doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.07.012

基于 Abaqus 的耦合式玉米秸秆皮穰分离仿真与试验

黄婉媛[1]　任德志[1]　宫元娟[1]　白雪卫[1]　匙　皓[2]　刘程伟[2]
(1.沈阳农业大学工程学院,沈阳 110866;2.沈阳格仿科技有限公司,沈阳 110866)

摘要:为提高玉米秸秆皮穰分离率、推进秸秆高值化利用进程,采用 Abaqus/Explicit 动力学显式求解器和中心差分求解法,对异向碾压和异向碾压锤切 2 种耦合式皮穰分离方法进行模拟分析,确定最佳耦合分离方式为异向碾压锤切耦合作用,进而试制秸秆异向碾压锤切皮穰分离试验台,并确定最佳工作与结构参数。以刀盘转速、碾压揭皮辊转速和刀片滑切角为试验因素,以秸秆皮穰分离率为试验指标,通过三元二次正交回归组合试验对分离试验台进行参数优化,利用 Design-Expert 进行数据分析,建立因素与指标间数学模型。试验表明:在刀盘转速为 449 r/min、碾压揭皮辊转速为 226 r/min、刀片滑切角为 46°的最优工作参数组合下,皮穰分离率为 88%,分离后的皮穰呈段状,满足实际生产需求。

关键词:玉米秸秆;段状皮穰分离;耦合分离法;显式动力学;Abaqus
中图分类号:S233.5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2021)07-0124-10　　**OSID**:

Coupling Separation Simulation Analysis and Test of Corn Stalk Rind-pith Based on Abaqus

HUANG Wanyuan[1]　REN Dezhi[1]　GONG Yuanjuan[1]　BAI Xuewei[1]　CHI Hao[2]　LIU Chengwei[2]
(1. *College of Engineering*, *Shenyang Agricultural University*, *Shenyang* 110866, *China*
2. *Shenyang GridSim Technology Ltd.*, *Co.*, *Shenyang* 110866, *China*)

Abstract: Corn stalk is a kind of biomass resource that can be developed and utilized, with its comprehensive utilization can stabilize the balance of agricultural ecology and alleviate the pressure of energy and environment. In China, corn stalk is rich in yield and widely used. Because the mixed existence of rind and pith will affect its utilization effect, corn stalk rind-pith separation is an effective way to increase the use ratio of this biomass resource. Based on dynamic explicit solver of Abaqus in conjunction with central difference algorithm, both of rind-pith separation coupling modes differential directions rolling compaction and anisotropic pound-cutting with rolling compaction were simulated and analyzed to improve the rind-pith separation rate and promote the process of high value utilization of corn stalk. The simulation results showed that the breaking forms of the two separation modes were mainly tensile breaking and the breaking process was similar; differential directions rolling compaction method just made pith and rind de-bonding and did not realize separation of them, but anisotropic pound-cutting with rolling compaction can do it. Considering the practical application of the separated pith and rind of corn stalk, anisotropic pound-cutting with rolling compaction was selected as the best separation mode applying to corn stalk rind-pith separation test bench and used to determine the best working and structural parameters. Orthogonal regression combination test was used to optimize the working parameters of the test bench, taking cutting disks rotation speed, peeling rollers rotation speed and blade sliding angle as test factors, stalk rind-pith separation rate as test index and corn stalk of 1st ~ 7th nodes as research object. After applying the variance analysis and the response surface analysis, regression models between factors and index was established by using the data processing software Design-Expert. Results showed that the cutting disks rotation speed, blade sliding angle the interaction between two previous

收稿日期:2020-09-07　修回日期:2020-10-10
基金项目:国家自然科学基金项目(51405311)、辽宁省重点研发计划项目(2019JH8/10200019)、辽宁省教育厅重点项目(LSNZD201707)和辽宁省教育厅项目(LSNQN201904)
作者简介:黄婉媛(1993—),女,博士生,主要从事玉米秸秆机械化研究,E-mail:2665069011@qq.com
通信作者:宫元娟(1963—),女,教授,博士生导师,主要从事秸秆利用技术及装备研究,E-mail:yuanjuangong@163.com

factors, cutting disks rotation speed and peeling rollers rotation speed had significant effect on the stalk rind-pith separation rate; the significance sequence of influencing factors was blade sliding angle, cutting disks rotation speed and peeling rollers rotation speed. After optimizing the parameters of the model, it indicated that the maximum corn stalk rind-pith separation rate was 88% and segment length of corn stalk was 27 mm under the optimal working parameters combination of cutting disks rotation speed was 449 r/min, peeling rollers rotation speed was 226 r/min and blade sliding angle was 46°. The actual production demand was met and guidance for the design of corn stalk rind-pith separator was provided.

Key words: corn stalk; section rind-pith separation; coupling separation method; explicit dynamic; Abaqus

0　引言

我国玉米种植面积广，玉米秸秆年产量可达 2.4 亿 t[1]。玉米秸秆在工业、农业、餐饮业等领域应用广泛，高纤维素含量的外皮适合作纸张、人造板及一次性餐具的原材料，蛋白质及营养元素含量丰富的内穰经处理可作为家畜饲料和乙醇提取的原料[2]。将玉米秸秆外皮和内穰分离，作为不同原料加以利用，有利于提高秸秆资源利用的附加值，推动玉米秸秆工业化利用进程[3-4]。

玉米秸秆皮穰的高效分离是制约秸秆高值化利用的瓶颈。目前，学者们大多研究单株整秆皮穰分离技术，单株秸秆分道式喂入，对秸秆打击、搓擦、脱叶，切开秸秆、压平、切削内穰，最后导出外皮[4-7]。该分离技术较为成熟，但分离效率较低，且在田间难以实现秸秆皮穰的直接分离，制约了其推广应用。另一种分离技术是基于外皮和内穰弹塑性形变差异的碾压切割式分离，该项技术通过对秸秆群的碾压、揭皮迫使皮穰间产生间隙，而后切段实现皮穰分离，分离后的皮穰呈段状，符合实际生产需求[8]。廖娜等[9]标定玉米秸秆的粘弹性参数，建立了双层复合薄壁实芯圆柱 ANSYS 有限元模型，对松弛模量参数误差进行模拟与试验，验证了模型的可行性与有效性。张李娴[10]建立了玉米秸秆皮、穰和整秆的力学特性离散元模型，并对秸秆打捆机械进行优化。有限元仿真模拟在玉米秸秆物料特性求解等方面得到了应用。

本文利用 Abaqus/Explicit 动力学显式求解器和中心差分求解法，模拟分析异向二次碾压和异向碾压锤切 2 种耦合作用的皮穰分离过程，确定分离秸秆皮穰的最佳方式，进而试制耦合分离皮穰试验台，通过三元二次正交旋转组合试验研究刀盘转速、碾压揭皮辊转速和刀片滑切角对玉米秸秆皮穰分离率的影响，优化试验台工作参数与结构参数，以提高其皮穰分离率。

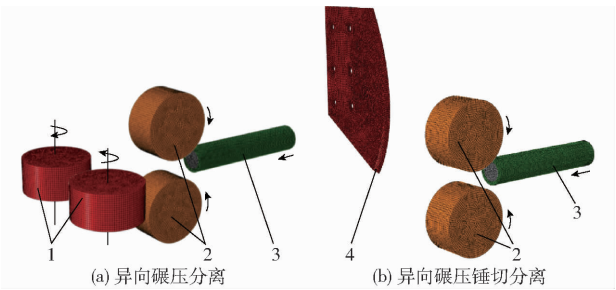
1　耦合分离方式仿真设计

基于前期研究成果[8]，本文提出了异向碾压和异向碾压锤切 2 种耦合分离方式。采用 Abaqus 有限元仿真软件对 2 种耦合分离方式进行工况模拟，根据皮穰间粘结单元损伤程度，确定出分离效果最优的分离方式应用于分离试验台中。

1.1　模型建立

1.1.1　耦合分离结构模型

锤切刀片选用阿基米德螺线型刀刃曲线，可降低切割阻力，提高刀具寿命[11]。SolidWorks 中的自定义方程建模适合阿基米德螺线型刀刃曲线的建模，故本文采用 SolidWorks 完成分离装置模型的建立和装配。为提高计算效率，确保求解稳定性[12]，对碾压揭皮辊的齿、动力装置等特征进行简化，结果如图 1 所示。



(a) 异向碾压分离　　(b) 异向碾压锤切分离

图 1　分离方式简化模型

Fig. 1　Simplified model of two separation modes

1. 二级异向碾压装置　2. 一级碾压装置　3. 玉米秸秆　4. 二级异向锤切装置

1.1.2　玉米秸秆模型

对秸秆进行简化建模，假设其为具有横截面各向同性的圆柱体，内部纤维沿轴向均匀整齐分布，不考虑茎节处差异[13]。在 Abaqus 中建立直径为 35 mm 的圆柱整体[13]，切割出厚度为 0.1 mm 的薄层来模拟 Cohesive 单元，模型中外皮厚度为 1 mm[10]。此种方法建立的 Cohesive 单元与其相邻的单元共节点，可传递力和位移。

1.2　网格划分、材料属性及边界设置

六面体网格模型计算规模小，多用于动力学分析中[14]。两种分离方式的简化模型如图 1 所示，分离装置分析模型采用六面体单元形状，选用进阶算法扫掠而成。异向碾压分离方式单元为 74 880 个、

节点数量为 64 752 个;异向碾压锤切分离方式单元为 96 883 个、节点数量为 84 900 个。将碾压辊和刀片设置为离散刚体,分别赋予模型中的分离装置、玉米秸秆皮、穰及粘结单元 Cohesive 相应的截面属性及材料属性[9,13],如表 1 所示。剪切刀片、玉米秸秆皮和穰单元类型为 C3D8R;碾压辊单元类型为 R3D4;粘结层单元类型为 COH3D8。根据工作原理约束各部件,设定碾压辊及刀片的工作转速分别为 300、600 r/min,预定义场中玉米秸秆初速度设置为 1 m/s。

表 1 材料属性参数

Tab.1 Material attribute parameters

部位	密度/($g\cdot cm^{-3}$)	泊松比	弹性模量/MPa	断裂能/($J\cdot m^{-2}$)
玉米秸秆外皮	1.12	0.3	3 845.70	4×10^{5}
玉米秸秆内穰	0.83	0.1	41.83	1.54×10^{4}
粘结单元 Cohesive	0.83	0.1	41.83	500

1.3 接触设置

模型中接触构件间的相互作用利用接触算法完成[15]。全局设定通用接触形式(General contact),异向碾压锤切模型中刀具与玉米整秆间新增面-面接触(Surface-to-surface contact)。该接触形式采用节点-表面离散方法,遵循有限滑移公式。在接触设置过程中,主面的网格要比从面稀疏[16]。接触属性包括法向和切向作用。因异向碾压锤切工况中,玉米秸秆和刀具之间非恒接触,且硬接触具有自动判定接触失效和接触压力不受限制的特点,则法向作用选用硬接触("Hard" contact)。切向作用选用库伦模型表示接触对间摩擦特性,库伦摩擦计算式为

$$f_{crit}=\mu p \tag{1}$$

式中 f_{crit}——临界切应力,MPa

μ——摩擦因数

p——法向接触压力,MPa

1.4 瞬态动力学显式求解

本文模拟的为高速锤切问题,且皮穰分离过程涉及粘结单元退化和失效问题。为使结果精确可靠,避免因大变形产生不收敛问题,本文基于可解决数值分析的显式动力学理论,采用 Abaqus/Explicit 动力显式求解器进行仿真分析,结构系统在 t 时刻的通用运动方程为

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{U}}_t+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{U}}_t+\boldsymbol{K}\boldsymbol{U}_t=\boldsymbol{R}_t \tag{2}$$

式中 $\boldsymbol{U}_t$——t 时刻节点位移向量

$\boldsymbol{M}$——质量矩阵 $\boldsymbol{C}$——阻尼系数矩阵

$\boldsymbol{K}$——刚度矩阵

$\boldsymbol{R}_t$——t 时刻节点载荷向量

锤切过程中速度快,刀具对物料具有冲撞效果,直接积分法中的中心差分求解法适用于冲击、碰撞等工况的求解,因此采用此法对运动方程进行求解。对加速度和速度变量采用差分代替,即

$$\ddot{\boldsymbol{U}}_t=\frac{1}{(\Delta t)^2}(\boldsymbol{U}_{t-\Delta t}-2\boldsymbol{U}_t+\boldsymbol{U}_{t+\Delta t}) \tag{3}$$

$$\dot{\boldsymbol{U}}_t=\frac{1}{2\Delta t}(\boldsymbol{U}_{t-\Delta t}-\boldsymbol{U}_{t+\Delta t}) \tag{4}$$

联立式(2)~(4),消除 $\ddot{\boldsymbol{U}}_t$ 和 $\dot{\boldsymbol{U}}_t$ 得 $t+\Delta t$ 时刻节点的位移向量 $\boldsymbol{U}_{t+\Delta t}$ 为

$$\boldsymbol{U}_{t+\Delta t}=\left[\boldsymbol{R}_t-\left(\boldsymbol{K}-\frac{2}{(\Delta t)^2}\boldsymbol{M}\right)\boldsymbol{U}_t-\left(\frac{1}{(\Delta t)^2}\boldsymbol{M}-\frac{1}{2\Delta t}\boldsymbol{C}\right)\boldsymbol{U}_{t-\Delta t}\right]\left(\frac{1}{(\Delta t)^2}\boldsymbol{M}+\frac{1}{2\Delta t}\boldsymbol{C}\right)^{-1} \tag{5}$$

由式(5)可知,求解 $\boldsymbol{U}_{t+\Delta t}$ 时,只需 $t+\Delta t$ 时刻以前的状态变量 $\boldsymbol{U}_t$ 和 $\boldsymbol{U}_{t-\Delta t}$ 即可。由于 $\ddot{\boldsymbol{U}}_0$、$\dot{\boldsymbol{U}}_0$、$\boldsymbol{U}_0$ 已知,将 $t=0$ 与式(3)、(4)联立可得

$$\boldsymbol{U}_{-\Delta t}=\boldsymbol{U}_0-\Delta t\dot{\boldsymbol{U}}_0+\frac{(\Delta t)^2}{2}\ddot{\boldsymbol{U}}_0 \tag{6}$$

将式(6)和 $t=0$ 代入式(5)得起始增量 $\boldsymbol{U}_{\Delta t}$。

1.5 仿真分析

Abaqus 中可提供识别拉伸和剪切两种破坏形式的场输出:MMIXDME。MMIXDME 为损伤演化过程中混合断裂模式的比例,可用于判断 Cohesive 单元主要破坏形式。当 MMIXDME 为 0~0.5 时,表示单元以拉伸破坏为主;当 MMIXDME 为 0.5~1 时,表示单元以剪切破坏为主;当 MMIXDME 为 -1 时,表示未被破坏。仿真计算结果共有 20 个分析子步。

1.5.1 一级碾压过程

异向碾压和异向碾压锤切 2 种耦合式分离方法对玉米秸秆的第 1 步处理方式均为碾压,碾压过程如图 2 所示。如图 2a 所示,玉米秸秆开始被碾压时,皮穰由于弹塑性差异,导致两侧粘结层受拉,但仍未分离;如图 2b 所示,随着纵向变形量的增加,皮穰横向变形差异加大,致使皮穰间粘结层单元损伤,横向粘结单元断裂,断裂处皮穰间产生分离;如图 2c 所示,当秸秆通过碾压辊时,秸秆外皮回弹位移大于内穰回弹位移,且由于一端被碾压辊夹持,自由端产生翘曲,致使皮穰纵向部分粘结层单元损伤失效,皮穰分离。由图 2c 可以看出,经过碾压辊的玉米秸秆皮穰间未完全分离,仍有部分粘结在一起。由图 2 可知,MMIXDME 大体取值范围为 0~0.5,粘结单元以拉伸破坏为主。

1.5.2 异向碾压耦合

异向碾压耦合式秸秆皮穰分离效果如图 3 所

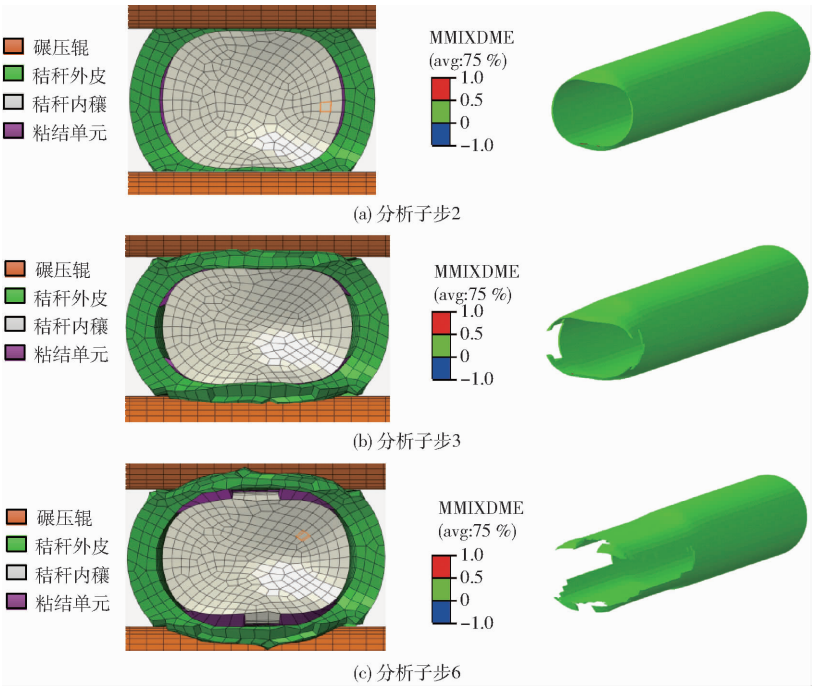


图 2　一级碾压过程及粘结层破坏形式

Fig. 2　The first stage rolling compaction process and breaking form of cohesive

示，分析图 3 可知，经过一级碾压且皮穰未完全分离的玉米秸秆经过异向碾压耦合作用，皮穰间粘结层均失效，皮穰间脱粘。该过程中，粘结层破坏形式如图 4 所示，MMIXDME 取值范围为 0 ~ 0.5，粘结单元以拉伸破坏为主。

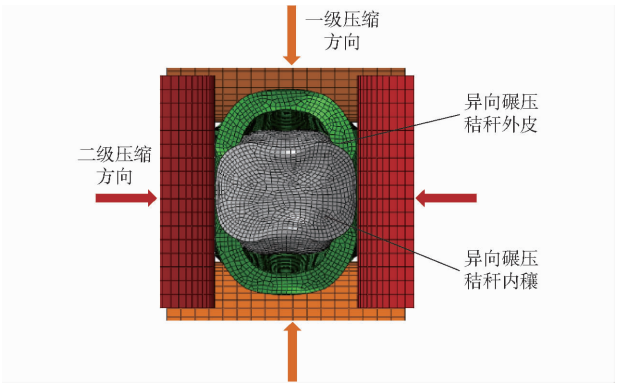


图 3　异向碾压耦合式分离效果

Fig. 3　Separation effect of different-directions rolling compaction coupling mode

由上述内容可知，异向碾压耦合式分离方法效果显著。但实现异向碾压耦合式分离方法的传动结构复杂，处理后的秸秆只是皮穰间脱粘，并未实现分离。经过切段和粉碎的玉米秸秆便于饲料、造纸、板材等方面应用[17]和运输，因此经异向碾压耦合式分离方法处理的玉米秸秆运输或使用过程中仍需二次处理。

1.5.3　异向碾压锤切耦合

异向碾压锤切耦合式秸秆皮穰分离效果如图 5 所示，由图 5 可知，当经过一级碾压且皮穰未完全分

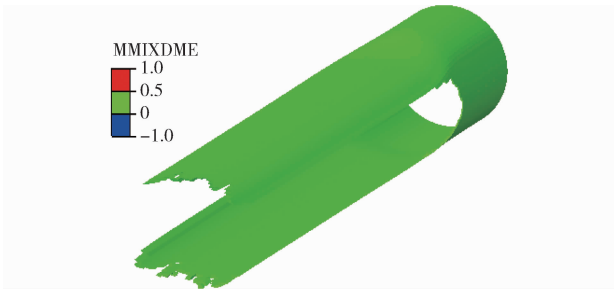


图 4　异向碾压耦合过程中粘结层破坏形式

Fig. 4　Breaking form of cohesive in process of different-directions rolling compaction coupling separation

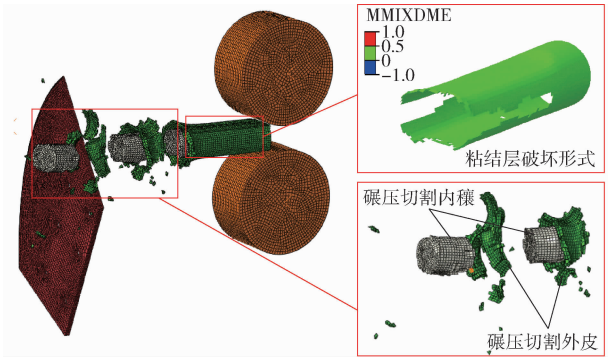


图 5　异向碾压锤切耦合式分离效果和粘结层破坏形式

Fig. 5　Sepration effect and cohesive breaking form in process of the anisotropic pound-cutting with rolling compaction

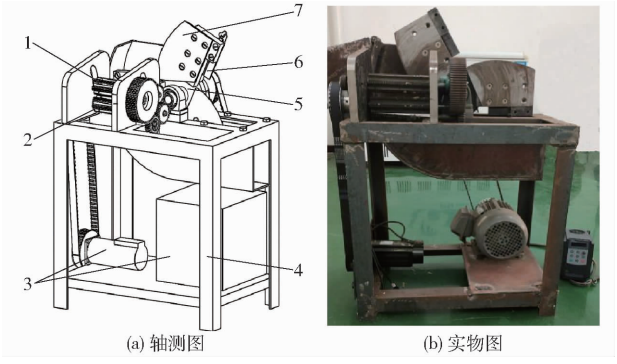
离的玉米秸秆经过异向锤切耦合作用，皮穰间的粘结单元均失效，皮穰脱离，经过切割后的截面处外皮向四周翻卷，皮穰间分离后呈段状皮穰。该过程中 MMIXDME 取值范围为 0 ~ 0.5，粘结单元以拉伸破坏为主。

由上述内容可知,异向碾压锤切耦合式分离方法效果显著,分离后的玉米秸秆呈段状,皮与穰可直接用于原料,满足生产需求。因此异向碾压锤切耦合分离方式符合生产实际应用。

2 试验台设计

2.1 结构特点

异向碾压锤切式玉米秸秆皮穰分离试验台,基于玉米秸秆皮穰弹塑性差异,采用碾压与锤击切割方向互异的施力方式,利用等滑切角的阿基米德螺线型圆盘刀实现玉米秸秆皮穰分离。切割过程中,刀片与进给物料间有恒定推挤角,可将刀片对物料所施的力分解成与碾压方向平行和与空间垂直的两个分力,实现进给物料异向受力分离。如图 6 所示,异向锤切式玉米秸秆皮穰分离试验台规格为 610 mm×404 mm×850 mm,其结构主要包括:动碾压揭皮辊、定碾压揭皮辊、弧形刀片、旋转刀盘、抛送叶片、电机和机架。动碾压揭皮辊和定碾压揭皮辊齿间间隙为 5 mm,动碾压揭皮辊在弹簧的连接作用下,可在轨道内随玉米秸秆的直径变化而滑动,通过其自身重力和弹簧拉力对喂入的玉米秸秆进行碾压。弧形刀片为阿基米德螺线型蛤刃结构,刃线原点与刀盘旋转中心点重合,且滑切角、推挤角恒定。旋转中心距初始剪切点 85 mm,喂料口宽 160 mm。3 片弧形刀片通过螺栓固定于刀片座和旋转刀盘上,方便拆卸更换,不同滑切角的刀片如图 7 所示。



(a) 轴测图 (b) 实物图

图 6 异向碾压锤切式玉米秸秆皮穰分离试验台

Fig. 6 Corn stalk rind-pith separation test bench based on anisotropic pound-cutting with rolling compaction mode

1. 动碾压揭皮辊 2. 定碾压揭皮辊 3. 电机 4. 机架 5. 旋转刀盘 6. 抛送叶片 7. 弧形刀片

2.2 工作原理

玉米秸秆群输送至碾压试验台的两碾压辊之间,经其碾压及揭皮后,由于玉米秸秆外皮与内穰存在弹塑性差异,二者间轴向与横向的粘结力被削弱甚至产生脱粘现象;碾压后的秸秆进入异向锤切装置,被旋转的弧形刀切成段状,秸秆由于受到与碾压

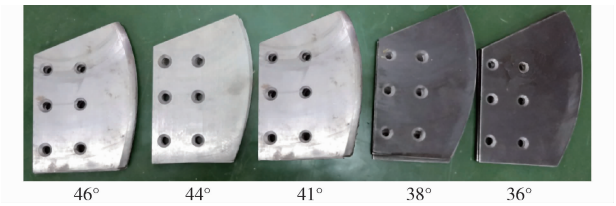


图 7 不同滑切角的刀片

Fig. 7 Blades of different sliding angles

方向互异的切割力、刀具撞击作用,致使外皮与内穰分离更加充分;而后依靠抛送叶片和切刀高速旋转产生的气动作用将皮穰带出。

2.3 刀片设计

2.3.1 等滑切角刀刃曲线设计

阿基米德螺线的极坐标方程[18]为

$$R = a\mathrm{e}^{\frac{\phi}{\tan\tau}} \tag{7}$$

式中 R——极径,mm

a——常数

τ——滑切角,(°)

ϕ——极角,(°)

如图 8 所示,刀刃曲线$\widehat{CC'}$绕旋转中心 O 点转动,b 为喂料口宽度,c 为刀片起始切入点到旋转中心 O 点的距离,称之为回转中心距,本文取 c = 85 mm。v、v_t和 v_n分别为切割线速度、切向切割线速度和法向切割线速度。

如图 8a 所示,随着刀刃线上任意一切割点从点 A 转变成 A',矢径 r 增加了 dr 变成 r',若 lim$\mathrm{d}\theta\to 0$,则 $l_{AB'}\approx l_{AB}$。滑切角计算式为

$$\tan\tau = \frac{l_{AB}}{l_{A'B}} = \frac{r\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}r} \tag{8}$$

若滑切角 τ 为定常数,即 $\tan\tau = k$,代入式(8)得

$$\frac{1}{r}\mathrm{d}r = \frac{1}{k}\mathrm{d}\theta \tag{9}$$

式(9)两边积分得到刃口曲线方程

$$r = d\mathrm{e}^{\frac{\theta}{k}} \tag{10}$$

d 为积分常数,当 $\theta = 0$ 时,$r = d = c = 85$ mm。

如图 8b 所示 γ 为推挤角,由式

$$\tau + \alpha_2 = \gamma + \alpha_2 = 90° \tag{11}$$

可知 $\tau = \gamma$。

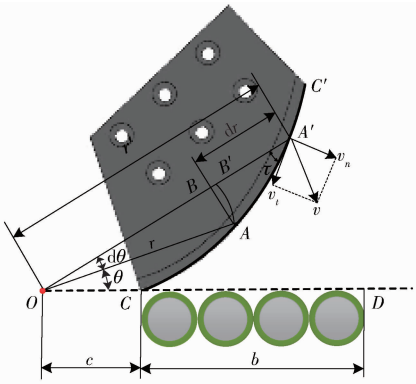
由于刀片刃口曲线的滑切角恒定不变,则本文设计的刀片在切割过程中具有恒定的滑切角和推挤角。

2.3.2 滑切角设计

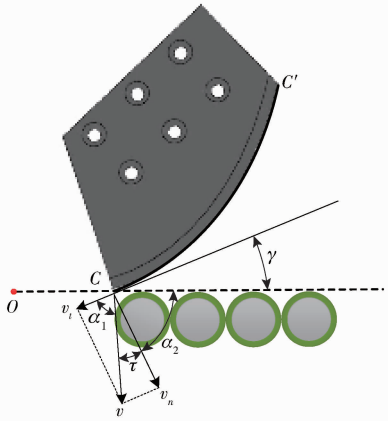
切割物料时,为防止物料被挤出,切割副的推挤角 γ 应小于动定刀与物料摩擦角之和,即满足

$$\gamma \leqslant \varphi_1 + \varphi_2 \tag{12}$$

式中 φ_1——动刀对物料的摩擦角,(°)



(a) 刀刃曲线推导示意图



(b) 刀刃滑切角与推挤角关系推导示意图

图 8　等滑切角刀刃曲线几何关系

Fig. 8　Geometric relationship of uni-sliding-angle blade curve

φ_2——定刀对物料的摩擦角，(°)

本文推挤角选取范围为 $10° \leqslant \gamma \leqslant 50°$[9,19-21]；滑切角越大，切割越省力，同时会增加对物料的推挤作用，因此本文滑切角 τ 初始取值范围为 $35° \leqslant \tau \leqslant 55°$[21-22]；随着切割转角增大，切割过程趋于平稳，平均切割扭矩降低，本文切割转角 β 的初始取值范围为 $45° \leqslant \beta \leqslant 60°$[22]。为保证刀具将喂入的物料全部切断，刀刃曲线的最大半径应不小于图 8a 所示的 l_{OD}，即 $b + c$。拟定试验台一次可同时喂入 4 ~ 5 根秸秆，所以取 $b = 160$ mm，则 $r_{max} = 245$ mm。

若 $\beta = 45°$、$\theta = 45°$时，物料皆被切断，此时 $r = r_{max}$。将 $\theta = 45°$、$r = 245$ mm 代入式(10)得 $\tau_{min} = 36.57°$；同理，若切割转角 $\beta = 65°$，将 $\theta = 65°$、$r = 245$ mm代入式(10)得 $\tau_{max} = 46.98°$。综上所述，刀片的滑切角和推挤角取值范围为[36.57°,46.98°]，且在许用区间内。考虑加工工艺精度，本文 τ、γ 取 36° ~ 46°。

2.3.3　刃口形状、刀片厚度及安装设计

蛤刃刀刃较厚，抗冲击，不宜卷崩，使用寿命较长。深入切割时，根据平面分散应力原理，其所受阻力较小，切割更省力[23-24]，因此本文试验台采用蛤刃刀片。为防止工作过程中变形过大，刀片厚度取 $\delta = 5$ mm[11]。剪切装置上刀片数量应适量，本文将 3 把刀片按等间距角安装在圆刀盘上，最大工作半径 $r_{max} = 0.245$ m，最小工作半径 $r_{min} = 0.085$ m。

2.3.4　刃角设计

图 9 所示截面 *NHFM* 为蛤刃法向横截面，ξ 与 ω 分别为蛤刃的最大和最小刃角。

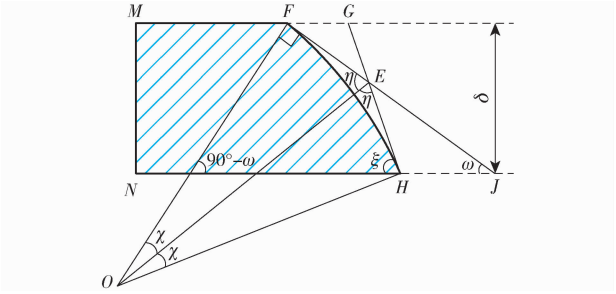


图 9　刃角曲线几何关系

Fig. 9　Geometric relationship of blade angle curve

由图 9 几何关系可知 $\eta = 90° + \dfrac{\omega - \xi}{2}$ 且 $l_{HE} = l_{EF}$，因此可换算得出

$$\chi = \frac{\xi - \omega}{2} \tag{13}$$

$$l_{GE} = \frac{\delta}{\sin\xi} - l_{HE} \tag{14}$$

$$l_{EJ} = \frac{\delta}{\sin\omega} - l_{EF} \tag{15}$$

由 $\triangle FEG \sim \triangle HEJ$ 可得

$$\frac{l_{GE}}{l_{EF}} = \frac{l_{HE}}{l_{EJ}} \tag{16}$$

将式(13) ~ (15)代入式(16)可得

$$l_{EF} = \frac{\delta}{\sin\xi + \sin\omega} \tag{17}$$

蛤刃曲率 κ 计算式为

$$\kappa = \frac{1}{l_{OF}} \approx \frac{1}{\dfrac{l_{EF}}{\tan\chi}} = \frac{(\sin\xi + \sin\omega)\tan\dfrac{\xi - \omega}{2}}{\delta} \tag{18}$$

刃角过大会增加切割阻力，过小则刀刃易损易崩，寿命低，刀刃角控制在 15° ~ 30° 之间较优[25-27]，即 $15° \leqslant \omega \leqslant \xi \leqslant 30°$。利用 Matlab 可计算出 $\xi = 30°$、$\omega = 15°$时 κ 取得最大值。蛤刃越不平坦，锤击效果越好，对皮穰分离越有效，而曲率是衡量几何平坦程度的标准，二者呈正相关。所以本文将蛤刃刃口角变化区间设计为 15° ~ 30°。

3　皮穰分离试验与参数优化

3.1　试验材料

试验材料取自沈阳农业大学试验基地，株高为 1.6 ~ 2.0 m，除穗后有 8 ~ 12 节。从中选取成熟、根

部直径(35 ±5) mm 的玉米秸秆,整株去叶、自然风干至含水率为 20% ±5%。由于玉米秸秆顶部直径小,抗弯折性能较差,收获过程中损伤形式主要是弯折,保留从根部数第 1 ~7 节玉米秸秆作为皮穗分离试验的试验材料,其力学特性如表 1 所示。

3.2 试验指标

据皮穗分离试验台的功能,选用皮穗分离率作为其工作性能的评价指标[8]。皮穗分离率是指完全实现皮穗分离的皮穗质量与喂入物料质量百分比,计算式为

$$S = \frac{m_s}{m_t} \times 100\% \tag{19}$$

式中 S——皮穗分离率,%

m_s——完全分离的皮穗质量,g

m_t——喂入物料总质量,g

皮穗间存在连丝粘黏现象视为不完全分离,不计入已分离质量。每组试验重复 5 次后取平均值。

3.3 试验因素

为优化锤切式玉米秸秆皮穗分离试验台工作性能,基于前期设计和预试验,以刀盘转速、碾压揭皮辊转速及刀片滑切角作为试验因素。

3.3.1 刀盘转速

当切割线速度 v 取值范围为 4 ~24 m/s 时,能够斩断物料且耗能较低[28-29]。刀片转速 N 计算公式为

$$N = \frac{60v}{2\pi\rho} \tag{20}$$

式中 ρ——刀片工作半径,m

由式(20)计算可知,刀片转速取值为 449.38 ~935.44 r/min 时符合圆盘刀片转速设计要求。试验过程中圆盘刀转速通过变频器控制在 449 ~935 r/min。

3.3.2 碾压揭皮辊转速

考虑到玉米秸秆的利用形式需求,其切段长度 L 为 13 ~50 mm[25]。碾压揭皮辊转速 n 计算公式为

$$n = \frac{kNL}{\pi D(1-\varepsilon)} \tag{21}$$

式中 D——碾压揭皮辊外径,本文取 54 mm

ε——打滑系数,经验取值范围为 0.05 ~0.07,本文取 0.05

根据公式(21)计算分析,确定揭皮碾压辊工作转速范围为 226.37 ~418.25 r/min。直接采用伺服电机将碾压揭皮辊转速控制在 226 ~418 r/min。

3.3.3 刀片滑切角

刀片滑切角根据滑切角设计结果取 36° ~46°。制造 5 组不同滑切角刀片,满足滑切角设计要求。

3.4 试验设计

采用三元二次正交旋转中心组合试验的方法进行分离试验台的特性分析与工作参数组合优化,因素编码如表 2 所示。

表 2 因素编码

Tab.2 Factors coding

编码	因素		
	刀盘转速 x_1/(r·min^{-1})	碾压揭皮辊转速 x_2/(r·min^{-1})	刀片滑切角 x_3/(°)
-1.682	449	226	36
-1	547	265	38
0	692	322	41
1	837	379	44
1.682	935	418	46

3.5 试验结果与分析

皮穗分离试验结果如表 3 所示,X_1、X_2、X_3为因素编码值,采用 Design-Expert 数据分析软件对试验数据进行分析,获得方差分析结果如表 4 所示。

表 3 试验设计与结果

Tab.3 Test design and results

试验号	因素			皮穗分离率/%
	刀盘转速 X_1	碾压揭皮辊转速 X_2	刀片滑切角 X_3	
1	1	1	1	75.06
2	1	1	-1	75.05
3	1	-1	1	76.58
4	1	-1	-1	63.96
5	-1	1	1	71.50
6	-1	1	-1	55.12
7	-1	-1	1	78.28
8	-1	-1	-1	61.73
9	1.682	0	0	66.22
10	-1.682	0	0	76.06
11	0	1.682	0	71.19
12	0	-1.682	0	75.66
13	0	0	1.682	59.67
14	0	0	-1.682	72.16
15	0	0	0	72.47
16	0	0	0	75.52
17	0	0	0	69.23
18	0	0	0	72.33
19	0	0	0	73.57
20	0	0	0	72.96
21	0	0	0	71.44
22	0	0	0	70.66
23	0	0	0	71.36

由表 4 可知,回归方程模型 $P < 0.0001$ 且 $F = 13.94 > F_{0.01}(9,13) = 4.19$,因此回归模型极为显著,决定系数 $R^2 = 0.9061$;此回归方程模型失拟项 $F = 2.68 < F_{0.05}(5,8) = 3.69$,$P = 0.1035 > 0.05$,因此该模型拟合度良好,各因素与目标函数间关联度

表 4　方差分析

Tab. 4　Analysis of variance

来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	672. 37	9	74. 71	13. 94	< 0. 000 1
X_1	120. 51	1	120. 51	22. 48	0. 000 4
X_2	1	1	1	0. 19	0. 672 7
X_3	324. 45	1	324. 45	60. 53	< 0. 000 1
X_1X_2	65. 9	1	65. 90	12. 29	0. 003 9
X_1X_3	51. 51	1	51. 51	9. 61	0. 008 4
X_2X_3	50. 42	1	20. 42	3. 81	0. 072 9
X_1^2	3. 12	1	3. 12	0. 58	0. 459 3
X_2^2	2. 12	1	2. 12	0. 39	0. 540 7
X_3^2	83. 34	1	83. 34	15. 55	0. 001 7
残差	69. 68	13	5. 36		
失拟	43. 65	5	8. 73	2. 68	0. 103 5
误差项	26. 03	8	3. 25		
总误差	742. 05	22			

高。由于 X_1、X_3、X_1X_2、X_1X_3及 X_3^2 满足 $P<0.01$，则因素 X_1、X_3、X_1X_2、X_1X_3及 X_3^2 对皮穰分离率影响显著。F 值与临界值差距越大，说明该因素对试验结果影响越显著[30]。因素 X_1、X_2、X_3的临界值相等，均为 $F_{0.01}(1,13)=9.07$，因此 3 个因素中，F 值越大，对结果影响越显著。由于 $F_{X_3}=60.53>F_{X_1}=22.48>F_{X_2}=0.19$，则影响因素主次顺序为 X_3、X_1、X_2。剔除不显著项后，皮穰分离率 S 的编码值回归模型为

$$S=72.13+2.97X_1+4.87X_3+2.87X_1X_2-2.54X_1X_3-2.29X_3^2 \tag{22}$$

因交互项 X_1X_2和 X_1X_3对皮穰分离率影响显著，对其进行分析。当刀片滑切角为 46°时，响应面如图 10a 所示。切段长度对切段式皮穰分离率影响较大，由图 10a 可知，当刀盘转速高达 935 r/min、揭皮辊转速为低值 226 r/min 时，秸秆切段长度为最小值，不利于皮穰分离，随着刀盘转速的减小，切段长度增加，皮穰分离率提高；当碾压辊转速高达 418 r/min、刀盘转速为低值 449 r/min 时，秸秆切段长度为最大值，不利于皮穰分离，随着刀盘速度增大，切段长度减小，皮穰分离率提高。由此可知，碾压揭皮辊转速与刀盘转速耦合作用改变玉米秸秆切段长度，影响着玉米秸秆皮穰分离率。当碾压揭皮辊转速为 226 r/min 时，响应面如图 10b 所示。由图 10b 可知，皮穰分离率随刀盘转速的降低、刀片滑切角的增大而提高。这是由于刀盘转速降低，刀片对秸秆穿透力减弱，进而使刀刃的锤击效果更显著[31]；刀片滑切角增大，剪切秸秆的推挤角随之增大，使玉米秸秆所受异向分力增加，有利于玉米秸秆的皮穰分离。

3.6　工作参数优化

利用 Design-Expert 8.0.6 软件 Optimization - Numerical 模块（响应优化）对模型进行优化求解，目标函数与实际变量优化约束条件为

$$\begin{cases}\max S(x_1,x_2,x_3)\\ 449\ \text{r/min}\leqslant x_1\leqslant 935\ \text{r/min}\\ 226\ \text{r/min}\leqslant x_2\leqslant 418\ \text{r/min}\\ 36^\circ\leqslant x_3\leqslant 46^\circ\end{cases} \tag{23}$$

应用 Design-Expert 8.0.6 软件获得最优工作参数为：刀盘转速 449 r/min、碾压揭皮辊转速 226 r/min、刀片滑切角 46°，此时玉米秸秆皮穰分离率达 88%。根据式（21）计算得出，此时切段长度为 27 mm。

3.7　验证试验

在最优工作参数下进行皮穰分离试验以验证模型和优化参数组合结果，为减小随机误差，进行 5 次重复试验，测量值分别为 86.56%、89.37%、87.96%、88.41% 和 89.02%。皮穰分离后呈段状（图 11），分离率均值为 88.264%，基本吻合模型预测结果。

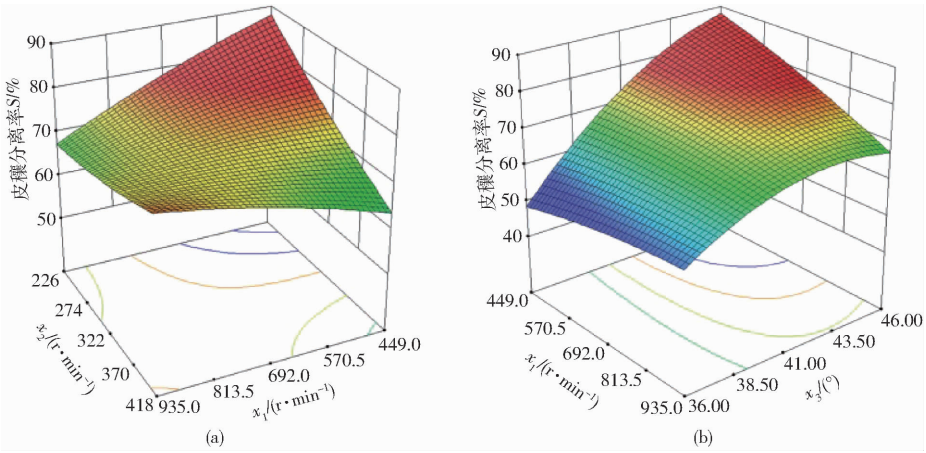


图 10　交互因素对皮穰分离率的影响

Fig. 10　Influence of interaction factors on rind-pith separation ratio



图 11 皮穰分离效果图

Fig. 11 Rendering of rind-pith separation

4 结论

(1)采用 Abaqus/Explicit 动力学显式求解器和中心差分求解法,对两种耦合作用的皮穰分离过程进行仿真分析。结果表明,异向碾压耦合作用的分离效果为整秆式皮穰脱粘,而异向碾压锤切耦合作用的分离效果为完全分离的段状皮穰,符合实际生产应用的分离方式。

(2)根据仿真分析结果及秸秆物料特性设计了异向碾压锤切式玉米秸秆皮穰分离试验台,将刀刃曲线设计为具有等滑切角的阿基米德螺线型,通过回转中心与刀刃曲线原点重合的装配方式保证推挤角恒定,刃型为具有锤击效果且刃角变化区间为 15°~30°的蛤刃,刀片厚度为 5 mm。

(3)优化试验表明,刀盘转速和刀片滑切角对玉米秸秆皮穰分离率均影响显著,影响因素主次顺序为刀片滑切角、刀盘转速、碾压揭皮辊转速;当刀盘转速为 449 r/min、碾压揭皮辊转速为 226 r/min、刀片滑切角为 46°时,皮穰分离后呈段状,分离率达 88%,满足生产实际需求。

参 考 文 献

[1] 王德福,王沫,李利桥. 锤片式粉碎机粉碎玉米秸秆机理分析与参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2017,48(11):165-171.
WANG Defu, WANG Mo, LI Liqiao. Mechanism analysis and parameter optimization of hammer mill for corn stalk[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 165-171. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20171120&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.020. (in Chinese)

[2] 刘立意,邴媛媛,董欣,等. 玉米秸秆压缩加载条件对其裂纹和机器功耗的影响[J]. 农业工程学报,2014,30(3):163-169.
LIU Liyi, BING Yuanyuan, DONG Xin, et al. Effects of loading conditions on cracks of corn stalk and power consumption of machine[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(3): 163-169. (in Chinese)

[3] 刘德军,董彬,李文斌,等. 无醛无毒防火秸秆人造板的制备与性能试验[J]. 农业工程学报,2017,33(1):301-307.
LIU Dejun, DONG Bin, LI Wenbin, et al. Preparation and performance test of formaldehyde-free innocuous and nonflammable straw particleboard[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(1): 301-307. (in Chinese)

[4] 孙竹莹. 玉米秸皮穰分离机:02237749.2[P]. 2003-07-23.

[5] 王德福,陈争光,于克强. 玉米秸秆剥穰机构参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(10):90-94.
WANG Defu, CHEN Zhengguang, YU Keqiang. Parameter optimization on separating mechanism for rind and pith of corn straw[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 90-94. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20121016&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.016. (in Chinese)

[6] 李平凡,花军,张向明. 玉米秸秆皮·瓤·叶分离一体机的设计研究[J]. 安徽农业科学,2013,41(33):13038-13041.
LI Pingfan, HUA Jun, ZHANG Xiangming. Design of the unity machine for bark-pulp-leaf separation on corn straw[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2013, 41(33): 13038-13041. (in Chinese)

[7] LI Liqiao, LI Chao, LI Donghao, et al. Study on hexagon-enveloping leaf-stripping mechanism for corn stalk[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2015, 22(4): 37-47.

[8] 任德志,白雪卫,刘德军,等. 玉米秸秆皮瓤分离碾压揭皮辊设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(1):93-99.
REN Dezhi, BAI Xuewei, LIU Dejun, et al. Design and test on roller-teeth husking roller in rind-pith separation of corn stalks[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 93-99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180111&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.011. (in Chinese)

[9] 廖娜,黄光群,陈龙健,等. 玉米秸秆芯结构建模与径向压缩过程模拟[J]. 农业机械学报,2011,42(6):117-121.
LIAO Na, HUANG Guangqun, CHEN Longjian, et al. Structure modeling and radial compression simulation of corn stalk cores[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011, 42(6): 117-121. (in Chinese)

[10] 张李娴. 玉米秸秆力学特性的离散元建模方法研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.
ZHANG Lixian. Research on the discrete element modeling method of corn stalk's mechanical characteristics[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2017. (in Chinese)

[11] 郑智旗,何进,李洪文,等. 动定刀支撑滑切式秸秆粉碎装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(增刊):108-116.
ZHENG Zhiqi, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of straw-chopping device with chopping and fixed knife supported slide cutting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 108-116.

(in Chinese)

[12] 傅旻,王金鑫,苏海龙,等. 基于 ABAQUS 的冲压机器人执行机构碰撞仿真分析及结构优化[J]. 机械强度,2020,42(3):741 - 746.
FU Min, WANG Jinxin, SU Hailong, et al. Simulation analysis and structure optimization of stamping robot actuator based on ABAQUS[J]. Journal of Mechanical Strength, 2020, 42(3): 741 - 746. (in Chinese)

[13] 陈声显. 玉米秸秆力学模型及压缩成型设备研究[D]. 长春:吉林大学,2011.
CHEN Shengxian. Research on mechanical model and compression molding equipment of corn straw[D]. Changchun: Jilin University, 2011. (in Chinese)

[14] GUO X, ZHANG Y, XIONG Z, et al. Load-bearing capacity of occlusive high-strength bolt connections [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 127: 1 - 14.

[15] 魏丕勇,闫清东,李宏才. 履带式移动机器人车体跌落碰撞仿真分析[J]. 机械强度,2005,27(1):12 - 16.
WEI Piyong, YAN Qingdong, LI Hongcai. Drop impact simulation of tracked mobile robot body[J]. Journal of Mechanical Strength, 2005, 27(1): 12 - 16. (in Chinese)

[16] 刘昆,高明星,俞同强,等. 自升式平台管结构碰撞损伤机理研究[J]. 船舶力学,2018,22(5):628 - 635.
LIU Kun, GAO Mingxing, YU Tongqiang, et al. Rsearch on the collision performance of circular tube of jack-up platform[J]. Journal of Ship Mechanics, 2018, 22(5): 628 - 635. (in Chinese)

[17] 马彩龙,王丽娟,王保爱,等. 新型玉米秸秆揉丝机的设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报,2019,54(4):216 - 222.
MA Cailong, WANG Lijuan, WANG Baoai, et al. Design and experiment of new corn stalk kneading machine[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2019, 54(4): 216 - 222. (in Chinese)

[18] 郭茜,张西良,徐云峰,等. 藤茎类秸秆专用切割刀片的设计与试验[J]. 农业工程学报,2014,30(24):47 - 53.
GUO Qian, ZHANG Xiliang, XU Yunfeng, et al. Design and experiment of cutting blade for cane straw[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(24): 47 - 53. (in Chinese)

[19] 邓本荣,杨静. 回转式切割器刀片设计[J]. 湖南农机,2004(2):18 - 19.

[20] 李冰,王顺喜,杨炳南. 青饲切碎机动刀片受力对比分析[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)

[21] 李林,闫秀芳,崔红梅,等. 圆盘式切碎器动刀片等滑切角刀刃曲线的研究[J]. 农村牧区机械化,2010,91(6):16 - 20.

[22] 郭艳. 盘刀式切碎器刀刃曲线对切割能耗的影响[J]. 吉林农业大学学报,2003,25(1):107 - 110.
GUO Yan. Effect of fly-wheel cutter head with different curve edges on cutting energy consumption[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2003, 25(1): 107 - 110. (in Chinese)

[23] 滕绍民,王泽群,李洋,等. 切割方式与切割阻力的理论研究[J]. 农机化研究,2009,31(5):89 - 90,96.
TENG Shaomin, WANG Zequn, LI Yang, et al. The theory study of the cutting ways and cutting resistance[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009, 31(5): 89 - 90,96. (in Chinese)

[24] 宋占华,宋华鲁,闫银发,等. 棉花秸秆往复式切割器动刀片优化设计[J]. 农业工程学报,2016,32(6):42 - 49.
SONG Zhanhua, SONG Hualu, YAN Yinfa, et al. Optimizing design on knife section of reciprocation cutter bars for harvesting cotton stalk[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(6): 42 - 49. (in Chinese)

[25] 王政,赵满全,李林,等. 盘刀式铡草机设计与性能试验[J]. 内蒙古农业科技,2012(3):71 - 72.

[26] 贾洪雷,姜鑫铭,郭明卓,等. V - L 型秸秆粉碎还田刀片设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(1):28 - 33.
JIA Honglei, JIANG Xinming, GUO Mingzhuo, et al. Design and experiment of V - L shaped smashed straw blade[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(1): 28 - 33. (in Chinese)

[27] 朴香兰,严天一. 直刃盘刀式切碎器功耗的影响因素分析[J]. 农机化研究,1998,20(4):52 - 53,110.

[28] 倪长安,蔺公振,姬江涛,等. 圆盘切割器切割玉米茎秆的试验与分析[J]. 洛阳工学院学报,1995,16(4):36 - 41.
NI Chang'an, LIN Gongzhen, JI Jiangtao, et al. Test and analysis of the disk cutter on cutting corn stalk [J]. Journal of Luoyang Institute of Technology, 1995, 16(4): 36 - 41. (in Chinese)

[29] 黄德超,王瑞丽. 铡草机切碎器性能分析[J]. 农业科技与装备,2009(6):43 - 44,47.
HUANG Dechao, WANG Ruili. Analysis of the performance of the chopper of hay cutter[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2009(6): 43 - 44,47. (in Chinese)

[30] 李云雁,胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京:化学工业出版社,2008.

[31] 王立军,张志恒,刘天华,等. 玉米收获机割台砍劈式茎秆粉碎装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报 2020,51(7):109 - 117.
WANG Lijun, ZHANG Zhiheng, LIU Tianhua, et al. Design and experiment of device for chopping stalk of header of maize harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(7): 109 - 117. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20200713&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.013. (in Chinese)