

随动式残膜回收螺旋清杂装置设计与试验

蒋德莉¹ 陈学庚^{1,2} 颜利民¹ 莫毅松³ 杨松梅⁴

(1. 石河子大学机械电气工程学院, 石河子 832003; 2. 农业农村部西北农业装备重点实验室, 石河子 832003;
3. 常州汉森机械有限公司, 常州 213034; 4. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022)

摘要: 针对目前残膜回收含杂率高的问题, 根据随动式残膜回收秸秆粉碎联合作业机工作原理, 提出了一种螺旋清杂装置。阐述了该装置的结构组成和工作原理, 对其关键部件双向螺旋输送机进行了分析和参数设计。利用 EDEM 软件建立了棉秆-土壤-螺旋清杂装置的三维离散元模型, 模拟仿真了棉秆和土壤混合颗粒的清理输送过程, 以螺旋清杂装置结构参数螺距系数、螺旋叶片直径和出料口间隙为试验因素, 以平均颗粒速度、平均纵向颗粒速度、质量流量及旋转轴总力矩为试验指标进行正交仿真试验, 分析了 3 个试验因素对各项指标影响的显著性及主次顺序, 试验结果显示螺旋清杂装置最优参数组合为: 螺距 200 mm, 螺旋叶片直径 200 mm, 出料口直径 220 mm。在该参数组合下制作螺旋清杂装置, 与随动式残膜回收秸秆粉碎联合作业机进行装配, 并进行了性能试验, 结果显示清杂装置清理棉秆、土壤等杂质效果符合设计要求, 回收残膜平均膜杂分离率为 89.51%。

关键词: 残膜回收机; 随动式; 螺旋清杂装置

中图分类号: S223.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)04-0137-09

Design and Experiment on Spiral Impurity Cleaning Device for Profile Modeling Residual Plastic Film Collector

JIANG Deli¹ CHEN Xuegeng^{1,2} YAN Limin¹ MO Yisong³ YANG Songmei⁴

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Shihezi University, Shihezi 832003, China
2. Key Laboratory of Northwest Agricultural Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shihezi 832003, China
3. Changzhou Han-Sun Machinery Co., Ltd., Changzhou 213034, China
4. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: As a kind of recyclable material, the residual film can be recycled and the pollution can be reduced only by separating the residual film from the impurity. However, the residual film, cotton core, cotton rod and other impurities after mechanical recovery are entangled seriously. So it is difficult to separate them, even to make use of resources. Direct incineration or centralized stacking of recovered residual film results in great waste of resources and serious secondary pollution. In order to solve the problem of high impurity content in waste film recovery, a spiral impurity cleaning device was put forward according to the working principle of the profile mode residual film collecting straw crushing combined machine. The structure and working principle of the spiral impurity cleaning device were introduced. The key parts of the device were analyzed and the parameters were designed. The three-dimensional discrete element model of cotton rod, soil and spiral impurity cleaning device was established by using EDEM software. The cleaning and conveying process of cotton rod and soil mixed particles was simulated. Taking the structure parameter pitch, the diameter of helical blade and outlet clearance of the spiral impurity cleaning device as test variables, orthogonal simulation experiments were carried out with mean particle velocity, average longitudinal particle velocity, mass flow rate and total helical axis torque as dependent variables. The influence of three test factors on each index was analyzed, and the order of primary and secondary factors was analyzed. The test results showed that the optimum parameter combination of the spiral impurity cleaning device was as follows: screw pitch was 200 mm, screw blade

收稿日期: 2018-09-26 修回日期: 2018-11-22
基金项目: 农业部公益性行业科研专项(201503105)
作者简介: 蒋德莉(1990—),女,研究实习员,主要从事农业机械设计及理论研究,E-mail: jdl490473814@163.com
通信作者: 陈学庚(1947—),男,中国工程院院士,研究员,主要从事棉花生产机械化和残膜污染治理研究,E-mail: chenxg130@sina.com

diameter was 200 mm, and outlet diameter was 220 mm. Under the combination of these parameters, the device was made and assembled with the profile mode residual film recovery straw pulverizing machine. A performance test was carried out in the cotton field. The results showed that the cleaning effect of cotton rod and soil by the equipment was in accordance with the design requirements, and residual film and impurity separation rate was 89. 51% .

Key words: residual film collector; follow up mode; spiral impurity cleaning device

0 引言

地膜覆盖栽培技术因具有显著的增温保墒、防病抗虫、抑制杂草,促进作物根系发育等优点,已成为棉花生产的主要种植模式,目前新疆棉田铺膜率达 100%^[1-2]。然而,地膜覆盖种植技术也给自然环境和农业生产可持续发展带来了一系列问题,如地膜残留导致的“白色污染”等。残膜回收是当前农业健康可持续发展的首要任务之一^[3]。传统的人工捡拾回收劳动强度大、生产效率低、回收率低,机械化残膜回收已成为必然趋势。

国内使用地膜厚度小,回收时残膜拉伸强度低、膜面破损严重,在机械化回收过程中膜杂分离困难^[3-4]。而残膜作为一种可循环利用材料,只有将残膜和杂质分离开来,才能实现残膜的回收利用,减少污染。传统用人工挑拣和洗膜的方式分离膜杂,或残膜回收后再利用装置对棉秆、残膜等混合物进行分离,工作强度大、效率低,无法实现大规模作业。机械化残膜回收过程中,主要通过重力和振动实现棉秆、土壤等杂质与地膜分离,杂质处于地膜上表面,分离较难,且分离后的杂质掉落地面,对后续残膜回收造成二次污染^[5-6]。因此急需开发一种清杂装置,在残膜回收作业中完成膜杂分离,提高作业效率。

为此,课题组设计了一种随动式残膜回收秸秆粉碎联合作业机,地膜捡拾过程中将地膜翻转 180°,在振动条件下实现膜面上的秸秆、土壤等杂质与地膜分离,且设计螺旋清杂装置,将分离后的杂质输送到机具两侧,避免杂质二次污染后续残膜回收。螺旋清杂装置的排杂效果与稳定性,直接影响随动式残膜回收秸秆粉碎联合作业机的工作稳定性。对螺旋输送装置的研究主要集中在结构和运动参数优化方面,开展此类研究的有:MOYSEY 等^[7]基于离散元分析了单螺旋挤出机的颗粒在螺杆上横向和纵向速度分布;刘师多等^[8]研究了玉米果穗螺旋摩擦输送器的叶片高度、导向侧板位置角、导向侧板倾角、升运角和转速等对玉米果穗输送性能的影响;戚江涛等^[9]基于 EDEM 对双螺旋奶牛饲喂装置给料性能进行了分析与试验,研究了 40 mm 和 70 mm 螺旋输送器不同转速(80、100、120 r/min)的给料稳定性。本文在以上研究基础上,利用离散元方法对螺

旋清杂装置排杂过程进行模拟仿真,探究清杂装置不同结构参数对杂质输送稳定性的影响,得到清杂装置最优参数组合,为残膜回收清杂装置设计提供合理的依据。

1 残膜回收工作原理与螺旋清杂装置结构

1.1 残膜回收工作原理

随动式残膜回收秸秆粉碎联合作业机地膜捡拾输送结构如图 1 所示,主要由起膜装置、地膜捡拾链排、驱动滚筒、螺旋清杂装置、振动装置和脱膜装置等组成,前端与棉秆粉碎机连接。作业时,棉秆粉碎机先将棉秆粉碎,由秸秆粉碎机的螺旋输送装置将粉碎后的秸秆输送到机具两侧,再由其后连接的地膜回收机将地膜捡拾回收。地膜回收作业时,起膜装置在重力和弹簧压力作用下随地仿形,且起膜齿始终置于土壤中,机具前进时,起膜齿将紧贴地表的地膜起松,地膜捡拾链排上的捡拾钉齿扎入土壤中,将地膜挑起,在动力带动下转动,挑起的地膜随链排运动向上运输(箭头方向),经脱膜装置完成地膜脱落。捡拾钉齿将地膜挑起的过程中,地膜完成了 180°翻转。

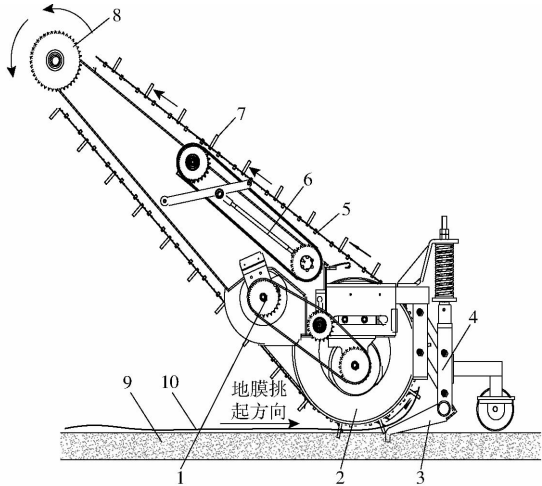


图 1 地膜捡拾输送结构示意图

Fig.1 Schematic of collecting and transporting structure of plastic film

- 1. 螺旋清杂装置 2. 驱动滚筒 3. 起膜齿 4. 起膜装置 5. 地膜捡拾链排 6. 振动装置 7. 捡拾钉齿 8. 脱膜装置 9. 土壤 10. 地膜

1.2 螺旋清杂装置结构

螺旋清杂装置主要由前后落杂导板、双向螺旋

输送机、轴承支撑座和支架等组成,其结构示意图如图 2 所示。地膜完成捡拾向上输送过程中,曲柄摇杆结构的振动装置击打地膜捡拾链排,膜面上附着的棉秆、土壤等杂质在振动作用下落入螺旋清杂装置中,双向螺旋输送机将棉秆、土壤等杂质输送至机具两侧完成清理工作。

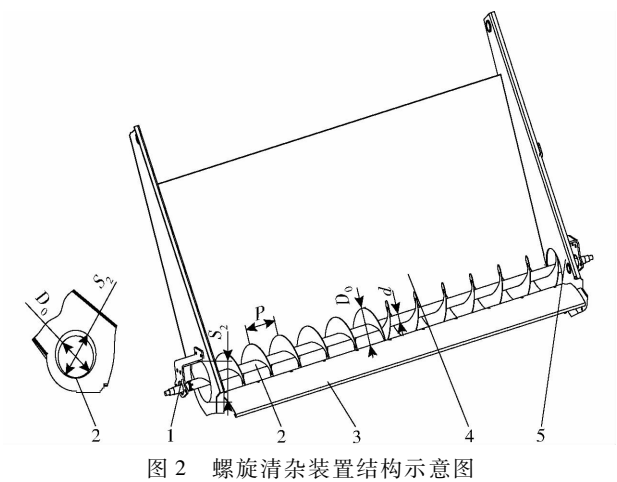


图 2 螺旋清杂装置结构示意图

Fig. 2 Structure diagram of screw cleaning device

1. 轴承支撑座 2. 双向螺旋输送机 3. 后落杂导板 4. 前落杂导板 5. 支架

2 螺旋清杂装置主要参数确定

2.1 螺旋叶片直径

螺旋叶片是双向螺旋输送器的主要工件,其型式有满面式、带式、月牙式和锯齿式,根据输送杂质的物理特性^[10],选用满面式螺旋叶片。此种结构产生的推送力大,生产率高。螺旋叶片直径根据螺旋输送机生产能力、输送物料类型、结构和布置形式等确定为^[10]

$$D_0 \geq K \sqrt[2.5]{\frac{Q}{\gamma \lambda \psi}} \times 1\,000 \tag{1}$$

式中 D_0 ——螺旋叶片直径,mm
 K ——物料综合系数,取值 0.045
 Q ——输送能力,t/h
 γ ——倾斜输送时的修正系数
 λ ——物料松散密度,t/m³
 ψ ——物料填充度,取值 0.35

假设棉秆粉碎后全部随地膜捡拾进入清杂装置,则输送能力 Q 为 13 t/h(根据棉秆株行距、高度、密度和作业速度等计算);该输送装置为水平输送, γ 取值 1; λ 与原料的种类、湿度、切料的长度等多种因素有关^[11],取值 1.1 t/m³。将各值代入式(1),计算可得: $D_0 \geq 184$ mm,设计初值 $D_0 = 200$ mm。

2.2 螺距

螺距不仅决定螺旋的升角,也决定物料运行的

滑移面,所以螺距的大小直接影响着物料输送过程,计算式通常为

$$P = K_1 D_0 \tag{2}$$

式中 P ——螺距,mm
 K_1 ——螺距系数

对于标准的螺旋输送装置^[11],通常 K_1 取 0.8 ~ 1.0,当倾斜布置或输送物料流动性较差时 $K_1 \leq 0.8$ 。土壤和棉秆流动性较好,取 $K_1 = 0.85$,则双向螺旋输送机叶片螺距初始值取 170 mm。

2.3 出料口间隙

螺旋清杂装置在双向螺旋输送器的推动下向机具两侧清理输送棉秆和土壤等杂质,当杂质输送至两端时易堆积堵塞,支架出料口尺寸 S_2 影响着杂质输送堆积程度。螺旋叶片与支架底部间隙设计为 4 mm,出料口的尺寸影响着支架出口上部与螺旋叶片间隙,间隙大有利于棉秆的排出,但间隙过大不仅不会增加棉秆的排出速度且会降低支架强度。故需找到适合棉秆排出的合理值,根据棉秆直径和要求棉秆在螺旋输送机两端具有良好的通过性,出料口间隙取值为 30 mm。

3 螺旋清杂过程仿真与分析

3.1 物理模型建立

接触模型是离散元法的重要基础,其实质是准静态下颗粒固体的接触力学弹塑性分析结果。参考文献[12-15],在仿真中设定颗粒与颗粒之间、颗粒与几何体模型之间为无滑动的 Hertz - Mindlin 接触模型。为加快计算,简化螺旋清杂装置的轴承座、安装孔、螺栓等部分,利用 SolidWorks 软件对螺旋清杂装置进行三维建模,另存为 igs 格式后导入 EDEM 软件几何体模块中,如图 3a,仿真重力加速度为 9.81 m/s²,模型中各部件的材料选择为 steel 属性。设置土壤颗粒半径为 5 mm^[15-17],仿真模型如图 3b,根据粉碎后棉秆物理特性^[18-19],在 EDEM 仿真中将棉秆物料近似成直径 10 mm、长约 150 mm 圆柱体,建成的棉秆离散元模型如图 3c 所示。

3.2 仿真参数设定

在仿真过程中,材料物理属性的合理确定是保证仿真结果的重要基础,参考文献[20-22],棉秆、土壤和几何体等材料属性设置如表 1。在清杂装置正上方设置颗粒生成平面,属性虚拟,生成位置随机。颗粒速度同地膜捡拾链排输送速度,分解到水平和纵向两个方向,则分别为

$$\begin{cases} v_x = v_m \cos \theta \\ v_y = v_m \sin \theta \end{cases} \tag{3}$$

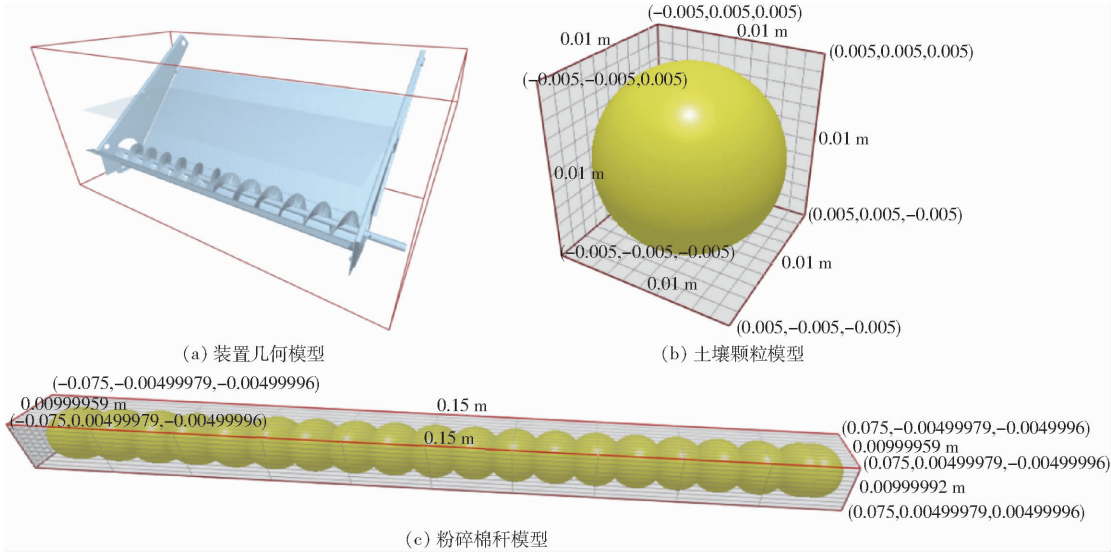


图 3 几何模型与颗粒模型

Fig. 3 Geometric model and particle model

式中 v_x ——地膜捡拾链排水平分速度,km/h
 v_m ——地膜捡拾链排合速度,km/h
 θ ——地膜捡拾链排与水平方向夹角,为 34°
 v_y ——地膜捡拾链排纵向分速度,km/h

表 1 材料属性
Tab.1 Material attributes

参数	数值	参数	数值
棉秆密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	120	棉秆-棉秆动摩擦因数	0.06
棉秆剪切模量/Pa	1.0×10^6	棉秆-钢恢复系数	0.3
棉秆泊松比	0.35	棉秆-钢静摩擦因数	0.45
土壤密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1446	棉秆-钢动摩擦因数	0.01
土壤剪切模量/Pa	1.09×10^6	土壤-土壤恢复系数	0.2
土壤泊松比	0.4	土壤-土壤静摩擦因数	0.4
钢密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7850	土壤-土壤动摩擦因数	0.3
钢剪切模量/Pa	1×10^{10}	土壤-钢恢复系数	0.3
钢泊松比	0.3	土壤-钢静摩擦因数	0.5
棉秆-棉秆恢复系数	0.3	土壤-钢动摩擦因数	0.4
棉秆-棉秆静摩擦因数	0.63		

田间试验时,当随动式残膜捡拾速度保持在 $4\sim4.4\text{ km/h}$ 范围内,残膜回收率和工作效率能够保持较好的平衡,故当地膜捡拾输送链排速度 v_m 取 4.4 km/h 时,计算可得 $v_x=3.65\text{ km/h}$ (1.01 m/s), $v_y=2.46\text{ km/h}$ (0.68 m/s)。颗粒生成的同时,双向螺旋输送机开始旋转输送物料,与实际排杂情况相符。瑞利时间步长设置为 25% ^[23],颗粒生成和排出过程总仿真时间为 18 s 。

3.3 仿真试验设计

基于上述螺旋清杂装置关键参数设计,初步确定双向螺旋输送机叶片直径 D_0 为 200 mm ,螺旋轴直径 d 为 45 mm ,螺距 P 为 170 mm ,螺旋叶片厚度为 2 mm ,螺旋叶片与机壳间隙为 4 mm ,出料口间隙

为 30 mm 。秸秆喂入量最大为 13 t/h (3.6 kg/s),随动式残膜回收秸秆粉碎联合作业中,秸秆粉碎机将棉秆粉碎后,其螺旋输送装置将粉碎的棉秆输送抛撒至田间,故膜上残留棉秆小于 10% 。为增强清杂装置的输送能力,仿真时按棉秆总量 20% 计算,即秸秆喂入量为 0.72 kg/s 。土壤最大喂入量为 8.2 t/h (2.3 kg/s),在残膜的捡拾运输过程中,绝大部分土壤落入驱动滚筒,螺旋清杂装置中较少。为模拟杂质的实际输送过程,在螺旋清杂装置中,同时生成秸秆和土壤,混合喂入量按 0.72 kg/s 计算。螺旋轴转速为 120 r/min 。选取双向螺旋输送机螺距系数、螺旋叶片直径和出料口间隙为试验因素,因素水平如表 2 所示。

表 2 试验因素水平
Tab.2 Factors and levels of orthogonal test

水平	因素		
	螺距系数	螺旋叶片直径/mm	出料口间隙/mm
1	0.8	180	20
2	0.9	200	30
3	1.0	220	40

3.4 评价指标

参考文献 ^[13,21,24],在螺旋输送仿真过程中,棉秆和土壤等杂质清理输送效果和性能由以下参数评价:

(1)平均颗粒速度 $V(\text{m/s})$:指三维空间内速度矢量和的平均值,表征秸秆和土壤等杂质颗粒移动的快慢。

(2)平均纵向颗粒速度 $V_y(\text{m/s})$:指颗粒垂向速度的平均值,与颗粒的垂向运动能力有关。

(3)质量流率 $q_m(\text{kg/s})$:等于单位时间内通过与螺旋轴线方向垂直的平面的颗粒总质量(这个平

面位于螺距两端的周期性边界的中间位置)。

(4) 旋转轴总力矩 $T(\text{N}\cdot\text{m})$: 旋转轴力矩主要由清杂装置对棉秆和土壤等杂质颗粒向两端输送做功而产生, 旋转轴总力矩的大小和波动反映清杂装置中颗粒的数量、分布和运动状态。

4 仿真结果分析

4.1 可视化输送过程分析

随动式秸秆粉碎残膜回收联合作业时, 螺旋清杂装置将从残膜中掉落的棉秆和土壤等杂质输送至捡拾地膜幅宽之外, 通过双向螺旋输送机向两侧输送, 在机具两端处抛撒至田间, 完成杂质的输送。其

输送过程如图 4 所示, 输送中杂质平均颗粒速度、平均纵向颗粒速度、质量流率和旋转轴总力矩变化规律如图 5 所示。

由图 4a 和图 5b 可知, 在 0.5 s 时, 由颗粒工厂生成的棉秆和土壤混合颗粒随机生成并散落在清杂装置上方, 模拟仿真残膜回收过程中杂质与地膜分离下落的过程, 棉秆和土壤混合颗粒在重力的作用下落入螺旋输送装置; 在 0.9 s 时, 混合颗粒随双向螺旋输送器的两个反向叶片转动向两端运动; 在 1.6 s 时, 混合颗粒从两端出料口排出; 在 4.0 s 时, 模拟输送达到稳定状态, 出料口持续排出混合颗粒。从模拟过程直观分析, 该装置设计能够满足棉秆和

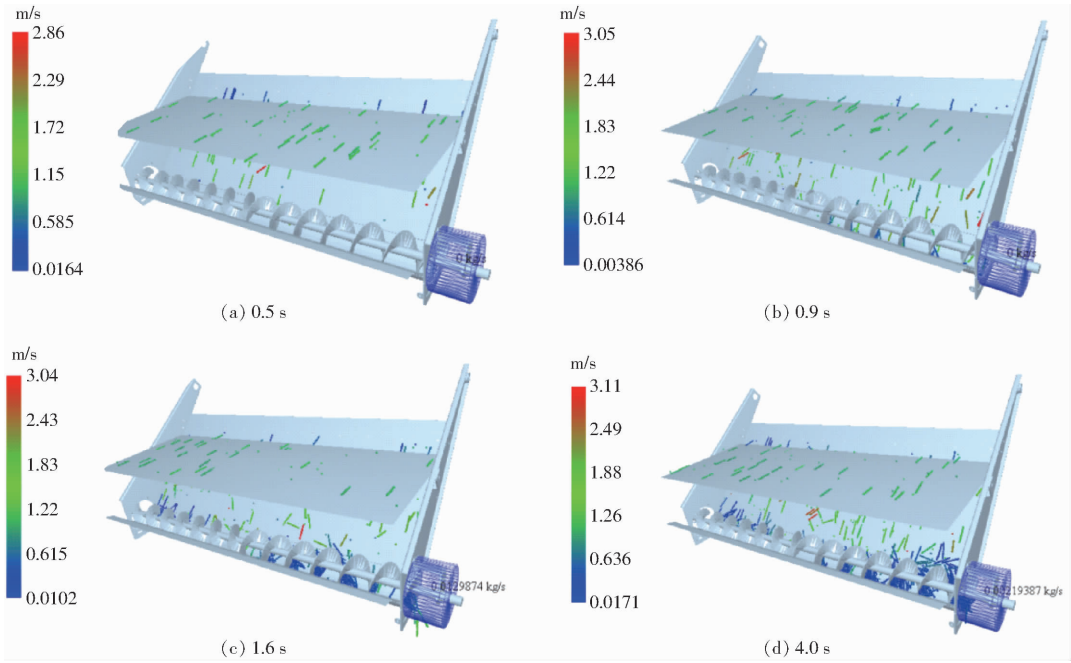


图 4 棉秆和土壤输送过程模拟

Fig.4 Simulation of cotton stalk and soil transport process

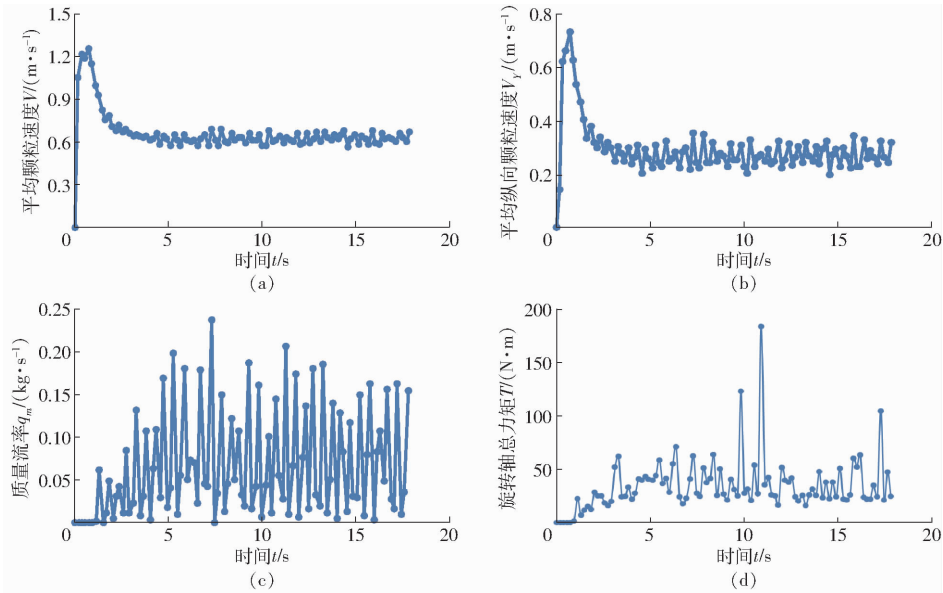


图 5 棉秆和土壤输送过程中监测指标变化曲线

Fig.5 Changing curves of monitoring indexes during cotton stalk and soil transportation

土壤的清杂输送要求。如图 5c 所示,双向螺旋输送机出料口的混合颗粒质量流率出现明显的波动变化,对比清杂输送动态过程可发现,棉秆和土壤混合颗粒从生成下落运动到出料口位置时,颗粒呈“团聚状”从出料口排出(如图 4a),此时颗粒质量流率与颗粒速度增大。如图 5d 所示,旋转轴总力矩也呈现明显波动变化,因旋转轴力矩主要是清杂装置对颗粒向两端输送做功

而产生。

4.2 正交试验结果分析

以螺距系数、螺旋叶片直径和出料口间隙为因素,暂不考虑各因素之间交互作用,选用四因素三水平正交试验表 $L_9(3^4)$,设计包含 9 个水平组合的试验方案,找出较优的结构参数组合,试验方案与试验结果如表 3 所示,表中 A 、 B 、 C 为因素螺距系数、螺旋叶片直径、出料口间隙水平值。

表 3 四因素三水平正交试验设计与结果
Tab.3 Design and results of four factors and three levels orthogonal experiment

试验号	因素				试验指标			
	A	B	C	空列	平均颗粒速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	平均纵向颗粒速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	质量流率/ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)	旋转轴总力矩/ ($\text{N}\cdot\text{m}$)
1	1	1	1	1	0.547 0	0.237 1	0.028 0	35.362 5
2	2	2	2	1	0.629 9	0.185 4	0.072 5	47.957 6
3	3	3	3	1	0.564 6	0.133 8	0.088 1	57.553 5
4	1	2	3	2	0.630 5	0.128 6	0.041 5	64.488 1
5	2	3	1	2	0.560 5	0.245 4	0.053 5	34.441 8
6	3	1	2	2	0.553 2	0.172 9	0.084 8	50.475 7
7	1	3	2	3	0.557 5	0.193 8	0.038 7	54.240 8
8	2	1	3	3	0.559 2	0.112 5	0.051 1	67.793 1
9	3	2	1	3	0.673 2	0.276 8	0.119 1	35.957 6
平均颗粒速度	k_1	0.578 3	0.553 1	0.593 6	0.580 5			
	k_2	0.583 2	0.644 5	0.580 2	0.581 4			
	k_3	0.597 0	0.560 9	0.584 8	0.596 6			
	R	0.018 7	0.091 4	0.013 4	0.016 1			
平均纵向颗粒速度	k_1	0.186 5	0.174 2	0.253 1	0.185 4			
	k_2	0.181 1	0.196 9	0.184 0	0.182 3			
	k_3	0.194 5	0.191 0	0.125 0	0.194 4			
	R	0.013 4	0.022 8	0.128 1	0.012 1			
质量流率	k_1	0.036 1	0.054 6	0.066 9	0.062 9			
	k_2	0.059 0	0.077 7	0.065 3	0.059 9			
	k_3	0.097 3	0.060 1	0.060 2	0.069 6			
	R	0.061 3	0.023 1	0.006 6	0.009 7			
旋转轴总力矩	k_1	51.363 8	51.210 4	35.254 0	46.957 9			
	k_2	50.064 2	49.467 8	50.891 4	49.801 9			
	k_3	47.995 6	48.745 4	63.278 2	52.663 8			
	R	3.368 2	2.465 1	28.024 3	5.706 0			

4.2.1 极差分析

由表 3 可知,螺距系数、螺旋叶片直径、出料口间隙对平均颗粒速度、平均纵向颗粒速度、质量流率及旋转轴总力矩均有不同程度的影响。由极差分析可知,螺距系数对平均颗粒速度、平均纵向颗粒速度及质量流率影响显著,出料口间隙对平均纵向颗粒速度、质量流率及旋转轴总力矩均有较显著的影响,螺旋叶片直径对平均颗粒速度影响显著。利用极差分析法分析三因素对各试验指标的影响。

由表 3 中平均颗粒速度的极差(R 值)可以看出,螺旋叶片直径对棉秆和土壤混合颗粒的平均速

度影响最大,其次是螺距系数,出料口间隙的影响最小。获得最高平均颗粒速度的是 9 号试验,试验条件为 $A_3B_2C_1$ 。

由表 3 平均纵向颗粒速度的极差(R 值)可以看出,出料口间隙对棉秆和土壤混合颗粒的平均纵向速度影响最大,其次是螺旋叶片直径,螺距系数的影响最小。获得最高平均纵向颗粒速度的是 9 号试验,试验条件为 $A_3B_2C_1$ 。

质量流率反映了双向螺旋输送机输送杂质的能力,质量流率越大,输送速度越快。由表 3 质量流率的极差(R 值)可知,螺距系数对棉秆和土壤混合颗

粒的输送影响最大,其次是螺旋叶片直径,出料口间隙影响最小。获得最高质量流率的是 9 号试验,试验条件为 $A_3B_2C_1$ 。

旋转轴总力矩反映了混合颗粒速度过程中的“团聚”状态和功耗情况,总力矩越小,输送越流畅,能耗越小。由表 3 旋转轴总力矩的极差(R 值)可知,出料口间隙对输送过程中旋转轴总力矩影响最大,其次是螺距系数,螺旋叶片直径影响最小。获得最低旋转轴总力矩的是 5 号试验,试验条件为 $A_2B_3C_1$ 。

4.2.2 方差分析

从正交试验表中可以看出,由误差列对各指标的影响数值已经超出可忽略不计的范围,因此引入方差分析来弥补极差分析的不足。用 SPSS 19.0 数据处理软件对以平均颗粒速度、平均纵向颗粒速度、质量流率及旋转轴总力矩为指标的正交试验结果进行方差分析,结果如表 4 所示。

表 4 试验结果方差分析

Tab.4 Variance analysis of test results

指标	因素	平方和	自由度	F	P
平均颗粒速度	A	0.001	2	1.141	0.467
	B	0.015	2	31.256	0.031 *
	C	0.001	2	0.562	0.640
	误差	0.002	2		
	总和	0.017	8		
平均纵向颗粒速度	A	0.001	2	1.159	0.463
	B	0.001	2	3.558	0.219
	C	0.025	2	104.908	0.009 **
	误差	0.001	2		
	总和	0.027	8		
质量流率	A	0.006	2	38.711	0.025 *
	B	0.001	2	5.871	0.146
	C	7.24×10^{-5}	2	0.487	0.672
	误差	0.000 1	2		
	总和	0.007	8		
旋转轴总力矩	A	17.313	2	0.354	0.738
	B	9.635	2	0.197	0.835
	C	1 183.322	2	24.23	0.040 *
	误差	48.837	2		
	总和	1 259.108	8		

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

方差分析表明螺旋叶片直径对平均颗粒速度有显著影响,螺距系数、出料口间隙对平均颗粒速度影响不显著;出料口间隙对平均纵向颗粒速度影响极显著,对旋转轴总力矩有显著影响,螺旋叶片直径和螺距系数对平均纵向颗粒速度和旋转轴总力矩影响不显著;螺距系数对质量流率有显著影响,螺旋叶片直径、出料口间隙对质量流率影响不显著。

通过综合平衡法的选取原则^[25-26],分析得到三因素影响主次顺序为螺旋叶片直径、螺距系数、出料口间隙。从各个指标的计算分析、极差分析以及方差分析可知,因素 B 对各个指标均有影响,尤其对平均颗粒速度影响显著, B_2 的平均颗粒速度明显高于 B_1 与 B_3 ,因此取 B_2 ;因素 A 对质量流率影响显著,且 A_3 质量流率高于 A_1 、 A_2 ,故取 A_3 。因素 C 对平均纵向颗粒速度和旋转轴总力矩影响最显著,旋转轴总力矩越小功耗越小,故取 C_1 。因此,本试验可得出棉秆和土壤的清理输送性能最好的结构参数组合是 $A_3B_2C_1$,即螺距系数为 1.0,叶片直径为 200 mm,出料口间隙为 20 mm,经计算转换可得双向螺旋输送机结构参数为:螺距 200 mm,螺旋叶片直径200 mm,出料口直径 220mm。

5 田间试验

5.1 试验条件

为检验随动式残膜回收螺旋清杂装置的田间作业性能,验证其螺旋清杂装置输送杂质效果,于 2018 年 5 月,在新疆芳草湖农场三分场棉花试验田进行了性能试验。棉花种植地膜幅宽为 2 050 mm,行距为 (660 + 100) mm,每幅膜种植 6 行。试验田地面较平整,滴灌带已回收,田间地膜滞留 360 ~ 400 d,有一定程度破损,棉秆含水率低、脆性大,膜面棉秆较多。试验机具为随动式残膜回收秸秆粉碎联合作业机(如图 6 所示),根据仿真试验获得的最佳结构参数组合制造清杂装置,并将其安装于试验机上,配套动力为约翰迪尔 904 型轮式拖拉机,试验作业速度为 4.4 km/h。试验设备包括卷尺 (0 ~ 50 m)、电子秤 (0 ~ 7 000 g,精度 1 g) 和秒表(永康市安郎工贸有限公司)等。

5.2 试验方法

按照 GB/T 25412—2010《残地膜回收机》的要求,进行随动式残膜回收机田间作业性能试验,并测定回收残膜膜杂分离率,同时考察螺旋清杂装置输送杂质情况。

试验随机选取一幅膜,测试区长度为 200 m,每 50 m 测试 1 次,一共测试 4 次,试验结果取 4 次测试结果平均值。回收残膜膜杂分离率^[21-22]的计算式为

$$\eta = \frac{m_1}{m_2} \times 100\%$$

(4)

式中 η ——膜杂分离率,%
 m_1 ——回收残膜的质量(人工抖动分离棉秆、土壤等杂质),g
 m_2 ——回收残膜和棉秆、土壤等杂质的总质量,g



图6 试验机具

Fig.6 Experiment machine

5.3 试验结果与讨论

随动式残膜回收秸秆粉碎联合作业机膜杂分离率田间试验结果如表5所示。

表5 田间试验结果
Tab.5 Results of field trials

测试区号	回收残膜 质量/g	回收膜杂 总质量/g	膜杂分离率/ %
1	2 980	3 389	87. 93
2	3 076	3 410	90. 21
3	3 265	3 687	88. 55
4	2 673	2 926	91. 35

由试验结果可知,随动式残膜回收秸秆粉碎联合作业机平均膜杂分离率为89.51%,满足农艺要求。在机具作业过程中,双向螺旋输送机能顺利将落入装置的棉秆、土壤等杂物输送至机具两侧,并通过出料口抛撒至田间,运行状况良好,性能稳定。回收残膜效果和棉秆、土壤等杂质清理输送效果如图7。

因试验在棉花收获后次年春季进行,棉秆在田间时间较长,含水率低、脆性大,且倒伏较多,与秋季作业条件相差较大,机具作业时,倒伏的棉秆随着残膜被拾拾;且设计的清杂装置为双向排杂,杂质抛撒



(a) 回收残膜 (b) 棉秆、土壤等杂质输送效果

图7 田间试验效果

Fig.7 Field experiment results

至机具两侧时,距离机具较近的杂质被二次拾拾回收,因此影响了膜杂分离率。

6 结论

(1)根据随动式残膜回收秸秆粉碎联合作业机,设计了一种螺旋清杂装置,阐述了其结构组成和工作原理,并对其关键部件双向螺旋输送机进行了分析和参数设计。螺旋清杂装置能有效地将地膜回收中分离的棉秆和土壤等输送抛撒至田间。

(2)利用 EDEM 软件建立了棉秆-土壤-螺旋清杂装置的三维离散元模型,模拟仿真了棉秆和土壤混合颗粒的清理输送过程,以螺旋清杂装置的结构参数螺距系数、螺旋叶片直径和出料口间隙为试验因素,以平均颗粒速度、平均纵向颗粒速度、质量流率及旋转轴总力矩为试验因变量进行正交仿真试验,分析了3个试验因素对各项指标影响的显著性及主次顺序,试验结果显示螺旋清杂装置最优参数组合为 $A_3B_2C_1$,即螺距 200 mm,螺旋叶片直径 200 mm,出料口直径为 220 mm。

(3)利用仿真优化得到的结构参数制作螺旋清杂装置,并与随动式残膜回收秸秆粉碎联合作业机进行装配和整机田间试验,结果表明,清杂装置清理棉秆、土壤等杂质效果符合设计要求,残膜回收后平均膜杂分离率为 89.51%,满足残膜回收作业要求。

参 考 文 献

[1] 刘建国,李彦斌,张伟,等. 绿洲棉田长期连作下残膜分布及对棉花生长的影响[J]. 农业环境科学学报,2010,29(2): 246-250.
LIU Jianguo,LI Yanbin,ZHANG Wei,et al. Distribution of residual film under long-term continuous cropping in oasis cotton field and its effect on cotton growth[J]. Journal of Agro-Environmental Science,2010,29(2):246-250. (in Chinese)

[2] 董合干,刘彤,李勇冠,等. 新疆棉田地膜残留对棉花产量及土壤理化性质的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(8):91-99.
DONG Hegan,LIU Tong,LI Yongguan,et al. Effects of plastic film residue on cotton yield and soil physical and chemical properties in Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(8):91-99. (in Chinese)

[3] 赵岩,陈学庚,温浩军,等. 农田残膜污染治理技术研究现状与展望[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(6):1-14.
ZHAO Yan,CHEN Xuegeng,WEN Haojun,et al. Research status and prospect of control technology for residual plastic film pollution in farmland[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(6):1-14. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170601&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.001. (in Chinese)

[4] ROCCA A R. Plastic mulch retriever;WO2009076729[P]. 2009-06-25.

[5] 白云龙,李晓龙,张胜,等. 内蒙古地膜残留污染现状及残膜回收利用对策研究[J]. 中国土壤与肥料,2015(6):139-145.
BAI Yunlong,LI Xiaolong,ZHANG Sheng,et al. Study on the current situation of plastic film residue pollution and the countermeasures for the recovery and utilization of residual film in Inner Mongolia[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China,2015(6):139-145. (in Chinese)

- [6] 陈学庚,周敦兴,颜利民,等. 一种随动式残膜回收机:CN206743793U[P]. 2017-12-15.
- [7] MOYSEY P A, THOMPSON M R. Modelling the solids inflow and solids conveying of single-screw extruders using the discrete element method[J]. Powder Technology, 2005, 153(2): 95-107.
- [8] 刘师多,牛康,师清翔,等. 玉米果穗螺旋摩擦输送装置的输送性能试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(12): 9-16.
LIU Shiduo, NIU Kang, SHI Qingxiang, et al. Performance experiment of friction conveying device for maize ears[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(12): 9-16. (in Chinese)
- [9] 戚江涛,蒙贺伟,坎杂,等. 基于 EDEM 的双螺旋奶牛饲喂装置给料性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 65-71.
QI Jiangtao, MENG Hewei, KAN Za, et al. Analysis and test of feeding performance of dual-spiral cow feeding device based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 65-71. (in Chinese)
- [10] 黄学群. 运输机械选型设计手册[M]. 2版. 北京: 化学工业出版社, 2011.
- [11] 罗胜,张西良,许俊,等. 螺旋不连续加料装置结构优化与性能仿真[J]. 农业工程学报, 2013, 29(3): 250-257.
LUO Sheng, ZHANG Xiliang, XU Jun, et al. Structure optimization and performance simulation of screw discontinuous feeding device[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(3): 250-257. (in Chinese)
- [12] MEI Lei, HU Jiquan, LI Yongzhi, et al. Research on modeling and simulation of the trafficability of vertical screw conveyor's intermediate support based on EDEM[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 456: 303-309.
- [13] 郑智旗. 玉米秸秆捡拾粉碎沟埋还田机研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [14] 方会敏,姬长英, FARMAN A C, 等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 22-28.
FANG Huimin, JI Changying, FARMAN A C, et al. Analysis of soil dynamic behavior during rotary tillage based on distinct element method[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 22-28. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160304&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.03.004. (in Chinese)
- [15] 方会敏,姬长英, AHMED A T, 等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(1): 60-67.
FANG Huimin, JI Changying, AHMED A T, et al. Simulation analysis of straw movement in straw-soil-rotary blade system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(1): 60-67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160109&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.009. (in Chinese)
- [16] 黄玉祥,杭程光,苑梦婵,等. 深松土壤扰动行为的离散元仿真与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 80-88.
HUANG Yuxiang, HANG Chengguang, YUAN Mengchan, et al. Discrete element simulation and experiment on disturbance behavior of subsoiling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 80-88. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160712&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.012. (in Chinese)
- [17] 邓佳玉,胡军,李庆达,等. 基于 EDEM 离散元法的深松铲仿真与试验研究[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(4): 14-18.
DENG Jiayu, HU Jun, LI Qingda, et al. Simulation and experimental study on the subsoiler based on EDEM discrete element method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(4): 14-18. (in Chinese)
- [18] 田辛亮,赵岩,陈学庚,等. 4JSM-2000A 型棉秆粉碎及搂膜联合作业机的研制[J]. 农业工程学报, 2018, 34(10): 25-35.
TIAN Xinliang, ZHAO Yan, CHEN Xuegeng, et al. Development of 4JSM-2000A type combined operation machine for cotton stalk chopping and residual plastic film collecting[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(10): 25-35. (in Chinese)
- [19] 由佳翰,陈学庚,张本华,等. 4JSM-2000 型棉秆粉碎与残膜回收联合作业机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 10-16.
YOU Jiahao, CHEN Xuegeng, ZHANG Benhua, et al. Design and experiment of 4JSM-2000 type combined operation machine for cotton stalk chopping and residual plastic film collecting[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10): 10-16. (in Chinese)
- [20] 冯俊小,林佳,李十中,等. 秸秆固态发酵回转筒内颗粒混合状态离散元参数标定[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(3): 208-213.
FENG Junxiao, LIN Jia, LI Shizhong, et al. Calibration of discrete element parameters of particle in rotary solid state fermenters[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(3): 208-213. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150330&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.03.030. (in Chinese)
- [21] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010.
- [22] OWEN P J, CLEARY P W. Prediction of screw conveyor performance using the discrete element method (DEM)[J]. Powder Technology, 2009, 193(3): 274-288.
- [23] 孟杰,孟文俊. 影响 EDEM 仿真结果的因素分析[J]. 机械工程与自动化, 2014(6): 49-51.
MENG Jie, MENG Wenjun. Analysis of influencing factor on results of EDEM simulation[J]. Mechanical Engineering & Automation, 2014(6): 49-51. (in Chinese)
- [24] ROBERTS A W. Design considerations and performance evaluation of screw conveyors[J]. Powder Technology, 2009, 19(3): 4-9.
- [25] 张杰,李浩,孔令卓,等. 肉羔羊育肥秸秆配合颗粒饲料加工工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(5): 274-281.
ZHANG Jie, LI Hao, KONG Lingzhuo, et al. Optimization of processing parameters of straw and particles feed for fattening lamb[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(5): 274-281. (in Chinese)
- [26] 邹舒畅,苏工兵,邵运果. 基于离散元法的苕荊茎秆分离装置仿真优化与试验[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(1): 60-67.
ZOU Shuchang, SU Gongbing, SHAO Yunguo. Simulation optimization and experiment of separation device for ramie stalks based on discrete element method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(1): 60-67. (in Chinese)