

几种金属材料的蠕变/疲劳交互作用及断裂分析

六二一所 周洪范

一、引言

目前在高温构件设计中仍沿用常规持久强度和蠕变极限,但它并不能完全反映构件的实际工作情况。近几年来,在高温构件故障分析中经常碰到按常规性能制造完全合格的构件,往往发生意外的断裂事故,而从故障件上取样复验,上述各项常规指标仍然合格。这说明必须研究更接近实际工作条件下的高温性能。蠕变/疲劳交互作用下的损伤规律就是这类课题之一。

国外在五十年代就作过金属材料在变动负荷及变动温度下的试验研究^[1]。七十年代以来,对蠕变/疲劳交互作用的研究更为活跃,已发表了不少专题论著^[2]。目前,正发展一种交互作用下的设计方法^[2],还提出了几种预测寿命公式^[3]。近十年来,又引入了断裂力学方法,研究材料裂纹扩展的规律。1976年在美国召开了交互作用学术讨论会,总结了近十年来的研究成果,探讨了影响交互作用的各种因素。本文对六种金属材料进行了应力控制的蠕变/疲劳复合试验,对结果进行了初步的分析讨论。

二、试验方法

蠕变/疲劳复合试验机结构示意图如图1,为便于安装试样,将整体马弗炉改装成对开炉,

用三组加热体分别调梯度,用过零触发式双向可控硅精密控温器控制温度。

复合试验加载谱见图2,可分为连续加载,保时加载及一次加载三种情况,试验中初负荷为恒定值,相当于试样上产生1公斤/毫米²应力的负荷。

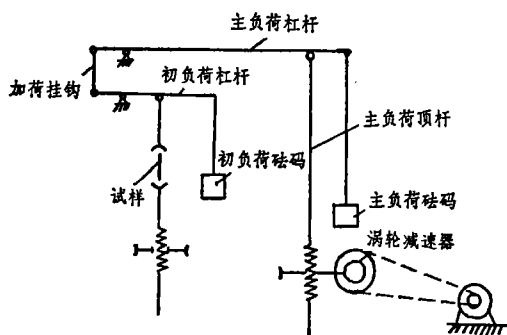


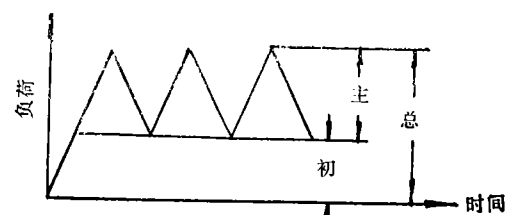
图1 蠕变/疲劳复合试验机结构示意图

三、材料及试验结果

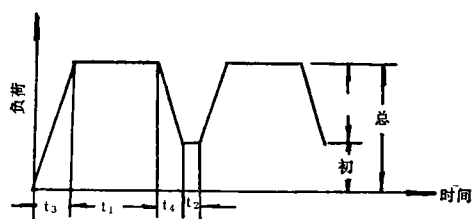
试验用料、试样类型、热处理制度及GH36, GH132两种材料的高温性能见表1、2。

将试验结果绘入纵座标为断裂循环数 N ,横座标为峰值拉伸负荷下的累计保持时间 $N\Delta t_1$,得到图3~9。可以看出,纵座标表示纯疲劳数据,横座标表示纯持久数据,具有相同保持时间的数据落在通过座标原点的同一直线上。

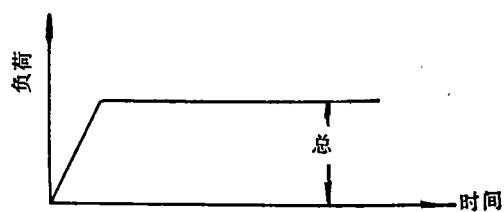
参加本文工作的有易家林、刘宜如、潘震昌等同志。感谢颜鸣皋总师、刘才穆及周瑞发同志的帮助。



连续加载（纯疲劳载荷）



保时加载（蠕变/疲劳复合加载） $t_1 = 5$ 分, 10分 30分钟
 $t_2 = 25$ 秒~1分
 $t_3 = t_4 = 12$ 秒



一次加载（纯持久载荷）

图 2 蠕变/疲劳复合试验加载谱

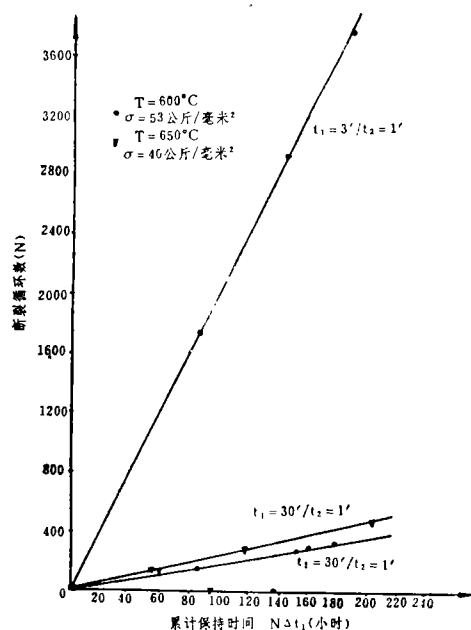


图 3 GH36 蠕变/疲劳复合强度

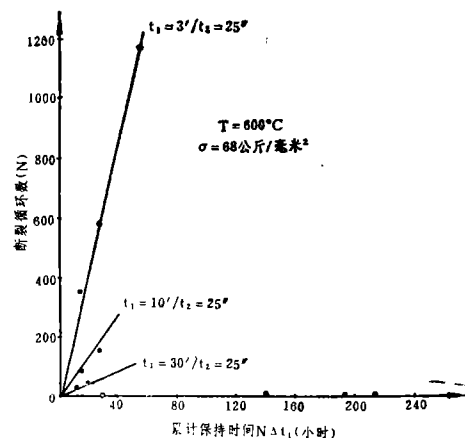


图 4 GH132 蠕变/疲劳复合强度

表 1 试验材料的试样及热处理制度

材 料	试 样 类 型	热 处 理 制 度
GH36	盘坯取样 $\phi 5$ 缺口($K_t \approx 2.3$)	1140°C, 1小时20分钟; 670°C, 8小时; 780°C, 16小时, 空冷
GH132	盘坯取样 $\phi 5$ 缺口($K_t \approx 2.3$)	980°C, 2小时, 油冷; 720°C, 16小时, 空冷
K5	铸态 $\phi 3$ 光滑试样	铸 态
GX-8	$\phi 5$ 光滑及缺口($K_t \approx 2.3$)	1140~1160°C, 空冷; 680~710°C, 回火2小时
TC4	$\phi 5$ 光滑试样	910°C, 1小时, 水淬; 480°C, 4小时, 空冷
LD8	$\phi 5$ 光滑试样	供应状态, 符合YB613-66

表 2 GH36及GH132高温机械性能

材 料	温度 °C	σ_b 公斤 毫米 ²	δ %	ψ %	持久应力 公斤 毫米 ²	持久寿命 小 时	δ 持久 %	ψ 持久 %
GH36	650	55.3	22.6	43.6	38	72.7	9.2	16.9
GH132	650	74.7	15	44.7	45	175	6.9	11.8

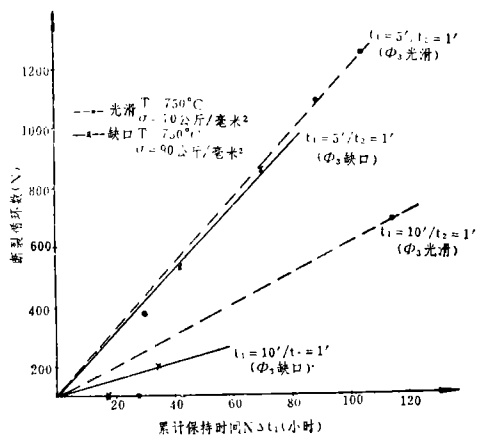


图 5 K5蠕变/疲劳复合强度

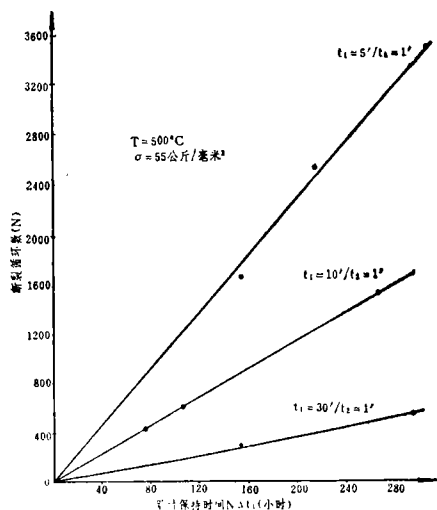


图 6 GX-8蠕变/疲劳复合强度
(ϕ 5光滑试样)

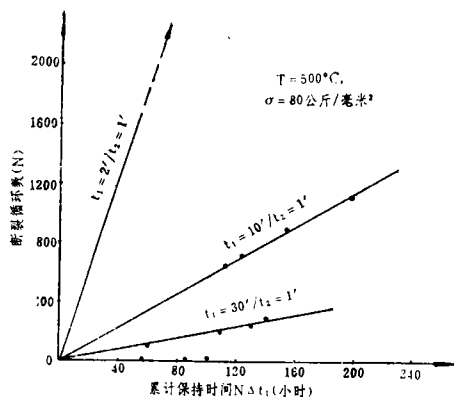


图 7 GX-8 蠕变/疲劳复合强度
(ϕ 5缺口试样, $K_t \approx 2.3$)

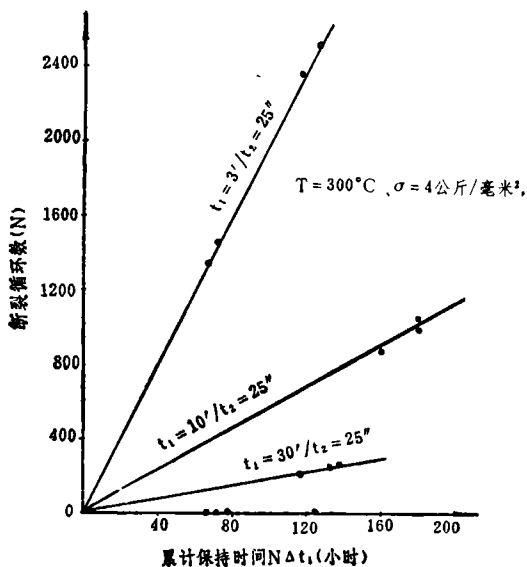


图 8 LD8 蠕变/疲劳复合强度

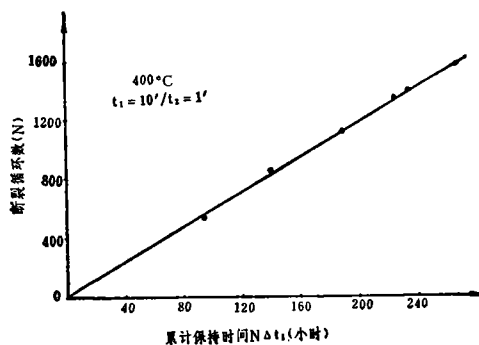


图 9 TC4 蠕变/疲劳复合强度

四、试验结果的讨论

从图3可见, GH36 在600°C, 53公斤/毫米²下, 断裂寿命对动负荷的敏感度不大, 寿命主要取决于负荷保持时间, 而与循环次数关系不大, 在650°C, 40公斤/毫米²时, 负荷保持3分钟的持久寿命比静拉持久寿命约高30%, 显示循环强化效应。同时也说明温度从400°C提高至650°C时, 交互作用效应增大。

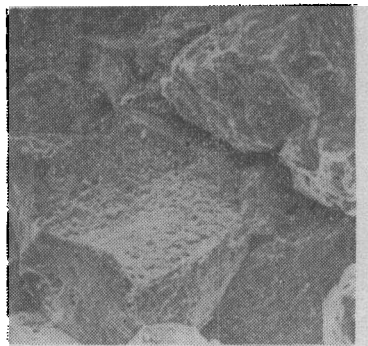
GH132在600°C, 68公斤/毫米²时, 负荷保持3分钟的持久寿命只有静拉持久寿命的20% (图4), 显示循环软化效应。这两种材料复合试验的电子金相见图10~15。从图10及11中可以看到在600°C时两种材料的静拉持久断口为典型的沿晶断口。在复合试验中, 负荷保持30分钟的GH36 试样断口主要是持久型沿晶断口 (图12), 而负荷保持3分钟的试样断口则是由疲劳造成的穿晶裂纹和由蠕变造成的沿晶裂纹所形成的混合型断口 (图13)。至于GH132合金, 由于持久塑性偏低, 在复合试验中, 无论负荷保持3分钟或30分钟, 断口特征主要为沿晶断裂。

断口分析表明, 蠕变/疲劳交互作用将使材料造成复合损伤, 交互作用的外部条件 (温度、应力、负荷保持时间, 试样形状) 和内在条件 (材料组织结构、持久塑性) 不同, 复合损伤的部位和程度也不相同。材料在交互作用下的使用寿命将取决于这些外部条件和内在条件的组合情况。K5光滑或缺口试样均显示循环强化 (图5), 当负荷保持10分钟, 缺口试样持久寿命降低的幅度大于光滑试样, 说明缺口敏感性对蠕变/疲劳复合强度有一定影响。GX-8材料无论光滑或缺口试样均显示循环强化效应 (图6、7), 但由于存在缺口敏感性, 缺口试样的强化效应低于光滑试样。铝合金LD8在300°C、4公斤/毫米²时, 仍显示循环强化 (图8), 而钛合金TC4在400°C复合试验中, 循环寿命近似为45°直线 (图9), 表明



2000×

图 10 GH36, $\phi 5$ 缺口试样 ($K_t \approx 2.3$),
 $T=600^\circ\text{C}$, $\sigma=53$ 公斤/毫米²
静拉伸持久 $\tau=138$ 小时



500×

图 11 GH132, $\phi 5$ 缺口试样 ($K_t \approx 2.3$),
 $T=600^\circ\text{C}$, $\sigma=68$ 公斤/毫米²
静拉伸持久 $\tau=192$ 小时45分, 沿晶区



2000×

图 12 GH36, $\phi 5$ 缺口试样 ($K_t \approx 2.3$),
 $T=600^\circ\text{C}$, $\sigma=53$ 公斤/毫米²,
 $\tau=185$ 小时30分, $t_1=30$ 分/ $t_2=1$ 分

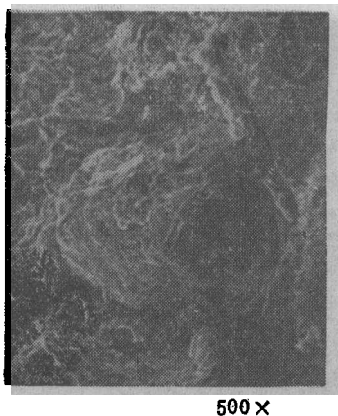


图 13 GH36, $\phi 5$ 缺口试样 ($K_t \approx 2.3$),
 $T=600^\circ\text{C}$, $\sigma=53$ 公斤/毫米²,
 $\tau=193$ 小时 56 分, $t_1=3$ 分/ $t_2=25$ 秒
 中心位置

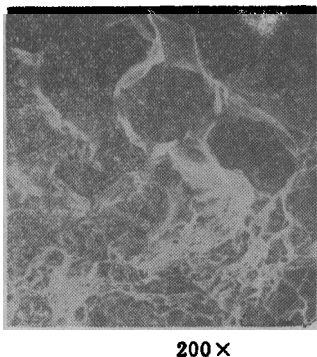


图 14 GH132, $\phi 5$ 缺口试样 ($K_t \approx 2.3$),
 $T=600^\circ\text{C}$, $\sigma=68$ 公斤/毫米²,
 $t_1=30$ 分/ $t_2=25$ 秒, $\tau=19$ 小时

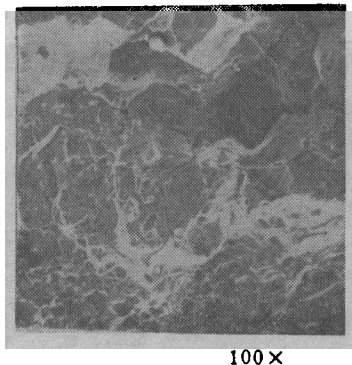


图 15 GH132, $\phi 5$ 缺口试样 ($K_t \approx 2.3$),
 $T=600^\circ\text{C}$, $\sigma=68$ 公斤/毫米²,
 $t_1=3$ 分/ $t_2=25$ 秒, $\tau=77$ 小时 30 分

其复合寿命中蠕变与疲劳损伤近似相等。

材料在交互作用下, 其损伤可分为三部分, 其一以蠕变为主, 其二以疲劳为主, 其三

为交互作用造成的复合损伤^[4]。按照通常的损伤分数律, 蠕变损伤可表示为:

$$\sum \frac{\Delta t_i}{t_r}$$

t_r 为纯蠕变断裂时间, Δt_i 为每一循环中峰值负荷保持时间。疲劳损伤可表示为:

$$\frac{N}{N_f}$$

N 为断裂循环数, N_f 为纯疲劳断裂循环数。根据 Miner 线性累积损伤定律, 当蠕变损伤与疲劳损伤之和等于 1 时, 材料即产生破坏, 故有:

$$\frac{N}{N_f} + \sum \frac{\Delta t_i}{t_r} = 1 \dots\dots\dots (1)$$

但是, 试验证明, 在许多情况下, 并不能完全满足(1)式, 两者之和不等于 1, 而是大于 1 或小于 1。Lagneberg 和 Atterno^[5] 提出用下式来描述具有蠕变/疲劳交互作用的损伤规律:

$$\frac{N}{N_f} + B \left(\frac{N}{N_f} \cdot \frac{N \Delta t_i}{t_r} \right)^{1/2} + \frac{N \Delta t_i}{t_r} = 1 \dots\dots\dots (2)$$

式中, $N \Delta t_i = \sum \Delta t_i$, B 为交互作用系数。 B 的大小反映交互作用的强弱。

$B=0$, 材料符合线性累积损伤定律。

$B>0$, 断裂寿命低于按线性定律预测寿命。

$B<0$, 断裂寿命高于按线性定律预测寿命。

因 N_f 和 t_r 是材料的已知参数, 在(1)式或(2)式中, 如已知 Δt_i , 则可求出断裂循环数 N , 如已知 N , 则可求出该循环次数下负荷能经受的总时间 $\sum \Delta t_i$ 。因此用(1)及(2)式, 可粗略地估算零件的工作寿命。本试验中, 以 GX-8 为例, 计算的累积损伤参数如表 3, 从表中可以看出, 无论光滑或缺口试样, 其交互作用系数 B 均小于零, 说明这种材料在 500°C 下具有循环强化特征, 交互作用有好的效果。应当指出, 上述(1)或(2)式, 都是从试样上求得的, 与实际零件在尺寸、形状、受力状态、环境介质等方面都有很大差

表3 GX-8蠕变/疲劳损伤参数

试样类别	试样号	温度 °C	应力 公斤/毫米 ²	加载条件	N/N _r	NΔt ₁ /t _r	B 平均
φ5 光滑试样	17	500	55	t ₁ =10分/t ₂ =1分	0.51	1.4	-1.7
	18	500	55	t ₁ =10分/t ₂ =1分	1.8	4.8	
	19	500	55	t ₁ =10分/t ₂ =1分	0.7	2	
	20	500	55	t ₁ =30分/t ₂ =1分	0.68	5	-2.5
	21	500	55	t ₁ =30分/t ₂ =1分	0.34	2.8	
	22	500	55	t ₁ =5分/t ₂ =1分	3	3.8	-1.4
	23	500	55	t ₁ =5分/t ₂ =1分	2	2.5	
	24	500	55	t ₁ =5分/t ₂ =1分	4	5.3	
φ5 缺口试样	17	500	80	t ₁ =10分/t ₂ =1分	4	1.3	-1.9
	18	500	80	t ₁ =10分/t ₂ =1分	5	1.6	
	15	500	80	t ₁ =10分/t ₂ =1分	2.9	1	
	19	500	80	t ₁ =10分/t ₂ =1分	3.1	1	
	20	500	80	t ₁ =30分/t ₂ =1分	1	1.1	-1
	21	500	80	t ₁ =30分/t ₂ =1分	0.53	0.5	
	24	500	80	t ₁ =30分/t ₂ =1分	1	1	
	1	500	80	t ₁ =2分/t ₂ =1分	15	1	-4
	2	500	80	t ₁ =2分/t ₂ =1分	19	1.1	
	3	500	80	t ₁ =2分/t ₂ =1分	17	1.1	

异。在精确计算寿命时,还应作必要的修正。但可以认为用蠕变/疲劳复合强度来衡量涡轮转子一类材料的使用性能,将更符合实际情况。

五、结 语

GH36, GH132, K5, GX-8, TC4及LD8六种金属材料蠕变/疲劳复合试验表明:

1. 不同类型材料对动负荷的敏感度不同。除GH132在600℃, 68公斤/毫米²时具有明显的循环软化效应外, 其他五种材料均显示循环强化。

2. 材料在蠕变/疲劳交互作用下将产生复合损伤, 损伤的部位和程度与材料的组织结构、持久塑性、温度范围以及在峰值负荷下的保持时间有关。蠕变损伤造成沿晶断裂; 疲劳损伤造成穿晶断裂; 随着负荷保持时间的变化, 断口可能显示混合型断裂特征。当材料的持久塑性较低时, 复合试验主要为沿晶断裂。

3. 缺口敏感性对材料的蠕变/疲劳复合强度有影响, GX-8及K5两种材料, 缺口试样的持久寿命随负荷保持时间变化而降低的幅度大

于光滑试样。

4. 用累积损伤方程

$$\frac{N}{N_r} + \frac{N\Delta t_1}{t_r} = 1 \text{ 及 } \frac{N}{N_r} + B \left(\frac{N}{N_r} \cdot \frac{N\Delta t_1}{t_r} \right)^{1/2} + \frac{N\Delta t_1}{t_r} = 1$$

可近似估算材料在蠕变/疲劳交互作用下的断裂寿命, 交互作用系数B可评定材料对交互作用的强弱。GX-8在500℃时B值小于零, 材料在交互作用下显示循环强化效应, 其断裂寿命高于按Miner线性规律预测的寿命。

参 考 文 献

1. A. H. Meleka, Metallurgical Review, Vol.7, No.25, P.43, 1962.
2. Symposium on Creep-Fatigue Interaction, ASME-MPC, 1976.
3. Milton, M. Leven, Proceedings of the Society for Experimental Stress Analysis, Vol. XXX, No.2, 1973, P.353-372.
4. David, A. Spera, NASA, TND 5317, July 1969.
5. R. Lagneberg, R. Atterno, Metallurgical Transaction 2 (1971), No.7, 1871.