DOI: 10.3901/JME.2015.10.086

低周疲劳过程损伤变量的复合分析法和三阶段损伤演化模型*

吴健栋¹ 蔡志鹏¹ 汤之南¹ 李克俭¹ 王 梁¹
潘际銮¹ 霍 鑫² 许晓进²

(1. 清华大学机械工程系 北京 100084; 2. 上海电气电站设备有限公司上海汽轮机厂 上海 200240)

摘要: 采用疲劳损伤力学的方法分析 NiCrMoV 钢核电汽轮机低压焊接转子 1:1 模拟件接头低周疲劳过程, 针对损伤变量表征方法中的弹性模量法和应力幅值法应用的局限性, 并考虑循环前期循环软化造成的材料的损伤, 提出适用于循环软化材料的低周疲劳全过程损伤变量表征的复合分析法, 提高了疲劳过程各阶段材料损伤测量的准确性; 提出低周疲劳损伤过程的三阶段损伤模型, 将焊接接头的疲劳损伤过程分为应力松弛、微空洞和微裂纹的萌生和扩展以及宏观裂纹的萌生和扩展三个阶段, 并用于分析焊接接头的低周疲劳损伤过程。试验结果表明, 在 NiCrMoV 钢汽轮机低压焊接转子接头的低周疲劳损伤过程分析中, 采用复合分析法表征损伤变量较弹性模量法和应力幅值法更为合理, 且三阶段疲劳损伤模型能很好地反映疲劳损伤过程。

关键词: NiCrMoV; 汽轮机转子; 焊接接头; 低周疲劳; 循环软化; 损伤变量; 损伤模型

中图分类号: O7

Combination Analyzing Method to Characterize Damage Variable and Three Stage Model of Fatigue Damage in Low-cycle Fatigue

WU Jiandong¹ CAI Zhipeng¹ TANG Zhinan¹ LI Kejian¹ WANG Liang¹ PAN Jiluan¹
HUO Xin² XU Xiaojin²

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. Process Department of Turbine Works,

Shanghai Electric Power Generation Equipment Co., Ltd., Shanghai 200240)

Abstract: The fatigue damage mechanics is used to analyze the low-cycle fatigue process of 1:1 simulated sample of NiCrMoV steel nuclear turbine LP welded rotor. A combination analyzing method(CAM) is presented for the limitations of elastic modulus method(EM) and stress amplitude method(SAM) on the definition of fatigue damage variable, which considers material damage during cyclic softening and applies to low-cycle fatigue of cyclic softening materials and improves the accuracy of damage measurement of fatigue process. A new fatigue damage model—three stage model of fatigue damage(TSM-FD) is also proposed to analyze the low-cycle fatigue process of welded joint, which divides fatigue process of welded joint into three stages, as stress relaxation, initiation and propagation of micro hole and crack and initiation and propagation of macro crack. The results show that, in low-cycle fatigue analysis of NiCrMoV steel nuclear turbine LP welded rotor, CAM is more reasonable than EM and SAM to characterize damage variable, and TSM-FD can well describe the evolution of fatigue damage.

Key words: NiCrMoV; steam turbine rotor; welded joint; low-cycle fatigue; cyclic softening; fatigue damage variable; fatigue damage model

0 前言

汽轮机转子是影响电力设备发电效率和安全

性的关键构件, 长期运行在复杂交变应力的作用下。机组的启动、停止和调峰, 以及在工作条件下产生的温度梯度和载荷波动, 均有可能使转子在局部区域产生塑性变形^[1], 特别是对于调峰量和工作温度跨度较大的超超临界和高超超临界汽轮机转子。进而在塑性变形的循环作用下, 转子局部区域容易

* 甘肃省有色金属新材料重点实验室开放基金资助项目(SKL12001)。20131012 收到初稿, 20140512 收到修改稿

产生塑性应变的积累,达到一定程度后就会在局部区域产生损伤,从而降低转子所能承受的损伤余量。

利用焊接方法制造汽轮机大型转子具有制造周期短、制造成本低、重量轻、刚度大、易保证产品锻件质量等方面的优势,使得焊接转子得到越来越广泛的应用。然而,对于焊接转子而言,由于焊接热过程的复杂性,焊后接头成分分布的不均匀性和接头不同区域力学性能的不一致性,给焊接接头的损伤行为的研究造成了很大的阻碍。

利用损伤力学研究疲劳过程已经成为疲劳过程分析的一个重要分支。其中,连续介质损伤力学,因能将属于同一连续过程的疲劳裂纹的启裂和扩展统一起来而得到广泛应用^[2]。国内外很多科学家进行很多相关的研究,逐渐形成了线性疲劳损伤积累理论和非线性疲劳损伤积累理论两大理论体系。然而,大部分的研究均基于纯材料,对于焊接接头的疲劳损伤分析仍有不足^[3-4]。

本文采用疲劳损伤力学的方法,研究了 NiCrMoV 钢焊接转子模拟件接头的恒应变幅低循环疲劳过程,提出了一种适合于循环软化材料等应变幅低循环疲劳过程的损伤变量的复合分析法和疲劳损伤的三阶段损伤演化模型,并在焊接转子模拟件接头低周疲劳试验中得到验证,对深入了解焊接转子的低周疲劳失效过程具有重要的理论指导意义。

1 试验内容

本文选用 NiCrMoV 钢核电汽轮机低压焊接转子 1:1 模拟件接头,模拟件尺寸如下:外径为 2 161 mm,内径为 1 170 mm,宽为 600 mm 的环形构件,焊接方法采用氩弧焊打底,埋弧焊盖面的深窄间隙多层多道焊,坡口设计、装配、预热、焊接和焊后回火热处理等工艺均与实际产品相同。25Cr2Ni2MoV 的主要成分质量分数如表 1 所示,焊丝选用 2.5%Ni 低合金钢,化学成分符合美国标准 ASME,焊接工艺参数见表 2。

表 1 25Cr2Ni2MoV 转子钢化学成分 %

元素	C	Si	Mn	Mo	Cr
质量分数	0.22~0.28	0.15~0.35	0.70~0.90	0.75~0.95	1.70~2.00
元素	Ni	V	P	S	Al
质量分数	1.00~2.00	0.07~0.09	≤0.015	≤0.015	≤0.010
元素	Cu	Sb	Sn	As	Fe
质量分数	≤0.20	≤0.0017	≤0.017	≤0.025	余量

表 2 焊接工艺参数

焊接电流/ A	电弧电压/ V	焊接速度/ (mm/s)	预热温度/ ℃	层间温度/ ℃	焊丝直径/ mm
450~550	28~32	6~8	200	200~350	3.2

控制应变低周疲劳试验在 MTS Landmark 高频疲劳试验机上完成,载荷采用应变拉压对称三角波,应变比为 $R=-1$,应变速率为 $5 \times 10^{-3} \sim 8 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$,试验温度为 20 ℃,以最大载荷降低 80%或试样断裂作为失效判定的标准。图 1 所示为低周疲劳试验的取样示意图。

图 1 焊接转子环形模拟件及低周疲劳取样示意图

2 损伤变量的表征

针对循环软化材料的低周疲劳损伤过程,常用的损伤变量的表征方式是弹性模量法和法应力幅值法,如式(1)^[4]和式(2)^[4-5]所示

$$D = 1 - \tilde{E}/E \quad (1)$$

式中 E ——无损材料的弹性模量;

$\tilde{E}$ ——损伤为 D 时材料的有效弹性模量。

$$D = 1 - \Delta\sigma/\Delta\sigma_0 \quad (2)$$

式中 $\Delta\sigma_0$ ——损伤为零时的应力幅值;

$\Delta\sigma$ ——损伤为 D 时的应力幅值。

对于弹性模量法, 假定材料在疲劳循环之前处于无损状态, 由于材料在弹性范围内拉伸的过程中不发生损伤, 因此, 第一次循环拉伸时的弹性模量即为无损状态下材料的弹性模量 E , 可以作为后续循环损伤的基准参考点(称损伤零点)。

然而, 在弹性模量法中, 材料的弹性模量 E 的大小主要由金属原子本身性质决定, 是一个不敏感常数^[6], 当损伤量较小时, 弹性模量法要求的测量精度较高。因此, 对于损伤发展比较缓慢的循环中期阶段, 每一循环造成的损伤量是很小的, 当测量精度不高时, 用弹性模量的变化来表征损伤演化将导致很长的循环时期内损伤量基本不变, 甚至出现下降的现象。因此, 用弹性模量发表征循环疲劳的损伤, 当损伤量变化较小时, 若测量精度不高, 则会出现问题。

对于应力幅值法, 确定材料发生损伤前循环的应力幅值 $\Delta\sigma$ (也称损伤零点, 记为 $\Delta\sigma_0$)是分析疲劳损伤过程的关键, 目前主要以循环软化结束后, 达到循环稳定时(图2)出现最大应力幅值时作为损伤零点(如图3中的 $\Delta\sigma_0$), 在此之前, 材料未发生损伤。

图2 循环软化材料循环稳定示意图

图3 应力幅值法的损伤零点

这种损伤零点的定义方法, 忽略了循环软化造成材料的损伤, 那么, 在循环软化过程中, 弹性模量急剧减小就缺乏了一个合理的解释; 另一方面, 循环稳定后出现最大应力幅值本身就存在一定的模糊性, 对于没有明显的循环稳定区的材料(如25Cr2Ni2MoV钢焊接转子接头), 图4为疲劳过程应力幅值随循环次数的变化, 图4中, $\Delta\epsilon/2$ 为总应变幅值, N 为循环次数, N_f 为疲劳寿命, 由图4可知, 循环稳定后应力幅值的最大值很难准确地标定。此外, 应力幅值法是在假设 Ramberg-Osgood 硬化法则和 Masing 规律成立的前提下推导出来的, Masing 规律认为, 疲劳循环过程中, 循环迟滞回线的拉伸过程和压缩过程是对称的。然而, 压缩过程的有效承载面积和拉伸过程的有效承载面积存在差异, 压缩过程中, 有效承载面积会增大, 因此压缩过程并不能反映材料真实的损伤情况。试验结果表明, 当疲劳循环达到疲劳寿命的90%左右时, 拉伸过程和压缩过程呈现出明显的不对称性, 如图5所示。

图4 疲劳循环过程应力幅值的变化

图5 循环后期拉伸和压缩过程的不对称性

针对应力幅值法和弹性模量法在焊接转子接头的疲劳损伤分析过程中应用的局限性, 本文提出

疲劳损伤过程损伤变量的复合分析法。根据 Ramberg-Osgood 硬化法则, 在未损伤之前, 材料的拉伸应力和拉伸塑性应变之间存在如下关系

$$\varepsilon_p = \left(\frac{\sigma}{K} \right)^n \quad (3)$$

式中 ε_p ——拉伸塑性应变;

σ ——拉伸应力;

K, n ——材料常数。

根据有效应力的概念^[5], 假设材料未损伤前, 承载面积为 S , 材料在损伤 D 后, 导致面积 S_D 的材料失去承载能力, 此时, 材料的有效承载面积为 $(S-S_D)$, 如图 6 所示。

图 6 有效承载面积

有效应力 $\tilde{\sigma}$ 定义为

$$\tilde{\sigma} = F / (S - S_D) \quad (4)$$

进一步推出

$$\tilde{\sigma} = \frac{F/S}{1 - S_D/S} = \frac{\sigma}{1 - D} \quad (5)$$

式中 $\sigma = F/S$ 。

为了避免对每种缺陷和每类损伤机理都进行微观力学的分析, LEMAITRE^[5]于 1971 年提出应变等效原理: 表观应力 σ 作用在受损材料上引起的应变变量 ε 与有效应力 $\tilde{\sigma}$ 作用在无损材料上引起的应变变量等价, 即

$$\tilde{\varepsilon}(\sigma) = \varepsilon(\tilde{\sigma}) \quad (6)$$

将式(3)和(5)代入式(6)可得

$$\varepsilon_p = \left(\frac{\tilde{\sigma}}{K} \right)^n = \left[\frac{\sigma}{K(1-D)} \right]^n \quad (7)$$

假设损伤为零时, 产生 ε_p 塑性应变需要施加的应力为 σ_0 ; 损伤为 D 时, 产生 ε_p 塑性应变需要施加的应力为 σ , 则有

$$\varepsilon_p = \left(\frac{\sigma_0}{K} \right)^n = \left[\frac{\sigma}{K(1-D)} \right]^n \quad (8)$$

可以推出

$$D = 1 - \frac{\sigma}{\sigma_0} \quad (9)$$

如前所述, σ_0 很难准确定义。但如果能知道某

一循环(N_1)结束时, 材料损伤为 D_1 , 对应的拉伸应力为 σ_1 , 那么, 后续循环任意时刻, 损伤 D_N 可以表示为

$$D_N = 1 - (1 - D_1) \frac{\sigma_N}{\sigma_1} \quad (10)$$

式中 下标 N ——第 N 次循环。

由前面的分析可知, 循环初期, 损伤的增长率较高, 弹性模量也发生了显著的变化, 此时, 用弹性模量法表征损伤量是可行的。因此, 若定义疲劳试验前为损伤零点, 即可根据初始的弹性模量值 E_0 和 N_1 次循环时的弹性模量 E_1 求得该循环时的损伤量 D_1 , 即

$$D_1 = 1 - E_1/E_0 \quad (11)$$

那么, 在 N_1 次循环之前各循环阶段的损伤量 D_N 可以表示为

$$D_N = 1 - E_N/E_0 \quad (12)$$

式中 E_N ——第 N 次循环时的拉伸卸载弹性模量。

结合式(10)和式(12), 在低周疲劳试验过程中, 记录下每一循环的应力峰值和前期循环的迟滞回线(低周疲劳试验中很容易做到这点), 即可准确求得整个疲劳过程的损伤演化过程, 即

$$\begin{cases} D_N = 1 - \frac{E_N}{E_0} & 1 \leq N \leq N_1 \\ D_N = 1 - (1 - D_1) \frac{\sigma_N}{\sigma_1} & N_1 \leq N \leq N_f \end{cases} \quad (13)$$

式中 N_1 ——循环软化阶段的某一循环, 依据材料在疲劳过程中循环软化速度的快慢来选取, 一般取 $N_1=5\sim7$ 。

复合分析法既能消除循环中后期拉伸过程和压缩过程不对称对试验结果的影响, 又能有效避免损伤缓慢发展期因弹性模量变化的不敏感而出现损伤测不准的现象。同时, 此方法考虑了循环软化过程造成的材料的损伤, 合理地解释了循环初期弹性模量急剧减小的现象。复合分析法适用于循环软化或前期出现短暂循环硬化后循环软化的材料的等应变幅低循环疲劳, 是一种较为简便可靠的损伤变量的表征方法。采用复合分析法和弹性模量法求得的不同应变幅值下 25Cr2Ni2MoV 钢核电汽轮机低压焊接转子 1:1 模拟件接头低周疲劳损伤的演化过程如图 7 所示。

由图 7 可知, 采用复合分析法处理的损伤演化过程, 在循环软化阶段, 弹性模量的急剧减小和损伤的迅速发展是相对应的, 而且, 在循环中期阶段, 不会出现损伤在很长的循环阶段内保持不变甚至下

降的现象, 与损伤不可逆性的观点是一致的。

(a) 复合分析法

(b) 弹性模量法

图7 复合分析法与弹性模量法的比较

3 非线性疲劳损伤积累模型

25Cr2Ni2MoV 钢焊接转子模拟件接头在恒应变幅低循环疲劳过程中, 接头损伤的发展可分为三个阶段: 损伤迅速发展(I)、损伤发展速率较低(II)、损伤加速发展(III)。目前, 在金属材料损伤力学的研究中, 对第 II、III 阶段的损伤的演化有较多的描述, 如 Lemaitre 模型, Chaboche 模型, 王铁军、楼志文、程光旭低周疲劳模型, 杨晓华低周疲劳模型等。

张晓兵等^[7]在研究复合材料时, 提出了疲劳损伤演化主要包括两个方面的内容: 一是裂纹的扩展, 二是新裂纹的增生, 而裂纹由微观发展到宏观需要经历较长的疲劳加载过程。PLUMTREE 等^[8-9]认为疲劳损伤发展分为两个阶段, 两个阶段的疲劳损伤 $D_1(N)$ 和 $D_2(N)$ 分别由式(14)、(15)求得

$$D_1(N) = D_c [1 - \exp(-N/\alpha)^\beta] \quad (14)$$

$$D_2(N) = D_a [1 - (1 - N/N_f)^\gamma] \quad (15)$$

式中 α, β, γ ——Weibull 分布参数, 由试验得到;

D_c, D_a ——微损伤饱和时的损伤量及修正系数。

损伤演化模型为

$$D = D_c [1 - \exp(-N/\alpha)^\beta] + D_a [1 - (1 - N/N_f)^\gamma] \quad (16)$$

程光旭等^[10]也认为疲劳损伤过程可分为两个阶段, 第一阶段为应力松弛阶段, 发生在循环初期, 这部分的损伤量可以由式(14)给出; 作者采用能量耗散的热力学方法, 推导出第二阶段的损伤量和式(15)具有相同的形式, 并给出损伤演化模型和式(16)相同, 式(16)还可以表示为

$$D = D_c [1 - \exp(-\mu N/N_f)^\beta] + D_a [1 - (1 - N/N_f)^\gamma] \quad (17)$$

式中 $\mu = N_f/\alpha$ 。

笔者认为, 两阶段疲劳损伤模型反映的是材料内部微孔洞和微裂纹的形成, 是材料内部整体能量耗散的情况, 并不能表征宏观裂纹形成后, 局部应力应变严重集中情况下的疲劳损伤过程。

对于 25Cr2Ni2MoV 钢焊接转子模拟件接头, 在疲劳过程中也会经历应力松弛(I)、微孔洞和微裂纹的萌生和扩展(II)和宏观裂纹的形成和扩展(III)三个阶段。第 I 阶段的损伤量 D 可由式(14)给出; 第 II 阶段的损伤可以采用热力学的能量原理推导损伤的演化方程。在疲劳过程中, 材料的损伤都是由塑性应变的积累造成的, 低周疲劳的损伤演化规律可由耗散势函数来描述^[11-13]

$$\varphi = \frac{Y^2}{2S_0} \frac{\Delta \epsilon_p}{(1 - N/N_f)^{1-\gamma}} \quad (18)$$

式中 φ ——耗散势函数;

$\Delta \epsilon_p$ ——每个循环的积累塑性应变范围, 在低周疲劳循环过程中为常数;

S_0, γ ——常数;

Y ——与损伤量 D 相关的损伤应变能释放率。

$$Y = -\frac{\Delta \sigma_{eq}^2 R_v}{2E(1-D)^2} \quad (19)$$

式中 $\Delta \sigma_{eq}$ ——循环 Mises 等效应力;

R_v ——反映应力三轴性的量。

$$R_v = \frac{2}{3} (1 + \nu) + 3(1 - 2\nu) \left(\frac{\Delta \sigma_H}{\Delta \sigma_{eq}} \right)^2 \quad (20)$$

式中 $\Delta \sigma_H$ ——循环平均应力, 在比例加载过程中,

R_v 为常量;

ν ——泊松比。

疲劳循环过程中, 损伤率 $\dot{D}$ 可以由耗散势函数 φ 来表示^[14-15]

$$\dot{D} = -\frac{\partial \varphi}{\partial Y} \quad (21)$$

将式(18)、(19)代入式(21), 可以推出

$$\dot{D} = \frac{\Delta \sigma_{eq}^2 R_v}{2ES_0(1-D)^2} \frac{\Delta \dot{\varepsilon}_p}{(1-N/N_f)^{1-\gamma}} \quad (22)$$

根据循环应力应变关系和 Lemaitre 的应变等效性原理可得

$$\frac{\Delta \sigma_{eq}}{1-D} = K(\Delta \varepsilon_p)^n \quad (23)$$

将式(23)代入式(22)可得

$$\dot{D} = \frac{K^2 R_v}{2ES_0} \frac{(\Delta \varepsilon_p)^{2n}}{(1-N/N_f)^{1-\gamma}} \Delta \dot{\varepsilon}_p \quad (24)$$

假设在一个循环内, D 保持不变, 以每一个循环作为损伤烟花的基本单位, 对式(24)积分则有

$$\frac{\delta D}{\delta N} = \frac{K^2 R_v}{2ES_0} \frac{(\Delta \varepsilon_p)^{2n+1}}{(2n+1)(1-N/N_f)^{1-\gamma}} \quad (25)$$

式(25)对 N 积分, 并代入边界条件: $D|_{N=0} = 0$ 和 $D|_{N=N_f} = D_a$, 可得

$$D = D_a[1 - (1 - N/N_f)^\gamma] \quad (26)$$

$$D_a = \frac{K^2 R_v}{2ES_0} \frac{(\Delta \varepsilon_p)^{2n+1} N_f}{\gamma(2n+1)} \quad (27)$$

因此, 第 II 阶段微孔洞和微裂纹的萌生和扩展

的损伤可由式(26)给出。

当宏观裂纹形成以后, 在裂纹面会产生应变集中, 特别是裂纹尖端, 塑性应变大部分都集中在裂纹面附近, 此时, 疲劳损伤的发展主要表现为裂纹面的开裂。黄云云等^[16]认为局部应变积累和损伤演化的关系式为幂函数表达式

$$\frac{\delta D}{\delta N} = A(\Delta \varepsilon_p)^m \quad (28)$$

式中 A, m ——常数。

由于外加应变载荷主要集中在裂纹面上, 在低周疲劳过程中, 应变幅保持不变, 可近似认为裂纹面上每一循环的塑性应变的积累量是恒值, 即有

$$\Delta \varepsilon_p = BN \quad (29)$$

式中 B ——常数。

将式(29)代入式(28)得

$$\frac{\delta D}{\delta N} = A(BN)^m \quad (30)$$

式(30)对 N 积分, 并代入边界条件: $D|_{N=0} = 0$ 和 $D|_{N=N_f} = D_i$, 可得

$$D = D_i \left(\frac{N}{N_f} \right)^\eta \quad (31)$$

式中 η ——常数, $\eta = m+1$;

D_i ——与外加应变幅有关的常数。

$$D_i = \frac{AB^m}{m+1} N_f^{m+1} \quad (32)$$

通过以上推导分析, 可以得到疲劳损伤过程三个阶段的损伤演化过程, 如表 3 所示。

表 3 低周疲劳损伤过程的三阶段损伤模型及参数

阶段	损伤过程	损伤演化模型	参数
第 I 阶段	应力松弛(蠕变) ^[10]	$D_1(N) = D_c[1 - \exp(-\mu N/N_f)^\beta]$	D_c ; $\mu = N_f/\alpha$; $\beta = \text{const}$ ^[9]
第 II 阶段	微孔洞和微裂纹的形成和扩展	$D_2(N) = D_a[1 - (1 - N/N_f)^\gamma]$	$\gamma \propto N_f^{[12-13]}$; $D_a = \frac{K^2 R_v}{2ES_0} \frac{(\Delta \varepsilon_p)^{2n+1} N_f}{\gamma(2n+1)}$
第 III 阶段	宏观裂纹的形成和扩展	$D_3(N) = D_i(N/N_f)^\eta$	$D_i = \frac{AB^m}{m+1} N_f^{m+1}$; η

那么, 疲劳过程的总损伤量应为三个阶段损伤量之和, 整个循环过程的损伤演化模型如下

$$D = D_1(N) + D_2(N) + D_3(N) = D_c[1 - \exp(-\mu N/N_f)^\beta] + D_a[1 - (1 - N/N_f)^\gamma] + D_i(N/N_f)^\eta \quad (33)$$

由式(33)的三阶段模型和式(17)的两阶段模型拟合的损伤演化过程的对比如图 8 所示。

由图 8 可知, 三阶段疲劳损伤演化模型更能准确反映 25Cr2Ni2MoV 钢焊接转子模拟件接头低周

疲劳损伤过程。将损伤演化过程分解为 I、II、III 三个损伤阶段, 如图 9 所示。

由图 9 可知, 应力松弛阶段只在循环前几十个循环内发生, 并很快达到饱和, 达到饱和后这部分损伤不再发展; 微孔洞和微裂纹的萌生和扩展贯穿整个循环过程, 且趋于某一个饱和状态; 宏观裂纹是在循环后期阶段, 当微裂纹和微孔洞增加到一定的量时产生的, 在循环前期, 材料内部不存在宏观裂纹, 这部分损伤基本为零, 宏观裂纹产生后, 损伤迅速增加直至试件失效。各应变幅值下的损伤模

型表达式见表 4。

图 8 疲劳损伤演化两阶段模型和三阶段模型拟合结果对比

图 9 疲劳损伤演化模型三阶段损伤的分离

表 4 低周疲劳过程各应变幅值下的三阶段损伤模型表达式

应变幅值 $\Delta\epsilon/2$	三阶段损伤模型表达式
0.004	$D = 0.007\ 6[1 - \exp(-87.36\ N/N_f)^{0.6}] + 0.100\ 9[1 - (1 - N/N_f)^{2.13}] + 0.307\ 2(N/N_f)^{39.44}$
0.006	$D = 0.119\ 2[1 - \exp(-108.9\ N/N_f)^{0.6}] + 0.115\ 0[1 - (1 - N/N_f)^{2.80}] + 0.353\ 8(N/N_f)^{35.55}$
0.008	$D = 0.145\ 6[1 - \exp(-133.9\ N/N_f)^{0.6}] + 0.123\ 1[1 - (1 - N/N_f)^{3.24}] + 0.376\ 3(N/N_f)^{31.97}$
0.010	$D = 0.162\ 8[1 - \exp(-143.2\ N/N_f)^{0.6}] + 0.125\ 9[1 - (1 - N/N_f)^{3.48}] + 0.406\ 8(N/N_f)^{27.54}$

4 疲劳损伤模型参数的确定

由表 3 可知, 参数 μ 、 γ 、 D_a 、 D_i 和疲劳寿命 N_f 之间有如下关系

$$\mu = N_f / \alpha \quad (34)$$

$$\gamma \propto N_f \quad (35)$$

$$D_a = \frac{K^2 R_v (\Delta\epsilon_p)^{2n+1} N_f}{2ES_0 \gamma (2n+1)} \quad (36)$$

$$D_i = \frac{AB^m}{m+1} N_f^{m+1} \quad (37)$$

又由于疲劳寿命与塑性应变幅有如下关系

$$N_f = C' \left(\frac{\Delta\epsilon_p}{K'} \right)^\zeta \quad (38)$$

将式(38)代入式(34)~(37)可得, μ 、 γ 、 D_a 、 D_i 与塑性应变幅 $\Delta\epsilon_p$ 具有幂函数关系, 统一用式(39)表示

$$y_j = a_j \left(\frac{\Delta\epsilon_p}{2} \right)^{b_j} \quad j=1, 2, 3, 4 \quad (39)$$

式中 $y_j(j=1,2,3,4)$ —— μ 、 γ 、 D_a 和 D_i 。

拟合结果如图 10 所示。

参数 β 是常数, 由试验数据拟合得到 $\beta=0.6$ 。

关于参数 η , 当产生宏观裂纹时, 若材料内部的损

图 10 μ 、 γ 、 D_a 、 D_i 与 $\Delta\epsilon_p/2$ 关系拟合结果

伤状态相同, 则 η 为常数, 但考虑到损伤 I 和 II 阶段的影响, 应变幅子越小, 宏观裂纹萌生时的循环比(N/N_f)越高, 则损伤 III 阶段的损伤曲线越陡, η 值越大, 本文作者认为 η 与塑性应变幅 $\Delta\epsilon_p$ 呈线性关系, 见图 11。

图 11 η 与 $\Delta\epsilon_p/2$ 的关系

D_c 是损伤 I 阶段达到饱和时的损伤值, 反映材料内部应力松弛饱和度的大小, 当塑性应变幅达到一定值后, 在循环的前几十周次内才会发生 I 阶段损伤, 且应变幅值越大, D_c 越大, 如图 12 所示, 由试验数据拟合得到 25Cr2Ni2MoV 钢焊接转子接头的 D_c - $\Delta\epsilon_p/2$ 关系式如下

$$\begin{cases} D_c = 0 & \frac{\Delta\epsilon_p}{2} \leq 0.00135 \\ D_c = 0.3359 + 0.0334 \cdot \ln\left(\frac{\Delta\epsilon_p}{2} - 0.00131\right) & \frac{\Delta\epsilon_p}{2} \geq 0.00135 \end{cases}$$

图 12 D_c 与 $\Delta\epsilon_p/2$ 的关系

综上所述, 三阶段损伤模型中各参数与塑性应变幅之间的关系如表 5 所示。

表 5 低周疲劳损伤过程三阶段损伤模型参数确定

损伤阶段	关系式
第 I 阶段	$\begin{cases} D_c = 0 & \frac{\Delta\epsilon_p}{2} \leq 0.00135 \\ D_c = 0.3359 + 0.0334 \cdot \ln\left(\frac{\Delta\epsilon_p}{2} - 0.00131\right) & \frac{\Delta\epsilon_p}{2} \geq 0.00135 \end{cases}$ $\mu = 684.06 \left(\frac{\Delta\epsilon_p}{2}\right)^{0.311} \quad \beta = 0.6$
第 II 阶段	$D_a = 0.2518 \left(\frac{\Delta\epsilon_p}{2}\right)^{0.136}$ $\gamma = 15.238 \left(\frac{\Delta\epsilon_p}{2}\right)^{0.293}$
第 III 阶段	$D_1 = 0.9353 \left(\frac{\Delta\epsilon_p}{2}\right)^{0.168}$ $\eta = 41.94 - 2106.69 \left(\frac{\Delta\epsilon_p}{2}\right)$

5 结论

本文研究了 25Cr2Ni2MoV 钢焊接转子模拟件接头等应变幅值下低周疲劳循环的损伤发展过程, 针对损伤变量的弹性模量和应力幅值表征方法存在的缺点进行了改进, 提出了一个针对循环软化材料低周疲劳的、简便且准确的损伤变量的复合分析方法, 并提出了损伤发展的三阶段损伤模型, 能够很好地表征 25Cr2Ni2MoV 钢焊接转子模拟件接头等应变幅值低循环疲劳的损伤发展历程, 解决了焊接转子接头低周疲劳全过程损伤分析问题, 为连续损伤力学在焊接转子接头疲劳过程分析中的应用, 特别是寿命的预测和安全性评估, 提供了可靠的理论依据。主要结论如下。

(1) 低循环疲劳初期的循环软化造成的材料的损伤不可忽略。

(2) 材料内部的损伤过程主要包括应力松弛阶段、微孔洞和微裂纹的萌生和扩展、宏观裂纹的萌生和扩展三个阶段, 应力松弛阶段只在循环前几十个循环内发生, 并很快达到饱和; 微孔洞和微裂纹的萌生和扩展贯穿整个循环过程, 且趋于某一个饱和状态; 宏观裂纹是在循环后期阶段, 当微裂纹和微孔洞增加到一定的量时产生的。

(3) 损伤变量的复合分析法能够准确表征焊接转子模拟件接头等应变幅低循环疲劳损伤演化过程中各循环阶段的损伤量, 且本文提出的疲劳损伤过程的三阶段疲劳损伤模型能够准确地预测接头总体损伤的演化过程。

参 考 文 献

- [1] 李雅武, 李长宝, 王梅英, 等. 30Cr1Mo1V 转子钢低周疲劳性能及损伤演变规律研究[J]. 汽轮机技术, 1998, 40(3): 184-187.

- LI Yawu, LI Changbao, WANG Meiyong, et al. A study on the low cycle fatigue behavior and the evolution law of damage in 30Cr1Mo1V rotor steel[J]. Turbine Technology, 1998, 40(3): 184-187.
- [2] 张行, 赵军. 金属构件应用疲劳损伤力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- ZHANG Xing, ZHAO Jun. Applied fatigue damage mechanics of metallic structural members[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998.
- [3] 李继红, 张建勋. 断裂应变对含损伤焊接接头裂纹扩展驱动力影响的数值[J]. 焊接学报, 2004, 25(1): 53-56.
- LI Jihong, ZHANG Jianxun. Numerical study on influence of rupture strain on crack driving force of welded joints with damage[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(1): 53-56.
- [4] 郝谦, 沙鹏, 田富强, 等. 高匹配焊接接头不均匀体低周疲劳损伤研究[J]. 机械强度, 2002, 24(4): 556-557.
- HAO Qian, SHA Peng, TIAN Fuqiang, et al. Study of low cycle fatigue (LCF) damage on the mechanical heterogeneity model of overmatched welded joints[J]. Journal of Mechanical Strength, 2002, 24(4): 556-557.
- [5] LEMAITRE J. 损伤力学教程[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- LEMAITRE J. A course on damage mechanics[M]. Beijing: Science Press, 1996.
- [6] 郝谦. 低合金钢焊接接头损伤机理和损伤演变的研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2001.
- HAO Qian. A study of the mechanism and evolution on the welded joint's damage of the low-alloy steel[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2001.
- [7] 张晓兵, 魏喜龙, 宋凌云, 等. 复合材料压力容器基体开裂损伤的研究[J]. 纤维复合材料, 2008(1): 7-10.
- ZHANG Xiaobing, WEI Xilong, SONG Lingyun, et al. Study on matrix crack of composite pressure tank[J]. Fiber Composites, 2008(1): 7-10.
- [8] PLUMTREE A, SHI L. Fatigue damage evolution in off-axis unidirectional CFRP[J]. International Journal of Fatigue, 2002, 24(2-4): 155-159.
- [9] PLUMTREE A, MELO M, DAHL J. Damage evolution in a $[\pm 45]_2$ S CFRP laminate under block loading conditions[J]. International Journal of Fatigue, 2010, 32(1): 139-145.
- [10] 程光旭, 韦玮, 李光哲. 复合材料疲劳损伤演化的两阶段模型[J]. 机械工程材料, 2000, 24(5): 1-4.
- CHENG Guangxu, WEI Wei, LI Guangzhe. A general two stage model for accumulation of fatigue damage in composite materials[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2000, 24(5): 1-4.
- [11] CHABOCHE J L, LESNE P M. A non-linear continuous fatigue damage model[J]. Fatigue Fract. Engng. Mater. Struct., 1988, 11(1): 1-17.
- [12] 吕涛, 杨晓华, 李年, 等. 2Cr13 钢低周疲劳损伤演变规律研究[J]. 机械强度, 1999, 21(2): 118-121.
- LÜ Tao, YANG Xiaohua, LI Nian, et al. Low cycle fatigue damage evolution law of 2Cr13 steel[J]. Journal of Mechanical Strength, 1999, 21(2): 118-121.
- [13] 王卫国, 郑雯. 12Cr1MoV 钢低周疲劳损伤研究[J]. 材料科学与工艺, 2005, 13(2): 193-195.
- WANG Weiguo, ZHENG Wen. Research of low cycle fatigue damage of 12Cr1MoV steel[J]. Materials Science & Technology, 2005, 13(2): 193-195.
- [14] CHENG Guangxu, ZUO Jianzheng, LOU Zhiwen, et al. Continuum damage model of low-cycle fatigue and fatigue damage analysis of welded joint[J]. Engineering Fracture Mechanics, 1996, 55(1): 155-161.
- [15] 刘新东, 郝际平. 连续介质损伤力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2001.
- LIU Xindong, HAO Jiping. Continuum damage mechanics[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2001.
- [16] 黄云云, 刘康林. 超高压管道的疲劳损伤研究[J]. 福州大学学报, 2010, 38(4): 563-567.
- HUANG Yunyun, LIU Kanglin. Fatigue damage study of the ultrahigh-pressure pipe line[J]. Journal of Fuzhou University, 2010, 38(4): 563-567.

作者简介: 吴健栋, 男, 1990 年出生。主要研究方向为焊接冶金和焊接力学。

E-mail: 393884439@qq.com

蔡志鹏(通信作者), 男, 1974 年出生, 博士, 副研究员。主要研究方向为焊接冶金和焊接力学。

E-mail: czpdme@tsinghua.edu.cn