

青贮玉米收获机碟盘式籽粒破碎装置仿真优化与试验

牟孝栋¹ 姜慧新² 孙延成¹ 徐海港³ 姚艳春¹ 耿端阳¹

(1. 山东理工大学农业工程与食品科学学院, 淄博 255000; 2. 山东省畜牧总站, 济南 250022;

3. 山东时风(集团)有限责任公司, 聊城 252800)

摘要: 针对青贮玉米收获机玉米籽粒破碎效果差、破碎率低、影响青贮秸秆发酵与籽粒养分转化的问题,设计了适合青贮玉米籽粒破碎的碟盘式青贮玉米籽粒破碎试验台,对关键部件刀盘进行了参数化设计,基于 DEM 法对籽粒破碎过程进行了运动和力学分析,首先建立基于离散元法的玉米籽粒粘结颗粒模型;利用 EDEM 离散元仿真软件开展正交仿真试验优化,选取刀齿数、刀刃深度、破碎间隙和刀辊转速作为仿真试验因素,籽粒破碎率为试验考察指标,确定了最优组合参数,即刀齿数 48、刀刃深度 5 mm、破碎间隙 2 mm、刀辊转速 59 r/s,在该条件下籽粒破碎率为 90.35%,仿真试验与台架试验相对误差为 3.36%;台架试验结束后,采用宾州筛对其筛分,物料可分为小型、标准、大型和未完全破碎型 4 种,占比分别为 1.3:6:1.8:0.9,与仿真试验结果一致。台架试验各指标满足行业标准,实现了对玉米籽粒的高破碎和高作业效率。

关键词: 青贮玉米收获机; 籽粒破碎; 离散元; 破碎刀盘; 碟盘式

中图分类号: S225.5 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)S1-0218-09

Simulation Optimization and Experiment of Disc-type Grain Crushing Device of Silage Corn Harvester

MOU Xiaodong¹ JIANG Huixin² SUN Yancheng¹ XU Haigang³ YAO Yanchun¹ GENG Duanyang¹

(1. School of Agricultural and Food Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China

2. Shandong Animal Husbandry Station, Ji'nan 250022, China 3. Shifeng Group Co., Ltd., Liaocheng 252800, China)

Abstract: Aiming at the problem of poor corn kernel crushing effect and low crushing rate of corn silage corn harvester, which affects the fermentation of silage straw and the conversion of kernel nutrients, combined with the disc-type kernel crushing technology which has the advantages of high working efficiency and good crushing quality, a dish-type silage corn kernel crushing test bench suitable for crushing silage corn kernels was developed. Parametric design of the key components of the cutter head, the movement and mechanical analysis of the grain crushing process were done based on the DEM method, firstly, the corn kernel bonding particle model was established based on the discrete element method. The EDEM discrete element simulation software was used to carry out the optimization simulation of the orthogonal experiment. The number of teeth, depth of blade, crushing gap and speed of the cutter roll were selected as the simulation test factors. The grain crushing rate was tested and investigated. The optimal combination parameter was determined: the number of teeth was 48, the depth of blade was 5 mm, the crushing gap was 2 mm, and the speed of the knife roll was 59 r/s. Under these conditions, the grain crushing rate was 90.35%, and the relative error between the simulation test and the bench test result was 3.36%. After the end of the bench test, the materials were screened with a Pennsylvania screen. The materials can be divided into four types: small, standard, large and incompletely crushed, with a ratio of 1.3:6:1.8:0.9, which was consistent with the simulation test results. The various indicators of the bench test met the industry standards, achieving high crushing of corn kernels and high working efficiency.

Key words: corn silage harvester; crushing of grains; discrete element; broken knife dish; disc type

收稿日期: 2020-08-02 修回日期: 2020-09-10

基金项目: 山东省农业重大应用技术创新项目(SD2019XM001)和山东省农机装备研发创新计划项目(2017YF004)

作者简介: 牟孝栋(1996—),男,硕士生,主要从事现代农业机械装备研究,E-mail: 1296797130@qq.com

通信作者: 耿端阳(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业机械装备研究,E-mail: dygxt@sdut.edu.cn

0 引言

随着国民生活水平的提高,对肉、奶产品的需求迅速上升,对于青贮饲料的需求也显著提高。在此背景下,国家适时发布了“供给侧改革”、“种植业结构调整”、“粮改饲”等国家政策,有效刺激了饲草料和青贮玉米的生产^[1-4]。但现有玉米青贮机存在籽粒破碎率低和揉搓效果差等问题,严重影响了青贮玉米的饲料品质提高和营养成分的转化吸收。故开展青贮玉米籽粒破碎与揉搓技术研究,对提高青贮玉米饲料口感、改善营养吸收率、改进发酵效果,具有重要的现实意义。

国内外学者针对青贮饲料的揉搓破碎做了相关研究,LISOWSKI 等^[5-6]研究了秸秆切断和揉搓过程功耗变化规律,并建立了相应的数学模型;尚坦等^[7-8]研究了秸秆揉搓丝化的结构变化规律,建立了丝状秸秆流流体模型,确定了揉搓盘的最佳转速和最大承载喂入速度;薛飞^[9]设计了对辊式揉搓破碎装置并对其进行了有限元分析和模态分析,证明了该技术可大幅度降低能耗、提高破碎率;梁荣庆等^[10]对切碎及揉搓部件进行了设计,探明了切碎刀数量及喂入速度对青贮玉米切断长度的影响规律;张锋伟等^[11]建立了玉米秸秆离散元模型,通过物理试验和虚拟试验相结合得出了玉米秸秆揉丝破碎过程的力学特性;赖庆辉等^[12]基于离散元法开展了三七种苗分离装置关键结构参数对分离效果影响的正交仿真试验,确定了最优参数组合并结合台架试验加以验证;韩丹丹等^[13-14]运用 EDEM - CFD 耦合分析方法,建立了玉米籽粒粘结颗粒模型,完成了内充气吹式排种器结构的优化和工作性能的改进。

离散元法 (Discrete element method, DEM) 是 20 世纪 70 年代由 CUNDALL 和 STRACK 首先提出的^[15],适用于模拟离散颗粒组合体在准静态或动态条件下的变形及破碎分析,证明了该方法具有参数调整方便,试验过程便于可视化、参数化控制等优势,为采用该方法开展青贮玉米籽粒破碎分析与研究提供了便利。

针对上述研究结论,结合当前籽粒破碎的研究现状,本文设计碟盘式青贮玉米籽粒破碎试验台,分析破碎碟盘的结构,开展基于 EDEM 离散元仿真的优化设计和正交仿真试验等研究,为改善青贮玉米籽粒破碎效果,提高饲料养分转化率提供理论支持。

1 试验台结构与工作原理

1.1 整机结构

碟盘式青贮玉米籽粒破碎试验台结构如图 1 所

示,主要由控制台、喂入装置(a)、切断装置(b)、揉搓破碎装置(c)和抛送装置(d)组成;揉搓破碎装置三维图如图 2 所示,主要由碟盘式揉搓破碎刀盘、破碎辊轴和带轮等组成,两揉搓辊的转速相同、方向相反,实现了青贮玉米籽粒的差速挤压、揉搓和剪切破碎,有效提高了籽粒破碎效果。

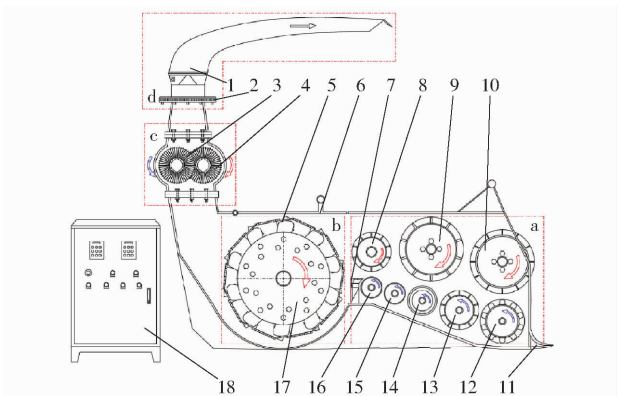


图 1 青贮玉米籽粒破碎试验台结构简图

Fig. 1 Test bench for crushing silage corn kernels

1. 抛料筒 2. 抛料筒转向器 3. 左破碎辊 4. 右破碎辊 5. 切刀 6. 切断观察盖 7. 定刀 8. 后齿形辊 9. 中齿形辊 10. 前齿形辊 11. 喂入口 12. 预压辊 13. 从动齿辊 14. 前光面辊 15. 中光面辊 16. 后光面辊 17. 切断滚筒 18. 控制台

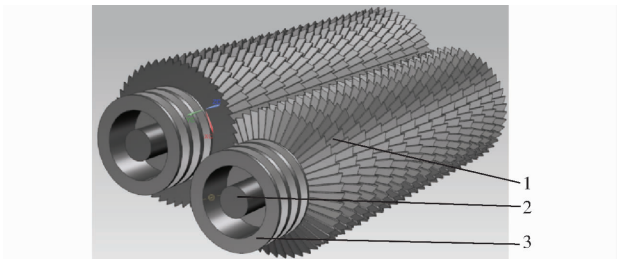


图 2 揉搓破碎装置结构图

Fig. 2 Structure diagram of kneading and crushing device

1. 碟盘式揉搓破碎刀盘 2. 破碎辊轴 3. 带轮

1.2 工作原理

碟盘式青贮玉米籽粒破碎试验台的动力由两个电机分别提供,大电机额定功率为 30 kW,为果穗切片和籽粒破碎装置提供动力;小电机额定功率为 10 kW,为喂入装置提供动力。工作时将果穗从喂入口喂入,由浮动式前齿形辊与预压辊配合抓取、预压缩和输送,其中浮动式结构提高了喂入口对带穗茎秆喂入量的适应性,前齿形辊提高了对茎秆和果穗的抓取能力;为了提高切碎长度(果穗切片)的一致性,后续齿形辊速度逐级递增,以实现茎秆姿态的调直;当茎秆输送到定刀位置时,茎秆在后齿形辊和后光面辊的夹持以及定刀辅助支撑下,由动刀完成茎秆的均匀切碎与果穗的切片;切碎后的茎秆与果穗被动刀抛送到由左、右破碎辊组成的籽粒破碎系统;在此位置,由于两相对向内转动的左右破碎辊为

圆盘式结构,所以其作用于片状果穗、茎秆上下表面的速度各不相同,由此实现对茎秆与果穗的挤压、揉搓和剪切,随后破碎物料在其惯性力作用下,从抛送筒抛出机外,完成茎秆的切碎揉搓和籽粒的揉搓破碎。

2 关键部件设计

圆盘式青贮玉米籽粒破碎试验台的籽粒破碎主要是通过两个相对向内旋转的蝶形齿盘对籽粒上下表面施加不同的作用力实现籽粒的揉搓、挤压和剪切,所以圆盘式揉搓破碎刀盘的结构参数对籽粒破

碎效果影响非常大。
刀盘各参数范围选定参考《农机设计手册》及文献[1-10]。

2.1 圆盘式破碎刀盘形状尺寸

针对对辊式籽粒破碎装置籽粒破碎截面面积有限制约了作业效率提高的问题,本籽粒破碎装置改直线型破碎截面为齿形破碎截面,实现了破碎截面面积的成倍增加;为了简化结构,圆盘结构设计为对称锥形,提高了两破碎辊间隙的一致性和轴向载荷的自平衡,大幅度提高了作业效率、减少了功率消耗、延长了机具寿命。具体结构如图3所示。

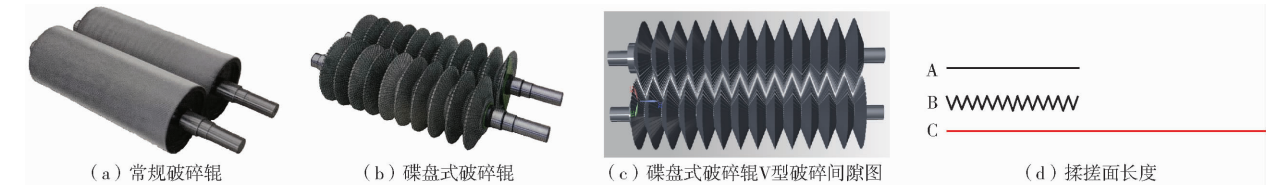


图3 圆盘式破碎辊与常规破碎辊对比图

Fig. 3 Comparison diagrams of disc crushing roller and conventional crushing roller
A. 常规破碎辊破碎长度 B. 圆盘式破碎辊破碎间隙形状 C. 圆盘式破碎辊破碎展开长度

考虑青贮玉米收获机一般作业效率较高,若采用传统差速辊式籽粒破碎装置,则必然导致差速辊转速很高,严重影响装置使用的可靠性。在破碎间隙确定的条件下,要实现破碎辊转速的降低,必须加大籽粒破碎截面的面积,故本破碎装置采用了圆盘

式破碎辊结构。
借鉴国内外破碎刀盘设计参数以及《农机设计手册》设计要求,本圆盘锥角设计为 $\alpha = 40^\circ$,设圆盘式破碎辊与常规破碎辊破碎间隙宽度均为 δ , h 为切刀深度,如图4a所示,则破碎装置破碎截面面积 S 为

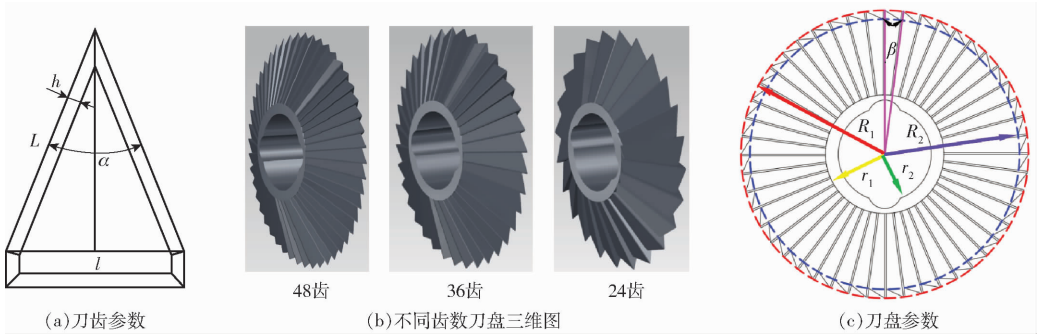


图4 刀盘示意图

Fig. 4 Diagrams of knife plate

$$S = 2n\delta L = \frac{n\delta l}{\sin \frac{\alpha}{2}} \tag{1}$$

式中 L ——圆盘斜边长,mm
 l ——圆盘宽度,mm
 n ——圆盘个数,个

圆盘式破碎辊与常规破碎辊破碎截面面积之比为

$$\frac{S}{S_0} = \frac{2n\delta L}{n\delta l} = \frac{1}{\sin \frac{\alpha}{2}} \tag{2}$$

式中 S_0 ——常规破碎辊破碎面积, mm^2

显然, $\sin(\alpha/2)$ 是一个小于1的数,表明通过该

方式可以显著提高籽粒破碎的截面面积。当 α 取 40° 时,通过化简得 $S/S_0 \approx 2.9$,即圆盘式破碎辊破碎面积是常规破碎辊的2.9倍,作业效率大大提高。

为增强圆盘运动过程对籽粒的揉搓效果,圆盘表面设置为齿形结构,以增强对籽粒的揉搓。其次,齿数越少,对籽粒的揉搓效果越差;齿数越多,圆盘对籽粒的揉搓作用越强,但是当齿数过多时,必然导致齿间距过小,很容易造成茎秆、穗轴、碎粒在此粘附,最终影响籽粒破碎效果。不同齿数刀盘如图4b。为满足刀盘的耐磨性与可靠性,刀盘材料选用合金工具钢9SiCr,刀盘的结构参数如图4c所示,

孔径为 r_2 ,内圆为刀盘底圆(即刀盘底端所在圆周)且半径为 r_1 ,中间圆为刀盘齿根圆(即刀盘齿根所在圆周)且半径为 R_2 ,外圆为刀盘齿顶圆(即刀盘齿顶所在圆周)且半径为 R_1 ,其中

$$m = \frac{360}{\beta} \tag{3}$$

式中 β ——单个刀片所占的角度, ($^\circ$)
 m ——刀齿数,个

2.2 破碎机理分析

籽粒在通过破碎间隙时发生揉搓破碎,破碎过程的运动分析如图 5 所示,取点 P 为破碎间隙中的任意一点,两刀辊的角速度相同,即 $\omega_1 = \omega_2$,则位于该点的左、右破碎刀盘的线速度分别为

$$\begin{cases} v_1 = l_1 \omega_1 \\ v_2 = l_2 \omega_2 \end{cases} \tag{4}$$

式中 $v_1、v_2$ ——两刀盘在点 P 处的线速度, m/s
 $l_1、l_2$ ——点 P 与两刀盘圆心的距离, mm

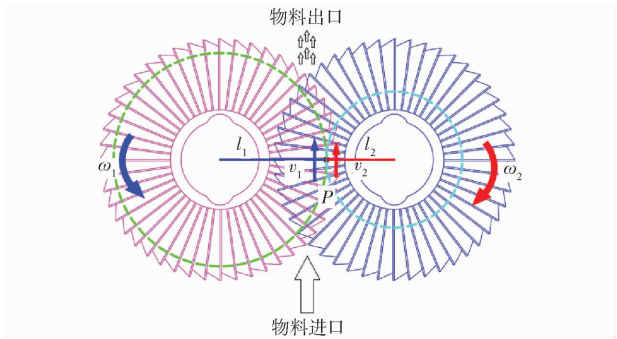


图 5 籽粒破碎过程运动分析

Fig. 5 Movement analysis of grain crushing process

由于 $l_1 > l_2$,所以 $v_1 > v_2$,表明碟盘式籽粒破碎的本质还是差速籽粒破碎原理,即主要通过揉搓实现籽粒的破碎。

取最不利于籽粒破碎的位置为例(该点距离两刀盘圆心相等),对籽粒自身进行运动与受力分析,如图 6,当籽粒位于破碎间隙点 P 处时,由于籽粒两端距辊轴中心的长度不同,籽粒左右两端存在如前所述的速度差,导致籽粒两端所受的力大小不同(此例中 $F_{11} > F_{22}、F_{21} > F_{12}$),左右两端皆形成扭矩

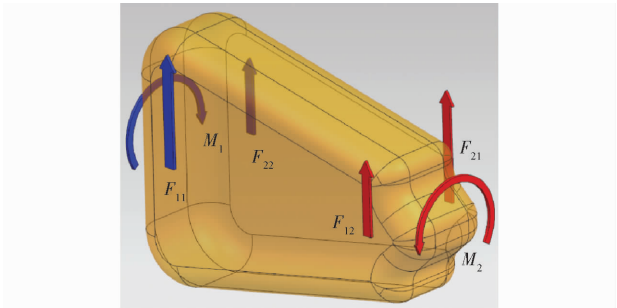


图 6 籽粒揉搓破碎运动与受力分析

Fig. 6 Analysis of motion and force of seed material

$M_1、M_2$,且方向相反,从而实现籽粒的剪切和揉搓破碎。即使籽粒位于两刀盘线速度相等的最不利位置,也可以达到此揉搓效果。

为了更清楚地研究籽粒破碎的过程,对各个阶段进行受力分析,如图 7 所示,包含籽粒进入初破碎阶段(A)、籽粒破碎阶段(B)和破碎籽粒抛出阶段(C), l_0 为破碎间隙宽度, $v_1、v_2$ 分别为两刀盘的线速度。

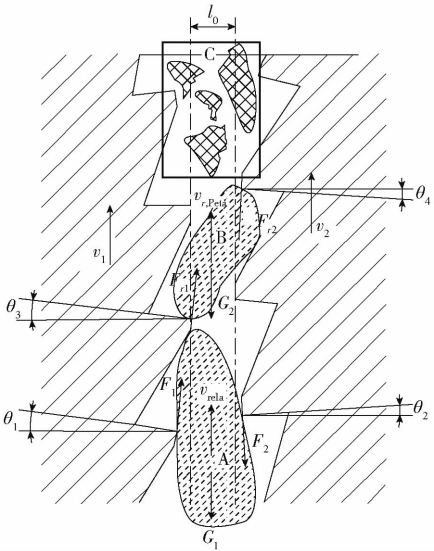


图 7 籽粒破碎过程力学分析

Fig. 7 Mechanical analysis of grain crushing process

在阶段 A,籽粒被两刀盘紧紧夹住送入破碎间隙中,进行初步破碎,并将未破碎的大颗粒送入间隙逐渐变窄的 B 阶段,此阶段的受力情况为

$$F_1 \cos \theta_1 = F_2 \cos \theta_2 + G_1 \tag{5}$$

式中 $\theta_1、\theta_2$ ——刀刃与水平方向的夹角, ($^\circ$)
 $F_1、F_2$ ——刀刃对籽粒的剪切力, N
 G_1 ——籽粒所受重力, N

在阶段 B,大颗粒在两刀盘的差速挤压下完成进一步破碎,达到破碎要求并向上抛出。此阶段的受力情况为

$$F_{r1} \cos \theta_3 = F_{r2} \cos \theta_4 + G_2 \tag{6}$$

式中 $\theta_3、\theta_4$ ——刀刃与水平方向的夹角, ($^\circ$)
 $F_{r1}、F_{r2}$ ——刀刃对籽粒的剪切力, N
 G_2 ——籽粒所受重力, N

在阶段 C,籽粒被破碎成细小物料向上抛出,沿抛料筒壁抛出机外。

整个破碎过程包含先挤压、再揉搓、后剪切,即大于破碎间隙的籽粒先被挤压破碎成能容于该间隙的物料,进而在两差速碟盘作用下实现揉搓,完成第 2 阶段的破碎,最后在揉搓过程遇到齿形刃口则对其剪切,完成第 3 阶段的破碎,所以整个过程籽粒破碎效果较好。

3 离散元仿真模型建立

破碎装置工作过程中伴随着大量的颗粒破碎,采用离散元软件 EDEM 对揉搓破碎过程进行仿真优化分析,通过模拟籽粒的仿真破碎过程,确定各结构参数影响揉搓破碎工作性能的显著性次序,并确定结构参数的最优组合,避免部件试制的盲目性,降低了成本。在仿真模拟前对玉米籽粒的力学参数和粘结参数进行测定。

3.1 接触模型

由于试验要观察玉米籽粒的微观颗粒破碎状况,故选用颗粒粘结模型(Bonded particle model, BPM),BPM 模型主要由力和力矩对其的接触作用进行描述,是由 Potyondy 和 Cundall 于 2004 年提出的,用以模拟岩石破碎分析^[16]。当颗粒 A 与颗粒 B 发生并行粘结时,在圆形接触面上会产生重叠量 L ,从而产生切向力矩、法向力矩、切向剪应力、法向剪应力。而当外界作用力大于任何一个临界切向、法向力矩或剪应力时,A、B 粒子分离,颗粒发生破碎。颗粒粘结模型如图 8 所示。

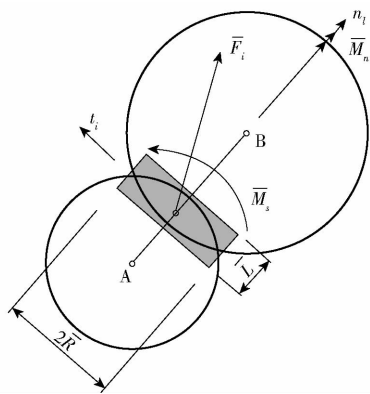


图 8 颗粒粘结模型

Fig. 8 Particle bond model

3.2 颗粒模型

本文所用玉米籽粒选用种植面积较广的郑单 958,随机选取 100 粒籽粒,采用游标卡尺重复测量玉米籽粒的尺寸参数(籽粒长度、籽粒上宽度、籽粒下宽度、籽粒厚度)取平均值。从籽粒中挑选最接近平均测量值的一粒玉米籽粒(图 9a),在 UG10.0 中按照测量值绘制籽粒的三维模型(图 9b),考虑到籽粒的破碎分析(若填充颗粒过大,破碎效果将下降)与计算机仿真时间(若填充颗粒较小,则仿真时间过长),将模型导入 EDEM 中选用半径为 0.52 mm 的小球进行填充,形成籽粒的离散模型,每个籽粒由 295 个 0.52 mm 的小球填充而成(图 9c),根据测得的玉米籽粒参数生成 BPM 模型,各小球之间通过粘结键形成一个整体(图 9d)。

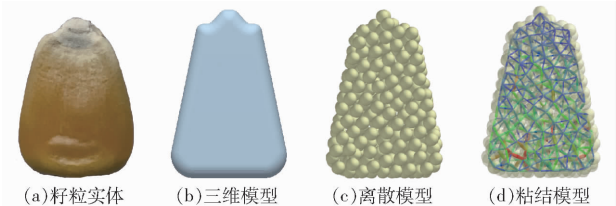


图 9 玉米籽粒模型

Fig. 9 Corn grain models

3.3 仿真参数确定

根据仿真要求破碎刀盘被赋予材质特性为合金工具钢。玉米颗粒、合金工具钢的力学性能和相互之间的物理特性如表 1 所示^[17]。设置 EDEM 中时间步长为 1×10^{-5} s,为尽可能详细提取颗粒的运动信息,在 EDEM 中每 0.005 s 保存一次数据。试验前采用烘干法对籽粒进行含水率测定,籽粒平均含水率为 40.2%,并对籽粒进行压缩试验和剪切试验得到最大压缩力和剪切力,利用理论计算得到粘结参数并在 EDEM 中分别反复进行压缩和剪切过程参数调试,根据其在压缩及剪切破坏中的状态与物理试验对比进行粘结参数的确定,结果如表 2 所示。

表 1 玉米籽粒物性参数

Tab. 1 Physical properties of corn kernels		
参数	玉米颗粒	合金工具钢
泊松比	0.4	0.25
剪切模量/Pa	1.31×10^8	8×10^{10}
密度/(g·cm ⁻³)	1.43	7.85
碰撞恢复系数(与颗粒)	0.151	0.702
静摩擦因数(与颗粒)	0.086	0.344
动摩擦因数(与颗粒)	0.072	0.053

表 2 玉米籽粒粘结参数

Tab. 2 Corn grain binding parameters	
参数	数值
法向刚度/(N·m ⁻¹)	9.86×10^8
切向刚度/(N·m ⁻¹)	6.15×10^8
临界法向应力/Pa	1.56×10^6
临界切向应力/Pa	9.27×10^5
粘结半径/mm	1

4 仿真试验与结果分析

4.1 破碎过程数值模型

仿真过程采用颗粒替换实现在 EDEM 软件中生成玉米籽粒离散元模型,之后立即给颗粒添 BPM 粘结模型以便牢固粘结。由于仿真过程需要处理的数据庞大,考虑到计算机运行速度,减少仿真计算时间,仿真过程中只生成 30 个玉米籽粒离散元模型,仿真过程如图 10 所示。

4.2 试验过程

为使玉米籽粒达到最佳破碎效果,探究刀盘各

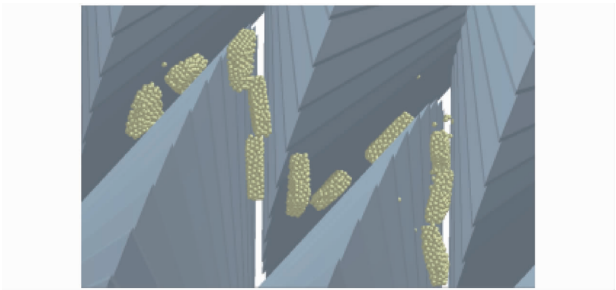


图 10 离散元仿真

Fig. 10 Discrete element simulation environment

结构参数(刀盘齿数、刀刃深度)与装置工作参数(破碎间隙、刀辊转速)的最佳配比,以籽粒破碎率为试验考察指标,分析四因素对破碎性能的影响。在参数选取时,考虑如果破碎间隙太小或转速过高,都会造成机器耗能过高,使得破碎成本和机械磨损迅速提高,所以本试验中,间隙最小取 2 mm、转速最大取 60 r/s。采用正交仿真试验,试验因素及编码如表 3 所示,表 3 各参数的选择参考文献[8-10]。根据 Design-Expert 软件中的响应曲面法进行试验方案设计与数据分析,以籽粒破损率作为试验考核指标,正交方案结果如表 4 所示, x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 为因素编码值。

表 3 试验因素与编码

Tab. 3 Test factors and levels

编码	因素			
	齿数	刀刃深度/mm	间隙/mm	转速/($\text{r}\cdot\text{s}^{-1}$)
-1	24	4	2	40
0	36	5	3	50
1	48	6	4	60

4.3 破碎性能评价指标

由于籽粒的破碎过程较为复杂,破碎物料的大小不一,难以确保全都达到破碎标准。据《全株玉米制作青贮饲料机械揉搓质量评价技术规范》与青贮玉米收获机行业标准要求,破碎籽粒体积为整粒体积的 1/8~1/3 即为合格^[18-26]。籽粒破碎率是指破碎程度达到合格标准的籽粒数占总籽粒数的百分比^[27-35]。所以本文对不同大小的物料进行了分类,其中不同体积大小的破碎籽粒采用宾州筛进行筛分,包括小型物料、标准物料、大型物料、未完全破碎物料。其中,小型物料为体积小于玉米籽粒体积 1/8 的物料(图 11a),标准物料为体积在玉米籽粒体积 1/8~1/4 的物料(图 11b),大型物料为体积在玉米籽粒体积 1/4~1/3 的物料(图 11c),未完全破碎物料为体积大于玉米籽粒体积 1/3 的物料(图 11d)。

图 12 是在刀齿数为 48、刀刃深度为 5 mm、破碎

表 4 正交试验方案与结果

Tab. 4 Orthogonal test scheme and results

试验 编号	试验因素				籽粒破碎率 $y_1/\%$
	x_1	x_2	x_3	x_4	
1	1	1	0	0	80.82
2	1	-1	0	0	80.75
3	1	0	1	0	72.50
4	1	0	-1	0	93.32
5	1	0	0	1	83.61
6	1	0	0	-1	78.84
7	-1	1	0	0	77.45
8	-1	-1	0	0	78.13
9	-1	0	1	0	67.71
10	-1	0	-1	0	88.22
11	-1	0	0	1	77.26
12	-1	0	0	-1	74.22
13	0	1	1	0	68.57
14	0	1	-1	0	89.74
15	0	1	0	1	79.02
16	0	1	0	-1	76.31
17	0	-1	1	0	69.16
18	0	-1	-1	0	89.85
19	0	-1	0	1	79.80
20	0	-1	0	-1	76.98
21	0	0	1	1	75.90
22	0	0	1	-1	68.53
23	0	0	-1	1	91.34
24	0	0	-1	-1	87.11
25	0	0	0	0	79.20
26	0	0	0	0	81.84

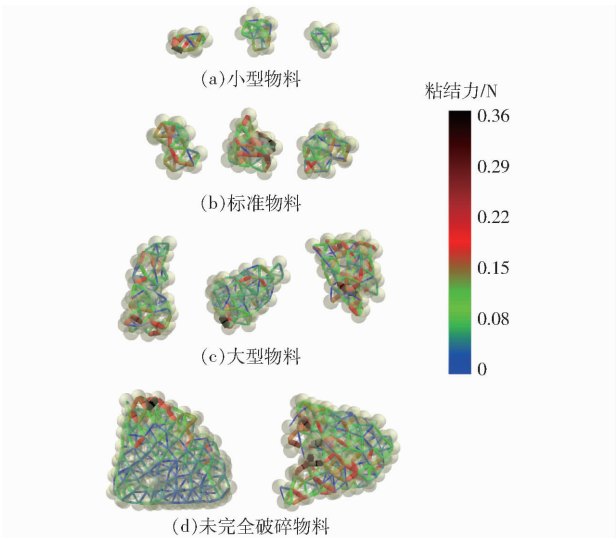


图 11 4 种不同类型物料

Fig. 11 Four types of materials

间隙为 2 mm、刀辊转速为 60 r/s 的条件下,破碎过程中粘结键数量的变化规律。从图中可以看出 30 粒玉米一共生成了 46 350 个粘结键,每个玉米籽粒有 1 545 个粘结键,平均每个颗粒有 5.23 个粘结键

相连接,可见模型粘结相当牢固。

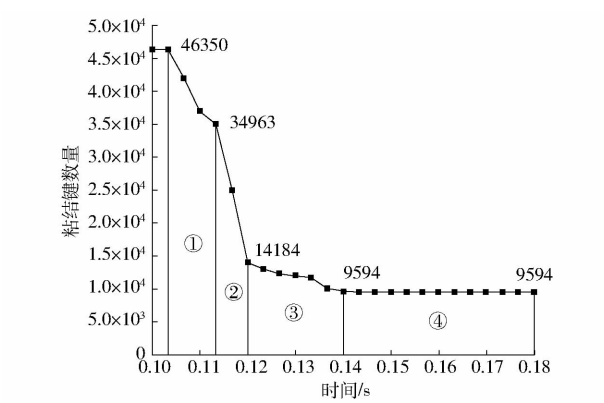


图 12 破碎过程粘结键数量变化曲线
Fig. 12 Change of bond number during crushing

从 0.103 s 到 0.113 s (阶段①),籽粒刚接触到刀盘并开始破碎,破碎速度较缓;从 0.113 s 到 0.120 s (阶段②),籽粒进入刀盘破碎间隙,在刀盘的高速旋转下,粘结键数量快速下降;从 0.120 s 到 0.140 s (阶段③),粘结键下降速度缓慢,在 0.140 s 之后 (阶段④) 不再发生破碎,粘结键数量保持不变。表明籽粒破碎主要发生在阶段②。

4.4 破碎性能分析

利用 Design-Expert 软件进行多元回归拟合和方差分析,结果如表 5 所示。由表 5 可知,籽粒破碎率 y_1 回归模型的显著性水平 $P < 0.001$,表明该回归模型显著性水平高,失拟项显著性水平 $P > 0.25$,表明回归模型拟合效果好。根据方差 F 可以判断各参数对籽粒破碎率的影响程度, x_1 、 x_3 、 x_4 对籽粒破碎

表 5 回归模型方差分析

Tab.5 Variance analysis of regression model					
变异来源	平方和	自由度	均方	<i>F</i>	<i>P</i>
模型	1 301.36	14	92.95	37.65	< 0.000 1 ***
x_1	60.80	1	60.80	24.33	0.000 4 ***
x_2	1.18	1	1.18	0.48	0.504 0
x_3	1 164.47	1	1 164.47	471.68	< 0.000 1 ***
x_4	51.83	1	51.83	21.00	0.000 8 ***
$x_1 x_2$	0.14	1	0.14	0.057	0.815 8
$x_1 x_3$	0.024	1	0.024	0.009	0.923 2
$x_1 x_4$	0.75	1	0.75	0.30	0.593 0
$x_2 x_3$	0.068	1	0.068	0.027	0.871 6
$x_2 x_4$	0.003	1	0.003	0.001	0.972 7
$x_3 x_4$	2.46	1	2.46	1.00	0.339 2
x_1^2	1.46	1	1.46	0.59	0.457 8
x_2^2	6.66	1	6.66	2.70	0.128 9
x_3^2	2.06	1	2.06	0.83	0.381 1
x_4^2	4.97	1	4.97	2.01	0.183 5
残差	27.16	11	2.47		
失拟	23.67	10	2.37	0.68	0.747 1

注:***表示影响极显著($P < 0.001$)。

率的影响达极显著,而各因素的交互作用不明显。4 个参数的影响程度由大到小依次为破碎间隙、刀齿数、刀辊转速、刀刃深度。

籽粒破碎率正交试验响应曲面如图 13 所示,图 13a 中,籽粒破碎率随刀齿数的增加而逐渐增大且趋势逐渐变缓,变化幅度显著,籽粒破碎率随刀刃深度的增加呈现先增大后减小的趋势,变化幅度显著;图 13b 中,籽粒破碎率随破碎间隙的增加而逐渐增大,变化幅度非常显著,籽粒破碎率随刀辊转速的增加而逐渐增大,变化幅度显著。通过仿真正交试验确定最优参数组合为:刀齿数 47.88、刀刃深度 5.05 mm、破碎间隙 2.01 mm、刀辊转速 59.11 r/s,此参数组合下籽粒破碎率为 93.39%。

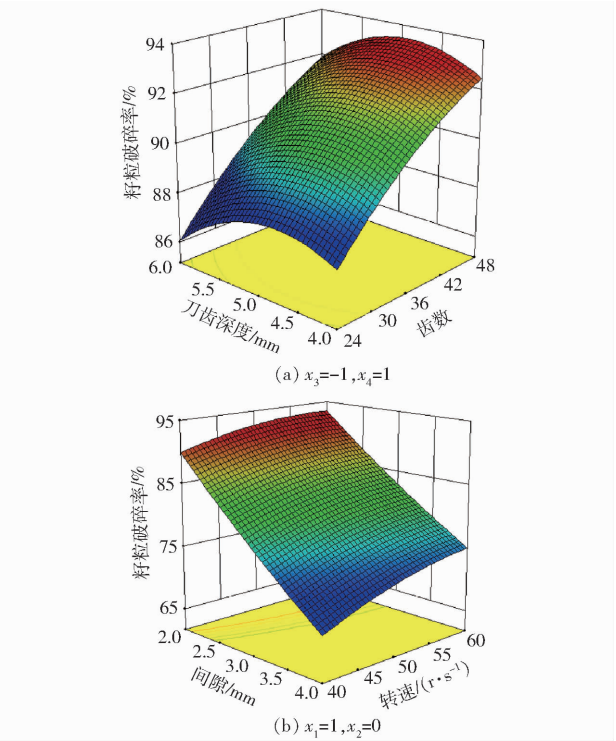


图 13 籽粒破碎率正交试验响应曲面
Fig. 13 Orthogonal test response surfaces of grain
breakage rate

5 验证试验

依据仿真试验结果,在研制的试验台上开展了相关验证试验,如图 14 所示。根据青贮收获试验台参数可调范围,选择一组接近优化值的参数进行台架试验:刀齿数 48、刀刃深度 5 mm、破碎间隙 2 mm、刀辊转速 59 r/s,在此参数组合下开展验证试验,玉米品种的选择与籽粒测量时一致,为郑单 958,籽粒含水率在 40.2%。

在输送带上平铺一定量的果穗,然后开动机器,每组试验进行 2 min,试验重复 3 次,每组试验结束后,对破碎籽粒进行集中分类并计算,得到 3 组破碎



图 14 籽粒破碎台架试验

Fig. 14 Seed crushing bench test

率,其平均值得籽粒破碎率为 90.35%,仿真试验与台架试验相对误差为 3.36%,符合青贮玉米饲料籽粒破碎率要求。籽粒破碎效果及分类如图 15 所示,共分为 4 类:小型物料、标准物料、大型物料和未

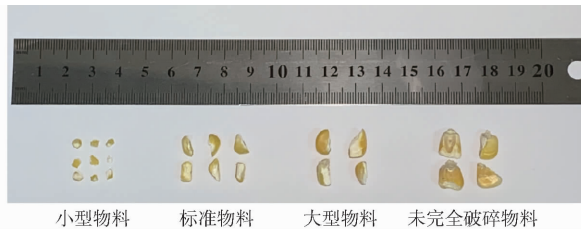


图 15 玉米籽粒破碎后物料形状

Fig. 15 Material shape of corn kernels after crushing

完全破碎物料,其占比分别为 1.3:6:1.8:0.9,与仿真试验结果相同。

6 结论

(1) 研制了青贮玉米籽粒破碎试验台,设计了碟盘式揉搓破碎刀盘,并对其进行了破碎机理分析,确定了影响破碎效果的 4 个主要参数:刀齿数、刀刃深度、破碎间隙和刀辊转速。

(2) 建立了玉米籽粒的粘结模型,开展了基于离散元软件 EDEM 的正交试验,探寻结构参数对籽粒破碎性能的影响,仿真试验结果表明,刀齿数、破碎间隙和刀辊转速对破碎性能影响显著,刀刃深度对破碎性能影响不显著,参考仿真结果选出最优组合参数为:刀齿数 48、刀刃深度 5 mm、破碎间隙 2 mm、刀辊转速 59 r/s。此时,破碎装置仿真破碎效果最优。

(3) 对破碎后的籽粒按照大小进行分类,结果表明台架试验与仿真试验的籽粒破碎大小分布规律一致。对仿真优化试验结果进行了样机试验,试验结果为:籽粒破碎率为 90.35%,仿真试验与台架试验相对误差为 3.36%,满足青贮机破碎要求。

参 考 文 献

- [1] 刘刚,赵满全,王文明,等.带有径向喂入装置的揉碎机性能试验[J].农业机械学报,2010,41(增刊):110-116.
LIU Gang,ZHAO Manquan,WANG Wenming,et al. Experiment on straw rubber with radial feeding device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(Supp.):110-116. (in Chinese)
- [2] 车刚,万霖,张伟,等.青贮饲料收获机实体设计与试验[J].农业机械学报,2010,41(2):82-86.
CHE Gang,WAN Lin,ZHANG Wei,et al. Solid design and experiment of forage harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(2):82-86. (in Chinese)
- [3] 杨颖,尚琴琴,王英博,等.4QX-12 型玉米青贮收获机的切碎性能分析与试验[J].农机化研究,2017,39(3):42-46.
YANG Ying,SHANG Qinqin,WANG Yingbo,et al. Chopped performance analysis and test on 4QX-12 silage maize harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2017,39(3):42-46. (in Chinese)
- [4] 吴晓杰,韩鲁佳,刘贤.不同切碎方式对全株玉米青贮饲料品质影响的试验研究[J].农业工程学报,2006,22(5):215-217.
WU Xiaojie,HAN Lujia,LIU Xian. Effects of different mechanical processes on the quality of whole-plant corn silage[J]. Transactions of the CSAE,2006,22(5):215-217. (in Chinese)
- [5] LISOWSKI A,KLONOWSKI J,SYPULA M,et al. Energy of feeding and chopping of biomass processing in the working units of forage harvester and energy balance of methane production from selected energy plants species[J]. Biomass and Bioenergy,2019,128:105301.
- [6] LISOWSKI A,SWIATEK K,KLONOWSKI J,et al. Movement of chopped material in the discharge spout of forage harvester with a flywheel chopping unit: measurements using maize and numerical simulation[J]. Biosystems Engineering,2012,111(4):381-391.
- [7] 尚坦,郭贵生.秸秆揉丝机揉搓机构内流场仿真与分析[J].农机化研究,2014,36(8):32-35.
SHANG Tan,GUO Guisheng. The simulation and analysis of the crop rubbing filament machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2014,36(8):32-35. (in Chinese)
- [8] 尚坦. 秸秆揉丝机揉搓机构内流场仿真及流固耦合分析[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2014.
SHANG Tan. Analysis of fluid-structure interaction and simulation of internal flow field for cornstalk rubbing silk machine[D]. Yangling: Northwest A&F University,2014. (in Chinese)
- [9] 薛飞. 自走式青饲料收获机关键部件设计及仿真[D]. 秦皇岛:河北科技师范学院,2017.
XUE Fei. Design and simulation of key components of self-walking green fodder harvester[D]. Qinhuangdao: Hebei Normal University of Science & Technology,2017. (in Chinese)
- [10] 梁荣庆,张翠英,李青江,等.4QG-2 型青贮收获机切碎揉搓装置的设计[J].农机化研究,2018,40(11):99-104.
LIANG Rongqing,ZHANG Cuiying,LI Qingjiang,et al. Design of chopping and rubbing device of 4QG-2 silage harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2018,40(11):99-104. (in Chinese)
- [11] 张锋伟,宋学锋,张雪坤,等.玉米秸秆揉丝破碎过程力学特性仿真与试验[J].农业工程学报,2019,35(9):58-65.
ZHANG Fengwei,SONG Xuefeng,ZHANG Xuekun,et al. Simulation and experiment on mechanical characteristics of kneading and crushing process of corn straw[J]. Transactions of the CSAE,2019,35(9):58-65. (in Chinese)
- [12] 赖庆辉,袁海阔,胡子武,等.滚筒板齿式三七种苗分离装置结构设计与试验[J].农业机械学报,2018,49(4):121-129.

- LAI Qinghui, YUAN Haikuo, HU Ziwu, et al. Design and experiment on seedling separation device of *Panax notoginseng* seedlings based on roller zigzag mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 121–129. (in Chinese)
- [13] 韩丹丹, 张东兴, 杨丽, 等. 基于 EDEM–CFD 耦合的内充气吹式排种器优化与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(11): 43–51.
- HAN Dandan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. Optimization and experiment of inside-filling air-blowing seed metering device based on EDEM–CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 43–51. (in Chinese)
- [14] 韩丹丹, 张东兴, 杨丽, 等. 内充气吹式玉米排种器工作性能 EDEM–CFD 模拟与试验[J]. 农业工程学报, 2017, 33(13): 23–31.
- HAN Dandan, ZHANG Dongxing, YANG Li, et al. EDEM–CFD simulation and experiment of working performance of inside-filling air-blowing seed metering device in maize[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(13): 23–31. (in Chinese)
- [15] CUNDALL P A, STRACK O D L. A discrete numerical model for granular assemblies[J]. Geotechnique, 1979, 29(1): 47–65.
- [16] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 2004, 41(8): 1329–1364.
- [17] 赵娅. 2ZLF–500 型轮刀式青贮饲料切碎机的结构组成及试验研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(5): 130–134.
- ZHAO Ya. The structure and experimental study on optimization design of 2ZLF–500 wheel type silage cutter[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(5): 130–134. (in Chinese)
- [18] 郝金魁, 温长文, 王进朝, 等. 型穗茎兼收型玉米联合收获机的研制[J]. 农机化研究, 2012, 34(12): 80–83.
- HAO Jinkui, WEN Changwen, WANG Jinchao, et al. Development and test of maize combine for corn picker and straw forage[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(12): 80–83. (in Chinese)
- [19] 丛宏斌, 李明利, 李汝莘, 等. 4YQK–2 型茎秆青贮打捆玉米收获机的设计[J]. 农业工程学报, 2009, 25(10): 96–100.
- CONG Hongbin, LI Mingli, LI Rushin, et al. Design of 4YQK–2 combine harvester for corn and straw ensilage[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10): 96–100. (in Chinese)
- [20] 王进华, 王泽群, 刘汉武, 等. 9265 型自走式矮秆青贮饲料收获机研究[J]. 农机化研究, 2012, 34(2): 109–112, 126.
- WANG Jinhua, WANG Zequn, LIU Hanwu, et al. 9265 self-propelled mower table silage harvester research[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(2): 109–112, 126. (in Chinese)
- [21] 袁洪方, 王德成, 王光辉, 等. 秸秆铡切揉搓装置优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 153–157.
- YUAN Hongfang, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Design and experiment of straw cutting and rubbing process device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 153–157. (in Chinese)
- [22] 万霖, 车刚, 汪春, 等. 4QZR–30 型青贮饲料收获机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2008, 39(3): 187–190.
- [23] 丛宏斌, 王克恒, 李汝莘, 等. 锥辊式玉米秸秆揉搓装置的设计[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 81–84, 92.
- CONG Hongbin, WANG Keheng, LI Rushen, et al. Design of a corn stalk rubbing cone[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 81–84, 92. (in Chinese)
- [24] 高梦祥, 郭康权, 杨中平, 等. 玉米秸秆的力学特性测试研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(4): 47–49, 52.
- GAO Mengxiang, GUO Kangquan, YANG Zhongping, et al. Study on mechanical properties of cornstalk[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(4): 47–49, 52. (in Chinese)
- [25] 陈立东, 李学永, 李亚婧, 等. 非对行全喂入式玉米青贮机立式转筒割台的设计[J]. 农机化研究, 2014, 36(11): 133–136.
- CHEN Lidong, LI Xueyong, LI Yajing, et al. Design on vertical drum cutting table for non-rowing and full-feeding type corn forage harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(11): 133–136. (in Chinese)
- [26] 李冰, 王顺喜, 杨炳南. 青饲切碎机刀片受力对比分析[J]. 农业机械学报, 2005, 36(5): 49–52.
- LI Bing, WANG Shunxi, YANG Bingnan. Force analysis of two kinds of moving blades on chopper[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(5): 49–52. (in Chinese)
- [27] 贾洪雷, 马成林. 曲面直刀刀切碎与抛送变量的研究[J]. 农业机械学报, 2002, 33(6): 41–43.
- JIA Honglei, MA Chenglin. Study on chopping and throwing parameters of the chopping knife with curved surface and straight edge[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2002, 33(6): 41–43. (in Chinese)
- [28] 乌兰图雅, 王春光, 祁少华, 等. 揉碎玉米秸秆螺旋输送性能试验分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(21): 51–59.
- WULAN Tuyu, WANG Chunguang, QI Shaohua, et al. Test and analysis of performance of screw conveyor for rubbing and breaking corn straw[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21): 51–59. (in Chinese)
- [29] 贾洪雷, 王增辉, 马成林, 等. 玉米秸秆切碎抛送装置的试验研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(6): 96–99.
- JIA Honglei, WANG Zenghui, MA Chenglin, et al. Chopping and throwing mechanism of corn straw[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(6): 96–99. (in Chinese)
- [30] 赵学林, 韩增德, 崔俊伟, 等. 玉米茎秆切碎装置现状分析[J]. 农机化研究, 2014, 36(7): 245–248, 252.
- ZHAO Xuelin, HAN Zengde, CUN Junwei, et al. The research and development of greenhouse equipment for rice factory-seedling[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2014, 36(7): 245–248, 252. (in Chinese)
- [31] 吕金庆, 杨颖, 尚琴琴, 等. 玉米青贮收获机切碎性能试验研究[J]. 东北农业大学学报, 2016, 47(4): 102–108.
- LÜ Jinqing, YANG Ying, SHANG Qinqin, et al. Study on chopping performance of silage maize harvester[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2016, 47(4): 102–108. (in Chinese)
- [32] 任冬梅. 一种全齿轮传动青饲料收获机关键技术研究 and 设计[D]. 济南: 山东大学, 2017.
- REN Dongmei. Research and design on all-gear transmission corn silage machine[D]. Jinan: Shandong University, 2017. (in Chinese)
- [33] 苏宏煜. 玉米秸秆挤丝揉搓机的分析与设计[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2013.
- SU Hongyu. The analysis and design for the rub silk machine of corn stover[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [34] 崔涛, 刘佳, 杨丽, 等. 基于高速摄像的玉米种子滚动摩擦特性试验与仿真[J]. 农业工程学报, 2013, 29(15): 34–41.
- CUI Tao, LIU Jia, YANG Li, et al. Experiment and simulation of rolling friction characteristic of corn seed based on high-speed photography[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15): 34–41. (in Chinese)
- [35] 王云霞, 梁志杰, 张东兴, 等. 基于离散元的玉米种子颗粒模型种间接触参数标定[J]. 农业工程学报, 2016, 32(22): 36–42.
- WANG Yunxia, LIANG Zhijie, ZHANG Dongxing, et al. Calibration method of contact characteristic parameters for corn seeds based on EDEM[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(22): 36–42. (in Chinese)