

金属蠕变律及蠕变行为研究

Study on Creep Law of Metal

金 尧, 孙亚芳, 孙训方 (西南交通大学力学系, 成都 610031)

邓 勇, 刘洪杰, 屠 勇 (东方锅炉厂材料研究所, 自贡 643011)

JIN Yao, SUN Ya-fang, SUN Xun-fang

(Department of Applied Mechanics and Engineering,

Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

DENG Yong, LIU Hong-jie, TU Yong

(Institute of Material, Dongfang Boiler Works, Zigong 643011, China)

摘要: 蠕变过程中, 材料内部状态的不断演化, 使得材料的蠕变行为发生改变。本文提出考虑损伤和硬化影响的蠕变律。利用该蠕变律讨论了 12Cr1MoV 钢蠕变行为。分析结果表明, $\dot{\epsilon}_c$ 在蠕变过程中始终变化, 第二阶段仅仅是 $\dot{\epsilon}_c$ 相对稳定的阶段, 其相对稳定程度和持续范围与载荷大小有关。在相同寿命分数下, 不同应力水平引起的硬化状态也不相同。

关键词: 蠕变; 蠕变律; 损伤; 硬化; 蠕变速率

中图分类号: TG113.25⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381 (2000) 11-0040-03

Abstract: With material internal state varying, creep behavior keeps on changing during creep. A creep law which takes account of damage and hardening influence is proposed. Creep behavior of 12Cr1MoV steel is discussed. Analysis shows that creep rate keeps changing during creep. The secondary stage of creep is merely relative steady stage, and degree of relative steady and duration life fraction depend on applied stress. Different stresses cause the same damage state but different hardening state in conditions of the same exposure time fraction.

Key words: creep; creep law; damage; hardening; creep rate

材料内部状态随蠕变过程的进行会不断变化。其中最重要的是微缺陷的萌生和发展, 以及内部微结构 (位错组态改变和第二相析出、沉淀等) 的变化。在连续介质力学中, 前者称为损伤, 后者称为硬化。

材料内部状态的变化将导致变形行为改变。按损伤理论, 材料变形行为与损伤演变直接相关, 因此研究材料的蠕变行为应充分考虑材料内部状态的影响。

本研究将硬化状态变量引入材料变形关系, 得到考虑损伤和硬化影响的蠕变律, 讨论了 12Cr1MoV 钢的蠕变行为。

1 受损伤和硬化影响的蠕变律

蠕变恒速理论忽略材料内部状态变化对蠕变速率的影响, 得到 Norton 律

$$\dot{\epsilon}_c = N\sigma^n \text{ 或 } \epsilon_c = N\sigma^n t \quad (1)$$

试验表明, 蠕变过程中蠕变速率 $\dot{\epsilon}_c$ 随蠕变时间 t 会发生变化, $\dot{\epsilon}_c$ 即受蠕变过程引起的损伤和硬化状态变化的影响。本研究引入硬化状态变量 h , 表征加载

历史引起材料微结构变化对 $\dot{\epsilon}_c$ 的影响。考虑到损伤对 $\dot{\epsilon}_c$ 有加速作用, 硬化 $\dot{\epsilon}_c$ 对有抑制作用, 将 $\dot{\epsilon}_c$ 表示为

$$\dot{\epsilon}_c = C\sigma^m h^{-1} (1-D)^{-k} = C\sigma^m h^{-1} h_D^{-k} \quad (2)$$

式中, m , C 和 k (> 0) 为常数, $h_D = (1-D)^k$ 为损伤对 $\dot{\epsilon}_c$ 的影响。将 h 表示为 σ 和 t 的幂函数

$$h = (C_1/\alpha)\sigma^\lambda t^{(1-\alpha)} \quad (3)$$

式中, C_1 和 λ (> 0) 为常数。 α 与载荷有关。得到

$$\dot{\epsilon}_c = A\alpha^n (1-D)^k t^{(1-\alpha)} \quad (4)$$

式中, $A = C/C_1$, $n = m - \lambda$ 。由 (4) 式, 在蠕变过程中, $\dot{\epsilon}_c$ 随 σ 和 D 增加而增加, 随 t 的增加而减小。当忽略损伤对 $\dot{\epsilon}_c$ 的影响, (4) 式成为

$$\dot{\epsilon}_c = A\alpha^n t^{(1-\alpha)} \text{ 或 } \epsilon_c = A\sigma^n t^\alpha \quad (5)$$

(5) 式为广泛用于描述蠕变第一、二阶段变形的 Bailey-Norton 律^[1~3]。当 $\alpha = 1$ 时, (5) 与 (1) 式相同。(4) 式考虑了损伤对 $\dot{\epsilon}_c$ 的加速作用, 还可描述蠕变第三阶段的加速现象。将 (4) 式代入蠕变损伤本构方程^[4]

$$\dot{D} = \left(\frac{\sigma}{\sigma_Q} \right)^q \dot{P} = \left(\frac{\sigma^2}{2EQ} \right)^q \dot{P} \quad (6)$$

得到蠕变损伤演变方程

$$\dot{D} = \left(\frac{\sigma}{2EQ}\right)^q C \sigma^{n_1} h^{-1} (1-D)^{-k} = S \alpha \frac{\sigma^{p_1}}{(1-D)^r} t^{-(1-\alpha)} \quad (7)$$

式中, Q 和 q 为常数, $n_1 = 2q + n$, $r = 2q + k$, $S = A / (2EQ)^q$. Y 为损伤应变能释放率, p 为塑性应变率, 一维蠕变条件下有 $p = \dot{\epsilon}_c$ 。对 (7) 式积分

$$(1-D)^{(r+1)} = 1 - (t/t_R)^\alpha = 1 - \beta^\alpha \quad (8)$$

(7) 和 (8) 式分别为考虑损伤和硬化影响的蠕变损伤演变方程和损伤表达式。(7) 式表明, 蠕变损伤演变不仅与当时的损伤值和应力水平有关, 而且依赖于当时的硬化程度。利用 (8) 式将 (4) 式改写为
$$d\epsilon = A \sigma^p t_R^\alpha [1 - (t/t_R)^\alpha]^{-k/(r+1)} d(t/t_R)^\alpha \quad (9)$$

积分后得蠕变变形律
$$\epsilon = \epsilon^* \{1 - [1 - (t/t_R)^\alpha]^\gamma\} \quad (10)$$
 式中, $\gamma = 1 - k/(r+1)$; $\epsilon^* = (A/Y) \sigma^p t_R^\alpha$

由 (10) 式得蠕变速率 $\dot{\epsilon}_c$ 、最小蠕变速率 $\dot{\epsilon}_{cmin}$ 的位置 $(t/t_R)_{min}$ 和最小蠕变速率 $\dot{\epsilon}_{cmin}$

$$\dot{\epsilon}_c = \epsilon^* \alpha \gamma t_R^{-1} [1 - (t/t_R)^\alpha]^{-(1-\gamma)} (t/t_R)^{-(1-\alpha)} \quad (11)$$

$$(t/t_R)_{min} = [(1-\alpha)/(1-\gamma\alpha)]^{1/\alpha} \quad (12)$$

$$\dot{\epsilon}_{cmin} = \epsilon^* \alpha \gamma t_R^{-1} \left(1 - \frac{1-\alpha}{1-\gamma\alpha}\right)^{-(1-\gamma)} \left(\frac{1-\alpha}{1-\gamma\alpha}\right)^{-(\frac{1-\alpha}{\alpha})} \quad (13)$$

2 蠕变行为分析

试验材料为 12Cr1MoV 钢母材和焊接接头 (简称焊材)。蠕变试验温度 550 , 试验应力为母材: 210, 225 和 235MPa, 焊材: 205, 210 和 225MPa。表 1 列出由试验数据回归出的 (10) 式中常数。图 1 试验结果表明, (10) 式较好反映金属的蠕变规律和特征。

表 1 12Cr1MoVG 钢蠕变数据

Table 1 Creep experiment results of 12Cr1MoV steel

	σ / MPa	$\epsilon^* \times 10^2$	α	γ	t_R / h	$(t/t_R)_{min}$	$\dot{\epsilon}_{cmin} \times 10^5 / \text{h}^{-1}$	
							本文计算	试验回归
母材	210	5.132	0.70	0.15	279.23	0.2098	4.3618	5.0278
	225	4.254	0.65	0.15	155.07	0.2329	6.7598	7.3750
	235	4.880	0.55	0.15	61.33	0.2738	20.8568	21.9500
焊材	205	2.555	0.60	0.25	126.75	0.2847	8.0525	8.6667
	210	2.584	0.58	0.25	86.97	0.2936	11.9661	12.7500
	225	2.775	0.48	0.25	20.8	0.3342	57.3238	67.5556

ϵ^* 为断裂时的名义总蠕变应变量, 其值反映了材料的蠕变变形能力。表 1 中母材的 ϵ^* 明显大于焊材。试验中, 焊材试样在焊缝处的蠕变变形极小, 试样的蠕变变形主要集中在焊缝两侧区域。因此焊材试样的

实际变形段小于母材试样, 使得总蠕变量明显低于母材。所有焊材试样的最终断裂总是发生在焊缝两侧的热影响区, 蠕变持久寿命远远低于母材, 这表明焊接过程的局部高温使热影响区的组织发生了不利的改变, 导致热影响区的抗蠕变能力大幅降低。因此要提高焊材的抗蠕变性能, 关键在于设法通过有效的热处理来改变热影响区的组织结构。

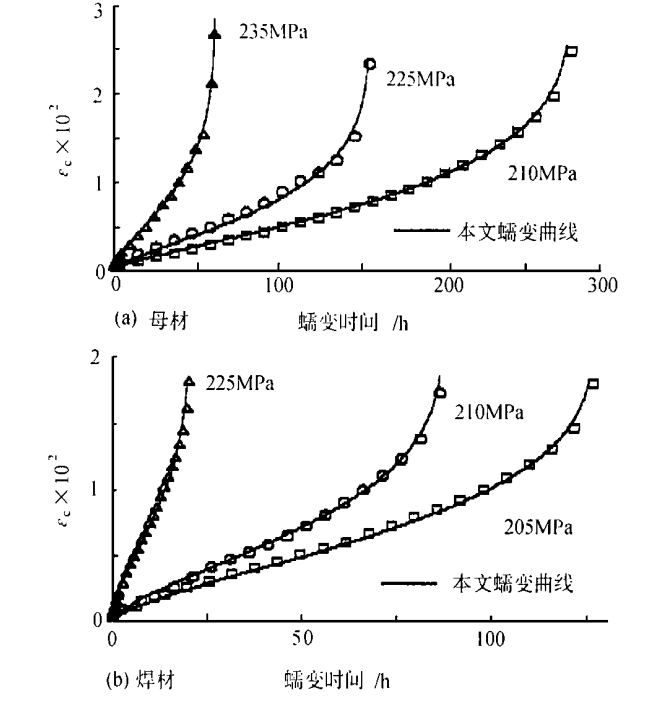


图 1 12Cr1MoV 钢蠕变曲线 (500)
Fig. 1 Creep curves of 12Cr1MoV steel at 500

图 2 给出的按 (11) 式计算的母材 $\dot{\epsilon}_c$ 随寿命分数 t/t_R 的变化曲线呈浴盆型, 曲线底部对应蠕变第二阶段。在蠕变第二阶段 $\dot{\epsilon}_c$ 并非恒定, 应力越高蠕变第二阶段 $\dot{\epsilon}_c$ 段的变化越明显, 持续的寿命分数越短; 而应力越低蠕变第二阶段 $\dot{\epsilon}_c$ 的变化越小, 持续的寿命分数越长。 $\dot{\epsilon}_c$ 变化的原因在于, 材料内部状态在蠕变过程中始终处于变化, 这种变化必然要反映到蠕变速率上, 只是在蠕变第二阶段这种变化相对较小, 或者软硬化的作用相互抵消, 使 $\dot{\epsilon}_c$ 近似保持恒定。蠕变第二阶段仅仅是 $\dot{\epsilon}_c$ 的相对稳定阶段, 其相对稳定程度和持续范围与载荷大小有关。在高应力下蠕变第二阶段几乎消失, 而低应力下常常不出现蠕变第三阶段^[3]。蠕变第二阶段的平均速率大于真实的最小蠕变速率。

表 1 给出了按 (13) 式计算的最小蠕变速率 $\dot{\epsilon}_{cmin}$ 和由蠕变第二阶段试验数据回归结果。

将 (2) 式中损伤影响项 h_D 表示为
$$h_D = (1-D)^k = [1 - (t/t_R)^\alpha]^{(1-\gamma)} \quad (14)$$

图3为 $h_D \sim t/t_R$ 曲线。材料受损后 $h_D < 1$, 说明损伤对材料变形行为的影响为软化效果。这是由于损伤使有效应力增大, 引起 $\dot{\epsilon}_c$ 增加。 h_D 与寿命分数几乎呈线性, 应力提高, 非线性程度增加。

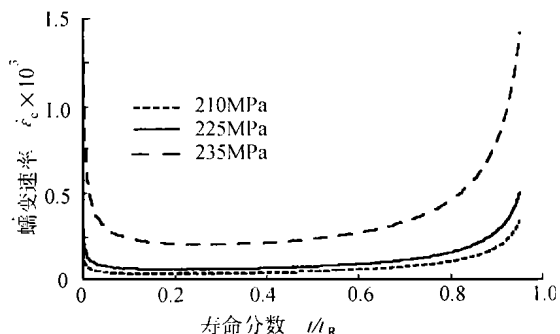


图2 蠕变速率(母材), 500

Fig. 2 Creep rate of base metal at 500

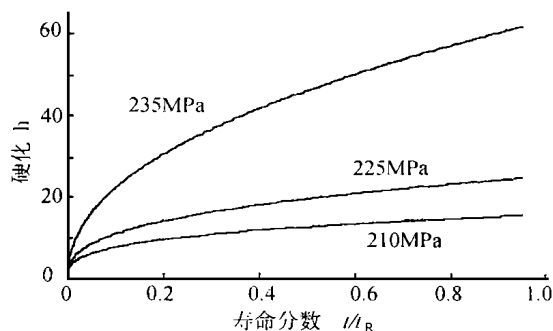


图3 损伤影响曲线

Fig. 3 Damage influence curves

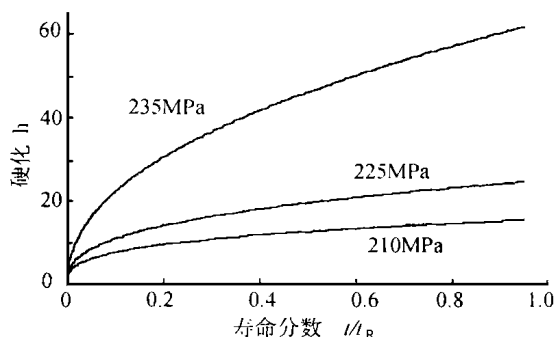


图4 硬化曲线

Fig. 4 Hardening curves

按(3)和(11)式, 蠕变初始($t=0$): $h=0$, $\dot{\epsilon}_c$ 。试验中蠕变载荷通常是缓慢、平稳的施加, 加载过程中蠕变已经发生, 因此蠕变发生的实际初始时刻是一个不易确定的量。为了避开 $t=0$ 时 $h=0$ 的矛盾, 采用下面的方法确定相对硬化状态:

取一个很小的寿命分数 β_0 , 令此刻的蠕变速率为

初始蠕变速率 $\dot{\epsilon}_c^0$, 硬化状态为初始硬化状态 h^* , 由(2)式($D=0$)得: $C\sigma^m = \dot{\epsilon}_c^0 h^*$ 。代入(2)式得相对硬化

$$h/h^* = (\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_c^0) h^{D-1} \quad (15)$$

图4为母材的 $h \sim t/t_R$ 曲线(取 $\beta_0 = 10^{-3}$, $h^* = 1$)。 $h > 1$, 材料变形行为的影响为硬化效果。 h 随 t/t_R 持续增长, 蠕变初期增长较快。相同寿命分数下, 高应力引起的硬化远大于低应力引起的硬化。

3 结论

(1) 材料蠕变时除了引起损伤外, 硬化状态也会因内部微结构的变化而改变。对受损材料内部状态仅用单一损伤变量来描述并不充分, 还应考虑材料的硬化状态。

(2) 对12Cr1MoV钢蠕变行为的分析表明, 本文提出的考虑加载历史影响的蠕变律可以反映蠕变三个阶段的变形规律。分析 $\dot{\epsilon}_c$ 认为在蠕变过程中始终处于变化, 第二阶段仅仅是 $\dot{\epsilon}_c$ 相对稳定的阶段, 其相对稳定程度和持续范围与载荷大小有关。

(3) 焊材的蠕变性能明显低于母材。原因是焊接过程的局部高温使热影响区组织发生了不利的改变, 导致抗蠕变能力大幅降低。因此要提高焊缝抗蠕变性能, 应设法通过有效的热处理来改变热影响区的组织结构。

(4) 讨论了载荷与相对硬化程度的关系, 在相同损伤程度时, 应力越大, 硬化越强烈。

参考文献

- [1] Kraus H. Creep analysis [M]. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1980, 18-27.
- [2] May I L. Principles of mechanical metallurgy. New York: Edward Arnold, 1981, 354-358.
- [3] 穆霞英. 蠕变力学 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1990, 11-22.
- [4] Lemaitre J. Formulation and identification of damage kinetic constitutive equations. In: eds. Krajcinovic D, Lemaitre J, Continuum Damage Mechanics Theory and Applications, Springer Verlag, New York, 1987, 37-89.
- [5] Blum W, Reppich B. Creep of particle-strengthened alloys. In: Creep Behaviour of Crystalline Solids, Swansea, 1985, 83-135.

收稿日期: 2000-08-10

作者简介: 金尧(1954-), 男, 工学博士, 西南交通大学力学系副教授, 从事固体材料的破坏理论研究。通讯地址: 四川成都西南交通大学力学系(610031)。

本文编辑: 解宏