

由残余变形反推微构件材料的应力应变关系*

杜 莹¹, 赵海峰, 舒思齐, 魏悦广

(中国科学院力学研究所非线性力学国家重点实验室, 北京 100080)

摘要: 本文通过对微结构破坏模式的测量, 反推出微构件材料的应力应变关系。在完成这一分析过程中, 首先通过建模与分析, 获得了刻划微结构力学行为的几何及物理参数关系, 然后结合测量出的数据数值求解得到表征应力应变曲线的特征参量, 进而获得应力应变曲线。本文结合薄膜/基体微结构进行分析。

关键词: 残余变形测量; 微结构; 微构件; 应力应变曲线; 薄膜/基体体系

1 引言

获得材料的应力-应变曲线对刻划材料的总体力学行为是必需的。通常材料的应力-应变曲线是通过简单的力学试验得到的。但是在特殊环境下或者对特殊材料, 人们很难由常规的力学试验测量其应力应变关系, 例如某些微电子元器件是在绝缘的底板上镀有一层很薄的导电或增韧薄膜, 由于尺度的微小化和工作环境的复杂性之特征很难预先对这种薄膜/基体体系中的薄膜材料进行拉伸试验, 获得该材料的应力-应变曲线。这种薄膜材料在破坏时呈现出龟裂或卷曲的形状特征, 说明薄膜经受了由弹塑性加载到卸载或反向加卸载的破坏过程^[1]。虽然人们难以对受制造工艺及环境因素影响之薄膜应力应变曲线进行力学实验, 但人们可以容易地测量出薄膜的厚度以及破坏后薄膜的残余曲率或者曲率半径^[2]。本项研究试图通过测出的残余曲率和有关的几何参数(如薄膜的厚度等), 再通过模拟分析获得的刻划微结构力学行为的几何及物理参数关系, 反推出薄膜材料的应力-应变曲线。可以由常见的微厚度板弯曲试验和薄膜撕裂试验的破坏方式近似模拟这种薄膜/基体体系的卷曲破坏^[1, 3, 4]。本文由微厚度板的弹塑性弯曲基本关系出发反推微电子元器件中的薄膜材料的应变-应变关系。本文方法可同样适用于由其它类型结构材料的破坏特征反推其应力应变关系。

2 薄膜/基体体系破坏的表征

作为一种特殊的微结构, 薄膜/基体体系在表面及界面工程中获得了广泛应用。薄膜撕裂试验是测量薄膜与基体界面粘结强度的重要手段, 该试验如图 1(a) 所示。薄膜通常是厚度为 $1 \mu\text{m}$ 到 0.2mm 的金属材料或复合材料, 它通过一层极薄的粘附材料粘结到基体上, 粘附层的厚度相对基体和薄膜都很小, 可以忽略。在薄膜一端施加拉力 P , 薄膜将脱离基体, 形成脱胶。通过测量获得在薄膜脱胶时其内部的应力和应变特征以及界面的粘结韧性。薄膜撕裂破坏后, 同样展现在人们面前的是残余曲率, 如图 1(b), 它不仅是撕裂薄膜的残余变形特征, 也是由各种残余应力(如温度应力)引起破坏的残余变形特征。一般早期对薄膜破坏的研究局限于薄膜只发生弹性变形, 而对韧性薄膜, 特别是金属薄膜来说, 由薄膜破坏后的残余变形可知, 薄膜经历了弹塑性加卸载破坏^[5, 6]。在薄膜撕裂试验的刻划中, 通常将薄膜简化为微厚度板的弯曲模型。

基金项目: 国家自然科学基金(19925211)和中科院“百人计划”资助

作者简介: 杜 莹(1979.10), 女, 中国科学院力学研究所固体力学硕士研究生

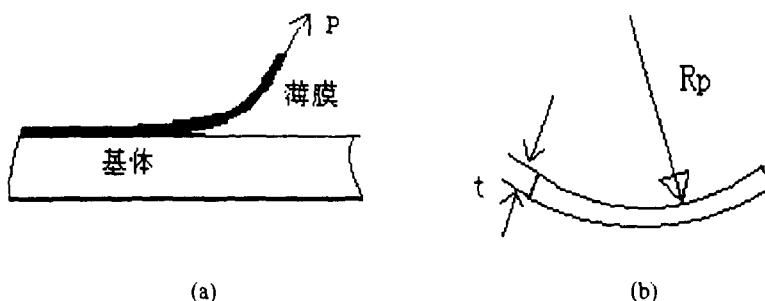


图 1 薄膜的撕裂破坏及残余曲率

文献[6]给出了如果薄膜材料的弹塑性应力应变曲线可由幂硬化关系

$$\sigma = \begin{cases} E\epsilon, & \text{if } \sigma \leq \sigma_0 \\ \sigma_0 (\epsilon / \epsilon_0)^N, & \text{if } \sigma \geq \sigma_0 \end{cases} \quad (1)$$

刻划，则在平面应变时的弯矩/曲率关系为[7]

$$\text{弹性弯曲: } \frac{M}{M_0} = \frac{2\kappa}{3\kappa_e} \quad (2)$$

$$\text{弹塑性弯曲: } \frac{M}{M_0} = \left\{ \frac{2}{3} - \frac{2}{N+2} \gamma \right\} \frac{1}{(\kappa / \kappa_e)^2} + \frac{2}{N+2} \gamma \left(\frac{\kappa}{\kappa_e} \right)^N \quad (3)$$

$$\text{其中 } \gamma = 2 \sqrt{\frac{1}{3} (1 - \nu + \nu^2)}^{1-N} (1 - \nu)^N,$$

$$\text{卸载: } \frac{M}{M_0} = \frac{2}{3} \frac{\kappa - \kappa_0}{\kappa_e} \quad (4)$$

其中 $(\sigma_0, N, M_0, \kappa_e, \kappa_0, E, \nu)$ 分别为屈服应力、幂硬化指数、理想弹塑性极限弯矩、弹性极限曲率、残余曲率、杨氏模量和泊松比。弯矩/曲率关系如图 2 所示。

3 材料参数反分析方法

材料参数的反分析是根据上节给出的 $M - \kappa$ 关系，从中反解求出基本材料参数，如屈服应力 σ_0 （有时记为 σ_y ）、杨氏模量 E 和幂强化指数 N 之间的关系。知道了材料材料的 σ_y 、 E 和 N 三个参数，就可以绘制出该材料的 $\sigma - \epsilon$ 曲线。假设薄膜在脱胶时的最大弯矩和最大曲率为 (M_B, κ_B) ，则由上节的关系可得反分析基本方程：

$$\left(\frac{2}{3} - \frac{2\gamma}{N+2} \right) \frac{\kappa_e^3}{\kappa_B^2} + \frac{2\gamma}{N+2} \frac{\kappa_B^N}{\kappa_e^{N-1}} - \frac{2}{3} (\kappa_B - \kappa_0) = 0 \quad (5)$$

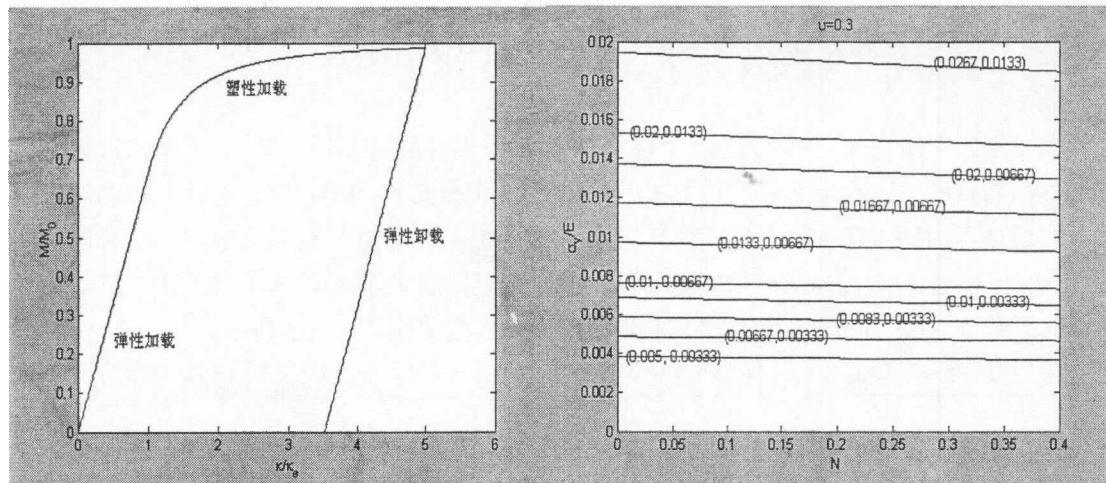


图 2 加卸载弯矩/曲率关系

图 3 可能的材料参数取值区间

$$\left(\frac{2}{3} - \frac{2\gamma}{N+2} \right) \frac{y^3}{\kappa_B^2} + \frac{2\gamma}{N+2} \overline{\kappa}_B^N y^{1-N} - \frac{2}{3} (\overline{\kappa}_B - \overline{\kappa}_0) = 0 \quad (6)$$

其中 $\kappa_e = y/t$, $y = [2(1-v^2)/\sqrt{1-v+v^2}] \sigma_y/E$, $\overline{\kappa}_B = t\kappa_B$, $\overline{\kappa}_0 = t\kappa_0$ 。参数 $\overline{\kappa}_B = t\kappa_B$, $\overline{\kappa}_0 = t\kappa_0$ 是很容易通过实验测量的, 所以在由 (6) 式反推 $\sigma_y/E - N$ 关系时, 取定 $\overline{\kappa}_B = t\kappa_B$, $\overline{\kappa}_0 = t\kappa_0$ 为一系列典型的值。另外, 由于泊松比对本文最终要得到的 $\sigma - \varepsilon$ 曲线影响不大, 这里也给定某个特殊的泊松比 0.3。

将 (6) 式看作含参数 N 、关于 y 的 3 次非线性方程。由于方程是非线性的, 将很难得到 y 的解析解, 只能通过迭代法给出 N 取某些值时 y 的近似解。这里简单介绍解非线性方程用到的牛顿迭代法, 设

$$f(y) = \left(\frac{2}{3} - \frac{2\gamma}{N+2} \right) \frac{y^3}{\kappa_B^2} + \frac{2\gamma}{N+2} \overline{\kappa}_B^N y^{1-N} - \frac{2}{3} (\overline{\kappa}_B - \overline{\kappa}_0) \quad (7)$$

$$df(y) = 3 \left(\frac{2}{3} - \frac{2\gamma}{N+2} \right) \frac{y^2}{\kappa_B^2} + \frac{2\gamma}{N+2} \overline{\kappa}_B^N (1-N) y^{-N} \quad (8)$$

其中 df 表示函数求导数。给定某个迭代初值 $y_0 = const$,

$$dy_0 = f(y_0) / df(y_0), \quad y_1 = y_0 - dy_0, \quad dy_1 = f(y_1) / df(y_1), \quad y_2 = y_1 - dy_1, \quad \dots \quad (9)$$

直到相邻两个迭代值的差小于某个足够小的数时, 认为此时的迭代值 y_k 就是方程 (6) 的近似解。一般材料的幂强化系数 N 不超过 0.4, 所以在 $[0, 0.4]$ 中取一系列 N 值, 得到点 $(N, \sigma_y/E)$ 连接成曲线, 如图 3 所示。

4 由铝合金薄膜残余曲率反推其应力应变曲线

对于一般形如图 1 的破坏后薄膜(或者薄板), 可以测量出残余曲率半径 R_p 和薄膜厚度 t 。根据前面两节介绍的薄膜脱胶的弹塑性弯曲模型可获得残余曲率。由于薄膜的破坏过程并不知道, 无法直接测量卸载点的曲率 κ_B 。根据文献[2]对铝合金薄膜撕裂实验, 测量给出 $\overline{\kappa}_B / \overline{\kappa}_0 \approx 1.5$, 薄膜厚度及测量出的参余曲率半径分别为 $t = 0.1mm$, $R_p = 77mm$ 则有

$$\overline{\kappa_0} = \frac{t}{R_p} = 1.3 * 10^{-3}, \quad \overline{\kappa_B} \approx 1.948 * 10^{-3} \quad (10)$$

由前面各式联立求解可给出对应铝合金薄膜的参数曲线 $\sigma_y/E - N$ 关系, 如图 4 所示。常规的铝合金材料的屈服应变(屈服应力比杨氏模量)为 $1.2 * 10^{-3} \sim 4 * 10^{-3}$ 。根据文献[2]的实验, 对应材料的屈服应变值约为 $1.43 * 10^{-3}$ 。这样可由图 4 获得幂硬化指数 N 值, 图中交点 A 对应的 N 值即为该材料的幂强化系数, 约为 0.26。另外由铝合金材料的杨氏模量值 $E \approx 70 GPa$ 可获得屈服强度 $\sigma_y = 1.43 * 10^{-3} E \approx 100 MPa$, 知道了材料的参数 σ_y 、 E 和 N , 就可以画出材料的应力一应变曲线, 如图 5 所示。

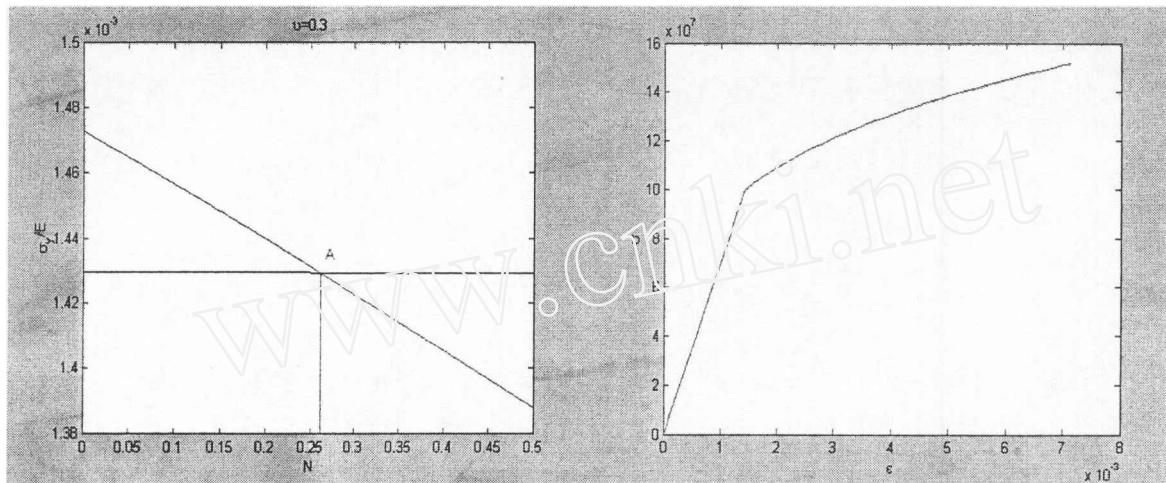


图 4 对于铝合金材料薄膜确定实际应取的参数值

图 5 由撕裂破坏残余曲率确定的应力应变曲线

5 结论和讨论

很多薄膜或者薄板的破坏过程可以用微梁的弹塑性弯曲模型来模拟, 从弹塑性弯曲模型得出的基本关系式进而反推出材料参数 σ_y 、 E 和 N 之间的关系, 这样由材料的 σ_y 、 E 和 N 参数, 得到材料在微尺度的 $\sigma - \varepsilon$ 曲线。

本文假设材料屈服后服从幂规律强化规则, 这只是对实际情况的简单近似处理。本文是在预知 σ_y/E 的情况下估计 N , 也可以在知道 N 情况下估计 σ_y/E 的值。另外, 由于测量的试样是破坏了的, 无法知道破坏过程的细节, 用微梁弯曲的弹塑性模型模拟破坏过也是十分粗略的近似计算, 可能会产生一定的误差。

参考文献

- [1] Kim K S, Aravas N, Int. J. Solids Structures, 1988, 24: 417~435.
- [2] Yang Q D, Thouless M D, Ward S M, J. Mech. Phys. Solids, 1999, 47: 1337~1353.
- [3] Kim J, Kim K S, Kim Y H, J. Adhesion Science and Tech., 1989, 3: 175~187.
- [4] Thouless M D, Kafkalidis M S, Ward S M, Scripta Mater., 1997, 37: 1081~1087.
- [5] Wei Y, Hutchinson J W, Int. J. Fracture, 1998, 93: 315~333.
- [6] Wei Y, Int. J. Fracture, 2002, 113: 233~252.
- [7] Wei Y, Hutchinson J W, Comprehensive Structural Integrity, 2003, in press.