doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.11.028

轻简型水稻秸秆捡拾打捆一体机设计与试验

贾彭程[1]　徐福东[1]　王金武[1]　邓　宇[2,3]　李景岩[2]　唐　汉[1]

(1.东北农业大学工程学院,哈尔滨 150030;2.黑龙江德沃科技开发有限公司,哈尔滨 150086;
3.黑龙江省农业机械工程科学研究院,哈尔滨 150081)

摘要:针对目前东北地区水稻秸秆捡拾打捆作业时,存在捡拾难度大、作业效率低、捆包质量差和用工成本高等问题,设计了 9Y-2230 轻简型秸秆捡拾打捆一体机,集成了捡拾、输送、压缩和打结功能于一体,在保证整机正常工作效率的同时,实现了水稻秸秆的不落地打捆功能,可一次性完成秸秆捡拾打捆作业。对螺旋喂入机构、拨料机构、打捆活塞机构等关键部件进行了优化设计与动力学分析,确定 9Y-2230 轻简型秸秆捡拾打捆一体机关键部件结构及运行参数。采用单因素试验确定机具前进速度、喂入量、压缩频率的取值范围;以成捆率和规则捆率为试验评价指标,以机具前进速度、喂入量、压缩频率为试验因素,设计三因素三水平正交试验。对正交试验结果进行极差分析,结果表明:当机具前进速度为 5.00 km/h,喂入量为 4.50 kg/s,压缩频率为 95.00 r/min 时,成捆率达 98.30%,规则捆率达 95.90%。以此参数组合进行田间试验验证,得到成捆率为 98.29%,规则捆率为 95.25%,与优化值相对误差均小于 5%,满足相关国家标准要求。

关键词:轻简型;秸秆打捆机;动力学分析;优化设计;田间试验

中图分类号:S817.11+5　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)11-0298-10　　**OSID**:

Design and Test of Light-weight Rice Straw Picking and Baling Integrated Machine

JIA Pengcheng[1]　XU Fudong[1]　WANG Jinwu[1]　DENG Yu[2,3]　LI Jingyan[2]　TANG Han[1]

(1. *College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin* 150030, *China*
2. *Heilongjiang Dewo Technology Development Co., Ltd., Harbin* 150086, *China*
3. *Heilongjiang Academy of Agricultural Machinery Engineering, Harbin* 150081, *China*)

Abstract: Aiming at the current rice straw picking and baling operation in the northeastern region, there are problems such as difficulty in picking up, low operating efficiency, poor quality of bales and high labor cost, the 9Y-2230 light-weight straw picking and baling integrated machine was developed, which integrated the functions of picking up, conveying, compressing and tying in one machine, and achieved the function of non-falling baling of rice straw while guaranteeing the normal efficiency of the whole machine, which can complete the straw picking and baling operation at one time. Focusing on the optimized design and dynamic analysis of the key components of the screw feeding mechanism, toggle mechanism, baling piston mechanism, etc., the structure and operating parameters of the key components of the 9Y-2230 light-weight straw picking and baling integrated machine were determined. A single-factor test was used to determine the range of values for the forward speed of the machine, the feeding volume and the compression frequency; a three-factor, three-level orthogonal test was designed with the bale-forming rate and the regular bale rate as the evaluation indexes of the test, and with the forward speed of the machine, the feeding volume and the compression frequency as the test factors. The results of the orthogonal test were analyzed in terms of extreme variance, and the results showed that when the forward speed of the machine was 5.00 km/h, the feeding volume was 4.50 kg/s, and the compression frequency was 95.00 r/min, the rate of bale formation at this time was up to 98.30%, and the rate of regular bale was up to 95.90%. This combination of parameters was verified in the field test,

收稿日期:2025-04-07　修回日期:2025-06-18

基金项目:黑龙江省重点研发计划项目(2023ZX05B03)和国家水稻产业技术体系岗位科学家项目(CARS-01)

作者简介:贾彭程(1996—),男,博士生,主要从事智能农机装备关键技术研究,E-mail:b230701001@neau.edu.cn

通信作者:唐汉(1991—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备关键技术研究,E-mail:tanghan@neau.edu.cn

and the bale rate was 98.29% and the regular bale rate was 95.25%, and the relative errors with the optimized values were all less than 5%, and the research results can provide a reference for the design of the integrated straw picking and baling machine.

Key words: light-weight; straw baler; kinetic analysis; design optimization; field test

0　引言

近年来,随着农业生产机械化水平的不断提高,秸秆资源的机械化处理与利用问题日益凸显[1]。秸秆回收利用是实现资源可持续、保护生态环境的重要措施之一[2]。然而,目前秸秆捡拾打捆机在实际生产应用中仍存在诸多问题亟待解决,包括秸秆捡拾困难、作业效率低、捆包质量差、人工成本高等[3];此外,水稻秸秆的规模化收储普遍采用牵引式打捆作业模式,即以拖拉机为动力源,通过方捆或圆捆成形装置对地表残留秸秆实施间歇式收集[4-6]。这些问题严重制约了秸秆综合利用效率和农业机械化水平的进一步提升。

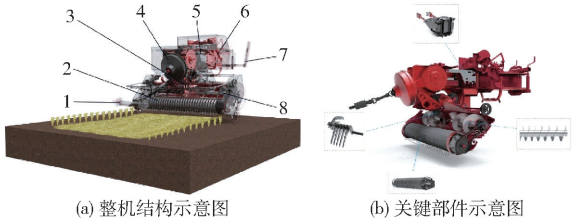
为解决上述问题,国内外研究人员已展开广泛研究与探讨。在整机设计与理论方面,ABDOH 等[7]利用改装后的约翰迪尔捡拾打捆机进行试验,考察了切碎与压缩后水稻和小麦秸秆在不同含水率、打捆机前进速度与刀具速度下,对切碎长度、成捆效率、能耗需求和单位成本的影响,作为缓解埃及饲料短缺问题的方案;AFZALINIA 等[8]假设秸秆为各向同性线弹性材料,建立了方捆压捆机压缩室内 x、y、z 方向压力分布的理论模型,使用大麦和小麦秸秆进行试验验证,表明模型与实测数据高度吻合,同时,基于试验数据为每种秸秆建立了仅随压缩深度变化的经验模型。在秸秆捡拾方面,主要研究集中于提升秸秆捡拾效率和降低堵塞,如通过优化捡拾器弹齿结构及运动轨迹改善捡拾效果,提高作业效率[9-10]。仝振伟等[11]利用弹齿尖端特殊轨迹设计,使弹齿运动更有利于秸秆的捡拾与输送,有效降低了捡拾过程中的堵塞率。在秸秆输送和压缩成型技术方面,相关学者对喂入机构、拨料机构、压缩机构等核心部件进行了优化设计与试验研究,以提高秸秆输送的连续性和压缩效率。庞统等[12]通过对秸秆喂入切碎装置进行结构优化与物料输送轨迹的运动学分析,有效避免了秸秆在输送过程中出现的堵塞与切碎质量较差现象;郭炜等[13]以 9YFLD-2.2 型大方草捆压捆机为研究对象,采用动力学建模结合 ADAMS 动态仿真的方法,获得喂入拨叉末端运动轨迹和速度曲线,揭示了喂入机构的运动规律;王浩杨等[14]针对南方地区田间秸秆回收存在的机械化水平低、作业连续性差的问题,通过仿真优化压缩装置运动轨迹,实现了“捡拾-输送-压缩”全流程一体化作业;而在打结机构的研究中,双扭结技术及凸轮-摆杆复合传动结构的引入,大大提高了成捆率和机械可靠性,尤其在高杂质含量环境下表现突出[15-16]。综上所述,相关学者对打捆机关键部件进行了理论分析与结构优化,然而现有机型仍存在许多不足,如在丘陵山地等小地块条件下作业效果不佳。为此,亟需研制适用于多种复杂田间环境,尤其是适合东北地区水稻秸秆捡拾打捆作业的机具。

针对上述问题和需求,本研究设计 9Y-2230 轻简型秸秆捡拾打捆一体机,集成秸秆捡拾、输送、压缩和打结等功能,对整机关键部件进行针对性优化设计,确定合理结构和运行参数,并通过田间试验验证其作业效果。

1　整机结构与工作原理

1.1　整机结构

9Y-2230 轻简型秸秆捡拾打捆一体机整机结构如图 1 所示,主要由牵引架、飞轮、捡拾器、螺旋喂入机构、拨料机构、打捆活塞机构、打结机构、机架等组成。由于捡拾器和压缩室之间距离较远,因此在这两部分之间设有螺旋喂入机构和拨料机构,可使秸秆喂入更加顺畅。本机型采用轻量化设计,对机架进行优化设计与布局,在确保可靠性需求的同时降低整机质量与配套功率,从而更好地适配东北地区丘陵山地及小地块作业环境。9Y-2230 轻简型秸秆捡拾打捆一体机的主要技术参数如表 1 所示。



(a) 整机结构示意图　　(b) 关键部件示意图

图 1　9Y-2230 轻简型秸秆捡拾打捆一体机结构图

Fig. 1　Structure diagrams of 9Y-2230 light-weight straw picking and baling integrated machine

1. 牵引架　2. 捡拾器　3. 拨料机构　4. 飞轮　5. 打捆活塞机构　6. 打结机构　7. 机架　8. 螺旋喂入机构

1.2　工作原理

打捆机作业时,由拖拉机牵引沿田间预先铺设好的秸秆方向行进,捡拾器同时进行连续圆周运动,将地面秸秆不断拾起并输送至后端的螺旋喂入机

表 1 主要技术参数

Tab. 1 Main technical parameters

参数	数值
配套功率/kW	≥40
捡拾宽度/mm	2 230
拖拉机输出轴转速/(r·min^{-1})	540
外形尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	5 700×2 960×1 730
草捆尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	460×360×(300~1 300)
成捆率/%	≥98
生产率/(kg·s^{-1})	0.83~1.67

构。在两侧螺旋叶片带动下,秸秆从两边被持续推送至物料通道入口,随后由喂入拨叉将其引导进入流道并沿流道向上抛送至压缩室,如图 2 所示。打捆活塞机构将秸秆压缩成块,最终由打结机构进行穿针打结,实现水稻秸秆的不落地连续打捆作业。

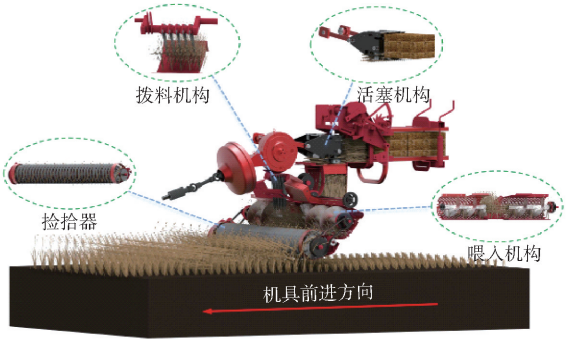


图 2 整机作业示意图

Fig. 2 Operation schematic of whole machine

2 关键部件设计与运动学分析

2.1 螺旋喂入机构设计

螺旋喂入机构是 9Y-2230 轻简型秸秆捡拾打捆一体机的核心部件,主要由传动轴、螺旋叶片、反向螺旋叶片、弧板、滚筒筒体等组成,其结构如图 3 所示。作业时,秸秆被螺旋喂入机构两端输送至通往压缩室的物料通道入口处,拨料机构搂集聚拢的秸秆,并将其抛送至压缩室喂入口。

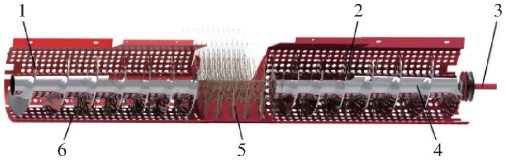
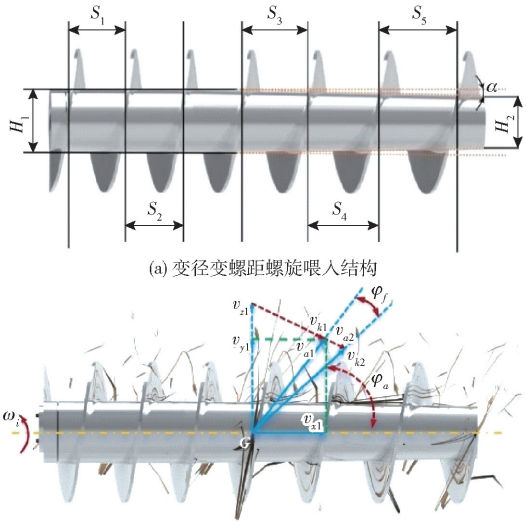


图 3 螺旋喂入机构结构示意图

Fig. 3 Schematic of structure of screw feeding mechanism

1. 反向螺旋叶片 2. 螺旋叶片 3. 传动轴 4. 滚筒筒体 5. 秸秆 6. 弧板

针对捡拾打捆作业中水稻秸秆易堵塞、缠轴等特性,本研究的螺旋喂入机构采用变径变螺距螺旋喂入设计,通过前端较大螺距快速汇集秸秆,中后端逐渐减小螺距,加强输送能力与流量均匀性,保证单位长度上料流均匀一致[17],即当前螺距的物料体积等于当前螺距的下料量与之前螺距的传送量之和[18]。如图 4a 所示,变径变螺距螺旋喂入结构有 5 段不同螺距 S_i($i=1,2,\cdots,5$)的螺旋叶片,筒体直径经滚筒中部由入口直径 H_1 平滑过渡到出口直径 H_2。



(a) 变径变螺距螺旋喂入结构

(b) 秸秆运移过程力学分析

图 4 变径变螺距螺旋喂入结构与物料运移过程力学分析

Fig. 4 Mechanical analysis of variable diameter and pitch screw feeding structures and material transport processes

对于第 i 段螺旋叶片,其单位长度(1 mm)每转下料体积 E_i 可表示为螺旋截面与轴之间的环状面积乘以螺距角的切向展开量,即

$$E_i=\pi\tan\alpha_i(R_i^2-r_1^2)\quad(i=1,2,\cdots,5)\tag{1}$$

式中 R_i——第 i 段叶片平均半径,mm

r_1——轴心半径,mm

α_i——该段螺距角,(°)

螺距角 α_i 满足 $\tan\alpha_i=S_i/(\pi D_i)$,其中 D_i 为该段平均直径($D_i=2R_i$)。

变径变螺距的核心在于“每一段下料量与前面所有段之和一致”,即第 i 段每转下料量 V_i($V_i=E_iS_i$)必须满足与第一段相同,这保证了喂入前后料流均匀,不产生料坯堆积或空载区[19],有效降低了秸秆在螺旋喂入段堵塞风险。为了防止秸秆缠绕在滚筒筒体上,滚筒筒体的周长必须大于秸秆茎秆的长度[20],因此滚筒筒体直径需满足条件

$$L_y=\pi H\tag{2}$$

式中 L_y——秸秆长度,mm

H——滚筒筒体直径,mm

由图 4b 中的几何关系可知,螺旋喂入机构以恒定角速度 ω_i 运转,物料在其作用下进行复合运动,该运动由沿螺旋叶片方向的相对滑移和绕滚筒旋转

所引起的牵连运动共同构成。设物料在点 G 与螺旋叶片接触，基于运动学原理对其运动过程进行分析。由于物料与螺旋叶片之间存在摩擦力，故物料的绝对速度 v_{a2} 会偏离运动合速度 v_{a1} 一定角度，则物料轴向速度 v_{x1} 可表示为

$$v_{x1}=\frac{S_i n_t}{60}\cos^2\varphi_\alpha\frac{\tan(\varphi_\alpha+\varphi_f)}{\tan\varphi_\alpha+\tan\varphi_f} \tag{3}$$

式中　n_t——螺旋喂入机构转速，r/min

φ_α——螺旋叶片升角，(°)

φ_f——物料与螺旋叶片表面间的摩擦角，(°)

在螺旋喂入机构工作时，为保证其喂入效率，应使其具有较大的轴向速度，即

$$\frac{\tan(\varphi_\alpha+\varphi_f)}{\tan\varphi_\alpha+\tan\varphi_f}\geqslant 0 \tag{4}$$

$$\frac{\mathrm{d}v_{a1}}{\mathrm{d}\varphi_a}=0 \tag{5}$$

式中　$\mathrm{d}v_{a1}$——螺旋喂入机构瞬时轴向速度变化量，mm/s

$\mathrm{d}\varphi_a$——螺旋叶片升角瞬时变化量，(°)

求解式(5)可得螺旋升角满足

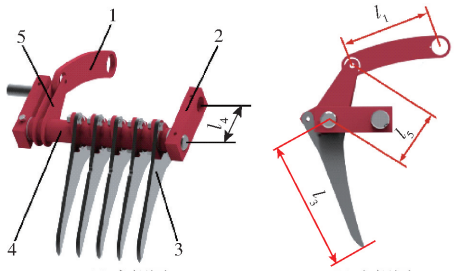
$$\varphi_\alpha=\frac{\pi}{4}-\frac{\varphi_f}{2} \tag{6}$$

将摩擦角 $\varphi_f=27°$ 代入式(6)得出螺旋叶片升角 $\varphi_\alpha=31.5°$。螺旋叶片升角越大，叶片对物料的轴向牵引力越强，也越容易出现物料滑移[21]，故设计时需保证 $\varphi_\alpha>\varphi_f$，以实现物料的稳定输送。

综合上述分析可知，螺旋喂入机构的螺距、转速、叶片升角以及物料与螺旋叶片表面间的摩擦角对成捆效果有较大影响。因此，螺旋喂入机构关键参数的设计应以满足目标作业时单位时间秸秆喂入量的要求为前提，综合优化螺距、转速、升角及摩擦角，使喂入过程高效、连续且均匀，从而提升整机工作效率。

2.2　拨料机构设计

为提升秸秆进入压缩室的连续性，通过优化拨料机构喂入拨叉长度，使摆动角度范围扩大，提高秸秆投送稳定性。如图 5 所示，拨料机构主要由摇杆、曲柄、喂入拨叉、拨叉支撑轴和连杆等部件组成，其主要作用是将秸秆从物料通道入口连续平稳地抛送至压缩室内。拨叉支撑轴上焊接有喂入拨叉及连杆，拨叉轴两端分别通过铰接方式与两个曲柄相连，右侧曲柄与输入轴连接；设计摇杆长度 l_1 为 320 mm，喂入拨叉长度 l_3 为 450 mm，连杆长度 l_5 为 150 mm，曲柄长度 l_4 为 140 mm。摇杆上端固定于机架壳体内的相应位置，下端则通过销轴与连杆连接，连杆与喂入拨叉共同焊接在拨叉支撑轴上。该连接形式使得拨料机构以曲柄-摇杆机构形式运行，从而高效地将秸秆抛送至压缩室喂入口。



(a) 主视图　　(b) 左视图

图 5　拨料机构整体结构图

Fig. 5　Overall structure diagrams of toggle mechanism

1. 摇杆　2. 曲柄　3. 喂入拨叉　4. 拨叉支撑轴　5. 连杆

拨料机构工作过程分为 2 个阶段：抛送阶段与喂入阶段[22-23]。作业时，在链轮驱动下，左侧曲柄促使拨叉支撑轴围绕曲柄轴进行旋转，焊接于其上的喂入拨叉与连杆也随之转动，同时摇杆下端相对于上端发生摆动。在秸秆喂入过程中，喂入拨叉前端先远离曲柄轴线以完成喂入动作，随后回撤至靠近曲柄轴线位置，从而实现稳定且无干涉的喂入运行[24]。以曲柄的轴心作为坐标原点 O，设定 X 轴水平向左为正、Y 轴竖直向上为正，构建如图 6 所示的平面直角坐标系。

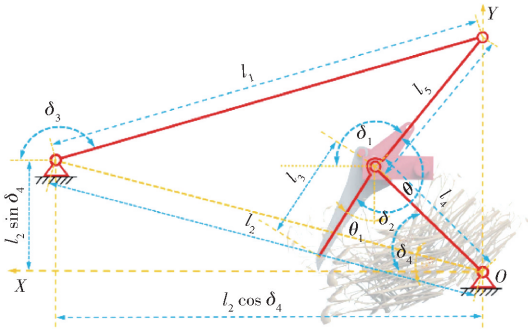


图 6　拨料机构运动过程力学分析

Fig. 6　Mechanical analysis of motion process of toggle mechanism

曲柄-摇杆机构的矢量关系可表示为

$$\boldsymbol{l}_1+\boldsymbol{l}_2=\boldsymbol{l}_4+\boldsymbol{l}_5 \tag{7}$$

在 X 轴与 Y 轴方向分别进行投影，可得出喂入机构的位置关系式

$$\begin{cases} l_1\cos\delta_3+l_2\cos\delta_4=l_4\cos\delta_2+l_5\cos\delta_1 \\ l_1\sin\delta_3+l_2\sin\delta_4=l_4\sin\delta_2+l_5\sin\delta_1 \end{cases} \tag{8}$$

式中　δ_1——连杆转角，(°)

δ_2——曲柄转角，(°)

δ_3——摇杆转角，(°)

δ_4——固定支架转角，(°)

为防止喂入拨叉与压缩室内部组件发生干涉，需确保曲柄转角 δ_2 与拨叉转角 θ_1 之间满足关系

$$\begin{cases}\delta_1=\pi-(\theta-\theta_1-3\pi/2)\\ l_4\cos\delta_2+l_3\sin\theta_1\geqslant L\\ l_4\sin\delta_2-l_3\cos\theta_1\leqslant H_3\end{cases}\tag{9}$$

式中 L——曲柄中心到压缩室近端水平距离,mm

H_3——曲柄中心到压缩室近端竖直距离,mm

将式(8)对时间 t 求一阶导数,得到拨料机构速度方程式

$$\begin{cases}-\omega_1 l_4\sin\delta_2-\omega_2 l_5\sin\delta_1=-\omega_3 l_1\sin\delta_3\\ \omega_1 l_4\cos\delta_2+\omega_2 l_5\cos\delta_1=\omega_3 l_1\cos\delta_3\end{cases}\tag{10}$$

式中 ω_1——曲柄角速度,rad/s

ω_2——连杆角速度,rad/s

ω_3——摇杆角速度,rad/s

由上述分析可知,通过对拨料机构几何参数进行数值优化,在实现最大化喂入效率的同时避免与活塞碰撞,有效提高物料输送效率,降低秸秆在物料通道内的堵塞概率;使用 Solidworks 对整个拨料机构进行运动仿真,得到喂入拨叉理想工作轨迹,如图 7 所示。进入压缩室时,拨叉末端线速度在整个喂入过程中达到最大值,且方向垂直向上,以确保足量秸秆被送入压缩室;离开压缩室时,由于拨叉与压缩活塞是正时传动,为避免碰撞,拨叉末端线速度方向保持竖直向下。此设计可保证较高喂入效率且有效降低拨叉与压缩活塞碰撞的风险[24]。

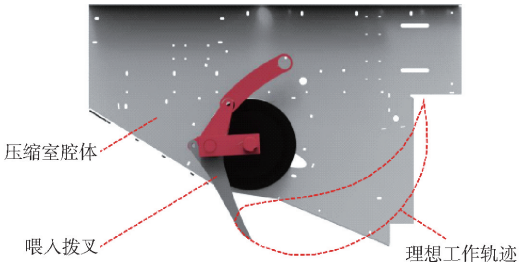


图 7 喂入拨叉理想工作轨迹

Fig. 7 Ideal working trajectory of feed forks

2.3 打捆活塞机构设计

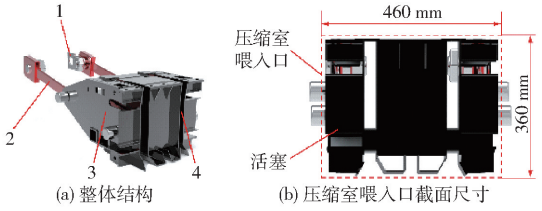
为提高秸秆压缩效率,本研究对打捆活塞机构的压缩频率以及压缩室喂入口截面尺寸进行了参数优化设计,优化后的打捆活塞机构如图 8a 所示,其主要由曲柄、连杆、活塞及刀片等部件组成,曲柄经花键与分动箱输出轴相连,并通过连杆将曲柄与活塞联接,构成双曲柄滑块机构,活塞前端加装刀片,配合截面尺寸为 460 mm × 360 mm 的压缩室喂入口,可有效剪碎并压实秸秆[25],如图 8b 所示。秸秆强度越大,压缩剪切所需的力就越大。打捆活塞压缩力计算公式为

$$F_c=\sigma_s A_c\tag{11}$$

式中 F_c——活塞施加的压缩力,N

σ_s——秸秆抗压强度或剪切强度,Pa

A_c——秸秆受压横截面积,mm^2



(a) 整体结构 (b) 压缩室喂入口截面尺寸

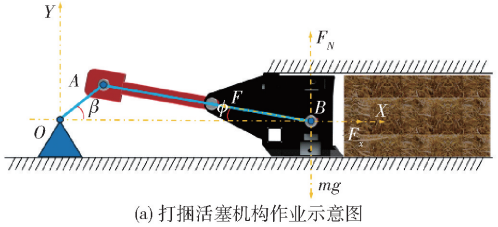
图 8 打捆活塞机构结构图

Fig. 8 Structure diagrams of baling piston mechanism

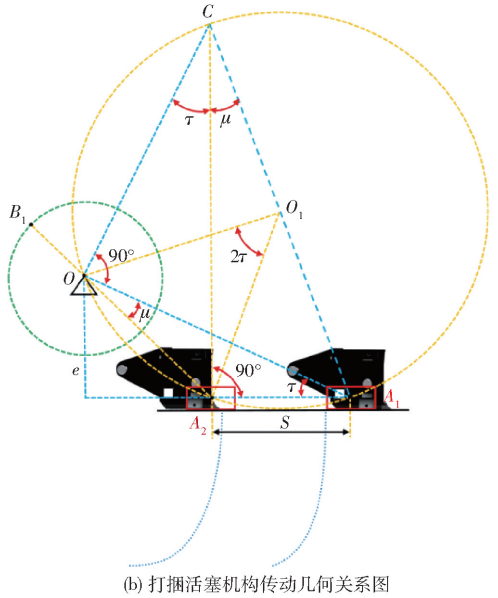
1. 曲柄 2. 连杆 3. 活塞 4. 刀片

水稻秸秆的抗剪强度和抗压强度较玉米秸秆高出 20% ~30%[26],若压缩力不足,将造成压缩不充分,影响成捆质量。通过优化打捆活塞机构结构参数,确保有效压实剪切,以防止堵塞现象发生。

本机型采用开式压缩,作业过程如图 9a 所示。作业时,通过捆包长度控制器在作业前预设所需草捆长度,活塞将秸秆推至其前极点位置逐步压实,物料的密度、压缩力及捆包长度不断上升,当打捆机运行至预设的压缩力与捆包长度条件时,打结机构对草捆进行捆扎,随后由活塞将打结完成的捆包推出压缩室。压缩频率是决定成捆率和规则捆率的关键参数,通过曲柄滑块几何关系优化曲柄转速,是设计打捆活塞机构压缩频率的核心[22]。压缩频率与曲柄滑块机构的力学特性相关,对捆包进行受力分析,



(a) 打捆活塞机构作业示意图



(b) 打捆活塞机构传动几何关系图

图 9 打捆活塞机构作业过程与力学分析

Fig. 9 Operation process and mechanical analysis of baling piston mechanism

得出其平衡方程为

$$\begin{cases} F_X + F\cos\beta = 0 \\ F\sin\beta + F_N - mg = 0 \end{cases} \tag{12}$$

式中　F_X——惯性力，N

F——连杆对滑块的作用力，N

F_N——支持力，N

m——滑块质量，kg

设 OA 长度为 r，AB 长度为 L_1，$\theta = \omega t$。选取直角坐标系 OXY，将式(12)分别在 X、Y 轴上投影，可得

$$mx'' = -F\cos\phi \tag{13}$$

$$my'' = F\sin\phi + F_N - mg \tag{14}$$

$$x = r\cos\beta + \sqrt{L_1^2 - r^2\sin^2\beta} \tag{15}$$

$$x' = -r\omega\sin\beta - \frac{r^2\omega\sin\beta\cos\beta}{\sqrt{L_1^2 - r^2\sin^2\beta}} \tag{16}$$

$$x'' = -r\omega^2\cos\beta - \frac{r^2\omega^2\cos(2\beta)(L_1^2 - r^2\sin^2\beta) + r^4\omega^2\sin^2\beta\cos^2\beta}{(L_1^2 - r^2\sin^2\beta)^{3/2}} \tag{17}$$

式中　ϕ——滑块导轨方向与水平方向的夹角，(°)

x'——x 对时间的一阶导数(速度)，mm/s

x''——x 对时间的二阶导数(加速度)，mm/s^2

β——打捆活塞机构连杆与水平方向夹角，(°)

由图 9 可知，A_1 和 A_2 为该机构活塞的极点位置，将曲柄 OB_1 长度设为 a，连杆 OA_2 长度设为 b。参考国外大方捆打捆机中减速箱输出轴与滑道偏置距离约为 85 mm，本研究取偏心距 $e = 70$ mm；通常，大型方捆打捆机的有效行程范围为 600 ~ 800 mm，参考国外几种大方捆打捆机，选择有效行程为 $S = 600$ mm；参考国外性能良好已有机型，取极位夹角设计值为 $\mu = 3°$[22]。由机构传动与几何关系可得出

$$a\sin\mu = \frac{l_{A_1A_2}}{2} \tag{18}$$

$$e = (a + b)\sin\tau \tag{19}$$

$$b - a = \frac{e}{\sin\mu} \tag{20}$$

由以上公式推导出关系式

$$a = \frac{l_{A_1A_2}}{2}\sqrt{1 - \frac{2e}{l_{A_1A_2}}\tan\mu} \tag{21}$$

$$b = \frac{l_{A_1A_2}}{2}\sqrt{1 + \frac{2e}{l_{A_1A_2}}\cot\mu} \tag{22}$$

式中　$l_{A_1A_2}$——活塞运动行程，mm

τ——极位夹角，(°)

将已知量 $l_{A_1A_2} = 600$ mm、$e = 70$ mm、$\mu = 3°$代入公式(21)、(22)求得

$$a = \frac{600}{2}\sqrt{1 - \frac{2\times 70}{600}\tan 3°} \approx 298.17 \text{ mm} \tag{23}$$

$$b = \frac{600}{2}\sqrt{1 + \frac{2\times 70}{600}\cot 3°} \approx 700.20 \text{ mm} \tag{24}$$

曲柄、连杆长度取整后得 $a = 298$ mm，$b = 700$ mm。

活塞压缩的有效行程决定压缩后秸秆捆包的密度，即

$$\eta = \eta_0 \frac{l_0}{l_0 - S} \times 10^{-3} \tag{25}$$

式中　η——压缩后秸秆密度，kg/m^3

η_0——秸秆初始密度，kg/m^3

l_0——秸秆压缩前长度，mm

随着压缩有效行程的增加，压缩后捆包密度也随之增大。当压缩活塞的有效行程达到一定数值时，捆包的密度基本不再变化[22]。

3　试验

3.1　试验设备及条件

试验于 2024 年 10 月进行，试验地点为黑龙江德沃科技开发有限公司双城示范基地。选用晚稻收割后田间遗留的水稻秸秆为试验材料，其站秆分布均匀整齐，未出现倒伏现象，残茬未发生腐烂[27]。试验机具由黑龙江德沃科技开发有限公司自主研制，动力装置选用雷沃 M504 - 2A 型四驱式拖拉机。试验设备和仪器包括电子转速测量仪、电子秤、秒表、米尺和含水率测定仪等。

3.2　试验指标与方法

试验方法和评价指标参照国家标准 GB/T 25423—2010《方草捆打捆机》和 GB/T 10395.20—2021《农林机械安全 第 20 部分：捡拾打捆机》进行。试验区域面积为 2 hm^2，每个速度水平单次试验面积约为 0.2 hm^2，将试验田平均划分为 3 个区域，每个区域随机选取 5 段测试区，植株高度经现场测量统一为 0.6 m，秸秆平均含水率为 30%，每批次试验连续作业时长为 30 min，通过秒表记录作业时间，并在该作业区间内完成打捆并进行计数，每个速度水平下进行不少于 3 次重复试验，并取平均值，以保证数据的可靠性。以水稻秸秆成捆率和规则捆率为试验评价指标。

3.3　单因素试验

3.3.1　机具前进速度对整机作业性能的影响

为了探究机具前进速度对整机作业性能的影响，对不同水平下的机具前进速度进行单因素试验。参照国内小方捆打捆机的工作参数范围，并结合本机实际工作条件，确定机具前进速度为 3.00、4.00、5.00、6.00、7.00 km/h，将喂入量和压缩频率分别调

至 4.50 kg/s 和 95.00 r/min。每组试验进行 3 次，试验结果以平均值表示，如图 10 所示。

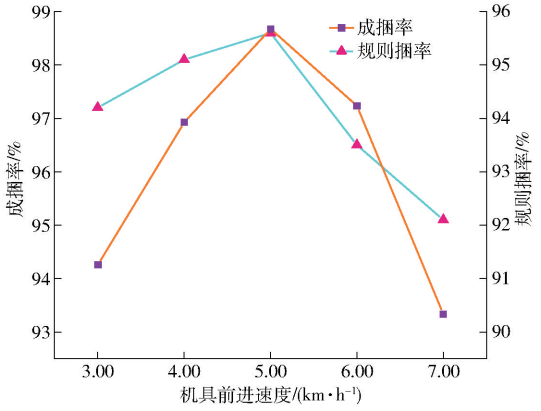


图 10 不同机具前进速度时整机作业性能变化曲线

Fig. 10 Variation curves of overall machine performance at different forward speeds

从图 10 中可知，成捆率与规则捆率随着机具前进速度的增加先增大后减小。出现这种情况的原因是在固定喂入量和固定压缩频率条件下，当机具前进速度较低时，捡拾器较多时间在同一地块单元面积内重复拾取，这可能会导致压缩室内空腔与不均匀填充，过度堆积的区域被压实后可能出现密度过高，而部分区域稀疏，从而使部分捆包无法成型或易散落；当机具前进速度过快时，捡拾器与秸秆接触时间较短，导致地面秸秆来不及完全拾取，部分秸秆或在喂入过程中分散，秸秆填充不足导致压缩时产生的回弹比增大，二次压缩前压缩室内秸秆处于较松散状态，易导致草捆密度降低，影响成捆率与规则捆率。机具前进速度为 3.00 ~ 4.00 km/h 时，成捆率与规则捆率的上升幅度最大；机具前进速度为 4.00 ~ 6.00 km/h 时，成捆率与规则捆率变化幅度较小，当机具前进速度为 5.00 km/h 时，成捆率与规则捆率最高，分别为 98.50% 和 95.60%；机具前进速度为 6.00 ~ 7.00 km/h 时，成捆率与规则捆率下降幅度较大。由上述分析可知，打捆作业时机具前进速度较优区间范围为 4.00 ~ 6.00 km/h，此时成捆率与规则捆率均处于较高水平。

3.3.2 喂入量对整机作业性能的影响

为了探究喂入量对整机作业性能的影响，对不同水平下的喂入量进行单因素试验。参照国内小方捆打捆机的工作参数范围，结合本机实际工作条件，确定喂入量为 3.00、3.75、4.50、5.25、6.00 kg/s，将机具前进速度和压缩频率分别调至 5.00 km/h 和 95.00 r/min。每组试验进行 3 次，试验结果以平均值表示，如图 11 所示。

从图 11 中可知，成捆率与规则捆率随着喂入量的增加先增大后减小。出现这种情况的原因是当喂入量较小时，打捆活塞机构能够充分压实物料，形成完整草捆，成捆率随喂入量增加而提升；当喂入量超过打捆活塞机构处理能力时，压缩室内秸秆堆积导致压缩不充分，草捆松散甚至堵塞，成捆率下降；喂入量过大时，物料在压缩室内的横向分布易出现偏移或厚度不均，导致捆包截面形状不规则。活塞压缩行程的节奏需与喂入量同步，过量喂入会破坏压缩周期的一致性，使捆包密度分层，降低规则捆率。当喂入量为 3.00 ~ 3.75 kg/s 时，成捆率与规则捆率的上升幅度较大；喂入量为 3.75 ~ 5.25 kg/s 时，成捆率与规则捆率先上升后下降，喂入量为 4.50 kg/s 时，成捆率为 98.80%，规则捆率为 95.50%，达到最大值；喂入量为 5.25 ~ 6.00 kg/s 时，成捆率与规则捆率的变化幅度较小。综上所述，当喂入量为 3.75 ~ 5.25 kg/s 区间时，开展打捆作业的成捆率与规则捆率均处于较高水平。

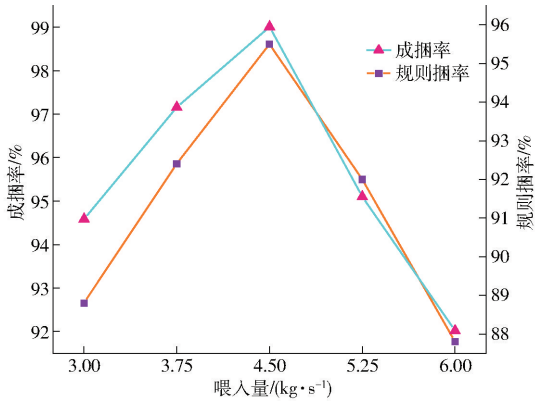


图 11 不同喂入量时整机作业性能变化曲线

Fig. 11 Variation curves of overall machine performance at different feedingvolumes

3.3.3 压缩频率对整机作业性能的影响

为了探究压缩频率对整机作业性能的影响，对不同水平下的压缩频率（压缩频率等于打捆活塞机构曲柄转速）进行单因素试验。参照国内小方捆打捆机的工作参数范围，并结合本机实际工作条件，确定压缩频率为 90.00、92.50、95.00、97.50、100.00 r/min，将机具前进速度和喂入量分别调至 5.00 km/h 和 4.50 kg/s。每组试验进行 3 次取平均值，试验结果如图 12 所示。

从图 12 中可知，随着压缩频率不断增加，成捆率与规则捆率均呈先上升后下降的趋势。出现这种情况的原因是随着压缩频率的增加，单位时间内活塞往复次数增多，减少了秸秆在压缩室内的滞留时间，秸秆被更快地压实，从而提升了成捆效率。在合理的压缩频次范围内，活塞通过多次挤压可使秸秆层与层之间的结合更加紧密，能够更快达到草捆成型的最低密度阈值，成捆率与规则捆率随之上升。

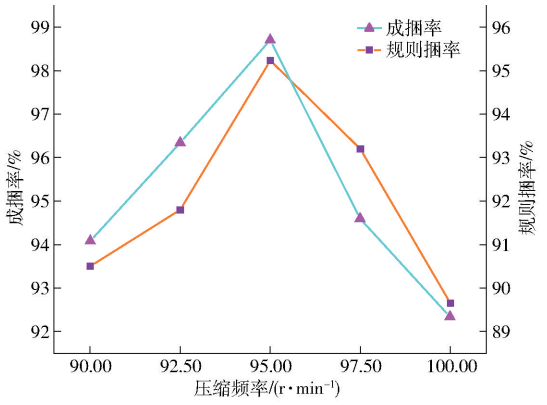


图 12　不同压缩频率时整机作业性能变化曲线

Fig. 12　Variation curves of overall machine performance at different compression frequencies

但高频率压缩可能导致单次压缩行程过短，秸秆未充分延展即被二次压缩，草捆出现层间错位或秸秆折叠现象，造成草捆截面形状不规则，导致成捆率与规则捆率下降。压缩频率为 90.00 ~ 95.00 r/min 时，成捆率与规则捆率的上升幅度较快；压缩频率为 92.50 ~ 97.50 r/min 时，成捆率与规则捆率先上升后下降，压缩频率为 95.00 r/min 时成捆率与规则捆率最高，分别为 98.50% 和 95.20%；压缩频率为 95.00 ~ 100.00 r/min 时，成捆率与规则捆率的下降幅度较快；因此，可以确定压缩频率为 92.50 ~ 97.50 r/min 时为开展秸秆打捆作业的较优区间。

3.4　正交试验

3.4.1　试验设计

通过单因素试验评估了机具前进速度、喂入量、压缩频率对整机性能指标的影响，并确定了各因素的水平。根据单因素试验的分析结果，以机具前进速度、喂入量、压缩频率为试验因素，开展三因素三水平正交试验，并进行极差分析。试验因素编码如表 2 所示，正交试验结果与极差分析如表 3 所示。

表 2　试验因素编码

Tab. 2　Codes of experimental factors

编码	因素		
	机具前进速度 A/(km·h^{-1})	喂入量 B/(kg·s^{-1})	压缩频率 C/(r·min^{-1})
1	4.00	3.75	92.50
2	5.00	4.50	95.00
3	6.00	5.25	97.50

3.4.2　试验结果

由表 3 可知，根据正交试验结果以及极差分析结果，对成捆率影响的主次顺序为机具前进速度、喂入量、压缩频率，对规则捆率影响的主次顺序为压缩频率、机具前进速度和喂入量，成捆率的较优组合为 $A_2B_2C_2$，规则捆率的较优组合为 $A_2B_1C_3$，最终确定最佳工作参数组合为 $A_2B_2C_2$，即机具前进速度为 5.00 km/h、喂入量为 4.50 kg/s、压缩频率为 95.00 r/min，此时成捆率为 98.30%，规则捆率为 95.90%，满足秸秆打捆作业整机设计要求。

表 3　正交试验方案与结果

Tab. 3　Orthogonal test scheme and results

序号		因素			成捆率/%	规则捆率/%
		机具前进速度 A/(km·h^{-1})	喂入量 B/(kg·s^{-1})	压缩频率 C/(r·min^{-1})		
1		4.00	3.75	92.50	96.70	94.50
2		4.00	4.50	97.50	97.10	95.30
3		4.00	5.25	95.00	97.60	93.80
4		5.00	3.75	97.50	97.90	95.50
5		5.00	4.50	95.00	98.30	95.90
6		5.00	5.25	92.50	96.90	94.30
7		6.00	3.75	95.00	95.20	95.30
8		6.00	4.50	92.50	97.20	93.80
9		6.00	5.25	97.50	94.20	95.10
成捆率	K_1	291.4	289.8	290.8		
	K_2	293.1	292.6	291.1		
	K_3	286.6	288.7	289.2		
	R	2.17	1.30	0.63		
规则捆率	K_1	283.6	285.3	282.6		
	K_2	285.7	285.0	285.0		
	K_3	284.2	283.2	285.9		
	R	0.70	0.70	1.10		

3.5　田间试验

为进一步验证 9Y－2230 轻简型秸秆捡拾打捆一体机作业效果及整机工作性能，于 2024 年 10 月在黑龙江德沃科技开发有限公司双城示范基地开展田间性能试验，如图 13 所示。参照正交试验得出的最佳工作参数组合，选取机具前进速度为 5.00 km/h，喂入量为 4.50 kg/s，压缩频率为 95.00 r/min，进行田间试验验证，试验重复 5 次，取平均值作为试验结果。



图 13　田间试验

Fig. 13　Field test

试验结果如表 4 所示。试验结果表明，本研究设计的 9Y－2230 轻简型秸秆捡拾打捆一体机田间作业性能良好，平均成捆率达到 98.29%，平均规则

捆率达到 95.25%,超过 GB/T 25423—2010 国家标准要求(成捆率不小于 98%,规则捆率不小于 95%)。田间试验结果与优化值的相对误差不超过 5%,满足作业要求。

表 4 田间试验结果

Tab. 4 Results of field test %

序号	成捆率	规则捆率
1	98.32	94.74
2	97.62	95.33
3	98.85	95.12
4	98.06	95.65
5	98.61	95.41
平均值	98.29	95.25

4 结论

(1)设计了 9Y-2230 轻简型秸秆捡拾打捆一体机,可实现秸秆从地面拾取、翻抛输送到压缩打结的一体化作业。通过对螺旋喂入机构、拨料机构和打捆活塞机构的作业过程进行动力学分析,对各关键部件进行了结构优化设计与工作参数确定。

(2)通过单因素试验确定机具前进速度、喂入量、压缩频率取值范围,进行三因素三水平正交试验,通过极差分析结果得出最优工作参数组合为:机具前进速度 5.00 km/h、喂入量 4.50 kg/s、压缩频率 95.00 r/min,此组合下成捆率为 98.30%,规则捆率为 95.90%,满足设计要求。

(3)田间试验结果表明,本研究设计的 9Y-2230 轻简型秸秆捡拾打捆一体机具有良好的田间适应性和作业稳定性,平均成捆率达到 98.29%,平均规则捆率达到 95.25%,整体性能优于国家标准要求,能够满足实际农业生产需求。

参 考 文 献

[1] 麻乾, 刘飞, 赵满全. 揉碎机揉碎机理分析及锤片结构优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊2): 7-15.
MA Qian, LIU Fei, ZHAO Manquan. Analysis of kneading mechanism and optimisation of hammer blade structure of kneading machin[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp.2): 7-15. (in Chinese)

[2] 王超瑞, 周宇琨, 温雅, 等. 秸秆还田方式对稻田土壤特性和温室气体排放的影响及其水肥互作调控[J]. 中国水稻科学, 2025, 39(3): 295-305.
WANG Chaorui, ZHOU Yukun, WEN Ya, et al. Effects of straw return methods on soil properties and greenhouse gas emissions in rice fields and their regulation by water-fertilizer interactions[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2025, 39(3): 295-305. (in Chinese)

[3] 石祖梁, 王飞, 王久臣, 等. 我国农作物秸秆资源利用特征、技术模式及发展建议[J]. 中国农业科技导报, 2019, 21(5): 8-16.
SHI Zuliang, WANG Fei, WANG Jiuchen, et al. Characteristics of crop straw resource utilisation, technology model and development suggestions in China[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2019, 21(5): 8-16. (in Chinese)

[4] 欧阳安, 王明磊, 崔涛, 等. 粮食作物生产装备应用现状与发展趋势[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(10): 298-304.
OUYANG An, WANG Minglei, CUI Tao, et al. Current status and development trend of grain crop production equipment application[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(10): 298-304. (in Chinese)

[5] 沈从举, 谭新赞, 代亚猛, 等. 9YQ-2200S 型秸秆方捆打捆机设计与试验[J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(4): 287-294.
SHEN Congju, TAN Xinzan, DAI Yameng, et al. Design and test of 9YQ-2200S straw square bale baler[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2024, 59(4): 287-294. (in Chinese)

[6] 付乾坤, 付君, 陈志, 等. 秸秆捡拾打捆机振动去土作业参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(8): 26-33.
FU Qiankun, FU Jun, CHEN Zhi, et al. Optimization of vibration de-soiling operation parameters of straw picking and baling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(8): 26-33. (in Chinese)

[7] MECHANIZATION A, ASIA I N, AMERICA A L, et al. Processing non-conventional forages via baling crop residues[J]. Agricultural Mechanization in Asia, Africa and Latin America: AMA, 2014, 45(2): 19-25.

[8] AFZALINIA S, ROBERGE M. Modeling of pressure distribution inside the compression chamber of a large square baler[J]. Transactions of the ASABE, 2008, 51(4): 1143-1152.

[9] WANG Q, JIANG Y, LI L, et al. Performance analysis of a spring-tooth drum pickup of straw baler via coupling simulation [J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021(4): 014.

[10] 郭辉, 高国民, 周伟, 等. 轮式自走方捆打捆机行走速度控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(12): 107-114.
GUO Hui, GAO Guomin, ZHOU Wei, et al. Design and test of traveling speed control system for wheeled self-propelled square bale baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 107-114. (in Chinese)

[11] 仝振伟, 李洪文, 卢彩云, 等. 直注式秸秆捡拾粉碎深埋机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 83-95.
TONG Zhenwei, LI Hongwen, LU Caiyun, et al. Design and test of direct injection straw picking and crushing machine[J].

Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 83 - 95. (in Chinese)

[12] 庞统, 阿力木·买买提吐尔逊, 杜志高, 等. 穗茎兼收型玉米收获机茎秆喂入切碎装置的设计与试验[J]. 农机化研究, 2025, 47(12): 101 - 109.
PANG Tong, ALIMU BUYMTI Tursun, DU Zhigao, et al. Design and test of stalk feeding and chopping device of corn harvester with both ears and stalks[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(12): 101 - 109. (in Chinese)

[13] 郭炜, 高晓宏, 苏佳佳, 等. 基于 ADAMS 的 9YFLD - 2.2 型大方草捆压捆机喂入机构动态仿真分析[J]. 饲料工业, 2024, 45(17): 13 - 17.
GUO Wei, GAO Xiaohong, SU Jiajia, et al. Dynamic simulation analysis of feeding mechanism of 9YFLD - 2.2 large square bale press based on ADAMS[J]. Feed Industry, 2024, 45(17): 13 - 17. (in Chinese)

[14] 王浩杨, 荆天天, 唐忠, 等. 田间废弃秸秆捡拾打捆机设计与试验[J]. 浙江农业学报, 2024, 36(10): 2368 - 2378.
WANG Haoyang, JING Tiantian, TANG Zhong, et al. Design and test of field waste straw picking and baling machine[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2024, 36(10): 2368 - 2378. (in Chinese)

[15] 杨杰, 王一言, 朱奕庚, 等. 方捆秸秆打捆机缠网机构设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(12): 36 - 40.
YANG Jie, WANG Yiyan, ZHU Yigeng, et al. Design and test of netting mechanism for square bale straw baler[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(12): 36 - 40. (in Chinese)

[16] TANG Z, ZHANG B, LIU X, et al. Structural model and bundling capacity of crawler picking and baling machine for straw wasted in field[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2020, 175: 105622.

[17] 张青松, 齐涛, 燕桓, 等. 稻茬田油菜直播秸秆覆盖还田装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 186 - 196.
ZHANG Qingsong, QI Tao, YAN Huan, et al. Design and test of straw mulching device for direct seeding oilseed rape in rice stubble field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 186 - 196. (in Chinese)

[18] LIN J, LIAO Q, WANG X, et al. Exploring straw movement through the simulation of shovel-type seedbed preparation machine-straw-soil interaction using the DEM - MBD coupling method[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2024, 226: 109465.

[19] 郁志宏, 淮守成, 王文明. 基于弹齿轨迹的滚筒式牧草捡拾器遗漏率及工作参数优化[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 37 - 43.
YU Zhihong, HUAI Shoucheng, WANG Wenming. Optimization of leakage rate and working parameters of roller forage picker base on elastic tooth trajectory[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(4): 37 - 43. (in Chinese)

[20] 金诚谦, 吴崇友, 金梅, 等. 4SY - 2 型油菜割晒机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(10): 76 - 79.
JIN Chengqian, WU Chongyou, JIN Mei, et al. Design and test of 4SY - 2 oilseed rape cutting and sunning machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(10): 76 - 79. (in Chinese)

[21] 侯守印, 纪张驰, 薛东辉, 等. 适配免耕播种单体的清秸装置改进设计与试验[J]. 农业机械学报, 2023, 54(7): 111 - 122.
HOU Shouyin, JI Zhangchi, XUE Donghui, et al. Improved design and test of straw removal device for no-tillage seeding unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(7): 111 - 122. (in Chinese)

[22] 王锋德, 陈志, 王俊友, 等. 4YF - 1300 型大方捆打捆机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 36 - 41.
WANG Fengde, CHEN Zhi, WANG Junyou, et al. Design and test of 4YF - 1300 large square bale baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 36 - 41. (in Chinese)

[23] 王成军, 韩锰, 龚智强. 可变压捆室打捆机结构设计与仿真分析[J]. 中国农机化学报, 2022, 43(9): 1 - 6.
WANG Chengjun, HAN Meng, GONG Zhiqiang. Structural design and simulation analysis of a baler with variable compression chamber[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2022, 43(9): 1 - 6. (in Chinese)

[24] 高雄, 汤岩, 陈铁英, 等. 大方草捆压捆机喂入机构运动分析与优化[J]. 农机化研究, 2017, 39(8): 12 - 16,21.
GAO Xiong, TANG Yan, CHEN Tieying, et al. Motion analysis and optimization of feeding mechanism of a large square bale press[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017, 39(8):12 - 16,21. (in Chinese)

[25] 马征, 李毕辉, 宋志强, 等. 联合收获机清选筛箱轻量化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(12): 201 - 211.
MA Zheng, LI Bihui, SONG Zhiqiang, et al. Lightweight design and test of combine harvester cleaning screen box[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(12): 201 - 211. (in Chinese)

[26] 戴飞, 赵武云, 张锋伟, 等. 西北雨养区全膜双垄沟播技术与配套机具研究进展分析[J]. 农业机械学报, 2019, 50(5): 1 - 16.
DAI Fei, ZHAO Wuyun, ZHANG Fengwei, et al. Analysis of the research progress of full-film double-row furrow sowing technology and supporting implements in northwest rainfed areas[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(5): 1 - 16. (in Chinese)

[27] 王立军, 宋良来, 冯鑫, 等. 谷物联合收获机筛分装置研究现状与发展分析[J]. 农业机械学报, 2021, 52(6): 1 - 17.
WANG Lijun, SONG Lianglai, FENG Xin, et al. Research status and development analysis of screening device for grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 1 - 17. (in Chinese)