

仿生犁铧耐磨性能仿真分析与试验研究

李庆达¹, 刘明辉¹, 汪昊¹, 王屹峰¹, 胡军¹, 赵胜雪¹, 殷常峰²

(1. 黑龙江八一农垦大学, 黑龙江 大庆 163319;
2. 山东旭拓新材料科技有限公司, 山东 潍坊 261000)

摘要: **目的** 解决传统犁铧耐磨性差、使用寿命短等问题。**方法** 以栉孔扇贝壳为仿生原型, 对其表面几何特征进行提取, 将棱纹几何结构特征应用于犁铧的设计。设计 6 种不同仿生棱纹方向及 3 种不同仿生棱纹间距的犁铧试样, 建立离散元模型, 分析土壤颗粒运动速度场以及犁铧耕作阻力图。**结果** 表面仿生结构设计改变了土壤颗粒的流动方向, 减小了土壤堆积量, 降低了所需牵引力, 从而提高了耐磨性能。不同仿生棱纹方向犁铧试样中, F-1 竖棱纹结构试样的平均耕作阻力最小, 平均耕作阻力值为 1 681.73 N; 不同仿生棱纹间距犁铧试样中, 棱纹间距为 5 mm 的 F-1-1 仿生表面接触的土壤颗粒的运动速度分布和趋势最佳。通过田间试验得出, 同种仿生棱纹方向结构设计下, 棱纹间距为 5 mm 的 F-1-1 试样的耐磨性能最佳, 相比传统犁铧试样磨损量减少 17.25%。**结论** 合理改变表面仿生棱纹方向与间距设计可显著提高犁铧耐磨性, 为仿生技术在农业机械方向上的应用提供参考。

关键词: 犁铧; 栉孔扇贝壳; 离散元; 仿生; 耐磨性能

中图分类号: TH117 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)19-0107-10

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.19.010

Simulation Analysis and Experimental Research on Wear Resistance of Bionic Plowshare

LI Qingda¹, LIU Minghui¹, WANG Hao¹, WANG Yifeng¹, HU Jun¹, ZHAO Shengxue¹, YIN Changfeng²

(1. Heilongjiang Bayi Agricultural University, Heilongjiang Daqing 163319, China;
2. Shandong Xutuo New Material Technology Co., Ltd., Shandong Weifang 261000, China)

ABSTRACT: According to the data, wear and tear loss efficiency accounts for material and energy loss of 60% to 80%, and the annual wear and tear of steel accounts for 10% of the total amount of steel A, resulting in huge economic losses. Agricultural equipment in the work process can not be used normally often due to parts failure, which results from the contact of deep pine shovels, plowshares, and other typical soil contact parts with the soil and the wear and tear caused by the loss of a large proportion of efficiency. To solve the problems of poor abrasion resistance of traditional plowshare, short service life, and frequent replacement of parts during operation, the work aims to adopt the chlamys farreri flap as a bionic prototype, extract its surface geometric features, and apply the ridge geometrical structure features to the design of plowshares to reduce the wear, lower the resistance, and prolong the service life. Six kinds of plowshare specimens with different surface bionic ridge

收稿日期: 2023-10-16; 修订日期: 2024-02-26

Received: 2023-10-16; **Revised:** 2024-02-26

基金项目: 黑龙江省自然科学基金优秀青年基金 (YQ2019E032); 黑龙江八一农垦大学“三纵”科研支持计划重点专项 (ZDZX202102)

Fund: Heilongjiang Provincial Natural Science Excellent Youth Fund (YQ2019E032); Heilongjiang Bayi Agricultural University "Three Verticals" Research Support Program Key Projects (ZDZX202102)

引文格式: 李庆达, 刘明辉, 汪昊, 等. 仿生犁铧耐磨性能仿真分析与试验研究[J]. 表面技术, 2024, 53(19): 107-116.

LI Qingda, LIU Minghui, WANG Hao, et al. Simulation Analysis and Experimental Research on Wear Resistance of Bionic Plowshare[J]. Surface Technology, 2024, 53(19): 107-116.

geometrical structures and three kinds of plowshare specimens with different ridge spacing under the same kind of bionic ridge geometrical structure were designed by UG three-dimensional modeling software. Nine groups of discrete element models were established by EDEM discrete element software to analyze the speed field of soil particle motion and the plowshare tillage resistance map, respectively. The surface bionic ridge geometrical structure design changed the flow direction of soil particles. When the direction of the bionic ridge was parallel to the direction of movement of soil particles, the amount of soil buildup decreased, and the required traction force lowered, thus improving the wear resistance. Among them, F-1 had the best abrasion resistance and the lowest average tillage resistance with an average tillage resistance value of 1 681.73 N. The soil particles in contact with the F-1-1 bionic surface in plowshare specimens with different bionic ridge spacing had the best distribution and trend of movement speed, the high-speed movement particles were concentrated in the tip and surface of the F-1-1, the soil particles had the smallest contact area and contact stress with its surface, and it was the best effect to improve the abrasion resistance performance. According to the styles and field tests, derived from field tests, F-1, F-2, and F-3 specimens had different degrees of improvement in wear resistance compared with the traditional plowshare and the wear resistance of F-1 increased by 9.92%. Under the same bionic ridge structure design, the F-1-1 specimen with 5 mm rib spacing had the best abrasion resistance, with 17.25% less abrasion compared to the traditional plowshare specimen. Reasonable surface bionic ridge geometrical structure design can significantly improve the wear resistance of the plowshare, providing a reference for the application of bionic technology in the direction of agricultural machinery.

KEY WORDS: plowshare; chlamys farreri shell; discrete element; bionic; wear resistance

农机具在工作过程中,常因零部件失效而无法正常使用,其中因深松铲、犁铧等典型触土部件与土壤接触而导致的磨损失效占很大比重^[1]。目前已有大量学者通过对基材的制造工艺、表面涂层处理工艺、结构参数设计优化等多方面提高犁铧的耐磨、减阻、降耗等性能,但由于犁铧田间作业环境复杂,工作周期长,导致仍存在作业效率低、耐磨效果差等问题^[2]。许多研究证明,依据仿生学理念,提取生物体特征,在材料表面进行仿生设计,可有效延长其使用寿命,保证作业要求的同时减小机具能耗,避免频繁更换部件,提高农机具工作效率^[3]。

近年来,随着工程仿生学的快速发展,对农机触土部件进行仿生设计,以期提高其耐磨性能,已成为一种新的研究思路^[4]。张智泓等^[5]结合砂鱼鳃头部特殊的几何结构特征,设计出一种仿生深松铲铲尖。结果表明,相比于凿型铲尖,其减阻率降低 8.34%~19.31%。张金波等^[6]将贝壳和穿山甲鳞片的棱纹形几何结构应用到深松铲上,设计出 3 种不同棱纹间距的深松铲刃。结果表明,仿生棱纹形深松铲刃可有效减小耕作阻力,并提高耐磨性能,磨损量减小 17%~30%。贾兵云等^[7]根据步甲、蜣螂物体表凸包型几何结构,在 45 钢表面设计出 7 种不同凸包型仿生结构。结果表明,不同的凸包分布对磨损特性有较大影响,试样磨损量随着滑动速度和磨料颗粒尺寸的增加而增大。

采用离散元法对农机部件的性能进行评价逐渐成为研究热点,通过对颗粒群体运动和位移进行分析,能够很大程度上提高模拟准确性,使仿真结果更

加接近于实际情况^[8-9]。于建群等^[10]通过离散元法分析了不同条件下开沟器的耕作阻力,并与田间试验结果进行了比较。结果表明,两者变化趋势基本一致,由此证明了采用离散元法分析开沟器工作阻力的可行性。方会敏等^[11]基于离散元法建立了旋耕工作模型,对比分析了实验与仿真的土壤位移。结果表明,土壤水平和侧向位移都随着转速增加而增加,为旋耕机械的设计与优化提供了理论依据。

本文基于棱纹型几何结构特征设计并加工仿生犁铧,通过离散元法模拟出土壤颗粒与犁铧试样相互作用后的运动情况和耕作阻力,探究不同仿生棱纹方向和不同棱纹间距对犁铧耐磨性能影响,并将模拟结果与田间试验结果进行对比,以验证离散元法的有效性,为犁铧耐磨减阻特性提供理论基础和设计依据。

1 仿生犁铧的设计

为适应不断变化的海洋生态环境,贝壳生物沉积碳酸钙和相对少量的有机基质材料,不断增加贝壳硬度。栉孔扇贝瓣的体表为橘黄色,长度为 5~8 cm,贝壳表面棱纹的宽度为 3 mm 左右^[12]。如图 1 所示。

在泥沙和水流的冲蚀过程中,栉孔扇贝瓣表面的棱纹结构通过改变泥沙和水流运动状态,使泥沙流动趋于最小能量状态,进而产生“滚动效应”和“引导效应”,使剪切层厚度增加,剪切层内磨料,密度减小,速度降低,从而显著提高其耐磨性^[13]。栉孔扇贝瓣外表面局部特征数据拟合方程^[14]为:

$$y=3\sin(0.4x) \quad (1)$$

该拟合方程 1/2 周期截面结构如图 2 所示。

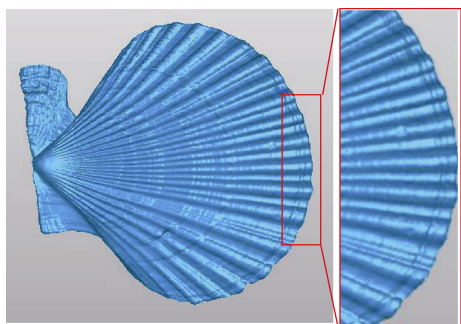


图 1 栉孔扇贝瓣
Fig.1 Chlamys farreri flap

本文结合试验用犁铧尺寸(总长度为 34.5 cm, 宽度为 10 cm, 厚度为 2 cm)、耐磨处理区域(长度为 12 cm, 宽度为 9 cm), 结合栉孔扇贝瓣外表面局部特征数据拟合方程及棱纹截面曲线图, 定义仿生棱纹列间距范围为 5~8 mm, 棱纹高度为 3 mm, 棱纹宽度为 8 mm。为探究仿生棱纹方向对犁铧耐磨性能的影响, 设计了 5 种不同仿生棱纹方向的仿生犁铧与 1 种传统耐磨犁铧三维模型, 如图 3 所示。F-1、F-2、F-3、F-4、F-5、F-6 分别为竖棱纹结构、放射状棱纹

结构、斜棱纹结构、网格状棱纹结构、横棱纹结构、传统耐磨犁铧。通过观察、测量栉孔扇贝表面的上、中、下 3 个部位的棱纹间距, 得出上、中、下部位的间距比为 4 : 2.5 : 1。设计了 3 种不同棱纹间距的仿生犁铧试样, 其三维模型(F-1、F-1-1、F-1-2)如图 4 所示。设计棱纹间距分别为 8、5、2 mm, 进一步探究仿生棱纹间距对犁铧耐磨性能的影响。

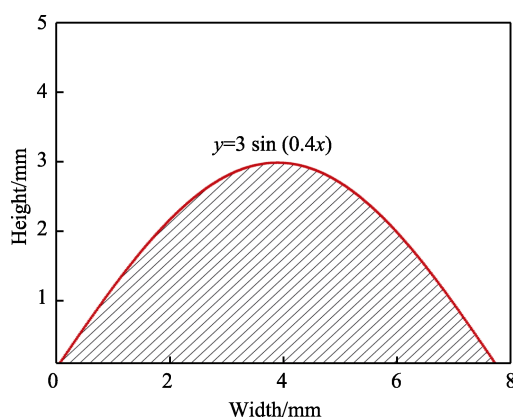


图 2 拟合方程棱纹截面曲线
Fig.2 Ridge section curve by fitting equation

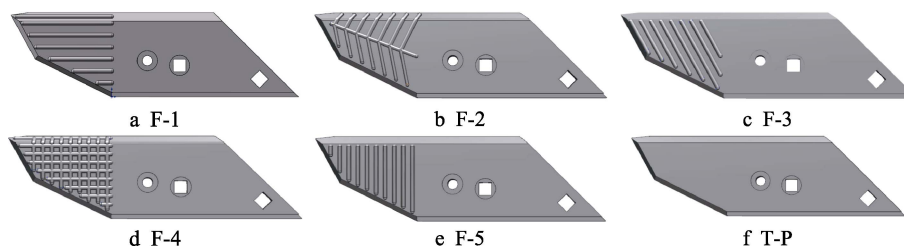


图 3 不同仿生结构的犁铧三维图
Fig.3 Three dimensional images of plowshare with different bionic structures

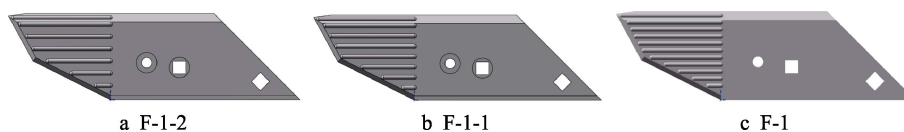


图 4 不同仿生棱纹间距的犁铧三维图
Fig.4 Three dimensional map of plowshare with different bionic ridge spacing

2 仿生犁铧工作过程的离散元仿真分析

2.1 边界模型的建立

本研究考虑到土壤颗粒相互间的挤压碰撞而产生的弹性-塑性接触变形, 选用 EEPA 模型, 用于分析犁铧作业过程中土壤由于含水而产生的黏结力以及线性黏弹性变形^[15]。此外, 由于 Hertz-Mindlin 模型对黏性土壤破碎过程中可产生良好的阻力效果, 因此选用 Hertz-Mindlin 模型作为土壤颗粒对土壤颗粒、土壤颗粒对犁铧接触力模型^[16-18]。

为准确反映数值模拟土壤的实际情况, 利用四级泰勒筛进行筛分后, 得到颗粒类型的半径尺寸及质量占比如表 1 所示, 土壤密度、含水率和土壤坚实度如表 2 所示。将犁铧试样三维模型以 .prt 格式导入 EDEM 软件中, 如图 5 所示。采用 1 500 mm×500 mm×500 mm 的模拟土槽按表 1 比例生成土壤颗粒 1.67×10^5 个, 此时生成土壤颗粒厚度约为整个犁铧长度的 5/6, 满足犁铧实际田间作业耕深 30 mm 的要求。对试验田土壤进行土壤参数测定, 获得土壤的各项仿真参数, 如表 2 所示^[19]。

2.2 模拟颗粒体系的运动过程

根据犁铧田间作业农艺要求, 设定犁铧试样的作

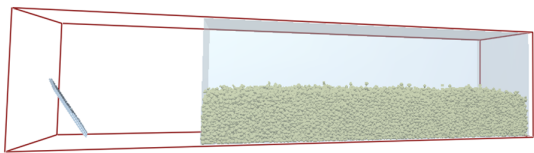


图 5 土槽与犁铧仿真模型
Fig.5 Simulation model of soil trough and plowshare

业速度为 2.2 m/s，耕作深度为 300 mm。重力加速度设置为 9.81 m/s²，网格尺寸单元设置为 3R，整个仿真分为 2 部分，0~2 s 生成土壤颗粒并使其沉降稳定，2~3.5 s 模拟犁铧试样与土壤颗粒作业^[20-21]。数据记录时间间隔设置为 0.01 s，共进行 6 组仿真试验，对犁铧耕作数据进行对比分析。

2.3 离散元分析结果与讨论

模拟 6 种犁铧试样作业时土壤颗粒的速度矢量图如图 6 所示，速度大小、方向分别由箭头颜色和箭头指向表示。由图 6a~c 可知，F-1、F-2、F-3 土壤颗粒速度分布均匀，且高速运动颗粒主要集中在 F-3 犁铧前端刃口处及 F-1、F-2 前端刃口和犁铧与土壤接触表面处，这有利于犁铧在工作时打破犁底层。土壤颗粒沿仿生棱纹方向流动，提高了土壤流动性，分散减少土壤堆积，从而提高犁铧耐磨性，并增强犁体前进方向的稳定性^[22]。由图 6d~f 可知，F-4、F-5、T-P（传统试样）中后段土壤颗粒速度较大，虽然对切削土壤起到较好效果，但更易产生土壤堆积现象，使土壤堆积在犁铧后半部分以及犁壁上，增大耕作阻力的同时挤压犁体，导致犁铧磨损量增加。

犁铧试样接触土壤颗粒过程中，达到稳定工作时的耕作阻力如图 7 所示。由图 7 可知，各犁铧试样在仿真过程中所受阻力出现小幅波动，原因在于犁铧在

表 1 土壤颗粒模型
Tab.1 Soil particle model

Categories	Geometry	Radius/mm	Percentage/%
Orbicular		0.5-1	69.82
Strip		1-1.25	9.64
Flaky		1.25-1.5	7.58
Chunk		1.5-2	12.96

作业过程中表面附着土壤，且随着犁铧切削土壤并向
前移动的同时，土壤的黏附程度也随之改变，即出现
小幅阻力波动。T-P、F-4 的阻力平均值分别为
1 877.23、1 865.17 N，而 F-5 的耕作阻力平均值为
1 957.27 N，高于 T-P、F-4 试样。这是由于仿生棱纹
方向与犁铧运动方向呈垂直状态，使土壤颗粒沿犁铧
表面向犁壁流动受到阻碍，增大耕作阻力，加快犁铧
磨损。F-1、F-2、F-3 耕作阻力值范围分别为 1 642.21~
1 724.41 N、1 654.30~1 742.84 N、1 682.36~
1 749.93 N，平均耕作阻力值分别为 1 681.73、
1 698.97、1 722.60 N。F-1 仿生棱纹方向与其运动方
向呈平行状态，有效加快了土壤流动，大幅减少了土
壤颗粒堆积量。F-2 仿生棱纹基准线上下端棱纹与其
夹角为 30°，所成角度使犁铧铲尖在磨损过程中始终
保持锋利状态，有利于打破犁底层，且基准线上、下
端棱纹可提高土壤流动性，降低耕作阻力，提高犁铧
的耐磨性。F-3 仿生棱纹犁铧刃口呈平行状态，能够
有效减小土壤的黏附，降低耕作阻力。

表 2 材料性能参数与接触参数
Tab.2 Material properties and contact parameters

Parameters	Numerical value
Soil moisture content/%	19.9
Density of soil particles/(kg·m ⁻³)	2 450
Poisson's ratio for soil	0.4
Soil shear modulus/Pa	2.24×10 ⁶
Coefficient of dynamic friction between soil particles	0.2
Coefficient of static friction between soil particles	0.35
Coefficient of recovery for soil intergranular construction	0.2
Density of plowshare specimen/(kg·m ⁻³)	7 850
Poisson's ratio of plowshare specimens	0.3
Plowshare specimen shear modulus/Pa	7.85×10 ¹⁰
Coefficient of recovery between soil particles and plowshare specimens	0.2
Coefficient of dynamic friction between soil particles and plowshare specimens	0.5
Coefficient of static friction between soil particles and plowshare specimen	0.4
Soil compaction/(kg·cm ²)	25.5

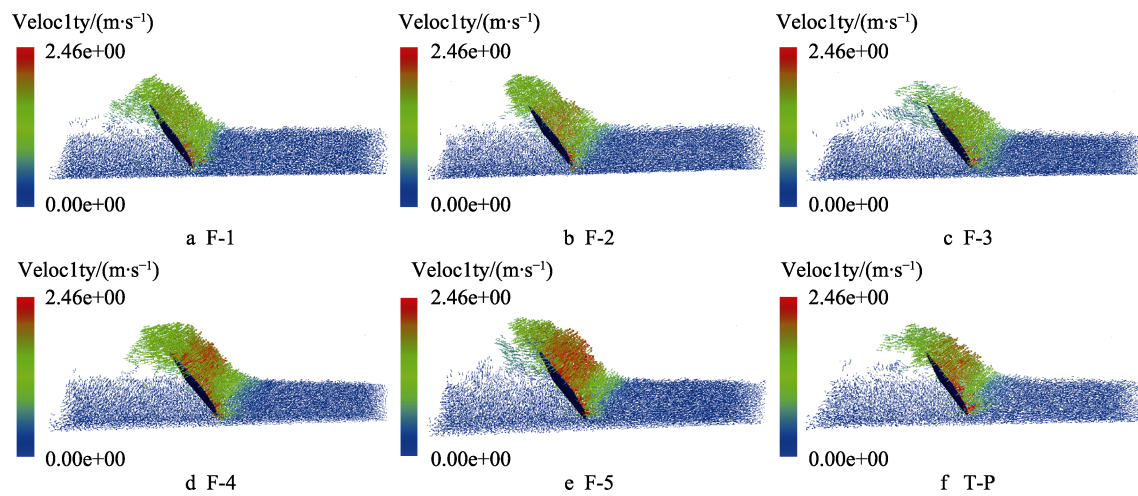


图 6 不同仿生犁铧的土壤颗粒速度场
Fig.6 Soil particle speed fields of different bionic plowshares

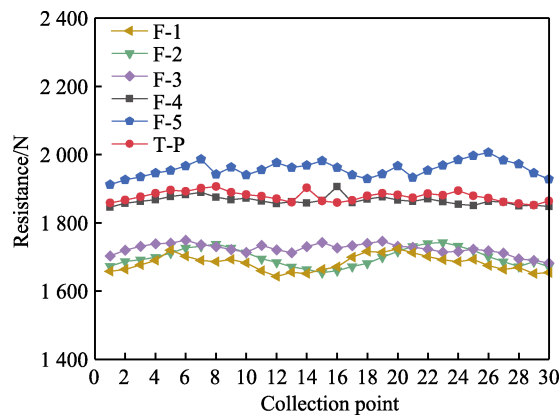


图 7 不同犁铧稳定工作时的耕作阻力
Fig.7 Tillage resistance diagram under steady operation of different plowshares

结合图 6、图 7 可以发现, 各犁铧试样磨损较为严重的部位为犁铧刃口处及中间区域, 上端部分磨损较轻。对比 6 种犁铧试样, F-1 的耕作阻力最小, 与

其表面接触的土壤颗粒速度分布均匀, 且速度方向与犁铧前进方向呈锐角, 既保证了翻地作业效果, 也避免了土壤竖直向上堆积, 挤压犁体阻碍前进的现象^[23]。最终确定 F-1 为最优仿生棱纹设计。根据 F-1 仿生结构, 设计 3 种不同间距的仿生棱纹, 通过离散元法, 分析相同参数设定下, 仿生犁铧达到稳定工作时间 2.5 s 时的土壤颗粒速度场, 如图 8 所示。

由图 8 可知, 3 种仿生犁铧表面土壤颗粒的速度分布均匀, 高速运动颗粒主要集中在犁铧尖端及犁铧与土壤接触表面。由于仿生犁铧尖端切削土壤时与土壤颗粒接触面积较小, 使高速颗粒集中在犁铧刃口处^[24]。图 8a~c 中, 与犁铧表面接触的土壤颗粒都有竖直向上运动趋势, 图 8b 中竖直向上运动的趋势大于图 8a、c, 且后端没有产生土壤颗粒堆积的现象。原因在于, 仿生棱纹改变了土壤颗粒的流动方向, 使土壤颗粒沿着仿生棱纹向上运动, 从而增加了土壤颗粒的流动性, 并减小了土壤堆积量, 降低了犁体耕作阻力, 从而提高了犁铧的耐磨性, 并延长了使用寿命^[25]。

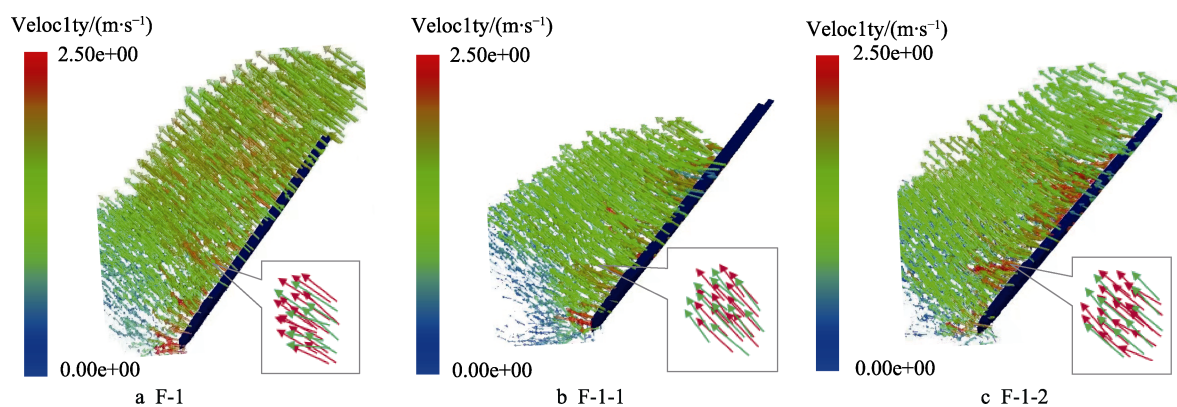


图 8 不同棱纹间距仿生犁铧的土壤颗粒速度场
Fig.8 Soil particle speed field of plowshares with different ridge spacing

3 田间试验

3.1 仿生棱纹制备

犁铧基材为硼钢,堆焊材料为粒度 100~150 目的 FJ-19 粉末和粒度 150~300 目的自熔性铁基合金粉末 Fe90,其化学成分见表 3。由山东旭拓新材料科技有限公司加工试样,采用间歇性等离子弧堆焊,堆焊工艺参数如表 4 所示^[26]。加工 5 种不同结构的仿生棱纹(F-1~F-5),传统耐磨犁铧(T-P)在加工区域堆焊耐磨层。根据离散元仿真模拟结果,选取最优仿生结构设计(F-1),加工出 3 种不同棱纹间距(8、5、2 mm)的犁铧试样(F-1、F-1-1、F-1-2),如图 9 所示。以磨损厚度和磨损质量作为试验指标,与传统犁铧进行对比分析,进一步探究仿生犁铧结构设计的合理性及

其对耐磨性能的影响。

表 3 试验材料化学成分
Tab.3 Chemical composition of test materials
wt.%

Powder composition	C	Cr	Si	Mo	B	Ni	Fe
FJ-19	3.6	31	3.4	3.1	1.9	5.3	51.7
Fe90	0.15	13.6	1.1	0.8	1.6	—	Bal.

表 4 等离子弧堆焊工艺参数
Tab.4 Plasma arc surfacing welding process parameters

Surfacing current/A	Welding speed/(cm·min ⁻¹)	Ion gas flow rate/(L·min ⁻¹)	Feeding speed/(g·min ⁻¹)
95	17	0.8	40

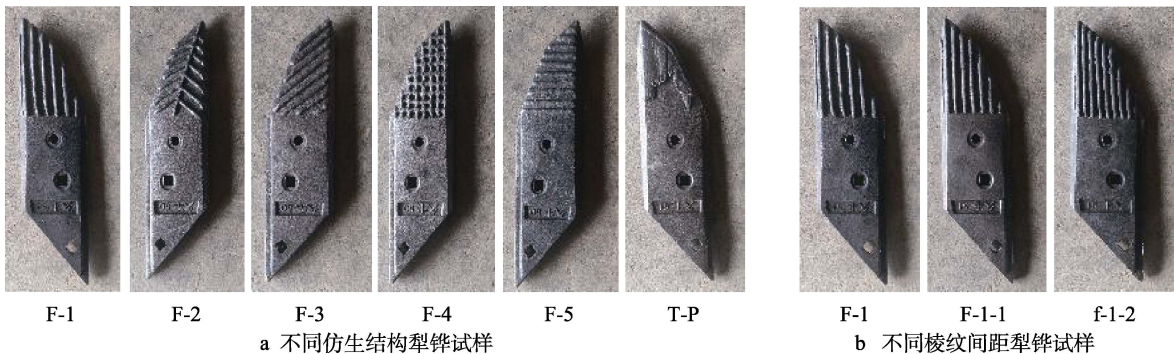


图 9 犁铧试样

Fig.9 Plowshare specimen: a) plowshare specimens with different bionic structures;
b) plowshare specimens with different ridge spacing

3.2 试验结果与分析

于 2022 年 10 月在黑龙江省鸡西市虎林市 854 农场进行田间试验,如图 10 所示。试验设备主要包括约翰迪尔 7M-2204 拖拉机、雷肯五铧悬挂翻转犁、高精度专业计数秤(测量精度为 0.1 g)、游标卡尺(测量精度为 0.02 mm)、环刀、四级泰勒筛、土壤紧实度仪、202-00A 电热恒温干燥箱等。在试验前测量(测量 5 次,取均值)并记录初始数据,犁铧各定位点初始厚度、犁铧初始质量。试验田前茬作物为玉米,五铧悬挂翻转犁入土角为 5°,幅宽为 220 cm,耕深为 300 mm,作业速度为 8 km/h,作业面积为 1.8 km²。犁铧作业效果如图 11 所示。



图 10 田间试验
Fig.10 Field test

在犁铧试样上标记定位,选取犁铧刃口处厚度、前刃到侧边宽度(宽度 I)、后刃到侧边宽度(宽度 II)、铲尖到螺丝孔长度 4 个定位点进行测量。每作业 0.27 km²,通过游标卡尺进行测量(每组实验结果均测量 5 次,取平均值),并记录实验数据,测量数据如图 12 所示。

由图 12 可知,F-1、F-2、F-3 各测量点的磨损厚度明显小于传统犁铧(T-P),且 F-1 磨损量小于 F-2 和 F-3,F-4、F-5 磨损厚度大于传统犁铧。F-1、F-2、F-3 仿生棱纹可提高土壤流动性,减少土壤堆积,F-4、F-5 仿生棱纹阻碍土壤流动,增大阻力,降低耐磨性。由于犁铧刃口和耐磨仿生棱纹结构的设计,使得土壤与犁铧刃口接触后的运动形态发生变化,使土壤在试样表面的流动状态趋于最小能量状态,减少了耕作过程中的能量损耗。土壤颗粒沿着仿生棱纹的方向运动,使土壤颗粒在犁铧刃口上形成了一种有序的运动轨迹,这种仿生棱纹结构能够有效地引导土壤颗粒的运动方向,使其更加顺畅地通过犁铧刃口,减少了土壤对铲体的黏附阻力,从而使其耐磨性优于传统试样^[27-28]。犁铧试样在前 3 个测量点磨损厚度较大,后 3 个测量点磨损厚度较小,原因在于犁铧试

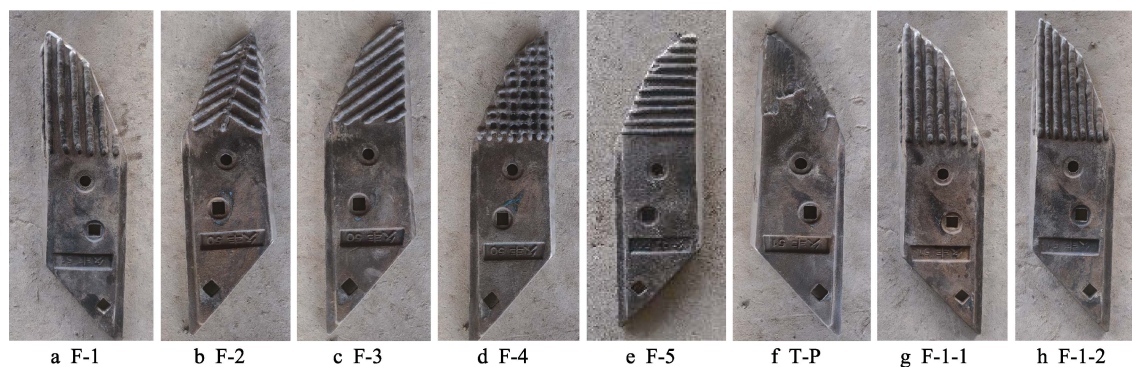


图 11 作业后犁铧试样

Fig.11 Share specimen after operation

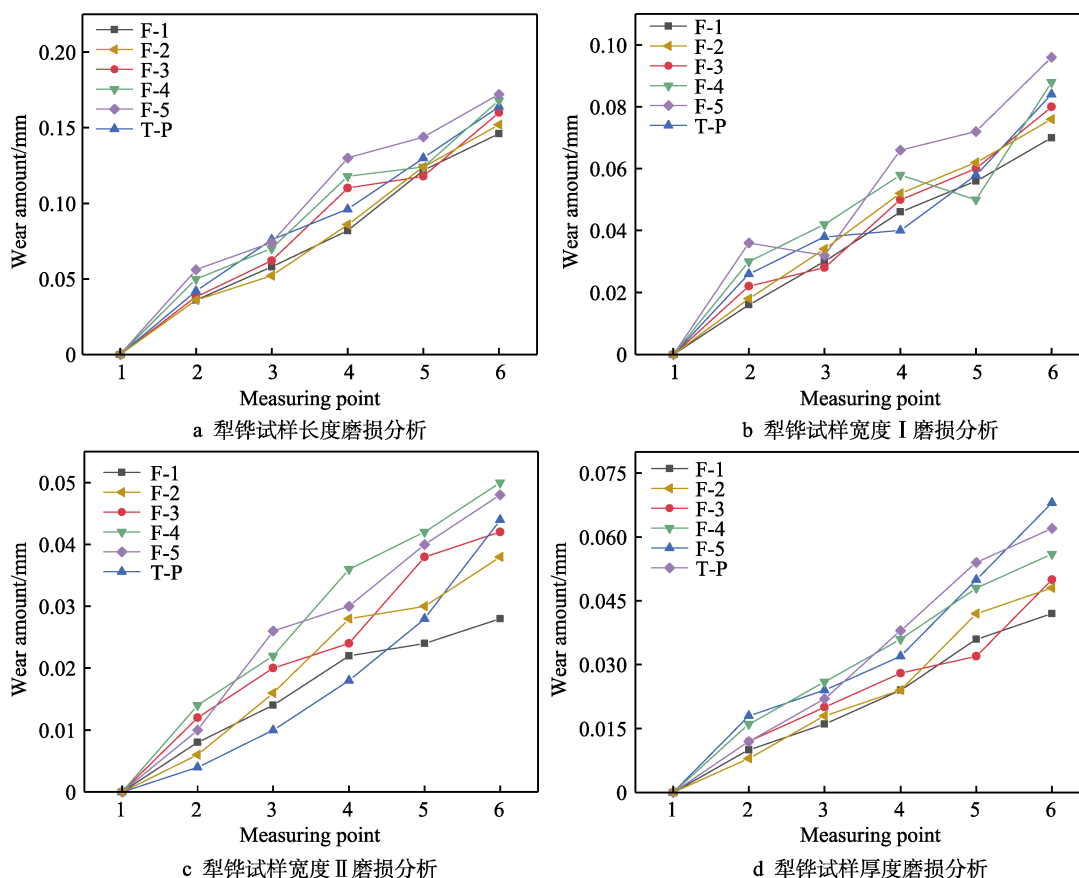


图 12 不同仿生结构犁铧试样磨损厚度分析

Fig.12 Analysis of wear thickness of plowshare specimens with different bionic structures:

- a) analysis of plowshare specimen length wear; b) plowshare specimen width I wear analysis;
c) plowshare specimen width II wear analysis; d) thickness wear analysis of plowshare specimens

样作业 0.8 km^2 后, 犁铧保持小背棱宽度, 刃口比较锋利, 形成自磨刃, 减小阻力和磨损量。

田间试验结束后, 拆卸犁铧并进行清理, 3 种不同仿生棱纹间距的犁铧试样磨损厚度分析如图 13 所示。可以看出, F-1-1 的磨损厚度小于 F-1-2、F-1, 棱纹间距为 5 mm 时, 耐磨效果最好。原因在于, 当棱纹间距不同时, 其运动场结构不同, 导致不同间距的仿生试样磨损量存在差异。犁铧作业过程中, 当表面棱纹结构间距为 5、8 mm 时, 使与其接触的土壤剪切层厚度增加, 同时剪切层的土壤密度变小, 减少

了土壤与犁铧表面的接触面积和接触应力。当土壤与仿生结构接触时, 土壤颗粒受到切削、挤压, 使其运动轨迹逐渐变得平滑, 因此合理的仿生棱纹间距能够改变表面与土壤之间的接触状态, 有效提高试样的耐磨性。当棱纹间距为 2 mm 时, 由于棱纹间距过密, 导致土壤剪切厚度减小, 增加表面接触力^[29-30]。结合图 13b、c 可知, 宽度 I 磨损量约为宽度 II 的 2 倍, 说明仿生犁铧磨损最严重的部位为犁铧尖端部分, 使离散元分析的数据得到充分的验证。

由图 14 可以明显看出, 试样 F-4、F-5 的磨损量

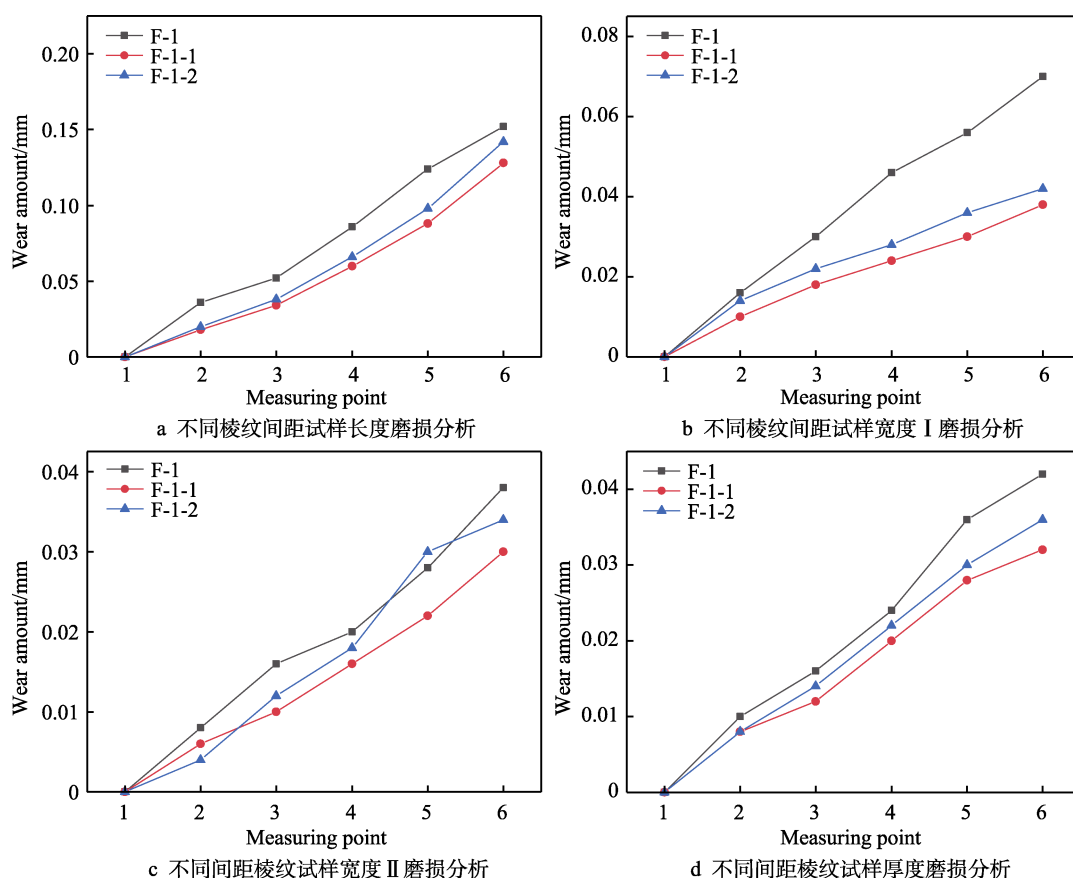


图 13 不同仿生棱纹间距犁铧试样磨损厚度分析

Fig.13 Analysis of wear thickness of plowshare specimens with different bionic ridge spacing:

a) specimen lengths at different ridge spacing; b) specimen width I at different ridge spacing; c) specimen width II at different ridge spacing; d) thickness of specimens at different ridge spacing

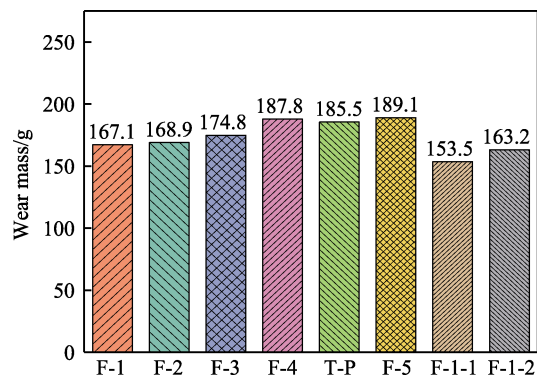


图 14 不同犁铧磨损量分析

Fig.14 Analysis of different plowshare wear

大于 T-P。由于其仿生棱纹方向与犁铧作业方向相垂直,导致耕作阻力变大,耐磨效果差。试样 F-1、F-2、F-3、F-1-1、F-1-2 的耐磨性相比于传统犁铧 T-P 都有不同程度提升,分别提高 9.92%、8.95%、5.77%、17.25%、12.02%。

4 结论

采用离散元法分别对 5 种不同仿生棱纹方向和 3 种不同仿生棱纹间距的犁铧试样进行仿真试验,探究

土壤颗粒运动情况及犁铧耕作阻力。采用等离子弧堆焊加工试样,并进行田间试验,以探究不同仿生棱纹方向、不同仿生棱纹间距设计的耐磨性及合理性,得出以下结论:

1) 5 种不同仿生棱纹方向模拟对比结果显示, F-1 试样表面仿生棱纹方向与犁铧前进方向平行,土壤颗粒速度分布均匀,速度方向与运动方向呈锐角,有效提高土壤流动性,大幅减少土壤颗粒堆积量,平均耕作阻力值最小;其余试样仿生棱纹均有阻碍土壤颗粒沿犁铧表面向犁壁流动的趋势,其中 F-5 试样仿生棱纹方向与犁铧前进方向垂直,平均耕作阻力值最大。

2) 3 种不同仿生棱纹间距耐磨对比结果显示, F-1-1 试样的各位置磨损厚度明显小于 F-1-2、F-1 试样,即棱纹间距为 5 mm 时,高速运动颗粒集中于犁铧尖端及表面,土壤与犁铧表面的接触面积和接触应力最小,耐磨性能最佳。

3) 田间试验证实仿生犁铧磨损最严重的部位为犁铧尖端部分,对比传统耐磨犁铧试样 (T-P),仿生犁铧磨损质量损失减小了 9.92%~17.25%。同种仿生结构下, F-1-1 试样磨损量为 153.5 g,耐磨性提高 17.25%。

参考文献:

- [1] STAWICKI T, KOSTENCKI P, BIAŁOBRZESKA B. Roughness of Ploughshare Working Surface and Mechanisms of Wear during Operation in Various Soils[J]. *Metals*, 2018, 8(12): 1042.
- [2] SINGH J, CHATHA S S, SIDHU B S. Effect of Alloying Elements in Fe-Based Hardfacings to Improve the Abrasive Wear Behavior of Ploughshares[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 2020, 234(23): 4737-4750.
- [3] 熙鹏, 丛茜, 汝绍锋, 等. 仿生通孔形活塞裙部耐磨性能研究[J]. *表面技术*, 2018, 47(9): 86-92.
XI P, CONG Q, RU S F, et al. Wear Resistance of Piston Skirt with Bionic through Hole[J]. *Surface Technology*, 2018, 47(9): 86-92.
- [4] 张琰, 黄河, 任露泉. 挖掘机仿生斗齿土壤切削试验与减阻机理研究[J]. *农业机械学报*, 2013, 44(1): 258-261.
ZHANG Y, HUANG H, REN L Q. Experiment and Drag Reduction Mechanism of Bionic Excavator Tooth during Soil Cutting[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(1): 258-261.
- [5] 张智泓, 甘帅汇, 左国标, 等. 以砂鱼鳃头部为原型的仿生深松铲尖设计与离散元仿真[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(9): 33-42.
ZHANG Z H, GAN S H, ZUO G B, et al. Bionic Design and Performance Experiment of Sandfish Head Inspired Subsoiler Tine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(9): 33-42.
- [6] 张金波, 佟金, 马云海. 仿生减阻深松铲设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(4): 141-145.
ZHANG J B, TONG J, MA Y H. Design and Experiment of Bionic Anti-Drag Subsoiler[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(4): 141-145.
- [7] 贾兵云. 凸包型仿生非光滑表面自由式磨料磨料磨损行为[D]. 长春: 吉林大学, 2004.
JIA B Y. Abrasive Wear Behavior of Free Abrasive with Convex Hull Bionic Non-Smooth Surface[D]. Changchun: Jilin University, 2004.
- [8] 曾智伟, 马旭, 曹秀龙, 等. 离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(4): 1-20.
ZENG Z W, MA X, CAO X L, et al. Critical Review of Applications of Discrete Element Method in Agricultural Engineering[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(4): 1-20.
- [9] 肖茂华, 汪开鑫, 杨望, 等. 基于东方蝾螈爪趾的仿生旋耕刀设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(2): 55-63.
XIAO M H, WANG K X, YANG W, et al. Design and Experiment of Bionic Rotary Blade Based on Claw Toe of *Gryllotalpa Orientalis* Burmeister[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(2): 55-63.
- [10] 于建群, 钱立彬, 于文静, 等. 开沟器工作阻力的离散元法仿真分析[J]. *农业机械学报*, 2009, 40(6): 53-57.
YU J Q, QIAN L B, YU W J, et al. DEM Analysis of the Resistances Applied on Furrow Openers[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2009, 40(6): 53-57.
- [11] 方会敏, 姬长英, Farman Ali Chandio, 等. 基于离散元法的旋耕过程土壤运动行为分析[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(3): 22-28.
FANG H M, JI C Y, CHANDIO F, et al. Analysis of Soil Dynamic Behavior during Rotary Tillage Based on Distinct Element Method[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(3): 22-28.
- [12] 彭叔森, 陈星云, 马永存, 等. 电泳沉积仿生“砖-泥”层状结构材料用于防腐蚀涂层的展望[J]. *表面技术*, 2019, 48(11): 170-178.
PENG S S, CHEN X Y, MA Y C, et al. Prospect of Electrophoretic Deposition Biomimetic Brick-and-Mortar Material for Anti-Corrosion Coating[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(11): 170-178.
- [13] 田喜梅. 典型贝类壳体生物耦合特性及其仿生耐磨研究[D]. 长春: 吉林大学, 2013.
TIAN X M. Study on Biocoupling Characteristics and Biomimetic Wear Resistance of Typical Shellfish Shells [D]. Changchun: Jilin University, 2013.
- [14] 荣宝军. 耐磨仿生几何结构表面及其土壤磨料磨损[D]. 长春: 吉林大学, 2008.
RONG B J. Wear-Resistant Bionic Geometric Structure Surface and Its Soil Abrasive Wear[D]. Changchun: Jilin University, 2008.
- [15] LI J W, JIANG X H, MA Y H, et al. Bionic Design of a Potato Digging Shovel with Drag Reduction Based on the Discrete Element Method (DEM) in Clay Soil[J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(20): 7096.
- [16] 丁启朔, 任骏, BELAL Eisa Adam, 等. 湿粘水稻土深松过程离散元分析[J]. *农业机械学报*, 2017, 48(3): 38-48.
DING Q S, REN J, ADAM B, et al. DEM Analysis of Subsoiling Process in Wet Clayey Paddy Soil[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(3): 38-48.
- [17] 赵淑红, 王加一, 杨超, 等. 保护性耕作破茬碎土刀设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2019, 50(9): 57-68.
ZHAO S H, WANG J Y, YANG C, et al. Design and Experiment of Stubble Chopper under Conservation Tillage[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(9): 57-68.
- [18] 祝英豪, 夏俊芳, 曾荣, 等. 基于离散元的稻板田旋耕功耗预测模型研究[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(10): 42-50.
ZHU Y H, XIA J F, ZENG R, et al. Prediction Model of Rotary Tillage Power Consumption in Paddy Stubble

- Field Based on Discrete Element Method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(10): 42-50.
- [19] 马跃进, 王安, 赵建国, 等. 基于离散元法的凸圆刃式深松铲减阻效果仿真分析与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(3): 16-23.
- MA Y J, WANG A, ZHAO J G, et al. Simulation Analysis and Experiment of Drag Reduction Effect of Convex Blade Subsoiler Based on Discrete Element Method[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(3): 16-23.
- [20] 郑侃, 何进, 李洪文, 等. 基于离散元深松土壤模型的折线破土刃深松铲研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(9): 62-72.
- ZHENG K, HE J, LI H W, et al. Research on Polyline Soil-Breaking Blade Subsoiler Based on Subsoiling Soil Model Using Discrete Element Method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9): 62-72.
- [21] 姬忠莹, 闫昌友, 张晓琴, 等. 仿生取向结构表界面及其摩擦各向异性研究进展[J]. 表面技术, 2018, 47(6): 112-121.
- JI Z Y, YAN C Y, ZHANG X Q, et al. Research Advances in Biomimetic Surfaces with Oriented Structures and Its Frictional Anisotropy[J]. Surface Technology, 2018, 47(6): 112-121.
- [22] 曹波, 李文辉, 王娜, 等. 基于 JKR 模型的湿式滚抛磨块离散元参数标定[J]. 表面技术, 2019, 48(3): 249-256.
- CAO B, LI W H, WANG N, et al. Calibration of Discrete Element Parameters of the Wet Barrel Finishing Abrasive Based on JKR Model[J]. Surface Technology, 2019, 48(3): 249-256.
- [23] UCGUL M, SAUNDERS C, FIELKE J M. Discrete Element Modelling of Top Soil Burial Using a Full Scale Mouldboard Plough under Field Conditions[J]. Biosystems Engineering, 2017, 160: 140-153.
- [24] ABBASPOUR-FARD M H, ALI HOSEINI S, AGHKHANI M H, et al. The Behavior of Tillage Tools with Acute and Obtuse Lift Angles[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2014, 12(1): 44-51.
- [25] SU W, ZHOU T, SUI Q, et al. Study on the Relationship between Intervals among Laser Stripes and the Abrasion Resistance of Biomimetic Laser Textured Surfaces[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 104: 216-224.
- [26] SU W, ZHOU T, ZHANG P, et al. Effect of Distribution of Striated Laser Hardening Tracks on Dry Sliding Wear Resistance of Biomimetic Surface[J]. Optics & Laser Technology, 2018, 98: 281-290.
- [27] 杜三明, 刘超, 蔡宏章, 等. 等离子喷涂 Cu-Al₂O₃ 复合涂层制备及摩擦学性能研究[J]. 表面技术, 2019, 48(3): 134-140.
- DU S M, LIU C, CAI H Z, et al. Preparation and Tribological Properties of Plasma Sprayed Cu-Al₂O₃ Composite Coatings[J]. Surface Technology, 2019, 48(3): 134-140.
- [28] WU L Y, JIAO Z B, SONG Y Q, et al. Experimental Investigations on Drag-Reduction Characteristics of Bionic Surface with Water-Trapping Microstructures of Fish Scales[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 12186.
- [29] ZHANG Q Z, ZUO G B, LAI Q H, et al. EDEM Investigation and Experimental Evaluation of Abrasive Wear Resistance Performance of Bionic Micro-Thorn and Convex Hull Geometrically Coupled Structured Surface [J]. Applied Sciences, 2021, 11(14): 6655.
- [30] ZHANG J B, ZHANG Q Z, GE Y Y, et al. Analysis of the Wear-Resistance Characteristics of Bionic Ridge Structures[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2020, 36(5): 697-702.