

## 小型水稻联合收割机旋风分离清选试验

卢伟<sup>1,2</sup>, 刘大为<sup>1,2</sup>, 李旭<sup>1,2</sup>, 谢方平<sup>1,2,3\*</sup>, 任述光<sup>1,2,3</sup>, 罗海峰<sup>1,2,3</sup>, 陈立永<sup>4</sup>

(1.湖南农业大学工学院,湖南长沙410128;2.南方粮油作物协同创新中心,湖南长沙410128;3.湖南省现代农业装备工程技术研究中心,湖南长沙410128;4.湖南省农广农业装备有限公司,湖南娄底417700)

**摘要:**针对4LZ-0.8型小型水稻联合收割机在清选过程中存在的清选损失较大以及连续作业时湿物料易堵塞问题,对其分离清选装置进行了改进设计。改进后的装置由物料输送机构、扬谷器、旋风分离清选筒以及吸杂风机组成,去除了原有刮板抛送机构,在旋风分离筒中加装了半球体分离组件,改物料径向进入分离筒为切向进入。利用自制旋风分离清选试验台,以扬谷器转速、吸杂风机转速、分离组件距入口高度为试验因素,以谷粒清洁率和清选损失率为性能评价指标,运用回归分析方法建立了清选系统的数学模型,优化确定了最佳参数组合。试验结果表明:当扬谷器转速为1 133 r/min,吸杂风机转速为2 609 r/min,分离组件距入口高度为51 mm时,谷粒清洁率达到98.93%,清选损失率为0.035%。

**关键词:**小型水稻联合收割机;旋风分离器;清选;性能指标

中图分类号:S225.4 文献标志码:A 文章编号:1007-1032(2016)01-0097-05

## Cyclone separating cleaning test for small-sized rice combine harvester

Lu Wei<sup>1,2</sup>, Liu Dawei<sup>1,2</sup>, Li Xu<sup>1,2</sup>, Xie Fangping<sup>1,2,3\*</sup>, Ren Shuguang<sup>1,2,3</sup>, Luo Haifeng<sup>1,2,3</sup>, Chen Liyong<sup>4</sup>

(1. College of Engineering, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Collaborative Innovation Center of Southern Chinese Grain and Oilseed, Changsha 410128, China; 3. Hunan Provincial Engineering Technology Research Center for Modern Agricultural Equipment, Changsha 410128, China; 4. Hunan Nongguang Agricultural Equipment Limited Company, Loudi, Hunan 417700, China)

**Abstract:** The separation device of 4LZ-0.8 small-sized harvester were developed to solve the problems of bigger cleaning loss and blocked by wet material. The developed device mainly consists of the material conveying mechanism, a winnower, the cyclone separation cleaning tube and the fan composition. The original scraper throwing mechanism is removed, and a hemisphere component separation was installed in the cyclone separation tube. The rice was feed into the cyclone separation tube along the radial direction instead of the tangential direction. By using the self-made cyclone separating cleaning tester, a mathematical model of the cleaning system was established by regression analysis using the winnower rotation rate, the suction fan speed and the distance between separating assembly and entrance as factors, and the grain clean-ratio and the cleaning loss as performance index. The combined kinematic parameters have been optimized. The results indicate that the grain clean-ratio of 98.93 % and the cleaning loss of 0.035 % could be achieved under the speed of 1 133 r/min, the suction fan speed of 2 609 r/min, and the height between separating assembly and entrance of 51 mm.

**Keywords:** small-sized rice combine harvester; cyclone separator; cleaning; performance index

南方丘陵山区稻田田块面积小,田块间高差较大,路窄坡陡,泥脚深烂,大中型联合收割机的使用受到限制<sup>[1-5]</sup>。为适应南方丘陵山地地形地貌特

点,研制开发结构简单、体积小、重量轻、易携带且清选效果较好的微型谷物联合收割机,对于推进山区农业机械化具有十分重要的意义<sup>[6-7]</sup>。旋风分

离清选系统具有结构简单、体积小、造价低、工作可靠等优点,在小型收割机上应用较为广泛,但仍存在风机转速过高、损失率较大等缺点,且潮湿物料对清选效果有较大影响<sup>[8-9]</sup>。研究表明,改善旋风分离清选系统清选效果,可从清选系统结构、工况、气流场等<sup>[10-17]</sup>方面进行改进,以达到提高籽粒清洁率,降低清选损失率的目的。

湖南农业大学与湖南农广农业装备有限公司合作研制的4LZ-0.8型小型水稻联合收割机,田间生产效果表明,该机工作可靠,清选效果良好,达到国家标准相关要求,但其清选过程中还存在清选损失较大以及连续作业时潮湿物料易堵塞问题。为了进一步优化清选系统结构和运动参数,笔者将谷粒清洁率和清选损失率作为性能评价指标,通过自制旋风分离清选试验台进行相关试验,确定了最佳参数组合,以期对4LZ-0.8型小型收割机的改进设计提供参考。

## 1 清选装置结构的改进

所设计的旋风分离清选装置在4LZ-0.8型小型联合收割机清选系统基础上,进行了如下改进。一是去除了原有的径向刮板输送装置,采用扬谷器抛洒物料。原有的刮板输送装置,虽在一定程度上增加物料输送量,提高生产能力,但刮板装置占有了更多输送空间。当生产条件恶劣时,物料含水率较大,脱出物中大杂余成分较多,物料与输送装置相互缠绕,增加了管道堵塞的几率,而在扬谷器叶片高速旋转作用下,物料完全可抛洒至分离筒内,因此去除了刮板输送装置。二是物料进入分离筒的方式由径向喂入改为切向喂入。切向进入时,物料混合物因漂浮速度不同使得各成分在分离筒内旋转分离,与径向进入时物料混合物在垂直方向随上升气流进行分离相比,可增加清选时间和清选行程,提高清选效率。三是在分离筒中加装了悬吊的半球体分离组件,如图1所示。与小型收割机传统空筒式结构相比,加装分离组件,能够避免因分离筒中心气流速度与筒壁四周气流速度差异过大而导致的籽粒随中心气流排出机外带来的清选损失。

根据整机配置要求,确定旋风分离筒直径 $D=300$  mm,出粮口直径 $d_1=165$  mm,吸杂管道直径 $d_2=150$  mm,中心筒高 $h_1=270$  mm,半球体分离

组件直径 $d=200$  mm。考虑输送管道和清选分离筒的联接平顺过渡等因素,采用边长为 $a=100$  mm的方形输送管道。

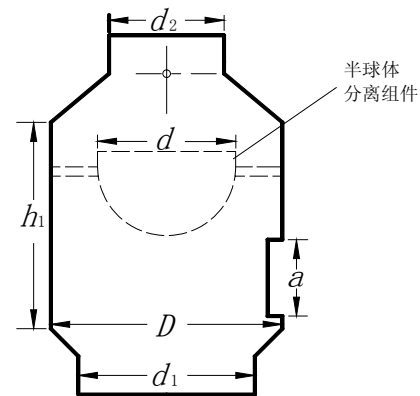


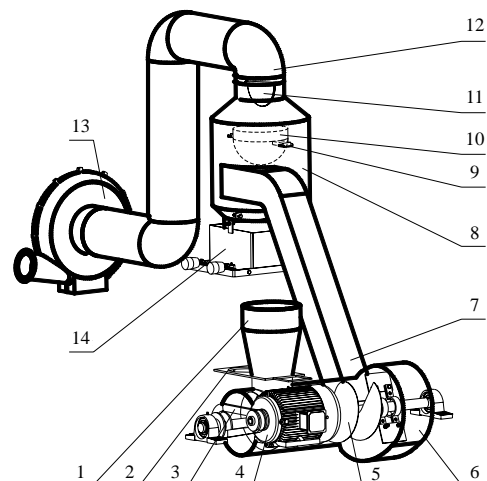
图1 分离筒的结构

Fig.1 Structure diagram of separator bowl

## 2 旋风分离清选装置试验台的结构及工作原理

### 2.1 清选装置试验台的结构

如图2所示,模拟旋风分离清选系统结构,自建清选试验台。旋风分离清选试验台主要由喂料斗、螺旋推运器、扬谷器、输送管道、旋风分离筒、半球体分离组件、风量调节器、吸杂管道、吸杂风机组成。旋风分离筒顶部设计成锥形,有利于短茎秆、颖壳、稻穗以及小杂余排出,并在顶部固定风量调节器,可手动调节风量,确保清选效果。



1 喂料斗;2 挡板;3 皮带;4 电动机;5 螺旋推运器;6 扬谷器;7 输送管道;8 旋风分离筒;9 固定连接器;10 半球体分离组件;11 风量调节器;12 吸杂管道;13 吸杂风机;14 吊袋框。

图2 清选试验台的结构

Fig.2 Structure diagram of the separating device

2.2 工作原理

供试水稻品种为湘早籼 46 号。试验时测得草谷比为 1.44, 谷粒含水率为 23.96%, 稻穗含水率为 38.26%, 短茎秆含水率为 61.92%, 千粒重为 31.50 g。

脱粒后的谷物由喂入斗进入螺旋推运器中, 在螺旋推运器作用下, 被输送至扬谷器内。扬谷器叶片高速旋转, 物料沿切向被抛洒至旋风分离筒, 物料流与上升气流近似于垂直相交。在竖直方向上, 混合物在流场中受到气动阻力(对除谷粒之外的杂余而言是动力)、自身重力及筒壁对混合物的摩擦力作用。当气动阻力等于物料重力时, 物料在气流中处于稳定的悬浮状态, 此时的气流速度称为漂浮速度, 它仅与物料自身的密度和形状有关。由于脱粒后的混合物中谷粒与短茎秆、稻穗、颖壳以及其他轻小杂余的形状、密度各不相同, 因此它们的漂浮速度均不同。工作时, 利用水稻谷粒与混杂的各类杂质的漂浮速度不同, 使吸杂风机产生小于谷粒漂

浮速度而大于杂质漂浮速度的风速, 谷物与杂质进行旋转分离, 杂质通过吸杂管道经吸杂风机排出, 而干净的谷粒则从分离筒底部掉入接粮装置中, 从而达到清选谷物的目的<sup>[18-19]</sup>。根据文献[20], 选取含杂率为 7% 的待清选物料, 以谷粒清洁率  $Y_q$  和清选损失率  $Y_s$  作为性能评价指标。落入接粮箱中的净粮质量与落入箱中的物料总质量的比值即谷粒清洁率, 吸杂风机吸出的谷粒质量与吸出谷粒质量与接粮箱中谷粒质量之和的比值即清选损失率。

3 试验设计

为了进一步研究谷粒清洁率、清选损失率与扬谷器转速  $n_1$ 、吸杂风机转速  $n_2$  以及分离组件上表面与输送管道入口高度  $h$  之间的关系, 设计进行回归正交组合试验<sup>[21]</sup>。在本试验中, 选取的试验因素为 3 个, 因此进行三元二次回归正交组合试验。试验因素及水平编码值见表 1。

表 1 三元二次回归正交试验因素及水平

Table 1 Factors and levels of ternary quadratic regression orthogonal experiment

因素	水平					
	$-\gamma$	$-1$	$0$	$1$	$\gamma$	$\Delta_j$
扬谷器转速/(r·min <sup>-1</sup> )	1 133	1 190	1 455	1 720	1 777	265
吸杂风机转速/(r·min <sup>-1</sup> )	2 191	2 228	2 400	2 572	2 609	172
组件与管道入口间隔高度/mm	33	40	70	100	107	30

4 试验结果和参数优化以及验证

4.1 试验结果

在本试验中, 当零水平试验次数  $m_0=1$  时,

$\gamma=1.215$ 。设二次回归方程中的二次项为  $Z_{ji}^2$ , 其对应的编码用  $Z'_{ji}$  表示, 则可得出中心化处理后的每个二次项编码。三元二次回归正交组合试验结果见表 2。

表 2 三元二次回归正交试验结果

Table 2 The results of ternary quadratic regression orthogonal design experiment

试验号	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_1Z_2$	$Z_1Z_3$	$Z_2Z_3$	$Z'_1$	$Z'_2$	$Z'_3$	$Y_q/\%$	$Y_s/\%$
1	1	1	1	1	1	1	0.270	0.270	0.270	97.41	0.046
2	1	1	-1	1	-1	-1	0.270	0.270	0.270	98.26	0.057
3	1	-1	1	-1	1	-1	0.270	0.270	0.270	98.13	0.033
4	1	-1	-1	-1	-1	1	0.270	0.270	0.270	98.24	0.033
5	-1	1	1	-1	-1	1	0.270	0.270	0.270	98.26	0.041
6	-1	1	-1	1	1	1	0.270	0.270	0.270	98.24	0.042
7	-1	-1	1	1	-1	-1	0.270	0.270	0.270	95.30	0.031
8	-1	-1	-1	1	1	1	0.270	0.270	0.270	98.26	0.021
9	1.215	0	0	0	0	0	0.747	-0.730	-0.730	97.39	0.039
10	-1.215	0	0	0	0	0	0.747	-0.730	-0.730	99.13	0.030

表 2(续)

试验号	$Z_1$	$Z_2$	$Z_3$	$Z_1Z_2$	$Z_1Z_3$	$Z_2Z_3$	$Z_1'$	$Z_2'$	$Z_3'$	$Y_q / \%$	$Y_s / \%$
11	0	1.215	0	0	0	0	-0.730	0.747	-0.730	98.29	0.061
12	0	-1.215	0	0	0	0	-0.730	0.747	-0.730	98.26	0.007
13	0	0	1.215	0	0	0	-0.730	-0.730	0.747	98.26	0.032
14	0	0	-1.215	0	0	0	-0.730	-0.730	0.747	98.20	0.040
15	0	0	0	0	0	0	-0.730	-0.730	-0.730	98.28	0.033

通过回归分析, 得到谷粒清洁率  $Y_q$  和损失率  $Y_s$  与扬谷器转速( $n_1$ )、吸杂风机转速( $n_2$ )以及分离组件上表面与输送管道入口高度( $h$ )三因素编码值  $Z_1$ 、 $Z_2$ 、 $Z_3$  的回归方程。

$$Y_q = 98.0933 - 0.14807Z_1 + 0.34367Z_2 - 0.48525Z_3 - 0.73940Z_1Z_2 + 0.43345Z_1Z_3 - 0.00440Z_2Z_3 - 0.15234Z_1^2 - 0.14219Z_2^2 - 0.17265Z_3^2;$$

$$Y_s = 0.03730 + 0.00286Z_1 + 0.01344Z_2 - 0.00231Z_3 - 0.00165Z_1Z_2 - 0.00080Z_1Z_3 - 0.00515Z_2Z_3 + 0.00249Z_1^2 + 0.00215Z_2^2 + 0.0035Z_3^2。$$

对回归方程的显著性检验表明, 2 方程显著不失拟, 说明与实际情况拟合较好, 可用其描述试验因素对清选性能的影响。

### 4.2 参数优化

为了得到预测最佳清选效果, 对试验数据进行优化求解。由于旋风分离清选试验性能评价指标是谷粒清洁率和清选损失率, 优化属于多目标优化, 用惩罚函数法优化求解。

目标函数  $F(X) = -Y_q$ ; 性能约束条件:  $G(X) = Y_s$  0.003; 边界约束条件:  $-1.215 < Z_j < 1.215$ 。

经过优化可得清选装置最优结构和运动参数组合为: 扬谷器转速  $n_1 = 1133$  r/min, 吸杂风机转速  $n_2 = 2609$  r/min, 分离组件与输送管道入口高度  $h = 51$  mm, 此时, 预测谷粒清洁率为 98.93%, 清选损失率为 0.035%, 满足国家行业标准相关要求。

### 4.3 验证试验

对通过优化求解所得到的最优参数组合进行验证试验, 多次试验取平均值, 得到谷粒清洁率为 98.79%, 清选损失率为 0.032%。通过验证试验结果可知, 谷粒清洁率和清选损失率均与预测结果误差不大, 说明试验方法采用得当, 建立的回归方程可靠有效。

### 4.4 喂入量和含杂率对清选性能的影响

为了研究喂入量对清选性能的影响, 在回归正交组合试验得到的最佳参数组合基础上, 进行清选装置对喂入量的适应性试验, 其结果如图 4 所示。当喂入量增大时, 谷粒清洁率减小, 原因在于随着单位时间里清选的物料增多, 分离筒内物料相互影响不断增大, 使下降的谷粒中夹带轻小杂物和被吸出的杂物携带谷粒的机会增多。

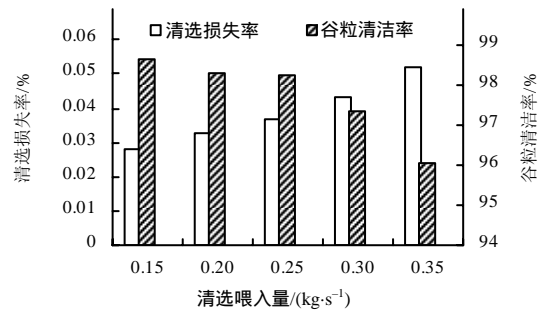


图 4 不同喂入量下的谷粒清选清洁率和损失率

Fig.4 The grain cleaning rate and loss rate under different feeding

在回归正交组合试验得到的最佳参数组合基础上, 进行清选装置的含杂率适应性试验, 其结果见图 5。随着待清选物料含杂物的不断增多, 混合物中短茎秆、颖壳、稻穗以及其他轻小杂余成分增多, 谷粒与杂物分离变得困难, 掉落谷粒中夹带的杂物和被吸出的杂物夹带籽粒增多, 而导致谷粒清洁率的降低, 损失率增大。

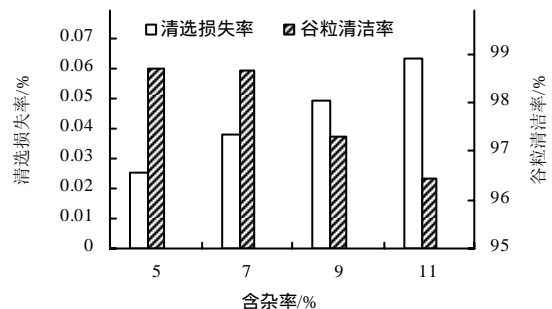


图 5 不同含杂率下的谷粒清选清洁率和损失率

Fig.5 The grain cleaning rate and loss rate under different percentage of trash content

## 5 结论

在旋风分离器中增加半球体分离组件的小型水稻联合收割机清选装置,采用如下运动参数为宜:扬谷器转速  $n_1=1\ 133\ \text{r/min}$ ,吸杂风机转速  $n_2=2\ 609\ \text{r/min}$ ,分离组件距入口高度  $h=51\ \text{mm}$ 。

回归正交组合试验表明,扬谷器转速、吸杂风机转速以及分离组件距入口高度对清选损失率影响小,但对谷粒清洁率影响较大。当吸杂风机转速提高以及分离组件距入口高度增加时,清洁率增加,而扬谷器转速对清洁率影响相反。

通过验证试验证明,该清选系统在最佳参数组合下,清选损失率为 0.035%,谷粒清洁率为 98.93%,满足国家行业标准要求。

### 参考文献:

- [1] 李黎红,倪建平,陈乾,等.中国杂交水稻种业的发展和展望[J].种子,2003,32(2):56-60.
- [2] 马萌.便携式谷物联合收割机清选系统试验研究与应用[D].洛阳:河南科技大学,2014.
- [3] 耿令新,张利娟,师清翔,等.便携式谷物联合收获机锥顶蜗壳式旋风分离清选系统参数优化[J].中国农机化学报,2013,34(4):146-149.
- [4] 王岳,杨林,韩增德,等.试论南方水稻收获工艺和联合收割机选型[J].农业机械学报,1997,28(1):140-144.
- [5] 魏世军.小型联合收割机清选系统试验研究[D].郑州:河南农业大学,2008.
- [6] 刘师多,师清翔,余炳辉,等.双风机圆筒筛清选机构的试验与参数优化[J].洛阳工学院学报,1998,19(1):59-63.
- [7] 王国欣,师清翔,倪长安,等.圆筒式短茎秆清理装置清选性能试验分析[J].洛阳工学院学报,2000,21(1):7-10.
- [8] 彭立岩.浅析旋风分离清选系统在谷物收割机上的应用[J].农业机械,2013,21(6):149.
- [9] 郑一平,林金秀,等.微型联合收割机的现状及前景[J].农机化研究,2007(9):232-234.
- [10] 倪长安,张利娟,刘师多,等.无导向片旋风分离清选系统的试验分析[J].农业工程学报,2008,24(8):135-138.
- [11] JB/T5117—2006 谷物联合收割机通用技术条件[S].
- [12] 吴文科,谢方平,王志高,等.联合收获机气流输送式清选机构[J].农业机械学报,2006,37(7):199-201.
- [13] 廖庆喜,陈立,李海同,等.油菜联合收获机脱出物清选试验台[J].农业机械学报,2013,44(10):80-85.
- [14] 伊文静,刘师多,师清翔,等.旋风分离清选系统结构及工况对清选性能的影响[J].农机化研究,2013,35(5):170-174.
- [15] 张利娟,刘师多,师清翔,等.物料状态对旋风分离清选系统清选性能的影响[J].河南科技大学学报(自然科学版),2006,27(3):68-70.
- [16] 孔秀华,王涛,黄法.流体力学[M].大连:大连海事大学出版社,2012:79-120.
- [17] 孙松林.小型水稻联合收获机的性能分析与发展探讨[J].湖南农业大学学报(自然科学版),1995,21(6):603-606.
- [18] 谢方平,王修善,任述光,等.4LZ-0.8型小型水稻联合收割机的设计[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2015,41(4):435-439.
- [19] 任述光,谢方平,王修善,等.4LZ-0.8型小型水稻联合收割机清选装置气固两相分离作业机理[J].农业工程学报,2015,31(12):16-22.
- [20] 刘正怀,郑一平,王志明,等.微型稻麦联合收获机气流式清选装置研究[J].农业机械学报,2015,46(7):103-108.
- [21] 李云雁,胡传荣.试验设计与数据处理[M].2版.北京:化学工业出版社,2010.

责任编辑:罗慧敏

英文编辑:吴志立