doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.12.031

基于柯恩达效应的小区收获机高效除杂装置辅助板设计与机理研究

李国莹[1,2]　徐祝欣[2]　李国梁[2]　李　雪[2,3]　卢志浩[3,4]　于润之[3,4]　杨　诚[1,2]

（1. 山东省主要农作物机械化生产装备协同创新中心，青岛 266109；
2. 青岛普兰泰克机械科技有限公司，青岛 266109；
3. 青岛农业大学机电工程学院，青岛 266109；4. 青岛普劳德机电科技有限公司，青岛 266109）

摘要：在小区收获机中，基于柯恩达效应的除杂系统是一种新型二级除杂装置，具有结构简单、空间占比小的优势。在实际应用中，仅依靠曲面的柯恩达效应仅能实现杂质分离，大部分杂质无法在气流作用下有效去除，导致除杂效率较低。为提升装置的除杂效率，增强曲面末端的柯恩达效应强度，并减少气流扩散现象，本文在原有除杂装置的基础上，增设了辅助板结构。基于 CFD－DEM 方法，获取了无辅助板时小麦籽粒和颖壳杂质的颗粒偏转角，并利用这些颗粒偏转角，通过几何关系确定了辅助板自由端角度的变化范围为 4.89°～27.12°。借助数值仿真方法，深入研究了装置内部柯恩达效应作用带的流场结构，确定了柯恩达效应末端速度突变处的高度位置范围为 0.112～0.128 m。基于仿真结果，进一步明确了辅助板长度及其固定端对应位置。最终，通过台架试验得出，当辅助板自由端角度为 25°，长度为 155 mm，固定端高度位置为 0.122 m 时，除杂效果最佳，籽粒含杂率为 0.998%，充分证明了辅助板在提升除杂装置性能方面的显著作用。

关键词：小区收获机；除杂装置；辅助板；CFD－DEM 耦合仿真；柯恩达效应

中图分类号：S225.3　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)12-0343-11　　**OSID**：

Design and Mechanism Study of Auxiliary Plate of New High-efficiency Impurity Removal Device for Plot Harvester Based on Coanda Effect

LI Guoying[1,2]　XU Zhuxin[2]　LI Guoliang[2]　LI Xue[2,3]　LU Zhihao[3,4]　YU Runzhi[3,4]　YANG Cheng[1,2]

(1. *Collaborative Innovation Center for Shandong's Main Crop Production Equipment and Mechanization*, *Qingdao* 266109, *China*
2. *Qingdao Plantech Mechanical Technology Co., Ltd.*, *Qingdao* 266109, *China*
3. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Qingdao Agricultural University*, *Qingdao* 266109, *China*
4. *Qingdao Proud Electromechanical Technology Co., Ltd.*, *Qingdao* 266109, *China*)

Abstract: In the plot combine harvester, the impurity removal system based on the Coanda effect serves as a novel secondary cleaning device, featuring advantages of simple structure and compact spatial footprint. However, in practical applications, relying solely on the Coanda effect generated by curved surfaces can only achieve partial impurity separation, as most impurities fail to be effectively removed under airflow, resulting in suboptimal cleaning efficiency. To enhance the device's performance, strengthen the Coanda effect intensity at the end of the curved surface, and mitigate airflow diffusion, an auxiliary plate structure was introduced to the original design. Using the CFD－DEM method, the particle deflection angles of wheat grains and husk impurities were obtained for the configuration without the auxiliary plate. These angles were then utilized to determine the variation range of the auxiliary plate's free-end angle (4.89°～27.12°) through geometric relationships. Numerical simulations were employed to analyze the flow field structure within the Coanda effect zone of the device, identifying the height range

收稿日期：2025－03－19　修回日期：2025－07－24

基金项目：山东省主要农作物机械化生产装备协同创新中心开放课题(SDXTZX－03)和山东省重点研发计划(农业良种工程)项目(2024LZGC004)

作者简介：李国莹(1983—)，男，高级工程师，主要从事小区育种装备研究，E-mail：yrzplantech@126.com

通信作者：杨诚(1988—)，男，高级工程师，主要从事小区育种装备研究，E-mail：ycplantech@126.com

(0.112 ~ 0.128 m) where abrupt velocity changes occurred at the end of the Coanda effect. Based on simulation results, the optimal length of the auxiliary plate and the positioning of its fixed end were further refined. Bench tests demonstrated that the highest cleaning efficiency was achieved when the auxiliary plate had a free-end angle of 25°, a length of 155 mm, and a fixed-end height of 0.122 m, and the impurity content in the grain is 0.998%, conclusively validating its significant role in improving device performance.

Key words: plot harvester; impurity removal device; auxiliary plate; CFD - DEM coupling simulation; Coanda effect

0 引言

种业作为国家战略性、基础性核心产业,是保障国家粮食安全的重要基石。实现作物育种试验机械化是扩大育种规模、提高育种试验效率和精度的关键。在品种改良和产量提升的过程中,小区育种收获机发挥着至关重要的作用。作为实现高效、精确收获的关键设备,小区育种收获机的性能直接关系到农作物的产量和质量。然而,在实际应用中,小区育种收获机在收获过程中常面临除杂效果不理想的问题[1-3],这不仅额外增加了后续处理的工作负担,还可能对农作物的品质产生负面影响。

目前,奥地利 Wintersteiger 公司、丹麦 Haldrup 公司、美国 Almaco 公司等设计生产的小区育种收获机已经达到国际领先水平。国内对小区育种收获机的研究起步较晚,特别是对小区育种收获机除杂装置研究较少[4-6]。张宁[7]设计了一款新型鱼鳞振动筛清选装置,通过优化振动筛的排布形式及相邻鱼鳞筛之间的筛片开度,提升了清选效果。张帅[8]基于仿生学原理,以蚯蚓为仿生原型,设计了一种可实现筛上玉米脱出物快速推送的仿生筛清选装置,实现了对大喂入量玉米脱出物的清选。郝超等[9]利用 Fluent - EDEM 耦合技术对玉米小区收获机旋风分离清选系统进行分析,研究了旋风分离清选系统分选筒高度、入料口直径、风速各因素对玉米杂质清选效果的影响规律,探明了各影响因素的最佳数据组合;穆培良[10]通过刚柔耦合,研发出一种聚脲弹性清选筛,并采用 CFD - DEM 耦合仿真技术对弹性清选筛进行仿真优化,得出最佳设计参数,显著提升了玉米籽粒收获的产量和质量;武振超[11]利用 CFD - DEM 耦合技术对比了平面、凸面、凹面 3 种编织筛的气流场及不同区域筛分特点,结合 3 种清选筛特点,设计出一种正弦曲线筛型筛面,有效提高了籽粒清洁率,降低了籽粒损失率。

国内小区育种收获机普遍采用旋风分离筒作为二级除杂装置,但其存在体积大、测产精度低等缺陷[12]。针对这些问题,本课题组提出了一种新型小区育种二级除杂装置——翼型曲面除杂装置[13]。该装置具有体积小、空间利用率高的优点,并通过优化流场结构,有效解决了传统旋流竖直清选导致的测产精度低的问题。然而,该装置在柯恩达效应作用带末端存在气流扩散现象,导致翼型曲面出口处带宽增加、流速降低,同时流场局部出现旋涡,使得流场结构复杂化,部分颖壳难以随气流排出。为了克服这些问题,进一步提高装置的除杂效率,需要引入辅助装置与翼型曲面结构协同工作。为此,本文以小麦小区育种收获为例,设计一种用于除杂装置的辅助板。该辅助板利用籽粒与颖壳的偏转特性,结合翼型曲面结构,通过优化设计缩短柯恩达效应作用带末端的带宽,改善流场结构,从而提升除杂效率,保证小麦籽粒的纯净度,并降低后续作物处理的难度。

1 除杂装置主要结构与工作原理

除杂装置在小区育种机械中,起到对收获的一级清选脱出物进行二级除杂的作用。该装置基于气流的柯恩达效应[13],利用脱出物中颖壳等轻质杂质物与小麦籽粒悬浮特性之间的显著差异,通过合理调整气流运动方向,使轻质杂质的运动状态发生显著变化,而小麦籽粒保持原有的运动状态,进而实现小麦籽粒与轻质杂质的有效分离。

图 1 为除杂装置的主要结构。在装置运作过程中,一级脱出物随着气流通过输送管到达引流板和翼型曲面前端,气流在柯恩达效应下紧贴壁面流动,于翼型曲面处形成柯恩达效应作用带,该作用带显著影响脱出物的运动状态。质量较小的颖壳杂质随气流向出口运动,而质量较大的小麦籽粒运动状态改变较小,仍向集粮仓运动,从而实现轻质杂质的分离,如图 2 所示。在此过程中,起到分离作用的关键结构是翼型曲面,其通过多弧段曲线设计使气流速度加快并产生偏转,利用杂质与籽粒在偏转气流下运动轨迹的差异实现分离。然而,仅依靠翼型曲面的附壁作用无法彻底清除杂质,辅助板成为装置不可或缺的一部分,亦是形成柯恩达效应带的关键结构之一。杂质在柯恩达效应带内发生偏转后,无法直接在气流作用下被清除,需与辅助板碰撞后改变

运动方向，方能从出口排出。因此，设计辅助板结构的目的是有效清除杂质和增强曲面末端柯恩达效应带的强度。

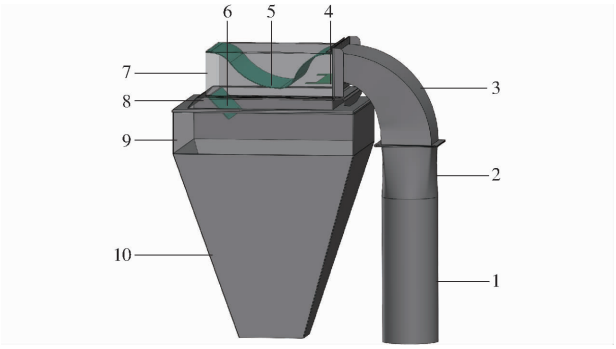


图 1　小区收获机除杂装置结构示意图

Fig. 1　Structural diagram of impurity separating device of plot harvester

1. 圆形输送管　2. 圆转方连接管　3. 导向输送管　4. 稳流板　5. 翼型曲面　6. 辅助板　7. 清选仓外壳　8. 曲面基座　9. 落料仓侧板　10. 集粮仓侧板

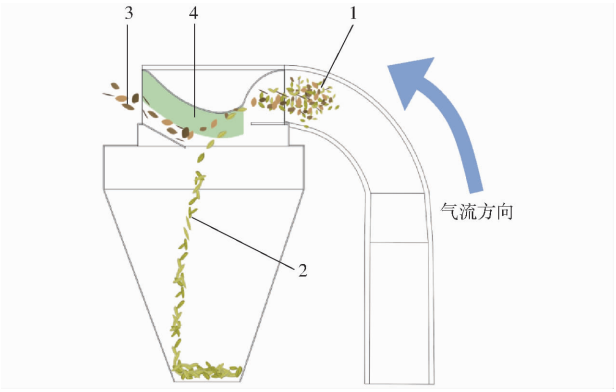


图 2　分离过程示意图

Fig. 2　Separation process

1. 一级脱出物　2. 小麦籽粒　3. 颖壳杂质　4. 柯恩达效应带

2　数值仿真

本文采用 CFD－DEM 方法进行数值仿真。在流场分析方面，通过求解控制方程揭示流场的变化规律，控制方程[14－16]为：

连续性方程

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

动量方程

$$\rho\left(\frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + (\boldsymbol{u}\cdot\nabla)\boldsymbol{u}\right) = -\nabla p + \mu\nabla^2\boldsymbol{u} + F \tag{2}$$

能量方程

$$\rho c_p\left(\frac{\partial T}{\partial t} + (\boldsymbol{u}\cdot\nabla)T\right) = -\nabla(k\nabla T) + q \tag{3}$$

式中　ρ——流体密度，kg/m^3

t——时间，s

$\boldsymbol{u}$——流体速度，m/s

p——压力，Pa

μ——动力粘度，Pa·s

F——作用于流体的体积力，N

c_p——比热容，J/(kg·K)

T——温度，K

k——热导率，W/(m·K)

q——热源项，W

图 3 详细展示了单颗粒在气流中的受力分析，其中 M_C 为颗粒质心。颗粒相的控制方程为

$$m_w\frac{\partial \boldsymbol{u}_s}{\partial t} = \boldsymbol{G} + \boldsymbol{F}_D + \boldsymbol{F}_L + \boldsymbol{F}_M + \boldsymbol{F}_C \tag{4}$$

$$\frac{\partial \omega_w}{\partial t} = \frac{T_w}{I_w} \tag{5}$$

式中　m_w——颗粒质量，kg

$\boldsymbol{u}_s$——颗粒速度，m/s

$\boldsymbol{G}$——颗粒重力，N

$\boldsymbol{F}_D$——颗粒受到流体曳力，N

$\boldsymbol{F}_L$——升力，N

$\boldsymbol{F}_M$——马格努斯力，N

$\boldsymbol{F}_C$——颗粒碰撞受到的合外力，N

ω_w——颗粒角速度，rad/s

T_w——总力矩，N·m

I_w——转动惯量，kg·m^2

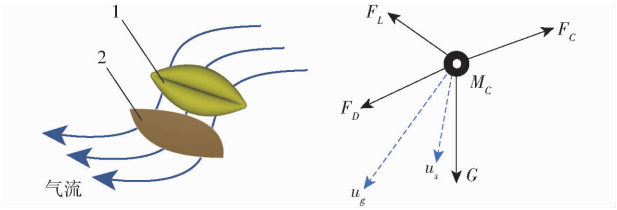


图 3　颗粒受力分析

Fig. 3　Particle force analysis

1. 小麦籽粒　2. 颖壳杂质

小麦籽粒和颖壳杂质在与辅助板碰撞后的受力情况，与单气流作用下的情形显著不同，具体碰撞受力分析如图 4 所示。颖壳杂质与板面发生斜向碰撞[17]，由此产生扭矩，导致颖壳杂质旋转，进而改变了颗粒的运动轨迹，使其产生较大的反弹高度和速度，有利于杂质颗粒向上运动并从装置出口分离。相比之下，大部分小麦籽粒因偏转角差异而直接进入落料区，而剩余的小部分小麦籽粒与板面发生非弹性正碰撞[18]，在沿平板滑动一段距离后，以与入射方向相反的速度反弹，最终在重力作用下，同样进入落料区。

在流固耦合过程中，针对颗粒接触的模型选择，本文采用 Hertzian spring－dashpot 模型作为法向力接触模型，Mindlin－Deresiewicz 模型作为切向力接触模型，而 JKR 模型则用于描述粘性力作用。

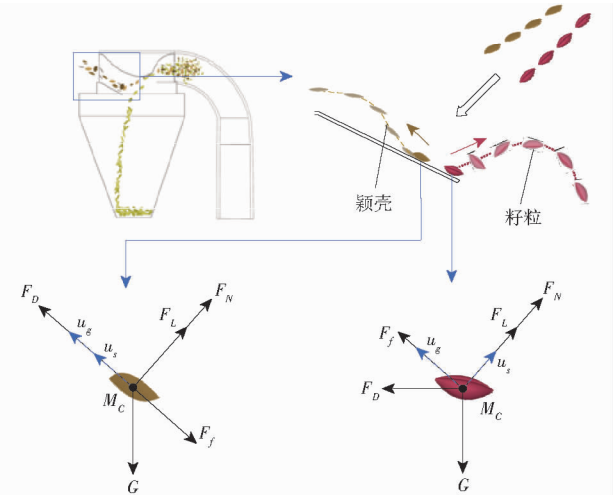


图 4 小麦籽粒和颖壳杂质受力分析

Fig. 4 Force analysis diagram of wheat grain and glume

3 除杂系统辅助板设计

柯恩达效应带区域的杂质清选过程分为两步，如图 5 所示，首先，实现分离：在分离区，利用柯恩达效应带气流对杂质和籽粒的不同作用力，产生不同的颗粒偏转角，从而将杂质与籽粒有效分离。其次，进行杂质排出：在除杂区，杂质与籽粒分离后，与辅助板发生斜向碰撞，并在柯恩达效应带的气流作用下，通过出口排出。

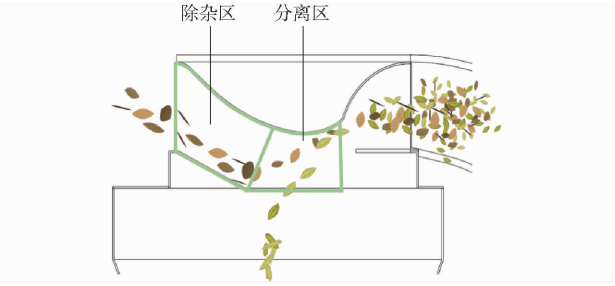


图 5 分离区与除杂区示意图

Fig. 5 Schematic diagram of separation zone and removal zone

若无辅助板与杂质碰撞以改变其运动方向，装置的除杂效率将显著降低，仅有少量微小杂质能在气流作用下排出。因此，辅助板的设计在除杂过程中起着至关重要的作用。

3.1 辅助板角度

辅助板角度设计的关键参数为小麦籽粒和颖壳杂质在分离区时的颗粒偏转角。颗粒偏转角定义为颗粒在流体中运动时，其轨迹与初始直线轨迹之间的夹角。这一角度通常由颗粒与流体之间的相互作用力[19-20]所引起。在本除杂装置中，其示意如图 6 所示。

在气流输送与几何约束共同作用下，小麦脱出物抵达偏转点，该点所处区域受柯恩达效应影响。

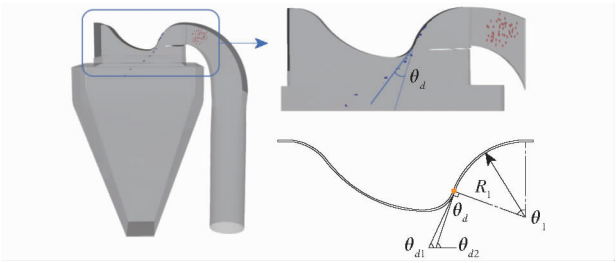


图 6 颗粒偏转角示意图

Fig. 6 Schematic of particle deflection angle

此时，颗粒的轨迹方向与原本的沿曲面切线向下的方向形成特定夹角，此夹角即为颗粒的偏转角，其计算式为

$$\theta_d = \theta_{d2} - \theta_{d1} \tag{6}$$

式中 θ_d——颗粒偏转角，(°)

θ_{d2}——偏转区圆弧切线与水平方向夹角，(°)

θ_{d1}——颗粒偏转轨迹在偏转点处的切线与水平方向夹角，(°)

由于脱出物各组分的悬浮特性存在差异，在气流作用下，它们会产生不同的颗粒偏转角。为了实现有效除杂，必须确保所有的杂质与辅助板发生斜向碰撞，而籽粒不与辅助板接触。因此，辅助板自由端对应的偏转角度要严格控制在大于籽粒偏转角最大值且小于杂质偏转角最小值的范围内。

首先，需确定小麦籽粒与颖壳杂质在分离过程中的颗粒偏转角范围。由于颗粒在分离区发生偏转，而辅助板的主要功能在于除杂区的杂质清除及流场结构优化，在气流清选过程中，籽粒和杂质的偏转角主要由其自身的空气动力学特性（如尺寸、密度、形状、阻力系数）和气流速度决定。根据斯托克斯定律或牛顿阻力公式，颗粒的终端速度与质量、迎风面积直接相关，而辅助板仅改变气流方向，不改变颗粒的固有属性，因此辅助板对籽粒和杂质的偏转角并无直接影响。基于此，在无辅助板情况下，进行除杂装置气流清选过程的 CFD－DEM 耦合仿真试验。

本试验选用流体力学仿真软件 Fluent 进行流场建模。首先，对除杂装置的结构模型进行流道抽取，随后对所获得的流道模型进行优化处理。流场网格采用多面体-六面体核心网格（poly－hexcore），并对翼型曲面区域的网格进行局部细化。图 7 展示了流道模型及网格模型，流场设置具体条件见表 1。

针对颗粒建模，采用自定义模型导入的方法，将小麦籽粒及其颖壳杂质的三维模型直接导入离散元仿真软件 Rocky DEM 中。采用法向力接触模型 Hertzian spring－dashpot、切向力接触模型 Mindlin－

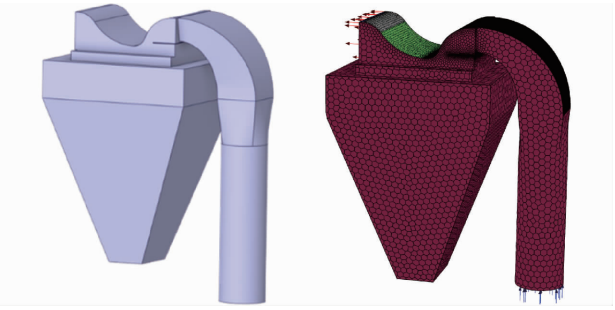


图 7　除杂装置流道模型和网格模型

Fig. 7　Impurity separation device flow channel model and mesh model

表 1　流场参数设置

Tab. 1　Flow field parameters setting

类别	参数	数值
湍流模型	Spalart－Allmaras[21－22]	
材料	空气密度	默认
入口边界	速度/(m·s^{-1})	45
出口边界	压力/kPa	101.325
瞬态计算	时间步长/s	0.000 1
	时间步数	5 000

Deresiewicz、粘结力接触模型 JKR。图 8 为小麦籽粒与颖壳的三维模型。表 2 为小麦籽粒、颖壳参数。表 3 为籽粒、颖壳和壁面在清选过程中各组分间的接触参数[23－24]。

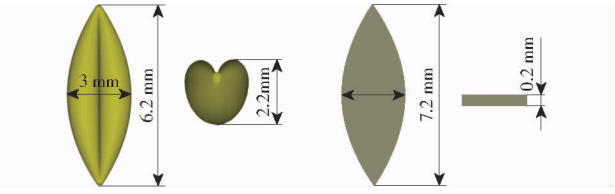


图 8　小麦籽粒与颖壳的三维模型

Fig. 8　3D modeling of wheat grain and glume

表 2　小麦籽粒和颖壳物理性质参数

Tab. 2　Wheat grain and glumes material parameters

参数	小麦籽粒	颖壳杂质
密度/(kg·m^{-3})	1 280	48.61
杨氏模量/(N·m^{-2})	1.014×10^{7}	2.8×10^{6}
泊松比	0.3	0.4
筛分直径/m	0.003	0.004

表 3　仿真试验接触参数

Tab. 3　Simulation experiment contact parameters

颗粒类别	接触对象	动摩擦因数	静摩擦因数	碰撞恢复系数
籽粒	籽粒	0.01	0.70	0.25
	颖壳	0.01	0.80	0.20
	壁面	0.01	0.58	0.30
颖壳	颖壳	0.01	0.65	0.21
	壁面	0.01	0.62	0.22

基于 CFD－DEM 耦合原理，利用 Fluent 和 Rocky DEM 仿真软件开展气固双向耦合试验，模拟了小麦脱出物从气力输送到分离落种的全过程。通过仿真试验，获取了小麦籽粒和颖壳杂质在各时间段的坐标值，并基于这些坐标值拟合出二者的轨迹方程。图 9 为 $t=0.036$ s 时，小麦籽粒坐标散点图与拟合轨迹。从图中可见，小麦籽粒因几何约束发生偏转进入分离区后，其整体轨迹受气流柯恩达效应影响较小，主要集中于偏转发生点的边界层区域。小麦籽粒的轨迹拟合方程为

$$y_1=a_1+b_1x \tag{7}$$

式中　a_1——截距　　b_1——斜率

式中 $a_1\in(-9.361,-8.963)$，$b_1\in(1.837,1.885)$。

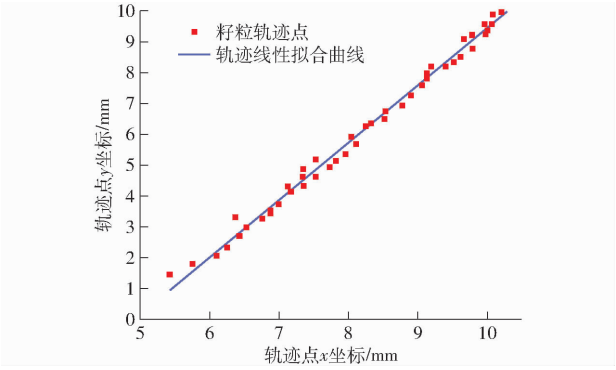


图 9　小麦籽粒坐标散点图与拟合轨迹

Fig. 9　Scatter plot of wheat grain coordinates and fitted trajectory

通过拟合轨迹方程，根据公式(6)计算得出小麦籽粒的偏转角范围为 3.87°～4.89°。

同理，通过对颖壳杂质坐标数据的处理，得到 $t=0.036$ s 时，颖壳杂质的偏转角范围为 27.12°～34.12°。图 10 为该时刻颖壳杂质的坐标散点图与拟合轨迹，拟合轨迹方程为

$$y_2=a_2+b_2x+cx^2 \tag{8}$$

式中　a_2、b_2、c——系数

式中 $a_2\in(4.863,5.047)$，$b_2\in(0.011,0.088)$，$c\in(0.040,0.047)$。

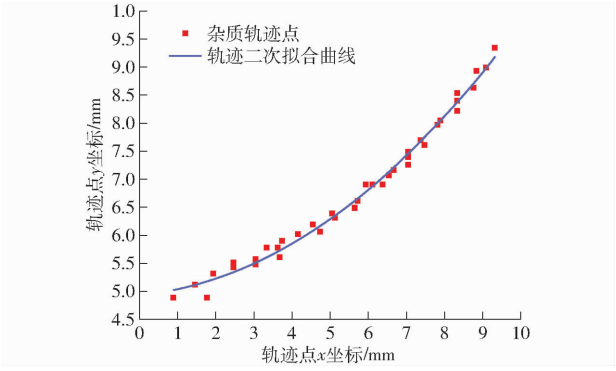


图 10　颖壳杂质坐标散点图与拟合轨迹

Fig. 10　Scatter plot of wheat glumes coordinates and fitted trajectory

依据辅助板角度范围的具体要求，综合考虑小

麦籽粒及其颖壳杂质的偏转角范围，最终确定辅助板自由端对应颗粒偏转角的范围为 4.89°～27.12°。

图 11 所示为辅助板自由端在除杂装置对称面内的可变区域，虚线代表偏转发生处流道圆弧的切线，即无气流作用时颗粒的正常运动轨迹。C 区表示辅助板整体角度范围与自由端对应偏转角范围的重叠区域，仅当辅助板自由端处于该区域时，除杂功能方能有效实现。

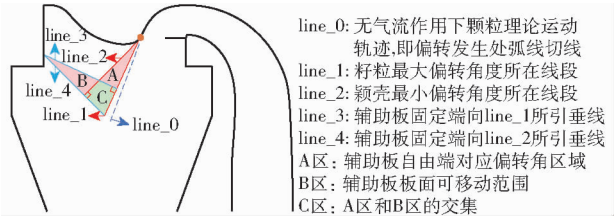


图 11 辅助板自由端可变化区域

Fig. 11 Variable area of free end of auxiliary plate

根据颗粒偏转角确定辅助板角度范围，旨在实现辅助板的除杂功能，具体角度需依据柯恩达效应带进行精确设定。图 12 展示在无辅助板作用下，竖直对称面的流线图，其中 line_5 所示的虚线表示柯恩达效应带的边界。为使流场分布更加均匀，辅助板的偏转角度应与该边界平行。通过测量分析，发现与 line_5 平行且自由端位于区域 C 的 line_6，其对应颗粒偏转角约为 25°。据此推断，当颗粒偏转角为 25°时，辅助板的角度最为理想。

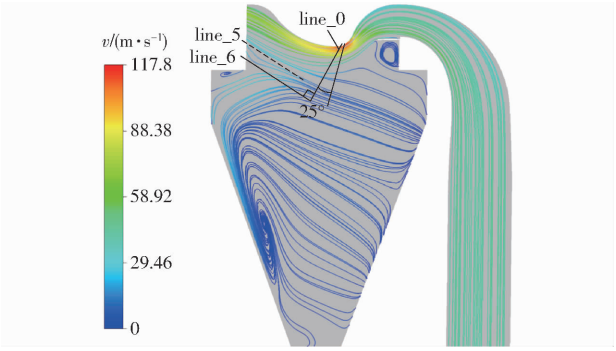


图 12 无辅助板下流场竖直对称面速度云图

Fig. 12 Velocity diagram of vertical plane of symmetry without auxiliary plate

3.2 辅助板长度

通过对辅助板角度设计的分析可知，辅助板自由端落在 C 区时，对小麦籽粒与颖壳杂质的分离效果最为显著。该区域同时也确定了辅助板的长度范围。当辅助板角度设定为 25°时，其长度 L 适宜范围为 155～200 mm。为此，L 选取 105、115、125、135、145、155、165、175、185、195 mm，进行仿真试验以验证其效果。

仿真试验的建立方法与 3.1 节所述类似，小麦籽粒与颖壳杂质颗粒的数量均设置为 50。典型时刻的籽粒与颖壳分离效果图，如图 13、14 所示。

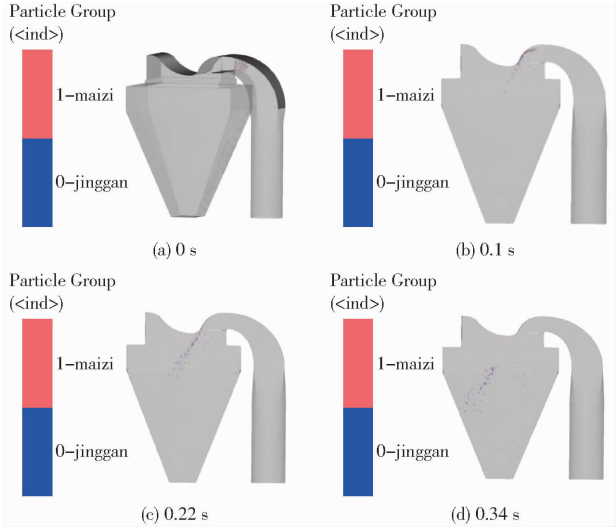


图 13 未安装辅助板时典型时刻分离效果图

Fig. 13 Diagrams of typical moment separation without installation of auxiliary plate

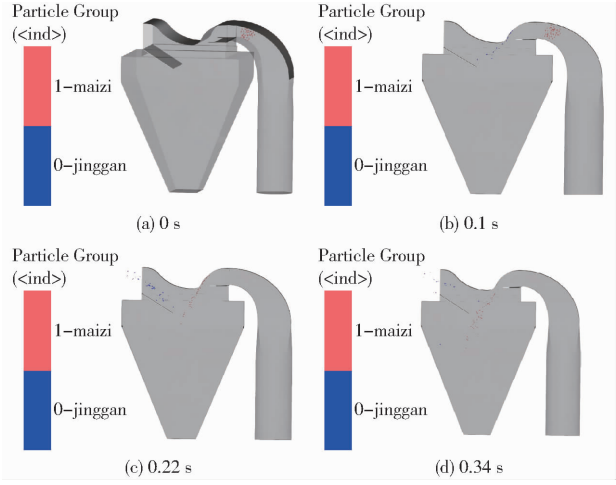


图 14 安装辅助板后典型时刻分离效果图

Fig. 14 Diagrams of typical moment separation after installation of auxiliary plate

对分离后各区域籽粒数和杂质数进行详细统计。表 4 展示了入口速度为 45 m/s 时，5 组仿真试

表 4 不同辅助板长度时小麦籽粒与颖壳杂质在各区域的数量统计

Tab. 4 Statistics on number of wheat grains and glumes in each region for different auxiliary plate lengths

辅助板	储存区		除杂区	
长度/mm	籽粒数	杂质数	籽粒数	杂质数
105	50	50	0	0
115	50	48	0	2
125	0	32	0	18
135	50	23	0	27
145	50	15	0	35
155	50	1	0	49
165	45	0	5	50
175	43	0	7	50
185	41	1	9	49
195	36	0	14	50

验中小麦籽粒与颖壳杂质在不同区域的数量分布情况。结果显示，储存区籽粒数量越多，除杂区杂质数量越多，这表明籽粒损失越少，装置的除杂效果更为显著。通过图 15 分析可知，辅助板越短，落在其上的籽粒数量越少，籽粒对辅助板清除杂质功能的影响也随之减小，同时还能确保杂质的分离效果。因此，在辅助板角度固定为 25°的情况下，辅助板长度在 C 区越短，其除杂效果越佳。

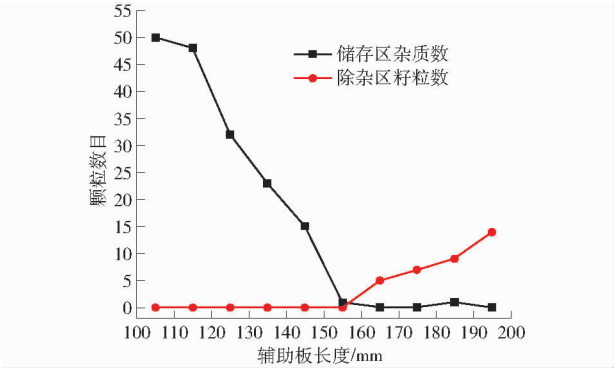


图 15　储存区杂质数和除杂区籽粒数随辅助板长度变化曲线

Fig. 15　Curves of variation of number of glumes in storage zone and number of grains in removal zone with length of auxiliary plate

3.3　辅助板高度

小麦籽粒和颖壳杂质的分离主要依靠气流对颗粒的作用。运动轨迹是实现小麦籽粒与颖壳杂质分离的重要运动学参数，不同的流场结构会导致两种颗粒的运动状态发生改变，因此，优化流场结构对提升分离效果有着至关重要的作用。

辅助板高度根据翼型曲面柯恩达效应作用带的流场结构来设计。小麦籽粒和颖壳杂质就是利用柯恩达效应速度带产生不同的运动方向和运动轨迹实现颗粒分离。

为了更好地解释本文装置的流场结构，定义了坐标系 $Oxyz$，如图 16 所示。以出口上缘中心位置点 P 为基准点，在基准点基础上定义原点 O，原点与基准点的位置关系已在图中标明，原点 O 与点 P 在 x 方向相距 173 mm，z 方向相距 354 mm，处于 y 轴原点位置。x 轴正向沿着装置长度方向向左，y 轴正向沿着装置宽度方向向后，z 轴正向沿着装置高度方向向下。

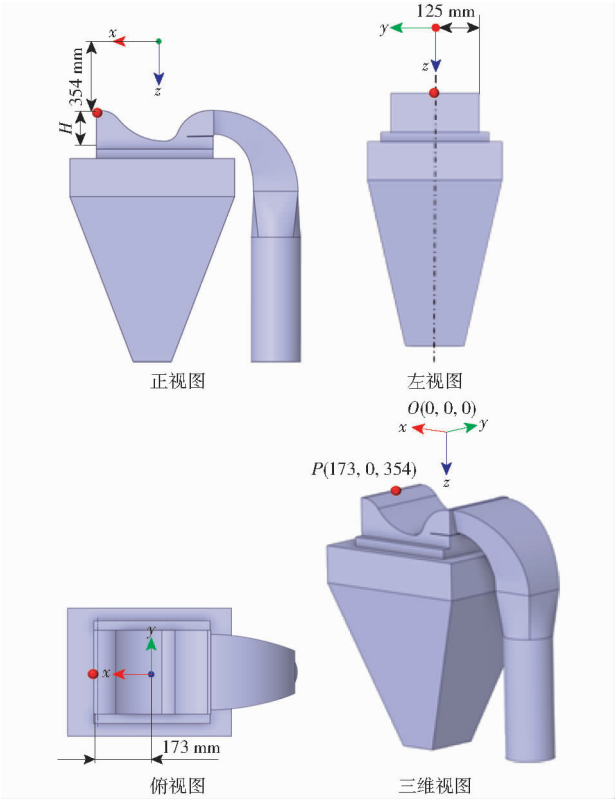


图 16　几何结构坐标图

Fig. 16　Diagram of geometric structure coordinate system

图 17 所示为在没有辅助板作用下，$y=0$、$y=0.04$ m、$y=0.06$ m 时除杂装置柯恩达效应带附近速度云图。整体上看，柯恩达效应作用带反映了翼型曲面对气流速度大小和方向的影响，由原来的均匀气流变为从近壁面向外逐渐减小的非均匀气流，非均匀气流对颗粒产生的压力差是影响颗粒运动的主要因素。柯恩达效应带起始处，气流的整体速度达到峰值，速度梯度较大，形成较大压力差，改变颗粒的速度方向；在接近气流出口处，柯恩达效应带尾流发生扩散现象，附壁效应减弱，部分高速气流产生斜向下的运动。在除杂装置实际运作时，这些气流会导致已经被分离的颖壳杂质在该气流作用下产生斜向下的运动，降低分离效果，因此，设置辅助板可以增强翼型曲面末端柯恩达效应强度，防止气流沿深度方向扩散。

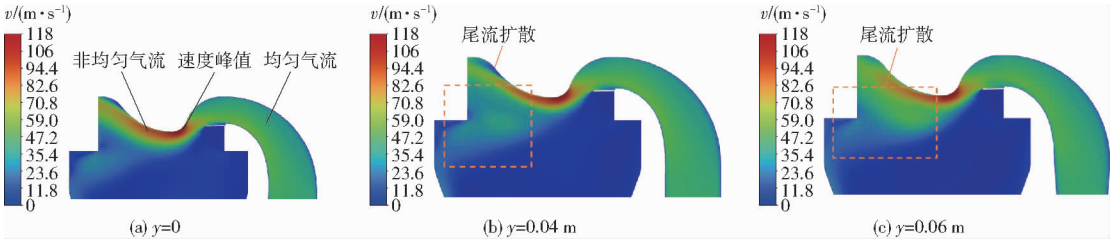


图 17　无辅助板时装置各竖直面速度云图

Fig. 17　Vertical velocity nephogram of the device without auxiliary plate

根据图 17 分析，当 $y=0$、$y=0.04$ m、$y=0.06$ m 时，柯恩达效应作用带末端扩散现象较为显著。为此，选取 3 个平面出口处的 4 条直线，具体位置为 $x=0.173$ m、$x=0.170$ m、$x=0.167$ m、$x=0.164$ m，如图 18a 所示。提取这些线段上的速度值，并绘制各线段上速度随 H 的变化图，H 表示线段上的点与出口顶端的距离，详见图 18b、18c、18d。H 在 0.1 ~ 0.15 m 内时，速度梯度达到最大值，该区域即为柯恩达效应带的边界。通过数据图分析，确定柯恩达效应带末端速度突变处对应 H 范围为 0.112 ~ 0.128 m，这一范围也正是辅助板固定端对应的 H 范围。H 选取 0.112、0.117、0.122、0.127 m，进行单流场仿真与气固耦合仿真试验，以探究不同辅助板高度对除杂效果的具体影响。

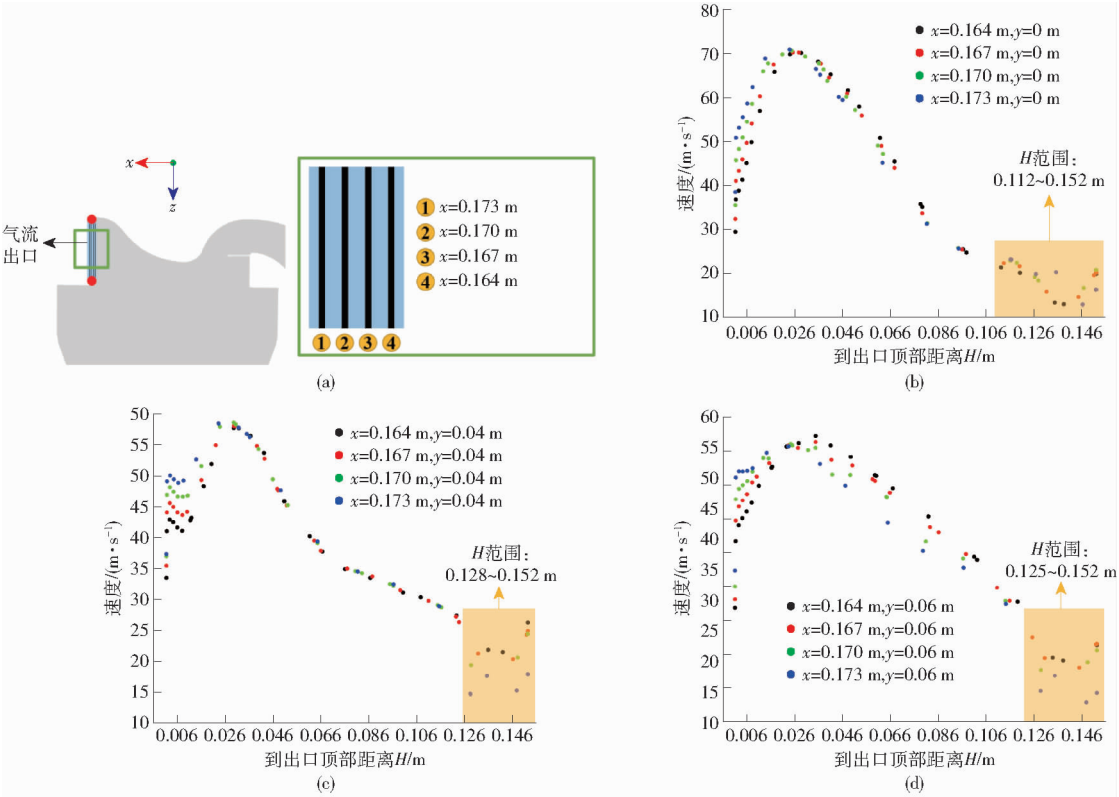


图 18 出口竖直方向速度随 H 变化值

Fig. 18 Velocity change of exit vertical direction with H

针对单流场仿真，图 19 ~ 21 展示了 H 为 0.112、0.117、0.122、0.127 m 时，竖直对称面的速度云图，从图中可以观察到，4 组试验的辅助板均起到了气流收集作用，减少了柯恩达效应带末端的气流扩散现象，验证了前述设计的可行性。

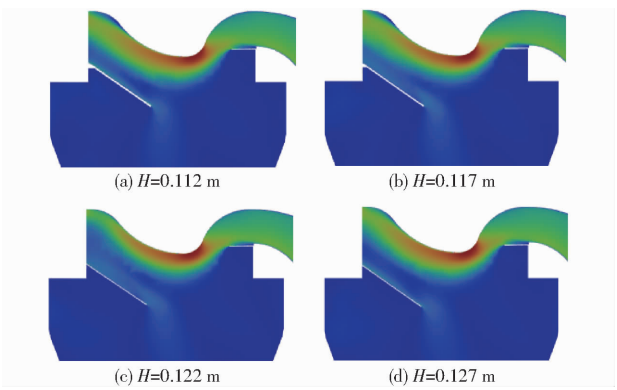


图 19 $y=0$ m 不同高度辅助板速度云图

Fig. 19 Velocity diagrams with different heights of auxiliary plate when $y=0$ m

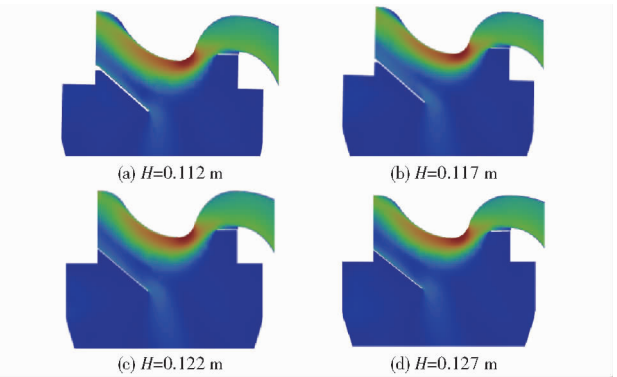


图 20 $y=0.04$ m 不同高度辅助板速度云图

Fig. 20 Velocity diagrams with different heights of auxiliary plate when $y=0.04$ m

针对气固耦合仿真，图 22 展示了 4 组试验在分离时刻的效果图。各组试验均展现出良好的分离除杂效果，具体的除杂情况需通过统计储存区籽粒数与分离区杂质数进行判断。表 5 提供了 4 组清选仿真试验的统计数据，数据显示，辅助板高度对除杂区

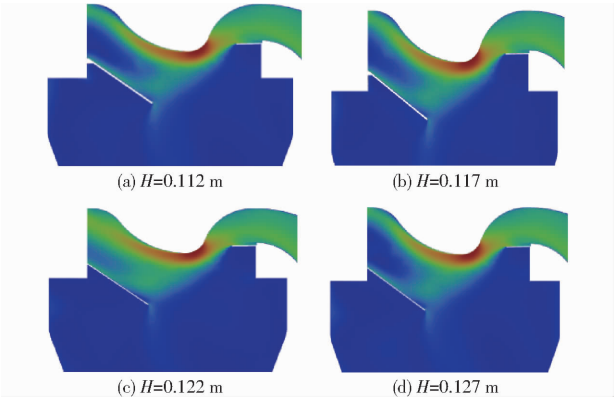


图 21　$y=0.06$ m 不同高度辅助板速度云图

Fig. 21　Velocity diagrams with different heights of auxiliary plate when $y=0.06$ m

的杂质数并无影响，所有杂质均被有效清除，储存区留下的籽粒数越多，表明籽粒损失越小，因此，当辅助板固定端 H 为 0.122 m 时，清选效果达到最佳。

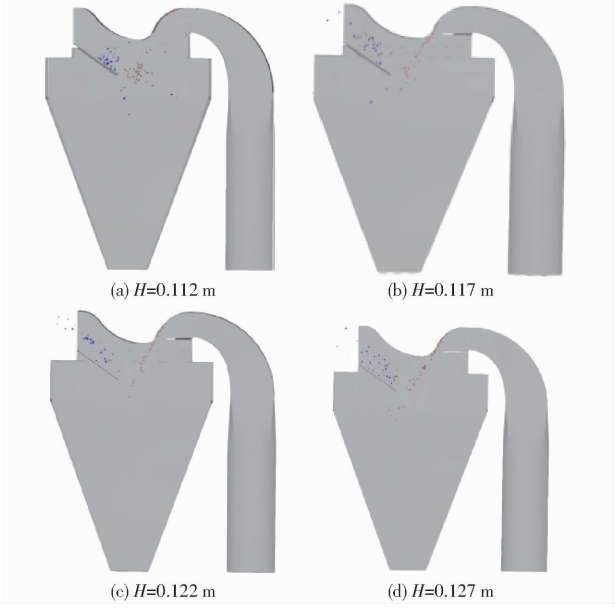


图 22　不同高度辅助板分离效果图

Fig. 22　Separation results of auxiliary plates of different heights

表 5　不同高度辅助板小麦籽粒与颖壳杂质在各区域的数量统计

Tab. 5　Statistics on number of wheat grains and glumes in each region for different auxiliary plate heights

参数		辅助板固定端高度 H/m			
		0.112	0.117	0.122	0.127
储存区	籽粒数	43	48	49	48
	杂质数	0	0	0	0
除杂区	籽粒数	7	2	1	2
	杂质数	50	50	50	50

采用不同角度、长度及高度的辅助板进行单流场仿真和 CFD－DEM 仿真试验，结果显示当辅助板自由端角度为 25°、长度为 155 mm、固定端 H 为 0.122 m 时，除杂装置的分离效果达到最佳。

4　台架验证试验

4.1　试验条件

为验证上述设计的装置辅助板能否达到预期的除杂效果，将配备辅助板的除杂装置安装在气力清选试验台上进行台架试验。具体装备如图 23 所示，除杂装置的圆形输送管通过螺纹管与螺旋输送器和风机连接。在实际运作过程中，通过调节风机风速和螺旋输送器转速，控制物料的喂入量和喂入速度。除杂装置的集粮仓下接测产称量系统，用于统计单个小区的小麦产量，为了便于观察小麦脱出物在气流输送和除杂过程中的运动状态与分离形式，导向输送管、清选仓外壳、落料仓侧板以及集粮仓均采用透明亚克力材料。

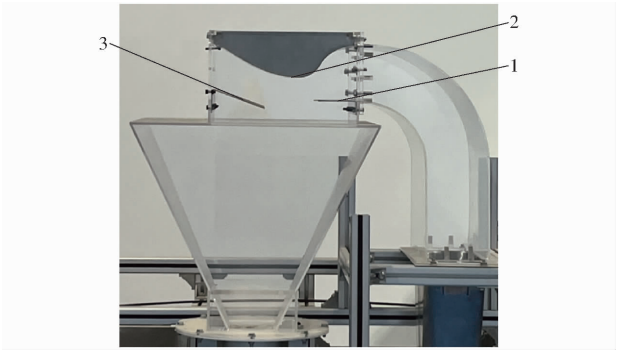


图 23　除杂系统试验台

Fig. 23　Impurity separation system test equipment

1. 引流板　2. 翼型曲面　3. 辅助板

4.2　试验材料与方法

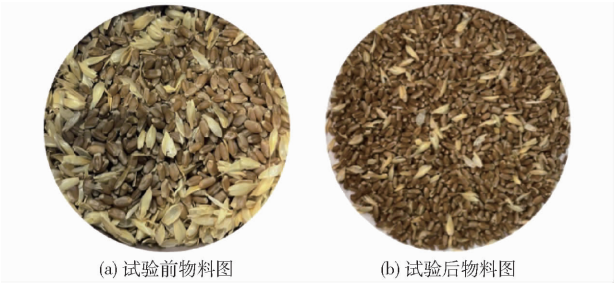
首先制备符合实际收获情况的一级小麦脱出物。试验前，在小区田收集一级清选得到的小麦脱出物，如图 24 所示。该脱出物包含小麦籽粒及部分颖壳杂质，其中短小秸秆在杂质中占比极低，不作为主要杂质研究对象，因此，采用分离筛对秸秆杂质进行处理，以获得与实际情况相符的小麦籽粒与颖壳杂质的一级脱出物。



图 24　一级清选后的小麦脱出物

Fig. 24　Wheat impurity mixture after primary cleaning

试验前,需将风机风速调至 45 m/s,以确保与仿真试验条件一致,并使用测速仪对入口风速进行精确验证。待流场稳定后,设置螺旋输送器喂入量为 3 kg/min,随后加入预先制备的小麦脱出物。1 min 后停止喂入并进行采样称量,此试验重复 5 次,试验前后小麦脱出物对比图如图 25 所示。计算籽粒含杂率,并取各次结果的平均值。试验得出 5 次结果为 1.02%、0.97%、0.93%、1.01%、1.06%,平均值为 0.998%。



(a) 试验前物料图 (b) 试验后物料图

图 25 试验前后物料对比图

Fig. 25 Material comparison before and after test

4.3 试验结果分析

采用基于柯恩达效应的新型二级除杂装置时小麦籽粒的含杂率约为 0.998%,采用旋风分离系统的二级除杂装置时小麦籽粒含杂率约为 2.34%[25],相比之下基于柯恩达效应的新型二级除杂装置除杂效果较好。由此可见,该装置符合使用标准,并具备有效的杂质清除功能。

5 结论

(1)基于翼型曲面除杂装置,对该装置中的辅助板角度、长度及高度 3 个关键参数进行设计与分析,有效降低了翼型曲面除杂装置的含杂率,并优化了除杂装置的流场结构,增强了装置内部流场的稳定性,从而提高了小区收获机的工作效率和测产精度。

(2)通过无辅助板时进行的 CFD-DEM 仿真试验,获取了小麦籽粒与颖壳杂质的颗粒坐标及轨迹拟合方程。经理论计算,确定了两组分颗粒在偏转发生处的偏转角范围为 4.89°~27.12°,结合颗粒入射偏转角度与柯恩达效应带边界,确定了辅助板角度为 25°。该方程及研究方法为后续不同作物的二级除杂装置设计提供了理论研究和依据。

(3)通过对除杂装置柯恩达效应带的测量以及内部流场结构分析,确定了辅助板的适宜长度和高度,有效解决了装置原有的气流扩散问题。

(4)台架试验结果表明,基于仿真试验得到的辅助板设计参数能够实现预期的除杂目标,籽粒含杂率为 0.998%,作业性能指标满足设计要求。

参 考 文 献

[1] 冯鑫. 玉米籽粒联合收获机清选装置的工作机理及结构优化设计研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2020.
FENG Xin. Research on the working mechanism and structural optimization design of the cleaning device of corn kernel combine harvester[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2020. (in Chinese)

[2] 邵永明. 玉米籽粒收获机低损伤脱粒装备设计与试验研究[D]. 合肥:安徽科技学院, 2020.
SHAO Yongming. Design and experimental study of low-damage threshing equipment for corn kernel harvester[D]. Hefei: Anhui Science and Technology University, 2020. (in Chinese)

[3] 赵学观, 徐丽明, 高连兴, 等. 基于 Fluent 的大豆脱粒机旋风分离器模拟与优化[J]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊 1):80-87.
ZHAO Xueguan, XU Liming, GAO Lianxing, et al. Fluent-based simulation and optimization of cyclone separator for soybean threshing machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp. 1): 80-87. (in Chinese)

[4] 王浩. 小区联合收获机的设计研究[D]. 太原:山西农业大学, 2023.
WANG Hao. Design and research of plot combine harvester[D]. Taiyuan: Shanxi Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[5] 邢高勇. 小区谷物联合收获机的智能调控系统研究[D]. 镇江:江苏大学, 2019.
XING Gaoyong. Research on intelligent control system of grain combine harvester in community[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019. (in Chinese)

[6] 欧佳顺. 小区水稻联合收割机脱粒清粮装置设计与试验[D]. 长沙:湖南农业大学, 2017.
OU Jiashun. Design and experiment of threshing and grain cleaning device for rice combine harvester[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[7] 张宁. 玉米籽粒收获机鱼鳞筛清选装置工作机理及优化分析[D]. 长春:吉林大学, 2022.
ZHANG Ning. Working mechanism and optimisation analysis of fish scale sieve cleaning device for corn kernel harvester[D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)

[8] 张帅. 玉米籽粒收获机蚯蚓仿生筛清选装置颗粒清选机理研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2023.
ZHANG Shuai. Research on particle cleaning mechanism of earthworm bionic sieve cleaning device for corn kernel harvester[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[9] 郝超，杨薇，李建东，等. 基于 Fluent－EDEM 耦合的旋风分离清选系统分析[J]. 农机化研究，2023，45(11)：43－48.
HAO Chao，YANG Wei，LI Jiandong，et al. Analysis of cyclone separation scavenging system based on Fluent－EDEM coupling[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2023，45(11)：43－48.（in Chinese）

[10] 穆培良. 玉米籽粒收获机械高净低损清选筛研究[D]. 长春：吉林大学，2020.
MU Peiliang. Study on high-net-low-loss cleaning sieve of corn grain harvesting machinery[D]. Changchun：Jilin University，2020.（in Chinese）

[11] 武振超. 玉米收获机曲面清选筛设计与试验[D]. 哈尔滨：东北农业大学，2019.
WU Zhenchao. Design and experiment of curved surface cleaning sieve for corn harvester[D]. Harbin：Northeast Agricultural University，2019.（in Chinese）

[12] 苗坤宏，崔彭帝，薛启隆，等. 金银花颗粒在旋风分离器中的流场数值模拟分析[J]. 中草药，2023，54(4)：1087－1097.
MIAO Kunhong，CUI Pengdi，XUE Qilong，et al. Numerical simulation analysis of flow field of honeysuckle particles in a cyclone separator[J]. Chinese Traditional and Herbal Drugs，2023，54(4)：1087－1097.（in Chinese）

[13] 鲍国丞，张振东，杨晓微，等. 基于康达效应的玉米小区收获机除杂装置设计与试验[J]. 农业机械学报，2024，55(10)：234－243.
BAO Guocheng，ZHANG Zhendong，YANG Xiaowei，et al. Design and experiment of separating impurities device for corn plot test harvester based on Coanda effect[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2024，55(10)：234－243.（in Chinese）

[14] CHRISTIAN K. Application of coupled CFD－DEM simulation to separation process in combine harvester cleaning devices[M]. Springer，Berlin Heidelberg，2020：52－66.

[15] DZIUBAK T，LESZEK Bąkała. Computational and experimental analysis of axial flow cyelone used for intake air filtration in interal combustion engines[J]. Energies，2021(14)：2285.

[16] 禹言芳，石博文，孟辉波，等. 基于 CED－DEM 算法的气力输送气固两相流特性分析[J]. 化工进展，2024，43(3)：1133－1144.
YU Yanfang，SHI Bowen，MENG Huibo，et al. Characterization of gas-solid two-phase flow for pneumatic conveying based on CFD－DEM algorithm[J]. Chemical Industry and Engineering Progress，2024，43(3)：1133－1144.（in Chinese）

[17] 巴涵，周甲伟，郭小乐，等. 水平转竖直弯管粗颗粒气力输送特性数值模拟[J]. 液压与气动，2023，47(3)：43－50.
BA Han，ZHOU Jiawei，GUO Xiaole，et al. Numerical simulation of pneumatic conveying characteristics of coarse particles from horizontal to vertical bends[J]. Chinese Hydraulics & Pneumaties，2023，47(3)：43－50.（in Chinese）

[18] 陈国良. 颗粒力学：基础与前言[M]. 北京：科学出版社，2013.

[19] LI X，SUN Z，WANG H，et al. Particle motion under turbulent eddies：inspiration for fine minerals flotation[J]. Chemical Engineering Science，2025，301：120754.

[20] 党贺，赵宝生，马学东，等. CFD－DEM 耦合的旋风式谷物清选装置的模拟研究[J]. 中国农机化学报，2020，41(4)：86－91，168.
DANG He，ZHAO Baosheng，MA Xuedong，et al. Simulation study of CFD－DEM coupled cyclone grain cleaning device[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization，2020，41(4)：86－91，168.（in Chinese）

[21] TRANCOSSI M. Mathematical modeling of Coanda effect[C]//SAE 2013 AeroTech Congress & Exhibition，2013.

[22] BURKOV A，GLUSHKOV A，LAZYKIN V，et al. Substantiation of the main design parameters of the separation chamber of the pneumatic separator using various methods for calculating particle trajectories in the pneumoseparating channel[J]. Agricultural Science Euro-North-East，2022，23(3)：402－410.

[23] 张文龙，武文斌，吕少杰，等. 制粉中的小麦力学参数和接触参数试验标定[J]. 河南工业大学学报(自然科学版)，2023，44(2)：105－112.
ZHANG Wenlong，WU Wenbin，LÜ Shaojie，et al. Experimental calibration of mechanical and contact parameters of wheat in milling[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)，2023，44(2)：105－112.（in Chinese）

[24] 孙延新，王明旭，张超. 小麦与输送机皮带接触参数的试验标定[J]. 河南工业大学学报(自然科学版)，2021，42(6)：113－120.
SUN Yanxin，WANG Mingxu，ZHANG Chao. Experimental calibration of contact parameters between wheat and conveyor belt[J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)，2021，42(6)：113－120.（in Chinese）

[25] 金鑫，杜新武，甘帮兴，等. 小型联合收获机旋风分离系统清选性能试验[J]. 农业机械学报，2016，47(5)：99－105.
JIN Xin，DU Xinwu，GAN Bangxing，et al. Cleaning performance test of cyclone separation system of small combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(5)：99－105.（in Chinese）