

灵芝-玉米秸秆的生物纸板制备工艺优化及性能研究

董紫薇¹, 李宇航¹, 李凡宇¹, 王正奇¹, 李玉^{1,2}, 韩雪容^{1,2*}

(1. 吉林农业大学食药用菌教育部工程研究中心, 长春 130118;

2. 吉林农业大学吉林省菌物表型组学重点实验室, 长春 130118)

摘要: 为解决使用化学粘合剂制备的纸板带来的环境污染以及健康损害等问题, 可替代传统纸板的环境友好型生物纸板开发成为研究热点。该研究使用韦伯灵芝/玉米秸秆组合, 通过优化培养时间、果糖添加量及秸秆颗粒度等单因素条件探究其对制备的菌丝体纸板力学、防水和热分解性能的影响, 并通过正交试验明确纸板的最佳培养工艺。试验结果表明, 各因素对纸板的边压强度、弯曲挺度、静曲强度的影响程度由大到小依次为颗粒度, 培养时间, 果糖添加量, 当颗粒度为 0.165~0.250 mm, 培养时间 30 d, 添加质量分数为 5% 的果糖时, 制备的纸板边压强度为 14.36 N/mm、静曲强度为 10.89 MPa、弯曲挺度为 33.09 mN/m, 并且随着颗粒度的减小, 纸板吸水 24 h 的吸水率和厚度膨胀率分别降低到 0.86% 和 0.50%。不同单因素条件制备的菌丝体纸板具有相似的热降解过程, 均在 170 °C 左右开始降解, 在 350 °C 达到最大。该研究为后续菌丝体复合材料的开发和应用提供参考依据。

关键词: 菌丝体; 复合材料; 力学性能; 防水性能; 生物质

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202402086

中图分类号: S216.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-18-0302-09

董紫薇, 李宇航, 李凡宇, 等. 灵芝-玉米秸秆的生物纸板制备工艺优化及性能研究[J]. 农业工程学报, 2024, 40(18): 302-310. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202402086 <http://www.tcsae.org>

DONG Ziwei, LI Yuhang, LI Fanyu, et al. Preparation and performance study of *Ganoderma weberianum*/corn straw mycelium paperboard[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(18): 302-310. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202402086 <http://www.tcsae.org>

0 引言

传统的纸质包装材料主要由草纤维或废纸纤维制成, 如瓦楞纸板、牛皮纸、蜂窝纸板等, 被广泛应用于家用电器、农产品、食品包装等领域^[1-2]。但是纸板包装材料使用的树脂黏合剂, 会释放甲醛, 危害人体健康。同时生产过程中消耗大量的木材, 产生废水废气, 容易造成森林资源的稀缺以及对环境的破坏^[3]。因此, 为解决上述问题, 开发新型可替代传统纸质包装的绿色环保型包装材料具有重要意义。

早在 2007 年, 美国的 EBEN BAYER 和 GAVIN MCINTYRE 提出了菌丝体材料的概念, 并创建了 Ecovative 公司, 对菌丝体材料进行了产业化的制备^[4]。自然界中广泛存在的真菌能利用秸秆、木屑、稻壳等农业废弃物作为基质, 通过形成血管状分枝的三维立体网络结构的菌丝体(黏合剂)将不连续的植物纤维紧密结合在一起形成一种天然的生物复合材料^[5-6]。这种菌丝体复合材料因其对环境友好、绿色可再生而引起研究人员的广泛关注^[7-9]。此外, 该种菌丝体复合材料具有隔热保温、保水性、阻燃性以及良好的隔音性能, 已被应用于包装、服

装、建筑等领域^[10-11]。迄今为止, 研究人员主要利用可以高效降解木质纤维素废物(如锯末和稻草)的白腐真菌如灵芝、平菇等制造出用在包装、建筑等方面的菌丝体复合材料^[10-13]。李红丽等^[14]通过热压制备含有灵芝菌丝的菌丝体复合材料, 不仅内部结合强度达到了刨花板国标, 而且相比于传统人造板甲醛含量更低。平菇菌丝与针叶木浆、纳米纤维素混合制备出的食品包装复合材料的性能可以用于代替传统食品包装纸^[15]。以上均证明了菌丝体复合材料有代替部分传统材料的潜力。另外, 研究发现优化培养时间可以增加平菇菌丝/木屑复合材料的力学性能^[16]。陈晨伟等^[17]在优化制备工艺参数时发现影响菌丝体力学性能的最大因素是基质颗粒度。添加葡萄糖、酵母粉等外源营养物质可以增加菌丝直径, 提高菌丝体材料的强度和回弹性^[18-21]。尽管如此, 真菌和基质组合及培养条件均需要区别对待, 以及生产工艺中的任何参数也需要进一步探究。

由于菌丝体材料在中国仍是一个较新的研究方向, 制备菌丝体生物纸板的菌种、基质以及工艺参数仍处于各种试验组合阶段, 许多研究中往往并不能在稳定菌种和基质的情况下同时兼顾纸板性能。制备菌丝体材料首要解决的就是如何使菌丝与基质结合后生产出的产品达到各种性能指标要求, 用于解决传统板材带来的各种健康问题。

本研究根据前期试验结果选出韦伯灵芝菌种和玉米秸秆基质组合, 在外源营养物质筛选中筛选出果糖作为添

收稿日期: 2024-02-26 修订日期: 2024-05-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No.31971252)

作者简介: 董紫薇, 研究方向为菌丝体复合材料。

Email: 3093715066@qq.com

*通信作者: 韩雪容, 教授, 博士生导师, 研究方向为生物材料。

Email: hanxuerong@jlu.edu.cn

加物, 并通过优化该组合的培养时间、设计果糖添加量以及秸秆颗粒度等单因素培养条件, 探讨对热压成型的菌丝体纸板各种性能的影响, 以期通过正交试验获得其最佳培养工艺。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

韦伯灵芝 3 054, 由吉林农业大学食药菌教育部工程研究中心提供; 玉米秸秆、麦麸、石灰、石膏, 均购于吉林省长春市菌菜基地; 牛皮纸板, 购于昊疆合纸业

有限公司。
麦芽糖酵母葡萄糖培养基 (MYG 液体培养基): 麦芽糖 10 g/L、酵母浸粉 5 g/L、葡萄糖 5 g/L, 加水溶解定容至 1 L, pH 7~8。固体培养基在此基础上添加 1.5 g/L 琼脂。

玉米秸秆固体培养基: 玉米秸秆 80%, 麦麸 18%, 石灰 1%, 石膏 1%, 含水量 60% (以上均为质量分数)。

1.2 主要仪器设备

HS-1 300-U 超净工作台, 苏州安泰空气技术有限公司; GR85DA 高压灭菌锅, 致微 (厦门) 仪器有限公司; GZX-300BS-III 光照培养箱, 上海新苗医疗器械制造有限公司; DHG-9 140 电热鼓风干燥箱, 上海一恒科学仪器有限公司; 4500Y 高速多功能粉碎机, 永康市铂欧五金制品有限公司; 日立 SU8600 扫描电镜, 日立科学仪器 (北京) 有限公司; NLH-600D 热压机, 天津诺雷信达科技有限公司; WDW-5A 万能试验机, 济南文腾试验仪器有限公司; BZL-YH 边压测试机, 红杉仪器科技有限公司; TGA-4 000 热重分析仪, 中科院东北地理所研制; 标准目筛, 九峰筛网厂。

1.3 单因素培养条件下菌丝体纸板的制备

1.3.1 培养时间筛选

将 30 mL 灵芝液体培养基均匀接种于灭菌后的 150 g 玉米秸秆固体培养基中, 用封口膜封口后放置于恒温培养箱中, 设置温度 25 °C, 分别培养 5、10、15、20、25、30 d, 然后放入烘箱中烘干。利用热压机 160 °C、5 MPa 压力, 热压 25 min, 制备菌丝体纸板。每组压制 10 个纸板样品。

1.3.2 秸秆颗粒度筛选

将玉米秸秆进行粉碎分筛处理、分别过孔径大小为 2.000、0.600、0.250、0.165 mm 的筛子, 制备不同玉米秸秆固体培养基 (150 g), 恒温培养 25 °C, 培养 20 d 后制备菌丝体纸板。每组压制 10 个纸板样品, 待用。

1.3.3 果糖添加量筛选

在未分筛的玉米秸秆固体培养基 (150 g) 中分别添加培养基质量分数分别为 1.0%、2.5%、5.0% 的果糖。恒温培养 25 °C, 培养 20 d 后制备菌丝体纸板。每组压制 10 个纸板样品, 待用。

1.4 正交试验

选择培养时间 20、25、30 d, 秸秆颗粒度 0.600~2.000、0.250~0.600、0.165~0.250 mm, 果糖添加质量

分数分别为 1.0%、2.5%、5.0%。建立 $L_9(3^4)$ 正交试验, 以边压强度、弯曲挺度、静曲强度为评价指标, 确定最佳工艺, 每个处理重复 6 次, 待用。

1.5 菌丝体纸板的性能测试

1.5.1 边压强度测试

根据国家标准 GB/T 6546-1998 《瓦楞纸板边压强度测定》, 利用 BZL-YH 纸板边压测试机测定菌丝基纸板与牛皮纸板的边压强度。试验压板以 12.5 mm/min 的速度匀速移动, 当压力值第 1 次达到最高时或变形曲线稳定时的数值即为边压力。每组菌丝体纸板测试 3 次力值。

1.5.2 静曲强度和弯曲挺度测试

参照国家标准 GB/T 23144-2008 《纸和纸板静态弯曲挺度的测定通用原理》, 利用 WDW-5A 万能试验机对菌丝体纸板与牛皮纸板进行静曲强度和弯曲挺度测试。试验压板以 10 mm/min 的速度匀速施加压力。每组菌丝体纸板测试 3 次力。

1.5.3 吸水率测试

将不同培养时间、不同秸秆颗粒度、不同果糖添加量制备的菌丝体纸板样品切割成长宽均为 5 cm 的正方形试样, 将试样完全浸泡在水中, 浸泡的过程中每隔 4 h 和 12 h 测试试样质量并记录, 测量时取出试样, 至没有水滴滴下后称量, 每组测试 3 次, 吸水率计算见式 (1)。

$$w = \frac{m_2 - m_1}{m_2} \times 100\% \quad (1)$$

式中 m_1 为浸泡之前试样纸板质量, g; m_2 为浸泡后没有水滴滴下的试样纸板质量, g; w 为吸水率, %。

1.5.4 厚度膨胀率测试

样品处理同 1.5.3, 但测量时取试样对角线的交叉点作为厚度测量处, 每组测试 3 次, 厚度膨胀率计算见式 (2)。

$$T = \frac{t_2 - t_1}{t_1} \times 100\% \quad (2)$$

式中 t_1 为浸泡之前试样纸板厚度, mm; t_2 为浸泡后试样纸板对角线交叉点的厚度, mm; T 为厚度膨胀率, %。

1.6 热重分析

利用 TGA-4 000 热重仪, 对样品进行测试, 每次样品质量为 10~15 mg, 测试温度为 30~600 °C, 升温速度为 10 °C/min, 保护气为高纯氮气, 流量为 50 mL/min, 测试后对数据进行分析。

1.7 数据分析

利用 Excel 2010 软件进行数据统计分析、SPSS 2019 软件进行单因素方差分析、Origin 2022 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 培养时间对热压成型的菌丝体纸板性质的影响

菌丝在制备材料的过程中充当黏合剂的作用, 培养时间的长短影响菌丝生物量, 从而影响材料性能。培养时间过短, 材料不成形; 培养时间过长, 造成底物被过度消耗, 导致材料力学性能下降。因此, 培养时间是影响菌丝体复合材料力学各种性能的重要影响因素之一。本研究讨论不同的培养时间对制备的菌丝体纸板力学性

能、吸水性能以及热性能方面的影响。

2.1.1 培养时间对菌丝体长势的影响

韦伯灵芝 3 054 在玉米秸秆基质中生长 0~30 d 的基质表面菌丝生长形态如图 1 所示。在定殖初期, 菌株适

应新环境, 生长缓慢, 10 d 后菌丝增多, 20 d 时, 菌丝已经完全覆盖基质。25~30 d 时, 菌丝整体朝一个方向生长, 基质中的营养、氧气等被消耗, 以及可能有一些未知的代谢产物, 导致菌丝生长缓慢, 逐步停止。

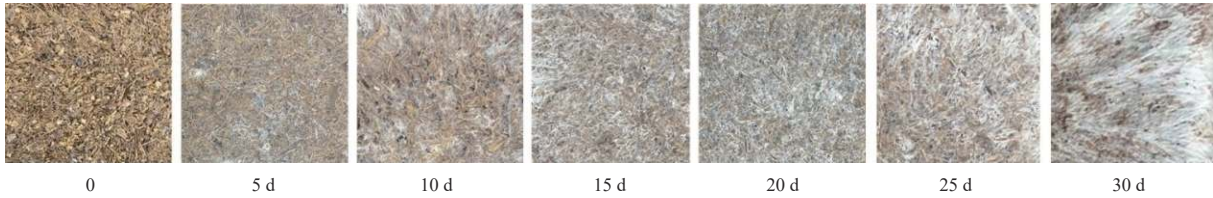


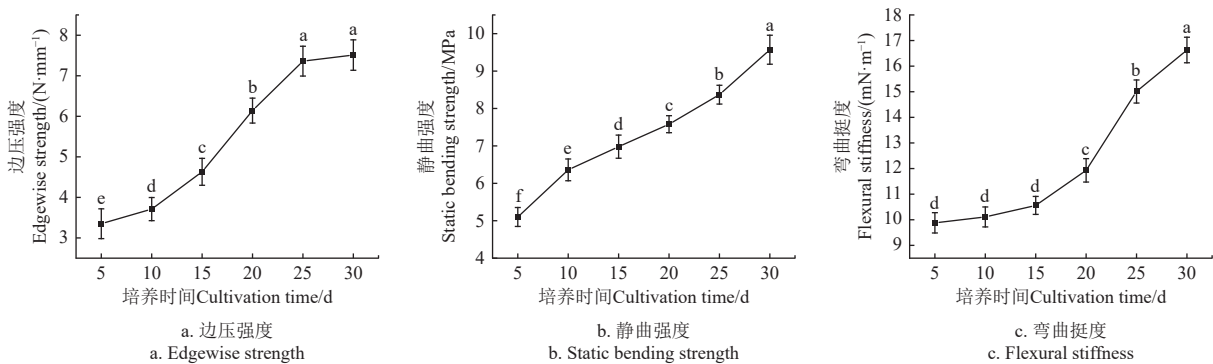
图 1 0~30 d 菌丝在玉米秸秆基质中的生长形态

Fig.1 Growth morphology of mycelium on substrate for 0~30 days

2.1.2 培养时间对菌丝体纸板力学性能的影响

不同培养时间制备的菌丝体纸板边压强度、静曲强度、弯曲挺度结果如图 2 所示。3 种力学性能都随着培养时间的增加而增大。边压强度随着培养时间的增加曲线呈较明显的“S”型(图 2a), 10~15 d 时, 呈明显的直线上升, 25~30 d 时, 增势不明显。静曲强度显著提升 ($P < 0.05$) (图 2b), 从 5~30 d 之间, 一直呈线性增长趋势。弯曲挺度曲线 15 d 时为一个分

界点(图 2c), 5~15 d 时弯曲挺度没有显著提高 ($P > 0.05$), 增长较为平缓, 20~30 d 时, 弯曲挺度显著提高 ($P < 0.05$), 呈急速线性生长。在 30 d 时, 边压强度为 7.51 N/mm, 低于对标的牛皮纸板边压强度 (12.78 N/mm); 静曲强度为 9.57 MPa, 与牛皮纸板静曲强度接近 (10.24 MPa); 弯曲挺度为 16.63 mN/m, 相比于牛皮纸板弯曲挺度 (13.10 mN/m) 提升 21.2%。



注: 不同小写字母表示不同组间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate that the different cultivation time is significant different ($P < 0.05$). The same below.

图 2 不同培养时间菌丝体纸板力学性能

Fig.2 Mechanical properties of mycelium paperboard at different cultivation times

2.1.3 培养时间对菌丝体纸板防水性能的影响

不同培养时间下菌丝体纸板吸水率和厚度膨胀率如表 1 所示。由于防水性能主要测试的是菌丝体完全覆盖基质的条件下, 菌丝作为黏合剂对纸板的保护作用, 所以选取生长了 20 d 之后的菌丝体纸板进行测试。随着菌丝体纸板培养时间的延长, 吸水性和厚度膨胀率大致呈现出逐渐降低的趋势, 纸板的防水性提升。培养时间为 30 d 时, 24 h 后的吸水率和厚度膨胀

率最小, 分别为 1.27% 和 1.68%。菌丝体复合材料内部含有疏松多孔结构, 较易吸水膨胀, 并且菌丝体纸板经过高温热压, 一定程度上使其内部结构更加致密, 吸水性能得到改善。随着培养时间的延长, 菌丝更容易降解基质, 在玉米秸秆基质颗粒之间形成网络, 将玉米秸秆之间较大的空隙分隔成较小的间隙, 减少水分子的浸入, 同时菌丝网络通过毛细作用提升保水性。

表 1 不同培养时间菌丝体纸板吸水率和厚度膨胀率

Table 1 Water absorption and thickness expansion rate of mycelium paperboard at different cultivation times

培养时间 Time/d	吸水率 Water absorption /%				厚度膨胀率 Water thickness expansion /%			
	4 h	8 h	12 h	24 h	4 h	8 h	12 h	24 h
20	2.79±0.51 ^a	3.19±0.33 ^a	3.42±0.64 ^a	3.92±0.45 ^a	1.95±0.31 ^{ab}	2.58±0.43 ^a	2.72±0.34 ^a	2.82±0.21 ^a
25	1.31±0.36 ^b	1.37±0.25 ^b	1.40±0.24 ^b	1.45±0.44 ^b	1.05±0.16 ^c	1.38±0.28 ^{bc}	1.64±0.23 ^b	1.79±0.32 ^b
30	1.06±0.33 ^b	1.14±0.65 ^b	1.20±0.53 ^b	1.27±0.22 ^b	1.10±0.27 ^c	1.23±0.16 ^{bc}	1.32±0.33 ^{bc}	1.68±0.23 ^b

注: 数据为平均值±标准差。下同。

Note: The data were mean±s. The same below.

2.1.4 培养时间对菌丝体纸板热性质的影响

不同培养时间菌丝体纸板热重曲线如图 3 所示。不同菌丝体纸板具有相似的热降解曲线 (thermo gravimetric analysis, TGA), 大致可分为 3 个阶段 (图 3a): 第一阶段是起始温度至 170 °C, 此阶段样品质量损失是所含游离水的蒸发。第二阶段为 170~420 °C。这一阶段质量损失是氨基酸、多糖、几丁质等有机成分的分解。第三阶段为 420 °C 之后, 主要是木质素分解阶段。

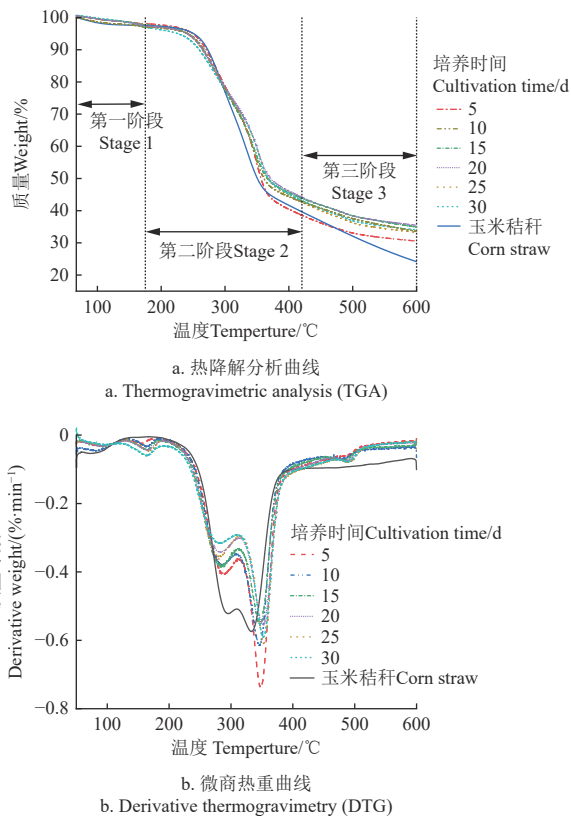


图 3 不同培养时间菌丝体纸板热重分析

Fig.3 Thermogravimetric analysis of mycelium paperboard with different cultivation times

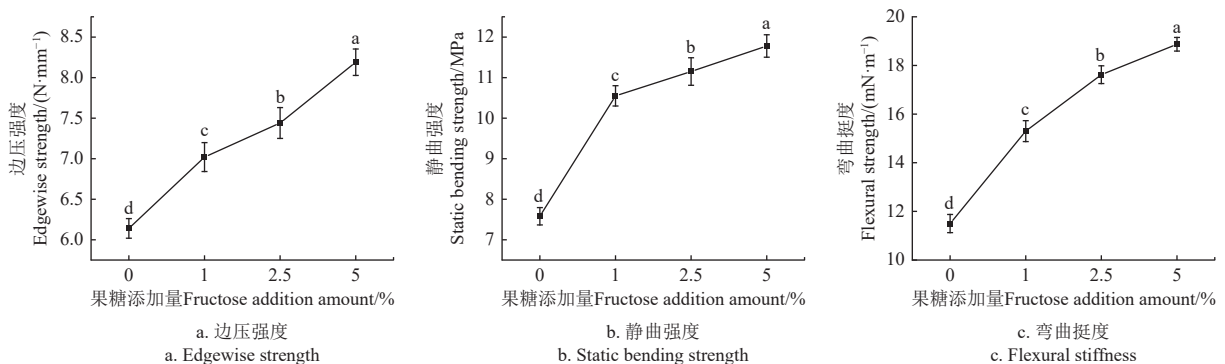


图 4 不同果糖添加量菌丝体纸板力学性能

Fig.4 Mechanical properties of mycelium paperboard with different fructose addition

2.2.2 果糖添加量对菌丝体纸板防水性能的影响

不同果糖添加量的菌丝体纸板吸水率和厚度膨胀率如表 2 所示。随着果糖的添加量增大, 吸水 24 h 后的吸水率和厚度膨胀率总体呈下降趋势, 但吸水率降低幅度偏小, 厚度膨胀率变化较明显。当果糖添加量为 5.0% 时,

微商热重分析曲线 (derivative thermo gravimetry, DTG) (图 3b) 出现 3 个峰, 第 1 个峰对应 170 °C 左右, 主要发生游离水的分解。第 2 个峰对应 280 °C 左右, 主要发生半纤维素的热解聚^[17], 培养 5 d 和 30 d 制备的板材热解速率分别为 -0.405%/min 与 -0.314%/min。第 3 个峰对应 350 °C 左右, 此处对应纤维素的降解。培养 5 d 制备的纸板在 348 °C 时, 热解速率最大为 -0.733%/min, 培养 30 d 制备的纸板在 355 °C 时, 热解速率最大为 -0.586%/min。综上所述, 培养时间的长短对于材料的热稳定性有一定的影响。

2.2 果糖添加量对菌丝体纸板性质的影响

真菌菌丝在生长过程中, 并不能直接利用养分, 而是先分解后利用。如果在菌丝定殖期间加入一些菌丝可以直接利用的养分, 不仅可以帮助菌丝快速定殖, 还可以大大缩短材料制备时间。另外, 国内外相继有研究发现外源营养物的加入对菌丝体复合材料性质方面有影响^[16-18]。本研究前期预试验结果显示, 果糖、葡萄糖以及蔗糖等的添加导致菌种的生物量增长速度增加, 本研究选择果糖作为外源营养物, 讨论果糖的添加量对菌丝体纸板力学性能、防水性能以及热性能方面的影响。

2.2.1 果糖添加量对菌丝体纸板力学性能的影响

不同果糖添加量制备的菌丝体纸板边压强度、静曲强度、弯曲挺度结果如图 4 所示。果糖含量增加, 3 种力学性能均提高。果糖添加质量分数为 5.0% 的菌丝体纸板的边压强度为 8.19 N/mm (图 4a), 不及牛皮纸板边压强度 (12.78 N/mm); 静曲强度为 11.78 MPa (图 4b), 相比于牛皮纸板静曲强度 (10.24 MPa) 提高 15.0%; 弯曲挺度为 18.87 mN/m (图 4c), 相比于牛皮纸板 (13.10 mN/m) 提高 30.5%。添加果糖可以有效提升菌丝体纸板力学性能, 当添加质量分数为 5.0% 的果糖时, 力学性能最好。

24 h 后吸水率为 0.90%, 厚度膨胀率为 0.90%。相比于果糖含量 1.0%, 吸水 24 h 后的菌丝体纸板吸水率和厚度膨胀率分别减小了 0.09 和 1.81 个百分点。随着果糖的添加, 基质中的碳源丰富, 给菌丝提供足够的营养, 菌丝生长浓密, 很好地减少水的浸入。

表2 不同果糖添加量菌丝体纸板的吸水率和厚度膨胀率

Table 2 Water absorption and thickness expansion rate of mycelium paperboard at different fructose addition

果糖添加量 Levulose additive amount/%	吸水率 Water absorption /%				厚度膨胀率 Water thickness expansion /%			
	4 h	8 h	12 h	24 h	4 h	8 h	12 h	24 h
1.0	0.75±0.55 ^b	0.83±0.34 ^{ab}	0.88±0.48 ^{ab}	0.99±0.26 ^a	2.09±0.22 ^a	2.27±0.43 ^a	2.50±0.38 ^a	2.71±0.41 ^a
2.5	0.62±0.13 ^c	0.81±0.32 ^{ab}	0.75±0.26 ^b	0.92±0.34 ^a	0.52±0.19 ^c	0.58±0.23 ^c	0.66±0.37 ^{bc}	1.02±0.32 ^b
5.0	0.65±0.25 ^c	0.70±0.21 ^b	0.74±0.23 ^b	0.90±0.13 ^a	0.60±0.27 ^c	0.78±0.28 ^b	0.93±0.31 ^{ab}	0.90±0.33 ^{ab}

2.2.3 果糖添加量对菌丝体纸板热性质的影响

不同果糖添加量菌丝体纸板的热重曲线如图5所示。热降解一共分为3个阶段(图5a), 第一阶段为起始温度至172℃, 第二阶段为172~428℃, 第三阶段为428℃, 至反应结束。DTG曲线中(图5b), 第一个峰对应279℃左右, 果糖添加量为1.0%和5.0%时制备的板材热解速率为-0.341%/min与-0.344%/min。第2个峰对应352℃左右, 当果糖添加量为1.0%时, 热解速率最大为-0.670%/min, 相比果糖添加量为5.0%的纸板热分解速率(-0.710%/min)降低-0.560%/min。不同果糖添加量对热解性能有影响, 随着果糖添加量的增加, 质量损失也在增加, 不利于菌丝体纸板的热稳定性。

2.3 秸秆颗粒度对菌丝体纸板性质的影响

制备菌丝体材料最重要的两个因素, 一个是菌丝, 另一个是所使用的基质。除了基质的种类和所含营养的多少这两个因素外, 基质的颗粒度大小对材料的外观和性质有重要影响。

2.3.1 秸秆颗粒度对菌丝体纸板外观的影响

如图6所示, 不同秸秆颗粒度菌丝体纸板外观形态差异较大。随着颗粒度减小, 菌丝体纸板表面逐渐平滑, 肉眼可见菌丝与秸秆纤维混合均匀。热压使菌丝体复合材料更加致密, 产生更强的黏合作用。不同板材切面整齐, 质地较硬, 整体呈现焦黄色, 是因为热压导致糖和蛋白质等有机物质的降解, 引起美拉德反应^[20]。

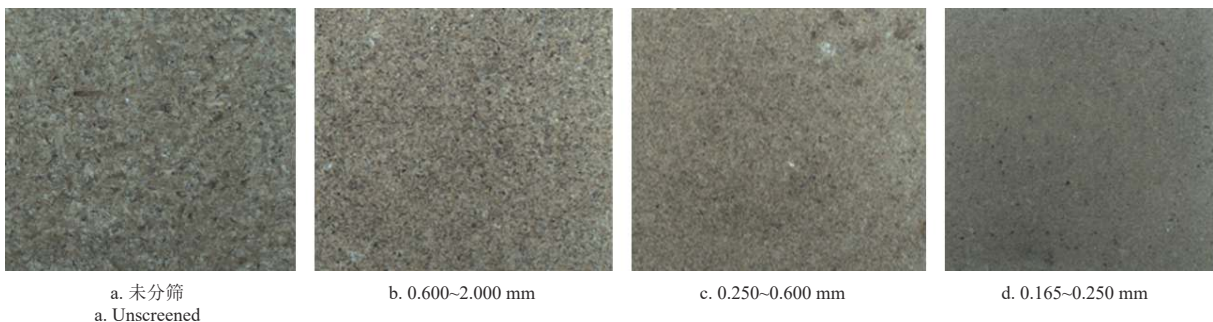


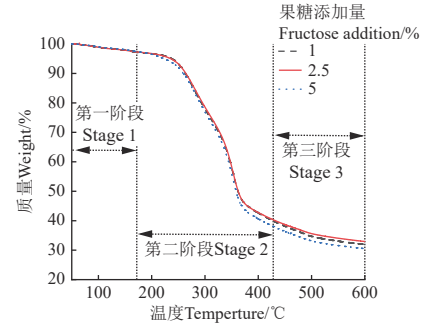
图6 不同秸秆颗粒度制备的菌丝体纸板外观

Fig.6 Appearance of mycelium-based paperboard prepared with different straw particle sizes

2.3.2 秸秆颗粒度对菌丝体纸板力学性能的影响

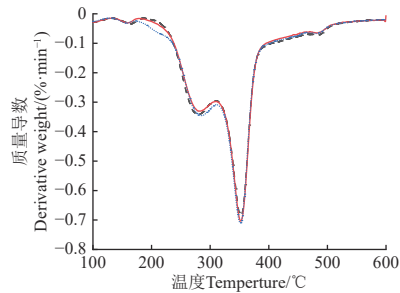
不同秸秆颗粒度制备的菌丝体纸板边压强度、静曲强度、弯曲挺度结果如图7所示。总体来说, 秸秆颗粒度越小, 制备的纸板的3种力学性能均升高。随着颗粒度的减小, 边压强度呈明显的直线上升, 0.165~0.250 mm的菌丝体纸板的边压强度最大, 为15.48 N/mm, 相比牛皮纸板(12.78 N/mm)提高了17.4%(图7a)。静曲强度随着颗粒度的减小曲线呈“S”型, 从0.600~

0.165~0.250 mm颗粒度制成的菌丝体纸板(图6d)的外观、手感最接近牛皮纸板。



a. 热降解分析曲线

a. Thermogravimetric analysis (TGA)



b. 微商热重曲线

b. Derivative thermogravimetry (DTG)

图5 不同果糖添加量菌丝体纸板热重分析

Fig.5 Thermogravimetric analysis of mycelium paperboard with different fructose addition

2.000 mm开始, 增长幅度增大, 到0.165~0.250 mm时为11.77 MPa, 相比于牛皮纸板静曲强度(10.24 MPa)提高了14.9%(图7b)。弯曲挺度从0.600~2.000 mm开始呈急速直线上升, 与未分筛显示出较明显的差异($P<0.05$), 当颗粒度为0.165~0.250 mm时为30.7 mN/m, 相比于牛皮纸板(13.10 mN/m)提高了57.3%(图7c)。在边压强度和静曲强度中, 未分筛与0.165~0.250 mm均有显著差异; 在弯曲挺度中, 未分筛和0.600~

2.000 mm 无显著差异 ($P>0.05$), 和 0.250~0.600 mm、0.165~0.250 mm 制备的菌丝体纸板有显著差异 ($P<$

0.05)。秸秆颗粒度为 0.165~0.250 mm 制备的菌丝体纸板, 力学性能最好。

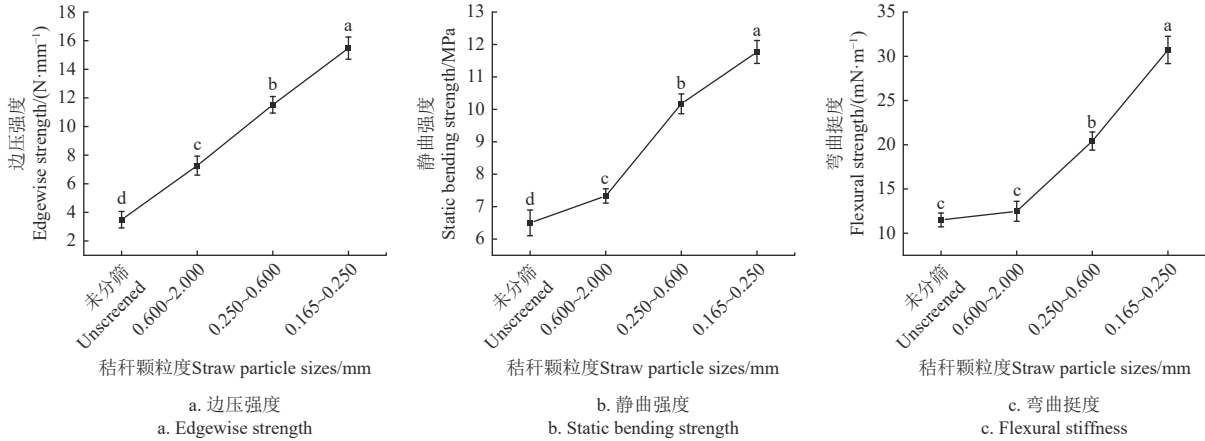


图 7 不同秸秆颗粒度菌丝体纸板力学性能

Fig.7 Mechanical properties of mycelium paperboard with different straw particle sizes

2.3.3 秸秆颗粒度对菌丝体纸板防水性能的影响

不同秸秆颗粒度菌丝体纸板吸水率和厚度膨胀率如表 3 所示。随着基质的颗粒度由粗到细, 菌丝体纸板的吸水率和厚度膨胀率逐渐减小。在 0.165~0.250 mm 时, 24 h 的吸水率为 0.86%, 厚度膨胀率为 0.59%。同时在

测试期间, 发现 0.165~0.250 mm 的秸秆制成的菌丝体纸板最不容易变形, 不易松散, 成型效果比其他组分有明显提高。原因是玉米秸秆细颗粒基质之间的空隙率较小, 导致菌丝体纸板致密, 内部结合紧密, 菌丝体纸板的防水性能提升。

表 3 不同秸秆颗粒度菌丝体纸板吸水率和厚度膨胀率

Table 3 Water absorption and thickness expansion rate of mycelium paperboard at different straw particle sizes

秸秆颗粒度 Straw particle sizes /mm	吸水率 Water absorption /%				厚度膨胀率 Water thickness expansion /%			
	4 h	8 h	12 h	24 h	4 h	8 h	12 h	24 h
0.600~2.000	1.97±0.31 ^{ab}	2.16±0.45 ^a	2.30±0.39 ^a	2.41±0.42 ^a	1.29±0.24 ^{ab}	1.63±0.36 ^a	1.72±0.23 ^a	1.90±0.36 ^a
0.250~0.600	1.70±0.23 ^b	1.90±0.26 ^{ab}	2.07±0.21 ^{ab}	2.26±0.31 ^a	0.99±0.37 ^b	1.11±0.34 ^{ab}	1.24±0.22 ^{ab}	1.37±0.14 ^{ab}
0.165~0.250	0.71±0.17 ^c	0.77±0.15 ^c	0.81±0.19 ^c	0.86±0.13 ^c	0.28±0.15 ^d	0.43±0.17 ^d	0.49±0.23 ^{cd}	0.59±0.23 ^{bc}

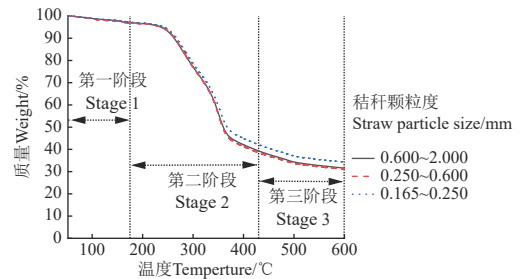
2.3.4 秸秆颗粒度对菌丝体纸板热性质的影响

不同秸秆颗粒度菌丝体纸板热重曲线如图 8 所示。热降解分为 3 个连续的热分解阶段 (图 8a)。第一阶段是起始温度至 175 °C。第二阶段为 175~430 °C。第三阶段为 430 °C 至反应结束。DTG 曲线 (图 8b) 出现的峰值与不同培养时间制成的菌丝体纸板类似。

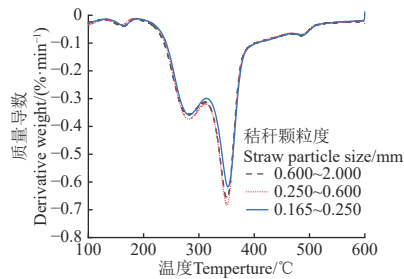
第 2 个峰对应 282 °C 左右, 秸秆颗粒度 0.600~2.000 mm 与 0.165~0.250 mm 制备的板材热解速率分别为 -0.355%/min 和 -0.351%/min; 第 3 个峰对应 350 °C 左右。当秸秆颗粒度 0.165~0.250 mm 时, 热解速率最大为 -0.601%/min, 相比秸秆颗粒度 0.600~2.000 mm 的纸板热解速率 (-0.655%/min) 减慢 -0.82%, 秸秆颗粒度越细, 有助于提高菌丝体纸板的热稳定性

2.4 制备菌丝体纸板的最佳工艺

选择培养时间 20、25、30 d, 秸秆颗粒度选择 0.600~2.000、0.250~0.600、0.165~0.250 mm, 果糖添加量为质量分数 1.0%、2.5%、5%, 通过三因素三水平正交试验, 以边压强度、弯曲挺度、静曲强度作为评价指标, 获得菌丝体纸板的最佳培养工艺。正交试验结果如表 4 所示。根据表 4 的试验结果, 计算极差, 分析结果如表 5 所示。



a. 热降解分析曲线
a. Thermogravimetric analysis (TGA)



b. 微商热重曲线
b. Derivative thermogravimetry (DTG)

图 8 不同秸秆颗粒度菌丝体纸板热重分析

Fig.8 Thermogravimetric analysis of mycelium paperboard with different straw particle sizes

3 个因素对边压强度的影响程度大小依次为 B (颗粒度)、A (培养时间)、C (果糖添加量), 以边

压强度最大值为优化目标,从 k_1 、 k_2 、 k_3 的大小分析得出,边压强度的最优条件为 $A_3B_3C_3$ 。3个因素对弯曲挺度的影响程度大小依次为 B 、 A 、 C ,以弯曲挺度最大值为优化目标,从 k_1 、 k_2 、 k_3 的大小分析得出,弯曲挺度的最优条件为 $A_2B_3C_1$ 。3个因素对静曲强度的影响程度大小依次为 B 、 A 、 C ,以静曲强度最大值为优化目标,从 k_1 、 k_2 、 k_3 的大小分析得出,静曲强度的最优条件为 $A_3B_3C_2$ 。

因此,菌丝体纸板的最佳培养工艺条件是培养时间为30 d、秸秆颗粒度为0.165~0.25 mm、果糖添加质量分数为5% ($A_3B_3C_3$)。其边压强度为14.36 N/mm,显著优于其他组合 ($P<0.05$)。静曲强度为10.89 MPa,与相对比的牛皮纸板(10.24 MPa)达到相同的水平,同时具有较强的弯曲挺度(33.09 mN/m)。该结果与单因素试验结果一致,相比牛皮纸板比较力学性能均有所提升。

表4 正交试验结果

Table 4 Orthogonal test result table

编号 No.	时间 Time A/d	颗粒度 Granularity B/mm	果糖 Fructose C/%	边压强度 Edgewise strenght/(N·mm ⁻¹)	弯曲挺度 Flexural stiffness/MPa	静曲强度 Static bending strength/(mN·m ⁻¹)
1	20	0.600~2.000	1.0	6.65±0.55 ^f	20.67±0.69 ^d	7.51±0.54 ^c
2	20	0.250~0.600	5.0	8.51±0.53 ^d	21.93±1.61 ^d	8.48±0.47 ^{bc}
3	20	0.165~0.250	2.5	10.79±0.61 ^b	30.87±1.13 ^b	10.81±0.73 ^a
4	25	0.600~2.000	5.0	8.88±0.11 ^{cd}	28.84±1.43 ^{bc}	7.32±0.80 ^c
5	25	0.250~0.600	2.5	8.80±0.17 ^{cd}	28.11±1.95 ^c	8.22±0.72 ^{bc}
6	25	0.165~0.250	1.0	10.88±0.85 ^b	33.09±0.03 ^a	9.41±1.09 ^b
7	30	0.600~2.000	2.5	7.51±0.45 ^e	21.80±0.54 ^d	8.04±0.70 ^{bc}
8	30	0.250~0.600	1.0	9.57±0.29 ^e	29.52±1.99 ^{bc}	9.06±0.37 ^b
9	30	0.165~0.250	5.0	14.36±0.34 ^a	30.64±0.24 ^b	10.89±1.24 ^a

表5 正交试验结果分析表

Table 5 Analysis table of orthogonal test results

指标 Indicators	边压强度 Edgewise strenght/(N·mm ⁻¹)			弯曲挺度 Flexural stiffness/(mN·m ⁻¹)			静曲强度 Static bending strength/MPa		
	A	B	C	A	B	C	A	B	C
	K_1	25.96	23.04	27.10	73.47	71.31	83.28	26.8	22.87
K_2	29.56	27.88	28.10	90.04	79.56	80.79	24.94	25.76	27.07
K_3	31.43	36.04	31.75	81.96	94.61	81.40	27.99	31.09	26.67
k_1	8.65	7.68	9.03	24.49	23.77	27.76	8.93	7.62	8.66
k_2	9.85	9.29	9.36	30.01	26.52	26.93	8.31	8.58	9.02
k_3	10.47	12.01	10.58	27.32	31.53	27.13	9.33	10.36	8.89
极差 R Range R	1.82	4.33	1.54	5.524	7.76	0.83	1.01	2.74	0.36
主次因素 Primary and secondary factors	$B>A>C$			$B>A>C$			$B>A>C$		
最优组合 Optimal combination	$A_3B_3C_3$			$A_2B_3C_1$			$A_3B_3C_2$		

3 讨论

力学性能是评价菌丝体复合材料的重要指标^[22]。研究证明通过改变基质培养时间、添加外源营养物质可以改善材料的力学性能。本研究中,菌丝体纸板的边压强度、静曲强度、弯曲挺度均随着培养时间的增长而增加。SUN等^[23]认为,培养时间延长可以使更多的菌丝充分定殖在基质中,形成内部黏合三维网络,增加材料基质间的黏结性,提供更好的力学性质的研究结果一致。秸秆颗粒度单因素试验中颗粒度为0.165~0.250 mm的菌丝体纸板边压强度为15.48 N/mm,弯曲挺度30.7 mN/m,相比牛皮纸板分别提高了17.4%和57.3%,证明了菌丝体材料的力学性能受到秸秆颗粒度的影响。侯佳希^[24]通过优化秸秆颗粒度以及培养时间,制备的香菇菌丝/玉米秸秆复合材料的抗压强度达到70.72 kPa。本研究发现菌丝体纸板的力学性能随着外源营养物质(果糖)含量的升高而提升,当果糖添加量为5%时,弯曲挺度达到最高值18.87 mN/m,相比未添加果糖的菌丝体纸板11.50 mN/m提升64.0%。丁榕^[25]在平菇菌丝体材料中添加葡萄糖,结果表明,添加葡萄糖组菌丝生长浓密且粗壮,材料弯曲强度为318.72 kPa,相比无外源营养组的材料205.49 kPa提升55.1%。添加外源营养物质,可以促进菌丝生长,在有限的时间内菌丝更加致密,提高菌丝体材料力学性

能。因此,改变基质培养时间、添加外源营养物质可以提升材料的力学性能。

菌丝体复合材料在应用中最大的问题之一就是防水性能差。吸水率和厚度膨胀率的高低能够反应材料吸水性的强弱。本研究中菌丝体纸板与市面上传统板材相比仍具有较高的吸水率和厚度膨胀率,这是因为原料中含有大量的木质纤维素成分,它们通常具有亲水性,纤维素细胞壁在与水接触的分子内含有许多O-H键,可以在水分子的H基团和纤维基质的O-H基团之间形成新的氢键,这些相互作用导致了纤维板内部的膨胀,增加了材料的吸水性^[26]。本研究发现更长的培养时间可以使菌丝体纤维板产生更低的厚度膨胀率和吸水率,这与SUN等^[23]结果一致。研究发现秸秆颗粒度单因素试验中0.165~0.250 mm秸秆菌丝体纸板的吸水率和厚度膨胀率相比其他单因素菌丝体纸板最低,防水效果比其他组分都有明显提高。这是玉米秸秆细颗粒基质之间的空隙率较小,导致菌丝体纸板致密,内部结合紧密,进而降低菌丝体纸板的吸水性能。王倩^[27]制备秀珍菇菌丝体刺槐复合板材和秀珍菇菌丝体苹果木复合板材,结果发现细颗粒的菌丝复合板由于颗粒度的减小导致吸水速度快,较粗颗粒的菌丝复合板吸水性增大,这与本试验结果相反。

菌丝体材料的热稳定性高度依赖于木质纤维素基材,

与其他成分相比, 菌丝体的比例较少, 对最终复合材料的热性能影响很小^[14]。这与本研究结果一致, 不同培养条件制备的菌丝体纸板都具有相似的热降解过程, 因为它们的基质都是玉米秸秆。不同菌丝体纸板在 170 °C 附近开始分解, 并在 350 °C 附近达到最大热降解速率。因此菌丝体基纤维板具有较高的降解温度, 表明其具有较好的热稳定性。

4 结 论

本文以农业废弃物玉米秸秆为基质, 利用韦伯灵芝的生长特性制得菌丝体纸板。以边压强度、静曲强度、弯曲挺度为评价指标, 通过单因素试验探讨培养时间、秸秆颗粒度以及果糖添加量对培养后热压成型的菌丝体纸板力学性能和防水性能的影响, 通过正交试验获得制备韦伯灵芝 3 054/玉米秸秆菌丝体纸板的最佳培养工艺, 得到结论如下:

1) 当培养时间 30 d、秸秆颗粒度 0.165~0.250 mm、果糖添加量为质量分数 5% 时, 此条件下培养的菌丝体材料经热压成型后边压强度为 14.36 N/mm, 静曲强度为 10.89 MPa、弯曲挺度为 33.09 mN/m, 相较于牛皮纸板各性能具有显著提升 ($P < 0.05$)。

2) 由正交试验结果和极差分析得到, 对菌丝体板材力学性能影响的最大因素是颗粒度, 其次是培养时间和果糖添加量。

[参 考 文 献]

- [1] 吴彤彤, 吴金卓, 王卉, 等. 缓冲包装材料经济性与环境影响评价研究进展[J]. 包装工程, 2021, 42(9): 17-24.
WU Tongtong, WU Jinzhuo, WANG Hui, et al. Research progress on technology economy and environmental impact assessment of buffer packaging materials[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(9): 17-24. (in Chinese with English abstract)
- [2] 陶宗晓. 基于运输角度的瓦楞纸包装设计优化研究[J]. 中国造纸, 2022, 41(3): 1-2.
TAO Zongxiao. Research on optimization of corrugated paper packaging design based on transportation angle[J]. China Pulp & Paper, 2022, 41(3): 1-2. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘延莉. 纸质包装材料中有机污染物向液态食品中迁移行为的研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2011.
LIU Yanli. Studies on the Migration of Organic Contaminations from Paper Packaging Materials into Liquid Food[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [4] 万杰, 银清扬, 翁端. 菌丝体基塑料的发展现状与前景[J]. 科技导报, 2019, 37(22): 105-112.
WAN Jie, YIN Qingyang, WENG Duan. Current status and tomorrow of mycelium based plastics[J]. Science & Technology Review, 2019, 37(22): 105-112. (in Chinese with English abstract)
- [5] LIU R, LONG L, SHENG Y, et al. Preparation of a kind of novel sustainable mycelium/cotton stalk composites and effects of pressing temperature on the properties[J]. Industrial Crops & Products, 2019, 141(C): 111732.
- [6] 高雪华, 李娜. 菌丝复合材料在设计中的应用研究[J]. 冶金与材料, 2020, 40(6): 99-100.
- GAO Xuehua, LI Na. Study on the application of mycelium composite materials in design[J]. Metallurgy and Materials, 2020, 40(6): 99-100. (in Chinese with English abstract)
- [7] MCBEE R M, LUCHT M, MUKHITOV N, et al. Engineering living and regenerative fungal-bacterial biocomposite structures[J]. Nature Materials, 2022, 21(4): 471-478.
- [8] 张哲瑜, 金倩. 菌丝体复合材料及其在建筑中的应用研究[J]. 建筑与文化, 2022(9): 13-15.
ZHANG Zheyu, JIN Qian. Research on mycelium composite material and its application in architecture[J]. Architecture & Culture, 2022(9): 13-15. (in Chinese with English abstract)
- [9] 刘览宇, 郑刚强, 周倩. 菌丝体材料产品化设计研究[J]. 包装工程, 2023, 44(6): 196-204.
LIU Lanyu, ZHENG Gangqiang, ZHOU Qian. Product design of mycelium materials[J]. Packaging Engineering, 2023, 44(6): 196-204. (in Chinese with English abstract)
- [10] 渠继红, 姜鲁, 李珠. 食用菌菌糠生物质建筑保温板性能研究[J]. 新型建筑材料, 2019, 46(2): 105-108.
QU Jihong, JIANG Lu, LI Zhu. Experimental study on performance of biomass insulation board with edible fungus chaff[J]. New Building Materials, 2019, 46(2): 105-108. (in Chinese with English abstract)
- [11] 闫薇, 于兰芳, 曹春红, 等. 菌丝体生物泡沫材料防火特性研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(8): 1239-1242.
YAN Wei, YU Lanfang, CAO Chunhong, et al. Study on fire performance of mycelium bio-foam[J]. Fire Science and Technology, 2021, 40(8): 1239-1242. (in Chinese with English abstract)
- [12] ABHIJITH R, ASHOK A, REJEESH C R. Sustainable packaging applications from mycelium to substitute polystyrene: A review[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 63: 2139-2145.
- [13] WIMMERS G, KLICK J, TACKABERRY L, et al. Fundamental studies for designing insulation panels from wood shavings and filamentous fungi[J]. BioResources, 2019, 14(3): 5506-5520.
- [14] 李红丽. 基于杨木木屑和人造板废料的菌丝体复合材料制备工艺研究[D]. 济南: 山东农业大学, 2022.
LI Hongli. Study on the Preparation Technology of Mycelium Composite Material Based on Poplar Sawdust and Wood-Based Panel Waste[D]. Jinan: Shandong Agricultural University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [15] 张冬玉, 万红瑶, 郭启愚, 等. 植物纤维/真菌纤维/纳米纤维素复合制备食品包装纸初探[J]. 纸和造纸, 2018, 37(5): 29-33.
ZHANG Dongyu, WAN Hongyao, GUO Qiyu, et al. Preliminary study on the preparation of food wrapping paper by fungal fiber/nano-cellulose composite[J]. Paper and Paper Making, 2018, 37(5): 29-33. (in Chinese with English abstract)
- [16] SHAKIR A, YHAYA M F, AHMAD M I, et al. Preparation and characterization of mycelium as a bio-matrix in fabrication of bio-composite[J]. Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences, 2020, 65(5): 128-143.
- [17] 陈晨伟, 彭柳城, 丁榕, 等. 制备工艺参数对菌丝体生物质材料性能的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(22): 183-189.
CHEN Chenwei, PENG Liucheng, DING Rong, et al. Effects of preparation process parameters on the properties of mycelium biomass materials[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(22): 183-189. (in Chinese with English abstract)
- [18] 陈晨伟, 丁榕, 彭柳城, 等. 外源营养物对菌丝体生物质材料的生长研究及其性能表征. 农业工程学报[J]. 2021, 37(21): 295-302.

- CHEN Chenwei, DING Rong, PENG Liucheng, et al. Effects of exogenous nutrients on the growth of mycelial biomass materials and its characterization[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(21): 295-302. (in Chinese with English abstract)
- [19] MISHRA R K, MOHANTY K. Pyrolysis kinetics and thermal behavior of waste sawdust biomass using thermogravimetric analysis[J]. Bioresource Technology, 2017, 23(3): 63-74.
- [20] POWRIE W D, WU C H, MOLUND V P. Browning reaction systems as sources of mutagens and antimutagens[J]. *Environmental Health Perspectives*, 1986, 67: 47-54.
- [21] 裴海生, 孙君社, 王民敬, 等. 木质素对灵芝菌丝体生长的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6): 309-314.
PEI Haisheng, SUN Junshe, WANG Minjing, et al. Effect of lignin on growth of *Ganoderma lucidum*[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(6): 309-314. (in Chinese with English abstract)
- [22] NOAM A, OFER D, TIFFANY A, et al. Mycelium bio-composites in industrial design and architecture: Comparative review and experimental analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 246(C): 119037.
- [23] SUN W J, MEHDI T, CAITLIN H, et al. Insight into mycelium-lignocellulosic bio-composites: Essential factors and properties[J]. Composites Part A, 2022, 161(7): 107-125.
- [24] 侯佳希. 真菌菌丝/玉米秸秆基多孔复合材料的制备[D]. 长春: 吉林农业大学, 2020.
HOU Jiashi. Preparation of Fungal Mycelium /Corn Straw Porous Composite Material[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [25] 丁榕. 平菇菌丝体材料制备及其性能研究[D]. 上海: 上海海洋大学, 2022.
DING Rong. Designing and Properties of *Pleurotus ostreatus* Mycelium Biomass Materials[D]. Shanghai: Shanghai Ocean University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [26] SISTI L, GIOIA C, TOTARO G, et al. Valorization of wheat bran agro-industrial byproduct as an upgrading filler for mycelium-based composite materials[J]. Industrial Crops and Products, 2021, 170(4): 113742-113751.
- [27] 王倩. 基于两种木材培养基质的秀珍菇菌丝/生物质复合板材的制备及性能研究[D]. 济南: 山东农业大学, 2022.
WANG Qian. Preparation and Performance of Mycelium/Biomass Composite Boards Based on Two Wood Substrates of *Pleurotus geesteranus*[D]. Jinan: Shandong Agricultural University, 2022. (in Chinese with English abstract)

Preparation and performance study of *Ganoderma weberianum*/corn straw mycelium paperboard

DONG Ziwei¹, LI Yuhang¹, LI Fanyu¹, WANG Zhengqi¹, LI Yu^{1,2}, HAN Xuerong^{1,2*}

(1. Engineering Research Center of Edible and Medicinal Fungi, Ministry of Education, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China; 2. Jilin Province Key Laboratory of Fungal Phenomics, Jilin Agricultural University, Changchun 130118, China)

Abstract: Environmental pollution has posed serious harm to human health. The use of adhesives has also caused in the traditional paperboard. It can be expected to develop the environmentally friendly mycelium paperboard. Among them, the hyphae can form clamp-shape connection structures for the nutrient reproduction and transfer. A natural biocomposite material can grow on the natural agricultural waste, due to the high dipole moment and hydrogen bonding between macromolecules. In this study, the combination of *Ganoderma weberianum*/corn straw was determined to design the single-factor cultivation conditions, such as the cultivation time, straw particle size, and fructose addition. A systematic investigation was also implemented to explore the effects on the mechanical properties, waterproof properties, and thermal decomposition performance of the hyphal paperboard formed by hot pressing. The optimal cultivation was obtained after orthogonal experiments. The experimental results indicate that the various factors were varied in the influence on the edgewise strength, flexural stiffness, and static bending strength and waterproofness of paperboard. Firstly, the flexural stiffness reached 16.63 mN/m, which was 21.2% higher than that of kraft study (13.10 mN/m), when the cultivation time was 30 days. Moreover, the water absorption (24 hours) also decreased from 3.92% to 1.27% with the increase of cultivation time. Secondly, previous studies showed that the addition of fructose, glucose, and sucrose increased the biomass growth rate of strains. The fructose was chosen as an exogenous nutrient. Once the mass fraction of 5% fructose was added, the mechanical properties were the best with a flexural stiffness of 18.87 mN/m, which was 30.5% higher than that of kraft study (13.10 mN/m). Thirdly, the particle size of substrate shared the significant impact on the appearance and properties of the material. Furthermore, the mycelium paperboard made of 0.165-0.250 mm particle size was the closest appearance and feel to kraft paper. At the same time, the mycelium paperboard made of 0.165-0.250 mm straw was the least prone to deformation and loosening during testing. The molding was significantly improved, compared with the rest components. In terms of mechanical properties, the edgewise strength, the static bending strength, and the flexural stiffness increased by 17.4%, 14.9%, and 57.3%, respectively. The influence level of various factors was also ranked in the descending order of the particle size, cultivation time, fructose addition amount. Once the particle size was 0.165-0.250 mm, the cultivation time was 30 days, and the fructose addition was 5.0%. The edgewise strength, static bending strength and flexural stiffness of prepared paperboard were 14.36 N/mm, 10.89 MPa, and 33.09 mN/m, respectively. The water absorption rate and water thickness expansion rate of paperboard after 24 hours of water absorption decreased to 0.86 and 0.59%, respectively, as the particle size decreased. The mycelium paperboard prepared by different single factors shared the same thermal decomposition, starting at around 150 °C and reaching its the maximum at 350 °C. This finding can provide a strong reference basis to develop and apply the mycelium composite materials in the future.

Keywords: mycelium; complex material; mechanical properties; waterproof performance; biomass