DOI: 10.3901/JME.2019.06.032

基于非线性损伤理论的焊接疲劳设计*

薛齐文¹ 杜秀云²

(1. 大连交通大学土木工程学院 大连 116028;

2. 辽宁师范大学物理与电子技术学院 大连 116029)

摘要: 构建一种基于非线性损伤理论的焊接疲劳设计模式, 能有效地用于多级疲劳载荷作用下焊接接头的疲劳设计与分析。所构建的设计模式, 不仅考虑了多级疲劳载荷的加载次序效应, 也考虑了载荷间的相互影响。采用 Manson-Halford 累积损伤模型以及改进模型来处理加载次序效应, 以应力比的形式来体现载荷间相互作用, 利用所构建疲劳设计模式对标准焊接接头进行疲劳设计, 讨论了不同疲劳载荷加载次序以及载荷级数等因素对焊接结构疲劳设计参数应力因数的影响, 并将设计结果与基于传统 Miner 理论的设计结果进行比较。数值结果表明, 基于非线性累积损伤理论所建的焊接疲劳设计模式, 可对焊接接头的疲劳特性进行有效的设计分析, 具有较高的精度和可信度。所建焊接结构疲劳设计模式能够较好地处理载荷次序效应以及载荷间的相互影响, 且模型参数相对较少, 可应用于实际工程设计。

关键词: Manson-Halford 模型; 载荷次序效应; 疲劳设计; 应力因数

中图分类号: TG405

Fatigue Design of Welded Structure Based on the Non-linear Cumulative Damage Theory

XUE Qiwen¹ DU Xiuyun²

(1. School of Civil Engineering, Dalian Jiaotong University, Dalian 116028;

2. School of Physics and Electronic Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029)

Abstract: A welding fatigue design model is constructed based on nonlinear damage theory, which can be effectively used for fatigue design and analysis of welded joints under multi-level fatigue load. The fatigue design model considers the load sequence effect and the influence of load interaction. The Manson-Halford cumulative damage model and its improved model are used to deal with the load sequence effect. The interaction between the loads is reflected in the form of stress ration. For the fatigue design of standard welded joints, influences of stress factor caused by different loading sequences and the level of load are discussed. Numerical examples are provided to test the performance of the proposed method, by comparing with the design results based on the traditional Miner theory, and satisfactory results are achieved with higher precision and reliability. The design model can better deal with the load sequence effect and the load interaction with less model parameters, and can be applied in engineering.

Key words: Manson-Halford model; load sequence effect; fatigue design; stress factor

0 前言

随着轨道交通行业的快速发展, 轨道车辆结构中存在大量的焊接结构, 其疲劳性能研究是广大学者以及企业设计人员广泛关注的热点问题之一^[1-3]。焊接接头是焊接结构的基本单元, 焊接接头的设计是首要的设计环节, 其抗疲劳设计是焊接结构抗疲

劳设计的重要组成部分^[4]。在设计过程中, 通过疲劳寿命分析获得应力因数, 判定应力状态等级, 并结合安全需求等级, 进而确定焊缝质量等级、焊缝检验等级等, 其中应力状态等级的确认是最为关键的一步, 是疲劳设计的关键环节。如何有效地对焊接接头的疲劳强度进行评判分析, 合理地获取用于分析的疲劳应力参量, 计算获取符合实际的应力因数则是进行疲劳设计的首要任务。

在进行焊接接头疲劳寿命设计分析时, 基于 S-N 曲线并结合疲劳累积损伤理论的方法是当前主要应用的两大类方法之一^[5]。在采用该方法设计过

* 国家自然科学基金(10802015)、辽宁省自然科学基金联合基金(2015020119)和辽宁省研究生教育教学改革研究(2017)资助项目。20180418 收到初稿, 20180801 收到修改稿

程中, 对焊接接头进行疲劳寿命预测的一个关键问题是疲劳损伤累积的分析。现今焊接结构疲劳评估体系大多采用 Palmgren-Miner 线性累积损伤理论(简称 Miner 法则), 计算相对简单, 工程中应用较为广泛^[6-7]。但是 Miner 法则忽略了循环载荷的加载顺序以及载荷之间影响, 不能保证疲劳寿命的预测精度, 常常不能满足工程要求。大量的试验数据和工程实践也表明, 载荷次序效应和载荷间相互作用的影响在预测疲劳寿命时是不可以被忽略的因素。针对载荷的作用顺序不同和载荷之间的干涉作用, 众多学者进行了不少的探讨^[8-10], 取得一些成果, 但仍不能满足实际工程的需要。在采用基于 $S-N$ 曲线并结合疲劳累积损伤理论的方法设计时, 仍需要对比疲劳累积损伤规律这个重要课题做更深层次的研究, 可尝试采用非线性累积损伤理论或对 Miner 法则进行改进的方法来弥补其不足。

基于非线性累积损伤理论, 目前疲劳设计分析理论模型较多, 主要有基于损伤曲线法的非线性损伤累积理论、基于连续损伤力学的非线性损伤累积理论、基于能量法的非线性损伤累积理论、基于物理性能退化的非线性损伤累积理论、以及考虑载荷间相互作用的非线性累积损伤理论等^[11-14]。其中 MANSON 和 HALFORD 给出了材料的裂纹长度与循环比存在的关系, 以及参数的计算方法, 建立较为完整的 Manson-Halford 模型^[15-16]。该模型能较好地描述载荷次序效应, 所需材料参数较少, 可用于承载状态复杂的焊接接头疲劳寿命预测。但是该模型未考虑载荷间的相互作用, 预测精度不能得到保证。在当前考虑载荷间相互作用的相关研究中, 现有的非线性累积损伤理论模型很多是以应力比的形式来体现, 如 Freudenthal-Heller 模型、Corten-Dolan 模型等。如何合理地描述载荷作用次序效应以及载荷间的相互作用, 建立合理的疲劳分析模型, 对焊接结构中的疲劳问题给出较为准确的分析与判断, 一直是众多疲劳专家长期以来需要解决的工程难题。目前, 同时考虑载荷次序效应以及载荷间相互作用的非线性累积损伤模型还相对较少, 直接应用于疲劳设计则更为少见。

鉴于以上考虑, 针对焊接接头疲劳设计问题, 引入 Manson-Halford 累积损伤理论, 考虑载荷加载次序效应以及载荷间的相互作用, 构建基于非线性损伤理论的焊接疲劳设计模式。在多级载荷作用下, 对标准焊接接头进行疲劳设计, 并将设计结果与基于传统 Miner 理论的设计结果进行了相比。数值结果表明, 所建焊接疲劳设计模式能对焊接接头的疲劳进行有效的的设计, 能够对载荷次序效应以及载荷间的相互影

响进行较好的分析, 具有较高的精度和可信度。

1 非线性损伤模型

基于损伤曲线法的非线性损伤累积理论最早由 MARCO 和 STRAKEY 提出。MANSON 和 HALFORD 给出了指数参数的计算方法, 建立了利用损伤曲线方法得到的疲劳累积损伤模型(简称为 Manson-Halford 模型, 即 M-H 模型), 能较好地描述载荷次序效应。在该模型中, 材料裂纹长度与循环比存在以下关系^[16]

$$a = a_0 + (0.18 - a_0) \left(\frac{n_a}{N_f} \right)^{\frac{2}{3} N_f^{0.4}} \quad (1)$$

损伤 D 就可用裂纹长度和循环比函数表示, 即

$$D = \frac{1}{0.18} \cdot \left[a_0 + (0.18 - a_0) \left(\frac{n_a}{N_f} \right)^{\frac{2}{3} N_f^{0.4}} \right] \quad (2)$$

式中 n_a ——达到一定裂纹长度所需经历循环数;
 a_0 ——材料的特征缺陷长度;
 a ——材料裂纹长度;
 N_f ——载荷对应的疲劳寿命。

基于上述参数描述, 应用该损伤理论对多级载荷下非线性疲劳累积损伤进行推导。

对于二级载荷作用累积损伤如图 1 所示。假定先施加应力水平 σ_1 作用 n_1 , 然后停止施加 σ_1 , 改为施加应力水平 σ_2 , 后续作用 n_2 次, 其总的累积损伤可表示为

$$D = \frac{n_1}{N_{f1}} + \frac{n_2}{N_{f2}} \quad (3)$$

图1 二级载荷下的累积损伤

根据材料的损伤特点, 在图 1 所示的 A 和 B 处, 其损伤应该是相等的, 即 $D_A = D_B$ 。根据式(2)可以

计算得到应力水平 σ_1 作用 n_1 次对应的损伤等效于应力水平 σ_2 作用 n'_2 所对应的损伤量, 表达为

$$\frac{n'_2}{N_{f2}} = \left(\frac{n_1}{N_{f1}} \right)^{\left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}} \right)^{0.4}} \quad (4)$$

当应力水平 σ_2 作用 n_2 次后, 总的损伤量可写为

$$D = \left(\frac{n_1}{N_{f1}} \right)^{\left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}} \right)^{0.4}} + \frac{n_2}{N_{f2}} \quad (5)$$

依次类推, 对应于三级及以上载荷作用时, 其累积损伤可表示为^[17]

$$D = \left\{ \left[\left(\frac{n_1}{N_{f1}} \right)^{\left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}} \right)^{0.4}} + \frac{n_2}{N_{f2}} \right]^{\left(\frac{N_{f2}}{N_{f3}} \right)^{0.4}} + \dots + \frac{n_{i-1}}{N_{f(i-1)}} \right\}^{\left(\frac{N_{f(i-1)}}{N_{fi}} \right)^{0.4}} + \frac{n_i}{N_{fi}} \quad (6)$$

式中, 当累积损伤 D 达到临界值时, 材料发生疲劳损伤。如果各级应力水平相同, 对应的各级应力对应的疲劳寿命也相同, 式(6)就退化为线性累积损伤模型。

2 等效应力的计算

疲劳载荷多表现为随机性的不规则载荷, 先将载荷分解为若干级水平的等幅载荷, 然后计算每级水平下的疲劳损伤, 各级损伤的累积即为原不规则载荷的疲劳损伤累计。在进行疲劳设计时, 根据累积损伤来计算等效应力。

根据线性 Miner 理论, 等效应力的计算公式可由下式进行推导得出

$$D = \sum \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{N_T}{N_{eq}} \quad (7)$$

$$N_{eq} = \frac{C}{\sigma_{eq}^m} \quad (8)$$

可以得到等效应力的计算公式为

$$\sigma_{eq} = \left[\frac{\sum (n_i \sigma_i^m)}{N_T} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (9)$$

式中 D ——疲劳损伤;

σ_{eq} ——等效应力;

n_i ——分级应力循环次数;

σ_i ——各级应力值, 为应力变化范围;

m ——S-N 曲线反向斜率;

N_T ——设计要求的循环次数;

N_{eq} ——等效循环次数。

由于 Miner 累积损伤与载荷的作用先后次序是无关的, 根据式(9)计算的等效应力是与载荷次序无关的。但是众多试验表明, 损伤是与加载次序相关的。当采用先低后高的载荷加载次序时, 低载荷有训练的效应, 疲劳寿命增加; 当采用先高后低的载荷加载次序时, 高载荷有破坏效应, 裂纹提前形成, 小载荷使裂纹扩展, 疲劳寿命缩短。在疲劳设计时, 须考虑载荷次序的影响, 按照非线性累积损伤模型进行设计。

Manson-Halford 模型能够较好地考虑载荷次序的影响, 在载荷进行分级后, 根据式(6)所示的累积损伤模型, 结合式(7), 可以得到基于非线性累积损伤的计算公式^[18]

$$D = \sum D_i =$$

$$\left\{ \left[\left(\frac{n_1}{N_{f1}} \right)^{\left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}} \right)^{0.4}} + \frac{n_2}{N_{f2}} \right]^{\left(\frac{N_{f2}}{N_{f3}} \right)^{0.4}} + \dots + \frac{n_{i-1}}{N_{f(i-1)}} \right\}^{\left(\frac{N_{f(i-1)}}{N_{fi}} \right)^{0.4}} + \frac{n_i}{N_{fi}} = \frac{N_T}{N_{eq}} \quad (10)$$

相应地, 对于各级应力 $N_i \sigma_i^m = C$ 以及式(8), 其等效应力的计算公式可表示为

$$(\sigma_{eq})^m = \frac{C}{N_T} \left\{ \left[\left(\frac{n_1 \sigma_1^m}{C} \right)^{\left(\frac{N_{f1}}{N_{f2}} \right)^{0.4}} + \frac{n_2 \sigma_2^m}{C} \right]^{\left(\frac{N_{f2}}{N_{f3}} \right)^{0.4}} + \dots + \frac{n_{i-1} \sigma_{i-1}^m}{C} \right\}^{\left(\frac{N_{f(i-1)}}{N_{fi}} \right)^{0.4}} + \frac{n_i \sigma_i^m}{C} \quad (11)$$

由于 $N_{fi} = C / \sigma_i^m$, 将式(11)进一步地写为

$$(\sigma_{eq})^m = \frac{C}{N_T} \left\{ \left[\left(\frac{n_1 \sigma_1^m}{C} \right)^{\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1} \right)^{0.4m}} + \frac{n_2 \sigma_2^m}{C} \right]^{\left(\frac{\sigma_3}{\sigma_2} \right)^{0.4m}} + \dots + \frac{n_{i-1} \sigma_{i-1}^m}{C} \right\}^{\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{i-1}} \right)^{0.4m}} + \frac{n_i \sigma_i^m}{C} \quad (12)$$

可将式(12)进一步整理, 可以得到最终的等效应力计算式

$$\sigma_{eq} = \left\{ \frac{C}{N_T} \left[\left(\left(\frac{n_1 \sigma_1^m}{C} \right)^{\frac{\sigma_2}{\sigma_1} 0.4m} + \frac{n_2 \sigma_2^m}{C} \right)^{\frac{\sigma_3}{\sigma_2} 0.4m} + \dots + \frac{n_{i-1} \sigma_{i-1}^m}{C} \right] + \frac{n_i \sigma_i^m}{C} \right\}^{\frac{1}{m}} \quad (13)$$

如果将指数项定义为 a_i ，表达式如下

$$a_i = \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{i-1}} \right)^{0.4m} \quad (14)$$

式(13)可写为

$$\sigma_{eq} = \left\{ \frac{C}{N_T} \left[\left(\left(\left(\frac{n_1 \sigma_1^m}{C} \right)^{a_1} + \frac{n_2 \sigma_2^m}{C} \right)^{a_2} + \dots + \frac{n_{i-1} \sigma_{i-1}^m}{C} \right)^{a_i} + \frac{n_i \sigma_i^m}{C} \right] \right\}^{\frac{1}{m}} \quad (15)$$

式(15)给出了基于 M-H 模型的非线性累积损伤理论计算等效应力的计算公式。式中参数 C 为 $S-N$ 曲线所对应的常数，其他各参数的意义与上述各式相同。

在式(15)中，等效应力的计算只考虑了载荷次序效应，而载荷间的相互作用尚未考虑，其预测分析精度也难以得到保证。为提高分析精度，以应力比的形式来体现载荷间相互作用，利用参考文献[17]中修正的 M-H 模型方法对指数参数进行修改 a_i ，可将式(14)写为

$$a_i^* = \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{i-1}} \right)^{0.4m \cdot \min\{\sigma_{i-1}/\sigma_i, \sigma_i/\sigma_{i-1}\}} \quad (16)$$

将式(16)代入式(15)中，即可得到基于修正 M-H 模型后的等效应力计算公式

$$\sigma_{eq}^* = \left\{ \frac{C}{N_T} \left[\left(\left(\left(\frac{n_1 \sigma_1^m}{C} \right)^{a_1^*} + \frac{n_2 \sigma_2^m}{C} \right)^{a_2^*} + \dots + \frac{n_{i-1} \sigma_{i-1}^m}{C} \right)^{a_i^*} + \frac{n_i \sigma_i^m}{C} \right] \right\}^{\frac{1}{m}} \quad (17)$$

式(17)是基于修正 M-H 模型的非线性累积损伤理论计算等效应力的计算公式。在该模型中，若载荷与损伤发生变化，疲劳损伤则随之呈非线性特征进行累积；当载荷高低次序发生变化时，累积损伤也随之变化。因而利用式(17)计算得到的等效应力既考虑了载荷次序效应，又考虑了载荷间的

相互作用。

3 疲劳寿命设计

在进行疲劳寿命设计时，对于标准的焊接接头，可以直接基于名义应力进行应力状态计算。在设计分析时，最为关键的两个步是计算给定循环次数下的疲劳强度值以及疲劳载荷作用下实际发生的应力变化范围两个值。根据这两个计算值，可进一步进行强度校核、计算应力因数以及应力状态等级评估。根据上述推导，利用非线性损伤累积理论进行疲劳寿命设计时，具体步骤如下^[19]。

- (1) 计算指定循环次数下的疲劳强度值 $\Delta\sigma_{ref}$ 。根据 BS7608 标准或 IIW 文件确认接头的疲劳等级，获取 $S-N$ 曲线数据，进而求得指定寿命次数的疲劳强度值。
- (2) 计算疲劳载荷下实际发生的应力变化范围，即等效应力变化范围 $\Delta\sigma_{eq}$ 。
- (3) 根据疲劳强度值 $\Delta\sigma_{ref}$ 和等效应力变化范围 $\Delta\sigma_n$ 进行强度校核。
- (4) 由疲劳强度值 $\Delta\sigma_{ref}$ 和等效应力变化范围 $\Delta\sigma_n$ ，计算该接头的应力因数 $s = \Delta\sigma_n / \Delta\sigma_{ref}$ 。
- (5) 根据应力因数，确定应力状态的等级。

4 算例

采用文献[19]中的疲劳寿命案例，如图 2 所示结构，主板和附板厚均为 $t=10$ mm，焊角 $l=10$ mm，主板宽 $W=100$ mm。结构受变幅载荷作用，其应力等级、作用频次、设计寿命可见表 1。尝试对该接头进行疲劳寿命设计分析，计算该接头的应力因数，并确定其应力状态等级。

图 2 承受拉伸变幅载荷谱实例

表 1 焊接结构载荷谱

应力等级 i	三级载荷		四级载荷		设计寿命 $N_T / \times 10^6$
	应力水平 σ_i / MPa	作用次数 $n_i / \times 10^6$	应力水平 σ_i / MPa	作用次数 $n_i / \times 10^6$	
1	40.0	0.4	40.0	0.4	1.0
2	60.0	0.3	50.0	0.2	
3	70.0	0.3	60.0	0.2	
4	—	—	70.0	0.2	

对于标准接头, 其等效应力既可用名义应力计算, 也可用结构应力计算。该焊接结构为标准接头, 本文中等效应力按照名义应力进行计算分析, 根据线性和非线性累积损伤理论, 按照载荷次序由高到低和由低到高的两种情况进行设计。

按照疲劳寿命设计的步骤首先计算指定循环次数下的疲劳强度值 $\Delta\sigma_{\text{ref}}$ 。由 BS7608 标准, 该接头细节是 F2 级, 参考设计寿命是 $N_{\text{ref}} = 2.0 \times$

10^6 , 且置信度为 97.5%, 可由下述公式计算疲劳强度值

$$\lg N = \lg C_0 - d \cdot \sigma - m \lg S_r \quad (18)$$

可以求出 $\Delta\sigma_{\text{ref}} = 59.94 \text{ MPa}$ 。该值的计算与载荷次序无关, 直接由相关参数计算得到。各参数的值分别为 $d = 2.0$, $C_0 = 1.231 \times 10^{12}$, $m = 3.0$, $\lg \sigma = 0.2279$ 。

4.1 设计方案 1: 载荷先高后低次序

线性累积损伤理论按照式(9)进行计算, 非线性累积损伤理论可按照式(15)、(17)进行计算, 对于三级和四级载荷两种不同的载荷谱, 相关计算数据可见表 2、3。表中所给出的损伤值为各对应级载荷作用结束后所有已作用载荷对应的损伤累积值。

4.2 设计方案 2: 载荷先低后高次序

采用同样的分析理论和计算公式, 其计算结果不相同, 相关数据可见表 4、5。

表 2 三级载荷先高后低次序设计

等级 i	σ_i / MPa	$n_i / \times 10^6$	$N_i / \times 10^6$	$D_i (M)$	$(n_{i-1}\sigma_{i-1}^m / C)^{a_i}$	$(n_{i-1}\sigma_{i-1}^m / C)^{a_i^*}$
1	70.0	0.3	1.255 758	0.238 900	0.083 591	0.083 591
2	60.0	0.3	1.994 097	0.389 344	0.179 751	0.172 920
3	40.0	0.4	6.730 077	0.448 778	0.368 987	0.301 971
合计	—	1.0	—	0.448 778	0.368 987	0.301 971
Miner 模型			$\Delta\sigma_{\text{ref}} = 59.94$	$\Delta\sigma_{\text{eq}} = 57.82$		$s = 0.954 3$
M-H 模型			$\Delta\sigma_{\text{ref}} = 59.94$	$\Delta\sigma_{\text{eq}} = 76.87$		$s = 1.282 4$
修正 M-H 模型			$\Delta\sigma_{\text{ref}} = 59.94$	$\Delta\sigma_{\text{eq}} = 71.90$		$s = 1.199 5$

注: $D_i (M)$ 表示利用 Miner 模型计算得到损伤累积值; $(n_{i-1}\sigma_{i-1}^m / C)^{a_i}$ 表示利用 M-H 模型计算得到损伤累积值; $(n_{i-1}\sigma_{i-1}^m / C)^{a_i^*}$ 表示利用修正 M-H 模型计算得到损伤累积值, 其余各表类同。

表 3 四级载荷先高后低次序设计

等级 i	σ_i / MPa	$n_i / \times 10^6$	$N_i / \times 10^6$	$D_i (M)$	$(n_{i-1}\sigma_{i-1}^m / C)^{a_i}$	$(n_{i-1}\sigma_{i-1}^m / C)^{a_i^*}$
1	70.0	0.2	1.255 758	0.159 266	0.055 727	0.055 727
2	60.0	0.2	1.994 097	0.259 562	0.125 840	0.120 192
3	50.0	0.2	3.445 800	0.317 604	0.209 417	0.191 401
4	40.0	0.4	6.730 077	0.377 039	0.323 152	0.284 068
合计	—	1.0	—	0.377 039	0.323 152	0.284 068
Miner 模型			$\Delta\sigma_{\text{ref}} = 59.94$	$\Delta\sigma_{\text{eq}} = 54.56$		$s = 0.910 2$
M-H 模型			$\Delta\sigma_{\text{ref}} = 59.94$	$\Delta\sigma_{\text{eq}} = 73.55$		$s = 1.227 1$
修正 M-H 模型			$\Delta\sigma_{\text{ref}} = 59.94$	$\Delta\sigma_{\text{eq}} = 70.45$		$s = 1.175 3$

表 4 三级载荷先低后高次序设计

等级 i	σ_i / MPa	$n_i / \times 10^6$	$N_i / \times 10^6$	$D_i (M)$	$(n_{i-1}\sigma_{i-1}^m / C)^{a_i}$	$(n_{i-1}\sigma_{i-1}^m / C)^{a_i^*}$
1	40.0	0.4	6.730 077	0.059 435	0.020 796	0.020 296
2	60.0	0.3	1.994 097	0.209 879	0.054 476	0.057 355
3	70.0	0.3	1.255 758	0.448 778	0.113 749	0.118 688
合计	—	1.0	—	0.448 778	0.113 749	0.118 688
Miner 模型			$\Delta\sigma_{\text{ref}} = 59.94$	$\Delta\sigma_{\text{eq}} = 57.82$		$s = 0.954 3$
M-H 模型			$\Delta\sigma_{\text{ref}} = 59.94$	$\Delta\sigma_{\text{eq}} = 51.92$		$s = 0.866 2$
修正 M-H 模型			$\Delta\sigma_{\text{ref}} = 59.94$	$\Delta\sigma_{\text{eq}} = 52.67$		$s = 0.878 7$

表 5 四级载荷先低后高次序设计

等级 i	σ_i / MPa	$n_i / \times 10^6$	$N_i / \times 10^6$	$D_i (M)$	$(n_{i-1} \sigma_{i-1}^m / C)^{a_i}$	$(n_{i-1} \sigma_{i-1}^m / C)^{a_i^*}$
1	40.0	0.4	6.730 077	0.059 435	0.020 796	0.020 796
2	50.0	0.2	3.445 800	0.117 476	0.026 640	0.028 553
3	60.0	0.2	1.994 097	0.217 772	0.046 070	0.049 115
4	70.0	0.2	1.255 758	0.377 039	0.080 378	0.084 991
合计	—	1.0	—	0.377 039	0.080 378	0.084 991
Miner 模型		$\Delta \sigma_{\text{ref}} = 59.94$		$\Delta \sigma_{\text{eq}} = 54.56$		$s = 0.910\ 2$
M-H 模型		$\Delta \sigma_{\text{ref}} = 59.94$		$\Delta \sigma_{\text{eq}} = 46.25$		$s = 0.771\ 6$
修正 M-H 模型		$\Delta \sigma_{\text{ref}} = 59.94$		$\Delta \sigma_{\text{eq}} = 47.12$		$s = 0.786\ 1$

由上述两个表中的计算数据表明。

(1) 采用 M-H 模型进行设计时, 疲劳寿命设计结果与载荷加载次序密切相关, 载荷级别数越多, 影响明显。对于三级载荷, 当载荷次序由高到低时, 应力因数为 1.282 4, 根据 BS EN15085, 该接头应力等级为高, 与线性 Miner 模型设计结果一致。但是当载荷次序由低到高时, 应力因数为 0.866 2, 根据 BS EN15085, 该接头应力等级为中, 比线性 Miner 模型设计结果低一个等级。对于四级载荷, 载荷次序变化时, 应力因数的变化更为明显。

(2) 采用修正的 M-H 模型进行设计时, 同样可以得到疲劳寿命设计结果与载荷加载次序密切相关, 载荷级别数越多, 对应力因数的影响越明显。由结果可知, 修正后模型在一定程度上避免了单纯考虑载荷次序效应而引起预测精度不够情况, 是对其分析结果的修正, 以保证分析、设计的有效性。

(3) 采用 Miner 模型进行设计时, 根据 BS EN15085, 应力因数大于 0.9, 该接头应力等级为“高”。疲劳寿命设计结果与载荷加载次序无关, 这与 Miner 理论一致。

(4) 依据不同的设计理论, 设计参数应力因数结果明显不同, 可根据不同的工况及其要求选择设计理论进行设计。对于多级载荷作用, 基于 M-H 模型的设计模式能较好地考虑次序效应, 而修正的 M-H 模型可同时考虑载荷次序效应以及载荷间的相互作用影响, 给出较为可信的分析结果。

5 结论

(1) 构建了基于 Manson-Halford 模型以及非线性损伤累积理论的多级载荷作用下焊接疲劳设计新模式, 可有效进行焊接疲劳设计, 且具有一定精度。

(2) 载荷级别数越多, 对应力因数的影响越明显, 所构建的疲劳设计模式能较好地考虑多级载荷

次序效应以及载荷间的相互作用, 在一定程度上避免了单纯考虑载荷次序效应而引起分析精度不够的情况, 给出比较可信的分析结果, 保证了焊接疲劳分析设计的有效性。

(3) 所建疲劳设计模式中涉及的参数可以根据多级载荷的应力水平实现自行计算分析, 避免人为引入参数的影响, 且参数相对较少, 可直接应用于工程实际问题。

参 考 文 献

- [1] 郑松林, 梁国清, 王治瑞, 等. 考虑低幅锻炼载荷的某轿车摆臂载荷谱编制[J]. 机械工程学报, 2014, 50(16): 147-154.
ZHENG Songlin, LIANG Guoqing, WANG Zhirui, et al. Complication of automotive lower control arm spectrum based on the low-amplitude training load[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(16): 147-154.
- [2] 李广全, 刘志明, 王文静, 等. 高速动车组齿轮箱疲劳裂纹机理分析研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(2): 99-105.
LI Guangquan, LIU Zhiming, WANG Wenjing, et al. Fatigue crack mechanism study on high-speed EMU gearbox[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(2): 99-105.
- [3] 王文静, 惠晓龙, 马纪军. 高速列车设备舱支架疲劳裂纹机理研究[J]. 机械工程学报, 2015, 51(6): 142-147.
WANG Wenjing, HUI Xiaolong, MA Jijun. Fatigue crack mechanism research on high speed train equipment cabin frame[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(6): 142-147.
- [4] British Standard Institute. BS 7608-2014+A1-2015 Fatigue design and assessment of steel structures[S]. London: BSI, 2015.
- [5] 李晓峰, 谢素明, 时慧焯, 等. 车辆焊接结构疲劳寿命评估方法研究[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(3): 74-78.
LI Xiaofeng, XIE Suming, SHI Huizhuo, et al. Study on the analysis method for fatigue life prediction of vehicle

- welded structure[J]. China Railway Science, 2007, 28(3): 74-78.
- [6] 田军, 刘志明, 何如. 动车铝合金车体焊接接头非线性疲劳累积损伤模型[J]. 铁道学报, 2012, 34(3): 40-43.
TIAN Jun, LIU Zhiming, HE Ru. Nonlinear fatigue-cumulative damage model for welded aluminum alloy joint of EMU[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(3): 40-43.
- [7] 谢素明, 周晓坤, 李向伟, 等. 基于美国 ASME 标准的重载货车车体焊缝疲劳寿命预测[J]. 计算力学学报, 2012, 29(1): 129-134.
XIE Suming, ZHOU Xiaokun, LI Xiangwei, et al. Fatigue life prediction for weld line in heavy freight carbody based on ASME standard[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2012, 29(1): 129-134.
- [8] YUAN R, LI H, HUANG H, et al. A new non-linear continuum damage mechanics model for fatigue life prediction under variable loading[J]. Mechanics, 2013, 19(5): 506-511.
- [9] DATTOMA V, GIANCANE S, NOBILE R, et al. Fatigue life prediction under variable loading based on a new non-linear continuum damage mechanics model[J]. International Journal of Fatigue, 2006, 28(2): 89-95.
- [10] 王旭亮, 聂宏. 考虑载荷加载顺序的模糊 Miner 理论研究[J]. 中国机械工程, 2008, 19(22): 2725-2728.
WANG Xuliang, NIE Hong. Study on fuzzy miner's rule considering load sequence[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(22): 2725-2728.
- [11] 黄洪钟, 朱顺鹏, 汪忠来, 等. 基于剩余强度衰减退化的非线性累积损伤准则及其可靠性定寿[J]. 应用基础与工程科学学报, 2011, 19(2): 323-334.
HUANG Hongzhong, ZHU Shunpeng, WANG Zhonglai, et al. Nonlinear fatigue damage cumulative rule based on strength degradation and its application to fatigue life reliability analysis[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2011, 19(2): 323-334.
- [12] ZHU S, HUANG H, HE L, et al. A generalized energy-based fatigue-creep damage parameter for life prediction of turbine disk alloys[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 90(90): 89-100.
- [13] GOLOS K, ELLYIN F. A total strain energy density theory for cumulative fatigue damage[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 1988, 110(1): 36-41.
- [14] GAO H, HUANG H, LV Z, et al. An improved Corten-Dolan's model based on damage and stress state effects[J]. Journal of Mechanical Science & Technology, 2015, 29(8): 3215-3223.
- [15] MARCO S, STARKEY W. Starkey. A concept of fatigue damage[J]. Transaction of the ASME, 1954, 76: 627-632.
- [16] MANSON S, HALFORD G. Practical implementation of the double linear damage rule and damage curve approach for treating cumulative fatigue damage[J]. International Journal of Fatigue, 1981, 17(2): 169-192.
- [17] 高会英. 复杂应力状态下焊接接头的疲劳寿命预测方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2016.
GAO Huiying. Research on fatigue life prediction methods of welded joints under complex stress states[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2016.
- [18] GAO H, HUANG H, ZHU S, et al. A modified nonlinear damage accumulation model for fatigue life prediction considering load interaction effects[J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014(1): 164378.
- [19] 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, 2017.
YAO Wenzhong, LI Xiangwei, DONG Pingsha. Theory and method of anti fatigue design of welding structure[M]. Beijing: China Machine Press, 2017.

作者简介: 薛齐文, 男, 1976 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为数值分析以及疲劳强度计算。

E-mail: xueqiwen@djtu.edu.cn

杜秀云(通信作者), 女, 1976 年出生, 博士, 讲师, 硕士研究生导师。主要研究方向为数值计算。

E-mail: duxiuyun@sohu.com