

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.07.007

李向阳, 李晓康, 张锋伟, 等. 青贮玉米收获机喂入切碎试验台设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(7): 41-47

Li Xiangyang, Li Xiaokang, Zhang Fengwei, et al. Design and test of the feeding and shredding test bench on silage corn harvester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(7): 41-47

青贮玉米收获机喂入切碎试验台设计与试验^{*}

李向阳¹, 李晓康^{2,3}, 张锋伟¹, 宋学锋¹, 潘伟阳¹, 侯晶涛¹

(1. 甘肃农业大学机电工程学院, 兰州市, 730070; 2. 甘肃省机械科学研究院有限责任公司, 兰州市, 730070;
3. 甘肃省草地农业机械重点实验室, 兰州市, 730070)

摘要: 经过收获并发酵制成的青贮玉米饲料营养价值较高, 是我国畜牧业可持续发展的物资基础。针对青贮玉米收获机存在切碎质量差、喂入时秸秆易缠绕堵塞、能耗高等问题, 设计喂入高度可调、喂入辊可反转、切碎质量较好的青贮玉米收获机喂入切碎试验台, 本试验台可以完成青贮玉米输送、喂入、切碎、抛送等工作过程。对试验台的关键零部件进行静力学分析和模态分析, 以验证其强度和可靠性。以秸秆切碎长度和长度合格率为主要性能参考指标, 对该试验台进行性能试验, 试验结果表明当喂入速度为 2.5 m/s, 切碎滚筒转速为 1 700 r/min 时, 切碎长度平均为 15.6 mm, 合格率为 96.1%, 生产效率为 15 000 kg/h, 各项指标均符合国家标准和行业标准。

关键词: 青贮玉米; 喂入装置; 切碎装置; 有限元法; 模态分析

中图分类号: S225.5+1 **文献标识码:** A **文章编号:** 2095-5553 (2024) 07-0041-07

Design and test of the feeding and shredding test bench on silage corn harvester

Li Xiangyang¹, Li Xiaokang^{2,3}, Zhang Fengwei¹, Song Xuefeng¹, Pan Weiyang¹, Hou Jingtao¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou, 730070, China;
2. Gansu Academy of Mechanical Sciences Co., Ltd, Lanzhou, 730070, China; 3. Key Laboratory of Grassland Agricultural Machinery in Gansu Province, Lanzhou, 730070, China)

Abstract: The silage corn feed made by harvesting and fermentation has high nutritional value, which is the material basis for the sustainable development of China's animal husbandry. Aiming at the problems of poor shredding quality, winding and clogging of straw during the feeding process, and high energy consumption in silage corn harvester, a test bench with feeding and shredding device for silage corn harvester is designed with adjustable feeding height, reversible feeding roll and good shredding quality. The test bench designed can complete the working process of silage corn transportation, feeding, shredding and throwing. Statics and modal analyses are carried out on key parts of the test bench to verify its strength and reliability. Taking shredding length and pass rate of straw as the main performance reference indexes, the performance test of the test bench was carried out. The test results showed that when the feeding speed was 2.5 m/s and the rotation speed of the shredding drum was 1 700 r/min, the average shredding length of straw was 15.6 mm, the pass rate was 96.1%, and the production efficiency was 15 000 kg/h. All indicators are in line with national and industry standards.

Keywords: silage corn; feeding device; shredding device; finite element method; modal analysis

0 引言

玉米秸秆作为一种粗饲料, 铡切后直接投喂食草

家畜时存在咀嚼费力不适口、营养吸收率低等问题^[1]。将含水率为 65%~75% 的玉米秸秆切碎并破节后, 在密封缺氧的环境下经过厌氧乳酸菌的发酵调制, 抑制

收稿日期: 2022年12月19日 修回日期: 2023年5月11日

* 基金项目: 甘肃省科技重大专项国际合作(18ZD2WA003); 国家自然科学基金(32260432); 甘肃省科技计划重点研发项目(21YF5NA092)

第一作者: 李向阳, 男, 1997年生, 甘肃通渭人, 硕士研究生; 研究方向为农业机械装备。E-mail: 2291968672@qq.com

通讯作者: 李晓康, 男, 1979年生, 甘肃庆阳人, 硕士, 正高级工程师; 研究方向为饲草收获技术及装备。E-mail: xiaokang_li01@163.com

其他细菌的繁殖,得到一种优质的饲料^[2],称为青贮饲料。青贮饲料具有气味酸香适口^[3]、柔软多汁,寄生虫少等特点,可以极大地改善反刍动物对于粗饲料的吸收,同时可以长期保存^[4]。

青贮饲料收获的一般过程为:秸秆切割、喂入、切碎、籽粒破碎和包膜密封^[5],喂入和切碎是两个重要环节。喂入装置中喂入辊的数量、排布和类型将直接影响喂入性能。国外青贮玉米收获机喂入辊个数以4个或6个居多,国内青贮收获机大多采用4个喂入辊,牧泽4QS-18A青贮收获机采用7个、美迪9QZ-3300A青贮收获机采用8个喂入辊,甘肃农业大学孙继鑫等^[6]设计的籽粒破碎装置采用5个喂入辊。在秸秆发生缠绕时,喂入装置的及时反转将极大地提高整机的安全性能,避免造成耽误农时、钢材耗费等经济损失^[7]。切碎装置中切刀类型和数量的不同会影响收获机的工作效率^[8]。常见的切碎装置有两种:滚刀式切碎装置和盘刀式切碎装置。盘刀式切碎装置因其特定结构而限制了喂入口的大小,国外青贮收获机已经舍弃不用,国内也只有牧神4QZ-3000A等极少数机型使用。内蒙古农业大学^[9-12]对盘刀式切碎器的发展与改进有突出贡献,完成主要参数确定,通过正交试验确定最佳动定刀间隙以及切碎器主轴最佳转速等工作。

针对现有小型青贮收获机喂入性能差、切碎质量不稳定等问题,设计一种青贮玉米收获机喂入切碎试验台。通过理论计算确定各部件参数,对关键部件进行CAE分析,确定其强度和可靠性。并在现场进行性能试验,通过试验结果的反馈来优化各装置的使用参数。

1 整体结构及其工作原理

1.1 整体结构

本试验台主要由输送装置、喂入装置、切碎装置、变频电机、物料抛送通道以及底座构成,结构如图1所示。

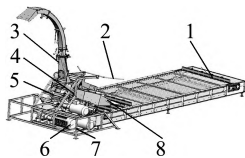


图1 试验台整体结构

Fig. 1 Overall structure of the test bench

1. 插禾运输装置 2. 扶禾杆 3. 抛料通道 4. 喂入装置
5. 切碎装置 6. 变频电机 7. 机架 8. 割台

1.2 工作原理

首先由输送装置将全株玉米输送至喂入装置前,此为第一阶段;喂入装置通过上下两个喂入辊配合将输送过来的全株玉米压实并喂入至切碎装置前,此为第二阶段;全株玉米经过切碎装置的动、定刀配合将其切碎,并通过物料抛送通道抛送出去,此为第三阶段,

整个过程结束。在机器运转的过程中,将后一阶段的运转速度设置的比前一阶段的大,这样在连续工作的过程中就不会轻易出现物料拥堵的现象。

2 关键部件设计

2.1 输送装置

输送装置的主要功能是将整株玉米通过输送带传输至喂入装置的上下喂入辊之间,主要由输送带、输送滚轴以及侧挡板构成,该部分由单独的变频电机驱动,选用Y132M-4型三项异步电动机,额定转速为1460 r/min。避免整机拥有复杂的传动系统。

2.2 喂入装置

喂入装置由上喂入辊、下喂入辊以及正反转变速箱组成,其三维模型如图2所示。传动方式为链传动,其优点是传动力矩大,不易打滑,适合整机的工作环境,可靠性高^[13]。喂入装置的作用是将输送装置传送过来的玉米秸秆通过对辊进行挤压,并且以一定的速度喂入切碎装置中,在强制喂入的过程中,上下两喂入辊相互配合,将秸秆连续不断地压平,使秸秆不发生弯曲,在喂入量增大的时候,下喂入辊轴被迫进入导槽,双联轴承座起到杠杆的作用,将顶端的弹簧拉伸,在弹簧的反作用力下,下喂入辊始终处于向上被拉的状态,实现喂入口高度自动调节^[14],保证整个喂入过程处于压紧状态,且对整个装置的寿命有很好的保护^[15];正反转变速箱的作用主要是当茎秆缠绕喂入辊时,喂入辊可以实现反转,便于清理。

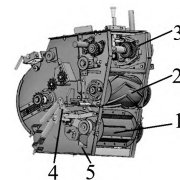


图2 喂入压平装置三维模型

Fig. 2 Feed the 3D model of the flattening device

1. 下喂入辊(浮动辊) 2. 上喂入辊(固定辊)
3. 正反转变速箱 4. 双联轴承座 5. 导槽

喂入辊直径是影响喂入性能的重要参数^[16],其理论计算如式(1)所示。

$$D_w = \frac{H(1-\mu)}{2(1-\cos\varphi)} \quad (1)$$

式中: D_w ——喂入辊直径, mm;

H ——传送带上物料厚度, mm;

μ ——物料压缩系数,一般取值0.6~0.8;

φ ——物料与辊摩擦角,一般取值 $16^\circ \sim 32^\circ$ 。

本设计中取 $H=114$ mm、 $\mu=0.7$ 、 $\varphi=24^\circ$,带入上式可得 $D_w=197.79$ mm,向上取整198 mm。喂入口幅宽338 mm,喂入口最高可达93 mm。

2.3 切碎装置

切碎装置是青贮收获机的核心部件之一,其性能的优劣直接影响青贮饲料的品质,切碎装置的功能是将喂入装置传送过来的全株玉米秸秆和果穗均匀切碎。常见的滚刀式切碎装置有螺旋滚刀式、平板滚刀式和直刃斜装滚刀式三种。本设计采用直刃斜装滚刀式切碎装置,有磨刃方便和结构紧凑等优点。

2.3.1 切碎装置的设计

为达到预定切断长度,设置 2 组刀片,每组数量为 6 把,设计排布方式如图 3 所示,其目的是工作时减小机械振动,切割阻力均匀,工作平稳;本装置的另一功能是将已切碎的秸秆进行收集并抛送,动刀片斜装角 Φ 越小,其抛送性能越好,但是切碎性能会随之下降^[17]。考虑到本机动刀片由特定的平板夹具固定且下方刀架呈圆弧状,可以完成抛送任务,为避免结构过于复杂,舍弃“切碎装置+抛送装置”的设计方式,为了使动刀片在高速运转的过程中滑切效果好、使用寿命较长^[18],本设计选择动刀片斜装角 Φ 为 12° 。磨刀装置是该装置的一个附加装置,通过调节砂棒和磨刀拉杆的配合,可以在动刀片处于安装状态时对其磨刃,避免拆卸,极大地提高工作效率。

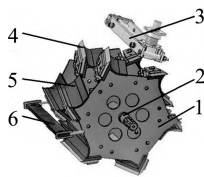


图 3 切碎装置

Fig. 3 Device of shredding

1. 滚刀架 2. 切碎主轴 3. 磨刀装置 4. 动刀片 5. 抛送板 6. 定刀

2.3.2 秸秆喂入过程受力分析

秸秆的喂入是根据喂入辊与秸秆之间相互摩擦产生的拽力,为保证喂入过程稳定且流畅不堵塞,对喂入过程进行受力分析^[19],假设在此过程中不受其他外力的影响,玉米秸秆在压缩后不会出现应力松弛现象。喂入过程示意如图 4 所示。

$$O_1O_2 = 2R_w + h = 2R_w \cos\alpha + H \quad (2)$$

式中: R_w ——喂入辊半径,mm;

h ——喂入后秸秆层厚度,mm。

为使秸秆在不受外力作用下能持续喂入,需满足

$$2fF_N \sin\alpha \geq 2F_N \cos\alpha \quad (3)$$

式中: F_N ——喂入辊对秸秆层的正压力,N;

f ——喂入辊与秸秆之间摩擦系数;

α ——正压力与中轴线夹角, $^\circ$ 。

即 $f \geq \tan\alpha$,其中 $f = \tan\varphi$,本研究 φ 取值 24° ,所以 $0 < \alpha \leq 24^\circ, f = 0.45$ 。

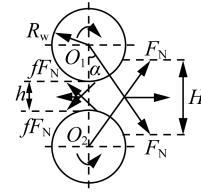


图 4 喂入过程示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the feeding process

2.3.3 动刀片参数确定

考虑到切碎装置的紧凑性,动刀片长度设计为 185 mm,宽度为 67.5 mm,厚度为 10 mm,动定刀间隙为 0.4~1 mm。刃口角在很大程度上影响着动刀的切割功耗和使用寿命^[20];刃口角较大时切割功耗增大;刃口角较小时切割功耗减小,但是刀刃的强度将降低,易磨损,刀片寿命变短。一般刃口角的设计范围是 $15^\circ \sim 30^\circ$,本设计取刃口角 $\beta = 30^\circ$ 。为保证刀片具有足够的刚度、强度、韧性以及耐磨性,材料选用刀具用钢 9SiCr,淬火后硬度需达到 HRC57~60。

动刀片与切割平面法向的夹角称为切割前角 ψ ,如图 5 所示。研究指出^[21],切割时秸秆层的体积将被压缩成原体积的 $2/3$,完成切割后,切下的秸秆与未切下的秸秆迅速回弹。当切割前角较小时,回弹阻力增大,出现冲压的特性,使切割滚筒减速、功耗增加。

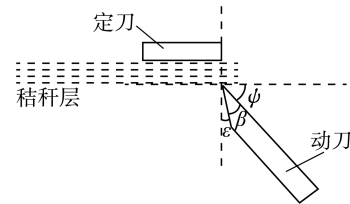


图 5 角度关系图

Fig. 5 Diagram of angle relations

为避免秸秆层在推送过程中摩擦动刀片前平面,刀片的安装角 ϵ 应满足

$$\epsilon \geq \arctg \frac{Z_d l_{\max}}{2\pi R_{\min}} \quad (4)$$

式中: ϵ ——刀片的安装角, $^\circ$;

Z_d ——动刀片数量,个;

l_{\max} ——秸秆最大理论切碎长度,mm;

R_{\min} ——动刀刃线最小回转半径,mm。

代入数据 $l_{\max} = 20 \text{ mm}, R_{\min} = 220 \text{ mm}$ 得 $\epsilon_{\min} = 4.96^\circ$,由角度关系图可知 $\psi = 90^\circ - \beta - \epsilon$,研究发现切割前角的最佳值为 $50^\circ \sim 60^\circ$,所以取整得 $\epsilon = 5^\circ, \psi = 55^\circ$ 。

2.3.4 动刀片受力分析

切碎滚筒在工作过程中,动刀片的受力过程是极为复杂的,其受到玉米秸秆的物料特性、秸秆的喂入量和滚筒转速等多重因素的影响^[22]。现假设动刀片的受力是均匀且相等的,将刀片受到的力简化为均布

载荷作用于刃口,分析刀片在转动接触玉米秸秆层后切割瞬间产生的阻力,研究受力情况。刀片切割玉米秸秆时的受力图如图 6 所示。

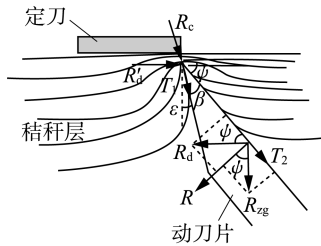


图 6 刀片切割玉米秸秆时的受力

Fig. 6 Force on which the blade cuts corn stalks

图 6 中 R_c 为玉米秸秆受刀刃的垂直方向压力后对刀刃的反作用力, N; R_d' 为玉米秸秆受刀刃的水平方向压力后对刀刃的反作用力; T_1 为刃面受到的玉米秸秆的摩擦力, N。则

$$R = R_d \sin\phi + R_{zg} \cos\phi \quad (5)$$

式中: R ——刀片受到的压力反作用力, N;

ϕ ——刀片的切割前角, 其值为 55° ;

R_{zg} ——玉米秸秆受到挤压时对刀片的反作用力, N;

R_d ——玉米秸秆受到刀面压力的反作用力, N。

取刀片与玉米秸秆的摩擦系数为 μ , 则

$$T_2 = \mu R = \mu (R_d \sin\phi + R_{zg} \cos\phi) \quad (6)$$

式中: T_2 ——刀面受到的玉米秸秆的摩擦力, N。

摩擦力 T_2 在刃面方向的分量为

$$T_2 \sin\beta = \mu (R_d \sin\phi + R_{zg} \cos\phi) \sin\beta \quad (7)$$

在刃面方向上, 动刀片的压力满足

$$P \geq R_c + T_1 + R_{zg} \cos\epsilon + T_2 \sin\beta \quad (8)$$

$$R_c = \Delta L \sigma_c \quad (9)$$

式中: Δ ——刀刃厚度, mm;

L ——刀刃长度, mm;

σ_c ——玉米秸秆的临界压应力, MPa。

σ_c 只能从实验仪器上测得, 且受秸秆的物理特性、刀片的锐利度和材料等因素的影响较大, 其他各项都是阻力, 同样受到秸秆物理特性、喂入秸秆厚度等外界因素的影响, 因此, 刀片的受力不能精确地通过计算得出, 需要大量的试验来测定。

2.3.5 动刀片有限元分析

青贮玉米秸秆抗剪能力强, 动刀片在切割时承受载荷较大, 因此对切碎装置动刀片采用软件 SolidWorks Simulation 进行静力学分析^[23], 验证其可靠性。查阅文献^[24]可知, 玉米秸秆的切碎力约为 $7 \sim 18.4$ N/mm, 玉米秸秆实际切割过程较为复杂, 为使分析模型简化, 将刀片受到的反作用力等效为对动刀片刃口均匀分布载荷。为使静力学分析结果可靠,

选取秸秆最大切碎力为 18.4 N/mm, 则刃口总载荷 $F_1 = 18.4 \times 185 = 3404$ N, 方向与刀片刃口方向相反。有限元网格划分选择品质较高, 将动刀片三维模型划分为 3.506037 mm 的小单元, 雅可比比为 4, 公差为 0.175302 mm, 节点数为 26592, 单元数为 16248。网格划分与载荷分布如图 7 所示。动刀片应力模型与静态位移如图 8、图 9 所示。

由图 8 可以看到动刀片在受力后的应力分布情况, 动刀片主要在螺栓孔处存在应力集中, 均匀分布的螺栓使得应力集中现象得到了有效分散, 应力值较小, 最大注解中显示左侧螺栓孔处最大应力为 8.047 MPa, 满足设计要求, 且动刀片在工作过程中有夹具的夹持, 可以进一步地缓解应力集中现象。

由图 9 可知, 动刀片的形变由于螺栓的存在而分散到两侧, 动刀片的安装属于滑切姿态, 工作过程主要由动刀片中部完成, 最大注解中显示静态位移值为 0.001228 mm, 显然可以忽略。通过对动刀片的静应力分析和静态位移分析可知, 刀片的强度和刚度都完全满足切碎青贮玉米秸秆的工作要求。

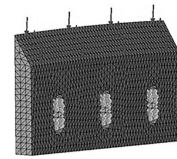


图 7 动刀片网格划分与载荷分布

Fig. 7 Mesh generation and Load distribution of moving blade

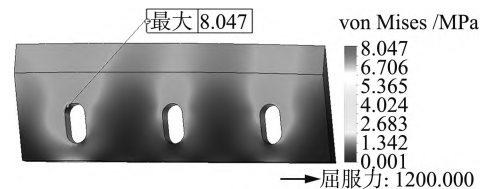


图 8 动刀片应力模型

Fig. 8 Stress model of moving blade

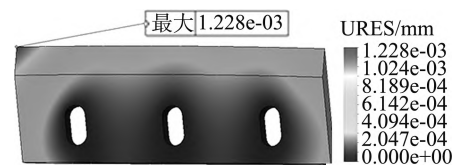


图 9 动刀片静态位移

Fig. 9 Static displacement of moving blade

2.3.6 切碎滚筒主轴模态分析

切碎滚筒主轴是切碎装置的重要零部件, 因其在高速旋转的环境下工作, 受振动平稳性的影响较大, 所以要对其进行模态分析, 研究固有频率, 避免在高速转动的过程中达到固有频率, 发生共振。45 号钢是轴类零件的常用材料, 在经过热处理工艺后, 力学性能较好, 刚度高。选择 45 号钢作为切碎滚筒主轴材料。在主轴两侧

轴颈处添加约束,将 SolidWorks Simulation 中的网格划分品质调节到良好,自动将主轴三维模型划分为 5.814 172 mm 的小单元,雅可比点为 4,公差为 0.290 709 mm,网格划分如图 10 所示。查阅文献[25]可知,轴对于高阶频率振动的激励响应要小于低阶频率, SolidWorks Simulation 中默认已给出前五阶的低阶模态振型图,如图 11 所示,相应固有频率如表 1 所示。



图 10 切碎滚筒主轴网格划分

Fig. 10 Grid division of cutting drum shaft

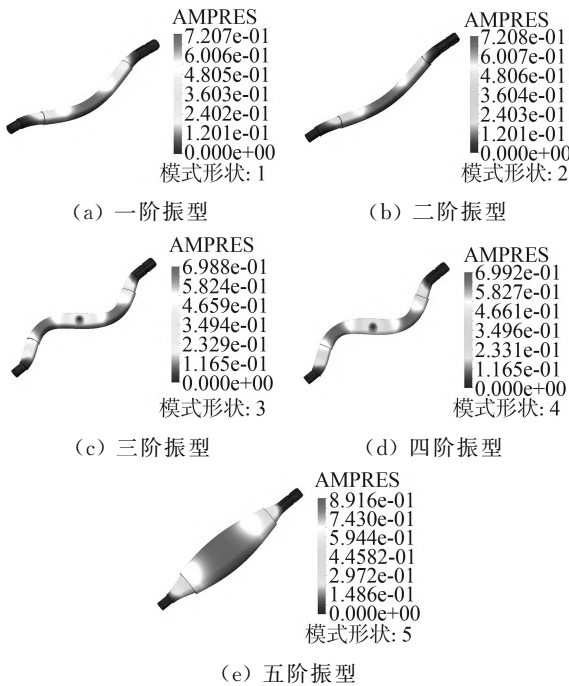


图 11 切碎滚筒主轴前五阶模态振型

Fig. 11 First five modes of the main shaft of the cutting drum

表 1 切碎滚筒主轴前五阶振动频率

Tab. 1 First five vibration frequencies of the main shaft of the cutting drum

模态阶数	频率/(rad · s ⁻¹)	频率/Hz	周期/s
1	4 263.2	678.51	0.001 473 8
2	4 268.7	679.39	0.001 471 9
3	12 036	1 915.6	0.000 522 03
4	12 049	1 917.7	0.000 521 47
5	18 512	2 946.3	0.000 339 41

显然,各模式对应的临界转速要远高于切碎主轴的设定转速,不可能发生共振现象,所以在正常工况下,主轴的疲劳和损坏不受共振因素的影响,但是在工作的过程中会出现微量弯曲变形,根据模态图分析预测弯曲裂纹应该出现在两端轴颈处,需进行适当的热加工处理以应对。

3 试验与结果分析

3.1 试验条件

试验在甘肃金科峰农业装备工程有限公司厂房空地进行,选取蜡熟期的新鲜全株玉米作为试验材料,通过烘干法测量其平均含水量为 65.3%。试验所需工具有:电热鼓风干燥箱,转速传感器、卷尺、游标卡尺、电子秤、秒表和温度计等。

3.2 试验方案

根据 NY/T 2696—2015《饲草青贮技术规程玉米》^[2]规定,青贮玉米的切碎长度是 10~20 mm。

理论切碎长度计算如式(10)所示。

$$l_c = \frac{60V_y}{n_d \times Z_d} \quad (10)$$

式中: l_c ——理论切碎长度, m;

V_y ——喂入速度, m/s;

n_d ——切碎器转速, r/min;

Z_d ——动刀片数量。

当秸秆笔直喂入时,理论切碎长度接近实际切碎长度,所以实际切碎长度一般大于理论切碎长度。

由切碎长度的计算公式可知,影响切碎长度的因素有喂入速度、切碎器转速以及动刀片个数,由于动刀片个数在设计之初就是固定不变的,所以选择喂入速度 V_y 和切碎转速 n_d 作为试验因素,为了使切碎长度落在 10~20 mm 之间,且根据农业机械设计手册,分别取四个梯度值:喂入速度 V_y (A1、A2、A3、A4),切碎转速 n_d (B1、B2、B3、B4),相关参数见表 2。

表 2 喂入速度与切碎转速梯度值

Tab. 2 Feed speed and shredding speed gradient values

喂入速度 /(m · s ⁻¹)	A1	A2	A3	A4
	1.5	2.0	2.5	3.0
切碎转速 /(r · min ⁻¹)	B1	B2	B3	B4
	1 100	1 300	1 500	1 700

在试验开始前应提前安装好可以调速的变频器,对试验台进行空载调试,保证其工作状态,在试验过程中应该保证各个电机在额定的电压下稳定的工作,不同喂入速度和切碎转速下理论切碎长度如表 3 所示。

表 3 理论切碎长度

Tab. 3 Theoretical shredding length mm

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
B ₁	13.64	18.18	22.73	27.27
B ₂	11.54	15.38	19.23	25.00
B ₃	10.00	13.33	16.57	20.00
B ₄	8.83	11.76	14.70	17.64

考虑到一部分理论切碎长度不在规定的青贮玉米长度 10~20 mm 之内,且实际切碎长度比理论切碎长度稍大,所以在试验过程中舍弃理论切碎长度大于等于和小于规定范围的组合(A₃B₁、A₄B₁、A₄B₂、A₄B₃、A₁B₄)。

根据中华人民共和国农业行业标准 NY/T 2088—2011《玉米青贮收获机作业质量》^[26] 中的作业质量检测方法,作为该试验的考核指标。在每组收获的饲料里随机抽取 6 个不少于 2 kg 的样品,3 个用于测量秸秆的长度、3 个用于测量秸秆切碎长度的合格率,并取平均值。现场试验过程如图 12 所示。



图 12 试验现场

Fig. 12 Test site

3.3 试验结果与分析

根据上述方法进行试验,所得试验结果如表 4、表 5 所示。

表 4 平均切碎长度

Tab. 4 Average shredding length mm

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
B ₁	14.2	19.3	—	—
B ₂	12.1	16.5	20.3	—
B ₃	11.3	14.6	17.3	—
B ₄	—	12.8	15.6	18.6

表 5 合格率

Tab. 5 Pass rate %

	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄
B ₁	95.6	94.5	—	—
B ₂	95.2	95.6	93.8	—
B ₃	94.8	95.7	95.4	—
B ₄	—	95.3	96.1	94.9

试验结果表明,在舍弃一部分理论上不符合青贮玉米规定的组合数据后,其他组合下切碎长度基本满足 NY/T 2696—2015《饲草青贮技术规程 玉米》的规定。

当喂入速度为 2.5 m/s、切碎器转速为 1 700 r/min 时,平均切碎长度为 15.6 mm,合格率为 96.1%,此时的生产率 E 为 15 000 kg/h。

$$E = \frac{Q}{t} \quad (11)$$

式中: E ——生产率,kg/h;

Q ——作业量,kg;

t ——时间,h。

显然,此喂入速度和切碎器转速为最优组合,根据对试验过程的观察,试验台工作平稳、没有出现堵塞和秸秆缠绕等现象,所生产的青贮玉米饲料质地良好,据初步感官判断,该试验台生产的饲料属于优质青贮玉米饲料。

4 结论

1) 通过理论分析和 SolidWorks 设计一种青贮玉米喂入切碎试验台,该试验台由物料输送装置、喂入压平装置、切碎装置、物料抛送通道以及底座构成。设计了各项工作参数和零件参数,对试验台关键部件进行静力学分析和模态分析,仿真结果显示设计强度足够满足作业要求,并预测了应力集中点。

2) 对试验台进行生产性能试验,在正常工况下运行平稳,切碎长度均匀。试验结果表明:当喂入速度为 2.5 m/s,切碎滚筒转速为 1 700 r/min 时,切碎长度平均为 15.6 mm,合格率为 96.1%,生产效率为 15 000 kg/h,各项指标均符合国家及行业标准,可以搭载 1.8 m 割台的小型青贮收获机,以期为我国小型青贮收获机械和类似机械提供一定参考。

参 考 文 献

- [1] 张旦主,孙伟,刘小龙,等. 切揉组合式青贮玉米粉碎机的设计与研究[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(6): 93—100. Zhang Danzhu, Sun Wei, Liu Xiaolong, et al. Design and research of the combined cutting and kneading silage corn crusher [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(6): 93—100.
- [2] NY/T 2696—2015, 饲草青贮技术规程 玉米[S].
- [3] 吴建忠,李绥艳,林红,等. 不同青贮玉米品种品质性状比较研究[J]. 畜牧与饲料科学, 2021, 42(2): 48—51.
- [4] 关伟. 奶牛、黄牛饲喂青贮饲料的注意事项[J]. 养殖技术顾问, 2014(11): 7.
- [5] 李恒,宁尚锴,闫翠平,等. 全株玉米青贮饲料制作技术的要点[J]. 中国畜牧业, 2022(3): 58.
- [6] 孙继鑫,张炜,马军民. 青贮玉米饲料籽粒破碎试验台设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(12): 62—67. Sun Jixin, Zhang Wei, Ma Junmin. Design and experiment of corn silage grain crushing test bed [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(12): 62—67.
- [7] 陈志. 中国农机零部件工业的现状和发展[J]. 农业机械, 2012(28): 78—82.
- [8] 李龙. 藤茎类秸秆滚筒式切割装置及性能试验研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2017.
- [9] 别镇江. 铡草机切碎器切割过程有限元仿真分析及切碎器性能试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- [10] 王光明. 盘刀式铡草机切碎器性能试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.
- [11] 闫秀芳. 盘刀式铡草机切碎器的虚拟设计及其性能研

- 究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2008.
- [12] 方梅, 别镇江, 郁志宏, 等. 盘刀式铡草机切割性能试验研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(2): 67-72.
Fang Mei, Bie Zhenjiang, Yu Zhihong, et al. Experimental study on cutting performance of disc cutter chaff cutter [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(2): 67-72.
- [13] 刘晓, 侯加林, 李文, 等. 青饲料收获机割台的设计[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(6): 11-15.
Liu Xiao, Hou Jialin, Li Wen, et al. Design on header of green fodder harvester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(6): 11-15.
- [14] 李媛. 9QZJ80 型秸秆铡切机喂入装置的研究设计[J]. 农村牧区机械化, 2013(5): 57-59.
- [15] Yu M, Omar C, Schmidt A, et al. Improving feeding powder distribution to the compaction zone in the roller compaction [J]. European Journal of Pharmaceutics and Biopharmaceutics, 2018, 128: 57-68.
- [16] 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: 中国农业科学技术出版社, 2007.
- [17] 赵毅彬, 迟淑筠. 玉米青贮机滚筒式切碎装置的设计[J]. 饲料工业, 2005, 16(15): 10-13.
- [18] 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.
- [19] Tian F, Xia K, Wang J, et al. Design and experiment of self-propelled straw forage crop harvester [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2021, 13(7): 16878140211024455.
- [20] Jiang Y, Li G, Zhang X. Double-objective optimization simulation and orthogonal experiment of shredding roller for silage machine [C]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing, 2020, 711(1): 012029.
- [21] 庞声海, 王乃信. 直刀刃滚刀式切碎器的分析与设计[J]. 农业机械学报, 1983(2): 46-54.
- [22] 周春燕. 青贮螺旋切碎滚筒关键零件的有限元分析及优化[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
- [23] 陈超祥, 胡其登. SolidWorks Simulation 高级教程, 2018 版[M]. 北京: 机械工业出版社, 2018.
- [24] 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.
- [25] 田王亮. 高速长锭轴动态特性分析与结构参数优选[D]. 上海: 东华大学, 2022.
- [26] NY/T 2088—2011, 玉米青贮收获机作业质量[S].

(上接第 33 页)

- [6] 李久英. 农用机械设计制造发展现状及先进技术应用探析[J]. 现代农机, 2020(4): 49-50.
- [7] Gao Z, Xu Q, Si Q, et al. Effects of different straw mulch rates on the runoff and sediment yield of young citrus orchards with lime soil and red soil under simulated rainfall conditions in southwest China [J]. Water, 2022, 14(7): 1119.
- [8] Prats S A, Merino A, González-Pérez J A, et al. Can straw-biochar mulching mitigate erosion of wildfire-degraded soils under extreme rainfall [J]. Science of the Total Environment, 2021, 761: 143219.
- [9] Sun H Y, Liu C M, Zhang X Y, et al. Effects of irrigation on water balance, yield and WUE of winter wheat in the North China Plain [J]. Agricultural Water Management, 2006, 85(1-2): 211-218.
- [10] 王姝逸. 机械起垄覆膜栽培实现紫甘薯高产高效[J]. 天津农业科技, 2013(4): 8.
- [11] Liu Q, Chen Y, Liu Y, et al. Coupling effects of plastic film mulching and urea types on water use efficiency and grain yield of maize in the Loess Plateau, China [J]. Soil and Tillage Research, 2016, 157: 1-10.
- [12] 马兆嵘, 刘有胜, 张芊芊, 等. 农用塑料薄膜使用现状与环境污染分析[J]. 生态毒理学报, 2020, 15(4): 21-32.
- [13] Dong Q, Dang T, Guo S, et al. Effects of mulching measures on soil moisture and N leaching potential in a spring maize planting system in the southern Loess Plateau [J]. Agricultural Water Management, 2019, 213: 803-808.
- [14] 徐谐庆, 饶洪辉, 刘木华. 油茶垦复机的机构设计及运动学仿真[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(3): 84-87.
Xu Xieqing, Rao Honghui, Liu Muhua. Mechanical design and kinematics simulation for Camellia reclamation machine [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(3): 84-87.
- [15] 杭程光. 基于离散元方法的深松土壤扰动行为研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [16] Calbet J A L, MacLean D A. Plasma glucagon and insulin responses depend on the rate of appearance of amino acids after ingestion of different protein solutions in humans [J]. The Journal of Nutrition, 2002, 132(8): 2174-2182.
- [17] 李杭杭. 基于 DEM-FEM 耦合的滑坡作用下管道力学响应分析[D]. 成都: 西南石油大学, 2017.
- [18] Li B, Chen Y, Chen J. Modeling of soil-claw interaction using the discrete element method (DEM) [J]. Soil and Tillage Research, 2016, 158: 177-185.
- [19] 戴飞, 宋学锋, 赵武云, 等. 全膜双垄沟覆膜土壤离散元接触参数仿真标定[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 49-56, 77.
- [20] 李旭东, 臧家俊, 高翔, 等. 果园秸秆覆盖机宽幅覆土装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(12): 70-78.
Li Xudong, Zang Jiajun, Gao Xiang, et al. Design and test of broad soil-covering device for orchard straw mulching machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(12): 70-78.

论文精选:青贮玉米收获机喂入切碎试验台设计与试验

成果简介

经过收获并发酵制成的青贮玉米饲料营养价值较高,是我国畜牧业可持续发展的物资基础。针对青贮玉米收获机存在切碎质量差、喂入时秸秆易缠绕堵塞、能耗高等问题,设计喂入高度可调、喂入辊可反转、切碎质量较好的青贮玉米收获机喂入切碎试验台,本试验台可以完成青贮玉米输送、喂入、切碎、抛送等工作过程。对试验台的关键零部件进行静力学分析和模态分析,以验证其强度和可靠性。以秸秆切碎长度和长度合格率为主要性能参考指标,对该试验台进行性能试验。结果表明,当喂入速度为 2.5 m/s,切碎滚筒转速为 1 700 r/min 时,切碎长度平均为 15.6 mm,合格率为 96.1%,生产效率为 15 000 kg/h,各项指标均符合国家标准和行业标准。该研究由国家自然科学基金(32260432)、甘肃省科技重大专项国际合作(18ZD2WA003)、甘肃省科技计划重点研发项目(21YF5NA092)等资助。

应用领域

该喂入切碎装置可搭载在小型丘陵山地自走式青贮收获机上,也可搭载在台架式青贮收获机上,可对青贮玉米、高粱、巨菌草等饲草进行无差别收获。

主要技术指标

配套动力 80 kW	切碎滚筒转速 1 100~1 700 r/min(可调)
喂入辊数量 2 个	喂入速度 1.5~3 m/s(可调)
平均切碎长度 15.6 mm	平均生产率 $\geq 15\,000$ kg/h

团队介绍

该成果由甘肃省机械科学研究院有限责任公司和甘肃农业大学机电工程学院北方特色作物生产机械化与农废资源化利用科研团队联合研发。甘肃省机械科学研究院有限责任公司主要致力于优质饲草商品化生产加工装备研究。近十年,承担国家省部委以上科研项目 10 余项,发表学术论文 6 篇,获授权发明专利 12 余项,获国家级、省部级奖励 8 项。

联系方式

联系人:李晓康,电话:18009497949,邮箱:xiaokang_li01@163.com

