

小型组合式王草铡切打浆机优化设计与试验

郇晓龙 尤 泳 王德成 张永禄 马文鹏 惠云婷
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 针对缺少适合家庭农户使用的王草专用铡切打浆机械问题,设计了一种小型组合式王草铡切打浆机,该机通过更换部件可进行王草的铡切、打浆加工。在现有研究的基础上,分析了轻简化王草铡切和打浆工艺,设计优化了喂入装置、铡切动刀和抛送板等关键部件;利用 ANSYS/LS-DYNA 软件对铡切机构切割过程进行计算机仿真,通过正交试验确定影响切割功耗的主次因素依次为切刀类型、动定刀间隙、定刀高度,最优水平组合为:铡切机构选取缺口圆弧切刀、动定刀间隙 2 mm、定刀高度 23 mm;通过试制试验样机,并进行王草打浆优化试验,确定打浆工艺最佳结构及工作参数为:主轴转速 1 400 r/min、王草破碎方式采用标准锤片与齿板破碎式、浆料排料方式采用圆孔凹板式。在试验的基础上对小型王草铡切打浆机进行改进,改进后的整机性能试验表明,王草铡切的纯工作时间生产率为 545 kg/h,标准草长率为 86%,打浆纯工作时间生产率为 150 kg/h,浆料中长草质量分数为 9.1%。

关键词: 王草; 铡切打浆机; 结构设计; 试验优化

中图分类号: S226.8 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2021)03-0117-10 OSID: 

Optimization Design and Experiment on Small Cutting and Beating Machine of King Grass

HUAN Xiaolong YOU Yong WANG Decheng ZHANG Yonglu MA Wenpeng HUI Yunting
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problem of lack of special cutting and beating machinery for King grass, the integrated process of King grass cutting and beating was studied, and a small combined King grass cutting and beating machine for family farmers was designed, which met the diversified requirements of King grass processing, and improved the quality of King grass cutting and beating machine working performance. Through theoretical analysis, the structure design and parameter calculation of the key parts such as feeding device, cutter and throwing board were completed. The cutting process of cutter mechanism was simulated by ANSYS/LS-DYNA. According to the orthogonal test, the main and secondary factors affecting cutting power consumption were cutter type, clearance between moving and fixed cutter, fixed cutter height. The notched circular cutter was selected, the clearance between moving and fixed cutter was 2 mm, and the height of fixed cutter was 23 mm. Through the processing of the prototype and the optimization test of King grass beating, the optimal structure and working parameters of beating process were determined as the spindle speed of 1 400 r/min, the King grass crushing mode was standard hammer and toothed plate crushing, and the slurry discharge structure was round hole concave plate. On the basis of experimental research, the small King grass chopping and beating machine was improved. The results of the improved performance test showed that the pure working time productivity of King grass cutting was 545 kg/h, and the standard grass length rate was 86%; the pure working time productivity of beating was 150 kg/h, and the long grass content in pulp was 9.1%.

Key words: King grass; cutting and beating machine; structure design; experimental optimization

0 引言

王草是一种由狼尾草与象草杂交而成的高秆类禾草,在我国南方地区广泛种植,其营养丰富,茎嫩多汁,每年可刈割多次,是一种高产的优质饲草^[1]。王草茎秆高大粗壮,为便于牲畜咀嚼和消化、提高饲喂效率,通常在饲喂前采用铡切、揉搓、打浆等方式进行加工处理。王草打浆可以减少饲草营养物质损失、增加牲畜采食量,便于与其他饲料进行混合,尤其适合饲喂猪、鸡等畜禽^[2-7]。

国内外学者以玉米秸秆、甜高粱秸秆等为加工对象进行了饲草铡切、揉搓机械的相关研究^[8-14]。文献[8-10]对秸秆铡切、揉搓过程进行分析,建立了秸秆揉搓过程的空间几何模型,得到茎秆含水率和切割状态等参数对铡切功耗的影响。文献[11-14]通过理论分析和台架试验相结合的方式,研究确定了安装角、刀尖倾角、筛孔直径、刀轴转速等结构和工作参数对秸秆的铡切效果和切割功耗的影响效果。

茎秆的物理特性对王草加工机械的设计具有重要影响。荣熊^[15]、叶炳南^[16]利用万能材料试验机对收割期王草茎秆进行了物理特性试验,结果表明,茎秆外皮在轴向有明显的线弹性,抗拉强度平均值 71.39 MPa,轴向拉伸弹性模量平均值 3 506 MPa,轴向抗拉强度 65.44 MPa,抗压强度平均值为 14.10 MPa,抗弯强度平均值为 14.66 MPa,抗弯弹性模量平均值为 132 MPa;王草茎秆外皮属于各向异性材料,其轴向和径向力学特性存在明显差异。王槊等^[17]在根径、取样高度两个维度上研究了收获期王草茎秆拉伸与剪切的强度问题,结果表明,根径、取样高度、长径及圆度等对茎秆强度无显著影响。综上所述,相比玉米、甜高粱、芦竹等其他高茎秆作物,王草含水率更高、茎秆强度更大,对加工机械的性能要求更高^[18-20]。

目前,缺少针对王草专用的铡切、打浆机械,利用传统的饲草铡切机、揉搓机对王草进行加工时,加工质量难以保证,且不具备对高含水率王草的打浆功能,难以同时满足小规模畜禽养殖户对王草的不同饲喂加工要求。本文在现有饲草粉碎、揉切等研究的基础上,对王草铡切、打浆一体化工艺进行研究,设计适用于家庭农户使用的小型组合式王草铡切打浆机,以满足对王草加工的多样化要求,同时提高王草铡切打浆机的工作性能。

1 总体结构与工作原理

1.1 总体结构

小型王草铡切打浆机总体结构如图 1 所示,主

要由机架、喂入装置、工作室、抛送口、下出料口、传动系统等组成。因王草茎秆高大粗壮,设计喂入装置包括喂入口、喂入拨辊和喂入压辊,由喂入电机提供动力。为增加对王草的输送能力,喂入拨辊为一对表面带有喂入拨齿的对辊,其辊间距离固定;喂入压辊为上下浮动对辊,位于拨辊后侧,可随喂入量而改变喂入间隙,以此实现在喂入量变化的情况下,喂入辊对王草施加稳定的夹持力,保证喂入流畅并防止堵塞。工作室内部主要安装有铡切刀盘、锤片组、破碎齿板、凹板、抛送板等。铡切刀盘、锤片组、抛送板布置于同一主轴上,并由主电机提供动力。破碎齿板安装于壳体上,凹板位于工作室下部,下出料口位于凹板下方。为便于实现王草铡切和打浆功能的切换,凹板通过螺栓与工作室主壳体相连,可根据铡切和打浆工艺的需要拆卸更换不同形式的凹板。抛送口在抛送板对应位置处的工作室上部,出口处安装有封闭挡板,在切换铡切或打浆功能时,可将抛送口开启或关闭。铡切刀盘上安装有铡切动刀,与定刀配合组成铡切机构。

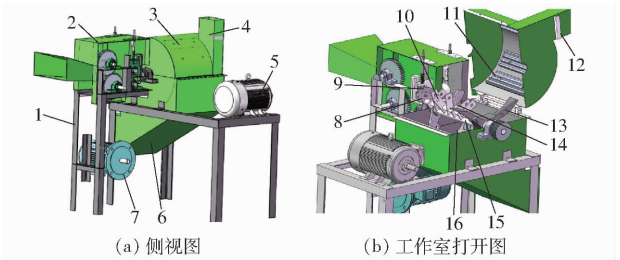


图 1 总体结构图

Fig. 1 Overall structure diagrams

1. 机架 2. 喂入装置 3. 工作室 4. 抛送口 5. 主电机 6. 下出料口 7. 喂入电机 8. 铡切刀盘 9. 动刀 10. 锤片组 11. 破碎齿板 12. 封闭挡板 13. 抛送板 14. 定刀 15. 主轴 16. 凹板

1.2 工作原理

铡切工作前,安装封闭凹板,关闭下出料口,并取下抛送口处的挡板,使铡切后的王草碎料可通过抛送口抛出。其工作过程为:王草通过喂入机构由喂入口连续喂入,经铡切机构上的动刀、定刀的剪切作用而被切断落入工作室,在高速旋转的锤片带动下向后方输送,并在抛送板的作用下经抛送出口排出工作室,由此实现对王草的铡切加工。铡切长度由喂入速度和动刀转速决定,在实际铡切工艺中,通过控制喂入机构转速,从而控制喂入速度来实现王草铡切长度的调整。铡切用王草可以为青绿或干王草,根据使用需求确定。

打浆工作前,安装抛送挡板,关闭抛送口,换装打浆用凹板,使打浆后的王草浆料可透过凹板经下出料口排出。其工作过程为高含水率的王草经铡切后落入工作室,铡切后的王草碎料在高速旋转的锤

片和破碎齿板的联合作用下被不断剪切、揉搓,在此过程中,在自身重力和锤片作用下,破碎后的王草浆料被压向凹板,当浆料粒度小于凹板孔径时,浆料经凹板下落至下出料口,排出工作室,实现青绿王草的打浆加工。打浆用王草需为刈割后的高含水率青绿王草。

2 关键部件设计与工艺分析

2.1 铡切动刀结构设计

铡切机构选用曲刃切刀。参照文献[21-22],切刀刃角选用 25°,切刀厚度选用 5 mm,采用 63Mn 钢制造。切刀刃口曲线采用偏心圆弧,如图 2 所示,其切刀刃口半径计算公式为

$$R = R_1 + \frac{1}{2}\delta_R =$$
$$\frac{\sqrt{(b+c)^2 + h^2}(\sin\tau_{\max} - \sqrt{\sin^2\tau_{\max} - \sin^2\tau_{\min}})}{\sin^2\tau_{\min}} + \frac{1}{2}\delta_R$$

(1)

式中 R ——切刀刃口半径,mm
 R_1 ——切刀刃口中线半径,mm
 b ——喂入口宽度,mm
 c ——切刀回转中心与喂入口水平距离,mm
 h ——切刀回转中心与喂入口垂直距离,mm
 $\tau_{\max}$ ——切刀最大滑切角,(°)
 $\tau_{\min}$ ——切刀最小滑切角,(°)
 δ_R ——刃口磨损储备量,常取 18~33 mm

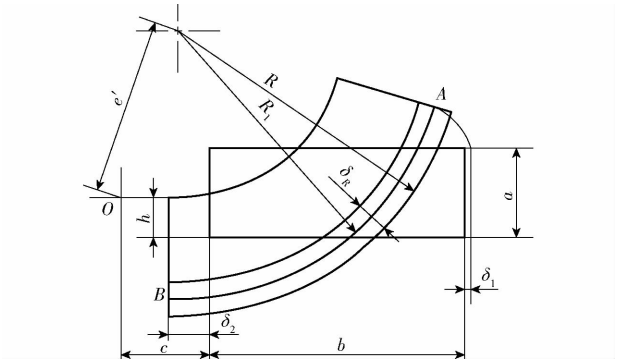


图 2 切刀结构示意图
Fig.2 Schematic of cutter structure

根据喂入机构设计,喂入口宽度 $b = 130\text{ mm}$,切刀回转中心与喂入口水平距离 $c = 45\text{ mm}$,喂入口高度 $h = 20\text{ mm}$ 。切刀最大滑切角取 50°,切刀最小滑切角取 30°,刃口磨损储备量取 28 mm。代入式(1)中,得切刀刃口半径 $R = 145\text{ mm}$ 。

切刀偏心距 e' 的计算公式为

$$e' = R_1 \cos^2 \tau_{\min}$$

(2)

代入数据,求得切刀偏心距 $e' = 114\text{ mm}$ 。

切刀远端点 A、近端点 B 与刀盘中心的水平距离为

$$L_{OA} = \sqrt{(b+c)^2 + h^2} + \delta_1$$
$$L_{OB} = c - \delta_2$$

式中 δ_1 ——右侧刀长余量,取 8~15 mm
 δ_2 ——左侧刀长余量,取 6~12 mm
 L_{OA} ——切刀远端点 A 与刀盘中心 O 的水平距离
 L_{OB} ——切刀近端点 B 与刀盘中心 O 的水平距离

综合考虑喂入口的布置形式,取 $\delta_1 = 9\text{ mm}$, $\delta_2 = 6\text{ mm}$,代入数据,求得 $L_{OA} = 185\text{ mm}$, $L_{OB} = 39\text{ mm}$ 。

2.2 抛送板及动刀架设计

抛送板及动刀架用于安装锤片架,抛送板在王草铡切加工时起到抛送王草的作用,动刀架用于固定动刀。抛送板是决定抛送效果的关键装置。袁洪方^[23]运用离散元法分析了切断后的玉米秸秆在抛送室中的运动规律,通过仿真试验得出了优选的抛送板角度为 6°~17°,优选的抛送板拐点长度为 150~200 mm。动刀架主要起支撑作用,根据动刀的设计对动刀架结构进行初步设计。所设计的抛送板、动刀架结构如图 3、4 所示,工作室主机结构如图 5。

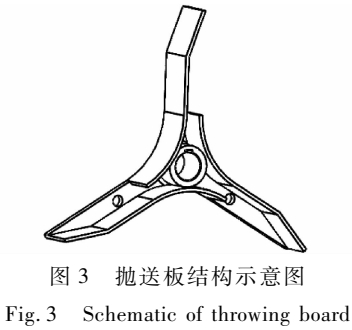


图 3 抛送板结构示意图
Fig.3 Schematic of throwing board

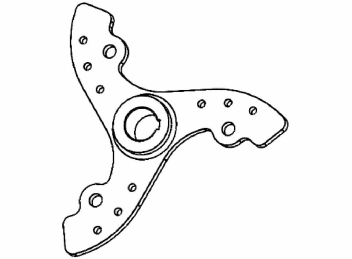


图 4 动刀架结构示意图
Fig.4 Schematic of moving tool rest



图 5 工作室内部结构图
Fig.5 Internal structure of studio
1. 喂入机构 2. 动刀架 3. 锤片组 4. 抛送板

2.3 喂入机构设计

为保证喂入量发生变化时实现连续、均匀地喂料,设计了具有自动调节喂入辊间隙功能的喂入机构。

2.3.1 浮动式喂入辊

在喂入口后方前后布置两组喂入辊,分别为喂入拨辊及喂入压辊。王草通过喂入口后经上下喂入拨辊配合向后拨送,由两喂入压辊夹紧输送至铡切机构进行切割。为了保证喂入压辊可以根据王草喂入量变化持续压紧喂入,采用压簧式夹紧机构。当王草喂入量增大时,可上下浮动的上喂入辊随王草喂入量调节两辊间距,王草通过间隙及所受压紧力随之增大,保证铡切效果。喂入辊配置简图如图6所示。

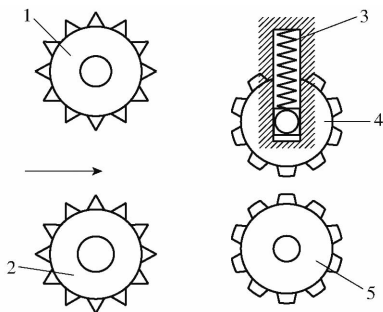


图6 喂入辊配置简图

Fig.6 Layout of feeding roller

1. 上喂入拨辊 2. 下喂入拨辊 3. 弹簧 4. 上喂入压辊 5. 下喂入压辊

2.3.2 喂入辊半径

喂入机构主要通过转动的喂入辊对饲草进行摩擦攫取实现喂入作用,其喂入过程受力分析如图7所示。图中 O_1 为下喂入辊回转中心, O_2 为上喂入辊回转中心, β 为喂入辊对饲草的正压力方向与辊轴连线间夹角, F 为喂入辊对饲草的正压力, μ 为摩擦因数, Y 为喂入前饲草厚度, γ 为喂入辊间隙, R_w 为喂入辊半径。厚度为 Y 的饲草,经上下喂入辊挤压后,厚度减小为两喂入辊的辊间间隙。假定在喂入过程中不存在弹性变形,仅靠喂入辊的攫取力。假定喂入辊对饲草的正压力 F 作用在接触弧的中心处,则两辊对喂入饲草的推力为 $2F\sin\beta$,两辊转动时对饲草层的摩擦力为 μF ,为使饲草产生喂入移动,则应满足

$$2\mu F\cos\beta \geq 2F\sin\beta \quad (5)$$

该条件可以保证喂入辊对饲草的攫取驱动力。由图7可以发现,当喂入辊半径越小时, β 越大,因此,喂入辊半径越大,喂入辊的攫取喂入能力越强,存在关系

$$L_{O_1O_2} = 2R_w + \gamma = 2R_w\cos(2\beta) + Y \quad (6)$$

在喂入临界条件,取喂入前王草厚度为40 mm,两辊间隙为20 mm,喂入辊对王草的摩擦角为 16° ,代入数据,求得 $R_{w\min} = 66$ mm。综合考虑一体机整体结构布局,设置一体机喂入辊半径 $R_w = 70$ mm。加工后喂入机构如图8所示。

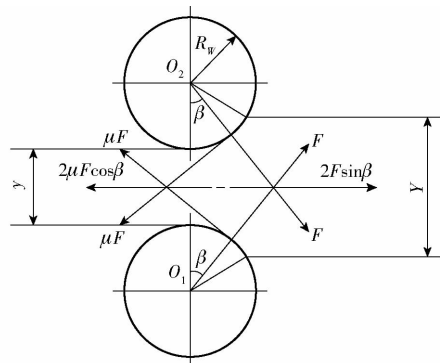


图7 喂入过程受力分析图

Fig.7 Force analysis diagram of feeding process



图8 喂入机构实物图

Fig.8 Feeding mechanism

1. 喂入拨辊 2. 喂入压辊

2.4 王草打浆工艺分析

饲草打浆的实质是通过机械外力对高含水率饲草进行破碎使之成为碎料。打浆工艺中,王草为青绿王草,含水率高,具有较强的韧性,青绿王草的破碎与干王草的破碎相比具有一定的复杂性。为实现青绿王草的破碎打浆,对王草破碎形式和浆料排料方式进行分析。

2.4.1 王草破碎形式分析

王草破碎主要通过高速运动的锤片和固定在仓室内壁上的齿板配合作用,使王草破碎成浆。本研究选择了标准锤片、L型锤片和Y型锤片3种锤片形式,如图9所示。标准锤片与齿板组合式,锤片与王草之间有较强的剪切作用,茎秆容易断裂;在搓擦阶段,由于锤片工作面较窄,且为径向方向,故发生的搓擦作用有限。L型锤片与齿板组合式,可以增加锤片与齿板间的搓擦作用,该种搓擦的破碎方式有利于较高含水率的韧性青绿王草的破碎。Y型锤片在高速破碎王草时具有较大的横向工作面积,使王草碎段在高速旋转的锤片的带动下,存在向外运动的趋势,会紧贴合齿板运动,这导致王草碎段在经过齿板时,将受到极大的搓擦作用。

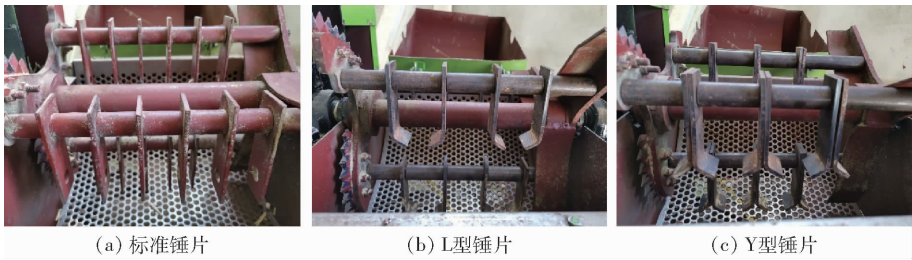


图 9 锤片布置形式

Fig.9 Arrangement of hammer piece

2.4.2 王草排料结构分析

在王草打浆工艺中,浆料的排出相比传统饲草加工中揉搓料的抛送及粉碎料的排出,具有更大的难度。本研究选择圆孔筛凹板式、栅格凹板式和轴流凹板式 3 种浆料排料结构进行试验研究。圆孔筛凹板采用粉碎用标准筛孔,利用粉碎工艺中的排料方式完成打浆浆料的排出。栅格凹板主要由栅条、圆钢等组成。栅条采用 2 mm 厚热轧板切割而成,栅条径向宽度为 25 mm,在一体机上轴向布置 40 片栅条,用 20 条 5 mm 圆钢穿制焊接。栅格凹板具有一定的径向厚度,可以增加浆料通过栅格凹板的时间,从而增加王草碎料在工作室内部被破碎的时间,进而提高浆料的破碎程度。轴流凹板为半圆柱面板,由热轧板卷制而成,在板上安装变高度斜向齿板,轴流凹板宽度小于工作室宽度,凹板在抛送板侧与侧板有一定间隙。变高度斜向齿板起导向作用,使王草碎段在工作室内部破碎过程中产生轴向运动,在王草浆料经破碎至远离铡切口一侧,浆料从筛板与侧板间的空隙处流出。

切刀对一簇王草进行切割,在本仿真试验中,为缩短运算时间,模拟铡切机构切割 2 根王草。建立定刀几何模型,根据设计的一体机铡切机构,配置王草茎秆、铡切机构及定刀位置,所组成的模型如图 10 所示。王草茎秆为正交各向异性材料,王草材料模型物理参数如表 1 所示^[15,27]。设置王草茎秆为 ORTHOTROPIC 本构模型,添加表中的各项参数,设置茎秆的失效属性 ADD_EROSION。切刀的材料为 65Mn。在建立铡切模型时,定义切刀为刚性材料模型,其物理参数^[28]如表 2 所示。

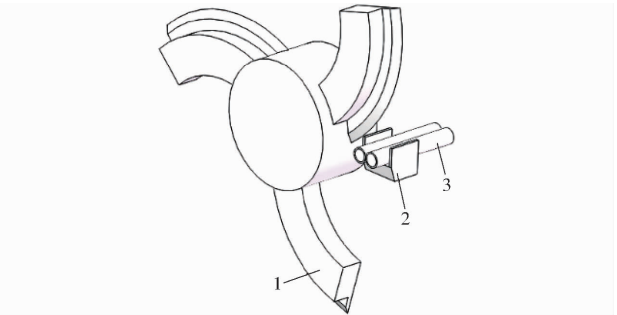


图 10 切割模型示意图

Fig. 10 Schematic of cutting model

1. 动刀 2. 定刀 3. 王草

3 铡切打浆机构工作参数优化

3.1 铡切机构仿真优化试验

为减少切割能耗以适用于家庭农户使用,利用显式动力学软件 ANSYS/LS-DYNA 进行铡切机构切割过程模拟^[24-26],研究动定刀间隙、定刀高度、主轴转速等因素对铡切机构切割王草功率消耗的影响,优化铡切结构工作参数。

3.1.1 切割模型建立和仿真参数设定

王草茎秆可分为芯部与外皮两部分,收获期王草茎秆芯部和外皮物理特性差异较大,外皮壁厚组织密集,结构强度大,而芯部质地松散易破碎,结构强度较低,王草茎秆强度主要集中在外皮部分,故铡切机构仿真优化试验以外皮作为切割研究对象。取王草茎秆直径为 16 mm,外皮厚度为 1.5 mm,建立一段长为 100 mm 的空心圆柱形王草茎秆模型。同时为提高运算速度,对铡切机构几何模型进行简化,将切刀与刀盘设为一个整体。在实际铡切过程中,

表 1 王草材料模型物理参数
Tab.1 Physical parameters of King grass material model

参数	数值
密度/(kg·m ⁻³)	1 090
X 方向弹性模量/MPa	28
Y 方向弹性模量/MPa	28
Z 方向弹性模量/MPa	3 506
XY 面泊松比	0. 340
XZ 面泊松比	0. 089
YZ 面泊松比	0. 089
XY 面剪切模量/MPa	10. 45
XZ 面剪切模量/MPa	50. 50
YZ 面剪切模量/MPa	50. 50

在铡切过程中,定义接触模型为 Surface to Surface Eroding。采用多区域网格划分法,细化王草茎秆网格,划分完成后,切割模型节点数为 10 435,单元数为 25 913。根据铡切机构实际工作工程,设

表 2 切刀材料模型物理参数

Tab.2 Physical parameters of cutter material model

参数	数值
密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	7 810
泊松比	0.3
抗拉强度/MPa	980
屈服强度/MPa	785
弹性模量/MPa	210 000
热轧硬度/HB	8 000
断面收缩率/%	10

定相关约束。对定刀施加全约束,对王草茎秆 Z 方向移动自由度施加约束,对铡切机构移动自由度施加全约束,对其 X 、 Y 方向旋转自由度施加约束。仿真试验中模拟切刀切割一次效果,即切刀旋转 180° 即可,通过计算,设置计算终止时间为 0.02 s ,采用默认步长输出。相关参数设置完成后,生成 K 文件,并由 Mechanical APDL 进行求解。利用 LS-PrePost 软件输出切割过程铡切机构的动能变化。在本仿真试验中,对铡切刀盘施加初始速度,在切割过程中,刀盘转速会因切割阻力而下降,其动能也随之下降,忽略切割过程中的内能变化,则铡切刀盘动能的减少量即切割功耗。

3.1.2 铡切机构仿真试验设计

根据铡切机构设计,铡切机构中切刀类型、动定刀间隙、定刀高度和主轴转速等参数会影响切割效果,为分析上述 4 种因素对切割效果的影响,利用 ANSYS/LS-DYNA 进行仿真铡切试验,以切割功耗为评价指标,进行四因素三水平正交试验^[29]。

目前,用于饲草铡切的切刀类型主要有曲刃切刀和齿刃切刀^[22-23]。曲刃切刀在铡切时有较好的滑切性能,但在切割后期推挤角较大,对饲草喂入稳定性有较高要求;齿刃切刀通过齿尖嵌入茎秆切割,切割过程中,茎秆不存在横向推挤,可以很好地被刀齿钳住。综合两种切刀的优缺点提出了缺口圆弧切刀,在铡切过程中,既具有曲刃切刀切割的优点,同时避免曲刃切刀切割对王草的推挤作用。3 种切刀的切割模型如图 11 所示。常见的饲草切碎机动定刀间隙为 $0.2\sim0.6\text{ mm}$,在切粗硬茎秆时可以适当取较大的间隙^[22]。由于王草茎秆较为粗硬,铡切时具有一定难度,且选用的齿形切刀、缺口圆弧切刀在受力较大时易变形,会导致动定刀碰撞,故在试验安排时选取 0.2 、 1.1 、 2.0 mm 等较大值。根据上文对喂入机构的设计计算,选用定刀高度 16 、 23 、 30 mm 。锤片转子末端线速度较小,不利于粉碎,故参考现有饲草揉搓机、粉碎机设计,选用 $1\ 000$ 、 $1\ 300$ 、 $1\ 600\text{ r/min}$ 进行铡切机构切割试验研究。试验因素与水平如表 3 所示。

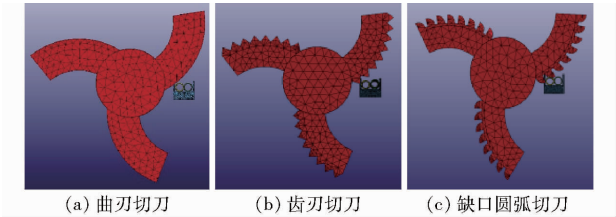


图 11 3 种切刀的切割模型

Fig. 11 Cutting models of three kinds of cutters

表 3 铡切正交试验因素水平

Tab.3 Factors and levels of cutting orthogonal test

水平	因素			
	切刀类型	动定刀间隙/	定刀高度/	主轴转速/
		mm	mm	($\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$)
1	曲刃切刀	0.2	16	1 000
2	齿刃切刀	1.1	23	1 300
3	缺口圆弧切刀	2.0	30	1 600

3.1.3 铡切机构切割试验结果分析

按表 4 铡切正交试验方案进行铡切试验, A 、 B 、 C 、 D 为因素水平值。计算得到各组试验的切割功耗如表 4 所示。计算机仿真切割过程如图 12 所示。

表 4 铡切正交试验方案与结果

Tab.4 Cutting orthogonal test scheme and results

序号	因素							
	A	B	C	D	空白列	空白列	空白列	功耗/ J
1	1	1	1	1	1	1	1	3.12
2	1	2	2	2	2	2	2	2.02
3	1	3	3	3	3	3	3	2.18
4	2	1	1	2	2	3	3	1.92
5	2	2	2	3	3	1	1	1.26
6	2	3	3	1	1	2	2	0.64
7	3	1	2	1	3	2	3	1.21
8	3	2	3	2	1	3	1	0.88
9	3	3	1	3	2	1	2	0.65
10	1	1	3	3	2	2	1	2.91
11	1	2	1	1	3	3	2	2.42
12	1	3	2	2	1	1	3	1.68
13	2	1	2	3	1	3	2	1.61
14	2	2	3	1	2	1	3	0.80
15	2	3	1	2	3	2	1	1.07
16	3	1	3	2	3	1	2	1.14
17	3	2	1	3	1	2	3	1.21
18	3	3	2	1	2	3	1	0.70

铡切机构切割王草正交试验的极差分析结果见表 5。以切割功耗为评价指标时,其值越小越好。从表 5 中可知,在铡切机构切割王草茎秆过程,影响切割功耗的因素主次顺序为 A 、 B 、 C 、 D 。最优水平组合为 $A_3B_3C_2D_2$,即选择缺口圆弧切刀,动定刀间隙为 2 mm ,定刀高度为 23 mm ,主轴转速为 $1\ 300\text{ r/min}$ 。

对铡切机构切割王草试验结果进行方差分析,结果如表 6 所示。由表 6 可以看出,以切割功耗为

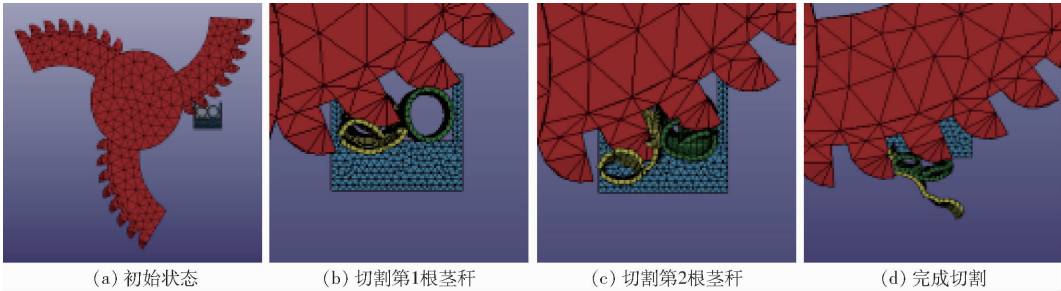


图 12 缺口圆弧切刀切割仿真过程

Fig. 12 Cutting simulation process of notch arc cutter

评价指标时,定刀高度的 P 值小于 0.05,说明其对切割功耗影响显著,切刀类型、动定刀间隙的 P 值小于 0.01,说明其对切割功耗的影响极显著;主轴转速的 P 值大于 0.05,说明主轴转速对切割功耗影响不显著。

表 5 铡切正交试验极差分析

Tab. 5 Range analysis of cutting orthogonal test							
均值	A	B	C	D	空白列	空白列	空白列
k_1	2.388	1.985	1.732	1.482	1.523	1.442	1.657
k_2	1.217	1.432	1.413	1.452	1.500	1.510	1.413
k_3	0.965	1.153	1.425	1.637	1.547	1.618	1.500
极差 R_j	1.423	0.832	0.319	0.185	0.047	0.176	0.244
优水平	A_3	B_3	C_2	D_2			

表 6 铡切正交试验方差分析

Tab. 6 Analysis of variance of cutting orthogonal test					
方差来源	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F	P
修正模型	9.584	8	1.198	32.128	<0.001
截距	41.770	1	41.770	1120.167	<0.001
A	6.924	2	3.462	92.843	<0.001
B	2.151	2	1.075	28.837	<0.001
C	0.391	2	0.196	5.243	0.031
D	0.118	2	0.059	1.586	0.257
误差	0.336	9	0.037		
总计	51.689	18			
修正后总计	9.920	17			

3.2 打浆机试验

在结构设计和铡切机构优化的基础上,进行王草铡切打浆机样机的试制,并在加工完成的样机上进行王草打浆优化试验,确定王草铡切打浆机的工艺最佳结构及工作参数。

3.2.1 样机试制

根据对王草铡切打浆机的设计、建模及铡切机构参数优化结果,完成试验样机的试制。样机所需的零部件由石家庄鑫农机械有限公司进行试制加工,试制完成后进行样机的总装和调试,总装后的王草铡切打浆样机如图 13 所示。

3.2.2 试验设计

为确定王草打浆最佳工艺参数,以主轴转速、王



图 13 王草铡切打浆样机

Fig. 13 Prototype of cutting and beating machine

草破碎方式、浆料排料方式为试验因素,同时为评价打浆效果,以浆料中长草质量分数为评价指标,进行三因素三水平正交试验。

根据铡切机构切割正交试验结果,主轴转速对切割功耗影响不显著,在此研究基础上,对王草打浆效果进行检验,选取王草打浆最佳主轴转速为整机最终主轴转速。综合考虑铡切试验研究结果和现有饲草加工设备主轴转速,确定本试验主轴转速为 1 200、1 300、1 400 r/min,试验因素水平如表 7 所示。

表 7 打浆正交试验因素水平

Tab. 7 Factors and levels of beating orthogonal test			
水平	因素		
	主轴转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	王草破碎方式	浆料排料 方式
1	1 200	标准锤片与齿板破碎式	圆孔凹板式
2	1 300	L 型锤片与齿板破碎式	栅格凹板式
3	1 400	Y 型锤片与齿板破碎式	轴流凹板式

试验用王草品种为热研 4 号,采自广东省湛江市,经刈割后立即用保鲜膜密封,运送至试验地开展试验。将采集的王草随机分为 9 组,每组 10 kg。试验时取部分样品采用烘干法测其含水率^[30],试验样品平均含水率为 91.3%。按表 8(X 、 Y 、 Z 为因素水平值)正交试验的顺序进行试验,在开始试验前,根据试验方案要求,调整试验样机工作参数,待样机运行平稳后开始匀速喂料。打浆完成后称取浆料质量,并从浆料不同位置处取样 3 次,每次 10 g,从中

挑选出长度超过 15 mm 的王草碎段,浆料中长草质量分数计算式为

$$T_x = \frac{m_x}{10} \times 100\%$$
 (7)

式中 m_x ——浆料中长度超过 15 mm 的王草碎段质量,g

表 8 打浆正交试验设计与结果

Tab.8 Results of beating orthogonal test

试验 序号	因素				浆料中长草 质量分数/%
	X	Y	Z	空白列	
1	1	1	1	1	11.74
2	1	2	2	2	29.19
3	1	3	3	3	35.36
4	2	1	2	3	22.30
5	2	2	3	1	26.08
6	2	3	1	2	6.45
7	3	1	3	2	23.56
8	3	2	1	3	6.57
9	3	3	2	1	22.58

3.2.3 试验结果

按试验安排完成 9 组试验,测得每组试验浆料中长草质量分数见表 8。对王草打浆正交试验进行极差分析,结果见表 9。以浆料中长草质量分数为评价指标时,其值越小越好。从表 9 可以看出,影响一体机打浆浆料中长草质量分数的主次顺序为 Z、X、Y。最优水平选取 $X_3Y_1Z_1$,即主轴转速为 1 400 r/min,王草破碎方式为标准锤片与齿板破碎式,浆料排料方式选择圆孔凹板式。对王草打浆试验结果进行方差分析,结果如表 10 所示。由表 10 可以看出,

表 9 打浆试验极差分析

Tab.9 Range analysis of beating test

均值	X	Y	Z	空白列
k_1	25.43	19.20	8.25	20.13
k_2	18.27	20.61	24.69	19.73
k_3	17.57	21.46	28.33	21.41
极差 R_j	7.86	2.26	20.08	1.68
优水平	X_3	Y_1	Z_1	

表 10 打浆试验方差分析

Tab.10 Analysis of variance of beating test

方差来源	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F	P
修正模型	807.978a	6	134.663	58.386	0.017
截距	3 754.421	1	3 754.421	1 627.802	0.001
X	113.535	2	56.768	24.613	0.039
Y	7.843	2	3.922	1.700	0.370
Z	686.599	2	343.300	148.844	0.007
误差	4.613	2	2.306		
总计	4 567.012	9			
修正后总计	812.591	8			

以浆料中长草质量分数为评价指标时,主轴转速的 P 值小于 0.05,说明其对浆料中长草质量分数影响显著,浆料排料方式的 P 值小于 0.01,说明此项对浆料中长草质量分数的影响极显著;王草破碎方式的 P 值大于 0.05,说明王草破碎方式对浆料中长草质量分数影响不显著。

以极差分析得到的最优水平 $X_3Y_1Z_1$ 进行验证试验,在此组合下测得浆料中长草质量分数为 6.37%,优于正交试验所有试验结果,所以王草铡切打浆机的打浆工艺参数选择主轴转速为 1 400 r/min,王草破碎方式为标准锤片与齿板破碎式,浆料排料方式为圆孔凹板式。

4 样机改进与性能试验

4.1 样机改进

根据对王草铡切打浆机的初步试制及王草打浆试验研究结果,对样机进行改进设计,调整相关结构参数,完成最终整机加工并进行调试。根据设计及优化结果,王草铡切打浆机主电机选用 Y 系列三相异步电机(Y112M-4 型),喂入机构电机选用 YE2-100L1-4 型三相异步电机,使用变频器调速。整机外形结构如图 14 所示,技术参数如表 11 所示。通过调试,机器的筛板、齿板等易于更换,可以较为方便地进行各功能的切换。



图 14 优化后王草铡切打浆机

Fig.14 Optimized King grass cutting and beating machine

表 11 技术参数

Tab.11 Technical parameters

参数	数值
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	1 000×1 260×1 220
配套动力/kW	4
主轴转速/(r·min ⁻¹)	1 400
喂入辊转速/(r·min ⁻¹)	130
锤片转子末端线速度/(m·s ⁻¹)	28
切刀数/把	3
锤片组数/组	6
转子直径/mm	400
工作室宽/mm	360

4.2 整机性能试验

2020年6月,于石家庄鑫农机械有限公司进行王草铡切和打浆性能试验,验证其工作性能。铡切性能试验按照标准 JB/T 7144—2007 和 JB/T 9707—2013 进行,其主要性能指标为纯工作时间生产率和标准草长率。试验前测得王草平均含水率为 72.8%,平均株高为 1.7 m,平均直径为 15 mm。在开始测试前,按要求将一体机调试至合适状态。铡切试验进行 3 次,结果取其平均值,每次铡切物料质量不少于 50 kg。结果表明,铡切纯工作时间生产率为 545 kg/h,铡切后王草碎料平均切草长度为 20.08 mm,符合设定 20 mm 的切草长度,标准草长率为 86%,王草铡切效果如图 15a 所示。

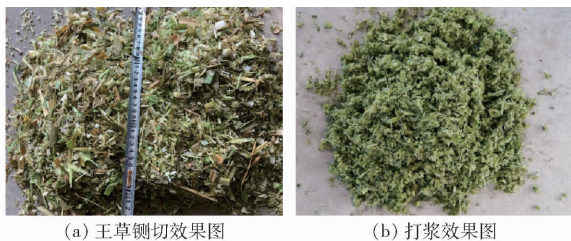


图 15 性能试验效果

Fig. 15 Performance test effect

目前,尚未发现饲草打浆相关的标准,本文参考饲草揉搓性能试验,以生产率为指标,评价其生产能力,以浆料中长草含量为指标,评价其打浆效果。性能试验采用新鲜王草茎秆,王草平均含水率为 92%,平均株高为 1.8 m,茎秆平均直径为 18.21 mm。在开始测试前,按要求将机器调至最佳工作状态。打

浆试验进行 3 次,结果取其平均值,每次打浆物料质量不少于 50 kg。试验结果表明,样机打浆纯工作时间生产率为 150 kg/h,浆料中长草(长度超过 15 mm)质量分数为 9.1%,王草打浆效果如图 15b 所示。

5 结论

(1)针对缺少适用于家庭农户使用的王草专用铡切打浆机械问题,设计了一种小型组合式王草铡切打浆机,该机通过更换部件可进行铡切、打浆的一机两用。提出了小型王草铡切打浆机的铡切、打浆工艺方案,完成对切刀结构、抛送板、动刀架、喂入机构等关键部件的设计和参数确定。

(2)采用计算机模拟仿真和样机试验相结合的方式,对铡切、打浆机构进行优化试验,正交试验结果表明,影响铡切机构切割功耗的因素主次顺序为切刀类型、动定刀间隙、定刀高度,铡切机构选取缺口圆弧切刀,动定刀间隙为 2 mm,定刀高度为 23 mm,打浆样机试验确定主轴转速为 1 400 r/min,王草破碎方式采用标准锤片与齿板破碎式,浆料排料方式采用圆孔凹板式。

(3)在试验的基础上对小型王草铡切打浆机进行改进,改进后的整机性能试验表明,王草铡切的纯工作时间生产率为 545 kg/h,标准草长率为 86%,打浆纯工作时间生产率为 150 kg/h,浆料中长草质量分数为 9.1%,机器性能可靠,适用于家庭农户使用。

参 考 文 献

- [1] 任继周. 草业大辞典[M]. 北京:中国农业出版社, 2008.
- [2] JOHNSON L M, HARRISON J H, DAVIDSON D, et al. Corn silage management: effects of hybrid, chop length, and mechanical processing on digestion and energy content[J]. Journal of Dairy Science, 2003, 86(1): 208–231.
- [3] ONETTI S G, SHAVER R D, BERTICS S J, et al. Influence of corn silage particle length on the performance of lactating dairy cows fed supplemental tallow[J]. Journal of Dairy Science, 2003, 86(9): 2949–2957.
- [4] SHINNERS K J, JIROVEC A G, BAL M. Processing whole-plant corn silage with crop processing rolls on a pull-type forage harvester[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2000, 16(4): 323–331.
- [5] COOKE K M, BERNARD J K. Effect of length of cut and kernel processing on use of corn silage by lactating dairy cows[J]. Journal of Dairy Science, 2005, 88(1): 310–316.
- [6] 高振江. 粗饲料揉搓加工机理与机具的研究[D]. 北京:北京农业工程大学, 1993.
GAO Zhenjiang. A study on mechanism and implement of rubbing process of straw and forage[D]. Beijing: Beijing University of Agricultural Engineering, 1993. (in Chinese)
- [7] 李烈柳. 畜牧饲养机械使用与维修[M]. 北京:金盾出版社, 2009.
- [8] 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 corn stalk rubbing cone[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 81–84, 92. (in Chinese)
- [9] IGE M T, FINNER M F. Forage harvester knife response to cutting force[J]. Transactions of the ASAE, 1976, 19(3): 451–454.
- [10] AKRITIDIS C B. The mechanical characteristics of maize stalks in relation to the characteristics of cutting blade[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1974, 19(1): 1–12.
- [11] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 153–157. http://www.jcsam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s30&journal_id=jcsam. DOI: 10. 6041/j. issn. 1000-1298. 2012. S0. 030. (in Chinese)

- [12] 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)
- [13] 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)
- [14] 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)
- [15] 荣熊. 王草茎秆滚刀切割工艺优化[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
RONG Xiong. Optimization of rotor cutter cutting technics for King grass[D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [16] 叶炳南. 王草收获关键技术与装置的试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2020.
YE Bingnan. Experimental research on key techniques and devices of Pennisetum sinense Roxb harvester[D]. Beijing: China Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [17] 王槲,杜嵇华,赵亮,等. 王草茎秆拉伸与剪切的强度特性[J]. 热带作物学报,2019,40(6):1188–1194.
WANG Shuo, DU Jihua, ZHAO Liang, et al. Tensile and shearing strength properties of the stems of King grass (*Pennisetum sinense* Roxb) [J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2019, 40(6): 1188–1194. (in Chinese)
- [18] 廖宜涛,廖庆喜,田波平,等. 收割期芦竹底部茎秆机械物理特性参数的试验研究[J]. 农业工程学报,2007,23(4):124–129.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, TIAN Boping, et al. Experimental research on the mechanical physical parameters of bottom stalk of the *Arundodonax* L. in harvesting period[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(4): 124–129. (in Chinese)
- [19] 陈艳军,吴科斌,张俊雄,等. 玉米秸秆力学参数与抗倒伏性能关系研究[J]. 农业机械学报,2011,42(6):89–92.
CHEN Yanjun, WU Kebin, ZHANG Junxiong, et al. Relationship between corn lodging resistance and mechanical parameters [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6): 89–92. (in Chinese)
- [20] 郭玉明,袁红梅,阴妍,等. 茎秆作物抗倒伏生物力学评价研究及关联分析[J]. 农业工程学报,2007,23(7):14–18.
GUO Yuming, YUAN Hongmei, YIN Yan, et al. Biomechanical evaluation and grey relational analysis of lodging resistance of stalk crops[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(7): 14–18. (in Chinese)
- [21] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册(下册)[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.
- [22] 杨明韶,杜健民. 草业工程机械学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2013.
- [23] 袁洪方. 饲草铡切揉搓关键装置优化设计与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2013.
YUAN Hongfang. Optimal design and experiment study on forage cutting and kneading device[D]. Beijing: China Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [24] 曹卫彬,孙胃岭,牛驰,等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的梳夹式红花采摘装置研究[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(11): 123–131.
CAO Weibin, SUN Weiling, NIU Chi, et al. Combed safflower picking device based on ANSYS/LS-DYNA [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 123–131. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181114&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.014. (in Chinese)
- [25] 廖宜涛,廖庆喜,舒彩霞,等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的芦竹切割进给速度匹配研究[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):30–34.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, SHU Caixia, et al. Matching of cutting and feeding speed for reaping *Arundo donax* L. based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 30–34. (in Chinese)
- [26] 李国和王敏杰,段春争. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的金属切削过程有限元模拟[J]. 农业机械学报,2007,38(12):173–176.
LI Guohe, WANG Minjie, DUAN Chunzheng. Finite element simulation of the process of orthogonal metal cutting based on the ANSYS/LS-DYNA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 173–176. (in Chinese)
- [27] 王槲,杜嵇华,赵亮,等. 王草茎秆弯曲与压缩的强度特性[J]. 江苏农业科学,2019,47(22):264–268.
WANG Shuo, DU Jihua, ZHAO Liang, et al. Bent and compressed strength characteristic of stems of King grass[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(22): 264–268. (in Chinese)
- [28] 何亚峰. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的钢管冷拔工艺有限元分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
HE Yafeng. Finite element ansysis of steel tube cold drawing technology based on ANSYS/LS-DYNA [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2006. (in Chinese)
- [29] 王万中. 试验的设计与分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [30] 车刚,陈正发,王鑫,等. 自主转送式杂粮含水率快速测定仪设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(11):357–366.
CHE Gang, CHEN Zhengfa, WANG Xin, et al. Design and experiment on autonomous transferring and quick measuring equipment of moisture content of coarse cereals[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(11): 357–366. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191140&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.11.040. (in Chinese)