

文章编号: 100226819(2001)0620097205

螺杆挤压膨化机加工农作物秸秆的试验研究

张祖立¹, 朱永文², 刘晓峰¹, 崔玉洁¹, 李永奎¹, 张本华¹

(1. 沈阳农业大学; 2 北京市农业机械研究所)

摘要: 利用小型自热式单螺杆挤压膨化机对农作物秸秆进行膨化加工试验。将螺杆螺距、喷嘴出口间隙、秸秆物料含水率、秸秆物料粒度作为试验因素, 经单因素试验和二次通用旋转组合试验找出其对秸秆膨化加工性能(膨化压力、生产率、度电产量等)的影响规律, 并经优化设计得出最佳参数组合。利用电子显微扫描观察和分析膨化及未膨化玉米秸、豆秸的微观结构的变化, 对农作物秸秆膨化机理进行了初步探讨, 并通过膨化和未膨化玉米秸、豆秸的营养成分对照测试分析, 证实了秸秆膨化能够改善秸秆的理化性状和营养成分, 为提高秸秆的利用率和可消化率创造了条件。

关键词: 农作物秸秆; 螺杆挤压; 膨化试验; 膨化机理

中图分类号: S377 **文献标识码:** A

我国农作物秸秆资源十分丰富, 据统计全国每年产各类农作物秸秆约 5 亿多 t。这些资源长期以来未能得到合理的开发利用。由于秸秆粗糙、坚硬而适口性差、采食率低, 且消化率低, 直接将秸秆饲喂动物效果不佳, 只有很少一部分用作牛羊等反刍动物的粗饲料, 而在猪禽等单胃动物饲料中由于秸秆含粗纤维量过高, 仅可作为填充料使用或不被利用, 因此, 造成巨大的资源浪费。

农作物秸秆的粗蛋白、粗脂肪含量很低, 而粗纤维含量较高。粗纤维包括纤维素、半纤维素、木质素以及少量的果胶物质。秸秆经过高温高压处理然后突然减压释放, 即所谓的膨化, 可以改变秸秆的理化性状和营养成分, 使动物对秸秆的采食率和消化率得到显著提高。目前有报道的秸秆膨化方法为罐式膨化法, 即“热喷”。这种膨化法是在密闭的容器内装入秸秆, 然后由蒸气锅炉向罐内通入高温(180 左右)、中高压(0.5~4 MPa)的水蒸气, 使秸秆受到高温和高压作用, 经 25 s 至 3 min 时间后突然释放, 秸秆被膨化。经热喷处理的秸秆饲料, 明显增加了可溶性成分和可消化、吸收成分, 使适口性变好, 从而提高了饲用价值。据报道, 热喷处理的玉米秸秆有机物消化率, 由原始秸秆的 52.09% 提高到 75.5%; 木质素由 19.5% 下降到 14.8%; 利用率提高了 2~3

倍^[1]。但这种方法尚存在一些问题如设备复杂、占地面积大、所需费用高等, 而未能广泛使用。

将螺杆式挤压膨化技术用于农作物秸秆膨化的试验研究, 目前尚未见报道。本文对此进行的试验研究表明, 螺杆式挤压膨化机能够进行农作物秸秆膨化加工, 膨化效果良好, 能够改善秸秆的理化性状, 为提高农作物秸秆的利用率和可消化率创造了条件。并且所需设备简单、体积小、费用低、使用维护方便, 特别适于乡镇企业和农村个体户使用。本文对玉米秸和豆秸进行了螺杆挤压膨化试验研究。

1 试验设备及试验材料

1.1 试验设备

试验设备采用自行研制的单螺杆挤压膨化机, 主要由螺杆、套筒、喷嘴等组成。

螺杆采用单螺旋等螺距变根径矩形螺纹结构。谷物膨化机螺杆的长径比 $L/\phi D$ 通常为 3~12, 但对于农作物秸秆来说, 由于不易变形, 且摩擦阻力较大, 长径比过大则易产生热分解, 甚至焦化。根据试验取螺杆长径比 $L/\phi D = 3$, 螺杆直径 $D = 80$ mm, 长度 $L = 240$ mm, 前端为锥形结构。

套筒采用内外套筒组合结构形式。内套筒为整体式, 外套筒为分段式, 便于加工和更换。根据挤压时物料受力和运动分析, 内套筒内壁表面越粗糙, 越有利于物料挤压。因此, 在内套筒内壁开有纵向矩形沟槽。

由于是试验阶段, 在本项研究过程中, 采用手工

收稿日期: 2001205225 修订日期: 2001209203

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(972118)

作者简介: 张祖立, 教授, 沈阳市东陵路 120 号 沈阳农业大学农业工程学院, 110161

加料方式。

1.2 工作参数的确定

膨化机的工作参数包括温度、压力和螺杆转速等。根据秸秆膨化的初步试验, 秸秆物料在挤压腔受到强烈的挤压和剪切作用, 以及物料之间和物料与金属件之间产生强烈的摩擦作用所产生的大量的热量, 使挤压腔温度在开机后十几秒到几十秒时间内便能达到秸秆物料膨化温度 120 ~ 140 , 甚至更高。表明这种膨化设备依靠自热能够满足秸秆膨化温度要求, 不需外加热源。挤压腔内压力通过在喷嘴出口近处安装压力传感器予以测定。螺杆转速直接影响秸秆物料在挤压腔内的停留时间, 停留时间太短, 物料来不及变性, 且易发生堵塞。停留时间太长, 物料易产生热分解, 甚至焦化。通过多次试验, 确定螺杆较适宜的转速为 550 r/min。

1.3 试验材料

用锤片式粉碎机粉碎的不同粒度的玉米秸、豆秸。

1.4 试验仪器

DT8 型三相四线有功电度表, BPR 230100 型压力传感器, YD 215 型动态电阻应变仪, SC16 型光线示波器, 682A 型半导体点温计, SZG20 型手持数字转速表, 以及天平等仪器。

2 试验及结果分析

2.1 试验安排

通过螺杆挤压膨化秸秆的单因素试验及主要影响因素分析表明, 不同螺距的螺杆不仅影响秸秆物料的推送速度和物料在膨化机内的停留时间, 而且直接影响膨化压力和膨化质量。螺杆螺距大, 则物料推送速度快, 膨化压力大, 膨化质量、生产率和电产量均有所提高, 但螺距过大易出现堵塞和物料炭化现象。喷嘴出口间隙是影响膨化压力的主要因素之一, 喷嘴出口间隙小, 压缩比大, 膨化压力大, 但易堵塞, 喷射不连续; 喷嘴出口间隙大, 则膨化压力低, 喷射稳定性好, 但喷射强度降低。秸秆物料的含水率对螺杆挤压膨化加工性能影响很大, 含水率低, 物料间剪切和摩擦阻力大, 物料在膨化腔内升温迅速, 膨化温度和膨化压力高, 但易出现膨化不完全或物料炭化现象; 含水率高, 挤压腔工作温度和压力低, 易出现“放炮”现象而影响膨化质量。不同粒度的秸秆物料具有不同的物理机械特性, 直接影响秸秆的膨化性能。物料粒度大其流动性差, 输送困难, 物料间

剪切和摩擦阻力大, 挤压腔升温快, 但易出现堵塞现象, 膨化工作不稳定。

根据单因素试验及分析, 确定螺杆螺距 Z_1 , 喷嘴出口间隙 Z_2 , 秸秆物料含水率 Z_3 及秸秆物料粒度 Z_4 为试验因素。各因素的取值及其水平安排见表 1。

表 1 试验因素水平表

	Z_1/mm	Z_2/mm	$Z_3/\%$	Z_4/mm
+ 2	47	5	50	8
+ 1	41	4	45	6
0	35	3	40	4
- 1	29	2	35	2
- 2	23	1	30	0.8

对各因素取值作线性变换:

$$x_1 = (Z_1 - 35) \cdot 0.6, x_2 = (Z_2 - 3) \cdot 0.1, x_3 = (Z_3 - 40) \cdot 0.5, x_4 = (Z_4 - 4) \cdot 0.2$$

试验安排及试验结果见表 2。

表 2 四因素通用旋转组合设计及试验结果

试验号	x_1	x_2	x_3	x_4	膨化压强 $\bar{M} \text{ Pa}$	生产率 $\bar{O} \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$	度电产量 $\bar{O} \text{ kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$
1	- 1	- 1	- 1	1	3.60	13.27	4.09
2	1	- 1	- 1	1	2.10	18.38	5.92
3	- 1	1	- 1	1	3.35	23.36	2.93
4	1	1	- 1	1	1.60	16.25	5.11
5	- 1	- 1	1	1	2.60	21.92	2.82
6	1	- 1	1	1	0.63	20.75	5.00
7	- 1	1	1	1	1.10	10.92	2.96
8	1	1	1	1	3.80	15.27	4.75
9	- 1	- 1	- 1	- 1	2.78	23.28	5.11
10	1	- 1	- 1	- 1	0.90	18.62	5.92
11	- 1	1	- 1	- 1	1.60	22.96	3.75
12	1	1	- 1	- 1	1.10	17.32	6.62
13	- 1	- 1	1	- 1	2.68	24.20	2.60
14	1	- 1	1	- 1	0.70	15.28	5.10
15	- 1	1	1	- 1	3.05	12.77	2.23
16	1	1	1	- 1	1.65	19.28	4.86
17	2	0	0	0	0.55	14.40	5.92
18	- 2	0	0	0	1.85	18.64	2.62
19	0	2	0	0	2.35	16.89	7.50
20	0	- 2	0	0	1.60	13.69	5.63
21	0	0	2	0	2.38	23.74	4.13
22	0	0	- 2	0	2.23	25.39	6.85
23	0	0	0	2	1.23	19.43	6.20
24	0	0	0	- 2	2.10	23.91	2.70
25	0	0	0	0	2.85	20.80	2.65
26	0	0	0	0	2.75	26.25	4.85
27	0	0	0	0	2.41	21.40	6.14
28	0	0	0	0	1.75	28.50	4.52
29	0	0	0	0	1.54	21.65	5.18
30	0	0	0	0	1.49	26.84	5.62
31	0	0	0	0	1.46	26.36	4.28

设 y_1, y_2, y_3 分别表示膨化压力、生产率、度电产量, 通过回归分析得回归方程如下:

$$y_1 = 2142 - 0.451x_1 + 0.117x_2 - 0.2x_3 + 0.11x_4 + 0.402x_1x_2 + 0.189x_1x_3 + 0.234x_1x_4 + 0.298x_2x_3 + 0.039x_2x_4 - 0.261x_3x_4 - 0.266x_1^2 + 0.023x_2^2 + 0.105x_3^2 - 0.055x_4^2 \quad (1)$$

$$y_2 = 23962 - 0.834x_1 - 0.465x_2 - 0.681x_3 - 0.94x_4 + 0.484x_1x_2 + 0.817x_1x_3 + 0.868x_1x_4 - 1.891x_2x_3 + 0.033x_2x_4 + 0.516x_3x_4 - 2.144x_1^2 - 2.452x_2^2 + 0.121x_3^2 - 0.604x_4^2 \quad (2)$$

$$y_3 = 4747 + 0.975x_1 + 0.016x_2 - 0.607x_3 + 0.183x_4 + 0.134x_1x_2 + 0.088x_1x_3 - 0.052x_1x_4 + 0.119x_2x_3 - 0.051x_2x_4 + 0.256x_3x_4 - 0.26x_1^2 + 0.315x_2^2 + 0.045x_3^2 - 0.215x_4^2 \quad (3)$$

方程的显著性水平均为 $A=0.1$, 方程都不失拟。

2.2 试验结果分析

2.2.1 组合试验结果分析

综合方程(1)~(3), 并对其回归系数进行方差分析及 t 检验可知: 螺秆螺距对膨化压力的影响最大, 其次是喷嘴出口间隙和秸秆物料的粉碎粒度, 秸秆物料的含水率对膨化压力影响最小; 秸秆物料的粉碎粒度对生产率的影响最大, 其次是喷嘴出口间隙、秸秆物料的含水率和螺秆螺距; 对度电产量影响最大的是螺秆螺距, 其次是秸秆物料的含水率, 再其次是秸秆物料的粉碎粒度, 而喷嘴出口间隙的影响最小。

根据试验分析, 选择度电产量为目标函数, 以螺秆螺距 Z_1 、喷嘴出口间隙 Z_2 、秸秆物料含水率 Z_3 和秸秆物料粉碎粒度 Z_4 为设计变量, 采用内点惩罚函

数法进行约束优化设计, 得到的最佳参数组合为: $Z_1 = 41 \text{ mm}, Z_2 = 4 \text{ mm}, Z_3 = 30\%, Z_4 = 4 \text{ mm}$; 其理论度电产量为 $7.034 \text{ kg}\ddot{\text{o}}(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。验证试验结果表明, 在最佳参数组合下, 其实际度电产量平均为 $6.547 \text{ kg}\ddot{\text{o}}(\text{kW} \cdot \text{h})$, 误差约为 7.29% 。

2.2.2 膨化秸秆的细胞结构变化及分析

试验结果表明, 膨化后秸秆外观改变明显, 堆放体积缩小, 梗状物减少, 大部分都变成絮状物, 膨松柔软, 并伴有籽实的糊香味。利用电子显微镜观察秸秆膨化前后的微观结构, 发现膨化前秸秆细胞排列整齐, 细胞结构完整, 细胞壁(其主要成分为纤维素)包裹着细胞内容物。膨化后的秸秆细胞结构被破坏, 细胞壁撕裂变为絮状纤维, 细胞间距拉大, 轮廓模糊, 细胞内容物游离出来。图 1 和图 2 是 6 mm 豆秸膨化前后的电子显微照像, 图 3 和图 4 是 4 mm 玉米秸膨化前后的电子显微照像, 图 5 和图 6 是 6 mm 玉米秸膨化前后的电子显微照像。

农作物秸秆膨化机理比较复杂, 但其主要作用原理包括热效应和机械效应。热效应是在高温高压蒸汽作用下, 使秸秆细胞壁内各层间木质素熔化和高温水解, 氢键断裂而吸水。机械效应是秸秆在膨化机体内与螺秆、套筒以及彼此间相互挤压、摩擦、剪切, 于膨化口处突然减压高速喷射而出, 由于运行速度和方向的改变而产生很大的内摩擦力。这种内摩擦力加上高温水蒸汽突然膨大而产生的胀力, 使秸秆撕碎, 乃至细胞游离, 胞壁疏松, 细胞间木质素分布状态改变, 饲料颗粒骤然减小, 密度增大, 堆放体积减小, 总表面积增大, 在牲畜消化道内与消化酶的接触面扩大, 使秸秆饲料的可消化率和采食量明显提高。

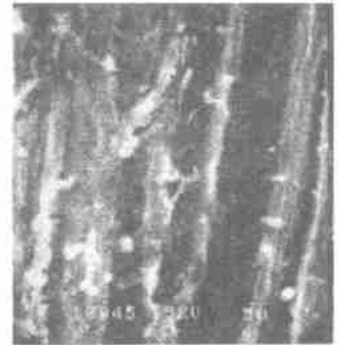
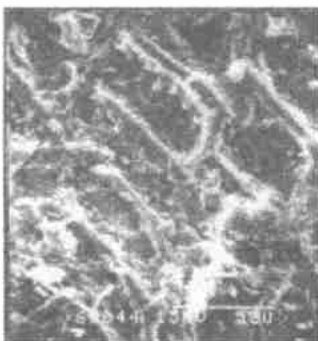


图 1 6 mm 未膨化豆秸的显微照片
Fig. 1 Microphotograph of bean stalk of 6 mm size before extruding procession

图 2 6 mm 膨化豆秸的显微照片
Fig. 2 Microphotograph of beans talk of 6 mm size after extruding procession

图 3 4 mm 未膨化玉米秸的显微照片
Fig. 3 Microphotograph of corn stalk of 4 mm size before extruding procession

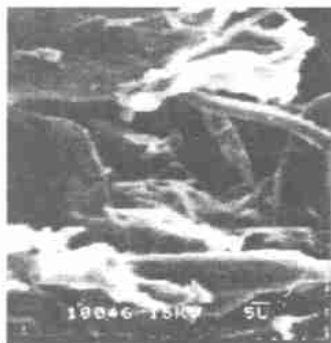


图 4 4 mm 膨化玉米秸的显微照片

Fig 4 Microphotograph of corn stalk of 4 mm size after extruding procession



图 5 6 mm 未膨化玉米秸的显微照片

Fig 5 Microphotograph of corn stalk of 6 mm size before extruding procession

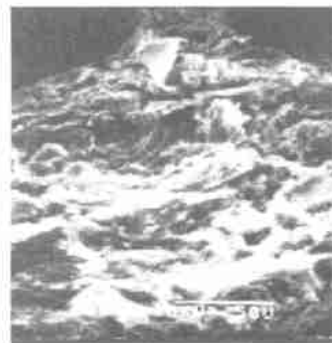


图 6 6 mm 膨化玉米秸的显微照片

Fig 6 Microphotograph of corn stalk of 6 mm size after extruding procession

2.2.3 膨化前后秸秆的营养成分及分析

照分析结果,由沈阳农业大学分析测试中心测试。

表 3 为膨化及未膨化豆秸、玉米秸营养成分对

表 3 膨化和未膨化豆秸、玉米秸营养成分对照分析结果

Table 3 Nutrition composition contrast analysis of the corn stalk and bean stalk after extruding procession

序号	品名	水分	灰分	粗蛋白	粗脂肪	粗纤维	无氮浸出物	酸性洗涤纤维	%
1	未膨化玉米秸	8.42	9.47	5.45	0.756	32.68	47.20	46.85	
2	膨化玉米秸	8.07	8.17	5.26	0.780	30.06	51.84	45.27	
3	未膨化豆秸	10.51	4.52	4.80	0.457	52.23	30.72	65.23	
4	膨化豆秸	10.40	5.07	4.87	0.450	43.00	40.41	59.23	

分析方法:粗蛋白:GB/T6432294;酸性洗涤纤维:酸性洗涤法;粗脂肪:GB/T6433294;水分:GB6435286;粗纤维:GB6434286;灰分:GB6438286;备注:无氮浸出物以干基计。

从表 3 中可看出,无论是玉米秸秆,还是豆秸秆,膨化加工对其粗蛋白和粗脂肪等成分的含量基本上没有影响,可见这种高温高压短时膨化农作物秸秆的加工方法基本上不损失秸秆的粗蛋白和粗脂肪这两种营养物质,而影响动物对其消化吸收的粗纤维和酸性洗涤纤维含量都得到不同程度的下降,容易吸收的无氮浸出物含量得到了提高。膨化玉米秸对照未膨化玉米秸,粗纤维降低了 8.02%,酸性洗涤纤维降低了 2.95%,无氮浸出物增加了 9.83%;膨化豆秸对照未膨化豆秸,粗纤维降低了 17.67%,酸性洗涤纤维降低了 9.2%,无氮浸出物增加了 31.54%。

2.2.4 膨化秸秆做饲料的经济及应用前景分析

本机结构简单、体积小、使用方便,特别适合于个体农户和饲养户使用,其中作为原料的秸秆,每年全国产量有 5 亿 t,其来源非常丰富和广泛,将秸秆膨化处理,进而转化成易被猪等单胃动物消化吸收

的饲料,这样既可减少环境污染,又可替代一部分饲料用粮,具有经济和社会双重效益。

本机售价为每台 2 000 元,其工业用电费用(以辽宁为例)为 0.6~0.8 元/(kW·h),度电产量可达 7 kg/(kW·h),膨化秸秆饲料的生产成本概略计算如下:

膨化秸秆的流动成本 $V = 0.707 = 0.1$ 元/kg,以辽宁省育肥猪饲料为例,其全省平均售价为 1.35 元/kg。在饲养试验中表明此膨化秸秆饲料可替代约 10% 的饲料用粮,猪的采食率会有所提高,而育肥时间基本不变。由此可见,用膨化秸秆做饲料可节约成本 $V_1 = (1.35 - 0.1) \times 10\% = 0.125$ 元/kg。以育肥一头猪用 300 kg 饲料用粮计,则可节约成本约 37.5 元,因此,约饲养 53 头猪便可收回成本。

如果用本机加工秸秆饲料收取加工费,以收取 0.12 元/kg 计,其纯利为 0.02 元/kg,以每天工作 10 h,生产率 23 kg/h 计,则每天可获取纯利 10×23

$\times 0.02 = 4.6$ 元, 约 14 个月即可收回成本。

若用本机加工秸秆膨化饲料出售, 以售价 0.2 元/kg 计, 每天工作 10 h, 人工费为 15 元/d, 则 250 d 可收回全部成本。

综上所述, 如果此技术推广开来, 无论从秸秆资源开发利用节约饲料用粮, 还是减少环境污染等都具有显著的经济及社会效益, 因此, 其应用前景将是广阔的。

3 结 论

自热式单螺杆螺旋挤压膨化机能有效地、顺利地进行作物秸秆膨化加工, 膨化效果良好, 性能稳定, 安全可靠。

变根径螺杆在外径为 80 mm、长度为 240 mm、转速为 550 r/min 时, 秸秆膨化加工的最佳参数组合为: 螺距 41 mm、喷嘴出口间隙 4 mm、秸秆物料粒度 4 mm、秸秆物料含水率 30%。膨化温度可达 120~140 °C, 膨化压强约为 1.8 MPa, 生产率约为 23 kg/h, 度电产量约为 7 kg/(kW·h)。

小型自热式单螺杆挤压膨化设备能够实现高温、高压、短时、连续膨化加工农作物秸秆, 且结构简单、操作方便、所需费用低、膨化效果较好, 特别适于

在中小型乡镇企业和农村个体户使用。

挤压膨化加工农作物秸秆能改变秸秆的理化性状, 提高秸秆饲料的适口性、采食率和消化率。在热效应和机械效应的双重作用下, 秸秆的细胞结构发生变化, 细胞壁疏松、细胞内容物游离出来, 秸秆饲料颗粒骤然减小, 总表面积增大, 为在牲畜消化道内与消化酶接触面的扩大和被瘤胃微生物最大程度地降解创造了条件。

螺杆挤压式膨化秸秆加工技术对秸秆的粗蛋白和粗脂肪等营养成分含量基本上没有影响, 而粗纤维和酸性洗涤纤维等得到了不同程度的下降, 无氮浸出物得到提高。

[参 考 文 献]

- [1] 边四辈, 卢旺, 王加启等. 提高秸秆营养价值的研究进展[J]. 国外畜牧科技, 1999, 26(5): 17~18
- [2] 吴民. 将粗饲料变成高效营养饲料的几种方法[J]. 粮食与饲料工业, 1991, 1: 40~41
- [3] 史兴乔, 边革, 刘玉英. 秸秆饲料的调制技术[J]. 辽宁畜牧兽医, 1998, 5: 30~31
- [4] 齐胜利, 王芙蓉. 秸秆饲料的营养与加工[J]. 粮食与饲料工业, 1998, 12: 28~29
- [5] 吴运生. 单螺杆挤压机工作性能探讨[J]. 粮食与饲料工业, 1995, 第 3 期: 30~33

Experimental Study on Extruding Crop Straw by Screw Extruder

Zhang Zuli¹, Zhu Yongwen², Liu Xiaofeng¹, Cui Yujie¹, Li Yongkui¹, Zhang Benhua¹

(1. College of Agricultural Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110161, China;

2. Research Institute of Agricultural Machinery, Beijing 100096, China)

Abstract: A kind of small size single screw extruder with self heating was used in this study. Screw pitch, spray nozzle clearance, chopped straw moisture content and straw size were different factors. Influence law of processing property (extruding pressure, production efficiency, output per kW·h) was obtained by a series of single factor and general rotatory combination design of four factors for experiment. The optimal combination of main parameters was gained by optimization method. With the help of electron microscope, it was found that the microstructure of corn stalk and bean stalk was changed after extruding as compared with that without extrusion. Therefore, the theory on extruding processing of the crop straw was studied. It was proved that the tissue structure of the straw can be changed by extruding process through the analysis of the nutrition composition. The feasibility rate and digestive rate for crop straw were improved.

Key words: crop straw; screw extrusion; extruding experiment; extruding theory