

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2023.11.007

抖动链齿杆式残膜-土壤-秸秆挖掘与输送装置设计与试验

靳伟<sup>1,2</sup> 丁幼春<sup>1</sup> 农峰<sup>1</sup> 张学军<sup>2,3</sup> 白圣贺<sup>4,5</sup>

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052;  
3. 新疆农业工程装备创新设计重点实验室, 乌鲁木齐 830052;  
4. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083;  
5. 农业装备技术全国重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 针对土壤层残膜回收装备存在挖掘阻力大、功耗高、易壅土等问题,设计抖动链齿杆式残膜-土壤-秸秆挖掘与输送装置,其中旋耕挖掘机构降低挖掘阻力并解决壅土问题,抖动链齿输送机构提高残膜-土壤-秸秆输送效率。建立输送链表面物料颗粒的受力模型,分析前进速度与输送链转速之间的变化关系,计算抖动轮与输送链转速;测定土壤剖面残膜和秸秆的含量及分布并建立虚拟仿真土槽,模拟棉田土壤中残膜和秸秆含量及分布特点。在EDEM中构建残膜-土壤-秸秆挖掘与输送装置仿真模型并设置挖掘铲入土深度150 mm,在不同前进速度(0.75、1、1.25 m/s)、旋耕刀片转速(210、230、250 r/min)、输送链转速(65、85、105 r/min)组合条件下,模拟挖掘与输送残膜-土壤-秸秆过程中的壅土效果和颗粒速度变化特性;根据仿真试验结果可知,在挖掘与输送装置前进速度较高的条件下易发生壅土问题,土壤层残膜、土壤和秸秆颗粒运动速度小于5 m/s。田间试验结果与仿真试验结果基本相同,在不同的因素水平组合条件下,田间试验测量壅土高度范围为71~246 mm;田间试验表明,当壅土高度小于等于90 mm时不会发生挖掘阻力较大并停机的问題。文中设计的挖掘与输送装置和作业效果分析方法,为设计新型的残膜-土壤-秸秆挖掘与输送装置提供参考。

**关键词:** 残膜-土壤-秸秆; 挖掘; 输送装置; 抖动链齿杆式; EDEM

中图分类号: S233.4      文献标识码: A      文章编号: 1000-1298(2023)11-0071-12

OSID:



Design and Test of Excavating and Conveying Device with Vibrating Chain Tooth and Bar for Residual Film – Soil – Straw

JIN Wei<sup>1,2</sup> DING Youchun<sup>1</sup> NONG Feng<sup>1</sup> ZHANG Xuejun<sup>2,3</sup> BAI Shenghe<sup>4,5</sup>

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China  
2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China  
3. Key Laboratory of Innovation Design of Xinjiang Agricultural Engineering Equipment, Urumqi 830052, China  
4. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China  
5. National Key Laboratory of Agricultural Equipment Technology, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Aiming at the problems such as high digging resistance, high power consumption and easy soil blockage in the soil layer of residual film recovery equipment, the residual film – soil – straw excavating and conveying device with vibrating chain tooth bar is designed, in which the rotary tillage excavating mechanism reduces the excavation resistance and solves the soil blockage problem, and the vibrating chain tooth conveying mechanism improves the residual film – soil – straw conveying efficiency. The force model of the material particles on the surface of the conveyor chain is established, the relationship between the forward speed and the speed of the conveyor chain is analyzed, and the speed of the shaking wheel and the conveyor chain is calculated. The content and distribution of residual film and straw in soil profile are measured and a virtual simulated soil tank is established to simulate the content and distribution characteristics of residual film and straw in cotton soil. The simulation model of excavating and conveying device is built and set the depth of excavation shovel to 150 mm in EDEM. Under different

收稿日期: 2023-08-03    修回日期: 2023-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(52005425)和新疆维吾尔自治区重点研发任务专项(2022397490)

作者简介: 靳伟(1987—),男,博士生,新疆农业大学副教授,主要从事农业机械设计及理论研究,E-mail: jwnice007@163.com

通信作者: 丁幼春(1978—),男,教授,博士,主要从事智慧农业技术与装备研究,E-mail: kingbug163@163.com

forward speed (0.75 m/s, 1 m/s, 1.25 m/s), rotary blade speed (210 r/min, 230 r/min, 250 r/min), conveyor chain speed (65 r/min, 85 r/min, 105 r/min) combination conditions, simulation of soil backwater effect and particle velocity variation in the process of excavating and conveying residual film - soil - straw. According to the simulation results, it can be seen that the blockage problem is easy to occur under the condition that the forward speed of the excavating and conveying device is high, and the motion speed of the residual film of soil layer, soil and straw particles is less than 5 m/s. The results of the field test are basically the same as those of the simulation test. Under the conditions of different combination of factors, the height of the soil blockage measured in the field test ranges from 71 mm to 246 mm. The field test shows that when the height of soil blockage is less than 90 mm, the problem of excavation resistance and stoppage will not occur. The excavating and conveying device and the operation effect analysis method designed in this paper can provide reference for designing a new type device of excavating and conveying residual film - soil - straw.

**Key words:** residual film - soil - straw; excavation; conveyor device; type of vibrating chain tooth and bar; EDEM

## 0 引言

生态环境部、农业农村部等印发《农业农村污染治理攻坚战行动方案(2021—2025年)》中明确要求残膜回收率达85%以上。目前,地表当年覆膜的机械化回收率可以达到85%以上,但往年未被回收的残膜混合在土壤层,导致土壤层残膜含量每年持续增加,土壤层残膜回收率仅有70%左右<sup>[1]</sup>。现阶段土壤层残膜回收机械主要存在挖掘阻力大、功耗高、易壅土等问题,亟需深入研究残膜-土壤-秸秆挖掘与输送技术与装置,为土壤层残膜回收提供技术支撑。

国外使用的地膜机械性能好、地膜使用周期短、便于机械化回收,主要利用滚筒卷收原理设计起膜、卷收机构<sup>[1]</sup>。地膜卷收机构较简单、卷收效率高、自动化程度较高,实现地膜卷收转速与前进速度相匹配。由于地理环境、地膜特性和覆膜种植模式不同,国内只能根据国情研制适宜的残膜回收机械。国内科研工作者研制的残膜回收机型约100种,按照捡膜部件入土深度不同,可分为地表残膜回收机和土壤层残膜回收机,土壤层残膜回收难度大、回收率低,已研发的土壤层残膜回收机类型较少<sup>[2]</sup>。东北农业大学、中国农业大学、新疆农业科学院农业机械化研究所等研制玉米苗期残膜回收与中耕联合作业机、柔性弹齿捡拾装置、棉秆粉碎与残膜回收联合作业机等多种地表残膜回收机,残膜回收率较高并且大多机型具备残膜打捆功能<sup>[2-4]</sup>。新疆农业大学、新疆农业科学院农业机械化研究所和塔里木大学等研制链齿式残膜回收与膜-土分离机、整地与残膜联合回收机、振动筛式残膜回收机等土壤层残膜回收机型,残膜回收率较低;已研发的土壤层残膜回收机存在结构复杂、挖掘与输送阻力大、回收的残膜含杂质高等问题,亟需研制新型土壤层残膜回收机

来提升土壤层残膜回收率<sup>[5-6]</sup>。

针对减阻挖掘与输送问题,国内外学者采用仿生技术、离散元仿真、创新结构设计等方法研究挖掘与输送机构和土壤互作用减阻机理。何晓宁等<sup>[7]</sup>建立油莎豆-土壤团聚体模型,利用离散元法模拟油莎豆减阻挖掘收获过程。ASAF等<sup>[8]</sup>研究土壤旋耕减阻机理,在不同速比的条件下,研究旋耕机构的阻力变化和性能响应指标。文献[9-10]研究水稻直播机旋耕机构参数与扭矩、碎土率之间的变化关系,优化旱地水稻直播机的防粘结刀辊。文献[11-13]研究秸秆-土壤-旋耕机构互作用机理,设计减阻挖掘仿生机构,研究成果可为根茎类农作物减阻与高效收获提供参考。McRae公司、Lockwood公司、Grimme公司等研发刮板输送机构、柔顺变形升运机构、多级输送缓冲分离机构等,主要用于根茎类农作物的低损收获<sup>[14-18]</sup>;新疆农业大学、甘肃农业大学等研制交接输送机构、环形分离机构、链杆式升运机构、多级提升输送机构等,可为新型输送机构的研发提供参考<sup>[19-22]</sup>。

根据文献可知,现阶段国内外学者在减阻挖掘、低损输送方面研究较多,提出减黏脱附旋耕、柔顺变形升运、多级交接输送等理论,主要应用在水稻、小麦、马铃薯、甘薯等作物的播种与收获作业,但在土壤层残膜-土壤-秸秆防堵挖掘与输送方面的研究较少,残膜-土壤-秸秆的物料特性、挖掘与输送要求和根茎类农作物挖掘收获要求差异性较大,不能直接利用现有的挖掘与输送装置,需探索新型的挖掘与输送机构。

2023年新疆棉花种植面积约 $2.42 \times 10^6 \text{ hm}^2$ (占全国85%),均采用覆膜种植技术,土壤中残膜含量约 $30 \text{ g/m}^2$ ,严重阻碍农业绿色发展<sup>[23-24]</sup>。针对上述问题,本文设计抖动链齿杆式残膜-土壤-秸秆挖掘与输送装置,提升残膜挖掘与输送效果,为设

计新型的挖掘与输送装置提供参考。

1 残膜-土壤-秸秆挖掘与输送试验条件

为了研究残膜-土壤-秸秆挖掘与输送装置壅土效果,需测定土壤中残膜和秸秆含量及分布。参考残地膜回收机作业质量标准 (NY/T 1227—2019),地表及土壤层深度 0 ~ 100 mm 内残地膜回收率大于等于 80%,土壤层深度 100 ~ 150 mm 内残地膜回收率大于等于 70%。因此,测定土壤层中秸秆和残膜含量及剖面分布情况,并且设置残膜-土壤-秸秆挖掘与输送装置挖掘深度为 150 mm。依据新疆棉花种植模式和农艺要求,矮化密植棉花收获、秸秆粉碎还田与地表残膜回收、耕整地后和播种前挖掘残膜-土壤-秸秆、回收残膜的农时与试验条件如图 1 所示。

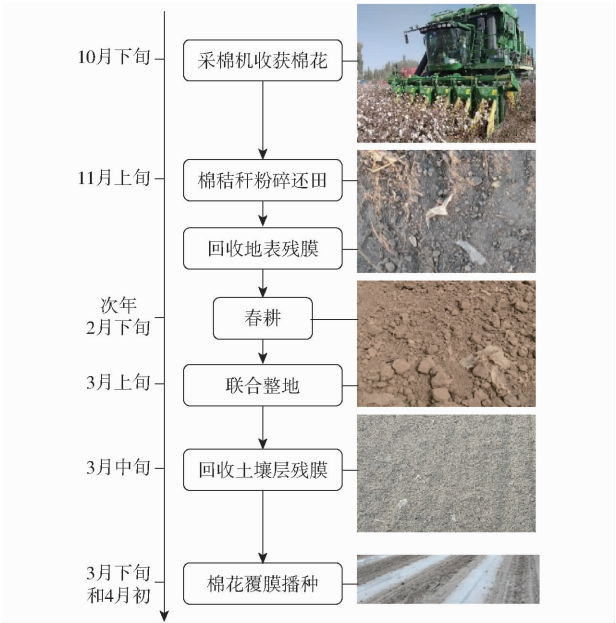


图 1 回收残膜的农时与试验条件示意图  
Fig. 1 Diagrammatic sketch of farming season and test conditions for recovering residual film

如图 2 所示,分别在新疆维吾尔自治区昌吉市大西渠镇(北疆)和新疆维吾尔自治区阿克苏市双城镇(南疆)春季播种前的棉田中测定残膜与秸秆含量,在棉田中随机选取 60 个测试点并编号,每个测试点的面积为 1 m<sup>2</sup>,分别将测试点土壤层 0 ~ 50 mm、50 ~ 100 mm、100 ~ 150 mm、150 ~ 200 mm 内残膜和秸秆筛分干净并装入对应编号的塑料袋中,清除秸秆表面的土壤并将残膜清洗干净、晒干、称量,最后记录秸秆和残膜质量试验数据。耕整地机械作业加剧残膜破碎程度,土壤层内残膜含量较高。

笔者长期对覆膜种植的棉区残膜含量进行测定,根据数据绘制残膜含量曲线,如图 3a 所示。土壤层 50 ~ 100 mm 残膜含量最高且均值为 11.85 g/m<sup>2</sup>,



图 2 棉田秸秆与残膜含量及剖面分布  
Fig. 2 Content and profile distribution of straw and residual film in cotton field

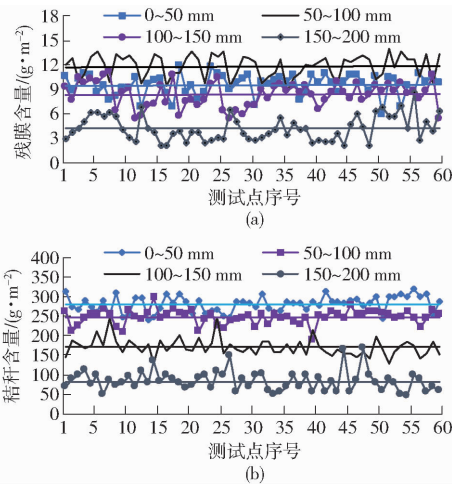


图 3 土壤层残膜与秸秆含量测定试验曲线  
Fig. 3 Test curve for determination of residual film and straw content in soil layer

0 ~ 50 mm 土壤层残膜含量较高且均值为 9.48 g/m<sup>2</sup>, 100 ~ 150 mm 土壤层残膜含量均值为 8.31 g/m<sup>2</sup>, 150 ~ 200 mm 土壤层残膜含量最低且均值为 4.17 g/m<sup>2</sup>,将各土壤层残膜含量累加得土壤层 200 mm 内残膜含量约为 33.81 g/m<sup>2</sup>。

如图 3b 所示,0 ~ 50 mm 土壤层秸秆含量最高且均值为 281.39 g/m<sup>2</sup>,50 ~ 100 mm 土壤层秸秆含量较高且均值为 247.93 g/m<sup>2</sup>,100 ~ 150 mm 土壤层秸秆含量均值为 171.08 g/m<sup>2</sup>,150 ~ 200 mm 土壤层秸秆含量最低且均值为 83.41 g/m<sup>2</sup>,土层 200 mm 内秸秆含量约为 783.81 g/m<sup>2</sup>,以上试验数据为建立虚拟土槽、仿真试验提供依据和参考。

2 装置整体结构与关键参数计算

2.1 挖掘与输送装置整体结构与工作原理

2.1.1 整体结构

残膜-土壤-秸秆挖掘与输送装置整体结构如图 4 所示,主要由机架、行走轮、液压缸、弹齿、深度调节机构、传动系统、挖掘铲、旋耕机构等构成。旋耕机构安装在装置的最前端,旋耕刀片粉碎土壤并且将残膜-土壤-秸秆抛送至挖掘铲和输送链齿中,实现残膜-土壤-秸秆防堵挖掘与输送的功能。

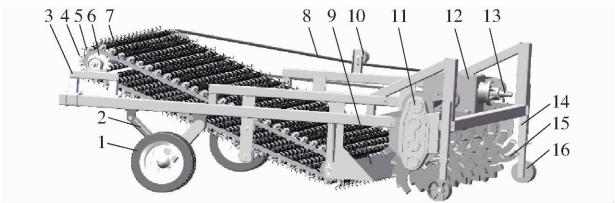


图 4 残膜-土壤-秸秆挖掘与输送装置结构示意图  
Fig.4 Structure diagram of the device for excavation and conveyor residual film - soil - straw

1. 行走轮 2. 液压缸 3. 机架 4. 弹齿 5. 齿杆 6. 链轮  
7. 链条 8. 带传动 9. 挖掘铲 10. 张紧轮 11. 直齿轮减速箱  
12. 锥齿轮减速箱 13. 动力输入轴 14. 深度调节机构 15. 旋耕刀片 16. 限深轮

2.1.2 工作原理

约翰迪尔 5-754 型轮式拖拉机提供动力,拖拉机牵引该装置挖掘、输送残膜-土壤-秸秆混合物。通过传动轴将拖拉机的动力传递至锥齿轮减速箱,并通过带传动、链传动和齿轮传动将动力输入输送和旋耕机构。田间作业时,调整深度调节机构使挖掘铲的入土深度为 150 mm 左右,旋耕机构将残膜-土壤-秸秆粉碎并抛送至输送机构中;在挖掘与输送的过程中,弹齿钩挂残膜,体积较小的秸秆和土壤颗粒通过弹齿之间的缝隙下落至地面,旋耕抛送、链齿抖动输送可解决挖掘壅土、阻力大等问题。

2.1.3 技术参数

结合新疆棉花种植模式和残膜-土壤-秸秆挖掘与输送农艺要求,确定残膜-土壤-秸秆挖掘与输送装置主要参数,如表 1 所示。

表 1 主要参数  
Tab.1 Main parameters

| 参数                           | 数值                |
|------------------------------|-------------------|
| 整体尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)       | 3 500×1 950×1 600 |
| 配套动力/kW                      | ≥56               |
| 挖掘铲入土深度/mm                   | ≤150              |
| 幅宽/mm                        | 1 700             |
| 作业速度/(m·s <sup>-1</sup> )    | 1.0               |
| 抖动轮转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 95                |
| 挖掘铲前端壅土高度/mm                 | 71~246            |

2.2 关键机构设计

2.2.1 抖动链齿输送机构设计

根据土壤层残膜-土壤-秸秆分布特点和破碎程度,设计抖动链齿输送机构,具备筛除土壤、钩挂残膜和输送物料的功能,其结构如图 5 所示,主要由弹齿、间隔套筒、齿杆、链条、抖动轮和挖掘铲等构成。

如图 5,为防止输送机构中的土壤颗粒下滑滚落,查阅文献可知升运角通常为 25°~35°,为实现

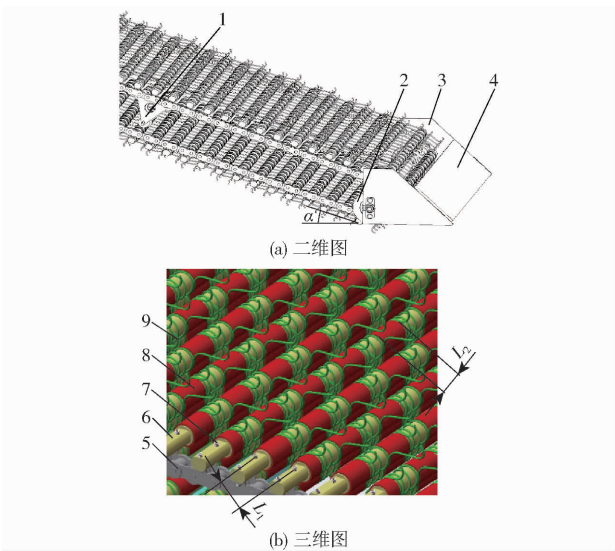


图 5 抖动链齿输送机构结构图  
Fig.5 Structure diagram of conveyor mechanism with vibrating chain tooth

1. 抖动轮 2. 支撑滚筒 3. 护板 4. 挖掘铲 5. 链条 6. 齿杆  
7. 螺栓 8. 间隔套筒 9. 弹齿

良好的输送效果、钩挂残膜、筛除土壤颗粒的功能,输送机构升运角  $\alpha$  取 30°。在抖动输送残膜-土壤-秸秆混合物的过程中,较小的土壤颗粒可以通过齿杆和弹齿之间的间隙掉落至地表。为了提高筛土效果,设计输送链长度为 2 200 mm、抖动轮振幅为 20 mm;齿杆之间间隙  $L_1$  为 70 mm、直径为 35 mm,间隔套筒长度  $L_2$  为 50 mm、外径为 40 mm。

2.2.2 旋耕挖掘机构设计

旋耕刀片破碎土壤并向后抛撒至挖掘铲和输送机构,实现土壤层残膜-土壤-秸秆防堵旋耕挖掘;旋耕挖掘机构主要由挖掘铲、传动系统、深度调节机构、旋耕刀片和限深轮等构成,如图 6 所示。为了减小旋耕刀片抛送残膜-土壤-秸秆的阻力、保持旋耕刀辊轴受力均衡、避免挖掘壅土,设计双排螺旋排列旋耕刀片,相邻两旋耕刀片轴向夹角 60°、间距 80 mm、旋耕刀片旋转半径取 290 mm,旋耕刀片交错安装在刀辊轴上,使残膜-土壤-秸秆均匀地被抛送至挖掘铲和输送机构中。挖掘铲倾斜角度与输送机构升运角  $\alpha$  相同,为 30°,挖掘铲幅宽为 1 700 mm。

2.3 抖动轮与输送链转速计算

如图 7 所示,抖动轮使输送链沿  $y$  轴做简谐运动,链齿向上运动同时做简谐运动,实现输送残膜-土壤-秸秆混合物和筛除土壤的功能。输送链沿  $y$  轴的最大振动距离为  $2r_1$ ,点  $O$  至输送链表面的垂直距离为  $r_1$ ,以点  $O$  为坐标原点建立坐标系,输送链表面物料颗粒  $O_1$  沿  $y$  轴的运动方程为

$$y_1 = -r_1 \cos(\omega_1 t + \theta) \tag{1}$$

式中  $r_1$ ——简谐运动振幅,mm

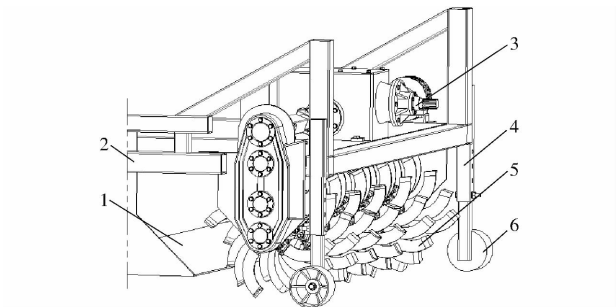


图 6 旋耕挖掘机构结构图

Fig. 6 Structure diagram of rotary tillage and excavation mechanism

1. 挖掘铲 2. 机架 3. 传动系统 4. 深度调节机构 5. 旋耕刀片 6. 限深轮

$\omega_1$ ——抖动轮角速度,rad/s

$\theta$ ——初始角度,rad

$t$ ——时间

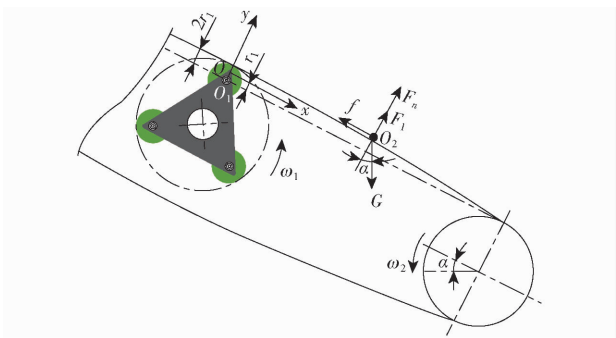


图 7 物料颗粒运动与受力分析

Fig. 7 Motion and force analysis of material particles

对式(1)进行求导得点  $O_1$  在  $y$  轴方向速度  $v_1$  和加速度  $a_1$  为

$$\begin{cases} v_1 = \dot{y}_1 = r_1 \omega_1 \sin(\omega_1 t + \theta) \\ a_1 = \ddot{y}_1 = r_1 \omega_1^2 \cos(\omega_1 t + \theta) \end{cases} \quad (2)$$

抖动轮角速度  $\omega_1$  和频率  $f_1$  的计算式为

$$\begin{cases} \omega_1 = 2\pi f_1 \\ f_1 = \frac{z_1 n_1}{60} \end{cases} \quad (3)$$

式中  $z_1$ ——抖动轮基轮数量,个

$n_1$ ——抖动轮转速,r/min

抖动轮基轮数量  $z_1$  取 3,将式(3)代入式(2)得点  $O_1$  在  $y$  轴方向速度和加速度为

$$\begin{cases} v_1 = \frac{r_1 \pi n_1}{10} \sin\left(\frac{\pi n_1}{10} t + \theta\right) \\ a_1 = r_1 \frac{(\pi n_1)^2}{100} \cos\left(\frac{\pi n_1}{10} t + \theta\right) \end{cases} \quad (4)$$

如图 7 所示,对输送链表面的物料颗粒  $O_2$  进行受力分析,推导抖动轮与输送链转速需满足的条件。在抖动轮的作用下,物料颗粒即将脱离输送链时  $F_n$  为 0,物料颗粒在  $y$  轴方向上的受力满足

$$\begin{cases} F_1 - G \cos \alpha \geq 0 \\ F_1 = m a_1 \\ G = m g \end{cases} \quad (5)$$

式中  $F_1$ ——土壤颗粒在  $y$  轴方向的惯性力,N

$G$ ——土壤颗粒重力,N

$m$ ——物料颗粒质量,g

$g$ ——重力加速度, $m/s^2$

在初始值  $t = 0, \theta = 0^\circ$  的条件下,将式(4)代入式(5)并整理得抖动轮转速  $n_1$  的表达式为

$$n_1 \geq \frac{10}{\pi} \sqrt{\frac{g \cos \alpha}{r_1}} \quad (6)$$

将  $\pi = 3.14, g = 9.8 \text{ m/s}^2, \alpha = 30^\circ, r_1 = 0.01 \text{ m}$  代入式(6)计算抖动轮转速  $n_1 \geq 92.78 \text{ r/min}$ ,取整数为 93 r/min。根据输送残膜-土壤-秸秆的体积和旋耕机构实际抛土量之间的关系,输送链转速应满足

$$L_3 L h_1 n_2 \geq 60 v h L \times 1000 \quad (7)$$

式中  $L_3$ ——输送链长度,mm

$h_1$ ——输送链表面物料高度,mm

$n_2$ ——输送链转速,r/min

$L$ ——装置幅宽,mm

$v$ ——挖掘与输送装置前进速度,m/s

$h$ ——挖掘铲入土深度,mm

将  $L_3 = 2200 \text{ mm}, L = 1700 \text{ mm}, h = 150 \text{ mm}$  代入式(7)并计算得

$$n_2 \geq \frac{4091 v}{h_1} \quad (8)$$

取  $h_1 = 50 \text{ mm}$ ,分别在  $v = 0.75 \text{ m/s}, v = 1 \text{ m/s}$  和  $v = 1.25 \text{ m/s}$  的条件下,代入式(8)求出输送链转速应分别满足  $n_2 \geq 62 \text{ r/min}, n_2 \geq 82 \text{ r/min}$  和  $n_2 \geq 103 \text{ r/min}$ ,计算结果为后续挖掘与输送效果仿真和田间试验提供参数。

### 3 基于 EDEM 的壅土效果仿真

#### 3.1 挖掘与输送装置仿真模型建立

利用 SolidWorks 建立挖掘与输送装置三维模型并导入 EDEM 软件中,同时参考残膜-土壤-秸秆在土壤剖面中的分布情况并构建虚拟土槽的尺寸(长×宽×高)为  $10000 \text{ mm} \times 3000 \text{ mm} \times 300 \text{ mm}$ ,如图 8 所示。在前期结构设计、参数计算和试验的条件下,改变挖掘与输送装置的参数组合,模拟棉田挖掘与输送残膜-土壤-秸秆过程中挖掘铲的前端壅土效果。

#### 3.2 颗粒模型参数

为了简化土壤、秸秆、残膜颗粒的仿真模型,减少仿真运行的时间,土壤仿真颗粒为球形,其直径分

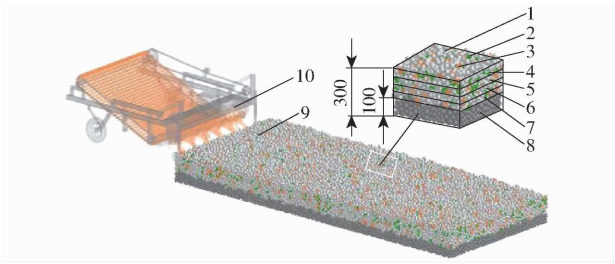


图 8 挖掘与输送效果仿真模型

Fig. 8 Simulation model of excavation and conveyor effect

1. 土壤颗粒 2. 秸秆 3. 残膜 4. 耕作表层 5. 耕作中层 6. 耕作底层 7. 过渡层 8. 犁底层 9. 土槽 10. 挖掘输送装置

别为 90、60、30 mm；棉花秸秆为圆柱形，由直径为 20 mm、中心距为 6 mm 的球形线性构成，其长度为

50 mm；残膜的长为 30 ~ 50 mm、宽为 20 ~ 30 mm，由直径为 0.02 mm 的球形颗粒线性排列构成，将以上颗粒建立 SolidWorks 模型并导入 EDEM；利用简化刚性球形颗粒和颗粒线性组合的方法，模拟颗粒特性。

棉田土壤的类型为沙性土壤，土壤颗粒之间的粘附力较小，所以 EDEM 的接触模型选用 Hertz - Mindlin with RVD Rolling Friction，该模型适应于沙性土壤颗粒滚动输送的要求，能够较为准确地模拟输送链对物料颗粒滚动特性。通过参考相关文献和测量，获取残膜、秸秆、土壤、旋耕刀片、弹齿等物料的密度、泊松比、剪切模量以及摩擦因数和颗粒碰撞恢复系数<sup>[25-26]</sup>，主要仿真试验参数如表 2 所示。

表 2 仿真特性参数

Tab. 2 Parameters of simulation characteristics

| 参数                              | 数值                    | 参数                            | 数值                |
|---------------------------------|-----------------------|-------------------------------|-------------------|
| 土槽长 × 宽 × 高/(mm × mm × mm)      | 10 000 × 3 000 × 300  | 土壤-土壤碰撞恢复系数 $e_1$             | 0.21              |
| 前进速度/(m · s <sup>-1</sup> )     | 0.75、1、1.25           | 土壤-旋耕刀碰撞恢复系数 $e_2$            | 0.60              |
| 旋耕刀片转速/(r · min <sup>-1</sup> ) | 210、230、250           | 土壤-秸秆碰撞恢复系数 $e_3$             | 0.50              |
| 抖动轮转速/(r · min <sup>-1</sup> )  | 95                    | 土壤-残膜碰撞恢复系数 $e_4$             | 0.31              |
| 输送链转速/(r · min <sup>-1</sup> )  | 65、85、105             | 土壤-弹齿碰撞恢复系数 $e_5$             | 0.40              |
| 入土深度/mm                         | 150                   | 土壤-齿杆碰撞恢复系数 $e_6$             | 0.45              |
| 旋耕刀泊松比 $\mu_1$                  | 0.25                  | 秸秆-弹齿碰撞恢复系数 $e_7$             | 0.30              |
| 旋耕刀剪切模量/Pa                      | $7.90 \times 10^{10}$ | 残膜-弹齿碰撞恢复系数 $e_8$             | 0.20              |
| 旋耕刀密度/(kg · m <sup>-3</sup> )   | $7.86 \times 10^3$    | 残膜泊松比 $\mu_6$                 | 0.42              |
| 弹齿泊松比 $\mu_2$                   | 0.27                  | 残膜剪切模量/Pa                     | $8.3 \times 10^8$ |
| 弹齿剪切模量/Pa                       | $8.01 \times 10^{10}$ | 残膜密度/(kg · m <sup>-3</sup> )  | 910               |
| 弹齿密度/(kg · m <sup>-3</sup> )    | $7.98 \times 10^3$    | 土壤粘结刚度/(N · m <sup>-3</sup> ) | $5 \times 10^7$   |
| 齿杆泊松比 $\mu_3$                   | 0.26                  | 土壤临界应力/Pa                     | $3 \times 10^5$   |
| 齿杆剪切模量/Pa                       | $8.20 \times 10^{10}$ | 土壤-土壤动摩擦因数 $f_{d1}$           | 0.35              |
| 齿杆密度/(kg · m <sup>-3</sup> )    | $7.85 \times 10^3$    | 土壤-旋耕刀动摩擦因数 $f_{d2}$          | 0.31              |
| 土壤泊松比 $\mu_4$                   | 0.32                  | 土壤-秸秆动摩擦因数 $f_{d3}$           | 0.15              |
| 土壤剪切模量/Pa                       | $4.5 \times 10^6$     | 土壤-残膜动摩擦因数 $f_{d4}$           | 0.28              |
| 土壤密度/(kg · m <sup>-3</sup> )    | $1.50 \times 10^3$    | 土壤-弹齿动摩擦因数 $f_{d5}$           | 0.12              |
| 棉花秸秆泊松比 $\mu_5$                 | 0.38                  | 土壤-齿杆动摩擦因数 $f_{d6}$           | 0.16              |
| 棉花秸秆剪切模量/Pa                     | $1.05 \times 10^9$    | 秸秆-弹齿动摩擦因数 $f_{d7}$           | 0.09              |
| 棉花秸秆密度/(kg · m <sup>-3</sup> )  | 800                   | 残膜-弹齿动摩擦因数 $f_{d8}$           | 0.22              |

3.3 土槽截面颗粒分布

挖掘铲入土深度设置为 150 mm，构建虚拟土槽的深度为 300 mm，如图 9 所示，其中土槽深度 200 ~ 300 mm 区域内土壤颗粒孔隙度约为 40%，此区域内土壤颗粒未被旋耕和挖掘扰动，为了简化虚拟土槽模型，设置该区域为犁底层且仅有土壤颗粒。土槽深度 0 ~ 200 mm 区域内土壤颗粒的孔隙度为 50%，将此区域分别划分为 4 层，0 ~ 50 mm 为耕作表层、50 ~ 100 mm 为耕作中层、100 ~ 150 mm 为耕作底层、150 ~ 200 mm 为耕作层与犁底层之间的过渡层，过渡层内土壤颗粒未被旋耕、挖掘扰动。

以图 3 土壤层残膜与秸秆含量测定试验结果为依据，土槽中残膜和秸秆的含量与棉田土壤中残膜、秸秆含量相同。设置耕作表层 0 ~ 50 mm 区域内残膜与秸秆的含量分别占虚拟土槽中残膜、秸秆总含量的 28%、36%；耕作中层 50 ~ 100 mm 区域内残膜与秸秆的含量分别占虚拟土槽中残膜、秸秆总含量的 35%、32%；耕作底层 100 ~ 150 mm 区域内残膜与秸秆的含量分别占虚拟土槽中残膜、秸秆总含量的 25%、22%；150 ~ 200 mm 区域内残膜与秸秆的含量分别占虚拟土槽中残膜、秸秆总含量的 12%、10%；犁底层和过渡层不会被旋耕刀扰动，该区域中

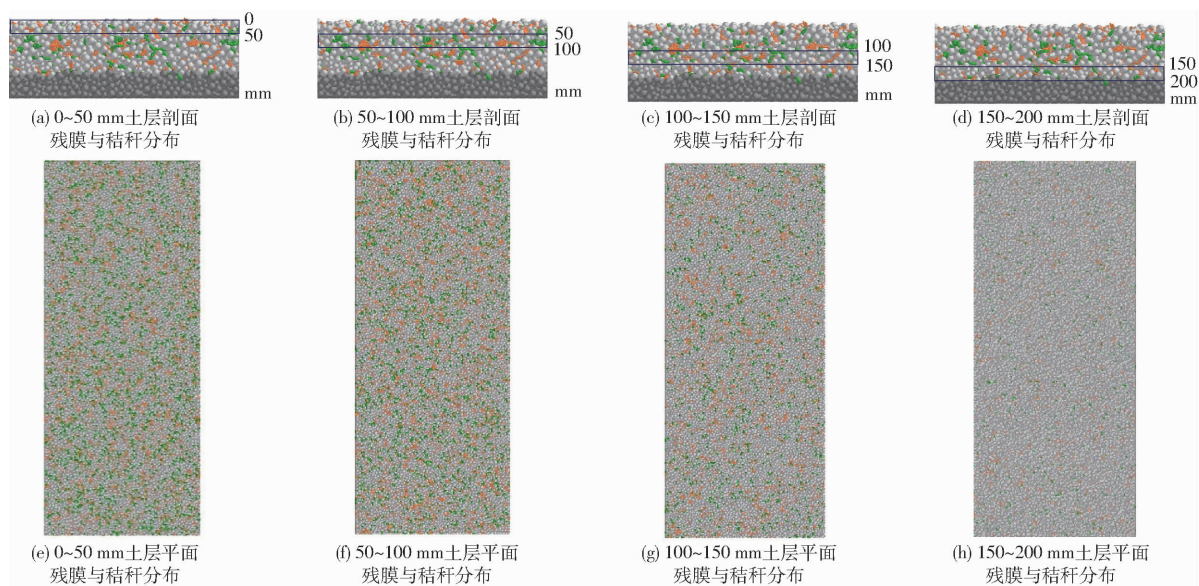


图 9 土层剖面与平面区域残膜和秸秆颗粒显示和分布效果

Fig. 9 Display and distribution effect of residual film and straw in soil profile and plane area

残膜、秸秆的含量最低。设置土壤层残膜和秸秆含量的比例,生成的土槽颗粒剖面 and 平面分布如图 9 所示。

为了更好地显示残膜、秸秆、土壤颗粒的分布,用颜色区别残膜、秸秆和土壤颗粒,秸秆的颜色设置为绿色、残膜的颜色设置为粉红色、土壤颗粒的颜色设置为灰色。图 9a~9d 为残膜、土壤和秸秆的剖面颗粒分布效果,其对应的颗粒平面分布效果如图 9e~9h。图 9e 中绿色秸秆颗粒的数量最多即该土壤层秸秆含量最高,图 9f 中粉红色残膜颗粒的数量最多即该土壤层残膜颗粒含量最高,图 9g 中绿色秸秆颗粒和粉红色残膜颗粒的数量较少即该土壤层残膜和秸秆含量较少,图 9h 中灰色土壤颗粒最多即残膜和秸秆含量最少。土槽颗粒分布满足图 3 中土壤层残膜、秸秆分布比例设置要求,文中设置的虚拟土槽可以有效模拟棉田残膜-土壤-秸秆颗粒仿真试验条件,为挖掘与输送性能仿真试验提供虚拟土槽模型。

### 3.4 仿真结果与分析

虚拟土槽生成后,将残膜-土壤-秸秆挖掘与输送装置的模型导入 EDEM 中并设置仿真参数。根据 2.2 节输送机构结构设计、2.3 节抖动轮转速计算结果和输送链的转速与装置前进速度之间的关系,设置挖掘与输送装置前进速度  $v$  分别为 0.75、1、1.25 m/s,抖动轮转速  $n_1$  为 95 r/min,输送链转速  $n_2$  分别为 65、85、105 r/min,挖掘铲入土深度  $h$  为 150 mm。参考秸秆旋耕与埋覆效果<sup>[11]</sup>和旋耕刀耕作性能研究文献[26],结合挖掘与输送残膜-土壤-秸秆的抛送效果,设置旋耕刀片转速  $n$  分别为 210、230、250 r/min。按照土壤层颗粒分布要求,生成虚拟土槽颗粒后进行挖掘与输送仿真试验,挖掘与输

送装置前进距离为 10 m,在不同参数条件下仿真效果如图 10 所示,对比分析在不同的前进速度、输送链转速和旋耕刀片转速参数组合的条件下,展示与分析挖掘与输送残膜-土壤-秸秆过程中的壅土效果。

当前进速度为 0.75、1、1.25 m/s 时,在不同输送链和旋耕刀片转速条件下仿真并获取 3 组壅土效果图。对比可以得出:图 10g~10i 中输送链表面的物料颗粒数量最多,图 10d~10f 中输送链表面的物料颗粒数量较多,图 10a~10c 中输送链表面的物料颗粒数量最少,即在旋耕刀片转速相同的条件下,输送链表面的物料颗粒数量随着装置前进速度的增大而增多;图 10g~10i 中旋耕机构的前端发生壅土现象,图 10a~10f 中旋耕机构前端没有发生壅土现象;在前进速度相同的条件下,旋耕刀片与输送链转速越高,壅土高度越低,挖掘与输送装置的前进速度较高的条件下易发生壅土问题;根据仿真结果可以得出,在前进速度小于等于 1 m/s 时,挖掘与输送装置不会发生壅土、停机的问题。

选取土槽宽度中心区域长×宽×高为 400 mm×100 mm×150 mm 的立方体,此立方体区域在长度方向上距离仿真起点为 3 000 mm。在划分的立方体区域内随机选取 9 个颗粒,即土壤层 0~50 mm 内选取残膜、土壤、秸秆颗粒各 1 个,土壤层 50~100 mm 内选取残膜、土壤、秸秆颗粒各 1 个,土壤层 100~150 mm 内选取残膜、土壤、秸秆颗粒各 1 个,共计 9 个颗粒。在图 9 壅土效果仿真试验的基础上,提取已选取的 9 个颗粒速度曲线,研究分析壅土效果与颗粒速度之间的变化关系,探索壅土高度较高时,颗粒群速度变化情况。

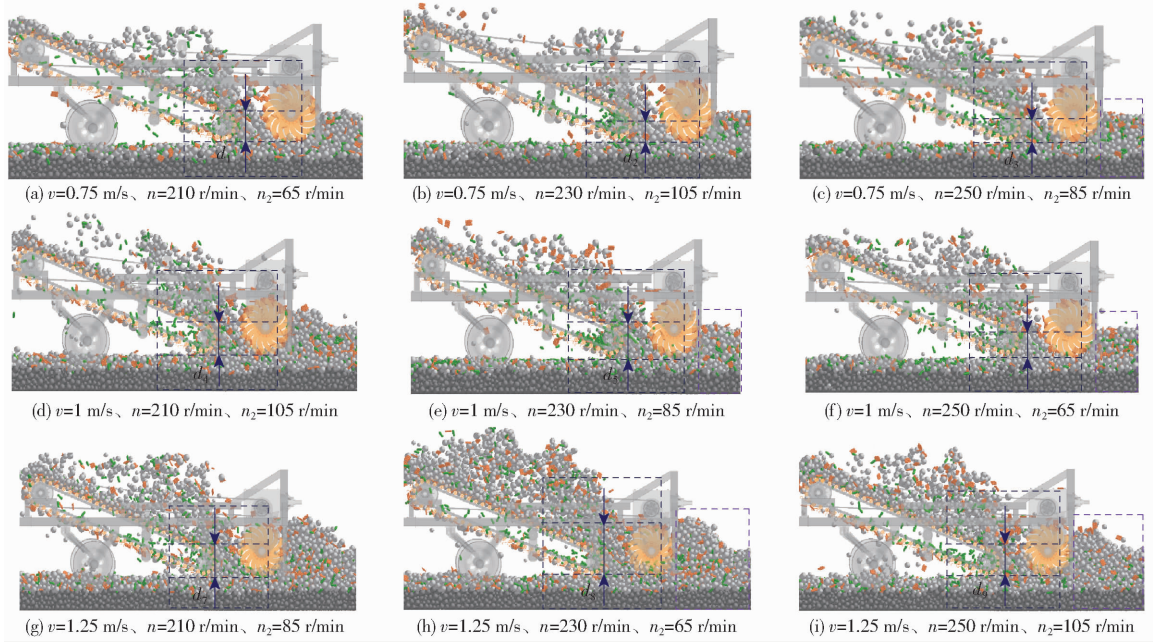


图 10 壅土效果仿真结果  
Fig. 10 Simulation result on soil blockage effect

在图 10 壅土效果仿真的基础上,分别分析上述选取的 9 个颗粒的运动速度,绘制与图 10 对应的颗粒速度曲线,在不同的参数条件下对比分析颗粒运动速度,如图 11 所示。图 11 中残膜、土壤和秸秆颗粒运动速度小于 5 m/s,旋耕刀片转速越高、输送链转速越大,颗粒运动速度越大。图中颗粒速度曲线的第 1 个波峰为旋耕刀片对颗粒的抛送速度峰值,后续的速度振荡为输送筛面抖动速度峰值。

根据图 11 可知,在装置前进速度相同条件下,颗粒运动速度最大值随着旋耕刀片转速升高而增大,颗粒速度减小为 0 的时间随着旋耕刀片转速升高而减小(即颗粒被旋耕至输送筛面、最后落至地面的时间,随着旋耕刀片的转速升高而减小);图 10d、10g、10h 的壅土高度较高,对应图 11d、11g、11h 的颗粒速度均较低,其速度最大值约为 3 m/s,壅土越高导致整体颗粒群运动速度越低,不利于残膜-土壤-秸秆混合物料的高效输送。

4 壅土效果田间试验

4.1 试验条件

为了验证基于 EDEM 的残膜-土壤-秸秆挖掘与输送仿真结果,在新疆维吾尔自治区阿克苏市双城镇春季播种前的棉田中进行试验。通过测定土壤破碎率约为 70.56%、土壤表层含水率约为 9.67%、土壤耕层含水率约为 17.82%、棉花秸秆含水率为 14.75%。

选用约翰迪尔 5-754 型轮式拖拉机提供动力,旋耕刀片转速和输送链转速通过更换减速箱、带轮

和链轮的方式获取试验参数,采用牵引的方式进行田间残膜-土壤-秸秆混合物料挖掘与输送,挖掘与输送装置在不同的参数组合条件下进行田间试验并分析挖掘与输送性能,试验装置如图 12 所示。

4.2 试验方法

利用计时器和激光测速仪测量带轮、链轮的转速和拖拉机的前进速度,使用卷尺测定挖掘铲的前端壅土高度。参考农作物挖掘收获时壅土试验相关文献<sup>[27-28]</sup>,在棉田中随机选取 45 个测试区域并编号,每个测试区域长度和宽度分别为 20 m 和 3.0 m;设置挖掘与输送装置的运动参数,拖拉机的前进距离设置为 10 m 并进行挖掘与输送残膜-土壤-秸秆的壅土效果试验。

等待挖掘与输送装置到达规定的距离后停机并测量挖掘铲的前端壅土高度,记录试验数据并计算 5 次试验的平均壅土高度。

4.3 试验结果

挖掘与输送装置田间试验因素水平与仿真试验因素水平相同,验证仿真与田间试验结果是否一致并优化装置的工作性能。检查拖拉机、挖掘与输送装置能够正常工作后,调整挖掘与输送装置的入土深度、更换带轮和链轮并设置挖掘与输送装置前进速度  $v$  分别约为 0.75、1、1.25 m/s,旋耕刀片转速  $n$  分别为 210、230、250 r/min,抖动轮转速  $n_1$  为 95 r/min,输送链转速  $n_2$  分别为 65、85、105 r/min,挖掘铲的入土深度  $h$  为 150 mm。在上述条件下进行田间挖掘与输送性能试验,测量壅土高度并记录试验结果,如表 3 所示。

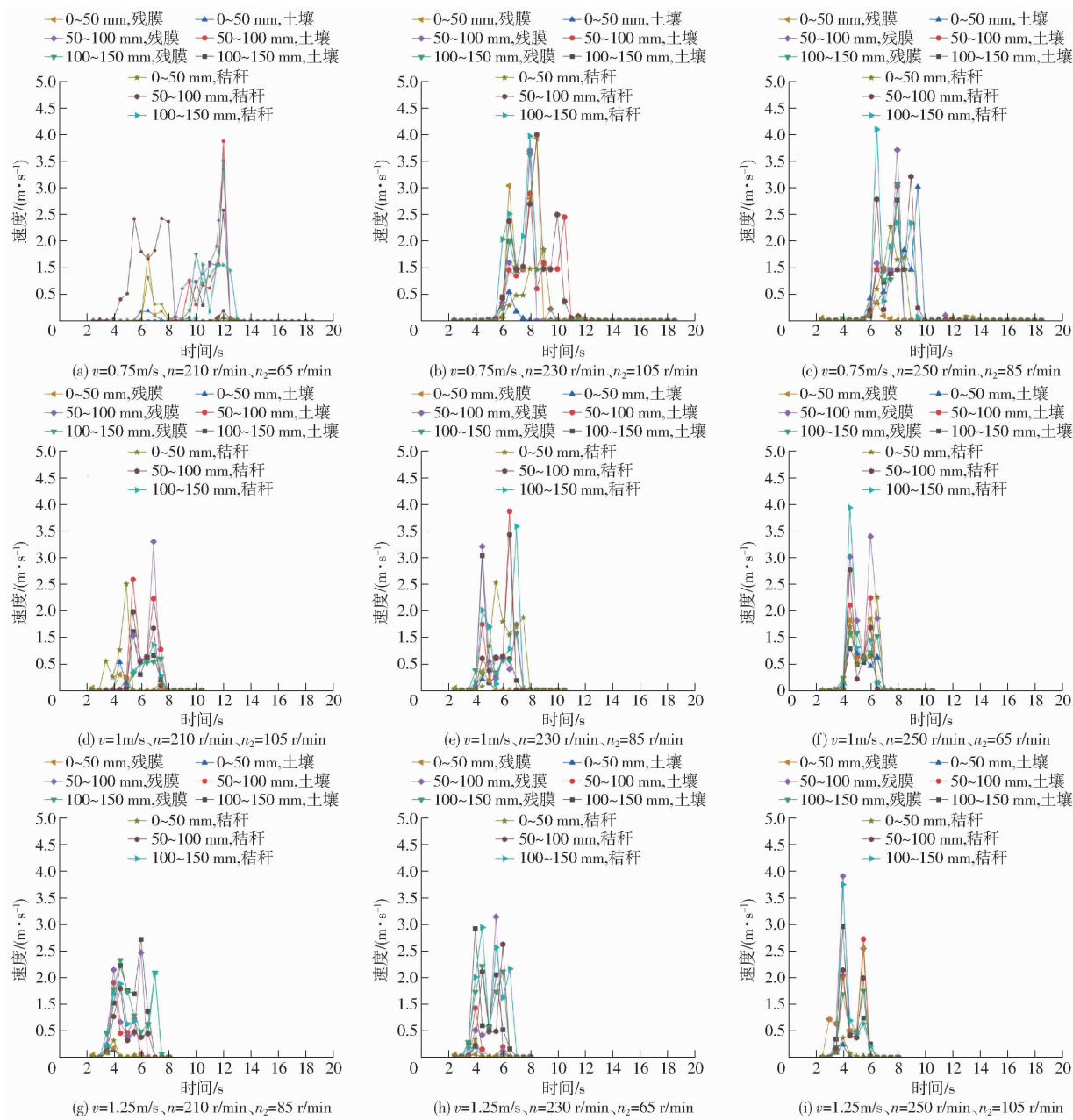


图 11 颗粒运动速度曲线

Fig. 11 Curve of particle velocity



图 12 挖掘与输送试验装置

Fig. 12 Test equipment of excavation and conveyor

根据表 3 可知, 壅土高度的仿真结果与田间试验结果基本一致, 所以仿真模型可以较准确地模拟挖掘与输送装置在田间的作业效果, 为优化挖掘与输送装置的结构和壅土性能提供条件。在挖掘铲入土深度为 150 mm、抖动轮转速为 95 r/min 的条件

下, 进行田间挖掘与输送试验。拖拉机前进速度、旋耕刀片转速、输送链转速对挖掘铲前端壅土高度影响较大, 在不同因素组合情况下, 壅土高度差异很大。当拖拉机前进速度为 1.25 m/s、旋耕刀片转速为 230 r/min、输送链转速为 65 r/min 时, 挖掘与输送装置平均壅土高度最大, 为 246 mm; 当拖拉机前进速度为 0.75 m/s、旋耕刀片转速为 230 r/min、输送链转速为 105 r/min 时, 挖掘与输送装置平均壅土高度最小, 为 71 mm; 在上述的试验因素和条件下, 挖掘与输送装置壅土高度均值为 71 ~ 246 mm; 田间挖掘与输送残膜-土壤-秸秆作业时, 需合理设置拖拉机前进速度、旋耕刀片转速、输送链转速等参数, 提升挖掘与输送效果。

表 3 挖掘铲前端壅土高度

Tab.3 Height of soil blockage at the front of digging shovel

| 序号 | 前进速度<br>$v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | 旋耕刀转速<br>$n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$ | 输送链转速<br>$n_2/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$ | 壅土高度田间试验值/mm |     |     |     |     | 壅土高度田间试<br>验均值 $\bar{H}/\text{mm}$ | 壅土高度仿真<br>值 $d/\text{mm}$ |
|----|------------------------------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------|--------------|-----|-----|-----|-----|------------------------------------|---------------------------|
|    |                                          |                                             |                                               | 1            | 2   | 3   | 4   | 5   |                                    |                           |
| 1  | 0.75                                     | 210                                         | 65                                            | 92           | 90  | 81  | 85  | 82  | 86                                 | 81                        |
| 2  | 0.75                                     | 230                                         | 105                                           | 68           | 75  | 69  | 79  | 67  | 71                                 | 68                        |
| 3  | 0.75                                     | 250                                         | 85                                            | 82           | 80  | 94  | 73  | 86  | 83                                 | 79                        |
| 4  | 1.00                                     | 210                                         | 105                                           | 107          | 123 | 129 | 112 | 109 | 116                                | 108                       |
| 5  | 1.00                                     | 230                                         | 85                                            | 86           | 95  | 88  | 102 | 89  | 92                                 | 96                        |
| 6  | 1.00                                     | 250                                         | 65                                            | 76           | 102 | 96  | 92  | 74  | 88                                 | 90                        |
| 7  | 1.25                                     | 210                                         | 85                                            | 193          | 171 | 172 | 184 | 195 | 183                                | 178                       |
| 8  | 1.25                                     | 230                                         | 65                                            | 259          | 239 | 237 | 242 | 253 | 246                                | 241                       |
| 9  | 1.25                                     | 250                                         | 105                                           | 83           | 80  | 66  | 76  | 70  | 75                                 | 71                        |

如图 13,在沙性土壤条件下,挖掘与输送田间试验结果与仿真结果基本相同,在一定条件下,该挖掘与输送装置可有效解决挖掘壅土问题,提高土壤层残膜-土壤-秸秆挖掘与输送效果。通过田间试验可知,当壅土高度小于等于 90 mm 时,不会发生因壅土造成阻力较大并停机的问題。在前进速度一定条件下,根据式(8)可计算出最小的输送链转速,但旋耕刀片转速应与前进速度、输送链转速相匹配,降

低挖掘铲前端壅土高度;当旋耕刀片转速、拖拉机前进速度和输送链转速满足一定关系时,挖掘与输送过程中不会发生壅土现象,否则将会出现图 13d、13g、13h 壅土停机问题。为了避免装置因壅土发生停机的问題,需分析拖拉机前进速度、旋耕刀片转速与壅土高度之间的变化关系,提升挖掘与输送装置的田间作业效果,解决土壤层残膜挖掘阻力大、易壅土、功耗高等问题。

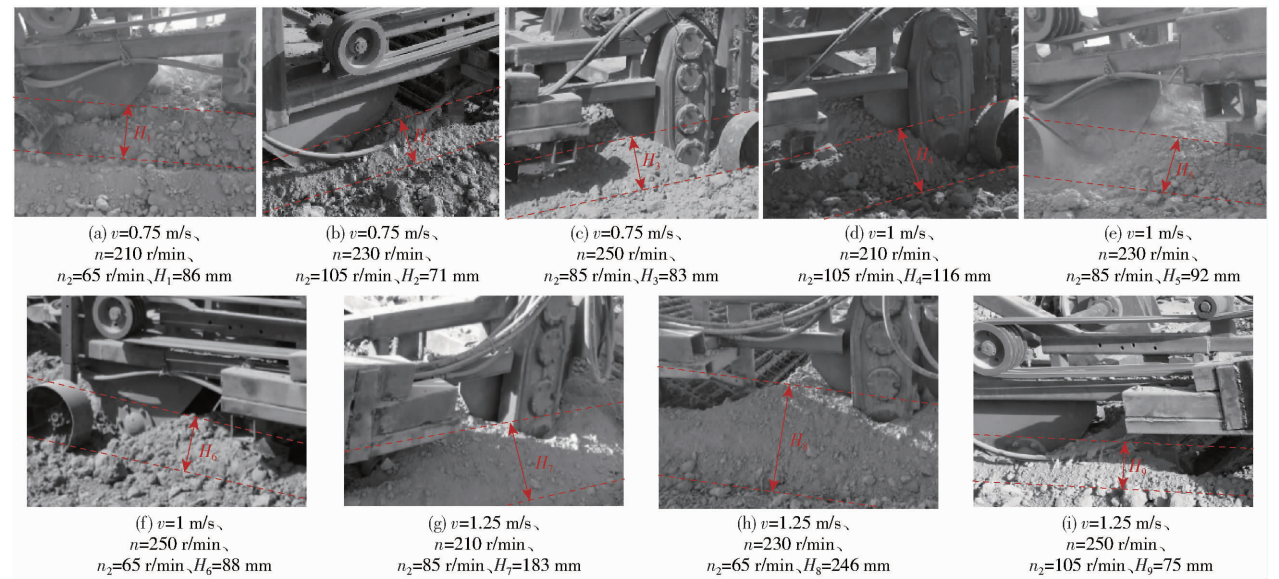


图 13 壅土效果田间试验结果

Fig.13 Field experiment results on soil blockage effect

4.4 试验结果分析

根据表 3 和图 13,调整挖掘铲的入土深度为 150 mm、抖动轮转速为 95 r/min,在挖掘输送装置前进速度  $v$  分别为 0.75 m/s (输送链转速为 65 r/min)、1 m/s (输送链转速为 85 r/min)、1.25 m/s (输送链转速 105 r/min) 的条件下,研究旋耕刀片转速与壅土高度的变化趋势。利用田间试验壅土高度均值,绘制旋耕刀片转速、前进速度与壅土高度之间的变化关系图。

根据图 14 可知,在不同前进速度条件下,壅土高度随着旋耕刀片转速的增加而降低且最终保持不变。在旋耕刀片转速  $n$  小于等于 210 r/min 的条件下,壅土高度随着挖掘与输送装置的前进速度增大而增大;当旋耕刀片转速  $n$  大于等于 240 r/min 时,挖掘铲前端壅土高度不受前进速度变化的影响并且壅土高度约为 80 mm;当旋耕刀片转速  $210\text{ r/min} \leq n \leq 240\text{ r/min}$  时,前进速度越小壅土高度越小并且壅土高度到达 80 mm 所需的旋

耕刀片转速越低。提高旋耕刀片转速可减小挖掘铲前端壅土高度,但旋耕刀片转速较高时易加剧残膜破碎程度。因此,为了避免发生壅土导致停机,必须研究在不同速度条件下壅土高度与旋耕刀片转速变化关系,使挖掘与输送装置前进速度与旋耕刀片转速相匹配,实现高效挖掘与输送残膜-土壤-秸秆混合物。

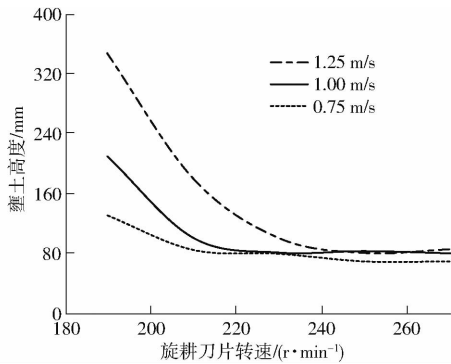


图 14 壅土高度与旋耕刀片转速关系曲线

Fig. 14 Curve between the height of soil blockage and the rotational speed of rotary tilling blade

5 结论

(1)根据土壤层残膜-土壤-秸秆分布特点和破碎程度,设计抖动链齿杆式输送机构,具备筛除土壤、钩挂残膜、输送残膜混合物料的功能;在不发生壅土停机的条件下,建立链齿筛面上的物料颗粒受力模型,推导出前进速度与输送链转速之间的关系,为后续仿真和田间试验提供理论依据。

(2)在 EDEM 中设置挖掘铲入土深度 150 mm,在不同前进速度(0.75、1、1.25 m/s)、旋耕刀片转速(210、230、250 r/min)、输送链转速(65、85、105 r/min)条件下,模拟挖掘与输送壅土效果和颗粒速度变化特性,仿真试验结果表明,壅土高度为 68 ~ 241 mm;挖掘与输送装置前进速度较高的条件下易发生壅土问题,残膜、土壤和秸秆颗粒运动速度小于 5 m/s。

(3)由田间试验结果得出,壅土高度田间试验与仿真试验结果基本相同,田间试验测得挖掘壅土高度为 71 ~ 246 mm;当壅土高度小于等于 90 mm 时,该装置不会发生挖掘阻力较大并停机的问題。

参 考 文 献

[1] 梁荣庆,陈学庚,张炳成,等. 新疆棉田残膜回收方式及资源化再利用现状问题与对策[J]. 农业工程学报,2019,35(16): 1-13.  
LIANG Rongqing, CHEN Xuegeng, ZHANG Bingcheng, et al. Problems and countermeasures of recycling methods and resource reuse of residual film in cotton fields of Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(16): 1-13. (in Chinese)

[2] 赵岩,陈学庚,温浩军,等. 农田残膜污染治理治理技术研究现状与展望[J]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 1-14. (in Chinese)

[3] 胡灿,王旭峰,陈学庚,等. 新疆农田残膜污染现状及防控策略[J]. 农业工程学报,2019,35(24):223-234.  
HU Can, WANG Xufeng, CHEN Xuegeng, et al. Current situation and control strategies of residual film pollution in Xinjiang[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(24): 223-234. (in Chinese)

[4] 冯雪锋,胡蓉,汪应军,等. 残膜阻隔装置气流分配室射流出口结构优化设计[J]. 农业机械学报,2022,53(增刊2):170-178.  
FENG Xuefeng, HU Rong, WANG Yingjun, et al. Optimization design of jet outlet structure in airflow distribution chamber of residual film barrier device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(Supp. 2): 170-178. (in Chinese)

[5] 王昭宇,陈学庚,颜利民,等. 随动式残膜回收机起膜捡拾机构设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(4):80-90.  
WANG Zhaoyu, CHEN Xuegeng, YAN Limin, et al. Design and experiment on collecting and removing device for profile modeling residual plastic film collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 80-90. (in Chinese)

[6] 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)

[7] 何晓宁,张学军,赵壮,等. 基于离散元法的油莎豆降阻挖掘装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(12):124-133.  
HE Xiaoning, ZHANG Xuejun, ZHAO Zhuang, et al. Design and test of resistance-reducing excavation device of *Cyperus edulis* based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(12): 124-133. (in Chinese)

[8] ASAF Z, RUBINSTEIN D, SHMULEVISH I. Determination of discrete element model parameters required for soil tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 92(12): 227-242.

[9] LEE K S, PARK S H, PARK W Y, et al. Strip tillage characteristics of rotary tiller blades for use in a dryland direct rice seeder[J]. Soil and Tillage Research, 2003, 71(1): 25-32.

[10] 刘国阳,夏俊芳,郑侃,等. 振动横挡阻隔式旋耕防粘结刀辊设计与试验[J]. 农业工程学报,2022,38(23):29-40.  
LIU Guoyang, XIA Junfang, ZHENG Kan, et al. Design and experiments of the barrier type rotary anti-adhesion blade roller with vibration crosspiece[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(23): 29-40. (in Chinese)

- [11] 徐高明,丁启朔,汪小岳,等. 秸秆-土壤-旋耕机交互下秸秆位移与埋覆效果研究[J]. 农业机械学报,2022,53(7):23-29.  
XU Gaoming, DING Qishuo, WANG Xiaochan, et al. Analysis of straw displacement and burying effect in straw-soil-rotary tiller interaction[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 23-29. (in Chinese)
- [12] 王亨泰,孙伟,王建箫,等. 根茎类中药材仿生挖掘铲的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报,2023,58(1):243-250.  
WANG Hengtai, SUN Wei, WANG Jianxiao, et al. Design and research of bionic digging shovel for rhizome Chinese herbal medicine[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2023, 58(1): 243-250. (in Chinese)
- [13] 夏春龙. 板蓝根挖掘装置设计与试验[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2022.  
XIA Chunlong. Design and test of digging device for *Radix isatidis*[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [14] 谭好超,徐丽明,马帅,等. 刮板式有机肥条铺与旋耕混合施肥机设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(11):163-175.  
TAN Haochao, XU Liming, MA Shuai, et al. Design and experiment of scraper organic fertilizer strip spreading and rotary tillage mixed fertilizer applicator[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 163-175. (in Chinese)
- [15] 刘兴. 马铃薯输送分级装置设计与试验研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2022.  
LIU Xing. Design and experimental research on potato conveying and grading device[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2022. (in Chinese)
- [16] 杨猛,张延化,张冲,等. 先揉切后分离风筛组合式花生膜秧分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(12):112-121.  
YANG Meng, ZHANG Yanhua, ZHANG Chong, et al. Design and experiment of fan-sieve combined peanut film-seedling separating device based on shredding and separating[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(12): 112-121. (in Chinese)
- [17] 姬江涛,李梦松,赵凯旋,等. 双孢菇柔性仿形采摘末端执行器设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(1):104-115.  
JI Jiangtao, LI Mengsong, ZHAO Kaixuan, et al. Design and experiment of flexible profiling picking end-effector for *Agaricus bisporus*[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(1): 104-115. (in Chinese)
- [18] 王磊,边祺旺,廖庆喜,等. 高茬黏重稻茬田油菜直播埋茬防堵深施肥复合装置研究[J]. 农业机械学报,2023,54(2):83-94.  
WANG Lei, BIAN Qiwang, LIAO Qingxi, et al. Burying stubble and anti-blocking deep fertilization composite device for rapeseed direct planting in high stubble and heavy soil rice stubble field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(2): 83-94. (in Chinese)
- [19] 谢建华,唐伟,曹肆林,等. 齿链复合式残膜回收机设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(1):11-19.  
XIE Jianhua, TANG Wei, CAO Silin, et al. Design and experiment of tooth chain compound residual film recovery machine[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(1): 11-19. (in Chinese)
- [20] 孙岳,简建明,田玉泰,等. 残膜回收机旋转式起膜装置起膜机理分析与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):304-310.  
SUN Yue, JIAN Jianming, TIAN Yutai, et al. Analysis and experiment of filming mechanism of rotary film-lifting device of residual film recycling machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 304-310. (in Chinese)
- [21] 辛尚龙,赵武云,戴飞,等. 玉米全膜双垄沟残膜回收机改进设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(增刊):311-319.  
XIN Shanglong, ZHAO Wuyun, DAI Fei, et al. Improved design and experiment of collector for corn whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 311-319. (in Chinese)
- [22] 孙伟,王虎存,赵武云,等. 残膜回收型全膜覆土垄播马铃薯挖掘机设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(9):105-114.  
SUN Wei, WANG Hucun, ZHAO Wuyun, et al. Design and experiment of potato digger with waste film recollection for complete film mulching, soil covering and ridge sowing pattern[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(9): 105-114. (in Chinese)
- [23] 苑严伟,白圣贺,牛康,等. 棉花种植机械化关键技术研究与装备研究进展[J]. 农业工程学报,2023,39(6):1-11.  
YUAN Yanwei, BAI Shenghe, NIU Kang, et al. Research progress in the key technologies and equipment for cotton planting mechanization[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(6): 1-11. (in Chinese)
- [24] 郭文松,贺小伟,王龙,等. 梳齿起膜气力脱膜式耕层残膜回收机研制[J]. 农业工程学报,2020,36(18):1-10.  
GUO Wensong, HE Xiaowei, WANG Long, et al. Development of a comb tooth loosening and pneumatic stripping plough layer residual film recovery machine[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(18): 1-10. (in Chinese)
- [25] 何瑞银,段庆飞,陈信信,等. 旋耕还田秸秆空间分布质量离散元分析[J]. 农业机械学报,2022,53(6):44-53.  
HE Ruiyin, DUAN Qingfei, CHEN Xinxin, et al. DEM analysis of spatial distribution quality of rotary tillage straw returning[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(6): 44-53. (in Chinese)
- [26] 郝志豪,郑恩来,李勋,等. 免耕播种机旋耕刀耕作性能分析与结构优化[J]. 农业工程学报,2023,39(2):1-13.  
HAO Zhihao, ZHENG Enlai, LI Xun, et al. Performance analysis of the soil-contacting parts for no-tillage planters and optimization of blade structure[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(2): 1-13. (in Chinese)
- [27] 侯加林,陈彦宇,李玉华,等. 铲筛组合式大葱挖掘抖土疏整装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2021,37(18):29-39.  
HOU Jialin, CHEN Yanyu, LI Yuhua, et al. Design and experiment of shovel-screen combined green onion digging, shaking, and soil tillage device[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(18): 29-39. (in Chinese)
- [28] 张兆国,薛浩田,王一驰,等. 基于离散元法的三七仿生挖掘铲设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(5):100-111.  
ZHANG Zhaoguo, XUE Haotian, WANG Yichi, et al. Design and experiment of *Panax notoginseng* bionic excavating shovel based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 100-111. (in Chinese)