

自走式藜麦联合收割机设计及试验

史瑞杰¹, 戴飞¹, 赵武云¹, 杨发荣², 张锋伟¹, 赵一鸣¹,
曲浩¹, 王天福¹, 郭军海¹

(1. 甘肃农业大学机电工程学院, 兰州 730070; 2. 甘肃省农业科学院 畜草与绿色农业研究所, 兰州 730070)

摘要:为提高藜麦机械化收获水平,解决普通谷物联合收割机收获时损失大、含杂高、喂入不畅等问题,针对收获期藜麦植株特性设计了一种大型自走式藜麦联合收割机。该机采用扩口式小行距链齿喂入割台、组合式纵轴流脱粒滚筒、专用编织筛凹板、双层往复式异向振动筛等装置,配合宽体过桥、脱粒滚筒无级变速和大脱分空间等设计实现了藜麦的顺畅喂入和高效脱粒分离,对关键部件进行了设计分析,并进行了田间试验。田间试验结果表明:当藜麦籽粒含水率为 14.42% 时,脱净率为 96.83%、含杂率为 4.41%、破损率为 0.2%、割台损失率为 1.14%、夹带损失率为 1.73%、清选损失率为 1.09%、飞溅损失率为 0.16%、总损失率为 4.13%;作业期间机具运行平稳,满足藜麦机械化收获要求。本文研究成果可为藜麦联合收割机设计及试验提供一定参考。

关键词:农业机械;联合收割机;藜麦;割台;脱粒滚筒

中图分类号:S225.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5497(2023)09-2686-09

DOI:10.13229/j.cnki.jdxbgxb.20211199

Design and experiments of self-propelled *quinoa* combine harvester

SHI Rui-jie¹, DAI Fei¹, ZHAO Wu-yun¹, YANG Fa-rong², ZHANG Feng-wei¹,
ZHAO Yi-ming¹, QU Hao¹, WANG Tian-fu¹, GUO Jun-hai¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. Livestock Grass and Green Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou 730070, China)

Abstract: To improve the mechanization harvesting level of *quinoa* and solve the problems of a significant loss rate, high impurity rate, and poor feeding during harvesting of ordinary rice-wheat combine harvester, according to the characteristics of *quinoa* plants during the harvesting period, a sizeable self-propelled *quinoa* combine harvester was designed. The machine used flaring type small row spacing chain teeth feeding into the header, combined longitudinal axial flow threshing cylinder, unique woven screen concave, double reciprocating vibrating screen and other devices, cooperation wide bridge, threshing cylinder CVT regulation, and excellent space design to realize the smooth *quinoa* feeding and efficient

收稿日期:2021-11-04.

基金项目:中央引导地方科技发展专项项目(ZCYD-2020-6-2);甘肃省农业农村厅科技项目(NJ2020-07);国家现代农业产业技术体系建设项目(CARS-14-1-28);甘肃农业大学伏羲青年英才培养计划项目(Gaufx-03Y01);甘肃省教育厅优秀研究生“创新之星”项目(2021CXZX-362).

作者简介:史瑞杰(1993-),男,博士.研究方向:北方特色作物机械化收获技术与装备.E-mail:aete_fcb@163.com

通信作者:赵武云(1966-),男,教授,博士.研究方向:北方旱区作物生产装备工程.E-mail:zhaowuy@gsau.edu.cn

threshing separation. Critical components for the design were analyzed, and a field experiment was carried out. The results of the field experiment showed that when the water content of *quinoa* grain was 14.42%, the threshing rate was 96.83%, the impurity rate was 4.41%, the damage rate was 0.2%, the header loss rate was 1.14%, the entrainment loss rate was 1.73%, the cleaning loss rate was 1.09%, the splash loss rate was 0.16%, the total loss rate was 4.13%. During the experiment, the machine runs smoothly and meets the mechanical harvesting of *quinoa*. This paper can provide some reference for the design and test of *quinoa* combine harvester.

Key words: agricultural machinery; combine harvester; *quinoa*; header; threshing cylinder

0 引言

藜麦(*Chenopodium quinoa* Willd.), 又称南美藜、印第安麦、奎藜、奎奴亚藜等, 一年生苋科藜亚科藜属双子叶草本植物, 原产南美洲, 距今已有5000~7000多年的历史, 具有良好的抗寒、抗旱、耐盐碱等特性^[1-4]。藜麦含有人体必需的18种氨基酸和婴儿必需的组氨酸, 富含高蛋白、胆固醇、多种维生素和矿物质, 具有低脂、低热量、低糖的特点, 已成为三高人群、糖尿病患者、孕婴的理想食品^[2-7]。

中国藜麦主要种植在甘肃、青海、内蒙古和云南等地, 藜麦种植面积呈逐年递增趋势^[2-4]。欧美国家藜麦种植面积较大, 现有的联合收割机拨禾轮转速、切割器切割速度、机具前进速度、脱粒滚筒转速、离心风机转速等均可实现无级变速, 能够根据藜麦品种、成熟状态等实现模块化参数动态调整, 进而实现藜麦联合收获^[8-10]。近年来, 海梅等^[11,12]针对普通谷物联合收割机收获藜麦清洁效果不理想、含杂率高等现象, 对藜麦脱出物空气动力学特性进行了测试和分析; 赵子龙等^[13]对浸水藜谷的机械特性进行了研究。目前, 国内市场没有藜麦专用联合收割机, 普通谷物联合收割机收获藜麦时表现出损失大、含杂高等问题。而国内大部分地区仍依靠人工种植和收获, 劳动强度大, 效率低, 成熟期藜麦暴露于潮湿的空气中24 h会发芽, 错过收获时间, 将严重影响其产量, 藜麦机械化收获水平严重影响了该产业的发展^[14-16], 研发高效低损的藜麦联合收割机至关重要^[17]。

为提高藜麦机械化收获水平, 解决藜麦联合收获难题, 本文拟设计一种大型自走式藜麦联合收割机。该机拟采用扩口式小行距链齿喂入割台、组合式纵轴流脱粒滚筒、专用编织筛凹板和双

层往复式异向振动筛等装置, 配合宽体过桥、双段式离心风机、杂余回滚筒二次复脱、脱粒滚筒无级变速调节和大脱分空间设计, 实现藜麦的顺畅喂入和高效脱粒分离, 减少割台损失, 降低籽粒含杂率, 并进行田间试验。本文以期对藜麦联合收割机的设计和试验提供一定参考。

1 藜麦种植农艺要求及植株特性

藜麦播种采用撒播、穴播和条播的方式, 根据种植地区降雨量确定覆膜与否。黄土高原雨养农业区一般以覆膜穴播为主, 播种时要求均匀播种、播深一致, 一般行距为300~600 mm, 株距为200~400 mm, 播种深度为20~30 mm, 最深不超过40 mm^[11], 土壤肥力较好地地块单穴播种2~4粒, 播种量为3 kg/hm²^[18]; 肥力较差地块每穴播种5~8粒, 播种量为6~7.5 kg/(hm²)^[19-21]。成熟期藜麦株高500~2500 mm, 果穗水平宽度为200~300 mm, 种子呈圆形药片状, 直径为1.5~2.0 mm, 千粒重为1.4~3.5 g^[21,22](见图1)。随着藜麦植株高度的增加、果穗成形, 抗倒伏能力逐渐降低^[23,24], 外加风力等外部作用会导致高秆藜麦出现大幅倒伏现象, 普通谷物联合收割机无法收割倒伏藜麦, 给藜麦机械化收获带来困难。



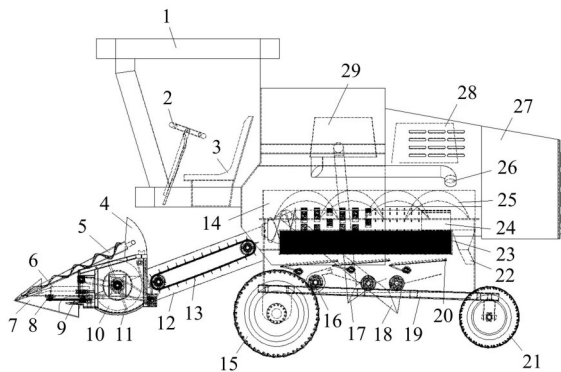
图1 藜麦

Fig. 1 *Quinoa*

2 整机结构和工作原理

2.1 整机结构

大型自走式藜麦联合收割机由 YC4A175-T300 型水冷式 4 缸 4 冲程柴油机提供动力, 整机包括切割喂入系统、脱粒分离系统、清选系统、储粮卸粮系统、行走系统、控制系统等。切割喂入系统包括扩口式小行距链齿喂入装置、输送搅龙、螺旋扶禾器、宽体过桥等; 脱粒分离系统包括三段式纵轴流脱粒滚筒、专用编织筛凹板等; 储粮卸粮系统包括螺旋输送机、粮仓、卸粮筒等。整机结构如图 2 所示, 技术参数如表 1 所示。



1-驾驶室;2-方向盘;3-座椅;4-后置防护网;5-螺旋扶禾器;6-链齿喂入装置;7-外分禾器;8-链条;9-切割器;10-输送搅龙;11-伸缩扒指;12-宽体过桥;13-输送链扒;14-脱粒滚筒;15-前轮;16-分段式离心风机;17-谷粒升运器;18-二次复脱输送机;19-底盘;20-往复式振动筛;21-后轮;22-排草口;23-编织筛凹板;24-组合式脱粒滚筒;25-导草板;26-出粮口;27-机壳;28-发动机;29-粮仓

图 2 自走式藜麦联合收割机结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of self-propelled quinoa combine harvester

表 1 自走式藜麦联合收割机技术参数

Table 1 Technical parameters of self-propelled quinoa combine harvester

参 数	数 值
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	7000×3375×3470
喂入量/(kg·s ⁻¹)	10
作业速度/(m·s ⁻¹)	0~2.68
额定功率/kW	129
额定转速/(r·min ⁻¹)	2200
滚筒参数(外径×长度)/(mm×mm)	φ600×3145
割台幅宽/mm	2800
离地间隙/mm	≥280
生产率/(hm ² ·h ⁻¹)	0.6~1.6

2.2 工作原理

藜麦植株在扩口式小行距链齿喂入装置拨齿作用下被往复式割刀切割, 再由输送搅龙、宽体过桥将藜麦植株送进脱粒滚筒进行脱粒分离。脱粒

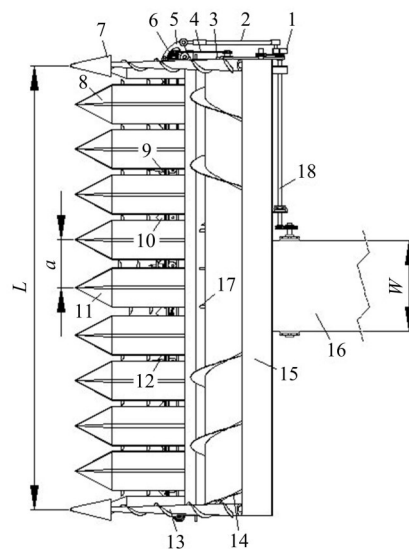
后藜麦茎秆被揉搓呈段状, 在导草板作用下排出机外。藜麦籽粒、未脱净果穗、长茎秆、短茎秆、颖壳和轻杂由专用编织筛凹板落入清选系统, 质量较轻的颖壳和轻杂被离心风机吹出机外, 藜麦籽粒由上筛落入籽粒输送机后被输送至粮仓, 短茎秆和长茎秆被上筛排出机外, 未脱净果穗落入下筛由杂余筛输送至杂余搅龙后经复脱器二次复脱, 直至完全脱粒为止。

3 关键部件设计

3.1 扩口式小行距链齿喂入割台

3.1.1 结构设计

为解决收割倒伏藜麦、高秆藜麦、不对行收获难题, 本文设计了一种扩口式小行距链齿喂入割台, 如图 3 所示。图 3 中, L 为割幅, mm; W 为宽体过桥宽度, mm, a 为内分禾器间距, mm。该割台主要由外分禾器、内分禾器、链齿喂入装置、割刀、螺旋扶禾器、输送搅龙、后置防护网、宽体过桥等组成。



1-凸轮;2-连杆;3-带轮;4-皮带轮;5-换向装置;6-锥齿轮;7-外分禾器;8-链齿喂入装置;9-链齿喂入装置传动链条;10-割刀;11-内分禾器;12-护刃器;13-螺旋扶禾器;14-输送搅龙;15-后置防护网;16-宽体过桥;17-伸缩扒指;18-动力输入轴

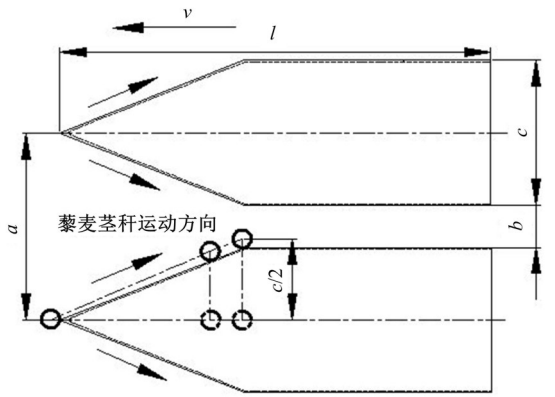
图 3 自走式藜麦联合收割机割台结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of header structure of self-propelled quinoa combine harvester

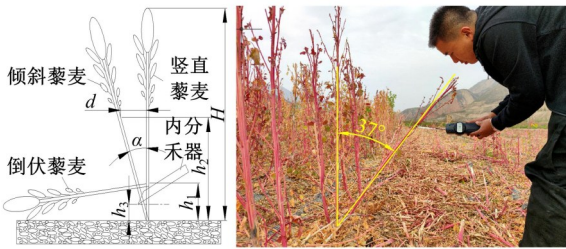
3.1.2 内分禾器参数设计

藜麦种植区域横跨黄土高原, 为保证机具适应性和收割倒伏藜麦, 内外分禾器端部应紧贴地面, 内分禾器宽度应小于藜麦茎秆最大倾斜距离。不对行收获时藜麦茎秆随内分禾器的分禾作用向

两侧倾斜(见图 4(a)),当藜麦茎秆达到最大倾斜角度 α 时发生折断现象(见图 4(b)),内分禾器的分禾宽度对割台顺畅喂入起到关键作用^[25]。图 4 中, b 为相邻内分禾器间距, mm; c 为内分禾器宽度, mm; l 为内分禾器长度, mm; d 为藜麦茎秆倾斜最大距离, mm; H 为藜麦植株高度, mm; h_1 为倒伏藜麦茎秆根茬高度, mm; h_2 为藜麦茎秆重心高度, mm; h_3 为内分禾器前端高度, mm; α 为藜麦茎秆倾斜最大角度, $^\circ$ 。



(a)内分禾器分禾示意图



(b)藜麦茎秆倾斜及折断示意图

图 4 内分禾器工作和藜麦茎秆倒伏示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the grain divider inside and stem lodging of quinoa

为保证藜麦茎秆不被折断,其倾斜最大角度 α 和最大距离 d 必须满足以下条件^[26]:

$$\begin{cases} d \leq c/2 \\ \alpha = \arctan \frac{c}{2h} \leq \theta \end{cases} \quad (1)$$

式中: h 为内分禾器的离地高度, mm; θ 为藜麦临界折断角, $^\circ$ 。

经测量 $\theta = 15^\circ \sim 37^\circ$, $h_1 = 0 \sim 200$ mm, 则取 $h_3 = 0 \sim 250$ mm, 由式(1)计算可得 $c'_{\max} \leq 361.7$ mm, 考虑到内分禾器安装方式、强度要求, 设计 $c = 260$ mm。

内分禾器长度和间距决定藜麦植株被切割后能否顺利进入割台。藜麦根部茎秆直径为 12.09~19.08 mm, 取计算用藜麦中下部茎秆平

均直径为 16.4 mm, 极限尺寸偏差为 7 mm, 考虑链齿及内分禾器存在加工工艺和安装误差, 取内分禾器间隙极限尺寸偏差为 6 mm, 根据可靠性设计方法^[27], 为保证 99% 的藜麦茎秆能被链齿送入割台, 内分禾器间距 b 应满足:

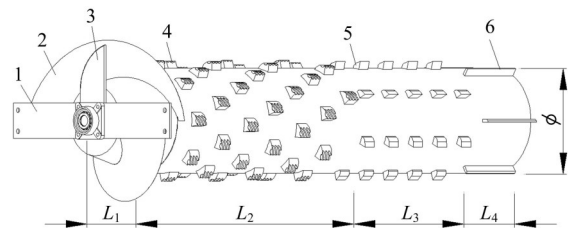
$$\begin{cases} l \geq H - h_g \\ 1 - \mu \left(\frac{b - 16.4}{\sqrt{7^2 + 6^2}} \right) \leq 0.001 \end{cases} \quad (2)$$

式中: h_g 为割茬高度, mm; μ 为标准正态分布函数。

查询标准正态分布表, 由式(2)计算得 $b \geq 38.58$ mm, 则取 $b \geq 44.58$ mm, 长 $l \geq 1300$ mm。内分禾器间隙影响割台喂入的流畅性。为保证不发生藜麦茎秆堵塞、断裂等现象, 同时考虑割台损失和拨齿结构设计, 取 $b = 60$ mm, $l = 1300$ mm。

3.2 组合式纵轴流脱粒滚筒

针对成熟期藜麦植株含水率大、草谷比大、难分离等现象, 本文采用组合式纵轴流脱粒滚筒, 由锥形螺旋喂入头、纹杆+板齿组合式脱粒滚筒组成, 脱粒段为纹杆式, 分离段为板齿式, 如图 5 所示。图 5 中, L_1 为锥形喂入段长度, mm; L_2 为脱粒段长度, mm; L_3 为分离段长度, mm; L_4 为排草段长度, mm; ϕ 为脱粒滚筒直径, mm。



1-前堵板;2-螺旋导草板;3-倒料月牙;4-纹杆脱粒块;5-板齿脱粒块;6-分离板

图 5 组合式纵轴流脱粒滚筒结构示意图

Fig. 5 Structure diagram of combined longitudinal axial flow threshing cylinder

锥形螺旋喂入头由前堵板、倒料月牙、螺旋导草板、锥形筒体和辐盘焊接而成。锥形螺旋喂入头前端直径为 400 mm, 后端 600 mm, 后端直径与脱粒滚筒直径相等, 取螺旋导草板最大直径为 650 mm。藜麦植株在螺旋导草板作用下, 以间歇螺旋形式沿脱粒滚筒轴向运动, 假设藜麦植株轴向速度恒定, 且藜麦植株轴向不可再压缩^[28], 由理论力学可知螺旋导草板与藜麦植株间存在摩擦力 F_f 和法向推力 T , 二者合力 F_0 与 T 的夹角 φ 为植株与螺旋导草板的摩擦角(见图 6)。

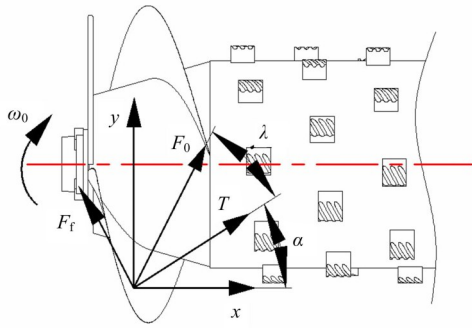


图 6 藜麦茎秆受力分析图

Fig. 6 Stress analysis diagram of quinoa stem

当最大螺旋升角 α_{\max} 和螺旋导草板摩擦角 λ 满足 $\alpha_{\max} < 45^\circ - \lambda/2 = 31^\circ$ 时,藜麦植株轴向运输速度达到最大值^[29],由此可得 L_1 满足:

$$L_1 = \pi \phi \tan \alpha < 555 \text{ mm} \quad (3)$$

参考整机空间布局设计,取 $L_1 = 300 \text{ mm}$,计算得 $\alpha = 13.43^\circ$ 。

脱粒滚筒转速 n_z 的计算公式为:

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

式中: v_z 为脱粒滚筒线速度, m/s,藜麦脱粒原件临界线速度鲜见报道,根据前期试验结果,参考大豆、高粱、玉米等作物脱粒参数设计^[30],同时考虑整机传动部件设置及功率损耗,取 $v_z = 15 \sim 25 \text{ m/s}$ 。

由式(4)计算得 $n_z = 477.46 \sim 795.77 \text{ r/min}$ 。脱粒滚筒纹杆脱粒块总数 Z 计算公式^[28]为:

$$Z \geq \frac{(1-\lambda)q_1}{0.6q_0} \quad (5)$$

式中: λ 为喂入作物中籽粒质量所占比例,取 0.25; q_1 为整机喂入量,取 10 kg/s; q_0 为单个纹杆脱粒块允许承担的喂入量,取 0.085 kg/s。

脱粒滚筒脱粒段长度 L_2 和总长度 L_g 计算公式^[29]为:

$$\begin{cases} L_2 = e(Z/K - 1) \\ L_g = L_1 + L_2 + L_3 + L_4 \end{cases} \quad (6)$$

式中: e 为纹杆顶端齿迹距,常用 25~50 mm,取 50 mm; K 为板齿螺旋头数,一般为 2~5,取 5。

由式(5)得 $Z \geq 147.06$,为保证藜麦籽粒充分脱粒,取 $Z = 148$ 。本文取 $L_1 = 300 \text{ mm}$, $L_3 = 775 \text{ mm}$, $L_4 = 220 \text{ mm}$, $\phi = 600 \text{ mm}$,由式(6)得 $L_2 = 1850 \text{ mm}$, $L_g = 3145 \text{ mm}$ 。脱粒间隙通过改变纹杆、板齿安装位置可在 15~30 mm 调整,脱粒滚筒转速在 530~800 r/min 由无级变速调节,喂入段导草板角度为 45° ,其余为 22° 。

为保证藜麦果穗完全脱粒,减少籽粒损伤,提高通过性,凹板采用专用编织筛凹板,总长为 2845 mm,包角为 180° (见图 7)。图 7 中, i 为筛条直径, mm; j 为筛条间距, mm; L_a 为编织筛长度, mm; Φ_1 为凹板宽度, mm。

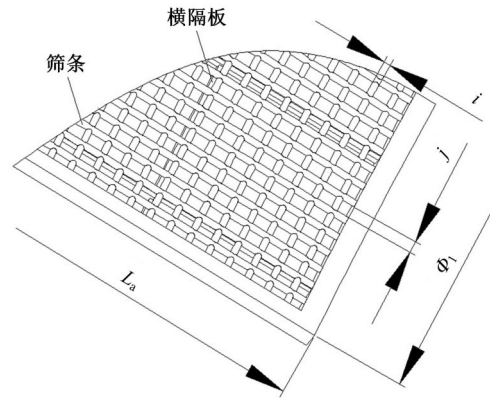


图 7 专用编织筛凹板局部放大示意图

Fig. 7 Local magnification diagram of unique woven screen concave

栅条间距 $j = 8 \text{ mm}$,筛条直径 $i = 5 \text{ mm}$,凹板锥度为 0° 。凹板总面积 S 和凹板弧长 L_a 对脱粒装置的脱粒分离能力有显著影响,其关系式为:

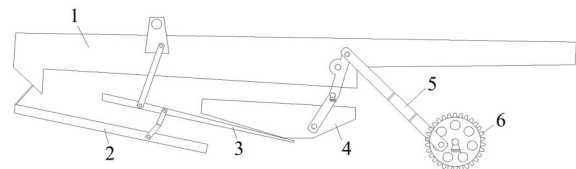
$$S = \Phi_1 L_a \quad (7)$$

由式(7)计算得 $S = 2.58 \text{ m}^2$ 。

3.3 双层往复异向振动筛

3.3.1 结构设计

藜麦收获时茎秆含水率较高,脱出物流动性差、分离难,普通谷物联合收割机收获时损失率高达 30%。为减少藜麦分离清选损失率和含杂率,同时最大程度实现藜麦茎秆饲料化,本文设计了双层往复异向振动筛(见图 8),可实现藜麦茎秆与籽粒的高效分离。



1-上筛箱;2-杂余滑板;3-籽粒滑板;4-下筛箱;5-驱动连杆;6-驱动齿轮

图 8 双层往复异向振动筛结构示意图

Fig. 8 Structure diagram of double reciprocating opposite vibrating screen

根据双层往复异向振动筛工作原理,设定上筛物料质量为藜麦脱出物中藜麦籽粒、未脱净果穗、长茎秆和短茎秆的总质量,下筛物料质量为

藜麦籽粒和未脱净果穗的总质量。为保证藜麦脱出物充分分离清选,上、下筛长度设计相等,振动筛尺寸取决于其表面积,喂入量和振动筛长度的计算公式^[30]为:

$$\begin{cases} q_2 = \rho/3600Y_1 \\ L_s = q_2(1 - \epsilon k)/(Bq_s) \end{cases} \quad (8)$$

式中: q_2 为上筛喂入量,kg/s; ρ 为双层异向振动筛生产率,取 1500 kg/h; L_s 为上筛长度,m; ϵ 为上筛上茎秆、果穗杂余占藜麦脱出物总质量比,取 0.268; k 为分离清选装置特性参数,取 0.60; B 为上筛宽度,取 0.95 m; q_s 为上筛单位面积允许承担藜麦脱出物喂入量,取 0.75 kg/(s·m²); Y_1 为藜麦联合收获时脱粒物料中籽粒质量所占比例。

由式(8)计算可得, $L_s=708$ mm, $q_2=0.6$ kg/s, $L_2=708$ mm, $q_3=0.12$ kg/s。

根据藜麦脱出物尺寸,上、下筛鳞片宽度分别设计为 10 mm、6 mm,相邻鳞片间距分别为 4 mm、2 mm;鳞片开口角度可在 0°~45°任意调节。

3.3.2 运动分析

双层往复异向振动筛筛面上脱出物受力分析如图 9 所示。图 9 中, F 为脱出物质点所受摩擦力,N; N 为脱出物质点所受支持力,N; G 为脱出物质点重力,N; P 为脱出物质点所受气流作用力,N; β 为风力方向与水平面的夹角,°; G^* 为脱粒物料质点所受系统惯性力,N; γ 为筛面倾角,°; δ 为筛面振动方向与水平面所夹锐角,°。

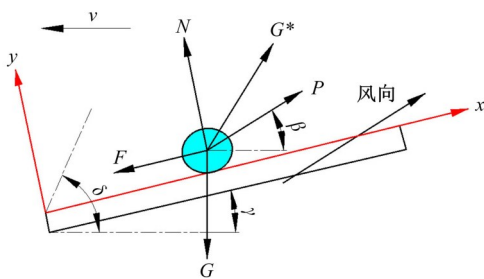


图 9 脱出物质点受力示意图

Fig. 9 Schematic diagram of particle force of threshing material

振动筛筛面运动可近似等效为往复直线运动,脱出物随筛面运动时同样受到气流作用,筛面位移 S_s 和气流作用力 P 的表达式为:

$$\begin{cases} S_s = A \sin \omega t \\ P = mk_p \xi^2 = mg \xi^2 / v_p^2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: A 为筛面沿振动方向的单振幅,mm; ω 为振动圆频率,rad/s; t 为时间,s; P 为气流对脱出物质

点的作用力,N; m 为脱出物质量,kg; k_p 为脱出物漂浮系数; ξ 为气流相对于质点的相对速度,m/s; v_p 为脱出物漂浮速度,m/s。

在振动筛和气流共同作用下,脱出物在筛面的运动形式与单颗粒定常运动有所不同。系统惯性力是脱出物在筛面产生相对运动的动力源,其力的方向决定了物料上滑、下滑的趋势。物料的上滑指数、下滑指数、脱离指数分别为:

$$\begin{cases} K_0 = \frac{A\omega^2}{g} > B_1 - C_1 \frac{\xi^2}{v_p^2} = K_1 \\ K_0 = \frac{A\omega^2}{g} < B_2 + C_2 \frac{\xi^2}{v_p^2} = K_2 \\ K_0 \cos \omega t = B_3 - C_3 \frac{\xi^2}{v_p^2} = K_3 \end{cases} \quad (10)$$

式中: K_0 为振动式运动加速度比,即定常振动指数; K_1 为脱出物上滑指数; K_2 为脱出物下滑指数; K_3 为脱出物脱离指数; B_i 、 C_i 分别为计算用常数。

由式(9)(10)可知,藜麦脱出物应具有向上、向下滑动的趋势,且不被抛离筛面,同时向下滑动距离应大于向上滑动距离,则振动筛正常工作条件为 $K_0 > K_3 > K_1 > K_2$ ^[31,32]。经试验,藜麦籽粒悬浮速度为 5.28~5.88 m/s,长茎秆速度为 2.92~3.15 m/s,短茎秆速度为 2.49~2.89 m/s,颖壳和轻杂速度为 1.56~2.1 m/s^[15],一般上筛 $A\omega^2$ 取值为(1.5~2) g ,下筛为(1~1.5) g ,曲轴半径 $r=23$ ~30 mm,转速 $n=200$ ~350 r/min^[29]。为保证藜麦籽粒及脱出物充分分离,本文取 $A=30$ mm、 $\omega=26.38$ rad/s、 $\beta=27.5^\circ$ 、 $\gamma=3.8^\circ$ 、 $\delta=26^\circ$ 、 $\varphi=19.4^\circ$ 、 $\xi=2.2$ ~2.3 m/s、 $v_p=2.89$ m/s^[15,31,32],由式(10)得 $K_0=2.12$, $K_1=0.12$ 、 $K_2=0.93$ 、 $K_3=2.02$,满足振动筛正常工作条件,同理可得下筛各参数值,同样满足振动筛正常工作条件。

随着鱼鳞筛开口角度的增大,藜麦籽粒、长茎秆、短茎秆在上、下筛筛面的运动范围逐渐缩小,脱出物向后运动的趋势逐渐增大,透筛性能逐渐增强。按照振动筛正常工作时定常指数 K 与 K_1 、 K_2 、 K_3 间的关系,鱼鳞筛开口角度应为 0°~22.5°。

4 田间试验

4.1 试验材料

自走式藜麦联合收割机作业性能试验于 2020 年 10 月 23~28 日在甘肃省武威市天祝藏族自治县松山镇进行。试验场地面积为 0.45 hm²,

所种藜麦品种为陇藜 1 号,植株高度为 1812~2236 mm,株距为 320 mm,行距为 400 mm,整株果穗圆周直径为 200~300 mm,籽粒直径为 1.5~2.2 mm,千粒重为 2.4~3.46 g,平均种植密度为 1280 株/hm²,籽粒含水率为 14.42%,茎秆含水率为 18.17%。试验前检查作业机各部件工作状态正常,调整脱粒滚筒转速为 720~750 r/min,鱼鳞筛开口角度为 12°~16°,分别对机具切割、脱粒、分离、清选、排草等功能及作业效果进行验证。

4.2 试验方法

按照国家标准要求^[33-35],保持割茬高度一致,作业流畅,试验场地按照割幅 3 m 划分为 6 等份区域,逐次进行联合收获试验,使用清洁编织袋进行取样并编号,前进距离为 25 m。作业完成后使用精度为 0.001 g 的电子天平测量样品,各参数取平均值,根据文献^[36,37]计算得出脱净率、含杂率、破损率、割台损失率、夹带损失率、清选损失率、飞溅损失率、总损失率。现场试验如图 10 所示。

4.3 试验结果

结合甘肃省藜麦种植特点,要求藜麦联合收



图 10 田间试验

Fig. 10 Field tests

割机脱净率 $\geq 95\%$,含杂率、总损失率均不超过 5%,破损率、割台损失率、夹带损失率、清选损失率均不超过 3%。按照试验所定标准,作业后割茬高度为 400 mm,杂草较少,无堵塞、功率不足等现象。人工测量后计算得出各指标值,结果如表 2 所示。联合收获后的藜麦籽粒外形完整,破损现象较少,试验指标均达到相关标准要求,试验过程中机具工作平稳、脱粒效果较好、含杂率低、破碎率极低、总损失率较小,符合藜麦联合收获标准要求,可以进行藜麦联合收获作业。

表 2 自走式藜麦联合收割机试验结果

Table 2 Test results of self-propelled quinoa combine

试验指标	脱净率/%	含杂率/%	破损率/%	割台损失率/%	夹带损失率/%	清选损失率/%	飞溅损失率/%	总损失率/%
标准值	≥ 95	≤ 5	≤ 3	≤ 3	≤ 3	≤ 3	≤ 3	≤ 5
试验结果	96.83	4.41	0.2	1.14	1.73	1.09	0.16	4.13

5 结 论

(1)为提高藜麦机械化收获水平,解决普通谷物联合收割机收获时损失大、含杂高、喂入不畅等问题,本文针对收获期藜麦植株特性,设计了一种大型自走式藜麦联合收割机。该机采用扩口式小行距链齿喂入割台、组合式纵轴流脱粒滚筒、专用编织筛凹板、双层往复异向振动筛等结构,配合宽体过桥、脱粒滚筒无级变速调节和大脱分空间设计,实现了藜麦的顺畅喂入和高效脱粒分离。阐述了藜麦联合收割机的结构组成和工作原理,对关键部件进行结构设计并进行田间试验。

(2)脱粒滚筒和双层往复异向振动筛透筛性能计算分析结果表明:脱粒滚筒转速在 530~800 r/min 内无级变速调节;双层往复异向振动筛正常工作条件为 $K_0 > K_3 > K_1 > K_2$,计算得 $K_0 = 2.12$, $K_1 = 0.12$, $K_2 = 0.93$, $K_3 = 2.02$,满足正常工作条件;鱼鳞筛开口角度应在 $0^\circ \sim 22.5^\circ$ 内选择。

(3)田间试验结果表明:藜麦籽粒含水率为 14.42% 时,脱净率为 96.83%、含杂率为 4.41%、破损率为 0.2%、割台损失率为 1.14%、夹带损失率为 1.73%、清选损失率为 1.09%、飞溅损失率为 0.16%、总损失率为 4.13%。作业期间机具运行平稳,作业指标符合试验标准,满足藜麦机械化收获要求,可以作为藜麦联合收割机使用。本文可为藜麦联合收割机设计和试验提供了一定参考。

参考文献:

- [1] Carrasco R R, Espinoza C, Jacobsen S E. Nutritional value and use of the andean crops quinoa (*Chenopodium quinoa*) and kaniwa (*Chenopodium pallidicaule*)[J]. Food Reviews International, 2006, 19(1):179-189.
- [2] 黄杰, 杨发荣, 李敏权, 等. 13 个藜麦材料在甘肃临夏旱作区适应性的初步评价[J]. 草业学报, 2016, 25(3): 191-201.
Huang Jie, Yang Fa-rong, Li Min-quan, et al. Preliminary evaluation of adaptability of 13 quinoa varieties

- ies in the linxia arid region of gansu province, China[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(3): 191-201.
- [3] 杨发荣, 黄杰, 魏玉明, 等. 藜麦生物学特性及应用[J]. 草业科学, 2017, 34(3): 607-613.
Yang Fa-rong, Huang Jie, Wei Yu-ming, et al. A review of biological characteristics, applications, and culture of *chenopodium quinoa*[J]. Pratacultural Science, 2017, 34(3): 607-613.
- [4] 袁飞敏, 权有娟, 刘德梅, 等. 藜麦植株形态及花器结构的初步观察[J]. 甘肃农业大学学报, 2018, 53(4): 49-53.
Yuan Fei-min, Quan You-juan, Liu De-mei, et al. Primary observation the plant morphologic and floral structure on *quinoa*(*Chenopodium quinoa* Willd) [J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2018, 53(4): 49-53.
- [5] 付丽红, 李晓斌. 基于岭脊分析的藜麦淀粉提取及糊化特性研究[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 299-306.
Fu Li-hong, Li Xiao-bin. Extraction and gelatinization characteristics of *chenopodium quinoa* willd starch based on ridge analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(18): 299-306.
- [6] Stikic R, Glamoclija D, Demin M, et al. Agronomical and nutritional evaluation of *quinoa* seeds (*Chenopodium quinoa* Willd.) as an ingredient in bread formulations[J]. Journal of Cereal Science, 2012, 55(2): 132-138.
- [7] González J A, Konishi Y, Bruno M, et al. Interrelationships among seed yield, total protein and amino acid composition of ten *quinoa* (*Chenopodium quinoa*) cultivars from two different agroecological regions[J]. Journal of the Science and Food Agriculture, 2012, 92(6): 1222-1229.
- [8] 陈庆文, 韩增德, 崔俊伟, 等. 自走式谷物联合收割机发展现状及趋势分析[J]. 中国农业科技导报, 2015, 17(1): 109-114.
Cheng Qing-wen, Han Zeng-de, Cui Jun-wei, et al. Development status and trend current situation of self-propelled combine harvester[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2015, 17(1): 109-114.
- [9] Fu J, Chen Z, Tian L J, et al. Review of grain threshing theory and technology[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2018, 11(3): 12-20.
- [10] 戴飞. 胡麻脱出物分离清选机理与关键技术研究[D]. 兰州:甘肃农业大学机电工程学院, 2020.
Dai Fei. Study on the separating-cleaning mechanism and key technology of flax threshing material[D]. Lanzhou: College of Mechanical and Electrical Engineering, Gansu Agricultural University, 2020.
- [11] 海梅, 杜文亮, 吴英思, 等. 藜麦脱出物空气动力学特性测试与分析[J]. 农机化研究, 2019, 41(2): 192-195, 215.
Hai Mei, Du Wen-liang, Wu Yin-si, et al. Test and analysis of aerodynamics on the *quinoa* threshed mixture[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(2): 192-195, 215.
- [12] 吴英思, 郭占斌, 杜文亮, 等. 藜麦脱出物的物料特性研究[J]. 农机化研究, 2017, 39(9): 184-189.
Wu Ying-si, Guo Zhan-bin, Du Wen-liang, et al. Study of the material properties on the *quinoa* threshed mixture[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(9): 184-189.
- [13] 赵子龙, 郭占斌, 杜文亮, 等. 浸水藜谷的机械特性研究[J]. 农机化研究, 2018, 40(11): 162-165, 170.
Zhao Zi-long, Guo Zhan-bin, Du Wen-liang, et al. The study of the mechanical properties of *quinoa*[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(11): 162-165, 170.
- [14] 顾建环. 天祝县高原寒旱区藜麦产业全程机械化推广探究[J]. 南方农业, 2020, 14(15):156-157.
- [15] 海梅. 藜麦联合收获机脱出物清选试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学机电工程学院, 2018.
Hai Mei. Experimental study on clearance of *quinoa* combine harvester[D]. Hohhot: College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, 2018.
- [16] 肖正春, 张广伦. 藜麦及其资源开发利用[J]. 中国野生植物资源, 2014, 33(2): 62-66.
Xiao Zheng-chun, Zhang Guang-lun. Development and utilization of *Chenopodium quinoa* willd[J]. Chinese Wild Plant Resources, 2014, 33(2): 62-66.
- [17] 托有德, 朱雪慧. 高原寒旱区藜麦生产机具现状与发展[J]. 农机科技推广, 2020(4):27-29.
- [18] 杨科, 刘文瑜, 王旺田, 等. 连作对藜麦生长和生理特性的影响[J]. 江西农业大学学报, 2021, 43(2): 244-252.
Yang Ke, Liu Wen-yu, Wang Wang-tian, et al. Effects of continuous cropping on growth and physiological characteristics of quinoa[J]. Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis, 2021, 43(2):244-252.
- [19] 魏玉明, 黄杰, 顾娴, 等. 藜麦规范化栽培技术规程[J]. 甘肃农业科技, 2015(12):77-80.
- [20] 沈宝云, 胡静, 郭谋子, 等. 早熟藜麦新品种条藜2号

- 的选育及栽培技术[J]. 种子, 2019, 38(4): 137-140.
- Shen Bao-yun, Hu Jing, Guo Mou-zi, et al. Breeding and cultivation techniques of new early maturity variety chenopodium quinoa cv. Tiaoli No. 2[J]. Seed, 2019, 38(4): 137-140.
- [21] 王丽娜, 任翠梅, 王明泽, 等. 中国藜麦种质资源分布及研究现状[J]. 黑龙江农业科学, 2020(12): 142-145.
- Wang Li-na, Ren Cui-mei, Wang Ming-ze, et al. Distribution and research status of *quinoa* germplasm resources in China[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2020(12): 142-145.
- [22] Atul B, Deepak O. Origin of genetic variability and improvement of *quinoa*(*Chenopodium quinoa* willd.)[J]. Gene Pool Diversity and Crop Improvement, 2016, 10: 241-270.
- [23] 郭建芳, 武小平, 丁健, 等. 矮壮素对藜麦抗倒伏的影响[J]. 山西农业科学, 2020, 48(7): 1019-1021, 1025.
- Guo Jian-fang, Wu Xiao-ping, Ding Jian, et al. Effect of chlormequat chloride on lodging resistance of *quinoa*[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2020, 48(7): 1019-1021, 1025.
- [24] 郭建芳, 武小平, 丁健[J]. 现代农业科技, 2019(15): 18-19.
- [25] 刘巍, 黄小毛, 马丽娜, 等. 油葵联合收获机专用割台设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 83-88, 135.
- Liu Wei, Huang Xiao-mao, Ma Li-na, et al. Design and experiment of special header of oil sunflower combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 83-88, 135.
- [26] 杜岳峰, 毛恩荣, 朱忠祥, 等. 两行玉米收获机割台设计与试验[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊2): 22-26.
- Du Yue-feng, Mao En-rong, Zhu Zhong-xiang, et al. Design and experiment of two-row corn harvester header[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Sup. 2): 22-26.
- [27] 谢里阳. 可靠性设计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2013.
- [28] 廖庆喜, 徐阳, 袁佳诚, 等. 油菜联合收获机切抛组合式纵轴流脱粒装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(7):140-150.
- Liao Qing-xi, Xu Yang, Yuan Jia-cheng, et al. Design and experiment on combined cutting and throwing longitudinal axial flow threshing and separating device of rape combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(7):140-150.
- [29] 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.
- [30] 戴飞, 付秋峰, 赵武云, 等. 双风道风筛式胡麻脱出物分离清选机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 117-125, 247.
- Dai Fei, Fu Qiu-feng, Zhao Wu-yun, et al. Design and test of double duct system of air-screen separating and cleaning machine for flax threshing material[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 117-125, 247.
- [31] 李耀明. 谷物联合收割机的设计与分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [32] 耿端阳, 牟孝栋, 张国栋, 等. 小麦联合收获机清选机理分析与优化试验[J]. 吉林大学学报:工学版, 2022, 52(1):219-230.
- Geng Duan-yang, Mu Xiao-dong, Zhang Guo-dong, et al. Analysis and optimization of cleaning mechanism of wheat combine harvester[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(1): 219-230.
- [33] GB/T 8097—2008. 收获机械联合收割机试验方法[S].
- [34] GB/T 2828.1—2012. 计数抽样检测程序[S].
- [35] GB/T 6562—2008. 农业机械试验条件[S].
- [36] 史瑞杰, 戴飞, 刘小龙, 等. 履带式丘陵山地胡麻联合收割机设计与试验[J]. 农业工程学报, 2021, 37(5): 59-67.
- Shi Rui-jie, Dai Fei, Liu Xiao-long, et al. Design and experiments of crawler-type hilly and mountainous flax combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(5): 59-67.
- [37] 史瑞杰, 戴飞, 赵武云, 等. 丘陵山地胡麻联合收割机作业参数优化与试验[J]. 吉林大学学报:工学版, 2022, 52(11):2746-2755.
- Shi Rui-jie, Dai Fei, Zhao Wu-yun, et al. Optimization and experiment of operation parameters of hilly area flax combine harvester[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(11): 2746-2755.