

苜蓿收割调制机六边异形齿压扁辊设计与试验

金 峤^{1,2} 尤 泳¹ 王德成¹ 王海翼^{1,2} 胡鹏展¹ 方宪法²

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业机械化科学研究院集团有限公司, 北京 100083)

摘要: 针对紫花苜蓿刈割压扁过程存在的碎草率高、茎秆折断损失大等问题,以初花期紫花苜蓿为研究对象,分析压扁过程茎秆弯折角对苜蓿茎秆折断率的影响。结合压扁过程几何与受力关系设计一种六边形辊齿,开展二次回归响应面试验,分析了压扁辊齿数、压扁辊转速及压扁辊间隙对压扁率、碎草率及茎秆折断率的影响,并通过干燥试验验证了六边形辊齿的压扁效果。结果表明,茎秆折断率受压扁辊间隙及茎秆弯折角的影响。当间隙一定时,茎秆折断率随茎秆弯折角增加而降低。当茎秆弯折角一定时,间隙越小茎秆折断率越大。当茎秆弯折角大于等于140°时,茎秆折断率小于10%。压扁辊最佳参数组合为:辊齿数6、压扁辊转速750 r/min、压扁辊间隙1.61 mm。此时,压扁率为97.12%、碎草率为1.40%、茎秆折断率为1.79%。在温度28~31℃的自然干燥条件下,0~30 min内混合破坏的平均干燥速率分别为挤压破坏和弯折破坏的1.43倍和1.97倍。在单株与多株干燥试验中,六边形辊齿压扁后苜蓿在0~30 min内的平均质量变化量分别为1.53 g、5.36 g,表现出更好的干燥效果。

关键词: 苜蓿收割调制机; 压扁辊; 六边形辊齿; 响应面试验

中图分类号: S225.8

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)12-0239-10

OSID:



Design and Experiment of Conditioning Roller for Alfalfa Mower Conditioner Based on Hexagonal Irregular Teeth

JIN Qiao^{1,2} YOU Yong¹ WANG Decheng¹ WANG Haiyi^{1,2} HU Pengzhan¹ FANG Xianfa²

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences Group Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: In response to the problems of high grass crushing rate and large stem breakage loss during the cutting and conditioning process of alfalfa, focusing on the initial flowering stage of alfalfa, the influence of stem bending angle during the conditioning process on the stem breakage rate of alfalfa was analyzed. A conditioning roller with hexagonal roller teeth was designed based on the geometry and force relationship of the conditioning process, and the effects of the number of roller teeth, conditioning roller speed, and roller gap on conditioning rate, conditioning loss rate, and stem breakage rate were analyzed based on quadratic regression response surface experiment. The conditioning effect of hexagonal roller teeth was verified through drying tests. The results indicated that the bending rate of the stem was influenced by the gap between rollers and the breakage angle of the stem. When the gap was fixed, the breakage rate of the stem was decreased as the bending angle was increased. When the bending angle of the stem was constant, the smaller the gap was, the greater the breakage rate of the stem was. When bending angle was greater than 140°, the breakage rate of the stem was less than 10%. The optimal number of roller teeth, roller speed, and roller clearance for the conditioning roller were 6, 750 r/min, and 1.61 mm, respectively. The experimental results under this parameter showed conditioning rate of 97.12%, conditioning loss rate of 1.40%, and stem fracture rate of 1.79%. Under natural drying conditions of 28~31℃, the average drying rates of mixed damage were 1.43 times and 1.97 times higher than those of compression damage and bending damage within 0~30 minutes, respectively. In the drying experiment, the average qualities changes rates of alfalfa conditioned with the conditioning roller within 0~30 minutes were 1.53 g and 5.36 g, respectively, which showed better drying effect than the traditional conditioning roller.

Key words: mower conditioner; conditioning roller; hexagonal shaped roller teeth; response surface experiment

收稿日期: 2024-01-15 修回日期: 2024-02-20

基金项目: 山东省重大科技创新工程项目(2022CXGC020704-01)和山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2022TSGC2508)

作者简介: 金峤(1994—),男,博士生,主要从事苜蓿收获装备设计研究,E-mail: 15941803601@163.com

通信作者: 方宪法(1963—),男,研究员,博士生导师,主要从事农业机械化研究,E-mail: fangxf@caams.org.cn

0 引言

紫花苜蓿具有蛋白质含量高、适口性好以及高产等优点^[1]。随着我国人口饮食结构的不断调整,对肉、蛋、奶需求的提高促进了我国畜牧业的不断发展,进而也提高了对苜蓿等优质牧草的需求^[2]。目前,苜蓿的收获方式以干草收获为主,辅助青贮收获。苜蓿的干草收获过程包括刈割压扁、田间摊晒、搂草打捆及储藏运输等环节。其中,压扁过程是通过击打、弯折茎秆等方式破坏茎秆表面纤维结构,加快茎秆内部水分蒸发速率,保证茎叶同步干燥,减少干燥后叶片脱落造成的营养损失^[1,3-6]。该过程是苜蓿干草收获的重要环节,同时压扁后的作物更加柔软,能有效降低打捆时的能量消耗^[7]。

国际上通常将压扁称为调制,根据调制方法的不同,调制器可以分为辊式调制器和叶轮式调制器。当收获作物茎秆强度较高时(如芒草、柳枝稷等)采用叶轮式压扁器,而在收获苜蓿等茎秆强度较低的作物时,则使用辊式压扁器^[5,8]。研究表明,收获相同作物时,叶轮式压扁器造成的作物质量损失是辊式压扁器的2倍以上^[9]。国内外学者针对苜蓿收获及割草压扁机设计与优化进行了大量研究^[10-19]。目前针对压扁系统的研究多集中在压扁辊间隙、转速、安装角度等工作参数对压扁效果的影响,而针对辊齿数量、辊齿形状等结构参数对压扁效果的影响研究则相对较少。国内常用的压扁辊为“人字形”压扁辊,辊齿数量以4个为主,辊齿形状多为类似扇形的四边形结构。经该类型压扁辊压扁后的苜蓿存在碎草率大、破坏不均匀、茎秆断裂占比高等问题。针对上述问题,结合苜蓿压扁作业要求,本文设计一种多参数可调的压扁试验台,开展苜蓿压扁试验。以提高压扁率,降低碎草率及茎秆折断率为目标,设计一种多边形辊齿的压扁辊,并通过响应面分析获取最佳工作参数及结构参数组合。通过开展压扁后干燥对比试验,验证多边形辊齿压扁辊实际效果。

1 压扁辊结构与工作原理

图1为苜蓿收获时采用的辊式调制器结构示意图,通过两个对向旋转的人字形胶辊破坏苜蓿茎秆表面纤维结构,加快茎秆内水分蒸发速率,缩短茎秆与叶片水分蒸发速率差值。

根据 GB/T 21899—2008《割草压扁机》,以文献[3]中设计的9GYZ-1.2型自走式压扁机使用的“人字形”压扁辊为基础设计一种异型齿压扁辊。压扁辊由左旋压扁单元和右旋压扁单元组成,辊长730 mm,螺旋角35°。压扁辊相关参数如表1所示。

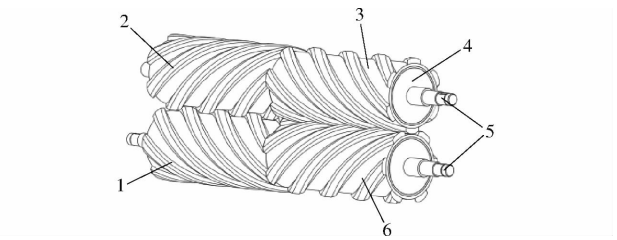


图1 压扁辊结构示意图

Fig.1 Schematic of conditioning roller

1.下压扁辊左单元包胶 2.上压扁辊左单元包胶 3.上压扁辊右单元包胶 4.无缝钢辊 5.压扁辊轴 6.下压扁辊右单元包胶

表1 压扁辊基本结构参数

Tab.1 Structural parameters of conditioner roller

参数	数值
辊长/mm	730
辊齿数量	6
齿高/mm	15
齿厚/mm	51.98
齿根圆直径/mm	180
齿顶圆直径/mm	210
材料硬度	95A

2 关键部件设计

2.1 压扁过程受力分析与茎秆弯折原理

2.1.1 压扁后苜蓿破坏分类

如图2所示,压扁后苜蓿破坏形式可分成3类:由辊齿面和齿槽面挤压苜蓿形成的挤压破坏;由辊齿齿棱挤压以及上下辊齿间距缩短过程中弯折茎秆形成的弯折破坏;茎秆表皮受摩擦力作用形成的揉搓破坏。其中,弯折破坏根据茎秆与辊齿及齿槽相对位置的不同,会表现出不同程度的破坏结果。当仅有单个齿棱作用在苜蓿茎秆上时,会形成小角度

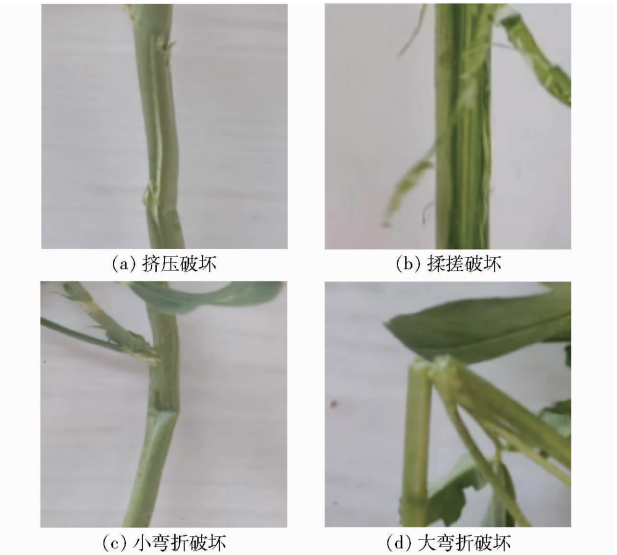


图2 压扁过程苜蓿破坏形式类别

Fig.2 Classification of damage modes of alfalfa during conditioning process

弯折破坏(简称小弯折破坏)。当上下齿距离逐渐缩短,苜蓿茎秆在上下辊齿共同作用下会形成大角度弯折破坏(简称大弯折破坏)。

根据对压扁后苜蓿茎秆的拉伸预试验发现,当苜蓿主茎秆上弯折破坏的径向破坏长度 d 大于该处茎秆半径时,拉伸试验的断裂位置会发生在此处。当破坏径向长与茎秆直径比 $\lambda \geq 0.5$ 时,将破坏称为大弯折破坏。反之称为小弯折破坏,如图 3 所示。

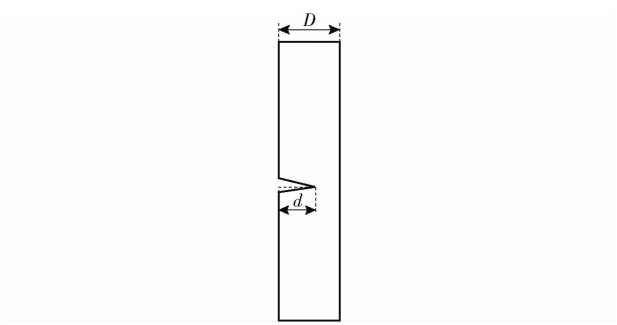


图 3 苜蓿茎秆弯折破坏示意图

Fig. 3 Schematic of alfalfa stem bending damage

2.1.2 挤压破坏受力分析

挤压破坏发生在辊齿与齿槽啮合过程中。由于辊齿高度 l_1 相对于茎秆直径不可忽略,因此挤压过程可以简化为两个半径不同而转速相同的对辊对苜蓿进行挤压,如图 4 所示。

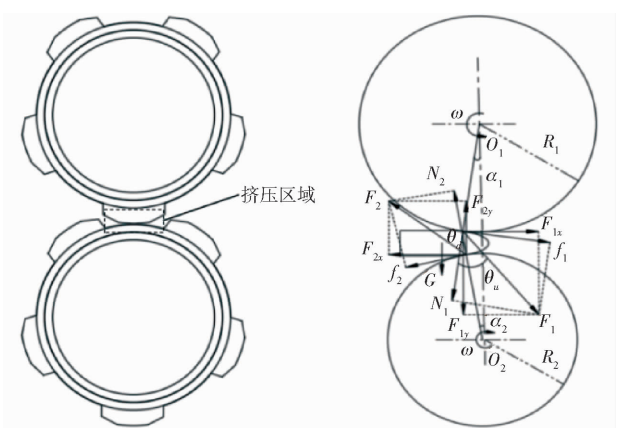


图 4 挤压过程受力分析

Fig. 4 Force analysis during compression process

选取挤压过程的任一位置,苜蓿受力关系为

$$\left\{\begin{aligned} f_1 &= \mu_1 N_1 = N_1 \tan \theta_u \\ f_2 &= \mu_2 N_2 = N_2 \tan \theta_d \\ \sin \alpha_1 &= \frac{b}{R_1} \\ \sin \alpha_2 &= \frac{b}{R_2} \\ R_1 &= R_2 + l_1 \\ F_1 &= N_1 \cos \theta_u \\ F_2 &= N_2 \cos \theta_d \end{aligned}\right. \quad (1)$$

式中 N_1 ——辊齿对苜蓿的正压力

N_2 ——齿槽对苜蓿的正压力
 f_1 ——辊齿对苜蓿的摩擦力
 f_2 ——齿槽对苜蓿的摩擦力
 α_1 、 α_2 ——接触点到辊中心连线与上下辊心连接线构成的夹角
 μ_1 ——苜蓿与辊齿间的摩擦因数
 μ_2 ——苜蓿与齿槽间的摩擦因数
 R_1 ——压扁辊中心到辊齿顶边的长度
 R_2 ——压扁辊中心到齿槽的长度
 θ_u ——苜蓿与上压扁辊的摩擦角
 θ_d ——苜蓿与下压扁辊的摩擦角
 b ——接触点到上下辊心连接线的垂直距离

在水平与竖直方向上将合力 F_1 与 F_2 进行分解,代入式(1),得到

$$\left\{\begin{aligned} F_{1x} &= f_1 \cos \alpha_1 - N_1 \sin \alpha_1 = N_1 (\mu_1 \cos \alpha_1 - \sin \alpha_1) \\ F_{2x} &= f_2 \cos \alpha_2 + N_2 \sin \alpha_2 = N_2 (\mu_2 \cos \alpha_2 + \sin \alpha_2) \\ F_{1y} &= F_{1x} \tan (\theta_u - \alpha_1) \\ F_{2y} &= F_{2x} \tan (\theta_d - \alpha_2) \end{aligned}\right. \quad (2)$$

式中 F_{1x} 、 F_{2x} ——合力 F_1 、 F_2 在水平方向分力
 F_{1y} 、 F_{2y} ——合力 F_1 、 F_2 在竖直方向分力

通过受力分析可得,在辊齿与齿槽啮合过程中,苜蓿受到挤压形成挤压破坏,同时由于辊齿与齿槽线速度存在微小差别,因此苜蓿同时会受到一定的揉搓作用。此外由于田间收获苜蓿过程中,压扁辊线速度大于割草机前进速度,因此齿槽对苜蓿的水平分力方向应该是先与辊齿对苜蓿的水平分力方向相同,再逐渐变到反方向。

2.1.3 揉搓破坏受力分析

揉搓破坏成因复杂,在辊齿面与齿槽面挤压苜蓿以及上下辊齿侧面挤压苜蓿时均会产生不同程度的揉搓作用。揉搓破坏受到苜蓿与苜蓿间、苜蓿与辊齿间相对位置的影响,也会受到苜蓿受力均匀性及苜蓿本身变形破坏程度的影响。以上辊齿侧壁和下辊齿侧壁挤压苜蓿为例,受力如图 5 所示。

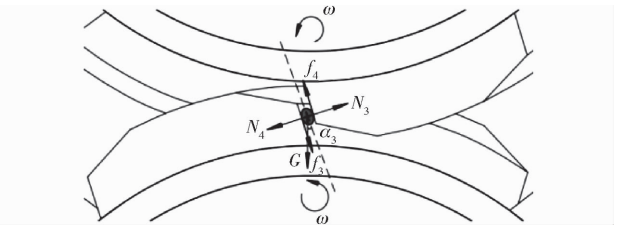


图 5 辊齿侧壁揉搓苜蓿受力分析

Fig. 5 Force situation of roller tooth sidewall kneading alfalfa

取任意位置进行受力分析,假设被揉搓段苜蓿重力为 G ,受辊齿侧壁曲率影响, N_3 、 N_4 方向为上、下

辊齿侧面与苜蓿接触点的切平面法线方向。在转动过程中,上、下辊齿的相对运动趋势会发生变化,导致摩擦力方向发生改变。其中

$$\begin{cases} f_3 = \mu_1 N_3 \\ f_4 = \mu_2 N_4 \\ N_3 = N_4 + G \cos \alpha_3 \end{cases} \quad (3)$$

式中 f_3 、 f_4 ——辊齿侧壁对苜蓿的摩擦力
 N_3 、 N_4 ——辊齿侧壁对苜蓿的正压力
 α_3 ——辊齿侧壁与重力方向间夹角

2.1.4 弯折过程几何关系分析

压扁过程压扁辊对苜蓿造成的机械损失主要包括叶片脱落和茎秆断裂 2 部分。过大的弯折作用会降低茎秆强度,造成苜蓿在后续摊晒、打捆、运输及储存过程中造成进一步的机械损失。据统计,苜蓿收获过程中平均有 78% 的苜蓿被最终用于饲喂或加工为草产品,剩下 22% 的苜蓿在其他环节被损失掉^[20]。两种弯折破坏中,小弯折破坏受力关系与挤压破坏受力关系相同。大弯折破坏则会受到法向压力与力矩的共同作用。结合压扁过程的几何关系,当相邻的上下辊齿侧壁平行时,苜蓿弯折角最大,夹角最小,如图 6 所示。规定辊齿结构角是过该点的高线与切线间的夹角,如图 7 所示。从图 7 中几何关系可知,苜蓿弯折优角受辊齿高度 h_c 、压扁辊间隙 h_j 、前后齿距离 L_c 以及辊齿结构角(折弯角) α_z 等参数影响。茎秆弯折后夹角 θ_w 满足

$$\theta_w = \alpha_z + \theta_{w1} + \theta_{w2} \approx \alpha_z + \theta_{w1} \quad (4)$$

式中 θ_w ——苜蓿弯折后钝角侧弯折角,简称茎秆弯折角

θ_{w1} 、 θ_{w2} —— θ_w 与 α_z 间的角度差值

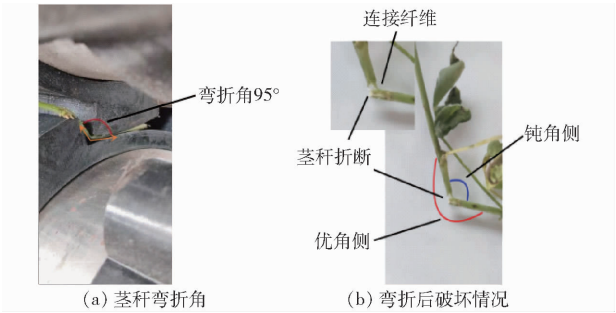


图 6 压扁过程茎秆弯折

Fig. 6 Stem bending during conditioning process

由于苜蓿被压弯后贴近齿顶圆侧会有翘起,因此 $\theta_{w2} \approx 0$ 。通过改变折弯角 α_z 、辊齿高度 h_c 、压扁辊间隙 h_j 及上下辊齿侧壁最短间距 L_c 可以改变压扁过程的 θ_w 。但 3 个参数中 h_c 和 L_c 变化范围较小,对 θ_w 的影响有限,因此需要通过改变弯角 α_z 实现茎秆弯折角 θ_w 的变化。以同底等高的方式改变四边形辊齿折弯角 α_z ,如图 8 所示。根据图 7 和图 8a 中几何位置,有

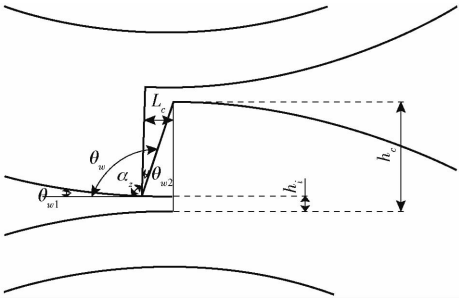


图 7 茎秆弯折示意图(四边形齿)

Fig. 7 Schematic of stem bending (quadrilateral teeth)

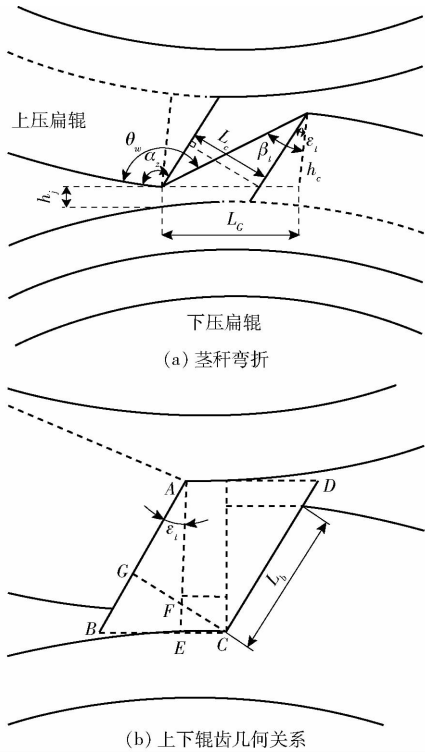


图 8 茎秆弯折和辊齿几何关系(梯形齿)示意图

Fig. 8 Schematics of stem bending and geometric relationship of roller teeth (trapezoidal teeth)

$$\begin{cases} \alpha_z = 90^\circ + \varepsilon_t \\ \theta_{w1} = \beta_t - \varepsilon_t \\ \theta_w = \alpha_z + \beta_t - \varepsilon_t \end{cases} \quad (5)$$

式中 ε_t ——辊齿侧边线与高线间的夹角
 β_t ——茎秆与梯形齿高线间夹角

延长辊齿侧边线形成平行四边形 $ABCD$,过点 A 做边 BC 垂线,垂足为 E ,过点 C 做边 AB 垂线,垂足为 G 并与 AE 相交于点 F ,故有 $L_c = L_{GF} + L_{FC}$ 。根据相似三角形关系, $\triangle AEB$ 、 $\triangle CEF$ 和 $\triangle AGF$ 相似,得到 L_c 和 L_c 表达式为

$$\begin{cases} L_c = \frac{L_c}{\cos \varepsilon_t} + (h_c - h_j) \tan \varepsilon_t \\ L_c = (h_c - h_j - L_c(\frac{\pi}{2}) \tan \varepsilon_t) \sin \varepsilon_t + \frac{L_c(\frac{\pi}{2})}{\cos \varepsilon_t} \end{cases} \quad (6)$$

式中 L_c ——上辊齿顶点到下辊齿高线的垂直距离

L_c ——上下辊辊齿侧壁平行时的垂直距离

$L_c(\frac{\pi}{2})$ —— α_z 为直角侧壁平行时的垂直距离

联立式(4)~(6)得到茎秆弯折角 θ_w 与辊齿高度 h_c 、压扁辊间隙 h_j 、辊齿侧壁距离 L_c 及辊齿折弯角 α_z 间的关系为

$$\begin{cases} \theta_w = \alpha_z + \arctan\left(2\tan\varepsilon_t - \frac{L_c(\frac{\pi}{2})\tan^2\varepsilon_t}{\eta} + \frac{L_c(\frac{\pi}{2})}{\eta\cos^2\varepsilon_t}\right) - \varepsilon_t \\ \theta_w(\frac{\pi}{2}) = \alpha_z + \arctan\frac{L_c(\frac{\pi}{2})}{\eta} \\ \eta = h_c - h_j \\ h_j < D \end{cases} \quad (7)$$

式中 η ——中间变量

D ——茎秆直径

2.2 多边形辊齿设计

为了降低压扁过程的弯折损失,减少压扁过程产生的大弯折破坏,设计一种类六边形辊齿,如图 9a 所示。六边形辊齿会形成 4 个折弯角,呈现轴对称关系。规定齿顶面与斜面间的夹角为第一折弯角 α_{z1} ,辊齿侧面与斜面夹角为第二折弯角 α_{z2} 。结

合预试验发现,在钝角 α_{z2} 处形成的钝角齿棱及其相邻的两个面的共同作用下,会形成挤压-弯折-挤压的混合式破坏,如图 9b 所示。为了提高苜蓿破裂均匀性,将钝角齿棱设置在 1/4 齿顶弧处。第一折弯角 α_{z1} 挤压苜蓿形成的弯折角 θ_w 近似等于 α_{z1} 。第二折弯角 α_{z2} 挤压苜蓿形成的弯折角 θ_w 可由公式(5)计算。保证 α_{z1} 在 1/4 齿顶弧处时, α_{z1} 与 α_{z2} 受辊齿数的影响, α_{z2} 还受到侧壁与齿根圆交点处切线间夹角的影响。在保证辊齿宽度不小于齿根宽度时,当侧壁与辊齿对称轴平行时,侧壁与斜面间夹角最大。此时, $\widehat{AB}$ 与 $\widehat{CD}$ 相等。借用齿轮中的相关概念,相关结构参数关系为

$$\begin{cases} e = s + L_c \\ P = s + e \\ P = \pi d_1 / Z \\ \theta_1 = s / R_1 \\ \theta_2 = s / R_2 \end{cases} \quad (8)$$

式中 P ——齿距 s ——齿厚

e ——槽宽 Z ——齿数

d_1 ——齿顶圆与齿根圆直径均值

θ_1 —— $\widehat{AB}$ 圆心角 θ_2 —— $\widehat{CD}$ 圆心角

根据图 9a、9c 中几何关系可得

$$\theta_3 = (\theta_1 - \theta_2) / 2 \quad (9)$$

$$L_{AE} = 2R_1 \sin(\theta_3 / 2) \quad (10)$$

$$\tan\theta_4 = L_{AE} / h_g \quad (11)$$

$$\cos\theta_4 = h_g / h_{c1} \quad (12)$$

式中 h_g ——齿顶圆切线与齿根圆切线公法线距离

θ_3 —— OD 与 OA 间夹角

θ_4 —— AD 与 OD 间夹角

h_{c1} ——当辊齿为四边形时的侧边长度

联立公式(8)~(12)得到

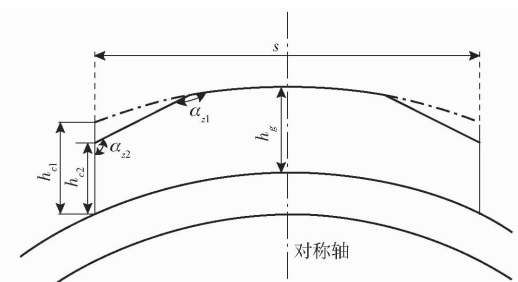
$$\begin{cases} h_{c1} = h_g / \cos(\arctan(2R_1 \sin\varepsilon) / h_g) \\ \varepsilon = (\theta_1 - \theta_2) / 4 \end{cases} \quad (13)$$

为了保证压扁过程中 α_{z2} 对苜蓿存在弯折作用, h_{c2} (六边形辊齿侧边长度) 与 h_{c1} 应满足关系式

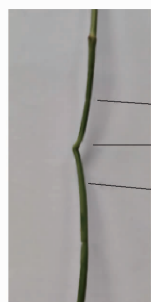
$$\begin{cases} h_{c1} - h_{c2} = \Delta h \\ \Delta h > h_{c1} / 2 \end{cases} \quad (14)$$

式中 Δh ——四边形辊齿与六边形辊齿侧壁高度差

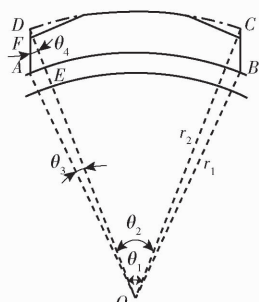
根据上述推导可知 Δh 受辊齿数 Z 及齿厚 s 的影响。当 α_{z2} 一定时,随着齿数 Z 增加齿厚 s 减小,进而 Δh 减小。 Δh 减小有助于提高苜蓿压扁的均匀性,但增加齿数会增加压扁过程的牧草损失。同时,当 α_{z1} 与 α_{z2} 过于接近时可能会增加茎秆的折断率。根据极坐标系与直角坐标系间的转换关系,以滚筒圆心为原点建立直角坐标系,如图 10 所示。 G



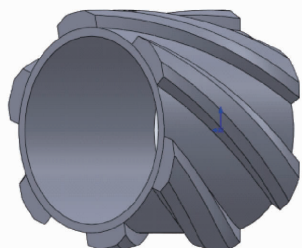
(a) 六边形辊齿结构



(b) 茎秆混合式破坏



(c) 六边形辊齿几何关系



(d) 多边形辊齿三维结构

图 9 混合式破坏与六边形辊齿示意图

Fig. 9 Schematics of mixed damage and hexagonal roller teeth

位于四分之一齿面处,连接 FG , θ_7 为 FG 与 x 轴间夹角。根据图中几何关系有

$$\theta_5 = s/(4R_2)$$

(15)

$$\theta_6 = s/(2R_2)$$

(16)

$$\theta_7 = \theta_w - \beta_{i2} - \pi/2$$

(17)

$$\tan\theta_7 = \frac{|y_G - y_F|}{|x_G - x_F|} = \frac{|y_G - (y_D - \Delta h)|}{|x_G - x_F|}$$

(18)

式中 θ_5 ——四分之一齿弧面对应圆心角
 θ_6 ——二分之一齿弧面对应圆心角
 (x_G, y_G) ——直角坐标系下点 G 坐标
 (x_F, y_F) ——直角坐标系下点 F 坐标
 y_D ——直角坐标系下点 D 纵坐标
 β_{i2} ——弯折过程中茎秆与辊齿侧壁间夹角

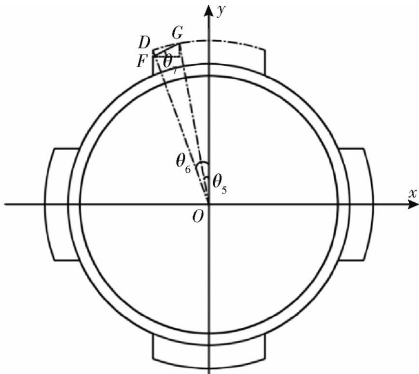


图 10 直角坐标系下的几何关系示意图

Fig. 10 Geometric relationships in Cartesian coordinate systems

为了简化计算,当辊齿侧壁间间隙较小时, β_{i2} 可以简化为

$$\tan\beta_{i2} \approx \frac{h_j}{h_{e1} - 2\Delta h - h_j}$$

(19)

联立式(13)~(19)得到 θ_w , β_{i2} 与 Δh 间的关系式为

$$\begin{cases} \theta_7 + \beta_{i2} = \arctan V_1 + \arctan V_2 = \theta_w - \frac{\pi}{2} \\ V_1 = \frac{|r_2(\sin\theta_5 - \sin(2\theta_5)) + \Delta h|}{|r_2(\cos(2\theta_5) - \cos\theta_5)|} \\ V_2 = \frac{L_c}{h_{e1} - 2\Delta h - h_j} \end{cases}$$

(20)

式中 V_1 、 V_2 ——中间变量

3 试验

3.1 试验材料与试验装置

试验苜蓿取自河北省无极县苜蓿种植基地。为了减少苜蓿植株差异对试验结果的影响,本次试验选取的苜蓿茎秆直径为 2~3 mm,长度为 200~400 mm,含水率大于 70%。

根据苜蓿压扁技术要求设计苜蓿压扁试验台,

如图 11 所示。试验台由喂入量控制机构、胶辊压扁机构、间隙调节机构、角度调节机构及传动机构组成。其中,喂入量控制机构由传动带组成,胶辊压扁机构由 1 对对向旋转的“人字形”压扁辊组成,间隙与角度调节机构由调节丝杠及滑动轴承组成,传动机构由变频电机、链轮、带轮等组成。试验台工作时,由变频电机提供动力,上、下压扁辊在传动机构的驱动下实现等速反向旋转,人字齿相互啮合,实现对茎秆的弯折与压扁作用。

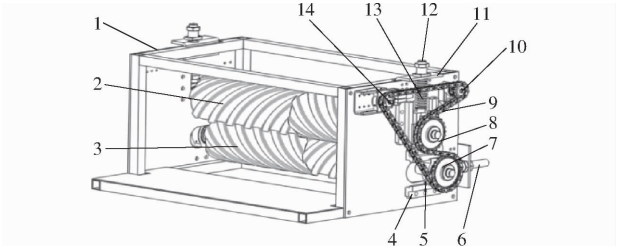


图 11 压扁试验台结构示意图

Fig. 11 Structural diagram of conditioning test bench

1. 机架 2. 上压扁辊 3. 下压扁辊 4. 滑动轴承导轨 5. 互动轴承 6. 水平调节丝杠 7. 下压扁辊链轮 8. 上压扁辊链轮 9. 链条 10. 变向轮 11. 弹簧安装板 12. 竖直调节丝杠 13. 压紧弹簧 14. 张紧轮

多参数可调苜蓿压扁试验台如图 12 所示。其他试验设备包括游标卡尺、卷尺及电子秤(精度 0.01 g)。试验过程中通过水平和纵向的调节螺杆可以改变上下压扁辊间隙及安装角度。



图 12 苜蓿压扁试验台

Fig. 12 Alfalfa conditioning test bench

3.2 评价指标

试验结果评价指标主要包括茎秆折断率 η_z 、压扁率 C_r 、碎草率 B_r 及含水率 W_f 。

3.3 单因素试验

根据前文分析,为了验证压扁过程中苜蓿不同弯折角 θ_w 对压扁后茎秆折断率的影响,根据式(7)得到 α_z 和 θ_w 为: $\alpha_z = 90^\circ$ 、 $\theta_w = 102.99^\circ$; $\alpha_z = 100^\circ$ 、 $\theta_w = 118.26^\circ$; $\alpha_z = 108^\circ$ 、 $\theta_w = 131.91^\circ$; $\alpha_z = 116^\circ$ 、 $\theta_w = 140.50^\circ$; $\alpha_z = 125^\circ$ 、 $\theta_w = 147.85^\circ$ 。

通过 3D 打印技术制作不同折弯角的压扁辊包胶试件,试件长 160 mm,如图 13 所示。开展不同间隙及弯折角下的压扁试验。试验用苜蓿取自河北省无极县苜蓿种植基地,平均含水率为 74.3%。试验前

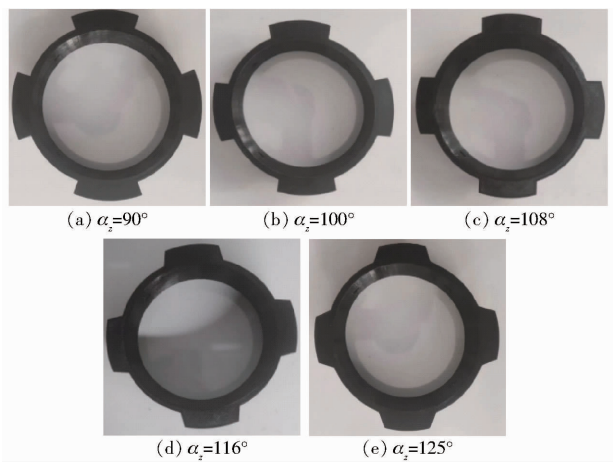


图 13 不同折弯角包胶试件

Fig. 13 Different angles rubber specimen

对随机 5 块 1 m × 1 m 地块上的苜蓿进行采集称量,测得苜蓿平均产量为 1 697. 5 g/m²。割草压扁机割幅为 1.2 m,额定前进速度为 1.4 m/s,压扁辊长为 730 mm。假定苜蓿切割后在压扁辊轴向方向上均匀喂入压扁辊,则单位长度压扁辊压扁苜蓿质量为 3. 91 g/(mm·s)。故 160 mm 包胶试件额定喂入量为 625. 6 g/s,通过传送带控制喂入量 590 ~ 660 g/s。

试验结果如图 14 所示。当压扁辊间隙一定时,折断率随折弯角的增加而减小。折弯角在 100° ~ 116° 时,折断率下降最明显,此时苜蓿茎秆折弯角对应范围在 118° ~ 140° 间。当折弯角小于 100° 时,折断率标准差大于其他情况,这主要是由苜蓿间的离散性及苜蓿植株本身上、中、下不同位置的力学性能差异引起的。当折弯角一定时,随着间隙增加,折断率呈下降趋势,且在间隙增加到 3. 5 mm 后,折断率下降显著。这是由于 3. 5 mm 的间隙大于苜蓿茎秆平均直径,并未在苜蓿弯折的同时对茎秆造成有效的应力集中而导致的。从上述试验结果可以看到,在满足苜蓿压扁农艺需求的同时,使苜蓿茎秆弯折角大于 131°,便可以有效降低压扁过程中茎秆折断现象,减少物质

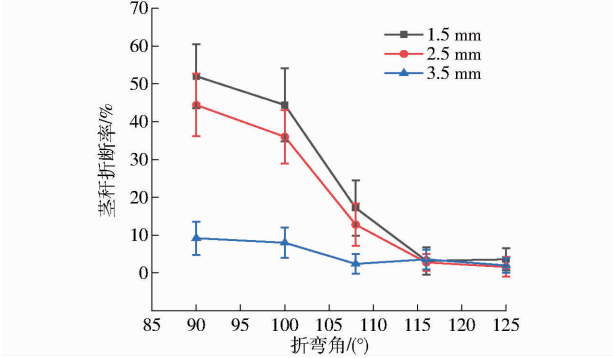


图 14 不同压扁辊间隙时茎秆折断率变化曲线

Fig. 14 Curves of stem bending rate varied with different conditioning rollers gaps

损失。

3. 4 响应面试验

3. 4. 1 响应面试验设计

为了确定六边形辊齿的最佳齿数以及最优工作参数,开展响应面试验。以压扁辊齿数、压扁辊转速、压扁辊间隙为试验因素,以碎草率、压扁率、茎秆折断率为试验指标,进行响应面试验。根据单因素试验结果,取 $\theta_w = 140^\circ$ 可以有效降低茎秆折断率,代入式(20)并使用 Matlab 求解得到 Δh 、 α_{z1} 、 α_{z2} 。制作六边形辊齿试件,如图 15 所示,相关参数如表 2 所示。因素水平如表 3 所示。

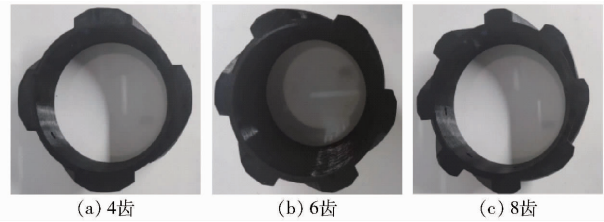


图 15 多辊齿试件

Fig. 15 Multi roll tooth specimen

表 2 辊齿数与 Δh 对应关系

Tab. 2 Relationship between number of roller teeth and Δh			
齿数	辊齿侧壁高度差 $\Delta h/\text{mm}$	第一折弯角 $\alpha_{z1}/(^{\circ})$	第二折弯角 $\alpha_{z2}/(^{\circ})$
4	5. 01	118. 71	161. 19
5	4. 69	118. 31	159. 56
6	4. 31	118. 23	158. 29
7	3. 83	118. 12	157. 74
8	3. 62	118. 03	156. 78

表 3 响应面试验因素编码

Tab. 3 Factors and codes of response surface test			
编码	因素		
	压扁辊齿数	压扁辊间隙/mm	压扁辊转速/(r·min ⁻¹)
1	4	1. 0	600
0	6	2. 0	800
-1	8	3. 0	1 000

3. 4. 2 试验结果分析

压扁响应面试验结果如表 4 所示,表中 A、B、C 表示压扁辊齿数、压扁辊间隙及压扁辊转速编码值。

压扁率、碎草率及茎秆折断率回归模型为

$$\left\{\begin{aligned}C_r &= 1. 69A - 1. 82B + 0. 17C + 0. 26AB - 0. 91AC + \\&\quad 0. 35BC - 3. 82A^2 - 1. 84B^2 - 1. 28C^2 + 97 \\B_r &= 1. 86A - 0. 23B + 0. 72C - 0. 54AB + 0. 15AC + \\&\quad 0. 018BC + 1. 57A^2 + 0. 19B^2 + 0. 31C^2 + 1. 78 \\ \eta_z &= 8. 68A - 1. 88B + 0. 97C - 1. 87AB + 0. 22AC - \\&\quad 0. 86BC + 6. 57A^2 - 0. 64B^2 + 0. 32C^2 + 3. 9\end{aligned}\right. \quad (21)$$

表 4 响应面试验结果

Tab.4 Response surface test results

试验 序号	因素			压扁 率/%	碎草 率/%	茎秆折断 率/%
	A	B	C			
1	1	1	0	91.06	4.49	14.72
2	-1	0	1	90.89	2.11	2.85
3	1	0	-1	94.70	4.91	18.28
4	0	0	0	97.72	1.59	4.03
5	-1	0	-1	88.35	1.28	1.42
6	0	0	0	96.43	1.76	5.24
7	0	-1	1	95.49	3.32	7.25
8	0	1	1	92.20	2.97	1.92
9	0	0	1	97.26	1.66	3.60
10	0	1	-1	91.54	1.21	1.63
11	-1	-1	0	92.13	1.51	1.20
12	0	-1	-1	96.24	1.63	3.53
13	-1	1	0	88.33	2.08	1.03
14	0	0	0	96.42	1.93	2.12
15	0	0	0	97.15	1.94	4.51
16	1	-1	0	93.80	6.09	22.35
17	1	0	1	93.62	6.35	20.60

对试验结果进行方程分析及显著性检验,结果如表 5 所示。压扁率、碎草率及茎秆折断率的回归模型 P 值均小于 0.01,失拟项 P 值均大于 0.05。对压扁率影响因素的主次顺序为: B 、 A 、 C ,对碎草率影响因素的主次顺序为: A 、 C 、 B ,对茎秆弯折率影响因素的主次顺序为: A 、 B 、 C 。影响显著交互项的响应面如图 16 所示。

根据实际需求,以压扁率大于 95%、碎草率小于 3%、茎秆弯折率小于 15% 为目标,得到优化结果为:压扁辊齿数 6、压扁辊转速 750 r/min、压扁辊间隙 1.61 mm。在最佳工作参数下进行 3 次重复试验,得到压扁率为 97.12%、碎草率为 1.40%、茎秆折断率为 1.79%。

3.5 干燥试验

通过对比六边形辊齿和四边形辊齿压扁后的苜蓿在自然条件下的干燥情况,验证六边形辊齿对压扁后苜蓿干燥性能的影响。分别开展不同破坏类型

表 5 苜蓿压扁试验方差分析

Tab.5 ANOVA of alfalfa conditioning experiment

方差 来源	压扁率				碎草率				茎秆折断率			
	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P	平方和	自由度	F	P
模型	143.38	9	24.40	0.000 2 **	44.83	9	92.19	<0.001 **	839.36	9	118.73	<0.001 **
A	22.71	1	34.79	0.000 6 **	27.60	1	510.86	<0.001 **	602.91	1	767.53	<0.001 **
B	26.39	1	40.42	0.000 4 **	0.41	1	7.50	0.029 0 *	28.24	1	35.95	0.000 5 **
C	0.23	1	0.36	0.567 8	4.09	1	75.69	<0.001 **	7.53	1	9.58	0.017 4 *
AB	0.28	1	0.43	0.532 8	1.18	1	21.79	0.002 3 **	13.91	1	17.71	0.004 0 **
AC	3.28	1	5.02	0.060 1	0.093	1	1.72	0.230 9	0.20	1	0.25	0.631 0
BC	0.5	1	0.76	0.411 9	1.225×10^{-3}	1	0.023	0.884 6	2.94	1	3.74	0.094 2
A^2	61.5	1	94.18	<0.001 **	10.42	1	192.88	<0.001 **	181.47	1	231.02	<0.001 **
B^2	14.32	1	21.93	0.002 3 **	0.16	1	2.91	0.131 8	1.72	1	2.20	0.182 0
C^2	6.94	1	10.64	0.013 8 *	0.41	1	7.65	0.027 9 *	0.44	1	0.56	0.479 6
残差	4.57	7	3.47	0.130 5	0.38	7			5.50	7		
失拟	3.3	3	1.1	3.47	0.28	3	3.76	0.116 5	0.056	3	0.014	0.997 5
误差	1.27	4	0.32		0.099	4			5.44	4		
总和	147.95	16			45.21	16			844.86	16		

注: * 表示差异显著 ($P < 0.05$); ** 表示差异极显著 ($P < 0.01$)。

的干燥对比试验、单株苜蓿干燥试验及多株苜蓿干燥试验,试样如图 17 所示。每次试验重复 5 次,结果取平均值。其中,在不同破坏类型的干燥对比试验中,将苜蓿主茎秆上存在的混合式破坏、挤压破坏和弯折破坏分别制成长 5 cm 试样,每 5 个试样为一组。在多株苜蓿干燥试验中,以 10 株苜蓿为一组。试验时温度为 28~31℃,试验过程每 30 min 记录一次质量变化。完成干燥试验后,将试样收集放入干燥箱内,以 104℃ 干燥 24 h,测量试件质量。

试验结果如图 18 所示。整体来看,压扁后苜蓿在前 30 min 内干燥速率最快,随着时间增加,干燥速率逐渐下降。在 0~30 min 内,3 种破坏中混合破

坏对干燥速影响最大,平均质量变化量为 0.12 g,含水率由 83.53% 下降到 29.32%。干燥时间达 120 min,含水率下降到 5.31%。挤压破坏影响次之,平均质量变化量为 0.08 g,含水率由 84.21% 下降到 40.27%。干燥时间达到 120 min,含水率下降到 6.53%。弯折破坏对干燥速率影响最小,平均质量变化量为 0.06 g,水率由 86.43% 下降到 50.15%。到 120 min,含水率下降到 12.20%。在 0~30 min 内,混合破坏形成的平均干燥速率分别为挤压破坏和弯折破坏的 1.43 倍和 1.97 倍。

单株干燥试验中,六边形辊齿压扁后苜蓿在 0~30 min 内平均质量变化量为 1.53 g,含水率由

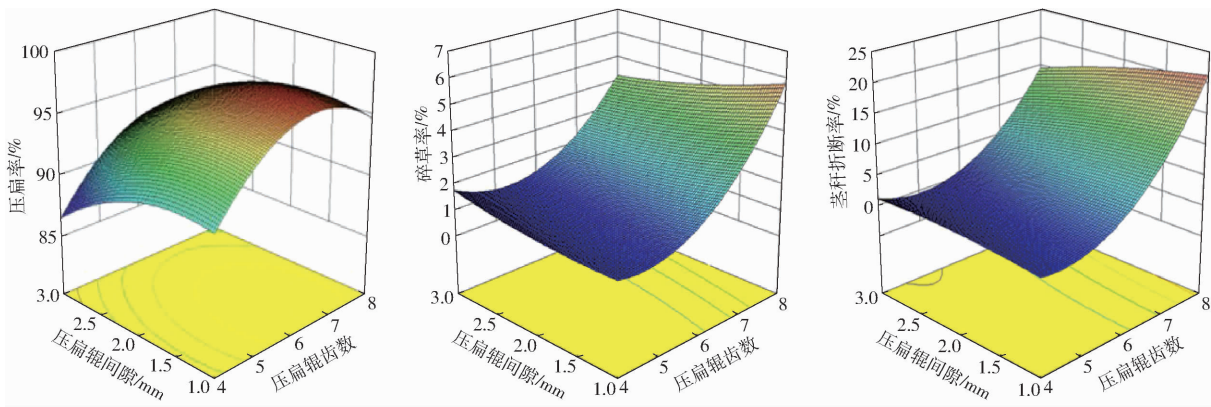


图 16 压扁辊转速为 700 r/min 时试验因素对评价指标影响的响应曲面

Fig. 16 Response surfaces of experimental factors to evaluation indicators at roller speed of 700 r/min

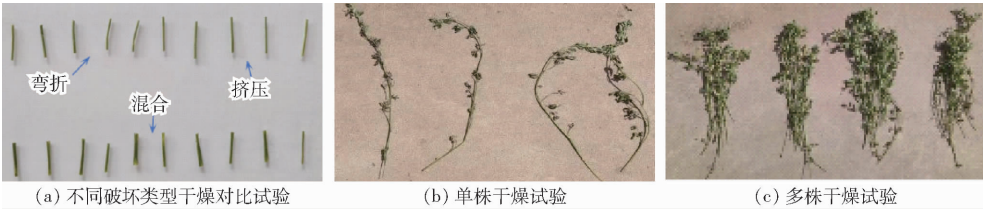


图 17 苜蓿干燥试验

Fig. 17 Alfalfa drying test

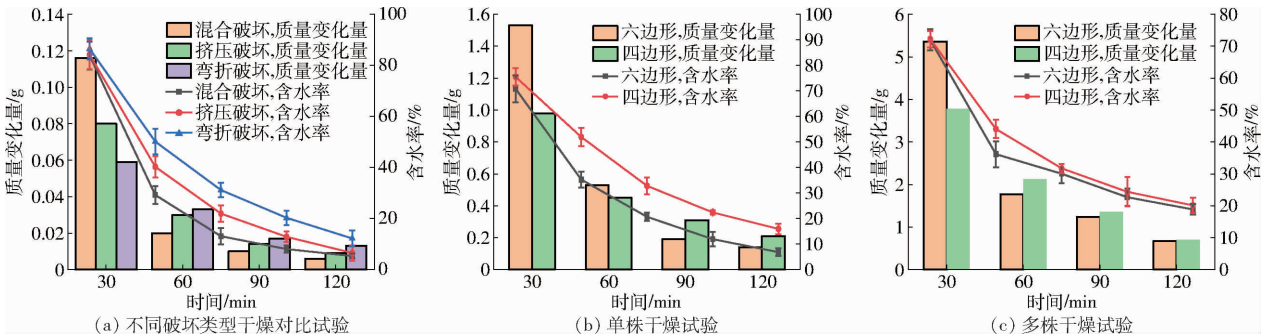


图 18 干燥试验结果

Fig. 18 Drying test results

70.81% 下降到 35.25%，到 120 min，含水率下降到 6.86%。四边形辊齿压扁后苜蓿在 0~30 min 内平均质量变化量为 0.98 g，含水率由 75.47% 下降到 51.93%，到 120 min，含水率下降到 15.94%。多株苜蓿干燥试验中，苜蓿质量变化情况与单株时类似，在前 30 min 内，质量变化最为显著，六边形辊齿压扁后苜蓿在 0~30 min 内平均质量变化量为 5.36 g，含水率由 71.98% 下降到 36.16%。干燥时间为 120 min 时，六边形压扁后苜蓿平均质量变化量由 1.77 g 下降到 0.67 g，含水率下降到 18.85%。0~30 min 内，四边形为 3.78 g，含水率由 72.24% 下降到 44.07%。在 30~120 min 内，四边形由 2.13 g 下降到 0.70 g，含水率下降到 20.10%。

由于试验过程苜蓿总量较小，彼此没有遮挡且是置于水泥地面上进行，因此干燥速率高于田间干燥情况。但综合以上 3 组试验的试验结果可

以看出，3 类破坏中，混合形破坏最有利于加快苜蓿干燥速率，挤压型破坏次之，弯折型破坏最弱。与四边形辊齿相比，六边形辊齿更有利于提高苜蓿干燥速率。

4 结论

- (1) 通过对压扁过程中苜蓿受力和辊齿间几何关系分析，建立了压扁过程中苜蓿弯折角 θ_w 与压扁辊折弯角 α_z 、辊齿间隙 h_j 、辊齿侧壁间距 h_c 之间的数学模型。通过单因素试验得到弯折角 θ_w 对茎秆折断率的影响关系。
- (2) 结合单因素试验结果，设计一种可有效降低压扁过程茎秆折断的六边形辊齿，通过响应面试验确定了六边形辊齿的最佳参数组合为：辊齿数 6、压扁辊转速 750 r/min、压扁辊间隙 1.61 mm。在最佳参数组合下压扁率、碎草率及茎秆折断率分别为

97.12%、1.40%和1.79%。

(3)通过开展六边形与四边形辊齿压扁后苜蓿干燥试验,发现六边形辊齿形成的混合式破坏对干燥速率的影响要大于挤压破坏和弯折破坏。在单株与多株干燥试验中,六边形辊齿压扁后的苜蓿在0~30 min内平均质量变化量分别为1.53、5.36 g,大于四边形辊齿的0.98、3.78 g,表现出更好的压扁效果。

参 考 文 献

[1] 王德成,贺长彬,武红剑,等. 苜蓿生产全程机械化技术研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 1-25.
WANG Decheng, HE Changbin, WU Hongjian, et al. Review of alfalfa full-mechanized production technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 1-25. (in Chinese)

[2] 谢华玲,杨艳萍,董瑜,等. 苜蓿国际发展态势分析[J]. 植物学报, 2021, 56(6): 740-750.
XIE Hualing, YANG Yanping, DONG Yu, et al. Analysis on international development trends of alfalfa[J]. Chinese Bulletin of Botany, 2021, 56(6): 740-750. (in Chinese)

[3] 邬备. 苜蓿刈割压扁收获机械系统的优化和试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
WU Bei. Optimization and experimental study on mechanical system of alfalfa mower conditioner [D]. Beijing: China Agricultural University, 2017. (in Chinese)

[4] LEWANDOWSKI I, CLIFTON-BROWN J C, SCURLOCK J M O, et al. Miscanthus: European experience with a novel energy crop[J]. Biomass and Bioenergy, 2000, 19(4): 209-227.

[5] FASICK G T, LIU J. Lab scale studies of miscanthus mechanical conditioning and bale compression [J]. Biosystems Engineering, 2020, 200: 366-376.

[6] MATHANKER S K, HANSEN A C. Impact of miscanthus yield on harvesting cost and fuel consumption[J]. Biomass and Bioenergy, 2015, 81: 162-166.

[7] KUMHÁLA F, KROULÍK M, PROŠEK V. Development and evaluation of forage yield measure sensors in a mowing-conditioning machine[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 58(2): 154-163.

[8] CHEN Y, GRATTON J L, LIU J. Power requirements of hemp cutting and conditioning[J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(4): 417-424.

[9] GREENLEES W J, HANNA H M, SHINNERS K J, et al. A comparison of four mower conditioners on drying rate and leaf loss in alfalfa and grass[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2000, 16(1): 15-21.

[10] GONDA L, KUNSKÝ M, GÁBORČÍK N. Effects of a mower-conditioner on herbage at forage harvesting [J]. Research in Agricultural Engineering, 2001, 47(1): 13-17.

[11] 刘丽英,贾玉山,范文强,等. 影响苜蓿自然干燥的主要环境因子研究[J]. 草业学报, 2022, 31(2): 121-132.
LIU Liying, JIA Yushan, FAN Wenqiang, et al. An investigation of the main environmental factors affecting the natural drying of alfalfa for hay, and hay quality[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2022, 31(2): 121-132. (in Chinese)

[12] 孙林,薛艳林,贾玉山,等. 苜蓿干草品质评定综述[J]. 中国草地学报, 2019, 41(4): 158-166.
SUN Lin, XUE Yanlin, JIA Yushan, et al. Review of evaluation methods of alfalfa hay quality [J]. Chinese Journal of Grassland, 2019, 41(4): 158-166. (in Chinese)

[13] 宋占华,邢书仑,王征,等. 苜蓿调制试验台测控系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(2): 122-134.
SONG Zhanhua, XING Shulun, WANG Zheng, et al. Design and experiment of measurement and control system for alfalfa conditioning test bench[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(2): 122-134. (in Chinese)

[14] 邬备,王德成,王光辉,等. 割草机切割压扁装置运行参数优化与试验[J]. 农业机械学报, 2017, 48(10): 76-83.
WU Bei, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Optimization and experiments of cut-condition device working parameter on mower conditioner[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(10): 76-83. (in Chinese)

[15] 王林,张克平,杨君乾. 基于离散元法苜蓿压扁调制过程仿真分析与试验[J]. 东北农业大学学报, 2023, 54(4): 86-96.
WANG Lin, ZHANG Keping, YANG Junqian. Simulation analysis and experiment of alfalfa flattening modulation process based on discrete element method[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2023, 54(4): 86-96. (in Chinese)

[16] 高东明,王德成. 苜蓿茎秆压扁系数对水分散失的影响研究[J]. 中国农业大学学报, 2016, 21(12): 89-95.
GAO Dongming, WANG Decheng. Water loss alfalfa stem affected by flattening coefficient[J]. Journal of China Agricultural University, 2016, 21(12): 89-95. (in Chinese)

[17] 凌旭,赵春花. 苜蓿压扁试验台设计及其机架模态分析[J]. 农业装备与车辆工程, 2021, 59(1): 50-53.
LING Xu, ZHAO Chunhua. Design of alfalfa flattening test bench and modal analysis of its rack[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2021, 59(1): 50-53. (in Chinese)

[18] SHINNERS K J, WUEST J M, CUDOC J E, et al. Intensive conditioning of alfalfa: drying rate and leaf loss [C] // ASAE Annual Meeting, 2006.

[19] FYCHAN R, LEEMANS D K, SCOTT M B, et al. Effect of mower/conditioner type during legume or grass harvesting on silage quality [C] // General Meeting of the European Grassland Federation, 2016.

[20] STANISAVLJEVIĆ R, VUKOVIĆ A, BARAC S, et al. Influence of harvesting on quality of alfalfa forage used for haylage and hay[J]. Journal of Agricultural Sciences, 2019, 25(3): 384-390.