doi: 10. 11933/j. issn. 1007-9289. 20201222003

# Ⅱ型滑移开裂行为下竹胶板单搭接结构力学特性\*

张 杰<sup>1</sup> 邓砚泽<sup>1</sup> 张 瀚<sup>2</sup> 赵广慧<sup>1</sup> 向 东<sup>3</sup>
(1.西南石油大学机电工程学院 成都 610500;
2.加拿大阿尔伯塔大学机械工程系 埃德蒙顿 T6G 2G8 加拿大;
3.西南石油大学新能源与材料学院 成都 610500)

**摘要:**为研究竹胶板的剪切滑移力学行为与失效机理,建立竹胶板单搭接结构 II 型滑移开裂数值模型,考虑非线性接触,利用 无厚度 cohesive 黏聚力行为模拟黏接层损伤失效,从极限失效载荷、剥离应力及剪切应力角度分析单搭接结构在位移载荷作 用下发生剪切滑移失效的演化规律,探究了竹胶板厚度、黏接长度、位移载荷量对搭接结构失效机制影响规律。结果表明,竹 胶板厚度越小,搭接面沿长度两侧剥离失效越剧烈,一定范围内的竹板厚度增加可提高单搭接结构胶合能力;随着搭接长度 增加,极限失效载荷增长率下降,搭接面上出现更多胶层界面黏合破坏区域,混合破坏模式更加明显,而自由边长度对搭接效 果无显著影响;搭接面剥离失效占比随位移载荷增加而增加。研究结果可为竹材的胶合结构设计提供理论依据。 关键词: 竹胶板; 单搭接; 剪切滑移; 剥离失效 中图分类号: TU398

## Mechanical Properties of Bamboo Glued Board with Single Lap Structure under Mode II Slip Cracking Behavior

ZHANG Jie<sup>1</sup> DENG Yanze<sup>1</sup> ZHANG Han<sup>2</sup> ZHAO Guanghui<sup>1</sup> XIANG Dong<sup>3</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China;

2. Department of Mechanical Engineering, University of Alberta, Edmonton T6G 2G8, Canada;

3. School of New Energy and Materials, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: In order to study the mechanical behavior and failure mechanism of bamboo plywood, a numerical model of mode II slip cracking of bamboo glued board with single lap structure is established. Considering nonlinear contact, cohesive behavior without thickness is used to simulate the damage and failure of adhesive layer. The evolution law of shear slip failure of single lap structure under displacement load is analyzed from three aspects of ultimate failure load, peel stress and shear stress. Effects of the thickness of bamboo glued board, adhesive length and displacement load on the failure process of lap joint model were studied. The results show that the smaller the thickness of the bamboo plate is, the more severe the peeling failure along both sides of the lap surface is. The bonding capacity of the single lap structure can be improved by increasing the thickness of the bamboo plate within a certain range. With the increasing of the lap length, the growth rate of the ultimate failure load decreases, there are more adhesive failure areas on the lap surface, and the mixed failure mode is more obvious. The free edge length has no significant effect on the lap effect. The failure increases with the increasing of displacement load. The research results can provide theoretical and technical support for the glued structure design of bamboo.

Keywords: bamboo glued board; single lap; shear slip; peel failure

0 前言

竹材作为一种可再生资源,由于其优良的力学

性能被广泛应用于建筑等行业<sup>[1]</sup>。但由于缺少可 靠的连接方式,限制了竹材应用发展,常规螺栓、销 钉、连接器在使用过程中易造成竹材变形过大<sup>[2]</sup>。

 <sup>\*</sup> 中国博士后科学基金(2019M653839XB)和四川省博士后特别资助项目。
 Fund: Surpported by China Postdoctoral Science Foundation(2019M653839XB) and Special Foundation for Sichuan Postdoctoral.
 20201222 收到初稿, 20210121 收到修改稿

树脂胶接被广泛应用于胶合竹等各类竹材连接<sup>[3-4]</sup>。不同工况下胶合竹板失效形式差异较大,因此开展胶合竹板剪切滑移失效力学特性研究对其结构设计至关重要。

许多学者对竹胶合板进行了探索研究,如 LI 等[5]利用环境扫描电子显微镜和傅立叶变换红外 光谱分析了玻璃纤维增强竹胶合板的黏结机理,发 现胶合板失效后玻璃纤维与树脂结合面无破损。 TANG 等<sup>[6]</sup> 对竹胶合板基本力学性能进行了详细测 试,为竹胶合板抗压强度和抗剪强度参数提供了数 据库材料。ZHANG 等<sup>[7]</sup>研究钢竹胶合板胶结力学 性能,提出了不平衡胶接接头的解析模型,发现初始 脱黏是由竹胶合板与胶层界面处的剪应力和剥离应 力引起的。WU 等<sup>[8]</sup>通过试验得到竹胶合板在剪 切过程中具有良好的弯曲和剪切性能,并对胶合 板破坏模式进行探讨。JAN 等<sup>[9]</sup>通过有限元分析 了竹胶合板的面应变和层间应力。FENG 等<sup>[10]</sup>提 出了建筑用竹胶合板的最佳工艺。HAN 等<sup>[11]</sup>对 酚醛树脂胶合竹胶合板的弯曲力学性能进行了测 试和分析。

目前针对竹胶板的研究大多限于试验,且只能 分析最终胶合破坏失效状态,较难对胶合失效过程 定量分析。搭接胶合可以应用解析法求解<sup>[12-13]</sup>,但 是竹板间发生剪切滑移失效时,应力计算非常复杂, 同时受限于试验条件,得到的数据十分有限。因此 本文通过建立竹胶合板单搭接剪切滑移三维数值仿 真模型,采用非线性接触 cohesive 黏聚力行为分析 胶层开裂及损伤演化过程,研究单搭接模型的剪切 滑移力学特性,实现对竹胶板搭接效果评价与影响 因素分析。

## 1 胶合竹板数值模型

#### 1.1 数值模型

竹胶板的单搭接结构模型如图 1 所示,竹板尺 寸采用 70 mm×35 mm×16 mm 竹胶板<sup>[14]</sup>,搭接部分 长度 35 mm。下竹板固定,上竹板最左端施加位移 载荷。





实际中,胶合层厚度是极其微小的,若在分析中 引入较明显的胶合层厚度,模型在施加位移载荷会 带来附加弯矩导致竹胶板发生张拉破坏<sup>[15]</sup>,不适用 于研究搭接竹板的剪切破坏,因此采用无厚度黏聚 力接触行为模拟胶合过程。

胶合破坏主要有胶合层剪切滑移破坏、胶合层 张拉破坏以及竹板拉伸破坏三种,通过实验<sup>[16]</sup>得 知,胶合竹板主要是由于胶层的剪切破坏导致胶结 失效破坏,故本文数值模型分析胶层在剪切力作用 下发生破坏模式。

竹材应力应变关系已有研究<sup>[17]</sup>,其属于各向异 性材料,经过交叉组配的竹胶板本构更加复杂,但该 组配方式使得竹胶板材料性质基本均匀,故在进行 竹胶板单搭接性能分析中可将竹胶板视为各向同性 材料<sup>[18]</sup>,文中竹胶板弹性模量 4 091 MPa,泊松比为 0.2,采用环氧树脂胶(DG4)对竹板进行黏接。胶层 法向弹性模量和剪切模量均为 1 500 MPa,法向极 限拉应力强度为 13.6 MPa,横向剪切应力强度为 13.7 MPa, B-K 损伤演化准则法向断裂能  $G_{1c}$  = 0.32 kJ/mm<sup>2</sup>,剪切断裂能  $G_{1c}$  = 0.41 kJ/mm<sup>2[14]</sup>。

#### 1.2 黏聚区本构模型

黏聚力模型是在 DUGDALE 和 BARENBLAT 内 聚力模型基础上,伴随黏聚力理论逐步发展起来 的<sup>[19]</sup>。根据断裂失效的方式黏聚力本构模型可分 为单一型和混合型。单一型指在黏接界面只发生纯 拉或纯剪破坏形式。本文黏接的两竹胶板主要破坏 形式为剪切破坏,不可避免地会产生张拉破坏,因此 属于混合破坏形式,故采用图 2 所示双线性黏聚力 本构模型对胶合竹板界面进行模拟。



图 2 Cohesive 单元混合型失效双线性 内聚力本构关系

Fig. 2 Bilinear cohesive constitutive relation of mixed failure for cohesive element

胶层黏聚力拉应力随着开裂位移增加而增大, 当拉应力随开裂位移的增大而达到一个极值点时, 即材料开始发生损伤并扩展,随后应力随着位移增加而线性下降,当应力下降到0时,破坏已完全发生,界面分离。

胶层初始状态的力与位移为线性关系,当达到 胶层所能承受最大应力时,胶层发生开裂,故对于初 始损伤准则选择尤为重要,本文采用常用的二次名 义应力准则<sup>[20]</sup>

$$\left(\frac{\sigma_{\rm n}}{\sigma_{\rm n}^{\rm max}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\rm s}}{\sigma_{\rm s}^{\rm max}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\rm t}}{\sigma_{\rm t}^{\rm max}}\right)^2 = 1 \qquad (1)$$

式中, $\sigma_n,\sigma_s,\sigma_t$ 分别代表黏聚力单元承受的法向以 及两个切向应力; $\sigma_n^{max},\sigma_s^{max},\sigma_t^{max}$ 分别代表黏聚力单 元所能承受的极限应力,当三个方向的应力之比平 方和为1时损伤开始。

当材料满足发生初始破坏条件后,进入产生裂 纹的胶层失效过程,即损伤演化。通常由参数 SDEG 刚度退化参数来表征,当刚度退化达到1时, 该黏聚力单元完全失效。

$$SDEG = \frac{\delta_{\rm m}^{\rm f}(\delta_{\rm m}^{\rm max} - \delta_{\rm m}^{\rm 0})}{\delta_{\rm m}^{\rm max}(\delta_{\rm m}^{\rm f} - \delta_{\rm m}^{\rm 0})}$$
(2)

式中,δ<sup>max</sup> 为加载过程中结点最大位移;δ<sup>f</sup><sub>m</sub>为胶层完 全失效时结点位移;δ<sup>o</sup><sub>m</sub> 为胶层开始损伤时结点 位移。

在黏聚力拉应力与剪应力共同作用下胶层发生 失效,由能量耗散率表征胶层开裂失效过程,本文采 用 B-K 准则进行描述。

$$G_{\rm T} = G_{\rm 1C} + (G_{\rm IIC} - G_{\rm 1C}) \left(\frac{G_{\rm II}}{G_{\rm 1}}\right)^{\eta}$$
(3)

$$G_{\rm 1C} = \frac{T\delta_{\rm m}^{\rm max}}{2} \tag{4}$$

$$G_{\rm IIC} = \frac{\tau \delta_{\rm m}^{\rm max}}{2} \tag{5}$$

式中, $G_{\rm T}$ 为混合模式下断裂能; $G_{\rm 1C}$ 为 Cohesive 单元 法向方向断裂能; $G_{\rm IC}$ 为 Cohesive 单元剪切方向断 裂能; $G_{\rm I}$ 表示界面牵引力做功, $G_{\rm I}$ 为界面剪切力做 功; $\eta$ 为材料参数; $\delta_{\rm m}^{\rm max}$ 为混合失效模式下最大有效 位移,T为法向最大应力, $\tau$ 为切向最大应力。

#### 1.3 网格无关性验证

如图 3 所示,对不同网格数量竹胶板搭接模型 进行分析,得到竹胶板开裂最大破坏载荷随竹板 位移关系。随着网格数量增加,峰值失效载荷变 化趋势在一个数值范围内上下波动,且位移变化 关系始终相同,说明仿真模型收敛。后续分析中, 为保证计算结果准确,采用 4 320 网格数量进行模 型分析。



## 2 胶合竹板力学性能分析

#### 2.1 竹胶板整体剪切滑移结果分析

图 4 为不同损伤程度下搭接竹板应力云图。整 个黏接层在剪切滑移过程中具有最大值区域,即损 伤起始、50%部分损伤以及近乎完全失效三个时间 点。滑移剪切过程中搭接竹板的黏结层在位移载荷 作用下产生裂纹,胶合界面开始出现应力,且应力大 小随着开裂位移增加而增加,Damage 为 0.5 时应力 达到最大,再增加到一定程度后,峰值应力不再出现 在胶合面两端,开始向中部转移。两竹板自由端始 终未出现明显应力。



Fig. 4 Stress distribution nephogram of glued bamboo board with different damage degree

图 5 和图 6 分别为不同损伤程度下胶合面内聚 力单元刚度退化和损伤初始判据云图。刚度退化值 为 1 表示内聚力单元完全失效,损伤初始判据为 1 表示该点处内聚力单元开始进入损伤失效阶段。由 图可知,整个胶合界面损伤失效过程并不是同步进 行,而是由两侧向中间逐步发展,具有一定滞后性。



图 5 不同损伤程度下胶合面内聚力单元刚度退化云图 Fig. 5 In plane damage nephogram with different degrees of cohesion





Fig. 6 Initial damage criterion of cohesive element in adhesive surface under different damage degree

图 7 为竹胶合板极限失效载荷随位移变化曲线。 位移 0~0.24 mm 为线弹性阶段,胶层未发生损伤,该 阶段的线性规律表明整个搭接竹板并未发生明显刚 度变化。当位移为 0.24 时,竹板上出现峰值载荷,随 位移增加的弹性阶段结束,胶层开始进入损伤失效阶 段,位移达到 0.37 mm 时,胶层完全失效,竹板之间搭 接面不再有黏聚力,即完全分离,此时载荷为 0。





#### 2.2 胶合面不同损伤程度下剥离应力分析

图 8 为不同损伤程度下胶合面接触应力云图和 沿路径 A-B 的剥离应力变化曲线。接触应力最大值 始终出现在搭接面左右侧。三个损伤时刻中 A 处 接触应力始终大于 B 处,这是由于位移载荷在 A 端 施加, B 端是固定端,同时由于附加弯矩的影响,导 致 B 端接触应力始终小于同时刻的 A 端。



图 8 不同损伤程度下沿路径 A-B 剥离应力变化曲线 Fig. 8 peeling stress curve along the path of A-B under different damage degrees

当 Damage 为 0.1 时,胶层刚开始进入损伤,峰 值接触应力较小, 仅为 26 MPa; 当 Damage 达到 0.9, 胶层即将失效,端点处最大接触应力为 39 MPa,此时剥离强度比初始损伤较强;剥离强度最 大时刻的 Damage 为 0.5,此时接触应力在三个阶段 中最大,剥离程度最剧烈,最大接触应力为 45 MPa, 竹板间抵抗拉伸剥离效果最明显,竹板有肉眼可见的 微小跳动,表现为较小弹性变形,此时竹板并未分离, 随着位移增加,该变形会消失,竹板恢复原状。

Damage 为 0.5 时, 搭接面中部出现明显的负接 触应力, 这是由于搭接面两端有较大剥离应力, 大的 剥离强度导致竹板发生微小形变, 故当力作用在竹 板上两端时就会产生一定附加弯矩,方向为逆时针, 该弯矩使得搭接面中部出现轻微挤压,产生较小负 值接触应力。

#### 2.3 胶合面不同损伤程度下剪切应力分析

如图 9 所示,剪切应力与接触应力不同,搭接面 最大剪切应力是随开裂位移增加,逐渐向黏接界面 中部移动,这是由于剪切滑移行为是从搭接面两端 开始,逐步演化直至覆盖整个搭接面。Damage 为 0.1 时,最大剪切应力出现在搭接面两端,此时胶层 刚开始进入损伤阶段,只有搭接面两端产生剥离趋 势,出现对称剪切力,搭接面中部未发生明显剪切行 为,只有较小剪切应力,故剪切应力在路径 A-B 上表 现为具有最小值的凹函数。







Damage 为 0.5 时,峰值剪切应力开始向搭接面 中部转移,在两端峰值之间路径中的剪切应力变化 规律同初始损伤时刻相同。但随着剪切滑移量增加,搭接面中间点处具有更大剪切应力,这是损伤累 积带来的影响,且该点处剪切应力会随着滑移量的 增加继续增大。此刻,在搭接面两端开始出现不完 整剪切带,即图中波浪条纹处,剪切带呈斜向 45°分 布,剪切带周围剪切应力较低。

Damage 为 0.9 时,最大剪切应力分布在搭接面 中部,胶合层即将完全失效,竹板搭接面也即将完全 分离。剪切带的形成会阻碍裂纹扩展,在图中表现为 多个波峰,剪切强度越大剪切带越长<sup>[21]</sup>,剪切带面积 越大。相对于 Damage 为 0.5 时,搭接面上出现了较 多剪切带,且均出现在已发生过剧烈剪切运动的面 上,分布规律相同;但此刻剪切带更长、数量也更多。 剪切带在沿宽度方向上分布于两侧,沿宽度方向的中 部并无剪切带,表明搭接面发生剧烈剪切滑移运动的 点主要发生在率先分离的搭接面边缘位置。

## 3 胶合参数影响

#### 3.1 竹板厚度

对厚度为4 mm、8 mm、12 mm、16 mm 的四种竹 板进行研究,选取剥离应力、剪切应力、极限失效载 荷三种参数进行对比分析。

Damage 为 0.5 时剥离应力在路径 A-B 上的变化 规律(图 10),不同厚度搭接竹板沿着路径 A-B 的剥 离应力变化趋势大致相同,高剥离应力分布在搭接区 域两侧,向搭接区域中部靠拢的剥离应力逐渐减小。 可知,相同损伤情况下搭接区域边缘的剥离应力随着 厚度减少而逐渐减小。这是由于竹板厚度减小,单位 面内承受载荷能力降低,而较低剥离应力使搭接面分 离,搭接竹板越厚,分离难度越高,胶接强度越高。

图 10 中,四种不同厚度胶合竹板都产生了局部 负值接触应力,但随着厚度的减小,负值接触应力从 搭接面中部向边缘转移。4 mm 厚竹板最小接触应 力出现在 5.3 mm 和 29.1 mm 处,而此刻搭接面中 部接触应力为较小的正值。这是由于随着竹板厚度 的减小,整体搭接模型刚度下降,竹板抵抗弯曲变形 的能力降低,弯矩对竹板的影响加剧,搭接面沿长度 两侧小范围内的剥离失效程度相对较厚竹板更加剧 烈。对应图中 4 mm 厚竹板最小接触应力发生在搭 接面两侧,而此刻在 5.3 mm 到 29.1 mm 之间表现 为小幅度的凸函数,说明该搭接面中部也有微小胶 层剥离现象出现。因此,在接头设计中选择较小厚 度竹胶合板时,边缘及中部应采用较大刚度的胶黏



图 10 不同厚度下沿路径 A-B 的剥离应力变化曲线 Fig. 10 Peel stress curves along paths A-B under different thicknesses

剂,以提高胶接能力。

Damage 为 0.9 时不同厚度竹板的搭接面剪切 应力分布规律相同(图 11),但出现数量不同剪切 带。其中,搭接面上从左边至中部分为剥离区、剪切 带区、剪切区。剥离区主要发生胶层界面黏合破坏, 即剥离破坏后界面不会留下明显残胶,剪切区发生 胶层剪切内聚破坏,剪切带区有多条阻碍胶层剪切 失效的剪切带。剪切带数量的增加虽然会提高剪切 强度<sup>[19]</sup>,但同时会导致胶合界面形貌破坏严重。随 着厚度减小,剪切带区域面积逐渐增大。竹板厚度 为 4 mm 时,剪切带区域几乎分布于整个胶合面上, 剥离区域减少,该变化表明胶结竹板厚度会影响胶 合面内聚力单元剪切失效行为,产生更多剪切带,界面 失效主要为剪切滑移失效。

图 12 为不同厚度搭接竹板极限失效载荷位移 曲线。随着厚度减小,极限失效载荷降低,搭接强度 下降,最大失效位移也增加;载荷线性上升阶段斜率



with different thickness(MPa)





减小,模型刚度降低。四条曲线所围面积大致相同, 近似认为四种厚度下胶层耗散能量不变。厚度减 小,使得模型剪切失效更加明显,极限失效载荷急剧 下降,最大失效位移急剧增加,这是由于随着厚度减 小,面内作用载荷减小,整体模型刚度降低,抵抗变 形能力降低,此时胶层破坏形式中剪切失效破坏更 加明显,胶合能力变弱。结合剪切带随厚度变化分 析,可知胶合能力随竹板的厚度增加而提高,进而趋 于稳定,达到 16 mm 厚时,再提高厚度,胶合能力不 会有明显的提升。

#### 3.2 竹板搭接边与自由边长度

分析自由边以及搭接边长度为 20 mm、35 mm、 50 mm、65 mm、80 mm 模型。图 13 表明,不同自由 边长度下,极限载荷无显著变化,自由边长度不会直 接影响竹板搭接效果。由于本模型加载位移载荷在 搭接竹板搭接面一侧,并未靠近自由端,而下竹板完 全固定,故位移载荷全部通过胶黏剂施加在搭接界



面上。而随着搭接边长度增加,极限载荷变化呈上 升趋势,这是由于搭接界面面积增加,胶合强度增强,达到胶层破坏所需载荷也随之增加。

图 14 为不同搭接长度下搭接面剪切应力分布 规律。长度增加至 35 mm 开始出现一定数量剪切 带,且随着搭接长度增加,剪切带在搭接面的分布 规律更加明显;在搭接面水平对称轴的上下两侧 呈半圆形分布,且沿宽度两侧方向退化,峰值剪切 应力随搭接长度增加而增加。当搭接长度达到 50 mm 甚至更长时,搭接面上剥离区域、剪切带区 域、剪切区域出现明显分界线,剥离区域分布在搭 接面沿长度两侧以及沿宽度方向对称分布的剪切 带之间。该现象表明随着搭接长度的增加,相同 力作用下将产生更大弯矩,其作用在搭接竹板上, 导致竹板剥离力增大。如 80 mm 搭接长度即将失 效的搭接面剪切应力云图,搭接面上出现较多胶 层界面黏合破坏区域,此区域上无明显残余胶黏 剂,变为混合破坏模式。



图 14 不同搭接长度胶合面剪切应力云图(MPa)

Fig. 14 Shear stress nephogram of adhesive surface with different lap length(MPa)

图 15 为不同搭接长度下极限失效载荷与位移 变化曲线,可知极限失效载荷随着搭接长度的增加 而增加,并且增长率逐渐减小,呈非线性关系,极限 失效载荷会趋于稳定值。实际工程中考虑到材料质 量及成本,不宜选用过大搭接长度提高胶合强度。

#### 3.3 位移载荷

由图 16 可知,随着位移载荷增加,载荷位移曲 线在加载过程中均保持相同斜率的线性增长,模型 刚度稳定性良好;较大力作用在竹板上会产生大的 附加弯矩,部分单元发生剥离失效,此时极限载荷与 最大开裂位移也随着位移载荷增加而增加,位移载 荷曲线所围面积变大,模型胶合破坏能量耗散增加, 这是由于胶层开裂形式由大面积剪切失效转变为具 有胶层剥离破坏和剪切破坏并存的混合失效形式。



图 15 不同搭接长度下极限失效载荷-位移曲线 Fig. 15 Ultimate failure load displacement curves under different lap lengths







图 17 为不同位移载荷下最大接触应力曲线,随着位 移载荷增加,接触应力始终处于上升趋势,且最大接 触应力出现在搭接界面两侧边缘处,说明位移载荷 增加会使得胶层产生更大拉伸剥离失效效应,搭接 面沿长度的两侧始终为剥离现象最剧烈点。



### 4 结论

(1) 位移载荷作用下单搭接竹胶板发生剪切滑 移失效,初期载荷随位移线性增长,达到峰值后胶层 进入损伤阶段,载荷开始下降;高应力最先出现在搭 接面沿长度方向两侧,并随开裂位移增加向搭接面 中部转移;最高接触应力始终出现在搭接面两端, Damage 为 0.5 时,搭接竹板剥离强度最大;搭接面 剪切应力云图出现了剥离区、剪切带区、剪切区三种 区域,最高剪切应力随位移增加从搭接面边缘向中 部转移直至消失,剪切带呈斜向 45°分布,其周围剪 切应力较低,同时会阻止裂纹扩展,胶层即将完全失 效即 Damage0.9 时剪切带数量最多。 (2) 竹板厚度越小,边缘剥离应力越小,竹板抵 抗弯曲变形能力下降,搭接面上出现挤压现象的点 由中部向两侧转移,搭接面中部开始有小的胶层剥 离应力,搭接面沿长度两侧小范围内的剥离失效程 度相对较厚的竹板更加剧烈;剪切带数量及极限失 效载荷随竹板厚度减小呈单调变化。

(3)不同自由边长度搭接胶合竹板对搭接效果 无显著影响;搭接边长度增加,极限失效载荷增加, 胶合能力增强,搭接面上出现更多的界面黏合破坏 区域;极限失效载荷随搭接长度增加趋于稳定。

(4)随着位移载荷增加,胶合破坏位移与极限 载荷均单调递增变化,搭接模型胶合破坏严重;搭接 面两侧始终为接触应力最大点,该值随位移载荷的 增加呈单调增变化;模型表现为混合失效形式且拉 伸剥离失效占比逐渐增加。

#### 参考文献

- [1] LI Haitao, ZHANG Qisheng, HUANG Dongsheng, et al. Compressive performance of laminated bamboo [J]. Composites Part B, 2013, 54(1): 319-328.
- [2] ZHANG Xiubiao, JIANG Zehui, FEI Benhua, et al. Experimental performance of threaded steel glued into laminated bamboo[J]. Construction and Building Materials, 2020, 249:118780.
- [3] TAN T, RAHBAR N, ALLAMEH S M, et al. Mechanical properties of functionally graded hierarchical bamboo structures [J]. Acta Biomaterialia, 2011, 7 (10): 3796-3803.
- [4] KATLEEN D F, RONALD R. One laminated bambooframe house per hectare per year [J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 210-218.
- [5] QUAN Li, CHEN X, QI W, et al. Analysis of bonding mechanism of glass giber-reinforced bamboo plywood
   [J]. BioResources, 2020(1): 529-543.
- [6] TANG G, ZHANG Z, SUN P, et al. Experimental research on basical mechanical properties of bamboo plywood[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020: 12043.
- [7] ZHANG Z, LI Y, LIU R. An analytical model of stresses in adhesive bonded interface between steel and bamboo plywood [J]. International Journal of Solids and Structures, 2015: 103-113.
- [8] QING Wuwen, CHEN Shuai, MA Xueyuan. Test research on flexural and shear properties of bamboo plywood [J]. Applied Mechanics and Materials, 2012 (166-169):2951-2157.

2021 年

- [9] HAN J, LIANG C. A study on face strain and interlaminar stress of bamboo plywood [J]. Advanced Materials Research, 2012: 488-492.
- [10] Feng M Z, Zhao R L, Lv N et al. Constructional Bamboo Plywood Process Control and Production Process
   [J]. Applied Mechanics & Materials, 2012, 184–185: 728-731.
- [11] HAN Zou. Study on the bending mechanical properties of bamboo plywood used middle temperature PF resine
  [J]. Adv Mater Res-Switz, 2012, 374 - 377: 1239-1243.
- [12] SILVA L F M D, NEVES P J C D, ADAMS R D, et al. Analytical models of adhesively bonded joints—Part I: Literature survey[J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009, 29(3): 319-330.
- [13] LUO Q, TONG L. Analytical solutions for nonlinear analysis of composite single-lap adhesive joints [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009, 29(2): 144-154.
- [14] 许达,李玉顺,张振文,等.内聚力模型在钢-竹组 合梁变形分析中的应用[J].林产工业,2018(8): 42-47.
  XU Da, LI Yushun, ZHANG Zhenwen, et al. Application of cohesive force model in deformation analysis of steel bamboo composite beams[J]. Forestry industry, 2018(8): 42-47.
- [15] 邓雅琼,陈洋,栗娜,等.三维编织复合材料与金属 胶接结构的力学性能及优化[J].复合材料学报, 2018,35(10):2760-2767.

DENG Yaqiong, CHEN Yang, LI Na, et al. Mechanical properties and optimization of 3D braided composites bonded to metal[J]. Acta Composite, 2018, 35(10): 2760-2767.

[16] 赵章荣,傅万四,光杨,等.胶合竹片胶层开裂数值 模拟研究[J].林产工业,2018(11):22-25. ZHAO Zhangrong, FU wansi, GUANG Yang, et al. Numerical simulation study on glue layer cracking of glued bamboo [J]. Forest Products Industry, 2018 (11): 22-25.

- [17] 江泽慧,常亮,王正,等.结构用竹集成材物理力学 性能研究[J].木材工业,2005(4):22-24,30.
  JIANG Zehui, CHANG Liang, WANG Zheng, et al. Study on physical and mechanical properties of structural bamboo Glulam[J]. Wood Industry, 2005 (4):22-24,30.
- [18] 屈鹏. 带约束拉杆方形薄壁钢管/竹胶合板组合空芯 柱轴心抗压性能[D]. 湘潭:湘潭大学, 2016.
   QU Peng. Axial compressive properties of square thinwalled steel tube/bamboo plywood composite hollow core column with restrained tie rod[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2016.
- [19] 寇剑锋,徐绯,郭家平,等. 黏聚力模型破坏准则及 其参数选取[J]. 机械强度, 2011, 35(5): 714-718.
  KOU Jianfeng, XU Fei, GUO Jiaping, et al. Failure criterion and parameter selection of cohesive model[J].
  Mechanical Strength, 2011, 35(5): 714-718.
- [20] CAMPILHO R D S G, BANEA M D, NETO J A B P, et al. Modelling adhesive joints with cohesive zone models:Effect of the cohesive law shape of the adhesive layer
  [J]. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013, 44: 48-56.
- [21] 韩闯.复合材料 T 型接头拉脱性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2013.
  HAN Chuang. Study on pull off properties of composite T-joints[D]. Harbin: Harbin Institute of technology, 2013.

作者简介:张杰(通信作者),男,1987年出生,博士,副研究员,硕士 研究生导师。主要研究方向为清洁能源装备设计与服役安全、复合 材料力学。

E-mail:longmenshao@163.com