

香蕉秸秆粉碎抛撒还田机仿生刀片设计与试验

张喜瑞¹ 倪世雷¹ 刘俊孝¹ 胡旭航¹ 张志富¹ 符少华²

(1. 海南大学机电工程学院, 海口 570228; 2. 海南大学信息与通信工程学院, 海口 570228)

摘要: 为解决海南省香蕉秸秆粉碎机作业过程中粉碎效果差和抛撒不均匀等问题,设计了一款具有良好秸秆粉碎性能的仿生锯齿粉碎尖刀还田机。将仿生学原理应用到粉碎刀片设计中,仿蓝鲨牙齿锯齿轮廓设计了一款仿生锯齿粉碎尖刀,通过仿真验证了仿生锯齿尖刀对香蕉秸秆的切割能力,并设计了仿生锯齿尖刀与传统粉碎刀混合使用,制定了试验方案并进行整机仿真与田间试验。利用 Fluent 软件研究了香蕉秸秆粉碎还田机作业过程中粉碎刀轴转速、粉碎室离地高度和粉碎刀刀尖与机壳距离等参数对粉碎室内不同位置的压力场、速度场的影响。仿真结果表明,当刀轴转速为 2 000 r/min 时,粉碎室喂入特性最佳;粉碎室离地高度越大,秸秆喂入特性越好,但过高或过低的离地高度会导致粉碎室内秸秆流动性降低;增加粉碎刀刀尖与机壳间隙会导致秸秆抛撒情况产生不良影响。仿真试验和田间试验结果表明,仿生锯齿尖刀与传统粉碎刀混合使用,可在保证秸秆捡拾能力同时,提高整机粉碎合格率和抛撒均匀度。

关键词: 香蕉秸秆; 粉碎还田; 仿生刀片; 流场特性

中图分类号: S224.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)08-0138-14

OSID:



Design and Flow Field Analysis of Bionic Blade of Banana Straw Crushing and Throwing Machine

ZHANG Xirui¹ NI Shilei¹ LIU Junxiao¹ HU Xuhang¹ ZHANG Zhifu¹ FU Shaohua²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China

2. School of Information and Communication Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China)

Abstract: To solve the problems of poor crushing effect and uneven scattering of banana straw crusher in Hainan Province during operation, a field returning machine was designed with a biomimetic serrated grinding knife with good straw crushing performance. Applying the principles of bionics to the design of crushing blades, a biomimetic serrated crushing knife was designed based on the serrated profile of blue shark teeth. The cutting ability of the biomimetic serrated knife on banana straw was verified through simulation, and a mixed use of the biomimetic serrated blade and traditional crushing knife was designed. An experimental plan was developed for machine simulation and field experiments. Using Fluent flow field analysis software, the effects of parameters such as the speed of the crushing blade shaft, the height of the crushing chamber from the ground, and the distance of the crushing blade tip from the casing on the pressure and velocity fields at different positions in the banana straw crushing and returning machine during operation were studied. When the spindle speed was 2 000 r/min, the feeding characteristics of the crushing chamber were the best. The higher the height of the crushing chamber from the ground was, the better the feeding characteristics of the straw were, but too high or too low of the height from the ground can lead to a decrease in the fluidity of the straw in the crushing chamber. Increasing the gap between the tip of the crushing knife and the casing can have a negative impact on the scattering of straw. Through simulation and field experiments, it can be concluded that the combination of biomimetic serrated blade and traditional crushing blade can ensure the straw picking ability while improving the

收稿日期: 2023-11-22 修回日期: 2024-01-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(52075137、51965015)、海南省重点研发计划项目(SQ2022XDNY0150)和海南省院士创新平台项目(HD-YSZX-202005、HD-YSZX-202101)

作者简介: 张喜瑞(1981—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备与农业机器人研究,E-mail: zhangxr@hainanu.edu.cn

通信作者: 刘俊孝(1992—),男,讲师,博士,主要从事热带作物秸秆还田装备研究,E-mail: 995229@hainanu.edu.cn

crushing qualification and scattering uniformity of the entire machine. The research result can provide support for the design and optimization of banana straw returning machines.

Key words: banana straw; crushing and returning farmland; biomimetic blade; flow field characteristics

0 引言

我国是世界第三大香蕉生产国,海南省是中国香蕉产业的主要发展地之一^[1-2]。截至 2021 年,我国香蕉年产值约 337 亿元。香蕉产业的发展带动了当地农业经济,为农民增收和地方经济发展做出了贡献。然而,香蕉种植也会产生大量秸秆,2020 年我国香蕉秸秆量达 2.0×10^7 t^[3-5]。这些秸秆如果处理不当,不仅会占据耕地资源,还会对环境造成污染。

香蕉秸秆是一种柔性物料,其含水率高、柔韧性强、纤维含量高。现有香蕉秸秆粉碎还田机^[6-9]普遍存在粉碎效果不理想、秸秆抛撒不均等问题,极大地制约了香蕉秸秆粉碎还田装备和技术的推广与应用。

因此,研发粉碎效果理想、秸秆抛撒均匀的香蕉秸秆粉碎还田机对于香蕉产业发展具有重要意义。国内外学者针对提高粉碎还田机^[10-12]粉碎性能及抛撒性能进行了诸多研究;王彬等^[13]设计了一种异向双辊式香蕉秸秆粉碎还田机,采用波浪形甩刀切割破碎,通过双辊异向挤压和剪切将香蕉秸秆进行 2 次粉碎,提高了香蕉秸秆粉碎率;李志强等^[14]设计了一种纵向双辊式香蕉秸秆粉碎还田机,采用动定刀交错排布,香蕉秸秆由卧轴双辊纵向粉碎,增加了粉碎机粉碎香蕉秸秆空间,提高了香蕉秸秆粉碎还田机工作性能。上述研究虽对香蕉秸秆粉碎还田装置部分关键部件优化设计,提升了香蕉秸秆粉碎合格率,但仍有进一步提高空间。

本文设计一款仿生锯齿粉碎尖刀,并以香蕉秸秆粉碎还田机为载体,基于 Fluent 软件研究作业过程中粉碎室流场特性,以期提升粉碎效果及秸秆抛撒均匀性,为秸秆粉碎抛撒装置设计与优化提供理论基础和支撑。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

香蕉秸秆粉碎还田机^[15-16]主要由三点悬挂装置、传动装置、粉碎装置、可调节限深轮、外壳组成。传动装置由变速箱、左右传动轴、左右齿轮变速箱组成。粉碎装置主要包括粉碎刀轴、粉碎刀座、L 形弯刀和仿生锯齿尖刀。整机结构示意图如图 1 所示。

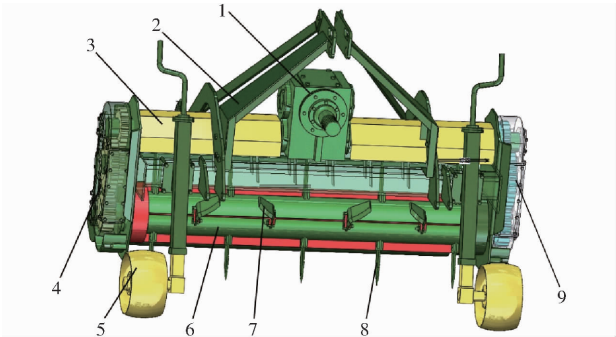


图 1 整机结构图

Fig. 1 Machine structure drawing

1. 变速箱 2. 三点悬挂装置 3. 机壳 4. 左齿轮变速箱 5. 行走装置 6. 粉碎刀轴 7. L 形弯刀 8. 仿生锯齿尖刀 9. 右齿轮变速箱

1.2 工作原理

香蕉秸秆粉碎还田机通过三点悬挂装置挂接在拖拉机后方,在拖拉机牵引下前进,拖拉机动力经传动装置传递给粉碎刀轴。粉碎刀轴上通过螺栓安装粉碎刀片,通过高速旋转将秸秆粉碎,秸秆粉碎后经高速旋转刀轴带来的离心力和粉碎室内流场压力抛撒至机具后方,实现抛撒功能。整机主要技术参数如表 1 所示。

表 1 主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters

参数	数值/形式
粉碎机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 280×1 500×1 150
工作幅宽/mm	1 200
粉碎刀轴转速/(r·min ⁻¹)	1 600~2 000
粉碎刀轴直径/mm	150
粉碎刀轴旋转半径/mm	320
粉碎刀数量	18
粉碎刀排列方式	对称双螺旋线排列

香蕉秸秆纤维长且韧性较高,在滑切过程中冲击力会将秸秆表面的纤维打断,香蕉秸秆会迅速划走、弹开,未被完全粉碎的香蕉秸秆随流场转动并相互混合,在此过程中秸秆长纤维会缠绕刀片,影响其粉碎性能。L 形弯刀比直刀具有更好的秸秆抓取能力,但 L 形粉碎刀对纤维切割能力不足,长条纤维成团分布,导致粉碎效果不佳,也影响了抛撒均匀性。锯齿尖刀比光刃粉碎刀有更好的秸秆切割性能,通过仿生技术设计锯齿尖刀,提升其切割性能,并将锯齿尖刀与 L 形弯刀呈双螺旋线混合排列,即可兼顾秸秆抓起性能及切割性能,实现长纤维高效粉碎。

2 仿生锯齿粉碎尖刀刀片设计与仿真

2.1 刀片设计

2.1.1 蓝鲨牙齿轮廓

通过前期研究发现,对于粗大、纤维含量高的香蕉秸秆常规粉碎刀切割效果不佳。现有锯齿尖刀锯齿形状多为尖头三角形,其具有强大的切削能力,但粉碎后形成的细碎香蕉秸秆易附着在锋利的锯齿边缘,降低了锯齿尖刀切削能力,且这种形状的锯齿极易磨损,需频繁更换刀具,有效作业时长较短。因此对具有高切割能力的蓝鲨锥形锯状牙齿进行仿生设计^[17-18],设计一款具有良好切削性能、适合用来切割纤维含量高且韧性大的香蕉秸秆粉碎刀^[19-20]。

蓝鲨是大型掠夺性鲨鱼,牙齿呈圆锥形锯齿状,为典型的切割型牙齿,能够刺穿猎物,承受和分散刺穿猎物时产生的垂直力。MOYER 等^[21]使用微型计算机断层扫描(CT)、扫描电子显微镜记录了蓝鲨锯齿之间的组织学变化,并将锯齿状鲨鱼牙齿与人工造工具进行比较,识别可能增强切割性能的特征。蓝鲨腭方骨齿冠向远端倾斜,形成近中端切刃和远端切刃(图2)。近中端切刃和远端切刃都有锯齿。蓝鲨牙齿齿冠顶端部分的大锯齿呈明显的顶部倾斜,锯齿沿着牙侧排列,有疏有密,形状不一,呈不规则圆锥形,如图3所示。

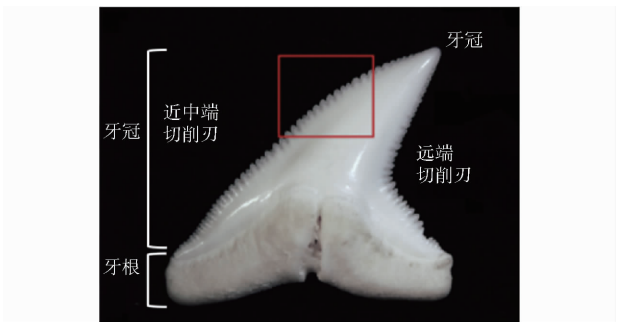


图2 单颗蓝鲨牙齿
Fig.2 Shark tooth



图3 局部锯齿
Fig.3 Local sawtooth

对牙齿受到的阻力进行划分,使力分散在圆锥形锯齿的整个表面。锥形锯齿提供了更大的面积来

分散应力,而同时锯齿牙釉嵴结构减少了边缘半径。图4为蓝鲨齿牙釉嵴。齿面所受正应力如图5所示,计算公式为

$$\sigma = \frac{F}{A} \tag{1}$$

式中 σ ——法向应力
 F ——力 A ——面积

锥形锯齿面积越大,在锯齿上的应力分布越广^[22]。

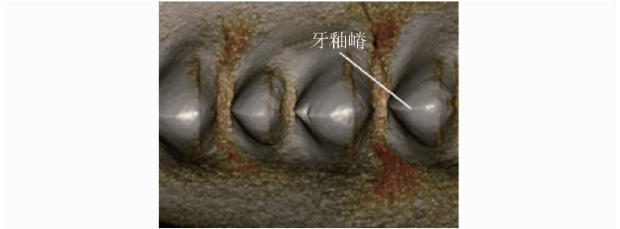


图4 蓝鲨齿牙釉嵴
Fig.4 Shark tooth enamel ridge

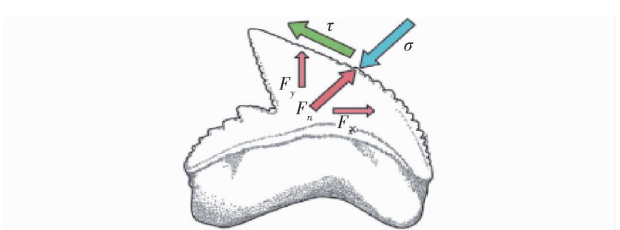


图5 切削过程中锯齿受力情况
Fig.5 Force on sawtooth during cutting

当牙齿切过一个物体时,牙齿施加在物体上的力,其法向力 F_n 为水平力 F_x 和垂直力 F_y 的合力。法向力在被切割物体上产生反方向的应力,即法向应力(σ)和切向应力(τ)。沿着鲨鱼牙齿的近中端切刃,切向应力将被切割的材料引向牙齿顶点,增加了牙齿穿透力。锥形锯齿具有更强穿透力,因其增加了表面积,可以分散法向应力和切向应力所导致的应变,而同时锯齿牙釉嵴结构减小了边缘半径。

选用蓝鲨牙齿作为仿生原型,设计一款具有良好切削性能、适合用来切割纤维含量高且韧性大的香蕉秸秆粉碎刀。

2.1.2 仿鲨鱼齿轮廓特征曲线提取

通过电子显微镜拍摄蓝鲨牙齿图像并运用Python中的灰度算法、高斯滤波算法和边缘检测算法进行预处理。首先,在数字图像进行处理前,将其转换为灰度图像,并对其进行色阶调整,增大切齿与底面背景色差,减少背景杂色影响,从而提高提取曲线精度。使用Python中的Open CV库函数CvtColor进行颜色空间变换技术灰度处理,以增强鲜明颜色和单调背景前的区分度。原图像如图6a所示,灰度化处理后图像如图6b所示。对图像进行先膨胀后腐蚀的封闭运算,进一步对图像边界轮廓进行识别,得到鲨鱼齿清晰轮廓曲线,如图6c所示。

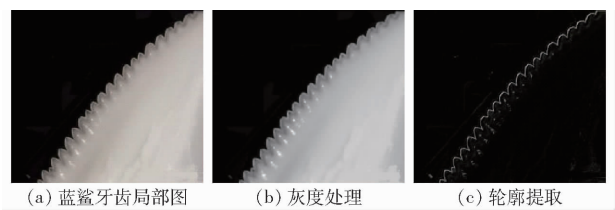


图 6 蓝鲨牙齿轮廓提取
Fig. 6 Shark tooth contour extraction

2.1.3 仿鲨鱼齿轮廓特征曲线拟合

将鲨鱼齿边缘曲线进行旋转平放,利用 Matlab 中的 HaoCurve 工具对 Python 提取出的曲线进行离散点数据提取,如图 7 所示。为了更好地拟合曲线,将曲线分成 10 段,如图 8 所示。然后运用 Matlab 中的 Curve fitting 工具箱,选用六次多项式 (Polynomial) 对曲线进行拟合,拟合结果如图 9 所示。每段拟合后可输出一个六次多项式,即

$$f(x) = p_1x^6 + p_2x^5 + p_3x^4 + p_4x^3 + p_5x^2 + p_6x + p_7 \tag{2}$$

10 段曲线拟合结果系数如表 2 所示。

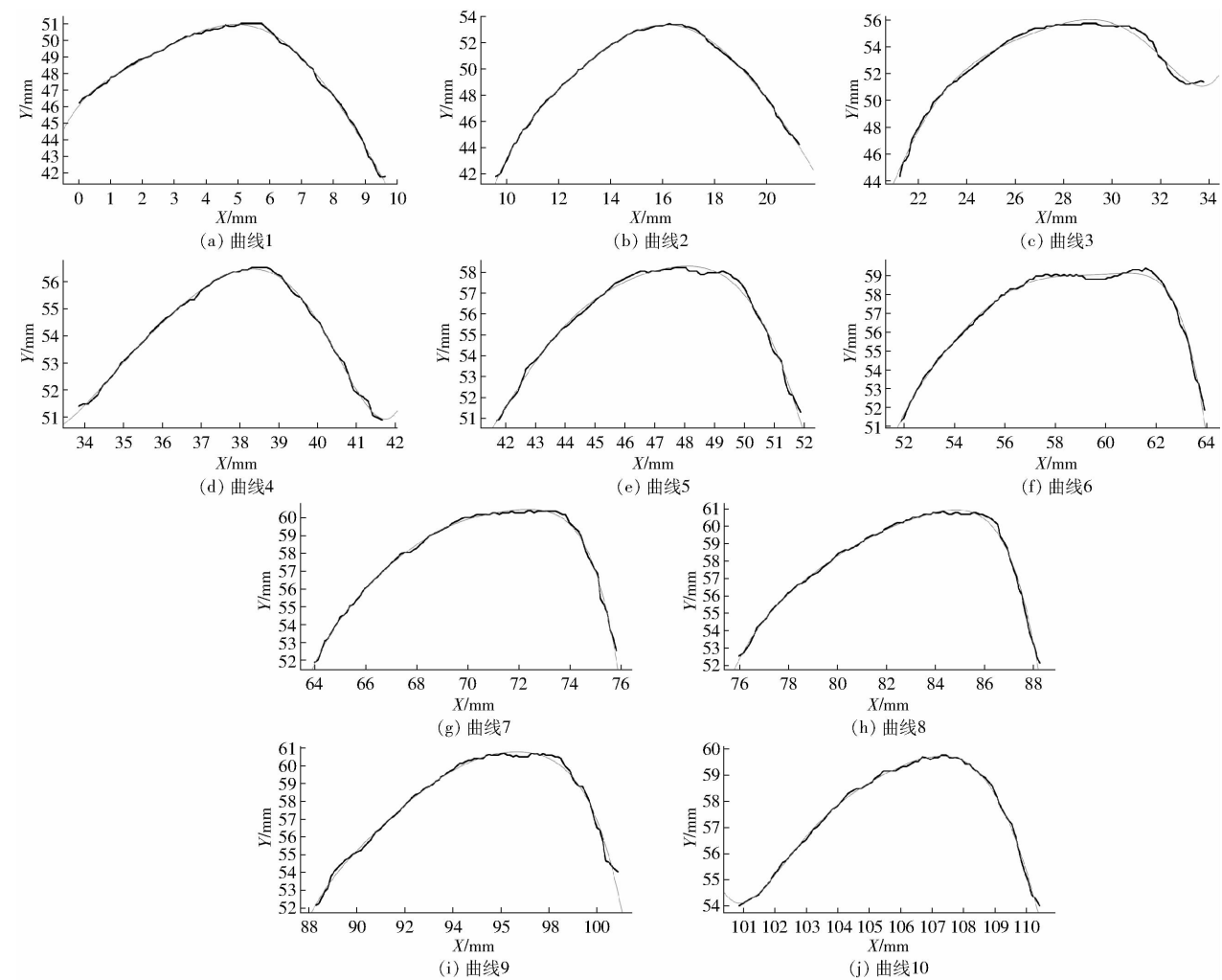


图 9 分段曲线拟合结果
Fig. 9 Piecewise curves fitting results

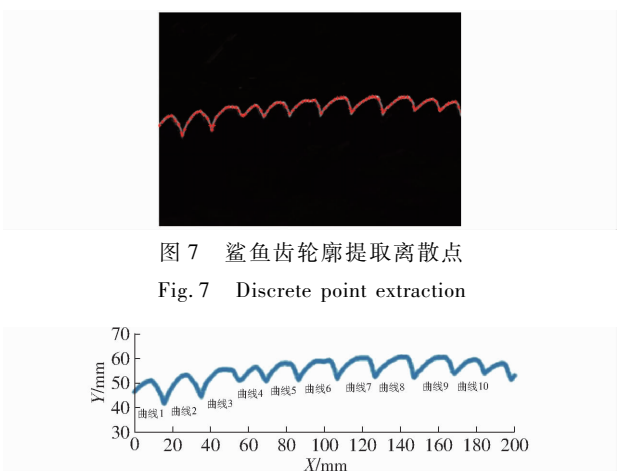


图 7 鲨鱼齿轮廓提取离散点
Fig. 7 Discrete point extraction

图 8 特征曲线分段

Fig. 8 Feature curve segmentation

2.2 刀片仿真

Solidworks 中的拟合样条线工具允许用户创建平滑且精确的曲线,准确地表示所需的形状。因此将曲线拟合结果输入 Solidworks 生成曲线,并绘制三维图。尺寸参考现有粉碎刀尺寸,具体参数如图 10 所示。

表 2 鲨鱼齿六项式拟合方程系数

Tab.2 Shark tooth six-term formula fitting equation coefficient

鲨鱼齿特征曲线序号	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6	p_7	R^2
1	-1.75×10^{-4}	5.96×10^{-3}	-7.47×10^{-2}	4.02×10^{-1}	-1.06	2.39	46.1	9.974×10^{-5}
2	-6.76×10^{-5}	6.79×10^{-3}	-2.79×10^{-1}	6.00	-7.13×10^1	4.47×10^2	-1.12×10^2	0.999
3	8.43×10^{-5}	-1.34×10^{-2}	8.75×10^{-1}	-3.01×10^1	5.84×10^2	-5.94×10^2	2.49×10^4	0.989
4	6.59×10^{-4}	-1.46×10^{-1}	13.40	-6.57×10^2	1.81×10^4	2.66×10^5	1.62×10^6	0.998
5	1.029×10^{-4}	-2.92×10^{-2}	3.45	-2.17×10^2	7.63×10^2	1.43×10^5	1.11×10^6	0.994
6	-1.386×10^{-4}	4.71×10^{-2}	-6.66	5.02×10^2	2.13×10^4	4.81×10^5	4.52×10^6	0.994
7	-1.241×10^{-4}	5.13×10^{-2}	-8.85	8.13×10^2	4.20×10^4	1.16×10^6	1.33×10^7	0.997
8	-7.34×10^{-5}	3.57×10^{-2}	-7.21	7.78×10^2	4.72×10^4	1.53×10^6	2.06×10^7	0.996
9	-5.72×10^{-5}	3.22×10^{-2}	-7.54	9.43×10^2	6.63×10^4	2.48×10^6	3.88×10^7	0.993
10	2.56×10^{-4}	-1.64×10^{-1}	43.40	-6.14×10^2	4.89×10^5	2.08×10^7	3.67×10^8	0.998

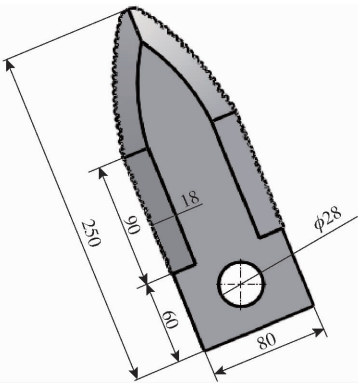


图 10 仿生锯齿粉碎尖刀三维图及其尺寸

Fig.10 3-D image and dimensions of bionic serrated grinding knife

香蕉秸秆粉碎作业时,粉碎刀锯齿边缘与秸秆接触^[23-24]为主要受力部位,因此在 ANSYS 中模拟粉碎秸秆时刀片受力与变形。选择粉碎刀材料为高硬度高强度的 Cr12Mov,设置材料参数:弹性模量 E 为 215 GPa,泊松比 μ 为 0.28,密度 ρ 为 7 800 kg/m³。将仿生刀刀片模型 Para solid 格式文件导入 ANSYS Workbench 19.2,并进行网格划分,设置网格尺寸为 2 mm,结果如图 11a 所示。

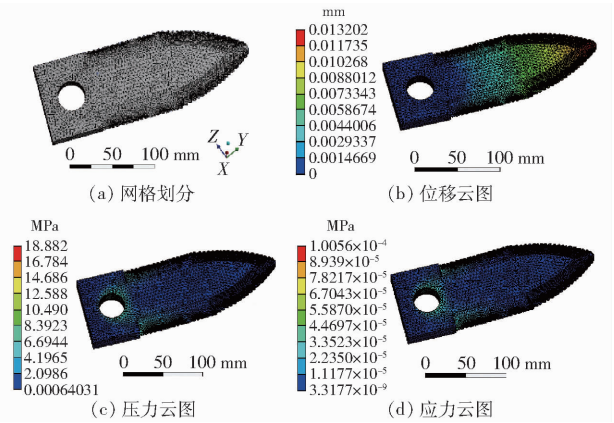


图 11 仿生锯齿尖刀静力学分析

Fig.11 Statics analysis of bionic serrated knife

有限元分析求解后,在后处理部分可获得仿生

锯齿尖刀片位移和应变云图,如图 11 所示。对刀片加载相同载荷时,变形量最大的地方主要分布在刀刃受载处,仿生锯齿尖刀最大变形量为 0.013 202 mm,最大应力和应变主要分布在圆孔位置,其次在圆孔周围与刀刃相邻的边沿部分,分析所得最大应力为 18.882 MPa,相应最大应变为 1.0056×10^{-4} mm;对于高速动载下的 Cr12Mov 的许用应力 σ_s 约为 750 MPa,因此该设计满足安全使用要求。

2.3 仿真试验

利用建立的香蕉秸秆离散元模型进行刀具切割秸秆仿真试验,对比普通光刃直刀、仿生锯齿尖刀和无锯齿尖刀的切割性能,如图 12 所示,切割过程分为切入、切断、贯穿 3 个阶段。

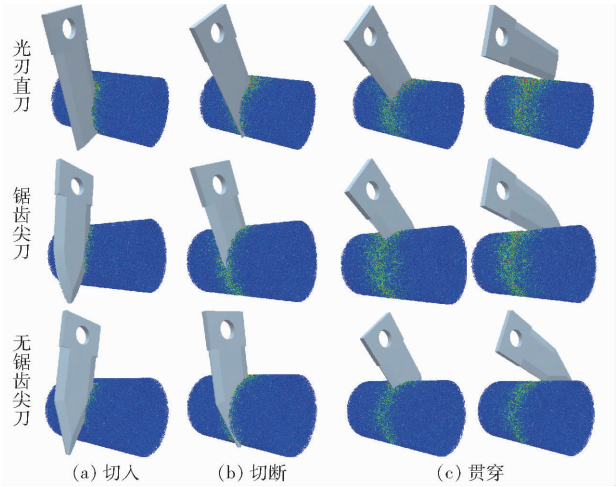


图 12 刀具剪切仿真对比试验

Fig.12 Blade shear simulation tests

由图 13 可知,香蕉秸秆粘结模型共生成粘结键 484 068 个,普通光刃直刀、仿生锯齿尖刀和无锯齿尖刀切割秸秆过程中粘结键断裂数量分别为 44 085、53 310 和 46 986,仿生锯齿尖刀切断粘结键数量比普通光刃直刀、无锯齿尖刀增加 20.9%、13.5%。由仿真结果可知,在秸秆粉碎中,仿生锯齿尖刀其尖头和锯齿结构可使更多的粘结键断裂,具

有更好的纤维切断能力。

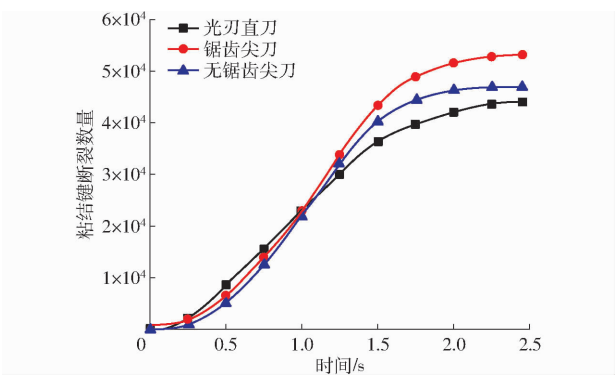


图 13 粘结键断裂数量-时间变化曲线

Fig. 13 Number of broken bond - time curves

通过 EDEM 后处理模块导出仿真过程中刀具的受力情况,如图 14 所示。图 14 为 3 种刀具在仿真中所受合力随时间变化情况。由图 14 可知,3 种刀具所受合力变化趋势相近,在切入和贯穿阶段锯齿尖刀比光刃刀受力小,而在中间切断阶段,锯齿尖刀受力大于光刃直刀,说明在切入和贯穿阶段,锯齿尖刀由于其独特结构特性,更容易切入香蕉秸秆,并在贯穿时用较小的力即可切断藕断丝连的部分秸秆纤维。这 3 种刀具中所受合力最小的为无锯齿尖刀,说明尖头结构可使刀受力更小,而增加锯齿结构后会在一定程度上增加刀具受力,而力的作用是相互的,锯齿结构可使秸秆受到更大的切割力,更容易断裂。图 15 为 3 种刀片仿真过程中各时间段所受最大剪切力的变化情况。由图 15 可知,光刃刀所受最大剪切力远大于锯齿尖刀和无锯齿尖刀,说明锯齿尖刀齿形仿蓝鲨牙齿轮廓,具有良好的切削性能和减阻性能。图 16 为 3 种刀具在切割过程中所受平均剪切力随时间的变化情况。由图 16 可知,仿生锯齿尖刀在整个仿真过程中所受的平均剪切力远小于无锯齿尖刀和光刃直刀,而光刃直刀所受平均剪切力最大,说明尖头的存在有减阻作用,而锯齿的存在可以进一步分散刀具在剪切过程中所受应力。

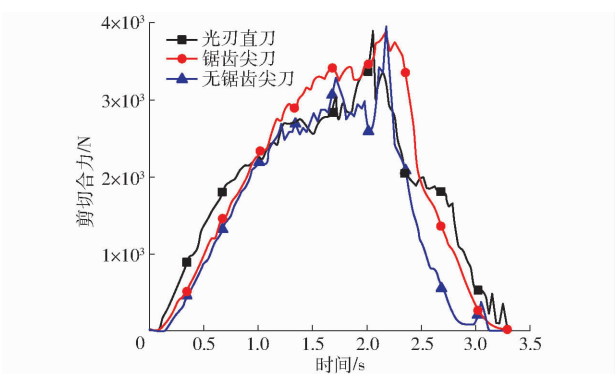


图 14 刀具所受合力-时间变化曲线

Fig. 14 Blades total force - time curves

综合仿真结果可知,虽无锯齿尖刀所受剪切合

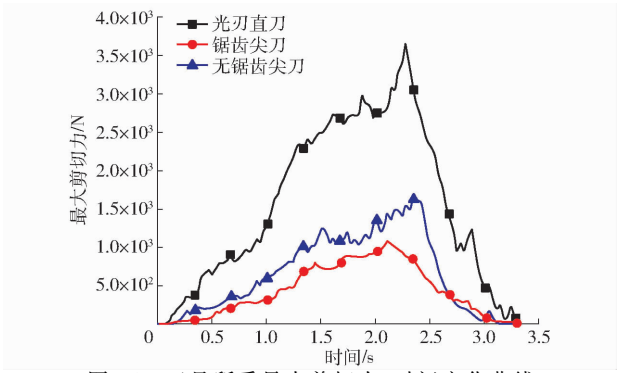


图 15 刀具所受最大剪切力-时间变化曲线

Fig. 15 Blades maximum force - time curves

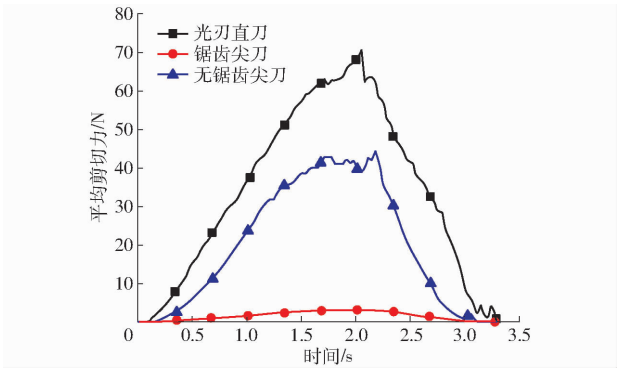


图 16 刀具所受平均剪切力-时间变化曲线

Fig. 16 Blades bverage force - time curves

力稍小于其他两种刀,但其受最大剪切力和平均剪切力都大于仿生锯齿尖刀,说明仿生锯齿的存在可将剪切力分散到各个方向,锯齿和尖头结构的存在都有助于提高刀具对香蕉秸秆的切割能力。

3 基于 CFD 的香蕉秸秆粉碎还田机粉碎室内流场分析

3.1 香蕉秸秆粉碎还田机粉碎室数值理论计算

为了确保对粉碎刀轴流域进行准确的数值模拟。根据粉碎室内实际情况,定义粉碎刀轴流域为旋转流域,其他流域定义为静止流域,对应采用静止坐标系进行描述。在模拟过程中,粉碎室壳体为静止壁面,粉碎刀轴表面为旋转壁面旋转速度与粉碎刀轴转速相同。入口边界条件采用 0 Pa 压力入口,相对应的出口边界条件则采用 0 Pa 压力出口。

在进行流体计算域划分前,对粉碎室三维结构模型进行简化,忽略如轴承座、轴承螺栓等细小零件,因其对流场产生的影响可忽略不计,简化后粉碎室^[25-26]三维结构模型如图 17a 所示。进入 ANSYS Workbench Meshing 采用四面体网格对粉碎室流体域进行网格划分,如图 17b 所示,共生成网格数量 428 056,节点数量 1 399 859,最小正交质量为 0.118 6,大于 0.02,达到网格生成标准。

为了更直观了解粉碎室内不同区域流场特

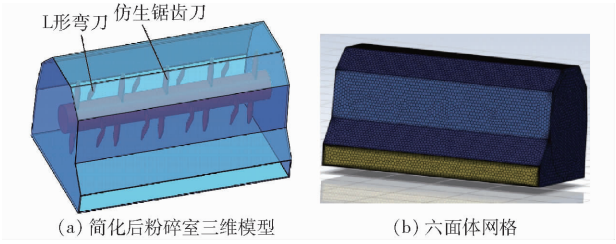


图 17 粉碎室网格模型

Fig. 17 Mesh models of crushing chamber

性^[27-29],选取 7 个具有代表性的截面 P1 ~ P7,如图 18 所示。其中,截面 P1、P2、P3 与平面 YZ 平行,分别穿过左侧仿生锯齿尖刀、L 形弯刀和介于两者排布间隙的区域,截面 P4 与 ZX 平面平行并经过粉碎刀轴中心线,截面 P5 与 YX 平面平行并经过粉碎刀轴中心线。截面 P6、P7 分别为粉碎室出口、入口。

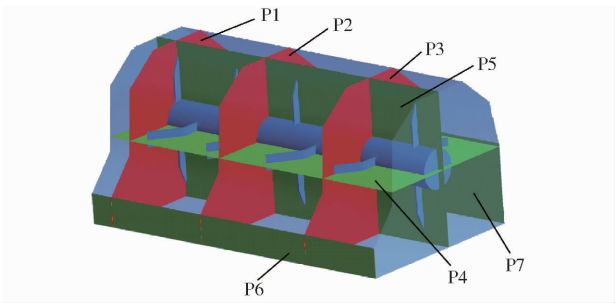


图 18 选取粉碎室截面 P1 ~ P7 位置

Fig. 18 Select of positions of sections P1 ~ P7 of crushing chamber

3.2 数值模拟与结果分析

3.2.1 粉碎室内速度场

本文流场划分为速度场和压力场。粉碎室内流线分布如图 19 所示。根据 Fluent 仿真结果显示,粉碎刀轴以恒定转速 1 600 r/min 旋转,流体从入口处进入流场,后跟随刀轴转动,一部分流体从出口处排出。

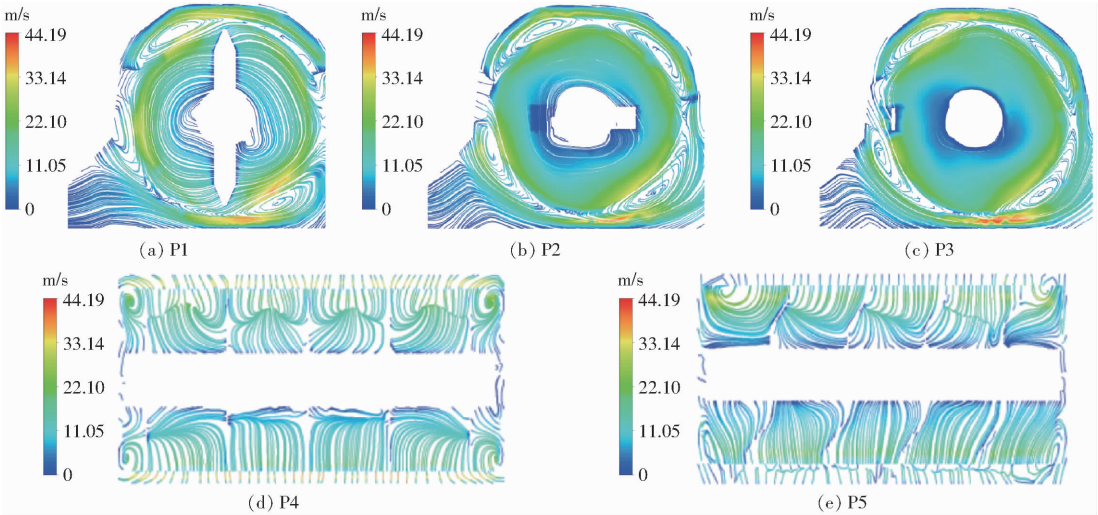


图 21 截面 P1 ~ P5 流线图

Fig. 21 Flow diagrams of sections P1 ~ P5

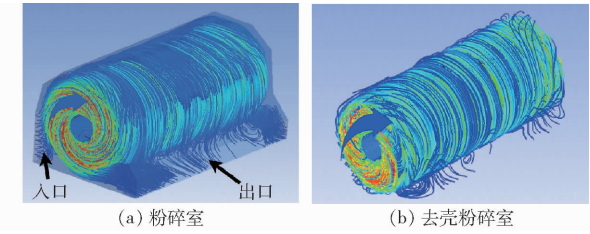


图 19 粉碎室内流线分布

Fig. 19 Comminution room flow distributions

根据 Fluent 的模拟结果显示,粉碎室内有多处产生涡核(图 20),粉碎刀轴迎风面和背风面上尤为集中,且迎风面上的涡核区域远大于背风面,这与涡核形成本质原因有关,涡核产生是由于流体不能承受高强度剪切应力,当雷诺数足够大时,涡结构必须转移到旋转状态。壁面附近涡结构大,而且涡结构的形成与粉碎室的机壳形状和结构参数密切相关。因此,通过研究各参数变化对粉碎室内流场特性的影响,可以改善粉碎室气流流动性并提高粉碎抛撒性能。

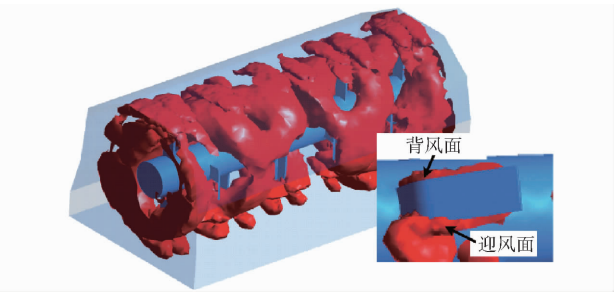


图 20 粉碎室内涡核区

Fig. 20 Pulverizing inner vortex core region

本文研究秸秆粉碎抛撒还田机粉碎室内流场特性^[30-31]。图 21 为粉碎室各位置流线图,从图 21 可知涡流分布情况。截面 P1、P2 和 P3 上的流线图显示在机壳附近和粉碎室入口、出口处均形成了明显的涡流区域,此外,截面 P4、P5 上粉碎刀轴区域的

涡流分布非常复杂。

图 22 为不同截面上流体速度云图。可以看出，流体在粉碎刀刀尖处流速最大，较高的流速一方面

可以使进入此区域的秸秆被充分粉碎，另一方面高速运动的流体可将粉碎后的秸秆带出粉碎室，起到抛撒的作用。

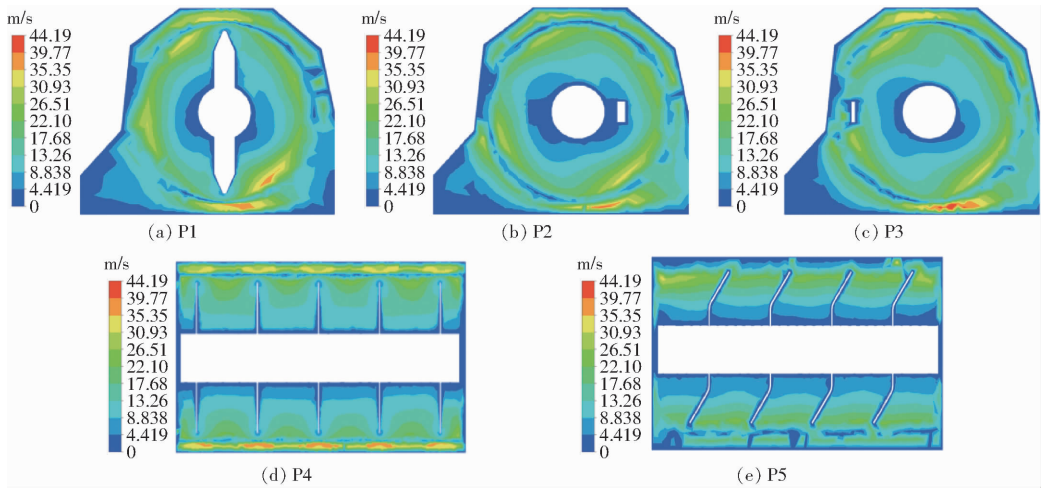


图 22 截面 P1 ~ P5 速度云图

Fig. 22 Velocity cloud images of sections P1 ~ P5

3.2.2 粉碎室内压力场

由图 23 可知，粉碎室流场内机壳转角处压力最大，且靠近旋转轴处压力较小，与粉碎抛撒还田机实际作业情况相符。图 23d 为横穿仿生锯齿尖刀的截面图，从图 23d 可以看出，其周围压力场分布较均

匀，从粉碎刀轴到机壳压力均匀增大。图 23e 为横穿 L 形弯刀的横截面，弯刀具有弯折角，相比直刀较不规则，在粉碎刀轴旋转时，粉碎弯刀周围的压力场较为紊乱，弯刀周围形成的压力比锯齿直刀周围大。

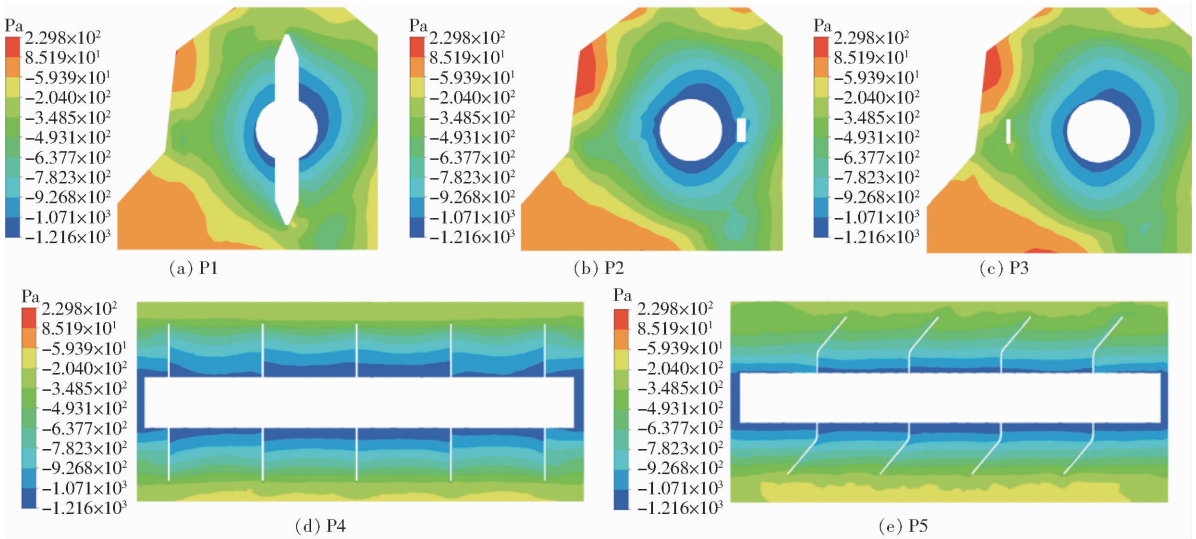


图 23 截面 P1 ~ P5 压力云图

Fig. 23 Pressure cloud maps of sections P1 ~ P5

粉碎室入口处压力云图(图 24)显示，入口附近有一个基本呈左右对称的负压区域。这个负压区域由高速旋转粉碎刀轴产生。粉碎过程中，粉碎室机壳入口处形成的负压起到了促进秸秆喂入粉碎室的作用，特别是拖拉机压倒后地表上倒伏着的秸秆的作用更为明显。

3.3 粉碎机参数对粉碎室内流场的影响

3.3.1 粉碎刀轴转速

粉碎刀轴工作转速对于粉碎还田机作业性能的

影响十分显著，对抛撒性能也有一定影响。在

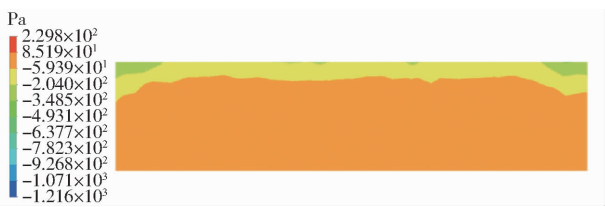


图 24 粉碎室入口处压力云图

Fig. 24 Pressure cloud diagram at entrance of crushing chamber

Fluent 流场模拟试验中,设定 3 组粉碎刀轴转速,分别为 1 600、1 800、2 000 r/min,保持其他参数不变。通过改变转速,研究不同转速下秸秆粉碎和抛撒性能。

(1)粉碎刀轴转速对秸秆喂入性能的影响

如图 25 所示,随着粉碎刀轴转速的增加,粉碎

室入口处的最大负压和负压区面积也逐渐增加。当粉碎刀轴转速为 2 000 r/min 时,最大流体流量为 0.382 7 kg/s,高于低转速时的入口流体流量。说明增加粉碎刀轴的转速可以提高入口处负压,增大流入粉碎室的流体流量,从而提高粉碎机喂入性能。

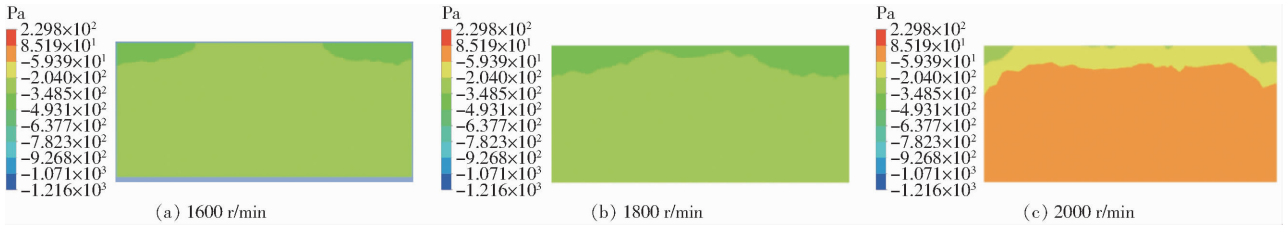


图 25 不同转速下粉碎室入口处压力云图

Fig. 25 Pressure cloud diagrams at entrance of grinding chamber at different speeds

(2)粉碎刀轴转速对秸秆流动性的影响

不同粉碎刀轴转速下在截面 P1 ~ P3 上的流线图如图 26 所示。从图 26 可以看出,粉碎室内粉碎刀轴旋转域与机壳之间的区域产生了涡流,且粉碎刀轴转速为 1 600、1 800 r/min 时,刀尖与机壳之间形成的涡流比转速为 2 000 r/min 时多。当刀轴转速为 1 600 r/min 时,产生的涡流主要分布在入口处和机壳拐角附近,且出口处有回流现象。当刀轴转速为 1 800 r/min 时,产生的涡流主要集中在入口处,而机壳附近有一些涡流但不多。当刀轴转速提高到 2 000 r/min 时,产生的涡流几乎消失。当刀轴转速为 1 600 ~ 2 000 r/min 时,随着刀轴转速的增加,粉碎室内流体速度增加,形成涡流的区域减少,

流场分布更均匀,流线更平滑,从而促进粉碎室内流体流动,提高粉碎室秸秆流动特性,使得进入粉碎室内的香蕉秸秆得到充分粉碎^[32-33]。

3.3.2 粉碎室离地高度

在模拟秸秆粉碎还田机作业的过程中,粉碎室离地的高度是一个非常重要的参数,它会直接影响到秸秆留茬高度和喂入量。为了探究粉碎室离地高度对于秸秆粉碎抛撒还田机的影响,设置离地高度 80、100、120 mm 进行粉碎室内流场模拟,并保持粉碎室其他参数不变。

(1)粉碎室离地高度对秸秆喂入性能的影响

当粉碎室离地高度为 80 mm 时,粉碎室入口处出现最大负压 (62.72 Pa),且最大负压随着粉碎室

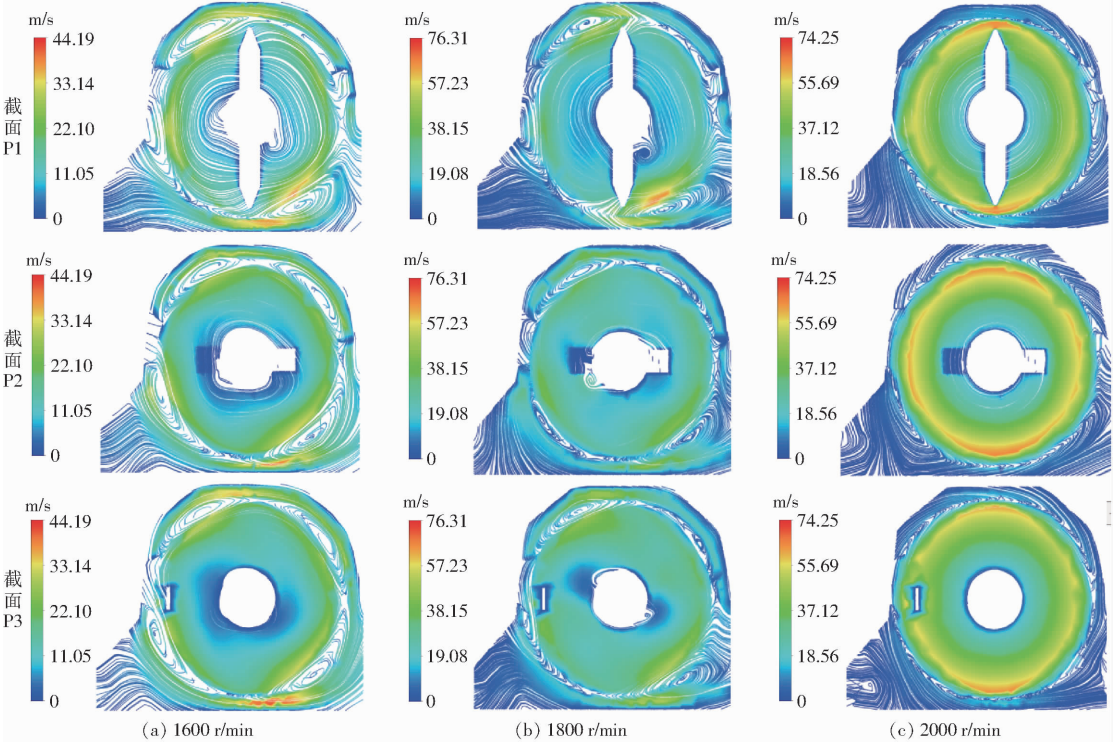


图 26 不同粉碎刀轴转速下截面 P1 ~ P3 上流线图

Fig. 26 Flow diagrams of sections P1 ~ P3 at different cutter shaft speeds

离地高度的增加而逐渐减小。这是由于随着粉碎室离地高度减小,粉碎室内流出面积减小,出口处流速增大,导致负压增大;另外,随着粉碎室离地高度增大,粉碎室入口处流体流量先增加后减小,最大流量为 0.382 7 kg/s。因此,粉碎室离地高度太大或太小都不利于秸秆的喂入。

(2) 粉碎室离地高度对秸秆流动性的影响

根据图 27 所示的流线分布,观察到在截面 P1

处,秸秆喂入口即流体入口处和机壳拐角处形成了多处涡流区域。随着粉碎室离地高度的增加,机壳附近涡流现象加剧,会使粉碎室内香蕉秸秆的流动变得混乱,影响香蕉秸秆粉碎效果。当粉碎室离地高度为 80 mm 时,粉碎室出口处会出现回流。但是,出口处回流情况会随着粉碎室离地高度的增加而改善。

图 27 显示在 3 种情况下 P3 截面机壳后挡板拐

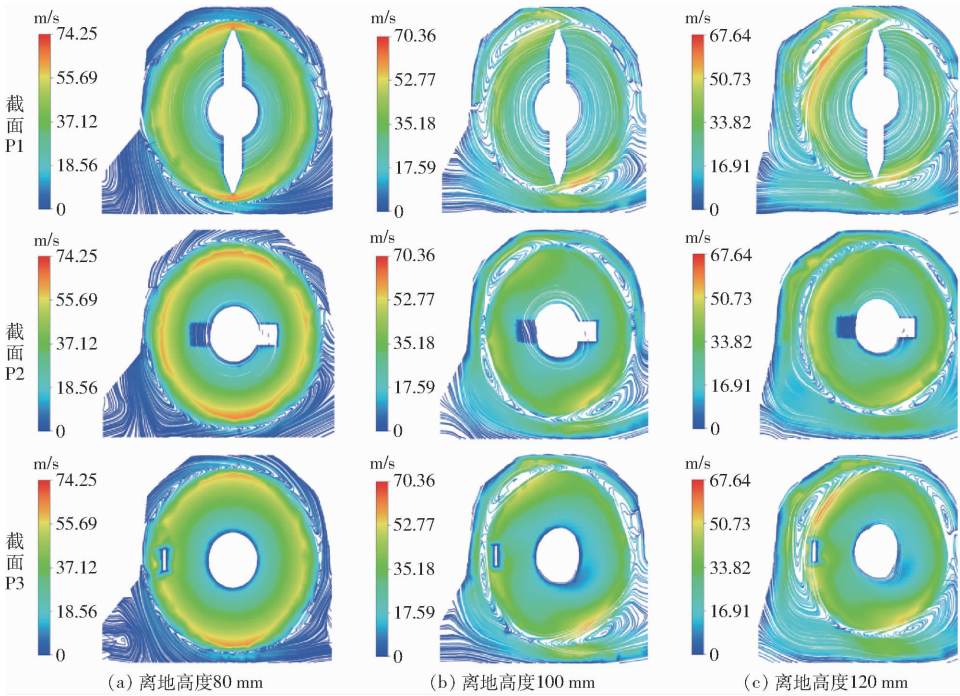


图 27 不同粉碎室离地高度下截面 P1 ~ P3 上流线图

Fig. 27 Flow diagrams of sections P1 ~ P3 at different housing elevations

角处均产生了涡流^[34-36]。当粉碎室离地高度从 80 mm 到 100 mm 再到 120 mm,旋转刀轴区域与壳体之间产生的涡流越来越明显,这表明在试验范围内,随着离地高度增加,粉碎室内流场变得混乱,影响了粉碎室内秸秆流动性,一定程度上影响了秸秆粉碎效果。

无论是粉碎室离地高度过高还是过低,都会导致粉碎室内秸秆流动性降低。因此,在设计秸秆粉碎机时,应该考虑到粉碎室离地高度的合适范围,以确保秸秆能够顺畅地流动和粉碎。

3.3.3 刀尖与机壳间隙

在模拟秸秆粉碎抛撒还田机^[37-38]的过程中,粉碎刀刀尖与机壳的间隙是一个非常重要的结构参数。设置刀尖与机壳间隙为 60、80、100 mm。同时,保持其他参数不变,以确保试验准确性和可靠性。刀尖与机壳间隙直接关系到秸秆粉碎效果和抛撒特性。较小的间隙可以提高粉碎效率,但也可能会影响秸秆抛撒均匀度。

因此,在试验中设置不同间隙,研究刀尖与机壳

间隙对秸秆粉碎效果和抛撒特性的影响,进一步优化秸秆粉碎抛撒还田机的设计。图 28 展示了在不同刀尖与机壳间隙下,截面 P1、P2 和 P3 上的流线分布情况。从图 28 中截面 P1 上的流线可以看出,在试验条件下,随着刀尖与壳体间隙的增加,粉碎室出口处流体速度随之减小。因此,增加粉碎刀刀尖与机壳的间隙可能会导致秸秆抛撒性能下降。

4 田间试验

4.1 试验条件

为验证香蕉秸秆粉碎还田机作业性能,确定关键部件最佳作业参数,根据 GB/T 24675.6—2021《保护性耕作机械 第 6 部分:秸秆粉碎还田机》要求^[39],于 2023 年 10 月在海南乐东试验田进行田间试验,试验田宽 15 m,长 60 m,试验田香蕉品种为“巴西蕉”,香蕉茎秆直径为 38 ~ 52 mm,香蕉茎秆平均纤维含量 3.8%。在其他条件相同情况下进行试验。

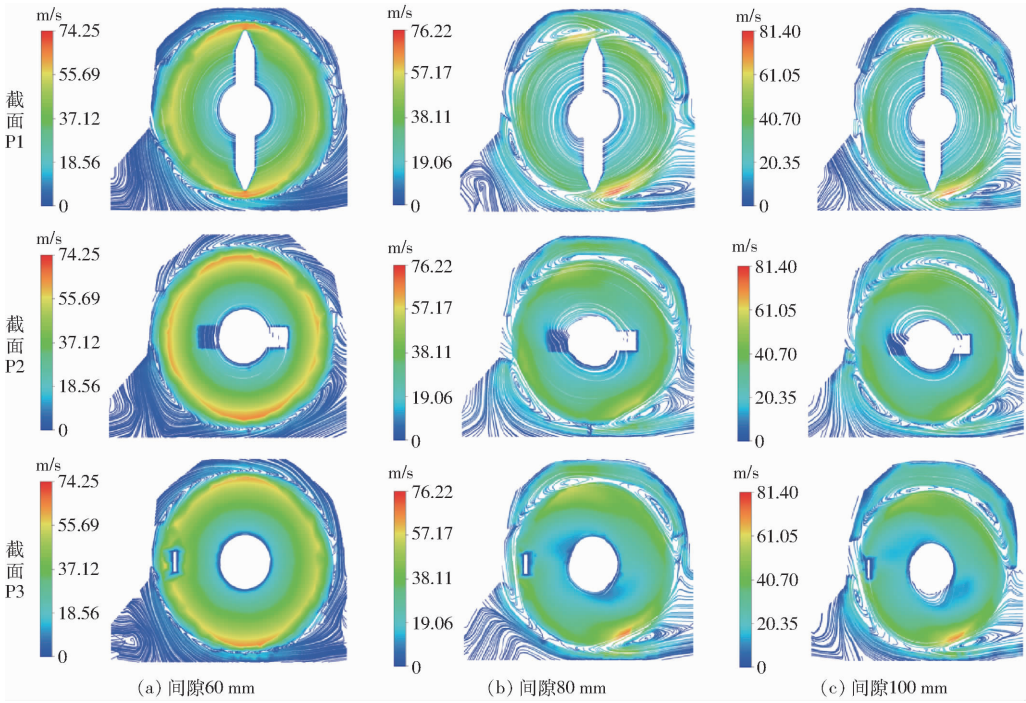


图 28 不同刀尖与机壳间隙下截面 P1 ~ P3 上流线图

Fig. 28 Flow diagrams on lower sections P1 ~ P3 of different tool tips and casing clearance

4.2 试验设计

试验选取粉碎刀轴转速、粉碎室离地高度、刀尖与机壳间隙为试验因素;以香蕉秸秆粉碎合格率和抛撒均匀度为指标。对粉碎刀轴转速,粉碎室离地高度、刀尖与机壳间隙 3 个影响因素进行三因素三水平正交试验,其因素编码如表 3 所示。

表 3 试验因素编码

Tab.3 Experimental factors and levels

编码	因素		
	粉碎刀轴转速 $x_1/(r \cdot \min^{-1})$	粉碎室离地高度 x_2/mm	刀尖与机壳间隙 x_3/mm
1	2 000	120	100
0	1 800	100	80
-1	1 600	80	60

4.3 试验方法

以香蕉秸秆粉碎合格率、香蕉秸秆抛撒均匀度为试验指标,共进行 17 组试验。在拖拉机行程上,等间距选取 6 个 1 m × 1 m 粉碎后的试验区,收集每个区域内所有香蕉秸秆并称量。各指标计算式为

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{i=1}^6 Q_i}{6} \quad (3)$$

其中

$$Q_i = \frac{m_{i1} - m_{i2}}{m_{i1}} \times 100\% \quad (i=1,2,\dots,6) \quad (4)$$

式中

$\bar{Q}$ ——平均粉碎合格率, %
 Q_i ——第 i 个试验区秸秆粉碎合格率, %
 m_{i1} ——第 i 个试验区内香蕉秸秆总质量, g

m_{i2} ——第 i 个试验区中长度大于 100 mm 的香蕉秸秆总质量, g
香蕉秸秆抛撒均匀度计算式为

$$U = \left(1 - \frac{1}{m} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (m_{i1} - \bar{m})^2}{5}} \right) \times 100\% \quad (5)$$

其中

$$\bar{m} = \frac{\sum_{i=1}^6 m_{i1}}{6} \quad (6)$$

式中 $\bar{m}$ ——各个试验区内香蕉秸秆平均质量, g
 U ——香蕉秸秆抛撒均匀度, %

对试验数据进行多元回归拟合分析,试验设计与结果如表 4 所示。表中 X_1 、 X_2 、 X_3 为因素编码值,指标方差分析结果如表 5 所示。

由表 5 可得,影响香蕉秸秆粉碎合格率因素主次顺序为刀尖与机壳间隙、粉碎刀轴转速、粉碎室离地高度,其中刀尖与机壳间隙对香蕉秸秆粉碎合格率影响极显著;影响香蕉秸秆抛撒均匀度因素主次顺序为刀尖与机壳间隙、粉碎刀轴转速、粉碎室离地高度,其中刀尖与机壳间隙、粉碎刀轴转速对香蕉秸秆抛撒均匀度的影响均极显著,粉碎室离地高度和刀尖与机壳间隙的交互作用对香蕉秸秆抛撒均匀度的影响显著;建立香蕉秸秆粉碎合格率 Y_1 、香蕉秸秆抛撒均匀度 Y_2 的回归方程为

$$Y_1 = 91.5 - 1.3375X_1 - 0.05X_2 + 3.1875X_3 + 0.1X_1X_2 + 0.275X_1X_3 - 0.55X_2X_3 + 2.7375X_1^2 - 4.6875X_2^2 + 0.1875X_3^2 \quad (7)$$

表 4 试验方案与结果

Tab.4 Test scheme and results

试验 序号	因素			粉碎合格 率 Y_1 /%	抛撒均匀 度 Y_2 /%
	X_1	X_2	X_3		
1	1	1	0	91.5	82.9
2	-1	1	0	87.6	80.3
3	1	-1	0	91.3	82.3
4	-1	-1	0	87.8	80.6
5	1	0	1	94.3	84.5
6	-1	0	1	92.1	82.4
7	1	0	-1	96.2	87.3
8	-1	0	-1	95.1	86.2
9	0	1	1	81.4	78.4
10	0	-1	1	82.3	79.2
11	0	1	-1	92.8	82.4
12	0	-1	-1	91.5	81.4
13	0	0	0	91.4	82.1
14	0	0	0	91.6	81.9
15	0	0	0	91.5	82.7
16	0	0	0	91.2	82.6
17	0	0	0	91.8	82.4

表 5 方差分析

Tab.5 Analysis of variance

方差来源	香蕉秸秆粉碎合格率				香蕉秸秆抛撒均匀度			
	平方和	均方和	F	P	平方和	均方和	F	P
模型	215.9	23.99	5.07	0.021 9	77.77	8.64	96.86	<0.000 1
X_1	14.31	14.31	3.02	0.125 6	7.03	7.03	78.81	<0.000 1 **
X_2	0.02	0.02	0.004 2	0.95	0.031 3	0.031 3	0.350 3	0.572 6
X_3	81.28	81.28	17.17	0.004 3 **	20.48	20.48	229.56	<0.000 1 **
X_1X_2	0.04	0.04	0.008 5	0.929 3	0.202 5	0.202 5	2.27	0.175 6
X_1X_3	0.302 5	0.302 5	0.063 9	0.807 7	0.25	0.25	2.80	0.138
X_2X_3	1.21	1.21	0.255 6	0.628 7	0.81	0.81	9.08	0.019 6 *
X_1^2	31.55	31.55	6.67	0.036 4 *	16.30	16.30	182.70	<0.000 1 **
X_2^2	92.52	92.52	19.55	0.003 1 **	32.60	32.60	365.40	<0.000 1 **
X_3^2	0.148	0.148	0.031 3	0.864 6	2.64	2.64	29.64	0.001 **
残差	33.13	4.73			0.624 5	0.089 2		
总和	249.04				78.4			

注：* 表示显著 ($P<0.05$)；** 表示极显著 ($P<0.01$)。



图 29 仿生锯齿尖刀实物图

Fig. 29 Bionic serrated knife physical picture

撒均匀度为指标进行分析。

试验测定 3 种方案的秸秆粉碎合格率分别为 93.8% (方案 1)、94.5% (方案 2) 和 96.2% (方案 3), 抛撒均匀度分别为 84.4% (方案 1)、85.8% (方案 2) 和 87.3% (方案 3)。可知仿生锯齿尖刀可提

$$Y_2 = 82.34 - 0.9375X_1 - 0.0625X_2 + 1.6X_3 + 0.225X_1X_2 + 0.25X_1X_3 - 0.45X_2X_3 + 1.9675X_1^2 - 2.7825X_2^2 + 0.7925X_3^2 \quad (8)$$

为获得香蕉秸秆粉碎抛撒还田机最佳工作性能下的因素组合,利用 Design-Expert 软件的优化模块,以香蕉秸秆粉碎合格率和香蕉秸秆抛撒均匀度为优化目标,建立优化方程并求解得:当粉碎刀轴转速为 2 000 r/min、粉碎室离地高度为 100 mm、刀尖与机壳间隙为 60 mm 时,香蕉秸秆粉碎抛撒还田机工作性能最优。此时,香蕉秸秆粉碎合格率为 96.2%,抛撒均匀度为 87.3%。

4.4 对比试验

为验证优化设计后机具粉碎效果和抛撒均匀度,设计 3 种试验方案,方案 1 为粉碎刀全部选用 L 形弯刀,共 18 把;方案 2 为全部选用仿生锯齿尖刀;方案 3 为粉碎刀选用 10 把仿生锯齿尖刀 (图 29)、8 把 L 形弯刀。在其他条件相同的情况下分别进行试验 (图 30),以香蕉秸秆粉碎合格率和抛



图 30 田间秸秆粉碎试验

Fig. 30 Straw comminution test in field

高粉碎效果,且将 L 形弯刀与仿生锯齿尖刀混合使用效果最佳。通过仿真试验和田间试验结果可知,仿生锯齿尖刀与传统粉碎刀混合使用,可以在保证秸秆捡拾能力的同时,提高整机粉碎合格率和抛撒均匀度。

5 结 论

(1)通过对整机关键部件刀片的研究,将仿生学原理应用到粉碎刀片设计中,仿蓝鲨牙齿锯齿轮廓设计了一款具有良好秸秆粉碎性能的仿生锯齿粉碎尖刀。

(2)利用 Fluent 流场分析软件,研究了香蕉秸秆粉碎还田机作业过程中粉碎室内流场特性,研究各个参数对粉碎室的影响。确定在试验条件下,刀

轴转速为 2 000 r/min 时,粉碎室喂入特性最佳;粉碎室离地高度越大,秸秆喂入特性越好,但过高或过低的离地高度会导致粉碎室内秸秆流动性降低;增加粉碎刀刀尖与机壳的间隙会导致秸秆抛撒情况产生不良影响。

(3)设计香蕉秸秆粉碎抛撒还田机并制定试验方案进行田间试验,可得仿生锯齿尖刀与传统粉碎刀混合使用,可以在保证秸秆捡拾能力的同时,提高整机粉碎合格率和抛撒均匀度。

参 考 文 献

[1] 王全永,欧燕芳.我国香蕉产业标准化现状和对策[J].中国标准化,2021(3):147-152.
WANG Quanyong, Ou Yanfang. Present situation and countermeasures of banana industry standardization in China[J]. China Standardization,2021(3):147-152. (in Chinese)

[2] 徐小俊,刘恩平.我国香蕉市场与产业调查分析报告[J].农产品市场,2021(12):44-46.
XU Xiaojun, LIU Enping. Survey and analysis report of banana market and industry in China[J]. Agricultural Products Market,2021(12):44-46. (in Chinese)

[3] 王瑞芳,王竞成,赵东海,等.香蕉低压过热蒸汽-真空组合干燥研究[J].农业机械学报,2022,53(3):392-399.
WANG Ruifang, WANG Jingcheng, ZHAO Donghai, et al. Drying of banana using combined low-pressure superheated steam and vacuum drying[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(3):392-399. (in Chinese)

[4] 张喜瑞,曾望强,刘俊孝,等.基于离散元法的砖红壤斜柄折翼式深松铲设计与试验[J].农业机械学报,2022,53(3):40-49.
ZHANG Xirui, ZENG Wangqiang, LIU Junxiao, et al. Design and experiment of iateritic soil inclined handle folding wing subsoiling shovel based on discrete element method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(3):40-49. (in Chinese)

[5] 张海洋,张瑶,李民赞,等.基于 BSO-SVR 的香蕉遥感时序估产模型研究[J].农业机械学报,2021,52(增刊):98-107.
ZHANG Haiyang, ZHANG Yao, LI Minzan, et al. BSO-SVR-based remote sensing time-series yield estimation model for banana[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(Supp.):98-107. (in Chinese)

[6] 李常营.留高茬式玉米收获机切割部件的仿生设计及其切割机理[D].长春:吉林大学,2014.
LI Changying. Bionic blade of corn harvester for leaving high stubble and its cutting mechanism[D]. Changchun: Jilin University,2014. (in Chinese)

[7] 李粤,郭超凡,姚德宇,等.定甩刀防缠式香蕉秸秆粉碎还田机设计与试验[J].农业工程学报,2021,37(18):11-19.
LI Yue, GUO Chaofan, YAO Deyu, et al. Design and experiment of banana straw crushing and returning machine with anti-wrapping device supported by flailing blade[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(18):11-19. (in Chinese)

[8] 刘鹏,何进,章志强,等.基于 CFD-DEM 的秸秆还田机碎秆运动特性分析与试验[J].农业机械学报,2020,51(增刊1):244-253.
LIU Peng, HE Jin, ZHANG Zhiqiang et al. Kinematic characteristic analysis and field test of chopped stalk in straw retention machine based on CFD-DEM coupling simulation method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(Supp.1):244-253. (in Chinese)

[9] 章志强.玉米秸秆粉碎抛撒还田机的设计与秸秆运动特性研究[D].北京:中国农业大学,2018.
ZHANG Zhiqiang. Research on corn straw chopping and spreading machine design and dynamic characteristics of straw[D]. Beijing: China Agricultural University,2018. (in Chinese)

[10] 张喜瑞,王自强,李粤,等.滑切防缠式香蕉秸秆还田机设计与试验[J].农业工程学报,2018,34(3):26-34.
ZHANG Xirui, WANG Ziqiang, LI Yue, et al. Design and experiment of sliding-cutting and anti-twining returning device for banana straw[J]. Transactions of the CSAE,2018,34(3):26-34. (in Chinese)

[11] 章志强,何进,李洪文,等.可调节式秸秆粉碎抛撒还田机设计与试验[J].农业机械学报,2017,48(9):76-87.
ZHANG Zhiqiang, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment on straw chopper cum spreader with adjustable spreading device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(9):76-87. (in Chinese)

[12] 欧忠庆,张园,刘智强,等.正反颠倒 U 型甩刀香蕉茎秆粉碎还田机的设计与试验[J].农机化研究,2020,42(12):80-84.
OU Zhongqing, ZHANG Yuan, LIU Zhiqiang et al. Design and test of banana stalk crushing and returning machine with inverted U-shaped throwing knife[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2020,42(12):80-84. (in Chinese)

[13] 王彬,于云峰,张喜瑞.异向双辊式香蕉秸秆粉碎还田机设计与试验[J].中国农机化学报,2020,41(2):6-12.
WANG Bin, YU Yunfeng, ZHANG Xirui. Design and test of counter-directional double-roller banana straw grinding and returning machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2020,41(2):6-12. (in Chinese)

[14] 李志强,李粤,贺宁波,等.纵向双辊式香蕉秸秆粉碎还田机的设计与试验[J].中国农机化学报,2020,41(3):180-184.

- LI Zhiqiang, LI Yue, HE Ningbo, et al. Design and experiment of the banana stalk crushing and returning machine with lengthways double rollers type[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(3): 180 – 184. (in Chinese)
- [15] 刘鹏, 何进, 娄尚易, 等. 异速圆盘动态支撑式玉米秸秆粉碎装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(10): 41 – 50.
- LIU Peng, HE Jin, LOU Shangyi, et al. Design and experiment for dynamic supporting type maize straw chopping retention device with different rotation speeds of disc blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(10): 41 – 50. (in Chinese)
- [16] 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, 87.
- 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, 87. (in Chinese)
- [17] 陆锦. 联合收获机秸秆切碎装置的仿生刀片的设计及试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2022.
- LU Jin. Design and experimental study of the bionic blade for straw shredding device of combined harvester[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2022. (in Chinese)
- [18] 马晶, 张明鉴, 刘强, 等. 仿生刀具研究进展综述[J]. 机械工程学报, 2022, 58(13): 261 – 281.
- MA Jing, ZHANG Mingjian, LIU Qiang, et al. A review of the research progress of bionic cutting tools[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(13): 261 – 281. (in Chinese)
- [19] 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)
- [20] 王金峰, 张鑫, 唐汉, 等. 水稻秸秆反旋深埋滑切还田刀优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 28 – 39.
- WANG Jinfeng, ZHANG Xin, TANG Han, et al. Optimal design and experiment of deep-buried reverse rotating sliding cutting straw returning blade[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 28 – 39. (in Chinese)
- [21] MOYER J K, BEMIS W E. Shark teeth as edged weapons: serrated teeth of three species of selachians[J]. Zoology, 2017, 120: 101 – 109.
- [22] 孙妮娜, 王晓燕, 李洪文, 等. 差速锯切式水稻秸秆粉碎还田机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(22): 267 – 276.
- SUN Ni'na, WANG Xiaoyan, LI Hongwen, et al. Design and experiment of differential sawing rice straw chopper for turning to field[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(22): 267 – 276. (in Chinese)
- [23] 田昆鹏, 李显旺, 沈成, 等. 天牛仿生大麻收割机切割刀片设计与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(5): 56 – 61.
- TIAN Kunpeng, LI Xianwang, SHEN Cheng, et al. Design and test of cutting blade of cannabis harvester based on longicorn bionic principle[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(5): 56 – 61. (in Chinese)
- [24] 王彬, 于云峰, 张喜瑞. 异向双辊式香蕉秸秆粉碎还田机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(2): 6 – 12.
- WANG Bin, YU Yunfeng, ZHANG Xirui. Design and test of counter-twin roll banana straw crushing and returning machine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(2): 6 – 12. (in Chinese)
- [25] 翁晓星, 陈长卿, 王刚, 等. 基于 CFD – DEM 的机采鲜叶管道集叶过程数值模拟研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11): 424 – 432.
- WENG Xiaoxing, CHEN Changqing, WANG Gang, et al. Numerical simulation of leaf collection process in machine harvested fresh leaves pipeline based on CFD – DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11): 424 – 432. (in Chinese)
- [26] 叶晓琰, 王朋, 张德胜, 等. 不同叶片后掠角度下轴流泵叶顶区空化流场与性能研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 194 – 201.
- YE Xiaoyan, WANG Peng, ZHANG Desheng, et al. Cavitation flow field in tip region and performance of axial flow pump under different blade swept angles[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 194 – 201. (in Chinese)
- [27] 王伯凯, 于昭洋, 胡志超, 等. 花生捡拾收获机三风系风选系统流场数值模拟与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 103 – 114.
- WANG Bokai, YU Zhaoyang, HU Zhichao, et al. Numerical simulation and experiment of flow field in three air systems of air separation system of peanut pickup harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 103 – 114. (in Chinese)
- [28] 朱广飞, 白岩松, 王松林, 等. 玉米干储一体仓气流场仿真分析与优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊1): 381 – 390.
- ZHU Guangfei, BAI Yansong, WANG Songlin, et al. Simulation analysis and optimization of the airflow field in integrated silo for corn drying and storage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Sup. 1): 381 – 390. (in Chinese)
- [29] 孙文峰, 王进, 常晋恺, 等. 喷雾机预混装置动态流场分析与参数优化[J]. 农业机械学报, 2023, 54(4): 83 – 95.
- SUN Wenfeng, WANG Jin, CHANG Jinkai, et al. Dynamic flow field analysis and parameter optimization of premixing device of spray[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(4): 83 – 95. (in Chinese)

- 130 – 139.
- ZHAO Siqi, DING Weimin, ZHAO Sanqin, et al. Performance analysis and optimization of pneumatic fishpond feeder based on EDEM – Fluent coupling[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9): 130 – 139. (in Chinese)
- [19] 汪帅帅. 基于 EDEM – Fluent 耦合仿真的气力式投饵机设计与试验[D]. 武汉:华中农业大学,2022.
- WANG Shuaishuai. Design and experiment of pneumatic bait casting machine based on EDEM – Fluent coupling simulation [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2022. (in Chinese)
- [20] KONG X, LIU J, YANG T, et al. Numerical simulation of feed pellet breakage in pneumatic conveying[J]. Biosystems Engineering, 2022, 218: 31 – 42.
- [21] 张丽珍,杨朦朦,胡庆松,等. 精准投饲机送料精度仿真与分析[J]. 上海海洋大学学报,2018,27(5):703 – 709.
- ZHANG Lizhen, YANG Mengmeng, HU Qingsong, et al. Simulation and analysis of feeding accuracy of precision feeding machine[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2018, 27(5): 703 – 709. (in Chinese)
- [22] 吴建章,李东森. 通风除尘与气力输送[M]. 北京:中国轻工业出版社,2009.
- [23] 牛智有,江善晨,孔宪锐,等. 膨化颗粒饲料碰撞破碎特性分析与离散元模拟仿真[J]. 农业机械学报,2023,54(8): 371 – 380.
- NIU Zhiyou, JIANG Shanchen, KONG Xianrui, et al. Impact breakage characteristics and discrete element simulation of extruded pellet feed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 371 – 380. (in Chinese)
- [24] 温翔宇,袁洪方,王刚,等. 颗粒肥料离散元仿真摩擦因数标定方法研究[J]. 农业机械学报,2020,51(2):115 – 122,142.
- WEN Xiangyu, YUAN Hongfang, WANG Gang, et al. Calibration method of friction coefficient of granular fertilizer by discrete element simulation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 115 – 122, 142. (in Chinese)
- [25] ZHOU J, LIU Y, DU C, et al. Effect of the particle shape and swirling intensity on the breakage of lump coal particle in pneumatic conveying[J]. Powder Technology, 2017, 317: 438 – 448.

(上接第 151 页)

- [30] 魏思林. 基于耦合仿生机理立式香蕉秸秆粉碎还田机的优化设计[D]. 海口:海南大学,2019.
- WEI Silin. Optimal design of vertical banana straw crushing and returning machine based on coupling bionic mechanism[D]. Haikou: Hainan University,2019. (in Chinese)
- [31] 辛青青. 基于 Fluent – EDEM 的马铃薯秧粉碎抛送装置仿真与试验[D]. 泰安:山东农业大学,2020.
- XIN Qingqing. Simulation and text of potato seedling crushing and throwing device based on Fluent – EDEM [D]. Tai'an: Shandong Agricultural University,2020. (in Chinese)
- [32] 王立军,刘天华,冯鑫,等. 农业和食品领域中颗粒碰撞恢复系数的研究进展[J]. 农业工程学报,2021,37(20):313 – 322.
- WANG Lijun, LIU Tianhua, FENG Xin, et al. Research progress of the restitution coefficients of collision of particles in agricultural and food fields[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(20):313 – 322. (in Chinese)
- [33] 王自强,李粤,张喜瑞,等. 沟齿式香蕉假茎粉碎还田机设计与试验[J]. 农机化研究,2018,40(12):55 – 59.
- WANG Ziqiang, LI Yue, ZHANG Xirui, et al. Design and experiment on banana stalks disintegrator with double shafts[J]. Agricultural Mechanization Research,2018,40(12):55 – 59. (in Chinese)
- [34] FRAZZETTA T H. Feeding mechanisms in sharks and other elasmobranchs[J]. Advances in Comparative and Environmental Physiology, 1994, 18:31 – 57.
- [35] GUO J, KARKEE M, YANG Z, et al. Discrete element modeling and physical experiment research on the biomechanical properties of banana bunch stalk for postharvest machine development[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 188:106308.
- [36] JIA H, LI C, ZHANG Z, et al. Design of bionic saw blade for corn stalk cutting[J]. Journal of Bionics Engineering, 2013, 10(4):497 – 505.
- [37] 刘鹏,何进,李艳洁,等. 异速对辊式玉米秸秆粉碎还田装置设计与试验[J]. 农业工程学报,2020,36(14):69 – 79.
- LIU Peng, HE Jin, LI Yanjie, et al. Design and experiment of double rollers maize stalk chopping device with different rotation speeds[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(14):69 – 79. (in Chinese)
- [38] 张姬,于泳涛,杨启勇,等. 高留茬玉米秸秆复式割台粉碎还田装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(增刊):42 – 49.
- ZHANG Ji, YU Yongtao, YANG Qiyong, et al. Design and experiment of smashed straw unit for high stubble maize double header[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(Supp.): 42 – 49. (in Chinese)
- [39] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 保护性耕作机械 第6部分:秸秆粉碎还田机:GB/T 24675.6—2021[S]. 北京:中国标准出版社,2021.