doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2026.12.013

大方捆机玉米秸秆切碎装置设计与试验

车　犇[1,2]　付　君[1,2]　刘凤双[1,2]　薛　钊[1,2]　郑宜强[1,2]

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130025; 2. 吉林大学农业农村部高效播种收获装备重点实验室, 长春 130025)

摘要: 针对大方捆机切碎装置在大喂入量工况下剪切功耗高、切碎长度偏长且离散等问题,以自制大方捆玉米秸秆切碎装置为研究对象,开展作业参数多目标优化。基于动、定刀剪切结构对秸秆切碎过程受力特征及切碎间隙对剪切状态的影响进行分析,并通过单因素试验确定切碎转子转速、喂入速度和切碎间隙取值区间。采用 Box－Behnken 响应面法建立作业参数与平均切碎长度、平均作业扭矩之间的二次回归模型,分析多因素及其交互作用对切碎质量与能耗的影响规律。结果表明,各因素对综合性能的影响由大到小为:切碎间隙、切碎转子转速、喂入速度。经多目标优化,确定最优参数组合为:切碎转子转速 74 r/min、喂入速度 1.4 m/s、切碎间隙 66 mm;在该条件下,模型预测平均切碎长度为 77.56 mm,平均作业扭矩为 66.13 N·m。与典型高负载工况(切碎转子转速 68 r/min、喂入速度 1.6 m/s、切碎间隙 56 mm)相比,平均切碎长度降低 8.99%,平均扭矩降低 21.5%。田间验证试验结果表明,优化参数下实测平均切碎长度为 83.32 mm,与预测值相对误差为 7.4%,作业过程稳定,满足大方捆打捆作业要求。

关键词: 玉米秸秆; 大方捆机; 切碎装置; 作业参数; 田间试验

中图分类号: S225.5+1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2026)12-0142-11　　**OSID**:

Design and Experiment of Corn Stalk Chopping Device for Large Square Baler

CHE Ben[1,2]　FU Jun[1,2]　LIU Fengshuang[1,2]　XUE Zhao[1,2]　ZHENG Yiqiang[1,2]

(1. *College of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun* 130025, *China*
2. *Key Laboratory of Efficient Sowing and Harvesting Equipment, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Jilin University, Changchun* 130025, *China*)

Abstract: Aiming to address the problems of high cutting power consumption, excessive chopped length, and poor length uniformity of the chopping device of a large square baler under high feeding-rate conditions, a self-developed experimental bench for chopping corn stalks in a large square baler was used to carry out multi-objective optimization of operating parameters. Based on the shearing structure composed of moving and fixed knives, the force characteristics of the stalk chopping process and the effect of chopping clearance on the shearing state were analyzed, and the reasonable ranges of chopping rotor speed, feeding speed, and chopping clearance were determined through single-factor experiments. The Box－Behnken response surface method was employed to establish quadratic regression models between the operating parameters and the average chopped length as well as the average operating torque, and to analyze the effects of multiple factors and their interactions on chopping quality and energy consumption. The results showed that the order of influence of the factors on the overall performance, from the greatest to the least was as follows: chopping clearance, chopping rotor speed, and feeding speed. Through multi-objective optimization, the optimal parameter combination was determined as chopping rotor speed of 74 r/min, feeding speed of 1.4 m/s, and chopping clearance of 66 mm. Under these conditions, the model predicted an average chopped length of 77.56 mm and an average operating torque of 66.13 N·m. Compared with a typical high-load operating condition (chopping rotor speed of 68 r/min, feeding speed of 1.6 m/s, and chopping clearance of 56 mm), the average chopped length was reduced by 8.99%, the

收稿日期: 2025－12－08　修回日期: 2026－01－23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2002102)和吉林省农机研发制造推广应用一体化试点项目(3D5260554418)

作者简介: 车犇(1997—),男,博士生,主要从事农业机械化工程研究,E-mail: cheben22@mails.jlu.edu.cn

通信作者: 刘凤双(1992—),女,副教授,博士生导师,主要从事农业智能装备研究,E-mail: liufs21@jlu.edu.cn

average torque was reduced by 21.5%. Field validation tests showed that under the optimized parameters, the measured average chopped length was 83.32 mm, with a relative error of 7.4% from the predicted value. The operation process was stable and met the operational requirements of large square baling.

Key words: corn stalk; large square baler; chopping device; operating parameters; field experiment

0　引言

玉米是我国第一大粮食作物，2024 年种植面积达 4.474×10^7 km^2，年产秸秆超过 3×10^9 t，是重要的粗饲料和生物质资源[1-2]。在秸秆综合利用“五化”政策和“双碳”目标推动下，秸秆收获环节对作业效率与资源化水平提出了更高要求[3-4]。大方捆打捆作业因通量大、集运效率高，已成为秸秆离田的重要方式[5]。然而，现有切碎作业普遍存在能耗偏高、切碎长度偏长且离散性大的问题，影响打捆稳定性及饲用化利用效果[6]。因此，保证切碎质量的同时降低作业能耗，对提升秸秆收获效果具有重要意义。

在装置结构方面，现有研究主要通过优化动、定刀配合以增强物料约束。围绕“强剪切约束”，文献[7-8]通过改进动定刀同轴布置与支撑方式，提高了切碎均匀性；陈美舟等[9]设计的间隙自动调节装置进一步提升了剪切精度；朱惠斌等[10]通过采用动定刀横纵交错双支撑结构，使切碎长度合格率达 93.7%。在“喂入协同”方面，文献[11-12]通过优化喂入与切碎部件的协同关系，实现了切碎合格率提升和能耗显著降低。上述研究在常规工况下取得了良好效果，但针对大方捆打捆机“大幅宽、重载荷”的特性，单纯依靠结构优化难以兼顾切碎质量与能耗，仍需通过参数匹配进一步提升整体性能。文献[13-15]将多目标优化方法引入切碎过程，结合 CFD-DEM 耦合分析与粒度预测模型，对质量-能耗关系进行了探索。

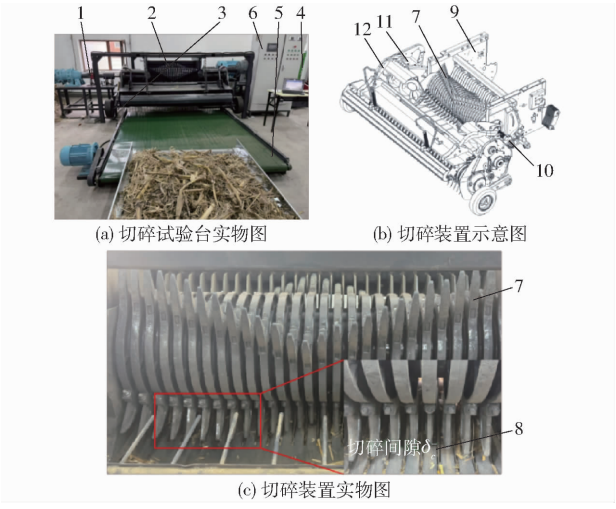
在作业参数优化方面，已有研究表明合理的参数匹配是改善切碎性能的关键。宋金库等[16]通过多体动力学仿真优化圆盘转速和作业速度，使秸秆粉碎长度达 49.2 mm；庞统等[17]通过试验确定滚刀转速、喂入厚度及间隙的最优组合，使切段合格率达 96.76%。但上述研究多基于高速冲击粉碎机理，转速通常高于 700 r/min，与大方捆机切碎装置采用的低速剪切原理存在显著差异[18-20]，难以直接指导低速重载工况下参数设计。

本文以大方捆机玉米秸秆切碎装置为研究对象，基于动、定刀剪切机理分析，结合单因素试验与 Box-Behnken 响应面法，建立切碎转子转速、喂入速度和切碎间隙与平均切碎长度和作业扭矩之间的回归模型，开展多目标优化，以获得兼顾切碎质量与低功耗的最优作业参数组合，为大方捆机切碎装置参数匹配与节能设计提供参考。

1　总体结构与工作原理

1.1　整机结构

玉米秸秆切碎试验台由输送装置、捡拾喂入装置、切碎装置、动力传动系统及机架组成，如图 1 所示。输送装置采用带式输送机，将秸秆匀速送入捡拾区；捡拾喂入装置由弹齿捡拾器和螺旋输送器组成，实现秸秆拾取并向中部汇聚；切碎装置位于喂入口后方，是完成秸秆剪切分段的核心部件。动力传动系统为各工作装置提供驱动，机架用于整体支撑与连接，主要技术参数见表 1。



(a) 切碎试验台实物图　(b) 切碎装置示意图　(c) 切碎装置实物图

图 1　玉米秸秆切碎试验台

Fig. 1　Corn stalk chopping test bench

1. 扭矩传感器　2. 切碎装置　3. 捡拾喂入装置　4. 输送装置　5. 液压站　6. 电气柜　7. 动刀　8. 定刀　9. 转子机架　10. 转子主轴　11. 连接机架　12. 螺旋输送器

切碎装置由动力系统、切碎转子及动、定刀组成。动刀沿转子轴向螺旋布置，定刀通过可调托架安装于机壳内壁附近，与动刀形成剪切副，切碎间隙 δ_c 可调。动力由电机经皮带轮和联轴器传递至转子轴，轴端布置动态扭矩传感器用于信号采集。

1.2　工作原理

试验时，玉米秸秆由输送带以恒定速度送入捡拾喂入装置，经捡拾与螺旋输送器汇聚形成稳定料

表 1 切碎试验台主要参数

Tab. 1 Main parameters of chopping test bench

参数	数值
试验台尺寸/(mm × mm × mm)	5 405 × 2 861 × 1 430
输送带尺寸/(mm × mm × mm)	2 855 × 2 558 × 418
总质量/kg	10 670
喂入/输送驱动功率/kW	11
切碎转子功率/kW	55
输送带功率/kW	5
有效作业幅宽/mm	2 200

层后进入切碎装置。切碎装置由转子机架和切碎室壳体构成切碎空间,定刀通过托架固定于机架侧,与沿轴向螺旋布置的动刀形成可调切碎间隙 δ_c。转子旋转过程,动刀掠过定刀形成强剪切区,秸秆在定刀支撑和壳体约束下发生剪切断裂,未完全切断部分经挤压与重复剪切实现分段切碎。切碎物料在离心作用下抛送至收集装置,切碎扭矩由传感器实时采集,缓冲系统用于减小振动与载荷波动。

2 切碎过程与参数分析

2.1 切碎装置运动过程分析

切碎过程,动刀在接触点 D 对秸秆施加切削作用,定刀在支撑点 S 提供约束反力,使秸秆局部产生剪切应力并在超过材料强度时断裂。鉴于动刀沿轴向螺旋布置、剪切区空间关系复杂,为便于工程分析,选取代表性轴向截面进行等效建模:以转子回转中心 O 为原点,沿喂入方向建立 x 轴、垂直喂入方向建立 y 轴,构建平面坐标系,如图 2 所示。

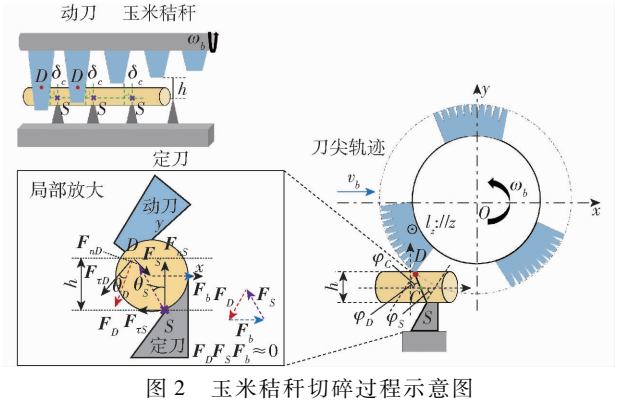


图 2 玉米秸秆切碎过程示意图

Fig. 2 Schematic of stalk chopping process

在代表性轴向截面内,线段 DS 表示秸秆主剪切路径,定义为主剪切线。考虑动刀沿轴向螺旋布置,过点 D 作平行于转子轴线直线 l_z,DS 与 l_z 所确定主剪切面,用作受力与力臂分析的参考平面。设 DS 在水平方向与垂直方向的投影差分别为 Δx 与 h,则主剪切方向角 φ_C 可表示为

$$\varphi_C = \arctan\frac{h}{\Delta x} \tag{1}$$

其中 $\Delta x = |x_D - x_S|$ $h = |y_D - y_S|$

式中 x_D、x_S——点 D、S x 坐标

y_D、y_S——点 D、S y 坐标

由式(1)可知,Δx 通过改变动、定刀刃口相对位置,进而调节主剪切方向角 φ_C,影响剪切载荷在切向与法向上的分配。为描述刀具几何与受力方向的关系,在轴向截面内定义动刀、定刀刃口与 x 轴夹角分别为 φ_D 和 φ_S。则等效合力 F_D、F_S 与主剪切线 DS 的夹角为 θ_D 和 θ_S 可表示为

$$\begin{cases}\theta_D = \varphi_D - \varphi_C \\ \theta_S = |\varphi_S - \varphi_C|\end{cases} \tag{2}$$

如图 2 所示,选取剪切瞬时秸秆作为研究对象,采用准静态近似。切割过程中,动刀与定刀分别对秸秆施加等效合力 F_D 与反力 F_S,同时考虑喂入与导向约束产生的等效轴向力 F_b(沿 x 轴正方向)。在准静态条件下,秸秆满足三力矢量平衡。为统一受力描述,在点 D、S 处分别建立以刃口切线为切向 τ,其法线为法向 n 的局部坐标系。动刀侧合力 F_D 分解为法向力 F_{nD} 与切向摩擦力 $F_{\tau D}$;定刀侧反力 F_S 分解为有效剪切分力 $F_{\tau S}$ 与法向夹持力 F_{nS}。$F_{\tau S}$ 为促使秸秆断裂的主要剪切分量,关系式为

$$\begin{bmatrix}F_{\tau i}\\ F_{ni}\end{bmatrix} = F_i\begin{bmatrix}\cos\theta_i\\ \sin\theta_i\end{bmatrix} \quad (i = D, S) \tag{3}$$

式中 $F_{\tau i}$——第 i 侧合力在 DS 方向分量

F_{ni}——第 i 侧合力在垂直 DS 方向分量

F_i——第 i 侧等效合力

θ_i——F_i 与主剪切线 DS 夹角

式(3)表明改变主剪切线 DS 方向,会影响剪切分力在总载荷中占比。Δx 较小时,剪切区约束增强,秸秆以剪切断裂为主,切口较平整,有利于抑制长梗;Δx 过大时,约束减弱,弯曲与撕裂作用增强,切碎均匀性下降,并伴随负载波动和能耗增加。除几何约束外,剪切过程还受动刀相对运动状态影响。在接触点 D 处,刀尖线速度 v_c 与喂入速度 v_b 共同决定动刀-秸秆相对速度水平,从而影响断裂效率与作业负载。提高转子转速 n_b 可增大 v_t,促进快速剪切断裂;转速偏低时,断裂更依赖挤压与拖拽,切碎长度离散度和扭矩波动增大。喂入速度 v_b 决定单位时间内进入剪切区的物料通量。转速一定时,v_b 增大会加剧剪切区堆积,提高切削阻力与作业负载。

综上,δ_c、n_b 和 v_b 分别通过调控剪切几何约束、刀尖相对速度和物料通量,共同决定剪切区受力状态,是影响秸秆切碎质量与能耗的关键作业参数。

2.2 关键作业参数

2.2.1 切碎转子转速

动刀刀刃线速度直接决定单位时间内提供的切

削能量和冲击强度，影响切碎质量和作业效率[21]。刀尖线速度计算式为

$$v_c = \omega R = \frac{\pi D n_b}{60} \tag{4}$$

式中　D——切碎转子回转直径，m

v_c——刀尖线速度，m/s

由式(4)可知，在 D 固定的条件下，v_c 与 n_b 成正比，因此 n_b 合理取值应以确定适宜的 v_c 区间为前提。同时，转子转速直接影响系统功率消耗。依据《农业机械设计手册》所需功率 N 与转子角速度 ω 间的关系可近似表示为

$$N = \frac{Q(\omega D)^2}{4\,000(1-f)} \tag{5}$$

其中

$$\omega = \frac{\pi n_b}{30}$$

式中　Q——物料喂入量，kg/s

f——综合系数，取 0.7 ~ 0.8

由式(5)可知，切碎功率与转速平方成正比，过高转速会显著增加能耗[22,29]。因此，转速应控制在合理范围。本试验平台为低速高扭矩剪切型结构，主要依靠剪切断裂；当刀尖线速度满足临界剪切要求，继续提高转速对切碎效果提升有限[23]。将刀尖线速度 v_c 设 2 ~ 4 m/s，以平衡切碎能力与功率经济性。将转子直径 $D \approx 0.7$ m，代入式(4)得转速为 54 ~ 110 r/min，该范围为试验转速取值边界。

2.2.2　喂入速度

喂入速度 v_b 是进给强度与作业效率的关键参数，直接与田间作业前进速度对应[24]。为定量分析 v_b 与切碎质量关系，建立运动学模型。定义有效剪切频率 f_c 为单位时间内完成切断的次数；在同一轴向截面内，动刀数量为 Z(本装置 $Z=1$)，则单位时间内剪切频率 f_c 及对应切碎长度 L_{th} 可表示为

$$f_c = \frac{Z\omega}{60} \tag{6}$$

$$L_{th} = \frac{v_b}{f_c} = \frac{60 v_b}{Z\omega} \tag{7}$$

实际工况中，v_b 通过改变进入剪切区的物料通量与料层厚度影响切碎效果。低 v_b 时秸秆堆积，剪切不充分，易产生长段；适当提高 v_b 可均匀分布料层，增强剪切作用，切碎长度减小。因此，v_b 应通过试验在作业负荷与切碎质量间合理匹配。参考田间作业前进速度 5 ~ 8 km/h(对应 1.39 ~ 2.22 m/s)，并兼顾试验台极限工况，取 v_b 为 0.8 ~ 2.4 m/s，其中 1.4 ~ 2.2 m/s 为田间作业区间。

2.2.3　切碎间隙

切碎间隙 δ_c 为控制秸秆断裂模式由剪切主导向弯曲撕裂转变的关键参数，直接影响切碎质量与能耗。由于秸秆剪切断裂与弯曲撕裂存在竞争机制[25]，当 δ_c 较小时，动、定刀约束增强，剪应力优先达到极限，秸秆以低能耗剪切断裂；δ_c 过大时，弯曲扭矩增大，弯曲拉伸应力占主导，易产生撕裂和长梗[28]。因此，为保持剪切主导断裂，切碎间隙需满足剪弯耦合约束条件

$$\delta_c \leqslant \frac{2kI_z}{AD}\frac{[\sigma_t]}{[\tau_s]}k_b \tag{8}$$

式中　I_z——截面惯性矩，m^4

σ_t、τ_s——抗拉、抗剪强度，MPa

k_b——修正系数，取 3 ~ 5

A——秸秆剪切截面面积，m^2

D——转子直径，m　　k——载荷系数

玉米秸秆由节部与节间组成，二者直径和刚度差异显著，δ_c 直接影响受刀方式。在给定 n_b 和 v_b 条件下，当理论切碎长度 $L_{th} > \delta_c$ 时，秸秆先与定刀接触并发生弯折，实际切碎长度受 δ_c 约束；随 δ_c 增大，定刀约束减弱，断裂模式由剪切向弯曲撕裂转变，长梗比例上升。δ_c 过小时，节部通过性下降，动、定刀挤压摩擦加剧，切碎阻力和堵塞风险增加。结合秸秆力学参数及工程修正结果，切碎间隙合理区间为 55 ~ 92 mm。综合装置结构，将 δ_c 试验范围确定为 46 ~ 86 mm，以覆盖典型切碎工况。

3　台架试验与参数优化

3.1　试验条件与方法

试验于 2024 年 10 月在吉林大学农业试验基地进行。试验物料为联合收获后的整株玉米秸秆切段，品种为“飞天 358”，以模拟大方捆机秸秆打捆典型作业工况。试验前测定物料物理特性：节间平均直径 33.7 mm、秆壁厚度 3.1 mm，自然堆积密度 56.4 kg/m^3，含水率约 28.3%。

为研究作业参数对切碎质量与能耗的影响，选取切碎转子转速 n_b、喂入速度 v_b 和切碎间隙 δ_c 为试验因素，采用单因素试验与 Box - Behnken 响应面试验相结合的方法。试验评价方法参照文献[26 - 27]。切碎轴扭矩与转速由测控系统采集，切碎长度采用游标卡尺测量。试验前按设定工况调整各参数，并在试验台前端设置辅助输送带以保证进料连续稳定。装置稳定运行后采集扭矩与转速信号并计算平均扭矩。每个工况重复试验 3 次，每次随机测量 100 段秸秆长度，取 3 次结果平均值作为该工况试验值。

试验评价指标及计算方法为：

(1)平均切碎长度

平均切碎长度 $\bar{L}$ 计算式为

$$\overline{L}=\frac{1}{N_i}\sum_{i=1}^{N_i}L_i \tag{9}$$

式中 L_i——第 i 段秸秆实测长度,mm

N_i——当次取样秸秆总段数

(2)平均扭矩

平均扭矩 $\overline{T}$ 用于表征不同工况下切碎装置负载水平及能耗特性。在试验达到稳定工作状态后,在时间区间[t_1,t_2]内对动态扭矩传感器采集的瞬时扭矩 $T(t)$进行时间平均,计算式为

$$\overline{T}=\frac{1}{t_2-t_1}\int_{t_1}^{t_2}T(t)\,\mathrm{d}t \tag{10}$$

3.2 单因素试验

3.2.1 切碎转子转速

当喂入速度 v_b为 1.6 m/s、切碎间隙 δ_c为 66 mm 时,选取切碎转子转速 n_b为 54 ~ 110 r/min 范围内进行单因素试验,结果如图 3、4 所示。

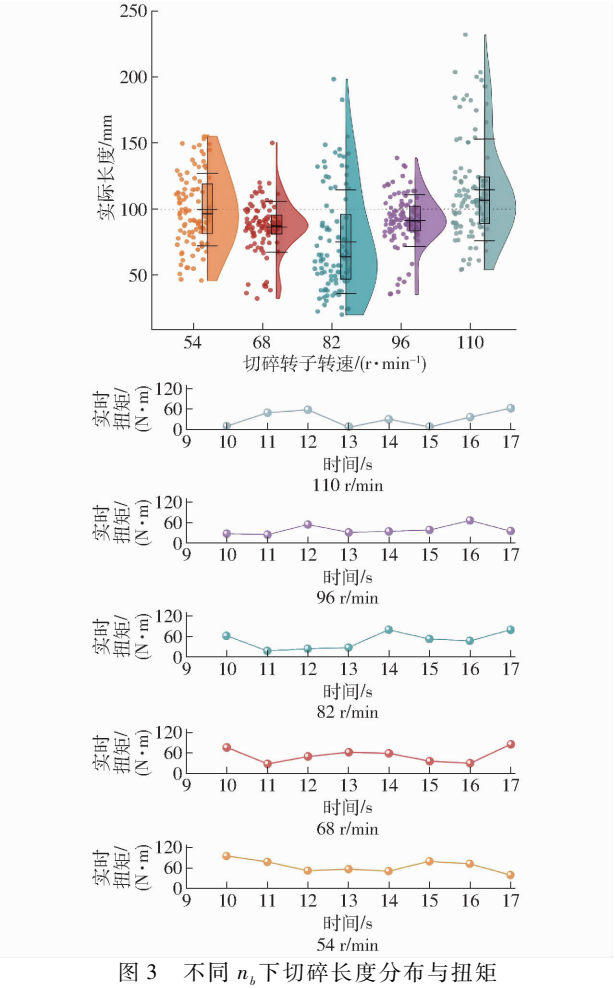


图 3 不同 n_b下切碎长度分布与扭矩

Fig. 3 Distribution of chopping lengths and torque based on different n_b

由图 3 可知,n_b对切碎质量与作业负载具有显著影响。转速由 54 r/min 提高至 68 r/min 时,切碎长度分布明显向短段集中;提高至 82 r/min 后,分布仍较集中但改善趋于平缓。继续增至 96 r/min 和

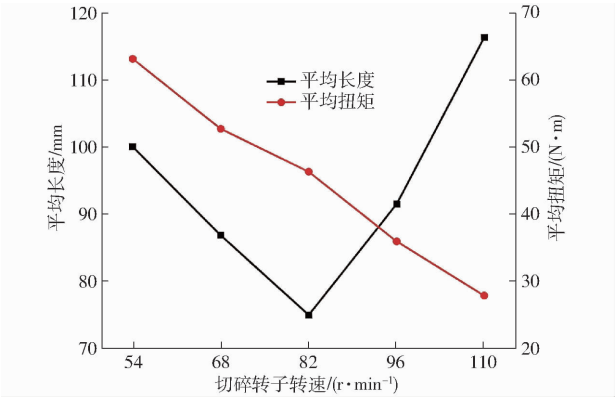


图 4 n_b对平均长度和扭矩的影响

Fig. 4 Influence of n_b on average length and torque

110 r/min,切碎长度整体回升,表明过高转速难以进一步改善切碎效果,其原因在于刀尖线速度过大导致单刀切削量和重复切割率降低。各工况下扭矩均呈周期性波动,低转速时扭矩水平高且峰值明显;当转速为 82 ~ 96 r/min 时,平均扭矩及波动幅值显著降低,作业平稳性改善;而在转速 110 r/min 下仍存在间歇性峰值,说明高转速易引发冲击负载。总体来看,平均切碎长度随转速先减小后略有回升,而平均扭矩基本呈下降趋势,在转速 82 r/min 附近切碎质量与能耗达到较优折中,因此取转速 68 ~ 96 r/min 作为响应面试验转速。

3.2.2 喂入速度

当切碎转子转速 n_b为 82 r/min、切碎间隙 δ_c为 66 mm 时,选取喂入速度 v_b为 0.8 ~ 2.4 m/s 进行单因素试验。

如图 5 所示,当 v_b由 0.8 m/s 提高至 1.6 m/s 时,切碎长度整体减小、分布趋于集中;当 v_b增至 2.0、2.4 m/s 后,切碎长度回升,表明 v_b过高会削弱切碎效果,其原因在于物料通量增大、料层变厚,部分秸秆未能充分剪切。由图 5 可知,当 v_b为 0.8、1.2 m/s 时,扭矩波动较大且峰值明显;当 v_b为 1.6 m/s 时,扭矩水平最低且波动最小,作业负载最为平稳;继续提高至 2.0、2.4 m/s 后,扭矩基值上升并出现间歇性峰值,表明高喂入量下挤压与摩擦作用增强。图 6 显示,平均扭矩随喂入速度总体呈下降趋势,在 1.6 m/s 附近达到较低水平。综合切碎质量与作业负载,选取 1.2 ~ 2.0 m/s 作为响应面试验喂入速度。

3.2.3 切碎间隙

当切碎转子转速 n_b为 82 r/min、喂入速度 v_b为 1.6 m/s 时,调节切碎间隙 δ_c在 46 ~ 86 mm 范围内变化,作业性能结果如图 7 和图 8 所示。

由图 7、8 可知,δ_c对切碎质量与作业负载具有显著影响。随着切碎间隙由 46 mm 增大至 86 mm,

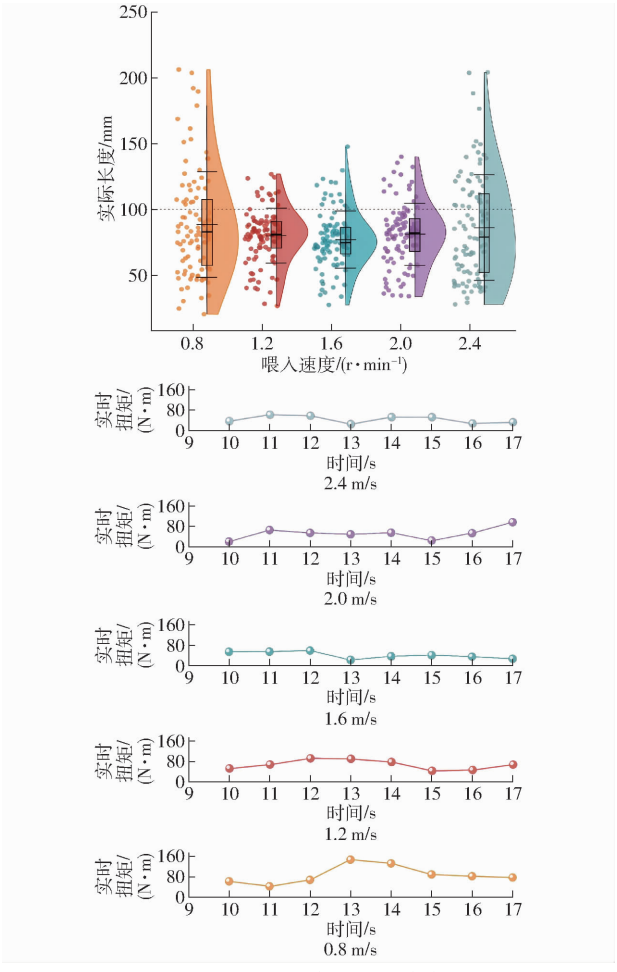


图 5　不同 v_b 下切碎长度分布与扭矩

Fig. 5　Distribution of chopping lengths and torque based on different v_b

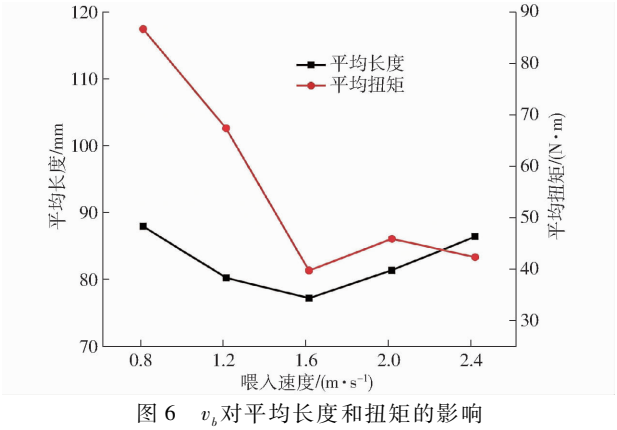


图 6　v_b 对平均长度和扭矩的影响

Fig. 6　Influence of v_b on average length and torque

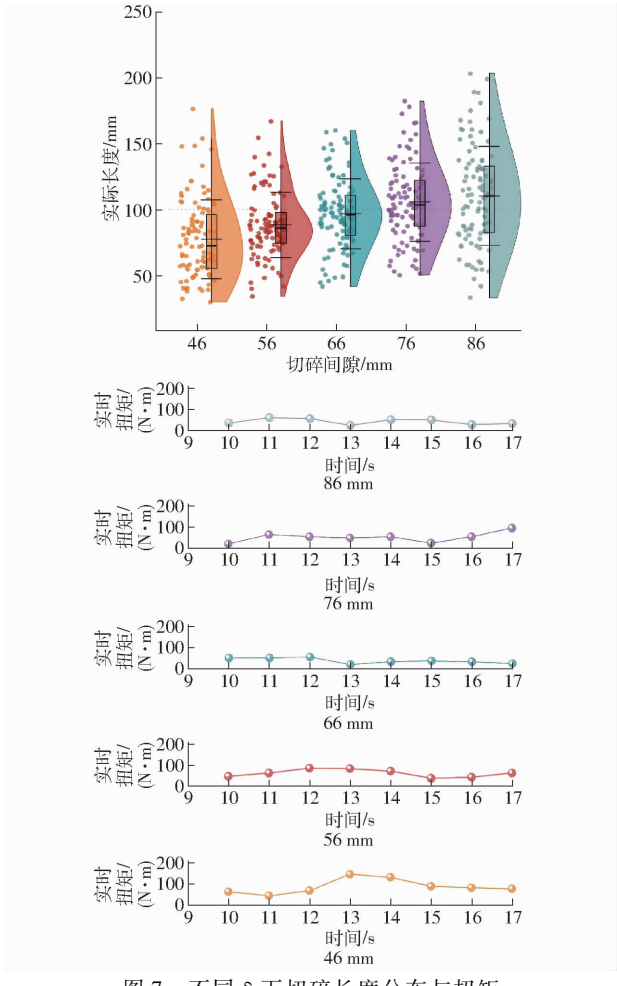


图 7　不同 δ_c 下切碎长度分布与扭矩

Fig. 7　Distribution of chopping lengths and torque based on different δ_c

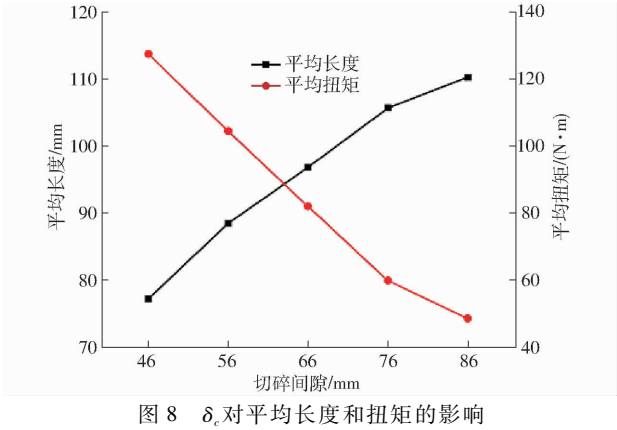


图 8　δ_c 对平均长度和扭矩的影响

Fig. 8　Influence of δ_c on average length and torque

切碎长度分布整体向长段区间移动，平均长度和离散性逐渐增大，表明间隙增大不利于切碎均匀性；其原因在于小间隙下秸秆受刀具约束较强，以剪切断裂为主，而间隙增大后弯曲断裂与轴向撕裂比例上升。在 46 mm 条件下，切碎轴扭矩水平最高且峰值明显；当 δ_c 增至 56 ~ 76 mm 时，扭矩显著降低并保持较小波动，其中 66 mm 工况最为平稳；增大至 86 mm 后，扭矩基值虽略有回升但整体较低，表明切碎作用减弱。总体来看，小间隙有利于缩短切碎长度但能耗较高，大间隙虽可降低扭矩但长梗比例增加。综合切碎质量与作业负载，选取 56 ~ 76 mm 作为后续响应面试验切碎间隙。

3.3　Box – Behnken 响应面试验

3.3.1　试验方案设计

为进一步探究作业参数对切碎性能指标的交互作用和影响规律，在单因素试验基础上，采用三因素

三水平 Box－Behnken 响应面试验设计。选取切碎转子转速(X_1)、喂入速度(X_2)、切碎间隙(X_3)为试验因素,以平均切碎长度(Y_1)和平均扭矩(Y_2)为试验指标。试验因素与编码如表 2 所示。

表 2 试验因素与编码

Tab. 2 Test factors and coding

编码	因素		
	转子转速/(r·min^{-1})	喂入速度/(m·s^{-1})	切碎间隙/mm
－1	68	1.2	56
0	82	1.6	66
1	96	2.0	76

采用 Design-Expert 13 软件进行三因素三水平 Box－Behnken 响应面试验设计与分析,共设计 17 个试验组合,试验方案及结果见表 3,X_1、X_2、X_3为因素编码值。

表 3 试验方案与结果

Tab. 3 Test plan and results

序号	因素			Y_1/mm	Y_2/(N·m)
	X_1	X_2	X_3		
1	0	0	0	82.12	41.57
2	0	－1	1	88.99	57.75
3	－1	1	0	89.09	61.54
4	－1	0	1	85.47	49.76
5	0	－1	－1	64.49	73.72
6	1	0	1	89.67	44.69
7	1	0	－1	67.79	50.13
8	0	1	－1	61.51	61.83
9	0	1	1	65.82	49.38
10	0	0	0	73.36	49.23
11	0	0	0	77.40	46.24
12	1	－1	0	89.01	57.06
13	0	0	0	80.45	52.59
14	－1	－1	0	78.89	58.95
15	0	0	0	76.25	50.26
16	1	1	0	64.57	38.72
17	－1	0	－1	85.22	84.26

3.3.2 试验结果与回归分析

以 Y_1和 Y_2为响应变量,对表 3 试验数据进行二次多项式回归建模,并通过方差分析检验模型显著性,结果如表 4、5 所示。两响应模型均达到显著水平,且失拟项 P 分别为 0.621、0.539(>0.05),说明模型拟合良好,可用于切碎性能分析。因素显著性分析结果显示,切碎间隙对平均切碎长度和平均扭矩的影响均极显著;喂入速度对平均切碎长度影响很显著,对平均扭矩影响显著;切碎转子转速对平均切碎长度影响显著,对平均扭矩影响极显著。

通过 Design-Expert 13 软件进行二次回归响应分析,得到 Y_1与 Y_2回归模型

$$Y_1 = 77.92 - 3.45X_1 - 5.05X_2 + 6.37X_3 - 8.66X_1X_2 + 5.41X_1X_3 - 5.05X_2X_3 + 7.15X_1^2 - 4.68X_2^2 - 3.03X_3^2 \tag{11}$$

表 4 平均切碎长度方差分析结果

Tab. 4 Analysis of variance results for average chopping length

变异来源	离均差平方和	自由度	均方	F	P
模型	1 471.81	9	163.53	16.04	<0.001 **
X_1	95.43	1	95.43	9.36	0.018 *
X_2	203.92	1	203.92	20.00	0.003 **
X_3	324.36	1	324.36	31.81	<0.001 **
X_1X_2	299.98	1	299.98	29.42	<0.001 **
X_1X_3	116.96	1	116.96	11.47	0.012 *
X_2X_3	101.91	1	101.91	9.99	0.016 *
X_1^2	215.52	1	215.52	21.14	0.003 **
X_2^2	92.24	1	92.24	9.05	0.020 *
X_3^2	38.73	1	38.73	3.80	0.092
残差	71.37	7	10.20		
失拟	23.48	3	7.83	0.653 7	0.621
误差	47.89	4	11.97		
总和	1 543.18	16			

注:** 表示差异极显著($P<0.01$);* 表示显著($0.01\leqslant P<0.05$),下同。

表 5 平均扭矩方差分析结果

Tab. 5 Analysis of variance results for average torque

变异来源	离均差平方和	自由度	均方	F	P
模型	1 975.52	9	219.50	13.08	0.001 **
X_1	510.56	1	510.56	30.42	<0.001 **
X_2	162.09	1	162.09	9.66	0.017 *
X_3	584.14	1	584.14	34.80	<0.001 **
X_1X_2	109.52	1	109.52	6.52	0.038 *
X_1X_3	211.12	1	211.12	12.58	0.009 **
X_2X_3	3.10	1	3.10	0.184 5	0.680
X_1^2	7.28	1	7.28	0.433 6	0.531
X_2^2	95.99	1	95.99	5.72	0.048 *
X_3^2	263.93	1	263.93	15.72	0.005 **
残差	117.51	7	16.79		
失拟	45.38	3	15.13	0.838 8	0.539
误差	72.13	4	18.03		
总和	2 093.03	16			

$$Y_2 = 47.98 - 7.99X_1 - 4.50X_2 - 8.55X_3 - 5.23X_1X_2 + 7.27X_1X_3 + 0.88X_2X_3 + 1.31X_1^2 + 4.77X_2^2 + 7.92X_3^2 \tag{12}$$

由表 4、5 可知,X_1、X_2和 X_3对 Y_1和 Y_2具有显著影响。X_1X_2和 X_1X_3在 2 种响应上均达到显著影响,说明切碎 n_b与 v_b、δ_c存在明显的交互作用;X_2X_3对 Y_1有显著影响,而对 Y_2影响不显著。综合 2 种响应的显著性结果,对切碎“质量-能耗”特性的影响由大到小为:切碎间隙、切碎转子转速、喂入速度。

3.3.3　响应面分析

（1）当 δ_c 固定为 66 mm（$X_3=0$）时，得到二元二次回归方程为

$$Y_1=77.92-3.45X_1-5.05X_2-8.66X_1X_2+7.15X_1^2-4.68X_2^2 \quad (13)$$

$$Y_2=47.98-7.99X_1-4.50X_2-5.23X_1X_2+1.31X_1^2+4.77X_2^2 \quad (14)$$

如图 9 所示，当 δ_c 为 66 mm 时，Y_1 随 n_b 先减小后略有回升，并在约 82 r/min 附近达到最小值；n_b 过低或过高均不利于切碎效果。Y_2 随 n_b 增加总体下降，表明提高 n_b 有助于降低切碎阻力。在相同 δ_c 下，v_b 对 Y_1 的影响具有转速依赖性：低转速区内 Y_1 随 v_b 略有增大，而在中高转速区内适当提高 v_b 有利于减小 Y_1。Y_2 随 v_b 缓慢上升，反映物料通量增大带来的负载增加。综合来看，n_b 与 v_b 存在显著交互作用，在 $n_b\approx82$ r/min、$v_b\approx1.6$ m/s 附近可在切碎质量与能耗之间取得较优折中。

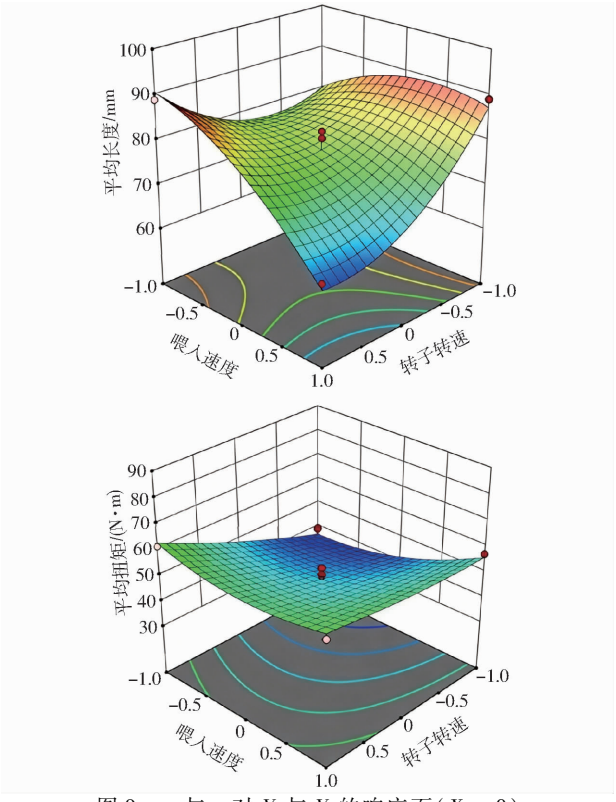


图 9　n_b 与 v_b 对 Y_1 与 Y_2 的响应面（$X_3=0$）

Fig. 9　Response surfaces of rotor n_b and v_b to Y_1 and Y_2

（2）当 v_b 固定为 1.6 m/s（$X_2=0$）时，得到二元二次回归方程为

$$Y_1=77.92-3.45X_1+6.37X_3+5.41X_1X_3+7.15X_1^2-3.03X_3^2 \quad (15)$$

$$Y_2=47.98-7.99X_1-8.55X_3+7.27X_1X_3+1.31X_1^2-7.92X_3^2 \quad (16)$$

如图 10 所示，随着 n_b 提高，当 v_b 为 1.6 m/s 时，Y_1 先减小后略有回升，转速适中时 Y_1 最小，表明切削能力与物料供给量匹配；转速过低或过高均不利于切碎效果。Y_2 随 n_b 增加呈下降趋势，说明提高 n_b 可降低切碎阻力。在固定 δ_c 时，增大 δ_c 会导致 Y_1 增大、Y_2 降低，表明适当增大 δ_c 可减少刀片挤压与剪切作用，降低能耗。综上，较高 n_b 与中等 δ_c 的组合能有效控制 Y_1 并降低 Y_2，是切碎质量与能耗之间的理想平衡点。

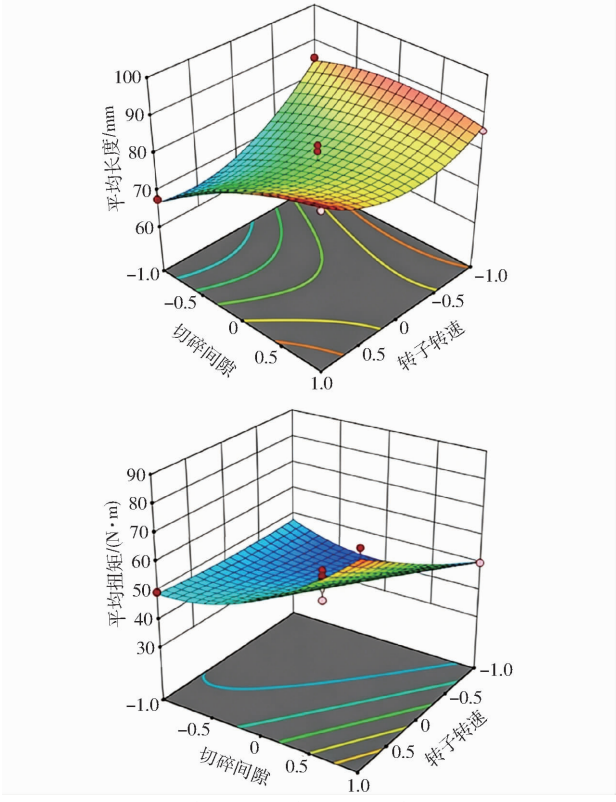


图 10　n_b 与 δ_c 对 Y_1 与 Y_2 的响应面（$X_2=0$）

Fig. 10　Response surfaces of rotor n_b and δ_c to Y_1 and Y_2

（3）当 n_b 固定为 82 r/min（$X_1=0$）时，得到二元二次回归方程为

$$Y_1=77.92-5.05X_2+6.37X_3-5.05X_2X_3-4.68X_2^2-3.03X_3^2 \quad (17)$$

$$Y_2=47.98-7.50X_2-8.55X_3+0.88X_2X_3+4.77X_2^2-7.92X_3^2 \quad (18)$$

如图 11 所示，当 n_b 为 82 r/min 时，v_b 与 δ_c 对 Y_1 的影响较为明显。中等 v_b 与中等 δ_c 组合时，Y_1 最小；低 v_b 时，物料供给不足，剪切不充分，导致 Y_1 增大。随着 δ_c 增大，动、定刀约束减弱，秸秆易发生弯曲或撕裂，导致 Y_1 增加。方差分析表明，喂入速度与切碎间隙对平均扭矩 Y_2 的交互作用不显著，主要影响 Y_1。综合分析，中等 v_b 与适中 δ_c 组合有利于减小 Y_1，为作业参数优化提供参考。

3.4　参数优化

为优化玉米秸秆切碎性能，应在保证切碎质量

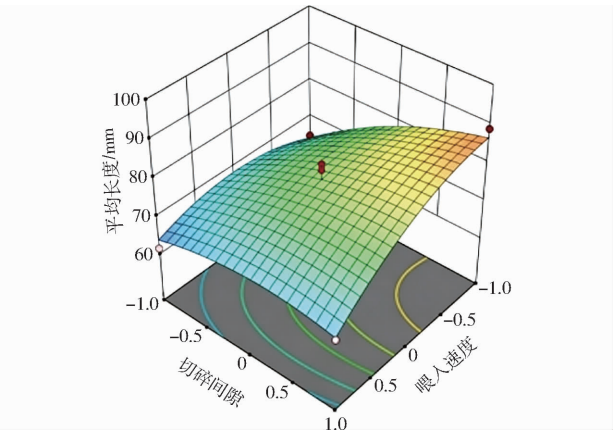


图 11 v_b 与 δ_c 对 Y_1 的响应面($X_1=0$)

Fig. 11 Response surface of rotor v_b and δ_c to Y_1

的同时尽量降低作业扭矩。为此,综合考虑 2 个指标,进行多目标优化。采用主目标函数法对 3 个影响因素进行优化,使用 Design-Expert 13 软件探讨满足性能要求的最优参数组合。约束条件为

$$\begin{cases} \min Y_1(X_1,X_2,X_3) \\ \min Y_2(X_1,X_2,X_3) \\ -1 \leqslant X_1 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_2 \leqslant 1 \\ -1 \leqslant X_3 \leqslant 1 \end{cases} \tag{19}$$

求得最优参数:n_b 为 73.13 r/min;v_b 为 1.42 m/s;δ_c 为 59.97 mm。考虑试验可操作性,将其调整为 n_b 为 74 r/min;v_b 为 1.4 m/s;δ_c 为 66 mm。此时 Y_1 为 77.56 mm,Y_2 为 66.13 N·m。

4 田间试验

为验证响应面优化所得参数组合在实际田间工况下的适用性与稳定性,开展玉米秸秆切碎田间验证试验。试验采用吉林鑫天朗集团 9YFQ-2.3 型大方捆秸秆打捆机(图 12a),将切碎转子转速、喂入速度和切碎间隙分别设置为优化值(n_b=74 r/min,v_b=1.4 m/s,δ_c=66 mm),其余参数按常规打捆作业调整。试验地点位于黑龙江省肇东市海城镇长井村,试验地前茬作物为玉米(品种飞天 358),秸秆为联合收获后自然铺放的整株秸秆,含水率约 33%,行距约 60 cm。考虑到切碎系统结构封闭且田间粉尘、振动较大,不具备动态扭矩测量条件,田间试验未布置扭矩传感器。共进行 5 组试验,每组作业距离约 30 m;每组作业结束后在草捆中随机分层取样(图 12b),测定切碎长度分布及平均切碎长度,并与台架试验结果对比分析,以验证优化参数组合在实际工况下的适用性。

田间试验结果见表 6。在优化参数组合下,5 组试验实测平均切碎长度为 75.21 ~ 92.08 mm,整体平均值为 83.32 mm,较台架预测值 77.56 mm 略有增大。除第 4 组外,其余各组切碎长度变异系数为 7.6% ~ 9.1%,分布较为集中,满足大方捆打捆作业的农艺要求,表明该参数组合具有较好的作业稳定性。与预测值相比,第 1、2、3、5 组相对误差为 -3.04% ~ 9.21%,均小于 10%;第 4 组相对误差为 18.62%,主要受秸秆含水率和喂入均匀性等田间不确定因素影响。综合 5 组结果,田间实测平均切碎长度与预测值整体相对误差为 7.4%,验证了所建回归模型及优化参数在实际田间工况下的工程适用性。



(a) 田间验证试验 (b) 大方捆打捆后玉米秸秆

图 12 田间试验

Fig. 12 Field test

表 6 田间验证试验结果

Tab. 6 Results of validation test in field

序号	预测长度/mm	田间实测长度/mm	变异系数/%	相对误差/%
1	77.56	81.23	8.4	4.69
2	77.56	83.44	8.7	7.53
3	77.56	75.21	7.6	-3.04
4	77.56	92.08	13.5	18.62
5	77.56	84.65	9.1	9.21

5 结论

(1)建立了玉米秸秆动-定刀剪切运动模型,明确了切碎转子转速、喂入速度和切碎间隙的耦合作用机理。单因素试验确定较优作业参数为:切碎转子转速 68 ~ 96 r/min、喂入速度 1.2 ~ 2.0 m/s、切碎间隙 56 ~ 76 mm。

(2)基于响应面试验建立了平均切碎长度和平均作业扭矩的回归模型,因素影响由大到小为:切碎间隙、切碎转子转速、喂入速度。多目标优化得到最优参数组合为:切碎转子转速 74 r/min、喂入速度 1.4 m/s、切碎间隙 66 mm。

(3)田间验证试验表明,最优参数组合下 5 组试验实测平均切碎长度为 75.21 ~ 92.08 mm,整体平均值 83.32 mm,与台架预测值整体相对误差为 7.4%,切碎长度变异系数为 7.6% ~ 9.1%,满足大方捆打捆作业的农艺要求,验证了模型及优化结果的工程适用性。

参 考 文 献

[1] 国家统计局. 中国统计年鉴—2024 [M]. 北京：中国统计出版社, 2024.

[2] 舒也,刘雅暄,刘苗苗,等. 中国主要农作物可收集秸秆能源潜力与生物乙醇生产潜力研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2023, 25(5)：64－72.
SHU Ye, LIU Yaxuan, LIU Miaomiao, et al. Study on the energy potential of major crop straw and the potential for bioethanol production in China[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2023, 25(5)：64－72. (in Chinese)

[3] SUN N, GAO C, DING Y, et al. Five-dimensional straw utilization model and its impact on carbon emission reduction in China [J]. Sustainability, 2022, 14(24)：16722.

[4] 于贵瑞, 郝天象, 朱剑兴. 中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(4)：423－434.
YU Guirui, HAO Tianxiang, ZHU Jianxing. Discussion on the strategies for carbon peak and carbon neutrality in China [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(4)：423－434. (in Chinese)

[5] GUERRIERI A S, ANIFANTIS A S, SANTORO F, et al. Study of a large square baler with innovative technological systems that optimize the ealing effectiveness[J]. Agriculture, 2019, 9(5)：86.

[6] KEMMERER B, LIU J, 董洁芳. 大方捆压捆及搬运作业效率的实证研究[J]. 中国农机化学报, 2017, 38(3)：137－141.
KEMMERER B, LIU J, DONG Jiefang. Empirical study on the efficiency of large square bale compression and handling operations [J]. Journal of Agricultural Mechanization, 2017, 38(3)：137－141. (in Chinese)

[7] 邱进, 吴明亮, 官春云, 等. 动定刀同轴水稻秸秆切碎还田装置结构设计与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10)：11－19.
QIU Jin, WU Mingliang, GUAN Chunyun, et al. Structural design and experiment of the moving and fixed knife coaxial rice straw shredding and returning device[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10)：11－19. (in Chinese)

[8] 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]. 农业机械学报,2016, 47(增刊)：108－116.
ZHENG Zhiqi, HE Jin, LI Hongwen, et al. Design and experiment of a straw crushing device with supported sliding cutting by moving and fixed knives[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.)：108－116. (in Chinese)

[9] 陈美舟, 徐广飞, 宋志才, 等. 青贮收获机动定刀间隙自动调节装置与控制系统研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(11)：188－196.
CHEN Meizhou, XU Guangfei, SONG Zhicai, et al. Design and experiments of clearance automatic adjusting test bench and control system for silage harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(11)：188－196. (in Chinese)

[10] 朱惠斌, 雷丰朗, 白丽珍, 等. 横纵刃滑切式玉米秸秆粉碎还田机设计与试验[J]. 江西农业大学学报, 2025, 47(1)：223－239.
ZHU Huibin, LEI Fenglang, BAI Lizhen, et al. Design and experiment of horizontal and vertical blade sliding cut corn straw crushing returning machine[J]. Journal of Jiangxi Agricultural University, 2025, 47(1)：223－239. (in Chinese)

[11] 姜伟, 荐世春, 周进, 等. 4JS220 型玉米秸秆切段还田机设计与试验[J]. 农业装备与车辆工程, 2022, 60(4)：6－10.
JIANG Wei, JIAN Shichun, ZHOU Jin, et al. Design and experiment of the 4JS220 corn straw cutting and returning machine [J]. Agricultural Equipment and Vehicle Engineering, 2022, 60(4)：6－10. (in Chinese)

[12] AWAD M, FOUDA O, FATHY W, et al. A combined machine for collecting and chopping rice straw[J]. Heliyon, 2022, 8(8)：1－12.

[13] VU V D, NGO Q H, NGUYEN T T, et al. Multi-objective optimisation of cutting force and cutting power in chopping agricultural residues[J]. Biosystems Engineering, 2020, 191：107－115.

[14] LIU W, YU Z, SU Q, et al. Mechanism analysis and performance optimization of corn stalk cutting and throwing based on CFD－DEM coupling approach[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 237：110731.

[15] LU M, XIA Y, BHATTACHARJEE T, et al. Predicting biomass comminution：physical experiment, population balance model, and deep learning[J]. Powder Technology, 2024, 441：119830.

[16] 宋金库, 李辉, 张华, 等. 玉米秸秆切碎还田机参数仿真优化与试验[J]. 林业机械与木工设备, 2024, 52(2)：37－42.
SONG Jinku, LI Hui, ZHANG Hua, et al. Parameter simulation optimization and test of corn straw crushing and returning machine[J]. Forestry Machinery and Woodworking Equipment, 2024, 52(2)：37－42. (in Chinese)

[17] 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·MAIMAITUXUN, DU Zhigao, et al. Design and experiment of stalk feeding and crushing device for combined corn harvesting machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2025, 47(12)：101－109. (in Chinese)

[18] 王海庆, 王迪, 田海清, 等. 黄贮玉米秸秆饲料收获机改进设计[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版), 2021,

42(5): 83 - 88.
WANG Haiqing, WANG Di, TIAN Haiqing, et al. Improved design of silage corn straw feed harvesting machine[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 42(5): 83 - 88. (in Chinese)

[19] 王德成, 李思标, 尤泳, 等. 饲草生产与加工机械化技术研究现状与展望[J]. 农业机械学报, 2025, 56(11): 1 - 20.
WANG Decheng, LI Sibiao, YOU Yong, et al. Research status and prospect of mechanized technology for forage production and processing[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(11): 1 - 20. (in Chinese)

[20] 刘照启, 尤泳, 高晓宏, 等. 基于圆捆打捆机成型过程的小麦秸秆物理特性试验[J]. 农业工程, 2025, 15(1): 107 - 113.
LIU Zhaoqi, YOU Yong, GAO Xiaohong, et al. Physical property test of wheat straw based on round baler forming process [J]. Agricultural Engineering, 2025, 15(1): 107 - 113. (in Chinese)

[21] 郭颖杰, 程昱, 贲东伟, 等. 玉米秸秆纵向剪切特性试验[J]. 中国农机化学报, 2016, 37(2): 123 - 126.
GUO Yingjie, CHENG Yu, BEN Dongwei, et al. Experimental study on longitudinal shear characteristics of corn straw[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2016, 37(2): 123 - 126. (in Chinese)

[22] BITRA V S P, WOMAC A R, IGATHINATHANE C, et al. Direct measures of mechanical energy for knife mill size reduction of switchgrass, wheat straw, and corn stover[J]. Bioresource Technology, 2009, 100(24): 6578 - 6585.

[23] 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 experiment of travelling speed control system for wheel self-propelled square baler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(12): 107 - 114. (in Chinese)

[24] 陈松涛,周学建,师清翔,等. 小麦秸秆还田机粉碎装置性能影响因素试验与优化[J]. 农业机械学报,2007,38(9): 67 - 70.
CHEN Songtao, ZHOU Xuejian, SHI Qingxiang, et al. Experiment and optimization on performance-influencing factors of chopping device for wheat straw returning machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(9): 67 - 70. (in Chinese)

[25] 万星宇,廖庆喜,蒋亚军,等. 饲用油菜机械化收获切碎过程离散元仿真与试验[J]. 吉林大学学报(工学版),2022, 52(11):2735 - 2745.
WAN Xingyu, LIAO Qingxi, JIANG Yajun, et al. Discrete element simulation and experiment on chopping process in mechanical harvesting of forage rape[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(11): 2735 - 2745. (in Chinese)

[26] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 秸秆切碎还田机 试验方法: GB/T 20884—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

[27] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 饲料粉碎机 试验方法: GB/T 10901—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

[28] 林涵,何进,李慧,等. 基于 PLC 控制的等径凸轮传动自动变速秸秆粉碎还田装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(7): 96 - 110.
LIN Han, HE Jin, LI Hui, et al. Design and experiment of automatic variable speed straw crushing and returning device with equal diameter cam drive based on PLC control[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(7): 96 - 110. (in Chinese)

[29] 高波, 翟之平, 兰月政, 等. 基于 DEM - BPM - CFD 的饲草揉碎机功耗预测模型研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(增刊 2): 168 - 176.
GAO Bo, ZHAI Zhiping, LAN Yuezheng, et al. Research on power consumption prediction model of forage kneading machine based on DEM - BPM - CFD[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(Supp. 2): 168 - 176. (in Chinese)