

# 玻璃纤维增强树脂基复合材料夹芯板- 钢板连接接头的弯曲性能

李永胜\*, 吴健, 王纬波

(中国船舶科学研究中心 船舶振动噪声重点实验室, 无锡 214082)

**摘要:** 以 PVC 泡沫或 Balsa 轻木为芯材的玻璃纤维增强树脂基复合材料(GRP)夹芯板目前广泛应用于船舶与海洋工程结构中。论文设计不同参数的 GRP 夹芯板-钢板混合接头模型, 进行四点弯曲加载下的静力及疲劳试验研究, 同时运用 ABAQUS 软件结合 MSC. fatigue 软件对接头的静态及疲劳弯曲失效进行数值模拟, 分析了接头的弯曲强度、刚度和失效模式, 并研究了接头填充区材料及长度、钢板嵌入填充区长度等参数对接头弯曲性能的影响。结果表明: 弯曲载荷作用下接头破坏发生在连接结合部, 失效模式则因填充区的不同设计而不同; 对提高接头的弯曲性能较为明显的设计参数包括将钢板延伸到接头填充区或者选择 Balsa 轻木替代 PVC 泡沫芯材; 对于受到疲劳弯曲载荷的接头模型, 在较大疲劳载荷水平下, 所有试件在未达到  $10^6$  次循环时均发生了疲劳破坏; 而在相对较小的疲劳载荷水平下, 经过  $10^6$  次循环后所有试件全部完好, 并且接头的剩余强度与疲劳试验前的静强度相近, 表明小载荷水平下接头的疲劳次数对其承载能力无影响。

**关键词:** 玻璃纤维增强树脂基复合材料夹芯板; 接头; 弯曲强度; 疲劳特性; 失效模式

**中图分类号:** TB332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3851(2018)06-1443-09

## Flexural behavior of hybrid joints of glass fiber reinforced composite sandwich panel-steel plate

LI Yongsheng, WU Jian, WANG Weibo

(National Key Laboratory of Science and Technology on Ship Vibration & Noise, China Ship Scientific Research Center (CSSRC), Wuxi 214082, China)

**Abstract:** Glass fiber reinforced resin composite(GRP) sandwich panels with PVC foam or Balsa wood as core material are widely used in ship construction and ocean engineering. Flexural behaviors of hybrid joints of sandwich panel-steel plate which subjected to static and fatigue loads respectively, were investigated with both numerical and experimental methods. Different parameter sets of hybrid joint specimens were designed and fabricated. Static and fatigue four-point bending experiments were implemented to study the bending strength, stiffness and failure modes of joints. ABAQUS and MSC. Fatigue softwares were also adopted to simulate their failure characteristics. The influences of filler material, geometric length of filler and the inserted length of steel plate on the bending performance of the joint were respectively assessed. The results show that failure occurs near the filler area of joints under bending load, and failure mode mainly depends on different filler parameters. Extending the steel end to filler area can obviously improve bending performance of joint, as well as adopting Balsa wood as filler material. All specimens are failed before  $10^6$  cycles in the larger fatigue load case, while in the lower fatigue load case, all the specimens are nearly intact after  $10^6$  cycles and their residual strengths are quite close to their static ultimate strength. It is indicated that fatigue cycles with smaller loading amplitudes have little influence on their loading capacities.

**Keywords:** glass fiber reinforced resin composite(GRP) sandwich panel; joint; bending strength; fatigue characteristic; failure mode

收稿日期: 2017-06-12; 录用日期: 2017-08-04; 网络出版时间: 2017-08-21 18:33  
网络出版地址: <https://doi.org/10.13801/j.cnki.fhclxb.20170821.001>  
基金项目: 深水半潜式支持平台研发专项(工信部联装[2016]546)  
通讯作者: 李永胜, 硕士, 高级工程师, 研究方向为复合材料力学 E-mail: liyongsheng@cssrc.com.cn  
引用格式: 李永胜, 吴健, 王纬波. 玻璃纤维增强树脂基复合材料夹芯板-钢板连接接头的弯曲性能[J]. 复合材料学报, 2018, 35(6): 1443-1451.  
LI Y S, WU J, WANG W B, et al. Flexural behavior of hybrid joints of glass fiber reinforced composite sandwich panel-steel plate [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2018, 35(6): 1443-1451 (in Chinese).

船舶上层建筑是船体最上一层纵通甲板以上的围壁结构和附属结构的统称,通常包括船楼、甲板室和机舱棚等。上层建筑用于布置各种舱室、减少甲板上浪、增舱和炉舱开口免受波浪侵袭。传统金属船舶的上层建筑结构材料通常采用钢或铝。玻璃纤维增强树脂基复合材料(GRP)由于具有质轻高强、耐腐蚀、可设计性强和成型工艺方便等诸多优点成为船舶上层建筑结构的理想结构材料<sup>[1-2]</sup>。由于其密度约为钢的 $1/3\sim 1/5$ ,弹性模量约为钢材的 $1/10\sim 1/15$ ,GRP应用于上层建筑可以减轻船舶上层结构重量,提高船舶及海洋工程结构的稳性;使用模量低的复合材料使原金属上层建筑成为轻型复合材料上层建筑,可以减轻下层建筑与钢质甲板连接处的应力集中,防止疲劳裂纹的产生,提高结构的使用寿命<sup>[3]</sup>。此外,当上层建筑结构采用夹芯结构形式后,隐身芯材的应用还可能使结构具有良好的雷达隐身功能。

复合材料应用到传统的金属船舶上势必会带来复合材料与金属的连接可靠性问题。连接部位通常是复合材料结构应用的最薄弱环节,几何构型及材料的突变使连接部位产生巨大的应力集中从而使破坏大部分发生在连接部位,连接部位的性能研究及优化设计一直是学术界和工程界的重要研究课题<sup>[4-9]</sup>。近年来,复合材料在国外大型钢质船舶及海上浮式结构的上层建筑、桅杆和烟囱等结构上的应用逐步增多<sup>[10-12]</sup>,一种新型的复合材料上层建筑与钢甲板的连接接头形式——夹芯复合材料板-钢板混合接头(Hybrid composite-to-steel joint,下文简称混合接头)被提出并在国外大型军舰上得到了应用,如著名的法国隐身护卫舰“La Fayette”舰的复合材料直升机机库与钢质船体甲板之间的连接结构应用了这种形式的接头(图1),这种接头在典型海洋环境中的力学性能、破坏模式等得到了广泛而深入的研究。

Wright等<sup>[13]</sup>针对混合接头的形式进行了研究,经过一系列的面内拉压及面外弯曲测试后认为对称的连接形式强度特性更好;Clifford等<sup>[14]</sup>对图1的混合接头形式进行了静力弯曲破坏试验研究,发现试件初始裂纹出现在接头结合部附近的芯材上,随后失效沿着平的芯材-复合材料表皮、钢-复合材料表皮界面迅速扩展,从而导致接头弯曲刚度急剧降低,于是Clifford等<sup>[14]</sup>建议了几种改进的接头结构形式;Cao和Grenestedt等<sup>[15]</sup>通过减小接头

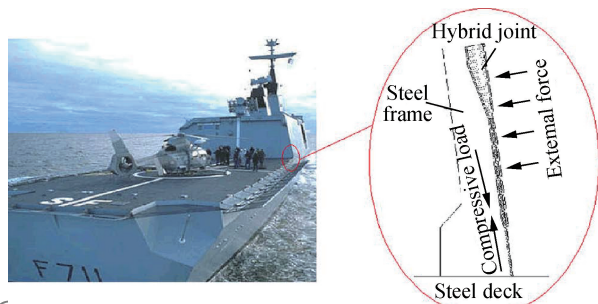


图1 夹芯复合材料-钢混合接头及其应用

Fig. 1 Hybrid composite-to-steel joint and its application

结合部钢的粘结长度并改用密度更小的芯材填充,试图既能减轻连接区的应力集中又能减轻接头重量,结果得到了与Clifford等<sup>[14]</sup>相似的失效模式;Boyd等<sup>[16]</sup>基于“La Fayette”舰上的复合材料直升机库与钢质露天甲板之间的混合接头,开展了典型海洋环境载荷下,接头受面内压缩载荷下的疲劳特性及剩余强度试验,结果发现得到的疲劳数据分布与基于统计的Weibull累积分布函数吻合良好,并且疲劳载荷引起的疲劳损伤对接头的刚度及破坏载荷影响较小;Boyd等<sup>[17]</sup>还在对接头设计参数灵敏度分析的基础上,利用遗传算法对接头进行了参数优化。

目前对于混合接头的力学性能研究主要集中在静力受载条件下的极限强度和失效模式研究,对于接头在疲劳载荷下的弯曲性能和破坏模式研究则相对较少。对于处于海洋环境、承受周期性波浪载荷的船舶及大型海上浮式结构的上层建筑结构来说,疲劳载荷是导致上层建筑与甲板连接处破坏的主要因素<sup>[18]</sup>。由于受材料、工艺及设计等多方面因素的影响,混合接头的失效模式更复杂,例如芯材中出现的剪切裂纹、金属-复合材料表皮粘结界面脱粘、夹芯复合材料板的面芯脱粘及组合失效模式的出现,使失效模拟及极限强度预测面临很大的挑战。

本文采用数值模拟结合试验分析的方法对GRP夹芯板-钢板混合接头进行了弯曲性能研究。首先通过静力破坏试验研究了接头的失效模式及弯曲强度,并对数值分析方法进行验证,分析了过渡区长度、填充材料选择及接头钢板是否嵌入过渡区等对接头弯曲性能的影响;然后优选出一种接头设计开展了两个载荷水平下的疲劳试验,对这种接头的弯曲疲劳性能、失效模式及剩余强度进行了研究。本文的研究成果对夹芯复合材料结构在船舶及

海洋结构物上的应用安全性设计及评估具有一定的参考价值。

1 实验

1.1 GRP 夹芯板-钢板混合接头的设计及制备

GRP 夹芯板-钢板混合接头基本形式如图 2 所示。接头右侧的夹芯复合材料板是被连接的复合材料上层建筑结构单元, 左侧钢板则为复合材料上层建筑与钢甲板连接的过渡结构。该过渡结构与夹芯

复合材料板形成混合接头后, 其末端可以与钢甲板焊接从而实现复合材料上层建筑与甲板之间的连接。基准设计方案 A 的接头设计参数如下: 接头总长为 350 mm, 其中过渡钢板长为 175 mm, 厚为 4 mm, 接头结合部的钢板没有嵌入至填充区; GRP 夹芯板长 115 mm, 芯材厚为 25 mm, 上、下 GRP 表皮厚度均为 1.5 mm; 梯形的过渡填充区长为 60 mm, 填充材料为 PVC 泡沫; 接头宽度为 50 mm。

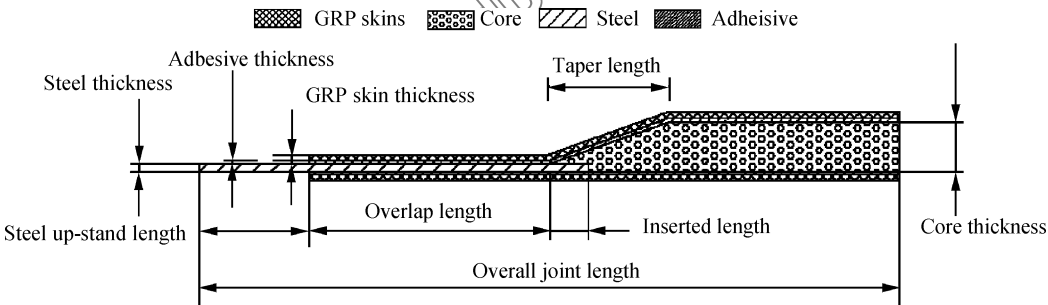


图 2 GRP 夹芯板-钢板混合接头形式及设计参数示意图

Fig. 2 Schematic of hybrid joint of GRP sandwich panel-steel plate type and its design parameters

在基准接头 A 的基础上, 其他参数不变, 分别改变过渡区长度、填充芯材及钢板嵌入过渡区的长度分别设计了 B 组、C 组及 D 组接头。接头设计参数如表 1 所示。

表 1 GRP 夹芯板-钢板混合接头关键区域设计参数  
Table 1 Design parameters of hybrid joint of GRP sandwich panel-steel plate critical region

Model	Taper length/mm	Inserted length/mm	Core material
A	60	0	PVC
B	90	0	PVC
C	60	30	PVC
D	60	0	Balsa

接头的过渡钢板采用低碳钢 Q235, GRP 表皮的增强材料采用南京玻纤院厚为 0.21 mm 的斜纹布多层铺设, 基体树脂采用金陵 DSM 公司的 AC430 乙烯基树脂; 试件中芯材采用了两种, 一种是型号为 Airex C70.75 的 PVC 泡沫, 为防水性能好的船用闭孔泡沫; 另一种是型号为 Baltek SB. 100 的 Balsa 轻木, 模量及强度比 PVC 泡沫更高; 胶层(Adhesive 层)材料为 AC430 乙烯基树脂。

混合接头试件制作时, 首先对钢板的上、下表面进行除锈, 粗砂打磨并用丙酮清洗干净; 然后钢板与芯材对齐、校平, 采用工装固定好后, 在非平直的表面一侧进行 GRP 的糊制。为了增加

GRP-钢之间的粘结质量, 在二者粘结界面铺放 1 层短切纤维毡; 糊制好后, 翻转试件, 同样铺放 1 层短切纤维毡, 然后进行平直一侧 GRP 的糊制, 糊制完后对试件抽真空, 然后放入干燥箱进行固化。

1.2 静力弯曲试验装置

采用四点弯曲的静力试验模型如图 3 所示。是由上述两个相同的接头模型经过左右对称形成的, 采用该设计克服了图 2 中单独接头模型在四点弯曲加载时, 在接头连接区发生破坏之前, 压头部位的夹芯板表皮或夹芯板端部的芯材往往提前失效导致试验无法进行下去的技术问题。

由于试件较长(约 1.65 m), 静力四点弯曲试验在非标设备上进行, 试验前预先制作了辅助加载工装, 主要包括试件支撑架、加力杆、分力器及足够刚性的框架(包括立柱、横梁和纵梁等)。试验主要工作原理是通过加力杆对试件施加力的作用, 并

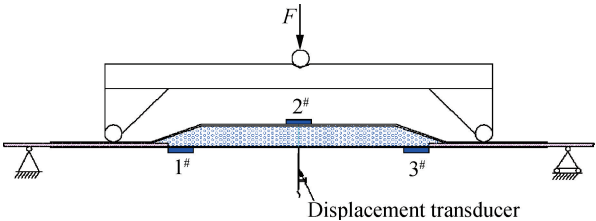


图 3 静力四点弯曲试验方法

Fig. 3 Static four-point bending test method



通过足够刚性的分力器将力平均分配到试件上，同时尽量保证两侧的加载力臂相等，使试件上的 2 个着力点之间的部分，尤其是接头关键部位受到纯弯曲作用。试件外侧两个支撑点通过支撑架提供支反力。试验中力臂固定为 200 mm。

试验前在试件典型部位粘贴应变片，位置如图 3 所示。其中 1<sup>#</sup> 和 3<sup>#</sup> 应变片对称布置于接头填充区附近的 GRP 下表皮上，且均靠近钢板末端粘贴；2<sup>#</sup> 应变片位于试件中心位置的 GRP 上表皮上。位移计布置于试件中心位置的下端。

试验过程中加载的力、变形和应变分别通过力传感器、位移传感器及应变片进行测定，其数据均由 TDS-530 静态应变仪记录。4 组接头每组试件测试 3 个，试件一直加载直至最终破坏。

1.3 疲劳弯曲试验装置

选取弯曲性能最好的一组试件进行弯曲疲劳试验测试。疲劳试验在 MTS 318.10 型平面双轴加载试验机上进行，试件采用图 2 所示的单个接头模型。试件实物模型及其安装如图 4 所示。

弯曲疲劳试验采用拉-拉非对称加载模式，加载波形为正弦波。由于试件疲劳载荷与四点弯曲的静强度有关，根据同一批次试件的静力弯曲试验结果，选取两种载荷水平开展接头的疲劳试验，弯曲疲劳载荷取值如下：(1) 弯曲疲劳试验 1：平均载荷  $\sigma_m$  取静强度的 22.5%，幅值为静强度的 7.5%；(2) 弯曲疲劳试验 2：平均载荷  $\sigma_m$  取静强度的 50%，幅值为静强度的 20%。

由于试验机的能力原因，其中小载荷水平(弯曲疲劳试验 1)频率为 8 Hz，大载荷水平(弯曲疲劳试验 2)频率为 2 Hz。疲劳寿命考核指标为疲劳寿命是否大于  $10^6$  次。

对于达到了  $10^6$  次的考核寿命未破坏的疲劳试件，采用静力弯曲试验的方法对其剩余强度进行测试，直至试件破坏。

试，直至试件破坏。

2 静力弯曲试验结果

根据试验中测得的力和位移数据，及试验前调整好的力臂值，绘制了接头在四点弯曲试验状况下的弯矩-位移曲线。试验中各接头均加载至破坏，图 5 为 4 组接头在静力四点弯曲加载条件下的典型弯矩-变形曲线。

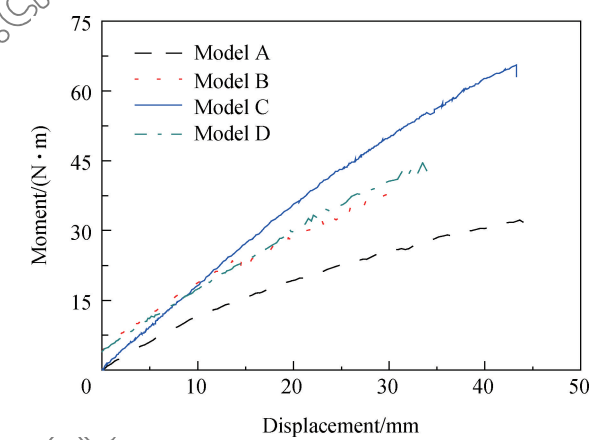


图 5 静力四点弯曲下 GRP 夹芯板-钢板混合接头试件典型弯矩-变形曲线

Fig. 5 Typical moment-displacement curves of hybrid joints of GRP sandwich panel-steel plate specimens under static four-point bending test

试验中记录的最大载荷值为接头的破坏载荷值，根据载荷和力臂值得到接头的破坏弯矩。A~D 组试件的破坏弯矩平均值分别为 32.7 N·m、38.6 N·m、72.8 N·m 和 44.9 N·m；离散系数分别为 9.9%、6.8%、9.8% 和 3%，离散系数主要是由试件加工中的不均匀性及试验操作过程中的人为误差等不可控制因素造成的。

根据试验测得的力和弯曲变形曲线，利用曲线初始线性段的斜率获取接头的弯曲刚度。4 组试件的弯曲刚度平均值分别为 5.08 N/m、7.03 N/m、9.23 N/m 和 6.55 N/m，离散系数分别为 10.2%、4.7%、0.9% 和 4.1%。

2.1 接头结合部钢板嵌入填充区对 GRP 夹芯板-钢板混合接头弯曲性能的影响

试验结果显示，接头结合部钢板嵌入填充区对接头力学性能影响最大。在其他几何及物理参数相同情况下，C 组接头通过将接头结合部的钢板嵌入到过渡区一定长度，其破坏弯矩平均值相对 A 组基准接头提高达 122.6%，刚度平均值相对提高 81.7%，表明钢板嵌入到填充区一定长度可以极大



图 4 四点弯曲疲劳试验安装图

Fig. 4 Installation for four-point bending fatigue test



地提高接头的弯曲强度和刚度。

2.2 填充区长度对 GRP 夹芯板-钢板混合接头弯曲性能的影响

B 组接头填充区长度相对 A 组接头增加 50%，其他参数保持不变。试验结果显示，B 组接头较 A 组基准接头弯曲强度提高了 18%，刚度平均值相对提高了 38.4%，表明增加过渡区长度可以提高接头的弯曲强度和刚度。

2.3 填充材料对 GRP 夹芯板-钢板混合接头弯曲性能的影响

4 组接头中，只有 D 组采用了模量及强度高的 Balsa 轻木，其他各组采用的是船舶用的闭孔防水、中等强度的低密度 PVC 泡沫。在其他几何及物理参数相同情况下，D 组接头较 A 组基准接头弯曲强度提高了 37.3%，刚度平均值相对提高了 28.9%，表明采用模量及强度高的填充材料可以提高接头的弯曲强度和刚度。

2.4 GRP 夹芯板-钢板混合接头静力弯曲的破坏模式

4 组试件的弯曲破坏模式如图 6 所示。可以看出，A、B、C 组中接头的结合部均出现了芯材破坏的现象，D 组接头由于采用了抗剪强度更高的 Balsa 轻木，芯材没有出现破坏。这是由于 A、B、C 组所用芯材均为泡沫芯材，其剪切强度及模量均较低，抗剪及抗压能力很弱。在弯曲载荷作用下，接头的芯材主要承受剪切应力，当芯材的剪切应力达到剪切强度值时芯材中会出现裂纹，但是接头没有完全失效。从试验结果来看，导致 A、B、D 组接头完全失去承载能力的破坏模式均为接头结合部

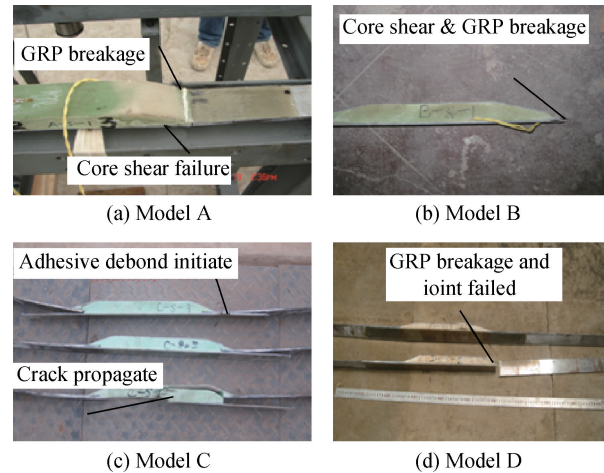


图 6 GRP 夹芯板-钢板混合接头试件静力四点弯曲破坏模式  
Fig. 6 Failure modes of four groups of hybrid joints of GRP sandwich panel-steel plate specimens under static four-point bending test

GRP 的断裂；C 组接头的破坏模式则与其他几组不同，其破坏模式为：接头结合部 GRP 表皮与钢板脱粘，所产生的裂纹快速扩展使 GRP 表皮和钢板、GRP 和芯材完全脱开。

3 疲劳弯曲试验结果

3.1 GRP 夹芯板-钢板混合接头弯曲疲劳寿命及破坏模式

疲劳试验前，静态弯曲试验测得 C 组 4 个试件的弯曲破坏载荷分别为 3.5 kN、3.4 kN、3.5 kN 和 3.5 kN，平均破坏载荷为 3.5 kN；取破坏载荷的最小值 3.4 kN 作为弯曲疲劳试验的静强度值，两种疲劳载荷下接头的疲劳寿命见表 2。可以看出，在相对较小载荷水平下接头试件在 10<sup>6</sup> 次后没有破坏；在相对较大载荷水平，接头试件的疲劳寿命均没有达到 10<sup>6</sup> 次，并且各试件的疲劳寿命分散性较大，其中一件的寿命仅 2.7×10<sup>4</sup> 万次。图 7 为试件弯曲疲劳破坏模式。可以看出，其破坏形式为端部粘接层开裂(6# 试件)，与另外两件试样存在明显区别，分析原因可能是该试样在端部粘接处存在缺陷，其粘接质量对连接结构的疲劳影响较大。其他两试件弯曲疲劳后试样主要是芯材内部发生剪切破坏后，出现的裂纹沿 GRP 上、下表皮与泡沫芯材的粘结界面迅速扩展导致接头完全失效。

表 2 GRP 夹芯板-钢板混合接头弯曲疲劳寿命试验结果  
Table 2 Fatigue life of hybrid joints of GRP sandwich panel-steel plate under flexural load condition

Fatigue set	Group 1			Group 2		
	1#	2#	3#	4#	5#	6#
Specimens	>100	>100	>100	40.3	23.2	2.7
Cycle(million)						

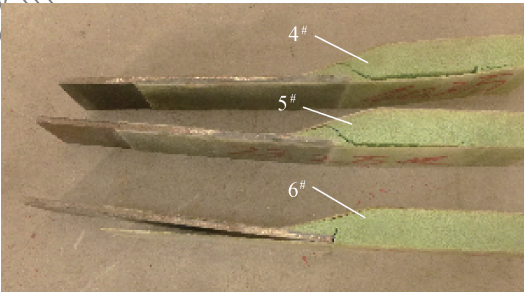


图 7 GRP 夹芯板-钢板混合接头试件弯曲疲劳破坏模式  
Fig. 7 Failure mode of hybrid joints of GRP sandwich panel-steel plate specimen under fatigue flexural loads

3.2 GRP 夹芯板-钢板混合接头剩余强度

对于相对较小载荷水平下的 3 个疲劳试件，在达到了 10<sup>6</sup> 次的考核寿命未破坏后，对其剩余强度

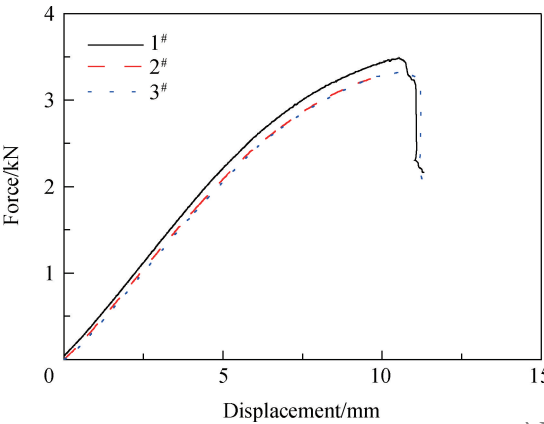


图 8 GFRP 夹芯板-钢板混合接头试件剩余强度测试结果  
Fig. 8 Residual strength of hybrid joints of GFRP sandwich panel-steel plate specimen

进行了测试, 试验结果如图 8 所示。3 个试样的极限载荷分别为 3.3 kN、3.3 kN 和 3.5 kN, 与静力加载试验的破坏载荷结果相比基本无差别, 说明经历小载荷水平疲劳载荷的接头, 其疲劳次数对其极限强度无明显影响。

4 GFRP 夹芯板-钢板混合接头失效数值分析

4.1 GFRP 夹芯板-钢板混合接头失效分析方法

接头的破坏需要综合考虑接头脱粘、GFRP 断裂及芯材剪切破坏等破坏模式<sup>[15]</sup>, 分析时主要分析接头 Adhesive 层的 Mises 应力、GFRP 表皮中的应力及芯材的剪应力。

设  $d$  为接头破坏指标, 当  $d < 1$  时, 接头完好; 当  $d \geq 1$  时, 接头破坏; 破坏指标  $d$  应取如下值:  
$$d = \max(d_f, d_c, d_a)$$
 (1)

式中,  $d_f$ 、 $d_c$  和  $d_a$  分别表示接头 GFRP、芯材及 Adhesive 层的破坏指标。

接头结合部的 GFRP 表皮断裂采用的破坏指标为

$$d_f = \frac{\sigma_1}{X}$$
 (2)

式中:  $\sigma_1$  为 GFRP 表皮中弯曲正应力;  $X$  为 GFRP 材料主方向的面内拉伸或压缩强度。船用 GFRP 通常为双轴向编织布材料, 因此面内两个主方向的强度是相同的。

Adhesive 层视为各向特性层, 所采用的破坏指标为

$$d_a = \frac{\sigma_{eq}}{S_a}$$
 (3)

式中:  $\sigma_{eq}$  为树脂等效应力;  $S_a$  表示树脂材料的拉伸强度值。

接头芯材剪切破坏采用的破坏指标为

$$d_c = \frac{\tau_c}{S_c}$$
 (4)

式中:  $\tau_c$  为芯材的剪应力;  $S_c$  为芯材的剪切强度。

4.2 GFRP 夹芯板-钢板混合接头有限元模型

在大型有限元结构分析平台 ABAQUS 上建立接头有限元模型, 采用八节点平面应变单元 (CPE8) 对接头进行离散。胶层厚度取 0.5 mm 进行计算, 并在胶层厚度方向上统一划分 2 个单元。由于网格划分较密, 只显示接头关键区域的网格划分图。

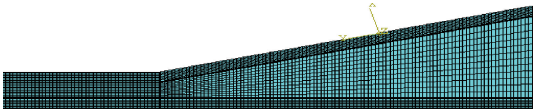


图 9 GFRP 夹芯板-钢板混合接头模型关键区域网格划分示意图  
Fig. 9 Mesh of critical region of hybrid joint of GFRP sandwich panel-steel plate model

接头各组成材料弹性常数见表 3, 材料强度参数见表 4。

表 3 GFRP 夹芯板-钢板混合接头材料弹性常数  
Table 3 Elastic constant values of hybrid joint of GFRP sandwich panel-steel plate materials

Material	Property	Value
GRP	$E_x, E_y, E_z/\text{GPa}$	13.8, 14.8, 14.8
	$G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}/\text{GPa}$	1.96, 1.56, 1.56
	$\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$	0.18, 0.37, 0.37
Balsa	$E_x, E_y, E_z/\text{GPa}$	0.057, 0.057, 3.57
	$G_{xy}, G_{yz}, G_{xz}/\text{GPa}$	0.16, 0.16, 0.16
	$\nu_{xy}, \nu_{yz}, \nu_{xz}$	0.23, 0.01, 0.01
PVC	$E/\text{GPa}$	0.063
	$\nu$	0.05
Steel	$E/\text{GPa}$	207
	$\nu$	0.3
Adhesive	$E/\text{GPa}$	2.59
	$\nu$	0.3

表 4 GFRP 夹芯板-钢板混合接头材料的强度值  
Table 4 Strength values of hybrid joint of GFRP sandwich panel-steel plate materials

Material	Tensile strength/MPa	Compression strength/MPa	Shear strength/MPa
GRP	289.0	131.0	37.8
Balsa	13.2	12.9	3.0
PVC	2.0	1.3	1.2
Steel	235.0	—	—
Adhesive	56.5	—	—

4.3 GFRP 夹芯板-钢板混合接头计算模型验证

为了验证计算模型的准确性, 选取其中 2 组试件的应变测试结果进行对比分析。试验中应变片粘

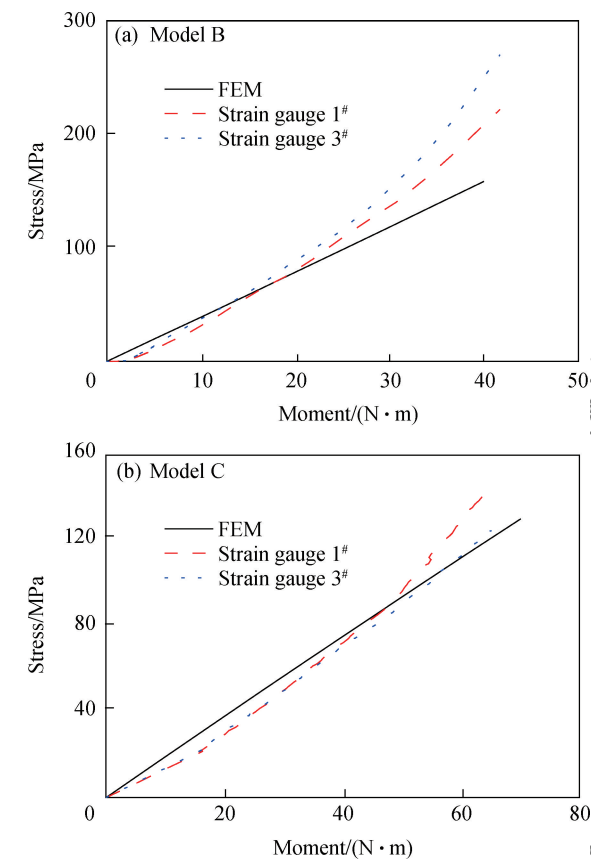


图 10 GRP 夹芯板-钢板混合接头连接处 GRP 表皮应力  
计算与试验比较

Fig. 10 Comparison of experimental and predict results of stress  
in GRP skins around the join region of GRP sandwich  
panel-steel plate specimen

贴在接头填充区附近的 GRP 下表皮上, 将测得的应变结果转化成 GRP 的应力值与计算结果进行对比分析, 对比结果如图 10 所示。

通过 2 组试件的对比分析可以看出, 接头关键部位应力计算值和试验值吻合较好。试验中测得的应力随着外加弯矩的增加出现了较强的非线性, 主要原因是随着弯矩的增加, 接头的弯曲变形不再是线性的增加, 这主要是试验中出现不可避免的力加载不平衡, 处于对称位置的接头关键部位出现的内部损伤程度也不一致引起的。

4.4 GRP 夹芯板-钢板混合接头失效

提取接头关键各部分单元应力最大值, 并计算其破坏指标, 列入表 5。可知, 各接头在受纯弯曲力情况下, 芯材中的剪切应力最先达到破坏指标, 因此接头首先会产生芯材剪切破坏。对于 A、B、D 3 组接头而言, 随着芯材的剪切破坏, 接头 GRP 表皮中的压缩应力也达到了强度值, 因此这 3 组接头

会出现 GRP 面内损伤模式。

表 5 40 N·m 弯矩下各组接头的失效指标计算结果

Table 5 Reputation results of failure index of  
each group joint under 40 N·m bending moment

Model	Adhesive failure	Tension failure of GRP	Buckling failure of GRP	Shear failure of core
A	0.84	0.62	1.66	1.97
B	0.50	0.54	1.36	1.58
C	0.32	0.26	0.33	1.05
D	0.66	0.41	1.09	1.46

对于 C 组接头而言, 随着芯材的剪切破坏, 接头 GRP 表皮中的压缩应力破坏指标及 Adhesive 中 Mises 应力破坏指标尚处于低位, 接头还能承受更大的弯曲载荷。从 C 组接头与 A 组接头 GRP 面内应力计算结果的对比分析, 在同样的载荷条件下, C 组接头关键区域 GRP 的面内拉伸/压缩应力相对 A 组分别减小了 58.3% 和 80%, 主要原因是 C 组接头结合部处的钢板向过渡区延伸一段长度, 增加了该截面处的抗弯刚度, 从而提高了抗弯强度。

4.5 GRP 夹芯板-钢板混合接头疲劳失效

根据静力分析情况, 主要选取 A 组和 C 组试件进行了疲劳对比分析。应用 MSC.Fatigue 疲劳分析软件数值模拟连接节点的疲劳性能, 以前面的静力弯曲模拟结果为基础, 导入 MSC.Fatigue 中并基于名义应力法对连接节点进行全寿命(S-N)分析<sup>[19-20]</sup>。全寿命分析以材料或零件的应力为基础, 用雨流循环计数法和 Palmgren-Miner 线性累积损伤理论为理论基础<sup>[21-22]</sup>。

在材料设置中选择文献[23]的实验数据。该 S-N 曲线的应力比 R 为 -1。图 11 为本文计算中

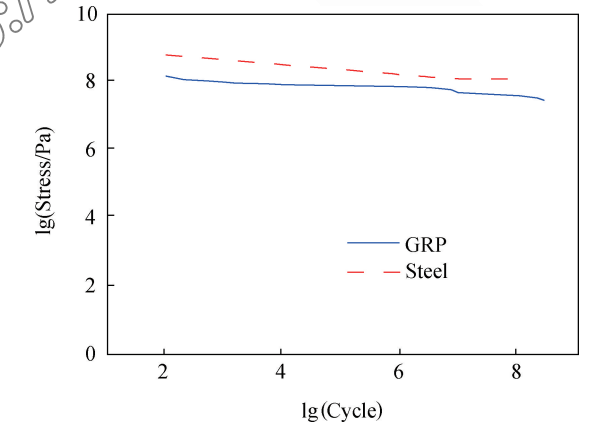


图 11 钢与 GRP 材料 S-N 曲线对比

Fig. 11 Comparison of S-N curves of steel and GRP



钢与 GRP 复合材料 S-N 曲线的对比。疲劳分析中载荷设置为正弦循环载荷,各计算 4 个工况,应力比  $R$  为  $-1$ ,载荷最大值分别为各个试件模拟强度结果的 15%、30%、50%和 70%。在分析方法设置中选择 Goodman 等寿命曲线作为平均应力修正,单向载荷。

图 12 为 2 组接头在最大静载荷 15%的节点疲劳寿命对数云图。可以看出,A 组接头的疲劳危险部位在接头钢板与过渡区的连接结合部,疲劳寿命为  $10^{8.08}$  次;C 组接头的疲劳危险部位则在填充区中钢板末端与芯材的界面附近的 GRP 表皮上,对数疲劳寿命为  $10^{9.87}$  次。预测的 GRP 破坏位置与试验中的近似一致,但是在该疲劳载荷下接头不会发生疲劳破坏。

图 13 为 2 组接头在不同级别疲劳载荷下的弯曲疲劳寿命。可以看出,随着疲劳载荷幅的增加,接头的疲劳寿命明显下降。

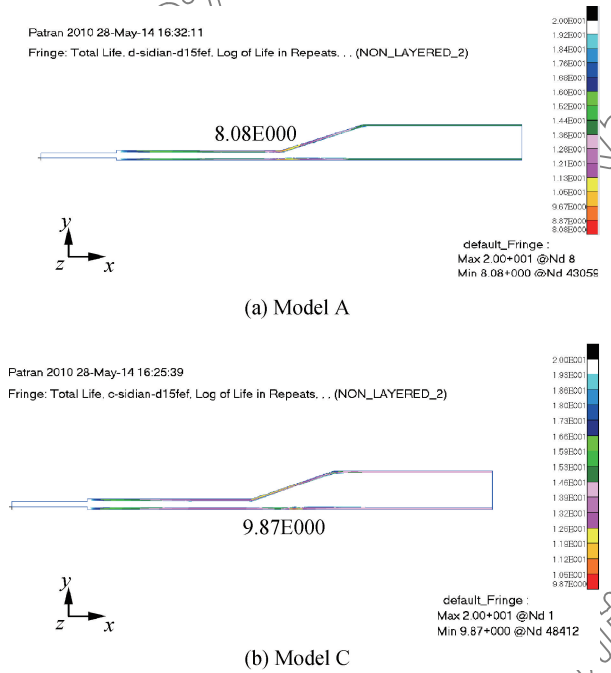


图 12 最大静载荷 15%下 GRP 夹芯板-钢板混合接头的节点疲劳寿命对数云图

Fig. 12 Logarithmic fatigue life of of GRP sandwich panel-steel plate under 15% of maximum static loads

5 结 论

(1) 接头填充区附近玻璃纤维增强树脂基复合材料(GRP)-钢的界面特性对 GRP 夹芯板-钢板混合接头的弯曲性能起决定作用。在弯曲载荷作用下,采用 PVC 泡沫芯材作为填充材料的接头,其

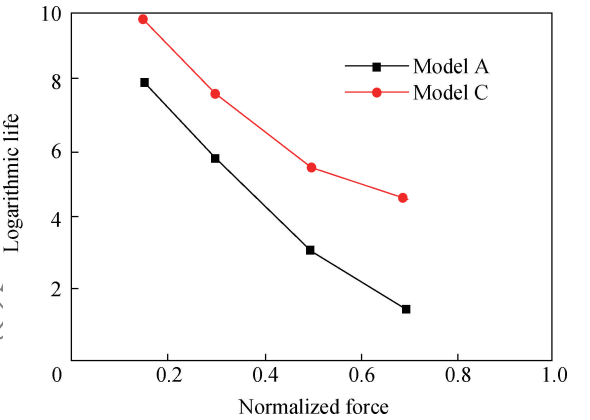


图 13 不同载荷下 GRP 夹芯板-钢板混合接头的疲劳寿命

Fig. 13 Fatigue life of of GRP sandwich panel-steel plate under different loads

失效模式为界面处 GRP 表皮的断裂,并伴有芯材的剪切破坏,弯曲性能由 GRP 的面内性能决定;而将界面处的钢板末端嵌入到填充区中,其失效模式主要是 GRP-钢粘结界面的脱粘,及由于 PVC 芯材中的剪切裂纹扩展导致 GRP-芯材粘结界面的脱粘,接头的弯曲性能由 GRP-钢、GRP-芯材的粘结界面特性及芯材的剪切性能决定;采用 Balsa 轻木作为填充材料的接头则为界面处 GRP 表皮的断裂失效。

(2) 接头填充区关键设计参数对接头弯曲性能影响为:随着钢板末端嵌入接头填充区,接头的弯曲强度和刚度得到极大的提高;由 Balsa 轻木代替 PVC 泡沫,接头弯曲强度和刚度也有相当幅度的提高;增加填充区长度也可以提高其弯曲强度和刚度,但弯曲强度提高相对较小。

(3) 接头的弯曲疲劳寿命主要取决于疲劳载荷水平:在较大疲劳载荷水平下,所发生的疲劳破坏模式与静力破坏情况相似;而在相对较小的疲劳载荷水平下,接头的剩余强度与疲劳试验前的静强度相近。

(4) 获得的数值结果与试验数据有较好的一致性,建立的接头失效分析方法能够有效地预测混合接头的静力及疲劳失效模式。

参考文献:

[1] MOURITZ A P, GELLERT E, BURCHILL P, et al. Review of advanced composite structures for naval ships and submarines[J]. Composite Structures, 2001, 53: 21-41.

[2] SMITH C S. Design of marine structures in composite materials[M]. London: Elsevier Applied Science, 1990.

- [3] NOURY P, HAYMAN B, MCGEORGE D, et al. Light-weight construction for advanced shipbuilding-recent development[R]. Norway: Det Norske Veritas, 2002.
- [4] BURLOVIĆ D, MILAT A, BALUNOVIĆ M, et al. Finite element analysis of composite-to-steel type of joint for marine industry[J]. *Welding in the world*, 2016, 60(5): 1-9.
- [5] LI X, LI P, LIN Z. Mechanical behavior of a glass-fiber reinforced composite to steel joint for ships[J]. *Journal of Marine Science and Application*, 2015, 14(1): 39-45.
- [6] KOTSIDIS E A, KOULOUKOURAS I G, TSOUVALIS N G, et al. Finite element parametric study of a composite-to-steel-joint[C]. *International Conference on Maritime Technology*, 2014.
- [7] 董一帆. 三维点阵复合材料上层建筑力学性能与结构设计研究[D]. 哈尔滨工程大学, 2014.  
DONG Yifan. Design and analysis of 3D lattice composite ship superstructure[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2014 (in Chinese).
- [8] LI Y S, WANG W B. Mechanical behaviors of adhesively-bonded, bolted and hybrid composite-to-steel joints[J]. *Journal of Ship Mechanics*, 2011, 15(9): 1052-1064.
- [9] HAYMAN B, BERGGREEN C, LUNDSGARD L C. Design of X-joints in sandwich structures for naval vessels[C]. *10th international Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures*, Houston: American Bureau of Shipping, 2007.
- [10] BOYD S W, BLAKE J I R, SHENOI R A, et al. Integrity of hybrid steel-to-composite joints for marine application[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment*, 2004, 218(4): 235-246.
- [11] GRENESTEDT J L, CAO J. Design and testing of joints composite sandwich/steel hybrid ship hulls[J]. *Composites Part A: Applied Science & Manufacturing*, 2004, 35(9): 1091-1105.
- [12] ARMANIOS E A, BUCINELL R B, WILSON D W, et al. Adhesion of stainless steel to fiber reinforced vinyl ester composite[J]. *Journal of Composites Technology and Research*, 2002, 24(4): 254-260.
- [13] WRIGHT P N H, WU Y, GIBSON A G. Factors affecting mechanical strength of steel to composite connections for warship structures[C]. *FRC 2002 9th International Conference on Fibre Reinforced Composites*, New York: CCME University of Newcastle, 2002.
- [14] CLIFFORD S M, MANGER C I C, CLYNE T W, et al. Characterization of glass fiber reinforced vinyl ester to steel joint for use between a naval GRP superstructure and a steel hull[J]. *Composite Structures*, 2002, 57(1-4): 59-66.
- [15] CAO J, GRENESTEDT J L. Test of a redesigned glass fibre reinforced vinyl ester to steel joint for use between a naval GRP superstructure and a steel hull[J]. *Southampton: Composite Structure*, 2003, 60: 439-445.
- [16] BOYD S W. Strength and durability of steel to composite joints for marine application[D]. University of Southampton, 2006.
- [17] BOYD S W, BLAKE J I R, SHENOI R A. Optimization of steel-composite connections for structural marine applications[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2008, 39(5): 891-906.
- [18] PETINOV S V, GUCHINSKY R V. Fatigue assessment of ship superstructure at expansion joint[J]. *Transactions of the Royal Institution of Naval Architects Part A: International Journal of Maritime Engineering*, 2013, 155: A201-A209.
- [19] 陈余岳, 柳辉. 1MW 变速恒频风力机复合材料叶片设计[J]. *GRP*, 2004(4): 1-6.  
CHEN Yuyue, YAO Hui. Composite blade design of 1MW variable speed constant frequency wind turbine[J]. *GRP*, 2004(4): 1-6 (in Chinese).
- [20] 梅威. 基于 MSC. Fatigue 的散货船结构疲劳寿命分析[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2011.  
MEI Wei. Fatigue life analysis of bulk carriers structure based on MSC. Fatigue[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2011 (in Chinese).
- [21] 刘青峰, 王发灯, 郑红霞. 疲劳分析软件 MSC Fatigue 的工程应用[J]. *计算机辅助工程*, 2013, 22(1): 492-496.  
LIU Qingfeng, WANG Fadeng, ZHENG Hongxia. Engineer application of fatigue analysis software MSC. Fatigue[J]. *Computer Aided Engineering*, 2013, 22(1): 492-496 (in Chinese).
- [22] 王国军. MSC Fatigue 疲劳分析实例指导教程[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009, 63-83.  
WANG Guojun. Fatigue analysis examples of the tutorial of MSC. Fatigue[J]. Beijing: China Machine Press, 2009: 63-83 (in Chinese).
- [23] DICKSON R F, FERNANDO G, ADAM T, et al. Fatigue behaviour of hybrid composites[J]. *Journal of Material Science*, 1989, 24(1): 227-233.