

DOI: 10.13733/j.jcam.issn.2095-5553.2024.07.016

陈文辉, 张中锋, 汪振荣, 等. 5TZ-900 型振动筛清选脱粒机设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(7): 104-113

Chen Wenhui, Zhang Zhongfeng, Wang Zhenrong, et al. Design and test of 5TZ-900 vibrating screen cleaning threshing machine [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(7): 104-113

5TZ-900 型振动筛清选脱粒机设计与试验^{*}

陈文辉¹, 张中锋², 汪振荣¹, 高自成³, 何舟¹, 顾秀艳¹

(1. 张掖市农业机械化技术推广站, 甘肃张掖, 734000; 2. 甘肃省农业机械化技术推广总站, 兰州市, 730046;
3. 张掖市科技服务中心, 甘肃张掖, 734000)

摘要:针对甘肃省山区梯田等中小地块联合收获机作业困难, 小麦、燕麦等粮食作物主要在农户庭院进行脱粒作业的需求现状, 设计集喂入、脱粒、清选和排草等作业功能于一体的 5TZ-900 型振动筛清选脱粒机。对机具的脱粒装置、清选装置、传动装置等关键部件进行理论分析和结构设计, 对满足工作需求的脱粒滚筒规格尺寸、钉齿数量和振动筛结构尺寸等进行计算分析, 确定影响振动筛清选脱粒机作业合格率的主要技术参数, 并对整机进行作业性能试验。试验结果表明, 机具空载运转时的噪声为 79.8 dB(A), 在试验作物的草谷比为 0.9、籽粒含水率在 15%~20% 和机具滚筒转速为 1 040 r/min 时, 机具作业的破碎率为 0.94%, 含杂率为 1.04%, 未脱净率为 0.93%, 总损失率为 1.36%, 生产效率为 1 120 kg/h, 各项指标达到设计要求和相关标准要求。

关键词:脱粒机; 振动筛; 清选脱粒; 脱净率; 含杂率

中图分类号:S226.1+2 **文献标识码:**A **文章编号:**2095-5553 (2024) 07-0104-10

Design and test of 5TZ-900 vibrating screen cleaning threshing machine

Chen Wenhui¹, Zhang Zhongfeng², Wang Zhenrong¹, Gao Zicheng³, He Zhou¹, Gu Xiuyan¹

(1. Zhangye Agricultural Mechanization Technology Extension Station, Zhangye, 734000, China;
2. Gansu Technology Promotion General Station of Agriculture Mechanization, Lanzhou, 730046, China;
3. Zhangye Science and Technology Service Center, Zhangye, 734000, China)

Abstract: In view of the difficult operation of combine harvesters in small and medium-sized plots such as terraces in mountainous areas of Gansu Province, and the demand for threshing operations of grain crops such as wheat and oats mainly in the courtyards of farmers, the 5TZ-900 vibrating screen threshing machine was designed, which integrated the functions of feeding, threshing, cleaning and weeding. The basic structure, working principle and main technical parameters of the machine were introduced. The theoretical analysis and structural design of the key components such as threshing device, cleaning device and transmission device were carried out. The size of threshing drum, the number of nail teeth and the structure size of vibrating screen were calculated and analyzed to meet the working requirements. The main technical parameters affecting the operation qualification rate of vibrating screen cleaning threshing machine were determined, and the operation performance test of the whole machine was carried out. The performance test results showed that the noise of the machine was 79.8 dB (A) when the machine was running without load. When the grass-to-grain ratio of the test crop was 0.9, the grain moisture content was between 15% and 20%, and the rotation speed of the machine drum was 1 040 r/min, the crushing rate of the machine operation was 0.94%, the impurity rate was 1.04%, the unremoval rate was 0.93%, the total loss rate was 1.36%, and the production efficiency was 1 120 kg/h. The indicators meet the design requirements and related standards.

Keywords: threshing machine; vibrating screen; cleaning threshing; removal rate; impurity content

收稿日期: 2023 年 7 月 31 日 修回日期: 2023 年 11 月 24 日

^{*} 基金项目: 甘肃省科技计划项目 (22CX8NG179)

第一作者: 陈文辉, 男, 1984 年生, 甘肃张掖人, 高级工程师; 研究方向为农机农艺技术融合及推广。E-mail: 342093704@qq.com

通讯作者: 张中锋, 男, 1984 年生, 甘肃甘谷人, 硕士, 正高级工程师; 研究方向为农业机械化技术开发与推广应用。E-mail: 275311651@qq.com

0 引言

近年来,国外粮食作物的联合收获机以超大型机型为主,智能化、信息化技术得到广泛应用,已实现低损高效的智能自主收获。欧美等粮食主要生产国家主要采用谷物联合收获机更换不同的割台,实现小麦、玉米等粮食作物的籽粒直收,并向系列化、大型化,低损失、高效率,智能化、信息化方向和提高机具的通用性与适应性方面发展。例如约翰迪尔拥有5个系列18个机型,可提供4种不同的谷物脱分技术方案,配套发动机功率150~405 kW均匀分布,向大型化发展的轴流脱粒滚筒的直径达到600 mm以上,并配置更大的脱粒分离空间和更强性能的清选系统;国外联合收获机通过脱分系统结构和工作参数的优化来实现低损收获,如纵向轴流滚筒式采用组合式的脱粒元件,配合脱粒间隙的实时调整来实现收获不同含水率作物的损失为最低水平,采用新型加速滚筒、角度可调的导向叶片和流量加速分离式的辅助分离机构等来实现作物收获的高效率;在智能化和信息化方面,主要以智能化的脱分系统控制技术为重点,运用信息化的多传感器融合技术在关键工况参数和作业质量参数进行实时获取,通过建立粮食农作物的收获作业模式来实现自学习的收获作业决策系统,根据在线监测的工作参数、作物含水率、喂入量、籽粒破碎率、脱净率、收获损失率和产量等信息,联合收获机可实时自主调整滚筒转速、脱粒间隙、作业速度及清选等工作参数,实现机具收获效率最大、损失最低和谷粒质量最佳的工作效果^[1, 2]。国外发达国家的粮食作物收获已基本实现全面机械化,少量的脱粒机也朝大型化、通用化和智能化发展,普遍采用了机电一体化和自动化技术,进一步提升机具作业效率。

目前,我国设计生产的谷物联合收割机以中、小型为主,与国外的先进技术差距较大,喂入量8 kg/s以上的联合收获机主要依赖进口。随着我国农村土地集约化经营和农机合作社的建立,对高效率高质量收获的大型联合收割机的需求也会不断扩大。近年来,国内相关学者围绕大中型联合收获机和大型脱粒机开展大量研究,并取得了一些成果。为满足不同地区作物籽粒脱粒需求,邓跃明^[3]研究设计出5TX-40型稻麦脱粒机,解决了小型稻麦脱粒机存在功能单一、没有清选装置和生产效率低的一些问题。王晓东等^[4]研究设计了5T-4型玉米脱粒清选机,有效解决了传统玉米脱粒效率低、劳动强度大、脱粒质量差的问题。赵武云等^[5]针对玉米种子开展了5TYJ-10A型玉米种子脱粒机作业性能试验,为玉米种子脱粒生产装备的研发

提供参考与借鉴。孙继东^[6]设计了5ZTL-300型水稻种子脱粒机,为水稻育种研究提供了实用机具。王旖旎等^[7]研究了新型玉米脱粒机的设计与实现,解决了降噪除尘等问题。侯梦魁^[8]开展了水稻脱粒机装置创新结构设计,脱粒滚筒上的弓齿采用了脱粒效果更好、断穗率更低的V型齿,大幅度提升了脱粒的效率和质量。马丽华等^[9]研究了挤搓式玉米脱粒机脱粒装置,并进行改进与试验,首次提出将弹簧齿和压板机构置于一体的玉米脱粒机,适应性强,脱粒性能好。国内还有一些学者针对胡麻、槐米以及藜麦等的专用脱粒机进行了探讨研究,对振动筛清选脱粒机的设计提供了重要依据。

现阶段我国丘陵山地粮食种植区的农业大都属于小农经济,需要推广一些小型的家用农机,而脱粒机是粮食作物种植户不可缺少的必备农机,因此有必要对适合山区农户庭院使用的脱粒机具及技术进行分析与探讨。但目前国内在适合丘陵山区粮食作物脱粒机研究方面较少,而在我国丘陵山地粮食种植区仍普遍使用脱粒机,长江以北地区以麦类脱粒机为主,长江以南地区以水稻脱粒机为主,在西南和西北等地也有以生产水稻和麦类脱粒机为主的企业。

目前国内已有的脱粒机,按脱粒装置工作原理大体可分为:纹杆滚筒式、钉齿滚筒式和弓齿滚筒式,纹杆滚筒式是以搓擦脱粒为主、冲击为辅,脱粒能力和分离能力强,有利于后续加工处理,多用于联合收获机;钉齿滚筒式是利用钉齿对谷物的强烈冲击以及在脱粒间隙内的搓擦而进行脱粒,抓取能力强,对不均匀喂入和潮湿作物有较强适应性;弓齿滚筒式是谷物沿滚筒轴向移动的过程中,谷穗不断受到滚筒弓齿的梳刷和冲击使谷粒被脱下,主要适用于水稻收获。我国现有脱粒机虽然品种较多,但大多为商用脱粒机,虽然效率高、脱粒效果好,但其体积庞大、成本高、工作时产生的噪声较大,因此不适合庭院较小的山区农户使用。

甘肃省丘陵山区面积占耕地面积76%以上,约70%的粮食作物种植在丘陵山区,但丘陵山区以中小地块为主,国内现有的大中型联合收获机存在进地、转弯和作业等技术难题,因此现阶段丘陵山区农户普遍采用田间收割粮食作物晾晒后再脱粒的分段收获方式,而目前现有的清选脱粒机以简易式机型为主,清选机构大多采用换向变速齿轮箱和其侧输出轴上的偏心轮实现换向变速来驱动清选筛,结构复杂、制造成本高,换向变速齿轮箱内的轴承和齿轮等因偏心的撞击大,易损坏,且作业效率低、损失率和含杂率较高,随着农村经济的发展和劳动力的减少,迫切需要一种适合农户庭院作业的高效低损型脱粒清选机^[10]。

本文针对甘肃省丘陵山区小地块中联合收获机作业困难,小麦、燕麦等粮食作物需收割晾晒后在庭院内进行脱粒作业的需求,以及现有清选脱粒机存在的上述问题,设计一种清选装置为振动筛偏心振动机构的振动筛清选脱粒机,可使机具的旋转运动垂直换向为往复运动,其振动机构包括簸动筛和簸动筛副筛,可实现脱粒作业的高效、低损和低含杂率,以期提高省内丘陵山区粮食作物分段收获后脱粒作业的机械化水平。

1 整机结构原理及主要技术参数

1.1 整机结构

5TZ-900 型振动筛清选脱粒机主要由喂入机构、传动机构、脱粒装置、清选装置和机架等部件组成,喂入机构包括喂入槽和其后部的喂料口,传动机构包括电动机、皮带传动机构和换向传动机构等,脱粒装置主要包括脱粒滚筒、凹板筛网和机盖等,清选装置主要包括引风机、秸秆导向出口、风机排杂出口、簸动筛、簸动筛副筛、排粮槽等部件,5TZ-900 型振动筛清选脱粒机的结构如图 1 所示。

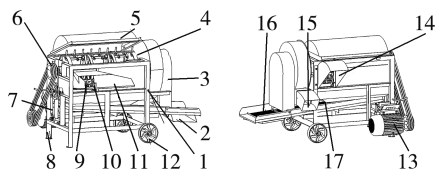


图 1 5TZ-900 型振动筛清选脱粒机结构示意图

Fig. 1 Structure diagram of 5TZ-900 type vibrating screen cleaning threshing machine

1. 机架 2. 排粮槽 3. 引风机 4. 脱粒滚筒 5. 机盖 6. 皮带传动机构
7. 换向传动机构 8. 固定支撑 9. 凹板筛网 10. 喂料口
11. 喂入槽 12. 行走轮 13. 电动机 14. 秸秆导向出口
15. 风机排杂出口 16. 簸动筛副筛 17. 簸动筛

机具在机架前端下方固定有电动机,动力经动力输入传动带传递到脱粒滚筒轴前端的主动皮带轮,从而带动脱粒装置工作,与此同时被脱粒作物由机具右上方的喂入槽和喂料口进入脱粒装置,经脱粒后的作物秸秆沿机具左上方的秸秆导向出口排出,较小的杂质和籽粒一起进入机具下部的清选装置,较轻的杂质被机具后端的引风机吸起,从风机排杂出口吹出,籽粒则从簸动筛副筛的筛网滤出后沿排粮槽排出。本设计采用皮带传动机构带动换向传动机构的偏心轴和偏心套转动,在偏心轴的作用下调节推拉杆做上下往复运动,再带动拐臂后端做前后摇摆运动,从而使簸动筛推拉杆做往复簸动运动的结构设计,解决了作物脱粒后清选不干净的问题;同时将喂入、脱粒、清选和动力传动等机构紧凑排列,可通过更换不同的脱粒滚筒和筛网以适应小麦、燕麦、高粱和谷子等不同的作物,机具

一次作业可完成喂入、脱粒、清选和排草等多道工序,具有体积小、结构紧凑,操作简便、工作平稳,安装转移方便等特点,适合在场地有限的农户庭院内进行农作物的清选脱粒作业。

1.2 工作原理

机具工作时,电动机通过皮带传动机构将动力传递到由脱粒滚筒和凹板筛网等组成的脱粒装置,经脱粒滚筒轴带动脱粒滚筒转动工作。与此同时,被脱粒作物从喂入机构采用人工均匀全喂入方式喂入,在自身重力的作用下,被脱粒作物沿喂入槽底板的斜面经喂料口滑入脱粒装置内。在高速旋转、以螺旋方式均匀排列固定在脱粒滚筒上的钉齿和凹板筛网的连续撞击、碾压和搓擦等综合作用下,作物籽粒与茎秆、糠皮等分离,经脱粒后的作物秸秆滞留在凹板筛网上方并快速沿秸秆导向出口径向排出,较小的碎茎秆、糠皮和穗头等杂质随籽粒一起从凹板筛网的小孔落入到清选装置内。在清选装置簸动筛的簸动作用下沿筛网向后运行,较轻的糠皮、穗头等杂质被安装在簸动筛后部上方的引风机吸起,再从风机排杂出口吹出机具外。较重的杂质和作物籽粒一起向后运行进入簸动筛副筛内,并在持续簸动作用下开始从簸动筛副筛的筛网眼滤出落入排粮槽,再沿排粮槽籽粒出口排出后进入集粮容器内,较重的碎茎秆、穗头等杂质从簸动筛副筛末端排草口被簸出^[11],完成农作物籽粒脱粒清选整个作业过程。

5TZ-900 型振动筛清选脱粒机的主要技术参数如表 1 所示。

表 1 主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters

参数	数值/形式
外形尺寸(长×宽×高) (mm×mm×mm)	2 150×2 000×1 260
结构质量/kg	225
电机功率/kW	7.5~11(三相电动机)
喂入方式	人工全喂入式
喂入台尺寸(长×宽)/(mm×mm)	930×480
喂入台高度/mm	880
滚筒形式	钉齿式
滚筒数量/个	1
滚筒转速/(r·min ⁻¹)	1 040
滚筒规格(直径×长度)/(mm×mm)	Φ500×900
钉齿工作长度/mm	70
凹板筛网形式	栅格式
振动筛形式	簸动往复式
风扇形式	叶片
作业效率/(kg·h ⁻¹)	800~1 200

2 关键部件设计

2.1 传动机构

根据脱粒机工作环境、载荷情况和动力传动的技术要求,本设计在电动机和动力输入轴之间采用皮带和带轮挠性传动方式传递动力,皮带传动具有占地小、易安装、有弹性和噪声低等特点,可起到缓冲减振和平稳运转的作用,能适应工作环境恶劣、载荷变化大的情况,也可满足农用机械结构简单、制造成本低的要求,皮带的弹性滑动还可对机具的重要部件起到过载保护作用。机具传动方案原理如图 2 所示。

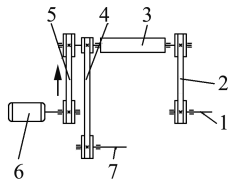


图 2 传动方案原理图

Fig. 2 Transmission scheme schematic diagram

1. 引风机驱动轴 2. 引风机传动带 3. 脱粒滚筒轴 4. 振动机构传动带
5. 动力输入传动带 6. 电动机 7. 振动机构偏心轴

动力通过动力输入传动带传递到振动机构传动带和脱粒滚筒轴,振动机构传动带带动振动机构偏心轴转动,从而驱动振动筛机构做往复复动,开始对脱粒后的籽粒进行清选作业,与此同时,脱粒滚筒轴带动脱粒滚筒转动进行脱粒做功,在脱粒滚筒的另一端装有引风机传动带,把动力传到引风机驱动轴,带动风机进行分离清选作业。

2.2 脱粒装置

脱粒装置是脱粒机的核心部件之一,主要用来进行作物籽粒的脱粒,其不仅在很大程度上决定了脱粒机的脱粒质量和生产率,而且对后续籽粒的分离和清选也有很大影响,而脱粒的难易程度与作物种类、品种、成熟度和湿度等密切相关,成熟度大、湿度大则较难脱粒,湿度大、秆草量大时会显著地降低脱粒装置的分离性能,所以,对脱粒装置的技术要求是在保证分离性能好、脱净率高和籽粒破碎率尽可能小的前提下,保证脱粒机具的通用性好、功耗较低^[12, 13]。按脱粒装置中脱粒滚筒的结构形式可分为纹杆滚筒式(切流式、轴流式)、钉齿式(切流式、轴流式)和弓齿滚筒式三种基本类型,本设计采用轴流钉齿滚筒式脱粒装置。

2.2.1 脱粒滚筒设计

本设计脱粒装置由脱粒滚筒、凹板筛网和机盖组成,凹板筛网与机盖形成一个圆筒,机盖内装有螺旋形导向板可使作物作螺旋线运动。脱粒滚筒由脱粒滚筒轴、横板、钉齿、中间辐盘及端面辐盘等部件组成,为适应较大的喂入量和避免脱粒机的重量太大,本设计脱

粒滚筒的形式采用圆柱形开式滚筒,由 2 个中间辐盘和 2 个端面辐盘为支撑,上面均匀分布有 6 条横板,横板用螺栓固定在中间辐盘和端面辐盘轮辋上,横板上安装有钉齿。脱粒滚筒的结构示意图如图 3 所示。

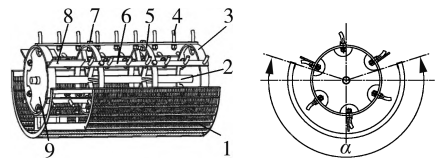


图 3 脱粒滚筒结构示意图

Fig. 3 Structure diagram of threshing cylinder

1. 凹板筛网 2. 脱粒滚筒轴 3. 端面辐盘轮辋 4. 钉齿
5. 中间辐盘 6. 横板 7. 螺栓 8. 秸秆导向 9. 端面辐盘

脱粒机的效率主要由脱粒滚筒的长度和直径而决定,脱粒滚筒长度 L 与钉齿 Z 的数量有关,决定了作物被冲击的次数和通过脱粒装置的时间,脱粒滚筒太短会降低脱净率,脱粒滚筒太长则会增加破碎率,也会增大机具的结构尺寸和制造成本。脱粒滚筒长度由式(1)计算^[14]。

$$L = a \left(\frac{Z}{k} - 1 \right) + 2\Delta l \quad (1)$$

式中: L ——脱粒滚筒的长度, mm;

a ——齿迹距,一般为 25~50 mm,本设计中齿迹距 $a = 50$ mm;

Z ——脱粒滚筒上钉齿的数量,本设计中确定 $Z = 54$ 个;

k ——螺旋线头数, $k = 2 \sim 5$, k 越大,脱粒能力越强,但秸秆破损、功耗也越大,本设计中确定杆齿的螺旋线头数 $k = 3$;

Δl ——边齿到横板端的距离,一般为 10~30 mm,本设计中根据结构尺寸确定 $\Delta l = 10$ mm。

代入数值可得,脱粒滚筒的长度 $L = 920$ mm,根据计算结果和脱粒滚筒长度系列尺寸,取脱粒滚筒长度 $L = 900$ mm。

脱粒滚筒的直径直接影响脱粒的效果,常用脱粒滚筒的直径为 400~600 mm 之间,若直径太小则容易出现作物秸秆缠绕,也会使凹板筛网的分离面积减小,若滚筒直径太大则影响机具的结构尺寸和占地面积。脱粒滚筒直径由式(2)计算。

$$D = \frac{M_s}{\pi} + 2h \quad (2)$$

式中: D ——脱粒滚筒的直径, mm;

M ——横板数,一般在脱粒滚筒上呈偶数安装,本设计中根据试验确定 $M = 6$ 个;

s ——钉齿间距,本设计中 $s = 190$ mm;

h ——钉齿工作高度,本设计中 $h = 70$ mm。

代入数值可得,脱粒滚筒直径 $D \approx 503 \text{ mm}$, 根据计算结果和脱粒滚筒直径系列尺寸,取脱粒滚筒直径 $D = 500 \text{ mm}$ 。

脱粒滚筒的转速对于脱粒机的运行稳定性和脱粒效率都有重要影响,转速过高会导致谷物在脱粒滚筒内的脱粒速度过快,从而影响脱粒效果,过高的转速还会加速机具的磨损与损坏;转速太低则会影响脱粒质量和效率,因此,要根据实际情况合理控制脱粒滚筒的转速,以保证机具的正常作业和脱粒效果。脱粒滚筒的转速与滚筒的直径和脱粒线速度有关,线速度越大、脱粒滚筒的转速也就越大;脱粒滚筒的直径越小,滚筒转速也越大,因此在设计脱粒滚筒时,需要根据脱粒技术要求确定滚筒脱粒的线速度,从而确定合适的滚筒转速。脱粒滚筒转速由式(3)计算。

$$N = \frac{60v}{\pi d} \quad (3)$$

式中: N ——脱粒滚筒的转速, r/min ;

v ——脱粒滚筒钉齿的线速度,轴流钉齿式脱粒滚筒的线速度一般为 $27 \sim 32 \text{ m/s}$,钉齿打击式的脱粒方式,脱粒滚筒的线速度太高会增加破碎率,太低则会影响脱粒的效率,根据试验数据,本设计中 $v = 31 \text{ m/s}$;

d ——脱粒滚筒齿顶圆的直径,由脱粒滚筒直径和钉齿工作高度可知 $d = 570 \text{ mm}$ 。

代入数值可得,脱粒滚筒的转速 $N \approx 1\,040 \text{ r/min}$,符合一般脱粒滚筒转速范围在 $940 \sim 1\,100 \text{ r/min}$ 的设计要求。

由此,确定脱粒滚筒的长度和直径后,再根据脱粒滚筒上单个钉齿的脱粒能力可确定脱粒滚筒的生产率,其由式(4)计算。

$$E_t = \frac{MNLq_0}{60} \quad (4)$$

式中: E_t ——脱粒滚筒的生产率, kg/s ;

q_0 ——单个钉齿的脱粒能力,与钉齿类型有关,一般 $q_0 = 0.02 \sim 0.04 \text{ kg/s}$,本设计中取 $q_0 = 0.02 \text{ kg/s}$ 。

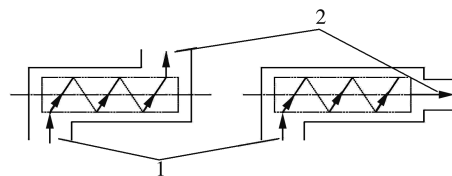
代入数值可得,脱粒滚筒的生产率 $E_t = 1.8 \text{ kg/s}$ 。

凹板筛网除配合脱粒滚筒起到脱粒作用外,还起到了使大部分籽粒快速分离的作用,可避免和减少脱粒后籽粒的破损,也减轻了脱粒装置的负担,因此在设计中应尽可能地加大凹板筛网的有效分离面积,从而提高凹板筛网的通过性,所以凹板筛网包角 α 越大,脱粒效果越好,但脱粒的功耗也增大,现有脱粒机械的凹板筛网的包角 α 一般为 $100^\circ \sim 240^\circ$,在满足脱粒效果的前提下,本设计中确定凹板筛网的包角 $\alpha = 216^\circ$ 。

2.2.2 脱粒装置的布置形式

按作物沿脱粒滚筒的运动方向,脱粒装置主要分为切流型、轴流切线型和轴流一切线—径向型三种类型。

切流型指谷物被脱粒滚筒抓取后,垂直于滚筒轴沿脱粒滚筒的切线方向运动而不发生轴向移动,脱粒后的茎秆也沿切线方向离开脱粒滚筒,该型式的脱粒时间短、生产率高,但为了脱粒干净滚筒必须要有较高的圆周速度以增强脱粒能力;轴流切线型指作物随脱粒滚筒作切线回转运动的同时还沿着轴向移动,其合成运动的轨迹为螺旋线,使谷物脱粒时间延长,从而可提高脱净率,该型式脱粒后的茎秆可通过两种方式排出,一种是从脱粒滚筒末端沿切线方向被排出,另一种是从脱粒滚筒轴端方向被排出;轴流一切线—径向型脱粒装置的脱粒滚筒一般呈锥形,作物随滚筒作切线回转运动的同时还沿着轴向和径向运动,其合成运动的轨迹为圆锥螺旋线,也可延长脱粒时间,但由于脱粒滚筒为锥形,直径在逐渐增大的同时圆周速度也逐渐加大,所以茎秆的破碎比较严重,使清选分离的难度加大。本设计采用轴流切线型中的径向喂入、径向排出作为脱粒装置的布置形式^[15],其布置形式如图4所示。



(a) 径向喂入,径向排出 (b) 径向喂入,轴向排出

图4 脱粒装置的布置形式

Fig. 4 Arrangement form of threshing device cloth

1. 喂料口 2. 排草口

本设计采用的钉齿滚筒式轴流切线型脱粒装置抓取谷物能力强,脱净率高、破损率低,对不均匀喂入和较潮湿谷物都有很好的适应性,既能脱粒又能分离,而且茎秆中夹带籽粒少、分离能力强。

2.2.3 钉齿设计

脱粒滚筒上的脱粒元件主要为各种形式的钉齿,工作时作物被钉齿抓取后进入脱粒滚筒和凹板筛网之间的脱粒间隙,在钉齿打击及钉齿顶部与凹板筛网的搓擦作用下进行脱粒作业,所以,钉齿在脱粒滚筒的排列和分布要均衡合理,以保证作物不会瞬间被推向一侧,有利于整个脱粒装置的动静平衡。

经试验比较可知,采用圆柱形钉齿效果较好,为充分发挥每个钉齿的作用,本设计钉齿脱粒端齿形略向后弯曲,以螺旋方式均匀排列固定在横板上,有利于作物秸秆和籽粒的轴向移动,也防止了秸秆在脱粒滚筒上的缠绕,同时还增加了脱粒作业的时间,可提高脱净率、降

低破碎率且实现负荷均匀和能耗低的效果^[16]。钉齿结构如图 5 所示。

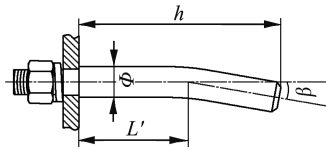


图 5 钉齿结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of nail teeth

如图 5 所示,钉齿直径 $\Phi = 12$ mm,钉齿工作高度 $h = 70$ mm,钉齿竖直端长度 $L' = 40$ mm,设计钉齿脱粒端的弯曲角度 $\beta = 10^\circ$,以增加钉齿旋转后的力度和提高脱粒能力,本设计中钉齿采用淬火硬度 HRC55—65 的锰钢制造,从而增加耐磨性和抗疲劳性,提高钉齿的使用寿命和性能。脱粒滚筒上钉齿的数量直接影响脱粒机的生产效率,钉齿数量 Z 由式(5)确定。

$$Z \geq \frac{q}{q_0} \quad (5)$$

式中: Z ——脱粒滚筒上钉齿的数量,个;

q ——设计喂入量,本设计中 $q = 1$ kg/s;

q_0 ——单个钉齿的脱粒能力,本设计中 $q_0 = 0.02$ kg/s。

代入数值可得,脱粒滚筒的钉齿的数量 $Z \geq 50$ 个,为使钉齿均匀排列固定在脱粒滚筒上的 6 条横板上,取钉齿数量 Z 为 54 个。

2.3 清选装置

清选装置由振动筛和风机组成,主要是利用被清选对象各组成部分之间的物理机械特性差异将其分离。经脱粒装置分离出的籽粒中混有碎茎秆、糠皮、颖壳和灰尘等夹杂物,需要通过清选装置将混合物中的夹杂物排出机具外,分离出干净的籽粒。清选装置类型主要有气流式、筛子式和气流筛子组合式,气流式是按照籽粒混合物各组成部分不同的空气动力特性进行清选;筛子式指利用籽粒混合物各组成部分的尺寸特性的差异进行分离和清选,主要根据籽粒的大小、形状等设计适当的筛孔达到筛选目的;气流筛组合式指利用混合物各组成部分不同的空气动力特性和尺寸特性将风机和振动筛配合进行分离和清选,该组合形式的清选效果好,在多数脱粒机和联合收获机普遍采用,本设计采用气流筛子组合式清选装置。

2.3.1 振动筛偏心振动机构设计

振动筛偏心振动机构主要包括簸动筛、簸动筛副筛、传动皮带、偏心驱动皮带轮、调节推拉杆、拐臂、排粮槽等部件,其中簸动筛为细筛网和运送筛,簸动筛副筛为粗筛网和分离筛,设计振动筛机构与水平面的倾斜角 $\gamma = 15^\circ$,可保证作物籽粒运送的流畅性。振动筛

偏心振动机构结构示意图如图 6 所示。

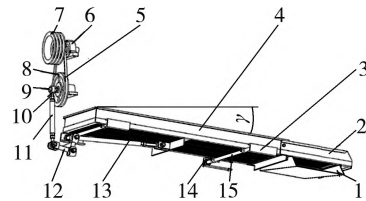


图 6 振动筛偏心振动机构结构示意图

Fig. 6 Structure diagram of eccentric vibration mechanism of vibrating screen

1. 排粮槽 2. 簸动筛副筛 3. 机架 4. 簸动筛 5. 传动皮带
6. 轴承座 7. 主动皮带轮 8. 偏心驱动皮带轮 9. 偏心轴
10. 偏心套 11. 调节推拉杆 12. 拐臂 13. 簸动筛推拉杆
14. 滚动轴承 15. 簸动筛支撑轴

工作时,动力经主动皮带轮和传动皮带传至偏心驱动皮带轮,当偏心驱动皮带轮做旋转运动时,偏心驱动皮带轮转动并带动偏心轴和偏心套一起转动,使调节推拉杆做上下往复运动,从而带动拐臂做摇摆运动,进而使簸动筛推拉杆带动簸动筛做往复簸动,簸动筛的前后两根簸动筛支承轴两端分别有两盘滚动轴承安装在机架槽钢内,可使簸动筛和簸动筛副筛在机架上方做前后往复簸动运动,从而完成作物籽粒脱粒清选的全过程。

2.3.2 偏心振动机构设计

偏心振动机构主要由偏心驱动皮带轮、偏心轴、偏心套、调节推拉杆、拐臂、簸动筛机架连接座、螺杆、簸动筛推拉杆等部件组成,其结构如图 7 所示。

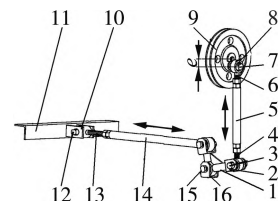


图 7 偏心振动机构结构示意图

Fig. 7 Structure diagram of eccentric vibration mechanism

1. 拐臂 2. 拐臂铰接 U 型支架 3. 拐臂铰接销轴 4. 拐臂螺栓
5. 调节推拉杆 6. 偏心套 7. 偏心轴 8. 偏心套
9. 偏心驱动皮带轮 10. 簸动筛机架连接座 11. 簸动筛机架
12. 簸动筛铰接销轴 13. 螺杆 14. 簸动筛推拉杆
15. 拐臂支承轴 16. 拐臂支承轴

偏心套与拐臂铰接 U 型支架之间装有一调节推拉杆,拐臂两端的拐臂铰接 U 型支架通过拐臂铰接销轴分别与调节推拉杆和簸动筛推拉杆连接,簸动筛推拉杆再经螺杆和簸动筛铰接销轴与簸动筛机架铰接,当偏心驱动皮带轮做旋转运动,调节推拉杆在偏心轴、偏心套的作用下做上下往复运动,使拐臂绕拐臂支承架内的拐臂支承轴做摇摆运动,从而带动簸动筛推拉杆做往复运动,在簸动筛推拉杆的作用下实现簸动筛的往复簸动。根据机具高度尺寸,设计调节推拉杆长度为 200 mm,根据生产实际可通过调节拐臂螺栓和

偏心套螺杆在调节推拉杆内的距离,实现 240 ~ 360 mm 范围内的长度调整;为防止偏心套与偏心驱动皮带轮发生干涉,设计偏心套安装在距偏心驱动皮带轮 14 mm 的偏心轴端,经大量疲劳试验和偏心振动机构整体尺寸,设计偏心距 $e=46$ mm;为确保振动筛机构与水平面的倾斜角度,设计簸动筛推拉杆长度为 420 mm,配合更换的不同振动筛网,可通过调节螺杆长度,实现不同频率和幅度的簸动,以满足不同作物籽粒簸动清选的需求。

2.3.3 振动筛机构设计

振动筛的作用是使作物籽粒和振动筛面之间、以及籽粒和杂质混合物之间都有合适的相对运动,使各组成物分离的同时,尽可能使需要的作物籽粒全部通过筛孔,而杂质混合物则在振动筛的作用下运送到振动筛末端。本设计选择结构简单、清选能力好的往复式振动筛,其主要由簸动筛、簸动筛副筛、排粮槽、簸动筛副筛排草口、振动筛机架等部件组成。振动筛机构的结构示意图如图 8 所示。

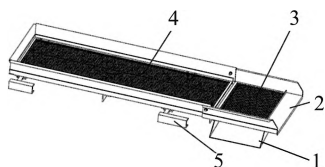


图 8 振动筛机构结构示意图

Fig. 8 Structure diagram of vibrating screen mechanism

1. 排粮槽 2. 簸动筛副筛排草口 3. 簸动筛副筛
4. 簸动筛 5. 振动筛机架

根据脱粒机的整体宽度尺寸,本设计中确定振动筛的宽度 $B=480$ mm。振动筛的长度越长则分离效果越好,但也要考虑机体尺寸的紧凑性。振动筛的长度可由式(6)^[17]计算。

$$L_s = \frac{Q}{Bq_s} \quad (6)$$

式中: L_s ——振动筛的长度,mm;

Q ——脱粒后混合物的质量,kg;

B ——振动筛的宽度,一般为接近于脱粒装置的宽度,本设计中 $B=480$ mm;

q_s ——振动筛单位面积可以承担的脱粒后混合物的喂入量,一般为 $1.5 \sim 2$ kg/s · m²,本设计中 $q_s=1.5$ kg/s · m²。

$$Q = E_t(1 - \delta\eta) \quad (7)$$

式中: δ ——作物秸秆占喂入脱粒机作物总质量的比值,本设计中 $\delta=0.5$;

η ——脱粒装置的工作特性系数,本设计根据小麦籽粒取 $\eta=0.6$ 。

根据式(6)和(7)可得

$$L_s = \frac{E_t(1 - \delta\eta)}{Bq_s} \quad (8)$$

代入数值可得,振动筛的长度 $L_s=1750$ mm,为便于整机布局和振动筛安装,取 $L_s=1720$ mm,按簸动筛长度与簸动筛副筛长度之比为 3:1 确定簸动筛长度为 1280 mm、簸动筛副筛长度为 430 mm,从而簸动筛设计尺寸为 1280 mm × 480 mm,簸动筛副筛设计尺寸为 430 mm × 480 mm。

本设计的簸动筛和簸动筛副筛设计为网眼筛形式,采用金属丝编织而成的编织筛,其制造简单,具有气流阻力小、有效面积大、生产率高的特点,由于不同作物籽粒大小尺寸的不同,筛网眼的尺寸也有所不同,本设计以小麦籽粒为例,设计簸动筛网眼采用 $\Phi 0.6$ mm 的金属丝、网眼尺寸为 2 mm × 2 mm 的方孔,设计簸动筛副筛采用 $\Phi 0.7$ mm 的金属丝、网眼尺寸为 7 mm × 7 mm 的方孔,可保证作物籽粒在簸动筛上的簸动运送和在簸动筛副筛上的筛网眼滤出,实现籽粒和碎茎秆、穗头等杂质的簸动分离。

2.3.4 排粮槽设计

排粮槽布置在振动筛机构后端的正下方,排粮槽的倾斜角度 θ 直接影响籽粒下落时的均匀程度, θ 过大时籽粒分散效果差, θ 过小时籽粒下落不顺畅、容易造成阻塞或下落的不均匀,而排粮槽的倾斜角度 θ 由籽粒自然休止角度和籽粒下落时与铁板的摩擦角来确定。而小麦籽粒的自然休止角一般为 $23^\circ \sim 38^\circ$,在相同水分条件下,小麦的内摩擦角为 $21.21^\circ \sim 37.67^\circ$,小麦与铁板的摩擦角系数为 $0.25 \sim 0.63$ 。排粮槽的结构示意如图 9 所示。本设计取小麦的自然休止角为 25° 、小麦的内摩擦角为 22° ,由于小麦籽粒间的摩擦系数大于小麦籽粒与铁板的摩擦系数,所以小麦从簸动筛副筛的筛网眼下落在排粮槽铁板上的自流下滑的角度 $\theta < 22^\circ$,已知振动筛机构与水平面的倾斜角度 $\gamma=15^\circ$,根据多次试验调整后确定排粮槽的倾斜角度为 $\theta=6^\circ$ 时,作物籽粒下落的流畅性和降低残留率的效果最理想。

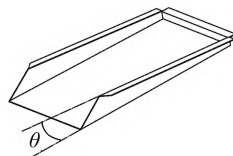


图 9 排粮槽结构示意图

Fig. 9 Structure diagram of the grain discharge trough

3 作业试验

3.1 试验内容

为验证所设计的 5TZ-900 型振动筛清选脱粒机的作业性能、作业效果和主要技术参数是否满足设计

要求和相关标准要求,试验在张掖市甘州区党寨镇进行,选用收割晾晒后的小麦为试验作物,根据机具配套的电动机功率为 7.5 kW、额定转速 1 400 r/min 的实际,采用额定电压为 380 V、额定电流为 25~100 A 的三相动力电。

根据相关标准要求,考核清选脱粒机的破碎率、含杂率、未脱净率、总损失率等性能指标分别是否满足不大于 1.2%、1.5%、1.0% 和 1.5% 的技术要求;测定试验样机的脱粒滚筒转速是否在 940~1 100 r/min 的设计值之间;检测机具作业效率是否在 800~1 200 kg/h 的设计值之间;测定试验样机的安全性能噪声是否满足不大于 88 dB(A) 的标准要求;考核机具对试验作物水份、草谷比等的适用能力,即试验物料在满足籽粒草谷比为 0.8~1.2、含水率为 15%~20% 的试验条件下机具的作业性能等。

3.2 试验条件和方法

试验前先将清选脱粒机固定在有三相电源且通风防火的试验场地,而后接通电源使机具空运转检查有无磨刮现象或异常声响,确定机具各部件运转正常并处于良好状态后方可进行性能试验,作业过程中采用人工均匀全喂入方式不间断喂入。试验过程中,根据相关标准要求使用皮尺、粮食水分测定仪、台秤、电子天平、数字转速表和噪声振动测量仪等仪器测量基本数据。试验所需检测仪器如表 2 所示。

表 2 试验检测仪器
Tab. 2 Test instruments

名称	型号	量程
皮尺	—	50 000 mm
粮食水分测定仪	QCS-3Z	6%~35%
台秤	TGT-100	0~100 kg
电子天平	BT223S	0~220 g
电子秒表	HS-30	0~24 h
数字转速表	DM6234P+	2.5~99 999 r/min
噪声振动测量仪	AWA5661	27~140 dB(A)

依据 GB/T 5982—2017《脱粒机 试验方法》和 JB/T 13425—2018《脱粒机 可靠性评定试验方法》等标准进行性能试验,以机具作业后作物籽粒的破碎率、含杂率、未脱净率、总损失率和作业效率为性能评价指标,破碎率 Z_p 、含杂率 Z_z 和未脱净率 S_w 计算如式(9)~式(11)所示。

$$Z_p = \frac{W_p}{W_x} \times 100\% \quad (9)$$

$$Z_z = \frac{W_{xz}}{W_{xh}} \times 100\% \quad (10)$$

$$S_w = \frac{W_w}{W} \times 100\% \quad (11)$$

式中: W_p ——小样中破碎籽粒质量,kg;

W_x ——小样籽粒质量,kg;

W_{xz} ——小样杂质质量,kg;

W_{xh} ——小样混合籽粒质量,kg;

W_w ——未脱净损失籽粒质量,kg;

W ——总籽粒质量,kg。

机具作业的总损失率由未脱净损失籽粒质量、夹带损失籽粒质量、清选损失籽粒质量及飞溅损失籽粒质量总和与总籽粒质量的比值计算,而总籽粒质量包括排粮槽籽粒出口籽粒质量、簸动筛副筛排草口籽粒质量、未脱净损失籽粒质量、夹带损失籽粒质量、清选损失籽粒质量、飞溅损失籽粒质量及二次处理籽粒质量之和。总损失率 S 、总籽粒质量 W 和排粮槽籽粒出口籽粒质量 W_c 由式(12)~式(14)计算。

$$S = \frac{W_w + W_j + W_q + W_f}{W} \times 100\% \quad (12)$$

$$W = W_c + W_{ci} + W_w + W_j + W_q + W_f + W_e \quad (13)$$

$$W_c = W_h(1 - Z_z) \quad (14)$$

式中: W_{ci} ——簸动筛副筛排草口籽粒质量,kg;

W_j ——夹带损失籽粒质量,kg;

W_q ——清选损失籽粒质量,kg;

W_f ——飞溅损失籽粒质量,kg;

W_e ——二次处理籽粒质量,kg;

W_h ——排粮槽籽粒出口混合籽粒质量,kg。

农业机械的作业效率是指机具在单位作业时间内完成的作业量,即脱粒机在单位作业时间内脱出的籽粒质量,本设计中机具脱出的籽粒质量包括排粮槽籽粒出口的籽粒质量和簸动筛副筛排草口的籽粒质量之和,机具的作业效率 E 可由式(15)计算。

$$E = \frac{W_c + W_{ci}}{t} \times 3.6 \quad (15)$$

式中: t ——工作时间,s。

3.3 试验结果与分析

在试验过程中被脱粒作物采用人工均匀全喂入方式喂入,试验时喂入量应为设计喂入量的 0.9~1.1 倍,先对试验作物小麦进行草谷比和籽粒含水率测定,通过电子天平测量作物茎秆质量和籽粒质量 5 次,计算其草谷比后取平均值为 0.9;通过粮食水分测试仪测量籽粒含水率 5 次,计算其平均值为 16.2%,测定结果满足相关标准规定的试验作物籽粒草谷比为 0.8~1.2、含水率为 15%~20% 的条件要求。试验作物的草谷比和籽粒含水率测量结果如表 3 所示。

机械的噪声除了损伤听力以外,还会引起其他人身损害,因此农机作业的噪声必须满足标准要求,由于试验的清选脱粒机以电动机为动力,所以选定位于距

机具表面 1 m、跟地面高度 1.5 m 的前、后、左、右四个点为测量点,在机具空载运转正常并处于良好状态后测定其空载运转噪声,声级计用 A 计权慢档,在每点进行 3 次噪声测定,取其平均值为噪声值;背景噪声是被测机具不工作情况下测得的声压级,当噪声测量值

超出背景噪声值大于 10 dB 时,不考虑背景噪声的影响。本设计机具为有分离、清选功能的人工全喂入筒式脱粒机,所以空载运转噪声应不大于 88 dB(A),测定机具空载运转噪声平均值为 79.8 dB(A),符合相关标准的技术要求。机具噪声检测结果如表 4 所示。

表 3 试验作物的草谷比和籽粒含水率
Tab. 3 Grass-grain ratio and grain moisture content of experimental crops

测定项目	第 1 次	第 2 次	第 3 次	第 4 次	第 5 次	测定结果(平均)	技术要求
茎秆质量/g	381	392	415	374	383	389	—
籽粒质量/g	418	431	462	410	422	428	—
草谷比	0.91	0.90	0.89	0.91	0.91	0.9	0.8~1.2
籽粒含水率/%	16.3	15.9	15.2	17.2	16.4	16.2	15~20

表 4 5TZ-900 型振动筛清选脱粒机的噪声检测结果
Tab. 4 Noise detection results of 5TZ-900 vibrating screen cleaning threshing machine dB(A)

测定项目	背景噪声	实测值			平均值	修正后值	平均声压级 L_{pA}	技术要求
		第 1 次	第 2 次	第 3 次				
机具前方	52.0	79.9	80.4	79.8	80.0	80.0	79.8	≤88
机具后方	52.0	79.8	79.6	79.5	79.6	79.6		
机具左方	52.0	79.7	79.9	79.6	79.7	79.7		
机具右方	52.0	79.8	80.3	79.7	79.9	79.9		

在清选脱粒机的作业性能试验中,按试验机具设计值中每小时最大处理量的 5% 左右选取 3 组不同重量的小麦试验作物,分别进行清选脱粒作业,试验机具达到正常作业状态后,采用数字转速表在脱粒滚筒轴轴端测定滚筒转速 3 次后取平均值;从排粮槽籽粒出口、簸动筛副筛末端排草口、风机排杂出口、秸秆导向出口等处同时接取样品,直至取样结束时各取样口同时停止取样;分 3 次从排粮槽籽粒出口接取的全部混合籽粒中随机取小样 100 g,再从小样混合籽粒中选出其中的破碎籽粒、包壳籽粒和其他杂质;从簸动筛副筛末端排草口接取的样品中选出未脱净籽粒和夹带籽粒,选出清选口和二次处理口样品中的所有籽粒,选出风机排杂出口样品中的所有籽粒,收集取样时间内溅出机外的籽粒,分别进行称重记录后对记录数据和测量值根据式(9)~式(15)性能试验方法和计算公式分别进行计算,以重复 3 次试验的平均值计算出破碎率、含杂率、未脱净率、总损失率及作业效率等最后的测试结果。清选脱粒机试验结果如表 5 所示。

由表 3、表 4 和表 5 的作业性能试验结果可知,本设计机具空载运转的噪声测量结果为 79.8 dB(A),在试验物料的草谷比为 0.9、籽粒含水率为 16.2% 和机具的滚筒转速为 1 040 r/min 的条件下,机具作业后的破碎率、含杂率、未脱净率、总损失率和作业效率分别为 0.94%、1.04%、0.93%、1.36% 和 1 120 kg/h,各项

指标皆优于相关技术标准。

表 5 5TZ-900 型振动筛清选脱粒机试验结果
Tab. 5 Test results of 5TZ-900 vibrating screen cleaning threshing machine

测定项目	第 1 次	第 2 次	第 3 次	试验结果(平均)	技术要求
试验时间/s	119	135	108	120.7	≥10
喂入量/(kg·s ⁻¹)	1.06	1.03	0.98	1.02	0.9~1.1
滚筒转速/(r·min ⁻¹)	1 040	1 040	1 040	1 040	940~1 100
破碎率/%	0.93	0.87	1.01	0.94	≤1.2
含杂率/%	1.09	0.98	1.05	1.04	≤1.5
未脱净率/%	0.94	0.89	0.97	0.93	≤1.0
总损失率/%	1.43	1.37	1.29	1.36	≤1.5
作业效率/(kg·h ⁻¹)	1 152	1 085	1 123	1 120	800~1 200

对于破损率指标,除了作物品种、籽粒硬度以及含水率外,机具转速过高和籽粒在脱粒装置内停留时间太长等也会使破损率增高,在机具的滚筒转速为 1 040 r/min、满足设计要求的条件下,试验中 3 次作业的破损率为 0.93%、0.87%、1.01%,均低于相关标准的要求,平均破碎率为 0.94%;对于有清选功能的脱粒机,脱粒时不干净和筛网过滤效果不佳都会使含杂率过高,本设计中采用凹板筛网小孔的初清、簸动筛簸动和风机吸吹的再清,簸动筛副筛的簸动和筛网眼过滤

的三清,极大地降低了机具作业的含杂率,试验中含杂率平均为1.04%;本设计采用钉齿滚筒式轴流切线型脱粒装置,相比传统脱粒机提高谷物抓取能力,降低未脱净率,对不均匀喂入和较潮湿作物的适应性也提高,试验中的未脱净率平均为0.93%;随着破碎率和未脱净率的降低,机具作业的总损失率也会降低,本次试验中机具作业的总损失率平均为1.36%、平均生产效率为1120 kg/h,各项技术性能指标均达到设计要求。

4 结论

1) 设计的脱粒装置中脱粒滚筒直径为500 mm、长度为900 mm,脱粒滚筒上钉齿总数为54个,钉齿直径为12 mm、工作高度为70 mm,且钉齿脱粒端有10°的弯曲角度,在保证分离性能好、脱净率高和籽粒破碎率尽可能小的前提下,脱粒机具的通用性好、功耗较低,解决了脱粒滚筒规格尺寸不合理影响脱净率和破碎率,以及作物茎秆对脱粒滚筒的缠绕问题。

2) 该振动筛偏心振动机构结构简单紧凑,其振动筛均为清选能力较好的往复式簸动筛,在簸动筛和簸动筛副筛往复簸动运动下,可使作物籽粒与碎茎秆、穗头等细小杂质边分离边均匀的向前簸动输送,在保证作物籽粒清选分离效果的同时可满足籽粒运送的流畅性。

3) 通过性能试验可知,机具空载运转时的噪声测量结果为79.8 dB(A),在试验作物的草谷比满足0.8~1.2、含水率满足15%~20%之间和机具的滚筒转速满足940~1100 r/min的条件时,机具作业的破碎率为0.94%,含杂率为1.04%,未脱净率为0.93%,总损失率为1.36%,生产效率为1120 kg/h,各项性能指标达到作业要求和相关标准要求。

4) 5TZ-900型振动筛清选脱粒机安装移动方便,适用于甘肃丘陵山区梯田等中小地块小麦、燕麦等作物分段收获后的机械化脱粒,为甘肃等西部山区农户庭院内机械化脱粒提供机具保障,也为推进山区家庭种植粮食作物机械化作业的快速发展和有效减轻农户脱粒作业的劳动强度和提高脱粒作业效率提供技术支撑。

参 考 文 献

[1] 张正中, 谢方平, 田立权, 等. 国外谷物联合收割机脱粒分离系统发展现状与展望[J]. 中国农机化学报, 2021, 42(1): 20-29.
Zhang Zhengzhong, Xie Fangping, Tian Liqun, et al. Current situation and development trend of threshing and separating system of international grain combine harvester [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2021, 42(1): 20-29.

[2] 唐怀壮, 陈秀生, 薛志原, 等. 谷物收获机脱粒系统的发

展[J]. 中国农业信息, 2018, 30(5): 32-39.

[3] 邓跃明. 5TX-40型稻麦脱粒机的研究设计[J]. 中国农机化学报, 2013, 34(2): 77-80.
Deng Yueming. Research and design of 5TX-40 rice-wheat thresher [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2013, 34(2): 77-80.

[4] 王晓东, 王合. 5T-4型玉米脱粒清选机的研究设计[J]. 农业机械, 2012(34): 140-141.

[5] 赵武云, 戴飞, 张锋伟, 等. 5TYJ-10A玉米种子脱粒机作业性能试验[J]. 农业现代化研究, 2017, 38(5): 907-913.
Zhao Wuyun, Dai Fei, Zhang Fengwei, et al. Performance test of the type of 5TYJ-10A corn seed thresher [J]. Research of Agricultural Modernization, 2017, 38(5): 907-913.

[6] 孙继东. 5ZTL-300型水稻种子脱粒机的研制[J]. 农业科技与装备, 2021(6): 48-49.

[7] 王旖旎, 李逢振, 黄通灵. 新型玉米脱粒机的设计与实现[J]. 中国新技术新产品, 2021(9): 80-82.

[8] 侯梦魁. 水稻脱粒机装置创新结构设计[J]. 南方农机, 2020, 51(16): 32-34.

[9] 马丽华, 朱春梅, 赵西伟. 挤搓式玉米脱粒机脱粒装置的改进与试验[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(17): 252-256.

[10] 张中锋, 石林雄, 闫典明, 等. 9ZRF-300型铡草揉草粉碎机研究与设计[J]. 中国农机化学报, 2018, 39(12): 59-64.
Zhang Zhongfeng, Shi Linxiong, Yan Dianming, et al. Research and design of 9ZRF-300 slot and knead grinder [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2018, 39(12): 59-64.

[11] 王晓莉. 5TH-130型槐米脱粒机设计与试验[J]. 农业工程, 2018, 8(6): 115-118.

[12] 寇元哲, 罗宏博. 柔性揉搓式小杂粮脱粒机滚筒优化设计[J]. 农业机械, 2020(3): 109-110.

[13] 张建, 甘露萍, 官万武. 荞麦脱粒装置的设计及有限元分析[J]. 中国农机化学报, 2019, 40(7): 7-12.
Zhang Jian, Gan Luping, Guan Wanwu. Design and finite element analysis of buckwheat threshing device [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2019, 40(7): 7-12.

[14] 班春华. 钉齿滚筒式脱粒装置的设计[J]. 农业科技与装备, 2013(1): 17-18.

[15] 林蜀云, 刘伟, 张明. 5TG-100A型油菜脱粒机结构设计[J]. 安徽农业科学, 2021, 49(7): 208-211.

[16] 赵瑞男, 毛欣, 衣淑娟, 等. 裸燕麦脱粒与分离装置的两端脱粒滚筒对比试验研究[J]. 中国农机化学报, 2020, 41(8): 7-12.
Zhao Ruinan, Mao Xin, Yi Shujuan, et al. Comparative experimental study on two threshing drums of naked oat threshing and separation device [J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2020, 41(8): 7-12.

[17] 瞿云飞, 赵武云, 赵一鸣, 等. 全喂入胡麻脱粒清选机的设计与试验[J]. 浙江农业学报, 2022, 34(4): 831-840.