DOI:10.12326/j.2096-9694.2022229

氨化废纸纤维增强酵母蛋白胶黏剂的研究

吴晓航，侯贤锋，孙 瑾，李 健，高振忠
（华南农业大学，广东广州 510642）

摘要：酵母蛋白具有生产效率高的优点，可用于制备蛋白质胶黏剂。本研究以酵母蛋白为基质、氨化废纸纤维为增强骨架，构建酵母蛋白质/交联剂/纤维的共交联纤维增强的蛋白胶体系，成功制备胶合板用胶黏剂。研究结果表明：环氧交联剂在蛋白质基质与纤维骨架的侧链间形成密集的化学连接，提高了蛋白质与纤维间的界面结合力；氨化废纸纤维增强酵母蛋白胶具有良好的结合强度与耐水性能，在氨化废纸纤维添加量为胶液质量的1.5%时，制备的胶合板Ⅰ、Ⅱ类湿强度分别达到0.79 MPa和1.76 MPa，满足GB/T 9846—2015《普通胶合板》中Ⅰ、Ⅱ类胶合板的强度要求。

关键词：酵母蛋白；氨化废纸纤维；胶黏剂；胶合板
中图分类号：TS653.3；TQ432.7 文献标识码：A 文章编号：2096-9694（2023）03-0019-08

Yeast Protein Adhesive Reinforced with Ammoniated Waste Paper Fiber

WU Xiaohang，HOU Xianfeng，SUN Jin，LI Jian，GAO Zhenzhong
（South China Agricultural University，Guangzhou 510642，Guangdong，China）

Abstract: Yeast protein has the advantages of high production efficiency, which is used to prepare protein adhesives. In this study, the plywood adhesive with excellent performance was successfully developed using yeast protein/crosslinker/fiber co-crosslinking fiber reinforcement protein adhesive system, which apllied yeast protein as the matrix and ammoniated waste paper fiber as the reinforced skeleton. With the cross-linking of epoxy cross-linker, dense chemical connections were formed between the multiple side groups of the fiber skeleton and protein matrix, which improved the interfacial bonding between protein and fiber. The fiber reinforcement substantially improved the adhesive bonding performance. Adding 1.5% of ammoniated waste paper fiber to the adhesive, the wet shear strengths of plywood reached 0.79 MPa for type I and 1.76 MPa for type II respectively, which met the strength requirements of plywood class I and II in GB/T 9846—2015 "*Plywood for general use*".

Key words: yeast protein; ammoniated waste paper fiber; adhesive; plywood

目前胶合板生产用胶黏剂主要是醛基胶黏剂，其原料主要来源于不可持续的石油化工产业[1]。在日益增长的环境压力下，生物基胶黏剂的研究成为热点。其中，大豆蛋白胶因无毒、无污染、可分解、反应活性高等优点备受关注[2]。然而，大豆是一种重要的粮食作物，涉及国家粮食安全问题。因此，拓宽蛋白质来源成为蛋白基胶黏剂的一个重要研究方向。

啤酒废酵母是啤酒酿造后沉降于发酵罐底部的失活酵母，是啤酒工业中主要的副产物。据估算，每生产1 kL啤酒，大约产生1~1.5 kg的废酵母[3]。2021年我国啤酒产量为356.9亿L，产生约

收稿日期：2022-12-19；修改日期：2023-02-11
作者简介：吴晓航（1999—），男，硕士研究生。
通讯作者：高振忠，男，教授。Email：zzgao@scau.edu.cn

45万t的啤酒废酵母。目前，啤酒废酵母的主要处理方式是干燥后作为饲料或直接排放，有效成分没有得到充分利用，造成资源浪费，同时污染环境[4]。啤酒废酵母的蛋白质含量为45%~60%，高于大豆（39%~45%），且其价格也比大豆低，是理想的蛋白胶蛋白质的原料[5-6]。此外，酵母细胞的大规模培育技术早已成熟，相比于大豆蛋白，酵母蛋白的生产具有产量稳定、效率高等一系列的优点[7]。国内外学者展开了使用啤酒废酵母制备木材胶黏剂的研究，并初步验证了该利用途径的可行性[8-9]。但目前还没有关于耐热水的酵母蛋白基胶黏剂的报道，酵母蛋白的胶接潜力尚未得到充分开发，其制备的胶合板耐水性不足，难以应用于潮湿环境。这可能是由于先前研究中对啤酒废酵母的预处理工艺过于简单，胶黏剂中存在多糖、脂类以及核苷酸等大量的杂质，导致酵母蛋白的性能与市售大豆分离蛋白存在一定差距[10]。因此，需要对啤酒废酵母中的蛋白质进行提取、纯化等处理。

除此之外，添加纤维填料是提升聚合物力学性能的一种简单而有效的方法。加入适量的植物纤维可以修复蛋白胶中不连续的粘附层，起到分散和承载应力的作用，从而提升胶黏剂的胶接性能[11]。废纸纤维主要由多种植物纤维组成，来源广泛、价格低廉、绿色环保，同时还具有高强度、高模量、低密度等优点，能够充当胶黏剂中的增强相[12]。但普通废纸纤维与蛋白质基质之间的结合主要依靠有限的机械互锁和氢键作用力，容易出现界面脱粘现象，导致纤维的增强作用失效。化学键合是一种增强复合材料界面结合性能的有效方式，通过在纤维与蛋白质基质间建立化学键连接来提高界面结合性能，纤维与蛋白质基质间的化学键密度越高，界面结合越稳固[13]。

本研究以啤酒废酵母为原料提取酵母蛋白质。采用乙二胺和环氧氯丙烷对废纸纤维进行氨化改性，制备具有高反应活性的氨化废纸纤维。以酵母蛋白为基质，氨化废纸纤维为增强相，三羟甲基丙烷三缩水甘油醚为交联剂，构建蛋白质/交联剂/纤维的共交联纤维增强的蛋白胶体系，旨为制备绿色、高性能的胶合板用胶提供一种新思路。

1 材料与方法

1.1 试验材料

啤酒废酵母干粉：黄棕色，100目，蛋白质的质量分数为45.64%，外购。

废纸：办公室废弃打印纸，纯白色，A4，70 g/m^2。自行收集。

桉木（*Eucalyptus* spp.）单板：30 cm×30 cm×2.2 mm（长×宽×厚），含水率10%~13%，外购。

试剂：三羟甲基丙烷三缩水甘油醚（Trimethylolpropanetriglycidylether，TTE）分析纯。氢氧化钠（NaOH）分析纯、盐酸（分析纯）、丙酮（分析纯）、环氧氯丙烷（Epichlorohydrin，EPI）分析纯、乙二胺（Ethylenediamine，EDA）分析纯。均外购。

1.2 仪器设备

电热鼓风干燥箱、恒温水浴锅、离心机、高速剪切仪、电动搅拌器、平板硫化机、万能力学试验机、旋转黏度计、傅里叶变换红外光谱仪、X射线衍射分析仪、差示热量扫描仪、扫描电镜等。

1.3 制备工艺

氨化废纸纤维增强酵母蛋白胶制备胶合板的示意图，如图1所示。

1.3.1 酵母蛋白质的提取　取120 g啤酒废酵母干粉，加入600 g质量分数为2%的NaOH溶液，在80 °C下搅拌破壁1 h。随后，用盐酸溶液将酵母裂解液的pH值调至9左右，倒入离心管中，在7 000 r/min下离心10 min。取上清液，调节pH值至4.1~4.3，静置2 h，随后在7 000 r/min下离心20 min，取沉淀，重复水洗直至中性。最后将沉淀再次离心浓缩，获得酵母分离蛋白（yeast protein isolate，YPI），膏状，固体含量为30%。

1.3.2 氨化废纸纤维的制备　将办公废纸放入水中浸泡24 h后，用高速剪切仪以10 000 r/min的转速疏解15 min。疏解后的纤维用筛网过滤，置于103 °C的烘箱中干燥8 h即可得到废纸纤维（waste paper fiber，WF）。将6 g WF加入到100 mL的NaOH溶液中（质量分数为10%），加入20 g EPI，搅拌3 h，使EPI与纤维充分发生取代反应，将环氧基接入废纸纤维中。过滤后用丙酮与水交替冲洗，除去残余的NaOH与EPI。

随后加入含有EDA（质量分数为2%）、质量分数为3%的NaOH溶液中，在60 °C下搅拌3 h，利用胺基与环氧基的开环反应，将EDA接入废纸纤维中。用水将纤维洗至中性过滤，烘干后获得氨化废纸纤维（ammoniated waste paper fiber，AWF）。用粉碎机将废纸纤维和氨化废纸纤维打成絮状备用。废纸纤维的氨化原理，如图2所示。

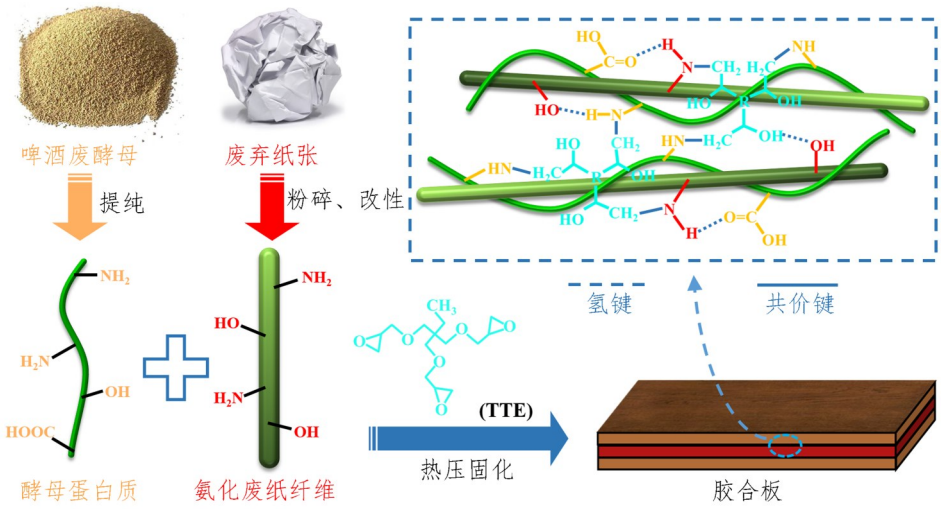


图1　氨化废纸纤维增强酵母蛋白胶制备胶合板的示意图

Fig.1　Schematic diagram of plywood prepared with yeast protein adhesive reinforced with ammoniated waste paper fibers

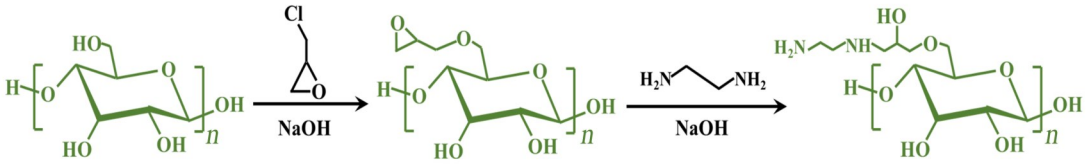


图2　纤维素氨化改性反应原理

Fig.2　Reaction principle of cellulose ammonification

1.3.3　酵母蛋白基胶黏剂的制备　取200 g YPI，用30%的NaOH溶液将其pH值调至9，在40 °C下搅拌1 h，以打开蛋白质的折叠结构，提高反应活性。分别加入相当于胶液质量0.5%、1.5%、2.5%、3.5%、4.5%的AWF，搅拌10 min，使其分散均匀。随后加入10 g TTE，继续搅拌20 min后取出，获得氨化废纸纤维增强酵母蛋白胶（YPI/TTE/AWF），每组实验分别制备三批胶黏剂。不同组酵母蛋白胶的制备方案设计，列于表1。

1.3.4　三层胶合板的制备　挑选三块无缺陷的单板，按250 g/m^{2}的涂胶量将胶黏剂均匀涂于芯层单板的两面，按照纵-横-纵的方式组坯，随后放进热压机中热压固化，热压温度为140 °C、压力为2 MPa、时间为792 s（120 s/mm）。每批胶黏剂压一块板。

表1　不同组酵母蛋白胶的试验设计

Tab.1　Experimental design of various yeast protein adhesive

编号	组别	TTE添加量/g	AWF添加量/g	WF添加量/g
1	YPI	0	0	0
2	YPI/TTE	10	0	0
3	YPI/TTE/WF-1.5	10	0	3
4	YPI/TTE/AWF-0.5	10	1	0
5	YPI/TTE/AWF-1.5	10	3	0
6	YPI/TTE/AWF-2.5	10	5	0
7	YPI/TTE/AWF-3.5	10	7	0
8	YPI/TTE/AWF-4.5	10	9	0

1.4　性能检测

1.4.1　胶黏剂基本性能

1）黏度：用旋转黏度计在25 °C下测试胶黏剂的黏度。

2）固体含量：称取m_1克酵母蛋白胶放入

140 ℃烘箱中烘至绝干，再称量干燥后的胶黏剂质量m_2，按下式计算胶黏剂的固体含量。重复测试3次，取平均值。

固体含量=(m_2/m_1)×100% （1）

1.4.2 胶黏剂化学结构

1）FT-IR分析：将样品置于140 °C的烘箱烘干2 h，研磨成粉末，按照1∶100的比例将样品与溴化钾混合并压成透明圆片，放入傅里叶红外光谱仪中进行测试。扫描范围为4 000~400 cm^{-1}，扫描次数为24次。

2）XRD分析：将样品置于140 °C的烘箱烘干2 h，研磨成粉末，放入X射线衍射仪中进行测试。扫描范围为5°~60°，步长为0.02°，扫描速度为2°/min。利用Jade 6软件计算样品的结晶度。

3）DSC分析：将样品置于真空冻干机中冻干72 h，称取6~8 mg放入差示热量扫描仪进行测试。选用连续升温模式，测试范围为40~220 °C，升温速率为10 °C/min。

1.4.3 胶黏剂微观结构 将胶黏剂样品置于140 °C的烘箱中干燥固化2 h，将固化后的胶块打碎成长宽小于4 mm的碎块，用扫描电子显微镜观察厚度方向上胶层的断面形貌。

1.4.4 胶合强度 参照GB/T 9846—2015《普通胶合板》中Ⅰ、Ⅱ类湿胶合强度的测定方法测试胶合板的湿强度。Ⅱ类湿胶合强度试件在测试前需要在63 °C水中浸渍3 h；Ⅰ类湿强度试件需要先在沸水中水煮4 h，随后在63 °C烘箱中烘干20 h，最后再次放入沸水中水煮4 h。所有试件在浸泡结束后在室温下冷却10 min再测定胶合强度，每块板取10个试件，测试结果取平均值。

2 结果与讨论

2.1 胶黏剂基本性能

由表2可以看出，随着AWF添加量的提高，酵母蛋白胶的固体含量不断上升，水分减少，有助于加快热压过程中胶层的固化速度。酵母分离蛋白的黏度为5 090 mPa•s，而加入低黏度的TTE后，蛋白胶黏度大幅提升至24 100 mPa•s，可以推断出TTE在胶黏剂制备过程中与酵母蛋白发生了交联反应，生成大分子聚合体，提高了胶黏剂的分子量，从而导致黏度上升。胶黏剂黏度与氨化废纸纤维添加量呈正相关，原因一方面是固体含量提升；另一方面则是AWF上含有大量极性基团与酵母蛋白间能够形成氢键连接，加大蛋白质溶液的流体剪切阻力。此外，在相同添加量下，用WF替代AWF，酵母蛋白胶的固体含量与黏度变化不大，说明氨化改性对蛋白胶这两个指标的影响不显著。

表2 不同酵母蛋白胶的固体含量与黏度

Tab.2 Solids content and viscosity of various yeast protein adhesives

编号	组别	固体含量/%	黏度/mPa·s（25 °C）
1	YPI	28.9	5 090
2	YPI/TTE	32.2	24 100
3	YPI/TTE/WF-1.5	33.1	37 600
4	YPI/TTE/AWF-0.5	32.6	28 700
5	YPI/TTE/AWF-1.5	33.3	39 500
6	YPI/TTE/AWF-2.5	33.7	55 300
7	YPI/TTE/AWF-3.5	34.4	72 500
8	YPI/TTE/AWF-4.5	35.0	92 000

2.2 胶黏剂的化学结构

2.2.1 胶化学成分分析 图3为WF和AWF的红外光谱谱图。

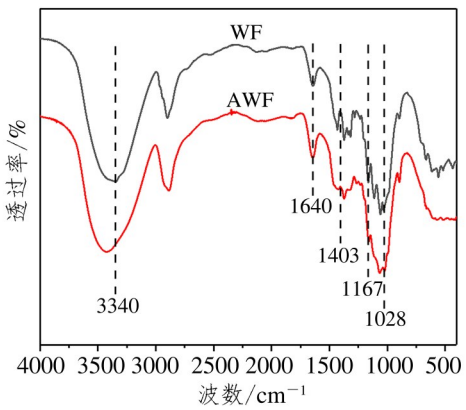


图3 普通废纸纤维与氨化废纸纤维的红外谱图

Fig.3 FT-IR spectrum of waste paper fibers with and without ammoniated modified

图3显示，WF的谱图中3 340 cm^{-1}处的特征峰代表O−H伸缩振动；1 028~1 167 cm^{-1}的特征峰代表醇和醚中的C−O伸缩振动。对比WF与AWF的谱图发现，AWF中3 340 cm^{-1}处特征峰发生移动，表明乙二胺成功接枝到废纸纤维上，缔合态伯胺中波长更高的N-H特征峰（3 438 cm^{-1}）与羟基O−

H 特征峰（3 340 cm^{-1}）相叠加导致特征峰的移动[14]。1 020~1 167 cm^{-1} 处特征峰强度减弱，这表明废纸纤维上的羟基被乙二胺-环氧氯丙烷所取代。N−H 的弯曲振动吸收峰出现在 1 640 cm^{-1} 和 1 403 cm^{-1} 附近。AWF 谱图上 1 640 cm^{-1} 处特征峰略微增强，在 1 403 cm^{-1} 处出现新峰并与原有的特征峰合并叠加，这进一步印证乙二胺成功接枝到废纸纤维上[15]。

图 4 为酵母分离蛋白、TTE 交联剂以及不同胶黏剂样品的红外光谱谱图。

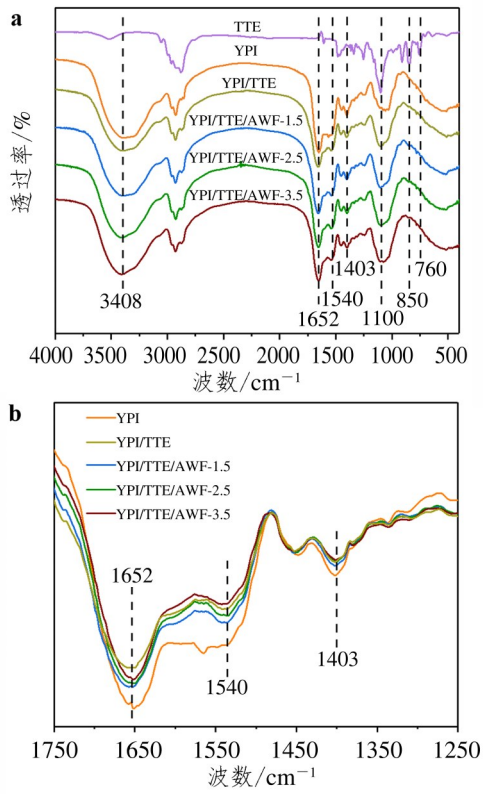
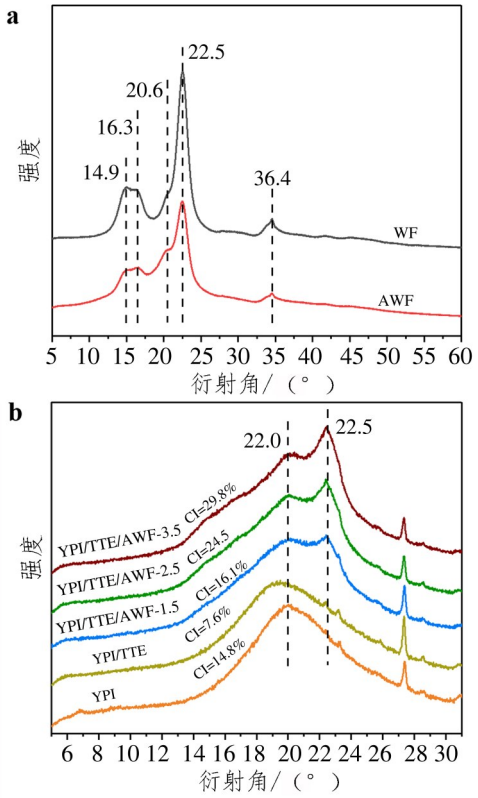


图 4　酵母分离蛋白、TTE 交联剂和不同酵母蛋白胶的红外光谱谱图

Fig.4　FT-IR spectra of YPI, TTE, and various yeast protein adhesive

TTE 中环氧基团的特征峰位于 850 cm^{-1} 和 760 cm^{-1} 处。当引入 TTE 后，固化胶黏剂的红外谱图中未发现相应的环氧基特征峰，表明 TTE 中的环氧基在固化过程中基本被消耗[16]。蛋白质中酰胺基团的三个典型特征峰出现在 1 652 cm^{-1}、1 540 cm^{-1} 和 1 250 cm^{-1} 处，分别对应 C=O 拉伸振动（酰胺Ⅰ带）、N−H 弯曲振动（酰胺Ⅱ带）以及 N−H 和 C−N 拉伸振动（酰胺Ⅲ带）。对比 YPI 与 YPI/TTE 的谱图，发现 3 408 cm^{-1}、1 652 cm^{-1}、1 540 cm^{-1} 和 1 403 cm^{-1} 处特征峰强度减弱，1 100 cm^{-1} 处特征峰增强。表明经过交联改性后，胶黏剂中胺基含量减少，羟基、醚键的含量增多，可以推断出 YPI 上的胺基与 TTE 上的环氧基发生了开环反应[17]。加入 AWF 后，可以观察到 3 408 cm^{-1} 处的特征峰逐步增强，表明 YPI 与 AWF 之间形成了大量的氢键缔合，两者具有良好的界面相容性[18]。当 AWF 添加量为 1.5% 时，酰胺Ⅰ、Ⅱ带特征峰略微增强，这可能是由于 AWF 上活性较高的伯胺基参与交联反应，消耗了部分环氧基团，保护了酰胺基上活性较低的 N−H 键。这表明 AWF 能够通过环氧交联剂与蛋白质基体形成间接的共价结合，从而增强胶黏剂基质与 AWF 之间的界面相互作用。进一步提高 AWF 的添加量，发现过多的纤维填料导致样品中蛋白质含量降低，酰胺Ⅰ、Ⅱ带强度减弱。

2.2.2　聚集态结构分析　利用 XRD 分析废纸纤维、氨化废纸纤维和不同酵母蛋白胶的聚集态结构，结果见图 5。



a 废纸纤维和氨化废纸纤维；b 不同酵母蛋白胶。

图 5　废纸纤维和不同酵母蛋白胶的 XRD 谱图

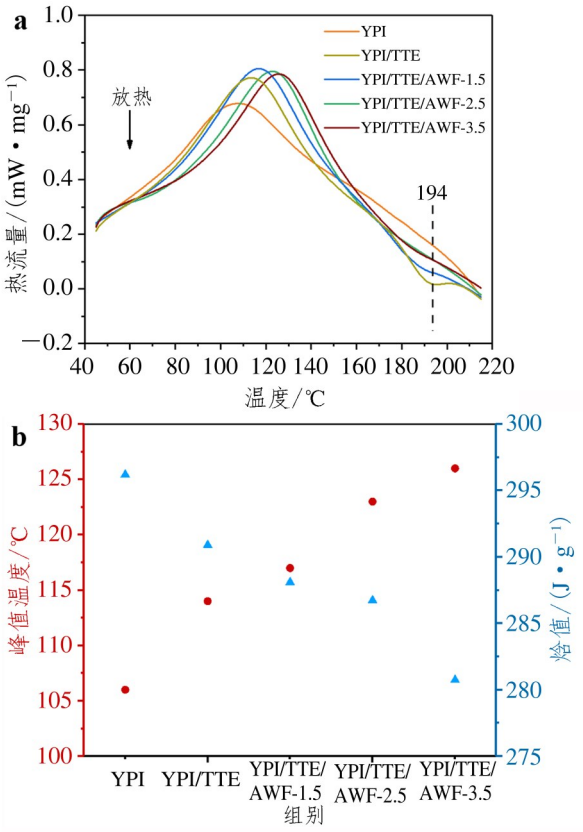
Fig.5　XRD spectra of waste paper fibers and various yeast protein adhesives

图5a显示，WF的XRD谱线分别在14.9°、16.3°、22.5°和34.6°处出现衍射峰，分别对应于I型纤维素中（1-10）、（110）、（200）和（004）晶面[19]。经氨化改性后，AWF谱线中衍射峰强度减弱，且在20.6°处出现新峰。这表明氨化改性后，纤维素结晶结构中原有的氢键被大量破坏，促使纤维素分子链发生重排，进而导致AWF晶型改变[20]。

在图5b中，20.0°处的衍射峰对应蛋白质二级结构中β-折叠的结晶区[21]。引入TTE后，20.0°处的衍射峰强度减弱，相应的结晶度从14.8%降低到7.6%。这是由于TTE与YPI间的交联反应破坏了原有的蛋白质晶区，而网状交联结构的形成限制了肽链的移动，阻碍了新晶区的形成[22]。加入AWF后，在22.5°处可以观察到由废纸纤维引起的强衍射峰。随着AWF添加量的增大，20.0°处衍射峰强度略有增加且峰型变尖，说明AWF促使肽链的排列堆积更加有序。

2.2.3 热稳定性分析 酵母分离蛋白以及不同胶黏剂样品的DSC曲线以及其对应的峰值温度和焓值，分别如图6a和6b所示。其中，峰值温度为最大热流量所对应的温度，焓值由热流量对测试时间进行积分后得出。

图6a显示，所有样品的DSC谱线都有一个大的吸热峰，该吸热峰主要与蛋白质的变性相关，对应分子内键的破坏和蛋白质的展开/聚集。引入TTE后，DSC曲线的峰值温度增大、焓值降低，表明胶黏剂的热稳定性得到提升，这主要是由于交联结构限制了蛋白质分子链的移动[23]。由于反应活性过高，伯胺基与环氧基的交联反应主要发生于制样过程中[24]。YPI/TTE曲线在194 °C处出现较弱的放热凹峰，这可能是由于胶黏剂中残余少量的环氧基，其在高温下与YPI上酰胺基等活性较低的基团发生反应，释放热量。添加AWF后，该放热凹峰消失，表明AWF上的伯胺基参与了交联反应，消耗了多余的环氧基团。多元体系中的多种相互作用可以有效地防止蛋白质链的断裂和移动，对蛋白质的热变性起到一定阻碍作用[25]。随着AWF添加量的提高，DSC曲线的峰值温度不断增大，焓值逐渐变小，热稳定性逐步提升。



a DSC曲线;b 峰值温度与焓值。

图6 酵母分离蛋白和不同酵母蛋白胶的DSC曲线以及其对应的峰值温度和焓值

Fig.6 DSC curves, peak temperatures, and enthalpies of YPI and various yeast protein adhesive

2.3 胶层微观形貌

通过SEM观察酵母分离蛋白以及不同胶黏剂样品固化后的微观形貌，如图7所示。

图7a显示，YPI的固化截面相对疏松、粗糙，表明YPI的内结合力较弱。经过TTE交联后，胶层致密程度明显改善，有利于阻挡水分侵入，提高胶黏剂的耐水性。这是由于YPI与TTE之间形成了密集的交联网络结构，极大加强了胶黏剂分子间的作用力[26]。图7c~7e直观地展现了YPI/TTE/AWF胶黏剂体系中的纤维骨架结构。在干燥固化后，少部分YPI基质紧密包裹住废纸纤维，多余的胶黏剂基质在水蒸气的作用下鼓起到胶层两侧，暴露出胶层中部蜂窝状的纤维骨架结构。在图7c~7e中均未发现胶黏剂的纤维和基质之间脱粘分离现象，表明YPI与AWF具有良好的界面结合，AWF能够有效传递、承载胶黏剂体系所受的应力[27]。添加量小于3.5%时，AWF表现出了良好的分散性。但随

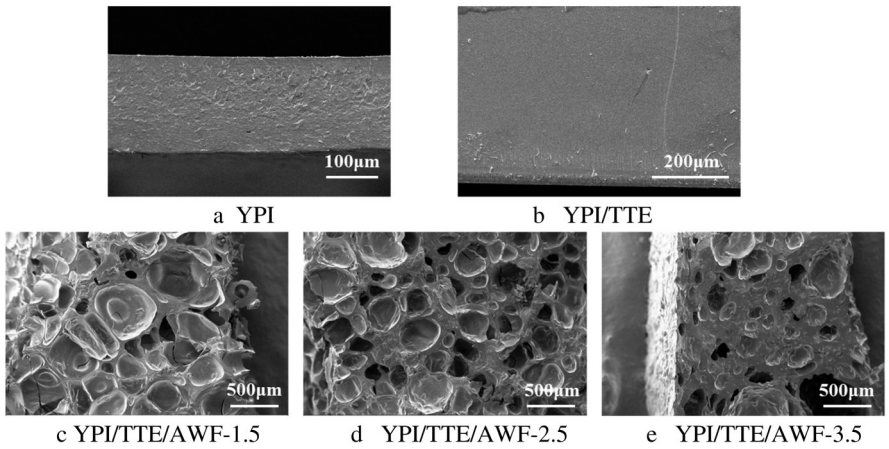


图7　酵母分离蛋白以及不同胶黏剂样品固化后的微观形貌

Fig.7　Microscopic morphology of YPI and various yeast protein adhesive after curing

着 AWF 添加量的提高，骨架缝隙逐渐缩小；当 AWF 的添加量达到 3.5% 时，纤维骨架出现团聚现象，难以均匀分散在基质中。

2.4　胶黏剂胶合强度

不同酵母蛋白胶制备胶合板的湿胶合强度，如图 8 所示。

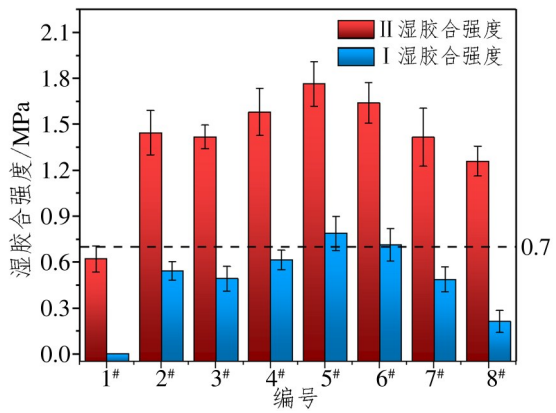


图8　不同酵母蛋白胶制备胶合板的湿胶合强度

Fig.8　Wet shear strength of plywood prepared with various yeast protein glues

图 8 显示，未改性酵母蛋白（1#）的胶接性能较差，不耐沸水煮，所制胶合板的湿强度不满足Ⅱ类胶合板的强度要求（≥0.7 MPa）。引入 TTE 后（2#），胶黏剂的耐水性显著改善，Ⅱ类湿强度提升了 133%，Ⅰ类湿强度由 0 提高到 0.54 MPa，但仍不满足Ⅰ类胶合板的强度要求。以 WF 作为纤维增强填料时（3#），湿胶合强度比 YPI/TTE 组略微降低。这可能是由于 WF 缺乏能够与环氧基反应的活性基团，纤维与酵母蛋白基质之间的结合主要依靠范德华力、氢键等弱力，在热水、沸水浸泡中容易被破坏，导致界面失效。加入 AWF 时（4#~8#），胶黏剂的湿强度随 AWF 添加量的提高呈先增后降趋势，并在 AWF 添加量为 1.5% 时达到最大值。此时，Ⅱ类湿强度达到 1.76 MPa，比添加前提高了 22%；Ⅰ类湿强度达到 0.79 MPa，比添加前提高了 45%，满足Ⅰ类胶合板的强度要求。说明本研究构建的共交联纤维增强的蛋白胶体系具有显著的强化效应，AWF 通过 TTE 的交联作用与 YPI 形成牢固、耐水的共价键连接，增强了纤维与基质间的界面结合力，能够有效地将外部载荷从基质传递到纤维[28]。进一步提高 AWF 添加量时，湿强度明显降低。这是由于过量的 AWF 加大了纤维骨架的堆叠密度，容易出现纤维团聚现象，阻断部分纤维和基质之间的相互作用；同时，过高的固体含量降低了胶液的流动性，使胶黏剂难以渗入木材，导致实际胶接面积减少，机械结合效应减弱。另外，AWF 上含有大量的亲水基团，大量引入 AWF 可能会加速水分对胶层的侵蚀速度，导致耐水性降低。

3　结论

1）氨化改性后，废纸纤维中的部分羟基被乙二胺-环氧氯丙烷所取代，成功将胺基引入废纸纤维中。这导致纤维素结晶结构中的原有氢键被大量破坏，氮原子与未反应的羟基形成新的氢键，促使纤维素分子链重排，最终引起废纸纤维的晶型改变、结晶度降低。

2）氨化废纸纤维在酵母蛋白胶中具有良好的分散性，纤维在固化时形成均匀的网状骨架。得益于纤维上的活性胺基，氨化废纸纤维可以通过环氧交联剂与酵母蛋白基质形成间接的化学键合，蛋白质基体通过氢键、共价键等多重作用紧密依附于纤维骨架上，有效限制蛋白质肽链的移动，提高胶黏剂的热稳定性。同时，氨化废纸纤维的添加促使肽链排列更加有序，提高了胶黏剂的结晶度。

3）优化的氨化废纸纤维添加量为胶液质量1.5%，此时胶合板的Ⅰ类湿强度达到0.79 MPa，比添加前提高了45%，满足Ⅰ类胶合板的强度要求。

4）本研究制备的酵母蛋白胶黏度大，初粘性好，能够满足实际胶合板生产中冷压工艺的要求，在耐水性能方面可以应用在潮湿的场景中。

参考文献：

[1] Pizzi A. Wood products and green chemistry[J]. Annals of Forest Science, 2015, 73(1):1-19.

[2] XU Y, HAN Y, SHI S, et al. Preparation of a moderate viscosity, high performance and adequately-stabilized soy protein-based adhesive via recombination of protein molecules[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 255(C): 120303.

[3] 崔荣煜. 啤酒厂固体废弃物资源化利用研究[D]. 苏州: 苏州科技大学, 2017.

[4] 杨星月. 酶处理的啤酒废酵母干预糖尿病小鼠效果评价[D]. 天津: 天津科技大学, 2018.

[5] Podpora B, Widerski F, Sadowska A, et al. Spent brewer's yeast extracts as a new component of functional food[J]. Czech Journal of Food Sciences, 2016, 34: 554-563.

[6] James A, Yang A. Interactions of protein content and globulin subunit composition of soybean proteins in relation to tofu gel properties[J]. Food Chemistry, 2016, 194: 284-289.

[7] 张耀, 邱晓曼, 孙浩, 等. 酿酒酵母的工业化应用[J]. 中国生物工程杂志, 2022, 42(Z1): 26-36.

[8] BAI M, HUANG Y, HUANG S, et al. A Novel Wood Adhesive Based on Yeast Hydrolysate[J]. Bioresources, 2019, 14: 6015-6024.

[9] Kadimaliev D, Telyatnik V, Revin V, et al. Optimization of the conditions required for chemical and biological modification of the yeast waste from beer manufacturing to produce adhesive compositions[J]. Bioresources, 2012, 7: 1984-1993.

[10] Decap N, Arroyo A, Enos J. Evaluation of single cell protein from yeast for the development of wood adhesives[J]. European Journal of Wood and Wood Products, 2016, 74(6): 821-828.

[11] WANG Y, WANG M, ZHANG W, et al. Performance comparison of different plant fiber/ soybean protein adhesive composites[J]. BioResources, 2017, 12(4): 8813-8826.

[12] 张效林, 迪静静, 薄相峰, 等. 废纸高值化利用及其在材料领域中的研究进展[J]. 中国造纸学报,2021,36(3):17-25.

[13] 杨震. 纳米纤维素的制备及其增强环氧树脂的性能研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2022.

[14] 张春晓. 氨基功能化纤维素的制备及其吸附性能研究[J]. 化学研究与应用, 2022, 34(7): 1546-1553.

[15] 党园园. 自交联季铵化聚乙烯亚胺纸张增湿强剂的制备及作用机理[D]. 西安: 陕西科技大学, 2022.

[16] Jablonskis A, Arshanitsa A, Arnautov A, et al. Evaluation of Ligno Boost ™ softwood kraft lignin epoxidation as an approach for its application in cured epoxy resins[J]. Industrial Crops & Products, 2018, 112.

[17] XU F, DONG Y, ZHANG W, et al. Preparation of cross-linked soy protein isolate-based environmentally-friendly films enhanced by PTGE and PAM[J]. Industrial Crops and Products, 2015, 67: 373-380.

[18] 刘晓蓉. 植物纤维增强增韧大豆蛋白胶黏剂及作用机制研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.

[19] French A D. Idealized powder diffraction patterns for cellulose polymorphs[J]. Cellulose ,2014, 21(2): 885-896.

[20] 修慧娟, 成锐, 李金宝, 等. 废纸纤维环氧化改性及其反应动力学研究[J]. 功能材料, 2018, 49(12): 12113-12117, 12122.

[21] KANG H, SONG X, WANG Z, et al. High-performance and fully renewable soy protein isolate-based film from microcrystalline cellulose via bio-inspired poly(dopamine) surface modification[J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2016, 4: 4354-4360.

[22] WANG Z, ZHAO S, SONG R, et al. The synergy between natural polyphenol-inspired catechol moieties and plant protein-derived bio-adhesive enhances the wet bonding strength[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 9664.

[23] 汪宗涛. 水性环氧聚合物改性大豆蛋白胶黏剂研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2020.

[24] 吴志刚. 蛋白基胶黏剂交联改性及机理研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.

[25] KANG H, WANG Z, WANG Y, et al. Development of mainly plant protein-derived plywood bioadhesives via soy protein isolate fiber self-reinforced soybean meal composites[J]. Industrial Crops & Products, 2019, 133: 10-17.

[26] PANG H, ZHAO S, WANG Z, et al. Development of soy protein-based adhesive with high water resistance and bonding strength by waterborne epoxy crosslinking strategy[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020, 100: 102600.

[27] LIU X, WANG K, GAO Q, et al. Bioinspired design by gecko structure and mussel chemistry for bio-based adhesive system through incorporating natural fibers[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 236(C): 117591.

[28] ZHAO S, WANG Z, KANG H, et al. Fully bio-based soybean adhesive in situ cross-linked by interactive network skeleton from plant oil-anchored fiber[J]. Industrial Crops & Products, 2018, 122: 366-374.

（本文编校 孟凡丹）