

焊接结构主 S-N 曲线拟合方法及软件开发

李向伟¹, 方吉², 赵尚超^{1,3}

(1. 中车齐齐哈尔车辆有限公司, 齐齐哈尔, 161000; 2. 大连交通大学, 大连, 116028; 3. 天津大学, 天津, 300350)

摘要: 主 S-N 曲线法是当前焊接结构疲劳计算的新方法, 在焊接结构疲劳分析中被广泛采用. 该方法以等效结构应力为核心参量, 实现了以一条 S-N 曲线计算不同载荷模式和焊接形式结构的疲劳寿命. 依据主 S-N 曲线法, 利用不同材料和焊接形式的疲劳试验建立了焊接结构疲劳试验数据库. 考虑厚度、弯曲比及多轴应力等修正参量的影响, 采用最小二乘法原理, 研究了不同主 S-N 曲线方程的拟合方法及其标准差. 在此基础上, 开发了主 S-N 曲线拟合方法的专用软件. 基于 VC++ 编程环境实现了名义应力、结构应力、等效结构应力、剪切结构应力、多轴结构应力及初始裂纹修正等主要计算功能. 基于该软件, 完成了试验数据的多参量的对比分析, 为研究焊接结构疲劳寿命评估及影响因素分析提供了技术基础.

关键词: 主 S-N 曲线法; 结构应力; 最小二乘法; 软件开发

中图分类号: TG 407 **文献标识码:** A **doi:** 10.12073/j.hjxb.20191018001

0 序言

主 S-N 曲线法是当前焊接结构疲劳计算的新方法, 在焊接结构疲劳分析中被广泛采用, 并取得了良好效果^[1-2]. 该方法以等效结构应力为核心参量, 实现了以一条 S-N 曲线计算不同载荷模式和焊接形式结构的疲劳寿命^[3]. 对于焊接结构疲劳可靠性研究人员而言, 在进行不同材料、不同工艺方法的疲劳试验研究过程中, 围绕如何根据试验结果归纳总结出哪些修正参量对评估结果影响较大, 如何才能拟合与实际情况更为接近的 S-N 曲线等问题, 国内外学者进行了相关的试验和方法的研究^[4-6]. 针对以上问题, 文中对既有焊接试件 S-N 曲线试验数据进行梳理、分析、归纳与总结, 并收集整理了其它标准及相关资料中的焊接结构疲劳试验原始数据^[7-8]. 采用最小二乘法原理, 考虑厚度、弯曲比及多轴应力等参量的影响研究了主 S-N 曲线方程的拟合方法, 对比分析了不同拟合修正参量的主 S-N 曲线的标准差.

针对上述原始试验数据, 建立了数据库, 并开发了专用的主 S-N 曲线拟合软件, 以该软件提供的数据库为基础, 开发了计算结构应力、等效结构应

力、等效剪切结构应力及等效多轴结构应力的算法程序; 采用最小二乘法原理, 开发了主 S-N 曲线拟合程序. 通过对比不同拟合算法的标准差, 得到主 S-N 曲线方程各参数, 提高了主 S-N 曲线的拟合精度. 另外, 所开发的软件还具有完备的数据分析功能, 其专用数据分类模块, 可对不同的焊接工艺、不同的焊后处理方法及不同的板厚等参数进行对比分类, 还可用于研究不同分类形式及不同拟合算法的主 S-N 曲线方程. 该软件为研究焊接结构疲劳寿命的影响因素及计算方法提供了高效分析工具, 并取得了良好的应用效果.

1 主 S-N 曲线拟合方法

1.1 主 S-N 曲线方程

结构应力是主 S-N 曲线方程的主要参量, 在焊接结构疲劳寿命评估过程中起主要作用. 结构应力值 σ_s 等于膜应力 σ_m 与弯曲应力 σ_b 二者之和 (见图 1), σ_s 是焊趾处的总应力, σ_n 是自平衡的残余应力, 已在试验中考虑其影响^[9]. 通常在简单试件的试验过程中名义应力 σ 可以方便获得, 而结构应力值 σ_s 则需要通过结构应力集中系数 SCF 与名义应力换算获得. 结构应力集中系数 SCF 是结构应力与名义应力的比值. 当复杂结构没办法得到解析解时, 通常用有限元方法通过提取节点力及弯矩计算获得^[10].

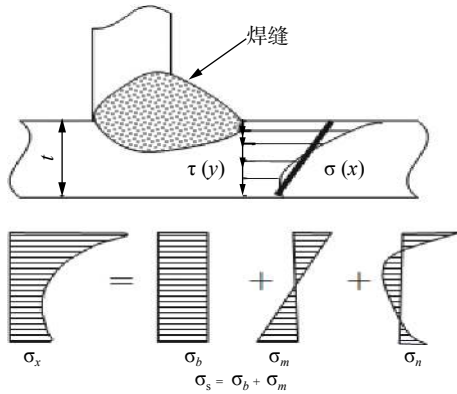


图 1 焊趾处应力分布及结构应力定义
Fig. 1 Stress distribution and structural stress definition at the weld toe

$$N = \int_{a_i/t \rightarrow 0}^{a/t=1} \frac{td(a/t)}{C(M_{kn})^n(\Delta K)^m} = \frac{1}{C} \cdot t^{1-\frac{m}{2}} \cdot (\Delta \sigma_s)^{-m} I(r) \quad (3)$$

令等效结构应力为

$$\Delta S_s = \frac{\Delta \sigma_s}{t^{(2-m)/2m} \cdot I(r)^{1/m}} \quad (4)$$

式中: $I(r)$ 为载荷弯曲度比 r 的无量纲函数; $m = 3.6$; ΔS_s 为等效结构应力变化范围. 由上式 (2) ~ 式 (4) 可得出主 S-N 曲线方程如下

$$N = (\Delta S_s / C_d)^{1/h} \quad (5)$$

式中: C_d , h 为通过试验数据拟合的主 S-N 曲线常数.

$$\Delta S_s = \frac{1}{F(\delta)} \left[\left(\frac{\Delta \sigma_k}{t^{(2-m)/2m} \cdot I_r^{1/m} \cdot f_{M,k}} \right)^2 + 3 \left(\frac{\Delta \tau_k}{t^{(2-m)/2m} \cdot I_r^{1/m}} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (8)$$

式中: $F(\delta)$ 为正弦载荷模式下结构应力 $\Delta \sigma_k$ 和剪切结构应力 $\Delta \tau_k$ 相位差的函数; $m = 3.6$ 表示 S-N 曲线斜率; $f_{M,k}$ 代表平均应力修正系数.

(4) 初始裂纹修正可以采用考虑初始裂纹长度对焊接结构疲劳寿命影响的表达式子 $I(r)^{1/m}$ 进行修正.

在软件中添加了上述修正参量对应的修正算法, 因此在疲劳评估过程中可以分别考虑厚度、载荷模式、应力比、多轴应力及初始裂纹等对疲劳寿命的影响, 同时也可以综合考虑这些影响因素.

1.3 最小二乘法主 S-N 曲线拟合

根据疲劳试验数据进行 S-N 曲线的拟合, 软件采用目前通用的最小二乘法进行数据统计分析. 利用最小二乘法可以方便获得未知参量, 并使得所求得的数据与实际测试数据之间误差的

结构应力集中系数为

$$SCF = \frac{\sigma_s}{\sigma} \quad (1)$$

Dong 等人^[11] 基于 Paris 公式, 采用包含膜应力与弯曲应力的应力强度因子表达式, 推导了主 S-N 曲线方程式.

$$da/dN = C(M_{kn})^n(\Delta K_n)^m \quad (2)$$

式中: a 为裂纹长度; N 为循环次数; C 为试验常数; n, m 由典型裂纹的试验数据确定; ΔK 为应力强度因子范围; M_{kn} 为焊趾缺口导致的应力强度因子放大系数; t 为厚度; r 为载荷弯曲度比.

1.2 主 S-N 曲线修正参量

研究主 S-N 曲线修正参量, 计算各因素对其标准差的影响, 并确定合理的修正方法. 主 S-N 曲线修正参量如下.

$$(1) \text{ 厚度修正 } \Delta S_s = \frac{\Delta \sigma_s}{t^{(2-m)/2m}} \quad (6)$$

$$(2) \text{ 弯曲比修正 } \Delta S_s = \frac{\Delta \sigma_s}{I(r)^{1/m}} \quad (7)$$

(3) 多轴应力修正

平方和最小^[12-13].

软件中采用的最小二乘法拟合算法为

$$\begin{cases} \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg \Delta S_{s_i} \\ \bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \lg N_i \\ l_{xx} = \sum_{i=1}^n (\lg \Delta S_{s_i} - \bar{x})^2 \\ l_{xy} = \sum_{i=1}^n (\lg \Delta S_{s_i} - \bar{x}) \cdot (\lg N_i - \bar{y}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: N_i 为第 i 个试验样本的疲劳寿命; ΔS_{s_i} 为 i 个试验样本的等效结构应力.

定义标准差为

$$\delta = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\lg N_i - \bar{y})^2}{n-1}} \quad (10)$$

则 $S-N$ 曲线为

$$\lg N = a \pm d\delta + b \cdot \lg \Delta S_s \quad (11)$$

利用参数的对应关系 $a = \lg C_d$, $b = -m$, 将式 (11) 写成主 $S-N$ 曲线形式如下

$$N = \frac{10^{(\lg C_d \pm d\delta)}}{\Delta S_s^m} \quad (12)$$

2 软件开发

2.1 软件开发

通过上述原理及软件需求分析, 设计了程序的主要流程. 通过收集整理现有试验、相关标准及其它焊接结构疲劳试验数据, 设计了疲劳试验数据库. 以该数据库为基础, 采用面向对象的模块化开发方法, 设计开发了软件的功能模块^[14-15]. 基于上述算法原理, 以名义应力为参量, 开发了计算结构应力、等效结构应力、等效剪切结构应力及等效多轴结构应力的算法程序. 采用最小二乘法, 开发了 $S-N$ 曲线拟合算法程序, 并实现了对系统进行查询、维护、统计及分析等多种功能.

$S-N$ 曲线数据库软件的程序流程见图 2. 其中

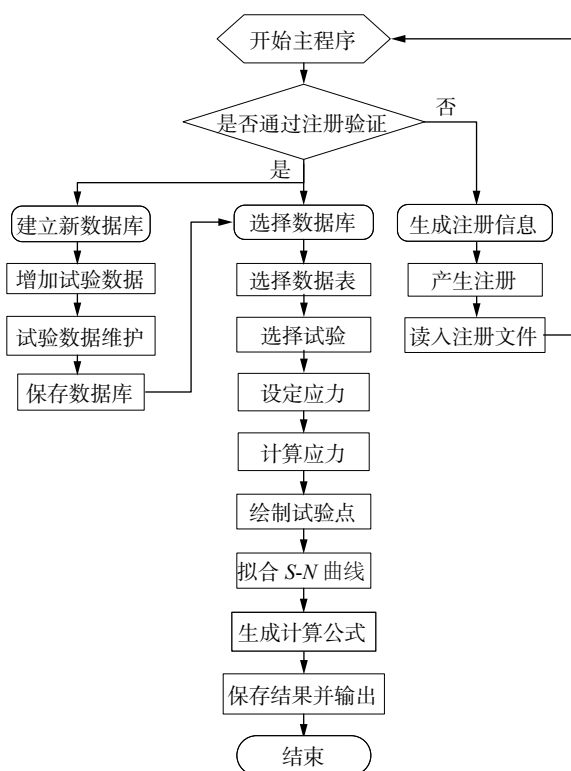


图 2 软件流程图

Fig. 2 Flow chart of the software

数据库的设计是软件开发过程中重要的环节, 对软件系统数据的维护、查询及数据的冗余都非常关键.

2.2 模块功能

软件中开发了相应的功能模块, 以实现完善的系统功能.

(1) 用户注册模块: 注册用户信息, 生成注册文件, 读入注册许可文件, 登陆软件系统.

(2) 系统主模块: 系统主界面, 提供全部系统功能菜单, 组织子功能模块, 组织数据的维护, 提供数据计算分析等功能.

(3) 数据表参考维护模块: 对所包括的各试验数据表中的试验数据来源、参考依据等项目进行增加、删除、修改等.

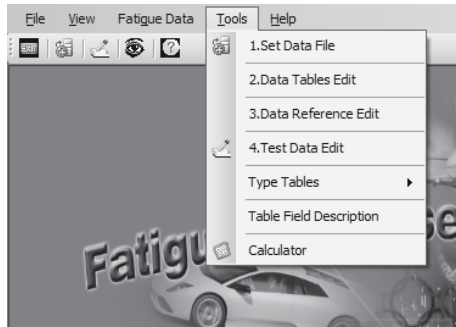
(4) 接头形式维护模块: 对数据表中各试验件的接头形式进行定义, 对试验件示意图进行对应, 对数据表中各项目进行增加、删除、修改等.

(5) 加载形式维护模块: 对数据表中各试验件的加载形式进行定义, 对加载示意图进行对应, 对数据表中各项目进行增加、删除、修改等.

(6) 试验数据维护模块: 试验件数据输入主界面, 可通过文本文件或 Excel 表文件将各数据字段导入, 可批量输入各试验项目内容; 可过滤、查询所有数据项, 可导出全部数据项, 可对各字段内容进行维护, 可对其它关联项进行快速对应. 该模块还设计了数据索引、排序等功能.

(7) 试验数据内容分析模块: 对试验数据进行统计分析, 对不同板厚、不同材料、不同焊接接头、载荷比、焊接条件等内容进行分类统计汇总.

(8) 主 $S-N$ 曲线数据生成及分析主模块: 试验数据分析及 $S-N$ 曲线数据拟合主模块, 提供对不同试验数据的分组绘制散点图, 根据最小二乘法进行不同标准差的 $S-N$ 曲线数据拟合, 得出主 $S-N$ 曲线方程. 提供了根据名义应力及应力集中系数, 进行不同应力的换算功能. 提供厚度修正、载荷比修正、载荷形式修正、缺陷修正及多轴应力修正等进行绘制主 $S-N$ 曲线的方法. 提供 ASME 标准 $S-N$ 曲线数据与数据库中的试验数据对比的功能, 具有根据应力计算寿命或根据寿命计算应力的功能, $S-N$ 曲线方程、试验数据及 $S-N$ 曲线图输出功能等功能. $S-N$ 试验数据及拟合程序界面见图 3.

图 3 主 $S-N$ 试验数据拟合程序界面Fig. 3 Main $S-N$ test data fitting interface

3 应用实例

下面以实例说明软件的灵活性及有效性. 从试验数据中提取 446 个试件的试验数据, 其中包含对接、角接、搭接焊缝; 其中载荷模式有拉伸和 4 点弯曲, 名义应力变化范围为 50 ~ 620 MPa.

3.1 数据统计分析

试验件的厚度分布范围为 6.35 ~ 100 mm, 采用软件对数据库进行了统计, 试验件焊接过程包含了 CO_2 气体保护焊、MAG 焊及 TIG 焊等. 采用软件对数据库进行了统计, 结果如图 4 所示. 其中 a 为焊条电弧焊; b 为 CO_2 气体保护焊; c 为熔化极气体保护焊; d 为熔化极活性气体保护电弧焊; e 为手工电弧焊; f 为手工金属电弧焊; g 为焊条电弧焊; h 为非熔化极惰性气体保护焊.

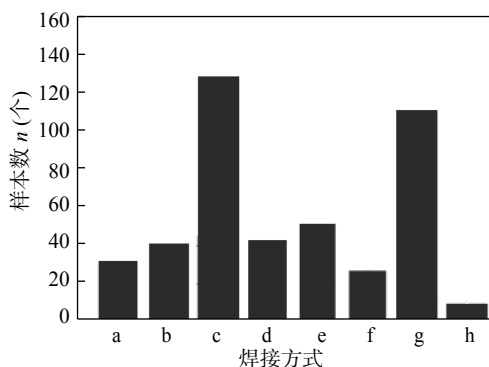


图 4 焊接处理形式统计图

Fig. 4 Statistical chart of welding processing form

试验件包括了不同的载荷比, 统计数据如图 5 所示, 其中横坐标载荷比: a 为 -1.0; b 为 -0.333; c 为 0.0; d 为 0.02; e 为 0.05; f 为 0.06; g 为 0.075; h 为 0.076; i 为 0.081; j 为 0.087; k 为 0.090; l 为 0.093; m 为 0.094; n 为 0.095; o 为 0.1; p 为 0.108; q 为 0.109; r 为 0.110; s 为 0.119;

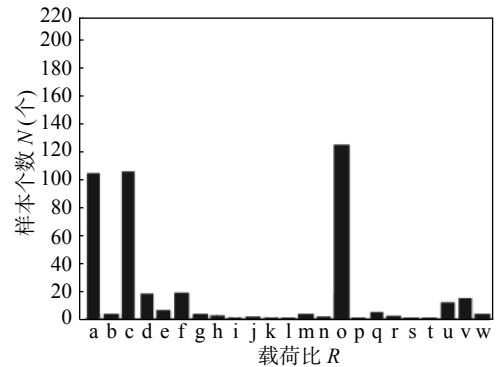


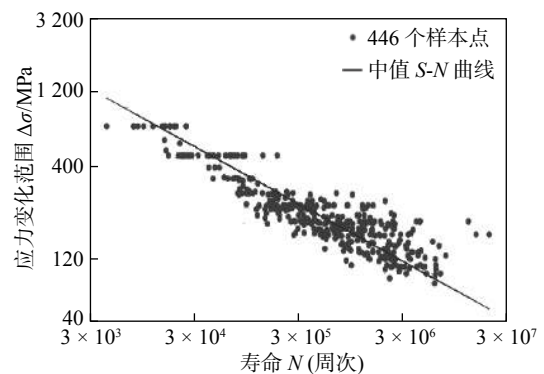
图 5 载荷比统计图

Fig. 5 Load ratio chart

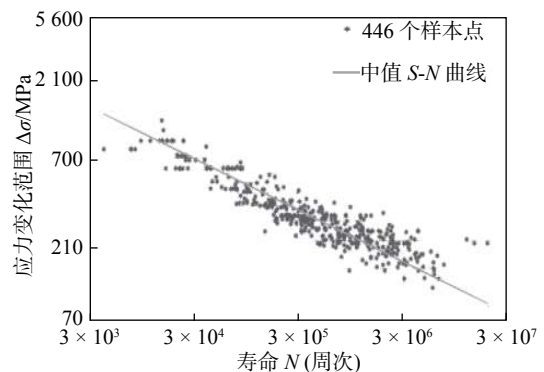
t 为 0.129; u 为 0.333; v 为 0.5; w 为 0.667.

3.2 主 $S-N$ 曲线拟合

以名义应力变化范围 $\Delta\sigma$ 为参量拟合的 $S-N$ 曲线如图 6 所示.

图 6 以名义应力拟合的 $S-N$ 曲线Fig. 6 $S-N$ curve fitted with nominal stress

以名义应力为参量, 对原始试验数据进行回归分析后的标准差为 0.299 4, 其中主 $S-N$ 曲线参数为 $C_d = 17\,228.2$, $h = 0.352\,3$. 采用式 (13) 的名义应力与厚度修正, 并拟合获得 $S-N$ 曲线如图 7 所示.

图 7 采用名义应力及厚度修正拟合的 $S-N$ 曲线Fig. 7 $S-N$ curve fitted with thickness correction and nominal stress

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta\sigma}{t^{\frac{2-m}{2m}}} \quad (13)$$

对名义应力及厚度修正, 回归分析后的标准差为 0.270 8, 其中主 $S-N$ 曲线参数为 $C_d = 21\ 731$, $h = 0.334\ 2$.

采用式 (14) 的结构应力与厚度修正, 并拟合获得 $S-N$ 曲线如图 8 所示.

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta\sigma \cdot SCF}{t^{\frac{2-m}{2m}}} \quad (14)$$

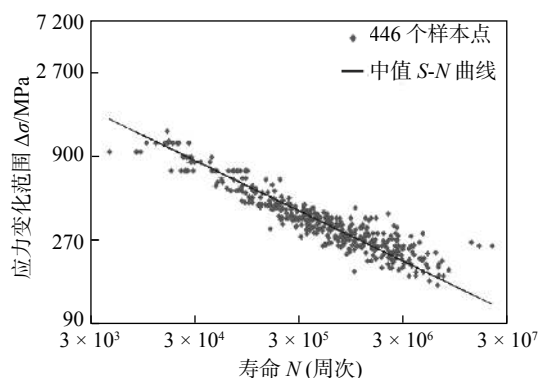


图 8 结构应力与厚度修正拟合的 $S-N$ 曲线

Fig. 8 $S-N$ curve fitted with thickness correction and structural stress

对结构应力进行厚度修正, 回归分析后的标准差为 0.248 2, 其中主 $S-N$ 曲线参数为 $C_d = 25\ 530.1$, $h = 0.325\ 9$.

采用式 (15) 的结构应力与厚度修正及载荷形式修正, 并拟合获得 $S-N$ 曲线如图 9 所示.

$$\Delta\sigma = \frac{\Delta\sigma \cdot SCF}{t^{\frac{2-m}{2m}} \cdot I(r)^{\frac{1}{m}}} \quad (15)$$

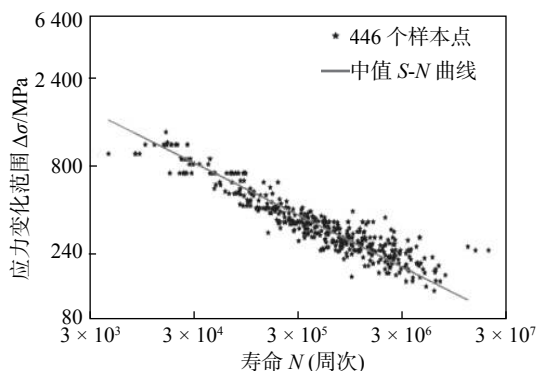


图 9 拟合的 $S-N$ 曲线

Fig. 9 Fitted $S-N$ curve

通过对结构应力进行厚度修正和载荷形式修正后拟合的 $S-N$ 曲线回归分析后的标准差为 0.248 4, 其中主 $S-N$ 曲线参数为 $C_d = 20\ 732.4$, $h = 0.326\ 0$.

通过上述不同焊接接头形式、不同厚度、不同材料的试验数据对比, 可以看出采用结构应力统计的 $S-N$ 曲线数据, 在双对数据坐标下试验数据呈线性分布, 分布带宽比采用名义应力法统计的试验数据更窄, 标准差更小, 实现了将主要影响因素融合到一条主 $S-N$ 曲线的新方法.

通过对比分析结构应力、厚度修正及载荷形式修正拟合的 $S-N$ 曲线, 结果显示采用结构应力拟合的 $S-N$ 曲线, 标准差较为接近, 说明结构应力是影响 $S-N$ 曲线的主要因素、厚度的影响次之, 而载荷形式 $I(r)$ 方程的修正对结果的影响相对较小.

通过上述实例的应用, 表明该软件可对主 $S-N$ 曲线试验数据以数据库的方法进行系统管理和维护, 方便应用与查询. 同时, 利用主 $S-N$ 曲线拟合模块, 可以根据用户的需求, 对不同的参数进行修正拟合, 分析试验结果的主要影响因素, 得到离散度更小的、精确更高的主 $S-N$ 曲线方程, 从而方便应用, 提高了寿命评估结果的准确性.

4 结论

(1) 提出了基于结构应力参量修正的主 $S-N$ 曲线拟合新方法, 该方法考虑了厚度、载荷模式、多轴应力、初始裂纹等因素对疲劳的影响, 从而使得所拟合的主 $S-N$ 曲线更准确.

(2) 基于 VC++ 编程环境, 开发了主 $S-N$ 曲线拟合程序, 实现了名义应力、结构应力、等效结构应力、等效剪切结构应力等计算功能; 通过参量修正的方法对所拟合的主 $S-N$ 曲线方程进行修正, 有效减小了主 $S-N$ 曲线拟合的离散度.

(3) 主 $S-N$ 曲线拟合软件由试验数据维护、 $S-N$ 曲线数据生成及分析、试验数据对比分析等 8 个主要功能模块组成, 各模块通过数据库进行数据交换, 实现了数据维护、数据查询、数据分析等主要功能. 应用案例表明, 该软件的开发为开展焊接结构疲劳研究提供了有效的分析工具.

参考文献

- [1] 王举金, 阳光武, 杨冰, 等. 基于结构应力法的环焊结构 $S-N$ 曲线分析 [J]. 焊接学报, 2019, 40(8): 63 - 68.
Wang Jujin, Yang Guangwu, Yang Bing, et al. $S-N$ curve analysis of ring welding based on structural stress method[J]. Transactions

- of the China Welding Institution, 2019, 40(8): 63 – 68.
- [2] 兆文忠, 魏鸿亮, 方吉, 等. 基于主 $S-N$ 曲线法的焊接结构虚拟疲劳试验理论与应用 [J]. 焊接学报, 2014, 35(5): 75 – 78.
Zhao Wenzhong, Wei Hongliang, Fang Ji, *et al.* The theory and application of the virtual fatigue test of welded structures based on the master $S-N$ curve method[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2014, 35(5): 75 – 78.
- [3] Mojgan Y, Mohammad M, Abbas S M. Master $S-N$ curve approach to fatigue prediction of breathing web panels[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 128(1): 789 – 799.
- [4] Sheafi E M, Tanner K E. Effects of specimen variables and stress amplitude on the $S-N$ analysis of two PMMA based bone cements[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 105: 119 – 127.
- [5] Ashish A, Sudath C, Siriwar D, *et al.* A new nonlinear fatigue damage model based only on $S-N$ curve parameters[J]. International Journal of Fatigue, 2017, 103: 327 – 341.
- [6] Grzegorz S, Bogdan L. Analysis of a simplified method for determining fatigue charts $\Delta S-N$ on the example of welded and soldered connectors[J]. Polish Maritime Research, 2018, 25(2): 92 – 99.
- [7] Dong P, Song S, Pei X. An IIW residual stress profile estimation scheme for girth welds in pressure vessel and piping components[J]. Welding in the World, 2016, 60(2): 283 – 298.
- [8] Xing S, Dong P, Threstha A. Analysis of fatigue failure mode transition in load-carrying fillet-welded connections[J]. Marine Structures, 2016, 46: 102 – 126.
- [9] Dong P. A structural stress definition and numerical implementation for fatigue analysis of welded joints[J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23(10): 865 – 876.
- [10] Xing S, Dong P. An analytical SCF solution method for joint misalignments and application in fatigue test data interpretation[J]. Marine Structures, 2016, 50: 143 – 161.
- [11] Dong P, Hong J K, Jesus A. Analysis of recent fatigue data using the structural stress procedure in ASME Div 2 rewrite[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2007, 129(3): 253 – 261.
- [12] Xiao Z, Feng D, Ling X, *et al.* State filtering-based least squares parameter estimation for bilinear systems using the hierarchical identification principle[J]. IET Control Theory & Applications, 2018, 12(12): 1704 – 1713.
- [13] Gould N I, Rees T, Scott J A. Convergence and evaluation-complexity analysis of a regularized Tensor-Newton method for solving nonlinear least-squares problems[J]. Computational Optimization and Applications, 2019, 73(1): 1 – 35.
- [14] Jung I H, Zhu Z, Kim J, *et al.* Recent progress on the fact sage thermodynamic database for new Mg alloy development[J]. The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society, 2017, 69(6): 1052 – 1059.
- [15] Gessert F, Wingerath W, Friedrich S, *et al.* NoSQL database systems: a survey and decision guidance[J]. Computer Science - Research and Development, 2017, 32(4): 353 – 365.

第一作者简介: 李向伟, 1968 年出生, 博士, 教授级高级工程师; 研究方向为结构强度试验与仿真; 发表论文 30 余篇; Email: xw_li@126.com.

通信作者简介: 方吉, 博士, 副教授; Email: 66199315@qq.com.

(编辑: 迟大钊)