

文章编号: 1000-8055(2006)052086-07

一种确定低周应变疲劳应变²寿命曲线的方法

张国栋¹, 苏彬¹, 王泓², 钟斌¹, 许超¹

(1. 北京航空材料研究院, 北京 100095; 2. 西北工业大学材料科学与工程学院, 西安 710072)

摘 要: 基于 Manson-Coffin 方程处理低周应变疲劳应变²寿命曲线, 提出了一种在短寿命区用低周应变疲劳试验数据, 长寿命区(5000 周~50000 周)用高周疲劳试验数据联合确定材料的高温低周应变疲劳应变²寿命曲线的方法。联合处理方法的应用将不再需要进行应变控制的长寿命小应变的疲劳试验, 节约了试验经费, 缩短了试验周期。用 GH141 合金 760 e 的低周应变疲劳和高周疲劳数据对该方法进行了验证, 验证结果发现: 联合处理方法和单纯的 Manson-Coffin 方程处理得到的应变²寿命曲线吻合很好。联合处理方法可以用来确定高温低周应变疲劳应变²寿命曲线。

关 键 词: 航空、航天推进系统; 低周疲劳; 寿命; 高周疲劳

中图分类号: V231.9; O346.2

文献标识码: A

A method for reducing strain²life curve of low cycle fatigue

ZHANG Guodong¹, SU Bin¹, WANG Hong², ZHONG Bin¹, XU Chao¹

(1. Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China;

2. School Material Science and Engineering,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Based on Manson-Coffin equations of low cycle fatigue (LCF) under strain controlled to acquire strain²life curve, a new technique for determining strain²life curve of LCF is developed. When fatigue life is shorter than 5000 cycles, experimental data of LCF under strain controlled are used. But when fatigue life is longer than 5000 cycles, experimental data of high cycle fatigue (HCF) under stress controlled are employed. This new method of combining LCF with HCF allows to avoid long fatigue life with small strain test under strain controlled, thus test expenses may be saved and test time shortened. Experimental data of LCF and HCF are reduced by new method for superalloy GH141, at temperature 760 e. Strain²life curves obtained by simply Manson-Coffin equation and by new method are in good agreement. The new method combining by LCF with HCF can be used to get strain²life curve of LCF.

Key words: aerospace propulsion system; low cycle fatigue (LCF); life; high cycle fatigue (HCF)

等温条件下应变控制的低周疲劳应变²寿命曲线是通过对应变²应力循环信息的记录, 计算弹

性应变与塑性应变的大小, 分别拟合弹性应变²寿命曲线和塑性应变²寿命曲线而最终得到总应变²

收稿日期: 200508208; 修订日期: 200512209

作者简介: 张国栋 (1972), 男, 陕西富平人, 北京航空材料研究院材料力学性能测试与表征研究室工程师, 硕士, 主要从事高温疲劳与断裂, 热机械疲劳方面研究。

寿命曲线和循环应力-应变曲线。考虑材料分散性对应变-寿命曲线的影响, 确定一条应变-寿命曲线一般至少需要 20 个有效试验数据点。高温低周应变疲劳试验难度大, 试验周期长, 所需试验经费多, 而高温低周应变疲劳性能对有些材料的工程应用是必须有一项性能数据, 没有高温低周疲劳的性能数据将影响这类材料的工程应用。在能够满足材料工程应用前提下, 如何减少试验经费, 缩短试验周期以及如何应用有限的试验数据给出能够较好的对高温低周疲劳寿命进行预测的应变-寿命方程是从事高温低周疲劳寿命预测的科研工作者共同的研究目标。

根据结构设计的要求, 材料的高温低周应变疲劳的应变-寿命曲线的寿命一般在 50 周~50000 周^[1]之间, 高周疲劳的应力-寿命曲线寿命一般在 5×10^3 周~ 1×10^7 周^[1]之间。对于许多高强度低韧性的材料, 当疲劳寿命大于 5000 周时, 如果用传统的 Manson-Coffin 方程^[2]对等温低周应变疲劳试验结果进行处理计算, 常常会发生计算出的塑性应变值非常小甚至是负值的情况。而在对塑性应变-寿命曲线进行拟合处理时, 这类塑性应变点将被示为无效的数据点^[3], 这将造成试验数据的极大浪费。既然这部分点(疲劳寿命大于 5000 周的点)在进行数据处理时不能得到充分利用, 那么, 能不能够只进行应变控制的短寿命大应变的疲劳试验, 长寿命小应变的疲劳试验用控制应力来进行, 甚至在长寿命区直接采用高周疲劳寿命在 5×10^3 周~ 5×10^4 周的试验数据来确定低周疲劳应变-寿命曲线, 本文将在这方面进行探索研究。

1 疲劳寿命预测

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^[4]。为了将 Manson-Coffin 方程推广到高温下使用, Coffin 提出了频率修正法^[5], Ostergren 提出了基于能量方法的损伤函数法^[6]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)^[7], 频率分离法(FS)^[8]、应变能范围区分法(SEP)^[9]等。目前美

国军用标准 MIL-HDBK-25J^[10]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。

中值 S-N 曲线的处理, 现有三参数幂函数法^[11]和美国军用标准 MIL-HDBK-25J 推荐的等效应力法。韩希鹏^[12]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, 并鉴于对散点法试验数据的统计值 P2-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 P2-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。

2 等温低周疲劳应变-寿命曲线的确定

疲劳试验通常可以通过控制应变和控制应力来进行。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, 此时进行疲劳试验时多采用应变控制, 在这种情况下, 材料的疲劳寿命一般比较短; 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试验, 由于应变控制疲劳试验较复杂, 因此, 当材料在没有进入屈服阶段前, 通常控制应力来进行疲劳试验, 材料的疲劳寿命一般比较长。

确定材料的高温低周应变疲劳的应变-寿命曲线一般需要 5×10^3 周~ 5×10^4 周的疲劳试验数据, 这些数据点通常是材料在没有进入屈服阶段前或是临近屈服点处的疲劳试验所得的。目前国内工程设计用材料的低周疲劳应变-寿命曲线在此寿命范围(5×10^3 周~ 5×10^4 周)内还是通过控制应变进行疲劳试验的。因此, 常常会出现当疲劳寿命大于 5×10^3 周时, 用传统的 Manson-Coffin 方程对等温低周应变疲劳试验结果进行处理计算出的塑性应变值非常小甚至是负值的情况。而在对塑性应变-寿命曲线进行拟合处理时, 这类塑性应变点将被示为无效的数据点, 造成了试验数据的极大浪费。临近屈服点处的疲劳试验既可以通过控制应变进行, 也可以通过控制应力进行。因此, 可通过控制应力的疲劳试验来获得疲劳寿命在 5×10^3 周~ 5×10^4 周之间的数据, 控制方式的改变将降低试验难度, 缩短试验周期。

应力疲劳中值 S-N 曲线和统计值 P2-S-N 曲线的测定通常要求按标准方法进行试验和数据处理,

即高应力、中等寿命区是在给定应力水平下用成组法,低应力段、长寿命区是在给定循环寿命下用升降法试验,然后按该标准推荐的方法进行拟合数据处理。这种方法被普遍采用,较为成熟,但其所需试样较多,且试验周期长、耗资大。目前国内外有很多疲劳数据是用试样较少的散点法进行试验。

高周疲劳试验数据一般包括了寿命在 5 @ 10³ 周~ 5 @10⁴ 周之间的试验点。当疲劳寿命在 5 @10³ 周~ 5 @10⁴ 周之间时,如果假设: (a) 试验频率对疲劳寿命没有影响, (b) 应力控制的疲劳试验不产生蠕变变形, (c) 应变控制的疲劳试验不产生应力松弛现象, (d) 没有鲍辛格(Bausch2inger)效应。那么, 可以通过循环应力2应变曲线来进行应力和应变之间的转化。从而, 在用 Man2son2Coffin 方法确定材料的高温低周应变疲劳的应变2寿命曲线时, 低寿命区用低周应变疲劳试验数据, 高寿命区(5 @10³ 周~ 5 @10⁴ 周)用高周疲劳试验数据, 这样将不再需要进行应变控制的长寿命小应变的疲劳试验, 节约了试验经费, 缩短了试验周期。

3 应用举例

在本研究中采用高温合金 GH 141 的 760 e 高温低周疲劳和高周疲劳数据对联合处理方法进行验证, 合金的 760 e 拉伸性能见表 1。本研究中采用 56 mm 低周疲劳试样和 55 mm 的高周疲劳试样。低周疲劳数据是通过在 MTS2809 疲劳试验机上进行应变比为- 1 的低周应变疲劳试验获得的, 高周疲劳数据是通过在 PLC2100C 高频疲劳试验机上进行应力比为- 1 的高周疲劳试验获得的。

表 1 GH141 合金的拉伸性能

Table 1 Tension performance of GH141

H e	R _b / MPa	R _{0.2} / MPa	D ₅ / %	W%
760	990	735	16. 0	21. 0

3. 1 低周疲劳试验结果

按照 Manson2Coffin 方法对 GH141 合金 760 e 低周应变疲劳试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 个有效试验点中只有 14 个试验点可以被用来拟合塑性应变2寿命曲线, 从而计算求得 Manson2Coffin 方程, 处理结果如图 1 所示。疲劳寿命大于 1000 周的试验数据不能得到充分的利用, 造成试验数据和试验资源的浪费。

在 25 个有效试验点中只有 11 个试验点(去掉塑性应变非常小和为负值的数据点) 可以被用来拟合塑性应变2应力曲线, 从而来确定循环应力2应变曲线方程, 处理结果如图 2 所示。

表 2 GH141 合金的低周疲劳性能

Table 2 LCF Performance of GH141

稳态迟滞回线特征值					试样数/ 根
(\$E_t/2)/ %	(\$E_e/2)/ %	(\$E_p/2)/ %	(\$R/2)/ MPa	2N _f / 反向数	
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	1 088	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	1 802	1
0. 601	0. 595	0. 005	821	1 400	1
0. 602	0. 568	0. 034	783	1 508	1
0. 501	0. 504	- 0. 004	696	3 824	1
0. 502	0. 521	- 0. 020	719	2 938	1
0. 501	0. 508	- 0. 007	700	3 596	1
0. 400	0. 411	- 0. 011	567	8 342	1
0. 400	0. 434	- 0. 035	599	8 110	1
0. 351	0. 400	- 0. 049	552	15 308	1
0. 299	0. 349	- 0. 051	482	39 370	1
0. 500	0. 518	- 0. 018	715	2 728	1
0. 399	0. 429	- 0. 030	592	6 314	1
0. 351	0. 360	- 0. 010	497	14 930	1
0. 300	0. 345	- 0. 045	476	23 974	1

3. 2 高周疲劳试验结果

对高温合金 GH 141 进行了 760 e 的应力控制高周疲劳试验, 得到结果如表 3 和图 3 所示。

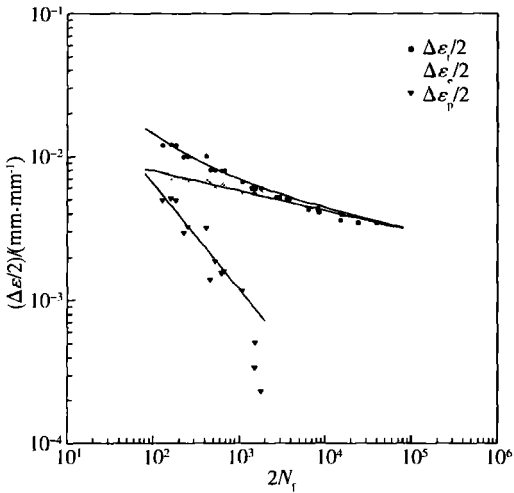


图1 Manson-Coffin 得到的应变-寿命曲线

Fig. 1 Strain-life curve reduced by Manson-Coffin equation

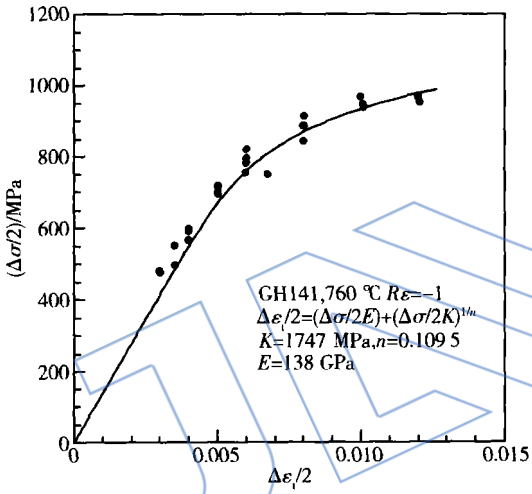


图2 循环应力-应变曲线

Fig. 2 Cyclic stress-strain curve

从图3可以看出: 高周疲劳试验数据包括了寿命在 5×10^3 周~ 5×10^4 周之间的试验点。

表3 GH141 合金的高周疲劳性能

Table 3 HCF performance of GH141

$R_{\max}/$ MPa	$N_f/$ 周	$R_{\max}/$ MPa	$N_f/$ 周	$R_{\max}/$ MPa	$N_f/$ 周
640	3 080	580	3 000	500	21 000
640	3 340	580	3 700	480	2 022 000
640	2 240	540	9 620	460	10 000 000
620	2 300	540	9 340		
580	4 510	540	12 640		

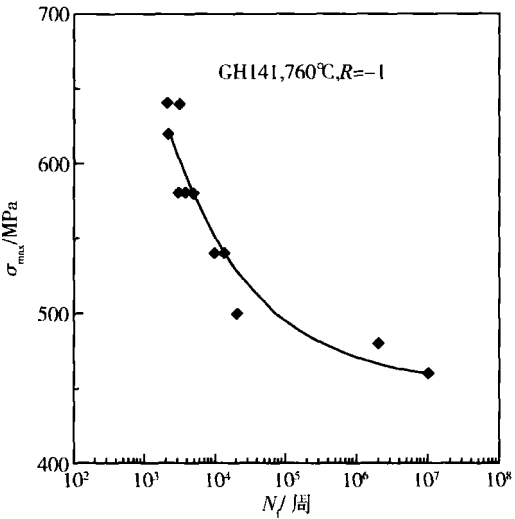


图3 高周疲劳应力-寿命曲线

Fig. 3 Stress-life curve of high cycle fatigue

3.3 联合方法处理结果

3.3.1 联合方法处理应力-寿命曲线

短寿命区(疲劳寿命小于 1000 周)取应变疲劳数据,长寿命区(疲劳寿命大于 1000 周)取高周疲劳数据构成组合数据,如表4所示。假设:应力与寿命之间符合指数关系分布,对组合数据(长寿命为高周疲劳数据,短寿命为低周疲劳数据)的应力与寿命关系进行拟合处理,结果如图4。从图4可以看出,组合数据的应力与寿命相关性很好。

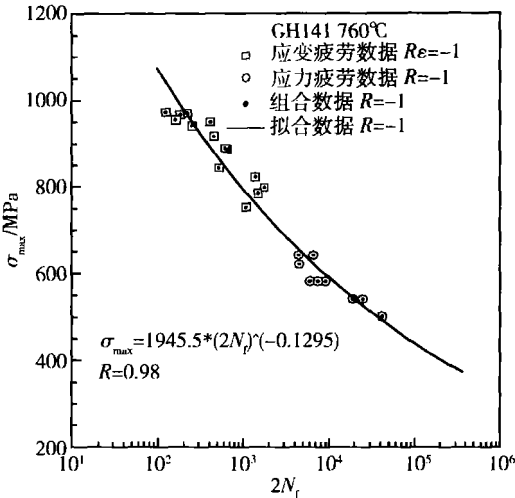


图4 组合形式的应力-寿命曲线

Fig. 4 Stress-life curve reduced by combined method

3.3.2 联合方法处理应变-寿命曲线

用低周应变疲劳得到的循环应力-应变曲线见图2,对组合数据中的高周疲劳数据进行应力-应变转换,得到了一系列的(应变,寿命)的数据

对, 结合短寿命区的低周应变疲劳数据, 组成了 (应变, 寿命) 的组合数据, 结果如表 5 所示。用组合数据与用单纯的低周应变疲劳数据处理结果进行比较, 结果如图 5 和图 6 所示。结果发现, 用 (应变, 寿命) 的组合数据与用单纯的低周应变疲劳数据处理得到的应变2寿命曲线吻合很好。在长寿命区(1 @10³ 周~ 1 @10⁵ 周)两种方法得到的计算寿命比落在 1.57 倍分散带区域内, 如图 6 所示。图 6 中横坐标为应变疲劳寿命模型的预测寿命, 用 2N_{p1} 代表; 纵坐标为组合数据疲劳寿命模型的预测寿命, 用 2N_{p2} 代表。

表 4 应力形式的组合试验数据

Table 4 Combined experiment data in stress form

	$R_{max}/$	$2N_f/$	$R_{max}/$	$2N_f/$	$R_{max}/$	$2N_f/$
	MPa	反向数	MPa	反向数	MPa	反向数
应变疲劳数据	972	128	953	162	888	626
	949	416	969	226	796	1802
	843	522	940	254	821	1400
	751	1088	886	670	783	1508
	966	184	915	460		
应力疲劳数据	640	6680	580	6000	540	25280
	640	4480	580	7400	500	42000
	620	4600	540	19240		
	580	9020	540	18680		

3.3.3 联合数据处理方法的寿命预测能力验证

由于 (应变, 寿命) 的组合数据中没有包含低周应变疲劳所测得的长寿命数据点, 所以可以用低周应变疲劳所测得的长寿命数据点来验证用 (应变, 寿命) 的组合数据处理得到的 Manson2 Coffin 方程的寿命预测能力, 验证结果如表 6 和图 7 所示。从图可以看出, 单纯的低周应变疲劳数据处理得到的应变2寿命曲线的预测寿命与观测寿命之比在 3.98 倍之内, 组合数据处理得到的应变2寿命曲线方程的预测寿命与观测寿命之比在 6.25 倍之内, 用 (应变, 寿命) 的组合数据与用单纯的低周应变疲劳数据处理得到的应变2寿命曲线预测得到的寿命之比在 1.57 倍之内。所以在进行低周应变疲劳应变2寿命曲线的测定时, 可以采用数据组合法 (长寿命为高周疲劳数据, 短寿命为低周疲劳数据) 来进行, 这样可以降低试验难度, 减少试验用试样, 缩短试验周期, 节省试验费用。

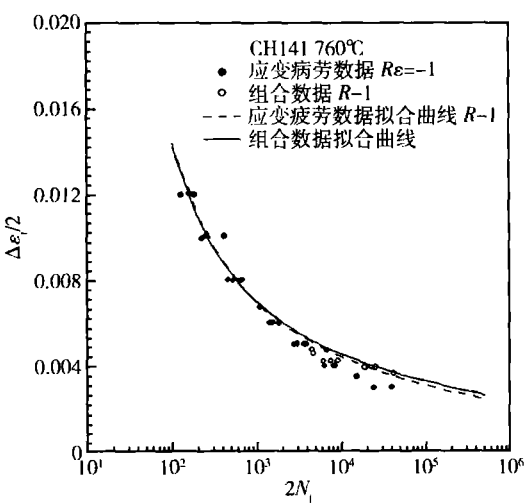


图 5 组合形式的应变寿命曲线
Fig. 5 Stress-life curve reduced by combined method

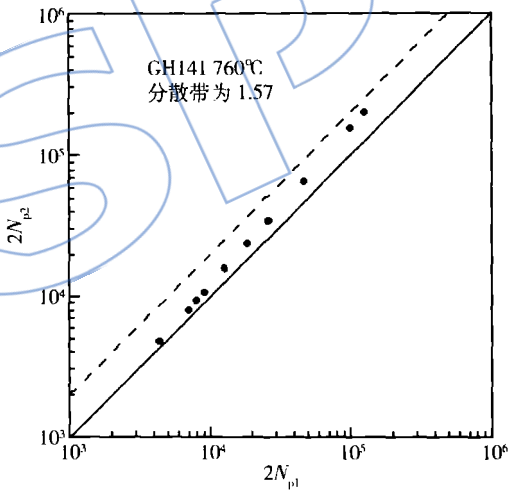


图 6 计算疲劳寿命的比较
Fig. 6 Compare results of calculated fatigue life

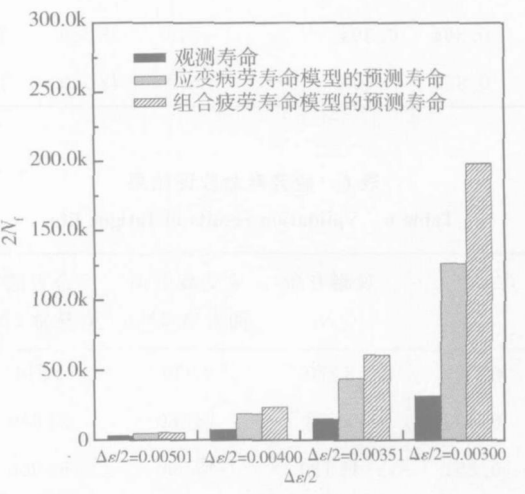


图 7 疲劳寿命验证结果
Fig. 7 Validation results of fatigue life

表 5 应变形式的组合试验数据

Table 5 Combined Experiment data in strain form

	稳态迟滞回线特征值					
	$(\sigma_{E1}/2)/(\sigma_{E2}/2)$	$(\sigma_{E3}/2)/(\sigma_{E4}/2)$	$(\sigma_{E5}/2)/(\sigma_{E6}/2)$	$(\sigma_{R1}/2)/(\sigma_{R2}/2)$	$(2N_f)/$	试样数/根
应变疲劳数据	%	%	%	MPa	反向数	
	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
应力疲劳数据	0.474	0.474	-	640	6680	1
	0.474	0.474	-	640	4480	1
	0.457	0.457	-	620	4600	1
	0.425	0.425	-	580	9020	1
	0.425	0.425	-	580	6000	1
	0.425	0.425	-	580	7400	1
	0.394	0.394	-	540	19240	1
	0.394	0.394	-	540	18680	1
	0.394	0.394	-	540	25280	1
	0.363	0.363	-	500	42000	1

表 6 疲劳寿命验证结果

Table 6 Validation results of fatigue life

$(\sigma_{E1}/2)/(\sigma_{E2}/2)$	观测寿命 $2N_f$	应变疲劳预测寿命 $2N_{p1}$	组合方法预测寿命 $2N_{p2}$
%			
0.501	3270	4930	5514
0.400	7588	18680	23840
0.351	15120	43560	60900
0.300	31672	126200	198000

4 结 论

基于 Manson2Coffin 方程提出了在短寿命区用低周应变疲劳试验数据,长寿命区(5 @10³ 周~ 5 @10⁴ 周)用高周疲劳试验数据联合确定材料的高温低周应变疲劳应变2寿命曲线的方法,应用 GH141 合金 760e 的低周应变疲劳和高周疲劳数据进行了验证研究,得到结论如下:

(1)联合处理方法和单纯的用低周应变疲劳数据处理得到的应变2寿命曲线吻合很好。

(2)在确定材料的高温低周应变疲劳应变2寿命曲线时,可以采用短寿命区用低周应变疲劳试验数据,长寿命区(5 @10³ 周~ 5 @10⁴ 周)用高周疲劳试验数据的联合处理法。

(3)联合处理法的应用将不再需要进行长寿命区(5 @10³ 周~ 5 @10⁴ 周)控制应变的低周疲劳试验,可以控制应力进行低周疲劳试验,通过应力2应变的转换得到(应变,寿命)数据。控制方式的改变降低了试验难度,节约了试验经费,缩短了试验周期,降低试验成本。

(4)控制应力进行的长寿命区(5 @10³ 周~ 5 @10⁴ 周)低周疲劳试验得到的(应力,寿命)数据可以与轴向高周应力疲劳的试验数据联合处理得到高周 S2N 曲线,使试验数据得到充分的利用。

(5)对长寿命区(5 @10³ 周~ 5 @10⁴ 周)的试验数据进行联合处理,不仅拓宽了低周疲劳应变2寿命曲线的应用范围,而且使高周疲劳 S2N 曲线的范围拓宽到了 5 @10³ 周,有力的补充了高周疲劳 S2N 曲线的低频段的试验数据。

参考文献:

[1] GJB/Z 18291,金属材料力学性能数据表达准则[S]. 北京:国防科工委军标出版发行部,1992.

[2] Manson S S. A Complex Subject2Some Simple Approximations[J]. Journal of Experiment Mechanics, 1965, (57): 1932226.

[3] 张国栋,苏彬,王泓,等. K403 合金高温低周应变疲劳寿命预测方法研究[J]. 机械强度,2004,26(S):263266.

ZHANG G D, Su B, Wang H, et al. Method of life prediction for low cycle fatigue in superalloy K403[J]. Journal of Mechanical Strength, 2004, 26(S): 2632266.

[4] 谢济洲. 低循环疲劳手册[M]. 北京:北京航空材料研究所,1991. 28232.

[5] Coffin L F. The effect of frequency on high temperature low2cycle fatigue[A]. In Proceedings of Air Force Conference on Fracture and Fatigue of Aircraft Structures[C]. AFD12TR2702144, 1970: 302312.

[6] 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.

[7] Manson S S, Halford G R, Hirschberg M H. Creep-fatigue analysis by strain-range partitioning[A]. In Design for Elevated Temperature Environment[C], S. Y. Zaretsky, ed: ASME, 1971: 1228.

[8] Coffin L F. The concept of frequency separation in life prediction for time-dependent fatigue[A]. ASME-MPC Symposium on Creep-Fatigue Interaction[C]. MPC23, 1976: 349-363.

[9] He J, Duan Z, Ning Y, Zhao D. Strain energy partitioning and its application to GH33A nickel-base superalloy and 1Cr18Ni9Ti stainless steel[A]. In Advance in Life Prediction Methods[C]. NY: D. A. Woodford and J. R. Whitehead eds., ASME, 1983: 27-32.

[10] MIL-HDBK-25J. 航空与航天飞行器结构用金属材料与元件[S]. 美国空军, 2003.

[11] 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.

Fu Huimin. Regression analysis of three-parameter power function[J]. Journal of Aerospace Power, 1994, 9(2): 186-190.

[12] 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.

HAN Xi-peng, XU Chao, DUAN Zu-xiang, et al. Modified equivalent stress model for high cycle fatigue curves[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003, 23(3): 53-57.

