

# 1.25Cr0.5Mo 钢疲劳 - 蠕变交互作用的损伤研究 \*

陈志平 蒋家羚 陈凌  
(浙江大学化工机械研究所, 杭州 310027)

**摘要** 以连续损伤力学 (CDM) 的经典损伤理论为基础, 对疲劳、蠕变及其交互作用下的损伤演化分别进行了研究, 进而推导出一个新的疲劳 - 蠕变交互作用的损伤模型. 为将上述模型方便的运用于工程实际之中, 通过 1.25Cr0.5Mo 钢光滑试样 540 °C 环境下应力控制的梯形波加载实验, 对工程中容易测量的轴向变形即平均应变的变化规律进行了研究, 选取平均应变的变化作为损伤变量, 用上述模型进行了 1.25Cr0.5Mo 钢光滑试样 540 °C 下的疲劳 - 蠕变交互作用的损伤描述, 结果表明实验损伤点与该模型的损伤演化规律符合较好. 在上述模型和平均应变变化规律的基础上, 对工程上如何进行失效判定进行了相应的探讨.

**关键词** 疲劳, 蠕变, 疲劳 - 蠕变交互作用, 损伤变量, 平均应变

**中图法分类号** O346.2, TG142.71 **文献标识码** A **文章编号** 0412-1961(2007)06-0637-06

## RESEARCH ON FATIGUE-CREEP INTERACTION DAMAGE OF STEEL 1.25Cr0.5Mo

CHEN Zhiping, JIANG Jialing, CHEN Ling

Research Institute of Chemical Mechanic Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027

Correspondent: CHEN Zhiping, associate professor, Tel: (0571)87953007, E-mail: zhiping@zju.edu.cn

Supported by National Key Technology R & D Program of China (No.2004BA803B02-06)

Manuscript received 2006-12-08, in revised form 2007-03-20

**ABSTRACT** Based on the continuum damage mechanics, a new damage model has been developed for fatigue-creep interaction. In order to apply this model to the practical engineering condition, fatigue-creep interaction experiments of cylindrical specimens of steel 1.25Cr0.5Mo have been carried out to research the damage evolution at 540 °C under stress control, using a trapezium waveform with the hold-time per cycle. According to the experiments, the changing rule of mean strain has been studied and the change of mean strain is defined as the damage variable. Damage curves of different stress ranges have been obtained based on the above damage model. Results show that the values of damage calculated from the damage variable agree well with these damage curves. Based on the damage model and the change rules of mean strain, the failure assessment in engineering is also discussed, and a method to prevent the rupture of engineering components has been proposed.

**KEY WORDS** fatigue, creep, fatigue-creep interaction, damage variable, mean strain

石油化工、动力、航空航天等部门中的许多机械设备, 如: 压力容器、电厂锅炉、汽轮机、燃气轮机与冶金机械等, 长期处于高温与低周期疲劳载荷条件下工作, 对这一类装备进行安全评估时, 应考虑疲劳载荷与高温蠕变的交互作用对材料损伤的影响<sup>[1]</sup>. 为从理论上探讨材料疲劳 - 蠕变交互作用的损伤机制, 采用连续损伤力学 (continuum damage mechanics——CDM) 进行疲劳 - 蠕变交互作用的研究.

连续损伤力学主要研究材料内部缺陷的产生和发展

所引起的宏观力学效应及最终导致材料破坏的过程和规律. 损伤的概念最初由 Kachanov<sup>[2]</sup> 和 Rabotnov<sup>[3]</sup> 引入, 后经 Lemaitre 等人<sup>[4,5]</sup> 的发展, 给出了定量描述损伤的理论基础. 到目前为止, 国内外一些学者用连续损伤力学对疲劳 - 蠕变交互作用进行了研究<sup>[6-10]</sup>, 并建立了相应的损伤模型. 这些模型大都形式复杂, 且参数较多, 需要单纯的疲劳及蠕变数据. 但是, 有研究表明<sup>[11]</sup>: 由于疲劳与循环频率相关, 因此疲劳数据的选取必须参考循环频率做出; 另外, 高温下进行低频疲劳 - 蠕变交互作用之后的高周疲劳时, 破坏很难以穿晶开裂 (疲劳型) 的方式进行, 按纯疲劳实验结果获得的参数就不再适用.

基于以上问题, 本文从连续损伤力学出发, 对疲劳和蠕变的损伤演化分别进行了研究, 提出一个新的疲劳 - 蠕变交互作用的损伤模型, 此模型不需要单纯的疲劳和蠕变

\* 国家十五科技攻关资助项目 2004BA803B02-06

收到初稿日期: 2006-12-08, 收到修改稿日期: 2007-03-20

作者简介: 陈志平, 男, 1965 年生, 副教授, 博士

数据,所有的参数都由所研究的疲劳-蠕变交互作用获得.通过 1.25Cr0.5Mo 钢光滑试样 540 °C 环境下应力控制的梯形波加载实验,采用应变能密度的变化作为损伤变量,用上述模型进行了疲劳-蠕变交互作用的损伤描述,结果表明,实验损伤点与该模型的损伤演化规律符合较好.

## 1 疲劳-蠕变交互作用的损伤力学

### 1.1 疲劳-蠕变交互作用的损伤理论

根据 Kachanov<sup>[2]</sup> 和 Rabotnov<sup>[3]</sup> 的经典损伤理论,单轴拉伸的试样有 3 种状态,初始无损状态、损伤状态和虚构无损状态.损伤变量  $D(0 \leq D \leq 1)$  表征微裂纹和微空隙导致材料损伤过程中有效承载面积减小的程度,即由于分布的微裂纹和微空隙的形成与扩展,试样的横截面积  $A$  减小到有效承载面积  $A^*$ .由此损伤变量  $D$  和  $A^*$  的关系为

$$1 - D = A^*/A \quad (1)$$

有效承载面积的减小导致应力增大,有效应力  $\tilde{\sigma}$  与名义应力  $\sigma$  的关系为<sup>[12]</sup>

$$\tilde{\sigma} = \sigma/(1 - D) \quad (2)$$

由文献 [12, 13] 可知,材料内部的微裂纹和微空隙导致有效承载面积减小,从而造成材料损伤,降低材料承载能力和力学性能.

用  $D_f$  表示疲劳损伤,  $D_c$  表示蠕变损伤,两种损伤的增量表达式可以写成<sup>[12]</sup>

$$dD_f = F_f(\Delta P, D_f, D_c)dN \quad (3)$$

$$dD_c = F_c(\sigma_{eq}, D_c, D_f)dt \quad (4)$$

其中  $\Delta P$  为累积塑性应变,  $\sigma_{eq}$  为 von Mises 应力.

材料中不同缺陷造成的损伤不能直接相加,但是根据损伤力学有效应力的定义,分别由疲劳和蠕变所造成的结构实际承载截面积的减少量则可以相加<sup>[14]</sup>,因此有

$$D = D_f + D_c \quad (5)$$

基于式 (5), 式 (3) 和 (4) 可近似变形为

$$dD_f = F_f(\Delta P, D_f + D_c)dN = F_f(\Delta P, D)dN \quad (6)$$

$$dD_c = F_c(\sigma_{eq}, D_c + D_f)dt = F_c(\sigma_{eq}, D)dt \quad (7)$$

对式 (5) 取微分并将式 (6)、(7) 代入, 可得如下表达式:

$$dD = dD_f + dD_c = F_f(\Delta P, D)dN + F_c(\sigma_{eq}, D)dt \quad (8)$$

式中函数  $F_f$  和  $F_c$  都是非线性的, 并且其中都含有损伤变量  $D$ , 因此式 (8) 表明了疲劳-蠕变交互作用损伤的非

线性本质. 分别得到  $dD_f$  和  $dD_c$  的表达式, 代入式 (8), 即可得到疲劳-蠕变交互作用的损伤表达式.

### 1.2 疲劳的损伤理论

疲劳损伤主要来自于累积塑性应变. 根据 CDM 理论, 疲劳的损伤演化方程可由一个合适的耗散势来描述, 由构造出的耗散势导出材料的损伤演化方程, 通过积分得到损伤模型, 再由实验来进行验证和确定常数.

前期的研究工作<sup>[15]</sup> 对疲劳损伤的基础理论进行了详细的说明, 其指出, 在假定塑性变形和微塑性变形导致损伤和内部能量耗散的基础上, 耗散势可写为

$$\varphi = \varphi_P(\sigma, \sigma_Y, R, D) + \varphi_D(Y, r, T, \varepsilon_e, D) + \varphi_\alpha \quad (9)$$

其中,  $\sigma$  为应力张量,  $\sigma_Y$  为材料的初始屈服应力,  $R$  为各向同性累积塑性应变的硬化参数,  $Y$  为应变能释放率,  $r$  为累积塑性应变,  $T$  为温度,  $\varepsilon_e$  为弹性应变张量,  $\varphi_P$  是采用塑性耦合损伤的 von Mises 屈服函数, 对应塑性的耗散部分,  $\varphi_D$  对应损伤的耗散部分,  $\varphi_\alpha$  是背应变的耗散部分, 影响很小.

损伤动力学定律可表示如下:

$$\dot{D} = -\frac{\partial \varphi_D}{\partial Y} \dot{\lambda} = -\frac{\partial \varphi}{\partial Y} \quad (10)$$

其中,  $\lambda$  为恒正的标量乘子,  $Y$  由下式得到:

$$Y = -\sigma_{eq}^2 R_v / [2E(1 - D)^2] \quad (11)$$

式中  $R_v$  为三轴度<sup>[15]</sup>,  $E$  为弹性模量. 按照 CDM 理论, 选取合适的耗散势, 代入损伤动力学定律式 (10), 即可得到损伤的演化方程, 再积分得到损伤表达式. 耗散势的选取已有很多研究<sup>[15-20]</sup>, 本文的前期研究工作<sup>[15]</sup> 选取的耗散势形式简单, 满足各向同性假设, 并且能综合反映温度和加载水平的影响, 因此采用文献 [15] 的耗散势

$$\varphi = \frac{Y^2}{2S_0} \frac{\Delta \dot{r}}{[(1 - N/N_f)]^{1-\beta(\sigma, T)}} \quad (12)$$

其中  $\sigma$  表示加载水平,  $\Delta \dot{r}$  为每一循环的塑性应变累积,  $S_0$  为与温度有关的材料常数, 函数  $\beta(\sigma, T)$  表示损伤累积的程度,  $N$  为循环周次,  $N_f$  为疲劳寿命. 将式 (12) 代入式 (10) 可得

$$\dot{D} = \left( -\frac{Y}{S_0} \right) \frac{\Delta \dot{r}}{[(1 - N/N_f)]^{1-\beta(\sigma, T)}} \quad (13)$$

令  $\Delta \tilde{\sigma}_{eq} = \sigma_{eq}/(1 - D)$ , 并按应变等价性假设<sup>[5]</sup>, 将损伤时应力-应变关系表示为  $\Delta \tilde{\sigma}_{eq} = K \Delta r^m$ , 其中  $K, m$  为常数.  $\Delta \tilde{\sigma}_{eq}$  和式 (11) 代入式 (13) 可得

$$\dot{D} = \frac{K^2 R_v}{2ES_0} \frac{\Delta r^{2m}}{[(1 - N/N_f)]^{1-\beta(\sigma, T)}} \Delta \dot{r} \quad (14)$$

上式即为疲劳损伤的演化方程.

### 1.3 蠕变的损伤理论

材料处于高温时, 会产生明显的粘性流动现象, 不断的流动会引起内部出现微孔和微裂纹, 产生损伤, 这种损伤为粘性流动损伤或者延时蠕变损伤, 简称为蠕变损伤. 在材料各向同性的假设基础上, 蠕变的损伤演化方程式可写为如下形式<sup>[21]</sup>:

$$\dot{D} = \dot{\epsilon}(-Y/Q)^K \quad (15)$$

式中  $K, Q$  为材料常数. 在内应力很小的情况下, 应力和应变率满足如下 Norton 公式<sup>[21]</sup>:

$$\dot{\sigma} = N\dot{\epsilon}_p^{1/n} = N\dot{\epsilon}^{1/n} \quad (16)$$

式中  $\epsilon_p$  为塑性应变,  $N$  和  $n$  为材料常数. 将式 (2), (11) 和 (16) 代入式 (15) 可得

$$\dot{D} = \left[ \frac{\sigma}{A(1-D)} \right]^m \quad (17)$$

其中  $m, A$  表达式如下:

$$m = 2K + n \quad (18)$$

$$A = [R_v/(2EQ)]^{K/r} N^{n/r} \quad (19)$$

由于实际的蠕变损伤不可能是线性累积的, 并且损伤的累积与温度和加载水平相关, 引进非线性效应<sup>[21]</sup>, 将式 (17) 改写为

$$\dot{D} = \left[ \frac{\sigma}{A(1-D)} \right]^m (1-D)^{m-k(\sigma, T)} \quad (20)$$

式 (20) 为蠕变损伤的演化方程, 函数  $k(\sigma, T)$  描述蠕变损伤的累积程度.

### 1.4 疲劳-蠕变交互作用的损伤模型

疲劳-蠕变交互作用的损伤演化方程如式 (8) 所示, 式 (8) 积分即得损伤 (式 (5)). 式 (8) 中的  $dD_f$  和  $dD_c$  可由式 (14), (20) 得到, 将式 (14) 和式 (20) 积分后代入式 (5) 即可得到疲劳-蠕变交互作用的损伤模型.

对式 (14) 积分, 积分上下限取为:  $D|_{N=0} = D_{f0}$ ,  $D|_{N=N_f} = D_{ff}$ .  $D_{f0}$  和  $D_{ff}$  分别代表疲劳条件下的初始损伤和失效损伤. 积分结果如下:

$$D_f = D_{ff} - (D_{ff} - D_{f0})[(1 - N/N_f)]^{\beta(\sigma, T)} \quad (21)$$

对式 (20) 积分, 积分上下限取为:  $D|_{t=0} = D_{c0}$ ,  $D|_{t=t_c} = D_{cc}$ .  $D_{c0}$  和  $D_{cc}$  分别代表蠕变条件下的初始损伤和失效损伤,  $t_c$  为蠕变失效时间. 积分结果如下:

$$D_c = D_{cc} - (D_{cc} - D_{c0})(1 - t/t_c)^{1/[k(\sigma, T)+1]} \quad (22)$$

对于带峰值应力保载循环的疲劳-蠕变交互作用, 循环周次  $N$  和蠕变时间  $t$  的关系如下:

$$t = T_{F-C}N \quad (23)$$

式中,  $T_{F-C}$  为一个循环内的保载时间. 将式 (23) 代入式 (22), 并用  $\alpha(\sigma, T)$  代替  $1/[k(\sigma, T) + 1]$ , 可得下式:

$$D_c = D_{cc} - (D_{cc} - D_{c0})[(1 - N/N_c)]^{\alpha(\sigma, T)} \quad (24)$$

式中  $N_c$  为失效寿命.

在带保载循环的疲劳-蠕变交互作用情况下, 疲劳寿命与蠕变寿命是一致的, 即  $N_f = N_c$ , 记为  $N_D$ . 将式 (21), (24) 代入式 (5), 可得如下疲劳-蠕变交互作用损伤表达式:

$$D = (D_{ff} + D_{cc}) - [(D_{ff} - D_{f0})(1 - N/N_D)^{\beta(\sigma, T)} + (D_{cc} - D_{c0})(1 - N/N_D)^{\alpha(\sigma, T)}] \quad (25)$$

其中  $D_{ff} + D_{cc} = 1$ , 表示失效破坏时损伤为 1;  $D_{f0} + D_{c0} = D_0$ , 表示初始损伤为  $D_0$ .

式 (25) 中的疲劳损伤和蠕变损伤是按单纯的疲劳和蠕变情况得到的, 未考虑疲劳-蠕变交互作用对各自损伤的影响; 其次, 在大多数情况下, 由于疲劳和蠕变的交互作用, 疲劳损伤和蠕变损伤的区分十分不易; 另外, 单纯的疲劳和蠕变的损伤演化都具有  $(1 - N/N_D)$  的幂函数的形式, 可认为疲劳-蠕变交互作用下的损伤演化也具有该形式, 函数的幂指数反映交互作用下的损伤累积程度. 综上所述, 用  $(1 - N/N_D)^{q(\sigma, T)}$  综合描述疲劳-蠕变交互作用下的损伤演化, 将式 (25) 改写如下:

$$D = 1 - (1 - D_0)(1 - N/N_D)^{q(\sigma, T)} \quad (26)$$

在带峰值应力保载循环的疲劳-蠕变交互作用下, 加载水平由最大应力  $\sigma_{max}$  和应力幅  $\sigma_a$  决定, 因此, 式 (26) 可写为如下形式:

$$D = 1 - (1 - D_0)(1 - N/N_D)^{q(\sigma_{max}, \sigma_a, T)} \quad (27)$$

## 2 损伤变量的选取

损伤变量是一种用于描述材料内部损伤状态变化发展及其对材料力学作用影响的内部状态变量<sup>[22]</sup>.

已有研究表明, 对于损伤变量的选取, 主要有两种比较好的方式. 一种是选取弹性模量或者间接反映弹性模量的割线模量的变化作为损伤变量<sup>[16, 20, 23]</sup>; 另一种是选取应变能密度的变化作为损伤变量<sup>[15]</sup>.

上述两种损伤变量在描述损伤时有其各自的优点, 但是在实际工程应用中却具有测量不便, 实时性不强等缺点. 从工程实际出发, 选取工程中容易测量的轴向变形即平均应变的变化作为损伤变量. 定义如下:

$$D = \epsilon_N / \epsilon_f \quad (28)$$

其中,  $\epsilon_N$  为循环过程中的平均应变,  $\epsilon_f$  为材料断裂时的平均应变.

### 3 实验结果及讨论

实验在岛津电液伺服疲劳试验机 EHF-EG250-40L 上进行, 实验温度为 540 °C, 采用 1.25Cr0.5Mo 珠光体耐热钢光滑试样, 控制方式为应力控制, 波形为梯形波, 加载频率为 0.05 Hz, 上、下保载时间为 5 s. 具体的实验条件见文献 [24]. 材料的化学成分 (质量分数, %) 为: C 0.16, Si 0.74, Mn 0.61, P 0.027, S 0.002, Cu 0.01, Ni 0.02, Mo 0.61, Cr 1.45. 在 540 °C 下的力学性能分别为:  $E=1.77 \times 10^5$  MPa,  $\sigma_{0.2}=385$  MPa,  $\sigma_b=482$  MPa,  $\psi=86.1\%$ .

图 1 是材料在 540 °C 疲劳-蠕变交互作用下的平均应变变化图. 由图可知, 平均应变的变化具有典型的损伤变量变化特征, 其随循环周次增加而增加, 在循环后期, 平均应变增加速率明显提高. 这说明随着循环的进行, 损伤逐渐累积, 材料产生形变, 形变达到一定程度后迅速加剧导致断裂. 因此采用平均应变的变化作为损伤变量是可行的.

实验中材料的损伤按式 (28) 进行计算, 损伤的演化曲线用式 (27) 进行拟合, 其结果见图 2, 实验数据和计算结果见表 1 (表中  $\Delta\sigma$  为名义应力范围,  $\sigma_m$  为平均应力).

图 2 是基于式 (27) 的不同应力条件下的疲劳-蠕变交互作用损伤曲线拟合图. 从图 2 可知, 在选择平均应变作为损伤变量时, 按式 (27) 得到的损伤曲线与按式 (28) 得到的实测损伤点的符合程度极好, 能够描述损伤演化的进程. 另外, 在特定的温度下, 式 (27) 中幂指数函数  $q$  可看成加载水平的函数, 图 3 给出了函数  $q$  随平均应力的变化趋势.

从图 3 可知,  $q$  随平均应力  $\sigma_m$  的增加呈现单调下降的趋势, 由于应力幅与平均应力满足如下关系式:

$$\sigma_m = \sigma_{\max} - \sigma_a \quad (29)$$

因此, 只需得到  $q$  随平均应力的变化规律, 再将式 (29) 代入, 即可得到  $q$  随应力幅和最大应力的变化关系式. 图

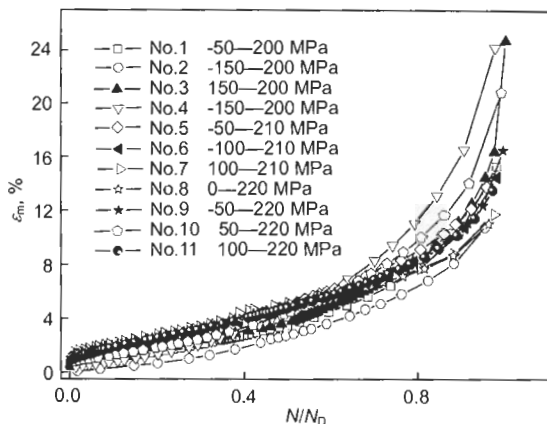


图 1 1.25Cr0.5Mo 钢的平均应变变化曲线

Fig.1 Change curves of mean strain of 1.25Cr0.5Mo steel at 540 °C, 0.5 Hz and holding time of 5 s

3 中曲线为函数  $q$  随平均应力变化的拟合曲线, 曲线关系式如下:

$$q = 0.1988\sigma_m^{-0.08794} \quad (30)$$

将式 (29) 代入, 得

$$q = 0.1988(\sigma_{\max} - \sigma_a)^{-0.08794} \quad (31)$$

将式 (31) 代入式 (27) 即可得到 1.25Cr0.5Mo 钢 540 °C 环境下疲劳-蠕变交互作用的损伤模型如下:

$$D = 1 - (1 - D_0)(1 - N/N_0)^{0.1988(\sigma_{\max} - \sigma_a)^{-0.08794}} \quad (32)$$

由上述分析知, 该损伤模型能较好的描述损伤的演

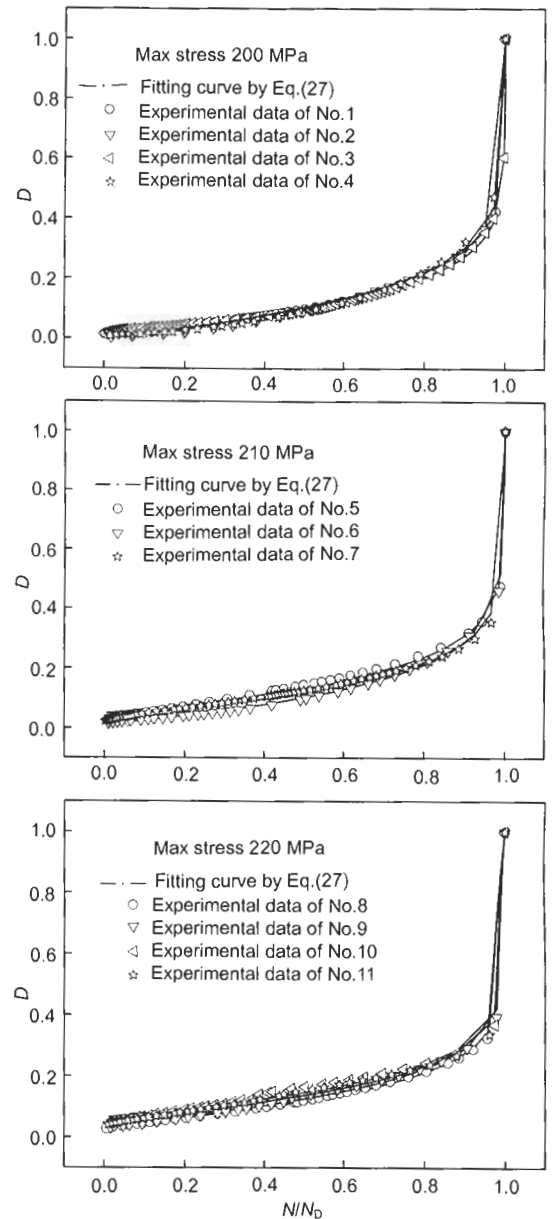


图 2 疲劳-蠕变交互作用损伤模型拟合

Fig.2 Fitting curves of the fatigue-creep interaction damage model (Eq.27) under different stress conditions

表 1 540 °C 疲劳 - 蠕变交互作用实验数据和计算结果  
Table 1 Test data and calculated results under fatigue-creep interaction at 540 °C

Specimen No.	$\Delta\sigma$ MPa	$\sigma_a$ MPa	$\sigma_m$ MPa	$D_0$	$q$	$N_D$ cycle
1	-50—200	125	75	0.08235	0.13656	2914
2	-150—200	175	25	0	0.14729	169
3	150—200	25	175	0.01475	0.13147	1952
4	-150—200	175	25	0	0.15551	198
5	-50—210	130	80	0.04872	0.13582	439
6	-100—210	155	55	0.01159	0.13886	274
7	100—210	55	155	0.0356	0.12938	1227
8	0—220	110	110	0.03615	0.12425	566
9	-50—220	135	85	0.03971	0.1317	191
10	50—220	85	135	0.06401	0.12848	268
11	100—220	60	160	0.05515	0.12774	308

Note:  $\Delta\sigma$ -nominal stress range,  $\sigma_m$ -mean stress

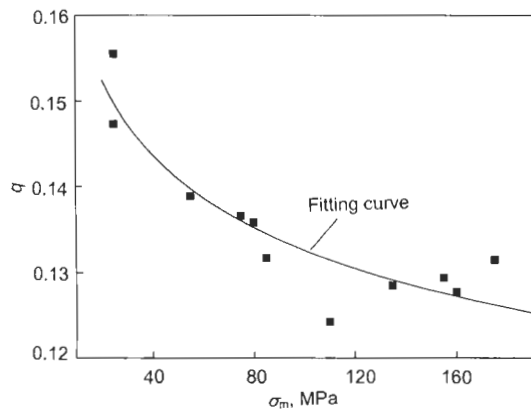


图 3  $q$  随平均应力的变化及其拟合曲线

Fig.3 Change of  $q$  in Eq.(26) with mean stress  $\sigma_m$  and its fitting curve

化, 具有实用价值.

#### 4 疲劳 - 蠕变交互作用失效评定的探讨

图 1 中的平均应变在循环后期出现加速段, 可用下式定义的平均应变速率计算每个采样点的平均应变速率:

$$v_{mi} = (\epsilon_{mi} - \epsilon_{mj}) / (\Delta N_{i,j}) \quad (33)$$

其中,  $v_{mi}$  为第  $i$  周次的平均应变速率,  $\epsilon_{mi}$  和  $\epsilon_{mj}$  分别为第  $i$  周次和第  $j$  周次的平均应变,  $\Delta N_{i,j}$  表示第  $i$  周次和第  $j$  周次之间的循环次数. 经分析得到每个试样平均应变加速点在断裂寿命中的百分比, 实验数据如表 2 所示.

从表 2 可见, 几乎每个试样的平均应变加速点都位于断裂寿命的 81% 左右, 这说明 1.25Cr0.5Mo 钢在 540 °C 疲劳 - 蠕变交互作用下的断裂失效具有可预测性.

另外, 本文第 3 节的实验结果表明, 在选取平均应变的变化作为损伤变量时, 按本文提出的疲劳 - 蠕变交互作

表 2 平均应变数据表  
Table 2 Data of mean strain

Specimen No.	$N_D$ cycle	Critical position, cycle	Critical life proportion, %
1	2914	2350	80.65
2	169	139	82.25
3	1952	1640	84.02
4	198	157	79.29
5	439	371	84.51
6	274	222	81.02
7	1227	1040	84.76
8	566	431	76.15
9	191	161	84.29
10	268	216	80.6
11	308	236	76.62

用的损伤模型式 (27) 能较好地描述损伤的进行. 因此, 只要按式 (27) 计算出 81% 寿命处的损伤值, 然后代入式 (28) 得到该点处的平均应变值, 此应变值即为试样进入加速损伤阶段的临界应变. 以此临界应变为基准, 可对工程实际中的构件做出安全评估, 在临界应变前的使用都是安全的, 当形变达到临界应变后, 应停止该构件的使用.

#### 5 结论

(1) 从连续损伤力学出发, 对疲劳和蠕变的损伤演化分别进行了研究, 提出了一个新的疲劳 - 蠕变交互作用的损伤模型

$$D = 1 - (1 - D_0)(1 - N/N_D)^{q(\sigma_{max}, \sigma_a, T)}$$

模型形式简单, 不需要单纯的疲劳和蠕变数据, 使用方便.

(2) 在进行疲劳 - 蠕变的交互作用的损伤描述时, 选取平均应变的变化作为损伤变量, 具有测量容易、时实性强等优点. 通过 1.25Cr0.5Mo 钢光滑试样在 540 °C 环境下应力控制的梯形波加载实验, 采用平均应变的变化作为损伤变量, 用上述模型进行了疲劳 - 蠕变交互作用的损伤描述, 结果表明实测损伤点与该模型的损伤演化曲线符合较好.

(3) 1.25Cr0.5Mo 钢在 540 °C 下的疲劳 - 蠕变交互作用存在临界加速点, 可通过上述模型计算出其临界加速点的临界应变值.

#### 参考文献

- [1] Plumbridge W J, Dean M, Sand Miller D A. *Fatigue Eng Mater Struct*, 1982; 5(1): 101
- [2] Kachanov L M. *Isv Akad Nauk SSA Otd Tekh*, 1958; 8: 26
- [3] Robotnov Y N. *Creep Problems in Structure Members*. Amsterdam: North-Holland, 1969

- [4] Lemaitre J, Chaboche J L. *Mechanics of Solid Materials*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990
- [5] Krajcinovic D, Lemaitre J. *Continuum Damage Mechanics: Theory and Application*. Berlin: Springer Verlag, 1987: 37
- [6] Bhattacharya B, Ellingwood B. *Int J Solids Struct*, 1999; 36: 1757
- [7] Yaguchi M, Nakamura T, Ishikawa A, Asada Y. *Nucl Eng Des*, 1996; 162(1): 97
- [8] Dai Z Y, Zhai J, Li Q. *J Southwest Jiaotong Univ*, 1998; 33(1): 30  
(戴振雨, 翟己, 黎强. 西南交通大学学报, 1998; 33(1): 30)
- [9] Xiong X R. *Jiangxi Sci*, 2005; 23(1): 9  
(熊先仁. 江西科学, 2005; 23(1): 9)
- [10] Jing J P, Meng G. *Proc CSEE*, 2003; 23(9): 167  
(荆建平, 孟光. 中国电机工程学报, 2003; 23(9): 167)
- [11] Lou Z W. *Principle of Damage Mechanics*. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1991: 104  
(楼志文. 损伤力学基础. 西安: 西安交通大学出版社, 1991: 104)
- [12] Lemaitre J. *Nucl Eng Des*, 1984; 80: 233
- [13] Lemaitre J. *J Eng Mater Technol—Trans ASME*, 1979; 101: 284
- [14] Lemaitre J, Chaboche J L. *Mechanics of Solid Material*. Cambridge: Cambridge University Press, 1990
- [15] Chen L, Jiang J L. *Acta Metall Sin*, 2005; 41: 157  
(陈凌, 蒋家羚. 金属学报, 2005; 41: 157)
- [16] Lemaitre J. *J Eng Mater Technol—Trans ASME*, 1985; 107: 83
- [17] Tai W H. *Eng Fract Mech*, 1990; 37: 853
- [18] Wang T J. *Eng Fract Mech*, 1992; 42: 177
- [19] Chandrakanth S, Pandey P C. *Eng Fract Mech*, 1995; 50: 457
- [20] Yang X H, Li N, Jin Z H, Wang T J. *Int J Fatigue*, 1997; 19: 687
- [21] Wu H Y. *Damage Mechanics*. Beijing: National Defence Industry Press, 1990: 29  
(吴鸿遥. 损伤力学. 北京: 国防工业出版社, 1990: 29)
- [22] Yang G S. *Damage Mechanics and Composite Material Damage*. Beijing: National Defence Industry Press, 1995: 18  
(杨光松. 损伤力学与复合材料损伤. 北京: 国防工业出版社, 1995: 18)
- [23] Fan Z C, Jiang J L, Chen X D. *J Zhejiang Univ (Eng Sci)*, 2006; 40: 317  
(范志超, 蒋家羚, 陈学东. 浙江大学学报(工学版), 2006; 40: 317)
- [24] Yang T C, Chen L, Fan Z C, Chen X D, Jiang J L. *Pressure Vessel Technol*, 2005; 154(9): 6  
(杨铁成, 陈凌, 范志超, 陈学东, 蒋家羚. 压力容器, 2005; 154(9): 6)