

生物预处理协同膨化爆破制备秸秆纤维原料工艺参数优化

李龙海^{1,2}, 高 创¹, 范思远¹, 徐心航¹, 姜 涛¹,
刘 爽^{1,2}, 李 睿^{1,2}, 陈海涛^{1,2*}

(1. 东北农业大学大学工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑龙江省主要农作物生产机械化材料化技术创新中心, 哈尔滨 150030)

摘要: 为提高秸秆纤维地膜力学性能、减少打浆时间, 该研究提供了一种生物预处理协同膨化爆破制备秸秆纤维地膜原料的方法。为探究该项技术的工艺参数优化组合, 应用三因素五水平二次正交旋转中心组合试验方法, 选取预处理时间、主轴转速、模头间隙为试验因素, 以抗张指数、打浆时间、纤维长宽比作为性能指标, 得到了工艺参数优化组合, 结果表明: 工艺参数组合为预处理天数 10 d、主轴转速 120 r/min、模头间隙 3 mm, 所得纤维地膜抗张指数为 9.57 N m/g、打浆时间为 81.4 min, 纤维长宽比为 10.97, 与理论优化值相对误差不大于 5%。在此条件下制备的水稻秸秆纤维基地膜, 可满足水、旱田覆盖作物栽培技术要求, 研究结果可为水稻秸秆制备全降解植物纤维地膜的制作提供依据和技术支持。

关键词: 生物预处理; 水稻秸秆; 纤维地膜; 力学性能; 打浆能量

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407194

中图分类号: S216.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-22-0183-08

李龙海, 高创, 范思远, 等. 生物预处理协同膨化爆破制备秸秆纤维原料工艺参数优化[J]. 农业工程学报, 2024, 40(22): 183-190. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407194 <http://www.tcsae.org>

LI Longhai, GAO Chuang, FAN Siyuan, et al. Optimization of the parameters for the preparation of straw fiber raw material by biological pretreatment and synergistic expansion blasting[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(22): 183-190. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202407194 <http://www.tcsae.org>

0 引言

地膜覆盖作为一种高效的田间管理方法, 具有改善土壤生态环境、增温和保墒等功效^[1-4]。由于传统塑料地膜降解周期长、覆盖后地膜不易回收等问题导致田间土壤板结并形成隔层, 严重影响作物耕播质量及产量, 因此研究清洁环保可降解地膜成为农业可持续发展的重点之一^[5-6]。以农作物秸秆为原料制造的植物纤维地膜是一种清洁无污染、可完全降解的新型地膜, 保温、增墒效果与塑料地膜相若^[7], 抑制杂草效果显著, 其应用与推广对改善田间生态环境、增产增效、解决白色污染和实现农作物秸秆资源高值化利用具有重要意义。

物理制备法主要通过高温高压、蒸汽爆破、机械粉碎等物理方法制取秸秆纤维, 其具有绿色环保、适应性强等优点^[8-9], 但物理制备方法加工的秸秆纤维质量有待进一步提高^[10]。MI 等根据固体输送理论^[11-13]研发了 D200 型秸秆纤维制取机, 该装置利用单螺杆挤压剪切方法破碎秸秆, 饱和含水率的秸秆在机器内部受到单螺杆持续剪切、挤压, 改变秸秆纤维粒度, 同时摩擦热能汽化秸秆原料内部水分增大腔内压力, 于出口处发生膨化爆破,

迫使秸秆纤维撕裂帚化, 获得纤维地膜原料。纤维原料浸泡至充分润胀后进行机械制浆处理, 经打浆机飞刀切断成细小纤维, 借鉴造纸湿法成膜工艺^[14], 使细小纤维交错搭接经干燥压制得纤维地膜成品, 其中秸秆纤维化程度对纤维地膜物理特性具有显著影响。由于秸秆固有的物理属性, 物理加工过程中存在秸秆纤维化程度(秸秆物理形态变化程度, 直径越小纤维化程度越高)、帚化(纤维产生起毛、撕裂、分丝等现象)程度低的问题, 使地膜抄造时纤维搭接键合力不足, 造成地膜机械化敷设过程中易出现破损现象。生物处理方法可以调节秸秆化学组分, 影响秸秆物理特性, 有助于提高机械法制备秸秆纤维质量。

生物制取法主要通过微生物对秸秆进行发酵处理, 具有节能环保的优点, 但处理时间较长, 生产效率还需进一步提高^[15-18], 刘晨娟^[19]使用白腐菌对脆性水稻秸秆进行发酵处理, 结果表明生物预处理秸秆可有效降低秸秆力学性能, 使得秸秆易于粉碎处理。范肖东等^[20]指出使用微生物对秸秆进行软化拆解, 有利于降解纤维化学组分, 改善纤维形态。张悦^[21]利用生物制剂对秸秆进行预处理, 秸秆的解聚显著提升了地膜结晶度, 改善了地膜力学性能。YANG 等^[22]通过生物酶对秸秆进行预处理然后通过高压均质机将玉米秸秆纤维化处理获取玉米秸秆纤维。BANVILLE 等^[23]适用原位酶对纤维素纤维进行酶解, 研究证明原位酶的加入可显著提高纤维产品质量指数。BAJPAI 等^[24]通过研究证明使用真菌和酶对秸秆进行预处理, 可以减少打浆时间与能量消耗, 改善纸

收稿日期: 2024-07-22 修订日期: 2024-11-05

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(31701311); 黑龙江省自然科学基金联合引导项目(LH2021C030)

作者简介: 李龙海, 博士, 副教授, 研究方向为生物质机械。

Email: lilonghai@neau.edu.cn

*通信作者: 陈海涛, 教授, 博士生导师, 研究方向为生物质材料技术装备和旱作农业装备技术。Email: htchen@neau.edu.cn

浆质量^[25]。ROL 等^[26]通过对酶促水解的研究证明在机械处理前对秸秆进行预处理对纤维素纳米纤维产品的性能和能量消耗具有积极作用。综上所述,生物处理对秸秆纤维的加工质量具有显著影响。

本研究是以水稻秸秆为原料,采用生物预处理与膨化爆破技术结合的方法,提出一种绿色的秸秆纤维制取方法,提高秸秆纤维原料加工质量,改善秸秆纤维地膜的力学性能。首先向水稻秸秆中添加生物菌剂与清水,放入发酵箱进行密封发酵固定天数,取出浸泡至饱和含水率后,通过秸秆纤维制取机的挤压、剪切、揉搓和膨化,获取纤维地膜原料,并通过湿法成膜工艺制得秸秆纤维地膜。通过正交旋转中心组合试验,获取该项工艺参数优化组合,为实现清洁环保的秸秆纤维基可降解地膜的制作提供依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料与设备

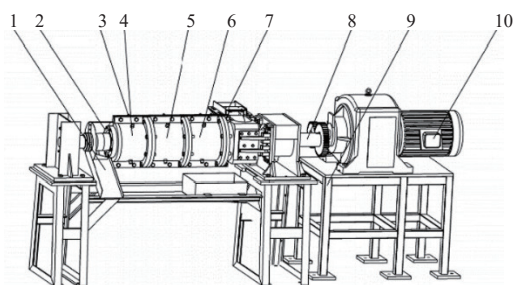
试验材料:水稻秸秆为 2023 年收获的绥梗 18 水稻秸秆(纤维素质量分数约 50.2%、木质素约 14.6%、半纤维素约 27.5%),初始含水率约为 17%,平均长度 100 cm,复合生物酶菌液由东北农业大学生命科学院自制,主要成分由菌粉(孢霉菌株发酵酶、霉菌株发酵酶、EM 复合菌)、发酵液(浓度为 10%~20% 的红糖水发酵液)组成,将菌粉与发酵液按照质量比 1:1 的比例均匀混合后得到复合生物酶菌液,制作完成后密封备用。

试验设备:D200 型秸秆纤维制取机(东北农业大学旱作主要作物机械化材料化技术装备学科团队自制,如图 1 所示);ZT4-00 瓦利打浆机(中通试验设备有限公司);ATV312HU75N4 型变频器(施耐德电气有限公司,变频范围 0~50 Hz);ZJG-100 型肖伯氏打浆度测试仪(精度 1°SR,长春月明试验装置有限公司);ZCX-A 型纸页成型器(长春市月明小型试验机有限责任公司);ZL-3 006 摆锤式纸张抗张力测量仪器(济南瑞德克仪器有限公司);DCP-DGG-9070AD 型电热恒温鼓风干燥箱(上海森信实验仪器有限公司);JA5003N 电子天平(精度 0.001 g,上海菁海仪器有限公司);秸秆揉切机(哈尔滨龙牧机械有限公司);FQA 纤维质量分析仪(加拿大 OPTEST 公司);

1.2 秸秆纤维原料加工工艺

D200 型秸秆纤维制取机是以单螺杆主轴为主体,由电机带动旋转。常温水浸泡至饱和含水率的秸秆原料经强制喂入装置进入主机后,在主轴螺旋传动的作用下,沿主轴前进方向输送。于喂入段、挤压段形成速度层流场,秸秆物料与螺杆不断摩擦,使得机器内部温度开始上升,秸秆在这两段不断压缩、剪切、揉搓后呈粗纤维状,完成原料的初加工。秸秆物料进入爆破段后,秸秆纤维进一步的剪切、揉搓,机器腔体压力与温度不断升高,形成高温高压的温-压耦合场内,使物料在机器内部达到一定压缩比。秸秆粗纤维经模头排出机体后,高压蒸汽骤然减压,形成膨化爆破现象,从而使得内部管束

状结构发生急剧膨胀,产生膨化爆破效果,将植物纤维胀裂为细小纤维态,从而获得帚化度较高、分支细小的纤维浆料原料。



1. 出口口 2. 自制可变间隙模头 3. 冷却系统 4. 爆破段 5. 挤压段 6. 喂入段 7. 强制喂入装置 8. 主轴 9. 机架 10. 主电机
1. Discharge port; 2. self-made variable clearance mould head; 3. Cooling system; 4. Blasting section; 5. Extrusion section; 6. Feeding section; 7. Force-feeding device; 8. Spindle; 9. Frame; 10. Main motor

图 1 D200 型秸秆纤维制取机结构简图

Fig.1 Sketch of the structure of the D200 straw fiber making machine

1.3 试验设计与方法

1.3.1 试验因素与范围选取

1) 试验因素,预处理天数:生物预处理可有效对秸秆进行发酵解聚,调节秸秆化学组分,改变秸秆力学性能,这有利于秸秆的加工处理与纤维质量的提高,但过长的预处理时间会造成秸秆过度解聚,导致纤维力学性能过差,进而影响秸秆纤维质量^[27]。因此应当在合理的预处理时间范围内进行取值。为获取生物预处理时间范围,以生物预处理时间为试验因素,秸秆利用率、拉伸性能为评价指标,建立单因素试验(图 2)。

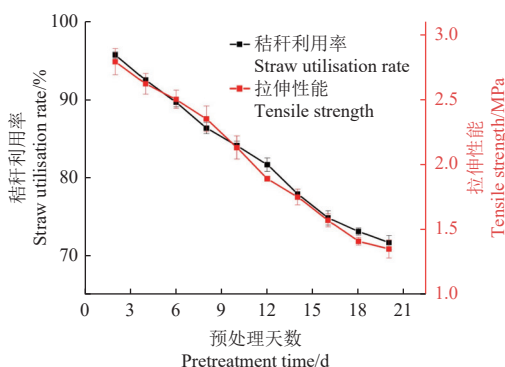


图 2 试验因素范围选取试验结果

Fig.2 Experimental factor range selection experimental results

秸秆利用率随预处理时间增加呈下降趋势,当预处理时间超过 12 d 时秸秆利用率下降速率加快,原料损失率增加,拉伸性能随预处理时间增加呈下降趋势,预处理时间为 6 d 时下降趋势加快,12 d 时下降趋势开始变缓。其原因为菌剂利用秸秆底物提供的营养物质进行大量繁殖并分泌纤维素酶,激发了微生物活性,破坏了秸秆致密的表面结构,使得其力学性能下降,当预处理天数超过 6 d 时,秸秆利用率和拉伸性能下降趋势加快,其原因主要为此时菌剂经前期的大量繁殖,到达菌剂数量与活性的峰值,造成了拉伸性能下降趋势加快,后期

由于秸秆底物提供营养物质不足, 影响菌剂活性, 造成拉伸性能下降趋势变缓。考虑秸秆力学性能影响, 尽量减少原料损失和加工经济性影响, 选取预处理天数范围为 0~12 d。

主轴转速, 主轴转速直接影响着秸秆纤维的输送效率和加工质量, 主轴转速的提升可有效增加秸秆剪切速率, 提高秸秆纤维牵引速度^[28], 同时随着秸秆转速的增加提高了秸秆摩擦热能, 加速秸秆纤维内部水分汽化, 增大腔体压力, 故选择主轴转速作为试验因素, 根据团队前期研究, 确定主轴转速范围为 80~120 r/min。

模头间隙, 根据团队前期研究^[23-24], 较小的模头间隙可有效对秸秆纤维形成阻滞效果, 增加出口处秸秆纤维剪切速率, 产生良好的膨化爆破效果, 但较小的模头间隙降低了秸秆纤维制取效率, 当模头间隙较大时, 虽提高纤维生产效率, 但降低了秸秆纤维剪切速率, 导致膨化爆破效果不佳, 影响纤维质量, 因此选择模头间隙作为试验因素。根据团队前期研究确定模头间隙范围为 2~6 mm。

2) 评价指标

抗张指数, 因地膜材料强度需满足机械移栽作业要求, 选择抗张指数作为评价指标。

打浆时间, 打浆时间对制作地膜的能量消耗与制作效率具有直接关系, 打浆时间的减少有利于降低能耗、提升效率, 选择打浆时间为评价指标纤维长宽比, 纤维长宽比直接影响地膜力学性能, 较大的纤维长宽比有助于增强纤维间的搭建效果, 选择纤维长宽比作为评价指标。

1.3.2 试验设计

本试验以提高秸秆纤维地膜力学性能, 降低打浆时间为目的, 为探究该工艺优化参数组合, 选取预处理天数、主轴转速、模头间隙为试验因素, 以抗张指数、打浆时间、纤维长宽比为性能指标, 采用三因素五水平二次回归正交旋转中心组合优化试验方法, 因素水平编码表如表 1 所示, 利用 Design-Expert 软件 (V 8.0.6.1) 探寻工艺参数优化组合。

1.3.3 秸秆预处理方法

将收获后的水稻秸秆去除所携带的泥土、沙砾等杂质, 经秸秆揉切机处理成 10~15 cm 的小段备用, 向揉切过后的秸秆中加入清水使秸秆质量含水率达 50%~55%, 同时加入复合生物酶菌液, 施加过程中不断翻动秸秆以保证秸秆与菌液充分混合, 施加比例为基于秸秆干重的 0.5%。处理完成后的秸秆放入发酵箱分别进行 0、3、6、9、12 d 的常温发酵, 基于团队前期研究, 将发酵完成后的秸秆浸没于清水中, 浸泡 10 h 至秸秆达饱和含水率, 将饱和含水率的秸秆喂入 D200 型秸秆纤维制取机, 参照因素水平编码表, 分别调整主轴转速、模头间隙至相应水平, 进行秸秆纤维的加工。

1.3.4 试验指标测试方法

抗张指数测定方法: 根据国家标准 GB/T12914-2008

《纸和纸板抗张指数的测定》, 对秸秆纤维地膜进行抗张指数测定^[29], 抗张指数计算式如下所示:

$$Y = \frac{F'}{L_w g} \times 10^3 \quad (1)$$

式中 Y 为抗张指数, N·m/g; F' 为平均抗张力, N; L_w 为试样宽度, mm; g 为试样定量, g/m²。

表 1 因素水平编码表
Table 1 Factors and levels code

水平 Levels	试验因素 Factors		
	预处理天数 Pretreatment time x_1/d	主轴转速 Spindle speed $x_2/(r \cdot min^{-1})$	模头间隙 Clearance of mould head x_3/mm
-1.682	0	80	2
-1	3	90	3
0	6	100	4
+1	9	110	5
+1.682	12	120	6

打浆时间测定方法: 测试参考文献^[30]所述方法, 对打浆时间进行测定, 并记录相应数值。

纤维长宽比测定方法: 根据国家标准《纸浆纤维长度的测定-图像分析法: GB/T 28218-2011》^[31], 对纤维长宽比进行测量。

1.4 秸秆纤维基地膜制备

将制取完成后的水稻秸秆纤维自然风干后备用, 取风干后的秸秆纤维加入清水浸泡处理, 参照实验室瓦利打浆法^[32]打浆, 再按照肖伯特-瑞格勒法^[33]测量打浆度, 打浆至叩解度达 50±3°SR, 实验室地膜制备参照《纸浆物理试验用实验室纸页的制备常规纸页成型器法: GB/T24324-2009》^[34], 按照定量 75 g/m² 进行抄片、压片、烘干操作, 完成秸秆纤维地膜制作。

2 试验结果与分析

2.1 试验结果

工艺参数优化试验结果如表 2 所示。

2.2 回归模型与方差分析

抗张指数、打浆时间、纤维长宽比的方差分析结果如表 2 所示, 在置信度 $\alpha=0.05$ 条件下, 对表 2 中试验数据进行回归分析, 分别建立抗张指数、打浆时间、纤维长宽比回归方程, 分析试验因素对抗张指数、打浆时间、纤维长宽比的影响情况。对方差分析结果进行 F 检验 (表 3), 剔除不显著交互项 ($P>0.05$), 各目标函数回归模型如式 (1)~(3) 所示

$$y_1 = 7.84 - 0.15X_1 + 0.80X_2 + 0.063X_3 + 0.38X_1X_2 - 0.098X_1X_3 - 0.27X_2X_3 - 0.72X_1^2 + 0.11X_2^2 - 0.20X_3^2 \quad (2)$$

$$y_2 = 90.91 - 6.49X_1 - 1.64X_2 + 0.96X_3 + 1.00X_1X_2 - 0.75X_1X_3 + 2.25X_2X_3 - 0.68X_1^2 - 0.68X_2^2 + 1.80X_3^2 \quad (3)$$

$$y_3 = 9.77 - 0.19X_1 + 0.32X_2 - 0.030X_3 + 0.24X_1X_2 - 0.049X_1X_3 + 0.29X_2^2 - 0.067X_2^2 - 0.22X_3^2 \quad (4)$$

对式 (2)~(4) 的回归模型进行方差分析, 由表 4

可知, 每个指标回归项 P 值 <0.05 , 说明回归方程显著; 失拟项不显著 P 值 >0.05 , 说明模型拟合效果较好。通过回归模型方差分析表探究各因素对性能指标的贡献率对比 F 值得出各参量对抗张指数的影响顺序依次为: 主轴转

速、预处理天数、模头间隙, 各参量对打浆时间的影响顺序依次为: 预处理天数、主轴转速、模头间隙。各参量对纤维长宽比的影响顺序为: 主轴转速、预处理天数、模头间隙。

表 2 中心组合试验结果
Table 2 Results of central composite experiment

序号 No.	处理时间 Pretreatment time X_1	主轴转速 Spindle speed X_2	模头间隙 Clearance of mould head X_3	抗张指数 Tensile index $y_1/(\text{Nm}\cdot\text{g}^{-1})$	打浆时间 Pulping time y_2/min	纤维长宽比 Fiber aspect ratio y_3
1	-1	-1	-1	6.35	100	9.88
2	+1	-1	-1	5.49	88	9.14
3	-1	+1	-1	7.62	91	10.05
4	+1	+1	-1	8.45	81	10.17
5	-1	-1	+1	7.12	100	9.89
6	+1	-1	+1	6.05	83	8.87
7	-1	+1	+1	7.5	98	10.08
8	+1	+1	+1	7.76	87	10.09
9	-1.682	0	0	6.15	101	10.88
10	+1.682	0	0	5.46	78	10.27
11	0	-1.682	0	6.78	92	9.05
12	0	+1.682	0	9.52	87	10.1
13	0	0	-1.682	7.16	95	9.18
14	0	0	+1.682	7.36	98	9.12
15	0	0	0	7.85	90	9.76
16	0	0	0	7.89	91	9.77
17	0	0	0	7.81	91	9.78
18	0	0	0	7.81	90	9.88
19	0	0	0	7.82	91	9.75
20	0	0	0	7.86	92	9.74
21	0	0	0	7.65	90	9.72
22	0	0	0	7.96	91	9.79
23	0	0	0	7.95	92	9.71

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

变异来源 Source of variation	项目 Item	平方和 Sum of squares	自由度 DF	均方 Mean square	F 值 F value	P 值 P value
抗张指数 Tensile index	模型	19.90	9	2.21	$F_2=239.23$	$<0.000\ 1$
	剩余	0.12	13	9.243×10^{-3}		
	失拟	0.053	5	0.011	$F_1=1.24$	0.372 7
	误差	0.068	8	8.453×10^{-3}		
	总和	20.02	22			
打浆时间 Pulping time	模型	744.47	9	82.72	$F_2=99.22$	$<0.000\ 1$
	剩余	10.84	13	0.83		
	失拟	5.95	5	1.19	$F_1=1.95$	0.191 8
	误差	4.89	8	0.61		
	总和	755.30	22			
纤维长宽比 Aspect ratio of fiber	模型	4.54	9	0.61	$F_2=239.07$	$<0.000\ 1$
	剩余	0.027	13			
	失拟	7.448×10^{-3}	5	0.50	$F_1=0.60$	0.705 3
	误差	0.020	8	2.111×10^{-3}		
	总和	4.57	22	1.490×10^{-3}		

表 4 验证试验结果
Table 4 Validation test results

项目 Project	抗张指数 Tensile index/ $(\text{Nm}\cdot\text{g}^{-1})$	打浆时间 Pulping time/ min	纤维长宽比 fiber aspect ratio
试验值 Experimental values	9.65	83	11.07
	9.57	81	10.97
	9.40	86	10.69
	9.63	75	10.87
	9.58	82	11.23
平均值 Average values	9.57	81.4	10.97
优化值 Optimization value	9.41	78	10.61
相对误差率 Relative error rate/%	1.7	4.36	3.39

2.3 各因素对评价指标影响规律

2.3.1 交互作用对抗张指数的影响

当模头间隙为 4 mm 时, 主轴转速和预处理时间对抗张指数影响如图 3a 所示, 抗张指数随主轴转速增大而增大, 随预处理时间增加先增大后减小。当预处理时间处于 0 水平时, 抗张指数随主轴转速增大而增大, 当主轴转速为 80 r/min 时, 此时抗张指数最小为 6.78Nm /g, 随着主轴转速上升至 120 r/min, 此时抗张指数达到最大值为 9.52 Nm /g。这是因为主轴转速增加了秸秆纤维的牵引速度, 使得高含水率的秸秆在喂入段、挤压段散失水分减少, 同时主轴转速的增加, 提高了单位时间内秸秆剪切速率, 产生了更多的摩擦热能, 使得秸秆中固存的水分在爆破段提供了更多的蒸汽, 从而提高腔内压力^[35], 经膨化爆破后提高了秸秆纤维分支帚化程度, 进而改善纤维的搭建效果, 使得抗张指数上升。抗张指数随预处理天数的增加呈先上升后下降趋势, 当主轴转速处于 0 水平时, 抗张指数在预处理时间为 0~6 d 时呈上升趋势, 在 6~12 d 时呈下降趋势, 预处理时间为 0 d 时, 抗张指数为 6.15 Nm /g, 当预处理时间增加至 6 d 时, 此时抗张指数上升至最大值 7.96 Nm /g, 随着预处理时间的继续延长到 12 d 时, 此时抗张指数达到最小值 5.46 Nm /g。这是由于生物酶利用秸秆提供的营养物质产生了纤维素酶, 破坏了秸秆蜡质层等组织^[21], 降低了秸秆力学性能, 使秸秆更易于剪切、撕裂和膨化爆破, 提高了秸秆纤维化程度, 但随着预处理时间的延长, 纤维素酶过度降解了秸秆纤维, 使得纤维力学性能严重下降, 因此抗张指数随预处理时间增加呈先上升后下降趋势。

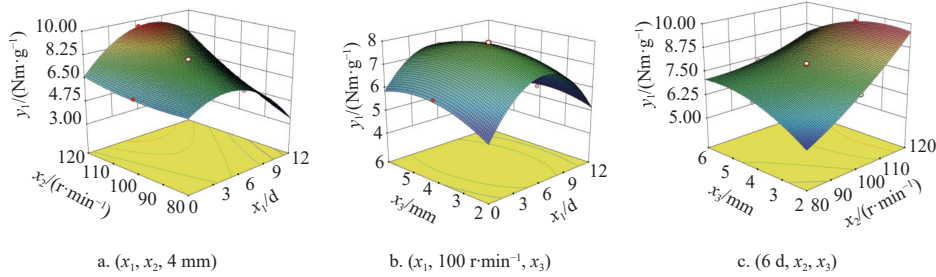


图 3 各因素对抗张指数的影响

Fig.3 Effect of factors on tensile index

当主轴转速为 100 r/min 时, 预处理天数和模头间隙对抗张指数影响如图 3b 所示, 抗张指数随预处理天数的增加呈先上升后下降趋势, 随模头间隙增大变化趋势并不显著, 整体呈先上升后下降趋势, 当预处理天数处于 0 水平时, 最小值出现在模头间隙为 2 mm, 此时抗张指数为 7.16 Nm/g, 最大值出现在模头间隙为 4 mm 时, 抗张指数为 7.96 Nm/g, 随着模头间隙的继续增大至 6 mm 时, 抗张指数下降至 7.36 Nm/g。这是由于预处理天数对抗张指数的影响程度远大于模头间隙对抗张指数影响程度, 使得抗张指数随模头间隙的增大, 变化趋势不显著。

当预处理天数为 6 d 时, 主轴转速和模头间隙对抗张指数的影响如图 3c 所示, 抗张指数随主轴转速的增大而增大, 当模头间隙处于高水平时, 抗张指数随主轴转速的增大上升趋势并不显著, 而当模头间隙减小至低水平时上升趋势开始显著, 这是由于随着模头间隙的减小, 增大了机器腔内工作压力, 使膨化爆破效果更佳显著, 提高了纤维分支带化程度^[28], 使抗张指数上升趋势更加明显。当主轴转速处于低水平时, 抗张指数随模头间隙的增大而增大, 而当主轴转速处于高水平时, 抗张指数随模头间隙的增大而减小。这是由于主轴转速较低时, 秸秆纤维牵引速度较慢, 模头间隙水平较低, 导致高含水率的秸秆在喂入、挤压段散失了过多的水分, 过少的水分导致转化蒸汽不足, 影响秸秆纤维膨化爆破效果。而模头间隙水平较高时, 提供了更大的工作间隙, 使得秸秆散失水分减少, 在爆破段更多的水分转换成蒸汽, 改善了纤维膨化爆破效果, 故在低水平的主轴转速时, 抗张指数随模头间隙的增大而增大。随着主轴转速的升高, 秸秆纤维牵引速度的加快, 秸秆更多的水分携带至爆破段以提供更多的水蒸气提高腔内压力, 此时较小的模头

间隙有助于提高腔内压力^[36], 使得水蒸气产生更好的膨化爆破效果, 导致了抗张指数随模头间隙增大而减小。

2.3.2 交互作用对打浆时间的影响

当模头间隙为 4 mm 时, 预处理时间与主轴转速对打浆时间的影响如图 4a 所示, 打浆时间随预处理时间的增加而减小, 随主轴转速增加而减小。当主轴转速处于 0 水平时, 打浆时间随预处理天数增加而降低, 当预处理时间为 0 d 时, 打浆时间最长为 101 min, 随着预处理时间延长至 12 d 时, 打浆时间下降至 78 min。这是由于菌剂所分泌的纤维素酶对秸秆的解聚, 破坏了秸秆表面结构增加了秸秆纤维的吸水性与膨胀性^[21], 同时生物预处理使得秸秆纤维力学性能持续降低, 秸秆更加的松散柔软, 导致在打浆过程中纤维更易被切断, 从而缩短打浆时间^[37]。打浆时间随主轴转速的增大而减小, 打浆时间随主轴转速的增加呈下降趋势, 当预处理时间为 0 水平时, 打浆时间随主轴转速增加而降低, 最大值出现在主轴转速为 80 r/min 时, 打浆时间为 92 min, 随着主轴转速增加至 120 r/min 时, 此时打浆时间最短为 87 min。这是由于主轴转速的增加, 加快了秸秆剪切速率升高腔内压力, 有助于提高秸秆结构降解程度^[38], 同时主轴转速的增加提高腔内压力有利于改善秸秆纤维化程度, 增加细小纤维比例, 减少了打浆时间。当预处理天数增加至高水平时, 打浆时间随主轴转速增加变化并不显著, 这可能是由于过长的预处理时间, 使得秸秆纤维力学性能严重下降, 秸秆易被剪切、揉搓成纤维, 所以低水平的主轴转速已经满足了秸秆纤维化的需求, 随着主轴转速的提高, 秸秆纤维化程度变化并不显著, 造成了打浆时间随主轴转速的增加并不显著的结果。

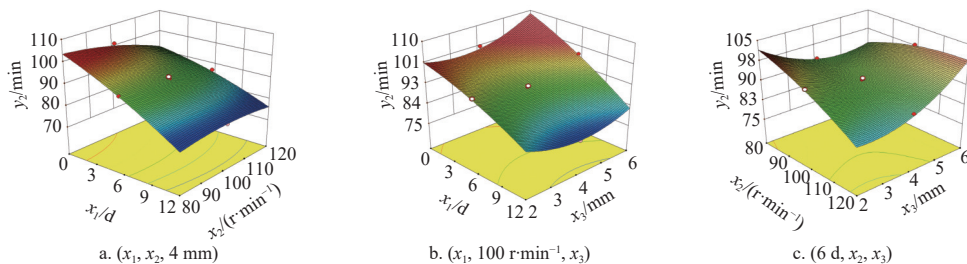


图 4 各因素对打浆时间的影响

Fig.4 Effect of factors on beating time

当主轴转速为 100 r/min 时, 预处理天数和模头间隙对打浆时间的影响如图 4b 所示, 打浆时间随预处理时间

的增加而下降, 随模头间隙的增加呈先下降后上升趋势, 当预处理时间为 0 水平时, 打浆时间随模头间隙增大先

下降后上升,当模头间隙为 2 mm 时,打浆时间为 95 min,随着模头间隙增大至 4 mm 时,打浆时间最短为 90 min,当模头间隙上升至 6 mm 时,打浆时间达到最大值为 98 min。预处理时间为高水平时,打浆时间随模头间隙增加变化趋势并不显著,这可能是由于预处理时间的增加,使得松散柔软纤维在打浆时更易切断,此时模头间隙对打浆的影响程度远小于预处理时间对打浆时间影响程度,造成了变化趋势的不显著。

当预处理时间为 6 d 时,主轴转速和模头间隙对打浆时间影响如图 4c 所示,模头间隙处于低水平时,打浆时间随主轴转速增大而减小,随着模头间隙上升至高水平时,打浆时间随主轴转速的增大而增大。这是因为模头间隙较小时,主轴转速的增大提供了更多摩擦热能,同时使得秸秆保留了更多的水分至爆破段,在爆破段产生了更大的工作压力,较高的含水率和较大的压力有利于增加秸秆结构降解程度^[38],改善秸秆纤维膨化爆破效果,提升细小纤维的比例,造成打浆时间的下降。而随着模头间隙的增大,机器工作间隙增大,而较大的模头间隙使得爆破段粗纤维无法在模头处堆积,此时的纤维更多的从模头处挤出,粗纤维占比升高,导致了打浆时间的延长。

当主轴转速处于低水平时,打浆时间随模头间隙升高而降低,而随着主轴转速增加至高水平时,打浆时间随模头间隙的升高而升高。这可能是由于主轴转速处于低水平时,较小的模头间隙使得秸秆在喂入段、挤压段散失过多水分,使得在爆破段将无法提供充足水分转换成蒸汽,导致膨化爆破效果变差,造成了细小纤维占比减少,延长了打浆时间。当主轴转速处于高水平时,虽保留了秸秆中更多的水分,但由于较大的模头间隙使得粗纤维直接从模口处挤出,导致秸秆纤维无法在模口处堆积进行进一步剪切^[29],粗纤维占比提高延长了打浆时间。

2.3.3 交互作用对纤维长宽比的影响

当模头间隙为 4 mm 时,主轴转速和预处理时间对纤维长宽比影响如图 5a 所示,当预处理时间处于低水平时,主轴转速对纤维长宽比影响并不明显,而当预处理天数处于高水平时,纤维长宽比与主轴转速呈正相关,即随主轴转速的上升而上升。当预处理时间处于 0 水平时,纤维长宽比最小值出现在主轴转速为 80 r/min 时,纤维长宽比为 9.05,随主轴转速增加至 120 r/min 时,纤维长宽比达到最大为 10.1。主轴转速为低水平时,纤维长宽比与预处理时间呈负相关,即随预处理时间增加而下降,当主轴转速提高至高水平时,纤维长宽比随预处理时间增加呈现下降后上升趋势,其中主轴转速对纤维长宽比影响较预处理时间对纤维长宽比影响显著。当主轴转速处于 0 水平时,纤维长宽比随预处理时间增加呈先下降后上升趋势,当预处理为 0 d 时,此时纤维长宽比最大为 10.88,当预处理时间增加至 6 d 时,纤维长宽比达到最小值为 9.71,预处理时间为 12 d 时,纤维长宽比上升至 10.27。

当主轴转速为 100 r/min 时,模头间隙和预处理时间对纤维长宽比影响如图 5b 所示,纤维长宽比随模头间隙的上升呈先上升后下降趋势。而纤维长宽比随预处理时

间的上升呈先下降后上升趋势,其中预处理时间对纤维长宽比的影响较模头间隙对纤维长宽比的影响显著。

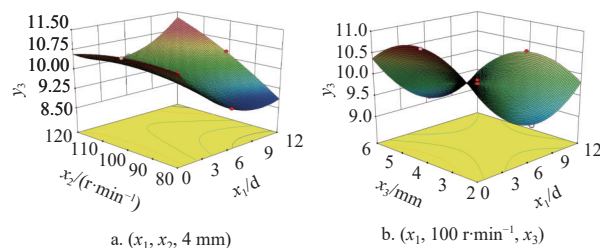


图 5 各因素对纤维长宽比的影响
Fig.5 Effect of factors on fiber aspect ratio

2.4 优化分析

为保证秸秆纤维地膜具有良好的力学性能以满足田间机械化作业要求,以提高秸秆纤维原料加工质量改善秸秆纤维地膜力学性能为目的,以高抗张指数、低打浆时间、高纤维长宽比为优化指标,对预处理天数、主轴转速、模头间隙进行优化,得到优化参数组合,建立秸秆纤维地膜优化模型式(5),对参数进行优化求解。

$$\begin{cases} \max y_1(X_1, X_2, X_3) \\ \min y_2(X_1, X_2, X_3) \\ \max y_3(X_1, X_2, X_3) \\ X_1 \in [-1.682, 1.682] \\ X_2 \in [-1.682, 1.682] \\ X_3 \in [-1.682, 1.682] \end{cases} \quad (5)$$

对参数进行参数优化求解,预处理天数为 10.03 d,主轴转速为 120 r/min,模头间隙为 3.07 mm,在此条件下,抗张指数为 9.41 N m/g,打浆时间为 78 min,纤维长宽比为 10.61。

2.5 验证试验

为验证优化试验结果准确性,结合机器实际工作条件考虑,对优化参数进行调整,选取预处理天数为 10 d、主轴转速为 120 r/min、模头间隙为 3 mm 为优化参数,分别测定各项评价指标,取 5 次平行验证,抗张指数为 9.57 N m/g、打浆时间为 81.4 min,纤维长宽比为 10.97,相对误差率不超过 5%,表明参数优化结果可靠。

3 结 论

1) 各参量对抗张指数影响顺序依次为:主轴转速、预处理天数、模头间隙;各参量对打浆时间的影响顺序依次为:预处理天数、主轴转速、模头间隙;各参量对纤维长宽比的影响顺序依次为主轴转速、预处理天数、模头间隙。

2) 工艺参数优化组合为预处理天数 10 d、主轴转速 120 r/min、模头间隙 3 mm,水稻秸秆纤维基地膜抗张指数为 9.57 N m/g、打浆时间为 81.4 min,纤维长宽比为 10.97,与预测模型相比,相对误差不超过 5%,研究结果为水稻秸秆纤维清洁制取工艺提供参考依据。

3) 本研究提供了一种生物预处理协同膨化爆破制备秸秆纤维原料的方法并提供该方法的工艺参数优化组合,该方法有效改善了地膜力学性能、降低了打浆时间,为

秸秆资源高值化利用提供支持。

4 展 望

该方法从小规模试验研究到大规模工业化应用, 仍存在问题亟待解决, 如: 秸秆发酵效果受季节性温差影响较大的问题; 在大批量秸秆发酵时, 菌剂布施不均影响秸秆发酵均匀性的问题。针对这些问题, 建议可利用具有施菌、监测、搅拌功能的自动化工业设备, 替代人工进行大规模秸秆菌剂布施、搅拌作业, 解决菌剂布施不均匀导致秸秆发酵不均的问题。搅拌完成后采用堆肥方式进行大规模秸秆发酵, 并安装温度传感器实时监测发酵温度, 利用发酵产生的热量调节发酵温度, 解决季节性温差导致秸秆发酵效果差异问题。这些措施有望推动该方法在工业化应用中的进一步完善与优化, 同时也为实现更高效、可持续的秸秆纤维制取技术提供强有力的技术支撑, 加速该技术的应用推广, 从而推动农作物秸秆的资源化利用与环境保护事业发展。

【参 考 文 献】

- [1] 明向兰, 陈海涛, 魏志鹏. 低定量环保型水稻秸秆纤维地膜制造工艺参数优化[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(19): 259-266.
MING Xianglan, CHEN Haitao, WEI Zhipeng. Optimization of technical parameters for making light-basis-weight and environment-friendly rice straw fiber film[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2019, 35(19): 259-266. (in Chinese with English abstract)
- [2] 陈海涛, 竹筱歆, 刘爽. 水稻秸秆纤维基绿色地膜制造工艺参数优化[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(7): 271-279.
CHEN Haitao, ZHU Xiaoxin, LIU Shuang. Optimization of technical parameters for rice straw fiber-based mulch[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(7): 271-279. (in Chinese with English abstract)
- [3] 胥子航, 王睿, 刘育旺, 等. 地膜和秸秆覆盖提高春玉米产量与氮肥利用效率[J]. *植物营养与肥料学报*, 2023, 29(11): 1991-2003.
XU Zihang, WANG Rui, LIU Yuwang, et al. Plastic film and straw mulching improve yield and nitrogen use efficiency of spring maize[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2023, 29(11): 1991-2003 (in Chinese with English abstract)
- [4] 郎倩, 竹筱歆, 张丽新, 等. 原位聚合法制备可降解纤维基地膜及机理分析[J]. *农业工程报*, 2023, 39(15): 249-258.
LANG Qian, Zhu Xiaoxin, ZHANG Lixin, et al. Fabrication and mechanism analysis of degradable fiber membrane by in situ polymerization[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)* 2023, 39(15): 249-258. (in Chinese with English abstract)
- [5] 杨那, 毛晓涵, 李彦, 等. 农田土壤有机碳及活性碳组分对秸秆和地膜覆盖响应的 Meta 分析[J/OL]. *环境科学*, 1-13 [2024-11-05].
YANG Na, MAO Xiaohan, LI Yan, et al. Meta-analysis of soil organic carbon and its active fractions in response to straw and film mulching [J]. *Environmental Science*, 1-13[2024-11-05]. (in Chinese with English abstract)
- [6] 岳翔, 王金宝, 李虹, 等. 基于绿色农业视角的生物可降解地膜现状研究[J]. *农业科技与信息*, 2023(3): 90-94.
- [7] 严昌荣, 刘恩科, 舒帆, 等. 我国地膜覆盖和残留污染特点与防控技术[J]. *农业资源与环境学报*, 2014, 31(2): 95-102.
YAN Changrong, LIU Enke, SHU Fan, et al. Review of agricultural plastic mulching and its residual pollution and prevention measures in China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*. 2014, 31(2): 95-102(in Chinese with English abstract)
- [8] 魏文义. 同向平行双螺杆挤出机喂料系统的现状与发展[J]. *工程塑料应用*, 2003, 30(2): 53-55.
WEI Wenyi. Situation and development for the feeding system of co-rotating parallel twin-screw extruder[J]. *Engineering Plastics Application*, 2003, 30(2): 53-55. (in Chinese with English abstract)
- [9] 朱锡锋. 2006. 生物质热解原理与技术[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社.
- [10] 陈海涛, 尚会敏, 何昀阳, 等. 小麦秸秆纤维基地膜制造工艺参数优化[J]. *东北农业大学学报*, 2021, 52(1): 71-81, 96. (in Chinese with English abstract)
CHEN Haitao, SHANG Huimin, HE Yunyang, et al. Optimization of process parameters for extrusion explosion wheat straw fiber-based mulch[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2021, 52(1): 71-81,96. (in Chinese with English abstract)
- [11] MI C Q, MCLEAN A G, ARNOLD P. Optimal mechanical design of single span screw feeders [J]. *ResearchGate*, 1991, 3: 227-239.
- [12] HAAKER G, JONGEJAN M, BEKHUIS J. A method to optimize screw feeder geometry for equable draw-down performance[J]. *Powder Handling Process*, 1994, 6: 209-214.
- [13] ROBERTS A. The influence of granular vortex motion on the volumetric performance of enclosed screw conveyors[J]. *Powder Technology*, 1999, 104: 56-67.
- [14] 陈立新, 沈新元. 相转化法的湿法成膜机理[J]. *膜科学与技术*, 1997(3): 2-7, 19.
- [15] WOOLEY R, RUTH M, GLASSNER D, et al. Process design and costing of bioethanol technology: A tool for determining the status and direction of research and development[J]. *Biotechnology Progress*, 1999, 15(5): 794-803.
- [16] 管斌, 孙艳玲, 谢来苏, 等. 生物制浆的技术难度以及木素降解酶的应用前景[J]. *中国造纸学报*, 2002, 16(2): 107-113.
GUAN Bin, SUN Yanling, XIE Laisu, et al. Technical difficulties in biopulping and the prospect of lignin nases applications[J]. *Transactions of China Pulp and Paper*, 2002, 16(2): 107-113. (in Chinese with English abstract)
- [17] 徐海娟, 梁文芷. 白腐菌降解木素酶系及其作用机理[J]. *环境污染治理技术与设备*, 2000, 20(3): 51-54.
XU Haijuan, LIANG Wenzhi. White rot fungus's enzyme system for lignin degradation and their mechanisms[J]. *Techniques and Equipment for Environmental Pollution Control*, 2000, 20(3): 51-54 (in Chinese with English abstract)
- [18] 高扬, 王双飞, 陈嘉翔. 木素的生物降解及酶的作用[J]. *纸和造纸*, 1996(2): 51-52.
- [19] 刘晨娟. 脆性水稻秸秆的生物预处理及发酵[D]. 武汉: 华中农业大学, 2010.
LIU Chenjuan. The Biological Pretreatment of Brittle Rice Straw and Its Fermentation[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [20] 范肖东, 张悦, 吴增游, 等. 微生物预处理秸秆纤维浆结构、形态及成膜性研究[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(15): 69-77.
FAN Xiaodong, ZHANG Yue, WU Zengyou, et al. Straw fiber pretreated by microorganism: pulp structure, fiber-morphology and film-forming properties[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(15): 69-77. (in Chinese with English abstract)
- [21] 张悦. 秸秆纤维基抑草地膜的制备及性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.
Zhang Yue. Study On The Preparation and Properties of Rice Straw Fiber-Based Grass Suppressing Mulch Film[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2019. (In Chinese With English Abstract)
- [22] YANG H, BAI L, DUAN Y, et al. Upcycling corn straw into nanocelluloses via enzyme-assisted homogenization: Application as building blocks for high-performance films[J].

- Journal of Cleaner Production*, 2023, 390: 136215.
- [23] BANVILLE G, GATT E, BELGACEM N, et al. Cellulose fibers deconstruction by twin-screw extrusion with in situ enzymatic hydrolysis via bioextrusion[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 327: 124819.
- [24] BAJPAI P, MISHRA S P, MISHRA O P, et al. Biochemical pulping of bagasse[J]. *Biotechnology progress*, 2004, 20(4): 1270-1272.
- [25] LECOURT M, SIGOILLOT J C, PETIT-CONIL M. Cellulase-assisted refining of chemical pulps: Impact of enzymatic charge and refining intensity on energy consumption and pulp quality[J]. *Process biochemistry*, 2010, 45(8): 1274-1278.
- [26] ROL F, KARAKASHOV B, NECHYPORCHUK O, et al. Pilot-scale twin screw extrusion and chemical pretreatment as an energy-efficient method for the production of nano fibrillated cellulose at high solid content[J]. *ACS Sustainable Chemistry Engineering*, 2017, 5 (8):6524-6531.
- [27] 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: 124688.
- [28] 纸和纸板抗张指数的测定恒速拉伸法: GB/T 12914-2018 [S]北京: 标准出版社, 2018.
- [29] 闵诗尧. D200 型小麦秸秆纤维原料制取机供给与挤出关键技术研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2019.
- MIN Shiyao, Key Technology Research on the Raw Material Supply and Extrusion System of D200 Wheat Straw Fiber Extruder[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2019(in Chinese with English abstract)
- [30] 张颖, 邢振雷, 宗浩, 等. 小麦秸秆纤维地膜原料打浆工艺参数优化[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(11): 248-253.
- ZHANG Ying, XING Zhenlei, ZONG Hao, et al. Optimization of pulping process parameters for preparing wheat straw fiber mulch material[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(11): 248-253. (in Chinese with English abstract)
- [31] 纸浆打浆度的测定 (肖伯尔-瑞格勒法): GB/T 3332-2004 [S]. 北京: 标准出版社
- [32] 纸浆物理试验用实验室纸页的制备快速凯塞法: GB/T 24326-2009, [S]. 北京: 标准出版社
- [33] 纸浆纤维长度的测定图像分析法: GB/T 28218-2011 [S] 北京: 标准出版社.
- [34] 纸浆实验室打浆瓦利 (Valley) 打浆机法: GB/T 24325-2009 [S]. 北京: 标准出版社.
- [35] 刘环宇, 江连洲, 陈海涛, 等. 水稻秸秆纤维制取机工作参数优化与性能试验[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(10): 161-169.
- LIU Huanyu, JIANG Lianzhou, CHEN Haitao, et al. Working parameter optimization and performance test of straw fiber machine[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(10): 161-169. (in Chinese with English abstract)
- [36] 刘环宇. 秸秆纤维原料清洁制取中试平台优化设计及关键技术研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- LIU Huanyu. Research on the Key Technology of Design and Optimization for Straw Fiber Pilot Production Platform[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017. (in Chinese with English abstract)
- [37] LIN X, WU Z, ZHANG C, et al. Enzymatic pulping of lignocellulosic biomass[J]. *Industrial Crops and Products*, 2018, 120: 16-24.
- [38] 冉福, 焦婷, 雷赵民, 等. 不同蒸汽爆破条件对玉米秸秆饲用价值的影响[J]. *草业科学*, 2020, 37(10): 2133-2141.
- RAN Fu, JIAO Ting, LEI Zhaomin, et al. Effect of different steam explosion conditions on the feeding value of corn straw[J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(10): 2133-2141 (in Chinese with English abstract)

Optimization of the parameters for the preparation of straw fiber raw material by biological pretreatment and synergistic expansion blasting

LI Longhai^{1,2}, GAO Chuang¹, FAN Siyuan¹, XU Xinhang¹, JIANG Tao¹,
LIU Shuang^{1,2}, LI Rui^{1,2}, CHEN Haitao^{1,2*}

(1. Department of College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Heilongjiang Province Technology Innovation Center of Mechanization and Materialization of Major Crops Production, Harbin 150030, China)

Abstract: Mulching as a traditional field management technique, boasts the benefits of improving soil ecology and maintaining soil temperature and moisture. The biodegradable plant fiber mulch produced from crop straw boasts abundant raw material sources and has similar temperature and moisture retention effects to plastic mulch, which would have no phenomenon of soil hardening, and compromised crop cultivation and sowing quality. The quality of straw fiber obtained through physical methods cannot meet the demand of mulch film. To improve the mechanical properties of straw fiber mulch film and reduce pulping time, this study introduces a method of preparing straw fiber mulch raw materials through biological pretreatment combined with extrusion-explosion. To explore the optimal combination of process parameters for this technology, three-factor and five-level quadratic orthogonal central composite rotatable design experimental approach was employed, with pretreatment time, spindle speed, and Clearance of mould head selected as the experimental factors, and tensile index, pulping time, and fiber aspect ratio as performance indicators. The results showed that pretreatment time and spindle speed, spindle speed and clearance of mould head had very significant effects on the tensile index ($P < 0.01$). Pretreatment time and clearance of mould head have significant effect on tensile index ($P < 0.05$). Pretreatment time and spindle speed, pretreatment time and clearance of mould head have significant effect on pulping time ($P < 0.05$). Spindle speed and pretreatment time had very significant effect ($P < 0.01$) on pulping time, the spindle speed and clearance of mould head has no significant effect on fiber aspect ratio ($P > 0.05$). Pretreatment time and spindle speed have very significant effect on fiber aspect ratio ($P < 0.01$). Pretreatment time and clearance of mould head have significant effect on fiber aspect ratio ($P < 0.05$). The optimal combination of process parameters was determined to be 10 days of pretreatment, a spindle speed of 120 r/min, and a Clearance of mould head of 3 mm. The resulting fiber mulch exhibited a tensile index of 9.57 N·m/g, a pulping time of 81.4 minutes, and a fiber aspect ratio of 10.97, with a relative error not exceeding 5% compared to the theoretical optimal values. The rice straw fiber-based mulch prepared under these conditions meets the technical requirements for crop cultivation in both irrigated and dry fields. This study provides a basis and technical support for the production of fully biodegradable plant fiber mulch film from rice straw.

Keywords: biological pretreatment; rice straw; fiber mulch; mechanical properties; pulping energy