doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.02.029

联合收获机螺旋交错排布式脱粒滚筒设计与试验

江　涛[1,2]　李海同[1]　黄鸣辉[2]　张　敏[1]　金　梅[1]　关卓怀[1]

(1.农业农村部南京农业机械化研究所,南京 210014;2.国机重工集团常林有限公司,常州 213133)

摘要:针对履带式谷物联合收获机脱粒滚筒对物料打击力度大、脱出物细碎化程度高,导致清选筛面杂余多易堆积,影响籽粒透筛,造成清选损失率高以及功率消耗大等问题,通过优化齿杆及脱粒元件的结构和排布,设计了螺旋交错排布式脱粒滚筒,减少了滚筒载荷波动,降低了脱粒元件对物料的冲击强度,有利于减少物料的破碎和断裂。通过离散元仿真试验与台架试验分析了脱出物籽粒分布规律,对比分析了茎秆在原机滚筒和所设计螺旋滚筒内的运移速度以及滚筒受到的扭矩。仿真试验结果表明,当滚筒转速为 750 r/min 时,茎秆在所设计螺旋滚筒内的运移速度提升 23.5%,更利于物料向后输送,平均扭矩下降 29.2%,且扭矩波动变化更小,脱粒作业稳定性更好。田间对比试验结果表明,所设计螺旋滚筒脱出物茎秆断裂和细碎化程度更低,减轻了筛面负荷,提升了籽粒透筛概率,清选损失率平均降低 22.8%。在相同作业条件下,配置螺旋滚筒的联合收获机平均油耗下降 18.1%。仿真试验与田间对比试验结果表明,所设计的螺旋交错排布式脱粒滚筒有助于减少作业损失,提升作业效率,降低脱粒功耗,能够满足履带式联合收获机高效低损低功耗的作业需求。

关键词:联合收获机;脱粒滚筒;螺旋交错排布式

中图分类号:S225.3　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)02-0314-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Spiral Interlaced Threshing Cylinder for Combine Harvester

JIANG Tao[1,2]　LI Haitong[1]　HUANG Minghui[2]　ZHANG Min[1]　JIN Mei[1]　GUAN Zhuohuai[1]

(1. *Nanjing Institute of Agriculture Mechanization*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Nanjing* 210014, *China*
2. *National Machinery Heavy Industry* (*Changzhou*) *Excarator Co.*, *Ltd.*, *Changzhou* 213133, *China*)

Abstract: The threshing cylinder of the crawler-type grain combine harvester tends to become easily clogged under high feeding rate conditions, which leads to severe fragmentation of threshed materials, resulting in an accumulation of residuals on the cleaning screen, which affects grain sieving efficiency, increases cleaning losses, and significantly elevates power consumption. By optimizing the structure and arrangement of the rasp bars and threshing elements, a spiral interlaced arrangement threshing cylinder was designed. This design reduced fluctuations in cylinder load and decreased the impact intensity of the threshing elements on the material, thereby minimizing material breakage and fragmentation. Through discrete element simulation and bench tests, the distribution patterns of threshed grain were analyzed. A comparative analysis was conducted on the migration speed of stalks within the original cylinder and the designed cylinder, as well as the torque exerted on the cylinder. The simulation results indicated that at rotational speed of 750 r/min, the migration speed of stalks within the designed cylinder was increased by 23.5%, facilitating the rearward conveyance of materials. Additionally, the average torque of the designed cylinder was decreased by 29.2%, with reduced torque fluctuations, thereby improving the stability of the threshing operation. Field comparison test results showed that the designed cylinder significantly reduced stalk breakage and fragmentation, thereby decreasing the load on the cleaning screen

收稿日期:2024-09-06　修回日期:2024-10-22

基金项目:中国农业科学院科技创新工程重大科研任务项目(CAAS-ZDRW202405)、国家重点研发计划项目(2021YFD200050201、2023YFD2001003)和湖南省智能农机装备创新研发项目

作者简介:江涛(1988—),男,副研究员,博士,主要从事农作物收获技术与装备研究,E-mail:justod_cr7@163.com

通信作者:关卓怀(1988—),男,副研究员,博士,主要从事农作物收获技术与装备研究,E-mail:Guan_zh@foxmail.com

and increasing the probability of grain passing through the vibrating screen. The cleaning loss rate was reduced by an average of 22.8%. Moreover, under the same operating conditions, the combine harvester equipped with the designed cylinder demonstrated an average fuel consumption reduction of 18.1%. Combining the results of the simulation experiments and field comparison tests, it was evident that the designed threshing cylinder can reduce operational losses, enhance working efficiency, and lower threshing power consumption. It effectively met the requirements for low-loss, high-efficiency operation under high feeding rate conditions.

Key words: combine harvester; threshing cylinder; spiral interlaced

0　引言

脱粒是谷物机械化收获至关重要的环节，由脱粒滚筒上的脱粒元件对谷物进行冲击、梳刷、碾压等作用方式实现脱粒[1]，其作业性能对后续清选以及整体收获作业质量具有重要影响[2-5]。

国外先进收获机企业通过增加脱粒滚筒直径和长度来增加脱粒面积、延长脱粒行程，从而提升脱粒作业质量和效率，但是这类大型收获机械更适合大面积规模化种植区域使用。我国长江流域以及丘陵山区等稻油轮作区仍然以中小型联合收获机为主，受限于机具尺寸和重量要求，这种方法并不完全适用。

目前普遍使用的履带式联合收获机主力机型大多采用纵轴流开式脱粒滚筒[6]，纵轴流脱粒方式具有较长的脱粒行程，有利于谷物脱粒和分离。开式脱粒滚筒构造简单，重量轻，对谷物的抓取能力较强，利于谷物的蓬松和脱粒，更适用于中小型收获机。虽然脱净率和分离率较切流式滚筒有所提高，但是对茎秆的打击力度大，滚筒功率消耗相应增加，同时茎秆的断裂和破碎加重，易对后续清选作业造成影响[7]。此外齿杆对空气的搅动大，易缠草，进一步增加了功率消耗。

国内学者针对谷物联合收获机脱粒分离装置开展的相关研究多侧重于降低籽粒损失率、破碎率等性能指标以及降低脱粒功耗[8-12]。

纵轴流脱粒分离滚筒功耗占比高已成为制约履带式联合收获机进一步向大喂入量、轻量化、高效率发展的瓶颈[13-14]。此外，脱粒元件对物料冲击强度大，易造成茎秆断裂和破碎度高，增加清选负荷和损失。因此，提高脱粒分离滚筒作业性能，是提升收获机整体作业质量的关键。

基于上述问题和解决思路，本文设计一种螺旋交错排布式脱粒分离滚筒，结合仿真分析、台架及田间试验，验证所设计滚筒能够提高物料轴向运移速度，降低脱粒功率消耗，同时减少滚筒脱出物中的断裂茎秆占比，减轻筛面负荷，降低清选作业损失。

1　滚筒结构与分析

1.1　常规脱粒滚筒存在问题分析

目前普遍应用的履带式联合收获机脱粒滚筒齿杆均沿轴向呈直线形式，同一根齿杆上的脱粒元件按等间距排布，如图 1 所示。

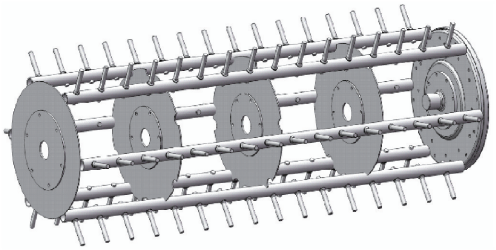


图 1　常规脱粒滚筒结构示意图

Fig. 1　Structure diagram of conventional threshing cylinder

将滚筒沿径向展开如图 2 所示，图中 1－Ⅰ、2－Ⅱ、6－Ⅵ等直线表示齿杆，红色圆点表示脱粒元件。

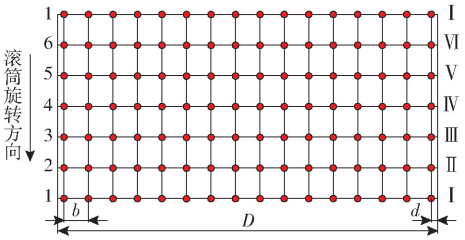


图 2　常规脱粒滚筒脱粒元件排布示意图

Fig. 2　Schematic of conventional threshing elements layout

常规滚筒转动时相邻齿杆与物料的接触有间隔，会降低脱粒元件对物料的作用频率，因此通常会适当增加滚筒转速，但是相应地会提高籽粒和茎秆的破碎率，增加功率消耗和清选作业难度。并且由于整个齿杆上的脱粒元件同时与物料作用，增加了瞬时冲击力，导致滚筒载荷波动大，易产生堵塞。为了降低这种影响，在某些研究中，联合收获机的脱粒元件会以螺旋线形式排布，如图 3 所示的单线螺旋排布和图 4 所示的双线螺旋排布。

图 3 中的虚线表示脱粒元件运动轨迹，根据螺旋线特点，有

$$b = \frac{n}{k}a \tag{1}$$

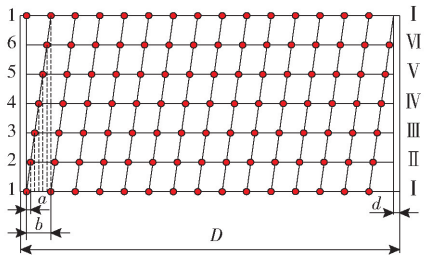


图 3 单线螺旋脱粒元件排布示意图

Fig. 3 Schematic of single-line spiral threshing elements layout

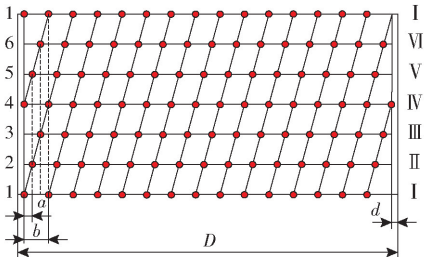


图 4 双线螺旋脱粒元件排布示意图

Fig. 4 Schematic of double-line spiral threshing elements layout

式中 b——脱粒元件间距,mm

n——脱粒齿杆数,取 6

k——螺旋线数

a——齿迹间距,mm

根据《农业机械设计手册》相关设计说明,脱粒滚筒的脱粒能力与齿迹上的脱粒元件数量相关,同一齿迹通过的脱粒元件数越多,脱粒能力越强,各齿迹线上通过的脱粒元件数和螺旋线数相等。因此,将脱粒元件以单线或双线螺旋形式排布,会减少同一齿迹线上的脱粒元件数,在水稻倒伏、含水率高等复杂作业条件下易造成滚筒堵塞,降低作业效率。

此外,由于单、双线螺旋排列滚筒齿杆同样为直线形式,在其转动时,同一齿杆上的所有脱粒元件仍然是同时进入脱粒区域与物料接触和作用,并不能有效降低脱粒滚筒和物料受到的冲击载荷强度,不利于减少茎秆的断裂和破碎程度,对作业质量提升和减租降耗效果仍有不足。因此,本文提出一种新的脱粒滚筒结构,来解决茎秆断裂度高和脱粒功耗大的问题。

1.2 总体结构与工作原理

为了实现联合收获机脱粒滚筒降阻减耗,同时提升后续清选作业质量和效率的目标,设计了一种螺旋交错排布式纵轴流脱粒滚筒(简称螺旋滚筒),如图 5 所示。

螺旋滚筒主要由喂入头、齿杆、脱粒元件、导流板、凹板筛和顶盖组成。作业时,物料在导流板和脱粒元件的作用下往滚筒后端运移,并与脱粒元件不断发生碰撞,籽粒在脱粒元件与凹板筛的作用下脱离枝梗,颖壳、碎秸、碎叶等谷粒混合物在滚筒离心力的作用下由凹板筛孔间隙落下,秸秆从滚筒的另一端排出。

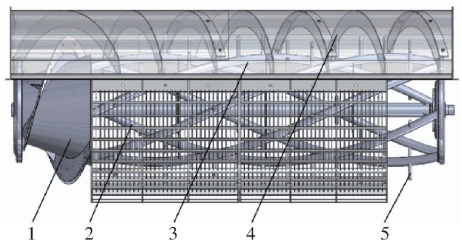


图 5 螺旋交错排布式纵轴流脱粒滚筒结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of spiral interlaced threshing cylinder

1. 喂入头 2. 齿杆 3. 凹板筛 4. 顶盖及导流板 5. 脱粒元件

1.3 螺旋交错排布齿杆与脱粒元件设计

为了保证脱粒元件对物料的脱粒能力和作用效果,同时尽可能降低脱粒冲击载荷和功率消耗,减小茎秆破碎度,设计了一种螺旋交错排布式脱粒滚筒。将脱粒齿杆改进为图 6 所示结构,齿杆的首端固定在辐盘位置 1,末端固定在辐盘位置 4,齿杆由直线形式更改为空间曲线形式。以滚筒传动轴为基准,所构成的空间曲线首尾两端间隔 180°相位角,其余 5 根齿杆按照同样的结构均布于辐盘上,形成螺旋交错式排布。

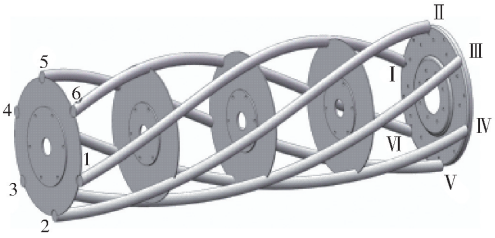


图 6 螺旋交错式滚筒齿杆结构示意图

Fig. 6 Schematic of tooth rod structure of spiral interlaced threshing cylinder

将滚筒沿径向展开,齿杆及脱粒元件排布如图 7 所示。

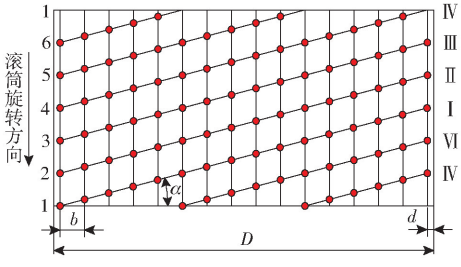


图 7 齿杆及脱粒元件排布示意图

Fig. 7 Schematic of tooth rod and threshing elements layout

根据图 7 关系有

$$D = b\left(\frac{z}{n} - 1\right) + 2d \tag{2}$$

式中　D——滚筒长度，mm

z——脱粒元件总数

d——脱粒元件到齿杆端部距离，取 20 mm

脱粒元件数量对功耗的影响比较显著[15]，脱粒滚筒功耗随脱粒元件数量的减少而降低，但是数量过少易导致秸秆缠绕、滚筒堵塞，无法完成正常脱粒工作。脱粒元件数量与脱粒作业率关系式为[16]

$$z \geqslant \frac{(1-u)q}{0.6p} \tag{3}$$

式中　u——喂入物料中谷物比重，取 0.42

q——脱粒滚筒喂入量，取 3.5 kg/s

p——脱粒元件脱粒能力系数，本文采用圆柱形杆齿，取 0.035

由式(3)可得脱粒元件总数 $z \geqslant 96$，本文取 96。根据试验样机原滚筒长度，由式(2)可得脱粒元件间距 $b = 80$ mm。

在图 7 中，齿杆和水平方向存在一个夹角 α，根据齿杆首尾两端固定点的相位关系有

$$\alpha = \arctan \frac{\beta \pi R}{180D} \tag{4}$$

式中　β——齿杆首尾固定点相位差，(°)

R——脱粒滚筒半径，mm

由于齿杆与水平方向存在夹角，当滚筒按图 7 所示方向转动时，齿杆对物料的作用力除了沿径向方向的 F_r 外，还存在一个沿轴线方向水平向后的作用力 F_x(图 8)，该作用力能够提高滚筒对物料的向后推送能力，提高物料的向后运移速度，相较于常规直线齿杆滚筒，能够减少堵塞，提高作业效率。

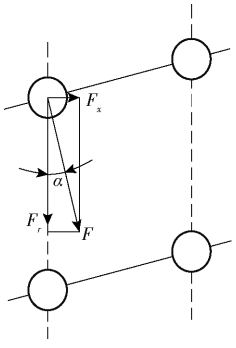


图 8　齿杆对物料作用力示意图

Fig. 8　Schematic of force of tooth rod on materials

由于齿杆所形成的空间曲线在首尾两端固定点位存在相位差，为了使得滚筒旋转时同一齿杆上各脱粒元件的旋转半径能够保持一致，从而确保各脱粒元件与脱粒凹板筛的间隙保持相同，同一齿杆上的相邻脱粒元件轴线方向应当保持一定的角度差，即

$$\theta = \frac{\beta k}{z} \tag{5}$$

式中　θ——相邻脱粒元件角度差，(°)

如图 9 所示，齿杆首端脱粒元件 Z1 竖直向下，其后每一个脱粒原件均绕水平方向向上旋转相同角度 θ，保持等角度差排布，直至末端杆齿 Z2 竖直向上。

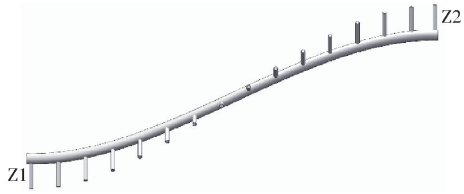


图 9　脱粒元件等角度差排布示意图

Fig. 9　Schematic of equal angle difference layout of threshing elements

同一齿杆上的脱粒元件轨迹如图 10 所示，可以看出，当脱粒元件按等角度差排布时，各旋转半径和运动轨迹保持一致，以确保脱粒间隙不会变化。

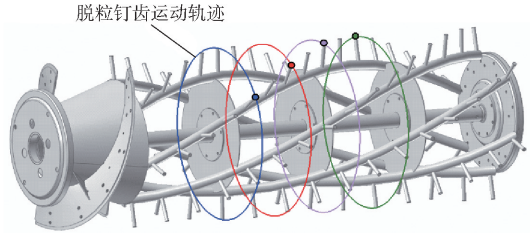


图 10　脱粒元件运动轨迹

Fig. 10　Motion trajectory of threshing element

结合图 7 和图 10，同一齿迹上的脱粒元件数没有减少，保证了滚筒的脱粒能力。在滚筒转动时，相比直线式齿杆上整排脱粒元件同时进入脱分区域，采用螺旋交错排布齿杆和等角度差排布脱粒元件，各齿杆上的脱粒元件依次进入脱分区域并与物料接触，形成渐次作用，具有更高的平顺性，能够降低脱粒元件对物料的冲击强度，减少滚筒载荷波动，避免堵塞，使得滚筒作业更为稳定，从而降低滚筒脱粒功耗。同时还能够提高物料向后运移速度，提高作业效率。此外，冲击强度的降低和运移效率的提升有利于减少物料的破碎和断裂，减少进入清选系统的脱出物总量，降低清选作业负荷，提高清选作业质量。

2　脱粒过程仿真

2.1　模型及参数设置

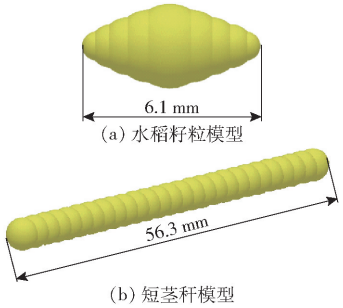
2.1.1　脱粒滚筒模型

由于实际生产中普遍应用的联合收获机主力机型均采用直列式脱粒滚筒，为了解决收获作业中存在的问题，且更直观地对比实机作业效果，综合考虑所设计滚筒相对于常规、单线、双线螺旋排列滚筒的优势，采用图 3 排列方式的常规滚筒进行对比分析。

在 Solidworks 软件中分别建立图 1 和图 10 所示的两种脱粒滚筒以及螺旋喂入头、导流顶盖、凹板筛等关键部件三维模型,外形尺寸保持一致,将模型导入 EDEM 软件中并设置特性参数。

2.1.2 物料离散元模型

在收获水稻时,滚筒脱出混合物主要包括籽粒、短茎秆、长茎秆、颖壳以及其他轻杂物等,其中籽粒和短茎秆质量占混合物 90% 以上[17],此外考虑到本文中的仿真分析目的是为了得到两种滚筒在相同工况下的受力表现以及物料在两种滚筒中的运动状态变化,为了提高仿真效率,对物料模型进行简化[18],仅考虑籽粒和短茎秆对脱粒过程的影响,建立的水稻籽粒和短茎秆多球聚合模型如图 11 所示。



(a) 水稻籽粒模型

(b) 短茎秆模型

图 11 物料离散元模型

Fig. 11 Materials discrete element model

各材料力学特性参数及相互间接触作用系数如表 1、2 所示[19]。

表 1 物料力学特性参数

Tab. 1 Mechanical properties of materials

参数	籽粒	短茎秆	筛面
泊松比	0.28	0.4	0.3
剪切模量/MPa	2.6	1	7 000
密度/(kg·m^{-3})	1 350	100	7 850

2.1.3 仿真参数设置

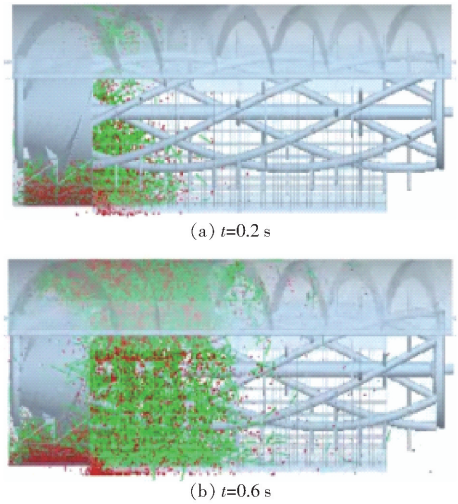
在螺旋喂入头处设置颗粒工厂,由于物料经过输送槽进入螺旋喂入头时具有一定的初速度,因此为了提高物料进入脱粒滚筒的效率,避免物料在此处堆积,影响物料生产效率,在颗粒工厂中设置籽粒和茎秆混合物料产生时具有 3.5 m/s 的轴向初速度。

表 2 各材料间接触系数

Tab. 2 Contact coefficient between materials

项目	碰撞恢复系数	静摩擦因数	滚动摩擦因数
籽粒-籽粒	0.20	0.80	0.01
籽粒-茎秆	0.25	0.65	0.01
籽粒-筛面	0.40	0.56	0.01
茎秆-茎秆	0.40	0.40	0.01
茎秆-筛面	0.20	0.70	0.01

根据喂入量和水稻草谷比以及籽粒与短茎秆的成分比例设置物料的生成速率,其中籽粒生成速率为 3.1 kg/s,茎秆生成速率为 0.4 kg/s,物料生成时间 2 s,仿真总时间 5 s,步长设置为 1×10^{-6} s,EDEM 中的基础接触模型采用 Hertz - Mindlin 无滑移模型。仿真过程如图 12 所示。



(a) t=0.2 s

(b) t=0.6 s

图 12 脱粒过程仿真

Fig. 12 Simulation of threshing process

2.2 仿真结果分析

2.2.1 脱出籽粒分布规律

在脱粒滚筒下方设置统计区域,分别沿滚筒轴向与径向划分为 10×11 个子区域,用于统计籽粒的透筛数量和位置。

根据各个子区域所测得的籽粒数量,建立籽粒分布数量三维曲面图,其中横坐标表示径向与轴向的子区域,纵坐标表示某个子区域内籽粒数量与颗粒工厂生成的籽粒总数比值。常规滚筒与螺旋滚筒在不同转速下仿真结果如图 13 和图 14 所示。

根据籽粒分布对比结果可以看出,在滚筒轴向方向上,两种滚筒在不同转速下的脱出籽粒分布都是前多后少,且递减明显,基本位于滚筒前段 30% ~40% 区域内。在滚筒径向方向,两种滚筒在不同转速下的脱出籽粒分布基本都是侧边高,中间低,不同的是普通滚筒脱出籽粒在单侧分布更为集中,螺旋滚筒脱出籽粒呈现两侧高、中间低的马蹄形分布规律。由仿真结果可以看出,螺旋滚筒不会对脱出籽粒在滚筒轴向和径向方向上的分布产生较大的影响,所呈现的分布符合正常规律,并不会出现单侧籽粒过多的失衡情况,避免影响清选作业质量。

2.2.2 茎秆轴向运动速度对比

轴向速度是物料在滚筒内部的一项重要运动参数,由于大部分籽粒在滚筒前半段已经透过凹板筛进入清选室,因此对于茎秆等杂物,向后的运动速度

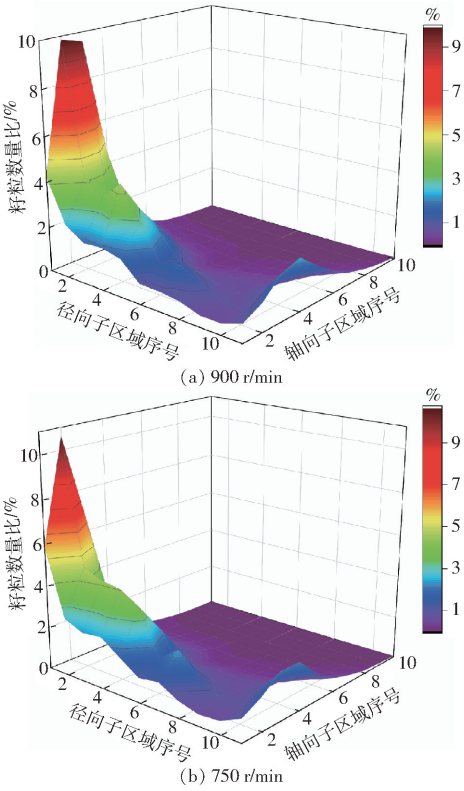


图 13　常规滚筒脱出物籽粒分布

Fig. 13　Grain distribution of conventional cylinder threshed output

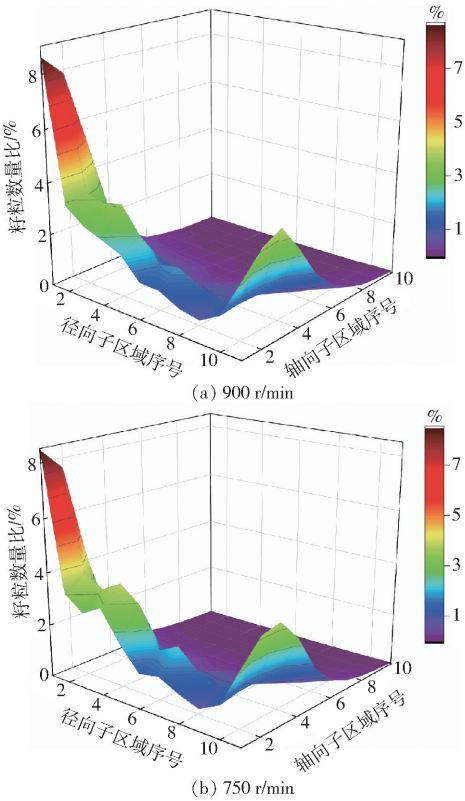


图 14　螺旋滚筒脱出物籽粒分布

Fig. 14　Grain distribution of spiral interlaced cylinder threshed output

更为关键，应当适当增加，使其尽快离开脱粒区域，以避免在滚筒内重复击打，增加断裂和破碎。

通过后处理提取不同转速下，两种滚筒内的茎秆在 2.0 ~ 4.5 s 仿真过程中的轴向平均运动速度，如图 15 所示。

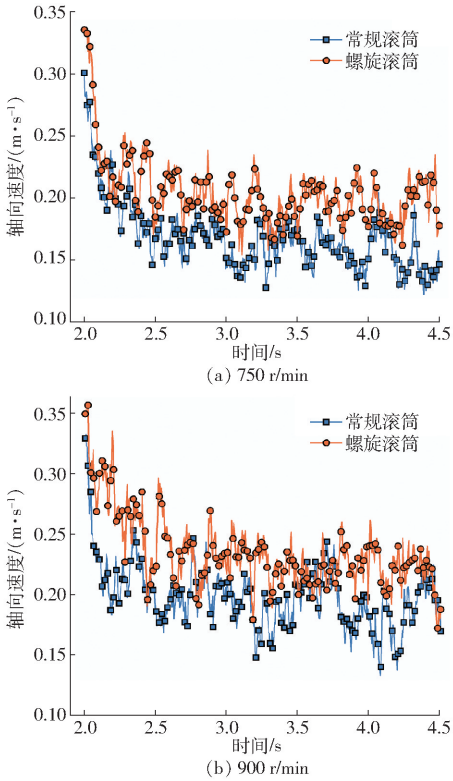


图 15　茎秆轴向运动速度曲线

Fig. 15　Curves of axial movement velocity of stem

由图 15 可以看出，在不同作业参数下，茎秆在两种滚筒内轴向运动速度均有所差异。当滚筒转速为 750 r/min 时，常规滚筒内茎秆轴向运动平均速度为 0.17 m/s，螺旋滚筒内茎秆轴向运动平均速度为 0.21 m/s，速度提升 23.5%；当滚筒转速为 900 r/min 时，常规滚筒内茎秆轴向运动平均速度为 0.22 m/s，螺旋滚筒内茎秆轴向运动平均速度为 0.28 m/s，速度提升 27.3%。由此可以看出，在不同的滚筒转速下，茎秆在螺旋滚筒内的轴向运动速度均有一定程度的提升，有利于物料快速向后输送，能够减少堵塞情况的发生，更适用于大喂入量作业条件下的高效脱粒分离需求。

2.2.3　脱粒功耗对比

脱粒功耗主要分为空载功耗和有效功耗，其中有效功耗为水稻籽粒从稻穗上分离下来所需要的功耗。当物料流动连续且稳定时，有效功耗为

$$P_t = e\frac{qv_t^2}{1-f} \tag{6}$$

式中　P_t——脱粒有效功率，kW

e——修正系数

v_t——脱粒线速度，m/s

f——水稻通过凹板筛时的综合接触系数

除了这一部分有效功耗外,物料在脱粒过程中与脱粒元件的碰撞会让物料内部积蓄能量[20],依据 Palmgren – Miner 累积损伤理论,这种内部累计能量与碰撞次数成正相关,随着碰撞次数增加,在该能量达到临界值后,物料会产生断裂或破碎,因此,在脱粒过程中,应当减少茎秆、角果壳等杂余物料和脱粒元件、凹板之间的碰撞次数,从而降低功耗。

如图 16 所示,通过后处理提取不同转速下,茎秆在两种滚筒内与脱粒装置以及其他物料之间的碰撞次数,可以看出,在不同的滚筒转速下,茎秆在螺旋滚筒内的碰撞次数均低于在常规滚筒内的碰撞次数,由此可以进一步明确,当采用螺旋滚筒后,在相同的作业工况下能够降低脱粒功耗。

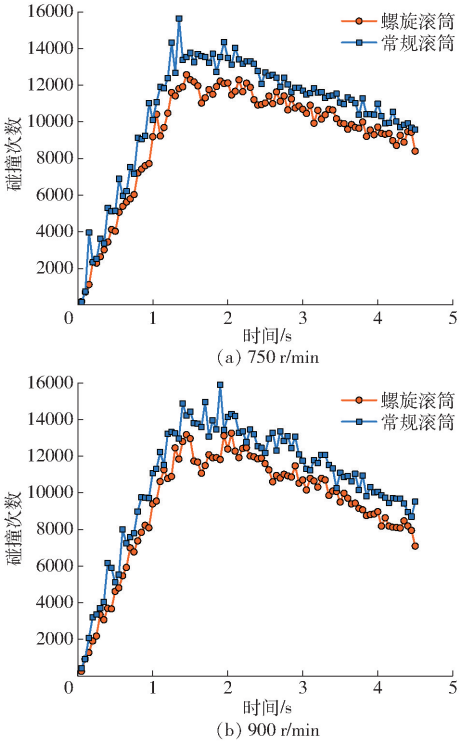


图 16 茎秆碰撞次数对比曲线

Fig. 16 Contrast curves of stem collisions

为了更加直观地对比脱粒功耗,提取脱粒滚筒在作业过程中包括螺旋喂入头、脱粒元件以及齿杆和辐盘等部件在内的总扭矩,两种滚筒在不同转速下扭矩随时间变化关系如图 17 所示。

从整体上看,在相同的工况下,两种滚筒所受扭矩随时间变化规律基本一致,在物料生成累积阶段扭矩逐渐增大,在 2 s 时物料生成完毕,滚筒扭矩达到最大值,随着籽粒和茎秆的排出,扭矩逐渐降低。从整体上看,在整个仿真过程中,螺旋滚筒所受的扭矩小于常规滚筒。对扭矩进行分析,结果如表 3 所示。

在两种作业转速下,模型F值分别为 88.04 和

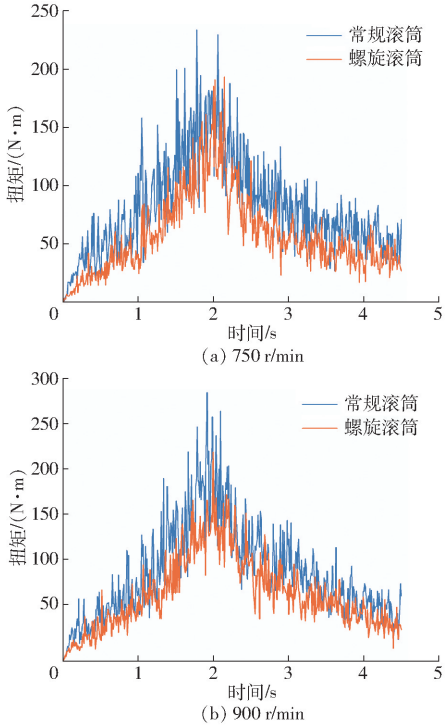


图 17 滚筒扭矩变化曲线

Fig. 17 Contrast curves of cylinder torque

表 3 滚筒扭矩分析

Tab. 3 Analysis of cylinder torque N·m

转速/(r·min^{-1})	滚筒类型	均值	标准差	均值标准误差
750	常规滚筒	81.4	41.8	1.97
	螺旋滚筒	57.6	34.2	1.61
900	常规滚筒	93.6	50.9	2.40
	螺旋滚筒	70.8	39.3	1.85

56.83,表明两种滚筒所受扭矩具有显著差异。同时,两种工况下螺旋滚筒的扭矩均值和标准差都小于常规滚筒,表明在脱粒过程中,螺旋滚筒所受扭矩更小,且扭矩波动变化较小,较少受到瞬时冲击载荷,脱粒过程更具平顺性和稳定性。

3 脱粒滚筒台架试验

3.1 试验材料和方法

为验证仿真试验结果准确性,在现有的脱粒试验台进行对比试验,如图 18 所示。该试验台脱粒滚筒采用电机独立驱动,并且安装有 RK – 060 型扭矩传感器,可以实时监测滚筒扭矩。

在田间收集整株水稻作为台架试验材料,茎秆含水率 58.7%,籽粒含水率 22.5%。根据仿真参数设置,每次试验将 7 kg 的物料均匀放于输送带上,人工铺放物料时靠近割台一端空余 1 m,用以输送带加速至设定的线速度,余下 2 m 均匀铺放物料,设定输送带线速度为 1 m/s,滚筒转速与仿真试验保持一致。



图 18　试验台架

Fig. 18　Test bench

3.2　台架试验结果

3.2.1　脱出物中籽粒分布

为了便于统计，在脱粒滚筒下方按径向和轴向放置 5 ×7 个接样盒，用于统计脱出物中不同位置分布的籽粒占比，根据接样盒中收集到的籽粒数量，建立籽粒分布三维曲面图，其中纵坐标表示接样盒中籽粒与单次试验物料中籽粒总质量百分比，脱出籽粒分布对比如图 19 所示。

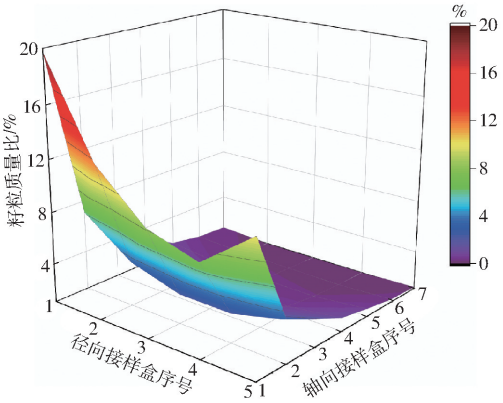


图 19　台架试验螺旋滚筒脱出物籽粒分布

Fig. 19　Grain distribution of spiral interlaced cylinder threshed output in bench test

在滚筒轴向方向上，脱出物中的籽粒分布仍然是集中在滚筒前 30% 区域，在径向方向上的分布为两侧多中间少，结合图 14 可以看出，通过台架试验所得到的螺旋交错式脱粒滚筒籽粒分布规律和变化趋势与仿真试验结果基本一致。

3.2.2　滚筒扭矩对比

对台架试验中所测得的滚筒扭矩进行分析，结果如表 4 所示。

表 4　滚筒扭矩台架试验结果

Tab. 4　Results of cylinder torque in bench test　N·m

转速/(r·min^{-1})	滚筒类型	均值	标准差	均值标准误差
750	常规滚筒	99.2	51.4	2.32
	螺旋滚筒	75.4	42.5	1.86
900	常规滚筒	112.8	64.2	3.10
	螺旋滚筒	95.2	49.3	2.12

结合台架试验结果与表 3 可以看出，台架试验中滚筒扭矩均值与仿真试验中有所差异，分析原因是台架中滚筒的安装和传动会提高滚筒负荷，导致扭矩增加，但是在两种转速下，螺旋滚筒所受扭矩均值和标准差都要小于常规滚筒，与仿真试验结果相符。随着转速的增加，台架试验与仿真试验的脱粒滚筒所受扭矩的变化趋势相一致，表明仿真试验结果具有一定的准确性，可用于脱粒滚筒作业性能的研究与分析。

4　田间试验

4.1　试验条件

为了验证螺旋交错排布式脱粒滚筒对联合收获机作业性能提升效果，于 2023 年 11 月 17 日在江苏省高邮市进行了田间对比试验，试验水稻品种为华良优 919，理论产量 1.8 kg/m^2，茎秆含水率 64.9%，籽粒含水率 20.4%，选取水稻长势均匀、无倒伏田块进行试验，作业条件符合水稻收获要求。

4.2　试验方法

选择收获机喂入量以及脱粒滚筒型式为影响因素，以脱粒损失率、清选损失率以及作业功耗为评价指标进行试验。参考 GB/T 8097—2008《收获机械　联合收割机　试验方法》和 NY/T 498—2013《水稻联合收割机 作业质量》等标准进行对比试验。为了排除脱粒滚筒之外的因素影响，采用 2 台相同型号的联合收获机进行分组试验，其中 A 组为采用常规滚筒的原厂机型，B 组为换装本文设计的螺旋脱粒滚筒机型，各组试验测区长度均为 15 m，准备区长度 5 m 用以联合收获机加速至作业速度，机具在测区内保持匀速前进，滚筒转速保持为 750 r/min。在联合收获机脱粒滚筒排草口与振动筛尾部挂接采样袋，分别接取脱分与清选的排出杂余物料，通过人工处理接取的脱分与清选的试验样本，测量并记录各个成分质量以计算脱粒损失率和清选损失率，为降低误差，每组试验进行 3 次取各指标平均值。田间试验情况如图 20 所示。



图 20　田间试验

Fig. 20　Field test

试验前按 5 点采样法，由人工分别割取 1 m^2 内

的水稻并脱粒,测得单位面积籽粒产量,计算脱粒损失率与清选损失率。

根据各组试验用时、试验田块水稻籽粒平均产量以及收集到的脱分和清选物料质量,计算各组试验的喂入量。

4.3 试验结果分析

4.3.1 滚筒脱出茎秆长度分布对比

联合收获机脱粒滚筒的有效功率消耗包括脱粒元件对物料的冲击、梳刷,物料间产生的摩擦,以及茎秆的破碎、断裂等形变[21],其中茎秆形变可以用来表征功率消耗。

对各组试验接取的滚筒脱出物料进行随机取样,每次取样 2.5 kg,测量各样本中所有茎秆长度,并记录各个长度分布段的茎秆质量,得到两种滚筒脱出物中不同长度茎秆质量占比,如图 21 所示。

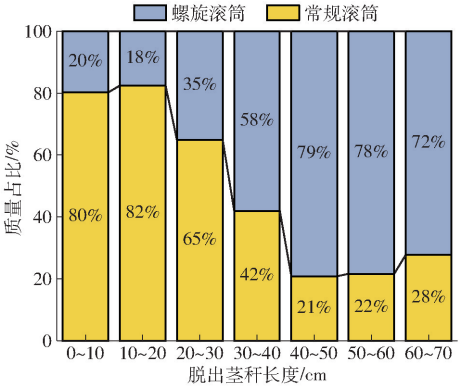


图 21 不同长度茎秆质量占比

Fig. 21 Mass proportion of stem with different lengths

由图 21 可以看出,A 组脱出物中的茎秆长度主要分布在 10 ~ 40 cm,其中在 10 ~ 20 cm 分布段质量占比最高。B 组脱出物中的茎秆长度主要分布在 30 ~ 70 cm,其中以 40 ~ 50 cm 分布段最多。统计结果表明,A 组脱出茎秆相较于 B 组,断裂和破碎程度更高,表明常规滚筒在脱粒过程中对物料的打击力度更大,茎秆的形变量更大,因此有效功率消耗更多,若脱粒滚筒的功率消耗占比过高,易影响整机作业质量和效率。

4.3.2 滚筒脱出物料成分与清选损失率对比

联合收获机清选作业质量除了受气流与振动筛参数影响外,与滚筒脱出物的分布、物料量以及组成成分密切相关。脱出物主要包括籽粒、茎秆以及杂余等,如图 22 所示,当脱出物量较大或过于细碎时,会增加清选筛面负荷,提高清选筛分难度,增加清选损失。

对各组试验接取的清选排出物料进行清理和测算,得到两种滚筒在不同喂入量下的筛面杂余质量占比和清选损失率,其中杂余质量占比为清选排出物质量与喂入物料总量的比值,结果如表 5 所示。



(a) 籽粒 (b) 茎秆 (c) 杂余

图 22 滚筒脱出物主要成分

Fig. 22 Main components of threshed output materials

表 5 筛面杂余质量占比及清选损失率对比

Tab. 5 Comparison of impurity mass proportion of screen surface and cleaning loss rate

组别	试验号	喂入量/(kg·s^{-1})	杂余质量占比/%	脱粒损失率/%	清选损失率/%
A	1	3	4.36	0.65	1.22
	2	4	6.72	0.71	1.54
	3	5	7.56	0.82	1.95
B	1	3	1.88	0.54	0.92
	2	4	3.06	0.62	1.08
	3	5	2.86	0.75	1.29

由表 5 可以看出,B 组螺旋脱粒滚筒脱粒损失率满足 NY/T 498—2013《水稻联合收割机 作业质量》中的相关要求,且较 A 组脱粒损失率有所下降。由于该脱粒滚筒在保持元件脱粒能力的同时,对茎秆的作用力更均匀,冲击力度降低,降低了茎秆的破碎度,减轻了籽粒与短茎秆等杂余的裹挟,因此在一定程度上降低了脱粒损失率。

此外,由于 B 组螺旋滚筒降低了茎秆等物料的断裂、破碎程度,因此能够有效降低清选损失率。相较于 A 组常规滚筒,物料在经过 B 组螺旋滚筒后,筛面杂余质量占比降低,即在同样的凹板筛结构和滚筒作业参数下,落入清选室的破碎茎秆和其他杂物有所减少,表明 B 组滚筒对茎秆等物料的打击强度更小,减轻了其断裂和破碎程度,降低了杂余通过凹板筛的概率。同时,由于筛面杂物减少,有效降低了清选筛的作业负荷,筛面物料筛分更加充分,减少了杂物与籽粒的裹挟,提升了籽粒的透筛概率。同时,较少的筛面杂物量也会提高清选气流的穿透和作用效果,进一步降低清选损失率。

4.3.3 作业功耗对比

联合收获机脱分作业在满足损失率指标要求的前提下,还应当考虑作业顺畅性和功率消耗,以实现提质降耗、节本增效的目标。

为了明确两种脱粒滚筒的作业功耗差别,以单位面积燃油消耗量作为评价指标,进行 A、B 两组机具的对比试验。选取面积足够大且土壤条件基本一

致的田块进行对比试验，降低行走阻力和频繁调头对动力消耗造成的影响。其余各项试验条件和作业参数保持一致，机具均以正常前进速度满幅宽作业，留茬高度为 20 cm，每隔一定时间测量并记录作业面积和油耗。

试验结果如表 6 所示，A 组配置常规脱粒滚筒机器平均单位面积油耗量为 50.6 L/hm^2，B 组配置螺旋滚筒机器平均单位面积油耗量为 41.5 L/hm^2，油耗降低 18.1%，进一步说明所设计的螺旋滚筒在相同的作业条件和工况下能够降低脱粒元件对物料的击打力度，提升作业顺畅性，有效降低脱粒作业功耗。

表 6　油耗对比试验结果

Tab.6　Test results of fuel consumption comparison

试验号	A 组		B 组	
	面积/hm^2	燃油消耗/L	面积/hm^2	燃油消耗/L
1	0.57	27.9	0.61	24.40
2	0.61	30.6	0.65	26.91
3	0.84	43.8	0.76	32.45
单位面积油耗量/(L·hm^{-2})	50.6		41.5	

5　结论

(1)为了满足履带式谷物联合收获机高质高效低功耗作业需求，设计了一种螺旋交错排布式脱粒滚筒，在保证脱粒分离性能的基础上，提高了物料在滚筒内的运移效率，降低了脱粒元件对物料的打击力度和作业功耗，同时有效解决了因筛面杂余物料过多导致的清选损失率高的问题。

(2)优化了脱粒齿杆的排列方式，由常规的直列式排布更改为空间曲线排布，并且同一齿杆上的脱粒元件间保持一定的角度差，在作业时各个脱粒元件和齿杆渐次进入脱粒区域与物料作用，能够降低冲击载荷，提高作业平顺性，减少茎秆断裂和破碎。

(3)通过离散元仿真试验对比分析了物料在原机滚筒和本文所设计螺旋滚筒内的向后运移速度以及滚筒所受扭矩，并通过台架试验验证了仿真结果的准确性，结果表明当转速为 750、900 r/min 时，物料在螺旋滚筒内的运移速度分别提高 23.5% 和 27.3%，同时螺旋滚筒平均扭矩较原机滚筒分别下降 29.2% 和 24.4%。

(4)田间对比试验结果表明，物料在经过螺旋滚筒作用后，茎秆断裂和细碎程度更低，筛面杂余占比更少，筛面负荷降低，更利于籽粒透筛，清选损失率平均降低 22.8%。同时作业功耗更低，同等作业条件下油耗降低 18.1%，表明所设计的螺旋滚筒能够在提升作业性能的同时降低脱粒功耗。

参　考　文　献

[1] 滕悦江，金诚谦，陈艳普，等. 稻麦联合收获机分段式脱粒装置设计与优化[J]. 农业工程学报，2020，36(12)：1－12.
TENG Yuejiang, JIN Chengqian, CHEN Yanpu, et al. Design and optimization of segmented threshing device of combine harvester for rice and wheat[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(12): 1－12. (in Chinese)

[2] 李耀明，丁为民，陈进. 梳脱式联合收获机脱粒输送装置自动控制系统[J]. 农业机械学报，2004，35(5)：86－89.
LI Yaoming, DING Weimin, CHEN Jin. Automatic controller for threshing and transporting devices of stripping combine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(5): 86－89. (in Chinese)

[3] 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)

[4] 王鹏，金诚谦，王超，等. 谷物联合收获机脱粒系统研究现状[J]. 中国农机化学报，2023，44(5)：48－57.
WANG Peng, JIN Chengqian, WANG Chao, et al. Research status of threshing system of grain combine harvester[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2023, 44(5): 48－57. (in Chinese)

[5] MIU P I, KUTZBACH H D. Modeling and simulation of grain threshing and separation in axial threshing units: Part Ⅱ: application to tangential feeding[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2008, 60(1): 105－109.

[6] 衣淑娟. 钉齿式双滚筒轴流脱粒与分离装置的试验研究[J]. 机械设计与制造，2006(5)：88－89.
YI Shujuan. Experimental research on the spike tooth of double axial flow threshing and separating unit[J]. Machinery Design & Manufacture. 2006(5): 88－89. (in Chinese)

[7] TANG Zhong, ZHANG Ben, WANG Bing, et al. Breaking paths of rice stalks during threshing[J]. Biosystems Engineering, 2021, 204(1): 346－357.

[8] 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)

[9] 滕悦江，金诚谦，陈艳普，等. 联合收获机 360°脱粒分离装置设计与试验[J]. 农机化研究，2021，43(8)：135－142.

TENG Yuejiang, JIN Chengqian, CHEN Yanpu, et al. Design and experimental research on the 360° threshing and separation device of combined harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2021, 43(8): 135 - 142. (in Chinese)

[10] 王志明,吕彭民,陈霓,等. 横置差速轴流脱分选系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2016,47(12):53 - 61.
WANG Zhiming, LÜ Pengmin, CHEN Ni, et al. Design and experiment on axial-flow differential-speed threshing-separating-cleaning unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(12): 53 - 61. (in Chinese)

[11] 李心平,王文哲,赵高源,等. 纵轴流双柔性碾搓式谷子脱粒装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2021,52(7):113 - 123.
LI Xinping, WANG Wenzhe, ZHAO Gaoyuan, et al. Design and experiment of longitudinal axial flow double flexible rolling and kneading threshing device for millet[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 113 - 123. (in Chinese)

[12] 谢干,张国忠,付建伟,等. 鼓形与圆柱形杆齿式纵轴流脱粒滚筒功耗对比试验[J]. 华中农业大学学报,2021,40(1): 202 - 209.
XIE Gan, ZHANG Guozhong, FU Jianwei, et al. Comparing power consumption of drum and cylindrical rod-tooth longitudinal axial flow threshing roller[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(1): 202 - 209. (in Chinese)

[13] 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)

[14] 赵胜华,张国忠,张仕杰,等. 基于薄膜传感器的横轴流脱粒滚筒实时喂入量测量系统设计[J]. 华中农业大学学报, 2020,39(2):160 - 169.
ZHAO Shenghua, ZHANG Guozhong, ZHANG Shijie, et al. Designing a real-time feed measurement system for horizontal axial flow threshing drum based on thin film sensor[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020, 39(2): 160 - 169. (in Chinese)

[15] 姜楠,李永军,周欣宇. 钉齿间距对单轴流脱粒与分离装置性能影响的试验研究[J]. 黑龙江八一农垦大学学报,2011, 23(5):31 - 34.
JIANG Nan, LI Yongjun, ZHOU Xinyu. Experimental research about spike-tooth spacing's performance impact on a single axial flow threshing and separating unit[J]. Journal of Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2021, 23(5): 31 - 34. (in Chinese)

[16] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.

[17] CHAI Xiaoyu, ZHOU Ying, XU Lizhang, et al. Effect of guide strips on the distribution of threshed outputs and cleaning losses for a tangential-longitudinal flow rice combine harvester[J]. Biosystems Engineering, 2020, 198(1):223 - 234.

[18] LIU Yanbin, LI Yaoming, DONG Yunhua, et al. Development of a variable-diameter threshing drum for rice combine harvester using MBD - DEM coupling simulation[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 196: 106859.

[19] XU Lizhang, LI Yang, CHAI Xiaoyu, et al. Numerical simulation of gas-solid two-phase flow to predict the cleaning performance of rice combine harvesters[J]. Biosystems Engineering, 2020, 190: 11 - 24.

[20] 康家鑫,王修善,谢方平,等. 适应不同成熟度大豆的差速脱粒滚筒性能试验与分析[J]. 农业工程学报,2023,39(1): 38 - 49.
KANG Jiaxin, WANG Xiushan, XIE Fangping, et al. Experiments and analysis of the differential threshing cylinder for soybean with different maturities[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(1): 38 - 49. (in Chinese)

[21] 钱震杰,金诚谦,袁文胜,等. 柔性脱粒齿杆与谷物含摩擦打击动力学模型[J]. 吉林大学学报(工学版),2021,51(3): 1121 - 1130.
QIAN Zhenjie, JIN Chengqian, YUAN Wensheng, et al. Frictional impact dynamics model of threshing process between flexible teeth and grains[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2021, 51(3): 1121 - 1130. (in Chinese)