

孜然脱粒机风筛式清选装置的设计与试验

王凡瑞^{1,2}, 李斌^{1*}, 朱荣光^{2*}, 王士国¹, 刘洋¹, 高小龙², 杨星宇²

(1. 新疆农垦科学院机械装备研究所, 石河子 832099; 2. 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832003)

摘要: 由于孜然籽粒粒径小、脱出物外形尺寸相似, 且缺少专用的清选装置, 导致孜然籽粒的清选含杂率高、清选效率低。该研究在孜然籽粒特有物理特征分析的基础上, 结合现有各类清选装置的工作原理, 设计了一种风筛式孜然清选装置, 开展了具有针对性的清选装置关键部件的设计, 包括复合式双层筛、贯流式风机、风挡拦截装置等。通过气固耦合仿真技术对清选流场压力分布、气流速度及清选物料固相运动规律进行分析, 验证装置结构设计合理性, 确定影响清选效果的主要因素为风速、振动频率、入风角度; 将风速、振动频率、入风角度作为试验因素, 以损失率及含杂率为评价指标, 通过三因素三水平正交试验, 得到自变量与清选效果的二次多项式响应面回归模型, 并通过多元回归拟合分析得到清选装置最优工作参数为: 风速 10.27 m/s, 振动频率 4.07 Hz, 入风角度 20.26°。根据最优参数自制试验台架进行验证试验, 得到孜然籽粒清选后的平均损失率、含杂率分别为 3.40% 和 5.28%, 损失率、含杂率的理论预测值与台架试验结果的相对误差分别为 0.94%、1.73%, 证明回归模型具有较高的准确性, 孜然脱粒机清选装置的设计满足孜然籽粒清选作业标准。

关键词: 孜然; 清选装置; 脱出物; 振动风筛式; Fluent-EDEM 耦合

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404134

中图分类号: S255.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-22-0039-12

王凡瑞, 李斌, 朱荣光, 等. 孜然脱粒机风筛式清选装置的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2024, 40(22): 39-50. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404134 <http://www.tcsae.org>

WANG Fanrui, LI Bin, ZHU Rongguang, et al. Design and test of the wind-sieve type cleaning equipment for cumin threshing machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(22): 39-50. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202404134 <http://www.tcsae.org>

0 引言

新疆特色绿洲农业具有极佳的温、光资源, 具有良好的孜然种植资源禀赋^[1-2]。孜然成为新疆南疆地区增产增收的重用经济作物。据统计新疆孜然种植总面积达到 $3.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[3], 占全国种植面积 90%^[4], 总产量达 15 000 t。2023 年, 由于厄尔尼诺现象, 印度全年干旱, 国外孜然产区产量大幅下降, 国内孜然产地收购价格达 53.3 元/kg, 创历史新高。孜然种植面积逐年扩大, 现有孜然脱粒清选手段清选含杂率高、损失率高、喂入量小, 无法满足新疆地区孜然清选需求。因此, 急需一款大喂入量孜然脱粒清选的专用设备, 以达到在保证较低损失率和含杂率的情况下完成高效孜然籽粒清选的目的。

国外对孜然清选装置及其理论的研究较早, 对筛分过程的影响因素有较成熟的研究。ALKHALDI 等^[5]发现筛分过程对机器工作参数和结构参数极为敏感, 使用离散元法分析了不同颗粒粒径分布下的筛分效率, 通过改

变筛网倾斜度、孔径大小、振动频率和喂料速度, 得到了相关因素与清选效果的变化趋势。MYHAN 等^[6]通过研究发现振动筛分清选效果不是单一因素作用的结果, 而是诸多相关因素共同作用的结果, 主要影响清选质量的因素有曲柄转速、振动筛振动频率、振动筛体安装角度、清选风机风速等。SRIVASTAV 等^[7]开发了一种双滚筒式孜然清选机, 指出振动筛振动频率和筛体安装角度及进料速度对清选效果有显著影响, 并通过试验, 得到了机器最佳运行参数, 当筛体安装角度为 $5^\circ \sim 7^\circ$ 时, 清选效果最佳。JETHVA 等^[8]研究设计了一款小农户适用的低成本往复式孜然清选分级设备, 对进料速度、筛网转速、筛网倾斜角度进行了优化。ARADWAD 等^[9]指出, 孜然籽粒上连接的果梗是造成脱粒清选效果下降的主要原因, 针对该现象设计了一种双平板式离心机构来提高清选效果, 显著降低了经过清选后孜然籽粒与果梗连接的情况。

国内科研人员对于孜然清选装置的研究处在起步阶段, 孜然清选装置仅有相关专利, 商用孜然清选装置尚未见到报道。塔里木大学陈佳林^[10]设计的一款果园用小型孜然收获专利机型, 整个装置被封装于箱体内部, 结构紧凑, 但目前仍为概念产品, 未投入实际生产应用。仲金凤^[11]设计了一款孜然采集收取筛分装置, 该装置针对性强, 但结构存在一定的不足, 其振动网筛与出料口相对位置较近, 孜然籽粒在振动筛网上得不到充足筛分便

收稿日期: 2024-04-19 修订日期: 2024-09-21

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发项目 (2023B02025-2); 粮棉生产高端农机装备创新团队项目 (NCG202223)

作者简介: 王凡瑞, 研究方向为机械工程。Email: wangfanrui2112@163.com

*通信作者: 李斌, 研究员, 研究方向为农业机械设计。

Email: bin175337620@sina.com; 朱荣光, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为农畜产品快速无损检测技术与智能装备。

Email: rgzh_jd@163.com

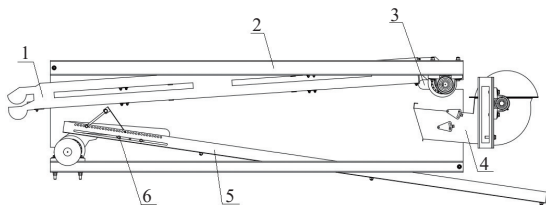
被排出, 损失率无法得到保障。尹超^[12]设计了一款效率较高的孜然清选装置, 该装置通过叶片和振动筛间的相互作用, 能够有效地将孜然籽粒和脱粒杂质分离, 但装置运行时, 需要外接抽风机, 因此只适于在指定地点进行工作。柴绍青^[13]设计了一款孜然专用的振动式筛选装置, 该装置在清选过程中, 通过对孜然进行连续三次筛分, 使得清选后的孜然籽粒具有较低的含杂率, 但其清选过程与破碎过程混杂, 可能具有较大的夹带损失。高云龙^[14]设计了一款孜然除杂筛选装置, 该装置结构简单, 但其振动是通过电机正反转实现, 当该装置结构尺寸较大时, 装置转动惯量较大, 能耗高。而当装置结构尺寸较小时, 能够筛选的孜然数量少, 清选效率不高。

国内外目前对于孜然清选装置的研究皆处于起步阶段, 已有的清选装置存在针对性弱、含杂率高、损失率大等问题。因此, 本文参考孜然相似作物清选装置结构, 设计了一种风筛式孜然清选装置, 在对孜然物料特性研究的基础上, 对孜然清选装置结构和参数进行初步确定, 通过气固耦合仿真分析对结构进行验证, 并利用多元拟合分析得到最优工作参数组合, 最后通过台架试验验证优化结果。

1 装置结构及工作原理

1.1 装置结构

清选装置整体结构如图1所示, 由复合式双层筛、贯流式风机、振动偏心构件、风挡调节装置等组成, 装置整体尺寸为3 500 mm×2 000 mm×1 700 mm。



1. 复合式双层筛 2. 机架 3. 振动偏心构件 4. 贯流式风机 5. 振动细筛 6. 风挡调节装置
1. Compound double-layer sieve 2. Frame 3. Vibration eccentric mechanism 4. Tubular fan 5. Vibrating fine sieve 6. Windshield adjustment device

图1 风筛式孜然清选装置

Fig.1 Wind-sieve type cleaning device for cumin

1.2 工作原理

皮带轮带动振动轴转动, 使固定于振动轴上的偏心构件做定轴圆周运动, 产生稳定、周期性的振动, 通过偏心轮连接板传递到复合式双层筛。动力通过同样的方式传入振动细筛, 产生振动效果。贯流式风机的风机主轴高速旋转, 气流从进气口进入, 经过叶片两次扰动, 于涡舌附近形成较稳定涡旋, 产生均匀的类型矩形清选流场。

该清选装置的具体清选过程为: 脱粒滚筒中经过破碎的孜然植株形成脱出物由集料斗进入复合式双层筛上表面, 复合式双层筛往复振动, 粗茎秆等较大杂质在复合式双层筛第一层筛表面被筛去, 细茎秆等较小杂质被第二层筛筛分。复合式双层筛具有一定倾斜度, 在振动、

重力、风机气流共同作用下, 筛体表面杂质流向末端, 最终排出清选装置。孜然籽粒夹杂部分孜然细茎秆从复合式双层筛落下, 贯流式风机在细筛和复合式双层筛中间空腔形成斜向上工作气流。孜然籽粒、孜然细茎秆及尘土悬浮速度差异较大, 水平方向上抛出距离不同。孜然细茎秆、尘土等悬浮速度较小的杂质抛出距离较远, 因此被吹出筛体外, 而孜然籽粒抛出距离短, 则被留在细筛表面, 在振动中运动至集料口, 最终得到干净的孜然籽粒。

2 关键部件结构设计与参数设计

2.1 振动筛结构设计及筛上物料受力分析

课题组选取“新孜然一号”孜然作为试验对象, 在完成对孜然的脱粒后, 收取1 000 g孜然脱出物, 对其几何特征、含水率等物料特性进行测定, 测定的结果如表1所示, 结果表明, 杂质总量占脱出物总量39%, 其中孜然粗茎秆(破碎)杂质占脱出物总质量18%, 孜然细茎秆(破碎)杂质占脱出物总质量16%。经测定孜然粗茎秆(破碎)、孜然细茎秆(破碎)密度分别为590和640 kg/m³。

表1 孜然脱出物物料特性

Table 1 Material characteristics of cumin extrusions

测试项目 Test items	孜然籽粒 Cumin seed	孜然粗茎秆 Cumin thick stalks	孜然细茎秆 Cumin thin stalks
脱出物组成成分占比/%	61	18	16
粒径或直径均值/mm	1.406 2	0.669 2	1.478
长度均值/mm	5.192	65.54	64.78
悬浮速度均值/(m·s ⁻¹)	3.96	4.81	1.80
含水率均值/%	1.78	6.01	5.75
密度均值/(kg·m ⁻³)	1 040	590	640

为便于叙述, 下文将孜然粗茎秆(破碎)简写为孜然粗茎秆, 孜然细茎秆(破碎)简写为孜然细茎秆。

孜然粗茎秆、细茎秆密度较低, 体积分数大, 根据以往经验^[15], 单层振动筛难以满足大体积分数杂质清选需求。本文采用组合式筛体。上筛为2层筛网组成的复合式振动筛, 下筛为单层细筛。

2.1.1 振动筛筛网选型

孜然籽粒呈纺锤结构, 外形尺寸较为集中, 截面形状为圆形, 脱出物中茎秆常为细长圆柱形长条, 如图2所示。

农业领域常用筛网类型有冲孔筛、鱼鳞筛、编织筛、锯齿筛等^[16]。采用圆形网眼可以减小茎秆等杂质通过筛网的几率。而冲孔筛相较于鱼鳞筛和锯齿筛结构更简单, 造价更低, 相较于编织筛, 具有更好的刚度, 安装更简单, 因此, 清选筛上筛采用复合式结构, 由2层冲孔圆孔筛组成。筛孔尺寸根据式(1)计算^[17]。

$$a = (1.3 \sim 1.4) d \quad (1)$$

式中 a 为筛孔直径, mm; d 为筛下物最大颗粒尺寸, mm。经过计算并圆整, 理论上, 上下筛孔的直径皆应为2.0 mm, 但是若双层筛上下筛筛孔尺寸一致, 上层筛清选压力大, 筛孔易堵塞, 筛网长度变长, 并且夹带损

失较高，而下层筛起不到清选作用。因此设计上筛孔的直径为 4.0 mm，下筛孔的直径为 2.0 mm，从而使上筛网能分流脱出物杂质，让大部分粗茎秆在上筛网中排出，剩余小部分粗茎秆和细茎秆则能在下筛网中排出。此外，每一层筛网的厚度为 1.5 mm，上下层有效筛分面积分别为 58% 和 46%。由于孜然籽粒粒径小，暂无明显小于孜然粒径的冲孔筛和鱼鳞筛，因此选用 30 目（孔径为 0.6 mm）编制筛作为下层细筛材料。



图 2 孜然脱出物示意图

Fig.2 Schematic diagram of cumin threshed mixture

2.1.2 复合式振动筛结构尺寸设计

振动筛结构尺寸过大会导致振动筛表面杂质停留时间过长，增加杂质过筛几率，从而降低清选效果。振动筛结构尺寸过小，脱出物筛面筛分不充分，将大大增加清选损失率。

因此，振动筛结构尺寸与喂入量匹配时，清洁效率最高^[17]。设清选装置复合式双层筛上筛长度为 L_1 ，喂入量为 Q_1 ，复合式双层筛下筛长度为 L_2 ，喂入量为 Q_2 。

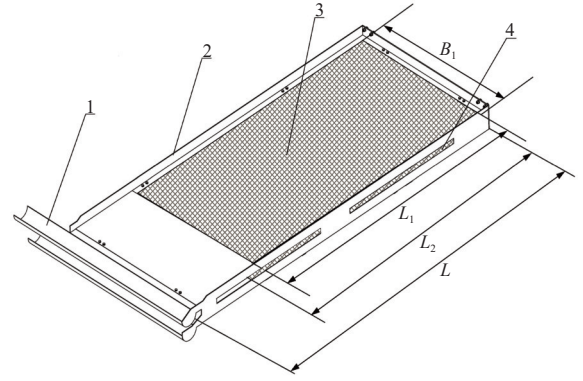
清选筛长度根据式 (2) 和式 (3)^[18] 计算。

$$\begin{cases} L_1 = \frac{Q_1(1-\delta_1 k_0)}{B_1 q_{s1}} \\ L_2 = \frac{Q_2(1-\delta_2 k)}{B_2 q_{s2}} \end{cases} \quad (2)$$

$$Q_2 = Q_1(1 - Y_2) \quad (3)$$

式中 δ_1 为复合式双层筛上筛喂入物中杂质占比，根据前期物料试验测定结果， δ_1 取 39%， δ_2 为复合式双层筛下筛喂入杂质占比，取 21%。 k_0 为清选装置特性参数，参考农业机械设计手册给定的取值范围， k 取 0.6。 B_1 和 B_2 为复合式双层筛上下筛宽度，均取 800 mm。 q_{s1} 和 q_{s2} 为复合式双层筛上下筛单位面积可承担喂入量，分别取 0.64 和 0.51 kg/(s·m²)。 Y_2 为孜然粗茎秆质量占脱出物质量比例，通过物料试验得到该值为 18%。

经过计算，复合式双层筛上筛长度为 748 mm，复合式双层筛下筛长度为 878 mm。考虑到实际制造生产难度，复合式双层筛总长度取 1 200 mm，复合式双层筛上筛长度 $L_1=800$ mm，如图 3 所示，上筛后半部为未冲孔铁皮填充，保证总长 $L=1\ 200$ mm。复合式双层筛下筛长 $L_2=900$ mm，其余部分使用未冲孔铁皮填充。



1.杂质引导槽 2.侧边板 3.上筛 4.下筛

1. Impurity guide groove 2. Side plate 3. Top sieve 4. Bottom sieve

注：L 为筛网总长，mm； L_1 为上筛长度，mm； L_2 为下筛长度，mm； B_1 为筛网宽度，mm。

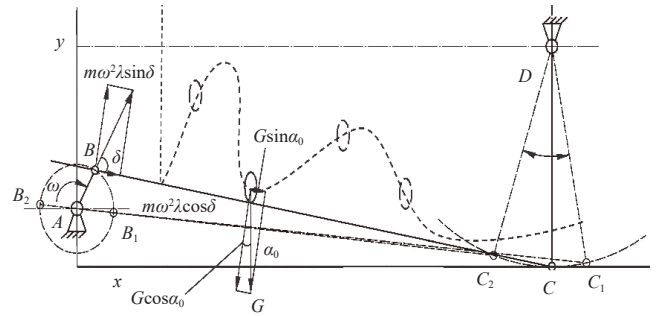
Note: L is the total length of the sieve, mm; L_1 is the length of the top sieve, mm; L_2 is the length of the bottom sieve, mm; B_1 is the sieve width, mm.

图 3 复合式双层筛结构示意图

Fig.3 Structure diagram of compound double-layer sieve

2.1.3 振动筛安装尺寸及筛上物料受力分析

物料振动输送时，运动形式主要为滑行运动和抛掷运动^[17]。由于筛孔直径略大于孜然粒径，这要求孜然籽粒在运动状态下，以近乎垂直筛孔方向落入筛网，因此，孜然籽粒需在筛网表面出现抛掷运动。对清选筛上孜然脱出物进行受力分析，如图 4 所示。



注： m 为脱出物质量，kg； ω 为振动筛运动角速度，rad·s⁻¹； δ 为振动筛振动方向角，(°)； α_0 为振动筛安装角，(°)； λ 为振动筛振动幅度，cm； G 为重力，N； A 、 D 分别为振动筛主动曲柄和从动曲柄的安装位置； B 、 B_1 、 B_2 分别为主动曲柄不同时刻的位置； C 、 C_1 、 C_2 分别表示主动曲柄处于 B 、 B_1 、 B_2 时从动曲柄的位置。

Note: m is the mass of the dislodged material, kg; ω is the angular velocity of the vibrating screen movement, rad·s⁻¹; δ is the vibrating screen vibration direction angle, (°); α_0 is the vibrating screen mounting angle, (°); λ is the vibration amplitude of the vibrating screen, cm; G is the gravitational force, N; A , D is the vibrating screen active crank and slave crank installation position, respectively; B , B_1 , B_2 is the active crank position at different time, respectively; C , C_1 , C_2 is the active cranks position when the slave crank at B , B_1 , B_2 , respectively.

图 4 筛面脱出物运动轨迹及受力分析

Fig.4 Motion and force analysis of extruded material on screen surface

此时物料受重力 G 和振动筛作用力 F_ω 共同作用，其中 F_ω 为

$$F_\omega = m\omega^2\lambda\sin\delta \quad (4)$$

为使孜然脱出物在运动状态中出现抛掷运动，则脱出物所受筛面最大振动加速度垂直于筛面方向的分量应大于脱出物所受重力垂直于筛孔方向的分量，即：

$$m\omega^2\lambda\sin\delta > mg\cos\alpha_0 \quad (5)$$

由此定义抛掷指数 p 为

$$p = \frac{\omega^2\lambda\sin\delta}{g\cos\alpha_0} > 1 \quad (6)$$

式中 g 为重力加速度 (m/s^2)。当 $1 \leq p \leq 3.3$ 时, 筛体每振动一次, 物料出现一次抛掷运动^[17]。当抛掷指数 $3.3 \leq p \leq 6.36$ 时, 抛掷周期大于振动周期, 筛体每振动 2 次, 物料抛掷一次。当脱出物位于抛掷周期时, 振动筛振动并未起到实质性效果, 其产生的振动无效。因此为了减少能量损耗, 选择 $1 \leq p \leq 3.3$ 。在此范围内抛掷指数增大, 抛掷幅度增大, 故取抛掷指数为 2.5。

对于容易发生滚动的物料, 振动机构的安装角一般不大于 12° ^[17], 为了保证物料能尽可能稳定地做抛掷运动, 本文 α_0 取值为 10° , 对于连杆式振动机常选用低频大振幅, 振幅 λ 为 $20 \sim 50 \text{ mm}$, 振动角为 $20^\circ \sim 45^\circ$ ^[17], 结合筛体长度和课题组相似清选机构设计经验, 本文取振幅 $\lambda=40 \text{ mm}$, 振动角 $\delta=24^\circ$ 。

2.1.4 振动筛功率核算

清选装置整体功率为各部分组件功率总和, 其大小决定了后期需的动力机械功率的大小^[18], 因此在设计阶段进行功率核算极为重要。振动筛功率的计算如式 (7)、式 (8) 所示^[19]。

$$N = N_1 + N_2 \quad (7)$$

$$\begin{cases} N_1 = \frac{Q_s N_{p1}}{\eta_1} \\ N_2 = \frac{Q_s N_{p2}}{\eta_2} \end{cases} \quad (8)$$

式中 N 为清选装置总功率, kW ; N_1 为上筛清选所需功率, kW ; N_2 为下筛清选所需功率, kW ; Q_s 为清选装置喂入量, kg/s ; $N_{p(i=1,2)}$ 为脱出物单位生产率所需功率, kW ; η_1 、 η_2 为上、下筛功率系数。

根据机器设计喂入量和物料试验结果, 取喂入量为 0.5 kg/s 。查询农业机械设计手册, 取功率系数 $\eta=0.9$, 每单位生产率上筛所需功率 $0.4 \sim 0.55 \text{ kW}$, 下筛所需功率 $0.25 \sim 0.3 \text{ kW}$ 。本文取上筛 $N_{p1}=0.55 \text{ kW}$, 下筛 $N_{p2}=0.3 \text{ kW}$ 。经计算, 驱动振动筛进行正常工作所需功率为 0.47 kW 。

2.2 贯流式风机设计

贯流式风机具有较小的叶轮尺寸, 且风机叶轮轴向长度不受限制, 有较大出风面积, 其出风截面横向速度分布均匀、纵向速度分布梯度大、且有层流性质^[20]。因此, 本文选择贯流式风机作为清选风机。

贯流式风机主要结构由风道上壁、镂空上壳体、叶片、风机主轴、风道下壁组成, 如图 5 所示。考虑后续多因素试验, 在出风口处加装风向调节风挡、风量调节风挡。贯流式风机风量是关于叶轮直径、叶片数量、叶轮轴相对轴径的复杂函数。根据陶南等^[21] 给出的设计方法结合农业机械设计手册进行相关计算。

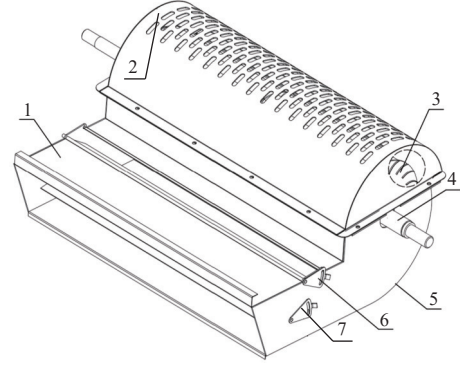


图 5 贯流式风机结构
Fig.5 Structure of tubular fan

2.2.1 风量及总压计算

风机风量大小及总压大小是其他参数设计的基础, 风机风量大小决定了清选作业时风机的清选能力, 所需风量为

$$V = \frac{\beta Q}{\mu \rho} \quad (9)$$

式中 V 为风机风量, m^3/s ; β 为脱出物杂质占比, 取 39% ; Q 为清选装置喂入量, 取 0.5 kg/s ; μ 为携带杂质气流混合浓度比; ρ 为空气密度。根据农机机械设计手册, 取 $\mu=0.25$, $\rho=1.20 \text{ kg/m}^3$ 。

风机总压表示的是气流经过风机叶片加速后所获得动能大小, 其计算式为

$$h_1 = h_j + h_d \quad (10)$$

$$\begin{cases} h_j = \frac{\zeta l \rho v_2^2}{2rg} + \frac{\psi \rho v_2^2}{2g} + \frac{\lambda \rho v_2^2}{2g} \\ h_d = \frac{\rho v_0^2}{2g} \end{cases} \quad (11)$$

式中 h_1 为风机总压, Pa ; h_j 为风机静压, Pa ; h_d 为风机动压, Pa ; 根据农用清选单风道横流风机设计方法, 确定清选气流摩擦系数 $\zeta=0.4$, 管道气体阻力系数 $\psi=0.35$, 进出口气体阻力系数 $\lambda=0.35$, 风管水利半径 $r=0.028 \text{ m}$ ^[21]; l 为清选流场长度, 根据装置的设计尺寸, $l=2.5 \text{ m}$; v_0 为清选气流流速, 根据设计要求, 取 $v_0=10 \text{ m/s}$; $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 。

经计算, $V=0.65 \text{ m}^3/\text{s}$, 总压 $h_1=230.58 \text{ Pa}$ 。

2.2.2 风机结构尺寸

清选工作气流与清选筛体在清选作业流程中具有相互配合, 出风口宽度应略大于振动筛宽度, 保证清选流场能覆盖所有待分离脱出物。因此, 贯流式风机出风口尺寸设计为 $830 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$ 。

叶轮直径 D_2 与叶轮转速能够影响叶片的线速度, 进而影响清选风场强度, 本文采用典型贯流风机叶轮直径尺寸, 即 $D_2=280 \text{ mm}$, 根据式 (12) 可求得叶轮内径 $D_1=98.8 \text{ mm}$ 。

$$n = \frac{D_1}{D_2} \quad (12)$$

式中 n 为叶轮内外径比, 参考横流式风机设计方法, n 取 0.71。

叶片数量增加可以强化清选流场, 但叶片数量过多将导致栅距减小, 风道阻力增加, 最佳叶片数量可以通过式 (13) 计算。

$$Z = \frac{17.952}{1.645 - 0.003875D_2} \quad (13)$$

经计算得到最佳叶片数量 $Z=32$ 。

2.2.3 风机功率核算

风机的理论功率可利用式 (14) 进行计算^[22]。

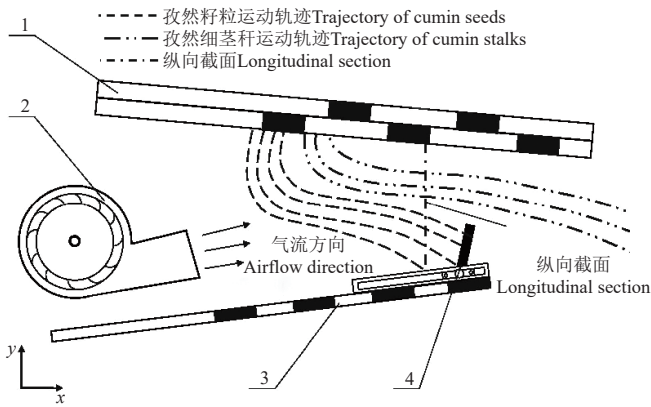
$$N = V \cdot h_1 / (1000\eta \cdot \eta_m) \quad (14)$$

式中 η 为农用型清选风机效率; η_m 为机械传动效率。结合农用清选装置单风道横流式风机设计方法与农业机械设计手册进行, 取 $\eta=0.42$ 、 $\eta_m=0.90$ 。经计算风机总功率为 0.397 kW。

2.3 风挡调节装置设计

清选装置需要满足不同含水率下孜然籽粒的清选作业要求, 且清选作业情况复杂多变, 在达到较低含杂率的情况下可能无法兼顾损失率, 因此对风机风速、入风角度、振动筛振动频率做出相应改变。

孜然细茎秆直径小于等于孜然籽粒直径, 筛网网孔无法在拦截孜然细茎秆的情况下使孜然籽粒落下。根据孜然脱出物悬浮速度试验得知, 孜然籽粒与孜然细茎秆悬浮速度、密度、质量有较大差异, 当受到工作气流曳力作用, 具有不同运动轨迹。如图 6 所示。



1. 复合式双层筛 2. 贯流式风机 3. 振动细筛 4. 风挡拦截装置
1. Compound double-layer type sieve 2. Tubular fan 3. Vibration fine sieve 4. Windshield interception device

图 6 脱出物运动轨迹示意图

Fig.6 Trajectory diagram of ejection

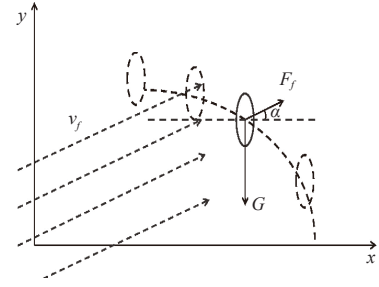
孜然籽粒在清选流场中受到气流曳力和重力作用, 如图 7 所示。

对位于清选流场中的孜然籽粒进行受力分析:

$$\begin{cases} F_f = k\rho S v_f^2 \\ G = mg \end{cases} \quad (15)$$

式中 k 为物体在空气中阻力系数; S 为气流对脱出物的

作用面积, m^2 。



注: v_f 为工作气流流速, $m \cdot s^{-1}$; F_f 为工作气流曳力, N; α 为 F_f 与筛面间的夹角, $(^\circ)$ 。

Note: v_f is the working airflow velocity, $m \cdot s^{-1}$; F_f is the trailing force of the working airflow, N; α is the angle between F_f and the sieve surface, $(^\circ)$ 。

图 7 孜然籽粒受清选气流作用受力分析示意图

Fig.7 Schematic diagram of stress analysis of cumin seeds subjected to cleaning air

将气流曳力分解, 得到水平方向所受合力 F_x 和竖直方向合力 F_y , 则水平方向加速度 a_x 和竖直方向加速度 a_y 可由式 (16) 计算。

$$\begin{cases} F_y = G - F_f \sin \alpha \\ F_x = F_f \cos \alpha \\ a_y = \frac{G - F_f \sin \alpha}{m} \\ a_x = \frac{F_f \cos \alpha}{m} \end{cases} \quad (16)$$

由此可得孜然脱出物下落时间 t 、水平方向位移 S_x 和竖直方向位移 S_y 分别为

$$t = \sqrt{\frac{2h}{a_y}} \quad (17)$$

$$\begin{cases} S_x = \frac{F_f \cos \alpha}{ma_y} \\ S_y = h \end{cases} \quad (18)$$

式中 h 为复合式双层筛下筛到细筛表面距离, m。将式 (18) 变形可得:

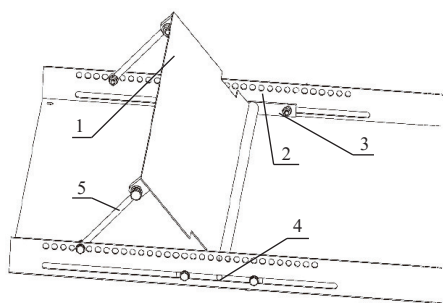
$$S_x = \frac{k\rho S v^2 \cos \alpha}{mg - k\rho S v^2 \sin \alpha} \quad (19)$$

根据式 (19) 可知, 物料下落过程中水平方向位移是关于脱出物流作用面积、工作气流流速、气流作用角度、物料质量的函数。通过计算可知, 在相同工作气流流速、气流作用角度下, 孜然籽粒的水平位移小于细茎秆的水平位移。

此外, 由于使孜然籽粒悬浮所需的气流速度高, 而使孜然细茎秆悬浮所需的气流速度低, 因此在相同气流流速、相同气流作用角度下, 竖直方向上孜然籽粒的竖直高度同样小于孜然细茎秆的竖直高度, 如图 6 所示。因此为了进一步降低清选损失, 本文通过设计安装在细筛表面的风挡装置, 拦截位于截面底部的孜然籽粒。该风挡装置前后位置和风挡高度均可调节, 以适应不同清选要求。

风挡装置由挡风板、支撑杆、移动支架等零件组成,

如图 8 所示。



1. 挡风板 2. 抛孔角钢 3. 螺栓 4. 移动板 5. 支撑杆
1. Air baffle 2. Angle steel 3. Bolts 4. Moving plate 5. Support rod

图 8 风挡装置结构示意图

Fig.8 Structure diagram of windshield interceptor

风挡装置安装在清选细筛末端, 通过改变螺栓位置, 移动支架可以前后移动。挡风板可绕移动支架做定轴旋转, 调节挡风高度。

3 仿真分析

本文通过 FLUENT 耦合 EDEM 进行气固两相流耦合仿真, 主要仿真目的有以下几点:

(1) 评估清选装置内部流场。对动压、静压、总压进行分析, 进而评估流场工作状态和能量损耗情况。

(2) 使用轨迹流程图对孜然籽粒、孜然细茎秆、孜然粗茎秆运动轨迹进行监测, 验证风机、振动筛安装相对位置及结构设计合理性。

(3) 通过仿真分析, 完成清选装置单因素试验, 确定影响清选效果的相关因素及变化区间, 通过响应面试验, 得到清选装置最优参数。

3.1 颗粒建模及离散元模型验证

3.1.1 颗粒建模

在 EDEM 中创建孜然脱出物的 3 种颗粒模型^[23], 如图 9 所示。分别将 STEP 模型导入, 设置平滑值为 5, 最小颗粒半径为 0.1 mm 的单球模型对孜然颗粒进行填充, 单个孜然颗粒共填充 27 颗球模型。使用平滑值为 8, 最小颗粒半径为 0.5 的单球模型对孜然粗茎秆和细茎秆进行填充, 共填充 22 颗球模型。

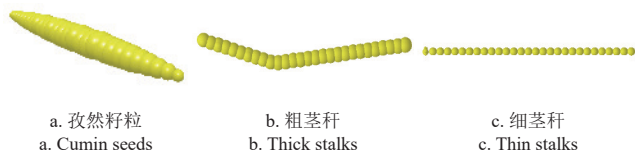


图 9 孜然脱出物离散元建模

Fig.9 Discrete element modeling of cumin extrusions

通过质构仪对孜然籽粒与粗、细茎秆进行压缩与剪切试验, 测量其弹性模量、剪切模量以及泊松比, 采用浸液法对孜然脱出物的密度进行测定, 采用斜面法测量孜然脱出物对应的静摩擦系数、滑动摩擦系数等接触参数。这些参数是构建离散元模型的参数基础^[24-26], 表 2、表 3 为本文离散元模型仿真参数。

表 2 孜然脱出物本征参数

Table 2 Intrinsic parameters of cumin extrusions

类型 Type	弹性模量 Elasticity modulus/MPa	剪切模量 Shear modulus/MPa	泊松比 Poisson's ratio
孜然籽粒 Cumin seeds	134.05	50.1	0.32
粗茎秆 Thick stalks	230.7	67.7	0.42
细茎秆 Thin stalks	157.4	55.6	0.41

表 3 孜然脱出物静摩擦系数

Table 3 Static friction coefficient of cumin extrusions

对象 Object	最大值 Maximum	最小值 Minimum	平均值 Average
孜然籽粒-孜然籽粒	0.709	0.621	0.67
孜然籽粒-粗茎秆	0.647	0.514	0.56
孜然籽粒-细茎秆	0.669	0.576	0.61
孜然籽粒-钢板	0.835	0.635	0.72
粗茎秆-粗茎秆	0.567	0.471	0.52
粗茎秆-细茎秆	0.736	0.583	0.66
粗茎秆-钢板	0.813	0.620	0.73
细茎秆-细茎秆	0.842	0.634	0.78
细茎秆-钢板	0.808	0.689	0.72

3.1.2 离散元模型验证

堆积角试验是经典离散元仿真标定试验。本文通过对比实际试验和离散元仿真试验中形成的物料堆积角, 如图 10 所示, 对离散元模型进行校准。试验中, 将实际堆积角试验拍摄图像, 导入 Matlab 中, 对图像进行二值化、边缘检测、图像切除等操作得到实际堆积角拟合曲线和堆积角度, 试验重复 3 次。得到实际堆积角平均值为 32.3°, 离散元模型堆积角平均值为 32.081°。使用 Origin 进行双样本 T 检测, $P=0.848>0.05$, 表面离散元模型堆积角与实际试验堆积角之间没有显著性差异, 离散元模型可以反映实际筛选过程。

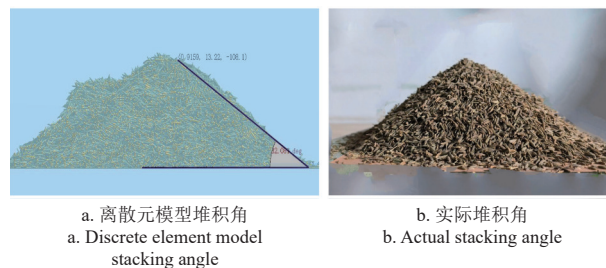


图 10 孜然脱出物离散元标定

Fig.10 Discrete element calibration of cumin extract

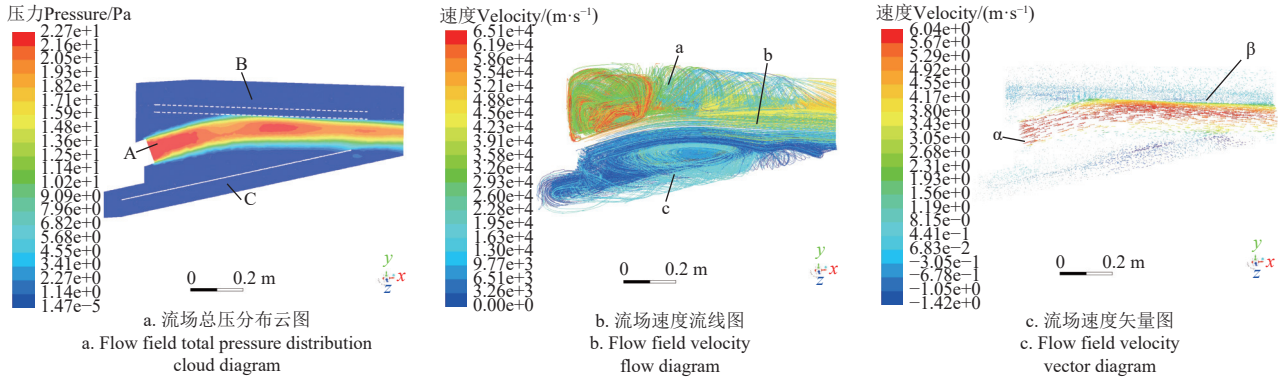
3.2 清选作业气固两相运动分析

3.2.1 流场压力分布及速度分析

如图 11a 所示, 箱体内部靠近复合式双层筛底部存在一片高压区域 (区域 A), 其单位面积压强变化范围为 14.8~22.7 Pa, 其他箱体区域 (区域 B、C) 为低压区域, 低压区域单位面积压强变化范围为 $1.47 \times 10^{-5} \sim 14.8$ Pa。区域 A 的面积小于区域 B、C 的 1/2, 且该区域基本覆盖了设计时为风机进行风力筛选所预留的通道, 该现象表明气流流动较为集中, 气体动能集中度好, 振动筛及风机位置布置合理, 可以达到清选装置设计要求。图 11b 为气体流程图, 图中 a 为双层筛区域, b 为双层筛底部与振动细筛间的区域, c 为振动细筛所在的区域。气流

流线在 b 处均匀且集中, 表明该处气流流动稳定, 气流一致性好。气流在 c 处中间部分形成一个较大规模涡旋, 该现象可能会造成孜然脱出物的动能损耗。但由于该区域的最大速度为 1.95×10^4 m/s, 相较于 a、b 区域而言速度较低, 因此对孜然脱出物造成的动能损耗有限。图 11c 为清选流场速度矢量图。矢量图中气流方向的变化可以反映装置内部结构对气流路径的影响。图中 α 为风机

气流入口、 β 为示双层筛的下筛底部。风机工作时, 气流由 α 处进入, 并与 β 处发生接触, 接触过程产生了气流动能的耗散, 从而使得该处的气流流速从 $5.67 \sim 6.04$ m/s 下降至 $3.80 \sim 4.17$ m/s。接触部分有少量低速气流穿过 β 区域向斜上方运动, 降低了孜然脱出物竖直方向的下落速度, 但由于网孔较小, 透过气流总量较少, 影响较小。



注: A 表示高压区域; B 表示双层筛处的低压区域; C 表示振动细筛处的低压区域。a 表示双层筛所在的区域; b 表示双层筛底部与振动细筛中间的区域; c 表示振动细筛所在的区域。 α 表示风机气流入口; β 表示双层筛的下筛底部区域。

Note: A indicates the high-pressure area; B indicates the low-pressure area at the double-deck sieve; and C indicates the low-pressure area at the vibrating fine screen. a denotes the region where the double-deck sieve is located; b denotes the region midway between the bottom of the double-deck sieve and the vibrating fine screen; c denotes the region where the vibrating fine screen is located. α denotes a fan airflow inlet; β denotes a region at the bottom of the lower sieve of the double-deck sieve.

图 11 清选流场压力及速度分布云图

Fig.11 Cloud picture of pressure and velocity distribution in cleaning flow field

3.2.2 清选物料固相运动规律分析

如图 12a 所示, 孜然籽粒由上方集料斗垂直落入复合式双层筛, 筛体振动, 孜然籽粒受到水平方向加速度, 在多次弹跳后, 进入复合筛下层, 进而落入复合式双层筛和细筛之间空腔, 受到清选气流作用, 落入细筛上表面, 如图 12b 所示。图 12c 孜然粗茎秆在清选机构中运动轨迹流线图表明, 筛体网眼尺寸合适, 并无孜然粗茎秆透过双层筛体。孜然粗茎秆在筛体振动作用下, 获得水

平方向加速度, 在复合式双层筛表面振动跳跃, 以较高的速度向清选装置右侧运动, 最终被排出清选装置外。图 12d 为孜然细茎秆在清选装置中运行轨迹图。孜然细茎秆直径接近甚至小于孜然籽粒直径, 受到复合式双层筛振动作用, 其运动姿态可能变为竖直向下或接近竖直向下, 有一定几率透过复合式双层筛。流动轨迹显示, 有较大部分孜然细茎秆透过复合式双层筛上筛, 少部分透过复合式双层筛下筛。

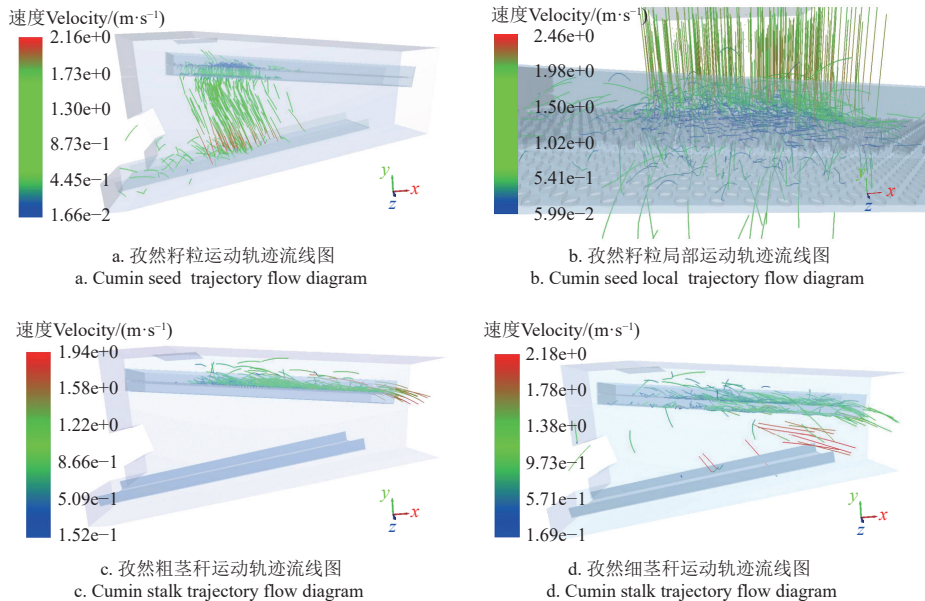


图 12 孜然脱出物运动轨迹流线图

Fig.12 Trajectory flow diagram of cumin extrusions

完全透过复合式双层筛的孜然细茎秆在下方空腔中受到工作气流曳力作用,其速度急剧增加,受工作气流作用,大部分孜然细茎秆被吹出清选装置,未被吹出孜然细茎秆成为清选杂质的主要来源。

3.3 单因素仿真试验

3.3.1 单因素仿真试验方案

通过预试验对影响孜然清选装置清选效果的参数进行筛选,由于改变风机风速、风机入风角度、振动筛振动频率时,孜然的清选效果变化最明显,因此选择风机风速、风机入风角度、振动筛振动频率、三个参数进行单因素试验。结合参考文献[26]和预试验结果,对单因素试验因素变化范围进行确定,如表4所示。

采用损失率 Y_1 含杂率 Y_2 对作业效果进行评价,含杂率和损失率定义如下:

$$\begin{cases} Y_1 = \frac{m_1}{M_1} \times 100\% \\ Y_2 = \frac{m_2}{M_2} \times 100\% \end{cases} \quad (20)$$

式中 M_1 为清选作业前孜然籽粒总质量, kg; m_1 为清选作业后损失孜然籽粒质量, kg; M_2 为清选作业后孜然籽粒总质量, kg; m_2 为杂质质量, kg。

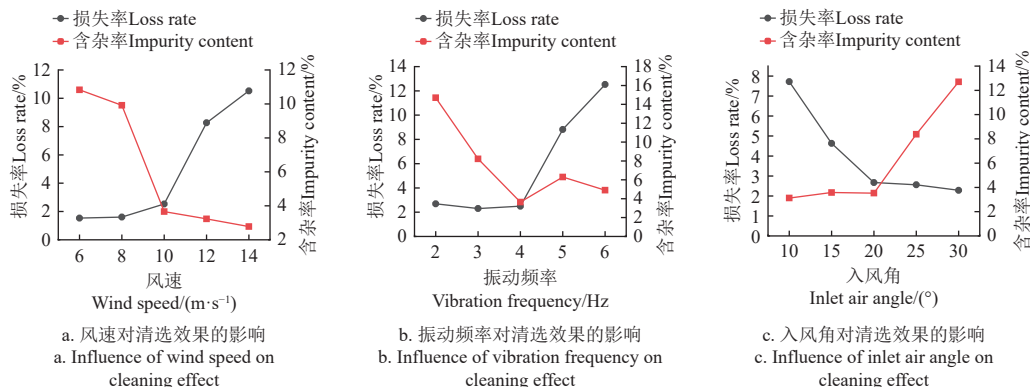


图 13 单因素仿真试验结果

Fig.13 Results of the single-factor simulation test

3.4 响应面仿真试验

3.4.1 响应面试验方案及结果

根据单因素结果,开展多因素试验方案设计,采用三因素三水平分析试验,进行 17 组试验,5 个零点估计误差,采用 Box-Behnken Design 设计方法,使用 Design Expert11 进行试验安排^[27-29]。试验因素水平如表5所示,试验方案与结果如表6所示。

表 5 响应面试验因素水平表

水平	风速	振动频率	入风角度
Level	Wind speed $X_1/(m \cdot s^{-1})$	Vibration frequency X_2/Hz	Inlet air angle $X_3/(^{\circ})$
-1	8	3	18
0	10	4	20
1	12	5	22

3.4.2 回归模型建立与显著性检验

利用 Design-Expert 11 多元回归拟合分析得到孜然清

表 4 单因素试验水平表

范围	风速	振动频率	入风角
Scope	Wind speed/(m·s ⁻¹)	Vibration frequency/Hz	Inlet air angle/(°)
-2	6	2	10
-1	8	3	15
0	10	4	20
1	12	5	25
2	14	6	30

3.3.2 清选装置单因素仿真试验结果

如图13a所示,损失率随着风速增加不断上升,含杂率随着风速增加不断下降。损失率变化极差为9%,表明清选风机风速对清选含杂率影响效果显著。含杂率变化极差为6.8%,表明清选风速对清选含杂率影响显著。最佳清选风速应在8~12 m/s之间。如图13b所示,损失率随着振动频率增加不断上升,含杂率随着振动频率增加先下降后升高。损失率变化极差为10.9%,表明振动频率对清选含杂率影响显著。含杂率变化极差为9.4%,表明振动频率对清选含杂率影响显著。最佳振动频率应在3~5 Hz之间。如图13c所示,损失率随着入风角度增加不断下降,含杂率随着入风角度增加不断上升。损失率变化极差为3.5%,表明入风角度对清选含杂率影响不显著。含杂率变化极差为9.6%,表明入风角度对清选含杂率影响显著。最佳入风角度应在18°~22°之间。

选最优参数,建立风速 X_1 、振动频率 X_2 、入风角度 X_3 关于损失率 Y_1 响应值的二次多项式响应面回归模型,如式(21)所示。

$$Y_1 = 224.1305 - 12.20937X_1 - 18.0185X_2 - 12.40937X_3 + 0.4275X_1X_2 + 0.006875X_1X_3 - 0.065X_2X_3 + 0.472687X_1^2 + 2.03825X_2^2 + 0.318937X_3^2 \quad (21)$$

对回归方程进行方差分析,如表7所示,损失率试验模型 $P < 0.001$,表明试验模型可以很好反映损失率与自变量之间变化关系,其中风速 X_1 和振动频率 X_2 , $P < 0.001$,表明风速和振动频率对模型影响极为显著^[30]。入风角度 X_3 , P 值为 0.0413,表明入风角度对损失率影响显著。失拟项 P 值为 0.224,表明回归方差拟合度高。模型决定系数 R^2 为 0.9899,表明模型可以在准确率

98% 以上概率解释上述评价指标。

相关参数与含杂率 Y_2 的二次多项式响应面回归模型如式 (22) 所示。

$$Y_2 = 150.575 25 - 3.125 62X_1 - 9.553X_2 - 10.738 12X_3 + 0.068 75X_1X_2 - 0.133 75X_1X_3 - 0.271 25X_2X_3 + 0.295 875X_1^2 + 1.596X_2^2 + 0.319 625X_3^2 \quad (22)$$

模型显著水平 P 小于 0.000 1, 表明各因素对评价指标影响极为显著, 风速 X_1 和振动频率 X_3 , P 值均大于等于 0.001 小于 0.05, 表明该因素对评价指标影响为显著。振动频率 X_2 显著水平 P 小于 0.000 1, 表明振动频率对含杂率影响极为显著。失拟项 P 值为 0.052 5, 表明回归方差拟合度高。模型决定系数 R^2 为 0.989 5, 表明模型解释上述评价指标的准确率在 98% 以上。

表 6 试验方案及结果

Table 6 Test schedule and response values

序号 No.	风速 Wind speed	振动频率 Vibration frequency	入风角度 Inlet air angle	损失率 Loss rate/%	含杂率 Impurity content/%
1	-1	0	-1	7.14	5.78
2	0	-1	1	4.82	8.05
3	0	1	1	7.02	3.93
4	-1	-1	0	7.66	7.26
5	0	1	-1	7.08	6.02
6	0	0	0	2.26	3.51
7	1	-1	0	2.62	8.59
8	0	0	0	2.38	3.84
9	1	1	0	6.92	5.81
10	-1	0	1	8.14	4.85
11	0	0	0	2.79	3.49
12	0	0	0	2.26	3.74
13	-1	1	0	8.54	3.93
14	0	0	0	2.84	3.51
15	1	0	1	4.26	5.31
16	0	-1	-1	4.36	7.97
17	1	0	-1	3.15	8.38

表 7 回归方程方差分析

Table 7 Analysis of variance of regression equation

来源 Source	损失率 Loss rate				含杂率 Impurity content			
	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	F	P	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	F	P
模型 Model	86.73	9	76.12	<0.000 1**	56.58	9	73.11	<0.000 1**
X_1	26.39	1	208.48	<0.000 1**	4.91	1	57.15	0.000 1*
X_2	12.75	1	100.73	<0.000 1**	18.54	1	215.66	<0.000 1**
X_3	0.787 5	1	6.22	0.041 3*	4.52	1	52.51	0.000 2*
X_1X_2	2.92	1	23.1	0.002*	0.075 6	1	0.879 5	0.037 96
X_1X_3	0.003	1	0.023 9	0.881 5	1.14	1	13.31	0.008 2*
X_2X_3	0.067 6	1	0.534	0.488 7	1.18	1	13.69	0.007 7*
X_1^2	15.05	1	118.9	<0.000 1**	5.9	1	68.59	<0.000 1**
X_2^2	17.49	1	138.19	<0.000 1**	10.73	1	124.73	<0.000 1**
X_3^2	6.85	1	54.14	0.000 2*	6.88	1	80.04	<0.000 1**
残差 Residual	0.886 1	7			0.601 9	7		
失拟项 Lack of fit	0.557 0	3	2.26	0.224	0.498	3	6.39	0.052 5
误差 Pure error	0.329 1	4			0.103 9	4		
总和 Total	87.61	16			57.18	16		

注: $P < 0.01$ (极显著, **); $P < 0.05$ (显著, *)。Note: $P < 0.01$ (highly significant, **); $P < 0.05$ (significant, *)

3.4.3 各因素贡献率分析

贡献率 K 表征因素对模型的影响程度, 各因素贡献率计算结果如表 8 所示。分析可知, 风速对损失率模型影响最大, 其次为振动频率、入风角度。振动频率对含杂率模型影响最大, 其次为风速、入风角度。

表 8 各因素贡献率

Table 8 Contribution rate of factors

指标 Index	风速 Wind speed	振动频率 Vibration frequency	入风角度 Inlet air angle
损失率 Loss rate	2.46	2.46	1.82
含杂率 Impurity content	2.43	2.45	1.96

3.4.4 参数优化

采用 Design-Expert 11 多元回归拟合分析对损失率、含杂率回归方程进行求解, 如式 (25) 所示, 以损失率和含杂率均取最小值时参数最优, 求解结果如表 9 所示。

表 9 参数优化结果

Table 9 Parameter optimization results

项目 Item	风速 Wind speed ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	振动频率 Vibration frequency /Hz	入风角度 Inlet air angle /($^{\circ}$)	损失率 Loss rate/%	含杂率 Impurity content/%
值 Value	10.27	4.07	20.26	2.463	3.55

$$\begin{cases} \text{s.t.} \begin{cases} 8 \text{ m/s} \leq X_1 \leq 12 \text{ m/s} \\ 3 \text{ Hz} \leq X_2 \leq 5 \text{ Hz} \\ 18^{\circ} \leq X_3 \leq 22^{\circ} \end{cases} \\ \min(Y_1) \\ \min(Y_2) \end{cases} \quad (23)$$

4 台架试验

4.1 试验条件与设备

试验地点选在新疆农垦科学院棉花全程机械化中心工厂内, 试验时间为 2023 年 7 月 8 日, 试验用孜然脱出物通过自制孜然脱粒机获取, 试验品种为“新孜然一号”。试验设备为孜然清选试验台, 如图 14 所示。



图 14 孜然清选装置试验

Fig.14 Test of cumin cleaning device

振动筛和风机采用 2 个额定功率 1.5 kW 的三相异步电动机驱动。孜然清选试验台总体尺寸为 3 200 mm×1 200 mm×1 000 mm。其他试验设备有风速测定仪、电子量角器、电子秤、托盘、卷尺、工具包等。

4.2 试验参数与方法

试验参照 GB/T5262-2008《农业机械试验条件测定方法一般规定》，对孜然清选装置实际作业效果进行测试。

试验开始前，首先对振动筛安装角度、振动筛筛网间隙等尺寸进行测量与校核。之后利用电子秤称量 2 kg 孜然脱出物。装置启动后，等待机器运转稳定，以 0.5 kg/s 的喂入速度向孜然清选装置中加入孜然脱出物。试验过程中通过变频器控制电机转速，进而控制振动频率和风机风速，通过风机左侧风向调节扳手调节入风角度。当试验进行到集料装置中不再有孜然籽粒进入后，等待 10 s，使用精度 0.01 g 的电子秤对集料斗中的孜然籽粒和其余杂质进行称量，之后收集清选装置出口及装置外部散落的孜然籽粒并进行称量。

4.3 结果与分析

台架试验效果如图 15 所示。导流槽排出的杂质中未出现茎秆携带大量孜然籽粒被排出的情况，表明装置夹带损失少，网眼尺寸设计符合要求，筛网长度设计合理。在出风口排出的杂质中，杂质类型主要为孜然细茎秆和粗茎秆混合物，同样未见大量夹带孜然籽粒的现象，表明风速和风向设计合理。集料斗收集的孜然籽粒中发现少许孜然籽粒尾部有细茎秆掺杂，但是含量较少，含杂率小于 6%，符合设计预期。

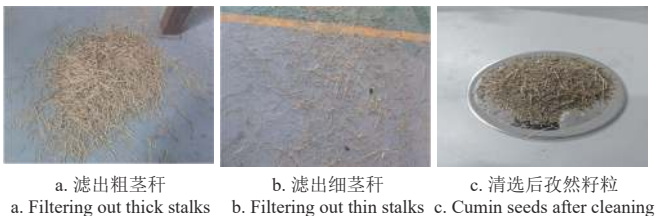


图 15 试验效果图

Fig.15 Effects of test

试验结果如表 10 所示，台架试验得到的平均损失率和含杂率分别为 3.40% 和 5.28%，该结果与预测值基本一致。装置在大喂入量的情况下并未出现堵塞现象。

表 10 验证试验试验结果
Table 10 Verification test results

序号 No.	损失率 Loss rate/%	含杂率 Impurity content/%
1	2.98	6.46
2	3.01	5.32
3	3.61	4.98
4	3.73	4.90
5	3.68	4.72
平均值 Mean value	3.40	5.28

台架试验与模型预测的损失率与含杂率分别高出 0.94 和 1.73 个百分点，表明二次多项式回归模型具有较好的准确性。台架试验籽粒损失率升高是由于台架侧方

有少部分孜然籽粒散落。经过观察，孜然籽粒向侧方散落是由于喂入时孜然与复合式振动筛上筛面发生碰撞导致的。台架试验含杂率高于模型预测值主要原因是试验台气密性低，因此气流衰减速度大而导致的。

5 结 论

1) 针对目前孜然脱粒机清选装置清选喂入量低，清选损失率、含杂率高等问题，设计了一款由振动筛体、贯流式风机、风挡调节装置组成的风筛式孜然清选装置。振动筛体尺寸为 1 200 mm×850 mm，上、下层筛网孔径分别为 4 mm，2 mm。清选风机风量为 0.65 m³/s，总压为 230.58 Pa，叶片数量为 32 片。

2) 采用 CFD-DEM 气固耦合技术，对清选装置内部气流场工作状态进行分析，得到影响气流场的主要参数为风速、振动频率、入风角度，并得到其适宜变化范围为：风速 8~10 m/s，振动频率 3~5 Hz，入风角度 18°~22°。仿真结果表明，孜然脱出物运动状态符合设计预期，孜然清选装置结构设计合理。

3) 进行单因素试验与正交仿真试验，初步判断了清选装置的工作效果，得到了关于损失率与含杂率的二次项多项式回归模型，获得了清选装置工作的最优参数组合，并根据正交试验结果对各因素在模型中的贡献率进行分析，明确了各因素对清选损失率的影响程度由大到小分别为风速、振动频率、入风角度，以及各因素对清选含杂率的影响程度由大到小分别为振动频率、风速、入风角度。

4) 通过台架试验对最优工作参数进行验证，台架试验得到的清选后孜然损失率和含杂率平均值分别为 3.40% 和 5.28%，比模型预测值分别高出 0.94 和 1.73 个百分点，装置在大喂入量的情况下并未出现装置堵塞的现象。

[参 考 文 献]

[1] 雷钧杰, 陈兴武, 曾卫东, 等. 新疆孜然新品种及高产栽培技术[J]. 新疆农业科技, 2012(1): 54-55.

[2] 张锋伦, 吴素玲, 张卫明, 等. 我国孜然种植模式调查及产品质量初步评价[J]. 食品工业, 2015, 36(1): 171-173. ZHANG Fenglun, WU Suling, ZHANG Weiming, et al. Cumin clanting modes survey and quality evaluation of China[J]. Food Industry, 2015, 36(1): 171-173. (in Chinese with English abstract)

[3] 李杨辉. 孜然秸秆替代小麦秸秆对羔羊生产性能、瘤胃微生物组成和胃肠道形态的影响[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2023. LI Yanghui. Effects of Cumin Straw Replacement of Wheat Straw on Performance, Rumen Microbial Composition and Gastrointestinal Morphology of Lambs[D]. Aral: Tarim University, 2023. (in Chinese with English abstract)

[4] 田西京. 南疆孜然种质资源生态适应性研究与评价[D]. 阿拉尔: 塔里木大学, 2017. TIAN Xijing. Ecological Adaptability of Cumin Germplasm

- Resources in Southern Xinjiang[D]. Aral: Tarim University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [5] ALKHALDI H, EBERHARD P. Particle screening phenomena in an oblique multi-level tumbling reservoir: A numerical study using discrete element simulation[J]. *Granular Matter*, 2007, 9(6): 415-429.
- [6] MYHAN R, JACHIMCZYK E. Grain separation in a straw walker unit of a combine harvester: Process model[J]. *Biosystems Engineering*, 2016, 145: 93-107.
- [7] SRIVASTAV S, JOSHI D C. Mathematical model for design and development of double drum rotary screen cleaner-cum-grader for cumin seed[J]. *Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America*, 2013, 44(3): 70-74. .
- [8] JETHVA K R, VARSHNEY A K. Design and development of reciprocating type cumin cleaner cum grader[J]. *Ama, Agricultural Mechanization in Asia, Africa & Latin America*, 2016, 47(1): 7-12.
- [9] ARADWAD P P, KUMAR A T V, MANI I, et al. Design and development of cumin destalker machine[J]. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2022, 81(7): 705-711.
- [10] 陈佳林, 胡守林, 陈国栋等. 一种果园用小型孜然脱粒机. CN208609408U[P], 2019-03-19.
- [11] 仲金凤. 一种孜然采集用收取装置. CN208047349U[P]. 2018-11-06.
- [12] 尹超, 李小林. 一种孜然采集用收取装置. CN210840741U[P]. 2020-06-26.
- [13] 柴绍青. 一种用于孜然加工的振动筛选装置. CN211755435U[P]. 2020-10-27.
- [14] 高云龙. 一种孜然初步除杂装置. CN213494913U[P]. 2021-06-22.
- [15] 戴飞, 赵武云, 付秋峰, 等. 双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机参数优化与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(7): 83-92.
- DAI Fei, ZHAO Wuyun, FU Qiufeng, et al. Parameter optimization and test of double-duct wind screen type hula threshing material separating and cleaning machine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(7): 83-92. (in Chinese with English abstract)
- [16] 连国党, 马丽娜, 封伟, 等. 食葵籽粒双层振动风筛式清选装置设计与试验[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(20): 55-65.
- LIAN Guopang, MA Lina, FENG Wei, et al. Design and test of a double-layer vibrating wind-screen type cleaning device for sunflower seeds[J]. *Transactionsof the Chinese Society of Agricultural Machinery(Transactions of the CSAE)*, 2023, 39(20): 55-65. (in Chinese with English abstract)
- [17] 闻邦椿. 振动筛振动给料机振动输送机的设计与调试[M]. 北京: 化学工业出版社, 1989.
- [18] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下册)[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [19] 戴飞, 付秋峰, 赵武云, 等. 双风道风筛式胡麻脱粒物料分离清选机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(4): 117-125, 247.
- DAI Fei, FU Qiufeng, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of double-channel air screen type separating and cleaning machine for flax threshing materials[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(4): 117-125, 247. (in Chinese with English abstract)
- [20] 施德芝. 贯流式风机的几个问题[J]. *江苏大学学报: 自然科学版*, 1984(3): 72-89.
- SHI Dezhi. Some problems of tubular fan[J]. *Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition*, 1984(3): 72-89. (in Chinese with English abstract)
- [21] 陶南, 王成芝. 农用清选单风道横流风机设计方法[J]. *浙江农业大学学报*, 1988, (4): 73-78.
- TAO Nan, WANG Chengzhi. Design method of cross-flow fan for agricultural cleaning Single Duct[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 1988, (4): 73-78. (in Chinese with English abstract)
- [22] 刘正怀, 郑一平, 王志明, 等. 微型稻麦联合收获机气流式清选装置研究[J]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 102-108.
- LIU Zhenghui, ZHENG Yiping, WANG Zhiming, et al. Research on air flow cleaning device of miniature rice-wheat combine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 102-108. (in Chinese with English abstract)
- [23] 李洪昌, 李耀明, 唐忠, 等. 基于 EDEM 的振动筛分数值模拟与分析[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(5): 117-121.
- LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Simulation and analysis of fractional value of vibrating screen based on EDEM[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery(Transactions of the CSAE)*, 2011, 27(5): 117-121. (in Chinese with English abstract)
- [24] 王国强, 郝万军, 王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010.
- [25] 路修强. 基于 CFD-DEM 耦合小麦收获机清选装置仿真分析与优化[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- LU Xiuqiang. Simulation Analysis and Optimization of the Wheat Harvester Cleaning Device Based on CFD-DEM Coupling[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [26] 袁子翔, 戴飞, 赵武云, 等. 基于 CFD-DEM 的胡麻风筛式清选装置仿真分析与试验[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41 (6): 281-290.
- YUAN Zixiang, DAI Fei, ZHAO Wuyun, et al. Simulation analysis and test of flax screen cleaning device based on CFD-DEM[J]. *Agricultural Research in Arid Areas*, 2019, 41(6): 281-290. (in Chinese with English abstract)
- [27] 吴亮, 余创, 梁志坚, 等. 基于 Fluent-Edem 流固耦合算法

- 的水下台阶爆破爆堆形成过程研究[J]. 爆破, 2023, 40(4): 37-43, 123.
- WU Liang, YU Chuang, LIANG Zhijian, et al. Research on the formation process of underwater step blasting and explosive pile based on Fluid-EDEM coupling algorithm[J]. *Blasting*, 2023, 40(4): 37-43, 123. (in Chinese with English abstract)
- [28] 李琴, 雷雨薇, 孙浩翔, 等. 基于 EDEM-Fluent 耦合的激光机械钻头井底流场与排屑性能研究[J]. 工程设计学报, 2023, 30(4): 521-530.
- LI Qin, LEI Yuwei, SUN Haoxiang, et al. Study on bottom hole flow field and chip removal performance of laser mechanical bit based on EDEM-Fluent coupling[J]. *Chinese Journal of Engineering Design*, 2019, 30(4): 521-530. (in Chinese with English abstract)
- [29] 汤亮, 陈全, 龚发云, 等. 基于 CFD-DEM 的物料转运过程诱导风流场与产尘因素分析[J]. 机械设计, 2024, 41(1): 63-69.
- TANG Liang, CHEN Quan, GONG Fayun, et al. Analysis of induced air flow field and dust generation factors in Material transfer process based on CFD-DEM[J]. *Journal of Mechanical Design*, 2018, 41(1): 63-69. (in Chinese with English abstract)
- [30] 侯俊铭, 任兆坦, 朱红杰. 双层倾斜振动风筛式蓖麻清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(S2): 39-51.
- HOU Junming, REN Zhaotan, ZHU Hongjie. Design and test of double-decked inclined vibrating wind screen type castor clearing device[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(S2): 39-51. (in Chinese with English abstract)

Design and test of the wind-sieve type cleaning equipment for cumin threshing machine

WANG Fanrui^{1,2}, LI Bin^{1*}, ZHU Rongguang^{2*}, WANG Shiguo¹, LIU Yang¹, GAO Xiaolong², YANG Xingyu²

(1. Mechanical Equipment Research Institute, Xinjiang Academy of Agricultural and Reclamation Science, Shihezi 832099, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: Cumin grains face significant challenges during cleaning, due mainly to their small particle size and similar external dimensions. Specialized cleaning devices are necessary to improve a high impurity content rate and low cleaning efficiency. In this study, a wind-screen cumin cleaning device was designed, according to the unique physical characteristics of cumin seeds and the working principles of existing cleaning devices. The key components of the cleaning device encompassed the structural and parameter design of the composite double-deck sieve, the cross-flow fan, and the wind-blocking and intercepting device. Gas-solid coupling simulation was utilized to ensure its effectiveness. The pressure distribution was examined in the scavenging flow field, the airflow velocity, and the solid-phase movement of scavenging materials. The device structure was verified after the simulation. The main influencing factors on the scavenging effect were determined as the wind speed, vibration frequency, and air inlet angle. The three-factor and three-level orthogonal test was conducted as the test factors with the loss rate and the evaluation index as the impurity rate. A quadratic polynomial response surface regression model was obtained to further investigate the relationship between the independent variables and the scavenging effect. The optimal working parameters were identified for the scavenging device, with a wind speed of 10.27 m/s, a vibration frequency of 4.07 Hz, and an inlet angle of 20.26°. A homemade test stand was utilized to validate the optimal parameters. The combination of working parameters was tested as well. The average loss rate and impurity rate after cumin seed cleaning were 3.40% and 5.28%, respectively. The theoretical prediction value was close to the test ones, indicating the high accuracy of a regression model. Furthermore, the composite double-deck sieve was carefully considered to ensure efficient cleaning while minimizing loss. The cross-flow fan and wind-blocking-intercepting device also contributed to the overall effectiveness of the cleaning device. In conclusion, the wind-screen cumin cleaning device can serve as an effective solution to the challenges during cleaning. The optimal working parameters can be expected to minimize the grain loss and impurity rates. The gas-solid coupling simulation was used to further validate the structure design. The findings can provide a strong reference for the practical application and effectiveness of the cleaning device.

Keywords: cumin; cleaning device; ejection; vibrating screen type; Fluent-EDEM coupling