

仿魁蚶表面肋-槽结构的水田打浆机刀片耐磨设计与试验

王欢¹ 梁宇龙¹ 王博斌¹ 张天奕¹ 吕莹¹ 丛潜¹ 曹译文¹
高继平² 徐燕¹ 邬立岩¹

(1. 沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866; 2. 沈阳农业大学农学院, 沈阳 110866)

摘要: 水田打浆机刀片在泥浆环境中作业时, 承受土壤颗粒的摩擦、冲击和冲蚀作用, 易出现磨损严重、使用寿命短等问题。本文选取具有优异耐磨损特性的潮间带魁蚶壳体表面微观结构为仿生原型, 开展打浆机刀片仿生耐磨设计与试验研究。利用超景深显微镜提取魁蚶壳体表面肋-槽结构特征, 分析表面流场和颗粒运动轨迹, 揭示其耐磨机理。基于离散元法 (EDEM) 建立“刀片-泥壤”互作模型, 分析肋-槽结构参数变化对法向和切向接触能量的影响规律, 采用 Box - Behnken 响应面法 (RSM), 对凹槽深度、宽度及放射肋宽度进行多目标参数优化。仿真结果表明: 当凹槽深度为 0.27 mm、凹槽宽度为 0.68 mm、放射肋宽度为 0.18 mm 时, 仿生刀片的法向累计接触能量 (1.406 J) 与切向累计接触能量 (0.85 J) 最小。基于参数优化结果试制仿生刀片并进行田间对比试验, 结果显示: 优化后仿生刀片的磨损质量和磨损率分别为 2.048 g 和 0.383%, 与普通光滑刀片相比, 磨损率降低了 65.53%。可为水田机械触土部件的耐磨研究提供理论依据。

关键词: 刀片耐磨性; 水田打浆机; 魁蚶; 肋-槽结构; 离散元仿真

中图分类号: S222.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2026)11-0059-08



OSID:

Design and Experiment on Wear Resistance of Paddy Field Pulping Machine Blade Inspired by Rib - Groove Structure of *Scapharca broughtonii*

WANG Huan¹ LIANG Yulong¹ WANG Bobin¹ ZHANG Tianyi¹ LÜ Ying¹ CONG Qian¹
CAO Yiwen¹ GAO Jiping² XU Yan¹ WU Liyan¹

(1. College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China
2. Agronomy College, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: When paddy field pulping machine blades operate in a muddy environment, they are subjected to friction, impact, and erosion by soil particles, which easily lead to severe wear and a short service life. The microstructures on the shell surface of intertidal *Scapharca broughtonii*—possessing excellent wear resistance—were selected as the bionic prototype to carry out design and experimental research on the bionic wear resistance of pulping machine blades. The “rib - groove” structural features of the *Scapharca broughtonii* shell surface were investigated by using a 3D microscope, and the surface flow field and particle movement trajectories were analyzed to reveal the wear resistance mechanism. Based on the discrete element method (EDEM), a “blade - soil” interaction model was established to analyze the influence of “rib - groove” structural parameter variations on normal and tangential contact energy. The Box - Behnken response surface method (RSM) was adopted for multi-objective parameter optimization of groove depth, groove width, and rib width. The simulation results showed that when the groove depth was 0.27 mm, the groove width was 0.68 mm, and the rib width was 0.18 mm, the normal cumulative contact energy (1.406 J) and tangential cumulative contact energy (0.85 J) of the bionic blade were minimized. Bionic blades were prepared based on the optimized parameters, and field comparative tests were conducted. The results indicated that the wear mass and wear rate of the optimized bionic blade were 2.048 g and 0.383%, respectively. Compared with conventional smooth blades, the wear rate was

收稿日期: 2026-03-09 修回日期: 2026-03-16

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52275264)

作者简介: 王欢 (1993—), 男, 讲师, 博士, 主要从事农业机械仿生减阻研究, E-mail: syeng94277@syau.edu.cn

通信作者: 徐燕 (1990—), 女, 讲师, 博士, 主要从事水田智能管控研究, E-mail: xuyan@syau.edu.cn

reduced by 65.53%. The research result can provide a theoretical basis for the wear resistance research of soil-contacting components in paddy field machinery.

Key words: blade wear resistance; paddy field pulping machine; *Scapharca broughtonii*; rib – groove structure; EDEM simulation

0 引言

水田耕整地机械如平地机、打浆机、机耕船等，是水稻机械化种植的重要装备，对保障水田整地效果和插秧质量具有重要作用。其关键触土部件如打浆刀片长期与泥浆接触，极易发生磨损，影响作业质量、作业效率及能耗。在作业过程中，打浆刀片持续承受水田泥浆的摩擦、冲击、冲蚀作用，磨损严重时会发生卷刃、崩刃、变形甚至断裂等失效，导致作业效率下降、能耗增加，成为制约水田机械化高效作业的突出瓶颈^[1-4]。因此，开展打浆刀的减磨增寿研究对节本降耗具有重要意义，为其它触泥部件的耐磨性研究提供方法借鉴。

针对触土部件的耐磨强化问题，国内外学者开展了大量研究，主要集中于表面改性，包括等离子堆焊、激光熔覆、热喷涂等表面强化工艺^[5-10]，通过在触土部件表面制备耐磨涂层提升抗磨损性能。这类方法在一定程度上提升了触土部件的耐磨性，但存在制备成本高、工艺复杂、涂层易脱落等缺陷，难以适应水田机械触泥部件规模化生产与复杂工况的应用需求。

自然界中，生物为适应复杂的土壤环境进化出优异的耐磨结构，其结构特征为触土部件仿生设计提供了天然灵感^[11-15]。ZHANG 等^[16]受克拉基变色龙启发设计了“微刺-凸壳”耦合结构表面，将农机触土部件的磨损损失降低 94.1%。然而，现有仿生耐磨研究多聚焦于旱田触土部件，针对水田泥浆特殊介质（高含水率、低剪切强度、固液混合特性）的仿生设计研究相对较少。水田泥浆与旱田土壤的物理力学属性有显著差异，使得旱田场景下的仿生结构难以直接适配水田工况，亟需开展水田机械触土部件的仿生耐磨研究。

魁蚶（*Scapharca broughtonii*）长期生活在潮间带，承受海水的往复冲刷与磨蚀，进化出规则排列的肋-槽结构，形成了优异的耐冲蚀与抗磨损性能^[17]。魁蚶在潮间带的生存环境与水田打浆机刀片在泥壤中的工作环境相似，均需应对固液混合介质的冲蚀，为水田打浆机刀片的仿生设计提供了生物原型。鉴于此，本研究以魁蚶壳体肋-槽结构为仿生原型，开展水田打浆机刀片仿生耐磨设计与试验研究。通过超景深显微镜分析魁蚶壳体肋-槽的结构特征参数，

揭示其耐磨机理；基于离散元法（EDEM）建立“刀片-泥壤”互动模型，优化凹槽深度、凹槽宽度及放射肋宽度等关键参数；通过田间试验验证仿生刀片的耐磨性能，确定最优耐磨性能的仿生刀片。

1 仿生原型选取与耐磨机理分析

1.1 仿生特征提取

采用超景深显微镜（VHX-5000 型）对魁蚶壳体表面结构进行观察，结果如图 1 所示，其壳体表面由放射肋与肋间凹槽构成。放射肋与肋间凹槽分布较为均匀，且放射肋较宽。凹槽结构呈规则的平行排列长条状，其表面亦由放射肋与肋间凹槽构成。

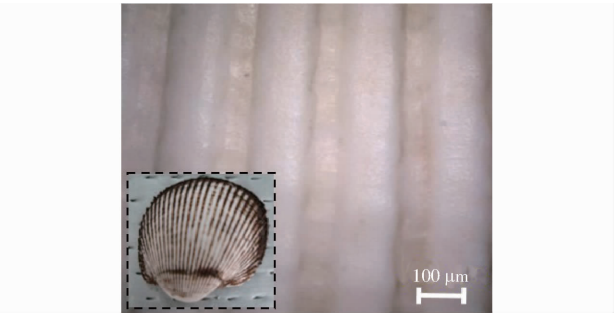


图 1 魁蚶壳体表面肋-槽结构
Fig. 1 “Rib – groove” structure on shell surface of *Scapharca broughtonii*

对魁蚶壳体横断面进行观察，结果如图 2 所示，发现凹槽结构呈倒梯形，宽度约为 1.5 mm，深度约为 0.5 mm，且凹槽宽度与放射肋宽度之比约为 1:1.5。

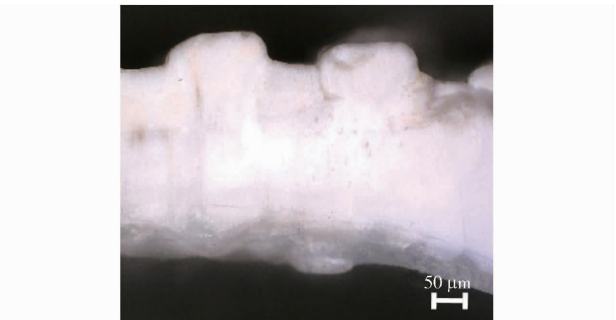


图 2 横截面微观结构
Fig. 2 Cross-sectional microstructure

1.2 耐磨机理分析

图 3 为魁蚶表面肋-槽结构的耐磨损机理分析图。当泥浆流过魁蚶表面时，凹槽内形成低速涡旋，能够固存流体介质并形成具备缓冲功能的“流体气垫”，将泥壤颗粒与凹槽底部隔离，削弱磨粒对沟槽

内壁的冲击与切削作用。此外,凹槽结构通过改变近壁面流场状态,增强流体湍流强度,使磨粒向远离壁面方向运移,降低泥壤颗粒对蚌蚌表面的法向冲击动能与切向切削力,进而提升表面抗磨损性能。

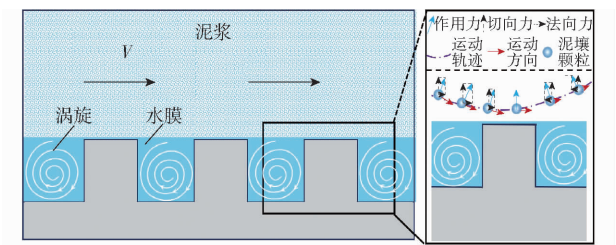


图 3 泥壤颗粒与蚌蚌接触机理分析图

Fig. 3 Analysis diagram of contact mechanism between soil particles and *Scapharca broughtonii*

2 仿生打浆刀片设计与参数优化

2.1 仿生刀片设计与强度校核

选用沃得 1JSL 系列水田打浆机刀片(图 4a),其长度为 205 mm,宽度为 65 mm,厚度为 5 mm。基于蚌蚌微观结构参数,利用三维建模软件(Solidworks)建立具有若干个仿蚌蚌沟槽结构的刀片,如图 4b 所示,刀片凹槽深度在 0.05 ~ 0.35 mm 之间,宽度在 0.5 ~ 0.8 mm 之间,放射肋宽度在 0.05 ~ 0.35 mm 之间。

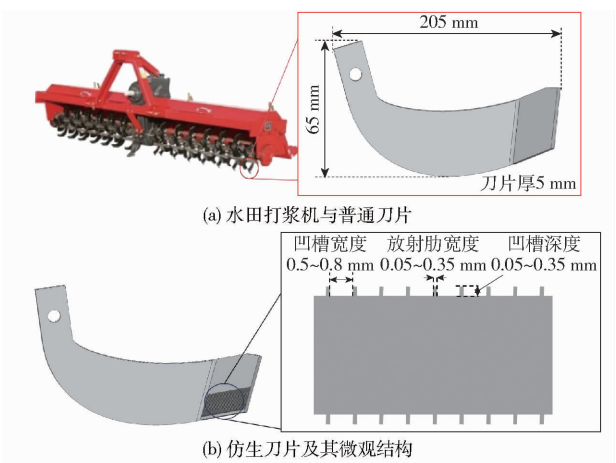


图 4 仿生打浆刀的三维模型建立

Fig. 4 3D model construction of bionic paddy field blade

为验证刀片结构强度,利用 ANSYS 进行静力学分析,如图 5 所示。结果表明:在转速为 300 r/min 时,水田打浆刀所受的应力在 0.12 ~ 114.71 MPa 之间,均小于材料的许用应力 200 MPa(图 5),其最大应力远小于材料屈服极限,满足强度要求,说明打浆刀具备足够的安全性和可靠性。

2.2 离散元仿真模型构建

根据前人研究^[18-21],本研究在仿真分析时将泥浆颗粒直径设为 5 mm,底层土壤颗粒直径设为 8 mm。各个材料之间的密度、泊松比、剪切模量、静

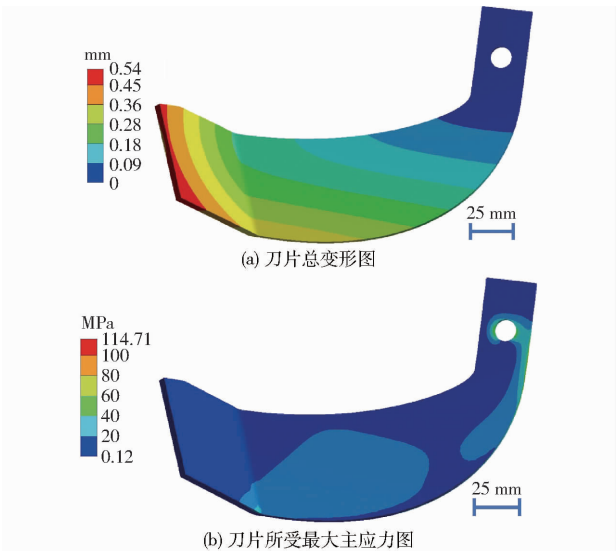


图 5 应力分析结果

Fig. 5 Stress analysis results

摩擦因数、动摩擦因数以及碰撞恢复系数如表 1 所示。

表 1 材料性能参数

Tab. 1 Material performance parameters	
参数	数值
打浆刀密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 890
打浆刀泊松比	0.269
打浆刀剪切模量/Pa	8.23×10^{10}
泥浆密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 500
泥浆泊松比	0.38
泥浆剪切模量/Pa	1×10^6
底层土壤密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	1 850
底层土壤泊松比	0.30
底层土壤剪切模量/Pa	1×10^8
泥浆-泥浆恢复系数	0.3
泥浆-泥浆静摩擦因数	0.114
泥浆-泥浆动摩擦因数	0.1
底层土壤-底层土壤恢复系数	0.6
底层土壤-底层土壤静摩擦因数	0.6
底层土壤-底层土壤动摩擦因数	0.4
泥浆-打浆刀恢复系数	0.5
泥浆-打浆刀静摩擦因数	0.2
泥浆-打浆刀动摩擦因数	0.03
底层土壤-打浆刀恢复系数	0.6
底层土壤-打浆刀静摩擦因数	0.6
底层土壤-打浆刀动摩擦因数	0.05
底层土壤-泥浆恢复系数	0.7
底层土壤-泥浆静摩擦因数	0.1
底层土壤-泥浆动摩擦因数	0.1

参考前人相关研究^[22],设定泥浆、底层土壤颗粒和打浆刀之间的接触模型,如表 2 所示。

基于土壤颗粒模型及其接触模型,构建长、宽、高分别为 2 000、700、185 mm 的土壤模型,然后将打浆刀片的三维模型导入 EDEM 中,建立“土壤-打浆

表 2 接触模型
Tab.2 Contact model

接触单元	接触模型
底层土壤与底层土壤	Hertz – Mindlin with Bonding
泥浆与泥浆	Hertz – Mindlin with JKR
泥浆与底层土壤	Hertz – Mindlin with JKR
打浆刀与泥浆、底层土壤	Relative wear

刀”的模型(图6)。设定参数如下:刀片前进速度为0.5 m/s,旋转速度为300 r/min,重力加速度为9.81 m/s²,网格尺寸(Cell Size)设为2.5R。仿真过程分为两个阶段:0~0.5 s 用于生成土壤颗粒并使其沉降形成稳定的 bond 键,0.5~4.0 s 用于模拟打浆刀与土壤颗粒的相互作用。数据采集时间间隔为0.01 s。

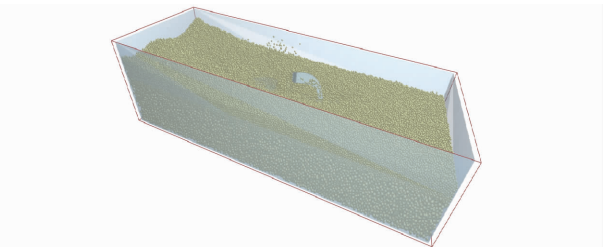


图 6 仿真分析模型

Fig.6 Simulation analysis model

2.3 仿生刀片结构参数试验优化

2.3.1 试验方案设计

基于响应面法(RSM),研究打浆刀片微观结构参数(凹槽深度、凹槽宽度、放射肋宽度)对法向累计接触能量和切向累计接触能量的影响规律。法向累计接触能量表征了土壤及泥浆颗粒对刀片表面的冲击强度,这种冲击是诱发部件表面疲劳磨损及微裂纹扩展的主导因素;切向累计接触能量反映了颗粒对部件表面的切削、刮擦及摩擦作用,该种切削摩擦作用是导致材料去除与磨痕形成的主要原因。通过 Box – Behnken Design (BBD) 组合方法开展三因素三水平优化试验,根据在设计阶段对不同几何结构参数耐磨性能的初步评估,筛选出耐磨性能最优的参数组合,试验因素编码如表3所示。

表 3 试验因素编码
Tab.3 Factors coding

编码	因素			mm
	凹槽深度	凹槽宽度	放射肋宽度	
-1	0.10	0.50	0.10	
0	0.20	0.60	0.15	
1	0.30	0.70	0.20	

经过数值模拟计算后,水田打浆刀在不同凹槽深度、凹槽宽度、放射肋宽度参数组合下的法向累计接触能量(Y_1)与切向累计接触能量(Y_2)如表4所

示, X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值。利用 Design-Expert 软件对仿真结果进行分析,分别建立法向累计接触能量和切向累计接触能量与结构参数间的二次回归模型。

表 4 试验方案与结果
Tab.4 Test scheme and results

试验号	因素			法向累计接触能量 Y_1 /J	切向累计接触能量 Y_2 /J
	凹槽深度 X_1	凹槽宽 X_2	放射肋 宽度 X_3		
1	-1	-1	0	3.235	2.998
2	1	-1	0	2.523	2.312
3	-1	1	0	2.512	2.345
4	1	1	0	1.841	1.586
5	-1	0	-1	4.866	3.703
6	1	0	-1	4.175	3.281
7	-1	0	1	3.786	2.832
8	1	0	1	2.303	0.996
9	0	-1	-1	4.387	3.803
10	0	1	-1	4.023	3.751
11	0	-1	1	3.354	2.531
12	0	1	1	1.947	1.214
13	0	0	0	1.985	1.825
14	0	0	0	1.964	1.487
15	0	0	0	1.677	1.403
16	0	0	0	1.811	1.318
17	0	0	0	1.749	1.318

2.3.2 方差分析

对表4数据进行方差分析(表5),得到法向累计接触能量和切向累计接触能量回归模型。

根据表5可知,法向累计接触能量回归模型显著,失拟项不显著,表明模型拟合程度较好,无失拟现象。将不显著项剔除后得到的各因素与评价指标的回归方程为

$$Y_1 = 1.8372 - 0.444625X_1 - 0.397X_2 - 0.757625X_3 - 0.198X_1X_3 - 0.26075X_2X_3 + 0.52265X_1^2 + 1.42265X_3^2 \quad (1)$$

根据表5可知,切向累计接触能量回归模型显著,失拟项不显著,表明模型拟合程度较好,无失拟现象发生。将不显著项剔除后得到的各因素与评价指标的回归方程为

$$Y_2 = 1.4702 - 0.462875X_1 - 0.3435X_2 - 0.870625X_3 - 0.3535X_1X_3 - 0.31625X_2X_3 + 0.35915X_1^2 + 0.4809X_2^2 + 0.87365X_3^2 \quad (2)$$

2.3.3 响应面分析

法向累计接触能量与各试验因素之间的响应曲面如图7所示。

如图7a所示,法向累计接触能量随凹槽深度和宽度的增加而降低。当凹槽深度和宽度达到最大值

表 5 累计接触能量回归模型方差分析

Tab.5 Analysis of variance for cumulative contact energy regression model

方差来源	法向累计接触能量					切向累计接触能量				
	平方和	自由度	均方	F	P	平方和	自由度	均方	F	P
模型	18.22	9	2.02	83.30	<0.000 1 **	14.81	9	1.65	36.80	<0.000 1 **
X_1	1.58	1	1.58	65.09	<0.000 1 **	1.71	1	1.71	38.34	0.000 4 **
X_2	1.26	1	1.26	51.89	0.000 2 **	0.943 9	1	0.943 9	21.11	0.002 5 **
X_3	4.59	1	4.59	188.98	<0.000 1 **	6.06	1	6.06	135.64	<0.000 1 **
X_1X_2	0.000 4	1	0.000 4	0.017 3	0.899 1	0.001 3	1	0.001 3	0.029 8	0.867 8
X_1X_3	0.156 8	1	0.156 8	6.45	0.038 6 *	0.499 8	1	0.499 8	11.18	0.012 4 *
X_2X_3	0.272 0	1	0.272 0	11.19	0.012 3 *	0.400 1	1	0.400 1	8.95	0.020 2 *
X_1^2	1.15	1	1.15	47.33	0.000 2 **	0.543 1	1	0.543 1	12.15	0.010 2 *
X_2^2	0.118 7	1	0.118 7	4.88	0.062 8	0.973 7	1	0.973 7	21.78	0.002 3 **
X_3^2	8.52	1	8.52	350.72	<0.000 1 **	3.21	1	3.21	71.89	<0.000 1 **
残差	0.170 1	7	0.024 3			0.312 9	7	0.044 7		
失拟	0.098 0	3	0.032 7	1.81	0.284 4	0.135 9	3	0.045 3	1.02	0.470 8
误差	0.072 1	4	0.018 0			0.177 0	4	0.044 3		
总值	18.39	16				15.12	16			

注：**表示差异极显著($P<0.01$),*表示差异显著($0.01\leq P<0.05$)。

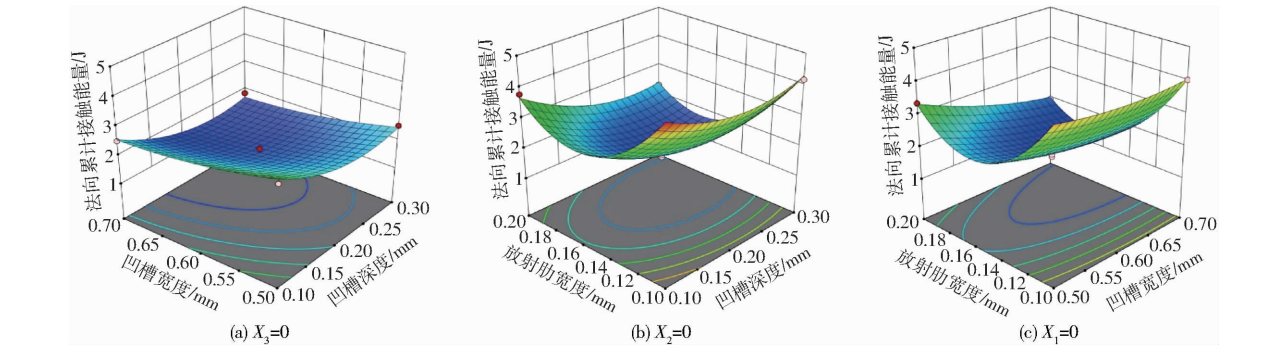


图 7 试验因素交互作用对法向累计接触能量影响的响应曲面

Fig.7 Response surfaces for effect of experimental factor interaction on accumulated normal contact energy

时,法向累计接触能量最小。其主要原因是:当凹槽的宽度和深度增大时,由于涡旋作用,其内部固存流体增多,使得相邻单元体之间聚集了大量低速的流体,并形成稳定的“流体气垫”,降低了土壤颗粒对刀片表面冲击,导致法向累计接触能量降低。

如图 7b 所示,法向累计接触能量随放射肋宽度的增加呈先降低后升高的变化趋势。与凹槽深度相比,放射肋宽度变化对响应曲面曲率的影响更显著。当放射肋宽度超过 0.18 mm 时,刀片表面非光滑特征逐渐弱化并趋于平坦,凹槽间的凸起肋结构的导流功能失效,土壤颗粒对刀片表面的垂直冲击作用加剧,导致法向累计接触能量显著增加。当放射肋宽度小于 0.18 mm 时,相邻凹槽间的凸起肋结构将垂直冲击的流体介质分流至两侧凹槽,将法向冲击动能向切向流动能转化,实现“避硬就软”的仿生耐磨机制。

如图 7c 所示,法向累计接触能量的最低值集中于“宽凹槽 + 窄放射肋”的参数组合区间。与凹槽宽度相比,放射肋宽度的变化对响应曲面曲率的影响

响更显著。当放射肋宽度小于 0.15 mm 时,刀片表面凸起结构的支撑强度不足,在土壤颗粒冲击与交变载荷作用下易发生变形失效,导致法向累计接触能量增加。当放射肋宽度为 0.18 mm 时,凸起肋结构既能提供支撑,又能固存流体,强化“流体气垫”的缓冲效应,实现结构强度与耐磨性能的最优平衡。

切向累计接触能量与各试验因素之间的响应曲面如图 8 所示。

如图 8a 所示,切向累计接触能量随着放射肋宽度和凹槽宽度的增加呈持续下降趋势。与凹槽宽度相比,放射肋宽度变化对响应曲面曲率的影响更显著。当放射肋宽度超过 0.18 mm 时,刀片表面肋-槽占空比失衡,土壤颗粒与刀片表面的接触面积增大,泥浆润滑作用降低,导致切向累计接触能量升高。当放射肋宽度小于 0.18 mm 时,“宽槽窄肋”的结构组合减少了颗粒与刀片表面的直接接触,泥浆介质形成连续润滑膜,将“固-固”滑动转化为“固-液”滚动,大幅削弱了颗粒的切削作用。

如图 8b 所示,切向累计接触能量随凹槽深度和

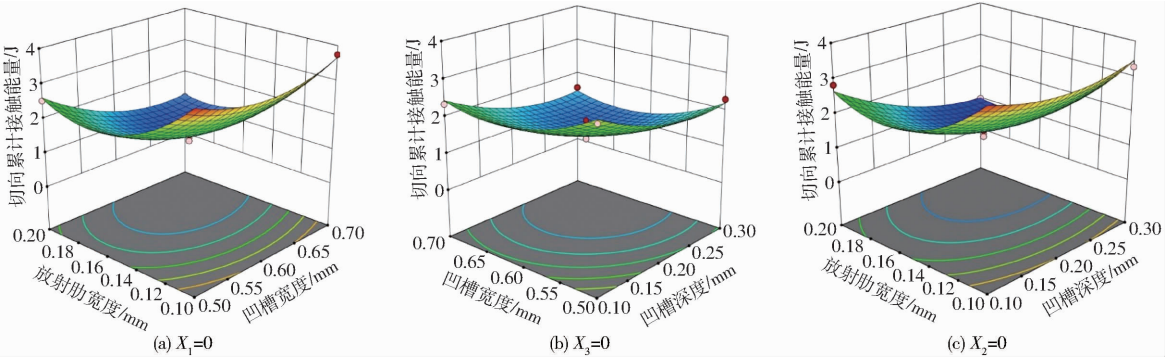


图 8 试验因素交互作用对切向累计接触能量影响的响应曲面

Fig. 8 Response surfaces of tangential accumulated contact energy affected by interaction of experimental factors

宽度的增加呈持续下降趋势,在凹槽深度 0.25 ~ 0.30 mm、宽度 0.65 ~ 0.70 mm 区间降至最低。当凹槽深度小于 0.25 mm 时,其内部流体固存空间有限,导致涡旋作用减弱,切向累计接触能量增加;当凹槽深度处于 0.25 ~ 0.30 mm 范围时,深宽凹槽内流体形成强涡旋,产生升力使颗粒呈“悬浮”或“滚动”状态,降低切向累计接触能量。

如图 8c 所示,切向累计接触能量随放射肋宽度和凹槽深度的增加呈先降后升的变化趋势。当放射肋宽度超过 0.18 mm 时,会阻碍流体流动,加剧颗粒与表面的刮擦作用,导致切向累计接触能量上升。当放射肋深度小于 0.18 mm 时,“窄放射肋 + 深凹槽”的结构组合使流体在肋间形成“跳跃”流动,形成连续润滑膜,降低切向累计接触能量。

2.3.4 多目标优化

为了获得打浆刀耐磨性能最佳参数组合,利用 Design-Expert 进行多目标优化算法,以法向累计接触能量和切向累计接触能量最小值为优化目标,通过分析建立优化数学模型为

$$\begin{cases} \min Y_1 \\ \min Y_2 \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1 \leq X_1 \leq 1 \\ -1 \leq X_2 \leq 1 \\ -1 \leq X_3 \leq 1 \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

求解得到最优参数组合为:凹槽深度 0.27 mm、凹槽宽度 0.68 mm、放射肋宽度 0.18 mm,法向累计接触能量 1.406 J、切向累计接触能量 0.85 J。为了验证优化结果的可信度,对凹槽深度 0.27 mm、凹槽宽度 0.68 mm、放射肋宽度 0.18 mm 的仿生刀片进行结果优化验证,试验重复 3 次,取平均值作为评价指标实际值。累计接触能量为 1.516 J,切向累计接触能量 0.904 J,与优化结果相对误差分别为 7.3%、6.0%,表明所建立的数学模型和优化结果准确可信。

3 田间磨损试验

3.1 试样制备

刀片材料选用 45 号钢,采用激光雕刻方法制备刀片试验样件,并对制备完成后的样件进行磨损试验。试验选择 $L_9(3^4)$ 正交表,对条纹型结构特征进行参数设计,加工打浆刀样件 9 个。试验方案见表 6。

表 6 试验方案
Tab.6 Experimental design

因素试验号	凹槽深度	凹槽宽度	放射肋宽度
1	0.10	0.50	0.10
2	0.10	0.60	0.15
3	0.10	0.70	0.20
4	0.20	0.50	0.15
5	0.20	0.60	0.20
6	0.20	0.70	0.10
7	0.30	0.50	0.20
8	0.30	0.60	0.10
9	0.30	0.70	0.15

3.2 试验条件与方法

于沈阳农业大学试验田进行田间磨损试验 (41°49'24.29"N,123°33'55.36"E),选用 TG4 型田园管理机作为动力平台挂载试验样刀进行实地作业,累计工作时长为 64 h。试验后,计算刀片的磨损量。在试验前,对 9 种仿生条纹型样件和 3 个光滑表面样件进行清洗(图 9a、9b),去除表面残留物质。清洗后进行干燥,利用电子天平测量打浆刀片的质量。

磨损试验结束后,两种样件表面微观结构如图 9c、9d 所示,光滑表面出现了磨损迹象,而仿生刀片未发生弯折或崩裂,其表面微观结构也未出现脱落等现象。对样件进行清洗并进行干燥处理,利用电子天平称量磨损后刀片,计算刀片磨损率

$$\varepsilon = W/W_0 \times 100\%$$

(4)

其中

$$W = W_0 - W_1$$

(5)

式中 W ——试验磨损量,g

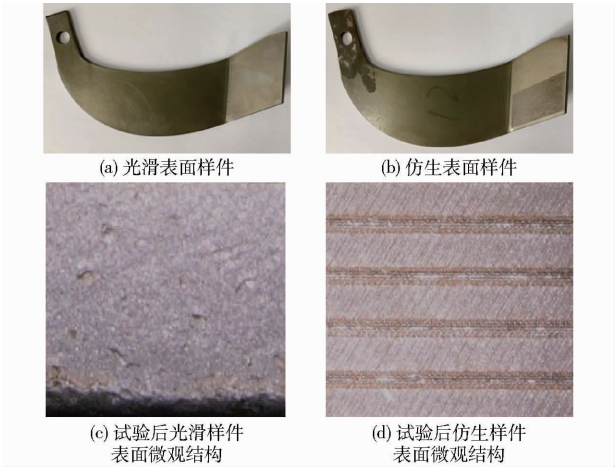


图 9 打浆刀样件
Fig.9 Paddy field blade samples

W_1 ——试样在试验后质量,g
 W_0 ——试样在试样前质量,g
 ε ——试验磨损率,%

3.3 试验结果与分析

表 7 为刀片磨损前后的质量及其磨损率。试验结果表明:仿生打浆刀的磨损量和磨损率均小于光滑样件。8 号仿生试验刀片(凹槽深度 0.3 mm、凹槽宽度 0.6 mm、放射肋宽度 0.10 mm)的磨损量与磨损率最小,分别为 2.048 g 和 0.383%。试验结果与仿真优化获得的参数结果接近(凹槽深度 0.27 mm、凹槽宽度 0.68 mm、放射肋宽度 0.18 mm)。试验与仿真最优参数存在偏差,其主要因素来源于:①仿真过程中对泥浆与土壤颗粒的理想化处理(设定颗粒为均匀球形、忽略颗粒团聚现象)。实际水田土壤中存在不规则硬杂质、土壤团聚体等复杂成分,对放射肋的冲击磨损更为显著,导致较窄的放射肋(0.10 mm)在实际作业中更能减少“固-固”接触面积。②仿真未完全考虑刀片加工工

表 7 试验前后打浆刀样件磨损量和磨损率对比
Tab.7 Comparison of wear amount and wear rate of beating tool samples before and after the experiment

样品	W_0/g	W_1/g	W/g	$\varepsilon/\%$
仿生 1	535.592	532.617	2.975	0.555
仿生 2	536.466	533.428	3.038	0.566
仿生 3	539.215	537.013	2.202	0.408
仿生 4	535.488	532.631	2.857	0.534
仿生 5	536.077	533.896	2.181	0.407
仿生 6	538.404	535.749	2.655	0.493
仿生 7	532.295	529.998	2.297	0.432
仿生 8	534.277	532.229	2.048	0.383
仿生 9	536.866	534.311	2.555	0.476
光滑 1	536.312	530.439	5.873	1.095
光滑 2	536.541	530.578	5.963	1.111
光滑 3	536.453	530.414	6.039	1.126

艺对性能的影响。激光雕刻加工的仿生结构边缘存在微小毛刺,导致窄放射肋样件在作业初期的导流效果优于仿真预测,因而表现出更低的磨损率。

通过数值计算与分析试验结果(见表 8),发现影响仿生打浆刀样件磨损量的主要因素依次为:放射肋宽度(C)、凹槽深度(A)、凹槽宽度(B)。优水平的排列顺序为 A_3 、 B_2 、 C_3 ,因此最优组合是 $A_3B_2C_3$ 。这表明,放射肋宽度结构参数变化对磨损量影响显著,其次是凹槽深度,而凹槽宽度的影响最小。当凹槽深度为 0.30 mm,得到最佳的耐磨效果,其磨损率为 0.383%。相较于普通打浆刀片(平均磨损率为 1.111%)降低 65.53%。

表 8 极差分析结果
Tab.8 Results of range analysis

序号	因素			磨损率/ %
	凹槽深度/ mm	凹槽宽度/ mm	放射肋宽 度/mm	
1	0.10	0.50	0.10	0.555
2	0.10	0.60	0.15	0.566
3	0.10	0.70	0.20	0.408
4	0.20	0.50	0.15	0.534
5	0.20	0.60	0.20	0.407
6	0.20	0.70	0.10	0.493
7	0.30	0.50	0.20	0.432
8	0.30	0.60	0.10	0.383
9	0.30	0.70	0.15	0.476
K_1	1.530	1.521	1.431	
K_2	1.434	1.356	1.576	
K_3	1.291	1.377	1.247	
k_1	0.510	0.507	0.477	
k_2	0.478	0.452	0.525	
k_3	0.430	0.459	0.416	
R_j	0.080	0.055	0.109	
主次因素	$C > A > B$			
优水平	A_3	B_2	C_3	
最优组合	$A_3B_2C_3$			

4 结论

(1)通过超景深显微镜观察发现,𧈧蚌壳体表面由规则排列的放射肋和肋间凹槽结构组成,凹槽与放射肋宽度比约 1:1.5。肋-槽结构能有效改变近壁面流场,形成流体缓冲层,减少泥沙颗粒与壁面的接触面积。

(2)EDEM 数值仿真表明,放射肋宽度、凹槽深度、凹槽宽度对仿生刀片耐磨性能的影响显著,主次顺序为放射肋宽度、凹槽深度、凹槽宽度。当凹槽深度为 0.27 mm、凹槽宽度为 0.68 mm、放射肋宽度为

0.18 mm 时,仿生刀片的法向累计接触能量(1.406 J)与切向累计接触能量(0.85 J)最小,耐磨性能最优,刀片耐磨性能最优。

(3)田间对比试验表明,优化后的仿生刀片磨损性能显著优于普通光滑刀片。当凹槽深度 0.3 mm、凹槽宽度 0.6 mm、放射肋宽度 0.10 mm 时,磨损量为 2.048 g,磨损率低至 0.383%,相较于普通刀片(平均磨损率 1.111%)降低 65.53%。

参 考 文 献

[1] 王金峰,尚文虎,翁武雄,等. 圆盘顶出式水田侧深施肥装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(6):62-72.
WANG Jinfeng, SHANG Wenhui, WENG Wuxiong, et al. Design and experiment of disc ejection type paddy field side deep fertilization device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 62-72. (in Chinese)

[2] 贾洪雷,王万鹏,陈志,等. 农业机械触土部件优化研究现状与展望[J]. 农业机械学报,2017,48(7):1-13.
JIA Honglei, WANG Wanpeng, CHEN Zhi, et al. Research status and prospect of soil-engaging components optimization for agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(7): 1-13. (in Chinese)

[3] 李清超,郑炫,孟祥金,等. 铧式犁在北疆玉米地应用现状与改进建议[J]. 中国农机化学报,2021,42(7):202-208.
LI Qingchao, ZHENG Xuan, MENG Xiangjin, et al. Application status and improvement suggestions of mouldboard plough in the cornfield of Northern Xinjiang[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(7): 202-208. (in Chinese)

[4] 宋月鹏,王伟,高东升,等. 基于表面工程技术制备农机 刀具的研究现状[J]. 中国农机化学报,2018,39(1):27-31.
SONG Yuepeng, WANG Wei, GAO Dongsheng, et al. Research status of agricultural machine cutting tools treated by surface engineering technology[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(1): 27-31. (in Chinese)

[5] 郝建军,杨泽宇,马璐萍,等. Fe-Cr-C-V 等离子堆焊层改善旋耕刀耐磨性和冲击韧性[J]. 农业工程学报,2019,35(3):24-30.
HAO Jianjun, YANG Zeyu, MA Luping, et al. Fe-Cr-C-V plasma surfacing layer improving wear resistance and impact toughness of rotary blade[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(3): 24-30. (in Chinese)

[6] 程靖越,姚海华,赵万新,等. Al0.6CoCrFeNiTi/TiC 高熵合金熔覆层组织与摩擦磨损行为[J]. 机械工程学报,2025,61(10):141-151.
CHENG Jingyue, YAO Haihua, ZHAO Wanxin, et al. Microstructure and frictional wear behavior of Al0.6CoCrFeNiTi/TiC cladding layers[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2025, 61(10): 141-151. (in Chinese)

[7] FENG Z, TANG M, LIU Y, et al. In situ synthesis of TiC-TiN-reinforced Fe-base plasma cladding coatings[J]. Surface Engineering, 2018, 34(4): 309-315.

[8] JANKAUSKAS V, KREIVAITIS R, STONKUS D, et al. Research of strengthening plough parts by welding[J]. Mechanika, 2015, 35(1): 80-84.

[9] 翟艳坤. 旋耕刀等离子熔覆 Fe/Ni-WC 基梯度涂层制备及性能研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学,2023.
ZHAI Yankun. Rotary plow knife plasma cladding preparation and properties of Fe/Ni-WC based gradient coatings[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023. (in Chinese)

[10] 肖居鹏,杨学锋,夏国峰,等. 激光熔覆 Fe-Mo 涂层增强铧式犁表面耐磨性能研究[J]. 特钢技术,2021,27(4):13-17,12.
XIAO Jupeng, YANG Xuefeng, XIA Guofeng, et al. Study on laser cladding Fe-Mo coating to enhance the surface wear resistance of moldboard plough[J]. Special Steel Technology, 2021, 27(4): 13-17, 12. (in Chinese)

[11] ZHANG L, ZHAI Y B, CHEN J N, et al. Optimization design and performance study of a subsoiler underlying the tea garden subsoiling mechanism based on bionics and EDEM[J]. Soil & Tillage Research, 2022, 220: 105375.

[12] SONG W, JIANG X H, LI L K, et al. Increasing the width of disturbance of plough pan with bionic inspired subsoilers[J]. Soil & Tillage Research, 2022, 220: 105356.

[13] ZHANG Jihao, LI Jing, CHEN Wanggang, et al. Research progress on bionic drag reduction and wear resistance characteristics of agricultural soil touching machinery structures[J]. Surface Technology, 2024, 53(20): 36-50.

[14] 王洪昌. 基于鼯鼠爪趾几何结构特征的苗间仿生除草铲设计[D]. 长春:吉林大学,2015.
WANG Hongchang. Design of intra-row bionic weeding blade based on geometric characteristic of claws of *Myosorex* [D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)

[15] HAN Z W, ZHU B, YANG M K, et al. The effect of the micro-structures on the scorpion surface for improving the anti-erosion performance[J]. Surface & Coatings Technology, 2017, 313: 143-150.

[16] ZHANG Qingzhu, ZUO Guobiao, LAI Qinghui, 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.

[17] 张成春,李雪丽,张春艳,等. 毛蚶壳形态/材料耦合仿生表面耐冲蚀性能试验[J]. 农业机械学报,2014,45(增刊):314-318.
ZHANG Chengchun, LI Xueli, ZHANG Chunyan, et al. Experiments on erosion resistance of bionic surface with coupling characteristics of material and morphology inspired by scapharca shell[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 314-318. (in Chinese)

discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 176 – 187. (in Chinese)

[18] 杨秀丽,陈彬,邢航,等. 滑刀开沟-气力引射式液肥雾化侧深施肥装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2023,39(16): 13 – 25.
YANG Xiuli, CHEN Bin, XING Hang, et al. Design and experiments of the side-deep fertilization device with sliding-knife furrow opener and pneumatic ejector for a liquid fertilizer atomizer[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(16): 13 – 25. (in Chinese)

[19] 赵淑红,刘佳明,赵国鹏,等. 侧深施肥直斜偏置式免耕播种开沟器设计与试验[J]. 农业工程学报,2024,40(11): 26 – 37.
ZHAO Shuhong, LIU Jiaming, ZHAO Guopeng, et al. Design and experiment of the straight oblique offset no-tillage sowing furrow opener with side deep fertilization[J]. Transactions of the CSAE, 2024, 40(11): 26 – 37. (in Chinese)

[20] 赵淑红,赵国鹏,冷明新,等. 与深松铲互作锯齿式灭茬刀设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(4): 151 – 162.
ZHAO Shuhong, ZHAO Guopeng, LENG Mingxin, et al. Design and testing of serrated stubble-breaking blade with interaction type with subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(4): 151 – 162. (in Chinese)

[21] 龚皓晖. 基于土壤力学模型的深松铲有限元分析与结构优化[D]. 成都:西华大学,2013.
GONG Haohui. Finite element analysis and structure optimization for subsoiling shovel based on soil mechanics model[D]. Chengdu: Xihua University, 2013. (in Chinese)

[22] 廖洋洋,尤泳,王德成,等. 燕麦和箭筈豌豆混合种子离散元模型参数标定与试验[J]. 农业机械学报,2022,53(8): 14 – 22.
LIAO Yangyang, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Parameter calibration and experiment of discrete element model for mixed seeds of oat and arrow pea[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(8): 14 – 22. (in Chinese)

[23] YANG Xiaolong, ZHENG Long, LI Da. The snake-inspired robots: a review[J]. Assembly Automation, 2022, 42(4): 567 – 583.

[24] 乔德金. 气吹式苜蓿种子排种系统关键装置设计与试验研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学,2024.
QIAO Dejin. Design and experimental study on the key device of alfalfa seed pneumatic metering system[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2024. (in Chinese)

[25] 杨薇. 基于离散元法的巨菌草开沟器结构优化与试验研究[D]. 福州:福建农林大学,2019.
YANG Wei. Structure optimization and experimental study of the *Pennisetum. sp* opener based on the discrete element method [D]. Fujian: Fujian Agriculture and Forestry University, 2019. (in Chinese)

[26] 中国农业机械学会. 牧草免耕播种机: T/NJ 1359—2023[S]. 北京:中国农业机械学会,2023.

(上接第 66 页)

[18] 王金峰,杨东泽,王震涛,等. 水稻秸秆双轴深埋还田机设计与试验[J]. 农业机械学报,2023,54(4): 21 – 30.
WANG Jinfeng, YANG Dongze, WANG Zhentao, et al. Design and experiment of rice straw biaxial deep-buried returning machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 21 – 30. (in Chinese)

[19] 郑侃,李宇飞,夏俊芳,等. 开沟旋耕机渐变螺旋升角轴向匀土刀辊设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(5): 63 – 73.
ZHENG Kan, LI Yufei, XIA Junfang, et al. Design and experiment of land leveling blade roller of ditching and rotary tiller with gradual spiral angle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(5): 63 – 73. (in Chinese)

[20] 祝英豪,张居敏,曾荣,等. 人字型水旱两用旋埋刀辊设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(4): 49 – 57, 273.
ZHU Yinghao, ZHANG Jumin, ZENG Rong, et al. Design and experiment of herringbone type rotary blade roller for burying stubble in paddy field and dry land[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(4): 49 – 57, 273. (in Chinese)

[21] 王金武,唐汉,王金峰,等. 悬挂式水田单侧修筑埂机数值模拟分析与性能优化[J]. 农业机械学报,2017,48(8): 72 – 80.
WANG Jinwu, TANG Han, WANG Jinfeng, et al. Numerical analysis and performance optimization experiment on hanging unilateral ridger for paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 72 – 80. (in Chinese)

[22] 夏进启,闫龙,詹华,等. 表面涂层厚度对旋耕刀功耗的影响及优化[J]. 农业工程学报,2025,41(8): 39 – 48.
XIA Jinqi, YAN Long, ZHAN Hua, et al. Influence and optimization of surface coating thickness on the power consumption of rotary blades[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(8): 39 – 48. (in Chinese)