

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2025101

单板孔洞修补方式对胶合板力学性能的影响

刘晓玲^{1,2}, 禩示青^{1,2}, 潘礼成^{1,3}, 邱方亮^{1,3}, 李匀曦¹, 陈松武^{1,2}

(1. 广西广林新材木业集团有限公司, 广西南宁 530022; 2. 广西壮族自治区林业科学研究院/广西木材及人造板加工利用科技成果转化中试研究基地, 广西南宁 530002; 3. 崇左广林迪芬新材料科技有限公司, 广西崇左 532205)



摘要: 针对单板孔洞缺陷导致胶合板力学性能下降的问题, 以带有圆形孔洞缺陷的桉木 (*Eucalyptus* spp.) 旋切单板为研究对象, 分别采用补片、灰钙腻子及木混腻子三种材料对单板孔洞进行修补, 再制备胶合板, 采用非接触全场应变测量系统 (digital image correlation, DIC) 分析胶合强度测试过程中应变的传递规律, 并探究不同孔洞修补方式对胶合板力学性能的影响。结果表明, 未修补单板孔洞周围形成局部应变集中, 破坏应变传递路径, 以其制备胶合板的胶合强度、静曲强度和弹性模量, 较无孔洞对照组分别下降32.92%、18.78%和10.65%。经灰钙腻子和木混腻子修补单板制备的胶合板, 在测试过程中应变变化规律相似, 修补材料均能充分填充孔洞间隙并改善应力传递路径。较未修补组, 灰钙腻子修补组 (CP组) 的胶合强度、静曲强度和弹性模量分别提升43.52%、18.62%和10.96%, 木混腻子修补组 (WP组) 的胶合强度、静曲强度和弹性模量分别提升39.81%、14.72%和7.20%。补片修补虽然在一定程度上提升胶合板的力学性能, 但修补后孔洞边缘仍存在缝隙, 补片与单板基材贴合度不好, 提升效果有限。综合分析, 两种腻子修补对胶合板力学性能提升效果较好, 可为胶合板孔洞缺陷修复提供参考。

关键词: 胶合板; 单板孔洞修补; 补片; 腻子; 力学性能

中图分类号: TS653.3; S792.39 文献标识码: A 文章编号: 2096-9694 (2026) 01-0082-08

Effects of Veneer Hole Repair Methods on Mechanical Properties of Plywood

LIU Xiaoling^{1,2}, XUAN Shiqing^{1,2}, PAN Licheng^{1,3}, QIU Fangliang^{1,3}, LI Yunxi¹, CHEN Songwu^{1,2}

(1. Guangxi Guanglin Xincai Wood Industry Group Co., Ltd., Nanning 530022, Guangxi, China;

2. Guangxi Forestry Research Institute, Guangxi Wood and Wood-based Panel Processing and Utilization of Scientific and Technological Achievements Transformation Pilot Research Base, Nanning 530002, Guangxi, China;

3. Chongzuo Guanglindifen New Materials Technology Co. Ltd., Chongzuo 532205, Guangxi, China)

Abstract: To investigate the effects of veneer hole-repair methods on the mechanical properties of plywood, rotary-cut *Eucalyptus* veneers with circular holes were used as material. Three repair methods, namely veneer patch, calcium hydroxide-based putty and wood-mixed putty, were applied to the holes before plywood manufacture. A non-contact full-field strain measurement system (digital image correlation, DIC) was used to analyze strain transfer during the bonding strength test. The results showed

收稿日期: 2025-09-22; 修改日期: 2025-12-31

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目“基于数字化协同的林木产品智能制造关键技术”(2023YFD2201500); 广西科技重大专项“抗划超韧浸渍胶膜纸界面强化关键技术研发及应用”(AA23062010)。

作者简介: 刘晓玲 (1989—), 女, 高级工程师。Email: 331040868@qq.com

通讯作者: 陈松武, 男, 正高级工程师。Email: 291961165@qq.com

that pronounced local strain concentration occurred around unrepaired holes, disrupting the strain-transfer path. Compared with the control group without holes, the bonding strength, modulus of rupture (MOR), and modulus of elasticity (MOE) of the group with holes unrepaired decreased by 32.92%, 18.78%, and 10.65% respectively. Plywood prepared from veneers repaired with calcium hydroxide-based putty (Group CP) and wood-mixed putty (Group WP) exhibited similar strain-evolution patterns during the bonding strength test. These repair materials effectively filled the holes and improved stress transfer. Compared with the unrepaired group, the bonding strength increased by 43.52% and 39.81%, respectively, while the MOR and MOE increased by 18.62% and 10.96% for Group CP and by 14.72% and 7.20% for Group WP, respectively. Although veneer patch repair improved the mechanical properties of plywood to some extent, gaps remained at the hole edges, resulting in insufficient bonding with the veneer substrate and a limited repair effect. Overall, the two putty-based repair methods showed better performance in improving the mechanical properties of plywood, providing a useful reference for the repair of veneer hole defects in plywood production.

Key words: plywood; veneer hole repair; veneer patch; putty; mechanical properties

桉树 (*Eucalyptus* spp.) 为我国胶合板制备的主要原料树种^[1]。然而速生桉木单板存在死节、虫孔等缺陷, 造成胶层缺胶、弱界面和应力集中等问题, 影响胶合板性能^[2-3]。在实际应用过程中, 针对有孔洞缺陷的单板, 需对其进行修补, 即先去除缺陷, 再用补片或腻子等材料进行修补, 以提高单板利用率。

目前单板孔洞修补研究主要集中在补片形状、覆面填充材料、自动化修补设备等方面。刘诚等^[4]通过试验和有限元模拟分析不同形状补片对杨木 (*Populus* spp.) 单板拉伸性能的影响, 结果表明在拉伸荷载作用下, 应力集中在孔洞周边; 蝶形补片与节子形状匹配度最好且承载能力最大。石敏任等^[5]探究木纤维对腻子填补材料性能的影响, 发现添加木纤维可提升腻子填料的耐磨性、干湿强度等性能。单板缺陷自动化修补研究主要涉及基于仪器和机器视觉的单板缺陷检测、定位识别和数控挖补等^[6-10]。目前国内外已开发集成单板运输、缺陷检测与挖补的多功能单板自动化挖补机生产线^[11-12]。但针对单板孔洞修补方式对胶合板力学性能的影响, 相关研究仍较为匮乏。

鉴于此, 本研究以带有圆形孔洞的桉木旋切单板为修补对象, 分别采用补片、灰钙腻子、木混腻子等材料进行修补, 结合非接触全场应变测量系统 (digital image correlation, DIC), 探究不同修补材料对胶合板胶合强度、静曲强度及弹性

模量的影响, 旨在为桉木胶合板单板孔洞修补工艺参数优化提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

桉木旋切单板: 含水率为 10%~12%, 密度为 0.435 g/cm³, 尺寸为 1 270 mm×650 mm×1.7 mm, 为匹配热压机幅面, 将其裁剪为 500 mm×500 mm。

聚合 4, 4'-二苯基甲烷二异氰酸酯 (pMDI): 密度为 1.22~1.25 g/cm³ (25 °C), 异氰酸根含量为 30.5%~32.0%, 黏度为 150~250 mPa·s (25 °C)。

环氧树脂胶黏剂 E-44: 耐温范围—40~100 °C, 剪切强度 12 MPa, 初始固化时间为 4~6 h, 完全固化时间为 24 h。

孔洞修补材料: 补片、灰钙腻子和木混腻子。其中, 补片为直径 14 mm 的圆形木片, 使用开孔器从无缺陷的桉木旋切单板上钻取。灰钙腻子由灰钙粉、重质碳酸钙、滑石粉、可再分散乳胶粉、水泥和保水剂等组成, 使用时其与水的质量比为 3:1。木混腻子为桉木木粉 (含水率 8%, 粒径为 40~60 目^[5]) 按 10% (质量分数) 的比例加入到灰钙腻子中混合均匀。所有试验材料均由崇左广林迪芬新材料科技有限公司提供。

1.2 仪器设备

玻璃开孔器、多功能热压机、电热鼓风干燥箱、非接触全场应变测量系统 (VIC-3D)、万能力

学试验机 (UTM-4204) 等。

1.3 试验方法

1.3.1 单板修补 设置5组单板 (图1), 分别为无孔洞对照组 (control, 简称C组)、有孔洞未修补组 (hole, 简称H组)、补片修补组 (veneer patch, 简称VP组)、灰钙腻子修补组 (calcium hydroxide-based putty, 简称CP组)、木混腻子修补组 (wood flour mixed putty, 简称WP组)。

H组 (图1b): 使用直径为14 mm的开孔器在单板死节位置打孔, 确保孔洞完全包含死节并去除其周围的坏死组织, 孔洞未做修补。

VP组 (图1c): 使用直径16 mm的开孔器

(锯路约1 mm) 在完好单板上制取直径约14 mm的木片作为补片, 在补片圆周均匀涂覆环氧树脂胶黏剂, 将其嵌入孔洞, 修补前后防止环氧树脂粘连上下单板。

CP组 (图1d): 使用刮板将灰钙腻子填入孔洞、刮平, 并防止腻子与其他单板粘连。

WP组 (图1e): 采用与CP组相同的方法, 将木混腻子填入孔洞并刮平表面。

使用重物将单板压平, 并在室内 (25 °C) 放置48 h, 确保环氧树脂和填补材料完全固化。之后对修补部位进行打磨, 确保表面平整, 避免因填补材料或胶黏剂突出影响后续涂胶组坯。

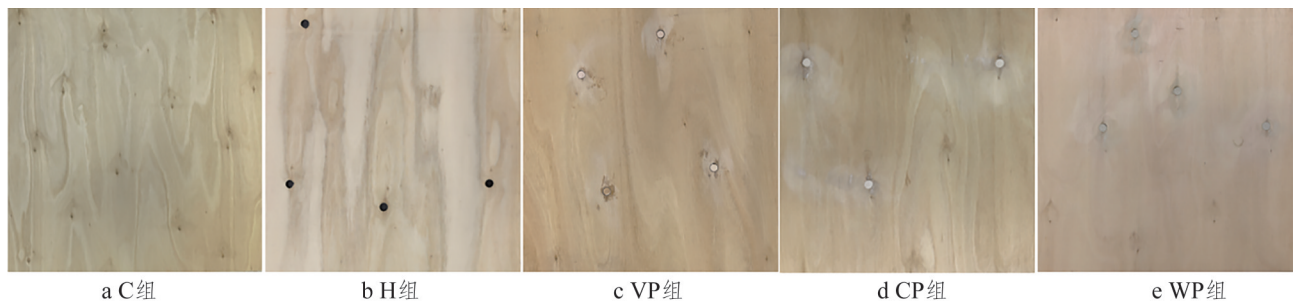


图1 试验用5组单板照片

Fig.1 5 groups of experimental veneer photos

1.3.2 三层胶合板制备 组坯前对每张单板进行拍照, 记录孔洞位置, 使3层单板的孔洞不重叠。pMDI胶黏剂单面涂胶量为40 g/m²。热压工艺参数为: 温度170 °C, 压力1.05 MPa, 时间8 min (约1 min/mm), 热压完成后逐级卸压。每个试验组制备6张规格为500 mm×500 mm×5 mm的胶合板。

1.4 性能测试

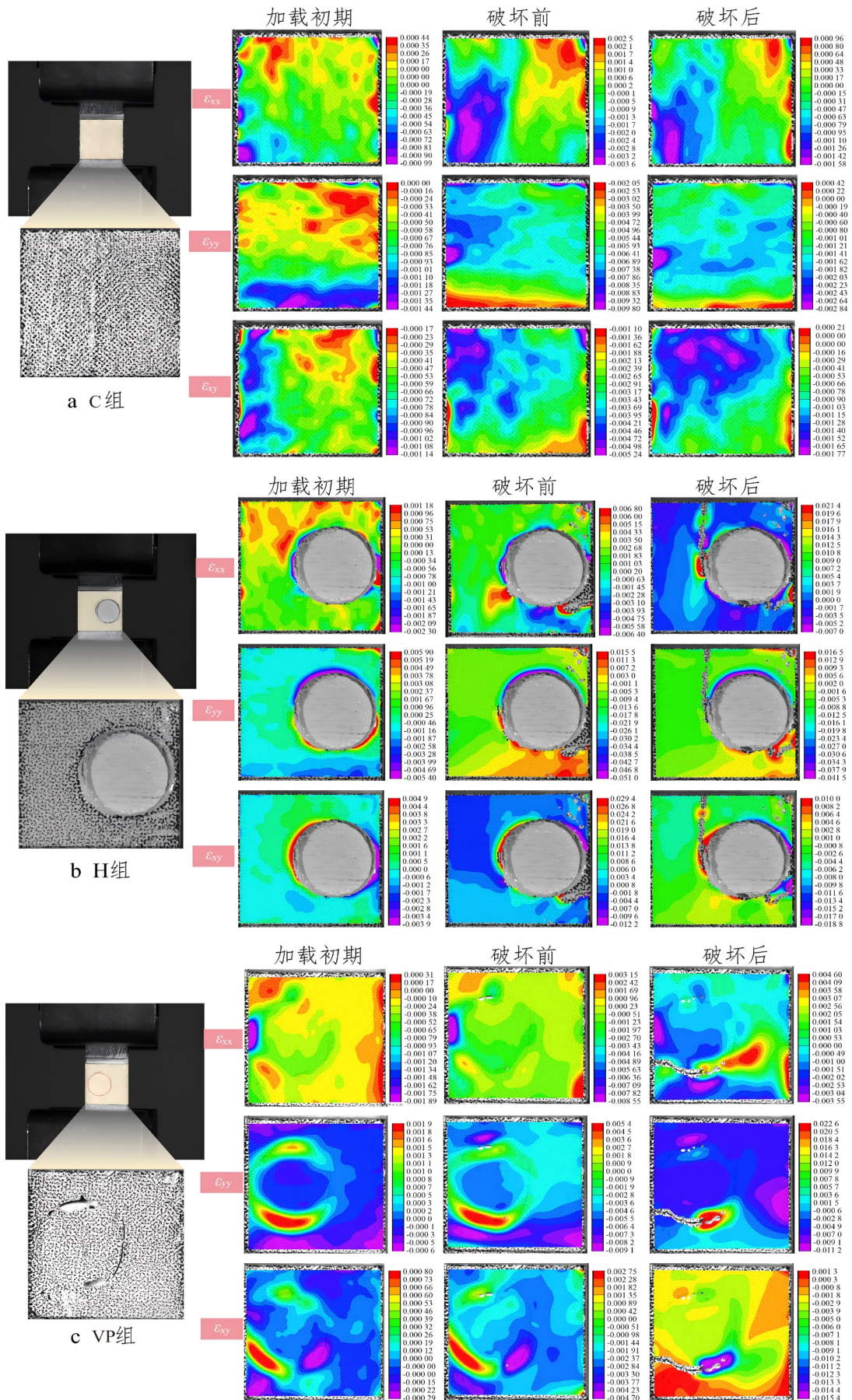
1.4.1 应变分布 参照GB/T 9846—2015《普通胶合板》制备胶合强度试件, 确保孔洞位于试件的表面, 采用DIC测量系统采集胶合强度试件中部 (25 mm×25 mm) 区域在受拉状态下的应变分布情况。先使用白色喷漆均匀喷涂于拭干的试件表面, 待漆膜干透后, 再随机点涂少量黑色散斑。相机分辨率为4 096×3 000, 2台相机的摄像夹角为25°, 照片采集频率为5张/秒, 采集时段从试验开始至试件破坏结束。设置试件的加载速度为1 mm/min, 确保DIC系统与力学试验机同步启动与采集。每组从6张胶合板中随机选取5个有效试件进行测试。

1.4.2 胶合板力学性能测试 参照GB/T 9846—2015中II类胶合板 (能够通过63 °C±3 °C热水浸渍试验, 供潮湿条件下使用的耐水胶合板) 要求, 进行胶合强度、浸渍剥离和抗弯性能测试。除C组外, 其他4组胶合板试件均含有孔洞, 考虑到胶合板制备过程中死节的位置随机, 测试时未规定孔洞在试件中的具体位置。从每组胶合板试样中随机选取抗弯性能和浸渍剥离强度有效试件数为6个, 胶合强度有效试件数为12个。

2 结果与分析

2.1 应变分析

各组试件受拉过程均经历加载初期产生应变, 随着载荷增加应变扩展, 直至最终破坏的阶段。提取从加载初期至试件或孔洞破坏前后各阶段中具有代表性时刻的横向应变 (ϵ_{xx})、纵向应变 (ϵ_{yy}) 和剪切应变 (ϵ_{xy}) 云图, 分析孔洞和修补部位在受力状态下的应变演化趋势, 如图2所示。



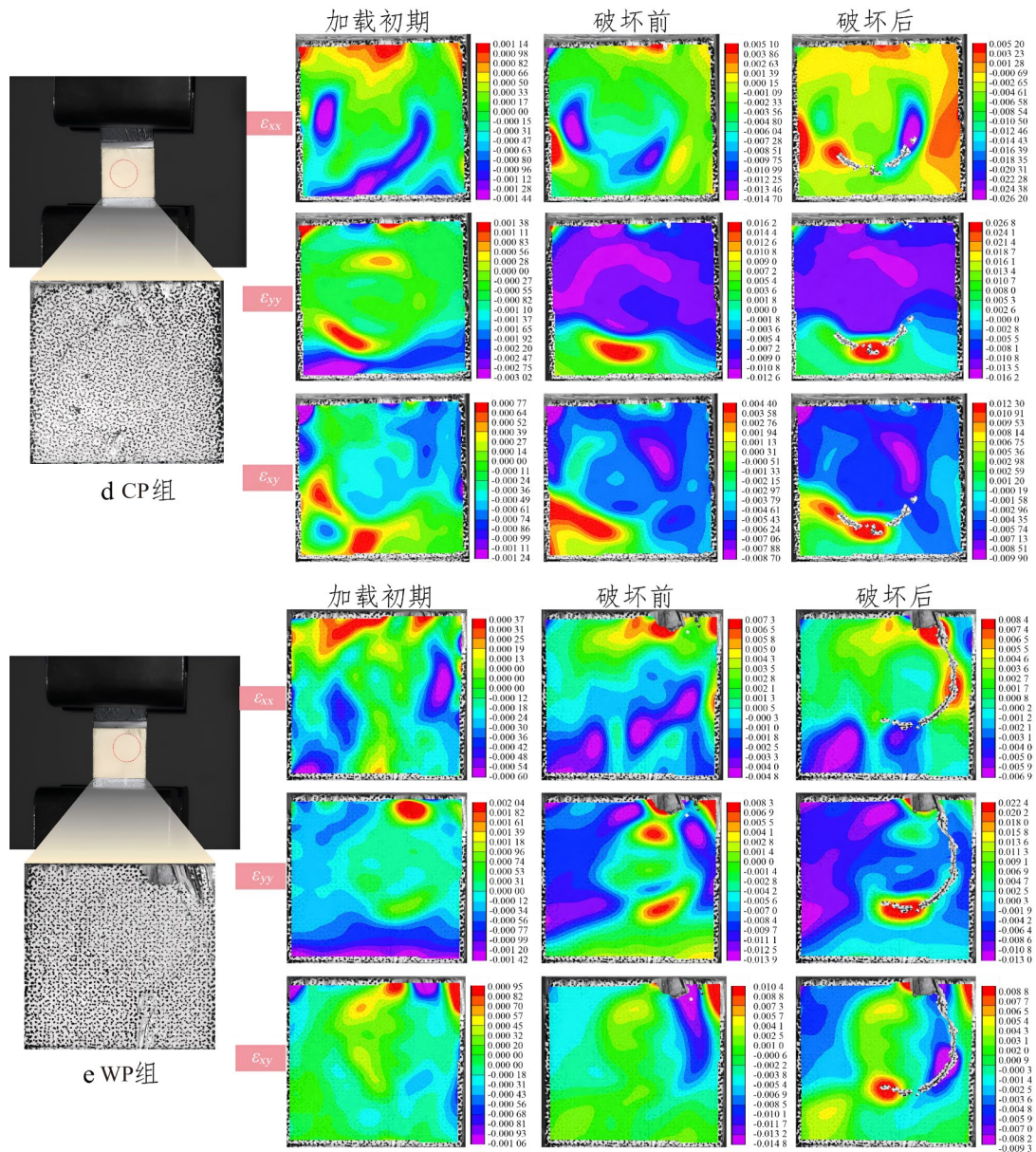


图2 胶合板胶合强度测试过程的应变云图

Fig.2 Strain contour maps of plywood bonding strength testing process

图2a显示,加载初期C组试件受拉部下部的 ε_{yy} 最大(-0.0014),表明下部区域承载力较大。破坏前,试件受拉部下部的 ε_{yy} 增大至-0.0021,上部与左侧也出现较大的 ε_{yy} (-0.0098),左下角与右上角表现出方向相反的 ε_{xx} (分别为-0.0036和0.0025),同时整个受拉部均可观察到剪切应变分布。破坏后,各方向的应变下降,受拉部下部 ε_{yy} 下降至0.0004,在试件左上角残留部分剪切应变,左下角残留部分横向应变。

从图2b可以观察到,加载初期H组在孔洞周围产生明显应变集中,孔洞周围的 ε_{xx} 、 ε_{yy} 和 ε_{xy} 绝

对值最大,分别为0.0023、0.0059、0.0049。在破坏前,受拉面全域产生剪切应变,但仍集中在孔洞附近,此时 ε_{xx} 、 ε_{yy} 和 ε_{xy} 绝对值最大,分别增至0.0064、0.0510、0.0294;随着载荷增加,孔洞周边逐渐发生损伤,导致DIC系统对部分区域的应变识别失效。最终表板沿孔洞周边顺纹撕裂,试件破坏,应变降低,但仍集中在孔洞及撕裂区域。

图2c显示,VP组试件在修补后存在缝隙,加载初期在孔洞周围产生应变集中,此时 ε_{yy} 为0.0019。与以往研究一致,即应变集中出现在孔

边区域^[4]。随着载荷增加,受拉部右下角出现较大应变(ε_{xx} 从0.000 3增至0.003 1, ε_{yy} 从-0.000 6增至-0.009 1),与H组应变现象(应变全部集中在孔洞周围)相比,这一变化表明VP组受拉区域的其他部位参与承载,应变传递路径发生改变。在孔洞修补区域下侧开裂后,试件仍存在较大应变,受拉部中上部 ε_{yy} 为-0.002 8至-0.011 2,整体试件仍具有承载能力。

由图2d和图2e可知,两种腻子类材料修补试件(CP组和WP组)的修补面较为完好,其应变变化规律相似。在试件加载初期,在孔洞周围产生应变集中,但比VP组低;同时,在受拉部上部和下部存在较大应变,与C组类似。随着载荷增加,观察到整个受拉区域的应变分布范围增大,CP组上侧的 ε_{yy} 从-0.003 0增至-0.012 6,WP组右上角的 ε_{yy} 从0.001 0增至0.010 4。最终,孔洞周边灰钙腻子修补材料与基材剥离,孔洞部位损伤,与VP组一致,此时应变并未下降,CP组上侧的 ε_{yy} 为0.016 2,WP组右上角的 ε_{yy} 为0.008 8,整体试件仍具有承载能力,应变转移至未破坏的修补区域。

2.2 胶合板性能

2.2.1 破坏模式

各组胶合板胶合强度试件的破坏模式,如图3所示。

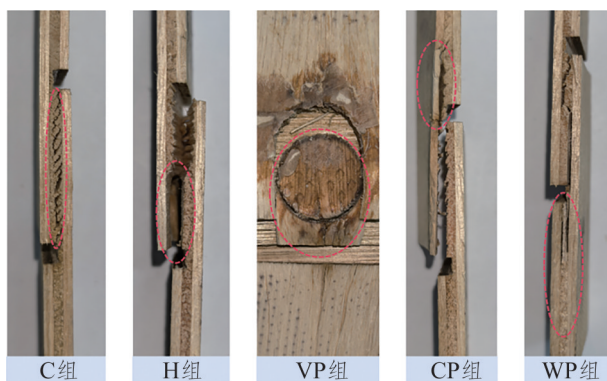


图3 胶合板胶合强度测试的破坏模式

Fig.3 Failure modes of plywood bonding strength testing

图3显示,胶合强度试件的主要破坏模式包括芯层单板破坏、胶接界面破坏以及孔洞位置破坏,不同组别的特征差异与应变集中区的分布规律相吻合。C组试件主要的破坏模式包括芯层单板横纹受拉破坏和胶接界面剥离破坏,表明pMDI胶黏剂

的胶合性能优异,可有效传递应力。H组试件因孔洞存在,形成明显的结构薄弱区,破坏模式自芯板的上部直接延伸至孔洞区域,结合图2b可知,H组试件孔洞周边应变集中、部分区域识别失效,拉伸载荷下应变集中效应加剧,孔洞增加了胶合板的破坏机率。VP组试件的补片在拉伸破坏时仍完整地附着于单板上,但其邻近单板出现剪切破坏,这表明补片与pMDI胶形成的胶合强度较高。结合图2c可知,孔洞修补可以改变应变传递路径,分散应力至非孔洞区域。CP组试件除存在胶接界面破坏外,孔洞(位于上部夹具夹持下缘)处的灰钙腻子在水浸泡冷却后发生收缩流失现象,导致其在拉伸过程中受拉变形,并与芯板脱离。类似地,WP组试件芯板孔洞(位于下部夹具夹持上缘)的修补材料木混腻子也发生流失变形,在拉伸时与单板脱离;另外,WP组试件在受拉部下侧存在芯板与表板间胶接界面破坏现象,推测为胶黏剂涂布不均导致局部界面结合强度不足导致。

2.2.2 胶合强度和抗弯性能

5组试件未见明显的剥离现象,满足GB/T 9846—2015《普通胶合板》要求;并且,锯开试件后未发现内部胶层开裂,表明孔洞修补处理并未影响胶层在湿热环境下的稳定性,胶层仍保持良好的粘结性能和结构完整性。

各组胶合板胶合强度和抗弯性能的测试结果,如图4所示;方差分析结果,列于表1。

C组试件的应变分布显示,加载过程中应变可通过连续路径传递至各承载单元,其胶合强度与抗弯性能保持在较高水平,表明无缺陷单板制备胶合板具有良好的结构完整性与应力传递效率。

图4a显示,H组试件的胶合强度较C组降低32.92%。结合应变云图(图2b)观察到,H组试件孔洞周边应变集中,破坏了载荷作用下应力的传递路径,削弱了结构整体性、降低了胶合强度。3组单板孔洞修补试件,VP组、CP组和WP组的胶合强度,较H组分别提高了20.37%、43.52%和39.81%,表明修补材料能够有效提升胶合板的胶合性能。从应变云图(图2)观察到,单板经修补后,可使除孔洞区域外的其他部位参与承载,减少局部应变集中现象。其中,腻子修补组(CP组、

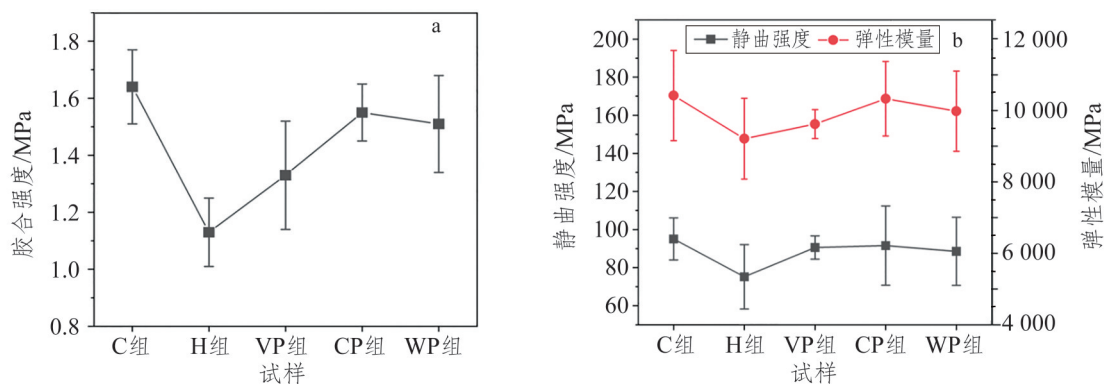


图4 不同组胶合板的胶合强度和抗弯性能

Fig.4 Bonding strength and bending strength of different plywood groups

表1 胶合板力学性能的方差分析

Tab.1 Analysis of variance for the mechanical properties of plywood

性能指标	差异源	离差平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
胶合强度	组间	1.533	4	0.383 3	3.885 0	0.007 6	**
	组内	5.427	55	0.098 7			
	总计	6.960	59				
静曲强度	组间	1 744.304	4	436.076 0	1.721 2	0.169 6	
	组内	8 107.252	32	253.351 6			
	总计	9 851.556	36				
弹性模量	组间	10 320 326	4	2 580 082	1.687 3	0.177 2	
	组内	48 936 830	32	1 529 276			
	总计	59 257 157	36				

注:**表示差异极显著($P<0.01$)。

WP组)的胶合强度提升幅度较高,原因是其细腻的材质能够充分填充孔洞内部的细小间隙,从而提高应力传递效率。方差分析结果(表1)显示,单板孔洞修补方式对胶合板胶合强度影响极显著($P<0.01$)。

由图4b可知,H组试件的MOR与MOE较C组分别下降18.78%和10.65%,这是因为孔洞削弱胶合板的承载能力,使其在受弯时易出现断裂或过早变形。相较于H组,VP组的MOR和MOE分别提高17.32%和3.33%,CP组的MOR和MOE分别提高18.62%和10.96%,WP组的MOR和MOE分别提升14.72%和7.20%。CP组和WP组通过修补材料填充,减缓孔洞周边区域应变集中的问题,从而增强抗弯性能。方差分析结果(表1)显示,采用补片或腻子材料填充单板孔洞的修补方式,对胶合板抗弯性能无显著影响。

3 结论

1) 以带有圆形孔洞的桉木旋切单板为修补对象,分别采用补片、灰钙腻子和木混腻子对其进行修补处理,再以其制备相应的胶合板。在胶合强度测试过程中,无孔洞对照组(C组)试件的受拉面产生应变,无明显应变集中现象;有孔洞未修补组(H组)加载时孔洞周边出现明显应变集中,最终沿孔洞周边发生破坏。不同孔洞修补方式均可改变应力-应变传递路径,使孔洞以外的区域参与应变传递;且在孔洞修补区域发生破坏后,试件仍具有一定的承载能力。其中,孔洞补片修补组(VP组)存在修补缝隙,导致应力传递不连续;而腻子修补组(CP组、WP组)的应变集中程度低于VP组。

2) 与无孔洞缺陷的C组相比,带孔洞的H组胶合强度、静曲强度(MOR)和弹性模量(MOE)分别下降32.92%、18.78%和10.65%,表明单板孔洞缺陷对胶合板力学性能具有削弱作用。采用补片或腻子修补孔洞可有效提升胶合板承载性能。与H组相比,VP组的胶合强度、MOR和MOE分别提高20.37%、17.32%和3.33%,CP组三项指标分别提高43.52%、18.62%和10.96%,WP组三项指标分别提升39.81%、14.72%和7.20%。

3) 后续将考虑补片-腻子混合修补方式的优势,以补片提供结构支撑、腻子弥补间隙,进一步优化孔洞修补工艺。还将开展修补材料与环境因素耦合作用的系统研究,以全面评价修补材料的耐久性和可靠性,为胶合板缺陷修补和力学性能提升提供技术支撑。

参考文献:

- [1] 刘元强, 叶交友, 詹先旭, 等. 胶合板生产工艺探讨[J]. 中国人造板, 2021, 28(7): 7-14.
LIU Y Q, YE J Y, ZHAN X X, et al. Review and prospect on plywood production technology[J]. China Wood-Based Panels, 2021, 28(7): 7-14.
- [2] 黄腾华, 宋恋环, 黎小波, 等. 桉木单板背面裂隙率对胶合板性能的影响[J]. 广西林业科学, 2024, 53(2): 262-267.
HUANG T H, SONG L H, LI X B, et al. Effects of veneer back cracking rates of eucalypt woods on performances of plywoods[J]. Guangxi Forestry Science, 2024, 53(2): 262-267.
- [3] 杨松, 王宝山, 沈锦桃. 单板缺陷自动化修补技术研究进展[J]. 世界林业研究, 2023, 36(3): 63-68.
YANG S, WANG B J, SHEN J T. Research advance in automatic patching technology for veneer defects[J]. World Forestry Research, 2023, 36(3): 63-68.
- [4] 刘诚, 刘伟, 花军, 等. 补片形状对修补的杨木单板力学性能的影响[J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(2): 123-127, 137.
LIU C, LIU W, HUA J, et al. Effect of patch shape on mechanical properties of repaired poplar veneer[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(2): 123-127, 137.
- [5] 石敏任, 迟洋, 胡冬英. 新型胶合板水性木质复合覆面填补材料的制备和评价[J]. 林产工业, 2023, 60(11): 31-37.
SHI M R, CHI Y, HU D Y. Preparation and evaluation of a new type of water-based wood composite cladding material for plywood[J]. China Forest Products Industry, 2023, 60(11): 31-37.
- [6] PANG W Y, QING J J, LIU Q L, et al. Developing an artificial intelligence (AI) system to patch plywood defects in manufacture[J]. Procedia Computer Science, 2020, 166: 139-143.
- [7] 程玉柱, 李赵春. 基于 Visual C++ 的单板表面缺陷图像检测软件开发与应用[J]. 木材工业, 2018, 32(6): 41-44.
CHENG Y Z, LI Z C. An image detection program for veneer surface defects based on visual C++[J]. China Wood Industry, 2018, 32(6): 41-44.
- [8] 夏雪, 多化琼, 丁安宁, 等. 机器视觉在单板缺陷检测中的应用[J]. 世界林业研究, 2022, 35(6): 69-74.
XIA X, DUO H Q, DING A N, et al. Application of machine vision to veneer defect detection[J]. World Forestry Research, 2022, 35(6): 69-74.
- [9] 贺春光, 高凡, 袁云梅, 等. 基于自适应校正和非锐化掩模的木材单板节子图像增强算法研究[J]. 木材科学与技术, 2023, 37(1): 74-82.
HE C G, GAO F, YUAN Y M, et al. Study on image enhancement algorithm of wood veneer knot based on adaptive correction and unsharpening mask technology[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2023, 37(1): 74-82.
- [10] POWERS P. Lighting basics for machine vision[J]. Quality, 2020, 59(13): 5.
- [11] 郭乙宏, 姚瑜, 李运华. 木材加工机械的单板缺陷检测和自动挖补技术研究[J]. 制造技术与机床, 2025(1): 75-85.
GUO Y H, YAO Y, LI Y H. Research on flaw detection and automatic digging-filling of wood-board for wood machine tool[J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2025(1): 75-85.
- [12] KAURANEN E, TOLONEN E. Veneer patching apparatus: USA, US2012018042[P]. 2012-01-26.
(责任副主编 徐朝阳 / 编校 向琴)

(上接第73页)

- [8] 何金蓉, 屈伟, 冯云, 等. 抗菌人造板的研究进展及展望[J]. 林产工业, 2023, 60(4): 75-80.
HE J R, QU W, FENG Y, et al. Research progress and prospect of antibacterial wood-based panel[J]. China Forest Products Industry, 2023, 60(4): 75-80.
- [9] 王保华, 张显权, 付超, 等. 中密度纤维板抗菌处理工艺[J]. 东北林业大学学报, 2014, 42(8): 95-98.
WANG B H, ZHANG X Q, FU C, et al. Antibacterial technology on medium density fiberboard[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2014, 42(8): 95-98.
- [10] ALEKSANDROV L, RANGELOVA N, LAZAROVA-ZDRAVKOVA N, et al. Preparation, characterization, and antibacterial properties of Cu-fibreboards[J]. Materials, 2023, 16(21): 6936.
- [11] 张文标, 李文珠, 曾凡地. 竹炭的红外辐射特性[J]. 浙江林学院学报, 2008, 25(5): 573-577.
ZHANG W B, LI W Z, ZENG F D. Infrared radiation with bamboo charcoal[J]. Journal of Zhejiang Forestry College, 2008, 25(5): 573-577.
- [12] WARM K, TRIPODI G, ANDRIS E, et al. Spectroscopic characterization of a reactive $[Cu_2(\mu-OH)_2]^{2+}$ intermediate in Cu/TEMPO catalyzed aerobic alcohol oxidation reaction[J]. Angewandte Chemie, 2021, 60(42): 23018-23024.
- [13] 蒋腾, 胡正怡, 蔡建国. 2-咪唑烷酮合成机理及工艺优化研究[J]. 化学世界, 2015, 56(11): 671-675.
JIANG T, HU Z Y, CAI J G. Optimization and mechanism of the synthesis of 2-imidazolidone[J]. Chemical World, 2015, 56(11): 671-675.
- [14] ZHAO H, LI X Z, WANG X, et al. Effect of copper (II) sulfate on the properties of urea formaldehyde adhesive[J]. Polymers, 2022, 14(1): 94.
- [15] 赵金, 王行, 韦双颖, 等. 氨水用量对胶合板用脲醛树脂结构与性能的影响[J]. 林业工程学报, 2025, 10(6): 33-42.
ZHAO J, WANG H, WEI S Y, et al. Effects of ammonia dosage on structure and property of urea-formaldehyde resin for plywood[J]. Journal of Forestry Engineering, 2025, 10(6): 33-42.
- [16] TONG Q L, FAN Z Z, WANG B, et al. Preparation and application of superhydrophobic copper mesh by chemical etching and in-situ growth [J]. Frontiers in Chemistry, 2021(9): 737550.
- [17] LIU X L, JIANG Z H, LI J, et al. Super-hydrophobic property of nano-sized cupric oxide films[J]. Surface and Coatings Technology, 2010, 204(20): 3200-3204.
- [18] ZHANG C J, PEI K, SHENG T Y, et al. Metal oxides engineering: toward sustainable superhydrophobic surfaces[J]. Advanced Functional Materials, 2026, 36: e12239.
- [19] 尹锁, 方旭峰. 人造板用甲醛捕捉剂研究进展[J]. 中国人造板, 2023, 30(3): 10-13.
YIN S, FANG X Z. A review of formaldehyde scavenger[J]. China Wood-Based Panels, 2023, 30(3): 10-13.
- [20] 伍成梁. 活性炭-纳米银颗粒(AC-AgNPs)的制备及其抗菌性能研究[D]. 天津: 天津大学, 2022.
- [21] 钟晓. 可广泛应用的纳米氧化铜抗菌剂[J]. 化工新型材料, 2003, 31(12): 46.
(本文编校 向琴)