

薄膜/基体界面的撕裂实验研究

赵海峰 魏悦广

(中国科学院力学研究所, 100871)

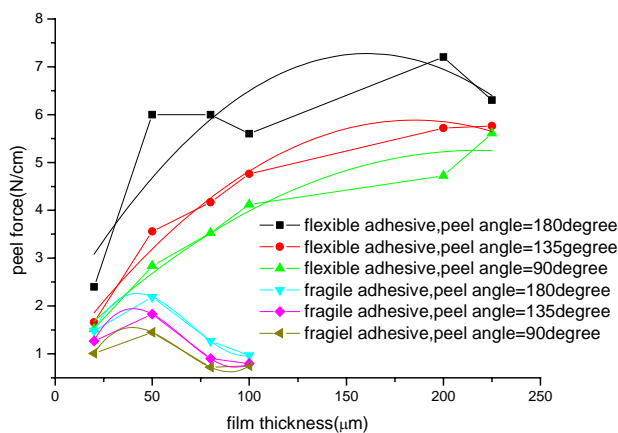
摘要 新型材料大都离不开薄膜。薄膜材料广泛应用在表面工程、界面工程、生物材料以及微纳米机电系统 (MEMS) 等领域。研究和评估薄膜/基体界面的力学性能 - 特别是在微尺度下, 具有重要的科学研究价值和应用价值。划痕和撕裂是微/纳米尺度薄膜力学性能测量的两种主要方法, 而撕裂实验相对简单可行, 理论分析模型也相对方便建立。本文系统研究了 Al/epoxy/Al₂O₃ 体系和 Cu/Al₂O₃ 体系的撕裂实验, 开发出一套微尺度薄膜撕裂的实验设备和方法, 得出薄膜厚度、撕裂角度、epoxy 层厚度等因素对撕裂力的影响。应用微梁弯曲模型和粘聚力 (EPZ) 模型, 本文从总撕裂力中分离薄膜塑性变形耗散能量, 得出了所考察薄膜/基体界面的粘结韧性等力学性能。

样品制备与实验设备: Al/epoxy/Al₂O₃ 体系制备时将样品固定在模具中, epoxy 在适当的压力下常温固化。在 epoxy 中掺入微小的直径均匀的玻璃小球以控制 epoxy 层的厚度。本文考虑了两种固化条件下界面的粘结韧性, 分别为 epoxy/polyimide=1:1 和 epoxy/polyimide=1:1.5。Cu/Al₂O₃ 体系的制备采用两道工序。先在 Al₂O₃ 基体上真空多弧镀膜, 膜厚 500nm; 然后采用酸性溶液电镀, 最终膜厚分别控制为 2、5、10 和 15 μm。实验设备是在一台多功能材料试验机的基础上开发的。自行设计夹具, 实现微米尺度薄膜的撕裂, 并保证撕裂过程中撕裂角度恒定。一台 Questar 光学望远测量系统用于实时观察撕裂过程中裂纹的扩展情况并记录, 实验后对所记录的图片进行图像处理和分析得到一些重要的现象和参数。

基本实验结果: 为保证实验结果的可比性, 每次撕裂实验中裂纹扩展达到稳定时的扩展速度 v_{crack} 保持为 2mm/min, 即

$$v_{crack} = v_{crosshead} / (1 - \cos \theta) = 2 \text{ mm / min}$$

其中 θ 是撕裂角度。通过一系列实验, 本文得出薄膜厚度、撕裂角度、epoxy 层厚度等因素对撕裂力的影响。例如下图说明 Al/epoxy/Al₂O₃ 体系两种固化比例下, 撕裂力随薄膜厚度的关系。



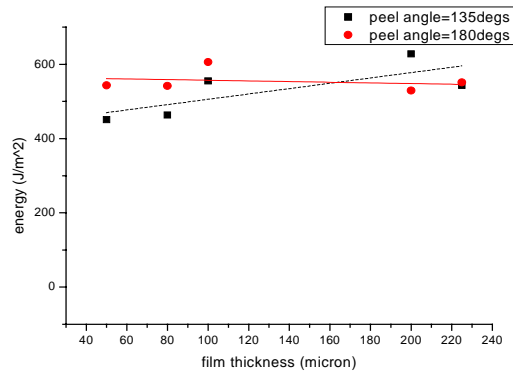
模型分析：应用微梁弯曲模型和粘聚力（EPZ）模型，本文从总撕裂力 P 中分离薄膜塑性变形耗散能量 Γ^P ，得出了所考察薄膜/基体界面的粘结韧性 Γ_0 等力学性能。例如采用改进的微梁弯曲模型，在考虑微梁完全卸载后反向弯曲的情况下，仍然可以得到解析的结果：

$$\begin{cases} M_B / M_0 = \frac{2}{3}(\kappa_B - \kappa_0) / \kappa_e \\ \kappa_0 = \kappa_B + \left(\frac{3}{N+2}\gamma - 1\right) \frac{\kappa_e^3}{\kappa_B^2} - \frac{3}{N+2}\gamma \frac{\kappa_B^N}{\kappa_e^{N-1}} \end{cases}$$

$$\Gamma^P = \frac{1}{2}M_e\kappa_e - \frac{1}{2}M_B(\kappa_B - \kappa_0) + \left(\frac{2}{3} - \frac{2}{N+2}\gamma\right)M_0\left(\kappa_e - \frac{\kappa_B^2}{\kappa_e}\right) + \frac{2\gamma}{(N+1)(N+2)}M_0\left(\frac{\kappa_B^{N+1}}{\kappa_e^N} - \kappa_e\right) + \frac{1}{2}B\kappa_0^2w_0$$

$$\Gamma_0 = P - \Gamma^P$$

对于 Al/epoxy/Al₂O₃ 体系的实验结果，得出如下的粘结韧性 Γ_0 随薄膜厚度的变化关系。



关键词：薄膜；撕裂实验；界面粘结韧性；微梁弯曲模型；粘聚力模型