doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.04.014

与深松铲互作锯齿式灭茬刀设计与试验

赵淑红　赵国鹏　冷明新　刘曦泽　蒋长乐　袁溢文　杨悦乾
（东北农业大学工程学院，哈尔滨 150030）

摘要：针对东北垄作区秸秆还田后灭茬阻力大、功耗高、灭茬率低、作业后垄形差等问题，设计了一种与深松铲互作的锯齿式灭茬刀。通过离散元仿真确定锯齿式灭茬刀与深松铲安装间距为 60 mm，同时为满足锯齿式灭茬刀作业时正切刃与不同深度（30、60、90、120 mm）的土壤颗粒产生相同的相对加速度，结合灭茬刀与深松铲动力学分析，得到不同深度的滑切角，确定了锯齿式灭茬刀正切刃的刃口曲线。以刀盘直径和灭茬刀安装角为试验因素，作业阻力、功耗为试验指标，进行二因素五水平中心组合试验，得到刀盘直径 312 mm、安装角 73.2°时作业阻力和功耗最小（作业阻力为 1 167 N、功耗为 14.6 kW）；田间试验以灭茬刀入土深度、机具前进速度为试验因素，作业阻力、垄高宽比、灭茬率为试验指标，优化得到灭茬刀入土深度为 102 mm、机具前进速度为 0.65 m/s 时，灭茬刀作业阻力为 1 467 N、垄高宽比为 0.529、灭茬率为 95.4%。在此最优作业参数下进行田间性能对比试验，结果表明锯齿式灭茬刀比传统灭茬刀作业阻力降低 13%、垄高宽比提高 6%、灭茬率提高 1 个百分点，工作性能稳定，满足机具作业质量及农艺要求。

关键词：锯齿式灭茬刀；深松铲；互作
中图分类号：S233.1　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-1298(2025)04-0151-12　　**OSID**：

Design and Testing of Serrated Stubble-breaking Blade with Interactiontype with Subsoiler

ZHAO Shuhong　ZHAO Guopeng　LENG Mingxin　LIU Xize　JIANG Changle　YUAN Yiwen　YANG Yueqian
(*College of Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*)

Abstract: Aiming at the problems of high resistance, high power consumption, low stubble-breaking rate, and poor ridge shape after the operation of subsoil stubble-breaking machine after straw return to the field in northeast ridging area, a stubble-breaking blade with interaction with subsoiler was designed. The mounting distance between the subsoiler and stubble-breaking blade was determined to be 60 mm by discrete element simulation. Meanwhile, in order to satisfy the same relative acceleration between the cutting edge of stubble-breaking blade and soil particles at different depths (30 mm, 60 mm, 90 mm, 120 mm) during operation, the sliding angle at different depths was obtained by combining the kinetic analysis of the stubble-breaking blade and subsoiler, and the cutting edge curve of the stubble-breaking blade was determined. Taking the blade disk diameter and stubble-breaking blade mounting angle as the test factors, and operating resistance and power consumption as the test indexes, a two-factor, five-level center combination test was carried out. The test results showed that the minimum operating resistance and power consumption were obtained at the blade disk diameter of 312 mm and the mounting angle of 73.2° (the operating resistance was 1 167 N and the power consumption was 14.6 kW). In the field test, the depth of stubble-breaking blade entering the soil and the forward speed of machine were taken as the test factors, the working resistance, ridge height/width ratio and stubble-breaking rate were taken as the test indexes. The optimized results showed that when the depth of blade entering the soil was 102 mm and the forward speed was 0.65 m/s, the working resistance was 1 467 N, ridge height/width ratio was 0.529, and stubble-breaking rate was 95.4%. Comparative field performance tests were conducted at this optimal operation parameter, and test results showed that compared with the traditional stubble-breaking

收稿日期：2024-03-08　修回日期：2024-05-14
基金项目：黑龙江省“揭榜挂帅”科技攻关项目(2021ZXJ05B03)
作者简介：赵淑红(1969—)，女，教授，博士生导师，主要从事田间农业机械及力学特性研究，E-mail：shhzh091@sina.com
通信作者：杨悦乾(1967—)，男，研究员，主要从事保护性农业装备研究，E-mail：yangyueqian@126.com

blade, the serrated stubble-breaking blade operating resistance was reduced by 13%, the height/width ratio of the ridge was increased by 6%, and the stubble-breaking rate was increased by 1 percentage points, which was able to meet the quality of the machine operation and the agronomic requirements.

Key words: stubble-breaking blade; subsoiler; interaction

0 引言

东北地区是中国重要的粮食生产地之一,该地区垄作有利于提高土壤温度、保护作物根系、促进水分渗透等[1-3]。同时通过深松灭茬联合作业,不仅可以提高土壤肥力,促进作物生长,还能有效防控病虫害,对于土壤改良和作物生长都具有重要意义[4-6]。

近年来国内外针对灭茬部件作业阻力大、功耗高问题进行了大量研究。TONG 等[7]仿生鼹鼠趾尖的几何结构,设计了土壤旋耕和碎茬的仿生刀片,在室内土壤仓中测试了不同组合仿生结构叶片的功耗,考察了仿生结构对功耗的影响。LI 等[8]建立一个有限元(FEM)根-土复合体数值模型,使用 FEM 的 3D 动态仿真模型预测作用在灭茬刀上的耕作阻力。ZHAO 等[9]利用离散元法,研究了在条带播种中,各种平直旋耕刀边缘曲线类型对耕作力矩和土壤扰动的影响。刘九庆等[10]设计了一种阿基米德螺旋线型灭茬刀,解决了灭茬刀灭茬效果不佳、功耗较大等问题。林静等[11]研制了 1MXQ-4 型灭茬旋耕起垄联合作业机,可一次完成深松、灭茬、覆土镇压等作业,达到垄沟垄台互换效果,为玉米播种创造良好的土壤工况条件。郑侃等[12]打破现有深松旋耕联合作业机深松部件在前、旋耕部件在后的传统结构,设计用于深耕的反旋深松联合作业耕整机,从而实现深层土壤疏松、表层土壤破碎平整、秸秆混埋的目的。赵艳忠等[13]针对深松灭茬机作业过程中动土量大、灭茬效果不理想以及刀辊易缠草堵塞等问题,设计了带状深松灭茬机,使得机具能够平稳作业,提高灭茬效率。王瑞丽等[14]针对作物秸秆深埋还田根茬未粉碎,深开沟的同时会出现大块土垡,研制了一种开沟灭茬机,实现秸秆深埋还田、开沟、灭茬和碎土。现有研究仅通过仿生、力学分析等进行灭茬刀设计,仍存在作业阻力大、功耗高问题,同时关于垄形的研究未见报道。

本文针对东北垄作秸秆还田区,结合保护性耕作模式,基于深松铲作业后土壤回落特性,设计锯齿式灭茬刀实现交互效应并实现减阻降耗等目的,通过田间试验获得最佳作业参数以更好满足东北地区垄作要求。

1 整机结构与灭茬刀动力学分析

1.1 整机结构与工作原理

设计的锯齿式灭茬刀安装于深松灭茬机上,深松灭茬机主要由悬挂架、变速箱、限深轮、锯齿式灭茬刀、深松铲及机架等部件组成,如图 1 所示。

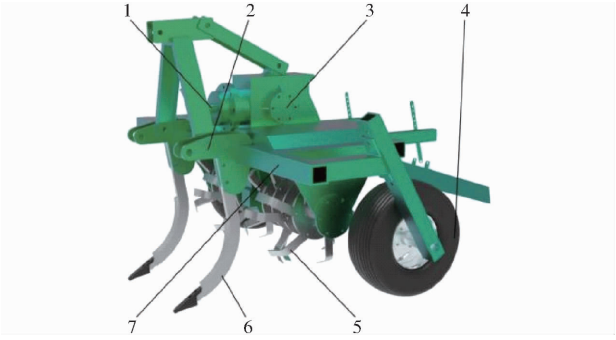


图 1 深松灭茬机结构图

Fig. 1 Subsoiling stubble-breaking machine structure diagram

1. 动力输入轴 2. 悬挂架 3. 变速箱 4. 限深轮 5. 锯齿式灭茬刀 6. 深松铲 7. 机架

机具与拖拉机以三点悬挂组成机组,机组作业时拖拉机传动机构驱动刀辊转动,由深松部件完成深松作业,达到蓄水保墒等目的,同时高速旋转的灭茬刀对秸秆和根茬进行砍切,打碎后的根茬、秸秆在灭茬刀作用下被向后抛出。

1.2 灭茬刀动力学分析

由于灭茬刀作业时,土壤已在深松铲的作用下处于运动状态,所以结合深松铲作业后土壤的运动状态对灭茬刀进行动力学分析。

取根土为动点 M 并建立空间坐标系,即 XYZ 坐标系,如图 2 所示。当动点 M 相对于灭茬刀产生滑动时,则会受到沿着 X 反方向的滑动摩擦力 F_S;动点 M 在灭茬刀作业之前受到深松铲作业后周围土壤作用力为 F_M,当灭茬刀作业于动点时周围土壤亦会对动点 M 产生作用力为 F'_M。故动力学方程为

$$F_{X1}\sin\alpha\cos\theta + F_{Y1}\sin\theta - F_{Z1}\cos\alpha\cos\theta - F_S = m(a_r + a_e\cos\theta\cos\alpha) \tag{1}$$

$$F_N + F_{X1}\sin\alpha\sin\theta - F_{Y1}\cos\theta - F_{Z1}\cos\alpha\sin\theta = m(a_c\cos\beta + a_e\sin\theta\cos\alpha) \tag{2}$$

$$F_{Z1}\sin\alpha + F_{X1}\cos\alpha = m(a_c\sin\beta - a_e\sin\alpha) \tag{3}$$

$$F_S = F_N\tan\varphi \tag{4}$$

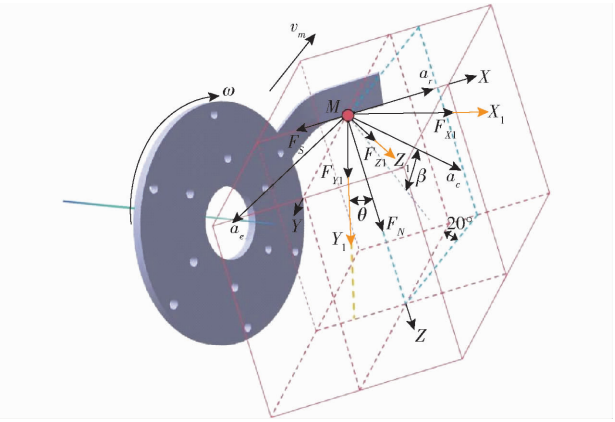


图 2　灭茬刀动力学分析

Fig. 2　Kinetic analysis of stubble-breaking blade

化简得

$$-F_N(\tan\varphi+\cot\theta)-ma_e\cos\alpha\cot\theta\cot\beta+\cot\theta\cot\beta(F_{Z1}\sin\alpha+F_{X1}\cos\alpha)-\cot\theta(F_{X1}\sin\alpha\sin\theta-F_{Y1}\cos\theta-F_{Z1}\cos\alpha\sin\theta)+F_{X1}\sin\alpha\cos\theta+F_{Y1}\sin\theta-F_{Z1}\cos\alpha\cos\theta=ma_r \quad (5)$$

式中　m——根土动点 M 质量，kg

θ——滑切角，(°)

F_N——动点 M 受灭茬刀正切刃的法向压力，N

a_e——牵连加速度，m/s^2

a_r——相对加速度，m/s^2

a_c——科氏加速度，m/s^2

φ——根茬与土壤滑动摩擦角，(°)

β——科氏加速度 a_c 与 XY 平面投影夹角，(°)

F_{X1}——F_M 与 F'_M 在 X_1 轴方向受到的合力，N

F_{Y1}——F_M 与 F'_M 在 Y_1 轴方向受到的合力，N

F_{Z1}——F_M 与 F'_M 在 Z_1 轴方向受到的合力，N

α——灭茬刀弯折角，(°)

通过滑切原理可降低碰撞量和耕作阻力[15]，灭茬刀作业深度为 120 mm，由式(5)，可将作业深度沿着深度间隔 30 mm 平均划分，即灭茬刀在作业时灭茬刀正切刃与 30、60、90、120 mm 不同深度的土壤颗粒产生的相对加速度相等，减少不同深度的根土与灭茬刀的碰撞。

为得到各个深度的滑切角，设计灭茬刀正切刃曲线，由式(5)得知，需考虑根茬不同位置与土壤滑动摩擦角之间的关系，该关系由文献[15]方法测得。通过 Matlab 软件得根茬与土壤的滑动摩擦角随深度变化的拟合曲线如图 3a 所示；需考虑科氏加速度 a_c 投影到 XY 平面夹角 β 与滑切角 θ 之间的关系，经测量数据如图 3b 所示；还需考虑 F_{X1}、F_{Y1}、F_{Z1} 与深度之间的关系，该关系需要分别通过深松铲仿真、深松灭茬仿真得到。

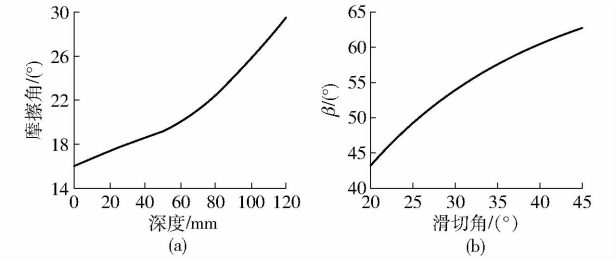


图 3　关系曲线

Fig. 3　Relation curves

2　离散元仿真

2.1　参数设置

为模拟东北地区壤土，利用离散元软件 EDEM 建立土壤模型[15]，选择土壤颗粒间接触模型为 Hertz－Mindlin(no slip)模型和 Hertz－Mindlin with Bonding 模型；深松铲、灭茬刀与土壤颗粒的模型为 Hertz－Mindlin(no slip)模型；根茬与土壤颗粒间内聚力接触模型为 Hertz－Mindlin with JKR。参数如表 1 所示。

表 1　离散元仿真参数

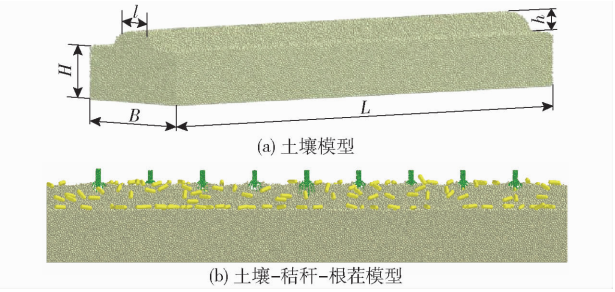
Tab. 1　Discrete element simulation parameters

参数	数值
土壤颗粒泊松比	0.41
土壤颗粒剪切模量/Pa	1.24×10^6
土壤颗粒密度/(kg·m^{-3})	2 150
土壤颗粒间动摩擦因数	0.2
土壤颗粒间静摩擦因数	0.3
土壤与深松铲、灭茬刀之间恢复系数	0.6
土壤与深松铲、灭茬刀之间静摩擦因数	0.313
土壤与深松铲、灭茬刀之间动摩擦因数	0.107
秸秆与深松铲、灭茬刀之间静摩擦因数	0.30
秸秆与深松铲、灭茬刀之间动摩擦因数	0.01
根茬与深松铲、灭茬刀之间静摩擦因数	0.60
根茬与深松铲、灭茬刀之间动摩擦因数	0.02
土壤之间恢复系数	0.6
颗粒间法向接触刚度/(N·m^{-1})	3.4×10^8
颗粒间切向接触刚度/(N·m^{-1})	1.5×10^8
颗粒间临界法向应力/kPa	200
颗粒间临界切向应力/kPa	68

东北地区垄台高 160～200 mm，垄距一般为 600～700 mm[16]，并考虑到灭茬刀作业范围及土壤抛撒，建立长 L = 3 000 mm、宽 B = 800 mm、高 H = 450 mm 的土槽模型，垄台高度 h 为 160 mm，垄台顶宽度 l 为 300 mm，其中垄高宽比 h/l 为 0.53，如图 4a 所示，并建立仿真所需地表残留秸秆和玉米根茬模型，如图 4b 所示。

2.2　深松铲仿真分析

仿真深松铲采用 JB/T 9788—1999《深松铲和深松铲柄》规定的型式和基本尺寸，深松铲高



(a) 土壤模型

(b) 土壤-秸秆-根茬模型

图 4 土槽模型

Fig. 4 Soil bin model

600 mm、入土角 23°、铲柄 270 mm;将深松铲保存格式为 step 并导入 EDEM,材料为 65Mn 钢,设置前进速度为 1 m/s,深松深度为 300 mm。

2.3 灭茬刀与深松铲安装距离分析及确定

被深松铲挑起的土壤颗粒经过深松铲后,在自重与周围土壤作用下开始回落,填入深松铲所开沟槽中,土壤颗粒速度矢量分布如图 5 所示。

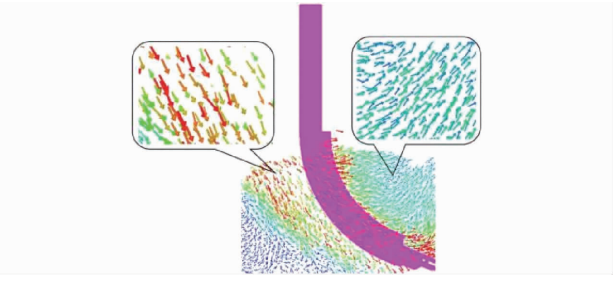


图 5 土壤颗粒速度矢量分布

Fig. 5 Velocity vector distribution of soil particles

随着灭茬刀入土深度增加,作业阻力增大。为使灭茬刀作业阻力降低,灭茬刀应作用于深松铲作业后颗粒达到稳定回落状态且速度最大的时刻,且该时刻颗粒与深松铲铲柄后端距离为灭茬刀与深松铲之间的安装距离。

在 EDEM 后处理中对土壤颗粒进行速度分析,如图 6 所示。颗粒在 2.4 ~ 2.6 s 达到稳定回落过程,颗粒速度先增大后减小。故当时间确定为 2.5 s 时,深松铲与颗粒之间的距离就是灭茬刀与深松铲安装距离,经测量为 60 mm。

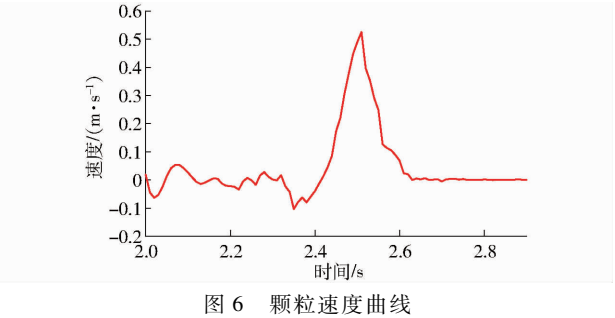


图 6 颗粒速度曲线

Fig. 6 Particle velocity variation curve

2.4 深松铲扰动范围区域划分

通过离散元仿真,深松铲扰动范围分布较广,不同的位置颗粒运动状态区别较大,为考察灭茬刀正切刃设计的合理性,对深松铲扰动范围进行区域划分。将灭茬刀作业幅宽沿 X_1 轴分为 8 个区域,Z_1 轴为前进方向,如图 7 所示。

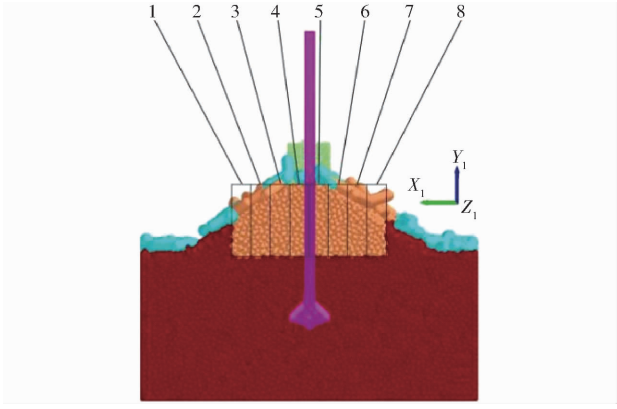


图 7 深松铲仿真几何模型

Fig. 7 Simulation geometry model of subsoiler

将各区域从左至右依次分为 1 ~ 8,观察各区域内土壤颗粒位移,如表 2 所示。

表 2 各区域土壤颗粒位移

Tab. 2 Different areas displacement mm

区域序号	X_1	Y_1	Z_1
1	0 ~ 2	1 ~ 4	1 ~ 5
2	1 ~ 8	4 ~ 18	6 ~ 15
3	6 ~ 18	22 ~ 40	16 ~ 20
4	16 ~ 24	37 ~ 65	21 ~ 32
5	14 ~ 26	25 ~ 34	9 ~ 14
6	8 ~ 19	5 ~ 17	5 ~ 10
7	2 ~ 7	4 ~ 8	4 ~ 6
8	0 ~ 3	2 ~ 3	1 ~ 2

通过文献[17 - 19]及表 2 数据可知,X_1 轴位移比 Z_1 轴、Y_1 轴位移较小,同时 X_1Y_1 平面扰动范围没有 Y_1Z_1 平面扰动范围大,故而只观察 Y_1Z_1 平面土壤颗粒轨迹,区域 1、7、8 土壤颗粒位移小,剔除。再将剔除后区域依次从左至右排为 1 ~ 5,观察各区域 Y_1Z_1 平面颗粒运动轨迹,每个区域可看作典型颗粒群,在这些典型群内颗粒轨迹较为同质,而典型群间颗粒轨迹差异大,故区域划分合理。各区域颗粒运动轨迹如图 8 所示。

通过 EDEM 软件后处理模块导出深松铲作业后各个区域 30、60、90、120 mm 深度周围土壤颗粒对动点 M 的作用力 F_M。

2.5 深松铲灭茬刀仿真分析

基于深松铲作业后土壤回落特性,确定了灭茬刀与深松铲安装距离和深松铲扰动范围区域划分,为得到深松铲作业后灭茬刀作业瞬时各个区域 30、60、90、120 mm 周围土壤颗粒对动点 M 的作用力 F'_M,

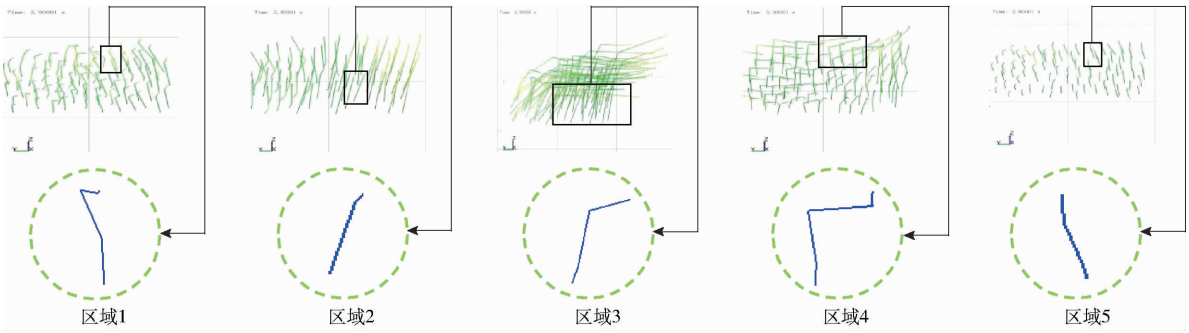


图 8　各区域土壤颗粒轨迹图

Fig. 8　Soil particle trajectory maps of various areas

将深松铲与灭茬刀 stp 格式导入 EDEM 模型中进行仿真，灭茬刀弯曲半径 30 mm、弯折角 110°，材料为 65Mn 钢。结合《农业机械设计手册》[20]，针对常规作业参数进行仿真试验，设置前进速度为 1 m/s，深松深度为 300 mm，灭茬深度为 120 mm。如图 9 所示，蓝色表示颗粒静止、红色表示颗粒速度较大、绿色表示介于两者之间。深松铲刚作业时，犁底层在深松铲铲尖的作用下按垂直于铲尖上表面方向向上方及两侧运动，犁底层被打破，深松铲前方土壤在铲柄的挤压、切削作用下沿铲柄两侧运动（图 9a）；深松铲进入土槽后，被深松铲挑起的土壤颗粒经过深松铲后，在自重与周围土壤作用下开始回落，填入深松铲所开沟槽中，后置灭茬刀作业于深松铲作业后土壤回落过程，同时不断对地表残留秸秆、玉米根茬进行砍切、撕裂作业，灭茬刀将破碎的秸秆、根茬、土壤向后上抛起，从而实现灭茬刀与深松铲交互作业，达到减阻降耗目的（图 9c、9b）；直至深松灭茬作业结束（图 9d）。

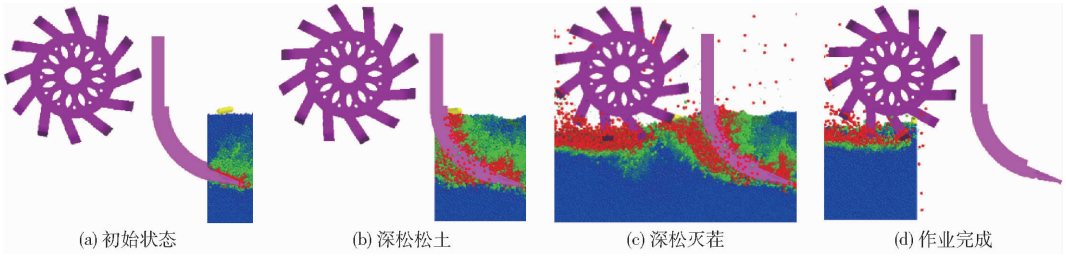


图 9　深松灭茬作业土壤运动分析

Fig. 9　Analysis of soil movement in subsoiling stubble-breaking operation

由 EDEM 软件导出各区域 30、60、90、120 mm 深度周围土壤颗粒对动点 M 的作用力 F'_M。将 F_M 与 F'_M 分解到 X_1、Y_1、Z_1 轴，并用 F_{X1}、F_{Y1}、F_{Z1} 表示其合力，如图 10 所示，为计算滑切角提供依据。

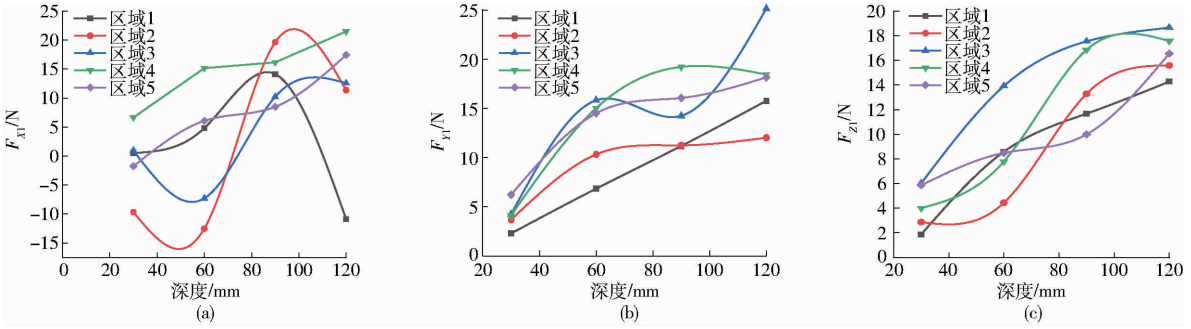


图 10　深度与力关系曲线

Fig. 10　Curves of force variation with depth

由图 10a 可知，F_{X1} 为 −17 ~ 22 N，随着深度增加，区域 1 F_{X1} 先增大后减小；区域 2 F_{X1} 先减小后增大再减小；区域 3 F_{X1} 先减小后增大；区域 4、5 F_{X1} 先增大后减小。当深松铲灭茬刀作业时，由于垄台固有的梯形结构，左右两侧土壤会向垄沟滑落，故而周围土壤会有一个反向作用力，导致区域 1、2、3 都存在负值，同时随着作业深度增加，作用力 F_{X1} 数值会增大。

由图 10b 可知，F_{Y1} 为 4 ~ 25 N，随着深度增加，区域 1 F_{Y1} 增大；区域 2、3 F_{Y1} 先增大后减小再增大；区域 4 F_{Y1} 先增大后减小；区域 5 F_{Y1} 增大。当深松铲作业后，被深松铲扰动的土壤颗粒在自重与周围

土壤作用下开始回落,填入深松铲所开沟槽中,周围土壤会存在向上的作用力,故而作用力 F_{Y1} 都为正,且随着深度增加,作用力 F_{Y1} 在各区域总体呈现增大趋势。

由图 10c 可知,F_{Z1} 为 2 ~ 18 N,随着深度增加,区域 1、2、3 F_{Z1} 增大;区域 4 F_{Z1} 先增大后减小;区域 5 F_{Z1} 增大。当深松铲作业后,深松铲开出的沟槽会被周围土壤逐渐填充至满,周围土壤会存在向前进方向的作用力,故而作用力 F_{Z1} 都为正,且随着作业深度增加总体呈现增大趋势。

3 灭茬刀设计

3.1 各区域不同深度滑切角确定

通过式(5)确定各区域深度为 30、60、90、120 mm 时滑切角,使不同深度的根土与灭茬刀正切刃有相同的相对加速度,但式(5)中牵连加速度 a_e 未知,且其为式(5)中第 2 项系数,故将式(5)拆为

$$A = \tan\varphi + \cot\theta \tag{6}$$

$$B = -\cos\alpha\cot\theta\cot\beta \tag{7}$$

$$C = \cot\theta\cot\beta(F_Z\sin\alpha + F_X\cos\alpha) - \cot\theta(F_{X1}\sin\alpha\sin\theta - F_{Y1}\cos\theta - F_{Z1}\cos\alpha\sin\theta) + F_{X1}\sin\alpha\cos\theta + F_{Y1}\sin\theta - F_{Z1}\cos\alpha\cos\theta = ma_r \tag{8}$$

将各区域不同深度 30、60、90、120 mm 所对应的摩擦角 φ 与力 F_{X1}、F_{Y1}、F_{Z1} 分别代入式(6)、(7)、(8),可求解出各个区域不同深度所对应的滑切角多个解,以 A 为 Z 轴,B 为 Y 轴,C 为 X 轴,得到如图 11 所示的等高线图。

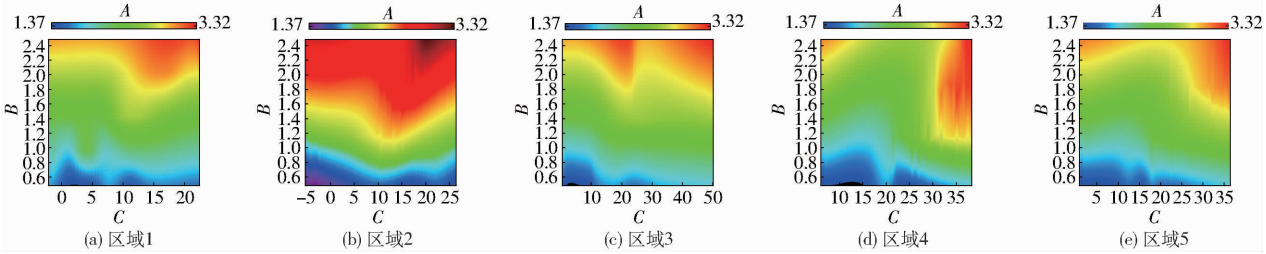


图 11 等高线图

Fig. 11 Contour maps

为从多组解中得出最优解,将 Origin 里主次级别数都设置为 5,每一个独立数据的变异度用样本标准差 S 表示。

通过计算得到各个区域不同深度对应的滑切角,令 30 mm 对应的滑切角为 θ_1,60 mm 对应 θ_2,90 mm对应 θ_3,120 mm 对应 θ_4,并对结果取整。当确定一个深度所对应的滑切角时,其余 3 个不同深度所对应的滑切角唯一,如表 3 所示。

表 3 各区域不同深度的滑切角

Tab. 3 Slide cutting angle of different depths in each area (°)

序号	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
1	32	33	36	38
2	36	37	41	44
3	35	36	39	42
4	31	32	34	36
5	33	35	37	40

3.2 锯齿式灭茬刀设计

假设各个区域刃口曲线为 $y = ax^4 + bx^3 + cx^2 + dx + e$,灭茬刀刃口切线法线斜率为 $\pm\tan(90° - \theta)$,即灭茬刀刃口切线斜率为 $\pm\dfrac{1}{\tan(90° - \theta)}$,所以通过方程组可得到各个区域灭茬刀刃口曲线,令横坐标为 p,纵坐标为 q,如图 12 所示,上行图法线斜率为正,下行图法线斜率为负。同时由于 L 形刀工作原理的特性,灭茬刀正切刃切土并向后抛,经由垄台成形部件,L 形刀比其它结构形式灭茬刀更容易较好地保持作业后的垄形,L 形灭茬刀作业土垡抛撒轨迹如图 13 所示,灭茬部件回转半径为 R、入土深度为 H、旋转角速度为 ω、机具前进速度为 v_m 时,建立如图 13 所示的坐标系,设刀轴初始旋转中心为坐标系原点,深松灭茬机前进方向为 x 轴正向,垂直向下为 y 轴。v_x 为灭茬刀运动速度在 x 轴方向上的分量,v_y 为灭茬刀运动速度在 y 轴方向上的分量,当其运动轨迹为余摆线时,土垡将被向后抛撒,故而 L 形刀更容易较好保持作业后的垄形。

同时锯齿形不但可以有效切削,并具有良好的降阻功能[21-22],锯齿式灭茬刀更是具有减阻降耗的优点[23-24]。故该灭茬刀正切刃设计为锯齿式。因为表 3 中每一组数据都满足各个区域不同深度滑切角要求,故不涉及排布顺序问题。将 5 个区域所对应的曲线依次连接,如图 14 所示。

依据文献[25-26],将灭茬刀正切刃刃口线形不合理处优化为圆弧和缓和曲线段,从而减少应力集中问题。将其导入到 CATIA 中作为草图绘制锯齿式灭茬刀,灭茬刀竖直长度 225 mm、弯曲半径 30 mm、弯折角 110°、幅宽 90 mm、厚度 5 mm。灭茬刀按螺旋线型装配到刀轴上,灭茬刀辊每个刀盘上

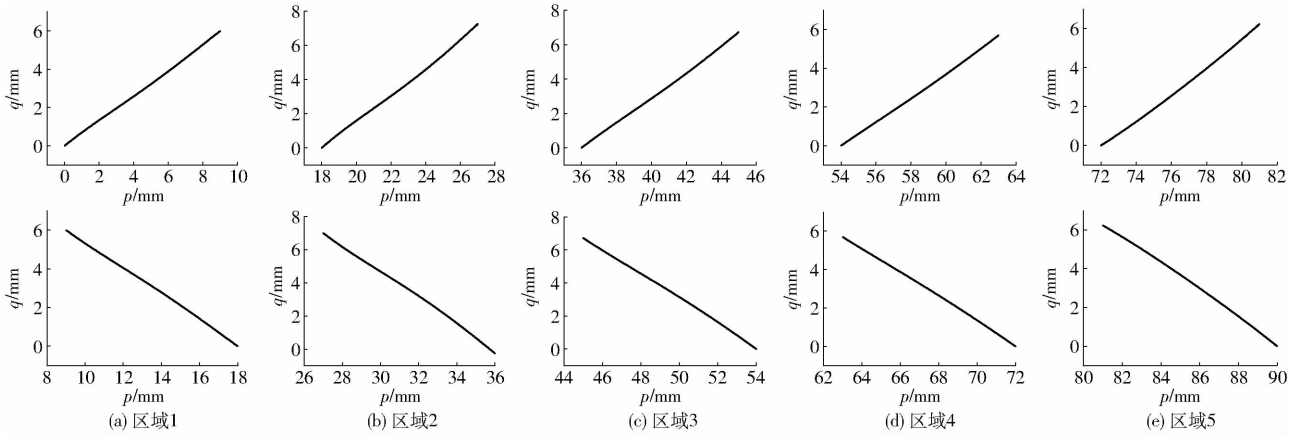


图 12　灭茬刀刃口曲线

Fig. 12　Cutting edge curves of stubble-breaking blade

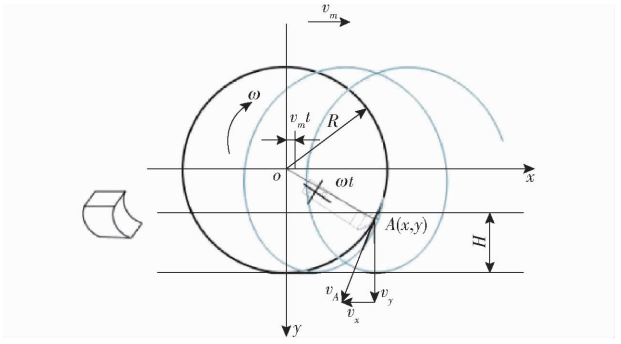


图 13　L 形灭茬刀作业土垡抛撒轨迹图

Fig. 13　L-shaped stubble knife for rifling soilmap

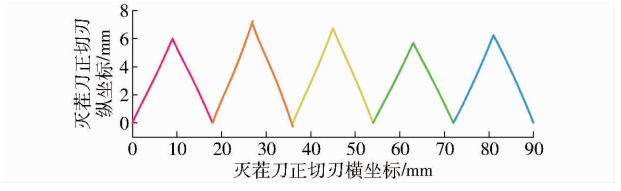


图 14　锯齿式灭茬刀正切刃刃口形状

Fig. 14　Cutting edge shape of stubble-breaking blade

灭茬刀数量从左到右依次为 6、3、3、6，右刀辊与其对称排列，灭茬刀辊安装 4 个刀盘，刀盘间距为 80 mm。

4　刀辊结构参数正交仿真试验优化

为进一步探究灭茬刀辊的作业性能，实现减阻降耗，通过 EDEM 离散元仿真对刀盘直径与安装角结构参数进行优化。

4.1　试验方法

4.1.1　因素水平确定

(1)刀盘直径

灭茬速度 v_c、机具前进速度 v_m、灭茬刀转速 n、灭茬刀回转半径 R 及灭茬深度 h_1 之间的关系式为

$$R \geqslant 30\frac{v_c + v_m}{\pi n} + h_1 \tag{9}$$

结合实际灭茬取灭茬刀转速 n 为 380 ~ 460 r/min，机具前进速度 v_m 为 0.5 ~ 1.5 m/s，刀盘直径设计原则是保证能够达到作业所需的最大耕深时，刀盘不能和地表接触，否则会影响整地机正常工作，故最大灭茬深度 h = 150 mm。若灭茬刀转速取最大值 n = 460 r/min，机具前进速度取最小值 v_m = 0.5 m/s，v_c = 5.5 m/s，则灭茬刀最小回转半径 R = 280 mm；若灭茬刀转速取最小值 n = 380 r/min，机具前进速度取最大值 v_m = 1.5 m/s，v_c = 5.5 m/s，为防止灭茬刀回转半径大，机具结构过大，即满足式(9)即可，故取等于号，则灭茬刀最大回转半径 R = 360 mm。刀盘直径应取 260 ~ 360 mm。

(2)灭茬刀安装角

灭茬刀安装角是灭茬刀正切刃面和回转中心到入土点连线的夹角。灭茬刀安装角计算公式为

$$\gamma = \arccos\frac{1}{\lambda} - \arcsin\frac{b\lambda}{2R\sqrt{\lambda^2 - 1}} \tag{10}$$

式中　λ——速度比

b——灭茬刀正切刃幅宽，mm

γ——安装角，(°)

R 为 260 ~ 360 mm，b = 40 mm，目前常用灭茬刀 λ 为 4 ~ 8，选取不同速度比与回转半径，故安装角 γ 为 72° ~ 80°。

4.1.2　试验因素与试验方案

为研究刀盘直径和安装角对深松灭茬机作业效果的影响，应用 Design-Expert 8.0.6 软件采用二因素五水平中心组合试验，以灭茬刀作业阻力、功耗为试验指标，共实施 13 组试验。试验因素编码如表 4 所示，试验结果如表 5 所示，X_1、X_2 为因素编码值。

4.2　试验结果分析

4.2.1　作业阻力回归模型与显著性检验

作业阻力 Y_1 方差分析如表 6 所示。X_2、X_1X_2、X_1^2 和 X_2^2 对作业阻力 Y_1 的影响极显著($P < 0.01$)；X_1 对功耗 Y_1 影响显著($0.01 \leqslant P < 0.05$)。得到各因

表 4 试验因素编码

Tab. 4 Coding of experiment factors

编码	因素	
	安装角 x_1/(°)	刀盘直径 x_2/mm
1.414	80.0	360.0
1	78.8	345.4
0	76.0	310.0
-1	73.2	274.6
-1.414	72.0	260.0

表 5 试验方案与结果

Tab. 5 Schemes and results of experiment

试验序号	因素		作业阻力	功耗
	X_1	X_2	Y_1/N	Y_2/kW
1	-1	-1	1 203.917	15.03
2	1	-1	1 135.927	13.42
3	-1	1	1 428.245	13.30
4	1	1	1 462.253	16.97
5	-1.414	0	944.404	11.54
6	1.414	0	930.547	12.16
7	0	-1.414	1 500.603	17.50
8	0	1.414	1 865.513	19.14
9	0	0	1 381.393	19.03
10	0	0	1 364.610	18.39
11	0	0	1 377.311	18.84
12	0	0	1 375.140	18.47
13	0	0	1 367.093	18.28

表 6 作业阻力方差分析

Tab. 6 Operation resistance variance analysis

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	7.14×10^5	5	1.43×10^5	2 579.5	<0.000 1 ***
X_1	358.83	1	358.83	6.48	0.038 3 **
X_2	1.42×10^5	1	1.42×10^5	2 570.25	<0.000 1 ***
X_1X_2	2 600.9	1	2 600.9	47	0.000 2 ***
X_1^2	3.32×10^5	1	3.32×10^5	6 006.97	<0.000 1 ***
X_2^2	1.66×10^5	1	1.66×10^5	2 992.86	<0.000 1 ***
失拟	188.56	3	62.85	1.26	0.399
误差	198.83	4	49.71		
总和	7.14×10^5	12			

注：*** 表示极显著($P<0.01$)；** 表示显著($0.01\leqslant P<0.05$)。下同。

素对阻力 Y_1 影响的回归方程为

$$Y_1 = 1\,373.11 - 6.7X_1 + 133.43X_2 + 25.5X_1X_2 - 218.58X_1^2 + 154.59X_2^2 \quad (11)$$

4.2.2 功耗回归模型与显著性检验

功耗 Y_2 方差分析如表 7 所示。X_2、X_1X_2、X_1^2 对功耗 Y_2 的影响极显著($P<0.01$)；X_1 对功耗 Y_2 的影响显著($0.01\leqslant P<0.05$)；X_2^2 对功耗 Y_2 不显著($P>0.1$)，剔除不显著项后得到各因素对功耗 Y_2 影响的回归方程为

表 7 功耗方差分析

Tab. 7 Power variance analysis

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	94.21	4	23.55	140.85	<0.000 1 ***
X_1	1.07	1	1.07	6.38	0.035 5 **
X_2	2.17	1	2.17	12.96	0.007 ***
X_1X_2	6.95	1	6.95	41.55	0.000 2 ***
X_1^2	84.03	1	84.03	502.51	<0.000 1 ***
X_2^2	0.4	1	0.41	3.06	0.123 8
失拟	0.93	4	0.23	2.30	0.220 2
误差	0.41	4	0.10		
总和	95.55	12			

$$Y_2 = 18.43 + 0.37X_1 + 0.52X_2 + 1.32X_1X_2 - 3.45X_1^2 \quad (12)$$

4.2.3 响应曲面分析

通过 Design-Expert 8.0.6 统计软件对试验数据进行处理，得出安装角 x_1、刀盘直径 x_2 之间交互作用对各个指标影响的响应曲面，如图 15 所示。

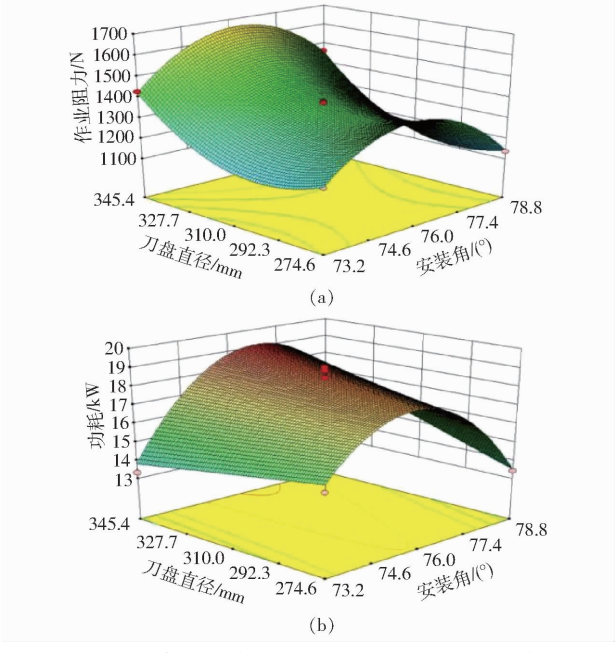


图 15 因素交互作用对评价指标影响的响应曲面

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

如图 15a 所示，当刀盘直径一定时，作业阻力随着安装角增大呈先增大后减小趋势；当安装角一定时，作业阻力随着刀盘直径增大呈先减小后增大的趋势。

如图 15b 所示，当刀盘直径一定时，功耗随着安装角增大先增大后减小；当安装角一定时，功耗随着刀盘直径增大呈减小的趋势。

4.3 结构参数优化

利用 Design-Expert 8.0.6 软件中的优化模块对回归模型进行求解，根据实际工作条件及上述相关

模型分析结果，选定试验因素目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1(x_1, x_2) \\ \min Y_2(x_1, x_2) \\ 73.2° \leqslant x_1 \leqslant 78.8° \\ 274.6\ \text{mm} \leqslant x_2 \leqslant 345.4\ \text{mm} \end{cases} \tag{13}$$

对其结构参数进行求解，参数优化结果为：锯齿式灭茬刀安装角 73.2°、刀盘直径 312 mm，此时锯齿式灭茬刀的作业阻力为 1 167 N、功耗为 14.6 kW。

5　田间试验

通过仿真优化结果可知，优化设计的锯齿式灭茬刀满足基本需求。以东北垄作区玉米秸秆还田后，深松灭茬田间实际灭茬刀入土深度和机具前进速度为试验因素，以作业阻力、垄高宽比和灭茬率为试验指标进行优化试验。

5.1　试验条件与准备

田间作业性能试验于 2023 年 10 月 18 日在黑龙江省东北农业大学保护性耕作试验基地进行。试验地为垄作玉米秸秆还田免耕地，平均留茬高度为 108 mm、土壤硬度为 448 kPa（100 mm）、1 035 kPa（200 mm）、1 828 kPa（300 mm），土壤平均含水率为 15.25%，根茬平均含水率为 44.48%。锯齿式灭茬刀实物图与土壤取样如图 16 所示。



（a）锯齿式灭茬刀实物图　　（b）土壤取样

图 16　试验准备

Fig. 16　Test preparation

试验所需设备有约翰迪尔-324 型拖拉机（宁波）、深松灭茬机、约翰迪尔-280 型拖拉机、GPS-10A 型机动车多功能检测装置、水平尺、卷尺、土壤硬度仪、环刀组件等。测试系统如图 17 所示。

5.2　作业参数优化

由于深松灭茬机灭茬刀的入土深度和机具前进速度在作业过程中存在交互影响，故采用二因素五水平中心组合试验优化试验指标。采用 Design-Expert 8.0.6 将灭茬刀入土深度和机具前进速度进行因素水平划分，试验因素编码如表 8 所示。



图 17　测试系统

Fig. 17　Test system

1. 约翰迪尔-324 型拖拉机　2. 深松灭茬机　3. 约翰迪尔-280 型拖拉机　4. 牵引绳　5. GPS-10A 型机动车多功能检测装置

表 8　田间试验因素编码

Tab. 8　Coding of experiment factors

编码	因素	
	入土深度 x_3/mm	前进速度 x_4/(m·s^{-1})
1.414	140.00	1.50
1	131.22	1.35
0	110.00	1.00
-1	88.78	0.65
-1.414	80.00	0.50

5.3　优化试验与结果分析

试验方案与结果如表 9 所示，X_3、X_4为因素编码值，建立各因素与指标的回归模型，从而获得最优的工作参数组合。

表 9　田间试验方案与结果

Tab. 9　Experimental scheme and results

试验序号	因素		作业阻力	垄高宽比	灭茬率
	X_3	X_4	Y_3/N	Y_4	Y_5/%
1	-1	-1	1 291	0.614 9	93.1
2	1	-1	1 665	0.348 4	95.0
3	-1	1	1 426	0.547 3	93.1
4	1	1	1 780	0.313 3	95.6
5	-1.414	0	1 227	0.640 9	91.0
6	1.414	0	1 753	0.280 8	93.8
7	0	-1.414	1 500	0.483 6	95.7
8	0	1.414	1 684	0.414 7	96.2
9	0	0	1 616	0.486 2	96.4
10	0	0	1 626	0.470 6	96.0
11	0	0	1 626	0.496 6	96.4
12	0	0	1 601	0.474 5	96.3
13	0	0	1 629	0.443 3	96.5

5.3.1　作业阻力回归模型与显著性检验

作业阻力 Y_3 方差分析如表 10 所示。X_3、X_4、X_3^2、X_4^2 对作业阻力 Y_3 的影响极显著（$P < 0.01$）；X_3X_4不显著（$P > 0.1$），得到各因素对作业阻力 Y_3 影响的回归方程为

$$Y_3 = 1\,619.6 + 183.98X_3 + 63.78X_4 - 64.93X_3^2 - 13.93X_4^2 \tag{14}$$

5.3.2　垄高宽比回归模型与显著性检验

垄高宽比 Y_4 方差分析如表 11 所示。X_3、X_4对

表 10 田间试验作业阻力方差分析

Tab. 10 Operation resistance variance analysis

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	3.33×10^5	5	66 595.33	811.78	<0.000 1 ***
X_3	2.71×10^5	1	2.71×10^5	3 301.02	<0.000 1 ***
X_4	3.2×10^4	1	3.2×10^4	396.66	<0.000 1 ***
X_3X_4	100	1	100	1.22	0.306 1
X_3^2	2.9×10^4	1	2.9×10^4	357.45	<0.000 1 ***
X_4^2	1 348.91	1	1 348.91	16.44	0.004 8 ***
失拟	45.05	3	15.02	0.11	0.947 7
误差	529.2	4	132.3		
总和	3.34×10^5	12			

表 11 田间试验垄高宽比方差分析

Tab. 11 Variance analysis of row width ratio

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	0.13	4	0.033	139.36	<0.000 1 ***
X_3	0.13	1	0.13	531.58	<0.000 1 ***
X_4	5.01×10^{-3}	1	5.01×10^{-3}	20.88	0.001 8 ***
X_3X_4	2.64×10^{-4}	1	2.64×10^{-4}	1.1	0.324 6
X_3^2	2.90×10^{-4}	1	2.90×10^{-4}	1.24	0.301 4
X_4^2	9.29×10^{-4}	1	9.29×10^{-4}	3.88	0.084 5 *
失拟	3.05×10^{-4}	4	7.61×10^{-5}	0.19	0.9324
误差	1.61×10^{-3}	4	4.03×10^{-4}		
总和	0.14	12			

注：* 表示较显著($0.05\leqslant P<0.1$)。下同。

垄高宽比 Y_4的影响极显著($P<0.01$)；X_4^2 对垄高宽比 Y_4的影响较显著($0.05<P<0.1$)；X_3X_4和 X_3^2 对垄高宽比 Y_4影响不显著($P>0.1$)，剔除不显著项后得到各因素对垄高宽比 Y_4影响的回归方程为

$$Y_4=0.47-0.13X_3-0.025X_4-0.011X_4^2 \tag{15}$$

5.3.3 灭茬率回归模型与显著性检验

灭茬率 Y_5方差分析如表 12 所示。

表 12 田间试验灭茬率方差分析

Tab. 12 Analysis of variance of stubble-breaking rate

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	35.63	5	7.13	285.23	<0.000 1 ***
X_3	8.74	1	8.74	349.62	<0.000 1 ***
X_4	0.21	1	0.21	8.55	0.022 2 **
X_3X_4	0.09	1	0.09	3.60	0.099 5 *
X_3^2	26.55	1	26.55	1 062.73	<0.000 1 ***
X_4^2	0.22	1	0.22	8.90	0.020 4 **
失拟	0.027	3	8.97×10^{-3}	0.24	0.863 1
误差	0.15	4	0.037		
总和	35.81	12			

X_3、X_3^2 对灭茬率 Y_5的影响极显著($P<0.01$)；X_4、X_4^2 对灭茬率 Y_5的影响显著($0.01<P<0.05$)；X_3X_4对灭茬率 Y_5较显著($0.05<P<0.1$)，得到各因素对灭茬率 Y_5影响的回归方程为

$$Y_5=96.32+1.04X_3+0.16X_4+0.15X_3X_4-1.95X_3^2-0.18X_4^2 \tag{16}$$

5.4 响应曲面分析

通过 Design-Expert 8.0.6 统计软件对试验数据进行处理，得出入土深度、前进速度交互作用对各个指标影响的响应曲面，如图 18 所示。

如图 18a 所示，当机具前进速度一定时，作业阻力随着灭茬刀入土深度增大呈增大趋势；当灭茬刀入土深度一定时，作业阻力随着机具前进速度的增大呈增大的趋势。

如图 18b 所示，当机具前进速度一定时，垄高宽比随着灭茬刀入土深度增大呈减小的趋势；当灭茬刀入土深度一定时，垄高宽比随着机具前进速度的增大呈减小的趋势。

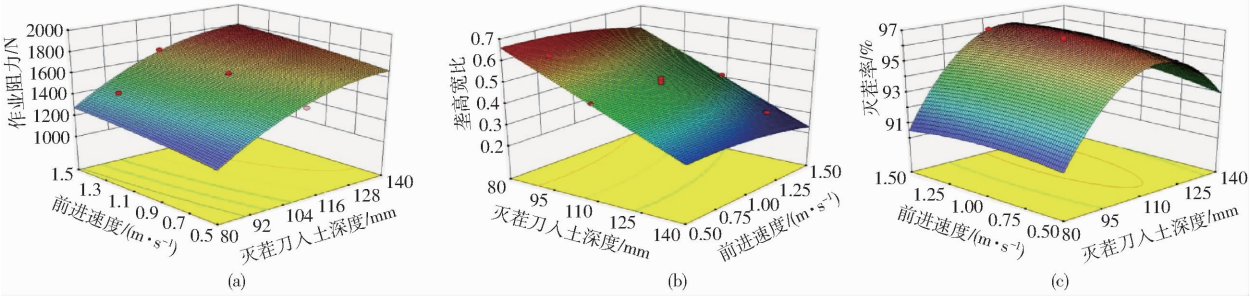


图 18 田间试验因素交互作用对评价指标影响的响应曲面

Fig. 18 Response surface of influence of evaluation indicators on factor interaction

如图 18c 所示，当机具前进速度一定时，灭茬率随着灭茬刀入土深度增大呈先增大后减小的趋势；当灭茬刀入土深度一定时，灭茬率随着机具前进速度的增大呈先增大后减小的趋势。

5.5 作业参数优化

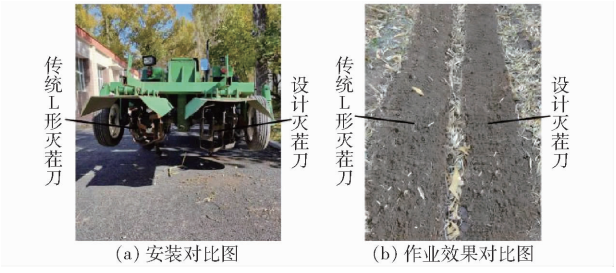
利用 Design-Expert 8.0.6 软件中的优化模块对回归模型进行求解，根据实际工作条件及上述相关模型分析结果，选定试验因素目标函数和约束条件为

$$\begin{cases}\min Y_3(x_3,x_4)\\ Y_4(x_3,x_4)=0.53\\ \max Y_5(x_3,x_4)\\ 88.78\ \text{mm}\leqslant x_3\leqslant 131.22\ \text{mm}\\ 0.65\ \text{m/s}\leqslant x_4\leqslant 1.35\ \text{m/s}\end{cases} \tag{17}$$

东北垄有利于减少风蚀、促进土壤熟化和养分分解，故尽可能还原深松灭茬后的垄高宽比，使得垄高宽比 Y_4 越靠近 0.53 越好。优化得灭茬刀入土深度为 102 mm、机具前进速度为 0.65 m/s，此时灭茬刀作业阻力为 1 467 N、垄高宽比为 0.529、灭茬率为 95.4%。

5.6　田间对比试验

深松灭茬机灭茬刀入土深度 102 mm、机具前进速度 0.65 m/s，在此条件下与传统灭茬刀进行田间对比试验，测试优化后深松灭茬机作业性能效果，如图 19 所示。



(a) 安装对比图　　(b) 作业效果对比图

图 19　田间对比试验

Fig. 19　Field comparison experiments

设计灭茬刀作业时平均阻力为 1 525 N、垄高宽比为 0.52、灭茬率为 95%；传统灭茬刀作业时平均阻力为 1 743 N、垄高宽比为 0.49、灭茬率为 94%。作业阻力降低 13%、垄高宽比提高 6%、灭茬率提高 1 个百分点。

6　结论

(1)针对东北垄作区秸秆还田后灭茬阻力大、功耗高、灭茬率低、作业后垄形差等问题，设计与国标 JB/T 9788—1999 中规定的深松铲交互效应的锯齿式灭茬刀。对灭茬刀进行动力学分析，结合离散元仿真，确定灭茬刀与深松铲安装距离为 60 mm，并获得不同深度所对应的滑切角，以确定灭茬刀正切刃刃口曲线。

(2)由二因素五水平中心组合仿真试验分析确定刀盘直径为 312 mm，安装角为 73.2°，得到灭茬刀辊结构，此时锯齿式灭茬刀作业阻力为 1 167 N、功耗为 14.6 kW。

(3)加工实物后在田间通过二因素五水平中心组合试验得到最优作业参数，灭茬刀入土深度为 102 mm、机具前进速度为 0.65 m/s。通过对比试验，得出锯齿式灭茬刀作业阻力降低 13%、垄高宽比提高 6%、灭茬率提高 1 个百分点，各项指标均优于传统灭茬刀。可满足东北垄作玉米秸秆还田区深松灭茬机作业性能要求。

参　考　文　献

[1] 张光辉，杨扬，刘瑛娜，等. 东北黑土区土壤侵蚀研究进展与展望[J]. 水土保持学报，2022，36(2)：1－12.
ZHANG Guanghui，YANG Yang，LIU Yingna，et al. The northeast black earth area of soil erosion research progress and prospect [J]. Journal of Soil and Water Conservation，2022，4(2)：1－12. (in Chinese)

[2] 袁婷婷. 秸秆覆盖条件下垄作沟灌夏玉米节水效应试验研究[D]. 郑州：华北水利水电大学，2020.
YUAN Tingting. Experimental study on water-saving effect of summer maize under ridge tillage and furrow irrigation with straw mulching[D]. Zhengzhou：North China University of Water Resources and Electric Power，2020. (in Chinese)

[3] 于博威，张晴雯，郝卓，等. 东北黑土区长缓坡耕地横坡垄作与地形对土壤可蚀性的交互作用[J]. 中国农业科学，2023，56(23)：4706－4716.
YU Bowei，ZHANG Qingwen，HAO Zhuo，et al . Interaction of cross ridge cultivation and topography on soil erodibility in long gentle slope cultivated land in Northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica，2019，56(23)：4706－4716. (in Chinese)

[4] 王庆杰，曹鑫鹏，王超，等. 东北黑土地玉米免少耕播种技术与机具研究进展[J]. 农业机械学报，2021，52(10)：1－15.
WANG Qingjie，CAO Xinpeng，WANG Chao，et al. Research progress of no/minimum tillage corn seeding technology and machine in northeast black land of China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2021，52(10)：1－15. (in Chinese)

[5] 杨华，王欣，孙士明，等. 1GZM－350 型灭茬深松整地联合作业机的研究[J]. 农机化研究，2015，37(11)：142－147.
YANG Hua，WANG Xin，SUN Shiming，et al. Study on the type of 1GZM－350 stubble subsoiling combined machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research，2015，37(11)：142－147. (in Chinese)

[6] 赵大勇，李连豪，许春林，等. 1ZQHF－350/5 型前后分置悬挂式联合整地机[J]. 农业机械学报，2014，45(10)：92－96.
ZHAO Dayong，LI Lianhao，XU Chunlin，et al. 1ZQHF－350/5 hang combined cultivating machine with front-stubble-breaking，post-subsoil and rotary-tilling equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2014，45(10)：92－96. (in Chinese)

[7] TONG J，JI W F，JIA H L，et al. Design and tests of biomimetic blades for soil-rototilling and stubble-breaking[J]. Journal of Bionic Engineering，2015，12(3)：495－503.

[8] LI M，XI S，YANG Y，et al. A 3D simulation model of corn stubble cutting using finite element method[J]. Soil and Tillage Research，2017，166(3)：43－51.

[9] ZHAO H，LI H，MA S，et al. The effect of various edge-curve types of plain-straight blades for strip tillage seeding on torque and soil disturbance using DEM[J]. Soil and Tillage Research，2020，202(8)：104674.

[10] 刘九庆,牛明,商友云,等. 基于 ANSYS 的灭茬刀多目标驱动优化设计[J]. 沈阳工业大学学报,2014,36(2):182 - 187.
LIU Jiuqing, NIU Ming, SHANG Youyun, et al. Multi-goal driven optimization design of stubble-smashing cutter based on ANSYS[J]. Journal of Shenyang University of Technology,2014,36(2):182 - 187. (in Chinese)
[11] 林静,张桐嘉,陈彬,等. 深松灭茬旋耕起垄联合作业机设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(2):28 - 39.
LIN Jing,ZHANG Tongjia,CHEN Bin,et al. Design and test of subsoiling rotary rilling and rilling combined operating machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2019,50(2):28 - 39. (in Chinese)
[12] 郑侃,何进,李洪文,等. 反旋深松联合作业耕整机设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(8):61 - 71.
ZHENG Kan,HE Jin,LI Hongwen,et al. Design and experiment of combined tillage implement of reverse-rotary and subsoiling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(8):61 - 71. (in Chinese)
[13] 赵艳忠,王运兴,刘海涛,等. 带状深松灭茬机灭茬部件设计与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(3):94 - 103.
ZHAO Yanzhong,WANG Yunxing,LIU Haitao,et al. Design and test of stubble-breaking components on strip subsoiling and stubble-breaking machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(3):94 - 103. (in Chinese)
[14] 王瑞丽,杨鹏,RABIU FALALU JAHUN,等. 秸秆深埋还田开沟灭茬机设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(5):40 - 47.
WANG Ruili,YANG Peng,RABIU FALALU JAHUN,et al. Design and experiment of combine machine for deep furrowing, stubble chopping, returning and burying of chopped straw[J]. Transactions of the CSAE,2017,33(5):40 - 47. (in Chinese)
[15] 王加一,赵淑红,杨智杰,等. 玉米条带少耕作业驱动式破茬刀设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(8):51 - 61.
WANG Jiayi,ZHAO Shuhong,YANG Zhijie,et al. Design and experiment of driving stubble cutter for corn strip with less tillage operation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(8):51 - 61. (in Chinese)
[16] 张景禹. 垄作玉米智能株间机械除草装置设计与试验[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2021.
ZHANG Jingyu. Design and experiment on intelligent intra-row mechanical weeding device of the ripple maize[D]. Harbin: Northeast Agricultural University,2021. (in Chinese)
[17] 王学振. 土壤-带翼深松铲互作关系及其效应研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2021.
WANG Xuezheng. Soil-winged subsoiler interactions and their effects[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021. (in Chinese)
[18] 陈坤. 后掠式弧形深松铲柄的结构优化研究[D]. 长春:吉林农业大学,2012.
CHEN Kun. Study on structural optimization of extroverted are subsoiler[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2012. (in Chinese)
[19] SONG W, JIANG X H, LI L K, et al. Increasing the width of disturbance of plough pan with bionic inspired subsoilers[J]. Soil and Tillage Research,2022,220:105356.
[20] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
[21] 任露泉,徐晓波,陈秉聪,等. 典型土壤动物爪趾形态的初步分析[J]. 农业机械学报,1990,21(2):44 - 49.
REN Luquan,XU Xiaobo,CHEN Bingcong,et al. Initial research on claw shapes of the typical soil animals[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1990,21(2):44 - 49. (in Chinese)
[22] 胡波,赵先锋,袁森,等. 切削加工中的滑移线场理论及切削力研究现状[J]. 工具技术,2024,58(8):9 - 18.
HU Bo,ZHAO Xianfeng,YUAN Sen,et al. Research status of slip line field theory and cutting force in machining[J]. Tool Engineering,2024,58(8):9 - 18. (in Chinese)
[23] 蒋锐,陈阳,于成信,等. 仿蟋蟀切齿叶减阻灭茬刀片设计与试验[J]. 工程设计学报,2018,25(4):409 - 419.
JIANG Rui,CHEN Yang,YU Chengxin,et al. Design and experiment of cricket's incisor lobe inspired stubble cutting blade with drag reduction[J]. Chinese Journal of Engineering Design,2018,25(4):409 - 419. (in Chinese)
[24] 文立阁. 灭茬刀辊仿生减阻研究[D]. 长春:吉林大学,2009.
WEN Lige. Study on bionic and resistance-reduction of stubblec rushing blade roller[D]. Changchun: Jilin University,2009. (in Chinese)
[25] 李婷. 变截面蜂窝结构力学特性及面内力诱导面外变形行为研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2023.
LI Ting. Study on mechanical characteristics of honeycomb structures with variable cross-section and out-of-plane deformation induced by surface internal forces[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2023. (in Chinese)
[26] 张耀,曹小平,王春芬,等. 材料力学[M]. 北京:清华大学出版社,2015.