

残膜回收机铲齿式起膜装置设计与试验

蒋永新^{1,2} 曲衡¹ 刘旋峰² 张海春² 周欣² 张丽²

(1. 新疆农业大学机电工程学院, 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆农业科学院农业机械化研究所, 乌鲁木齐 830091)

摘要: 针对残膜回收机捡拾装置寿命低以及作业过程中存在漏膜等问题,为提高残膜回收率及作业效率,设计了一种铲齿式起膜装置。设计起膜齿结构及排列方式,并进行起膜齿力学分析计算,确定起膜装置影响因素。使用 EDEM 软件对边膜齿开展离散元仿真,建立边膜齿-土壤的作业模型,选取边膜齿入土角、边膜齿铲片形状作为试验因素,以边膜齿所受合力以及磨损量作为评价指标,采用两因素三水平仿真试验。试验结果表明,当边膜齿入土角为 35°、边膜齿铲片形状为 SP₂ 时,作业性能较优,合力为 228.83 N,磨损量为 2.81 mm,较优组合下对土壤挠动情况进行分析,土壤表层呈驼峰状可有效抬起土壤,通过 ANSYS 结构静力学模块与 EDEM 耦合,得到边膜齿最大应力为 48.513 MPa,最大变形量为 0.416 mm,仿真结果表明起膜齿结构设计和作业情况满足设计要求。田间试验结果表明,铲齿式起膜装置平均起膜率为 94.2%,研究结果可为残膜回收机起膜装置设计提供参考。

关键词: 残膜回收机; 起膜装置; 铲齿式; 离散元

中图分类号: S223.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2025)01-0282-08 OSID: 

Design and Experiment of Spade Tooth Film Lifting Device for Residual Film Recycling Machine

JIANG Yongxin^{1,2} QU Heng¹ LIU Xuanfeng² ZHANG Haichun² ZHOU Xin² ZHANG Li²

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

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

Abstract: Aiming at the problems of low life span of the pick-up device of the residual film recycling machine and film leakage in the process of operation, a spade tooth film lifting device was designed to improve the residual film recovery rate and operational efficiency. The structure and arrangement of the teeth were designed, and the mechanical analysis and calculation of the teeth were carried out to determine the factors affecting the film pick-up device. Using EDEM software to carry out discrete element simulation on the edge film teeth, the operating model of edge film teeth - soil was established, the angle of the edge film teeth into the soil was selected, the shape of the edge film teeth shovel blade was taken as the test factors, and the combined force on the edge film teeth and the amount of abrasion were taken as the evaluation indexes, and two-factor and three-level simulation test was adopted. The test results showed that when the angle of the edge film teeth into the soil was 35°, the shape of the edge film teeth shovel blade was SP₂, the operational performance was better, the combined force was 228.83 N, the wear amount was 2.81 mm, the better combination of the analysis of the soil deflection situation, that the soil surface was hump-shaped can effectively lift the soil, through the ANSYS structural static module coupled with the EDEM to get the maximum stress of the edge film teeth. The maximum stress was 48.513 MPa and the maximum deformation was 0.416 mm, simulation results showed that the structural design and operation of the tines met the design requirements. The field test results showed that the average film lifting rate of the shovel tooth film lifting device was 94.2%, and the results can provide a reference for the design of film lifting device of the residual film recycling machine.

Key words: residual film recycling machine; film lifting device; spade tooth type; discrete element

收稿日期: 2024-09-18 修回日期: 2024-10-12

基金项目: 新疆农业科学院青年科技骨干创新能力培养项目(xjnkq-2023025)、新疆维吾尔自治区重点研发计划项目(2022B02022-3)、农业农村部西北绿洲农业环境重点实验室开放基金项目(XBLZ-20242)、新疆棉花产业技术体系项目(XJARS-03)、新疆维吾尔自治区“揭榜挂帅”项目和自治区公益性项目(KY2022018)

作者简介: 蒋永新(1975—),男,研究员,博士,主要从事智能农业装备研究,E-mail: 10661713@qq.com

通信作者: 刘旋峰(1981—),男,副研究员,博士生导师,主要从事农业智能装备工程技术研究,E-mail: 52695694@qq.com

0 引言

地膜覆盖技术在我国广泛应用,提升农业经济效益的同时造成了“白色污染”,残留在土壤中的地膜影响农作物生长^[1-4]。机械化残膜回收是治理残膜污染的重要途径,目前我国科研人员已经研制了多种残膜回收机具,但捡拾效率仍有待提高^[5-7]。由于田间作业环境复杂,拖拉机多次进出棉田造成地表不平整,捡拾装置在回收残膜过程中容易漏捡,并且土壤中的坚硬物易造成拾膜部件损坏,影响残膜回收作业效率。

针对起膜装置研究,孙岳等^[8]设计了一种旋转式起膜装置,起膜刀交错排列在刀轴上,该装置入土深度为 25 cm,可完成碎土、起膜、抛膜等一系列工作。康建明等^[9]设计了一种滑刀式起膜装置,整个装置与平行四杆仿形机构刚性连接,通过分析起膜机理,确定了起膜铲导曲面参数方程,田间试验起膜率达 91.30%。王昭宇等^[10]在捡拾装置前增设起膜轮,通过分析起膜过程,确定了起膜轮结构参数,采用非线性优化计算方法优化作业参数。

本文根据 1MSF-2.1 型残膜回收机作业要求,设计一种铲齿式起膜装置。分析起膜齿力学,确定影响作业的主要因素,采用离散元法对起膜齿作业过程进行数值模拟,得到较优作业参数,通过田间试验检测实际作业效果,以期进一步提高残膜回收率。

1 起膜装置结构组成与工作原理

1.1 结构组成

起膜装置位于残膜回收机捡拾装置下方,主要由横梁、连接架、起膜长齿(边膜齿)、起膜短齿、花键套管等组成,横梁与花键套管焊接,起膜齿齿根为花键状与横梁内花键套管相配合,通过双螺母紧固连接,起膜装置结构及工作原理图如图 1 所示,起膜装置主要技术参数见表 1。

1.2 工作原理

针对地表不平整、田间沟壑、边膜等问题,起膜装置需完成碎土起膜过程。残膜回收机田间作业时,起膜齿进入土壤,通过机具前行划破土层,在起膜齿齿尖剪切力和挤压力作用下将表层土壤及残膜向上隆起,捡拾装置和起膜齿交错排列,随后捡拾装置在疏松土壤中将隆起的残膜回收,机具前进同时,土壤和杂质从起膜齿间隙排至装置后侧,若土壤中含有石块等坚硬物,可通过起膜齿破碎以减少捡拾装置损坏状况。铲齿式起膜装置不仅增加残膜回收机捡拾装置寿命且增加残膜回收率,一定程度上提高了机具作业效率。

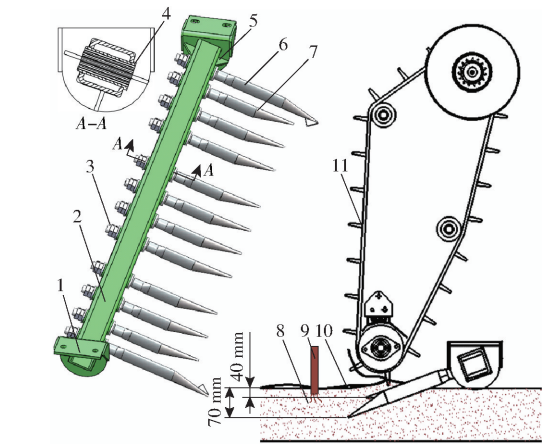


图 1 起膜-捡拾装置结构及工作原理图

Fig.1 Structure and working principle diagram of film lifting and picking up device

1. 连接架 2. 横梁 3. 锁紧螺母 4. 花键套管 5. 加强筋 6. 边膜齿 7. 起膜短齿 8. 土槽 9. 棉花根茬 10. 地膜 11. 捡拾装置

表 1 起膜装置主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of film lifting device

参数	数值
工作幅宽/mm	2 000
边膜齿入土深度/mm	70
起膜短齿入土深度/mm	40
机具前进速度/(km·h ⁻¹)	8

2 结构设计与参数确定

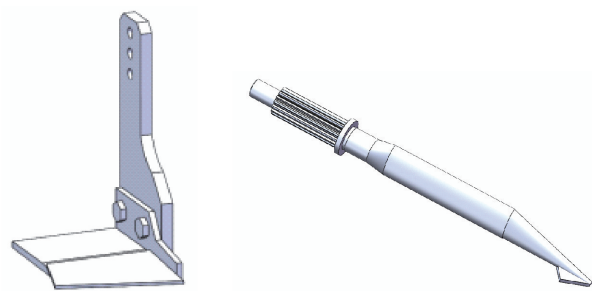
2.1 起膜齿设计

根据前期调研,棉田间沟壑深度在 35 mm 内,因此起膜短齿入土深度应不小于 35 mm,入土深度设计为 40 mm;边膜单边掩埋地表以下 50 ~ 70 mm 之间,边膜齿入土深度设计为 70 mm。边膜与覆土粘连,边膜较深,起边膜阻力较大。目前起边膜装置搭配较为普遍的边膜铲有双翼铲和单翼铲,其中双翼铲受力均衡,但工作中容易撕裂边膜,无效工作面较大;而单翼铲刃宽较长,翻起边膜宽度最大,有利于将边膜翻出^[11-12]。边膜齿设计采用单翼铲齿式单翼边膜齿形成,如图 2 所示,相对于传统边膜铲,提高了入土能力和降阻能力。

边膜齿齿尖处焊有铲片,铲片材料为 65 Mn 钢,铲片结构如图 3 所示,侧刃具有滑切作用,有利于破土且增加起膜面积,刃宽设计为 45 mm,铲片形状选取 3 种三角形:等腰三角形 (SP₁) 刃倾角 β 为 58°、三角形 (SP₂) 刃倾角 β 为 45°,以及直角三角形 (SP₃) 刃倾角 β 为 39°。

2.2 起膜装置排列设计

残膜回收机起膜效果与起膜装置排列方式相关,设计起膜齿间距时,需防止捡拾装置与起膜齿之



(a) 传统单翼边膜铲

(b) 铲齿式单翼边膜齿

图2 起边膜装置

Fig. 2 Lifting film units

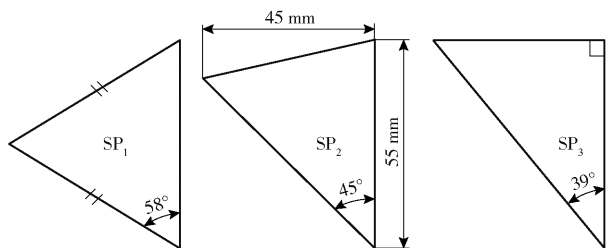


图3 铲片结构示意图

Fig. 3 Schematic of shovel blade structure

间产生干涉,并且需将起膜齿与棉花根茬避开,减少起膜齿齿尖磨损,提高起膜齿寿命。若起膜齿间距过大,整幅膜下土壤疏松效果不明显,存在漏膜现象,降低残膜回收率;若起膜齿间距过小,前进阻力增大,增加能耗,且石块等杂物无法从起膜齿间通过,容易造成壅土,不利于捡拾装置捡拾残膜,影响正常作业。根据前期调研,边膜单边掩埋宽度 50 ~ 70 mm,基于 1MSF-2.1 型棉秸秆粉碎还田及残膜回收打包一体机捡拾装置结构,起膜装置工作幅宽取 2 000 mm,边膜齿位于机具两侧对称安装,为减小起膜齿工作阻力,起膜齿数量取 12,排列示意图如图 4 所示。

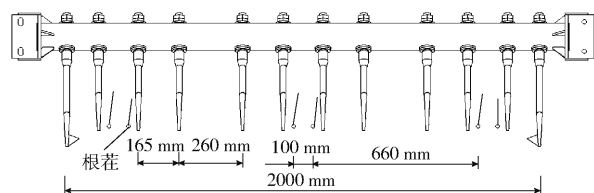


图4 起膜齿排列示意图

Fig. 4 Schematic of arrangement of film-raising teeth

匀速前进时,机具起膜齿铲起土壤及土壤表面残膜和杂质,利于捡拾装置进行残膜回收。对起膜短齿进行力学分析,建立直角坐标系,如图 5 所示。根据力学平衡方程得

$$F = F_f + f_1 \cos \alpha + N_1 \sin \alpha \quad (1)$$

式中 F ——起膜齿牵引力, N

F_f ——楔面切土阻力, N

f_1 ——起膜齿切土面受土壤摩擦力, N

N_1 ——起膜齿表面法向载荷, N

α ——起膜齿入土角, ($^\circ$)

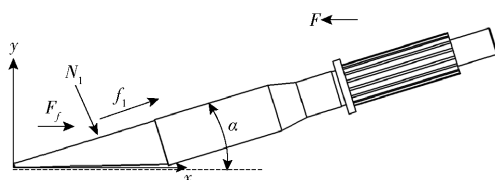


图5 起膜短齿受力分析

Fig. 5 Force analysis of film-raising short tooth

对式(1)化简得

$$F = F_f + \sqrt{f_1^2 + N_1^2} \sin(\alpha + \varphi) \quad (2)$$

其中

$$\tan \varphi = \frac{f_1}{N_1} = \mu \quad (3)$$

式中 φ ——三角函数辅助角, ($^\circ$)

μ ——土壤摩擦因数

由式(2)、(3)可知,影响起膜短齿牵引力的主要因素为入土角 α 和楔面切土阻力 F_f 。

相对于起膜短齿,边膜齿入土深度大且受力面积大,所受合力最大,容易损坏,对边膜齿进行受力分析,建立空间力系坐标,如图 6 所示,通过受力平衡方程可以确定齿面入土角度的理论值,边膜齿受力平衡方程为

$$F = f_1 \cos \alpha + N_1 \sin \alpha + N_2 \sin \beta + f_2 \cos \beta + F_f \quad (4)$$

式中 f_2 ——铲片刃面受土壤摩擦力, N

N_2 ——铲片刃面所受土壤压力, N

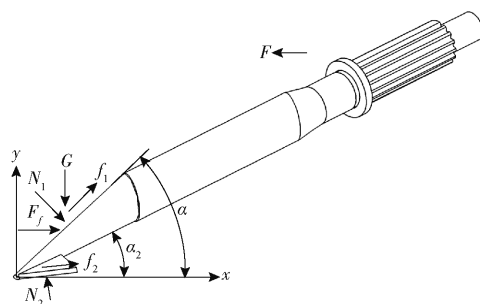


图6 边膜齿受力分析

Fig. 6 Force analysis of side film teeth

边膜齿入土作业时受力与土壤受力相同,由于铲片前端宽度较小,切土阻力忽略不计,则力系平衡方程为^[13]

$$\begin{cases} N_1 \sin \alpha + f_1 \cos \alpha + F_f - N_3 \sin \theta - \\ (T_1 + F_1 + F_a) \cos \theta = 0 \\ G - N_1 \cos \alpha + f_1 \sin \alpha - N_3 \cos \theta + \\ (T_1 + F_1 + F_a) \sin \theta = 0 \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$F_a = \frac{\gamma}{g} b h v^2$$

$$F_1 = c S \quad T_1 = \mu' N_3$$

式中 N_3 ——地表土壤对齿表面的土壤挤压力, N

G ——土壤、残膜及表面杂质重力, N

T_1 ——土壤内摩擦力, N

b ——边膜齿齿尖工作面宽度,mm
 h ——边膜齿入土深度,mm
 F_1 ——土壤内部剪切失效时剪切力,N
 F_a ——土壤运动加速力,N
 θ ——土壤剪切角,(°)
 v ——作业速度,m/s γ ——土壤容重
 c ——土壤内聚力,Pa
 S ——扰动土壤剪切面面积,m²
 μ' ——土壤内摩擦因数
由式(5)可得牵引力 F 为

$$F = N_1 (\sin\beta + \mu' \cos\beta) + \frac{\mu \cos\alpha + \sin\alpha}{g \sin(\alpha + \theta)} \cdot \frac{Gg(\sin\theta + \mu' \cos\theta) \sin(\alpha + \theta) + cSg \sin(\alpha + \theta) + \gamma h d v^2 \sin\alpha}{(1 - \mu\mu') \sin(\alpha + \theta) + (\mu' + \mu) \cos(\alpha + \theta)}$$

(6)

由式(4)~(6)可知,影响边膜齿受力的主要因素为入土角 α 和铲片刃倾角 β ,入土角为齿尖刃线与其在地平面上投影线的夹角,入土角直接影响起膜齿破碎土壤和起膜作业效果。若入土深度不变,入土角增大,碎土效果好,起膜齿越容易入土,但入土角过大,容易撕裂地膜,起膜齿不能正常托起残膜,影响捡拾整机作业效果;入土角过小,起膜齿托起的残膜和杂物将会雍堵在起膜齿的横梁上,导致工作阻力增加,影响捡拾装置正常作业,增大能量消耗。边膜齿入土角 α 可取 $25^\circ \sim 45^\circ$ ^[13-14],采用离散元方法确定边膜齿入土角 α 。

3 仿真

起膜齿在工作过程中对土壤的撬动不便观察,离散元是一种模拟土壤和机械相互作用的分析方法^[15-16],利用 EDEM 模拟起膜齿对土壤的破碎过程中土壤颗粒的动态特性。由于边膜齿为易损坏部件,因此只对单个边膜齿进行离散元仿真分析。选取土壤与边膜齿接触模型为 Hertz - Mindlin (no silp)、土壤与土壤接触模型为 Hertz - Mindlin with JKR^[17-19],根据边膜齿碎土过程中土壤与边膜齿、土壤与土壤的相互作用及运动规律,参照文献[20-23],材料参数见表 2,土壤材料接触参数见表 3。保证运算正确基础上需降低计算机运算量,土壤颗粒采用单球体模型,颗粒半径 2.5 mm,选取颗粒工厂尺寸为 1 200 mm×400 mm×150 mm,采用虚实结合的方法填充颗粒,边膜齿-土壤仿真模型如图 7 所示。

3.1 试验方案设计及结果

以边膜齿入土角与铲片形状作为试验因素,以边膜齿所受合力磨损量作为评价指标,进行两因素三水平仿真试验^[24],试验因素水平如表 4 所示。

表 2 材料参数

Tab. 2 Material parameters

材料	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(kg·m ⁻³)
边膜齿	0.3	7.9×10^{10}	7 860
土壤颗粒	0.3	5.0×10^7	2 600

表 3 土壤接触参数

Tab. 3 Soil contact parameters

项目	弹性恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数	JKR/(J·m ⁻²)
土壤与边膜齿	0.54	0.31	0.13	
土壤与土壤	0.21	0.68	0.27	7.8

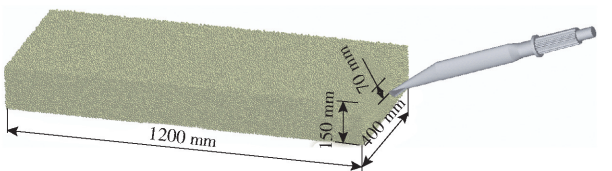


图 7 EDEM 仿真模型
Fig. 7 EDEM simulation model

表 4 仿真试验因素水平

Tab. 4 Simulation test factors and levels

水平	因素	
	边膜齿入土角 $A/(^\circ)$	铲片形状 B
1	25	SP ₁
2	35	SP ₂
3	45	SP ₃

根据 1MSF-2.1 型棉秸秆粉碎还田及残膜回收打包一体机作业要求,选取入土深度为 70 mm,机具前进速度为 8 km/h,记录数据间隔为 0.01 s,设置混合步数为 20%。由于磨损量具有累加性,在作业稳定情况下,取 0.55 s 时间节点作为试验数据。边膜入土角为 A 、铲片形状为 B 、合力为 Y_1 、磨损量为 Y_2 ,试验方案及结果如表 5 所示, X_1 、 X_2 为因素水平。

表 5 试验方案及结果

Tab. 5 Experimental program and results

试验序号	因素		合力 Y_1 /N	磨损量 Y_2 /mm
	X_1	X_2		
1	1	1	263.02	2.68
2	1	2	241.37	2.52
3	1	3	266.54	2.83
4	2	1	251.03	3.04
5	2	2	228.83	2.81
6	2	3	262.69	3.13
7	3	1	286.16	3.68
8	3	2	269.18	3.46
9	3	3	302.52	3.87

仿真试验前需对 Particle to Geometry 添加磨损模型 Archard Wear,将磨损系数设为 $1 \times 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$,

仿真结束后,EDEM 后处理模块导出所受合力和磨损量。

3.2 试验结果分析

为找出最佳参数组合,定量研究试验因素对试验指标的影响。对试验数据进行处理,得出试验因素对试验指标影响的趋势图,如图 8 所示。

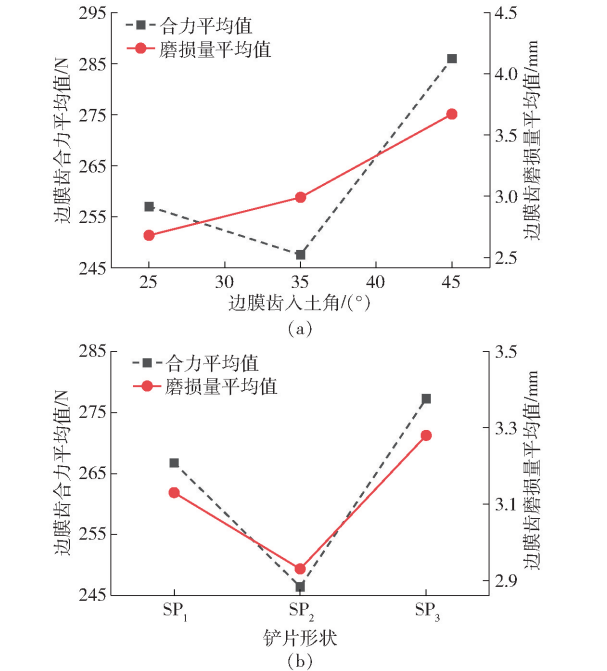


图 8 各试验因素对试验指标的影响
Fig.8 Effect of test factors on test indicators

由表 5 和图 8a 可知,随着边膜齿入土角增大,磨损量增大(2.68 ~ 3.67 mm),边膜齿所受合力呈先减小后增大趋势,当入土角达 35°时,所受合力平均值最小为 247.52 N。为增加边膜齿齿尖使用寿命,应减小磨损量,根据综合平衡法,当所受合力最小时,磨损量越小,使用寿命越长,选取边膜齿入土角为 35°。由表 5 和图 8b 可知,铲片形状为 SP₂时,边膜齿所受合力及磨损量最小,合力平均值为 246.46 N,磨损量平均值为 2.93 mm,选取优化铲片形状为 SP₂。综上所述,选取优化组合为 A₂B₂,即边膜齿入土角为 35°、铲片形状为 SP₂,边膜齿所受合力为 228.83 N,磨损量为 2.81 mm。

利用 EDEM 后处理模块提取边膜齿作业过程中土壤绝对工作阻力及各轴方向分量^[25-26],如图 9 所示,土壤阻力在边膜齿进入土壤后趋于稳定,土壤绝对工作阻力与 x 轴分量具有相似的变化趋势,变化范围为 150 ~ 320 N,沿 y 轴和 z 轴分量变化波动较小,边膜齿土壤阻力见表 6。

3.3 优化结果土壤扰动分析

土壤扰动能够直接反映土壤颗粒运动路径和分布情况^[27],优化参数组合 A₂B₂土壤扰动情况,选取

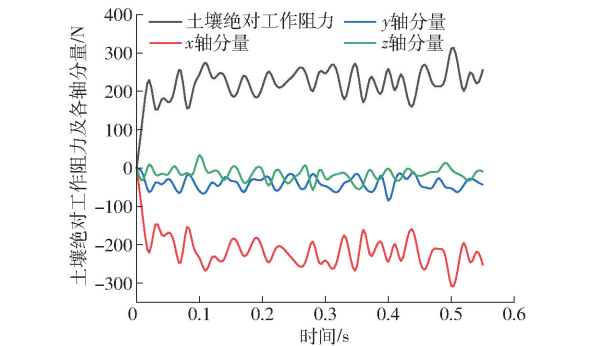


图 9 工作阻力仿真曲线
Fig.9 Simulated working resistance curves

表 6 载荷统计
Tab.6 Load statistics

参数	绝对值	x 轴分量	y 轴分量	z 轴分量
最大值	311.34	-131.57	-10.42	34.21
最小值	136.31	-306.84	-84.81	-57.25
均值	223.26	-217.94	-40.22	-15.75
标准差	35.36	34.76	16.19	16.47

边膜齿稳定工作时间为 0.55 s,土壤扰动云图如图 10 所示。由图 10a 可知,土壤表层形成扇形扰动轮廓,正向堆积角为 24.08°;由图 10b 可知,土壤表层形成驼峰状,侧向堆积角为 42.84°;由图 10c 可知,土壤颗粒运动呈发散状,在边膜齿作用下土壤扰动呈非对称状。齿身与齿尖连接处铲起颗粒有少量起伏变化,表明破碎土壤颗粒断裂后沿齿身与齿尖平面向连接处发生侧向移动,增加颗粒滑行距离,颗粒不稳定状态突出,在竖直方向较为活跃,在边膜齿剪切与挤压下土壤沿齿面向上运动,工作时能有效将土壤切破抬升,切土效果较好,提高了捡拾装置作业效率。由土壤扰动情况来看,较优参数组合可有效抬起疏松土壤,满足设计要求。

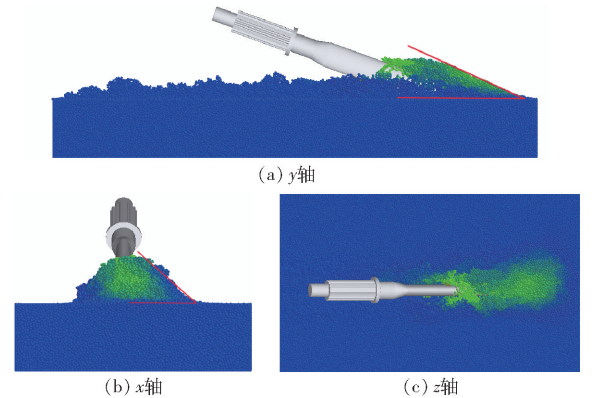


图 10 土壤颗粒扰动云图
Fig.10 Cloud maps of soil particle disturbance

3.4 离散元-有限元耦合分析

由离散元分析可知,当边膜齿在 0.5 s 时产生最大合力,将 0.5 s 处边膜齿受力数据导出,以边膜齿接触力作为载荷条件,通过单向耦合有限元软件

ANSYS 结构静力学 Static Structural 和离散元 EDEM 模块^[28]。Workbench 网格划分与 EDEM 网格划分保持一致,采用 2 mm 的四面体网格,在齿根花键处添加固定载荷,所受合力由 EDEM 模块导入。

边膜齿等效应力云图如图 11 所示。模型应力集中部位主要在边膜齿焊接处以及齿身与齿根连接处,且模型应力最大值为 48.513 MPa,远小于材料最大许用应力。模型变形云图如图 12 所示,边膜齿变形由齿尖向齿身方向逐渐减小,由于边膜齿无对称性,同时在土壤挤压作用下,变形方向向无单翼侧,模型最大变形位于边膜齿齿尖端部,变形量最大为 0.416 mm,在齿根处变形最小。综上所述,边膜齿强度及刚度满足设计要求。

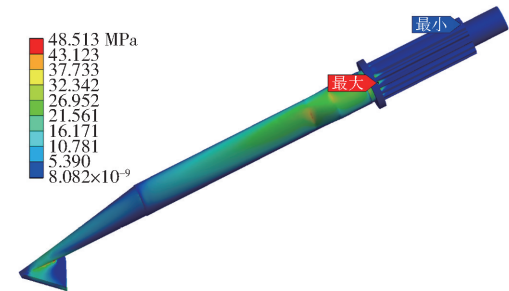


图 11 边膜齿等效应力云图

Fig. 11 Side film tooth stress cloud diagram

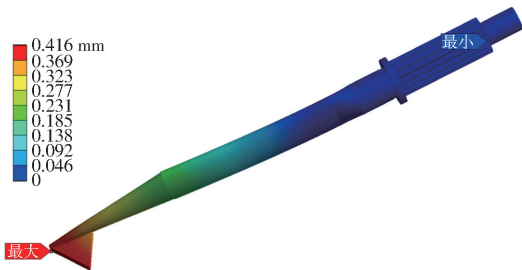


图 12 边膜齿变形云图

Fig. 12 Side film teeth deformation cloud diagram

4 田间试验

4.1 试验条件

为检验起膜装置田间作业性能及可靠性,于 2024 年 3 月在新疆维吾尔自治区巴音郭楞蒙古自治州尉犁县进行田间作业性能试验。试验地块滴灌带已取出,地膜为 0.01 mm 的耐候地膜,幅宽为 2 050 mm,完整性较好,土壤类型为砂土,TJSD-750-2 型土壤紧实度仪测得土壤紧实度为 3 960 kPa,TJS-1 型土壤水分测试仪测得含水率为 16.9%。配套动力为亿嘉迪敦 YJ1804-F,试验平台采用新疆农业科学院农业机械化研究所生产的 1MSF-2.1 型棉秸秆粉碎还田及残膜回收打包一体机,机具作业速度为 8 km/h。

4.2 试验方案

起膜率直接反映起膜装置作业效果,由残膜回

收机进行起膜试验,试验选取测区长度 10 m,由人工捡拾测区内未起的地膜,分别将地膜洗净、晾干、称量,试验重复 5 次,试验结果取 5 次测试结果平均值,则起膜率 Y_1 计算式为

$$Y_1 = \frac{M_1}{M_1 + M_2} \times 100\%$$
 (7)

式中 M_1 ——起膜装置遗漏地膜质量,g
 M_2 ——起膜装置铲起地膜质量,g

4.3 试验结果

田间试验效果如图 13 所示,结果如表 7 所示。



图 13 田间试验

Fig. 13 Field experiments

表 7 田间试验结果

Tab.7 Result of field experiment

试验序号	起膜率/%
1	93.4
2	93.8
3	94.3
4	94.5
5	94.8
平均值	94.2

由表 7 可知,铲齿式起膜装置平均起膜率为 94.2%,起膜齿可有效破碎土壤,将土壤和残膜抬升,残留边膜较少,且不平整地况可有效捡拾残膜,起膜效果较好,因根茬容易挂膜,不易捡拾,从而降低了起膜率。机具作业过程中,未发生壅土现象,机具运行状况良好,性能稳定,可有效提高残膜回收率。

5 结论

- (1) 针对沟壑地况提高残膜回收机捡拾率以及作业效率需求,设计了一种铲齿式起膜装置,确定起膜齿结构参数,对起膜齿进行力学分析,确定影响作业效果的主要因素。
- (2) 对边膜齿进行离散元仿真模拟试验,以边膜齿入土角、铲片形状作为试验因素,以边膜齿所受

合力以及磨损量作为评价指标,得到最优参数组合:边膜齿入土角为 35°、铲片形状为 SP₂。应用 ANSYS 和离散元 EDEM 耦合对边膜齿进行静力学分析,模型应力集中主要位于铲片焊接处以及齿身与齿根连接处,最大应力为 48.513 MPa,满足材料许用应力,

验证了边膜齿可行性与有效性。
(3)利用仿真优化得到的结构参数制作起膜装置,并进行田间试验。试验结果表明,该装置可有效抬起土壤和残膜,平均起膜率为 94.2%,起膜效果较好,满足设计要求。

参 考 文 献

[1] 张加凡,梁静,罗守杨,等.农田残膜污染现状及其治理对策[J].土壤与作物,2022,11(4):385-397.
ZHANG Jiafan, LIANG Jing, LUO Shouyang, et al. Current situation and countermeasures of residual plastic film pollution in farmland[J]. Soils and Crops,2022,11(4):385-397. (in Chinese)

[2] 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)

[3] 王海基,王敏,王吉亮,等.新疆农田残膜污染治理技术与防控策略[J].中国农机化学报,2022,43(4):166-174.
WANG Haiji, WANG Min, WANG Jiliang, et al. Control technology and control strategy of residual film pollution in Xinjiang farmland[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022,43(4):166-174. (in Chinese)

[4] WANG Lin, LI Xiaogang, LU Jieting, et al. Continuous plastic-film mulching increases soil aggregation but decreases soil pH in semiarid areas of China[J]. Soil & Tillage Research,2017,167:46-53.

[5] 蒋德莉,陈学庚,颜利民,等.农田残膜资源化利用技术与装备研究[J].中国农机化学报,2020,41(1):179-190.
JIANG Deli, CHEN Xuegeng, YAN Limin, et al. Research on technology and equipment for utilization of residual film in farmland[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020,41(1):179-190. (in Chinese)

[6] 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].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)

[7] 邢剑飞,王旭峰,王龙.残膜回收机在新疆地区的应用现状研究[J].塔里木大学学报,2019,31(3):76-82.
XING Jianfei, WANG Xufeng, WANG Long. Research on the application status of residual plastic film recycling machine in Xinjiang[J]. Journal of Tarim University, 2019,31(3):76-82. (in Chinese)

[8] 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)

[9] 康建明,王士国,颜利民,等.残膜回收机起膜铲设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(增刊):143-148.
KANG Jianming, WANG Shiguo, YAN Limin, et al. Design and experiment of loosen shovel installed on plastic film collecting machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(Supp.):143-148. (in Chinese)

[10] 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 ddevice for profile modeling residual plastic film collector[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(4):80-90. (in Chinese)

[11] 连潇,王建吉,寇元哲.垄膜种植残膜回收机边膜铲的设计与试验[J].安徽农业大学学报,2020,47(3):494-498.
LIAN Xiao, WANG Jianji, KOU Yuanzhe. Design and experiment of side-film shovel of residual film recycling machine for ridge and film trend-planting[J]. Journal of Anhui Agricultural University,2020,47(3):494-498. (in Chinese)

[12] 谢建华,杨豫新,唐炜,等.基于离散元法的不同起边膜装置的性能分析及试验[J].农机化研究,2021,43(5):10-17.
XIE Jianhua, YANG Yuxin, TANG Wei, et al. Performance analysis and test of different rising edge film devices based of discrete element method[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021,43(5):10-17. (in Chinese)

[13] 张佳喜,张丽,刘旋峰,等.不同边膜铲起膜性能分析及其起膜率对比试验[J].农业工程学报,2017,33(4):10-15.
ZHANG Jiayi, ZHANG Li, LIU Xuanfeng, et al. Mechanical analysis and contrast experiment on collecting residual plastic film with different side-film shovels[J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(4):10-15. (in Chinese)

[14] 蔺吉顺,毕晓伟,刘东华.强切割农田起膜铲的设计[J].中国农机化学报,2014,35(6):91-93.
LIN Jishun, BI Xiaowei, LIU Donghua. Design of strong cutting farm film shovel[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2014,35(6):91-93. (in Chinese)

[15] GAO Qun, CHEN Ying, ZHOU Haibo, et al. Simulation of a seed opener using the discrete element method (DEM)[J]. Agric. Eng. Int.:CIGR Journal, 2015,17(3):72-82.

[16] LI Bo, XIA Rui, LIU Fanyi, et al. Determination of the draft force for different subsoiler points using discrete element method [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016,9(3):81-87.

- [17] 戴飞,宋学锋,赵武云,等.全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定[J].农业机械学报,2019,50(2):49–56,77. DAI Fei, SONG Xuefeng, ZHAO Wuyun, et al. Simulative calibration on contact parameters of discrete elements for covering soil on whole plastic film mulching on double ridges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2):49–56,77. (in Chinese)
- [18] 张冲,范旭辉,李明森,等.基于 EDEM 的凿式犁铲土壤扰动仿真分析与试验[J].农业机械学报,2022,53(增刊2):52–59. ZHANG Chong, FAN Xuhui, LI Mingsen, et al. Simulation analysis and experiment of soil disturbance by chisel plow based on EDEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022,52(Supp.2):52–59. (in Chinese)
- [19] 周华,车海龙,耿端阳,等.玉米田耕层典型土壤离散元模型建立与参数标定[J].农业机械学报,2023,54(11):49–60,113. ZHOU Hua, CHE Hailong, GENG Duanyang, et al. Discrete element modeling and parameter calibration of typical soil in maize field tillage layer[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(11):49–60,113. (in Chinese)
- [20] 刘进宝,郑炫,杨怀君,等.基于离散元的棉田仿生减阻犁型设计与试验[J].中国农机化学报,2024,45(2):13–19. LIU Jinbao, ZHENG Xuan, YANG Huaijun, et al. Design and experiment of bionic drag reduction plough in cotton field based on discrete element method[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024,45(2):13–19. (in Chinese)
- [21] 张锐,韩佃雷,吉巧丽,等.离散元模拟中沙土参数标定方法研究[J].农业机械学报,2017,48(3):49–56. ZHANG Rui, HAN Dianlei, JI Qiaoli, et al. Calibration methods of sandy soil parameters in simulation of discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(3):49–56. (in Chinese)
- [22] 李蒙良,王立宗,廖庆喜,等.油菜机直播微垄种床制备过程旋耕后土壤离散元参数标定[J].农业工程学报,2023,39(20):10–19. LI Mengliang, WANG Lizong, LIAO Qingxi, et al. Calibration of rototilled soil discrete element parameters after rotary tillage in the preparation process of rapeseed mechanized direct seeding micro-ridge seed ben[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(20):10–19. (in Chinese)
- [23] 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)
- [24] 吴紫晗,李粤,郭超凡,等.自走式香蕉秸秆粉碎还田机设计与仿真分析[J].中国农机化学报,2022,43(9):40–46. WU Zihan, LI Yue, GUO Chaofan, et al. Design and simulation analysis of self-propelled banana straw crushing and returning machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022,43(9):40–46. (in Chinese)
- [25] 顿国强,陈海涛,纪文义.基于 EDEM 仿真与 SolidWorks Simulation 的凿式深松铲有限元分析[J].河南农业大学学报,2017,51(5):678–682. DUN Guoqiang, CHEN Haitao, JI Wenyi. Finite element analysis of chisel-type deep shovel based on EDEM and SolidWorks Simulation[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2017,51(5):678–682. (in Chinese)
- [26] 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)
- [27] 李吉成,孙坤鹏,张永华,等.基于离散元法的双翼深松铲耕作行为的仿真分析[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2023,44(2):67–75. LI Jicheng, SUN Kunpeng, ZHANG Yonghua, et al. Simulation of tillage behavior of double winged subsoiler based on discrete element method[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University(Natural Science Edition), 2023,44(2):67–75. (in Chinese)
- [28] 程双娇,王立华,王学军,等.基于 ANSYS 与 EDEM 耦合的有砟轨道结构力学特性研究[J].机械与电子,2018,36(1):3–6,14. CHENG Shuangjiao, WANG Lihua, WANG Xuejun, et al. Study on mechanical characteristics of ballasted track based on coupling of ANSYS and EDEM[J]. Machinery and Electronics, 2018,36(1):3–6,14. (in Chinese)