

# 基于免割收获的小麦扶持脱粒装置试验优化<sup>\*</sup>

周浩 师清翔 耿令新 马萌 袁华杰 李宇航

(河南科技大学车辆与动力工程学院, 洛阳 471003)

**摘要:** 利用小麦扶持脱粒装置试验台,以脱粒损失率为指标进行了滚筒转速、板齿倾角单因素试验,初步确定了脱粒滚筒转速和板齿倾角。在此基础上,以脱粒损失率和含杂率为指标,进行了滚筒转速、筛孔尺寸和脱粒间隙三因素正交试验和滚筒转速、脱粒间隙两因素回归试验,优化确定了该扶持脱粒装置的最佳参数组合。当筛孔尺寸为14 mm、板齿倾角为0°、脱粒间隙为18.5 mm、滚筒转速为927 r/min、滚筒长度为700 mm时,脱粒损失率和含杂率分别为2.71%和19.20%。

**关键词:** 小麦 免割收获 扶持 脱粒装置

**中图分类号:** S225.3      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2013)S2-0052-05

## Experiment of Wheat Supported Threshing Apparatus Based on Free-cutting Harvest

Zhou Hao Shi Qingxiang Geng Lingxin Ma Meng Yuan Huajie Li Yuhang

(Vehicle and Motive Power Engineering College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China)

**Abstract:** By using the self-designed threshing apparatus test-bed, single-factor tests of roller-speed and tooth-angle were carried out and the values of these two factors were obtained. On this basis, the three factors orthogonal test, including the speed of the roller, the mesh aperture and the thresh gap, was researched. The two factors regression experiment, including the roller speed and the thresh gap, was also studied. Optimum parameter combination of threshing apparatus was obtained. When the mesh aperture was 14 mm, tooth angle was 0°, thresh gap was 18.5 mm, roller speed was 927 r/min and roller length was 700 mm, the threshing loss rate was 2.71% and the trash content was 19.20%.

**Key words:** Wheat Free-cutting harvest Supported Threshing apparatus

### 引言

我国有大量的丘陵山区,其耕地面积占我国可耕地面积的30%,广泛种植小麦和水稻。丘陵山区地况复杂,地块狭小且不规则,有些地区甚至无耕道。联合收获机按喂入方式可分为全喂入联合收获机和半喂入联合收获机。前者脱粒装置功耗大,后者夹持输送装置结构复杂,均使整机较大,无法适应丘陵山区的复杂地况<sup>[1~11]</sup>。研究功耗低、尺寸小、机动性灵活且可分部件快速装拆的组合便携式联合收获机是解决这一地区谷物收获难题的可行途径。

本研究以半喂入脱粒作为脱粒的基本形式,借助土壤对谷物植株的约束,采用一对螺旋输送机取代传统的夹持输送机构,完成物料向脱粒装置的有序喂入,脱粒装置在螺旋输送器的扶持作用下完成脱粒作业<sup>[12]</sup>。本文通过试验研究,确定该脱粒装置的主要结构和运动参数。

### 1 试验设备与试验方法

#### 1.1 试验设备及仪器

脱粒试验台如图1所示,主要由小车、螺旋输送机、脱粒装置等部分组成。试验用小麦固定在小车

收稿日期: 2013-06-26 修回日期: 2013-07-10

<sup>\*</sup> “十二五”国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B10)

**作者简介:** 周浩,硕士生,主要从事谷物联合收获机研究,E-mail: zhouhao850307@163.com

**通讯作者:** 师清翔,教授,主要从事谷物联合收获机研究,E-mail: sqx@mail.haust.edu.cn

上,小车在小车驱动电动机的带动下沿小车轨道运动,模拟脱粒装置在田间的工作状况。当小麦行至上、下螺旋输送机锥段形成的 V 形入口处时,在上、下螺旋输送器的引导扶持作用下,进入脱粒装置(图 2)。进入脱粒装置的小麦在螺旋输送器的扶持作用下完成脱粒作业,籽粒经凹板分离,固定于小车上的茎秆从脱粒装置的轴向出口排出。脱粒装置主要由脱粒滚筒、凹板和壳体组成。脱粒滚筒为封闭式,脱粒元件为齿厚 5 mm、齿高 15 mm 板齿。脱粒滚筒直径为 330 mm,长度为 700 mm。更换脱粒滚筒可以改变板齿齿面与脱粒滚筒横截面的夹角,即板齿倾角。凹板采用编织筛网,更换方便。脱粒滚筒转速由滚筒驱动电动机控制,上、下螺旋输送机转速由螺旋输送机驱动电动机控制,接料盒接取经凹板下落的分离物。接料盒等分为 10 小格,从滚筒入口到出口依次编号 1、2、…、10<sup>[13]</sup>。

试验仪器包括激光测速仪、秒表、电子秤、精密电子秤、计算机等。

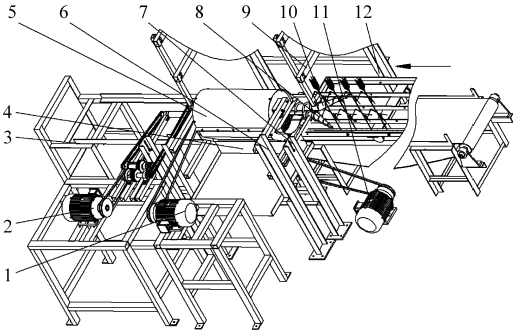


图 1 脱粒试验台结构简图

Fig. 1 Sketch map of threshing test bed

1. 滚筒驱动电动机 2. 螺旋输送机驱动电动机 3. 小车轮轴  
4. 接料盒 5. 脱粒滚筒 6. 滚筒支撑架 7. 下螺旋输送机支撑架  
8. 下螺旋输送机 9. 上螺旋输送机支撑架 10. 上螺旋输送机  
11. 小车驱动电动机 12. 小车



图 2 小麦扶持喂入照片

Fig. 2 Photo of wheat supported feeding

1.2 试验条件及方法

田间检测结果表明,丘陵山区小麦产量为 4 500 kg/hm<sup>2</sup>左右,小麦高度 700 mm,茎秆含水率

12.11%,籽粒含水率 6.78%,谷草比为 1:1.25,以此为据,确定每次试验所需物料质量,均匀地夹持在小车上。

试验开始前,首先将小车的输送速度调节至拟定的联合收获机田间行走速度 0.4 m/s。然后调节螺旋输送器的转速,使其螺旋叶片对作物的引导速度与小车的输送速度相同。并在脱粒装置的下方铺塑料布,用以接取脱粒过程中从脱粒装置飞溅出的籽粒。最后将接料盒放在脱粒装置的下方指定位置。

试验时,首先启动脱粒滚筒和螺旋输送机,待脱粒滚筒和螺旋输送机匀速旋转后,启动固定有小麦植株的输送小车。固定于小车上小麦在螺旋输送器的引导和扶持作用下进入脱粒装置进行脱粒,籽粒、部分颖糠和短茎秆经脱粒装置的凹板下落至接料盒,完成脱粒的麦秆从脱粒装置的轴向出口排出。至此,完成脱粒过程,切断相关工作装置电源。

对接料盒接取物料进行处理,首先称量接料盒中各个小格内物料的质量  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, 10$ ),然后利用清选机对小格内的物料进行清选,利用振动筛将籽粒和断穗分开,人工揉搓获得短穗中的籽粒,分别称量每格中脱净的籽粒质量  $y'_i$  和断穗籽粒质量  $y''_i$ 。

脱粒装置下方塑料布上收集的籽粒和完成脱粒的小麦茎秆上未脱下的籽粒均为脱粒损失,合并称量,记为  $y_s$ 。

脱粒装置的性能参数为:

断穗籽粒率为凹板分离物中,未脱净的籽粒占籽粒总质量的百分比,即

$$v_1 = \frac{\sum_{i=1}^{10} y''_i}{\sum_{i=1}^{10} (y'_i + y''_i) + y_s} \times 100\%$$

含杂率

$$v_2 = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^{10} (y'_i + y''_i)}{\sum_{i=1}^{10} x_i} \right] \times 100\%$$

脱粒损失率

$$v_3 = \frac{y_s}{\sum_{i=1}^{10} (y'_i + y''_i) + y_s} \times 100\%$$

2 试验结果与分析

2.1 单因素试验

2.1.1 滚筒转速

在脱粒间隙为 12 mm、板齿倾角为 8°、凹板方孔编织筛网的筛孔尺寸为 12 mm 的条件下,以脱粒损

失率  $v_3$  为指标,对滚筒转速进行单因素试验,试验结果如表 1 所示。试验结果拟合方程如图 3 所示。从图中可以明显看到,当滚筒转速达到 850 r/min 时,脱粒损失率降低缓慢。故初定滚筒转速 850 r/min 作为后续试验的参考转速。

表 1 滚筒转速试验结果  
Tab.1 Results of roller-speed test

| 滚筒转速<br>$n/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ | 滚筒线速度<br>$v/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ | 脱粒损失率 $v_3/\%$ |       |       |
|------------------------------------------|-----------------------------------------|----------------|-------|-------|
|                                          |                                         | 1              | 2     | 平均    |
| 468                                      | 8.0                                     | 23.73          | 24.63 | 24.18 |
| 608                                      | 10.5                                    | 10.95          | 9.70  | 10.33 |
| 753                                      | 13.0                                    | 7.98           | 5.60  | 6.79  |
| 898                                      | 15.5                                    | 4.56           | 5.02  | 4.79  |
| 1 042                                    | 18.0                                    | 4.42           | 4.30  | 4.36  |

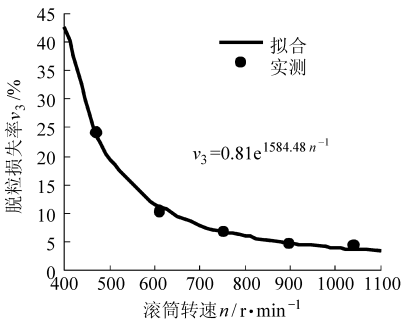


图 3 转速对脱粒损失率的影响

Fig.3 Speed effects on threshing loss rate

滚筒转速为 850 r/min,其他因素水平不变的情况下,凹板分离籽粒沿脱粒装置纵向分布如图 4 所示。最后两格的籽粒很少,暂将最后两格也作为脱粒损失,此时脱粒滚筒的有效长度为 560 mm,脱粒损失率为

$$v_4 = \frac{y_s + \sum_{i=9}^{10} (y'_i + y''_i)}{\sum_{i=1}^{10} (y'_i + y''_i) + y_s} \times 100\%$$

含杂率为

$$v_5 = \left[ 1 - \frac{\sum_{i=1}^8 (y'_i + y''_i)}{\sum_{i=1}^8 x_i} \right] \times 100\%$$

2.1.2 板齿倾角

滚筒转速为 850 r/min,脱粒间隙为 12 mm,凹板筛孔尺寸为 12 mm,以脱粒滚筒长为 560 mm 时的脱粒损失率  $v_4$  为试验指标,对板齿倾角  $\alpha$  进行单因素试验,试验结果如图 5 所示。由图可知,在试验范围内,板齿倾角为 0°时,  $v_4$  最小,故以板齿倾角为 0°进行后续正交试验。

2.2 正交试验

滚筒转速、脱粒间隙和筛孔尺寸可能对脱粒性

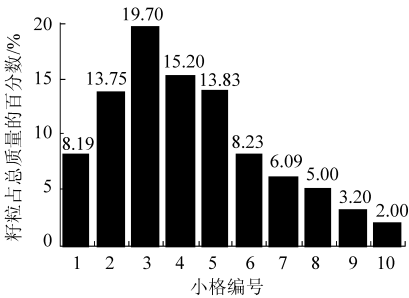


图 4 籽粒沿脱粒装置纵向的分布

Fig.4 Grain distribution along roller

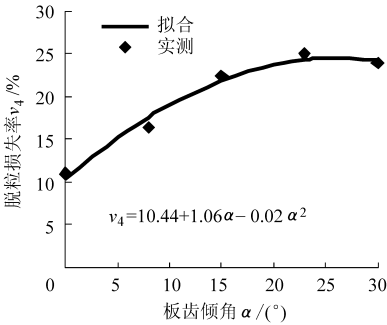


图 5 板齿倾角对脱粒损失率的影响

Fig.5 Tooth-angle effects on threshing loss rate

能有较大影响。本试验采用正交试验,试验板齿倾角为 0°,试验各因素水平如表 2 所示,选用  $L_9(3^4)$  正交表,试验方案及结果如表 3 所示。

表 2 因素水平编码

Tab.2 Coding of factors and levels

| 水平 | 因素                               |               |               |
|----|----------------------------------|---------------|---------------|
|    | 滚筒转速                             | 脱粒间隙          | 筛孔尺寸          |
|    | $A/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ | $B/\text{mm}$ | $C/\text{mm}$ |
| 1  | 780                              | 8             | 10            |
| 2  | 940                              | 12            | 12            |
| 3  | 1 100                            | 16            | 14            |

对表 3 试验结果极差分析显示,各因素对脱粒损失率  $v_4$  的影响主次顺序为 A、B、C。

对断穗籽粒率、含杂率、脱粒损失率 3 个性能指标进行加权评分,当三者的加权系数分别为 0.2、0.3、0.5 时,数据处理结果显示,因素对指标的影响主次依次是 A、B、C,较优组合为:滚筒转速 940 r/min,脱粒间隙 16 mm,筛孔尺寸 14 mm。

2.3 回归试验

正交试验结果显示,筛孔尺寸对试验指标影响不显著,且筛孔尺寸已经标准化,现有筛孔尺寸无法满足回归试验的参数选择要求,故在筛孔尺寸为 14 mm、板齿倾角为 0°的情况下,只对滚筒转速和脱粒间隙两因素进行回归试验。以正交试验得到的参数较优组合为回归试验两因素的零水平,则回归试验因素水平编码如表 4 所示。

表 3 正交试验方案与试验结果

Tab.3 Orthogonal test program and test results

| 试验<br>序号 | 滚筒转速<br>$A/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ | 脱粒间隙<br>$B/\text{mm}$ | 筛孔尺寸<br>$C/\text{mm}$ | 断穗籽粒率<br>$v_1/\%$ | 含杂率<br>$v_2/\%$ | 脱粒损失率<br>$v_4/\%$ |
|----------|------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| 1        | 780                                      | 8                     | 10                    | 2.36              | 19.29           | 12.64             |
| 2        | 780                                      | 12                    | 12                    | 2.96              | 19.85           | 10.47             |
| 3        | 780                                      | 16                    | 14                    | 3.28              | 18.05           | 8.31              |
| 4        | 940                                      | 8                     | 14                    | 2.31              | 20.11           | 7.68              |
| 5        | 940                                      | 12                    | 10                    | 2.02              | 19.93           | 7.64              |
| 6        | 940                                      | 16                    | 12                    | 2.01              | 19.17           | 7.48              |
| 7        | 1 100                                    | 8                     | 12                    | 2.38              | 20.41           | 6.85              |
| 8        | 1 100                                    | 12                    | 14                    | 1.84              | 21.59           | 6.64              |
| 9        | 1 100                                    | 16                    | 10                    | 2.25              | 20.58           | 6.53              |

表 4 回归试验因素编码

Tab.4 Coding of regression test

| 编码     | 滚筒转速 $A/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ | 脱粒间隙 $B/\text{mm}$ |
|--------|---------------------------------------|--------------------|
| 1.414  | 1 090                                 | 22.0               |
| 1      | 1 046                                 | 20.2               |
| 0      | 940                                   | 16.0               |
| -1     | 834                                   | 11.8               |
| -1.414 | 790                                   | 10.0               |

已得到的试验结果显示,在试验范围内各因素对断穗籽粒率  $v_1$  的影响均不显著,故回归试验以脱粒损失率  $v_4$  和含杂率  $v_2$  为试验指标,试验方案与试验结果如表 5 所示,其中  $x_1$  和  $x_2$  分别为滚筒转速和脱粒间隙的编码值。

表 5 回归试验方案及结果

Tab.5 Scheme and results of regression test

| 试验<br>序号 | 滚筒转速<br>$x_1$ | 脱粒间隙<br>$x_2$ | 脱粒损失率<br>$v_4/\%$ | 含杂率<br>$v_2/\%$ |
|----------|---------------|---------------|-------------------|-----------------|
| 1        | 1             | 1             | 7.25              | 20.72           |
| 2        | 1             | -1            | 9.12              | 21.88           |
| 3        | -1            | 1             | 12.00             | 18.78           |
| 4        | -1            | -1            | 12.09             | 18.96           |
| 5        | -1.414        | 0             | 9.04              | 19.44           |
| 6        | 1.414         | 0             | 6.71              | 22.09           |
| 7        | 0             | -1.414        | 8.29              | 21.58           |
| 8        | 0             | 1.414         | 11.12             | 17.88           |
| 9        | 0             | 0             | 9.06              | 19.19           |
| 10       | 0             | 0             | 6.00              | 19.93           |
| 11       | 0             | 0             | 7.33              | 18.70           |
| 12       | 0             | 0             | 7.21              | 20.23           |
| 13       | 0             | 0             | 7.46              | 21.26           |

所得数据进行多元分析,得到各指标在因素空间内的回归方程:

脱粒损失率

$$v_4=70.570\,52-0.095\,93x_1-1.559\,12x_2-0.001\,05x_1x_2+0.000\,05x_1^2+0.081\,65x_2^2$$

(1)

含杂率

$$v_2=35.515\,55-0.048\,94x_1+0.524\,81x_2-0.000\,58x_1x_2+0.000\,04x_1^2-0.005\,76x_2^2$$

(2)

式(1)的相关系数  $R$  为 0.815 49,剩余标准差  $S$  为 1.512 45;式(2)的相关系数  $R$  为 0.859 33,剩余标准差  $S$  为 0.911 91。对式(1)、(2)进行方差分析,结果如表 6 所示。由于试验物料含水率变化较大,故取  $\alpha=0.25$  的置信水平。

表 6 回归方程的方差分析

Tab.6 Variance analysis of regression equations

| 指标              | 方差来源 | SS       | $f$ | MS      | $F$   | 显著性水平 |
|-----------------|------|----------|-----|---------|-------|-------|
| 脱粒<br>损失率 $v_4$ | 失拟   | 10.402 2 | 3   | 3.467 4 | 2.914 | 不失拟   |
|                 | 误差   | 4.759 5  | 4   | 1.189 9 |       |       |
|                 | 回归   | 32.640 1 | 5   | 6.528   | 3.014 | 显著    |
|                 | 剩余   | 15.161 7 | 7   | 2.166   |       |       |
|                 | 总和   | 47.801 8 | 12  |         |       |       |
| 含杂率 $v_2$       | 失拟   | 2.101 5  | 3   | 0.700 5 | 0.719 | 不失拟   |
|                 | 误差   | 3.896 3  | 4   | 0.974 1 |       |       |
|                 | 回归   | 16.257 5 | 5   | 3.251 5 | 3.795 | 显著    |
|                 | 剩余   | 5.997 8  | 7   | 0.856 8 |       |       |
|                 | 总和   | 22.255 3 | 12  |         |       |       |

用加权优化法进行参数优化,当脱粒损失率  $v_4$  和含杂率  $v_2$  的加权系数分别为 0.4、0.6 时,最佳参数组合为:滚筒转速 927 r/min,脱粒间隙18.5 mm。在最佳参数组合下脱粒损失率  $v_4$  和含杂率  $v_2$  分别为 8.34% 和 19.20%。

2.4 验证试验

由于最佳参数组合在回归试验中没有出现,故需最佳参数下的验证试验,验证试验结果如表 7 所示。考虑试验过程物料状态(含水率)变化对试验造成的误差,试验结果与最佳参数下的预测值比较接近。

2.5 脱粒性能影响因素分析

由式(1)、(2)通过降维分析,得出参数对各指标的影响规律,结果如图 6 所示。

表 7 验证试验方案及结果  
Tab.7 Validation test sheme and results

| 试验<br>序号 | 滚筒转速<br>$A/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ | 脱粒间隙<br>$B/\text{mm}$ | 筛孔尺寸<br>$C/\text{mm}$ | 板齿倾角<br>$\alpha/(\text{ }^\circ)$ | 脱粒损失率    |          | 含杂率      |          |
|----------|------------------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------------------|----------|----------|----------|----------|
|          |                                          |                       |                       |                                   | $v_4/\%$ | $v_3/\%$ | $v_2/\%$ | $v_5/\%$ |
| 1        | 927                                      | 18.5                  | 14                    | 0                                 | 8.19     | 2.67     | 18.96    | 19.13    |
| 2        | 927                                      | 18.5                  | 14                    | 0                                 | 8.80     | 2.82     | 19.71    | 20.17    |
| 3        | 927                                      | 18.5                  | 14                    | 0                                 | 8.26     | 2.64     | 19.67    | 20.19    |

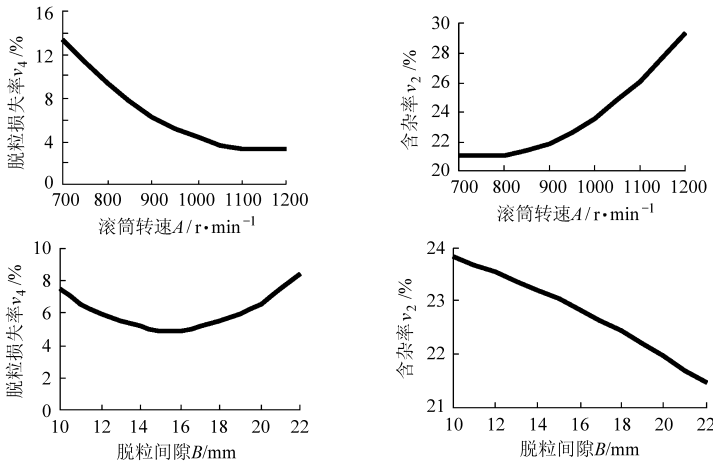


图 6 参数对各脱粒指标的影响  
Fig.6 Regularity of parameters influence on threshing indicators

由图 6 可知,在试验范围内,滚筒转速增大,脱粒损失率降低,含杂率升高;增大脱粒间隙,脱粒损失率先降低后升高,含杂率降低。

通过验证试验结果可以看出,在该试验台配置情况下,滚筒长度在 560 mm 时,损失率太高,可以考虑适当增加滚筒长度来降低脱粒损失率。

3 结论

(1)在试验条件下,脱粒装置最佳参数组合为:滚筒转速 927 r/min、脱粒间隙 18.5 mm、板齿倾角

0°和筛孔尺寸 14 mm。在最佳参数组合下,脱粒滚筒长度为 560 mm 时的脱粒损失率  $v_4$  和含杂率  $v_5$  为 8.34% 和 19.83%;脱粒滚筒长度为 700 mm 时的脱粒损失率  $v_3$  和含杂率  $v_2$  分别为 2.71% 和 19.20%。

(2)在试验范围内,增大滚筒转速,脱粒损失率降低,含杂率升高;脱粒间隙增大时,脱粒损失率先降低后升高,含杂率降低。

(3)该试验台配置下,可以考虑增加滚筒长度来降低脱粒装置的脱粒损失率。

参 考 文 献

1 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京:中国农业出版社,2003.

2 Miu P I,Kutzbach H D. Modeling and simulation of grain threshing and separation in axial threshing units: part II . Application to tangential feeding[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(1):105 ~ 109.

3 袁琦堡,师清翔,王国欣,等. 短程高强度横向轴流脱粒装置参数优化[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):43 ~ 47.

Yuan Qibao, Shi Qingxiang, Wang Guoxin, et al. Parameters optimization of short-rang high-strength transverse axial threshing unit [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(Supp.):43 ~ 47. (in Chinese)

4 陈德俊,龚永坚,黄东明,等. 履带式全喂入稻麦联合收割机新型工作装置研究设计[J]. 农业机械学报,2007,38(8):82 ~ 85.

Chen Dejun, Gong Yongjian, Huang Dongming, et al. Development on some apparatus of Chinese model caterpillar rice-wheat combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2007,38(8):82 ~ 85. (in Chinese)

5 徐立章,李耀明,马朝兴,等. 横轴流双滚筒脱粒分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2009,40(11):55 ~ 58.

Xu Lizhang, Li Yaoming, Ma Chaoxing, et al. Design and experiment of threshing and separating unit with double axial cylinder [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(11):55 ~ 58. (in Chinese)

6 李耀明,李洪昌,徐立章,等. 短纹杆-板齿式轴流脱粒分离装置性能试验[J]. 农业机械学报,2009,40(7):88 ~ 92.

Li Yaoming, Li Hongchang, Xu Lizhang, et al. Performance test of short-rasp-bar of axial flow threshing and separating unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2009,40(7):88 ~ 92. (in Chinese)

增大;较小的摘穗板间隙断茎率小。

4 结论

- (1)拉茎辊纯摘穗功率远小于拉茎辊空转所消耗功率,可对摘穗部件进行优化设计,减小自身转动的功率消耗。
- (2)玉米割台工作功率与摘穗板间隙和拉茎辊

- 转速有关,随摘穗板间隙增大而减小,随拉茎辊转速提高消耗功率增大。
- (3)果穗损伤率、损失率随拉茎辊、传动轴转速升高而减小,拉茎辊、传动轴高速工作时,较大的摘穗板间隙使果穗损伤率、损失率较低。
- (4)断茎率、断穗率随拉茎辊转速升高而增大;较大的摘穗板间隙使断穗率小、断茎率较大。

参 考 文 献

1 范国昌,王惠新,籍俊杰,等. 影响玉米摘穗过程中籽粒破碎和籽粒损失率的因素分析[J]. 农业工程学报, 2002, 18(4): 72 ~ 74.  
Fan Guochang, Wang Huixin, Ji Junjie, et al. Analysis of influence factor on seed damage rate and loss rate during picking corn-cob[J]. Transactions of the CSAE, 2002, 18(4): 72 ~ 74. (in Chinese)

2 常树堂,许兴华,张少杰. 应重点解决玉米收获机械化中最突出的问题[J]. 农业机械, 2005(11): 65.

3 周桂莲,王广来. 玉米摘穗机构的改进可行性分析[J]. 农业机械, 2010(1): 73 ~ 74.

4 张明涛,吕新民. 玉米摘穗装置的理论分析与仿真研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2008.  
Zhang Mingtao, Lü Xinmin. Theoretics analysis and imitation research of corn snapping bars[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2008. (in Chinese)

5 曹文,丁俊华,李在臣. 玉米摘穗装置的设计研究[J]. 农业装备与车辆工程, 2009(1): 20 ~ 27.  
Cao Wen, Ding Junhua, Li Zaichen. Research and design on corn snapping bars[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2009(1): 20 ~ 27. (in Chinese)

6 贺俊林. 低损伤玉米摘穗部件表面仿生技术和不分行喂入机构仿真[D]. 长春:吉林大学, 2007.

7 李鲁予. 玉米收获机械创新原理与应用初探[J]. 农业机械, 2007(6B): 33 ~ 34.

8 Mahmoud A R, Buchele W F. Corn ear orientation effects on mechanical damage and forces on concave[J]. Transactions of the ASAE, 1975, 18(3): 444 ~ 447.

9 Runia W T. Hears offer more than meets the eye[J]. Agriculture Book Magazine, 1991, 17(3): 15 ~ 16.

10 Brass R W, Marley S J. Roller shelter: low damage corn shelling cylinder[J]. Transactions of the ASAE, 1973, 16(1): 64 ~ 66.

(上接第 56 页)

7 谢方平,罗锡文,卢向阳,等. 柔性杆齿滚筒脱粒机理[J]. 农业工程学报,2009,25(8):110 ~ 114.  
Xie Fangping, Luo Xiwen, Lu Xiangyang, et al. Threshing principle of flexible pole-teeth roller for paddy rice[J]. Transactions of the CSAE,2009,25(8):110 ~ 114. (in Chinese)

8 刘辉,刘鹏程,张建军,等. 轴流式脱粒装置脱粒性能的试验研究[J]. 农机化研究,2012(3):176 ~ 179.  
Liu Hui, Liu Pengcheng, Zhang Jianjun, et al. Experimental research on threshing performance of axial flow threshing device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2012(3):176 ~ 179. (in Chinese)

9 陈度,王书茂,康峰,等. 联合收割机喂入量与收获过程损失模型[J]. 农业工程学报,2011,27(9):18 ~ 21.  
Chen Du, Wang Shumao, Kang Feng, et al. Mathematical model of feeding rate and processing loss for combine harvester[J]. Transactions of the CSAE,2011,27(9):18 ~ 21. (in Chinese)

10 李耀明,贾毕清,徐立章,等. 纵横流联合收割机切流脱粒分离装置的研制与试验[J]. 农业工程学报,2009,25(12):93 ~ 96.  
Li Yaoming, Jia Bqing, Xu Lizhang, et al. Development and experiment on tangential flow threshing and separation device of axial flow combine[J]. Transactions of the CSAE,2009,25(12):93 ~ 96. (in Chinese)

11 陈霓,余红娟,陈德俊,等. 半喂入联合收获机同轴差速脱粒滚筒设计与研究[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):39 ~ 42.  
Chen Ni, Yu Hongjuan, Chen Dejun, et al. Design and test on coaxial differential threshing rotor of head-feed combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(Supp.):39 ~ 42. (in Chinese)

12 胡勇克,黛莉莉,皮亚男. 螺旋输送器的原理与设计[J]. 南昌大学学报:工科版,2000,22(4):29 ~ 33.  
Hu Yongke, Dai Lili, Pi Ya'nan. Theories and calculation of the auger-type conveyer[J]. Journal of Nanchang University: Engineering & Technology,2000,22(4):29 ~ 33. (in Chinese)

13 郭炎,李耀明,李洪昌,等. 纵轴流脱粒分离装置脱出物的径向分布规律[J]. 农机化研究,2011(12):110 ~ 112.  
Guo Yan, Li Yaoming, Li Hongchang, et al. The radial distribution regularities of emerging of object with longitudinal axial flow threshing and separating device[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2011(12):110 ~ 112. (in Chinese)