

# 用电阻量测方法研究蠕变状态下的金属损伤<sup>1)</sup>

Lokochtchenko A. M.<sup>2)</sup>

(苏联莫斯科大学力学研究所)

**摘要** 本文建议一种量测蠕变下金属损伤的方法。与其它方法相比,这个方法可用于进行在蠕变试验过程中的损伤测量,而无需使试件卸载或冷却。用此方法对试验数据进行加工就可得到在蠕变过程中的试验损伤曲线。对这些曲线的分析导致结论:材料破坏时的损伤是所加应力的递减函数。这一结论是以前所得理论结果的试验验证。

**关键词** 蠕变,蠕变破坏,结构损伤,电阻,金属,铜,动力方程

## 一、引言

估计高温下结构物强度的基本问题之一,是确定其破坏时间。为了用唯象方法研究金属的蠕变直至破坏,通常考虑两种机制:韧性与脆性。韧性破坏出现在蠕变过程中,其特征是材料结构在大变形下保持不变。脆性破坏的假定用于分析所试验的材料具有结构变化时的蠕变破坏。本文建议描述金属蠕变时结构变化的物理参量及其量测方法。

## 二、材料损伤及其测量方法

L. M. Kachanov<sup>[1]</sup> 与 Yu. N. Rabotnov<sup>[2]</sup> 是最先建议采用结构损伤的假定以对第三阶段(此阶段以破坏而结束)蠕变进行解析的描述的学者。他们采用一新的函数  $\omega(t)$ , 它是描述在蠕变过程中积累的结构损伤的结构参数。按[1—2],  $\omega(0) = 0$  对应于蠕变过程的开始,而条件  $\omega^* = \omega(t^*) = 1$  对应于破坏时间  $t^*$ 。Yu. N. Rabotnov<sup>[3]</sup> 建议应用力学状态方程来描述结构物金属的蠕变与蠕变破坏,而在这一方程中采用的结构参数不是一个而是  $n$  个。为了确定这些参数,对状态方程还补充以一组动力方程 (*kinetic equations*)。在过去30年中这一方法被用于描述蠕变过程中的各种特性(参见综述<sup>[4-5]</sup>)。在许多学者的文中建议了各种具有结构参数的蠕变本构方程,例如: Yu. N. Rabotnov, L. M. Kachanov, N. N. Malinin, S. A. Shesterikov, O. V. Sosnin, J. Hult, F. A. Leckie, D. R. Hayhurst, S. Murakami, J. Lemaitre<sup>[6]</sup>, Shen Huairong<sup>[7]</sup> 等。

在大多数的理论研究中,损伤参数  $\omega$  具有唯象的性质,不考虑这一参数与材料结构真实变化之间的联系。最近发表了一些试验研究,把这一结构参数同材料结构的真实损伤联系起来,而对材料结构的研究通常用金相的或物理的方法进行。

1) 黄克智编委推荐并译成中文。

2) 华南理工大学访问学者(1988—1989)。

本文于1989年10月31日收到。

大多数学者认为蠕变过程伴随着空穴的出现与微裂纹的形成。在[8]中把单个空穴的尺度当作  $\omega$ , 而这一尺度到达临界尺寸的时间为  $t^*$ 。在[9]中把裂纹尺寸当作  $\omega$ , 而裂纹尺寸到达一个颗粒尺度的时间为  $t^*$ 。在[10]中把空穴半径与空穴间半距离的比值当作损伤度量  $\omega$ , 而从蠕变过程开始到空穴会合( $\omega^* = 1$ )的时间为  $t^*$ 。在[11]中采用两个参数来分析材料结构: 空穴致密度与空穴平均体积。在[12]中把晶间裂纹总长与晶间边界总长的比值当作  $\omega$ , 在一系列的论文([13—14]等)假定位错致密度为结构参数。

某些学者把材料密度的相对变化当作结构损伤([15—18]及其他), 确定松散度的动力方程是由质量守恒条件得到<sup>[18]</sup>。文[19]的作者认为材料的破坏是由微空穴与微裂纹积累到一临界数目而造成的, 这一临界值可由密度与微硬度测量来确定。在[20]中给出了详细的综述, 介绍了密度相对变化依赖于应力、温度与时间关系的研究结果。

### 三、在蠕变试验过程中量测金属损伤的方法

以上所述研究损伤的试验方法, 不能用于在蠕变试验过程中进行结构损伤量测。用这些方法量测  $\omega$  值, 必须中止试验; 此外, 如用金相的方法还必须切割试件。

本文建议在蠕变下量测金属结构损伤的方法, 这一方法可用于在高温试验过程中进行量测而无需使试件卸载或冷却。为了求得函数  $\omega(t)$ , 必须在同一瞬间  $t$  量测柱形拉伸试件的电阻  $R(t)$  与长度  $l(t)$ 。柱形拉伸试件电阻增加有两个原因。第一个原因是试件长度增加且横截面相应地减小。第二个原因是以出现空穴与微裂纹为标志的材料结构损伤以及损伤积累与会合, 直至形成主裂纹。我们假定这两个因素相互独立地起作用。受载试件的电阻  $R(t)$  可表示成五个部分之和:

$$R(t) = R_0 + \Delta R_1 + \Delta R_2 + \Delta R_3(t) + \Delta R_4(t) \quad (1)$$

$R_0$  为在试验温度  $T$  下未加载试件的电阻,  $\Delta R_1$  与  $\Delta R_2$  各为在瞬时加载下由于试件变形及结构缺陷引起的电阻增加,  $\Delta R_3(t)$  与  $\Delta R_4(t)$  各为在蠕变下由于相同原因引起的电阻增加。

我们先来考虑在试件中无微缺陷的情况。在此情况下, 我们假定以下的条件: 在均匀变形下(一直到出现颈缩为止)试件体积保持不变, 在试验过程中材料比电阻  $\rho$  保持常数, 试件电阻  $R$  正比于试件长度, 反比于试件横截面积。在此情况下由(1)得到

$$R(t) = R_0 + \Delta R_1 + \Delta R_3(t) = \frac{\rho l(t)}{F(t)} = \frac{\rho l_0}{F_0} \left( \frac{l}{l_0} \right)^2 = R_0 \left( 1 + \frac{\Delta l_0}{l_0} + \frac{\Delta l_t}{l_0} \right)^2 \quad (2)$$

$$l_0 = l_{00}(1 + \alpha T) \quad (3)$$

式中  $l_{00}$  与  $l_0$  各为未加载试件在室温与在试验温度  $T$  下的长度,  $F_0$  与  $F(t)$  各为未加载试件在温度  $T$  下在初始时间 ( $t = 0$ ) 与在任意时间  $t$  的横截面积,  $\alpha$  为线膨胀系数,  $\Delta l_0$  为试件由于瞬时加载的伸长,  $\Delta l_t$  为在蠕变过程中积累的伸长。由(2)得到

$$\Delta R_3 = \frac{2R_0}{l_0} \Delta l_t \left( 1 + \frac{\Delta l_t}{2l_0} \right) \quad (4)$$

由(1), 当  $t = +0$  时

$$R_0 + \Delta R_1 + \Delta R_2 = \tilde{R}_0 \quad (5)$$

式中  $\tilde{R}_0$  为试件在加载后的瞬间的电阻值,  $\tilde{R}_0$  值可以在试验中测出。将(4)与(5)代入

(1), 可得到  $\Delta R_4(t)$  的方程:

$$\Delta R_4(t) = R(t) - \tilde{R}_0 - \Delta R_3(t) \quad (6)$$

$\Delta R_4(t)$  确定由于蠕变过程中试件结构损伤所引起的电阻增加。我们称比值

$$\omega(t) = \frac{\Delta R_4(t)}{R_0} \quad (7)$$

为结构损伤度量, 而

$$Q(t) = \frac{\Delta R_4(t)}{\Delta R_3(t) + \Delta R_4(t)} \quad (8)$$

为由于结构损伤引起的电阻增加相对于电阻总增加的比值。

#### 四、用所建议的方法分析试验结果

柱形铜试件试验结果<sup>[21]</sup>是援用本文所建议方法的应用例子。文[21]中的试验是在温度 400℃ 与拉力恒定条件下进行的, 初始应力  $\sigma_0$  等于 40, 50, 60 与 70 MPa (这些试件在 400℃ 下的材料纵向强度为 120 MPa)。在分析[21]中的试验数据时采用了两种应变度量: 利用在蠕变过程中试件伸长数据得到通常的应变度量

$$\varepsilon(t) = \ln \frac{l(t)}{l_0} \quad (9)$$

以及利用这些试件的电阻量测结果的应变度量

$$\varepsilon_R(t) = 0.5 \ln \frac{R(t)}{R_0} \quad (10)$$

在得到(10)时, 假定了在试件中无微缺陷。如上所述, (9)与(10)式中的  $l_0$  与  $R_0$  各为在试验温度(400℃)下试件在加载前的长度与电阻。文[21]中所示的蠕变曲线  $p(t)$  与  $p_R(t)$  就是各由(9)与(10)式得到的。结果表明, 在最初, 由两个不同方法所得到的蠕变曲线基本上重合。从某一时间开始, 由电阻方法量测得的蠕变应变  $p_R(t)$  增加比由几何伸长所得的应变  $p(t)$  更快。对试验数据的分析表明在高应力(在所研究的范围内)蠕变主要由穿晶的剪切变形实现, 因而  $p_R(t)$  与  $p(t)$  的差别比较小。在低应力下, 这两条曲线的差

表 1 用所建议方法分析试验数据<sup>[21]</sup>的结果

| $\sigma_0$ | $t^*$ | $R_0$ | $\tilde{R}_0$ | $R^*$ | $\Delta l_t^*$ | $\Delta R_3^*$ | $\Delta R_4^*$ | $\omega^*$ | $Q^*$ | $\omega_0^*$ | $Q_0^*$ |
|------------|-------|-------|---------------|-------|----------------|----------------|----------------|------------|-------|--------------|---------|
| 40         | 68.0  | 96.8  | 101.0         | 127.0 | 3.96           | 15.8           | 10.2           | 0.105      | 0.39  | 0.093        | 0.34    |
|            | 66.5  | 99.4  | 102.5         | 131.2 | 4.97           | 20.6           | 8.1            | 0.081      | 0.28  |              |         |
| 50         | 40.0  | 123.4 | 126.5         | 162.6 | 5.41           | 27.0           | 8.2            | 0.066      | 0.23  | 0.079        | 0.24    |
|            | 37.0  | 121.9 | 125.0         | 167.7 | 6.14           | 31.5           | 11.2           | 0.092      | 0.26  |              |         |
| 60         | 24.0  | 148.5 | 154.5         | 209.5 | 7.30           | 46.2           | 8.8            | 0.059      | 0.16  | 0.068        | 0.17    |
|            | 27.8  | 148.5 | 158.4         | 220.0 | 7.90           | 50.3           | 11.3           | 0.076      | 0.18  |              |         |
| 70         | 11.8  | 170.0 | 182.4         | 272.4 | 10.80          | 80.7           | 9.3            | 0.055      | 0.10  | 0.057        | 0.11    |
|            | 11.5  | 171.5 | 187.6         | 275.0 | 10.30          | 77.3           | 10.1           | 0.059      | 0.12  |              |         |

别加大,低应力下蠕变过程的特点是沿晶界空穴与裂纹早期形成,脆化以及随后的晶间破坏。

对每一试件得到了试验曲线  $I(t)$  与  $R(t)$ , 然后利用它们来计算在不同应力下损伤参数  $\omega(t)$  依赖于时间  $t$  的关系。对于全部 8 个试件, 用所建议方法分析对应于破坏时间  $t^*$  的试验数据的结果, 在表 1 中给出。表 1 中的单位,  $\sigma_0$  为 MPa,  $t^*$  为小时,  $\Delta l^*$

为 mm, 所有的电阻值的单位为微欧姆。对应于破坏时间的一切参数值用星号表示。以  $\omega_0^*$  与  $\Omega_0^*$  表示对在相同应力  $\sigma_0$  下不同试件的  $\omega^*$  与  $\Omega^*$  的平均值。表 1 表明极限值  $\omega_0^*$  与  $\Omega_0^*$  随应力  $\sigma_0$  的明显递减关系。图 1 表示在应力  $\sigma_0 = 60$  MPa 下的蠕变曲线  $p(\bar{t})$  与损伤曲线  $\omega(\bar{t})$ 。  $\bar{t}$  为无量纲时间, 它等于真实时间  $t$  与在所考虑的应力作用下破坏时间  $t^*$  的比值。图 1 表明, 在定性上讲, 曲线  $\omega(\bar{t})$  与曲线  $p(\bar{t})$  相似, 但曲线  $\omega(\bar{t})$  比  $p(\bar{t})$  更清楚地显示从第二阶段蠕变到第三阶段蠕变的过渡。

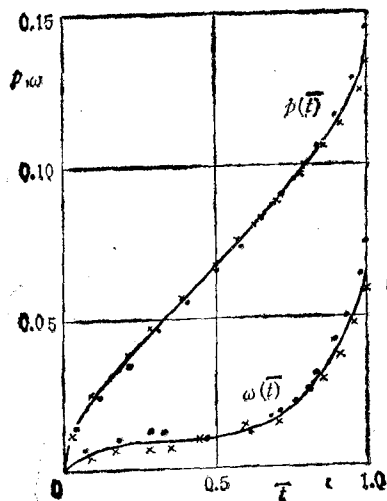


图 1 对于  $\sigma_0 = 60$  MPa 的蠕变曲线  $p(\bar{t})$  与损伤曲线  $\omega(\bar{t})$

在[12]中给出对这些试件结构的金相研究结果; 这一研究是在沿轴向长度的中央横截面上切割出的微截面上进行的。在该文<sup>[12]</sup>中利用试件结构的金相分析结果考虑了损伤的定量度量。利用不同的原理(在[12]中的金相分析与本文利用电阻数据)得到量测损伤的两种方法, 给出递减型函数  $\omega_0^*(\sigma_0)$  相同的结果。

为了解析地描述这一结果我们可以应用 H. Broberg<sup>[22]</sup> 的动力方程, 该方程考虑材料在瞬时加载时的损伤。在[23]中证明这些方程导致蠕变破坏条件

$$\left. \frac{d\omega}{dt} \right|_{t=t^*} \rightarrow +\infty$$

而  $\omega^* = \omega(t^*)$  为极限值。在[12,24]中证明 H. Broberg 方程导致极限损伤值随  $\sigma_0$  的增加而递减。用所建议的方法分析试验数据<sup>[21]</sup>也得到相同的结果。

## 参 考 文 献

- [1] Kachanov L M. O vremeni razrusheniya v usloviyah polzuchesti, Izv. AN SSSR, Otdel. tehn. nauk, 1958, 8: 26—31, (in Russian)
- [2] Rabotnov Yu N. O mekhanizme dliteinogo razrusheniya, v sbornike, voprosi prochnosti materialov i konstrukcii, Izdat. AN SSSR, M. 1959: 5—7 (in Russian)
- [3] Rabotnov Yu N Polzuchest elementov konstrukcii. M., Nauka, 752str, 1966 (in Russian, translated into English)
- [4] Shesterikov S A, Lokochtchenko A M. Polzuchest i dlitel'naya prochnost metallov, Itogi nauki i tekhniki. Ser. Mehan. deform. tverd. tela, Vses. inst. nauchn. i tehn. inform. M., 1980, 13: 3—104 (in Russian)
- [5] Polzuchest i dlitel'naya prochnost elementov konstrukcii Bibliogr. ukazatel (red. -Nikitenko A. F.), Sib. Otdel. AN SSSR, Novosibirsk, 342 str. 1987 (in Russian)
- [6] Lemaitre J., Damage modelling for prediction of plastic or creep fatigue failure in structures. Acta me-

- chanica solida sinica*, 1981, 4: 512—525 (in Chinese)
- [7] Shen Huairong, On nonlinear constitutive equation for visco-elastic damage media and dewetting damage model for highly filled polymers. *Acta mechanica solida sinica* 1987, 1: 41—47 (in Chinese)
  - [8] Horiguchi M., Kawasaki T., Creep rupture of stainless steels at high temperatures *J. Jap. Soc. Strength and Fract. Mat.*, 1977, 12(1) 34—43 (in Japan)
  - [9] Dyson B F, Taplin D M R., Creep damage accumulation, grain bound. *Inst. Met. Spring Resident. Conf.*, Ser. 3, 1976, London: s. a., E/23-E/28
  - [10] Riedel H. The extension of a macroscopic crack at elevated temperature by the growth and coalescence of microvoids Creep in structures Proc., III IUTAM Symp. Leicester., IX 1980, 8—12; Berlin e. a. 1981: 504—515
  - [11] Leckie F. A., Hayhurst D R Constitutive equations for creep rupture *Acta Met.*, 1977, 25: 1059—1070
  - [12] Lokochtchenko A M. Investigation of material damage under creep and creep strength., *Prikl. mekhan. i tekhn. fiz.*, 1982, 6: 129—133 (in Russian, translated into English)
  - [13] Nigmatulin R I, Holin N N. Dislokacionnaya kinetika syerkhplasticnosti i polzuchesti metallov. *Dokl. AN SSSR*, 1976, 231, (2): 303—306 (in Russian)
  - [14] Estrin Y, Mecking H. A unified phenomenological description of work hardening and creep based on one-parameter models, *Acta Met.*, 1984, 32, (1): 57—70
  - [15] Rozenberg V M, Shalimova A V Zvereva T S. Vliyanie temperaturi i napryazhenii na obrazovanie por pri polzuchesti. *Fiz. met. i metalloved.*, 1968, 25, (2): 326—332 (in Russian)
  - [16] Cane B. F. Deformation, induced intergranular creep cavitation in alphasiron, *Metal. Sci.*, 1978, 12, (2): 102—108
  - [17] Betehtin V I, Kadamcev A G, Petrov A I. Osobennosti mikrorazrusheniya metallov pri vysokotemperaturnoi polzuchesti, *Metallaved. i termich. obrab. met.*, 1980, (12): 24—26 (in Russian)
  - [18] Arutyunyan R A. O vzaimosvyazi reologii i razrusheniya polimernikh materialov. *Mekh. kompoz. mater.*, 1983, (4): 583—586 (in Russian)
  - [19] Kumanin V I, Trunin I I, Bogomolnaya R B. Izychenie processa nakopleniya povrezhdaemosti v usloviyakh vysokotemperaturnoi polzuchesti. *Nauchn. trudi Vses. zaachn. mashinostr. inst.*, 1973, 1: 55—65 (in Russian)
  - [20] Belloni G., Bernasconi G. Creep damage models, *Creep Eng. Mater. and Structure. Proc. Semin. Ispra (Varese)*, 1978 London, 1979: 195—227.
  - [21] Shesterikov S A, Lokochtchenko A M, Myakotin E A. Use of the method of measuring electrical resistance in studying the strength and creep of metals. *Probl. prochn.*, AN Ukr SSR, 1984, (10): 32—35 (in Russian, translated into English)
  - [22] Broberg H. A new criterion for brittle rupture. *J. Appl. Mech.*, 1974, 41(3): 809—811
  - [23] Boström P O, Broberg H, Bräthe L, Chrzanowski M. On failure conditions in viscoelastic media and structures. *Int. Symp. on mechanics of viscoelastic media and bodies*, Gothenburg, Sept. 1974, 2—6 Springer-Verlag, Berlin 1975, 302—311
  - [24] Dacheva M D Lokochtchenko A M, Shesterikov S A. Model representation of the ultimate strain during creep, *Prikl. mekhan. i tekhn. fiz.*, Sib. Otdel. AN SSSR, 1984, (4): 139—142 (in Russian, translated into English)

## THE INVESTIGATION OF THE METAL DAMAGE AT THE CREEP BY THE METHOD OF ELECTRICAL RESISTANCE MEASURING

Lokochtchenko A. M.

*(Institute of Mechanics, Moscow University, USSR)*

**Abstract** In this paper the method of damage measurement of metal structure at the creep is proposed. In contrast to other methods, it allows to carry out the measurement of this damage in the process of creep test without unloading and cooling of specimens. Experimental damage curves during creep are obtained as a result of test data processing by the suggested method. The analysis of these curves leads to a conclusion that the material damage at rupture is monotonically decreasing function of applied stress. This conclusion is experimental verification of the theoretical results obtained earlier.

**Key words** creep, creep rupture, structure damage, electrical resistance, metals, copper, kinetic equation