doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.19.026

振动风选式稻谷清选机清粮装置流场分析与结构优化

葛　俊[1,2]　冯睿焯[1,2]　曹成茂[1,2]　徐　微[1,2]　徐国进[1,2]　秦　宽[1,2]
陈建国[3]　王　雷[3]　孙　燕[1,2]　方梁菲[1,2]
(1.安徽农业大学工学院,合肥 230036;2.安徽省智能农机装备工程实验室,合肥 230036;
3.安徽省正宇粮机科技股份有限公司,阜阳 236512)

摘要:针对现有风选谷物清选机加工稻谷时,因稻谷表面毛刺相互粘附,使杂质被粘附在稻谷之间无法脱离,导致清选质量变差的问题,建立清粮剪切流场与稻谷粘附模型,确定稻谷在清粮流场中的粘附扰动规律。基于流场-稻谷耦合关系,确定稻谷粘附扰动与稻杂分层的临界速度范围,并结合连续方程优化清粮装置结构参数,得到参数优化范围为:清粮室高度 760~840 mm、清粮室长度 1 960~2 040 mm、清粮室后挡板长度 540~620 mm。采用流固耦合仿真方法,进行三因素五水平二次正交旋转组合试验,确定最优结构参数组合。试验结果表明,当清粮室高度为 800 mm、清粮室长度为 2 000 mm、清粮室后挡板长度为 580 mm 时,含杂率为 0.853%,损失率为 1.11%,满足清选农艺要求。验证试验表明,在最优参数组合下,含杂率、损失率分别为 0.88%、1.14%,与优化结果相对误差控制在 3% 以内,表明优化结果具有可靠性。该研究可为风选式稻谷清选装置的结构优化提供理论依据与技术参考。

关键词:稻杂混合物;振动风选式清选机;清粮装置;稻谷粘附;纵向剪切;耦合仿真
中图分类号:S226.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2026)19-0289-11　　**OSID**:

Flow Field Analysis and Structural Optimization of Vibrating Air-selected Rice Grain Cleaning Device

Ge Jun[1,2]　Feng Ruizhuo[1,2]　Cao Chengmao[1,2]　Xu Wei[1,2]　Xu Guojin[1,2]　Qin Kuan[1,2]
Chen Jianguo[3]　Wang Lei[3]　Sun Yan[1,2]　Fang Liangfei[1,2]
(1. *School of Engineering*, *Anhui Agricultural University*, *Hefei* 230036, *China*
2. *Anhui Intelligent Agricultural Machinery Equipment Engineering Laboratory*, *Hefei* 230036, *China*
3. *Anhui Zhengyu Grain Machinery Technology Co.*, *Ltd.*, *Fuyang* 236512, *China*)

Abstract: Aiming at the problem that when the existing grain sorting machine processes rice, the impurities are mixed between the rice to form stubborn impurities due to the mutual adhesion caused by the burrs on the surface of the rice, which leads to the deterioration of the sorting quality, the model of the shear flow field and the adhesion of the rice was established to determine the adhesion disturbance law of the rice in the flow field of sorting environment. The model can accurately characterize the adhesion interaction between rough rice and impurities under shear airflow conditions. Based on the flow field-rice coupling relationship, the critical velocity range of rice adhesion disturbance and rice impurities stratification was determined. Combined with the continuous equation, the structural parameters of the grain sorting device were optimized, and the optimization range was obtained: height of the grain cleaning chamber was 760~840 mm, length of the grain cleaning chamber was 1 960~2 040 mm, and length of the rear baffle of the grain cleaning chamber was 540~620 mm. The parametric optimization tests were carried out by fluid-solid coupling simulation with a quadratic orthogonal rotary combination design. The optimal combination of structural parameters was determined by three-factor and five-level orthogonal test. The results showed that when the height of the grain cleaning room was 800 mm, the length of the grain cleaning room was 2 000 mm, and the length of the rear baffle of the grain cleaning room was 580 mm,

收稿日期:2025-06-19　修回日期:2025-09-28
基金项目:国家自然科学基金项目(52075003)
作者简介:葛俊(1984—),男,讲师,博士,主要从事农业机械化研究,E-mail:gejunahau@ahau.edu.cn
通信作者:秦宽(1989—),男,副教授,博士,主要从事农业机械化装备研究,E-mail:qinkuan@ahau.edu.cn

the impurity rate was 0.853%, and the loss rate was 1.11%, which met the agronomic requirements of the sorting. The validation test showed that under the optimal parameter combination, the impurity rate and loss rate was 0.88% and 1.14%, respectively, and the relative error with the optimization result was within 3%, indicating the reliability and accuracy of the optimized results. The research result can provide theoretical basis and technical reference for the structural optimization of rice sorting device.

Key words: rice-impurity mixture; vibrating air-selected type cleaning machine; grain cleaning device; rice adhesion; longitudinal shear; coupling simulation

0 引言

我国水稻产量连续 3 年保持在 2 亿吨以上[1]。相较于其他谷物类型,稻谷因其表面坚硬、粗糙且外壳有丰富的毛刺,故在清选加工方面与其他谷物存在明显差异[2-3]。稻谷收获后,因稻谷间毛刺作用会夹杂瘪谷、茎秆、颖壳、石子、灰尘等杂质,形成稻杂混合物,为获得清洁的稻谷需要对稻杂混合物进行清选[4-5]。

近年来,谷物清选机械及清选原理的研究取得了优异成果,且主要集中在清选机械风选设备和筛选设备。陶晓[6]设计了一种双层振动筛,可以有效提高谷物清选质量,而樊晨龙等[7]设计了一种双层振动式清选装置,以应对大喂入时损失率和含杂率高等问题。周璇等[8]设计了一种圆锥形风机,其清选指标明显且优于清选农业生产标准。刘星弈等[9]设计了一种双风道横流吸杂风机,有效解决流量分布不均问题。在清选原理研究方面,研究多通过仿真和试验的方式进行,以探究清选原理。胡森等[10]通过流体仿真,得出风道的截面流体质量会影响谷物清选作业。Xu 等[11]通过清选数学模型,验证了气流速度与清选性能评价指标呈线性关系;Elemam 等[12]通过仿真发现,入口高度变化时的风速最有利于清选。陈广慧等[13]采用耦合仿真的方法,得出了在气流作用下振动筛的最佳工作参数组合。丁贺贺等[14]验证了清选风速越大,则谷物损失越大,而进料量越小,则谷物清洁度越高。肖星星等[15]运用耦合仿真研究发现饱满稻谷更有利于清选。Almohammed 等[16]提出了一种计算模型,分析出流场中颗粒的粘附力与颗粒直径成反比。Ahmadi 等[17]运用 JKR 模型探究了不同颗粒在不同流动条件下,粘附力和剪切速度的变化情况。

综上所述,诸多学者对谷物清选机振动筛、风道结构、风机形态和具体作业参数等方面开展了研究,为后续谷物清选机械的设计优化提供参考。同时颗粒的粘附作为气固两相流中影响清选质量的主要因素之一,其相关研究基本停留在颗粒在流场中的一般性原理,鉴于稻谷独特的表面性质,需要考虑其在清粮流场环境中的粘附情况,故本文主要针对稻谷清选机在清选加工时,稻谷表面毛刺易在清选环境中粘附,导致杂质夹杂难分层、含杂率与损失率偏高的问题,通过清粮室参数优化设计提升稻谷清粮装置清选效果。

1 振动风选式稻谷清选机结构与工作原理

1.1 整机结构

振动风选式稻谷清选机由进料斗、振动筛、离心风机、稻谷清粮装置、移动机架组成,其中稻谷清粮装置由垂直风道、吸杂风道、旋风式除尘器(沙克龙)、清杂风道、出风口组成并与离心风机直接连接。垂直风道由上风道、清粮室、下料斗以及吸杂口组成。整机由电机作为配套动力固定于机架上方。整机结构如图 1 所示。

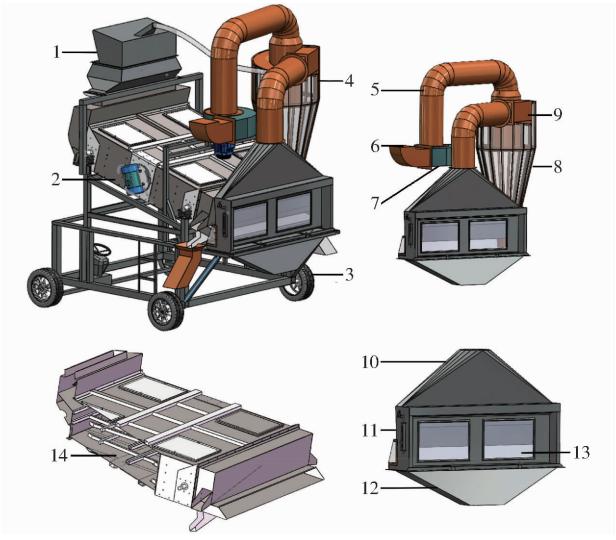


图 1 整机结构图

Fig. 1 Structure diagram of whole machine

1. 进料斗 2. 振动筛 3. 移动机架 4. 稻谷清粮装置 5. 清杂风道 6. 出风口 7. 离心风机 8. 沙克龙 9. 吸杂风道 10. 上风道 11. 清粮室 12. 下料斗 13. 吸杂口 14. 振动筛筛面

振动风选式稻谷清选机主要技术参数为:整机外形尺寸(长×宽×高)为 3 800 mm×3 600 mm×4 200 mm,配套功率为 7.5 kW,生产率为 60 t/h;稻谷清粮装置外形尺寸(长×宽×高)为 3 600 mm×2 040 mm×3 500 mm,低压离心风机转速为 800 r/min;清粮振动筛外形尺寸(长×宽×高)为 2 600 mm×2 200 mm×600 mm,振动电机频率为

50 Hz。

1.2　工作原理

振动电机驱动振动筛筛面振动，低压离心风机回转在稻谷清粮装置内产生低压空气流场；原始稻杂混合物由振动筛进料斗喂入，经振动筛筛选，实现初筛。此时稻杂混合物主要由稻谷、瘪谷、短茎秆组成，在重力和风力的作用下经振动筛出料口进入垂直风道内。进入稻谷清粮装置内的混合物在流场的作用下实现分层，清选后的稻谷于下料斗流出，杂质则经吸杂风道向上运动并在沙克龙处实现二次沉降，轻杂质则由清杂风道经出风口吹出，完成对稻杂混合物的整体清选。

2　关键部件设计与流场分析

目前，常见振动风选机在小流量筛选后进入清粮室的稻谷平均含杂率约为 3.3%，含杂率和生产率均不理想，为了改善这一状况，本研究拟根据生产实际需求，在经过结构和流场优化设计后风选机满足生产率 60 t/h 时稻谷含杂率和损失率均降至 2% 以下的目标。为了满足以上清粮农艺要求，并结合清粮（吸杂）流场规律对清粮室结构进行优化改进。

2.1　清粮室宽度设计

清粮室为矩形通道结构，为保障 60 t/h 生产率，清粮室吸杂口单位时间截面需流过粮食质量 M_f 为

$$M_f = \frac{M_t \varepsilon}{n_l} \tag{1}$$

其中，M_t 为生产率，ε 为稻杂混合物清洁率，取 96.7%[18]，n_l 为稻谷可能堆叠的层数，为保证最大流量最小堆叠层数取 2，经计算可得粮食流量为 6.14 kg/s。因此要满足单位截面通过粮食质量，避免吸粮口处粮食发生堵塞，同时保证稻杂做抛物线运动时能够进入清粮室，需首先对吸杂口宽度及清粮室吸粮口与振动筛出料口的距离进行设计计算。

如图 2 所示，稻杂混合物由振动筛初步清选后由振动筛出料口送入清粮室吸杂口中，稻杂颗粒离开振动筛筛面并以一定速度 v_0 继续向下运动 h = 200 mm 并撞击倾斜角度 α 为 60°的振动筛出料口斜面，从而形成一个垂直于斜面方向的速度。此时稻杂颗粒速度 v 分为 3 种情况[19]：①稻杂颗粒在筛面振动和摩擦的共同作用下丧失速度，此时仅因重力作用向下运动撞击出料口斜面，撞击后速度 v_1 为

$$v_1 = v_{\min} = \sqrt{2gh} \tag{2}$$

式中　$v_{\min}$——颗粒撞击斜面后最小速度

g——重力加速度

②由于振动筛筛面运动为简谐运动，简谐运动的速度随时间变化表现为周期性。稻杂颗粒在筛面振动的作用下获得初始速度

$$v_0 = v_{\text{avg}} = 2k\pi fA \tag{3}$$

式中　v_{avg}——颗粒撞击斜面后平均速度

k——经验系数，取 0.6

f——振动筛振动频率

A——振动筛振动幅度

下落撞击斜面，撞击后速度 v_2 为

$$v_2 = \sqrt{v_{\text{avg}}^2 + 2gh} \tag{4}$$

③而在实际简谐运动的过程中，速度在一个周期内不断变化，呈现出正负交替的变化。小部分稻杂颗粒运动至平衡位置时获得最大速度 $v_{\max}$

$$v_0 = v_{\max} = 2\pi fA \tag{5}$$

下落撞击斜面，撞击后速度 v_3 为

$$v_3 = \sqrt{v_{\max}^2 + 2gh} \tag{6}$$

已知振动筛频率 f 为 50 Hz，振动幅度 A 为 10 mm。代入数值可得稻杂颗粒做抛物线运动最小撞击速度 $v_{\min}$ 为 1.99 m/s，平均速度 v_{avg} 为 2.18 m/s，最大速度 $v_{\max}$ 为 2.71 m/s。

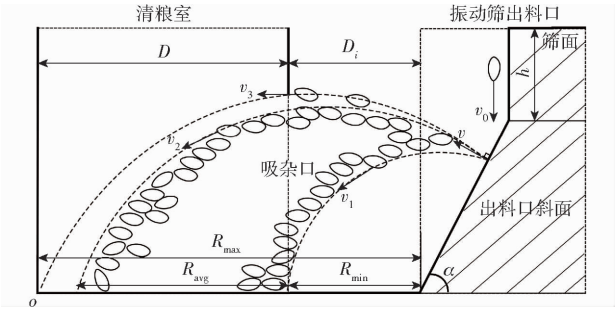


图 2　稻杂颗粒抛物线轨迹示意图

Fig. 2　Diagram of throw trajectory of rice hybrid

稻杂颗粒在以上速度范围内做抛物线运动，有

$$x = v_x t = vt\cos\alpha \tag{7}$$

$$y = v_y t - \frac{1}{2}gt^2 = vt\sin\alpha - \frac{1}{2}gt^2 \tag{8}$$

式中　v_x、v_y——稻杂颗粒撞击后抛射速度的水平、竖直速度分量

t——稻杂颗粒做抛物线运动时长

联立式(7)、(8)，可知轨迹方程为

$$y = x\tan\alpha - \frac{g}{2v\cos\alpha}x^2 \tag{9}$$

稻杂颗粒的射程 R 为

$$R = \frac{v^2\sin(2\alpha)}{g} \tag{10}$$

已知高度 h 为 200 mm，斜面角度 α 为 60°。由式(9)可得

$$\begin{cases} y_1 = 1.73x - 4.95x^2 \\ y_2 = 1.73x - 4.13x^2 \\ y_3 = 1.73x - 2.67x^2 \end{cases} \tag{11}$$

式中 y_1、y_2、y_3——稻杂颗粒在 v_1、v_2、v_3 速度下竖直方向位移

当稻杂颗粒运动至(0,0)时稻杂颗粒顺利射入清粮室内,此时 $y=0$,当稻杂颗粒以 v_1 做抛物线运动时,此时最小射程 R_{min} 为 350 mm;稻杂颗粒以 v_2 做抛物线运动,则此平均射程 R_{avg} 为 420 mm;当稻杂颗粒以 v_3 做抛物线运动时,此时最大射程 R_{max} 为 650 mm;为保证稻杂颗粒顺利经吸杂口进入清粮室,且不与壁面发生碰撞回弹从而造成堵塞,此时清粮室宽度 D 应为 300 mm;同时为保证稻杂颗粒做抛物线运动时最小射程范围能够进入清粮室,则此时清粮室吸粮口与振动筛出料口的配合距离 D_i 应为 350 mm。

2.2 清粮流场剪切模型分析

已知进入清粮室的稻杂混合物主要以稻谷为主,其中夹杂着瘪谷、短茎秆以及少量颖壳与灰尘,在清粮室流场环境中稻谷间会由于表面毛刺发生粘附现象,将杂质锁在稻谷间,不利于负压流场将杂质吸走。为提高清选质量,需要破除流场内稻谷的粘附,在这一过程中依赖流场对稻谷粘附现象的扰动。

如图 3 所示,为实现上述扰动,需要在稻谷间形成剪切流场,依赖剪切流场中所产生的剪切力实现对稻谷的扰动,按照剪切作用方向可以分为横向剪切和纵向剪切[20-21]。速度梯度是剪切流场的主要特征,上文已经求得清粮室宽度 D,以 D 作为吸杂口截面流体速度变化的距离,设此时吸杂口截面平均速度为 v_D(m/s),则速度梯度 Δv 可表示为

$$\Delta v = \frac{2v_D}{D} \tag{12}$$

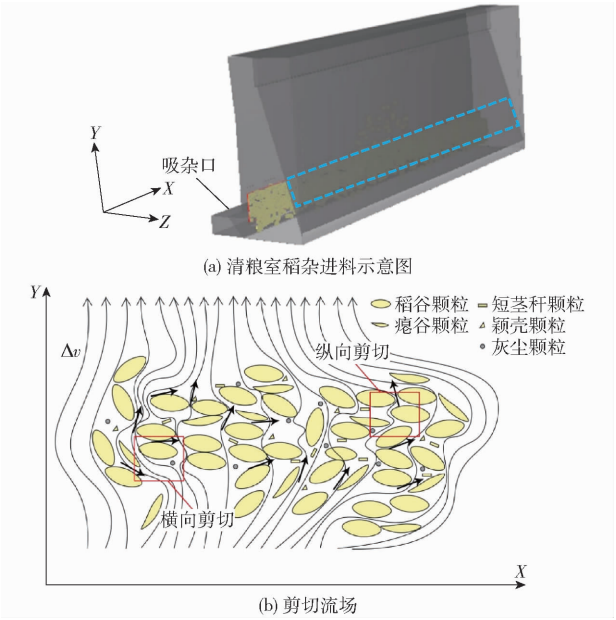


图 3 剪切流场示意图

Fig. 3 Schematics of shear flow field

其中速度梯度 Δv 的单位为 s^{-1}。剪切力根源于速度梯度,速度梯度越大,所能产生的流场中的剪切力强度也就越大,对稻谷粘附现象的扰动也就越明显。剪切力为实现对稻谷粘附现象的扰动,需削弱稻谷之间由于表面毛刺作用所产生的粘附力[22-23],稻谷粘附模型如图 4 所示。

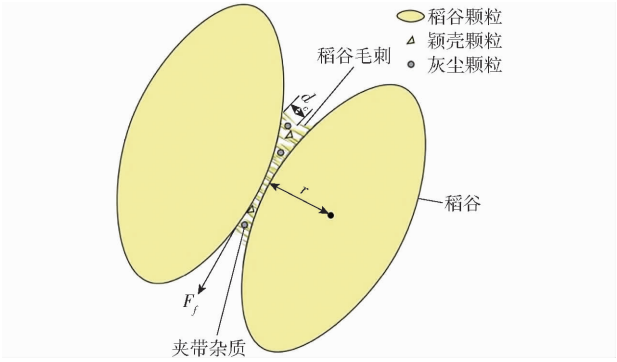


图 4 稻谷粘附模型

Fig. 4 Rice adhesion modeling

两个稻谷间表面毛刺由于机械嵌合产生了阻碍稻谷相对运动的粘附力,其与物料表面粘附系数、等效半径、毛刺平均长度有关[24-25],故粘附力 F_f 可表示为

$$F_f = 2\eta\tau d_c r \tag{13}$$

式中 η——物料表面粘附系数,取低粘附表面的典型值 0.1 N/m

τ——粘附力经验常数,取 2

r——稻谷等效半径

d_c——稻谷毛刺平均长度

又因 F_f 的强度依赖于稻谷间毛刺的嵌合深度,则有

$$F_f(d) = \begin{cases} F_f & (d < 2d_c) \\ 0 & (d \geqslant 2d_c) \end{cases} \tag{14}$$

其中,d 为稻谷间的表面间距。当粘附的稻谷受到剪切力时,d 逐渐增大,毛刺间的机械嵌合作用逐渐衰减,此时 F_f 的作用被削弱,稻谷分离,所夹杂的杂质被释放。而纵向剪切在破除稻谷粘附将其分离后,还将产生纵向的吸力,将杂质向上吸出清粮室,因此纵向剪切对稻谷粘附现象的扰动起到关键作用,故对纵向剪切进行分析[26]。

如图 5 所示,在流场环境下作用于稻谷粘附现象的纵向剪切力的主要来源是升力[27]。此时升力起到纵向剪切力的作用,会削弱稻谷之间的粘附力,纵向剪切力 F_l 与颗粒自身等效半径 r、速度梯度 Δv 密切相关[28],可表示为

$$F_l = 4C_l\sqrt{\rho\mu}\Delta v r \tag{15}$$

式中 C_l——升力系数,典型剪切流场下为 0.5

μ——流场中空气流体动力黏度,取 1.81×10^{-5} Pa·s

ρ——流场中空气流体密度，取 1.205 kg/m^3

可见速度梯度变化越大，流场中剪切力的效果也就越强。在这一过程中剪切力在克服粘附力的同时需要在力的方向上给予稻谷一定的加速度，从而实现竖直方向上稻谷的相对位移，摆脱原有的粘附状态，实现扰动。此时需满足

$$ma = F_l - F_f \tag{16}$$

式中　m——稻谷质量，kg

a——稻谷纵向方向上所获得的加速度，m/s^2

已知清粮室吸杂口截面理想状态下 1 s 内稻杂颗粒进料与扰动同时发生，为保证顺利扰动，此时颗粒间的相对位移需大于 2 倍的稻谷毛刺平均长度 d_c，以防止稻谷间相互粘连，故

$$\frac{1}{2}at^2 \geqslant 2d_c \tag{17}$$

联立公式(14)～(17)可得

$$\frac{C_l\sqrt{\rho\mu}\Delta v r - 2\eta\tau d_c r}{2m} \geqslant 2d_c \tag{18}$$

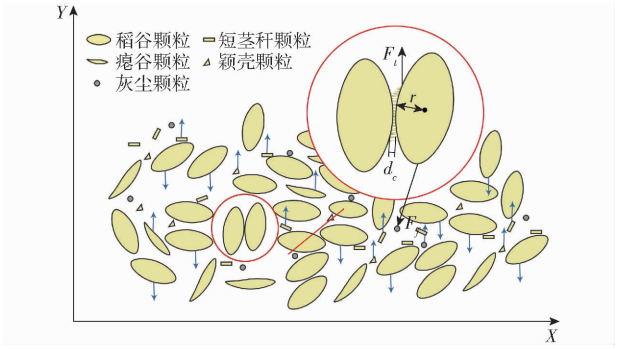


图 5　纵向剪切示意图

Fig. 5　Schematic of longitudinal shear

故扰动所需的速度梯度应为

$$\Delta v \geqslant \frac{4d_c m + 2\eta\tau d_c r}{C_l r\sqrt{\rho\mu}} \tag{19}$$

已知稻谷等效半径 r 为 4.5×10^{-4} m，稻谷毛刺平均长度 d_c 约为 1.2×10^{-5} m，空气流体密度 ρ 为 1.205 kg/m^3，动力粘度 μ 为 1.81×10^{-5} Pa·s，代入可得，此时的速度梯度为 23.68 s^{-1}，在理想状态下流体的平均速度为 3.552 m/s。因此，吸杂口处的平均速度需超过 3.552 m/s，以破除稻谷粘附实现扰动。

又因流场对稻杂清选时在纵向方向上还会由于各自悬浮速度不同从而发生稻谷与杂质间的分层[29]。为此吸杂口处速度应当介于杂质和稻谷的悬浮速度之间，稻谷、瘪谷、短茎秆悬浮速度均值分别为 5.64、3.22、2.01 m/s[30]。因此，为了保证对稻谷扰动时，实现稻谷与杂质的顺利分层，此时清粮室吸杂口处的平均速度需保持在 3.55～5.64 m/s 之间。

2.3　清粮室结构设计

上文已经计算出清粮室为保证对稻杂颗粒扰动的同时，又能够实现颗粒物的顺利分层，此时清粮室吸杂口处的平均速度 v_D 需保持在 3.55～5.64 m/s 之间。为实现上述条件，对清粮室结构参数进行初步设计。稻谷清粮装置尺寸如图 6 所示。

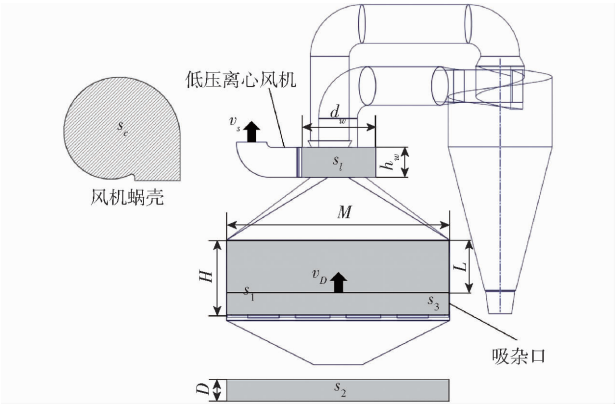


图 6　稻谷清粮装置尺寸参数示意图

Fig. 6　Dimensions of rice grain sorting device

如图 6 所示，稻谷清粮装置的流场环境由低压离心风机提供动力。待风机回转稳定后，多次测量其出风口速度，取均值为 v_s = 21 m/s，作为风机回转时的理想风速。则离心风机对应流线方向的体积流量为

$$\begin{cases} q_l = v_s s_l = v_s h_w d_w \\ q_c = v_s s_c = v_s \pi \left(\dfrac{d_w}{2}\right)^2 \end{cases} \tag{20}$$

式中　q_l、q_c——对应截面的体积流量，kg/m^3

s_l、s_c——风机蜗壳室横、纵截面积，m^2

h_w——风机蜗壳高度，mm

d_w——风机蜗壳直径，mm

由于风机所提供的体积流量是定常量，为了能够使装置所产生的气流速度满足清选条件，则要求当流量到达至清粮室吸杂口截面时平均速度 v_D 在要求范围内。根据连续方程，在同一流线方向上体积流量是常量[31]，则有

$$\begin{cases} v_D s_1 = v_s s_l & (1.48\ \text{m}^2 \leqslant s_1 \leqslant 1.71\ \text{m}^2) \\ v_D s_2 = v_s s_c & (0.58\ \text{m}^2 \leqslant s_2 \leqslant 0.62\ \text{m}^2) \\ v_D s_3 = v_s s_l & (0.38\ \text{m}^2 \leqslant s_3 \leqslant 0.48\ \text{m}^2) \end{cases} \tag{21}$$

式中　s_1——清粮室吸杂口纵向截面积，m^2

s_2——清粮室吸杂口横向截面积，m^2

s_3——吸杂口面积，m^2

上述分析得出稻谷由于表面毛刺接触所产生的粘附力会对清选产生影响，而随着速度的增大能够冲破这一阻力对稻谷产生扰动并促使稻杂分层，具

体的影响因素包括清粮室高度 H、清粮室长度 M 以及清粮室后挡板长度 L。代入相关数值可得各因素优化参数结构范围为：760 mm ≤ H ≤ 840 mm、1 960 mm ≤ M ≤ 2 040 mm 以及 540 mm ≤ L ≤ 620 mm。速度增大虽能扰动稻谷，但速度变化过大会影响稻杂混合物清选质量，故需对这 3 个关键结构参数展开相关分析。

3 关键参数仿真优化

通过对稻谷清粮装置关键部件的分析并确定结构优化参数范围后，需分析优化后关键结构参数对清选质量的影响。在稻谷清粮装置工作过程中，涉及了流场环境和稻杂混合物之间的相互作用，因此采用流固耦合的仿真数值模拟方法优化关键结构参数。

3.1 影响清选质量的关键结构因素

根据对稻谷清粮装置清粮室清选状态的分析，设置仿真试验因素与水平：清粮室高度 H 为 760、800、840 mm，清粮室长度 M 为 1 960、2 000、2 040 mm，清粮室后挡板长度 L 为 540、580、620 mm，以稻杂混合物清选后含杂率和损失率为指标展开三因素五水平二次正交旋转组合试验，优化关键结构参数。

3.2 试验设计

本次试验采用三因素五水平二次正交旋转组合试验[32-33]，利用 Design-Expert 13 建立影响因素和目标函数的数学模型，对最优参数配比组合进行优化。以清粮室高度 x_1、清粮室长度 x_2 和清粮室后挡板长度 x_3 作为影响因素，试验因素编码如表 1 所示。以含杂率 Y_1 和损失率 Y_2 为清选作业性能的评价指标，根据 GB/T 5983—2013《种子清选机试验方法》测定含杂率 Y_1 和损失率 Y_2。

表 1 试验因素编码

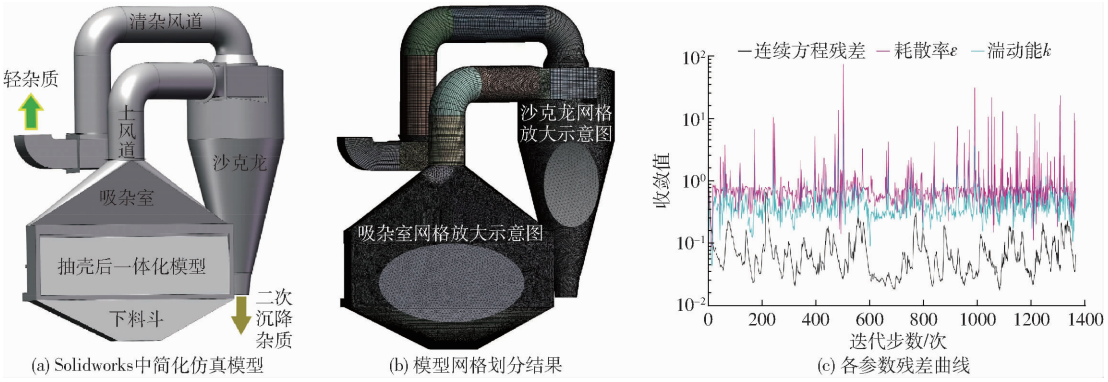
Tab. 1 Experimental factors and coding mm

编码	因素		
	x_1	x_2	x_3
1.414	840	2 040	620
1	820	2 020	600
0	800	2 000	580
−1	780	1 980	560
−1.414	760	1 960	540

3.3 Fluent − Rocky Dem 耦合仿真模型建立

稻谷清粮装置流固耦合仿真涉及流场模型计算和离散元耦合，需要分别建立流场收敛模型与离散元颗粒模型。采用 CPU 为 32 核 64 线程、GPU 为 NVIDIA RTX 4060 的计算平台为硬件支撑，CPU 主要用于流场计算，GPU 主要用于耦合分析。

首先运用 Solidworks 对模型进行简化（如图 7a 所示），运用 Spaceclaim 进行流体抽取并在 Mechanical 中进行网格划分，设定默认网格尺寸为 30 mm 并加密关键部位网格，网格材料为流体，定义下料口为 Inlet，即边界进口；风机出风口为 Outlet，即边界出口；风扇扇叶壁面定义为 Fanwall，即移动壁面（图 7b）。单元质量在 0.63 ~ 0.88 范围内，纵横比 1.07，偏度在 0.13 ~ 0.49 范围内，正交质量在 0.25 ~ 0.98 之间，满足网格质量的基本要求，网格数量范围为 2.81×10^8 ~ 2.93×10^8。



(a) Solidworks中简化仿真模型 (b) 模型网格划分结果 (c) 各参数残差曲线

图 7 仿真模型处理及各参数收敛性分析

Fig. 7 Simulation model processing and analysis of convergence of parameters

导入 Fluent 中运用 Coupled 计算方法、64 位并行，对案例进行混合初始化。一个标准大气压，重力加速度为 Y 方向向上（−9.81 m/s²）。进口压强为 0 Pa；出口压强等于一个标准大气压强；设定风扇壁面为移动壁面，旋转方向为 Y 轴负方向，转速为 800 r/min。如图 7c 所示，计算迭代 1 350 次收敛。基于 Rocky Dem 采用自定义多面体模型（Custom Polyhedron）对谷物颗粒建模，而后将其导入 Fluent 流场模型，随即开展流固耦合仿真，使仿真模拟更加接近实际工况。根据具体参数建立稻谷、瘪谷、短茎秆的颗粒模型，如图 8 所示。将仿真收敛的流场模型导入，并将建模完成的稻杂混合物颗粒按比例导

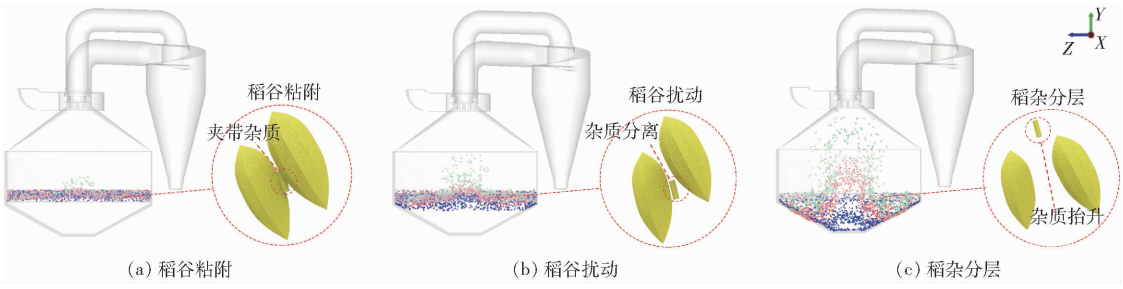


图 8　清选过程示意图

Fig. 8　Sorting process

入模型中。

本研究所采用的仿真参数和接触参数如表 2、3 所示[34-35]。添加离散元系数，设定 Inlet 颗粒：稻谷 58 t/h、瘪谷 1.2 t/h、短茎秆 0.8 t/h。稻谷颗粒和瘪谷颗粒采用 Schiller & Naumann 模型进行运动计算；短茎秆颗粒采用 Marheineke & Wegener 模型进行计算。仿真时长为 10 s，输出频率为 0.5 s。

表 2　稻杂混合物力学特性参数

Tab. 2　Mechanical properties of rough rice-impurity mixtures

项目	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(kg·m^{-3})
装置壁面	0.3	7×10^{8}	7 800
稻谷	0.3	7.54×10^{6}	1 090
瘪谷	0.35	9.6×10^{5}	240
短茎秆	0.4	3.8×10^{5}	320

表 3　稻杂混合物互作物理性质参数

Tab. 3　Interaction parameters in rough rice-impurity mixtures

项目	恢复系数 e	静摩擦因数 f_s	动摩擦因数 f_d
稻谷-稻谷	0.40	0.81	0.01
稻谷-瘪谷	0.32	0.86	0.01
稻谷-短茎秆	0.29	0.78	0.01
稻谷-装置壁面	0.56	0.35	0.01
瘪谷-瘪谷	0.38	0.79	0.01
瘪谷-短茎秆	0.31	0.68	0.01
瘪谷-装置壁面	0.34	0.33	0.01
短茎秆-短茎秆	0.26	0.42	0.01
短茎秆-装置壁面	0.29	0.31	0.01

3.4　结果分析

以清粮室关键参数作为变量，进行三因素五水平二次正交旋转组合试验设计，共 20 个处理，每次试验前都需要根据试验方案来调整因素水平，试验方案与结果如表 4 所示，表中 X_1、X_2、X_3 为因素编码值。

使用 Design-Expert 13 软件对试验结果进行回归模型显著性检验与方差分析，根据表 4 得到含杂率 Y_1 和损失率 Y_2 二次回归模型

表 4　试验方案与结果

Tab. 4　Test scheme and test results

序号	因素			含杂率	损失率
	X_1	X_2	X_3	Y_1/%	Y_2/%
1	0	0	0	0.86	1.11
2	1	1	1	1.10	1.40
3	−1	−1	1	1.15	1.45
4	0	0	1.414	1.05	1.35
5	0	0	0	0.83	1.12
6	1	−1	−1	1.25	1.55
7	0	0	−1.414	1.20	1.50
8	−1.414	0	0	1.50	1.85
9	0	0	0	0.85	1.12
10	0	0	0	0.83	1.13
11	−1	1	−1	1.30	1.60
12	0	−1.414	0	1.40	1.75
13	0	1.414	0	1.35	1.70
14	−1	1	1	1.25	1.55
15	1.414	0	0	1.45	1.80
16	0	0	0	0.85	1.11
17	1	−1	1	1.30	1.65
18	0	0	0	0.81	1.15
19	−1	−1	−1	1.35	1.70
20	1	1	−1	1.20	1.50

$$Y_1 = 0.8556 - 0.01875X_1 - 0.01875X_2 - 0.0375X_3 - 0.0375X_1X_2 - 0.025X_1X_3 + 0.027X_2X_3 + 0.159X_1^2 + 0.134X_2^2 + 0.0715X_3^2 \quad (22)$$

$$Y_2 = 1.11 - 0.01875X_1 - 0.025X_2 - 0.0375X_3 - 0.0375X_1X_2 - 0.0223X_1X_3 + 0.0281X_2X_3 + 0.181X_1^2 + 0.156X_2^2 + 0.0813X_3^2 \quad (23)$$

随后对各系数以及含杂率与损失率进行组内统计检验量及其置信区间分析，结果如表 5 所示。由表 5 可知，目标函数含杂率、损失率回归方程影响极显著，且失拟项 P 值大于 0.05，表明回归模型与实际情况较为符合，无失拟情况出现；含杂率、损失率回归方程决定系数 R^2 为 0.9829、0.9793，说明该方程所得结果与实际数值高度相似，因此可以使用上述的回归方程模型代替真实试验对结果进行分析。

由表 5 可知，含杂率、损失率模型显著性 P 小于 0.01，说明该回归方程模型具有显著的统计学意

义。对于目标函数含杂率,其因素 X_1、X_1^2、X_2^2、X_3^2 影响极显著。对于目标函数损失率,其因素 X_1、X_1^2、X_2、X_2^2、X_3^2影响极显著。由表中检验 F 值可知,影响含杂率的因素从大到小为清粮室高度、清粮室后挡板长度、清粮室长度;影响损失率的因素从大到小依次为清粮室高度、清粮室长度、清粮室后挡板长度。

表 5 含杂率 Y_1 和损失率 Y_2 的二次项模型方差分析

Tab. 5 Analysis of variance of quadratic term model with impurity rate Y_1 and loss rate Y_2

方差来源	含杂率 Y_1					损失率 Y_2				
	平方和	自由度	均方	F	P	平方和	自由度	均方	F	P
模型	0.960 6	9	0.106 7	63.68	<0.000 1 **	1.26	9	0.140 5	52.55	0.000 1 **
X_1	0.005 6	1	0.005 6	3.36	0.001 7 **	0.005 6	1	0.005 6	42.10	0.000 1 **
X_2	0.005 6	1	0.005 6	3.36	0.032 5 *	0.010 0	1	0.010 0	13.74	0.005 6 **
X_3	0.022 5	1	0.022 5	13.42	0.027 4 *	0.022 5	1	0.022 5	8.42	0.185 4
X_1X_2	0.011 2	1	0.011 2	6.71	0.026 9 *	0.011 2	1	0.011 2	4.21	0.017 4 *
X_1X_3	0.005 0	1	0.005 0	2.98	0.114 8	0.011 2	1	0.011 2	0.940 3	0.306 4
X_2X_3	0.003 0	1	0.003 0	3.56	0.584 0	0.001 8	1	0.001 8	4.87	0.024 4 *
X_1^2	0.636 4	1	0.636 4	379.66	0.000 1 **	0.827 0	1	0.827 0	309.38	0.000 1 **
X_2^2	0.452 1	1	0.452 1	269.71	0.000 1 **	0.614 7	1	0.614 7	229.96	0.000 1 **
X_3^2	0.128 9	1	0.128 9	76.88	0.000 1 **	0.166 4	1	0.166 4	62.27	0.000 1 **
残差	0.016 8	10	0.001 7			0.026 7	10	0.002 7		
失拟	0.016 8	5	0.003 4	2.02	0.148 5	0.026 7	5	0.005 3	0.763 8	0.198 7
误差	0.030 0	5	0.006 0			0.026 0	5	0.005 2		
总和	1.010 4	19				1.294 4	19			

注:* 表示影响显著($0.01 \leqslant P < 0.05$),** 表示影响极显著($P < 0.01$)。

根据表 5 对显著项进行响应曲面分析,结果如图 9、10 所示。由图 9a ~ 9c 可知,含杂率随清粮室长度、清粮室高度、清粮室后挡板长度增加均呈现先减小后增加的趋势,就含杂率指标影响显著性而言,其顺序为:清粮室高度、清粮室后挡板长度、清粮室长度。由图 10a ~ 10c 可知,损失率随清粮室长度、清粮室高度、清粮室后挡板长度增加均呈现先减小后增加的趋势,就损失率指标影响显著性而言,其顺序为:清粮室高度、清粮室长度、清粮室后挡板长度。

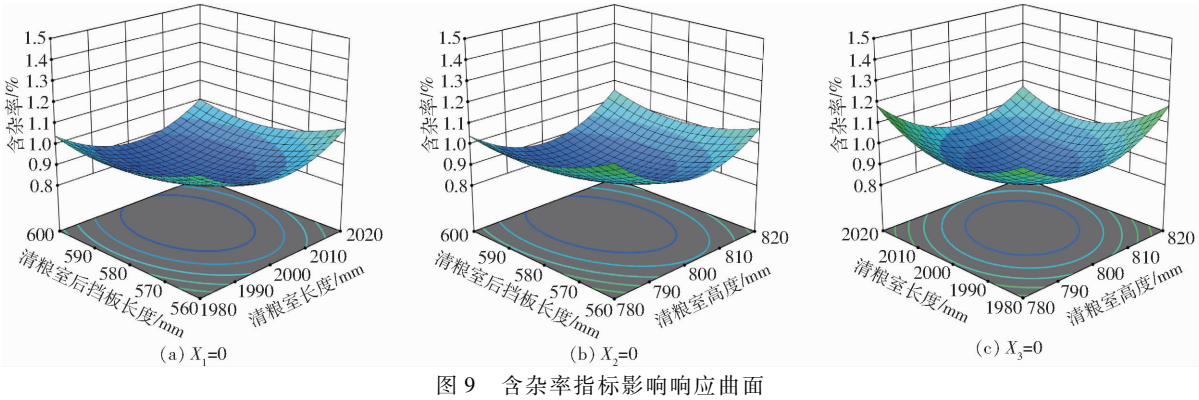


图 9 含杂率指标影响响应曲面

Fig. 9 Response surfaces of impurity rate indicator

为了获得稻谷清粮装置最佳性能参数组合,根据 JB/T 7721—2011《复式粮食清选机》要求,保证清选机清选时物料的含杂率在 2% 以下、损失率在 2% 以下,含杂率和损失率越低越好。因此结合试验因素边界条件,确立稻谷清粮装置的优化数学模型为

$$\begin{cases} \text{Min } Y_1(X_1、X_2、X_3) \\ \text{Min } Y_2(X_1、X_2、X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \end{cases} \tag{24}$$

运用 Design-Expert 13 对目标参数的数学模型进行优化求解,得到最优结构参数组合为:清粮室高度为 800 mm、清粮室长度为 2 000 mm、清粮室后挡板长度为 580 mm,基于此组合下的含杂率为 0.853%、损失率为 1.11%。

4 验证试验

为验证稻谷清粮装置最优结构参数组合下清选作业性能,对振动风选式谷物清选机进行验证试验。

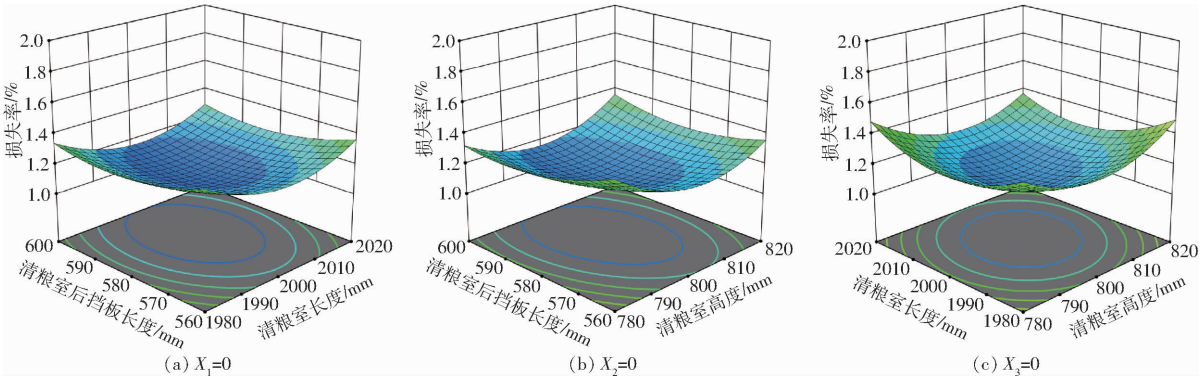


图 10　损失率指标影响响应曲面

Fig. 10　Response surfaces of loss rate indicator

4.1　试验条件

在第 3 节正交试验的基础上，得到最优结构参数组合为：清粮室高度 800 mm、清粮室长度为 2 000 mm、清粮室后挡板长度为 580 mm。在满足谷物清选机工艺要求条件下进行样机试制，于 2024 年 8 月 26 日在安徽省淮南市寿县大井粮食购销合作社进行验证试验。

4.2　试验方法

试验前设定样机电机振动频率为 50 Hz、离心风机转速为 800 r/min、稻杂混合物单位时间进料量为 60 t/h。试验场地为标准化粮食加工车间，地面平整度误差小于 5 mm/m，环境温度(28 ± 2)℃，相对湿度(65 ± 5)%。如图 11a 所示，试验的主要设备与测量仪器包括：振动风选式谷物清选机(配套功率 7.5 kW，额定电压 380 V)；电子天平(量程 0 ~ 10 kg，精度 0.01 g)；数字式风速仪(量程 0 ~ 30 m/s，精度 ±0.1 m/s)；标准网眼筛(孔径 2 mm)。



(a) 试验样机　(b) 试验取样　(c) 清选后稻谷

图 11　验证试验

Fig. 11　Validation tests

试验过程中，使用传送带 2 ~ 3 m/s 范围实现稳定均匀进料，且确保吸杂口平均风速维持在(4.2 ± 0.3) m/s，以实现稳定清选。清选稳定运行 30 min 后开始取样。取样时在下料口处使用不锈钢取样铲连续截取物料流，每次取样时间控制在 5 s 内，取样量为 8 kg。检测时先称量，再进行标准网人工筛分，筛动频率控制在 100 次/min，筛分时间 3 min。筛分完成后分别称量筛上物(纯净稻谷)和筛下物(杂质)质量，整个试验过程重复 3 次，每次间隔 1 h 以消除设备温升影响。验证试验过程如图 11 所示。

含杂率及损失率作为清选作业性能的评价指标，根据 GB/T 5983—2013《种子清选机试验方法》测定含杂率及损失率。含杂率为籽粒样本中杂余质量占取样总质量的百分比，损失率为清选过程中所损失的籽粒占总体的百分比。

4.3　试验结果

试验结果如表 6 所示，样机在最优结构参数组合条件下，清选后的稻杂混合物含杂率为 0.88%、损失率为 1.14%，与仿真优化结果相对误差控制在 3% 以内，说明验证试验与仿真试验结果具有一致性和准确性，试验结果满足设计要求，可保证振动风选式谷物清选机的清选质量达到并超过 JB/T 7721—2011《复式粮食清选机》农艺标准。

表 6　试验验证结果

Tab. 6　Experimental results of verification　%

项目	1	2	3	平均值
含杂率	0.91	0.86	0.88	0.88
损失率	1.08	1.23	1.12	1.14

5　结论

(1)针对因稻谷表面存在毛刺，易在清粮流场中发生粘附，从而使得杂质被夹杂在稻谷间难以分层，最终导致清选质量变差的问题，对振动风选式谷物清选机关键部件——稻谷清粮装置进行设计优化，使得经振动筛初筛后的稻杂混合物由稻谷清粮装置清选后，稻杂混合物的含杂率和损失率均降至 2% 以下。

(2)稻谷清粮装置清粮室结构直接影响稻谷的扰动与稻杂混合物的分层，通过对清粮室内部清选流场进行分析，考虑稻谷表面毛刺粘附与剪切流场的耦合关系，确定清粮室内清粮流场速度范围为 3.55 ~ 5.64 m/s。

(3)根据所得速度范围对清粮室结构参数进行优化，得出清粮室高度为 760 mm ≤ H ≤ 840 mm，清

粮室长度为 1 960 mm≤M≤2 040 mm,清粮室后挡板长度 540 mm≤L≤620 mm;建立 Fluent - Rocky Dem 流固耦合仿真模型,并进行三因素五水平二次正交旋转组合试验,得出清粮室最优结构参数组合为:清粮室高度 800 mm、清粮室长度为 2 000 mm、清粮室后挡板长度为 580 mm。

(4)基于最优参数组合试制样机,开展样机清选验证试验。验证试验结果表明:样机在最优结构参数组合条件下,清选后的稻杂混合物含杂率为 0.88%、损失率为 1.14%,与仿真优化结果相对误差控制在 3% 以内,说明验证试验与正交试验结果具有一致性和准确性,试验结果满足设计要求,可保证振动风选式谷物清选机的清选质量达到并超过农艺标准。

参 考 文 献

[1] 王旖旎, 吴玲. 全球视域下国际形势、粮食安全与中国方案[J]. 农业经济与管理, 2024(2): 13 - 24.
Wang Yini, Wu Ling. International situation, food security and China's plan in global perspective[J]. Agricultural Economics and Management, 2024(2): 13 - 24. (in Chinese)

[2] 武拉平, 胡南燕. 中国粮食加工环节损失现状、困境与减损路径[J]. 中州学刊, 2025(3): 39 - 47.
Wu Laping, Hu Nanyan. Current situation, dilemma and loss reduction path of grain processing losses in China[J]. Academic Journal of Zhongzhou, 2025(3): 39 - 47. (in Chinese)

[3] 张东明,黄紫阳,陈一夫,等. 基于离散元法的谷子脱出物建模与参数标定[J]. 农业机械学报, 2025, 56(12): 354 - 365.
Zhang Dongming, Huang Ziyang, Chen Yifu, et al. Discrete element method based modeling and parameter calibration for millet threshing mixture[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(12): 354 - 365. (in Chinese)

[4] GB 1350—2009 稻谷[S].

[5] 李洋,薛向磊,俞国红,等. 基于 CFD - DEM 的谷物联合收获机清选损失监测占比补偿方法研究[J]. 农业机械学报, 2026, 57(11): 269 - 281,353.
Li Yang, Xue Xianglei, Yu Guohong, et al. Compensation method for cleaning loss monitoring proportion of grain combine harvesters based on CFD - DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026, 57(11): 269 - 281,353. (in Chinese)

[6] 陶晓. 谷物籽粒清选装置的设计与试验[J]. 农机化研究, 2025, 47(5): 152 - 157.
Tao Xiao. Design and testing of a grain seed cleaning device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(5): 152 - 157. (in Chinese)

[7] 樊晨龙, 崔涛, 张东兴, 等. 纵轴流联合收获机双层异向清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊 1): 239 - 248.
Fan Chenlong, Cui Tao, Zhang Dongxing, et al. Design and experiment of double-layered reverse cleaning device for axial flow combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(S1): 239 - 248. (in Chinese)

[8] 周璇, 王志明, 陈霓, 等. 圆锥形风机清选室气流场数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(3): 91 - 100.
Zhou Xuan, Wang Zhiming, Chen Ni, et al. Numerical simulation and experiment of airflow field of cleaning room under action of conical fan[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 91 - 100. (in Chinese)

[9] 刘星弈, 王升升, 姬江涛, 等. 双风道横流风机设计与吸气特性试验[J]. 农机化研究, 2025, 47(9): 155 - 161.
Liu Xingyi, Wang Shengsheng, Ji Jiangtao, et al. Design and suction characteristics test of double air ducts cross flow fan[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(9): 155 - 161. (in Chinese)

[10] 胡森, 陈霖, 陈治帆, 等. 双出风口清选装置气流场仿真及清选试验研究[J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(9): 67 - 79.
Hu Sen, Chen Lin, Chen Zhifan, et al. Simulation and test of airflow field of double outlet cleaning device[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2023, 54(9): 67 - 79. (in Chinese)

[11] Xu T, Li Y. Effect of airflow field in the tangential-longitudinal flow threshing and cleaning system on harvesting performance[J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2020,2020(1): 4121595.

[12] El-emam M A, Shi W, Zhou L. CFD - DEM simulation and optimization of gas-cyclone performance with realistic macroscopic particulate matter[J]. Advanced Powder Technology, 2019, 30(11): 2686 - 2702.

[13] 陈广慧, 李军, 滕杰, 等. 基于 EDEM - Fluent 耦合的风筛式清选装置仿真及分析[J]. 中国农机化学报, 2020,41(5): 69 - 73.
Chen Guanghui, Li Jun, Teng Jie, et al. Simulation and analysis of wind screen cleaning device based on EDEM - Fluent coupling[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020,41(5): 69 - 73. (in Chinese)

[14] 丁贺贺, 石加联, 马学东, 等. 基于 DEM - CFD 耦合的谷物垂直气流风选仿真试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2019, 54(6): 190 - 197.
Ding Hehe, Shi Jialian, Ma Xuedong, et al. Simulation experiment of grain vertical air separation based on DEM - CFD

coupling[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2019, 54(6): 190 – 197. (in Chinese)

[15] 肖星星, 李骅, 吴崇友, 等. 基于 DEM – CFD 两种早稻品种圆筒筛清选过程的运动分析[J]. 机械设计, 2018, 35(10): 32 – 37.
Xiao Xingxing, Li Hua, Wu Chongyou, et al. Motion analysis on two early-rice varieties screened in a cylindrical sieve by means of the DEM – CFD methods[J]. Journal of Machine Design, 2018, 35(10): 32 – 37. (in Chinese)

[16] Almohammed N, Breuer M. Modeling and simulation of particle-wall adhesion of aerosol particles in particle-laden turbulent flows[J]. International Journal of Multiphase Flow, 2016,85: 142 – 156.

[17] Ahmadi G, Guo S. Bumpy particle adhesion and removal in turbulent flows including electrostatic and capillary forces[J]. The Journal of Adhesion, 2007, 83(3): 289 – 311.

[18] DG/T 122—2019 粮食清选机[S].

[19] 刘占斌, 郭衍臣, 张东升, 等. 基于离散元法的颗粒筛分行为模拟与仿真研究[J]. 机械设计与研究, 2025, 41(1): 305 – 310.
Liu Zhanbin, Guo Yanchen, Zhang Dongsheng, et al. Simulation of particle screening behavior based on discrete element method[J]. Machine Design and Research, 2025, 41(1): 305 – 310. (in Chinese)

[20] Datt C, Elfring G J. Dynamics and rheology of particles in shear-thinning fluids[J]. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, 2018,262: 107 – 114.

[21] 于源, 刘克润, 李兴帅, 等. 涡流空气分级流场中颗粒运动及分布规律研究[J]. 化工学报, 2023, 74(10): 4074 – 4086.
Yu Yuan, Liu Kerun, Li Xingshuai, et al. Study of particle motion and distribution laws in the turbo air classification flow field [J]. CIESC Journal, 2023, 74(10): 4074 – 4086. (in Chinese)

[22] Cheng X, Xiao S, Cao A S, et al. A unified constitutive model for pressure sensitive shear flow transitions in moderate dense granular materials[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 19669.

[23] 陈娟, 张明阳, 张林华, 等. 入口深度对环形剪切流场内液滴生成的影响[J]. 节能, 2024, 43(3): 42 – 44.

[24] Sansao B M B, Kellar J J, Cross W M, et al. Comparison of surface energy and adhesion energy of surface-treated particles [J]. Powder Technology, 2021,384: 267 – 275.

[25] Tanaka T, Tanaka S, Washino K, et al. DEM analysis of cohesive granular shear flow using dynamic adhesion force model-model validation for contact-dominated regime[J]. Powder Technology, 2024,447: 120198.

[26] Wei T, Wang Y, Yang X. Layered structure of turbulent plane wall jet[J]. International Journal of Heat and Fluid Flow, 2021,92: 108872.

[27] Ruan Y, Xiao Z. On the shear-induced lift in two-way coupled turbulent channel flow laden with heavy particles[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2024,984: A24.

[28] Li J, Wang P, Zheng X. Effects of the Saffman lift force on particle statistics and turbulence modulation in two-phase flow[J]. Physical Review Fluids, 2024, 9(3): 034301.

[29] 张妍, 王子谦, 张延, 等. 密度对谷物混合颗粒分层影响的分析[J]. 农机化研究, 2025, 47(4): 35 – 41,49.
Zhang Yan, Wang Ziqian, Zhang Yan, et al. Analysis of the effect of density on the stratification of mixed grains[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(4): 35 – 41,49. (in Chinese)

[30] 李洪昌, 高芳, 李耀明, 等. 水稻籽粒物理特性测定[J]. 农机化研究, 2014, 36(3): 23 – 27.
Li Hongchang, Gao Fang, Li Yaoming, et al. Determination of rice grain physical properties[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(3): 23 – 27. (in Chinese)

[31] 楚晨晖. 计算流体力学原理及工程应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2023.

[32] 秦宽, 步坤亭, 沈周高, 等. 连续复式茶叶理条机优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 382 – 393.
Qin Kuan, Bu Kunting, Shen Zhougao, et al. Optimization design and experiment of continuous compound tea leaf barber[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 382 – 393. (in Chinese)

[33] 秦宽, 郎旭涛, 沈周高, 等. 茶园仿生往复式开沟松土机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(3): 29 – 39.
Qin Kuan, Lang Xutao, Shen Zhougao, et al. Design and experiment of reciprocating furrowing and loosening machine for tea garden[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(3): 29 – 39. (in Chinese)

[34] 侯杰, 谢方平, 王修善, 等. 水稻茎秆接触物理参数测定与离散元仿真标定[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(3): 747 – 758.
Hou Jie, Xie Fangping, Wang Xiushan, et al. Measurement of contact physical parameters of flexible rice straw and discrete element simulation calibration[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(3): 747 – 758. (in Chinese)

[35] 鹿芳媛, 马旭, 谭穗妍, 等. 水稻芽种离散元主要接触参数仿真标定与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(2): 93 – 99.
Lu Fangyuan, Ma Xu, Tan Suiyan, et al. Simulative calibration and experiment on main contact parameters of discrete elements for rice bud seeds[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 93 – 99. (in Chinese)