

大豆玉米带状复合种植模式下仿生减阻破茬防堵装置设计与试验

朱惠斌 李 垚 白丽珍 李榕东 王明鹏 徐 豪

(昆明理工大学现代农业工程学院, 昆明 650500)

摘要: 针对西南地区耕地地块零散、土壤黏重、秸秆覆盖量大且以整秆覆盖为主等特点,结合大豆玉米带状复合种植免耕播种作业需求,设计了一种费马螺线型仿生减阻破茬防堵装置。基于滑切切割理论构建费马螺线型破茬刀刃口曲线,并以疑布甲虫翅鞘表面非光滑结构为仿生对象,设计楔形仿生减阻单元。建立“秸秆与根茬-黏重土壤-破茬装置”离散元耦合模型,采用二次回归正交旋转组合试验,对机组前进速度、破茬刀转速及刃口角度等关键参数进行优化分析。正交试验结果表明,当机组前进速度为 0.91 m/s、破茬刀转速为 225 r/min、刃口角度为 25.2°时,破茬刀对根茬的粘结键断裂数量为 21 470,作业功率为 5.82 kW。田间试验结果表明,在平均秸秆覆盖率为 94%、整秆覆盖量为 0.575 kg/m² 条件下,装置对玉米-大豆秸秆的平均切断率为 92.98%,较传统缺口型圆盘破茬刀提高 50.91%,作业过程中通过性良好,满足西南地区免耕播种作业要求。研究揭示了费马螺线刃口滑切特性与仿生减阻单元协同作用机制,验证了仿生曲线刀具在高覆盖、黏重土壤条件下的减阻防堵优势,为西南丘陵地区免耕播种机关键部件的结构创新与参数优化提供了理论依据与技术支持。

关键词: 免耕播种机; 费马螺线; 离散元法; 仿生减阻; 破茬防堵装置; 复合种植模式

中图分类号: S223

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)11-0067-10

OSID:



Design and Experiment of Bionic Drag-reducing, Stubble-breaking and Anti-blocking Device under Soybean – Maize Strip Intercropping System

ZHU Huibin LI Yao BAI Lizhen LI Rongdong WANG Mingpeng XU Hao

(Faculty of Modern Agricultural Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Aiming to address the characteristics of fragmented farmland plots, heavy clay soil, and extensive straw coverage (primarily whole-stalk coverage) in the southwestern region, a bionic drag-reduction anti-clogging device based on the Fermat spiral was designed to meet the requirements of no-till seeding for soybean – corn strip intercropping. The cutting-edge curve of the stubble-breaking blade was constructed based on sliding-cutting theory, and a wedge-shaped biomimetic drag-reducing unit was designed, inspired by the non-smooth surface structure of the Tenebrionidae elytra. A discrete element coupling model of “multi-crop residues – heavy clay soil – residue-clearing device” was established, and a second-order orthogonal rotation combination experiment was conducted to optimize key parameters, including the forward speed of the machine, the rotational speed of the stubble-breaking blade and the blade edge angle. The orthogonal experimental results showed that when the forward speed was 0.91 m/s, the rotational speed of the stubble-breaking blade was 225 r/min, and the blade edge angle was 25.2°, the number of bonding breaks between the stubble-breaking blade and root residues reached 21 470, with an operational power of 5.82 kW. Field tests demonstrated that under conditions of an average straw coverage rate of 94% and a whole-stalk coverage of 0.575 kg/m², the device achieved an average cutting rate of 92.98% for corn – soybean straw, representing a 50.91% improvement compared with that of traditional notched disk blades. The device exhibited good passability during operation, meeting the requirements of no-till seeding in the southwestern region. The results revealed the synergistic

收稿日期: 2026-03-16 修回日期: 2026-03-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(52265033)和云南省自然科学基金项目(202401AS070115)

作者简介: 朱惠斌(1974—),男,教授,博士,主要从事丘陵山区保护性耕作技术与装备研究,E-mail: hbzhu113@163.com

通信作者: 白丽珍(1975—),女,高级实验师,主要从事智慧农业生产技术与装备研究,E-mail: lzhbai@163.com

mechanism between the sliding-cutting characteristics of the Fermat spiral cutting edge of the stubble-breaking blade and the biomimetic drag-reducing structure, validating the advantages of biomimetic curved stubble-breaking blade in reducing drag and preventing blockage under conditions of high straw coverage and heavy clay soil. The research result can provide theoretical support and technical foundation for the structural innovation and parameter optimization of key components of no-till seeder in hilly regions of southwestern China.

Key words: no-till seeder; Fermat spiral; discrete element method; biomimetic drag reduction; anti-clogging device; strip intercropping system

0 引言

西南地区受地形起伏大、耕地地块零散及长期不合理耕作方式等因素影响^[1-2],水土流失、土壤退化和肥力下降等问题较为突出^[3-4]。在此背景下,发展保护性耕作技术与高效复合种植模式,对提升土地利用效率和保障区域粮食安全具有重要意义。大豆玉米带状复合种植通过优化作物空间配置,实现“玉米基本不减产、多收一季豆”的生产目标^[5],有利于提升农田生态系统稳定性和生物多样性^[6-7]。然而,在大豆玉米带状复合种植模式下,前茬作物秸秆与根茬残留量大且分布复杂,叠加西南地区土壤黏重、含水率高等典型工况,使免耕播种过程中易出现秸秆缠绕、入土阻力大及机具堵塞等问题,严重影响播种作业连续性与作业质量。因此,需对该地区特有的种植模式及作业环境下免耕播种机的关键部件进行设计。

破茬防堵装置作为免耕播种装备的核心部件,其残茬处理能力与物料流动稳定性直接影响播种精度、作业连续性和种床质量^[8-10]。针对免耕条件下秸秆堆积与堵塞问题,国内外学者围绕破茬防堵装置结构形式及作用机理开展了大量研究,相关技术总体可分为驱动式和被动式两类。驱动式防堵技术通过引入外部动力增强秸秆切断与输送能力,是当前免耕播种机防堵研究的重要方向^[11]。ZHANG等^[12]研制了驱动-弹性清秸装置,在保证清秸效果的同时降低了土壤扰动;张银平等^[13-14]设计了动定刀组合式根茬切割及破碎移位装置,并提出动力补偿自适应清秸装置,提高了秸秆切断效率。陈海涛等^[15]研制了免耕精量播种覆秸一体机,实现了清秸与覆秸作业的协同优化。ZHANG等^[16]结合试验与离散元仿真方法,分析了圆辊爪式防堵机构作用下秸秆运动特性。朱惠斌等^[17]和毕津硕等^[18]分别提出动力式切茬防堵装置和动态滑切驱动圆盘防堵装置,在提高切断率的同时降低了作业功率。被动式防堵技术主要通过优化作业部件结构参数和物料流动路径,在不依赖外部动力输入的条件下实现防堵与清秸,具有结构简单、能耗低等优势。张仕林

等^[19]提出切抛组合式破茬清秸防堵装置,提高了种带清洁度;LIN等^[20]设计了铲式播种床整备机,并揭示了秸秆在防堵结构作用下的运动规律;LI等^[21]提出渐开线缺口圆盘结构,改善了秸秆切割性能并降低了作业阻力。ZHENG等^[22]通过设置导流板与茬板结构,提高了秸秆流动稳定性;毕津硕等^[23]基于动态滑切理论设计了被动式锯齿圆盘防堵装置。KUMAR等^[24]和 LOPES等^[25]分别从残茬清理效果和载荷条件角度,分析了被动式切刀结构对秸秆切割性能和能耗特性的影响。现有研究在免耕播种机破茬防堵装置结构设计及参数优化方面取得了一定进展,但在复杂秸秆覆盖条件下的通过性、黏重土壤工况下的减阻性能以及整秆覆盖条件下的切断稳定性等方面仍存在不足,难以满足西南地区免耕播种作业对稳定性与低能耗的综合需求。

针对上述问题,本文以大豆玉米带状复合种植条件下的免耕播种作业为研究对象,基于滑切理论提出一种费马螺线型仿生减阻破茬防堵装置。通过构建费马螺线型破茬刀刃口曲线,并引入疑布甲虫翅鞘非光滑结构进行仿生减阻设计,结合离散元仿真与田间试验,对装置结构参数及作业性能进行系统分析与验证,以期对复杂秸秆覆盖条件下免耕播种机破茬防堵装置的设计与优化提供工程参考。

1 总体结构设计和工作原理

1.1 总体结构

大豆玉米带状复合种植免耕播种机主要由主机架、驱动式清秸装置、开沟施肥装置、播种单元和覆土镇压装置等部分组成,如图 1 所示。机具作业时,经传动系统驱动破茬刀与清秸装置协同作业,实现秸秆切断与侧向清理,为后续播种单元提供相对洁净的播种带条件。免耕播种机整机主要结构参数如表 1 所示。

1.2 工作原理

大豆玉米带状复合种植免耕播种机通过后方三点悬挂装置与拖拉机连接。作业过程中,拖拉机动力经 PTO 输入并分配为两路:一路驱动破茬刀旋转,实现秸秆及根茬切断;另一路驱动清秸装置侧向

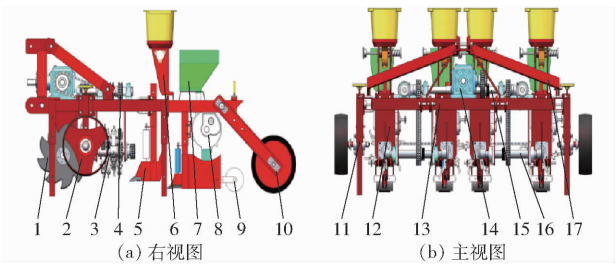


图 1 大豆玉米带状复合种植免耕播种机结构示意图
Fig. 1 Structure of soybean – corn strip intercropping no-till seeder

1. 仿生减阻圆盘刀 2. 地轮 3. 驱动式清秸装置 4. 传动链轮
5. 施肥开沟器 6. 槽轮式排肥器 7. 种箱 8. 勺轮式排种器
9. 覆土轮 10. 镇压轮 11. 脚支架 12. 固定板 13. 机架 14. 一级减速器 15. 主轴 16. 圆盘刀传动轴 17. 三点悬挂装置

表 1 大豆玉米带状复合种植免耕播种机主要参数
Tab.1 Main parameters of corn and soybean strip no-till seeder

参数	数值/型式
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 800 × 2 200 × 1 400
质量/kg	750
配套功率/kW	22. 37 ~ 37. 29
开沟器类型	锄式
排肥器类型	槽轮式
排种器类型	勺轮式
玉米行距/cm	40
玉米株距/cm	20
大豆行距/cm	30
大豆株距/cm	15
施肥深度/cm	4 ~ 5
播种深度/cm	3 ~ 4
作业行数	4

运动,将残茬抛移至播种带两侧,从而为播种单元提供清洁作业带。

2 关键部件设计

2.1 费马螺旋型仿生减阻破茬刀结构设计

费马螺旋型仿生减阻破茬防堵装置(后文简称“破茬装置”,主要包括破茬刀和减阻单元)作为免耕播种机的核心作业部件,其结构与性能直接影响机具的入土能力、秸秆切断效果及防堵性能。基于滑切切割理论,引入费马螺旋作为破茬刀刃口曲线形式,设计费马螺旋型破茬刀结构,其总体结构如图 2 所示。

2.1.1 破茬刀旋转半径的确定

破茬刀旋转半径是影响秸秆切断效果与机具通过性的关键结构参数之一。因此,有必要在满足切断要求的前提下合理确定破茬刀旋转半径。在文献[26]参数设置基础上,结合本文研究对象对部分参数进行调整后,取地表土壤与秸秆之间的摩擦角

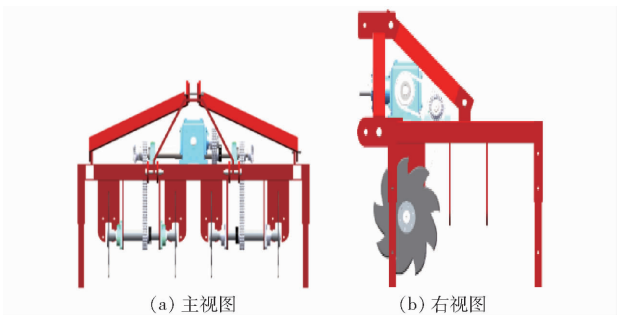


图 2 破茬装置结构示意图
Fig. 2 Structure of bionic stubble-breaking device

为 30°,秸秆与刀具之间的摩擦角为 35°,得到破茬刀合理旋转直径为 450 mm。

2.1.2 破茬刀刃口数量确定

破茬刀刃口数量直接影响刀具对残茬的连续切割能力及防堵性能。基于破茬装置主要作用于高密度根茬分布区域的工程需求,选取 50 mm 作为有效切削深度进行刃口数量设计。根据相邻刃口在圆周方向上的切削连续性条件,确定破茬刀缺口包角为 40°,最终得到破茬刀刃口数量为 9 个。

2.1.3 费马螺旋刀刃口曲线方程

在农机刀具的设计体系中,刃口几何形态是决定土壤穿透效率与防堵塞能力的关键技术指标。其中,具有凸面特征的刃口设计展现出优异的滑切性能,其独特的曲线结构能形成渐进式滑切轨迹,从而在降低作业能耗的同时,显著提升秸秆切断质量^[27]。

基于滑切割理论,构建滑切角动态演化模型,系统分析费马螺旋变曲率特性对秸秆切断机理及切割性能的影响。基于此坐标系及参数定义,费马螺旋型破茬刀的刃口曲线方程为

$$\begin{cases} x = R_0 + K \sqrt{\theta - (i - 1) 40} \cos \theta \\ y = R_0 + K \sqrt{\theta - (i - 1) 40} \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

其中
$$K = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{\varphi} \quad (2)$$

式中 $R_{\min}$ 、 $R_{\max}$ ——破茬刀刃口最小、最大半径,mm
 θ ——破茬刀转角,(°)
 φ ——破茬刀缺口包角,(°)
 R_0 ——刃口曲线起始半径,mm
 i ——缺口编号 K ——螺旋系数

费马螺旋型刃口在旋转过程中,其刃口曲率随极角变化而连续变化,使刀刃与秸秆接触点沿刃口呈渐进式移动,形成连续滑切过程。由以上内容建立破茬刀结构参数与刃口曲线方程,如图 3 所示。

2.1.4 滑切切割机理分析

为探究以费马螺旋为刃口曲线破茬刀对秸秆的滑切效果,对费马螺旋型破茬刀切割秸秆过程进行

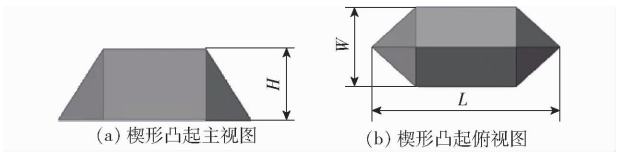


图 7 仿生楔形减阻单元

Fig. 7 Bionic wedge-shaped drag reduction unit

阻单元结构难以达到降低摩擦阻力的设计初衷^[31]。对甲虫背部三维模型进行切分处理后,以及考虑到破茬刀刀刃刀形状的特殊性,基于几何分析与运动学仿真,为优化仿生减阻单元的综合性能,确定其夹角 $\theta = 12^\circ$,单元尺寸范围为:长度 L 为 $5 \sim 22.5$ mm,宽度 W 为 $4.3 \sim 7.5$ mm,高度 H 为 $3 \sim 4.5$ mm,间距 D 为 $12 \sim 15$ mm。据此构建楔形仿生减阻破茬刀。

3 仿真试验与结果分析

3.1 离散元模型建立与参数设置

3.1.1 离散元接触模型选取

基于 EDEM 建立“刀具-秸秆-土壤”耦合模型,采用 Hertz - Mindlin with JKR 接触模型进行描述,以兼顾计算效率与力学响应精度,如图 8 所示。

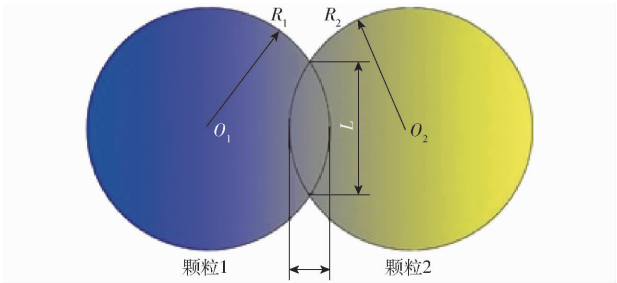


图 8 Hertz - Mindlin with JKR 接触模型

Fig. 8 Hertz - Mindlin with JKR contact model

3.1.2 土槽与秸秆-根茬离散元模型建立

基于田间实测土壤物理参数,在 EDEM 中建立尺寸为 $1\,000\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 200\text{ mm}$ 的土槽模型。为兼顾计算精度与仿真效率,设置土壤颗粒半径为 4 mm ,接触半径为 4.5 mm 。秸秆几何参数与力学参数如表 2 所示。

表 2 秸秆几何参数与力学参数

Tab. 2 Geometric parameters and mechanical parameters of straw

参数	数值
秸秆平均总长度/mm	1 714
平均节间长度/mm	143. 1
平均外径/mm	28. 6
平均壁厚/mm	1. 14
含水率/%	6. 18
抗弯强度/MPa	15 ~ 35
弹性模量/GPa	1 ~ 4

在保证秸秆局部受力与切割响应规律能够有效表征的前提下,将玉米秸秆简化为长度 300 mm 、直径 30 mm 的等效节段模型,并采用颗粒填充与粘结键连接方式建立玉米秸秆离散元模型,如图 9 所示。

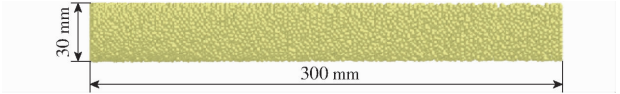


图 9 玉米秸秆离散元模型

Fig. 9 Discrete elemental model of corn stover

3.1.3 仿真参数与接触参数设置

为提升数值模拟试验精度,基于田间实测参数,构建玉米秸秆、根茬及土槽的颗粒模型。依据文献[32],玉米秸秆、根茬以及土壤的本征参数如表 3 所示。

表 3 玉米秸秆、根茬和土壤颗粒的本征参数

Tab. 3 Intrinsic parameters of corn stover, root stubble and soil particles

类别	参数	数值
玉米秸秆	泊松比	0. 4
	剪切模量/Pa	$1. 7 \times 10^6$
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	470
玉米根茬	泊松比	0. 35
	剪切模量/Pa	$8. 5 \times 10^7$
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	266. 3
土壤	泊松比	0. 4
	剪切模量/Pa	6×10^7
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1 709
65Mn 钢	泊松比	0. 27
	剪切模量/Pa	$7. 85 \times 10^{10}$
	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	7 850

仿生离散元模型主要包括仿生减阻破茬刀以及玉米秸秆、根茬以及土壤。仿生减阻破茬刀、玉米秸秆、根茬以及土壤之间的接触参数由文献[32 - 33]所得。

3.2 仿生减阻破茬刀作业参数优化仿真试验

3.2.1 试验因素与评价指标

免耕播种作业过程中,破茬刀的作业参数与结构参数对秸秆及根茬的切断效果和作业能耗具有显著影响。

基于上述分析,选取机组前进速度、破茬刀转速及刃口角度作为试验因素。以根茬颗粒之间粘结键断裂数量 Y_1 表征破茬刀对根茬的破碎效果,以作业功率 Y_2 表征破茬作业过程中的能耗水平。

试验因素及其编码设置如表 4 所示。

3.2.2 回归模型建立与显著性分析

采用三因素五水平二次回归正交旋转组合试验设计方法,对费马螺线型破茬刀作业参数进行仿真试验研究。试验结果如表 5 (X_1 、 X_2 、 X_3 分别表示机组前进速度、破茬刀转速、刃口角度编码值) 所示。

表 4 试验因素编码

Tab.4 Test factors and codes

编码	因素		
	机组前进速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	破茬刀转速/ ($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)	刃口角度/ ($^{\circ}$)
1.682	1.39	350	30.00
1	1.22	310	27.97
0	0.98	250	25.00
-1	0.73	190	22.03
-1.682	0.56	150	20.00

基于 Design-Expert 11.0 软件对仿真结果进行回归分析与方差分析(表 6、7),建立粘结键断裂数量与作业功率的回归模型。方差分析结果表明,粘结键断裂数量模型的决定系数 R^2 为 0.952 5,模型极显著($P<0.01$),失拟项不显著($P>0.05$),说明所建立模型具有较高的拟合精度与预测可靠性。

表 5 模拟试验结果

Tab.5 Results of simulation tests

试验 序号	因素			Y_1	Y_2/kW
	X_1	X_2	X_3		
1	-1	-1	-1	25 756	9.35
2	1	-1	-1	20 324	12.60
3	-1	1	-1	31 452	12.90
4	1	1	-1	25 916	15.14
5	-1	-1	1	21 612	8.52
6	1	-1	1	18 596	12.13
7	-1	1	1	26 420	11.85
8	1	1	1	23 584	14.85
9	-1.68	0	0	25 324	11.47
10	1.68	0	0	17 496	14.16
11	0	-1.68	0	22 072	8.50
12	0	1.68	0	32 742	14.86
13	0	0	0	21 577	8.37
14	0	0	-1.68	18 016	9.30
15	0	0	1.68	20 763	7.51
16	0	0	0	22 708	6.12
17	0	0	0	20 316	7.10
18	0	0	0	22 820	6.46
19	0	0	0	21 512	5.85
20	0	0	0	22 664	5.52
21	0	0	0	21 268	7.25
22	0	0	0	22 340	5.00
23	0	0	0	20 916	6.40

机组前进速度、破茬刀转速及刃口角度对粘结键断裂数量的影响均达到极显著水平,其中破茬刀转速的二次项影响尤为显著。建立的机组前进速度、破茬刀转速、刃口角度及转速二次项与粘结键断裂数量间的回归方程为

$$Y_1=21\,673.52-2\,195.61X_1+2\,857.81X_2-1\,407.71X_3+2\,279.83X_2^2$$

(4)

作业功率回归模型的决定系数 R^2 为 0.959 7,

表 6 粘结键断裂数方差分析

Tab.6 ANOVA for number of bond breaks

方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	2.938×10^8	9	28.94	$<0.000\,1$
X_1	6.584×10^7	1	58.36	$<0.000\,1$
X_2	1.115×10^8	1	98.88	$<0.000\,1$
X_3	2.706×10^7	1	23.99	0.000 3
X_1X_2	722	1	0.000 6	0.980 2
X_1X_3	3.272×10^6	1	2.9	0.112 3
X_2X_3	2.783×10^5	1	0.246 7	0.627 7
X_1^2	4.046×10^5	1	0.358 7	0.559 5
X_2^2	8.259×10^7	1	73.21	$<0.000\,1$
X_3^2	2.683×10^6	1	2.38	0.147 0
残差	1.466×10^7	13		
失拟项	7.425×10^6	5	1.64	0.253 9
纯误差	7.239×10^6	8		
总和	3.085×10^8	22		

表 7 作业功率方差分析

Tab.7 ANOVA for operational power consumption				
方差来源	平方和	自由度	F	P
模型	235	9	31.37	$<0.000\,1$
X_1	20.24	1	24.31	0.000 3
X_2	38.19	1	45.87	$<0.000\,1$
X_3	0.08	1	0.10	0.75
X_1X_2	0.32	1	0.39	0.54
X_1X_3	0.15	1	0.18	0.67
X_2X_3	0.01	1	0.01	0.98
X_1^2	94.82	1	113.91	$<0.000\,1$
X_2^2	66.23	1	79.56	$<0.000\,1$
X_3^2	17.04	1	20.48	0.000 6
残差	10.82	13		
失拟项	5.27	5	1.52	0.284 3
纯误差	5.55	8		
总和	245.82	22		

模型同样达到极显著水平($P<0.01$),且失拟项不显著。机组前进速度与破茬刀转速是影响作业功率的主要因素,其二次项效应亦表现显著。建立的机组前进速度、破茬刀转速、刃口角度及刃口角度与作业功率之间的回归方程为

$$Y_2=6.34+1.22X_1+1.67X_2-0.078\,8X_3+2.44X_1^2+2.04X_2^2+1.04X_3^2$$

(5)

3.2.3 响应面分析与参数优化

基于建立的回归模型,绘制各因素交互作用对粘结键断裂数量和作业功率的响应曲面^[32],如图 10、11 所示。结果表明,在较低机组前进速度条件下,提高破茬刀转速可显著增加粘结键断裂数量;随着机组前进速度的提高,破茬刀与根茬的有效作用时间缩短,破碎效果逐渐减弱。

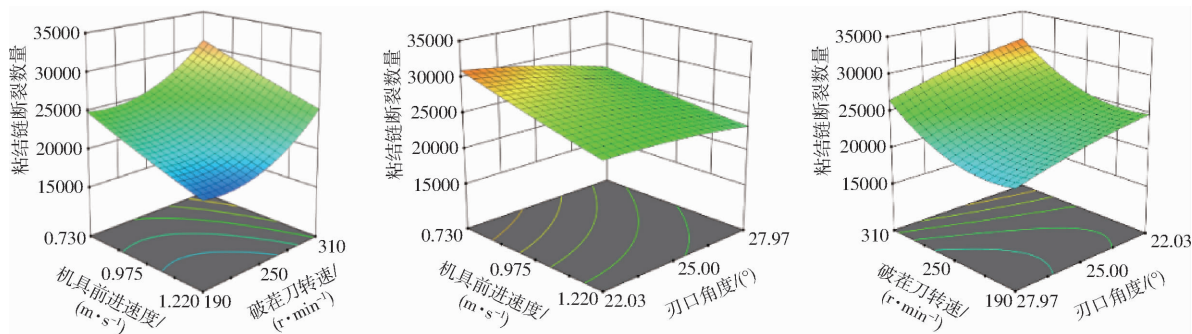


图 10 交互因素对粘结键断裂数量影响的响应曲面

Fig. 10 Response surfaces of interaction factors to number of bond breaks

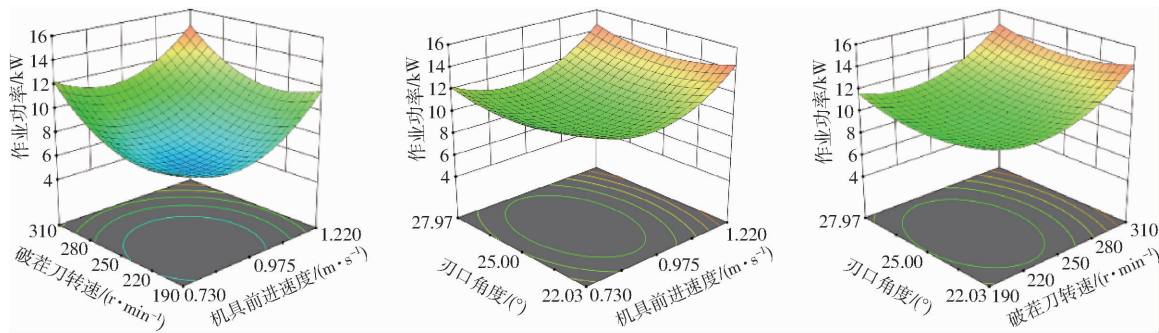


图 11 交互因素对作业功率影响的响应曲面

Fig. 11 Response surfaces of interaction factors to operational power

以最大化粘结键断裂数量、最小化作业功率为目标,对作业参数进行多目标优化并构建粘结键断裂数量和作业功率的目标函数为

$$\begin{cases} \max Y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min Y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1.682 \leq X_1 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_2 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq X_3 \leq 1.682 \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

获得最优参数组合为:机组前进速度 0.91 m/s、破茬刀转速 225 r/min、刃口角度 25.2°。在该参数条件下,预测粘结键断裂数量为 21 470,作业功率为 5.82 kW。仿真验证结果与预测值相对误差小于 8%,表明优化结果具有可靠性。

3.3 破茬防堵装置减阻单元减阻机理数值模拟试验

3.3.1 仿生减阻单元结构参数

为进一步揭示仿生减阻单元结构参数对破茬刀入土作业阻力的影响规律,基于前述仿生楔形减阻单元设计方案,开展仿生减阻破茬刀减阻性能的离散元数值模拟试验。

仿生减阻单元的几何结构参数主要包括单元高度 H 、单元宽度 W 、单元长度 L 以及相邻单元间距 D 。

为避免其他因素对试验结果产生干扰,仿真过程中保持土壤参数、破茬刀转速、入土深度及作业工况条件一致,仅对仿生减阻单元的结构参数进行系统变化。

3.3.2 仿生减阻单元数值模拟

基于所建立的“仿生减阻破茬刀-土壤”耦合离散元模型,对不同仿生减阻单元参数组合条件下破茬刀的入土作业过程进行数值模拟分析。仿真过程中记录破茬刀在稳定作业阶段的水平耕作阻力变化情况,并取其平均值作为该参数组合下的作业阻力评价指标。

在所有试验组合中,单元长度 22.5 mm、间距 15 mm、宽度 7.5 mm、高度 4.5 mm 对应的仿生减阻破茬刀在入土作业过程中所受阻力最小,其作业阻力低于光面破茬刀。结果说明,合理的仿生减阻单元结构参数组合能够有效改善破茬刀-土壤界面的接触状态,从而降低破茬刀入土作业阻力。

3.3.3 仿生减阻效果对比分析

为进一步验证仿生减阻单元的工程适用性,对最优仿生减阻破茬刀与光面破茬刀在相同作业条件下的功率变化情况进行对比分析,其结果如图 12 所示。

结果表明,当入土深度达到稳定作业状态后,光面破茬刀的作业功率随时间增长速率明显高于仿生减阻破茬刀。

4 田间试验

4.1 试验条件与设备

田间试验于 2025 年 3 月 2 日在云南省昆明市

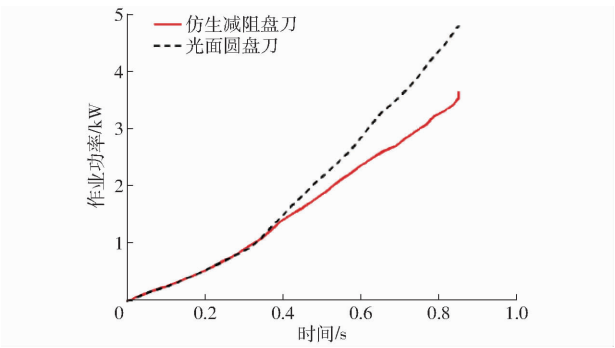


图 12 仿生减阻破茬刀与光面破茬刀作业功率对比
Fig. 12 Comparison of bionic stubble breaking and glossy stubble breaking knife power

呈贡区昆明理工大学保护性耕作试验田(24°50′56″N, 102°51′49″E)进行。试验区域长 50 m、宽 20 m,海拔 1 932 m。土壤类型为红壤土,其 0~15 cm 土层平均含水率为 19.5%,平均容重为 1.20 g/cm³;0~25 cm 土层平均坚实度为 1.1 MPa。试验时大气压强约 84 kPa,相对湿度 21.8%。前茬作物为玉米与大豆。玉米根茬平均含水率为 11.45%,大豆根茬含水率为 9.28%,玉米秸秆含水率为 6.18%。田间秸秆覆盖率为 94%,秸秆覆盖量为 0.575 kg/m²,覆盖形式包括整秆平铺与碎秸平铺。

根据优化所得参数,试制了费马螺旋型仿生减阻破茬防堵装置。整机配备 4 组破茬单元,通过三点悬挂与东方红 504 型拖拉机连接,并由动力输出轴经万向节传动箱传递动力。

4.2 试验方法与评价指标

大豆玉米带状复合种植免耕播种机的田间作业性能依据国家标准^[34]和农业行业标准^[35]进行评价,主要指标包括:播种作业通过性、动土率、秸秆切断率、清秸率、粒距合格指数及种肥播深合格率。

4.2.1 播种作业通过性与动土率

在秸秆整秆全覆盖条件下进行播种施肥作业,观察破茬开沟机构与驱动式清秸装置的堵塞情况。根据堵塞程度分为:无堵塞、轻度堵塞、中度堵塞和重度堵塞。若无堵塞或仅轻度堵塞,则判定作业通过性合格。完成免耕播种作业后,观察破茬开沟机构对土壤的扰动情况并对所开种沟进行动土测量。

4.2.2 秸秆切断率与清秸率

拆开除沟器,避免未切断秸秆被剥离测量区。按优化参数设定机具前进速度作业,完成后在作业区随机选取 9 个测量区,每个区长 1 m、宽为一条播种带。作业后秸秆仍位于播种带上且无明显断口,判定为未切断;若秸秆因破茬刀切割完全断开且断口位于播种带一侧,则判定为切断。

在试验田随机选取 10 个测点,在播种作业前测量每个测点内单位面积秸秆的数量;播种作业完成

后,在清秸装置作业区域内随机取 10 个测点,测量区域面积内秸秆剩余数量,试验数据求平均值。

4.2.3 粒距合格指数与种肥播深合格率

播种机完成免耕播种作业后,在播种区域内分别对 3 片作业区域内的玉米和大豆播种带选取 9 个点进行播种以及施肥深度的测量。当实际播种深度与理论播种深度偏差在 ±1 cm 范围内时,判定播深为合格;当实际施肥深度与理论施肥深度偏差在 ±2 cm 范围内时,判定施肥深度合格。其中,大豆理论播种深度为 4 cm,玉米理论播种深度为 5 cm,理论施肥深度为 8 cm。

4.3 试验结果与分析

4.3.1 播种作业通过性与动土率

大豆玉米带状复合种植免耕播种机在全程作业中运行稳定、连续。观测发现,机架缝隙及开沟器前方偶有少量秸秆暂存(图 13a),但随机器振动及播种带两侧秸秆摩擦,该部分秸秆可自行脱落,作业通过性合格。作业后种带清秸,地表秸秆被有效切断(图 13b)。对种沟断面进行测量计算后,机具平均动土率为 15%,远低于国家标准限值(≤40%),符合免耕播种作业要求。

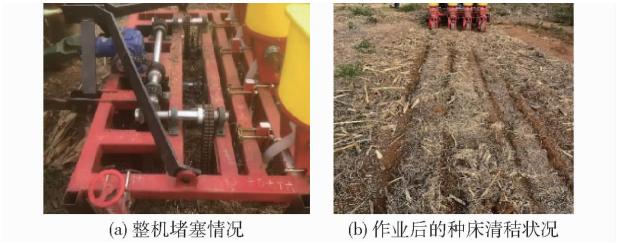


图 13 整机播种作业通过性
Fig. 13 Passing of whole machine for seeding operations

4.3.2 秸秆切断率与清秸率

对比仿生减阻破茬刀与缺口破茬刀的作业效果,二者秸秆切断率如表 8 所示。由表可知,仿生减阻破茬刀的平均秸秆切断率优于传统缺口型破茬

表 8 不同破茬装置秸秆切断率		
Tab. 8 Straw cutting rate of different stubble-breaking devices		%
序号	仿生减阻破茬刀切断率	缺口型破茬刀切断率
1	89.33	55.35
2	92.77	67.31
3	88.68	71.75
4	93.32	68.19
5	100	52.09
6	92.13	58.92
7	100	62.02
8	87.30	53.53
9	93.26	65.33
平均值	92.98	61.61

刀,表明其具有更佳的秸秆切断性能,满足西南地区作业要求。

相较于缺口型破茬刀,仿生减阻破茬刀的切断率提高了 50.91%。对测量点内秸秆数量进行观察和统计,在清秸装置作用下,平均清秸率为 82.67%,满足免耕播种作业要求。

4.3.3 粒距合格指数与种肥播深合格率

免耕播种作业完成后,免耕播种机玉米与大豆的粒距合格指数分别为 87.77% 和 85.55%,符合国家免耕播种作业要求。

玉米种子理论播种深度为 5 cm,大豆种子理论播种为 4 cm,理论施肥深度为 10 cm,得到玉米播种深度合格率、施肥深度合格率和大豆播种深度合格率、施肥深度合格率均满足相关作业指标。

5 结论

(1)将费马螺线引入破茬刀刃口结构设计,建立了费马螺线型破茬刀结构模型。理论分析表明,

该刃口曲线在切割过程中可形成渐进式滑切轨迹,有利于降低切割阻力,提高秸秆及根茬的切断效率。以疑布甲虫翅鞘表面非光滑结构为仿生原型,设计了楔形仿生减阻单元并合理布置于破茬刀表面。离散元仿真结果表明,优化后的仿生结构参数及排布方式可有效降低破茬刀入土作业阻力,相较于光面破茬刀表现出明显减阻效果。

(2)通过离散元仿真与二次回归正交旋转组合试验,确定了破茬装置的最优作业参数组合为:机组前进速度 0.91 m/s、破茬刀转速 225 r/min、刃口角度 25.2°。在该参数条件下,破碎效果与作业功率之间实现较优匹配,模型预测值与验证试验结果误差均小于 8%。

(3)田间试验结果表明,在高秸秆覆盖与黏重土壤条件下,所设计的费马螺线型仿生减阻破茬防堵装置作业通过性良好,平均秸秆切断率达到 92.98%,清秸率达 82.67%,能够满足西南地区大豆玉米带状复合种植免耕播种作业需求。

参 考 文 献

[1] 鲍玉海,贺秀斌,尹飞虎,等. 西南地区农业水资源利用及雨水资源高效调控技术路径研究[J]. 中国工程科学,2024,26(6):169-180.
BAO Yuhai, HE Xiubin, YIN Feihu, et al. Research on agricultural water resources utilization and high-efficiency regulation technology path of rainwater resources in Southwest China[J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(6): 169-180. (in Chinese)

[2] 程佳龙,张军以. 西南地区水陆耦合的生态安全格局识别与生态韧性评估优化[J]. 农业工程学报,2025,41(8):272-281.
CHENG Jialong, ZHANG Junyi. Identifying ecological security pattern and optimizing ecological resilience assessment for water-land coupling in Southwest China[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(8): 272-281. (in Chinese)

[3] WU Q L, JIANG X H, SHI X, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of soil erosion and its driving mechanisms; a case study of the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2024,242:108075.

[4] WANG J Y, WANG Z, ZENG Y, et al. Human-altered soil loss dominates nearly half of water erosion in China but surges in agriculture-intensive areas[J]. One Earth, 2024,7(11):2008-2018.

[5] ZHANG J C, YAO W, WEN Y K, et al. Temporal and spatial patterns of N₂O emissions in maize/legume strip intercropping: effects of straw incorporation and crop interactions[J]. Field Crops Research, 2025,326:109850.

[6] LI X J, XIA H Y, QIAO Y T, et al. Diversification of wheat-maize double cropping with legume intercrops im-proves nitrogen-use efficiency at crop and system levels[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2023,345:108329.

[7] CHEN X F, SONG W W, YANG Y D, et al. Effect of soybean inclusion in cropping systems on productivity, profitability, and carbon footprints: a case study from the Huang-Huai-Hai Plain[J]. Agricultural Systems,2025,316:134422.

[8] ZHANG J C, QIAN X, WEI Y T, et al. Optimizing row configuration and maize planting density enhances yield and economic benefits in maize-soybean strip intercropping[J]. Field Crops Research, 2023,291:108741.

[9] WEN L, YU S L, LIAO Z Q, et al. Synergistic effects of row configuration and nitrogen level on water utilization and productivity in maize-soybean strip intercropping system on the Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2026,323:110102.

[10] KOU H T, LIAO Z Q, LAI Z L, et al. Optimized row configuration enhances dry matter and nitrogen accumulation and translocation in drip-fertigated maize-soybean strip intercropping[J]. Field Crops Research, 2026, 337: 110290.

[11] WANG X Z, ZHOU H, ZHOU H, et al. Research progress and development in anti-blocking methods for no-till seeders in regenerative agriculture[J]. Biosystems Engineering, 2025, 242: 1-16.

[12] ZHANG C L, LI H, WANG Q J, et al. A driven-elastic straw clearing device for strip tillage based on DEM-MFBD coupling simulation[J]. Biosystems Engineering, 2023, 235: 45-58.

[13] 张银平,徐婷,侯献伟,等. 麦茬地免耕播种机切秸破茬种床整理装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2026,57(2):1-11,18.

- ZHANG Yinping, XU Ting, HOU Xianwei, et al. Design and experiment of straw cutting, stubble breaking and seed bed preparation device for no-till seeders in wheat stubble fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2026,57(2):1-11,18. (in Chinese)
- [14] 张银平,郝泽华,徐婷,等.玉米免耕播种机动力补偿自适应清秸装置设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(1):174-185.
- ZHANG Yinping, HAO Zehua, XU Ting, et al. Design and experiment of dynamic compensation adaptive straw removal device for corn no-till seeder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(1):174-185. (in Chinese)
- [15] 陈海涛,高伟,王星,等.玉豆带状复合种植免耕精量播种覆秸一体机设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(4):202-212,223.
- CHEN Haitao, GAO Wei, WANG Xing, et al. Design and experiment of integrated machine for no-till precision seeding and straw mulching for corn and soybean strip compound planting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(4):202-212,223. (in Chinese)
- [16] ZHANG Y Q, WANG Q J, LI H W, et al. Experimental and numerical analysis of straw motion under the action of an anti-blocking mechanism for a no-till maize planter[J]. Agriculture, 2024, 14(7): 1001.
- [17] 朱惠斌,钱诚,白丽珍,等.正反转动力式玉米切茬防堵装置设计与试验[J].农业工程学报,2022,38(1):1-11.
- ZHU Huibin, QIAN Cheng, BAI Lizhen, et al. Design and experiments of active anti-blocking device with forward-reverse rotation[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(1): 1-11. (in Chinese)
- [18] 毕津硕,卢彩云,李洪文,等.动态滑切分段式驱动圆盘防堵装置设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(10):291-300,374.
- BI Jinshuo, LU Caiyun, LI Hongwen, et al. Design and testing of dynamic sliding cutting segmented drive disc anti-blocking device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(10):291-300,374. (in Chinese)
- [19] 张仕林,黄玉祥,赵宏波,等.切抛组合式小麦宽幅沟播破茬清秸防堵装置设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(5):40-52.
- ZHANG Shilin, HUANG Yuxiang, ZHAO Hongbo, et al. Design and experiment of cutting and throwing combined anti-blocking device for wide-seedbed seeding of wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(5):40-52. (in Chinese)
- [20] LIN J X, WANG Q J, LI H W, et al. Exploring straw movement through simulation of shovel-type seedbed preparation machine-straw-soil interaction using DEM-MBD coupling method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 226: 109465.
- [21] LI S C, DIAO P S, ZHANG Y P, et al. Design and performance evaluation of notched type discs for application in no-till seeding using discrete element method and field trials[J]. Biosystems Engineering, 2025, 257: 104222.
- [22] ZHENG Y B, WANG Q J, LI H W, et al. Design and optimization of volute directing plate and stubble board for enhancing anticlogging of tillering straw[J]. Powder Technology, 2024, 448: 120288.
- [23] 毕津硕,卢彩云,李洪文,等.基于最优动态滑切的被动式锯齿圆盘防堵装置设计与试验[J].农业机械学报,2025,56(4):118-128.
- BI Jinshuo, LU Caiyun, LI Hongwen, et al. Design and experiment of anti-blocking device passive sawtooth disc based on optimal dynamic sliding cutting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(4):118-128. (in Chinese)
- [24] KUMAR M, KAMENDRA, PANDEY H S, et al. Sustainable no-tillage practices with a disc-type novel residue cleaning mechanism: design and field evaluation[J]. Soil and Tillage Research, 2025, 251: 106560.
- [25] LOPES A G C, SILVA A C D, CORREIA T P D S, et al. Effect of applied loads on passive rolling coulters for cutting crop residues[J]. Smart Agricultural Technology, 2025, 10: 100702.
- [26] 夏俊芳,张朋,苑宏文,等.水稻秸秆离散元柔性模型参数标定与试验验证[J].农业机械学报,2024,55(9):174-184.
- XIA Junfang, ZHANG Peng, YUAN Hongwen, et al. Calibration and verification of flexible rice straw model by discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(9):174-184. (in Chinese)
- [27] ZHANG S L, HUANG Y X, GAO X J, et al. Evaluating the influence of rotary tiller blade edge curves on maize residue using DEM[J]. Biosystems Engineering, 2025, 250: 49-61.
- [28] ZHANG F, LUO Z, ZHENG E, et al. Imitating pangolin scale structure for reducing adhesion and resistance of rotary tillage in wet soil[J]. Soil and Tillage Research, 2025, 245: 106306.
- [29] 王法安,倪畅,张兆国,等.基于穿山甲前足的三七仿生挖掘铲设计与试验[J].农业机械学报,2024,55(增刊2):10-19.
- WANG Fa'an, NI Chang, ZHANG Zhaoguo, et al. Design and experiment of panax noto-ginseng bionic digging shovel based on front foot of pangolin[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024,55(Supp.2):10-19. (in Chinese)

tomato in saline alkali soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 311 – 318, 350. (in Chinese)

[19] 李晓爽,党红凯,宋妮,等. 肥沙混施对盐碱地冬小麦耗水特性与生长的影响[J]. 农业机械学报,2020,51(5):272 – 284.

LI Xiaoshuang, DANG Hongkai, SONG Ni, et al. Effects of biological organic fertilizer and yellow river sediment mixture on water consumption and growth of winter wheat in saline alkali land[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(5): 272 – 284. (in Chinese)

[20] LIU P, WANG S, SHI Y, et al. Tangential adhesion strength between clay and steel for various soil softnesses[J]. Journal of Materials in Civil Engineering,2019, 31(5): 04019048.

[21] FANG Y, ZHUO B, WANG Y, et al. Metal-soil interface adhesion in clay clogging during shield tunneling: theoretical model and experimental validation[J]. Underground Space, 2024, 15: 188 – 202.

[22] MITCHELL J K, SOGA K. Fundamentals of soil behavior[M]. New York: John Wiley & Sons, 2005.

[23] 李广信. 高等土力学[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.

[24] LI M, GAO Z, TANG J, et al. Experimental assessment of electro-osmotic soil-engaging tools for adhesion reduction[J]. European Journal of Soil Science,2025, 76(3):e70133.

[25] REN L Q, HAN Z W, LI J Q,et al. Experimental investigation of bionic rough curved soil cutting blade surface to reduce soil adhesion and friction[J]. Soil and Tillage Research, 2006, 85(1 – 2): 1 – 12.

[26] JIA X. Unsmooth cuticles of soil animals and theoretical analysis of their hydrophobicity and anti-soil-adhesion mechanism[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2006, 295(2): 490 – 494.

[27] SALEM A,WANG H, GAO Y,et al. Effect of biomimetic surface geometry, soil texture, and soil moisture content on the drag force of soil-touching parts[J]. Applied Sciences, 2021, 11(19): 8927.

[28] 陶燕丽,周建,龚晓南,等. 铁和铜电极对电渗效果影响的对比试验研究[J]. 岩土工程学报,2013,35(2):388 – 394.

TAO Yanli, ZHOU Jian, GONG Xiaonan, et al. Comparative experiment on influence of ferrum and cuprum electrodes on electroosmotic effects[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(2): 388 – 394. (in Chinese)

[29] REN L, CONG Q, TONG J, et al. Reducing adhesion of soil against loading shovel using bionic electro-osmosis method[J]. Journal of Terramechanics, 2001, 38:211 – 219.

[30] MACKON C. The effect of electro-osmosis on soil to steel sliding friction as influenced by speed, voltage and soil moisture [D]. New York: Cornell University,1962.

[31] KHAN M, QAISRANI R, LI J. The techniques of reducing adhesion and scouring soil by bionic-review of literature[J]. Advances in Natural Science, 2010,3(2): 41 – 50.

[32] MASSAH J, FARD M, AGHEL H. An optimized bionic electro-osmotic soil-engaging implement for soil adhesion reduction [J]. Journal of Terramechanics, 2021, 95: 1 – 6.

(上接第 76 页)

[30] LI J W, LI H W, WANG Q J, et al. Resistance reduction mechanism of potato bionic digging shovels in clay soil[J]. Biosystems Engineering, 2023, 233: 19 – 33.

[31] ZHANG S L, ZHAO H B, WANG X Z, et al. Discrete element modeling and shear properties of maize stubble-soil complex [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 204: 107575.

[32] 侯锡彬,崔舒然,李明森,等. 1ZLZ – 300 型全幅复式种床整地机设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(增刊 1): 125 – 134.

HOU Xibin, CUI Shuran, LI Mingsen, et al. Design and experiment of 1ZLZ – 300 full width compound seed bed preparation machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(Supp.1):125 – 134. (in Chinese)

[33] 朱惠斌,吴宪,白丽珍,等. 基于 EDEM – ADAMS 仿真的稻茬地双轴破茬免耕装置研制[J]. 农业工程学报, 2022, 38(19): 10 – 22.

ZHU Huibin, WU Xian, BAI Lizhen, et al. Development of the biaxial stubble breaking no-tillage device for rice stubble field based on EDEM – ADAMS simulation[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(19): 10 – 22. (in Chinese)

[34] GB/T 20865—2017 免(少)耕施肥播种机[S]. 北京:中国标准出版社,2017.

[35] NY/T 1003—2006 施肥机械质量评价技术规范[S]. 北京:中国农业出版社,2006.