

# CFRP-木材复合材界面 I 型断裂特性研究

杨小军, 阙泽利, 孙友富\*

(南京林业大学 材料科学与工程学院, 江苏 南京 210037)

**摘要:**采用基于断裂力学能量释放率理论的双悬臂梁试验方法对 CFRP 与落叶松及杉木复合界面断裂韧性进行了研究。结果表明, CFRP-木材界面断裂韧性优于木材间界面, 界面两侧材料的差异性有助于改善界面裂纹的失稳扩展; 界面内裂纹尖端应力巨大, 扩展主要发生在界面层内; 复合材试件状态对断裂韧性影响较大, 干状态时复合材断裂韧性较小, 水分增加有利于抵抗裂纹扩展。断裂韧性可作为界面强度评价参数, 干状态时 CFRP 与落叶松间界面为  $673.24 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ , CFRP 与杉木间界面为  $438.14 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

**关键词:**CFRP-木材复合材; 界面; 双悬臂梁; I 型断裂韧性

**中图分类号:**S781.21      **文献标志码:**A      **文章编号:**1001-7461(2014)04-0198-05

## Mode-I Interlaminar Fracture Toughness of CFRP Reinforced Wood Composites

YANG Xiao-jun, QUE Ze-li, SUN You-fu\*

(College of Materials Science and Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

**Abstract:** The interface fracture toughness of CFRP-larch (*Larix olgensis*) and CFRP-fir (*Cunninghamia lanceolata*) was studied by using the testing method of double cantilever beam based on the energy release rate criterion. The results showed that the interface fracture toughness of CFRP-wood was higher than that of wood-wood. The difference of materials on both sides was helpful for improving instable propagation of cracks. The propagation of crack mostly happened in the interface layer. The fracture toughness of composite material in low moisture content was less than that in high moisture content. The increase of moisture content helped composites to resist crack propagation. Fracture toughness could be used as the interface performance evaluation parameter. In dry state, the interface failure toughness of CFRP-larch and CFRP-fir were  $673.24 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$  and  $438.14 \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$ , respectively.

**Key words:** CFRP-wood composite; interface; double cantilever beam; Mode-I fracture toughness

我国速生材树种多、资源丰富、品质参差不齐<sup>[1]</sup>, 如何提升其力学性能以适应现代木结构建筑的需要, 成了我国专家学者当前普遍关注的焦点。随着物理力学性能优异的碳纤维增强材料(Carbon Fibre Reinforced Polymer, 缩写 CFRP)技术的发展, 通过在木材表面粘结复合 CFRP 成了改善其性能一种有效的技术手段<sup>[2-4]</sup>。自 20 世纪 90 年代以来, 碳纤维就已被广泛用于木建筑危房加固工程。

CFRP 在木材及木结构增强方面显示出了巨大潜力。CFRP 增强木材的关键是 CFRP-木材复合界面能否有效传递应力, 界面胶合强度不足、胶合不完整或界面层木材的局部开裂等皆可导致增强材或复合材的过早破坏。另外, CFRP-木材复合材在结构应用中其界面上常存在剥离应力, 如胶合木梁的受弯(剪)裂纹、CFRP 的截断处截面抗弯刚度突变都会引起应力集中导致 CFRP 剥离, 而界面抵抗剥离的

收稿日期: 2013-11-15    修回日期: 2014-01-08

基金项目: 国家自然科学基金(31300484); 南京林业大学高学历人才基金项目(NJFU); 江苏高校优势学科建设工程项目(PAPD); 江苏省大学生创新创业项目(201310298052Z)。

作者简介: 杨小军, 男, 博士, 讲师, 研究方向: 木材加工与木结构建筑工程。E-mail: yxj5460@163.com

\*通信作者: 孙友富, 男, 教授, 博导, 研究方向: 木材加工与木结构建筑工程。E-mail: sun@ailin.com.cn

能力又很低,在荷载及各种环境条件作用下复合材界面极易脱胶导致构件破坏,界面局部分层会使复合材界面在极小的应力状态下失稳扩展,从而使界面传递应力失效<sup>[5-7]</sup>。因此界面分层对 CFRP 增强材而言是一种重要的破坏形式。分层破坏形式主要有与界面正应力有关的张开型或剥离型(I 型)和与界面剪应力有关的滑移型(II 型)2 种。复合材胶合界面在拉伸荷载作用下抵抗的裂纹扩展能力比在剪切荷载作用下更弱,所以张开型(I 型)裂纹比其他断裂模式重要<sup>[8-10]</sup>。复合材界面上由于材料性质不匹配,导致裂纹尖端前部奇异应力场振荡,距裂纹尖端越近振荡频率越大,与应力场相应的位移场也具有同样的振荡性,在荷载作用下复合材界面裂纹尖端附近的开裂面相互渗透或闭合,该相互渗透区域非常小,远小于断裂过程区,线弹性断裂力学方法可适用于复合材界面<sup>[11-14]</sup>。J. M. Devitt<sup>[15]</sup> 等论证了基于双悬臂梁(DCB)试件的弹性应变能释放率的计算可用于张开型裂纹模式的粘弹性材料。为此本研究将运用基于断裂力学能量释放率理论的双悬臂梁试验方法评估 CFRP-木材复合材界面断裂韧性。

1 材料与方法

1.1 试验材料与仪器

试验用木材采用产地东北的落叶松(*Larix olgensis*)锯材和产地江西的杉木(*Cunninghamia lanceolata*)锯材,有部分活节,纹理通直,一等材,初含水率皆为 15%。落叶松(12% 含水率时)基本物理力学性能:气干密度  $0.632\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,顺纹抗压强度 56.5 MPa,抗弯强度 89 MPa,抗弯弹性模量 14.1 GPa,径面、弦面顺纹抗剪强度分别为 8.1、6.5 MPa。杉木(12% 含水率时)基本物理力学性能:气干密度  $0.357\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,顺纹抗压强度 35.9 MPa,抗弯强度 65.2 MPa,抗弯弹性模量 9.1 GPa,径面、弦面顺纹抗剪强度分别为 5.8、7.1 MPa。

CFRP 片材为聚丙烯腈基碳纤维,单向织物,理论厚度 0.111 mm,受拉弹性模量为  $2.4\times10^5\text{ MPa}$ ,面密度  $206\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ,抗拉强度 3450 MPa,极限拉伸应变为 1%。

胶粘剂为双组分环氧类,类型 I:混合后初黏度 (23 ℃) 5 000 mPa·s,其混合体积比为 2:1,胶体主要力学性能:抗拉强度 50 MPa,弹性模量 2.0 GPa,延伸率 2.2%。类型 II:混合后初黏度 (23 ℃) 6 000 mPa·s,其混合重量比为 1:1,胶体主要力学性能:抗拉强度 55 MPa,弹性模量 1.85 GPa,延伸率 2.3%。

试验用主要仪器有型号为 CMT4304 微机控制万能力学试验机和型号为 HS-150 恒温恒湿试验箱。

1.2 方法

测试方法:依据复合材料力学中关于复合材料层间 I 型断裂韧度的测定方法,将复合材试件设计成双悬臂梁(DCB)试件(图 1)。材料界面裂纹扩展的抗力可以通过临界应变能释放率来表征,而材料界面张开型(I 型)断裂临界应变能释放率,则可以采用 DCB 试件进行试验获得。试样加载端的中间层中含有一定长度的初始裂纹,载荷通过粘接在试件两侧的加载接头传递到试件上。DCB 试件以  $1\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$  加载速率在万能力学试验机进行加载试验,试验机采用位移控制,记录其载荷—加载点张开位移曲线,并在加载过程中进行数次卸载,同时记录裂纹扩展长度。将记录数据依据式(1)计算出界面断裂韧性值。试验测试环境温度 20℃,相对湿度 65%。

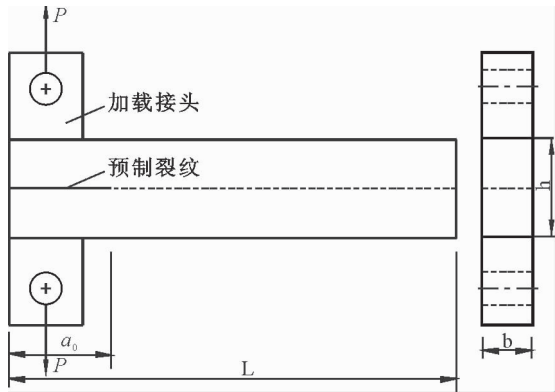


图 1 双悬臂梁(DCB)试件示意图

Fig. 1 Sample of double cantilever beam

计算依据:实际试验中连续加载和裂纹扩展可能同时发生。将能量释放率  $G_{IC}$  在裂纹扩展开始以后,用裂纹长度方程表示:

$$G_{IC} = \frac{3H}{2b} \tag{1}$$

式中:  $H = \frac{P_c \delta_c}{a}$  = 常数,  $b$  为试件宽,  $P_c$  和  $\delta_c$  分别为荷载  $P$  和加载点张开位移  $\delta$  的临界值。另外,根据裂纹扩展时  $P_c$  随  $\delta_c$  连续变化的曲线,对一些裂纹长度直接用方程算出  $H$  平均值,即:

$$H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{P_{ci} \delta_{ci}}{a_i} \tag{2}$$

式中:  $P_{ci}$  和  $\delta_{ci}$  是与第  $i$  个裂纹长度  $a_i$  的  $P$  和  $\delta$  的临界值,  $n$  是数据点的总数。

1.3 试样制作

试样加工:挑选纹理通直且分布均匀径切规格

材,刨切后按设计结构进行工艺复合,工艺复合压力为 0.10 MPa,施胶量为  $250\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ ,固化 48 h 后将复合材加工成设计规格试件,尺寸误差控制在  $\pm 1\text{ mm}$  以内。试验分 16 组,每组 5 个试件,试件长皆为 33 cm,试验设计如表 1 所示。

表 1 断裂韧性试件  
Table 1 Specimen of fracture toughness

试验组	$b/\text{mm}$	$a_0/\text{mm}$	$H/\text{mm}$	界面类型	胶黏剂	状态
L-L-D	40	35	30	落叶松-落叶松	类型 I	干
L-L-W	40	35	30	落叶松-落叶松	类型 I	湿
C-L-I-D	40	35	30	CFRP-落叶松	类型 I	干
C-L-I-W	40	35	30	CFRP-落叶松	类型 I	湿
C-L-II-D	40	35	30	CFRP-落叶松	类型 II	干
C-L-II-W	40	35	30	CFRP-落叶松	类型 II	湿
C-L-I-D-D	40	30	30	CFRP-落叶松	类型 I	干
C-L-I-D-C	40	40	30	CFRP-落叶松	类型 I	干
C-L-I-Z	30	35	30	CFRP-落叶松	类型 I	干
C-L-I-T	20	35	30	CFRP-落叶松	类型 I	干
S-S-D	40	35	30	杉木-杉木	类型 I	干
S-S-W	40	35	30	杉木-杉木	类型 I	湿
C-S-I-D	40	35	30	CFRP-杉木	类型 I	干
C-S-I-W	40	35	30	CFRP-杉木	类型 I	湿
C-S-II-D	40	35	30	CFRP-杉木	类型 II	干
C-S-II-W	40	35	30	CFRP-杉木	类型 II	湿

注:表中“干”状态指试件复合后置于温度为 20℃、湿度为 75%(平衡含水率约 15%)的恒温恒湿箱中处理 48 h;“湿”状态指试件复合后置于温度为 40℃、湿度为 95%(平衡含水率约 22.5%)的恒温恒湿箱中处理 48 h。

2 结果与分析

CFRP-木材复合材双悬臂梁 I 型断裂韧性实测结果如表 2。

表 2 断裂韧性实测结果

Table 2 Test summary of fracture toughness

试验组	$\bar{P}_I^1/\text{N}$	$\bar{\delta}_I^1$ / $(\times 10^{-4}\text{ m})$	$\bar{G}_{IC}$ / $(\text{N}\cdot\text{m}^{-1})$	变异 系数/%
L-L-D	756.87	7.37	606.31	7.1
L-L-W	912.23	7.62	735.27	3.6
C-L-I-D	835.42	7.51	673.24	11.2
C-L-I-W	939.16	9.06	911.26	12.9
C-L-II-D	819.17	7.34	653.61	5.8
C-L-II-W	911.06	9.17	895.74	10.6
C-L-I-D-D	850.33	6.74	666.79	11.2
C-L-I-D-C	830.76	8.46	727.47	9.9
C-L-I-Z	696.56	6.63	669.93	11.8
C-L-I-T	417.71	7.41	675.24	19.3
S-S-D	522.34	7.17	399.59	9.1
S-S-W	681.77	7.35	536.89	6.3
C-S-I-D	563.62	7.26	438.14	13.7
C-S-I-W	824.25	7.53	665.28	12.3
C-S-II-D	549.95	7.35	433.67	12.3
C-S-II-W	812.94	7.75	675.53	9.3

注:表中  $\bar{P}_I^1/\text{N}$  为第 1 个裂纹长对应的平均启裂载荷, $\bar{\delta}_I^1$  为第 1 个裂纹长对应的启裂载荷下的平均张开位移, $\bar{G}_{IC}$  为平均断裂韧性。

2.1 不同宽度界面断裂韧性

通透 I 型裂纹宽为 20、30 mm 及 40 mm 时对 CFRP-木材复合材界面断裂韧性几乎无影响(图

预制裂纹方法:参照层合板层间裂纹预制方法<sup>[11]</sup>,在试件工艺复合前,在裂纹设计位置,采用厚度为 0.02 mm 厚的聚氯乙烯(PVC)薄膜包覆,以划分粘贴区域,PVC 与环氧树脂胶不能胶合,在试件复合后抽出 PVC,即可实现预制裂纹。

2),表明试件宽在 20 mm 以上时双悬臂梁处于平面应变状态,裂纹扩展沿界面宽度方向中间处向界面纵向发展同时向边部发展,断裂面痕迹呈抛物线型,起主要影响的是试件两侧,在平面应变状态下试件宽度的增加,两侧边缘应力状态几乎未改变,裂纹扩展阻力基本保持不变。另外,复合材界面 I 型断裂过程符合脆性材料断裂特征。试件宽度为 20 mm 时,断裂韧性变异系数相对较大,宽度窄时受试验复合工艺、试件自身的变异性及胶层厚薄不均等影响较大,导致结果出现较大离散。另外如试件宽度过窄,裂纹失稳后可能会沿混合型裂纹方向扩展。可见试件宽度在 30 mm 以上时可满足断裂韧性测试宽度要求。

2.2 不同裂纹长界面断裂韧性

裂纹长度在 30、35 mm 及 40 mm 时复合材界面断裂韧性平均值相差较小(图 3),3 种初始裂纹长度下断裂韧性的变异系数都在 12%以内,说明在 30~40 mm 范围内,所测得的值都比较稳定。裂纹长度对复合材界面 I 型断裂韧性无显著影响。预制裂纹长为 30 mm 时达启裂载荷时间相对较短,对应的张开位移较小(表 2)。预制裂纹长在 30~40 mm 范围,可满足复合材界面断裂韧性测试要求。

2.3 不同界面类型断裂韧性

相同条件下不同材料间界面断裂韧性平均值差

异显著,木材与木材结合面断裂韧性显著小于CFRP与木材结合面(图4)。木材间界面断裂韧性小,是因为环氧树脂胶黏剂对木材的浸润性和粘结性不及胶黏剂对CFRP,另外,由复合材断裂面观察发现浅表层木材被剥离,表明胶粘剂对木材的渗透性不强或渗透时间不充分,从而出现较弱的粘结性能。CFRP与木材间界面断裂韧性较高,界面一侧的CFRP有较好粘结性能,制约了界面另一侧木材面。

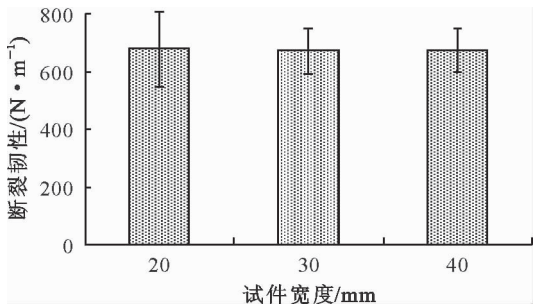


图2 不同宽度界面断裂韧性

Fig. 2 Fracture toughness of different width interface

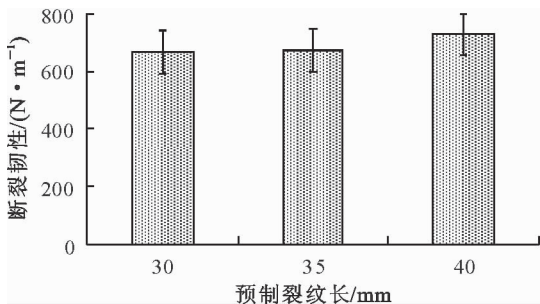


图3 不同裂纹长界面断裂韧性

Fig. 3 Fracture toughness of different crack length interface

复合材不论在干状态或湿状态都表现出CFRP与木材界面断裂韧性变异系数都偏大于木材间界面,一方面CFRP与木材间界面由于两侧材料的差异导致木材材性的不均匀性突出,另一方面界面层材料性质不是均匀分布沿界面层厚度呈一定规律变化,界面裂纹尖端失稳后未能完全沿界面胶体内I型裂纹方向扩展,试件破坏面几乎都发生在木材与胶体结合部。

2.4 不同环境状态界面断裂韧性

同一树种复合材中,木材间界面及CFRP与木材间界面在干状态下的断裂韧性都远小于湿状态(图5)。干状态下试件木材含水率较低约15%,环氧树脂胶黏剂与木材间胶合牢靠但脆性较大,而湿状态复合材试件是经过湿热环境处理,木材大量吸湿,界面处水分含量也相应增大,脆性下降,另外,木材水分的增加使木材力学性能出现下降也是原因之一。可见对CFRP-木材复合材界面而言,含水率增

加裂纹不易失稳扩展,有利于断裂韧性的提高。

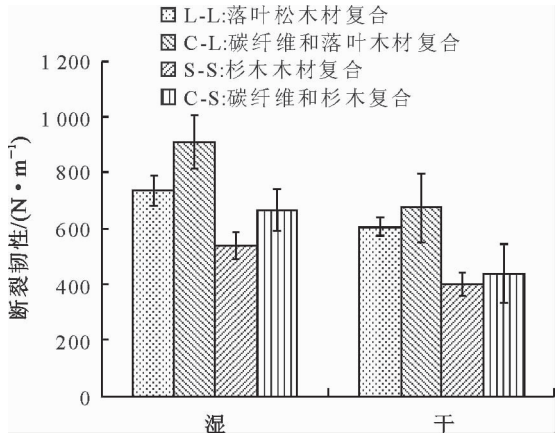


图4 不同类型界面断裂韧性

Fig. 4 Fracture toughness of different types of interface

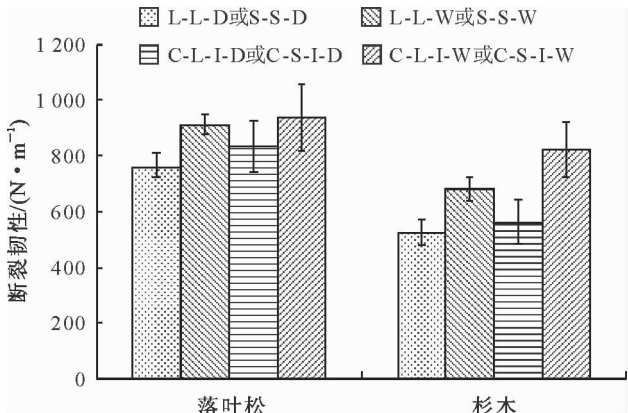


图5 不同环境状态界面断裂韧性

Fig. 5 Fracture toughness of different environmental status interface

2.5 不同树种复合材界面断裂韧性

树种对复合材界面断裂韧性影响显著,落叶松复合材断裂韧性是杉木复合材的1.37倍以上(图6)。这与杉木木材材性松软、横纹抗拉强度低、材性变异大等因素有关,杉木复合材界面在较小载荷下便出现裂纹尖端沿木材表层失稳扩展。

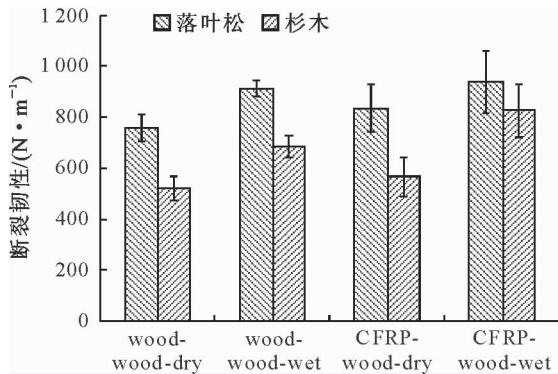


图6 不同树种复合材界面断裂韧性

Fig. 6 Fracture toughness of composite material between different species



2.6 不同类型胶黏剂复合材界面断裂韧性

两种类型的环氧树脂胶对复合材界面断裂韧性几乎无影响(图 7),2 类型胶黏剂都是用于 CFRP 的专用胶,对 CFRP 胶合性能都较好且脆性相当,与木材胶合时往往取决于胶液的浸润性和木材的渗透性。

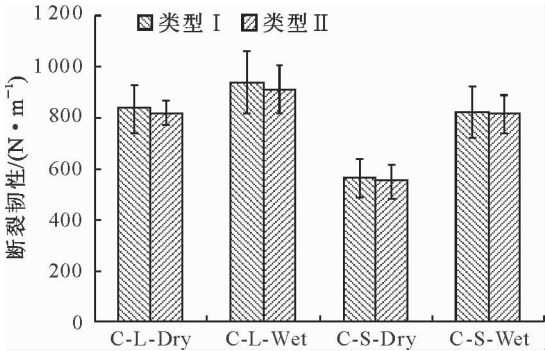


图 7 不同类型胶黏剂复合材界面断裂韧性  
Fig. 7 Fracture toughness of composite material with different types of adhesives

3 结论与讨论

基于断裂力学能量释放率理论的双悬臂梁试验方法是复合材料层间或界面的断裂韧性测试的一个重要的手段,引入断裂韧性作为 CFRP 与木材复合材界面强度评价参数能弥补其界面处传统力学性能评价指标(水煮剥离率、界面剪切强度及界面粘结强度等)的不足。

CFRP-木材复合材双悬臂梁试验方法中,对通透裂纹而言,复合材界面裂纹宽度为 30 mm、双悬臂梁厚度为 30 mm 及预制裂纹长为 30 mm 时可满足脆性材料平面应变断裂韧性测试要求。本研究中杉木间界面断裂韧性为 399.59 N·m<sup>-1</sup>,落叶松间界面断裂韧性为 606.31 N·m<sup>-1</sup>,CFRP 与落叶松间界面为 673.24 N·m<sup>-1</sup>,CFRP 与杉木间界面为 438.14 N·m<sup>-1</sup>。断裂韧性的大小反映了复合材界面的裂纹尖端是否易失稳扩展,界面内裂纹尖端应力巨大,裂纹失稳扩展主要发生界面层内,木材与 CFRP 间界面断裂韧性远大于木材间界面,说明界面两侧材料的差异性有助于改善裂纹的失稳扩展。

复合材试件状态对断裂韧性影响较大,湿环境时复合材界面由于湿和热的共同作用使裂纹尖端脆性下降,文献中碳纤维增强双马来酰亚胺复合材料层间断裂韧性<sup>[11]</sup>也反映了这一特性。落叶松及杉木与环氧树脂胶黏剂的胶结性能及木材的自身材性的差异由断裂韧性值的大小可看出明显差异,断裂韧性可作为 CFRP-木材复合材界面强度评价参数。

参考文献:

[1] 徐明,任海青,郭伟. 我国杉木材性变异研究进展[J]. 西北林学院学报, 2008, 23(1):185-189.  
XU M, REN H Q, GUO W. Research progress of variations for wood properties of Chinese Fir[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2008, 23(1):185-189. (in Chinese)

[2] 马晓军,袁澄,杨红梅,等. 合成条件对木质碳纤维纺丝液结构的影响[J]. 西北林学院学报, 2012, 27(5):194-196.  
MA X J, YUAN C, YANG H M, *et al.* Effect of synthesis conditions on the structure of spinning solutions for preparing wood-based carbon fibers[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2012, 27(5):194-196. (in Chinese)

[3] LI Y F, XIE Y M, TSAI M J. Enhancement of the flexural performance of retrofitted wood beams using CFRP composite sheets[J]. Construction and Building Materials, 2009, 23(1): 411-422.

[4] JANKOWSKI L J, JASIENKO J, NOWAK T P. Experimental assessment of CFRP reinforced wooden beams by 4-point bending tests and photoelastic coating technique[J]. Materials and Structures, 2010, 43(2):141-150.

[5] TRIANTAFILLOU T C. Shear reinforcement of wood using FRP materials[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1997, 9(2):65-69.

[6] RICE J R. Elastic fracture mechanics concepts for interfacial cracks[J]. Journal of Applied Mechanics, 1988, 55:98-103.

[7] CHUNG H G, SWAIN M V, MORI T. Evaluation of the strain energy release rate for the fracture of titanium-porcelain interfacial bonding[J]. Biomaterials, 1997, 18(23): 1553-1557.

[8] 黄维扬. 工程断裂力学[M]. 北京:航空工业出版社,1992.

[9] 王瑞,王广峰,郭兴峰. 织物增强复合材料层合板 I 型层间断裂特性[J]. 复合材料学报, 2004, 21(1):68-72.

[10] 王瑞,王广峰,郭兴峰,等. 缝合层合板的 I 型层间断裂韧性研究[J]. 无机材料学报, 2004, 19(5):1123-1128.

[11] 管国阳,矫桂琼,潘文革. 湿热环境下复合材料的混合型层间断裂特性研究[J]. 复合材料学报, 2004, 21(2):81-86.

[12] 陈瑛,乔丕忠,姜弘道,等. 双材料界面断裂力学模型与实验方法[J]. 力学进展, 2008, 38(1):53-60.  
CHEN Y, QIAO P Z, JIANG H D, *et al.* Review on experimental methods and fracture models for bi-material interfaces [J]. Advances in Mechanics, 2008, 38(1):53-60. (in Chinese)

[13] 向毅斌,吴诗淳. 双材料界面断裂韧性的测定方法[J]. 兵工学报, 2002, 23(1):112-115.

[14] TOYA M, ARITOMI M, CHOSA A. Energy release rates for an interface crack embedded in a laminated beam subjected to three-point bending [J]. Journal of Applied Mechanics, 1997, 64(2): 375-382.

[15] DEVITT J M, SCHAPERY R A, BRADLEY W L. A method for determining mode I delamination fracture toughness of elastic and viscoelastic composite materials[J]. Journal of Composite Materials, 1980, 14(5): 270-285.