

## 船舶及海洋工程装备

## 成组法疲劳试件个数选取方法研究

张凡<sup>1,2</sup>, 王艺陶<sup>1,2</sup>, 王丹<sup>1,2</sup>, 竺一峰<sup>1,2</sup>

(1.中国船舶科学研究中心, 江苏 无锡 214082; 2.深海技术科学太湖实验室, 江苏 无锡 214125)

**摘要:** **目的** 在成组法疲劳试验过程中, 确定最少疲劳试件个数判据, 获取有效可靠的疲劳试验结果。**方法** 基于疲劳可靠性的基本原理, 在疲劳寿命对数正态分布的假设下, 根据  $t$  分布理论, 结合船舶及海洋工程一般构件具有 95%置信度和可靠度  $p=97.72\%$  下的  $P-S-N$  曲线的基本要求, 推算出相应置信度和可靠度下 5% 误差限度内的疲劳试件个数与允许的最大变异系数数值的对应关系, 以此作为成组法疲劳试验最少试件个数的判据, 开展典型节点的疲劳试验。**结果** 得到了具有 95%置信度的百位估计值  $N_p$ , 并通过线性相关系数  $r$ , 判断对数疲劳应力  $Y=\lg S$  与  $X=\lg N_p$  之间线性相关的程度, 采用最小二乘法对对数疲劳寿命  $\lg N_p$  和对数疲劳应力  $\lg S$  进行线性拟合, 得到了具有 95%置信度的  $P-S-N$  曲线, 与 IIW 规范中相应的曲线一致。**结论** 文中给出的成组法疲劳试验个数确定方法是合理、可靠的, 为船舶与海洋工程结构物典型焊接接头成组法疲劳试验个数的确定提供了依据。

**关键词:** 试件个数;  $P-S-N$  曲线; 变异系数; 疲劳可靠性; 成组法; 疲劳试验; 船舶结构

中图分类号: O346.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-9242(2024)01-0074-07

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.01.010

## Selection Method of the Number of Fatigue Specimens by Group Method

ZHANG Fan<sup>1,2</sup>, WANG Yitao<sup>1,2</sup>, WANG Dan<sup>1,2</sup>, ZHU Yifeng<sup>1,2</sup>

(1. China Ship Scientific Research Center, Jiangsu Wuxi 214082, China; 2. Taihu Laboratory of Deepsea Technological Science, Jiangsu Wuxi 214125, China)

**ABSTRACT:** The work aims to determine the minimum number of fatigue specimens in the process of fatigue test by group method and obtain effective and reliable fatigue test results. Based on the basic principle of fatigue reliability, under the assumption of lognormal distribution of fatigue life, according to the  $t$  distribution theory and combined with the basic requirements of  $P-S-N$  curve with 95% confidence and 97.72% reliability for general components of ships and offshore engineering, the corresponding relationship between the number of fatigue specimens within 5% error limit of corresponding confidence and reliability and the allowable maximum variation coefficient value was calculated, which was used as the criterion for the minimum number of specimens in the fatigue test by group method, and then the fatigue test of typical nodes was carried out. The estimated value  $N_p$  with 95% confidence was obtained, and the degree of linear correlation between logarithmic fatigue stress  $Y=\lg S$  and  $X=\lg N_p$  was judged by linear correlation coefficient  $r$ . The logarithmic fatigue life  $\lg N_p$  and logarithmic fatigue stress  $\lg S$  were linearly fitted by least square method, and a  $P-S-N$  curve with 95% confidence was obtained, which was consistent with the corresponding curve in IIW code. The method for determining the number of fatigue tests by group method given is reasonable and reliable, which provides a basis for determining the number of fatigue tests by group method for typical welded joints of

收稿日期: 2022-10-22; 修订日期: 2023-12-14

Received: 2022-10-22; Revised: 2023-12-14

引文格式: 张凡, 王艺陶, 王丹, 等. 成组法疲劳试件个数选取方法研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(1): 74-80.

ZHANG Fan, WANG Yitao, WANG Dan, et al. Selection Method of the Number of Fatigue Specimens by Group Method[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(1): 74-80.

ships and offshore engineering structures.

**KEY WORDS:** number of specimens; *P-S-N* curve; coefficient of variation; fatigue reliability; group method; fatigue test; ship structure

在船舶与海洋工程结构典型节点的疲劳强度评估时, 常采用 *S-N* 曲线法, 国内外军民船规范如 ABS<sup>[1]</sup>、DNV-GL<sup>[2]</sup>、IIW<sup>[3]</sup>、CCS<sup>[4]</sup>给出了典型节点的 *S-N* 曲线, 但对于特殊的节点, 仍需要开展疲劳模型试验, 以获取相应的 *S-N* 曲线。目前, 国内低周疲劳试验方法主要参考 ASTM E466<sup>[5]</sup>、GB/T 15248<sup>[6]</sup>和 GB/T 26077<sup>[7]</sup>、GB/T 24176<sup>[8]</sup>/ISO 12107<sup>[9]</sup>和 HB 5287<sup>[10]</sup>等标准。对于疲劳试样个数的选取, 各标准存在较大的差异。如 GB/T 24176<sup>[8]</sup>/ISO 12107<sup>[9]</sup>中规定, 在给定应力 *S* 下进行疲劳试验时, 要求的试样数依赖于试验目的和材料的可靠性, 推荐对于解释性试验至少 7 个试样, 对于可靠性设计至少 28 个试样。HB 5287—2009<sup>[10]</sup>中提供了具有某置信度(如 95%)和在一定误差条件下的中值 *S-N* 曲线, 必须保证的每组最少试样个数。文献[11]中关于疲劳试验的标准中规定, 进行 3 个应力水平下的成组试验时, 每个应力水平下的成组试验至少需要获得 5 个有效试验数据点数。为保证统计结果的准确性, 需对样本量设置最低限, 从疲劳可靠性考虑, 对于循环次数 *N* 较小的高应力水平, 试验结果的离散性较小, 试件个数可适当减少; 随着应力水平的降低, 试验结果的分散性增加, 试件个数应有所增加。由此可见, 对于各应力水平, 不宜使用相同的试件个数。

傅惠民等<sup>[12]</sup>在疲劳寿命服从对数正态分布的前提下, 采用异方差回归分析技术对疲劳试验数据实现了整体分析。吕箴等<sup>[13]</sup>采用加权最小二乘法, 融合历史数据和小样本试验数据获得了大样本, 并进行了统计分析。此外, 也有很多学者借助先验信息的 Bayes 统计评估方法和人工神经网络研究了疲劳寿命的分散性<sup>[14-15]</sup>, 提出了包括大样本和小样本疲劳寿命数据的多种 *P-S-N* 曲线拟合方法<sup>[16-22]</sup>。由于数学计算繁琐或精度及稳定性等原因, 目前还没有能广泛应用于工程的小样本方法。本文基于疲劳寿命对数正态分布假设下, 采用最小二乘法拟合具有一定置信度的 *P-S-N* 曲线, 研究了可疑数据判别取舍方法、数据正态性检验、样本数量对试验结果影响、不同试样加工状态以及不同的试验机进行疲劳试验的数据对比分析等数据处理方法。

由于疲劳试验费时和费力, 很少能得到满足统计要求的大样本试验数据。现有的疲劳试验数据基本上属于小样本, 因此在试验时, 如何确定样本数量, 以及利用小样本数量, 来得到较高可靠度的疲劳寿命特性, 是疲劳试验设计的关键技术之一。本文以疲劳可靠性<sup>[23-24]</sup>为基础, 结合船舶与海洋工程中 *P-S-N* 曲线

的基本规定, 推算出了一定误差范围内(小于 5%)具有 95%置信度、97.72%存活率(可靠度)下的疲劳试件个数与允许的最大变异系数数值的对应关系, 便可得到以试验结果的分散程度来确定最少试件个数的判据, 在保证试验结果“可比性”与“再现性”的同时, 可以节省大量试件。

## 1 基于疲劳可靠性的疲劳试件个数确定方法

已有的结构钢、铝合金以及铜等材料的轴向加载和旋转弯曲疲劳试验结果表明, 对于中、短寿命区(循环次数小于  $10^6$ ), 其疲劳寿命服从对数正态分布。在此假设下, 分析估计母体百分位值的最少试件个数判据。

正态母体“百分位”  $X_p$  的定义:

$$P(X > x_p) = \int_{x_p}^{\infty} f(x) dx = p \quad (1)$$

式中:  $p$  为疲劳寿命  $X > X_p$  的概率;  $f(x)$  疲劳寿命的概率分布。

对于任一可靠度  $p$  下的百分位值估计值为  $\hat{X}_p$ :

$$\hat{x}_p = \hat{\mu} + \mu_p \hat{\sigma} = \hat{\mu} + \mu_p \hat{k} s \quad (2)$$

由于样确定的百分位值  $\bar{X}_p + \mu_p \hat{\sigma}$ , 可能大于真值  $\mu + \mu_p \hat{\sigma}$ , 也可能小于真值, 它是以一定的概率发生在它的左右区间内。假设随机变量  $\zeta = \bar{X} + \mu_p \hat{k} s_X$ , 其中,  $\bar{X}$  为随机变量的子样均值、 $s_X$  为子样标准差。在实际应用中, 可近似假设  $\zeta$  服从正态分布, 则可按式(3)和式(4)计算  $\zeta$  的数学期望  $E(\zeta)$  和方差  $\text{Var}(\zeta)$ 。

$$E(\zeta) = E(\bar{X} + \mu_p \hat{k} s_X) = \mu + \mu_p \sigma \quad (3)$$

$$\text{Var}(\zeta) = \text{Var}(\bar{X} + \mu_p \hat{k} s_X) = \text{Var}(\bar{X}) + (\mu_p \hat{k})^2 \text{Var}(s_X) = \sigma^2 \left[ \frac{1}{n} + \mu_p^2 (\hat{k}^2 - 1) \right] \quad (4)$$

将  $\zeta$  转换成标准正态变量  $U = \frac{\zeta - E(\zeta)}{\sqrt{\text{Var}(\zeta)}}$ , 则:

$$t_x = \frac{U}{\sqrt{\chi^2 / (n-1)}} = \frac{(\bar{X} + \mu_p \hat{k} s_X) - (\mu + \mu_p \sigma)}{s_X \left[ \frac{1}{n} + \mu_p^2 (\hat{k}^2 - 1) \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (5)$$

当给定置信度  $\gamma$  和自由度  $(n-1)$  时, 可由  $t$  分布查得  $t_\gamma$ , 则  $t$  将以置信度  $\gamma$  位于  $[-t_\gamma, t_\gamma]$  区间内:

$-t_\gamma < t < t_\gamma$   
即:

$$-\frac{(\bar{x} + \mu_p \hat{\sigma}) - (\mu + \mu_p \sigma)}{s \left[ \frac{1}{n} + \mu_p^2 (\hat{k}^2 - 1) \right]^{\frac{1}{2}}} < t_\gamma \quad (7)$$

$$\frac{t_\gamma s \left[ \frac{1}{n} + \mu_p^2 (\hat{k}^2 - 1) \right]^{\frac{1}{2}}}{\bar{x} + \mu_p \hat{\sigma}} < \frac{(\bar{x} + \mu_p \hat{\sigma}) - (\mu + \mu_p \sigma)}{\bar{x} + \mu_p \hat{\sigma}} < \frac{t_\gamma s \left[ \frac{1}{n} + \mu_p^2 (\hat{k}^2 - 1) \right]^{\frac{1}{2}}}{\bar{x} + \mu_p \hat{\sigma}} \quad (8)$$

$$\frac{(\bar{x} + \mu_p \hat{\sigma}) - (\mu + \mu_p \sigma)}{\bar{x} + \mu_p \hat{\sigma}} < \frac{t_\gamma s \left[ \frac{1}{n} + \mu_p^2 (\hat{k}^2 - 1) \right]^{\frac{1}{2}}}{\bar{x} + \mu_p \hat{\sigma}}$$

用  $\delta$  表示相对误差限度 (绝对值), 得:

$$\delta = \frac{t_\gamma s \left[ \frac{1}{n} + \mu_p^2 (\hat{k}^2 - 1) \right]^{\frac{1}{2}}}{\bar{x} + \mu_p \hat{\sigma}} \quad (9)$$

按式 (9) 可得到相对误差变  $\delta \leq 5\%$  时, 异系数  $C_V$ 、可靠度  $p$ 、置信度  $\gamma$  和观测个数  $n$  之间的关系, 即估计母体百分位值需要最少试件个数的判据:

$$C_V = \frac{s}{x} \leq \frac{0.05}{t_\gamma \left[ \frac{1}{n} + \mu_p^2 (\hat{k}^2 - 1) \right]^{0.5} - 0.05 \mu_p \hat{k}} \quad (10)$$

对于船舶与海洋工程一般结构疲劳强度校核时的  $P-S-N$  曲线, 具有置信度 95% 和可靠度 (存活率) 97.72%, 试验结果的变异系数小于对应试件个数允许的最大变异系数 (见表 1) 时, 便可获按式 (10) 得在较小误差范围内 ( $\delta \leq 5\%$ ) 的具有 95% 置信度的母体百分位估计值。

表 1 最少试件个数 (估计母体 97.72 百分位值)

Tab.1 Minimum number of specimens (estimated 97.72 percentile of matrix)

试件个数	允许的最大变异系数
4	0.022 736
5	0.027 413
6	0.031 442
7	0.035 004
8	0.038 211
9	0.041 139
10	0.043 84
11	0.046 354
12	0.048 71
13	0.050 929
14	0.053 031
15	0.055 028
16	0.056 934

## 2 疲劳描述

疲劳试件参照 GB/T 13816—1992 《焊接接头脉动拉伸疲劳试验方法》中的十字形角接头进行设计。为了能够准确掌握试验模型上的应力分布及焊缝附近处的应力集中情况, 使用 solid45 实体单元对其进行建模, 试件简化为理想模型, 只考虑了焊缝的几何形状, 不考虑基本材料、热影响区和焊缝材料属性的变化, 加载时, 采用一端刚性固定, 另一端施加拉力的方式进行模拟, 数值模拟结果如图 1 所示。试验模型由 MTS 疲劳试验系统进行加载, 如图 2 所示, 其最大载荷为  $\pm 250$  kN, 最大位移为  $\pm 175$  mm。试验数据采用动态应变测试系统和静态应变测试系统相结合的方式采集, 如图 3 所示。在疲劳试验过程中, 时刻关注裂纹的萌生及扩展状态 (如图 4 所示), 当产生贯穿裂纹时, 停止疲劳试验, 此时的循环次数为疲劳破坏时的循环次数。

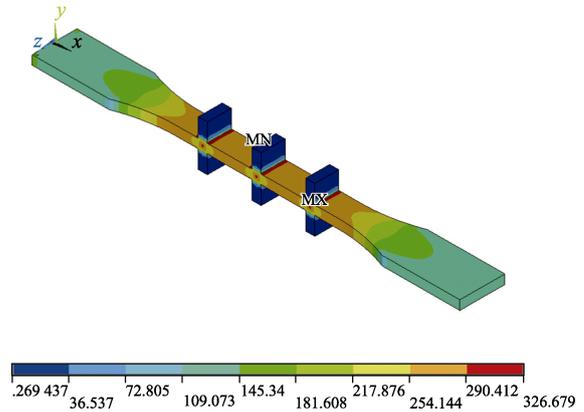


图 1 试验模型有限元计算结果  
Fig.1 Finite element results of the experimental model



图 2 MTS 疲劳试验机  
Fig.2 MTS fatigue test machine

按照上述试验方法开展某高强度钢典型节点的疲劳试验, 试验结果见表 2。中值对数疲劳寿命  $X$  按式 (11) 进行计算。

$$\bar{X} = \lg N_{50} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg N_i \quad (11)$$

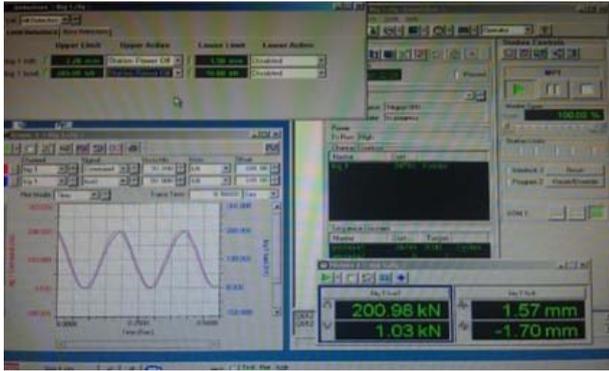


图 3 MTS 疲劳试验机加载及控制系统

Fig.3 MTS fatigue test machine loading and control system

式中:  $N_i$  为一组试验中第  $i$  个试样的疲劳寿命;  $n$  为一组试样的总数;  $N_{50}$  为具有 50% 存活率的疲劳寿命, 即中值疲劳寿命。

对数疲劳寿命标准差  $S$  按式 (12) 计算:

$$S = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n (\lg N_i)^2 - \left( \sum_{i=1}^n \lg N_i \right)^2}{n(n-1)}} \quad (12)$$

表 2 疲劳试验结果

Tab.2 Fatigue test results

序号	应力/MPa	循环次数	试验个数	变异系数	是否满足最少试件个数
1	317.46	257869, 130674, 107302, 148690, 76672, 121038, 125399, 186379, 55639	9	0.038 540	是
2	370.37	83010, 74792, 82066, 90668, 58086, 69102, 112958, 61745	8	0.019 104	是
3	423.28	53200, 47909, 54172, 33444, 59721, 53391, 54901, 52140	8	0.016 351	是
4	476.19	18997, 24165, 17269, 22204, 25888, 19796, 18219, 27606	8	0.017 333	是

### 3 结果分析

利用相关系数来判断  $Y=\lg S$  与  $X=\lg N$  之间线性相关的密切程度, 相关系数  $r$  的定义如下:

$$r = \frac{L_{YX}}{\sqrt{L_{XX}L_{YY}}} \quad (14)$$

式中:  $L_{XX}$ 、 $L_{XY}$  和  $L_{YY}$  是与  $n$  个数据点坐标  $(\lg N_i, \lg S_i)$  有关的量:

$$\left. \begin{aligned} L_{YY} &= \sum_{i=1}^n (\lg S_i)^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n \lg S_i \right)^2 \\ L_{XX} &= \sum_{i=1}^n (\lg N_i)^2 - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n \lg N_i \right)^2 \\ L_{XY} &= \sum_{i=1}^n (\lg S_i \cdot \lg N_i) - \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n \lg N_i \right) \cdot \left( \sum_{i=1}^n \lg S_i \right) \end{aligned} \right\} (15)$$

为了检验  $Y=\lg S$  与  $X=\lg N$  之间的线性相关程度, 采用统计学家卡尔·皮尔逊设计的统计指标, 其为研究变量之间线性相关程度的量, 即相关系数  $r$ , 按式



图 4 试验模型疲劳裂纹

Fig.4 Experimental model fatigue cracking

变异系数  $C_V$  按式 (13) 计算:

$$C_V = S/\bar{X} \quad (13)$$

按照式 (12) 中变异系数计算公式对试验结果进行处理, 计算结果见表 2。结合表 1 中最少试件个数与变异系数之间的关系, 可知在每级应力水平下疲劳个数最少试件个数要求。由表 2 可知, 在疲劳寿命对数正态分布的假设下, 每级应力水平下试件个数满足变异系数与最少试件个数的要求, 能够基于试验结果得到具有 95% 置信度的百分位值, 可满足海洋工程结构疲劳强度评估要求。

(14) 计算得到  $r=-0.974 5$ 。查文献[2]附表 4 中的相关系数检验表, 即按式 (14) 计算出的相关系数的绝对值  $|r|$  大于相关系数检验表中的值, 才能考虑用直线拟合变量之间的关系。统计结果表明, 本次试验结果的  $Y=\lg S$  与  $X=\lg N$  可以用直线拟合。

在中等寿命区 ( $10^4 \sim 10^6$  循环次数) 的应力  $S$  与寿命  $N$  在对数坐标 ( $\lg N - \lg S$ ) 上呈直线关系, 可以式 (16) 的形式进行表达。

$$\lg N = \lg A + m \lg S \quad (16)$$

式中:  $m$  和  $A$  为待定估计参数。

在疲劳寿命为对数正态分布的假设下, 存活率  $p$  按式 (17) 计算。

$$p = P(X > x_p) = \int_{x_p}^{+\infty} f_X(x) dx = 1 - \int_{-\infty}^{x_p} f_X(x) dx = 1 - \int_{-\infty}^{x_p} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x}} \exp\left[-\frac{(X-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2}\right] dx \quad (17)$$

式中:  $X$  为对数疲劳寿命,  $X=\lg N$ ;  $x_p$  为存活率为  $p$  的对数安全寿命,  $x_p=\lg N_p$ 。

表3 试验结果的相关系数  
Tab.3 Correlation coefficients of test results

序号	$Y=\lg S$	$X=\lg N$	$L_{XX}$	$L_{YY}$	$L_{XY}$	相关系数 $r$	文献[2]附表4中的相关系数检验值
1	2.501 7	5.090 2					
2	2.568 6	4.889 0	0.311 9	0.017 2	-0.071 5	-0.974 5	0.95
3	2.626 6	4.703 1					
4	2.677 8	4.332 1					

令  $\mu=(x-\mu_x)/\sigma_x$ , 则存活率  $p$  可转换成公式(18)。

$$p = 1 - \int_{-\infty}^{x_p} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_x} \exp\left[-\frac{(x-\mu_x)^2}{2\sigma_x^2}\right] dx = 1 - \int_{-\infty}^{\mu_p} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{\mu^2}{2}\right] d\mu = 1 - \Phi(\mu_p) \quad (18)$$

式中:  $\mu_p$  为与存活率  $p$  对应的标准正态偏量;  $\Phi$  为标准正态分布函数。

给定存活率  $p$  后, 可从标准正态分布表中查得  $\mu_p$ 。  $\mu_p$  和  $p$  之间对应的关系见式(19)。

$$x_p = \mu_x + \mu_p \sigma_x \quad (19)$$

在每级应力水平对数疲劳寿命变异系数与试件个数满足表1对应关系时, 可按式(20)估算出具有一定置信度的百位值  $\hat{x}_p$ 。

$$\hat{x}_p = \bar{x} + \mu_p \hat{k}s \quad (20)$$

对表3中各级应力水平下的疲劳试验数据进行统计分析, 即可计算出具有95%置信度、存活率  $p=97.72\%$  的安全寿命估计值  $\hat{x}_p$ , 见表4。用最小二乘法拟合数据点  $(\lg S_1, \lg N_{p1}), (\lg S_2, \lg N_{p2}) \cdots (\lg S_4, \lg N_{p4})$  得到的最佳直线, 即是存活率为  $p$  的  $P-S-N$  曲线。

表4 试验结果统计  
Tab.4 Statistics of test results

序号	试验个数	对数疲劳寿命中值 $\bar{x}$	对数疲劳寿命标准差 $s$	标准差修正系数 $\hat{k}$	百分位值估计值 $\hat{x}_p = \ln N_p$
1	9	5.090 2	0.196 18	0.038 540	4.685 5
2	8	4.889 0	0.093 40	0.019 104	4.695 4
3	8	4.703 1	0.076 90	0.016 351	4.543 7
4	8	4.332 1	0.075 09	0.017 333	4.176 5

按照一元线性回归的原理, 认为最佳拟合直线的准则是, 使实测的  $\lg N_i$  与  $\lg N_i^*$  之差的平方和最小, 即令  $Q$  取最小值。

$$Q = \sum_{i=1}^n (\lg N_i - \lg N_i^*)^2 = \sum_{i=1}^n (\lg N_i - \lg A + m \lg S_i)^2 \quad (21)$$

为此将  $Q$  分别对  $\lg A$  和  $m$  求偏导, 并令它们为0, 得:

$$\frac{\partial Q}{\partial (\lg A)} = -\sum_{i=1}^n (\lg N_i - \lg A + m \lg S_i) = 0 \quad (22)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial (m)} = -\sum_{i=1}^n (\lg N_i - \lg A + m \lg S_i) \lg S_i = 0 \quad (23)$$

由此解得:

$$m = \frac{\sum_{i=1}^n \lg N_i \lg S_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg S_i \sum_{i=1}^n \lg N_i}{\sum_{i=1}^n (\lg S_i)^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \lg S_i\right)^2} \quad (24)$$

$$\lg A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg N_i + \frac{m}{n} \sum_{i=1}^n \lg S_i \quad (25)$$

大量的疲劳试验结果表明, 对于钢结构的  $S-N$  曲线通常取为-3。本次也按此方法进行简化处理, 将表

4中各级应力水平的对数疲劳寿命中值  $\bar{x}$  和百位值估计值  $\ln N_p$ , 以及对数应力幅值  $\lg S$  代入式(23)和(24)便可得到存活率为  $p=50\%$  的中值  $S-N$  曲线和  $p=97.72\%$  的  $P-S-N$  曲线(如图5所示), 相应的  $S-N$  曲线的表达式见式(26)和(27), 与 IIW<sup>[10]</sup>中对应的  $S-N$  曲线较为接近。

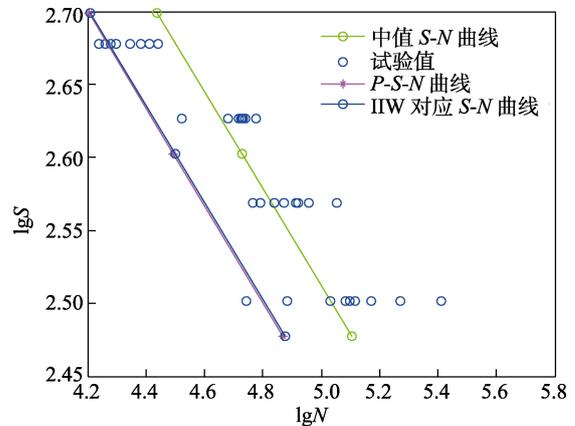


图5 试验节点的中值  $S-N$  曲线和  $P-S-N$  曲线 ( $p=97.72\%$ )  
Fig.5 Median  $S-N$  curve and  $P-S-N$  curve of experimental nodes ( $p=97.72\%$ )

$$\lg N = 12.535 - 3 \lg S \quad (26)$$

$$\lg N = 12.306 - 3 \lg S \quad (27)$$

## 4 结论

本文基于疲劳可靠性的基本原理, 在疲劳寿命服从对数正态分布的条件下, 结合船舶与海洋工程一般结构  $P$ - $S$ - $N$  曲线的基本规定, 得到了成组法疲劳试验每级应力水平下疲劳试件个数与允许的最大变异系数之间的关系, 并以此为判据, 对十字形接头的疲劳试验结果进行了统计分析, 结果表明:

1) 形成的基于可靠性的疲劳试件个数选取判据, 可以为成组法疲劳试验过程中试件个数的确定提供依据, 解决了船舶与海洋工程结构物的焊接节点成组法疲劳试验过程中试件个数难以精准把握的难题。

2) 试验结果拟合的得到的  $S$ - $N$  曲线与 IIW 规范相应的  $S$ - $N$  曲线基本一致, 表明文中各级应力水平下疲劳试件个数选取方法和试验数据处理方法合理和可靠, 保证了试验结果的“可比性”与“再现性”的同时, 节省了大量试验成本, 对于指导海洋工程结构  $S$ - $N$  曲线疲劳试验具有重要的指导意义。

### 参考文献:

- [1] ABS. Guide for Fatigue Assessment Offshore Structures[S].
- [2] DNV-GL. Rules for Classification Ships[S].
- [3] IIW Document XIII-1965-03/XV-1127-03, Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components[S].
- [4] 中国船级社. 船体结构疲劳强度指南[K]. 北京:中国船级社, 2021.  
China Classification Society. Guidelines for Fatigue Strength of Ship Structure[K]. Beijing: China Classification Society, 2021.
- [5] ASTM E466-15, Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials[S].
- [6] GB/T 15248—2008, 金属材料轴向等幅低循环疲劳试验方法[S].  
GB/T 15248—2008, The Test Method for Axial Loading Constant-Amplitude Low-Cycle Fatigue of Metallic Materials[S].
- [7] GB/T 26077—2010, 金属材料疲劳试验轴向应变控制方法[S].  
GB/T 26077—2010, Metallic Materials—Fatigue Testing—Axial-Strain-Controlled Method[S].
- [8] GB/T 24176—2009, 金属材料疲劳试验数据统计方案与分析方法[S].  
GB/T 24176—2009, Metallic Materials—Fatigue Testing—Statistical Planning and Analysis of Data[S].
- [9] ISO12107—2012, Metallic Material Fatigue Testing Statistical Planning and Analysis of Data[S].
- [10] HB 5287—2009, 金属材料轴向加载疲劳试验方法[S].  
HB 5287—2009, Axial Loading Fatigue Test Method for Metallic Materials[S].
- [11] DONG P, HONG J K, OSAGE D A, et al. The Master  $S$ - $N$  Curve Method an Implementation for Fatigue Evaluation of Welded Components in the ASME B&PV Code Section VIII, Division 2 and API 579-1/ASME FFS-1[M]. New York: WRC Bulletin, 2010.
- [12] 傅惠民, 刘成瑞.  $S$ - $N$  曲线和  $P$ - $S$ - $N$  曲线小子样测试方法[J]. 机械强度, 2006, 28(4): 552-555.  
FU H M, LIU C R. Small Sample Test Method for  $S$ - $N$  and  $P$ - $S$ - $N$  Curves[J]. Journal of Mechanical Strength, 2006, 28(4): 552-555.
- [13] 吕箴, 姚卫星. 小样本疲劳寿命分析问题研究进展[J]. 力学与实践, 2008, 30(5): 9-15.  
LU Z, YAO W X. Progress in Small Sample Experiments for Fatigue Life Analysis[J]. Mechanics in Engineering, 2008, 30(5): 9-15.
- [14] XIE L Y, LIU J Z, WU N X, et al. Backwards Statistical Inference Method for  $P$ - $S$ - $N$  Curve Fitting with Small-Sample Experiment Data[J]. International Journal of Fatigue, 2014, 63: 62-67.
- [15] SHIMIZU S, TOSHA K, TSUCHIYA K. New Data Analysis of Probabilistic Stress-Life ( $P$ - $S$ - $N$ ) Curve and Its Application for Structural Materials[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(3): 565-575.
- [16] 兆文忠, 李向伟, 董平沙. 焊接结构抗疲劳设计理论与方法[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.  
ZHAO W Z, LI X W, DONG P S. Theory and Method of Fatigue Resistance Design for Welded Structures[M]. Beijing: China Machine Press, 2021.
- [17] BAPTISTA C, REIS A, NUSSBAUMER A. Probabilistic  $S$ - $N$  Curves for Constant and Variable Amplitude[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 101: 312-327.
- [18] LEONETTI D, MALJAARS J, SNIJDER H H. Fitting Fatigue Test Data with a Novel  $S$ - $N$  Curve Using Frequentist and Bayesian Inference[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 105: 128-143.
- [19] 盛兴旺, 郑纬奇, 雷佶洲. 基于小样本数据的构件疲劳破坏全寿命区  $S$ - $N$  曲线[J]. 中国铁道科学, 2017, 38(5): 22-29.  
SHENG X W, ZHENG W Q, LEI J Z.  $S$ - $N$  Curve of Fatigue Failure Life Cycle of Component Based on Small Sample Data[J]. China Railway Science, 2017, 38(5): 22-29.
- [20] KAWAI M, YANO K. Anisomorphic Constant Fatigue Life Diagrams of Constant Probability of Failure and Prediction of  $P$ - $S$ - $N$  Curves for Unidirectional Carbon/Epoxy Laminates[J]. International Journal of Fatigue, 2016, 83: 323-334.
- [21] 谢里阳, 刘建中. 样本信息聚集原理与  $P$ - $S$ - $N$  曲线拟合方法[J]. 机械工程学报, 2013, 49(15): 96-104.  
XIE L Y, LIU J Z. Principle of Sample Polymerization

- and Method of  $P-S-N$  Curve Fitting[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(15): 96-104.
- [22] 刘潇然, 孙秦, 梁珂. 工程  $P-S-N$  曲线的小子样预测方法研究[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(5): 831-838.  
LIU X R, SUN Q, LIANG K. A Small Sample Prediction Method for Engineering  $P-S-N$  Curve[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(5): 831-838.
- [23] 高镇同, 熊骏江. 疲劳可靠性[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.
- GAO Z T, XIONG J J. Fatigue Reliability[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2010.
- [24] 胡毓仁, 李典庆, 陈伯真, 等. 船舶与海洋工程结构疲劳可靠性分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2010.  
HU Y R, LI D Q, CHEN B Z, et. Fatigue Reliability Analysis of Ship and Ocean Engineering Structures[M]. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2010.