

高周疲劳和低周疲劳统一的能量表征方法研究

A Uniform Method for High Cycle Fatigue and Low Cycle Fatigue

许超, 张国栋, 苏彬

(北京航空材料研究院, 北京 100095)

XU Chao, ZHANG Guo-dong, SU Bin

(Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 对高周疲劳和低周疲劳寿命预测模型进行了研究, 提出了一种能够将高周疲劳和低周疲劳统一表征的能量形式参量。用统一的能量形式表征参量对高温合金 GH141 的 760℃高周疲劳和低周疲劳数据进行处理, 得到理想的能量-寿命方程。用 1Cr11Ni2W2MoV 钢 500℃和粉末盘材料 FGH95 的 600℃高温低周疲劳和高周疲劳数据对统一表征方法进行验证, 验证结果表明, 用能量形式的表征参量能够得到理想的能量-寿命方程。

关键词: 高周疲劳; 低周疲劳; 寿命预测; 能量表征; 高温合金

中图分类号: O346.2; V231.95 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381(2007)08-0065-04

Abstract: Based on life prediction models for high cycle fatigue (HCF) and low cycle fatigue (LCF), a new method, i. e. uniform three-parameter strain energy function, was developed to characterize combining HCF and LCF. HCF and LCF data of superalloy GH141 at 760 °C was reduced by the method, the perfect energy-life equation was acquired. Except for superalloy GH141 case, the method was also valid for processing the combining HCF and LCF data of steel 1Cr11Ni2W2MoV at 500 °C and PM superalloy FGH95 at 600 °C respectively.

Key words: high cycle fatigue; low cycle fatigue; life prediction; energy characterization; superalloy

疲劳实验通常可以通过控制应变或控制应力来进行。按照控制方式可以将疲劳分为应力疲劳和应变疲劳。材料发生了塑性变形进入屈服阶段后, 小的应力变化将引起大的变形, 此时进行疲劳实验时多采用应变控制, 材料的疲劳寿命一般比较短, 因此, 通常也叫低周疲劳。而当材料在没有进入屈服阶段前, 采用应力和采用应变都可以进行疲劳实验, 通常控制应力来进行疲劳实验, 材料的疲劳寿命一般比较长, 因此, 通常也叫高周疲劳。

目前对于高周疲劳和低周疲劳用不同的寿命模型来进行表征。等温低周疲劳寿命预测技术的研究与发展是从室温到高温, Manson-Coffin 寿命模型^[1]实现了低周疲劳寿命研究从定性研究发展到定量研究的突破, 也为高温低周疲劳寿命预测技术的发展奠定了基础。高温低周疲劳寿命不再是塑性应变范围的唯一函数, 而且与受载的时间、变形的性质(包括塑性流变和蠕变变形)以及环境因素有密切的关系^[2]。为了将 Manson-Coffin 方程推广到高温下使用, Coffin 提出了频率修正法^[3], Ostergren 提出了基于能量方法的损伤

函数法^[4]等。20 世纪 70 年代初至今, 国际航空科研部门广泛使用的是应变范围区分法(SRP)^[5], 频率分离法(FS)^[6]、应变能范围区分法(SEP)^[7]等。目前美国军用标准 MIL-HDBK-5J^[8]在处理低周应变疲劳和高周应力疲劳数据时推荐采用的方法与模型相同, 只是模型中的变量不同, 应力疲劳的变量是应力和寿命, 而应变疲劳的变量是应变和寿命。我国沿用了 Manson-Coffin 寿命模型来进行等温低周疲劳寿命估算。

应力疲劳中值 S-N 曲线的处理, 现有三参数幂函数法^[9]和美国军用标准 MIL-HDBK-5J 推荐的等效应力法。韩希鹏^[10]等对两种方法各自具有的优缺点及其适用范围作了一定研究, 并鉴于对散点法实验数据的统计值 P-S-N 曲线处理尚无权威方法, 提出了用修正的三参数幂函数法或修正的等效应力法处理统计值 P-S-N 曲线的方法, 改进了原有方法的处理效果, 拓宽其工程应用范围。

本研究试图寻找一种统一的表征参量来表征高周疲劳和低周疲劳寿命特征。应用能量法则来进行疲劳寿命的预测能够揭示疲劳损伤的本质, 具有较高的准

确性, 并且物理意义明确, 对疲劳寿命评估具有重要的实际意义^[11]。

1 三参数幂函数能量方法寿命预测模型

目前通常用疲劳寿命来将疲劳分为高周疲劳(疲劳寿命大于 10⁵ 周) 和低周疲劳(疲劳寿命小于 10⁵ 周)。采用应力控制的方式进行高周疲劳实验, 用应力参量来表征高周疲劳的寿命特征; 采用应变控制的方式进行低周疲劳实验, 用应变参量或能量参量来表征低周疲劳的寿命特征。如果能够用能量参量来表征高周疲劳的寿命特征, 那就可以将高周疲劳和低周疲劳统一起来用一个表征参量进行表征, 从而就不需将疲劳划分为高周疲劳和低周疲劳, 但能量参量表征同时需要应力和应变参量。而在进行高周疲劳实验时是通过控制应力进行的, 基于实验周期和实验手段的考虑不可能将高周疲劳改为应变控制, 因此要得到能量形式的表征参量就必须进行必要的应力和应变之间的转化。如果假设: (a) 应力控制的疲劳实验不产生蠕变变形, (b) 应变控制的疲劳实验不产生应力松弛现象, (c) 没有鲍辛格(Bauschinger) 效应。那么, 可以通过循环应力-应变曲线来进行应力和应变之间的转化。

综合 Manson-Coffin 方程、拉伸滞后能损伤函数法和 ϵ/N 曲线三参数幂函数公式的优缺点, 本工作在对三种材料的实验数据进行分析 and 研究后, 根据 David L. McDowell 和 Matthew P. Miller^[12] 提出的疲劳参量 α , 提出了高周疲劳和低周疲劳统一的三参数幂函数能量方法(3USE) 寿命预测模型

$$N_f(\Delta\alpha - \Delta\alpha_0)^m = C \tag{1}$$

$$\begin{aligned} \Delta\alpha &= \Delta\alpha_e + \Delta\alpha_{in} \\ &= \frac{\Delta\sigma \Delta\epsilon_e}{2} + f(1/n') \cdot \frac{\Delta\sigma \Delta\epsilon_{in}}{2\pi} \\ &= \frac{(\Delta\sigma)^2}{2E} + f(1/n') \cdot \frac{\Delta\sigma}{\pi} \cdot \left(\frac{\Delta\sigma}{2K}\right)^{1/n'} \end{aligned} \tag{2}$$

$$f(1/n') = 3.85 \sqrt{\frac{1}{n'}} (1 - n') + \pi n' \tag{3}$$

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = K \left(\frac{\Delta\epsilon_{in}}{2}\right)^{n'} \tag{4}$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} \tag{5}$$

式中: $\Delta\alpha$ 为疲劳参量幅值, $\Delta\alpha_0$ 为疲劳极限。 $\Delta\alpha_0, m, C$ 均为待定常数。纯疲劳时非弹性应变范围 $\Delta\epsilon_{in}$ 用 $\Delta\epsilon_p$ 代替。 E 为弹性模量, K 为循环硬化系数, n' 为循环硬化指数。

2 应用举例

在本研究中采用高温合金 GH141 的 760℃ 高温低周疲劳和高周疲劳数据对统一表征方法进行处理, 合金的 760℃ 拉伸性能见表 1。本研究中采用 $\phi 6\text{mm}$ 低周疲劳试样和 $\phi 5\text{mm}$ 的高周疲劳试样。低周疲劳数据是通过在 MTS-809 疲劳实验机上进行应变比为 1 的低周应变疲劳实验获得的, 高周疲劳数据是通过在 PLG-100C 高频疲劳实验机上进行应力比为 -1 的高周疲劳实验获得的。

表 1 GH141 合金的拉伸性能
Table 1 Tension property of superalloy GH141

$\theta/^\circ\text{C}$	σ_b/MPa	$\sigma_{b.2}/\text{MPa}$	$\delta_5/\%$	$\psi/\%$
760	990	735	16.0	21.0

2.1 低周疲劳实验结果

按照 Manson-Coffin 方法对 GH141 合金 760℃ 低周应变疲劳实验数据进行处理得到弹性应变和塑性应变, 结果如表 2 所示。从表中可以看出: 在 25 个有效实验点中只有 14 个实验点可以被用来拟合塑性应变-寿命曲线, 去掉塑性应变非常小和为负值的数据点, 只有 11 个实验点可以被用来拟合塑性应变-应力曲线, 从而来确定循环应力-应变曲线方程, 处理结果如图 1 所示。

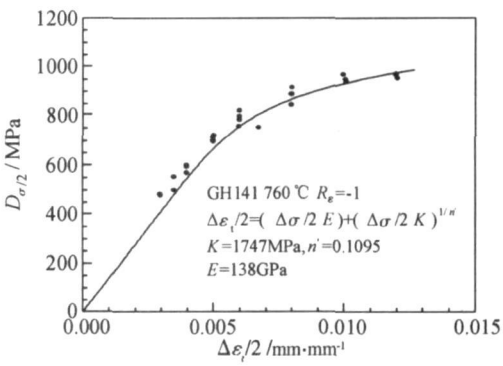


图 1 循环应力-应变曲线
Fig. 1 Cyclic stress-strain curve

2.2 高周疲劳实验结果

对高温合金 GH141 进行了 760℃ 的应力控制高周疲劳实验, 得到结果如表 3 和图 2 所示。

2.3 三参数幂函数能量方法处理结果

按照三参数幂函数能量方法对高温合金 GH141 的 760℃ 高温低周疲劳和高周疲劳数据进行整理和提取, 结果如表 4 所示。

表 2 GH141 合金的低周疲劳性能数据
Table 2 LCF property data of superalloy GH 141

$\Delta \epsilon_f / 2 / \%$	$\Delta \epsilon_c / 2 / \%$	$\Delta \epsilon_p / 2 / \%$	$\Delta \sigma / 2 / \text{MPa}$	$2N_f / \text{cycle}$	Number of specimen
1.200	0.704	0.495	972	128	1
1.007	0.688	0.319	949	416	1
0.799	0.611	0.188	843	522	1
0.674	0.544	0.129	751	1088	1
1.200	0.700	0.499	966	184	1
1.206	0.691	0.515	953	162	1
0.997	0.702	0.295	969	226	1
1.009	0.681	0.328	940	254	1
0.803	0.642	0.161	886	670	1
0.803	0.663	0.139	915	460	1
0.799	0.644	0.155	888	626	1
0.600	0.577	0.023	796	1802	1
0.601	0.595	0.005	821	1400	1
0.602	0.568	0.034	783	1508	1
0.501	0.504	-0.004	696	3824	1
0.502	0.521	-0.020	719	2938	1
0.501	0.508	-0.007	700	3596	1
0.400	0.411	-0.011	567	8342	1
0.400	0.434	-0.035	599	8110	1
0.351	0.400	-0.049	552	15308	1
0.299	0.349	-0.051	482	39370	1
0.500	0.518	-0.018	715	2728	1
0.399	0.429	-0.030	592	6314	1
0.351	0.360	-0.010	497	14930	1
0.300	0.345	-0.045	476	23974	1

表 3 GH141 合金的高周疲劳性能
Table 3 HCF property data of superalloy GH 141

$\sigma_{\max} / \text{MPa}$	N_f / cycle	$\sigma_{\max} / \text{MPa}$	N_f / cycle	$\sigma_{\max} / \text{MPa}$	N_f / cycle
640	3080	580	3000	500	21000
640	3340	580	3700	480	2022000
640	2240	540	9620	460	10000000
620	2300	540	9340		
580	4510	540	12640		

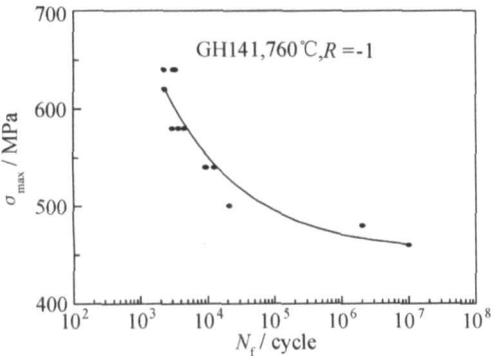


图 2 高周疲劳应力-寿命曲线

Fig. 2 Stress-life curve of high cycle fatigue

按照三参数幂函数能量方法对整理和提取得到的低周疲劳和高周疲劳数据进行处理, 得到结果如图 3 所示。从图 3 中可以看出: 三参数幂函数能量方法拟合结果较为理想。

3 验证结果

3.1 1Cr11Ni2W2MoV 验证结果

用 1Cr11Ni2W2MoV 钢的 500 °C 高温低周疲劳和高周疲劳数据对统一表征方法进行验证。统一表征方法得到的能量-寿命曲线如图 4 所示。从图可以看出:

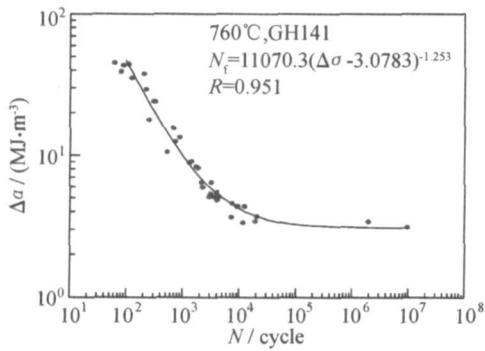


图 3 三参数幂函数能量方法得到的能量-寿命曲线
Fig. 3 Energy-life curve of LCF reduced by three-parameter energy function

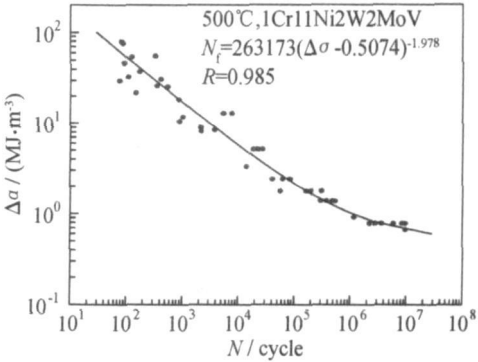


图 4 三参数幂函数能量方法得到的能量-寿命曲线
Fig. 4 Energy-life curve of LCF reduced by three-parameter energy function

表 4 三参数幂函数能量方法得到的 GH141 合金
760℃疲劳性能数据

Table 4 Property data of fatigue reduced by three-parameter energy function for superalloy GH 141 at 760 °C

$\Delta a / (MJ \cdot m^{-3})$	$N_f / cycle$	$\Delta a / (MJ \cdot m^{-3})$	$N_f / cycle$
44 7258	64	4 5176	7654
37 5697	208	3 3925	19685
17 6503	261	8 7923	1364
10 4464	544	5 2934	3157
42 8495	92	3 6156	7465
38 7700	81	3 3125	11987
43 7354	113	6 3875	3340
34 9362	127	6 3875	2240
23 6016	335	5 8981	2300
29 0897	230	5 0418	4510
23 9428	313	5 0418	3000
13 2929	901	5 0418	3700
15 4363	700	4 3068	9620
12 3935	754	4 3068	9340
8 0771	1912	4 3068	12640
8 9781	1469	3 6602	21000
8 2382	1798	3 3636	2022000
4 7829	4171	3 0826	10000000
5 4308	4055		

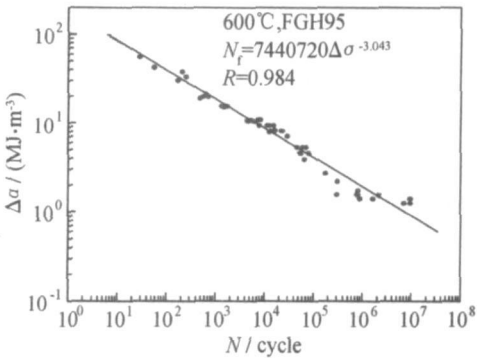


图 5 三参数幂函数能量方法得到的能量-寿命曲线
Fig. 5 Energy-life curve of LCF reduced by three-parameter energy function

4 结论

- (1) 三参数幂函数能量方法可以被用来将高周疲劳和低周疲劳统一表征。
- (2) 三参数幂函数能量方法可以得到较为理想的疲劳能量-寿命方程。
- (3) 三参数幂函数能量方法的采用将不需要将疲劳分为高周疲劳和低周疲劳, 扩展了能量-寿命方程的应用范围。

参考文献

[1] MANSON S S. A complex subject—some simple approximations [J]. J of Experiment Mechanics, 1965, 57: 193– 226.
[2] 谢济洲. 低循环疲劳手册[M]. 北京: 北京航空材料研究所, 1991. 28– 32.
[3] COFFIN L F. The effect of frequency on high temperature low-cycle fatigue [A]. In Proceedings of Air Force Conference on Fracture and Fatigue of Aircraft Structures [C]. AFDL-TR-70-144, 1970. 301– 312.
[4] OSTERGREN W J. A damage function and associated failure equation for predicting hold time and frequency effects in elevated temperature low cycle fatigue [J]. Journal of Testing and Evaluation, 1976, 4(5): 327– 339.

采用能量参数 Δa 能够较好的表征高周疲劳和低周疲劳寿命特征, 数据拟合的相关系数为 0.985。

3.2 FGH95 验证结果

用 FGH95 粉末盘材料的 600℃高温低周疲劳和高周疲劳数据对统一表征方法进行验证。统一表征方法得到的能量-寿命曲线如图 5 所示。从图可以看出: 采用能量参数 Δa 能够较好的表征高周疲劳和低周疲劳寿命特征, 数据拟合的相关系数为 0.984。

表面时产生反射了, 其反射系数 R 由下式得出: $R =$

$$\frac{1 - Z_s/Z_w}{1 + Z_s/Z_w}, \text{ 式中 } Z_w = 377 \Omega, Z_s = \sqrt{\frac{G}{\mu_r}}, G \text{ 和 } \mu_r \text{ 分别为}$$

材料的相对电导率和相对磁导率, 反射损耗由材料的 G 和 μ_r 决定, μ_r/G 越小则反射损耗越大。当电磁波入射到镀银羰基铁粉时首先被银层反射, 部分透过银层的电磁波被羰基铁粉吸收。电磁波的吸收损耗为:

$A = 131.4t \sqrt{G\mu_r}$, f 为电磁波的频率, t 为电磁波在材料中的传播距离, 在 f, t 一定的情况下, 吸收损耗同样由材料的 G 和 μ_r 决定, $\mu_r \cdot G$ 越大则反射损耗越大。由此可见, 镀银羰基铁粉是通过外层银对电磁波的反射和内部羰基铁粉对电磁波的吸收来屏蔽电磁波的。

4 结论

(1) 用化学镀法, 甲醛为还原剂, 制备了银层均匀、包覆完整的镀银羰基铁粉。用 XRD, SEM 和 EDX 对其进行了表征。

(2) 羰基铁粉镀银后的抗氧化性能得到明显提高。

(3) 厚 0.2mm、镀银羰基铁粉质量含量为 75% 的电磁屏蔽材料在 100kHz~1.5GHz 频率范围内获得优于 -32dB 的屏蔽效能; 该电磁屏蔽材料对频率小于 200, 800MHz 左右及大于 1.4GHz 的电磁波的屏蔽效能较好。

(4) 镀银羰基铁粉是通过外层银对电磁波的反射和内部羰基铁粉对电磁波的吸收来屏蔽电磁波的。

参考文献

- [1] SHEN Guo-zhu, XU Zheng, LI Yi. Absorbing properties and structural design of microwave absorbers based on W-type La-doped ferrite and carbon fiber composites[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2006, 301: 325—330.
- [2] 张晓宁, 毛倩瑾, 王群. 三明治型电磁屏蔽材料的制备与性能[J]. 材料研究学报, 2002, 16(5): 536—540.
- [3] KAZANTSEVA N E, RYVKINA N G, CHMUTIN I A. Promising materials for microwave absorbers[J]. Radiotekhnika i Elektronika, 2003, 48(2): 196—209.
- [4] DAS N C, KHASTGIR D, CHAKI T K, et al. Electromagnetic interference shielding effectiveness of carbon black and carbon fibre filled EVA and NR based composites[J]. Composites Part A, 2000, 31: 1069—1081.
- [5] MAMUNYA Y E P, DAVYDENKO V V, PISSIS P, et al. Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders[J]. European Polymer Journal, 2002, 38: 1887—1897.
- [6] 荒木庸夫. 电磁干扰和防止措施[M]. 宋永林译. 北京: 中国计量出版社, 1989. 151.

基金项目: 国家自然科学基金(50372013); 高等学校博士学科点专项科研基金(20050562002); 广东省自然科学基金(036918); 广东省科技计划项目(2004B10301008); 广州市科技计划项目(2005Z2-D2051); 广东省教育厅自然科学研究项目(04Z005)

收稿日期: 2006-11-20; 修订日期: 2007-01-20

作者简介: 曹晓国(1979-), 男, 博士研究生, 现从事超细粉体的制备和表面处理, 联系地址: 广州大学城广东工业大学材料与能源学院(510006)。E-mail: cxiaogs@163.com

(上接第 68 页)

- [5] MANSON S S, HALFORD G. R, HIRSCHBERG M H. Creep-fatigue analysis by strain-range partitioning[A]. In Design for Elevated Temperature Environment[C]. New York ASME, 1971. 12—28.
- [6] COFFIN L F. The concept of frequency separation in life prediction for time-dependent fatigue[A]. Symposium on Creep-Fatigue Interaction[C]. New York ASM E-M PG-3, 1976. 349—363.
- [7] HE J, DUAN Z, NING Y, et al. Strain energy partitioning and its application to GH33A nickel-base superalloy and 1Cr18Ni9Ti stainless steel[A]. WOODFORD D A, WHITEHEAD J R. In Advance in Life Prediction Methods[C]. New York ASME, 1983. 27—32.
- [8] MILLER HDBK-5J, 航空与航天飞行器结构用金属材料与元件[S].
- [9] 付惠民. 三参数幂函数回归分析[J]. 航空动力学报, 1994, 9(2): 186—190.

- [10] 韩希鹏, 许超, 段作祥, 等. 高周疲劳曲线的等效应力法[J]. 航空材料学报, 2003, 23(3): 53—57.
- [11] 陈凌, 蒋家玲, 范志超, 等. 低周疲劳寿命预测的能量模型探讨[J]. 金属学报, 2006, 42(2): 195—200.
- [12] MILLER M P, McDOWELL D L, OCHMKE R L F, et al. A life prediction model for thermomechanical fatigue based on microcrack propagation[A]. SEHITOGLA H. Thermomechanical Fatigue Behavior of Materials[C]. Philadelphia: ASTM STP 1186, American Society for Testing and Materials, 1993. 35—49.

收稿日期: 2007-04-18; 修订日期: 2007-06-15

作者简介: 许超(1976-), 男, 工程师, 主要从事高温疲劳与断裂研究, 联系地址: 北京 81 信箱 7 分箱(100095)。E-mail: chao.xu@biam.ac.cn