报,2022,34(4):831-840.
QU Jiangfei, ZHAO Wuyun,ZHAO Yiming,et al. Design and experiment of full feed flax threshing and cleaning machine[J]. Zhejiang Agricultural Journal,2022,34(4):831-840. (in Chinese)

[27] 史瑞杰,戴飞,赵武云,等. 全喂入式胡麻脱粒机的设计与试验[J]. 中国农业大学学报,2019,24(8):120-132.
SHI Ruijie, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Design and test of full-feed flax thresher[J]. Journal of China Agricultural University,2019,24(8):120-132. (in Chinese)

(上接第 143 页)

[22] 侯小秋,李丽华. 基于 BP 神经网络辨识的预测滤波 PID 控制[J]. 黄河科技学院学报,2023,25(5):26-31.
HOU Xiaoqiu, LI Lihua. Predictive filtering PID control based on BP neural network Identification[J]. Journal of Huanghe S&T College,2023,25(5):26-31. (in Chinese)

[23] 赵永杰,张强,潘德法,等. 基于蝙蝠算法优化的 BP 神经网络估算工质沸点温度[J]. 自动化与仪器仪表,2022(4):75-79.
ZHAO Yongjie, ZHANG Qiang, PAN Defa, et al. BP neural network based on bat algorithm optimizationto estimate the boiling point temperature of working medium[J]. Automation & Instrumentation,2022(4):75-79. (in Chinese)

[24] 吕石磊,范仁杰,李震,等. 基于改进蝙蝠算法和圆柱坐标系的农业无人机航迹规划[J]. 农业机械学报,2023,54(1):20-29,63.
LÜ Shilei, FAN Renjie,LI Zhen, et al. Track planning of agricultural UAV based on improved bat algorithm and cylindrical coordinate system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(1):20-29,63. (in Chinese)

[25] YAN Hongying, CHU Jizheng. RFID positioning algorithm based on BA optimization[C]//2020 5th International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS), 2020:854-858.

[26] 郭贝,任金霞. 基于蝙蝠算法优化 BP 神经网络的特征点匹配[J]. 制造业自动化,2019,41(8):68-70,80.
GUO Bei, REN Jinxia. Optimization of BP-based feature point matching based on bat algorithm[J]. Manufacturing Automation,2019,41(8):68-70,80. (in Chinese)