

油菜联合收获机切抛组合式纵轴流脱粒装置设计与试验

廖庆喜^{1,2} 徐阳^{1,2} 袁佳诚^{1,2} 万星宇^{1,2} 蒋亚军^{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链耙式输送机输送距离长、且易引起油菜高粗茎秆堵塞的问题,设计了一种切抛组合式纵轴流脱粒装置,实现油菜的强制喂入、切断抛送、脱粒分离功能于一体,整机关键部件全部采用液压驱动,可保证其无级调速和运转平稳。通过对茎秆的运动学与动力学分析,确定了喂入辊、切碎滚筒和脱粒滚筒的结构参数与工作参数,以夹带损失率和功耗等为评价指标,开展了切碎滚筒转速、脱粒滚筒转速和脱粒间隙的正交试验。正交试验结果表明:较优参数组合为切碎滚筒转速 450 r/min、脱粒滚筒转速 450 r/min、脱粒间隙 30 mm,此时夹带损失率为 0.415%,脱出物短茎秆质量分数为 10.43%,切碎滚筒和脱粒滚筒总功耗为 4.16 kW,排草口茎秆平均长度 134.8 mm,对应的旋风分离清选系统籽粒总损失率为 6.13%、清洁率为 91.97%。田间试验表明,切抛组合式纵轴流脱粒装置能实现物料由割台至脱粒装置的均匀连续输送和脱粒分离功能,可满足油菜联合收获机的作业要求。

关键词: 油菜; 联合收获机; 切抛组合; 纵轴流脱粒装置

中图分类号: S225.99 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2019)07-0140-11

Design and Experiment on Combined Cutting and Throwing Longitudinal Axial Flow Threshing and Separating Device of Rape Combine Harvester

LIAO Qingxi^{1,2} XU Yang^{1,2} YUAN Jiacheng^{1,2} WAN Xingyu^{1,2} JIANG Yajun^{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: A combined cutting and throwing longitudinal axial flow threshing and separating device was designed to solve the problems like long transport distance and high probability of blockage in threshing device due to the low adaptability of the chain conveyor to rape with high and thick stems in traditional rape combine harvester. The functions of forced feeding, cutting, throwing, threshing and separating were combined, and the key parts of the rape combine harvester were all hydraulically driven to ensure their stepless speed regulation and smooth operation. The structural and working parameters of feeding roller, cutting cylinder and threshing cylinder were determined based on kinematics and dynamics analysis of stem. The orthogonal experiment of cutting cylinder speed, threshing cylinder speed and threshing clearance were carried out while the entrainment loss ratio and power consumption were used as indexes. The results of orthogonal experiment showed that the optimal parameters were 450 r/min for the cutting cylinder speed, 450 r/min for the threshing cylinder speed and 30 mm for the threshing clearance. Under this combination of parameters, the total loss ratio was 0.415%, the mass percentages of short stems in the threshing outlets was 10.43%, the total power consumption for cutting cylinder and threshing cylinder was 4.16 kW and the average length of the stems discharged from the outlet of stems was 134.8 mm. In addition, the loss ratio and cleaning ratio of cyclone separation cleaning system were 6.13% and 91.97%, respectively. The field experiment showed that the combined cutting and throwing longitudinal axial flow threshing and separating device could realize the uniform continuous conveying, threshing and separating of materials from the header to the threshing device and it could meet the operation demand of the rape combine harvester.

Key words: rape; combine harvester; combined cutting and throwing; longitudinal axial threshing device

收稿日期: 2018-12-18 修回日期: 2019-03-18

基金项目: 农业科研杰出人才及其创新团队项目、湖北省技术创新专项重大项目(2016ABA094)和湖北省农业科技创新行动项目

作者简介: 廖庆喜(1968—),男,教授,博士生导师,主要从事油菜机械化生产技术与装备研究, E-mail: liaoqx@mail.hzau.edu.cn

0 引言

油菜联合收获即在油菜的角果成熟后期,一次完成对田间油菜切割、脱粒、清选等联合作业,能有效提高油菜收获效率,但同时也存在适收期短、收获损失率不易控制等缺点。我国现有的油菜联合收获机多基于传统全喂入式稻麦联合收获机设计^[1-3],脱粒装置是油菜联合收获机的核心部件,它不仅决定了整机的脱粒质量,且影响后续清选效果^[5-7]。

目前,众多学者针对脱粒装置开展了系统研究,包括探究脱粒分离结构对性能的影响^[8-13],降低脱粒滚筒总功耗^[14-16],分析脱离装置内的物料运动规律及受力^[17-19]等。为解决谷物联合收获过程中存在对含水率高的谷物适应性差、脱粒损失率大、易堵塞等问题,徐立章等^[20]研制的4LQZ-6型切纵流联合收获机在纵轴流脱离装置前安装倾斜输送链耙、切流脱粒装置和强制喂入装置,并进行了田间试验和性能检测。徐立章等^[21]研制的切纵流双滚筒联合收获机通过链耙输送物料,切纵脱粒分离装置采用先易后难、有序脱粒。梁苏宁等^[22]研制的4LZG-3.0型谷子联合收获机中间输送装置采用耙齿式输送器结构,能及时将大量的谷物快速送入脱粒滚筒。李耀明等^[23]研制的斜置切纵流双滚筒脱粒分离装置中,前置切流滚筒对物料进行强制喂入并初脱分,斜置纵轴流滚筒完成籽粒的复脱分离任务,过渡口采用螺旋喂入配合导流罩喂入物料。综上所述,传统油菜联合收获机大都采用链耙式输送器输送物料,存在结构复杂、输送距离长等问题,且链耙输送器输出的物料主要依靠脱粒滚筒前端抓取头喂入到纵轴流滚筒,收获茎秆高粗的油菜时,物料喂入不均匀,易导致脱粒分离负载不稳定。

为简化传统油菜联合收获机结构,实现物料顺畅输送,本文设计一种切抛组合式纵轴流脱离装置,采用横轴流切抛装置与纵轴流脱离装置组合式结构,实现油菜的强制喂入、切断抛送、脱粒分离的串联结构,为油菜联合收获机脱粒装置结构及运行参数的优化提供参考。

1 总体结构与工作过程

1.1 油菜联合收获机总体结构

自行研制的4LYZ-2.0型油菜联合收获机主要由割台、切抛组合式纵轴流脱离装置、旋风分离清选系统、履带式行走底盘及液动力系统等组成,关键部件均采用液压驱动,可实现无级调速。整机结构及主要技术参数如图1、表1所示。

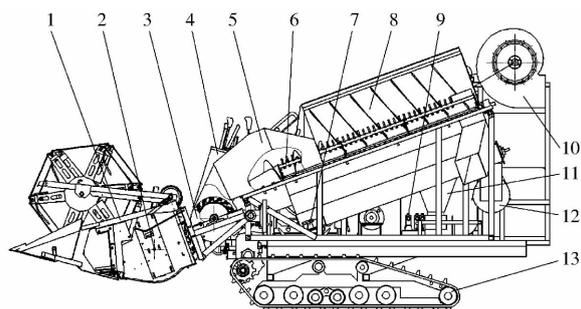


图1 4LYZ-2.0型油菜联合收获机总体结构图

Fig.1 Overall structure diagram of 4LYZ-2.0 type rapeseed combine harvester

1. 割台 2. 复切输送器 3. 切抛装置 4. 驾驶室 5. 喂入罩壳
6. 纵轴流脱粒装置 7. 筛下物输送器 8. 顶盖 9. 液压控制阀块
10. 离心风机 11. 旋风分离筒 12. 抛料机 13. 行走系统

表1 4LYZ-2.0型油菜联合收获机主要技术参数

Tab.1 Main technical parameters of 4LYZ-2.0 type rapeseed combine harvester

参数	数值/型式
行走系	履带自走式
配套动力/kW	72
非行走系驱动方式	全液压
长×宽×高/(mm×mm×mm)	5 400×2 300×2 800
割台宽度/mm	2 000
留茬高度/mm	≤350
喂入量/(kg·s ⁻¹)	≥2
脱粒装置	切抛组合式纵轴流脱离装置
清选系统	旋风分离

1.2 切抛组合式纵轴流脱离装置结构与工作过程

切抛组合式纵轴流脱离装置主要由切抛装置、脱粒装置和机架等组成,横轴流切抛装置与纵轴流脱粒装置通过转轴联接;其中切抛装置包括喂入辊、切碎滚筒、切碎滚筒机架及抛料罩壳等,脱粒装置包括抓取喂入头、过渡罩壳、脱粒滚筒、导向顶盖、凹板筛、筛下物输送器、下罩壳和机架等,抛料罩壳的抛送通道与过渡罩壳入口对接,其整体结构如图2所示。

油菜茎秆在切抛组合式纵轴流脱离装置内的流动方向与路径如图3所示。根据物料在切抛组合式纵轴流脱离装置内的工作过程可划分为3个阶段:抓取喂入阶段Ⅰ、切断抛送阶段Ⅱ、脱粒分离阶段Ⅲ。各阶段喂入量相同,并大于排草口处的物料流量。

在阶段Ⅰ中,喂入辊将割台输送过来的油菜抓取压紧,均匀喂入至切碎滚筒;在阶段Ⅱ中,由切碎滚筒对高粗油菜茎秆进行初步切断,利用离心力和高速气流的综合作用将切碎的茎秆进行抛送,物料沿抛料罩壳切线抛送至脱粒装置;在阶段Ⅲ中,螺旋叶片配合导流罩迅速将物料沿脱粒滚筒轴线方向推

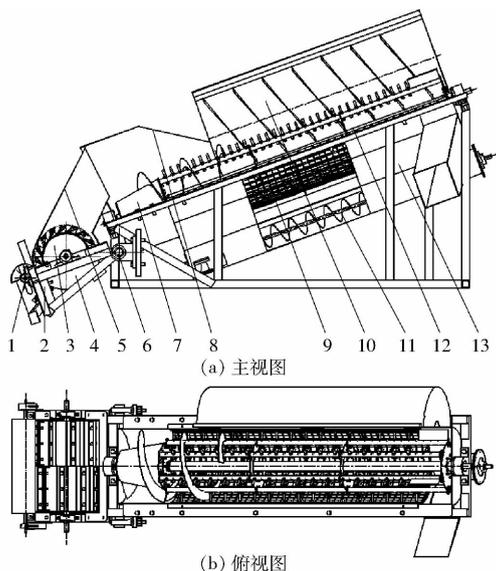


图2 切抛组合式纵轴流脱粒装置结构示意图
Fig.2 Structure sketches of combined cutting and throwing longitudinal axial flow threshing and separating device for rape combine harvester

1. 喂入辊 2. 切碎滚筒支架 3. 切碎滚筒 4. 下罩壳 5. 抛料罩壳 6. 割台升降转轴 7. 抓取喂入头 8. 喂入罩壳 9. 凹板筛 10. 导向顶盖 11. 筛下物输送机 12. 脱粒滚筒 13. 脱粒滚筒下罩壳

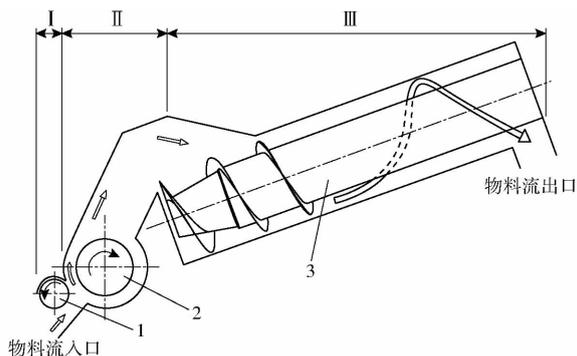


图3 茎秆流动示意图

Fig.3 Stem flow diagram

1. 喂入辊 2. 切碎滚筒 3. 脱粒滚筒

送,物料在顶盖导向板和脱粒元件作用下完成脱粒,脱出物透过凹板筛与茎秆分离。整个作业过程中,物料输送路程缩短,切抛装置将高粗的油菜茎秆层初步切断、均匀抛送,有利于稳定脱粒滚筒负荷。

2 关键部件设计与分析

2.1 喂入辊

抓取喂入阶段中抓取、压紧和喂送物料的主要部件是喂入辊,由喂入辊轴、压草齿板和轴承座构成,其喂入性能与喂入辊的直径和形状有关,如图4所示。压草齿板的刃口设计成等边三角形的尖齿,将尖齿叶片交错排布,使输送方向上无盲区,以提高辊子的抓取能力,考虑到相邻两齿间距大于油菜茎

秆直径,取齿板上相邻两齿间距 c 为 35 mm,齿高 h_c 为 60 mm;根据割台物料输送口尺寸设计喂入辊压草齿板长度 l_c 为 580 mm。

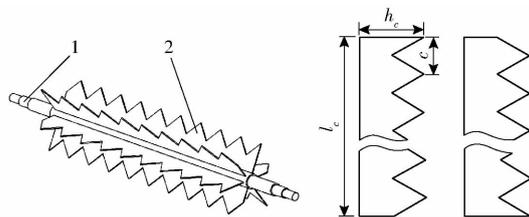


图4 喂入辊及齿形分布

Fig.4 Feeding roll and tooth profile distribution

1. 喂入辊轴 2. 压草齿板

对经过喂入辊的油菜茎秆进行受力分析,如图5所示,油菜茎秆在输送通道内连续流动且茎秆之间存在摩擦力,将其视为茎秆流进行计算。此时茎秆层主要受两个力,分别为喂入辊对茎秆层的正压力 N 以及茎秆层与喂入辊之间的摩擦力 μN 。其中正压力 N 为阻止茎秆喂入的力,摩擦力 μN 是拉入茎秆的力。

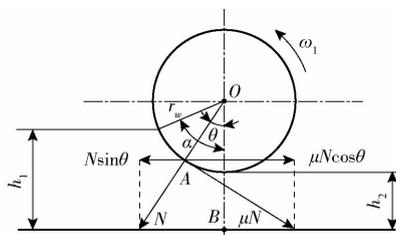


图5 油菜茎秆受力分析

Fig.5 Force analysis diagram of feed roller

若在喂入过程中物料没有推力,仅靠喂入辊的摩擦力,为了使茎秆正常喂入须满足

$$\mu N \cos \theta > N \sin \theta \quad (1)$$

$$\text{即} \quad \varphi > \theta \quad (2)$$

式中 φ ——油菜茎秆与喂入辊齿面的摩擦角,取 27°

θ —— N 的方向角, ($^\circ$)

喂入辊中心到输送通道下罩壳距离为

$$l_{OB} = r_w \cos \alpha + h_1 = r_w + h_2 \quad (3)$$

将 $\varphi = \theta$ 和 $\alpha = 2\theta$ 代入式(3),令茎秆层经过喂入辊的压缩程度 $\tau = h_2/h_1$,即喂入辊直径为

$$D_w = \frac{2h_1(1-\tau)}{1-\cos(2\varphi)} \quad (4)$$

式中 D_w ——喂入辊直径,mm

r_w ——喂入辊半径,mm

h_1 ——茎秆层喂入前厚度,mm

h_2 ——茎秆层被喂入辊压缩后厚度,mm

α ——茎秆层附着在喂入辊表面的弧长包角, ($^\circ$)

已知在茎秆层经过喂入辊的压缩程度 τ 一定

时,为了增大喂入辊与物料接触表面(增大 α 角),就要采用较小直径的喂入辊。由试验可知当喂入量在 $2\sim 3\text{ kg/s}$ 时,喂入辊前油菜茎秆层厚度 h_1 在 $100\sim 120\text{ mm}$ 。取 $h_2/h_1=0.7$, $\varphi=27^\circ$ 时,由式(4)可得:喂入辊最小直径 $D_{w\min}$ 范围为 $146\sim 174\text{ mm}$ 。由于喂入辊应尽量靠近伸缩拨指和切碎滚筒的动刀刀刃,所以应该尽量取较小的直径,即喂入辊直径设计为 150 mm 。

油菜被喂入辊卷入切碎滚筒的速度 v_w 为

$$v_w = \frac{\pi D_w n_w}{60} \quad (5)$$

式中 v_w ——喂入辊喂入速度, m/s

n_w ——喂入辊转速, r/min

为了适应物料的输送,喂入辊输送的线速度要大于割台复切输送器的喂入线速度,复切输送机转速 $n_f=200\text{ r/min}$,复切输送机半径 $r_f=0.15\text{ m}$,则输送线速度 $v_f=3.14\text{ m/s}$;为减少油菜籽粒喂入过程的损失,在满足抓取和输送的基础上,要尽量减少喂入辊对油菜果荚的打击,喂入辊的线速度应小于油菜果荚脱粒所需的脱粒元件的速度。参考相关作物的研究结果取 6 m/s ^[24],喂入辊速度需满足 $v_w < 6\text{ m/s}$ 。完整表达为

$$v_f < v_w < 6\text{ m/s} \quad (6)$$

由式(5)、(6)可知 $400\text{ r/min} < n_w < 764\text{ r/min}$,在满足物料输送能力的前提下为尽量减少转速过快对油菜果荚的打击,取喂入辊转速 $n_w=500\text{ r/min}$,则 $v_w=3.93\text{ m/s}$ 。

2.2 切碎滚筒

切碎抛送阶段主要工作部件为切碎滚筒,平板滚刀式切碎滚筒的动刀是直刃刀,具有良好的切碎和抛送性能,其结构如图6所示,切碎滚筒主要由动刀护板、动刀座、动刀、切碎滚筒基座、切碎滚筒主

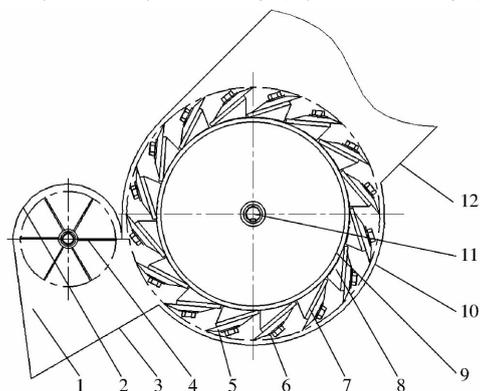


图6 喂入辊与切碎滚筒示意图

Fig.6 Structure sketch of feeding roller and cutting cylinder

1. 喂入辊侧板 2. 喂入辊上罩壳 3. 喂入辊底板 4. 喂入辊
5. 动刀 6. 动刀护板 7. 动刀座 8. 动刀角度固定座 9. 切碎滚筒基座 10. 切碎滚筒下罩壳 11. 切碎滚筒主轴 12. 抛料罩壳

轴、抛料罩壳等组成。

当切碎滚筒较小时,只能通过提高切碎滚筒转速来满足茎秆切段长度要求,转速提高对切碎滚筒的刚性、强度和动平衡要求较高,在割台和收获机底盘空间允许的情况下,应尽量加大切碎滚筒直径。因此,将切碎滚筒直径设计为 400 mm 。为保证喂入顺畅,切碎滚筒工作宽度略大于喂入口宽度 $20\sim 60\text{ mm}$,由于受到整机装配中横向尺寸的约束,确定切碎滚筒的工作宽度为 600 mm 。为避免在切碎过程中茎秆摩擦动刀片的前表面,动刀片的刃角 γ' 与安装前倾角 φ' 应该满足 $\gamma' + \varphi' < 90^\circ$,综合考虑该动刀片应具有很强抛送能力和初步切断茎秆的功能^[24],设计动刀片的刃角 $\gamma' = 21^\circ$,安装前倾角 $\varphi' = 50^\circ$ 。为保证切碎过程的平稳性、连续性,采用2组共16把动刀左右交错安装在滚筒体动刀座上,考虑到降低加工成本和切割功耗,采用削切方式切碎茎秆,并将切段油菜沿抛送罩壳直接抛出。

茎秆理论切碎长度为相邻动刀片两次切断动作之间茎秆的进给量,考虑到油菜茎秆输送与切割过程中非垂直喂入以及打滑因素的影响,实际切碎长度为

$$l_q = \frac{60\,000 v_w}{n_q z_q (1 - \varepsilon)} \quad (7)$$

式中 n_q ——切碎滚筒转速, r/min

z_q ——切碎滚筒上单排动刀片数,为8

ε ——茎秆输送切割过程的打滑与垂直纠正系数,取0.55

由式(7)知喂入速度一定时,茎秆切碎长度与切碎滚筒转速成反比,依据GB/T 24675.6—2009《保护性耕作机械 秸秆粉碎还田机》,油菜茎秆切碎长度小于 150 mm ,由此可计算得切碎滚筒转速大于 437 r/min 。

油菜茎秆切段进入切碎滚筒后,将在绕定轴转动的动刀片上运动,设茎秆切段与动刀片为非弹性碰撞,茎秆切段沿刀片方向运动无初速度,忽略其重力和空气阻力,可计算出茎秆切段在动刀片上 t 时刻 M 点的位移及运动速度,切碎滚筒抛送物料质点受力如图7所示。

转轴 O 水平配置,动坐标轴 $O'L$ 沿叶片方向向外为正并与叶片一起旋转,当时间 $t=0$ 时, $l=l_0$, $dl/dt=0$ 。质点沿刀片运动的微分方程式为

$$m\omega_2^2 r \cos\delta - \mu \left(2m\omega_2 \frac{dl}{dt} + m\omega_2^2 r \sin\delta \right) = m \frac{d^2 l}{dt^2} \quad (8)$$

式中 ω_2 ——切碎滚筒角速度, rad/s

m ——物料质点 M 的质量

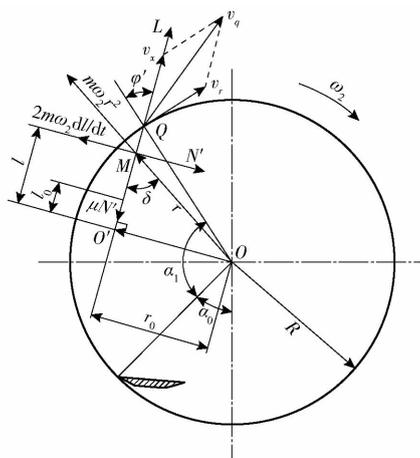


图7 物质质点在滑移过程中受力图

Fig. 7 Force diagram of material particle in slip process

r ——物质质心位置与叶轮轴心 O 距离, mm

δ ——动刀片与点 M 处径向夹角, ($^\circ$)

l ——物质质点 M 动坐标, mm

μ ——摩擦因数

$r \cos \delta = l, r \sin \delta = r_0$, 为了简化方程式, 使 $\mu = 1$,

则质点的位移与速度函数为

$$l = (l_0 + r_0) (0.85e^{0.414\omega_2 t} + 0.15e^{-2.414\omega_2 t}) + r_0 \quad (9)$$

$$\frac{dl}{dt} = (l_0 + r_0) \omega_2 (0.352e^{0.414\omega_2 t} - 0.362e^{-2.414\omega_2 t}) \quad (10)$$

式中 l_0 ——物质质点在动刀片上的初始位置, mm

r_0 ——动刀片工作面与回转中心的垂直距离, mm

式(9)、(10)表征茎秆切段位移及速度与时间的关系, 影响速度的因素有 l_0 、 ω_2 和 r_0 。为使靠近刀片末端的茎秆切段能获得足够的速度分量, 提高切碎滚筒角速度可有效提高抛送速度, 也可以适当增大刀片工作面与回转中心的垂直距离, 即增大刀片倾角 δ_0 。

由于物料的最佳抛出角为 $60^\circ \sim 130^\circ$, 过低或过高则会导致物料与罩壳碰撞、摩擦, 增加功耗^[25]。考虑后面脱粒滚筒空间布局, 取动刀转角 $\alpha_1 = 90^\circ$, 即设计抛料罩壳与切碎滚筒的水平面角度呈 45° 向后倾斜。

茎秆切段的抛送高度 H 及切碎滚筒转速 n_q 计算式为

$$\begin{cases} H = \frac{\eta_H v_r^2}{2g} \\ n_q = \frac{60v_r}{\pi D_q \eta_r} \end{cases} \quad (11)$$

式中 v_r ——茎秆切段离开动刀片沿抛料罩壳的线速度, m/s

η_H ——由于茎秆切段在抛送过程中受到相互碰撞缠绕并与罩壳摩擦而造成抛送高度降低的系数, 取 0.25

D_q ——切碎滚筒直径, 0.4 m

η_r ——茎秆切段在抛送过程中抛送角纠正系数, 取 0.9

为保证茎秆切段能沿抛送罩壳抛送至脱粒装置抓取喂入头上方而不回流, 沿抛送罩壳抛送高度 H 需大于抓取喂入头前端竖直高度 H_1 , 为减小功耗, 沿抛送罩壳抛送高度 H 需小于抓取喂入头末端竖直高度 H_2 。由三维图中可测得 $H_1 = 0.93$ m, $H_2 = 1.66$ m, 将 $H_1 < H < H_2$ 代入式(11)可得 414 r/min $< n_q < 552$ r/min, 综合式(7)分析可得切碎滚筒转速范围为 437 r/min $< n_q < 552$ r/min。

2.3 脱离装置

脱粒分离阶段作业部件是纵轴流脱离装置, 如图8所示, 主要包括抓取喂入头、脱粒滚筒、凹板筛和导向顶盖等部件。

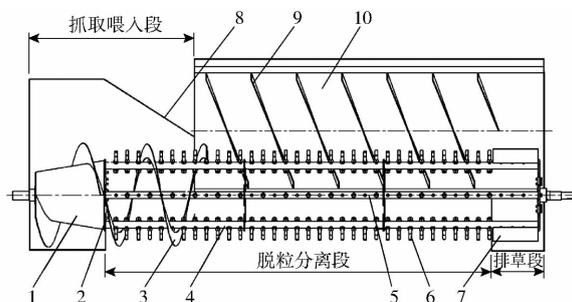


图8 纵轴流脱粒装置结构简图

Fig. 8 Sketch of longitudinal axial flow threshing and separating device

1. 抓取喂入头 2. 辐盘 3. 螺旋叶片 4. 脱粒齿杆 5. 脱粒滚筒轴 6. 脱粒钉齿 7. 排草板 8. 喂入罩壳 9. 导向板 10. 导向顶盖

2.3.1 抓取喂入头

抓取喂入头由螺旋叶片、锥形筒体和连接辐盘焊接组成。锥形筒体前端直径 $D_1 = 200$ mm, 以提高脱粒装置的适应性和物料的输送, 后端与脱离滚筒齿杆处的圆周面大小相当, 取锥形筒体后端直径 $D_2 = 300$ mm。螺旋叶片外径应比脱粒滚筒齿顶圆直径略大, 以便作物能螺旋进入脱粒室, 故设计取螺旋叶片外径 $D_T = 460$ mm。

油菜茎秆切段从抓取喂入头上方喂入, 在螺旋叶片的作用下, 以间歇螺旋形式向脱粒滚筒排草口运动, 假设茎秆切段已不可再压缩且在螺旋叶片作用下轴向速度 v_z 恒定。由图9可知, 螺旋叶片与茎秆存在摩擦力 F_f 和法向推力 T , 两者合力 F 与 T 偏离一个角度 φ , 为茎秆与螺旋叶片的摩擦角。参考文献[26], 欲使茎秆轴向运动速度最大, 最大螺旋

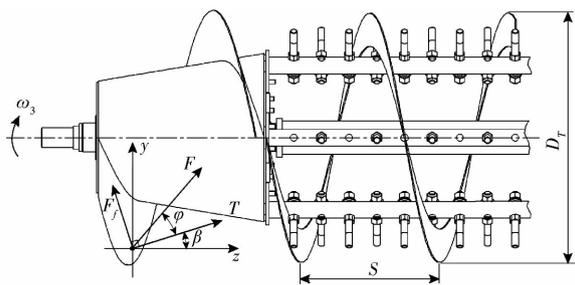


图9 物料受力分析

Fig. 9 Force analysis of material

升角 β_{\max} 和螺旋叶片摩擦角 φ 应满足: $\beta_{\max} < 45^\circ - \varphi/2 = 31^\circ$ 。

可确定螺旋叶片螺距 S 的范围为

$$S = \pi D_r \tan \beta < 566 \text{ mm} \quad (12)$$

单头螺旋的抓取喂入头长度 $l_1 = S < 566 \text{ mm}$, 参考现有机型的标准, 考虑到脱粒滚筒纵向空间选取 $S = 300 \text{ mm}$, 计算得螺旋升角 β 为 18° 。

为提高油菜切段物料层的输送能力, 在螺旋喂入头后端延伸一段螺旋叶片, 螺旋叶片的轴向输送能力需要大于脱粒滚筒的喂入量, 即

$$Q = \frac{\pi}{24} [(D_r - 2\lambda)^2 - d^2] \psi S n_z \gamma C \rho \times 10^{-10} > 2 \text{ kg/s} \quad (13)$$

式中 Q ——螺旋叶片连续输送的输送量, kg/s

d ——螺旋叶片内直径, 为 300 mm

λ ——螺旋叶片与外壳间隙, 为 10 mm

n_z ——脱粒滚筒转速, r/min

ψ ——输送物料的充满系数, 油菜取 0.3

γ ——油菜单位容积的质量, 取 80 kg/m^3

C ——脱粒滚筒倾斜输送系数, 取 0.88

ρ ——螺旋叶片罩壳包角系数, 抓取喂入段罩壳包角为 180° , 取 0.5

由式(13)计算得 $n_z > 386 \text{ r/min}$ 。

2.3.2 脱粒滚筒

为适应潮湿不均匀大喂入量作物, 采用钉齿式脱粒元件。脱粒滚筒的钉齿总数 Z 按脱粒装置的生产效率确定, 即

$$Z \geq \frac{(1 - \beta')q}{0.6q_d} \quad (14)$$

式中 q ——脱粒装置喂入量, 取 2 kg/s

β' ——喂入作物中籽粒所占质量比例, 取 0.25

q_d ——每个钉齿的脱粒能力, 取 0.025 kg/s

由式(14)计算得 $Z \geq 100$, 考虑到增加齿数会造成对油菜的脱粒打击作用增强, 增强茎秆破碎程度, 故取 $Z = 102$ 。

脱粒滚筒齿顶圆直径 D_z 计算式^[24]为

$$D_z = MS_z/\pi + 2h \quad (15)$$

式中 M ——滚筒齿杆数, 常用 $6 \sim 12$, 取 6

S_z ——齿杆间距, 常用 $120 \sim 200 \text{ mm}$, 为降低对油菜茎秆切段打击次数, 取 160 mm

h ——钉齿高度, 取 70 mm

由式(15)可得 $D_z = 445.6 \text{ mm}$, 取 450 mm 。钉齿螺旋头数 K 等于每个齿迹上的钉齿数量, 一般为 $2 \sim 5$, 考虑到负载均匀、提高脱粒能力, 采用 3 头螺旋排列方式安装在脱粒齿板上, 钉齿排列方式展开如图 10 所示。

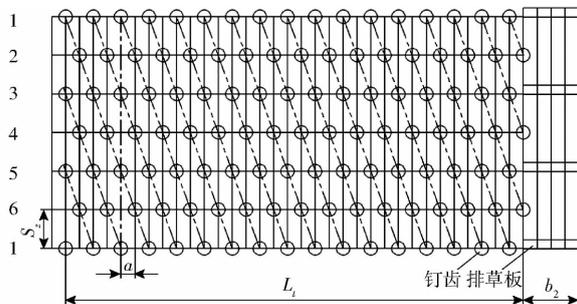


图10 脱粒滚筒钉齿排列方式

Fig. 10 Arrangement of nail-tooth on axial threshing cylinder

根据农业机械设计手册^[24], 纵轴流脱粒滚筒的脱粒分离段长度 L_i 和总长度 L 计算式为

$$\begin{cases} L_i = a(Z/K - 1) \\ L = l_1 + L_i + b_1 + b_2 \end{cases} \quad (16)$$

式中 a ——钉齿齿迹距, 常用 $25 \sim 50 \text{ mm}$, 取 50 mm

l_1 ——抓取喂入头长度, 取 300 mm

b_1 ——脱粒滚筒前端辐盘与最始端钉齿的距离, 取 50 mm

b_2 ——排草段长度, 取 220 mm

由式(16)可知纵轴流脱粒滚筒脱粒分离段长度 $L_i = 1650 \text{ mm}$, 总长度为 $L = 2220 \text{ mm}$ 。

脱粒滚筒转速 n_z 为

$$n_z = 6 \times 10^4 \frac{v_z}{\pi D_z} \quad (17)$$

式中 v_z ——纵轴流脱粒滚筒齿顶圆的线速度, m/s 。参考大豆的脱粒速度为 $7 \sim 9 \text{ m/s}$, 玉米脱粒速度为 $17 \sim 20 \text{ m/s}$ ^[24], 在保证油菜果荚脱净率的前提下, 为避免因速度过大导致油菜碎茎秆比例和功耗增大, 取 v_z 为 $10 \sim 16 \text{ m/s}$ 。

由式(17)可求得 n_z 为 $424 \sim 679 \text{ r/min}$, 综合式(13)得脱粒滚筒转速 n_z 为 $424 \sim 679 \text{ r/min}$ 。

脱粒滚筒下方的凹板筛要与滚筒配合增加对籽粒的分离能力, 针对已被初步切断油菜经脱粒后混合物中含有短茎秆、油菜籽粒、果荚壳和轻杂余成分, 为增加籽粒分离率采用编织筛式凹板筛网, 设计凹板包角为 180° , 筛孔尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ 。脱粒

间隙为滚筒齿顶圆与下方凹板筛之间的距离,可通过调节脱粒杆齿两头的螺栓使脱粒间隙在 20 ~ 30 mm 可调。

为保证排草口茎秆排放顺畅,在滚筒圆周齿杆末端各焊合 3 块 150 mm × 40 mm × 2 mm 的排草板(见图 8 中部件 7)。滚筒转动过程中,排草板类似于风机叶片,增大排草口气流量,对切碎茎秆具有助浮、促排的作用。

3 正交试验

3.1 试验材料

试验在华中农业大学现代农业科技试验基地进行,试验油菜品种为华油杂 62,种植方式为机直播,人工收获后运送至试验场地。试验以自行研制的 4LYZ-2.0 型油菜联合收获机为平台,主要试验设备包括:雷诺 CHPM480-05-0C 型八通道液压测试仪、SR-PTT400-05-0C 型压力传感器、GFM3143-03-035.00 型齿轮式流量传感器、SR-CT60-B-B-6 型涡轮式流量传感器、转速测量仪及配套的霍尔元件接头。将霍尔元件接头安装在各马达与部件联接的联轴器处,并通过数据线与转速显示仪连接,实时显示各马达转速。将雷诺压力传感器和流量传感器分别串联到切碎滚筒及脱粒滚筒回路中,通过数据线将压力、流量传感器与雷诺八通道液压测试仪连接,液压测试仪采集记录来自传感器的压力、流量等相关液压数据,试验台如图 11 所示。

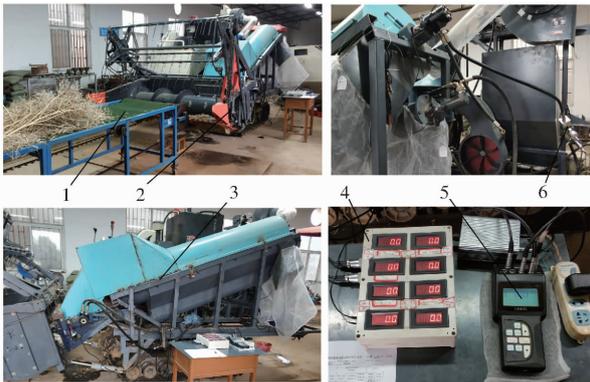


图 11 切抛组合式纵轴流脱粒装置试验台

Fig. 11 Test bed of combined cutting and throwing longitudinal axial flow threshing and separating device

1. 输送带 2. 割台 3. 切抛组合式纵轴流脱粒装置 4. 转速测量仪 5. 八通道液压测试仪 6. 压力和流量传感器

3.2 试验方法

每次试验开始前将 2 kg 试验油菜均匀平铺在喂入输送带上,输送带由变频器带动电机驱动,由变频器调速来控制喂入量为 2 kg/s。将发动机转速调节至 2 000 r/min,启动关键部件液压系统,通过调节

被测回路节流阀开度,改变各回路上复切输送机、喂入辊、切碎滚筒和脱粒滚筒的马达转速至要求数值,待各装置运转稳定后,启动输送装置,完成输送、喂入、脱粒分离和接料过程。

每次试验结束后,收集纵轴流脱粒装置筛下物出料口和排草口处的物料,分别筛分出其中的油菜籽粒并称量。喂入物料总质量为 M_0 ,透过凹板筛的物料总质量为 M_1 ,其中籽粒质量为 m_1 ,短茎秆的质量为 m_2 ;排草口排出的物料质量为 M_2 ,其中夹带的籽粒质量为 m_3 。则夹带损失率 β_1 、筛下脱出物中籽粒所占质量分数 η_1 、筛下脱出物短茎秆所占质量分数 η_2 为

$$\begin{cases} \beta_1 = m_3 / (m_1 + m_3) \times 100\% \\ \eta_1 = m_1 / M_1 \times 100\% \\ \eta_2 = m_2 / M_1 \times 100\% \end{cases} \quad (18)$$

将液压测试仪中切碎滚筒和脱粒滚筒液压回路的流量、压差等数据导入配套软件中,液压测试仪可以根据实际测量结果自动生成流量与压力关于时间的数据曲线图,计算出切碎滚筒电动机回路和脱粒滚筒电动机回路的流量 q_v (L/min) 及功耗 P (kW)

$$q_v = \frac{V_g n \eta_{Mv}}{1\,000} \quad (19)$$

$$P = \frac{q_v \Delta p}{600 \eta_i} \quad (20)$$

其中 $\eta_i = \eta_{Mm} \eta_{Mv}$ (21)

式中 V_g ——电动机排量,切碎滚筒和脱粒滚筒电动机排量为 51.7 mL/r

n ——电动机转速, r/min

Δp ——电动机工作压差, MPa

q_v ——电动机工作流量, L/min

η_{Mv} ——电动机容积效率,取 0.95

η_{Mm} ——电动机机械效率,取 0.92

η_i ——电动机总效率,为 0.874

3.3 试验结果与分析

根据机器的设计要求,喂入量为 2 kg/s,按 $L_9(3^4)$ 正交表安排因素的 3 个不同水平进行正交试验,选择脱粒滚筒转速、切碎滚筒转速、脱粒间隙为影响因素,以脱粒夹带损失率、切碎滚筒和脱粒滚筒总功耗、脱出物短茎秆质量分数和排草口茎秆平均长度为试验指标。切碎滚筒转速为 437 ~ 552 r/min,脱粒滚筒转速 424 ~ 679 r/min,脱粒间隙为 20 ~ 30 mm,以降低功耗为原则确定试验因素水平范围,如表 2 所示。

通过对油菜联合收获机切抛组合式纵轴流脱粒装置进行脱粒分离试验,得到脱粒夹带损失率、脱出物短茎秆质量分数、总功耗(包括切碎滚筒功耗和

脱粒滚筒功耗)和排草口茎秆平均长度,试验结果如表 3 所示,A、B、C 分别为脱粒滚筒转速、切碎滚筒转速、脱粒间隙的因素水平值。

由表 3 可知,通过极差分析得,影响总功耗和排草口茎秆平均长度的主次因素分别为:脱粒滚筒转速、切碎滚筒转速、脱粒间隙。对于总功耗和排草口茎秆平均长度的最优方案分别为 $A_1B_1C_2$ 和 $A_3B_3C_1$,

表 2 试验因素水平

Tab.2 Factors and levels of experiment

水平	试验因素		
	脱粒滚筒转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	切碎滚筒转速/ ($r \cdot \min^{-1}$)	脱粒间隙/ mm
1	450	450	20
2	500	500	25
3	550	550	30

表 3 正交试验结果和极差分析

Tab.3 Results of orthogonal test and range analysis

试验序号	试验因素			试验指标			
	A	B	C	夹带损失率 $\beta_1/\%$	脱出物短茎秆 质量分数 $\eta_2/\%$	总功耗/ kW	排草口茎秆 平均长度/mm
1	1	1	1	0.460	12.40	4.22	128.8
2	1	2	2	0.455	11.24	4.30	125.4
3	1	3	3	0.430	13.85	4.36	123.5
4	2	1	3	0.420	11.80	4.58	125.8
5	2	2	1	0.485	12.93	4.70	114.7
6	2	3	2	0.540	19.17	4.64	119.4
7	3	1	2	0.595	17.60	5.08	122.8
8	3	2	3	0.550	12.47	5.54	117.9
9	3	3	1	0.575	19.42	5.72	111.9
夹带损失率	k_1	0.448	0.492	0.507			
	k_2	0.482	0.497	0.530			
	k_3	0.573	0.515	0.467			
	R	0.125	0.023	0.063			
	较优水平 主次因素	A_1	B_1	C_3			
脱出物短茎秆 质量分数	k_1	12.50	13.93	14.92			
	k_2	14.63	12.21	16.00			
	k_3	16.50	17.48	12.71			
	R	4.00	5.27	3.30			
	较优水平 主次因素	A_1	B_2	C_3			
总功耗	k_1	4.29	4.63	4.88			
	k_2	4.64	4.85	4.67			
	k_3	5.45	4.91	4.83			
	R	1.15	0.28	0.21			
	较优水平 主次因素	A_1	B_1	C_2			
排草口茎秆 平均长度	k_1	125.9	125.8	118.5			
	k_2	120.0	119.3	122.5			
	k_3	117.5	118.3	122.4			
	R	8.4	7.5	4.1			
	较优水平 主次因素	A_3	B_3	C_1			

说明适当减小脱粒间隙有助于缩短排草口茎秆平均长度,脱粒滚筒和切碎滚筒转速增加造成功耗上升、排草口茎秆平均长度减小,由于在各因素不同水平下排草口茎秆平均长度都满足设计要求,考虑到降低功耗选择脱粒滚筒和切碎滚筒转速较低的水平。

切碎滚筒转速增加使得单位时间茎秆被切碎程度越大,造成透过凹板筛的脱出物中短茎秆质量分数增大,不利于后续清选作业,结合降低功耗和夹带损失率的原则,本文选择切碎滚筒转速为450 r/min,同时其它试验指标下脱粒滚筒转速 450 r/min 为出现

次数较多的优水平,所以取脱粒滚筒转速为450 r/min;为降低夹带损失率和脱出物短茎秆质量分数,取脱粒间隙为30 mm。

由表4的方差分析可知,脱粒滚筒转速对籽粒夹带损失率、脱出物短茎秆质量分数、功耗、排草口茎秆平均长度影响达显著或极显著水平,切碎滚筒转速显著影响脱出物短茎秆质量分数和排草口茎秆平均长度,脱粒间隙对脱出物短茎秆质量分数影响显著。

表4 方差分析

Tab.4 Variance analysis result

试验指标	方差来源	平方和	自由度	F	显著性
夹带损失率	A	0.025 1	2	19.38	**
	B	0.000 9	2	0.35	
	C	0.006 1	2	4.75	
	误差	0.002 5	2		
筛下脱出物短茎秆质量分数	A	24.04	2	34.35	*
	B	43.28	2	61.84	*
	C	16.93	2	24.20	*
	误差	0.7	2		
总功耗	A	2.101	2	60.03	*
	B	0.130	2	3.71	
	C	0.069	2	1.97	
	误差	0.035	2		
排草口茎秆平均长度	A	111.13	2	25.37	*
	B	99.71	2	22.76	*
	C	32.03	2	7.31	
	误差	4.38	2		

注:**表示因素影响极显著,*表示因素影响显著。

综上分析,较优参数组合方案为 $A_1B_1C_3$,即切碎滚筒转速450 r/min,脱粒滚筒转速450 r/min,脱粒间隙30 mm。由于较优参数未出现在正交试验中,在较优参数下进行验证试验,油菜联合收获机切抛组合式纵轴流脱离装置的性能指标为:夹带损失率0.415%,脱出物短茎秆质量分数10.43%,总功耗4.16 kW,排草口茎秆平均长度134.8 mm。

正交试验主要研究切抛组合式纵轴流脱离装置的脱离性能,以期寻求较优结构和工作参数组合,为综合考虑整机性能,需分析联合收获机的清选性能;在切抛组合式脱离装置较优参数组合下收集脱粒滚筒筛下脱出物,并喂入整机上旋风分离清选系统进行清选性能试验,得出旋风分离清选系统籽粒总损失率与清洁率分别为6.13%与91.97%,满足整机旋风分离清选性能要求。

4 田间试验

田间试验于2018年5月在华中农业大学现代农业科技试验基地,依据GB/T 8097—2008《收获机

械联合收割机试验方法》进行。以4LYZ-2.0型油菜联合收获机为试验对象,试验材料为华油杂62,种植方式为机直播,种植密度为40株/m²,油菜平均株高为1456 mm,平均籽粒含水率为18.47%,平均茎秆含水率为26.38%;联合收获机割幅2 m,试验时割茬高度为350 mm,机组前进速度3.24~4.68 km/h,喂入量为2.0~2.9 kg/s,作业效率为0.65~0.94 hm²/h。工作后收集脱粒滚筒排草口、旋风分离筒出粮口和离心风机出口处物料并称量,计算脱粒滚筒夹带损失率和旋风分离清选系统清洁率及损失率。油菜成熟度不一致,田间沟壑较多、行走速度不稳定等因素导致整机喂入量波动,脱粒滚筒夹带损失率平均值为2.41%,清选系统损失率平均值为7.83%,清洁率平均值为87.65%。

油菜联合收获机田间收获作业时整机运行平稳,物料流动顺畅未出现堵塞现象,田间试验效果如图12所示。试验表明切抛组合式纵轴流脱离装置可实现对油菜的抓取喂入、切断抛送、脱粒分离功能,提高了整机在田间的适应性,可满足油菜联合收获机的工作要求。



图12 田间试验

Fig.12 Field experiment

5 结论

(1)设计了一种切抛组合式纵轴流脱离装置,切抛装置在强制喂入的基础上,同时具有初步切断和抛送功能,切断后茎秆被快速抛送至脱离装置内进行脱粒分离,减少了油菜高粗茎秆输送过程的缠绕堵塞现象,通过将两者组合实现油菜的强制喂入、切断抛送、脱粒分离功能,满足油菜联合收获机脱粒要求。整机关键部件采用液压驱动,保证其无级调速和运转平稳。

(2)试验分析得出:影响总功耗(包括切碎滚筒功耗和脱粒滚筒功耗)和排草口茎秆平均长度的因素主次顺序为:脱粒滚筒转速、切碎滚筒转速、脱粒间隙;影响夹带损失率的因素主次顺序为:脱粒滚筒转速、脱粒间隙、切碎滚筒转速;影响脱出物短茎秆质量分数的因素主次顺序为:切碎滚筒转速、脱粒滚筒转速、脱粒间隙。

(3)通过正交试验,优化确定切抛组合式纵轴流脱粒装置的影响因素较优组合为:切碎滚筒转速450 r/min、脱粒滚筒转速450 r/min、脱粒间隙30 mm。较优参数组合下脱粒性能指标为:籽粒夹带损失率0.415%、脱出物短茎秆质量分数10.43%、总功耗4.16 kW、排草口茎秆平均长度134.8 mm;对应的旋风分离清选系统籽粒总损失率与清洁率分别为6.13%与91.97%。

(4)田间试验表明:脱粒滚筒夹带损失率平均值为2.41%,清选系统损失率平均值为7.83%,油菜籽粒清洁率平均值为87.65%。4LYZ-2.0型油菜联合收获机收获油菜时物料流动顺畅,罩壳内未出现堵塞现象,切抛组合式纵轴流脱粒装置可实现对油菜的抓取喂入、切断抛送、脱粒分离功能。本研究可为缩短油菜在联合收获机内的流动路径、稳定脱粒滚筒负载提供参考。

参 考 文 献

- [1] 吴崇友,王积军,廖庆喜,等. 油菜生产现状与问题分析[J]. 中国农机化学报,2017,38(1):124-131.
WU Chongyou, WANG Jijun, LIAO Qingxi, et al. Current status and problems of rapeseed production[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2017, 38(1): 124-131. (in Chinese)
- [2] 罗海峰,汤楚宙,官春云,等. 油菜机械化收获研究进展[J]. 农机化研究,2015,37(1):1-8.
LUO Haifeng, TANG Chuzhou, GUAN Chunyun, et al. Research progress in rapeseed mechanized harvest[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2015, 37(1): 1-8. (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] 王殿忠,陈秀生. 大喂入量谷物轴流脱粒装置的发展现状及趋势[J]. 农业技术与装备,2017(6):81-84.
WANG Dianzhong, CHEN Xiusheng. Development status and trend of large feed grain axial threshing equipment[J]. Agricultural Technology & Equipment, 2017(6):81-84. (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] 王刚,关卓怀,沐森林,等. 油菜联合收获机种子籽粒脱粒装置结构及运行参数优化[J]. 农业工程学报,2017,33(24):52-57.
WANG Gang, GUAN Zhuohuai, MU Senlin, et al. Optimization of operating parameter and structure for seed thresher device for rape combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24):52-57. (in Chinese)
- [7] TADO C J M, WACKER P, KUTZBACH H D, et al. Development of stripper harvesters: a review[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1998, 71(2):103-112.
- [8] MIU P I, KUTZBACH H D. Mathematical model of material kinematics in an axial threshing unit[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 58(2):93-99.
- [9] 李耀明,周伟,徐立章,等. 单切双横流脱粒分离装置参数试验与优化[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(5):62-67,92.
LI Yaoming, ZHOU Wei, XU Lizhang, et al. Parameter test and optimization of tangential-horizontal-horizontal threshing and separating device[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(5):62-67, 92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150510&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.05.010. (in Chinese)
- [10] 李耀明,孙韬,徐立章. 油菜多滚筒脱粒分离装置的性能试验与分析[J]. 农业工程学报,2013,29(8):36-43.
LI Yaoming, SUN Tao, XU Lizhang. Performance test and analysis of rape multi cylinder threshing and separating device[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(8):36-43. (in Chinese)
- [11] 黄鹏,廖庆喜,宗望远,等. 油菜联合收获机不同脱粒元件对脱粒性能的影响试验[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(增刊2):47-51.
HUANG Peng, LIAO Qingxi, ZONG Wangyuan, et al. Effect of different threshing elements on threshing and separating performance for rape combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2):47-51. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s210&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.s2.010. (in Chinese)
- [12] 唐忠,李耀明,徐立章,等. 切纵流联合收获机小麦脱粒分离性能评价与试验[J]. 农业工程学报,2012,28(3):14-19.
TANG Zhong, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Experiment and evaluating indicators of wheat threshing and separating on test-bed of longitudinal axial-threshing unit[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(3):14-19. (in Chinese)
- [13] 唐忠,李耀明,徐立章,等. 不同脱粒元件对切流与纵轴流水稻脱粒分离性能的影响[J]. 农业工程学报,2011,27(3):93-97.
TANG Zhong, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Effects of different threshing components on grain threshing and separating by tangential-axial test device[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3):93-97. (in Chinese)

- [14] 金小亮,朱晓星,金诚谦,等. 谷物脱粒滚筒的功耗模型研究[J]. 中国农机化学报,2015,36(3):30-33,38.
JIN Xiaoliang, ZHU Xiaoxing, JIN Chengqian, et al. Research on the power consumption model of grain threshing cylinder [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2015, 36(3):30-33, 38. (in Chinese)
- [15] 任述光,谢方平,罗锡文,等. 柔性齿与刚性齿脱粒水稻功耗比较分析与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(5):12-18.
REN Shuguang, XIE Fangping, LUO Xiwen, et al. Analysis and test of power consumption in paddy threshing using flexible and rigid teeth[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(5):12-18. (in Chinese)
- [16] 李耀明,唐忠,徐立章,等. 纵轴流脱粒分离装置功耗分析与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(6):93-97.
LI Yaoming, TANG Zhong, XU Lizhang, et al. Power analysis and experiment on longitudinal axial-threshing unit test-bed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(6):93-97. (in Chinese)
- [17] 宁小波,陈进,李耀明,等. 联合收获机脱粒系统动力学模型及调速控制仿真与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(21):25-34.
NING Xiaobo, CHEN Jin, LI Yaoming, et al. Kinetic model of combine harvester threshing system and simulation and experiment of speed control[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(21):25-34. (in Chinese)
- [18] 宗望远,廖庆喜,黄鹏,等. 组合式油菜脱粒装置设计与物料运动轨迹分析[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(增刊2):41-46.
ZONG Wangyuan, LIAO Qingxi, HUANG Peng, et al. Design of combined rape threshing device and analysis of rape cane movement trail[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2):41-46. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s209&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.009. (in Chinese)
- [19] 姜楠,衣淑娟,张延河. 钉齿式轴流装置脱粒过程高速摄像分析[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊):52-56.
JIANG Nan, YI Shujuan, ZHANG Yanhe. High-speed photography analysis of threshing process on axial flow device with nails teeth[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.):52-56. (in Chinese)
- [20] 徐立章,李耀明,唐忠,等. 4LQZ-6型切纵流联合收获机[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(8):94-98,111.
XU Lizhang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. 4LQZ-6 tangential-longitudinal axial combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(8):94-98, 111. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130817&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.08.017. (in Chinese)
- [21] 徐立章,李耀明,王成红,等. 切纵流双滚筒联合收获机脱粒分离装置[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(2):105-108.
XU Lizhang, LI Yaoming, WANG Chenghong, et al. A combinational threshing and separating unit of combine harvester with atransverse tangential cylinder and an axial rotor[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(2):105-108. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20140218&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.02.018. (in Chinese)
- [22] 梁苏宁,金诚谦,张奋飞,等. 4LZG-3.0型谷子联合收获机的设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(12):31-38.
LIANG Suning, JIN Chengqian, ZHANG Fenfei, et al. Design and experiment of 4LZG-3.0 millet combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(12):31-38. (in Chinese)
- [23] 李耀明,陈洋,徐立章,等. 斜置切纵流联合收获机脱粒分离装置结构参数优化[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(9):56-61.
LI Yaoming, CHEN Yang, XU Lizhang, et al. Optimization of structural parameters for threshing and separating device in obliquetangential-longitudinal combine[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(9):56-61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160909&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.09.009. (in Chinese)
- [24] 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.
- [25] 翟之平,吴雅梅,王春光. 物料沿抛送叶片的运动仿真与高速摄像分析[J]. 农业工程学报,2012,28(2):23-28.
ZHAI Zhiping, WU Yamei, WANG Chunguang. Dynamic simulation and high-speed camera analysis on materials moving along throwing impellers[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2):23-28. (in Chinese)
- [26] 杨方飞,阎楚良. 谷物在纵向轴流滚筒脱粒空间中的运动状态分析[J]. 农业机械学报,2008,39(11):48-50,25.
YANG Fangfei, YAN Chuliang. Movement analysis of cereal in axial flow threshing roller space[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(11):48-50, 25. (in Chinese)