

国外航空材料 专题参考资料 (50)

金属的蠕变/疲劳 交互作用及其测试技术



航空材料编辑部

1977年11月

说 明

航空发动机转子部件，在起飞——巡航——着陆的多次循环中，部件材料实际上经受着蠕变——疲劳的交互作用。为了给设计、科研及生产部门的同志们提供一点有关材料蠕变——疲劳复合性能方面的参考资料，本文集共收集了九篇文章。概括地介绍了近年来国外在开展蠕变——疲劳复合性能试验研究方面的情况。文中列举了一些常用高温合金复合性能的测试技术及试验结果的分析，提供了在蠕变——疲劳交互作用下循环寿命的计算方法。这些内容对开展材料应用性能研究，为设计选材提供较为可靠的依据，具有一定的参考价值。

本文集系周洪范同志翻译，文中不当之处，望读者批评指正。



目 录

转子钢蠕变和疲劳交互作用	(1)
三种高温合金的循环蠕变断裂行为	(28)
Inconel X-750 合金复合蠕变/疲劳行为	(39)
复合蠕变与疲劳负荷对高温下奥氏体不锈钢的影响	(46)
叠加疲劳对Udimet-700镍基合金蠕变性能的影响	(52)
蠕变在高温低周疲劳中的作用	(65)
保持时间对高温低周疲劳的影响	(75)
用常规控制方法改进一种 Ni-Fe 基高温合金的 工程性能	(105)
考察低循环疲劳和蠕变时高温循环寿命的计算	(115)

转子钢蠕变和疲劳交互作用

Milton M. Leven

摘 要

对 $1\text{Cr}-1\text{Mo}-\frac{1}{4}\text{V}$ 转子钢在 1000°F (538°C) 下, 测定了蠕变和低周疲劳的交互作用。这些试验包括 5 种不同形式的控制应变循环: 恒拉应力蠕变, 不同频率的线性可变应变, 最大压应变下有保持期、最大拉应变下有保持期、或两者都有的循环。用以描述蠕变和疲劳交互作用的实验数据为:

- (1) Coffin 提出的修正频率应变范围法;
- (2) Conway 和 Berling 提出的断裂总时间与单个循环时间的关系;
- (3) Ellis 和 Esztergar 提出的断裂总时间与达到断裂循环次数的关系;
- (4) 金属性能委员会用蠕变与疲劳交替试验来确定损伤分数的总和;
- (5) Manson、Halford 及 Hirschbeng 提出的应变范围划分法。

为了说明应变范围划分法, NASA Lewis 研究中心作了七种补充试验。

采用观察的、超声的和声发射的方法检查裂纹源并不是十分成功的。裂纹源的粗略标志可从循环数 N_b 来判定, 即应力循环曲线上第一次偏离一个恒定斜率。

用以确定蠕变范围内的疲劳寿命的预测法(基于单调的试验), 看来是不足的, 当然用来对材料和温度进行粗略的比较还是可行的。

应变范围(频率修正的)方法的发展, 考虑到缺口的作用, 用缺口试样的试验结果比较光滑和缺口试样的裂纹情况, 可以验证这种方法。

导 言

首先应该提出 1972 年我们学会第一任荣誉主席 W·M·Murray 的讲座, 荣誉主席和我的老朋友 Bill Murray。

我决定在表观的基础上来讨论蠕变和低周疲劳交互作用。一组单轴控制应变转子钢的 20 个试样用于比较描述或预测金属在高温下与时间有关的低周疲劳的性能。

在恒温下具有固定应变极限的低周疲劳试验, 近年来已用于模拟由于热循环引起的机械应变。其实际意义在于许多材料的热疲劳行为可从等温控制应变疲劳试验中预测出来。机械疲劳试验中温度的作用可作为热循环的最高温度。因此, 冶金现象不应忽视, 并维持低寿命。本文涉及的低周疲劳考察范围为 10^5 周次。

历 史 状 况

1964 年, Manson^[1] 在他的 Murray 讲演中, 学会成立前, 在其“疲劳行为的重复性”一文中, “通用斜率”法用于预测低周疲劳寿命, 其中总应变范围 $\Delta\epsilon_t$ 和断裂循环数 N_f 的关系式为:

33407

$$\Delta \epsilon_t = A N_f^a + B N_f^c \quad (1)$$

$$= \frac{3.5 \sigma_u}{E} \cdot N_f^{-0.12} + D^{0.6} N_f^{-0.6} \quad (1a)$$

σ_u 为极限强度, E 为弹性模数。

$D = 1_n \{ (100 / (100 - R \cdot A)) \}$, 为断裂塑性。这个方程式适合于大多数材料在室温下的低周疲劳行为。在高温下, 蠕变或松弛变得重要了, 要求对方程式(1)进行修正。

1967年, Manson 和 Halford^[2] 提出了“10%定律”

$$N_f' = 0.10 N_f \quad (2)$$

其中, 考虑到蠕变和松弛的影响, 寿命降至室温数值的10%。

1971年开始, Manson, Halford, 及 Hirschberg^[3] 提出了“应变范围划分法”来描述低周疲劳和蠕变的交互作用。

1967年, 在本学会讨论高温低周疲劳以前, Coffin^[4] 首先提出了塑性应变范围按应变率和与温度有关的塑性指标 D' 来表达, 即:

$$\Delta \epsilon_p / D' = B' N_f^{c'} \quad (3)$$

式中塑性指标 D' 取决于每一应变率及温度。由此引出 Coffin^[5] 提出“修正频率”应变范围的研究。其中如将频率指标加于 Coffin-Manson 方程式后即可得到:

$$\Delta \epsilon_t = A N_f^a v^b + B N_f^c v^d \quad (4)$$

式中, v 为循环频率次/分 (cpm) $\left(1 \text{ cpm} = \frac{1}{60} \text{ HZ}\right)$

系数 A 及 B 和指数 a 、 b 、 c 、 d 对给定的材料在给定的温度下均为常数。

试 验 方 法

本文采用的20种试验都是 1Cr-1Mo- $\frac{1}{4}$ V 转子钢在空气和 1000°F (538°C) 下进行试验的。其中除试验 6 采用圆柱形试样外, 其余的试样均采用漏斗形试样。在试样的最小截面处用一个直径方向的引伸计来测量试样直径上的变形。轴向变形则通过模拟计数器获得, 并用来控制电液加荷装置^[6]。

恒拉应力的控制应变蠕变(试验 1 至 5)

在这 5 个试验中, 恒拉应力 σ_T 在加荷期 t_T 内产生的拉应变为 $\Delta \epsilon_t / 2$, 当负荷迅速反复后

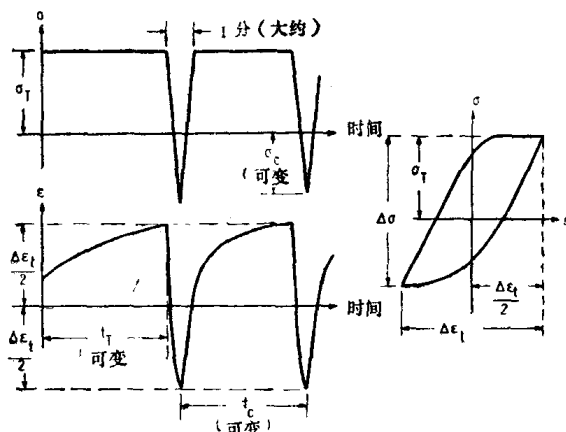


图 1 采用恒拉应力 σ_T 蠕变的控制应变循环疲劳试验 (包括试验 1—5)

产生一个压应变为 $-\Delta\epsilon_t/2$ ，如图 1 所示。由于这种材料在 1000°F 和这个应变范围内具有循环应变软化的特性，每一个实际循环的时间缩短了。如图 2 所示。平均循环时间等于总的试验时间除以至断裂的循环数 N_f'

即：
$$\text{平均 } t_c = \sum_{N=1}^{N=N_f'} t_c / N_f' \quad (5)$$

平均循环频率为：
$$\text{平均 } v = 1 / \text{平均 } t_c \quad (6)$$

在恒拉应力 σ_T 下的总时间为各循环的总和所对应的总蠕变时间

$$t_{cR} = \sum_{N=1}^{N=N_f'} t_T \quad (7)$$

断裂寿命 t_R 与应力 σ_T 的关系如图 3。按蠕变损伤表达的寿命分数为 t_{cR}/t_R ，蠕变损伤的三个数值按图 3 所示的三条蠕变断裂曲线来计算。设 N_f 为频率 $v = 1\text{cpm}$ (1 次/分)，疲劳试验中至断裂的循环数。总变形范围为 $\Delta\epsilon_t$ ，由于疲劳造成的寿命分数按 N_f'/N_f 计算。试验结果及计算结果如表 1 所示，损伤分数见图 4。

表 1 1Cr-1Mo- $\frac{1}{4}$ V 转子钢 1000°F (538°C) 时，按恒应力及损伤分数 N_f'/N_f 和 t_{cR}/t_R 计算的 5 个蠕变试验结果

试验号 N_t	总应变 范 围	恒定拉 伸蠕变 应力 *	至断裂 至断裂 循环数 总时间	一个循环 的平均 时 间	在 σ_T 时 的总蠕 变时间	在 1 次/分 时的疲 劳寿命	由于疲劳 产生的 损伤分数
	$\Delta\epsilon_t$	σ_T	N_f'	t_f	平均 t_c	t_{cR}	N_f
		千磅/时 ²	周 次	分	分	分	周 次
1	0.0260	56.8	357	503	1.41	228	380
2	0.0255	46.0	240	4670	19.5	4390	390
3	0.0433	45.6	87	4985	57.3	4883	185
4	0.0243	56.9	436	467	1.07	87	410
5	0.0359	53.8	251	547	2.18	327	230

试验 号 N_t	Westinghouse 1000 F		Battelle 1000 F		Battele, Larson- Miller 曲线		N_f'/N_f
	t_R	t_{cR}/t_R	t_R	t_{cR}/t_R	t_R	t_{cR}/t_R	
	分		分		分		
1	265	0.86	450	0.51	650	0.35	0.94
2	3300	1.33	6200	0.71	8700	0.50	0.62
3	3700	1.32	7000	0.70	9800	0.50	0.47
4	260	0.33	440	0.20	640	0.14	1.06
5	510	0.64	880	0.37	1300	0.25	1.09

图 4 中符号 $\rightarrow$ $\bigcirc$ $\square$ $\triangle$

* 1 千磅/时² (1000 磅/平方吋) = 6.89476 Mpa (兆 pascals)

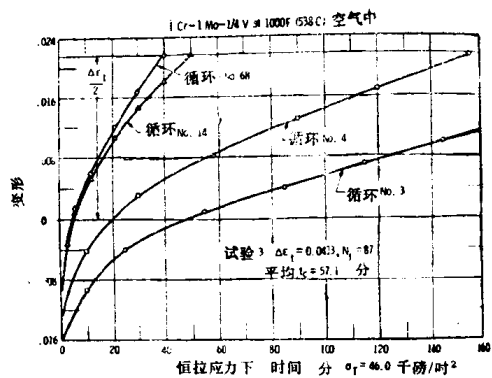


图2 在试验3中要求得到 $\Delta \epsilon_t/2$, 在恒应力下表示缩短时间的曲线

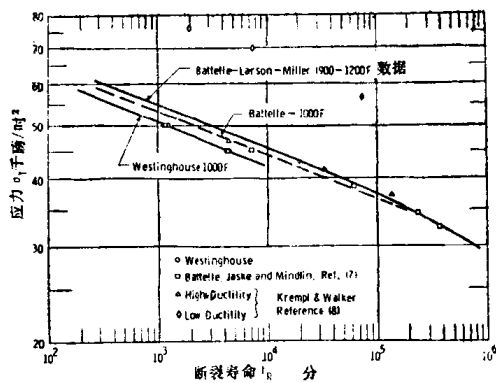


图3 $1\text{Cr}-1\text{Mo}-\frac{1}{4}\text{V}$ 转子钢在 1000°F (538°C) 时的蠕变——断裂曲线

由于很难控制和检查在恒应力下进行蠕变试验, 而且单调蠕变断裂寿命的分散度又与这种检查有关, 因此一般不采用这样的试验, 而采用其他的应力, 应变循环形式。

线性的应变——时间可变性 (试验6、7、13、14、16、17、18及19)

表2 $1\text{Cr}-1\text{Mo}-\frac{1}{4}\text{V}$ 转子钢 1000°F (538°C) 时20个试验的综合结果

试验 No	中 等 寿 命 数 据									试 验 型 式
	$\Delta \epsilon_t$	v	N_f	$\Delta \epsilon_e$	$\Delta \epsilon_p$	σ_T	σ_c	$\Delta \sigma$	$\Delta \sigma_B$	
	次/分	周 次				千磅/时²	千磅/时²	千磅/时²	千磅/时²	
1	0.0260	0.709	357	0.0050	0.0210	56.8	-49.2	106.0	—	(1)
2	0.0255	0.0513	240	0.0050	0.0205	46.0	-59.7	105.7	—	(1)
3	0.0433	0.0175	87	0.0052	0.0381	45.6	-63.4	109.0	—	(1)
4	0.0243	0.935	436	0.0052	0.0191	56.9	-53.3	110.2	—	(1)
5	0.0359	0.459	251	0.0057	0.0302	53.8	-66.0	119.8	—	(1)
6	0.0286	0.0148	128	0.0053	0.0233	54.2	-57.2	111.4	—	(2)
7	0.0375	0.990	246	0.0060	0.0315	65.6	-66.8	132.4	—	(2)
8	0.0576	0.0167	37	0.0050	0.0526	71.5	-77.0	148.5	106.0	(3)
9	0.0505	0.0167	66	0.0046	0.0459	52.7	-84.8	137.5	96.8	(4)
10	0.0221	0.0167	246	0.0043	0.0178	63.0	-61.8	124.5	90.0	(3)
11	0.0230	0.0167	213	0.0042	0.0188	56.7	-63.0	119.7	88.7	(4)
12	0.0221	0.0167	213	0.0023	0.0198	53.3	-55.6	108.9	47.7	(5)
13	0.0262	0.0165	158	0.0046	0.0216	44.7	-52.7	97.4	—	(2)
14	0.0045	0.985	23,450	0.0039	0.0006	45.8	-36.3	82.1	—	(2)
15	0.0102	0.0167	697	0.0040	0.0062	44.6	-55.8	100.4	83.0	(4)
16	0.0100	1.00	1698	0.0047	0.0053	50.0	-48.8	98.8	—	(2)
17	0.0100	1.00	1700	0.0046	0.0054	45.8	-51.2	97.0	—	(2)
18	0.0348	1.00	277	0.0058	0.0290	58.2	-63.5	121.7	—	(2)
19	0.0500	1.00	108	0.0059	0.0441	61.6	-62.4	124.0	—	(2)
20	0.0131	0.0167	306	0.0041	0.0090	58.5	-49.4	107.9	87.1	(3)

试验型式

1 千磅/时² = 6.89476Mpa

- (1) 恒应力蠕变, 图1 (2) 三角形应变波型, 图5 (3) 压缩保时, 图6(a)
(4) 拉伸保时, 图6(b) (5) 压缩及拉伸保时, 图6(c)

应力和应变随时间的变化如图 5 所示。其中总应变范围 $\Delta\epsilon_t$ 及频率 ν 在每个试验中均为常数。但是从一个到另一个试验它们是不同的。对试验 6 及 13 而言，循环频率分别为 0.0148 及 0.0165 次/分，而对试验 7、14、16、17、18 及 19 而言，其频率接近 1 次/分，如表 2 所示。

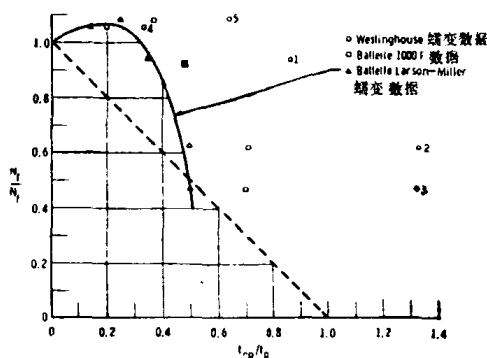


图 4 $1\text{Cr-1Mo-}\frac{1}{4}\text{V}$ 钢 1000°F (538°C) 的蠕变和低循环疲劳交互作用(包括试验 1—5)

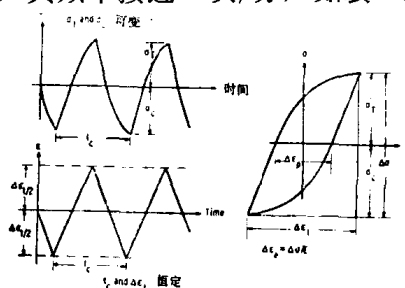


图 5 三角形应变波形的控制应变循环疲劳试验参数。总应变范围 $\Delta\epsilon_e$ ，频率 $\nu = \frac{1}{t_c}$ 次/分，试验 6、7、13、14、16、17、18 及 19。

保持时间的试验 (试验 8、9、10、11、12、15、及 20)

在这些试验中，最大压应变，最大拉应变，或两者在时间间隔 t_H 内，在每一个循环中均保持恒定。因此，应力是有松弛的，如图 6 所示。

试验 8、10 及 20 在最大压应变下保持 59 分钟，每 60 分钟为一个循环。如图 6 (a) 所示，试验 9、11 及 15 在最大拉应变下保持 59 分，如图 6 (b)。试验 12 在最大拉应变及最大压应变下均保持 29.5 分钟，如图 6 (c)。这七个保持时间的试验，接近于平均寿命的应力松弛行为，如图 7 所示。由于循环应变软化的影响，从一个循环到另一个循环是可变的。与松弛行为有关的最大应力总应力范围或总应变范围均未见到。20 个试验的总应变范围 $\Delta\epsilon_t$ ，频率 ν 及至断裂的循环数 N_f 的基本数据见表 2。从表 2 中，还可以看到弹性应变范围 $\Delta\epsilon_e$ ，塑性应变范围 $\Delta\epsilon_p$ ，

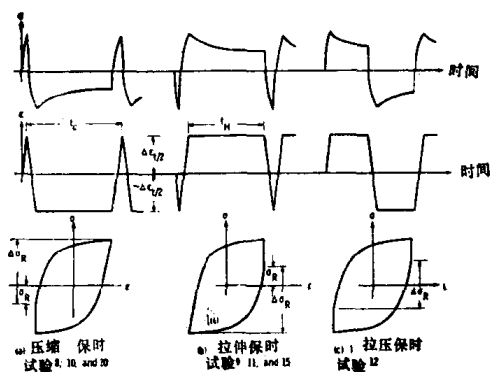


图 6 有保持时间的控制应变循环疲劳

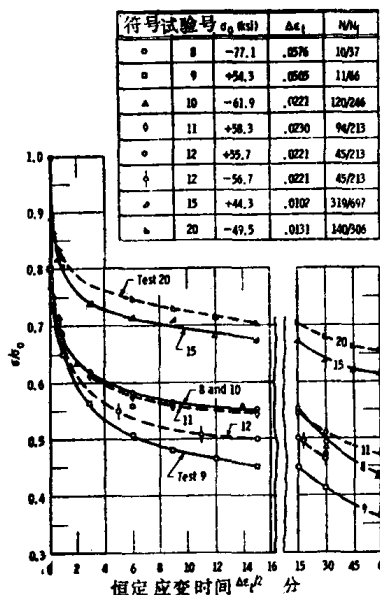


图 7 $1\text{Cr-1Mo-}\frac{1}{4}\text{V}$ 钢 1000°F 相当于中等寿命的恒应变保时应力松弛试验

总应力范围 $\Delta\sigma$ ，平均寿命数据以及保持时间试验中松弛后的应力范围 $\Delta\sigma_R$ 。弹性应变范围按下式求得

$$\Delta\epsilon_e = \frac{\Delta\sigma}{E} \quad (8)$$

对于无保持时间的试验：

$$\Delta\sigma_e = \frac{\Delta\sigma_R}{E} \quad (8a)$$

在保持时间的试验中， E 取 21.0×10^3 千磅/吋²。

塑性应变范围则可从总应变范围中减去弹性应变而求出。

试验结果的分析

问题的提出

表2中20个试验的数据以及其他材料的相同试验按近年来提出的几种方法的基础上进行分析，其中包括：

- (1) Coffin^[5] 提出的应力及应变频率修正法；
- (2) Conway及Berling^[9] 提出的断裂总时间与一个循环的时间关系式；
- (3) Ellis和Esztergar^[10] 提出的断裂总时间与至断裂循环次数的关系式；
- (4) 由金属性能委员会提出的用疲劳蠕变交替损伤分数总和法(Mpc)^[11]；
- (5) 由Manson, Halford 及 Hirschberg^[3] 提出的应变范围划分法。

频率修正法用于1Cr-1Mo- $\frac{1}{4}$ V钢在1000°F的试验，用此法预测的结果与用其他方法预测的结果进行了比较^[5]。

频率修正的应变范围

考虑到时间与高温低周疲劳试验的依存关系，以频率期限加入通常的Coffin-Manson方程式如Coffin所推荐的下式：

$$\Delta\epsilon_e = AN_f^a v^b \quad (9)$$

$$\text{以及} \quad \Delta\epsilon_p = BN_f^c v^d \quad (10)$$

总应变范围为：

$$\Delta\epsilon_t = \Delta\epsilon_e + \Delta\epsilon_p = AN_f^a v^b + BN_f^c v^d \quad (4)$$

式中： A 及 B 为常数，分别表示弹性及塑性变形分量的截距。

$N_f = 1$ 个循环， $v = 1$ 次/分， a 、 b 、 c 及 d 对于特殊的材料在给定温度下均为常数。用多次回归计算分析法得到表2的实验数据的6个常数为

$$\Delta\epsilon_e = 0.0097 N_f^{-0.095} v^{0.080} \quad (9a)$$

$$\Delta\epsilon_p = 2.80 N_f^{-0.831} v^{0.162} \quad (10a)$$

$$\text{以及} \quad \Delta\epsilon_t = 0.0097 N_f^{-0.095} v^{0.080} + 2.80 N_f^{-0.831} v^{0.162} \quad (4a)$$

方程式(9a)及(10a)绘入图8中， $v = 1$ 及 $1/16$ 次/分

符合表2的实验数据。

从图8中可见，由于在最大压缩变形下保持了一段时间，使寿命缩短(试验8、10及20)，至少等于10。如果不超过这个数值，则是由于在最大拉应变下的保持时间所造成(试验9、

11、及15)。这个现象对于不锈钢来说是矛盾的。同样，试验6及13在频率为1/60次/分时，出现了应变呈线性的变化。在保持时间的试验中，寿命的缩短大致相同。这种试验型式的应力——时间变化，基本上是不相同的，如图5及图6所示。

图9为方程式(4a)的表达形式，其中 $v = 10, 1, 1/10, 1/60$ 、及 $1/720$ 次/分，并且图中还比较了其他研究者对这种材料的试验数据。

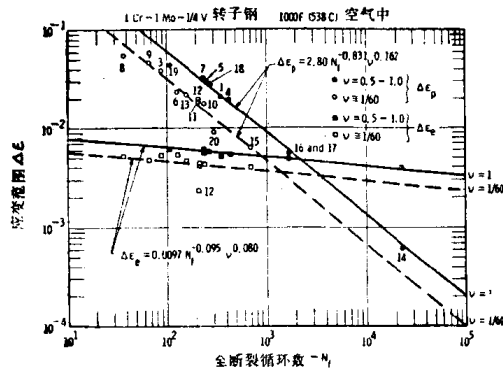


图8 弹性及塑性应变范围与至断裂周次关系

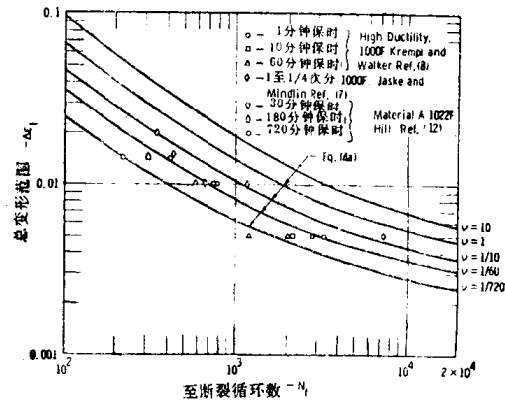


图9 频率或保持时间对1Cr-1Mo- $\frac{1}{4}$ V 转子钢在1000°F (538°C) 时，低周疲劳性能的影响

Battelle 的数据是用同一锻件上的材料进行试验的。

图10表明总应变范围随断裂周次变化的情况，频率范围从10至0.0001次/分采用十进制。这些曲线用于建立 $t_f - t_c$ 曲线及 $t_f - N_f$ 曲线，并用于检验其他研究者推荐的方法。

应当记住，方程式(4)根据温度和材料分别取自上限和下限频率范围。因此，当频率大于10至100次/分时，断裂寿命只与周次有关，而与时间(或频率)无关。同样，对于很低的频率来说，方程式(4)可用于描述保持时间试验中大大减少了松弛的情况。当用方程式(4)描述频率对疲劳寿命的影响时，也有一些问题，因为更主要的是空气环境的氧化或腐蚀作用，而不是蠕变或松弛的作用^[12,13]。

频率修正的应力范围

弹性应力范围 $\Delta\sigma$ 或 $\Delta\sigma_R$ ，可从方程式(8)或(8a)中得到。与断裂周次 N_f 的关系如下：

$$\Delta\sigma \text{ 或 } \Delta\sigma_R = E \cdot \Delta\epsilon_e = E A N_f^a v^{b \cdot *}$$
(11)

应力的频率修正表达式为：

$$\frac{\Delta\sigma}{v^b} \text{ 或 } \frac{\Delta\sigma_R}{v^b} = E \cdot A \cdot N_f^a$$
(11a)

对于 1Cr-1Mo- $\frac{1}{4}$ V 钢在1000°F 时上式可写为

$$\frac{\Delta\sigma}{v^{0.080}} \text{ 或 } \frac{\Delta\sigma_R}{v^{0.080}} = 203.7 N_f^{-0.095}$$
(11b)

式中， $\Delta\sigma$ 或 $\Delta\sigma_R$ 按千磅/时²计

$\Delta\sigma/v^{0.080}$ 或 $\Delta\sigma_R/v^{0.080}$ 的试验值计算结果列入表3，并绘入图11。它们与

*用方程式(4)或(11)，可建立任何频率下的循环应力——应变图。如采用

$\sigma = (\Delta\sigma \text{ 或 } \Delta\sigma_R)/2$ 及 $\epsilon = \Delta\epsilon_t/2$ 。

203.7 $N_f^{0.095}$ 数值进行了比较。频率为 1 次/分，试验 12 的应力范围频率修正值中无论拉伸和压缩的应力松弛都较低，而试验 6 的应力范围较高。

频率修正的应力范围可能与塑性应变范围有关，从方程式 (10) 及 (11) 中消去 N_f 后得到：

$$\frac{\Delta\sigma \text{ 或 } \Delta\sigma_R}{v^{b-ad/c}} = \frac{E \cdot A}{B^{a/c}} \Delta\epsilon_p^{a/c} \quad (12)$$

表 3 1Cr-1Mo - $\frac{1}{4}$ V 转子钢 1000°F (538°C)

频率修正应力范围的 20 个试验结果

试验 No	N_f 周次	$\Delta\sigma$ 或 $\Delta\sigma_R$ 千磅/吋 ²	$\Delta\epsilon_p$	v 周次	$\Delta\sigma v^{-0.080}$ 或 $\Delta\sigma_R v^{-0.080}$ 千磅/吋 ²	$\Delta\sigma v^{-0.0615}$ 或 $\Delta\sigma_R v^{-0.0615}$ 千磅/吋 ²
1	357	106.0	0.0210	0.709	109.0	108.3
2	240	105.7	0.0205	0.0513	134.0	126.9
3	87	109.0	0.0381	0.0175	150.7	139.8
4	436	110.2	0.0191	0.935	110.8	110.7
5	251	119.8	0.0302	0.459	127.5	125.7
6	128	111.4	0.0233	0.0148	156.1	144.3
7	246	132.4	0.0315	0.990	132.5	132.5
8	37	106.0	0.0526	0.0167	147.0	136.3
9	66	96.8	0.0459	0.0167	134.3	124.5
10	246	90.0	0.0178	0.0167	124.9	115.7
11	213	88.7	0.0188	0.0167	123.0	114.1
12	213	47.7	0.0198	0.0167	66.2	61.4
13	158	97.4	0.0216	0.0165	135.2	125.3
14	23,450	82.1	0.0006	0.985	82.2	82.2
15	697	83.0	0.0062	0.0167	115.3	106.7
16	1698	98.8	0.0053	1.00	98.8	98.8
17	1700	97.0	0.0054	1.00	97.0	97.0
18	277	121.7	0.0290	1.00	121.7	121.7
19	108	124.0	0.0441	1.00	124.0	124.0
20	306	87.1	0.0090	0.0167	120.8	112.0

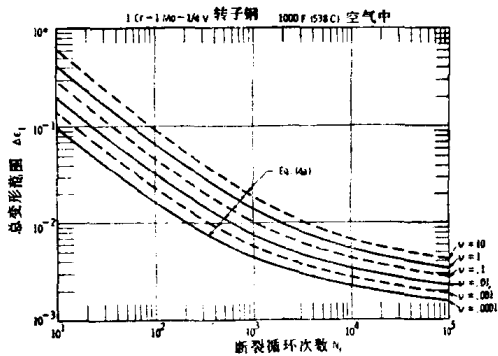


图 10 总应变范围与断裂周次的变化关系，频率变化为一个十进位，从 10 至 0.0001 周/分

对于1Cr-1Mo- $\frac{1}{4}$ V 转子钢在1000°F时可写为:

$$\frac{\Delta\sigma \text{ 或 } \Delta\sigma_R}{v^{0.0615}} = 181.1 \Delta\epsilon_p^{0.1143} \quad \text{仟磅/吋}^2 \quad (12a)$$

20 个试验的 $(\Delta\sigma \text{ 或 } \Delta\sigma_R)/v^{0.0615}$ 的计算值列入表 3 并绘入图 12。图中与单一频率的 $181.1 \Delta\epsilon_p^{0.1143}$ 进行了比较, 最大误差可在试验 6 及试验 12 中见到。

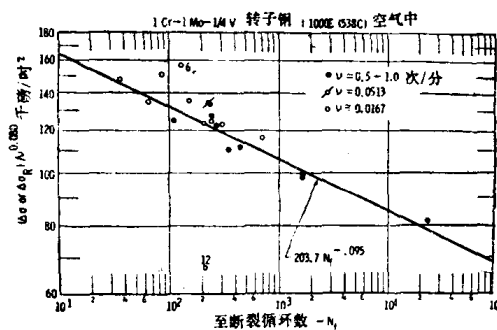


图11 频率修正的应力范围与至断裂周次的关系

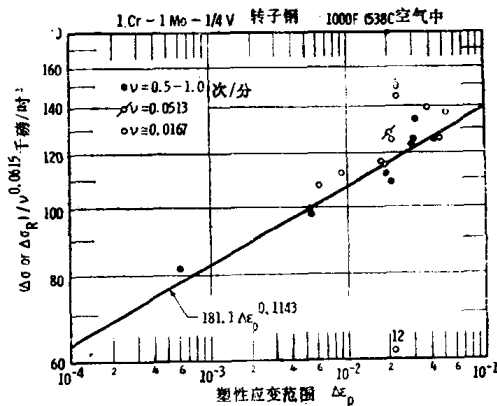


图12 频率修正的应力范围与塑性应变范围的关系

其他探讨

断裂总时间与一个循环时间的关系

Forrest^[14], Coles^[15]及 Conway及Barling^[9] 采用了下述关系式:

$$v^K t_f = c \quad (13)$$

描述蠕变与低周疲劳在高温下的交互作用, 式中:

$t_f = N_f/v$ 为按分计的断裂总时间, v 按次/分表示, C 及 K 对于特定材料在特定温度和总应变范围下为常数, 方程式(13)也可写成:

$$t_f = c \cdot t_c^K \quad (13a)$$

式中: $t_c = 1/v$ 为一个循环的时间(按分计)

图13表明: t_f 与 t_c 的关系是总应变范围的图 9 及图10从总应变范围频率修正方程式 (4a) 转换而来的。当应变范围大于0.006时, 图 13 的图形变为直线, 这说明方程式 (13a) 是正确的。截距 C 及指数 K , 对于1Cr-1Mo- $\frac{1}{4}$ V 钢在1000°F 的数值列入表4, 并与其他材料的数据进行了比较, 对于低应变范围来说, 曲线接近于直线。通过 $t_c = 1$ 及 100 分的 t_f 相应值, 如图13的点划线, $\Delta\epsilon_t = 0.003, 0.004$ 及 0.005 。

表4 按 $t_f = ct_c^k$ 所描述的蠕变及疲劳交互作用
的各种材料和不同温度下求得的 c 及 k 值

$\Delta\epsilon_t$	1Cr-1Mo- $\frac{1}{4}$ -V 1000F(538C)		1Cr-1Mo- $\frac{1}{4}$ -V 950F(510C)		1Cr-1Mo- $\frac{1}{4}$ -V 1000F(538C) ①Timo及Sarney 参考[16]		1Cr-1Mo- $\frac{1}{4}$ -V		AISI 304 1202F(650C) Conway及Berling 参考[9]		2 $\frac{1}{4}$ -Cr-Mo 1112F(600C) Edmunds及White 参考[17]	
	C	K	C	K	C	K	C	K	C	K	C	K
0.003	255,000	0.412	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.004	40,000	0.558	23,000	0.550	26,500	0.551	—	—	—	—	15,000	0.552
0.005	13,400	0.641	11,000	0.638	9050	0.638	②3600	0.813	4200	0.62	7100	0.638
0.006	6600	0.692	6200	0.686	4450	0.693	—	—	—	—	4100	0.685
0.007	4150	0.730	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.008	3050	0.745	2900	0.740	2000	0.736	—	—	—	—	1915	0.758
0.010	1890	0.757	2000	0.770	1175	0.768	②930	0.896	—	—	1180	0.781
0.015	885	0.774	850	0.820	—	—	③860	0.800	—	—	600	0.830
0.020	560	0.778	550	0.845	336	0.837	—	—	390	0.79	370	0.856
0.030	302	0.789	300	0.872	183	0.856	—	—	—	—	208	0.898
0.040	203	0.787	190	0.890	121	0.872	—	—	—	—	140	0.910
0.050	150	0.794	140	0.900	91	0.878	—	—	—	—	105	0.898
0.060	116	0.796	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
0.080	80	0.802	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

① 裂纹起始;

② 1000 F 高塑性转子钢 Krempel 及 Walker^[8];

③ 1022 F 材料 A. Hill^[12]。

指数 K 当总应变范围从 0.003 变至 0.08 时, 从 0.420 增至 0.802。 K 的极限值可近似的用

$N_f = t_f/t_c$ 及 $v = 1/t_c$ 来代替方程式 (9) 及 (10)

$$t_f = \left(\frac{\Delta\epsilon_e}{A} \right)^{1/a} t_c^{1+b/a} \quad (9b)$$

$$\text{及 } t_f = \left(\frac{\Delta\epsilon_p}{B} \right)^{1/c} t_c^{1+d/c} \quad (10b)$$

对于 1Cr-1Mo- $\frac{1}{4}$ -V 钢在 1000° F 时, 方程式 (9b) 及 (10b) 变为:

$$t_f = \left(\frac{0.0097}{\Delta\epsilon_e} \right)^{10.53} t_c^{0.16} \quad (9c)$$

$$\text{及 } t_f = \left(\frac{2.80}{\Delta\epsilon_p} \right)^{1.203} t_c^{0.805} \quad (10c)$$

因此, 对于低应变范围来说, 应变实际上是弹性的, 可以应用方程式 (9c)。 K 接近 0.16。对于高应变范围来说, 应变实际上是塑性的, K 接近 0.805 是极限值。对于 $\Delta\epsilon_e = 0.003$ 及 0.08 计算的截距 $c = 226,000$ 及 72.0。

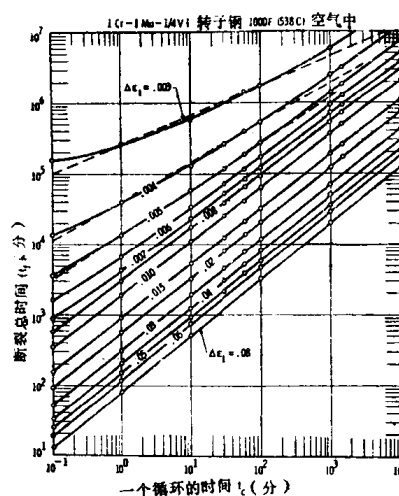


图13 断裂总时间与一个循环时间的关系, 按频率修正的总应变范围方程式 (4a) 求得

断裂总时间与周期数的关系

Ellis及Esztergar^[10]用下述关系式描述蠕变和疲劳的交互作用:

$$t_f = C_1 (N_f)^{-m} \quad (14)$$

与方程式(13)或方程式(13a)相同

$$C_1 = c^{1/(1-k)} \text{ 及 } m = k/(1-k)$$

Ellis 及 Esztergar 在可变的应变速率连续循环中, 假设第一种为常数 C_1 及 m , 第二为循环松弛, 第三为循环蠕变, 如图14所示。

本文所涉及的频率修正仅包含连续循环, 松弛和蠕变中一个常数的假设。1Cr-1Mo- $\frac{1}{4}$ V 材料在 1000 F 时, 按方程式 (4a) 得到的 t_f 及 N_f 关系图14, 如图15所示。

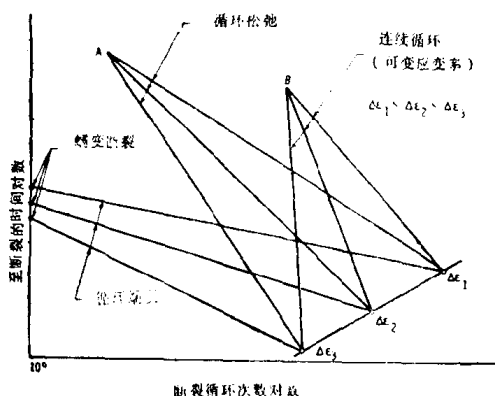


图14 Ellis及ESZtergar 假设的连续循环, 循环松弛及循环蠕变加荷的 N_f 曲线

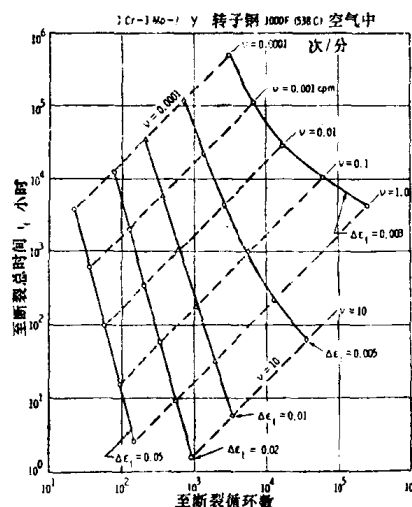


图15 按频率修正的应变方程 (4a) 推导的 1Cr-1Mo- $\frac{1}{4}$ V 钢的 t_f 与 N_f 关系曲线

金属性能委员会 (MPC) 研究了 1Cr-1Mo- $\frac{1}{4}$ V 转子钢在 1000 F 用本文的试验法进行了蠕变及疲劳的交互作用的研究。在他们的试验中, 光滑试棒经受复合的循环试验, 试验的第一部分包括 23* 小时的恒定拉伸负荷。

这种复合循环的滞后回线如图16所示, 由于循环应变软化发生在此转子钢 1000° F 时, 其复合循环累积数在循环的蠕变部分所提供的应变范围比循环疲劳的应变范围大得多, 如图16的 “nth” 循环周次所示。

表 5 综合了从 A 至 P 18 个 MPC 试验结果, 蠕变损伤分数 t_{CR}/t_R 及疲劳损伤因子 N'_f/N_f 计算于表 5 中, 并绘入图17与试验 1 至 5 的结果进行了比较。

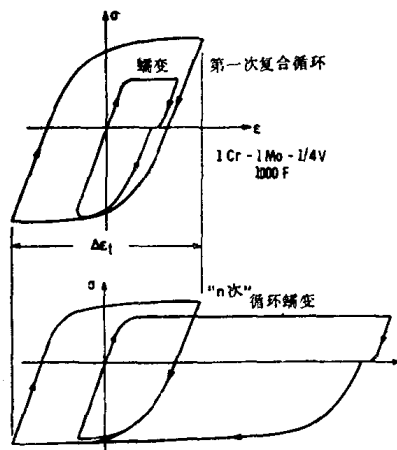


图16 金属性能委员会蠕变——疲劳交互试验的典型滞后回线

* 有的蠕变试验时间为 47 小时, 随后 1.5 疲劳循环, 这个负荷去掉后, 随即施加一定数量的全反复, 控制应变循环疲劳 (即 1.5, 2.5, 5.5 或 22.5 个循环)。

表5 按金属性能委员会对1Cr-1Mo- $\frac{1}{4}$ V转子钢在1000F(538°C)下进行蠕变及疲劳交替试验中计算的蠕变及疲劳损伤分数

试验 No	试 样 No	蠕 变 应 力 千磅/时 ²	t_R 小 时	$\Delta\epsilon_t$	N_f 周 次	每23小时 蠕变的疲 劳循环数	试 验 寿 命		损 伤 分 数	
							t_{cR} 小 时	N_f' 周 次	$\frac{t_{cR}}{t_R}$	$\frac{N_f'}{N_f}$
A	1A1A	39.0	1,000	0.015	450	1.5	523	33	0.523	0.073
B	1A3A					5.5	345	77	0.345	0.171
B'	1A3A A					5.5	506	117.5	0.506	0.261
C	1A5A					22.5	340	315	0.340	0.700
C'	1A5A A	↓	↓	↓	↓	22.5	275	247.5	0.275	0.550
D	1B4A	36.5	3,000	0.015	450	0.75*	1410	44.5	0.470	0.099
E	1B2A	↓	↓	↓	↓	2.5	985	105	0.328	0.233
F	1B5A	↓	↓	↓	↓	22.5	471	450	0.157	1.00
G	1C2A	32.0	10,000	0.015	450	2.5	3019	325	0.302	0.722
H	1C5A	↓	↓	↓	↓	22.5	576	562.5	0.058	1.25
I	1C4A					0.75*	4117.6	130.5	0.412	0.290
J	1D5A	27.5	30,000	0.015	450	22.5	576	562.5	0.019	1.25
K	1D1A	27.5	30,000	0.015	450	1.5	4813.9	312.5	0.160	0.649
L	1B4C	36.5	3,000	0.011	800	0.75*	1175	36	0.392	0.045
M	1A1E	39.0	1,000	0.0055	4,000	1.5	687	43.5	0.687	0.011
N	1A3E	↓	↓	↓	↓	5.5	734	170.5	0.734	0.043
O	1A5E	↓	↓	↓	↓	22.5	571	540	0.571	0.135
P	1C3E	32.0	10,000	0.0055	4,000	5.5	3621.4	863.5	0.362	0.216

* 每47小时蠕变的1.5疲劳循环数

图17中可以看到许多其他材料的结果, 对小的蠕变损伤分数来说应用线性损伤律是保守的, 对于大的蠕变损伤分数来说, 明显是不适用的。

蠕变损伤因子, 用常规蠕变断裂寿命 t_R 可以测出来。但试验表明: 循环蠕变断裂寿命 t_{cc} 对于循环应变软化的材料而言, 是相当低的。例如, 对1Cr-1Mo- $\frac{1}{4}$ V转子钢在空气中, 1000°F时: $t_{cc} = 0.60 - 0.7 t_R$

如 t_{cc} 用于测定蠕变损伤因子, 则图17中的试验点更严格地服从线性关系。

应变范围划分试验

Manson, Halford 及Hirschberg^[3] 提出塑性应变范围 $\Delta\epsilon_P$ 划分法, 其组成如下:

- (a) $\Delta\epsilon_{PP}$ ——完全反复塑性;
- (b) $\Delta\epsilon_{PC}$ ——拉伸塑性加压缩蠕变,

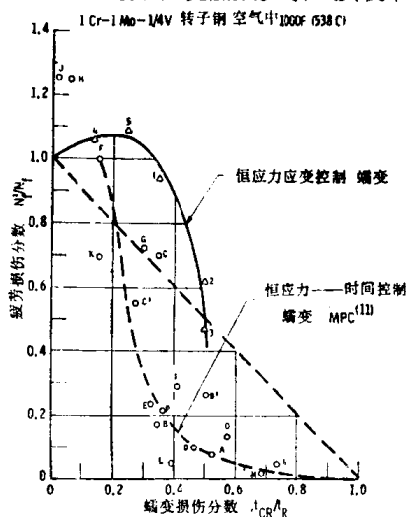


图17 从试验1—5得到的损伤因子与MPC试验A—P得到的损伤因子比较

(c) $\Delta\epsilon_{CP}$ ——拉伸蠕变加反复压缩塑性；

(d) $\Delta\epsilon_{CC}$ ——完全反复蠕变。

上述标号中，注解的第一个字母(C为蠕变，P为塑性应变)，相当于循环拉伸部分之上叠加应变型式。第二个字母相当于循环压缩部分上叠加应变型式。

可以认为：在循环寿命和每一个应变分量之间存在着一个普遍的关系，如图18所示，因而交互损伤律可以写成如下的形式：

$$\frac{1}{N_f} = \frac{F_{PP}}{N_{PP}} + \frac{F_{PC}}{N_{PC}} + \frac{F_{CP}}{N_{CP}} + \frac{F_{CC}}{N_{CC}} \quad (15)$$

式中， N_f 代表复合循环中断裂的循环数，其中包括任何或全部应变范围分量，如图 18 所示。

为了从实验上确定图18所表明的损伤关系，首先要进行控制应变范围的试验。频率应足够高以满足纯塑性应变，为此目的，在 NASA 的Lewis研究中心^[8]进行了频率为 60 次/分 (1HZ) 的两种试验。试验号为21及22，结果如表 6 及图19。在两个试验的基础上可用下式来表达纯塑性损伤的关系：

$$\Delta\epsilon_P = 3.20 N_{PP}^{-0.831} \quad (16)$$

$$\text{或} \quad N_{PP} = 4.03 (\Delta\epsilon_P)^{-1.20} \quad (16a)$$

如图19所示。

表 6 NASA, Lewis 研究中心完成的 6 个试验的综合结果，对 1Cr-1Mo

— $\frac{1}{4}$ V 转子钢在 1000 F (538°C) 时验证了应变范围划分损伤规律

试验No	21	22	23	24	25	26
N_f 周次	366	1818	250	260	460	400
平均 ν 次/分	60	60	0.103	0.134	0.850	0.122
$\Delta\epsilon_t$	0.0290	0.0107	0.0250	0.0245	0.0206	0.0268
$\Delta\epsilon_e$	0.0057	0.0047	0.0052	0.0057	0.0048	0.0049
$\Delta\epsilon_p$	0.0233	0.0060	0.0198	0.0188	0.0158	0.0219
$\Delta\epsilon_{pp}$	0.0233	0.0060	0.0097	0.0091	0.0104	0.0080
$\Delta\epsilon_{pc}$	无	无	无	无	无	0.0139
$\Delta\epsilon_{cp}$	无	无	0.0101	0.0097	无	无
$\Delta\epsilon_{cc}$	无	无	无	无	0.0054	无
F_{pp}	1	1	0.490	0.484	0.658	0.365
F_{pc}	—	—	—	—	—	0.635
F_{cp}	—	—	0.510	0.516	—	—
F_{cc}	—	—	—	—	0.342	—
N_{pp} (方程式16a)			446	475	585	395
N_{pc} (方程式15)			—	—	—	403
N_{cp} (方程式17)			176	182	—	—
N_{cc} (方程式15)			—	—	326	—

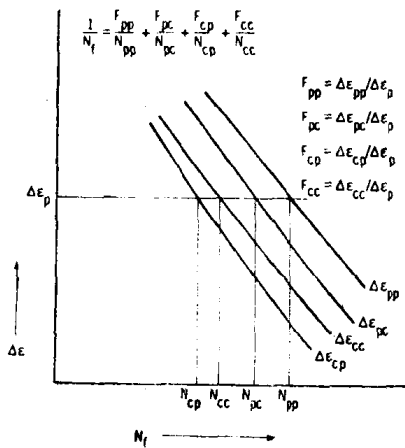


图18 应变范围划分法所确定的交互损伤律

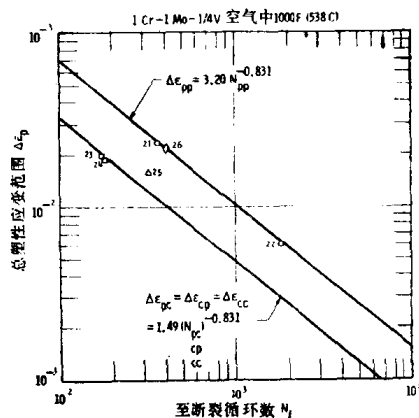


图19 NASA, Lewis研究中心在6个试验中得到的应变范围划分分量与断裂循环次数的关系

指数-0.831与上述总塑性应变方程(10a)相同。此外, 试验23及24则是仅有塑性及蠕变应变叠加在循环拉伸部分, 以及仅有塑性应变叠加在循环压缩部分。这是通过在 1000°F 及拉伸部分上保持恒定应力, 去掉负荷, 冷却, 并在500°F 时完成循环压缩部分, 试验结果见表6, 由方程式(15)求出 N_{CP} , 但仅有 F_{PP} 及 F_{CP} ,

$$N_{CP} = \frac{F_{CP}}{\frac{1}{N_f} - \frac{F_{PP}}{N_{PP}}} \quad (17)$$

N_{PP} 可从方程式(16a)中求得。

试验25中, 在循环过程中仅叠加 $\Delta\epsilon_{pp}$ 及 $\Delta\epsilon_{pc}$ 而试验26则叠加了 $\Delta\epsilon_{pp}$ 及 $\Delta\epsilon_{pc}$ 如表6及图19所示。

由于应变范围划分试验数量有限, 故假定 $\Delta\epsilon_{pc}$, $\Delta\epsilon_{cp}$ 及 $\Delta\epsilon_{cc}$ 具有相同的损伤规律, 这个假设是基于前述的试验, 在最大拉应变, 最大压应变或在两者下保持时间所得到的寿命降低情况均相同, 因此:

$$\Delta\epsilon_{\left\{\begin{smallmatrix} pc \\ cp \\ cc \end{smallmatrix}\right\}} = 1.49 N_{\left\{\begin{smallmatrix} pc \\ cp \\ cc \end{smallmatrix}\right\}}^{-0.831} \quad (18)$$

$$\text{或: } N_{\left\{\begin{smallmatrix} pc \\ cp \\ cc \end{smallmatrix}\right\}} = 1.61 (\Delta\epsilon_{\left\{\begin{smallmatrix} pc \\ cp \\ cc \end{smallmatrix}\right\}})^{-1.20} \quad (18a)$$

应指出, $\Delta\epsilon_{pc}$, $\Delta\epsilon_{cp}$ 及 $\Delta\epsilon_{cc}$ 的损伤是相同的, 我们可将所有这些滞弹性应变写成 $\Delta\epsilon_{PCCP}$ 因此:

$$1 = F_{PP} + F_{PCCP} \quad (19)$$

方程式(15)简化为:

$$\frac{1}{N_f} = \frac{F_{PP}}{N_{PP}} + \frac{F_{PCCP}}{N_{PCCP}} \quad (20)$$

从方程式(16a)及(18a)中得到 $N_{PCCP} = 0.4 N_{PP}$,

故: $F_{PCCP} = 1 - F_{PP}$, 我们得到:

$$N_f = \frac{0.4 N_{PP}}{1 - 0.6 F_{PP}} \quad (21)$$