

# 玉米秸秆皮糠分离机械运行参数优化试验

王德福<sup>1,2</sup>, 于克强<sup>2</sup>, 陈争光<sup>2</sup>

(1. 河南农业大学机电学院, 郑州 450002; 2. 东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

**摘要:** 为有效适应各季节玉米秸秆的皮糠分离加工及确定玉米秸秆皮糠分离机的运行参数, 该文针对作者所设计的玉米秸秆皮糠分离机, 在已经结构参数优化的基础上, 又对除叶机构与剥糠机构进行了运行试验研究。通过多因素正交旋转组合试验确定除叶机构与剥糠机构的关键运行参数, 结果表明: 影响除叶率的显著因素是 U 型齿板底宽和秸秆喂入速度, 齿辊转速有影响但不显著; 影响剥糠率的主要因素及其顺序为秸秆喂入速度、剥糠辊转速、剥糠刀与支撑板间距。并通过综合已有研究及样机试验结果, 确定主要运行参数为秸秆喂入速度 1.2~1.3 m/s, 除叶齿辊旋转线速度大于 5 m/s, 剥糠辊旋转线速度大于 5.8 m/s 时, 该分离机对各季节玉米秸秆进行皮糠分离加工的适用性较好, 且其生产率大于 0.5 t/h, 除叶率大于 97.6%, 剥糠率大于 95.7%。

**关键词:** 加工, 分离, 装备, 玉米秸秆, 皮糠

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.21.004

中图分类号: S817.19; S216.2 文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2013)-21-0026-07

王德福, 于克强, 陈争光. 玉米秸秆皮糠分离机械运行参数优化试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(21): 26-32.  
Wang Defu, Yu Keqiang, Chen Zhengguang. Optimized test of running parameter on rind-pith separation equipment for corn stalk[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(21): 26-32. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

中国农业每年生产的玉米秸秆约 2 亿 t<sup>[1]</sup>。传统上, 玉米秸秆主要用来作(烧柴)燃料、饲料、肥料(沤农家肥), 或将其就地焚烧。随着经济和技术的发展, 玉米秸秆作为生物质资源正在得到更广泛的应用。除传统应用以外, 玉米秸秆也用于成型燃料、制取乙醇、造纸、建筑材料<sup>[2-10]</sup>。但由于玉米秸秆皮糠叶中的成分含量相差较大, 玉米秸秆整秆应用的效果不佳。玉米秸秆外皮中含有丰富的纤维素和木质素, 适于作燃料、建材或造纸; 而叶片和内糠中含有丰富的脂肪与蛋白类物质, 可用作反刍动物的优质饲料或高效制取乙醇。因此, 若能实现玉米秸秆外皮、内糠、叶片各尽其用, 将促进资源的有效利用与生态环境的保护, 并可产生巨大的社会价值和经济价值<sup>[11-15]</sup>。目前中国已进行了许多相关研究<sup>[16-23]</sup>, 为实现玉米秸秆皮糠的有效分离, 也开发了相应的分离设备<sup>[24-26]</sup>, 但由于玉米秸秆的差异性及复杂性, 现有分离设备存在除叶机构(如其钢丝除叶部件)和剥糠机构(如其切展部件、旋

切部件)耐用性及可靠性差、皮糠分离质量不稳定等问题。为此, 针对作者所设计的配置 U 齿板的除叶机构, 以及夹持切割、旋切剥糠机构, 在玉米秸秆剥糠机构结构参数优化<sup>[25]</sup>的基础上, 本文分别对除叶机构与剥糠机构进行了运行试验, 以确定影响除叶率和剥糠率的运行因素, 以期为该玉米秸秆皮糠分离机的研发及应用提供技术依据。

## 1 试验设备及工作原理

### 1.1 试验设备

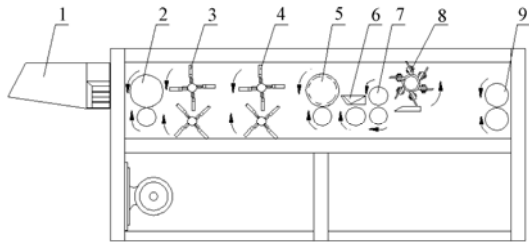
作者已经设计的(4 通道)玉米秸秆皮糠分离机(见图 1a), 主要由除叶机构和剥糠机构组成。除叶机构主要由前后配置的两对相对旋转的齿辊组成。齿辊上安装有 U 形除叶齿板, 其安装相位差为 90°角, 工作时上下除叶辊的除叶齿板相位差为 45°角, 上下除叶辊等速相对旋转时除叶齿板对玉米秸秆形成上下相互支撑、同时进行对秸秆的六边包络除叶作业, 以实现冲击、搓擦与梳刷除叶。剥糠机构主要由夹持切割辊、展开部件、压平喂入辊、剥糠辊和支撑板组成, 其中夹持切割辊集夹持、定位、切割于一体, 保证了随后加工的质量。为加强切削和刮削玉米秸秆内糠的能力, 剥糠辊上配置有 6 个安装角为前倾 15°的剥糠刀, 同时为在保证其必要的切削线速度情况下降低剥糠辊的转速而取其剥糠刀旋转直径 186 mm。

收稿日期: 2012-12-24 修订日期: 2013-09-29

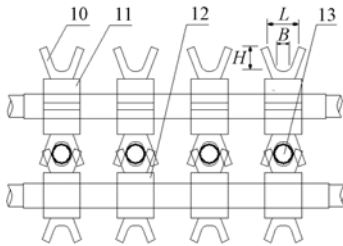
基金项目: 黑龙江省科技攻关资助项目(GA09B501); 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2009AA043602)

作者简介: 王德福(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事畜牧机械研究。郑州 河南农业大学机电学院, 450002。

Email: dfwang640203@sohu.com



a. 分离机结构示意图  
a. Separation equipment



b. 除叶齿辊结构示意图  
b. Leaf-stripping roll

1. 喂入台 2. 喂入辊 3. 前除叶辊 4. 后除叶辊 5. 夹持切割辊  
6. 切割展开部件 7. 压平辊 8. 剥糠辊 9. 输出辊 10. U 形齿板  
11. 上除叶辊 12. 下除叶辊 13. 玉米秸秆  
1. Feeding platform 2. Feeding roll 3. front leaf-stripping roll 4. back leaf-stripping roll 5. Cutting roll 6. Opening part for cutting 7. Flattening roll 8. Pith-stripping roll 9. Output roll 10. U groove plate 11. Upper leaf-stripping roll 12. Lower leaf-stripping roll 13. Corn stalk  
注:  $B$  为 U 形齿板的底宽,  $L$  为 U 形齿板的顶宽,  $L=B+20$  mm、 $H$  为 U 形齿板的高度。  
Note:  $B$  means bottom width of U groove plate,  $L$  means top width of U groove plate,  $L=B+20$  mm,  $H$  means height of U groove plate.

图 1 玉米秸秆皮糠分离机示意图

Fig.1 Configuration of rind-pith separation equipment

本机的外形尺寸为：长度 3.0 m、宽度 0.95 m、高度 1.0 m，总质量约 700 kg；其主要技术参数为：加工秸秆列数为 4 列，设计要求生产率大于 0.5 t/h，分离率大于 95%，配套动力为 5.5 kW。

### 1.2 工作原理

本文采用的玉米秸秆皮糠分离主要工艺为：秸秆喂入-两级除叶-旋切剥糠-外皮输出，其关键工艺为除叶与剥糠。玉米秸秆皮糠分离过程是，在喂入辊夹持输送下秸秆根部向前进入齿辊除叶机构，经其打击、搓擦，大部分叶片脱离茎秆；然后秸秆进入剥糠机构，经纵向切割、展开、压平、内糠切削，实现内糠与外皮的分离；最后外皮由输出辊导出。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验材料

选用黑龙江省冬季含水率 65.3%、根部最小直径大于 20 mm 的整株玉米秸秆，作为试验材料。玉米秸秆皮糠分离机的样机试验采用经室内（暖室）存放后含水率降为 12.1%的整株玉米秸秆。

### 2.2 作业效果评价指标

按照除叶机构与剥糠机构分离的性能要求，选用除叶率与剥糠率分别作为其效果评价指标。

#### 1) 除叶率

指通过除叶机构后除掉叶片的质量与叶片总质量的百分比。每组试验做 10 个重复（每次处理 1 根秸秆），取平均值。计算公式为

$$Y_1 = \frac{P}{Q} \times 100\% \quad (1)$$

式中， $Y_1$  为除叶率； $P$  为除掉叶片的质量，g； $Q$  为除叶用玉米秸秆叶片的总质量，g。

#### 2) 剥糠率

指玉米秸秆剥糠后所获得的糠质量占糠总质量的百分比（不计茎秆直径小于 10 mm 部分）。每组试验做 10 个重复（每次处理 1 根秸秆），取其平均值。计算公式为

$$Y_2 = \frac{m_0}{m} \times 100\% \quad (2)$$

式中， $Y_2$  为剥糠率； $m_0$  为剥离的瓢质量，g； $m$  为所试验玉米秸秆内瓢的总质量，g。

### 2.3 试验设计

#### 1) 除叶试验

由预试验知，喂入速度低、除叶齿辊（最大旋转直径 190 mm）转速高利于提高除叶率，但生产率会降低；U 形齿板工作面（如图 1b）尺寸直接影响除叶效果，本文假设秸秆最大直径 30 mm，依此设计其底宽  $B$ 、顶宽  $L=B+20$  mm、高度  $H=37$  mm。为试验除叶机构的运行性能，选择对除叶率有重要影响的喂入速度、齿板底宽、齿辊转速作为因素安排了三因素五水平试验，见表 1。

表 1 除叶试验因素水平编码表

Table 1 Relation of actual value and coded value			
编码值 Coded value	喂入速度 A Feeding speed /(m·s <sup>-1</sup> )	齿板底宽 B Bottom width /mm	齿辊转速 C Rotation speed /(r·m <sup>-1</sup> )
-1.682	0.7	20	398
-1	1.0	22	500
0	1.5	25	650
1	2.0	28	800
1.682	2.3	30	902

#### 2) 剥糠试验

为研究剥糠机构的性能，在剥糠预试验与前期剥糠机构结构参数优化基础上，选择对剥糠率影响较大的喂入速度、剥糠刀与支撑板间距、剥糠辊转速作为因素安排了三因素五水平试验，见表 2。

表 2 剥穗试验因素水平编码表

编码值 Coded value	喂入速度 <i>A</i> Feeding speed (m·s <sup>-1</sup> )	间距 <i>D</i> Clearance /mm	剥穗辊转速 <i>E</i> Rotation speed (r·m <sup>-1</sup> )
-1.682	0.5	1.7	348
-1	0.7	2.0	450
0	1.0	2.5	600
1	1.3	3.0	750
1.682	1.5	3.3	852

### 3 试验结果与分析

#### 3.1 除叶试验

##### 3.1.1 试验结果

除叶试验结果见表 3 所示。

表 3 除叶试验结果

序号 No.	试验因素及水平 Factors and levels			除叶率 Leaf-stripping percent <i>Y<sub>i</sub></i> /%
	喂入速度 <i>A</i> Feeding speed	齿板底宽 <i>B</i> Bottom width	辊转速 <i>C</i> Rotation speed	
1	0	0	0	88.7
2	0	0	-1.68	85.7
3	1.68	0	0	80.9
4	-1	1	1	85.4
5	0	0	0	83.2
6	-1	-1	-1	96.7
7	0	0	1.68	89.2
8	1	-1	1	93.7
9	1	-1	-1	89.8
10	1	1	-1	82.6
11	-1	-1	1	97.6
12	0	0	0	85.9
13	0	0	0	86.5
14	0	1.68	0	78.1
15	-1.68	0	0	93.3
16	0	-1.68	0	93.8
17	1	1	1	83.3
18	-1	1	-1	82.2
19	0	0	0	85.5
20	0	0	0	86.1

##### 3.1.2 试验分析

通过 Design Expert 软件对试验数据进行分析, 获得除叶率回归模型及其方差分析。

$$Y_i = 85.92 - 2.44A - 5.18B + 1.07C + 1.14AB + 0.06AC - 0.11BC + 0.82A^2 + 0.42B^2 + 0.95C^2 \quad (3)$$

从表 4 的方差分析结果可知, 模型的 *P* 值为 0.0004, 说明模型处于显著水平; 模型的相关系数 *R*<sup>2</sup> 为 0.9082, 说明模型拟合程度良好, 试验误差小;

失拟性不显著 ( $P=0.2040>0.1$ ), 因此模型是合适的; 该模型可以用于确定各因素对除叶机构除叶率的影响规律的评估。式 (3) 中, 齿板底宽 *B* 和喂入速度 *A* 对除叶率影响显著, 齿辊转速 *C* 对除叶率有影响但不显著 (转速基本满足除叶要求)。

表 4 除叶率回归模型的方差分析

项目 Source	均方 Mean Square	<i>F</i> 值 <i>F</i> Value	<i>P</i> 值 <i>P</i> value
模型	55.02	11.00	0.0004
<i>A</i>	81.46	16.28	0.0024
<i>B</i>	366.05	73.17	<0.0001
<i>C</i>	15.58	3.11	0.1081
<i>AB</i>	10.35	2.07	0.1808
<i>AC</i>	0.031	0.0062	0.9386
<i>BC</i>	0.10	0.020	0.8897
<i>A</i> <sup>2</sup>	9.75	1.95	0.1928
<i>B</i> <sup>2</sup>	2.50	0.50	0.4962
<i>C</i> <sup>2</sup>	12.91	2.58	0.1393
失拟性	6.88	2.20	0.2040

采用频数分析法对试验结果进行优化, 确定满足除叶率 95%~100% 的因素取值范围, 见表 5。按试验设计, 3 个试验因素在 [-1.682, 1.682] 范围内总计有 5<sup>3</sup>=125 个组合方案, 将这些组合点带入回归方程, 可求得除叶率 (95%~100%) 出现的方案个数 14 个, 占全部方案数的 11.2%。

表 5 除叶率 (95%~100%) 频数分析表

编码 Coded value	频数 Frequency		
	喂入速度 <i>A</i> Feeding speed	齿板底宽 <i>B</i> Bottom width	齿辊转速 <i>C</i> Rotation speed
-1.682	3	6	2
-1	4	7	3
0	5	1	3
1	1	0	2
1.682	1	0	4
平均值	-0.45	-1.22	0.17
标准差	0.98	0.47	1.24
95% 置信区间	-0.97~0.06	-1.47~-0.97	-0.48~0.82
试验因素取值范围	1.02~1.53(m·s <sup>-1</sup> )	20.6~22.08/mm	577.85~772.8(r·m <sup>-1</sup> )

由表 5 及验证试验证实, 喂入速度宜 1.2~1.4 m/s; 齿板底宽宜 20~22 mm, 本文确定前、后两级除叶齿板底宽分别为 22 和 20 mm; 齿辊转速宜 580~700 r/min。

### 3.2 剥穗试验

#### 3.2.1 试验结果

剥穗试验结果见表 6 所示。

#### 3.2.2 试验分析

通过 Design Expert 软件对剥穗试验数据进行

分析，获得剥糠率回归模型及其方差分析。

$$Y_2 = 90.58 + 5.81A - 2.58D - 7.01E + 0.38AD - 2.87AE - 1.17DE - 3.06A^2 - 0.10D^2 - 4.20E^2 \quad (4)$$

表 6 剥糠试验结果

Table 6 Result of pith-stripping experiment

序号 No.	试验因素及水平 Factors and levels			剥糠率 $Y_2$ Pith-stripping percent/%
	喂入速度 $A$ Feeding speed	间距 $D$ Clearance	剥糠辊转速 $E$ Rotation speed	
1	0	0	0	85.2
2	0	0	-1.68	89.6
3	1.68	0	0	95.5
4	-1	1	1	68.7
5	0	0	0	92.8
6	-1	-1	-1	86.1
7	0	0	1.68	70.6
8	1	-1	1	81.5
9	1	-1	-1	98.5
10	1	1	-1	97.5
11	-1	-1	1	75.9
12	0	0	0	89.1
13	0	0	0	91.8
14	0	1.68	0	88.9
15	-1.68	0	0	71.5
16	0	-1.68	0	94.5
17	1	1	1	71.1
18	-1	1	-1	78.9
19	0	0	0	90.9
20	0	0	0	93.2

从表 7 的方差分析结果可知，模型的  $P$  值为 0.0001，说明模型处于显著水平；模型的相关系数  $R^2$  为 0.9334，说明模型拟合程度良好，试验误差小；失拟性不显著 ( $P=0.2955>0.1$ )，因此模型是合适的；该模型可以用于确定各因素对剥糠机构剥糠率的影响规律的评估。式 (4) 中，喂入速度  $A$ 、间距  $D$ 、剥糠辊转速  $E$  对剥糠率的影响均显著。

表 7 剥糠率回归模型的方差分析

Table 7 ANOVA on regression equation model

项目 Source	均方 Mean Square	$F$ 值 $F$ Value	$P$ 值 $P$ value
模型	184.22	15.56	<0.0001
$A$	461.20	38.96	<0.0001
$D$	90.82	7.67	0.0198
$E$	671.37	56.72	<0.0001
$AD$	1.13	0.10	0.7642
$AE$	66.12	5.59	0.0397
$DE$	11.04	0.93	0.3568
$A^2$	129.87	10.97	0.0078
$D^2$	0.15	0.01	0.9120
$E^2$	254.70	21.52	0.0009
失拟性	14.78	1.66	0.2955

采用频数分析法对试验结果进行优化，确定满足剥糠率 95%~100% 的因素取值范围，见表 8。按试验设计，3 个试验因素在 [-1.682、1.682] 范围内总计有  $5^3=125$  个组合方案，将这些组合点带入回归方程，可求得剥糠率 (95%~100%) 出现的方案个数 22 个，占全部方案数的 17.6%。

表 8 剥糠率 (95%~100%) 频数分析表

Table 8 Frequency of pith-stripping percent between 95% and 100%

编码 Coded value	频数 Frequency		
	喂入速度 $A$ Feeding speed	间距 $D$ Clearance	剥糠辊转速 $E$ Rotation speed
-1.682	0	5	10
-1	0	5	9
0	1	4	3
1	11	4	0
1.682	10	4	0
平均值	1.26	-0.12	-1.17
标准差	0.43	1.25	0.56
95% 置信区间	1.09~1.44	-0.64~0.4	-1.41~-0.94
试验因素取值范围	1.33~ 1.43/(m·s <sup>-1</sup> )	2.18~ 2.7/mm	388.92~ 458.98/(r·m <sup>-1</sup> )

由表 8 及验证试验证实，喂入速度宜 1.3~1.4 m/s；剥糠辊与支撑板间距宜 2.2 mm 左右；剥糠辊转速应不低于 450 r/min (线速度约 5.0 m/s)。

### 3.3 运行参数优化后的分离机性能试验

通过已进行的试验，本文设计的玉米秸秆皮糠分离机的关键运行参数确定如下：

1) 喂入辊的速度决定除叶机构的喂入速度及分离机的生产率，按试验优化的结果，其线速度确定为 1.2 m/s；夹持切割辊与压平辊的速度 (决定剥糠机构的喂入速度) 应等于喂入辊的速度，按照后道加工环节输送秸秆速度不低于前道环节的原则，其线速度确定为 1.3 m/s (符合试验优化结果)。

2) 为保证充分的打击、搓擦与梳脱，除叶齿辊旋转线速度确定为大于 5 m/s (取 600 r/min)。

3) 为保证针对不同季节玉米秸秆进行充分的切削与刮削，综合已进行的试验研究，剥糠辊旋转线速度确定为 5~8 m/s，本文确定其线速度大于 5.8 m/s (取 600 r/min)。

4) 为保证及时输出分离后的秸秆外皮，输出辊旋转线速度确定为 1.5 m/s (高于秸秆分离加工时的运动线速度 10% 以上)。

按本设计选取的参数加工了 (4 通道) 玉米秸

秆皮糠分离机, 并对含水率 12.1% 的玉米秸秆进行了性能测试。其性能测试试验数据如表 9 所示。获得的皮糠叶见图 2 所示。

表 9 玉米秸秆皮糠分离机性能测试数据表

Table 9 Data of testing of rind-pith separation equipment

指标 Index	测量值 Testing value	标准要求 Standard
除叶率/%	>97.6	≥95
剥糠率/%	>95.7	≥95
生产率/(t·h <sup>-1</sup> )	>0.5	≥0.5
吨料电耗/(kW·h·t <sup>-1</sup> )	6.5	<8



a. 除掉的叶片  
a. Stripped leaf      b. 剥掉的糠  
b. Stripped pith      c. 秸秆外皮  
c. Rind

图 2 玉米秸秆皮糠分离机试验

Fig.2 Experiments of rind-pith separation equipment

## 4 结 论

1) 通过除叶试验, 确定了以除叶齿板为主要部件的两级除叶机构的结构参数, 即前、后两级除叶机构的除叶齿板分别为底宽 22 和 20 mm、顶宽 42 和 40 mm、高度均为 37 mm; 通过剥糠试验, 确定了剥糠机构的主要结构参数, 即剥糠刀与支撑板间距 2.2 mm 左右。

2) 综合考虑各影响因素, 本文设计的玉米秸秆皮糠分离机的主要运行参数范围为: 秸秆喂入速度 1.2~1.3 m/s, 除叶齿辊旋转线速度大于 5 m/s, 剥糠辊旋转线速度大于 5.8 m/s。通过 (4 通道) 样机试验获得, 其生产率大于 0.5 t/h, 除叶率大于 97.6%, 剥糠率大于 95.7%。

### [参 考 文 献]

[1] 谢光辉, 王晓玉, 任兰天. 中国作物秸秆资源评估研究现状[J]. 生物工程学报, 2010, 26(7): 855—863.  
Xie Guanghui, Wang Xiaoyu, Ren Lantian. China's crop residues resources evaluation[J]. Chinese Journal of Biotechnology, 2010, 26(7): 855—863. (in Chinese with English abstract)

[2] 王永宏. 促进玉米秸秆加工储存向产业化发展[J]. 农机质量与监督, 2007(5): 39—40, 44.

[3] 王琪, 史宇亮, 李济宁, 等. 玉米秸秆板加工工艺优化[J]. 农业机械学报, 2007, 38(8): 199—201.

[4] 张新爱, 关润伶. 玉米秸秆包装材料的开发研究[J]. 包装工程, 2010, 31(11): 56—58.  
Zhang Xinai, Guan Runling. Research on development of corn stalk packaging material[J]. Packaging Engineering, 2010, 31(11): 56—58. (in Chinese with English abstract)

[5] 李捷, 郭康权. 玉米秸秆髓芯热压瓦楞芯纸的试验[J]. 农业机械学报, 2005, 36(7): 89—91.  
Li Jie, Guo Kangquan. Experimental study on corrugated paper production from cornstalk by hot press process[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(7): 89—91. (in Chinese with English abstract)

[6] 苏俊林, 赵晓文, 王巍. 生物质成型燃料研究现状及进展[J]. 节能技术, 2009, 27(2): 117—120.  
Su Junlin, Zhao Xiaowen, Wang Wei. Research status and development of the biomass briquette fuel[J]. Energy Conservation Technology, 2009, 27(2): 117—120. (in Chinese with English abstract)

[7] Jeewon Lee. Biological conversion of lignocellulosic biomass to ethanol[J]. Journal of Biotechnology, 1997(56): 1—24.

[8] Abolghasem Shahbazi, Yebo Li. Assessment of crop residues for bioethanol production in north Carolina[C]// 2005 ASAE Annual International Meeting, Paper Number: 056044.

[9] Zeng Meijuan, Eduardo Ximenes, Michael R Ladisch, et al. Tissue-specific biomass recalcitrance in corn stover pretreated with liquid hot-water:Enzymatic Hydrolysis[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2012, 109(2): 390—397.

[10] Zeng Meijuan, Eduardo Ximenes, Michael R Ladisch, et al. Tissue-specific biomass recalcitrance in corn stover pretreated with liquid hot-water:SEM Imaging[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2012, 109(2): 398—404.

[11] 薛红枫, 闰贵龙, 孟庆翔. 玉米秸秆不同部位碳水化合物组分体外发酵动态分析[J]. 畜牧兽医学报, 2007, 38(9): 92—93.

[12] 谢涛, 曹文龙, 史云天. 玉米秸秆饲料的现状及其玉米秸秆糠颗粒饲料的应用[J]. 农业与技术, 2010, 30(1): 66—68.

[13] 孙竹莹, 梁鸿馨. 玉米秸秆皮糠分离及其综合利用研究[J]. 农牧产品开发, 1999(5): 17—18.

[14] 孙竹营. 玉米秸秆的皮糠分离及其应用[J]. 实用技术, 2005(6): 28—29.

- [15] 胡伟. 精打细算之玉米秸秆皮糠分离利用技术[J]. 当代农机, 2007(3): 40—41.
- [16] 李晓东, 邱立春. 玉米秸秆物理机械特性试验研究[J]. 农业科技与装备, 2011(2): 62—64.  
Li Xiaodong, Qiu Lichun. Experimental investigation of physical mechanics characteristics for corn stalk[J]. Agricultural Science and Technology and Equipment, 2011(2): 62—64. (in Chinese with English abstract)
- [17] 高梦祥, 郭康全, 杨中平, 等. 玉米秸秆的力学特性测试研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(4): 47—49.  
Gao Mengxiang, Guo Kangquan, Yang Zhongping, et al. Study on mechanical properties of cornstalk[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2003, 34(4): 47—49. (in Chinese with English abstract)
- [18] 陈争光, 王德福, 李利桥, 等. 玉米秸秆皮拉伸和剪切特性试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(21): 59—65.  
Chen Zhengguang, Wang Defu, Li Liqiao, et al. Experimental study on tensile and shearing characteristics of rind of corn stalk[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2012, 28(21): 59—65. (in Chinese with English abstract)
- [19] 高梦祥, 杨中平, 郭康全, 等. 玉米秸秆的冲击式茎叶分离试验研究[J]. 农业机械学报, 2003, 34(2): 40—42.  
Gao Mengxiang, Yang Zhongping, Guo Kangquan, et al. Experimental study on blasting separation of stem and leaves of corn stalk[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2003, 34(2): 40—42. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王景锋, 杨中平, 范芳娟. 气流式分离机分离不同形态秸秆碎料的试验研究[J]. 农机化研究, 2005(3): 196—198.  
Wang Jingfeng, Yang Zhongping, Fan Fangjuan. Experimental investigation on current separator for difforn cornstalk separation[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2005(3): 196—198. (in Chinese with English abstract)
- [21] 王光炬, 乔艳辉, 吕勇. 甘蔗剥叶机理研究[J]. 山东农业大学学报: 自然科学版, 2007, 38(3): 461—464.  
Wang Guangju, Qiao Yanhui, Lü Yong. Study on sugarcane detrashing mechanism of the rhombus detrashing element and the nylon detrashing brush element[J]. Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science, 2007, 38(3): 461—464. (in Chinese with English abstract)
- [22] 杨坚, 黄丽丽, 杨望, 等. 弯、直蔗剥叶质量影响因素的试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(4): 123—129.  
Yang Jian, Huang Lili, Yang Wang, et al. Experiment on the factors affecting the detrashing quality of the straight and bending sugarcane[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering(Transactions of the CSAE), 2009, 25(4): 123—129. (in Chinese with English abstract)
- [23] 牟向伟, 区颖刚, 刘庆庭, 等. 弹性齿滚筒式甘蔗剥叶装置[J]. 农业机械学报, 2012, 43(4): 60—65.  
Mou Xiangwei, Ou Yinggang, Liu Qingting, et al. Elastic dentation roller type sugarcane leaf-stripping device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 60—65. (in Chinese with English abstract)
- [24] 刘丽玲, 王德福. 玉米秸秆皮糠分离机剖瓢机构试验研究[J]. 东北农业大学学报, 2011, 42(2): 43—47.  
Liu Liling, Wang Defu. Experimental study on separating mechanism of corn stalk[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2011, 42(2): 43—47. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王德福, 陈争光, 于克强. 玉米秸秆剥机机构参数优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 90—94.  
Wang Defu, Chen Zhengguang, Yu Keqiang. Parameter optimization on separation mechanism for rind and pith of corn stalk[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 90—94. (in Chinese with English abstract)
- [26] 朱新华. 玉米秸秆茎叶分离机研制及试验[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2011.  
Zhu Xinhua. Study on Stem-Leaf Separation Properties of Corn stalk and Development of Separator[D]. Xi'an: Northwest A and F University, 2011. (in Chinese with English abstract)

## Optimized test of running parameter on rind-pith separation equipment for corn stalk

Wang Defu<sup>1,2</sup>, Yu Keqiang<sup>2</sup>, Chen Zhengguang<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China;

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

**Abstract:** With the development of agriculture in China, the total annual production of straw is over 700 million tons, including more than 200 million tons of corn stalk. In general, corn stalk was utilized as the common domestic fuel and livestock feed, and the remaining straw was burned in fields in the past, which led to waste of resources and pollution of environment. With economic development, technological progress, and the growing demand for resources (including energy resources), valuable utilization of corn stalk is emphasized at home and abroad, such as separately using rind, pith and leaves to achieve maximum value according to their different chemical compositions. Therefore, rind-pith separation equipment for corn stalk has been developed in China. So far, the separating quality, adaptability, operational reliability and productive efficiency of rind-pith separation equipment for corn stalk are still low. Further research is needed, including deeply researching and developing the key mechanisms for rind-pith separation equipment.

For effective separation of the rind and pith of a variety of corn stalk (especially corn stalk with a high moisture content obtained in the corn harvesting season) and determination of the operation parameters of rind-pith separation equipment, a leaf-stripping mechanism and pith-stripping mechanism of rind-pith separation equipment for corn stalk had been experimented on. By preliminary experiments and analysis, two stages of leaf-stripping technology of blasting, stripping and rubbing had been used and conformed. Key parameters of leaf-stripping mechanism and the pith-stripping mechanism had been determined by multi-factor orthogonal rotation combination experiments. By an analysis of the experiments for the leaf-stripping mechanism, the significant factor was the bottom width of the U groove plate and the feeding speed for corn stalk with the third significant factor being, the rotation speed of the leaf-stripping roll. For the pith-stripping mechanism, the most significant factor was the feeding speed for the corn stalk, the second significant factor was the rotation speed of the pith-stripping roll, and the third significant factor was the clearance between the pith-stripping blade and supporting plate. By a comprehensive analysis of the existing experimental results, the main movement parameters of rind-pith separation equipment for corn stalk were as following: feeding speed for corn stalk 1.2~1.3 m/s, rotation linear speed of leaf-stripping roll more than 5 m/s, rotation linear speed of the pith-stripping roll more than 5.8m/s.

Based on the optimization parameters of the above experiments, the four-pass rind-pith separation equipment for corn stalk was designed. The separation equipment was mainly composed of a feeding mechanism (including a feeding table and feeding roll), two leaf-stripping mechanisms, an opening and flattening mechanism (mainly cutting, opening and flattening corn stalk), a pith-stripping mechanism, and an output mechanism (mainly transportation rind out of the equipment). By experiments, the separation equipment was found to be practical to separate corn stalk from about ten percent moisture content to about seventy percent moisture content. Then, the separation equipment was examined and tested, and overall productivity was more than 0.5 t/h according to corn stalk with about twelve percent moisture content, the leaf-stripping percent was more than ninety-seven point six percent, and the pith-stripping percent was more than ninety-five point seven percent. The above results could be served as a guide for the designing and optimizing of rind-pith separation equipment for corn stalk.

**Key words:** processing, separation, equipment, corn stalk, rind and pith

(责任编辑: 张俊芳)