王瑞丽,孟繁博文,王正清,等.秸秆深还机开沟覆土铲设计与试验[J].沈阳农业大学学报,2025,56(3):000-000. WANG R L, MENGFAN B W, WANG Z Q, et al.Design and experiment of trenching and soil covering shovel for straw deep returner[J].Journal of Shenyang Agricultural University,2025,56(3):000-000.

# 秸秆深还机开沟覆土铲设计与试验

王瑞丽<sup>a</sup>, 孟繁博文<sup>a</sup>, 王正清<sup>a</sup>, 李德帅<sup>a</sup>, 曲梦成<sup>a</sup>, 白雪吟<sup>a</sup>, 范昊明<sup>b\*</sup> (沈阳农业大学 a. 工程学院, b. 水利学院, 沈阳 110161)

**摘 要:[目的]**针对现有秸秆深埋还田机开沟覆土部件结构复杂、开沟后无法进行自动覆土、功率消耗较高等问题,设计了一种自动开沟覆土铲。[方法]通过理论分析确定秸秆深埋还田机开沟覆土铲的主要结构参数。以铲尖入土角、铲体幅宽和耕作速度为关键试验因素,采用离散元软件进行仿真分析,探究3个试验因素对耕作阻力和覆土率的影响。通过多因素试验分析各因素交互项对开沟覆土铲耕作阻力和自动覆土率的影响。通过仿真试验分析确定3个因素的最优范围,以及耕作阻力最小、覆土率最高时3个因素的较优水平组合。[结果]仿真结果表明开沟覆土铲的较优参数为铲尖入土角24°、铲体幅宽420 mm、耕作速度1.48 m·s<sup>-1</sup>,此时耕作阻力为2 875 N,自动覆土率为87.76%。[结论]根据仿真结果的较优参数组合进行的秸秆深埋还田机开沟覆土铲的设计和田间性能试验得出,开沟覆土铲开沟深度稳定性为98.84%,开沟宽度一致性为96.35%,自动覆土率为86.47%,耕作阻力为2 856 N。仿真试验结果和田间试验结果符合设计要求。

文章编号:1000-1700(2025)03-0000-10

## Design and Experiment of Trenching and Soil Covering Shovel for Straw Deep Returner

WANG Ruili<sup>a</sup>, MENGFAN Bowen<sup>a</sup>, WANG Zhengqing<sup>a</sup>, LI Deshuai<sup>a</sup>, QU Mengcheng<sup>a</sup>, BAI Xueyin<sup>a</sup>, FAN Haoming<sup>b\*</sup>

(a. College of Engineering, b. College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China)

**Abstract:** [**Objective**]In order to solve the problems of the complex structure of the trenching and soil covering parts, the inability to carry out automatic soil covering after ditching, and the high power consumption of the existing straw deep burial returning machine, an trenching and automatic soil covering shovel designed. [**Methods**]Through theoretical analysis, the main structural parameters of the straw deep burial returning machine were determined. Taking the penetrating angle of the shovel tip , the width of the shovel body and the forward speed as the key test factors, the simulation analysis was carried out based on discrete element software , to explore the influence of the 3 test factors on tillage resistance and soil covering rate. The effects of the interaction terms of each factor on the tillage resistance and automatic soil covering rate of the trenching and soil covering unit were analyzed using multi-factor experiments. Through experimental analysis, the optimal range of the three factors and the optimal combination of the three factors for minimum tillage resistance and maximum soil covering rate are obtained. [**Results**]The simulation results show that the optimal parameters of the trenching shovel are as follows: the penetrating angle of the shovel tip is 24°, the shovel width is 420 mm, the forward speed is 1.48 m·s<sup>-1</sup>, then the tillage resistance is 2 875 N, and the automatic soil covering rate is 87.76%. [**Conclusion**]According to the optimal combination of parameters of the simulation results, the design and field performance test of the trenching and soil covering shovel of

收稿日期:2024-07-23 修回日期:2024-11-10

基金项目:辽宁省揭榜挂帅项目(2022JH1/10400017);沈阳市科技计划项目(24-216-2-10)

第一作者:王瑞丽(1970-),女,博士,教授,从事农业机械化及智能化装备研究,E-mail:wangruili@syau.edu.cn

通信作者:范昊明(1972-),男,博士,教授,博士生导师,从事土壤侵蚀规律、流域水沙研究,E-mail:fanhaoming@ syau.edu.cn

the straw deep burial returning machine were carried out. Finally, it is concluded that the stability of the trenching depth of the trenching shovel is 98.84%, the consistency of ditching width was 96.35%, the automatic soil covering rate was 86.47%, and the tillage resistance was 2 856 N. The simulation test results and field test results meet the design requirements.

Key words: straw deep returner; trenching and soil covering shovel; work effect; parameter optimization.

随着玉米连作年限增长,土壤肥力退化现象逐渐加剧。长期以来,我国采用翻耕、旋耕等作业方式,尽管 在一定程度上提高了农作物产量,却也对土地造成了损害。土壤耕作层逐渐浅化、土壤坚实度不断增加、土壤 蓄水保墒能力下降<sup>[1-5]</sup>。如果把土壤表面的秸秆通过秸秆深埋还田机直接还田,这将为后茬作物的生长提供所 需养料<sup>[6-10]</sup>。秸秆直接还田有助于增加土壤有机质含量,减少地表径流<sup>[11]</sup>。秸秆在深层土壤中经过腐烂分解, 能够很大程度改良土壤,有助于打破土壤犁底层,增强蓄水保墒能力,促进农作物根系的养分吸收,从而达到 增产的效果<sup>[12-14]</sup>。

目前,国内外的秸秆还田机大多只能将秸秆粉碎后抛撒或浅层覆盖,只有少数机型具备将土壤与碎秸秆 混合后深埋的功能。而这种还田会导致土壤犁底层增厚上移,耕作层变薄、肥力下降,进而影响农作物生长, 最终会导致农作物减产<sup>[15-17]</sup>。多数秸秆还田机功率消耗较大,结构复杂,无法在开沟时自动覆土。为确保作业 后地表平整,以便春季顺利播种,通常需要在开沟装置后增设覆土装置。然而这种做法会增加耕作阻力<sup>[18-20]</sup>。

针对秸秆还田机开沟后无法自动覆土,加装覆土装置导致机具作业功耗相应增大,以及粉碎秸秆后深埋 的深度不够影响播种等问题,本研究设计了一种秸秆深埋还田机自动开沟覆土铲。分析秸秆深埋还田机开沟 覆土铲的主要结构参数,并采用离散元仿真试验,分析各因素对开沟覆土铲所受耕作阻力和自动覆土率的影 响显著性,最后进行田间试验,验证秸秆深埋还田机开沟覆土铲的作业效果,为后续秸秆深埋还田机的设计提 供参考依据。

### 1 关键部件结构与工作原理

秸秆深埋还田机(图1)由拖拉机输出轴动力通过万 向节传递给变速箱,变速箱把动力变速并改变方向后传 递给传动装置中的皮带轮,这些部件协同工作,实现两个 切割粉碎刀的对向转动。通过切割粉碎刀的转动,地面上 的秸秆被迅速粉碎,并抛洒到导流板上。随后,粉碎后的 秸秆在导流板的作用下,进入开沟覆土铲的铲腔内,经过 尾端的开口处,碎秸秆顺利流入沟内,接着进行自动覆土 操作,并由镇压轮对地表进行压实,使土壤平整。

秸秆深还机的优势在于能够在开沟的同时进行自动 覆土,因为开沟覆土铲(图2)采用单侧曲面铲体设计,主 要由铲柄、铲尖、铲翼、镇压轮、铲腔等组成,铲尖设计为 三角形,铲腔尾端设有开口,镇压轮安装在开口下方,铲 翼位于铲腔的外侧。在机具前进过程中,铲尖和铲柄破 土完成开沟作业,在此过程中,土壤受到铲体的挤压发生 横向运动,当铲尖和铲柄破土时,能够将土壤向上抬升,



 机架; 2.悬挂架; 3.变速箱; 4.传动装置; 5.防尘壳体; 6.镇压轮; 7.限深装置; 8.开沟覆土铲; 9.防割壳体; 10.切割粉碎刀; 11.导流板
 1.Racks; 2.Suspension racks; 3.Gearbox; 4.Transmission; 5.Dust-proof housing;
 6.Suppression wheel; 7.Depth limiting device; 8.Trenching shovel; 9. Cut-resistant housing; 10. Cutting crusher; 11. Deflectors

图1 秸秆深还机结构原理图 Figure 1 Structure diagram of straw deep returning machine

并通过铲腔的挤压作业,开出适当宽度和深度的沟壑形成空腔。在此过程中,秸秆通过铲腔进入土壤空腔,并完成自动覆土作业,从而实现秸秆还田功能。

## 2 开沟覆土铲受力分析

开沟覆土铲在田间作业时土壤受力情况如图3,作用力划分为AB段、BC段和BD段。在AB段,土壤主要受 到其自重G1、与铲尖表面相对运动产生的摩擦力f,以及铲尖对其产生的作用力F1,重力G1的方向垂直向下,摩



<sup>1.</sup>铲柄; 2.铲尖; 3.铲翼; 4.镇压轮; 5.铲腔; 6耕作层; 7.犁底层; 8.心土层 1.Shovel handle; 2.Shovel tip; 3.Shovel wings; 4.Suppression wheel; 5.Shovel cavity; 6. Cultivated layer; 7.Plough pan layer; 8.Subsoil layer

图2 开沟覆土铲结构示意图 Figure 2 Schematic diagram of trenching and soil covering shovel structure

擦力f的方向与铲尖表面平行,作用力F<sub>1</sub>方向与铲尖表 面垂直;BC段侧重于铲柄对土壤的作用,在此段,土壤 主要受自身重力G<sub>2</sub>以及铲柄产生的剪切和挤压作用力 F<sub>2</sub>,机具前进产生的剪切和挤压作用力导致土壤破碎并 改变其原有的物理结构,从而形成深沟,剪切和挤压作 用力F<sub>2</sub>方向都垂直于铲柄;BD段为铲翼对土壤的作用, 在这一部分,土壤主要受自身重力G<sub>3</sub>、铲翼对其产生的 剪切作用力F<sub>3</sub>和挤压作用力F<sub>4</sub>,剪切作用力F<sub>3</sub>方向垂 直于铲翼侧边,土壤的挤压作用力F<sub>4</sub>方向与机具的前 进方向一致。



图3 土壤受力示意图 Figure 3 Diagram of soil forces

#### 2.1 开沟覆土铲破土过程受力分析

在开沟覆土铲工作时,在其作业区域前方形成的楔形土块被抬升后发生破碎,不会产生土壤翻扣现象。随着开沟覆土铲不断向前,铲柄刃部不断对土壤进行切割,受到土壤的水平耕作阻力<sup>[21]</sup>。综合考虑铲尖和铲柄 刃部在切割土壤过程中产生的牵引阻力P为:

$$P = k_1 l_1 + k_2 l_2 \tag{1}$$

式中:k1、k2分别为单位长度上阻力在移动方向的分量;l1、b2分别为铲尖刃部和铲柄刃部的长度(mm)。

#### 2.2 开沟覆土铲对土壤切削破坏运动分析

在耕作过程中,铲翼会对土壤进行挤压,导致其剪切破坏。在此过程中,铲翼所受的水平方向分力即为牵引阻力*T*:

$$T = N\sin\alpha + F\cos\alpha = N(\sin\alpha + f\cos\alpha)$$
(2)

式中:N为法向压力(N);F为土壤对铲尖的摩擦力(N);a为开沟覆土铲入土角度(°)。

土壤正应力水平 $\delta_{0}=90 \text{ kN} \cdot \text{m}^{-2}, \xi$ 为土壤的相关系数。假设开沟覆土铲有效工作面积为A,则法向压力N为:

$$N = A \cdot \xi \cdot \delta \Delta t \tag{3}$$

又由于 $f=\tan \varphi$ ,其中 $\varphi$ 为土壤的摩擦角。则牵引阻力T:

$$T = A \cdot \xi \cdot \delta(\sin \alpha + f \cos \alpha) = A \cdot \xi \cdot \delta(\sin \alpha + \tan \phi \cos \alpha)$$
(4)

式中:f为摩擦系数。

## 3 开沟覆土铲仿真分析

#### 3.1 仿真模型建立

3.1.1 物理模型建立 开沟覆土铲结构主要由铲柄、铲尖、铲翼、镇压轮支架、镇压轮和铲腔组成,采用三维建

模软件 SolidWorks 对开沟覆土铲进行建模如图4,并将 其保存为 IGS 格式,导入 EDEM 软件。在运用 EDEM 离散元仿真软件进行模拟时,需要设定材料参数、接触 参数以及力学参数等,本研究测得试验数据涉及到的 离散元仿真参数如表1。

3.1.2 土壤颗粒模型 本研究采用土壤类型为砂壤土, 耕作层在0~15 cm。该层土壤具有较大孔隙度,硬度相对 较小,土壤颗粒多呈粒状或柱状。位于15 cm以下的犁底 层土壤更为紧实,硬度较大,土壤颗粒多表现为单粒结构 和块状。而心土层则指30 cm以下的土壤,这部分土壤通



图4 开沟覆土铲三维模型

Figure 4 3D model of trenching and soil coverig shovel

表1	离散元仿真参数
----	---------

Table 1Parameters for discrete element simulation	
参数 Parameter	数值Value
开沟覆土铲(45钢)泊松比Trenching shovel (45 steel) Poisson's ratio	0.27
开沟覆土铲(45钢)剪切模量Trenching and soil covering shovel (45 steel) shear modulus/Pa	8.23×10 <sup>10</sup>
开沟覆土铲(45钢)密度Trenching shovel (45 steel) density/(kg·m <sup>-3</sup> )	7 800
土—土恢复系数Soil-to-soil recovery coefficient	0.12
土—钢恢复系数 Soil-steel recovery coefficient	0.10
土—钢静摩擦系数 Static friction coefficient of soil-steel	0.60
土—钢动摩擦系数Soil-steel dynamic friction coefficient	0.40
耕层土壤泊松比Poisson's ratio of cultivated soil	0.25
耕层土壤剪切模量 Soil shear modulus of cultivated layer/Pa	$1 \times 10^{6}$
耕层土壤密度 Soil density in the cultivated layer/(kg·m <sup>-3</sup> )	1 420
耕层土壤黏结刚度 Soil bond stiffness of the cultivated layer/(N·m <sup>-3</sup> )	5×10 <sup>7</sup>
耕层土壤黏结应力Soil cohesion stress in the cultivated layer/Pa	$2 \times 10^{4}$
耕作层土壤摩擦系数Soil friction coefficient of the cultivated layer	0.334
犁底层土壤泊松比 Plough pan soil Poisson's ratio	0.34
犁底层土壤剪切模量 Plough pan soil shear modulus/Pa	$1.1 \times 10^{6}$
犁底层土壤密度 Plough pan soil density/(kg·m <sup>-3</sup> )	1510
犁底层土壤粘结刚度 Plough pan soil bond stiffness/(N·m <sup>-3</sup> )	5×10 <sup>7</sup>
犁底层土壤黏结应力 Plough pan soil cohesion stress/Pa	3×10 <sup>4</sup>
犁底层土壤摩擦系数 Coefficient of friction of plough pan soil	0.283
心土层土壤泊松比 Poisson's ratio of subsoil layer	0.37
心土层土壤剪切模量 Soil shear modulus of subsoil layer/Pa	$1.2 \times 10^{6}$
心土层土壤密度 Soil density of the subsoil soil layer/(kg·m <sup>-3</sup> )	1 550
心土层土壤黏结刚度 Soil bond stiffness of subsoil layer/(N·m <sup>-3</sup> )	5×10 <sup>7</sup>
心土层土壤黏结应力 Soil cohesion stress of subsoil layer/Pa	$4 \times 10^{4}$
心土层土壤摩擦系数Soil friction coefficient of the subsoil layer	0.226

常无需耕作,主要由体积较大的核状颗粒组成(图5)。



图5 土壤颗粒模型 Figure 5 Soil particle model

3.1.3 接触模型 接触模型是离散元法的核心基础,其本质在于准静态颗粒固体的接触力学弹塑性分析。本研究选定Herz-Mindlin with Bonding模型作为土壤颗粒接触模型,可以有效模拟砂壤土的破碎过程<sup>[22]</sup>。

## 3.2 仿真试验分析

3.2.1 仿真参数 由秸秆深埋还田机的工作原理可知,其主要参数为铲尖入土角A、铲体幅宽B、耕作速度C。因此,根据以往试验及参考文献确定铲尖入土角、铲体幅宽、耕作速度作为重点仿真试验因素。基于单因素实验获得的最优范围。采用Design-Expert软件中的Box-Behnken方法进行组合试验设计。确定仿真试验因素水平如表 2。

Table 2   Table of factor level coding							
		因素 Factor					
水平 Level —	入土角 Penetrating angle A/(°)	幅宽 Width B/mm	耕作速度 Forward speed C/(m・s <sup>-1</sup> )				
-1	21	380	1.12				
0	24	420	1.38				
1	27	460	1.64				

表2 因素水平编码

3.2.2 仿真结果方差分析 根据Box-Behnken试验方案,共进行 17 组试验,试验方案及结果如表 3。通过 Design-Expert 软件对仿真试验结果所得数据进行分析,得到开沟覆土铲覆土率Y<sub>1</sub>与耕作阻力Y<sub>2</sub>的回归方程,并对 其显著性进行检验。

Table 3   Test scheme and results							
因素水平 Factor level				试验指标 Test metrics			
试验编写 Trial number	入土角 <i>A/</i> (°) Penetrating angle A	幅宽 <i>B</i> /mm Width <i>B</i>	耕作速度 C/(m・s <sup>-1</sup> ) Forward speed C	覆土率Y <sub>1</sub> /% Soil covering rate Y <sub>1</sub>	耕作阻力Y2/N Tillage resistance Y2		
1	21	380	1.38	77.82	2 587		
2	27	380	1.38	80.43	2 638		
3	21	460	1.38	82.97	2 984		
4	27	460	1.38	81.73	2 804		
5	21	420	1.12	75.41	2 773		
6	27	420	1.12	78.93	2 690		
7	21	420	1.64	83.50	2 953		
8	27	420	1.64	86.19	2 849		
9	24	380	1.12	71.51	2 603		
10	24	460	1.12	80.24	2 983		
11	24	380	1.64	84.86	2 861		
12	24	460	1.64	82.18	2 980		
13	24	420	1.38	85.76	2 838		
14	24	420	1.38	86.67	2 779		
15	24	420	1.38	86.47	2 872		
16	24	420	1.38	87.01	2 826		
17	24	420	1.38	85.95	2 829		

表3 试验方案及结果

3.2.2.1 开沟覆土铲覆土率Y<sub>1</sub>显著性分析 对开沟覆土铲的覆土率Y<sub>1</sub>回归模型进行方差分析和回归系数显著 性检验(表4)。覆土率Y<sub>1</sub>回归方程为:

Ŷ<sub>1</sub> = 86.37 + 0.947 5A + 1.56B + 3.83C - 0.962 5AB - 0.207 5AC - 2.85BC - 2.16A<sup>2</sup> - 3.47B<sup>2</sup> - 3.20C<sup>2</sup> (5) 由表 4可知,覆土率Y<sub>1</sub>的回归模型P<0.01,说明此模型极显著,失拟项的P>0.05,失拟项不显著,表示回归 方程拟合较好,所以该拟合可以用于开沟覆土铲覆土率的预测。一次项A、B、C,交互项AB、BC,以及二次项A<sup>2</sup>、B<sup>2</sup>、C<sup>2</sup>对开沟覆土铲开沟后覆土率的影响显著,显著的交互项可以支撑3个响应变量,模型的预测和优化合理。
3.2.2.2 开沟覆土铲的耕作阻力Y<sub>2</sub>显著性分析 对开沟覆土铲的耕作阻力Y<sub>2</sub>回归模型进行方差分析和回归系 数显著性检验,(表5)。耕作阻力Y<sub>2</sub>回归方程为:

Ŷ<sub>2</sub> = 2 828.80 - 39.50A + 132.75B + 74.25C - 57.75AC - 62.25BC - 58.03A<sup>2</sup> - 17.53B<sup>2</sup> + 45.48C<sup>2</sup>
 由表 5 可知,耕作阻力 Y<sub>2</sub>的回归模型 P<0.01,说明此模型极显著,失拟项的 P>0.05,失拟项不显著,表明回
 归方程拟合较好,所以该拟合可以用于开沟覆土铲耕作阻力的预测。一次项A、B、C,交互项AB、BC,以及二次
 项A<sup>2</sup>、C<sup>2</sup>对开沟覆土铲开沟后覆土率的影响显著,显著的交互项可以支撑3个响应变量,模型的预测和优化合理。

Table 4Analysis of variance of soil covering rate						
评价指标 Evaluation indicators	方差来源 Source of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	Р
	模型Model	306.81	9	34.09	59.56	< 0.000 1
	Α	7.18	1	7.18	12.55	0.009 4
	В	19.53	1	19.53	34.12	0.000 6
	С	117.35	1	117.35	205.02	< 0.000 1
	AB	3.71	1	3.71	6.47	0.038 4
	AC	0.172 2	1	0.172 2	0.300 9	0.600 4
覆土率Y <sub>1</sub> /%	BC	32.55	1	32.55	56.86	0.000 1
Soil covering rate $Y_1$	$A^2$	19.69	1	19.69	34.39	0.000 6
	$B^2$	50.76	1	50.76	88.69	< 0.000 1
	$C^2$	43.18	1	43.18	75.43	< 0.000 1
	残项Residues	4.01	7	0.572 4		
	失拟项 Lack of fit	2.95	3	0.982 9	3.72	0.1186
	纯误差 Pure error	1.06	4	0.264 5		
	总和Sum	310.81	16			

#### 表4 覆土率方差分析 Table 4 Analysis of variance of soil covering rate

注:P≤0.01 表示高度显著:0.01<P≤0.05 表示显著:P>0.05 表示不显著。下同。

Note: P<0.01 means highly significant; 0.01<P<0.05 means significant; P>0.05 means not significant. The same below.

Table 5 variance analysis of thage resistance							
评价指标Evaluation indicators	方差来源 Source of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	Р	
	模型model	251 200	9	27 914.29	31.25	< 0.000 1	
	A	12 482.00	1	12 482.00	13.97	0.007 3	
	В	141 000	1	141 000	157.81	< 0.000 1	
	С	44 104.50	1	44 104.50	49.37	0.000 2	
	AB	13 340.25	1	13 340.25	14.93	0.006 2	
	AC	110.25	1	110.25	0.123 4	0.735 7	
耕作阻力Y <sub>2</sub> /N	BC	17 030.25	1	17 030.25	19.06	0.003 3	
Tillage resistance $Y_2$	$A^2$	14 176.42	1	14 176.42	15.87	0.005 3	
	$B^2$	1 293.16	1	1 293.16	1.45	0.268 0	
	$C^2$	8 707.27	1	8 707.27	9.75	0.016 8	
	残项Residues	6 253.30	7	893.33			
	失拟项 Lack of fit	1 814.50	3	604.83	0.545 0	0.6773	
	纯误差 Pure error	4 438.80	4	1 109.70			
	总和sum	257 500	16				

#### 表5 耕作阻力方差分析 Table 5 Variance analysis of tillage resistance

3.2.3 响应曲面分析 采用响应面分析法对试验数据进行分析,旨在研究开沟覆土铲性能核心指标与关键影响因素之间的内在关系。根据数据分析的结果,绘制了各因素对覆土率的响应曲面图(图6和图7),直观地展示 了各影响因素对开沟覆土铲性能评价指标的具体影响,以及这些影响因素之间如何相互作用,共同影响评价 指标的交互作用。

影响因素对开沟覆土铲的覆土率影响的主次顺序为耕作速度、幅宽、入土角,3个影响因素对开沟覆土铲 的覆土率均存在显著(P<0.05)交互作用。当耕作速度一定时,随着铲尖入土角的增大,开沟覆土铲的覆土率呈 现先增加后减小的趋势;随着幅宽的增大,开沟覆土铲的覆土率呈现先缓慢增加,达到高水平时出现缓慢减小 的趋势(图 6a)。当铲体幅宽一定时,随着入土角的增大,开沟覆土铲的覆土率呈现先增加后减小趋势,最大值 出现在中等水平附近;随着耕作速度的增加,开沟覆土铲的覆土率呈现先增加后逐渐缓慢较小的趋势(图 6b)。 当铲尖入土角一定时,随着铲体幅宽的增加,开沟覆土铲的覆土率呈现先增长后缓慢减小的趋势;随着耕作速 度的增加,开沟覆土铲的覆土率呈现增长由快速到缓慢,高水平有缓慢减小的趋势(图 6c)。

影响因素对开沟覆土铲的耕作阻力影响的主次顺序为幅宽、耕作速度、入土角,幅宽和耕作速度均存在显著(P<0.05)交互作用。保持耕作速度不变的情况下,随着入土角的逐渐增大,耕作阻力呈现先增长后减小的趋势;而幅宽的增大则导致耕作阻力先迅速增加,随后增长速度逐渐放缓(图7a)。保持幅宽不变的情况下,随着



Figure 6 Effect of the interaction of various factors on the soil covering rate of trenching and soil covering shovel

入土角的逐渐增大,耕作阻力呈现先增加后减小的趋势;随着耕作速度的增加,耕作阻力呈现先缓慢减小后快速增加的趋势(图7b)。保持入土角不变的情况下,随着幅宽的增加,耕作阻力呈现先快速后缓慢的增的趋势;随着耕作速度的增加,耕作阻力呈现先减小后增加的趋势(图7c)。



图7 各因素相互作用对开沟覆土铲耕作阻力的影响



## 4 田间试验

## 4.1 试验条件

试验使用的仪器和设备有秸秆深还机、开沟覆土铲、阻力测试仪、卷尺、直尺、标杆及铁锹等。在秋季收获后,为了验证开沟覆土铲的工作性能以及仿真结果的准确性,参照现行的NY/T500-2002《秸秆还田机作业质量》、NY/T740—2003《田间开沟机械作业质量》等标准对开沟覆土铲进行田间性能试验如图8,试验在辽宁省沈阳市浑南区祝家街道上楼子进行,试验地块为垄作,种植作物为玉米,试验地含水率为22.97%。

#### 4.2 性能试验

在评估开沟覆土铲的性能时,着重测试了其开沟和覆土情况。为此,选取了开沟深度的稳定性、开沟宽度 的一致性和自动覆土率作为关键评价指标,以全面反映开沟覆土铲的作业效果。

在测定开沟覆土铲的覆土率时,首先需要确定开沟的深度,具体操作是,利用铁锹移除沟外和沟内回落的 土壤,露出原始地表和沟底。随后,在两沟壁间放置直尺,测量沟底到直尺(地表)的距离,以此作为该点的开

- 7 -

沟深度。在测量开沟覆土铲的开沟宽度时,需清除自 动回落到沟内的土壤,选取0,150,300 mm这3个位置, 取三者的平均值作为该点的开沟宽度。最后,在测量 自动覆土率时,首先划定测量区域为100 mm×300 mm, 分别称量开沟覆土铲翻出沟外的土壤和自动回落到沟 里的土壤的重量,通过计算落入沟内土壤质量占土壤 总质量的比例,得到该点自动覆土率。

由表 6可知,5个行程下开沟覆土铲的平均开沟深度 分别为 303,302,300,302,301.5 mm。在相同作业行 程下,5个行程中的开沟覆土铲开沟深度稳定性系数均 高于 98%,这充分表明开沟覆土铲在开沟深度稳定性 上具有良好表现。



图8 田间试验 Figure 8 The field test

Table 6         Experimental results of trenching depth						
参数Parameters	行程1 First run	行程2 Second run	行程3 Third run	行程4 Fourth run	行程5 Fifth run	
最大值 Maximum/mm	308	307	304	306	305	
最小值 Minimum/mm	298	297	296	298	298	
平均值 Average value/mm	303	302	300	302	301.5	
极差 Range/mm	10	10	8	8	7	
稳定性系数/%	09.25	08.24	00 (7	09.69	09.94	
Stability factor	98.35	98.54	98.07	98.08	98.84	

表6 开沟深度试验结果

由表 7可知,5个行程中开沟覆土铲的平均开沟宽度依次为 290,292.5,293,289.5,287.5 mm。在相同的作

业行程下,左铲和右铲的开沟宽度差异最大为15 mm以内。5个行程的开沟覆土铲开沟宽度一致性系数均超 过 95%,这充分表明开沟覆土铲在开沟宽度一致性上具有良好表现。

Table 7Experimental results of trenching width							
参数Parameters	行程1 First run	行程2 Second run	行程3 Third run	行程4 Fouth run	行程 5 Fifth run		
最大值 Maximum/mm	302	306	302	299	298		
最小值 Minimum/mm	278	279	284	280	277		
平均值Average value/mm	290	292.5	293	289.5	287.5		
极差Range/mm	24	27	18	19	21		
一致性系数/%	05.96	05.29	06.02	06 72	06.25		
Coefficient of conformity	93.80	95.58	90.95	90.72	90.55		

表7 开沟宽度试验结果

在开沟覆土铲耕作(图9)时,铲尖和铲柄完成破土后,将土壤向上抬升,铲腔挤压土壤开出适当的深度和宽 度后,能够形成空腔如图9b。这时秸秆可以被扫入土壤空腔内,完成秸秆深埋并自动覆土过程,实现秸秆还田 功能。试验验证了开沟覆土铲可以较好地实现设计目标。

由表 8可知,5个行程下开沟覆土铲的平均自动覆土率分别为 86.45%、87.05%、85.55%、87.75% 和 85.55%。

## 5 讨论与结论

本研究设计了一种全新结构的开沟覆土铲,可实现开沟、覆土、秸秆深埋、深松等多项作业的一体化,与现 有的深松铲相比较,该开沟覆土铲结构简单,深松效果好,能够实现开沟后自动覆土。

本研究重点分析了开沟覆土铲的设计原则和工作原理,确定了基本结构参数,并通过 EDEM 仿真试验确 定影响秸秆深埋还田机结构的主要参数顺序,设计了开沟覆土铲,并通过田间试验验证开沟覆土铲参数的准 确性和减阻性能。对秸秆深埋还田机的关键部件开沟覆土铲结构参数进行了理论分析,并对开沟覆土铲的工



a. 开沟覆土铲开沟情况 Trench of trenching and soil covering shovel



b. 开沟覆土铲开沟形成空腔 Cavity formed by trenching and soil covering shovel

#### 图9 开沟覆土铲工作过程

#### Figure 9 The working process of trenching and soil covering shovel

#### 表8 覆土率试验结果

Table 8	Experimental	results	of soil	covering	rate

参数Parameters	行程1 First run	行程2 Second run	行程3 Third run	行程4 Fouth run	行程 5 Fifth run
最大值 Maximum/%	88.4	89.6	88.9	92.1	89.4
最小值 Minimum/%	84.5	84.5	82.2	83.4	82.7
平均值 Average value/%	86.45	87.05	85.55	87.75	85.55
极差Range/%	3.9	5.1	6.7	8.7	7.7

作参数进行设计和计算,初步确定其参数的取值范围,开沟覆土铲铲尖入土角在21~27°,铲体幅宽在380~460 mm, 耕作速度在1.12~1.64 m·s<sup>-1</sup>。采用 Solidworks 三维建模及离散元软件 EDEM 进行开沟覆土铲模型建立和仿 真,对能够影响覆土率和耕作阻力性能的参数进行 Box-Behnken 试验。并利用 Design-Expert13 软件分析每个 参数对其影响规律,确定了开沟覆土铲结构参数的较优解,铲体幅宽为420 mm,铲尖入土角为24°,耕作速度 为1.48 m·s<sup>-1</sup>。根据仿真结果对开沟覆土铲进行田间试验,其结果表明开沟深度稳定性达到98.84%、开沟宽度 一致性达到96.35%、覆土率为86.47%,该开沟覆土铲符合设计要求,满足田间作业过程中的作业要求。

#### 参考文献:

- [1] 吴子岳,高焕文.根茬处理技术的现状与发展[J].中国农业大学学报,2000,5(4):46-49.
  - WU Z Y,GAO H W.Present state and development on technology of stubble chopping [J].Journal of China Agricultural University, 2000,5(4):46-49.
- [2] 王红彦,王 飞,孙仁华,等.国外农作物秸秆利用政策法规综述及其经验启示[J].农业工程学报,2016,32(16):216-222.
   WANG H Y,WANG F,SUN R H,et al.Policies and regulations of crop straw utilization of foreign countries and its experience and inspiration for China[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2016,32(16):216-222.
- [3] 闫 雷,董天浩,喇乐鹏,等.免耕和秸秆还田对东北黑土区土壤团聚体组成及有机碳含量的影响[J].农业工程学报,2020,36 (22):181-188.

YAN L,DONG T H,LA Y P,et al.Effects of no-tillage and straw returning on soil aggregates composition and organic carbon content in black soil areas of Northeast China[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2020, 36:181-188.

- [4] 邹文秀,韩晓增,严 君,等.耕翻和秸秆还田深度对东北黑土物理性质的影响[J].农业工程学报,2020,36(15):9-18.
   ZOU W X,HAN X Z,YAN J,et al.Effects of incorporation depth of tillage and straw returning on soil physical properties of black soil in Northeast China[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2020,36:9-18.
- [5] 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 R L,YANG P,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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33 (5):40-47.

[6] 丁天宇,郭自春,钱泳其,等.秸秆还田方式对砂姜黑土有机碳组分和孔隙结构的影响[J].农业工程学报,2023,39(16):71-78. DING T Y,GUO Z C,QIAN Y Q,et al.Effects of straw return methods on the soil organic carbon fractions and pore structure characteristics of Shajiang black soil[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2023,39(16):71-78.

[7] 贾洪雷,谭贺文,马中洋,等.玉米收获机断秸导流装置设计与试验[J].农业工程学报,2022,38(4):12-23.
 JIA H L,TAN H W,MA Z Y,et al.Design and experiment of the straw breaking and diversion device for maize harvesters[J].
 Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2022,38(4):12-23.

[8] 韩 豹,董小伟,褚宝柱,等.秸秆绳不开沟深埋还田机切土刀的设计与试验[J].农机化研究,2024,46(12):107-112.
 HAN B,DONG X W,CHU B Z,et al.Design and test of soil cutter for straw rope deep buried returning machine without trenching [J].Journal of Agricultural Mechanization Research,2024,46(12):107-112.

- [9] 曾 山,徐 卓,于开鑫,等.自走式蔬菜播种机底盘的设计与试验[J].沈阳农业大学学报,2023,54(2):176-188.
   ZENG S,XU Z,YU K X,et al.Design and experiment of self-propelled vegetable seeder chassis[J].Journal of Shenyang Agricultural University 2023,54(2):176-188.
- [10] 秦 宽,魏新钊,李光耀,等.软夹轮压式甘薯移栽机设计与试验[J].东北农业大学学报,2024,55(4):73-84. QIN K,WEI X Z,LI G Y,et al.Design and testing of a soft clamp wheel type sweet potato transplanter[J].Journal of Northeast Agricultural University,2024,55(4):73-84.
- [11] 迟岩杰,张银平,王占滨,等.复合式秸秆混土还田机设计与试验[J].农机化研究,2023,45(1):133-138.
   CHI Y J,ZHANG Y P,WANG Z B,et al.Design and experiment of combined straw and stubble crushing and returning machine [J].Journal of Agricultural Mechanization Research,2023,45(1):133-138.
- [12] 王瑞丽,潘广鑫,杨 鹏,等.旋耕式秸秆深埋还田开沟机设计与试验[J].沈阳农业大学学报,2016,47(2):185-191.
   WANG R L,PAN G X,YANG P,et al.Design and experiment of straw deep returning rotary ditching machine[J].Journal of Shenyang Agricultural University,2016,47(2):185-191.
- [13] 王学振,岳 斌,高喜杰,等. 深松铲不同翼铲安装高度时土壤扰动行为仿真与试验[J]. 农业机械学报,2018,49(10):124-136.
   WANG X Z,YUE B,GAO X J,et al. Discrete element simulations and experiments of disturbance behavior as affected by mounting height of subsoiler's wing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(10):124-136.
- [14] 林 静,马 铁,李宝筏.1JHL-2型秸秆深埋还田机设计与试验[J].农业工程学报,2017,33(20):32-40.
   LIN J,MA T,LI B F.Design and test of 1JHL-2 type straw deep burying and returning machine[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2017,33(20):32-40.
- [15] 王瑞丽,李培源,王铁军,等. 圆捆玉米秸秆离散元参数标定[J].沈阳农业大学学报,2022,53(3):319-326.
   WANG R L,LI P Y,WANG T J,et al.Discrete element parameter calibration for round bales of corn stalks[J].Journal of Shenyang Agricultural University,2022,53(3):319-326.
- [16] 王宪良,胡 红,王庆杰,等.基于离散元的土壤模型参数标定方法[J].农业机械学报,2017,48(12):78-85.
   WANG X L,HU H,WANG Q J,et al.Calibration method of soil contact characteristic parameters based on DEM theory[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(12):78-85.
- [17] 郑智旗,何 进,王庆杰,等. 秸秆捡拾粉碎掩埋复式还田机设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(7):87-96.
   ZHENG Z Q,HE J,WANG Q J,et al.Design and experiment on straw pickup-chopping and ditch-burying integrated machine[J].
   Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(7):87-96.
- [18] 魏子翔,何瑞银,李毅念,等.稻茬田带状立旋作业参数对种床清秸与平整效果的影响[J].南京农业大学学报,2024,47(5):1037-1048.

WEI Z X,HE R Y,LI Y N, t al.Effects of strip vertical rotation working parameters on seedbed straw cleaning and flatness in rice stubble field[J].Journal of Nanjing Agricultural University,2024,47(5):1037-1048.

- [19] 林金天.土壤动力特性与节能耕作及机具设计[J].农业机械学报,1996,27(增刊1):42-46.
  - LIN J T.Soil dynamic properties and saving tillage energy and implements design[J].Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1996,27(S1):42-46.
- [20] 王瑞丽,柴佳佳,许方剑,等.秸秆直注深埋还田机设计与试验[J].沈阳农业大学学报,2019,50(5):634-640.
   WANG R L,CHAI J J,XU F J,et al.Design and experiment of direct injection straw deep bury and returning machine[J].
   Journal of Shenyang Agricultural University,2019,50(5):634-640.
- [21] 赵 萍,徐国发,李增玺,等.秋季深耕分层施肥对辽北地区玉米产量及土壤理化特性的影响[J]. 沈阳农业大学学报,2021,52 (4):500-505.
   ZHAO P,XU G F,LI Z X,et al. Effects on maize yield and soil physical and chemical properties through deep tillage and

ZHAO P,XU G F,LI Z X,et al.Effects on maize yield and soil physical and chemical properties through deep tillage and layered fertilization in autumn in northern liaoning province[J].Journal of Shenyang Agricultural University,2021,52(4):500-505.

[22] ZENG Z W,MA X,CHEN Y,et al.Modelling residue incorporation of selected chisel ploughing tools using the discrete element method (DEM)[J].Soil and Tillage Research,2020,197:104505.