

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S2.024

油菜联合收获机组合式旋风分离清选参数分析与试验

万星宇¹ 廖宜涛^{1,2} 袁佳诚¹ 王 昌¹ 何 坤¹ 廖庆喜^{1,2}

(1. 华中农业大学工学院, 武汉 430070; 2. 农业农村部长江中下游农业装备重点实验室, 武汉 430070)

摘要: 针对传统油菜联合收获机风筛组合式清选装置结构复杂、振动较大的问题,设计了一种组合式旋风分离清选系统,主要由抛扬装置、组合式旋风分离筒、吸杂管道、离心风机等组成,其中,组合式旋风分离筒包括上锥段、中间圆柱段、下锥段、可拆卸圆弧或锥形挡料板等部件。结合油菜脱粒分离装置中脱出物输出量分析计算得出抛扬装置主轴理论转速不小于 569.6 r/min,结合杂余分离最小风量需求分析得出组合式旋风分离筒出粮口直径小于 256 mm;基于运动学与动力学建立了单粒油菜籽粒在旋风分离筒稳定气流场中的运动方程组,分析了挡料板对籽粒分离的影响;以抛扬装置主轴转速、吸杂口风量为因素,以旋风分离系统清洁率与损失率为评价指标开展了单因素试验;开展了正交试验寻求抛扬装置主轴转速、吸杂口风量、上锥段锥角、挡料板形式、出粮口直径的最佳参数组合。单因素试验结果表明:抛扬装置主轴转速与吸杂口风量分别在 500~700 r/min、0.566~0.692 m³/s 范围内清选性能较优。正交试验结果表明:旋风分离清选系统清选性能影响主次因素为吸杂口风量(吸杂口风速)、挡料板形式、上锥段锥角、出粮口直径、抛扬装置主轴转速;最佳参数组合为吸杂口风量 0.692 m³/s、抛扬装置主轴转速 600 r/min、上锥段锥角 30°、无挡料板、出粮口直径 200 mm;最佳参数组合与不同工况条件下,开展验证试验得出旋风分离清选系统清洁率和损失率分别为 86.80%~94.45% 和 5.90%~7.73%。该研究为油菜联合收获机清选装置的结构优化和改进提供了参考。

关键词: 油菜;联合收获;旋风分离清选;组合式;试验

中图分类号: S225.99 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2020)S2-0202-10

Parameters Analysis and Experiment of Cyclone Separation Cleaning System with Replaceable Parts for Rapeseed Combine Harvester

WAN Xingyu¹ LIAO Yitao^{1,2} YUAN Jiacheng¹ WANG Chang¹ HE Kun¹ LIAO Qingxi^{1,2}

(1. College of Engineering, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China

2. Key Laboratory of Agricultural Equipment in Mid-lower Yangtze River, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Wuhan 430070, China)

Abstract: In view of the complicated structure and large vibration of the screen combined cleaning device which utilized fan and sieve in the traditional rapeseed combine harvester, the cyclone separation cleaning system with replaceable parts was designed. The system was mainly composed of the blower, the cyclone separator with replaceable parts, pipe, centrifugal fan, etc. Moreover, all parts of the cyclone separator like the upper cone, cylinder part, lower cone, and arc/cone baffle inside were replaceable. Base on the amount of threshing outputs produced by the threshing and separating device of the harvester, the theoretical rotational speed of the blower was calculated, which was not less than 569.6 r/min. To meet the minimum air volume requirement for separating the materials other than grain (MOG), it was concluded that the rapeseed outlet diameter of the cyclone separator should be less than 256 mm. Based on kinematics and dynamics, the motion equations of a single rapeseed in the steady airflow field inside the cyclone separator were established, and the influence of the baffle on the separation performance of rapeseed was analyzed. Furthermore, the single-factor experiment was conducted to find out the effects of the rotational speed of the blower, and the air volume of the MOG outlet on the cleaning ratio and loss

收稿日期: 2020-08-05 修回日期: 2020-09-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFD1000904)、国家自然科学基金项目(52075210)、农业农村部长江中下游农业装备重点实验室项目、国家油菜产业技术体系专项(CARS-12)、湖北省农业科技创新行动项目和中国博士后科学基金项目(2020M682438)

作者简介: 万星宇(1991—),男,博士后,主要从事油菜机械化收获技术与装备研究,E-mail: wanxy@mail.hzau.edu.cn

通信作者: 廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事现代农业装备设计与测控研究,E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

ratio of the cyclone separation cleaning system. After that, the orthogonal was carried out to find the optimal combination of blower rotational speed, the air volume of the MOG outlet, the angle of the upper cone, the type of baffle, and the rapeseed outlet diameter. The results of the single-factor experiment indicated that the cleaning performance was better when the rotational speed of the blower and the air volume was in the range of 500 ~ 700 r/min and 0.566 ~ 0.692 m³/s, respectively. The results of the orthogonal experiment illustrated that the primary and secondary factors affecting the cleaning performance of the cyclone separation cleaning system were air volume (air velocity) of the MOG outlet, baffle form, angle of the upper cone, rapeseed outlet diameter and rotational speed of the blower. The optimal combination of parameters could be obtained when the air volume of MOG outlet was 0.692 m³/s, the rotational speed of the blower was 600 r/min, the angle of the upper cone was 30°, no baffle was used, and the rapeseed outlet diameter was 200 mm. Under this condition, the cleaning ratio and loss ratio of the cyclone separation cleaning system was 91.50% and 6.02%, respectively. To validate the performance of the cleaning system in actual production, the field experiment was carried out. There was no blockage existing in the blower, the cyclone separator, and the pipe. Finally, the range of the cleaning ratio and loss ratio was 86.80% ~ 94.45% and 5.90% ~ 7.73%, respectively, in the field. This work could provide a reference for the structural optimization and improvement of the cleaning device for the rapeseed combine harvester.

Key words: rapeseed; combine harvesting; cyclone separation cleaning; combinational parts; experiment

0 引言

油菜是我国主要油料作物,兼具蔬菜、饲用^[1-2]、蜜源、绿肥等多功能开发利用价值。加快推进油菜机械化生产是促进油菜产业提质增效的重要保证,油菜机械化收获是油菜生产全程机械化的终端环节,收获效果影响油菜籽粒品质^[3]。现阶段油菜机械化收获主要有分段收获和联合收获两种方式^[4-5],联合收获可一次性完成切割、脱粒、分离、清选等作业工序,获得清洁籽粒^[6-7],生产效率高。油菜联合收获清选装置作业对象为油菜脱出物,具有组分糝杂、含水率高、籽粒细小等特点^[8],导致清选后籽粒清洁率低、损失率高。此外,常规油菜联合收获机多由稻麦收获机改装^[9-11],清选装置多采用风筛组合式,通过更换筛网、调整运行参数等措施以提高清选装置适应性,但由于气室庞大、筛体往复振动,仍存在结构复杂、振动较大的现实问题。

旋风分离采用气流清选原理,结构相对简单,在农业清选、粮油加工、工业除尘等领域均有应用^[12-15]。油菜旋风分离清选系统主要利用脱出物机械物理性能^[16-18]和空气动力学特性^[19-21]差异实现籽粒的分离,其核心部件为旋风分离筒,风机运行时在旋风分离筒内部形成悬浮气流场是实现籽粒与杂余分离的载体,悬浮气流场清选性能受旋风分离筒结构和运行参数的影响,刘师多等^[22-23]基于小麦联合收获平台探究了旋风分离清选系统风机转速、扬谷器转速和旋风分离筒结构参数对清选性能的影响;在结构改进方面,耿令新等^[24]设计了一种锥顶蜗壳式旋风分离筒并开展相关试验;周学建等^[25-26]

则采用旋风分离筒吸杂口偏置设计,研究了偏置位移和角度对清选性能的影响;师清翔等^[27]从整机布局与物料输送角度出发,提出采用双扬谷器结构,在优化清选性能的同时实现物料流向的改变。由以上研究可知,由于脱出物普遍为多种固相颗粒混合,应用于不同谷物的旋风分离筒在其圆柱段上方不宜采用常规旋风分离筒平面封口形式,而是采用锥体形式以避免杂余堆积;影响悬浮气流场分布的旋风分离筒结构参数相对较多,对旋风分离清选系统结构和运行参数的匹配研究有待进一步开展;受限于油菜脱出物在旋风分离气流场内的随机运动,对脱出物组分在悬浮气流场中运动规律的研究鲜有报道。

本研究在油菜联合收获机旋风分离清选系统设计的基础上,结合旋风分离气流场状态解析油菜籽粒的运动过程,优化得出抛扬装置主轴转速、吸杂口风量等运行参数与旋风分离筒上锥段锥角、挡料板形式、出粮口直径等结构参数的最佳组合,为油菜联合收获机清选装置的设计和优化提供参考。

1 基本结构及工作原理

1.1 油菜联合收获机

自制 4LYZ-1.8 型油菜联合收获机结构如图 1 所示,主要包括分体组合式割台^[28]、集成式纵轴流脱粒分离装置^[29]、旋风分离清选系统等部分,可一次性完成油菜的切割、输送、脱粒、分离、清选等项工序。

油菜联合收获机作业时,田间植株由拨禾轮扶持送入割台并被切割,切断后的油菜茎秆进入复合式推运器,在复合式推运器表面螺旋排布的切刀作

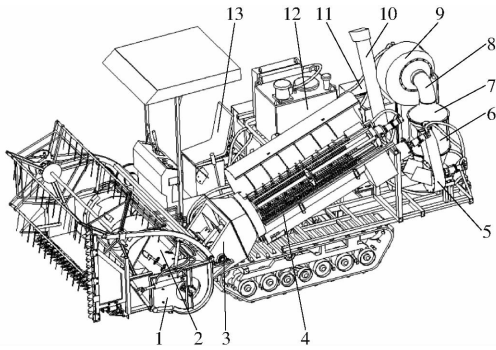


图1 4LYZ-1.8型油菜联合收获机结构示意图

Fig.1 Structural diagram of 4LYZ-1.8 type combine harvester for rapeseed

1. 分体组合式割台 2. 复合式推运器 3. 喂入辊 4. 集成式脱粒分离装置 5. 抛扬装置 6. 旋风分离清选系统 7. 组合式旋风分离筒 8. 吸杂管道 9. 离心风机 10. 籽粒提升螺旋输送机 11. 粮箱 12. 液压系统 13. 驾驶室

用下被初步切断,完成主茎弯切;弯切后的茎秆由集成式脱粒分离装置喂入辊抓取至纵轴流脱离装置内;进入脱离装置的物料中,果荚在脱粒元件击打、揉搓作用下破裂并释放油菜籽粒,大部分短茎秆、荚壳沿脱粒滚筒轴向运移至田间,少量短茎秆透过筛网并与荚壳、轻杂余等组成杂余物料,透过筛网的籽粒与杂余混合即为油菜脱出物;脱出物在输送机作用下被输送至旋风分离清选系统完成清选作业。油菜联合收获机主要技术参数如表1所示。

表1 油菜联合收获机主要技术参数

Tab.1 Main parameters of rapeseed combine harvester

参数	数值/形式
行走系	履带自走式
长×宽×高/(mm×mm×mm)	2 575×2 530×4 520
动力/kW	32.4
作业幅宽/mm	1 800
喂入量/(kg·s ⁻¹)	≥1.5
非行走系驱动方式	液压驱动

1.2 组合式旋风分离清选系统

旋风分离清选系统主要由抛扬装置、组合式旋风分离筒、吸杂管道、离心风机等组成,工作流程如图2所示。本研究采用的组合式旋风分离筒分为上锥段、中间圆柱段和下锥段3部分,上锥段出口为吸杂口,与吸杂管道相连,可防止杂余在悬浮气流作用下堆积于旋风分离筒顶部,造成堵塞,中间圆柱段与强制输送带相连,下锥段出口为出粮口,吸杂管道连接旋风分离筒与离心风机;同时为对比验证旋风分离筒内部稳流装置对旋风分离清选性能的影响,开展了有无挡料板结构的性能对比分析。

由图2可知,旋风分离筒内气流主要由吸杂口提供,入口气流进入旋风分离筒内后需要产生一定

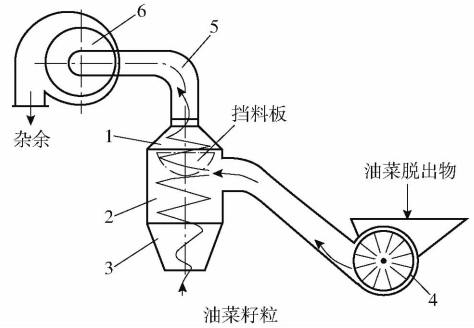


图2 组合式旋风分离清选系统工作流程

Fig.2 Working process of cyclone separation cleaning system with replaceable parts

1. 旋风分离筒上锥段 2. 旋风分离筒中间圆柱段 3. 旋风分离筒下锥段 4. 抛扬装置 5. 吸杂管道 6. 离心风机

悬浮负压迫使部分杂余迁移至吸杂口,籽粒则在离心力作用下沿近筒壁部分旋转下移至出粮口;旋风分离筒中心轴区域则在风机作用下形成速度较高区域,即为高速气流区,近筒壁区域气流速度较低,为低速气流区;籽粒及部分杂余下落至下锥段后由于截面变化,会缓慢靠近高速气流区,杂余被高速气流携带至吸杂口,籽粒则由出粮口落下,实现籽粒与杂余的分离。

2 系统设计与分析

2.1 抛扬装置主轴转速

抛扬装置抛送物料主要包括两个阶段:第1阶段为快速旋转的抛送叶轮抛扔物料阶段,物料主要靠快速旋转的叶片抛扔来获得能量;第2阶段为物料离开抛送叶片后流经出料直管阶段,快速旋转的叶片使气流获得能量。抛扬装置叶轮叶片大都是径向配置,常用叶轮直径为200~400 mm,叶片宽度为40~100 mm,叶片径向高度为40~90 mm,叶片数为2~6个,叶片厚度为2~3 mm,叶轮与外壳的底面与侧面间隙为5~8 mm。考虑整机空间布局选定叶轮外径 $D_y=300$ mm。

抛扬装置将油菜脱出物抛送至管道出口时,应有一定的初速度以保证油菜脱出物切向抛入旋风分离筒内。根据能量守恒定律可得叶轮线速度^[30]为

$$v_y = (1 + \mu_{s2}) \cos \gamma_g \sqrt{2gH_s(1 + \mu_{s1}) + v_f^2} \quad (1)$$

式中 H_s ——升运高度,取0.6 m

v_f ——管道出口处末速度,m/s

γ_g ——管道与水平面夹角,不小于60°,取70°

μ_{s1} ——输送物在输送过程中能量损失系数,取0.22

μ_{s2} ——叶轮圆周速度转换为物料初速度的差异损失系数,取0.55

g ——重力加速度,取 9.8 m/s^2

计算得

$$v_f = \sqrt{\frac{v_y^2}{[(1 + \mu_{s2}) \cos \gamma_g]^2} - 2gH_s(1 + \mu_{s1})} \quad (2)$$

同时,抛扬装置主轴转速 n_y 满足

$$n_y = \frac{60v_y}{\pi D_y} \quad (3)$$

抛扬装置生产率需大于油菜脱出物的喂入量,抛扬装置生产率计算式为^[30]

$$Q_y = 30n_y m_y \gamma_w \eta a_y^2 b_y \tan \varphi_r / 3600 \geq 1 \text{ kg/s} \quad (4)$$

式中 Q_y ——抛扬装置生产率, kg/s

a_y ——叶轮叶片高度,取 60 mm

b_y ——叶轮叶片宽度,取 100 mm

m_y ——叶轮叶片数量,取 10 个

η ——效率系数,取 0.3

n_y ——抛扬装置主轴转速, r/min

γ_w ——物料密度,取 728 kg/m^3

φ_r ——输送物自然休止角,取 17°

计算得

$$n_y \geq 569.6 \text{ r/min}$$

通常抛扬装置叶轮与外壳的底面与侧面间隙为 $5 \sim 8 \text{ mm}$,取间隙为 10 mm 以便于安装,叶轮叶片高度为 60 mm ,支撑底板厚 20 mm ,总宽 80 mm ,故出口宽度 $a_c = 100 \text{ mm}$;为保证输料顺畅,取叶轮直径的一半宽度为出口高度 b_c ,即 $b_c = 150 \text{ mm}$;出口截面积为 0.015 m^2 ,由式(2)及抛扬装置主轴转速范围可换算得出抛扬装置出口处风量 $V_k \geq 0.246 \text{ m}^3/\text{s}$ 。抛扬装置出口处设置有风门,用于按需调节风量以适应不同喂入量。

2.2 旋风分离筒参数

2.2.1 最小风量

旋风分离筒主要任务为分离籽粒与杂余。旋风分离筒所需最小风量与杂余喂入量有关,计算式为

$$V_0 = Q_q / (\mu_h \rho) \quad (5)$$

式中 V_0 ——旋风分离筒圆柱段所需最小风量, m^3/s

Q_q ——杂余喂入量,最小约为 0.2 kg/s ^[12]

ρ ——空气密度,取 1.2 kg/m^3

μ_h ——携带杂质气流的混合浓度比, $0.2 \sim 0.3$,取 0.3

计算得 $V_0 = 0.556 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

2.2.2 出粮口直径

抛扬装置出口与旋风分离筒入口相连,则旋风分离筒出粮口处风量为

$$V_l = V_0 - V_k \quad (6)$$

计算得, $V_l = 0.31 \text{ m}^3/\text{s}$ 。油菜脱出物悬浮速度测定表明籽粒悬浮速度为 $7.4 \sim 9.4 \text{ m/s}$ ^[20]。为保证籽粒顺利落下,取出粮口处风速小于 6 m/s 使其小于籽粒悬浮速度,则出粮口直径 $D_c < 256 \text{ mm}$ 。

2.3 籽粒自由迁移过程的运动学与动力学分析

籽粒在旋风分离筒内自由迁移过程中作出如下假设^[31]:①油菜籽粒为球体。②籽粒仅在气流场中运动,不考虑与筒壁及其他物料的碰撞。③忽略空气黏度及籽粒旋转。④籽粒在旋风分离筒内主要受空气阻力、重力作用,忽略惯性力、升力、浮力等复杂变化或数值较小的力,则籽粒受力模型可表示为

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = F_c + F_d \quad (7)$$

式中 m_p ——籽粒质量, kg

v_p ——籽粒速度, m/s

t ——籽粒运动时间, s

F_c ——籽粒所受重力, N

F_d ——籽粒所受空气阻力, N

籽粒在旋风分离筒内的迁移运动可分解为水平面与垂直面运动,水平面内运动则可分解为以旋风分离筒中心为原点的径向与切向运动,适合在极坐标下分析籽粒在水平面内运动微分方程组;垂直面内主要分析籽粒上下运动轨迹,适宜在笛卡尔坐标系下分析,极坐标与笛卡尔坐标系之间可相互转换。

籽粒所受空气阻力与籽粒、气流相对速度有关,设气流场中籽粒与气流相对速度 v_c 为

$$v_c = u - v_p \quad (8)$$

式中 u ——气流绝对速度, m/s

同时,相对速度在水平面与垂直面内可分解为径向、切向、垂直方向分速度,即

$$v_c = v_{ch} + v_{cr} + v_{cz} \quad (9)$$

式中 v_{ch} ——径向分速度, m/s

v_{cr} ——切向分速度, m/s

v_{cz} ——垂直方向分速度, m/s

籽粒在气流中的空气阻力可分解为水平面分力与垂直面分力,即

$$F_d = F_{dh} + F_{dz} \quad (10)$$

式中 F_{dh} ——空气阻力的水平面分力, N

F_{dz} ——空气阻力的垂直面分力, N

气流场连续、稳定状态下,籽粒自由迁移运动分析如图3所示。

在水平面内,以旋风分离筒中心为原点建立极坐标系,籽粒位置坐标 $O(r, \theta)$ 可由极径 r 与极角 θ 表示。籽粒所受空气阻力为^[32]

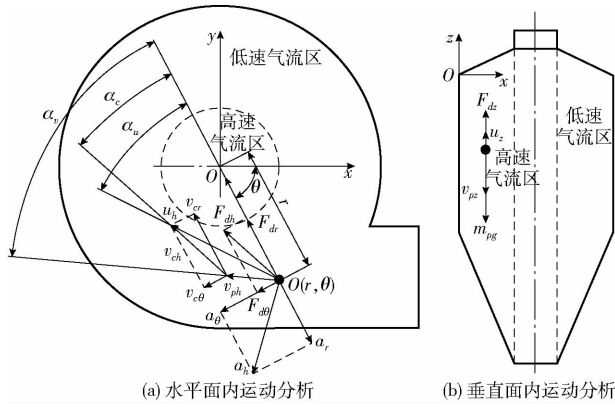


图3 籽粒迁移运动分析

Fig.3 Motion analysis of single rapeseed

$$F_{dh} = \frac{1}{8} C_D \rho_t \pi d_p^2 v_{ch}^2 \mathbf{v}_{ch} \quad (11)$$

式中 C_D ——阻力系数

ρ_t ——气体密度, kg/m^3

\mathbf{v}_{ch} ——水平面内相对速度的单位方向向量

d_p ——油菜籽粒直径, m

设径向方向与切向方向的单位向量分别为 \mathbf{r} 与

θ , 则籽粒在极坐标下的速度方程为

$$\mathbf{v}_{ph} = \dot{r}\mathbf{r} + r\dot{\theta}\theta \quad (12)$$

进一步地

$$\begin{cases} v_{ph}^2 = \dot{r}^2 + (r\dot{\theta})^2 \\ v_{ph} \cos\alpha_v = \dot{r} \\ v_{ph} \sin\alpha_v = r\dot{\theta} \end{cases} \quad (13)$$

由图3可知

$$\begin{cases} v_{ch} \cos\alpha_c = u_h \cos\alpha_u - v_{ph} \cos\alpha_v \\ v_{ch} \sin\alpha_c = u_h \sin\alpha_u - v_{ph} \sin\alpha_v \end{cases} \quad (14)$$

式中 α_c ——相对速度与极径方向向量 \mathbf{r} 夹角, rad

α_u ——气流速度与极径方向向量 \mathbf{r} 夹角, rad

α_v ——籽粒速度与极径方向向量 \mathbf{r} 夹角, rad

联立式(13)、(14)可得

$$\begin{cases} v_{ch} \cos\alpha_c = u_h \cos\alpha_u - \dot{r} \\ v_{ch} \sin\alpha_c = u_h \sin\alpha_u - r\dot{\theta} \end{cases} \quad (15)$$

由式(12)可计算得出

$$v_{ch}^2 = u_h^2 + \dot{r}^2 + (r\dot{\theta})^2 - 2u_h(\dot{r} \cos\alpha_u + r\dot{\theta} \sin\alpha_u) \quad (16)$$

籽粒在极坐标下径向与切向加速度方程为

$$\begin{cases} a_h = a_r + a_\theta \\ a_r = (\ddot{r} - r\dot{\theta}^2) \mathbf{r} \\ a_\theta = (2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta}) \theta \end{cases} \quad (17)$$

由籽粒径向与切向受力可知

$$\begin{cases} m_p a_r = F_{dh} \cos\alpha_c \\ m_p a_\theta = F_{dh} \sin\alpha_c \end{cases} \quad (18)$$

假设籽粒为球体, 则籽粒质量为

$$m_p = \frac{1}{6} \pi d_p^3 \rho_p \quad (19)$$

式中 ρ_p ——油菜籽粒密度, kg/m^3

计算得出

$$\begin{cases} \ddot{r} - r\dot{\theta}^2 = \frac{3}{4} C_D \frac{v_{ch}^2 \rho_t}{d_p \rho_p} \cos\alpha_c \\ 2\dot{r}\dot{\theta} + r\ddot{\theta} = \frac{3}{4} C_D \frac{v_{ch}^2 \rho_t}{d_p \rho_p} \sin\alpha_c \end{cases} \quad (20)$$

可得籽粒在水平面极坐标系中的运动微分方程

为

$$\begin{cases} \ddot{r} = r\dot{\theta}^2 + \frac{3}{4} C_D \frac{\rho_t}{d_p \rho_p} (u_h \cos\alpha_u - v_{ph} \cos\alpha_v) \cdot \\ \sqrt{u_h^2 + \dot{r}^2 + (r\dot{\theta})^2 - 2u_h(\dot{r} \cos\alpha_u + r\dot{\theta} \sin\alpha_u)} \\ \ddot{\theta} = \left[\frac{3}{4} C_D \frac{\rho_t}{d_p \rho_p} (u_h \sin\alpha_u - v_{ph} \sin\alpha_v) \cdot \right. \\ \left. \sqrt{u_h^2 + \dot{r}^2 + (r\dot{\theta})^2 - 2u_h(\dot{r} \cos\alpha_u + r\dot{\theta} \sin\alpha_u)} - 2\dot{r}\dot{\theta} \right] / r \end{cases} \quad (21)$$

在垂直平面内, 运动状态主要受重力及空气阻力影响。由受力分析可得

$$m_p a_z = m_p g - F_{dz} \quad (22)$$

在垂直面笛卡尔坐标系下

$$a_z = \ddot{z} \quad (23)$$

$$v_{cz} = u_z - v_{pz} \quad (24)$$

则籽粒在垂直面内的运动微分方程为

$$\ddot{z} = g - \frac{3}{4} C_D \frac{(u_z - v_{pz})^2 \rho_t}{d_p \rho_p} \quad (25)$$

综上所述, 籽粒在水平面极坐标系与垂直面笛卡尔坐标系混合参照系中的简易模型运动微分方程组为

$$\begin{cases} \ddot{r} = r\dot{\theta}^2 + \frac{3}{4} C_D \frac{\rho_t}{d_p \rho_p} (u_h \cos\alpha_u - v_{ph} \cos\alpha_v) \cdot \\ \sqrt{u_h^2 + \dot{r}^2 + (r\dot{\theta})^2 - 2u_h(\dot{r} \cos\alpha_u + r\dot{\theta} \sin\alpha_u)} \\ \ddot{\theta} = \left[\frac{3}{4} C_D \frac{\rho_t}{d_p \rho_p} (u_h \sin\alpha_u - v_{ph} \sin\alpha_v) \cdot \right. \\ \left. \sqrt{u_h^2 + \dot{r}^2 + (r\dot{\theta})^2 - 2u_h(\dot{r} \cos\alpha_u + r\dot{\theta} \sin\alpha_u)} - 2\dot{r}\dot{\theta} \right] / r \\ \ddot{z} = g - \frac{3}{4} C_D \frac{(u_z - v_{pz})^2 \rho_t}{d_p \rho_p} \end{cases} \quad (26)$$

籽粒简易模型运动微分方程为非线性且变系数的二阶常微分方程, 由方程组可以看出, 籽粒运动轨迹与籽粒、气流速度大小与方向相关, 亦受籽粒自身

直径、密度等特性的影响。对于油菜收获而言,在筒内增加物料挡板会导致高速气流区发散,扰动内部气流场导致稳定性发生变化,引起清选系统清洁率和损失率波动,需通过试验进一步对比验证挡料板结构对清选性能的影响。

3 性能试验

3.1 试验材料与方法

试验材料为人工配比油菜脱出物,主要包括籽粒、短茎秆、荚壳及轻杂余,将物料喂入抛扬装置中,待工作结束后,收集各出口处物料并称量。为寻求组合式旋风分离清选系统较优参数组合,通过调节风机转速、测试吸杂口风速换算得出吸杂口风量,通过更换部件改变上锥段锥角、出粮口直径、挡料板结构形式等结构参数,试验台架如图 4 所示。通过单因素试验探明抛扬装置主轴转速及吸杂口风量的较优范围,在较优范围内综合考虑结构参数开展正交试验得出最佳参数组合,并在最佳参数组合条件下开展台架验证试验。



图 4 组合式旋风分离清选系统试验台

Fig. 4 Test-bed of cyclone separation cleaning system with replaceable parts

1. 抛扬装置 2. 旋风分离筒 3. 吸杂管道 4. 离心风机 5. 电动机 I 6. 支架 7. 电动机 II

3.2 试验评价指标

试验以籽粒清洁率与损失率为评价指标,可通过收集出粮口处物料,筛分并称量籽粒质量计算。清洁率与损失率计算公式为

$$Y_q = \frac{m_2}{m_0} \times 100\% \quad (27)$$

$$Y_s = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (28)$$

式中 Y_q ——清洁率, %

Y_s ——损失率, %

m_0 ——出粮口物料总质量, kg

m_1 ——喂入油菜籽粒总质量, kg

m_2 ——出粮口油菜籽粒总质量, kg

4 试验结果与分析

4.1 吸杂口风量对清选性能的影响

吸杂口风速直接与离心风机转速相关,在吸杂口直径不变情况下可计算对应的吸杂口风量,吸杂口风速、风量与风机转速对照如表 2 所示。

表 2 吸杂口风速、风量与风机转速对照

Tab. 2 Comparison of air velocity and air flow of MOG outlet and fan speed

吸杂口风速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	吸杂口风量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	风机转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)
10	0.314	954
12	0.377	978
14	0.440	1 087
16	0.503	1 247
18	0.566	1 415
20	0.629	1 575
22	0.692	1 835

图 5 为吸杂口风量与清选性能的关系曲线。由图可知,旋风分离清选系统清洁率与损失率均随着吸杂口风量的增加而增加,在吸杂口截面面积不变的情况下,风量增加可代表吸杂口风速的提高,随着吸杂口风速的增加,旋风分离筒内轴向悬浮气流速度增大,籽粒与杂余相对气流的轴向速度差增加,导致空气阻力增大,籽粒更易被悬浮气流捕获并由吸杂口排出,导致损失率增大;吸杂口风量为 $0.314 \sim 0.503 \text{ m}^3/\text{s}$ 、吸杂口风速在 $10 \sim 16 \text{ m/s}$,清洁率较低,考虑籽粒清洁率要求,吸杂口风量为 $0.565 \sim 0.692 \text{ m}^3/\text{s}$ 、吸杂口风速为 $18 \sim 22 \text{ m/s}$ 清选性能较好。

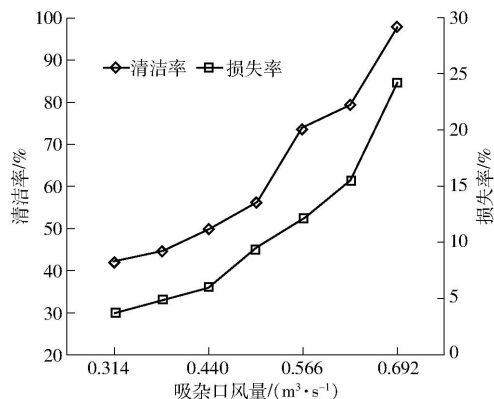


图 5 吸杂口风量与清选性能的关系曲线

Fig. 5 Relationship between air volume of MOG outlet and cleaning performance

4.2 抛扬装置主轴转速对清选性能的影响

图 6 为抛扬装置主轴转速与清选性能的关系曲线,由图可知,随着抛扬装置主轴转速的增大,清洁率与损失率均呈先增大后减小的变化趋势;抛扬装

置主轴转速通过改变油菜脱出物进入旋风分离筒内初速度影响旋风分离清选性能^[14],抛扬装置主轴转速较低时脱出物进入旋风分离筒内的初速度较低,所受离心力较小使物料靠近高速气流区,更易被悬浮气流捕获,导致损失率增大。综合考虑籽粒清洁率与损失率要求,当抛扬装置主轴转速为 500 ~ 700 r/min 时,清选性能较好。

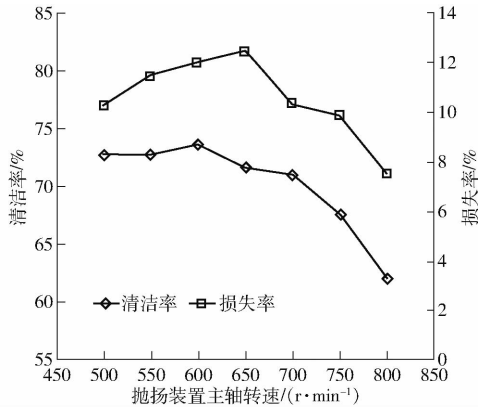


图6 抛扬装置主轴转速与清选性能的关系曲线

Fig. 6 Relationship between blower rotational speed and cleaning performance

4.3 正交试验

为寻求双锥段式旋风分离清选系统较优结构与运行参数,以吸杂口风量、抛扬装置主轴转速为运行参数变量,以上锥段锥角、挡料板形式、出粮口直径

为结构参数变量,开展五因素三水平正交试验,采用计算清洁率与损失率隶属度并采用综合评分的方法评价清选性能,评分越高清选性能越好,指标隶属度与综合评分计算方法为^[13,33]

$$M = (I_i - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}) \quad (29)$$

$$S = 0.35M_q - 0.65M_s \quad (30)$$

式中 M ——指标隶属度

I_i ——当前指标值

I_{\min} ——指标最小值

I_{\max} ——指标最大值

S ——综合评分

M_q ——清洁率隶属度

M_s ——损失率隶属度

试验因素水平和试验结果分别如表3、4所示, A ~ E 为因素水平值。

表3 试验因素水平

Tab. 3 Factors and levels

水平	因素				
	吸杂口 风量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	抛扬装置 主轴转速/ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	上锥段 锥角/ ($^\circ$)	挡料板 形式	出粮口 直径/ mm
1	0.566	500	30	锥形	200
2	0.629	600	45	圆弧形	150
3	0.692	700	60	无	100

表4 试验结果

Tab. 4 Results of orthogonal experiment

试验号	A	B	C	D	E	清洁率/%	损失率/%	清洁率隶属度	损失率隶属度	综合评分
1	1	1	1	1	1	70.51	13.96	0.41	0.20	0.34
2	1	2	2	2	2	94.34	13.16	0.90	0.18	0.15
3	1	3	3	3	3	90.08	10.70	0.82	0.10	0.13
4	2	1	1	2	3	96.00	20.05	0.94	0.39	0.28
5	2	2	2	3	1	79.20	15.57	0.59	0.25	0.31
6	2	3	3	1	2	94.42	25.55	0.91	0.56	0.40
7	3	1	2	3	2	98.43	21.00	0.99	0.42	0.28
8	3	2	3	1	3	96.88	39.88	0.96	1.00	0.67
9	3	3	1	2	1	91.63	22.86	0.85	0.48	0.36
10	1	1	3	2	2	92.00	23.26	0.85	0.49	0.37
11	1	2	1	3	3	81.25	13.23	0.63	0.18	0.25
12	1	3	2	1	1	50.71	7.34	0.00	0.00	0.35
13	2	1	2	1	3	96.41	20.45	0.95	0.40	0.28
14	2	2	3	2	1	85.22	20.40	0.71	0.40	0.36
15	2	3	1	3	2	92.98	19.35	0.88	0.37	0.28
16	3	1	3	3	1	91.86	28.23	0.85	0.64	0.47
17	3	2	1	1	2	98.32	31.37	0.99	0.74	0.48
18	3	3	2	2	3	99.00	32.06	1.00	0.76	0.49
K_1	1.59	2.01	2.39	1.72	2.19					
K_2	1.91	2.22	1.86	2.01	1.96					
K_3	2.75	2.02	1.99	2.52	2.09					
R	1.16	0.21	0.53	0.80	0.23					

正交试验结果表明,影响旋风分离清选性能的主要因素为:吸杂口风量(吸杂口风速)、挡料板形式、上锥段锥角、出粮口直径、抛扬装置主轴转速,最佳参数组合为吸杂口风量 $0.692 \text{ m}^3/\text{s}$ (吸杂口风速为 22 m/s)、抛扬装置主轴转速 600 r/min 、上锥段锥角 30° 、无挡料板、出粮口直径 200 mm ;最佳参数组合条件下,开展验证试验得出旋风分离清选系统清洁率和损失率分别为 91.50% 和 6.02% 。

4.4 田间试验

以组合式旋风分离清选系统为试验对象,自 2015—2019 年期间于华中农业大学油菜试验田中开展油菜联合收获机田间功能性试验(图 7),油菜种植密度为 $38 \sim 40 \text{ 株}/\text{m}^2$,籽粒含水率为 $18.70\% \sim 23.47\%$,茎秆含水率为 $26.90\% \sim 46.70\%$,割茬 350 mm ;在不同工况下作业过程中割台喂入顺畅,抛扬装置、组合式旋风分离筒、吸杂管道等无堵塞现



图 7 清选系统田间试验

Fig. 7 Field experiment of cleaning system

象,旋风分离清选系统清洁率为 $86.80\% \sim 94.45\%$,损失率为 $5.90\% \sim 7.73\%$ 。

5 结论

(1)单因素试验结果表明,在吸杂口截面面积不变情况下,吸杂口风量与抛扬装置主轴转速影响组合式旋风分离清选系统清洁率与损失率,当吸杂口风量为 $0.566 \sim 0.692 \text{ m}^3/\text{s}$,抛扬装置主轴转速为 $500 \sim 700 \text{ r/min}$ 时,清选性能较好。

(2)正交试验结果表明,组合式旋风分离清选系统清选性能的影响主要因素为吸杂口风量(吸杂口风速)、挡料板形式、上锥段锥角、出粮口直径、抛扬装置主轴转速,最佳参数组合为吸杂口风量 $0.692 \text{ m}^3/\text{s}$ 、无挡料板、上锥段锥角 30° 、出粮口直径 200 mm 、抛扬装置主轴转速 600 r/min ,在最佳参数组合条件下,系统清洁率与损失率分别为 91.50% 和 6.02% 。

(3)田间性能试验结果表明,组合式旋风分离清选系统作业顺畅,在不同田间工况下,清选系统清洁率为 $86.80\% \sim 94.45\%$,损失率为 $5.90\% \sim 7.73\%$,满足实际生产需求。

(4)旋风分离清选系统内籽粒与杂余的分离过程相对复杂,难以通过理论分析精确得出结构与运行参数对物料颗粒迁移的影响规律,后续将重点围绕喂入量波动变化并结合计算机仿真模拟软件开展旋风分离过程的气固耦合机制研究。

参 考 文 献

- [1] 蒋亚军,廖宜涛,廖庆喜. 冬春鲜喂饲用油菜收获机滚刀式切碎装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(2): 102 - 111.
JIANG Yajun, LIAO Yitao, LIAO Qingxi. Design and experiment on cylinder-type chopping device of harvester for fodder rapeseed in winter and spring[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 102 - 111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190211&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.02.011. (in Chinese)
- [2] 廖宜涛,廖庆喜,周宇,等. 饲料油菜薹期收获茎秆破碎离散元仿真参数标定[J/OL]. 农业机械学报,2020,51(6):73 - 82.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, ZHOU Yu, et al. Parameters calibration of discrete element model of fodder rape crop harvest in bolting stage[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6): 73 - 82. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20200608&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.008. (in Chinese)
- [3] 罗海峰,汤楚宙,官春云,等. 适应机械化收获的田间油菜植株特性研究[J]. 农业工程学报,2010,26(增刊1):61 - 66.
LUO Haifeng, TANG Chuzhou, GUAN Chunyun, et al. Plant characteristic research on field rape based on mechanized harvesting adaptability [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp.1): 61 - 66. (in Chinese)
- [4] 吴崇友,肖圣元,金梅. 油菜联合收获与分段收获效果比较[J]. 农业工程学报,2014,30(17):10 - 16.
WU Chongyou, XIAO Shengyuan, JIN Mei. Comparison on rape combine harvesting and two-stage harvesting[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(17): 10 - 16. (in Chinese)
- [5] 黄小毛,宗望远. 油菜联合收获的研究现状及发展趋势[J]. 农业工程,2012,2(1):14 - 19.
HUANG Xiaomao, ZONG Wangyuan. Research status and development trend of rape combine harvester[J]. Agricultural Engineering, 2012, 2(1): 14 - 19. (in Chinese)
- [6] 刘德军,赵秀荣,高连兴,等. 不同收获方式含水率对油菜收获物流损失的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(10):339 - 342.
LIU Dejun, ZHAO Xiurong, GAO Lianxing, et al. Effect of moisture content on rape harvest logistics losses under different

- harvest methods[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(10): 339-342. (in Chinese)
- [7] 徐立章,李洋,李耀明,等. 谷物联合收获机清选技术与装置研究进展[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(10):1-16.
XU Lizhang, LI Yang, LI Yaoming, et al. Research progress on cleaning technology and device of grain combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 1-16. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20191001&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.10.001. (in Chinese)
- [8] 施新新,吴崇友,李骅,等. 两种油菜收获脱出物的物理机械特性及空气动力学特性测定与分析[J]. 江西农业学报,2018,30(6):104-108.
SHI Xinxin, WU Chongyou, LI Hua, et al. Measurement and analysis of physical mechanical properties and aerodynamic characteristics of harvesting extractions from two rape varieties [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2018, 30(6): 104-108. (in Chinese)
- [9] 马丽娜,魏俊逸,黄小毛,等. 4LL-1.5Y型履带式油菜联合收获机割台振动分析[J]. 安徽农业大学学报,2019,46(4):723-727.
MA Li'na, WEI Junyi, HUANG Xiaomao, et al. Vibration analysis of cutting table of 4LL-1.5Y crawler rape combine harvester [J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2019, 46(4): 723-727. (in Chinese)
- [10] 关卓怀,吴崇友,王刚,等. 油菜联合收割机双向电驱动分行竖割刀设计[J]. 农业工程学报,2019,35(3):1-8.
GUAN Zhuohuai, WU Chongyou, WANG Gang, et al. Design of bidirectional electric driven side vertical cutter for rape combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(3): 1-8. (in Chinese)
- [11] 黄小毛,查显涛,宗望远,等. 油菜联合收获割台落粒横流气压收集装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):227-233.
HUANG Xiaomao, ZHA Xiantao, ZONG Wangyuan, et al. Design and test of transverse positive pressure airflow collection device for header losses of rape combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47 (Supp.): 227-233. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2016s035&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.035. (in Chinese)
- [12] WAN Xingyu, LIAO Qingxi, XU Yang, et al. Design and evaluation of cyclone separation cleaning devices using a conical sieve for rape combine harvesters[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2018, 34(4): 677-686.
- [13] 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)
- [14] 万星宇,舒彩霞,徐阳,等. 油菜联合收获机分离清选差速圆筒筛设计与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(14):27-35.
WAN Xingyu, SHU Caixia, XU Yang, et al. Design and experiment on cylinder sieve with different rotational speed in cleaning system for rape combine harvesters[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(14): 27-35. (in Chinese)
- [15] 廖庆喜,徐阳,袁佳诚,等. 油菜联合收获机切抛组式纵轴流脱离装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(7):140-150.
LIAO Qingxi, XU Yang, YUAN Jiacheng, et al. Design and experiment on combined cutting and throwing longitudinal axial flow threshing and separating device of rape combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7): 140-150. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190714&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.07.014. (in Chinese)
- [16] 陈翠英,王志华,李青林. 油菜脱出物物理机械特性及振动筛参数优化[J]. 农业机械学报,2005,36(3):60-63,70.
CHEN Cuiying, WANG Zhihua, LI Qinglin. Mechanophysical properties of rape extractives and parametrical optimization of vibration sieve[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(3): 60-63, 70. (in Chinese)
- [17] 马征,李耀明,徐立章. 收获期油菜茎秆表面浸润特性研究[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(6):98-103.
MA Zheng, LI Yaoming, XU Lizhang. Wetting property of rapeseed (*Brassica napus* L.) stalk surface[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(6): 98-103. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140616&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.016. (in Chinese)
- [18] 马征,李耀明,徐立章. 农业工程领域颗粒运动研究综述[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(2):22-29.
MA Zheng, LI Yaoming, XU Lizhang. Summarize of particle movements research in agricultural engineering realm[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 22-29. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130205&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.005. (in Chinese)
- [19] 宗望远,黄小毛,潘海兵,等. 下落油菜籽粒在无秸秆正压纵向气流场中的漂移特性[J]. 农业工程学报,2015,31(3):70-76.
ZONG Wangyuan, HUANG Xiaomao, PAN Haibing, et al. Drifting property of falling oil rape seeds in longitudinal positive pressure airflow field without stalks[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 70-76. (in Chinese)
- [20] 陈立,廖庆喜,宗望远,等. 油菜联合收获机脱出物空气动力学特性测定[J/OL]. 农业机械学报,2012,43(增刊):125-130.

- CHEN Li, LIAO Qingxi, ZONG Wangyuan, et al. Aerodynamic characteristics measurement of extraction components for rape combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 125-130. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2012s25&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.025. (in Chinese)
- [21] 马征,李耀明,徐立章.油菜脱出物漂浮速度及摩擦与浸润特性的测定与分析[J].农业工程学报,2011,27(9):13-17. MA Zheng, LI Yaoming, XU Lizhang. Testing and analysis on rape excursion components characteristics in floating, friction and wettability[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(9): 13-17. (in Chinese)
- [22] 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)
- [23] 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)
- [24] 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)
- [25] 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/OL].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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(8): 80-85, 159. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140813&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.08.013. (in Chinese)
- [26] 袁华杰,周学建,马萌,等.吸杂口偏置型旋风分离装置的小麦清选试验[J].河南科技大学学报(自然科学版),2014,35(5):73-78,111. YUAN Huajie, ZHOU Xuejian, MA Meng, et al. Wheat cleaning experiment of cyclone separating device based on off-centered inlet scoop [J]. Journal of Henan University of Science and Technology (Natural Science), 2014, 35(5): 73-78, 111. (in Chinese)
- [27] 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/OL].农业机械学报,2014,45(11):124-128. SHI Qingxiang, MA Meng, YAN Weihong, et al. Two-stage winnower cyclone separating cleaning system performance testing and optimization[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(11): 124-128. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20141119&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.11.019. (in Chinese)
- [28] 李海同,廖庆喜,李平,等.油菜联合收获机分体组合式割台的设计[J].华中农业大学学报,2014,33(5):111-116. LI Haitong, LIAO Qingxi, LI Ping, et al. Design on separating-combined header of rape combine harvester[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2014, 33(5): 111-116. (in Chinese)
- [29] 李海同,万星宇,王华,等.油菜联合收获机集成式纵轴流脱离装置设计与试验[J/OL].农业机械学报,2017,48(5):108-116. LI Haitong, WAN Xingyu, WANG Hua, et al. Design and experiment on integrated longitudinal axial flow threshing and separating device of rape combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(5):108-116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170513&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.013. (in Chinese)
- [30] 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.
- [31] 王修善,刘大为,谢方平,等.旋风清选分离筒中脱出物籽粒的运动分析[J].时代农机,2019,46(3):104-108.
- [32] 李万平.计算流体力学[M].武汉:华中科技大学出版社,2004.
- [33] 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/OL].农业机械学报,2013,44(10):80-85. LIAO Qingxi, CHEN Li, LI Haitong, et al. Cleaning unit test-bed of extraction components for rape combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(10): 80-85. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20131014&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.10.014. (in Chinese)