

# 两级蠕变下损伤演变及寿命估算

## Creep Damage Evolution and Remaining Life under Two Level Stresses

魏楠, 金尧, 孙训方 (西南交通大学, 成都 610031)

WEI Nan, JIN Yao, SUN Xun-fang (Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**摘要:** 在两级或多级加载下, 材料的蠕变寿命分数之和与加载顺序密切相关, 这表明加载历史对损伤演变过程具有显著的影响。本研究采用考虑损伤和硬化影响的蠕变律, 得到的蠕变损伤演变过程受加载历史的影响。讨论了两级蠕变加载时损伤演变和寿命估算问题。结果表明, 本研究方法 with 试验结果吻合较好, 可以反映加载效应的影响。

**关键词:** 蠕变; 损伤演变; 剩余寿命; 顺序效应

中图分类号: TG113.25<sup>+</sup> 文献标识码: A 文章编号: 1001-4381 (2000) 11-0003-03

**Abstract:** The sum of time-ratios is connected with creep loading order. It means creep damage evolution is affected by loading history. In present paper, creep law taking account of damage and hardening state was used to deduce the creep damage evolution equation, which includes loading history effect. Damage evolution and remaining life under conditions of two-level creep loading were discussed. The result shows that proposed method of predicting remaining life coincides with experiment and can reflect loading order effect

**Key words:** creep; damage evolution; remaining life; order effect

试样经受多级蠕变载荷时, 每一级加载都将产生一定的损伤, 当损伤累积达到临界值时试样失效。现有各种损伤理论均采用单一损伤变量来描述受损材料的劣化状态, 认为只要受损试样的损伤一定, 不论引起该损伤的加载历史如何, 在随后的相同载荷下, 其损伤演变过程和剩余寿命将完全相同, 即认为在不同载荷水平下, 存在着“等效损伤”状态。然而, 实验结果表明, 在蠕变条件下, 受损试样的剩余寿命强烈地依赖于产生该损伤的加载历史。经历不同加载历史的受损试样, 即使损伤状态相同, 但在随后的相同载荷下, 其剩余寿命完全不同, 各级载荷间一般具有明显的交互作用。

考虑到受损材料的微结构因加载历史不同而有差异, 影响材料的变形和损伤行为, 本研究将硬化状态变量引入蠕变损伤演变方程, 以表征加载历史对损伤演化和剩余寿命的影响。

### 1 两级加载

简单加载时 (载荷不变化), 考虑损伤和硬化影响的蠕变律、蠕变损伤演变方程和蠕变损伤计算式为

$$\dot{\epsilon} = C \dot{\epsilon}^m h^{-1} (1-D)^{-k} = A^{-n} (1-D)^{-k} \dot{\epsilon}^{-(1-n)} \quad (1)$$

$$D = \left( \frac{\dot{\epsilon}}{2EQ} \right)^q C^{\frac{1}{m}} h^{-1} (1-D)^{-k} = S \frac{n_1}{(1-D)^{rt}} \dot{\epsilon}^{-(1-n)} \quad (2)$$

$$(1-D)^{(r+1)} = 1 - (t/t_R) = 1 - \quad (3)$$

式中, 硬化变量  $h = (C_1/\dot{\epsilon})^{-1/n_1} t^{(1-n_1)}$ ,  $A$ ,  $n$ ,  $n_1$ ,  $k$  和  $S$  等为常数。(2) 式表明, 蠕变损伤演变不仅与当时的损伤和应力有关, 还依赖于当时的硬化程度。

蠕变曲线分析中 随载荷略有变化。为使问题简化, 在下面对蠕变损伤的讨论中将 视为常数。

#### 1.1 剩余寿命

如果试样 1 在  $\sigma_1$  下蠕变  $t_1$  后, 改为  $\sigma_2$  继续蠕变到破坏, 下面讨论在  $\sigma_2$  下损伤演变和剩余寿命。

假想另有试样 2 在  $\sigma_2$  下蠕变到破坏 (简单加载)。但将试样 2 的加载过程看作两级加载, 第一级 ( $\sigma_2$ ,  $t_2$ ), 第二级 [ $\sigma_2$ , ( $t_{R2} - t_2$ )]。

由于将 视为是常数, 蠕变损伤仅与寿命分数有关。当  $t_2/t_{R2} = t_1/t_{R1} = 1$  时, 试样 1 经蠕变过程 ( $\sigma_1$ ,  $t_1$ ) 和试样 2 经 ( $\sigma_2$ ,  $t_2$ ) 后损伤同为  $D_1$ , 但硬化状态分别为  $h^{(1)}$  和  $h^{(2)}$ 。一般来说,  $h^{(1)} > h^{(2)}$ 。(1) 和 (2) 式表明,  $\dot{\epsilon}$  和  $D$  与  $h$  成反比, 即在相同损伤的情况下, 硬化越严重,  $\dot{\epsilon}$  和  $D$  越小。两个试样虽然损伤状态相同, 但是硬化状态不同。当这两试样在  $\sigma_2$  下继续蠕变时, 损伤演变过程和剩余寿命也就不相同。

按 (1) 式, 试样 2 在第二级加载后的  $\dot{\epsilon}$  为

$$\dot{\epsilon} = A^{-\frac{n}{2}} (1-D)^{-k} (t + t_2)^{-(1-n)} \quad (4)$$

式中  $t$  自第二级载荷施加起算。(4) 式中的  $(1-D)^{-k}$  表示试样 2 经 ( $\sigma_2$ ,  $t_2$ ) 后, 损伤对  $\dot{\epsilon}$  的影响, 因为试

样经蠕变过程  $(\sigma_1, t_1)$  和  $(\sigma_2, t_2)$  后损伤相同, 因此该项也可表示试样 1 经  $(\sigma_1, t_1)$  后, 在  $\sigma_2$  下损伤对  $\epsilon$  的影响。(4) 式中的  $(t+t_2)^{-(1-\alpha)}$  表示试样 2 经  $(\sigma_2, t_2)$  后, 硬化对  $\epsilon$  的影响, 由于试样经  $(\sigma_1, t_1)$  和  $(\sigma_2, t_2)$  后硬化状态并不相同, 因此只要对该项进行修正, 就可得到试样 1 经  $(\sigma_1, t_1)$  后, 在第二级载荷  $\sigma_2$  下的  $\epsilon$ 。

引入相当时间  $t_1$ , 认为试样 2 经  $(\sigma_2, t_1)$  引起的硬化状态  $h$  与试样 1 经  $(\sigma_1, t_1)$  引起的硬化状态  $h^{(1)}$  对第二级载荷下  $\epsilon$  的影响等效。即将试样 1 经  $(\sigma_1, t_1)$  引起的实际硬化状态, 假想为是经  $(\sigma_2, t_1)$  所引起的“假想硬化状态”(损伤仍为实际损伤  $D_1$ )。就将两级不同载荷的损伤演变和剩余寿命问题简化为两级相同载荷的问题。按此分析, 试样 1 在施加第二级载荷  $\sigma_2$  后  $\epsilon$  为

$$\epsilon = A \frac{n}{2} (1-D)^{-k} (t+t_1)^{-(1-\alpha)} \quad (5)$$

第二级载荷下的损伤演变方程为

$$D = S \frac{\frac{n}{2}}{(1-D)^r} (t+t_1)^{-(1-\alpha)} \quad (6)$$

(5) 和 (6) 式中的  $t$  自  $\sigma_2$  施加起算, 此时损伤为  $D_1$ 。对 (6) 式积分得第二级载荷下的损伤  $D_2$

$$(1-D_2)^{(r+1)} = 1 - \frac{1}{(1-D_1)^r} \left( \frac{t+t_1}{t_1+t_2} \right)^{1-\alpha} \quad (7)$$

式中,  $\sigma_2 = t/t_{R2}$ ,  $\sigma_1 = t_1/t_{R2}$  为相当寿命分数。当  $D_2 = 1$  时  $t = t_2$  为剩余寿命。由 (7) 式得第二级载荷  $\sigma_2$  下的剩余寿命分数  $\sigma_2^* = t_2^*/t_{R2}$  为

$$\sigma_2^* = (1 - \frac{1}{(1-D_1)^r} \left( \frac{t_1+t_2}{t_1+t_2} \right)^{1-\alpha})^{1/(r+1)} \quad (8)$$

文 [1] 分析: 相同寿命分数下, 高应力引起的硬化程度比低应力严重。如果  $\sigma_1 > \sigma_2$ , 一般有  $h^{(1)} > h^{(2)}$ , 使得当载荷由高应力  $\sigma_1$  改变为低应力  $\sigma_2$  时,  $\epsilon$  和  $D$  小于直接施加  $\sigma_2$ , 在  $D = D_1$  时的  $\epsilon$  和  $D$ 。这说明高-低加载时, 在低应力下损伤速率减缓。因此有  $\sigma_1 > \sigma_2$  和  $\sigma_1 + \sigma_2^* > 1$ 。同样分析, 在低-高加载时, 有  $h^{(1)} < h^{(2)}$ ,  $\sigma_1 < \sigma_2$  和  $\sigma_1 + \sigma_2^* < 1$ 。而当  $\sigma_1 = \sigma_2$  时,  $h^{(1)} = h^{(2)}$  和  $\sigma_1 + \sigma_2^* = 1$ 。

$\sigma_1$  应与第一级加载历史  $(\sigma_1, t_1)$  和第二级载荷  $\sigma_2$  有关。将  $\sigma_1$  表示为

$$\sigma_1 = \sigma_2 + F_{12} \frac{n_c}{1} \quad (9)$$

上式等号右边第二项是由于硬化的差异引起的交互作用项。蠕变交互作用指数  $n_c$  为常数(高-低和低-高加载时,  $n_c$  可能取不同的值); 蠕变交互作用系数  $F_{12}$  为载荷的函数。交互作用项表示第一级加载历史对第二级载荷下损伤和剩余寿命的影响。

## 1.2 损伤演变

蠕变是在高温下进行, 蠕变过程除引起变形硬化外, 还会发生回复、再结晶等软化过程, 使硬化效应减弱。高-低加载时, 受回复、再结晶软化过程的影响, 高应力引起的硬化效果在低应力下的蠕变过程中并不会长时间保持, 而要逐渐减弱, 使得在第二级载荷初期出现软化; 而在低-高加载时, 低应力引起的硬化效果相对较弱, 在高应力下硬化得以持续。

文献 [1] 报导了某材料改变蠕变应力后,  $\epsilon$  的变化情况: 第一阶段在高应力下  $\epsilon$  呈下降(硬化过程); 第二阶段改变为低应力,  $\epsilon$  在突然降到最低值后逐渐开始增加(软化过程); 第三阶段重新回到高应力, 这时的高于第一阶段末的  $\epsilon$ , 表明第一阶段高应力引起硬化在第二阶段低应力蠕变过程中被减弱。

文献 [2] 在某材料每蠕变 8h 后卸载 30h 的动态蠕变试验中观察到, 与连续蠕变相比, 动态蠕变的  $\epsilon$  大大增加, 而蠕变寿命减少约 30%。这种现象可以解释为, 由于蠕变引起的硬化效应在卸载期间被逐渐减弱, 使得后续的  $\epsilon$  和  $D$  增加。

由相当寿命分数概念,  $\sigma_1$  表示第一级加载历史对材料在  $\sigma_2$  下蠕变到破坏整个过程中, 损伤演变过程的笼统效应。考虑到蠕变过程存在着回复、再结晶的软化过程, 在高-低加载时, 高应力引起的硬化效果在低应力初期要逐渐衰减。因此严格的说, 加载历史对第二级载荷下  $\epsilon$  和  $D$  的影响并不是均匀的, (5) 和 (6) 式中的相当时间  $t_1$  应当是时间  $t$  的减函数。

为避免数学上的困难, (6) 式积分时将  $t_1$  作为常数。得到的损伤计算式 (7) 对低-高加载基本合理, 但对于高-低加载就不太合适(存在着软化过程)。作为近似, 损伤计算时可将 (9) 式中的  $\sigma_1$  当作  $\sigma_2$  的减函数。假设硬化效应为对数衰减, 将 (9) 式改写为

$$\sigma_1 = (\sigma_2 + F_{12} \frac{n_c}{1}) \phi(\sigma_2) \quad (10)$$

$$\phi(\sigma_2) = 1 - S_d \lg \frac{\sigma_2}{\sigma_2^*} \begin{cases} = 0 & \text{低-高加载} \\ > 0 & \text{高-低加载} \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\phi(\sigma_2)$  为衰减因子,  $S_d$  为常数。

## 2 算例

图 1 中虚线为某 Cr-Mo-V 钢两级蠕变试验结果分析曲线。取蠕变交互作用系数  $F_{12}$  为如下形式

$$F_{12} = S_{gn} \left( \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_2} \right) \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)^{b_1} \left[ 1 + B \left( \frac{\sigma_1}{\sigma_2} \right)^{b_2} \lg \frac{1+\sigma_2}{\sigma_2} \right] \quad (12)$$

式中,  $S_{gn} = \sigma_1 - \sigma_2$ ,  $B$ ,  $b_1$  和  $b_2$  为常数。 $S_{gn}(x)$  根据  $x$  大于、小于和等于 0 分别取为 1, -1 和 0。

表 1 给出由试验结果得到的 (9) 和 (12) 式中的

系、指数。图 1 中实线为本文计算曲线。

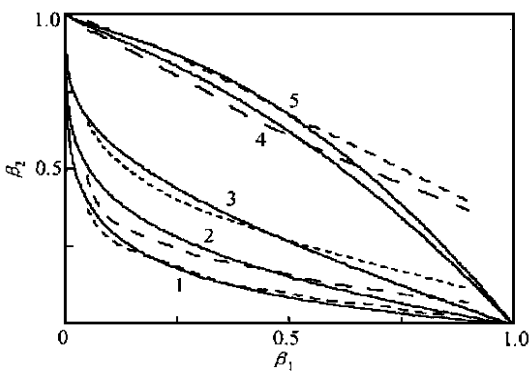


图 1 蠕变/蠕变交互作用图  
Fig.1 Creep/creep interaction curves

表 1 Cr-Mo-V 钢蠕变交互作用系、指数

Table 1 Creep interaction coefficients and exponents

	$\sigma_1/\text{MPa}$	$\sigma_2/\text{MPa}$	$F_{12}$	$n_c$	曲线
低-高 加载	138	241	- 0.94998	1.0	
	172	241	- 0.85822	1.0	
	207	241	- 0.64000	1.0	
低-高 加载	276	241	0.85618	2.0	
	296	241	1.24565	2.0	
$B= 5.55, b_1= 0.6623, b_2= 0.8800, n= 0.3$					

图 2 为  $\beta_1$  取不同值时, 由 (10) 式计算的损伤演变曲线。图 2a 为高-低顺序加载 (取  $S_d=1$ )。  $\beta_1=1.0$

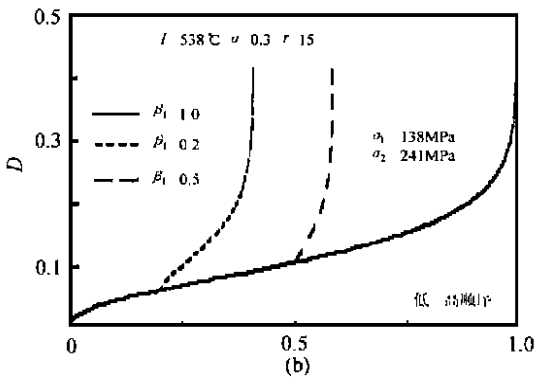
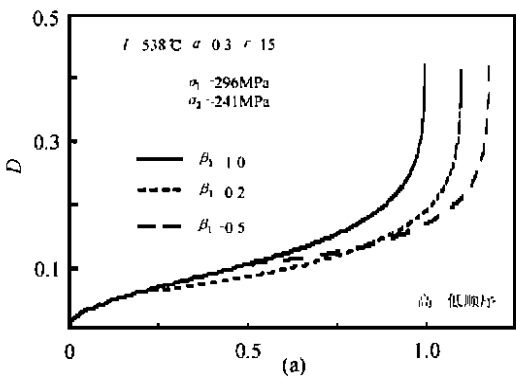


图 2 两级蠕变加载损伤演变曲线  
Fig. 2 Creep damage curves

映了两级加载时损伤的演化规律和剩余寿命。其结果表明, 蠕变/蠕变间存在明显的交互作用。

参考文献

[ 1 ] Blum W, Reppich B. Creep of particle-strengthened alloys. In: Creep Behavior of Crystalline Solids, Swansea, 1985: 83 ~ 135  
[ 2 ] Gong Z L, Hsu T R. A constitutive model for metals subjected to cyclic creep [ J ] . Trans. ASME, J. Eng. Materials Tech.

对应的是简单加载的情况。曲线表明, 在应力降低的瞬时,  $D$  突然下降,  $\beta_1$  越大,  $D$  的下降也越显著。高-低顺序加载时  $D$  的减缓, 使得寿命分数之和大于 1。图 2b 为低-高顺序加载。图中曲线显示, 在应力增大的瞬时,  $D$  突然提高。 $D$  的提高使得损伤演变过程加速, 寿命分数之和小于 1。

上述分析说明, 蠕变损伤演变不仅与当时的损伤程度有关, 而且强烈地依赖于加载历史引起的硬化状态。忽略硬化状态对损伤演变的影响, 就无法正确反映在变化载荷下损伤的演变。变载后的损伤演变曲线不同于简单加载时的损伤演变曲线, 即不能通过简单的平移使它们重合。

3 讨论

蠕变过程中材料的微结构会发生变化。不同加载历程形成的微结构也不同, 从而影响材料的变形和损伤行为。研究蠕变损伤演变应考虑加载历史效应。

蠕变加载时, 材料的硬化状态是由特定加载条件 (应力、时间和温度等) 下形成的特殊微结构所决定。它不同于单调加载时由塑性变形所引起的加工硬化。不同的加载历史, 其微结构变化不可能相同, 因此硬化状态也不可能真正等效。本文提出的硬化状态等效是对特定的第二级载荷而言。

考虑硬化的蠕变损伤本构方程 (6) 式, 较好地反

1991, 113 (4): 419 ~ 424

[ 3 ] Goldhoff R M, Woodford D A. The evaluation of creep damage in Cr-Mo-V steel. ASTM STP 515, 1972: 89 ~ 106

收稿日期: 2000-08-10

作者简介: 魏楠 (1954-), 女, 西南交通大学机械学院工程师。通讯地址: 四川成都西南交通大学机械工程学院 (610031)

本文编辑: 杨 雪