

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2022062

异氰酸酯胶黏剂在桉木刨花板中的 渗透及界面力学性能

吕城龙^{1,2}, 姚艳¹, 王军锋³, 席靖宇¹, 李万兆¹, 王新洲^{1,4}

(1. 南京林业大学材料科学与工程学院, 江苏南京 210037; 2. 南京工大建设工程技术有限公司, 江苏南京 211800;

3. 广西壮族自治区林业科学研究院, 广西南宁 530002; 4. 大亚科技股份有限公司, 江苏丹阳 212300)



摘要: 采用荧光显微技术、扫描电子显微镜结合元素分析法以及纳米力学分析技术, 分析不同施胶量下的异氰酸酯胶黏剂与木刨花的界面结构和力学性能。结果表明: 增加施胶量可以提高胶黏剂在刨花中的渗透深度, 在施胶量为6%时, 胶黏剂的渗透深度最大, 平均渗透深度和有效渗透深度分别为1 074 μm 和712 μm 。胶黏剂渗透可以提高刨花细胞壁的弹性模量和硬度, 但施胶量对界面力学性能无明显影响; 在施胶量为6%时, 界面区域刨花细胞壁的弹性模量为20.04 GPa, 硬度为0.69 GPa。施胶量从3%增至6%时, 刨花板的内结合强度和2 h吸水厚度膨胀率得到改善, 但进一步增至9%时, 板材性能并未提高。综合考虑, 建议采用异氰酸酯胶黏剂制备刨花板时, 施胶量宜控制在6%左右。

关键词: 刨花; 异氰酸酯; 渗透; 胶合界面; 纳米压痕; 力学性能

中图分类号: S792.39; TU366.4

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2022) 06-0088-07

Penetration of Isocyanates Adhesive in Eucalyptus Wood Particleboards and Mechanical Properties of Bonding Interphase

LYU Cheng-long^{1,2}, YAO Yan¹, WANG Jun-feng³, XI Jing-yu¹, LI Wan-zhao¹, WANG Xin-zhou^{1,4}

(1. College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 2. Nanjing Gongda Construction Technology Co., Ltd., Nanjing 211800, Jiangsu, China; 3. Guangxi Zhuang Autonomous Region Forestry Research Institute, Nanning 530002, Guangxi, China; 4. Dareglobal Technologies Group Co. Ltd., Danyang 212300, Jiangsu, China)

Abstract: The microstructure and mechanical properties of bonding interphase between isocyanates adhesive and Eucalyptus wood particles with different resin content were investigated by using fluorescence microscopy, scanning electron microscopy, energy-dispersive spectroscopy, and nanoindentation. Results indicated that the penetration depth of adhesive into wood increased with the increasing resin content. When the resin content was 6%, the average penetration depth and effective penetration depth reached 1 074 μm and 712 μm , respectively. The penetration of adhesive into wood structures made a positive contribution to the elastic modulus (E_r) and hardness (H) of wood cell walls in the bonding interphase. However, the resin content showed no significant effect on the mechanical

收稿日期: 2022-04-06; 修改日期: 2022-07-16

基金项目: 国家重点研发计划课题“高强度定向结构板制造与应用技术”(2021YFD2200602); 江西省林业局科技创新专项“基于OSB的木质结构材开发与应用”(202135)。

作者简介: 吕城龙(1988—), 男, 工程师。Email: lvchenglongnjfu@126.com

通讯作者: 王新洲, 男, 副教授。Email: xzwang@njfu.edu.cn

properties of bonding interphase. The E_r and H values of cell walls after adhesive penetration was 20.04 GPa and 0.69 GPa under the resin content of 6%, respectively. Meanwhile, the internal bonding strength and thickness swelling were improved as the resin content increased from 3% to 6%. When the resin content increased to 9%, the bonding performance was not improved. It was suggested that the resin content needs be controlled at about 6% when isocyanates adhesive was used to prepare particleboards.

Key words: particles; isocyanate; penetration; bonding interphase; nanoindentation; mechanical properties

刨花板具有性能稳定、易加工等优点,在家具制造、建筑装饰装修等领域得到广泛应用。近年来,以密度低于 0.6 g/cm^3 的轻质刨花板作为非结构用家具及装饰板材,不仅能降低加工能耗和运输成本,还能节约木材资源,受到家具制造企业的青睐^[1]。然而采用脲醛树脂胶黏剂压制密度低于 0.6 g/cm^3 的刨花板,往往不能达到 GB/T 4897—2015《刨花板》中家具用刨花板的物理力学性能要求^[2]。

异氰酸酯(Isocyanate)胶黏剂具有活泼的异氰酸酯基($-\text{NCO}$),能与木材中的纤维素、半纤维素等化学组分中的大量羟基($-\text{OH}$)形成化学键结合,从而产生较强的胶接性能^[3]。在特殊材料(如农作物秸秆)胶合以及胶合强度要求高的场合中广泛应用^[4-5]。近几年来,聚合异氰酸酯胶黏剂(Diphenylmethane diisocyanate, pMDI)或者异氰酸酯改性脲醛树脂被尝试用于制备轻质刨花板^[2,6]。研究发现,轻质刨花板的物理力学性能随pMDI用量的增加而提高,且改善效果明显,但施加量超过一定程度,增强效果不明显^[6]。目前相关研究主要关于板材宏观性能的测试分析,而异氰酸酯与木材刨花胶接性能的机理研究相对较少。

在木材胶合制品的制造过程中,胶黏剂与相邻木质单元接触、渗透、固化后形成胶合界面,该界面是决定木材与树脂复合构件强度的重要因素^[7-8]。稳定的胶合界面有助于材料之间传递应力,但胶合界面通常也是胶合构件中的薄弱环节。因此,开展胶黏剂在木质单元中的渗透分布及其对板材性能的影响将有助于揭示板材胶合性能的形成机制。在胶黏剂渗透分布方面,国内外学者开展了大量研究工作,发现利用荧光显微技术结合数字图像处理分析方法可以获得胶黏剂在木质单元中的有效渗透深度等参数^[9-10];采用原子力显微镜等超高分辨率检测技术观察发现,低分子量胶

黏剂不仅通过导管、纹孔等通道渗透进入木材内部结构,还可以进入细胞壁结构中^[11-13]。但是关于异氰酸酯胶黏剂与木材单元间界面的基本特征,如渗透分布、界面力学性能,是否受到施胶工艺参数的影响,尚未见报道。

本研究以异氰酸酯为胶黏剂制备轻质刨花板,采用荧光显微技术、扫描电子显微镜结合元素分析法以及纳米力学分析技术研究不同施胶量时异氰酸酯在木材刨花单元中渗透分布以及界面力学性能,进一步阐述木质复合材料界面胶接力形成的机理,旨在为轻质刨花板的工艺优化和胶合性能调控提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

巨尾桉(*Eucalyptus grandis* × *E. urophylla*)刨花:窄长平刨花和棒状刨花,气干含水率为9%~12%。长度35~50 mm、宽度6~11 mm、厚度1.5~9 mm的刨花,占比20%;长度20~35 mm、宽度5~10 mm、厚度1~2 mm的刨花,占比20%;长度10~20 mm、宽度3~8 mm、厚度0.5~2 mm的刨花,占比60%。

异氰酸酯胶黏剂:棕色液体,黏度为150~250 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ (25 °C),主成分为聚合异氰酸酯(pMDI),异氰酸根质量分数为30.5%~32.0%,密度为1.22~1.25 g/cm^3 。

1.2 仪器与设备

荧光显微镜(Olympus BX51);大型滑走式切片机(YAMATO REM-710);超薄切片机(Leica MZ6);钻石刀(Ultra AFM);扫描电子显微镜-EDS能谱联用分析仪(JSM-7600F);纳米压痕仪(iMicro nanoindenter),金刚石Berkovich探针;万能力学试验机(UTM5504)。

1.3 刨花板制备

采用喷胶方式对刨花进行施胶,控制施胶量分别为3%、6%、9%;选择若干规则尺寸为20 mm×5 mm×2 mm(长×宽×厚)的刨花顺纹组坯固定后,置于板坯芯层部位。热压温度为160℃、热压时间为7 min。采用三段式热压法进行热压。第一段在短时间施以高压,使板坯表层形成致密层,压力3 MPa;第二段卸压至2 MPa,使胶黏剂迅速充分发泡;第三段压力降到1 MPa,直到板材达到目标厚度。制备的刨花板密度为0.50 g/cm³,尺寸为400 mm×400 mm×18 mm(长×宽×厚)。每种施胶量的板材分别制备3块样品。

1.4 性能测试

1) 胶黏剂渗透分布。将试样浸泡于水中软化,以胶线为中心,制取厚度为20 μm的切片若干;将切片用甲苯胺蓝溶液染色后,封片处理。运用光学显微镜在激发光波长≥350 nm下对切片进行观察,再通过图像处理软件测量胶黏剂在刨花中的渗透分布。根据式(1)和(2)计算出切片中胶黏剂的有效渗透深度(EP)和平均渗透深度(AP)^[14]。从每种施胶量条件下的试样中分别制取6个切片,进行统计分析。

$$EP = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{x_0} \quad (1)$$

$$AP = \frac{\sum_{i=1}^5 y_i}{5} \quad (2)$$

式中:EP—有效渗透深度,μm;AP—平均渗透深度,μm; n —胶斑个数; A_i —第 i 个渗透面积,μm²; x_0 —胶线长度,约为2 500 μm; y_i —最远渗透深度,μm。

2) 界面形貌结构及元素分析。将试样的横切面顶端刨切成四棱锥形,采用超薄切片机将锥形顶端抛光,获得表面粗糙度低于10 nm的胶合界面区域。运用扫描电子显微镜(SEM)及配套的X射线能谱仪(EDS)对界面区域形貌结构及微区元素组成进行分析,扫描加速电压为20 kV。

3) 界面力学性能。将上述抛光后的样品固定在纳米压痕仪试验台上,利用纳米压痕仪内置的光学显微镜对样品表面进行观察,如图1所示。主要测试3个不同部位的力学性能:界面区域树脂(位置A);与胶黏剂接触的木材细胞壁(位置B);

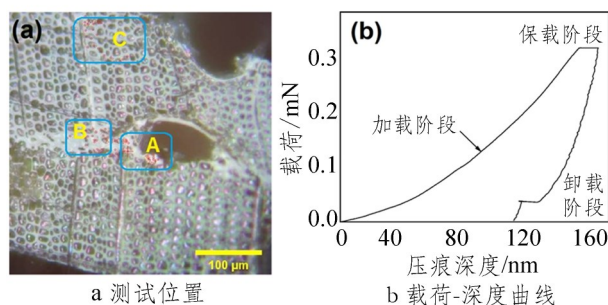


图1 界面力学性能测试

Fig.1 Mechanical property test of bonding liner

未与胶黏剂接触的木材细胞壁(位置C)。胶黏剂材质均匀,有效测试点为20个;两种细胞壁有效测试点均为30个,分布在5~6个细胞上。选用三段式恒速率、加载卸载模式(加载压入5 s、最大载荷保持2 s、卸载5 s),最大载荷为300 μN。

根据 Oliver 和 Pharr 法^[15],对加载-深度曲线(图1b)进行分析,计算弹性模量(E_r)和硬度(H)。公式如下:

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2\beta} \frac{S}{\sqrt{A}} \quad (3)$$

$$H = \frac{P_{\max}}{A(h_c)} \quad (4)$$

式中: β —常数,1.034; S —弹性接触刚度,μN/nm,由卸载曲线顶部斜率计算得出; A —材料与探针的接触投影面积,nm²; $P_{\max}$ —最大载荷,μN; $A(h_c)$ —最大载荷时探针与材料的接触面积,nm²。

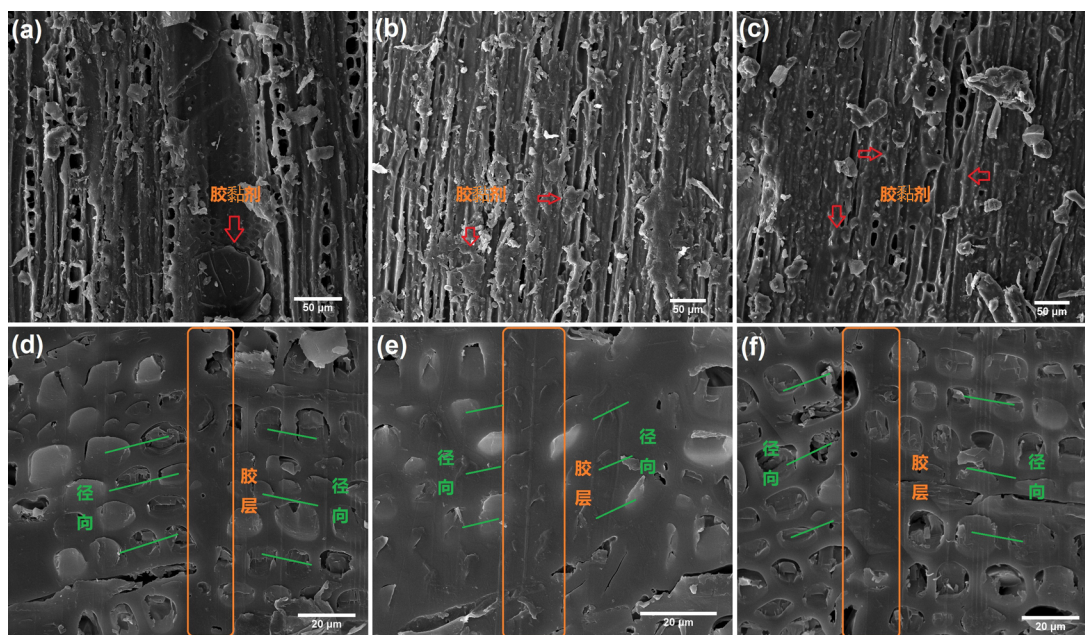
4) 刨花板内结合强度和吸水厚度膨胀率。根据 GB/T 17657—2013《人造板及饰面人造板理化性能试验方法》进行测定,测试样品数各为8个,结果取平均值。

2 结果与分析

2.1 形貌结构

不同施胶量时刨花的微观形貌及刨花板试样胶合界面区域的形貌结构,见图2。

从图2a~c中可以看出,胶黏剂主要分布在木材导管内腔、纤维细胞壁等组织结构表面。施胶量为3%时,刨花表面的胶黏剂较少且分布不均;随着施胶量增加,刨花表面胶黏剂增加,木材组织结构被覆盖面积变大,分布趋于均匀。在热压过程中,刨花之间形成胶合界面;根据经典胶合



注：a~c 施胶量分别为3%、6%和9%的刨花表面；g~f 施胶量分别为3%、6%和9%的刨花板胶合界面。

图2 刨花及刨花板胶合界面区域的微观形貌

Fig.2 Microstructure of wood particles and bonding interphase region of particleboards

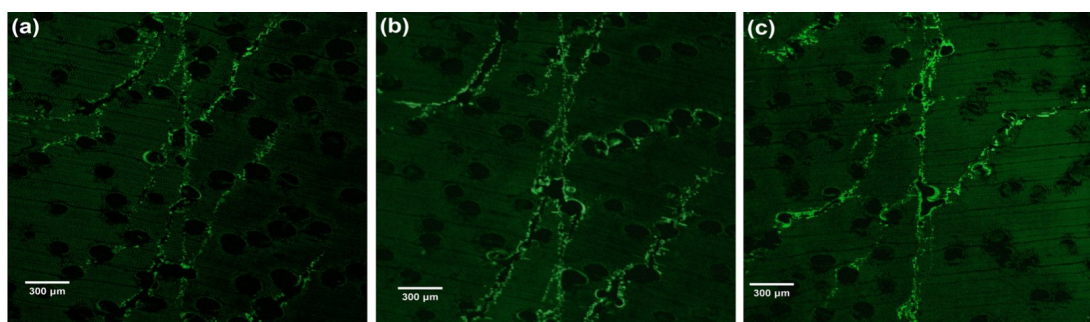
理论模型，胶合界面主要由木材、木材界面、木材与胶黏剂界面相，胶黏剂界面和纯胶层组成^[16]。

对比图2d~f可知，不同施胶量时，胶合界面的形貌结构存在明显区别。施胶量为3%时，没有形成清晰的胶层；当施胶量增至6%及以上时，可以看到连续的胶层，且木材与胶黏剂的界面相宽度也随之增加；继续增加施胶量，界面相宽度趋

于稳定，甚至出现局部不连续现象，这可能源于在一定的陈化时间内，胶黏剂未能充分渗透到木材刨花中，部分胶黏剂被挤压出所致。

2.2 胶黏剂渗透分布

采用荧光示踪方法对胶黏剂在刨花中的渗透分布进行分析，并获取试件胶合界面处的荧光显微图像（图3）。



施胶量：a—3%；b—6%；c—9%。

图3 刨花板胶合界面的荧光显微图

Fig.3 Fluorescence micrographs of particleboard bonding interphase

从图3中可以清晰地看到，胶黏剂在木材刨花中的渗透和分布状态。对比图3a、b和c发现，不同施胶量时胶黏剂的渗透路径和分布形态无明显区别。主要原因是，在压力作用下，胶黏剂通过不同尺度的孔隙结构进行渗透，如加工过程刨花表面产生的裂隙、细胞间纹孔结构等^[17]。

观察图3a~c发现，当施胶量为6%时，刨花之间的界面相比施胶量为3%和9%的宽。在施胶量较低时，树脂总量较少，渗透进入界面的树脂偏少，胶层较薄；但当施胶量较大时，胶黏剂堆叠的概率增加，在渗透速率和外加压力一定的情况，少量胶黏剂可能被挤出刨花的胶合区域，这与扫

描电镜观察结果一致。

平均渗透深度 (AP) 和有效渗透深度 (EP) 是量化表征树脂在木材中渗透分布的重要物理参数^[10]。不同施胶量时, 胶黏剂在刨花板中的平均渗透深度和有效渗透深度, 如图4所示。

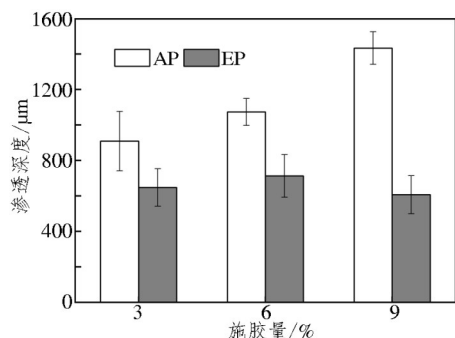


图4 胶黏剂在刨花中的渗透深度

Fig.4 Penetration depth of adhesive into wood particles

图4显示, 随着施胶量的增加, 平均渗透深度 (AP) 逐渐增大, 而有效渗透深度 (EP) 呈先增后减的趋势。在施胶量为6%时, 胶黏剂在刨花中的平均渗透深度和有效渗透深度分别为 1 074 μm 和

712 μm 。

方差分析 (p 值检验) 显示, AP 和 EP 的 p 检验值分别为 0.004 和 0.138, 表明 AP 在 $p=0.05$ 水平下呈现差异显著, 而 EP 差异不显著。平均渗透深度更多反映的是胶黏剂在木材中的渗透能力, 连续的渗透可产生“胶钉”作用, 有利于提高胶合强度, 而离胶层较远或不连续的胶黏剂渗透对胶合强度的贡献相对较小。有效渗透深度反映的是树脂渗透对胶合性能的有效贡献。综合 AP 和 EP 来看, 施胶量为6%时, 胶黏剂的渗透和分布效果最好; 当施胶量为9%时, 胶黏剂堆叠的概率增加, 导致 EP 增加不明显, 即对胶合性能的增量贡献不明显, 且增加生产成本。

2.3 胶合界面元素分析

为进一步分析胶黏剂在刨花中的分布情况, 对胶合界面区域的成分进行分析 (图5)。测试试样取自胶合试件的横截面。具体测试位置为界面区域树脂 (位置A)、与胶黏剂接触的木材细胞壁 (位置B) 和未与胶黏剂接触的木材细胞壁 (位置C)。

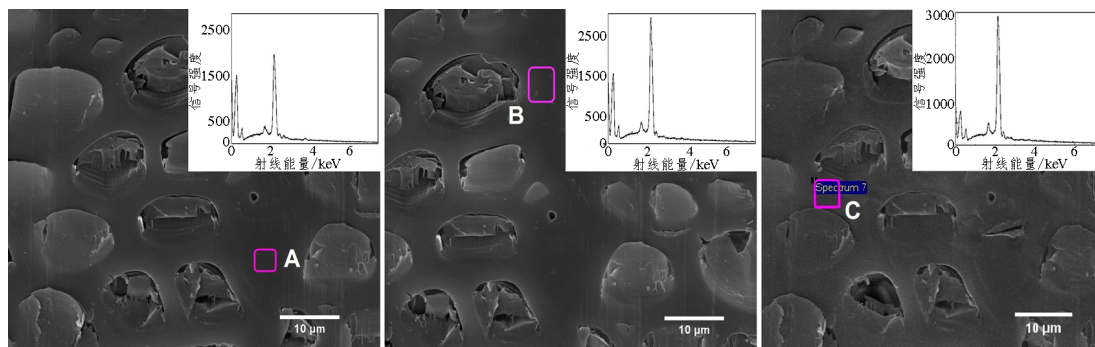


图5 刨花板胶合界面的元素分析

Fig.5 Element analysis of particleboard bonding interphase

图5显示, 木材和异氰酸酯胶黏剂中主要元素均为C和O, 但两种材料中C和O元素的占比存在差异, 3种施胶量时刨花板胶合界面区域不同位置的元素平均质量百分比, 见图6。

从图6可看出, 未与胶黏剂接触的细胞壁 (位置C) 中C元素的平均质量百分比是 56.82%, O元素的为 42.52%; 界面区域胶黏剂 (位置A) C元素的平均质量百分比高于细胞壁中的, 而氧元素的质量百分比低于细胞壁中的, 这与木材和胶黏剂树脂自身化学组成差异相关。而与胶黏剂接触的木材细胞壁 (位置B) 的C元素和O元素的平均质

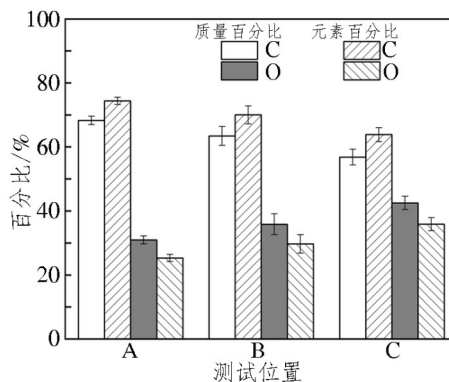


图6 刨花板胶合界面元素和质量百分比

Fig.6 Element contents of particleboard bonding interphase

量百分比处于两者之间,说明界面区域胶黏剂分子可能进入细胞壁层的孔隙结构中,起到填充增强作用^[11]。

2.4 胶合界面力学性能

界面相尺寸较小,但在界面载荷传递、应力分散等方面起着重要作用,对复合材料整体强度有重要的影响^[18]。胶合界面通常是整个复合材料构件中最为薄弱的环节,在外载或外部环境作用下易发生界面破坏从而失效。图7是纳米压痕测得的刨花板胶合界面区域细胞壁和树脂的弹性模量和硬度平均值。

图7显示,当施胶量为3%时,细胞壁(位置C)的弹性模量 E_r 为18.10 GPa,硬度 H 为0.63 GPa;异氰酸酯胶黏剂(位置A)的 E_r 和 H 分别为7.11 GPa和0.62 GPa;而与胶黏剂接触的细胞壁(位置B)的弹性模量和硬度分别增加了11%和10%,说明异氰酸酯胶黏剂对木材纤维细胞壁具有增强作用。这与元素分析结果一致,胶黏剂分子渗透进入木材细胞壁壁中,进而增加细胞壁密度;另外,树脂可以与纤维素或半纤维素发生交联反应,形成网络弹性结构,增强了细胞壁层^[19]。

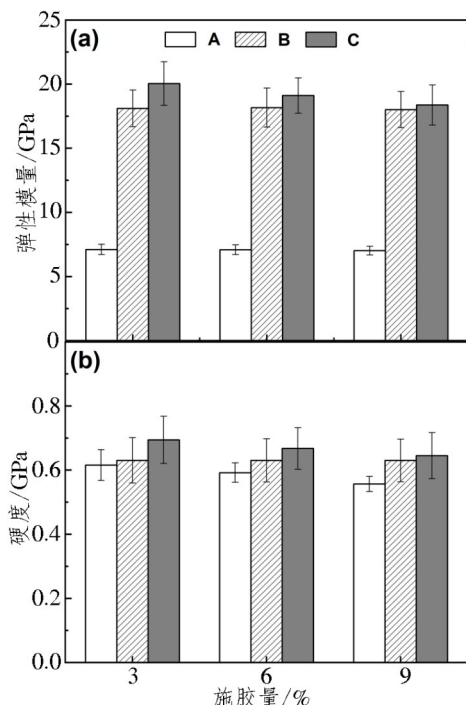


图7 刨花板胶合界面处的弹性模量和硬度

Fig.7 Elastic modulus and hardness of particleboard bonding interphase

对比不同施胶量条件下刨花板胶合界面的力学性能发现,胶合界面的各相材料弹性模量和硬度均相近。通过对界面区域材料的弹性模量和硬度值分别进行方差分析(p 值检验)发现, E_r 和 H 的 p 检验值分别为0.142和0.163,结果表明 E_r 和 H 值在 $p=0.05$ 水平下差异均不显著,说明增加施胶量对胶合界面的力学性能无显著影响。

另外,从图7中也可以看出,随着施胶量增加,胶合界面区域中的异氰酸酯胶黏剂和木材细胞壁的力学性能略呈下降趋势。胶黏剂的弹性模量和硬度与树脂的固化程度存在一定的正相关关系。当施胶量增加时,界面区域胶液堆叠,胶层厚度相对增加;因此,在同一固化条件下,界面区域的树脂固化程度呈下降趋势,因而其力学性能降低^[20]。

2.5 内结合强度和吸水厚度膨胀率

不同施胶量时刨花板的内结合强度(IB)和2h吸水厚度膨胀率(TS)测试结果,见图8。

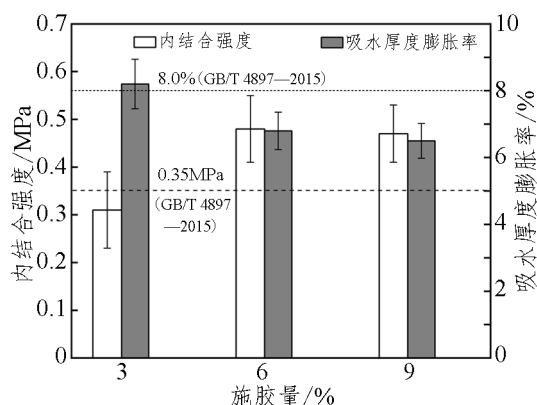


图8 刨花板内结合强度和吸水厚度膨胀率

Fig.8 Internal bonding strength and thickness swelling of particleboards

图8显示,当施胶量为3%时,刨花板的IB和TS分别为0.31 MPa和8.2%,均未达到GB/T 4897—2015《刨花板》标准中对干燥型家具用刨花板的要求(0.35 MPa和8.0%);随着施胶量增加,板材的IB和TS均得到改善,且达到标准中的要求;但当施胶量位9%时,板材的性能提高不明显。该结果与胶合界面结构和力学性能的变化规律具有较好的相关性,即当施胶量达到一定限值时,施胶量的增加不能显著改善胶黏剂在木材中的有效渗透和界面相材料的力学性能以及胶合性能。

3 结论

1) 增加施胶量可以改善胶黏剂在刨花单元内的渗透和分布效果,但当施胶量达到9%时,胶黏剂在刨花中的有效渗透深度有所减小,对胶接强度的贡献率降低。

2) 异氰酸酯胶黏剂进入木材细胞壁壁层结构,可以起到增强界面的效果;当施胶量为6%时,经胶黏剂渗透后的刨花细胞壁的弹性模量和硬度分别为20.04 GPa和0.69 GPa;但当施胶量达到一定限值时,通过继续提高施胶量不能达到改善胶合界面微观弹性模量和硬度的效果。

3) 综合胶合界面结构和力学性能以及内结合强度,建议采用异氰酸酯胶黏剂制备轻质刨花板时,施胶量宜控制在6%左右,不宜超过9%。

参考文献:

- [1] 罗书品,高黎,郭文静. 轻质刨花板研究进展[J]. 中国人造板, 2019, 26(1): 1-5.
LUO S P, GAO L, GUO W J. Review of research progress on low-density particleboard[J]. China Wood-Based Panels, 2019, 26(1): 1-5.
- [2] 孙萍,张健,刘红光,等. UF/PMDI与PMDI胶黏剂制备轻质刨花板性能对比研究[J]. 林产工业, 2021, 58(6): 7-12.
SUN P, ZHANG J, LIU H G, et al. Study on the performance of UF/PMDI and PMDI adhesives for preparing light-weight particleboards[J]. China Forest Products Industry, 2021, 58(6): 7-12.
- [3] 朱俊. 聚氨酯胶粘剂主要应用领域现状及发展趋势[J]. 化学工业, 2013, 31(11): 34-38.
ZHU J. The present situation of main application fields of polyurethane adhesives and its development trend[J]. Chemical Industry, 2013, 31(11): 34-38.
- [4] 于文吉,周月,任丁华,等. 异氰酸酯麦秸均质板的制造工艺[J]. 木材工业, 2001(3): 3-4, 19.
YU W J, ZHOU Y, REN D H, et al. Manufacturing technology of mdi wheat straw homogeneous board[J]. China Wood Industry, 2001, (3): 3-4, 19.
- [5] 林巧佳,何修善,吴纯初,等. 异氰酸酯胶无毒低密度杉木刨花板的制造[J]. 木材工业, 2000(3): 27-30.
LIN Q J, HE X S, WU C C, et al. Manufacturing of nonpoisonous low density Chinese fir particleboard bonded with diisocyanate adhesive[J]. China Wood Industry, 2000, (3): 27-30.
- [6] 刘明,陈秀兰,詹满军,等. UF/PMDI组合胶黏剂在刨花板生产中的应用[J]. 林产工业, 2019, 56(10): 13-18.
LIU M, CHEN X L, ZHAN M J, et al. Application of UF resin and PMDI composite adhesive in particleboard manufacturing[J]. China Forest Products Industry, 2019, 56(10): 13-18.
- [7] 秦理哲,林兰英,罗建举,等. 木材胶合界面性能表征技术研究进展[J]. 世界林业研究, 2013, 26(5): 59-63.
QIN L Z, LIN L Y, LUO J J, et al. Research progress in characterization techniques of wood bonding interface[J]. World Forestry Research, 2013, 26(5): 59-63.
- [8] Jesson D A, Watts J F. The interface and interphase in polymer matrix composites: effect on mechanical properties and methods for identification[J]. Polymer Reviews, 2012, 52(3): 321-354.
- [9] HE Q, ZHAN T Y, ZHANG H Y, et al. Variation of surface and bonding properties among four wood species induced by a high voltage electrostatic field (HVEF) [J]. Holzforschung, 2019, 73(10): 957-965.
- [10] 关明杰,雍宸,赵佳. 竹材胶合界面的荧光跟踪法表征[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2012, 36(5): 125-128.
GUAN M J, YONG C, ZHAO J. Characterization on bamboo bonding interface by fluorescent track[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2012, 36(5): 125-128.
- [11] XU D L, ZHANG Y, ZHOU H D, et al. Characterization of adhesive penetration in wood bond by means of scanning thermal microscopy (SThM) [J]. Holzforschung, 2016, 70(4): 323-330.
- [12] WANG X Z, ZHAO L G, DENG Y H, et al. Effect of the penetration of isocyanates (pMDI) on the nanomechanics of wood cell wall evaluated by AFM-IR and nanoindentation (NI) [J]. Holzforschung, 2018, 72(4): 301-309.
- [13] WANG X Z, DENG Y H, LI Y J, et al. *In situ* identification of the molecular-scale interactions of phenol-formaldehyde resin and wood cell walls using infrared nanospectroscopy[J]. RSC Advances, 2016, 6(80): 76318-76324.
- [14] GUAN M J, HUANG Z W, ZENG D. Shear strength and microscopic characterization of a bamboo bonding interface with phenol formaldehyde resins modified with larch thanaka and urea[J]. BioResources, 2016, 11(1): 492-502.
- [15] Oliver W C, Pharr G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments[J]. Journal of Materials Research, 1992, 7(6): 1564-1583.
- [16] Frihart C. R. Model for understanding the durability performance of wood adhesives [C]. 30th annual meeting of the adhesion society, Inc. 2007, Tampa Bay, FL, ISSN 1086-9506: 222-224.
- [17] Frihart C R. Adhesive groups and how they relate to the durability of bonded wood[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2009, 23(4): 601-617.
- [18] Jesson D A, Watts J F. The interface and interphase in polymer matrix composites: effect on mechanical properties and methods for identification[J]. Polymer Reviews, 2012, 52(3): 321-354.
- [19] 王新洲,谢序勤,王思群,等. 基于纳米压痕技术的木材胶合界面力学行为[J]. 林业科学, 2019, 55(7): 128-136.
WANG X Z, XIE X Q, WANG S Q, et al. Investigation of the mechanical behavior of wood-adhesive interphase by using nanoindentation[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2019, 55(7): 128-136.
- [20] WANG X Z, LI Y J, WANG S Q, et al. Investigating the nanomechanical behavior of thermosetting polymers using high-temperature nanoindentation[J]. European Polymer Journal, 2015, 70: 360-370.

(本文编校 孟凡丹)