

微型稻麦联合收获机气流式清选装置研究*

刘正怀¹ 郑一平¹ 王志明¹ 陈德俊¹ 王 俊²

(1. 金华职业技术学院机电工程学院, 金华 321007; 2. 浙江大学生物系统工程与食品科学学院, 杭州 310058)

摘要: 为提高应用于丘陵山区作业的微型稻麦联合收割机作业质量, 设计了气流式清选装置。通过设计计算确定了气流式清选装置主要工作部件(清选筒、吸风管、吸风机)的结构参数和工作参数, 对清选筒进行了三维实体模型气流流场仿真分析。结果表明, 清选装置结构、气流风速分布符合设计要求, 清选分离效果好。经水稻收获田间对比试验表明: 装有气流式清选装置的微型联合收获机具有结构紧凑、转移方便等原机特点; 清选筒气流流场的风压风速分布满足设计要求; 与没有清选装置的微型联合收获机相比, 总损失率从 3.8% 下降到 2.34%, 破碎率从 1.5% 下降到 1.4%, 含杂率从 7.2% 下降到 1.2%, 分别下降了 38.42%、8.33% 和 83.33%, 达到了国家行业标准 JB/T 5117—2006 的要求, 其中含杂率下降尤为显著。

关键词: 微型 联合收获机 气流式 清选装置 设计

中图分类号: S225.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)07-0102-07

Design on Air-flowing Cleaning Unit of Micro Rice – Wheat Combine Harvester

Liu Zhenghuai¹ Zheng Yiping¹ Wang Zhiming¹ Chen Dejun¹ Wang Jun²

(1. Mechanical and Electrical Engineering College, Jinhua Polytechnic, Jinhua 321007, China

2. School of Biosystems Engineering and Food Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: To improve the operating quality of the micro rice – wheat combine harvester in hilly and mountainous areas, an air-flowing cleaning unit was designed. By means of design and calculation, the main working parts' (cleaning unit, suction tube and suction fan) structure parameters and working parameters were defined. Simulating analyses on 3D model of air-flowing field in the cleaning unit were done. The results showed that the cleaning device structure and distribution of air-flow speed met the design requirements well and the cleaning effect was good. The compared field test with the rice harvest showed that the micro combine harvester with air-flowing cleaning unit had the features of compact size and easy operation. The distribution of air-flowing velocity and pressure in the cleaning unit could meet design requirements well. Comparing to micro combine harvester without air-flowing cleaning unit, the total loss rate decreased from 3.8% to 2.34%, the damage rate decreased from 1.5% to 1.4% and the impurities rate decreased from 7.2% to 1.2%, which fell by 38.42%, 8.33% and 83.33%, respectively. Every performance reached the demands to JB/T 5117—2006 well. The decline of impurities rate was particularly significant.

Key words: Micro Combine harvester Air-flowing type Cleaning unit Design

引言

随着我国农业机械化的快速推进, 研发、推广适

合丘陵山区先进适用的农业机械成为重要研究内容^[1], 其中适合丘陵地区的小型、优质联合收获机更受关注。

收稿日期: 2014-10-15 修回日期: 2014-12-15

* 国家自然科学基金资助项目(51305182)和浙江省科技厅公益技术研究资助项目(2013C32027)

作者简介: 刘正怀, 副教授, 主要从事水稻收获机械装备研究, E-mail: liuzh0579@163.com

通讯作者: 陈德俊, 教授, 主要从事水稻收获机械装备研究, E-mail: cdj0579@163.com

自走式微型联合收获机是 20 世纪 90 年代末发展起来的一种简单实用的新机型,具有结构简单、体积小、操纵灵活、转移方便等特点,适合丘陵山区使用。但这类机型由于受结构尺寸和配套功率的限制,无法采用联合收获机上广泛应用的风筛式清选装置,所以微型联合收获机通常没有谷物清选机构,因而含杂率高。气流式清选装置结构简单,占用空间小,工作可靠,适合在微型联合收获机上应用。国内学者对此进行过相关研究,刘师多等^[2-4]对小型联合收获机的旋风式清选装置进行了深入的试验研究,优化了工作参数;彭维明^[5]对切向旋风分离器内部流场进行了数值模拟,分析了湍流中的流体动力学模型;唐倩雯等^[6]进行了谷物气流清选系统的仿真研究。但以上研究对气流式清选装置的结构设计论述较少,仿真研究内容较简单。本研究通过理论计算,设计微型稻麦联合收获机气流式清选装置,通过清选筒气流流场仿真和田间试验对其工作性能进行验证。

1 清选物料构成及其空气动力学特性参数

微型稻麦联合收获机通常采用横置轴流式全喂入结构。作业时,从凹板筛分离出来的混合物包含有籽粒、短茎秆、颖壳、碎茎叶及稻糠等。清选物料空气动力学特性为^[7]:对于临界速度,水稻籽粒为 10.1 m/s,小麦籽粒为 8.9 ~ 11.5 m/s,稻麦颖壳为 0.6 ~ 5.0 m/s,短茎秆(< 10 cm)为 5.0 ~ 6.0 m/s。对于飘浮系数,水稻为 0.1 m⁻¹,小麦为 0.075 ~ 0.12 m⁻¹。

2 气流式清选装置整体结构与工作原理

微型水稻联合收获机一般配套于 8.8 kW 以上的手扶拖拉机上,因此要求清选装置结构小、质量轻、振动小且性能优。气流式清选装置主要由气流式清选筒、吸风管和通用型离心风机组成,其整体结构如图 1 所示。

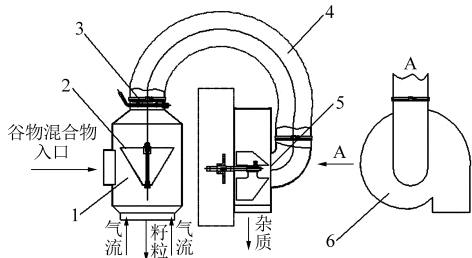


图 1 气流式清选装置结构示意图

Fig. 1 Structure of air-flowing cleaning unit

1. 清选筒 2. 倒锥挡筒 3. 风门 4. 吸风管 5. 吸风机进风口
6. 吸风机

工作原理:在高速回转的离心式吸风机作用下,气流主要从出粮口吸入(少部分气流也从进料口吸入),混合物由喂料抛送器送入清选筒后冲击安装于清选筒中的倒锥挡筒使其旋转并带动混合物整体旋转,在离心力的作用下混合物被散开,其中质量大的籽粒等被抛向清选筒内壁。混合物中不同物料具有不同的临界速度,由于从出粮口吸入的空气流速小于籽粒的临界速度,籽粒沿清选筒内壁旋转下滑,经出粮口排出进入集谷箱;从清选筒出风口吸出的风速大于颖壳、稻糠和短茎秆等杂质的临界速度,这些杂质穿过倒锥挡筒与清选筒壁之间的环形空间,经吸风管由吸风机排到机外。在与清选筒连接的吸风管上装有风门,可根据物料含水率等工况调节吸引气流的负压,以获得最佳清选质量。

3 气流式清选装置工作部件设计

3.1 清选筒参数设计

计算所需气流流量,确定清选筒结构参数和工作参数^[8]。

3.1.1 清选气流流量 V

清选筒的清选能力(生产率和含杂率)由清选气流流量和出粮口大小决定。所需清选气流流量 V (m³/s)计算式为

$$V = \frac{\beta Q}{\mu \rho} \tag{1}$$

式中 β ——需清除的杂质占喂入量的比例,对全喂入机型,水稻为 10% ~ 15%,小麦为 15% ~ 20%,取 15%

Q ——机器喂入量,取 0.45 kg/s

μ ——携带杂质气流的混合浓度比,一般为 0.2 ~ 0.3,取 0.25

ρ ——空气密度,取 1.20 kg/m³

代入式(1),得 $V = 0.225$ m³/s,取 $V = 0.23$ m³/s。

3.1.2 清选筒结构参数及工作参数

(1)清选筒筒体直径 d 与高度 h

清选筒直径和高度既要满足清选要求也要考虑整机布置,根据清选物料流量和安装空间,取 $d = 300$ mm, $h = 280$ mm(圆柱部分,总高 500 mm),两端为便于出粮和排杂,各以锐角收缩与出粮口和出风口连接,如图 2 所示。

(2)出粮口(进风口)直径 d_1

根据文献[8],出粮口直径计算公式为

$$d_1 = 1.13 \sqrt{V/v_1} \tag{2}$$

式中 v_1 ——出粮口风速, m/s

根据文献[8],无扩散沉降段清选筒进口风速为 5 ~ 6 m/s,取 5.5 m/s。代入式(2),得 $d_1 = 0.23$ m。

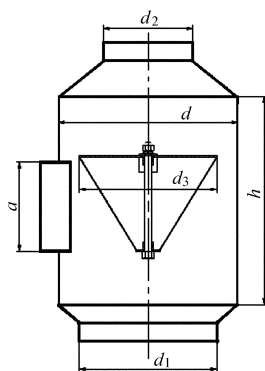


图2 清选筒结构参数示意图

Fig. 2 Diagram of cleaning unit's structure parameter

出粮口直径 d_1 应大于 200 mm, 以防止粗茎秆聚集堵塞。

(3) 出风口直径 d_2

清选筒通过吸风管与通用型离心风机(简称吸风机)进气口相连, 为获取充足的负压, 出风口直径 d_2 应小于出粮口直径 d_1 , 根据经验数据取 $d_2 = 160$ mm。

(4) 进料口参数

进料口为正方形, 边长 0.15 m, 从凹板筛分离出来的混合物在抛送器作用下由此抛入清选筒。

(5) 倒锥挡筒

倒锥挡筒为空心圆锥形装置, 居中倒挂安装于清选筒中并可绕其中心轴旋转。当含有籽粒及短茎秆、颖壳、碎茎叶、糠等杂质的混合物高速进入清选筒时, 倒锥挡筒受其冲击绕中心轴旋转并将混合物击散。倒锥挡筒大端直径 $d_3 = 200$ mm, 与清选筒内壁圆周方向有 50 mm 通道, 可确保稻麦颖壳和短茎秆等杂质通过该通道排出机外。倒锥挡筒能挡住籽粒向上运动, 从机械上阻止了籽粒被吸出机外引起的损失。筒体圆锥角为 60° , 大于籽粒与筒壁钢板的摩擦角, 便于籽粒顺利滑落。

(6) 清选谷粒流量 Q_1

出粮口直径与籽粒流量的关系式为^[8]

$$Q_1 = kd_1 \quad (3)$$

式中 k ——出粮口每米直径单位时间清选谷粒量, 一般为 $1.30 \sim 2.19$ kg/(s·m), 本文取 1.30 kg/(s·m)

将数据代入式(3), 得 $Q_1 = 0.30$ kg/s。

本设计出谷量约为 0.25 kg/s, 因此满足要求。

(7) 清选筒进口风速 v_1

气流式清选装置主要由清选筒的出粮口和进料口进风, 在吸风管上没有沉降室时, 根据设计要求, 出粮口为圆形, 其面积为

$$S_1 = \pi \left(\frac{d_1}{2} \right)^2 = 0.042 \text{ m}^2$$

进料口为正方形, 边长 0.15 m, 其面积为 $S_2 = 0.022 \text{ m}^2$, 进风总面积为 $S = S_1 + S_2 = 0.064 \text{ m}^2$ 。

由于进料口和出粮口进风时都有物料阻挡, 取 $S = 0.05 \text{ m}^2$ 。

当 $v_1 = 5.5$ m/s 时, $V = v_1 S$, 得 $V = 0.275 \text{ m}^3/\text{s}$, 满足由式(1)求得的气流流量的需要。

3.2 吸风管参数计算

3.2.1 吸风管直径 d_2

吸风管直径等于清选筒出风口直径, 因此 $d_2 = 160$ mm。

3.2.2 吸风管风速 v_2

吸风管风速即清选筒出口风速 v_2 , 可根据吸风管直径 d_2 和空气流量 V 求得, 代入数据得 $v_2 = \frac{4V}{\pi d_2^2} = 11.5$ m/s。

取 $v_2 = 11$ m/s, v_2 大于稻麦颖壳临界速度 ($0.6 \sim 5.0$ m/s) 和短茎秆临界速度 ($5.0 \sim 6.0$ m/s), 可将稻麦颖壳和短茎秆排出机外。从风速纵向分布矢量图可知, 倒锥挡筒与清选筒内壁之间的环状空间的气流风速为 6 m/s 左右, 小于稻麦籽粒临界速度 ($8.9 \sim 11.5$ m/s), 故不会将稻麦籽粒排出机外引起损失。

3.3 吸风机参数确定

吸风机需满足清选筒清选所需气流流量和出粮口进风风速的要求, 气流式清选装置的风机采用吸入型通用离心式风机。为了吸走分离筒内的轻微杂质, 要求吸风管断面内具有均匀的风速, 因此风机叶轮壳体采用螺旋蜗壳形。

3.3.1 吸风机设计原始数据

空气流量 V 为 $0.23 \text{ m}^3/\text{s}$ (0.28 kg/s); 气流工作速度即吸风管风速 $v_2 = 11.0$ m/s; 根据文献[9], 风压全压 h_1 (负压, Pa) 为

$$h_1 = h_j + h_d \quad (4)$$

其中

$$h_j = h_{j1} + h_{j2} + h_{j3} = \frac{\xi l \rho v_2^2}{2rg} + \frac{\psi \rho v_2^2}{2g} + \frac{\lambda \rho v_2^2}{2g} \quad (5)$$

式中 h_j ——静压, 克服空气在流动中的阻力, Pa

h_d ——动压头, Pa

h_{j1} ——沿程压头损失, Pa

h_{j2} ——局部压头损失, Pa

h_{j3} ——进出口压头损失, Pa

式中, 水力半径 r 为 0.038 m, 气流摩擦因数 ξ 取 0.35, 管道长度 l 为 1.1 m, 管道对气流阻力系数 ψ 取 0.35, 风机进出口对气流的阻力系数 λ 取 0.6, g 为重力加速度, 取 9.8 m/s^2 。

$$h_d = \frac{\rho v_2^2}{2g} \tag{6}$$

将本机有关参数代入式 (4) ~ (6) 得, $h_1 = 876.42 \text{ Pa}$ 。

吸风机叶轮外径 D_2 为 $250 \sim 400 \text{ mm}$ ^[8], 取 $D_2 = 270 \text{ mm}$ 。

吸风机转速 $n(\text{r/min})$ 为

$$n = \frac{60}{\pi D_2} \sqrt{\frac{hg}{\varepsilon \rho}} \tag{7}$$

其中系数 $\varepsilon = 0.35 \sim 0.40$, 取 $\varepsilon = 0.40$ 。数据代入式 (7), 得 $n = 3\,031.8 \text{ r/min}$, 取 $n = 3\,000 \text{ r/min}$ 。

3.3.2 吸风机设计

下述计算参照文献 [10 - 11], 吸风机结构如图 3 所示。

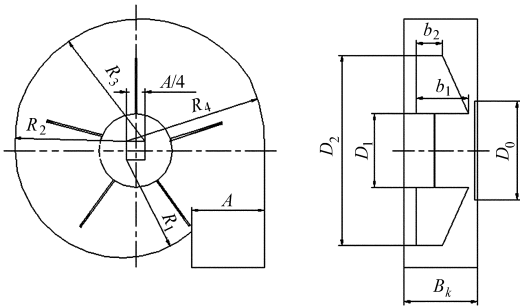


图 3 吸风机结构参数示意图

Fig.3 Diagram of suction fan's structure parameter

吸风机比转数 $n_s = \frac{nV^{1/2}}{h^{3/4}}$, 代入数据, 得 $n_s = 8.94$ 。

流量系数 $\bar{k}_v = \frac{4V}{\pi D_2^2 u_2}$, 代入数据, 得 $\bar{k}_v = 0.099$ 。

在通用型离心式风机 C-4-72No.5 无因次性能曲线图中, 对应流量系数 $\bar{k}_v = 0.099$, 压力系数 $\bar{k}_h = 0.45$ 。

吸风机叶轮内径 $D_1 = 1.194 \sqrt[3]{\bar{k}_v} D_2$, 代入数据, 取 $D_1 = 0.12 \text{ m}$ 。

进风口直径 $D_0 = 2 \sqrt{\frac{V}{\pi v_2}}$, 代入数据, 得 $D_0 = 0.16 \text{ m}$ 。

叶片出口宽度 $b_2 = \frac{\bar{k}_v D_2}{4\phi}$, 式中 ϕ 为流速系数,

$\phi = \frac{C_{2r}}{u_2}$, 径向叶片 $\phi = 0.2 \sim 0.35$, 取 0.2 ; C_{2r} 、 u_2 分别为叶片出口风速径向和切向分量。代入数据, 得 $b_2 = 0.033 \text{ m}$ 。

叶片进口宽度 $b_1 = \frac{D_2}{D_1} b_2$, 代入数据, 得 $b_1 = 0.074 \text{ m}$ 。

叶片数 $Z = k_1 \frac{D_2 + D_1}{D_2 - D_1}$, 式中 k_1 为系数, 一般为

$k_1 = 2 \sim 4$, 取 $k_1 = 2$ 。代入数据, 得 $Z = 5.2$, 取 $Z = 5$ 。

取螺旋蜗壳扩展尺寸 $A = 40 \text{ mm}$, 经计算得蜗壳作图半径 $R_1 = 140 \text{ mm}$, $R_2 = 150 \text{ mm}$, $R_3 = 160 \text{ mm}$, $R_4 = 170 \text{ mm}$ 。

外壳宽度 $B_k = (1.5 \sim 2.0) b_1$, 代入数据, 得 $B_k = 0.11 \sim 0.14 \text{ m}$, 取 $B_k = 0.12 \text{ m}$ 。

3.3.3 吸风机功率消耗 N

根据文献 [8], 吸风机功率计算式为

$$N = \frac{Vh}{1\,000 \eta \eta_m} \tag{8}$$

式中 η ——全压效率, 一般为 $0.45 \sim 0.6$, 取 0.5

η_m ——机械效率, 取 0.92

代入数据, 得 $N = 0.44 \text{ kW}$ 。

4 清选筒气流流场仿真

为了验证本机清选装置结构和工作参数设计的合理性, 对清选筒内的气流流场进行了仿真计算。

4.1 清选筒建模

根据文献 [12 - 13], 以清选筒上顶面中心为坐标原点, 筒体轴线为 z 轴, 垂直于进料口截面为 x 轴建立坐标系。首先按照清选筒的设计几何参数, 在 CATIA 三维 CAD 软件中建立清选筒和倒锥挡筒等三维实体模型, 接着用 Hypermesh 软件对三维实体模型进行处理, 根据进气系统的结构, 选取自由网格实体单元 ctria3 将实体模型共划分为约 10 万个非均匀四面体网格单元, 导入 CFX-Design 软件进行仿真计算。

4.2 计算方法

将清选筒网格化后输出的 .nas 格式文件导入 CFX-Design 软件中, 并进行仿真条件设置。

由于清选筒内物料相对气流所占的体积很小, 在气相流场模拟时可忽略固相物料颗粒对气相流场的影响。清选筒内的气流为非稳态的三维旋转湍流气流, 且气体流速不高, 故可将气体按不可压缩介质处理, 分析计算采用低雷诺数 $k-\varepsilon$ 湍流模型。

4.3 边界条件

出粮口为干净谷粒落料口, 在筒内负压的作用下同时也是气流进入清选筒的主入口, 将此处设置为压力进口边界, 表压强设为标准大气压; 进料口处, 空气由抛送器获得进入清选筒的初速度, 故将进料口处的边界条件设为速度入口边界; 出风口连接吸风管和吸风机, 将吸风口处的边界条件设为速度出口边界。

4.4 计算结果与分析

4.4.1 流场的压力分析

经 CFX-Design 软件仿真计算收敛后, 取 $x = 0 \text{ mm}$ 截

面处压力,得 $x=0$ mm 截面静压分布云图(图4)。

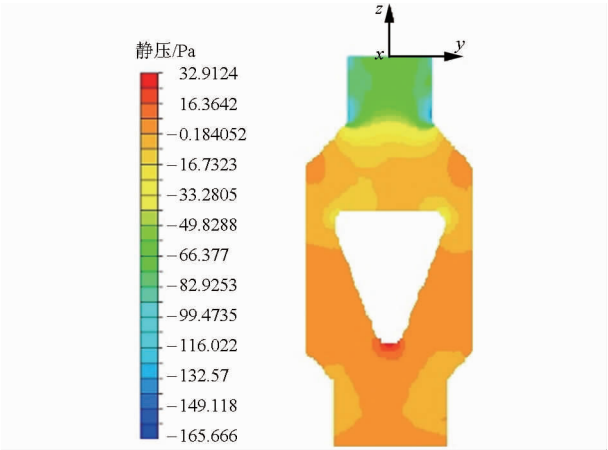


图4 $x=0$ mm 截面静压分布纵向剖面云图
Fig.4 Static pressure distribution cloud chart of $x=0$ mm longitudinal profile in cleaning unit

静压分布云图显示筒内静压为负压,沿筒体轴线方向变化不大,径向压力分布基本呈轴对称分布,有利于杂余从清选筒内各个部位向出风口集中外排。由于清选筒内倒锥挡筒的存在,在挡筒的锥顶附近形成了一个比较明显的压力变化边界,静压较高,有助于锥顶附近杂质的外排。

图5为 $x=0$ mm 截面上不同高度处的静压分布曲线。

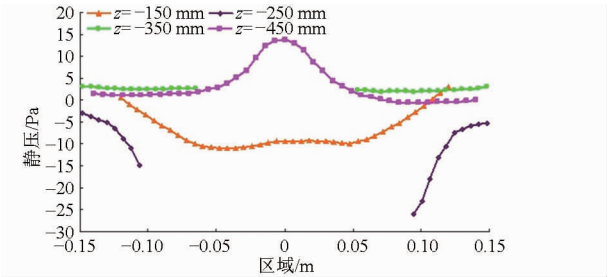


图5 $x=0$ mm 截面上不同高度静压分布曲线
Fig.5 Static pressure curves of different heights on $x=0$ mm longitudinal profile

不同高度压力分布基本呈轴对称形状,清选筒内由于倒锥挡筒的存在,图中高度 $z=-250$ mm 和 $z=-350$ mm 处静压曲线被倒锥挡筒隔断而不连续,其中高度 $z=-250$ mm 处于进料口附近,由于进料口进风的影响,压力出现明显变化;高度 $z=-450$ mm 处静压分布曲线出现峰值,这是由挡筒锥顶面的阻挡作用形成的;高度 $z=-150$ mm 处接近吸风管,静压沿径向有较大波动,但倒锥挡筒的存在使得静压波动变得更加缓和。

4.4.2 流场速度分析

图6、7分别为 $x=0$ mm 截面速度分布矢量图和 $z=-320$ mm 高度处速度分布云图。

图6显示在通过清选筒中心轴的截面上,由出

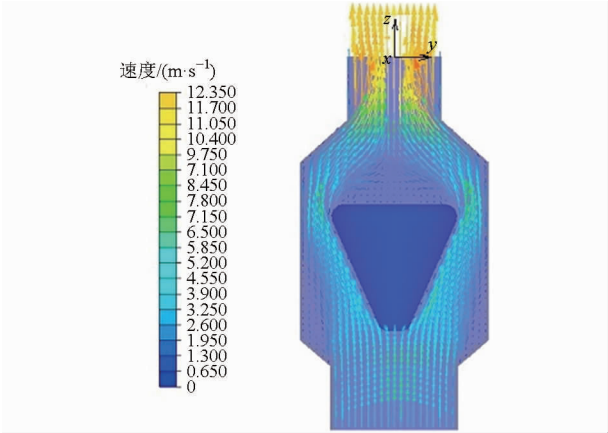


图6 $x=0$ mm 截面速度分布纵向剖面矢量图
Fig.6 Velocity distribution vector graphic of $x=0$ mm longitudinal profile in cleaning unit

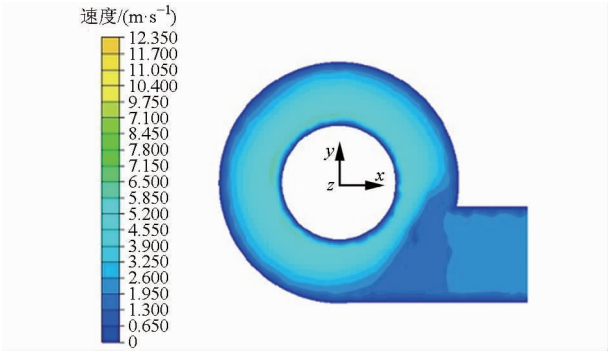


图7 $z=-320$ mm 高度处速度分布横向剖面云图
Fig.7 Velocity distribution cloud chart of $z=-320$ mm horizontal section in cleaning unit

粮口和清选混合物入口进入清选筒的气流速度向上,在挡筒的周边气流速度为 $6\sim7$ m/s,大于短茎秆等杂质的漂浮速度,小于稻麦籽粒的漂浮速度,因此能有效地将籽粒和杂质分离;图7显示挡筒外壁与清选筒体内壁之间的气流速度在 6 m/s 左右,靠近壁面的气流速度很小,接近于 0 m/s,有助于从清选混合物入口进入的物料撞击壁面散开,使混合物各成分充分接触气流。以上分析说明,籽粒能顺利从出粮口落入集谷桶(图8a),短茎秆等杂质能在清选气流作用下通过吸风机排出机外(图8b)。

5 田间对比试验

2013年10月,在浙江省武义县东干镇王山头村进行田间对比测试试验(图9),对比试验机型为装有本气流式清选装置的4L-80A型(如图10)和没有清选装置的4L-80型微型联合收获机,4L-80A型是4L-80型的改进机型,除装配有气流式清选装置外,其他参数均相同。收割作物水稻为黄熟直立的籼优644晚粳稻,作物自然高109.7 cm,穗幅差22.3 cm,草谷比1.21,茎秆含水率54.01%,籽粒含水率23.8%,产量为 $5\,405\text{ kg/hm}^2$,作业地块

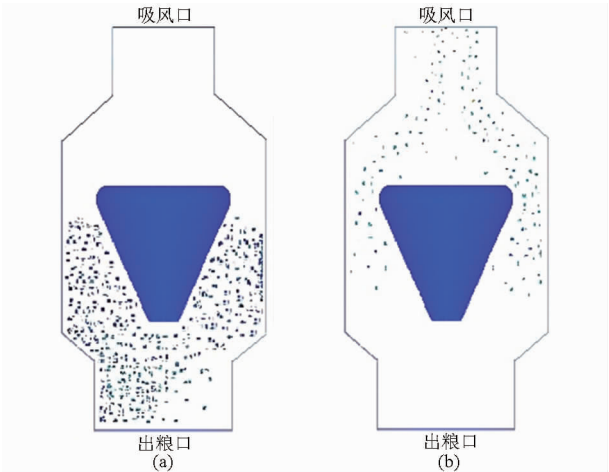


图 8 谷物籽粒和杂质运动状态图

Fig. 8 Rice’s and impurities’ simulation motion state diagram in cleaning unit
(a) 谷物籽粒 (b) 杂质



图 9 4L-80A 型微型联合收获机田间试验

Fig. 9 Field testing of 4L-80A micro combine harvester

干燥。为减少试验误差,两机在同一田块同时同方向作业,机器前进速度 0.5 m/s,平均割幅 803 mm,平均割茬高 279.5 mm,喂入量 0.48 kg/s。试验对比考查了两机的总损失率、破碎率和含杂率指标,结果见表 1。

由表 1 可见,有气流清选装置的 4L-80A 型联合收获机各项技术性能指标达到了行业标准 JB/T 5117—2006 的要求。其中含杂率和总损失率,装有本气流式清选装置的 4L-80A 型明显好于没有清选装置的 4L-80 型,这是由于没有清选装置的微型联合收获机收获的水稻含杂率高达 7.2%,需进行

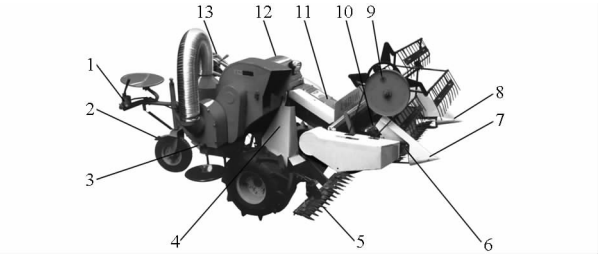


图 10 有气流式清选装置的 4L-80A 型微型联合收获机
Fig. 10 4L-80A micro combine harvester with air-flowing cleaning unit

1. 液压升降机构 2. 乘坐导向机构 3. 气流清选装置 4. 工作离合器 5. 下割台 6. 上割台 7. 右分禾器 8. 左分禾器 9. 拨禾装置 10. 割台输送器 11. 输禾装置 12. 脱粒装置 13. 操纵装置

表 1 2 种联合收获机实测性能对比
Tab. 1 Actual measurement performance comparison between two types of combine harvester %

性能参数	JB/T 5117 行标	无气流式 清选装置	有气流式 清选装置
总损失率	≤3.0	3.80	2.34
破碎率	≤2.0	1.5	1.4
含杂率	≤1.5	7.2	1.2

人工清选,造成二次损失,损失率明显变大。

6 结论

(1)气流式清选装置无筛分机构,结构简单体积小,适合作为微型联合收获机的清选分离装置。

(2)经清选筒内压场和流场仿真计算表明,清选装置结构、气流风速分布符合设计要求,可以获得较好的清选分离效果。

(3)经水稻收获田间试验测定,与没有清选装置的微型联合收获机相比,总损失率从 3.8% 下降到 2.34%,破碎率从 1.5% 下降到 1.4%,含杂率从 7.2% 下降到 1.2%,分别下降了 38.42%、8.33% 和 83.33%,达到了行业标准 JB/T 5117—2006 的要求,其中含杂率下降尤为显著。

参 考 文 献

1 白人朴. 关于推进丘陵山区农业机械化的一些思考[C]//丘陵山区农业机械化发展论坛论文集,2009.

2 刘师多,张利娟,师清翔. 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):46-48.
Liu Shiduo, Zhang Lijuan, Shi Qingxiang. 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): 46-48. (in Chinese)

3 高春艳,师清翔,刘师多,等. 结构和运动参数对微型联合收割机清选性能的影响[J]. 河南科技大学学报:自然科学版, 2005,26(5):73-76.
Gao Chunyan, Shi Qingxiang, Liu Shiduo, et al. Influence of configuration and movement parameters on cleaning performance of micro-combine harvesters[J]. Journal of Luoyang Institute of Technology, 2005,26(5):73-76. (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. Experimental analysis on cyclone separating cleaning system of no-guide vanes[J].

- Transactions of the CSAE, 2008,24(8):135-138. (in Chinese)
- 5 彭维明. 切向旋风分离器内部流场的数值模拟及试验研究[J]. 农业机械学报,2001,32(4):20-24.
Peng Weiming. Numerical simulation and experimental research on the flowpattern in tangential inlet cyclone[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(4):20-24. (in Chinese)
- 6 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 mechanism system of grain[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2012, 51(9):1890-1894. (in Chinese)
- 7 吴守一. 农业机械学:下册[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,1987:139-146.
- 8 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:下册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- 9 北京农业机械化学院. 农业机械的原理、设计与计算[M]. 北京:中国农业出版社,1959:104-121.
- 10 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册:上册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
- 11 汤楚宙. 水稻联合收割机原理与设计[M]. 长沙:湖南科学技术出版社,2002.
- 12 北京兆迪科技有限公司. CATIA V5 R20 实例宝典[M]. 北京:北京大学出版社,2012:92-133.
- 13 李楚琳. Hyperworks 分析应用实例[M]. 北京:机械工业出版社,2008:87-123.
- 14 李银海,丁启朔,郑一平,等. 微型联合收割机气流式清选装置的仿真研究[J]. 农机化研究,2009(1):85-87.
Li Yinhai, Ding Qishuo, Zheng Yiping, et al. Simulation on pneumatic cleaning mechanism for mini-combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009(1):85-87. (in Chinese)
- 15 王同福,宋玉英,王进朝. 气流清选原理在脱粒机上的应用[J]. 河北农业大学学报,1997,20(1):103-109.
Wang Tongfu, Song Yuying, Wang Jinchao. The use of pneumatic separate in huller[J]. Journal of Agricultural University of Hebei, 1997,20(1):103-109. (in Chinese)
- 16 北京兆迪科技有限公司. CATIA V5 R21 钣金设计教程[M]. 北京:机械工业出版社,2013:60-90.
- 17 徐立章,于丽娟,李耀明,等. 双出风口多风道离心风机内部流场数值模拟[J]. 农业机械学报,2014,45(10):78-86.
Xu Lizhang, Yu Lijuan, Li Yaoming, et al. Numerical simulation of internal flow field in centrifugal fan with double outlet and multi-duct[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(10):78-86. (in Chinese)
- 18 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):80-85,79.
Liao Qingxi, Chen Li, Li Haitong, et al. Cleaning unit test-bed of extraction components for rape combine harvester [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(10):80-85,79. (in Chinese)
- ~~~~~

(上接第 129 页)

- 9 王志华,陈翠英. 基于 ADAMS 的联合收割机振动筛虚拟设计[J]. 农业机械学报,2003,34(4):53-56.
Wang Zhihua, Chen Cuiying. Virtual design of vibrating sieve of combine harvester based on ADAMS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2003, 34(4):53-56. (in Chinese)
- 10 季顺中,李双,陈树人,等. 基于 ADAMS 的高速插秧机三插臂分插机构运动仿真[J]. 农业机械学报,2010,41(增刊):82-85.
Ji Shunzhong, Li Shuang, Chen Shuren, et al. Kinematical simulation of three separating planting bars of high-performance rice transplanter based on ADAMS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(Supp.):82-85. (in Chinese)
- 11 宫成宇,赵匀,冯江,等. 基于 ADAMS 玉米移栽机顶出机构的设计与仿真[J]. 农机化研究,2013,35(6):127-130.
Gong Chengyu, Zhao Yun, Feng Jiang, et al. The corn transplanting machine push-out mechanism design based on ADAMS[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2013,35(6):127-130. (in Chinese)
- 12 赵满全,张宁,杨铁军,等. 双圆盘割草机切割器虚拟样机设计与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(8):101-105.
Zhao Manquan, Zhang Ning, Yang Tiejun, et al. Design and experiment of virtual prototype of double disc mower cutter [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8):101-105. (in Chinese)
- 13 李增刚. ADAMS 入门详解与实例[M]. 北京:国防工业出版社,2008.
- 14 杜岳峰,朱忠祥,毛恩荣,等. 基于 ADAMS 的丘陵山地小型玉米收获机仿真[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):1-5.
Du Yuefeng, Zhu Zhongxiang, Mao Enrong, et al. Simulation on small-scale corn harvester for hilly area based on ADAMS [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.):1-5. (in Chinese)
- 15 何为. 优化试验设计方法及数据分析[M]. 北京:化学工业出版社,2014.
- 16 GB/T 10938—2008 旋转割草机[S]. 2008.
- 17 GB/T 5668—2008 旋耕机[S]. 2008.