

GFRP 复合材料-轻木夹芯梁弯曲疲劳性能试验

史慧媛¹, 刘伟庆^{*1, 2}, 方海², 霍瑞丽²

(1. 东南大学 土木工程学院, 南京 210096; 2. 南京工业大学 土木工程学院, 南京 211800)

摘要: 为研究真空导入成型的玻璃纤维增强树脂基复合材料-Balsa 轻木(GFRP-Balsa)夹芯梁弯曲疲劳性能, 进行了普通无格构、单格构增强、双格构增强三种类型共 42 根试件在不同荷载等级下的四点弯曲疲劳试验, 得到夹芯梁的弯曲疲劳破坏模式、疲劳寿命和损伤演化规律, 分析了三种类型夹芯梁在弯曲疲劳荷载下不同的损伤机制。研究结果发现, 无格构夹芯梁的失效模式统一为芯材剪切和面板脱粘, 格构增强夹芯梁的失效模式随格构设置及荷载等级变化, 主要有上面板屈曲或压坏、下面板拉断等; 采用指数经验模型拟合夹芯梁的疲劳荷载-寿命(S-N)曲线, 得到三种类型夹芯梁的寿命预测公式; 夹芯梁的位移演化历经“位移瞬降-平稳演化-损伤萌生至破坏”三个阶段, 相对于无格构试件, 格构增强试件在疲劳失效前有较明显预兆。

关键词: 玻璃纤维增强树脂基复合材料; 轻木; 夹芯梁; 疲劳试验; 格构增强

中图分类号: TB332; TB301 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2018)05-1114-09

Experimental research on flexural fatigue behavior of GFRP-Balsa sandwich beams

SHI Huiyuan¹, LIU Weiqing^{*1, 2}, FANG Hai², HUO Ruili²

(1. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. College of Civil Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China)

Abstract: In order to study the flexural fatigue behavior of glass fiber reinforced polymer(GFRP)-Balsa sandwich beams prepared by a vacuum assisted resin infusion process, four-point fatigue bending tests for 42 specimens under different load levels were carried out. The fatigue failure modes, fatigue life and damage evolution of the sandwich beams were obtained. The damage mechanism of the three types of sandwich beams under bending fatigue load was analyzed. The failure modes of the beams without lattice-web are unified for the core shear failure and debonding, while those of the beams with lattice-web reinforced are varies with the number of lattice-web and the load level, which is buckling or partial crushing of upper facesheet or tensile failure of lower facesheet. The fatigue load-life(S-N) curves of sandwich beams were fitted by exponential empirical model, and the life prediction formulas of three kinds of sandwich beams were obtained. The displacement evolution of the sandwich beams undergoes three stages of “transient fall-stable evolution-damage initiation to failure”. Compared with the specimens without lattice-web, the lattice-web reinforced specimens have obvious signs before fatigue failure.

Keywords: glass fiber reinforced polymer(GFRP); balsa wood; sandwich beam; fatigue experiment; lattice-web reinforced

玻璃纤维增强树脂基复合材料(GFRP)因其较低的价格优势, 在基础设施领域中被逐步广泛应用^[1-3], 以蜂窝、泡沫和木材等作为芯材的复合材料夹芯结构是工程应用中广泛的结构形式。Balsa 轻

木, 俗称巴沙木, 作为世界上质量最轻的木材, 具有生长速度快、力学性能稳定、保温隔热性能好、绿色环保等优点^[4-6], 在美国、英国等广泛应用于航空航天、汽车制造等领域中, 近年来在工程领域中

收稿日期: 2017-04-26; 录用日期: 2017-06-23; 网络出版时间: 2017-07-07 13:41

网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170707.001>

基金项目: 国家自然科学基金(51238003; 51578285); 国家自然科学基金青年基金(51608264); 江苏省自然科学基金(BK20161545); 江苏省高校优势学科建设工程(CE02-1-11)

通讯作者: 刘伟庆, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为复合材料结构、现代木结构 E-mail: wqliu@njtech.edu.cn

引用格式: 史慧媛, 刘伟庆, 方海, 等. GFRP 复合材料-轻木夹芯梁弯曲疲劳性能试验[J]. 复合材料学报, 2018, 35(5): 1114-1122.

SHI Huiyuan, LIU Weiqing, FANG Hai, et al. Experimental research on flexural fatigue behavior of GFRP-Balsa sandwich beams [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(5): 1114-1122 (in Chinese).

的应用也越来越被重视。传统复合材料夹芯构件在制造与服役过程中极易发生面层与芯材界面剥离破坏，严重制约其轻质高强特性的发挥^[7-8]。针对此种情况，工程上提出了以泡沫或木材为芯材，以复合材料为面层及格构腹板的格构增强复合材料夹芯结构^[9-11]，并将其应用于道路垫板、桥面板、快速拼装房屋及桥梁防撞装置等领域，应用结果表明，相对于传统复合材料夹层结构，该新型结构具有优异的力学性能和界面性能^[12-14]。

在环境及应力不断作用下，结构及构件在使用过程中往往会产生损伤以至破坏，疲劳破坏为结构及构件主要破坏形式之一。由于疲劳破坏没有明显的宏观塑性变形，破坏十分突然，很容易造成灾难性事故，因此需对复合材料结构的疲劳特性进行充分研究，提出科学疲劳寿命评价模型，研究疲劳载荷作用下的结构性能和灾变机制。目前为止，国内外对复合材料单层及层合结构的疲劳性能试验及理论研究已较为成熟^[15-17]，但对复合材料夹层结构的疲劳破坏机制研究还不够系统。通过对复合材料夹芯结构在土木工程中的应用(尤其应用于桥梁结构)分析及试验研究发现，疲劳载荷是其损伤发生及累积的主要因素之一，在疲劳交变载荷作用下，结构件的纤维面板和芯材会发生不同程度的损伤破坏，且会发生界面脱层现象^[18-19]，直接影响了结构复合材料的承载力和耐久性，严重制约了结构的可靠度和安全性。由此可见，对纤维增强树脂基复合材料夹芯结构的疲劳损伤演化、力学特性及寿命预测进行研究具有重要的理论和工程实际意义。本研究针对玻璃纤维增强树脂基复合材料-Balsa 轻木(GFRP-Balsa)夹芯梁开展了四点弯曲疲劳性能试验，考虑不同格构设置对复合材料夹芯结构疲劳性能的影响，研究轻木夹芯复合材料结构的疲劳损伤机制和破坏模式。

1 试验准备及过程

1.1 试件设计

为了得到格构腹板对 GFRP-Balsa 夹芯梁疲劳性能的影响，本研究设计了三种芯材形式试件，如表 1 所示，分别为芯材无格构增强、芯材有一道纵向格构增强、芯材有二道纵向格构增强。所有试件均基于树脂传递工艺，采用真空导入一次成型^[20]，如图 1 所示，先对 Balsa 木板进行预处理，上下表面为 30 mm×30 mm 正交开槽，槽宽为 2 mm，槽深为 2 mm；每个交点处打一个孔，孔径为 3 mm；切割成所需尺寸。再对试件进行面板和格构腹板纤维铺设，对无格构试件，面板铺设(0°, 90°)、0°、(±45°)玻纤布各一层；对格构增强试件，芯材用一层具有较好包扎平整度的(±45°)玻纤布包裹，并用玻璃纤维丝捆扎，使玻璃纤维布与板材平整地铺设在一起，然后在其上下层面铺设(0°, 90°)、0°玻璃纤维布各一层。选用不饱和树脂导入，通过抽真空的方式使树脂浸透，待固化成型后，切割成所需尺寸。试件总高度约为 30 mm，宽度为 70 mm，长度为 350 mm，格构厚度为 1.5 mm。成型试件如图 2 所示，GFRP 面层主要承受正应力；GFRP 格构承受抗剪和抗剥离作用；Balsa 木芯起辅助成型作用，提供抗剪能力，且为格构及面层提供弹性支撑，防止局部压陷和局部屈曲，同时木芯材可改善截面应力分布，有效减弱面层与格构相交处的应力集中，大幅延迟劈裂破坏。

经过材料性能试验可知，纤维面板抗拉强度为 223.21 MPa，弹性模量为 13.95 GPa；剪切强度为 42.18 MPa，剪切模量为 7.67 GPa。Balsa 木密度为 140 kg/m³，抗剪强度为 1.65 MPa；剪切模量为 0.12 GPa。

1.2 四点弯曲静力试验

采用 MTS-370 电液伺服疲劳试验机对试样进行加载，并同时完成数据采集任务。在进行疲劳试

表 1 GFRP-Balsa 夹芯梁试件尺寸
Table 1 Size of GFRP-Balsa sandwich beam specimens

Specimen	Fiber laying of facesheet	Core thickness/mm	Web spacing/mm	Fiber laying of webs
No lattice-web 	[(0, 90)/0/(±45)] _T	25.4	—	—
One lattice-web 	[(0, 90)/0/(±45)] _T	25.4	70	[±45] ₂
Two lattice-web 	[(0, 90)/0/(±45)] _T	25.4	35	[±45] ₂

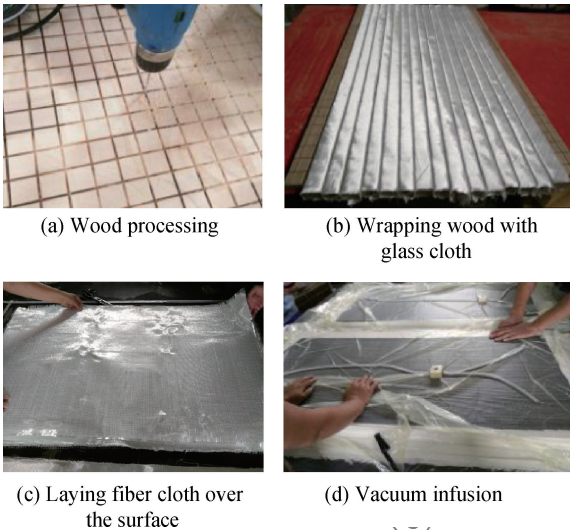


图 1 GFRP-Balsa 夹芯梁制作过程

Fig. 1 Production process of GFRP-Balsa sandwich beams

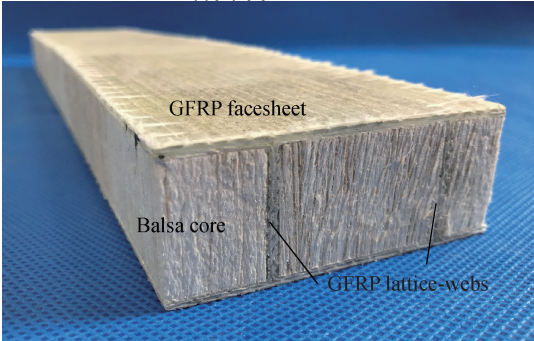


图 2 GFRP-Balsa 夹芯梁试件结构示意

Fig. 2 Sketch of the GFRP-Balsa sandwich beam specimens

验前, 先对三种类型试件分别进行四点弯静力试验, 以得到试件的极限承载力, 加载方式如图 3 所示。其中每种类型分别设计 4 个试件。夹芯梁跨度

设计为 300 mm, 两加载点间距为 100 mm, 静弯曲试验采用位移控制的加载方式, 加载速率为 2 mm/min, 当试件出现破坏时停止试验, 加载过程中记录荷载-跨中位移曲线(如图 4 所示)及三类试件的破坏形态。

四点弯曲静力试验结果如表 2 所示, 相比无格构试件, 格构增强试件的承载能力大幅度提升, 单格构试件比无格构试件平均极限承载能力提高

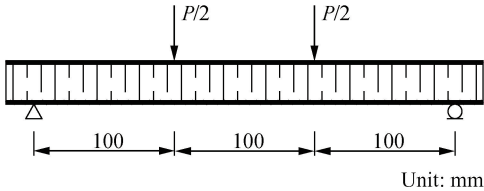


图 3 四点弯曲加载形式

Fig. 3 Test setup of four-point bending

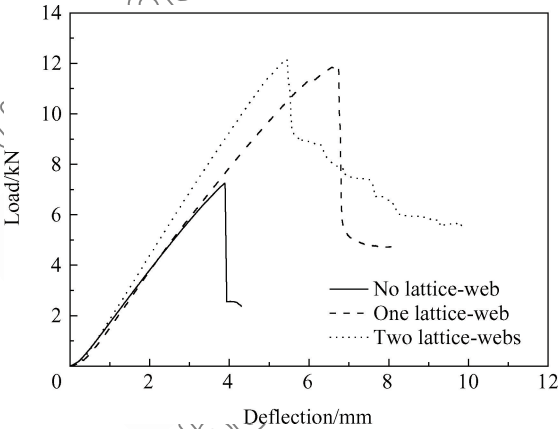


图 4 四点弯曲作用下 GFRP-Balsa 夹芯梁试件荷载-位移曲线

Fig. 4 Load-displacement curves of four-point bending GFRP-Balsa sandwich beam specimens

表 2 GFRP-Balsa 夹芯梁四点弯曲试验结果

Table 2 Four-point bending results of GFRP-Balsa sandwich beams

Specimen	No.	Failure mode	Ultimate capacity/kN	Average/kN	Ultimate displacement/mm	Average/mm
No lattice-web	B0-1	Core shear; Debonding	8.43	7.32	4.52	3.85
	B0-2	Core shear; Debonding	7.25		3.88	
	B0-3	Core shear; Debonding	6.64		3.36	
	B0-4	Core shear; Debonding	6.95		3.64	
One lattice-web	B1-1	Local crush of upper facesheet; Debonding	11.57	11.79	6.30	6.50
	B1-2	Local crush of upper facesheet; Debonding	12.02		6.60	
	B1-3	Debonding	11.89		6.69	
	B1-4	Local crush of upper facesheet	11.66		6.40	
Two lattice-webs	B2-1	Buckling of upper facesheet	13.05	12.66	5.74	5.60
	B2-2	Local crush of upper facesheet	12.13		5.46	
	B2-3	Local crush of upper facesheet	12.55		5.88	
	B2-4	Local crush of upper facesheet	12.91		5.31	

61%，跨中位移提高 69%；双格构试件与单格构试件的极限承载力、跨中位移差别不大，其中，极限承载力有 7% 的小幅提高，跨中最大位移降低 14%。

1.3 四点弯曲疲劳试验

由四点弯曲静力试验结果进行疲劳试验的设计。疲劳试验采用以力控制的加载方式，正弦波加载，试验装置如图 5 所示。与碳纤复材、金属等构件相比，GFRP-Balsa 夹芯梁刚度相对较低，在四点弯曲作用下变形较大，加载过快，机器则不能很好的控制载荷的变化，经测试试验，对所有试件加载频率取 4 Hz。用 P_u 表示静载试验所得试件的极限承载力， P_{max} 和 P_{min} 分别表示疲劳加载时荷载的最大和最小值，应力比 R 定义为加载时 P_{max} 与 P_{min} 之比，对于所有疲劳试验取 $R=0.1$ 。载荷等级 r 定义为 P_{max} 与 P_u 之比，本次试验中 r 在 0.5~0.9 之间取值，从 $r=0.9$ 开始依次试验，每组试验分别取 3 个试件，当试件竖向位移大于 10 mm 或循环次数达到 10^6 时，疲劳试验结束。

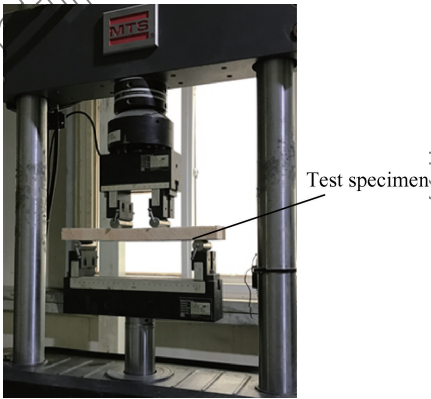


图 5 四点弯曲疲劳试验装置

Fig. 5 Test equipment of four-point bending fatigue test

以 0.1 为载荷等级级差，按照试验设置条件依次进行 42 组试验。包括 12 根无格构试件在 0.9、0.8、0.7、0.6 四种载荷等级下的试验，15 根单格构、15 根双格构试件分别在 0.9、0.8、0.7、0.6、0.5 五种载荷等级下的试验。

2 结果与讨论

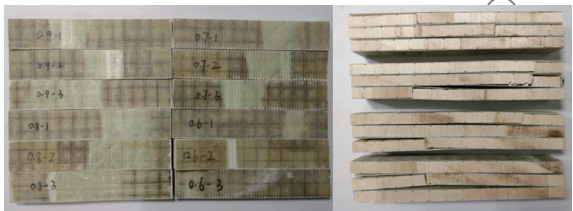
2.1 GFRP-Balsa 夹芯梁破坏模式

2.1.1 无格构夹芯梁

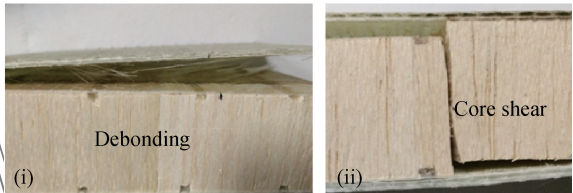
图 6 为无格构 GFRP-Balsa 夹芯梁疲劳破坏模式。图 7 为无格构 GFRP-Balsa 夹芯梁疲劳破坏过程。可知，无格构夹芯梁出现了两种破坏模式：弯剪段芯材的剪切破坏和面板、芯材界面脱粘。各载

荷等级下，夹芯梁的破坏过程相似。加载初期，试件外观无明显的反应，位移小幅度增加；随着加载进行，夹芯梁芯材在弯剪段出现裂纹，裂纹沿木材纹理不断扩展，当扩至芯材与面板界面时，面板与芯材界面脱粘，并出现相对滑动，如图 7(a) 所示；随后，在“滑动”发生有限次数时，芯材迅速折断，并发出清脆的断裂声，如图 7(b) 所示。从裂纹肉眼可见至最终破坏的时间，相对于试件总寿命来说非常短暂，破坏呈现明显的脆性破坏特征。

当载荷等级为 0.6 时，试件 2 发生疲劳破坏，试件 1 和试件 3 在循环 10^6 次后未发生疲劳破坏，且外观无明显的变化。对试件 1 和试件 3(编号分别为 0.6-1、0.6-3)采用上述静载试验方案加载至破坏，以模拟其疲劳损伤后的承载能力极限状态，荷载-位移变化如图 8 所示。可以看出，试件在经过 10^6 次低载荷水平循环往复加载后，静力弯曲的荷载-位移变化规律与未经过循环加载的试件相似，刚度、极限承载能力及竖向位移变化均无明显差别，说明试件 0.6-1 和 0.6-3 在疲劳试验中并未出现能够影响弯曲性能的损伤。



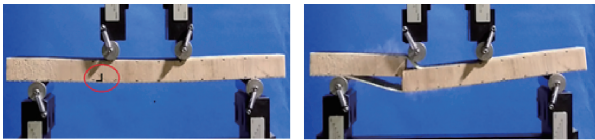
(a) Specimens after failure



(b) Failure modes

图 6 无格构 GFRP-Balsa 夹芯梁疲劳破坏模式

Fig. 6 Fatigue failure modes of GFRP-Balsa sandwich beams without lattice-web



(a) Core crack propagate to interface

(b) Failure moment

图 7 无格构 GFRP-Balsa 夹芯梁疲劳破坏过程

Fig. 7 Fatigue failure progress of GFRP-Balsa sandwich beams without lattice-web

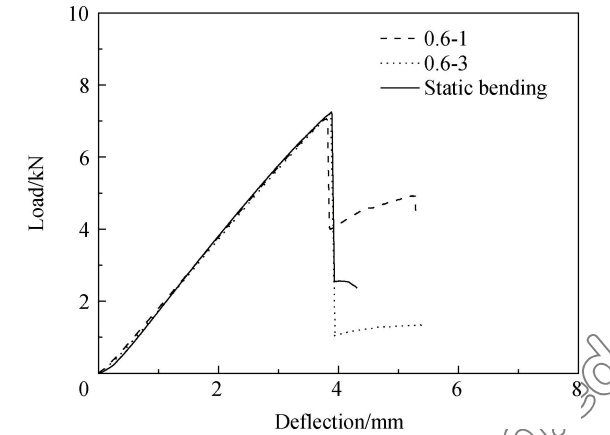


图 8 疲劳作用后静力 GFRP-Balsa 夹芯梁弯曲荷载-位移曲线对比
Fig. 8 Comparison of static bending load-displacement curves of GFRP-Balsa sandwich beams after fatigue tests

2.1.2 格构增强夹芯梁

图 9 为单格构试件的破坏模式。可知，当载荷等级为 0.9 和 0.8 时，试件最终破坏模式主要为上面板屈曲或加载点处压坏；载荷等级为 0.6 和 0.5 时，主要为下面板拉断；载荷等级为 0.7 时，出现了不同的破坏模式，试件 0.7-1 上面板局部压坏、屈曲，试件 0.7-2 下面板拉断，试件 0.7-3 上面板局部压坏、面板部分脱层但未发生大面积剥离。

图 10 为双格构 GFRP-Balsa 夹芯梁疲劳破坏模式。可知，双格构试件的最终破坏模式为下面板拉断或上面板屈曲。当载荷等级为 0.9 时，试件 0.9-1 因跨中上面板屈曲而失效，对于其余 14 根试件，导致试件位移过大而最终失效的原因均为纯弯段下面板断裂，且部分试件出现芯材碎裂、崩出的情况。

图 11 为格构增强 GFRP-Balsa 夹芯梁疲劳破坏过程。对于两种不同格构设置的夹芯梁，破坏过程是相似的：加载初期同无格构夹芯梁，试件外观无明显反应，位移稳定缓慢增长；随着加载进行，夹芯梁首先在弯剪段出现裂纹，可见裂纹沿木材纹理扩展至面板、芯材界面处时，面板与芯材出现局部脱层；随着试件上下往复运动，弯剪段裂纹不断萌生且扩展，界面多处“滑动”出现，如图 11(a)所示，试验机记录的位移不断增加，但试件整体仍然保持一定的承载能力；随着位移的不断增长，试件会出现以下几种情况：(1)对于单格构梁试件 0.9-1、0.9-2、0.9-3、0.8-2、0.8-3、0.7-1、0.7-3，上面板在加载点处压坏且部分伴随屈曲，试件位移迅速增大，试验停止。(2)对于试件单格构梁 0.8-1 和双格构梁 0.9-1，试件跨中上面板发生屈曲破坏，试件

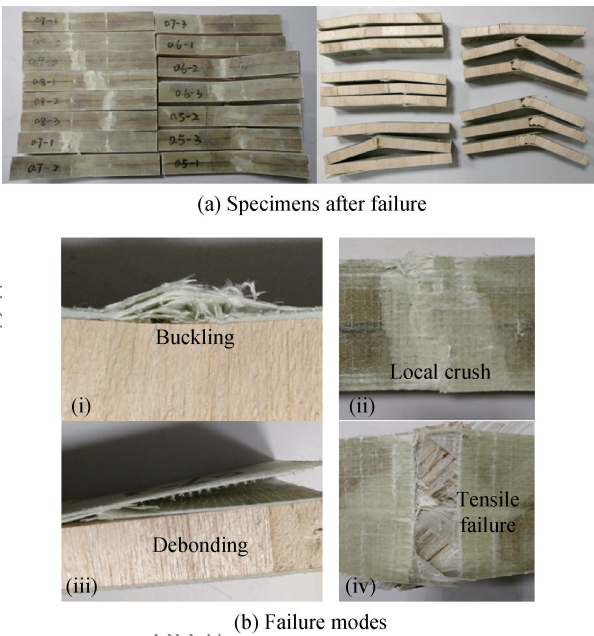


图 9 单格构 GFRP-Balsa 木夹芯梁疲劳破坏模式
Fig. 9 Fatigue failure modes of GFRP-Balsa sandwich beams with one lattice-web

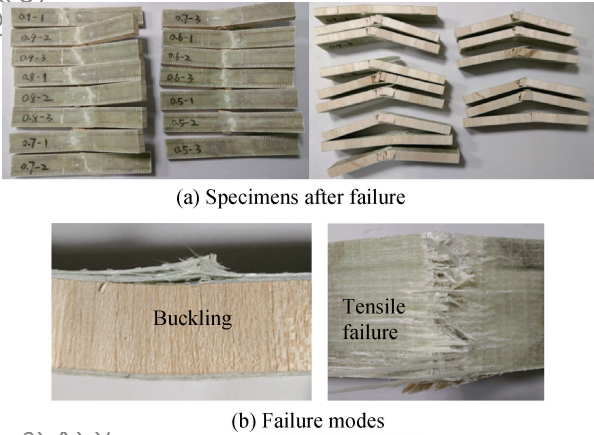


图 10 双格构 GFRP-Balsa 夹芯梁疲劳破坏模式
Fig. 10 Fatigue failure modes of GFRP-Balsa sandwich beams with two lattice-webs

位移迅速增大，试验停止，如图 11(b)所示。(3)对于其余夹芯梁，随着加载进行，下面板纤维开始断裂，并伴随“噼啪”声，如图 11(c)所示，试件位移不断增加，直至下面板无法承受循环中最大弯曲拉应力而崩断，整个试件也因此因此在纯弯段折断，芯材碎裂，如图 11(d)所示。与无格构试件不同，格构增强试件从裂纹可见至最终破坏持续时间较长，试件可带裂缝工作，并在最终破坏前有相对较明显征兆。

2.2 GFRP-Balsa 夹芯梁疲劳寿命

表 3 为三种类型夹芯梁在力控模式下疲劳寿命

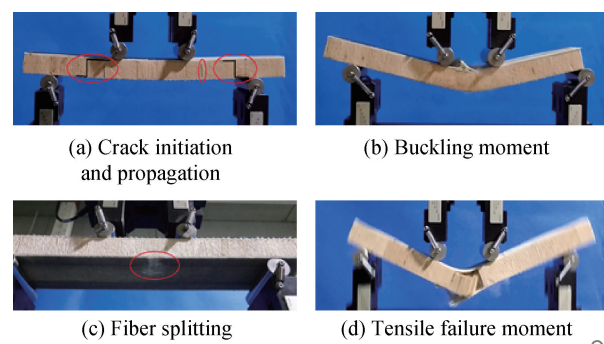


图 11 格构增强 GFRP-Balsa 夹芯梁疲劳破坏过程

Fig. 11 Fatigue failure progress of GFRP-Balsa sandwich beams with lattice-webs

表 3 GFRP-Balsa 夹芯梁四点弯曲疲劳寿命值
Table 3 Fatigue life of GFRP-Balsa sandwich beams under four-point bending tests

Load level	No lattice-web		One lattice-web		Two lattice-webs	
	$P_{\max}/\text{kN}$	S	$P_{\max}/\text{kN}$	S	$P_{\max}/\text{kN}$	S
0.9	6.59	1512	10.61	2152	11.39	3041
		2007		469		8033
		1327		1060		10880
0.8	5.86	8162	9.43	6721	10.13	20843
		5516		6709		19588
		8349		4474		12271
0.7	5.12	23473	8.25	46080	8.86	20734
		43959		33778		27537
		50509		29085		31080
0.6	4.39	1000000+	7.07	96895	7.60	84113
		783495		100657		40394
		1000000+		118053		82268
0.5	—	—	5.90	283367	6.33	209154
				368850		185458
				321498		266499

Notes: $P_{\max}$ —Maximum fatigue load; S —Fatigue life.

值。在疲劳载荷作用下，此种结构内部损伤机制复杂，建立微观的寿命预测模型较难实现， $S-N$ 曲线法是描述材料或结构疲劳性能最直观有效的寿命预测方法，可以从宏观角度反映结构的疲劳性能。根据疲劳寿命结果分布形态，本研究选取如下幂函数经验公式，采用最小二乘法拟合，得到如图 12 所示三种类型夹芯梁在四点弯曲模式下的 $S-N$ 曲线及疲劳寿命预测公式如下：

$$S = aN^b \tag{1}$$

式中： S 为疲劳试验的载荷水平； N 为试件疲劳破坏时的循环次数； a 和 b 为与格构设置、加载频率、载荷比、环境温度等有关的材料参数。

指数型疲劳寿命经验公式能较好的适用于 GFRP-Balsa 夹芯梁，三类试件的拟合残差相差不

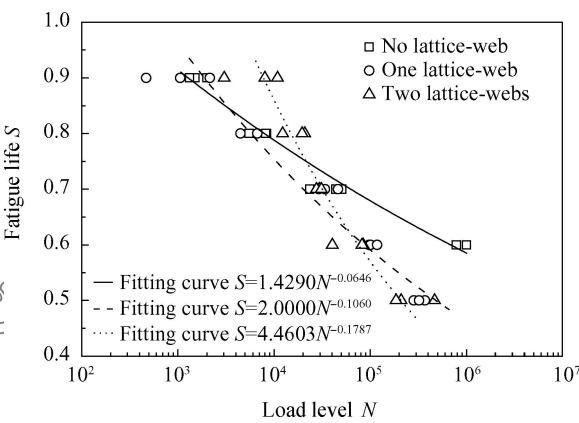


图 12 三类 GFRP-Balsa 夹芯梁试件疲劳载荷-寿命($S-N$) 曲线对比

Fig. 12 Comparison of fatigue load-life($S-N$) curves of three types of GFRP-Balsa sandwich beam specimens

大，分别为 0.0699、0.1371、0.0084。总体来说，在所考察的载荷等级下，三类试件的疲劳寿命均表现出较优异的耐久性。

格构设置对夹芯梁的疲劳寿命分布规律有显著影响，格构设置越多， $S-N$ 曲线越陡，在较高载荷等级下，双格构试件的耐疲劳性能最好，在较低载荷等级下，无格构试件的耐疲劳性能最好。有、无格构试件的疲劳破坏机制是不同的，无格构试件的疲劳失效是由于 Balsa 芯材剪切裂纹的出现，有格构试件的最终疲劳失效却是芯材裂纹扩展后引起 GFRP 面板的失效。在高载荷等级作用下，三类试件都相对较早萌生初始裂纹，此时，无格构试件在裂纹萌生后迅速破坏，有格构试件则在相对较晚的时间由于面板破坏而最终失效。在低载荷等级作用下，无格构试件的 $P_{\max}$ 相比有格构试件小的多，芯材剪切裂纹出现较晚，而有格构试件因其相对较高的 $P_{\max}$ ，芯材中剪切裂纹萌生、扩展较快，也因此更早出现疲劳失效；此时，双格构试件比单格构试件更容易出现破坏，这是由于双格构试件在加工成型过程中更容易在芯材中产生初始缺陷，在进行循环往复加载时，初始缺陷越多，裂纹萌生、扩展的速率越大。因试件总尺寸限制，双格构试件的芯材在加工过程中需要切割成较细的条型(如图 1(b)所示)，而 Balsa 木本身较软，制作加工过程中很容易形成损伤，如将试件扩大为足尺的桥面板、风力发电叶片等，因加工成型造成的初始损伤将会减少。

2.3 GFRP-Balsa 夹芯梁疲劳损伤演化规律
在不同载荷水平下，取每种类型试件中最接近

平均疲劳寿命的试件，描绘其峰值、谷值竖向位移（依试验机记录，竖向位移为负值）和疲劳相对寿命（当前循环与总循环之比）关系，如图 13 所示。在整个加载过程中，试件最大、最小位移演化具有明显的“三阶段”特征：（1）位移瞬降区：加载初期，作动器上下往复加载搜索载荷平衡位置；（2）平稳演化阶段：疲劳加载平稳进行，结构保持稳定承载，

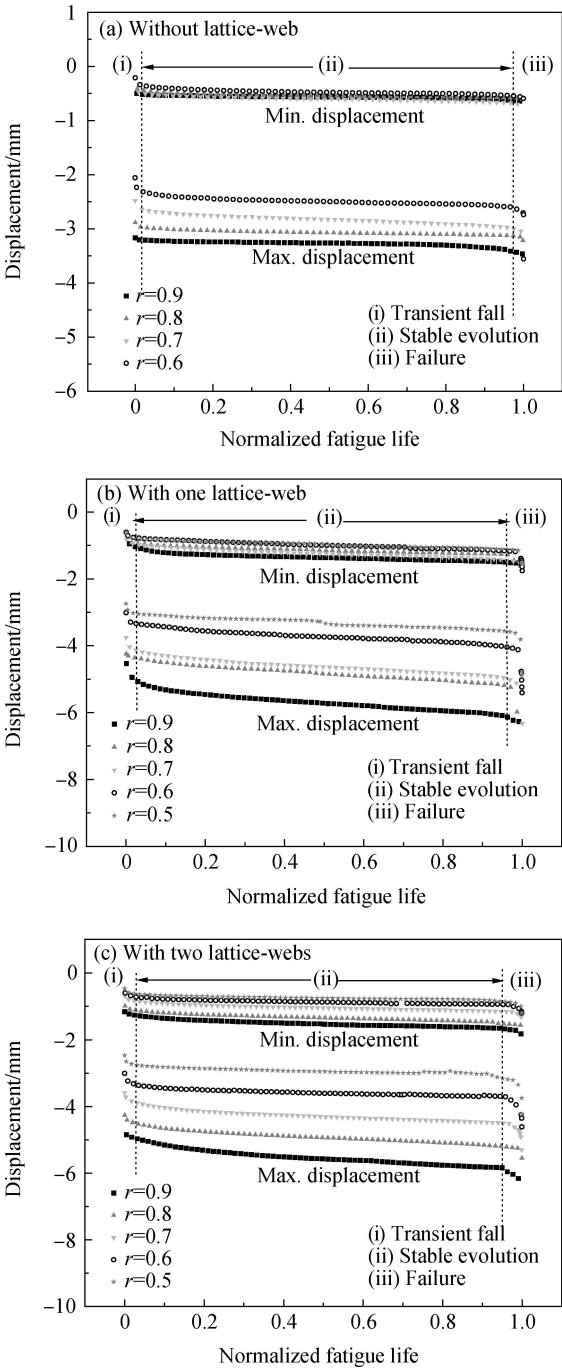


图 13 三类 GFRP-Balsa 夹芯梁试件疲劳竖向位移演化
Fig. 13 Fatigue vertical displacement evolution of three types of GFRP-Balsa sandwich beam specimens

此阶段越长预示试件的抗疲劳能力越强；（3）损伤萌生至破坏阶段：试件内部损伤开始萌生，且以相对较快的速率扩展，最终导致整个结构的疲劳失效。

图 14 为三类 GFRP-Balsa 夹芯梁试件位移演化规律对比。可见，三类试件具有相同的第一和第三阶段变化特征。在第二阶段中，相对于有格构试件，无格构试件位移斜率无明显下降，验证了无格构试件在芯材出现裂纹时会迅速破坏的特征；有格构试件在芯材中出现裂缝时仍可持续承受疲劳循环载荷的作用，虽然位移斜率相对变化较大，但总体仍然显现平稳演化阶段。无格构试件在低于其疲劳强度的载荷作用下进行一定量次数的循环并不会出现疲劳损伤；试件一旦有疲劳损伤萌生，便会迅速破坏。

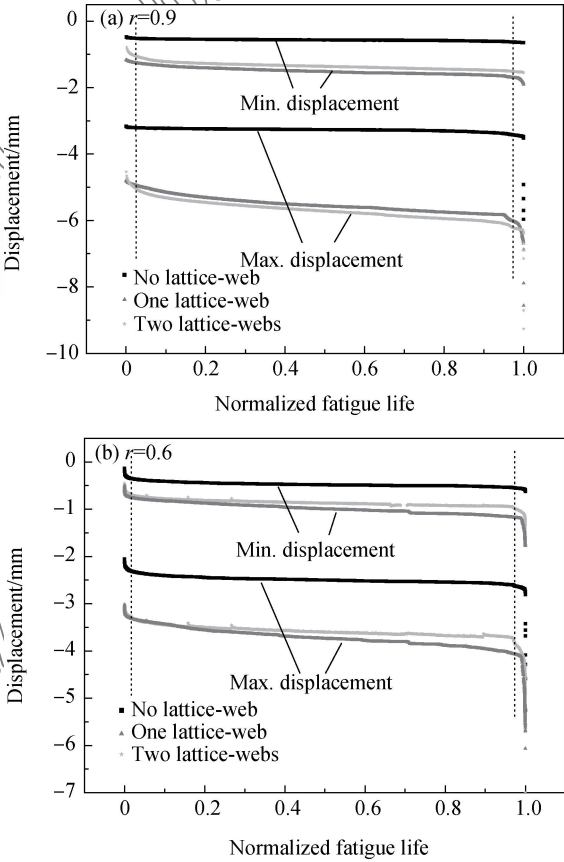


图 14 高载荷水平下三类 GFRP-Balsa 夹芯梁试件
位移演化规律对比
Fig. 14 Comparison of displacement evolution of three types of GFRP-Balsa sandwich beam specimens under higher load level

3 结 论

针对玻璃纤维增强树脂基复合材料-Balsa 轻木

(GFRP-Balsa)夹芯梁,开展了四点弯曲疲劳性能试验研究,对比了无格构普通夹芯梁与格构增强夹芯梁的静力弯曲性能和疲劳弯曲性能,总结出其疲劳破坏规律及损伤机制,根据试验结果拟合出适用于此种夹芯结构的疲劳寿命预测公式,主要得到以下几方面结论:

(1) GFRP-Balsa 夹芯梁在静力四点弯曲载荷作用下,单格构试件比无格构试件的极限承载能力提高 61%,跨中位移提高 69%;双格构试件与单格构试件的极限承载力、跨中位移差别不大。

(2) GFRP-Balsa 夹芯梁在力控模式的四点弯曲疲劳载荷作用下,无格构试件出现了芯材剪切破坏和界面脱粘两种破坏模式;当载荷等级较高时,单格构试件最终失效模式为上面板屈曲和局部压坏,当载荷等级较低时,最终失效模式为下面板拉断;双格构试件的最终失效模式为下面板拉断或上面板屈曲。

(3) GFRP-Balsa 夹芯梁的疲劳荷载-寿命($S-N$)曲线符合指数型变化规律,拟合残差最大为 0.1371。格构设置对夹芯梁的疲劳寿命分布规律有显著影响,格构设置越多, $S-N$ 曲线越陡。

(4) 在疲劳加载过程中,GFRP-Balsa 夹芯梁的位移演化历经位移瞬降、平稳演化、损伤萌生至破坏过程,具有“三阶段”特征。在第二阶段中,有格构试件在芯材中出现裂缝时仍可持续承受疲劳循环载荷的作用,在最终失效前有较明显的预兆期。总体来看,格构增强 GFRP-Balsa 夹芯结构具有良好的应用前景。

参考文献:

[1] 叶列平,冯鹏. FRP 在工程结构中的应用与发展[J]. 土木工程学报, 2006, 39(3): 24-36.
YE L P, FENG P. Applications and development of fiber reinforced polymer[J]. Engineering Structures, 2006, 39(3): 24-36 (in Chinese).

[2] 戚贵军,李惠. FRP 复合材料土木工程应用与耐久性[J]. 材料工程, 2010(S1): 121-126.
XIAN G J, LI H. Application and durability of fiber reinforced polymer in civil engineering[J]. Material Engineering, 2010(S1): 121-126 (in Chinese).

[3] 冯鹏. 复合材料在土木工程中的发展与应用[J]. 玻璃钢/复合材料, 2014(9): 99-104.
FENG P. Development and application of composite in civil

engineering[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2014 (9): 99-104 (in Chinese).

[4] SILVA A D, KYRIAKIDES S. Compressive response and failure of balsa wood[J]. International Journal of Solids & Structures, 2007, 44(25-26): 8685-8717.

[5] OSEI-ANTWI M, CASTRO J D, VASSILOPOULOS A P, et al. Shear mechanical characterization of balsa wood as core material of composite sandwich panels[J]. Construction & Building Materials, 2013, 41(41): 231-238.

[6] THOMAS G, NADIA N, STEFANIE F, et al. High-temperature mechanical properties and thermal recovery of balsa wood[J]. Journal of Wood Science, 2010, 56(6): 437-443.

[7] CORIGLIANO A, RIZZI E, PAPA E. Experimental characterization and numerical simulations of a syntactic-foam/glass-fibre composite sandwich[J]. Composites Science & Technology, 2000, 60(11): 2169-2180.

[8] DANIEL I M, GROUTOS E E. Failure modes of composite sandwich beams[J]. Theoretical & Applied Mechanics, 2008, 35(1-3): 105-118.

[9] 方海,刘伟庆,万里. 格构增强型复合材料夹层结构的制备与受力性能[J]. 玻璃钢/复合材料, 2009(4): 67-69.
FANG H, LIU W Q, WAN L. Mechanical properties and manufacturing process of lattice reinforced sandwich composites[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2009(4): 67-69 (in Chinese).

[10] 陈向前,刘伟庆,方海. 双向纤维腹板增强复合材料夹层板受弯性能试验研究[J]. 实验力学, 2012, 27(4): 32-34.
CHEN X Q, LIU W Q, FANG H. Experimental study of flexural behavior of composite sandwich panel reinforced by two-way webs[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(4): 32-34 (in Chinese).

[11] 吴中元,方海,刘伟庆,等. 格构腹板式界面增强泡桐木夹芯复合材料梁的弯曲性能试验[J]. 玻璃钢/复合材料, 2015 (10): 53-57.
WU Z Y, FANG H, LIU W Q, et al. Experimental study on flexural behavior of paulownia wooden core sandwich composite beam reinforced with lattice web[J]. Fiber Reinforced Plastics/Composites, 2015(10): 53-57 (in Chinese).

[12] WANG L, LIU W, WAN L, et al. Mechanical performance of foam-filled lattice composite panels in four-point bending: Experimental investigation and analytical modeling[J]. Composites Part B: Engineering, 2014, 67: 270-279.

[13] ZHANG F, LIU W, WANG L, et al. Flexural behavior of hybrid composite beams with a bamboo layer and lattice ribs[J]. Journal of Reinforced Plastics & Composites, 2015, 34

- (7): 521-533.
- [14] SHI H, LIU W, FANG H, et al. Flexural responses and pseudo-ductile performance of lattice-web reinforced GFRP-wood sandwich beams[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2017, 108: 364-376.
- [15] 廉伟, 姚卫星. 复合材料层压板剩余刚度—剩余强度关联模型[J]. *复合材料学报*, 2008, 25(5): 151-156.
- LIAN W, YAO W X. Residual stiffness-residual strength coupled model of composite laminates [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2008, 25(5): 151-156 (in Chinese).
- [16] CAPRINO G, TETI R, IORIO I D. Predicting residual strength of pre-fatigued glass fibre-reinforced plastic laminates through acoustic emission monitoring[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2005, 36(5): 365-371.
- [17] 石文静, 胡伟平, 张森, 等. E-GFRP 单向板疲劳性能及失效机制的实验研究[J]. *复合材料学报*, 2012, 29(2): 121-129.
- SHI W J, HU W P, ZHANG M, et al. Experimental investigation for fatigue property and fatigue failure mechanism of the E-GFRP angle ply unidirectional laminates[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2012, 29(2): 121-129 (in Chinese).
- [18] SHARMA N, GIBSON R F, AYORINDE E O. Fatigue of foam and honeycomb core composite sandwich structures: A tutorial[J]. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 2006, 8(4): 263-319.
- [19] 张响鹏, 刘伟庆, 万里, 等. 泡桐木夹层梁的弯曲疲劳试验[J]. *南京工业大学学报: 自然科学版*, 2014, 36(5): 76-82.
- ZHANG X P, LIU W Q, WAN L, et al. Bending fatigue experiment on paulownia core sandwich composite beam[J]. *Journal of Nanjing Tech University (Natural Science Edition)*, 2014, 36(5): 76-82 (in Chinese).
- [20] 崔辛, 刘钧, 肖加余, 等. 真空导入模塑成型工艺的研究进展[J]. *材料导报*, 2013, 27(17): 14-18.
- CUI X, LIU J, XIAO J Y, et al. Research progress of vacuum infusion molding process[J]. *Materials Reviews*, 2013, 27(17): 14-18 (in Chinese).