

## 金属蠕变与蠕变破坏理论综述<sup>1)</sup>

Shesterikov, S. A. Lokochtchenko, A. M.

(苏联, 莫斯科大学, 力学研究所)

**提要** 本文对金属在均匀单向与复杂应力状态下的蠕变与蠕变破坏行为及结构物蠕变下持久性发展了系统的试验与理论研究。

在试验研究中本文考虑了各种金属在恒应力与变应力下的行为, 应力集中, 加载方式对蠕变破坏的影响; 同时还提出了材料的结构损伤的新的量测方法。

**关键词** 金属, 蠕变, 蠕变破坏

Rabotnov Yu. N.<sup>[1]</sup> 的概念最适于解析地描述试验结果。这一概念包含一个力学状态方程和一组用于计算结构参数  $q_i$  的动力方程, 这些参数描写材料的状态。对于单轴拉伸, 这一概念通常表示成以下的形式:

$$\left. \begin{aligned} \dot{p} &= \dot{p}(\sigma, T, q_1, q_2, \dots, q_N) \\ dq_i &= a_i dp + b_i d\sigma + c_i dt + f_i dT \\ i &= 1, 2, \dots, N \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中  $p$  为蠕变变形,  $\dot{p}$  为蠕变率,  $\sigma$  为应力,  $T$  为温度,  $t$  为时间,  $a_i, b_i, c_i, f_i$  通常依赖于  $p, \sigma, T, t$  以及结构参数  $q_1, q_2, \dots, q_N$ 。应用方程(1)及其对复杂应力状态的各种推广形式可以更好地对各种试验结果作定性的与定量的描述。形式如(1)的方程可用于描述金属, 也可以描述其他材料(混凝土, 聚合物及其他)的行为; 粘性行为, 例如粘弹性, 粘塑性及其他特性, 也可以用方程(1)来研究。

这一方程组常被用来解析地描述在恒温蠕变下观察到的各种试验现象。在此情况下通常采用一个描述材料损伤的结构参数  $\omega(t)$ , 而方程(1)简化成以下的简单形式:

$$\dot{p} = f(\sigma, \omega), \quad \dot{\omega} = \varphi(\sigma, \omega) \quad (2)$$

结构参数  $\omega$  在国际力学文献中已广为人知, 即 Rabotnov, Yu. N.-Kachanov, L. M. 参数<sup>[1,2]</sup>。利用方程(2)来描述各种效应所遇到的基本问题是函数  $f(\sigma, \omega)$  与  $\varphi(\sigma, \omega)$  形式的具体化以及确定它们的规律性。

作者在他们们的研究中确定了一系列的参数(用于方程(1)), 上述函数的形式以及推广于复杂应力状态的方法。

为了分析典型的结构物元件的持久性, 作者应用了各种考虑材料粘性的方程。他们研究了杆(纯弯, 具有初始偏心杆的屈曲), 板(横向压力作用下的蠕变, 盘中应力的松弛), 厚壁管及薄壁壳(外压及纯弯)的行为。壳的持久性理论分析还补充以试验研究, 结果表示

本文于1989年10月31日收到英文稿, 于1990年8月31日收到译文。

1) 黄克智编委推荐并译成中文。

在理论与试验数据间存在很好的关联性。

### 1. 在多轴应力状态下的蠕变与蠕变破坏的研究

作者利用动力 (Kinetic) 与准则方法对蠕变破坏进行了试验与理论的综合研究, 也研究了在非单轴应力状态下的振动蠕变的研究。

作者用试验显示了瞬时加载方式对恒应力分量作用下破坏时间有重要的影响<sup>[3]</sup>。所建议的用于描述该效应的动力方程, 损伤参数以准矢量形式出现<sup>[3,4]</sup>。

在利用准则方法对蠕变破坏的研究中, 作者首先建议在复杂应力状态下选择蠕变破坏准则的定量的方法<sup>[5-8]</sup>。这一方法对试验结果进行统计学的处理。然后将这一方法用于分析在蠕变破坏试验中薄壁管材料的各向异性<sup>[9,10]</sup>。

对一个钢种 Cr18 Ni10Ti 的大量管子试件(69 个试件)在温度 850℃ 及各种复杂应力状态下进行了试验研究。统计学的分析得到理论与试验符合很好的结果<sup>[5]</sup>。

在温度 20 与 200℃ 间进行了铝合金振动蠕变的试验研究。作者证明振动蠕变效应(在静应力上叠加一小的循环分量引起蠕变率显著增加)只在以下情况下可以检测到: 静应力与循环应力构成一变化的多轴应力状态(轴向静拉伸载荷加上扭转振动, 或静扭转加上轴向振动)<sup>[11-14]</sup>。

### 2. 在单轴拉伸下蠕变过程与蠕变破坏各种特性的研究

建议了方程(2)的具体形式, 它允许蠕变曲线的定常阶段与加速阶段时间的比值在很大的范围内变化。

已经证明, 在方程(2)中引进  $f(\sigma, \omega)$  与  $\varphi(\sigma, \omega)$  依赖于  $\sigma$  的不同的函数关系, 就可以描述在试验中观察到的破坏蠕变变形随应力水平的非单调关系<sup>[16]</sup>。

利用物理的与金相的方法研究铜在 400℃ 温度下的蠕变与蠕变破坏。建议在柱形试件拉伸试验过程中量测试件的电阻的方法来确定蠕变曲线<sup>[17,18]</sup>。建议两种方法量测损伤参数  $w(t)$  它们各依据于电阻研究与金相分析的结果; 两种方法都得到破坏时损伤值随应力增加而减少<sup>[17-19]</sup>。采用蠕变动力方程(1), 其中考虑了瞬时加载时的材料特性, 可以对这一现象进行解析的描述。

Shesterikov S. A. 与 Yumasheva M. A. 考虑了方程(1)的一种型式, 其中定常蠕变率为应力的分段线性函数。采用这一表示式, 同时在总蠕变量中叠加一有限部分, 结果可以描述在很宽的应力范围内的试验数据。

对拉伸杆断裂时间依赖于杆长的关系进行了试验研究。破坏时间随着长度增加而减少; 根据材料结构的微观非均匀性的考虑, 对这一现象给出了解释<sup>[22]</sup>。

对应力集中对拉伸蠕变破坏的影响进行了系统的试验研究。考虑材料结构的微观非均匀性, 对这一效应建议了定性的与定量的描述方法。

### 3. 在变应力下蠕变破坏的研究

利用动力方程(1)对变拉伸应力下的蠕变破坏进行了系统的研究。主要的问题在于由恒应力下的试验结果预言在变应力下的破坏时间。通常是采用线性累积规则在预言变应力下的蠕变破坏。对于逐段恒值应力作用情况, 建议了方程(1)的几种形式, 它们可以描述偏离线性累积规则的偏差。特别是, 作者分析了由于瞬时应力变化引起损伤参数阶梯性变化的模型<sup>[23]</sup>, 和具有两个损伤参数的模型<sup>[24,25]</sup> 等等。

#### 4. 在蠕变下结构物元件持久性的研究

作者研究了杆在弯曲下的行为: 纯弯直至破坏(在压缩下非线性粘性, 在拉伸下损伤按(2)式增加), 以及具有初始偏心的杆在压缩载荷下的屈曲(材料为粘性<sup>[26]</sup>或弹性-粘弹性<sup>[27]</sup>).

研究了圆形与环形板的行为(弹性因支板在横向压力下的大变形弯曲<sup>[28]</sup>, 粘弹性板的大变形<sup>[29]</sup>, 弹性-粘弹性盘中的应力松弛<sup>[30]</sup>).

研究了弹性-非线性粘性-理想塑性材料厚壁管中的应力松弛<sup>[26]</sup>.

作者系统地研究了具有初始几何缺陷的薄壁圆柱壳在均匀外压下的行为, 及直到扁平状的行为<sup>[31-41]</sup>. 曲率无关材料(线性与非线性弹性<sup>[32]</sup>, 弹性-理想塑性, 弹性-线性硬化塑性)制成的壳的行为分析归结为确定极限压力. 具有蠕变的壳的行为分析(非线性粘性<sup>[35,36]</sup>, 粘性-弹性-理想塑性<sup>[37]</sup>及其他材料<sup>[38,39]</sup>)归结为确定变扁平的时间  $t^*$ . 作者研究了壳的初始缺陷形状对  $t^*$  的影响<sup>[40]</sup>. 作者以及其他人所得试验结果表明在  $t^*$  试验值与理论预言值之间有着很好的关联性<sup>[41]</sup>.

对圆柱壳在纯弯下的持久性进行了系统的研究. 利用各种假定得到了几个解<sup>[42-45]</sup>. 作者所进行的试验表明  $t^*$  的理论值与试验值很好地相符.

一些合作者与研究生 (E. A. Mjakotin, M. A. Yumasheva, V. I. Nikolaev, I. V. Namestnikova, N. E. Pechenina 等人)也参加了研究工作.

#### 参 考 文 献

Mekhanika tverdogo tela, AN SSSR; Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika, AN SSSR; Problemi prochnosti, AN Uka SSR; Vestnik Moskovskogo Universiteta. Seriya "Matematika i mekhanika"; 为俄文刊,有英译文. Izvestiya VUZov, Seriya "Mashinostroyeniye"; 文集 "Deformirovaniye i razrusheniye tvyordih tel" 及其他杂志与文集,均为俄文.

- [1] Rabotnov, Yu. N., Polzuchest elementov konstrukcii. M., Nauka, (1966), 752. (in Russian, translated into English).
- [2] Kachanov, L. M., Teoriya polzuchesti. M., Fizmatgiz., (1960), 455.
- [3] Lokochtchenko, A. M., In collection: "Voprosy dolgovremennoi prochnosti energeticheskogo oborudovaniya". Trudi Centralnogo kotlo-turbinnogo Instituta 230. Leningrad, (1986), 107—109.
- [4] Namestnikova, I. V., Shesterikov, S. A., In collection: "Def. i razr. tv. tel". Moscow Univ., 1985, 43—52.
- [5] Lokochtchenko, A. M., Myakotin, E. A., Shesterikov, S. A., Mekh. tverdogo tela, 4(1979), 87—94.
- [6] Lokochtchenko, A. M., Probl. prochnosti, 8(1983), 55—59.
- [7] Eremina, I. I., Lokochtchenko, A. M., Selivanova, T. I. Izv. VUZov. Ser. Mash., 10(1983), 148—150.
- [8] Lokochtchenko, A. M., Shesterikov, S. A., Probl. prochn., 12(1986), 3—8.
- [9] Lokochtchenko, A. M., Probl. prochn., 9(1983), 71—73.
- [10] Lokochtchenko, A. M., Shesterikov, S. A., In coll.: "Prochnost materialov i elementov konstrukcii pri sloznom napryazennom sostoyanii", Kiev, (1986), 159—164.
- [11] Shesterikov, S. A., Izvestiya AN SSSR, Otdel. Tekhnicheskikh Nauk, Mekhanika i mashinostroyeniye, 2(1961), 148—149.
- [12] Lokochtchenko, A. M., Shesterikov, S. A., Mekh. tverdogo tela, 3(1966), 141—143.
- [13] Lokochtchenko, A. M., Myakotin, E. A., Shesterikov, S. A., Probl. prochnosti, 5(1985), 50—54.
- [14] Lokochtchenko, A. M., Myakotin, E. A., Nikolaev, V. I., Shesterikov, S. A. In collection: "Deform. i razr tverdikh tel", Moscow Univ., (1985), 31—42.
- [15] Lokochtchenko, A. M., Shesterikov, S. A., Prikl. mekh. i tekh. fizika, 3(1980), 155—159.
- [16] Lokochtchenko, A. M., Shesterikov, S. A., Prikl. meth. i tekh. fizika, 1(1982), 160—163.
- [17] Lokochtchenko, A. M., Myakotin, E. A., Shesterikov, S. A., Probl. prochnosti, 10(1984), 32—35.
- [18] Lokochtchenko, A. M., Myakotin, E. A., Nikolaev, V. I., Shesterikov, S. A., In collection: "Deform. i

- razr. tverdikh tel", Moscow Univ., (1985), 88--94.
- [19] Lokochtchenko, A. M., Prikl. mekh. i tekhn. fizika, 6(1982), 129—133.
- [20] Dacheva, M. D., Lokochtchekno, A. M., Shesterikov, S. A., Prikl. mekhan. i tekhn. fizika, 4(1984), 139—142.
- [21] Shesterikov, S. A., Yumasheva, M. A., Mekh. tverdogo tela, 1(1984), 86—91.
- [22] Averyanova, T. M., Lokochtchenko, A. M., Nikolaev, V. I., Shesterikov, S. A., In collection: "Deform. i razr. tverdikh tel", Moscow University, (1985), 68—77.
- [23] Lokochtchenko, A. M., Namestnikova, I. V., Shesterikov, S. A., Probl. prochn., 10(1981), 47—51.
- [24] Lokochtchenko, A. M., Shesterikov, S. A., Prikl. mekhan. i tekhn. fizika, 2(1982), 139—143.
- [25] Lokochtchenko, A. M., Namestnikova, I. V., Probl. prochn., 1(1983), 9—13.
- [26] Lokochtchenko, A. M., Shesterikov, S. A., Prikl. mekhan. i tekhn. fizika, 4(1966), 154—159.
- [27] Lokochtchenko, A. M., Shesterikov, S. A., Prikl. mekhan. i tekhn. fizika, 5(1966), 156—160.
- [28] Lokochtchenko, A. M., Mekhan. tverdogo tela, 5(1974), 169—173.
- [29] Lokochtchekho, A. M., Shesterikov, S. A., Mekhan. tverdogo tela, 5(1967), 167—170.
- [30] Lokochtchenko, A. M., Shesterikov, S. A., Izvestiya VUZov Mashinostroenie, 7(1966), 34—40.
- [31] Lokochtchenko, A. M., In collection: "Deform. i razrush. tverdikh tel", 37(1975), 15—24.
- [32] Aliev, R. L., Lokochtchenko, A. M., Shesterikov, S. A., Vestn. Moscow Univ. Mat., mekh., 3(1969), 97—102.
- [33] Lokochtchenko, A. M., Shesterikov, S. A., Mekh. tverdogo tela, 3(1970), 125—126.
- [34] Afanasyeva, A. V., Lokochtchenko, A. M., In collection: "Deform. i razrush. tverdikh tel", (1985), 139—148.
- [35] Vanko, V. I., Shesterikov, S. A., Mekh. tverd. tela, 5(1966), 127—130.
- [36] Lokochtchenko, A. M., Shesterikov, S. A., In collection: "Deform. i razrush. tverdikh tel", Moscow Univ., 23(1973), 10—14.
- [37] Lokochtchenko, A. M., Vestn. Moscow Univ., Mat., mekh., 6(1969), 117—123.
- [38] Lokochtchenko, A. M., In collection: "Deform. i razrush. tverdikh tel", 23(1973), 21—25.
- [39] Lokoschtschenko, A. M. Zamm, 54(1974), 203—205 (in German).
- [40] Lokochtchenko, A. M., Shesterikov, S. A., Mekhan. tverdogo tela, 3(1985), 113—118.
- [41] Kachelkin, V. V., Lokochtchenko, A. M., Myakotin, E. A., Shesterikov, S. A., Mekhan. tverdogo tela, 1(1974), 155—158.
- [42] Kononenko, V. A., Lokochtchenko, A. M., Izvestiya VUZov. Mashinostroenie, (1982), 29—33.
- [43] Lokochtchenko, A. M., Pechenina, N. E., in collection: "Deform. i razrush. tverdikh tel", Moscow Univ., (1985), 124—131.
- [44] Lokochtchenko, A. M., Shesterikov, S. A., Mekhan. tverdogo tela, 2(1982), 187—191.
- [45] Lokochtchenko, A. M., Pechenina, N. E., Izvestiya VUZov. Mashinostroenie, 1(1983), 28—33.

## SUMMARY OF RESULTS ON THEORY OF CREEP AND CREEP RUPTURE OF METALS

Shesterikov, S. A. Lokochtchenko, A. M.

(Institute of Mechanics, Moscow University, USSR)

**Abstract** The authors developed a systematic experimental and theoretical study on the behaviour of creep and creep rupture of metals under uniaxial and complex stress state, as well as on durability of constructional elements during creep.

In experimental studies the authors considered the behaviour of various metals under constant and variable stresses, stress concentration, influence of way of loading on creep rupture; the authors also suggested new measuring methods of structure damage of material.

**Key words** metal, creep, creep rupture