

DOI: 10.7652/xjtuxb201709018

夹芯复合材料 T 型接头弯曲疲劳损伤机制及 剩余强度试验研究

周晓松, 梅志远, 张焱冰
(海军工程大学舰船工程系, 430033, 武汉)

摘要: 为了解夹芯复合材料 T 型接头在弯曲疲劳载荷作用下的损伤特征模式及剩余强度特性,以疲劳加载试验机和万能材料试验机为测试平台,开展了该型接头的弯曲疲劳试验以及疲劳加载前后的静力弯曲破坏对比试验。通过接头疲劳加载前的静力弯曲破坏试验,获取了结构初始破坏载荷并观测了损伤特征模式。试验研究结果表明,在弯曲疲劳载荷作用下,接头结构刚度呈现渐进退化特征且随疲劳载荷峰值的上升呈加速趋势,接头的疲劳损伤模式主要为水平基座夹芯板两侧简支边界位置泡沫芯材的剪切损伤,泡沫芯材力学性能的退化导致结构刚度的渐进式下降。进一步的试验结果对比分析表明,该型接头的疲劳安全峰值载荷可取为结构初始损伤载荷的 70%,在疲劳安全峰值载荷范围内并经历 10^5 次弯曲疲劳循环后,接头的初始刚度和极限承载弯矩与疲劳承载前基本相当。

关键词: 复合材料;T 型连接;弯曲载荷;疲劳损伤;剩余强度

中图分类号: TB330.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)09-0125-06

Experimental Research on the Bending Fatigue Damage and Residual Strength of Composite Sandwich T-Joint

ZHOU Xiaosong, MEI Zhiyuan, ZHANG Yanbing
(Department of Naval Architecture Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430003, China)

Abstract: To understand the fatigue damage behavior and residual strength of composite sandwich T-joint subject to bending loads, the bending fatigue tests were performed, including the static bending failure tests before and after the fatigue tests on fatigue loading test machine and universal material testing machine. The static bending failure tests were carried out before fatigue loading to obtain the initial failure load of the structure, and the damage characteristic mode was observed. The experimental results show that the stiffness of the composite sandwich T-joint presents a progressive degradation, and the acceleration trend increases with the rise of the peak load; The shear damage of foam core is the main damage mode of the composite sandwich T-joint on the side of the horizontal panel; The degradation of mechanical property of the foam leads to a progressive decrease in the structural stiffness. Further comparative analysis shows that the stiffness and the ultimate bearable bending moment of the composite sandwich T-joint after 10^5 fatigue loading circles are approximately equal to that before fatigue loading is imposed under the condition that the fatigue peak load is 70% of the initial failure load.

Keywords: composite; T-joint; bending load; fatigue damage; residual strength

夹芯复合材料 T 型接头作为典型的连接形式,具有结构轻盈、连接效率高以及没有钻孔引起的应力集中等优点,在航空航天和舰船设计领域的结构装配设计中被广泛应用^[1-2]。近年来,国内外研究者运用数值计算、试验、理论与试验相结合的方法,对夹芯复合材料 T 型接头开展了一系列研究,主要集中在不同载荷形式下的极限承载强度与损伤失效机理方面。Zhou 等研究了夹芯板 T 型连接结构在不同载荷形式下的力学性能和损伤失效机理^[3];陈亮等研究了夹芯复合材料 T 型接头的制备工艺并开展了一系列的力学性能试验研究^[4]。Lih 等通过仿真分析和试验测试研究了复合材料 T 型接头的断裂力学行为^[5]。

然而,复合材料结构在长期服役过程中,低于结构静强度水平的单次载荷虽然不会对结构造成任何损伤,但同样的载荷重复多次,则会导致结构力学性能退化甚至完全破坏^[6-8]。复合材料结构的疲劳破坏通常就出现在连接接头中,相关文献已经报道了多起由于连接接头疲劳破坏而导致的灾难性事故^[9-11]。因此,在复合材料结构设计中,接头的疲劳损伤机制及剩余强度特性成为复合材料结构抗疲劳设计中被重点关注的内容。

本文针对典型夹芯复合材料 T 型接头开展了弯曲疲劳承载试验以及疲劳承载前后的静力弯曲破坏试验,重点分析了夹芯复合材料 T 型接头在弯曲载荷作用下的疲劳损伤特征模式及剩余强度特性,为复合材料整体结构的抗疲劳设计提供了依据。

1 试件设计制备

1.1 材料体系选型

本文设计的夹芯复合材料 T 型接头由复合材料夹芯板和梯形过渡区组成,其中复合材料夹芯板由水平基座板和垂向支柱板组成。结构试件制备共需要 3 种原材料,复合材料表层纤维采用无碱玻璃纤维斜纹布,树脂采用美国亚士兰 510C 环氧树脂基树脂,夹芯板和梯形过渡区的泡沫芯材选用 HP80 芯材。无碱玻璃纤维布具有强度高、密度低、绝缘隔热及耐高温性能好等优点,在航空航天与舰船复合材料结构设计中得到广泛应用。环氧树脂基树脂具有良好的力学性能、耐腐蚀性能和抗疲劳特性,与玻璃纤维固化成型后的复合界面性能较好。选用的 HP80 泡沫芯材具有密度低、剪切模量和剪切强度高等优点。

1.2 结构方案设计

夹芯复合材料 T 型接头主要设计参量包括:试件长度 $L=400$ mm,高度 $H=150$ mm,夹芯板表层复合材料厚度 $G=4$ mm,泡沫芯材厚度 $C=32$ mm,梯形过渡区泡沫高度 $D=32$ mm 及坡角 $\theta=45^\circ$,过渡区铺层长度 $L_1=L_2=40$ mm,局部加强区铺层长度 $J_1=J_3=30$ mm, $J_2=J_4=60$ mm,厚度 $T=1$ mm。复合材料表层共含有 13 层纤维布,单层平均厚度为 0.308 mm,试件宽度为 60 mm,结构示意图如图 1 所示。

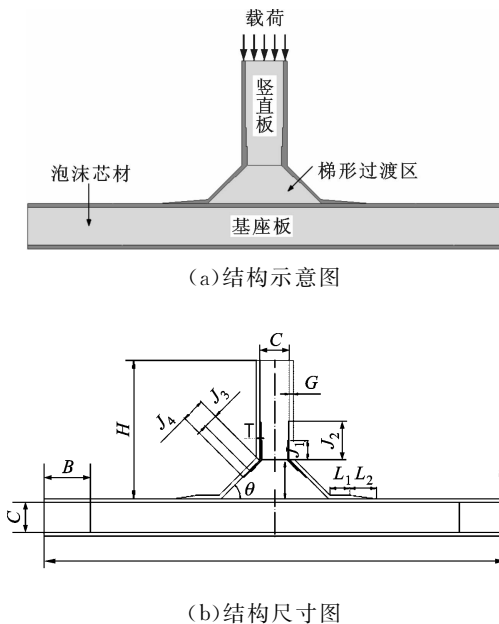


图 1 夹芯复合材料 T 型接头示意图

2 试验加载方案

2.1 静力弯曲破坏试验

夹芯复合材料 T 型接头的弯曲试验工作在海军工程大学舰船结构与材料工程实验室完成,静力弯曲破坏试验的主要设备为西安力创 10 t 电子万能材料试验机。对夹芯复合材料 T 型接头的工程应用背景分析可知,作为轻型夹层板结构的连接接头,连接部位通常作局部铺层加固和增强,长期服役过程中较低的弯曲疲劳载荷对接头局部连接部位的强度和刚度影响并不突出。然而,结构弯曲疲劳载荷极易容易造成连接部位两侧基座板泡沫芯材抗剪切性能的退化,从而导致 T 型接头弯曲强度和刚度的退化,影响整体结构的安全使用。参照国标 GB/T 1456—2005《夹层结构弯曲性能试验方法》,试验在采用三点弯曲加载方式、底部跨距为 275 mm 以及两侧简支边界的条件下,主要考察的是夹层板泡沫芯材的抗剪切性能对接头整体结构强度和刚度的

影响。接头垂向支柱板顶端加载头位移持续加载,加载速度为 2 mm/min,直至卸载或试件出现明显的结构破坏,以获取完整的载荷位移曲线,加载测试方案如图 2 所示。静力弯曲破坏试验的主要目的是为了获取该型夹芯复合材料 T 型接头的结构初始破坏载荷,为弯曲疲劳试验的加载载荷提供依据,从而分析评估该型接头的弯曲疲劳承载特性。静力弯曲试件共 3 个,编号为 W_1 、 W_2 、 W_3 。

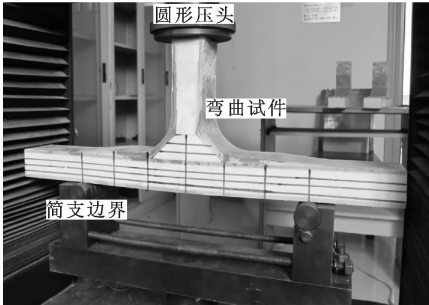


图 2 夹芯复合材料 T 型接头弯曲试验方案

2.2 弯曲疲劳加载试验

弯曲疲劳试验的主要设备为西安力创微机控制电液伺服疲劳试验机。由静力弯曲试验结果可知,该型接头在承受 5.66 kN 轴向压弯载荷时将产生初始损伤并导致结构刚度退化。因此,为了研究不同疲劳峰值载荷对接头疲劳承载特性的影响,将试件 P_1 、 P_2 、 P_3 的疲劳试验载荷峰值分别设为接头初始损伤载荷的 90%、80%、70% 进行加载,数值分别为 5.08、4.52、4.02 kN。试验采用正弦循环加载方式,载荷范围为一 0.2 kN 至疲劳载荷峰值,载荷加载频率均为 5 Hz,循环周期为 10^5 。为分析载荷加载频率对接头疲劳损伤特性的影响,试件 P_4 、 P_5 的加载频率分别为 1、10 Hz,疲劳试验载荷峰值设为接头初始损伤载荷的 70%,即 4.02 kN。试验采用三点弯曲加载方式,底部跨距为 275 mm,筒支边界条件,顶部利用槽型工装夹持,压头载荷均匀作用于顶部工装,夹芯复合材料 T 型接头疲劳试验方案如图 3 所示。

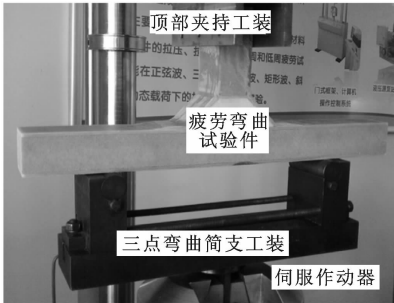
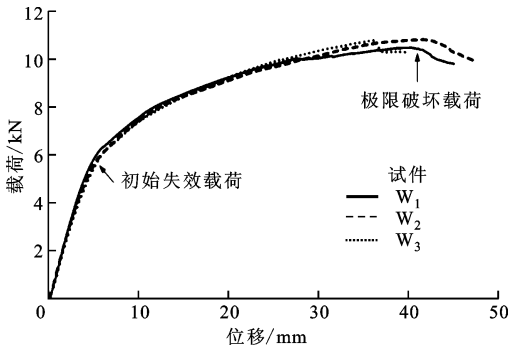


图 3 夹芯复合材料 T 型接头疲劳试验方案

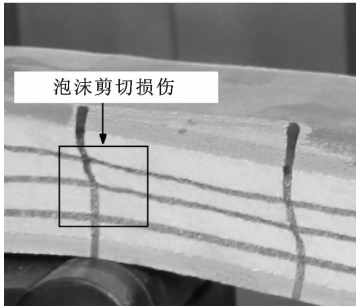
3 试验结果分析

3.1 静力弯曲破坏模式分析

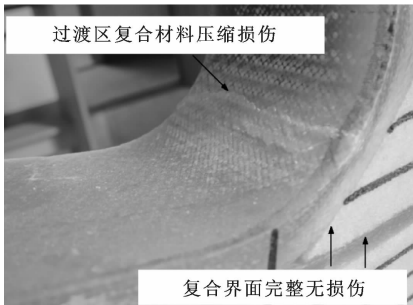
静力弯曲试验的载荷位移曲线和典型破坏模式如图 4 所示。对夹芯复合材料 T 型接头的典型破坏模式进行分析,典型破坏模式包括两侧筒支边界区域泡沫芯材的剪切损伤和梯形过渡区表层复合材料的压缩损伤。其中剪切损伤是夹芯复合材料 T 型接头初始损伤的主要特征模式,当接头初始损伤出现后,结构刚度下降,但结构的整体承载能力并未丧失。压缩损伤模式出现在结构承载的中后期,是导致夹芯复合材料 T 型接头丧失承载能力的主要原因。



(a) 静力弯曲载荷位移曲线



(b) 两侧筒支边界区域



(c) 梯形过渡区域

图 4 夹芯复合材料 T 型接头载荷位移曲线和典型破坏模式

3.2 弯曲疲劳损伤机制分析

夹芯复合材料 T 型接头在交变载荷作用下,常

常在高应力区域出现较大规模的损伤,其损伤的形态可能是界面脱胶和基体开裂,或是少量纤维断裂以及泡沫芯材的损伤退化,或是损伤的复合失效,从而导致接头结构强度和刚度的退化。对复合材料结构疲劳寿命的预报理论大致分为 $S-N$ 曲线理论和疲劳损伤累积理论。

本文中研究中夹芯复合材料 T 型接头的 $S-N$ 曲线定义为连接结构在某一加载载荷水平下的循环次数 N 与其相应的极限加载载荷 S 的实测关系。在疲劳加载试验测试中,由于接头试件损伤或裂纹扩展导致疲劳试验机停机,或接头加载变形显著增加,此时的载荷循环次数 N 可作为该接头试件在此载荷水平下的寿命,由此得到该型夹芯复合材料 T 型接头在该 3 点弯曲加载条件下的疲劳寿命变化规律,具体疲劳寿命试验数据如表 1 所示。

表 1 夹芯复合材料 T 型接头疲劳寿命试验数据

试件	载荷/kN	频率/Hz	循环次数
P_1	5.08	5	33 183
P_2	4.52	5	60 856
P_3	4.08	5	10^5
P_4	4.08	1	10^5
P_5	4.08	10	10^5

由表 1 可知,试件 P_1 、 P_2 在疲劳加载试验过程中均出现结构疲劳损伤,都未能完成 10^5 次疲劳循环加载试验。试件 P_1 在 5.08 kN 最大交变载荷作用下的有效循环次数最少,试验过程中当循环次数达到 33 183 时,疲劳试验停止。试件 P_2 在 4.52 kN 最大交变载荷作用下有效循环次数有所增加,达到 60 856。试件 P_3 、 P_4 、 P_5 在 4.08 kN 最大交变载荷及 1~10 Hz 加载频率条件下均完成了 10^5 次循环,夹芯复合材料 T 型接头 $S-N$ 曲线如图 5 所示。

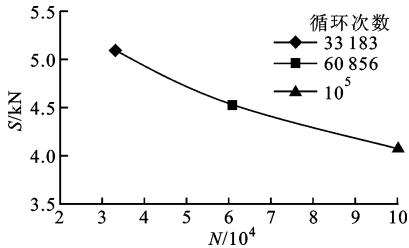


图 5 夹芯复合材料 T 型接头 $S-N$ 曲线

对试件疲劳加载试验过程进行分析,可知在弯曲疲劳载荷作用下,夹芯复合材料 T 型接头疲劳损伤特征模式主要表现为水平基座泡沫芯材的剪切损伤。初始损伤裂纹首先出现在水平基座夹芯板两侧

简支边界位置处,然后裂纹由两侧简支边界位置向内侧梯形过渡区扩展,试验加载过程后期可观察到明显的动态裂纹扩展现象,夹芯复合材料 T 型接头疲劳加载状态如图 6 所示。由于接头水平基座板的泡沫芯材出现裂纹损伤且损伤不断扩展,从而导致结构刚度的逐步下降和加载变形的不断增加,试验进程提前终止。进一步对梯形过渡区进行观察分析,可知过渡区复合材料表层以及复合材料表层与泡沫芯材间的复合界面仍保持完好,并未出现任何形式的损伤和裂纹。由此可知,试验加载工况下夹芯复合材料 T 型接头的疲劳承载强度主要由泡沫芯材的剪切强度决定,水平基座夹芯板芯材的抗剪承载能力起决定作用。初始损伤裂纹出现后,泡沫芯材剪切裂纹的扩展导致接头疲劳承载能力下降,因而选用剪切强度和抗剪切疲劳性能较好的泡沫芯材可以显著改善夹芯复合材料 T 型接头的弯曲疲

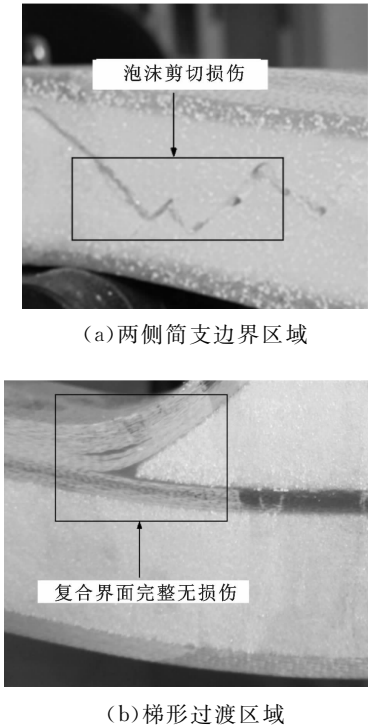


图 6 夹芯复合材料 T 型接头疲劳加载状态

劳承载特性。

试件 P_1 在最大交变载荷保持稳定的情况下,轴向压缩位移幅值呈现逐步上升的趋势,疲劳加载曲线如图 7 所示。结合试件 P_1 的疲劳损伤特征模式分析可知,夹芯复合材料 T 型接头在弯曲疲劳载荷作用下,由于水平基座板两侧简支边界处泡沫芯材裂纹的出现和扩展而导致接头刚度出现退化。因此,夹芯复合材料 T 型接头在弯曲疲劳峰值载荷保持稳定的情况下,轴向加载位移必须保持逐步增加

的趋势。与传统金属连接接头不同,夹芯复合材料 T 型接头出现疲劳损伤后,损伤裂纹并不会出现迅速扩展而导致接头崩溃性破坏的特征,整体结构仍具有较强的疲劳承载能力,结构刚度随着疲劳循环次数的增加而呈现渐进退化的趋势。

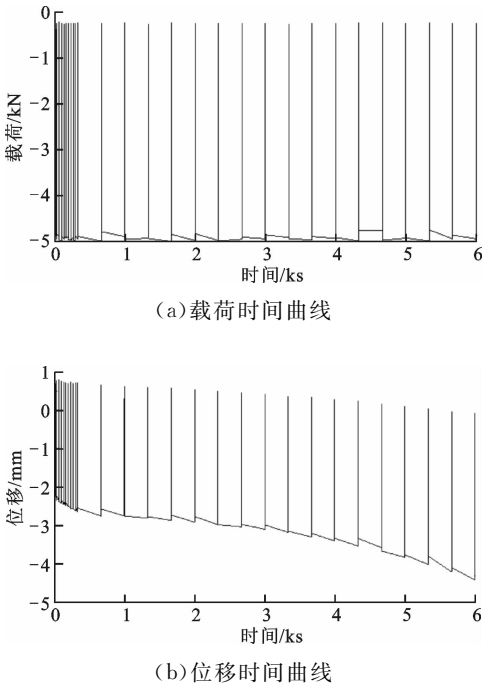


图 7 试件 P₁ 疲劳加载曲线

试件 P₂ 的疲劳加载曲线与试件 P₁ 基本相似。由于弯曲疲劳峰值载荷较试件 P₁ 有所降低,在试验过程中循环次数达到 60 856 时,疲劳试验停止,有效循环次数较试件 P₁ 有所提高。试件 P₃ 则顺利完成了 10⁵ 次循环疲劳加载,加载过程中并未出现任何形式的损伤,结构刚度也未出现退化,加载变形保持稳定。初步试验结果表明,在该试验加载工况下,夹芯复合材料 T 型接头具有良好的弯曲疲劳承载特性,在 5 Hz 加载频率条件下,接头安全疲劳峰值载荷可取为初始损伤载荷的 70%。此外,考虑到夹芯复合材料 T 型接头在服役过程中结构会受到不同频率条件下的弯曲疲劳载荷作用,本文进一步对该型接头在不同频率状态下的疲劳承载特性开展了试验研究,疲劳峰值载荷设为接头初始损伤载荷的 70%,加载频率设为 1、10 Hz,试件 P₄、P₅ 顺利完成了 10⁵ 次循环加载,循环加载过程中未发现任何形式的损伤和结构刚度退化现象,表明该型接头在不同加载频率条件下具有良好的弯曲疲劳承载特性。

3.3 剩余强度特性分析

在实际工程应用中,夹芯复合材料 T 型接头在经历一定次数的循环疲劳载荷后,接头的剩余强度

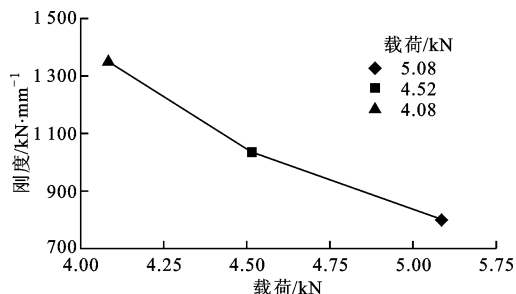
大小是否满足整体结构的力学承载设计要求这成为工程应用中关心的实际问题。尽管夹芯复合材料 T 型接头的损失疲劳性能能够用 S-N 曲线做些描述,但简单的 S-N 曲线不能够充分地给出夹芯复合材料 T 型接头疲劳损伤退化后的剩余载荷响应特征。为了解该型接头疲劳承载后的剩余强度特性,本文基于疲劳累积损伤的剩余强度模型,进一步开展了疲劳承载后的静力弯曲破坏试验,与该型接头疲劳承载前的弯曲破坏试验结果进行对比分析,数据对比如表 2 所示。

表 2 T 型接头疲劳前后试验数据对比

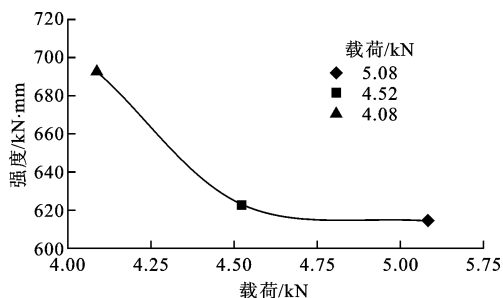
试件	载荷/ kN	频率/ Hz	刚度/ kN · mm ⁻¹	强度/ kN · mm
W ₁			1 377	688
W ₂			1 311	676
W ₃			1 237	719
P ₁	5.08	5	631	632
P ₂	4.52	5	928	639
P ₃	4.08	5	1 325	698
P ₄	4.08	1	1 322	710
P ₅	4.08	10	1 311	703

由表 2 可知,试件 P₁ 在最大交变载荷 5.08 kN 作用下,接头初始刚度较 W₁、W₂、W₃ 静力弯曲破坏试验初始刚度平均值约下降 52%,极限承载弯矩与疲劳承载前极限承载弯矩平均值下降约 9%。试件 P₂ 初始刚度较疲劳承载前下降约为 29%,极限承载弯矩与疲劳承载前平均值下降约 8%。试件 P₃ 的初始刚度和极限承载弯矩与疲劳承载前基本相当。此外,不同载荷频率下试件 P₄、P₅ 在疲劳承载后,接头的初始刚度和极限承载弯矩与疲劳承载前仍基本相当,并未受到加载频率的影响。夹芯复合材料 T 型接头的剩余强度和剩余刚度变化曲线如图 8 所示。由图 8 可知,结构的剩余刚度随疲劳加载载荷的上升近似呈线性退化特征,而结构的剩余强度则呈现先下降后趋于稳定的退化规律。疲劳峰值载荷大小对该试验加载工况下夹芯复合材料 T 型接头的结构初始刚度影响较大,对结构的极限承载弯矩影响较小。结合破坏模式分析可知,结构刚度退化的主要因素为水平基座板泡沫芯材的剪切损伤破坏,而决定结构极限承载能力的主要因素为复合材料表层的强度。弯曲疲劳承载过程中并未导致表层复合材料出现任何形式的损伤,因而对结构的极限承载能力影响较小。因此,在上述试验加载工况下,夹芯复合材料 T 型接头的安全疲劳峰值载荷

可取为结构初始损伤载荷的 70%，在此安全峰值范围内结构具有较好的弯曲疲劳承载特性。



(a) 结构刚度-疲劳载荷变化曲线



(b) 结构强度-疲劳载荷变化曲线

图 8 夹芯复合材料 T 型接头刚度与强度退化曲线

4 结 论

(1) 在采用三点弯曲加载、底部跨距为 275 mm 以及两侧简支边界的条件下,夹芯复合材料 T 型接头的弯曲疲劳损伤模式主要为水平基座板泡沫芯材的剪切损伤,泡沫芯材力学性能的退化导致结构刚度的渐进式下降。

(2) 在采用三点弯曲加载、底部跨距为 275 mm 以及两侧简支边界的条件下,夹芯复合材料 T 型接头疲劳承载后的剩余强度特性与疲劳峰值载荷大小密切相关,在疲劳峰值载荷不高于结构初始损伤载荷 70% 的条件下,结构具有较好的疲劳承载特性。

(3) 在采用三点弯曲加载、底部跨距为 275 mm 以及两侧简支边界的条件下,提高夹芯复合材料 T 型接头弯曲疲劳性能的关键在于选择剪切强度和抗剪切疲劳特性较好的泡沫芯材。

参考文献:

- [1] SUN F F, FAN H L, ZHOU C W, et al. Equivalent analysis and failure prediction of quasi-isotropic composite sandwich cylinder with lattice core under uniaxial compression [J]. *Composite Structures*, 2013, 101: 180-190.
- [2] JIN F N, CHEN H L, ZHAO L, et al. Failure mech-

anisms of sandwich composites with orthotropic integrated woven corrugated cores: experiments [J]. *Composite Structures*, 2013, 98: 53-58.

- [3] ZHOU D W, LUOCA L A, SAUNDERS M. Numerical simulation of sandwich T-joints under dynamic loading [J]. *Composites: Part B*, 2008, 39: 973-985.
- [4] 陈亮, 杨坤. 夹芯复合材料 T 型接头制备工艺及力学性能试验研究 [J]. *中国舰船研究*, 2014, 9(4): 70-75.
- CHEN Liang, YANG Kun. Processing method and experimental investigation on the mechanical properties for composite sandwich T-joints [J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2014, 9(4): 70-75.
- [5] LIH C H, DHARMAWAN F, HERSZBERG I, et al. Fracture behaviour of composite maritime T-joints [J]. *Composite Structures*, 2006, 75: 339-350.
- [6] 张可荣, 张建勋, 黄嗣罗, 等. 大型厚壁筒体斜接管接头应力特征有限元快速预测 [J]. *西安交通大学学报*, 2010, 44(3): 68-71.
- ZHANG Kerong, ZHANG Jianxun, HUANG Siluo, et al. Fast finite element stress prediction for large thick wall welded cylinder with angle-inserting elbow [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2010, 44(3): 68-71.
- [7] 周磊, 汪楚清, 孙清, 等. 玻璃纤维增强复合材料输电塔节点承载力试验研究及有限元分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(9): 112.
- ZHOU Lei, WANG Chuqing, SUN Qing, et al. Experimental study and finite element analysis on ultimate bearing capacity of joint of glass fiber reinforced polymer for transmission tower [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(9): 112.
- [8] BIAGI R, BART-SMITH H. In-plane column response of metallic corrugated core sandwich panels [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2012, 49(26): 3901-3914.
- [9] YAN L L, HAN B, YU B, et al. Three-point bending of sandwich beams with aluminum foam-filled corrugated cores [J]. *Materials & Design*, 2014, 60: 510-519.
- [10] JIN F N, CHEN H L, ZHAO L, et al. Failure mechanisms of sandwich composites with orthotropic integrated woven corrugated cores: experiments [J]. *Composite Structures*, 2013, 98: 53-58.
- [11] LI X, WANG Z H, ZHU F, et al. Response of aluminium corrugated sandwich panels under air blast loadings: Experiment and numerical simulation [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2014, 65: 79-88.

(编辑 赵炜)