

制备工艺对菌丝复合材料抗压性能的影响

张皓越，黄橙紫，彭源德，周映君，龚文兵，谢纯良*

(中国农业科学院麻类研究所，长沙 410205)

摘要：为获得菌丝复合材料抗压性能的最佳工艺参数，该研究以压缩强度为评价指标，通过筛选与优化试验研究了真菌菌株、培养基质、基质粒径和接种量对菌丝复合材料抗压性能的影响。结果表明，采用 *Ganoderma resinaceum* 为供试菌株、芦苇秆与玉米芯为复配基质，在基质粒径为 0.075~2.000 mm、接种量为 7.5% 的工艺参数下能制得压缩强度较高的菌丝复合材料，其 10% 相对形变的压缩强度达到 190.99 kPa，为 18.0 kg/m³ 聚苯乙烯泡沫塑料的 1.90 倍。该研究结果可为制备环保可降解菌丝包装材料提供参考，同时对提高芦苇秆等农业废弃物的综合利用率具有一定的实际意义。

关键词：抗压强度；农业废弃物；生物质；制备工艺；菌丝复合材料

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202408230

中图分类号: R318.08

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2025)-03-0301-08

张皓越，黄橙紫，彭源德，等. 制备工艺对菌丝复合材料抗压性能的影响[J]. 农业工程学报, 2025, 41(3): 301-308. doi:

10.11975/j.issn.1002-6819.202408230 <http://www.tcsae.org>

ZHANG Haoyue, HUANG Chengzi, PENG Yuande, et al. Effects of preparation process on the compressive property of mycelium composite materials[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2025, 41(3): 301-308. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202408230 <http://www.tcsae.org>

0 引言

随着电商贸易及物流运输的快速发展，人们对发泡聚苯乙烯（expandable polystyrene, EPS）的需求急剧增长，因其质轻、比强度高、缓冲性能良好等优点而备受青睐^[1]。然而，生产 EPS 会大量消耗石油等不可再生资源，生产过程中还会释放大量 CO₂ 温室气体。随着泡沫塑料产量与消费量增长，其废弃物数量也在与日俱增，而中国废旧泡沫塑料回收利用率偏低^[2]，通常采用直接焚烧或填埋等简易处理方式，前者会产生大量有害气体，造成大气污染，后者在地下难以被生物降解，极易造成土壤、水体“白色污染”，导致农作物减产、地下水污染等环境问题，危及人体或动物健康^[3]。基于以上现状，开发新型可降解包装缓冲材料正在成为当前研究热点。

中国农作物秸秆资源丰富，2022 年产量约 8.64 亿 t^[4]，若不对其加以利用和处理，则极易造成资源浪费和环境污染。秸秆肥料化是目前实现农业秸秆综合利用的主要手段，占秸秆综合利用率的 60% 以上^[5]。然而秸秆直接还田容易导致土地板结、播种质量差、病虫害危害等问题，间接还田及腐熟还田处理方式较为复杂且对处理技术有一定要求^[6]。芦苇是农作物秸秆的一种^[7]，其茎秆坚

韧，纤维长、木质素含量高，具备可再生、可降解和无污染等优点，过去作为造纸的重要原料而得以利用^[8]。然而，造纸废水排放会直接污染天然水质，随着环境保护力度加大，芦苇造纸产业被引导退出，芦苇的大量废弃不仅浪费资源，还会导致水体富营养化，对湖区水质、景观、生态构成直接威胁^[9]。中国农业秸秆综合化利用依然面临严峻挑战，亟待提高农业秸秆多途径利用率。由于农作物秸秆富含纤维素、半纤维素、木质素等成分，能够被腐生真菌分解、吸收并利用^[10]，因此将分解木质纤维素的真菌接种在农业秸秆上培养，制备具有一定抗压强度的菌丝复合包装缓冲材料，以期提升农业废弃物综合利用率，替代传统石油基泡沫塑料，正逐渐成为当前生物质材料研究与开发的热点。

菌丝复合材料（mycelium composite material, MCM）是一种将农业废弃物（如芦苇秆、麻秆、玉米芯等）作为培养基质，通过接入大型真菌菌株分解吸收基质营养成分，使菌丝延伸、分支、融合以形成复杂的网络结构，从而将松散的基质黏合为一体的新型生物质材料^[11]。菌丝复合材料因其提高农副产物利用率、可降解、生产能耗低、环境友好等优势，近年来受到广泛关注。目前，国内外学者围绕菌株种类、基质类型、制备工艺、后处理等对材料性能进行优化，以制备抗压、抗弯、缓冲性能更佳的菌丝复合材料。例如，JONES 等^[12]通过菌株筛选试验，发现冬生多孔菌（*Polyporus brumalis*）和淡红侧耳（*Pleurotus djamor*）具有较高的生长率及菌丝密度，提高了菌丝复合材料生产效率。ELSACKER 等^[13]研究了不同基质与不同粒径对菌丝复合材料性能的影响，结果显示粒径对材料性能的影响比基质种类更明显，表明了基质粒度对材料性能的重要性。陈晨伟等^[14-15]通过优

收稿日期: 2024-08-30 修订日期: 2024-11-07

基金项目: 国家麻类产业技术体系建设专项 (CARS-16); 湖南省科技重大专项 (2021NK1010-3); 中国农业科学院麻类研究所科技创新工程重大任务专项 (CAAS-ASTIP-2023-IBFC); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项 (1610242023005); 湖南省科技创新计划项目 (2022RC1151)
作者简介: 张皓越, 研究方向为微生物资源利用。

Email: zhy0871666@163.com

*通信作者: 谢纯良, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为微生物发酵工程。Email: xiechunliang@caas.cn

化菌丝复合材料的制备工艺(接种量、水添加量、接种方法等),提升改进了材料的抗弯和缓冲性能,达到或超过发泡聚苯乙烯的类似特性。AHMADI^[16]探究了培养周期对纤维素-菌丝体泡沫材料的影响,当培养周期为25 d时,材料抗压强度、能量吸收特性和热稳定性显著提高。APPELS等^[17]对菌丝复合材料进行热压后处理,得到一批抗拉强度较高(0.24 MPa)、断裂应变较低(0.7%)的材料,其与木材等天然材料性质相似,为材料后处理提供了新思路。

尽管有诸多学者对不同菌株、基质进行了筛选优化,然而对菌株和基质缺乏系统的评价与筛选。另外,相关研究仅从1~2个角度对材料性能进行优化,缺乏连续性的筛选步骤。因此,本研究基于10种真菌、6种基质及其复配组合制备菌丝复合材料,以压缩强度为评价指标,依次对菌株、基质、粒径与接种量进行筛选和优化,将上一次的优化结果用于下一次试验,制备压缩强度逐渐提高的材料。本研究旨在促进菌丝复合材料在包装领域的应用,以期提高芦苇秆等农业废弃物的综合利用率提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料及设备

试验中为菌丝生长提供营养的原料有:落麻、红麻、芦苇秆,购自中国农业科学院麻类研究所沅江试验站;棉籽壳、玉米芯、木屑、麸皮,购自市场。

其他试验材料:氧化钙、葡萄糖购自上海麦克林生化科技股份有限公司。

试验仪器与设备:超净工作台,SPX-250BX生化培养箱,天津市泰斯特仪器有限公司;BSG-400培养箱,上海博迅实业有限公司医疗设备厂;ZQZY-B8ES振荡培养箱,上海知楚仪器有限公司;GR110DR全自动灭菌锅,美国致微仪器有限公司;SU-3 500扫描电子显微镜,株式会社日立制作所;TX350e体视显微镜,广州金卡思贸易有限公司;GFL-70鼓风干燥箱,天津市莱玻特瑞仪器设备有限公司;RMDW-5电子万能试验机,济南锐玛机械设备有限公司。

1.2 培养基

麦芽浸粉培养基:30 g/L 麦芽浸粉、3 g/L 大豆胨、15 g/L 琼脂,溶于蒸馏水并定容至1 L,121 ℃ 灭菌15 min。

麦芽浸粉液体培养基:20 g/L 麦芽浸粉、20 g/L 葡萄糖、1 g/L 胰蛋白胨、1 g/L 发酵提取物,溶于蒸馏水并定容至1 L,121 ℃ 灭菌15 min^[18]。

菌丝复合材料固态培养基:以基料80%、麸皮18%、氧化钙粉末2%的比例^[19],按0.15 g/cm³的干料密度混合培养料,加入适量清水,使基质含水率达到70%,搅拌均匀,121 ℃ 灭菌2 h。

1.3 菌丝复合材料的制备

参考陈晨伟等^[20]方法并稍作修改,将菌株接种至麦芽浸粉培养基上,25 ℃ 活化7 d。将活化的菌丝接入麦芽浸粉液体培养基,置于25 ℃、180 r/min条件下避光

振荡培养7 d,制得液体菌种。以6.5%接种量将液体菌种接入生长基质,28 ℃ 下避光培养15 d后,将材料脱模,然后将其底部朝上在28 ℃ 下继续避光培养2 d后,置于60 ℃ 烘箱中脱水48 h,得到菌丝复合材料。

1.4 试验方法

1.4.1 优异菌株筛选

设定接种量为6.5%、培养时间为15 d,粒径为0.075~2.000 mm的红麻与棉籽壳(KCS)为复合生长基质,选取10种不同真菌菌株进行优异菌株筛选试验,这些菌株分别为无柄灵芝(*Ganoderma resinaceum*)、糙皮侧耳(*Pleurotus ostreatus*)、凤尾菇(*Pleurotus sajor-caju*)、血红栓菌(*Trametes sanguinea*)、秀珍菇(*Pleurotus geesteranus*)、金针菇(*Flammulina filiformis*)、茶树菇(*Agrocybe aegerita*)、胶质鳞伞(*Pholiota squamosa*)、香菇(*Lentinus edodes*)、猴头菇(*Hericium erinaceus*) (以上菌株均来自中国农业科学院麻类研究所)。利用万能试验机对材料试件进行压缩性能表征,筛选出一种优异菌株,适宜制备强度较高的菌丝复合材料。

1.4.2 适宜基质筛选

设定接种量为6.5%、培养时间为15 d,以优异菌株*Ganoderma resinaceum*为供试菌株,基质粒径为0.075~2.000 mm,利用17种原料进行适宜基质筛选试验,包括落麻(noil,N)、红麻(kenaf,K)、芦苇秆(reed straw,R)、棉籽壳(cotton seed shell,CS)、玉米芯(corn cob,CC)、木屑(sawdust,S)6种单配基质,及落麻与棉籽壳(NCS)、落麻与玉米芯(NCC)、落麻与木屑(NS)、红麻与芦苇秆(KR)、红麻与棉籽壳(KCS)、红麻与玉米芯(KCC)、红麻与木屑(KS)、芦苇秆与棉籽壳(RCS)、芦苇秆与玉米芯(RCC)、芦苇秆与木屑(RS)、棉籽壳与玉米芯(CSCC)11种复配基质(复配基质由质量比1:1的两种原料组成)。利用万能试验机对材料试件进行压缩性能表征,筛选出一种适宜基质,通过该种基质可得到强度较高的菌丝复合材料。

1.4.3 基质粒径筛选

设定接种量为6.5%、培养时间为15 d,以优异菌株*Ganoderma resinaceum*为供试菌株,适宜基质芦苇秆与玉米芯(RCC)为供试基质。参考侯佳希^[21]的方法,对4种不同基质粒径开展筛选试验,粒径分组为0.850~2.000 mm、0.250~0.850 mm、0.075~0.250 mm、0.075~2.000 mm。利用万能试验机对材料试件进行压缩性能表征,筛选出一种适宜的基质粒径,适宜制备强度较高的菌丝复合材料。

1.4.4 接种量优化

设定培养时间为15 d,以优异菌株*Ganoderma resinaceum*为供试菌,适宜基质芦苇秆与玉米芯(RCC)为供试基质,筛选到的优异粒径0.075~2.000 mm为供试粒径。根据前期预试验结果,对6组不同接种量进行优化试验,各接种量水平为3.5%、4.5%、5.5%、6.5%、7.5%、8.5%。利用万能试验机对材料试件进行压缩性能表征,筛选出一种优异接种量,适宜制备强度较高的菌

丝复合材料。

1.5 菌丝复合材料性能测试

1.5.1 体视显微镜分析

从菌丝复合材料芯部取少量待观测样品，置于体视显微镜载物台之上，调整目镜及物镜使样品位于成像中央，调节放大倍数和焦距使成像清晰，对样品结构特征及菌丝分布情况进行观察和记录。

1.5.2 扫描电子显微镜（scanning electron microscope, SEM）分析

从菌丝复合材料横截面处取少量待观测样品，用双面胶带将其固定在铜质载物台上，溅射镀金 1~2 min。在真空环境下使用 10 kV 加速电压获取样品显微图像。

1.5.3 密度

根据 APPELS 等^[17]的方法，利用电子天平称量试件质量。利用游标卡尺测量试件长度与宽度，计算试件横截面积；测量试件原始厚度。依照式（1）计算试件密度：

$$\rho = \frac{m}{ST} \times 10^3 \tag{1}$$

式中 ρ 为试件密度，g/cm³； m 为试件质量，g； S 为试件横截面积，mm²； T 为试件原始厚度，mm。

1.5.4 压缩性能

根据 GB/T 8813—2020《硬质泡沫塑料 压缩性能的测定》^[22]中的方法 A，使用万能试验机以（12±3）mm/min 的速度沿菌丝复合材料厚度方向进行压缩性能测试。通过计算得到相对形变 10% 的压缩强度和能量吸收效率（ η ）-应力（ σ ）曲线。

$$\sigma = \frac{F}{S} \tag{2}$$

式中 σ 为压缩应力，kPa； F 为压缩载荷，N。

$$\varepsilon = \frac{T - T_j}{T} \times 100\% \tag{3}$$

式中 ε 为压缩应变，%； T_j 为试件试验后的厚度，mm。

根据陈晨伟等^[14]的方法，缓冲系数计算见式（4）。

$$C = \frac{1}{\eta} = \frac{\sigma}{\int_0^\varepsilon \sigma d\varepsilon} \tag{4}$$

式中 C 为缓冲系数； η 为能量吸收效率。

将应力（ σ ）-应变（ ε ）曲线转换为缓冲系数（ η ）-应力（ σ ）曲线，缓冲系数越小，材料单位体积下吸收的外部能量越多，其缓冲效果越好^[23]。

1.5.5 菌丝生长速度测定

在超净工作台中，用打孔器在菌丝边缘打孔，用接种钩接种至 MEA 平板中央，重复 3 次，将平板置于 25℃ 培养箱避光培养。本试验采用十字交叉法测定菌丝生长速度^[24]，即接种后在皿底十字划线，待菌丝萌出，在其尖端标注测量最长半径 r_1 ，待菌丝生长至 3、6 d 时，在菌丝外缘标注测量最长半径 r_2 ，依照式（5）计算菌丝生长速度：

$$v = \frac{r_2 - r_1}{t} \tag{5}$$

式中 v 为菌株的生长速度，mm/d； r_1 为菌丝萌出时尖端最长半径，mm； r_2 为生长 t d 后菌丝外缘最长半径； t 为菌丝的生长时间，d。

1.6 数据分析

使用 Origin 2024 作图；使用 SPSS 19 进行方差分析，通过 Duncan 极差检验进行差异性分析， $P < 0.05$ 表示具有显著性差异。

2 结果与分析

2.1 优异菌株筛选

2.1.1 压缩性能分析

本研究对不同菌株制备菌丝复合材料的密度、压缩强度和最小缓冲系数进行了分析。表 1 结果显示，密度最大的菌丝复合材料为 *Ganoderma resinaceum* 组（0.196 g/cm³），密度最小的为 *Hericium erinaceus* 组（0.161 g/cm³），菌丝材料的密度均显著（ $P < 0.05$ ）高于 EPS 板。

表 1 不同菌株制备的菌丝复合材料压缩性能及生长速度

Table 1 Compressive property and growth rate of mycelium composite materials produced from different fungi strains

菌株种类 Species of fungi strains	密度 Density/(g·cm ⁻³)	压缩强度 Compressive strength/kPa	最小缓冲系数 Minimum buffer factor	生长速度 Growth rate/(mm·d ⁻¹)
EPS	0.013±0.000 ^f	73.01±6.53 ^c	4.85±0.18 ^d	-
无柄灵芝 <i>Ganoderma resinaceum</i>	0.196±0.011 ^a	88.59±2.19 ^{ab}	9.06±1.35 ^{bc}	7.94±0.43 ^a
糙皮侧耳 <i>Pleurotus ostreatus</i>	0.188±0.003 ^{ab}	38.77±3.18 ^e	8.92±0.12 ^{bc}	5.69±0.19 ^c
凤尾菇 <i>Pleurotus sajor-caju</i>	0.192±0.005 ^{ab}	48.8±11.39 ^{de}	8.93±0.18 ^{bc}	5.11±0.31 ^{cd}
血红栓菌 <i>Trametes sanguinea</i>	0.190±0.002 ^{ab}	96.43±4.03 ^a	9.55±0.4 ^b	6.33±0.15 ^b
秀珍菇 <i>Pleurotus geesteranus</i>	0.169±0.004 ^{cde}	41.76±6.62 ^e	8.88±0.39 ^{bc}	6.51±0.59 ^b
金针菇 <i>Flammulina filiformis</i>	0.183±0.005 ^b	75.21±4.31 ^{bc}	8.13±0.29 ^c	5.33±0.38 ^c
茶树菇 <i>Agrocybe aegerita</i>	0.181±0.001 ^{bc}	57.65±11.04 ^d	9.3±0.05 ^b	4.65±0.16 ^d
胶质鳞伞 <i>Pholiota squamosa</i>	0.180±0.016 ^{bcd}	16.19±2.08 ^e	10.69±0.95 ^a	2.47±0.35 ^f
香菇 <i>Lentinus edodes</i>	0.169±0.008 ^{de}	36.34±14.83 ^{ef}	8.77±0.68 ^{bc}	3.01±0.02 ^e
猴头菇 <i>Hericium erinaceus</i>	0.161±0.005 ^e	23.53±1.87 ^{fe}	9.23±0.3 ^b	3.03±0.03 ^e

注：EPS 为发泡聚苯乙烯。所有数值均表示为平均值±标准差；同一列中不同小写字母表示具有显著性差异（ $P < 0.05$ ）；压缩强度为形变量的 10%，下同。
Note: EPS is expandable polystyrene; all values are expressed as mean ± standard deviation; different lowercase letters in the same column represents significant difference ($P < 0.05$); compressive strength are 10% of deformation quantity, the same as below.

Ganoderma resinaceum 和 *Trametes sanguinea* 组在相对形变 10% 的压缩强度显著（ $P < 0.05$ ）高于其他菌株（88.59 和 96.43 kPa），分别为 EPS 板的 1.21 和 1.32 倍。EPS 板的最小缓冲系数显著低于所测的菌丝材料（ $P < 0.05$ ），

当在不同菌株间比较时,除 *Flammulina filiformis* 组最小缓冲系数显著低于 *Pholiota squamosa*、*Agrocybe aegerita* 组外,其余菌株对菌丝复合材料的最小缓冲系数影响不显著。以上结果表明,不同菌株种类对菌丝复合材料的密度、压缩强度、缓冲性能产生显著性差异。这可能是因为不同菌株具有不同木质纤维素降解酶系统,使得木质纤维素的降解程度出现差异,进而对材料密度和力学性能造成影响^[10]。菌丝生长速度也是影响材料抗压性能的因素之一,表 1 结果表明, *Ganoderma resinaceum* 在 MEA 平板上的生长速度显著 ($P<0.05$) 高于其他菌株。生长速度较快的菌株能延伸、分支出数量较多的菌丝,在基质间建立较复杂的菌丝网络结构,使得菌丝与基质的粘结性增强,当材料受压时具备较高的抗压强度,意味着菌丝生长速度与材料抗压性能成正相关关系。李亨^[25]利用杏鲍菇、玉木耳、秀珍菇、香菇、元蘑、白灵菇、姬菇 7 种菌株制备菌丝复合材料,并对不同菌株生长速度进行测定,结果表明生长速度最快的杏鲍菇 (1.21 cm/d) 对应材料的抗压性能最佳,该结果与本研究相似。综上,基于 *Ganoderma resinaceum* 组和 *Trametes sanguinea* 组菌丝复合材料较高的压缩强度,而 *Trametes sanguinea* 的红色菌丝和孢子易对试验环境产生不良影响,因此选择 *Ganoderma resinaceum* 为优异菌株的筛选结果,并用于后续试验。

2.1.2 外观及微观形态分析

根据表 1 差异性分析结果,分别将压缩强度在 a~b、c~d、e~f 的菌株定为高、中、低 3 个水平,选择 *Ganoderma resinaceum*、*Pleurotus sajor-caju*、*Hericium erinaceus* 为高、中、低水平的代表菌株,对该 3 种材料的外观、体视显微结构、SEM 微观结构进行分析,以阐明材料外观及微观结构与压缩性能的关系。通过分析样品外观形态 (图 1) 可知, *Ganoderma resinaceum* 组表面菌层致密、厚实且完整,具有泡沫质感,白色与黄褐色相间,可能与烘干时真菌细胞壁和植物材料中糖与蛋白质发生美拉德反应有关^[17]。 *Pleurotus sajor-caju* 组表面几乎为致密厚实的白色菌层,同样具备泡沫质感。然而, *Hericium erinaceus* 组材料菌丝层稀薄且不完整,裸露出褐色松散的基质。材料成型过程中,表面菌丝接触更充足的氧气,可形成一层致密的保护性菌丝层^[26]。在材料压缩过程中,这种保护性菌层使其在相同应变下承受更高载荷,因此 *Ganoderma resinaceum* 和 *Pleurotus sajor-caju* 具备较高和中等水平的压缩强度。然而, *Hericium erinaceus* 组材料表面菌丝层不完整,松散的基质颗粒易碎裂脱落,形状稳定性较差,承载能力较弱。

如图 1 体视显微结构和 SEM 微观结构可知, *Ganoderma resinaceum* 组的菌丝浓密程度最高,基质间隙几乎被白色菌丝填充,菌丝网络密度较其他两组更高,网络结构更复杂; *Pleurotus sajor-caju* 组菌丝浓密程度较低,在部分基质间形成稀薄的菌丝网络; *Hericium erinaceus* 组仅有少量菌丝附着于基质上,未见联结基质颗粒的网络结构。这可能归因于 *Ganoderma resinaceum*

较快的生长速度,在相同培养时间内菌丝网络蔓延范围更广,菌丝分支数量更多。菌丝在生长过程中相互搭接,在节点处粘结在一起,随着菌丝间相互聚集交缠,形成复杂的三维网状结构。基于 *Ganoderma resinaceum* 组较稠密的菌丝网络结构和较高的压缩强度水平,则网络结构的密度可能与压缩强度成正相关^[27]。

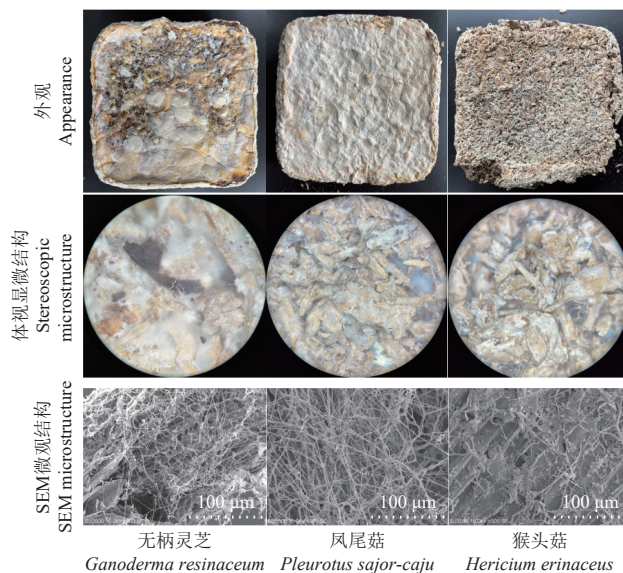


图 1 无柄灵芝、凤尾菇及猴头菇试样外观、体视显微结构及 SEM 微观结构图

Fig.1 Appearance, stereoscopic microstructure and SEM(scanning electron microscope) microstructure diagram of *Ganoderma resinaceum*, *Pleurotus sajor-caju* and *Hericium erinaceus* test samples

2.2 适宜基质筛选

2.2.1 不同基质菌丝复合材料压缩性能分析

本研究对不同基质制备菌丝复合材料的密度、压缩强度和最小缓冲系数进行了分析。表 2 结果显示,密度最大的菌丝复合材料为 NCS 组 (0.262 g/cm^3),密度最小的为 K 组 (0.114 g/cm^3),菌丝材料的密度均显著 ($P<0.05$) 高于 EPS 板。RCC 组在相对形变 10% 的压缩强度显著 ($P<0.05$) 高于其他基质 (140.56 kPa),为 EPS 板的 5.97 倍。EPS 板的最小缓冲系数显著低于所测的菌丝材料 ($P<0.05$),当在不同基质间比较时,除 NS、KS、CC 组最小缓冲系数显著低于 NCS、NCC、S 组外,其余基质对菌丝复合材料的最小缓冲系数影响不显著。以上结果表明,不同基质种类对菌丝复合材料的密度、压缩强度、缓冲性能产生显著性差异。这可能是因为不同基质的来源、类型、植株种类、组织成熟度均有不同,这些因素会影响基质中纤维素、半纤维素和木质素的含量及比例,其通过影响菌丝体的生长,使菌丝复合材料的抗压性能表现出差异^[10]。PENG 等^[28]利用稻秆、甘蔗渣、椰皮髓、木屑、玉米秸秆 5 种农业废弃物制备菌丝复合材料,对不同基质组材料的各项性能进行表征,结果表明材料密度与压缩强度成正相关关系,木屑组材料的抗压强度 (456.70 kPa) 显著高于玉米秸秆组 (270.31 kPa),该结果与本研究相似。然而,当前相关

研究多采用木屑、锯末、棉籽壳、玉米秸秆、稻草、甘蔗渣等作为基质进行筛选和优化^[10,21,26-27]，却鲜有利用芦苇秆制成菌丝复合材料的案例，后者对于拓展芦苇副产物综合利用途径、改善湖泊沼泽生态环境以及提高区域经济效益具有积极作用。综上，基于RCC组菌丝复合材料较高的压缩强度，确定其为基质筛选结果，用于后续试验。

表2 不同基质制备的菌丝复合材料压缩性能

Table 2 Compressive property of mycelium composite materials produced from different substrates

基质种类 Categories of substrates	密度 Density/ (g·cm ⁻³)	压缩强度 Compressive strength/kPa	最小缓冲系数 Minimum buffer factor
EPS	0.006±0.000 ^h	23.54±10.09 ⁱ	5.53±0.04 ^c
NCS	0.262±0.012 ^a	65.20±11.71 ^{ef}	8.65±0.45 ^a
NCC	0.209±0.035 ^{abcde}	76.34±5.39 ^{de}	8.58±1.55 ^a
NS	0.222±0.009 ^{abcd}	109.38±14.85 ^b	7.17±0.57 ^b
KR	0.157±0.042 ^{efg}	80.39±8.12 ^{de}	8.12±0.23 ^{ab}
KCS	0.183±0.017 ^{bcdef}	82.92±5.04 ^{cd}	7.9±0.53 ^{ab}
KCC	0.166±0.006 ^{cdefg}	73.37±7.41 ^{de}	7.6±1.28 ^{ab}
KS	0.175±0.008 ^{cdefg}	85.66±13.70 ^{cd}	7.07±0.49 ^b
RCS	0.232±0.027 ^{abc}	66.99±6.91 ^{ef}	7.66±0.28 ^{ab}
RCC	0.232±0.026 ^{abc}	140.56±20.59 ^a	8.21±0.42 ^{ab}
RS	0.202±0.017 ^{abcde}	81.07±9.57 ^{de}	8.17±0.59 ^{ab}
CSCC	0.246±0.016 ^{ab}	96.96±7.08 ^{bc}	8.04±0.66 ^{ab}
N	0.132±0.070 ^{fg}	65.49±9.43 ^{ef}	7.9±0.98 ^{ab}
K	0.114±0.049 ^g	43.77±7.92 ^{gh}	8±0.59 ^{ab}
R	0.134±0.071 ^{fg}	37.88±7.41 ^h	8.03±1.17 ^{ab}
CS	0.186±0.115 ^{bcdef}	45.55±6.09 ^{gh}	8.01±0.19 ^{ab}
CC	0.156±0.087 ^{defg}	73.43±1.61 ^{de}	7.16±0.56 ^b
S	0.147±0.086 ^{efg}	52.99±4.07 ^{fg}	8.55±1.03 ^a

注：NCS为落麻与棉籽壳，NCC为落麻与玉米芯，NS为落麻与木屑，KR为红麻与芦苇秆，KCS为红麻与棉籽壳，KCC为红麻与玉米芯，KS为红麻与木屑，RCS为芦苇秆与棉籽壳，RCC为芦苇秆与玉米芯，RS为芦苇秆与木屑，CSCC为棉籽壳与玉米芯，N为落麻，K为红麻，R为芦苇秆，CS为玉米芯，CC为玉米芯，S为木屑，下同。

Note: NCS is noil and cotton seed shell, NCC is noil and corn cob, NS is noil and sawdust, KR is kenaf and reed straw, KCS is kenaf and cotton seed shell, KCC is kenaf and corn cob, KS is kenaf and sawdust, RCS is reed straw and cotton seed shell, RCC is reed straw and corn cob, RS is reed straw and sawdust, CSCC is cotton seed shell and corn cob, N is noil, K is kenaf, R is reed straw, CS is corn cob, CC is corn cob, S is sawdust, the same as below.

2.2.2 不同基质菌丝复合材料外观及微观形态分析

根据表2差异性分析结果，分别将压缩强度在a~c、d~e、f~h的基质定为高、中、低3个水平，选择RCC、CC、R组为高、中、低水平的代表基质，对该3种材料的外观、体视显微结构、SEM微观结构进行分析，以阐明材料外观及微观结构与压缩性能的关系。通过分析样品外观形态（图2）可知，不同材料表面均形成致密、完整的保护性菌丝层，呈白色至棕褐色。其中RCC组菌丝层为3组中最厚实且富有弹性；CC组菌丝层厚度次之，R组则厚度较薄，触感较粗糙。

如图2体视显微结构可知，RCC组菌丝密度较高，基质颗粒间分布的白色菌丝团块较浓厚；R组菌丝密度次之，菌丝体较稀薄，呈雾状覆盖于基质之上；CC组菌丝密度较低，菌丝体呈点状或线状附着于基质上。不同基质会使菌丝复合材料在形态学和力学性能上表现出差异，这是因为不同植物种类、不同类型、不同产地的基质会影响菌丝体多糖、脂质、几丁质等的含量及比例^[10]，进而影响菌丝体生长状态及菌丝网络结构的形成，并通

过相关性能测试表现出来^[29]。

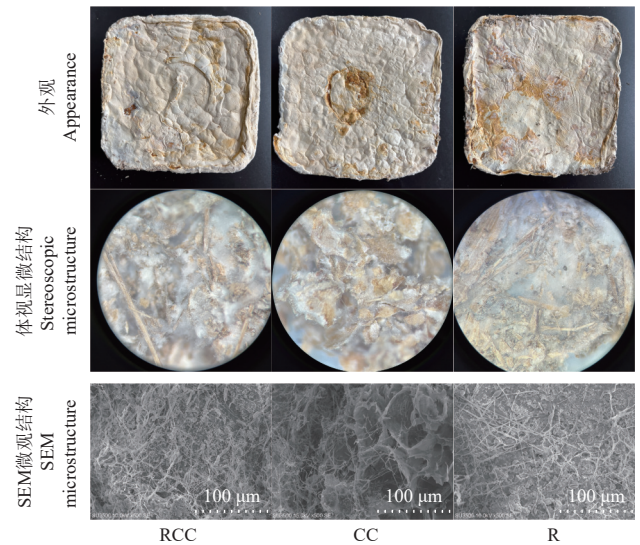


图2 RCC、CC及R试样外观、体视显微结构及SEM微观结构图

Fig.2 Appearance, stereoscopic microstructure and SEM microstructure diagram of RCC, CC and R group test samples

如图2 SEM微观结构可知，RCC组材料内部形成了密度较高的菌丝网络结构，R组网络结构密度次之，CC组网络结构密度较低。尽管CC组难以形成稠密的网络结构，但其在材料表面形成了较厚的菌丝层，说明玉米芯能提供较丰富的营养物质，促使菌丝良好生长；尽管R组表面菌层较稀薄，但其能为菌丝融合与联结提供锚点，以构成复杂的菌丝网络结构。因此，将芦苇秆（R）和玉米芯（CC）两种基质复配后，通过发挥各自优势，使复配基质的压缩强度较2种单配基质有了显著提升。

2.3 基质粒径筛选

本研究对不同基质粒径制备菌丝复合材料的密度、压缩强度和最小缓冲系数进行了分析，表3结果显示，密度最大的菌丝复合材料为0.075~2.000 mm组（0.239 g/cm³），密度最小为0.850~2.000 mm组（0.175 g/cm³）；0.075~2.000 mm组的菌丝复合材料在相对形变10%的压缩强度（189.44 kPa）显著（ $P<0.05$ ）高于其他粒径组，最小缓冲系数显著低于0.850~2.000、0.250~0.850 mm组。以上结果表明，不同基质粒径对菌丝复合材料的密度、压缩强度和最小缓冲系数产生显著性差异。菌丝复合材料的密度、压缩强度随着基质粒径的减小而增大，并在0.075~2.000 mm组中达到最高水平，材料的密度变化趋势与压缩强度呈正相关关系，这和EPS密度与抗压强度的关系相似^[30]。菌丝复合材料的最小缓冲系数随着基质粒径的减小而减小，并在0.075~2.000 mm组中达到最低水平，意味着0.075~2.000 mm组材料对外力的缓冲效果最佳。造成以上试验现象的原因可能是，当粒径较大时，基质颗粒间隙较大，菌丝在生长过程中难以完全填充这些孔隙，导致材料支撑外力的作用有限。当粒径减小，基质间隙随之减小，颗粒比表面积增大，这使菌丝转化吸收更多营养物质，遍布并填充较多孔隙，

使得材料的抗压性能提高。然而,随着菌丝不断生长,较小的孔隙被快速填充,材料内部空气量迅速下降,菌丝的生长进程受到制约。而 0.075~2.000 mm 组较广的粒径范围既能使菌丝获取足够营养,也为菌丝提供了较高空气量,因此菌丝得以迅速生长、填充孔隙,使材料的抗压性能得到进一步提高。侯佳希^[21]通过粒度筛选试验发现 0.250~0.850 mm 玉米秸秆下的多孔菌丝材料压缩强度较高 (93.02 kPa),而本研究中 0.075~2.000 mm 粒度下菌丝复合材料压缩强度较之提高了 51%。综上,0.075~2.000 mm 组因其较高的压缩强度及优异的缓冲性能,确定为基质粒径筛选结果,用于后续试验。

表 3 不同基质粒径制备的菌丝复合材料压缩性能

Table 3 Compressive property of mycelium composite materials produced from different partial sizes of substrate

基质粒径 Partial sizes of substrate/mm	密度 Density/(g·cm ⁻³)	压缩强度 Compressive strength/kPa	最小缓冲系数 Minimum buffer factor
0.850~2.000	0.175±0.007 ^c	61.01±7.47 ^c	9.78±0.58 ^a
0.250~0.850	0.176±0.005 ^c	84.26±16.37 ^c	9.48±0.47 ^a
0.075~0.250	0.197±0.008 ^b	129.12±37.04 ^b	8.99±1.10 ^{ab}
0.075~2.000	0.239±0.005 ^a	189.44±31.54 ^a	8.15±0.36 ^b

2.4 接种量优化

本研究对不同接种量制备菌丝复合材料的密度、压缩强度与最小缓冲系数进行了分析,表 4 结果显示,密度最大为 7.5% 组 (0.248 g/cm³),最小为 5.5% 组 (0.210 g/cm³),材料密度随接种量增大呈逐渐上升的变化趋势。在相对形变 10% 时,接种量 7.5% 组材料的压缩强度 (185.22 kPa) 最高,材料压缩强度随接种量增大呈先升高后降低再升高再降低的变化趋势。接种量 7.5% 组材料的最小缓冲系数达到最低,除 3.5%、7.5%、8.5% 组的最小缓冲系数显著 ($P<0.05$) 低于 4.5% 组外,其余组间差异不显著 ($P>0.05$)。

表 4 不同接种量下菌丝复合材料的压缩性能

Table 4 Density and compressive strength of mycelium composite materials at different inoculation amounts

接种量 Inoculation amounts/%	密度 Density/(g·cm ⁻³)	压缩强度 Compressive strength/kPa	最小缓冲系数 Minimum buffer factor
3.5	0.222±0.005 ^{bc}	146.08±26.91 ^{bc}	8.52±1.08 ^b
4.5	0.222±0.009 ^{bc}	161.80±13.96 ^{ab}	11.75±2.43 ^a
5.5	0.210±0.016 ^c	116.30±21.74 ^c	9.55±1.22 ^{ab}
6.5	0.217±0.006 ^{bc}	123.86±16.32 ^c	9.32±2.7 ^{ab}
7.5	0.248±0.022 ^a	185.22±20.09 ^a	8.41±0.94 ^b
8.5	0.233±0.017 ^{ab}	143.76±23.66 ^{bc}	8.81±1.66 ^b

当接种量较低时 (3.5%),有限的菌种仅形成较稀疏的菌丝网络,此时基质起主要抗压作用,材料压缩强度较低;当接种量升高时 (4.5%、7.5%),菌种的增多使菌丝扩大生长范围、填充较多基质孔隙,建立稠密的菌丝网络结构,此时主要由菌丝体和基质抵抗外部载荷,压缩强度达到较高水平;然而,当接种量上升至 8.5% 时,过多的菌种使菌丝相互竞争营养源和空气量,部分菌丝体生长受到一定程度的限制,菌丝网络结构密度下降,导致材料的抗压性能降低。陈晨伟等^[14]研究了不同接种量水平 (5%、10%、15%) 对菌丝体材料性能的影响,

结果表明材料的弯曲强度及缓冲性能随接种量增大呈先上升后下降的趋势,当接种量为 10% 时材料性能表现最佳,这与本研究结论相似。

综上,7.5% 接种量因其较高的压缩强度,确定为接种量优化结果,用于后续试验。

2.5 菌丝复合材料与 EPS 对比试验

通过上述筛选与优化试验,得到一套制备菌丝复合材料的最佳工艺参数:*Ganoderma resinaceum* 为供试菌株,芦苇秆与玉米芯 (RCC) 为复配基质,粒径范围为 0.075~2.000 mm,接种量为 7.5%。为了对比该工艺参数下菌丝复合材料与 EPS 板抗压性能的区别,将 *Ganoderma resinaceum* 接种至 RCC 基质上,经培养、干燥等流程制得菌丝复合材料,设置 4 种不同密度的 EPS 板为对照组,利用万能试验机对菌丝复合材料和 EPS 板进行压缩性能表征。表 5 结果显示,菌丝复合材料的密度、压缩强度、最小缓冲系数均显著 ($P<0.05$) 高于 4 种不同密度的 EPS 板,不同密度 EPS 间缓冲性能差异不明显。

表 5 最佳工艺参数下菌丝复合材料及 EPS 的压缩性能

Table 5 Compressive property of mycelium composite materials and EPS at optimal process parameters

试验组 Experimental groups	密度 Density/(g·cm ⁻³)	压缩强度 Compressive strength/kPa	最小缓冲系数 Minimum buffer factor
菌丝复合材料	0.218±0.008 ^a	190.99±40.49 ^a	7.85±0.65 ^a
7.5 kg·m ⁻³ EPS	0.008±0.000 ^c	33.54±0.75 ^c	5.53±0.04 ^b
10.0 kg·m ⁻³ EPS	0.010±0.000 ^{bc}	52.18±0.85 ^c	5.12±0.05 ^b
12.0 kg·m ⁻³ EPS	0.012±0.000 ^{bc}	65.8±2.42 ^{bc}	5.15±0.29 ^b
18.0 kg·m ⁻³ EPS	0.018±0.000 ^b	100.77±1.79 ^b	5.01±0.21 ^b

以上对比试验结果表明,菌丝复合材料具备比 EPS 更优异的压缩强度,结合其可生物降解、生产能耗低、环境友好等优势,具有替代 EPS 的潜力。然而,该材料仍存在密度较大、防水性能差等缺点,限制了材料的进一步推广与应用,是相关领域未来亟待解决的问题。另外,有学者试图将其开发为建筑材料^[25]、防水材料^[31]、过滤材料^[16]、吸声材料^[32]、内饰材料^[25]、隔热材料^[33]等,以进一步延伸菌丝复合材料的应用途径,为今后的研究方向提供了新的思路。

3 结论

本研究对菌株种类、基质种类、基质粒径和接种量进行筛选和优化试验,以压缩强度为评价指标,制得不同菌丝复合材料,通过分析比对材料结构与性能,确定了最佳菌株与基质组合、基质粒径及接种量水平,得到以下主要结论:

1) 菌丝复合材料的压缩强度与其外观特征、微观结构具有一定相关性,压缩强度越高,材料表面菌丝层越致密、完整度越高,菌丝网络结构的密度及复杂程度越高。将芦苇秆 (R) 和玉米芯 (CC) 组配为复合基质 (RCC),通过发挥二者各自优势 (玉米芯提供充足营养,芦苇秆促进菌丝网络结构生成) 可得到压缩性能良好的菌丝复合材料。

2) 由筛选及优化结果可知,采用 *Ganoderma*

resinaceum 为供试菌株、芦苇秆与玉米芯 (RCC) 为培养基质, 在基质粒径为 0.075~2.000 mm、接种量为 7.5% 的工艺参数下能制得压缩强度较高、缓冲性能良好的菌丝复合材料。由以上最佳工艺参数制备菌丝复合材料的压缩强度达到 190.99 kPa, 为 18.0 kg/m³ 发泡聚苯乙烯 (expandable polystyrene, EPS) 的 1.90 倍; 材料密度和最小缓冲系数显著 ($P < 0.05$) 高于不同密度 EPS 板, 需进一步研究以降低菌丝复合材料的密度, 并提升其缓冲性能。

[参 考 文 献]

- [1] 刘文华. 泡沫塑料在缓冲包装上的应用及设计[J]. 塑料科技, 2015, 43(12): 62-65.
LIU Wenhua. Application and design of foamed plastics in cushion packaging[J]. Plastics Science and Technology, 2015, 43(12): 62-65. (in Chinese with English abstract)
- [2] 慕宗宇. 废弃塑料的来源、危害及其回收利用[C]//2021 年全国有机固废处理与资源化利用高峰论坛论文集. 成都: 中国环境科学学会, 2021: 271-275.
- [3] 赵晶晶, 冯雅郡, 朱潇婷, 等. 石油基塑料的昆虫降解研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(7): 2207-2211, 2217.
ZHAO Jingjing, FENG Yajun, ZHU Xiaoting, et al. Review progress of insects feeding and degrading plastics[J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(7): 2207-2211, 2217. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘俊杰, 严晓斌, 张美怡, 等. 中国农作物秸秆资源产量分布及利用分析[J/OL]. 农业资源与环境学报, [2024-06-17]. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0184>.
LIU Junjie, YAN Xiaobin, ZHANG Meiyi et al. Analysis of yield distribution and utilization of crop straw resources in china[J/OL]. Journal of Agricultural Resources and Environment. [2024-06-17]. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2024.0184>. (in Chinese with English abstract)
- [5] 杨传文, 邢帆, 朱建春, 等. 中国秸秆资源的时空分布、利用现状与碳减排潜力[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 1149-1162.
YANG Chuanwen, XING Fan, ZHU Jianchun, et al. temporal and spatial distribution, utilization status, and carbon emission reduction potential of straw resources in China[J]. Environmental Science, 2023, 44(2): 1149-1162. (in Chinese with English abstract)
- [6] 吕冠杰. 探析秸秆综合利用在农业环保治理中的作用[J]. 新农民, 2024(8): 54-56.
LYU Guanjie. Exploring the role of comprehensive utilization of straw in agricultural environmental protection governance[J]. New Farmers, 2024(8): 54-56. (in Chinese with English abstract)
- [7] 田佳旺. 改性芦苇秸秆对硝酸盐氮的吸附及资源化利用的研究[D]. 保定: 河北大学, 2023.
TIAN Jiawang. Study on the Adsorption and Resourceutilization of Nitrate Nitrogen by Modifiedreed straw[D]. Baoding: Hebei University, 2023. (in Chinese with English abstract)
- [8] 王齐, 李晨琦, 张雪松, 等. 芦苇纤维材料的应用及发展趋势[J]. 林业科技, 2023, 48(5): 60-62.
WANG Qi, LI Chenqi, ZHANG Xuesong. Application and development trends of reed fiber materials[J]. Forestry Science & Technology, 2023, 48(5): 60-62. (in Chinese with English abstract)
- [9] 闫顺. 环保阻燃芦苇基纤维板的制备及表征[D]. 保定: 河北大学, 2020.
YAN Shun. Preparation and Characterization of Environmentally Friendly Flame-retardant Reed-based Fiberboard[D]. Baoding: Hebei University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [10] AIDUANG W, CHANTHALUCK A, KUMLA J, et al. Amazing fungi for eco-friendly composite materials: A comprehensive review[J]. Journal of Fungi, 2022, 8(8): 842.
- [11] SANTOS I S, NASCIMENTO B L, MARINO R H, et al. Influence of drying heat treatments on the mechanical behavior and physico-chemical properties of mycelial biocomposite[J]. Composites Part B: Engineering, 2021, 217: 108870.
- [12] JONES M, HUYNH T, JOHN S. Inherent species characteristic influence and growth performance assessment for mycelium composite applications[J]. Advanced Materials Letters, 2018, 9(1): 71-80.
- [13] ELSACKER E, VANDELOOK S, BRANCART J, et al. Mechanical, physical and chemical characterisation of mycelium-based composites with different types of lignocellulosic substrates[J]. Plos One, 2019, 14(7): e0213954.
- [14] 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)
- [15] HOLT G A, MCINTYRE G, FLAGG D, et al. Fungal mycelium and cotton plant materials in the manufacture of biodegradable molded packaging material: Evaluation study of select blends of cotton byproducts[J]. Journal of Biobased Materials and Bioenergy, 2012, 6(4): 431-439.
- [16] AHMADI H. Cellulose-mycelia Foam: Novel Bio-composite Material[D]. Vancouver: University of British Columbia, 2016.
- [17] APPELS F V W, CAMERE S, MONTALTI M, et al. Fabrication factors influencing mechanical, moisture- and water-related properties of mycelium-based composites[J]. Materials & Design, 2019, 161: 64-71.
- [18] GONG W B, LIU W, LU Y Y, et al. Constructing a new integrated genetic linkage map and mapping quantitative trait loci for vegetative mycelium growth rate in lentinula edodes[J]. Fungal Biology, 2014, 118(3): 295-308.
- [19] GONG W, XU R, XIAO Y, et al. Phenotypic evaluation and analysis of important agronomic traits in the hybrid and natural populations of lentinula edodes[J]. Scientia Horticulturae, 2014, 179: 271-276.
- [20] 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[J]. 农业工程学报, 2021, 37(21): 295-302.
CHEN Chenwei, DING Rong, PENG Liucheng. 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)
- [21] 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 Jiaxi. Preparation of Fungal Mycelium/Corn Straw Porous Composite Material[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2020. (in Chinese with English abstract)
- [22] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 硬质泡沫塑料 压缩性能的测定: GB/T 8813-2020 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [23] 梁秀, 王玉龙, 王柳. 泡沫塑料/瓦楞纸板组合结构的缓冲性能[J]. 包装工程, 2016, 37(15): 129-133.
LIANG Xiu, WANG Yulong, WANG Liu. Cushion properties of composite structures with foamed plastic and corrugated paperboard[J]. Packaging Engineering, 2016, 37(15): 129-133.

- (in Chinese with English abstract)
- [24] 聂建军, 潘保华, 李彩萍, 等. 运用正交试验法优化褐黄木耳母种培养基的配方研究[J]. 食用菌, 2020, 28(5): 318-320, 327.
NIE Jianjun, PAN Baohua, LI Caiping, et al. Optimum of stock culture medium formula of *Auricularia fuslosuccinea* by orthogonal test[J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2020, 28(5): 318-320, 327. (in Chinese with English abstract)
- [25] 李享. 菌丝材料的制备工艺及性能研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2022.
LI Xiang. Study on Preparation Technology and Properties of Mycelium Material[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2022. (in Chinese with English abstract)
- [26] ELSACKER E, VANDELOOK S, VAN Wylick A, et al. A comprehensive framework for the production of mycelium-based lignocellulosic composites[J]. *Science of The Total Environment*, 2020, 725: 138431.
- [27] 于博. 真菌菌丝/木屑复合材料生物成型及性能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2014.
YU Bo. Fungal Mycelium/Sawdust Composite Material Biological Molding and Performance[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [28] PENG L C, YI J, YANG X Y, et al. Development and characterization of mycelium bio-composites by utilization of different agricultural residual byproducts[J]. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 2023, 8(1): 78-89.
- [29] MAJIB N M, SAM S T, YAACOB N D, et al. Characterization of fungal foams from edible mushrooms using different agricultural wastes as substrates for packaging material[J]. *Polymers*, 2023, 15(4): 873.
- [30] 霍银磊, 张新昌. 基于能量吸收效率的泡沫塑料缓冲材料选择[J]. 中国塑料, 2007, 21(4): 54-57.
HUO Yinlei, ZHANG Xinchang. Cushioning foam selection based on energy absorption efficiency[J]. *China Plastics*, 2007, 21(4): 54-57. (in Chinese with English abstract)
- [31] 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.
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)
- [32] PELLETIER M G, HOLT G A, WANJURA J D, et al. Acoustic evaluation of mycological biopolymer, an all-natural closed cell foam alternative[J]. *Industrial Crops and Products*, 2019, 139: 111533.
- [33] 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)

Effects of preparation process on the compressive property of mycelium composite materials

ZHANG Haoyue, HUANG Chengzi, PENG Yuande, ZHOU Yingjun, GONG Wenbing, XIE Chunliang^{*}

(Institute of Bast Fiber Crops, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Changsha 410205, China)

Abstract: Agricultural straw (such as reed straw) has been underutilized to result in wasted resources and environmental pollution in recent years. A novel biodegradable packaging material, mycelium composite material can be expected to replace the foamed plastics. Fungi strains are also used to degrade agricultural straw, in order to improve the utilization rate of agricultural straw. This study aims to optimize the preparation process of mycelium composite materials with high compressive properties. A systematic investigation was implemented on the effects of fungi strains, inoculum amounts, substrate types, and particle sizes on the compressive property of mycelium composite material using compressive strength as the evaluation index. A total of ten fungi strains were selected, including *Ganoderma resinaceum*, *Pleurotus ostreatus*, *Pleurotus sajor-caju*, *Trametes sanguinea*, *Pleurotus geesteranus*, *Flammulina filiformis*, *Agrocybe aegerita*, *Pholiota squamosa*, *Lentinus edodes*, and *Hericium erinaceus*. The fungi strains were inoculated into kenaf and cottonseed hull compound substrate, in order to cultivate mycelium composite material. Results showed that the compressive strength of *Ganoderma resinaceum* group was significantly higher than the rest strains, due mainly to the compact external mycelial layer and tight hyphal network. The high growth rate was also attributed to a more compact mycelium network structure. *Ganoderma resinaceum* was inoculated into 17 substrates, including noil, kenaf, reed straw, cottonseed hull, corn cob, sawdust, and eleven compound substrates composed of the above six raw materials. The best compressive strength was achieved in the RCC group (reed straw and corn cob). The reason was that the reed straw and corn cob were provided the appropriate void structure and sufficient nutrients, which was conducive to the dense hyphal network. Then *Ganoderma resinaceum* was inoculated into RCC for the particle sizes and inoculum amounts. The highest compressive strength was achieved in the substrate with a wide range of particle sizes (0.075-2.000 mm). The substrate was combined with the large and small particle sizes, in order to provide the suitable nutrition and growth space, thus promoting the formation of a dense network structure of mycelia. The highest compressive strength was achieved in the 7.5% of inoculum amount. The mycelium colonization was weak in the case of low inoculum amount, thus resulting in the lower compressive strength of the material. Meanwhile, the excessive inoculation amount also caused the mycelia to compete for nutrients and space, thus reducing the density of the mycelium network structure for the low compressive strength of the material. An optimal combination of parameters was then achieved to produce the mycelium composite material: *Ganoderma resinaceum* as the tested strain, reed straw, and corn cob as the compound matrix, 0.075-2.000 mm of particle size, and 7.5% of inoculum amount. The high compressive strength and excellent buffering performance were obtained under the conditions. The compressive strength of the mycelium composite material reached 190.99 kPa at 10% relative deformation, which was 1.9 times that of 18.0 kg/m³ EPS. The findings can provide a strong reference to optimize the parameters and compressive properties of mycelium composite material. The positive significance was offered to improve the utilization of agricultural by-products, such as reed straw.

Keywords: compressive strength; agricultural wastes; biomass; preparation process; mycelium composite material