doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2021.06.015

喂入调节式秸秆破包揉丝机设计与试验

王铁军[1]　王铁良[1]　崔红光[2]　宫元娟[2]　田素博[2]　王瑞丽[2]
(1. 沈阳农业大学水利学院, 沈阳 110866; 2. 沈阳农业大学工程学院, 沈阳 110866)

摘要: 为解决小型揉丝机难以同时处理属地人工打包的整株捆与机械压制的小方捆玉米秸秆的问题,设计了一种秸秆破包揉丝机。通过进行秸秆受力与运动分析确定影响机器工作的主要结构与工作参数,并对整机传动系统与各轴转速进行设计与匹配。研究整株及方捆秸秆在初始喂入、内部运动和筛分排出过程中关键结构与工作参数对工作效率和丝化效果的影响,以电机输出转速、筛孔直径和喂入间隙为试验因素,以标定单位功率生产率和秸秆丝化率为评价指标,采用三元二次回归正交旋转中心组合试验方法进行了试验与分析,建立了试验因素与评价指标的回归模型。结果表明:对标定单位功率生产率的影响主次顺序为电机输出转速、喂入间隙、筛孔直径,对秸秆丝化率的影响主次顺序为筛孔直径、电机输出转速、喂入间隙;最优工作参数组合为:处理整株秸秆时,电机输出转速 1 353 r/min、筛孔直径 47 mm、喂入间隙 12 cm,处理方捆秸秆时,电机输出转速 1 072 r/min、筛孔直径 46 mm、喂入间隙 35 cm;验证试验表明,整株及方捆秸秆的标定单位功率生产率和秸秆丝化率均值分别为 99.34 kg/(kW·h)、98.86% 和 113.56 kg/(kW·h)、98.30%,满足设计要求。

关键词: 捆包秸秆; 破包揉丝; 揉丝机; 喂入调节装置
中图分类号: S226.8　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2021)06-0148-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Adjustable Feeding Straw Bale-breaking and Rubbing Filament Machine

WANG Tiejun[1]　WANG Tieliang[1]　CUI Hongguang[2]　GONG Yuanjuan[2]　TIAN Subo[2]　WANG Ruili[2]
(1. *College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang* 110866, *China*
2. *College of Engineering, Shenyang Agricultural University, Shenyang* 110866, *China*)

Abstract: One of the critical barriers for small rubbing filament machine is the great varies of material sizes especially in the feeding direction, which makes it difficult to process the local baled straw by the same device. A small and adjustable bale-breaking and rubbing filament machine was developed and tested to improve baled straw filamentous performance. The machine integrated bale-breaking and feeding device, cutting and shredding device, rubbing and filamentous device and sieving and discharge device. The structure and working principles of the machine were introduced, and the force of the straw in each device was analyzed, on which key devices and components were designed. Meanwhile, the ratio speed of each aixs were matched by the analysis of the transmission system. Effects of motor output speed (X_1), screen hole diameter (X_2) and feeding gap (X_3) on the productivity of standardized unit power (Y_E) and the percentage of filamentous straw (Y_H) were explored. Three-dimensional quadratic regression orthogonal rotation central combination experiment method combined with response surface method was used to conduct experiments and explore the interaction effects of influence factors on indicators. A regression model of influence factors and evaluation indicators was established through the analysis of variance. The significant factors affecting Y_E were ordered of X_1, X_3, X_2, and the significant factors affecting Y_H were ordered of X_2, X_1, X_3. In the interaction of factors, X_1X_2 had an extremely significant impact on Y_{E1}, and a significant impact on Y_{H1} and Y_{H2}; X_1X_3 had an extremely significant impact on Y_{E1} and a significant impact on Y_{E2}; X_2X_3 had an extremely significant effect on Y_{E1} and Y_{E2}. The optimal structure and working parameters combination were determined to be 1 353 r/min and

收稿日期: 2021-02-05　修回日期: 2021-03-24
基金项目: 辽宁省高校科研经费项目(LSNFW201909)和辽宁省自然科学基金项目(2019-ZD-0706)
作者简介: 王铁军(1991—),男,博士生,主要从事农业废弃物制肥工艺与成套装备研究,E-mail: 2017200009@stu.syau.edu.cn
通信作者: 王瑞丽(1970—),女,副教授,主要从事农业机械化及智能化装备研究,E-mail: wangruili@syau.edu.cn

1 072 r/min for x_1, 47 mm and 46 mm for x_2, and 12 cm and 35 cm for x_3, respectively for the whole-plant and the square-bale maize straw. Verification experiments demonstrated that the actual values for the whole-plant and square-bale maize straw of Y_E and Y_H were 99.34 kg/(kW·h), 113.56 kg/(kW·h), 98.86% and 98.30%, respectively. The small and adjustable bale-breaking and rubbing filament machine operation developed was effective for improving productivity and filamentous performance in the baled straw rubbing. It met the design requirements for the grain size of the comprehensive utilization of straws. Overall, the study laid the foundation for the development of the small multi-purpose straw rubbing filament machine.

Key words: baled straw; bale-breaking filament; rubbing filament machine; adjustable feeding device

0　引言

秸秆打捆是增加堆积密度、节省储存空间的有效途径[1-2],但中小规模或非集中连片种植产生的人工打包整株捆秸秆与机械压制小方捆秸秆难以利用,阻碍了地区农业生态环境的高质量发展[3-4]。丝化处理是秸秆资源化利用的基础[5],但秸秆是具有各向异性和粘弹性的复杂结构生物质[6-7],整株秸秆与方捆秸秆的物料性质存在差异。

国内外研究人员通过试验与仿真从秸秆受力分析、机构运动过程等角度对整株秸秆粉碎揉丝机理进行了研究[8-10],设计并改进了铡草揉草粉碎机、软秸秆散包粗碎机和草捆拆包粉碎机,以解决不同工作对象相应机具的应用问题[11-13],特别是针对捆包秸秆问题,设计了 6 极三相异步电动机驱动的破包设备及逆向应用秸秆卷压成型原理的圆捆拆包机[14-15]。

针对小型揉丝机不适用于方捆秸秆破包揉丝及大型揉丝机不适用于乡村移动揉丝作业等问题,本文设计一种适用于中小捆包秸秆的喂入调节式秸秆破包揉丝机。基于秸秆在机器各装置中的受力与运动分析,进行整机关键结构设计与传动系统匹配,分析关键结构与工作参数及其交互作用对机器生产能力与秸秆丝化效果的影响,并验证参数优化组合结果及最优参数组合条件下的机器使用性能,以期实现村户分散捆包秸秆的属地化揉丝处理。

1　整机结构与工作原理

喂入调节式秸秆破包揉丝机由喂入调节、切割粉碎、揉搓丝化和螺旋出料等装置组成(如图 1 所示)。

工作时,由可拆卸推杆与地轮带动机器行走与固定,以满足乡村移动式作业需求;通过滑动组件(滑轨、丝杠、转动轴承等)调节破包轴与传送链板间垂直距离(即喂入间隙),以实现不同喂入尺寸的捆包秸秆均可在传送链板带动下一次完成破包与喂入。捆包秸秆能够在锯盘刀及传送链板间被破包并夹持,进一步在定刀位置被切碎,切碎秸秆随直刀向后运动,在揉搓丝化装置中受锤片冲击被进一步粉碎,并在锤片与揉搓板间相对滑动,在摩擦、剪切作用下丝化,经筛网筛分后,被螺旋输送器推出至出料口,从机器中输出,通过“割-切-搓-推”等部件实现捆包秸秆的组合式揉丝处理。

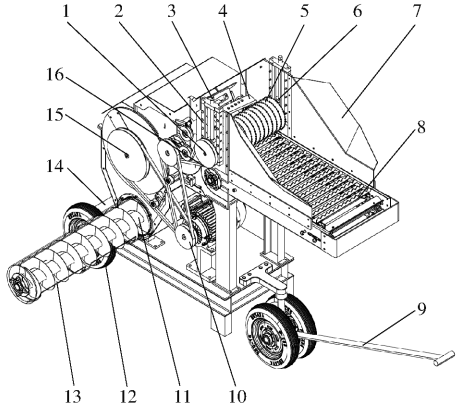


图 1　秸秆破包揉丝机结构示意图

Fig. 1　Structure schematic of straw bale-breaking and rubbing filament machine

1. 破包轴　2. 滑轨　3. 丝杠　4. 直刀　5. 锯盘刀　6. 转动轴承　7. 防护板　8. 传送链板　9. 推杆　10. 电动机　11. 螺旋输送器　12. 行走轮　13. 出料口　14. 机架　15. 揉丝轴　16. 定刀

2　秸秆受力分析与关键部件设计

2.1　喂入过程秸秆受力分析与装置设计

喂入调节装置包括传送链板、破包轴、锯盘刀、滑轨、丝杠、转动轴承、喂入轴和防护板等(如图 2 所示),喂入间隙可调节以适应不同秸秆的喂入尺寸。破包轴与喂入轴相互作用,为破裂捆包秸秆提供线速度,二者在同一竖直方向,转向相反。参照文献[16-17],设计锯盘刀直径为 180 mm,厚度为 2.5 mm,周向上布置 40 个双刃三角形齿,相邻锯齿间内切圆直径为 6 mm。

根据定向喂入条件下秸秆破裂破碎理论[18-20],喂入过程秸秆受力与运动分析如图 3 所示。工作时,保证捆包秸秆喂入的必要条件为

$$F_{f1}\cos\alpha + F_{f2} \geqslant F_{N1}\sin\alpha \tag{1}$$

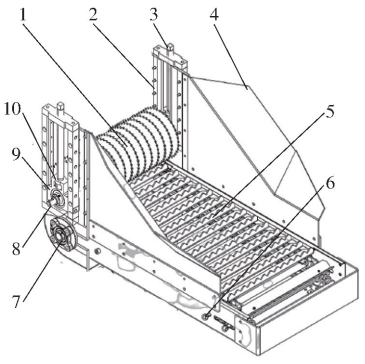


图 2 喂入调节装置结构示意图

Fig. 2 Structure schematic of adjustable feeding device

1. 锯盘刀 2. 滑轨 3. 丝杠 4. 护板 5. 传送链板 6. 锁紧螺母 7. 喂入轴 8. 破包轴 9. 转动轴承 10. 丝杠螺母

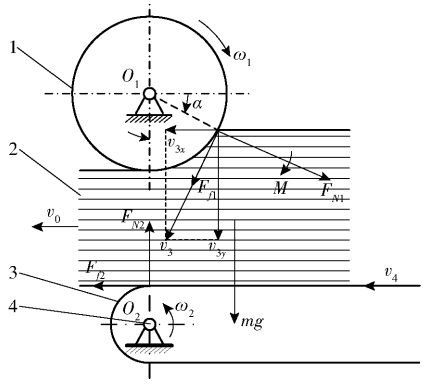


图 3 秸秆破包喂入过程受力与运动分析图

Fig. 3 Analysis diagram of force and movement of straw bale-breaking and feeding process

1. 锯盘刀 2. 捆包秸秆 3. 传送链板 4. 喂入轴

由图 3 有

$$F_{N2} = F_{f1}\sin\alpha + F_{N1}\cos\alpha + mg \tag{2}$$

$$F_{f1} = \mu_1 F_{N1} \tag{3}$$

$$F_{f2} = \mu_2 F_{N2} \tag{4}$$

式中 m——秸秆质量,kg

α——喂入角,(°)

g——重力加速度,m/s^2

F_{N1}——锯盘刀对秸秆的正压力,N

F_{N2}——喂入轴对秸秆的支持力,N

F_{f1}——锯盘刀对秸秆的摩擦力,N

F_{f2}——传送链板对秸秆的摩擦力,N

μ_1——秸秆与锯盘刀之间的摩擦因数

μ_2——秸秆与传动链板之间的摩擦因数

设锯盘刀与传动链板材质相同,则秸秆与二者摩擦因数相同,即 $\mu_1 = \mu_2 = \mu$,联立式(1)~(4)可得

$$2\mu\cos\alpha + \mu^2\sin\alpha + \frac{\mu mg}{F_{N1}} \geqslant \sin\alpha \tag{5}$$

式中 $\mu^2\sin\alpha + \dfrac{\mu mg}{F_{N1}} \geqslant 0$,为使式(1)成立,只需满足 $2\mu\cos\alpha \geqslant \sin\alpha$,即 $2\tan\varphi \geqslant \tan\alpha$。一般秸秆摩擦角 φ 取值范围为 17°~27°[21],则 α 取值范围为 32°~46°。由图 3 可知,喂入角的大小受喂入间隙和捆包秸秆喂入高度的影响,因此,当捆包秸秆喂入高度一定时,喂入间隙直接影响喂入角大小,为进一步明确喂入间隙对秸秆喂入性能和丝化效果的影响,本文对其进行试验优化。

2.2 切碎过程秸秆受力分析与装置设计

切割粉碎装置主要包括定刀和直刀。根据动定刀对秸秆滑切作用[22-23]及切碎过程秸秆受力与运动分析(图 4),得到切碎秸秆的必要条件为

$$F_\tau \sin\beta \geqslant F_{f3} + F_{f4}\sin\beta + F_{N4}\cos\beta \tag{6}$$

由图 4 有

$$mg + F_\tau\cos\beta + F_{N4}\sin\beta = F_{N3} + F_{f4}\cos\beta \tag{7}$$

$$F_{f3} = \mu_3 F_{N3} \tag{8}$$

$$F_{f4} = \mu_4 F_{N4} \tag{9}$$

式中 β——滑切角,(°)

F_τ——直刀对秸秆的切削力,N

F_{N3}——定刀对秸秆的支持力,N

F_{N4}——直刀对秸秆的正压力,N

F_{f3}——定刀对秸秆的摩擦力,N

F_{f4}——直刀对秸秆的摩擦力,N

μ_3——秸秆与直刀之间的摩擦因数

μ_4——秸秆与定刀之间的摩擦因数

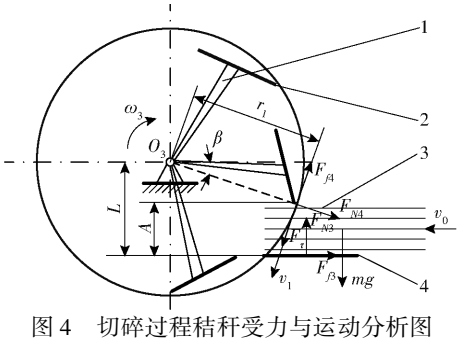


图 4 切碎过程秸秆受力与运动分析图

Fig. 4 Analysis diagram of force and movement of straw cutting and shredding process

1. 直刀架 2. 直刀 3. 秸秆 4. 定刀

设直刀与定刀材质相同,则秸秆与二者摩擦因数相同,即 $\mu_3 = \mu_4 = \mu'$,联立式(6)~(9)可得

$$\mu' + \frac{F_{N4}\cos(2\beta) + mg\sin\beta}{F_{N3}\cos\beta} \leqslant \tan\beta \tag{10}$$

式中 $\dfrac{F_{N4}\cos(2\beta) + mg\sin\beta}{F_{N3}\cos\beta} \geqslant 0$,为使式(6)成立,只需满足 $\tan\varphi \leqslant \tan\beta$,即 $\beta \geqslant 27°$。同时为便于秸秆均衡滑切,轴向上直刀左右交错排列,且左右两直刀与切碎轴轴线呈 3°~5°夹角,故周向间隔 60°布置 1 片直刀,切碎轴左右各布置 6 片直刀。

切碎机构高度 a 与宽度 b 计算式为[16]

$$ab = \frac{Q}{60\varphi_1 l Z_d n_1 \gamma} \tag{11}$$

式中　Q——生产率，设计值 200 kg/h

φ_1——切碎装置充满系数，取 0.1

l——秸秆切碎长度，设计值 10 ~ 50 mm

Z_d——直刀数，设计值 6

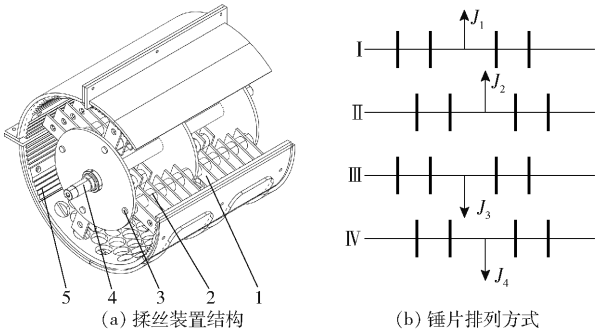
n_1——切碎轴转速，r/min

γ——秸秆丝容重，取 40 kg/m^3

取 $a = b/4$，则左右切碎机构组成的切割粉碎装置的高度和宽度设计值分别为 100 mm 和 400 mm。

2.3　揉丝过程秸秆受力分析与装置设计

揉搓丝化装置主要包括锤片、揉丝轴和揉搓板。如图 5 所示，揉丝轴周向均布 4 个平行销轴（Ⅰ ~ Ⅳ），轴向上相邻销轴上的锤片交错排布（J_1 ~ J_4），提高轴向上锤片密度，使其在工作中覆盖更多揉丝空间，增加秸秆与锤片接触面积，锤片设计长度 120 mm、宽度 30 mm、厚度 5 mm。



(a) 揉丝装置结构　　(b) 锤片排列方式

图 5　揉丝装置结构与锤片排列方式示意图

Fig. 5　Structure diagram of rubbing filamentous mechanism and hammer arrangement

1. 锤片　2. 套筒　3. 销轴　4. 揉丝轴　5. 揉搓板

根据秸秆丝化过程受到的锤击和揉搓作用分析[24]，秸秆丝化过程受力如图 6 所示。

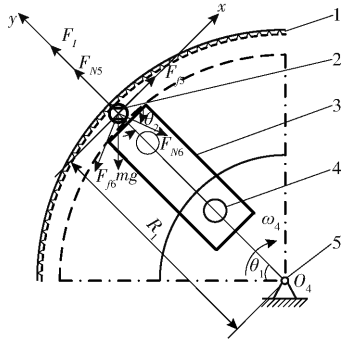


图 6　秸秆丝化过程受力分析图

Fig. 6　Force analysis diagram of fragment straw rubbing process

1. 揉搓板　2. 秸秆段　3. 锤片　4. 销轴　5. 揉丝轴

根据达朗贝尔原理，秸秆丝化瞬间应满足平衡状态，建立平衡方程式

$$\begin{cases} \sum F_x = F_{f5} + F_{N6}\sin\theta_2 - F_{f6}\cos\theta_2 - mg\cos\theta_1 = 0 \\ \sum F_y = F_I + F_{N5} - F_{N6}\cos\theta_2 - F_{f6}\sin\theta_2 - mg\sin\theta_1 = 0 \end{cases} \tag{12}$$

其中

$$F_I = m\omega_4^2 R_1 \tag{13}$$

$$F_{f5} = \mu_5 F_{N5} \tag{14}$$

$$F_{f6} = \mu_6 F_{N6} \tag{15}$$

式中　ω_4——锤片角速度，rad/s

θ_1——秸秆段和揉丝轴轴心连线水平夹角，(°)

θ_2——秸秆段和揉丝轴轴心连线与揉搓板对秸秆支持力方向间夹角，(°)

F_I——秸秆段离心力，N

F_{N5}——锤片对秸秆段的支持力，N

F_{N6}——揉搓板对秸秆段的支持力，N

F_{f5}——锤片对秸秆段的摩擦力，N

F_{f6}——揉搓板对秸秆段的摩擦力，N

R_1——秸秆段回转半径，mm

μ_5——秸秆段与锤片之间的摩擦因数

μ_6——秸秆段与揉搓板之间的摩擦因数

联立式(12) ~ (15)可得

$$\begin{cases} F_{f5} = mg\cos\theta_1 + \{[\mu_5 m\omega_4^2 R_1 + mg(\cos\theta_1 - \mu_5\sin\theta_1)] \cdot \\ \qquad (\mu_6\cos\theta_2 - \sin\theta_2)[(1+\mu_5\mu_6)\sin\theta_2 + (\mu_5 - \mu_6)\cos\theta_2]^{-1}\} \\ F_{f6} = \mu_6 \dfrac{\mu_5 m\omega_4^2 R_1 + mg(\cos\theta_1 - \mu_5\sin\theta_1)}{(1+\mu_5\mu_6)\sin\theta_2 + (\mu_5 - \mu_6)\cos\theta_2} \end{cases} \tag{16}$$

公式(16)表明，秸秆丝化所受摩擦力 F_{f5} 和 F_{f6} 与摩擦因数、位置、角速度等有关，其中揉搓板靠近锤片的表面上均布有楔形齿，可增大摩擦因数；锤片所在外圆周与揉搓板间预设一定锤筛间隙，优化秸秆段在锤片和揉搓板之间的相对位置与受力角度；锤片角速度与揉丝轴转速直接相关，当整机动力与传动比一定时，主要受电机输出转速影响，为进一步明确电机输出转速对秸秆丝化效果的影响，本文对其进行试验优化。

2.4　出料过程分析与装置设计

螺旋出料装置主要包括筛网和螺旋输送器。筛网上 T 型布置等直径圆孔，实现几何尺寸小于筛孔直径的秸秆丝从揉丝装置分离，经螺旋输送器推动至出料口，变被动输出为主动出料，可实现平稳高效输出，避免积料[25]。秸秆丝通过筛孔时应满足[16]

$$v \leqslant \left[D_1 - \frac{d}{2}(1 + \tan\delta)\right]\frac{g\cos\delta}{d} \tag{17}$$

式中　v——秸秆丝在筛面上的运动速度，m/s

D_1——筛孔直径，mm

d——秸秆丝粒径，设计值 1 ~ 20 mm

δ——筛面倾角,设计值 60°

则使 $v \geqslant 0$ m/s 时需满足 $D_1 \geqslant 27.32$ mm。为进一步明确筛孔直径对机器生产能力和秸秆丝化效果的影响,本文对其进行试验优化。

螺旋输送器主要参数关系式为[16]

$$Q = 47 D_2^2 \varphi_2 R_2 n_5 \gamma C \tag{18}$$

式中 D_2——螺旋直径,设计值 0.18 m

φ_2——螺旋输送器充满系数,取 0.4

R_2——螺距,设计值 0.1 m

n_5——螺旋输送轴转速,r/min

C——倾斜修正系数,取 1.0

2.5 传动系统设计

整机传动系统如图 7 所示,主要由带轮、轴、齿轮和固定件等组成,主要传动方式为带传动。其作用是把动力由电机通过不同型号带轮和齿轮进行变速和变向,分别以特定速度和扭矩向切碎轴和揉丝轴传递,再由切碎轴向破包轴传递,同时经揉丝轴输出并变向后向螺旋输送轴和喂入轴传递,保证整个丝化过程的正常运行。各轴之间转速匹配对作业质量具有重要影响,其中破包切割速度与喂入速度的匹配是影响破包效果和机器效率的重要因素之一。若破包轴转速过高,破裂后的秸秆有向机器外抛送趋势,降低内抛速度,不利于稳定喂入;若喂入速度过高,则无法实现对物料的有效切割[26],未被切割破包的秸秆捆难以在动定刀作用下切碎。

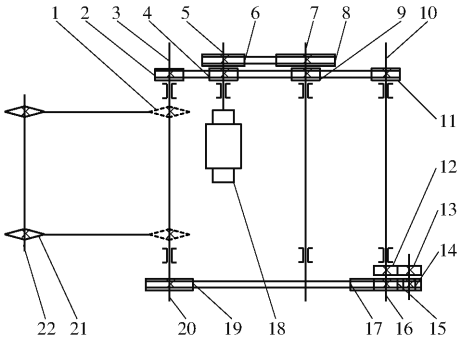


图 7 揉丝机传动示意图

Fig. 7 Schematic diagram of transmission for rubbing filament machine

1. 主动喂入齿轮 2. 破包轴带轮 3. 破包轴 4. 动力输出带轮Ⅰ 5. 动力输出轴 6. 动力输出带轮Ⅱ 7. 切碎轴 8. 切碎轴输入带轮 9. 切碎轴输出带轮 10. 揉丝轴 11. 揉丝轴带轮 12. 揉丝轴齿轮 13. 变向齿轮 14. 变向带轮 15. 螺旋输送轴输出带轮 16. 螺旋输送轴 17. 螺旋输送轴输入带轮 18. 电机 19. 喂入轴带轮 20. 主动喂入轴 21. 从动喂入齿轮 22. 从动喂入轴

取电机输出转速 $n_0 = 1\,000$ r/min,设计动力输出带轮Ⅰ、Ⅱ直径分别为 $d_{01} = 150$ mm、$d_{02} = 125$ mm,根据带传动比和齿轮传动比公式及转速与线速度关系[27]可知,切碎轴转速 n_1(r/min)、揉丝轴转速 n_2(r/min)、破包轴转速 n_3(r/min)、喂入轴转速 n_4(r/min)和螺旋输送轴转速 n_5(r/min),以及直刀线速度 v_1(m/s)、锤片线速度 v_2(m/s)、锯盘刀线速度 v_3(m/s)、传送链板线速度 v_4(m/s)分别为

$$\begin{cases} n_1 = \dfrac{n_0 d_{02}}{d_{11}} \\ n_2 = \dfrac{n_0 d_{01}}{d_2} \\ n_3 = \dfrac{n_0 d_{02} d_{12}}{d_{11} d_3} \\ n_4 = \dfrac{n_0 z_1 d_{01} d_{52} d_6}{z_2 d_2 d_4 d_{51}} \\ n_5 = \dfrac{n_0 z_1 d_{01} d_6}{z_2 d_2 d_{51}} \end{cases} \tag{19}$$

$$\begin{cases} v_1 = \dfrac{n_0 d_{02} \pi r_1}{30 d_{11}} \\ v_2 = \dfrac{n_0 d_{01} \pi r_2}{30 d_2} \\ v_3 = \dfrac{n_1 d_{12} \pi r_3}{30 d} \\ v_4 = \dfrac{n_5 d_{52} \pi r_4}{30 d_4} \end{cases} \tag{20}$$

式中 d_{11}——切碎轴输入带轮直径,mm

d_{12}——切碎轴输出带轮直径,mm

d_2——揉丝轴带轮直径,mm

d_3——破包轴带轮直径,mm

d_4——喂入轴带轮直径,mm

d_{51}——螺旋输送轴输入带轮直径,mm

d_{52}——螺旋输送轴输出带轮直径,mm

d_6——变向带轮直径,mm

z_1——揉丝轴齿轮齿数

z_2——变向齿轮齿数

r_1——直刀回转半径,设计值 200 mm

r_2——锤片回转半径,设计值 300 mm

r_3——锯盘刀回转半径,设计值 200 mm

r_4——传送链板转动半径,设计值 40 mm

研究表明,以切碎轴为轴心的直刀刃口远心端线速度适宜范围为 30 ~ 43 m/s[20],则 60.85 mm$\leqslant d_{11} \leqslant$ 87.22 mm,查表[27]取 $d_{11} = 85$ mm,得 $n_1 =$ 1 470.59 r/min,$v_1 = 30.78$ m/s。以锤片为主要工作部件的揉丝装置转子末端线速度适宜范围为 55 ~ 70 m/s[16],则 67.29 mm$\leqslant d_2 \leqslant$85.64 mm,查表[27]取 $d_2 = 85$ mm,得 $n_2 = 1\,764.71$ r/min,$v_2 = 55.41$ m/s。

根据式(18)得到螺旋输送轴转速 n_5下限值为 82.09 r/min,秸秆丝流动性较差,为保证秸秆丝平稳向设备外推出,取 $d_{51} = 450$ mm,$d_6 = 50$ mm,$z_1 = 20$,

$z_2=37$，得 $n_5=100.10$ r/min。

研究表明，玉米秸秆喂入速度为 0.88 m/s 时揉搓效果达到最优[28]，查表[27]取 $d_{52}=160$ mm、$d_4=80$ mm，得 $n_4=211.98$ r/min，$v_4=0.89$ m/s。

由图 3 可得秸秆喂入结束时速度（即进入切碎装置时速度）v_0 为

$$v_0=v_3\cos\alpha+v_4 \tag{21}$$

同时，定刀与回转中心垂直距离 L 与秸秆喂入高度 A 需满足[16]

$$L=A+r_1\frac{v_0}{v_1} \tag{22}$$

由图 4 有

$$L-A=r_1\sin\beta\cos\beta \tag{23}$$

联立式（21）~（23）可得

$$v_3=\frac{v_1\sin\beta\cos\beta-v_4}{\cos\alpha} \tag{24}$$

此时 v_3 取值范围为 13.46 ~ 16.58 m/s，查表[27]取 $d_{12}=56$ mm、$d_3=125$ mm，得 $n_3=658.82$ r/min，$v_3=13.79$ m/s。

3　试验与结果分析

3.1　试验条件

试验在农业农村部东北设施园艺工程科学观测实验站晒场进行。供试秸秆为 2019 年沈阳农业大学北山科研基地收割后风干的人工打包整株捆玉米秸秆（品种为万盈 178）及霞光自走式捡拾揉搓打捆机（辽宁宁越农机装备有限公司）压制的方捆玉米秸秆（品种为东单 1331，长 × 宽 × 高为 500 mm × 360 mm × 450 mm，密度为 250 kg/m^3，秸秆尺寸范围为 50 ~ 150 mm）。随机抽样测定秸秆含水率范围在 13.52% ~ 20.31% 之间，选取 15% ~ 18% 含水率范围内秸秆作为试验材料。

试验仪器设备包括 QUINTIX224 - 1CN 型电子分析天平（德国赛多利斯公司）、数显式 101 - 0A 型电热恒温干燥箱（上海阳光实验仪器有限公司）、8411 型电动振筛机（上虞市一峰仪器厂）、秒表等。

3.2　试验设计

应用 Design-Expert 软件，选择三元二次回归正交旋转中心组合试验设计方法，分别对整株秸秆与方捆秸秆进行试验。以电机输出转速（x_1）、筛孔直径（x_2）和喂入间隙（x_3）为试验因素，以标定单位功率生产率和秸秆丝化率为试验指标[29]。

喂入已称量秸秆，记录全部喂入试验时间，称量输出样品质量，计算标定单位功率生产率（结果保留两位小数）为

$$E=\frac{M(1-S)}{TP(1-S_b)}\times 60 \tag{25}$$

式中　M——试验用秸秆质量，kg

T——试验时间，min

P——配套动力总标定功率，本试验为 3.0 kW

S——试验用秸秆含水率，%

S_b——秸秆标准含水率，本试验为 20%

以相同时间间隔在出料口接取样品 3 次，每次 200 g，混合后筛分并称量，计算秸秆丝化率（结果保留两位小数）为

$$H=\frac{m_1}{m_0}\times 100\% \tag{26}$$

式中　m_1——样品中秸秆丝质量，g

m_0——秸秆样品质量，g

整株及方捆秸秆试验的因素编码如表 1、2 所示，为减小试验操作误差，取表中括号内圆整数值为试验值。试验方案与结果如表 3 所示（X_1、X_2、X_3 为因素编码值）。试验过程及试验采集样品分别如图 8 所示。

表 1　整株秸秆正交试验因素编码

Tab.1　Factors and codes of combination experiment for whole-plant maize straw

编码	因素		
	电机输出转速 x_1/(r·min^{-1})	筛孔直径 x_2/mm	喂入间隙 x_3/cm
1.682	1 400.00	50.00	12.00
1	1 237.81(1 250.00)	45.95(46.00)	11.19(11.20)
0	1 000.00	40.00	10.00
-1	762.19(750.00)	34.05(34.00)	8.81(8.80)
-1.682	600.00	30.00	8.00

表 2　方捆秸秆正交试验因素编码

Tab.2　Factors and codes of combination experiment for square-bale maize straw

编码	因素		
	电机输出转速 x_1/(r·min^{-1})	筛孔直径 x_2/mm	喂入间隙 x_3/cm
1.682	1 200.00	50.00	35.00
1	1 037.81(1 050.00)	45.95(46.00)	33.99(34.00)
0	800.00	40.00	32.50
-1	562.19(550.00)	34.05(34.00)	31.01(31.00)
-1.682	400.00	30.00	30.00

3.3　结果与分析

整株秸秆试验的标定单位功率生产率 E_1、秸秆丝化率 H_1 及方捆秸秆试验的标定单位功率生产率 E_2、秸秆丝化率 H_2 试验结果如表 3 所示。

3.3.1　方差分析

对回归模型进行方差分析和显著性检验，结果如表 4 所示。由表 4 可知，电机输出转速 X_1、喂入间隙 X_3 对 E 和 H 均有极显著影响（$P<0.01$），筛孔

表 3 试验方案与结果

Tab. 3 Experiment plan and results

编号	X_1	X_2	X_3	E_1/(kg·kW^{-1}·h^{-1})	H_1/%	E_2/(kg·kW^{-1}·h^{-1})	H_2/%
1	1	1	1	98.25	98.58	108.43	98.67
2	1	1	-1	97.09	98.65	94.36	98.79
3	1	-1	1	96.93	97.16	108.64	96.72
4	1	-1	-1	99.00	97.05	106.12	96.89
5	-1	1	1	91.00	97.25	93.84	97.04
6	-1	1	-1	95.11	97.31	89.70	97.32
7	-1	-1	1	85.67	96.08	93.30	96.09
8	-1	-1	-1	94.11	96.76	96.82	96.55
9	1.682	0	0	97.97	98.34	108.11	98.32
10	-1.682	0	0	86.13	96.57	98.31	96.85
11	0	1.682	0	96.34	98.57	93.46	98.81
12	0	-1.682	0	95.70	96.56	97.25	96.78
13	0	0	1.682	92.42	96.33	99.10	96.28
14	0	0	-1.682	98.89	97.45	94.33	97.72
15	0	0	0	94.08	96.42	94.65	96.17
16	0	0	0	95.68	96.49	95.87	96.53
17	0	0	0	94.32	96.36	91.71	96.23
18	0	0	0	94.18	96.72	95.95	96.68
19	0	0	0	94.05	96.70	93.73	96.30
20	0	0	0	92.94	96.54	92.10	96.69
21	0	0	0	92.56	96.46	93.41	96.51
22	0	0	0	94.47	96.44	92.83	96.38
23	0	0	0	94.68	96.83	92.45	96.42



(a) 试验样机 (b) 试验现场

(c) 整株秸秆丝 (d) 方捆秸秆丝

图 8 试验过程与采集的样品

Fig. 8 Experimental process and collected sample

直径 X_2对 E_2和 H 均有极显著影响($P<0.01$)、对 E_1有显著影响($P<0.05$);各因素对标定单位功率生产率的影响主次顺序为电机输出转速、喂入间隙、筛孔直径,对秸秆丝化率的影响主次顺序为筛孔直径、电机输出转速、喂入间隙。电机输出转速和筛孔直径交互作用(X_1X_2)对 E_1有极显著影响($P<0.01$),对 H_1和 H_2有显著影响($P<0.05$);电机输出转速和喂入间隙交互作用(X_1X_3)对 E_1有极显著影响($P<0.01$),对 E_2有显著影响($P<0.05$);筛孔直径和喂入间隙交互作用(X_2X_3)对 E_1和 E_2有极显著影响($P<0.01$)。决定系数 $R^2_{E1}=0.97$、$R^2_{H1}=0.96$、$R^2_{E2}=0.93$、$R^2_{H2}=0.95$,回归方程显著水平 F_R及失拟性检验 F_{Lf}、P 均大于 0.05,差异不显著,说明回归方程关系显著具有统计学意义。以 $P=0.05$ 显著水平剔除不显著项,简化后各因素与指标 Y 的回归模型为

$$Y_{E1}=94.11+3.32X_1+0.50X_2-1.78X_3-0.87X_1X_2+1.46X_1X_3+0.94X_2X_3-0.72X_1^2+0.68X_2^2+0.56X_3^2 \quad (27)$$

$$Y_{H1}=96.55+0.51X_1+0.59X_2-0.19X_3+0.16X_1X_2+0.32X_1^2+0.36X_2^2+0.12X_3^2 \quad (28)$$

$$Y_{E2}=93.63+4.42X_1-1.83X_2+1.85X_3+2.00X_1X_3+2.40X_2X_3+3.42X_1^2+1.13X_3^2 \quad (29)$$

$$Y_{H2}=96.44+0.48X_1+0.66X_2-0.25X_3+0.27X_1X_2+0.35X_1^2+0.43X_2^2+0.15X_3^2 \quad (30)$$

3.3.2 响应曲面分析

各因素及其交互作用对指标影响的响应曲面如图 9 所示。

图 9a ~9d 是喂入间隙(x_3)为零水平时,电机输出转速与筛孔直径交互作用(x_1x_2)对 E_1、H_1、E_2、H_2 影响的响应面图,分析可知,在试验因素取值范

表 4　试验数据方差分析与显著性检验

Tab. 4　Analysis of variance and significance test for experiment data

变异来源	F_{E1}	P_{E1}	F_{H1}	P_{H1}	F_{E2}	P_{E2}	F_{H2}	P_{H2}
模型	42. 6	<0. 000 1	39. 03	<0. 000 1	18. 86	<0. 000 1	26. 59	<0. 000 1
X_1	232. 49	<0. 000 1	96. 13	<0. 000 1	69. 42	<0. 000 1	47. 88	<0. 000 1
X_2	5. 22	0. 039 7	129. 58	<0. 000 1	11. 84	0. 004 4	90. 52	<0. 000 1
X_3	67. 16	<0. 000 1	13. 06	0. 003 1	12. 15	0. 004 0	13. 40	0. 002 9
X_1X_2	9. 27	0. 009 4	5. 72	0. 032 6	0. 94	0. 350 1	8. 63	0. 011 5
X_1X_3	26. 23	0. 000 2	2. 03	0. 177 4	8. 31	0. 012 8	0. 41	0. 531 0
X_2X_3	11. 04	0. 005 5	0. 65	0. 436 3	12. 00	0. 004 2	0. 10	0. 751 9
X_1^2	12. 69	0. 003 5	44. 09	<0. 000 1	48. 41	<0. 000 1	29. 92	0. 000 1
X_2^2	11. 51	0. 004 8	54. 95	<0. 000 1	1. 72	0. 212 9	44. 08	<0. 000 1
X_3^2	7. 60	0. 016 3	6. 19	0. 027 2	5. 27	0. 039 0	5. 14	0. 041 0
失拟	0. 40	0. 838 7	2. 18	0. 155 9	2. 49	0. 120 7	3. 26	0. 066 9

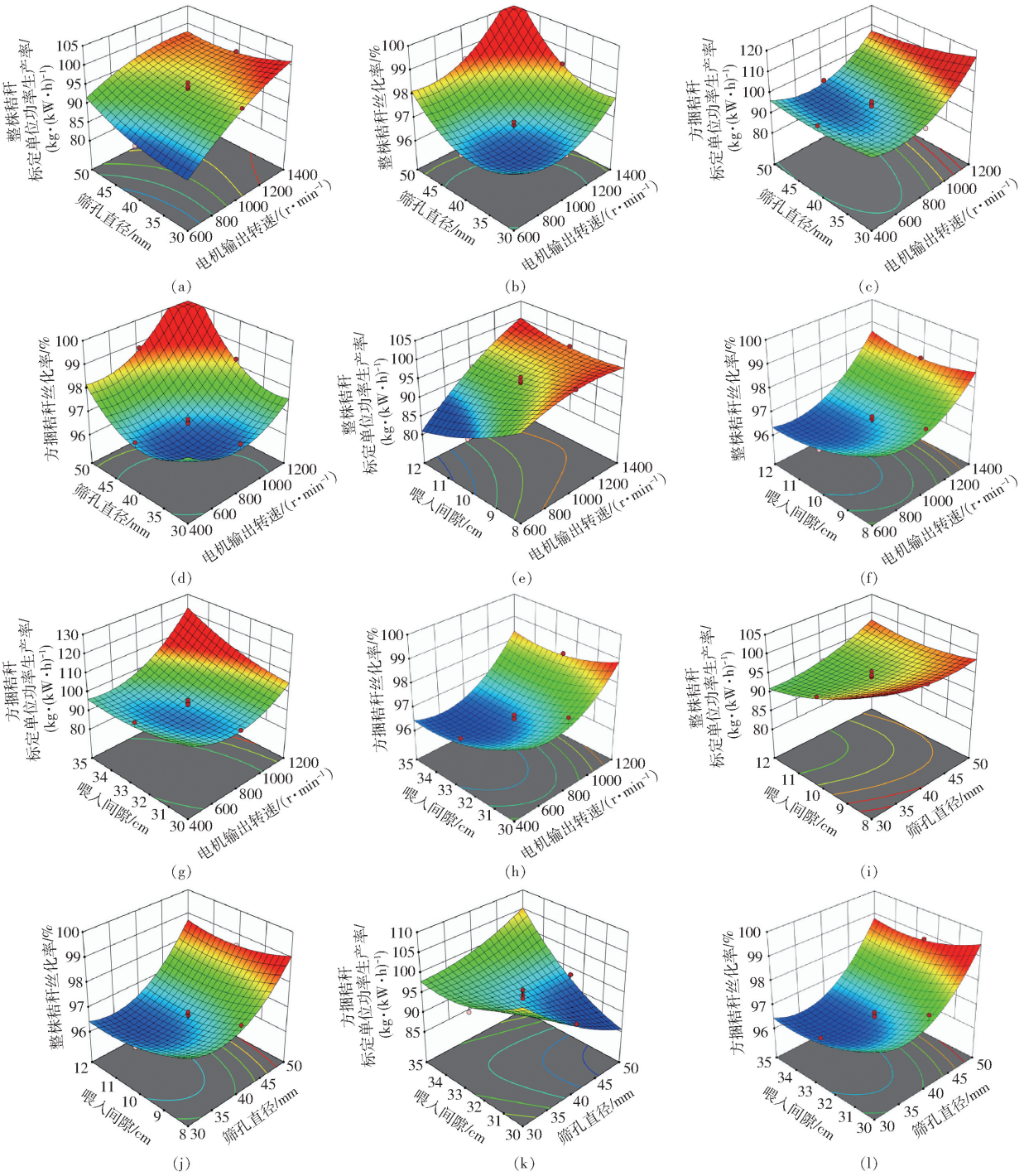


图 9　试验因素交互作用对指标影响的响应曲面

Fig. 9　Response surfaces of interaction experiment factors on index

围内,当 x_1 一定时,E 和 H 随 x_2 的增大而增大;当 x_2 一定时,E 和 H 随 x_1 的增大而增大。这是因为电机输出转速越高则各轴转速越高,筛孔直径越大使秸秆丝输出尺寸限制降低,使物料在相同时间内喂入更多、破裂破碎更快、揉搓和排出效率更高,提高了单位时间内丝化数量和质量,促使 E 与 H 提高;由于方捆秸秆较整株秸秆堆积密度大,故 E_1 比 E_2 增长量大、变化趋势更明显。

图 9e ~9h 是筛孔直径(x_2)为零水平时,电机输出转速与喂入间隙交互作用(x_1x_3)对 E_1、H_1、E_2、H_2 影响的响应面图,分析可知,在试验因素取值范围内,当 x_1 一定时,E 随 x_3 的增大而增大,H 随 x_3 的增大变化较小;当 x_3 一定时,E 和 H 均随 x_1 的增大而增大。这是因为电机输出转速及喂入间隙的增加提高了单位时间内秸秆喂入量,二者交互作用使 E 显著提升,且对 E_1 影响更显著;但电机输出转速及喂入间隙的提高增加了单位时间内设备处理物料总量,降低揉丝过程中单一秸秆所受揉搓作用频率,使 H 增长较为缓慢,故对 H_1 与 H_2 影响均不显著。

图 9i ~9l 是电机输出转速(x_1)为零水平时,筛孔直径与喂入间隙交互作用(x_2x_3)对 E_1、H_1、E_2、H_2 影响的响应面图,分析可知,在试验因素取值范围内,当 x_2 一定时,E 和 H 随 x_3 的增大变化较小;当 x_3 一定时,E 随 x_2 的增大而减小,但减小趋势平缓,H 随 x_2 的增大而增大。这是因为喂入间隙越小,物料在喂入过程受力越大,滑切作用越显著,切碎质量越高,单位时间内秸秆段数量增加、丝化质量提高,促进 E 和 H 提高;但喂入间隙过小阻碍物料喂入,喂入间隙过大降低锯盘刀破裂破碎作用,且方捆秸秆堆积密度高、喂入间隙变化区间小,故 E_2 比 E_1 变化趋势更大、影响更显著,但 H_1 与 H_2 变化趋势基本相同、影响不显著。

3.4 参数优化与验证试验

利用 Design-Expert 软件中的多目标优化算法,以标定单位功率生产率 E 最大值与秸秆丝化率 H 最大值为优化目标,建立整株秸秆及方捆秸秆约束条件的优化数学模型

$$\begin{cases}\max E_1(x_1,x_2,x_3)\\ \max H_1(x_1,x_2,x_3)\\ \text{s.t.}\begin{cases}600\ \text{r/min}\leqslant x_1\leqslant 1\,400\ \text{r/min}\\ 30\ \text{mm}\leqslant x_2\leqslant 50\ \text{mm}\\ 8\ \text{cm}\leqslant x_3\leqslant 12\ \text{cm}\end{cases}\end{cases}\tag{31}$$

$$\begin{cases}\max E_2(x_1,x_2,x_3)\\ \max H_2(x_1,x_2,x_3)\\ \text{s.t.}\begin{cases}400\ \text{r/min}\leqslant x_1\leqslant 1\,200\ \text{r/min}\\ 30\ \text{mm}\leqslant x_2\leqslant 50\ \text{mm}\\ 30\ \text{cm}\leqslant x_3\leqslant 35\ \text{cm}\end{cases}\end{cases}\tag{32}$$

求解得到整株秸秆最优工作参数组合为:电机输出转速 1 353 r/min、筛孔直径 47 mm、喂入间隙 12 cm,预测标定单位功率生产率 100.80 kg/(kW·h)、秸秆丝化率 99.71%;方捆秸秆最优工作参数组合为:电机输出转速 1 072 r/min、筛孔直径 46 mm、喂入间隙 35 cm,秸秆丝化率 99.07%、预测标定单位功率生产率 115.00 kg/(kW·h)。

为了进一步验证数学模型的可靠性与适用性,在相同的试验条件下,对优化结果进行试验验证,分别进行 3 次重复试验,取各次试验结果的平均值为该条件下性能指标实际值。测得整株秸秆及方捆秸秆的标定单位功率生产率和秸秆丝化率平均值分别为 99.34 kg/(kW·h)、98.86% 和 113.56 kg/(kW·h)、98.30%,对应整株及方捆秸秆的标定单位功率生产率和秸秆丝化率实际值与预测值之间的相对误差均小于 2%,说明所建模型及分析结果可信,机器具有较好的工作性能。

4 结论

(1)根据捆包秸秆就地分散处理的需求,设计了一种喂入调节式秸秆破包揉丝机,通过喂入调节装置一次完成破包喂入及“割-切-搓-推”组合式丝化处理,该机可提高中小农户秸秆属地化利用率。

(2)通过试验得出,影响标定单位功率生产率的因素主次顺序为电机输出转速、喂入间隙、筛孔直径,因素交互作用为电机输出转速和筛孔直径、电机输出转速和喂入间隙、筛孔直径和喂入间隙;影响秸秆丝化率的因素主次顺序为筛孔直径、电机输出转速、喂入间隙。

(3)通过响应面分析得出最佳工作参数组合:处理整株及方捆秸秆时分别为电机输出转速 1 353 r/min、筛孔直径 47 mm、喂入间隙 12 cm 及电机输出转速 1 072 r/min、筛孔直径 46 mm、喂入间隙 35 cm,对应的整株及方捆秸秆的标定单位功率生产率和秸秆丝化率的均值分别为 99.34 kg/(kW·h)、98.86% 和 113.56 kg/(kW·h)、98.30%。

参 考 文 献

[1] LI Hui, DAI Mingwei, DAI Shunli, et al. Current status and environment impact of direct straw return in China's cropland—a review[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 159(9): 293 - 300.

[2] 马彦华，宣传忠，武佩，等. 玉米秸秆振动压缩过程的应力松弛试验[J]. 农业工程学报，2016，32(19)：88－94.
MA Yanhua，XUAN Chuanzhong，WU Pei，et al. Experiment on stress relaxation of corn stover during compression with assisted vibration[J]. Transactions of the CSAE，2016，32(19)：88－94.（in Chinese）

[3] 王金武，唐汉，王金峰. 东北地区作物秸秆资源综合利用现状与发展分析[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(5)：1－21.
WANG Jinwu，TANG Han，WANG Jinfeng. Comprehensive utilization status and development analysis of crop straw resource in Northeast China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(5)：1－21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20170501&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2017.05.001.（in Chinese）

[4] HONG Jinglan，REN Lijun，HONG Jingmin，et al. Environmental impact assessment of corn straw utilization in China[J]. Journal of Cleaner Production，2016，112(Part2)：1700－1708.

[5] 王瑞丽，魏楷峰，刘洋，等. 饲料用秸秆丝化多频快速压缩成型工艺参数优化[J]. 农业工程学报，2016，32(21)：277－281.
WANG Ruili，WEI Kaifeng，LIU Yang，et al. Optimization of process parameters for multi-frequency rapid compression molding of corn stalk silk used for forage[J]. Transactions of the CSAE，2016，32(21)：277－281.（in Chinese）

[6] 任德志，白雪卫，刘德军，等. 玉米秸秆皮瓤分离碾压揭皮辊设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2018，49(1)：93－99.
REN Dezhi，BAI Xuewei，LIU Dejun，et al. Design and test on roller-teeth husking roller in rind-pith separation of corn stalks[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(1)：93－99. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180111&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.011.（in Chinese）

[7] DU Dongdong，WANG Jun. Research on mechanics properties of crop straws：a review[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering，2016，9(6)：10－19.

[8] 王德福，王沫，李利桥. 锤片式粉碎机粉碎玉米秸秆机理分析与参数优化[J/OL]. 农业机械学报，2017，48(11)：165－171.
WANG Defu，WANG Mo，LI Liqiao. Mechanism analysis and parameter optimization of hammer mill for corn stalk[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2017，48(11)：165－171. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20171120&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2017.11.020.（in Chinese）

[9] 方会敏，姬长英，TAGAR A A，等. 秸秆-土壤-旋耕刀系统中秸秆位移仿真分析[J/OL]. 农业机械学报，2016，47(1)：60－67.
FANG Huimin，JI Changying，TAGAR A A，et al. Simulation analysis of straw movement in straw－soil－rotary blade system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2016，47(1)：60－67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20160109&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2016.01.009.（in Chinese）

[10] MOMIN M A，WEMPE P A，GRIFT T E，et al. Effects of four base cutter blade designs on sugarcane stem cut quality[J]. American Society of Agricultural and Biological Engineers，2017，60(5)：1551－1560.

[11] 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.（in Chinese）

[12] 茆光华. 软秸秆散包粗碎机的设计与分析[D]. 南京：南京林业大学，2014.
MAO Guanghua. Design and analysis on soft straw bale loosing and crude shredding machine[D]. Nanjing：Nanjing Forestry University，2014.（in Chinese）

[13] 杨志超. 一种牵引式草捆拆包粉碎机的设计与试验研究[D]. 呼和浩特：内蒙古农业大学，2017.
YANG Zhichao. A towed bale unpacking machine design and experimental research[D]. Huhhot：Inner Mongolia Agricultural University，2017.（in Chinese）

[14] 黄明智. 玉米秸秆破包除杂机设计与研究[J]. 农村牧区机械化，2017(4)：20－22.

[15] 温海江，车刚，陈武东，等. 圆捆秸秆拆包机[J]. 现代化农业，2020(7)：66－67.

[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] 张姬，于泳涛，杨启勇，等. 高留茬玉米秸秆复式割台粉碎还田装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报，2018，49(增刊)：42－49.
ZHANG Ji，YU Yongtao，YANG Qiyong，et al. Design and experiment of smashed straw unit for high stubble maize double header[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2018，49(Supp.)：42－49. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2018s007&journal_id=jcsam. DOI：10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.007.（in Chinese）

[18] HAHN F，POBLANO E，PÉREZ R，et al. Design and evaluation of geared rollers for a roselle harvester[J]. American Society of Agricultural and Biological Engineering，2016，59(4)：777－785.

[19] IGATHINATHANE C，WOMAC A R，SOKHANSANJ S. Corn stalk orientation effect on mechanical cutting[J]. Biosystems Engineering，2010，107(2)：97－106.

[20] 孙妮娜，王晓燕，李洪文，等. 差速锯切式水稻秸秆粉碎还田机设计与试验[J]. 农业工程学报，2019，35(22)：267－276.

SUN Nina, WANG Xiaoyan, LI Hongwen, et al. Design and experiment of differential sawing rice straw chopper for turning to field[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(22): 267 - 276. (in Chinese)

[21] 杨明韶,杜健民. 草业工程机械学[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2013.

[22] 郑智旗, 何进, 李洪文, 等. 动定刀支撑滑切式秸秆粉碎装置设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(增刊): 108 - 116.
ZHENG Zhiqi, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of straw-chopping device with chopping and fixed knife supported slide cutting[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.): 108 - 116. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2016s017&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.017. (in Chinese)

[23] ZHANG Chunling, CHEN Liqing, XIA Junfang, et al. Effects of blade sliding cutting angle and stem level on cutting energy of rice stems[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(6): 75 - 81.

[24] 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. Working mechanism and structure optimization of hammer of rubbing machine[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp.2): 7 - 15. (in Chinese)

[25] WANG Di, HE Changbin, WANG Haiqing, et al. Design and experimental optimization of airfoil-triangle sieve for hammer mill[J]. INMATEH-Agricultural Engineering, 2020, 61(2): 315 - 322.

[26] 廖宜涛, 廖庆喜, 舒彩霞, 等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 的芦竹切割——进给速度匹配研究[J]. 农业机械学报,2011,42(增刊): 30 - 34.
LIAO Yitao, LIAO Qingxi, SHU Caixia, et al. Matching of cutting and feeding speed for reaping *Arundo donax* L. based on ANSYS/LS-DYNA[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(Supp.): 30 - 34. (in Chinese)

[27] 闻邦春. 机械设计手册[M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2014.

[28] 袁洪方, 王德成, 王光辉, 等. 秸秆铡切揉搓装置优化设计与试验[J]. 农业机械学报, 2012, 43(增刊): 153 - 157.
YUAN Hongfang, WANG Decheng, WANG Guanghui, et al. Design and experiment of straw cutting and rubbing process device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 153 - 157. (in Chinese)

[29] 中华人民共和国农业部. 秸秆揉丝机质量评价技术规范: NY/T 509—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

(上接第 135 页)

[20] 朱晨辉,李连豪,王万章,等. 高地隙液压履带车自动行走控制系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):456 - 462,469.
ZHU Chenhui,LI Lianhao,WANG Wanzhang,et al. Design and test of automatic walking control system for high clearance hydraulic tracked vehicle[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2018,49(Supp.):456 - 462,469. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2018s062&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.062. (in Chinese)

[21] 葛磊. 分布式变转速容积驱动液压挖掘机控制原理及其特性研究[D]. 太原:太原理工大学,2018.
GE Lei. Research on control principle and characteristics of distributed variable speed volumetric drive hydraulic excavator [D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology,2018. (in Chinese)

[22] 史增录,赵武云,吴建民,等. 4UX - 550 型马铃薯收获机悬挂机组机液耦合仿真[J]. 农业机械学报,2011,42(6):98 - 102,92.
SHI Zenglu,ZHAO Wuyun,WU Jianmin,et al. Suspension unit hydraulic-mechanical coupling simulation of 4UX - 500 potato harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2011,42(6):98 - 102,92. (in Chinese)

[23] 姜红花,白鹏,刘理民,等. 履带自走式果园自动对靶风送喷雾机研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):189 - 195.
JIANG Honghua,BAI Peng,LIU Limin,et al. Caterpillar self-propelled and air-assisted orchard sprayer with automatic target spray system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(Supp.):189 - 195. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 2016s029&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.029. (in Chinese)

[24] 高兰. 基于 PLC 的高空作业平台调平控制系统研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2016.
GAO Lan. Research on leveling control system of aerial working platform based on PLC [D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University,2016. (in Chinese)

[25] 赵菲菲. 牵引式三七收获机的设计与试验[D]. 昆明:昆明理工大学,2016.
ZHAO Feifei. Design and test of traction type notoginseng harvester[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2016. (in Chinese)