

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.014

# 4LZ-1.0Q型稻麦联合收获机脱粒清选部件试验与优化\*

钟挺 胡志超 顾峰玮 曹明珠 陈南云 王海鸥

(农业部南京农业机械化研究所农副产品加工工程技术中心, 南京 210014)

**【摘要】** 对4LZ-1.0Q型稻麦联合收获机脱粒清选部件进行了正交试验,采用模糊综合评价法对小麦田间试验结果进行分析,得出脱粒清选环节中钉齿脱粒滚筒、栅条凹板筛、上盖板、振动筛、离心风机部件的优化组合参数。试验结果表明,影响脱粒性能的因素主次顺序为:滚筒齿顶线速度、脱离间隙、上盖板导向次数、凹板筛筛分包角、凹板筛筛孔大小和脱粒间隙,优选参数组合为滚筒齿顶线速度 25 m/s、脱离间隙 55 mm、上盖板导向 4 次、凹板筛筛分包角 204°、凹板筛筛孔尺寸 36 mm × 15 mm、脱粒间隙 15 mm;影响清选性能的因素主次顺序为:振动筛曲柄转速、筛面结构形式、离心风机转速、振动筛振幅,优选参数组合为振动筛曲柄转速 404 r/min、筛面 16 mm 方孔编织筛、离心风机转速 1 787 r/min、振动筛振幅 30 mm。可控制含杂率小于 3%、破碎率小于 1%、脱粒清选籽粒损失率小于 1.5%。

**关键词:** 稻麦联合收获机 脱粒 清选 试验

**中图分类号:** S225.31 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)10-0076-06

## Optimization and Experiment for Threshing and Cleaning Parts of 4LZ-1.0Q Cereal Combine Harvester

Zhong Ting Hu Zhichao Gu Fengwei Cao Mingzhu Chen Nanyun Wang Haiou

(Research Center of Agricultural By-products Processing Engineering Technology, Nanjing Research Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China)

### Abstract

Orthogonal experiment of threshing and cleaning parts of 4LZ-1.0Q cereal combine harvester was designed. Wheat field experiments with fuzzy analysis of synthesise evaluation were analyzed. The optimized group of parameters in roller, concave board screen, cover plate, vibration sieve and centrifugal blower was got. Test results indicated the sequences of factors influencing the threshing performance were roller linear velocity, separating interval, guide number of cover plate, mesh size and screening area of concave board screen and threshing interval. The values were 25 m/s, 55 mm, 4, 204°, 36 mm × 15 mm and 15 mm, respectively. The sequences of factors influencing the cleaning performance were vibration sieve crank rotating speed, vibration sieve type, centrifugal blower rotating and amplitude of vibration sieve. The values were 404 r/min, 16 mm, 1 787 r/min and 30 mm. Thus, the impurity rate was less than 3%, the broken rate was less than 1% and the loss rate was less than 1.5%.

**Key words** Cereal combine harvester, Threshing, Cleaning, Experiment

### 引言

相对其他作物而言,我国稻麦联合收获技术发

展较早、水平较高,但与发达国家相比还存在较大差距,有待攻克和提升完善的技术问题还很多。

脱粒、分离、清选是稻麦联合收获作业关键环

收稿日期: 2011-10-18 修回日期: 2011-12-23

\* 农业部 2009 年度公益性行业(农业)科研专项资助项目(200903050)

作者简介: 钟挺,副研究员,主要从事农业机械化工程研究,E-mail: gfwsl@ yahoo.com.cn

通讯作者: 胡志超,研究员,博士,主要从事农业机械化工程及农产品加工技术装备研究,E-mail: nfzhongzi@163.com

节,影响因素复杂多样且相互制约,有效提高脱粒、清选环节的作业性能始终是稻麦机械化收获设备研发中必须重点考虑的问题之一。4LZ-1.0Q 型稻麦联合收获机是为适应南方丘陵山区作业研发地的小喂入量联合收获机。为提高机具适应性,攻克脱粒清选简约化技术难题,保证机具收获质量,本文针对该联合收获机的脱粒清选部件进行田间性能试验,分析各结构参数和运动参数对作业性能的影响主次关系,优化确定脱粒清选部件的较优参数组合,以期为我国轻简型稻麦收获机械设计提供与优化提供参考。

## 1 4LZ-1.0Q 型全喂入稻麦联合收获机

### 1.1 工作过程

该机采用全喂入横轴流脱粒原理,结构如图 1 所示,主要由底盘、传动系统、分禾器、拨禾器、切割装置、耙齿输送装置、脱分装置和清选系统等作业部件组成。其工作过程为:收获机前行时,分禾器与拨禾器将割幅内稻麦与两侧分开并拨向收获台,切割装置将茎秆切断,带穗头的茎秆进入耙齿输送装置,由喂入口进入脱分装置,已脱茎秆经排草口排出,籽粒与部分杂余分离至清选系统,杂余经清选系统分离并排出,籽粒经出粮系统排入接粮袋。

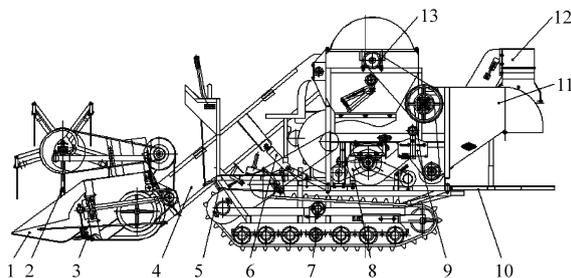


图 1 收获机结构简图

Fig. 1 Overall structure of combine harvester

1. 分禾器 2. 拨禾器 3. 切割装置 4. 耙齿输送装置 5. 操控部件
6. 液压系统 7. 橡胶履带行走系统 8. 清选系统 9. 张紧组件
10. 底盘 11. 脱粒机架 12. 出粮系统 13. 脱分装置

### 1.2 脱粒清选部件及影响因素

脱粒清选部件结构简图如图 2 所示,主要包括上盖板、钉齿脱粒滚筒、栅条凹板筛、离心风机和振动筛等工作部件。评价脱粒清选性能的指标有脱净率、破碎率、夹带损失率、含杂率和吹出损失率。

达到良好的脱粒性能是寻求脱净率、破碎率和夹带损失 3 个指标的有效平衡。对脱粒分离部件的优化设计须注意以下几点:①脱粒时间、强度和频率的选取需尽量合理。击打频率与强度若选取偏高,有利于提高脱粒效率,但易增加产生断穗、断枝的机率,而断穗、断枝较难彻底脱净,同时也易增加籽粒

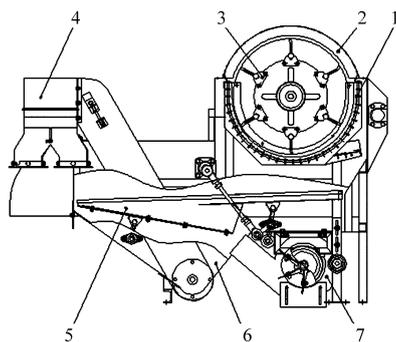


图 2 结构简图

Fig. 2 Overall structure

1. 栅条凹板筛 2. 上盖板 3. 钉齿脱粒滚筒 4. 出粮系统
5. 振动筛 6. 脱粒机壳体 7. 离心风机

的破碎机率;反之,如果略减弱强度、减少频率,对降低籽粒破碎率有益,但无法确保脱粒效率与良好脱净率指标。②脱离间隙(脱粒钉齿齿顶与上盖板间距)选取要合适。若偏小,已脱籽粒被夹于秸秆层中不易甩出,最后被携带至排草口排出,可能造成夹带损失;若偏大,易导致钉齿抓取谷草不力,影响滚筒内作业顺畅性。③凹板筛筛分面积与筛孔大小需合理选择。筛分面积由包角决定,包角偏小,筛分面积偏小,分离效果将打折扣;而筛孔尺寸如果偏大,容易增加未脱穗头从筛孔掉落的机率,会降低收获质量,如果尺寸偏小,籽粒分离效果变差,会出现夹带损失<sup>[1,9]</sup>。

清选部件采用风筛选配结构,凹板筛下物(籽粒、大轻杂、小轻杂)形成料帘均匀掉落至振动筛前部,离心风机吹出的筛上气流将小轻杂直接吹出机外。同时,由籽粒与大轻杂组成的混合物在筛子纵向振动与筛下气流向上吹托的双重作用下,逐渐形成纵向均匀分布且完成杂余与谷粒的上、下疏松分层。振动筛的纵向筛选推送及筛上气流吹动,使籽粒在筛面上前后滑滚,经筛孔掉落至出粮螺旋输送机收集,大轻杂在筛面上浮动翻滚向筛尾移动直至排出机外<sup>[2]</sup>。所以,对清选部件的优化设计应注意以下几点:①比较确定振动筛面的结构形式。②振动筛振幅与频率的参数选择需保证对物料的有效分层及对大轻杂的有力推送,降低含杂率中大轻杂含量。③优化离心风机及气流通道参数,吹走小轻杂的同时不影响籽粒的下落,降低吹出损失及含杂率中小轻杂含量<sup>[3,10]</sup>。

综上分析,确定脱粒性能的试验因素为脱粒间隙、上盖板导向次数(有效脱粒时间)、滚筒齿顶线速度(脱粒强度)、脱离间隙、凹板筛筛分包角、凹板筛筛孔尺寸,确定清选性能的试验分析因素(风道参数固定)为振动筛曲柄转速、振动筛振幅、离心风机转速和筛面结构形式,并进行性能优化试验。

## 2 试验总体设计

田间试验时间为 2011 年 6 月, 试验对象为小麦, 地点为江苏省南京市江宁区朱马场。为减少田间试验带来的误差影响, 尽可能选择土地较为平整、小麦长势较为均匀的田块。试验前测试如下数据: 小麦平均植株高度 95 cm、籽粒含水率 22%、留茬

10 cm 时作物平均总质量  $1.34 \text{ kg/m}^2$ 、草谷比 1.1。

### 2.1 脱粒性能试验设计

脱粒试验以脱粒间隙、上盖板导向次数、滚筒齿顶线速度、脱离间隙、凹板筛筛分包角、凹板筛筛孔尺寸为影响因素, 以脱净率、破碎率、夹带损失率为考查指标, 建立  $L_{16}(4^3 \times 2^3)$  正交表进行混合正交试验<sup>[4]</sup>, 因素水平安排如表 1 所示。

表 1 脱粒正交试验因素水平

Tab. 1 Factors and levels of orthogonal experiment in threshing

水平	因素					
	脱粒间隙 $T/\text{mm}$	滚筒齿顶线速度 $S/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	脱离间隙 $X/\text{mm}$	上盖板导向 次数 $D$	凹板筛筛分包角 $A/(\circ)$	凹板筛筛孔尺寸 $K/\text{mm} \times \text{mm}$
1	15	22	50	4	180	$36 \times 12$
2	20	23	55	5	204	$36 \times 15$
3	25	24	60			
4	35	25	65			

田间试验时, 机具以  $0.58 \text{ m/s}$  行走速度、低割茬 (10 cm)、满割幅 (1.4 m) 进行收获作业, 测定喂入量约为  $1.0 \text{ kg/s}$ , 以 15 m 作为一个行程。每个行程内分别在出粮口接籽粒取样, 在排草口接未脱净穗头和夹带籽粒取样, 为保证田间试验的取值尽可能精确, 每一个试验序号取 5 次行程的均值, 根据排草口未脱籽粒质量、夹带籽粒质量和出粮口破碎籽粒质量及三处籽粒总质量计算脱净率、破碎率和夹带损失率。

### 2.2 清选性能试验设计

清选试验以振动筛曲柄转速、振动筛振幅、离心风机转速和筛面结构形式为影响因素, 以含杂率与吹出损失率为考查指标, 建立  $L_9(3^4)$  正交表进行正交试验<sup>[4]</sup>, 因素水平安排如表 2 所示。

表 2 清选正交试验因素水平

Tab. 2 Factors and levels of orthogonal experiment in cleaning

水平	因素			
	振动筛曲柄转速 $Q/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	振动筛振幅 $F/\text{mm}$	离心风机转速 $L/\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	筛面结构形式 $G$
	1	365	25	1 573
2	388	30	1 787	编织筛 (方孔 16 mm)
3	404	35	1 986	圆孔筛 ( $\phi 10 \text{ mm}$ )

茬 (10 cm)、满割幅 (1.4 m) 进行收获作业, 测定喂入量为  $1.0 \text{ kg/s}$ , 以 15 m 作为一个行程。每个行程内分别在出粮口及机具尾部 (振动筛尾部) 接籽粒并称量, 为保证田间试验的取值尽可能精确, 每一个试验序号取 5 次行程的均值。以出粮口接料总质量、出粮口籽粒质量及吹出籽粒质量计算含杂率与吹出损失率。

## 3 试验结果与分析

### 3.1 脱粒性能试验结果与分析

根据脱粒试验安排得出每组试验序号下脱净率、破碎率及夹带损失率数据如表 3 所示。对这 3 指标试验结果采用模糊综合评价法进行数据处理<sup>[5]</sup>: 在确定评价指标集和对象集的前提下, 建立隶属函数和确定权重分配集, 分别计算 3 指标的隶属度, 最后计算分析模糊综合评价值。

试验数据分析时, 首先确定脱净率  $Y_1$ 、破碎率  $Y_2$ 、夹带损失率  $Y_3$  为评价指标集, 正交试验的 16 组试验数据为评价对象集; 由于脱净率为偏大型指标, 即指标越大越好; 破碎率和夹带损失率为偏小型指标, 即指标越小越好, 因此隶属函数  $R$  为

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ r_{31} & r_{32} & \cdots & r_{3n} \end{bmatrix}^T \quad (n = 16) \quad (1)$$

$$\text{其中 } r_{1n} = \frac{Y_{1n} - Y_{1n\min}}{Y_{1n\max} - Y_{1n\min}} \quad (n = 1, 2, \cdots, 16) \quad (2)$$

$$r_{2n} = \frac{Y_{2n\max} - Y_{2n}}{Y_{2n\max} - Y_{2n\min}} \quad (n = 1, 2, \cdots, 16) \quad (3)$$

田间试验时, 机具以  $0.58 \text{ m/s}$  行走速度、低割

$$r_{3n} = \frac{Y_{3nmax} - Y_{3n}}{Y_{3nmax} - Y_{3nmin}} \quad (n = 1, 2, \dots, 16) \quad (4)$$

其次根据检测标准,总损失率、破碎率和含杂率为三大收获性能指标,试验计算时总损失率为割台落地损失、未脱损失、夹带损失与清选吹出损失之和,综合考虑,试验结果计算时拟定未脱损失(用脱净率数值表征)和夹带损失为同一比重、破碎率比

重略高于两者,据此确定试验评价指标  $Y_1, Y_2, Y_3$  对应权重分配集  $P = [p_1(0.3) p_2(0.4) p_3(0.3)]^T$ 。模糊综合评价值为<sup>[6]</sup>

$$M = RP = [r_{11}p_1 + r_{21}p_2 + r_{31}p_3 + \dots + r_{1n}p_1 + r_{2n}p_2 + r_{3n}p_3]^T \quad (n = 16) \quad (5)$$

脱粒性能指标隶属度及模糊综合评价如表 3 所示。

表 3 脱粒性能指标隶属度及模糊综合评价

Tab. 3 Indicator jurisdiction and fuzzy synthesise evaluation indexes in threshing

试验号	因素正交列号						试验结果			脱净率隶属度 $r_{1n}$	破碎率隶属度 $r_{2n}$	夹带损失率隶属度 $r_{3n}$	模糊综合评价 $M_n$
	T	S	X	D	A	K	脱净率 $Y_1/\%$	破碎率 $Y_2/\%$	夹带损失率 $Y_3/\%$				
1	1	1	1	1	1	1	98.27	0.67	0.249	0.323	0.800	0.665	0.613
2	1	2	2	1	2	2	98.65	0.76	0.298	0.518	0.636	0.416	0.535
3	1	3	3	2	1	2	98.74	0.59	0.380	0.564	0.945	0	0.547
4	1	4	4	2	2	1	97.87	0.58	0.183	0.118	0.964	1	0.721
5	2	1	2	2	2	1	99.33	0.74	0.231	0.867	0.673	0.756	0.756
6	2	2	1	2	1	2	99.25	1.06	0.305	0.826	0.091	0.381	0.399
7	2	3	4	1	2	2	98.17	0.62	0.215	0.272	0.891	0.878	0.701
8	2	4	3	1	1	1	98.29	0.71	0.278	0.333	0.727	0.518	0.546
9	3	1	3	1	2	2	98.47	0.98	0.196	0.426	0.236	0.934	0.502
10	3	2	4	1	1	1	98.53	0.87	0.321	0.456	0.436	0.299	0.401
11	3	3	1	2	2	1	99.10	1.11	0.198	0.749	0	0.924	0.502
12	3	4	2	2	1	2	99.36	0.56	0.217	0.882	1	0.827	0.913
13	4	1	4	2	1	2	97.64	0.78	0.364	0	0.600	0.081	0.264
14	4	2	3	2	2	1	98.78	0.91	0.376	0.585	0.364	0.020	0.327
15	4	3	2	1	1	1	99.41	0.59	0.286	0.908	0.945	0.477	0.794
16	4	4	1	1	2	2	99.59	0.76	0.247	1	0.636	0.675	0.757

对模糊综合评价进行直观分析,分析结果如表 4 所示。从表可看出,影响脱净率、破碎率、夹带损失率的 6 个主要因素中,因素主次顺序为 S、X、D、A、K、T,即:滚筒齿顶线速度、脱离间隙、上盖板导向次数、凹板筛筛分包角、凹板筛筛孔尺寸和脱粒间隙。试验结果分析表明:在设计条件下,综合脱净率、破碎率及夹带损失率 3 个性能指标,脱粒部件的优化参数组合为:脱粒间隙 15 mm、滚筒齿顶线速度 25 m/s、脱离间隙 55 mm、上盖板导向 4 次、凹板筛筛分包角 204°、凹板筛筛孔尺寸 36 mm × 15 mm。

### 3.2 清选性能试验结果与分析

根据清选试验安排得出每组试验序号下含杂率和吹出损失率如表 5 所示。

对清选性能双指标试验结果同样采用模糊综合评价法进行数据处理,首先确定含杂率  $Y_4$  和吹出损失率  $Y_5$  为评价指标集,正交试验的 9 组试验数据为评

表 4 模糊综合评价法直观分析

Tab. 4 Fuzzy analysis of synthesise evaluation in threshing

水平	因素					
	脱粒间隙 T	滚筒齿顶线速度 S	脱离间隙 X	上盖板导向次数 D	凹板筛筛分包角 A	凹板筛筛孔尺寸 K
1	0.604	0.534	0.568	0.606	0.560	0.543
2	0.601	0.416	0.750	0.554	0.600	0.577
3	0.580	0.636	0.481			
4	0.536	0.734	0.522			
极差	0.068	0.318	0.269	0.052	0.04	0.034
折算后极差	0.061 2	0.286 2	0.242 1	0.104 4	0.080 3	0.068 3
主次因素	S、X、D、A、K、T					
较优方案	$T_1 S_4 X_2 D_1 A_2 K_2$					

价对象集;两个指标皆为偏小型指标,隶属函数为

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_{41} & r_{42} & \cdots & r_{4n} \\ r_{51} & r_{52} & \cdots & r_{5n} \end{bmatrix}^T \quad (n=9) \quad (6)$$

$$r_{1n} = \frac{Y_{4n\max} - Y_{4n}}{Y_{4n\max} - Y_{4n\min}} \quad (n=1, 2, \dots, 9) \quad (7)$$

$$r_{2n} = \frac{Y_{5n\max} - Y_{5n}}{Y_{5n\max} - Y_{5n\min}} \quad (n=1, 2, \dots, 9) \quad (8)$$

其次根据含杂率与吹出损失率指标重要性,同样考虑含杂率为整机三大收获性能指标之一,而清

选吹出损失率仅为总损失率4个分量指标之一,所以试验结果计算时,拟定含杂率比重略高于清选吹出损失率的2倍比重,确定 $Y_4$ 与 $Y_3$ 试验权重分配集 $\mathbf{P} = [p_4(0.7) \ p_5(0.3)]^T$ 。模糊综合评价值为<sup>[6]</sup>

$$\mathbf{M} = \mathbf{R}\mathbf{P} = [r_{41}p_4 + r_{51}p_5 + \cdots + r_{4n}p_4 + r_{5n}p_5]^T \quad (n=9) \quad (9)$$

清选性能指标隶属度及模糊综合评价如表5所示。

表5 清选性能指标隶属度及模糊综合评价

Tab.5 Indicator jurisdiction and fuzzy synthesize evaluation indexes in cleaning

试验号	因素正交列号				试验结果		含杂率	吹出损失率	模糊综合评价 $M_n$
	$Q$	$F$	$L$	$G$	含杂率 $Y_4/\%$	吹出损失率 $Y_5/\%$	隶属度 $r_{4n}$	隶属度 $r_{5n}$	
1	1	1	1	1	4.80	0.13	0.207	0.788	0.381
2	1	2	2	2	2.80	0.06	0.897	1	0.928
3	1	3	3	3	3.70	0.32	0.586	0.212	0.474
4	2	1	2	3	5.40	0.16	0	0.697	0.209
5	2	2	3	1	5.10	0.29	0.103	0.303	0.163
6	2	3	1	2	4.25	0.39	0.397	0	0.278
7	3	1	3	2	2.90	0.11	0.862	0.848	0.858
8	3	2	1	3	3.13	0.35	0.783	0.121	0.584
9	3	3	2	1	2.50	0.21	1	0.545	0.864

对模糊综合评价进行直观分析,分析结果如表6所示。从此表可看出,影响含杂率、吹出损失率的4个主要因素中,因素主次顺序为 $Q$ 、 $G$ 、 $L$ 、 $F$ ,即:振动筛曲柄转速、筛面结构形式、离心风机转速和振动筛振幅。同时,试验结果分析表明:在设计条件下,综合含杂率、吹出损失率2个性能指标,清选部件的优化参数组合为:振动筛曲柄转速404 r/min、16 mm方孔编织筛、离心风机转速1787 r/min、振动筛振幅30 mm。

表6 模糊综合评价法直观分析

Tab.6 Fuzzy analysis of synthesize evaluation in cleaning

水平	因素			
	振动筛曲柄转速 $Q$	振动筛振幅 $F$	离心风机转速 $L$	筛面结构形式 $G$
1	0.594	0.483	0.414	0.469
2	0.217	0.558	0.667	0.688
3	0.769	0.539	0.498	0.422
极差	0.552	0.075	0.253	0.266
主次因素	$Q$ 、 $G$ 、 $L$ 、 $F$			
较优方案	$Q_3F_2L_2G_2$			

### 3.3 脱粒清选验证试验

根据较优组合,调节机具脱粒间隙为15 mm、脱

离间隙为55 mm、滚筒齿顶线速度为25 m/s,更换导向4次的上盖板部件、包角 $204^\circ$ 与筛孔为36 mm × 15 mm的凹板筛部件,同等试验前提下作验证试验,测得脱净率、破碎率、夹带损失率分别为99.10%、0.43%和0.223%。结合权重对比分析表明,此工作参数组合下指标值优于正交试验中评价最高的第12组指标值99.36%、0.56%和0.217%。

同等试验前提下对清选性能作验证试验,根据较优组合,采用16 mm的方孔编织筛,编织筛振幅为30 mm,振频为404 r/min、离心风机转速为1787 r/min,测得含杂率和吹出损失率为2.57%和0.15%。结合权重对比分析正交试验中评价最高的第2组指标值2.8%和0.06%,表明此工作参数组合确为较优组合。

## 4 结论

(1)影响脱粒部件脱净率、破碎率、夹带损失率的6个因素主次顺序依次为:滚筒齿顶线速度、脱离间隙、上盖板导向次数、凹板筛筛分包角、凹板筛筛孔尺寸和脱粒间隙;影响清选部件含杂率、吹出损失率的4个因素主次顺序依次为:振动筛曲柄转速、筛面结构形式、离心风机转速和振动筛振幅。

(2)通过正交试验,优化确定各影响因素较优

组合为: 脱粒间隙 15 mm、滚筒齿顶线速度 25 m/s、1 787 r/min、振动筛振幅 30 mm, 较优参数组合下的  
 脱离间隙 55 mm、上盖板导向 4 次、凹板筛筛分包角 机具收获性能指标为: 脱净率 99.10%、破碎率  
 204°、凹板筛筛孔尺寸 36 mm × 15 mm、振动筛曲柄 0.43%、夹带损失率 0.223%、含杂率 2.57% 和吹出  
 转速 404 r/min、16 mm 方孔编织筛、离心风机转速 损失率 0.15%。

#### 参 考 文 献

- 李媛媛, 孙曙光, 林爱琴. 凹板间隙对谷物联合收获机作业性能影响的试验研究[J]. 装备制造技术, 2009(3): 22~23.  
Li Yuanyuan, Sun Shuguang, Lin Aiqin. Experimental study on the effect of concave clearance to grain combine harvester's work performance[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2009(3): 22~23. (in Chinese)
- 丁为民, 姬长英, 鲁植雄, 等. 农业机械学: 下册[M]. 北京: 中国农业出版社, 1996: 69~74.
- 蔺公振, 杨建明, 时心荣, 等. 悬挂式联合收获机清选装置的试验[J]. 洛阳工学院学报, 1994, 15(4): 21~25.  
Lin Gongzhen Yang Jianming Shi Xinrong, et al. Experiment of cleaning mechanism of tractor-mounted grain combine[J]. Journal of Luoyang Institute of Technology, 1994, 15(4): 21~25. (in Chinese)
- 陈魁. 试验设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 276~293.
- 吴崇友, 丁为民, 张敏, 等. 油菜分段收获脱粒清选试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 72~76.  
Wu Chongyou, Ding Weimin, Zhang Min, et al. Experiment onthreshing and cleaning in two-stage harvesting for rapeseed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 72~76. (in Chinese)
- 杜金萍. 模糊正交法在 Gr15 钢切削用量优化中的应用[J]. 轴承, 2007(3): 26~28.
- 徐立章, 李耀明, 张立功, 等. 轴流式脱粒清选装置试验台的设计[J]. 农业机械学报, 2007, 38(12): 85~88.  
Xu Lizhang, Li Yaoming, Zhang Ligong, et al. Development of test-bed of axial threshing and cleaning unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(12): 85~88. (in Chinese)
- 张建瓴, 赵华海, 周学成, 等. 珠江-130 型梳脱式联合收获机的部件试验研究[J]. 农业工程学报, 2001, 17(5): 63~67.  
Zhang Jianling, Zhao Huahai, Zhou Xuecheng, et al. Experimental research on modules of stripper combine harvester Zhujiang-130[J]. Transactions of the CSAE, 2001, 17(5): 63~67. (in Chinese)
- 陶桂香, 衣淑娟. 水稻轴流脱粒机理研究现状分析[J]. 农机化研究, 2007(11): 239~240.  
Tao Guixiang, Yi Shujuan. Analysis of the present situation and existing problems on corn axial threshing mechanics[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(11): 239~240. (in Chinese)
- 李耀明, 邓玲黎, 丁为民. 小型联合收割机清选装置的技术分析[J]. 农机化研究, 2004(3): 55~56.  
Li Yaoming, Deing Lingli, Ding Weiming. Analysis and improvement design on the cleaning mechanism of small grain combine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2004(3): 55~56. (in Chinese)

(上接第 75 页)

- Katul G G, Mahrt L, Poggi D, et al. One-and two-equation models for canopy turbulence[J]. Boundary-Layer Meteorology, 2004, 113(2): 81~109.
- Phattaralerphong J, Sathornkich J, Sinoquet H. A photographic gap fraction method for estimating leaf area of isolated trees: assessment with 3D digitized plants[J]. Tree Physiology, 2006, 26(1): 1123~1136.
- Brown R B, Sidahmed M M. Simulation of spray dispersal and deposition from a forestry airblast sprayer—part II: droplet trajectory model[J]. Transactions of the ASAE, 2001, 44(1): 11~17.
- 俞龙, 赵祚喜, 洪添胜. 果树冠层参数实时检测系统[J]. 农业机械学报, 2009, 40(增刊): 194~197.  
Yu Long, Zhao Zuoxi, Hong Tiansheng. Real time measuring system for fruiter canopy parameters[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(Supp.): 194~197. (in Chinese)
- 王贵恩, 洪添胜, 李捷, 等. 果树施药仿形喷雾的位置控制系统[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 81~84.  
Wang Guien, Hong Tiansheng, Li Jie, et al. Position control system of profile modeling spray for fruit trees[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(3): 81~84. (in Chinese)
- 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- 王军锋, 黄继伟, 黄俏梅, 等. 气力辅助静电雾化的 PIV 试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2011, 29(3): 251~254.  
Wang Junfeng, Huang Jiwei, Huang Qiaomei, et al. PIV experimental study on air-assisted electrostatic spray[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(3): 251~254. (in Chinese)