

水稻秸秆拆解工艺参数优化及纤维自交织结构

孙恩惠^{1,2,3}, 彭 鵬^{1,2}, 曲 萍^{1*}, 靳红梅¹, 雍 宸¹,
陈 玲¹, 刘歆颖⁴, 黄红英¹

(1. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 农业农村部盐碱土改良与利用(滨海盐碱地)重点实验室, 江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 南京 210014; 2. 江苏大学农业工程学院, 镇江 212013; 3. 江苏理工学院资源与环境工程学院, 常州 213000; 4. 南非大学催化与能源研究所, 约翰内斯堡 0710, 南非)

摘 要: 大尺寸高长径比纤维是影响非织造秸秆纤维生态毯质量的关键。机械揉搓是获得高长径比纤维的最佳处理技术工艺。该研究探究了揉丝机主轴转速和锤齿间隙对不同含水率秸秆纤维拆解揉丝的影响, 其工艺参数为主轴转速、锤齿间隙及物料含水率, 指标输出为秸秆丝化率与标定单位生产率, 并对纤维自交织结构特性进行评价。结果表明, 采用 Box-Behnken 响应面法(response surface method, RSM)开发了一个可确定输入和输出参数间的函数, 2 种评价指标模型均具有较高的可信度, 决定系数分别为 $R^2 > 0.95$, $R^2 > 0.84$ 。优化数学模型工艺参数: 含水率 41.2%, 主轴转速 2 498 r/min, 锤齿间隙 12.84 mm 组合下秸秆丝化率达 96.93%, 标定单位功率生产率为 29.33 kg/(kW·h)。大尺寸高长径比秸秆纤维长度 > 70 mm 和长宽比 > 80 比例增幅分别达 120.55% 和 16.01%, 有效改善纤维自交织能力, 所开发的 RSM 模型秸秆的实际揉搓拆解丝化率达 96.27%, 加工成本降低 27.50 元/t, 可广泛应用于生产大尺寸纤维秸秆基高值农用制品。该研究为生物质秸秆的有效循环利用和高值化材料产业的绿色可持续发展提供重要依据和技术支撑。

关键词: 秸秆; 纤维; 参数优化; 机械揉搓; 高长径比; 丝化率; 响应面法

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405107

中图分类号: S141.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-17-0103-08

孙恩惠, 彭鵬, 曲萍, 等. 水稻秸秆拆解工艺参数优化及纤维自交织结构[J]. 农业工程学报, 2024, 40(17): 103-110. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405107 <http://www.tcsae.org>
SUN Enhui, PENG Kun, QU Ping, et al. Optimization of rice straw disassembly process parameters and fiber self-interweaving structure[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(17): 103-110. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202405107 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

资源短缺、能源危机和碳减排已成为全球关注的焦点问题^[1], 因此, 寻求环境友好生物基材料替代部分化石能源将是未来经济发展的重要路径^[2-3]。随着可持续农业发展和环境保护意识的日益增强, 农业废弃物秸秆的高效资源化利用逐渐成为重点方向^[4-7]。秸秆纤维毯兼具良好的透气和水分调节能力, 有助于种植土壤改良, 维持土壤湿度, 调控植株根系生态环境, 促进植物根系生长, 增强土壤抗逆性和自洁能力, 对改善地表生态环境具积极效应^[8]。其不仅可实现秸秆资源化高值利用, 减少环境污染, 同时为农业生产提供便捷、有效的绿色低碳技术手段^[9-10]。

非织造成型生产具有自动化程度高、成型工艺相对简单等优势^[11-13]。然而, 机械揉搓分丝技术是制约秸秆

纤维高效自交织成型及其质量的关键因素, 直接影响产品均匀性和后续应用效果。目前, 秸秆揉丝机作为实现高值转化的核心设备, 实际操作中常因参数设置不当而导致分丝效率低下、揉丝物料几何尺寸过大及产出率不稳定等问题, 从而使得秸秆纤维毯农用制品均质稳定性受到挑战^[14]。

根据已有研究, 在结构设计方面常采用 Adams 运动学分析来获得秸秆揉搓运动轨迹^[15], 依据秸秆受力及理论分析, 可对揉丝机不同功能部件结构与工作参数进行设计^[16]。在结构优化方面, 研究表明不同形状锤片对秸秆粉碎效果有显著差异^[17]; 借助仿真手段, 可以对锤片高速旋转引起的流场产生的旋转噪声^[18]、涡流噪声^[19]进行定量分析, 同时流场也会直接影响丝状物料的抛出角^[20]及物料在气固环流层受力情况^[21]。王海庆等^[22]通过设计三角形筛片, 构建了异形揉丝粉碎室, 以破坏空气——物料环流层并改善粉碎机性能; 侯泽华等^[23]设计研发的 9RS-60 型揉碎机进行了单因素试验, 结果表明该揉碎机的性能较好, 秸秆丝化率变化趋势保持在 95% 左右; 李松毅^[24]则对现有揉碎机结构、秸秆加工方式及影响揉碎性能的主要工作参数进行研究, 发现通过调控喂入装置、揉碎装置及功率测试装置结构参数, 有助于提高标定单位功率生产率和秸秆丝化率。综上所述, 针对秸秆揉丝

收稿日期: 2024-05-16 修订日期: 2024-07-20

基金项目: 农业农村部种养殖结合重点实验室开放课题基金项目(0500256100ZX); 江苏省农业科技自主创新项目(CX(23)1034); 江苏省重点研发计划项目(BE2020335)

作者简介: 孙恩惠, 副研究员, 研究方向为秸秆纤维解离预处理技术与农用材料开发及应用。Email: enhun@126.com

*通信作者: 曲萍, 研究员, 研究方向为秸秆成型材料的开发及在农业中的应用。Email: quping@jaas.ac.cn

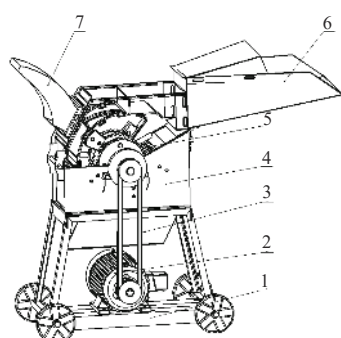
机的理论研究、试验及成型工艺的探讨相对较多,但关于在不同秸秆含水率条件下调控揉丝机转速和刀片间隙对大尺寸秸秆纤维分丝特性及产出率的模型预测少有报道。

基于此,本文从秸秆纤维自身物化特性结合揉丝机结构单元参数入手,设计调控不同主轴转速和锤齿间隙在物料不同含水率条件下进行秸秆揉搓试验。以大尺寸高长径比秸秆纤维丝化率及标定单位功率生产率作为关键评价指标,采用三因素三水平响应面法(response surface method, RSM)建立优化模型,并进行试验验证。通过对秸秆揉丝过程中机械参数的细节分析和实验数据的深入挖掘,旨在寻找综合性能最佳的机械揉搓工艺技术,并对拆解纤维自交织结构进行评价,以期实现提高揉丝能效,促进秸秆纤维的高值高效转化,为大规模秸秆纤维毯的实际应用提供现实指导意义和支撑依据。

1 揉丝机及锤片转子设计

1.1 揉丝机整机结构及工作原理

秸秆揉丝机的设计目的在于实现生物质秸秆的有效预处理和再利用。其工作部件包括给料系统、传动机构、揉丝主体及出料系统四大部分^[25],主要是由机架、电机、进料口、锤片、出料口、带传动结构等组成,整机结构如图1所示。通过这些系统协同工作,以达到预期的揉丝作用。



1. 机架 2. 电机 3. 带传动 4. 锤片
5. 锤片组件 6. 进料口 7. 出料口
1. Rack 2. Motor 3. Belt drive 4. Case
5. Hammer assembly 6. Feedport 7. Outlet

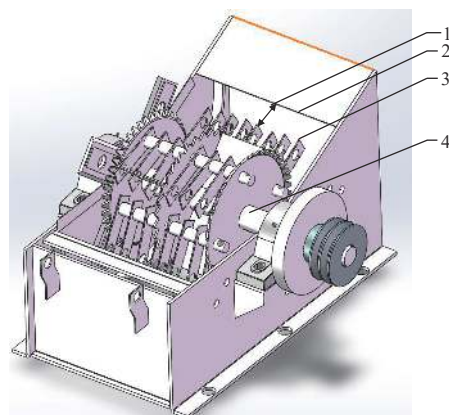
图1 秸秆揉丝机结构图

Fig.1 Structural diagram of straw kneading machine

揉丝机在工作过程中,秸秆原料首先通过进料口送入揉丝机工作区域,随后物料被高速旋转的锤片转子捕捉。锤片以一定的速度旋转,通过物理作用力对秸秆进行揉搓处理,经特定排列方式施加的剪切力、挤压力和撕裂力,使秸秆在瞬间受到强烈作用而达到揉丝转化成相对均匀的大尺寸拆解纤维丝化物料^[26]。处理后的秸秆纤维随后通过出料系统收集,用于后续加工利用。

1.2 锤片转子及设计

锤片转子是揉丝作业的核心部件,位于揉丝腔中心位置,主要对秸秆进行切割和揉搓作业,该系统包括锤片、支撑板、销轴等部件如图2所示。锤片嵌套在销轴上,采用套管约束其轴向位移;锤片转子高速旋转时,揉丝腔中形成高速运动气流,进而促进丝状物料加速穿过腔体。



1. 锤齿间隙 2. 齿板内侧顶端 3. 锤片末端 4. 主轴转速
1. Clearance between hammer and gear 2. Medial top of tooth plate
3. Hammer end 4. Spindle speed

图2 锤片转子系统图

Fig.2 Diagram of the hammer rotor system

锤齿间隙指锤片末端到齿板内侧顶端的直线距离,是影响秸秆丝化率和标定功率生产率的重要因子^[27],本机设计矩形锤片,结构简单,制造难度低,其带有两个销孔,用于固定和定位,利用锤片对物料的冲击揉搓可加工成具有一定长径比的秸秆纤维。锤片的横截面积影响锤片的冲击强度,揉丝机锤片厚度减小,其综合性能增强,这是由于物料的破坏发生在锤片侧面和棱角与物料接触瞬间。在相同的冲击强度下,选用厚度较小的锤片,可有效降低横截面积,增加锤片冲击强度。因此,在研究揉丝拆解过程中,提升揉搓效率主要归因于物料群体与锤片接触概率^[28]。部分企业在研发新型揉丝机时,提高锤片厚度,增加齿板密度和数量以改善揉丝破碎质量,但锤片厚度增加,会导致揉丝机标定单位功率生产率的下降。

2 试验材料与方法

2.1 试验条件及设备

试验于2023年在江苏省农业科学院六合基地进行(北纬32°28',东经118°36')。给定原材料为水稻秸秆,含水率10%~12%,长度在20~60 cm,由南京骏圣生态农业有限公司供应,所用尿素为工业级(安徽昊源化工集团)。试验开展之前,通过对机具进行调试,确保其处于合适的工作状态,试验时需保证均匀的水稻秸秆持续喂入量。

仪器设备主要有秸秆揉丝机(9RS-2型,郑州吉峰机械制造有限公司)、三相电表(DTS606,德力西电气)、数显游标卡尺(530系列-M型,三丰精密量具(上海)有限公司)、电子天平(LC-FA1004,上海力辰仪器科技有限公司)、通用矢量变频器(SKI-70,杭州三科变频技术有限公司)、超景深三维显微镜(VHX-500FE型,苏州萨测迪精密仪器有限公司)。

2.2 试验设计方案

2.2.1 响应面优化试验设计

本试验针对可控制且对评价指标有重要影响的因素如秸秆含水率、主轴转速和锤齿间隙进行研究。通过响

应面法 (RSM) 旨在寻求三个因素的最佳组合以实现高生产率、高效率制备大尺寸高长径比秸秆纤维的机械揉搓拆解工艺优化目的。

2.2.2 试验因子参数范围确定方法

揉丝过程中, 通过调节揉丝机电机功率改变主轴转速, 根据前期揉丝试验得到机具最佳揉丝转速为 2 400 r/min, 考虑到规模化揉丝情况有别于小试, 因此设置上下 100 r/min 的浮动范围, 速度分别为 2 300、2 400、2 500 r/min; 锤齿间隙的改变通过在转盘半径方向设置不同的销孔, 锤片通过销轴固定在不同的销轴孔来实现, 间隙越小, 发生堵塞的概率越大, 间隙太大则造成揉丝效果欠佳, 综合前期试验得到较优锤齿间隙为 13 mm, 按等距设定 10、13 和 16 mm 三挡锤齿间隙可调; 秸秆含水率则通过在揉丝前加入一定比例的水进行调节, 水分过高会使得秸秆不易揉碎, 过低则灰尘产生量大, 污染环境, 结合前期的研究结果^[8, 10], 得到 40%~60% 的含水率区间揉丝效果尚佳, 因此选取 40%、50% 和 60% 的含水率进行试验。

2.2.3 因素水平

设计秸秆丝化率及标定单位生产率为秸秆分丝功效评价指标。使用 Design-Expert 软件依据 Box-Behnken 中心组合设计原则的分析模块获得评价指标与试验因子间的回归数学模型并检测其显著性及交互作用。因素水平编码表如表 1 所示。

表 1 试验因素及水平
Table 1 Factors and level of test

水平 Level	因素 Factor		
	含水率 Moisture content $X_1/\%$	主轴转速 Spindle speed $X_2/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	锤齿间隙 Clearance between hammer and gear X_3/mm
-1	40	2 300	10
0	50	2 400	13
1	60	2 500	16

2.3 分析测定方法

2.3.1 秸秆丝化率

经前期研究得出, 秸秆纤维长度 10~70 mm 的更适用于后期加工成型。因此本文定义: 秸秆经揉搓加工后, 成品中长度为 10~70 mm 且几何宽度不大于 3 mm 的丝状物所占百分比为秸秆丝化率。测定方法: 每次负载试验开始 2 min 后, 每间隔 2 min 在出口横断接取成品样品 1 次, 共接取 3 次, 每次接取样品不少于 200 g, 将 3 次样品混合称其质量, 分拣出其中符合要求的秸秆丝并称量质量, 按式 (1) 计算秸秆丝化率。

$$H = \frac{M_1}{M} \times 100\% \quad (1)$$

式中 H 为秸秆丝化率, %; M 为加工后成品质量, g; M_1 为秸秆丝化质量, g。

2.3.2 标定单位生产率

揉丝机的标定单位生产率是指揉丝机在单位功率下, 单位时间内可以处理的物料重量。按式 (2) 计算标定单位功率生产率。

$$E = \frac{G}{TP} \times \frac{1-S}{1-S_b} \times 60 \quad (2)$$

式中 E 为标定单位功率生产率, kg/(kW·h); G 为试验用秸秆质量, kg; T 为试验时间, min; P 为配套动力总标定功率, kW; S_b 为秸秆标准水分 (当试验用秸秆为干秸秆时, S_b 按 20% 计算; 当试验用秸秆为青秸秆时, S_b 按 60% 计算), %; S 为试验用秸秆水分, %。

2.4 大尺寸高长径比秸秆纤维交织结构分析

大尺寸高长径比是用于描述秸秆纤维形态的重要指标, 直接影响秸秆纤维毯的质量^[8]。文中高长径比主要通过机械揉搓后获得的纤维长度和宽度比值体现。具体为, 称取 (5.0±0.2) g 样品, 通过数显游标卡尺测量所有秸秆纤维长度和宽度, 秸秆纤维长宽比为其长度与宽度的比值, 每组试验重复 3 次。并采用超景深三维显微镜对秸秆纤维生态毯表面进行微观结构和形貌表征。

2.5 数据分析

采用 Origin 9.0 软件进行数据整理, 使用 Design-Expert 8.0.6 软件中 Box-Behnken 响应面进行数据分析。

3 结果与分析

3.1 响应面分析结果及回归模型

试验设计方案及分析结果如表 2 所示。采用 Design-Expert 软件对试验数据进行多元回归拟合分析, 建立丝化率 φ_1 和标定单位功率生产率 φ_2 评价指标对含水率 X_1 、主轴转速 X_2 、锤齿间隙 X_3 这 3 个试验因素的二次多项式回归模型, 于信度 0.05 下进行 F 检验, 结果表明丝化率 φ_1 、标定单位功率生产率 φ_2 的二次项模型有意义。得到回归模型方程如式 (3)~(4) 所示:

$$\varphi_1 = 96.04 - 1.11X_1 + 1.43X_2 + 1.06X_3 + 0.26X_1X_2 + 0.35X_1X_3 - 0.61X_2X_3 - 0.43X_1^2 - 0.95X_2^2 - 1.56X_3^2 \quad (3)$$

$$\varphi_2 = 25.48 + 0.16X_1 + 0.27X_2 - 0.73X_3 - 1.03X_1X_2 + 0.12X_1X_3 + 0.33X_2X_3 + 0.68X_1^2 + 2.33X_2^2 - 0.1X_3^2 \quad (4)$$

表 2 Box-Behnken 试验方案与结果
Table 2 Test plan and result of Box-Behnken

试验号 No.	含水率 Moisture content $X_1/\%$	主轴转速 Spindle speed $X_2/(\text{r} \cdot \text{min}^{-1})$	锤齿间隙 Clearance between hammer and gear X_3/mm	丝化率 Filamentation rate $\varphi_1/\%$	标定单位 功率生产率 Calibration of unit power productivity $\varphi_2/(\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$
1	-1	0	0	96.23	25.00
2	1	0	0	94.68	25.53
3	0	-1	0	93.79	28.21
4	0	1	0	96.42	27.69
5	0	0	-1	93.28	26.95
6	0	0	1	95.95	25.28
7	-1	-1	0	94.16	27.07
8	-1	1	0	96.75	29.61
9	1	-1	0	92.18	30.15
10	1	1	0	95.79	28.57
11	-1	0	-1	95.28	27.31
12	-1	0	1	96.16	25.42
13	1	0	-1	91.26	26.59
14	1	0	1	93.52	25.17
15	0	-1	-1	90.28	27.61
16	0	-1	1	93.87	25.79
17	0	1	-1	94.25	28.08

3.2 回归模型方差分析

3.2.1 丝化率的方差分析

根据表3可知, 秸秆丝化率的回归模型 $F=14.95$, $P=0.0009$, 说明丝化率模型极显著, 失拟项 $P=0.8426>0.05$, 模型失拟不显著; 模型相关系数 $R^2=0.9505$, 表明该模型拟合程度较好, 实际试验中约 95.05% 的结果可通过拟合模型进行解释, 说明该模型有充分的准确性和通用性。

表3 回归模型方差分析
Table 3 Variance analysis regression model

指标 index	方差来源 Source of variance	平方和 Sum of squares	自由度 Degree of freedom	均方 Mean square	F	P
丝化率 Filamentation rate $\varphi_1/\%$	模型	52.95	9	5.88	14.95	0.0009**
	X_1	12.43	1	12.43	31.58	0.0008**
	X_2	16.05	1	16.05	40.78	0.0004**
	X_3	8.71	1	8.71	22.12	0.0022**
	X_1X_2	0.2601	1	0.2601	0.6608	0.4431
	X_1X_3	0.4761	1	0.4761	1.21	0.3078
	X_2X_3	0.8657	1	0.8657	2.2	0.1817
	X_1^2	0.5203	1	0.5203	1.32	0.2880
	X_2^2	2.19	1	2.19	5.55	0.0496*
	X_3^2	5.86	1	5.86	14.87	0.0062**
	残差	2.7555	7	0.3936		
	失拟	0.64	3	0.33	0.39	0.8426
标定单位功率生产率 Calibration of unit power productivity $\varphi_2/(\text{kg} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1})$	模型	33	9	3.67	4.09	0.0384*
	X_1	0.2579	1	0.2579	0.2876	0.6084
	X_2	0.5671	1	0.5671	0.6323	0.4526
	X_3	4.16	1	4.16	4.63	0.0684
	X_1X_2	4.24	1	4.24	4.72	0.0663
	X_1X_3	0.057	1	0.057	0.0635	0.8083
	X_2X_3	0.2522	1	0.2522	0.2812	0.6123
	X_1^2	1.25	1	1.25	1.4	0.2755
	X_2^2	13.06	1	13.06	14.56	0.0066**
	X_3^2	0.0241	1	0.0241	0.0269	0.8745
	残差	6.28	7	0.8969		
	失拟	3.125	4	2.872	0.46	0.2572
	误差	2.56	4	3.16		
	总和	39.28	16			

注: $P<0.01$ (极显著**); $0.01 \leq P<0.05$ (显著*).

Note: $P<0.01$ (highly significant **); $0.01 \leq P<0.05$ (significant *).

方差分析可表明各因素的显著性, 在该模型中一次项 X_2 、 X_1 、 X_3 和二次项 X_3^2 对秸秆丝化率影响极显著, 二次项 X_2^2 对丝化率影响显著, 其余项影响不显著, 可得影响秸秆丝化率的因素大小顺序为 X_2 (主轴转速) $> X_1$ (含水率) $> X_3$ (锤齿间隙)。

3.2.2 标定单位功率生产率方差分析

对标定单位功率生产率获得的方程进行方差分析, 结果如表3所示。模型 $F=4.09$, P 值为 0.0384, 说明该模型验证结果显著; X_1 、 X_2 、 X_3 三因素的 F 值 X_3 (锤齿间隙) $> X_2$ (主轴转速) $> X_1$ (含水率), 体现各因素对揉丝机标定单位功率生产率的影响程度大小顺序。失拟项 $P=0.2572>0.05$, 说明失拟项不显著, 拟合函数模型与实际试验之间的差异极小, 函数拟合结果较准确; 模型的决定系数 R^2 为 0.8402, 说明回归函数的可信度高, 试验数据可靠性强。

3.3 因子交互作用对秸秆丝化能效的影响

为更直观了解各交互因子对试验评价指标的影响,

运用 Design-Expert 软件作出各交互因子对秸秆丝化率和标定单位功率生产率影响的响应面分析图。

3.3.1 交互因素对丝化率的影响分析

图3为秸秆含水率 X_1 、主轴转速 X_2 、锤齿间隙 X_3 对水稻秸秆丝化率的交互作用响应面图。当锤齿间隙确定, 水稻秸秆的丝化率随含水率的增加呈下降趋势, 这是因为随含水率的增大, 水稻秸秆的韧性增强, 需多次打击、揉搓和撞击作用提高破碎力才能满足揉丝长度要求^[29-30]。随主轴转速的不断提高, 刀具对水稻秸秆作用力增大, 使得水稻秸秆丝化率随主轴转速增大而提升。当主轴转速一定时, 秸秆的丝化率随锤齿间隙的增大呈现先增大后减小的趋势, 随水稻秸秆的含水率上升而下降。当水稻秸秆的含水率一定时, 丝化率随锤齿间隙的增大先上升后下降, 说明过小的锤齿间隙, 使得水稻秸秆过度粉碎, 造成丝状物的比例减小, 降低了丝化率; 主轴转速对秸秆揉丝率的影响极其显著, 主轴转速与秸秆揉丝率呈递增的线性关系。当秸秆含水率 40%, 主轴转速为 2500 r/min, 锤齿间隙为 13 mm 时, 水稻秸秆丝化率最高为 96.75%。

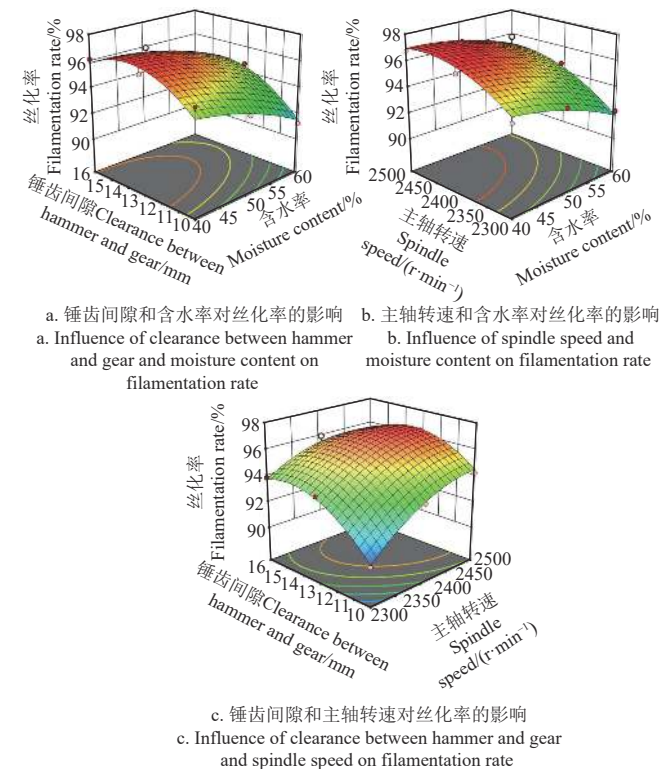


图3 试验因子交互作用对丝化率影响的响应面图

Fig.3 Response surface diagram of the effect of experimental factor interaction on the filamentation rate

3.3.2 交互因素对标定单位功率生产率的影响分析

图4为秸秆含水率 X_1 、主轴转速 X_2 、锤齿间隙 X_3 对标定单位功率生产率 φ_2 的交互作用响应面图。当揉丝机的锤齿间隙一定时, 随主轴转速和秸秆含水率的增加, 揉丝机的标定单位功率生产率呈现先下降后上升的趋势, 且主轴转速对标定单位功率生产率的影响大于含水率。当秸秆含水率一定时, 揉丝机的标定单位功率生产率随锤齿间隙的增大略有下降, 随主轴转速的增大呈

现先下降后上升的趋势。当秸秆含水率 60%，主轴转速 2 300 r/min，锤齿间隙 11.08 mm 时，标定单位功率生产率最高为 29.96 kg/(kW·h)。

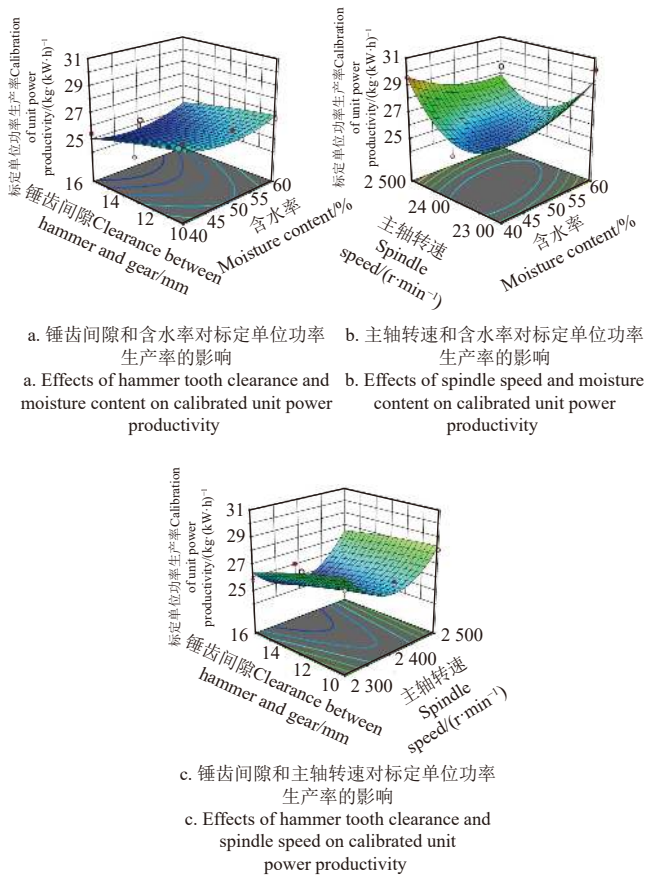


图 4 试验因子交互作用对标定单位功率生产率影响的响应面图

Fig.4 Response surface diagram of the effect of experimental factor interaction on calibrated unit power productivity

3.4 揉丝参数优化分析及试验验证

秸秆揉丝拆解工作时要求成品纤维丝化率高、生产效率高，以达到高效和节能双重目的。为获得揉丝机作业性能最佳参数组合，利用 Design-Expert 软件中的多目标优化算法，以丝化率最大值和标定单位功率生产率最大为优化目标，通过分析建立优化数学模型。

求解得到揉丝机最优参数组合为：秸秆含水率为 41.2%，主轴转速为 2 498 r/min，锤齿间隙为 12.84 mm。此参数组合下水稻秸秆丝化率为 96.93%，标定单位功率生产率为 29.33 kg/(kW·h)。

$$\begin{cases} \max \varphi_1(X_1, X_2, X_3) \\ \max \varphi_2(X_1, X_2, X_3) \\ 40\% \leq X_1 \leq 60\% \\ 2\,300 \text{ r/min} \leq X_2 \leq 2\,500 \text{ r/min} \\ 10 \text{ mm} \leq X_3 \leq 16 \text{ mm} \end{cases} \quad (5)$$

为了验证优化结果的可信度，将水稻秸秆含水率设定为 42%，主轴转速设定为 2 490 r/min、锤齿间隙为 13 mm，对优化结果进行验证，每组试验重复 5 次，计算 5 次试验结果的平均值作为该条件下的评价指标实际

值，测得丝化率为 96.27%，标定单位功率生产率为 28.98 kg/(kW·h)，与优化结果相对误差分别为 0.68% 和 1.19%，表明通过优化含水率、主轴转速和锤齿间隙等多影响因素能够获取可信度高的秸秆揉丝能效评价体系，所建立的数学模型和优化结果准确。

3.5 大尺寸高长径比秸秆纤维形态及自交织结构

大尺寸高长径比秸秆纤维长度和长宽比分布占比见图 5a 和 5b。可以看出，优化条件下制备的纤维长度 <20 mm 和 20~40 mm 分布占比较原有工艺下降幅度达 32.65% 和 39.48%，40~70 mm 和 >70 mm 的纤维占比呈增加趋势，尤其是 >70 mm 的纤维增幅达 120.55%；对应的纤维长宽比 >50~80 和 >80 的占比分别由 17.39% 和 6.52% 增加到 38.64% 和 16.01%，且增幅显著。此外，结合图 6a 可以明显发现秸秆纤维具有较好的丝化效果，自交织成毯强度良好，表面平整度较高（图 6b），同时结合超景深三维显微镜观察纤维毯表面形态，发现秸秆毯中纤维自交织缠结结构较为致密（图 6c）。

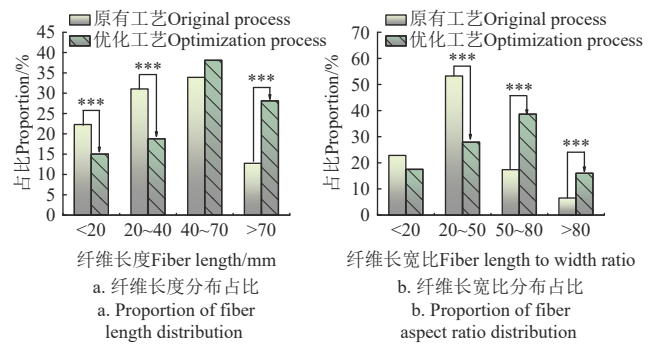


图 5 秸秆纤维机械揉丝纤维长度和长宽比分布占比

Fig.5 Mechanical kneading of straw fiber length and length-width ratio distribution proportion

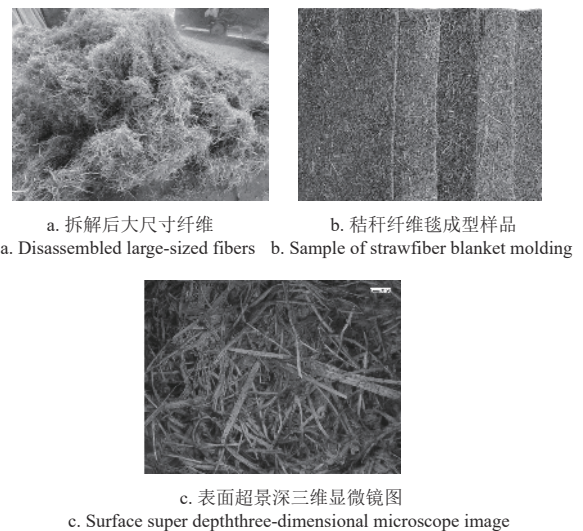


图 6 机械揉搓秸秆纤维及成型样品表面形态

Fig.6 Mechanical rubbing of straw fiber and forming of sample surface morphology

表明通过优化工艺机械揉搓的秸秆纤维具有较好的丝化交织性，而这种功能利于秸秆纤维毯的成型加

工^[31], 关于秸秆纤维交织成型优化工艺后续将进一步深入研究。

3.6 秸秆纤维加工成本分析

中国是农业大国, 每年秸秆总产量已逾 9 亿 t。采用非织造工艺将大尺寸高长径比水稻秸秆纤维加工成秸秆毯具工艺流程短、生产速度快, 产量高、成本低、用途广、原料来源多等特点, 是新一代环保材料, 兼具透气

好、柔韧性高、保水性好等优点, 应用前景广阔^[8]。

按照 1 条生产线生产幅宽 1.5 m (3 m/min), 含水率 10%、800 g/m² 的秸秆纤维毯, 年产 1 500 t 为依据, 水稻秸秆按照 300 元/t, 揉丝机日工作时间为 8 h 计。结合 RSM 模型优化工艺调节机械揉丝机模块参数, 对优化前后加工揉搓 1 000 kg 秸秆加工成本情况进行分析见表 4。优化后其加工成本可降低 27.50 元/t。

表 4 机械揉搓 1 000 kg 秸秆加工成本分析
Table 4 Analysis of processing cost of mechanical kneading 1 000 kg straw

项目 Item	丝化率 Filamentation rate/%	电费 Electricity consumption /(元·t ⁻¹)	原料损耗率 Loss rate/%	原料费 Raw material cost /(元·t ⁻¹)	水费 Water cost /(元·t ⁻¹)	人工费 Labor cost/(元·d ⁻¹)	加工成本费用 Processing cost expense /(元·t ⁻¹)
优化工艺 Optimization process	96.7	7.81	3.3	310	0.26	16.67	334.74
原有工艺 Original process	90.0	9.50	10.0	333	0.51	19.23	362.24

4 结 论

1) 为了解决秸秆分丝及标定功率生产率有限的问题, 本文研究调控主轴转速、锤齿间隙和原料含水率 3 个维度因子对秸秆分丝效果及标定功率生产率的影响, 通过 Box-Behnken 响应面 (RSM) 优化分析, 确定了主轴转速、锤齿间隙和原料含水率等工艺参数, 可有效提高机械揉搓大尺寸高长径比秸秆纤维丝得率。

2) RSM 回归模型方差分析, 明确了揉丝工艺的各因素对秸秆丝化率的影响显著顺序为主轴转速、含水率、锤齿间隙, 主轴转速与秸秆揉丝率呈递增的线性关系; 对揉丝机标定单位功率生产率影响显著顺序为锤齿间隙、主轴转速、含水率, 当锤齿间隙一定时, 随主轴转速和秸秆含水率呈先下降后上升的趋势。

3) 运用 Design-Expert 软件的优化模块, 以丝化率和标定单位功率生产率为评价目标, 确定最佳揉丝工作参数为: 秸秆含水率 41.2%, 主轴转速 2 498 r/min, 锤齿间隙 12.84 mm, 此工艺组合下水稻秸秆丝化率 96.93%, 标定单位功率生产率为 29.33 kg/(kW·h), 实际验证结果误差在 0.68% 和 1.19%, 结果可靠, 优化后大尺寸高长径比秸秆纤维占比增幅提高, 其加工成本可降低 27.50 元/吨。RSM 模型优化后的工艺参数为水稻秸秆分丝拆解能效提升及后续大尺寸秸秆纤维非织造高效成型加工奠定基础。

[参 考 文 献]

- [1] YANG J, CHANG J, CAO X, et al. Energy, environmental, and socioeconomic potential benefit of straw resources utilization under water availability limit condition[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 392,15: 136274.
- [2] MOUSAVI-AVVAL S, SAHOO K, NEPAL P, et al. Environmental impacts and techno-economic assessments of biobased products: A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2023, 180: 113302.
- [3] SIN X, XIE M, MAI L, et al. Biobased plastic: A plausible solution toward carbon neutrality in plastic industry[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 435(5): 129037.
- [4] WU Z, PENG K, ZHANG Y, et al. Lignocellulose dissociation with biological pretreatment towards the biochemical platform: A review[J]. *Materials Today Bio*, 2022, 16: 100445.
- [5] SUN E, ZHANG Y, YONG C, et al. Biological fermentation pretreatment accelerated the depolymerization of straw fiber and its mechanical properties as raw material for mulch film[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 284(15): 124688.
- [6] 范肖东, 韩善明, 曲萍, 等. 氯化胆碱/尿素预处理水稻秸秆及其解离纤维结构性能的表征[J]. *林产化学与工业*, 2023, 43(4): 9-16.
FAN Xiaodong, HAN Shanming, QU Ping, et al. Characterization of choline chloride/urea pretreated rice straw and its dissociative fiber structure and properties[J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2023, 43(4): 9-16. (in Chinese with English abstract)
- [7] 孙恩惠, 黄红英, 武国峰, 等. 稻壳/大豆蛋白基黏合剂成型育苗钵性能评价及成因分析[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(6): 1202-1209.
SUN Enhui, HUANG Hongying, WU Guofeng, et al. Performance evaluation and analysis of nursery containers made from rice husk/soybean protein adhesives[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(6): 1202-1209. (in Chinese with English abstract)
- [8] 曲萍, 黄红英, 孙恩惠, 等. 一种高长径比秸秆纤维的制备方法及其在针刺成型秸秆毯中的应用: 202211300323.3[P]. (2022-10-24).
- [9] ZHANG Y, WANG J, GONG S, et al. Straw mulching improves soil water content, increases flag leaf photosynthetic parameters and maintains the yield of winter wheat with different irrigation amounts[J]. *Agricultural Water Management*, 2021, 249(30): 106809.
- [10] 彭鹏, 靳红梅, 孙恩惠, 等. 秸秆纤维毯覆盖对葡萄园土壤理化性质、杂草防控及果实品质的影响[J]. *农业资源与环境学报*, 2024, DOI: 10.13254/j.jare.202.0005.
PENG Kun, JIN Hongmei, SUN Enhui, et al. Impact of straw fiber blanket mulching on soil properties, weed management, and grape quality in vineyards[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2024, DOI:

- 10.13254/j.jare.202.0005. (in Chinese with English abstract)
- [11] ZHAO W, YU R, DONG W, et al. The influence of long carbon fiber and its orientation on the properties of three-dimensional needle-punched CF/PEEK composites[J]. *Composites Science and Technology*, 2021, 203(8): 108565.
- [12] MENG X, FAN W, MAHARI W, et al. Production of three-dimensional fiber needle-punching composites from denim waste for utilization as furniture materials[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 281(25): 125321.
- [13] SINGH C, MUKHOPADHYAY S, RENGASAMY R. A sustainable approach to oil spill cleanup by kapok and waste cotton needle punched nonwoven blends[J]. *Industrial Crops and Products*, 2023, 191: 115939.
- [14] 刘禹辰. 基于离散元法的玉米秸秆揉丝仿真与试验研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2023.
- LIU Yuchen. Simulation and Experimental Study of Corn Stalk Kneading Based on Discrete Element Method[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张馨怡. 玉米秸秆滚压揉搓破碎机理与机构仿真研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- ZHANG Xinyi. Study on Mechanism and Mechanism Simulation of Rolling, Rubbing and Crushing of Corn Stalks[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [16] 成翔. 秸秆饲料收获机捡拾揉碎装置设计与实验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2023.
- CHENG Xiang. Design and Experiment of Picking and Crushing Device in Straw Feed Harvester[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李秀清. 基于离散元方法的锤片粉碎机玉米粉碎过程模拟及锤片性能试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2020.
- LI Xiuqing. The Simulation of Maize Crushing by Hammer Mill and the Test of Hammer Performance Based on Discrete Element Method[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [18] 曹丽英, 杨左文, 焦巍, 等. 锤片式粉碎机噪声源识别及降噪方法[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(7): 59-65.
- CAO Liying, YANG Zuowen, JIAO Wei, et al. Noise sources identification and noise reduction methods of hammer mill[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(7): 59-65. (in Chinese with English abstract)
- [19] 翟之平, 张龙, 刘长增, 等. 秸秆抛送装置外壳振动辐射噪声数值模拟与试验验证[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(16): 71-79.
- ZHAI Zhiping, ZHANG Long, LIU Changzeng, et al. Numerical simulation and experimental validation of radiation noise from vibrating shell of stalk impeller blower[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2017, 33(16): 71-79. (in Chinese with English abstract)
- [20] 方梅, 郁志宏, 张文杰, 等. 盘刀式铡草机粉碎物料运动过程分析与试验[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(7): 76-84.
- FANG Mei, YU Zhihong, ZHANG Wenjie, et al. Analysis and experiments of the movement process for the shredded material of disc knife chaff cutter[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2021, 37(7): 76-84. (in Chinese with English abstract)
- [21] 钱义, 王迪, 张珏, 等. 粉碎机异形筛片气流场数值模拟及试验研究[J]. *中国农业大学学报*, 2020, 25(3): 79-87.
- QIAN Yi, WANG Di, ZHANG Jue, et al. Numerical simulation and experimental research on the gas flow field of special-shaped sieve sheet of crusher[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2020, 25(3): 79-87. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王海庆, 玛纳拉苏仁, 田海清, 等. 锤片式粉碎机三角形筛片的设计及试验研究[J]. *农机化研究*, 2018, 40(7): 72-76.
- WANG Haiqing, MANALASUREN, TIAN Haiqing, et al. The design and experimental study on the triangular screen of hammer mill[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2018, 40(7): 72-76. (in Chinese with English abstract)
- [23] 侯泽华, 崔红梅, 闫鹏, 等. 9RS-60 型揉碎机工作性能试验研究[J]. *农机化研究*, 2020, 42(1): 141-146.
- HOU Zehua, CUI Hongmei, YAN Peng, et al. The orthogonal test study on working performance of 9R-60 crushed mill[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2020, 42(1): 141-146. (in Chinese with English abstract)
- [24] 李松毅. 玉米秸秆揉碎装置设计与性能试验研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2019.
- LI Songyi. Design and Performance Test of Corn Straw Crushing Device[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2019. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王铁军, 王铁良, 崔红光, 等. 喂入调节式秸秆破包揉丝机设计与试验[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(6): 148-158.
- WANG Tiejun, WANG Tieliang, CUI Hongguang, et al. Design and experiment of adjustable feeding straw bale-breaking and rubbing filament machine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(6): 148-158. (in Chinese with English abstract)
- [26] MATSUMOTO J, OHSAKI S, NAKAMURA H, et al. Quantitative analysis of wet kneading states by a novel compression test[J]. *Advanced Powder Technology*, 2024, 35(2): 104336.
- [27] LIANG R, ZHANG B, ZHOU P, et al. Power consumption analysis of the multi-edge toothed device for shredding the residual film and impurity mixture[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2022, 196: 106898.
- [28] 麻乾, 刘飞, 赵满全, 等. 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(S2): 7-15.
- MA Qian, LIU Fei, ZHAO Manquan, et al. Working mechanism and structure optimization of hammer of rubbing machine[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(S2): 7-15. (in Chinese with English abstract)
- [29] 李洪成. 锤片式粉碎机工作性能影响机理与优化研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.

- LI Hongcheng. Study on Influence Mechanism and Optimization of the Hammer Mill Grinding Performance[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [30] 陈涛, 衣淑娟, 李衣菲, 等. 铡切揉碎协同式牧草揉丝机设计与试验[J]. 农业机械学报, 2024, 55(2): 149-159.
- CHEN Tao, YI Shujuan, LI Yifei, et al. Design and test of cutting and crushing cooperative silk kneading machine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(2): 149-159. (in Chinese with English abstract)
- [31] CHEN X, JIANG H, WANG G, et al. Disposable bamboo fiber meal boxes characterized by efficient preparation, excellent performance, and the potential for beneficial degradation[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 434: 139973.

Optimization of rice straw disassembly process parameters and fiber self-interweaving structure

SUN Enhui^{1,2,3}, PENG Kun^{1,2}, QU Ping^{1*}, JIN Hongmei¹, YONG Cheng¹, CHEN Ling¹,
LIU Xinying⁴, HUANG Hongying¹

(1. Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization; Key Laboratory of Saline-Alkali Soil Improvement and Utilization (Coastal Saline-Alkali Lands), Ministry of Agriculture and Rural Affairs; Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Institute of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3. School of Resources and Environmental Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213000, China; 4. Institute for Catalysis and Energy Solutions, University of South Africa (UNISA), Johannesburg 0710, South Africa)

Abstract: Rice straw is an important renewable resource. Under the circumstance of global resource shortage and energy shortage, it is of great significance to vigorously develop comprehensive utilization of straw. It is not only an important way to realize agricultural circular economy and low-carbon economy, but also involves sustainable development issues such as soil fertility, environmental security and efficient utilization of renewable resources in the entire agricultural ecosystem. Straw fiber ecological blanket has a good function of air permeability and water permeability, and has a significant positive effect on the ecological protection of soil surface microenvironment. Mechanical kneading is the key technology for the dismantling and optimization of agricultural waste straw fiber. In this study, the optimal process input is the spindle speed, hammer tooth clearance and material water content, and the output is the straw silk rate and calibrated unit productivity. An intelligent model was developed using Box-Behnken response surface method (RSM) to determine the functional relationship between input and output parameters. The three evaluation index models all have high reliability, and the determination coefficients are $R^2 > 0.95$ and $R^2 > 0.84$, respectively. The variance analysis of RSM regression model clarified that the influence of various factors on straw silk ratio was in the order of spindle speed > water content > hammer tooth clearance, and the linear relationship between spindle speed and straw silk ratio was increasing. The significant influence on the calibrated unit power productivity of the kneading machine is in the order of hammer tooth clearance > spindle speed > moisture content. When the hammer tooth clearance is constant, it decreases first and then increases with the spindle speed and straw moisture content. The results of factor interaction analysis showed that when the water content of straw was 40%, the spindle speed was 2 500 r/min, and the hammer tooth clearance was 13 mm, the silk ratio of rice straw was 96.75%. When the straw moisture content is 60%, the spindle speed is 2 300 r/min, and the hammer tooth clearance is 11.08 mm, the maximum calibrated unit power productivity is 29.96 kg/(kW·h). Mathematical model process parameters optimization: straw moisture content is 41.2%, spindle speed is 2 498 r/min, hammer tooth clearance is 12.84 mm. Under the combination of these parameters, the rice straw silk ratio is 96.93%, and the calibrated unit power productivity is 29.33 kg/(kW·h). Under optimized conditions, the proportion of fibers with length of 40-70 mm and > 70 mm showed an increasing trend, especially the fiber with length of > 70 mm increased by 120.55%. The proportion of fiber length-to-width ratio > 50-80 and > 80 increased from 17.39% and 6.52% to 38.64% and 16.01%, respectively. Ultra depth of field microscopy showed that the self-interweaving formability of kneaded straw fiber was significantly improved. The optimized mechanical kneading cost of straw fiber can be reduced by 27.50 yuan/t. The mechanical kneading technology strategy of the RSM model developed in this paper is effective for improving the decomposition rate of biomass straw and reducing the consumption of biomass straw, and can be widely used in the production of high-value agricultural products based on large fiber bundles of straw. The mechanical kneading technique strategy of the RSM model developed in this paper is effective for improving the decomposing silk rate and reducing the consumption of biomass straw, and can be widely used in the production of large-size fiber bundle straw based high-value agricultural products.

Keywords: straw; fiber; parameter optimization; mechanical rubbing; height to length ratio; filification rate; response surface method