



Design and Experiments Research on 9GYQ Family of Forage Crusher Flattening System Equipped with Tooth-cutter

Chunhua Zhao^{1,2,*}, Ke Ping Zhang¹, Yuan Xi Deng², Aimin Gao¹

¹Mechanical and Electronic Engineering College, Gansu Agricultural University, Lanzhou, China

²Gansu Agricultural University, Lanzhou, China

Email address:

zhaochunhua20121012@foxmail.com (Chunhua Zhao), zhangkp@gsau.edu.cn (Ke ping Zhang), 872391699@qq.com (Yuan Xi Deng), Gaoaiming@gsau.edu.cn (Aimin Gao)

*Corresponding author

To cite this article:

Chunhua Zhao, Ke Ping Zhang, Yuan Xi Deng, Aimin Gao. Design and Experiments Research on 9GYQ Family of Forage Crusher Flattening System Equipped with Tooth-cutter. *Asia-Pacific Journal of Mechanical Engineering*. Vol. 2, No. 1, 2020, pp. 1-9.

Received: October 15, 2020; Accepted: October 26, 2020; Published: November 4, 2020

Abstract: Aiming at the problem of domestic forage Crusher lower adaptability, high power and unstability effect of rollers flattening in harvesting *Alfalfa*, and in order to improve practicability of forage Crusher based on the difference biomechanical characteristics between harvesting terraced dryland *Alfalfa* and irrigated *Alfalfa*, the effective power of forage Crusher flattening system equipped with Tooth-cutter was designed and application, V shape flattening device in 9GYQ family of forage Crusher were developed by using Solidworks software. Setting steel rollers with 5mm depth flattening device parameters and rubber rollers with 15mm depth were selected to orthogonal test and statistical analysis, respectively. Field tests results of 9GYQ family of forage Crusher show that: For terraced dryland *Alfalfa* Long dong, Rubber rollers were selected with initial pressure of 2200N/m, flattening gaps is adapt to 4 mm, inclination angle of 20°, respectively, and the average ratio of crushing is up to 90.77% and the loss rates of forage is up to 3.51% in field tests; For irrigated *Alfalfa*, rubber rollers were selected with initial pressure of 1650N/m, flattening gap 3 mm, inclination angle of 30°, respectively, and the average ratio of flattening is up to 91.88% and the loss rate of broken forage is up to 3.47% in field tests.

Keywords: Flattening System, Forage Crusher Equipped with Tooth-cutter, Power of Crushing, V Type of Flattening Rollers, The Ratio of Flattening, Experiment Design and Analysis

9GYQ系列齿形链割草压扁机压扁系统的设计与试验研究

赵春花^{1,2,*}, 张克平¹, 邓元喜², 高爱民¹

¹机电工程学院, 甘肃农业大学, 兰州, 中国

²甘肃农业大学, 兰州, 中国

邮箱

zhaochunhua20121012@foxmail.com (赵春花), zhangkp@gsau.edu.cn (张克平), 872391699@qq.com@gsau.edu.cn (邓元喜), Gaoaiming@gsau.edu.cn (高爱民)

摘要: 针对现有国产割草压扁机适应性不强, 功耗大, 且压扁质量不稳定等问题, 本研究基于干旱地和水浇地苜蓿草刈割期不同生物力学特性, 为提高割草压扁机实用性, 设计计算了压扁系统的应用功率, 利用Solidworks软件设计并研发了9GYQ-1.2割草压扁机和人字形压扁系统, 对压扁装置设定的人字形钢齿和人字形橡胶齿高分别设定为5 mm和15mm的条件下进行了正交试验和数据统计分析, 田间试验表明: 梯田旱地陇东苜蓿草第三年第一茬收获, 种植密度500株/米, 平均株高520毫米条件下, 较优方案选取人字形橡胶压扁辊初始压力2200N/m, 压扁间隙4mm, 压扁辊倾斜

角度20°，田间作业测试压扁率达90.77%%，碎草损失率3.51%%；水浇地三得利苜蓿草第三年第二茬收获，种植密度580株/米，平均株高764毫米条件下，较优方案选取人字形橡胶压扁辊初始压力1650N/m，压扁间隙3mm，压扁辊倾斜角度30°，田间作业测试压扁率达91.889%%、碎草损失率3.479%%。

关键词：压扁系统，齿形链割草压扁机，压扁功率，人字形压扁棍，压扁率，试验设计与分析

1. 引言

苜蓿以“牧草之王”著称，不仅产量高，而且草质优良，是我国栽培面积最大的牧草。2010年，甘肃苜蓿种植面积878万亩，具全国第一。2015年统计甘肃苜蓿种植面积已超过1000万亩，分布在西北和中东部山地和坡地的有680万亩。目前，甘肃黄土高原丘陵沟壑区山地、梯田种植的苜蓿草主栽品种生长条件恶劣，干旱梯田苜蓿草收获期植株矮粗，含蛋白低于河西地区水浇地。因地理条件等限制，目前各类坡地、梯田苜蓿草主要靠人工收获，晾晒过程中蛋白质、叶绿素、胡萝卜素、维生素等营养物质损失很大，因不能适时高效收获，获得的饲草品质极低[1-2]，严重降低了苜蓿干草的饲喂价值和商业价值。因此研发一种适用于坡地梯田规模化收获的小型山地割草压扁机迫在眉睫，其中压扁系统是割草压扁机重要系统，HongB. J. (1987)研究表明电镜下压扁茎秆效果是将木质化和非木质化细胞分开，压扁使茎秆分成许多部分，严重破坏角质层的蜡质层，从而增加茎秆表面积，降低角质层保持水分的能力。促进饲草茎叶快速同步干燥，有效保存饲草养分的最重要系统。

国外对牧草压扁（调制）部件的选择进行了比较深入的研究。相关研究结果表明，两个相向旋转的圆筒形胶辊作为调制部件，具有作业效果好、花叶损失少和很好的耐磨性等优点。调制部件的几何花纹形状对牧草的调制效果也有较大影响[3-6]。

2. 压扁系统总体设计与原理

割草压扁机压扁系统主要由压扁辊、传动系统、V型压扁间隙调节装置、机架以及导草、输草装置等组成。压扁辊安装时两个压扁辊轴心线平行，轴心线所构成的平面与地平面成一定的倾角。压扁间隙调节装置根据上、下压扁辊之间牧草喂入量，通过V型杆焊合件即浮动梁自动调节压扁间隙的大小。牧草茎秆经过上、下压扁辊的挤压之后，再通过输草板以均匀厚度的草条输出。压扁装置示意图如图1所示，其配套割草机技术参数如表1所示。

表1 9GYQ-1.2割草压扁机技术参数。

参数名称	数值
幅宽/mm	1200
整机重量/kg	320
配套动力/kW	14.7kW四轮拖拉机
作业速度/(km/h)	13.1
切割速度/(m/s)	7.5
总损失率%	≤4
压扁率%	≥90

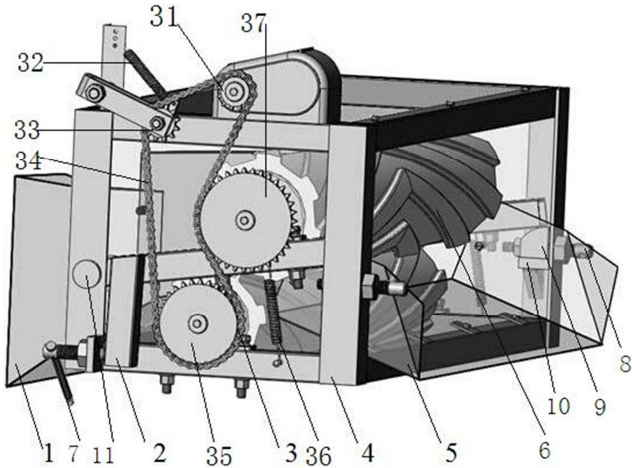


图1 压扁系统示意图。

1. 输草板；2. V型杆焊合件；3. 传动系统 31. 动力输入链轮；32. 张紧弹簧；33. 自动张紧链轮34. 链条35. 下压扁辊链轮36. 预紧弹簧37. 上压扁辊链轮4. 机架5. 导草板 6. 压扁辊9. 限位滑块10. 滑块底座11. 铰接轴组件。

2.1. 压扁装置传动系统

压扁装置的传动系统如图1所示。主机将动力输送到动力输入链轮上，上、下压扁辊转向相反，从而使压扁辊在啮合处的线速度方向相同。由于上压扁辊是浮动的，可根据喂入牧草厚度自动调节压扁间隙，这可能会使链条松边产生显著振动、跳齿和脱链等问题。而设计自动张紧轮能够自动调节链条的张紧力，从而保证了链条不松脱和链传动系统的稳定性。

2.2. 压扁系统传动设计

压扁链传动的设计主要包括压扁辊转速的确定、上下压扁辊链轮传动比的计算以及链传动的布置与张紧等。

压辊转速的确定

根据《中国畜牧业机械化》^[5]压扁辊的圆周线速度 V_y 应大于机器最大前进速度 V_m 的3倍以上，即： $V_y/V_m \geq 3$ ，9GYQ-1.2前悬挂割草压扁机配套动力为14.7kW拖拉机，输出转速2200r/min。由公式：

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{Z_2}{Z_1}$$

式中： n_1 ——输入轴的转速

n_2 ——上、下压扁辊的转速

Z_1 ——输入轴小链轮齿数

Z_2 ——上、下压扁辊链轮齿数

设计计算得：

$$n_2 = \frac{2000 \times 12}{30} = 800 \text{ r/min}$$

2.3. 压扁系统功耗及传动效率的计算

假设牧草喂入压辊时厚度均匀,建立了带有人字形的圆筒形压扁辊对牧草压扁的模型,模型中圆筒中心线的法向截面如图2所示。

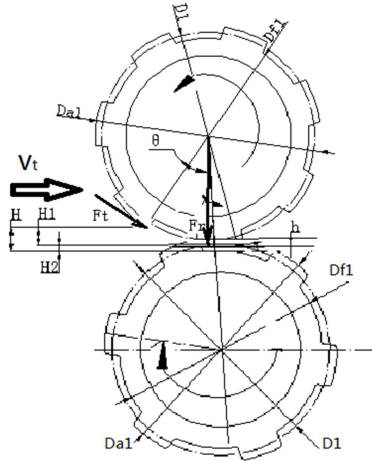


图2 压扁辊的法向截面图。

压扁辊对牧草的作用力分解为沿压扁辊表面切线方向的圆周力 F_t 和过压扁辊轴心且与圆周力垂直的法向力 F_r , 假设牧草匀速进入压扁辊, 且忽略牧草的质量, 压扁辊受到的合力为:

$$F = \frac{F_r}{\cos\theta}$$

式中: θ ——截面压力角。

由力的合成定理可得:

$$F_t = F_r \tan\theta$$

由文献[6]苜蓿压扁辊的压力、干燥速率、收获损失及干物质含量之间关系研究表明,在每米宽度上两个压扁辊对苜蓿的压力为1200~1570N时综合作业效果最好。取 F_r 最大值,即 $F_r = 1570 \text{ N}$, 则由:

$$\begin{aligned} \frac{F_t}{F_r} &= \tan\theta \\ \cos\theta &= \frac{1}{\sqrt{1+\mu^2}} \end{aligned}$$

式中: μ —牧草与钢辊之间的摩擦系数。取 $\mu = 0.25$ 代入得:

$$F_t = 393.5 \text{ N}$$

$$F = 1618.5 \text{ N}$$

$$\theta = 14.07^\circ$$

当压辊作业时,作用于其上的最大扭矩:

$$T = F_t \times D_a / 2 \times 10^3$$

式中: D_a ——压扁辊齿顶圆直径。设计计算得:

$$T = 37.58 \text{ N.m}$$

则压扁辊所需功率:

$$P_1 = \frac{T n_1}{9550} = \frac{37.58 \times 442.34}{9550} = 1.74 \text{ kW}$$

压扁系统是链轮带动的,其总传递效率取链轮传动效率 $\eta_1 = 0.97$, 则压扁系统总传递效率 η 为:

$$\eta = \eta_1 \times \eta_2 = 0.94$$

则压扁系统的功率:

$$p = \frac{P_1}{\eta} = \frac{1.74}{0.94} = 1.851 \text{ kW}$$

2.4. 压扁间隙调节装置[7-11]的设计与研究

压扁间隙调节装置如图1所示,V型杆焊合件通过铰接轴组件铰接在压扁装置机架上,其端部的底面与装在滑块底座的限位滑块上表面相贴合,限位滑块上表面呈半径 R 为 80~120mm 的圆弧面;通过转动后调节组件上的调节手柄,带动螺杆转动,从而实现上压辊和下压辊间固定间隙的粗调节;再以同样的操作方式使前调节组件上的螺杆转动,带动限位滑块移动,使其与V型杆焊合件紧紧接触,实现固定间隙的精调节,间隙调节范围0~5mm。当有障碍物堵塞或通过压扁辊时,不用停机清理或调节压扁间隙,上压辊受压自动转离,使障碍物迅速通过压扁辊;待障碍物通过后,在预紧弹簧作用下下压辊回到原位,压扁辊恢复正常作业。

根据压扁辊作业性能,人字形橡胶压扁辊齿高如果太小,抓取能力和对牧草的折弯压扁程度降低;如果齿高太大,在保证上、下压扁辊最小工作间隙1.0~1.5mm 情况下,上、下压扁辊的人字形容易发生根切,并且容易把牧草挤折断。经过solidWord模态啮合分析干涉检测如图3,并结合压扁辊人字形加工工艺难度^[12],橡胶式压扁辊选取齿高为 $e_1 = 15 \text{ mm}$,钢式压扁辊选取齿高为 $e_2 = 5 \text{ mm}$ 。

3. 正交设计和试验

研究表明[13-18],影响割草压扁机压扁效果的因素有很多,如压扁辊的表面结构和材料、布置方式、牧草喂入量、安装角度、压扁间隙、压扁辊初始压力、压扁辊转速、拨禾轮转速、牧草生长状况等多种因素。本研究以表2确定的4种因素作为主要因素。

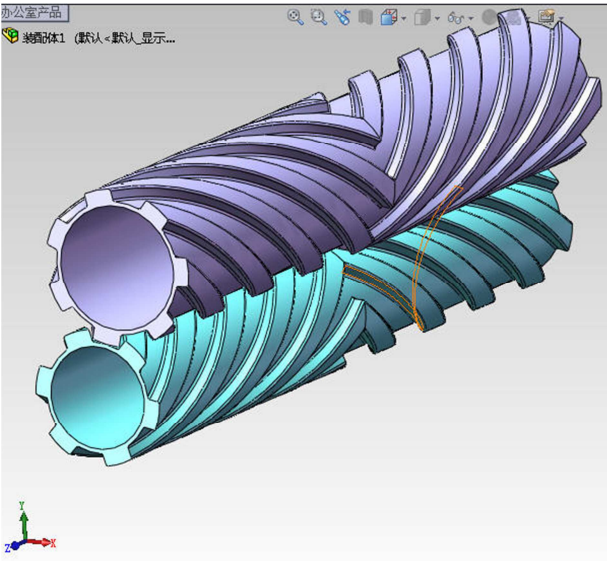


图3 模拟压扁系统和干涉检测。

3.1. 确定各因素水平

因素A:压扁辊的表面结构和材料等对压扁效果影响很大,采用人字形橡胶压扁辊和人字形钢压扁辊两种辊型进行试验,两种压扁辊布置形式相同,表面齿深和材料不同,如图2所示。因素B:压扁辊初始预紧力决定着压扁辊对牧草茎秆的压力大小。改变预紧弹簧的预紧拉力来改变压扁辊的初始压力。因素C:压扁间隙是影响压扁质量的重要因素之一。因素D:所谓压扁辊倾斜角度 θ 是指连接上下压扁辊轴线的直线与通过下压扁辊轴线的垂线之间的夹角,倾斜角度过大、过小都可能会降低压扁辊的喂入能力,导致在压扁辊喂入口堆积。

3.2. 正交试验

因素A:压扁辊的表面结构和材料等对压扁效果影响很大,采用人字形复合工程塑胶压扁辊(硬度HBS75,磨耗190)、人字形橡胶压扁辊(石墨复合橡胶硬度HBS85,磨耗220)齿压扁辊和人字形钢齿压扁辊三类材质压辊进行压扁质量试验研究,三类材质压扁辊布置形式相同,表面齿深不同,如图4所示。因素B:压扁辊初始压力大小直接决定着压扁辊对牧草的压力大小。改变预紧弹簧的预紧拉力来改变压扁辊的初始压力。因素C:压扁间隙是影响压扁效果的重要因素之一。因素D:所谓压扁辊倾斜角度 θ 是指连接上下压扁辊轴线的直线与通过下压扁辊轴线的垂线之间的夹角,倾斜角度过大、过小都可能会降低压扁辊的喂入能力,导致在压扁辊喂入口堆积。所述的压扁辊倾角范围分别为 $25^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 和 $15^{\circ}\sim 45^{\circ}$ 。本正交试验设计3组不同的倾角 35° 、 15° 、 25° ,即因素D的3种不同水平。构成L9(34)表,由此列出正交试验因素与水平表如表2所示。



a. 复合胶棍 b. 高密度橡胶棍 c.钢板焊接压扁辊

图4 人字形压扁辊结构和材料对比。

表2 试验因素水平。

因素	A 表面结构和材料	B 初始压力/(N/m)	C 压扁间隙/mm	D 倾斜角度/斜角
水平				
1	高密度橡胶棍	1600	2	35
2	胶棍	1400	3	15
3	钢棍	1200	4	25

3.3. 试验研究

3.3.1. 试验条件

将加工好的压扁装置应用于9GYQ-1.2齿刀链椭圆盘割草压扁机上,并进行田间苜蓿收获试验,测定压扁率和碎草损失率两项指标。由于苜蓿的含水率;茎秆年、茬、次和直径大小、生长密度等会影响压扁质量及压扁率关键指标,因此本试验分别对定西安定区青岚乡梯田旱地第七年陇东苜蓿第一茬、兰州大洼山牧草试验基地水浇地第三年第三茬紫花苜蓿进行了分批次三类压扁辊压扁质量试验研究。

3.3.2. 试验所需器材

试验中需要测量苜蓿的含水量、茎秆直径、生长密度,需备烘干箱、电子称、游标卡尺、卷尺、采样袋等器材,在调节各试验因素的水平时需要测量预紧弹簧拉力、压扁间隙和压扁辊倾斜角度,需拉力测量仪、间隙尺和角度尺等测量工具;记录测量数据和统计分析等。

3.3.3. 田间作物生长状况调查

为了解不同生长条件下的苜蓿对压扁率和碎草损失率的影响,在试验前对苜蓿的含水率、茎秆直径和生长密度进行测量。按照行业标准《牧草收获机械试验方法通则》^[19-20]规定的测量方法进行测量,测量结果如下表3、表4、表5所示。

表3 苜蓿的含水率。

测量项目	组别	状态	重量 (g)	含水率(%)	平均含水率(%)
梯田旱地陇东苜蓿	1	湿重	211.52	70.29%	67.71%
		干重	62.84		
	2	湿重	197.76	65.02%	
		干重	69.18		
	3	湿重	205.32	67.82%	
		干重	66.07		
水浇地三得利苜蓿	1	湿重	196.11	79.51%	76.68%
		干重	40.18		
	2	湿重	189.68	75.20%	
		干重	47.04		
	3	湿重	201.40	75.33%	
		干重	49.69		

表4. 苜蓿的茎秆直径。

项目	组别	1	2	3	4	5	6	7	8	9	平均直径 (mm)
梯田旱地		1.5	3.5	2.5	2.2	2.9	2.5	2.9	3.0	1.9	2.49
水浇地		3.3	2.5	2.8	2.2	3.4	2.8	1.4	2.1	2.1	2.45

表5. 苜蓿的生长密度。

测量项目	组别	密度 (株/m²)	平均密度 (株/m²)
梯田旱地陇东苜蓿	1	457	520
	2	496	
	3	489	
	4	491	
	5	545	
水浇地三得利苜蓿	1	723	764
	2	761	
	3	788	
	4	778	
	5	770	

下压扁辊通过轴承座安装在机架固定梁上，上压扁辊则通过轴承座安装在V型杆焊合件上，V型杆焊合件可绕铰接轴转动。预紧拉簧安装在V型浮动梁一端，弹簧两端分别挂接在V型杆焊合件和固定梁上，并由一定的预紧拉力施加在V型杆焊合件上。压扁装置依据喂入量的多少，在上浮动压扁系统和压扁辊自身重力作用下和预紧弹簧拉力的共同作用而浮动柔和压裂茎秆。

3.3.4. 试验数据的测量方法

本次试验如图5所示，主要研究2个试验指标——压扁率Yb和碎草损失率Scy。



图5 9GYQ齿形链割草压扁机田间试验照片。

(1) 压扁率Yb的测定

测定区内单位面积收获牧草中，被压扁苜蓿的质量与单位面积实际收获苜蓿质量之比为压扁率^[17-18]。每点沿割草压扁机前进方向取1m长，

$$Y_b = \frac{g_b}{g_a} \times 100$$

式中：Yb ——压扁率，%；
每一行程等间距测量两处，并按式（2-1）计算：
ga ——单位面积实际收获的苜蓿质量，（g/m²）；
gb ——单位面积实际收获的苜蓿中被压扁的牧草质量，

（2）碎草损失率Scy的测定

按照行业标准GB/T 21899-2008规定测试单位面积内由重割、拨禾、压扁、铺条工作过程形成的碎草质量与单位面积可收获牧草质量之比为碎草损失率。对于碎草损失率只测量计算单位面积内由压扁和铺条工作过程形成的碎草质量与单位面积实际收获苜蓿质量之比。测量方法是：在每一行程等间距测量两处，每处沿割草压扁机前进方向取1m长，从单位面积可收获的苜蓿草中获取地面未被收获的碎、短植株和压扁过度流果胶等小于3cm的苜蓿草，称其质量并换算成单位面积的损失量。按式（2-2）进行计算：

$$S_{cy} = \frac{g_{cy}}{g_b} \times 100$$

式中： S_{cy} ——收割、压扁，集条铺放等碎草损失率，%。**3.3.5. 试验数据的记录**
 g_{cy} ——单位面积内由收割、压扁和铺条等工作过程形成的总碎草质量，（ g/m^2 ）。按照上述试验数据测量方法，结果如表6、表7所示。

表6 梯田旱地苜蓿试验记录数据。			
试验编号	测量项目 单位面积实际收获的苜蓿质量 g_a (g/m^2)	单位面积收获苜蓿中被压扁的牧草质量 g_b (g/m^2)	单位面积内由压扁和铺条工作过程形成的碎草质量 g_{cy} (g/m^2)
1	1720	1208.30	32.68
2	1650	1383.36	41.58
3	1440	1342.08	46.80
4	1720	1454.43	47.30
5	1925	1844.54	82.77
6	1670	1613.22	120.74
7	1715	1392.41	27.78
8	1690	1475.88	42.25
9	1525	1452.56	53.24

表7 水浇地苜蓿试验记录数据。			
试验编号	测量项目 单位面积实际收获的苜蓿质量 g_a (g/m^2)	单位面积收获苜蓿中被压扁的牧草质量 g_b (g/m^2)	单位面积内由压扁和铺条工作过程形成的碎草质量 g_{cy} (g/m^2)
1	1810	1534.70	32.22
2	1725	1556.98	47.09
3	2150	1980.58	73.75
4	1975	1589.09	50.56
5	1690	1388.0	65.23
6	1875	1740.37	130.50
7	2320	1931.17	18.10
8	2015	1828.81	69.11
9	1825	1739.77	105.49

计算每组试验的试验指标值如表8、表9所示。

表8 梯田旱地苜蓿试验指标值。									
试验编号 \ 测量项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9
压扁率 Y_b (%)	70.25	83.84	93.20	84.56	95.82	96.60	81.19	87.33	94.14
碎草损失率 S_{cy} (%)	1.90	2.52	3.25	2.75	4.30	7.23	1.62	3.15	4.87

表9 9GYQ-1.2割草压扁机水浇地测苜蓿草指标。										
试验编号\测量项目	1	2	3	4	5	6	7	8	9	平均%
压扁率Y _b (%)	89.80	90.26	92.12	90.46	92.13	92.82	93.24	90.76	95.33	91.89
碎草损失率S _{cy} (%)	1.78	2.73	3.43	2.56	3.86	6.96	0.78	3.43	5.78	3.479

4. 试验数据分析

结合各试验因素与水平，梯田旱地陇东苜蓿的试验结果数据见表10所示，水浇地三得利苜蓿的试验结果数据见表11所示

表10 旱地梯田9GYQ-1.2型割草压扁机收获苜蓿草田间性能试验主要参数。							
试验	因素	1	2	3	4	试验指标测试结果	
		A	B	C	D	压扁率 Y_b	碎草损失率 S_{cy}
1		1	1	1	1	70.25	1.90
2		1	1	2	2	83.84	2.52
3		1	1	3	1.90	93.20	3.25
4		2	2	1	3	84.56	2.75
5		2	2	3	1	95.82	4.30
6		2	2	3	2	96.60	7.23
1.9		3	1	1	2	81.19	1.62
8		3	1	2	3	87.33	3.15
9		3	1	3	1	94.14	4.87
压扁	K_1	509.95	236.0	254.18	260.21		
	K_2	279.98	266.99	262.54	261.63		
	K_3		283.94	270.21	265.09		

因素		1	2	3	4	试验指标测试结果	
		A	B	C	D	压扁率 Y_b	碎草损失率 S_{cy}
率	k1	1.90	78.667	84.727	86.737		
	k2	92.327	92.327	87.513	87.210		
	k3		92.327	90.070	88.363		
	极差	7.335	15.980	5.343	1.626		
	优方案	$A_2B_3C_3D_3$					
	K1	17.31	6.27	12.28	11.07		
	K2	14.28	9.97	10.14	11.37		
	K3		15.35	9.17	9.15		
	k1	2.885	2.090	4.093	3.690		
	k2	4.760	3.323	3.380	3.790		
碎草损失率	k3		5.117	3.057	3.050		
	极差	1.875	3.027	1.036	0.740		
	优方案	$A_1B_1C_3D_3$					

表11 水浇地9GYQ-1.2型割草压扁机收获苜蓿草田间性能试验主要参数

		1	2	3	4	试验指标测试	
		A	B	C	D	压扁率 Y_b	碎草损失率 S_{cy}
1		1	1	1	1	84.79	1.78
2		1	1	2	2	90.26	2.327
3		1	1	3	3	92.12	3.43
4		2	2	1	2	80.46	2.56
5		2	2	2	3	82.13	3.86
6		2	2	3	1	92.82	6.96
7		3	1	1	2	83.24	0.78
8		3	1	2	3	90.76	3.43
9		3	1	3	1	95.33	5.78
压扁率	K1	536.50	248.49	268.37	262.25		
	K2	255.41	263.15	266.05	266.32		
	K3		280.27	257.49	263.34		
	k1	89.417	82.830	89.457	87.417		
	k2	85.137	87.717	88.683	88.773		
	k3		93.423	85.830	87.780		
	极差	4.280	10.593	3.627	1.356		
	优方案	$A_1B_3C_1D_2$					
碎草损失率	K1	17.93	92.327	12.17	11.42		
	K2	13.38	10.02	11.07	10.47		
	K3		16.17	8.07	9.42		
	k1	92.327	92.327	4.057	3.807		
	k2	4.460	3.340	3.690	3.490		
	k3		5.390	2.690	3.140		
	极差	1.472	3.683	1.367	0.667		
	优方案	$A_1B_1C_3D_3$					

如表10所示的压扁率的极差分别7.335、15.980、5.343、1.626，说明因素B对压扁率影响最大，因素A、C次之，D对压扁率的影响最小；对压扁率来说，k值越大，表示工作性能越好；对碎草损失率来说，k值越小，表示工作性能越好。因素B的3个水平所对应的压扁率平均值分别为78.667、88.997、94.647，从以上分析可以得出旱地苜蓿压扁率最高的优选方案是： $A_2B_3C_3D_3$ ，碎草损失率最低的优选方案是： $A_1B_1C_3D_3$ ，综合考虑GB对割草压扁机作业质量要求和正交试验排列方案，应选 $A_1B_3C_3D_3$ 为最优方案，即旱地苜蓿应选人字形橡胶压扁辊，初始压力2200N/m，压扁间隙4mm，倾斜角度20°；对于水浇地苜蓿试验：压扁率最高的优选方案是： $A_1B_3C_1D_2$ ，碎草损失率最低的优选方案是： $A_1B_1C_3D_3$ ，综合考虑作业质量要求，水浇地苜蓿草收获最优方案应选人字形橡胶压扁辊，初始压力1650N/m，压扁间隙3mm，倾斜角度30°，即方案 $A_1B_2C_2D_2$ 。

5. 试验结论

(1) 通过多因素正交试验设计和分析及田间作业质量评价标准可以确定9GYQ-1.2前悬挂割草压扁装置作业质量最优组合方案为：对梯田旱地苜蓿，种植密度475株/米²，平均株高520毫米，人字形橡胶压扁辊初始压力1400（N/m），压扁间隙4mm，倾斜角度25°；中国农业科学院兰州大洼山水浇地收获第三年第三茬苜蓿，种植密度554株/米，株高拉直平均764毫米，人字形橡胶压扁辊初始压力1400（N/m），压扁间隙3mm，倾斜角度25°时收获质量最佳。

(2) 基于前十年牧草生物力学特性研究 [21~24]和田间作业质量要求，不同生长环境条件下苜蓿的含水量和生物力学及显微组织结构不同，从而呈现出不同的压扁特性

和所需的压扁力, 表10和3.2研究表明: 人字钢齿压扁辊或橡胶压扁辊较适用于旱地梯田苜蓿草的压扁作业, 因压扁齿加工误差及焊接变形等累计误差而碎草损失大于人字形胶辊; 作业在水浇地收获高密度苜蓿时, B因素在平均1400N/m初始压力能够较好将细柔高产苜蓿草柔和压扁; 对于因素C, V型浮动双向调节压扁间隙组件与收获苜蓿草喂入量和茎秆物理力学特性有关, 依据收获苜蓿草种植密度压扁间隙调节范围为3mm~4mm时, 压扁质量高, 碎草损失率低; 设有"V"型双向上、下人字形胶压扁辊收获苜蓿草时, 上下胶辊安装倾角度为25°时能更好的将苜蓿草抓取喂入。

(3) 对于碎草损失率, 水浇地梯田旱地苜蓿试验, 钢辊的碎草损失率平均值k均大于橡胶辊的碎草损失率平均值k, 故因素A压扁辊的表面结构和材料是影响压扁质量的重要因素, 通过采用倾斜角25°、齿高15mm的人字形胶压扁辊收获旱地梯田苜蓿草可以降低碎草损失率, 获得较高的压扁率。

(4) 综上正交试验结果分析, 旱地梯田和水浇地收获苜蓿草的最优方案都是3号为较优方案, 即: 9GYQ-1.2前悬挂齿形链割草压扁机设置人字形胶压扁辊, 上下压辊安装角度25°, 初始压力为1400N, 依据苜蓿种植密度, 压扁间隙调节为4mm时, 梯田旱地苜蓿压扁率分别为90.77%、碎草损失率3.51%; 水浇地苜蓿草压扁率91.89%、碎草损失率3.48%, 田间作业关键指标均优于行业标准。

致谢

第一作者感谢本论文受助于甘肃省农村处重点专项(17YFNA061)和省伏羲杰出人才项目(FXRC20131117)的资助、农业部公益行业(重点)专项(201203024)子任务和国家自然科学基金(51565002)项目的支持。

参考文献

- [1] Kung L, Stough E C, McDonell E E, etc. The effect of wide swathing on wilting times and nutritive value of Alfalfa Journal of Dairy Science, 2010, 93 (4): 1770-1773.
- [2] 杨明韵. 切割压扁机的发展及特点[J]. 内蒙古农牧学院学报, 1982 (1): 139-157.
- [3] 单贵莲, 薛世明, 郭盼, 等. 刈割时期和调制方法对紫花苜蓿干草质量的影响[J]. 中国草地学报, 2012, (5): 28~33.
- [4] Wangchenje, Zhou he, etc. Path analysis of the population characters to crude protein during Alfalfa [J]. ACTA PRATACULTURAE SINICA, 2005, 14(3), 78~81.
- [5] Zhao Chunhua, Han Zhengsheng, Shi Shangli, ec al. Mechanical properties and microstructure of new species forage stems in harvesting periods[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(7): 179~183.
- [6] Phani K. Adapa, Greg J. Schoenau, Edwin A. Arinze. Fractionation of Alfalfa into Leaves and Stems using a Three Pass Rotary Drum Dryer [J]. Biosystems Engineering, 2005, 91 (4): 455~463.
- [7] 赵春花等, 甘肃农业大学. 一种前悬挂齿刀链椭圆盘割草调制机: 中国, ZL201510577332.0[P]. 授权日2019-07-26.
- [8] 高东明, 王德成, 郝丽颖, 等. 割草压扁机的调制机构设计与试验 [J]. 江苏大学学报, 2013, 34 (3): 287-292.
- [9] Fu Zuo li, etc. Study on cutting system for Two Discs Mower Conditioner [D], Doctoral dissertation of Chinese Agriculture University, 2014.6.
- [10] 赵春花等, 甘肃农业大学. 一种割草压扁机压扁间隙调节装置: 中国, ZL201410012231.4 [P]. 授权日2016-09-27.
- [11] 赵春花等, 甘肃农业大学. 一种坡地仿形割草压扁机传动系统: 中国, ZL201320197941.X [P]. 2013-10-09.
- [12] 卞鲁平, 赵春花*, 马世伦. 割草压扁机人字形橡胶压扁辊的加工方法[J]. 甘肃农业大学学报, 2014, 49 (5): 176-180.
- [13] Ahmad Khalilian, David Batchelder, Galen McLaughlin. Forage drying using hard crushing and binders [J]. Transactions of the ASAE, 1985, 28 (5): 1225-1228.
- [14] Kondratyev, V.N; Bobko, VA. The influence of the kinematic parameters of the cutting device mower on performance of cutting and grinding herds MelnopatsnR: haychhbln xyphal: 2011. (2): 47~56.
- [15] Savoie P, Asselin N, Lajoie J, Tremblay D. Evaluation of intensive forage conditioning with a modified disk mower [J]. Applied Engineering in Agriculture, 1997, 13 (6): 709~714.
- [16] Koegel R G, Fomin V I, Bruhn H D. Roller maceration and fractionation of forages [J]. Transactions of the ASAE, 1973, 16 (9): 236~240.
- [17] 赵建柱, 郭海林, 王枫辰, 等. 苜蓿草压扁试验台设计与试验[J]. 农业机械学报, 2014, 45 (11), 119~124.
- [18] CZ. 卡那沃依斯基(波兰). 收获机械 [M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1983: 302~307.
- [19] JB/T 9700-1999 牧草收获机械试验方法通则 [S].
- [20] 20. GB/T 21899-2008 割草压扁机[S].
- [21] 赵春花, 张锋伟, 韩正晟. 匍匐缠绕牧草收割期茎秆生物力学特性试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 65~69, 92.
- [22] Zhao Chunhua, Hanzhengsheng, Wangfenge. Experiment on Biomechanical Properties of Bottom Stems of Forage in harvesting period [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41 (4): 85~89, 100.
- [23] Zhao Chunhua, Wu Jianming, Cheng Zi yong, etc. Research on Mechanical Properties and Chemical Compositions of Bottom Stems of Alfalfa in Harvesting Period [C] // International Conference on Science and Technology, 2011, 1350~1355.

- [24] 赵春花等.牧草生物力学与草业机械耦合通用数据库系统 V3.0[P]. 中国国家版权局软件著作登记: 2015SR190150, 2015.9.