文章编号：1007−7294(2026)09−1517−10

砰击压力作用下铝合金高速船纵骨疲劳分析

张　凡[1,2]，胡嘉骏[2]，李陈峰[1]
（1. 哈尔滨工程大学，哈尔滨 150001；2. 中国船舶科学研究中心，江苏 无锡 214082）

摘要：针对高速船舶砰击应力响应疲劳评估难题，本研究基于小型高速铝合金船艏部实测数据，结合两种典型纵骨穿舱结构疲劳试验，运用线性累积损伤理论，分析应力响应与疲劳损伤。研究证实，砰击压力下应力响应具有显著冲击特性，应力幅值不再服从瑞利分布。结果表明：试验工况连续航行 212 小时测量点便可能产生疲劳裂纹。该成果深化了对砰击应力动态特性的认知，为高速铝合金船纵骨穿舱结构抗疲劳设计提供参考。

关键词：高速船；实测应力；铝合金疲劳；*S-N* 曲线；纵骨损伤
中图分类号：U663.43　　**文献标识码：**A　　**doi:** 10.3969/j.issn.1007−7294.2026.09.011

Fatigue analysis of longitudinal stiffeners in high-speed aluminum alloy ships under slamming

ZHANG Fan[1,2], *HU Jia−jun*[2], *LI Chen−feng*[1]
(1. Harbin Engineering University, Harbin 150001, China; 2. China Ship Scientific Research Center, Wuxi 214082, China)

Abstract: Aiming at the difficuties of fatigue evaluation of slamming stress response for high-speed ships, this study analyzes the stress response and fatigue damage based on the measured data of the bow of a small high-speed aluminum alloy ship, by combining with fatigue tests on two typical longitudinal bulkhead-penetrating structures, with the linear cumulative damage theory. The research confirms that the stress response under slamming pressure exhibits obvious impact characteristics, and the stress amplitude no longer follows the Rayleigh distribution. The results show that fatigue cracks may occur at the measuring points after 212 hours of continuous navigation under the test conditions. This achievement deepens the understanding of the dynamic characteristics of slamming stress and provides a reference for the anti-fatigue design of longitudinal bulkhead-penetrating structures of high-speed aluminum alloy ships.

Key words: high-speed vessels; full-scale test stress; aluminum alloy; *S-N* curve; damage of longitudinal stiffeners

0 引　言

由于铝合金材料具备强度高、耐腐蚀性好等优点，同时可以减轻船体重量，提高船舶航速，因此广泛应用于中小型高速船舶的建造[1]。与常规大型船舶不同，高速船在波浪中高航速航行时，由于船体艏部抬升、波浪破碎飞溅等原因，高速船的局部结构（如船艏、双体船的连接桥等）会遭受周期性的较大砰击力作用[2−3]，持久反复作用可致船体纵骨疲劳损坏。因此，研究高速铝合金船在砰击压力作用下的疲

收稿日期：2026−05−22
基金项目：项目编号 JCKY202306B016
作者简介：张　凡（1982–），女，硕士，高级工程师，E-mail：zhangfan07@cssrc.com.cn。

劳问题对该类船舶结构设计具有重要意义。

国内外各大船级社[4−5]的疲劳规范主要是针对大型船舶整体载荷作用下的疲劳问题,采用的 *S-N* 曲线适用于屈服极限小于 400 MPa 的钢材,主要针对散货船、油船等常规船型的典型节点,也并未有权威机构针对特殊新型船的典型节点进行疲劳试验,选取的 *S-N* 曲线也是近似参考相类似的节点。对于新型材料和特殊节点相结合的 *S-N* 曲线更是少之又少。国际焊接学会(IIW)[6]在焊接节点疲劳设计指南中发布了钢材料和铝合金材料 *S-N* 曲线,两组曲线包含若干节点,但其并不针对于船体结构节点。缪素菲等[7]针对船用铝合金典型板架结构,在反复载荷作用下开展不同载荷水平的疲劳试验,获得了不同载荷水平下典型节点的疲劳寿命和破坏模式。任慧龙等[8]设计并开展实际板厚 4 点弯曲疲劳模型试验,获得试验模型在不同载荷水平下的疲劳失效循环次数,根据试验测得数据得到 2 种扶强结构形式的 *S-N* 曲线,通过试验获得了矩形扶强材和削斜扶强材结构形式的某铝合金船体纵骨贯穿舱壁结构的疲劳性能。铝合金材料的 *S-N* 曲线尚不如钢质船舶节点那样完善,而对于新型船舶典型节点的疲劳特性,只有部分研究者针对少量节点进行了相应试验。

王伟等[9]以 CCS《海上高速船入级与建造规范》作为载荷输入,以一艘 22 m 长铝合金高速船为例,开展了船体梁载荷和侧向载荷作用下热点应力计算,基于线性累积损伤理论对目标船的纵骨进行疲劳损伤评估。许维军等[10]将非线性载荷的时域计算与线性频域谱分析方法相结合,参考相关规范中修正系数对应的应力响应传递函数,计算考虑非线性砰击载荷的疲劳损伤。李天祺[11]采用高速船的载荷计算,结合有限元进行应力分析,并开展疲劳工况、超越概率水平、疲劳试验等研究;开展高速船纵骨节点的疲劳分析,提出了一种基于规范改进的铝合金高速船的疲劳强度评估简化方法。刘静辰[12]采用简化分析方法对某铝合金双体船的纵骨节点进行了疲劳评估。乐京霞等[13]基于传统的设计波法,提出了一种计及波激振动的船舶结构疲劳损伤计算方法,并用该方法对一艘集装箱船的典型结构进行疲劳评估,给出了各计算热点的累积损伤值。徐志亭等[14]采用非线性时域方法计算船体总弯矩的时历分布,结合雨流计数法,统计出船体节点在非线性砰击载荷下的疲劳应力范围分布,进而得到船体节点考虑非线性砰击载荷影响的疲劳损伤。以上的评估方法都是基于总体载荷引起的结构疲劳问题,而对于局部砰击载荷下铝合金焊接的疲劳损伤研究较少。由于砰击载荷的瞬态性和强非线性,其计算理论还很不成熟,舰船结构在砰击作用下的应力响应更鲜有人研究,基于此,本文通过对实船应力数据进行处理,得到了实船砰击压力作用下的应力响应;通过对 2 种典型的纵骨穿舱结构形式的疲劳试验分析,获得了相应的铝合金焊接接头的疲劳性能,并基于线性累积损伤理论,获得了砰击压力作用下的铝合金焊接节点的疲劳特性,为铝合金高速船的结构设计提供参考。

1 砰击压力作用下铝合金船体纵骨上的应力响应特性分析

高速船在波浪海况下高速航行时,艏部区域承受较大的砰击载荷,其砰击载荷和结构响应具有十分复杂的强非线性特征,目前尚无有效的数值方法评估高速船的砰击载荷及其结构响应[15]。因此,为了获得实船在砰击压力作用下的应力响应特征,本文选取了一艘船长 40 余米铝合金高速船的艏部砰击压力作用区域。该区域的板材采用屈服极限为 180 MPa 的铝合金板,骨材采用屈服极限为 260 MPa 的铝合金挤压型材,并沿着纵骨方向布置了单向应变片,应变片的编号 S1-S4,具体位置如图 1 所示。实海域水深 30 m,浪高仪实测波高 1.15 m,最大波高 1.8 m,平均周期 4.6 s,在顶浪状态下以 37.5 节航速航行约 15 分钟,应力监测数据见图 2~5。

按照胡克定律将实测的应变转化成应力,各测点上产生极高的应力峰值,部分峰值超过了铝合金材料的屈服极限,应力响应在毫秒内达到峰值,随后急剧下降并小幅振荡衰减至零位附近,整个砰击响应过程持续时间约 1~2 s,远小于波浪载荷作用周期,砰击载荷作用下纵骨结构响应呈现明显的冲击特性。

鉴于上述砰击载荷作用下结构应力响应的冲击特性,采用峰值计数法提取循环幅值,每个砰击过程的峰值点如图 6 所示;对提取的应力循环进行统计并去除对疲劳损伤贡献较小的应力成分,对应力循

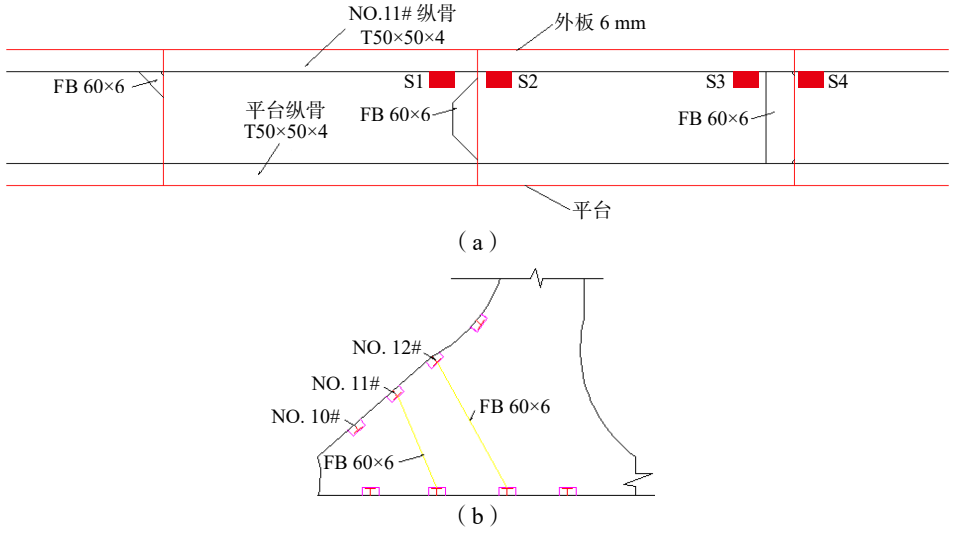


图 1　测点位置图

Fig.1　Location of the test points

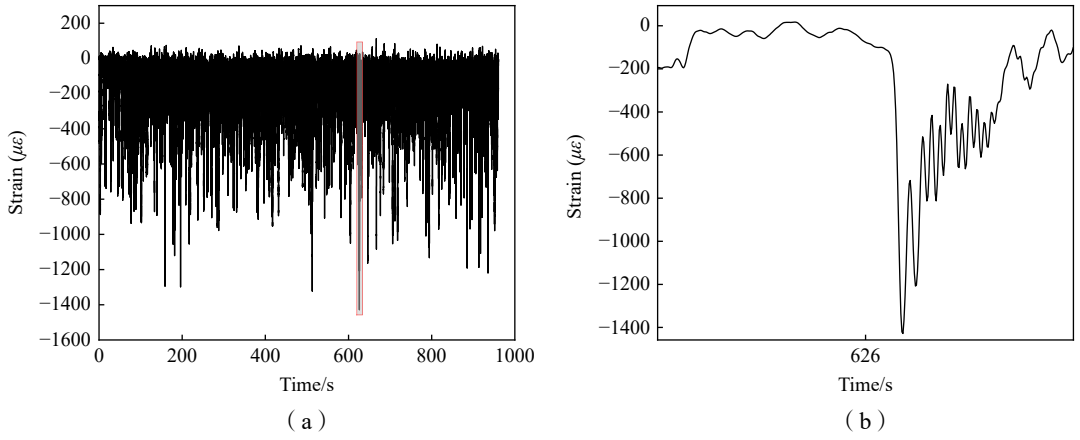


图 2　S1 测点的时域曲线

Fig.2　Time-domain curve of measuring point S1

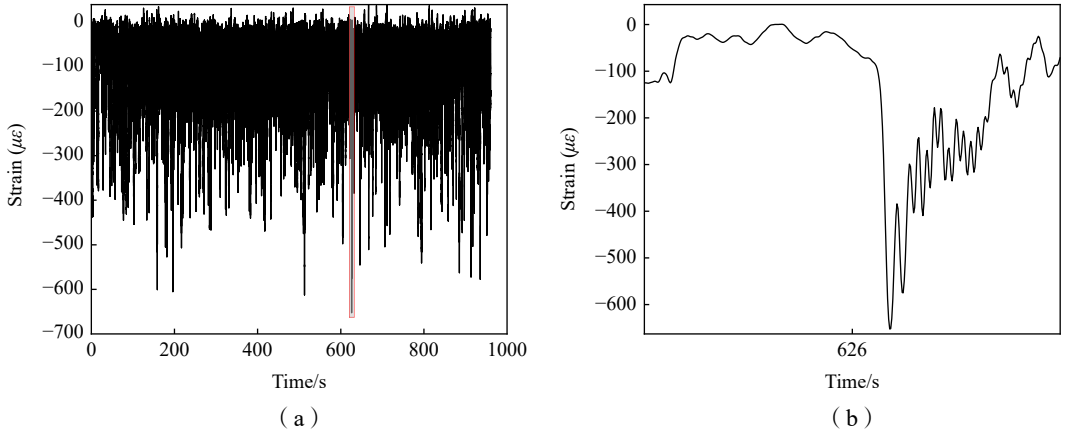
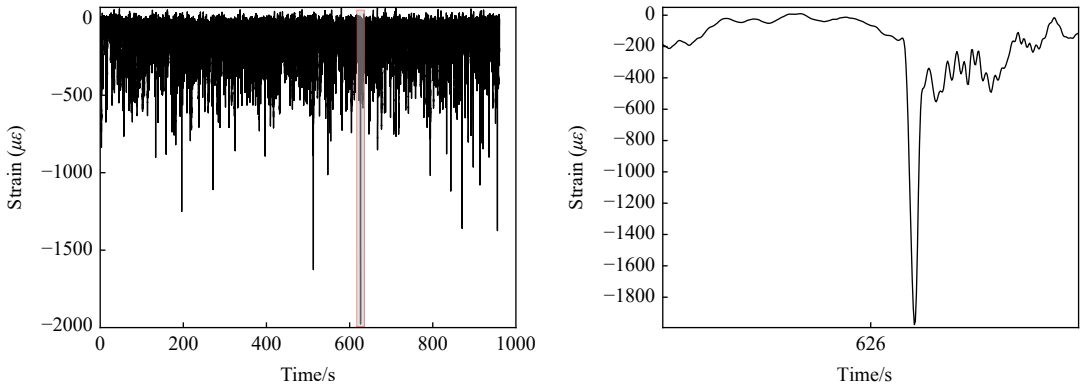


图 3　S2 测点的时域曲线

Fig.3　Time-domain curve of measuring point S2

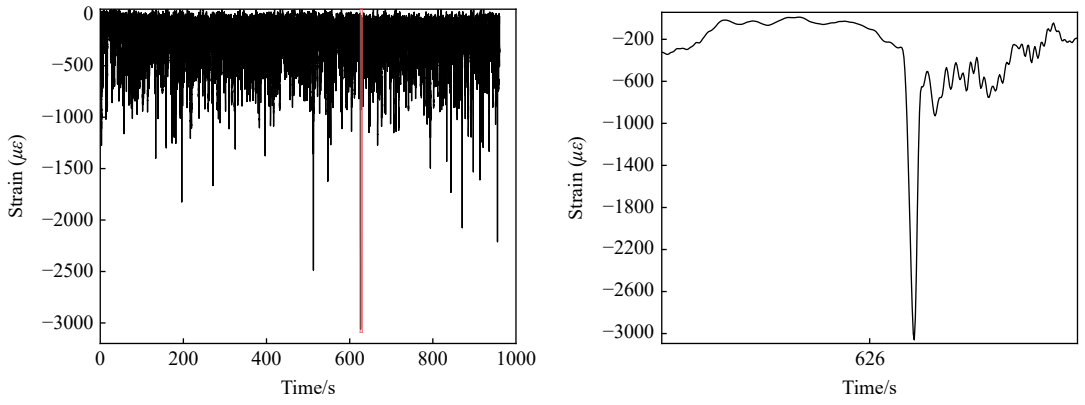
环幅值 S 进行拟合, 如图 7~10 所示, 并采用 K-S 检验(Kolmogorov-Smirnov)对拟合结果进行假设检验, 检验结果详见表 1。



（a） （b）

图 4 S3 测点的时域曲线

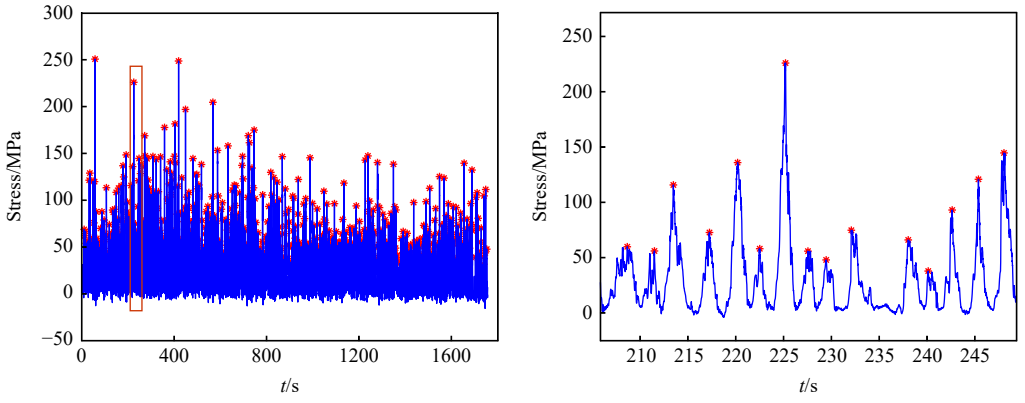
Fig.4 Time-domain curve of measuring point S3



（a） （b）

图 5 S4 测点的时域曲线

Fig.5 Time-domain curve of measuring point S4



（a）实测应力曲线 （b）局部放大

图 6 应力响应循环峰值提取

Fig.6 Extraction of peak values of stress response cycles

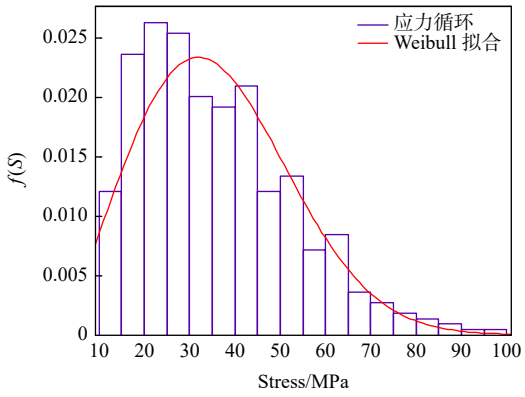


图 7　S1 测点应力幅值的概率密度（γ=2.319，δ=40.74）

Fig.7　Probability density of stress amplitude at measuring point S1

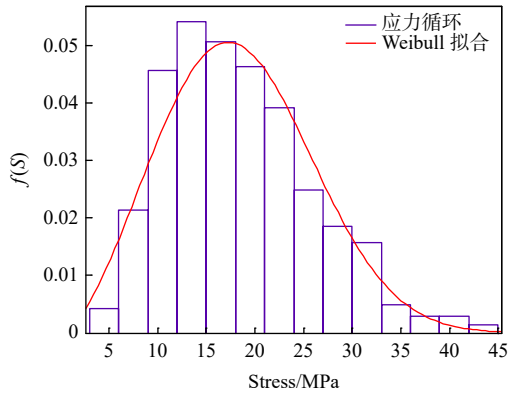


图 8　S2 测点应力幅值的概率密度（γ=2.623，δ=20.74）

Fig.8　Probability density of stress amplitude at measuring point S2

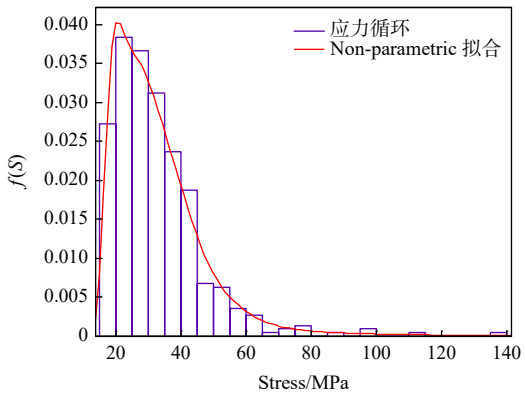


图 9　S3 测点应力幅值的概率密度

Fig.9　Probability density of stress amplitude at measuring point S3

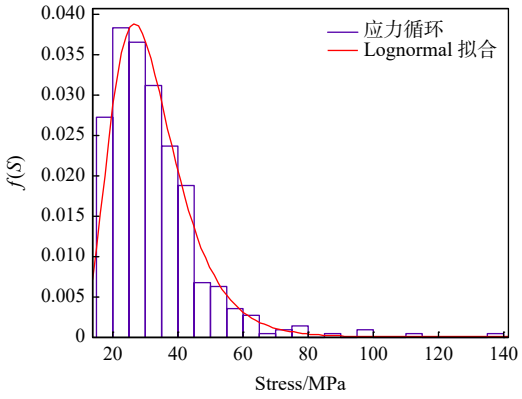


图 10　S4 测点应力幅值的概率密度

Fig.10　Probability density of stress amplitude at measuring point S4

表 1　曲线拟合假设检验

Tab.1　Goodness-of-fit test for curve fitting

	h（假设检验结果）	P（显著性）	是否满足假设检验	曲线拟合类型
测点S1	0	0.073 91	是	Weibull分布
测点S2	0	0.2510	是	Weibull分布
测点S3	0	0.1672	是	Lognormal拟合
测点S4	0	0.9918	是	Non-parametric拟合

由上述统计结果可知：在砰击压力作用下，各测点应力响应幅值不再服从 Rayleigh 分布。

2　铝合金纵骨穿舱结构的 *S-N* 曲线选取

根据现场实船勘测的纵骨裂纹情况，一般是从肘板或扶强材与纵骨面板连接的趾端或肋板与面板连接处开始萌生及扩展，为了获得该类纵骨穿舱节点的疲劳性能，选取了 2 类典型节点开展疲劳试验，1 号模型（纵骨穿过肋板，肋板一侧加扶强材，端部削斜且未与纵骨连接）的结构图和应力云图如图 11~12 所示，2 号模型（纵骨穿过肋板，肋板一侧加扶强材与面板连接）的结构图和应力云图如图 13~14 所示。

由上述应力云图可知：此类纵骨穿舱结构形式，应力最大值出现在纵骨面板的焊缝处。

试验模型选用屈服极限为 180 MPa 的铝合金板和屈服极限为 260 MPa 的铝合金挤压型材，并采用

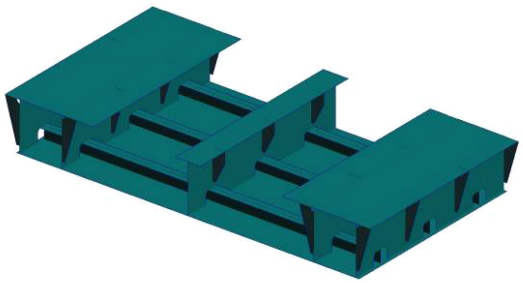


图 11 1 号模型结构图

Fig.11 Structural diagram of Model No. 1

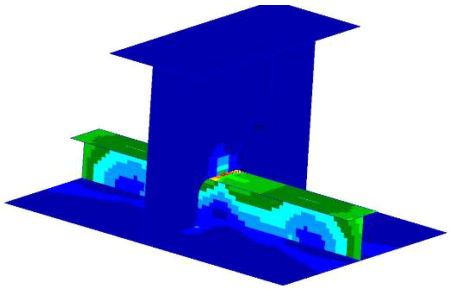


图 12 1 号模型有限元模型热点部位应力云图

Fig.12 Stress contour of hot spot areas of the Finite Element Model for Model No. 1

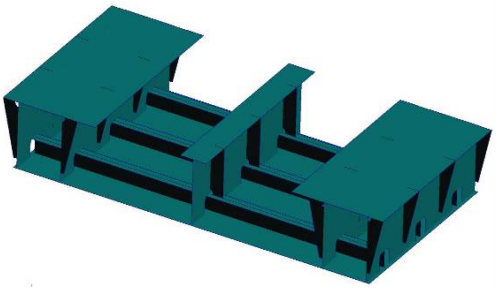


图 13 2 号模型结构图

Fig.13 Structural diagram of Model No.2

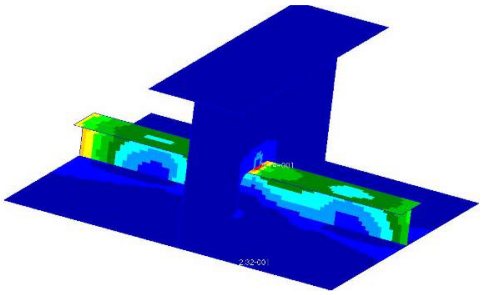


图 14 2 号模型有限元模型热点部位应力云图

Fig.14 Stress contour of hot spot areas of the Finite Element Model for Model No. 2

双面填角焊工艺。试件采用四点弯曲加载，即两端简支，跨中区域两点加载，加载示意图如图 15 所示，试验设备采用 MTS 多点加载试验系统加载，试验现场如图 16 所示。

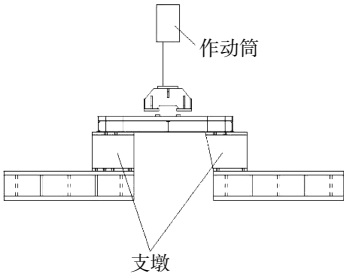


图 15 模型加载示意图

Fig.15 Schematic diagram of model loading

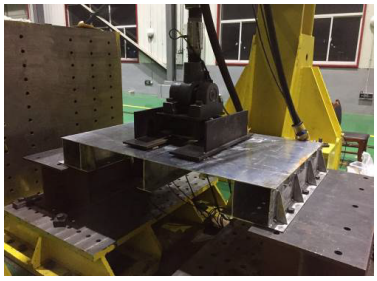


图 16 试验现场

Fig.16 Test site

1 号模型模拟纵骨穿过肋板并采用削斜扶强材加强，试验模型见图 17，2 号模型模拟纵骨穿过肋板且一侧加扶强材与纵骨面板连接，试验模型见图 18。试验中在纵骨面板上距离焊缝 0.5t 处和 1.5t 处粘贴单向应变片，如图 19~20。



图 17 1 号试验模型

Fig.17 Test model No. 1



图 18 2 号试验模型

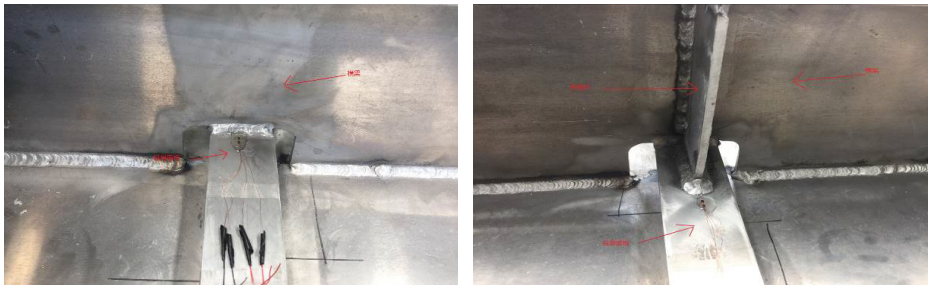
Fig.18 Test model No. 2



（a）　　（b）

图 19　1 号试验模型贴片方案

Fig.19　Strain gage attachment scheme for test Model No. 1



（a）　　（b）

图 20　2 号试验模型贴片方案

Fig.20　Strain gage attachment scheme for test Model No. 2

试验过程采用恒幅正弦波加载，加载频率为 2 Hz，每类模型各开展 4 个模型的疲劳试验与表 2 中序号对应，试验应力比 $R=0.1$。1 号试验模型所有裂纹出现在肋板与纵骨面板连接处，破坏部位如图 21 所示；2 号试验模型的裂纹分别出现在肋板与纵骨面板连接处和加强筋与纵骨面板连接处，破坏位置如图 22 所示。两类试件的裂纹出现位置与实船勘测结果基本一致。

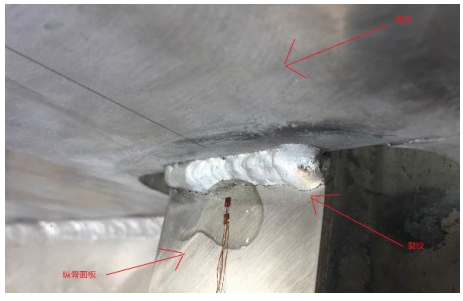


图 21　1 号模型破坏部位

Fig.21　Failure positions of Model No. 1



（a）横梁与纵骨面板连接焊趾处　　（b）扶强材与纵骨面板连接焊趾处

图 22　2 号模型破坏部位

Fig.22　Failure positions of Model No. 2

疲劳试验数据见表2，其中，S为按公式(1)计算得到的裂纹侧焊趾处的热点应力范围，N为试件表面裂纹长度超过20 mm或贯穿裂纹时的循环次数。

$$S = \frac{3\sigma_{t/2} - \sigma_{3t/2}}{2} \tag{1}$$

式中：$\sigma_{t/2}$为距离焊趾$t/2$处的最大主应力，实际处理时以测量的纵向正应力代替；$\sigma_{3t/2}$为距离焊趾$3t/2$处的最大主应力，实际处理时以测量的纵向正应力代替；t为板厚，单位mm。

表2 疲劳试验数据（热点应力）

Tab.2 Fatigue test data (hot spot stress)

模型	序号	S/MPa	循环次数N	断裂位置
1号模型	1	113	26 086	横梁与纵骨面板连接焊趾处（如图21）
	2	98	43 522	横梁与纵骨面板连接焊趾处（如图21）
	3	100	45 603	横梁与纵骨面板连接焊趾处（如图21）
	4	110	28 132	横梁与纵骨面板连接焊趾处（如图21）
2号模型	1	90	≥132 350	未出现裂纹
	2	115	104 000	横梁与纵骨面板连接焊趾处（如图22(a)）
	3	130	16 000	横梁与纵骨面板连接焊趾处（如图22(a)）
	4	100	85 000	扶强材与纵骨面板连接焊趾处（如图22(b)）

国内外民船规范[4−6]中的应力水平S与疲劳寿命N之间的表达式为

$$N = AS^{-m} \tag{2}$$

式中：A、m一般由疲劳试验结果确定。

参考文献[6]，采用名义应力法进行铝合金纵骨穿舱节点疲劳强度评估时，S-N曲线通常选取FAT 25~FAT 36之间，FAT 25和FAT 36对应的S-N曲线的表达式见公式(3)。

$$\begin{cases} N = 3.13\times10^{10}\times S^{-3}, & \text{FAT 25} \\ N = 9.33\times10^{10}\times S^{-3}, & \text{FAT 36} \end{cases} \tag{3}$$

参考文献[5]中侧向载荷下的应力集中系数k，2号模型扶强材与纵骨面板焊趾处的应力集中系数为1.4，其他焊趾处的应力集中系数取为1.25，并将公式(3)转成热点应力下的S-N曲线，如公式(4)所示，并与模型试验结果比较，详见图23。

$$\begin{cases} N = 3.13\times10^{10}/k^{-3}\times S^{-3}, & \text{FAT 25} \\ N = 9.33\times10^{10}/k^{-3}\times S^{-3}, & \text{FAT 36} \end{cases} \tag{4}$$

由上图可知：2号试件试验结果离散性相对较大，对于采用屈服极限为180 MPa的铝合金板和屈服极限为260 MPa的铝合金挤压型材焊接形式的纵骨穿舱型焊接类节点，从安全性角度考虑，推荐选用IIW规范[6]中铝合金材料的FAT 25对纵骨穿舱节点进行疲劳强度校核。

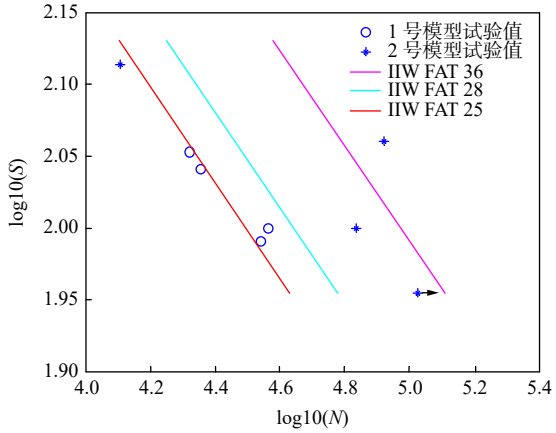


图23 S-N曲线（S为热点应力）

Fig.23 S-N curve （S is hot spot stress）

3 基于实测数据的疲劳累积损伤度计算

基于S-N曲线和Palmgren-Miner线性累积损伤原理，在多级恒幅交变应力作用下，总的疲劳损伤度D是各应力范围水平S_i下的损伤度D_i之和。某一应力范围水平S_i下的损伤度D_i等于该应力范围的实际循环次数n_i与结构在该应力范围S_i单一作用下达到破坏所需的循环次数N_i之比。假设应力范

围水平共有 K 级，则累积损伤度为

$$D_{\text{test}}=\sum_{i}^{N_{\text{test}}}\frac{n(S_i)}{N(S_i)} \tag{5}$$

式中：D_{test} 为试验时间段的累积损伤度；N_{test} 为试验时间段内的应力循环次数；$N(S_i)$为试验时间段内提取的应力循环对应的疲劳循环次数，按 IIW 规范[6] 中 FAT 25，具体表达式为

$$\begin{cases}N(S)=AS^{-m} & S\geqslant S_Q\\ N(S)=CS^{-r} & S<S_Q\end{cases} \tag{6}$$

式中：$N(S)$为与应力范围 S 相对应的结构疲劳失效时的应力循环次数；A、m、C 和 r 为 S-N 曲线系数（见表 3 所示）；S_Q为参考应力范围，单位为 MPa，当取 S 为S_Q时，$N(S_Q)=10^7$。

表 3　*S*-*N* 曲线参数（铝合金材料）

Tab.3　Parameters of *S*-*N* curve

S-*N* 曲线	$N\leqslant 10^7$		$N>10^7$		
	A	m	C	m	S_Q /MPa
FAT 25	3.13×10^{10}	3	6.68×10^{12}	5	14.62

采用胡克定律将各测点的应变曲线转换成应力曲线，并采用图 6 所示的峰值计数法提取各测点上的疲劳循环应力，按照公式(5)计算试验工况下的疲劳累积损伤度，详见表 4。

表 4　实测数据下典型节点的疲劳累积损伤（t=900 s）

Tab.4　Fatigue cumulative damage of typical joints under measured data

校核点编号	S1	S2	S3	S4
疲劳累积损伤度D	6.80×10^{-4}	7.95×10^{-5}	4.68×10^{-4}	1.18×10^{-3}

根据线性累积损伤理论，假定 D=1 时，结构即发生疲劳破坏。因此，可得到该船在试验工况下航行，其疲劳寿命 N 可按式(7)进行计算，计算结果见表 5。

$$\frac{D_{\text{test}}}{D}=\frac{N_{\text{test}}}{N}\Rightarrow N=\frac{N_{\text{test}}\times D}{D_{\text{test}}} \tag{7}$$

表 5　由测试数据反推出的疲劳寿命

Tab.5　Fatigue life deduced from measured data

校核点编号	累积损伤度	疲劳寿命N/h
S1	2.72×10^{-3}	368
S2	3.18×10^{-4}	3143
S3	1.87×10^{-3}	535
S4	4.71×10^{-3}	212

由上表的计算结果可知，试验船在 3 级海况下以 37.5 节顶浪连续航行 212 小时便有可能产生疲劳裂纹，由此可见，在铝合金高速船的结构设计时，需要充分考虑砰击压力引起的疲劳问题。

4 结　论

本文基于线性累积损伤理论，结合铝合金高速船纵骨应力实测数据与疲劳试验结果，得到了铝合金纵骨在砰击压力作用下的疲劳特性，形成的主要结论如下：

(1)中小型高速船在波浪中高速航行时，砰击区域的应力响应呈现典型冲击特征 —— 应力在毫秒级时间尺度内骤升至峰值，随后迅速衰减并振荡归零，整个单次冲击过程持续约 1~2 s。通过峰值计数法提取应力循环，应力幅值概率密度函数 PDF 不再服从线性系统假设的 Rayleigh 分布。

(2)针对屈服极限 180 MPa 铝合金板与 260 MPa 挤压型材焊接而成的纵骨穿舱节点，经对比试验

与规范验证，推荐使用国际焊接学会（IIW）规范中铝合金材料的 FAT 25 曲线，从而为同类结构的设计与评估提供了工程参考。

（3）本研究基于线性累积损伤理论，对试验海况下的疲劳损伤进行了系统计算。结果显示，在试验海况条件下，铝合金纵骨穿舱结构在连续航行 212 小时后可能出现疲劳损伤。尽管该结果仅为定量考核，但已充分揭示了中小型铝合金船舶艏部冲击区域纵骨结构疲劳设计的重要性，深化了对砰击应力动态特性的认知，为高速铝合金船纵骨穿舱结构抗疲劳设计提供参考。

参 考 文 献：

[1] 何建伟, 王祝堂. 船舶舰艇用铝及铝合金[J]. 轻合金加工技术, 2015, 43(9): 1–11.
He J W, Wang Z T. Aluminum and its alloys for ships and naval vessels[J]. Light Alloy Fabrication Technology, 2015, 43(9): 1–11. (in Chinese)

[2] 刘维勤, 胡雨晨, 等. 高速艇在波浪下的砰击载荷模型试验研究[J]. 船舶力学, 2023, 27(10): 1445–1454.
Liu W Q, Hu Y C, et al. Model experimental study on slamming load of high-speed crafts in waves[J]. Journal of Ship Mechanics, 2023, 27(10): 1445–1454. (in Chinese)

[3] Babak Shabani, Jason Lavroff, et al. Slam loads and pressures acting on high-speed wave-piercing catamarans in regular waves[J]. Marine Structures, 2019, 66: 136–153.

[4] ABS. Rules for building and classing steel vessels part 5A[S]. Houston: American Bureau of Shipping, 2010, Appendix C.

[5] 中国船级社. 船体结构疲劳强度指南[S]. 2021.
China Classification Society. Guidelines for fatigue strength of ship structure[S]. 2021. (in Chinese)

[6] IIW Joint Working Group. XIII-1539-07/XV-1254r4-07 IIW document Recommendation for fatigue design of welded joints and components [S]. 2008.

[7] 缪素菲, 刘敬喜, 赵　耀, 等. 船用铝合金板架结构典型节点的疲劳试验研究[J]. 船舶力学, 2020, 24(7): 934–941.
Miao S F, Liu J X, Zhao Y, et al. Exerimental study of fatigue properties of aluminium alloy plate[J]. Journal of Ship Mechanics, 2020, 24(7): 934–941. (in Chinese)

[8] 任慧龙, 马开开, 等. 不同扶强材形式的纵骨贯穿舱壁结构疲劳试验[J]. 船舶工程, 2019, 41: 14–18.
Ren H L, Ma K K, et al. Fatigue test of the cutout of bulkhead for longitudinals with different type of stiffeners[J]. Ship Engineering, 2019, 41: 14–18. (in Chinese)

[9] 王　伟, 等. 铝合金高速船纵骨节点疲劳强度简化计算方法研究[J]. 舰船科学技术, 2024, 46(24): 20–27.
Wang W, et al. Research on simplified fatigue strength calculation method for longitudinal frame nodes of aluminum alloy high speed craft[J]. Ship Science and Technology, 2024, 46(24): 20–27. (in Chinese)

[10] 许维军, 华　真, 等. 计及砰击载荷的舰船疲劳损伤直接计算法分析[J]. 中国舰船研究, 2022, 17(3): 264–272.
Xu W J, Hua Z, et al. Analysis of the direct calculation method of ship fatigue damage considering slamming load[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2022, 17(3): 264–272. (in Chinese)

[11] 李天祺. 铝合金高速船疲劳强度评估方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2024, 05.
Li T Q. Research on fatigue strength evaluation method of aluminum alloy high speed craft[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2024. (in Chinese)

[12] 刘静辰. 穿浪双体船结构疲劳强度研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007.
Liu J C. Fatigue strength assessment of wave penetrating catamaran(WPC)[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2007. (in Chinese)

[13] 乐京霞, 李建锋. 一种计及波激振动的船舶结构疲 劳损伤的计算方法[J]. 船舶力学, 2022, 26(1): 103–112.
Yue J X , Li J F. Calculation method of fatigue damage of hull structure considering springing[J]. Journal of Ship Mechanics, 2022, 26(1): 103–112. (in Chinese)

[14] 徐志亭, 赵　超, 王福花. 非线性砰击载荷对某大外飘型船舶疲劳损伤的影响[J]. 中国舰船研究, 2019, 14(6): 180–185.
Xu Z T, Zhao C, Wang F H. Effect of nonlinear slamming loads on the fatigue damage of a ship with large flare[J]. Chinese Journal of Ship Research, 2019, 14(6): 180–185. (in Chinese)

[15] 骆寒冰, 徐　慧. 舰船砰击载荷及结构动响应研究综述[J]. 船舶力学, 2010, 14(4): 439–450.
Luo H B, Xu H. Review of the state of the art of dynamic responses induced by slamming loads on ship structure[J]. Journal of Ship Mechanics, 2010, 14(4): 439–450. (in Chinese)