

分段滚筒式气力协助白星花金龟幼虫转化残膜混合物分离装置设计与试验

谢建华^{1,2} 李沅泽¹ 刘迎春³ 张佳^{1,4} 杜亚坤¹ 石鑫⁵

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆智能农业装备重点实验室, 乌鲁木齐 830052;
3. 新疆昌吉州玛纳斯县农牧业技术推广中心, 玛纳斯 832200; 4. 新疆工程学院机电工程学院, 乌鲁木齐 830023;
5. 新疆农业科学院农业机械化研究所, 乌鲁木齐 830091)

摘要: 针对白星花金龟幼虫转化残膜混合物后满足生物活性前提下多种形体差异显著混合物的分离问题, 设计了一种分段滚筒式气力协助白星花金龟幼虫转化残膜混合物分离装置。通过物理试验与理论计算确定了白星花金龟幼虫、虫砂、残膜阻力系数分区与理论悬浮速度, 利用悬浮速度台架试验验证了其准确性, 可为后续气固耦合仿真提供数据基础。通过理论分析与 EDEM-Fluent 耦合方法模拟残膜、幼虫及虫砂筛分过程, 确定了本装置的主要结构参数与工作参数。选择滚筒筛转速、滚筒筛倾角及风扇风速为试验因素, 残膜含杂率与虫砂含膜率为试验指标进行了单因素试验以确定各因素水平合理范围, 根据单因素试验结果, 设计了三因素三水平二次回归响应面试验并建立回归模型。试验结果表明: 影响残膜含杂率的因素由大到小依次为风扇风速、滚筒筛倾角、滚筒筛转速; 影响虫砂含膜率的因素由大到小依次为滚筒筛转速、滚筒筛倾角、风扇风速。优化后最优工作参数组合为滚筒筛转速 21.79 r/min、滚筒筛倾角 3.58°、风扇风速 5.52 m/s。以此参数组合进行物料筛分试验, 得到残膜含杂率与虫砂含膜率平均值分别为 8.96%、1.52%, 与理论优化值相对误差均小于 5%。该研究可为含生物活性且形体差异显著的混合物分离装置设计提供参考。

关键词: 残膜混合物; 白星花金龟幼虫; 分段式滚筒筛; 风选; 气固耦合; 参数优化

中图分类号: S226.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2024)11-0329-13

OSID:



Design and Test of Segmented Drum Pneumatically Assisted *Potosia brevitaris* Larva Residul Film Mixture Separation Device

XIE Jianhua^{1,2} LI Yuanze¹ LIU Yingchun³ ZHANG Jia^{1,4} DU Yakun¹ SHI Xin⁵

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China

2. Xinjiang Key Laboratory of Intelligent Agricultural Equipment, Urumqi 830052, China

3. Xinjiang Changji Prefecture Manas County Agriculture and Animal Husbandry Technology Extension Center, Manas 832200, China

4. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, China

5. Research Institute of Agricultural Mechanization, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830091, China)

Abstract: Aiming at the problem of mixture separation with significant differences in various shapes after the *Potosia brevitaris* larva biotransformation the residual film mixture to meet the premise of biological activity, a segmented drum type pneumatically assisted *Potosia brevitaris* larva biotransformation mixture separation device was designed. Through physical experiments and theoretical calculations, the resistance coefficient partitions and theoretical suspension speeds of *Potosia brevitaris* larva, frass, and residual films were determined. Its accuracy was verified by using a suspension speed bench test, which can provide data basis for subsequent fluid-structure interaction simulations. Through theoretical analysis and EDEM-Fluent coupling method, the screening process of residual film, larvae and frass was simulated, and the main structural parameters and working parameters of the device were determined. The rotation speed of the drum screen, the inclination angle of the drum screen and the fan wind speed were selected as test factors. The residual film impurity content rate and the frass film content rate were tested as test indicators. A single factor test was conducted to determine the reasonable range of the levels of each

收稿日期: 2024-07-08 修回日期: 2024-08-14

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发任务专项(2022B02046、2022B02017)

作者简介: 谢建华(1975—), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事农业固废废弃物回收机械装备研究, E-mail: xjh199032@163.com

factor. Based on the results of the single factor test, a three-factor and three-level quadratic regression response surface test was designed and a regression model was established. The test results showed that the order of factors affecting the impurity content of the residual film was fan speed, drum screen inclination angle, and drum screen speed. The order of factors affecting the film content of frass was drum screen rotation speed, drum screen inclination angle, and fan wind speed. After optimization, the optimal working parameter combination was drum screen rotation speed of 21.79 r/min, drum screen inclination angle of 3.58°, and fan wind speed of 5.52 m/s. The material screening test was carried out with this parameter combination, and the average impurity content rate of the residual film and the film content rate of the frass were 8.96% and 1.52%, respectively. The relative errors with the theoretical optimization values were less than 5%. The research can provide a reference for the design of separation devices for mixtures containing biological activity and significant differences in shape.

Key words: residual film mixtures; *Potosia brevitarsis* larva; segmented drum screen; wind screening; gas-solid coupling; parameter optimization

0 引言

机械化残膜回收技术的推广有效解决了残膜的白色污染问题,但所回收残膜中往往夹杂着大量秸秆、根茬和碎土等杂质^[1]。为有效解决残膜和秸秆、土壤等杂质的分离问题,学者研发了膜杂分离机械,但残膜与秸秆分离效果不佳,大多时候还需人工辅助分离,导致残膜的二次利用工作成本增加,经济效益低。现今,昆虫生物转化技术已成为研究热点,调查发现,白星花金龟幼虫可取食各种腐烂的农作物秸秆^[2],故利用该虫取食秸秆的特性可良好地解决残膜、秸秆难以分离的问题,并且白星花金龟幼虫还具有很高的经济价值,其自身可作为高蛋白饲料、入药等使用,幼虫产生的虫砂可作为有机肥料直接使用。但目前国内外对于白星花金龟幼虫的研究大多集中在其营养成分和对不同物质的转化能力上,对于白星花金龟幼虫转化残膜混合物后的筛分环节却鲜有报道^[3-5]。

滚筒筛作为脱粒、分选机械,其应用十分广泛。例如张胜伟等^[6]设计了一种双层滚筒筛式油莎豆果杂分离装置,有效解决了油莎豆收获时损失率与含杂率高的问题;连国党等^[7]设计了一种轴流螺旋滚筒式食葵脱粒装置,并分析了物料在脱粒空间的运移过程;贺磊等^[8]针对蚯蚓分选速度慢、效率低等问题,设计了一种滚筒式蚯蚓分选装置;万星宇等^[9]设计了一种差速圆筒筛,可对油菜脱出物进行初步筛分;为减少马铃薯损伤率和提高其收获效率,康宏斌等^[10]设计了一种滚筒筛型马铃薯分离输送装置;文献[11-12]探究了不同形态钉齿滚筒对向日葵脱粒性能的影响;WANG等^[13]根据脱出物分布规律设计了一种滚筒式荞麦脱粒机。综上所述,目前滚筒筛主要应用于农作物等的分选,在活体生物混合物分离上应用较少。

为实现白星花金龟幼虫转化残膜混合物后产生

的虫砂、残膜、幼虫等物料的有效分离,本文设计一种分段滚筒式气力协助白星花金龟幼虫转化残膜混合物分离装置,对物料在筛分空间内的运动过程进行运动学与动力学分析,通过理论分析与 EDEM-Fluent 耦合方法模拟残膜、幼虫及虫砂的筛分过程,确定装置主要结构参数与工作参数。在样机加工地通过单因素试验、三因素三水平二次回归响应面试验确定最优工作参数组合,验证本文理论分析与流固耦合仿真的准确性,以期为含生物活性且形体差异显著的混合物分离装置设计提供参考。

1 转化混合物物理特性测定

本文所用的待筛分白星花金龟幼虫混合物料由新疆玛纳斯县昆虫产业化科研基地提供。其中,残膜混合物经粉碎、发酵后投喂给白星花金龟幼虫,待其成长为三龄老熟幼虫后,其混合物料包括幼虫、虫砂、残膜和少量杂质 4 种物质,如图 1 所示。经检测得知 4 种物质质量比为 1:8.78:0.02:0.2。由于少量杂质质量占比较少,且成分为发酵后的牛粪、沙土、秸秆碎渣等物质,可与虫砂一起充当有机肥,在后续筛分时可与虫砂一起筛出,故将其当作虫砂看待。



图 1 转化后混合物料

Fig. 1 Mixed materials after biotransformation

1.1 白星花金龟幼虫混合物料悬浮速度测算

1.1.1 混合物料物理参数

物料含水率、密度、尺寸是影响其空气动力学性

能的主要因素^[14]。从混合物料中随机抽取试验样本,按其成分进行分拣,采用 SYF-6 型卤素快速水分测定仪测量虫砂含水率;分别利用土环法和排水法测量虫砂与白星花金龟幼虫密度,残膜密度参考文献[15]选取;分别利用不同孔径细筛、游标卡尺和直尺测量虫砂、白星花金龟幼虫及残膜尺寸,试验结果如表 1 所示。

表 1 混合物料物理参数

Tab. 1 Mixed material physical parameters

材料	密度/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	含水率/ %	长度/ mm	宽度/ mm	高度/ mm
幼虫	412		35 ~ 40	10 ~ 12	10 ~ 12
虫砂	940	39.59	3 ~ 4	2	2
残膜	930		50 ~ 200	40 ~ 100	0.01

1.1.2 阻力系数分区

在设计白星花金龟幼虫混合物料筛分装置前需先确定混合物料各组分间的悬浮速度,并根据三者悬浮速度变化范围确定适合的气流流速与气流倾角。而在研究混合物料在气流中的运动情况前,需先确定混合物料各组分所在的阻力系数分区。阻力系数是指物体所受阻力与气流动压和参考面积之比^[16],其表达式为

$$C_d = \frac{2F}{\rho_a v^2 A}$$

(1)

式中 C_d ——阻力系数

F ——空气阻力, N

ρ_a ——空气密度,取 1.293 kg/m^3

v ——气流相对于物料流速, m/s

A ——物料迎流横截面积, m^2

在流体力学中,阻力系数通常分为层流区、过渡区、湍流区,由于各分区阻力系数皆不相同,因此需通过理论计算确定白星花金龟幼虫混料各组分分区。采用粒径法^[17]判断白星花金龟幼虫及虫砂阻力系数分区,其公式为

$$T = \left[\frac{\mu^2}{\rho_a(\rho_s - \rho_a)} \right]^{\frac{1}{3}}$$

(2)

式中 T ——计算因子, m

μ ——空气动力黏度,温度 20°C 时取 $1.81 \times 10^{-5}\text{ Pa}\cdot\text{s}$

ρ_s ——物料密度, kg/m^3

3 个分区中物料适用的粒径分别为:层流区 $d_p \leq 2.2T$ 、过渡区 $2.2T < d_p \leq 20.4T$ 、湍流区 $20.4T < d_p \leq 100T$,其中 d_p 为物料粒径, mm 。采用等体积相当径法计算物料粒径,即与物料体积相等的球体直径作为物料粒径^[18],其公式为

$$V_s = \frac{\pi}{6} d_p^3$$

(3)

式中 V_s ——物料体积, mm^3

通过观察,伸展开的白星花金龟幼虫及其虫砂均可近似看作椭圆柱体,其体积计算公式为

$$V_s = \frac{4}{3} \pi abc$$

(4)

式中 a ——1/2 物料长度, mm

b ——1/2 物料宽度, mm

c ——1/2 物料高度, mm

将式(4)代入式(3)得白星花金龟幼虫和虫砂粒径计算公式为

$$d_p = 2(abc)^{\frac{1}{3}}$$

(5)

通过粒径法可判别出白星花金龟幼虫及其虫砂的阻力系数分区均为湍流区(Newton),其阻力系数 C_d 为 0.44。

残膜由于属于柔性片体材料,若将其体积看作球体会大大减小残膜迎风面积,故不能采用粒径法判断其阻力系数分区。

1.1.3 幼虫与虫砂悬浮速度

由于白星花金龟幼虫及其虫砂均采用体积相当径法计算粒径,故根据悬浮状态下物料浮力与空气阻力的力学平衡式^[19]

$$C_d \frac{\pi}{4} d_p^2 \rho_a \frac{v^2}{2} = \frac{\pi}{6} d_p^3 (\rho_s - \rho_a) g$$

(6)

式中 g ——重力加速度, m/s^2

可推导出白星花金龟幼虫及其虫砂悬浮速度计算公式为

$$v = \sqrt{\frac{4gd_p(\rho_s - \rho_a)}{3C_d\rho_a}}$$

(7)

1.1.4 残膜悬浮速度

在残膜处于悬浮状态时对其进行受力分析,根据受力平衡原理可知,残膜在空气中所受到的竖直向上的浮力与气流阻力之和等于残膜竖直向下的重力。将残膜的气流特性参数代入受力平衡方程,其计算式为

$$\begin{cases} G = F + F'_f \\ F = \frac{1}{2} C_d \rho_a A v_f^2 \end{cases}$$

(8)

式中 G ——重力, N

F'_f ——残膜空气浮力, N

v_f ——残膜悬浮速度, m/s

将伸展开的残膜当作超薄的矩形体看待^[20],残膜悬浮时受力及迎风面积计算式为

$$\begin{cases} G = \rho_p r_l r_w h_0 g \\ F_f = r_l r_w h_0 \rho_a g \\ A = r_l r_w \end{cases}$$

(9)

式中 ρ_p ——残膜密度, kg/m^3
 r_l ——残膜长度, m
 r_w ——残膜宽度, m
 h_0 ——残膜厚度, m

将式(9)代入式(8),推导出残膜理论悬浮速度公式为

$$v_f = \sqrt{\frac{2h_0g(\rho_p - \rho_a)}{C_d\rho_a}}$$

(10)

已知式(10)中残膜密度为 $930\text{ kg}/\text{m}^3$ 、厚度为 0.01 mm 、标准条件下空气密度为 $1.293\text{ kg}/\text{m}^3$,但空气阻力系数的影响因素较多,特别是与表征流体流动情况的无量纲雷诺数有关,雷诺数 Re 计算公式为

$$Re = \frac{\rho_a vl}{\mu}$$

(11)

式中 l ——特征长度, m

残膜属于柔性材料,受气流作用力后其特征长度一直在变化,即气流流动状态难以确定,因此残膜空气阻力系数为变值。由于本文仅需通过理论计算残膜悬浮速度大致范围以判断是否适合采用风选法筛分白星花金龟幼虫混合物料,故参考文献[21],选取残膜空气阻力系数为 $\pi/16$,将其代入式(10)得到残膜理论悬浮速度为 $0.90\text{ m}/\text{s}$ 。

计算结果表明,白星花金龟幼虫混合物料各成分间的理论悬浮速度差异明显,各物料悬浮速度从大到小依次为白星花金龟幼虫、虫砂、残膜,同种物料不同等级尺寸理论悬浮速度较为接近,故适宜采用风选法分离白星花金龟幼虫混合物料。

1.2 白星花金龟幼虫混合物料悬浮速度试验

为验证各物料阻力系数分区判断是否准确,需对各物料进行悬浮速度台架试验。试验前,将随机选取的混合物料堆中的白星花金龟幼虫、虫砂、残膜按其尺寸等级不同进行人工筛分,并用电子秤对其进行称量以获得足量的试验样本。试验时,将尺寸等级相同的某种物料放入悬浮速度试验装置锥形观察管下方喂料口的阻尼网上,启动风机,通过调节变频器来控制风速,使物料在气流作用下上升并最终悬浮在锥形观察管的某一范围内而呈现动平衡状态,此时,记录变频器上频率数值,关闭风机,待被测物料沉降后将其取出,重新启动风机并将变频器调到所记录数值,使用风速测试仪分别在锥形观察管的3个测速孔进行风速测量,此时,3个测速孔所测数值平均值即为该尺寸等级物料的悬浮速度^[22]。试验装置如图2所示。

不同尺寸等级白星花金龟幼虫混合物料理论悬浮速度计算与试验结果如表2所示,对比发现幼虫与虫砂悬浮速度理论值与试验值大致相同,即验证

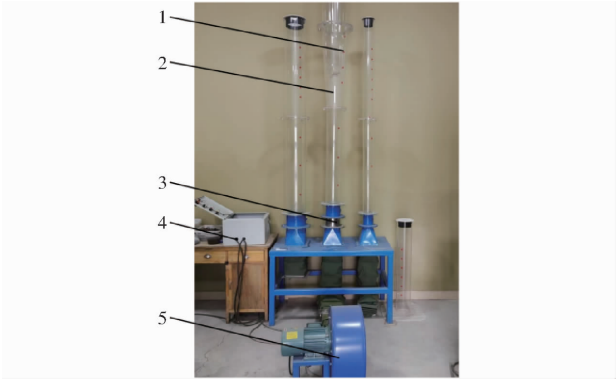


图2 悬浮速度试验装置

Fig.2 Suspension speed test device

1. 风速测试孔 2. 锥形观察管 3. 喂料口 4. 变频器 5. 风机

表2 物料悬浮速度理论值与试验值对比

Tab.2 Comparison between theory and experiment of material suspension speed

组分名称	粒径均值/ mm	面积均值/ mm ²	悬浮速度	悬浮速度
			理论值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	试验值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
白星花金 龟幼虫	15.18		11.97	12.97
	16.56		12.50	13.32
	17.93		13.01	14.12
虫砂	2.29		7.03	6.58
	2.41		7.21	7.07
	2.52		7.37	7.75
残膜		2 000	0.90	1.09
		6 000	0.90	1.56
		10 000	0.90	2.08

了前文理论计算两种物料阻力系数分区的正确性,可为后续流固耦合仿真提供数据基础;残膜悬浮速度理论值与试验值略有不同,归因于空气阻力系数的选择与实际有偏差,实际测量中残膜并非完全伸展状态。试验所测得的白星花金龟幼虫混合物料中白星花金龟幼虫、虫砂、残膜悬浮速度变化范围分别为 $12.97\sim14.12\text{ m}/\text{s}$ 、 $6.58\sim7.75\text{ m}/\text{s}$ 、 $1.09\sim2.08\text{ m}/\text{s}$ 。试验结果表明,白星花金龟幼虫、虫砂、残膜三者的悬浮速度变化范围差异明显,故适合选用风选法筛分白星花金龟幼虫混合物料,且初步确定合适的气流分离速度变化范围为 $2.08\sim6.58\text{ m}/\text{s}$ 。

2 整机结构与工作原理

根据上述内容中白星花金龟幼虫混合物料悬浮速度研究结果,设计如图3所示的白星花金龟幼虫转化残膜混合物分离装置,该装置主要由风扇、电机、变频器、螺旋输送机、滚筒筛、螺旋叶片、集膜箱等组成。滚筒筛通过拖轮支撑于支架上,并内设2条螺旋叶片;风扇与集膜箱分别位于滚筒筛前后两端;螺旋输送机置于滚筒筛圆孔段底部;变频

器可对风扇及滚筒筛转速分别进行调节。

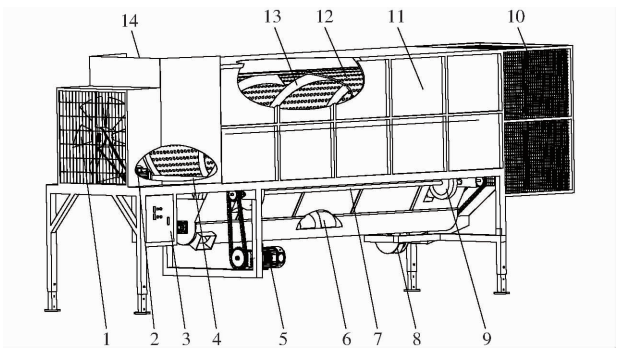


图 3 分离装置示意图

Fig. 3 Schematic of separation device

1. 风扇 2. 风扇电机 3. 变频器 4. 风向调节机构 5. 主电机
6. 螺旋输送机 7. 传动轴 8. 轴流风机 9. 托轮 10. 集膜箱
11. 支架 12. 滚筒筛 13. 螺旋叶片 14. 进料口

当混合物料从进料口进入后,风扇产生的气流开始接触混合物料。其中,残膜受气流的作用后直接被吹至滚筒筛尾端的集膜箱,虫砂与幼虫在螺旋叶片带动下不断向滚筒筛尾端移动,在移动过程中,体积较小的虫砂从圆孔筛眼中漏出,经螺旋输送机输送至虫砂出口,体积较大的白星花金龟幼虫则直接被螺旋叶片带至滚筒筛尾端的长圆孔处筛出。为防止残膜掉落时被幼虫、虫砂压覆及发酵后小部分残膜成团状以致难以被前端风扇气流吹出的现象发生,特在幼虫出料口前端加装轴流风机,其气流速度与风扇风速相同。从滚筒筛长圆孔处随幼虫一起掉落的小部分残膜受到轴流风机气流作用后可达到二次风选残膜的目的。

3 关键部件设计

3.1 滚筒筛结构及参数确定

为防止残膜挂在滚筒筛内壁以致难以被气流吹出,滚筒筛主体选用内壁光滑的冲孔型筛网,并且其分为两段,圆孔段用于筛虫砂,长圆孔段用于筛幼虫。其中,圆孔段内壁设有螺旋叶片,两端安装传动轨道,其结构如图 4 所示。

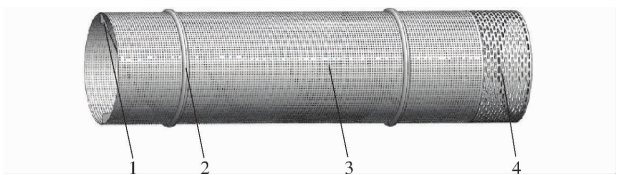


图 4 分段式滚筒筛结构示意图

Fig. 4 Structural diagram of segmented drum screen

1. 螺旋叶片 2. 传动轨道 3. 圆孔段 4. 长圆孔段

3.1.1 滚筒筛转速

滚筒筛转速对物料运动及受力状态有直接影响。当转速不断增大时,物料将从最初的滑落状

态转为抛落状态甚至紧贴筛面内壁的离心状态,当物料处于抛落状态时将产生瀑泻现象^[23],此时物料在滚筒筛内壁带动下内外层不断交叠,使筛分效果达到最佳。由于在前期试验时测得虫砂滑动摩擦角大于幼虫滑动摩擦角,即虫砂相较幼虫更易达到抛落状态,因此,为保证幼虫活性,对虫砂处于抛落状态时受力情况进行分析,在不考虑物料之间、物料与螺旋叶片之间作用力的情况下,建立虫砂在抛落状态下滑动与甩出两种平衡运动模型如图 5 所示。

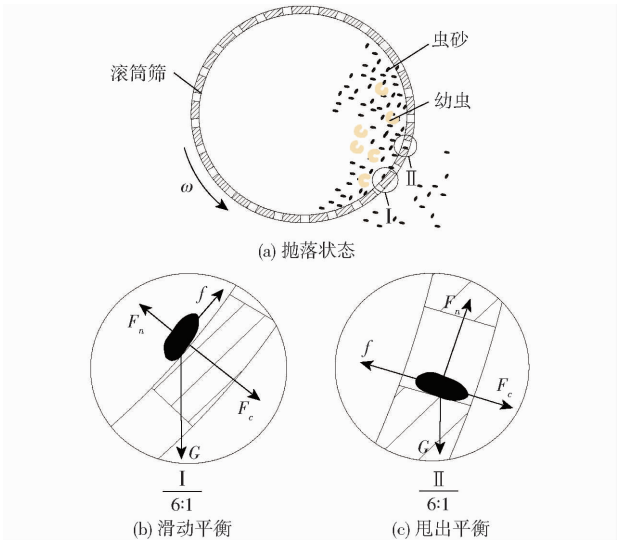


图 5 虫砂筛分过程受力分析

Fig. 5 Force analysis of worm sand screening process

滑动平衡时对虫砂受力分析可知

$$\begin{cases} G\sin\alpha - f = 0 \\ G = mg \\ f = \mu_1 F_n \\ \mu_1 = \tan\sigma \\ F_c + G\cos\alpha - F_n = 0 \\ F_c = m\omega^2 R \end{cases} \quad (12)$$

- 式中 f ——滚筒筛内壁对虫砂摩擦力, N
 F_n ——滚筒筛内壁对虫砂支持力, N
 μ_1 ——虫砂摩擦因数
 σ ——虫砂滑动摩擦角, ($^\circ$)
 F_c ——离心力, N
 α ——虫砂重力与离心力夹角, ($^\circ$)
 ω ——滚筒筛角速度, rad/s
 R ——滚筒筛半径, m

由式(12)可得

$$\omega = \sqrt{\frac{g\sin(\alpha - \sigma)}{R\sin\sigma}} \quad (13)$$

甩出平衡时对虫砂受力分析可知

$$\begin{cases} F_c + G\cos\alpha - f = 0 \\ F_c = m\omega^2 R \\ G = mg \\ f = \mu_1 F_n \\ \mu_1 = \tan\sigma \\ G\sin\alpha - F_n = 0 \\ F_n = G\sin\alpha \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可得

$$\omega = \sqrt{\frac{g\cos(\alpha + \sigma)}{R\cos\sigma}} \quad (15)$$

由于在相同角速度下甩出平衡角大于滑动平衡角,因此可根据虫砂滑动平衡时的受力分析确定滚筒筛转速^[24]。试验测得虫砂滑动摩擦角 σ 为 40° ,通常虫砂重力与离心力夹角 α 比滑动摩擦角大 $5^\circ \sim 10^\circ$ ^[25],本文取最小夹角 $\alpha_{\min} = 45^\circ$ 。为防止滚筒筛转速过快导致虫砂紧贴筛面内壁,滚筒筛转速需小于临界转速以满足虫砂的抛落状态,即最大夹角 $\alpha_{\max} = 90^\circ$ 。根据整机安装空间并参考《农业机械设计手册》^[26],取滚筒筛半径 R 为550 mm,将 $\alpha_{\min}$ 和 $\alpha_{\max}$ 分别代入式(13)得 $\omega_{\min} = 1.10 \text{ rad/s}$, $\omega_{\max} = 5.34 \text{ rad/s}$ 。根据角速度与转速换算公式

$$n = \frac{60\omega}{2\pi} \quad (16)$$

得滚筒筛转速范围为10.5~51.0 r/min。

3.1.2 滚筒筛长度

滚筒筛圆孔段有效筛分面积 S_1 满足

$$\begin{cases} S_1 = R(\alpha_{\max} - \alpha_{\min})L_1 \\ S_1 \geq \frac{Q_s}{q_s} \end{cases} \quad (17)$$

式中 L_1 ——滚筒筛圆孔段理论长度,m
 Q_s ——物料喂入量,kg/s
 q_s ——滚筒筛圆孔段单位面积筛分量,kg/(s·m²)

结合机具作业指标,取物料喂入量 Q_s 为1.3 kg/s,根据《农业机械设计手册》^[26]可知,滚筒筛圆孔段单位面积筛分量 q_s 为1.5~2.5 kg/(s·m²),由于虫砂含水率较高,故取滚筒筛圆孔段单位面积筛分量 q_s 为1.5 kg/(s·m²),将其代入式(17)可得滚筒筛圆孔段理论长度 $L_1 \geq 1.7 \text{ m}$ 。

由于在风扇产生的气流作用下会使虫砂在滚筒筛内水平移动一段距离,因此,滚筒筛圆孔段实际长度应为虫砂在气流作用下水平运动距离与滚筒筛圆孔段理论长度之和。对白星花金龟幼虫混合物料进行运动学分析,得到物料颗粒受力情况如图6所示。

结合式(1),并根据牛顿第二定律,分析图6几

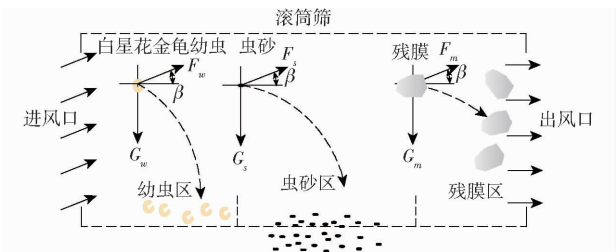


图6 物料在气流作用下受力分析

Fig. 6 Force analysis of materials under action of air flow

何关系,得出物料水平运动方程为

$$x = v t \cos\beta - \frac{m}{R} \ln \frac{m + C_d \rho_a A t v \cos\beta}{m} \quad (18)$$

式中 x ——物料水平运动距离,m
 t ——物料运动时间,s
 β ——气流倾角,取极限值 0°

参考前文所得气流速度变化范围、阻力系数与前期试验,根据式(18)可得虫砂水平运动最大距离 $x_{\max} = 2 \text{ m}$ 。则滚筒筛圆孔段实际长度 $L_2 \geq 3.7 \text{ m}$,为确保虫砂尽量完全筛出,滚筒筛圆孔段实际长度取 $L_2 = 4 \text{ m}$ 。

滚筒筛长圆孔段尾部设置的挡料环可阻挡未及时筛出的幼虫掉落至残膜出口,因此滚筒筛长圆孔段不必过长。通过前期预试验,取滚筒筛长圆孔段长度 $L_3 = 0.5 \text{ m}$,即得出滚筒筛总体长度 $L = 4.5 \text{ m}$ 。

3.1.3 滚筒筛筛孔

虫砂形状近似为椭圆柱体,实测粒径平均值为2.5 mm,长轴长度为4 mm,为提高筛分效率,选取圆孔孔径 d_0 为5 mm,为保证滚筒筛整体刚度,选取圆孔孔距 $c_1 = 2d_0$ 。伸展开的幼虫形状同样近似椭圆柱体,实测粒径平均值为12 mm,长轴长度可达40 mm,为提高筛分效率,并根据滚筒筛直径、长度合理布置长圆孔,选择长圆孔长度 $h = 66 \text{ mm}$,宽度 $d_3 = 16 \text{ mm}$,横向孔距 $k = 85 \text{ mm}$,纵向孔距 $y = 36 \text{ mm}$ 。由于筛分效率与筛面利用系数正相关,因此长圆孔排列方式选择筛面利用系数较高的同向交错排列,如图7所示。筛面利用系数 K_d 为

$$K_d = \frac{d_3 h - \left(1 - \frac{\pi}{4}\right) d_3^2}{y k} \quad (19)$$

计算得筛面利用系数 K_d 为0.33。

3.2 螺旋叶片结构及参数

当待筛分物料从喂料口进入后,白星花金龟幼虫及其虫砂在螺旋叶片作用下,沿滚筒筛轴线方向移动,移动过程中虫砂可透过圆孔段落入螺旋输送机内,幼虫则从长圆孔段排出。为提高物料的翻转搅拌效果,本文采用双头螺旋叶片。由于虫砂占比比较大,因此以虫砂作为分析对象。为确定螺旋叶片

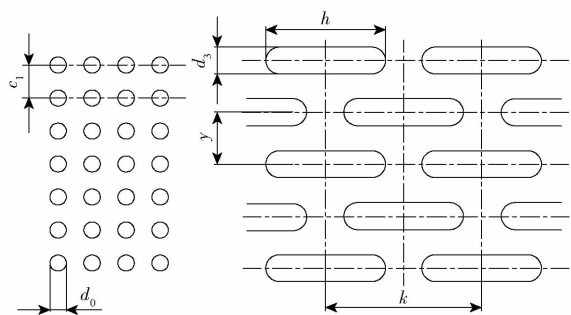


图 7 筛孔排布示意图

Fig. 7 Schematic of sieve hole arrangement

结构及工作参数,选择对虫砂沿滚筒筛轴向运移时的输送、筛分过程进行动力学与运动学分析,如图 8 所示。

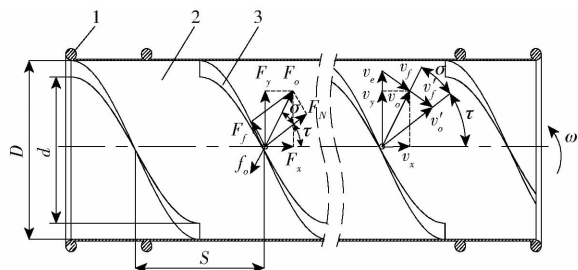


图 8 虫砂在螺旋叶片上受力与运动过程分析

Fig. 8 Analysis of force and movement process of frass on spiral blades

1. 传动轨道 2. 滚筒筛 3. 螺旋叶片

3.2.1 虫砂沿滚筒筛轴向动力学分析

由图 8 可知,虫砂所受螺旋叶片的合力 F_o 在摩擦力 F_f 的影响下产生了偏移,偏移角度等于摩擦角 σ ,并且合力可分解为轴向分力 F_x 和圆周分力 F_y ,计算式为

$$\begin{cases} F_x = F_o \cos(\sigma + \tau) \\ F_y = F_o \sin(\sigma + \tau) \\ \tau = \arctan \frac{S}{\pi D} \\ \sigma = \arctan \mu_1 \end{cases} \quad (20)$$

式中 τ ——螺旋叶片螺旋角, $(^\circ)$

S ——螺旋叶片螺距, m

D ——螺旋叶片外径, m

若使虫砂沿滚筒筛轴线方向运动,必须保证轴线方向上动力大于阻力,即满足

$$F_N \cos \tau \geq F_f \sin \tau + f_o \sin \left(\frac{\pi}{2} - \tau - \sigma \right) \quad (21)$$

式中 F_N ——螺旋叶片对虫砂法向推力, N

f_o ——滚筒筛对虫砂摩擦力, N

由式(21)可得

$$\begin{cases} F_N \cos \tau > F_f \sin \tau \\ F_f = \mu_1 F_N = F_N \tan \sigma \end{cases} \quad (22)$$

由式(22)可得

$$\cot \tau > \tan \sigma \quad (23)$$

由式(23)可得

$$\tau < \frac{\pi}{2} - \sigma \quad (24)$$

由前文可知虫砂滑动摩擦角 σ 为 40° ,可得螺旋叶片螺旋角 $\tau < 50^\circ$ 。

3.2.2 虫砂沿滚筒筛轴向运动学分析

由于螺旋叶片与虫砂间存在摩擦力,因此虫砂绝对运动速度 v_o' 的方向偏离法线一个滑动摩擦角 σ ,并可将其分解为虫砂的牵连速度 v_e 和无摩擦力时虫砂相对螺旋叶片的滑动速度 v_f' ;其合速度 v_o 可分解为沿轴向的分速度 v_x 与沿圆周的分速度 v_y ,即

$$\begin{cases} v_x = \frac{Sn(1 - \mu_1 \tan \tau) \cos^2 \tau}{60} \\ v_y = \frac{Sn(\mu_1 + \tan \tau) \cos^2 \tau}{60} \end{cases} \quad (25)$$

若使虫砂沿滚筒筛轴线方向运移,则轴向分速度大于 0,即满足

$$\begin{cases} v_x = \frac{Sn(1 - \mu_1 \tan \tau) \cos^2 \tau}{60} > 0 \\ \cos \tau = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{S}{\pi D} \right)^2}} \\ \tan \tau = \frac{S}{\pi D} \\ \mu_1 = \tan \sigma \end{cases} \quad (26)$$

由式(24)可得

$$\tan \tau < \tan \left(\frac{\pi}{2} - \sigma \right) \quad (27)$$

联立式(26)、(27)可得出螺旋叶片螺距应满足

$$S < \frac{\pi D}{\mu_1} \quad (28)$$

由于螺旋叶片焊接在滚筒筛内壁,故螺旋叶片外径 D 与滚筒筛直径相等,均为 1.1 m;根据式(28)可得螺旋叶片螺距 $S < 4.12$ m 即可满足物料输送条件。在物料具有最合理的速度分量并能克服轴向摩擦力的情况下,通常 S 取 $(0.8 \sim 1) D^{[27]}$,而本研究采用双头螺旋叶片,即 S 取 $(1.6 \sim 2) D$,为保证输送效率,最终选取螺旋叶片螺距为 1.8 m。

为避免产生堆积现象,螺旋叶片输送量应大于物料喂入量 Q_s ,螺旋叶片外径 D 与物料喂入量 Q_s 的关系为

$$Q_s \leq \frac{\pi(D^2 - d^2) \psi S n \rho C}{480} \quad (29)$$

式中 ψ ——物料填充系数,取 0.2

ρ ——虫砂幼虫混料密度,取 255 kg/m^3

C ——倾斜输送系数,取 0.8

代入式(29)计算得螺旋叶片内径 $d \leq 1.02\text{ m}$, 即螺旋叶片宽度需大于 4 cm 。

3.3 虫砂输送装置设计

为将从滚筒筛圆孔段中筛出的虫砂输送至机具外部,特在滚筒筛下端安装螺旋输送机。螺旋输送机主要由助流叶片、旋转中心轴、罩壳组成,由于工作强度不高,为满足经济性和轻量化要求,旋转中心轴设计为空心管状。为防止输送虫砂时产生堵塞,螺旋输送机喂入量应小于输送量。前文得物料喂入量 Q_s 为 1.3 kg/s ,在此假设极限工作情况,取螺旋输送机喂入量等于物料喂入量 Q_s ,转速计算式为

$$n_1 \geq \frac{900Q_s}{\pi\rho_f\psi_1D_1^2S_2} \tag{30}$$

式中 ρ_f ——虫砂堆积密度, kg/m^3
 ψ_1 ——虫砂填充系数,取 0.2
 D_1 ——螺旋公称直径, m
 S_2 ——螺旋输送机螺距, m
 n_1 ——螺旋输送机转速, r/min

查阅 JB/T 7679—2019,确定螺旋公称直径 D_1 为 0.4 m ,螺距 S_2 为 0.355 m ,代入式(30)得螺旋输送机转速 $n_1 \geq 35\text{ r/min}$ 时虫砂的输送效果较好。

4 基于 EDEM – Fluent 耦合的物料筛分仿真分析

通过对分离装置关键部件设计及参数分析,已初步确定滚筒筛转速与风扇风速范围,参考文献[28],滚筒筛倾角拟定为 $0^\circ \sim 8^\circ$ 。由于残膜进入滚筒筛后可能存在挂在螺旋叶片上以致无法被及时吹出的现象发生,因此特在分离装置上加装风向调节板以使气流产生倾角,从而便于残膜更好地定向排出。为确定合适的气流倾角,建立分离装置的 EDEM – Fluent 耦合仿真模型。

4.1 仿真模型与参数设置

4.1.1 颗粒模型

白星花金龟幼虫具有生物应激性,在实际输送及筛分状态下为蜷缩状态,故根据其实际尺寸,最终确定白星花金龟幼虫由 7 个半径为 5 mm 的基本球体连接组成;虫砂由 3 个半径为 1 mm 的基本球体连接组成;由于残膜在装置内部所占体积分数较小,为减小计算量,选择忽略残膜厚度对装置内部流场的影响,适当增加残膜填充颗粒直径的同时减小残膜密度,以保持残膜质量不变,为准确模拟残膜柔性特征,增加 Bonding V2 颗粒接触模型^[29]。3 种物料仿真模型如图 9 所示。

4.1.2 物料参数

根据前期试验和查阅文献[30]得到白星花金

龟幼虫转化残膜混合物后各物料物理特性参数与接触参数如表 3、4 所示。

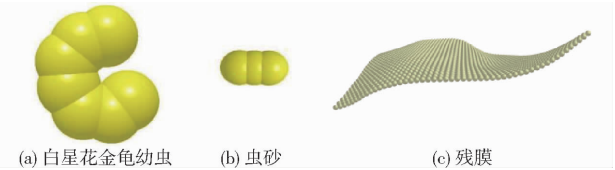


图 9 物料仿真模型

Fig. 9 Simulation models of materials

表 3 物料间接触参数

Tab. 3 Contact parameters between materials			
材料	碰撞恢复系数	静摩擦因数	动摩擦因数
幼虫-幼虫	0.185	0.500	0.400
幼虫-虫砂	0.250	0.600	0.500
幼虫-残膜	0.860	0.500	0.400
幼虫-壁面	0.223	0.325	0.435
虫砂-虫砂	0.350	0.550	0.226
虫砂-残膜	0.310	0.400	0.300
虫砂-壁面	0.387	0.625	0.167
残膜-残膜	0.000	0.520	0.430
残膜-壁面	0.200	0.500	0.220

表 4 物料物理特性参数

Tab. 4 Physical characteristic parameters of materials			
材料	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	泊松比	剪切模量/MPa
白星花金龟幼虫	412	0.30	11
虫砂	940	0.29	5
残膜	930	0.42	830
壁面(钢)	7.85×10^3	0.30	7.9×10^4

4.1.3 仿真参数设置

选择 EDEM 2022 和 Fluent 2022R1 进行耦合,由于虫砂具有一定湿度,易与残膜、幼虫产生黏附现象,而 Hertz – Mindlin with JKR 模型适用于含湿物料,因此在 EDEM 中选择 Hertz – Mindlin with JKR 为颗粒接触模型^[31]。由于本次气固耦合仿真试验主要用于确定合适的气流倾角,有无滚筒筛筛孔并不造成实际影响,因此为缩减仿真时间,选择忽略滚筒筛筛孔。将 Solidworks 前期建好的分离装置三维模型进行合理简化后导入 Workbench 中的 Fluent 模块抽取流体域,使用强制六面体划分网格的同时设置 INLET、OUTLET 和 WALL,网格划分完成后保存并导入 EDEM 中。共生成混合物料 1.3 kg (白星花金龟幼虫 0.130 kg 、虫砂 1.167 kg 、残膜 0.0026 kg),设置滚筒筛转速为 30.75 r/min ,滚筒筛倾角为 4° ,时间步长为 $2 \times 10^{-6}\text{ s}$,数据保存时间间隔为 0.01 s ,仿真总时间为 5 s 。

将保存的网格文件读入 Fluent 求解模块,气固耦合接口选用 DPM,通过前期计算得知 3 种物料阻力系数分区均为湍流区域,因此选择标准 $k - \varepsilon$ 湍流

模型进行瞬态计算,重力方向设置为 Z 轴负方向。通过前期单独进行的 Fluent 仿真可知,入口气流流速为 4.33 m/s 时,风扇转速为 500 r/min 。Fluent 求解器时间步长设为 EDEM 时间步长的 50 倍,即 $1\times 10^{-4}\text{ s}$,步长为 50 000 步。

4.2 仿真结果分析

根据前期所得滚筒筛半径与长度之比,选择气流倾角变化范围为 $0^{\circ}\sim 8^{\circ}$,气流倾角每变化 2° 进行一次仿真试验。单次筛分过程仿真模型如图 10 所示,试验结果如表 5 所示。对比 5 次仿真试验发现,当气流倾角为 6° 时叶片挂膜率最低,因此选择气流倾角为 6° 。

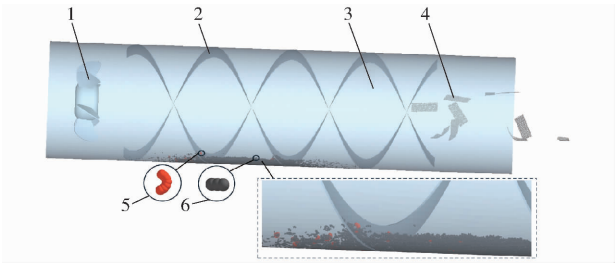


图 10 筛分过程仿真模型

Fig. 10 Screening process simulation model

1. 风扇 2. 螺旋叶片 3. 滚筒筛 4. 残膜 5. 白星花金龟幼虫 6. 虫砂

表 5 仿真试验结果
Tab. 5 Result of simulation test

试验序号	气流倾角/($^{\circ}$)	叶片挂膜率/%
1	0	8.5
2	2	6.7
3	4	5.2
4	6	2.6
5	8	4.3

5 试验

为进一步验证分段滚筒式气力协助白星花金龟幼虫转化混合物分离装置的作业效果,项目组于 2024 年 5 月在样机加工地河北省邢台市宁晋县地牛有限公司进行物料筛分试验,如图 11 所示。

5.1 单因素试验

为确定三因素三水平响应面试验各因素水平合理范围,先对滚筒筛转速、滚筒筛倾角、风扇风速进行单因素试验,并以残膜含杂率 Y_1 与虫砂含膜率 Y_2 为评价指标,以期得出各因素对筛分效果的影响规律,计算式为

$$Y_1 = \frac{M_1}{M_2} \times 100\%$$
 (31)

$$Y_2 = \frac{M_3}{M_4} \times 100\%$$
 (32)

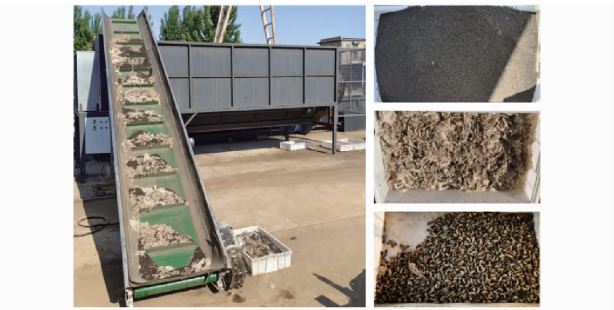


图 11 物料筛分试验

Fig. 11 Material screening test

式中 M_1 ——从集膜箱下方收集的杂质质量,kg
 M_2 ——集膜箱下方物料总质量,kg
 M_3 ——虫砂出料口处收集的残膜质量,kg
 M_4 ——虫砂出料口处物料总质量,kg

5.1.1 滚筒筛转速

分离装置正常工作时,滚筒筛转速过小会影响筛分效率,滚筒筛转速过大会使虫砂随幼虫一起从长圆孔段排出,影响筛分质量。因此,在滚筒筛倾角 4° 、风扇风速(即气流入口流速) 4.33 m/s 条件下,改变滚筒筛转速进行单因素试验,结果如图 12 所示。

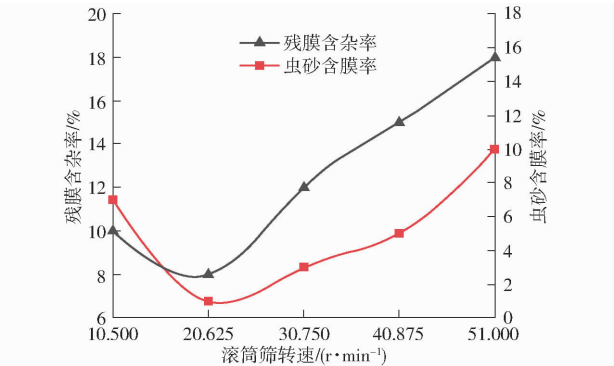


图 12 滚筒筛转速对筛分效果的影响

Fig. 12 Effect of drum screen speed on screening effect

从图 12 可知,滚筒筛转速对残膜含杂率和虫砂含膜率均有较大影响,随着滚筒筛转速增大,残膜含杂率和虫砂含膜率均呈先降低后升高的趋势,均在滚筒筛转速为 20.625 r/min 时达到最低,此时,残膜含杂率为 8.2% ,虫砂含膜率为 1.3% 。

5.1.2 滚筒筛倾角

在筛分过程中,滚筒筛倾角改变对物料运动状态有直接影响,倾角过大在导致白星花金龟幼虫筛分效率上升的同时也会导致虫砂来不及从滚筒筛圆孔段中筛出。在滚筒筛转速 30.75 r/min 、风扇风速 4.33 m/s 条件下,改变滚筒筛倾角进行单因素试验,结果如图 13 所示。

由图 13 可知,随着滚筒筛倾角增大,残膜含杂率递增,滚筒筛倾角在 $4^{\circ}\sim 6^{\circ}$ 之间残膜含杂率变化

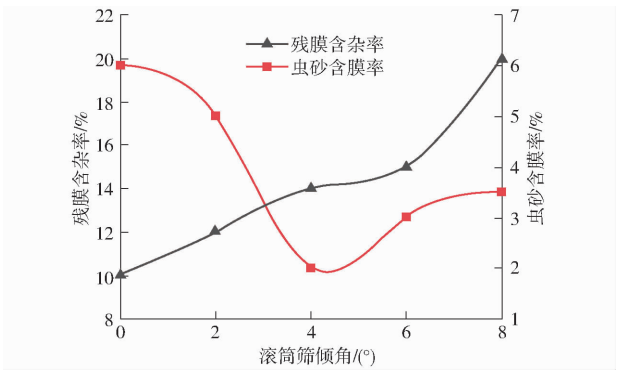


图 13 滚筒筛倾角对筛分效果的影响

Fig. 13 Effect of drum screen inclination angle on screening effect

平缓,超过 6° 时递增明显。虫砂含膜率在滚筒筛倾角为 4° 时最低,为 2.0% 。

5.1.3 风扇风速

在装置筛分时,风扇主要起到清选残膜的作用,风速过大会导致虫砂随残膜一起吹出,风速过小会使残膜堆积在滚筒筛长圆孔段尾端。在滚筒筛转速 30.75 r/min 、滚筒筛倾角 4° 条件下,改变风扇风速进行单因素试验,结果如图 14 所示。

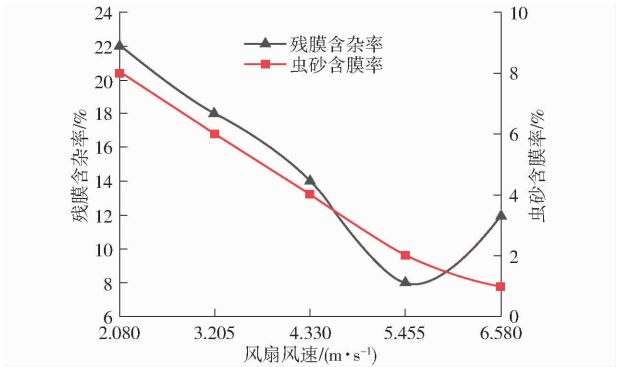


图 14 风扇风速对筛分效果的影响

Fig. 14 Effect of fan speed on screening effect

由图 14 可知,随着风扇风速不断增加,虫砂含膜率递减,残膜含杂率先降低后升高,在风扇风速为 5.455 m/s 时达到最低,为 8.2% 。

5.2 试验方案

为确定滚筒筛转速、滚筒筛倾角与风扇风速对分离装置筛分效率影响的最优参数组合,以残膜含杂率 Y_1 与虫砂含膜率 Y_2 作为评价指标,应用 Design-Expert 11 软件的 Box-Behken 模块对分离装置进行三因素三水平响应面试验,由 5.1 节确定试验因素编码如表 6 所示,试验方案与结果如表 7 所示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。

5.3 方差分析

利用 Design-Expert 11 软件对试验方案与结果进行方差分析和显著性检验,结果如表 8 所示。由表 8 可知,各试验因素对残膜含杂率 Y_1 和 Y_2 均有显

表 6 试验因素编码

Tab. 6 Test factors and codes

编码	因素		
	滚筒筛转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	滚筒筛倾角/ ($^{\circ}$)	风扇风速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
-1	10.500	2	4.330
0	20.625	4	5.455
1	30.750	6	6.580

表 7 试验方案与结果

Tab. 7 Test plan and result

试验 序号	因素			残膜含杂率 $Y_1/\%$	虫砂含膜率 $Y_2/\%$
	X_1	X_2	X_3		
1	-1	-1	0	10.20	5.80
2	0	0	0	8.90	1.70
3	0	-1	1	11.30	2.40
4	-1	0	-1	15.30	4.80
5	0	0	0	8.80	1.80
6	-1	0	1	13.20	5.40
7	1	0	-1	15.80	3.50
8	1	1	0	11.10	4.60
9	-1	1	0	10.80	5.80
10	0	1	1	11.70	2.40
11	0	0	0	8.70	1.50
12	0	0	0	8.70	1.60
13	1	-1	0	10.60	3.90
14	0	-1	-1	13.30	1.80
15	1	0	1	12.90	3.90
16	0	1	-1	14.30	2.60
17	0	0	0	8.80	1.60

著影响,且各试验因素对残膜含杂率影响顺序为风扇风速 X_3 、滚筒筛倾角 X_2 、滚筒筛转速 X_1 ;对虫砂含膜率影响顺序为滚筒筛转速 X_1 、滚筒筛倾角 X_2 、风扇风速 X_3 ;滚筒筛转速与风扇风速交互作用 X_1X_3 对残膜含杂率 Y_1 有极显著影响,滚筒筛倾角与风扇风速交互作用 X_2X_3 对残膜含杂率 Y_1 与虫砂含膜率 Y_2 均有显著影响,滚筒筛转速与滚筒筛倾角交互作用 X_1X_2 对虫砂含膜率 Y_2 有显著影响。

通过对试验结果进行回归分析,剔除不显著项,得到滚筒筛转速、滚筒筛倾角、风扇风速对残膜含杂率 Y_1 、虫砂含膜率 Y_2 影响的回归方程为

$$Y_1 = 8.83 + 0.11X_1 + 0.31X_2 - 1.20X_3 - 0.20X_1X_3 - 0.15X_2X_3 + 1.78X_1^2 + 3.75X_3^2 \quad (33)$$

$$Y_2 = 1.65 - 0.74X_1 + 0.19X_2 + 0.18X_3 + 0.18X_1X_2 - 0.20X_2X_3 + 2.74X_1^2 + 0.64X_2^2 \quad (34)$$

5.4 响应曲面分析

为了解各试验因素交互作用对残膜含杂率及虫砂含膜率的影响,应用 Design-Expert 11 软件分别绘制残膜含杂率及虫砂含膜率响应面图,如图 15 所示。

表 8 回归模型方差分析

Tab. 8 Regression model analysis of variance						
指标	方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
残膜含杂率 Y_1	模型	88.95	9	9.88	764.44	<0.000 1 **
	X_1	0.101 2	1	0.101 2	7.83	0.026 6 *
	X_2	0.781 3	1	0.781 3	60.43	0.000 1 **
	X_3	11.52	1	11.52	891.05	<0.000 1 **
	X_1X_2	0.002 5	1	0.002 5	0.193 4	0.673 4
	X_1X_3	0.160 0	1	0.160 0	12.38	0.009 8 **
	X_2X_3	0.090 0	1	0.090 0	6.96	0.033 5 *
	X_1^2	13.23	1	13.23	1 023.19	<0.000 1 **
	X_2^2	0.063 2	1	0.063 2	4.89	0.062 7
	X_3^2	59.13	1	59.13	4 573.72	<0.000 1 **
	残差	0.090 5	7	0.012 9		
	失拟	0.062 5	3	0.020 8	2.98	0.159 7
虫砂含膜率 Y_2	误差	0.028 0	4	0.007 0		
	总和	89.04	16			
	模型	39.63	9	4.40	281.50	<0.000 1 **
	X_1	4.35	1	4.35	278.16	<0.000 1 **
	X_2	0.281 2	1	0.281 2	17.98	0.003 8 **
	X_3	0.245 0	1	0.245 0	15.66	0.005 5 **
	X_1X_2	0.122 5	1	0.122 5	7.83	0.026 6 *
	X_1X_3	0.010 0	1	0.010 0	0.639 3	0.450 3
	X_2X_3	0.160 0	1	0.160 0	10.23	0.015 1 *
	X_1^2	31.67	1	31.67	2 024.48	<0.000 1 **
	X_2^2	1.74	1	1.74	111.11	<0.000 1 **
	X_3^2	0.001 3	1	0.001 3	0.082 4	0.782 3
	残差	0.109 5	7	0.015 6		
	失拟	0.057 5	3	0.019 2	1.47	0.348 4
	误差	0.052 0	4	0.013 0		
	总和	39.74	16			

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

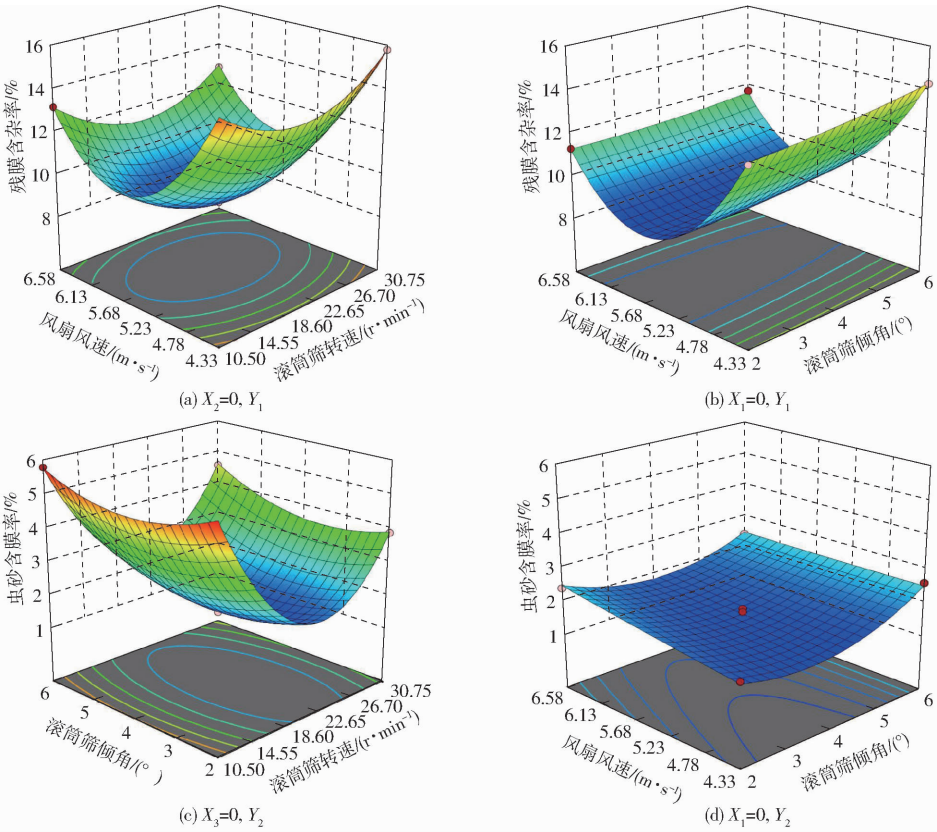


图 15 试验因素交互作用对指标影响的响应曲面

Fig. 15 Response surfaces of influence of experimental factor interaction on indicators

由图 15a、15b 可知,随着风扇风速增加,残膜含杂率呈先降低后升高趋势,在 5.68 m/s 附近达到最低值;残膜含杂率随着滚筒筛转速增加呈先降低后升高趋势,在 22.65 r/min 附近达到最低值;残膜含杂率随滚筒筛倾角的增大并无明显变化。由图 15c、15d 可知,随着滚筒筛倾角增加,虫砂含膜率呈先降低后升高趋势,在 4° 附近达到最低值;虫砂含膜率随着滚筒筛转速增加呈先降低后升高趋势,在 22.65 r/min 附近达到最低值;随着风扇风速增加,虫砂含膜率呈缓增趋势。

5.5 参数优化

为探寻分离装置最优工作参数,利用 Design-Expert 11 Optimization 模块对残膜含杂率和虫砂含膜率进行寻优处理,优化模型为

$$\begin{cases} \min Y_1 \\ \min Y_2 \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (35)$$

将相关参数代入软件,得试验因素最佳参数组合为:滚筒筛转速 21.79 r/min、滚筒筛倾角 3.58°、风扇风速 5.52 m/s,此时残膜含杂率和虫砂含膜率分别为 8.70% 和 1.59%。

5.6 试验验证

为验证优化结果的可靠性,根据优化后的试验参数进行物料筛分试验。为操作方便,进行物料筛分试验时圆整最优参数组合为:滚筒筛转速 22 r/min、滚筒筛倾角 4°、风扇风速 5.5 m/s;考虑存在随机误差,共进行 5 次物料筛分试验取平均值作为实际试验结果,理论优化结果以及试验验证结果如表 9 所示。由表 9 可知,残膜含杂率、虫砂含膜率理论值与试验值之间相对误差均小于 5%,优化结果可靠。

表 9 理论优化与试验验证结果对比

Tab.9 Comparison of theoretical optimization and verification test results

项目	残膜含杂率 Y_1	虫砂含膜率 Y_2
理论优化值	8.70	1.59
试验值	8.96	1.52
相对误差	2.9	4.6

6 结论

(1)针对白星花金龟幼虫转化残膜混合物物料

筛分过程中残膜、幼虫及虫砂分离不彻底导致含杂率较高的问题,设计了一种分段滚筒式气力协助白星花金龟幼虫转化残膜混合物分离装置,通过理论分析与 EDEM-Fluent 耦合的方法,确定了其关键零部件的主要结构与工作参数。

(2)以滚筒筛转速、滚筒筛倾角、风扇风速为试验因素,残膜含杂率、虫砂含膜率为评价指标开展单因素试验、三因素三水平响应面试验,建立了残膜含杂率、虫砂含膜率与各显著因素间的回归模型,利用回归模型进行参数寻优,结果表明:当滚筒筛转速为 21.79 r/min、滚筒筛倾角为 3.58°、风扇风速为 5.52 m/s 时残膜含杂率、虫砂含膜率最低,分别为 8.70% 与 1.59%。

(3)物料筛分验证试验表明:在最优参数组合下的风选型滚筒筛式分离装置的平均残膜含杂率为 8.96%,平均虫砂含膜率为 1.52%,二者与理论优化值相对误差均小于 5%,该结果验证了本文理论计算与仿真模拟数值的准确性,所设计机具作业性能满足相关行业标准要求。

参 考 文 献

[1] 张佳,胥俊,黄勇. 机收残膜混合物膜杂分离机械的研究现状[J]. 现代农机, 2022(3): 119-121.
ZHANG Jia, XU Jun, HUANG Yong. Research status of membrane and impurity separation machinery for mechanical collection of residual membrane mixtures[J]. Modern Agricultural Machinery, 2022(3): 119-121. (in Chinese)

[2] 徐业山. 虫菌复合技术分离棉田残膜回收混合物研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2023.
XU Yeshan. Study on the separation of recycled plastic film residual mixtures from cotton field by the composite technology of insect combined with the decomposing fungus[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[3] 伊宏峰,王毅,马延旭,等. 白星花金龟幼虫生物转化玉米秸秆营养物质的研究[J]. 特种经济动植物, 2021, 24(12): 3-5.
YI Hongfeng, WANG Yi, MA Yanxu, et al. Research on biotransformation of corn straw nutrients by *Potosia brevitarsis* larva[J]. Special Economic Animals and Plants, 2021, 24(12): 3-5. (in Chinese)

[4] 黄婉秋,石冬冬,蔡红英,等. 白星花金龟幼虫肠道中纤维素降解菌的筛选及其全基因组分析[J]. 中国农业科技导报, 2021, 23(6): 51-58.
HUANG Wanqiu, SHI Dongdong, CAI Hongying, et al. Identification and genome analysis of a cellulose degrading strain from the intestinal tract of *Protaetia brevitarsis* larva[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2021, 23(6): 51-58. (in Chinese)

[5] 杨柳,张广杰,徐韬,等. 白星花金龟幼虫对不同农业有机废弃物的转化力研究[J]. 新疆农业大学学报, 2019, 42(3): 189-193.
YANG Liu, ZHANG Guangjie, XU Tao, et al. Study on the conversion capacity of different agricultural organic wastes by larvae of *Potosia brevitarsis* lewis[J]. Journal of Xinjiang Agricultural University, 2019, 42(3): 189-193. (in Chinese)

[6] 张胜伟,张瑞雨,曹庆秋,等. 油莎豆收获机双层滚筒筛式果杂分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(3): 148-157.
ZHANG Shengwei, ZHANG Ruiyu, CAO Qingqiu, et al. Design and experiment of double-deck roller sieve type fruit impurity separation device for tiger nut harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(3): 148-157. (in Chinese)

[7] 连国党,魏鑫鑫,马丽娜,等. 轴流螺旋滚筒式食用向日葵脱粒装置设计与试验[J]. 农业工程学报, 2022, 38(17): 42-51.
LIAN Guodang, WEI Xinxin, MA Li'na, et al. Design and experiments of the axial-flow spiral drum threshing device for the edible sunflower[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(17): 42-51. (in Chinese)

[8] 贺磊,国瑞坤,杨先海,等. 滚筒式蚯蚓分选装置研究与试验[J]. 家畜生态学报, 2021, 42(8): 74-79.
HE Lei, GUO Ruikun, YANG Xianhai, et al. Research and test of drum-type earthworm sorting device[J]. Acta Ecologiae Animals Domastici, 2021, 42(8): 74-79. (in Chinese)

- [9] 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)
- [10] 康宏彬,刘铭,王雷,等. 基于 EDEM 的马铃薯收获机分离输送装置仿真分析[J]. 农机化研究, 2022, 44(5): 1–8, 16.
KANG Hongbin, LIU Ming, WANG Lei, et al. Simulation analysis of separation and conveying device of potato harvester based on EDEM[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(5): 1–8, 16. (in Chinese)
- [11] AZHARUDDIN K, MIR S, NARASIMHAN M M, et al. Design and fabrication of sunflower seed extracting machine[J]. International Journal of Latest Technology in Engineering, Management & Applied Science (IJLTEMAS), 2016, 5(6): 90–97.
- [12] MORSY H, ASHR A, KFRAWY A. Development and performance evaluation of a rubbing thresher for sunflower crop[J]. Journal of Soil Sciences and Agricultural Engineering, 2019, 10(1): 61–67.
- [13] WANG J W, LI Z W, HUSSAIN S, et al. Design and threshing outputs study of internal and external rotary roller buckwheat thresher[J]. INMATEH Agricultural Engineering, 2020, 60(1): 173–182.
- [14] 王学农,边博,吐鲁洪·吐尔迪,等. 巴旦木物料壳仁风选装置试验及参数优化[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 299–306.
WANG Xuenong, BIAN Bo, TURHONG Turdi, et al. Experiment and parameter optimization of almond shell kernel air separation device[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(12): 299–306. (in Chinese)
- [15] 刘霞,杨先海,李倩. 基于 Fluent 废塑料薄膜旋风分离过程的研究[J]. 工业安全与环保, 2016, 42(1): 38–41.
LIU Xia, YANG Xianhai, LI Qian. Research on waste plastic membrane separation in the cyclone based on Fluent[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2016, 42(1): 38–41. (in Chinese)
- [16] 马秋成,卢安舸,高连兴,等. 莲子物料空气动力学特性与壳仁分离装置试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 297–303.
MA Qiucheng, LU Ange, GAO Lianxing, et al. Aerodynamic characteristics of lotus seed mixtures and test on pneumatic separating device for lotus seed kernel and contaminants[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(6): 297–303. (in Chinese)
- [17] 杨伦,谢一华. 气力输送工程[M]. 北京:机械工业出版社, 2006.
- [18] 温翔宇,贾洪雷,张胜伟,等. 基于 EDEM–Fluent 耦合的颗粒肥料悬浮速度测定试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(3): 69–77.
WEN Xiangyu, JIA Honglei, ZHANG Shengwei, et al. Test of suspension velocity of granular fertilizer based on EDEM–Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(3): 69–77. (in Chinese)
- [19] 陈今朝,宋强. 风力分选垃圾技术的探讨[J]. 中国资源综合利用, 2009, 27(3): 26–27.
CHEN Jinchao, SONG Qiang. Discussion on wind power waste sorting technology[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2009, 27(3): 26–27. (in Chinese)
- [20] 靳伟,张学军,丁幼春,等. 基于 EDEM–Fluent 的残膜与杂质悬浮分离仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(4): 89–98.
JIN Wei, ZHANG Xuejun, DING Youchun, et al. Experiment on suspension separation of residual film and impurity based on EDEM–Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(4): 89–98. (in Chinese)
- [21] 刘红,杨先海,黄朋涛,等. 废旧塑料薄膜混合物风选参数研究[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2012, 26(3): 60–63.
LIU Hong, YANG Xianhai, HUANG Pengtao, et al. Study on separation parameters of waste plastic membrane mixture[J]. Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition), 2012, 26(3): 60–63. (in Chinese)
- [22] 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)
- [23] 袁佳诚,杨佳,万星宇,等. 油菜联合收获机滚筒筛式复清装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 99–108.
YUAN Jiacheng, YANG Jia, WAN Xingyu, et al. Design and experiment of cylinder sieve type re-cleaning device for rape combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 99–108. (in Chinese)
- [24] 王升升,陈盼,卢梦晴,等. 大白菜种子收获分离清选装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊 2): 181–190.
WANG Shengsheng, CHEN Pan, LU Mengqing, et al. Design and experiment of separation and cleaning device for Chinese cabbage seeds harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 181–190. (in Chinese)
- [25] 阚建文,何芳,汪裕安. 圆筒筛筛分的过筛率及其影响因素[J]. 农业机械学报, 1995, 26(2): 63–68.
ZHA Jianwen, HE Fang, WANG Yu'an. Passage rate factor and effects of parameter in screening of cylinder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1995, 26(2): 63–68. (in Chinese)
- [26] 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.
- [27] 石鑫,牛长河,王学农,等. 滚筒筛式废旧地膜与杂质风选装置设计[J]. 农业工程学报, 2017, 33(18): 19–26.
SHI Xin, NIU Changhe, WANG Xuenong, et al. Design of roller sieve waste plastic film and trash winnowing machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(18): 19–26. (in Chinese)

SONG Yuepeng, ZHANG Shuai, LI Tianhua, et al. Design and numerical simulation analysis of orchard fertilizer mixer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 181 – 188. (in Chinese)

[29] 冯静安, 唐小琦, 王卫兵, 等. 基于网格无关性与时间独立性的数值模拟可靠性的验证方法[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2017, 35(1): 52 – 56.

FENG Jing'an, TANG Xiaoqi, WANG Weibing, et al. Reliability verification method of numerical simulaion based on grid independence and time independence[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2017, 35(1): 52 – 56. (in Chinese)

[30] 高雄发, 郜聪, 张德胜, 等. 基于 CFD – DEM 的旋流泵混合颗粒固液两相流研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 163 – 170, 248.

GAO Xiongfa, GAO Cong, ZHANG Desheng, et al. Solid-liquid two-phase flow of mixed particles in vortex pump based on CFD – DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 163 – 170, 248. (in Chinese)

[31] MOROVATI K, HOMER C, TIAN F, et al. Opening configuration design effects on pooled stepped chutes[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 147(9): 06021011.

[32] YUE X, SHI Y. Flow characteristics analysis of a new combination agitator based on CFD[J]. Academic Journal of Science and Technology, 2023, 5(1): 120 – 125.

[33] MITTAK G, KIKUGAWA R I. Computational fluid dynamics simulation of a stirred tank reactor[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 46: 11015 – 11019.

[34] 李挺, 贾卓泰, 张庆华, 等. 几种单层桨搅拌槽内宏观混合特性的比较[J]. 化工学报, 2019, 70(1): 32 – 38.

LI Ting, JIA Zhuotai, ZHANG Qinghua, et al. Comparison of macro-mixing charateristics of a stirred tank with different impellers[J]. Chinese Journal of Chemical Engineering, 2019, 70(1): 32 – 38. (in Chinese)

[35] LIU Y, WACHEMO A C, YUAN H R, et al. Anaerobic digestion performance and microbial community structure of corn stover in three-stage continuously stirred tank reactors[J]. Bioresource Technology, 2019, 287: 121339.

[36] LI L, WANG K, ZHAO Q, et al. A critical review of experimental and CFD techniques to characterize the mixing performance of anaerobic digesters for biogas production[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/technology, 2022, 21(3): 665 – 689.

(上接第 341 页)

[28] 石鑫, 杨豫新, 牛长河, 等. 基于 Fluent 分析的棉田废地膜秸秆分离装置设计[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(4): 1062 – 1071.

SHI Xin, YANG Yuxin, NIU Changhe, et al. Design of cotton field waste mulch straw separation device based on Fluent analysis[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2023, 39(4): 1062 – 1071. (in Chinese)

[29] 解臣硕. 滚筒筛式膜杂风选机筛孔清堵装置理论与试验[D]. 泰安: 山东农业大学, 2023.

XIE Chenshuo. Theoretical research and experiment on the screen hole cleaning device of the drum screen membrane air separator[D]. Taian: Shandong Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[30] 靳伟, 丁幼春, 农峰, 等. 抖动链齿杆式残膜-土壤-秸秆挖掘与输送装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(11): 71 – 82.

JIN Wei, DING Youchun, NONG Feng, et al. Design and test of excavating and conveying device with vibrating chain tooth and bar for residual film – soil – straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(11): 71 – 82. (in Chinese)

[31] 朱新华, 伏胜康, 李旭东, 等. 不同含水率羊粪离散元参数通用标定方法研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(8): 34 – 41.

ZHU Xinhua, FU Shengkang, LI Xudong, et al. General method for discrete element parameters calibration of goat manure with different moisture contents[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 34 – 41. (in Chinese)