

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.030

秸秆铡切揉搓装置优化设计与试验^{*}

袁洪方 王德成 王光辉 付作立 蔡桑妮 梁 方
(中国农业大学工学院, 北京 100083)

【摘要】 利用自行设计的秸秆铡切揉搓试验台,以刀刃形状、喂入速度、锤片数量和主轴转速为变量,对含水率约为75%的玉米秸秆进行四因素三水平正交试验,得出该铡切揉搓装置的最优组合参数为:主轴转速为1 000 r/min、刀齿为多齿、锤片数量3个、喂入速度为0.88 m/s。该机构揉搓高水分玉米秸秆时,破节率大于96%,揉搓效果好。将传统的凸型刀刃加工成锯齿形状,可以提高揉搓机构生产率。

关键词: 秸秆 铡切 揉搓装置 正交试验 优化设计
中图分类号: S817.12⁺4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)S0-0153-05

Design and Experiment of Straw Cutting and Rubbing Process Device

Yuan Hongfang Wang Decheng Wang Guanghui Fu Zuoli Cai Sangni Liang Fang
(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract

A test-bed was designed for cutting and rubbing straw, an experiment was carried out by cutting and rubbing corn straws with 75% moisture content. By means of orthogonal experimental analysis, the best parameters of this device were as follows: the spindle speed of 1 000 r/min, multiple saw cutting blade, three hammers and feeding speed of 0.88 m/s. The result shows that when cutting and rubbing corn straw with 75% moisture content, the breaking rate is higher than 96%.

Key words Straw, Cutting, Rubbing equipment, Orthogonal experiment, Optimal design

引言

研究表明,经切短和粉碎揉搓处理后的秸秆,便于家畜咀嚼,减少能耗,同时也可提高采食量,并减少饲喂过程中的饲料浪费^[1-2]。铡切揉搓装置对于秸秆饲料加工机械有着重要的研究意义。

本文利用自行设计的秸秆铡切揉搓试验台,以刀刃形状、喂入速度、锤片数量和主轴转速为变量,对玉米秸秆进行揉搓试验,以研究不同变量对揉搓装置作业性能的影响。

1 试验台结构与原理

1.1 工作原理

如图1所示,该铡切揉搓机构试验台由自动喂料装置、揉搓装置、出料装置、上喂入辊、下喂入辊、

主电动机和调速电动机组成,进行饲草、秸秆揉切作业时,先开启主电动机,至主轴运转正常,再开启调速电动机,至自动喂料装置运转正常。物料由自动喂料装置运送,经上、下喂入辊送入揉搓室,经过揉搓装置先切断再揉搓后,由出料装置排出。主电动机控制揉搓装置主轴转速,通过更换不同传动比的带轮改变主轴转速,下喂入辊动力由调速电动机提供,可以通过改变喂入辊转速,调节物料喂入速度。

1.2 铡切揉搓装置

秸秆铡切揉搓试验装置(图2)主要由主轴、动刀固定板、动刀、锤片、齿板、送料板、出料口、壳体等部分组成,动刀固定板上安装有3组动刀片,物料进入该装置后首先进行切断作业,锤片通过销轴安装于动刀固定板和送料板之间,共3个销轴,每个销轴之间安有3组锤片,在下壳体处安装有齿板,与锤片

收稿日期: 2012-07-07 修回日期: 2012-08-06
^{*} 现代农业产业技术体系建设专项资金资助项目(CARS-35)
作者简介: 袁洪方, 博士生, 主要从事草业机械研究, E-mail: yhf1984828@163.com
通讯作者: 王德成, 教授, 博士生导师, 主要从事畜牧业机械研究, E-mail: wdc@cau.edu.cn

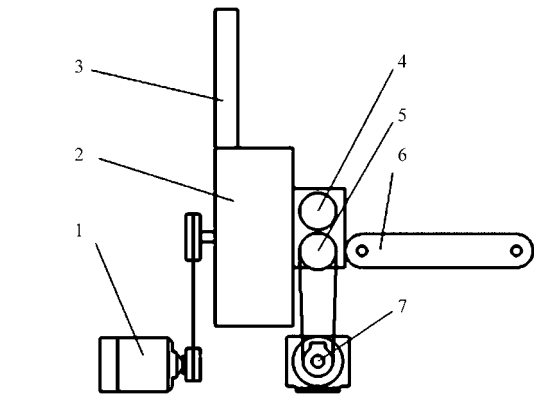


图1 铡切揉搓机构试验台简图

Fig. 1 Cutting and rubbing test-bed

1. 主电动机 2. 铡切揉搓装置 3. 出料装置 4. 上喂入辊
5. 下喂入辊 6. 自动喂料装置 7. 调速电动机

共同完成揉搓秸秆作业,同时对揉搓后的秸秆有导向作用,在送料板和气流的抛送作用下,将物料由出料口排出。

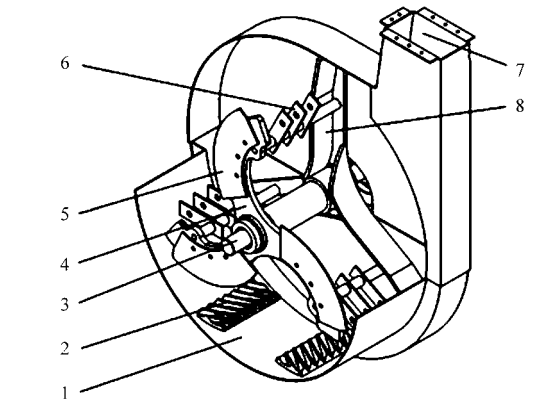


图2 铡切揉搓装置简图

Fig. 2 Cutting and rubbing device

1. 壳体 2. 齿板 3. 主轴 4. 动刀固定板 5. 动刀 6. 锤片
7. 出料口 8. 送料板

1.3 动刀片

动刀片选择凸刃口切刀(图3),滑切作用较好,负荷较均匀,刀片选用65Mn制作^[3],刃口宽度小于0.2 mm,刃口部分进行淬火和回火处理,刀片半径241 mm^[4],刃角16°,动刀与定刀间隙小于2 mm,锯齿形刀是在凸刃口切刀基础上,加工成带有锯齿形状的切刀(图4)。凸刃口切刀设计公式为

$$R = R_1 + \frac{1}{2} \delta_R = \frac{\sqrt{(b+c)^2 + h^2} (\sin \tau_{\max} - \sqrt{\sin^2 \tau_{\max} - \sin^2 \tau_{\min}})}{\sin^2 \tau_{\min}} + \frac{1}{2} \delta_R \tag{1}$$

式中 R ——偏心圆弧半径,mm
 $b、c、h$ ——喂入口的宽度及配置尺寸,mm
 $\tau_{\max}、\tau_{\min}$ ——切刀的最大和最小滑切角,常取
 $\tau_{\max} \leq 55^\circ, \tau_{\min} \geq 30^\circ$

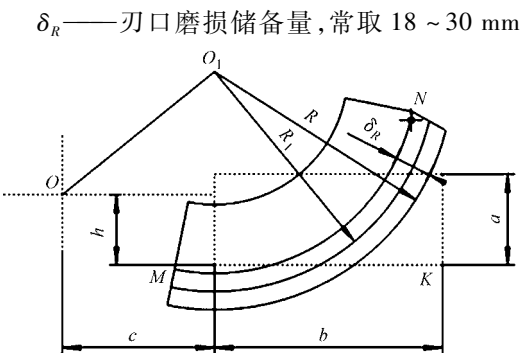


图3 凸刃口切刀结构图

Fig. 3 Sketch of cutting blade with convex edge

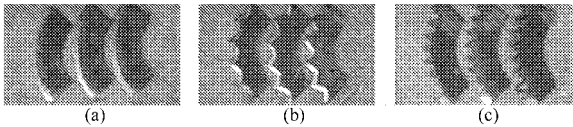


图4 不同形状切刀实物图

Fig. 4 Different shape of cutting blades

- (a) 无齿凸刃口切刀 (b) 少齿切刀 (c) 多齿切刀

1.4 锤片

锤片是揉搓过程的主要工作部件,易磨损,因此材料选用65Mn钢制造,并进行淬火处理,锤片厚度3 mm^[5]。

2 试验方法

选取甘肃丰玉4号玉米秸秆为试验物料,测得物料的含水率约为75%,以刀刃形状、喂入速度、锤片数量和主轴转速为变量(编码值为A、B、C、D),每个变量选取3个水平(表1),选用正交表L₉(3⁴)^[6]安排试验(表2),以纯工作小时生产率、千瓦时生产量和破节率作为综合评价指标,找出秸秆铡切揉搓最佳工艺参数以及影响其工作效果的主要因素。

每组试验秸秆称量50 kg,待机器运转平稳后,连续不断地喂料,保证每次喂料频率与质量一致,试验过程中始、中、末3个阶段分别接样品约100 g,同时记录试验时间、能耗,重复3次试验,试验参数测定如下:

(1) 物料相对含水率

从待铡玉米秸秆不同处取样3次,每次抽样约50 g,去除玉米秸秆和谷草中的铁钉、砖石、木枝等硬杂物,保证物料纯净,求得3份试样的含水率^[7],再对玉米秸秆的含水率求平均值,每份试样含水率计算公式为

$$H_{ci} = \frac{G_{si} - G_{gi}}{G_{si}} \times 100\% \tag{2}$$

式中 H_{ci} ——第*i*份物料相对含水率,%
 G_{si} ——第*i*份物料干燥前样品质量,g
 G_{gi} ——第*i*份物料干燥后样品质量,g

表 1 因素水平
Tab.1 Factor level

水平	因素			
	刀刃 形状	喂入速度 /m·s ⁻¹	锤片 数量	主轴转速 /r·min ⁻¹
1	无齿	0.59	1	800
2	少齿	0.88	2	1 000
3	多齿	1.18	3	1 200

(2) 纯工作小时生产率

称取待铡切物料质量,记录为 G ,用秒表记录从喂入开始至喂入结束的时间,记为纯工作时间 t_c 。纯工作小时生产率计算公式为^[7]

$$E_c = \frac{G}{t_c} \frac{1 - H_c}{1 - H}$$
 (3)

式中 H_c ——物料相对含水率,%

H ——物料标准含水率,取 17%

(3) 千瓦时生产量

千瓦时生产量计算公式为^[7]

$$g_a = \frac{G}{W} \frac{1 - H_c}{1 - H}$$
 (4)

式中 W ——纯工作时间内的耗电量,kW

(4) 破节率

以小样中带节草为测定依据。在测试的始、中、末阶段,从出草筒口处各接样 3 次,混合后十字交叉法取出小样 100 g,计算始、中、末各阶段各自的破节率^[7],再计算平均值,破节率计算公式为

$$S_p = \frac{G_p}{G_i} \times 100\%$$
 (5)

式中 S_p ——每阶段破节率,%

G_p ——小样中节草被压扁或破成两瓣以上的带节草的总质量,g

G_i ——小样中带节草总质量,g

3 结果与分析

3.1 极差分析

为了判断各因素主次、优水平及最优组合,对测试结果进行极差分析(如表 2 所示),结果表明,揉搓含水率约为 75% 的玉米秸秆时,影响因素的主次顺序为主轴转速 D 、刀齿形状 A 、锤片数量 C 、喂入速度 B 。

表 2 正交试验安排、结果及极差分析
Tab.2 Results of orthogonal experiment and range analysis

试验序号	A	B	C	D	纯工作小时生产率	千瓦时生产量	破节率
					$Y_1/\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	$Y_2/\text{kg}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$	$Y_3/\%$
1	1	1	1	1	275.10	55.89	85.37
2	1	2	2	2	406.80	55.84	89.62
3	1	3	3	3	371.69	36.86	92.53
4	2	1	2	3	342.18	39.32	89.53
5	2	2	3	1	348.58	74.96	92.87
6	2	3	1	2	468.67	49.99	94.04
7	3	1	3	2	495.65	62.68	97.00
8	3	2	1	3	509.94	59.90	90.78
9	3	3	2	1	434.33	73.39	86.65
Y_{1i}	351.20	370.98	417.90	352.67			
Y_{12}	386.47	421.77	394.44	457.04			
Y_{13}	479.97	424.90	405.31	407.94			
R_{1j}	128.78	53.92	23.46	104.37			
优水平	A_3	B_3	C_1	D_2			
主次因素	$A > D > B > C$						
Y_{21}	49.53	52.63	55.26	68.08			
Y_{22}	54.76	63.57	56.18	56.17			
Y_{23}	65.32	53.41	58.17	45.36			
R_{2j}	15.79	10.94	2.91	22.72			
优水平	A_3	B_2	C_3	D_1			
主次因素	$D > A > B > C$						
Y_{31}	89.17	90.63	90.06	88.30			
Y_{32}	92.15	91.09	88.60	93.56			
Y_{33}	91.48	91.07	94.13	90.95			
R_{3j}	2.97	0.46	5.53	5.26			
优水平	A_2	B_2	C_3	D_2			
主次因素	$C > D > A > B$						

极差分析可以看出,随着齿数增加,纯工作小时生产率和千瓦时生产量增加,破节率在多齿时开始出现下降趋势,但下降不多仍能达到生产要求,因此,选择多齿(A_3)为优水平;喂入速度对破节率影响不大,随着喂入速度的增加纯工作小时生产率和千瓦时生产量增加,但达到 0.88 m/s 后,增加较为缓慢,结合降低能耗考虑,选择 0.88 m/s(B_2)为优水平;千瓦时生产量和破节率随着锤片数量的增加而增加,纯工作小时生产率随着锤片数量增加呈先下降后增加趋势,1 个锤片和 3 个锤片时纯工作小时生产率相似,选择 3 个锤片(C_3)为优水平;千瓦时生产量随着主轴转速的增加而降低,纯工作小时生产率和破节率在转速为 1 000 r/min 时达到最大,选择 1 000 r/min(D_2)为优水平。

3.2 方差分析

正交试验方差分析结果见表 3,以纯工作小时

生产率、千瓦时生产量为评价指标时,将锤片数量看作误差项,在显著性水平为 0.05 的条件下,刀齿形状和主轴转速对纯工作小时生产率和千瓦时生产量影响显著,置信度为 95%;以破节率为评价指标时,将喂入速度看作误差项,在显著性水平为 0.05 的条件下,刀齿形状、主轴转速和锤片数量均对破节率有显著影响,置信度为 95%。

通过方差分析和极差分析可以看出,主轴转速和刀齿形状是影响揉搓工作效果的主要因素,主轴转速的水平变动对纯工作小时生产率、千瓦时生产量和破节率有显著影响,这与刘刚等的研究相似^[11]。得出最优组合不在正交试验的试验点中,运用试验数据的线性结构模型对最优解进行点估计及区间估计,以得出最优解所在的范围,并考察相近试验点是否在此范围之内。本试验中显著因素 A 、 D 的显著水平为 0.05,故取最大显著性水平为 0.05。

表 3 正交试验方差分析结果

Tab.3 Analysis of variance for orthogonal experiment

指标	来源	平方和	自由度	均方值	F	显著性
纯工作小时生产率	修正模型	48 425.797	6	8 070.966	19.506	0.050
		1 482 663.405	1	1 482 663.405	3 583.401	0.001
	刀齿形状	26 569.735	2	13 284.867	32.108	0.030
	喂入转速	5 497.423	2	2 748.711	6.643	0.131
	主轴转速	16 358.639	2	8 179.319	19.768	0.048
	残差	827.517	2	413.759		
	总计	1 531 916.719	9			
	修正总计	49 253.314	8			
千瓦时生产量	修正模型	1 386.619	6	231.103	34.923	0.028
		28 767.552	1	28 767.552	4 347.237	0.001
	刀齿形状	388.402	2	194.201	29.347	0.033
	喂入转速	223.314	2	111.657	16.873	0.056
	主轴转速	774.903	2	387.451	58.550	0.017
	残差	13.235	2	6.617		
	总计	30 167.406	9			
	修正总计	1 399.854	8			
破节率	修正模型	105.369	6	17.561	87.279	0.011
		74 418.021	1	74 418.021	369 850.457	0.001
	刀齿形状	14.595	2	7.297	36.268	0.027
	主轴转速	41.450	2	20.725	103.001	0.010
	锤片数量	49.324	2	24.662	122.568	0.008
	残差	0.402	2	0.201		
	总计	74 523.793	9			
	修正总计	105.771	8			

不同考核指标条件下,置信度为 95% 时的置信区间如表 4 所示。以纯工作小时生产率为考核指标时, A 、 D 为显著因素,最佳条件为 A_3 、 D_2 , 指标均值为 μ_{32} , 置信区间为 $(\hat{\mu}_{32} - \delta, \hat{\mu}_{32} + \delta)$, 该点的无偏估计计算公式^[9]为

$$\hat{\mu}_{32} = \bar{T}(A_3) + \bar{T}(D_2) - \hat{y} \tag{6}$$

式中 $\bar{T}$ ——优水平试验结果的平均值

$\hat{y}$ ——试验结果的总平均值

$$\delta = t_{1-\alpha/2}(f_e) \sqrt{S_e/f_e} / \sqrt{n/(1+n_1)}$$

式中 S_e ——误差的偏差平方和

f_e ——误差的自由度

n ——试验总次数

n_1 ——显著因子自由度之和

其中, $t_{1-\alpha/2}(f_e)$ 通过查 t 分布表求得。

表 4 试验指标真值置信区间

Tab. 4 Confidence interval of performance index

指标	优水平点	δ	置信区间
纯工作小时生产率/ $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$	531. 13	65. 22	465. 91 ~ 596. 35
千瓦时生产量/ $\text{kg}\cdot(\text{kW}\cdot\text{h})^{-1}$	76. 87	8. 25	68. 62 ~ 85. 12
破节率/%	97. 97	1. 44	96. 53 ~ 99. 41

同理,考核指标为千瓦时生产量时, A 、 D 为显著因素,最佳条件为 A_3 、 D_1 , 指标均值为 μ_{31} , 考核指标

为破节率时, A 、 C 、 D 为显著因素,最佳条件为 A_2 、 C_3 、 D_2 , 指标均值为 μ_{232} 。最优组合 A_3 、 B_3 、 C_1 、 D_2 , 不在试验点中,选择相近试验点 6 进行验证,纯工作小时生产率为 468. 67 kg/h 在真值区间内,最优组合 A_3 、 B_2 、 C_3 、 D_1 和 A_2 、 B_2 、 C_3 、 D_2 分别选择相近试验点 5 和 7 进行验证,千瓦时生产量为 74. 96 kg/(kW·h)、破节率为 97%, 均值在各自真值区间内,试验数据合理可靠。

4 结论

(1) 主轴转速 1 000 r/min、刀齿为多齿、锤片数量 3 个、喂入速度为 0. 88 m/s 时,揉搓玉米秸秆效果达到最优,此时,纯工作小时生产率真值在 465. 91 ~ 596. 35 kg/h 之间、千瓦时生产量真值在 68. 62 ~ 85. 12 kg/(kW·h) 之间、破节率真值在 96. 53% ~ 99. 41% 之间。

(2) 主轴转速和刀齿形状对纯工作小时生产率、千瓦时生产量及破节率有显著影响,将传统的凸型刀刃上加工成锯齿形状,可以提高纯工作小时生产率、单位小时生产量、破节率,但具体的锯齿数量、形状尺寸有待进一步研究。

(3) 该机构揉搓高水分玉米秸秆时,破节率在 96% 以上,揉搓效果好,可以应用于青贮铡草机或者青贮玉米收获机上。

参 考 文 献

1 刑延铤. 农作物秸秆饲料加工与应用[M]. 北京:金盾出版社,2008.

2 刘建新. 干草秸秆青贮饲料加工技术[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2003.

3 孟海波,韩鲁佳,刘向阳,等. 秸秆揉切机用刀片磨损的研究[J]. 农业机械学报,2003,34(5):61~64.
Meng Haibo, Han Lujia, Liu Xiangyang, et al. Study on cutter wear of a rubbing and cutting machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(5):61~64. (in Chinese)

4 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:下册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.

5 赵振国,李林. 9R-40 型揉碎机度电产量的性能分析与试验研究[J]. 内蒙古农业大学学报,2011,32(1):197~200.
Zhao Zhenguo, Li Lin. Study and analysis on kilowatt-hour yield of the type 9R-40 tearing chopper[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University, 2011, 32(1):197~200. (in Chinese)

6 王万中. 试验的设计与分析[M]. 北京:高等教育出版社,2004.

7 GB/T 20788—2006 饲草揉碎机[S]. 2006.

8 刘刚,赵满全,王文明,等. 带有径向喂入装置的揉碎机性能试验[J]. 农业机械学报,2010,41(增刊):110~116.
Liu Gang, Zhao Manquan, Wang Wenming, et al. Experiment on straw rubber with radial feeding device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.):110~116. (in Chinese)

9 周纪芾,茆诗松. 质量管理统计方法[M]. 北京:中国统计出版社,2008.