

滚筒式棉秆铡切机构的设计与试验

廖培旺¹ 刘凯凯¹ 陈明江² 王振伟² 张爱民^{1*}

(1.滨州市农业机械化科学研究所,山东 滨州 256600;2.农业部南京农业机械化研究所,南京 210014)

摘要 设计一种适用于棉秆等硬质茎秆,配套打捆机作业的滚筒式铡切机构。该机构采用先破碎后铡切的滚筒式刀组和安装于机架上的定刀配合作业将棉秆切断。滚筒式刀组采用破碎板与铡切刀在圆周上交错布置的方式,实现对棉秆先破碎后铡切的作业,减轻铡切刀的磨损,降低铡切作业功耗。根据棉秆特性,确定关键部件的参数,并运用 SolidWorks Simulation 软件对铡切刀进行静强度校核和对滚筒式铡切机构进行模态分析,研究铡切刀的应力、应变分布和滚筒式铡切机构的固有频率和振型。结果表明:铡切刀最大应力和最大变形均发生在螺栓孔处,分别为 $234.6 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 和 $7.521 \times 10^{-4} \text{ mm}$,铡切刀材料选用 65Mn 钢材,可满足性能要求;滚筒式铡切机构的最低阶固有频率为 53.675 Hz,高于其工作激励频率 6.5 Hz,不会形成共振。对该机构的主要性能进行试验,结果表明:当铡切滚筒以 185 r/min 旋转时,棉秆的铡切长度合格率为 95.31%,消耗功率约 30 kW。

关键词 棉秆; 滚筒式铡切机构; 破碎板; 铡切刀

中图分类号 S225.91+2

文章编号 1007-4333(2018)09-0131-08

文献标志码 A

Design and experiment of a roller type cotton stalk cutting mechanism

LIAO Peiwan¹, LIU Kaikai¹, CHEN Mingjiang², WANG Zhenwei², ZHANG Aimin^{1*}

(1. Binzhou Agricultural Mechanization Science Research Institute, Binzhou 256600, China;

2. Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization of Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China)

Abstract A roller type cotton stalk cutting mechanism with crushing plate and cutting knife was designed this study, which was suitable for cutting cotton stalk bundling. Cotton stalk was chopped by rotary knife after crushing and the fixed knife mounted on the frame of bundling machine. In order to achieve the function of cutting after crushing of cotton stalk and reduce the consumption of cutting tools and power consumption, the rotary knife group was adopted the way of which the crushing plate and cutting knife were arranged interlaced in the circle. According to the characteristics of cotton stalk, the parameters of the key components are identified. And SolidWorks Simulation software was then used to check the static strength finite element analysis of cutting knife and the modal analysis of roller type cutting mechanism, and the stress and strain distribution of cutting knife. The natural frequency and vibration mode of roller type cotton stalk cutting mechanism were investigated. The results of finite element analysis showed that the maximum stress and the maximum deformation of the cutting knife all were occurred on the bolt hole, and the values of which was respectively $234.6 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ and $7.521 \times 10^{-4} \text{ mm}$. The materials of the cutting knife was 65Mn steel to meet the performance requirements. The work frequency of the roller type cutting mechanism (6.5 Hz) was far below its first natural frequency (53.675 Hz). The main performance of the model machine was tested, and the experimental results showed that the qualified rate of cotton stalk crushing was 95.3%, when roller type cotton stalk cutting mechanism with crushing plate and cutting knife was at 185 r/min speed of the cutting drum, the power consumption was 30 kW.

Keywords cotton stalk; roller type cutting mechanism; crushing plate; cutting knife

收稿日期: 2017-11-20

基金项目: 山东省农机装备研发创新计划项目(2016YF038);国家自然科学基金项目(51505242);农业部现代农业装备重点实验室开放课题(201604001);滨州市科技发展计划项目(2015ZC0106)

第一作者: 廖培旺, 研究实习员, 主要从事棉秆收获机械研究, E-mail: bznjslpw@163.com

通讯作者: 张爱民, 副研究员, 主要从事棉秆全程机械化研究, E-mail: bzzam@163.com

棉秆是山东省继小麦秸秆和玉米秸秆之后的第三大农作物秸秆,年产棉秆量达 387.4 万 t^[1]。近年来,随着科技的应用与发展,棉秆利用范围正不断扩大,不仅可以作为燃料,还可以用来发电和造纸,经加工后还可以成为饲料^[2-3]。但是,由于棉秆回收机械的缺乏和不成熟,棉秆往往被废弃或就地焚烧,导致棉秆的综合利用率很低^[4]。解决棉秆回收的机械化问题对提高棉秆的综合利用率、改善生态环境和提高经济效益具有现实意义。

棉秆不同于其他农作物秸秆,其木质素含量较高,直接进行压缩打捆消耗功率大,且打捆密度低,因此棉秆在进行压缩打捆之前必须进行铡切。目前,国内外对农作物铡切机构进行了多方面的研究,1)设计了适用于柠条的切碎机构,并对其进行了理论分析,得出了平板刀滚筒切碎机构动刀片的最优结构参数^[5];2)对直刀斜装滚刀式切碎器进行优化设计,提出了一种功耗最低的优化方法^[6];3)对旋转式割草机进行了性能试验,得出通过降低草物料的输送加速度可以大大降低旋转式割草机的能耗^[7];4)研究了适用于玉米秸秆的剪切刀具,得出了切玉米秸秆刀具的斜角角度、接近角度、剪切角度和刀速的最佳值^[8]。但是,以上研究的铡切对象均为草物料等软性农作物秸秆,不适用于棉秆等木质素含量

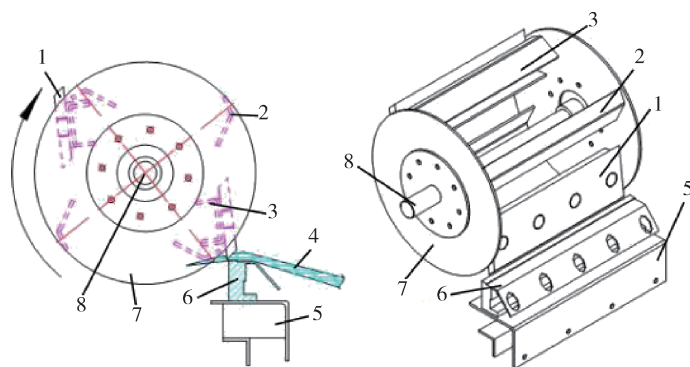
高的硬质秸秆。

针对以上问题,本研究拟设计一种适用于棉秆等硬质茎秆,配套打捆机作业的滚筒式铡切机构,旨在实现对棉秆先破碎后铡切的作业过程,提高棉秆的铡切质量和效率,降低铡切棉秆时的消耗功率。

1 结构与工作原理

1.1 整体结构

滚筒式棉秆铡切机构主要由铡切刀、铡切刀座、破碎板、定刀、定刀座和铡切滚筒等组成。破碎板和铡切刀在铡切滚筒外圆周上交错布置,两者形成足够的空间增加棉秆的通过性,破碎板与定刀配合将棉秆破碎,铡切刀与定刀配合将棉秆切断,实现对棉秆先破碎后铡切的作业(图 1)。滚筒式棉秆铡切机构采用破碎、铡切组合的工序布置,首先由破碎板对棉秆破碎 1 次,随后另一破碎板对棉秆破碎的同时由铡切刀将棉秆切断,使得铡切刀在切断棉秆时受到的切断阻力减小,降低铡切刀的负载和磨损。将该机构与打捆机配套作业,便于打捆机将木质化程度高的棉秆压缩打捆成高密度的棉捆,滚筒式棉秆铡切机构与打捆机的安装位置关系见图 2。本研究设计的滚筒式铡切机构的主要技术参数见表 1。



1. 铡切刀;2. 破碎板;3. 铡切刀座;4. 棉秆;5. 定刀座;6. 定刀;7. 铡切滚筒;8. 铡切轴

1. Cutting knife; 2. Crushing plate; 3. Cutting knife seat; 4. Cotton stalk; 5. Fixed knife seat; 6. Fixed knife; 7. Cutting drum; 8. Cutting axle

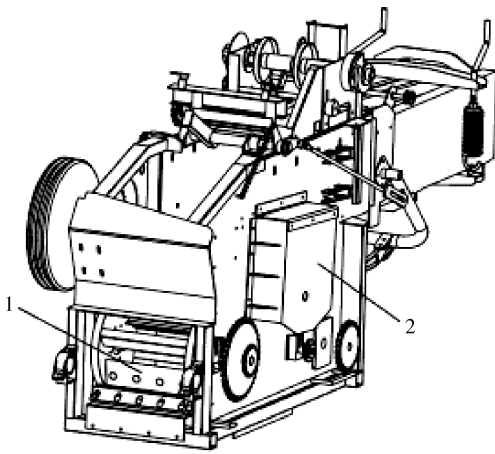
图 1 滚筒式铡切机构结构

Fig. 1 Structure of roller type cotton stalk cutting mechanism

1.2 棉秆铡切工作原理

本研究设计的滚筒式铡切机构主要通过交错布置的破碎板和铡切刀实现对棉秆的先破碎后铡切作业。与铡切轴相连的动力机构启动后,带动安装在

铡切滚筒上的铡切刀、破碎板以一定速度旋转,当破碎板(铡切刀)旋转与定刀将要接触时,在定刀的配合下,将输送到破碎板(铡切刀)与定刀之间的棉秆进行破碎(铡切)。



1. 滚筒式铡切机构; 2. 打捆机

- 1. Roller type cotton stalk cutting mechanism;
- 2. Baling machine

图 2 滚筒式铡切机构安装位置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of installation position of roller type cotton stalk cutting mechanism

棉秆在被滚筒式铡切机构铡切瞬间的受力见图 3^[9]。滚筒式铡切机构能够将棉秆切断的条件为：

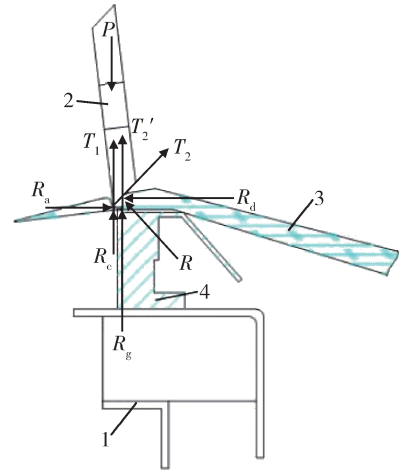
$$P \geq R_c + R_g + T_1 + T'_2 \quad (1)$$

式中： P 为铡切刀刀刃对棉秆的压力， N ； R_c 为被铡切棉秆对刀刃的反作用力， N ； R_g 为被挤压棉秆层对铡切刀向上的反作用力， N ； T_1 为铡切刀刀刃的摩擦力， N ； T'_2 为铡切刀刃面摩擦力的垂直投影， N 。

表 1 滚筒式铡切机构主要技术参数

Table 1 Main performance indexes and technical parameters of roller type cotton stalk cutting mechanism

参数 Parameter	数值 Value
铡切刀数量 Number of cutting knife	2
破碎板数量 Number of crushing plate	4
铡切滚筒直径/mm Diameter of cutting drum	495
理论铡切长度/mm Cutting length in the theory	195
铡切滚筒理论转速/(r/min) Speed of cutting drum in the theory	185
配套动力/kW Matched power	≥ 35



1. 定刀座; 2. 铡切刀; 3. 棉秆; 4. 定刀

- 1. Fixed knife seat; 2. Cutting knife;
- 3. Cotton stalk; 4. Fixed knife

P 为铡切刀刀刃对棉秆的压力， N ； R_c 为被铡切棉秆对铡切刀刀刃的反作用力， N ； T_1 和 T_2 分别为铡切刀刀刃的摩擦力和铡切刀刃面的摩擦力， N ； T'_2 为铡切刀刃面摩擦力的垂直投影， N ； R_g 、 R_a 和 R_d 分别为被挤压棉秆层对铡切刀向上、向右和向左的反作用力， N ； R 为被挤压棉秆层对铡切刀刃面的正压力， N 。

P is pressure of cutting knife blade on cotton stalk, N ; R_c is reaction force of cotton stalk cut by blade of cutting knife, N ; T_1 and T_2 are friction force of blade of cutting knife and blade surface of cutting knife, N ; T'_2 is Vertical projection of frictional force of blade surface of cutting knife, N ; R_g , R_a and R_d are reaction forces on the upward, rightward and leftward squeezed cotton stalk layer on cutting knife, N ; R is positive pressure of squeezed cotton stalk layer on blade surface of cutting knife, N .

图 3 棉秆在被滚筒式铡切机构铡切时瞬间受力图

Fig. 3 Instant force diagram of cotton stalk cut by roller type cutting mechanism

2 滚筒式铡切机构设计与理论分析

2.1 铡切刀设计

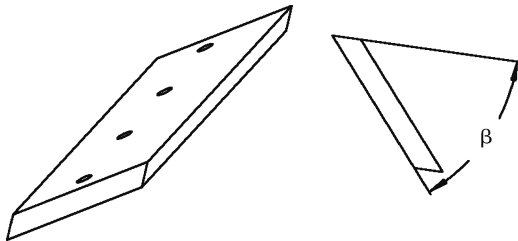
2.1.1 铡切刀尺寸

由于棉秆的化学成分主要为粗纤维，在铡切时需要的力比较大，铡切刀相对于用于铡草机的刀片更易磨损，因此将铡切刀设计成两侧均有刀刃的矩形刀片，待一侧磨损时，可更换为另一侧刀刃使机具继续作业；又由于铡切刀以高速旋转，为防止铡切刀在工作过程中产生过大变形，并防止铡切刀与定刀产生干涉，确定铡切刀厚度为 15 mm，长度为 375 mm，宽度为 105 mm，以保证铡切刀具有足够的强度；为将铡切刀固定于铡切刀座上，并保证铡切刀的强度，在铡切刀上开有 4 个 $\varphi 12.5$ mm 的定位通孔。

综上所述,铡切刀为两侧均带有刀刃的矩形刀片(图4),刀片尺寸为375 mm×105 mm×15 mm。

2.1.2 铡切刀刃角

刀片的刃角 β (图4)对铡切功耗和刀片的寿命有很大的影响。研究表明,刀片的刃角与功耗成正比,刃角越大,功耗也越大;但是,刃角越小刀刃强度也越小,导致铡切刀更易磨损^[10]。一般情况下,常用的刃角为 $15^\circ\sim 30^\circ$ ^[11],由于铡切棉秆时需要的力比较大,因此铡切刀的刃角设计为 30° ,能够在保证刀具强度的前提下使铡切功耗较低。



β 为铡切刀的刃角, $(^\circ)$ 。

β is blade angle of cutting knife, $(^\circ)$ 。

图4 铡切刀外形图

Fig. 4 Outside diagram of cutting knife

2.1.3 铡切刀材料

铡切刀的材质影响刀片的强度和耐磨性,由于铡切刀主要用来铡切棉秆,棉秆的主要成分为粗纤维,对刀具的磨损比较农作物秸秆要大很多。因此,普通结构钢并不能满足刀具的强度和耐磨性等性能要求,铡切刀选择强度和耐磨性更高的65Mn。65Mn的属性指标主要是^[12]:抗拉强度 $\sigma_b = 735 \times 10^6$ N/m²、屈服强度 $\sigma_s = 430 \times 10^6$ N/m²、弹性模量 $E = 210 \times 10^9$ N/m²、泊松比 $\mu = 0.3$ 、密度 $\rho = 7800$ kg/m³。

2.2 铡切滚筒的设计

2.2.1 铡切滚筒直径

铡切滚筒直径的计算公式为^[13]:

$$D = \frac{ZL \tan \alpha}{\pi} \quad (2)$$

式中: D 为铡切滚筒的外径,m; Z 为铡切滚筒圆周上均布的铡切刀数量; L 为棉秆喂入口宽度(约为铡切滚筒的长度),m; α 为铡切刀刃口与定刀刃口切线之间的夹角, $(^\circ)$ 。本研究中铡切刀数量 $Z = 2$ (图1),棉秆喂入口宽度 $L = 450$ mm,定刀的刃口方向为水平方向,铡切刀的刃角为 30° (图4),所以铡切刀刃口与定刀刃口切线之间的夹角 $\alpha = 60^\circ$ 。因此,

铡切滚筒的直径 $D \approx 495$ mm。

综上,铡切滚筒的直径 $D \approx 495$ mm,铡切滚筒的长度为450 mm。

2.2.2 铡切滚筒转速

由铡切滚筒的转矩和铡切刀刀刃的圆周力可求出铡切滚筒的转速。

$$T = 9.55 \times 10^6 \times \frac{P_1 \eta}{n} \quad (3)$$

$$F_t = \frac{2T}{D} \quad (4)$$

式中: T 为铡切滚筒的转矩,N·m; P_1 为发动机传递给铡切滚筒的功率,kW; η 为传递效率,%; n 为铡切滚筒的转速,r/min; F_t 为铡切刀刀刃的圆周力,N; D 为铡切滚筒的直径,m。

由于选取的试验棉秆平均直径为16 cm,含水率30%~50%,所以铡切刀刀刃的圆周力 $F_t \geq 6554$ N时^[14-15],才能够将棉秆切断。

发动机功率 $P_1 = 35$ kW,传递效率为0.98;又因为铡切滚筒的直径 $D \approx 495$ mm。因此,铡切滚筒的转速 $n \leq 201.9$ r/min。本研究设计的铡切滚筒转速为185 r/min,此转速下铡切刀刀刃的圆周力 $F_t = 7154$ N ≥ 6554 N,能够满足要求。

2.3 理论分析

2.3.1 铡切刀的静应力分析

首先使用SolidWorks建立铡切刀的三维模型,然后使用SolidWorks Simulation对铡切刀进行静应力分析。通过静应力分析可知,铡切刀在载荷等外因作用下产生的应力、应变和位移等的分布和铡切刀的强度和刚度是否满足条件。

由于铡切刀通过4个螺栓将铡切刀的底面固定在铡切刀座上,相对于铡切滚筒的自由度为零,因此添加4个螺栓孔的全约束和铡切刀底面在垂直方向的固定约束。

铡切刀在铡切时的受力比较复杂(图3),为计算简单,便于分析,将铡切刀的受力简化为均匀作用于刀刃面上的垂直载荷^[16]。假设铡切刀同时铡切16株棉秆,因此作用在刀刃面上的最大载荷约为 $F = 1.15 \times 10^5$ N。本研究设计的铡切刀的材质为65Mn。

采用标准网格进行划分,网格质量选择良好,因此网格划分的比较细致,共划分单元62455个,共得到节点83722个。铡切刀的应力和应变分布云见图5。

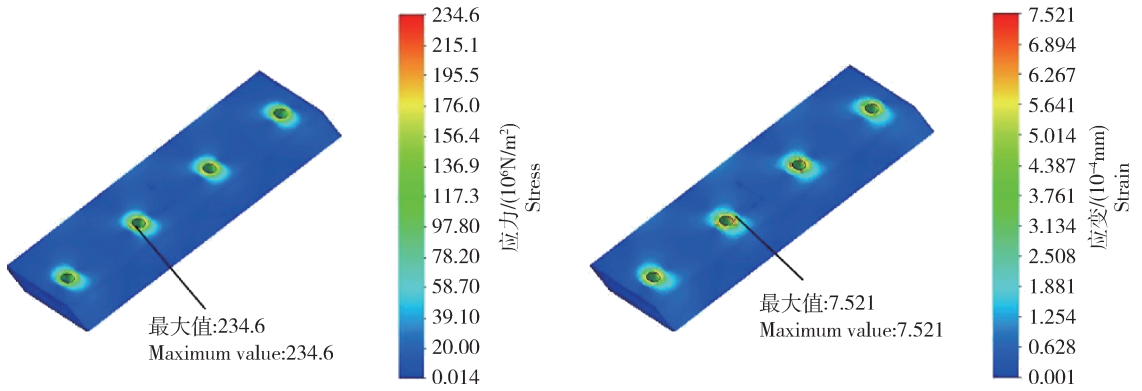


图 5 铡切刀的应力云图(a)和应变云图(b)

Fig. 5 Stress nephogram (a) and strain nephogram (b) of cutting knife

分析可知,铡切刀的应力集中主要发生在螺栓孔处,最大应力也发生在螺栓孔处,为 $234.6 \times 10^6 \text{ N/m}^2$, 小于材料(65Mn)的许用应力 $[\sigma] = 286.7 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ (安全系数取 1.5); 铡切刀的变形主要发生在螺栓孔处,最大变形值为 $7.521 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 。因此,铡切刀具有足够的强度和稳定性; 刀刃处的应力和变形都比较小,使得铡切刀不易磨损。

综上所述,本研究设计的铡切刀能够满足铡切棉秆的条件。

2.3.2 滚筒式铡切机构的模态分析

机械共振是指机械系统所受激励的频率与该系统的某阶固有频率相接近时,系统振幅显著增大的现象。一般情况下,机械共振是有害的,容易引起机械结构的变形和动应力,严重的还会造成破坏性事故。

因此,为避免本研究设计的滚筒式铡切机构在工作时发生共振现象,造成不必要的损害,必须对滚筒式铡切机构进行模态分析,研究该机械结构的固有频率和振型。

为便于 SolidWorks simulation 对该机械机构进行模态分析,忽略螺纹孔、倒角和圆角等次要因素^[17-18]。铡切滚筒和铡切轴的材质为 45# 钢,铡切刀的材质为 65Mn。45# 钢的属性指标主要为:抗拉强度 $\sigma_b = 600 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 、屈服强度 $\sigma_s = 355 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ 、弹性模量 $E = 210 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ 、泊松比 $\mu = 0.3$ 、密度 $\rho = 7\,850 \text{ kg/m}^3$ 。65Mn 的属性指标见 2.1.3。

由于是进行自由模态分析,不需要添加外载荷,因此网格划分采用智能划分^[19],铡切轴与铡切滚筒采用刚性连接,铡切刀与铡切滚筒采用销钉连接。为了减少仿真时间和保证仿真精度,铡切滚筒划分的单元尺寸为 12 mm,铡切刀和铡切轴划分的单元尺寸为 6 mm,滚筒式铡切机构共划分 107 648 个单元,

164 516 个节点。滚筒式铡切机构网格模型见图 6。

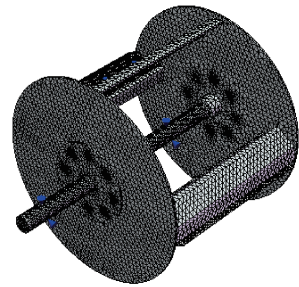


图 6 滚筒式铡切机构的网格模型

Fig. 6 Mesh model of roller type cotton stalk cutting mechanism

一般情况下,低阶振动对机械结构的影响比高阶振动要大,并且随着阶次的不断升高其对机械结构的影响效果在急剧减小。因此,本研究只提取滚筒式铡切机构的前 6 阶非零固有频率和振型进行分析。滚筒式铡切机构的前 6 阶非零固有频率见表 2,相对应的变形量见图 7。

表 2 滚筒式铡切机构的前 6 阶非零固有频率

Table 2 Nonzero natural frequencies of the first 6 order of roller type cotton stalk cutting mechanism

阶数	固有频率/Hz
Each mode	Natural frequency
1	53.675
2	113.840
3	120.150
4	138.820
5	152.280
6	173.300

滚筒式铡切机构的设计转速为 185 r/min,根据

换算公式^[20]计算,可得滚筒式铡切机构的工作频率为 6.5 Hz,远低于仿真分析所得的最低阶频率

53.675 Hz,因此本研究设计的滚筒式铡切机构在工作时不会发生共振现象。

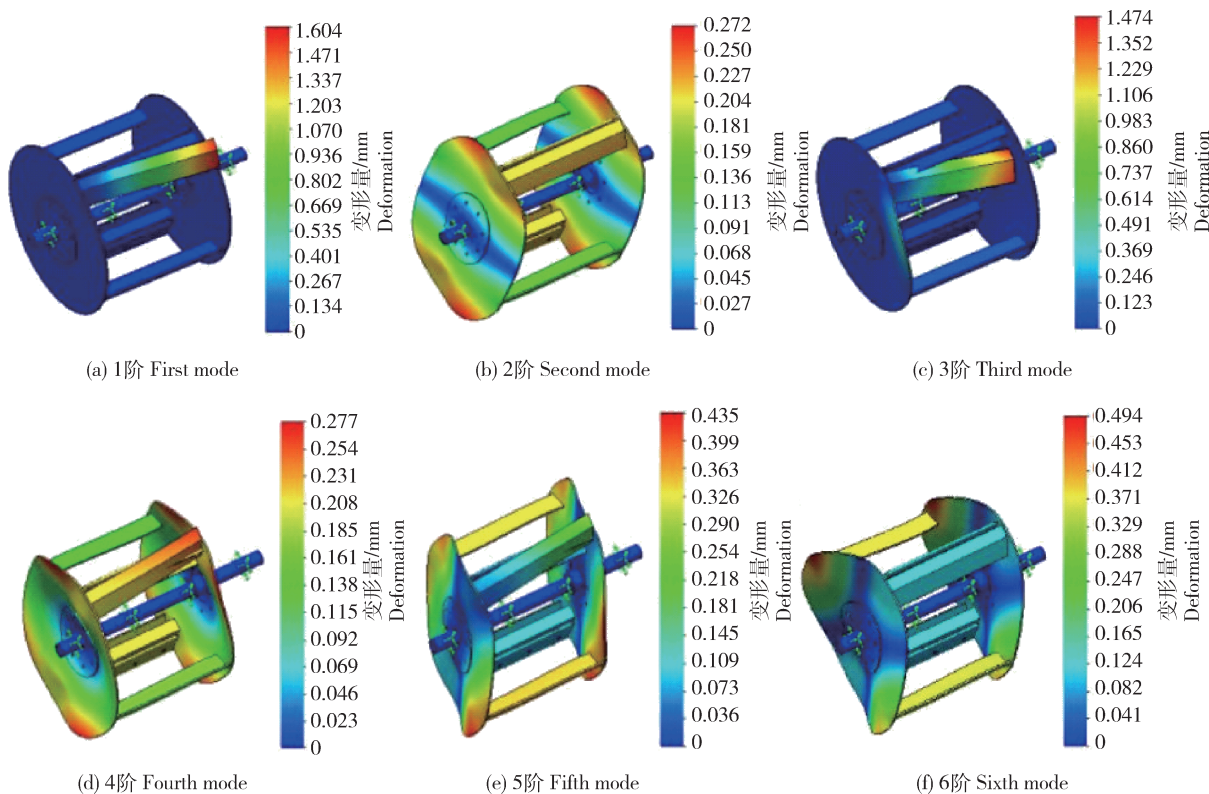


图7 滚筒式铡切机构前6阶非零固有频率对应的变形量

Fig. 7 Corresponding deformation the first 6 modes of non-zero natural frequency of roller type cotton stalk cutting mechanism

2.3.3 棉秆喂入速度的理论计算

理论铡切长度指在两相邻铡切刀两次铡切动作之间喂入棉秆的进给量。因此,滚筒式棉秆铡切机构的理论铡切长度的计算公式为:

$$l_c = \frac{60v_c}{nZ} \quad (5)$$

式中: l_c 为理论铡切长度,m; v_c 为棉秆的理论喂入速度,m/s; n 为铡切滚筒的转速,r/min; Z 为铡切滚筒圆周上均布的铡切刀数量。

为了便于铡切后的棉秆进行压缩打捆作业,棉秆的理论铡切长度应控制在15~25 cm。因此,棉秆的理论喂入速度应为 $0.925 \text{ m/s} \leq v_c \leq 1.542 \text{ m/s}$,本研究设计的滚筒式铡切机构的棉秆理论喂入速度为1.2 m/s,此速度下棉秆的理论铡切长度约为19.5 cm。

3 田间试验与分析

3.1 试验基本条件

滚筒式铡切机构的性能试验在山东省无棣县西

小王镇进行。所选取棉秆的含水率为30%~45%,棉秆直径12~18 cm;铡切滚筒转速185 r/min,棉秆喂入速度1.2 m/s。

试验以棉秆铡切长度合格率和消耗功率作为性能考核指标,检验本研究设计的滚筒式铡切机构的实际工作效果。棉秆铡切长度合格率及消耗功率的计算公式分别为^[21-22]:

$$\eta_1 = \left(1 - \frac{m_2}{m_1}\right) \times 100\% \quad (6)$$

$$P_2 = \frac{Tn}{9550} \quad (7)$$

式中: η_1 为棉秆铡切长度合格率,%; m_1 为试验组棉秆总质量,kg; m_2 为试验组不合格棉秆总质量,kg; n 为铡切滚筒的转速,r/min; P_2 为消耗功率,kW; T 为铡切滚筒的转矩,N·m。

由于田间条件比较复杂,滚筒式铡切机构的转速不是很稳定,因此铡切长度为 $19.5 \pm 3 \text{ cm}$ 均算合格长度。将试验棉秆平均划分为若干试验组,然后

分组进行试验, 每组分别进行统计棉秆铡切长度合格率和消耗功率, 最后取平均值作为最终试验数据。

3.2 试验结果

本研究设计的滚筒式铡切机构, 当铡切滚筒的

转速为 185 r/min 时, 棉秆铡切长度合格率为 95.31%, 功耗为 30 kW, 表明本研究设计的滚筒式铡切机构符合棉秆的铡切要求, 可以将棉秆按要求铡切断。

表3 滚筒式棉秆铡切机构的试验结果

Table 3 Experimental results of roller type cotton stalk cutting mechanism

试验组序号 Serial number of test group	棉秆总质量/kg Total weight of cotton stalk	不合格棉秆总质量/kg Total weight of unqualified cotton stalk	合格率/% Percent of pass	消耗功率/kW Consumed power
1	540	26	95.19	29
2	560	27	95.18	30
3	573	25	95.64	31
4	565	27	95.22	30
平均值 Average value	559.50	26.25	95.31	30

4 结束语

本研究设计了一种适用于打捆机的滚筒式棉秆铡切机构, 确定了关键部件的参数, 对关键部件进行了理论分析和试验校核。

1) 确定了滚筒式铡切机构主要零部件的关键尺寸, 并对其进行了仿真分析。分析结果表明, 设计的滚筒式铡切机构符合棉秆的铡切要求。

2) 试验结果表明, 滚筒式铡切机构工作性能良好, 能够按要求将棉秆进行铡切, 且铡切长度合格率达到 95.31%, 表明本研究设计的带有破碎板的滚筒式铡切机构是合理的, 且方案可行。

3) 将滚筒式铡切机构布置在打捆机前端, 其先铡切后压缩打捆的工作流程合理, 不会在滚筒式铡切机构处发生堵塞现象, 并有利于棉秆的压缩打捆作业。

参考文献 References

[1] 方放, 李想, 石祖梁, 王飞, 常志州, 张珊, 孙仁华, 宝哲, 邱凌. 黄淮海地区农作物秸秆资源分布及利用结构分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 229
Fang F, Li X, Shi Z L, Wang F, Chang Z Z, Zhang S, Sun R H, Bao Z, Qiu L. Analysis on distribution and use structure of crop straw resources in Huang-Huai-Hai plain of china [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(2): 229(in Chinese)

[2] 张振, 秦翠兰, 王磊元, 周岭. 棉秆资源利用现状分析[J]. 新疆

农机化, 2014(5): 21-25
Zhang Z, Qin C L, Wang L Y, Zhou L. Cotton stalk resources research status[J]. *Xijiang Agricultural Mechanization*, 2014 (5): 21-25 (in Chinese)

[3] 高瑞芳, 张吉树. 新疆棉花秸秆饲料化开发利用研究[J]. 中国畜牧杂志, 2016, 52(8): 76-79
Gao R F, Zhang J S. Study on exploiting and utilizing cotton stalks of xinjiang as feed[J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2016, 52(8): 76-79(in Chinese)

[4] 张顺明, 吴学志. 浅析棉花秸秆综合利用及配套机具[J]. 河北农机, 2015(5): 25
Zhang S M, Wu X Z. Brief analysis on comprehensive utilization of cotton straw and its supporting tools[J]. *Hebei Agricultural Machinery*, 2015(5): 25(in Chinese)

[5] 段震华. 柠条联合收获机输送切碎机构设计[D]. 太谷: 山西农业大学, 2015
Duan Z H. Design of the conveying and the shredding mechanism of Caragana korshinskii combined harvester[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2015 (in Chinese)

[6] 朴香兰, 李德洙, 张金松, 金铁汉, 许文花. 直刃斜装滚筒式切碎器的优化设计[J]. 延边大学农学学报, 1997, 19(3): 165-171
Piao X L, Li D Z, Zhang J S, Jin T H, Xu W H. Optimum design of straight edge slanting installing rolling and cutting device [J]. *Journal of Agricultural Science Yanbian University*, 1997, 19(3): 165-171(in Chinese)

[7] Mcrandal D M, McNulty P B. Impact cutting behavior of forage crops I: mathematical model and laboratory tests[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1978, 23(3): 313-328

[8] Prasad J, Gupta C P. Mechanical properties of maize stalk as related to harvesting[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1975, 20(1): 79-87

- [9] 曹玉. 滚筒式铡草机切碎器的理论分析及试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2012
Cao Y. Theoretical analysis and experimental research of the chopper of Hob-type hay cutter[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2012(in Chinese)
- [10] 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): 44
Huang D C, Wang R L. Analysis of the performance of the chopper of hay cutter[J]. *Agricultural Science & Technology Equipment*, 2009(6): 44(in Chinese)
- [11] 刘洋. 玉米青贮机滚筒式切碎装置的设计与有限元分析[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008
Liu Y. Design and finite element analysis of roller shredding mechanism for silage maize harvester [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008(in Chinese)
- [12] 成大先. 机械设计手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 9-12
Cheng D X. *Machinery Handbook* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2016, 2007: 9-12(in Chinese)
- [13] 吴巧梅. 平板刀式滚筒切碎装置的参数的研究与优化[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010
Wu Q M. Study and optimization of the parameter of slab cutter cylinder type shredding mechanism [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2010(in Chinese)
- [14] 杜现军, 李玉道, 颜世涛, 李秀芝, 宋占华, 李法德. 棉秆力学性能试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 87-91
Du X J, Li Y D, Yan S T, Li X Z, Song Z H, Li F D. Mechanics characteristics of cotton stalks [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(4): 87-91(in Chinese)
- [15] 沈晓阳, 王平, 蒋升, 徐苏阳. 棉秆压缩与剪切力学性能的研究[J]. 农机化研究, 2010(9): 155-158
Shen X Y, Wang P, Jiang S, Xu S Y. Study on mechanical property of compression and shearing of cotton stalks[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2010(9): 155-158(in Chinese)
- [16] 吴巧梅, 吕新民, 李淑琴. 玉米青贮切碎器动刀片的分析与优化[J]. 农机化研究, 2010(4): 37-39
Wu Q M, Lv X M, Li S Q. To analyze and optimize the blade of corn cutter for silage [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2010(4): 37-39(in Chinese)
- [17] 陈超祥, 叶修梓. SolidWorks Simulation 基础教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 43-62
Chen C X, Ye X Z. *The Basic Course for SolidWorks Simulation* [M]. Beijing: China Machine Press, 2010: 43-62 (in Chinese)
- [18] 江洪, 陈燎, 王智. SolidWorks 有限元分析实例讲解[M]北京: 机械工业出版社, 2007: 32-46
Jiang H, Chen L, Wang Z. *Examples of SolidWorks Finite Element Analysis* [M]. Beijing: China Machine Press, 2007: 32-46(in Chinese)
- [19] 丁双双, 王吉奎, 李天文, 胡凯, 文仁超. 棉秆粉碎装置的动力学仿真分析[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(2): 119-122
Ding S S, Wang J K, Li T W, Hu K, Wen R C. Dynamic analysis of cotton-stalk straw crushing device[J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2016, 37(2): 119-122 (in Chinese)
- [20] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003: 45-47
Li B F. *Agricultural Mechanics* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003: 45-47(in Chinese)
- [21] 郑智旗, 何进, 李洪文, 刁培松, 王庆杰, 张祥彩. 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): 108-115
Zheng Z Q, He J, Li H W, Diao P S, Wang Q J, Zhang X C. 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(S): 108-115(in Chinese)
- [22] 陈黎卿, 梁修天, 曹成茂. 基于多体动力学的秸秆还田机虚拟仿真与功耗测试[J]. 农业机械学报, 2010, 47(3): 155-158
Chen L Q, Liang X T, Cao C M. Virtual simulation and power test of straw counters-field based on multibody dynamics [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2010, 47(3): 155-158 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春