

自由端加捻立式青草制辫成型装置设计与试验

李 帅^{1,2} 游朝鑫¹ 定冬旭¹ 王 坤¹ 张书柏¹ 王光辉³

(1. 北京印刷学院机电工程学院, 北京 102600;

2. 北京印刷学院数字化印刷装备北京市重点实验室, 北京 102600;

3. 中国农业大学工学院, 北京 100083)

摘要: 为提高青藏高原牧区草辫成型效率并降低人工劳动强度,实现草辫机械化和连续稳定成型,本文设计了一种立式青草制辫成型装置,能够适应不同牧草喂入量,实现自适应连续强制加捻。基于加捻过程的力学关系,构建了喂料辊转速与加捻角速度之间定量模型;通过青燕麦草压缩特性试验,建立了压缩力与压缩位移多项式,决定系数达0.99以上。在此基础上,基于搭建的制辫试验平台进行了三因素三水平正交试验,研究喂料厚度、喂料辊压力、加捻转矩及喂料速度对成型质量的影响,试验结果表明,喂料辊压力需保持为8.26~17.89 kg,加捻转矩为12.43 N·m以上,可实现有效加捻,喂料厚度越大所需压力越大。当喂料加捻辊线速度为0.10 m/s、加捻转速为89 r/min、喂料厚度为0.10 m时,成型草辫最大抗拉强度达到120.58 N。研究表明,在喂入量自适应条件下,立式单捻制辫装置能够实现连续强制加捻,并满足草辫晾晒所需的成型强度要求。

关键词: 立式单捻; 制辫; 成型装置; 青燕麦草; 抗拉强度

中图分类号: S226.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2026)08-0111-08

OSID:



Design and Experiment of Vertical Braiding Device with Free-end Twisting

LI Shuai^{1,2} YOU Chaoxin¹ DING Dongxu¹ WANG Kun¹ ZHANG Shubai¹ WANG Guanghui³

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China

2. Beijing Key Laboratory of Digitalized Printing Equipment, Beijing Institute of Graphic Communication, Beijing 102600, China

3. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In the pastoral regions of the Qinghai-Tibet Plateau, the traditional method of manually braiding freshly harvested forage for drying is characterized by low efficiency and high labor intensity. To address this challenge and achieve mechanized, continuous, and stable grass braid forming, a vertical green grass braiding device was designed. The device featured an adaptive mechanism that accommodated varying forage feed rates and enabled continuous forced twisting. Based on the mechanical analysis of the twisting process, a quantitative relationship between the feed roller rotational speed and the twisting angular velocity was established. Compression characteristic tests were conducted by using green oat straw, and the relationship between compression force and displacement was accurately modeled by a quartic polynomial equation with a coefficient of determination exceeding 0.99. Utilizing a custom-built experimental braiding platform, a three-factor three-level orthogonal test was performed to investigate the effects of feed thickness, feed pressure, twisting torque, and feed linear speed on the forming quality, with the maximum tensile strength of the formed grass braid as the primary evaluation index. The experimental results indicated that effective twisting was achieved when the feed roller pressure was maintained within the range of 8.26 kg to 17.89 kg and the twisting torque exceeded 12.43 N·m, with higher feed thickness requiring greater applied pressure. Under the optimal combination of operating parameters, specifically a feed-twisting roller linear speed of 0.10 m/s, a twisting speed of 89 r/min, and a feed thickness of 0.10 m, the formed grass braid attained a maximum tensile strength of 120.58 N.

收稿日期: 2026-01-30 修回日期: 2026-02-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(51905040)、北京市教育委员会科技计划项目(KM202010015002)、北京印刷学院校级科研计划项目(Ea202406)和数字化印刷装备北京市重点实验室项目(20190325002)

作者简介: 李帅(1990—),男,副教授,博士,主要从事牧草机械研究,E-mail: lishuai_marshall@bige.edu.cn

通信作者: 王光辉(1974—),男,教授,博士生导师,主要从事草业生产机械化技术及工艺研究,E-mail: guanghui.wang@cau.edu.cn

The research demonstrated that the proposed vertical single-twist braiding device, operating under adaptive feed conditions, which can successfully achieve continuous forced twisting and produce grass braids with tensile strength sufficient to meet the requirements for subsequent field drying. The findings can provide a theoretical basis and technical reference for the development of mechanized grass braiding equipment for alpine pastoral applications.

Key words: vertical single-twist; braiding; forming device; green oat grass; tensile strength

0 引言

草辫加工是青藏高原牧区特有的生产方式,收获期适逢雨季,牧民通常将刈割后的牧草制成草辫后搭在晾草架上晾晒,不仅通风透光加快脱水速率,而且能在下雨时及时遮盖,防止牧草霉变,可有效保证牧草品质^[1-2]。然而,目前草辫仍以牧民手工制作为主,该生产方式劳动强度大,工作效率低,且牧区劳动力不足,无法满足生产需求,青草制辫实现机械化显得尤为重要。

当前,在青草制辫成型工艺方面,草辫制作主要由人工完成,牧民们手动将散草捋顺后,通过卷绕的方式将散草拧成草束^[3]。目前国外学者主要研究了与青草制辫工艺相似的纱线物料加捻原理^[4-6],ATOUI等^[7]研究了纤维和可持续扭纱的拉伸力学特性;EGOROVA等^[8]模拟了纱线加捻变形过程;FURLANI等^[9]通过建模分析在纯张力情况下单股扭转连续丝纱线性能;MINE等^[10]研究了不同纱线组合对压股纱辅助性能的影响。国内学者大多围绕纱线等柔性材料纺纱加捻工艺进行研究^[11-12],通过分析捻度、转矩等因素,优化加捻工艺^[13-15]。在青草制辫成型机具方面,王光辉等^[16-18]研制的青草制辫成型机,采用带有抄板的加捻滚筒带动青草实现加捻,青草捻回主要受到加捻滚筒转速和抄板结构的影响^[19-20]。但草辫加捻连续性与均匀性可进一步提高。

为实现草辫连续、均匀加捻,本文设计自由端加捻立式青草制辫成型装置,利用牧草自身重力,实现牧草连续强制喂入和强制加捻,以保证青草制辫连续性和草辫紧实度。

1 整体结构和工作原理

1.1 总体结构

自由端加捻是一种前端固定、中间段加捻、末端不受约束的加捻方式。自由端加捻立式青草制辫成型装置主要由料斗、旋转支撑架、喂料加捻辊,牵引输出辊、喂料传动机构、加捻传动机构和牵引传动机构组成,结构如图1所示。料斗与机架固连,相对地面固定;喂料传动机构固定在旋转支撑架上,在喂料传动机构驱动下,主动喂料加捻辊和从动喂料加捻

辊可分别绕自身轴线相向旋转;在加捻传动机构驱动下,旋转支撑架可带动主动喂料加捻辊和从动喂料加捻辊一起围绕料斗轴线水平公转;在牵引传动机构驱动下,主动牵引输出辊和从动牵引输出辊可绕自身轴线相向旋转,持续稳定输出加捻的草辫。料斗起辅助喂料作用,与喂料加捻辊之间有一定距离。

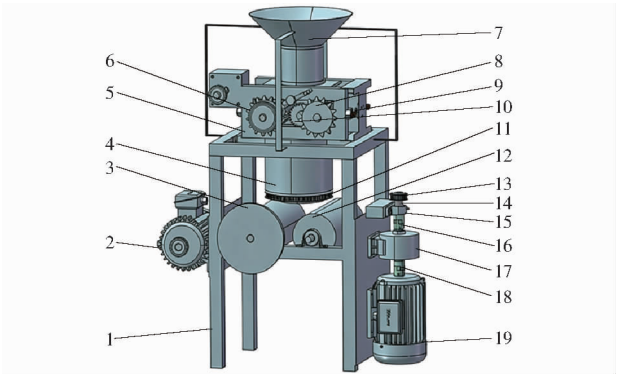


图1 立式青草制辫成型装置结构设计
Fig.1 Structural design of vertical single-twist grass braiding forming device

1. 机架 2. 电动机 A 3. 主动牵引输出辊 4. 立式轴承座 5. 旋转支撑架 6. 主动链轮 7. 料斗 8. 从动链轮 9. 压力传感器 10. 从动喂料加捻辊 11. 从动同步带轮 A 12. 从动牵引输出辊 13. 主动同步带轮 A 14. 短轴 A 15. 带座轴承 16. 弹性联轴器 A 17. 扭矩传感器 18. 弹性联轴器 B 19. 电动机 B

1.2 工作原理

为实现青草有效加捻,在青草制辫成型过程,需保证青草一端被握持,另一端绕自身轴线回转,青草各截面间产生相对回转角位移,使青草形成捻回。通过有效加捻,青草形成同向异形单捻草辫。设计的自由端加捻立式制辫成型原理图如图2所示,牧草依次经过自由喂料端、加捻区和输出端,实现强制喂料、强制加捻和强制输出等功能。

强制喂料:当牧草原料被投入料斗时,在一对喂料加捻辊作用下,投入料斗的牧草被夹持并向加捻区输送。为保证草辫连续性和均匀性,使料斗内牧草始终处于被处理和输送动态过程中,不会形成静态堆积和架空,故采用定时间歇投入方式进行喂料。通过传送带将牧草原料输送到料斗上方,再进行自由落体进入料斗,在牧草原料接触料斗前,受到传送带初速度和重力加速度影响。当牧草接触到料斗

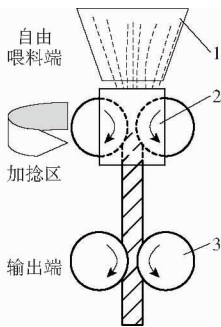


图 2 自由端加捻的立式制辫成型原理图
Fig.2 Mechanism schematic of vertical free-end twisting grass braiding forming
1. 料斗 2. 喂料加捻辊 3. 牵引输出辊

后,则均匀连续向下输送,使新投入的牧草束与前一束牧草在料斗内形成稳定的搭接区域,从而实现牧草连续过渡。虽牧草长度存在一定差异,仍可维持相邻牧草束之间的有效搭接;强制加捻:当牧草到达加捻区时,出料端受到牵引输出辊的夹持,进料端被喂料加捻辊夹持喂入的同时,旋转支撑架驱动一对喂料加捻辊围绕草辫轴线旋转,强制加捻牧草,获得一定量的捻回,喂料加捻辊与牵引输出辊之间的距离不影响草辫加捻效果;强制输出:加捻完成后草辫到达输出端时,在一对牵引输出辊作用下,实现成型草辫连续强制牵引输出。

2 关键部件设计

2.1 料斗

料斗是承接原料的部件,只起到支撑牧草辅助喂料的作用,根据牧草外形参数确定料斗高度和料斗小端直径。如图 3 所示,为保证料斗中牧草能被强制夹持喂入,应尽量减少料斗与喂料加捻辊之间的间隙 h_{δ} ,此外,料斗底部直径 d_h 应不大于喂料加捻辊长度 W_r ;为实现喂料端自由,保证物料能够沿料斗斜面自由滑落,应满足

$$\begin{cases} mgsin\theta_h \geq \mu_{hg} mgcos\theta_h \\ d_h \leq W_r \\ d_h \leq b_{\delta} + d_2 \\ l_g \leq h_h \end{cases} \quad (1)$$

式中 θ_h ——料斗锥面倾斜角, ($^{\circ}$)
 b_{δ} ——喂料加捻辊之间的间隙, mm
 d_2 ——喂料加捻辊直径, mm
 h_h ——料斗高度, mm
 μ_{hg} ——牧草和料斗之间的摩擦因数
 l_g ——牧草平均长度, mm

为有效增大料斗承接面,保证物料能靠自重下滑^[21-22],设计料斗锥面倾斜角 θ_h 为 65° 。当喂入草条宽度为 150 mm 时,设计料斗底部直径 d_h 为 150 mm。

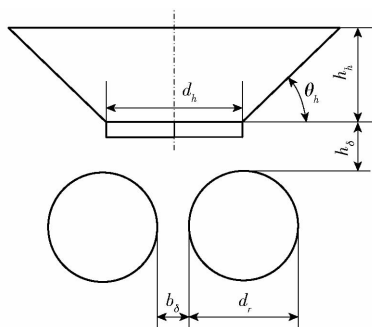


图 3 料斗结构示意图
Fig.3 Structural schematic of feed hopper

2.2 喂料加捻装置

2.2.1 喂料加捻装置组成和原理

喂料加捻装置主要由 2 个喂料加捻辊、弹簧和旋转支撑架组成。当牧草原料被投入料斗时,在一对喂料加捻辊旋转挤压作用下,投入料斗的牧草被夹持并向加捻区输送。当牧草到达加捻区时,出料端受到牵引输出辊夹持,进料端被喂料加捻辊夹持喂入的同时,旋转支撑架驱动一对喂料加捻辊围绕草辫的轴线旋转,强制加捻牧草,获得一定量的捻回,完成草料加捻。

以燕麦草作为研究对象进行加捻试验。同时针对实际生产中草料种类不同,在加捻装置上加入可伸缩的弹簧,以更好地调整控制喂料加捻辊之间的距离,便于制作不同粗细的草辫。

2.2.2 喂料加捻装置受力分析

为保证喂料加捻辊能够有效夹持牧草,避免喂料加捻辊与燕麦草之间的滑移,根据喂料加捻辊有效喂料要求,对喂料过程进行受力分析。在草料进入喂料加捻装置前,可通过喂入草束横截面积 S 表征燕麦草喂入量。为此,将喂入草宽度 b 与喂料加捻辊长度 W_r 设为 140 mm,而草条厚度 W_g 反映喂入量,因此喂入草横截面积 S 计算式为

$$S = bW_g = \frac{\pi d^2}{4} \quad (2)$$

式中 d ——草辫直径, mm

根据喂入量控制以及手工工艺要求,草辫直径为 90 mm,喂料草条宽度取 140 mm,可计算出辊子间隙 b_{δ} (压缩后草条厚度忽略牧草反弹) 为 45.44 mm,根据牧草可压裂宽度 ε ,可得平铺在输送机上的草条厚度(喂入量) $W_g = 45.44/\varepsilon = (53 \sim 106)$ mm^[23]。

为简化喂料加捻辊结构,忽略辊体上螺纹钢,假设喂料加捻辊是标准的圆柱面。在垂直于喂料加捻辊轴线的草辫与辊子发生接触瞬间,加捻草辫受力如图 4 所示(从动喂料加捻辊对加捻草辫的作用力与主动喂料加捻辊相同),其中 F_N 为喂料加捻辊作

用在草瓣上的法向力, F_f 为喂料加捻辊作用于草瓣上的摩擦力。将 F_N 和 F_f 沿草瓣轴向和径向分解, 可得沿径向压缩草瓣的力 F_{Nx} 、 F_{fx} 和沿草瓣轴向牵引草瓣进入喂料加捻辊间隙的力 F_{fy} 与阻止草瓣进入喂料加捻辊间隙的力 F_{Ny} 。由于喂料加捻辊和牵引输出辊之间距离不变, 而加捻会使得草沿着螺旋状结构布置, 从而使得草瓣产生沿轴线方向的轴向拉力 T , 方向与重力 G 相同。

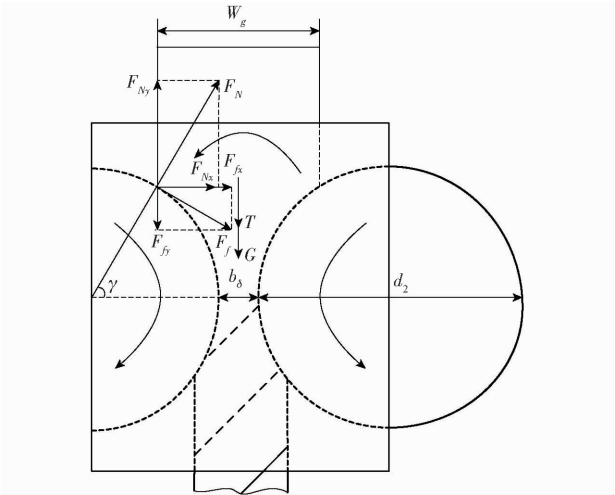


图 4 喂料加捻辊喂料受力分析图
Fig. 4 Force analysis diagram of fiber feed twisting roller feeding process

喂料加捻辊中主动喂料加捻辊是浮动辊, 随着喂料加捻辊牵引草瓣不断进入辊子间隙, 在此过程中, 草瓣受到的法向力 F_N 和切向摩擦力 F_f 不断增大, 喂料加捻辊对草瓣的牵引作用也逐渐增强, 直至草瓣达到加捻辊最小间隙, 此时喂料加捻辊对草瓣的牵引作用达到最大。显然, 在草瓣初始喂入瞬间, 喂料加捻辊抓取草瓣条件为

$$2F_{fy} + G + T \geq 2F_{Ny} \quad (3)$$

在初始牵引阶段, 草瓣受到轴向拉力 T 较小, 为简化分析过程, 可忽略不计。于是草瓣喂入光滑喂料加捻辊的抓取条件为

$$2F_N \mu_0 \cos \gamma + G \geq 2F_N \sin \gamma \quad (4)$$

其中
$$\cos \gamma = 1 - \frac{W_g - b_\delta}{d_2} \quad (5)$$

式中 μ_0 ——喂料加捻辊与草瓣之间的摩擦因数
 γ ——喂料加捻辊对草瓣的起始抓取角, ($^\circ$)
得到喂料加料辊抓取草瓣时其结构参数与特性参数之间的关系为

$$d_2 \geq \frac{(W_g - b_\delta) \mu_0}{\mu_0 - \sin \gamma + \frac{G}{2F_N}} \quad (6)$$

根据草瓣成型工艺要求, 草瓣成型直径为 0.09 m 左右, 一般茎秆压缩比为 0.6 ~ 0.9, 喂料加捻辊对

茎秆的摩擦因数 μ_0 为 0.7 ~ 1.1^[24]。当喂料加捻辊间隙 b_δ 取 0.6 W_g , μ_0 取 0.7 时, 由式(6)得 $d_2 \geq 0.064$ m。喂料加捻辊牵引草瓣的同时围绕草瓣轴向公转, 为减少转动惯量, 应减小喂料加捻辊尺寸, 为保证喂料能力, 取喂料加捻辊直径 d_2 为 0.07 m。同时, 在喂料加捻辊圆柱面上, 平行于喂料加捻辊轴线方向, 沿周向均布 16 根直径为 0.01 m 与喂料加捻辊等长的螺纹钢, 以进一步增强对物料夹持与轴向牵引作用。

2.2.3 喂料加捻辊弹簧压缩系数测量

为进一步标定支撑浮动辊压缩弹簧弹性系数, 在万能试验机上进行弹簧压缩测试, 得到弹簧压缩量与压力拟合关系如图 5 所示。

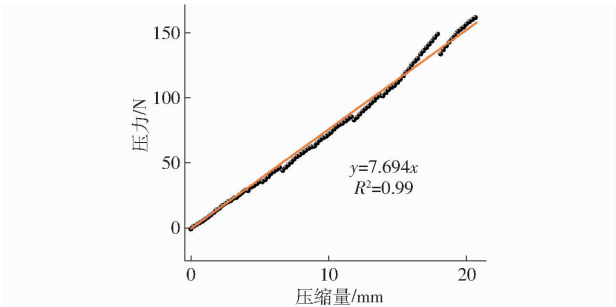


图 5 弹簧压缩量与压力的拟合关系
Fig. 5 Fitting relationship between spring compression and pressure

2.3 牵引输出辊设计

参考文献[23], 为确保草料能够正常喂入, 牵引输出辊直径 d_r 需满足

$$d_r \geq \frac{h_g - b_{\delta 1}}{1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \mu_0^2}}} \quad (7)$$

式中 h_g ——草瓣直径, mm
 $b_{\delta 1}$ ——牵引输出辊工作间隙, mm

草瓣直径为 90 mm, 由此得到牵引输出辊直径为 190 mm, 牵引输出辊长度需大于 90 mm, 此处为保证加捻草瓣顺利输出, 设计牵引输出辊长度为 150 mm。

2.4 喂料加捻辊线速度与加捻角速度关系

当牧草到达加捻区时, 出料端受到牵引输出辊夹持, 进料端被喂料加捻辊夹持喂入的同时, 旋转支撑架驱动一对喂料加捻辊围绕草瓣轴线旋转, 使得牧草获得一定量的捻回, 完成加捻牧草。回转角为 360 $^\circ$ 时为一个捻回, 当长度为 L 的草瓣用时 t 通过加捻区间时, 喂料加捻辊线速度 v 与加捻角速度 w 关系为

$$v = \frac{L}{2\pi n} w \quad (8)$$

式中 n ——草瓣通过加捻区间被加捻的圈数

由此可得,在确保草辫加捻圈数不变情况下,喂料加捻辊线速度 v 与加捻角速度 w 呈正相关,当草辫进行加捻时,草辫自身在加捻过程形成螺旋状排列结构,内部会产生抵抗加捻作用的转矩 M_a ,且随着加捻圈数增加,转矩 M_a 不断增大。同时草辫与加捻辊之间的摩擦力会产生摩擦转矩 M_f 。为实现对草辫旋转加捻, M_a 和 M_f 需满足

$$M_a < M_f \tag{9}$$

初始加捻时,草辫加捻次数较少,转矩 M_a 小于摩擦转矩 M_f ,使得草辫在摩擦转矩 M_f 作用下被带动旋转进行加捻。随着喂料加捻辊线速度和加捻速度增加,草辫加捻速度加快,转矩 M_a 增大,当转矩 M_a 等于摩擦转矩 M_f 时,是草辫与加捻装置之间产生打滑的临界值,因此,为了防止打滑现象,草辫加捻圈数应小于产生打滑所需的加捻次数。

2.5 喂料加捻辊线速度与牵引输出辊速度关系

如图 6 所示,在加捻过程,单段加捻材料因加捻而产生捻回角 α ,使得材料由直线排列变成螺旋线状态排列,这种排列结构使得草辫自身具有一定弹性,随着加捻次数增加,螺旋线长 S_0 不变,捻距 L_T 减小,捻回角 α 增大,捻制圆周长增大,材料总体长度变短。

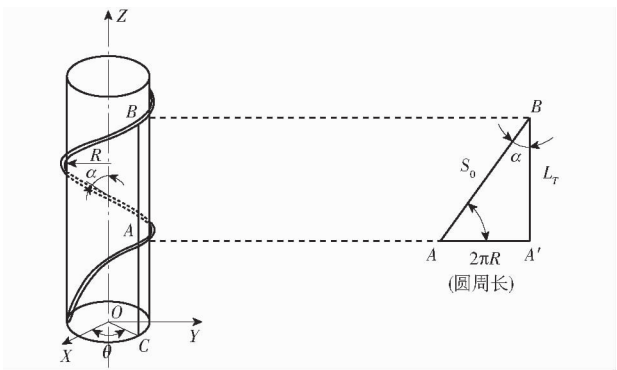


图 6 草辫加捻后呈螺旋线状态及展开图
Fig. 6 Helical configuration and unfolded diagram of post-twisting grass braid

由于喂料加捻辊和牵引输出辊之间距离不变,随着加捻次数增加,草辫会受到两端沿轴线方向的轴向拉力从而影响草辫质量,为了减小轴向拉力影响,牵引输出辊线速度 v_1 应略小于喂料加捻辊线速度 v ,即

$$v_1 < v \tag{10}$$

3 试验

为验证关键部件设计合理性,以青草压缩力学模型为基础,开展多因素正交试验,分析喂料加捻辊线速度、加捻转速和喂料厚度等因素对草辫成型效果的影响。

3.1 试验材料和设备

试验材料为青燕麦秸秆,试验前测得燕麦秸秆含水率为 60%。试验设备与仪器:自由端加捻立式单捻制辫成型装置,UTM5504 型万能试验机。

3.2 试验结果与分析

3.2.1 青燕麦草压缩特性试验

将燕麦秆切割成长度为 250 mm 长段,其中燕麦秸秆和麦穗交错排布,确保同一高度上物料厚度均匀,如图 7 所示。根据草辫成型工艺要求,选择试样厚度为 60、80、100 mm,使用万能试验机进行多次青燕麦草侧开式压缩试验(图 7)。



图 7 青燕麦草压缩特性试验

Fig. 7 Compression characteristics test of green oat grass

得到厚度为 60、80、100 mm 的压缩力与压缩位移数学模型如图 8 所示。由图 8 可知,压缩力与压缩位移在一元四次多项式关系的情况下,拟合度达 99% 以上。

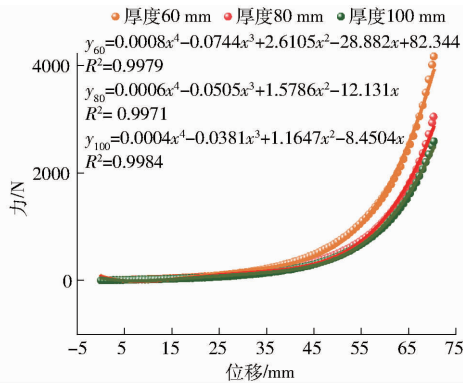


图 8 压缩力与压缩位移拟合曲线

Fig. 8 Fitting curves of compression force vs displacement

3.2.2 加捻草辫多因素正交试验

为了得到与草辫成型工艺相结合的最佳工作参数,在草辫加捻过程,喂料加捻辊线速度 A 、加捻转速 B 、喂料厚度 C 以及喂料加捻辊线速度与加捻转速交互作用 $A \times B$ 等因素都会对草辫成型产生影响,采用多因素正交试验可有效减少试验次数^[25-26]。所有转速通过变频器调速,喂料草条宽度为 140 mm,通过调整平铺在皮带输送机上的草条厚度,实现不同喂入量。输出线速度由喂料加捻辊线速度和草在筒内中心层的加捻转速决定。正交试验因素水平见表 1。

表 1 试验因素水平

Tab. 1 Factor-level for experimental design			
水平	因素		
	喂料加捻辊线速度/(m·s ⁻¹)	加捻转速/(r·min ⁻¹)	喂料厚度/m
1	0.10	58.4	0.06
2	0.15	73.8	0.08
3	0.20	89.0	0.10

为减少喂料加捻过程阻力,实现高效加捻,试制立式加捻制辫成型试验台并制取草辫,再将制成的草辫进行万能试验机拉伸试验,如图 9 所示。得到不同因素下所制成草辫抗压强度和转矩,从而分析立式青草制辫成型装置喂入量、喂入速度、加捻转速对草辫压力和草辫转矩的影响规律。



图 9 草辫机加捻草辫试验和万能试验机拉伸试验
Fig. 9 Braiding machine twisting test with straw grass braid and universal testing machine tensile test

共进行 9 组草辫试制试验,试验后统计转矩、压力和草辫最大拉力以及草辫利用率(草辫质量与喂料总质量比值)。每组试验持续一定时间,转矩和压力取采样均值,草辫拉伸试验每组重复 3 次取平均值,试验结果见表 2。

表 2 试验结果
Tab. 2 Experimental results

序号	因素				转矩/(N·m)	压力/kg	草辫最大拉力/N	草辫利用率/%
	A	B	A×B	C				
1	1	1	1	1	12.47	14.26	88.56	95
2	1	2	2	2	14.47	15.05	112.87	97
3	1	3	3	3	19.54	8.26	120.58	98
4	2	1	2	3	12.43	11.78	106.43	99
5	2	2	3	1	15.65	17.34	74.79	97
6	2	3	1	2	18.00	12.30	82.26	98
7	3	1	3	2	10.84	17.89	草辫未成型	/
8	3	2	1	3	14.45	12.60	草辫未成型	/
9	3	3	2	1	17.85	9.72	115.78	98

(1)各因素与草辫转矩关系

根据 9 组试验结果得到草辫转矩随时间的变化曲线如图 10 所示。由图 10 可得,草辫加捻过程中,转矩呈“初期峰值-下降-稳态-最终归零”的动态变化。开始阶段,草辫尚未完全进入喂料加捻辊间隙,

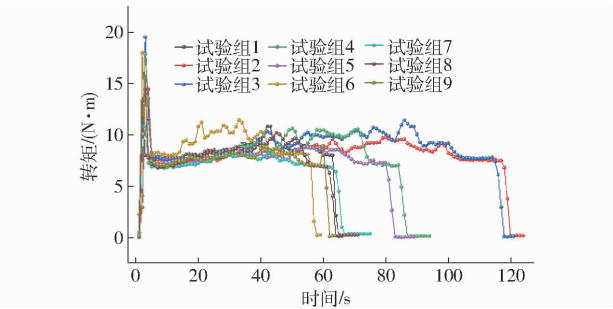


图 10 草辫转矩监测曲线
Fig. 10 Torque monitoring chart of grass braid

纤维松散,辊子需要克服较大的摩擦力和牵引阻力,因此转矩迅速升至峰值。随着草辫逐渐被压入辊缝并开始成型,纤维间相对滑动减少,摩擦力下降,转矩开始降低并在一定范围内趋于稳定,反映了草辫在稳态阶段的均匀加捻与连续牵引过程。最终,当草辫完全通过加捻区到达输出端时,辊子不再受摩擦牵引,转矩迅速归零。该规律与传统单一纤维加捻曲线不同,主要原因在于草辫由燕麦秸秆和麦穗交错排布,初期松散结构导致峰值明显。

对比 9 组转矩峰值可得加捻转速越快,草辫加捻转矩越大。由于第 7 组和第 8 组最终生产的草辫未成型,剔除这 2 组的转矩峰值,对比剩余 7 组数据可得,草辫加捻转矩需要达到 12.43 N·m 以上。

(2)各因素与压力关系

按照相同预紧力分组进行对比,9 组数据中 1、4、7 组预紧力为 5.6 kg,2、5、8 组预紧力为 6.8 kg,3、6、9 组预紧力为 11.5 kg。根据试验结果可得压力随时间的变化曲线如图 11 所示。

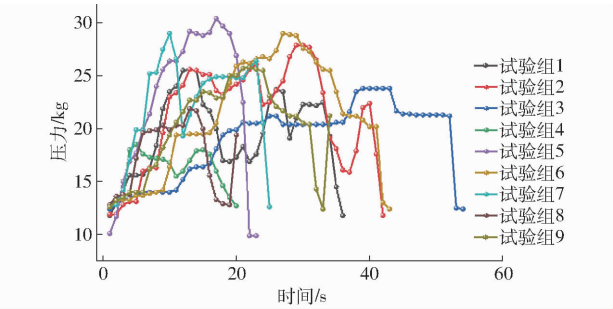


图 11 草辫压力检测曲线
Fig. 11 Pressure detection chart of grass braid

通过 9 组数据对比,可得在相同预紧力下压力走势大致相同。由图 11 和表 2 可得草辫加捻时草辫所受压力即喂料加捻辊压力为 8.26 ~ 17.89 kg;且喂料厚度不同,其草辫压力也有所差异。可以发现,预紧力相同情况下,喂料厚度越大,喂料加捻辊压力越大。

(3)各因素与草辫最大拉力关系

用万能试验机对 9 组加捻草辫进行抗拉强度

测试,得出草辫最大拉力以及草辫利用率如表 2 所示(第 7、8 组在加捻后未形成草辫,故不进行抗拉强度测试)。第 3 组草辫最大压力为 120.58 N,草辫利用率为 98%,第 4 组草辫最大压力为 106.43 N,草辫利用率为 99%,而加捻草辫最大拉力所表示的抗拉强度是体现草辫质量决定性因素,同时第 3 组草辫利用率仅低 1 个百分点,少许的喂料损耗在抗拉强度差距上,可以忽略。综合考虑下,选择第 3 组为立式青草制辫成型装置加捻条件。

通过多因素正交试验结果对比,得喂料加捻辊压力为 8.26 ~ 17.89 kg,喂料厚度越大,喂料加捻辊压力越大,加捻转矩需要达到 12.43 N·m 以上。当喂料加捻辊线速度为 0.10 m/s、加捻转速为 89 r/min,喂料厚度为 0.10 m 时,草辫最大抗拉强度最大为 120.58 N。立式青草制辫成型装置制作的草辫能够满足草辫晾晒不发生破坏的指标要求,实现了在牧草喂入量自适应的情况下连续强制加捻。

4 结 论

(1)设计了一种基于自由端加捻的立式青草制辫成型装置,实现牧草的连续强制喂入和强制加捻,保证青草制辫的连续性和草辫的紧实度。

(2)采用万能试验机进行了青燕麦草开式压缩特性试验,建立了压缩力与压缩位移数学模型,试验结果表明,压缩力与压缩位移在一元四次多项式关系的情况下,决定系数达 0.99 以上,可为有效喂料提供理论支撑。

(3)立式青草制辫成型装置加捻草辫多因素正交试验结果表明,喂料加捻辊压力为 8.26 ~ 17.89 kg 时,喂料厚度越大,喂料加捻辊压力越大,加捻扭矩需达 12.43 N·m 以上才能制成草辫。加捻草辫万能试验机拉伸试验结果表明,当喂料加捻辊线速度为 0.10 m/s、加捻转速为 89 r/min,喂料厚度为 0.10 m 时,草辫最大抗拉强度最大为 120.58 N。立式青草制辫成型装置制作的草辫能够满足草辫晾晒不发生破坏的指标要求,实现了在牧草喂入量自适应的情况下连续强制加捻。

参 考 文 献

[1] 尤泳,胡鹏展,王德成,等.青饲料收获技术与装备研究综述[J].农业机械学报,2025,56(11):21-41.
YOU Yong,HU Pengzhan,WANG Decheng,et al. Review of research on green forage harvesting technologies and equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025,56(11):21-41. (in Chinese)

[2] 韩航琪,王梓凡,项敏,等.燕麦草块加工参数筛选及其对营养成分含量的影响[J].中国草地学报,2025,47(4):67-74.
HAN Hangqi,WANG Zifan,XIANG Min,et al. Screening of processing parameters and their effect on nutritive composition of oat hay cube[J]. Chinese Journal of Grassland, 2025,47(4):67-74. (in Chinese)

[3] 李帅.青草制辫成型机设计与试验研究[D].北京:中国农业大学,2018.
LI Shuai. Design and experimental research of green grass braid forming machine[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018. (in Chinese)

[4] JIANG W,YUZE Z,QIAN D, et al. Simulation and analysis of the twist propagation process of polyester staple yarn on the fiber scale[J]. Textile Research Journal,2021,91(7-8):874-884.

[5] YIN R,TAO X M,XU B G. Mathematical modeling of yarn dynamics in a generalized twisting system[J]. Scientific Reports, 2016,6(1):24432.

[6] PETRULYT E S, PETRULIS D. Influence of twisting on linen fancy yarn structure[J]. Journal of Natural Fibers,2014,11(1): 74-86.

[7] ATOUI S,BELAADI A,BOUMAAZA M,et al. Weibull statistics and ANOVA analysis of the tensile mechanical characteristics of chamaerops humilis cellulose fibers and sustainable twisted yarns[J]. Journal of Natural Fibers,2024,21:2431677.

[8] EGOROVA M A, KISELEV S V. Simulation of deformation processes in polyester twisted yarns[J]. Fibre Chemistry,2023, 55(3):171-173.

[9] FURLANI J P V, ANDRÉS M A. Mechanical modeling of single ply twisted continuous-filament yarns under pure tension[J]. International Journal of Solids and Structures,2023,267:112138.

[10] MINE A,RECEP E,FATIH S, et al. Effect of different yarn combinations on auxetic properties of plied yarns[J]. Autex Research Journal,2021,23(1):77-88.

[11] 聂玉强,胡晓阳,王亲亲,等.加捻工艺对隔振器用芳纶纤维力学性能影响规律[J].海军工程大学学报,2024,36(6): 79-84.
NIE Yuqiang,HU Xiaoyang,WANG Qinqin,et al. Influence of twisting process on mechanical properties of aramid fiber for vibration isolator[J]. Journal of Naval University of Engineering,2024,36(6):79-84. (in Chinese)

[12] 卢馨蕊,李潇,张文清,等.环锭纺纱线结构的演化与创新发 展[J].纺织导报,2025(2):59-64.
LU Xinrui,LI Xiao,ZHANG Wenqing,et al. Evolution and innovative development of ring spinning yarn structure[J].

- Spinning Technology,2025(2):59-64. (in Chinese)
- [13] 蒋波,韩庆锋,劳天天,等. 倍捻筒子首尾纱捻度分布的研究[J]. 毛纺科技,2024,52(12):26-30.
JIANG Bo,HAN Qingfeng,LAO Tiantian,et al. Study on the twist distribution of tube head and tail yarn in double twister[J]. Wool Textile Journal,2024,52(12):26-30. (in Chinese)
- [14] 洪焱,沈小林,田野,等. 基于自由转子的纱线扭矩的检测方法[J]. 纺织学报,2021,42(10):61-66.
HONG Yan,SHEN Xiaolin,TIAN Ye,et al. Measurement method of yarn torque using a free rotor[J]. Journal of Textile Research,2021,42(10):61-66. (in Chinese)
- [15] 樊桂琪,邵伟光,蔡利海,等. 加捻对线密度较大涤纶单纱拉伸力学性能的影响[J]. 毛纺科技,2023,51(5):1-6.
FAN Guiqi,SHAO Weiguang,CAI Lihai,et al. Influence of twisting on tensile properties of polyester coarse count single yarn [J]. Wool Textile Journal,2023,51(5):1-6. (in Chinese)
- [16] 中国农业大学. 一种机电两用的青草成辫成型装置: 201410670106.2[P]. 2016-04-27.
- [17] 北京印刷学院. 一种单筒青草成辫成型装置: 201910896916.2[P]. 2020-11-03.
- [18] 余永,贺刚,王光辉,等. 苜蓿同向异形制备与堆存试验[J]. 农业机械学报,2017,48(3):99-105.
YU Yong,HE Gang,WANG Guanghui,et al. Preparation and storage experiment of cocurrent special-shaped alfalfa[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(3):99-105. (in Chinese)
- [19] 叶大鹏,赵熠威,黄德耀,等. 卧旋式生物有机肥发酵罐翻堆工艺设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(7):662-670.
YE Dapeng,ZHAO Yiwei,HUANG Deyao,et al. Design and experiment of horizontal rotating bioorganic fertilizer fermentation tank flipping process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(7):662-670. (in Chinese)
- [20] 中国农业大学. 一种用于柔性材料的旋转牵引输出成型装置: 201610371230.8[P]. 2018-01-02.
- [21] 熊师,方宪法,牛康,等. 对虾定向输送装置设计与参数优化试验[J]. 农业机械学报,2021,52(5):324-331.
XIONG Shi,FANG Xianfa,NIU Kang,et al. Design and parameter optimization of directional conveying device for shrimp[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(5):324-331. (in Chinese)
- [22] 熊师,赵博,胡小鹿,等. 对虾逐只分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(11):357-365.
XIONG Shi,ZHAO Bo,HU Xiaolu,et al. Design and experiment on prawn single separation device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(11):357-365. (in Chinese)
- [23] 李帅,王光辉,王德成,等. 青草制辫成型装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2017,48(7):112-120.
LI Shuai,WANG Guanghui,WANG Decheng,et al. Design and experiment of green grass braid forming device [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2017,48(7):112-120. (in Chinese)
- [24] 耿端阳,张道林,王相友,等. 新编农业机械学[M]. 北京:国防工业出版社,2011.
- [25] 李尚平,李鑫志,文春明,等. 双芽蔗段横向种植机沟深控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2024,55(12):22-32.
LI Shangping,LI Xinzhi,WEN Chunming,et al. Tillage depth control system for double-bud cane section transverse planters [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2024,55(12):22-32. (in Chinese)
- [26] 施印炎,汪小昆,章永年,等. 芦苇有序收获机往复切割力影响因素试验与分析[J]. 中国农机化学报,2018,39(12):46-53.
SHI Yinyan,WANG Xiaochan,ZHANG Yongnian,et al. Test and analysis on the influence factors of reciprocating cutting force of *Artemisia selengensis* harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2018,39(12):46-53. (in Chinese)

(上接第88页)

- [23] 马帅,徐丽明,袁全春,等. 葡萄藤防寒土与清土部件相互作用的离散元仿真参数标定[J]. 农业工程学报,2020,36(1):40-49.
MA Shuai,XU Liming,YUAN Quanchun,et al. Calibration of discrete element simulation parameters of grapevine antifreezing soil and its interaction with soil-cleaning components[J]. Transactions of the CSAE,2020,36(1):40-49. (in Chinese)
- [24] 苏媛,刘文政,房玉林,等. 同轴差速式酿酒葡萄离心破碎机设计与试验[J]. 农业机械学报,2025,56(7):105-115.
SU Yuan,LIU Wenzheng,FANG Yulin,et al. Design and experiment of coaxial differential speed centrifugal crushing device for grape[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2025,56(7):105-115. (in Chinese)
- [25] KAN Z,ALLEN M D,HONG W, et al. Design and experiment of anti-vibrating and anti-wrapping rotary components for subsoiler cum rotary tiller[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering,2019,12(4):47-55.
- [26] ZHAO H,LI H,MA S, et al. The effect of various edge-curve types of plain-straight blades for strip tillage seeding on torque and soil disturbance using DEM[J]. Soil & Tillage Research,2020,202(38):104674.