

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.12.012

先揉切后分离风筛组合式花生膜秧分离装置设计与试验

杨 猛 张延化 张 冲 顾峰玮 于昭洋 胡志超

(农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘要: 针对覆膜花生收获后的花生秧在饲料加工过程中存在膜秧分离不彻底、损失率高等问题,结合揉切后物料尺寸特征和悬浮特性,设计了一种兼具分级、清土、输送和除膜功能的风筛组合式膜秧分离装置,并进行了膜秧分离特性试验与参数优化。以上层筛风机转速、下层筛风机转速和振动筛频率为试验因素,以除膜率和损失率为试验指标,运用 Design-Expert 8.0.6 软件设计三因素三水平二次回归正交试验,建立了响应面回归模型,并进行优化与试验验证。结果表明:各因素对除膜率影响的主次顺序为:下层筛风机转速、上层筛风机转速、振动筛频率;各因素对损失率影响的主次顺序为:下层筛风机转速、振动筛频率、上层筛风机转速。对优化结果进行了试验验证,当上层筛风机转速 760 r/min、下层筛风机转速 670 r/min、振动筛频率 4 Hz 时,除膜率为 91.24%,损失率为 8.51%,验证试验结果与模型预测值相对误差小于 5%。

关键词: 花生秧;膜秧分离装置;参数优化;正交试验

中图分类号: S226.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)12-0112-10

OSID:



Design and Experiment of Fan-sieve Combined Peanut Film – Seedling Separating Device Based on Shredding and Separating

YANG Meng ZHANG Yanhua ZHANG Chong GU Fengwei YU Zhaoyang HU Zhichao
(Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: Peanut seedlings has many advantages as husbandry forage, such as rich nutrition, soft texture and low price. However, residual film on the harvested peanut seedlings that mulching cultivated would seriously affect the digestive system functions of livestock and reduce the feed utilization value of peanut seedlings. Therefore, it's an urgent issue to carry out the research on removing the residual film from peanut seedlings. There are significantly differences on the components and suspension velocities of mixture materials that shredded by peanut seedlings shredding and residual film sucking machine, which make it difficult to separate residual film out from peanut seedlings. The suspension velocities of shredded materials are the basic characteristics during the research of improved design and parameters optimization for the device of separate residual film out from peanut seedlings. In view of the outstanding problems at present, for example, it's hard to separate residual film form peanut seedlings and the materials loss rate is higher than that was expected. The suspension velocity measurement experiment was designed and conducted by using DFPP-25 type suspension velocity testing equipment, the physical characteristics and suspension velocities of materials that shredded by peanut seedlings shredding and residual film sucking machine were studied, and a kind of residual film-seedlings separating device of which combined centrifugal fans and vibrating sieve was designed, with the functions of grading, dust cleaning, material conveying and residual film sucking. The rotational speed of upper fans were designed to be 700~900 r/min adjustable, that of lower fans were 500~700 r/min adjustable, and the frequency of vibrating sieve was 3~4 Hz adjustable. By using the peanut seedlings shredding and residual film sucking machine as the experimental platform, the performance test and parameters optimization of the residual film-seedlings separating device were carried out. The quadratic regression orthogonal test of three-factor and three-level was designed by taking the rotational speed of upper fans, lower fans and the frequency of vibrating sieve

收稿日期: 2020-06-10 修回日期: 2020-07-12

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(S201918、S202011)

作者简介: 杨猛(1996—),男,助理工程师,主要从事农机装备研究,E-mail: yangm0114@163.com

通信作者: 胡志超(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事农作物收获及产后加工技术与装备研究,E-mail: zchu369@163.com

as experimental factors, and residual film removal rate and materials loss rate as response values. The quadratic polynomial response surface regression models were established and optimized via the optimization modules of Design-Expert 8.0.6. The results showed that the significance order of the influence of test factors on residual film removal rate was as follows: the rotational speed of lower fans, the rotational speed of upper fans, and the frequency of vibrating sieve; the order of the influence on materials loss rate was as follows: the rotational speed of lower fans, the frequency of vibrating sieve, and the rotational speed of upper fans. The validation test results presented that the residual film removal rate was 91.24% and the materials loss rate was 8.51% when the rotational speed of upper fans was 760 r/min, the rotational speed of lower fans was 670 r/min, and the frequency of vibrating sieve was 4 Hz. The relative error between the validation test results and the predicted values of the models was less than 5%, which proved that the models were reliable. The research result can provide reference for design and optimization of the residual film - seedling separating device of peanut seedlings shredding and residual film sucking machine.

Key words: peanut seedling; residual film - seedling separating device; parameters optimization; orthogonal test

0 引言

花生秧作为畜牧饲料具有营养丰富、质地松软、价格低廉等特点^[1-2]。中国部分花生主产区常采用覆膜种植方式,覆膜种植具有保温、保墒等功能,可显著提高花生产量^[3]。目前,中国花生覆膜种植面积已超过 233 万 hm^2 ^[4]。覆膜种植花生收获后的花生秧会缠带残膜,如果直接粉碎作为畜牧饲料使用,动物(尤其是反刍动物)摄入后会产生各种消化系统病症,甚至危及牲畜生命。因此,含残膜花生秧需要通过人工或机械手段清除残膜,以提高其利用价值。

在花生机械化收获作业过程中,由于输送、摘果等作业部件的挤压和揉搓,残膜与秧蔓之间缠绕紧实、打结成团,人工操作很难将残膜直接从花生秧上摘除干净。花生秧揉切除膜机是一种兼具揉切、除膜功能的花生秧饲料化加工设备,能够对花生秧及残膜进行揉切作业,并将残膜从揉切后的混合物料中分离出来,从而满足花生秧饲料化加工的要求。膜秧分离作业是含残膜花生秧饲料化加工的重要组成部分,其作业质量将直接影响花生秧揉切除膜机的作业性能。农产品物料清选分离方法包括风选法、电选法和磁选法等,其中风选法在多种农产品物料清选分离设备中被广泛应用^[5-6]。膜秧分离作业与物料清选作业原理相类似,国内外对含残膜花生秧膜秧分离的研究相对较少,在设计时可参考借鉴农作物收获机械和产后加工设备清选装置等相关研究成果^[7-17]。含残膜花生秧经揉切除膜机揉切后,其物料成分复杂、外形尺寸多样、物理状态多变、物理属性差异较大,使膜秧分离作业难度较高。现有机型存在除膜率低、秧料损失率高等问题(其中除膜率不足 85%,损失率超过 12%)。因此,研究花生

膜秧分离特性、优化膜秧分离装置、提高膜秧分离率、降低损失率是当前花生秧揉切除膜机亟待解决的关键技术问题。

本文结合花生秧揉切后物料的尺寸特征和悬浮特性设计一种风筛组合式膜秧分离装置,并以花生秧揉切除膜机为试验平台,进行膜秧分离特性试验与参数优化,研究膜秧分离装置结构及运动参数对除膜率和损失率的影响规律,寻求较优参数组合,并进行验证试验,为花生秧揉切除膜机膜秧分离装置结构设计及优化提供参考。

1 总体结构与作业原理

花生秧揉切除膜机一次可完成喂料、揉切、膜秧分离、复碎和秧料输送收集等功能,动力输出由电机提供。作业时,含残膜花生秧从机具前端喂入装置均匀喂入,经推料轴输送至揉切装置进行揉切作业。经揉切后残膜与秧料的混合物料向下落至膜秧分离装置的双层振动筛上,并在其作用下进行分级、清土、除膜并向后输送。未切碎的秧料从上层编织筛尾部侧边出口输送至复碎装置,经复碎装置输送至前端喂入装置进行二次揉切,切碎的秧料从下层冲孔筛上向后输送至物料提升输送装置,在上层筛后上方以及物料提升输送装置与冲孔筛间布置有离心风机,用于分离从筛上输送的混合物料中夹杂的残膜,洁净的秧料由物料提升输送装置向后输送至出料口进行装袋。设备总体结构如图 1 所示。

2 物料特性试验与关键部件设计

2.1 揉切物料悬浮速度测定

含残膜花生秧经揉切后物料中残膜与秧料在悬浮速度上的差异,是设计花生秧揉切除膜机膜秧分离装置离心风机的重要依据。因此在离心风机参数

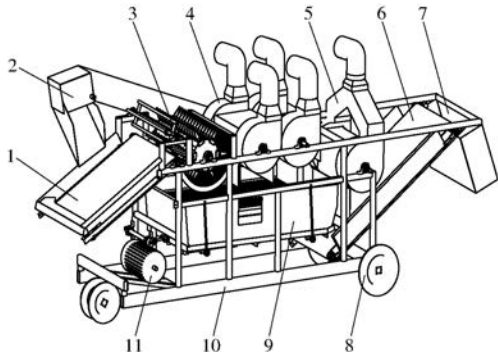


图1 设备总体结构示意图

Fig.1 Schematic of machine

1. 喂入装置 2. 复碎装置 3. 揉切装置 4. 上层筛离心风机
5. 下层筛离心风机 6. 物料提升输送装置 7. 出料口 8. 行走轮
9. 双层振动筛 10. 机架 11. 电机

设计之前有必要进行揉切后物料悬浮速度的测定。

试验用花生秧为花生覆膜种植主产区的主栽品种“鲁花11”、“四粒红”和“花育22”，所覆地膜规格为常用的厚度0.008 mm的标准聚乙烯塑料膜。摘

表1 花生秧揉切后各物料成分悬浮速度

Tab.1 Suspension velocity of shredded materials of peanut seedlings

花生品种	粗茎秆	细茎秆	根	果柄	叶	残膜
鲁花11	3.76 ~ 5.73	2.61 ~ 3.76	3.75 ~ 5.99	2.81 ~ 3.62	1.22 ~ 1.61	0.56 ~ 0.96
四粒红	3.67 ~ 5.51	2.53 ~ 3.79	3.84 ~ 5.92	2.79 ~ 3.55	1.08 ~ 1.54	0.51 ~ 0.97
花育22	3.80 ~ 5.68	2.69 ~ 3.83	3.99 ~ 6.07	2.89 ~ 3.43	1.17 ~ 1.56	0.66 ~ 1.03

由表1可见,同一品种花生秧不同物料间悬浮速度存在明显差异,而不同品种花生秧揉切后的同种物料悬浮速度基本一致;经揉切粉碎后的残膜悬浮速度除略小于花生叶以外,与其他物料悬浮速度差异显著。残膜与花生秧物料间悬浮速度差异显著,有利于花生秧揉切除膜机将残膜从揉切后的物料中分离出来。说明本设计采用风筛组合式分离原理进行含残膜花生秧膜秧分离的方案可行。

2.2 结构与主要参数设计

为保证加工后的花生秧在满足牲畜适口性的同时使花生秧揉切除膜机达到较好的膜秧分离效果,所设计的膜秧分离装置采用一前一后、一上一下的两级离心风机与双层振动筛组合进行膜秧分离作业,该组合可根据筛上物料的尺寸特征以及悬浮特性,确定膜秧分离装置较优作业参数,实现物料与残膜的“分级双吸”。如图2所示,膜秧分离装置主要由离心风机、双层振动筛以及其他零部件组成,动力由电机带动带轮提供。作为花生秧揉切除膜机的核心工作部件,其工作原理是:机具作业时,经揉切装置揉切后的膜秧混合物料落至膜秧分离装置双层振动筛上层编织筛前端,在编织筛的振动作用下进行分级并向后输送,混合物料中尺寸超过编织筛筛孔

果后的花生秧自然晾晒至含水率20%以下,以保证揉切除膜后在储存与运输过程中不产生霉变。参考油菜、谷子等^[18-20]农作物联合收获机收获时脱出物悬浮特性的研究方法以及悬浮速度测定方法国家标准^[21]。从花生秧揉切除膜机试验现场随机取揉切后的混合物料进行尺寸特征分析并对物料分捡,通过分析发现:在揉切后的混合物料中,长度小于30 mm的物料质量占比90%以上,这类物料作为畜牧饲料适口性较好,去除残膜后可以直接装袋;长度超过30 mm的物料,需进入复碎装置进行二次揉切处理。对混合物料分捡得到粗茎秆(径向尺寸大于3 mm的段状花生秧茎秆)、细茎秆(径向尺寸小于3 mm的段状花生秧茎秆)、根、果柄、叶和粉碎后的残膜等物料,分别进行悬浮速度测定试验。悬浮速度测定试验使用DFPF-25型物料悬浮速度试验装置,试验设备、方法及计算公式参考文献^[6,20],3种试验花生秧揉切后各物料成分悬浮速度试验结果如表1所示。

尺寸的物料在上层编织筛上继续向后输送至后端,编织筛后端上方布置有离心风机,当编织筛上物料输送至离心风机吸风口下方时,残膜在离心风机叶片高速旋转形成的气流作用下被吸走并吹出,上层筛尾部是复碎进料口,分离出残膜的上层物料由复碎进料口进入复碎装置;混合物料中尺寸较小的物料在上层编织筛的分级作用下落至下层冲孔筛进行

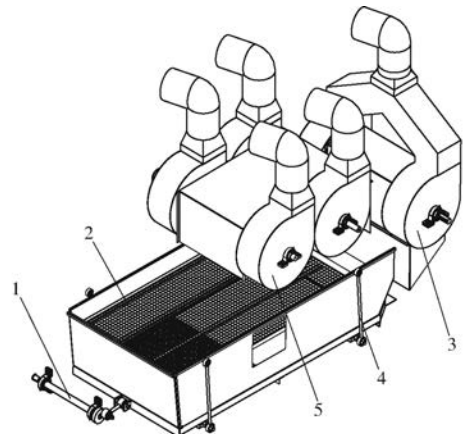


图2 膜秧分离装置结构示意图

Fig.2 Schematic of residual film-seedling separating device

1. 曲柄连杆机构 2. 振动筛 3. 下层筛风机 4. 摇杆 5. 上层筛风机

清土并向后输送,下层冲孔筛与物料提升输送装置之间也布置有离心风机,对输送至吸风口处的下层混合物料进行除膜作业,分离出残膜的洁净秧料由物料提升输送装置输送至出料口装袋。

2.2.1 离心风机主要参数设计

揉切后的残膜与花生秧物料间悬浮速度的差异是离心风机参数设计的主要依据^[22]。离心风机吸风口处气流速度应大于残膜的悬浮速度且小于筛上花生秧物料的悬浮速度。通过样机试验研究分析振动筛上物料分布情况得到:当膜秧混合物料在双层振动筛的振动作用下分级并向后输送至离心风机下方时,上层编织筛上的物料几乎全部是长度超过 30 mm 的花生秧粗茎秆和待分离的残膜,而下层冲孔筛上的物料则是满足牲畜适口性的花生秧揉切后的混合物料。因此,上层筛风机吸风口处风速应小于粗茎秆悬浮速度最小值,为 1.03 ~ 3.67 m/s,下层筛风机吸风口处风速应小于花生叶悬浮速度最小值,为 1.03 ~ 1.08 m/s,但考虑到进食含残膜花生秧饲料对牲畜的危害高于作业过程中损失部分花生秧造成的经济损失,在设计时为将残膜除去,应适当提高下层筛风机吸风口处风速,因此本设计中将下层筛风机吸风口处风速范围定为 1.03 ~ 2.79 m/s。离心风机结构如图 3 所示,上层筛风机与下层筛风机除转速不同外,结构参数基本一致,此处以上层筛风机为例。

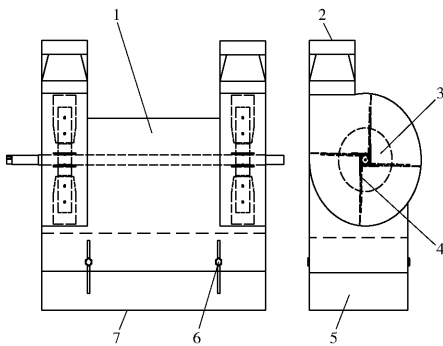


图 3 离心风机结构简图

Fig. 3 Structural diagram of centrifugal fans

1. 吸风道 2. 出风口 3. 内侧进风口 4. 风机叶轮 5. 吸风口调节套 6. 吸风口高度调节旋钮 7. 吸风口

风机采用径向直叶片通用型离心风机,叶轮外径 D 一般为 250 ~ 400 mm^[14],取 $D = 400$ mm。风机出风口理论风速计算公式为

$$v = av_c \quad (1)$$

式中 v ——风机出风口风速, m/s

a ——速度增大系数,范围为 1.9 ~ 3.9,取 1.9^[22]

v_c ——吸风口风速, m/s

离心风机全压^[23]计算式为

$$p_q = p_i + p_b \quad (2)$$

其中

$$p_i = \frac{\xi l \rho v^2}{2r_0 g} + \frac{\psi \rho v^2}{2g} + \frac{\lambda \rho v^2}{2g} \quad (3)$$

$$p_b = \frac{\rho v^2}{2g} \quad (4)$$

式中

p_q ——风机全压, Pa

p_i ——风机静压, Pa

p_b ——风机动压, Pa

ξ ——气流摩擦因数,取 0.35^[22]

l ——吸风道长度,设计值 0.5 m

ρ ——空气密度,取 1.293 kg/m³

r_0 ——水力半径,取 0.038 m^[22]

g ——重力加速度,取 9.8 m/s²

ψ ——管道对气流阻力系数,取 0.35^[22]

λ ——风机进出口对气流阻力系数,取 0.6^[22]

代入数据得:上层筛风机全压 p_{q1} 为 1.66 ~ 20.98 Pa,下层筛风机全压 p_{q2} 为 1.66 ~ 12.13 Pa。

离心风机转速 n 为

$$n = \frac{60}{\pi D} \sqrt{\frac{p_q g}{\varepsilon \rho}} \quad (5)$$

式中 ε ——计算系数,为 0.35 ~ 0.4,取 0.4^[14]

将离心风机全压数据代入式(5)中,圆整后得上层筛风机转速范围 n_1 为 268 ~ 952 r/min,下层筛风机转速范围 n_2 为 268 ~ 724 r/min。样机试验表明,当上层筛风机转速低于 700 r/min,下层筛风机转速低于 500 r/min 时,设备损失率虽然较低,但除膜率会骤降至 80% 以下,不能满足生产需要;而当上层筛风机转速高于 900 r/min,下层筛风机转速高于 700 r/min 时,设备除膜率虽能满足要求,但损失率会增加至 10% 以上,综合考虑设备除膜率与损失率作业指标,结合样机试验,最终确定上层筛风机转速为 700 ~ 900 r/min 可调,下层筛风机转速 500 ~ 700 r/min 可调。吸风口距筛面高度为 150 ~ 350 mm 可调。

2.2.2 双层振动筛主要参数设计

样机试验表明:花生秧经揉切装置一次揉切后物料尺寸不能完全满足花生秧饲料化加工的要求,部分花生秧未经充分揉切即掉落至振动筛上。针对此问题,设计了双层振动输送装置,采用双层振动筛来完成揉切后物料的分级、清土、除膜与输送。经上层编织筛分级,充分揉切后的秧料、残膜以及尘土落至下层冲孔筛进行清土、输送与除膜,未经充分揉切的秧料、残膜在上层编织筛的振动作用下进行除膜并向后输送至复碎装置。在上层编织筛后端上部以及下层冲孔筛尾部布置有离心风机,经揉切装置切

碎的残膜在离心风机作用下被吸走并吹出。根据花生秧经揉切后物料的尺寸特征,双层振动筛上层采用筛孔边长为 20 mm 的编织筛,长×宽为 1 680 mm × 930 mm,下层设计成筛孔孔径 2 mm 的冲孔筛,长×宽为 1 960 mm × 930 mm,筛孔采用六角形配置法^[24],前部有孔、后部无孔,如图 4 所示,其中上层筛与下层筛间距离为 330 mm。在试验的基础上参考文献[22],确定振动筛振幅为 60 mm,即振动筛驱动机构中曲柄半径为 30 mm。振动筛振动运动分析如图 5 所示。

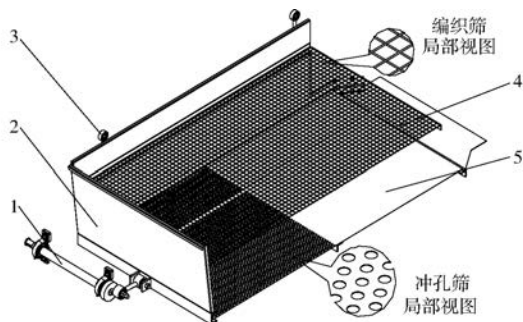


图4 振动筛结构简图

Fig. 4 Structural diagram of vibrating sieve

1. 曲柄连杆机构 2. 筛体 3. 摇杆 4. 上层编织筛 5. 下层冲孔筛

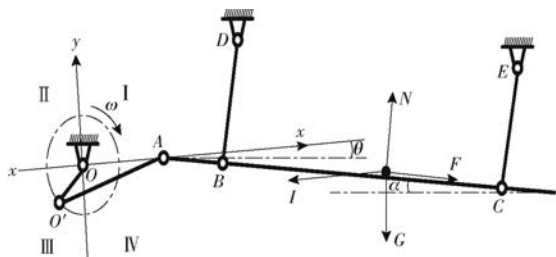


图5 筛上物料受力分析

Fig. 5 Mechanical analysis of forces acting upon material particle on sieve

不考虑加工与安装误差,筛体的运动可看作简谐运动^[24-25]。设 OA 方向为筛体运动正方向,沿筛面向上为物料沿筛面相对运动正方向,则筛体的运动可表示为

$$x = -r \cos(\omega t) \quad (6)$$

$$v_s = \frac{dx}{dt} = r\omega \sin(\omega t) \quad (7)$$

$$a_s = \frac{dv_s}{dt} = r\omega^2 \cos(\omega t) \quad (8)$$

式中 x ——筛体位移, m

v_s ——筛体速度, m/s

a_s ——筛体加速度, m/s²

r ——曲柄半径, 设计值 0.03 m

ω ——曲柄角速度, rad/s

t ——时间, s

设曲柄位于 II、III 象限内时筛体加速度为正,指

向右方,此时物料在振动筛上受力分析如图 5 所示。

设物料沿筛体向上滑动的加速度为 $\frac{d^2 x_{AB}}{dt^2}$, 则

$$m \frac{d^2 x_{AB}}{dt^2} = I \cos(\alpha + \theta) - G \sin \alpha - F \quad (9)$$

$$\text{其中} \quad I = mr\omega^2 \cos(\omega t) \quad (10)$$

$$F = N \tan \varphi \quad (11)$$

式中 I ——物料所受惯性力, N

x_{AB} ——物料沿筛体滑动位移, m

G ——重力, N

F ——摩擦力, N

N ——物料所受筛面法向反力, N

α ——筛面倾角, 设计值 2°

θ ——筛体振动方向角, 设计值 5.5°

φ ——摩擦角, 取 31.8°^[22]

令 $\delta = \frac{\cos(\alpha + \theta + \varphi)}{\cos \varphi}$, 则式(9)可简化为

$$\frac{1}{\delta} \frac{d^2 x_{AB}}{dt^2} = r\omega^2 \cos(\omega t) - g \frac{\sin(\alpha + \varphi)}{\cos(\alpha + \theta + \varphi)} \quad (12)$$

当 $r\omega^2 \cos(\omega t) > g \frac{\sin(\alpha + \varphi)}{\cos(\alpha + \theta + \varphi)}$ 时, $\frac{d^2 x_{AB}}{dt^2} > 0$,

物料将沿筛面上滑, 当 $\cos(\omega t) = 1$ 时, 曲柄角速度达到物料上滑的极限值。从而, 物料向上滑动的曲柄极限转速为

$$n_3 = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g \sin(\alpha + \varphi)}{r \cos(\alpha + \theta + \varphi)}} \quad (13)$$

同理可得曲柄位于 I、IV 象限内时物料向下滑动的曲柄极限转速为

$$n_4 = \frac{30}{\pi} \sqrt{\frac{g \sin(\varphi - \alpha)}{r \cos(\theta + \alpha - \varphi)}} \quad (14)$$

结合上述分析, 将相关数据代入式(13)、(14)中得, 物料向上滑动曲柄转速 $n_3 > 146.36$ r/min, 向下滑动曲柄转速 $n_4 > 127.45$ r/min。在样机试制过程中发现, 当曲柄转速小于 150 r/min 时, 筛上物料不能顺畅地输送至物料提升输送装置, 导致花生秧物料拥堵, 设备已无法正常作业; 当曲柄转速大于 270 r/min 时, 整机抖动幅度过大, 长时间作业会损坏设备零部件, 也无法正常作业。结合试验结果, 最终确定曲柄转速 180 ~ 240 r/min 可调, 即振动筛振动频率 3 ~ 4 Hz 可调。

经过样机初步试验以及前期物料悬浮特性试验基础, 测得揉切后物料中残膜与花生秧间悬浮速度差异明显, 此外, 根据残膜质量轻、易飘浮等特性, 揉切后物料在膜秧分离装置振动筛上运动时残膜会被离心风机吸风口处气流吸走并吹出, 达到残膜与花生秧物料的分离效果。要得到膜秧分离的较优效

果,需要后续试验研究膜秧分离装置各因素的影响关系以及因素间的交互作用,确定作业参数较优配比。

3 膜秧分离特性试验

3.1 试验材料与设备

膜秧分离特性试验在山东临沭东泰机械有限公司进行,以取自东泰机械有限公司试验田覆膜种植的“花育 22”花生收获后自然晾晒的花生秧为试验材料,花生秧含水率 14% ~ 16%,含膜率 0.8% ~ 1.2% (测量方法:每次测量随机取 5 kg 试验材料,人工摘除秧上缠绕的残膜进行称量并计算样品中残膜所占比例)。试验花生秧按照设备设计值以 0.5 kg/s 的喂入量由人工均匀喂入。试验主要设备与仪器包括:花生秧揉切除膜机、电子秤、DGF30/7-IA 型电热鼓风干燥箱、FA1004 型电子天平、DT-2236 型数显转数表、密封袋等。试验现场如图 6 所示。



图 6 试验现场

Fig. 6 Test site

3.2 试验因素与指标

在花生秧揉切除膜机作业过程中,有很多影响设备作业性能的因素,基于前期设计与单因素试验基础,确定上层筛风机转速、下层筛风机转速和振动筛频率对机具作业性能影响显著。因此选取上述 3 个作业参数作为试验因素,以除膜率和损失率为试验指标,开展花生秧揉切除膜机膜秧分离特性试验。考虑到参数变化范围较大,开展试验时需要准确、有效调整各作业参数水平。在花生秧揉切除膜机的试验中,通过变频电机控制上层筛风机转速;通过改变下层筛风机驱动带轮直径来调节下层筛风机转速;通过改变曲柄驱动带轮的直径来改变曲柄的转速,进而改变振动筛频率。除膜率计算公式为

$$R = \left(1 - \frac{M_0 M_3}{M_1 M_2}\right) \times 100\% \quad (15)$$

式中 R ——除膜率, %

M_0 ——每次试验喂入的含残膜花生秧的总质量, kg

M_1 ——每次试验喂入含残膜花生秧中残膜的质量, kg

M_2 ——作业后从出料口取样质量, kg

M_3 ——作业后所取样品中未除净的残膜质量, kg

损失率计算公式为

$$L = \frac{M_a - M_b}{M_a} \times 100\% \quad (16)$$

式中 L ——损失率, %

M_a ——每次试验喂入的含残膜花生秧中花生秧的总质量, kg

M_b ——每次作业后从出料口处收集已除膜花生秧的质量(未除净残膜的质量忽略不计), kg

3.3 试验设计与方法

根据 Design-Expert 8.0.6 软件中的 Box - Behnken 三因素三水平试验设计方案,开展花生秧揉切除膜机膜秧分离特性试验研究。结合前述分析与设计结果,以除膜率 R 和损失率 L 为响应值,对上层筛风机转速、下层筛风机转速、振动筛频率开展三因素三水平试验研究。各试验因素编码如表 2 所示。

表 2 试验因素编码

Tab. 2 Codes of test factors

编码	因素		
	上层筛风机转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	下层筛风机转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	振动筛频率/ Hz
-1	700	500	3.0
0	800	600	3.5
1	900	700	4.0

正交试验方案包括 17 个试验点,其中包括 12 个分析因子和 5 个零点估计误差。试验设计方案及结果如表 3 所示(X_1 、 X_2 、 X_3 为上层筛风机转速、下层筛风机转速、振动筛频率的编码值)。

3.4 回归模型与显著性分析

根据表 3 中的正交试验数据,采用 Design-Expert 8.0.6 软件对试验数据进行多元回归拟合分析^[26-29],建立除膜率 R 、损失率 L 对上层筛风机转速、下层筛风机转速、振动筛频率 3 个自变量的二次多项式回归模型

$$R = 89.41 - 2.92X_1 + 4.89X_2 + 1.12X_3 - 1.79X_1X_2 + 0.67X_1X_3 + 0.22X_2X_3 - 2.73X_1^2 - 2.09X_2^2 - 0.66X_3^2 \quad (17)$$

$$L = 6.99 - 1.70X_1 + 3.22X_2 - 2.32X_3 - 0.90X_1X_2 + 0.30X_1X_3 - 1.20X_2X_3 + 0.37X_1^2 + 1.70X_2^2 + 1.09X_3^2 \quad (18)$$

表3 试验设计方案及结果

Tab.3 Test design scheme and results

试验编号	X_1	X_2	X_3	除膜率 $R/\%$	损失率 $L/\%$
1	0	-1	-1	88.56	11.91
2	1	0	-1	90.53	17.21
3	-1	0	-1	81.39	8.26
4	0	0	0	90.58	7.53
5	1	-1	0	93.81	15.05
6	0	0	0	90.38	6.68
7	1	0	1	92.39	8.91
8	0	0	0	88.32	6.27
9	-1	0	1	82.36	4.75
10	0	0	0	87.92	7.61
11	0	1	1	84.83	5.59
12	0	0	0	89.86	6.85
13	1	1	0	85.35	9.39
14	-1	-1	0	80.26	6.92
15	0	-1	1	90.28	7.92
16	-1	1	0	78.95	4.86
17	0	1	-1	80.43	8.37

对回归模型进行方差分析,结果如表4所示。由表4可知,除膜率和损失率的回归模型显著性水平 P 均小于 0.01,可知两模型均极显著。失拟项显著性水平 P 均大于 0.05(分别为 0.5854 和 0.1196),表明除膜率和损失率回归模型拟合度均较高,拟合效果较好。模型决定系数 R^2 均大于 0.97(分别为 0.9738 和 0.9730),说明上述两模型可以解释 97% 以上的评价指标。所以花生秧揉切除膜机膜秧分离装置的作业参数可以用此模型进行参数优化。

对上述回归模型进行优化,剔除回归模型中的不显著项,回归模型优化结果为

$$R = 89.14 - 2.92X_1 + 4.89X_2 + 1.12X_3 - 1.79X_1X_2 - 2.77X_1^2 - 2.12X_2^2 \quad (19)$$

$$L = 7.14 - 1.70X_1 + 3.22X_2 - 2.32X_3 - 1.20X_2X_3 + 1.72X_2^2 + 1.11X_3^2 \quad (20)$$

分析优化后的模型,除膜率、损失率模型 $P < 0.0001$,失拟项 P 值分别为 0.6196 和 0.1016,模型

表4 回归模型方差分析

Tab.4 Variance and analysis of regression model

方差来源	除膜率 R				损失率 L			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	340.29	9	28.88	0.0001**	177.83	9	28.01	0.0001**
X_1	68.15	1	52.06	0.0002**	23.09	1	32.72	0.0007**
X_2	191.30	1	146.12	<0.0001**	83.01	1	117.67	<0.0001**
X_3	10.01	1	7.65	0.0279*	43.15	1	61.17	0.0001**
X_1X_2	12.78	1	9.76	0.0167*	3.24	1	4.59	0.0693
X_1X_3	1.80	1	1.37	0.2799	0.37	1	0.52	0.4947
X_2X_3	0.20	1	0.15	0.7089	5.74	1	8.13	0.0246*
X_1^2	31.40	1	23.99	0.0018**	0.56	1	0.80	0.4009
X_2^2	18.37	1	14.03	0.0072**	12.18	1	17.27	0.0043**
X_3^2	1.81	1	1.38	0.2779	5.03	1	7.14	0.0319*
残差	9.16	7			4.94	7		
失拟项	3.24	3	0.73	0.5854	3.63	3	3.69	0.1196
误差	5.92	4			1.31	4		
总和	349.46	16			182.77	16		

注: * 表示差异显著($P < 0.05$); ** 表示差异极显著($P < 0.01$)。

决定系数 R^2 分别为 0.9629 和 0.9502,可知优化后的回归模型极显著且拟合效果较好,模型可靠。

参数对回归模型方程的影响程度可以通过显著性水平 P 评价。上层筛风机转速、下层筛风机转速和振动筛频率 3 个试验因素对除膜率影响的显著性顺序为:下层筛风机转速、上层筛风机转速、振动筛频率;试验因素对损失率影响的显著性顺序为:下层筛风机转速、振动筛频率、上层筛风机转速。

3.5 响应面分析

利用 Design-Expert 8.0.6 软件的 Model Graphs 模块得到 3D Surface 响应面图如图 7 所示,根据响

应面图分析上层筛风机转速、下层筛风机转速和振动筛频率因素间交互作用对除膜率和损失率响应值的影响。

图 7a 为振动筛频率位于中心水平(3.5 Hz)时,上层筛风机转速与下层筛风机转速两因素交互作用对除膜率影响的响应面图。由图可知,在两因素交互作用影响下,当下层筛风机转速逐渐增加时,除膜率逐渐升高且变化幅度较为明显,而当上层筛风机转速逐渐增加时除膜率先升高后降低,并且变化幅度相对平缓。除膜率的响应面曲线沿下层筛风机转速方向的变化较明显,这表明振动筛频率位于中心

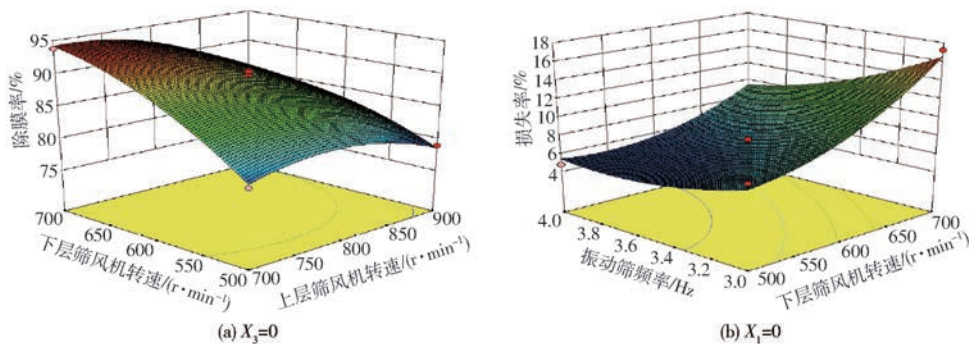


图 7 试验因素对除膜率和损失率影响的响应曲面

Fig. 7 Response surfaces of test factors on residual film removal rate and materials loss rate

水平时,下层筛风机转速对除膜率的影响效果比上层筛风机转速的影响效果显著。图 7b 为上层筛风机转速位于中心水平(800 r/min)时,下层筛风机转速与振动筛频率两因素交互作用对损失率影响的响应面图。由图可知,在下层筛风机转速与振动筛频率两因素交互作用下,当振动筛频率逐渐增加时损失率先降低后升高,并且变化幅度比较平缓,而当下层筛风机转速逐渐增加时,损失率逐渐升高且变化幅度比较明显。损失率的响应面曲线沿下层筛风机转速方向的变化较明显,这表明上层筛风机转速位于中心水平时,下层筛风机转速对损失率的影响效果比振动筛频率的影响效果显著。

4 参数优化与试验验证

4.1 参数优化

为使花生秧揉切除膜机膜秧分离作业效果达到最佳状态,需要花生秧揉切除膜机的除膜率较高,同时损失率较低,通过因素间交互作用对除膜率和损失率影响的响应面图分析可知:当上层筛风机转速偏低、下层筛风机转速偏高、振动筛频率适中时可以达到较高的除膜率;当上层筛风机转速适中、下层筛风机转速偏低、振动筛频率偏高时,可以实现较低损失率。考虑到各因素及因素间交互作用对试验指标响应值的影响效果有所差异,需要对回归模型进行多目标优化。

利用 Design-Expert 8.0.6 软件的 Optimization 模块对试验指标的回归模型进行多目标优化设计^[30-31],针对响应值除膜率和损失率进行分析,考虑到花生秧揉切除膜机加工后的花生秧料将直接用作牲畜饲料使用,所以需要优先保证除膜率高,其次保证损失率低,此外如果将损失率权重设定过低,将不能满足实际生产需要。为综合评价花生秧揉切除膜机膜秧分离作业性能,本文在进行目标优化计算时,给定约束条件,对两试验指标增加权重,其中除膜率占 60%,损失率占 40%,最终得出目标函数优

化值。

根据前述对试验指标回归模型的分析结果以及花生秧揉切除膜机膜秧分离作业条件,在 Design-Expert 8.0.6 软件 Optimization 模块中,对各试验因素的约束条件进行设定:上层筛风机转速 700 ~ 900 r/min,下层筛风机转速 500 ~ 700 r/min,振动筛频率 3 ~ 4 Hz。除膜率 R 取目标函数的最大值 100%,损失率 L 取目标函数的最小值 0。软件分析得到 3 个因素水平的优化结果为:当上层筛风机转速为 758.06 r/min、下层筛风机转速为 668.73 r/min、振动筛频率为 4.00 Hz 时,回归模型曲面响应值最大,此时模型预测值除膜率为 93.38%,损失率为 8.85%。

4.2 试验验证

为验证模型预测结果可靠性,2019 年 10 月中旬,采用优化结果在东泰机械有限公司试验田进行了 5 次验证试验,试验结果取平均值。考虑到设备实际作业情况,将优化后的参数进行圆整,调整上层筛风机转速为 760 r/min,下层筛风机转速为 670 r/min,振动筛频率为 4 Hz。依照参数调整后的方案进行膜秧分离验证试验,试验结果如表 5 所示。

表 5 模型预测值与验证试验结果对比

Tab. 5 Comparison of model prediction and validation test results

类型	除膜率 R	损失率 L
试验值	91.24	8.51
模型预测值	93.38	8.85
相对误差	2.29	3.84

由表 5 可知,膜秧分离作业验证试验结果与回归模型预测结果相对误差均小于 5%,试验结果与模型预测值较为接近,说明上述参数优化回归模型可靠性较高。当花生秧揉切除膜机膜秧分离装置参考优化结果调整为上层筛风机转速 760 r/min、下层筛风机转速 670 r/min、振动筛频率 4 Hz 进行作业时,花生秧揉切除膜机除膜率相较于现有机型的

85%以下提高至91.24%,损失率由12%以上降低至8.51%,设备膜秧分离性能得到提高。设备作业效果如图8所示。

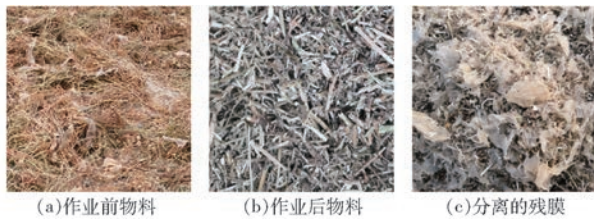


图8 设备作业效果

Fig. 8 Working effects of equipment

5 结论

(1)针对覆膜花生收获后的花生秧在饲料加工过程中膜秧分离不彻底、损失率高等问题,结合揉切后各物料成分尺寸特征和悬浮特性,设计了一种风筛组合式膜秧分离装置,确定了膜秧分离装置主要参数取值范围:上层筛风机转速700~900 r/min,

下层筛风机转速500~700 r/min,振动筛频率3~4 Hz。

(2)各因素对除膜率影响的显著性由大到小依次为:下层筛风机转速、上层筛风机转速、振动筛频率;各因素对损失率影响的显著性由大到小依次为:下层筛风机转速、振动筛频率、上层筛风机转速。各因素间的交互作用影响结果为:上层筛风机转速与下层筛风机转速间的交互作用对除膜率影响显著,下层筛风机转速与振动筛频率间的交互作用对损失率影响显著,其他因素间交互作用对除膜率和损失率影响不显著。

(3)运用 Design-Expert 8.0.6 软件进行了正交试验和试验结果分析,并对回归模型进行了优化。优化后膜秧分离装置较优参数组合为:上层筛风机转速760 r/min,下层筛风机转速670 r/min,振动筛频率4 Hz,此时,除膜率为91.24%,损失率为8.51%,设备的膜秧分离性能得到提高。

参 考 文 献

- [1] 文昭竹,曾宁波,穆麟,等. 花生秧的营养成分、贮藏技术与饲用价值研究进展[J]. 湖南生态科学学报,2018,5(1):40-45. WEN Zhaozhu, ZENG Ningbo, MU Lin, et al. Research progress in nutritional components, storage technology and feeding value of peanut vine[J]. Journal of Hunan Ecological Science, 2018, 5(1): 40-45. (in Chinese)
- [2] 李洋,窦秀静,张幸怡,等. 非常规粗饲料分级指数和相对价值比较研究[J]. 东北农业大学学报,2016,47(2):54-60. LI Yang, DOU Xiujing, ZHANG Xingyi, et al. Comparison study on GI and RFV determination and roughage forage[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2016, 47(2): 54-60. (in Chinese)
- [3] 游兆延,顾峰玮,吴峰,等. 垄作花生残膜回收技术研究[J]. 农机化研究,2016,38(1):207-211. YOU Zhaoyan, GU Fengwei, WU Feng, et al. Research on ridged peanut residue plastic film recycling technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(1): 207-211. (in Chinese)
- [4] 严昌荣,何文清,刘爽,等. 中国地膜覆盖及残留污染防控[M]. 北京:科学出版社,2015.
- [5] 王维,王亚妮,田智辉,等. 物料悬浮速度测试台的设计与试验研究[J]. 中国农机化学报,2016,37(6):44-46,78. WANG Wei, WANG Yani, TIAN Zhihui, et al. Research on design and experimental of material suspension velocity test bench[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(6): 44-46, 78. (in Chinese)
- [6] 侯华铭,崔清亮,郭玉明,等. 气吹式粮油作物脱出物清选悬浮速度测量装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(16):43-49. HOU Huaming, CUI Qingliang, GUO Yuming, et al. Design and test of air-sweeping suspension velocity testing device for cleaning threshed materials of grain and oil crops[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(16): 43-49. (in Chinese)
- [7] 高连兴,李献奇,关萌,等. 双吸风口振动式花生荚果清选装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(3):110-117. GAO Lianxing, LI Xianqi, GUAN Meng, et al. Design and test on cleaning device of peanut pods with double air-suction inlets with vibration screen [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 110-117. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150316&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.016. (in Chinese)
- [8] 廖庆喜,陈立,李海同,等. 油菜联合收获机脱出物清选试验台[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(10):80-85,79. LIAO Qingxi, CHEN Li, LI Haitong, et al. Cleaning unit test-bed of extraction components for rape combine harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 80-85, 79. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131014&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.014. (in Chinese)
- [9] 程超,付君,陈志,等. 玉米籽粒收获机清选装置参数优化试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(7):151-158. CHENG Chao, FU Jun, CHEN Zhi, et al. Optimization experiment on cleaning device parameters of corn kernel harvester [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 151-158. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190715&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.015. (in Chinese)
- [10] 曹成茂,罗坤,彭美乐,等. 山核桃物料风选机理与风选性能试验研究[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(9):105-112. CAO Chengmao, LUO Kun, PENG Meile, et al. Experiment on winnowing mechanism and winnowing performance of hickory material[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 105-112. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190912&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.09.012. (in Chinese)
- [11] MOKHTARI N A, ARABHOSSEINI A, KIANMEHR M H. Separation of shelled walnut particles using pneumatic method[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2013, 6(3): 88-93.

- [12] MEKONNEN G G, JOSSE D B, MARTINE B. Numerical and experimental study of a cross-flow fan for combine cleaning shoes [J]. *Biosystems Engineering*, 2010, 106(4): 448 - 457.
- [13] BART L, THOMAS A, ENGELBERT T, et al. Simulation of grain-straw separation by discrete element modeling with bendable straw particles [J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2014, 101: 24 - 33.
- [14] 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/OL]. *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 material [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(8): 140 - 147. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190816&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.016. (in Chinese)
- [15] 张敏, 金诚谦, 梁苏宁, 等. 风筛选式油菜联合收割机清选机构参数优化与试验 [J]. *农业工程学报*, 2015, 31(24): 8 - 15. ZHANG Min, JIN Chengqian, LIANG Suning, et al. Parameter optimization and experiment on air-screen cleaning device of rapeseed combine harvester [J]. *Transactions of the CSAE*, 2015, 31(24): 8 - 15. (in Chinese)
- [16] 李心平, 孟亚娟, 张家亮, 等. 辊搓圆筒筛式谷子清选装置设计与试验 [J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(10): 92 - 102, 136. LI Xiping, MENG Yajuan, ZHANG Jialiang, et al. Design and test of cleaning device for roller rubbing cylinder sieve of millet [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(10): 92 - 102, 136. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181011&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.011. (in Chinese)
- [17] 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/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(7): 102 - 108. LIU Zhenghui, ZHENG Yiping, WANG Zhiming, et al. Design on air-flowing cleaning unit of micro rice-wheat combine harvester [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(7): 102 - 108. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150715&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.015. (in Chinese)
- [18] 陈立, 廖庆喜, 宗望远, 等. 油菜联合收获机脱出物空气动力学特性测定 [J]. *农业机械学报*, 2012, 43(增刊): 125 - 130. CHEN Li, LIAO Qingxi, ZONG Wangyuan, et al. Aerodynamic characteristics measurement of extraction components for rape combine harvester [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2012, 43(Supp.): 125 - 130. (in Chinese)
- [19] 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 content 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)
- [20] 马征, 李耀明, 徐立章. 油菜脱出物漂浮速度及摩擦与浸润特性的测定与分析 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(9): 13 - 17. MA Zheng, LI Yaoming, XU Lizhang. Testing and analysis on rape excursion components characteristics in floating, friction and wettability [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(9): 13 - 17. (in Chinese)
- [21] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 牧草种子悬浮速度测定方法: JB/T 7290—2007 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [22] 李献奇. 双吸风口振动式花生摘果机清选装置研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2015. LI Xianqi. Study on cleaning device of peanut picker with double air-suction inlets with vibration screen [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [23] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册 [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [24] 李宝筏. 农业机械学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [25] 丁为民. 农业机械学 [M]. 2版. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2011.
- [26] 茆诗松, 周纪芈, 陈颖. 试验设计 [M]. 2版. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- [27] 施丽莉, 胡志超, 顾峰玮, 等. 耙齿式茎秆花生残膜回收机设计及参数优化 [J]. *农业工程学报*, 2017, 33(2): 8 - 15. SHI Lili, HU Zhichao, GU Fengwei, et al. Design and parameter optimization of rake and tooth ridge reclaimer for peanut residue [J]. *Transactions of the CSAE*, 2017, 33(2): 8 - 15. (in Chinese)
- [28] 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/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(10): 115 - 123. WANG Lijun, FENG Xin, WU Zhenchao, et al. Design and test of stepped vibrating screen with cross air for maize harvester [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(10): 115 - 123. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181013&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.013. (in Chinese)
- [29] 戴飞, 赵武云, 孙伟, 等. 马铃薯收获与气力辅助残膜回收联合作业机设计与试验 [J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(1): 64 - 72. DAI Fei, ZHAO Wuyun, SUN Wei, et al. Design and experiment of combined operation machine for potato harvesting and plastic film pneumatic auxiliary collecting [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(1): 64 - 72. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170109&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.01.009. (in Chinese)
- [30] 张学军, 刘家强, 史增录, 等. 残膜回收机逆向膜土分离装置的设计与参数优化 [J]. *农业工程学报*, 2019, 35(4): 46 - 55. ZHANG Xuejun, LIU Jiaqiang, SHI Zenglu, et al. Design and parameter optimization of reverse membrane and soil separation device for residual film recovery machine [J]. *Transactions of the CSAE*, 2019, 35(4): 46 - 55. (in Chinese)
- [31] 孙伟, 那明君, 冯江, 等. 割前摘脱收获机立式离心分离复脱清选装置优化 [J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(7): 73 - 81. SUN Wei, NA Mingjun, FENG Jiang, et al. Optimization of centrifugal separating-rethreshing-cleaning apparatus for stripper combine harvester [J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(7): 73 - 81. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180709&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.07.009. (in Chinese)