

油菜联合收获机滚筒筛式复清装置设计与试验

袁佳诚¹ 杨佳¹ 万星宇¹ 廖宜涛^{1,2} 廖庆喜^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对油菜联合收获机脱粒分离作业后脱出物组分杂, 籽粒细小不易分离, 导致清选作业清洁率低、人工复清劳动强度大等问题, 设计了一种挂载在粮箱上的模块化滚筒筛式复清装置。基于运动学与动力学分析了物料提升螺旋输送器和筛分装置的结构参数与运行参数范围; 以滚筒筛式复清装置的损失率、清洁率及筛分效率为评价指标, 以滚筒筛转速、筛网内助流螺旋叶片螺距和筛孔直径为影响因素, 基于 EDEM 开展了三因素三水平正交试验, 确定了最佳参数组合, 并利用收获关键部件试验台开展了验证试验。仿真结果表明: 当喂入量为 0.6 kg/s 时, 滚筒筛式复清装置的较优参数组合为筛孔直径 5 mm、滚筒筛转速 105 r/min、筛网内助流螺旋叶片螺距 250 mm, 此时滚筒筛式复清装置损失率为 0.92%、清洁率为 98.96%、筛分效率为 95.12%。台架验证试验表明, 带有滚筒筛式复清装置的清选系统工作顺畅, 在最佳参数组合条件下, 滚筒筛式复清装置的损失率为 0.96%、清洁率为 98.67%、筛分效率为 95.36%, 对比未增加滚筒筛式复清装置前清洁率提升了 4.38 个百分点。研究可为油菜联合收获机清选装置结构改进和优化提供参考。

关键词: 油菜联合收获机; 清选系统; 复清装置; 滚筒筛; EDEM

中图分类号: S225.99 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2022)09-0099-10 OSID: 

Design and Experiment of Cylinder Sieve Type Re-cleaning Device for Rape Combine Harvester

YUAN Jiacheng¹ YANG Jia¹ WAN Xingyu¹ LIAO Yitao^{1,2} LIAO Qingxi^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: Existing rape combine harvester has the challenges to separate the small rapeseed from the threshing outputs whose components are mixed, highlighting the need to improve the cleaning rate to reduce the labor consumption in manual re-cleaning process. Therefore, a modularized re-cleaning cylinder sieve, which could hung on the grain tank, was designed. Based on the kinematics and dynamic analysis, the range of structure and operation parameters of the material lifting screw conveyor and screening device were analyzed. A three-factor and three-level orthogonal experiment was carried out by using EDEM. The loss rate, cleaning rate and screening efficiency were taken as the indexes. The rotating speed of cylinder sieve, the screw pitch of the spiral blade, and the diameter of the sieve hole were taken as the factors. The optimal parameter combination was determined by the orthogonal experiment, and verified by the bench verification experiment. The simulation results indicated that the optimal parameter combination of the diameter of sieve hole, the rotating speed of cylinder sieve, and the screw pitch of the spiral blade were 5 mm, 105 r/min and 250 mm, respectively. When the feeding rate was 0.6 kg/s, under this condition, the loss rate, cleaning rate, and screening efficiency of re-cleaning cylinder sieve were 0.92%, 98.96% and 95.12%, respectively. The results of bench experiment showed that the cleaning system with re-cleaning cylinder sieve could work smoothly. Under the optimal

收稿日期: 2021-10-28 修回日期: 2022-01-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(52075210)、中国博士后科学基金项目(2020M682438)和财政部和农业农村部:国家现代油菜产业技术体系专项(CARS-12)

作者简介: 袁佳诚(1995—),男,博士生,主要从事油菜机械化收获技术与装备研究,E-mail: yuanjiacheng_hzau@foxmail.com

通信作者: 廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究,E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

parameter combination, the loss rate, cleaning rate, and screening efficiency were 0.96%, 98.67% and 95.36%, respectively. Compared with the performance of the cyclone separation cleaning device without re-cleaning cylinder sieve, the cleaning rate was improved by 4.38 percentage points. The research could provide a reference for the structural improvement and optimization of cleaning device of rape combine harvester.

Key words: rape combine harvester; cleaning system; re-cleaning device; cylinder screen; EDEM

0 引言

油菜是我国最主要的油料作物,其种植面积和产量均居世界前列,2020 年种植面积为 $6.76 \times 10^6 \text{ hm}^2$,总产量为 $1.4049 \times 10^7 \text{ t}$,但油菜机收率仅为 48.55%^[1-2]。油菜机械化收获水平低下导致劳动强度大、生产效率低、生产成本低,严重制约了油菜生产规模持续扩大^[3-5]。

联合收获是我国油菜机械化收获的主要方式之一,可一次性完成油菜的切割、输送、脱粒、分离、清选等环节。清选装置性能直接影响联合收获机的作业质量及后续的贮藏与加工^[6]。为实现高效低损高清洁率的油菜联合收获,相关学者针对风筛式清选装置开展了风机和振动筛的优化设计、筛分机理解析、气流场、物料运动和参数匹配分析等研究。文献[7-12]针对风机和振动筛结构优化设计分别提出了双风道六出风口风机、圆锥形风机、多自由度双层不平行振动筛等结构,旨在提高清选装置的工作性能。文献[13-14]针对脱出物易粘附、堵塞清选筛的问题探究了脱出物粘附规律,开展了仿生筛的结构设计。金诚谦等^[15-16]开展了清选装置参数优化设计,明确了各参数对清选质量的影响及参数间的匹配关系;在清选装置内气流场和物料运动分析研究中计算流体力学 CFD 和颗粒离散元 DEM 及其耦合的方法被广泛应用^[17],李洪昌等^[18]研究了脱出物在清选室内的运动规律及脱出物颗粒运动轨迹。此外,文献[19-21]将旋风分离清选装置用于油菜、小麦、谷子等作物的清选作业过程中,研究结果表明旋风分离可应用于中小型联合收获机上。倪长安等^[22]对旋风分离清选关键部件的运行参数和结构参数开展了试验研究。HUANG 等^[23]通过双向耦合 CFD 模拟和试验,研究了颗粒喂入量对旋风分离器性能的影响,进一步提升了旋风分离清选装置的工作性能。但由于适收期油菜成熟度不一致、品种间物料特性差异较大、油菜联合收获机适应性不佳导致收获后籽粒清洁率低,人工复清劳动强度大、效率低等问题依旧突出;此外,清选装置损失率与清洁率同增同减,联合收获机清选性能有待提升^[24]。

本文针对上述问题,设计一种模块化的滚筒筛式复清装置,与旋风分离清选装置配合使用,通过旋

风分离清选剔除脱出物中的轻细杂余,旋风分离清选作业后的物料在提升螺旋输送机输送至粮箱的过程中,通过挂接在粮箱上的滚筒筛式复清装置进一步筛分其中的粗长杂余,完成洁净籽粒的提取,为油菜联合收获机清选装置结构改进和优化提供参考。

1 整机结构与工作过程

1.1 整机结构

自主研发的 4LYZ-4.0 型油菜联合收获机为液压驱动自走式油菜联合收获机,主要由割台、切抛装置、纵轴流脱粒分离装置、旋风分离清选装置、滚筒筛式复清装置、履带式行走底盘及液压驱动系统等组成,其结构和主要技术参数如图 1、表 1 所示。

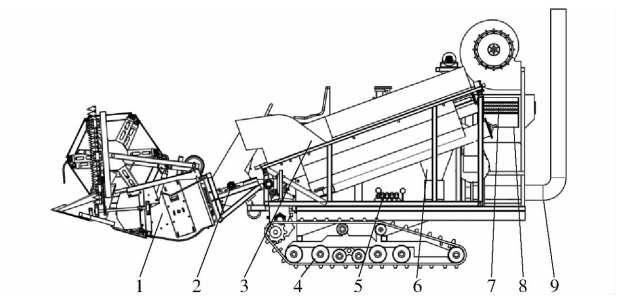


图 1 4LYZ-4.0 型油菜联合收获机总体结构图

Fig.1 Overall structure of 4LYZ-4.0 rape combine harvester

1. 割台 2. 切抛装置 3. 纵轴流脱粒分离装置 4. 行走底盘
5. 液压驱动系统 6. 旋风分离清选装置 7. 滚筒筛式复清装置
8. 粮箱 9. 自动卸粮系统

表 1 油菜联合收获机主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of rape combine harvester

参数	数值/型式
行走方式	履带自走式
动力/kW	72
作业系驱动方式	液压驱动
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	5 000×2 300×2 800
割幅/mm	2 000
留茬高度/mm	100~350
喂入量/(kg·s ⁻¹)	4.0
作业效率/(hm ² ·h ⁻¹)	0.43~0.72

1.2 滚筒筛式复清装置基本结构与工作过程

清选作业由旋风分离清选装置与滚筒筛式复清装置配合完成。旋风分离清选装置由抛扬机、旋风分离筒、风机、风管等组成;滚筒筛式复清装置由带

有助流螺旋叶片的滚筒筛等组成,如图 2 所示。滚筒筛式复清装置是一个具有复清功能的模块化子系统,根据模块之间标准化和通用化的设计原则,可通过螺栓连接快速安装在粮箱内,与旋风清选装置或风筛式清选装置组合使用,实现功能的快速重构。

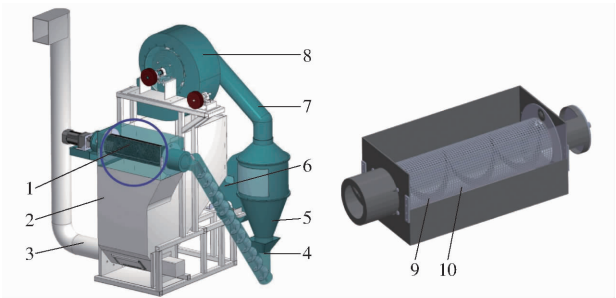


图 2 清选作业装置总体结构图

Fig. 2 Overall structure diagram of cleaning device

1. 滚筒筛式复清装置 2. 粮箱 3. 自动卸粮装置 4. 提升螺旋输送器 5. 旋风分离筒 6. 抛扬机 7. 风管 8. 风机 9. 筛网内助流螺旋叶片 10. 筛网

油菜脱出物经喂料口喂入抛扬机内,在抛扬机的作用下以一定的初速度被抛送至旋风分离筒内,在旋风分离筒内部气流场的作用下,大部分杂余在上升气流的裹挟下由风机出口排出,籽粒及少量杂余由出粮口落下,出粮口处的物料为含杂油菜籽,杂余主要包括荚壳和茎秆等粗长杂余。含杂油菜籽在提升螺旋输送器的作用下被提升至粮箱上部的滚筒筛式复清装置内,滚筒筛转动过程中,在助流螺旋叶片的作用下,物料沿轴向运动过程中籽粒透过筛孔落入粮箱内,杂余则从排草口排送至田间,清选作业工艺流程如图 3 所示。

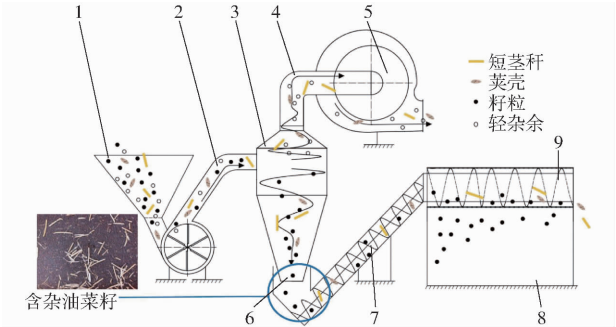


图 3 清选作业工艺流程图

Fig. 3 Process flow chart of cleaning process

1. 喂料口 2. 抛扬机 3. 旋风分离筒 4. 风管 5. 风机 6. 出粮口 7. 提升螺旋输送器 8. 粮箱 9. 滚筒筛式复清装置

2 滚筒筛式复清装置关键部件设计

2.1 提升螺旋输送器

提升螺旋输送器常用于农业物料的提升与输送。参照《农业机械设计手册》并结合清选装置空间尺寸及输送量,确定螺旋叶片外径为 110 mm、螺

旋叶片厚度为 2 mm、主轴直径为 20 mm、螺距为 120 mm,考虑到油菜籽粒较小且流动性较好,螺旋叶片与外壳间隙取 3 mm。

提升螺旋输送器应高效地将旋风分离作业后的物料及时输送至滚筒筛内,避免输送不及时导致的堵塞。因此,提升螺旋输送器的输送效率应大于旋风分离筒出口处含杂油菜籽的生成速率 Q ,参照《农业机械设计手册》可知,提升螺旋输送器的工作效率 Q_s 为

$$Q_s = \frac{\pi}{24} [(D_s - 2\delta)^2 - d^2] \psi t_s n_z \gamma C \times 10^{-10} \geq Q \quad (1)$$

式中 D_s ——螺旋叶片外径,取 110 mm
 δ ——螺旋叶片与机壳之间的间隙,取 3 mm
 d ——螺旋叶片内径,取 20 mm
 ψ ——输送物料时的充满系数,输送谷物或杂余时取 0.3 ~ 0.4,其大小受被输送物料的摩擦性质及其粘附特性影响,油菜脱出物取 0.4
 t_s ——提升螺旋输送器叶片螺距,取 120 mm
 n_z ——提升螺旋输送器转速, r/min
 γ ——输送物料容重,取 690 kg/m³
 C ——倾斜输送系数,取 0.64^[25]

收获指数是经济产量与生物产量的干物质质量比值,联合收获机的喂入量与其相关。目前种植的油菜品种收获指数平均值为 25%,收获期油菜茎秆含水率约为 70%,籽粒含水率约为 40%,综合计算得收获期籽粒质量约占整体生物量的 14.30%^[26]。联合收获机喂入量为 4 kg/s 时,收获后所获籽粒生成速率为 0.57 kg/s。旋风分离清选装置处理后的含杂油菜籽中籽粒比例约为 95%,计算得旋风分离清选后旋风分离筒出粮口处含杂油菜籽生成速率 Q 为 0.6 kg/s^[27]。由式(1)计算得提升螺旋输送器转速 $n_z \geq 207.61$ r/min,为避免喂入量波动导致的堵塞,适当提高提升螺旋输送器转速,综合考虑提升螺旋输送器转速取 220 r/min。

2.2 滚筒筛

滚筒筛采用圆柱筒体,筛网上均布筛孔,其内壁上设有助流螺旋叶片,滚筒筛一端连接提升螺旋输送器出口,一端为排草口。滚筒筛式复清装置安装固定于粮箱上,通过带有万向球的挡环轴向固定,万向球可降低滚筒筛回转运动过程中的干摩擦。滚筒筛总成结构示意图如图 4 所示。

筛网单位面积可承担的筛分物料质量与筛面利用系数相关,其大小与筛孔形状、尺寸、间距和排列形式相关。由于含杂油菜籽中籽粒近似球形,故滚筒筛采用圆形孔,油菜籽粒直径多分布在 1.42 ~

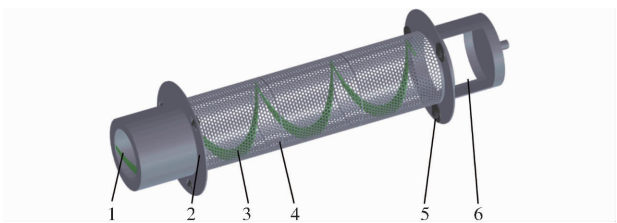


图 4 滚筒筛总成结构示意图

Fig. 4 Structural diagram of cylinder sieve assembly

1. 滚筒筛进料口 2. 轴向固定挡环 3. 筛网内助流螺旋叶片
4. 筛网 5. 万向球 6. 排草口

2. 96 mm 之间,筛孔直径 D_k 应大于 3 mm;另一方面通过筛分预试验确定了含杂油菜籽的筛理曲线,结果表明当筛孔大于 7 mm 时,筛分后物料中杂质较多,筛分效果较差。综上初步选取筛孔直径为 3 ~ 7 mm^[28]。

在其他参数不变的条件下,筛面利用系数越高筛分效率越高,筛分效果越好,因此筛孔采用筛面利用系数较高的正三角形排列,筛面利用系数 K_0 为^[29]

$$K_0 = \frac{0.91}{(\varphi + 1)^2} \times 100\% \quad (2)$$

式中 φ ——筛孔边缘间距与筛孔直径的比值

在保证筛体结构强度和刚度的条件下,筛孔边缘间距越小筛面利用系数越高,更有利于筛分。当筛孔直径取 5 mm 时,筛孔边缘间距可取 1 mm,此时筛面利用系数为 63.19%。筛面利用系数影响筛分效果,而筛孔直径和筛孔边缘间距影响筛面利用系数,因此通过式(2)控制筛孔直径与筛孔边缘间距的关系,确保筛面利用系数不变。当筛孔直径为 3 mm 时,筛孔边缘间距为 0.6 mm;筛孔直径为 7 mm 时,筛孔边缘间距为 1.4 mm。

为避免筛分效率过低导致滚筒筛式复清装置损失大的问题,筛网面积 S 需满足^[25]

$$\begin{cases} q_s S \geq Q(1 - \sigma) \\ S = \pi D_g L \end{cases} \quad (3)$$

式中 q_s ——筛网单位面积可承担筛分物料质量,取 2.5 kg/(s·m²)

σ ——含杂油菜籽中杂余质量比,取 0.05^[27]

D_g ——滚筒筛直径,考虑清选装置的空间尺寸,取 0.16 m

L ——滚筒筛长度, m

由式(3)计算得 $L \geq 0.45$ m,考虑与整机匹配滚筒筛长度 L 取 0.6 m。

滚筒筛转速对筛分质量影响较大,在不同转速条件下物料在滚筒筛内运动状态不同,物料在滚筒筛内常见的运动状态如图 5 所示。

滚筒筛转速较低时,物料在滚筒内因摩擦力沿

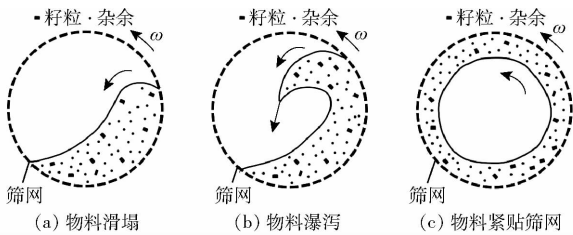


图 5 物料在滚筒内运动形式

Fig. 5 Movement forms of material in cylinder

筛面运动方向被抬起,提升到一定高度时物料产生滑塌现象,运动形式如图 5a 所示,此时滚筒筛内物料流动性不佳,不利于筛网内物料由内层到外层的反复交替,影响筛分效率;转速继续增大后,筛网内物料产生瀑泻现象,运动形式如图 5b 所示,筛网内物料由内层到外层的反复交替,物料中的籽粒运动达到湍流条件,有利于籽粒的透筛过程;转速过高时物料在离心力的作用下紧贴筛网,运动形式如图 5c 所示,物料无法在滚筒筛内充分流动,导致筛分损失率过高^[30]。

综上可知,当滚筒筛内物料运动状态为瀑泻时筛分效果最佳,在此条件下分析物料瀑泻时筛网内物料受力情况。在不考虑物料间相互作用力的条件下,将滚筒筛内物料简化为质点。滚筒内物料主要受重力 G 、摩擦力 f 、支持力 N 和离心力 $m_z \omega^2 R$,滚筒内物料在垂直轴线平面受力如图 6 所示。

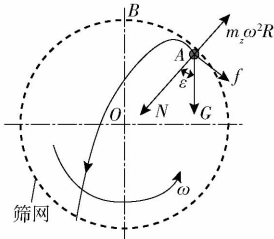


图 6 瀑泻时物料在滚筒内受力分析

Fig. 6 Mechanical analysis of materials in cylinder sieve during waterfall

物料被提升到点 A 后被抛出产生瀑泻现象,此时物料受的离心力等于重力沿径向的分力与支持力的合力,当物料运动到点 B,此时对应滚筒筛的转速为产生瀑泻现象的最大临界转速,此时重力方向与支持力夹角 ε 为 0°,滚筒内壁对物料的支持力为 0,滚筒筛内物料产生瀑泻需满足

$$\begin{cases} m_z R \omega^2 \leq m_z g \cos \varepsilon \\ \omega = 2 \pi n / 60 \end{cases} \quad (4)$$

式中 R ——滚筒筛半径,取 0.08 m

ω ——滚筒筛角速度, rad/s

m_z ——滚筒筛内物料质量, g

g ——重力加速度,取 9.81 m/s²

n ——滚筒筛转速, r/min

计算得 $n \leq 105.57 \text{ r/min}$ 。

为确保滚筒筛内部螺旋叶片能够有效地将籽粒输送,避免堵塞,其输送效率 Q_g 应大于 0.6 kg/s (2.16 t/h),即满足无轴螺旋输送计算公式

$$Q_g = 47D_g^2 t_g n \psi_2 \gamma_2 C_2 \geq 2.16 \text{ t/h} \quad (5)$$

式中 t_g ——筛网内助流螺旋叶片螺距, m

ψ_2 ——滚筒筛输送物料时的充满系数,含杂油菜籽取 0.35

γ_2 ——含杂油菜籽容积质量,取 0.86 t/m^3 [31]

C_2 ——滚筒筛倾斜输送系数,滚筒筛为水平安装,倾斜输送系数取 1

参照《农业机械设计手册》螺旋叶片螺距 t_g 最小值取 $0.8D_g \approx 0.13 \text{ m}$ [25],计算得 $n \geq 45.86 \text{ r/min}$ 。

综上可知,滚筒筛同时满足籽粒透筛和输送的要求转速范围为 $45.86 \sim 105.57 \text{ r/min}$ 。

2.3 滚筒筛筛分性能分析

滚筒筛内物料在助流螺旋叶片的作用下,从喂料口进入,沿轴线方向移动,移动过程中籽粒可透过筛孔落入粮箱内,杂余则从排草口排送至田间。假设瞬时透过筛网的物料质量与当时筛面上可过筛物料质量 m 成正比, k_1 为瞬时过筛量随筛上物料质量变化系数,则

$$\frac{dm}{dt} = -k_1 m \quad (6)$$

筛面上可过筛物料质量 m 随筛分时间 t 增大而减小,对式(6)积分得

$$\ln m = -k_1 t + c \quad (7)$$

当 $t=0, m=m_0, m_0$ 为筛面上初始可透过筛物料质量,则 $\ln m_0 = c$, 有

$$\ln m - \ln m_0 = -k_1 t \quad (8)$$

由式(8)可知未透过筛的可透筛物料质量占总可透筛物料质量的比为

$$m/m_0 = e^{-k_1 t} \quad (9)$$

由筛分效率定义可知,筛分效率为

$$\eta = 1 - m/m_0 = (1 - e^{-k_1 t}) \times 100\% \quad (10)$$

由于筛分机械种类繁多,单一系数 k_1 不足以概括各种条件,引入系数 p ,则通用筛分效率计算公式为

$$\eta = (1 - e^{-k_1 t^p}) \times 100\% \quad (11)$$

将 $e^{-k_1 t^p}$ 分解为级数,取前两项可得

$$\eta = 1 - \frac{1}{1 + k_1 t^p} = \frac{k_1 t^p}{1 + k_1 t^p} \times 100\% \quad (12)$$

令 $k_1 = 1/a$, 则

$$\eta = \frac{t^p}{a + t^p} \times 100\% \quad (13)$$

如物料在筛面上的平均速度为 v_1 , 则 $t = L/v_1$,

式(13)可转换为

$$\eta = \frac{L^p}{av_1^p + L^p} \times 100\% \quad (14)$$

由式(13)、(14)可知,物料在滚筒筛内的滞留时间影响滚筒筛筛分性能,滞留时间与物料轴向运动距离和运动速度有关。当输送距离一定时,物料轴向速度过快,筛网内籽粒难以及时透过筛网导致筛分损失较大;若物料轴向速度较慢,则物料在滚筒筛内滞留时间较长,虽然增加籽粒透筛概率,但也会增大杂余的透筛概率,导致筛分后籽粒清洁率低,此外轴向速度较小时,物料输送性能较差,易导致滚筒筛堵塞等问题。为保证较高的筛分效率,滚筒筛需确定适宜长度和筛分时间 [29]。

物料在助流螺旋叶片展开图上速度分解如图 7 所示,助流螺旋叶片的螺旋升角为 α ,物料随叶片运动的牵连线速度为 v_0 ,物料相对于叶片的滑动速度为 v_r ,在摩擦力作用下,物料实际运动速度相对于螺旋线切线方向偏移一个角度,角度大小等于摩擦角 β 。物料实际运动速度 v_a 可分解为轴向速度 v_z 和圆周速度 v_t 。图中 v'_a 与 v'_r 分别为不考虑摩擦力作用下的实际运动速度与物料相对于叶片的滑动速度,计算式为

$$\left\{ \begin{aligned} v_z &= \frac{t_g n \left(1 - \mu \frac{t_g}{2\pi R} \right)}{60 \left[1 + \left(\frac{t_g}{2\pi R} \right)^2 \right]} \\ v_t &= \frac{t_g n \left(\frac{t_g}{2\pi R} + \mu \right)}{60 \left[1 + \left(\frac{t_g}{2\pi R} \right)^2 \right]} \end{aligned} \right. \quad (15)$$

$$\left\{ \begin{aligned} t_z &= \frac{60L \left[1 + \left(\frac{t_g}{2\pi R} \right)^2 \right]}{t_g n \left(\frac{t_g}{2\pi R} + \mu \right)} \end{aligned} \right. \quad (16)$$

式中 μ ——物料与助流螺旋叶片表面摩擦因数

t_z ——物料完整经过筛网的时间

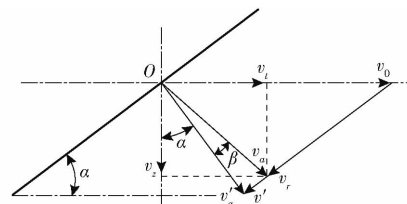


图 7 螺旋叶片上物料速度分析

Fig. 7 Velocity analysis of materials on screw vane

由式(16)可知,在筛网开孔率、长度与直径一定的情况下,筛网内助流螺旋叶片螺距、筛网转速均影响物料完整经过筛网的时间 t_z 。

通过筛网内物料在助流螺旋叶片上的受力分

析,可进一步明确和验证滚筒筛结构与运行参数范围。将筛网内助流螺旋叶片上的物料简化为质点,物料在运动过程中受助流螺旋叶片的法向推力 F_n 、重力 G 、筛网间的摩擦力 f_0 和叶片间的摩擦力 F_f 。物料在滚筒筛内受力分析如图 8 所示。由图 8 可知,助流螺旋叶片对物料的合力 F 在叶片间的摩擦力 F_f 的影响下偏离了一个角度,其大小等于摩擦角 β , θ 为物料和轴心连线与竖直线夹角。物料所受合力可分解为轴向分力 F_z 和圆周方向分力 F_t [32], 计算式为

$$\begin{cases} F_z = F \cos(\alpha + \beta) \\ F_t = F \sin(\alpha + \beta) \\ \alpha = \arctan(t_g / (2\pi R)) \\ \beta = \arctan\mu \end{cases} \quad (17)$$

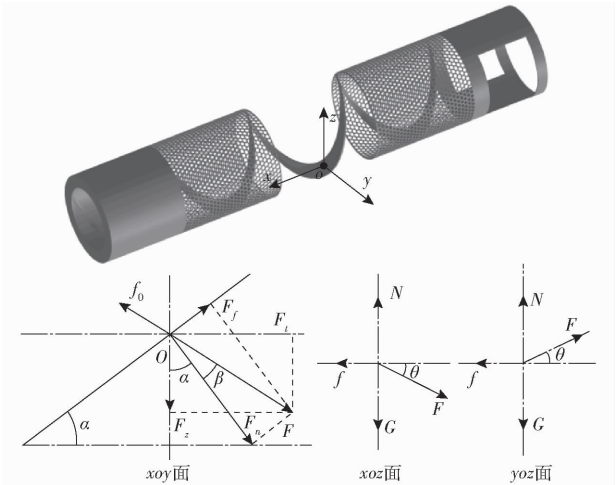


图 8 物料在筛网内助流螺旋叶片上受力分析
Fig. 8 Mechanical analysis of materials on screw pitch of flow aid vane

法向推力沿轴向的分力是物料沿轴向运动的动力,为保证物料顺畅输送,运动过程中必须克服切向摩擦力 F_f 沿轴向分力及物料所受筛网摩擦力沿轴向的分力,即满足

$$F_n \cos\alpha \geq F_f \sin\alpha + f_0 \sin(90^\circ - \alpha - \beta) \quad (18)$$

对式(18)缩放得

$$F_n \cos\alpha \geq F_f \sin\alpha \quad (19)$$

$$F_f = \mu F_n = F_n \tan\beta \quad (20)$$

$$f_0 = \mu_2 m_z g \quad (21)$$

式中 μ_2 ——筛网与物料摩擦因数,取 0.5

由式(19)~(21)可得 $\alpha < 63.43^\circ$, 进一步计算得助流螺旋叶片螺距 t_g 应小于 1.01 m。

在满足输送性能要求的基础上,筛网内助流螺旋叶片还需满足筛分性能要求,保证籽粒在筛面上运动时,重心可及时运动到筛网平面以下,即油菜籽粒运动过程中移动一个筛孔的时间需大于物料重心运动到筛网内平面以下所需的时间,油菜籽粒在筛

网内运动轨迹如图 9 所示。

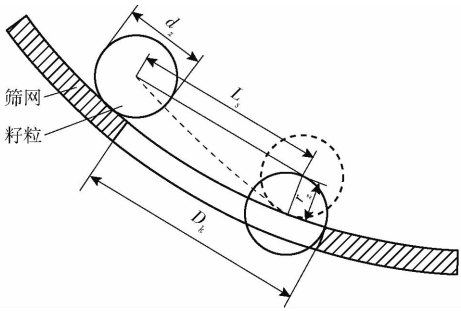


图 9 籽粒在筛网内运动轨迹示意图
Fig. 9 Schematic of rapeseed movement in screen track

由图 9 可知,籽粒在筛网内移动距离 L_s 的时间 t_2 需大于籽粒沿筛网径向移动距离 r_z 的时间 t_1 , L_s 略大于筛孔直径 D_k , 取最小值 3 mm 计算,即满足

$$\begin{cases} r_z = 0.5gt_1 \\ L_s = v_a t_2 \\ v_a = \sqrt{v_z^2 + v_t^2} \\ t_1 \leq t_2 \end{cases} \quad (22)$$

式中 r_z ——籽粒半径,取 1.1 mm

由式(16)、(22)可知,当滚筒筛转速与筛孔直径最小时,螺旋叶片螺距可取最大值,代入式(22)可得螺旋叶片螺距 t_g 应小于 350 mm;螺旋叶片螺距最小值一般大于 $0.8D_g$, 即螺距大于 128 mm [25]。综上,筛网内助流螺旋叶片螺距为 $128 \text{ mm} \leq t_g \leq 350 \text{ mm}$ 。

3 基于 EDEM 的复清性能仿真试验

3.1 仿真参数设置

为描述籽粒提升与滚筒筛复清的工作过程,本文采用 Hertz - mindlin 无滑移接触模型。各颗粒物料力学特性参数及与其他物体的接触参数如表 2、3 所示 [33]。

表 2 物料力学参数

Tab. 2 Mechanical parameters of materials

物料	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(kg·m ⁻³)
油菜籽粒	0.25	1.1 × 10 ⁷	1 060
粗长杂余	0.40	1.0 × 10 ⁶	100
筛网	0.30	7.9 × 10 ¹⁰	7 850

表 3 接触参数

Tab. 3 Contact parameter

接触物料	碰撞恢复系数	静摩擦因数	动摩擦因数
油菜籽粒-筛网	0.6	0.3	0.01
油菜籽粒-油菜籽粒	0.6	0.5	0.01
油菜籽粒-粗长杂余	0.6	0.6	0.01
粗长杂余-粗长杂余	0.2	0.7	0.01
粗长杂余-筛网	0.2	0.8	0.01

油菜籽粒三轴尺寸测定结果表明,油菜籽粒近似球形,其直径分布呈正态分布规律,直径多分布在 1.42 ~ 2.96 mm 之间,且主要分布在 2.2 mm 附近;短茎秆及荚壳长度主要分布在 40 mm 附近,参考文献[34]中所述方法建立油菜及杂余的颗粒模型,如图 10 所示。

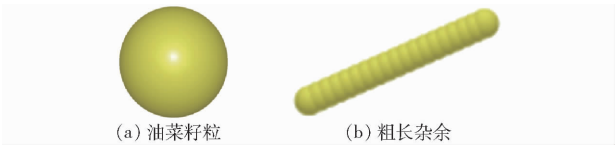


图 10 颗粒模型
Fig. 10 Particle models

利用 SolidWorks 按照实际参数对滚筒筛式复清装置进行三维建模,在实物基础上对模型进行合理简化,仿真三维模型主要包括:颗粒工厂、喂料口、提升螺旋输送机、滚筒筛、籽粒统计区、杂余统计区,如图 11 所示。基于旋风分离筒出粮口处含杂油菜籽粒生成速率及含杂油菜籽中各组分比例设定参数,含杂油菜籽生成总速率为 0.6 kg/s,其中籽粒占比为 95%,杂余为 5%,颗粒生成时间为 10 s,设定时间步长为 Rayleigh 时间步长的 20%,即 1×10^{-5} s,数据记录时间间隔为 0.01 s,为保证含杂油菜籽充分提升并完成筛分,仿真模拟时间设定为 15 s。

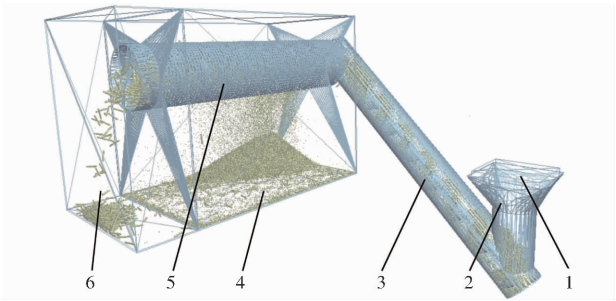


图 11 仿真三维模型
Fig. 11 3D model of simulation

1. 颗粒工厂 2. 喂料口 3. 提升螺旋输送机 4. 籽粒统计区
5. 滚筒筛 6. 杂余统计区

3.2 正交试验

结合关键部件参数分析,选取影响滚筒筛式复清装置作业性能的筛孔直径、滚筒筛转速、筛网内助流螺旋叶片螺距为试验因素,以滚筒筛式复清装置的损失率、清洁率和筛分效率为评价指标,开展三因素三水平正交试验,试验因素水平如表 4 所示。仿真结束后统计籽粒与杂余收集盒内各物料质量,计籽粒收集盒中籽粒质量为 m_1 、杂余质量为 m_2 ,杂余收集盒中籽粒质量为 m_3 、杂余质量为 m_4 ,分别计算滚筒筛式复清装置的损失率 Y_s 、清洁率 Y_q 和筛分效率 η ,计算式为

$$\begin{cases} Y_q = m_1 / (m_1 + m_2) \times 100 \% \\ Y_s = m_3 / (m_1 + m_3) \times 100 \% \\ \eta = (m_1 + m_2) / (m_1 + m_2 + m_3 + m_4) \times 100 \% \end{cases}$$

(23)

表 4 因素水平
Tab.4 Factors and levels

水平	因素		
	筛孔直径/ mm	滚筒筛转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	筛网内助流螺旋 叶片螺距/mm
1	3	45	150
2	5	75	250
3	7	105	350

试验结果如表 5 所示, A 、 B 、 C 为因素水平值,采用综合评分法分析,实际生产中需优先保证低损失率,其次保证高清洁率,拟定清洁率权重为 0.35,损失率权重为 0.65,以加权后的综合分作为评价标准,综合分等于 0.35 乘以清洁率隶属度减去 0.65 乘以损失率隶属度,得分越高效果越好^[33]。

正交试验结果表明,不同参数组合下滚筒筛式复清装置的筛分效率均大于 90%,满足滚筒筛的设计要求。影响油菜滚筒筛式复清装置作业性能的主要因素依次为筛孔直径、筛网内助流螺旋叶片螺距、滚筒筛转速。滚筒筛式复清装置的最佳参数组合为 $A_2B_3C_2$ 。

以最佳参数组合开展仿真验证试验,试验结果表明,在最佳参数组合条件下,复清装置损失率为 0.92%、清洁率为 98.96%、筛分效率为 95.12%。

由表 6 可知,滚筒筛式复清装置筛孔直径对装置损失率、清洁率和筛分效率影响均极显著;滚筒筛转速对损失率、清洁率和筛分效率影响均显著;滚筒筛内助流螺旋叶片螺距对损失率、清洁率和筛分效率影响均显著。

4 台架试验

为验证滚筒筛式复清装置作业效果,依据仿真结果试制滚筒筛式复清装置,与旋风分离清选装置配合使用开展台架试验。

本试验主要依托华中农业大学工学院自主研发的收获关键部件试验台,主要由控制柜、输送带、割台、输送链耙、纵轴流脱粒分离装置、旋风分离清选装置和控制检测系统组成,如图 12 所示。收获关键部件试验台关键部件参数可调,相关运行参数可在线监测。

试验油菜品种为华油杂 62,对物料进行复水处理,控制油菜整株含水率为 60% ~ 70%,试验前将

表 5 正交试验结果
Tab.5 Results of orthogonal experiments

试验序号	因素			清洁率	损失率	筛分效率	清洁率隶	损失率隶	综合评分
	A	B	C	$Y_q/\%$	$Y_s/\%$	$\eta/\%$	属度	属度	
1	1	1	1	98.74	4.29	92.08	0.71	0.89	-0.33
2	1	2	2	99.48	4.55	91.15	0.90	0.94	-0.30
3	1	3	3	99.89	4.82	90.52	1.00	1.00	-0.30
4	2	1	2	98.33	0.62	96.01	0.61	0.12	0.13
5	2	2	3	98.77	1.13	95.10	0.72	0.23	0.10
6	2	3	1	98.58	0.88	95.52	0.67	0.18	0.12
7	3	1	3	96.07	0.11	98.68	0.04	0.02	0.00
8	3	2	1	95.91	0.18	98.87	0.00	0.03	-0.02
9	3	3	2	96.33	0.03	98.59	0.11	0.00	0.04
k_1	-0.31	-0.06	-0.08						
k_2	0.12	-0.07	-0.05						
k_3	0.01	-0.05	-0.06						
R	0.43	0.02	0.03						

表 6 方差分析
Tab.6 Variance analysis

试验指标	来源	自由度	F	P
损失率	A	2	2 399.13	0.001 **
	B	2	23.88	0.040 *
	C	2	23.21	0.041 *
清洁率	A	2	7 026.56	0.001 **
	B	2	28.26	0.034 *
	C	2	29.18	0.033 *
筛分效率	A	2	2 435.89	0.001 **
	B	2	24.35	0.039 *
	C	2	23.80	0.040 *

注：**表示极显著($P<0.01$),*表示显著($P<0.05$)。

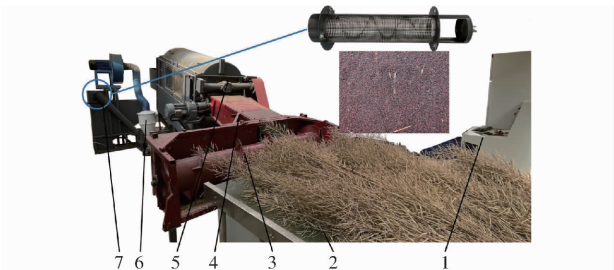


图 12 收获关键部件试验台

Fig.12 Test bench for key components of harvester

1.控制台 2.输送带 3.割台 4.输送链耙 5.纵轴流脱粒分离装置 6.旋风分离装置 7.滚筒筛

20 kg 油菜均匀铺放在长 4 m、宽 1.5 m 的输送带上,调节输送带速度,控制喂入量为 4 kg/s。调节试验台各关键部件参数完成物料喂入输送、脱粒清选及复清过程,试验过程中脱粒滚筒转速为 450 r/min、抛扬机转速为 650 r/min、风机转速为 1 800 r/min、滚筒筛转速为 105 r/min。试验结束后,收集粮箱内

和滚筒筛排草口处物料,人工分选并称量,计算滚筒筛式复清装置损失率、清洁率、筛分效率,试验重复 3 次取平均值。

前期试验结果表明,未安装滚筒筛式复清装置时清选系统清洁率为 94.29%、损失率为 5.08%^[27]。将滚筒筛式复清装置与旋风分离清选装置配合使用时,在最佳参数组合条件下开展台架试验,滚筒筛式复清装置台架试验损失率为 0.96%、清洁率为 98.67%、筛分效率为 95.36%,对比未增加滚筒筛式复清装置清洁率提升 4.38 个百分点。

5 结论

(1)设计了一种便捷式挂接于粮箱上的模块化滚筒筛式复清装置,可进一步筛分旋风分离清选装置作业后输出含杂油菜籽中的杂余,提升了油菜联合收获机的清选性能。

(2)基于 EDEM 仿真的正交试验结果表明,影响滚筒筛式复清装置作业效果的主次因素依次为筛孔直径、滚筒筛转速和筛网内助流螺旋叶片螺距,滚筒筛式复清装置的最佳参数组合为:筛孔直径 5 mm、滚筒筛转速 105 r/min、筛网内助流叶片螺距 250 mm,此时滚筒筛式复清装置的损失率为 0.92%、清洁率为 98.96%、筛分效率为 95.12%。

(3)台架验证试验结果表明,带有滚筒筛式复清装置的清选系统工作顺畅,在最佳参数组合条件下,滚筒筛式复清装置损失率为 0.96%、清洁率为 98.67%、筛分效率为 95.36%,对比未增加滚筒筛式复清装置清洁率提升 4.38 个百分点。

参 考 文 献

[1] 吴崇友,肖圣元,金梅. 油菜联合收获与分段收获效果比较[J]. 农业工程学报, 2014, 30(17): 10-16.

- WU Chongyou, XIAO Shengyuan, JIN Mei. Comparison on rape combine harvesting and two-stage harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17): 10–16. (in Chinese)
- [2] 吴传云,温浩军,吴崇友,等. 我国主要经济作物机械化主攻方向与主推技术[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(12): 195–203.
WU Chuanyun, WEN Haojun, WU Chongyou, et al. Main directions and push technologies of economic crops mechanization in China[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(12): 195–203. (in Chinese)
- [3] 刘德军,赵秀荣,高连兴,等. 不同收获方式含水率对油菜收获物流损失的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(10): 339–342.
LIU Dejun, ZHAO Xiurong, GAO Lianxing, et al. Effect of moisture content on rape harvest logistics losses under different harvest methods[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 339–342. (in Chinese)
- [4] 侯华铭,崔清亮,郭玉明. 全喂入谷子联合收获机脱出物含水率对其悬浮特性的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 29–35.
HOU Huaming, CUI Qingliang, GUO Yuming. Effects of moisture contents of threshed materials from whole-feeding combine for foxtail millet on their suspension characteristics[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(24): 29–35. (in Chinese)
- [5] ILDAR B, SALAVAT M, RAMIL L, et al. Mathematical modeling and research of the work of the grain combine harvester cleaning system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 165: 104966.
- [6] 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)
- [7] 童水光,沈强,唐宁,等. 纵轴流清选装置混合流场数值模拟与优化试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 135–142.
TONG Shuiguang, SHEN Qiang, TANG Ning, et al. Numerical simulation and optimization experiment of mixed flow field on longitudinal axial flow cleaning device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 135–142. (in Chinese)
- [8] 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): 239–248.
FAN Chenlong, CUI Tao, ZHANG Dongxing, et al. Design and experiment of double layer counter direction cleaning device for longitudinal axial flow combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49 (Supp.): 239–248. (in Chinese)
- [9] 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 cross flow stepped vibrating screen for corn combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 115–123. (in Chinese)
- [10] 王立军,李瑞,于泳涛,等. 玉米籽粒收获机双层不平行振动筛设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7): 130–139.
WANG Lijun, LI Rui, YU Yongtao, et al. Design and test of double-layer non-parallel vibrating screen for corn grain harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 130–139. (in Chinese)
- [11] 王立军,马杨,冯鑫,等. 玉米籽粒收获机分段式振动筛清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(9): 89–100.
WANG Lijun, MA Yang, FENG Xin, et al. Design and experiment of segmented vibrating screen in cleaning device of maize grain harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 89–100. (in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 程超,付君,陈志,等. 收获机振动筛振动参数影响不同湿度脱出物粘附特性[J]. 农业工程学报, 2019, 35(8): 29–36.
CHENG Chao, FU Jun, CHEN Zhi, et al. Effect of vibration parameters of vibrating screen for harvester on adhesion characteristics of threshed mixtures with different moistures[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(8): 29–36. (in Chinese)
- [14] 李耀明,马征,徐立章. 油菜联合收获机筛面粘附物摩擦特性[J]. 农业机械学报, 2010, 41(12): 54–57.
LI Yaoming, MA Zheng, XU Lizhang. Tribological characteristics of adhesive materials on cleaning sieve of rape combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(12): 54–57. (in Chinese)
- [15] 金诚谦,李庆伦,倪有亮,等. 小麦联合收获机双出风口多风道清选作业试验[J]. 农业工程学报, 2020, 36(10): 26–34.
JIN Chengqian, LI Qinglun, NI Youliang, et al. Experimental study on double air outlet multi-ducts cleaning device of wheat combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(10): 26–34. (in Chinese)
- [16] 钟挺,胡志超,顾峰玮,等. 4LZ-1.0Q 型稻麦联合收获机脱粒清选部件试验与优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 76–81.
ZHONG Ting, HU Zhichao, GU Fengwei, et al. Experiment and optimization of threshing and cleaning components of 4LZ-1.0Q rice-wheat combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 76–81. (in Chinese)
- [17] CHAI Xiaoyu, ZHOU Ying, XU Lizhang, et al. Effect of guide strips on the distribution of threshed outputs and cleaning losses for a tangential-longitudinal flow rice combine harvester[J]. Biosystems Engineering, 2020, 198(4): 223–234.
- [18] 李洪昌,李耀明,唐忠,等. 风筛式清选装置振动筛上物料运动 CFD-DEM 数值模拟[J]. 农业机械学报, 2012,

- 43(2):79–84.
- LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Numerical simulation of material motion on vibrating screen of air-and-screen cleaning device based on CFD–DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2):79–84. (in Chinese)
- [19] 廖庆喜, 万星宇, 李海同, 等. 油菜联合收获机旋风分离清选系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 24–31. LIAO Qingxi, WAN Xingyu, LI Haitong, et al. Design and experiment on cyclone separating cleaning system for rape combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 24–31. (in Chinese)
- [20] 师清翔, 马萌, 闫卫红, 等. 双扬谷器旋风分离清选系统试验与参数优化[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 124–128. SHI Qingxiang, MA Meng, YAN Weihong, et al. Two-stage winnower cyclone separating cleaning system performance testing and optimization[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 124–128. (in Chinese)
- [21] 戴飞, 赵武云, 刘国春, 等. 胡麻脱粒物料分离清选机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 140–147. DAI Fei, ZHAO Wuyun, LIU Guochun, et al. Design and experiment of separating and cleaning machine for flax threshing materials[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 140–147. (in Chinese)
- [22] 倪长安, 张利娟, 刘师多, 等. 无导向片旋风分离清选系统的试验分析[J]. 农业工程学报, 2008, 24(8): 135–138. NI Chang'an, ZHANG Lijuan, LIU Shiduo, et al. Experimental analysis on cyclone separating cleaning system of no-guide vanes[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 135–138. (in Chinese)
- [23] HUANG A N, ITO K, FUKASAWA T, et al. Effects of particle mass loading on the hydrodynamics and separation efficiency of a cyclone separator[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2018, 90: 61–67.
- [24] 万星宇, 廖庆喜, 廖宜涛, 等. 油菜全产业链机械化智能化关键技术装备研究现状及发展趋势[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(2): 24–44. WAN Xingyu, LIAO Qingxi, LIAI Yitao, et al. Situation and prospect of key technology and equipment in mechanization and intelligentization of rapeseed whole industry chain[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(2): 24–44. (in Chinese)
- [25] 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.
- [26] 李加纳, 卢坤, 荐红举, 等. 油菜收获指数研究进展[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(5): 640–648. LI Jiana, LU Kun, JIAN Hongju, et al. Research progress of rape harvest index[J]. Chinese Journal of Oil Crops, 2018, 40(5): 640–648. (in Chinese)
- [27] 袁佳诚, 王昌, 何坤, 等. 油菜联合收获机筛下物组分质量比对清选性能影响[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(5): 1897–1907. YUAN Jiacheng, WANG Chang, HE Kun, et al. Effect of components mass ratio under sieve on cleaning system performance for rape combine harvester[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2021, 51(5): 1897–1907. (in Chinese)
- [28] 廖庆喜, 王昌, 何坤, 等. 油菜联合收获后含杂油菜籽复清机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 175–185, 232. LIAO Qingxi, WANG Chang, HE Kun, et al. Design and experiment on re-cleaning machine for rapeseed after combine harvesting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 175–185, 232. (in Chinese)
- [29] 刘协舫, 郑晓, 丁应生, 等. 食品机械[M]. 武汉: 湖北科学技术出版社, 2002.
- [30] 张临海. 农作物秸秆固体成型预处理研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. ZHANG Linhai. Study on pretreatment of crop straw densified biofuel[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [31] 雷维, 王瑞莉, 王刘艳, 等. 甘蓝型油菜容重及其相关性状的全基因组关联分析[J]. 作物学报, 2021, 47(11): 2099–2110. LEI Wei, WANG Ruili, WANG Liuyan, et al. Genome-wide association study of seed density and its related traits in *Brassica napus* L[J]. Acta Agronomica Sinica, 2021, 47(11): 2099–2110. (in Chinese)
- [32] 尹忠俊, 孙洁, 陈兵, 等. 开式螺旋输送机输送机理分析与参数设计[J]. 矿山机械, 2010, 38(11): 66–71. YIN Zhongjun, SUN Jie, CHEN Bing, et al. Study on transportation mechanism of open screw conveyors and design of parameters[J]. Mining & Processing Equipment, 2010, 38(11): 66–71. (in Chinese)
- [33] 万星宇, 舒彩霞, 徐阳, 等. 油菜联合收获机分离清选差速圆筒筛设计与试验[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 27–35. WAN Xingyu, SHU Caixia, XU Yang, et al. Design and experiment on cylinder sieve with different rotational speed in cleaning system for rape combine harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 27–35. (in Chinese)
- [34] 吴崇友. 油菜机械化收获技术[M]. 镇江: 江苏大学出版社, 2017.