

文章编号: 1000-8055(2008)04-0742-05

GH30 合金疲劳-蠕变概率模型的研究

胡殿印, 王荣桥, 洪 杰, 李其汉

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘 要: 基于疲劳-蠕变特性函数基础上, 提出了针对镍基高温合金材料的疲劳-蠕变耦合失效模式的概率模型的研究方法. 针对镍基合金 GH30 的连续疲劳-蠕变交互作用的试验结果, 确定了 GH30 在 600 °C 温度下的疲劳-蠕变特性函数, 考虑随机因素后, 进行了 GH30 材料在疲劳-蠕变耦合失效模式下的概率模型分析, 研究表明随机因素对材料的失效概率很大, 通过灵敏度分析可确定影响破坏的主要因素以提高寿命.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 疲劳-蠕变; 概率模型; 可靠度; 失效概率

中图分类号: V231. 95

文献标识码: A

Investigation on probabilistic model for fatigue-creep failure of alloy GH30

HU Dian-yin, WANG Rong-qiao, HONG Jie, LI Qi-han

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: A probabilistic model for fatigue-creep reliability analysis was studied based on the deterministic fatigue-creep failure function, and the corresponding approach was proposed. Fatigue-creep failure function of alloy GH30 at 600 °C was established by using the experimental results under continuous cyclic creep. With consideration of random variables, probabilistic analysis for fatigue-creep of alloy GH30 was performed. The calculations show that random variables do great contributions to the failure probability. Furthermore, the effect of different variables on failure probability can be revealed through the sensitivity analysis, helping to improve the components' life.

Key words: aerospace propulsion system; fatigue-creep; probabilistic model; reliability; failure probability

据统计, 在各类零部件的失效中, 约有 80 % 是由疲劳破坏引起的, 而且发生失效的零部件大都处于高温状态, 因此研究材料和零部件的高温疲劳强度具有十分重要的意义^[1]. 当环境温度高于 0.5 T_m (T_m 为材料的熔点) 时, 由于蠕变-疲劳的交互作用而使材料的强度显著下降. 在疲劳与蠕变交互作用下, 零件的使用寿命比纯蠕变和纯疲劳作用下的寿命要低 1~2 个数量级. 航空发动机的典型部件如涡轮盘、涡轮叶片等受到高温交

变载荷的作用, 常会发生疲劳-蠕变耦合作用造成的破坏.

最初关于疲劳-蠕变交互作用下结构寿命预测的模型和方法的研究均属于确定性问题, 但是, 实践证明, 由于结果在实际加工和使用过程中, 其材料属性、几何尺寸、工作条件等都存在随机性, 导致结构或构件的寿命存在很大的分散度 (可达 6~10 倍), 粉末冶金和复合材料结构的寿命分散度还要大得多. 传统的寿命计算方法采用确定性

收稿日期: 2007-03-28; 修订日期: 2007-05-29

作者简介: 胡殿印(1980-), 女, 辽宁朝阳人, 博士生, 主要从事航空发动机结构强度及疲劳断裂可靠性研究.

设计参数来计算寿命值,没有充分考虑参数的随机性,不能估计设计风险,而需要采用安全系数法来防止失效,因此所预测的寿命值往往偏低,造成过于保守的设计。

疲劳-蠕变耦合失效模式下概率模型的研究国内外都处于起步阶段,相关的文献资料很少。作者基于疲劳-蠕变特性函数确定性问题的基础上,将其应用到镍基高温合金材料,提出了疲劳-蠕变耦合失效模式下概率模型的研究思路:首先分析影响结构的失效概率和寿命的分散性的随机因素及其分布特征;讨论载荷间的相互作用及不同失效机理的作用,利用损伤理论建立极限状态函数;应用解析或数值方法求解结构的失效概率。

1 随机因素的分析

影响疲劳-蠕变作用下结构的失效概率和寿命的随机因素有很多,比较典型的有:材料的不确定性(如材料的弹性模量、泊松比等)、外界载荷的随机性、几何尺寸、载荷循环数与蠕变作用时间、疲劳寿命与蠕变寿命的分散性、外界环境的变化引起材料温度与应力的随机变化。

对于随机因素的分布类型可以利用传统的经验分布,例如疲劳寿命一般服从对数正态分布或威布尔分布^[2-3],蠕变寿命对数正态分布;也可以结合设计的实验得到变量的统计分布,利用小子样的实验数据统计推断出母体的随机分布特征,然后进行假设检验和参数估计。

2 疲劳-蠕变特性函数

高温部件寿命评定由多种方法,如破坏法、非破坏性检查法和分析计算法等。其中分析计算方法是工程上对高温部件进行寿命损耗评定的一种主要方法。其核心内容是确定材料的疲劳-蠕变交互作用寿命损耗评定曲线,根据相应的失效准则,对高温部件的寿命损耗进行评判,确定部件的寿命是否合格。

目前,工程上普遍接受并广泛应用的高温寿命评定准则是修正后的线性损伤累积法则,即认为失效时的总损伤不等于 1。其表达式为

$$D_f + D_c \leq D_{cr} \tag{1}$$

其中, D_c 为蠕变损伤, D_f 为疲劳损伤, D_{cr} 为疲劳-蠕变交互作用下的寿命损伤临界值,由材料特性试验确定。当 $D_{cr} < 1$ 称为正交互作用,即疲劳、蠕变的交互作用相互削弱;当 $D_{cr} > 1$ 时为负交互作用,即疲劳、蠕变相互加强。传统的分析常采用

ASME 锅炉与压力容器设计规范的双线性曲线^[4],如图 1 所示。

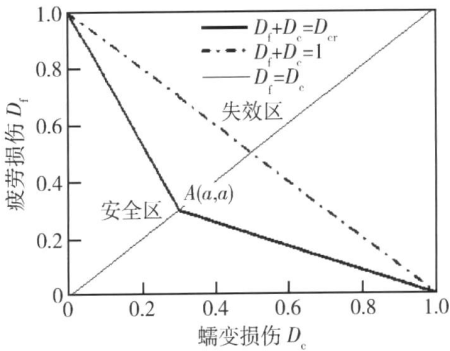


图 1 ASME 代码疲劳-蠕变曲线

Fig. 1 Fatigue-creep failure function in ASME Code

双线性曲线的特点:(1)图像关于直线 $D_c = D_f$ 对称;(2)两条直线的交点坐标为 $A(a, a)$ 。该曲线具有一定的局限性,表现在:曲线不光滑;如果最可能点(MPP)发生在曲线的交点处,则二阶可靠性近似方法不适用,因为该点处的二阶导数不连续。

基于上述曲线的特点,Mao 和 Mahadevan^[5]在 2000 年提出了新的疲劳-蠕变特性函数,即 θ 参数法,这个函数克服了 ASME 曲线不连续的缺点,没有假设曲线对称,且考虑了载荷顺序和蠕变损伤对材料的疲劳-蠕变寿命的影响,引入了两个参数来表示(当载荷顺序不同时相应的参数取值也不同),函数关系为式(2),曲线如图 2 所示。

$$D_f = F(D_c) = 2 - e^{\theta_1 D_c} + \frac{e^{\theta_1} - 2}{e^{\theta_2} - 1} (e^{-\theta_2 D_c} - 1) \tag{2}$$

其中 θ_1, θ_2 为疲劳-蠕变特性函数的材料参数。

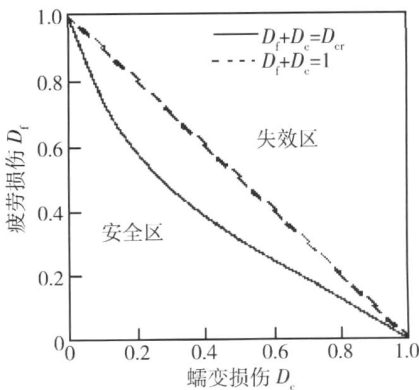


图 2 疲劳-蠕变函数的参数法

Fig. 2 Fatigue-creep failure function of θ equation

3 疲劳-蠕变作用下的失效概率

疲劳与蠕变交互作用下结构的失效临界状态满足

$$D = D_f + D_c = D_{cr} \tag{3}$$

其中 D_{cr} 表示临界总损伤,当 $D > D_{cr}$ 时发生疲劳-蠕变失效; $D < D_{cr}$ 结构处于安全状态.最简单的累积损伤理论认为总损伤达到 1 时结构失效,但是实验发现临界损伤并不等于 1^[6-7],其数值与疲劳载荷、蠕变载荷的顺序有关.疲劳-蠕变交互作用下结构的临界损伤是疲劳损伤与蠕变损伤的非线性函数,可表示成 $D_{cr} = f(D_f, D_c)$.

这样疲劳-蠕变交互作用下的极限状态函数可以表示为

$$g(Y) = D_{cr} - D \tag{4}$$

由式(4)可知,当失效时满足 $g(Y) < 0$,失效概率表示成

$$P_f = P\{g(Y) < 0\} = \int_{g(Y) < 0} \dots \int_0 f_Y(y) dy \tag{5}$$

其中 Y 是随机变量的向量; $f_Y(y)$ 是随机向量 Y 的随机变量的联合概率密度函数.

利用解析方法和数值模拟技术可以对方程(5)求解,得到结构的失效概率.

4 GH30 疲劳-蠕变概率模型的研究

GH30 镍基合金的成分和结构最为简单,其它的镍基合金都是以这种合金为基本成分而发展起来的.试验方法和结果参考文献[8],实验温度 600 °C,采用循环载荷下的循环蠕变(CF)试验,即在应力幅下带有不同保持时间的低周疲劳实验.改变保持时间的长短,就可改变每周内的蠕变分量和疲劳分量的比例,为了建立 GH30 的疲劳-蠕变特性函数,载荷谱如图 3 所示,各种加载类型下每个循环的疲劳时间不变,均为 1 min.试验结果见表 1.

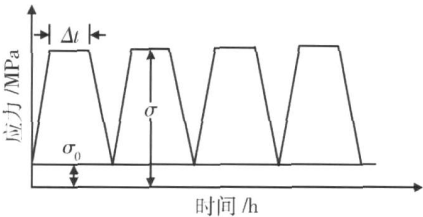


图 3 实验施加的应力波形
Fig. 3 Stress wave superimposed during the experiment

表 1 连续循环蠕变下的实验数据

Table 1 Experimental data under CF load

周期/min	∞	2	1.33	1
断裂时间/h	4.0	7.67	11.83	15.72
断裂时间/循环数	0	223	513	881
累积保持时间/h	4.0	3.81	2.58	0
$\sum(t_c/T_c)$	1.0	0.78	0.53	0
$\sum(n_f/N_f)$	0	0.26	0.53	1.0

由表 1 可知,当保载时间 ∞ 时对应纯蠕变,可得材料的蠕变寿命;同理当保载时间取 0 时为纯疲劳状态,通过试验确定材料的疲劳寿命.

GH30 合金的疲劳-蠕变特性函数的确定性表达采用双参数形式,其中的参数 θ_1, θ_2 通过非线性曲线拟合确定,拟合结果如图 4 所示,拟合的参数 $\theta_1 = 0.775\ 89, \theta_2 = -2.948\ 63$. 图中的虚线表示疲劳损伤与蠕变损伤线性作用.

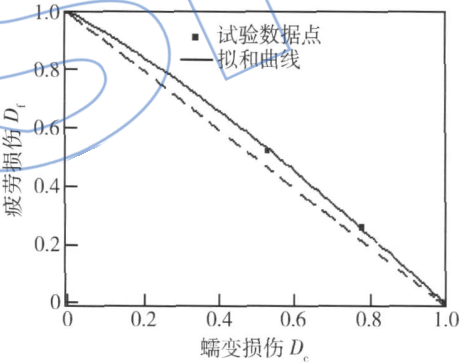


图 4 GH30 材料的疲劳-蠕变特性函数
Fig. 4 Fatigue-creep failure function for GH30

从图 4 可知, GH30 材料在连续循环蠕变载荷作用下呈现疲劳与蠕变之间的负交互作用.

这样,疲劳-蠕变交互作用下的极限状态函数为

$$g(T_c, N_f, t_c, n_f, \theta_1, \theta_2) = D_{cr} - (D_c + D_f) = 2 - e^{\theta_1 D_c} + \frac{e^{\theta_1} - 2}{e^{-\theta_2} - 1} (e^{-\theta_2 D_c} - 1) - D_f \tag{6}$$

考虑到载荷、材料及寿命的分散性,随机变量取为蠕变载荷时间 t_c , 疲劳载荷循环数 n_f , 蠕变寿命 T_c , 疲劳寿命 N_f , 参数 θ_1 和 θ_2 . 取寿命服从对数正态分布^[2], 其它变量的分布参考文献[5], 确定性计算的结果作为随机变量的均值, 变异系数取为 0.2, 随机变量的数字特征见表 2.

表 2 随机变量统计特征
Table 2 Random variables

随机变量	分布特征	均值	标准差
T_c	对数正态分布	4.0h	0.8
N_f	对数正态分布	881 循环数	176.2
n_c	对数正态分布	u_{n_c}	$0.2 u_{n_c}$
n_f	对数正态分布	u_{n_f}	$0.2 u_{n_f}$
θ_1	正态分布	0.775 89	0.155 18
θ_2	正态分布	- 2.948 63	0.589 73

则疲劳-蠕变交互作用下的失效概率为

$$P_f = P(g(T_c, N_f, t_c, n_c, \theta_1, \theta_2) < 0) \quad (7)$$

求解方程(7),采用响应面法和蒙特卡洛法相结合进行可靠性分析.首先采用带有交叉项的二次多项式模型拟合出涡轮盘低循环疲劳-蠕变寿命的响应面,然后利用蒙特卡洛法进行 10^6 次抽样,得到材料的失效概率,计算结果如图 5,图 6 所示.

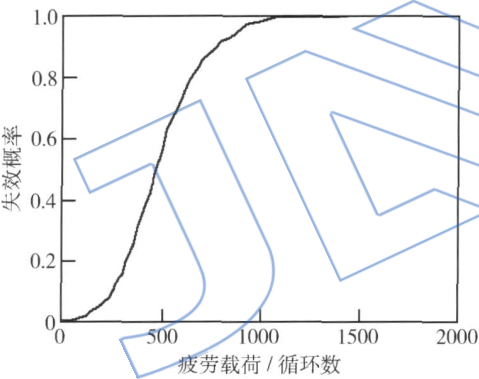


图 5 疲劳载荷循环数对失效概率的影响($t_c=2.0$ h)
Fig. 5 Effect of fatigue load cycles on failure probability

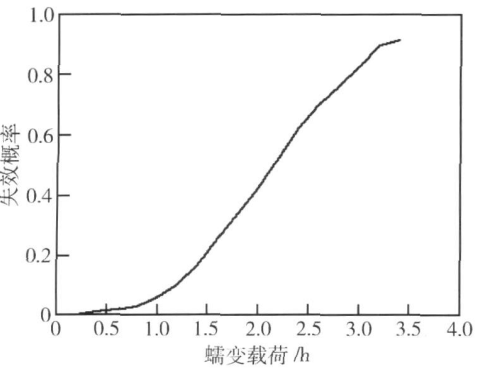


图 6 蠕变载荷循环数对失效概率的影响($n_f=440.5$ 循环数)
Fig. 6 Effect of creep load on failure probability

通过图 5,图 6 可以看出,疲劳载荷和蠕变载荷对结构的失效概率有很大影响,随着载荷循环数的增加,结构的失效概率增大,即可靠性降低.

5 灵敏度分析

为了研究随机变量 GH30 材料疲劳-蠕变率模型的影响程度并找出主要的影响因素,对随机变量进行灵敏度分析,结果如图 7 所示.

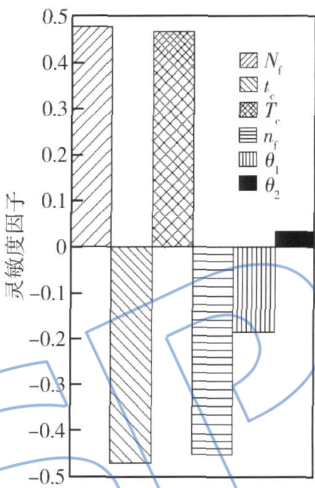


图 7 随机变量的灵敏度分析
Fig. 7 Sensitivity analysis of random variables

通过灵敏度分析发现,寿命(包括疲劳寿命、蠕变寿命)和载荷(疲劳循环数、蠕变保持时间)是影响 GH30 合金概率模型的主要因素,而疲劳-蠕变特性函数中参数 θ_1, θ_2 的离散程度对结果的分散性影响较小.因此控制与载荷和寿命相关的各因素的离散程度,就可以保证计算结果具有较高的可靠性.

6 结 论

- (1) 将疲劳-蠕变特性函数应用于镍基高温合金,建立了 GH30 材料在 600 °C环境下的疲劳-蠕变特性函数.结果表明, GH30 合金在连续循环蠕变载荷作用下疲劳与蠕变呈现负交互作用.
- (2) 随机因素的分布和数字特征对疲劳-蠕变耦合失效模式作用下的结构破坏概率有很大影响,因此在具体分析中应通过试验和统计方法来确定随机因素的特性.
- (3) 灵敏度分析确定影响结构失效概率的主要因素和次要因素,从而可提高结构或构件的使用寿命.
- (4) 考虑载荷、材料及寿命等分散性,在确定性疲劳-蠕变特性函数的基础上提出了疲劳-蠕变耦合失效模式下的概率模型的研究思路.把材料

的疲劳-蠕变概率模型应用于真实结构中就可进行结构疲劳-蠕变失效模式下寿命的可靠性分析.

参考文献：

[1] 徐灏. 疲劳强度[M]. 北京:高等教育出版社,1988.

[2] 高镇同,熊峻江. 疲劳可靠性[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2000.

[3] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京:国防工业出版社,2003.

[4] 陈杰富,李厚毅,林洪书,等. 12Cr1MoV 钢制部件疲劳-蠕变交互作用特性曲线的研究[J]. 发电设备,2004,1:43-47.

CHEN Jiefu, LI Houyi, LIN Hongshu, et al. Study on creep-fatigue interaction characteristic curves of parts made of 12Cr1MoV steel[J]. Equipment of Generating Electricity,2004,1:43-47.

[5] Mao H Y, Mahadevan S. Reliability analysis of creep-fatigue failure[J]. International Journal of Fatigue,2000,22:789-797.

[6] Yaguchi M, Nakamura T, Ishikawa A, et al. Creep-fatigue damage assessment by subsequent fatigue straining [J]. Nuclear Engineering and Design,1996,16:97-106.

[7] Zhang W, Miller K J. A study of cumulative fatigue damage under variable loading-mode conditions[J]. Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures,1996,19(2/3):229-239.

[8] 王翔. GH30 镍基合金的蠕变和蠕变-疲劳交互作用的研究[D]. 合肥:中国科学院固体物理研究所,1993.

WANG Xiang. Investigation on creep and creep-fatigue interaction in a nickel based alloy GH30[D]. Hefei:Institute of Solid State Physics of the Chinese Academy of Sciences, 1993.

