

基于黄牛舌尖丝状乳突结构的仿生脱粒齿形设计与试验

付君^{1,2} 张屹晨^{1,3} 陈志^{1,2} 任露泉^{1,3} 程超^{1,3}

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083;

3. 吉林大学工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022)

摘要:为解决小麦机械脱粒过程中脱净率低的问题,以牛舌尖表面丝状乳突结构为仿生原型,开展了小麦仿生脱粒齿形设计与试验。对牛舌尖表面进行形貌特征观测,发现舌尖表面丝状乳突分布密度大,结构特征明显,丝状乳突的轮廓呈圆锥状,下粗上细,整体相对粗壮,尖端呈半球形,与牛舌表面呈 $35^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 夹角,向口腔方向倾斜。构建“乳突-物料”接触工作界面,包括完全分离、初始接触、乳突插入物料及完全接触4个过程。基于丝状乳突结构特征参数,构建仿生齿形模型,进行单仿生齿形脱粒仿真试验,得到单仿生齿形脱粒最优参数组合:放大比例为2.5、行进速度为15 mm/s、倾角为 38° 、接触位置为齿形全高度的0.2倍处、材料为Q345碳钢。设计了仿生脱粒齿形试验部件及台架,进行仿生脱粒齿形正交试验,并对脱粒过程进行摄像分析。结果表明,仿生脱粒齿形试验部件的脱粒性能良好,脱净率介于97.5%~99.5%之间;最优结构参数组合为:放大比例2.565、倾角 39.8° 、脱粒间隙9.11 mm。

关键词:小麦;机械脱粒;黄牛舌尖;丝状乳突;仿生齿形;脱净率

中图分类号: S225.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)07-0167-10

Bionic Design and Experiment of Threshing Tooth Based on Structure of Cattle Apex Tongue Filiform Papillae

FU Jun^{1,2} ZHANG Yichen^{1,3} CHEN Zhi^{1,2} REN Luquan^{1,3} CHENG Chao^{1,3}

(1. College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

3. Key Laboratory of Bionic Engineering, Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: Threshing is an important working operation in wheat harvesting process. However, low threshed rate is an important problem restricting threshing operation, so it is urgent to innovate threshing mechanism and improve threshing parts. Cattles were typical ruminants and their tongues provided a natural biological model for bionic threshing. The filiform papillae was observed on the surface of the tongue tip of cattle by scanning electronic microscope. The distribution density of filiform papillae was large, and its structural characteristics were obvious. Its outline was conical, and its tip was hemispherical. The filiform papillae was inclined and the inclination angle was $35^{\circ} \sim 40^{\circ}$. The “papillae-material” contact working interface was constructed, including four working steps of complete separation, initial contact, papillae-material insertion and complete contact. Based on structural characteristic parameters of filiform papillae, the bionic tooth model was constructed and the simulation test of bionic tooth threshing was carried out. The optimal combination of parameters for bionic tooth threshing was obtained. The optimal combination was 2.5 times magnify ratio, 15 mm/s movement speed, 38° inclination angle, contact position for 0.2 times the height of tooth form the whole place, Q345 material. The bionic tooth threshing bench test was carried out and the threshing process was analyzed by camera. The regression model and response surfaces were established by orthogonal test. Response surface analysis showed that the threshing performance of bionic tooth was good, and the threshed rate was ranged from 97.5% to 99.5%. The optimal structure parameter combination of bionic tooth was obtained. The magnify times was 2.565, the inclination angle was 39.8° , and the threshing clearance was 9.11 mm.

Key words: wheat; mechanical threshing; tongue apex of cattle; filiform papillae; bionic tooth; threshed rate

收稿日期: 2019-03-12 修回日期: 2019-05-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0700302)

作者简介: 付君(1983—),男,副教授,博士生导师,主要从事仿生收获技术与装备研究,E-mail: fu_jun@jlu.edu.cn

通信作者: 陈志(1955—),男,研究员,博士生导师,主要从事全价值收获技术与装备研究,E-mail: caamschen@126.com

0 引言

目前,我国小麦机械化收获技术发展迅速,脱粒是小麦机械化收获的重要组成部分,然而,低脱净率和高损失率等问题长期制约小麦脱粒质量的提升^[1-3]。因此,创新小麦机械脱粒原理、优化小麦脱粒部件是实现小麦机械化收获降损增效的必要途径。

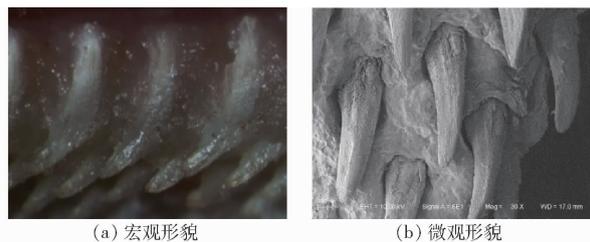
仿生学是一门将生命科学与工程技术有机融合的新学科^[4],仿生学的发展与应用为农机装备关键零部件的设计及优化提供了新理念,近年来在农业工程领域应用较为广泛^[5-19]。目前,利用仿生学原理解决粮食机械化脱粒中低脱净率和高损失率等难题的研究较少,其中仿生玉米脱粒研究较为典型,李心平等^[20-23]受鸡啄食玉米果穗的启发,提出了“先离散后脱粒”的仿生脱粒方法,设计了仿生鸡喙玉米脱粒离散辊,玉米种子脱粒试验表明,仿生脱粒可有效降低籽粒损伤率,提高脱净率。

黄牛是典型的反刍动物,小麦等谷物是黄牛的食物来源之一。黄牛摄取谷物时,依靠舌尖的卷曲实现对物料的摄入功能,舌尖与物料接触时,舌尖表面的丝状乳突能够插入物料表面,引起物料变形、生成裂纹并失稳扩张,最终导致物料表面局部断裂、分离^[24]。本文根据黄牛舌部对小麦优异的脱粒性能,采用黄淮海地区种植的“济麦20”小麦,以牛舌舌尖表面乳突结构为仿生原型,构建仿生脱粒接触界面,设计并优化仿生小麦脱粒齿形,以解决小麦机械脱粒技术难题。

1 牛舌乳突仿生原理

1.1 舌尖丝状乳突形貌特征

为提取牛舌舌尖乳突结构特征,利用体视显微镜(Stereo Discovery V12)和扫描电镜(ZEISS EVO 18)对牛舌舌尖表面进行宏观和微观形貌观测。试验所用黄牛品种为西门塔尔牛。试验时,将新鲜离体牛舌放入浓度为75%的酒精中浸泡2h,去掉其表面污垢,用冷风吹干,利用体视显微镜观察舌尖宏观形貌,结果如图1a所示。完成上述宏观形貌观测后,将舌尖切成方块状试样,尺寸为10mm×10mm,首先,利用浓度为0.1mol/L的磷酸盐缓冲剂对试样进行冲洗,然后,利用质量分数为2.5%的戊二醛对试样固定6h,再次利用磷酸盐缓冲剂冲洗试样2次,最后,用质量分数为1%的四氧化锇进行二次固定1h,用丙酮进行脱水处理。试样制备完成后,将其放入扫描电镜的高压密闭容器中进行脱水、喷金,舌尖丝状乳突微观形貌如图1b所示。



(a) 宏观形貌

(b) 微观形貌

图1 舌尖丝状乳突形貌观测结果

Fig. 1 Morphology observation of filiform papillae on tongue apex

由图1a可以看出,舌尖部位乳突分布密度大,乳突结构特征明显,丝状乳突与牛舌表面呈 $35^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 夹角,向口腔方向倾斜;由图1b可以看出,丝状乳突轮廓呈圆锥状,下粗上细,整体相对粗壮,尖部呈半球形,丝状乳突周围环绕一条较深的、呈不规则圆形的沟;综合分析可知,牛在摄食过程中,主要依靠舌尖的卷曲与旋转摄入物料,舌尖表面密布的丝状乳突均为角质化的上皮组织^[25],黄牛摄取的物料绝大部分为植物材料,当舌尖与物料接触时,角质化的丝状乳突保持结构和位置不变,物料被丝状乳突挤压变形,舌尖与物料相互接触时,丝状乳突可近似简化为刚性杆件,物料近似简化为柔性块状实体,两种材料不同、刚度不同的物体构成的“乳突-物料”接触工作界面为仿生脱粒研究提供了天然的生物模型。

1.2 接触界面特性分析

图2为“乳突-物料”接触界面形成示意图,包括完全分离、初始接触、乳突插入物料及完全接触4个过程^[24]。由图2a可以看出,完全分离阶段即初始摄食时,乳突与物料之间不接触,不产生任何作用力,物料表面的凸峰和凹谷未变化。由图2b可以看出,初始接触阶段即摄食活动开始进行时,物料表面的凸峰与乳突顶部最先接触,并在Y方向发生相对运动,相对坚硬乳突挤压并进入物料表面凹谷,在挤压力的作用下使相邻凸峰弯曲,物料在相对运动和挤压力作用下在Y方向产生变形量 H_1 ,此时界面主要由舌尖乳突的顶部、物料表面变形的凸峰和凹谷构成。由图2c可以看出,乳突插入物料阶段即摄食活动继续进行时,舌尖持续向物料施加作用力,使物料表面的已变形区域产生“位错塞积”变形效应^[26],物料表面的凹谷区域产生应力集中,生成裂纹并失稳扩张,导致物料凹谷区域产生局部断裂,加快乳突向物料表面的插入,当物料表面的部分凸峰与乳突基底面接触时,物料与舌尖在Y方向上发生变形量 H_2 ,此时界面主要由乳突根部、物料的部分凹谷和凸峰构成。由图2d可以看出,当物料表面上的凸峰和凹谷完全消失时,物料内部与乳突基底面完

全接触,物料在 Y 方向发生微小变形量 H_3 ,此时界面主要由物料内部和乳突基底面构成,物料的弹

性变形施加在乳突表面,增加物料和乳突的连接强度。

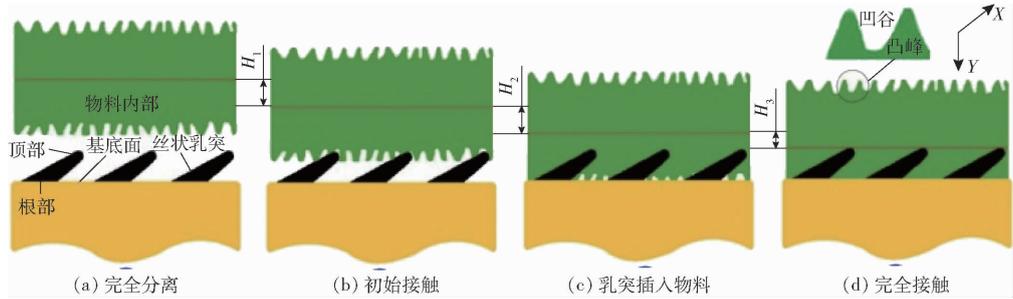


图 2 乳突与物料接触界面形成示意图

Fig. 2 Schematics of contact interface between filiform papillae and material

根据上述分析可知,“乳突-物料”接触界面中包含了乳突、乳突基底和物料。乳突倾角对物料接触变形有直接影响,倾角越小,物料法向变形量、接触半径和接触中心压力越小。乳突顶部的球形结构可增加乳突与物料的接触面积,降低对物料表面的应力损伤。乳突倾角和球形顶部结构共同作用,可有效降低物料的变形量和应力集中,达到降低物料表面机械损伤的目的。牛舌表面的乳突相对物料表现为刚性材料特征,当舌尖与物料接触时,刚性乳突能够加速物料表面的裂纹产生、裂纹扩展,直至形成完全接触。乳突的轮廓呈上细下粗的锥形,在接触初始阶段能够以较大的应力使物料产生裂纹。乳突倾角能够与牛舌的卷曲运动互相配合,当牛舌处于最低摄食位置时,乳突恰好处于水平状态,既能使牛舌与最低位置的物料接触,又能使刚性乳突以最大的作用力插入物料内部,从而实现对低位物料的高效固定。乳突在舌尖表面的分布密度最大,密布的乳突产生较大的机械作用力,促进物料与其基体发生拉伸变形,实现对物料的高效断裂和高效摄取。乳突长度和倾角相互配合,增加界面的粗糙度,使物料获得较小的粘着力,增强物料在高位状态与舌尖的分离效率,提高物料卸载速度。

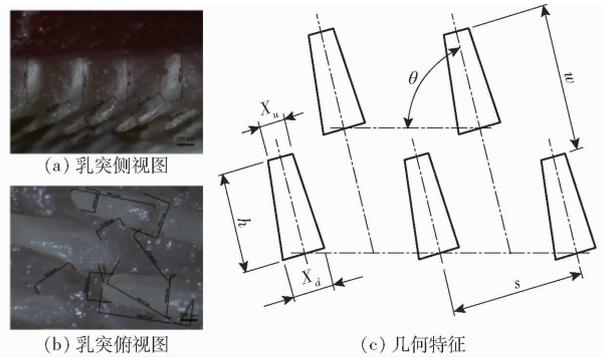


图 3 仿生齿形模型构建原理图

Fig. 3 Schematics of bionic tooth model construction

形在横向和纵向的最大间距需要满足

$$\begin{cases} e < 1.38K < N \\ M < 1.68K < N \end{cases} \quad (1)$$

式中 M ——籽粒最大长度, mm
 N ——麦穗单元的最小宽度, mm
 K ——放大比例

通过对小麦籽粒和麦穗统计,可得 M 取值为 3.25 mm, N 取值为 6 mm,代入式(1)计算可得 $2.26 < K < 3.57$,考虑机械加工精度,选择齿形放大比例 K 分别为 1.0、1.5、2.0、2.5、3.0、3.5,根据放大比例和牛舌丝状乳突的基本形貌特征参数,建立仿生齿形模型参数如表 1 所示。

表 1 仿生齿形模型参数

Tab. 1 Bionic tooth model parameters

放大比例 K	下直径 X_d /mm	上直径 X_u /mm	高度 h /mm	横向间距 s /mm	纵向间距 w /mm	倾角 $\theta/(^\circ)$
1.0	0.94	0.55	2.10	1.38	1.68	38 ± 2.01
1.5	1.41	0.83	3.15	2.07	2.52	38 ± 2.01
2.0	1.88	1.10	4.20	2.76	3.36	38 ± 2.01
2.5	2.35	1.38	5.25	3.45	4.20	38 ± 2.01
3.0	2.82	1.65	6.30	4.14	5.04	38 ± 2.01
3.5	3.29	1.93	7.35	4.83	5.88	38 ± 2.01

2 仿生齿形模型构建及仿真

2.1 仿生齿形模型构建

基于牛舌舌尖表面丝状乳突形貌特征以及“乳突-物料”接触界面特性分析,进行仿生齿形几何模型构建及仿真,如图 3 所示,仿生齿形模型构建以舌尖丝状乳突的几何特征为原理。

通过对丝状乳突的几何结构特征测试可知,丝状乳突下直径 X_d 为 0.94 mm,上直径 X_u 为 0.55 mm,高度 h 为 2.10 mm,齿形齿与齿之间的横向间距 s 为 1.38 mm,纵向间距 w 为 1.68 mm,倾角 θ 为 38° 。根据脱粒功能要求,麦穗应受到脱粒齿的有效机械作用力,并保证籽粒可自由下落至收集区,故仿生齿

2.2 小麦生物力学特性

小麦主要由麦穗和茎秆组成(图 4a),其中,麦

穗由麦穗单元和穗轴构成(图4b)。麦穗单元包含籽粒和两层颖壳(含麦芒),颖壳紧密包裹籽粒,当麦穗单元与穗轴分离时,籽粒自由脱粒。在分析小麦几何特征时,可将颖壳和籽粒视为一体,从而简化成图4c和图4d的几何模型。从正面看,麦穗单元分为3瓣,并与穗轴形成结点 O ,麦穗单元同向、有序叠加在穗轴上(图4c);从侧面看,穗轴由9~10节上宽下窄、上厚下薄的茎秆连接,与麦穗单元呈一定距离偏离,麦穗单元交错、有序排布在穗轴两侧(图4d)。

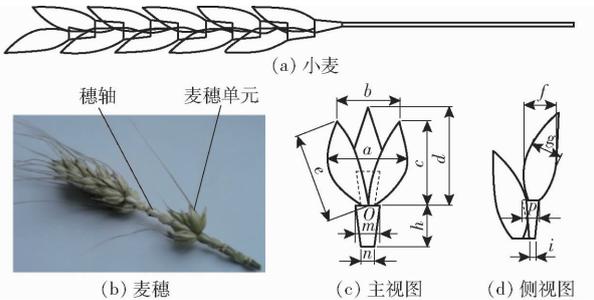


图4 小麦几何结构示意图

Fig.4 Geometric structure diagrams of wheat

由图4可知,麦穗单元的正面和侧面均相对于穗轴向外张开,并形成规则排列的接触表面;麦穗单元均通过结点 O 与穗轴连接,形成铰接固定方式,为优化脱粒界面、创新脱粒机理奠定了力学基础。利用机械式静摩擦试验台测量小麦摩擦因数,利用QT-1186型电子万能试验机测试测量麦穗拉伸断裂力学特性^[27],结合激光扫描仪测量所得麦穗几何尺寸进行计算,得到其弹性模量和泊松比。

2.3 小麦物理模型

确定麦穗进行特征参量,确定麦穗几何结构,利用游标卡尺对麦穗进行手工测绘,测量精度为0.01 mm。测绘品种为山东省农业科学院研发的高产冬小麦“济麦20号”,麦穗净长度为80 mm以上,麦穗总长为140~160 mm,所用小麦平均含水率为22%。取10组小麦重复测量10次,得到麦穗单元和穗轴的几何特征如表2、3所示。

2.4 单仿生齿形脱粒仿真

为了进一步分析仿生齿形与麦穗单元的接触应力,利用有限元分析软件ABAQUS进行单仿生齿形脱粒运动仿真,根据表2、3建立麦穗单元几何特征;仿生齿形与单麦穗单元的接触是典型的非线性边界条件,并且界面接触面积和应力随外载变化,故选择ABAQUS软件中的Standard求解器;仿真分析模型如图5所示,麦穗单元和仿生齿形的材料属性如表4所示。

如图5所示,根据材料属性特征,将麦穗单元视

表2 麦穗单元几何特征

Tab.2 Geometric features of wheat ear unit mm

序号	中部 宽度 a	顶部 宽度 b	外侧 高度 c	中部 高度 d	外侧 长度 e	侧面 宽度 f	侧面 厚度 g
1	13.10	9.40	9.70	11.50	11.20	3.70	5.20
2	12.56	8.60	9.22	12.96	8.74	3.84	5.10
3	14.90	9.70	9.80	11.60	10.70	4.60	4.82
4	12.96	8.70	7.46	11.48	8.64	4.40	4.50
5	13.60	9.50	10.30	11.10	10.50	4.82	4.30
6	14.56	9.70	10.10	11.58	10.40	3.54	4.50
7	12.80	9.40	10.70	12.10	9.90	3.20	5.30
8	12.30	8.80	9.80	11.38	10.10	4.10	4.40
9	14.70	9.62	10.30	11.40	10.50	3.34	4.20
10	14.20	9.70	8.60	11.70	9.42	4.32	4.14
平均值	13.57 ± 0.96	9.13 ± 0.44	9.60 ± 0.96	11.68 ± 0.52	10.01 ± 0.84	3.99 ± 0.55	4.65 ± 0.43

表3 穗轴几何特征

Tab.3 Geometric features of ear axis mm

序号	高度	宽度(上)	宽度(下)	厚度(上)	厚度(下)
1	2.20	3.50	1.40	4.47	1.08
2	2.20	3.20	1.30	4.59	0.70
3	2.16	3.54	2.30	4.24	1.10
4	1.80	3.60	2.10	4.68	0.90
5	2.04	3.62	2.20	4.29	1.04
6	1.90	4.02	2.10	4.29	0.90
7	1.76	3.10	2.10	4.84	0.80
8	1.78	2.90	1.50	3.51	1.10
9	2.30	3.30	1.90	4.91	0.90
10	2.26	4.10	2.10	4.16	0.80
平均值	2.04 ± 0.20	3.49 ± 0.38	1.90 ± 0.36	4.40 ± 0.40	0.93 ± 0.14

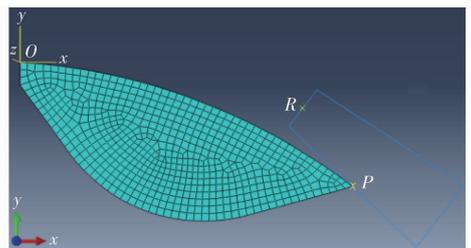


图5 仿真分析接触示意图

Fig.5 Diagram of simulation analysis contact

表4 麦穗和仿生齿形材料属性

Tab.4 Material properties of wheat ear and bionic tooth

参数	小麦	Q235 碳钢	Q345 碳钢
弹性模量/MPa	95	210 000	206 000
泊松比	0.233	0.300	0.280

为可变形体,将单仿生齿形视为解析刚体,通过仿真分析优化单仿生齿形的结构和界面接触方式,故将麦穗单元和单仿生齿形的接触模型视为二维模型^[28],并在二维平面环境下创建麦穗单元和单仿生

齿形部件。创建材料属性和界面后,对麦穗单元指派截面,对仿生齿形创建参考点 R 、接触点 P 和结点 O ,装配麦穗单元和仿生齿形,仿真过程分为 2 步骤:①使单仿生齿形与麦穗单元缓慢接触。②使麦穗单元的约束点发生连续性应力变化。

将二者的相互作用方式选择为表面-表面,将麦穗单元与单仿生齿形的接触表面摩擦因数设为 0.977。对单仿生齿形的参考点 R 施加匀速直线运动,将麦穗单元的右上结点设置为约束点,使麦穗单元受力后围绕结点发生转动。当麦穗单元划分网格后,对模型进行仿真分析。随着麦穗单元围绕结点的转动,其从穗轴上被掰下,实现籽粒脱落。

仿真试验选取仿生齿形的放大比例、倾角、弹性模量、相对速度和接触位置等 5 个参数作为试验因素,以麦穗单元结点处的最大应力为试验指标,应力越大,表明单仿生齿形对麦穗单元的脱粒作用越明显,参照文献[29]设计正交试验方案,单个仿生齿形脱粒仿真试验方案及结果如表 5 所示。

由表 5 可知,试验因素对节点处最大应力的影响程度为大到小依次为:放大比例、接触位置、弹性模量、倾角、速度;最优组合为 $A_4B_3C_1D_2E_2$,即放大比例为 2.5,速度为 15 mm/s,倾角为 38° ,接触位置为齿形全高度的 0.2 倍处,材料为 Q345 碳钢。根据上述仿真结果,利用最优组合重新设置仿真试验环境,再次进行单仿生齿形脱粒仿真试验,试验方法与前述仿真方法一致,麦穗单元的脱粒过程应力变化如图 6 所示。

由图 6 可知,单仿生齿形与麦穗单元作用初期,麦穗单元的结点 O 及其与仿生齿形的接触点 P 是应力集中区;随着麦穗单元的受力旋转,接触点 P 周围的应力集中逐渐消失,结点 O 周围的应力集中逐渐加强。麦穗单元旋转过程中,结点 O 始终是应力最大区域,麦穗单元的内部没有受到较大应力。由此可知,单仿生齿形对麦穗单元的机械作用,能够转换成麦穗单元结点 O 处的集中应力,促进麦穗单元高效脱落。麦穗单元脱落过程中,结点 O 处的应力集中区域逐渐扩大,当仿生齿形接近麦穗单元中部时,麦穗单元的应力集中区域沿结点 O 面向接触界面呈长条状;当单仿生齿形接近麦穗单元上部时,麦穗单元的应力集中区域沿结点 O 处向两侧扩展,增加麦穗单元的脱落速度。

图 7 为麦穗单元结点 O 处的最大应力随转动角的变化曲线。由图 7 可知,单仿生齿形与麦穗单元接触过程中,结点 O 的应力呈波动状态,使麦穗单元承受交变应力。当麦穗单元与水平面呈夹角 45.29° 时,即图 6h 中麦穗单元的位置,结点 O 处的

表 5 单仿生齿形仿真试验方案及结果

Tab.5 Test analysis schemes and results of single bionic tooth

试验编号	放大比例 A	速度 $B/$ ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$)	倾角 $C/$ ($^\circ$)	接触位置 D	弹性模量 E/MPa	最大应力 y/Pa
1	1.0	5	38	0.5h	21.0	30.66
2	1.0	10	38	0.2h	20.6	89.80
3	1.0	15	52	0.2h	21.0	48.57
4	1.0	20	52	0.5h	20.6	42.25
5	1.5	5	52	0.2h	20.6	21.68
6	1.5	10	52	0.5h	21.0	34.09
7	1.5	15	38	0.5h	20.6	68.28
8	1.5	20	38	0.2h	21.0	31.83
9	2.0	5	38	0.5h	20.6	120.50
10	2.0	10	38	0.2h	21.0	80.35
11	2.0	15	52	0.2h	20.6	131.10
12	2.0	20	52	0.5h	21.0	40.74
13	2.5	5	52	0.2h	21.0	130.50
14	2.5	10	52	0.5h	20.6	76.81
15	2.5	15	38	0.5h	21.0	32.31
16	2.5	20	38	0.2h	20.6	143.00
17	3.0	5	38	0.5h	20.6	42.90
18	3.0	10	38	0.2h	21.0	72.25
19	3.0	15	52	0.2h	20.6	80.90
20	3.0	20	52	0.5h	21.0	47.16
21	3.5	5	52	0.2h	21.0	111.30
22	3.5	10	52	0.5h	20.6	40.65
23	3.5	15	38	0.5h	21.0	125.72
24	3.5	20	38	0.2h	20.6	95.63
\bar{y}_{j1}	52.82	74.59	77.77	58.51	65.46	
\bar{y}_{j2}	38.97	65.66	67.15	86.41	79.46	
\bar{y}_{j3}	93.17	81.15				
\bar{y}_{j4}	95.66	66.77				
\bar{y}_{j5}	60.80					
\bar{y}_{j6}	93.32					
R_j	56.69	15.49	10.62	27.90	14.00	
R'_j	20.98	6.97	7.54	19.81	9.94	
优水平	A_4	B_3	C_1	D_2	E_2	
主次因素			$A、D、E、C、B$			

应力达到最大值,为 151.7 Pa,此值大于表 5 中的任意应力,结果表明,在最优组合仿真试验条件下,单仿生齿形对麦穗单元的机械作用效果十分显著。

3 仿生齿形脱粒试验

3.1 试验部件

根据仿生齿形模型构建原理及仿真试验结果,设计仿生脱粒齿形试验部件,并开展正交优化试验。仿生脱粒齿形试验部件设计如图 8 所示,利用表 1 仿生齿形模型参数,根据不同试验要求,选取合适的齿形放大比例等相关参数,设计仿生齿形零件

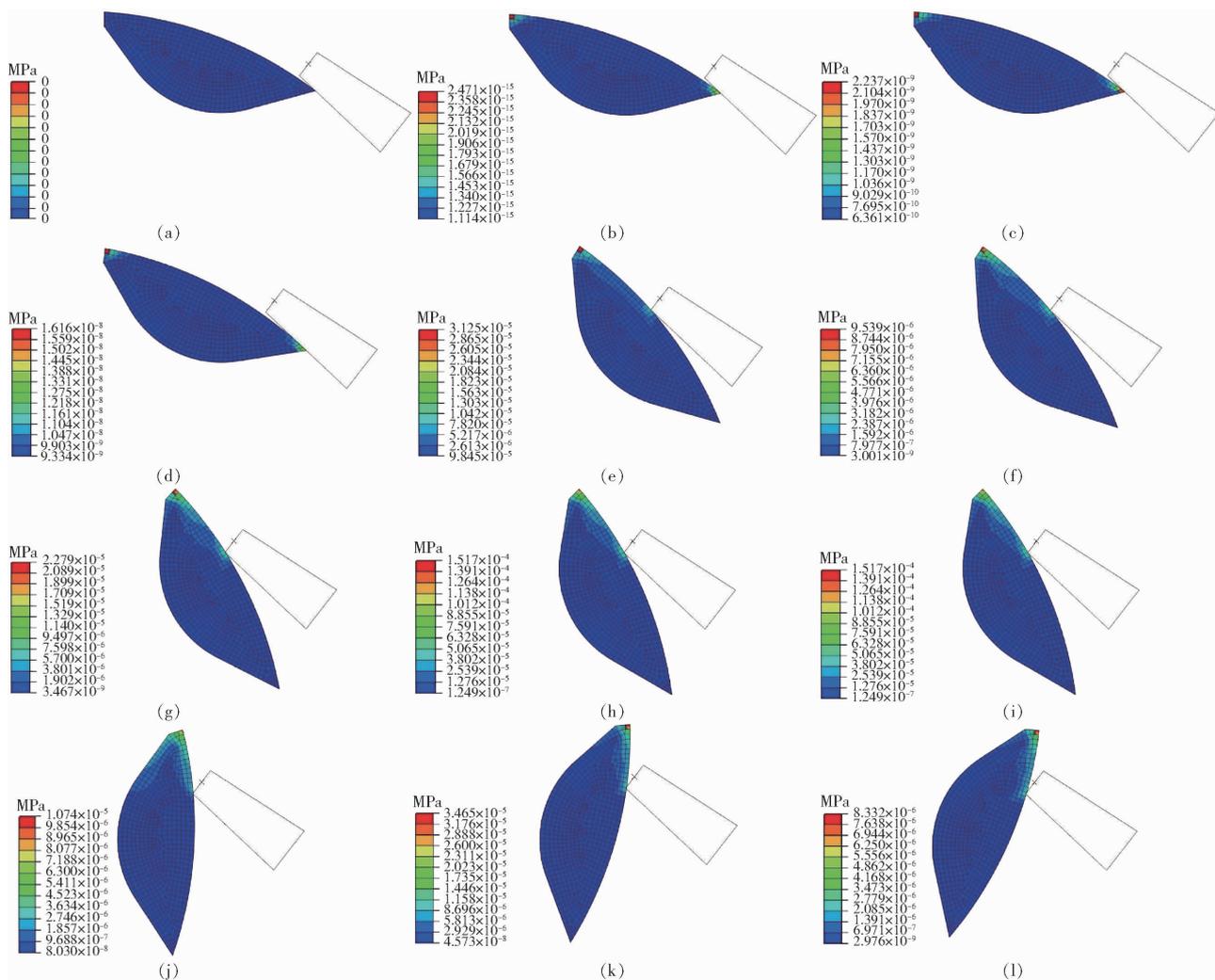


图6 单仿生齿形脱粒应力云图

Fig. 6 Stress nephograms of single bionic tooth threshing

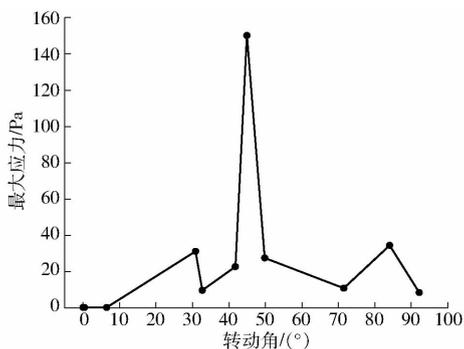


图7 单仿生齿形脱粒最大应力变化曲线

Fig. 7 Maximum stress variation law of single bionic tooth threshing

(图8a),由仿生齿形零件均匀阵列组成仿生脱粒齿形试验部件(图8b),利用夹具将仿生齿形零件固定,仿生齿形整体倾斜向上,形成仿生齿形脱粒表面,完成装配的仿生脱粒齿形试验部件如图9所示。

3.2 仿生脱粒齿形试验台

仿生脱粒齿形试验台如图10所示,主要由机架、异步电机(100 YY-250/4型)、驱动系统和仿生

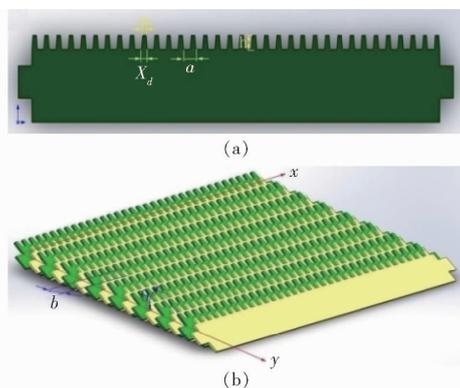


图8 仿生脱粒齿形试验部件设计

Fig. 8 Bionic threshing tooth experiment part design

脱粒齿形试验部件等组成;机架由矩形钢管搭建而成;驱动系统为偏置曲柄滑块机构,曲柄通过连杆带动滑杆在滑轨上往复直线运动;下仿生脱粒齿形试验部件通过立柱固定在滑杆上,上仿生脱粒齿形试验部件安装在机架上方,可以通过调整螺纹套调整其安装高度。脱粒作业时,麦穗位于上、下仿生脱粒齿形试验部件之间,上仿生脱粒齿形试验部件固定不动,下仿生脱粒齿形试验部件作往复直线运动,二



图 9 仿生脱粒齿形试验部件实物

Fig. 9 Bionic threshing tooth test part

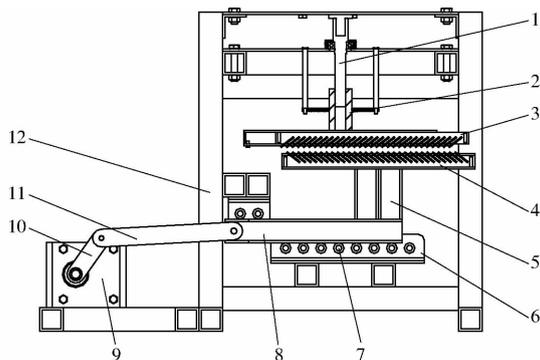


图 10 仿生脱粒齿形试验台示意图

Fig. 10 Bionic threshing tooth test bed

1. 螺纹杆 2. 螺纹套 3. 上仿生脱粒齿形试验部件 4. 下仿生脱粒齿形试验部件 5. 立柱 6. 滑轨 7. 滚子 8. 滑杆 9. 电机 10. 曲柄 11. 连杆 12. 机架

者的仿生齿形构成仿生揉搓脱粒运动副,麦穗在其中受到揉搓脱粒作用。

3.3 二次回归正交组合设计及分析

二次回归正交组合试验选取仿生脱粒齿形的放大比例、倾角和脱粒间隙作为正交试验影响因素,以麦穗脱净率为试验指标,试验采用二次回归正交组合设计方法^[30],试验因素编码如表 6 所示,正交试验方案如表 7 所示,表中 X_1 、 X_2 、 X_3 为试验因素编码值。试验在吉林大学工程仿生教育部重点实验室进行,试验对象为“济麦 20 号”冬小麦,含水率为 22%,为防止茎秆对仿生脱粒齿形麦穗脱粒试验产生干扰,试验用麦穗将茎秆全部去掉。根据谷物收获机喂入量定义^[31]

$$q = \mu LM'p \quad (2)$$

式中 μ ——作物性质系数,kg/m
 L ——上仿生脱粒齿形试验部件宽度,m
 M' ——仿生齿形零件数量
 p ——上仿生脱粒齿形试验部件往复运动频率,Hz

确定本试验喂入量为 0.45 kg/s。

根据表 6 试验因素,选用 Q345 碳钢,加工 5 种放大比例仿生脱粒齿形试验部件,加工 5 种倾角仿生齿形夹具,通过螺纹套调节脱粒间隙,每组试验部件加工 2 个,分别安装在上、下 2 层,且仿生脱粒齿

形的朝向相同,试验前调整电机转速,使仿生脱粒齿形以最大 15 mm/s 的速度作水平直线往复运动。

表 6 试验因素编码

Tab. 6 Test factors and coding

编码	因素		
	放大比例 x_1	倾角 $x_2/(^\circ)$	脱粒间隙 x_3/mm
1. 353	3. 000	52. 0	10. 50
1	2. 935	50. 2	10. 29
0	2. 750	45. 0	9. 70
-1	2. 565	39. 8	9. 11
-1. 353	2. 500	38. 0	8. 90

表 7 仿生脱粒齿形试验方案及结果

Tab. 7 Test scheme and results of bionic threshing tooth

编号	因素			脱净率 $Y/\%$
	X_1	X_2	X_3	
1	1	1	1	96. 91
2	1	1	-1	98. 72
3	1	-1	1	98. 52
4	1	-1	-1	99. 11
5	-1	1	1	98. 81
6	-1	1	-1	99. 15
7	-1	-1	1	99. 18
8	-1	-1	-1	99. 32
9	1. 353	0	0	97. 42
10	-1. 353	0	0	98. 25
11	0	1. 353	0	97. 52
12	0	-1. 353	0	98. 57
13	0	0	1. 353	96. 43
14	0	0	-1. 353	99. 21
15	0	0	0	98. 05
16	0	0	0	97. 86
17	0	0	0	98. 27

根据表 7 中正交试验结果,进行三元二次回归拟合计算,得到仿生脱粒齿形试验指标脱净率 Y 关于放大比例 x_1 、倾角 x_2 和脱粒间隙 x_3 的回归模型为

$$Y = 1.4055 - 0.0760x_1 - 0.0011x_2 - 0.0416x_3 - 0.0019x_1x_2 - 0.0220x_1x_3 - 0.0006x_2x_3 + 0.0645x_1^2 + 0.000124x_2^2 + 0.0061x_3^2 \quad (3)$$

回归模型方差分析结果如表 8 所示。

由表 8 可知,回归模型的显著性水平 P 为 0.01,失拟项显著性水平 P 为 0.25,结果表明回归模型显著性水平高,回归拟合效果优。根据方差 F 可知,试验因素一次项对仿生脱粒齿形脱净率的影响程度由大到小依次为:脱粒间隙、放大比例、倾角;试验因素交互项对仿生脱粒齿形脱净率的影响程度由大到小依次为:放大比例和脱粒间隙、放大比例和倾角、倾角和脱粒间隙;试验因素二次项对仿生脱粒齿形脱净率的影响程度由大到小依次为:倾角、放大

表8 脱净率回归模型方差分析结果

Tab.8 Variance analysis results of threshing performance regression model

指标	S	F	P
模型	9.6482×10^{-4}	12.74	0.01
x_1	1.6025×10^{-4}	38.06	0.05
x_2	1.3451×10^{-4}	31.95	0.05
x_3	3.7822×10^{-4}	89.38	0.05
x_1x_2	2.6645×10^{-5}	6.33	0.25
x_1x_3	4.608×10^{-5}	10.95	0.10
x_2x_3	2.5205×10^{-5}	5.99	0.25
x_1^2	3.2667×10^{-5}	7.76	0.25
x_2^2	7.5436×10^{-5}	17.92	0.10
x_3^2	3.0286×10^{-5}	7.19	0.25
失拟项	4.71×10^{-5}	2.24	0.25

比例、脱粒间隙；综合来看，试验因素一次项对仿生脱粒齿形脱净率的影响程度远大于二次项和交互项。试验因素最优组合为：放大比例 2.565、倾角 39.8° 、脱粒间隙 9.11 mm，结合回归模型(3)，可得回归模型双因素响应面如图 11 所示，仿生脱粒齿形的脱粒性能良好，根据响应面变化趋势，脱净率介于 $97.5\% \sim 99.5\%$ 之间，放大比例和脱粒间隙 2 个试验因素间交互作用较为显著，当各试验因素的水平较低时，试验因素的二次作用较为显著。

图 12 为仿生脱粒齿形高速摄像过程显著性脱粒位移变化，仿生脱粒齿形与每个麦穗单元接触时，倾斜的仿生齿形插入麦穗单元的间隙(图 12a ~ 12d)，相对运动促使仿生齿形对麦穗单元形成微观

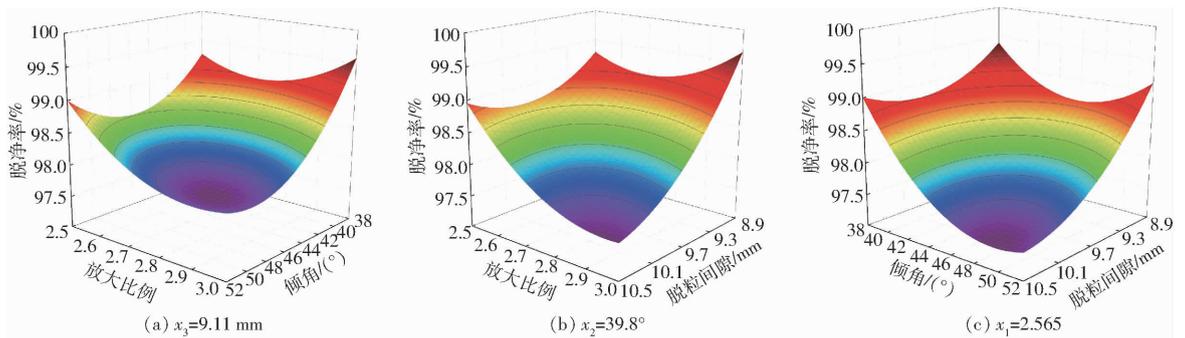


图 11 回归模型双因素响应面

Fig. 11 Two factors response surfaces of regression model

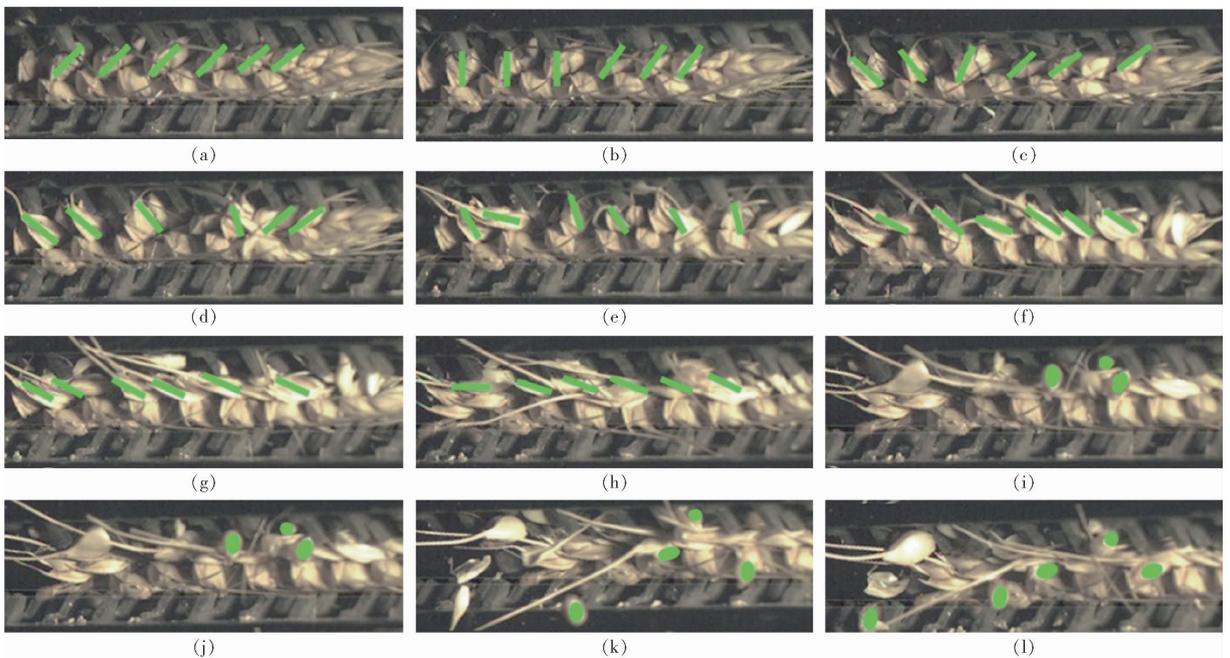


图 12 仿生脱粒齿形高速摄像过程

Fig. 12 Bonitooth threshing high speed camera process

力矩作用，麦穗单元相对穗轴发生摆动(图 12e ~ 12h)，摆动过程中籽粒与穗轴结点发生断裂，从而与穗轴分离(图 12i ~ 12l)；随着仿生齿形与麦穗的相对运动，首次接触时没有完成脱粒的麦穗单元与后续仿生齿形继续接触，使其再次发生摆动，直至

脱落。

4 结论

(1) 对牛舌舌尖表面进行形貌特征观测，发现舌尖表面丝状乳突分布密度大，结构特征明显，丝状

乳突的轮廓呈圆锥状,下粗上细,整体相对粗壮,尖部呈半球形,与牛舌表面呈 $35^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 夹角,向口腔方向倾斜。

(2)构建“乳突-物料”接触工作界面,包括完全分离、初始接触、乳突插入物料及完全接触4个过程,分析各工作过程乳突作业原理,为仿生脱粒研究提供了天然的生物模型。

(3)以丝状乳突结构为仿生原型,构建仿生齿形模型,进行单仿生齿形脱粒仿真试验,得到单仿生

齿形脱粒的最优参数组合:放大比例为2.5、行进速度为15 mm/s、倾角为 38° 、接触位置为齿形全高度的0.2倍处、材料为Q345碳钢。

(4)设计仿生脱粒齿形试验部件及台架,进行仿生脱粒齿形正交试验,并对脱粒过程进行摄像分析。试验表明,仿生脱粒齿形试验部件的脱粒性能良好,脱净率介于97.5%~99.5%之间,最优结构参数组合为:放大比例2.565、倾角 39.8° 、脱粒间隙9.11 mm。

参 考 文 献

- [1] 高利伟,许世卫,李哲敏,等.中国主要粮食作物产后损失特征及减损潜力研究[J].农业工程学报,2016,32(23):1-11.
GAO Liwei, XU Shiwei, LI Zhemin, et al. Main grain crop postharvest losses and its reducing potential in China[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(23): 1-11. (in Chinese)
- [2] HARRISON H P. Grain separation and damage of an axial-flow combine[J]. Canadian Agricultural Engineering, 1992, 34(1): 49-53.
- [3] 徐立章,李耀明,王显仁.谷物脱粒损伤的研究进展分析[J].农业工程学报,2009,25(1):303-307.
XU Lizhang, LI Yaoming, WANG Xianren. Research development of grain damage during threshing[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(1): 303-307. (in Chinese)
- [4] 任露泉,梁云虹.仿生学导论[M].北京:科学出版社,2016.
- [5] 贾洪雷,郑健,赵佳乐,等.仿蚯蚓运动多功能开沟器设计及参数优化[J].农业工程学报,2018,34(12):62-71.
JIA Honglei, ZHENG Jian, ZHAO Jiale, et al. Design and parameter optimization of earthworm-like multi-function opener[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(12): 62-71. (in Chinese)
- [6] 赵淑红,刘宏俊,谭贺文,等.仿旗鱼头部曲线型开沟器设计与性能试验[J].农业工程学报,2017,33(5):32-39.
ZHAO Shuhong, LIU Hongjun, TAN Hewen, et al. Design and performance experiment of opener based on bionic sailfish head curve[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 32-39. (in Chinese)
- [7] 杨玉婉,佟金,马云海,等.基于鼯鼠多趾结构特征的仿生切土部件刀片设计与试验[J/OL].农业机械学报,2018,49(12):122-128.
YANG Yuwan, TONG Jin, MA Yunhai, et al. Design and experiment of bionic soil-cutting blade based on multi-claw combination of mole rat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 122-128. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181215&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.015. (in Chinese)
- [8] 马云海,裴高院,王虎彪,等.挖掘机獾爪齿趾仿生斗齿提高其入土性能仿真与试验[J].农业工程学报,2016,32(18):67-72.
MA Yunhai, PEI Gaoyuan, WANG Hubiao, et al. Simulation and experiment of badger claw toe bionic excavator bucket tooth for improving performance of digging and cutting[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(18): 67-72. (in Chinese)
- [9] 佟金,荣宝军,马云海,等.仿生棱柱几何结构表面的土壤磨料磨损[J].摩擦学学报,2008,28(3):193-197.
TONG Jin, RONG Baojun, MA Yunhai, et al. Abrasive wear of the biomimetic ridge surfaces against soil[J]. Tribology, 2008, 28(3): 193-197. (in Chinese)
- [10] 张金波,佟金,马云海.仿生肋条结构表面深松铲刃的磨料磨损[J].吉林大学学报(工学版),2015,45(1):174-180.
ZHANG Jinbo, TONG Jin, MA Yunhai. Abrasive wear characteristics of subsoiler tines with bionic rib structure surface[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2015, 45(1): 174-180. (in Chinese)
- [11] 李建桥,张广权,王颖,等.仿螃蟹步行机构及其通过性试验[J].农业工程学报,2016,32(14):47-54.
LI Jianqiao, ZHANG Guangquan, WANG Ying, et al. Bionic crab walking mechanism and its kinematic characteristics analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(14): 47-54. (in Chinese)
- [12] 王颖,李建桥,张广权,等.基于多种介质的仿生步行足力学特性[J].吉林大学学报(工学版),2017,47(2):546-551.
WANG Ying, LI Jianqiao, ZHANG Guangquan. Mechanical characteristics of bionic walking foot in different media[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2017, 47(2): 546-551. (in Chinese)
- [13] 张锐,杨明明,潘润铎,等.鸵鸟足底非规则曲面形貌数学模型构建[J].农业工程学报,2015,31(增刊1):71-78.
ZHANG Rui, YANG Mingming, PAN Runduo, et al. Mathematical model establishment of irregular plantar surface of ostrich didactyl foot[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(Supp. 1): 71-78. (in Chinese)
- [14] 张锐,罗刚,薛书亮,等.沙地刚性轮构型仿生设计及牵引性能数值分析[J].农业工程学报,2015,31(3):122-128.
ZHANG Rui, LUO Gang, XUE Shuliang, et al. Bionic design of configuration of rigid wheel moving on sand and numerical

- analysis on its traction performance [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 122 - 128. (in Chinese)
- [15] 张锐, 吉巧丽, 张四华, 等. 越沙步行轮仿生设计及动力学性能仿真[J]. 农业工程学报, 2016, 32(15): 26 - 31.
ZHANG Rui, JI Qiaoli, ZHANG Sihua, et al. Bionic design and dynamics performance simulation of walking wheel to travel on sand[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(15): 26 - 31. (in Chinese)
- [16] 张锐, 吉巧丽, 杨明明, 等. 火星巡视器鼓形车轮仿生设计与性能分析[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 311 - 316.
ZHANG Rui, JI Qiaoli, YANG Mingming, et al. Bionic design and performance analysis of drum shaped wheel of Mars rover [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 311 - 316. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160841&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.041. (in Chinese)
- [17] 张永智, 左权桢, 孙少明, 等. 水田叶轮仿生增力叶片[J]. 吉林大学学报(工学版), 2008, 38(增刊2): 153 - 157.
ZHANG Yongzhi, ZUO Quancheng, SUN Shaoming, et al. Bionic propulsion blade for the paddy impeller[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2008, 38(Supp. 2): 153 - 157. (in Chinese)
- [18] 张伏, 王亚飞, 马田乐, 等. 山羊蹄底部非规则曲面仿生形貌数学模型构建及验证[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 30 - 36.
ZHANG Fu, WANG Yafei, MA Tianle, et al. Mathematical model establishment and validation of bionic irregular plantar surface of goat's hoof[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(15): 30 - 36. (in Chinese)
- [19] ZHANG Fu, WANG Wei, ZHANG Guoying, et al. Gait analysis of goat at different slopes and study on biomimetic walking mechanism[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2016, 9(3): 40 - 47.
- [20] 李心平, 李玉柱, 高吭, 等. 种子玉米籽粒仿生脱粒机理分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(2): 99 - 103.
LI Xinping, LI Yuzhu, GAO Hang, et al. Bionic threshing process analysis of seed corn kernel[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(2): 99 - 103. (in Chinese)
- [21] 李心平, 吴康, 金鑫, 等. 基于仿生脱粒的鸡喙啄取玉米果穗引起籽粒离散过程分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 34 - 40.
LI Xinping, WU Kang, JIN Xin, et al. Analysis on discrete process of kernels caused by beak pecking corn ear by simulating threshing[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(18): 34 - 40. (in Chinese)
- [22] 李心平, 马义东, 金鑫, 等. 玉米种子仿生脱粒机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(7): 97 - 101.
LI Xinping, MA Yidong, JIN Xin, et al. Design and test of corn seed bionic thresher[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(7): 97 - 101. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150715&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.07.015. (in Chinese)
- [23] 李心平, 马磊, 耿令新, 等. 玉米种子仿生脱粒机性能试验与参数优化[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 62 - 69.
LI Xinping, MA Lei, GENG Lingxin, et al. Performance test and parameter optimization of corn seed bionic thresher[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 62 - 69. (in Chinese)
- [24] FU J, QIAN Z H, REN L Q. Morphologic effects of filiform papilla root on the lingual mechanical functions of Chinese yellow cattle[J]. International Journal of Morphology, 2016, 34(1): 63 - 77.
- [25] SCALA G, MIRABELLA N, PELAGALLI G V. Morphofunctional study of the lingual papillae in cattle (*Bos taurus*) [J]. Anatomia, Histologia, Embryologia, 1995, 24(2): 101 - 105.
- [26] 万玲, 严波, 张培源. 断裂力学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- [27] 付君, 钱志辉, 尹维, 等. 小麦摩擦与拉伸性能[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(2): 501 - 507.
FU Jun, QIAN Zhihui, YIN Wei, et al. Experimental study of friction and tensile properties of wheat[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(2): 501 - 507. (in Chinese)
- [28] MIU P I, KUTZBACH H D. Modeling and simulation of grain threshing and separation in threshing units[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(1): 96 - 104.
- [29] 任露泉. 回归设计及其优化[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [30] 任露泉. 试验设计及其优化[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [31] 张强, 梁留锁. 农业机械学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2014.