文章类型：论文|刊号（ISSN）：2630-4678 /（中图刊号）：650GL004

乙二醛-丙烯酰胺复配改性木材的防霉与抗白蚁性能

李腊梅　谢桂军
广东省林业科学研究院/广东省森林培育与保护利用重点实验室/粤港澳大湾区生态系统保护修复国家林业和草原局重点实验室
DOI:10.32629/as.v9i9.4308

[摘　要] 为评价乙二醛-丙烯酰胺复配体系对木材生物耐久性的改善效果,以马尾松(Pinus massoniana Lamb.)木材为研究对象,采用乙二醛和丙烯酰胺复配药液进行浸渍处理,并通过加热方式促进药剂固化。处理材经干燥和热处理后,分别依据GB/T 18260—2015和GB/T 18261—2013进行室内抗白蚁试验和防霉试验。结果表明,复配处理材对可可球二孢菌、桔青霉、绿色木霉和黑曲霉均表现出较强的抑制作用,防治效力为100%;与未处理对照相比,处理材的质量损失率由67.6%降低至0.2%,白蚁蛀蚀等级为9.5。上述结果表明,乙二醛-丙烯酰胺复配浸渍-热处理能够显著改善马尾松木材的防霉和抗白蚁性能,但其长期耐久性、药剂浸出性及作用机制仍需进一步研究。
[关键词] 乙二醛；丙烯酰胺；马尾松；木材改性；防霉；抗白蚁
中图分类号：S72　文献标识码：A

Mold Resistance and Termite Resistance of Wood Modified with a Glyoxal–Acrylamide Formulation

Lamei Li　Guijun Xie
Guangdong Academy of Forestry/Guangdong Provincial Key Laboratory of Forest Silviculture, Protection and Utilization/Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration on Ecosystem Conservation and Restoration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area

[Abstract] To evaluate the improvement in the biological durability of wood conferred by a glyoxal–acrylamide formulation, Masson pine (Pinus massoniana Lamb.) wood was selected as the study material. The wood specimens were impregnated with a mixed glyoxal–acrylamide solution, and heating was subsequently applied to promote curing of the chemicals. After drying and thermal treatment, laboratory termite-resistance and mold-resistance tests were conducted in accordance with GB/T 18260-2015 and GB/T 18261-2013, respectively. The results showed that the co-modified wood exhibited strong inhibitory effects against Botryodiplodia theobromae, Penicillium citrinum, Trichoderma viride, and Aspergillus niger, with a control efficacy of 100%. Compared with the untreated control, the mass-loss rate of the treated wood decreased from 67.6% to 0.2%, while the termite damage rating was 9.5. These results indicate that glyoxal–acrylamide co-impregnation followed by thermal treatment can significantly improve the mold resistance and termite resistance of Masson pine wood. However, its long-term durability, chemical leachability, and underlying mechanisms require further investigation.
[Key words] Glyoxal; acrylamide; Masson pine; wood modification; mold resistance; termite resistance

1 引言

木材作为一种重要的建筑和家具材料,易受霉菌、腐朽真菌和白蚁的生物降解,从而影响其耐久性和应用价值。过去主要采用铬铜砷(CCA)和铜有机防腐剂处理木材,取得较好防护的效果,但面临造成重金属污染的环境压力,且无法有效抑制霉菌。人们便转向研究有机防腐技术,Kartal,S.N.研究发现0.5%和1.0%浓度下二癸基二甲基铵四氟硼酸盐(DBF)处理的木材在霉菌和白蚁抵抗测试中表现出良好的防护性能[1]。Arango,R.A.使用N,N-萘酰基羟胺(NHA)处理的南部黄松和道格拉斯冷杉表现出良好的抗白蚁能力,与传统防腐剂的效果相当[2]。Kartal,S.N.使用0.5%浓度的存香树(L.orientalis)提取物处理苏格兰松(Pinus sylvestris L.)木材,发现其对部分真菌表现出抑制作用,但对

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

某些类型的白腐和霉菌效果有限[3]。Dong, Y.利用聚羧酸(CA和BTCA)化学交联改性竹材,处理竹材达到防霉等级1和较高的白蚁死亡率[4]。Hadi, Y. S.利永化学烟熏化合物设计的木材防腐剂处理木材之后,其木材表现出100%的白蚁死亡率,且重量损失下降至11.2%[5]。Clausen, C. A.结合硼酸盐的基础配方,添加Voriconazole、Thiabendazole或Thujaplicin,其提出的多组分生物杀虫剂在抑制棕腐、白腐真菌和霉菌方面提供了有效保护,同时对白蚁也表现出一定驱避作用[6]。

此外,纳米颗粒可改善木材的防护性能和耐久性,使用纳米氧化锌、锌硼酸盐和氧化铜真空浸泡处理黑松木材,发现纳米锌硼酸对白腐真菌有显著的抑制作用,并能有效抵抗白蚁取食[7]。采用了实验设计对比分析的研究方法,评估了不同处理(纳米铜、纳米锌、纳米硼等)在木材中对抗真菌、白蚁及其浸出特性的效果,纳米铜和纳米锌展现出良好的浸出抗性和抗真菌能力,纳米锌尤其对白蚁表现突出,但防霉效果有限[8]。

乙二醛又称草醛、甘醛,具有反应活性高和摩尔体积小等特点,可制备许多系列精细化工产品,在纺织印染、造纸、皮革、香料、建材、医药、农药、水处理及洗涤业、国防、卫生及化妆品、石油和冶金工业、食品工业、环保等方面具有广泛用途。丙烯酰胺是一种重要的化工原料,丙烯酰胺固体在室温下很稳定,当处于熔点或氧化条件下,则很容易发生聚合反应。为寻找合适的、绿色环保、可再生、可持续、可生物降解的木材改性剂,本文将乙二醛和丙烯酰胺制成复配改性剂,用于改性马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.)木材,达到防霉防白蚁目的。

2 材料与方法

2.1材料

试验木材为马尾松(*Pinus massoniana* Lamb.),试件尺寸为34cm(长)×6cm(宽)×2.5cm(厚)。木材初始含水率为15%,密度为0.50 g/cm^3。试件随机分组,每组包括3块木材用于浸渍处理。试验所用乙二醛为质量分数40%的水溶液,购自天津科密欧；丙烯酰胺为质量分数50%的水溶液,购自广州万思拓材料科技有限公司。

2.2木材浸渍与热处理

按照试验设计配制乙二醛-丙烯酰胺复配药液。将木材试件置于处理罐中,采用李宾空细胞法进行浸渍处理。处理结束后取出试件,去除表面残余药液并进行自然干燥。随后,将试件置于蒸汽热处理罐中,在108 ℃条件下处理25 min；之后以10 bar蒸汽吹扫10 min,再在160 ℃条件下进行电热固化1 h。

2.3抗白蚁试验

将改性处理后的木材锯制为25 mm×25 mm×6 mm(顺纹)大小的试件,每组设置5个平行试件。按照GB/T 18260—2015木材防腐剂对白蚁毒效实验室试验方法,进行室内抗白蚁测试,并评定白蚁蛀蚀等级。

2.4防霉性能试验

将改性处理后的木材锯制尺寸为20 mm×5 mm×50 mm (顺纹)大小的试件,每组设置24个平行试件。按照GB/T 18261-2013防霉剂对木材霉菌及变色菌防治效力的试验方法,选用可可球二孢菌、桔青霉、绿色木霉和黑曲霉进行接种培养。培养结束后,根据试件表面菌落覆盖情况进行分级,并评定防治效力。

3 结果

3.1白蚁试验

乙二醛-丙烯酰胺复配改性木材和未处理木材的抗白蚁试验如表1和图1。表1显示,乙二醛-丙烯酰胺复配处理显著降低了马尾松木材在白蚁试验中的质量损失。复配处理材的质量损失率为0.2%,明显低于未处理材的67.6%,质量损失率降低了67.4个百分点,表明处理材受到的白蚁取食和蛀蚀较少。复配处理材中未观察到存活白蚁,蚁蛀等级为9.5；相比之下,未处理材的蚁蛀等级仅为4,且质量损失率较高。按照蚁蛀等级越高表示蛀蚀程度越轻的评价原则,复配处理材表现出较好的抗白蚁性能。图1进一步直观反映了两类试件的白蚁蛀蚀差异。与未处理材相比,乙二醛-丙烯酰胺复配处理材表面及边缘区域的蛀蚀痕迹较少,试件整体结构保持较为完整；未处理材则出现较明显的取食痕迹和表面破坏。图1所示的形貌差异与表1中的质量损失率和蚁蛀等级结果基本一致,说明复配浸渍-热处理能够有效减轻白蚁对马尾松木材的侵蚀。

表1 白蚁测试结果

样品名称	处理方式	质量损失率(%)	白蚁存活率(%)	蚁蛀等级
E	乙二醛-丙烯酰胺复配处理	0.2	0	9.5
F	未处理	67.6	32.4	4



图1 乙二醛-丙烯酰胺复配处理松木白蚁蛀蚀形貌

3.2防霉试验

表2显示,乙二醛-丙烯酰胺复配处理材对4种供试霉菌均表现出较强的抑制效果。对于可可球二孢菌、桔青霉、绿色木霉和黑曲霉,复配处理材的防治效力均达到100.0%,表明在本试验条件下,处理材表面未出现或基本未出现可见霉菌生长。相比之下,未处理材对4种供试霉菌的防治效力均为0,说明其对霉菌侵染缺乏有效防护能力。从不同菌种的试验结果来看,复配处理材

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

对所选的丝状真菌均保持了相同的防护效果，说明该处理体系在本试验范围内具有较为广泛的防霉作用。然而，由于表2仅列出了防治效力的最终结果，尚缺少菌落覆盖等级、菌落面积或重复试件的原始评分，因此目前只能说明处理材具有明显的防霉效果，尚不能进一步比较4种霉菌对处理体系的敏感性差异。图2显示，复配处理材表面基本保持完整，未见明显的菌落覆盖，而未处理材表面出现了较明显的霉菌生长现象。图像观察结果与表2中的防治效力结果相互印证，进一步说明乙二醛-丙烯酰胺复配处理能够抑制供试霉菌在马尾松木材表面的生长。

表2 防霉测试结果

样品名称	菌种	防治效力(%)
E	可可球二孢菌	100.0
	桔青霉	100.0
	绿色木霉	100.0
	黑曲霉	100.0
F	可可球二孢菌	0
	桔青霉	0
	绿色木霉	0
	黑曲霉	0

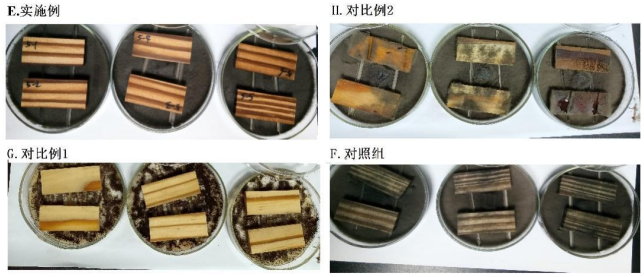


图2 乙二醛-丙烯酰胺复配处理松木抗霉形貌

4 讨论

本研究结果表明，乙二醛-丙烯酰胺复配浸渍和热处理能够改善马尾松木材对供试霉菌的抵抗能力。处理材对可可球二孢菌、桔青霉、绿色木霉和黑曲霉的防治效力均达到100%，而未处理对照组未表现出明显的防霉效果。该结果说明，复配处理可能通过降低木材内部可利用营养物质的有效性、限制水分迁移以及提高木材基体的致密性，抑制霉菌孢子的萌发和菌丝生长。然而，本研究尚未开展木材吸湿性、孔隙结构、化学官能团及药剂浸出性分析，因此上述作用机制仍需通过傅里叶变换红外光谱、扫描电子显微镜、吸水率测试和浸出试验进一步验证。

抗白蚁试验结果显示，复配处理材的质量损失率低于对照组，且蛀蚀等级较高，表明处理材能够降低白蚁取食或侵蚀程度。乙二醛和丙烯酰胺经热处理后可能在木材细胞壁或细胞腔中形成具有一定稳定性的交联结构，从而减少白蚁可取食的组分，并提高木材的物理阻隔作用。此外，处理过程中形成的部分低分子反应产物也可能对白蚁产生驱避或毒害作用。但是，在缺乏白蚁死亡率、取食率、药剂保留量和浸出后抗白蚁数据的情况下，尚不能判断该防护效果主要来源于毒杀作用、驱避作用还是木材结构变化。

已有研究表明，有机防腐剂、硼酸盐、纳米锌和纳米铜等处理体系能够在不同程度上提高木材的防霉、抗腐朽和抗白蚁性能，但其效果通常受到药剂类型、处理浓度、木材种类、试验菌种及浸出条件的影响[9-14]。与部分含重金属防腐体系相比，乙二醛-丙烯酰胺复配体系具有原料易得和热固化处理方便等特点，但其环境安全性不能仅依据防霉和抗白蚁效果进行判断。后续研究应重点评价游离甲醛或其他挥发性反应产物、药剂浸出率、处理材力学性能、尺寸稳定性以及长期户外耐久性。

本研究仍存在一定局限性。首先，试验处理组数量较少，尚未系统分析乙二醛与丙烯酰胺配比、药液浓度及热处理参数对防护效果的影响。其次，当前结果主要来源于室内短期试验，不能直接代表木材在户外环境中的长期使用性能。再次，原始数据中尚缺少重复试件的离散性指标，因此无法充分评价处理效果的稳定性。未来应通过正交试验或响应面法优化配方，并结合药剂浸出、结构表征、力学性能和人工气候老化试验，对该复配改性体系进行综合评价。

5 结论

在本试验条件下，乙二醛-丙烯酰胺复配浸渍及热处理能够提高马尾松木材对可可球二孢菌、桔青霉、绿色木霉和黑曲霉的抵抗能力，处理材对上述供试霉菌的防治效力达到100%。与对照组相比，复配处理材表现出较低的白蚁侵蚀程度和较高的蛀蚀等级，显示出一定的抗白蚁潜力。

[参考文献]

[1]Kartal,S.N.,et al.(2006)."Laboratory evaluation of boron-containing quaternary ammonia compound, didecyl dimethyl ammonium tetrafluoroborate(DBF)for control of decay and termite attack and fungal staining of wood."Holz als Roh-und Werkstoff 64(1):62-67.

[2]Arango,R.A.,et al.(2006)."Natural durability of tropical and native woods against termite damage by Reticulitermes flavipes(Kollar)."International Biodeterioration and Biodegradation 57(3):146-150.

[3]Kartal,S.N.,et al.(2012)."Preliminary evaluation of storax and its constituents: Fungal decay, mold and termite resistance."International Biodeterioration and Biodegradation 70:47-54.

[4]Dong,Y.,et al.(2021)."Evaluation of anti-mold,termite resistance and physical-mechanical properties of bamboo cross-linking modified by polycarboxylic acids."Construction and Building Materials 272.

[5]Hadi,Y.S.,et al.(2023)."COLOUR CHANGE AND EFFECTIVITY OF CHEMICALLY-SMOKED BASED PRESERVATIVES COMPOUNDS ON THREE FAST-GROWING TROPICAL TREE SPECIES WOOD."Journal of Tropical Forest Science 35(2):118-129.

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.

[6]Clausen,C.A.and V.Yang (2007)."Protecting wood from mould, decay, and termites with multi-component biocide systems."International Biodeterioration and Biodegradation 59(1):20-24.

[7]Mantanis,G.,et al.(2014)."Evaluation of mold, decay and termite resistance of pine wood treated with zinc-and copper-based nanocompounds." International Biodeterioration and Biodegradation 90:140-144.

[8]Kartal,S.N.,et al.(2009)."Do the unique properties of nanometals affect leachability or efficacy against fungi and termites?"International Biodeterioration and Biodegradation 63(4):490-495.

[9]Terzi,E.,et al.(2016)."Role of various nano-particles in prevention of fungal decay, mold growth and termite attack in wood, and their effect on weathering properties and water repellency."International Biodeterioration and Biodegradation 107:77-87.

[10]Liang,G.,et al.(2024)."Effectiveness of organic biocide in long-term protection of bamboo against mold fungi with Trametes versicolor pre-treatment."International Biodeterioration and Biodegradation 188.

[11]Betlej,I.,et al.(2024)."Graphene Oxide as a Factor Modifying the Properties of Wood."Coatings 14(3).

[12]Kartal,S.N.,et al.(2020)."Performance of fluoride and boron compounds against drywood and subterranean termites and decay and mold fungi."Journal of Forestry Research 31(4):1425-1434.

[13]Cai,Y.,et al.(2024)."PREPARATION AND PERFORMANCE OF ANTI MILDEW GLUED LAMINATED BAMBOO."Wood Research 69(1):9-22.

[14]Han,G.,et al.(2012)."Performance of zinc borate-treated oriented structural straw board against mold fungi, decay fungi, and termites-a preliminary trial."BioResources 7(3):2986-2995.

作者简介：

李腊梅(1990--),女,汉族,湖北恩施人,硕士研究生,高级工程师,研究方向：木材加工利用。

Copyright © This work is licensed under a Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.