

循环蠕变加载下疲劳裂纹扩展速率的探讨

于 强

(四川理工学院理学院, 四川 自贡 643000)

摘 要:根据循环蠕变加载下应力-应变迟滞回线的周期性,提出了在一个循环周期内以应变能密度为损伤参量,并把材料的机械疲劳损伤和蠕变损伤统一处理的方法,以解决这两种损伤之间的交互作用问题;指出了在循环蠕变的加速现象中包含了这两种损伤之间的交互作用的效果;借助于等效杨氏模量概念,对静蠕变公式进行修正后用于循环蠕变的应变计算,进而对能量密度进行计算。然后参照单轴疲劳的研究过程,导出了循环蠕变加载下基于能量密度的疲劳裂纹扩展速率公式。

关键词:循环蠕变;迟滞回线;应变能密度;裂纹扩展速率

中图分类号: O346. 2

文献标识码: A

引 言

当温度 $T \geq 0.4T_m$ (T_m 为熔点绝对温度) 保持不变时,若构件受到恒定的应力作用,随着时间的延长,构件的应变缓慢增加的现象,称为静蠕变;若构件受到的是循环应力作用,则称为循环蠕变。循环蠕变加载下构件既会受到机械疲劳损伤又会高温蠕变损伤,还会受到二者交互作用的损伤。这会使总的损伤并不等于两种单一损伤的线性叠加,而总的损伤量如何确定目前尚未得到很好的解决。

目前对循环蠕变加载下疲劳寿命的研究较多,对裂纹的扩展很少,已有文献注意到了机械疲劳与蠕变的交互作用对构件寿命的影响^[1],而关于裂纹扩展速率的计算,一般是将总的扩展量分解为与时间无关的机械疲劳裂纹扩展和与时间相关的蠕变裂纹扩展,然后再将二者进行线性叠加的方法来描述裂纹扩展^[2-3]。但是机械疲劳与蠕变的交互作用对裂纹扩展的影响问题仍未很好的解决。为了建立一个在循环蠕变加载下,既要充分考虑机械疲劳与蠕变交汇作用对裂纹扩展速率的影响,又要计算方便的裂纹扩展速率的计算公式,文中主要做了以下几项工作。

在分析了应力加载下的循环蠕变应力-应变迟滞回线后,将应变划分为了机械疲劳应变和蠕变应变两部分,可见到对裂纹扩展有贡献的能量密度等于机械疲劳

能量密度与蠕变能量密度之和。若以能量密度为裂纹扩展的损伤参量,对于疲劳损伤和蠕变损伤的积累性,则可用标量叠加表示而计算方便。

对循环蠕变相对静蠕变所具有的加速效应^[4],从单位时间内能量密度必然随之增大的角度来看,则应该理解为这也是材料损伤的加速,和单位时间内损伤量的增大。而在这种加速中所增大的损伤中,理应包含了机械疲劳损伤和蠕变损伤之间的交互作用的影响。为了计算循环蠕变的蠕变量和能量密度,提出了用等效杨氏模量对静蠕变公式加以修正以后用于计算循环蠕变应变的方法。

考虑构件应是处于较大区域的塑性变形状态,线弹性力学失效。则在一个循环中,考虑用裂纹的扩展量与在这个循环中的能量密度成比例来描述裂纹的扩展。最后参照单轴疲劳加载下裂纹的扩展的研究过程,导出了循环蠕变加载下疲劳裂纹扩展速率的计算公式。

1 应变能密度对材料损伤的描述

1.1 常温下的应变能密度

在常温下,试件受到外力作用时可以不考虑蠕变变形,单位体积材料的变形成称为材料的应变能密度,它等于材料承受的应力与该应力下所产生的应变之积,是应力和应变的一个综合量,由弹性应变能密度和塑性应变能密度两部分构成。它对材料的损伤描述具有单值

性和标量的叠加性,而对材料累积性损伤描述十分方便。

45 号钢的标准圆柱形试件单轴拉伸实验的应力 - 应变曲线,如图 1 所示。

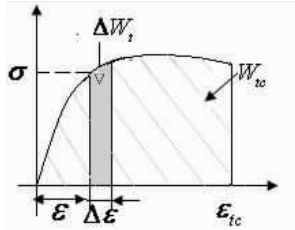


图 1 单轴拉伸实验中的总能量密度 W_i

设试件承受拉伸应力 σ , 随着应变 ε 增大 $\Delta\varepsilon$, 则能量密度增加 $\Delta W_i = \sigma\Delta\varepsilon$ 。在 $\sigma - \varepsilon$ 图上为小条阴影面积, 材料的损伤程度与这面积成正比。

应变 ε 的进一步增大, 能量密度值 $W_i = \int_0^{\varepsilon} \sigma d\varepsilon$ 则随之增大, 材料的损伤累积也随之增大; 当能量密度值增大到某一个临界破坏值 W_{ic} 后, (在图 1 中为 $\sigma - \varepsilon$ 曲线与 $\sigma \geq 0$, 在 $0 - \varepsilon_{ic}$ 范围内的面积), 试件就会发生断裂。

图 2 所示的 1Cr18Ni9Ti 不锈钢漏斗形光滑标准试件, 在应力比 $R = 0$ 的等应力幅的三角波加载实验中^[5] 有:

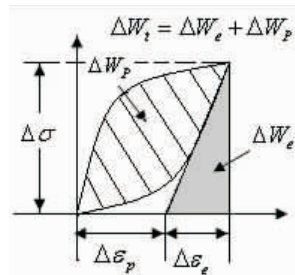


图 2 一个循环中的弹性、塑性及应变能密度

由一个循环的迟滞回线可见应变 $\Delta\varepsilon_i =$ 弹性应变 $\Delta\varepsilon_e +$ 塑性应变 $\Delta\varepsilon_p$, 应变能密度 $\Delta W_i =$ 弹性应变能密度 $\Delta W_e +$ 塑性应变能密度 ΔW_p 。

单轴加载低疲劳的迟滞回线方程一般用修正的 Ramber - Osgood 关系可以较好的描述^[5], 即

$$\frac{\Delta\varepsilon_i}{2} = \frac{\Delta\sigma}{2E} + \left(\frac{\Delta\sigma - \Delta\sigma_0}{2K'} \right)^{\frac{1}{n'}} \quad (1)$$

式中:

- $\Delta\sigma$ 为循环应力
- $\Delta\sigma_0$ 为循环屈服应力
- K' 为循环强度系数
- E 为杨氏弹性模量

n' 为循环塑性硬化指数

弹性应变能量密度(为图 2 中的三角形阴影部分)

$$\Delta W_e = \frac{\Delta\sigma^2}{2E} \quad (2)$$

塑性应变能量密度^[5] (为图 2 中的斜线阴影曲面形部分)

$$\Delta W_p \approx \frac{1 - n'}{1 + n'} \Delta\sigma \Delta\varepsilon_p + \frac{2n'}{1 + n'} \Delta\sigma_0 \Delta\varepsilon_p \quad (3)$$

该循环中材料受到的损伤程度也与该循环的能量密度的大小成正比, 而在下一个循环中, 材料还会受到完全类似的损伤。

当有 N 次循环作用后, 材料受到的总损伤是 N 次循环作用的累积损伤, 它应与各个循环的能量密度之和 W_i 成正比。即

$$W_i = \sum_{i=1}^N (\Delta W_i)_i \quad (4)$$

当循环的次数达到构件寿命 N_f 后, 构件的能量密度达到破坏临界值 W_{if} , 材料受到的累积损伤也达到临界值, 试件就会发生断裂。

1.2 高温下的蠕变能密度

构件在高温环境中受交变应力作用时, 材料除了会发生弹性应变 $\Delta\varepsilon_e$ 、塑性应变外 $\Delta\varepsilon_p$, 还可能会有蠕变应变 $\Delta\varepsilon_c$, 以及相应的蠕变能密度 ΔW_c , 并且加载波形不同, 则产生蠕变应变 $\Delta\varepsilon_c$ 不同, 蠕变能密度 ΔW_c 值也不同。

1.2.1 无保载时间加载的蠕变能密度

高温下, 典型的无保载时间的加载为等应力幅的三角波, 设最大应力为 σ_{max} , 应力比为 $R = 0$, 平均应力为 $\sigma_m = \sigma_{max}/2$, 循环周期为 t_n 。由于在一个周期内的平均应力大于零, 构件会发生蠕变, 在迟滞回线图上直观表现为, 下一个迟滞环的位置会相对上一个迟滞环沿着应变轴 ε 移动, 移动量就是平均应力 σ_m 作用下, t_n 内发生的蠕变量 $\Delta\varepsilon_c^m$, 如图 3 所示。

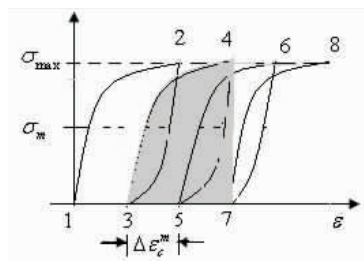


图 3 三角形波加载下的迟滞回线和蠕变量 $\Delta\varepsilon_c^m$

该循环的应变能密度 ΔW_i , (图 3 中的阴影部分,) 而平均应力下的蠕变能密度为

$$\Delta W_c^m \approx \sigma_{max} \Delta\varepsilon_c^m \quad (5)$$

1.2.2 有保载时间加载的蠕变能密度

在高温下,典型的有保载时间的加载为等应力幅的等腰梯形波,如图4所示。

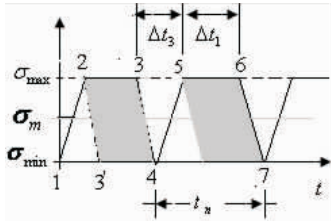


图4 保载时间为 Δt_1 的等腰梯形波

设在一个循环(1-2-3-4)内,最大应力 σ_{\max} 下的保载时间为 Δt_1 , 最小应力 $\sigma_{\min} = 0$ 下的保载时间为 $\Delta t_2 = 0$, 应力变化的时间为 Δt_3 , 循环的周期为 $t_n = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \Delta t_3$ 。

等腰梯形波加载使材料产生的蠕变来自于两个方面,由图4中可见:一是加载应力波中的三角形(1-2-3')部分,会因平均应力 σ_m 在 Δt_3 时间内产生蠕变应变 $\Delta \varepsilon_c^m$ 。二是加载应力波中的平行四边形(2-3-4-3')部分,会因保持应力 σ_{\max} 在 Δt_1 时间内产生的蠕变应变 $\Delta \varepsilon_c^1$ 。

等腰梯形应力波加载的迟滞回线如图5所示。

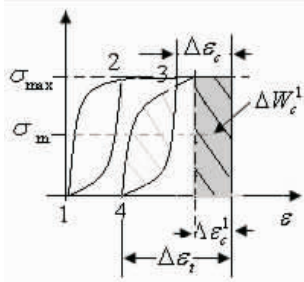


图5 等腰梯形应力波加载的迟滞回线

保持应力下的蠕变能密度(为图中所示的阴影部分),即

$$\Delta W_c^1 = \sigma_{\max} \Delta \varepsilon_c^1 \quad (6)$$

该循环(1-2-3-4)的蠕变能密度为平均应力下的蠕变能密度与保持应力下的蠕变能密度之和,即

$$\Delta W_c = \Delta W_c^m + \Delta W_c^1 \approx \sigma_{\max} (\Delta \varepsilon_c^m + \Delta \varepsilon_c^1) = \sigma_{\max} \Delta \varepsilon_c \quad (7)$$

该循环(1-2-3-4)的应变能密度为:弹性应变能密度、塑性应变能密度及蠕变能密度之和,即

$$\Delta W_t = \Delta W_e + \Delta W_p + \Delta W_c \quad (8)$$

由(8)式可见:在高温环境中,材料经历一个循环周期所具有的应变能密度,在形式上只比常温环境中的应变能密度多了蠕变应变能密度一项。类比常温下选取应变能密度为材料的损伤参量的方法,若计算出高温下该循环的应变能密度值 ΔW_t , 就可以描述该循环对材料

造成的损伤了。

2 循环蠕变应变 $\Delta \varepsilon_c$ 的计算

在高温环境中,材料的力学性质会随温度变化而发生改变,如强度指标会有下降的趋势,塑性指标会有增大的趋势,具体的数值需要通过实验来测定。而在交变应力作用下,若要确定蠕变能密度 ΔW_c , 则重点是计算循环蠕变应变 $\Delta \varepsilon_c$, 而如何计算循环蠕变应变 $\Delta \varepsilon_c$ 尚在探讨之中。在这里,根据循环蠕变应变与静蠕变曲线的相似和区别,提出对静蠕变公式进行修正以后用于计算循环蠕变应变的方法。

2.1 环蠕变应变与静蠕变的相似和区别

蠕变应变 ε_c 与蠕变时间 t (或者循环次数 N) 之间的关系曲线(蠕变曲线)是描述蠕变应变的主要规律曲线。同材料、同温度、相同最大应力的条件下,循环蠕变应变与静蠕变曲线的相似主要为^[6]: (1) 环蠕变应变曲线的包迹与静蠕变曲线形状相似,都具有明显的三个阶段(瞬态、稳态、加速阶段)蠕变特征。(2) 环蠕变应变与静蠕变达到断裂时,产生的总蠕变量几乎相等。(3) 应力具有各种不同保持时间($\Delta t_1 \geq 2\text{min}$)的循环蠕变的归一化百分比寿命曲线与静蠕变归一化百分比寿命曲线几乎完全重合^[7]。

循环蠕变应变与静蠕变曲线的区别主要体现在: (1) 循环蠕变应变与静蠕变相比较,具有明显的(时间)加速蠕变的特征^[8]。如试件在同样的最大应力作用下,若静蠕变需要100小时会断裂,则循环蠕变可能只需要60小时就会断裂。(2) 在不同应力保持时间的循环蠕变之间比较,则应力保持时间越长,试件断裂所需的循环次数越少,即循环次数寿命越短。

由于循环蠕变应变与静蠕变曲线的相似,使静蠕变公式具有修正后可以描述循环蠕变的可能性,而循环蠕变的加速特性,正是需要做修正的内容。

2.2 环蠕变应变的计算公式

循环蠕变的加速,这也是循环蠕变对材料损伤的加速,即在同时间段内,循环蠕变对材料的损伤比静蠕变造成的损伤更为严重。机械疲劳和蠕变交汇作用的损伤,理应包含在新增加的损伤之中。并且新增加的损伤同样具有积累性。用等效杨氏模量可以有效地描述循环蠕变下损伤的累积性,导出循环蠕变的计算公式。

2.2.1 等效杨氏模量

由于循环蠕变会造成材料性能的加速劣化,而应力-应变的实验数据同样也在标志着这种加速劣化,故定义材料在循环蠕变循环中的等效杨氏模量 E' 的下降来描述材料逐渐的劣化程度,即^[9]

$$E' = \frac{\sigma_{\max}}{\varepsilon'} = \frac{\sigma_{\max}}{S/L_0} \quad (9)$$

其中 σ_{\max} 为最大应力, ε' 为由最大位移而换算来的最大应变, L_0 为试件的初始长度, S 为试件的初始长度到某个循环的最大位移。各个相关量的标注如图 6 所示。

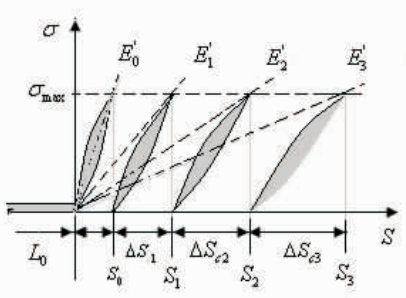


图 6 应力-位移曲线及等效杨氏模量 E'_N

各个循环的蠕变位移为

$$\Delta S_{e1}, \Delta S_{e2} \cdots \Delta S_{e_i} \cdots \Delta S_{eN}$$

各个循环的蠕变应变为

$$\Delta \varepsilon_{e1}, \Delta \varepsilon_{e2} \cdots \Delta \varepsilon_{e_i} \cdots \Delta \varepsilon_{eN}$$

在等应力幅作用下,若近似地取各个循环的无蠕变疲劳的应变 ε_0 (为疲劳弹性应变 ε_e 与疲劳塑性应变 ε_p 之和) 保持不变,则第 N 次循环时试件的最大位移

$$S_N \approx S_0 + \sum_{i=1}^N \Delta S_{eN} \quad (10)$$

最大应变

$$\varepsilon'_N = \frac{S_{eN}}{L_0} \approx \varepsilon_0 + \sum_{i=1}^N \Delta \varepsilon_{eN} \quad (11)$$

等效杨氏模量则为

$$E'_N = \frac{\sigma_{\max}}{\varepsilon'_N} \quad (12)$$

可见,随着循环次数 N 的增加,最大应变 ε'_N 增大,等效杨氏模量 E'_N 则累积式的减小,描述着材料性能的累积式加速劣化。

2.2.2 循环蠕变的计算

循环蠕变下的等效应力 σ_N^* 。设循环蠕变中材料的劣化程度变量为

$$D = 1 - \frac{E'_N}{E} \quad (13)$$

其中 $E = \Delta \sigma_0 / \varepsilon_e$ 是材料在交变应力下的杨氏模量(由单轴疲劳试验测定)。令循环蠕变下的等效应力为

$$\sigma_N^* = \frac{\sigma}{1-D} \quad (14)$$

则最大等效应力为

$$\sigma_{N,\max}^* = \frac{\sigma_{\max}}{1-D} = E \varepsilon'_N \quad (15)$$

其值随着循环次数增加而增大。

静蠕变公式的修正:由于蠕变的恒速阶段,所占时间很长,约为寿命的 75% 左右,是工程中最实用的阶段,故对此阶段做修正,其余阶段修正方法相同。

由已知的静蠕变恒速 Dorn 等式^[10]

$$\varepsilon = At \sigma_a^n \exp\left(\frac{-Q_c}{RT}\right) \quad (16)$$

式中: A 材料常数(随绝对温度 T 变化)

σ_a 为加载应力值

t 为 σ_a 作用下的蠕变时间

n 是应力指数(随应力而变)

Q_c 是材料的表观激活能(随温度变化)

R 是气体常数

将最大等效应力 $\sigma_{N,\max}^*$ 代替(16)式中的应力 σ_a , 则得到最大应力 σ_{\max} 作用下循环蠕变的应变方程式

$$\varepsilon'_N = At (E \varepsilon'_N)^n \exp\left(\frac{-Q_c}{RT}\right) \quad (17)$$

其中 t 为最大应力 σ_{\max} 的作用时间。

各个循环的蠕变应变的计算:依次取 $i = 1, 2, 3, \dots$

N 次循环,则从方程式(17)中可解出 ε'_N (N 次循环所产生的最大应变)值,再由式(10)即 $\varepsilon'_N \approx \varepsilon_0 +$

$$\sum_{i=1}^N \Delta \varepsilon_{eN}, \text{ 解出各个循环的蠕变应变值 } \Delta \varepsilon_{e1}, \Delta \varepsilon_{e2} \cdots \Delta \varepsilon_{e_i} \cdots \Delta \varepsilon_{eN}。$$

若在一个循环中保持应力 σ_{\max} 作用的时间 $\Delta t_1 = 0$, 仅有平均应力 σ_m 作用,则 N 次循环的蠕变时间为 $t = N \Delta t_3$, Δt_3 是一个循环中的应力变化时间,解出的是平均应力下的各个循环的蠕变应 $\Delta \varepsilon_{eN}^m$ 。

若在一个循环中应力变化时间 Δt_3 内的平均应力 $\sigma_m = 0$, 仅有保持应力 σ_{\max} 作用,则 N 次循环的蠕变作用时间为 $t = N \Delta t_1$, Δt_1 是一个循环中的应力保持时间,解出的则是保持应力 σ_{\max} 下各个的循环蠕变 $\Delta \varepsilon_{eN}$ 。

若既有平均应力 σ_m , 又有保持应力 σ_{\max} 作用,则 N 次循环的蠕变时间为 $t = N t_n$, t_n 是一个循环的周期,循环蠕变的应变方程式为

$$\varepsilon'_N = AN \left[\Delta t_1 (E \varepsilon'_N)^{n_1} + \Delta t_3 \left(\frac{\sigma_m}{\sigma_{\max}} E \varepsilon'_N \right)^{n_2} \right] \exp\left(\frac{-Q_c}{RT}\right) \quad (18)$$

式中: n_1 是 σ_{\max} 下的蠕变应力指数, n_2 是 σ_m 下的蠕变应力指数。则(18)式解出的是平均应力与保持应力共同作用下产生的各个循环的蠕变应变 $\Delta \varepsilon_{eN}$ 值。将各个循环的蠕变应 $\Delta \varepsilon_{eN}$ 值代入式(7)则可求出各个循环的蠕变能密度

$$\Delta W_{eN} \approx \sigma_{\max} \Delta \varepsilon_{eN} \quad (19)$$

由式(8)则可得各个循环周期的应变能密度

$$\Delta W_{tN} = \Delta W_{eN} + \Delta W_{pN} + \Delta W_c \quad (20)$$

3 基于能量密度的疲劳裂纹扩展速率公式

在导出了循环蠕变加载下各个循环周期的应变能密度 $\Delta W'_{iN}$ 以后,下面参照单轴疲劳的研究方法,来推导循环蠕变加载下以总能量密度为损伤变量的疲劳裂纹扩展速率公式。

3.1 基本假设

(1) 构件的材料是存在缺陷的(如不均匀,有夹杂,孔洞,微裂纹等),在外应力作用下,材料中这些部位会形成应力集中,使材料的损伤局部严重,成为裂纹形核和扩展的源区。

(2) 在第 N 次循环周期中,裂纹形核和扩展的驱动力,来自于裂尖局部区域的应变能密度 $\Delta W'_{iN}$, 其值为局部弹性应变能密度 $\Delta W'_{eN}$ 、局部塑性应变能密度 $\Delta W'_{pN}$ 及局部蠕变应变能密度 $\Delta W'_{cN}$ 之和。考虑非扩展缺陷的能量吸收及损伤过程中的热和振动等消耗,裂纹形核和扩展的实际驱动力则用 $(\Delta W'_{iN})^\xi$ 来表示, ξ ($\xi \leq 1$) 为应变能密度利用指数。

(3) 单位循环所产生的裂纹扩展量 da/dN , (a 为裂纹长度, N 为循环次数),与裂尖塑性区的尺寸 a_p 成正比,与局部实际应变能密度 $(\Delta W'_{iN})^\xi$ 成正比。即

$$\frac{da}{dN} = \Delta a = B(\Delta W'_{iN})^\xi a_p \quad (21)$$

其中 B 为材料常数,与温度相关。

3.2 裂尖塑性区尺寸 a_p 估算

由于以 $\Delta W'_{iN}$ 为材料的损伤变量,所以需用 $\Delta W'_{iN}$ 来表示 a_p 。

由裂纹扩展的张开闭合模型,裂尖塑性区尺寸为^[11]

$$a_p \approx \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_1}{\Delta\sigma_o} \right)^2 \quad (22)$$

式中: $\Delta\sigma_o$ 为循环屈服应力, K_1 为应力强度因子。

设裂尖塑性区处于平面应力下,则^[11]

$$K_1^2 = E\Delta J \quad (23)$$

式中 ΔJ 为裂尖塑性区的 J 积分。

设构件处于大范围屈服状态中,并存在小裂纹时,则^[11]

$$\Delta J = 2\pi Y^2 \Delta W'_{iN} a \quad (24)$$

其中 Y 为裂纹几何形状因子。

将式(23)、式(24)代入式(22),则得

$$a_p = \frac{EY^2}{\Delta\sigma_o^2} (\Delta W'_{iN}) a \quad (25)$$

3.3 裂尖局部区域的应变能密度 $\Delta W'_{iN}$

由于 $\Delta W'_{iN}$ 不便计算,则用名义应变能密度 $\Delta W'_{iN}$ 来表示 $\Delta W'_{iN}$ 。由 Neuber 准则

$$\Delta W'_{iN} = K_t^2 \Delta W'_{iN} \quad (26)$$

式中 K_t 为理论应力集中系数(设循环中不改变)即

$$K_t = 1 + 2\left(\frac{a}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \approx 2\left(\frac{a}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

其中 ρ 为裂尖曲率平均半径,由实验估测。故

$$\Delta W'_{iN} = \frac{4}{\rho} \Delta W'_{iN} a \quad (28)$$

3.4 疲劳裂纹扩展速率

将式(25)、式(28)代入式(21)则得到

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta W'_{iN} a)^{\xi+1} \quad (29)$$

式中

$$C = B \frac{4EY^2}{\rho(\Delta\sigma_o)^2} \quad (30)$$

是与构件缺陷和材料相关的常数,会随温度发生变化。

式(29)、式(30)就是循环蠕变加载下的疲劳裂纹扩展的速率公式。

由公式(29)、式(30)可见,若测定出一定温度下,交变疲劳和静蠕变疲劳的相关材料参数,当给定外加的应力波形后,就可以计算出在该应力波形的作用下,所产生的循环蠕变疲劳裂纹扩展的速率。公式中的应变能密度具有明显的蠕变累积性增加的特征,必然可预测循环蠕变疲劳裂纹的扩展速率也应具有加速的特征,这一特征是机械疲劳损伤与蠕变损伤之间交互作用产生的损伤的直接反映。该公式中材料参数随循环数的可能变化和随温度的变化未加以讨论。

4 结束语

本文力图寻找一个循环蠕变加载下疲劳裂纹扩展速率的计算公式,一要充分考虑机械疲劳与蠕变疲劳交汇作用对裂纹扩展速率的影响,二要计算方便。

通过对循环蠕变能量密度的分析,因其对应力-应变表述的综合性、标量叠加的计算方便性、及对材料损伤描述的单值性而见到:若以能量密度为损伤参量,在一个循环周期中,若将机械疲劳与蠕变疲劳的损伤做简单相加就可以统一描述;在多个循环周期中,对循环蠕变的损伤累积描述也是简单相加。

通过对循环蠕变迟滞回线的分析,可见循环蠕变的加速性,实质是表达了机械疲劳与蠕变交汇作用材料损伤的加速,对裂纹扩展的加速。对静蠕变做累积性损伤的修正后,则可以循环蠕变的应变,计算蠕变能密度,及循环蠕变的能量密度。

以能量密度为损伤参量,参照单轴疲劳加载的研究方法,导出了循环蠕变加载下疲劳短裂纹扩展速率的计算公式,该公式的正确程度有待今后的实验验证。

参考文献:

- [1] 卿华,江和浦,温卫东.DD6 单晶合金疲劳蠕变性能研究[J].燃气涡轮试验与研究,2007,20(3):51-56.
- [2] 王璞,董建新,张麦仓.合金蠕变/疲劳裂纹扩展速率及 a-N 曲线分析[J].稀有金属材料与工程,2011,40(4):631-636.
- [3] 于强.随机载荷加载下疲劳裂纹扩展速度的一种计算方法[J].四川理工学院学报:自然科学版,2010,23(4):406-410.
- [4] 袁超,郭建亭,杨洪才.定向凝固镍基高温合金 DZ417G 的循环蠕变行为[J].金属学报,1999,35:492.
- [5] 赵永翔.低周疲劳短裂纹行为和可靠性分析[D].成都:西南交通大学,2006.
- [6] 关逊,刘庆,郭建亭.高温合金循环蠕变实验[J].工程与实验,2008(3):25-28.
- [7] 赵鹏,轩福贞,涂善东.超超临界汽轮机转子 X12CrMoVNbB10-1-1 钢棘轮效应的实验研究[J].动力工程学报,2010,30(4):309-311.
- [8] 郭建亭.高温合金材料学(上册)[M].北京:科学出版社,2008.
- [9] 范志超,陈学东,蒋家玲.16MnR 钢循环蠕变-疲劳交互作用损伤力学模型[J].固体力学学报,2006,27(1):66-67.
- [10] Mukherjee A K.Bird J E.Dorn J E.Experimental correlations for high-temperature creep[M].Trans ASM. 1969.
- [11] 陈麓,蔡其巩,王仁智,等.工程断裂力学[M].北京:国防工业出版社,1977.

Research on the Fatigue Crack Growth Rate under Cyclic Creep Loading

YU Qiang

(School of Science, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract: Based on the periodicity of stress-stain hysteresis loop, a method is put forward to deal with the interaction between mechanical fatigue damage and creep damage by regarding the stain energy density as density damage in one cycle and integrating mechanical fatigue damage with creep damage. The acceleration of cyclic creep is proved to be the result of the interaction between mechanical fatigue damage and creep damage. The formula of static creep is modified to be applied to computing the stain of cyclic creep and stain energy density by virtue of equivalent Young modulus. Refer to the fatigue process uniaxial loading, the formula of fatigue crack growth rate under cyclic creep loading based on stain energy density is derived.

Key words: cyclic creep; hysteresis loop; stain energy density; crack growth rate