

环形土壤磨损试验平台设计与试验

衣雪梅¹ 吴大有² 王弘坤² 张冲² 母延绪²

(1. 塔里木大学机械电气化工程学院, 阿拉尔 843300; 2. 西北农林科技大学机械与电子工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: 现有土壤磨损试验中面临直线式土槽行程受限、圆形土槽受离心力和内外径速度差大、土壤整备困难等问题。基于此,研制了一种新型环形跑道式土壤磨损试验平台。该平台主要由环形土槽、闭环导轨和磨损测试装置组成。磨损测试装置集成了驱动、姿态调节和土壤整备等功能模块,能够实现触土部件沿导轨的往复运动,复现多工况、长距离的触土部件土壤磨损试验。通过 PLC 控制运行速度(0~10 km/h),同时可实现耕深、推土角及切土角的精准调控。以 1L-225 型梯形犁铧为测试对象,开展了 140 km 的长距离磨损试验,并结合离散元法(DEM)构建了“土壤-犁铧”互作模型,从载荷、流场及表面形貌等方面验证了平台的可靠性。测试结果表明,测试平台入土深度波动偏差在 ± 4.5 mm 以内,运行速度变异系数仅为 2.1%,整备后的土壤坚实度达到了田间实测值的 80% 以上。可靠性验证表明,稳定耕作阶段的实测阻力与仿真结果的相对误差较低,且波动相位一致。土槽试验观测到的刃口点蚀、平行犁沟等磨损形貌及犁铧外表轮廓的演变规律与仿真结果高度契合。多工况试验验证了测试平台在复杂工况下的复现能力。该环形土壤磨损试验平台的运行参数可控、耕作载荷稳定,具备真实复现田间长距离耕作磨损失效的能力。

关键词: 环形土槽; 触土部件; 磨损失效; 离散元法

中图分类号: S220.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2026)11-0089-10

OSID:



Design and Testing of Ring-shaped Soil Wear Test Platform

YI Xuemei¹ WU Dayou² WANG Hongkun² ZHANG Chong² MU Yanxu²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Tarim University, Alar 843300, China

2. College of Mechanical and Electronic Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Existing soil wear testing methods face several limitations, including restricted travel distance in linear soil bins, significant centrifugal effects and velocity differences between inner and outer radii in circular soil bins, and difficulties in soil preparation. To address these issues, a novel annular track-type soil wear testing platform was developed. The platform mainly consisted of an annular soil bin, a closed-loop guide rail, and a wear testing apparatus. The wear testing apparatus integrated functional modules for driving, attitude adjustment, and soil preparation, enabling reciprocating motion of soil-engaging components along the guide rail and facilitating long-distance soil wear experiments under multiple operating conditions. The operating speed (0~10 km/h) was regulated via a programmable logic controller (PLC), while tillage depth, rake angle, and cutting angle can be precisely adjusted. Using a 1L-225 trapezoidal ploughshare as the test specimen, a long-distance wear experiment covering 140 km was conducted. A discrete element method (DEM) model describing the soil-ploughshare interaction was also established to validate the reliability of the platform in terms of load characteristics, soil flow field, and surface morphology evolution. Experimental results indicated that the fluctuation of penetration depth remained within ± 4.5 mm, while the coefficient of variation of the operating speed was only 2.1%. In addition, the soil firmness after preparation reached more than 80% of the measured field value. Reliability verification demonstrated that the measured draft force during the stable tillage stage showed a low relative error compared with simulation results, with consistent fluctuation phases. Wear morphologies observed in the soil bin tests, such as edge pitting and parallel furrow patterns, as well as the evolution of

收稿日期: 2026-03-13 修回日期: 2026-03-17

基金项目: 新疆人才发展基金(第二批)南疆兵团引才专项(52530801)、塔里木大学胡杨英才——引进人才科研启动金(博士)项目(TDZKBS202683)和陕西省重点研发计划一般项目(2024NC-YBXM-204)

作者简介: 衣雪梅(1976—),女,副教授,博士,主要从事先进材料制备及智能农机装备研究,E-mail: xuemei_yi@nwsuaf.edu.cn

the ploughshare outer contour, showed strong agreement with the simulation results. Multi-condition experiments further verified the platform's capability to reproduce complex operating conditions. The proposed annular soil wear testing platform provided controllable operating parameters and stable tillage loads, enabling realistic reproduction of long-distance field wear failure processes. It therefore offered significant value for research on drag reduction and wear resistance of soil-engaging components, as well as for service life prediction.

Key words: ring-shaped soil wear test platform; soil-engaging components; wear failure; discrete element method (DEM)

0 引言

农机触土部件在耕作作业中长期遭受土壤颗粒的冲蚀与摩擦,由此导致的磨损失效不仅增加了耕作能耗,还直接导致了触土部件的频繁停机更换,造成耕作效率和质量降低,严重制约了现代农业生产的效率与作业经济性^[1-3]。因此,深入研究“土壤-触土部件”的互作行为,已成为提高我国现代农业装备性能的重要方向^[4-5]。

目前,研究“土壤-触土部件”互作行为的方法主要分为田间试验法和土槽试验法。与田间试验相比,土槽试验因具有土壤参数可控、环境干扰小、易于安装高精度传感器进行实时监测等优势,已成为“土壤-触土部件”互作行为研究的重要手段^[6-7]。

现有土槽运动轨迹主要分为直线式、圆形及环形3类。直线式土槽最为常见,如叶岩等^[8]设计的直线式土槽,其结构简单且数据采集稳定性好,但受限于导轨长度,部件在短距离内需频繁经历加速、减速及往复换向过程,难以复现田间长距离连续耕作的工况。张艳静^[9]设计了一种旋转臂式圆形土槽,通过悬臂的旋转实现触土部件的循环运动,有效解决了直线式土槽行程受限的问题。然而,悬臂结构在大扭矩工况下易产生高频振颤,影响测试数据的准确性。马君等^[10]采用牵引式圆环形土槽方案,将试验台沿环形轨道牵引运动,改善了运行稳定性,但圆环形结构持续旋转产生的离心力以及内外径的线速度差,仍对测试精度造成干扰。颜华等^[11]提出的环形跑道式土槽,通过直线段与圆弧段的组合,兼顾了长距离连续性与运动稳定性,但该类型土槽普遍存在占地面积大、土壤参数调控困难等问题,限制了其在频繁调整土壤工况下的磨损试验中的广泛应用。

针对现有试验平台的不足,本文设计一种新型环形跑道式土壤磨损试验平台。该平台通过闭环导轨模拟触土部件在田间长时耕作的工况,以解决直线土槽行程不足及圆形土槽受离心力与内外径速度差干扰较大等问题^[12-14]。本研究以 1L-225 型梯形犁铧为例,利用该测试平台开展多工况长距离的磨损试验,并结合离散元 (DEM) 仿真与磨损表征技术,对该

试验平台的准确性与运行稳定性进行综合评估。

1 磨损试验平台结构组成与工作原理

1.1 结构组成

土壤磨损试验平台主要由环形土槽、闭环导轨和磨损试验装置3部分组成,试验平台整体结构如图1所示。

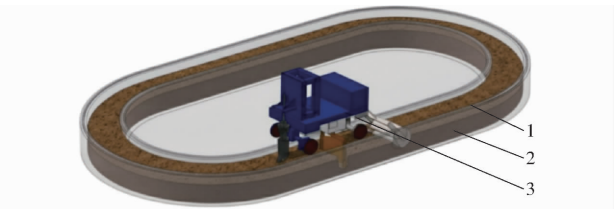


图1 土壤磨损试验平台结构图

Fig.1 Soil wear test platform structure diagram

1. 闭环导轨 2. 土槽 3. 磨损试验装置

闭环导轨固定于土槽侧壁上沿,为试验平台提供精确、可控、可重复的移动路径;磨损试验装置位于闭环导轨上部,可沿闭环导轨进行往复运动。其核心技术参数如表1所示。

表1 磨损试验装置主要技术参数	
Tab.1 Main technical parameters of wear device	
参数	数值
土槽宽度/mm	520
最大回转半径/mm	2 000
触土部件入土深度/mm	100 ~ 450
机具运行速度/(km·h ⁻¹)	0 ~ 10

1.2 工作原理

该环形土壤磨损试验平台通过闭环运动系统实现触土部件与土壤之间的连续、可重复的相对运动。磨损试验装置作为执行单元,安装于闭环导轨之上。试验装置工作时,其内置的控制系统驱动伺服电机,带动试验装置沿导轨进行匀速往复运动,从而为触土部件提供稳定的耕作路径与速度。试验装置集成的姿态调节机构通过改变触土部件的入土深度、切土角及推土角,实现在不同作业参数下对触土部件进行磨损试验。当触土部件在土壤中进行时,土壤对部件产生的阻力通过传动系统传递至扭矩传感

器,实现耕作扭矩与转速的实时、动态监测。此外,在试验装置行进过程中,其尾部的覆土板与镇压辊随即对耕作形成的犁沟进行回填与压实,使土槽内的土壤物理状态在每次耕作循环后快速恢复至预设条件,从而保证后续试验工况的一致性与试验数据的可重复性。

2 结构与参数确定

2.1 土槽与导轨

环形土槽与闭环导轨是试验平台的基础支撑系统。环形土槽作为承载土壤的容器,其核心功能是提供足够的耕作空间,以模拟田间连续耕作工况^[15]。

因此,土槽的截面尺寸设计需依据典型农机触土部件的耕作需求,确保农机触土部件具有足够的耕作空间,不同农机触土部件耕作参数见表 2。综合考虑制造与安装误差,最终确定环形土槽宽度为 520 mm,内置土壤厚度为 500 mm。

表 2 不同农机触土部件耕作参数

Tab. 2 Tillage parameters of different agricultural machinery soil-engaging components mm		
触土部件	耕深	耕幅
犁铧	150 ~ 300	200 ~ 400
深松铲	250 ~ 400	150 ~ 300
开沟器	30 ~ 100	20 ~ 80

闭环导轨的设计需兼顾直线运行的稳定性与弯道转向的灵活性。由于闭环导轨固定于土槽侧壁上沿,为保证设备稳定支撑,轨距需大于土槽宽度,在此基础上为减小磨损试验装置的回转半径,同时基于零部件标准化与维护便利性的考量,最终选定闭环导轨的轨距为 600 mm^[16]。

为确保磨损试验装置能够顺利通过弯道区域,依据刚体绕定点转动模型计算磨损试验装置的最小回转半径,其计算公式为^[17]

$$R_{\min} = \frac{L}{\sin\alpha_{\max}}$$

(1)

式中 $R_{\min}$ ——设备最小回转半径,mm

L ——轨距,mm

$\alpha_{\max}$ ——设备最大转角,(°)

根据设备整体设计与配件安装空间要求,设定最大转角为 20°,代入式(1)得装置所需最小回转半径为 1 754 mm,为确保试验装置运行平稳并留有余量,最终设计平台回转半径为 2 000 mm。为保证触土部件在大部分行程中处于直线耕作状态,尽可能减小离心力与内外径速度差的干扰,要求平台直线运行距离大于 2 倍回转半径^[18],因此,确定环形土

槽的总长度为 30 000 mm。

2.2 磨损试验装置

2.2.1 装置组成

磨损试验装置是一个集传动、姿态调节、数据采集与土壤整备于一体的集成系统,如图 2 所示,该装置由动力与控制模块、姿态调节模块、数据采集模块和土壤整备模块组成,其中动力与控制模块包括控制箱、传动部件、电机及供电系统,姿态调节模块包括三爪卡盘、上法兰杆、下法兰、触土部件夹持机构,数据采集模块包括扭矩传感器及其连接部件,土壤整备模块包括覆土板和镇压辊。

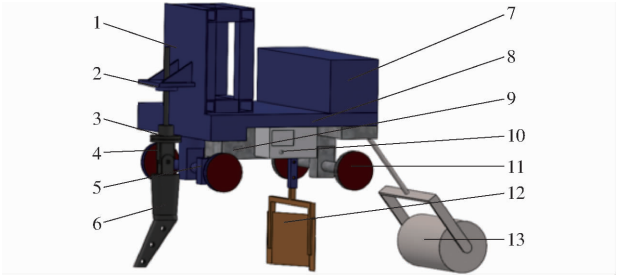


图 2 磨损试验装置

Fig. 2 Wear test device

1. 支撑架 2. 三爪卡盘 3. 上法兰杆 4. 下法兰 5. 扭矩传感器 6. 触土部件夹持机构 7. 配重块 8. 磨损试验装置主体
9. 电机及供电系统 10. 控制箱 11. 橡胶轮 12. 覆土板 13. 镇压辊

2.2.2 动力与控制模块

动力与控制模块为磨损试验装置提供稳定、可调的牵引力。动力与控制系统主要由电机、传动部件、控制箱及供电系统组成,控制系统采用 PLC 可编程控制器通过控制箱内的变频器调节电机频率,实现磨损试验装置在 0 ~ 10 km/h 范围内的调速,以覆盖拖拉机田间实际耕作 3 ~ 8 km/h 的速度区间^[19]。

2.2.3 姿态调节模块

姿态调节模块能够满足多种触土部件的耕作姿态调整,其主要由三爪卡盘、上法兰杆、下法兰、触土部件夹持机构组成。该系统具备较高的通用性与兼容性,夹持机构设计为多种可互换的模块化接口,能够适配铧式犁、深松铲、开沟器等多种触土部件,如图 3 所示。

姿态调节模块能够实现对触土部件耕作姿态的精准控制,如图 4 所示。上法兰杆上端由三爪卡盘夹持固定,通过调节卡盘夹持上法兰杆的纵向位置,可实现入土深度在 100 ~ 450 mm 范围内的无级调节,精度可达 ± 1 mm,能够覆盖从浅耕到深松的所有耕作深度需求;上法兰杆下端与下法兰通过螺栓副连接,利用法兰盘的径向旋转特性,旋转下法兰即



图3 触土部件夹持机构

Fig. 3 Soil-engaging components clamping mechanism

可在 0°~360°范围内调整推土角;夹持机构固定于下法兰底部,并设计有圆弧摆动副,通过夹持机构绕轴线前后摆动,可实现切土角在 0°~45°范围内的无级调节。

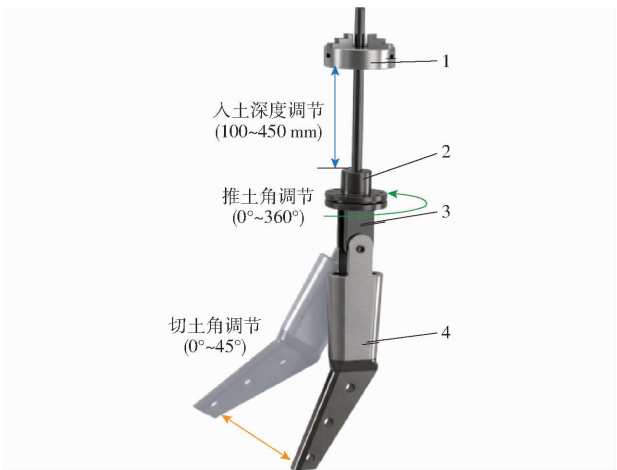


图4 姿态调节示意图

Fig. 4 Posture adjustment diagram

1. 三爪卡盘 2. 上法兰杆 3. 下法兰 4. 触土部件夹持机构

2.2.4 数据采集模块

数据采集模块由 HZJ-D200 扭矩传感器组成。该传感器量程 0~200 N·m,测试精度 ±0.4 N·m,并通过挠性联轴器与动力输出轴连接,传感器外壳通过支架进行刚性固定,防止外壳随轴旋转,从而建立稳定的静态参考基准。系统通过传感器反馈的原始数据经过转化,实现作业参数的实时获取^[20]。

扭矩传感器内置测速模块,可实时输出传动轴的转速,由此可得触土部件的线性耕作速度 v ,计算公式为^[17]

$$v = \frac{2\pi nr}{60}$$
 (2)

式中 n ——传动主轴转速,r/min
 r ——力臂长度,m

触土部件在土壤中所受的水平耕作阻力无法直接测量,可通过扭矩传感器测得的动态扭矩转速结合传动效率进行换算。根据力矩平衡原理,计算公式为^[17]

$$R = \frac{(T - T_0)\eta}{r}$$
 (3)

式中 R ——触土部件的耕作阻力,N
 T ——传动主轴扭矩,N·m
 η ——传动系统机械效率,%
 T_0 ——空载时的阻力矩,N·m

2.2.5 土壤整备模块

在土槽试验中,触土部件作业后会留下明显的犁沟并导致土壤松散,破坏了原有的土壤结构,土壤整备模块在触土部件耕作后的极短时间内,能够自动完成土壤的回填与压实^[21]。这一过程使土壤坚实度恢复至预设的试验标准,保证了试验平台能够进行连续的田间工况模拟,确保了磨损数据的可重复性与可靠性。

土壤整备系统主要由覆土板和镇压辊组成。覆土板采用 V 形对称结构,当装置运行时,V 形板能将犁沟两侧被抛出的土壤高效地回填至沟壑内,进而初步整平土壤表层;紧随其后的镇压辊对回填后的土壤施加静压力,通过滚压减少土壤颗粒间的空隙,从而使土壤达到目标坚实度。

为确保整备后的土壤达到田间实测的坚实度要求,需对镇压辊质量进行精确设计。土壤坚实度与镇压辊参数的数学关系模型为^[17]

$$S = k \left(\frac{Mg}{A} \right)^N$$
 (4)

式中 S ——土壤坚实度,kPa
 k 、 N ——与土壤类型相关的系数,取 0.01、0.35
 M ——镇压辊质量,kg
 A ——镇压辊与土壤的接地面积,m²
 g ——重力加速度,m/s²

选用美国 Spectrum 公司生产的 SC900 型土壤坚实度仪对西北农林科技大学试验田 0~300 mm 土层的坚实度进行多点测量,为保证数据的准确性,等距取 3 点进行测量并求平均值,得到土壤平均坚实度为 227.39 kPa,将实测数据及系数代入式(4)中,确定镇压辊质量为 90 kg。

3 犁铧测试试验

3.1 试验设计

为验证环形跑道式土壤磨损试验平台的可靠性,开展土槽试验与仿真模拟。鉴于犁铧在标准作业工况下受到的机械阻力显著高于其他典型的触土部件(深松铲、开沟器),同时其磨损特征较为显著,因此,本研究选取 1L-225 型梯形犁铧作为试验对象。针对耕作环境,设定仿真与试验参数:土壤坚实度为 227.39 kPa,含水率为 (12±2)% ,耕作速度为 3 km/h,耕深为 200 mm,推土角为 35°。

土槽试验在环形土壤磨损试验平台上展开,如图 5 所示,设定总行程为 140 km,并以 35 km 为步长设置 4 个监测节点,记录各阶段的耕作参数及犁铧磨损情况。



图 5 多功能农机触土部件磨损试验平台样机
Fig. 5 Prototype of functional agricultural machinery soil-engaging component wear test platform
1. 磨损试验装置 2. 闭环导轨

田间试验的“土壤-犁铧”仿真模型则基于离散元法 (DEM) 构建。通过采用不同粒径的球形颗粒堆积成由耕作层、犁底层及心土层组成的 3 层土壤结构,并采用 Hertz - Mindlin with Bonding V2 模型在颗粒间生成圆柱形粘结键模拟土壤颗粒间的粘结力,还原土壤在犁铧挤压下的剪切破裂特性^[22-25],“土壤-犁铧”互作模型如图 6 所示。

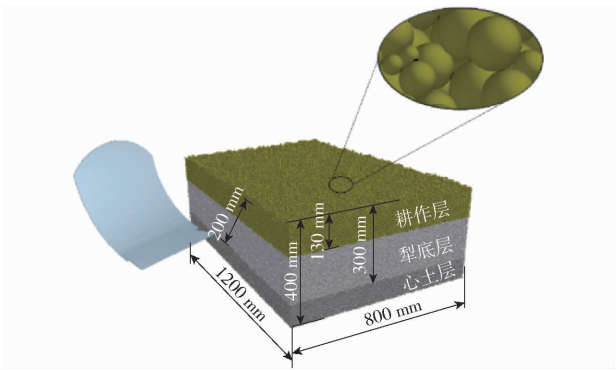


图 6 犁铧部件耕作仿真模型
Fig. 6 Plowshare component cultivation simulation model

为保证仿真结果的可靠性,本研究采用了筛分法、称量法、土壤坚实度测量技术等多种方法来获取试验土壤的物理和力学特性,并用于仿真模型的参数设置。各相关材料参数及接触力学参数见表 3、4。

表 3 材料参数 Tab. 3 Material parameters			
材料	泊松比	剪切模量/Pa	密度/(g·cm ⁻³)
触土部件	0.30	7.9×10^{10}	7.81
耕作层颗粒	0.41	1.0×10^8	1.51
犁底层颗粒	0.43	1.0×10^8	1.66
心土层颗粒	0.44	1.0×10^8	1.74

3.2 试验结果与分析

为评估触土部件的磨损程度,利用无水乙醇对

表 4 土壤材料接触参数 Tab. 4 Soil material contact parameters			
项目	恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
耕作层与部件	0.51	0.54	0.34
犁底层与部件	0.51	0.54	0.26
心土层与部件	0.51	0.49	0.22
土壤间	0.20	0.36	0.24

耕作后的犁铧进行清洗,去除表面附着的土壤颗粒。采用 EX - E650 型电子天平测量试验前后的犁铧质量,并结合磨损区域的几何尺寸变化,评估犁铧的磨损情况。

为进一步获取犁铧的磨损形貌,在刃口处进行切割取样,并使用 RX50 型金相显微镜对经清洗与除锈处理后的样块进行观察^[26],如图 7 所示。试验结束后,将土槽试验测得的阻力波动曲线及宏观磨损形貌,与离散元仿真输出的阻力及土壤扰动情况进行对比。从宏观阻力、微观流场、形貌演变等方面,综合评估该磨损试验平台的准确性。

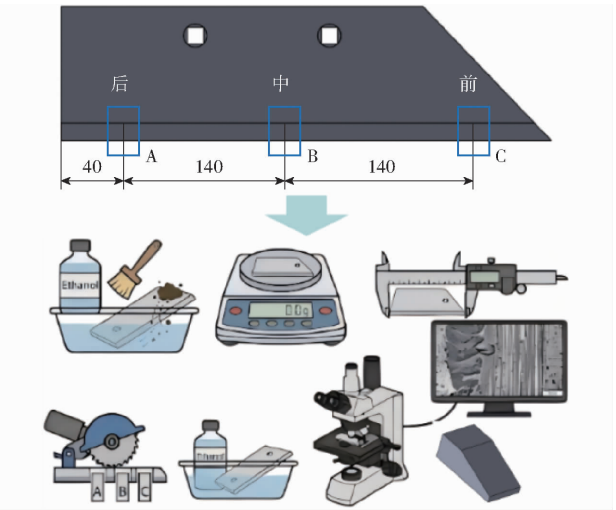


图 7 典型磨损区域取样及磨损特性表征
Fig. 7 Sampling of typical wear areas and characterization of wear features

3.2.1 土壤整备效果与平台稳定性分析

为深入探究触土部件耕作后的土壤扰动特征,验证土壤整备系统设计的合理性,本研究在 EDEM 后处理中采用 Stream 流线模式对土壤颗粒运动轨迹进行可视化表征,并基于速度大小进行颜色编码,不同耕作阶段的土壤扰动效果如图 8 所示。

结果显示,犁铧入土与稳定阶段,犁铧前端土壤受剧烈挤压,并呈现向前上方隆起的趋势,颗粒位移矢量由水平推挤演化为沿犁壁曲面的滑移;与此同时,受犁壁偏角导向,土壤颗粒在获得向上速度的同时产生侧向位移,导致犁铧正后方形成明显的空腔。犁铧出土与脱离阶段,受扰动的土壤颗粒并未依靠重力完全回填至原路径,耕作轨迹中心留下了一道

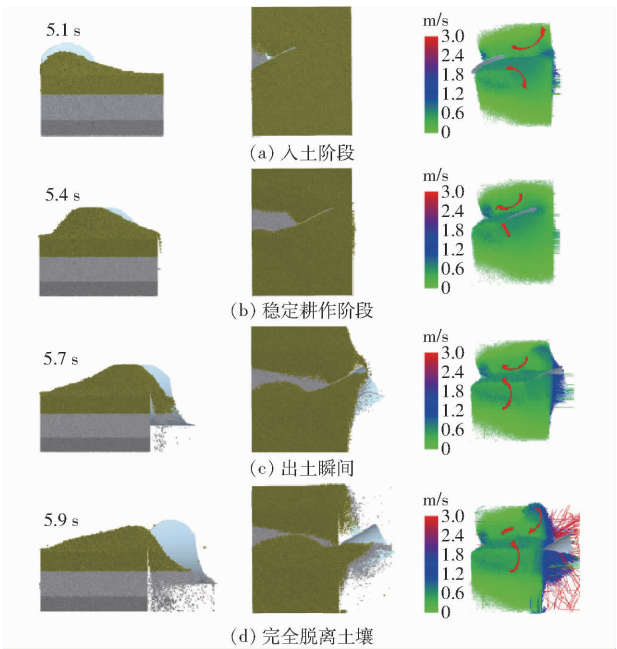


图8 不同耕作阶段犁铧对土壤扰动效果图
Fig. 8 Diagrams of soil disturbance by plowshares at different cultivation stages

深浅不一的沟壑,且大部分土壤被堆积在沟壑两侧^[27]。

土壤流动规律表明,仅依靠土壤自然塌落或直线型覆土板的单向推移,易造成土壤的回填不均。验证了本平台采用V形覆土板设计的必要性。即利用对称斜面结构,将侧翼堆积的土壤向中心汇聚,从而实现土壤的高效回填,并实现整地。

在实现整地的基础上,土壤坚实度是评价土槽模拟田间环境准确性的核心指标,直接决定了试验数据的有效性。

为此,本研究选取不同耕作距离对整地后的土壤进行了坚实度测量,在土槽中选取6个测量点,每个测量点测量3次,取平均值,试验过程如图9所示。

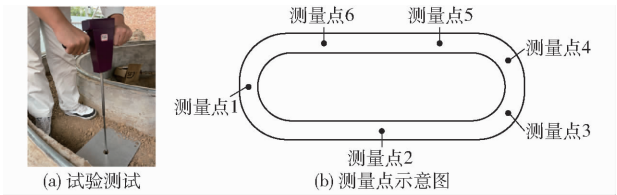


图9 土壤坚实度测试
Fig. 9 Soil compaction tests

测量结果显示,土槽内土壤耕作层与犁底层的平均坚实度分别为 207.09 kPa 和 275.01 kPa,均达到田间试验土壤平均坚实度的 80% 以上,这表明整地后的土壤环境已满足触土部件摩擦磨损试验对田间工况复现的要求。

此外,作业参数的稳定性对试验结果也具有显

著影响,因此需要对作业参数的稳定性进行分析。在设定深度 200 mm、速度 3 km/h 的工况下,进行了 3 次犁铧耕作试验,并测量其耕作 140 km 后的入土深度。

结果显示,3 次试验中入土深度的最大波动小于 4.5 mm,耕深的变异系数为 2.25%,满足国标 (GB/T 14225—2008) 中耕深变异系数 10% 以内的要求,试验装置运行速度的变异系数仅为 2.1%。

综上所述,该试验平台能够通过土壤整备系统模拟田间耕作条件,且耕作参数稳定,为开展高质量土壤磨损试验奠定了基础。

3.2.2 平台可靠性分析

耕作阻力的变化能够在一定程度上直接反映触土部件的磨损程度。本研究采用“理论-仿真-试验”相结合的方法对试验平台的耕作精度进行了验证。通过对犁铧耕作过程进行离散元仿真,得到耕作平均阻力为 2 411.1 N,这与理论计算得出的阻力 2 540 N 相吻合,验证了仿真模型的可靠性。

在此基础上,对比分析了平台实测阻力与离散元仿真结果,如图 10 所示。结果表明,在犁铧稳定耕作阶段,试验的平均阻力为 2 574.3 N,与仿真的相对误差为 6.34%。与此同时,试验曲线与仿真曲线在波动相位上展现出高度一致性,证明该平台能够真实复现田间耕作载荷。

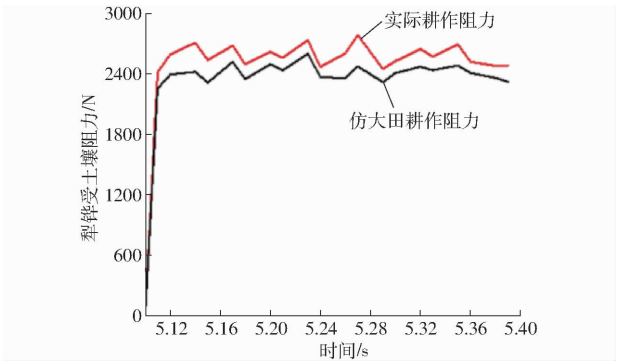


图10 耕作阻力变化曲线
Fig. 10 Tillage resistance

误差分析表明,数值差异主要源于仿真模型中土壤参数的随机化分布。由于该相对误差低于工程允许阈值(10%),证明该平台能够真实复现田间耕作载荷,为后续开展长距离磨损演变试验提供了可靠的力学基础。

为深入探究该平台在长周期试验中的可靠性,本研究将对犁铧磨损后的表面形貌进行分析,对比实际耕作后犁铧刃口的宏观磨损情况与仿真模型中土壤颗粒在犁铧刃口的流动规律。可以观察到,犁铧的磨损本质是土壤颗粒在流场中,通过碰撞、刻划及挤压等交互作用将载荷施加于部件表面,进而导

致部件材料持续损失与性能退化^[28]。

由图 11 所示的犁铧刃口微观流场分析可知,土壤颗粒在触碰犁铧刃尖的瞬间产生显著的分流现象,其运动状态由自由流动迅速转变为沿犁铧表面的受迫滑移状态。土壤颗粒接触瞬间的法向冲击力,导致犁铧刃尖区域易形成硬化层。而分流后的颗粒在上方压力下,贴合犁铧刃口进行高速滑动,形成了稳定的磨料运动轨迹,解释了犁铧刃口处平行犁沟的产生。

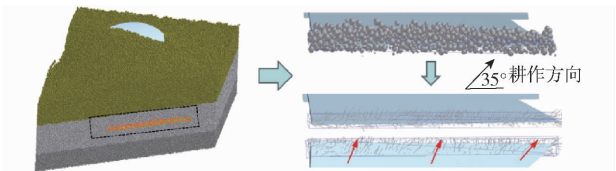


图 11 犁铧刃口处微观土壤流场图

Fig. 11 Microscopic soil flow field diagram at plowshare edge

上述基于流场的磨损规律的分析,在 140 km 耕作行程后的犁铧试样微观形貌中得到了验证。

如图 12 所示,试样表面分布有大量不规则的暗色凹坑,如图 12e 所示,这是犁铧在长距离耕作中,表面材料在土壤颗粒的作用下,诱发疲劳裂纹,最终发生剥落并演化为点蚀坑^[29]。此外,试样表面密布着由硬质颗粒切削形成的平行犁沟,其呈现出中后部痕迹较前部更为陡峭的特征,且划痕延伸方向与部件运动轨迹基本一致,这与仿真捕捉的颗粒流动方向高度契合,呈现出典型的磨料磨损特征。这再次验证了该试验平台对田间复杂工况的真实还原能力。

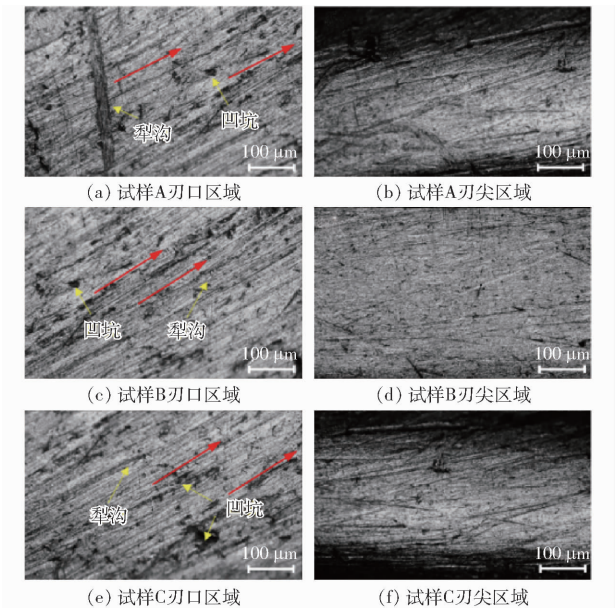


图 12 犁铧刃口微观磨损

Fig. 12 Microscopic wear of plowshare edges

对比不同位置的磨损程度发现,犁铧刃口区域的磨损程度显著高于刃尖区域,这一现象完整印证

了仿真结果,尽管犁铧刃尖区域率先接触土壤,承受的瞬时冲击载荷较大,但由于颗粒分流迅速,缺乏持续高压刮擦,并且由于犁铧刃尖区域在土壤颗粒的法向冲击下易形成硬化层,这使其在宏观上反而表现出相对平滑的磨损状态^[30]。相比之下,犁铧刃口区域则长时间处于高压滑移流场中,受到土壤的持续切削作用影响,导致犁铧刃口区域的材料去除率显著高于刃尖区域。

通过微观土壤流场与犁铧磨损形貌的对比分析,不仅解释了犁铧在土壤中的磨损演化规律,更通过实测形貌与仿真流场的一致性,证明了该试验平台在模拟触土部件田间耕作方面具有极高的可靠性。

微观层面的颗粒磨料切削与材料疲劳剥落,最终表现为犁铧宏观几何形状的改变。由于刃口是犁铧磨损最严重的区域,其形状演变是导致耕作阻力增大的主要因素,因此需要对试验得到的犁铧刃口形状进行分析验证。为准确捕捉刃口形状的变化过程,本研究利用 Origin 软件提取犁铧刃口轮廓特征曲线,并选取耕作 70 km 与 140 km 后这两个刃口形态变化的典型节点绘制刃口形态变化,如图 13 所示。



图 13 犁铧刃口形状变化

Fig. 13 Changes in shape of plowshare blade

由图 13 可见,犁铧刃口的几何形貌呈现出明显的阶段性演变特征。磨损初期,原本锐利的刃口边缘在磨粒磨损作用下逐渐钝化,轮廓由原始的 V 形逐渐演变为平缓的 U 形,曲率半径显著增大;随着耕作距离的增加,刃口材料持续流失,刃线逐渐演化出圆弧状轮廓,同时整体厚度明显减小。随着磨损进程的深入,当刃尖完全失去锐度后,原本处于非接触状态的区域开始与沟底土壤发生挤压接触,该区域在土壤颗粒的不断磨损下,逐渐由点线接触演变为面接触。由于该接触面处于刃口的背面,且与耕作路径呈微小夹角,宏观上形成了一条清晰的背棱。试验后期,刃口磨损量分布逐渐趋于稳定,背棱上下比例接近 1:3,该形貌演变规律与赵根松等^[31]的研究结果高度一致。因此,从宏观失效角度再次证明了该环形磨损试验平台能够真实复现触土部件在长距离耕作下的磨损全过程。

3.2.3 多工况试验分析及平台适用性评估

上述研究验证了平台在标准工况下的可靠性。

为进一步评估该平台在复杂多变工况下的模拟能力,本研究在基准耕作参数的基础上,采用控制变量法设定了 4 组对比试验。变量参数涵盖了耕作速度 (3、5 km/h)、耕作深度 (200、250 mm) 及推土角 (35°、45°) [32-33]。

不同工况下犁铧累积磨损质量变化如图 14 所示,结果表明该平台能够捕捉耕作参数变化对磨损速率的影响,各组别呈现出显著的差异化特征。组别 1 (耕作速度 3 km/h,耕深 200 mm,推土角 35°) 与组别 4 (耕作速度 3 km/h,耕深 200 mm,推土角 45°) 在耕作 140 km 后,损失质量分别为 187.6 g 与 218.3 g,分别占犁铧初始质量的 7.98% 与 9.29%;其质量损失与耕作距离基本呈线性增长关系,表明在较低速度与标准耕深下,犁铧仍处于稳态磨损初期。而组别 2 (耕作速度 5 km/h,耕深 200 mm,推土角 35°) 与组别 3 (耕作速度 3 km/h,耕深 250 mm,推土角 35°) 在同等耕作距离下磨损量更为显著,分别达到 272.6 g 与 241.8 g,占比为 11.60% 与 10.29%,但这两组曲线随耕作距离的增加呈现先陡后缓的演变趋势,分析认为,高速耕作增加了土壤颗粒对刃口的冲击力,而深耕则显著提升了挤压应力,两者均加剧了材料的磨损,曲线后期趋于平缓,表明犁铧已逐渐过渡至稳定磨损阶段。

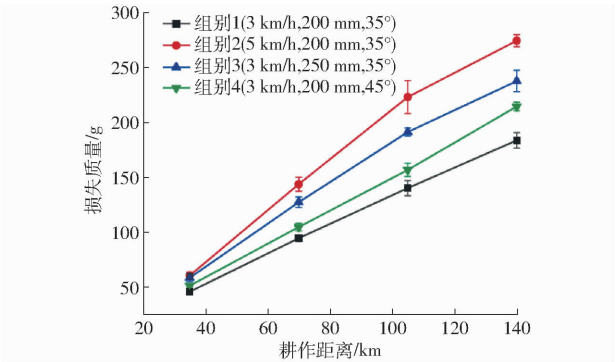


图 14 犁铧磨损后质量损失情况

Fig. 14 Quality loss after plowshare wear

随耕作距离增加,犁铧除质量损耗外,其几何尺寸亦发生显著演变,犁铧不同部位宽度随耕作距离的变化规律如图 15 所示,对比数据可知无论在何种工况下,犁铧在耕作过程中前部和端部磨损明显高于中部,其中前部宽度减少最为明显,已发生显著形变。

对比图 15a、15b 可以看出,当速度由 3 km/h 提升至 5 km/h 时,磨损最为剧烈,犁尖 (前部) 宽度由 107 mm 缩减至 87.95 mm,这是因为土壤颗粒对犁铧表面的冲击动能与速度的平方成正比,高耕速显著增强了磨粒的冲击切削作用。耕深从 200 mm 增加至 250 mm 后,平均宽度减损至约 90.85 mm,这是

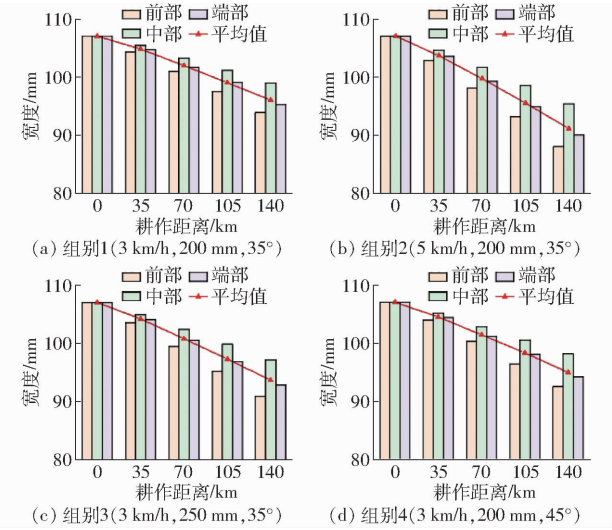


图 15 犁铧不同部位宽度随耕作距离的变化曲线

Fig. 15 Variation curves of width of different parts of plowshare with cultivation distance

由于深层土壤坚实度更高,且犁体上方覆盖土方的重力增加,导致作用于犁铧表面的法向压力增大,根据 Archard 磨损模型,磨损量随正压力的增加而线性增长。此外,推土角由 35°调至 45°后,犁铧宽度降至 92.45 mm,主要是角度增大改变了土流在犁面的滑动路径,导致切削阻力增加,强化了土壤对刃口的挤压与破坏。不同工况下犁铧几何宽度的演变趋势与质量损耗规律具有高度一致性,验证了试验数据的可靠性。

综上所述,该试验平台不仅在标准工况下具备较高的可靠性,在面对速度、深度及姿态参数变化的复杂工况时,同样能够复现触土部件的磨损失效特征,数据表现出良好的一致性与可重复性,充分证明了该平台在触土部件多工况磨损研究领域具有广泛的适用性与科研价值。

4 结论

(1) 研制了一种环形跑道式土壤磨损试验平台。该平台利用环形闭环导轨结构克服了传统直线土槽行程不足的缺陷,并显著减小了圆形土槽产生的离心力与内外径速度差对试验数据的干扰。平台配套的姿态调节系统具备高度的通用性,能够适配犁铧、深松铲、开沟器等多种典型触土部件,并实现了入土深度 0 ~ 450 mm、推土角 0 ~ 360°及切土角 0° ~ 45°的宽范围、高精度调控。

(2) 验证了平台耕作过程的高可靠性与可复现性,确保了试验数据的科学可靠。实测数据显示,在预设工况下,入土深度的波动偏差控制在 ±4.5 mm 以内,运行速度的变异系数仅为 2.1%,均在误差允许范围内。在物理试验观测到的刃口点蚀、平行犁

沟等形貌特征及宏观轮廓演变规律,均与仿真分析中土壤流场分析高度一致,证明该平台能够真实复现田间耕作环境下的“土壤-犁铧”互作过程。

(3)证明了该平台在复杂多变工况下的高度适

应性。通过对不同耕作速度、深度及推土角的多组控制变量试验分析表明,该平台能够复现触土部件在不同工况下的磨损特征,使其在触土部件多工况磨损研究领域具有广泛的适用性与科研价值。

参 考 文 献

[1] 张艳静,詹华,徐天杨,等. 农业机械耕作部件磨损性能试验研究现状[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(1): 61 – 67.
ZHANG Yanjing, ZHAN Hua, XU Tianyang, et al. Current research of experiment on wear performance for tillage tools of agricultural machinery[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(1): 61 – 67. (in Chinese)

[2] SINGH J, CHATHA S S, SIDHU B S. Abrasive wear behavior of newly developed weld overlaid tillage tools in laboratory and in actual field conditions[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 55: 143 – 152.

[3] 陈建能,叶军,夏旭东,等. 轮胎摩擦驱动的旋转式圆形土槽试验台设计与应用[J]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 66 – 71, 58.
CHEN Jianneng, YE Jun, XIA Xudong, et al. Design and application of rotary round soil-bin test bed driven by tyre friction [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 66 – 71, 58. (in Chinese)

[4] 侯云涛. 农机土槽试验检测技术研究现状与发展趋势[J]. 江苏农机化, 2024(2): 22 – 25.
HOU Yuntao. Research status and development trends of agricultural machinery soil slot testing technology [J]. Jiangsu Agricultural Mechanization, 2024(2): 22 – 25. (in Chinese)

[5] 李军,金嗣淳,王桂英,等. 土槽试验台研究综述[J]. 湖北理工学院学报, 2015, 31(5): 1 – 5.
LI Jun, JIN Sichun, WANG Guiying, et al. Review of study on soil bin test-bed[J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 2015, 31(5): 1 – 5. (in Chinese)

[6] 潘世强,操子夫,赵婉宁,等. 微型土槽试验台的优化设计与试验[J]. 农机化研究, 2015, 37(10): 144 – 146, 262.
PAN Shiqiang, CAO Zifu, ZHAO Wanning, et al. Optimization design and test of micro soil bin test bench[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(10): 144 – 146, 262. (in Chinese)

[7] CHEN L, ZOU M, CHEN Z, et al. The applications of soil bin test facilities to terramechanics; a review [J]. Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali, 2024, 35(3): 683 – 703.

[8] 叶岩,程睿,赵德春,等. 耕作机械性能参数测试土槽试验台优化设计与试验[J]. 农机化研究, 2025, 47(12): 217 – 223.
YE Yan, CHENG Rui, ZHAO Dechun, et al. Optimization design and test of soil trough test bench fortillage mechanical performance parameter test [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(12): 217 – 223. (in Chinese)

[9] 张艳静. 农机入土部件耐磨层多因素耦合环境磨损试验机研制[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院, 2023.
ZHANG Yanjing. Development of multi-factor coupled environmental wear tester for anti-wear coatings for agricultural machinery tillage tools [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2023. (in Chinese)

[10] 马君,孙先明,杨存志,等. 旋转式圆环形土槽试验台设计[J]. 农机使用与维修, 2020(2): 4 – 7.
MA Jun, SUN Xianming, YANG Cunzhi, et al. Design of a rotary ring-shaped soil trench test bench [J]. Agricultural Machinery Using & Maintenance, 2020(2): 4 – 7. (in Chinese)

[11] 颜华,吴俭敏,林金天. 环形土槽微耕机试验平台设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊 1): 68 – 72.
YAN Hua, WU Jianmin, LIN Jintian. Design of micro-cultivator testing platform with annular soil bin [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Sup. 1): 68 – 72. (in Chinese)

[12] 张超. 田间耕作试验台设计及开沟性能研究[D]. 扬州:扬州大学, 2021.
ZHANG Chao. Research on the design of field tillage test platform and its ditching performance of opener [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2021. (in Chinese)

[13] 吴泽全,马君,刘俊杰,等. 环形土槽综合试验台设计[J]. 时代农机, 2018, 45(5): 214 – 215.
WU Zequan, MA Jun, LIU Junjie, et al. Design of a ring-shaped soil trench comprehensive test bench [J]. Times Agricultural Machinery, 2018, 45(5): 214 – 215. (in Chinese)

[14] 谢建华,曹晓冉,杨业龙,等. 小型土槽台车测试系统的设计与试验[J]. 机械设计, 2017, 34(7): 38 – 42.
XIE Jianhua, CAO Xiaoran, YANG Yelong, et al. Design and experiment of small-scale soil bin testing system [J]. Journal of Machine Design, 2017, 34(7): 38 – 42. (in Chinese)

[15] GODWIN R J, SPOOR G, KILGOUR J. The design and operation of a simple low cost soil bin [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1980, 25(1): 99 – 104.

[16] 孙新城,叶军,严江军,等. 旋转式农机土槽试验台运行平稳性控制方法及试验验证[J]. 农业工程学报, 2015, 31(13): 46 – 52.
SUN Xincheng, YE Jun, YAN Jiangjun, et al. Running stability control method and test verification of soil groove testrig for rotary agricultural machine [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(13): 46 – 52. (in Chinese)

[17] 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.

[18] 王建萧,田斌,孙伟,等. 小型试验土槽的设计和研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(2): 1-4.
WANG Jianxiao,TIAN Bin,SUN Wei,et al. Design and research of small test soil bin[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2022, 60(2): 1-4. (in Chinese)

[19] 于艳,尚书旗,刘晓红. 基于 PLC 的农机试验土槽控制系统的设计[J]. 农机化研究, 2011, 33(1): 138-140.
YU Yan,SHANG Shuqi,LIU Xiaohong. Design of control system for tests platform of soil-bin for agricultural machine based on PLC[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(1): 138-140. (in Chinese)

[20] 于艳,龚丽农,尚书旗. 农机土槽试验动力学参数测试系统的研制[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊1): 323-328.
YU Yan,GONG Linong,SHANG Shuqi. Development of soil bin test dynamic parameters measurement system[J]. Transactions of the CSAE,2011, 27(Supp. 1): 323-328. (in Chinese)

[21] 姚忠志,沈东华,皮灵杰,等. 简易土槽试验台的设计与试验[J]. 农机化研究, 2023, 45(8): 39-45,102.
YAO Zhongzhi,SHEN Donghua,PI Lingjie,et al. Design and test of simple soil trough test bench[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2023, 45(8): 39-45,102. (in Chinese)

[22] 王屹峰,李庆达,汪昊,等. 犁体阻力离散元仿真分析[J]. 农机使用与维修, 2024(4): 8-11.
WANG Yifeng, LI Qingda, WANG Hao,et al. Discrete element simulation analysis of plough body resistance[J]. Agricultural Machinery Using & Maintenance, 2024(4): 8-11. (in Chinese)

[23] 方雨阳,张克平,杨智凯. 基于离散元法的西北旱区铧式犁耕作过程仿真分析与试验[J]. 江西农业大学学报, 2024, 46(5): 1323-1340.
FANG Yuyang,ZHANG Keping,YANG Zhikai. Simulation analysis and experiment of ploughing process in northwest arid region based on discrete element method[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis,2024, 46(5): 1323-1340. (in Chinese)

[24] 李松泽. 深松铧结构减阻设计及表面激光熔覆涂层耐磨性研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2023.
LI Songze. Research on structural drag reduction design of subsoiler and wear resistance of surface laser fusion coating[D]. Yangling:Northwest A&F University,2023. (in Chinese)

[25] 王屹峰. 基于动力学仿真分析的铧式犁体耕作阻力影响因素研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学, 2024.
WANG Yifeng. Study on factors affecting the tillage resistance of moldboard plow based on dynamic simulation analysis[D]. Daqing:Heilongjiang Bayi Agricultural University,2024. (in Chinese)

[26] 南翔. 基于异质磨损调控的自磨犁铧设计及耐磨性能研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2025.
NAN Xiang. Design and wear resistance performance research of self-grinding plowshare based on heterogeneous wear regulation [D]. Yangling:Northwest A&F University,2025. (in Chinese)

[27] MAKANGE N R, JI C, TOROTWA I. Prediction of cutting forces and soil behavior with discrete element simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 179: 105848.

[28] 冯啸林,陆峰,马伟达,等. 农业机械触土部件磨料磨损研究概况与应用前景[J]. 现代化农业, 2025(1): 94-96.
FENG Xiaolin,LU Feng,MA Weida,et al. Overview and application prospects of abrasive wear of soil-engaging components in agricultural machinery[J]. Modernizing Agriculture,2025(1): 94-96. (in Chinese)

[29] 李开杰. 犁铧铲尖耐磨减阻特性研究与试验[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学, 2020.
LI Kaijie. Research and test on wear resistance and drag reduction of plowshare tip [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University,2020. (in Chinese)

[30] 韩晓蕊. 南疆地区高速犁触土部件田间磨损试验研究[D]. 阿拉尔:塔里木大学, 2025.
HAN Xiaorui. Research on field wear test of high-speed plow contact soil components in southern Xinjiang region[D]. Alar: Tarim University,2025. (in Chinese)

[31] 赵根松. 犁刃磨损规律及获得自磨刃方法的探讨[J]. 农业机械学报, 1966,9(2): 139-142.
ZHAO Gensong. Study on the wear patterns of plow blades and methods for obtaining self-sharpening edges[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,1966,9(2): 139-142. (in Chinese)

[32] 孙妮娜,王晓燕. 秸秆粉碎还田与整地复式作业机连接装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(2):15-24.
SUN Ni'na, WANG Xiaoyan. Design and experiment of connection device of duplex straw crushing returning and soil preparation machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(2):15-24. (in Chinese)

[33] 刘元义,于圣洁,胥备,等. 基于离散元的设施农业就地翻土犁的研究与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2024, 54(4): 1153-1165.
LIU Yuanyi, YU Shengjie, XU Bei,et al. Experimental study on in-situ tilling plow in facility agriculture based on discrete element method[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(4): 1153-1165. (in Chinese)