

文章编号: 1000-8055(2005) 03-0418-06

一种修正的应变范围区分法

胡绪腾, 宋迎东

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

摘要: 针对高强度、低延性材料非弹性应变范围小、难以区分的特点, 提出一种修正的应变范围区分方法。该方法不区分非弹性应变中的塑性和蠕变, 定义了3种基本类型的非弹性应变范围, 即拉伸塑性-压缩塑性非弹性应变范围、拉伸塑性和蠕变-压缩塑性非弹性应变范围和拉伸塑性-压缩塑性和蠕变非弹性应变范围。对同时包含拉/压蠕变的循环, 采用线性累积损伤法则预测其寿命。用 Rene'95 材料 650℃ 下控制应变的循环松弛试验数据对修正方法进行了验证, 结果表明: 对 Rene'95 材料的蠕变疲劳寿命, 修正方法的预测能力好于应变范围区分法(SRP), 对基本试验的寿命预测精度基本上在2倍范围之内。

关键词: 航空、航天推进系统; 蠕变疲劳; 应变范围区分法; 寿命模型; 线性累积损伤法则; 寿命预测
中图分类号: O346.2 文献标识码: A

Modified Strain range Partitioning Method

HU Xu-teng, SONG Ying-dong

(College of Energy and Power Engineering,

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: According to the character that for the high strength, low ductility alloys, the inelastic strains is small and difficult to determine, a modified method of Strain Range Partitioning (SRP) was presented. Plasticity and creep are not partitioned, and three basic kinds of inelastic strain ranges are defined in the modified SRP as follows: tensile plasticity-compressive plasticity was designated as pp inelastic strain range, tensile plasticity and creep-compressive plasticity was designated as cp inelastic strain range and tensile plasticity-compressive plasticity and creep was designated as pc inelastic strain range. The linear damage rule was applied to predict the life of cc type cycle that contains both tensile creep and compressive creep. The modified SRP was evaluated for its ability to predict creep-fatigue behavior of thermomechanically processed advanced nickel-base superalloy used for turbine disks, Rene'95, at 650℃. The result indicates that the predictive ability of the modified SRP is better than SRP, and the prediction of the is mostly within a scatter band of 2 compared to the baseline test data.

Key words: aerospace propulsion system; creep-fatigue; Strain Range Partitioning (SRP); life model; linear damage rule; life prediction

随着航空发动机性能的不不断提高, 其涡轮部件工作温度越来越高, 对其进行疲劳定寿时, 必须考虑蠕变与低循环疲劳交互作用的影响。多年来,

已建立多种高温蠕变疲劳寿命预测方法, 其中应变范围区分法(Strainrange Partitioning, 简称为SRP) 是比较有效和获得广泛应用的一种方

法^[1, 2]。但SRP 法主要针对低强度、高延性材料而发展起来的^[3]，在高应变、短寿命范围内，非弹性应变范围较大，可准确区分时，SRP 法预测精度较高^[4]。文献[3]评定了SRP 法对高强度、低延性镍基高温合金 Rene'95 蠕变疲劳寿命预测的适用性，结果表明SRP 法不适合预测 Rene'95 的高温疲劳行为。本文针对 Rene'95 材料循环应变范围小的特点，提出一种修正的应变范围区分方法和累积损伤法则，并用 Rene'95 材料 650℃ 下的循环松弛试验数据进行了验证，结果表明修正方法对 Rene'95 的预测效果较好。

1 应变范围区分法(SRP)

SRP 法由 Manson 等人^[5]于 1971 年提出，该方法直接分析高温循环滞后回线的非弹性应变范围，认为与时间相关(蠕变)和时间无关(塑性)的两类应变，即使应变量相同，所引起的损伤也不同，必须对非弹性应变范围进行区分。SRP 法的 4 种基本应变类型如图 1 所示。

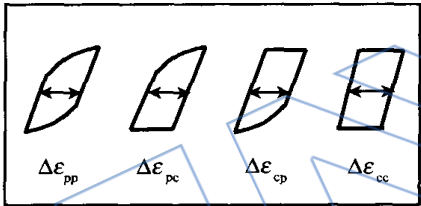


图1 SRP 法应变类型
Fig. 1 Strain types of SRP

SRP 法按照 Manson-Coffin 公式来建立 4 种应变范围分量与其对应循环寿命之间的关系，表示为：

$$N_{ij} = A_{ij} (\Delta \epsilon_{ij})^{\beta_{ij}} \quad (1)$$

方程(1)中： $ij = pp, pc, cp$ 或 cc ， A_{ij} 和 β_{ij} 为材料参数， N_{ij} 为与应变范围分量对应的循环寿命。

总的循环寿命 N_f 由下式表示的交互作用损伤法则确定^[6]：

$$\frac{1}{N_f} = \frac{F_{pp}}{N_{pp}} + \frac{F_{ps}}{N_{pc}} \left(\text{或} \frac{F_{cp}}{N_{cp}} \right) + \frac{F_{cc}}{N_{cc}} \quad (2)$$

其中： F_{ij} 为应变分数， $F_{ij} = \Delta \epsilon_{ij} / \Delta \epsilon_{in}^i$ ； $N_{ij} = A_{ij} (\Delta \epsilon_{in}^i)^{\beta_{ij}}$

2 应变范围区分法的修正

2.1 修正方法的基本应变类型

SRP 法对低强度、高延性材料的蠕变疲劳寿命预测能力获得多种材料试验的肯定^[3]。但对高

强度、低延性材料，其非弹性应变范围很小，SRP 法预测精度不高^[3]。文献[3]详细评定了SRP 法对铸锻 Rene'95 蠕变疲劳寿命预测的适用性。材料试验分为基本试验和验证性试验。研究表明SRP 法存在以下不足之处：

- (1) 部分基本材料试验的非弹性应变范围不能准确区分，建立寿命方程(1)时不得不将其舍去；
- (2) 应用方程(2) 计算 N_f 时，出现“负”的寿命现象，因此最终建立的寿命方程将不包含这些“负寿命”的试验数据信息；
- (3) 大部分试验的非弹性应变范围均较小，区分应变范围分量时相对误差将增大，因此标定出的材料参数误差也会增加，导致最终的寿命预测误差增大；
- (4) 部分验证性试验的非弹性应变范围也不能准确区分，因此不能用其验证基本试验的标定结果。

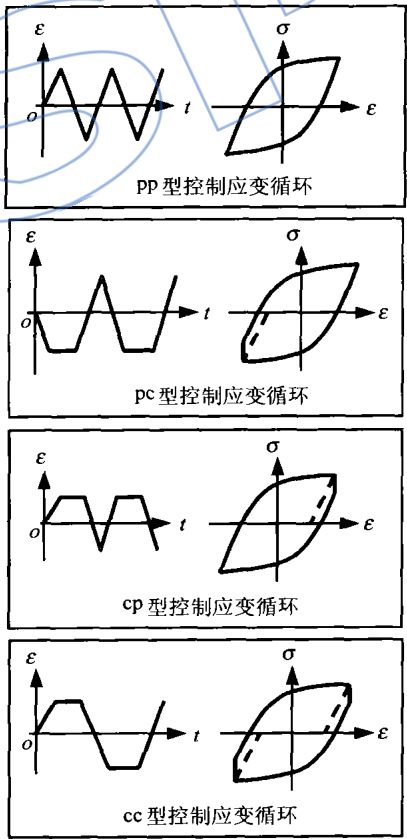


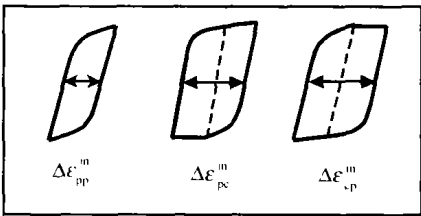
图2 控制应变循环波形与滞后回线示意图
Fig. 2 Strain-hold waveforms and hysteresis loop

另外，基本蠕变疲劳试验中不存在纯 $\Delta \epsilon_{cc}$ ， $\Delta \epsilon_{cp}$ 和 $\Delta \epsilon_{pc}$ 应变范围分量，它们总是与 $\Delta \epsilon_{cp}$ 并存(见图2)。SRP 法在假设的损伤法则下将其区分

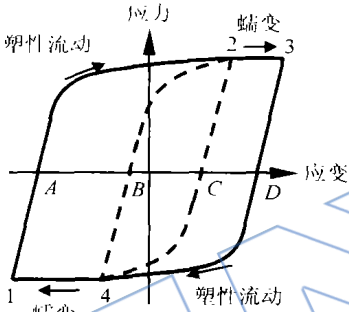
出来,难免会带来不可预见的误差。

基于以上分析,为了克服SRP法的不足之处,针对高强度、低延性材料的特点,本文提出如下假设来建立一种修正的应变范围区分方法:

(1) 不区分 p_c 和 c_p 型循环中非弹性应变的塑性和蠕变,直接以总的非弹性应变范围作为基本应变类型,加上 p_p 型循环,本文假设只有3种基本应变类型,分别记为 $\Delta\epsilon_{pp}^{in}$ 、 $\Delta\epsilon_{pc}^{in}$ 和 $\Delta\epsilon_{cp}^{in}$,如图3(a)所示;



(a) 修正方法的基本应变类型



(b) cc型循环的非弹性应变范围

图3 修正方法的应变类型和应变范围区分
Fig. 3 Strain types and strainrange partitioning method of the modified SRP

(2) 不将cc型循环加载的非弹性应变范围作为基本的应变类型,而假设 $\Delta\epsilon_{cc}^{in}$ 由 $\Delta\epsilon_{pp}^{in}$ 、 $\Delta\epsilon_{pc}^{in}$ 和 $\Delta\epsilon_{cp}^{in}$ 组合而成,即: $\Delta\epsilon_{cc}^{in} = \Delta\epsilon_{pc}^{in} + \Delta\epsilon_{cp}^{in} - \Delta\epsilon_{pp}^{in}$,如图3(b)所示。

由图3(b)可知修正方法有一定的适用范围。如果拉伸塑性应变与压缩塑性应变之和小于拉伸蠕变与压缩蠕变之和,则修正方法的第(2)条假设不成立,修正方法将不能使用。因此,修正方法只能用于蠕变量较小的蠕变疲劳寿命预测。

2.2 修正方法的寿命方程与累积损伤法则

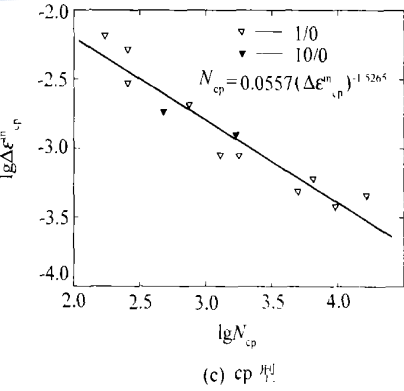
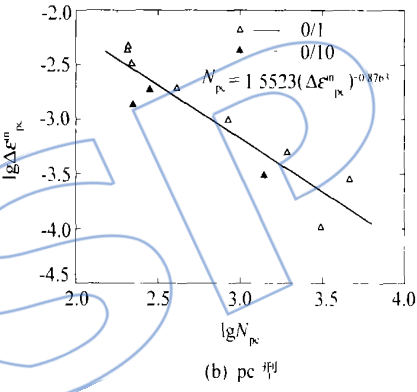
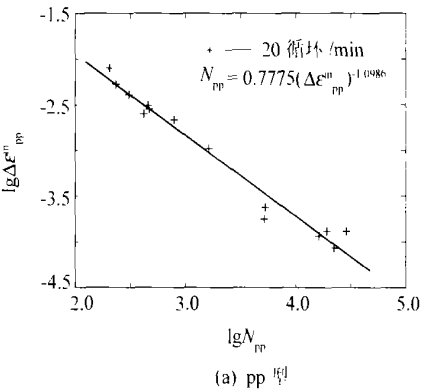
按照Manson-Coffin公式对修正方法的3种基本应变类型建立如下寿命方程:

$$N_{ij} = A_{ij} (\Delta\epsilon_{ij}^{in})^{\beta_{ij}} \tag{3}$$

式中: $ij = pp, pc$ 或 cp , A_{ij} 和 β_{ij} 为材料参数, N_{ij} 为3种循环的总寿命。

cc型循环的总寿命 N_f 由下面的线性累积损伤法则确定:

$$\frac{1}{N_f} = \frac{1}{N_{pc}} + \frac{1}{N_{cp}} + \frac{1}{N_{pp}} \tag{4}$$



20 循环/min —— 快速拉压循环 (每分钟 20 个循环)
0/1, 0/10, 1/0 和 10/0 中 1 和 10 表示小拉、压保持时间

图4 pp、pc 和 cp 型循环的非弹性应变范围 - 寿命曲线

Fig. 4 Inelastic strainrange-life relationships of pp, pc and cp type of cycles

3 修正方法的试验数据验证

3.1 pp、pc 和 cp 3 种基本循环的结果

本文用文献[3]中 Rene 95 材料 650℃ 下的蠕

变疲劳试验数据对修正方法进行了验证,结果表明修正方法对 R_{ene-95} 的预测效果较好。

首先由基本试验数据按方程(3)最小二乘拟合,得到3种基本循环的寿命方程:

$$N_{pp} = 0.777\ 5(\Delta\epsilon_{pp}^{in})^{-1.098\ 6} \tag{5}$$

$$N_{pc} = 1.552\ 3(\Delta\epsilon_{pc}^{in})^{-0.876\ 3} \tag{6}$$

$$N_{cp} = 0.055\ 7(\Delta\epsilon_{cp}^{in})^{-1.526\ 5} \tag{7}$$

3种循环的非弹性应变范围-寿命曲线如图4所示。从中可以看出虽然存在蠕变等因素的影响,非弹性应变和寿命之间的近似对数线性关系仍比较明显,好于文献[3]中区分应变后的结果。

定义寿命分散系数:

如果 $N_p \geq N_f$, $S_c = N_p/N_f$

如果 $N_p < N_f$, $S_c = N_p/N_f$

其中: N_p 为预测寿命, N_f 为试验寿命。

首先分析修正方法对pp,pc和cp3种基本循环的寿命预测结果,并与SRP法的结果作了对比。预测结果分别见表1~3。结果表明:对于pp型循环,修正方法与SRP法的寿命方程完全相同,因此寿命预测结果也完全相同,且预测精度均在2倍范围之内;对于cp型循环,修正方法的预测结果明显好于SRP法,这是由于修正方法不区分其塑性应变和蠕变应变,因此不会出现SRP法中的“负寿命”问题,建立的寿命方程包含了所有试验数据的信息;对于pc型循环,修正方法的预测结果也好于SRP法,且对于不能准确区分应变类型的试验,SRP法无法给出预测结果,而修正方法显示出其优越性。可见不区分非弹性应变范围,而直接应用Manson-Coffin公式建立整个非弹性应变范围与寿命之间的方程,对基本试验数据具有较高的预测精度,预测结果好于SRP法。

表1 修正方法对pp型基本试验的寿命预测结果
Table 1 Life predictions of the modified method for pp type of cycle

试棒 编号	$\Delta\epsilon^{to}$	N_f	N_p	S_c		试棒 编号	$\Delta\epsilon^{to}$	N_f	N_p	S_c	
				修正法	SRP 法					修正法	SRP 法
21	0.022 0	203	159	1.28	1.28	27	0.012 0	1 629	1 472	1.11	1.11
17	0.020 0	234	246	1.05	1.05	255	0.011 0	5 332	7 472	1.40	1.40
18	0.018 0	307	328	1.07	1.07	29	0.010 0	5 158	10 297	2.00	2.00
224	0.016 0	415	561	1.35	1.35	30	0.009 0	16 215	16 380	1.01	1.01
22	0.016 0	461	442	1.04	1.04	234	0.009 0	19 160	14 453	1.33	1.33
240	0.016 0	463	486	1.05	1.05	235	0.009 0	22 364	23 050	1.03	1.03
26	0.014 0	784	657	1.19	1.19	239	0.008 8	28 697	14 453	1.99	1.99

表2 修正方法对pc型基本试验的寿命预测结果
Table 2 Life predictions of the modified method for pc type of cycle

试棒 编号	$\Delta\epsilon^{to}$	N_f	N_p	S_c		试棒 编号	$\Delta\epsilon^{to}$	N_f	N_p	S_c	
				修正法	SRP 法					修正法	SRP 法
6	0.018 0	207	184	1.12	1.15	16	0.010 0	3 093	4 839	1.56	×
11	0.016 0	209	171	1.22	1.25	238	0.009 0	4 619	2 015	2.29	2.31
14	0.016 0	219	236	1.08	1.11	222	0.014 0	224	505	2.25	2.39
8	0.014 0	413	373	1.11	1.00	41	0.012 0	283	385	1.36	1.08
13	0.012 0	846	673	1.26	1.09	253	0.010 0	1 397	1 868	1.34	2.10
241	0.011 0	1 940	1 234	1.57	1.18						

注: ×——表示SRP法不能准确区分应变类型。以下同。

表3 修正方法对cp型基本试验的寿命预测结果

Table 3 Life predictions of the modified method for cp type of cycle

试棒 编号	$\Delta\epsilon^{\text{to}}$	N_f	N_p	S_c		试棒 编号	$\Delta\epsilon^{\text{to}}$	N_f	N_p	S_c	
				修正法	SRP 法					修正法	SRP 法
245	0.020 0	171	119	1.43	1.02	38	0.010 0	5 013	6 279	1.25	1.82
5	0.018 0	255	170	1.50	1.13	233	0.010 0	651 9	4 551	1.43	2.98
10	0.016 0	257	401	1.56	1.62	33	0.010 0	960 9	9 256	1.04	2.39
7	0.014 0	748	701	1.07	1.26	237	0.009 0	16 418	6 938	2.37	5.44
12	0.012 0	128 9	251 2	1.95	1.22	228	0.014 0	481	826	1.72	1.37
39	0.011 0	178 1	252 5	1.42	1.36	40	0.012 0	1 705	1 485	1.15	1.80

表4 修正方法对可等效为pp,pc或cp型循环的寿命预测结果

Table 4 Life predictions of the modified method for verification tests

试棒 编号	$\Delta\epsilon^{\text{to}}$	N_f	N_p	S_c		试棒 编号	$\Delta\epsilon^{\text{to}}$	N_f	N_p	S_c		
				修正法	SRP 法					修正法	SRP 法	
等 34	0.013 0	526	1 258	2.39	2.39	等 256	0.018 0	60	284	4.73	×	
效 19	0.012 0	1 138	1 536	1.35	1.35	效 252	0.014 0	194	945	4.87	6.09	
pp 229	0.009 0	5 277	7 204	1.37	1.37	pc 260	0.014 0	646	660	1.02	×	
等 效 pc	247	0.018 0	263	217	1.21	1.32	等 259	0.012 0	1 731	881	1.97	×
	251	0.014 0	639	669	1.05	2.08	242	0.018 0	472	235	2.01	1.64
	262	0.012 0	1 086	1 280	1.18	×	246	0.018 0	253	243	1.04	1.13
	261	0.014 0	499	607	1.22	×	cp 244	0.016 0	447	474	1.06	1.02

表5 修正方法对cc型循环及可等效为cc型循环的寿命预测结果

Table 5 Life predictions of the modified method for cc type of cycle

试棒 编号	$\Delta\epsilon^{\text{to}}$	N_f	N_p	S_c		试棒 编号	$\Delta\epsilon^{\text{to}}$	N_f	N_p	S_c	
				修正法	SRP 法					修正法	SRP 法
1	0.018 0	156	127	1.23	1.06	227	0.014 0	455	280	1.63	1.49
2	0.016 0	238	218	1.09	1.15	223	0.012 0	945	538	1.76	1.50
32	0.014 0	358	398	1.11	1.47	226	0.014 0	349	382	1.09	1.17
9	0.012 0	959	693	1.38	1.40	225	0.012 0	464	536	1.15	1.23
4	0.010 0	1 215	786	1.55	1.53	23	0.018 0	110	148	1.34	2.44
15	0.010 0	1 288	1 128	1.14	1.00	24	0.017 0	159	199	1.25	2.23
28	0.018 0	115	104	1.11	1.10	20	0.016 0	301	291	1.03	1.71
31	0.014 0	199	167	1.19	1.42	25	0.015 0	282	416	1.48	2.63
230	0.012 0	331	619	1.87	1.48						

3.2 cc 型循环和验证性试验的结果

本文不将 cc 型循环作为基本循环类型, 而将其作为 3 种基本循环的组合。因此, cc 型循环在这里可以作为验证性试验, 直接用 pp, pc 和 cp 的数据对其预测。另外, 文献[3] 中的验证性试验中, 一部分可等效为 pp, pc 和 cp 型循环, 一部分可等效为 cc 型循环。对可等效为 pp, pc 和 cp 型循环的试验直接利用公式(5)、(6) 和(7) 计算预测寿命, 结果见表 4。对 cc 型循环和可等效为 cc 型循环慢速拉压循环试验应用线性损伤法则(4) 式计算预测寿命, 结果见表 5。

表 4 的结果表明: 除 256 号和 252 号试棒, 修正方法对可等效为 pp, pc 或 cp 型循环的验证性试验的预测精度也较高。256 号和 252 号试棒的预测分散系数较大, 而应用 SRP 法时, 256 号试棒不能准确区分应变类型, 252 号预测分散系数更大, 为 6. 09。但也有可能, 这两根试棒由于材料缺陷或试验问题, 过早失效。表 5 则表明本文提出的累积损伤法则的预测精度好于 SRP 法, 所有 cc 型循环和可等效为 cc 型循环的试验, 寿命分散系数均不超过 2。因此, 本文提出的对 cc 型循环的应变范围区分方法和线性累积损伤法则是有效的。综上分析, 对 Rene'95 材料, 修正方法的预测效果比 SRP 法要好, 并且修正方法减少了寿命方程的个数和计算的复杂性, 从而减少了标定试验数量, 可节约试验时间和试验经费。

4 结 论

本文针对高强度、低延性的 Rene' 95 材料循

环滞后回线非弹性应变范围较小的特点, 提出了一种修正的应变范围区分方法和累积损伤法则, 并用 Rene'95 材料 650℃ 下的控制应变循环松弛试验数据对修正方法进行了验证和评定。结果表明本文提出的修正方法对 Rene'95 材料的蠕变疲劳寿命具有较好的预测能力, 比 SRP 法预测效果好。该方法可望推广应用于国产同类高强度、低延性高温合金的蠕变疲劳寿命预测。

参考文献:

- [1] Halford G R. Evolution of Creep-Fatigue Life Prediction Models, Creep-Fatigue Interaction at High Temperature [R]. Haritos G K, Ochoa O O, eds., ASME AD- Vol. 21, 1991: 43~57.
- [2] AGARD Conference Proceedings No. 243. Characterization of Low Cycle High Temperature Fatigue by the Strainrange Partitioning Method[R]. Aalborg, Denmark, 1978.
- [3] Bernstein H L. An Evaluation of Four Current Models to Predict the Creep- Fatigue Interaction in Rene 95[R]. AFML- TR- 79- 4075, 1979.
- [4] Saltsman J F, Halford G R. Life Prediction of Thermomechanical Fatigue Using the Total Strain Version of Strainrange Partitioning (SRP) - A Proposal [R]. NASA TP- 2779, 1988.
- [5] Manson S S, Halford G R, Hirschberg M H. Creep-Fatigue Analysis by Strain-Range Partitioning[R]. First Symposium on Design for Elevated Temperature Environment, ASME, 1971: 12~28.
- [6] Manson S S. The Challenge to Unify Treatment of High Temperature Fatigue - A Partisan Proposal Based on Strainrange Partitioning [R]. Fatigue at Elevated Temperatures, ASTM STP 520, 1972: 744~775.