doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.03.021

玉米籽粒收获机清选装置多四棱锥筛设计与试验

王立军　黄文耀　杨志磊　冯　鑫　孟祥民　曾龙驰
(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为提高玉米籽粒收获机清选装置在大喂入量条件下的性能,设计了一种多四棱锥筛,通过非平面结构使筛上玉米籽粒滞留并快速透筛。依据理论分析确定了多四棱锥筛的关键结构参数,采用 CFD－DEM 耦合仿真对多四棱锥清选装置内气固两相运动进行了数值模拟。结果表明:在玉米混合物喂入量为 7 kg/s 时,多四棱锥筛筛前出现了一条高速气流带,有利于混合物的分离,筛体中部气流速度较低,有利于配合多四棱锥筛结构使玉米籽粒滞留,在多四棱锥筛的运动下,筛上玉米籽粒完成“撞筛—滞留—跃起—撞筛—透筛”,筛上混合物未出现堆积现象,筛上玉米籽粒完成快速透筛。以多四棱锥筛单元体高度、清选装置入口气流速度、振动筛振动幅度为试验因素,以玉米籽粒的含杂率、损失率、筛分速率为清选装置性能的评价指标,进行了二次正交旋转组合试验,建立了各因素与指标间的数学模型,获得了各参数的最优组合为:多四棱锥筛单元体高度 11.26 mm、清选装置入口气流速度 9.6 m/s、振动筛振动幅度 15.13 mm。通过高速摄像台架试验验证了筛上玉米籽粒的运动规律;在玉米混合物喂入量为 7 kg/s 时,多四棱锥筛清选装置籽粒的含杂率为 1.68%,损失率为 1.33%,筛分速率为 3.66 kg/s,均满足国家标准要求,多四棱锥筛清选装置可以完成喂入量 7 kg/s 下玉米籽粒清选作业。

关键词: 玉米籽粒收获机; 清选装置; 多四棱锥筛; 数值模拟; 参数优化
中图分类号: S225.5+1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)03-0215-13　　**OSID**:

Design and Experiment of Multi-tetragonal Conical Sieve for Maize Grain Harvester Cleaning Device

WANG Lijun　HUANG Wenyao　YANG Zhilei　FENG Xin　MENG Xiangmin　ZENG Longchi
(*College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: Aiming to improve the cleaning performance of maize grain harvester cleaning device under the condition of large feeding mass, a multi-tetragonal conical sieve was designed to make the maize grains on the sieve retained and quickly penetrate the sieve through the non-planar structure. The key structural parameters of the multi-tetragonal conical sieve were determined by theoretical analysis. CFD－DEM method was used for numerical simulating the motion of gas-solid two-phase in multi-tetragonal conical sieve cleaning device. A high speed airflow belt could be formed in front of the multi-tetragonal conical sieve, which was beneficial to make maize mixtures separated. The air velocity in the middle of the sieve body was low, which was conducive to the retention of maize grain with the structure of multi-tetragonal conical sieve. The maize grain on the sieve completed the process of ‘impact sieve－retention－leaping－impact sieve－through the sieve’ under the movement of multi-tetragonal conical sieve. No build-up of the maize mixture on the sieve. The maize grain on the sieve completed rapid penetration of the sieve. The height of multi-tetragonal conical sieve unit, the airflow velocity at the inlet of the cleaning device and the vibrating amplitude of the vibrating sieve were selected as the test factors. The impurity rate, loss rate and screening efficiency of maize grain were selected as test indexes. The quadratic orthogonal rotation combination test was carried out. The mathematical models between factors and indicators were established. The best combination of parameters was obtained as follows, the height of the multi-tetragonal conical sieve unit was 11.26 mm, the airflow velocity of the cleaning device was 9.6 m/s, the vibration amplitude of the vibrating screen was 15.13 mm. The motion law of maize grains on the sieve was verified through the bench validation test. At the maize mixture feeding mass of 7 kg/s, the impurity

收稿日期: 2024－10－16　修回日期: 2025－02－24
基金项目: 国家自然科学基金项目(52075091)
作者简介: 王立军(1978—),女,教授,博士生导师,主要从事收获与秸秆还田机械研究,E-mail: wljszf@163.com

rate of maize grain after screening by the multi-tetragonal conical sieve cleaning device was 1.68%, the loss rate of maize grain was 1.33%, and the screening efficiency of maize grain was 3.66 kg/s. The multi-tetragonal conical sieve cleaning device could meet the requirements of cleaning maize mixtures with large feed mass. The research result had a certain reference value for improving the working performance of maize grain combine harvester.

Key words: maize grain harvester; cleaning device; multi-tetragonal conical sieve; numerical simulation; parameter optimization

0 引言

随着科技进步,在玉米收获作业中机械化程度越来越高[1]。课题组前期通过农场调研确定了德美亚一号玉米品种的平均产量为 6 146 kg/hm^2,常发佳联 CF808 型 6 行玉米联合收获机作业幅宽为 4 m,以常规速度 1.5 m/s 作业时清选装置中玉米混合物喂入量约为 5 kg/s,但近年来随着单位作物产量和机具作业速度的增加[2],清选装置内玉米混合物的喂入量逐年增加,已经达到 7 kg/s[3]。现有的平面筛和鱼鳞筛的清选装置在处理常规 5 kg/s 的喂入量时籽粒含杂率和损失率可以满足国家标准要求,但在处理大喂入量 7 kg/s 时,筛上发生堆积现象,籽粒透筛速率降低且杂余无法快速排出机外,最终导致含杂率和损失率增加,无法达到国家标准[4]。振动筛作为清选装置的核心部件之一[5],其结构将会影响筛上玉米混合物的运动状态,最终决定含杂率和损失率,与清选装置的性能直接相关[6]。

为提高清选装置的作业性能,许多研究者针对振动筛筛型进行了大量研究。邓嘉鸣等[7]设计出了一种可以实现物料多维透筛的凹坑型筛面和波浪型筛面,增加了有效筛分面积,有助于防止物料堆积,同时提高了籽粒透筛率和振动筛的筛分效率。彭三河等[8]设计了三角形断面的棱面筛,在保证含杂率和损失率满足要求的情况下,相比较平面筛,作业效率得到了极大的提升。王立军等[9]设计出了一种由正弦函数控制筛长的正弦曲线编织筛,该正弦筛可以完成对筛上不同区域内玉米混合物的清选,并有利于玉米秸秆和玉米芯等杂余快速排出清选装置,提高振动筛的利用率和作业效率。SHEN 等[10]设计了一种变角度曲面筛,运用仿真数值模拟和实际台架试验验证了变角度曲面筛在处理大喂入量物料时具有明显的筛分速率和作业效果。LI 等[11]设计了一种带有滑指的多段阶梯筛,当物料经过滑指时,玉米籽粒透过滑指,而其余组分则被滑指甩到振动筛筛后,提高了筛上物料的分散度,有效增强了振动筛的清选性能。王立军等[12]设计了一种圆孔-贝壳组合筛,筛上物料在快速分散的同时完成迅速透筛。YIN 等[13]通过模拟椭圆振动筛上颗粒流动的筛选过程,探究了筛选速率与振动筛之间碰撞率的关系。侯勇俊等[14]运用 DEM 方法模拟颗粒在一种基于均衡运动原理旋振筛上的运动过程,研究了颗粒在筛上的分布情况和近筛面颗粒速度对筛分速率的影响。FU 等[15]运用 CFD-DEM 技术模拟玉米混合物在一种带孔结构的变坡度筛网上的清选过程,研究了玉米籽粒和杂余在振动筛上的运动轨迹与清选性能。许多专家和学者针对振动筛筛型进行了创新设计,并初见成效,这说明从筛体结构出发,设计一种新型结构的振动筛来提高在大喂入量下清选装置的清选性能具有可行性。

本文基于三角形横向截面的棱面筛可以提高有效筛分面积和筛分速率[8],将三角形的横纵截面结合,设计一种具有三维结构的多四棱锥筛。通过非平面结构使筛上玉米籽粒滞留并快速透筛,采用 CFD-DEM 耦合仿真对多四棱锥筛清选装置内气固两相运动进行数值模拟并对该过程进行分析。通过多因素试验优化获得多四棱锥筛清选装置参数的最优组合,通过台架试验验证仿真结果的准确性,以期提高在大喂入量玉米混合物下清选装置的作业性能。

1 多四棱锥筛清选装置整体结构及工作原理

1.1 多四棱锥筛清选装置整体结构

多四棱锥筛清选装置结构如图 1 所示,主要由机架、曲柄摇杆机构和多四棱锥筛等构成。多四棱锥筛固定在侧板上,侧板后端通过吊杆铰接在机架上,侧板前端与摇杆连接,摇杆通过连杆与曲柄连接,构成曲柄摇杆机构,外部动力带动曲柄转动后使多四棱锥筛做平面往复运动。

1.2 多四棱锥筛清选装置工作原理

玉米混合物(玉米籽粒、玉米秸秆、玉米芯)在被抖动板初步分散后喂入清选装置,在被气流吹散后完成初步分层,落到多四棱锥筛上,近筛面籽粒被滞留并快速透筛,处于相邻单元体之间无法透筛的籽粒在多四棱锥筛和气流的协同作用下向筛后运移,完成“撞筛—滞留—透筛”或“撞筛—滞留—跃起—撞筛—滞留—透筛”的过程,最终完成玉米混

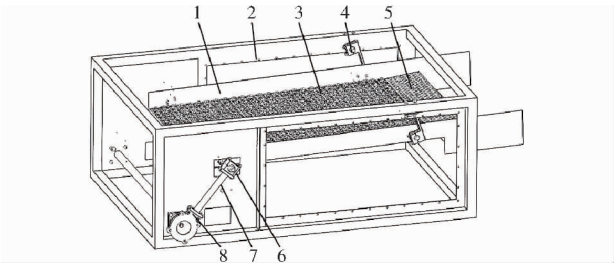


图 1　多四棱锥筛清选装置结构示意图

Fig. 1　Structure diagram of multi-tetragonal conical sieve cleaning device

1. 侧板　2. 机架　3. 多四棱锥筛　4. 吊杆　5. 尾筛　6. 摇杆　7. 连杆　8. 曲柄

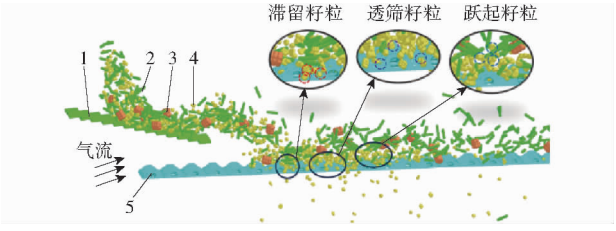


图 2　多四棱锥筛工作原理图

Fig. 2　Working principle diagram of multi-tetragonal conical sieve

1. 抖动板　2. 玉米秸秆　3. 玉米芯　4. 玉米籽粒　5. 多四棱锥筛

合物清选作业，其工作原理图如图 2 所示。

2　多四棱锥筛结构设计与分析

2.1　多四棱锥筛设计

基于横向三角形截面的棱面筛可以在保证玉米籽粒含杂率和损失率满足要求的同时，提高有效筛分面积和筛分速率[8]，本研究将三角形的横纵截面结合，得到多四棱锥筛模型，如图 3 所示。以期通过该三维结构的筛面提高玉米籽粒与筛面的碰撞率，加快籽粒透筛的速率，最终使得清选装置能够完成大喂入量下的玉米籽粒清选作业。

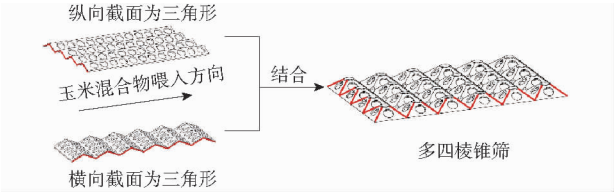


图 3　多四棱锥筛设计

Fig. 3　Design of multi-tetragonal conical sieve

2.2　多四棱锥筛筛上玉米籽粒受力分析

本研究的多四棱锥筛主要用于替换传统清选装置中的平面筛，其由曲柄摇杆机构驱动，在竖直平面内做往复振动运动，运动方程为

$$\begin{cases} S = -A\cos(\omega t) \\ V = A\omega\sin(\omega t) \\ a = A\omega^2\cos(\omega t) \end{cases} \tag{1}$$

式中　S——筛面位移，m

A——筛面振幅，m

ω——筛面角速度，rad/s

t——筛分时间，s

V——筛面速度，m/s

a——筛面加速度，m/s^2

以加速回落阶段为例，对多四棱锥筛纵截面不同侧壁上的玉米籽粒进行受力分析，如图 4 所示。

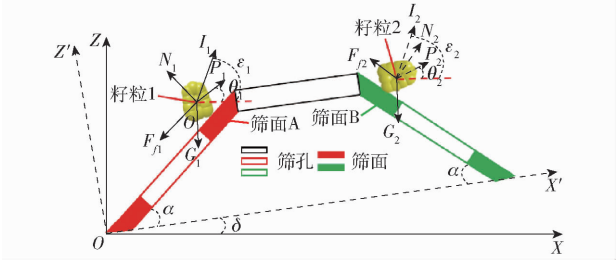


图 4　多四棱锥筛筛上籽粒受力分析图

Fig. 4　Forces analysis diagram of grains on multi-tetragonal conical sieve

籽粒 1 和籽粒 2 的受力平衡方程为

$$N_1 = G_1\cos(\alpha+\delta) - |I_1|\sin(\varepsilon_1-\alpha-\delta) + P_1\sin(\alpha+\delta-\theta_1) \tag{2}$$

$$N_2 = G_2\cos(\alpha-\delta) - |I_2|\sin(\varepsilon_2+\alpha-\delta) - P_2\sin(\alpha+\theta_2-\delta) \tag{3}$$

$$F_1 = |I_1|\cos(\varepsilon_1-\alpha-\delta) + P_1\cos(\alpha+\delta-\theta_1) - G_1\sin(\alpha+\delta) - F_{f1} \tag{4}$$

$$F_2 = F_{f2} - |I_2|\cos(\varepsilon_2+\alpha-\delta) + P_2\cos(\alpha-\delta+\theta_2) - G_2\sin(\alpha-\delta) \tag{5}$$

其中

$$I_1 = m_1A\omega^2\cos(\omega t) \tag{6}$$

$$I_2 = m_2A\omega^2\cos(\omega t) \tag{7}$$

$$G_1 = m_1g \tag{8}$$

$$G_2 = m_2g \tag{9}$$

$$P_1 = C_d\rho S_1u^2 \tag{10}$$

$$P_2 = C_d\rho S_2u^2 \tag{11}$$

$$F_{f1} = \tan\varphi_1N_1 \tag{12}$$

$$F_{f2} = \tan\varphi_2N_2 \tag{13}$$

式中　N_1、N_2——籽粒 1 和籽粒 2 所受筛面支持力，N

I_1、I_2——籽粒 1 和籽粒 2 所受惯性力，N

P_1、P_2——籽粒 1 和籽粒 2 所受气流作用力，N

G_1、G_2——籽粒 1 和籽粒 2 所受重力，N

F_1、F_2——籽粒 1 和籽粒 2 所受合力，N

F_{f1}、F_{f2}——籽粒 1 和籽粒 2 所受摩擦力，N

θ_1、θ_2——籽粒 1 和籽粒 2 所受气流方向角，(°)

ε_1、ε_2——籽粒 1 和籽粒 2 所受惯性力方向角，(°)

α——单元体侧壁倾角，(°)

δ——多四棱锥筛安装角度，(°)

m_1、m_2——籽粒 1 和籽粒 2 质量,g

C_d——非球形颗粒阻力系数

ρ——空气密度,kg/m^3

g——重力加速度,m/s^2

S_1、S_2——籽粒 1 和籽粒 2 迎风面积,m^2

u——气流速度,m/s

φ_1、φ_2——籽粒 1 和籽粒 2 与筛面的摩擦角,(°)

将式(2)~(13)整理后得到多四棱锥筛筛上玉米籽粒所受到的支持力与沿侧壁方向的合力,即

$$N_1 = m_1 g\cos(\alpha+\delta) - |m_1 A\omega^2\cos(\omega t)|\sin(\varepsilon_1-\alpha-\delta) + C_d\rho S_1 u^2\sin(\alpha+\delta-\theta_1) \tag{14}$$

$$N_2 = m_2 g\cos(\alpha-\delta) - |m_2 A\omega^2\cos(\omega t)|\sin(\varepsilon_2+\alpha-\delta) - C_d\rho S_2 u^2\sin(\alpha+\theta_2-\delta) \tag{15}$$

$$F_1 = |m_1 A\omega^2\cos(\omega t)|(\cos(\varepsilon_1-\alpha-\delta) + \sin(\varepsilon_1-\alpha-\delta)\tan\varphi_1) - m_1 g(\sin(\alpha+\delta)+\cos(\alpha+\delta)\tan\varphi_1) + C_d\rho S_1 u_1^2(\cos(\alpha+\delta-\theta_1) - \sin(\alpha+\delta-\theta_1)\tan\varphi_1) \tag{16}$$

$$F_2 = m_2 g(\cos(\alpha-\delta)\tan\varphi_2 - \sin(\alpha-\delta)) - |m_2 A\omega^2\cos(\omega t)|(\sin(\varepsilon_2+\alpha-\delta)\tan\varphi_2 + \cos(\varepsilon_2+\alpha-\delta)) - C_d\rho S_2 u^2(\sin(\alpha+\theta_2-\delta)\tan\varphi_2 - \cos(\alpha-\delta+\theta_2)) \tag{17}$$

分析式(14)~(17)可以得知,当 $N_1\leqslant 0$ 且 $N_2\leqslant 0$ 时,籽粒是与筛面分离的,此时籽粒处于被抛起或透筛状态。当 $N_1>0$ 且 $N_2>0$ 时,表明多四棱锥筛对筛上籽粒存在力的作用,此时依据 F_1 和 F_2 的大小和方向,可以推断出玉米籽粒的运动状态,包括滑动、滚动和碰撞等多种情况。与平面筛相比,当玉米混合物沿 OX 方向喂入并与多四棱锥筛碰撞时,由于碰撞夹角不同,籽粒会朝着不同的方向运动[16],且筛面 1 对籽粒的支持力呈增大趋势,对籽粒的扰动效果更强。同理分析可以得到籽粒在多四棱锥筛横截面上的受力情况。

2.3 多四棱锥筛单元体关键参数的确定

为保证玉米籽粒能够透过筛孔,而杂余无法透过,对筛孔直径进行设计。在筛分过程中,玉米籽粒和玉米芯在筛上混合物层中处于下层位置,且锥型玉米籽粒占籽粒总数的 74.8%,因此筛孔的设计主要考虑了锥型玉米籽粒和玉米芯的大小。课题组前期调研得到了锥型玉米籽粒的长、宽、厚分别为 11、8.81、5 mm,玉米芯的宽和直径分别为 9.7~22 mm、7.1~20 mm。依据文献[15]中关于筛孔直径的计算方法,将相关数值代入后得到籽粒以不同姿态透筛时筛孔的最小值分别为 11、9.4、5、14.46、14.95 mm,玉米芯以不同姿态透筛时筛孔最小值的范围为 7.1~29.73 mm,为最大程度使玉米籽粒透过筛孔,增加籽粒透筛概率,将筛孔直径设计为 15 mm[9]。在保证整体振动筛强度的条件下,为使开孔率最大,在多四棱锥筛单元体顶部也开直径为 15 mm 的圆孔。结合实际工艺情况得到多四棱锥筛单元体三维结构,如图 5 所示。

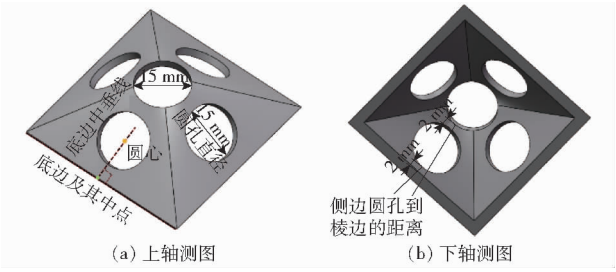


图 5 多四棱锥筛单元体三维结构图

Fig. 5 Three-dimensional structure of multi-tetragonal conical sieve unit

单元体的其余结构参数还包括底边长 D、高度 H 和侧壁倾角 α,如图 6 所示,它们之间的关系为

$$\tan\alpha = \frac{2H}{D-R} \tag{18}$$

$$L_1 = \frac{2}{\sin\alpha} \tag{19}$$

$$L_2 = (R+4)\cos\alpha \tag{20}$$

$$D = 2(L_1+L_2)+R \tag{21}$$

式中 R——圆孔直径,mm

L_1——底边外侧长度,mm

L_2——底边内侧长度,mm

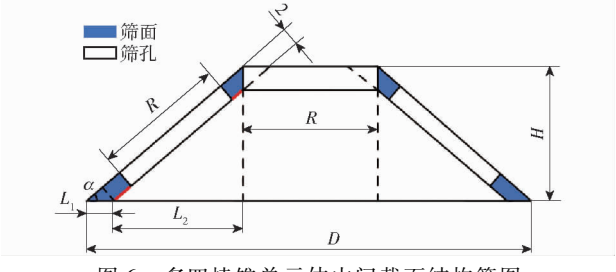


图 6 多四棱锥单元体中间截面结构简图

Fig. 6 Sketch of structure of intermediate cross-section of multi-tetragonal conical sieve unit

当圆孔直径取 15 mm 时,得到单元体高度 H 和单元体侧壁倾角 α 的关系为

$$H = \frac{2}{\cos\alpha} + 19\sin\alpha \tag{22}$$

基于课题组前期对非平面筛上籽粒跃起高度的研究[17-18],多四棱锥筛单元体高度 H 的取值范围

初步确定为 0 mm≤H≤18 mm，具体范围将根据后续仿真试验进一步确定。

2.4　多四棱锥筛单元体排布设计

为保证整个振动筛的排布最为紧密，设计了单元体的 3 种排布形式[19]，分别为 H 型、T 型、X 型，如图 7 所示。H 型单元体排布为单元体底边对齐，同时 4 个相邻的单元体交界处开孔；T 型单元体排布为相邻单元体交错排布；X 型单元体排布为底边一条对角线与振动筛运动方向平行，单元体交界处开孔。这 3 种排布形式在单元体结构参数相同的条件下开孔率大小为：H 型 > X 型 > T 型，具体作业效果将通过后续仿真试验进行对比。

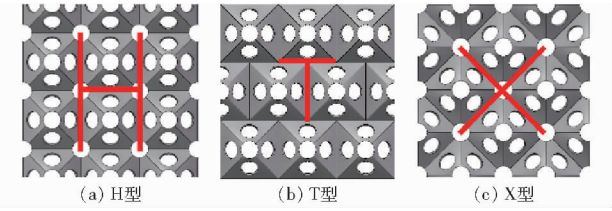


图 7　不同类型的单元体排布

Fig. 7　Arrangement of different types of units

3　清选装置内气固两相流数值模拟

3.1　清选装置模型

基于常发佳联 CF808 型玉米联合收获机中清选装置的振动筛进行改进和优化。传统平面筛清选装置中各部件的结构参数和安装位置如图 8a、8b 所示。在进行多四棱锥筛清选装置三维模型建立时，仅将传统平面筛清选装置内的振动筛替换为多四棱锥筛，其余参数保持不变，多四棱锥筛清选装置三维模型如图 8c 所示。考虑到多四棱锥筛没有横向运动，且筛宽方向两端呈对称结构，为提高仿真模拟的计算速度，并通过预试验得到，当筛宽方向取 4 个并列的单元体时，即可满足研究需求。将三维模型导出为 STEP 格式，并导入 Gambit 进行网格划分，如图 8d 所示。不同结构参数下模型的网格总数为 2.2×10^6 ~ 2.4×10^6，生成的网格偏移度最大为 0.89。

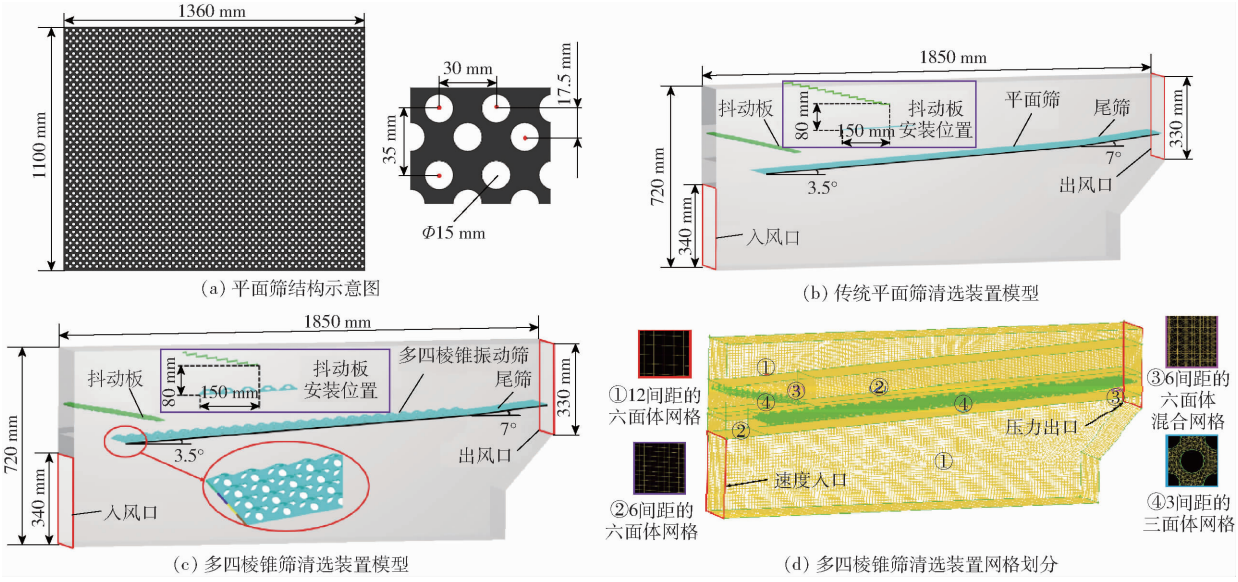


图 8　装置模型及网格划分

Fig. 8　Model and divided mesh of device

3.2　颗粒模型

选取德美亚一号玉米品种为试验对象，课题组通过田间调研测定收获期玉米籽粒、玉米芯、玉米秸秆的含水率分别为(24.2 ± 1)%、(46.9 ± 1.2)%、(63.5 ± 0.9)%，满足国家对于收获玉米籽粒含水率的要求。利用三维激光扫描台(Perceptron 916 - 4131、精度 0.1 μm)对玉米混合物外形进行扫描建模，去除噪点和尖边后将扫描对象点云图转换为 STEP 格式文件，运用 EDEM 软件，以各组分的轮廓为边界，选定合适直径的小球进行填充，填充后颗粒模型和对应的尺寸如表 1 所示。

3.3　仿真参数设定

在 EDEM 中选用 Hertz - Mindlin(no - slip)模型，振动筛筛体、抖动板及清选装置材料设置为钢[3]，基于课题组前期研究成果[16]，玉米混合物和部件的力学特性及相互接触参数设定见表 2 和表 3。

将长度为 200 mm，宽度为 200 mm 的虚拟颗粒工厂垂直置于抖动板上方，6 行玉米收获机常规喂入量为 5.0 kg/s，在本研究中，玉米混合物的喂入量设定为 5.0 ~ 8.0 kg/s，探究多四棱锥筛清选装置的极限性能。根据模拟中振动筛与实际振动筛宽度

表 1 颗粒模型及其参数

Tab. 1 Models and parameters of particles

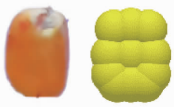
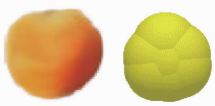
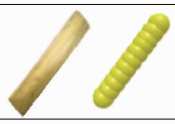
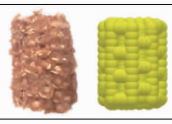
项目	锥形玉米籽粒	矩形玉米籽粒	球形籽粒	玉米秸秆	玉米芯
模型					
尺寸/mm	长:11.00 宽:8.81 厚:5.00	长:11.00 宽:9.40 厚:5.00	长:9.10 宽:8.80 厚:6.60	长:28.00~52.00 直径:6.00~8.00	宽:9.70~22.00 直径:7.10~20.00

表 2 材料力学特性参数

Tab. 2 Parameters of mechanical properties of materials

材料	密度 ρ/(kg·m^{-3})	剪切模量 G/Pa	泊松比 ν
玉米籽粒	1 190	1.27×10^{6}	0.40
玉米秸秆	150	1.00×10^{6}	0.42
玉米芯	650	1.09×10^{6}	0.45
筛面(钢)	7 800	7.00×10^{8}	0.30

表 3 材料间接触属性参数

Tab. 3 Parameters of interaction properties of materials

材料	碰撞恢复系数	滚动摩擦因数	静摩擦因数
玉米籽粒-玉米籽粒	0.44	0.06	0.50
玉米籽粒-玉米秸秆	0.35	0.01	0.32
玉米籽粒-玉米芯	0.28	0.01	0.73
玉米籽粒-筛面	0.61	0.03	0.53
玉米秸秆-玉米秸秆	0.26	0.01	0.32
玉米秸秆-玉米芯	0.29	0.01	0.47
玉米秸秆-筛面	0.43	0.01	0.45
玉米芯-玉米芯	0.27	0.01	0.97
玉米芯-筛面	0.39	0.01	0.43

的比例设置喂入量[20],喂入物料的比例依据图 9 所示,多四棱锥筛振动方向角为 136.6°,振动频率为 5 Hz,振动幅度为 19.0 mm[12];抖动板振动幅度设置为 38.2 mm,振动方向角设置为 155.4°,振动频率设置为 5.38 Hz,喂入时间为 3 s,模拟时间为 8 s。

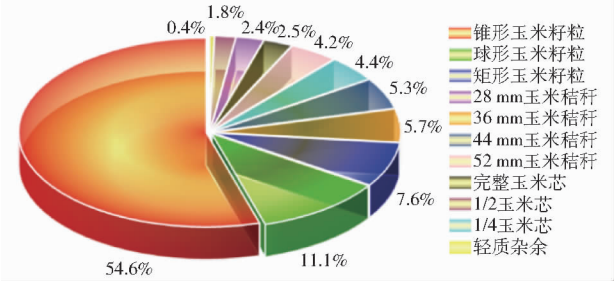


图 9 玉米混合物不同成分的比例

Fig. 9 Proportion of different components of maize mixtures

Fluent 中采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,采用瞬态压力模型作为求解器[21],装置内气压数值设置为 101.325 kPa,湍流强度设定为 3.16%,入口气流速度方向角选取中心值 22.5°作为仿真参数,清选装置入口气流速度为 9.6~16.0 m/s;残差为 1×10^{-3},时间步长为 0.005 s,总模拟时间为 8 s,EDEM 时间步长为 Rayleigh 时间步长的 20%,Fluent 时间步长为 EDEM 时间步长的 100 倍。

3.4 模拟结果分析

3.4.1 单元体不同排布形式下清选性能对比

为确定 3 种筛型清选性能的优劣,利用 EDEM 后处理功能在清选装置玉米籽粒收集处添加 Grid Bin Group 1,待清选过程结束后,分别提取 Grid Bin Group 1 中玉米籽粒和杂余的质量,计算籽粒含杂率 η_1 和籽粒损失率 η_2,计算公式为

$$\eta_1=\frac{m_4}{m_3}\times100\% \tag{23}$$

$$\eta_2=\left(1-\frac{m_6}{m_5}\right)\times100\% \tag{24}$$

式中 m_3——筛下玉米混合物总质量,kg

m_4——筛下杂余总质量,kg

m_5——颗粒工厂喂入的玉米籽粒总质量,kg

m_6——筛下玉米籽粒总质量,kg

3 种筛型在不同单元体高度下的籽粒含杂率与损失率如图 10 所示。分析可知,在不同单元体高度下,H 型筛的含杂率和损失率均低于其余两种,因此后续研究即将采用 H 型筛。当单元体高度小于 8 mm 时,玉米损失率不满足国家标准要求,当单元体高度为 18 mm 时含杂率不满足国家标准要求,因此将单元体高度试验区间缩小为 9~17 mm。

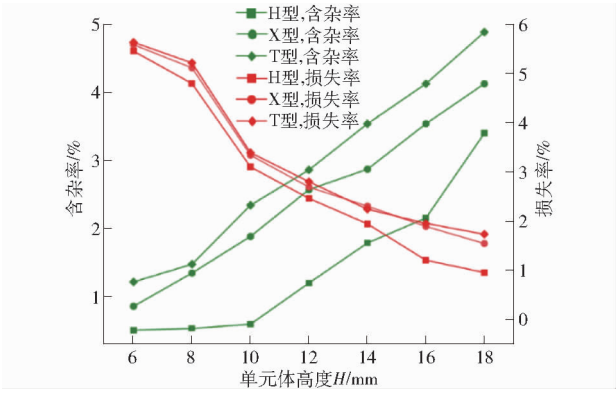


图 10 不同单元体高度下单元体排列形式对清选性能的影响

Fig. 10 Effect of unit arrangement on cleaning performance at different unit heights

3.4.2　不同喂入量下清选性能分析

基于已经确定的 H 型多四棱锥筛清选装置，探究喂入量 5 ~ 8 kg/s 对清选装置性能的影响，具体结果如表 4 所示。结果表明，随着喂入量的增加，籽粒含杂率和损失率均呈上升趋势；在喂入量 5 ~ 7 kg/s 下，籽粒含杂率和损失率均满足国家标准要求（籽粒含杂率小于 2.5%，籽粒损失率小于 2%）；在喂入量8 kg/s 下籽粒损失率和含杂率分别为 3.2% 和 2.8%，无法满足国家标准要求。因此后续研究所选取的喂入量条件为多四棱锥筛所能承受的最大喂入量 7 kg/s，探究在该喂入量条件下，筛上玉米籽粒的运动规律和各参数对多四棱锥筛清选装置性能的影响。

表 4　不同喂入量下多四棱锥筛清选装置的清选性能

Tab. 4　Cleaning performance of multi-tetragonal conical sieve with different feed masses　%

项目		喂入量/(kg·s^{-1})			
		5	6	7	8
含杂率	试验 1	1.23	1.46	1.97	3.12
	试验 2	1.28	1.61	1.87	3.27
	试验 3	1.21	1.49	1.89	3.21
	平均值	1.24	1.52	1.91	3.20
	标准差	0.03	0.06	0.04	0.06
损失率	试验 1	0.91	1.40	1.76	2.86
	试验 2	0.92	1.48	1.83	2.76
	试验 3	0.99	1.49	1.81	2.78
	平均值	0.94	1.46	1.80	2.80
	标准差	0.04	0.04	0.03	0.04

3.4.3　多四棱锥筛清选装置内气流场分析

在仿真结束后利用 Fluent 软件提取多四棱锥筛清选装置内的气流场分布情况，如图 11 所示。沿筛长方向在筛面上 0 ~ 80 mm 高度内（籽粒运动层）的矩形区域被划分成了 5 个小区域，分别提取并计算 A ~ E 5 个区域内气流速度的平均值。

分析可知，气流在筛体前端产生了一条高速气流带，如区域 A 所示，气流平均速度为 14.7 m/s，相比于入口气流速度增加了 1.9 m/s，有利于从抖动板落下的混合物分离；在筛体中部气流速度有所减小，如区域 B、C、D 所示，分别为 10.6、7.6、7.3 m/s，减小了籽粒向筛后运移的速度，有利于籽粒滞留，减小损失率；在筛尾位置气流速度又有所增加，如区域 E 所示，达到了 9.5 m/s，加快了玉米秸秆等杂余快速排出清选装置，整体气流场分布规律有利于多四棱锥筛清选装置进行清选作业。

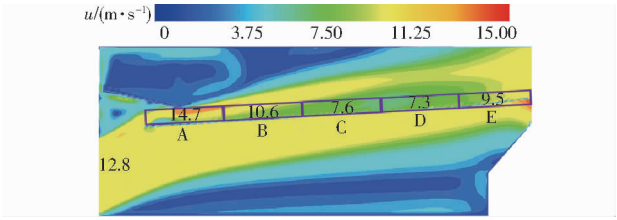


图 11　多四棱锥筛清选装置内气流场分布

Fig. 11　Distribution of airflow field in multi-tetragonal conical sieve cleaning device

3.4.4　多四棱锥筛清选装置筛分过程宏观分析

多四棱锥筛清选装置中玉米混合物筛分过程如图 12 所示。由颗粒工厂随机生成的玉米混合物首先落在抖动板上，被抖动板初步分散后抛起；在经过抖动板和多四棱锥筛之间的区域时，玉米秸秆和玉米芯等杂余被向后吹动的距离大于玉米籽粒，混合物完成再次分散。随着筛上混合物的增加，单位时间内脱离筛面物料的质量和从抖动板落到筛面物料的质量达到动态平衡，大部分玉米籽粒在筛体前中部完成了透筛，而筛尾部分气流速度增大，玉米秸秆和玉米芯等杂余被快速排出装置外；在颗粒工厂停止喂入后，多四棱锥筛筛上混合物的质量开始减少，未透筛的玉米籽粒继续完成透筛，玉米秸秆等杂余被快速排出，直至没有玉米籽粒透筛时筛分作业结束。

3.4.5　筛上玉米混合物质量分析

利用 EDEM 后处理模块在多四棱锥筛筛上添

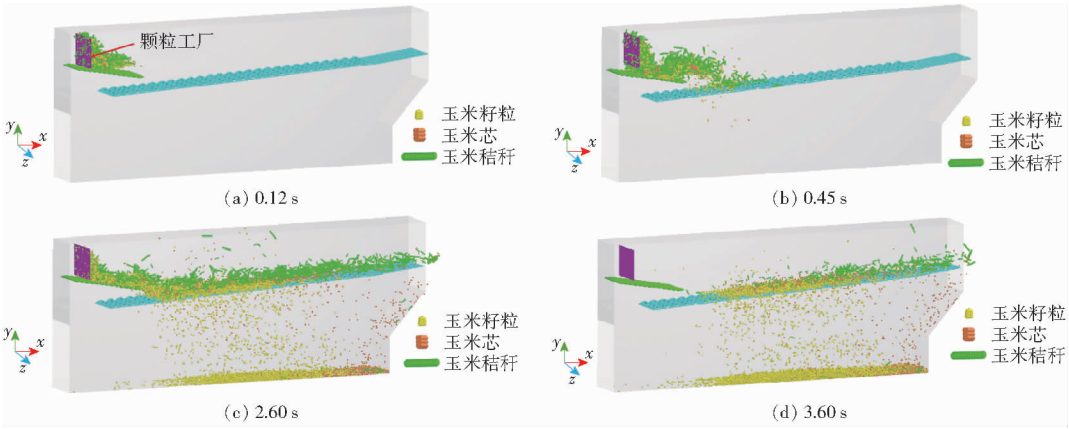


图 12　多四棱锥筛清选装置内玉米混合物筛分过程

Fig. 12　Cleaning process of maize mixtures in multi-tetragonal conical sieve cleaning device

加 Geometry Bin 1,提取 Geometry Bin 1 中玉米混合物质量随时间的变化。多四棱锥筛筛上玉米混合物质量随时间的变化如图 13 所示。分析可知,在筛分前期(0 ~2.4 s),筛上玉米混合物质量先急剧增加,后相对缓慢地增加。多四棱锥筛清选装置在 2.4 s 进入稳定筛分阶段,筛上混合物质量在 0.63 kg 附近波动。在 3.4 s 时进入筛分后期,筛上玉米混合物的质量开始下降,直至为 0 kg,在 4.8 s 完成筛分作业。

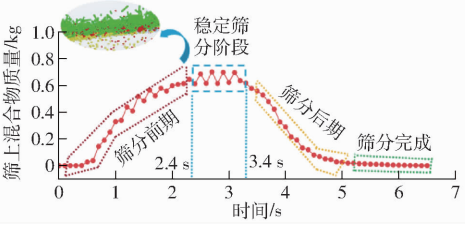


图 13 筛上玉米混合物质量的变化

Fig. 13 Variation in mass of maize mixtures on sieves

3.4.6 筛上玉米混合物运动速度分析

为进一步证明多四棱锥筛对筛上玉米混合物的运移效果,利用 EDEM 后处理模块在多四棱锥筛筛上添加 Geometry Bin 2,提取稳定筛分阶段内 Geometry Bin 2 中玉米籽粒和杂余的水平速度,并计算其相应的平均水平速度,其迁移速比计算式为

$$\lambda_m = \frac{V_s}{V_g} \times 100\% \tag{25}$$

式中 λ_m——筛上玉米混合物的迁移速比,%

V_s——筛上杂余的平均水平速度,m/s

V_g——筛上玉米籽粒的平均水平速度,m/s

如图 14 所示,通过分析多四棱锥筛筛上玉米混合物在稳定筛分阶段内相邻两个周期的迁移速比,发现筛上玉米混合物的迁移速比在一个运动周期内先增大后减小,最大值达到了 4.584%。分析原因可能为多四棱锥筛对筛上玉米籽粒起到了滞留的效果,使得玉米籽粒的平均水平速度减小,对玉米秸秆和玉米芯等杂余水平速度影响较小,导致杂余与籽粒的速度差变大,筛上玉米混合物分离效果较好。

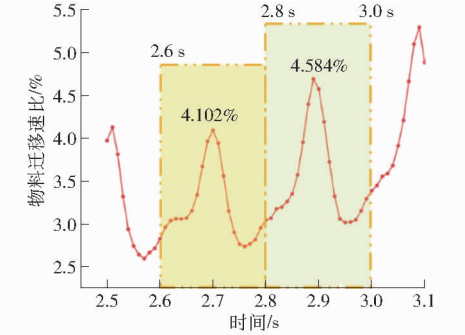


图 14 筛上物料的迁移速比

Fig. 14 Migration velocity ratios of materials on sieves

提取了多四棱锥筛筛上玉米籽粒的速度矢量图,如图 15 所示。分析可知在减速上升和减速下落阶段,近筛面的玉米籽粒与单元体侧壁碰撞,导致籽粒水平速度降低且方向分散,有利于降低玉米籽粒的含杂率和损失率。

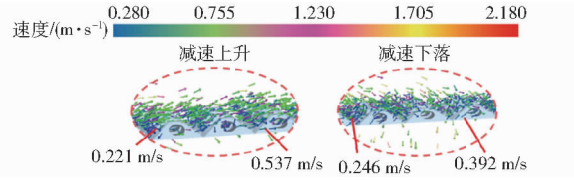


图 15 筛上玉米籽粒速度矢量图

Fig. 15 Vector plot of velocity of maize grain on sieve

3.5 多因素试验

3.5.1 试验设计

依据预试验结果和前文的研究,选取多四棱锥筛单元体高度 x_1、气流速度 x_2 和振动幅度 x_3 为试验因素,以含杂率 y_1、玉米损失率 y_2 和筛分速率 y_3 为指标进行三因素五水平二次正交旋转中心组合试验,试验因素编码如表 5 所示,多因素试验设计和结果如表 6 所示(X_1、X_2、X_3 为因素编码值)。

表 5 试验因素编码

Tab. 5 Experimental factors codes

编码	单元体高度 x_1/mm	气流速度 x_2/(m·s^{-1})	振动幅度 x_3/mm
-1.682	9.00	9.60	13.70
-1	10.62	10.90	15.85
0	13.00	12.80	19.00
1	15.38	14.70	22.15
1.682	17.00	16.00	24.30

3.5.2 试验结果与分析

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验结果进行分析,得到含杂率 y_1、损失率 y_2 和筛分速率 y_3 回归方程,并进行显著性检验。

3.5.2.1 含杂率

(1)回归模型

通过对数据分析和拟合[22]可知:模型显著性检验 F 值为 57.73,P 值小于 0.001,该模型显著;失拟项 $P=0.714>0.05$,残差项不显著,表明该回归模型成立。其中 3 个主效应项、交互项 X_1X_3、X_2X_3 以及 3 个二次项对指标影响显著,其余项影响不显著,主效应项对含杂率影响的主次顺序为:X_1、X_2、X_3。剔除不显著项获得各因素对籽粒含杂率的回归方程为

$$y_1 = 1.93 + 0.49X_1 - 0.17X_2 - 0.13X_3 + 0.075X_1X_3 - 0.083X_2X_3 - 0.052X_1^2 - 0.067X_2^2 - 0.05X_3^2 \quad (R^2 = 0.9956) \tag{26}$$

表 6　试验设计与结果

Tab. 6　Design and results of experiment

序号	因素			y_1/%	y_2/%	y_3/(kg·s^{-1})
	X_1	X_2	X_3			
1	-1	-1	-1	2.39	2.43	1.13
2	1	-1	-1	2.30	1.24	0.48
3	-1	1	-1	1.03	2.80	0.72
4	1	1	-1	2.06	1.15	0.50
5	-1	-1	1	1.10	2.20	0.60
6	1	-1	1	1.90	1.22	0.49
7	-1	1	1	0.91	2.10	0.45
8	1	1	1	1.80	1.40	0.52
9	-1.682	0	0	0.59	5.56	0.67
10	1.682	0	0	2.90	0.95	0.50
11	0	-1.682	0	4.40	1.20	0.53
12	0	1.682	0	1.76	3.20	0.52
13	0	0	-1.682	3.77	1.02	0.55
14	0	0	1.682	0.84	5.53	0.57
15	0	0	0	1.78	2.23	0.56
16	0	0	0	1.60	2.10	0.63
17	0	0	0	1.87	1.27	0.63
18	0	0	0	1.82	1.80	0.65
19	0	0	0	1.84	2.20	0.69
20	0	0	0	1.68	1.89	0.59
21	0	0	0	1.70	1.97	0.61
22	0	0	0	1.75	2.11	0.65
23	0	0	0	1.68	2.09	0.58

（2）响应曲面分析

各因素对含杂率影响的响应曲面如图 16 所示。当振动幅度不变时，随着单元体高度的增加，含杂率整体呈上升趋势。分析原因为当单元体高度增加时，对筛上玉米籽粒的滞留效果更强，导致筛上玉米混合物的分层效果变差，与筛面接触的杂余变多，杂余透筛概率增加，最终含杂率增加。当单元体高度保持不变时，随着振动幅度的增加，含杂率降低，分析原因为当振动幅度增加时，筛上玉米混合物一次抛起向后运移的距离增加，导致杂余与筛面的接触机会变小，最终导致含杂率降低。当振动幅度不变时，随着气流速度的增加，筛上混合物跃起高度变大，落回筛面的时间存在差异，使得筛上混合物的分层效果变好，杂余透筛概率降低，最终导致含杂率下降。

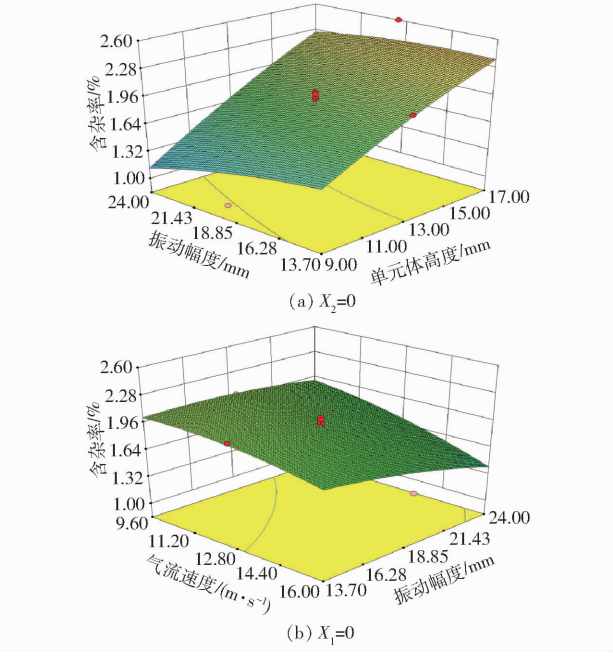


图 16　各因素对含杂率影响的响应曲面

Fig. 16　Response surfaces of effect of factors on impurity rate of grain

3.5.2.2　损失率

（1）回归模型

模型显著性检验 F 值为 153.96，P 值小于 0.001，该模型显著；失拟项 $P=0.446>0.05$，残差项不显著，表明该回归模型成立。其中 3 个主效应项、交互项 X_1X_2 和 X_2X_3 以及 3 个二次项对指标影响显著，其余项影响不显著，主效应项对损失率影响的主次顺序为：X_1、X_2、X_3。剔除不显著项获得各因素对损失率的回归方程为

$$y_2=1.71-0.38X_1+0.15X_2+0.067X_3+0.068X_1X_2-0.047X_2X_3+0.074X_1^2+0.029X_2^2-0.025X_3^2\quad(R^2=0.9907)\quad(27)$$

（2）响应曲面分析

各因素对损失率影响的响应曲面如图 17 所示。

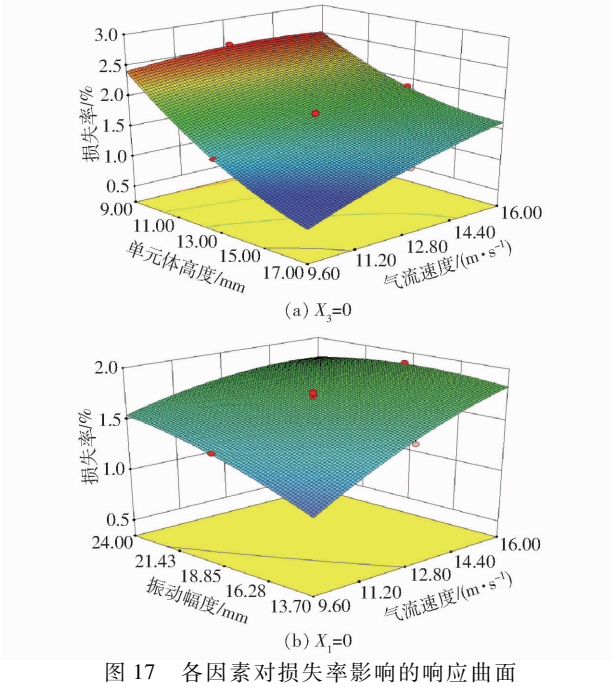


图 17　各因素对损失率影响的响应曲面

Fig. 17　Response surfaces of effect of factors on loss rate of grain

当气流速度不变时，随着单元体高度的增加，玉米籽粒损失率呈下降趋势。分析原因为随着单元体高度的增加，多四棱锥筛对筛上玉米籽粒的滞留效果更强，籽粒与单元体碰撞次数变多，透筛概率增

加,最终导致损失率下降。当单元体高度不变时,随着气流速度的增加,损失率随之增加,分析原因为籽粒在竖直和水平方向的受力增加,与筛面接触时间减少,透筛概率降低,最终导致损失率增加。当气流速度保持不变时,随着振动幅度的增加,玉米籽粒损失率也随之增加。分析原因为振动幅度增大时,筛上籽粒每次抛起向后运移的距离增加,使其与筛面的碰撞次数变少,透筛概率降低,最终导致损失率增加。

3.5.2.3 筛分速率

(1)回归模型

同理分析可知:模型显著性检验 F 值为 64.38,P 值小于 0.001,该模型显著;失拟项 $P=0.1347>0.05$,残差项不显著,表明该回归模型成立。其中 3 个主效应项、交互项 X_1X_2 和 X_1X_3 以及 3 个二次项对指标影响显著,其余项影响不显著,主效应项对筛分速率影响的主次顺序为:X_1、X_2、X_3。剔除不显著项获得各因素对筛分速率的回归方程为

$$y_3=0.6-0.037X_1+0.013X_2+5.99\times10^{-3}X_3+0.013X_1X_2+8\times10^{-3}X_1X_3+8.18\times10^{-3}X_1^2-3.847\times10^{-3}X_2^2-5.266\times10^{-3}X_3^2\quad(R^2=0.9781)\tag{28}$$

(2)响应曲面分析

各因素对筛分速率影响的响应曲面如图 18 所示。当单元体高度在 9 ~ 13 mm 时,随着气流速度的增加筛分速率有所下降。分析原因为随着气流速度的增加,玉米籽粒受力增加,导致其单位时间内向后运移的距离变远,随杂余排出清选装置外,导致筛分速率下降。当单元体高度在 13 ~ 17 mm 时随着气流速度的增加筛分速率有所上升。分析原因为随着气流速度的增加,位于相邻单元体交界处未透筛的玉米籽粒在气流力增大的条件下跃起高度变大,再次与筛面碰撞或透筛,最终导致筛分速率上升。当振动幅度不变时,随着单元体高度的增加,筛分速率呈下降趋势。分析原因为当单元体高度增加时,多四棱锥筛对筛上玉米籽粒的滞留效果更强,筛上玉米混合物分层不均匀,最终导致筛分速率下降。

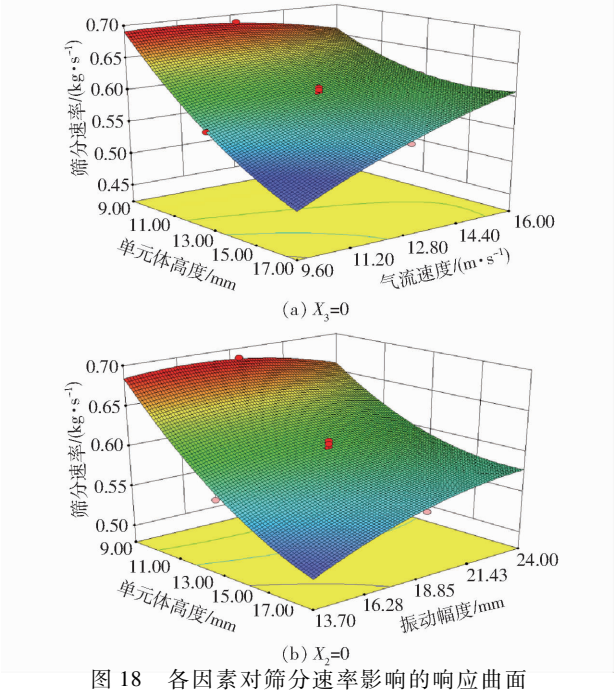


图 18 各因素对筛分速率影响的响应曲面

Fig. 18 Response surfaces of effect of factors on screening rate of grain

3.5.3 参数优化

利用 Design-Expert 8.0.6 软件对各指标回归模型进行约束优化求解,在满足清选性能要求的前提下获得较低的含杂率、损失率和较高的筛分速率,参数优化模型为

$$\begin{cases}\min y_1\\ \min y_2\\ \max y_3\\ \text{s.t.}\begin{cases}-1.682\leqslant X_1\leqslant1.682\\ -1.682\leqslant X_2\leqslant1.682\\ -1.682\leqslant X_3\leqslant1.682\end{cases}\end{cases}\tag{29}$$

当单元体高度为 11.26 mm,气流速度为 9.6 m/s,振动幅度为 15.13 mm,此时多四棱锥筛清选装置含杂率为 1.62%,玉米损失率为 1.57%,筛分速率为 0.66 kg/s。

4 验证试验

4.1 试验装置与物料

为了验证仿真试验优化结果的准确性,依据优化结果加工试验装置并搭建高速摄像试验台架,如图 19 所示。



图 19 试验台架

Fig. 19 Test bench

1. 振动筛 2. 高速摄像机 3. 抖动板 4. 风机 5. 电机 6. 变频器 7. 计算机 8. 机架

试验使用的玉米籽粒、玉米芯和玉米秸秆的含水率分别为(24.2 ± 1)%、(46.9 ± 1.2)%、(63.5 ± 0.9)%,且抖动板、振动筛和玉米混合物的材料力学特性以及相互间的接触参数与仿真试验一致。按照图 9 所示比例配比 21 kg 玉米混合物,并将其均

匀铺在抖动板上，通过反复试验并利用高速摄像机进行观察[4]，使得 3 s 内 21 kg 的玉米混合物均匀地喂入到振动筛上，保证清选装置台架试验喂入量为 7 kg/s，试验重复 3 次。为方便在高速图像中追踪玉米籽粒，验证玉米籽粒的运动规律，提前将玉米籽粒进行染色处理[23]，分别为原色籽粒、蓝色籽粒、红色籽粒和绿色籽粒。

基于优化结果，制备了单元体高度为 11.2 mm 的多四棱锥筛，通过变频器将清选装置入口气流的速度和振动筛振动频率分别设定为 9.6 m/s 和 5 Hz，通过调整摇杆长度使振动筛振动幅度为 15.1 mm。清选装置入口气流速度风机变频器频数 f_1 与风机出风口风速 v_f 的关系为[24]

$$f_1 = 3.09v_f + 0.921 \tag{30}$$

振动筛变频器频数 f_2 与振动筛振动频率 v_z 的关系为

$$f_2 = 3.838\,8v_z + 0.243\,9 \tag{31}$$

计算可得频数 f_1 和 f_2 应分别调整为 30.58、19.44 Hz，保证台架试验参数与优化结果一致。

试验前调整各设备，实现清选装置整体正常稳定运行后，开始通过抖动板喂入玉米混合物；待无玉米混合物透筛后关闭变频器并保存本次高速摄像文件，收集筛下玉米混合物，对应视频文件计算并记录籽粒含杂率和损失率。

4.2　试验结果

提取了稳定筛分阶段一个运动周期内多四棱锥筛中部筛上玉米籽粒的运动轨迹，如图 20 所示。分析可知，多四棱锥筛筛上未发生堆积现象，筛体后部混合物的数量明显少于前部，大量的玉米籽粒完成了透筛，且筛上玉米混合物有着较好的分层效果。近筛面的玉米籽粒与多四棱锥筛发生碰撞被滞留，一些籽粒在碰撞后完成透筛，这与仿真试验中提取的近筛面玉米籽粒速度矢量规律分析一致。其次，处于相邻单元之间未透筛的玉米籽粒在多四棱锥筛和气流的作用下被抛起后越过单元体，并且再次与单元体碰撞后完成透筛。

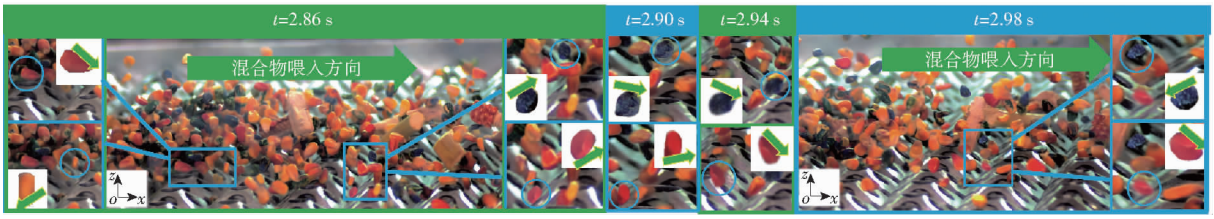


图 20　多四棱锥筛筛上玉米籽粒运动状态

Fig. 20　Movement of maize grains on multi-tetragonal conical sieve

为验证多因素优化试验后多四棱锥筛在连续大喂入量条件下清选性能的准确性，参照 GB/T 21961—2008《玉米收获机械试验方法》进行试验，每组试验进行 3 次重复，对清选装置的籽粒含杂率、损失率和筛分速率进行了统计，并与平面筛和仿生蚯蚓筛清选装置[17-18]进行清选性能对比试验，试验结果如表 7 所示。

在最优工作条件下，多四棱锥筛清选装置的籽粒含杂率为 1.68%，损失率为 1.33%，筛分速率为 3.66 kg/s。相比于平面筛和仿生蚯蚓筛清选装置，籽粒含杂率分别降低了 0.78、0.14 个百分点，籽粒损失率分别降低了 1.42、0.65 个百分点，筛分速率分别提高了 0.16、0.11 kg/s，多四棱锥筛清选装置 3 项指标均优于其余两种筛型，且满足国家标准要求[3]。

表 7　台架试验结果

Tab. 7　Results of bench test

序号	平面筛			仿生蚯蚓筛			多四棱锥筛		
	籽粒含杂率/%	籽粒损失率/%	筛分速率/(kg·s^{-1})	籽粒含杂率/%	籽粒损失率/%	筛分速率/(kg·s^{-1})	籽粒含杂率/%	籽粒损失率/%	筛分速率/(kg·s^{-1})
1	2.59	2.38	3.53	1.83	1.94	3.53	1.71	1.25	3.59
2	2.45	2.63	3.50	1.78	1.95	3.55	1.73	1.32	3.73
3	2.34	3.25	3.47	1.85	1.96	3.57	1.61	1.42	3.66
平均值	2.46	2.75	3.50	1.82	1.95	3.55	1.68	1.33	3.66
标准差	0.10	0.37	0.03	0.03	0.01	0.02	0.04	0.06	0.06

多四棱锥筛清选装置的籽粒含杂率、损失率和筛分速率与多因素试验中获得的最优结果相对误差为 3.57%、15.2%、1.37%，因实际试验中装置密封性和电压不稳定等情况，试验结果存在一定误差，验证了多因素优化试验结果的准确性。多四棱锥筛清选装置能够完成玉米混合物连续 7 kg/s 喂入量条件下的清选作业，且清选性能相较于课题组前期研究成果得到了提升。

5 结论

(1)设计了一种多四棱锥筛,确定了多四棱锥筛单元体的关键结构参数,提出了单元体的 3 种排列方式,并通过 CFD - DEM 耦合方法,确定 H 型多四棱锥筛清选性能优于其余两种。

(2)在稳定筛分阶段,多四棱锥筛筛上玉米籽粒被滞留,有利于筛上混合物的分离,同时籽粒的滞留提高了籽粒的透筛速率。

(3)建立了清选装置主要参数与关键指标之间的回归模型,获得了多四棱锥筛清选装置的最优参数组合为:单元体高度 11.26 mm,气流速度 9.6 m/s,振动幅度 15.13 mm。

(4)通过高速摄像台架试验验证了筛上玉米籽粒"撞筛—滞留—跃起—撞筛—透筛"的运动规律。当玉米混合物喂入量为 7 kg/s 时,多四棱锥筛清选装置含杂率为 1.68%,籽粒的损失率为 1.33%,筛分速率为 3.66 kg/s,满足国家标准要求。

参 考 文 献

[1] 吴凯文. 玉米联合收获机发展现状及存在的问题[J]. 农业开发与装备,2019(6):31 - 32.

[2] 刘成强,徐海港,王建强. 自走式玉米籽粒联合收获机优化设计[J]. 农业工程,2017,7(5):113 - 116.
LIU Chengqiang, XU Haigang, WANG Jianqiang. Optimization design of self-propelled corn combine harvester[J]. Agricultural Engineering, 2017, 7(5):113 - 116. (in Chinese)

[3] 王立军,刘伟腾,李懿航,等. 大喂入量玉米籽粒收获机清选系统双层筛孔抖动板研究[J]. 农业机械学报,2022,53(7):92 - 102.
WANG Lijun, LIU Weiteng, LI Yihang, et al. Research of double-layer jitter plates with holes in large-feeding mass cleaning system of maize grain harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(7):92 - 102. (in Chinese)

[4] 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)

[5] 徐立章,李洋,李耀明,等. 谷物联合收获机清选技术与装置研究进展[J]. 农业机械学报,2019,50(10):1 - 16.
XU Lizhang, LI Yang, LI Yaoming, et al. Research progress on cleaning technology and device of grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(10):1 - 16. (in Chinese)

[6] 苏天生,韩增德,崔俊伟,等. 谷物联合收割机清选装置研究现状及发展趋势[J]. 农机化研究,2016,38(2):6 - 11.
SU Tiansheng, HAN Zengde, CUI Junwei, et al. Research status and development trend of cleaning unit of cereal combine harvesters[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016,38(2):6 - 11. (in Chinese)

[7] 邓嘉鸣,沈惠平,李菊,等. 三维并联振动筛设计与实验[J]. 农业机械学报,2013,44(11):342 - 346,328.
DENG Jiaming, SHEN Huiping, LI Ju, et al. Design and experiment for three-dimensional parallel kinematics vibration sieve [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(11):342 - 346,328. (in Chinese)

[8] 彭三河,张云华. 谷物清选机振动筛结构的试验研究[J]. 湖北农学院学报,2004(4):313 - 315.
PENG Sanhe, ZHANG Yunhua. The testing research on the structure of vibrating screen of grain cleaning machine[J]. Journal of Hubei Agricultural College, 2004(4):313 - 315. (in Chinese)

[9] 王立军,武振超,冯鑫,等. 玉米收获机清选曲面筛设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(2):90 - 101.
WANG Lijun, WU Zhenchao, FENG Xin, et al. Design and experiment of curved screen for maize grain harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(2):90 - 101. (in Chinese)

[10] SHEN Guolang, CHEN Zhiquan, WU Xiaoqiu, et al. Stepwise shape optimization of the surface of a vibrating screen[J]. Particuology,2021,58:26 - 34.

[11] LI Yibo, XU Yang, CUI Tao, et al. Improving particle dispersion characteristics with a novel cleaning screen: parameter design and numerical simulation[J]. Powder Technology,2022,397:116987.

[12] 王立军,冯鑫,郑招辉,等. 玉米清选组合孔筛体设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(5):104 - 113.
WANG Lijun,FENG Xin, ZHENG Zhaohui, et al. Design and test of combined sieve of maize screening[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(5):104 - 113. (in Chinese)

[13] YIN Zhongjun, ZHANG Hang, HAN Tian . Simulation of particle flow on an elliptical vibrating screen using the discrete element method[J]. Powder Technology,2016,302:443 - 454.

[14] 侯勇俊,祝敬涛,李华川,等. 均衡运动旋转振动筛 DEM 数值模拟[J]. 化工学报,2021,72(5):2706 - 2717.
HOU Yongjun, ZHU Jingtao, LI Huachuan, et al. DEM numerical simulation on rotary vibrating screen under balanced motion [J]. CIESC Journal, 2021,72(5):2706 - 2717. (in Chinese)

[15] FU Jun, ZHANG Jialiang, LIU Fengshuang. Enhanced sieving mechanism of novel cleaning screen and investigation of particle movement characteristics on the screen[J]. Powder Technology,2024,431:119043.

[16] WANG Lijun, ZHOU Wenxiu, DING Zhengjun, et al. Experimental determination of parameter effects on the coefficient of

restitution of differently shaped maize in three-dimensions[J]. Powder Technology,2015,284:187 – 194.
[17] WANG Lijun, LI Yihang, WANG Housheng, et al. Behavior of maize particles on the bionic sieve designed based on the earthworm's contour[J]. Powder Technology,2022,403:117399.
[18] 李懿航. 基于蚯蚓头部轮廓的玉米籽粒仿生筛设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2023.
LI Yihang. Design and experiment of bionic sieve based on earthworm's contour for maize grains cleaning[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023. (in Chinese)
[19] WANG Lijun, CHAI Jin, WANG Housheng, et al. Design and performance of a countersunk screen in a maize cleaning device [J]. Biosystems Engineering,2021,209:300 – 314.
[20] XU Lizhang, LI Yang, CHAI Xiaoyu, et al. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow to predict the cleaning performance of rice combine harvesters[J]. Biosystems Engineering,2020,190:11 – 24.
[21] 王立军,冯鑫,武振超,等. 玉米联合收获机贯流风阶梯式振动筛设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(10):115 – 123.
WANG Lijun, FENG Xin, WU Zhenchao, et al. Design and test of stepped vibrating screen with cross air for maize harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(10):115 – 123. (in Chinese)
[22] 潘丽军,陈锦权. 试验设计与数据处理[M]. 南京:东南大学出版社,2008.
[23] CAO Bin, JIA Fuguo, ZENG Yong, et al. Effects of rotation speed and rice sieve geometry on turbulent motion of particles in a vertical rice mill[J]. Powder Technology,2018,325:429 – 440.
[24] FENG Xin, GONG Zhenping, WANG Lijun, et al. Behavior of maize particle penetrating a sieve hole based on the particle centroid in an air-screen cleaning unit[J]. Powder Technology,2021,385:501 – 516.

(上接第 214 页)

[22] 徐济双,焦俊,李淼,等. 融合改进 A* 算法与模糊 PID 的病死畜禽运输机器人路径规划与运动控制方法[J]. 智慧农业(中英文), 2023, 5(4): 127 – 136.
XU Jishuang, JIAO Jun, LI Miao, et al. Path planning and motion control method for sick and dead animal transport robots integrating improved A* algorithm and fuzzy PID[J]. Smart Agriculture, 2023, 5(4): 127 – 136. (in Chinese)
[23] ZHANG J, LING H, TANG Z, et al. Path planning of USV in confined waters based on improved A* and DWA fusion algorithm[J]. Ocean Engineering, 2025, 322: 11.
[24] NIU T, WANG L, XU Y, et al. Quintic Bézier curve and numerical optimal solution based path planning approach in seismic exploration[J]. Control Engineering Practice, 2024, 145: 105855.
[25] 奚小波,史扬杰,单翔,等. 基于 Bezier 曲线优化的农机自动驾驶避障控制方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(19): 82 – 88.
XI Xiaobo, SHI Yangjie, SHAN Xiang, et al. Obstacle avoidance path control method for agricultural machinery automatic driving based on optimized Bezier[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(19): 82 – 88. (in Chinese)
[26] 杨洋,温兴,马强龙,等. 基于贝塞尔曲线的动态识别区农机避障路径实时规划[J]. 农业工程学报, 2022, 38(6): 34 – 43.
YANG Yang, WEN Xing, MA Qianglong, et al. Real time planning of the obstacle avoidance path of agricultural machinery in dynamic recognition areas based on Bezier curve[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(6): 34 – 43. (in Chinese)
[27] JIANG X, WANG Z, DONG C. A path planning algorithm based on improved RRT sampling region[J]. Computers Materials and Continua, 2024, 80(3): 4303 – 4323.
[28] JIANG S, QI P, HAN L, et al. Navigation system for orchard spraying robot based on 3D LiDAR SLAM with NDT_ICP point cloud registration[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 220: 108870.
[29] LI Q, ZHU H. Performance evaluation of 2D LiDAR SLAM algorithms in simulated orchard environments[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 221: 108994.