

铡切揉碎协同式牧草揉丝机设计与试验

陈涛¹ 衣淑娟¹ 李衣菲^{1,2} 陶桂香¹ 毛欣¹ 曲善民³

(1. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319; 2. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030;

3. 黑龙江八一农垦大学动物科技学院, 大庆 163319)

摘要: 针对现有的牧草揉丝机效率低、揉丝质量差、对高含水率牧草不适用等问题,以苜蓿为加工对象设计了一种铡切揉碎协同式牧草揉丝机。对铡切和揉碎过程进行了理论分析,并通过设计计算确定了揉丝机的总体结构和关键部件结构参数。以生产率、丝化率为性能评价指标,进行了以电机输出转速、筛孔直径、喂入量、含水率为试验因素的单因素试验;将含水率为65%的苜蓿作为加工对象,进行了以电机输出转速、筛孔直径、喂入量为试验因素的二次正交旋转组合试验。单因素试验确定了试验因素的取值范围,探究了揉丝机对不同含水率苜蓿的揉丝效果。通过 Design-Expert 12.0 软件对二次正交旋转组合试验的试验结果进行了响应曲面分析、回归分析及目标优化,得到了试验因素与评价指标之间的回归方程,以生产率和丝化率同时最大化为目标,对电机输出转速、筛孔直径、喂入量进行多目标寻优求解,确定最优参数组合为:电机输出转速 443.77 r/min、筛孔直径 14 mm、喂入量 1.27 kg/s,揉丝验证试验表明,生产率为 5 065.98 kg/h、丝化率为 94.87%;该装置揉丝效率高、质量好,而且能够揉丝高含水率牧草,满足牧草揉丝机设计要求。

关键词: 牧草; 铡切; 揉碎; 揉丝机; 协同作业

中图分类号: S223.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)02-0149-11

OSID:



Design and Test of Cutting and Crushing Cooperative Silk Kneading Machine

CHEN Tao¹ YI Shujuan¹ LI Yifei^{1,2} TAO Guixiang¹ MAO Xin¹ QU Shanmin³

(1. College of Engineering, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China

2. College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

3. College of Animal, Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China)

Abstract: In response to the problems of low efficiency, poor quality, and inapplicability to high moisture content grass in existing grass kneading machines, a collaborative cutting and crushing grass kneading machine was designed for alfalfa processing. Theoretical analysis was conducted on the cutting and crushing processes, and the overall structure and key component structural dimensions of the wire kneading machine were determined through design calculations. A single factor experiment was conducted with motor output speed, mesh diameter, feed rate, and moisture content as experimental factors, using productivity and spinning rate as performance evaluation indicators. A quadratic orthogonal rotation combination experiment was conducted by using alfalfa with moisture content of 65% as the processing object, with motor output speed, sieve diameter, and feed rate as experimental factors. The single factor experiment determined the range of experimental factors and explored the silk kneading effect of the silk kneading machine on alfalfa with different moisture contents. Response surface analysis, regression analysis, and objective optimization were conducted on the experimental results of the quadratic orthogonal rotation combination experiment by using the Design-Expert 12.0 software. The regression equation between the experimental factors and evaluation indicators was obtained. With the goal of maximizing both productivity and silk rate, multi-objective optimization was carried out on the output speed, mesh diameter, and feed rate of the motor. The optimal parameter combination was determined as follows: the output speed of the motor was 443.77 r/min, the sieve diameter was 14 mm, the feeding

收稿日期: 2023-07-11 修回日期: 2023-08-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(52275246)和黑龙江八一农垦大学研究生创新科研项目(YJSCX2023-Z02)

作者简介: 陈涛(1996—),男,博士生,主要从事牧草粉碎机械研究,E-mail: 2841662304@qq.com

通信作者: 衣淑娟(1965—),女,教授,博士生导师,主要从事牧草粉碎机械研究,E-mail: yishujuan_2005@126.com

amount was 1.27 kg/s, and the validation test of wire rolling showed that the production rate was 5 065.98 kg/h, and the silk rate as 94.87%. The device had high silk kneading efficiency, good quality, which can knead grass with high moisture content, meeting the design requirements of the grass kneading machine.

Key words: forage grass; chopping; crush; silk kneading machine; cooperative

0 引言

粉碎作为牧草加工的重要环节之一,其破碎质量对加工成本和牲畜消化效果有着重要影响^[1-2]。粉碎是将牧草切断,使其内部营养外露,不仅可以提高适口性,还能够增加与牲畜胃液的接触面积,缩短反刍和咀嚼时间,降低牲畜的咀嚼消耗能量。粉碎后的牧草容易咀嚼,并且口感佳,促进牲畜对其营养成分的吸收^[3]。反刍动物对牧草的长度需求为30~50 mm,粉碎过长或过短均不利于消化吸收。为防止搅拌切割后过短,粉碎得到的牧草长度需要在50~70 mm^[4-6]。

牧草加工按照破碎形式可分为切碎加工、粉碎加工和揉碎加工,与之对应的机型有铡切式粉碎机、锤片式粉碎机、揉切式粉碎机等^[7-8]。铡切式粉碎机通过剪切的方式对牧草进行破碎,虽然具有结构简单、功耗低、生产率较高等优点,但加工后的碎草多为圆秆,而且存在硬节,会导致牲畜消化不良、适口性降低,不利于牲畜的消化吸收^[9];锤片式粉碎机先通过锤片的打击作用对牧草进行一定程度的粉碎,然后将牧草以较快的速度抛向粉碎室内部的揉搓板和筛板上,受到揉搓板的碰撞和筛板的搓擦进一步粉碎,其粉碎效率高,适应性广,但粉碎后的牧草过于细碎,不能使其纤维度得到较好保留,导致其蓬松度较低,无法长时间贮存^[10];揉丝机是在高速旋转的锤片和齿板的揉搓作用下,将牧草破碎,破碎后的牧草为柔软、蓬松的丝状段,使营养外露,增大与牲畜消化系统的接触面积,促进消化吸收^[11]。

国外在饲草加工机械方面,种类齐全,功能相对完善,技术比较成熟,但是主要用于大型农田和牧场,不适用于我国小规模养殖地区对饲草加工机械小型化和便捷性的使用需求^[12]。国内相关学者一直致力于牧草加工机械的研究,越来越多的新机型不断涌现。虽然在一定程度上改善了牧草揉丝质量,但由于高含水率的牧草韧性强,所需要的破碎力更大,现有的揉丝机作业时整株牧草容易对转子产生缠绕,造成堵塞^[13-15],存在效率低、揉丝质量差、对于含水率较大的牧草不适用等问题。

本文以苜蓿为加工对象,设计一种铡切揉碎协同式牧草揉丝机,通过将铡切、粉碎和揉搓等加工方

式集约化组合进行协同作业,实现对牧草的揉丝。在揉丝之前先对牧草进行预加工,通过铡切的方式将其切成一定长度的小段。并设计锤片-锯齿刀组合式揉丝转子,提高轴向上揉丝部件密度,增加单位时间内牧草与揉丝部件相互作用频率,通过打击、揉搓、撞击的方式将铡切后的碎草段破碎成丝状,从而改善揉丝质量,提高生产效率。

1 整机结构与工作原理

铡切揉碎协同式牧草揉丝机主要由电机、机架、输送机构、喂料机构、铡切机构、揉丝机构、筛分机构、传动系统等部分组成,结构如图1所示。

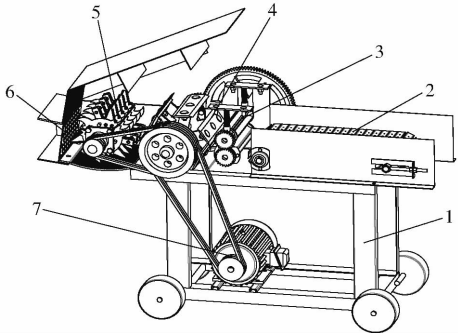


图1 铡切揉碎协同式牧草揉丝机结构示意图

Fig.1 Structural diagram of cutting and crushing cooperative silk kneading machine

- 1. 机架 2. 输送机构 3. 喂料机构 4. 铡切机构 5. 揉丝机构
- 6. 筛板 7. 电机

作业时,整株牧草通过输送机构运送至喂料机构,喂料机构将牧草均匀喂入铡切仓,完成喂料;铡切机构将牧草破碎成一定长度的小段,完成铡切;揉丝机构将铡切后的牧草段破碎成丝状,完成揉丝;满足揉丝长度的碎草通过揉丝转子旋转产生的气流和离心力的双重作用透过筛板抛到机体外部,完成筛分抛送。

2 关键部件设计

2.1 铡切过程苜蓿受力和机构设计

2.1.1 铡切过程苜蓿受力分析

铡切机构由铡切转子和铡切定刀组成,铡切转子包括铡切动刀、刀架、铡切轴、铡切动刀安装板,结构如图2所示。铡草时,在做旋转运动的铡草动刀和定刀的剪切作用下将整株苜蓿铡切成苜蓿段,铡

碎的苜蓿在铡切转子的运动下推送至揉丝仓。

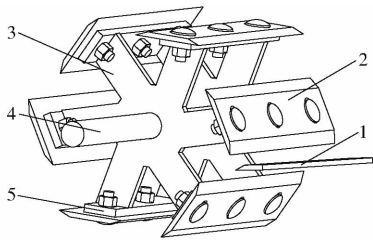


图 2 铡切机构结构图

Fig. 2 Structure diagram of cutting mechanism

1. 铡切定刀 2. 铡切动刀 3. 刀架 4. 铡切轴 5. 铡切动刀安装板

铡切过程苜蓿受力分析如图 3 所示。根据动定刀对苜蓿剪切作用以及铡切过程苜蓿受力与运动分析,得到切碎苜蓿的必要条件为

$$F_{\tau} \sin \alpha \geq F_{f1} + F_{f2} \sin \alpha + F_{N2} \cos \alpha \quad (1)$$

由图 3 可知

$$mg + F_{\tau} \cos \alpha + F_{N2} \sin \alpha = F_{N1} + F_{f2} \cos \alpha \quad (2)$$

$$F_{f1} = \mu_1 F_{N1} \quad (3)$$

$$F_{f2} = \mu_2 F_{N2} \quad (4)$$

式中 α ——滑切角, ($^{\circ}$) m ——苜蓿质量, kg
 g ——重力加速度, m/s^2

F_{τ} ——铡切动刀对苜蓿的切削力, N

F_{N1} ——铡切定刀对苜蓿的支持力, N

F_{N2} ——铡切动刀对苜蓿的正压力, N

F_{f1} ——铡切定刀对苜蓿的摩擦力, N

F_{f2} ——铡切动刀对苜蓿的摩擦力, N

μ_1 ——苜蓿与铡切定刀之间的摩擦因数

μ_2 ——苜蓿与铡切动刀之间的摩擦因数

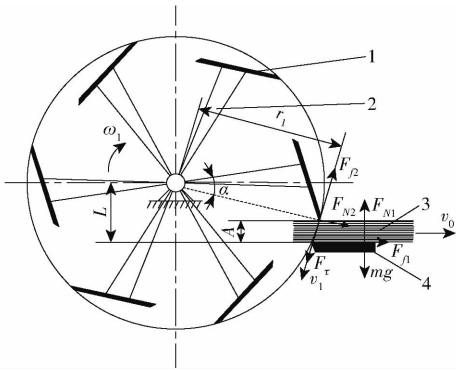


图 3 铡切过程苜蓿受力与运动分析

Fig. 3 Analysis of force and motion of alfalfa during cutting process

1. 铡切动刀 2. 刀架 3. 苜蓿 4. 铡切定刀

本文所设计的铡切动刀与定刀材料均为 65Mn, 则苜蓿与二者的摩擦因数相同, 即 $\mu_1 = \mu_2 = \mu$, 联立式(1)~(4)可得

$$\mu + \frac{F_{N2} \cos(2\alpha) + mgs \sin \alpha}{F_{N1} \cos \alpha} \leq \tan \alpha \quad (5)$$

其中
$$\frac{F_{N2} \cos(2\alpha) + mgs \sin \alpha}{F_{N1} \cos \alpha} \geq 0$$

若式(5)成立, 可以得到苜蓿摩擦角正切值 $\tan \varphi \leq \tan \alpha$, 苜蓿摩擦角 φ 一般为 $24^{\circ} \sim 32^{\circ}$ ^[16], 即 $\alpha \geq 32^{\circ}$ 。

2.1.2 铡切动刀设计

为便于苜蓿均衡滑切, 降低功耗, 铡切动刀需倾斜安装, 但倾斜角度过大会影响动平衡, 发生振动, 因此滑切角设计为 32° , 周向间隔 60° 布置 1 片动刀, 铡切轴共布置 6 片动刀, 铡切动刀结构如图 4 所示。

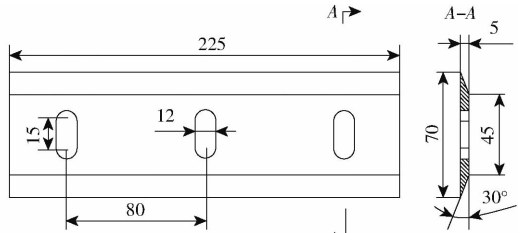


图 4 铡切动刀结构图

Fig. 4 Structure diagram of cutting blade

2.2 揉丝过程苜蓿受力分析和机构设计

2.2.1 苜蓿受力分析

揉丝机构包括揉丝转子、揉搓板、复揉搓板, 揉丝转子包括揉丝轴、锤架板、锯齿刀、锤片, 结构如图 5 所示。本文设计一种锤片-锯齿刀组合式揉丝转子, 在揉丝轴的径向上均匀分布 3 个平行销轴, 锤片沿销轴的轴向上成对均匀排布, 锤架板沿揉丝轴的轴向等间距分布, 锤架板的外缘设计为月牙型, 既可以有效打破苜蓿在揉丝仓内的环流运动, 还能够加强对苜蓿的打击作用。锤架板圆周方向均匀分布 3 个锯齿刀, 与锤片在轴向上形成交错排列, 以此提高揉丝部件分布密度, 使其在工作中覆盖更多揉丝空间, 增加单位时间内苜蓿与揉丝部件相互作用频率。工作时, 苜蓿段在高速旋转的锤片和锯齿刀的打击, 锤片和锯齿刀分别与揉搓齿板的揉搓、撕裂, 以及苜蓿段与筛板之间撞击等多种破碎方式协同作用下破碎成丝状, 满足揉丝长度的碎草被分离到机体外部,

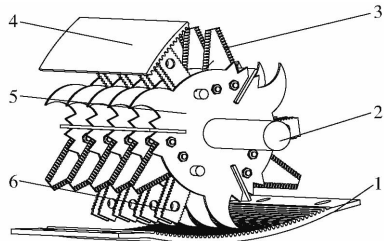


图 5 揉丝机构结构图

Fig. 5 Structure diagram of silk kneading mechanism

1. 揉搓板 2. 揉丝轴 3. 锯齿刀 4. 复揉搓板 5. 锤架板 6. 锤片

大于揉丝长度需求的碎草经过复揉搓板进行再揉搓,继续通过与上次揉丝相同的破碎方式实现进一步破碎,直至长度满足揉丝需求。

根据苜蓿揉丝过程受到的打击和揉搓作用分析,苜蓿丝化过程受力如图 6 所示。

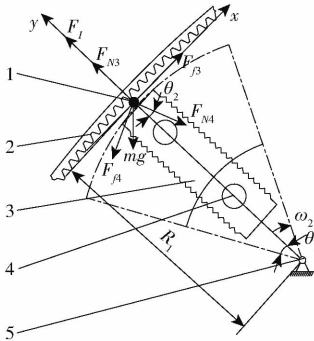


图 6 苜蓿揉丝过程受力分析

Fig. 6 Stress analysis of alfalfa silk kneading process

1. 苜蓿 2. 复揉搓板 3. 锤片 4. 销轴 5. 揉丝轴

根据达朗贝尔原理,揉丝瞬间苜蓿应满足平衡状态,建立平衡方程式

$$\begin{cases} \sum F_x = F_{f3} + F_{N4} \sin \theta_2 - F_{f4} \cos \theta_2 - mg \cos \theta_1 = 0 \\ \sum F_y = F_I + F_{N3} - F_{N4} \cos \theta_2 - F_{f4} \sin \theta_2 - mg \sin \theta_1 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

其中 $F_I = m\omega_2^2 R_1$ (7)

$F_{f3} = \mu_3 F_{N3}$ (8)

$F_{f4} = \mu_4 F_{N4}$ (9)

式中 ω_2 ——锤片角速度,rad/s

θ_1 ——苜蓿段和揉丝轴轴心连线水平夹角, (°)

θ_2 ——苜蓿段和揉丝轴轴心连线与揉搓板对苜蓿支持力间夹角, (°)

F_I ——苜蓿段离心力,N

F_{N3} ——锤片对苜蓿段的支持力,N

F_{N4} ——揉搓板对苜蓿段的支持力,N

F_{f3} ——锤片对苜蓿段的摩擦力,N

F_{f4} ——揉搓板对苜蓿段的摩擦力,N

R_1 ——苜蓿段回转半径,mm

μ_3 ——苜蓿段与锤片之间的摩擦因数

μ_4 ——苜蓿段与揉搓板之间的摩擦因数

联立式(6)~(9)可得

$$\begin{cases} F_{f3} = mg \cos \theta_1 + [\mu_3 m \omega_2^2 R_1 + mg (\cos \theta_1 - \mu_3 \sin \theta_1)] \cdot \\ \quad (\mu_4 \cos \theta_2 - \sin \theta_2) / [(1 + \mu_3 \mu_4) \sin \theta_2 + \\ \quad (\mu_3 - \mu_4) \cos \theta_2] \\ F_{f4} = \mu_4 \frac{\mu_3 m \omega_2^2 R_1 + mg (\cos \theta_1 - \mu_3 \sin \theta_1)}{(1 + \mu_3 \mu_4) \sin \theta_2 + (\mu_3 - \mu_4) \cos \theta_2} \end{cases} \quad (10)$$

公式(10)表明,苜蓿揉丝过程中所受到的摩擦力 F_{f3} 和 F_{f4} 与摩擦因数、位置、角速度等有关,其中揉搓板靠近锤片的表面上设有梯形齿,可增大摩擦因数;锤片角速度直接由揉丝轴转速所决定,当机器动力与传动比一定时,揉丝轴转速主要受电机输出转速影响,为明确电机输出转速对苜蓿揉丝效果的影响,本文通过试验对其进行优化。

2.2.2 锤片和锯齿刀设计

锤片设计为矩形锯齿状,在对苜蓿进行打击破碎的同时增加锤片与物料之间的摩擦,还可以产生更好的滑切和刺切作用。锯齿刀呈六边形,刀的两边刀口顶面制成变梯形断面不等深齿纹,以提高刀片的强度和耐磨性,锤片和锯齿刀结构如图 7 所示。

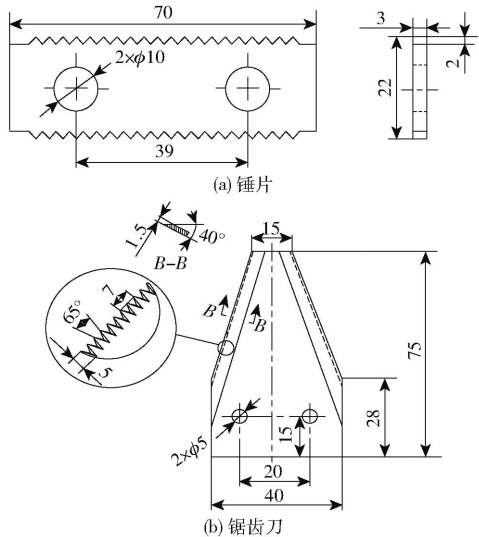


图 7 锤片和锯齿刀结构图

Fig. 7 Structure diagrams of hammer blade and serrated blade

2.2.3 揉搓板设计

在揉丝机中,揉搓板是牧草破碎的重要部件,不仅可以加强对物料的撞击作用,增强破碎效果,还能够打破环层,使碎草及时排出机体,提高生产效率。所以揉搓板结构参数对整机的生产效率和揉丝效果有明显的影响^[17]。采用铸造加工的方式制造整块揉搓板,安装在揉碎室内,揉搓板结构如图 8 所示。复揉搓板半径、齿高、齿间夹角、厚度等参数与揉搓板设计值相同。

2.2.4 筛板设计

筛板是在排料口处对被揉丝后的牧草进行筛选的部件,使几何尺寸小于筛孔直径的牧草丝从机体内分离^[18-19]。其具有双重作用,既可以控制排除物料长度,将物料进行筛分,还可以与未完全粉碎的物料进行相互碰撞,促进物料进一步破碎^[20-21]。

由于圆孔筛具有结构简单、制造方便等特点,在粉碎机中应用较为广泛^[22]。筛孔直径是影响粉碎机粉碎质量与生产率的重要参数。筛孔直径较大,

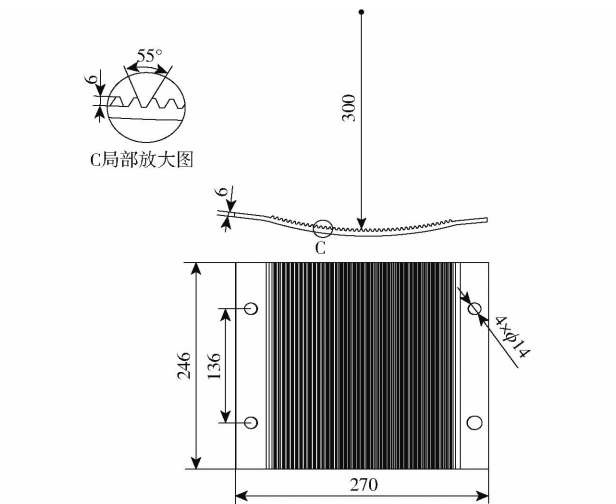


图 8 揉搓板结构图

Fig. 8 Structure diagram of kneading board

能使粉碎的物料比较容易的通过筛板,虽然增加了机器生产率,降低了功耗,但是粉碎后牧草长度较大;筛孔直径太小,使粉碎物料不能较为容易地透过筛孔,造成过度揉丝,而且增加了功耗。筛孔直径与碎草长度之间满足关系^[23]

$$l = (0.25 \sim 0.33) d \quad (11)$$

式中 l ——碎草长度,mm

d ——筛孔直径,mm

经式(11)计算,结合实际揉丝作业需求,筛孔直径范围取 12~22 mm,结构如图 9 所示。为进一步明确筛孔直径对机器揉丝效率和质量的影响,本文通过试验对其进行优化。

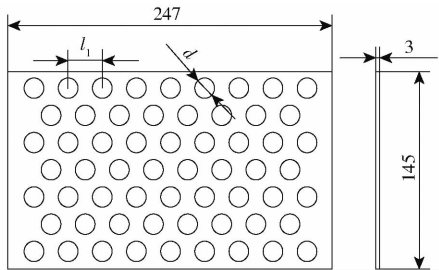


图 9 筛板结构图

Fig. 9 Sieve plate structure diagram

2.3 输送机构

采用链板式输送机构将苜蓿输送至喂料机构,主要包括链轮、弯板链条、主动轴、从动轴、张紧机构、输送板、驱动链轮、支撑链轮等零部件,结构如图 10 所示。

传动部件为 2 条 10 A 的弯板链条,将输送板用螺钉固定在弯板链条上。输送机构整体设计长为 540 mm,输送板长度为 225 mm,两侧弯板链条内缘间距离为 150 mm。

通过主动轴进行动力传递,为防止发生链条震动,发生脱链等现象,在从动轴两侧设有张紧机构,

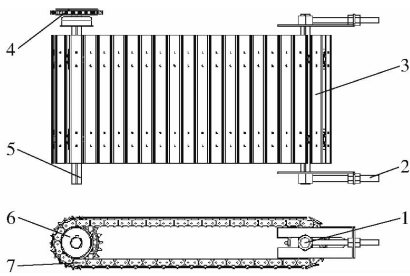


图 10 输送机构结构示意图

Fig. 10 Structural diagram of conveyor

- 1. 从动轴 2. 张紧机构 3. 输送板 4. 驱动链轮 5. 主动轴
- 6. 支撑链轮 7. 链条

通过调节从动轴沿链板方向前后移动来实现张紧,以此保证苜蓿均匀有序输送。

2.4 喂料机构

现有的揉丝机的喂料处采用倾斜的喂料斗,利用物料重力进行喂料;有些揉丝机采用传送带进行喂料,利用摩擦力的作用进行喂料,这些喂料方式喂料不均匀,容易造成堵塞^[24]。

采用对辊式喂料机构进行喂料。在喂料口处上下布置一组直径相同的喂入辊,电机通过传动系统驱动两喂入辊进行等速反向旋转,苜蓿通过上下两喂入辊夹紧输送至铡切机构进行切碎。设计压簧式夹紧机构,可以根据苜蓿喂入量的波动,自动调节两辊间距,不仅可以实现连续、均匀喂料,还可以提高切碎质量,获得更为精准、均匀的切碎长度,为提高丝化后苜蓿尺寸均匀度奠定了基础。喂料机构结构如图 11 所示。

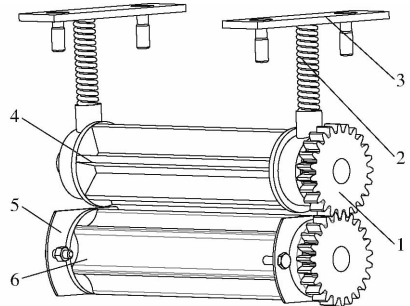


图 11 喂料机构结构示意图

Fig. 11 Structure diagram of feeding mechanism

- 1. 齿轮 2. 压紧弹簧 3. 限位板 4. 上压草辊 5. 轴承座 6. 下压草辊

喂料辊的结构对喂料的顺畅性影响很大,当喂料辊表面相对光滑时,喂料过程中苜蓿在喂料辊表面容易发生打滑、缠绕现象^[25]。苜蓿与喂料辊的摩擦力应尽量增大,以提高喂料对辊对苜蓿的抓取能力,保证苜蓿能够顺畅喂入,因此上辊采用周向均匀布置矩形板增大摩擦。

通过改变传动比调节苜蓿喂入速度,苜蓿被喂料机构通过上下两喂入辊产生的夹持力和摩擦力顺

利喂入。苜蓿喂入过程如图 12 所示。

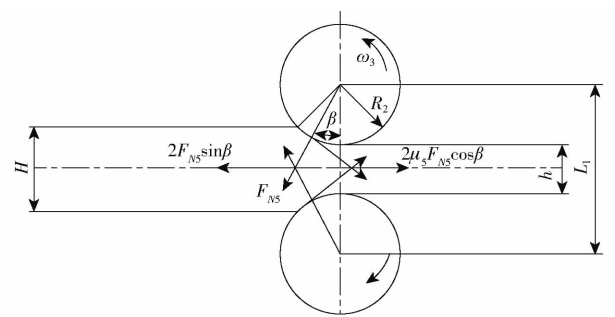


图 12 苜蓿喂入过程示意图

Fig. 12 Schematic of alfalfa feeding process

以苜蓿和喂入辊接触弧中点处对苜蓿进行受力分析。为保证苜蓿顺利喂入，喂入辊转动对苜蓿茎秆的摩擦力应大于其正压力的水平分力，即

$$\mu_5 F_{N5} \cos \beta - F_{N5} \sin \beta \geq 0 \tag{12}$$

其中 $\mu_5 = \tan \delta$

式中 μ_5 ——动摩擦因数

δ ——喂入辊对苜蓿茎秆的摩擦角

F_{N5} ——喂入辊对茎秆正压力，N

β ——正压力与竖直方向夹角，(°)

由式(12)可得当 $\delta \geq \beta$ 时，喂入辊可完成对物料的夹持喂入，喂入辊半径 R_2 计算式为

$$L_1 = 2R_2 + h = 2R_2 \cos(2\beta) + H \tag{13}$$

式中 H ——喂入茎秆流厚度，mm

h ——喂入辊间隙，mm

L_1 ——两辊轴心距，mm

为保证顺利喂入，应满足式(12)条件，即 $\delta \geq \beta$ ，则喂入辊半径满足

$$R_2 \geq \frac{H - h}{2(1 - \cos(2\delta))} \tag{14}$$

令 $\mu' = \frac{h}{H}$ ，为压缩系数，因本揉丝机所设计喂入量较小，设计 $H = 100$ mm，当压缩系数为 0.6 ~ 0.8，其喂入辊半径为 40.4 ~ 80.8 mm，其平均值约为 60.6 mm，圆整后取喂入辊半径 $R_2 = 60$ mm，喂入辊间隙 h 为 24 ~ 46 mm。

3 台架性能试验

3.1 试验材料与仪器设备

研制揉丝机样机进行性能试验，以苜蓿为加工对象，在黑龙江省大庆市杜尔伯特蒙古族自治县乾禾牧草种植基地进行采集。在现蕾期齐地刈割，采集的苜蓿无病虫害、无明显机械损伤，随机抽样测定苜蓿平均含水率为 81.34%，试验在黑龙江八一农垦大学农作物收获实验室进行，试验现场如图 13 所示。

试验仪器包括转速表、水分测定仪、天平、秒

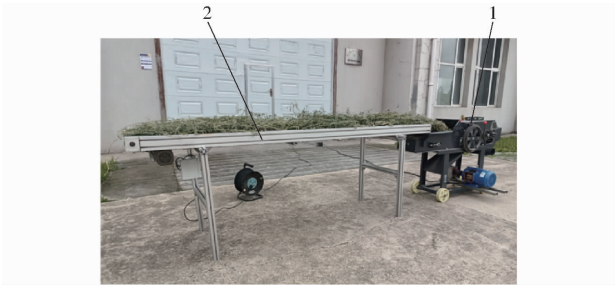


图 13 铡切揉碎协同式牧草揉丝装置试验台

Fig. 13 Test bench for cutting and crushing cooperative silk kneading machine

1. 揉丝机样机 2. 喂料输送带

表等。

3.2 试验设计

根据理论分析结果和为了检验机器对高含水率苜蓿的揉丝效果，参照 NY/T 509—2015《秸秆揉丝机质量评价技术规范》，选取生产率、丝化率为评价指标，分别进行以电机输出转速、筛孔直径、喂入量、含水率为试验因素的单因素试验和以电机输出转速、筛孔直径、喂入量为试验因素的三因素五水平二次回归正交旋转组合试验^[26]。单因素试验中采用自然干燥的方法获得所需含水率的苜蓿，各评价指标计算方法如下：

(1) 生产率

喂入已称量苜蓿，记录全部喂入试验时间，称量输出样品质量，计算生产率为

$$y_1 = \frac{m_1}{t} \times 3\,600 \tag{15}$$

式中 m_1 ——输出苜蓿质量，kg

t ——试验时间，s

(2) 丝化率

以相同时间间隔在出料口接取样品 3 次，每次不少于 200 g，将所有样品混合后进行称量，筛选其中合格的苜蓿丝并称量，计算苜蓿丝化率为

$$y_2 = \frac{m_2}{m_0} \times 100\% \tag{16}$$

式中 m_2 ——样品中苜蓿丝质量，g

m_0 ——苜蓿样品质量，g

试验采用喂料输送带进行连续喂入，通过变频器控制电机转速。

3.3 试验结果与分析

3.3.1 单因素试验

根据前期预试验、机器的可调范围，电机输出转速单因素取值范围为 150 ~ 600 r/min，筛孔直径 12 ~ 22 mm，喂入量 0.5 ~ 2.5 kg/s，根据苜蓿收获后加工对含水率的不同需求，含水率单因素试验取值范围为 10% ~ 80%^[27]。

电机输出转速对生产率、丝化率的影响如图 14 所示(筛孔直径 16 mm、喂入量 1.5 kg/s、含水率 80%)。

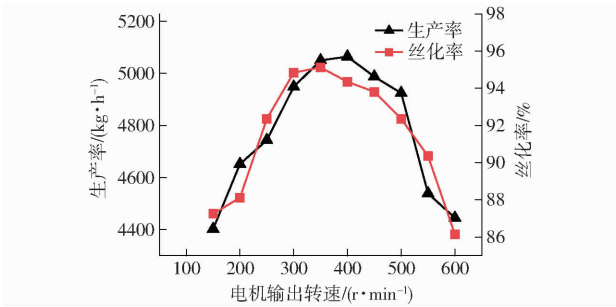


图 14 不同电机输出转速时性能指标变化曲线
Fig. 14 Variation curves of performance index at different motor output speeds

由图 14 可知,随着电机输出转速的增大,生产率和丝化率均呈现先增大后减小的趋势。原因在于随着电机输出转速的增大,铡切和揉丝转子转速都会加快,单位时间内可以增加苜蓿与揉丝部件的相互作用频率,所以生产率和丝化率增大。当电机输出转速过大时,碎草会随着揉丝转子一直进行转动,形成环流,无法通过离心力及时透过筛孔抛出机体外,而且会造成过度揉丝,丝化后的苜蓿成为粉状,所以生产率和丝化率均呈现降低趋势。电机输出转速在 250 ~ 500 r/min 范围内,生产率和丝化率处于较高水平,当电机输出转速超过 500 r/min 后,生产率和丝化率急剧下降,因此电机输出转速不宜超过 500 r/min。综合考虑生产率和丝化率,电机输出转速在 250 ~ 500 r/min 范围内揉丝性能较优。

筛孔直径对生产率、丝化率的影响如图 15 所示(电机输出转速 350 r/min、喂入量 1.5 kg/s、含水率 80%)。

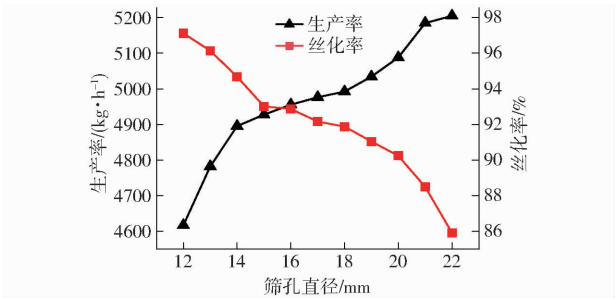


图 15 不同筛孔直径时性能指标变化曲线
Fig. 15 Variation curves of performance indexes with different sieve diameters

由图 15 可知,随着筛孔直径的增大,生产率呈现上升趋势,丝化率呈现降低趋势。原因在于筛孔直径越大,使碎草透过筛孔限制降低,使苜蓿在相同时间内喂入更多、排出效率更高,提高了单位时间内的揉丝数量,所以生产率增大。但是会使一些长度

大于揉丝要求的苜蓿透过筛孔,导致丝化率降低。筛孔直径在 14 ~ 20 mm 范围内,生产率和丝化率较为稳定,同时处于较高水平,当筛孔直径超过 20 mm 后,虽然生产率呈上升趋势,但丝化率急剧下降,因此筛孔直径不宜超过 20 mm。综合考虑生产率和丝化率,筛孔直径在 14 ~ 20 mm 范围内揉丝性能较优。

喂入量对生产率、丝化率的影响如图 16 所示(电机输出转速 350 r/min、筛孔直径 16 mm、含水率 80%)。

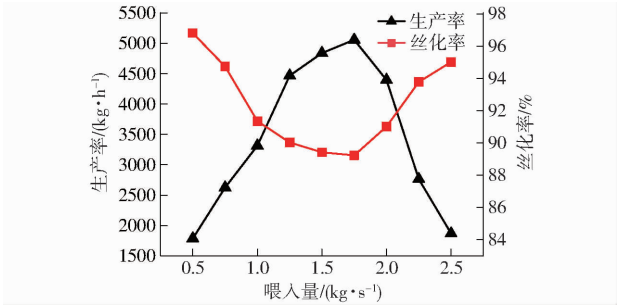


图 16 不同喂入量时性能指标变化曲线
Fig. 16 Variation curves of performance index with different feeding amounts

由图 16 可知,随着喂入量的增加,生产率先升高后降低,丝化率先降低后升高。当喂入量为 0.5 ~ 1.75 kg/s 时,喂料机构具有自调节能力,苜蓿可以顺利进入到机器内,铡切仓和揉丝仓内苜蓿增多,所以生产率呈上升趋势,单个苜蓿与揉丝部件相互作用频率减少,所以丝化率呈下降趋势;当喂入量大于 1.75 kg/s 时,喂料机构自调节能力减弱,苜蓿开始在喂料口处堆积,铡切仓和揉丝仓内苜蓿减少,所以生产率降低,单个苜蓿与揉丝部件相互作用频率增加,所以丝化率升高,当喂入量超过 2 kg/s 时,生产率开始急剧下降。综合考虑生产率和丝化率,喂入量范围在 1 ~ 2 kg/s 范围内揉丝性能较优。

含水率对生产率、丝化率的影响如图 17 所示(电机输出转速 350 r/min、筛孔直径 16 mm、喂入量

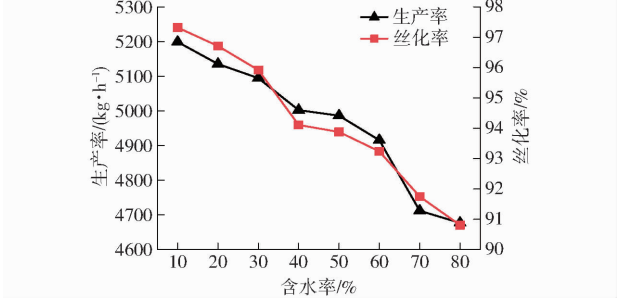


图 17 不同含水率时性能指标变化曲线
Fig. 17 Variation curves of performance index with different moisture contents

1.5 kg/s)。

由图 17 可知,随着含水率的增大,生产率和丝化率均呈现下降趋势。原因在于随着含水率的增大,苜蓿的韧性增强,所需要的破碎力更大,需要多次的打击、揉搓和撞击作用才会满足揉丝长度要求,因此生产率和丝化率都逐渐降低,但是丝化率始终大于 90%,体现了机器可以揉丝不同含水率的苜蓿,实现“干湿两用”。

3.3.2 二次旋转正交组合试验

为进一步考察所设计的揉丝机对高含水率苜蓿的揉丝效果,根据单因素试验得到的取值范围,采用 Design-Expert 12.0 软件进行三因素五水平二次旋转正交组合试验。根据苜蓿青贮对含水率的要求,以含水率为 65% 的苜蓿为揉丝对象,对 23 组因素水平组合进行揉丝试验,探究电机输出转速、筛孔直径、喂入量对生产率、丝化率的影响规律,建立试验因素与评价指标之间的回归方程和优化模型。因素编码如表 1 所示,表中括号内数值是根据实际作业需要对取值圆整的结果。试验方案与结果如表 2 所示, x_1 、 x_2 、 x_3 为因素编码值。

表 1 因素编码

Tab.1 Factors coding

编码	因素		
	电机输出转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	筛孔直径/ mm	喂入量/ ($kg \cdot s^{-1}$)
1.682	500	20	2.0
1	449.3(450)	18.8(19)	1.8
0	375	17	1.5
-1	300.7(300)	15.2(15)	1.2
-1.682	250	14	1.0

对表 2 数据进行方差分析,得到生产率和丝化率回归模型,结果分别如表 3 和表 4 所示。

根据表 3 可知,生产率回归模型($P < 0.000\ 1$)显著,失拟项($P = 0.193\ 6$)不显著,表明该模型拟合程度较好,无失拟现象发生。决定系数 $R^2 = 0.964\ 4$,校正相关系数 $R_{adj} = 0.939\ 8$,与 1 非常接近,变异系数为 1.66%,表明该试验数据可靠。回归方程的预测值与通过对试验结果分析所得到的实际值关系显著,将不显著项剔除后得到的各因素与评价指标的回归方程为

$$y_1 = 5\ 115.98 + 76.08x_1 - 167.75x_2 + 51.56x_3 - 61.56x_1x_2 + 67.92x_1x_3 - 10.27x_2x_3 - 284.7x_1^2 - 131.08x_2^2$$

(17)

生产率与各试验因素之间的响应曲面如图 18 所示。

表 2 试验方案与结果

Tab.2 Test scheme and results

序号	因素			$y_1 /$ ($kg \cdot h^{-1}$)	$y_2 / \%$
	x_1	x_2	x_3		
1	1	1	1	4 590.21	95.84
2	1	1	-1	4 365.40	94.62
3	1	-1	1	4 952.07	94.53
4	1	-1	-1	4 757.15	96.56
5	-1	1	1	4 395.94	88.51
6	-1	1	-1	4 513.76	92.68
7	-1	-1	1	4 582.55	83.41
8	-1	-1	-1	4 588.32	91.62
9	1.682	0	0	4 470.74	95.53
10	-1.682	0	0	4 200.32	83.68
11	0	1.682	0	4 390.60	93.87
12	0	-1.682	0	5 149.43	93.35
13	0	0	1.682	5 008.91	90.08
14	0	0	-1.682	4 766.34	96.41
15	0	0	0	5 137.16	91.63
16	0	0	0	5 117.43	93.26
17	0	0	0	4 974.76	91.85
18	0	0	0	5 094.31	91.71
19	0	0	0	5 070.22	91.64
20	0	0	0	5 168.64	90.48
21	0	0	0	5 171.60	90.15
22	0	0	0	5 206.13	92.01
23	0	0	0	5 095.08	92.23

表 3 生产率回归模型方差分析

Tab.3 Analysis of variance for regression model of productivity

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	2.24×10^6	9	2.49×10^5	39.15	$< 0.000\ 1^{**}$
x_1	79 053.77	1	79 053.77	12.44	$0.003\ 7^{**}$
x_2	3.84×10^5	1	3.84×10^5	60.46	$< 0.000\ 1^{**}$
x_3	36 300.18	1	36 300.18	5.71	$0.032\ 7^*$
x_1^2	30 312.14	1	30 312.14	4.77	$0.047\ 9^*$
x_2^2	36 899.58	1	36 899.58	5.81	$0.031\ 5^*$
x_3^2	843.78	1	843.78	0.13	0.721 5
x_1x_2	1.29×10^6	1	1.29×10^6	202.62	$< 0.000\ 1^{**}$
x_1x_3	2.73×10^5	1	2.73×10^5	42.95	$< 0.000\ 1^{**}$
x_2x_3	1.27×10^5	1	1.27×10^5	20.02	$0.000\ 6^{**}$
残差	82 629.68	13	6 356.13		
失拟	45 249.84	5	9 049.97	1.94	0.193 6
误差	37 379.83	8	4 672.48		
总和	2.32×10^6	22			

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

由图 18a 可知,在试验因素取值区间内,随着电机输出转速和筛孔直径的增大,生产率呈上升趋势,且筛孔直径对生产率的影响大于电机输出转速。由图 18b 可知,在试验因素取值区间内,生产率随喂入

表 4 丝化率回归模型方差分析

Tab. 4 Analysis of variance for regression model of filamentization rate

方差来源	平方和	自由度	均方	F	P
模型	244. 9	9	27. 21	42. 32	<0. 000 1 **
x_1	149. 99	1	149. 99	233. 27	<0. 000 1 **
x_2	3. 00	1	3. 00	4. 67	0. 049 9 *
x_3	41. 60	1	41. 60	64. 70	<0. 000 1 **
x_1^2	5. 76	1	5. 76	8. 96	0. 010 4 *
x_2^2	16. 73	1	16. 73	26. 02	0. 000 2 **
x_3^2	6. 64	1	6. 64	10. 33	0. 006 8 **
$x_1 x_2$	8. 22	1	8. 22	12. 79	0. 003 4 **
$x_1 x_3$	7. 71	1	7. 71	11. 99	0. 004 2 **
$x_2 x_3$	5. 12	1	5. 12	7. 96	0. 014 4 *
残差	8. 36	13	0. 64		
失拟	1. 64	5	0. 33	0. 39	0. 842 6
误差	6. 72	8	0. 84		
总和	253. 26	22			

量增加先增大后减少,且电机输出转速对生产率的影响大于喂入量。由图 18c 可知,随着喂入量的增大,生产率先增大后减小,在试验因素取值区间内,筛孔直径对生产率的影响大于喂入量。

根据表 4 可知,丝化率回归模型($P < 0. 000 1$)显著,失拟项($P = 0. 842 6$)不显著,表明该模型拟合程度较好,无失拟现象发生。决定系数 $R^2 = 0. 967 0$,校正决定系数 $R_{adj} = 0. 944 1$,与 1 非常接近,变异系数为 0. 85%,表明该试验数据可靠。回归方程的预测值与通过对试验结果分析得到的实际值关系显著,各因素与评价指标的回归方程为

$$y_2 = 93. 66 + 3. 31x_1 + 0. 47x_2 - 1. 75x_3 - 0. 85x_1x_2 + 1. 45x_1x_3 + 0. 91x_2x_3 - 0. 72x_1^2 + 0. 7x_2^2 + 0. 57x_3^2$$

(18)

丝化率与各试验因素之间的响应曲面如图 19 所示。

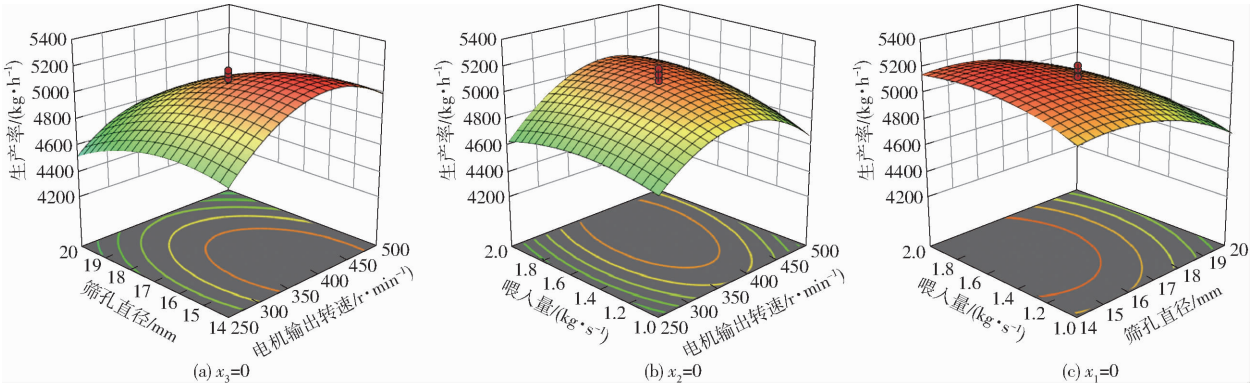


图 18 试验因素交互作用对生产率影响的响应曲面
Fig. 18 Relation response surfaces of influence of experimental factor interaction on productivity

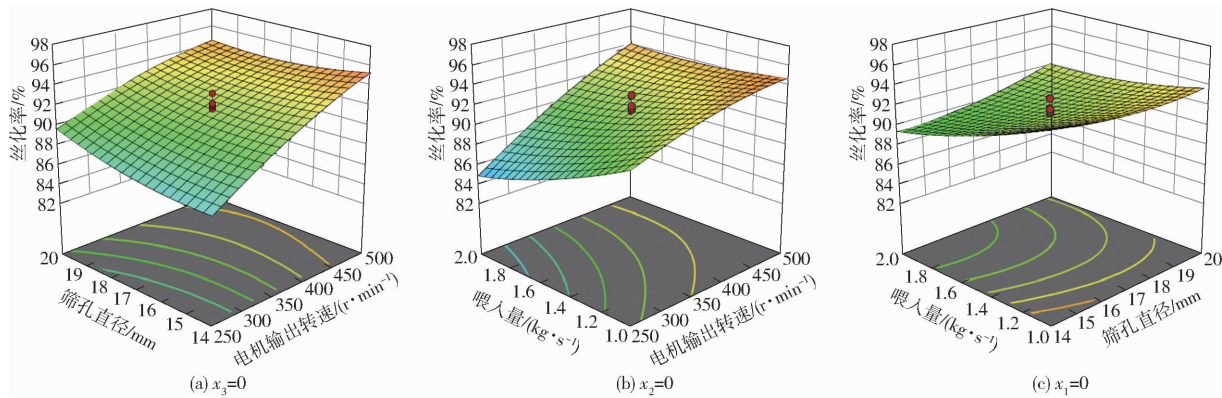


图 19 试验因素交互作用对丝化率影响的响应曲面
Fig. 19 Relation response surfaces of influence of experimental factors interaction on silk rate

由图 19a 可知,在试验因素取值区间内,随着电机输出转速和筛孔直径的增大,丝化率呈先上升后下降趋势,且电机输出转速对丝化率的影响大于筛孔直径。由图 19b 可知,在试验因素取值区间内,生产率随喂入量增大先增大后减小,且电机输出转速对丝化率的影响大于喂入量。由图 19c 可知,在试

验因素取值区间内,喂入量对丝化率的影响大于筛孔直径。

3.4 参数优化与试验验证

为了获得揉丝机作业性能最佳参数组合,利用 Design-Expert 12.0 软件中的多目标优化算法,以生产率最大值和丝化率最大值为优化目标,通过分析

建立优化数学模型

$$\begin{cases} \max y_1(x_1, x_2, x_3) \\ \max y_2(x_1, x_2, x_3) \\ \text{s. t.} \begin{cases} -1.682 \leq x_1 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq x_2 \leq 1.682 \\ -1.682 \leq x_3 \leq 1.682 \end{cases} \end{cases} \quad (19)$$

求解得到揉丝机最优参数组合为:电机输出转速 443.77 r/min、筛孔直径 14 mm、喂入量 1.27 kg/s,此参数组合下生产率为 5 078.28 kg/h、丝化率为 94.93%。

为了验证优化结果的可信度,将电机输出转速圆整为 445 r/min、喂入量圆整为 1.3 kg/s、筛孔直径选取为 14 mm,对优化结果进行验证,每组试验重复 5 次,计算 5 次试验结果的平均值作为该条件下的评价指标实际值,测得生产率为 5 065.98 kg/h、丝化率为 94.87%,与优化结果相对误差分别为 0.24%、0.06%,表明所建立的数学模型和优化结果准确可信,揉丝机具有较好的工作性能,揉丝效果如图 20 所示。

4 结论

(1)针对现有的牧草粉碎机效率低、揉丝质量差且无法对高含水率牧草进行揉丝等问题,设计了一种铡切揉碎协同式牧草揉丝机,采用铡切和揉碎



图 20 丝化后苜蓿样品

Fig. 20 Medicago sativa sample after silking

协同作业的揉丝模式,在揉丝之前先通过铡切的方式将牧草切成一定长度的小段,以此提高生产率和揉丝质量,而且可以同时适用于低含水率和高含水率牧草的揉丝作业,实现“干湿两用”。

(2)通过单因素试验得到了电机输出转速、筛孔直径、喂入量、含水率对生产率和丝化率的影响规律,确定了最优取值范围。以含水率为 65%的苜蓿为加工对象,进行了多因素试验,建立了生产率和丝化率的回归模型。

(3)以生产率和丝化率同时最大化为目标,对电机输出转速、筛孔直径、喂入量进行多目标优化求解,最优参数组合为:电机输出转速 443.77 r/min、筛孔直径 14 mm、喂入量 1.27 kg/s。验证试验表明,生产率为 5 065.98 kg/h、丝化率为 94.87%,满足高含水率苜蓿揉丝要求。

参 考 文 献

[1] 吴昆,宋月鹏.农作物茎秆切割理论与方法研究进展分析[J].农业机械学报,2022,53(6):1-20.
WU Kun,SONG Yuepeng. Research progress analysis of crop stalk cutting theory and method[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(6):1-20. (in Chinese)

[2] 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)

[3] 方梅,郁志宏,张文杰,等.盘刀式铡草机粉碎物料运动过程分析与试验[J].农业工程学报,2021,37(7):76-84.
FANG Mei,YU Zhihong,ZHANG Wenjie, et al. Analysis and experiments of the movement process for the shredded material of disc knife chaff cutter[J]. Transactions of the CSAE,2021,37(7):76-84. (in Chinese)

[4] 范国强,王忠宇,王保兴,等.旋筒供料锤式饲草粉碎机设计与试验[J].农业机械学报,2021,52(12):43-53,76.
FAN Guoqiang,WANG Zhongyu,WANG Baoxing, et al. Design and experiment of rotary feed tube hammer grinder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(12):43-53,76. (in Chinese)

[5] 郑智旗,何进,李洪文,等.动定刀支撑滑切式秸秆粉碎装置设计与试验[J].农业机械学报,2016,47(增刊):108-116.
ZHENG Zhiqi, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of straw-chopping device with chopping and fixed knife supported slide cutting[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(Supp.):108-116. (in Chinese)

[6] ZHANG J,FENG B,GUO L, et al. Performance test and process parameter optimization of 9FF type square bale straw crusher[J]. Int. J. Agric. Biol. Eng.,2021,14(3):232-240.

[7] 曹丽英,李帅波,李春东,等.锤片式饲料粉碎机的研究发展现状[J].饲料工业,2021,42(3):31-36.
CAO Liying, LI Shuaibo, LI Chundong, et al. Research and development status of hammer type feed grinder[J]. Feed Industry, 2021,42(3):31-36. (in Chinese)

[8] 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)

[9] 蒋亚军,廖宜涛,廖庆喜.冬春鲜喂饲用油菜收获机滚刀式切碎装置设计与试验[J].农业机械学报,2019,50(2):102-111.

- JIANG Yajun, LIAO Yitao, LIAO Qingxi. Design and experiment on cylinder-type chopping device of harvester for fodder rapeseed in winter and spring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 102 – 111. (in Chinese)
- [10] 刘宝, 宗力, 张东兴. 锤片式粉碎机空载运行中锤片的受力及运动状态[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7): 123 – 128.
LIU Bao, ZONG Li, ZHANG Dongxing. Force and motion states of hammer mill at unloaded running[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 123 – 128. (in Chinese)
- [11] 麻乾, 刘飞, 赵满全. 揉碎机揉碎机理分析及锤片结构优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊2): 7 – 15.
MA Qian, LIU Fei, ZHAO Manquan. Working mechanism and structure optimization of hammer of rubbing machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp. 2): 7 – 15. (in Chinese)
- [12] XU K, GE Y Y, XIAO M H, et al. Design of a straw picking and cutting device[J]. Int. J. Agric. Biol. Eng., 2021, 14(6): 93 – 98.
- [13] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(11): 165 – 171. (in Chinese)
- [14] 王铁军, 王铁良, 崔红光, 等. 喂入调节式秸秆破包揉丝机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 148 – 158.
WANG Tiejun, WANG Tieliang, CUI Hongguang, et al. Design and experiment of adjustable feeding straw bale-breaking and rubbing filament machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 148 – 158. (in Chinese)
- [15] 尤泳, 王红达, 郇晓龙, 等. 王草收获机滚筒破碎装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 134 – 142.
YOU Yong, WANG Hongda, HUAN Xiaolong, et al. Design and experiment of roller crushing device of king grass harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 134 – 142. (in Chinese)
- [16] 陈涛, 衣淑娟, 李衣菲, 等. 苜蓿现蕾期茎秆离散元模型建立与参数标定[J]. 农业机械学报, 2023, 54(5): 91 – 100.
CHEN Tao, YI Shujuan, LI Yifei, et al. Establishment of discrete element model and parameter calibration of alfalfa stem in budding stage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5): 91 – 100. (in Chinese)
- [17] 郇晓龙, 尤泳, 王德成, 等. 小型组合式王草铡切打浆机优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(3): 117 – 126.
HUAN Xiaolong, YOU Yong, WANG Decheng, et al. Optimization design and experiment on small cutting and beating machine of king grass[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(3): 117 – 126. (in Chinese)
- [18] 曹丽英, 史兴华, 汪建新, 等. 锤片式饲料粉碎机分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 128 – 133.
CAO Liying, SHI Xinghua, WANG Jianxin, et al. Design and experiment of separation device of hammer feed mill[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(11): 128 – 133. (in Chinese)
- [19] 田海清, 王海庆, 黄涛, 等. 锤片饲料粉碎机组合形筛板设计改善粉碎性能[J]. 农业工程学报, 2018, 34(22): 45 – 52.
TIAN Haiqing, WANG Haiqing, HUANG Tao, et al. Design of combination sieve for hammer feed mill to improve crushing performance[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(22): 45 – 52. (in Chinese)
- [20] 申庆泰, 金敏, 池少英, 等. 饲料粉碎机锤片磨损特征与自磨刃强化处理[J]. 农业机械学报, 2010, 41(增刊): 229 – 232.
SHEN Qingtai, JIN Min, CHI Shaoying, et al. Wear characteristics and self sharpening blade strengthening treatment of feed crusher hammer blades[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.): 229 – 232. (in Chinese)
- [21] 田海清, 屈丰富, 刘伟峰, 等. 锤片式粉碎机分段圆弧筛板设计与粉碎性能试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(4): 92 – 95.
TIAN Haiqing, QU Fengfu, LIU Weifeng, et al. Design and experiment of piecewise arc-shaped screen on hammer mill to grinding performance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(4): 92 – 95. (in Chinese)
- [22] 曹丽英, 汪阳, 李春东, 等. 提高锤片式粉碎机筛分效率的研究[J]. 饲料工业, 2020, 41(23): 27 – 33.
CAO Liying, WANG Yang, LI Chundong, et al. Research on improving the screening efficiency of hammer crushers[J]. Feed Industry, 2020, 41(23): 27 – 33. (in Chinese)
- [23] 张伟. 9RS-3 型秸秆揉丝机的设计与性能试验[D]. 太谷: 山西农业大学, 2016.
ZHANG Wei. Design and performance test of 9RS-3 straw kneader[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [24] 李松毅. 玉米秸秆揉碎装置设计与性能试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
LI Songyi. Design and performance test of corn straw crushing device[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019. (in Chinese)
- [25] 刘维岗. 秸秆粉碎特性分析及其粉碎设备结构优化[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019.
LIU Weigang. Analysis of straw crushing characteristics and optimization of crushing equipment structure[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019. (in Chinese)
- [26] 李云雁. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008.
- [27] 张涵. 苜蓿茎秆剪切特性及切割参数的试验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
ZHANG Han. Experimental study on shear characteristics and cutting parameters of alfalfa stems[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)