

## 平头压痕蠕变损伤实验的有限元模拟分析\*

岳珠峰

(西北工业大学工程力学系, 西安 710072)

**摘要** 对平头压痕蠕变实验进行了有限元模拟分析, 重点考虑了受压材料的蠕变损伤. 基于等效应力控制的蠕变损伤方程, 在完成了 Abaqus 的 Creep 用户子程序的基础上对单相半无限大材料和薄膜 / 基体的两相材料系统的平头压痕蠕变损伤响应进行了有限元模拟. 结果表明, 蠕变压痕速率与材料的损伤参量相关, 也与压头大小以及薄膜厚度 / 压头直径之比有关. 与无损伤材料一样, 也可以通过压痕蠕变损伤实验来得到受压材料的蠕变损伤规律.

**关键词** 压痕蠕变实验, 蠕变损伤, 有限元法, 单相半无限大材料, 薄膜 / 基体系统

**中图分类号** TG111.8, TB115

**文献标识码** A

**文章编号** 0412-1961(2005)01-0015-04

## FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE CREEP DAMAGE INDENTATION TESTING WITH FLAT INDENTER

YUE Zhufeng

Department of Engineering Mechanics, Northwestern Polytechnical University, Xian 710072

Correspondent: YUE Zhufeng, professor. Tel: (029)88495540, E-mail: zfyue@nwpu.edu.cn

Supported by National Natural Science Foundation of China (Nos.50375124 and 10472094)

Manuscript received 2004-01-13, in revised form 2004-04-16

**ABSTRACT** The creep indentation testing with cylindrical flat indenters has been simulated by the finite element method with special attention on the creep damage of the indented materials. For the equivalent-stress-controlled-damage materials, the user subroutine Creep has been programmed for Abaqus, which is used to analyze the one-phase half-infinite material and thin-film/substrate material systems. It is found that the creep indentation depth rate is influenced by the damage parameters of the indented materials as well as the size of the indenters and the ratio of the indenter size to thickness of the thin film. It is a possible, like that of the non-damage creep indentation experiments, to obtain the creep damage law of the indented materials from the creep damage indentation testing.

**KEY WORDS** creep indentation testing, creep damage, finite element method, one-phase half-infinite material, thin film/substrate system

相对于单轴拉伸实验, 平头压痕蠕变实验有许多优势, 特别是在无法用单轴拉伸实验测量的情况<sup>[1-5]</sup>. 压痕蠕变实验是由室温的硬度实验发展而来, 其压头可以是各种形状. 硬度实验已有国际标准<sup>[6]</sup>, 但压痕蠕变实验尚无标准. 压痕蠕变实验的压头可以是硬度实验压头, 也可以是柱状平压头. 对于柱状平压头, 常应力下压痕速率  $\dot{d}$  与压痕应力  $\sigma_N$  的关系在稳定阶段为<sup>[4,5]</sup>

$$\dot{d} = c_1 \sigma_N^{n_1} \quad (1)$$

式中  $c_1$  和  $n_1$  为常数,  $d$  为压痕. 它们反映受压材料的

压痕特性.

平头压痕蠕变实验可获得被压材料的蠕变力学性能. 材料的蠕变变形可以用下式表示

$$\dot{\epsilon} = c_m \sigma^{n_m} \quad (2)$$

式中  $\dot{\epsilon}$  为材料的蠕变率,  $\sigma$  为蠕变应力,  $c_m$  和  $n_m$  分别为材料的蠕变常数和蠕变指数.

从数值上, 针对不同的材料及材料系统已经建立了由  $c_1$  和  $n_1$  确定  $c_m$  和  $n_m$  的方法<sup>[7-12]</sup>. 该方法核心是由两种不同压头尺寸的压痕实验结果结合多次逼近数值的方法来确定  $c_m$  和  $n_m$ .

对于平头压痕蠕变实验的一个重要进展为文献<sup>[7-12]</sup>提出的方法, 该方法虽然已初步得到实验验证<sup>[13]</sup>, 但由于未考虑蠕变损伤, 需进一步改进. 材料的蠕变损伤可以由下式表示

\* 国家自然科学基金项目 50375124, 10472094, 教育部回国人员基金和陕西省自然科学基金资助

收到初稿日期: 2004-01-13, 收到修改稿日期: 2004-04-16

作者简介: 岳珠峰, 男, 1965 生, 博士, 教授

$$\dot{\epsilon} = \frac{\beta \sigma_c^n}{(1 - \omega)^n} \quad (3a)$$

$$\dot{\omega} = \frac{D[\alpha \sigma_1 + (1 - \alpha)\sigma_c]^x}{(1 - \omega)^\phi} \quad (3b)$$

式中  $\dot{\omega}$  为损伤因子率;  $\omega$  为损伤因子, 在 0 到 1 之间变化,  $\omega=0$  为无损伤,  $\omega=1$  为完全 (理论) 损伤;  $\sigma_c$  为等效应力,  $\sigma_1$  为最大主应力;  $\beta, n, D, x, \phi$  和  $\alpha$  为模型参数. 公式 (3) 事实上是一个一般公式, 参数  $\alpha$  在 0 到 1 之间变化, 它决定材料蠕变损伤的应力敏感性, 即当  $\alpha=0$ , 损伤由等效应力控制; 当  $\alpha=1$ , 损伤由最大主应力控制.

本文将仅研究  $\alpha=0$  的情况, 这是一种较常见的简单情况.

### 1 计算模型

考虑两种材料系统, 一种为单相半无限大材料, 另一种为薄膜-基体材料系统. 对这两种材料系统, 考虑不同尺寸的柱状压头. 轴对称简化模型示于图 1 中.

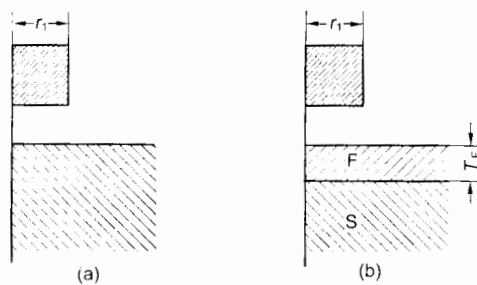


图 1 本文考虑的计算模型

Fig.1 Models used in the paper for half infinite one phase material (a) and thin film/substrate material system (b) ( $r_1$ —radius of indenter;  $T_F$ —thickness of the thin film)

采用 Abaqus 分析软件 [14], 损伤通过其用户子程序 Creep 引入 [15], 简化为轴对称问题, 每种情况的有限元 (FEM) 单元数为 5000 左右, 取 4 节点等参元. 假设压头为无限刚性, 因而在有限元模拟时可以不采用接触模式, 而直接在受压面施加面力, 同时保持受压面有相同的压痕位移 (可通过 MPC 卡控制).

### 2 数值分析结果

#### 2.1 单相材料系统

单相材料在受平头压痕恒定载荷作用下, 典型的压痕深度-时间曲线示于图 2. 可以看出, 压痕应力增加, 压痕深度随之增加. 计算中止状态为对应于压头前方材料的某些单元的损伤已经达到临界状态 ( $\omega=1$ ), 使得 Abaqus 不能再计算下去, 但不会导致压痕的失稳. 此时的损伤分布示于图 3.

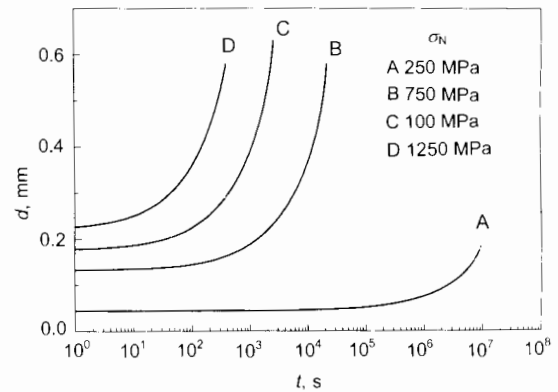


图 2 典型压痕深度-蠕变时间曲线

Fig.2 Simulated indentation depth creep time curves (Parameters in FEM:  $n = x = \phi = 6.5$ ,  $\beta = 1.52 \times 10^{-22}$ ,  $D = 2.53 \times 10^{-22}$ ,  $r_1 = 10$  mm)

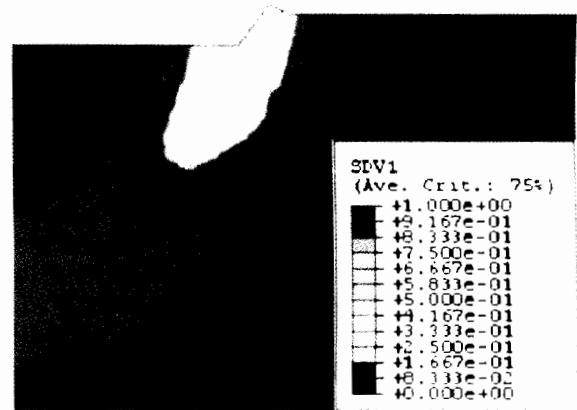


图 3 模拟的压头前方材料的损伤分布

Fig.3 Simulated damage distribution in front of the indenter, FEM model parameters to be the same as Fig.2, and the applied indentation stress  $\sigma_N=1000$  MPa. In the figure, SDV1 is the state variable of Abaqus, here it is damage variable  $\omega=1$

压头尺寸对压痕速率  $\dot{d}$  的影响示于图 4. 可以看出, 当考虑材料损伤时,  $\dot{d}$  显著高于不考虑损伤的情形. 在相同的压痕应力下, 大压头的  $\dot{d}$  大于小压头的. 压痕-时间曲线可分成三个阶段: 第一阶段为  $\dot{d}$  递减阶段, 这主要是由于压头前方受压材料应力状态调整 (蠕变变形导致应力变化, 一般为高应力减小). 第二阶段为“稳定”阶段, 但这个稳定阶段和无损材料的稳定阶段不一样, 因为此损伤材料“稳定”阶段一般较短, 同时是以下两种机理共同作用的结果: (1) 蠕变所导致压头前方材料应力水平调整, 表现为  $\dot{d}$  率随时间递减, 这是无损材料的现象; (2) 由于损伤导致蠕变率增大, 从而使得  $\dot{d}$  增大. 第三阶段为  $\dot{d}$  快速增大阶段, 位于压头前方材料开始失效.

同时, 图 5 给出材料损伤模型参数的影响. 不同的蠕变规律, 平头压痕率也不同.

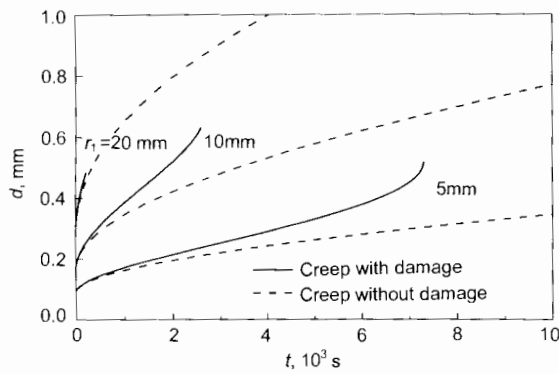


图 4 模拟的压头大小对压痕蠕变响应的影响

Fig.4 Simulated influence of the indenter size on the indentation creep behavior and a comparison of the creep with or without damage ( $n = x = \phi = 6.5, \beta = 1.52 \times 10^{-22}, D = 2.53 \times 10^{-22}, \sigma_N = 1000 \text{ MPa}$ )

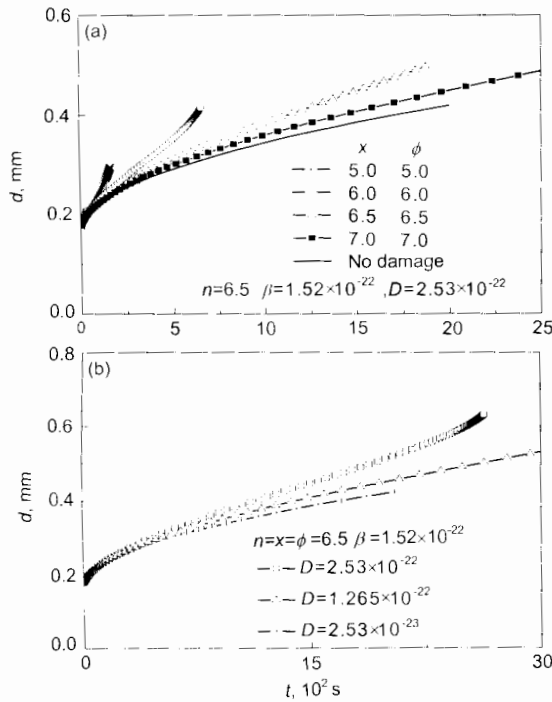


图 5 材料蠕变损伤参数对压痕蠕变响应的影响

Fig.5 Influences of the model parameters  $x, \phi$  (a) and  $D$  (b) on the indentation creep damage behavior ( $\sigma_N = 1000 \text{ MPa}, r_1 = 10 \text{ mm}$ )

### 2.2 薄膜 / 基体双相材料系统

薄膜材料系统已成为压痕实验广泛应用的对象。此处假设薄膜材料有蠕变变形和损伤，而基体材料仅发生了弹性变形。对于其它情况也很容易通过相同的方法计算得到。平头蠕变压痕的宏观响应与单相材料没有多大的差别，也有三个阶段。图 6 给出应力水平对压痕速率的影响。压头大小的影响示于图 7 中，从图中可以看出，压头大小的影响较为显著，这主要是由于薄膜厚度与压头大小处于同一个数量级上。

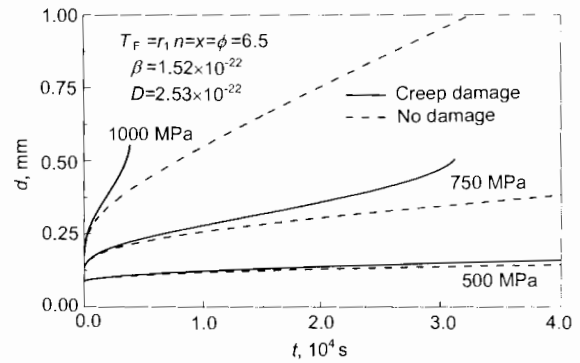


图 6 计算的薄膜 / 基体系统的蠕变压痕响应曲线

Fig.6 Simulated creep damage indentation behaviors of thin film under different impression stresses

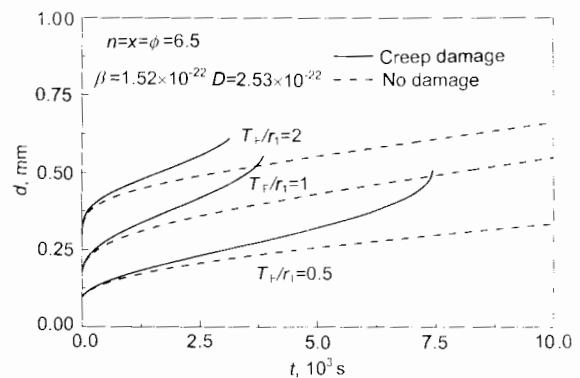


图 7 压头尺寸对压痕蠕变响应的影响

Fig.7 Influence of the indenter size on the creep damage indentation behavior of thin film/ substrate systems ( $\sigma_N = 1000 \text{ MPa}$ )

与单相材料不同，对薄膜材料系统的平头压痕的材料损伤有两处较为显著处，其一为压头前方，其二为薄膜 / 基体界面处。结果示于图 8 中。它们都随着时间的增加而增大。

### 3 讨论

#### 3.1 由平头压痕蠕变实验确定蠕变损伤参数的可行性

不考虑损伤时，可以通过两种不同尺寸的压头进行实验，结合有限元分析，通过多次逼近的方法可以求得材料的蠕变参数  $c_m$  和  $n_m$  (式 (2))，该方法有一定的普遍性。此处考虑压痕速率 - 时间的关系，作为典型的薄膜材料系统，结果示于图 9 中。压痕速率存在最小值  $\dot{d}_{min}$ 。考察对应于  $\dot{d}_{min}$  时的材料损伤可以发现，此时的损伤较小，可以忽略不计。因此，可以根据  $\dot{d}_{min}$  值来确定蠕变损伤方程中的  $n$  和  $\beta$  (式 (3))。

如果假设  $x = \phi = n$ ，则可以通过数值方法直接确定损伤数  $x (= \phi = n)$ ；如果  $x = \phi \neq n$ ，则可以通过一组测试 (不同尺寸的压头) 来得以确定  $n$  和  $x (= \phi)$ 。对此，需要进一步的研究。

#### 3.2 局部损伤和失效

平头压痕蠕变实验不存在压痕失稳的问题，但压头材

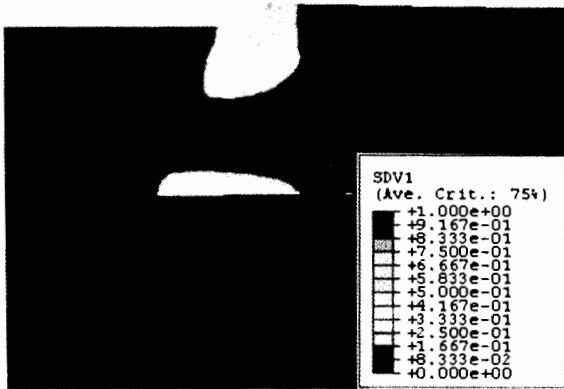


图8 计算终止时薄膜 / 基体系统平头压痕的损伤特征

Fig.8 Simulated creep damage characteristics of thin film/substrate system at the end of calculation (Model parameters: same as those in Fig.7 and  $T_F/r_1=1$ )

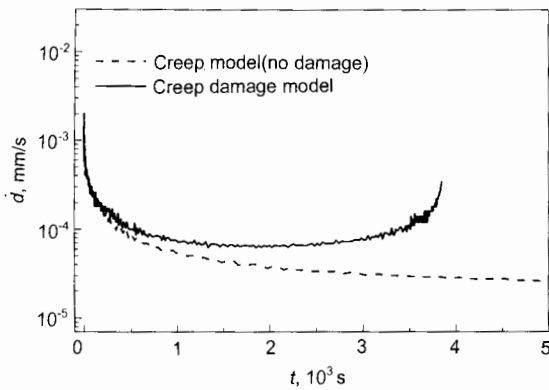


图9 蠕变压痕速率  $\dot{d}$  的变化

Fig.9 Indentation creep rate  $\dot{d}$  vs indentation time obtained from the case of  $\sigma_N=1000$  MPa in Fig.6

料前方材料将损伤失效,但这种损伤失效为局部的,随着压痕和时间的增加,它会较稳定的向前发展.本文没有进一步模拟.对这个过程的认识同样具有重要的意义.

### 3.3 本文方法适用性分析

正如前面所述,本文损伤模型为基于等效应力的损伤模型,即式(3)中情形.由于压痕实验的压头前方材料主要为受压,最大主应力为压应力,故平头压痕实验较难用

于拉应力敏感的蠕变损伤材料,但是对压应力敏感的蠕变损伤材料具有较大的适用性.

对于薄膜-基体材料系统,通过调整压头尺寸,也有望对界面蠕变损伤特性进行研究.

## 4 结论

(1) 完成了基于等效应力控制的蠕变损伤方程的Abaqus的Creep用户子程序,对单相半无限大材料和薄膜-基体的两相材料系统的压痕蠕变损伤响应进行了有限元模拟分析.

(2) 材料蠕变损伤压痕(深度)率与材料的损伤规律相关,也与压头大小以及薄膜/压头直径之比有关.

(3) 与无损伤材料一样,可以通过压痕蠕变损伤实验得到材料的蠕变参数.

## 参考文献

- [1] Evans B. *J Geophys Res*, 1984; 89: 4213
- [2] Li W B, Henshall J L, Hooper R M, Easterling K E. *Acta Metall Mater*, 1991; 39: 3099
- [3] Pandorf R, Broeckmann C, Berns H. *MP Materialprüfung*, 1999; 41: 294
- [4] Li J C M. In: Earthman J C, Mohamed F A eds, *Proc 7th Int Conf Creep and Fracture of Eng Mater Struc*, Warrendale: The Minerals, Metals & Materials Society, 1997: 109
- [5] Lucas B N, Oliver W C. *Metall Mater Trans*, 1999: 30A: 601
- [6] Dieter G E. *Mechanical Metallurgy*. New York: McGraw-Hill Book Company, 1988
- [7] Yue Z F, Probst-Hein M, Eggeler G. *Mater High Temp*, 2000; 17: 449
- [8] Yue Z F, Eggeler G. *J Mater Sci Technol*, 2000; 16: 559
- [9] Yue Z F, Eggeler G, Stoeckhert B. *Comp Mater Sci*, 2001, 21: 37
- [10] Yue Z F. *J Mater Sci Technol*, 2002; 21: 335
- [11] Yue Z F, Lu Z Z. *Mater Sci Eng*, 2003; 352A: 266
- [12] Yue Z F, Wan J S, Lu Z Z. *Appl Math Mech*, 2003; 23: 307
- [13] Dorner D, Roeller K, Skrotzki B, Stoeckhert B, Eggeler G. *Mater Sci Eng*, 2003; A357: 346
- [14] Hibbit, Karlsson, Sorensen. *Abaqus User's Manual, Version 5.6*, 1998
- [15] Yue Z F, Lu Z Z, Wang X M. *Mater High Temp*, 2002; 19: 147