

文章编号:1000-8055(2012)10-2342-06

基于应力循环特征的裂纹萌生寿命预测方法

魏大盛¹, 王延荣¹, 王相平², 王洪斌²

(1. 北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100191;

2. 中国航空工业集团公司 沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)

摘 要: 以两种镍基高温合金的应力循环特征为基础, 即粉末高温合金 FGH95 的循环硬化继而软化及变形高温合金 GH4169 的循环软化特性, 寻求载荷历程相关的损伤参量, 进而建立应力弱化损伤模型, 以考虑载荷历程对疲劳寿命的影响. 建立的应力弱化损伤模型可以较好地预测不同循环载荷条件下的疲劳寿命, 其预测精度不低于传统方法, 且优势在于使建立模型所需要的试样数量大大减少.

关 键 词: 裂纹萌生; 寿命预测; 粉末高温合金; 循环硬化; 循环软化

中图分类号: V231.95; V232.3

文献标志码: A

Life prediction method based on characteristic of cyclic stress

WEI Da-sheng¹, WANG Yan-rong¹, WANG Xiang-ping², WANG Hong-bin²

(1. School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China;

2. Shenyang Aeroengine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: Based on the characteristics of cyclic stress of two nickel-based superalloys, i. e., the cyclic softening followed by hardening of powder metallurgy (PM) FGH95 and the cyclic softening of cast GH4169, a stress-weaken damage model (SWDM) was established to evaluate the effect of load histories on lives. The model can be used to predict the fatigue lives under different cyclic loading conditions, of which prediction the accuracy is not less than that of traditional methods, and its most significant advantage is to greatly reduce the number of samples for life modeling.

Key words: crack initiation; life prediction; powder metallurgy; cyclic hardening; cyclic softening

疲劳寿命预测问题一直是工程研究领域的一个热点和难点, 至今尚有许多问题没有得到解决. 以航空发动机为例, 其热端部件的疲劳问题尤为突出, 而高温材料的寿命预测则是构件寿命评估的基础. 针对高温合金在疲劳、蠕变以及疲劳蠕变交互作用下的寿命预测, 国内外均已开展了大量研究, 特别是 1980 年—1987 年, 美国航空航天局开展的涡轮发动机热端部件计划 HOST(turbine

engine hot section technology project), 进行了等温条件、热机械条件下的各向同性、各向异性及涂层材料的疲劳试验, 并对发展的寿命模型进行了验证. 目前工程中采用的寿命预测模型大多是基于唯象学方法的, 相关损伤参量来自于半寿命循环时的迟滞环. 依据这种思路建立的寿命方程, 损伤参量的选取尚值得商榷. 因为循环参量将随着载荷循环发生变化, 例如保载导致的应力松弛、材

收稿日期: 2012-02-29

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/11.2297.V.20121015.1020.201210.2342_025.html

基金项目: 国家自然科学基金(51105023)

作者简介: 魏大盛(1978—), 男, 黑龙江宁安人, 讲师, 博士, 主要从事航空发动机结构强度、振动研究.

料的循环硬化/软化都使迟滞环损伤参量发生变化,这对于寿命产生的影响在传统寿命预测方法中没有得到足够的关注.

如何从材料循环力学行为的特征入手,明确循环参量随载荷历程的变化规律,进而建立可以考虑载荷历程影响的寿命方程,无论在材料疲劳行为研究还是结构寿命预测方面,都具有较大的实际意义.该寿命建模的思路为:依据材料的循环特征,将循环应力软化视为损伤,建立其与循环数之间的关联,进而形成基于应力弱化损伤模型(stress-weaken damage model, SWDM),用以考察载荷历程对疲劳寿命的影响.

1 高温合金循环应力特征研究

裂纹萌生寿命的预测方法,主要包括应变方法、能量方法以及损伤累积方法,见表 1.

表 1 高温蠕变疲劳寿命预测方法

Table 1 Life prediction of fatigue-creep interaction

类型	序号	方法	时间
应变方法	1	Manson-Coffin 方程 ^[1-2]	1953
	2	频率修正法(FM) ^[3]	1970
	3	频率分离法(FS) ^[4]	1976
	4	损伤率方法(DR) ^[5]	1976
	5	应变范围划分法(SRP) ^[6]	1971
	6	总应变范围划分法(TSSRP) ^[7]	1985
能量方法	7	拉伸迟滞能模型(Ostergren) ^[8]	1976
损伤方法	8	P-M 线性损伤累积理论 ^[9]	1924 1945
	9	循环累积损伤模型(CDA)	1985
	10	Chaboche 蠕变疲劳损伤模型 ^[10]	1990

Bernstein 曾经对上述部分方法进行了对比分析^[11].可以看出,上述方法考虑了材料的循环力学特征.鉴于此,选择 2 种镍基高温合金 FGH95 和 GH4169 作为研究对象,对比分析其在高温循环载荷下的行为特征.之所以选择这 2 种合金源于其性能的代表性:FGH95 为高强度、低韧性的粉末高温合金,采用粉末冶金工艺制备, γ' 相的体积分数约为 50%;GH4169 则为低强度、高韧性的变形高温合金,以体心四方的 γ'' 和面心立方的 γ' 相沉淀强化.制造工艺导致材料组织的差异,也使循环载荷下的材料力学行为体现出了显著不同.文献^[11-13]针对这 2 种材料开展了疲

劳试验研究,也是本文试验数据的来源.

FGH 95 材料性能较为特殊,除显示出高强度低韧性的特征外,对缺陷还较为敏感^[14-15].图 1 给出了循环载荷下 FGH95 的应力范围随对数循环数的变化,图中 MP××为 FGH95 试样编号.试验结果表明材料在最初的载荷循环中呈现出循环硬化的特性,硬化达到饱和以后材料开始软化,至材料破坏,应力幅值下降较小. FGH95 先硬化然后发生软化,其应力范围-对数循环数曲线接近于二次多项式,因而采用下式进行拟合,拟合参数见表 2.

$$\Delta\sigma = f(\lg N) =$$
$$B_0 + B_1 \lg N + B_2 (\lg N)^2 \tag{1}$$

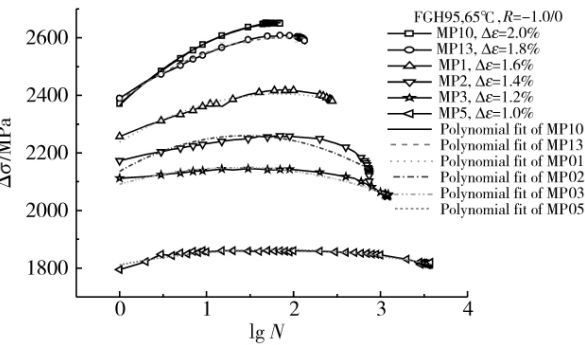


图 1 FGH95 的循环应力特征

Fig. 1 Characteristic of cyclic stress of FGH95

表 2 FGH95 拟合参数

Table 2 Fitting parameters of FGH95

试样 编号	$\Delta\epsilon/\%$	B_0	B_1	B_2	相关 系数 R
MP10	2.0	2365.4	289.78	-72.678	0.9988
MP13	1.8	2380.3	226.39	-58.039	0.9861
MP01	1.6	2238.0	180.35	-48.886	0.9334
MP02	1.4	2135.9	170.60	-58.573	0.8469
MP03	1.2	2091.1	85.164	-31.348	0.9643
MP05	1.0	1810.9	58.920	-16.302	0.9332

图 2 则为 GH4169 应力范围随对数循环数的变化,图中 EF××为 GH4169 试样编号.表明材料具有循环软化特征,软化结束至材料破坏,应力范围降低显著,此阶段对应的循环数所占比例并不高.采用线性方程拟合其应力范围-对数循环数曲线(不包含应力范围显著降低之后的阶段),拟合得到的参数见表 3.

$$\Delta\sigma = f(\lg N) = B + A \lg N \tag{2}$$

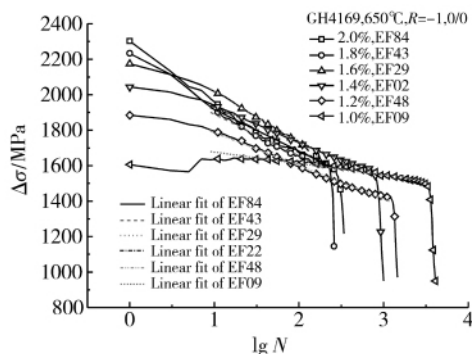


图 2 GH4169 的循环应力特征

Fig. 2 Characteristic of cyclic stress of GH4169

图 1、图 2 中的拟合结果及表 1、表 2 中的参数表明:数据相关系数较高,所选择的曲线形式可以很好地反映材料循环特征;二次多项式参数 B_0 及线性方程参数 B 为初始循环的应力范围;初始应力范围、最大应力范围以及破坏时(对于 GH4169 而言是应力范围显著下降时)应力范围是 3 个重要的数据点。

表 3 GH4169 拟合参数

Table 3 Fitting parameters of GH4169

试样编号	$\Delta\epsilon/\%$	A	B	相关系数 R
EF84	2.0	-235.06	2151.6	0.9661
EF43	1.8	-235.28	2125.2	0.9799
EF29	1.6	-291.20	2310.4	0.9978
EF02	1.4	-197.29	2127.6	0.9967
EF48	1.2	-187.22	1974.0	0.9927
EF09	1.0	-64.717	1741.1	0.9270

2 基于应力循环特征的寿命模型

2.1 寿命模型的建立

粉末高温合金 FGH95 硬化/软化的二次多项式可写为如下形式:

$$\Delta\sigma = B_2 \left(\lg N + \frac{B_1}{2B_2} \right)^2 + \frac{4B_0B_2 - B_1^2}{4B_2} \quad (3)$$

可得到寿命表达式

$$\lg N = \lg N_{\text{symm}} \pm \sqrt{\frac{\Delta\sigma_{\text{frac}} - \Delta\sigma_{\text{max}}}{B_2}} \quad (4)$$

式中,当 $\lg N > -B_1/2B_2$ 时取 + 号;当 $\lg N < -B_1/2B_2$ 时取 - 号,且有

$$\Delta\sigma_{\text{max}} = \frac{4B_0B_2 - B_1^2}{4B_2} \quad (5)$$

$$\lg N_{\text{symm}} = -\frac{B_1}{2B_2} \quad (6)$$

寿命方程中的参量可参见图 3。采用的试验数据包含了无保载、拉伸保载、压缩保载以及拉压保载 4 种条件,计算寿命时,首先依据无保载试验数据建立如下关系:

$$B_0 = g_1(\Delta\epsilon) \quad (7)$$

$$B_1 = g_2(\Delta\epsilon) \quad (8)$$

$$B_2 = g_3(\Delta\epsilon) \quad (9)$$

由此可以确定出不同总应变范围下的参数,并计算相对应的循环数。此模型认为循环软化代表一种循环相关的损伤,可称其为应力弱化损伤模型。

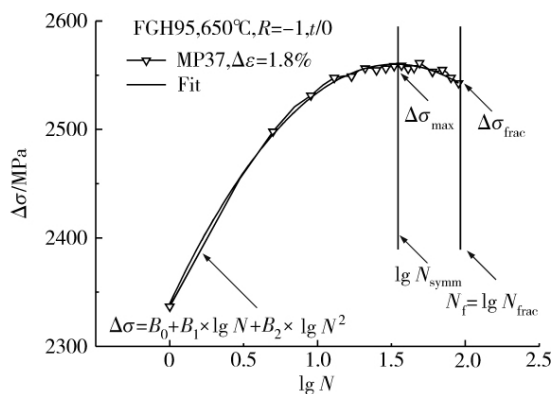


图 3 寿命预测模型中的参量(试样 MP37)

Fig. 3 Parameters in life model (sample MP37)

随着载荷条件的变化,达到硬化饱和时的循环数、应力硬化饱和后至材料破坏时的循环数将随之发生变化,这种变化可以通过模型中参数的变化加以体现。图 4 给出了不同保载条件下(图中 0/0, $t/0$, $0/t$ 及 t/t 分别代表无保载、拉伸保载 60 s,压缩保载 60 s 及拉压保载各 30 s)FGH95 参数 B_0 , B_1 , B_2 同总应变范围之间的关系,近似呈线性关系。

与上述流程类似,可以建立 GH4169 的 SWD (stree-weakens damag) 寿命模型,只是方程形式略有不同。

2.2 寿命预测结果

SWD 模型的计算寿命包括两部分:对于 FGH95,一是硬化达到饱和时的寿命数,二是硬化饱和后发生软化至破坏阶段的寿命;对于 GH4169,一是初始软化阶段的寿命数(通常为十几至几十个循环),二是线性软化阶段的寿命数,在寿命计算过程中重点考虑。

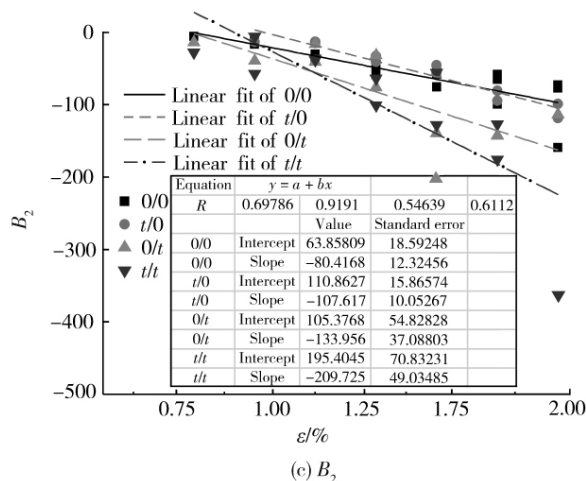
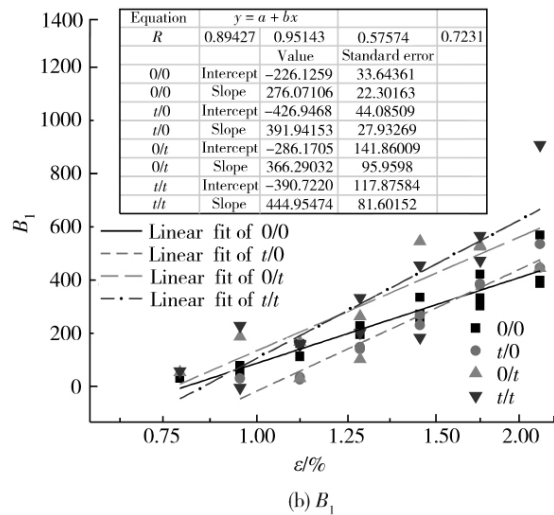
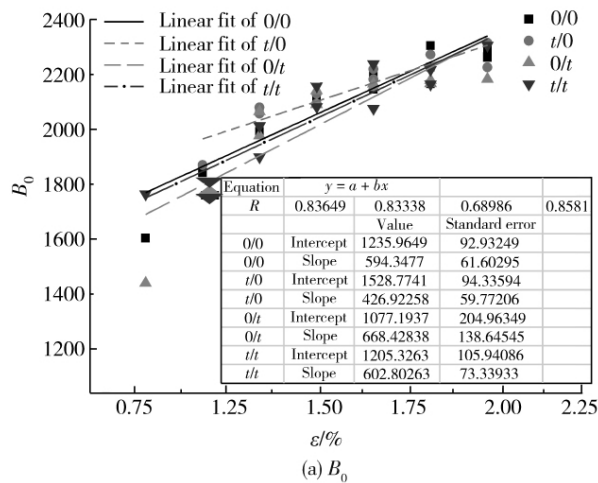


图 4 不同保载条件下的寿命预测模型参量

Fig. 4 Parameters in life model for different dwells

图 5、图 6 分别给出了 FGH95 和 GH4169 的寿命预测结果: 大部分寿命预测点落于 2 倍分散带之内; 几乎所有预测点都在 5 倍分散带之内, 除

了 GH4169 的数据点 A.

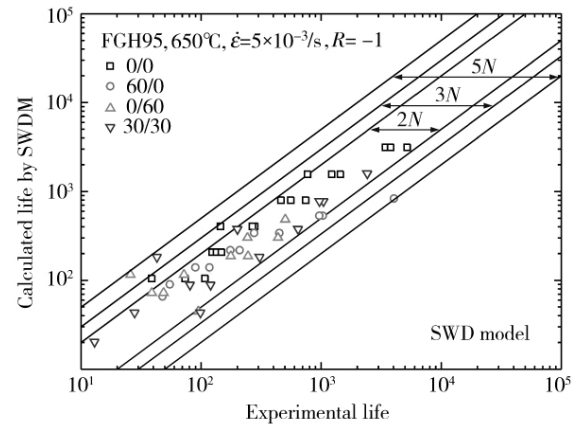


图 5 FGH95 不同保载条件下的寿命预测结果

Fig. 5 Predicted life of FGH95 under different dwells

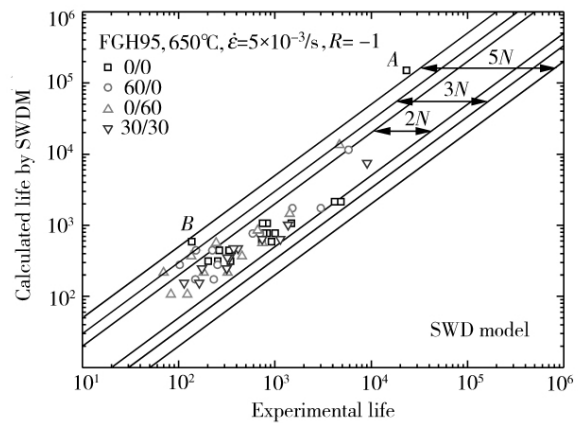


图 6 GH4169 不同保载条件下的寿命预测结果

Fig. 6 Predicted life of GH4169 under different dwells

数据点 A 的计算寿命偏长, 这同其循环应力软化特征有关. 总结 FGH95 及 GH4169 两种合金的应力范围-循环曲线可知, 材料发生失效之前通常经历软化过程, 高强度低韧性的 FGH95 先硬化后软化, 而低强度高韧性的 GH4169 则直接发生软化. 同时, 高温、大载荷易使材料直接发生软化, 低温、小载荷易使材料出现先硬化后软化的特征. 图 7 给出了低载荷条件下(总应变范围 0.8%)GH4169 的循环应力特征, 其与高载荷条件下(总应变范围大于 1.0%)的特征有所不同, 循环应力特性有先硬化后软化的趋势, 此时若以直线作为循环应力的演化规律, 将导致偏长的计算寿命.

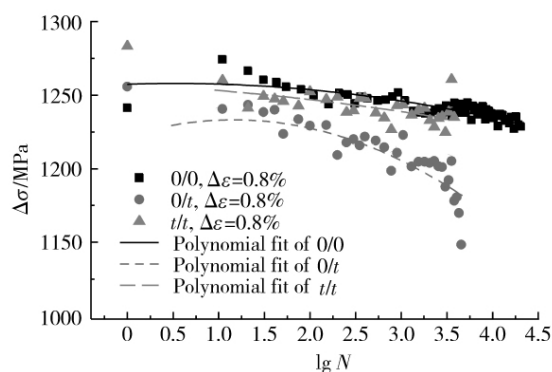


图 7 低载荷条件下 GH4169 的循环应力特征

Fig. 7 Cyclic stress of GH4169 under lower loading

3 建立 SWD 模型所需的试样数量

同试验数据点密切相关的预测精度和试验成本是寿命预测中的两个关注点,也是互相矛盾的两个方面,如何选择最少的数据点建立具有较高精度的预测方法,是工程中值得研究的一项内容.本节将尝试采用较少的数据点建立 SWD 模型,并进而分析寿命预测精度.

以二次多项式建立方程参数和应变范围的关系,则每种载荷条件最少需要 3 个试验数据点,4 种载荷条件共计 12 个试样的疲劳数据.需要说明的是,这里所用数据点较少,为提高精度,这里采用了二次多项式建立不同载荷条件下方程参数 (B_0, B_1, B_2) 和应变范围的关系,图 8 给出了拟合结果.

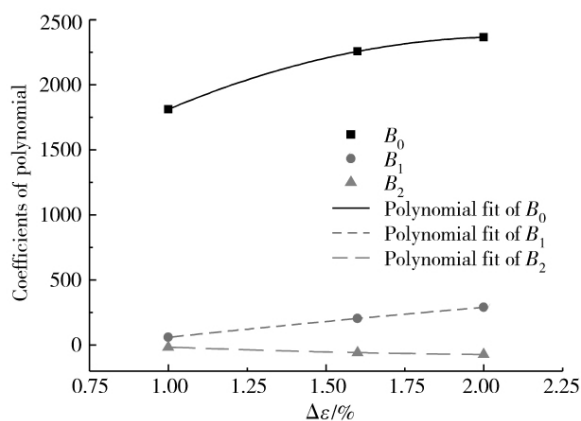


图 8 无保载条件下方程参数同应变范围的关系

Fig. 8 Parameters in life model for no dwell

图 9 给出了采用 12 个数据点进行建模时的寿命预测结果,大多数预测点在 2 倍分散带之内,几乎所有数据都在 5 倍分散带之内.为考察不同寿命模型的预测精度,以寿命分散带 ΔS 及标准

差 S_n 作为评价计算结果优劣的指标,表 4 给出了寿命模型的指标,可以看出:同 Manson-Coffin、总应变方程、DR,FS,Ostergren 及 SRP 等传统方法相比,SRP 法最好,SWD 模型则略优于其他几种方法;减少试验数据点建立 SWD 模型,寿命预测结果仍然能够保持一定的精度.

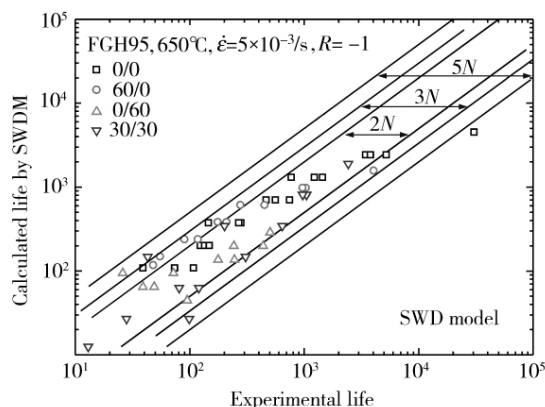


图 9 采用 12 个数据点建模时 FGH95 寿命预测结果

Fig. 9 Predicted life of FGH95 by using 12 data

表 4 寿命预测模型/方法评估

Table 4 Evaluation of life prediction models

	建模方式	ΔS	S_n
1	SWD 模型,所有 52 个数据点	-4.88	0.2578
2	SWD 模型,12 个数据点	-6.75	0.2870
3	Manson-Coffin equation	14.6	0.3672
4	Total strain equation	14.7	0.3722
5	Frequency-separation model	3.76	0.2608
6	Ostergren model	3.81	0.2767
7	Strainrange-partitioning model	3.94	0.2470

4 结 论

本文基于高温合金的循环应力特征,建立了一种可以考虑循环应力硬化/软化影响的寿命预测方法,得出了一些具有工程意义的结论:

1) 无论高强度低韧性材料(FGH95)还是低强度高韧性材料(GH4169),在破坏之前都体现出循环应力软化的特征,而这种应力弱化过程可视为一种损伤.

2) 与传统寿命预测方法不同,SWD 模型的建模思路较为新颖,建立循环应力特征同循环数之间的函数关系以后,将循环软化特征作为损伤引入寿命模型.

3) 传统寿命模型对疲劳数据分散性的处理体现在对方程参数的优化拟合中,与此类似,SWD 模型考虑疲劳分散性时,通过建立参数(B_0, B_1, B_2)与载荷(例如总应变范围)之间的关联得以体现,这种关联也是对数据进行拟合得出的。

4) SWD 模型最大的优点在于其寿命预测精度对试验数据数量的依赖性大大降低,采用 12 个数据点建模并计算所有试样寿命,其精度接近采用所有数据点建模时的预测精度,因而依据较少试样进行寿命预测是可行的,可极大地节约试验成本。

本文认为循环软化代表一种循环相关的损伤,可进一步将保载应力松弛视为一种时间相关的损伤,进而建立更广泛意义的应力弱化(软化/松弛)损伤模型。SWD 模型思想较为新颖,但还需要更多的材料数据予以支撑,其工程应用也有待于进一步深入研究。

参考文献:

- [1] Manson S S. Behavior of materials under conditions of thermal stress[R]. NACA-Report-1170, 1954.
- [2] Coffin L F, Jr. A study of the effects of cyclic thermal stresses on a ductile metal[J]. Transaction of the ASME, 1954, 76(6): 931-950.
- [3] Coffin L F, Jr. The effect of frequency on high temperature low-cycle fatigue[R]. AFFDL-TR-7-144, 1970.
- [4] Coffin L F, Jr. The concept of frequency separation in life prediction for time-dependent fatigue[C]// Proceedings of Symposium on Creep-Fatigue Interaction. New York: American Society of Mechanical Engineer, 1976: 349-364.
- [5] Majumdar S, Maiya P S. A damage equation for creep-fatigue interaction [C]// Proceedings of Symposium on Creep-Fatigue Interaction. New York: American Society of Mechanical Engineer, 1976: 323-326.
- [6] Halford G R, Hirschberg M H, Manson S S. Creep-fatigue analysis by strainrange partitioning [R]. NASA-TM-X-67838, 1971.
- [7] Halford G R, Saltsman J F. Strainrange partitioning: a total strain range version[R]. NASA-TM-83023, 1983.
- [8] Ostergren W J. A damage function and associated failure equations for predicting hold time and frequency effects in elevated temperature low-cycle fatigue[J]. Journal of Testing and Evaluation, 1976, 4(5): 327-339.
- [9] Miner M A. Cumulative damage in fatigue[J]. Journal of Applied Mechanics, 1945, 12(3): 159-164.
- [10] Chaboche J L, Gallerneau F. An overview of the damage approach of durability modeling at elevated temperature [J]. Fatigue & Fracture Engineering Material & Structure, 1996, 24(6): 405-418.
- [11] Bernstein H L. An evaluation of four current models to predict the creep-fatigue interaction in Rene 95[R]. AFML-TR-79-4075, 1979.
- [12] WEI Dasheng, YANG Xiaoguang. Investigation and modeling of low cycle fatigue behaviors of two Ni-based superalloys under dwell conditions[J]. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2009, 86(9): 616-621.
- [13] 魏大盛, 杨晓光, 王延荣, 等. 保载条件下 FGH95 材料的疲劳特性及寿命建模[J]. 航空动力学报, 2007, 22(3): 425-430.
WEI Dasheng, YANG Xiaoguang, WANG Yanrong, et al. Fatigue characteristics of FGH95 PM superalloy under dwell condition and modeling for life prediction[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(3): 425-430. (in Chinese)
- [14] 魏大盛, 杨晓光, 王延荣. 基于缺陷概率特点的粉末冶金材料寿命预测概率模型[J]. 航空动力学报, 2005, 20(6): 951-957.
WEI Dasheng, YANG Xiaoguang, WANG Yanrong. A probabilistic model for prediction of life based on probabilistic character of defects in PM alloys[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(6): 951-957. (in Chinese)
- [15] 魏大盛, 杨晓光, 王延荣. 基于缺陷分布形式的粉末冶金涡轮盘可靠度计算模型[J]. 机械工程学报, 2008, 44(11): 132-137.
WEI Dasheng, YANG Xiaoguang, WANG yanrong. Model for calculating the reliability of powder metallurgy turbine disk based on distribution of defects[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(11): 132-137. (in Chinese)