

文章编号:1673-9981(2013)04-0235-04

压痕法表征韧性膜力学性能的量纲分析*

廖艳果¹, 胡和平^{1,2}, 王晓锋¹

1. 南华大学数理学院, 湖南 衡阳 421001; 2. 湘潭大学低维材料及其应用教育部重点实验室, 湖南 湘潭 411105

摘要:通过对韧性膜/韧性基底体系的 Berkovich 压入过程进行量纲分析, 得到了压入法的加卸载参数和韧性膜/基底的力学参数之间的无量纲函数关系, 为建立压痕法表征韧性薄膜力学性能模型奠定基础。

关键词:韧性膜/韧性基底体系; 量纲分析; 加卸载参数

中图分类号: O341

文献标识码: A

韧性薄膜在生产和工业中具有很重要的作用, 薄膜和涂层不论用于功能元件或结构元件, 其力学性能都是极为重要的^[1-2]。因此, 如何测量韧性薄膜的基本力学性能参数具有特别重要的意义。测量薄膜力学性能的方法有拉伸法^[3]、纳米压痕法和薄膜弯曲试验等。由于薄膜在几何尺寸(尤其是厚度)方面的特点, 采用单轴拉伸实验测量薄膜的力学性能很困难。随着现代测试技术的发展, 人们通过微/纳米压入法来研究薄膜材料的力学性能。纳米压入法获得的压入参量除受到被压材料本身的力学性能影响外, 还会受到压头的几何形状和压入深度的影响, 因此, 很难获得材料的压入响应与这些参量间的解析式, 只能借助于数值方法。然而对众多参变量建立函数关系必须逐一考察所有参变量, 并假设其它参变量不变。这不仅带来计算量过多的问题, 而且由此建立的函数关系只适用于某些特定情况, 局限性很大。对于薄膜材料的 Berkovich 压入问题, 在某一压入深度下建立的压入载荷与材料性能间的函数关系无法适用于其它压入深度。因此, 如何有效地避开数值研究并建立能够反映所研究问题一般规律的函数关系就十分重要。量纲理论可解决这方面的问题。通过量纲分析, 不仅可以大大减少计算的工作量, 还可以建立各参量间的无量纲函数关系。本文运用量纲

分析的方法, 得出了由压痕载荷一位移参数和韧性薄膜/韧性基底力学参数之间的无量纲函数关系。

1 量纲分析

假设各向同性韧性薄膜/基底材料的单轴应力—应变关系为弹塑性线性强化模型^[4](图1), 即

$$\sigma_i = \begin{cases} E_i \varepsilon_i, & \sigma_i \leq \sigma_{yi} \\ E_{ii} \varepsilon_i, & \sigma_i > \sigma_{yi} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, i 为 f, s (分别为薄膜或基底) E_i 为膜或基底的弹性模量, σ_{yi} 为膜或基底的屈服强度, E_{ii} 为膜或基底的线性强化模量。

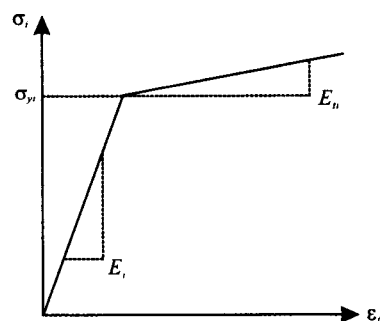


图1 弹塑性线性强化的应力—应变关系图

Fig. 1 A curve showing elastic-plastic linea relationship between stress and strain

收稿日期:2013-06-11

* 基金项目:湖南省教育厅项目(11C1104); 衡阳市科技局项目(2011KJ75)

作者简介:廖艳果(1981-),男,湖南娄底人,讲师,硕士。

图 2 是一个典型的锥形压头压入韧性材料得到的加卸载曲线图。

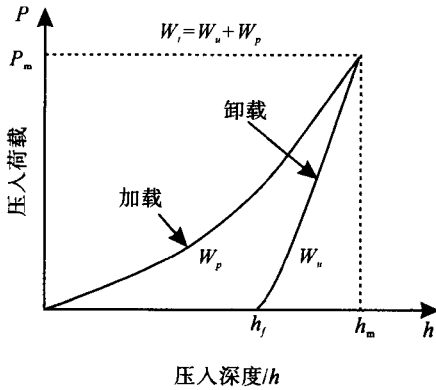


图 2 典型韧性材料的压痕加卸载曲线

Fig. 2 A typical loading-unloading curve of a tough material

图 2 中, P_m 为最大载荷, h_m 为压入的最大深度, h_f 为卸载后的残余深度. 通过对加载部分进行积分得到外力所做的总功 W_i . $W_i = \int_0^{h_m} Pdh$. W_i , P_m 和 h_f 应是韧性薄膜/基底的基本力学量(如弹性模量、屈服强度、泊松比和线性强化模量)、薄膜的厚度 (t_f)、最大压痕深度 (h_m) 和压头半角 (θ) 的函数, 它们之间的关系如方程 (2):

$$\begin{cases} P_m = P_m(E_f, \sigma_{yf}, E_{lf}, \nu_f, E_s, \sigma_{ys}, E_{ts}, \nu_s, t_f, h_m, \theta) \\ W_i = W_i(E_f, \sigma_{yf}, E_{lf}, \nu_f, E_s, \sigma_{ys}, E_{ts}, \nu_s, t_f, h_m, \theta) \\ h_f = h_f(E_f, \sigma_{yf}, E_{lf}, \nu_f, E_s, \sigma_{ys}, E_{ts}, \nu_s, t_f, h_m, \theta) \end{cases} \quad (2)$$

由于式 (2) 中参量繁多, 为直观起见, 本文选用长度单位 L 、质量单位 M 以及时间单位 T 作为基本量度单位, 将此压入问题中的有关参量的量纲列于表 1. 运用量纲理论的基本定理—— Π 定理, 对式 (2) 进行量纲分析, 取 σ_{ys} 和 h_m 为基本量, 对照表 1, 其余量的量纲可由 σ_{ys} 和 h_m 的量纲表示为:

$$\begin{aligned} [W_i] &= [\sigma_{ys}]^1 [h_m]^3 & [P_m] &= [\sigma_{ys}]^1 [h_m]^2 & [h_f] &= [\sigma_{ys}]^0 [h_m]^1 \\ [E_f] &= [\sigma_{ys}]^1 [h_m]^0 & [E_{lf}] &= [\sigma_{ys}]^1 [h_m]^0 & [\sigma_f] &= [\sigma_{ys}]^1 [h_m]^0 \\ [E_s] &= [\sigma_{ys}]^1 [h_m]^0 & [E_{ts}] &= [\sigma_{ys}]^1 [h_m]^0 & [t_f] &= [\sigma_{ys}]^0 [h_m]^1 \end{aligned}$$

表 1 膜/基体系压入问题相关参量的量纲

Table 1 A dimensional list about the related parameters of film/substrate system by indentation

参量	符号	量纲
总功	W_i	$L^2 MT^{-2}$
最大荷载	P_m	$L^1 MT^{-2}$
最大压入深度、残余深度、薄膜厚度	h_m, h_f, t_f	L
弹性模量	E_f, E_s	$L^{-1} MT^{-2}$
屈服强度	σ_{yf}, σ_{ys}	$L^{-1} MT^{-2}$
线性强化模量	E_{lf}, E_{ts}	$L^{-1} MT^{-2}$

在本文的研究中, 我们选用的是 Berkovich 压头. 由于压头的形状是确定的, 故 θ 也是确定的, 材料泊松比的影响可以忽略^[5-9], 所以应用 Π 定理, 方程 (2) 可简化为方程 (3):

$$\begin{cases} \frac{P_m}{\sigma_{ys} h_m^2} = \Phi \left[\frac{E_f}{\sigma_{ys}}, \frac{E_{lf}}{\sigma_{ys}}, \frac{E_s}{\sigma_{ys}}, \frac{E_{ts}}{\sigma_{ys}}, \frac{\sigma_{yf}}{\sigma_{ys}}, \frac{t_f}{h_m} \right] \\ \frac{W_i}{\sigma_{ys} h_m^3} = \varphi \left[\frac{E_f}{\sigma_{ys}}, \frac{E_{lf}}{\sigma_{ys}}, \frac{E_s}{\sigma_{ys}}, \frac{E_{ts}}{\sigma_{ys}}, \frac{\sigma_{yf}}{\sigma_{ys}}, \frac{t_f}{h_m} \right] \\ \frac{h_f}{h_m} = \psi \left[\frac{E_f}{\sigma_{ys}}, \frac{E_{lf}}{\sigma_{ys}}, \frac{E_s}{\sigma_{ys}}, \frac{E_{ts}}{\sigma_{ys}}, \frac{\sigma_{yf}}{\sigma_{ys}}, \frac{t_f}{h_m} \right] \end{cases} \quad (3)$$

2 压痕法表征韧性薄膜力学性能的流程

基底与薄膜两部分都需要测定其弹性模量、屈服强度和线性强化模量, 可以先测定韧性基底力学性能参数. 然后, 将基底的力学参量 E_s, σ_{ys} 和 E_{ts} 作为已知量, 根据无量纲方程 (3), 即可在基底材料为某一确定材料的情况下求得其韧性薄膜的应力应变关系. 图 3 为表征各向同性韧性膜/韧性基底材料的流程图.

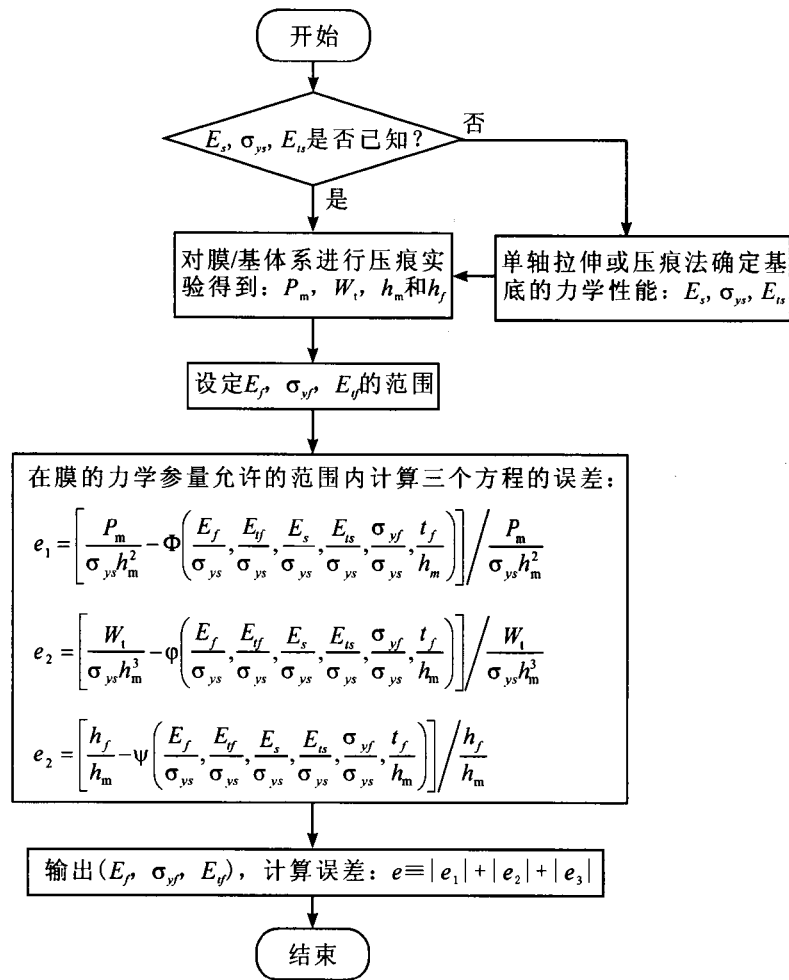


图3 表征韧性薄膜力学性能流程图

Fig. 3 The diagram of characterizing mechanical properties of ductile thin films

参考文献:

[1] BLECH A I. Electromigration in thin aluminum films on titanium nitride[J]. J Appl Phy,1976,47(4):1203.
 [2] ARZT E, NIX W D. A model for the effect of line width and mechanical strength on electromigration failure of interconnects with “near-bamboo” grain structures[J]. J Mater Res, 1991,6(4):731.
 [3] HARDWICH D A. The mechanical properties of thin films: A Review [J]. Thin Solid Films, 1987,154(1/2):109-124.
 [4] 杨桂通. 弹塑性力学[M]. 北京:高等教育出版社,1987: 2-3.
 [5] 廖艳果,胡和平,周益春. 能量法表征薄膜的塑性性能[J]. 材料研究与应用, 2010, 4(1):44-47.
 [6] 胡和平,廖艳果,周益春. 韧性薄膜/基底体系锥形压痕

的有限元分析[J]. 南华大学学报:自然科学版, 2009, 23(4):56-61.
 [7] LIAO Y G, ZHOU Y C, HUANG Y L, et al. Measuring elastic-plastic properties of thin films on elastic-plastic substrates by sharp indentation [J]. Mech Mat, 2009,41(3):308-318.
 [8] 廖艳果,胡和平,周益春. 加工硬化对薄膜基底体系临界压痕极限的影响[J]. 湘潭大学学报:自然科学版,2011, 33(2):17-21.
 [9] PELEGRI A A, HUANG X. Nanoindentation on soft film/hard substrate and hardfilm/soft substrate material systems with finite element analysis[J]. Compos Sci Technol, 2008,68(1):147-155.

(下转第 267 页)

Study on the mineral processing technique of a tungsten-tin ores

GUAN Tong, ZHOU Xiaotong, DENG Lihong

Guangdong General Research Institute for Industrial Technology (Guangzhou Research Institute of Non-ferrous Metals), Guangzhou 510650, China

Abstract: In view of ore properties of a tungsten-tin ores containing wolframite as the main marketable mineral and coarse particle-size distribution, a joint process of gravity separation and magnetic separation was adopted for recovering tungsten and tin. The tungsten and tin rough concentrate was obtained with gravity separation, and then tungsten and tin separation process with magnetic separation. When the grades of the crude ore were WO_3 0.40%, Sn 0.12%, good technical indexes such as tungsten concentrate grade of WO_3 65.03%, recovery rate of 79.74%, and tin concentrate grade of Sn 39.32%, recovery rate of 53.30% were obtained.

Key words: wolframite; cassiterite; gravity separation; magnetic separation

—————
(上接第 239 页)

Dimensional analysis of characterizing mechanical properties of ductile films by the indentation method

LIAO Yanguo¹, HU Heping^{1, 2}, WANG Xiaofeng¹

1. School of Mathematics and Physics, University of South China, Hengyang 421001, China; 2. Key Laboratory of Low Dimensional Materials & Application Technology (Xiangtan University), Ministry of Education, Xiangtan 411105, China

Abstract: A dimensional analysis was carried out about the process of Berkovich-indentation on a ductile film/substrate system. The corresponding dimensionless relationship between the loading/unloading parameters and the mechanical parameters of ductile film/substrate was obtained. This lays the foundation for the establishment of the model which can characterize the mechanical properties of ductile thin films by the indentation method.

Key words: ductile film/ductile substrate system; dimensional analysis; loading-unloading parameters