

双扬谷器旋风分离清选系统试验与参数优化*

师清翔¹ 马萌¹ 闫卫红² 周浩¹ 袁华杰¹ 李宇航¹

(1. 河南科技大学农业工程学院, 洛阳 471003; 2. 中国国机重工集团有限公司, 北京 100102)

摘要: 为设计便携式谷物联合收获机清选系统, 利用双扬谷器旋风分离清选系统试验台, 在无物料状态下通过研究两级扬谷器之间和二级扬谷器与风机之间输送管道内气流状态, 确定了物料顺利输送的一、二级扬谷器和风机转速的选取范围, 物料试验以小麦为试验对象, 以一级扬谷器、二级扬谷器和吸杂风机转速作为试验因素, 以清洁率为试验指标, 进行了正交试验和回归试验, 优化确定了最佳参数值。当一级扬谷器、二级扬谷器、风机转速分别为 300、764、3 255 r/min 时, 籽粒清洁率达 99% 以上。

关键词: 联合收获机 扬谷器 清选装置 参数优化

中图分类号: S225.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)11-0124-05

引言

目前, 丘陵山区谷物机械化收获, 迫切需要体积小、重量轻的便携式谷物联合收获机, 结构轻便、工作简单有效的清选系统对便携式谷物收获机至关重要。便携式谷物联合收获机拟利用割前脱的方式完成谷物的半喂入脱粒, 目前对于割前脱的谷物收获机采用气流清选系统, 该系统是通过物料惯性和气流来实现分离和清选, 其体积较大且压力损失难以控制。微型谷物联合收获机采用的旋风分离清选系统很好地解决了小型收获机对谷物清选的要求^[1-5], 笔者研究的便携式谷物联合收获机拟采用双扬谷器旋风分离清选系统来完成由脱粒装置分离出来的籽粒、颖糠和短茎秆混合物的分离清选工作^[6-12]。本研究从整机配置要求出发设计双扬谷器旋风分离清选系统试验台, 进行清选系统的清选性能试验, 探究清选系统主要运动参数对清选性能的影响规律, 为便携式谷物联合收获机清选系统的设计提供试验依据。

1 试验设备与方法

1.1 试验设备与仪器

清选试验台如图 1 所示, 主要由物料输送带、滑板、接料室、吸杂风机、旋风分离筒、一级扬谷器、二级扬谷器、物料推运器等组成, 主要工作部件的结构尺寸和相对位置依据便携式谷物联合收获机的整机配置要求确定。接料室长度为 500 mm, 物料推运器直径为 80 mm, 长度为 680 mm, 一级扬谷器直径为

200 mm, 二级扬谷器直径为 220 mm, 风机叶轮直径为 150 mm, 旋风分离筒直径为 230 mm, 高度为 420 mm。

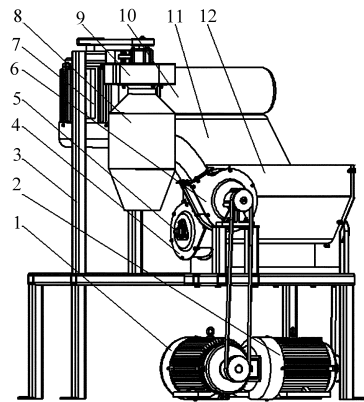


图 1 便携式谷物联合收获机清选系统试验台

Fig. 1 Portable grain combine harvester cleaning system test bench

1. 变频电动机 I 2. 变频电动机 II 3. 试验台支架 4. 一级扬谷器 5. 物料推运器 6. 二级扬谷器 7. 变频电动机 III 8. 旋风分离筒 9. 吸杂风机 10. 输送带 11. 滑板 12. 接料室

物料输送带完成试验物料的定量、稳定喂入, 物料推运器将定量喂入的物料输送至一级扬谷器, 一级扬谷器将物料抛送至与其呈垂直配置的二级扬谷器, 由二级扬谷器将物料抛送至旋风分离筒。两级扬谷器之间、二级扬谷器与旋风分离筒之间由矩形管道联接, 管道上开设有可密封的气流状态测量孔, 以检测特定运动参数下的气流状态。吸杂风机用于排除物料中的轻杂物, 其进风口和分离筒上端的吸杂口直接联接, 以提高风机吸杂效率, 吸杂风机、扬谷器均

由变频电动机驱动,以利于转速的调节。

试验仪器包括激光测速仪、毕托管、压力计、秒表、电子秤、精密电子秤、计算机等。

1.2 试验方案及方法

本清选系统拟应用于单行便携式谷物联合收获机,该机行进速度 0.5 m/s。室内清选试验所用物料的喂入量及物料构成是根据室内脱粒试验结果确定的。小麦试验喂入量为 48 g/s,含杂率为 19%。由于室内清选试验时间偏离实际收获季节,物料含水率低于田间作业情况,试验物料籽粒含水率为 8.7%,颖糠含水率 10.5%。

本研究所涉及的清选系统包含了以串联方式联接的两级扬谷器、旋风分离筒和吸杂风机,待清选物料在进入旋风分离筒之前需经管道实现在相互垂直的两个平面内的输送,清选过程中无堵塞是对该清选系统的基本要求。

待清选物料是籽粒、颖糠和短茎秆混合物,各组分空气动力学特性差别较大。清选系统工作过程中,位于联接管道中的物料受到重力、风力、惯性力以及管壁摩擦力的作用,风力和惯性力克服重力和管壁摩擦力实现物料的输送。籽粒密度较大,惯性力在其输送过程中发挥主要作用;颖糠和杂物密度较小,风力在其输送过程中发挥主要作用^[13-15]。在清选系统结构参数确定的情况下,惯性力主要与扬谷器的转速有关,而风力与扬谷器和风机的转速均有关系。合理确定扬谷器和风机的转速,保证管道中气流的理想状态是防止系统堵塞的关键。

管道中的气流状态由动压 p_d 和静压 p_s 所确定,动压大,气流速度高,对物料的输送能力强。静压大,说明系统输送阻力大。对于扬谷器之间联接管道而言,管道内 $p_s > 0$,说明二级扬谷器转速或风机转速过低;对于二级扬谷器与分离筒之间联接管道, $p_s > 0$,说明风机转速过低。因此,在进行系统性能试验时,扬谷器和风机转速选择应保证 $p_s \leq 0$ 。试验前,首先在无物料喂入的情况下,将毕托管分别固定于两扬谷器之间和二级扬谷器与旋风分离筒之间管道内,保证毕托管全压进气口迎气流来向。然后启动扬谷器、风机,并将其固定于要求转速,由压力计显示管道内气体的全压 p 、动压 p_d ,则静压 $p_s = p - p_d$ 。改变扬谷器和风机转速,测得不同运动参数下管道内的气流状态,发现当风机转速大于 2 000 r/min、一级扬谷器转速小于 400 r/min、二级扬谷器转速小于 1 000 r/min 时,两级联接管道中的静压 $p_s \leq 0$ 。此可作为系统性能试验时的运动参数选择范围依据。

性能试验时,首先将输送带速度调至 0.5 m/s,

将一级扬谷器、二级扬谷器和风机调至要求转速,并将物料均匀铺放在输送带上。然后依次启动风机、二级扬谷器和一级扬谷器,最后启动输送带。位于输送带上的物料经滑板进入接料室,由物料推运器输送至一级扬谷器,一级扬谷器将物料抛送至二级扬谷器叶轮中心部位,由二级扬谷器将物料抛送至旋风分离筒内,进入旋风分离筒内的物料受到惯性力、重力和气流的共同作用下,较重的籽粒沿分离筒内壁呈螺旋轨迹向下运动,经旋风分离筒下部的出粮口进入接粮箱,较轻的颖糠和杂余向分离筒中心运动,由吸杂风机排入接糠网袋,至此清选过程完成。

清选系统性能指标为籽粒清洁率和籽粒损失率,但在试验过程中发现籽粒损失最大为 0.08%,在此不列入试验的清选指标,故本研究以清洁率作为性能指标。

试验数据处理过程如下:将粮箱中物料称量并记为 Y ,用风机吹去粮箱物料中的颖糠和杂物,称得纯籽粒质量并记为 y ,则清洁率 $\eta = \frac{y}{Y} \times 100\%$ 。

2 试验与结果分析

2.1 正交试验

本试验在图 1 所示试验台上进行,试验因素编码表如表 1,选用 $L_9(3^4)$ 正交试验表,试验方案及结果见表 2。

表 1 试验因素水平表

Tab. 1 Coding of factor-levels

水平	因素		
	风机转速 A $/(r \cdot \min^{-1})$	二级扬谷器转速 $B/(r \cdot \min^{-1})$	一级扬谷器转速 $C/(r \cdot \min^{-1})$
1	2 300	700	250
2	2 500	800	300
3	2 800	900	350

表 2 小麦正交试验方案及试验结果

Tab. 2 Orthogonal test program and test results

试验号	风机转速 A $/(r \cdot \min^{-1})$	二级	一级	籽粒清洁 率 $\eta/\%$
		扬谷器转速 $B/(r \cdot \min^{-1})$	扬谷器转速 $C/(r \cdot \min^{-1})$	
1	2 300	700	250	96.83
2	2 300	800	300	96.64
3	2 300	900	350	95.41
4	2 500	700	300	97.93
5	2 500	800	350	97.86
6	2 500	900	250	97.57
7	2 800	700	350	98.75
8	2 800	800	250	98.62
9	2 800	900	300	98.33

正交试验极差分析表明,影响小麦籽粒清洁率的主要因素依次为A、B、C,较优组合为 $A_3B_2C_1$ 。对正交表进行方差分析,得到各个参数的显著水平分别为 $\alpha_A = 0.05$ 、 $\alpha_B = 0.25$ 、 $\alpha_C = 0.5$,可知一级扬谷器转速对性能影响不显著,在清选过程中只是起到输送作用。在回归试验中为保证物料输送稳定,将一级扬谷器转速固定为300 r/min。

2.2 二次通用旋转组合试验

在正交试验确定的较优试验条件附近,安排二次通用旋转组合试验。试验因素水平编码如表3所示,试验方案和试验结果如表4。 x_1 、 x_2 为编码值。

表3 回归试验因素编码表

Tab.3 Coding of regression test

编码	风机转速	二级扬谷器转速
	$A/(r \cdot \min^{-1})$	$B/(r \cdot \min^{-1})$
1.414	3 300	1 000
1	3 154	941
0	2 800	800
-1	2 446	659
-1.414	2 300	600

表4 回归试验方案及结果

Tab.4 Program and results of regression test

试验号	风机转速 x_1	二级扬谷器转速 x_2	籽粒清洁率 $\eta/\%$
1	1	1	99.38
2	1	-1	99.71
3	-1	1	96.53
4	-1	-1	96.70
5	-1.414	0	96.04
6	1.414	0	99.73
7	0	-1.414	98.45
8	0	1.414	98.10
9	0	0	98.91
10	0	0	99.00
11	0	0	98.90
12	0	0	98.98
13	0	0	99.01

应用二次通用旋转组合试验方法对表4中数据进行多元回归分析,得到小麦籽粒清洁率 η 与风机转速A、二级扬谷器转速B的回归方程

$$\eta = 42.20 + 0.0287A + 0.0285B - 0.000004A^2 - 0.00002B^2 - 0.0000008AB$$

回归方程的相关系数 $R = 0.99$,剩余标准差 $S = 0.09$,对方程进行方差分析,结果见表5,取 $\alpha = 0.1$ 的置信水平。

从表5的检验可以看出小麦清洁率的回归方程不失拟,且回归方程显著,说明回归方程与实际拟合得很好。

2.3 试验参数优化及验证

通过回归方程分别对A、B取偏导数得

$$\frac{\partial \eta}{\partial A} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial B} = 0 \quad (2)$$

对方程(1)和(2)求解得到最优参数组合:吸杂风机转速3 255 r/min,二级扬谷器转速764 r/min,清洁率99.87%。由于最佳参数组合在回归试验中没有出现,故需做最佳参数下的验证试验,验证试验结果如表6。

表5 回归方程方差分析

Tab.5 Variance analysis of the regression equations

方差来源	平方和	自由度	均方和	F值	显著性水平
失拟	0.05	3	0.02	6.35	不显著
误差	0.01	4	0.00		
回归	18.00	5	3.60	410.16	显著
剩余	0.06	7	0.01		
总和	18.06	12			

表6 验证试验方案及结果

Tab.6 Validation test program and results

试验号	风机转速	二级扬谷器转速	清洁率
	$A/(r \cdot \min^{-1})$	$B/(r \cdot \min^{-1})$	$\eta/\%$
1	3 255	764	99.83
2	3 255	764	99.79
3	3 255	764	99.98

2.4 清选性能影响因素分析

为研究单个因素对试验指标的影响规律,现将回归方程进行降维分析。将 $x_1 = 3 255$ r/min代入到回归方程中得到关于二级扬谷器转速 x_2 的一元回归方程,其对清洁率的影响规律曲线见图2;将 $x_2 = 764$ r/min代入到回归方程中得到关于风机转速 x_1 的一元回归方程,其对清洁率的影响规律曲线见图3。

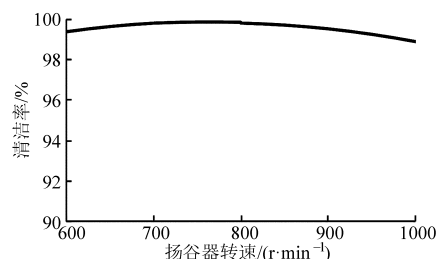


图2 二级扬谷器转速对清洁率的影响

Fig.2 Cleaning performance of the speed of winnower

由图2可以看出,当风机转速处在最优点时,在试验区区间[600,1 000]内,清洁率高达98.5%,且当二级扬谷器转速过高时,清洁率呈下降趋势,这是因为,随着二级扬谷器转速的提高,进入旋风分离筒物

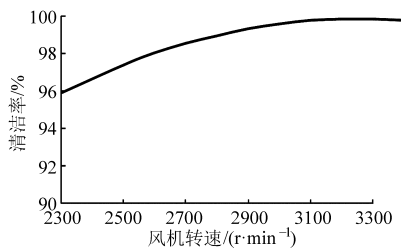


图 3 风机转速对清洁率的影响

Fig. 3 Cleaning performance of the speed of fan

料的速度增加,其沿旋风分离筒内壁运动时的离心力增加,物料中的籽粒和轻杂物一起压在旋风分离筒内壁,分离困难。从而使清洁率降低。由图 3 可以看出,当二级扬谷器转速处在最优点时,在试验区[2 300,3 300]内,物料的清洁率随风机转速增高明显增大,说明风机转速对清洁率有较大影响。

2.5 含水率适应性试验

前述试验所用物料含水率低于田间收割时物料含水率,为探究含水率较高时物料对本清选系统的影响,在室内试验允许范围内对清选系统做含水率适应性试验,试验结果见表 7。

从表 7 中可以看出,随着含水率的增加,清洁率

表 7 含水率适应性试验结果

Tab. 7 Adaptability test of moisture content %

含水率		清洁率
籽粒	颖糠	
10.3	11.7	98.9
11.5	17.1	98.7
12.6	21.4	98.2
13.3	28.5	97.8
14.7	30.2	97.5

呈下降趋势。这是因为含水率高,物料所受重力较大且物料之间的粘性较大,不宜分离。同时试验数据表明便携式谷物联合收获机不宜在籽粒含水率高于 13.3%、颖糠含水率高于 28.5% 的情况下进行田间清选作业。

2.6 喂入量适应性试验

为了探究较大喂入量下清选系统的清选性能,考虑到山区旱地小麦的生长情况,合理的安排了小麦的喂入量适应性试验,试验结果见表 8。

表 8 喂入量适应性试验结果

Tab. 8 Adaptability test of feeding quantity

喂入量/(g·s ⁻¹)	60	70	80	90	100
清洁率/%	99.7	99.4	99.4	99.3	99.2

从表 8 中可以看出,随着喂入量的增加,清洁率呈下降趋势,这是因为在分离筒内下降的籽粒夹带颖糠和上升的颖糠携带籽粒的机会增多。但在试验范围内,清洁率均达到 99% 以上,清选系统可满足山区较高产量小麦的清选要求。

3 结论

(1) 双扬谷器旋风分离清选系统的一级扬谷器对物料只有输送作用,对籽粒清洁率的影响很小。

(2) 清选系统的优化运动参数组合为:二级扬谷器转速为 764 r/min,吸杂风机转速为 3 255 r/min 时,小麦清洁率为 99.87%。

(3) 二级扬谷器、吸杂风机的转速均会影响籽粒清洁率,吸杂风机的转速增加时,籽粒清洁率明显提高,但二级扬谷器转速过高时,籽粒清洁率下降。

参 考 文 献

- Gebrehiwot M G, de Baerdemaeker J, Baelmans M. Effect of a cross-flow opening on the performance of a centrifugal fan in a combine harvester[J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(2): 247-256.
- Sujeet Kumar Shukla, Prashant Shukla, Pradyumna Ghosh. Evaluation of numerical schemes using different simulation methods for the continuous phase modeling of cyclone separators[J]. Advanced Powder Technology, 2011, 22(2): 209-219.
- 徐立章, 李耀明, 李洪昌, 等. 纵轴流脱粒分离-清选试验台设计[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 76-79, 134. Xu Lizhang, Li Yaoming, Li Hongchang, et al. Development on test-bed of longitudinal axial threshing-separating-cleaning unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 76-79, 134. (in Chinese)
- 周浩, 师清翔, 耿令新, 等. 基于免割收获的小麦扶持脱粒装置试验优化[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊): 52-56, 31. Zhou Hao, Shi Qingxiang, Geng Lingxin, et al. Experiment of wheat supported threshing apparatus based on free-cutting harvest[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.): 52-56, 31. (in Chinese)
- 王立军. 割前摘脱稻麦联合收获机分离清选装置物料运动模拟[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊): 62-64. Wang Lijun. Separation and initial cleaning chamber in grain-wheat combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 62-64. (in Chinese)
- 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. Ni Chang'an, Zhang Lijuan, Liu Shiduo, et al. Experimental analysis on cyclone separating cleaning system of no-guide vanes[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 135-138. (in Chinese)
- 刘师多, 张利娟, 师清翔, 等. 微型小麦联合收获机旋风分离清选系统研究[J]. 农业机械学报, 2006, 37(6): 45-48.

- Liu Shiduo, Zhang Lijuan, Shi Qingxiang, et al. Experimental research on cyclone separating cleaning system used on micro-combine harvester of wheat[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(6): 45-48. (in Chinese)
- 8 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.
Wu Wenke, Xie Fangping, Wang Zhigao, et al. Combine air conveyor cleaning mechanism[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(7): 199-201. (in Chinese)
- 9 李洪昌, 李耀明, 唐忠, 等. 基于神经网络的风筛式清选装置研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(增刊): 65-68.
Li Hongchang, Li Yaoming, Tang Zhong, et al. Air-and-screen cleaning device based on neural network[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 65-68. (in Chinese)
- 10 孙书民, 柯坚, 王进戈, 等. 两行微型收割机清选系统开发与研究[J]. 制造业自动化, 2012, 34(9): 15-18.
Sun Shumin, Ke Jian, Wang Jin'ge, et al. Development and research on two-row mini-harvester cleaning system[J]. Manufacturing Automation, 2012, 34(9): 15-18. (in Chinese)
- 11 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.
Yi Wenjing, Liu Shiduo, Shi Qingxiang, et al. Influence of cleaning performance affected by the structure of cyclone separating cleaning system and working condition[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(5): 170-174. (in Chinese)
- 12 钟挺, 胡志超, 顾峰玮, 等. 4LZ-1.0 Q型稻麦联合收获机脱粒清选部件试验与优化[J]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 76-81.
Zhong Ting, Hu Zhichao, Gu Fengwei, et al. Optimization and experiment for threshing and cleaning parts of 4LZ-1.0Q cereal combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 76-81. (in Chinese)
- 13 高春艳, 庞靖, 李心平, 等. 旋风分离型谷物清选器内流场数值模拟[J]. 农机化研究, 2013, 35(6): 37-40.
Gao Chunyan, Pang Jing, Li Xinping, et al. Numerical simulation of flow field of cyclone separator for cereal cleaning based on CFD[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013, 35(6): 37-40. (in Chinese)
- 14 程书山, 楚武利, 张浩光, 等. 离心风机性能及蜗壳壁面静压分布测试[J]. 风机技术, 2010(5): 19-21.
Cheng Shushan, Chu Wuli, Zhang Haoguang, et al. Measurement of centrifugal fan performance and volute wall surface static pressure distribution[J]. Compressor, Blower & Fan Technology, 2010(5): 19-21. (in Chinese)
- 15 成仲利, 李其昀, 朱现学, 等. 联合收获机清仓系统试验与气流压力损失分析[J]. 山东理工大学学报: 自然科学版, 2008, 22(6): 45-47, 50.
Cheng Zhongli, Li Qijun, Zhu Xianxue, et al. Studies in pressure loss of pneumatic dressing system for combine harvester[J]. Journal of Shandong University of Technology: Natural Science Edition, 2008, 22(6): 45-47, 50. (in Chinese)

Two-stage Winnower Cyclone Separating Cleaning System Performance Testing and Optimization

Shi Qingxiang¹ Ma Meng¹ Yan Weihong² Zhou Hao¹ Yuan Huajie¹ Li Yuhang¹

(1. Agricultural Engineering College, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China

2. China SINOMACH Heavy Industry Corporation, Beijing 100102, China)

Abstract: To solve the cleaning problems of portable reaper, the cleaning system test bench was designed and the wheat was chosen as the experimental object. Air flow test without material was done and analyzed the static pressure in the two stages of pipelines. The relation among the speed of first and second level winnower and the fan can be found. The test can provide the selection scope of motion parameters for the material test. In material test, the fan speed and the first and second winnower speed were selected for test factors, and the cleaning rate for test indicator. Through orthogonal test and quadratic general rotation test, the motion parameters of wheat were found out when its cleaning rate was best and the impact of individual factor on the indicator was researched by regression equation. The best motion parameters can be found through the test: when the speed of first and second level winnower and the fan was 300 r/min、764 r/min、3 255 r/min, the cleaning rate would be best. This combination of parameters will apply to portable reaper cleaning systems, and provide the system the reliable movement parameters.

Key words: Combine harvester Winnower Cleaning device Parameter optimization