

# 荆条胶接接头的力学性能研究

高 璟, 张晓燕, 郭雪静, 孔佳丽, 白永兵

河北农业大学, 河北省林木种质资源与森林保护重点实验室, 河北 保定  
Email: ndg.123@163.com

收稿日期: 2020年6月26日; 录用日期: 2020年8月14日; 发布日期: 2020年8月21日

## 摘 要

为通过胶接加长技术研发荆条家具提供理论依据, 选直径相近的荆条试样制成不同接头形式测试其胶合性能。胶接接头的拉伸试验结果表明: 搭接接头、交错对接接头、嵌接接头、斜接接头承受的最大拉伸载荷为1.226 KN、1.30 KN、1.422 KN、1.568 KN, 破坏应力主要为胶合切应力, 因此拉伸胶合强度基本相同。胶接接头的扭转试验结果表明: 嵌接、交错对接、斜接三种接头的扭转强度相近, 切变模量相近; 与无接头试样比较, 扭转强度明显降低, 但切变模量基本相同。胶接接头的弯曲试验结果表明: 方向一(沿试样长度方向的胶接面放置成水平面或与水平方向成倾斜面)加载, 破坏应力均为弯曲正应力, 斜接、嵌接、交错对接接头的弯曲胶合正应力分别为72.77 MPa、52.97 MPa、38.97 MPa, 弹性模量分别为20.14 GPa、7.99 GPa、5.61 GPa; 方向二(沿试样长度方向的胶接面放置成铅直面或与铅直方向成倾斜面)加载, 破坏应力均为弯曲切应力, 斜接、嵌接、交错对接三种接头的弯曲胶合切应力分别为6.31 MPa、3.56 MPa、1.72 MPa, 弹性模量分别为13.53 GPa、11.26 GPa、8.45 GPa。而无接头试样的抗弯强度是正应力169.41 MPa, 弹性模量为14.51 GPa, 与斜接接头的弹性模量没有明显差异。综合接头拉伸、扭转、弯曲时的胶合性能得知, 斜接接头为首选胶合接头形式。

## 关键词

斜接接头, 嵌接接头, 交错对接接头, 胶接, 力学性能

# Research on Bonding Joint Mechanical Properties of *Vitex negundo* Twigs

Jing Gao, Xiaoyan Zhang, Xuejing Guo, Jiali Kong, Yongbing Bai

Key Lab of Forest Resources and Forest Protect, Agricultural University of Hebei, Baoding Hebei  
Email: ndg.123@163.com

Received: Jun. 26<sup>th</sup>, 2020; accepted: Aug. 14<sup>th</sup>, 2020; published: Aug. 21<sup>st</sup>, 2020

## Abstract

In order to provide a theoretical basis on *Vitex negundo* twigs furniture by gluing lengthened techniques, the author used similar diameter *Vitex negundo* twigs to make different joints and tested the gluability of the joints. The results of the tensile tests showed that the maximum tensile loads of lap joint, staggered butt joint, rabbet joint and scarf joint were 1.226 KN, 1.30 KN, 1.422 KN and 1.568 KN in turn, and the breaking stress was glueing shear stress, so the tensile strengths of these four joints were on the whole the same. The results of the torsion tests showed that: the torsional strengths and the shearing modulus of rabbet joints, staggered butt joints and scarf joints were close; the torsional strengths of jointed test specimens decreased obviously than jointless specimens, but the shearing modulus was almost the same. The results of bending tests showed that the breaking stresses were bending normal stress loaded in direction one (the cemented surfaces in the length direction of the sample were placed in horizontal plane or inclined to the horizontal direction), the values of the bending normal stress of scarf joint, rabbet joint and staggered butt joint were 72.77 MPa, 52.97 MPa and 38.97 MPa respectively, the modulus of elasticity were 20.14 Gpa, 7.99 Gpa, 5.61Gpa in turn; loaded in direction two (the cemented surfaces in the length direction of the sample were placed in vertical plane or inclined to the vertical direction), the breaking stresses were all bending shear stress, the values of the bending shear stress of scarf joint, rabbet joint and staggered butt joint were 6.31 MPa, 3.56 MPa and 1.72 MPa respectively, the modulus of elasticity were 13.53 Gpa, 11.26 Gpa, 8.45 Gpa in turn. The bending strength of jointless test specimen was 169.41 MPa normal stress, the modulus of elasticity of jointless specimen was 14.51 GPa. By analyzing the bonding performance of different joints in tensile, torsional and bending tests, we concluded that scarf joint was the preferential joint type.

## Keywords

Scarf Joint, Rabbet Joint, Staggered Butt Joint, Adhesion, Mechanical Properties

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

荆条的中文学名为杜荆，是马鞭草科落叶灌木，在我国北方地区广为分布，枝条粗细均匀，是优良编织材料。但荆条枝条长度通常 1 米左右，难以像藤、柳那样编织成荆条家具，大大制约了荆条的加工利用。本研究试图利用胶接技术通过胶合加长来提高荆条的利用率。

胶接这种材料连接方式历史悠久，在好几个世纪之前已经被使用了，然而在最近的五、六十年中才对胶接技术和胶黏剂进行广泛和深入的研究[1]。在胶接工艺中，胶接接头的设计是一个重要的环节，其核心问题是胶接强度，而胶接接头的破坏是由于外力负荷和内部应力联合作用的结果[2]。

国内外关于胶接接头力学性能的研究主要有，1963 年 Voyutskii 对胶接接头胶黏层极薄和极厚两种不同状态的力学性能进行了研究，结果表明，在胶黏层中存在均匀分布的剪切力而胶接接头胶层中应力在接头两端存在比较大的应力集中[3]。1969 年 Kutscha 与 Hofer 将胶接件宽度、厚度、胶黏剂等作为研究对象，探寻了这些因素对应力集中的影响[4]。1971 年 Wooley 和 Carver 利用有限元的方法对单搭接接头进行应力分析，同时考虑其接头长度、弹性模量对其应力影响[5]，得出的分析结果与理论存在较好的一致性。东北

林业大学卢伟通过对搭接接头、盖板接头、斜接接头进行试验以及理论推导,同时使用有限元的方法对胶接接头进行力学性能测试,最终得到的理论与预测模型对于木质接头应用存在积极作用[1]。三峡大学的游敏、郑小玲对胶接接头的力学性能进行试验分析[6],并就主要的指标剪切强度和正拉强度进行了分析。

本研究根据荆条材料特点,请家具制作技术人员设计出适宜的荆条胶接接头形式——斜接接头、嵌接接头、交错对接接头,考虑荆条加工和使用时的拉伸、弯曲、扭转等受力方式,确定试验项目内容,对接头的胶合性能指标进行测试;根据各项力学试验的破坏情况和测试结果,结合强度理论进行应力分析计算,得出优选的接头结构形式。为胶接接头的应力分析与强度计算提供理论依据,促进接头的力学理论研究、应力分析和强度计算的发展。

## 2. 材料与方法

### 2.1. 试验材料

本试验材料荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)采自河北省保定市易县清西陵,含水率 8%~10%。选直径相近,通直,接头附近无节疤的枝条作为试样,以消除试样尺寸、节疤等对测试结果的影响。

用于荆条接头粘合的胶粘剂选用 502 胶水,502 胶水是家具制作中的常用粘合剂,且具有使用方便、胶结速度快、胶接牢固、价格低等特点,而成为本试验选定的胶黏剂。

### 2.2. 试验方法

#### 2.2.1. 拉伸试验方法

试验的主要设备有:WDW-100E 微控电子万能试验机。

拉伸试验参照 GB1938-2009 [7],按尺寸设计要求制作胶接接头,加压 5 min、静置 48 h 使胶黏剂(502 胶水)完全固化。为避免夹具对试样两端部造成应力集中而破坏,在试样两端部置放硬木夹块(图 1),夹块尺寸长 40 mm,厚 30 mm,高 25 mm。按该尺寸制成的夹块打孔后,将试样插入孔内,拉伸试验时,将夹具夹住硬木块,避免夹具直接接触试样导致试样端部破坏。



Figure 1. Small hardwood blocks installed at both ends of the sample

图 1. 试样两端置设硬木块

由于接头的剪切强度和正拉强度是接头能否正常使用的关键,根据胶接结构的承载状况,很多国家及国际标准化组织(ISO)均规定了标准试样的测试规范,试样厚度为 1.5~2 mm,搭接长度为 12.5~15 mm,试样宽度为 20~25 mm。参照以上标准以及游敏相关研究[6],本试验接头的胶接试样尺寸取直径 10 mm 左右、搭接长度  $l_1 = 20 \pm 1$  mm、嵌接长度  $l_0 = 5$  mm、嵌接总长度  $l_3 = l_1 + 2l_0$ ,试样总长度 220 mm。

胶接接头设计了三种接头形式(图 2、图 3、图 4),即斜接接头、嵌接接头、交错对接接头。由于这三种接头承受拉力时,接头内均会出现正应力和切应力,因此又特设计了对接接头(图 5)和搭接接头(图 6),其中对接接头胶合面只产生正应力,搭接接头胶合面只有切应力,据此作为分析三种设计接头拉伸破坏强度的参考依据。每种接头形式制作试样 10 对,拉伸强度试验有 5 种接头形式,共制作 50 对拉伸接头。

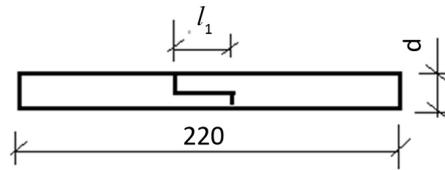


Figure 2. Staggered butt joint

图 2. 交错对接接头

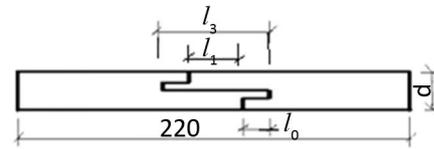


Figure 3. Rabbet joint

图 3. 嵌接接头

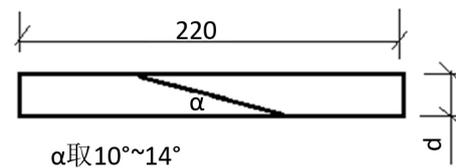


Figure 4. Scarf joint

图 4. 斜接接头

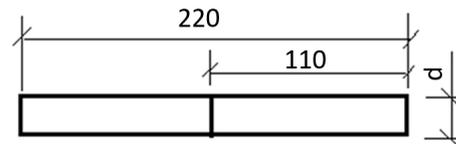


Figure 5. Butt joint

图 5. 对接接头

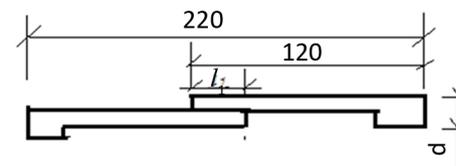


Figure 6. Lap joint

图 6. 搭接接头

将制作好的试件固定在万能力学试验机的夹紧器上，进行拉伸破坏试验。同时观察接头的失效形式。一般胶接接头按失效发生的部位，将失效大致分为四种形式，即胶层失效、被黏物失效、界面失效和混合失效。接头失效的形式不仅与胶黏剂、被黏物和胶接工艺有关，而且还与测试方法和使用条件相关[8] [9] [10]。

### 2.2.2. 扭转性能试验

主要试验设备有：ND-1000 微控扭转试验机，扭转引伸计。

扭转胶接接头形式有三种，即斜接接头、嵌接接头、交错对接接头。接头尺寸同拉伸试验。每种接头形式制作试样 10 对，共制作 30 对扭转试验接头。

由于国家目前没有木材扭曲试验标准，本项研究参照 GB239-84 “金属线材扭转试验方法” [11]进行。

将制作好的试件固定在 ND-1000 微控扭转试验机,进行扭转破坏试验(见图 7),同时观察接头的失效形式。



Figure 7. Torsion test  
图 7. 扭转试验

### 2.2.3. 弯曲性能试验

主要试验设备有: WDW-100E 微控电子万能试验机。

本研究的弯曲试验测定胶接接头的抗弯强度参照 GB/T1936.1-2009“木材抗弯强度试验方法”[12];接头的抗弯弹性模量参照 GB/T1936.2-2009“木材抗弯弹性模量试验方法”[13]进行。

弯曲胶接接头形式有三种,即斜接接头、嵌接接头、交错对接接头。荆条采用长度为 220 mm、跨度为 180 mm 的试样测试[16],考虑接头使用时可能承受不同方向的荷载作用,因此每种接头进行了 2 个方向的测试,每种接头形式制作试样 20 对,共制作 60 对弯曲试验接头。

## 3. 结果与分析

### 3.1. 胶接接头拉伸胶合强度的结果与分析

将荆条试样在试验机上以 1 mm/min 的拉伸速度进行拉伸试验,测得对接接头、搭接接头、嵌接接头、交错对接接头及斜接接头的最大拉伸载荷,据此计算各接头的拉伸胶合强度(见表 1)。

对接接头、搭接接头、斜接接头的拉伸胶合强度直接运用材料力学理论[14]计算。交错对接、嵌接接头则利用截面法[14]分析得出,首先在对接截面达到正应力临界值而开裂,此后搭接部位继续承载直至破坏,因此拉伸胶合强度均为搭接切应力。

由表 1 看出:搭接接头、交错对接接头、嵌接接头、斜接接头承受的最大拉伸载荷依次为 1.226 kN、1.30 kN、1.422 kN、1.568 kN,这 4 种接头的破坏应力主要为胶合切应力,对接接头承受的最大拉伸载荷仅 0.418 kN,破坏应力为正应力。胶接接头该拉伸试验结果表明:1) 接头胶接层承受剪切应力时的胶合强度远高于对接接头的正拉强度;2) 嵌接、交错对接接头的对接部分会先开裂、主要靠搭接部分承受荷载直至破坏,与利用截面法分析接头受力的理论结论是一致的,因此接头设计要尽量使其承受切应力;3) 斜接接头的应力有垂直于胶合面的正应力和平行于胶合面的切应力两种。这两种应力都随斜面夹角  $\alpha$  的减小而减小,因此,设计斜接时,应使夹角  $\alpha$  尽量小,此时胶合面上的应力小,同时,当  $\alpha < 45^\circ$  时,剪应力大于拉应力,因此本研究取  $\alpha = 10^\circ \sim 14^\circ$ ,对提高胶接强度有力;4) 由于搭接接头、交错对接接头、嵌接接头、斜接接头四种接头的破坏应力主要为胶合切应力,最大拉伸载荷实测值近似,且直径相近、搭接长度相同,因此该四种接头的拉伸胶合强度(最大拉伸载荷除以搭接面积)基本相同。同时需指出,由于斜接接头的斜截面上既有正应力、又有切应力,并且切应力方向沿斜截面方向,与嵌接、交错对接等接头的剪应力方向(沿施力方向)不同,因此斜接接头的拉伸胶接强度与嵌接、交错对接等接头不具有可比性,即应力数值不能作为比较接头拉伸胶接强度的指标。

**Table 1.** Mean value of tensile property index of bonding joint  
**表 1.** 胶接接头拉伸性能指标均值汇总

接头类型/joint type	对接接头 Butt joint	搭接接头 Lap joint	交错对接接头 Staggered butt joint	嵌接接头 Rabbit joint	斜接接头 Scarf joint
测试指标/testing index					
平均直径 Mean diameter/mm	10.695	10.115	10.538	10.864	10.085
最大拉伸载荷 Maximum tensile load/KN	0.418	1.226	1.3	1.422	1.568
破坏应力 Breaking stress	正应力 direct stress	切应力 shear stress	切应力 shear stress	切应力 shear stress	正应力/切应力 direct/shear stress
拉伸胶合强度 Tensile bonding strength/Mpa	4.66	6.04	6.14	6.51	0.83/3.98

### 3.2. 胶接接头扭转强度及切变模量的结果与分析

将直径相近的荆条试样在扭转试验机上分别以  $10^\circ/\text{min}$ 、 $60^\circ/\text{min}$  的扭转速度测得嵌接接头、交错对接接头、斜接接头的最大扭矩和扭转角(标距为 100 mm)，依据材料力学理论[14]计算各种接头的扭转胶合强度和切变模量，测试结果见表 2。

由荆条不同接头的扭转性能指标测试结果表明：斜接接头、交错对接接头、嵌接接头的扭转胶合强度分别为 11.611 MPa、11.563 MPa、10.130 mPa；斜接接头、交错对接接头、嵌接接头的切变模量分别为 1.210 GPa、1.305 GPa、1.078 GPa。说明三接头的扭转胶合强度基本相同，切变模量基本相同。这是由于三种接头的实测最大扭矩近似，扭转强度、切变模量均与最大扭矩成正比，因此直径相近情况下三种接头的扭转强度、切变模量基本相同；并且扭转受力时荆条试样横截面上的应力分布是圆形截面的外边缘上距圆心最远的点应力最大，且三种接头圆截面的外边缘均有胶缝，因此外边缘胶缝首先开裂、导致试样破坏，说明作为扭转构件使用时宜选较细的荆条，其接头外缘产生的应力小，不易开裂，对提高扭转强度有利。

有接头的荆条试件与无接头试样比较：无接头试样的扭转胶合强度为 26.49 MPa [15]，明显高于有接头的试样；而无接头试样的切变模量为 1.068 GPa，与有接头试样的切变模量基本相同。说明接头仅降低扭转胶合强度，而对扭转变形没有影响。

**Table 2.** Mean value of torsion property index of bonding joint  
**表 2.** 胶接接头扭转性能指标均值汇总

接头类型	交错对接接头 Staggered butt joint	嵌接接头 Rabbit joint	斜接接头 Scarf joint	无胶接接头[16] Non junction
测试指标				
平均直径 Mean diameter/mm	9.976	10.212	10.269	9.369
平均最大扭矩 Mean values of maximum torque/N·m	2.242	2.031	2.433	4.274
扭转强度 Torsional strength/MPa	11.563	10.130	11.611	26.49
切变模量 Shear modulus/GPa	1.305	1.078	1.210	1.068

注：无胶接扭转性能指标引见参考文献[15]。

### 3.3. 胶接接头弯曲胶合强度及弹性模量的结果与分析

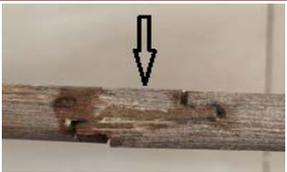
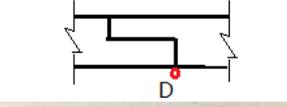
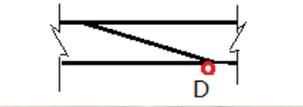
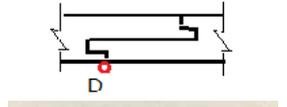
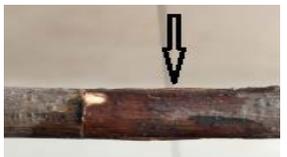
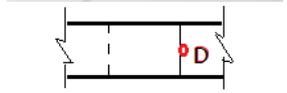
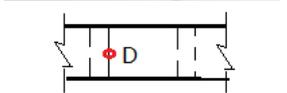
#### 3.3.1. 胶接接头弯曲断裂点与破坏应力分析

依据荆条胶合接头试验时的视频和现场观察断裂情况得知,三种接头承受弯曲荷载时,断裂点D总是出现在接头胶合的薄弱部位:斜接接头断裂点是近似椭圆胶合面的长轴端点;交错对接接头断裂点是对接半圆胶合面的顶点;嵌接接头断裂点是外侧对接圆弧胶合面的顶点;如表3所示。

由表3看出,沿方向一加载,即沿试样长度方向的胶接面放置成水平面或与水平方向成倾斜面,并施加与水平胶接面垂直的荷载,此时以中轴线为界,上部胶缝受压、下部胶缝受拉,断裂点均出现在试样下边缘,从接头下边缘断裂可以判定胶接接头的破坏应力为弯曲正应力,弯曲正应力沿横截面高度的分布是试样横截面胶缝下边缘点的正应力最大,其应力值超过了胶缝临界值,导致下边缘胶合薄弱点开裂,接着裂缝逐渐加速扩展,最终瞬时扩展至全截面,导致试样破坏,因此试验断裂点与弯曲正应力理论最大值是吻合的;试样失效类型主要为混合失效,由表3可看出:荆条接头承受表3图示弯曲载荷(方向一)时多沿胶层与界面下边缘开裂(交错对接接头、斜接接头),或是下边缘开裂后试样弯曲相互挤压导致试样沿纹理开裂失效(斜接接头、嵌接接头)。方向二加载,即沿试样长度方向的胶接面放置成铅直面或与铅直方向成倾斜面,并施加与铅直胶接面平行的荷载,此时胶合面主要承受剪力,因此破坏应力均为弯曲切应力,弯曲切应力沿横截面高度的分布是中性轴处最大,与实测断裂点一致;试样失效类型仍为混合失效,荆条接头承受表3图示弯曲载荷(方向二)时在中轴附近出现水平向裂纹(交错对接接头、斜接接头),或因受力接头薄弱处相互挤压出现剥皮现象甚至整体断裂(嵌接接头、交错对接接头)。因此三种接头的弯曲胶合强度,沿不同方向加载破坏应力有别。

Table 3. Break point and failure condition of three types of bonding joint

表3. 三种接头断裂点与失效情况

接头类型 Joint type	交错对接接头 Staggered butt joint	斜接接头 Scarf joint	嵌接接头 Rabbet joint
加载图示 Loading graphics			
方向一 Direction 1			
断裂点D Break points D			
破坏试样 Break samples			
失效类型 Type of failure	混合失效		
加载图示 Loading graphics			
方向二 Direction 1			
断裂点D Break points D			

Continued



### 3.3.2. 胶接接头的弯曲胶合强度及弹性模量的结果与分析

将直径为 10 mm 左右的荆条斜接接头试样，在试验机上以 2 mm/min 的加载速度、跨距 180 mm、沿 2 个方向进行弯曲试验，测得胶接接头承受的最大荷载，依据试验标准[13]计算接头的抗弯弹性模量；按照材料力学理论[14]计算方向一加载的弯曲胶合正应力；方向二加载，根据三种接头胶合面形状以及力学理论推导得出，中性轴处胶合切应力计算公式分别为：

$$\text{斜接接头 } \tau_{\max} = \frac{8Q_{\max}}{3A}$$

$$\text{交错对接接头 } \tau_{\max} = \frac{2Q_{\max}}{A} \cdot \frac{l_1 + \frac{2}{3}d}{l_1 + d}$$

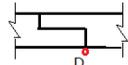
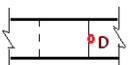
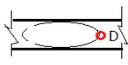
$$\text{嵌接接头 } \tau_{\max} = \frac{2Q_{\max}}{A} \cdot \frac{l_3 + \frac{2}{3}d}{l_3 + d}$$

式中： $\tau_{\text{胶}}$ ——胶合缝的弯曲剪切力(MPa)； $Q_{\max}$ ——胶接试样断裂时的剪力(N)； $A$ ——试样圆形截面面积( $\text{mm}^2$ )；嵌接接头总长度 $l_3 = l_1 + 2l_0$ ， $l_0$ ——嵌接长度(m)取 5 mm， $l_1$ ——搭接长度(mm)。

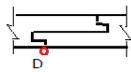
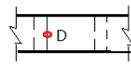
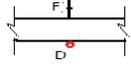
荆条胶接接头的弯曲胶合强度及弹性模量测试结果汇总见表 4。由表 4 看出：沿方向一加载，斜接接头、嵌接接头、交错对接接头的弯曲胶合正应力分别为 72.77 MPa、52.97 MPa、38.97 MPa。沿方向二加载，斜接接头、嵌接接头、交错对接接头的弯曲胶合切应力分别为 6.31 MPa、3.56 MPa、1.72 MPa。接头弯曲胶合强度结果表明：由于最大弯曲载荷均是斜接接头 > 嵌接接头 > 交错对接接头，弯曲胶合强度均与最大弯曲载荷成正比，因此斜接接头的弯曲胶合强度最好。而相同接头不同加载方向的最大弯曲载荷均是方向二 > 方向一，说明木质弯曲胶接接头的破坏主要是正应力所致，因此使用中尽量使接头按方向二的位置放置，以提高接头的承载力。

Table 4. Mean value of bending property index of bonding joint

表 4. 胶接接头弯曲性能指标均值汇总

接头类型 Joint type	平均直径 Mean diameter/mm	平均最大载荷 Mean value of maximum load/KN	破坏应力 Breaking stress	弯曲(胶合)强度 Flexural bonding strength/MPa	断裂点 D Break points D	平均弹模 Mean value of modulus/GPa	
错对接接头 Staggered butt joint	方向一 Direction 1	10.51	0.10	正应力	38.97		5.61
	方向二 Direction 2	9.94	0.15	切应力	1.72		8.45
斜接接头 Scarf joint	方向一 Direction 1	10.65	0.27	正应力	72.77		20.14
	方向二 Direction 2	10.88	0.44	切应力	6.31		13.53

Continued

嵌接接头 Rabbit joint	方向一 Direction 1	11.71	0.18	正应力	52.97		7.99
	方向二 Direction 2	11.22	0.38	切应力	3.56		11.26
无胶接头 [17] Non junction		9.25	21.90	正应力	169.41		14.51

注：无胶接头的的数据引自参考文献[15]。

根据三种接头的抗弯弹性模量结果表明：沿方向一加载，斜接接头、嵌接接头、交错对接接头的弹性模量分别为 20.14 GPa、7.99 GPa、5.61 GPa。沿方向二加载，斜接接头、嵌接接头、交错对接接头的弹性模量分别为 13.53 GPa、11.26 GPa、8.45 GPa。因此三种接头中，斜接接头的弹性模量最好。

将三种接头试样与无接头试样进行比较：无接头试样的抗弯强度是正应力 169.41 MPa，明显高于有接头试样的正应力；而无接头试样的弹性模量为 14.51 GPa，高于嵌接接头、交错对接接头，与斜接接头的弹性模量没有明显差异，说明斜接接头仅降低弯曲胶合强度，而对弯曲变形没有影响。

#### 4. 结论与讨论

由于胶接的低成本、低应力集中及易维护，被广泛运用于连接体系中[17]，充分理解认识胶接接头的胶合强度，有利于保证胶接接头的可靠、安全和有效。

通过对 5 种接头进行拉伸试验，结果表明：搭接接头、交错对接接头、嵌接接头、斜接接头承受的最大拉伸载荷为 1.226 kN、1.30 kN、1.422 kN、1.568 kN，对接接头承受的最大拉伸载荷仅为 0.418 kN，说明接头胶接层受剪切应力时的拉伸胶合强度远高于对接接头的正拉强度；由于这 4 种接头的破坏应力主要为胶合切应力，因此这 4 种接头的拉伸胶合强度基本相同。

通过对 3 种接头进行扭转试验，结果表明：接头的扭转胶合强度相近，切变模量相近；与无接头试样比较，扭转胶合强度明显降低，但切变模量基本相同，说明接头仅降低扭转胶合强度，而对扭转变形没有影响。

通过对 3 种接头进行弯曲试验，结合现场试验观察及试样断裂情况，三种接头承受弯曲荷载时，断裂点 D 总是出现在胶合的薄弱部位，该试验断裂点与力学理论中应力沿横截面高度分布的最大值部位一致。弯曲试验结果表明：1) 斜接接头、嵌接接头、交错对接接头的弯曲胶合强度，沿不同方向加载破坏应力有别；方向一加载，破坏应力均为弯曲正应力，数值分别为 72.77 MPa、52.97 MPa、38.97 MPa；方向二加载，破坏应力均为弯曲切应力，数值分别为 6.31 MPa、3.56 MPa、1.72 MPa。因此三种接头中，斜接接头的弯曲胶合强度最好。2) 斜接接头、嵌接接头、交错对接接头的弹性模量，沿方向一加载，分别为 20.14 GPa、7.99 GPa、5.61 GPa。沿方向二加载，分别为 13.53 GPa、11.26 GPa、8.45 GPa。因此三种接头中，斜接接头的弹性模量最好。3) 有接头试样与无接头试样比较，无接头试样的抗弯强度是正应力 169.41 MPa，弹性模量为 14.51 GPa，抗弯强度明显高于有接头试样，弹性模量与斜接接头试样没有明显差异，说明斜接接头仅降低弯曲胶合强度，而对弯曲变形没有影响。因此斜接接头的抗弯性能最好。

鉴于斜接接头、嵌接接头、交错对接接头承受拉伸、扭转、弯曲时的胶合性能，显然斜接接头优于交错对接接头和嵌接接头，且斜接接头便于加工，为荆条胶接时的首选接头形式。

#### 基金项目

国家科技部十五科技支撑计划项目：“华北土石山区植被恢复与重建技术试验示范”(2006BAD03A11)；河北省林业局项目(0803015)；河北农业大学重点科研基金项目“荆条材性分析及荆编家具制造工艺研究”。

## 参考文献

- [1] 卢伟. 木质胶接接头力学性能的研究[D]: [博士学位论文]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [2] 宋冬利, 李赫亮, 李智超. 接头形式对胶接强度的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2000, 19(4): 426-429.
- [3] Voyutskii, S.S. (1963) Autohesion and Adhesion of High Polymers. English Edition, John Wiley, New York.
- [4] Kutscha, D. and Hofer, K. (1969) Feasibility of Joining Advanced Composite Flight Vehicles. *AFML-TR-68-391*.
- [5] Wooley, G.R. and Carver, D.R. (1971) Dynamic Performance Characteristics of Mixed and Unmixed Turbofan Engine. *Journal of Aircraft*, **8**, 817-822.
- [6] 游敏, 郑小玲. 胶接接头剪切和正拉强度试验方法的分析[J]. 粘接, 1994, 15(3): 29-34.
- [7] GB/T1938-2009. 木材拉伸强度试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [8] 陆关兴. 胶接接头设计[J]. 粘接, 1986, 7(4): 39-47.
- [9] 殷勇, 涂善东. 胶接接头力学研究回顾[J]. 化工机械, 2001, 28(4): 241-245.
- [10] 关世伟. 胶接接头破坏分析[J]. 中国胶粘剂, 2015, 24(2): 57-58.
- [11] GB239-1999. 金属线材扭转试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
- [12] GB/T1936.1-2009. 木材抗弯强度试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [13] GB/T1936.2-2009. 木材抗弯弹性模量试验方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [14] 孙训芳, 方孝淑, 关来泰. 材料力学(I)第5版[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [15] 高璟, 张晓燕, 卢国新, 等. 荆条藤柳力学性质的测试与对比研究[J]. 林业实用技术, 2012(11): 103-106.
- [16] 高璟, 张晓燕, 卢国新, 等. 高径比跨高比对荆条纵向抗压抗弯性能测试精度的影响[J]. 西北林学院学报, 2014, 29(4): 214-218.
- [17] 王玉奇, 何晓聪, 曾凯. 胶接接头力学性能研究进展[J]. 机械强度, 2016, 38(2): 339-347.