

基于非线性连续疲劳损伤的激光熔覆构件 疲劳寿命评估

华 亮^{1,2} 田 威³ 廖文和¹ 曾 超³

¹南京航空航天大学理学院, 江苏 南京 211106

²南京铁道职业技术学院动力工程学院, 江苏 南京 210031

³南京航空航天大学机电学院, 江苏 南京 210016

摘要 在考虑裂纹闭合效应及熔覆残余拉应力对疲劳损伤影响的情况下,对Chaboche提出的非线性连续疲劳累积损伤模型进行了修正,得到了激光熔覆试件疲劳寿命评估模型,并由激光熔覆试件对称循环拉压疲劳试验、静拉伸试验、残余拉应力检测等试验数据得出了修正模型的相关参数。通过二级加载(高低加载和低高加载)拉压疲劳试验对寿命评估模型进行了验证,结果表明模型计算值和试验值吻合良好,证明修正后的模型能够准确预测激光熔覆试件的疲劳寿命。

关键词 激光技术; 激光熔覆; 疲劳累积损伤; 裂纹闭合; 寿命评估

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0903006

Fatigue Life Evaluation for Laser Cladding Component Based on Non-Linear Continuum Fatigue Damage Model

Hua Liang^{1,2} Tian Wei³ Liao Wenhe¹ Zeng Chao³

¹College of Science, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 211106, China

²College of Power Engineering, Nanjing Institute of Railway Technology, Nanjing, Jiangsu 210031, China

³College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China

Abstract Chaboche's model of nonlinear continuum fatigue damage is modified based on the impact of crack closure and residual tension stress of laser cladding effect on fatigue damage. A cumulative fatigue damage model is developed accordingly to predict the fatigue life for laser cladding component. The related parameters are concluded from fully reversed fatigue experiment and static tension test and residual tension stress test. To verify the proposed model, tension-compression fatigue tests under two stage loadings (high-low loading and low-high loading) are carried out. The results show that the calculated value and experimental value are in good agreement. It has been proved to be an efficient method to predict the fatigue life of the laser cladding component.

Key words laser technique; laser cladding; fatigue cumulative damage; crack closure; life evaluation

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引 言

随着经济的飞速发展和人口的迅猛增长,各种资源的匮乏越来越严重,因此节约能源的迫切性日益彰显,而再制造技术就是节约资源的一种行之有效的方法,再制造产品的成本只是新品的50%,可节能60%,节材70%^[1]。

收稿日期: 2015-03-25; 收到修改稿日期: 2015-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(51105205)、江苏省高级访问工程师项目(2014FG060)

作者简介: 华 亮(1979—),男,博士研究生,讲师,主要从事激光熔覆、寿命评估方面的研究。E-mail: hua672@163.com

导师简介: 廖文和(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事数字化设计制造技术方面的研究。

E-mail: cnwho@nuaa.edu.cn

激光熔覆技术是实现再制造工程的重要技术之一,由于其熔覆层与基体易形成冶金结合、熔覆层组织细化、稀释率低、表面硬度和耐磨性优良,尤其适合金属零部件(如汽车发动机、飞机发动机叶片等)的再制造,具有广泛的应用前景^[2-6]。

结构疲劳寿命评估长期以来一直是相关行业的一个技术热点,在激光熔覆领域,国内外学者虽然对激光熔覆试件的疲劳寿命进行了研究^[7-11],但他们的研究主要基于试验分析,缺乏理论推导。这些学者的研究成果对于激光熔覆技术的推广应用具有非常积极的意义,但不足之处是没有对激光熔覆产品疲劳寿命的定量表述做进一步的研究。

研究表明,裂纹闭合可以显著阻止疲劳裂纹的扩展,故而能够增强易于疲劳断裂的材料和结构的损伤容限特性^[12],忽视裂纹闭合效应往往会导致过度保守的寿命估计,从而引起不必要的材料及经济损失,因此寿命评估分析时应考虑裂纹闭合效应对疲劳损伤的影响,以提高寿命评估模型的准确性与经济性,而准确与经济对再制造构件的疲劳寿命评估而言更具有非凡意义。

Chaboche 等^[13-17]提出的疲劳损伤模型由于考虑了疲劳极限以下应力造成的损伤、加载顺序及平均应力的影响,且模型参数易于获取,因此获得了较为广泛的应用。但该模型没有考虑裂纹闭合效应对损伤及寿命的影响,本文在考虑裂纹闭合效应及残余拉应力对激光熔覆试件疲劳累积损伤影响的基础上,对 Chaboche 的模型进行修正,并通过激光熔覆构件拉压疲劳试验获得相关参数,利用二级应力疲劳试验结果验证修正模型的正确性,以期获得更精确的疲劳寿命评估模型,提高再制造构件疲劳寿命预测的可靠性及经济性。

2 非线性疲劳累积损伤模型修正

Chaboche 提出的非线性连续疲劳累积损伤模型形式如下^[13]:

$$dD = f(\sigma_{\max}, \sigma_m, D) dN \quad (1)$$

对于单轴疲劳问题,Chaboche 建议,损伤与疲劳载荷作用次数的关系可表示为

$$dD = [1 - (1 - D)^{\beta+1}]^{\alpha} \left[\frac{\sigma_a}{M_0(1 - b\sigma_m)(1 - D)} \right]^{\beta} dN \quad (2)$$

(1)、(2)式中 D 是损伤变量, N 是疲劳载荷作用次数, σ_{\max} 是最大应力, σ_a 是应力幅, σ_m 是平均应力, β 、 M_0 、 b 是与材料相关的参数, α 是与损伤及载荷都有关的参数。

Dattoma 等^[17]建议 α 表示为:

$$\alpha = 1 - \frac{1}{H} \left\langle \frac{\sigma_{\max} - \sigma_R}{\sigma_b - \sigma_{\max}} \right\rangle^a \quad (3)$$

式中若 $x > 0$, $\langle x \rangle = x$; 若 $x \leq 0$, 则 $\langle x \rangle = 0$ 。 σ_R 为材料对应应力比 R 下的疲劳极限, σ_b 为材料强度极限, H 和 a 为实验常数,对金属材料, Dattoma 建议取 $H = 0.0801$, $a = 0.434$ 。

2.1 裂纹闭合对疲劳损伤的影响

1970 年, Elber^[18]首次提出裂纹闭合机制,其实验结果表明,即使试样在只承受拉伸载荷的情况下,疲劳裂纹也能闭合,并提出了裂纹扩展有效因子 ξ 与载荷比 R 之间的关系式。随后国内外科研工作者对裂纹闭合现象进行了大量研究,得出了不同的裂纹扩展有效因子模型,部分模型表达式如表 1 所示。

表 1 裂纹扩展有效因子模型

Table 1 Model of crack growth effective factor

| Model | Material | Reference |
|--|------------|-----------|
| $\xi = 0.9 + 0.2R^2 - 0.4R^4, (R > 0)$ $\xi = 0.9, (R \leq 0)$ | 7075 | [19] |
| $\xi = 0.55 + 0.35R + 0.1R^2, (-1 \leq R \leq 1)$ | 2024 | [20] |
| $\xi = 0.52 + 0.42R + 0.06R^2, (R \geq 0)$ $\xi = (0.52 - 0.1R)/(1 - R), (-2 \leq R < 0)$ | 2024 | [21] |
| $\xi = 0.6684 - 2.4135R + 7.0077R^2, (0 \leq R \leq 0.5)$ | Steel 316L | [22] |
| $\xi = 0.75 + 0.3R + 0.15R^2, (-1 \leq R \leq 1)$ M | Mild steel | [23] |

考虑裂纹闭合效应后,(1)式可修正为:

$$dD_{\xi} = f[\sigma_{\max}, \sigma_m, \xi D] dN, \quad (4)$$

式中 D_{ξ} 表示考虑裂纹闭合效应的损伤, ξ 表示裂纹闭合有效因子。

进而(2)式可修正为:

$$dD_{\xi} = [1 - (1 - \xi D)^{\beta+1}]^{\alpha} \left[\frac{\sigma_a}{M_0(1 - b\sigma_m)(1 - \xi D)} \right]^{\beta} dN. \quad (5)$$

假设金属材料的初始损伤状态为 $D_0 = 0 (N = 0)$, 材料破坏时 $D = 1 (N = N_f)$, 将(5)式在 $D_{\xi} \in (0, 1)$ 间积分, 可得材料的失效疲劳寿命为:

$$N_f = \frac{1}{\xi} \frac{1}{1 - \alpha} \frac{1}{1 + \beta} \left[\frac{M_0(1 - b\sigma_m)}{\sigma_a} \right]^{\beta} [1 - (1 - \xi)^{\beta+1}]^{1-\alpha}. \quad (6)$$

2.2 模型材料参数的确定

2.2.1 激光熔覆试验材料

基体选用熔覆性能良好的 Q345R(16 MnR)钢, 熔覆粉末选用 Ni60 自熔合金, 粉末粒度为 44~105 μm 。基体及熔覆粉末主要化学成分如表 2 和表 3 所示。

表 2 Q345R 化学成分 (质量分数, %)

Table 2 Chemical component of Q345R (mass fraction, %)

| Element | C | Si | Mn | S | P |
|---------|-------------|-----------|-----------|--------------|--------------|
| Q345R | ≤ 0.20 | 0.20~0.60 | 1.20~1.60 | ≤ 0.035 | ≤ 0.035 |

表 3 Ni60 化学成分 (质量分数, %)

Table 3 Chemical component of Ni60 (mass fraction, %)

| Element | C | Cr | B | Si | Fe | Ni |
|---------|---------|-------|---------|---------|------|------|
| Ni60 | 0.6~1.0 | 14~17 | 2.5~4.5 | 3.0~4.5 | < 15 | Bal. |

熔覆前基体用丙酮清洗干净, 熔覆粉末进行烘干处理。采用 Nd:YAG 激光器进行同轴送粉单道激光熔覆试验。经反复试验获得良好冶金结合且无裂纹的熔覆参数为: 电流 $I = 210 \text{ A}$, 脉宽 $\tau = 3.5 \text{ ms}$, 频率 $f = 15 \text{ Hz}$, 扫描速度 $v = 180 \text{ mm/min}$, 送粉速率为 6 g/s , 激光束光斑直径为 2 mm , 离焦量为 $+1.5 \text{ mm}$, 采用氩气同轴保护, 流量为 10 L/min 。

2.2.2 参数确定

模型中涉及的材料强度极限和疲劳极限分别由静拉伸试验和疲劳试验确定, 试验用到的激光熔覆试件形状与尺寸如图 1 所示, 图中试件中心阴影部分为熔覆区域, 宽度为 1 mm , 熔覆深度为 0.5 mm 。

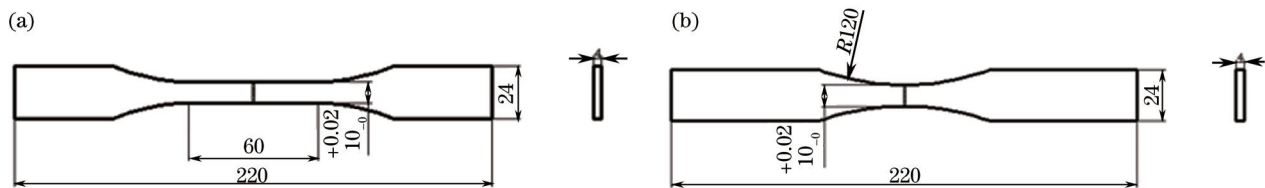


图 1 熔覆试件形状及尺寸(mm)。(a) 拉伸试件; (b) 疲劳试件

Fig.1 Shape and dimensions of cladding specimen (mm). (a) Tensile specimen; (b) fatigue specimen

静拉伸试验测得熔覆试件的强度极限为 560 MPa 。在室温和标准大气环境下采用高频疲劳试验机进行轴向拉压疲劳试验, 应力比 $R = -1$, 频率约为 100 Hz , 试验过程分为 6 级应力, 每级应力水平试验 3 根疲劳试件。由疲劳试验得到激光熔覆试件的 S-N 曲线如图 2 所示, 由之得到其疲劳极限为 69 MPa 。

激光熔覆过程产生的残余拉应力会对试件的疲劳性能造成不利影响, 考虑残余拉应力后, 平均应力可表示为^[24]:

$$\sigma_m = \sigma_{m0} + \sigma_{r\max}, \quad (7)$$

式中 σ_{m0} 表示没有残余拉应力存在时的平均应力, $\sigma_{r\max}$ 为最大残余拉应力, 经测量本次熔覆条件下试件最大残余拉应力为 315.3 MPa 。

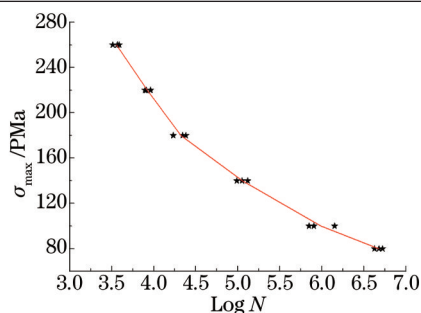


图2 Q345R 钢熔覆试件的拉压 S-N 曲线

Fig.2 S-N curve of Q345R cladding specimen

因此(6)式可进一步修正为:

$$N_f = \frac{1}{\xi} \frac{1}{1-\alpha} \frac{1}{1+\beta} \left[\frac{M_0 [1 - b(\sigma_{m0} + \sigma_{rmax})]}{\sigma_a} \right]^\beta \left[1 - (1-\xi)^{\beta+1} \right]^{1-\alpha} \quad (8)$$

利用材料抗拉强度 σ_b , 拉压疲劳极限 σ_{-1} , 不同应力水平对应的最大应力 σ_{max} 等参数, 根据(3)式可得不同应力水平对应参数 α 的值。依据(8)式和疲劳试验数据在软件 Origin 中采用自定义函数的方式进行拟合, 即可得(8)式中的各个材料参数: $\beta=5.003$, $M_0=3985.423$, $b=0.001$ 。裂纹扩展有效因子采用低碳钢的表达式, 至此修正模型中的材料参数全部确定。

3 激光熔覆试件寿命评估

(8)式计算所得寿命与疲劳试验寿命的对比如图3所示, 由图3可以看出, 修正模型的寿命曲线非常光滑, 且模型计算值和试验数据基本吻合, 说明修正模型可以较为准确地预测激光熔覆试件的疲劳寿命。

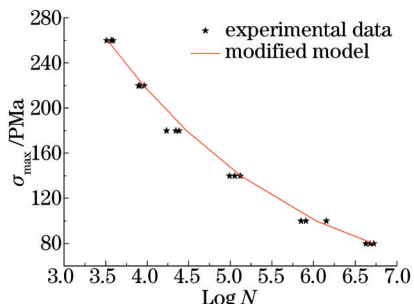


图3 疲劳寿命试验值与寿命修正模型计算值比较

Fig.3 Fatigue life of experimental data and modified model

为进一步验证模型的准确性, 对熔覆试件进行二级应力疲劳试验。试验时采用高-低及低-高两种加载方式对激光熔覆试件进行加载, 第一级应力加载一定次数后, 转换为第二级应力继续加载, 直至试件失效。此种情况下, 由于第一级载荷的作用, 第二级载荷作用时试件初始损伤不为零, 设第一级载荷作用后试件损伤为 D_n ($0 < D_n < 1$), 将(5)式在 $D_\xi \in (D_n, 1)$ 间积分并考虑残余拉应力的影响, 可得第二级载荷作用下试件疲劳寿命计算式:

$$N_{f2} = \frac{1}{\xi} \frac{1}{1-\alpha} \frac{1}{1+\beta} \left[\frac{M_0 [1 - b(\sigma_m + \sigma_{rmax})]}{\sigma_a} \right]^\beta \left\{ \left[1 - (1-\xi)^{1+\beta} \right]^{1-\alpha} - \left[1 - (1-D_\xi)^{1+\beta} \right]^{1-\alpha} \right\}, \quad (9)$$

式中 D_ξ 为考虑裂纹闭合效应后第一级载荷作用下试件的实际损伤, 可表示为

$$D_\xi = 1 - \left\{ 1 - \left[1 - (1-\xi)^{\beta+1} \right] \left[\frac{N_n}{N_f} \right]^{1-\alpha} \right\}^{\frac{1}{1+\beta}} \quad (10)$$

二级应力拉压疲劳试验采用的两级载荷为 140 MPa 和 100 MPa, 应力比 $R=-1$, 试验分两种情况: 1) 是先施加高载荷, 作用 40000 次后再转换为低载荷作用, 直至试件断裂; 2) 先施加低载荷, 作用 300000 次后, 再施加高载荷, 直至试件断裂。记录试件断裂时第二级载荷的作用次数并和(9)式计算的疲劳寿命比较, 结果表

明采用低-高载荷加载方式,模型计算结果和试验值吻合较好,两者间的误差只有 8.33%,但高-低加载方式下两者的误差高达 41.21%,即高-低加载时模型精度较差,具体结果如表 4 所示。分析其原因发现,Chaboche 非线性连续疲劳累积损伤模型考虑了加载顺序的影响,但引入裂纹闭合效应对模型修正时并没有考虑加载顺序对裂纹闭合效应的影响,因此造成不同加载方式下模型精度的差异。

研究表明,载荷作用下,疲劳裂纹顶端的后部形成一个残余延伸变形区,它使裂纹张开位移减小,因而会使裂纹面间提前接触(闭合),即表现为裂纹扩展的驱动力下降,当从一个加载块变到另一个加载块时,裂纹扩展机制会发生明显改变,裂纹扩展与阻滞效应由材料特定的微观组织特性控制^[12],即加载顺序对裂纹闭合有明显影响,为考虑载荷加载顺序对裂纹闭合效应的影响,假设两级加载疲劳试验时,第一级载荷作用次数为 n_1 ,第二级载荷作用次数为 n_2 ,第一级载荷单独作用直到试件断裂时的次数为 n_{f1} ,第二级载荷单独作用直到试件断裂时的次数为 n_{f2} ,两级加载直至试件断裂时,试件的实际损伤为 1,但试件的计算损伤 D_c 为:

$$D_c = \frac{n_1}{n_{f1}} + \frac{n_2}{n_{f2}} \quad (11)$$

实际损伤与计算损伤的差异是由于不同载荷对裂纹闭合影响程度不同造成的,因此对裂纹有效扩展因子可修正为:

$$\xi_m = \xi / D_c \quad (12)$$

ξ_m 为考虑加载顺序后的裂纹有效扩展因子。

由此第二级载荷作用下试件疲劳寿命计算(9)式可修正为:

$$N_{f2} = \frac{1}{\xi_m} \frac{1}{1-\alpha} \frac{1}{1+\beta} \left[\frac{M_0 [1 - (b\sigma_m + \sigma_{rmax})]}{\sigma_a} \right]^\beta \left\{ [1 - (1 - \xi_m)^{1+\beta}]^{1-\alpha} - [1 - (1 - D_c)^{1+\beta}]^{1-\alpha} \right\} \quad (13)$$

引入加载顺序对裂纹闭合效应的影响后,不论是高-低加载还是低-高加载,模型精度都得到较大程度的改善,高-低加载情况下,模型计算值和试验值的误差由 41.21%大幅降低为 8.69%,低-高加载情况下误差也由 8.33%降为 2.98%,具体计算结果如表 4 所示。

表 4 试验与模型预测结果对比

Table 4 Comparison between the experimental and predicted results

| Load sequence | Secondary load times | | | | Results of formula (9) | Error | Results of formula (13) | Error |
|---------------|----------------------|--------|--------|---------|------------------------|--------|-------------------------|-------|
| | 1 | 2 | 3 | Average | | | | |
| High-low | 406000 | 386000 | 357000 | 383000 | 540820 | 41.21% | 416276 | 8.69% |
| Low-high | 117000 | 123000 | 119000 | 120000 | 110001 | 8.33% | 123576 | 2.98% |

4 结 论

1) 对 Q345R 钢熔覆 Ni60 合金试件在室温大气环境下进行了对称循环拉压疲劳试验,得到了其轴向拉压疲劳 S-N 曲线。

2) 考虑裂纹闭合效应及熔覆残余拉应力对损伤影响的情况下对 Chaboche 提出的非线性连续疲劳累积损伤模型进行了修正,并利用实验数据得出了模型中的相关参数。

3) 由修正后的非线性连续疲劳累积损伤模型得到了熔覆试件疲劳寿命评估模型,并在考虑加载顺序对裂纹闭合效应影响的情况下,对寿命评估模型进行了进一步修正,二级加载疲劳试验结果表明该模型计算结果和试验结果吻合很好,即二次修正后的模型能够比较准确地预测激光熔覆试件的疲劳寿命。

参 考 文 献

1 Xu Binshi. Remanufacture engineering and its development in China[J]. China Surface Engineering, 2010, 23(2): 1-6.
徐滨士. 中国再制造工程及其进展[J]. 中国表面工程, 2010, 23(2): 1-6.

2 Díaz E, Amado J M, Montero J, et al.. Comparative study of Co-based alloys in repairing low Cr-Mo steel components by laser cladding[J]. Physics Procedia, 2012, 39: 368-375.

3 Leunda J, Soriano C, Sanz C, et al.. Laser cladding of vanadium-carbide tool steels for die repair[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 345-352.

- 4 Feng Hui, Li Jianfeng, Sun Jie. Study on remanufacturing repair of damaged crank shaft journal surface by laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0803003.
封 慧, 李剑锋, 孙 杰. 曲轴轴颈损伤表面的激光熔覆再制造修复[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0803003.
- 5 Li Kaibin, Li Dong, Liu Dongyu, *et al.*. Research of fiber laser cladding repairing process with wirefeeding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1103006.
李凯斌, 李 东, 刘东宇, 等. 光纤激光送丝熔覆修复工艺研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1103006.
- 6 Chen Lie, Tao Ran, Liu Dun, *et al.*. Analysis and control of the cracking tendency on helical tooth surface during laser cladding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(11): 1103005.
陈 列, 陶 然, 刘 顿, 等. 斜齿面激光熔覆的开裂倾向分析及控制研究[J]. 中国激光, 2014, 41(11): 1103005.
- 7 Ganesh P, Moitra A, Tiwari P. Fracture behavior of laser-clad joint of stellite 21 on AISI 316L stainless steel[J]. Materials Science and Engineering A, 2010, 527(16): 3748-3756.
- 8 Shi D S, Qian C L, Milan B. Effect of laser clad repair on the fatigue behaviour of ultra-high strength AISI 4340 steel[J]. Materials Science & Engineering A, 2014: 46-57.
- 9 Zhao Wenyu, Liu Fenggui, Li Zhuguo, *et al.*. Study on high-cycle fatigue behavior of laser-cladding stellite6 on 17-4 PH stainless steel[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(10): 1003014.
赵文雨, 芦凤桂, 李铸国, 等. 17-4 PH 不锈钢表面激光熔覆 stellite6 合金涂层高周疲劳行为研究[J]. 中国激光, 2014, 41(10): 1003014.
- 10 Xu Liang, Hui Li, Hu Fangyou, *et al.*. Effecting factors on fatigue performance of aluminum alloy by surface laser cladding[J]. Journal of mechanical strength, 2005, 27(3): 399-401.
许 良, 回 丽, 胡芳友, 等. 表面熔覆铝合金疲劳性能的影响因素[J]. 机械强度, 2005, 27(3): 399-401.
- 11 Wang Cheng, Lai Zhilin, An Zhibin, *et al.*. Properties improvement of laser cladding TC4 Titanium alloy by laser shock processing [J]. Journal of Jiangsu University, 2013, 34(3): 331-334.
汪 诚, 赖志林, 安志斌, 等. 激光冲击强化对熔覆后 TC4 钛合金性能的提高[J]. 江苏大学学报, 2013, 34(3): 331-334.
- 12 Wang Guangzhong. Material Fatigue (Second Edition) [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999.
王光中. 材料的疲劳(第二版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.
- 13 Chaboche J L, Lesne P M. A non-linear continuous fatigue damage model[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 1988, 11(1): 1-17.
- 14 Giancane S, Nobile R, Panella F W, *et al.*. Fatigue life prediction of notched components based on a new nonlinear continuum damage mechanics model[J]. Procedia Engineering, 2010, 2(1): 1317-1325.
- 15 Lin Jiewei, Zhang Junhong, Zhang Guichang, *et al.*. Study on fatigue damage of aero-engine blade based on non-linear continuum damage model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(18): 66-70.
林杰威, 张俊红, 张桂昌, 等. 基于连续非线性损伤的航空发动机叶片疲劳研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(18): 66-70.
- 16 Lin Youzhi, Fu Gaosheng, Li Lei, *et al.*. Study on non-linear fatigue damage engineering model for titanium alloy[J]. Journal of Ship Mechanics, 2013, 17(11): 1300-1308.
林有智, 傅高升, 李 雷, 等. 钛合金非线性疲劳损伤工程模型研究[J]. 船舶力学, 2013, 17(11): 1300-1308.
- 17 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.
- 18 Elber W. Fatigue crack closure under cyclic tension[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1970, 2: 37-45.
- 19 Newman J C, Wu X R, Swain M H, *et al.*. Small-crack growth and fatigue life predictions for high-strength aluminium alloys Part II: Crack closure and fatigue analyses[J]. Fatigue Fracture of Engineering Materials Structures, 2000, 23(1): 59-72.
- 20 Schijve J. Some formulas for the crack opening stress level[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1981, 14(3): 461-465.
- 21 Meggiolaro M A, De C J T P. On the dominant role of crack closure on fatigue crack growth modeling[J]. International Journal of Fatigue, 2003, 25(9): 843-854.
- 22 Singh P J, Mukhopadhyay C K, Jayakumar T, *et al.*. Understanding fatigue crack propagation in AISI 316 (N) weld using Elber's crack closure concept: Experimental results from GCMOD and acoustic emission techniques[J]. International Journal of Fatigue, 2007, 29(12): 2170-2179.
- 23 Kumar R, Singh K. Influence of stress ratio on fatigue crack growth in mild steel[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1995, 50(3): 377-384.
- 24 Teng T L, Chang P H. Effect of residual stresses on fatigue crack initiation life for butt-welded joints[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2004, 145(3): 325-335.