

# 薄膜/基体界面的撕裂试验的混合型模型

张东波 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 100190)

**摘要** 撕裂试验作为一种简单而有效的实验方法在界面工程中有广泛的应用。本文采用有限元法对薄膜/基体界面的撕裂进行数值模拟, 对多角度撕裂的界面破坏形式进行了系统的研究, 得到了稳态撕裂力及相角与撕裂角度之间的关系。

**关键词:** 撕裂试验、稳态撕裂力、相角

## 一、引言

早在 1953 年, Spies<sup>[1]</sup>首次对 90 度角撕裂试验(如图 1 所示)进行分析, 撕裂试验也由于其简单易操作至今仍在许多领域都有广泛的应用。早期对于撕裂试验的研究多局限于弹性撕裂, 即将薄膜和基体都作为弹性材料来处理。为了预测由于塑性耗散引起能量释放率(撕裂力)的增大, Kim 及其合作者<sup>[2]</sup>提出并采用了薄膜的弯曲模型对韧性薄膜撕裂中的塑性耗散进行预测。Wei 和 Hutchinson<sup>[3]</sup>在分析弹塑性薄膜的撕裂问题时, 采用了一种不同于 Kim 的弯曲模型的方法, 除已脱胶部分之外, 薄膜的脱胶过程完全由平面应变弹塑性有限元方法模拟, 在分析过程中采用粘聚力模型来刻画韧性薄膜沿基体界面被撕裂或脱胶过程, 所得结果无论是在定性还是定量上均与 Kim 的薄膜弯曲模型结果有很大区别。

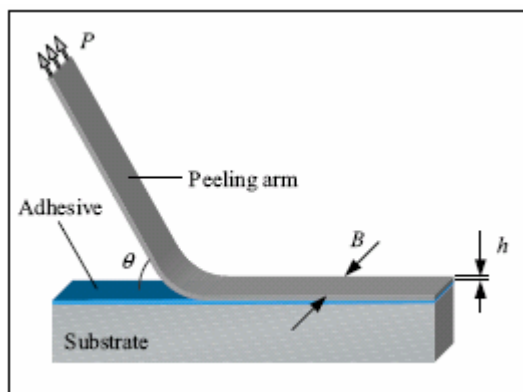


图1 撕裂试验示意图

鉴于目前几种关于韧性薄膜撕裂模型对结果预测的不一致, 几位学者<sup>[4]</sup>联名提出开展关于薄膜撕裂实验刻画模型有效性检验的国际合作。在声明中指出无论采用何种方法, 都须采用粘聚力模型来刻画界面断裂过程。

## 二、基本模型

薄膜与基体之间的界面采用粘聚力(cohesive)模型进行模拟, 薄膜和基体选取幂硬化形式的本构关系。材料的参数选取选下:

薄膜:  $\sigma_{Y1}, n_1, \nu_1, E_1, t$ ;

基底:  $\sigma_{Y2}, n_2, \nu_2, E_2$ ;

界面:  $\hat{\sigma}, \delta_n^c, \hat{\tau}, \delta_t^c$ ;

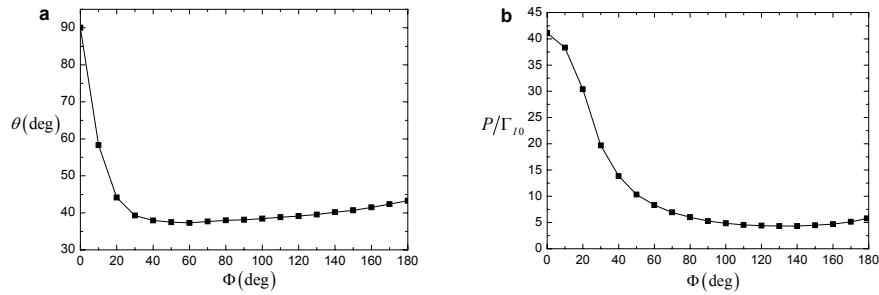
撕裂力、界面裂纹长度及撕裂角度:  $P, \Delta a, \Phi$ 。

无量纲函数:

$$\frac{P}{\Gamma_{I0}} = F\left(\frac{\delta_n^c}{t}, \frac{\delta_t^c}{t}, \frac{\hat{\sigma}}{\sigma_{Y1}}, \frac{\hat{\tau}}{\sigma_{Y1}}, \frac{\sigma_{Y1}}{E_1}, \frac{\sigma_{Y2}}{\sigma_{Y1}}, \frac{E_2}{E_1}, n_1, n_2, \nu_1, \nu_2, \Phi\right); \quad (1)$$

$$\frac{\Delta a}{t} = F\left(\frac{\delta_n^c}{t}, \frac{\delta_t^c}{t}, \frac{\hat{\sigma}}{\sigma_{Y1}}, \frac{\hat{\tau}}{\sigma_{Y1}}, \frac{\sigma_{Y1}}{E_1}, \frac{\sigma_{Y2}}{\sigma_{Y1}}, \frac{E_2}{E_1}, n_1, n_2, \nu_1, \nu_2, \Phi\right). \quad (2)$$

本文中参数选取如下： $E/\sigma_Y = 500$ ， $E_2/E_1 = 6$ ， $\nu_1 = \nu_2 = 0.3$ ， $n_1 = n_2 = 0.1$ ， $\hat{\sigma} = \hat{\tau} = \sigma_{Y1}$ ， $\delta_n^c = \delta_t^c = 0.1t$ ，稳态撕裂力及相角随撕裂角度的变化如图 2 所示。



(a) 相角  $\theta$  vs 撕裂角  $\Phi$ ； (b) 无量纲稳态撕裂力  $P/\Gamma_{I0}$  vs 撕裂角  $\Phi$

图2. 撕裂角对相角和稳态撕裂力的影响.

### 三、结论

对薄膜/基体界面的撕裂试验进行了数值分析，得到了稳态撕裂力和界面层裂的相角随之撕裂角度的变化关系，随着撕裂角度的增加，稳态撕裂力和相角都呈先下降后上升的趋势。

### 参 考 文 献

- 1 Spies GJ, The peeling test on redux-bonded joints. Journal of Aircraft Engineering, 1953, 25: 64-70
- 2 Kim KS, Aravas N, Elasto-plastic analysis of the peel test. Int J Solid Struct, 1998, 24: 417-435
- 3 Wei Y, Hutchinson JW. Interface strength, work of adhesion and plasticity in the peel test. Int J Fracture, 1998, 93: 315-333
- 4 Cotterell B, Williams G, Hutchinson JW, et al. Annoucement of a round robin on the analysis of the peel test. Int J Fracture, 2002, 114: L9-L13