

基于康达效应的玉米小区收获机除杂装置设计与试验

鲍国丞^{1,2} 张振东^{2,3} 杨晓微⁴ 刘立晶² 李建东² 吕洲翼² 杨薇^{2,3}

(1. 青岛农业大学机电工程学院, 青岛 266109; 2. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083;

3. 山东省主要农作物机械化生产装备协同创新中心, 青岛 266109; 4. 中国农业大学理学院, 北京 100091)

摘要: 为了提高玉米小区收获机二级除杂作业效率和质量, 解决传统清选除杂装置体积大、流场稳定性差、流场稳定所需时间长等问题, 本文基于气流康达效应设计了一种翼型曲面除杂装置, 并结合流场理论分析及计算流体力学与模拟离散元法(CFD-DEM)耦合仿真试验确定其结构参数。通过对流场中的颗粒进行受力分析得知, 曳力加速度主要受颗粒密度与直径的影响。设置单因素试验研究该装置对不同密度、不同直径的颗粒混合物分离效果, 拟合得出颗粒各密度、直径与其轨迹线偏转角的关系方程。通过台架试验验证该装置对玉米脱出混合物中轻质杂质分离功能的可行性, 试验结果表明籽粒含杂率低至1.014%, 作业性能指标满足设计要求。

关键词: 玉米; 小区收获机; 康达效应; 除杂装置; CFD-DEM耦合仿真

中图分类号: S225.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)10-0234-10

OSID:



Design and Experiment of Separating Impurities Device for Corn Plot Test Harvester Based on Coanda Effect

BAO Guocheng^{1,2} ZHANG Zhendong^{2,3} YANG Xiaowei⁴ LIU Lijing² LI Jiandong² LÜ Zhouyi² YANG Wei^{2,3}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China

3. Collaborative Innovation Center for Shandong's Main Crop Production Equipment and Mechanization, Qingdao 266109, China

4. College of Science, China Agricultural University, Beijing 100091, China)

Abstract: A device with a wing-shaped curved surface was designed to separate impurities based on the principle of the Coanda effect. The device improved the operational efficiency and separation quality of the second-stage impurity separation device of a corn breeding plot harvester. Moreover, the device solved some problems of conventional devices for cleaning and separating impurities, such as large size, poor flow field stability, and long time to stabilize the flow field. The structural parameters of the device were determined by the theoretical analysis of the gas flow field and the simulation tests by using computational fluid dynamics and discrete element method. Particles in the flow field experienced complex forces, among which the trailing force was the most effective for separating small particles. The magnitude of particle trailing acceleration was mainly influenced by particle density and diameter. Therefore, two sets of single-factor tests were conducted to investigate the separation effect of the device on particle mixtures with different densities and diameters, respectively. By analyzing the experimental results of the single-factor tests, the relationship equations between the density particles and their streamline deflection angles and the relationship equations between the diameter particles and their streamline deflection angles were obtained. Finally, the bench test results showed that the wing-shaped curved surface impurity separation device had a feasible separation function for the light impurities in the mixture after corn threshing. The bench test data indicated that the impurity content of corn kernels was as low as 1.014%, and the operational performance index of this device met the expected design requirements.

Key words: corn; plot test harvester; Coanda effect; separating impurities device; CFD-DEM coupling simulation

收稿日期: 2023-12-21 修回日期: 2024-02-25

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项目和国家重点研发计划项目(2023YFD2000400)

作者简介: 鲍国丞(1996—),男,博士生,主要从事农业机械设计及理论研究,E-mail: baogc0229@163.com

通信作者: 杨薇(1984—),女,高级工程师,主要从事农业机械设计及应用研究,E-mail: yangwei@caams.org.cn

0 引言

玉米小区收获机是玉米育种环节中的重要装备,其收获籽粒的净度影响小区育种试验测产数据的准确性。目前玉米小区收获机设置两级清选除杂环节,一级清选一般由脱粒清选筛将玉米脱出混合物中碎秸秆、碎芯轴等大块杂质筛出;二级清选多采用旋风分离器分离轻质杂质与灰尘。文献[1-3]借助仿真分析等手段对旋风分离器的结构参数及内部流场特征等进行分析研究,但该装置存在清除率偏低、结构尺寸大等问题^[4-6]。

目前,气流的康达效应特性被广泛应用于工业、化工中粉尘与超微粉尘的分级与过滤等环节^[7-8]。崔悦等^[9]设计了一种松香粉尘处理装置,利用导流风罩引导粉尘气流产生康达效应流经多层过滤床实现有效除尘;赵乾坤^[10]通过数值仿真等手段对基于康达效应的新式除尘风机进行结构设计,优化矿井巷道的降尘效果;胥海伦等^[11]采用有限容积法对射流分级机中微粒运动进行数值模拟,证明射流分级机可以有效地对直径较小的超微粉进行高精度分级。综合以上研究可知,利用康达效应实现玉米籽粒收获过程中的轻质杂质分离具备可行性,基于康达效应的翼型曲面除杂装置利用气流附壁特性实现玉米籽粒与轻质杂质的高效分离,可以更好地满足玉米小区收获机布局紧凑、净度高的要求。但是玉米脱出物中的轻质杂质颗粒相较于粉尘体积偏大,因此本研究重点对翼型曲面除杂装置结构形式及功能原理开展分析,获得较优结构的输送偏转管路及可分离较大杂质的气流引导翼型曲面,以期提高玉米小区收获机二级清选除杂装置的作业性能。

针对上述问题,本文设计一种基于康达效应的翼型曲面除杂装置,研究高速气流对约束环境下不同密度颗粒混合物的选择性分离行为及机制,进一步丰富气力式小区收获机的脱粒混合物可控分离理论与方法,为作物籽粒二次除杂与富集提供技术思路。

1 整体结构与工作原理

1.1 整体结构

二级清选除杂装置安装于测产系统上部,完成玉米脱出物中轻质杂质与灰尘的分离作业(图1)。目前市场上玉米小区收获机多采用旋风分离器作为轻质杂质的清选装置。此类清选装置依靠气流及物料切向注入造成的旋转气流使密度及质量较大颗粒在离心力的作用下脱离气流,轻质颗粒被气旋裹挟

排出^[6]。为了获得较好的分离效果,旋风分离器往往需要具备较大的体积(长径比)和较长清选时间,因此此类清选装置制约着玉米小区收获机机型尺寸、部件布局与作业效率^[12-14]。

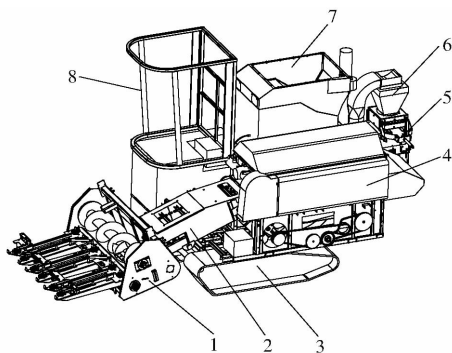


图1 玉米小区收获机结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of combine harvester in corn plot
1. 割台 2. 过桥输送器 3. 行走底盘 4. 脱粒清选装置 5. 测产装置 6. 二级清选除杂装置 7. 粮仓 8. 驾驶室

设计的二级清选除杂装置如图2所示,包括风机、文丘里输送管、翼型曲面除杂装置、测产装置等。利用输送气流产生康达效应的特点解决传统二级清选除杂装置空间占用率大与清选效率低的问题。

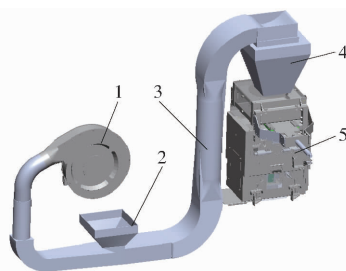


图2 二级清选除杂装置结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of the secondary cleaning device

1. 风机 2. 文丘里输送管 3. 输送管 4. 翼型曲面除杂装置 5. 测产装置

1.2 康达效应与翼型曲面除杂装置

当自由射流或壁射流如图3贴壁流动,由于流体粘性,近壁面的流体流速降低,导致射流偏离原本的流动方向,改为沿着凸出表面流动的现象,此现象称为康达效应,也称附壁效应或柯恩达效应。在康达效应产生时,射流对周围流体有卷吸作用,而且近壁面流体速度的减缓和流线方向的改变使得射流偏转外侧的气流压力大于射流内侧和曲面交界处的压力,压力差是射流产生附壁流动的原因。当2倍射流宽度 L_x 小于偏转壁面半径 R_x 时则会产生康达效应。

基于康达效应的翼型曲面除杂装置主要由输送管、稳流板、气流偏转面、气流引流面、辅助引导板等部分组成,如图4所示。按照翼型曲面除杂装置不

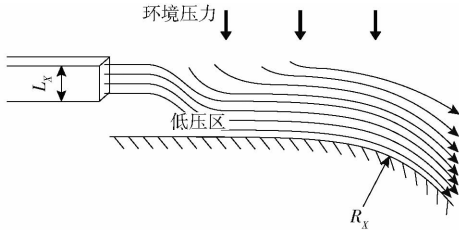


图3 康达效应原理图

Fig.3 Schematic of Coanda effect

同区域的功能,可将其划分为输送区、偏转区、分离区与储存区。工作时,玉米脱出混合物被输送气流通过输送管道喷射至翼型曲面除杂装置中,在偏转区翼型表面引导气流偏转并加速,利用作物籽粒与短茎秆、轻杂余等颗粒在跟随气流通过分离区翼型曲面时具有不同惯性迁移的特性^[15],使得大密度的籽粒较小地改变迁移速度,在重力作用下脱离气流沉降至储存区的存粮仓;短茎秆、轻杂余等悬浮性较好的轻质颗粒沿翼型曲面附壁绕行,较大地改变迁移方向,随附壁气流排出,从而实现清选除杂作业以获得净度较高的收获物。通过对装置内流场仿真分析表明,存粮仓体积与形状变化对流场流型影响较小,即该装置相较于传统旋风分离器体积更小、结构简单、流场稳定,适用于玉米籽粒收获机械,满足玉米小区收获机对空间利用高的需求。

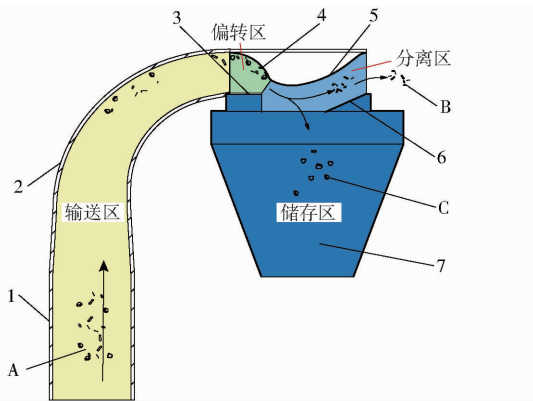


图4 翼型曲面除杂装置结构示意图

Fig.4 Structure diagram of airfoil surface decontamination device

1. 竖直输送管道 2. 圆转方导向输送管道 3. 稳流板 4. 气流偏转面 5. 气流引流面 6. 辅助引导板 7. 存粮仓
- A. 玉米脱出混合物 B. 轻质杂质 C. 玉米籽粒

2 翼型曲面除杂装置结构设计

2.1 输送作业运动学分析与结构设计

翼型曲面除杂装置输送区主要完成玉米混杂物的向上输送并引导其水平偏转功能^[16]。玉米小区收获作业时,由于小区间作业存在相互独立性,玉米脱出物流量存在周期性与阶段性变化。根据2023

年隆平高科济源试验站玉米小区测产数据测算,输送管道内玉米籽粒峰值流量最大可达0.5 kg/s,根据公式

$$Q_n = \frac{W_n}{\rho_q} \quad (1)$$

$$W_n = \lambda \frac{W_f}{\mu} \quad (2)$$

$$Q_n = \frac{\pi D_l^2}{4} v_q \quad (3)$$

式中 Q_n ——所需风量, m^3/s

W_n ——单位时间输送气流质量, kg/s

ρ_q ——标准大气压下空气密度, kg/m^3

W_f ——单位时间输送种子质量, kg/s

μ ——单位时间内种子与气流混合比,低压稀相流输送混合比范围为1~10,由于颗粒较少取1.8

λ ——安全系数,为保证脱出物流量突变不堵塞管道,取2

D_l ——输送管直径, mm

v_q ——输送风速,取20 m/s

计算后选用输送管直径 D_l 为170 mm 。

为避免玉米籽粒在输送过程中与偏转管壁发生磕碰造成籽粒动能损耗、籽粒回落拥堵的问题,管型变化过渡选用内切平滑设计。如图5所示,输送管在由圆形截面A-A经由矩形截面B-B过渡为矩形截面C-C时截面积相等,避免了管道内由于横截面积突变导致的输送流场不稳定进而造成料栓堆积问题^[17]。

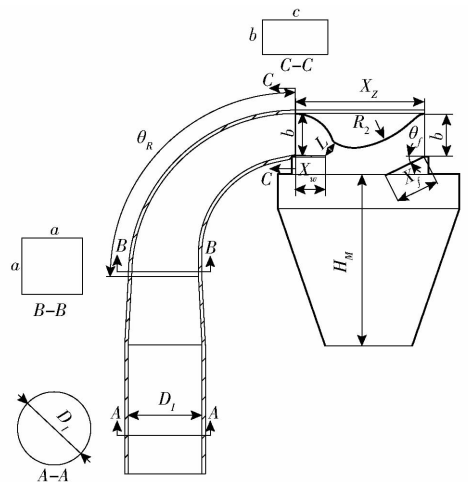


图5 翼型曲面除杂装置结构参数示意图

Fig.5 Structural parameter diagram of airfoil surface decontamination device

玉米脱出物输送过程中关键位置受力分析如图6所示。由于颗粒与流场相互影响,导致流场内流态变化较为复杂,特别是在转弯输送时颗粒同时

受离心作用和复杂紊流的影响^[18], 颗粒间冲击碰撞加剧, 连续的冲刷也降低弯管使用寿命。颗粒在输送段末端时在管壁作用下实现竖直方向速度衰减至零, 水平方向速度由零增大的运动规律。由牛顿第二定律得输送区颗粒运动及受力方程为

$$m_a \frac{dv_a}{dt} = F_D + F_p + F_M + G + F_v + F_f + F_N \quad (4)$$

$$J_c \frac{d\omega_c}{dt} = T_c \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_f \rho_q v_f) + \nabla(\alpha_f \rho_q v_f v_f) = \\ -\alpha_f \nabla p + \nabla(\alpha_f T_f) + \alpha_f \rho_q g + F_{p \rightarrow f} \end{aligned} \quad (6)$$

式中 m_a ——颗粒质量, kg
 v_a ——颗粒的瞬时速度, m/s
 F_D ——流体曳力, N
 F_p ——压力梯度力, N
 F_M ——马格努斯升力, N
 G ——颗粒重力, N
 F_v ——虚拟质量力, N
 F_f ——摩擦力, N
 F_N ——支持力, N
 J_c ——颗粒转动惯量, kg·m²
 ω_c ——角速度, rad/s
 T_c ——总力矩, N·m
 α_f ——气体体积分数
 T_f ——气体应力张量
 p ——气体压强, Pa
 $F_{p \rightarrow f}$ ——流体相与颗粒相相互作用产生的动量源项
 g ——重力加速度, m/s²
 v_f ——流场内作用于颗粒的流体微团速度, m/s

流体压力, 而气力输送过程中的颗粒旋转不显著, 因此可以忽略马格努斯升力, 颗粒在管道内输运主要由流体曳力主导。支持力作为向心力使颗粒完成转向, 在转向过程中颗粒与管壁摩擦产生阻力。因此在流体中颗粒所受力计算式为^[19]

$$F_D = m_a \frac{v_g - v_a}{\Gamma_r} = \frac{3}{4} m_a \frac{\rho_g C_D}{\rho_a d_a} |v_g - v_a| (v_g - v_a) \quad (7)$$

$$F_N = m_a \frac{v_a^2}{r_a} \quad (8)$$

$$F_f = \mu_0 F_N \quad (9)$$

其中

$$\Gamma_r = \frac{\rho_a d_a^2}{18 \mu_g C_D Re} \quad (10)$$

$$Re = \frac{\rho_g d_a |v_g - v_a|}{\mu_g} \quad (11)$$

$$C_D = \frac{24}{Re} \left(1 + \frac{1}{6} Re^{2/3} \right) \quad (12)$$

式中 Γ_r ——颗粒弛豫时间, s

Re ——雷诺数

ρ_a ——颗粒密度, kg/m³

ρ_g ——流体密度, kg/m³

d_a ——颗粒直径, mm

μ_g ——流体动力黏度, Pa·s

C_D ——阻力系数

v_g ——流体速度, m/s

r_a ——轨迹瞬时半径, m

μ_0 ——摩擦因数

根据式(7)~(9)可知颗粒所受的曳力受到颗粒密度、流体密度、流体黏度、颗粒速度、流体速度等的影响, 因此可以通过改变流体速度, 进而改变曳力、摩擦力, 最终影响管道内的流态, 实现物料在管道内的稳定输送。

2.2 翼型曲面结构参数设计

输送气流产生康达效应是翼型曲面分离装置功能实现的重要前提。如图7所示, 翼形曲面装置由偏转面、过渡面、引流面以及整流面组成, 各曲面之间两两相切衔接。

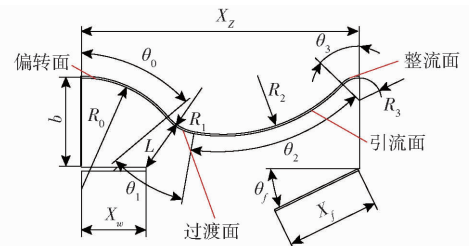


图7 翼型曲面结构示意图

Fig.7 Structure diagram of airfoil surface

考虑到上述若干力中仅流体曳力、马格努斯升力、摩擦力、支持力与颗粒重力量级相近, 并且马格努斯升力取决于物体旋转速度及旋转物体相对侧的

半径为 R_0 的偏转面与长度为 X_w 的稳流板将宽

度为 b 的气流加速至偏转角为 θ_0 、宽度为 L 的射流,射流经过过渡面后发生康达效应随引流面偏转^[20]。其中设置稳流板可以加速射流增大颗粒所受曳力。结合装置尺寸与流场-颗粒仿真预试验,各参数设计应符合条件

$$\theta_0 + \theta_3 = \theta_1 + \theta_2 \quad (13)$$

$$(R_0 + R_1) \sin \theta_0 - R_1 \cos \theta_0 \tan(\theta_0 - \theta_1) + R_2 \sin(\theta_0 - \theta_1) + (R_2 + R_3) \sin \theta_3 = X_z \quad (14)$$

$$|R_0 - b| \tan \theta_0 \leq X_w \leq R_0 \sin \theta_0 \quad (15)$$

$$(R_0 + R_1) \sin \theta_0 - R_1 \cos \theta_0 \tan(\theta_0 - \theta_1) \geq \frac{X_z}{3} \quad (16)$$

$$b - (R_0 - R_1) \cos \theta_0 - R_1 \cos(\theta_0 - \theta_1) > 0 \quad (17)$$

式中 $\theta_0, \theta_1, \theta_2, \theta_3$ ——偏转面、过渡面、引流面、整流面角度, ($^\circ$)

R_0, R_1, R_2, R_3 ——偏转面、过渡面、引流面、整流面半径, mm

X_z ——曲面总跨度, mm

为使输送气流发生康达效应,气流引流面半径与气流宽度需满足

$$2L < R_2 \quad (18)$$

即引流面半径越大越容易发生康达效应,但偏转面过大会导致分离装置结构尺寸偏大,以及杂质的水平迁移距离增大不利于杂质的高效分离。

由于翼型曲面分离装置较短,康达效应发生段射流近似看作等宽度的均匀射流。因此可依据微积分原理将偏转射流等效为方向不变的水平射流,颗粒在气流中的运动分解为沿气流方向的运动与垂直于气流方向的运动。结合图6和图8所示,沿气流方向(翼型曲面切线方向)的运动主要受曳力与重力的合力影响,垂直气流方向的运动受重力分力影响。通过虚拟分界线 OP 将颗粒轨迹线划分为2个类型,当颗粒轨迹线高于点 P 时,该颗粒可借助辅助分离板作用由射流边界紊动混合层漩涡带出分离;当颗粒无法运动到辅助分离板时该颗粒落入存粮仓收集。同时粉末状与极轻质的颗粒在压力梯度的作用下无法脱离气流直接被裹挟排出。

$$\begin{cases} x^2 + y^2 + 40y - 4400 = 0 & (0 \leq x \leq 91.93 \text{ mm}; 57.14 \text{ mm} \leq y \leq 100 \text{ mm}) \\ x^2 - 260.46x + y^2 - 178.54y + 9660.19 = 0 & (91.93 \text{ mm} < x \leq 12.155 \text{ mm}; 40.03 \text{ mm} < y \leq 57.14 \text{ mm}) \\ x^2 - 305.6x + y^2 - 434.6y + 26616.99 = 0 & (121.55 \text{ mm} < x \leq 282.6 \text{ mm}; 37.3 \text{ mm} < y \leq 92.59 \text{ mm}) \\ x^2 - 600x + y^2 - 151.74y + 57017.34 = 0 & (282.6 \text{ mm} < x \leq 300 \text{ mm}; 92.59 \text{ mm} < y \leq 100 \text{ mm}) \end{cases} \quad (21)$$

3 CFD-DEM 耦合仿真

由曳力加速度计算公式可知,颗粒密度与颗粒直径是影响曳力加速度的重要因素。实际分离作业

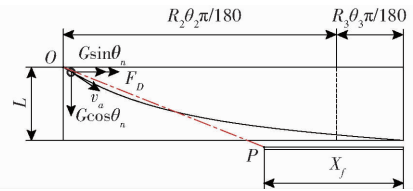


图8 颗粒轨迹微分示意图

Fig. 8 Differential diagram of particle trajectories

对颗粒微分运动轨迹采用运动学理论分析,被分离颗粒的垂直气流方向与沿气流方向运动学方程为

$$L = v_0 \sin \theta_n T + \frac{G \cos \theta_n}{2m_a} T^2 \quad (19)$$

$$\frac{R_2 \theta_2 \pi}{180} + \frac{R_3 \theta_3 \pi}{180} - X_f \leq v_0 \cos \theta_n T + \frac{G \sin \theta_n + F_D}{2m_a} T^2 \quad (20)$$

式中 v_0 ——颗粒在点 O 的速度, m/s

θ_n ——流体流线与竖直方向夹角, ($^\circ$)

T ——颗粒气流内运动时间, s

X_f ——辅助引导板长度, mm

由于射流宽度越宽、颗粒垂直气流方向分速度越小,颗粒在气流内运动越久,则曳力可作用时间越长,进而颗粒速度方向变化越大,因此颗粒初始入射速度及入射角同样是颗粒轨迹线的重要影响因素。结合式(7)可知,颗粒在分离装置内的运动路径受到颗粒密度、颗粒直径、颗粒入射速度、射流宽度、引流面曲率、辅助托板长度与角度、流体密度与黏度等因素的影响,可通过改变射流宽度、翼型曲面偏转面与引流面结构参数等因素,进而改变曳力作用时间,最终影响物料颗粒轨迹线,实现不同物料的分选。

综合公式(13)~(18)及颗粒运动学分析,结合中国农业机械化科学研究院集团有限公司研制的玉米小区收获机二级除杂装置空间与尺寸要求,取 $L = 50 \text{ mm}$, $X_w = 85 \text{ mm}$, $b = 100 \text{ mm}$, $\theta_0 = 50^\circ$, $R_0 = 120 \text{ mm}$, $\theta_1 = 40^\circ$, $R_1 = 50 \text{ mm}$, $\theta_2 = 56.14^\circ$, $R_2 = 180 \text{ mm}$, $\theta_3 = 46.14^\circ$, $R_3 = 24.14 \text{ mm}$ 。综上可得曲面拟合方程

中,颗粒受力不同于理想状态分析,颗粒群运动使流场流态复杂多变,颗粒间也存在相互作用。为验证翼型曲面除杂装置康达效应对玉米脱出混合物的分离可行性,设置单因素仿真试验分别研究颗粒密度

与颗粒直径对颗粒运动迹线的影响^[21]。

由于目前康达效应多用于粉尘颗粒的分离作业,相较于玉米脱出混合物中的杂质颗粒的粒径与质量差距较大,因此在预试验的基础上进行试验设计时重点考察轻质杂质的轨迹线分布规律,试验水平设置采取等比数列分布。玉米籽粒与脱出物杂质的物理特性如表 1 所示^[22]。为减小试验系统误差,放大试验效果,试验分离模型均设置为球型颗粒,试验因素水平如表 2、3 所示。由于曳力加速度与颗粒密度和颗粒直径的乘积成反比,设置某单因素试验时将另一因素参考物料特性参数的最大值进行固定。即设置密度因素试验时,固定仿真颗粒直径设置为茎秆类球直径均值 10 mm,考虑脱出混合物中密度最大物质为玉米籽粒^[23-24],因此密度水平区间为 10 ~ 1 200 kg/m³;设置直径因素试验时,固定仿真颗粒密度为茎秆密度 112 kg/m³,考虑一级圆孔清选筛孔径一般为 15 mm,因此直径水平区间为 0.2 ~ 15 mm。

表 1 玉米脱出物成分物理特性参数

Tab. 1 Physical characteristic parameters of maize extract composition

材料	密度/(kg·m ⁻³)	类球直径均值/mm
玉米籽粒	1 200	8
茎秆颗粒	112	10
芯轴颗粒	330	4
轻质杂质	18	1

表 2 密度因素试验水平

Tab. 2 Density factor test levels

颗粒名称	K1	K2	K3	K4	K5	K6
密度/(kg·m ⁻³)	10	30	90	270	810	1 200
颗粒注入速率/(g·s ⁻¹)	3.5	7	21	63	189	300

表 3 直径因素试验水平

Tab. 3 Diameter factor test levels

颗粒名称	D1	D2	D3	D4	D5
直径/mm	0.2	0.6	1.8	5.4	15
颗粒注入速率/(g·s ⁻¹)	3.5 × 10 ⁻⁴	8.3 × 10 ⁻³	0.25	6.83	116.67

3.1 流场与颗粒模型建立

仿真分析基于 CFD-DEM 耦合分析软件 Fluent 与 Rocky 开展^[25]。首先抽取翼型曲面除杂装置流体域体积,并在 Fluent meshing 中完成网格划分,得到如图 9a 所示流体域多面体网格模型。开展 Fluent 流场单相流仿真,如图 9b 所示速度场中输送气流有明显的附壁运动现象,输送管道内气流流速稳定且均匀,在入口风速 20 m/s 时引流面偏转处气

流流速最大可达 54 m/s。存粮仓内流场稳定且无大流速涡流,对康达效应气流的运动无明显影响。将常温气流视为连续相,定义球形颗粒为离散相,开展气固耦合仿真分析翼型曲面除杂装置内部气流与颗粒之间的相互作用。根据已有文献成果与玉米小区收获机参数指标,设置仿真计算参数如表 4、5 所示^[26]。

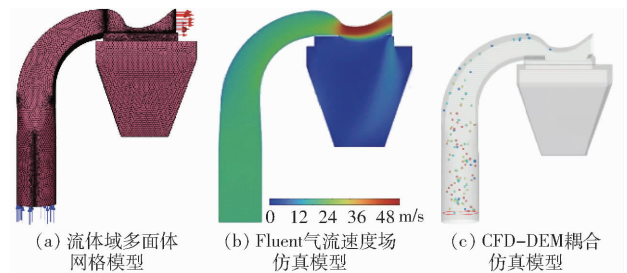


图 9 翼型曲面除杂装置仿真模型

Fig. 9 Simulation model of airfoil surface decontamination device

表 4 CFD 仿真计算参数

Tab. 4 CFD simulation calculation parameters

项目	参数	数值
空气	密度/(kg·m ⁻³)	1.225
	动力粘度/(Pa·s)	1.789 × 10 ⁻⁵
速度入口	速度/(m·s ⁻¹)	20
	湍流强度/%	5
压力出口	水力直径/m	0.17
	压力/Pa	0

表 5 DEM 仿真试验参数

Tab. 5 DEM simulation experiment parameters

项目	参数	数值
密度仿真试验颗粒	泊松比	0.4
	杨氏模量/MPa	38.36
	直径/mm	10
直径仿真试验颗粒	泊松比	0.42
	杨氏模量/MPa	38.36
	密度/(kg·m ⁻³)	112
壁面	泊松比	0.3
	杨氏模量/MPa	105
	密度/(kg·m ⁻³)	7 800
密度仿真试验颗粒-颗粒	碰撞恢复系数	0.31
	静摩擦因数	0.79
	动摩擦因数	0.01
密度仿真试验颗粒-壁面	碰撞恢复系数	0.33
	静摩擦因数	0.70
	动摩擦因数	0.01
直径仿真试验颗粒-颗粒	碰撞恢复系数	0.21
	静摩擦因数	0.65
	动摩擦因数	0.01
直径仿真试验颗粒-壁面	碰撞恢复系数	0.29
	静摩擦因数	0.62
	动摩擦因数	0.01

3.2 单因素试验

3.2.1 颗粒密度

由图 10a 可以看出,不同密度的颗粒在翼型曲面除杂装置中沿导向输送管上侧运动并随气流进入气流偏转面,随后脱离顶面接触开始受康达效应气流曳力推动运动。颗粒密度越大其加速度越小则轨迹偏转角变化越小,且由于自身惯性较大更容易脱离气流。因此颗粒密度的差异导致颗粒加速度不同,颗粒轨迹偏转角与颗粒密度存在线性关系。侧向观测仿真算例,如图 10b 绘制各密度颗粒轨迹线,每种密度颗粒各取 20 个样本测量并统计其轨迹偏转角分布,得颗粒轨迹偏转角箱线图如图 11 所示。由统计图可知各密度颗粒偏转角分布范围及偏转角中位数。颗粒 K1 与颗粒 K2、K3 的轨迹偏转角差异不大甚至略有重叠,因此 K1 ~ K3 密度区间颗粒区分度不高。但颗粒 K1 与颗粒 K4 ~ K6 存在至少 7° 的轨迹偏转差异角,因此可知玉米颗粒与密度在 90 kg/m^3 以下的杂质颗粒可依据此装置实现分离。表 6 为各密度颗粒轨迹线中位偏转角 θ_m ,与密度拟合后得到轨迹线偏转角与颗粒密度的关系方程

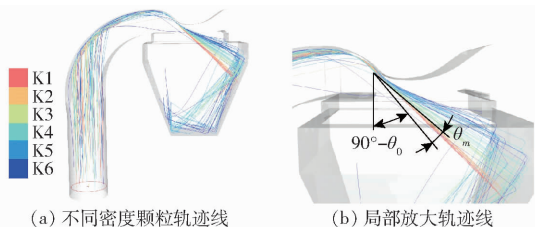


图 10 不同密度颗粒耦合仿真结果

Fig. 10 Coupling simulation results of different density particles

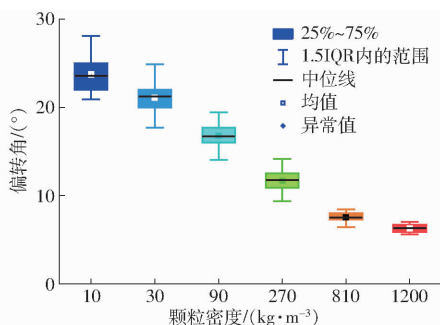


图 11 不同密度颗粒轨迹偏转角箱线图

Fig. 11 Box diagram of trajectory deflection angle of particles with different densities

表 6 不同密度颗粒轨迹线偏转角

Tab. 6 Median angle of deflection of track line of different density particles

颗粒名称	K1	K2	K3	K4	K5	K6
颗粒密度 $\rho / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	10	30	90	270	810	1200
偏转角 $\theta_m / (^\circ)$	24.57	21.22	16.73	11.78	7.94	6.35

$$y_1 = 45.72x_1^{-0.25} \quad (22)$$

决定系数 R^2 为 0.96,拟合效果良好。颗粒密度-偏转角拟合曲线如图 12 所示。

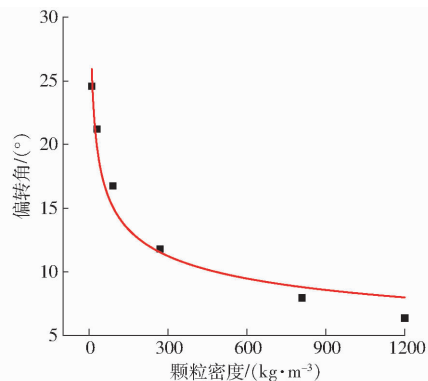


图 12 颗粒密度-偏转角拟合曲线

Fig. 12 Particle density - deflection angle fitting curve

3.2.2 颗粒直径

同理,不同直径的颗粒受到康达效应气流曳力推动,其轨迹线偏转也存在差异,如图 13a 所示。直径越小的颗粒加速度越大,越容易随气流进行偏转。因此同样侧向观测仿真算例,绘制如图 13b 所示各直径颗粒轨迹线,每种直径颗粒各取 20 个样本测量并统计其轨迹偏转角分布,得颗粒轨迹偏转角箱线图如图 14 所示。由统计图可知各直径颗粒偏转角分布范围及中位偏转角。颗粒 D1 与颗粒 D2 的轨迹偏转角存在重叠,因此 D1 与 D2 直径区间内颗粒区分度不高。但颗粒 D1 与颗粒 D3 ~ D5 存在至少 6° 的轨迹偏转差异角,因此可知玉米颗粒与直径在 1.8 mm 以下的杂质颗粒可依据此装置实现分离。通过表 7 中各直径颗粒与其轨迹线中位偏转角 θ_m ,得到轨迹线偏转角关于颗粒直径的拟合方程

$$y_2 = 22.49x_2^{-0.26} \quad (23)$$

决定系数 R^2 为 0.99,拟合效果良好。颗粒直径-偏转角拟合曲线如图 15 所示。

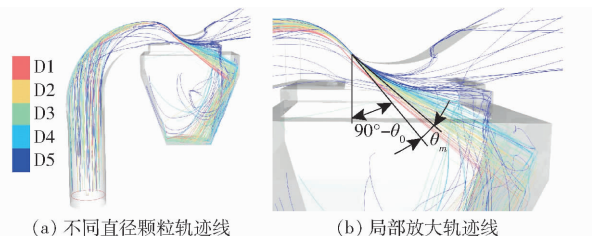


图 13 不同直径颗粒耦合仿真结果

Fig. 13 Coupling simulation results of different diameters

3.2.3 讨论

在固定颗粒体积时,将玉米籽粒与轻质杂质密度参数代入式(22)得其颗粒轨迹线偏转角后作差,知两颗间存在偏转差异角 6.28° ;在固定颗粒密度时,取体积类球直径近似作为玉米籽粒与轻质杂

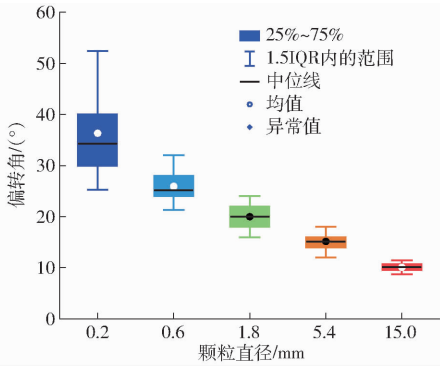


图 14 不同直径颗粒轨迹偏转角箱线图

Fig. 14 Box diagram of trajectory deflection angle of particles with different diameters

表 7 不同直径颗粒轨迹线偏转角

Tab. 7 Deflection angle of streamline of particles of different diameters

颗粒名称	D1	D2	D3	D4	D5
颗粒直径 d_a /mm	0.2	0.6	1.8	5.4	15
偏转角 θ_m /($^\circ$)	34.32	25.18	19.95	15.15	10.08

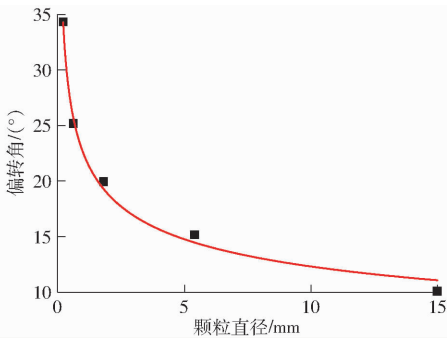


图 15 颗粒直径-偏转角拟合曲线

Fig. 15 Diameters - deflection angle fitting curve

质颗粒直径分别代入式(23), 获得其轨迹线间存在偏转差异角 9.39° 。轻质杂质同时具备低密度与小直径的特征, 根据迫敛准则, 轻质杂质的轨迹线偏转差异角均大于两单因素试验所得差异角参考值。同理, 实际中玉米籽粒外形多为马齿型与锥球型, 其最小迎风面积小于该类球体截面积, 导致玉米籽粒实际作业的轨迹偏转角略小于仿真结果。因此为获得最广的杂质密度与直径分离范围, 结合仿真结果取 6.28° 作为设计参考。如图 5 所示设计辅助分离板长度 X_f 为 116 mm, 倾角 θ_f 为 20° 。由于辅助分离板的引导作用, 翼型曲面除杂装置可实现轨迹线偏转角大于 6.28° 的颗粒分离作业。

3.3 台架验证试验

3.3.1 试验条件

为验证数值模拟辅助设计翼型曲面除杂装置的作业性能, 将其安装于气力式清选试验台上进行台架试验, 如图 16 所示。试验台可通过控制台调节风机转速及粮食输送机转速进而控制输送风速及物料

喂入量。为便于观察试验分离过程, 翼型曲面除杂装置采用透明亚克力材质。

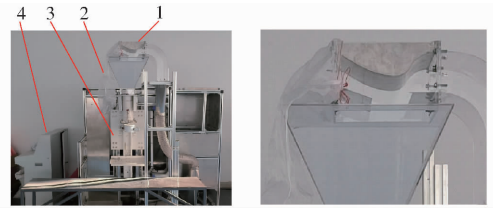


图 16 气力式清选试验台

Fig. 16 Pneumatic cleaning test bench

1. 翼型除杂装置 2. 网袋 3. 称量系统 4. 控制台

3.3.2 试验材料及方法

在玉米小区收获机二级清选除杂装置前收集玉米脱出混合物, 使用分离筛分离玉米芯轴与部分玉米籽粒, 制备含轻质杂质 15% 的玉米籽粒混合物 (图 17a) 作为试验对象。参照 T/CAAMM 29—2018《玉米籽粒收获机脱粒装置》团体标准, 选取含杂率为试验指标。试验时, 调整风机转速使输送风速达到 20 m/s , 待装置流场稳定后设置输送装置喂入量为 5 kg/min 并开始喂入玉米籽粒混合物, 1 min 后停止喂入并采样称量, 试验重复 5 次, 由公式

$$Z_z = \frac{m_z}{m_c} \times 100\% \quad (24)$$

式中 Z_z ——籽粒含杂率, %
 m_z ——杂质质量, g
 m_c ——样品总质量, g

计算籽粒含杂率并取结果均值, 如表 8 所示。



(a) 试验前物料 (b) 试验后物料

图 17 试验前后物料对比

Fig. 17 Material comparison before and after test

表 8 翼型曲面除杂装置台架试验结果

Tab. 8 Bench test results of miscellaneous devices on airfoil surface

参数	试验号					均值
	1	2	3	4	5	
含杂率/%	0.96	1.15	0.84	1.21	0.91	1.014

3.3.3 试验结果

由表 8 可知, 玉米籽粒含杂率在 1.014% 左右, 可实现轻质杂质的去除功能, 符合装置使用需求, 但仍

有提升空间。通过台架试验可知,影响该装置分离效果的因素还有装置翼型曲面偏转面与引流面尺寸、稳流板尺寸、输送风速、辅助分离板尺寸等。导致翼型曲面除杂装置分离杂质不彻底的原因主要有:玉米籽粒群在气流中的运动导致流场流态复杂多样,玉米籽粒运动为杂质提供破风效果,导致杂质受曳力较小;分离流场内存在沿壁侧流,气流两侧的竖直侧壁对气流也存在吸附作用,导致气流边缘无法产生康达效应,该沿壁侧流携带部分杂质进入存粮仓。

4 结论

(1)设计了一种基于康达效应的翼型曲面除杂装置,进行了总体结构设计与关键参数理论分析。采用翼型曲面结构解决了传统玉米小区收获机二级

清选除杂装置体积大的问题;采用稳流板与辅助分离板结合的方法解决流场稳定性差、流场稳定所需时间长的问题。提高了玉米小区收获机工作效率与测产精度。

(2)装置理论分析及仿真试验结果表明,利用高速气流产生康达效应对约束环境下的不同密度及不同直径颗粒混合物具有可行有效的选择性分离效果。当偏转角为 50° 和引流角为 56.14° 时,分别得到颗粒轨迹线偏转角关于颗粒密度以及颗粒直径的拟合方程,该方程可为翼型曲面除杂装置设计提供理论基础。

(3)台架试验结果表明,翼型曲面除杂装置可完成轻质杂质的除杂作业,籽粒含杂率低至 1.014% ,作业性能指标满足设计要求。

参 考 文 献

- [1] 赵峰,孙明兴,郝哲峰,等. 基于计算颗粒流体力学的旋风分离器结构优化[J]. 发电技术, 2021, 42(5): 637-642.
ZHAO Feng, SUN Mingxing, HAO Zhefeng, et al. Structural optimization of cyclone separators based on computational particle hydrodynamics[J]. Power Generation Technology, 2021, 42(5): 637-642. (in Chinese)
- [2] 党贺,赵宝生,马学东,等. 基于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. Simulating research on cyclone grain cleaning device based on CFD-DEM coupling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(4): 86-91, 168. (in Chinese)
- [3] 刘秀林,陈建义,姜淑凤,等. 旋风分离器结构优化实验研究[J]. 现代化工, 2019, 39(12): 205-209.
LIU Xiulin, CHEN Jianyi, JIANG Shufeng, et al. Experimental study of cyclone separator structure optimization[J]. Modern Chemical Industry, 2019, 39(12): 205-209. (in Chinese)
- [4] 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)
- [5] 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)
- [6] 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)
- [7] DZIUBAK T, KAŁA L B. Computational and experimental analysis of axial flow cyclone used for intake air filtration in internal combustion engines[J]. Energies, 2021(14): 2285.
- [8] LUBERT C. On some recent applications of the Coanda effect[J]. International Journal of Acoustics and Vibration, 2011, 16(3): 144-153.
- [9] 崔悦,刘冰瑾,蓝天茹. 基于康达效应的松香粉尘多层过滤器[J]. 科技与创新, 2023(2): 155-157.
CUI Yue, LIU Bingjin, LAN Tianru. Multilayer filter for rosin dust based on the Coanda effect[J]. Technology and Innovation, 2023(2): 155-157. (in Chinese)
- [10] 赵乾坤. 基于康达效应的新型除尘风机的研究与应用[D]. 北京:中国矿业大学, 2019.
ZHAO Qiankun. Research and application of a new type of dust removal fan based on Coanda effect[D]. Beijing: China University of Mining and Technology, 2019. (in Chinese)
- [11] 胥海伦,陈海淼,毕海权. 基于康达效应的超微粉气流分级数值模拟研究[J]. 西南科技大学学报(自然科学版), 2005, 20(1): 42-45.
XU Hailun, CHEN Haiyan, BI Haiquan. Numerical simulation study of airflow classification of ultrafine powder based on Coanda effect[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2005, 20(1): 42-45. (in Chinese)
- [12] 李圣楠,武斌,陈葵,等. 筒锥比对旋风分离器切割直径及流场的影响[J/OL]. 化学工业与工程: 1-10. <https://doi.org/10.13353/j.issn.1004.9533.20230132>.

- LI Shengnan, WU Bin, CHEN Kui, et al. Cutting diameter for solid particles and flow field in cyclones with different cylinder-cone height ratio [J/OL]. *Chemical Industry and Engineering*; 1 – 10. <https://doi.org/10.13353/j.issn.1004.9533.20230132>. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 王望春. 基于 CFD 的坚果烘干旋风除尘器结构优化设计[D]. 西安: 长安大学, 2022.
WANG Wangchun. Structural optimization design of nut drying cyclone dust collector based on CFD [D]. Xi'an: Chang'an University, 2022. (in Chinese)
- [15] KHARCHENKO S, BORSHCH Y, KOVALYSHYN S, et al. Modeling of aerodynamic separation of preliminarily stratified grain mixture in vertical pneumatic separation duct[J]. *Applied Sciences*, 2021(11): 4383.
- [16] 付作立, 李贵川, 李海宇, 等. 荞麦播种机气力集排系统螺旋式增压管设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2023, 54(12): 37 – 45, 69.
FU Zuoli, LI Guichuan, LI Haiyu, et al. Design and test of spiral booster pipe for pneumatic collecting and discharging system of buckwheat seeder[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2023, 54(12): 37 – 45, 69. (in Chinese)
- [17] 巴涵, 周甲伟, 郭小乐, 等. 水平转垂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 & Pneumatics*, 2023, 47(3): 43 – 50. (in Chinese)
- [18] 禹言芳, 石博文, 孟辉波, 等. 基于 CFD-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 Huiibo, 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)
- [19] 周甲伟, 郭小乐, 巴涵, 等. 基于 CFD-DEM 耦合数值模拟的垂直管道气力输送流型特性研究[J]. *工程热物理学报*, 2023, 44(9): 2464 – 2473.
ZHOU Jiawei, GUO Xiaole, BA Han, et al. Characterization of flow pattern of vertical pipe pneumatic conveying based on CFD – DEM coupled numerical simulation [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2023, 44(9): 2464 – 2473. (in Chinese)
- [20] 胡经朝, 赵国成, 肖龙飞. 基于康达效应的海底集矿装置流场与集矿特性试验研究[J]. *海洋工程*, 2022, 40(5): 132 – 138.
HU Jingchao, ZHAO Guocheng, XIAO Longfei. Experimental study on the flow field and ore collection characteristics of submarine ore collecting device based on the Coanda effect[J]. *The Ocean Engineering*, 2022, 40(5): 132 – 138. (in Chinese)
- [21] 胡浩然, 柳忠彬, 张海周, 等. 进气速度与质量流率对多密度颗粒分离性能的影响研究[J]. *有色金属(选矿部分)*, 2022(1): 62 – 67.
HU Haoran, LIU Zhongbin, ZHANG Haizhou, et al. Study on the effect of inlet velocity and mass flow rate on the separation performance of multi-density particles[J]. *Nonferrous Metals (Mineral Processing Section)*, 2022(1): 62 – 67. (in Chinese)
- [22] 于泳涛. 基于蚯蚓运动特征的玉米清选仿生筛的设计与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
YU Yongtao. Design and experimental study of bionic screen for maize cleaning based on earthworm motion characteristics [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [23] 王立军, 李洋, 梁昌, 等. 贯流风筛清选装置内玉米脱出物运动规律研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(9): 122 – 127.
WANG Lijun, LI Yang, LIANG Chang, et al. Research on the motion law of corn dislodged material in the cleaning device of cross-flow wind sieve[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(9): 122 – 127. (in Chinese)
- [24] 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)
- [25] EL-EMAM M A, HAN C, DONG S W, et al. Rocky DEM – CFD simulation for realistic granular flow in an aerodynamic separating device[Z]. 2019.
- [26] 王立军, 马杨, 冯鑫, 等. 玉米籽粒收获机分段式振动筛清选装置设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(9): 89 – 100.
WANG Lijun, MA Yang, FENG Xin, et al. Design and test of segmented vibrating screen cleaning device for corn kernel harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(9): 89 – 100. (in Chinese)