

小型联合收获机旋风分离系统清选性能试验

金鑫¹ 杜新武¹ 甘帮兴² 姬江涛¹ 董祥³ 王国新²

(1. 河南科技大学农业工程学院, 洛阳 471003; 2. 现代农装科技股份有限公司, 北京 100083;

3. 中国农业机械化科学研究院, 北京 100083)

摘要: 为了解决小型联合收获机清选装置谷糠分离不彻底和损失率较高的问题,利用高速摄影装置研究了吸杂风机转速、扬谷器风机转速和通气孔直径对清选性能的影响机理,以小麦籽粒、颖糠、茎秆混合物料为对象,利用研制的旋风分离系统试验台,选取气孔排布方式、通气孔直径、吸杂风机转速和扬谷器风机转速为试验因素,清洁率和损失率为试验指标,进行了单因素和多因素清选性能试验。单因素试验结果表明,气孔排布方式为螺旋形时,清选效果较好,随着吸杂风机转速、扬谷器风机转速和通气孔直径的增加,清洁率先上升后降低,损失率则逐渐增加,最大损失率不超过2%;正交试验表明:吸杂风机转速为1 900 r/min、扬谷器风机转速为1 100 r/min、通气孔直径为8 mm时,清洁率平均值大于93%,损失率平均值低于1.5%,损失率比优化前降低了25%。

关键词: 小型联合收获机; 旋风分离系统; 优化; 性能试验; 高速摄影

中图分类号: S225.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2016)05-0099-07

Cleaning Performance Experiment of Cyclone Separating System in Miniature Combine Harvester

Jin Xin¹ Du Xinwu¹ Gan Bangxing² Ji Jiangtao¹ Dong Xiang³ Wang Guoxin²

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

2. The Modern Agricultural Equipment Co., Ltd., Beijing 100083, China

3. Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to solve the problems of halfway separating and high losing rate of the cyclone separation system, material movement analysis was done by using of high-speed photography. The wheat and mixture of stalk were chosen as the experiment objects, statistical experiment was carried out when diameter of air pores, rotating speed of the fan and rotating speed of the winnower were chosen as the experiment factors and cleaning rate and losing rate were chosen as the experiment indicators. Single factor experiment result showed that the arrangement of the air pores had effect on the cleaning ability. When the arrangement of the pores was spiral, the system performed better. The cleaning rate was increased first and went down later with the increasing of the rotating speed of the fan, winnower and the diameter of the air pores. The losing rate was increased with the increasing of the rotating speed of the fan, winnower and the diameter of the air pores, the value of losing rate was no more than 2%. Multi-factor experiment result showed that when the rotating speed of the fan was 1 900 r/min, the rotating speed of the winnower was 1 100 r/min and the diameter of the air pores was 8 mm, the cleaning system worked better, the average value of losing rate was less than 1.5%, which was reduced by 25% compared with the former.

Key words: miniature combine harvester; cyclone separation system; optimization; performance experiment; high-speed photography

收稿日期: 2015-10-28 修回日期: 2015-11-17

基金项目: 国家国际科技合作专项(2013DFA71130)、国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012AA10A502)和河南科技大学青年基金项目(2015NQ004)

作者简介: 金鑫(1986—),男,讲师,博士,主要从事农作物低损收获与高效种植技术研究,E-mail: jx.771@163.com

通信作者: 姬江涛(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业技术装备研究,E-mail: jj0907@163.com

引言

旋风分离系统是由扬谷器、籽粒输送通道、旋风分离筒和吸杂风机组成的气固分离系统,它是在旋风分离器的基础上,利用不同物质的漂浮速度对收获后的谷糠茎秆混合物进行分离^[1]。与传统的圆筒筛和振动筛相比,具有体积小、结构简单和分离效率高等特点,因而被广泛运用在微型谷物联合收获机上。

国内学者对旋风分离系统做了大量的研究^[2-5],并且带有旋风分离系统的收获机械也已成为成熟产品,然而在实际工作过程中仍出现谷糠分离不彻底和损失率高的问题。针对以上问题,相关学者分别从旋风分离系统不同机构参数和工况对旋风分离系统清选性能的影响做了大量研究^[6-15],其中有研究表明,旋风分离筒底部开有通气孔时分离效果较好^[12],但未对筒底部气孔参数进行深入研究。本文以分离筒底部孔的参数和工况为试验因素,对旋风分离系统清选性能进行试验研究。

1 试验条件

1.1 仪器和设备

旋风分离系统试验台主要由输送带、扬谷器、旋风分离筒、吸杂管道和吸杂风机组成,其结构如图1所示,核心部件旋风分离筒结构如图2所示,主要由杂余出口、上锥段、物料入口、筒体直线段和下锥段组成,在下锥段上按不同排布方式开直径为6 mm,中心距为15 mm,相同数量的通气孔。

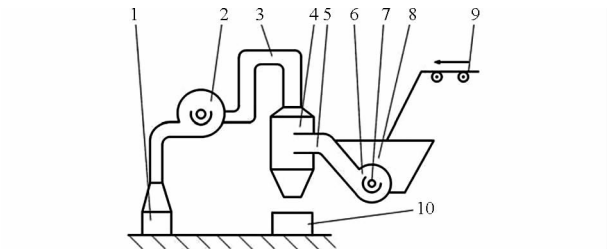


图1 旋风分离清选系统试验台原理图

Fig.1 Test-bed of cyclone separating-cleaning system

1. 接粮袋 2. 吸杂风机 3. 吸杂管道 4. 旋风分离筒 5. 输送管道 6. 扬谷器 7. 推运器 8. 接料室 9. 物料输送带 10. 接粮箱

试验仪器包括:变频电动机(YTSP100L-4-2.2 kW),电子秤,高速摄像设备(高速摄像机主机、摄像头、液晶显示屏、光源、变压器、光缆和电源线等)。

1.2 试验材料

物料混合物:试验采用河北省涞水县当年自然成熟的小麦,收获滚筒脱粒后含杂率约为40%,将

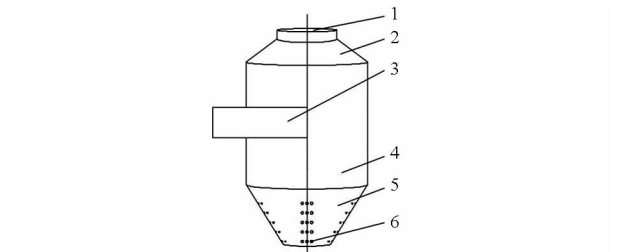


图2 旋风分离筒结构图

Fig.2 Structure of cyclone separator

1. 杂余出口 2. 上锥段 3. 物料入口 4. 筒体直立段 5. 下锥段 6. 气流入口

籽粒、颖糠和茎秆按照质量比19:10:3混合而成,总质量1.28 kg;其各成分的含水率分别为16.23%、21.46%和21.46%,长短茎秆长度以10 cm为界限(根据前期试验测试,对于小麦茎秆,10 cm以下茎秆与大于10 cm茎秆其漂浮速度范围有较大区别,分别为4.76~5.95 m/s和6.06~10.12 m/s)。清选喂入量为0.16 kg/s,取样时间为8 s。

1.3 试验方法和试验指标

试验过程中,将物料混合物均匀地平铺在输送带上,启动吸杂风机和扬谷器,调整转速,待电动机运行平稳后启动输送带,物料在输送带的带动下均匀地落入接粮口,经推送器推送至扬谷器部分,在扬谷器的抛扔作用下,经输送管道切向进入到旋风分离筒内部。混合物料在旋风分离筒内部受到旋转气流和惯性力的作用,较重的籽粒沿筒壁向下运动落入接粮箱中;较轻的颖糠和短茎秆在吸杂风机作用下随上行气流经吸杂管道排出落入接糠袋中。

试验选取籽粒清洁率 Y_q 和损失率 Y_s 作为清选性能指标,其计算公式为

$$Y_q = \frac{w_2}{w_1} \times 100\% \tag{1}$$

$$Y_s = \frac{w_3}{w_2 + w_3} \times 100\% \tag{2}$$

式中 w_1 ——接粮箱样品总质量
 w_2 ——接粮箱籽粒净质量
 w_3 ——接糠袋中籽粒质量

2 试验方案

2.1 单因素试验

(1)吸杂风机转速对清选性能的影响

为了探究吸杂风机不同转速对清选性能的影响,取扬谷器风机转速为1 100 r/min,直径为6 mm的通气孔,孔中心间距为15 mm,分别用均匀分布、螺旋形分布和三角形分布的分离筒(图3)进行试验,风机转速取1 700~2 500 r/min,试验结果见表1。

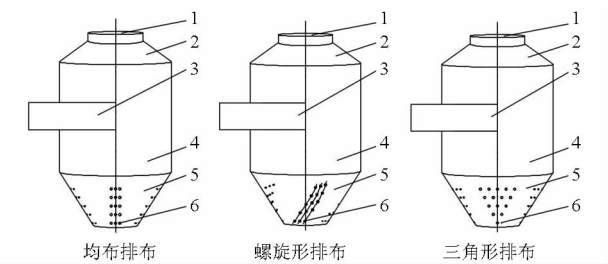


图3 不同排布方式的旋风分离筒结构图

Fig.3 Cyclone separator with different arrangements of air pores

1. 杂余出口 2. 上锥段 3. 物料入口 4. 筒体直立段
5. 下锥段 6. 气流入口

表1 不同吸杂风机转速下的清选试验结果

Tab.1 Experiment data of different rotating speeds of fan

吸杂风机 转速/ (r·min ⁻¹)	螺旋形		均布		三角形	
	清洁 率/%	损失 率/%	清洁 率/%	损失 率/%	清洁 率/%	损失 率/%
1 700	92.32	1.21	91.20	1.35	89.56	1.23
1 800	93.12	1.24	92.04	1.40	90.13	1.30
1 900	94.31	1.25	92.77	1.43	91.22	1.32
2 000	96.13	1.27	93.45	1.47	93.21	1.41
2 100	97.72	1.37	95.35	1.49	94.46	1.46
2 200	97.75	1.42	94.23	1.51	94.02	1.45
2 300	96.65	1.51	93.22	1.53	92.31	1.51
2 400	96.23	1.63	92.53	1.62	91.20	1.60
2 500	95.56	1.70	92.41	1.73	91.13	1.69

由表1中的数据得出风机转速对清洁率和损失率的影响曲线(图4、5),从图中可以看出,螺旋形分离筒分离性能最好,均布排布分离筒次之,三角形分离筒最差。对于3种不同排布方式的分离筒,其清洁率都随着风机转速的增加先增加后降低,转速在2 100 r/min左右时清洁率最高。通过高速摄像观察,这主要是由于在混合物料分离清选过程中,随着风速的增加物料各成分间的“分层效应”增强,当风机转速在2 100 r/min时,混合物料的层流状态最好,利于籽粒与颖糠、茎秆的分离;但当风速继续增大,混合物料的层流状态逐渐消失,越来越趋于稳流

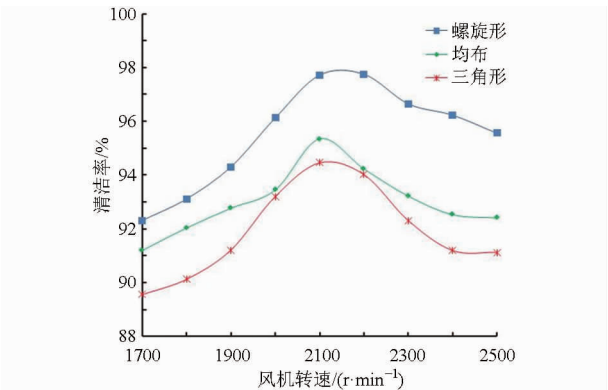


图4 风机转速对清洁率的影响

Fig.4 Effect of rotating speed of fan on cleaning rate

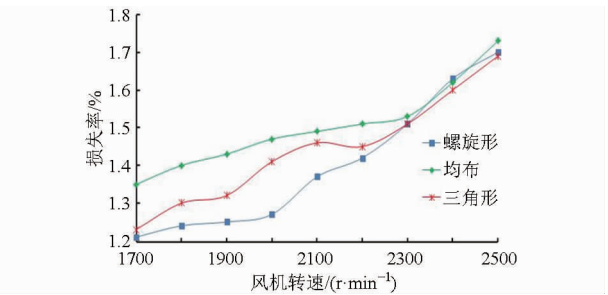


图5 风机转速对损失率的影响

Fig.5 Effect of rotating speed of fan on losing rate

状态进而清洁率下降;损失率随着风机转速的升高而增高,在试验转速范围内损失率为1.23%~1.69%,风机转速在2 100 r/min时,清洁率最高,且损失率小于2%,满足清选要求^[16]。

(2)扬谷器风机转速对清选性能的影响

为了探究扬谷器风机转速对清选性能的影响,依据上述试验中得到的最佳转速,以吸杂风机转速为2 100 r/min,分别采用同一直径通气孔,螺旋形分布、均匀分布和三角形分布的分离筒进行试验,扬谷器风机转速取700~1 500 r/min,试验结果见表2。

表2 不同扬谷器风机转速下清选试验结果

Tab.2 Experiment data of different rotating speeds of winnower

扬谷器 风机转速/ (r·min ⁻¹)	螺旋形		均布		三角形	
	清洁 率/%	损失 率/%	清洁 率/%	损失 率/%	清洁 率/%	损失 率/%
700	94.43	1.41	93.31	1.38	91.23	1.29
800	95.23	1.45	93.69	1.43	92.04	1.33
900	96.02	1.52	94.21	1.56	92.69	1.42
1 000	97.13	1.54	95.79	1.61	93.21	1.49
1 100	97.73	1.62	96.12	1.69	93.89	1.61
1 200	96.67	1.65	95.26	1.70	94.72	1.73
1 300	95.79	1.67	95.02	1.74	93.69	1.79
1 400	95.23	1.70	94.46	1.81	93.02	1.84
1 500	94.12	1.76	93.87	1.86	92.45	1.93

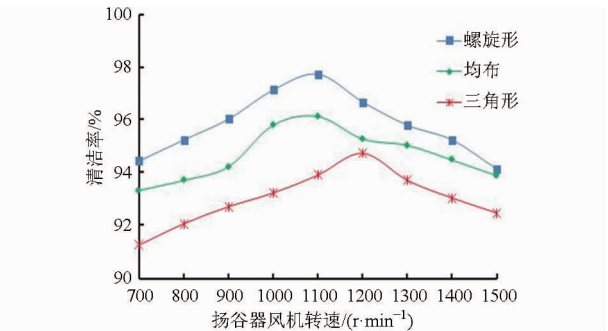


图6 扬谷器风机转速对清洁率的影响

Fig.6 Effect of rotating speed of winnower on cleaning rate

由表2中数据得出扬谷器风机转速对清洁率和损失率的影响曲线(图6、7)。从图中可以看出,随

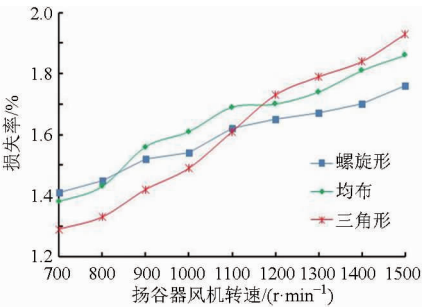


图 7 扬谷器风机转速对损失率的影响

Fig. 7 Effect of rotating speed of winnower on losing rate

着扬谷器风机转速的增加,清洁率先增加后降低,损失率随着转速的增加而增加,在试验转速范围内,损失率在 1.29% ~ 1.79% 之间,扬谷器风机转速在 1 100 r/min 左右时,清洁率高于 93%,损失率低于 2%,满足清选要求^[16]。

(3) 通气孔直径对清选性能的影响

为了探究不同直径的通气孔对清选性能的影响,选取单因素试验中的最佳转速:吸杂风机转速为 2 100 r/min,扬谷器风机转速为 1 100 r/min,对 3 种不同分布且带有直径分别为 3、4、5、6、7、8 mm 通气孔的分离筒进行试验,试验结果如表 3 所示。

表 3 不同通气孔直径的清选试验结果

Tab.3 Effect of different diameters of air pore on cleaning performance

通气孔 直径/ mm	螺旋形		均布		三角形	
	清洁 率/%	损失 率/%	清洁 率/%	损失 率/%	清洁 率/%	损失 率/%
3	93.21	1.32	91.14	1.40	91.56	1.36
4	94.02	1.40	92.03	1.43	92.33	1.41
5	95.89	1.43	92.94	1.49	92.64	1.46
6	97.66	1.51	93.69	1.54	93.24	1.56
7	96.23	1.57	93.24	1.62	92.66	1.62
8	95.65	1.60	92.86	1.71	92.05	1.68

由表 3 中的数据得出通气孔直径对清洁率和损失率的影响曲线(图 8、9),从图中可以看出,螺旋形排布的清选性能最好,均布排布次之,三角形排布最差。清洁率随着通气孔直径的增加先增加后降低,

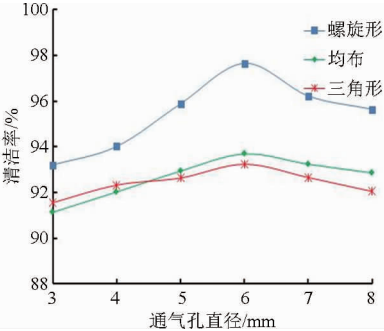


图 8 通气孔直径对清洁率的影响

Fig. 8 Effect of diameter of air pore on cleaning rate

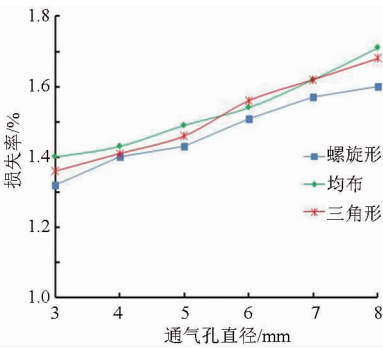


图 9 通气孔直径对损失率的影响

Fig. 9 Effect of diameter of air pore on losing rate

损失率则随着气孔直径的增加而增加,通气孔直径为 6 mm 时,清洁率大于 93%,损失率不高于 2%,清选效果较好。

2.2 混合物料运动状态分析

为了探究上述因素不同水平对旋风分离装置的影响机理,利用高速摄影设备对试验过程中籽粒、颖糠和茎秆运动状态进行拍摄观察,并对观察结果进行分析。

(1) 吸杂风机转速对物料运动状态的影响

吸杂风机转速主要影响输送管道和分离筒内气流的速度,进而影响物料的运动状态,3 种不同转速下,分离筒内物料的运动状态如图 10 所示。

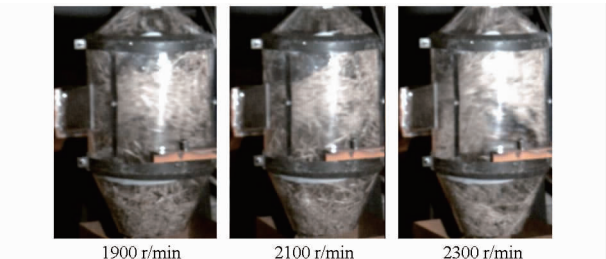


图 10 不同风机转速物料运动状态高速摄影结果

Fig. 10 Effect of different rotating speeds of fan on material movement state

吸杂风机转速从 1 900 r/min 升到 2 100 r/min 时,分离筒内气流速度明显增高,物料运动速度加快,物料间的运动分层现象明显,茎秆和部分颖糠受气流作用在分离筒直立部分做无规则运动,籽粒在颖糠和筒壁之间做螺旋运动,在重力作用下,落至底部出粮口,当速度逐渐增加至 2 300 r/min 时,茎秆和部分颖糠在直立部分运动幅度加大,夹杂部分籽粒做无规则运动,导致部分籽粒损失。在下锥段部分,籽粒运动速度加快,进入大部分颖糠所在的分离筒中心的高速区,两者之间的运动分层现象消失,籽粒夹杂颖糠下落,清洁率降低。

(2) 扬谷器风机转速对混合物料运动状态影响

扬谷器风机对混合物料的运动状态影响主要体现在物料进入分离筒时的初速度,即扬谷器风机转

速决定了物料进入分离筒中的初速度,初速度对物料在分离筒中的运动状态有不同程度的影响,3 种不同扬谷器风机转速下物料各成分的运动状态如图 11 所示。

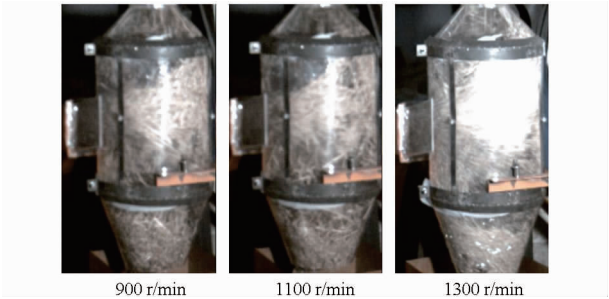


图 11 不同扬谷器风机转速物料运动状态的高速摄影结果

Fig. 11 Effect of different rotating speeds of winnower on material movement state

扬谷器风机转速由 900 r/min 升到 1 100 r/min 时,混合物料的运动速度相应提高。扬谷器风机转速较低时,物料各成分间运动速度有差异且相互间夹杂着运动,无规则运动的长茎秆速度较慢,颖糠速度较快,长茎秆阻滞了颖糠的运动。当扬谷器内气流运动速度较快时,物料进入分离筒的初速度较大,混合物料各组分运动速度趋向一致,相互间阻滞作用减弱。当转速上升至 1 300 r/min 时,各成分之间的运动速度差异明显且各成分间的夹杂作用显著,损失率上升、清洁率降低。

(3) 通气孔直径对物料运动状态的影响
下锥面开通气孔可以增加分离筒中的进气量,进而影响分离筒中气流场的分布,3 种不同通气孔直径时物料的运动状态如图 12 所示。

通过试验观察可知,气孔增大了分离筒内的进气量,能缓解分离筒下锥面部分的拥堵,当通气孔直径由小增大时,进气量增加,颖糠聚集到中心的高速区,随气流上升分离出去;当通气孔增大到 8 mm 时,部分籽粒也进入到中心高速区,各成分之间的分层运动现象逐渐消失,各成分之间相互夹杂运动,导致损失率上升,清洁率下降。

2.3 多因素试验

由上述单因素试验和高速摄影分析可知,吸杂风机转速、扬谷器风机转速、通气孔排布方式和通气孔直径对清选性能都有影响。并且吸杂风机转速在 2 100 r/min,扬谷器风机转速在 1 100 r/min,通气孔直径在 6 mm 时清选效果较好,由于影响清选性能的因素较多,在单因素试验得到的最佳试验参数基础上进行三因素三水平多指标正交试验 ($L_9(3^4)$ 表),试验因素水平表如表 4 所示,试验指标为清洁率和损失率。

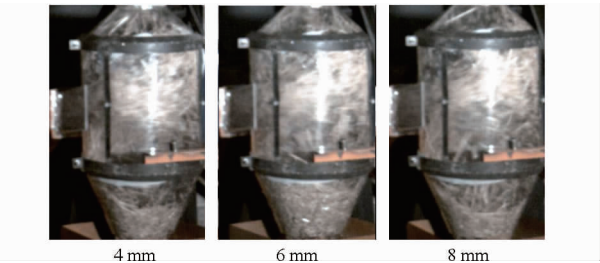


图 12 不同通气孔直径影响物料运动状态的高速摄影结果

Fig. 12 Effect of different diameters of air pore on material movement state

表 4 试验因素水平
Tab. 4 Levels of experimental factors

水平	试验因素		
	通气孔直径/ mm	吸杂风机转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	扬谷器风机转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)
1	4	1 900	900
2	6	2 100	1 100
3	8	2 300	1 300

多指标正交试验结果见表 5, A、B、C 为因素编码值。根据试验指标,清洁率越大越好,从表中的数据可知,因素 C 的极差最大,然后是因素 B,其次是因素 A,因此因素 A 对试验结果影响较大,取水平 2 最好,因素 B 次之,取水平 2 最好,最后是因素 A,取水平 2 较好。损失率越小越好,因素 A 极差最大,然

表 5 试验方案与结果
Tab. 5 Experiment scheme and result

试验号	A	B	空列	C	清洁率/%	损失率/%
1	1	1	1	1	91.22	1.62
2	1	2	2	2	97.54	1.46
3	1	3	3	3	92.31	1.33
4	2	1	2	3	96.45	1.58
5	2	2	3	1	94.12	1.74
6	2	3	1	2	92.45	1.62
7	3	1	3	2	95.32	1.22
8	3	2	1	3	92.31	1.43
9	3	3	2	1	93.21	1.31
清洁率/%	k_1	93.69	94.33	91.99	92.85	
	k_2	94.34	94.65	95.73	95.10	
	k_3	93.61	92.65	93.91	93.69	
	极差 R	0.73	2	3.74	2.25	
	因素主次 优方案	C、B、A $C_2B_2A_2$				
损失率/%	k_1	1.46	1.38	1.46	1.55	
	k_2	1.64	1.63	1.54	1.46	
	k_3	1.32	1.42	1.43	1.44	
	极差 R	0.33	0.25	0.11	0.077	
	因素主次 优方案	A、B、C $A_3B_1C_3$				

后是因素 B , 其次是因素 C , 因此因素 A 对试验结果影响较大, 取水平 3 最好, 其次是因素 B , 取水平 1 最好, 而后是因素 C , 取水平 3 最好。对于清洁率而言, 最佳组合为 $C_2 B_2 A_2$, 即扬谷器风机转速为 1 100 r/min, 吸杂风机转速为 2 100 r/min, 通气孔直径为 6 mm 时最佳, 对于损失率而言, 最佳组合为 $A_3 B_1 C_3$,

即通气孔直径为 8 mm、吸杂风机转速为 1 900 r/min、扬谷器风机转速为 1 300 r/min 时效果最好。

由以上分析可知, 两试验指标的最佳组合不同, 利用多指标正交试验设计中的综合平衡法对因素进行综合比较和分析, 根据试验结果, 作出两种指标的趋势图(图 13、14)。

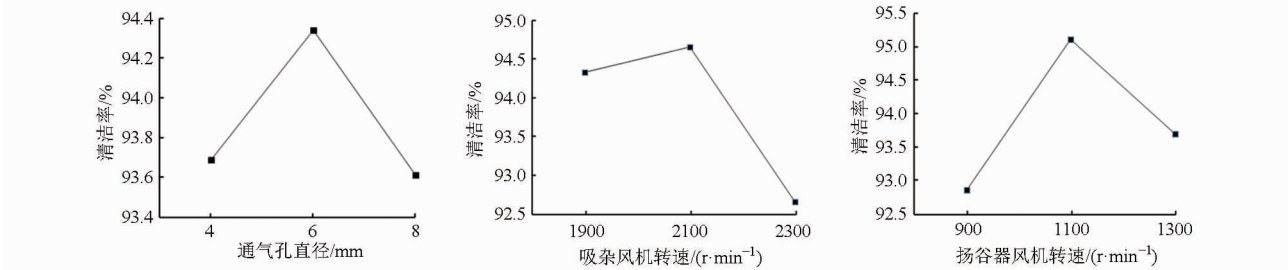


图 13 清洁率随 3 个因素的变化曲线

Fig. 13 Tendency curves of cleaning rate

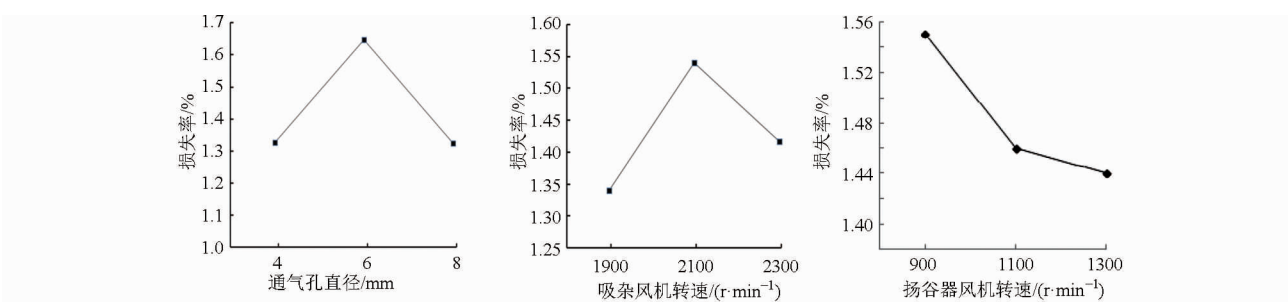


图 14 损失率随 3 个因素的变化曲线

Fig. 14 Tendency curves of losing rate

因素 A : 对于清洁率, 因素 A 取 A_2 最好, 对于损失率, 因素 A 取 A_3 较好, 从图 13 中可以看出, A 取 A_2 和 A_3 时, 清洁率相差不大, 且下降趋势不明显, 从图 14 中可以看出, A 取 A_2 和 A_3 时, 损失率相差较大, 且下降趋势明显, 综合以上分析, 因素 A 取 A_3 。

因素 B : 对于清洁率, B 取 B_2 最好, 对于损失率, B 取 B_1 最好, 从图 13 中可以看出 B_1 和 B_2 相差不大, 从图 14 中可以看出 B 取 B_1 和 B_2 时, 结果相差较大, 且上升趋势明显, 因此 B 取 B_1 较好。

因素 C : 对于清洁率, C 取 C_2 最好, 对于损失率, C 取 C_3 最好, 从图 13 中可以看出, C 取 C_1 和 C_2 时, 对清洁率的影响较大, 上升趋势明显, 从图 14 中可以看出, C 取 C_2 、 C_3 时, 损失率相差不大并且变化趋势不明显, 因此 C 取 C_2 最好。

综合以上分析可知, 最佳组合为 $C_2 B_1 A_3$, 即扬谷器风机转速为 1 100 r/min、吸杂风机转速为 1 900 r/min、通气孔直径为 8 mm 时, 在此工况下进行试验测得清洁率为 97.6%, 损失率为 1.32%。

3 结论

(1) 单因素清选试验表明: ①对于 3 种不同排

布方式通气孔的旋风分离筒, 螺旋形排布的清选性能最好, 随着吸杂风机转速的增加, 清洁率先上升后降低, 最佳风机转速为 2 100 r/min; 损失率则随着风机转速的增加而增加, 在试验范围内, 损失率在 1.23% ~ 1.69% 之间, 符合清选要求^[16]。②随着扬谷器风机转速的增加, 清洁率先上升后下降, 最佳风机转速为 1 100 r/min; 损失率随着扬谷器风机转速的增加而增加, 在试验范围内, 损失率在 1.29% ~ 1.79% 之间。③随着通气孔直径的增加, 清洁率先上升后下降, 最佳直径为 6 mm; 损失率随着通气孔直径的增加而增加, 在试验范围内, 损失率在 1.36% ~ 1.68% 之间。

(2) 利用高速摄像装置分析不同工况和孔参数对分离筒内物料运动状态的影响机理, 结果表明, 吸杂风机转速、扬谷器风机转速和通气孔直径对分离筒内混合物的运动状态有明显的影 响, 取上述试验参数的不同水平分别进行试验运动状态观察可知, 随着试验参数的不断增大, 混合物的运动状态由混乱的相互夹杂运动状态逐渐转为分层运动状态(清选效果好), 再由分层运动状态转变为混乱的相互夹杂运动状态(清选效果差)。这一试验结果可为确定分离系统的最佳工况参数提供参考。

(3)正交试验结果表明,通气孔直径、吸杂风机转速和扬谷器风机转速为影响清选性能的主要因素,利用综合分析法得出最佳组合为 $A_3B_1C_2$,即通气孔直径为8 mm、吸杂风机转速为1 900 r/min、扬谷器风机转速为1 100 r/min时,清洁率平均值超过93%,损失率平均值低于1.5%,比优化前降低了25%。

参 考 文 献

1 徐云云. 新型旋风分离清选系统及其在微型谷物联合收割机上的应用[D]. 洛阳:河南科技大学, 2010.
XU Yunyun. New cyclone separating system and its application on the micro-combine[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2010. (in Chinese)

2 敬志臣, 韩正晟, 高爱民, 等. 基于 Fluent 软件的旋风分离清选系统仿真研究[J]. 机械研究与应用, 2014(6): 25-27,30.
JING Zhichen, HAN Zhengsheng, GAO Aimin, et al. Simulation study on cyclone separation cleaning system based on Fluent[J]. Mechanical Research & Application, 2014(6): 25-27,30. (in Chinese)

3 廖庆喜, 万星宇, 李海同, 等. 油菜联合收获机旋风分离清选系统设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(14): 24-31.
LIAO Qingxi, WAN Xingyu, LI Haitong, et al. Design and experiment on cyclone separating cleaning system for rape combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(14): 24-31. (in Chinese)

4 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. Experiment analysis on cyclone sparating system of no-guide vanes [J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(8): 135-138. (in Chinese)

5 唐倩雯, 尹健. 谷物气流清选系统的仿真研究[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(9): 1890-1894.
TANG Qianwen, YIN Jian. Simulation study on air cleaning mechanical system of grain[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2012, 51(9): 1890-1894. (in Chinese)

6 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): 146-149,133.
GENG Lingxin, ZHANG Lijuan, SHI Qingxiang, et al. Parameter optimization of cleaning system of corn-top volute on portable grain combine[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(4): 146-149,133. (in Chinese)

7 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.
MA Meng. Research and application on portable grain combine harvester cleaning system[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)

8 庞奇. 新型旋风分离清选系统内部气流及物料状态研究[D]. 洛阳:河南科技大学, 2009.
PANG Qi. Research on the flow field and material motion status inside new cyclone separating cleaning system[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)

9 师清翔, 马萌, 闫卫红, 等. 双扬谷器旋风分离清选系统试验与参数优化[J]. 农业机械学报, 2014, 45(11): 124-128.
SHI Qingxiang, MA Meng, YAN Weihong, et al. Experiment and parameter optimization double winnow cyclone separating cleaning system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 124-128. (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(18): 15-18.
SUN Shumin, KE Jian, WANG Jin'ge, et al. Development and research on two-row mini-harvester cleanning system [J]. Manufacturing Automation, 2012, 34(18): 15-18. (in Chinese)

11 王升升, 师清翔, 倪长安, 等. 旋风分离清选系统阻力特性及工况的试验研究[J]. 河南科技大学学报:自然科学版, 2011, 32(4): 53-56, 111.
WANG Shengsheng, SHI Qingxiang, NI Chang'an, et al. Testing research on resistance characteristics and operating in cyclone separating cleaning system[J]. Journal of Henan University of Science & Technology: Natural Science, 2011, 32(4): 53-56, 111. (in Chinese)

12 伊文静. 微型谷物联合收割机旋风分离清选系统工况及结构运动参数研究[D]. 洛阳:河南科技大学, 2012.
YI Wenjing. Working conditions and structure parameters research on cyclone separating cleaning system of micro-combine grain [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)

13 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(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(5): 170-174. (in Chinese)

14 周学建,袁华杰,闫卫红,等.联合收获机吸杂口偏置型旋风分离清选装置试验[J].农业机械学报,2014,45(8):80-85,159.
ZHOU Xuejian, YUAN Huajie, YAN Weihong, et al. Performance experiment on cyclone separating device based on off-centered inlet scoop[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 80-85,159. (in Chinese)

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, 109.
ZHANG Lijuan, LIU Shiduo, SHI Qingxiang, et al. Effect of material status on cleaning performance of cyclone separating system [J]. Journal of Henan University of Science & Technology: Natural Science, 2006, 27(3): 68-70, 109. (in Chinese)

16 NY/T 995—2006 谷物(小麦)联合收获机械作业质量[S]. 2006.