

含曲线型膜基界面的高分子基金属薄膜延展性能*

许 巍 杨金水 王 飞 卢天健**

(西安交通大学强度与振动教育部重点实验室,西安,710049)

摘 要 柔性电子系统中联接电子元件的互联金属导线多以附着在高分子基底上的薄膜形式存在.该文首先实验研究了在含糙化表面的聚酰亚胺基底上附着 Cu 膜的延展性能,结果显示,提高基底表面粗糙度能够显著降低 Cu 膜在拉伸条件下的裂纹密度.然后采用有限元方法模拟计算了基底表面糙化处理后,金属薄膜在拉伸状态下的应力分布,结果表明曲线型界面可显著改变金属薄膜在拉伸状态下的表面正应力分布,从而达到抑制金属表面裂纹的扩展以及降低裂纹密度的作用.最后,采用内聚力模型模拟膜基界面,研究了在拉伸条件下曲线型界面的损伤分布情况.结果表明,相对于平直界面,曲线型界面不易发生界面破坏.

关键词 柔性电子,金属薄膜,延展性,界面糙化,内聚力模型

0 引言

建立在柔性和可延性基板之上的新兴电子技术通称为柔性电子技术(Flexible electronics technology).由于其自身的柔性和延展性,柔性电子产品具有广阔的应用前景^[1].柔性电子系统中联接电子元件的互联金属导线多以附着在高分子基底上的薄膜形式存在,此类膜基体系在服役过程中需要承受相对较大的变形.因此,如何改进高分子基金属薄膜的延展性能成为现今制约柔性电子技术发展的关键问题之一.研究表明,高分子基金属薄膜在拉伸过程中发生的薄膜断裂及界面破坏是制约其延展性能的重要因素^[2,3],故降低这两种破坏形式发生的可能性对提升该膜基体系的延展性能具有重要的意义.

以往的实验研究发现通过预先对高分子基底进行喷砂^[4]、表面酸碱腐蚀^[4]、离子轰击^[5-7]和离子注入^[8]等表面处理,然后再沉积金属薄膜,可以提高基底的粗糙程度,有效的增强金属薄膜和基底的机械咬合和结合面积,从而达到改善薄膜基底间的结合性能的目的.其中,离子处理方法可以有效地增加基底的表面活性,从而增强膜基间的结合键^[5-8].但是,上述研究侧重于研究基底糙化对膜基结合强度的影响,对于在拉伸条件下,含糙化(曲线型)界面的高

分子基金属薄膜如何抵抗薄膜断裂及界面破坏这一关键问题,却缺乏深入研究.此外,上述表面处理方法均有一定的局限性,如离子方法会导致高分子基底的热降解,从而降低其使用寿命;在酸碱腐蚀处理中,被糙化区域和酸碱溶液的浓度均不好控制,酸碱溶液的强腐蚀性具有一定危险.相比而言,喷砂工艺在提高基底表面粗糙度上具有一定优势.

本文实验研究了在喷砂糙化处理的聚酰亚胺基底上附着 Cu 膜的延展性能,获得 Cu 膜在拉伸条件下的裂纹密度和基底表面粗糙度之间的关系;为了解释该实验结果,采用有限元方法计算了具有糙化膜基界面的高分子基金属薄膜沿拉伸方向的表面正应力分布;最后,采用双线性内聚力模型模拟膜基界面,研究了曲线型界面在拉伸条件下的损伤分布及界面裂纹扩展情况.本文的研究结果将为曲线型界面在分子基金属薄膜中的应用提供理论依据.

1 实验

1.1 实验过程

首先对 Kapton[®] 聚酰亚胺(PI)基底(厚度 125 μm)的表面进行喷砂处理.通过调节喷枪内压缩空气的气压、喷射距离、角度及其时间可获得不同形态的表面形貌.在气压 0.4 MPa、喷射距离 400 mm、

* 国家基础研究计划项目(2006CB601202),高等学校学科创新引智计划项目(B06024)和国家自然科学基金项目(10872157, 10825210)资助.

2009-09-22 收到第 1 稿,2010-05-03 收到修改稿.

** 通讯作者. Tel:029-82665600, E-mail:tjlu@mail.xjtu.edu.cn.

喷射角度 45° 的条件下,通过改变喷射时间获得不同的基底表面形态.利用 VHX-600 超景深数码显微镜观测喷砂后基底表面的形貌,图 1(a) 给出了其三维分析照片.采用 Surtronic25 表面粗糙度仪测量基底的表面粗糙度.表面粗糙度定义为工件表面上微小峰谷的高低程度和间距状况,也称微观不平度.在取样长度 L 内,沿测量方向的轮廓线上的点与基准线之间距离绝对值的算术平均值^[9]即为表面粗糙度 R :

$$R = \frac{1}{L} \int_0^L |f(x)| dx \quad (1)$$

其中 $f(x)$ 代表轮廓函数.

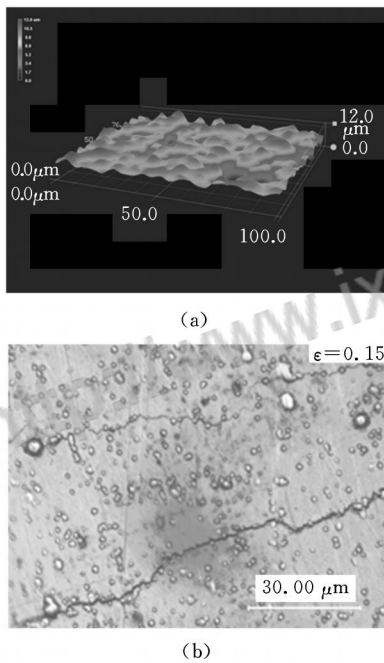


图 1 (a) 聚酰亚胺基底喷砂后的表面形貌显微镜分析照片; (b) 拉伸应变为 0.15 时, 喷砂聚酰亚胺基 Cu 膜的表面裂纹

Fig. 1 (a) Surface morphology of polyimide substrate after sandblasting; (b) Formation of surface cracks in polyimide-supported Cu film at tensile strain of 0.15

采用 FJL520 型高真空磁控溅射设备在喷砂聚酰亚胺基底上沉积 Cu 膜.主要制备参数为:背底真空度 2.0×10^{-4} Pa、溅射气压约 0.4 Pa、溅射功率 180 W.溅射完成后在炉腔内 200 °C 退火 30 min.对溅射后的 Cu 膜截面进行扫描电镜 (SEM) 观察,测量其厚度约为 $3.1 \pm 0.1 \mu\text{m}$.

采用 Instron5848 小载荷试验机对 Cu/PI 膜基

体系在室温下进行单轴拉伸实验,拉伸应变速率为 $1.0 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.通过该加载设备附带的高精度激光探测仪,自动记录载荷及位移数据.采用 VHX-600 超景深数码显微镜观察 Cu 膜在不同应变时的表面裂纹,读取裂纹长度和测试面积的大小.在设定的测试面积 $2500 \pm 200 \mu\text{m}^2$ 范围内,在不同应变下对每个拉伸试样进行多次裂纹观察统计,得出平均裂纹密度.图 1(b) 给出了基底喷砂的 Cu 膜在拉伸应变为 15% 时的显微镜照片,可清晰的看到裂纹在薄膜表面形成,大致为平行分布,其扩展方向与拉伸方向垂直.

1.2 实验结果

本文将裂纹密度 (crack density) 定义为单位面积内的表观裂纹长度.图 2 给出了薄膜表观平均裂纹密度 (ρ) 与基底粗糙度 (R) 在三种拉伸应变条件下的关系曲线.由于未喷砂的 PI 基底表面本身并不是绝对光滑,其测量的粗糙度值为 $0.49 \mu\text{m}$.相对于此未喷砂情况,喷砂后 Cu 膜的表观平均裂纹密度随着基底粗糙度的增加而逐渐降低,也就是说喷砂基底能够显著抑制在拉伸条件下 Cu 膜表观裂纹的扩展.

尽管 Cu 的表观裂纹密度随着喷砂基底粗糙度的增大有降低的趋势,这种降低的趋势逐步放缓,当基底达到一定的粗糙程度时,其对 Cu 膜表观裂纹扩展的抑制效果不再明显 (图 2).

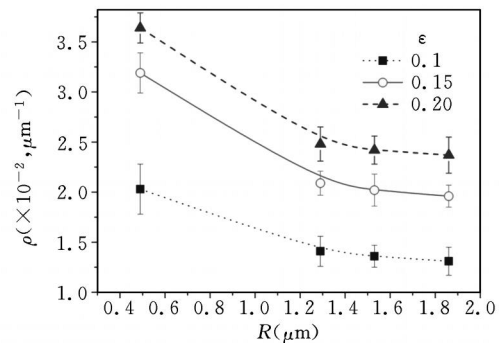


图 2 不同拉伸应变条件下,喷砂聚酰亚胺基 Cu 膜的表面裂纹密度与基底粗糙度的关系

Fig. 2 Crack density of polyimide-supported Cu film plotted as a function of substrate surface roughness for selected tensile strains

2 糙化界面的薄膜表面应力

聚酰亚胺基底经喷砂处理后,其表面从平直形

式转变成曲线形式,导致 Cu 膜在拉伸条件下的裂纹密度降低,而薄膜表面裂纹的形成与其表面的拉伸应力分布密切相关. 本节利用商业有限元软件 ABAQUS,计算具有糙化界面和不同表面形貌的薄膜的拉伸应力分布.

2.1 计算模型

为了消除界面滑移和脱粘的影响,首先假定金属薄膜与高分子基底完美结合,膜基界面的曲线满足如下正弦曲线形式(图 3):

$$y = a \sin^2 x \quad (2)$$

其中 a 是正弦曲线的振幅, λ 为该曲线的波长, x 的正方向为图 3 中的水平向右方向, y 的正方向与 x 轴垂直且向上.

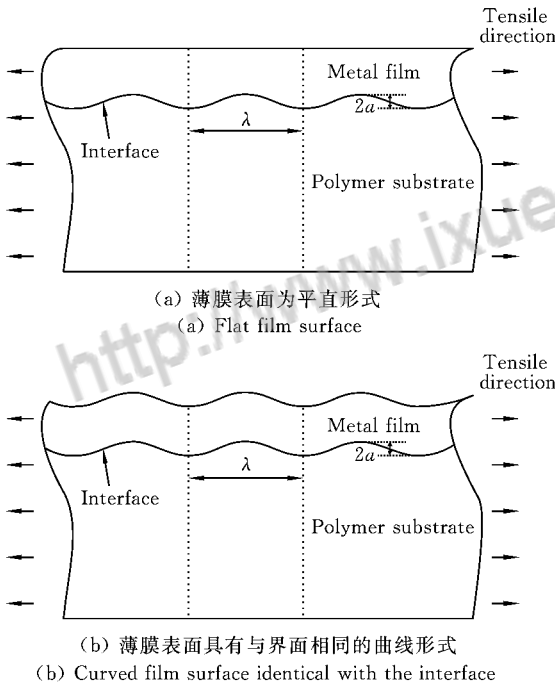


图 3 具有正弦曲线形式糙化界面的高分子基金属薄膜模型

Fig. 3 Polymer-supported metal film with sinusoidal interface

根据工艺参数的不同,在糙化基底上沉积的金属薄膜可能存在两种不同外表面形态,一种是平直型薄膜表面形态;另一种是曲线型表面形态. 图 3 给出了针对这两种形态的模型,其中图 3(b)的薄膜外表面曲线形式与基底表面的曲线形式相同.

为了节约计算资源且不失一般性,选取膜基体系中的两种代表性单元作为计算模型(图 4),薄膜

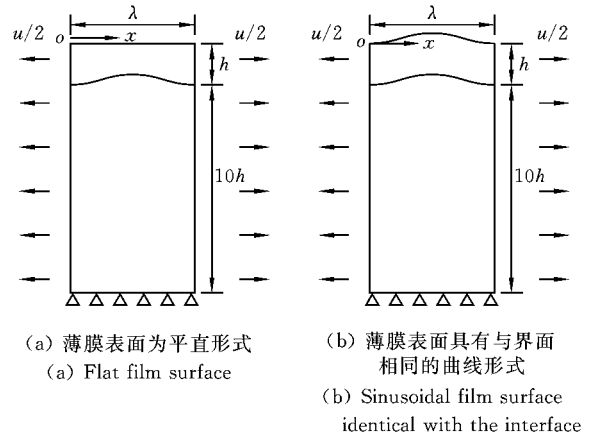


图 4 代表性计算单元

Fig. 4 Representative computational unit

的厚度为 h ,基底的厚度取为 $10h$,薄膜和基底的网格单元采用四节点平面应变单元(CPE4R 单元),单元总数量为 4400. 该模型中的界面曲线具有一个完整波长周期,水平长度为 λ . 令基底下边缘的竖直位移为 0,在基底层右端施加给定位移边界条件,模型的左右边界取为位移边界条件,位移值为 $u/2$. 则在拉伸后,名义应变值为 u/λ .

假设 Cu 膜和高分子基底均满足指数强化模型^[10],即在单轴拉伸状态下,其应力应变关系满足:

$$\sigma = \begin{cases} E \epsilon & \epsilon \leq \epsilon_y \\ \sigma_y \left(\frac{\epsilon - \epsilon_y}{\epsilon_f - \epsilon_y} \right)^N & \epsilon > \epsilon_y \end{cases} \quad (3)$$

其中 E 为杨氏模量, N 是强化指数, σ_y 代表屈服强度. Cu 膜和高分子基底(PI基)的材料参数见表 1.

表 1 Cu/PI 膜基体系材料参数^[10]

Table 1 Material parameters of Cu/PI system^[10]

材料	N	σ_y (MPa)	E (GPa)	泊松比
Cu 膜	0.02	100	100	0.34
PI 基	0.5	50	8	0.35

2.2 计算结果

在拉伸名义应变为 10% 的条件下,图 5(a) 展现了薄膜表面的拉伸正应力分布,其中 $a/\lambda = 0$ 对应平直界面. 可以看出,在平直表面的情况下(图 4(a)),各种振幅波长比(以下简称振波比)对薄膜表面拉伸正应力影响的区别不是很明显. 相比而言,薄膜表面为曲线时(图 4(b)),各种振波比条件下的薄膜表面拉伸正应力分布具有明显的差异性.

图 5(b) 给出了这种分布的差异性. 从图中可以看到, 相对于平界面情况, 糙化界面条件下的波谷处表面峰值应力值略为偏大, 而在波谷以外的位置, 应力值明显较小, 随着振波比的增大, 这种偏小的趋势更加明显.

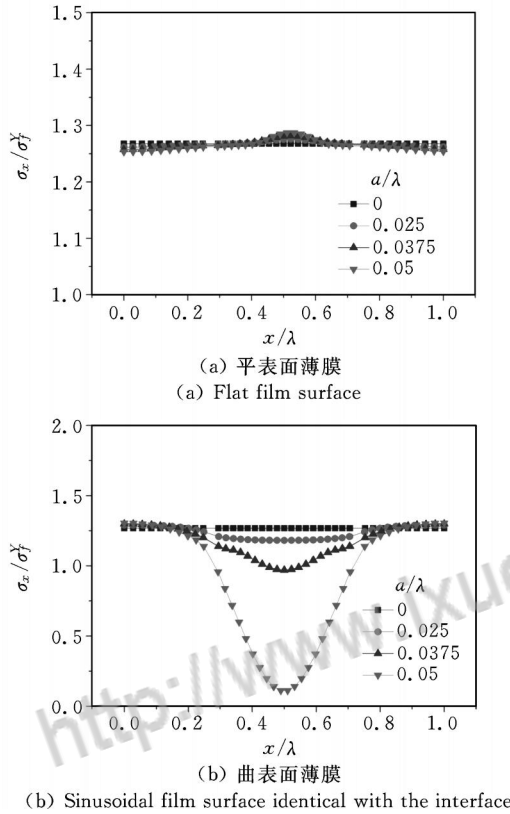


图 5 拉伸应变为 10% 时, 金属薄膜表面在拉伸方向的应力分布

Fig. 5 Distribution of normal stress on film surface when the tensile strain is 10%

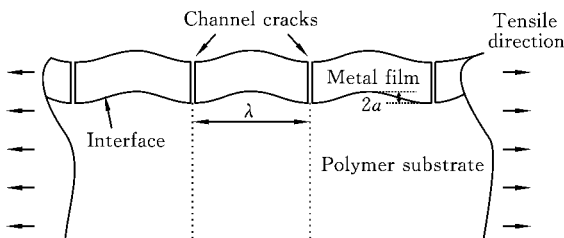


图 6 在拉伸过程中, 贯穿裂纹易在薄膜的波谷表面处形成并扩展至膜基界面

Fig. 6 Upon stretching, channel cracks tend to form on the valley of film surface and extend to film/ substrate interface

3 曲线型界面的破坏

图 5(b) 的结果表明, 相对于平直表面, 采用曲线型界面能够改变金属薄膜表面的应力分布, 从而降低表面裂纹扩展的可能性. 此外, 波谷处的薄膜表面应力值较大, 在此形成裂纹并扩展的可能性也较大. 研究表明^[3]: 高分子基金属薄膜在拉伸过程中易形成贯穿薄膜厚度方向的裂纹, 且裂纹扩展方向与拉伸方向垂直 (如图 6(a) 所示).

基底承受外界作用力, 并通过膜基界面将变形传递给薄膜, 此过程通常伴随有膜基界面的损伤和断裂, 界面破坏成为该膜基体系的另一种重要失效形式. 本节采用内聚力单元^[11] (cohesive zone element) 模拟膜基界面, 计算在拉伸后该界面的损伤分布情况, 以研究曲线型界面形式对抑制自身破坏的作用.

3.1 内聚力模型

采用的内聚力单元满足双线性内聚力模型 (bilinear cohesive zone model), 图 7 给出了其内聚应力 (traction) 和开裂相对位移 (separation) 的关系曲线 (T-S 关系). 其中, 图 7(a) 和图 7(b) 分别给出拉伸方向和剪切方向的 T-S 关系曲线. 在图 7 中, T 表示内聚应力值, 上标 n 和 s 分别代表拉伸和剪切方向的对应值 (下同), m 和 m 分别是拉伸方向和剪切方向的内聚强度, u_m 和 u_c 分别表示最大分离量和临界分离量.

根据图 7 所示的双线性内聚力模型, 拉伸和剪切方向的分离能可分别表达为:

$$\begin{aligned}
 n &= \int_0^{u_m^n} T^n du^n = \frac{1}{2} T_m^n u_m^n \\
 s &= \int_0^{u_m^s} T^s du^s = \frac{1}{2} T_m^s u_m^s
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

当界面的分离位移达到一定门槛值时, 即满足一定的损伤判据时, 界面层将发生损伤. 本文采用平面问题下的最大应力判据:

$$\max_m \langle T^m \rangle, T_m^s = 1
 \tag{5}$$

式中 $\langle \ \ \rangle$ 为 Macaulay 括号, 数学关系为 $\langle x \rangle = (|x| + x)/2$, 其物理意义表示纯压缩变形或者纯压缩应力不产生任何损伤.

本文采用内聚力模型中常用的标量型损伤变量 $D^{[12]}$, 即通过引入总分离量 (其中: $\ =$

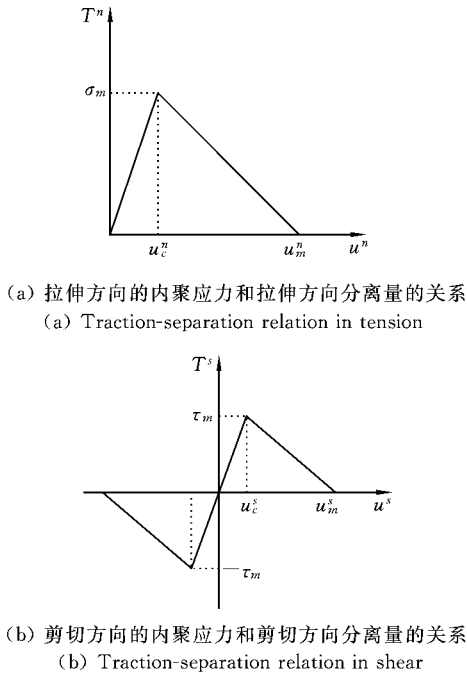


图 7 双线性内聚力模型的 $T-S$ 关系曲线

Fig. 7 Typical bilinear traction-separation law of cohesive zone model

$\langle u^n \rangle^2 + (u^s)^2$), 来表征界面单元进入退化阶段后的损伤程度^[11,12]:

$$D = \frac{f(\max - c)}{\max(f - c)} \quad (6)$$

当损伤发生后, D 值从 0 单调递增直至 1; 当 D 值达到 1 时, 界面单元发生完全失效并退化. 式(6)中的 \max 代表整个加载历史过程中的最大总分离量, c 和 f 分别表示内聚力单元开始发生损伤和完全失效时的总分离量, 其中 f 由式(7)确定:

$$f = \frac{2}{T_o^{\text{eff}}} \quad (7)$$

式中 T_o^{eff} 为界面在分离过程中释放的总能量, T_o^{eff} 为损伤起始时刻的有效应力值, 在本文中由下式给出:

$$T_o^{\text{eff}} = (T_o^n)^2 + (T_o^s)^2 \quad (8)$$

其中 T_o^n 和 T_o^s 分别表示损伤起始时刻的拉伸和剪切方向的内聚应力值.

为简化起见, 仍然选取图 6 中的代表性单元为计算模型, 如图 8(a) 所示. 边界条件与第 2 节类似, 但位移边界条件只作用在基底部分. 高分子基底和金属薄膜的材料参数采用表 1 数据. 采用单层的四节点内聚力单元(CO H2D4 单元)模拟膜基界面层.

为了研究在不同界面上的损伤分布, 并体现出曲线型界面抵抗破坏的优势, 本节采用弱结合的膜

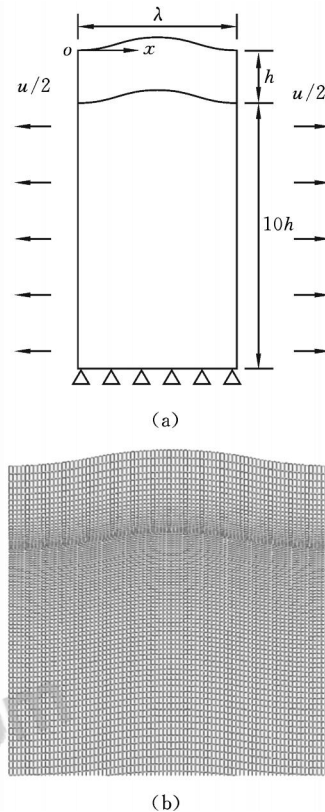


图 8 (a) 考虑界面破坏的代表性计算单元; (b) 网格划分

Fig. 8 (a) Representative computational unit considering interface damage; (b) Finite elements mesh

基界面, 同时假定拉伸和剪切方向的内聚参数相同, 其中界面强度 σ_m 为 50 MPa, 界面分离能 G_c 为 10 J/m². 有限元网格划分如图 8(b) 所示, 界面附近处网格细分, 远离界面处的网格较为稀疏, 以此获得良好的计算精度和较快的收敛时间.

3.2 计算结果

对图 8 所示单元施加给定位移边界条件, 使其名义应变分别为 5%, 10%, 15%. 图 9 给出了在这三种应变条件下的界面损伤分布情况. 由于计算单元的对称性, 该图仅给出了其右半部的损伤分布情况. 从图中可以看出, 相对于平直界面 ($a' = 0$), 曲线型界面的损伤 ($D > 0$) 分布范围明显偏小; 随着应变的增大, 三种曲线型界面情况下 ($a' = 0.025, 0.037, 0.05$) 的损伤分布的差异性逐渐增大, 即曲线型界面抑制损伤的效果愈加显著.

在图 9 数据的基础上, 图 10 更为直观的给出了在各种应变条件下, 损伤区范围随着振幅比的变化曲线. 其中, 损伤区范围用 L_D/a' 定义, 其中 L_D 为发

生损伤的界面在 x 轴上投影的长度. 因此, $L_D/$ 也可以理解为发生损伤的界面长度在整个界面长度中所占比例. 图 10 表明, 随着振波比的增大, 在相同的应变条件下, 损伤区范围减小. 由此可得, 曲线界面相对于平直界面更不容易发生损伤失效. 振波比越大的曲线界面越不容易发生损伤, 且当承受的应变越大时, 曲线界面对损伤的抑制作用更为显著.

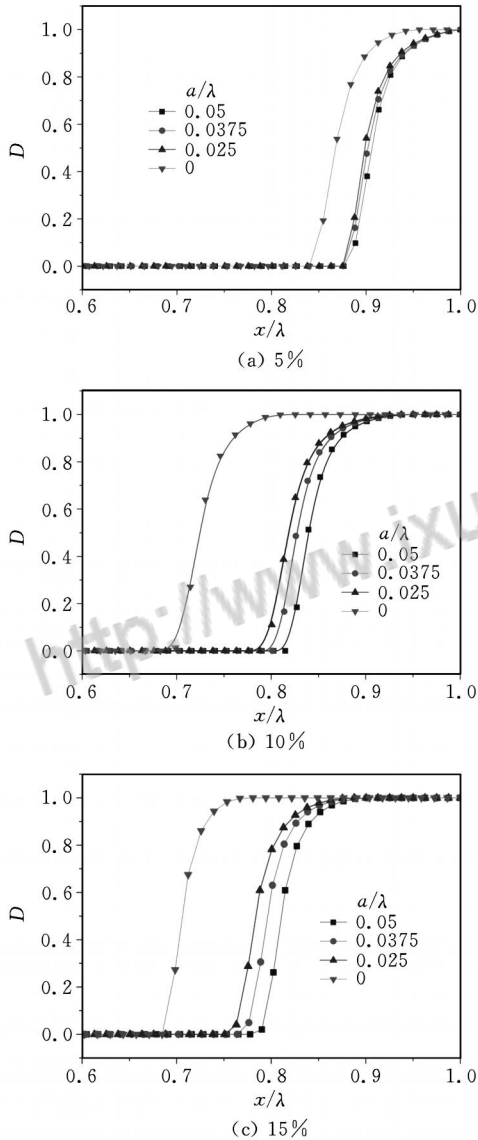
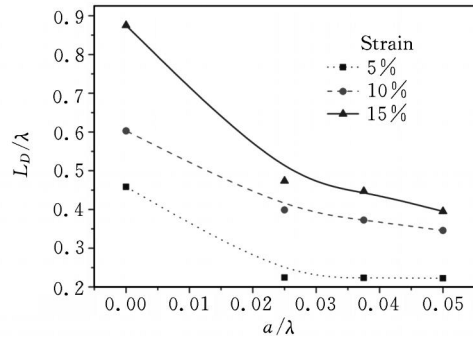


图 9 不同拉伸应变条件下膜基界面的损伤分布
Fig. 9 Distribution of interfacial damage for selected tensile strains

在图 9 所示的损伤区范围内存在损伤变量 $D = 1$ 的区域, 代表内聚力单元完全失效退化情形, 即在该区域形成了界面裂纹. 图 11 比较了在拉伸应变同为 10% 的条件下, 具有平直界面和曲线型界面 ($a/$



10 不同拉伸应变条件下, 振波比对界面损伤范围的影响
Fig. 10 Influence of amplitude/ wavelength ratio on interfacial damage for selected tensile strains

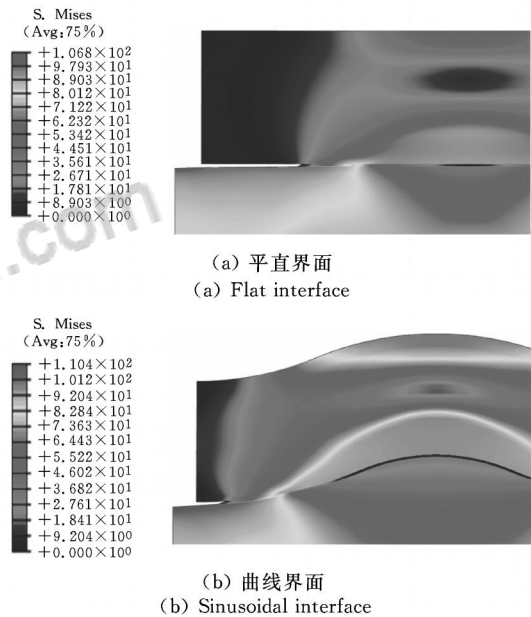


图 11 拉伸应变为 10% 时膜基体系形成的界面裂纹 (云图表示 Mises 应力场)
Fig. 11 Formation of interface crack in film/ substrate system when the tensile strain is 10% (contours represent Mises stress fields)

$= 0.05$) 的膜基体系的界面裂纹长度 (其中云图所表示的为 Mises 应力场). 由于模型的对称性, 该图仅给出了左端界面裂纹. 曲线型界面膜基体系形成的界面裂纹明显小于平面界面膜基体系的界面裂纹. 根据图 9 的计算结果, 图 12 给出了在三种应变条件下, 归一化裂纹长度与振波比的关系曲线. L_c 表示界面裂纹在 x 轴上投影的长度, 因此 $L_c/$ 可以理解为界面裂纹长度在整个界面长度中所占比例. 图 12 所表现出的变化趋势与图 10 类似, 也就是说曲线型界面不但能抑制拉伸过程中界面损伤的发生,

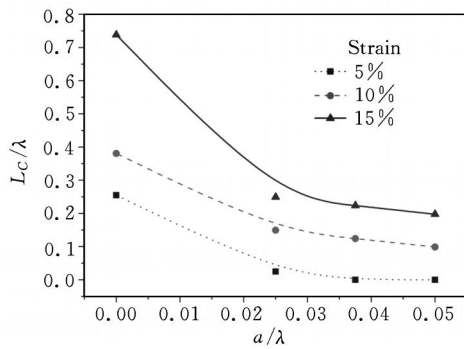


图 12 不同拉伸应变条件下, 振幅比对界面裂纹长度的影响

Fig. 12 Influence of amplitude/wavelength ratio on length of interface crack for selected tensile strains

而且能抑制界面裂纹的扩展. 同样, 当承受的应变越大时, 曲线界面对界面裂纹扩展的抑制作用更为显著.

4 讨论

本文的实验结果表明, 糙化界面对抑制薄膜表观裂纹密度的增长具有明显作用. 产生这种抑制作用的因素主要有二.

首先, 基底表面的糙化(曲线化)导致薄膜沉积形态发生变化, 从而改变了薄膜表面的拉伸应力分布. 已有的关于高分子基金属薄膜的拉伸实验结果表明, 由于高分子基底对薄膜的开裂存在约束效应, 而薄膜的外表面是自由表面, 相对约束较小, 因此往往从薄膜表面起裂^[13,14]. 根据型裂纹的能量释放率理论, 薄膜表面的拉伸应力对薄膜的裂纹扩展具有至关重要的影响^[15]. 界面的曲线附着形式能够显著的降低整个表面的拉伸应力水平, 降低拉伸过程中的表观裂纹密度, 从而最终提高薄膜的延展性能.

图 3(b) 所示的界面附着形式类似于金属弹簧. 相对于金属丝, 金属弹簧有着更高的延展能力和变形恢复能力, 其原因就是改变了拉伸过程中的弹簧的应力分布. 基于这种考虑, Li 等^[16] 计算了在平直基底上沉积具有曲线分布形式的金属薄膜, 发现该方法能提高整个体系的延展性能. 同样, 本文结果表明, 在曲线基底上沉积的金属薄膜也是通过改变在拉伸条件下的表面拉伸应力分布, 最终提高整体的延展性.

其次, 相对于平直界面, 曲线型界面不易发生破

坏, 从而更好的保持对薄膜的约束, 避免局部脱粘导致的薄膜开裂. 曲线型界面的膜基体系在拉伸过程中不易发生损伤的原因主要有: (1) 薄膜界面损伤失效的主因是薄膜基底的相对滑动, 而曲线型界面增加了薄膜和基底间的机械咬合^[2], 使相对滑动变得更加困难; (2) 糙化界面增加了膜基结合的面积, 增强了膜基的结合能力, 界面损伤和界面裂纹扩展相对不易发生. 这里值得一提的是, 如图 10 和图 12 所示, 随着振幅比的增大, 在相同应变条件下, 界面破坏的程度相应减小, 但这种减小的趋势逐渐趋缓, 也就是说应该存在一个最优的振幅比值, 在该比值下, 膜基界面的结合性能最好, 这一点在以往的实验中已经得到了验证^[5,7].

高分子基金属薄膜在柔性电子技术的实际应用中, 不但要承受拉伸形变, 还要承受弯曲、扭转等多种形式的形变, 因此进一步的研究将考虑含曲线界面的高分子基金属薄膜在这些形变下的延展性能. 此外, 本文计算中将金属薄膜简化为宏观金属材料, 而电子工业中常用的金属薄膜多为微纳米量级, 从而具有一定程度的尺度效应, 后续计算将考虑这种尺度效应, 以获取更为精确的结果.

5 结论

在拉伸条件下, 实验研究了糙化界面对抑制聚酰亚胺基 Cu 膜表观裂纹扩展的影响, 发现随着基底粗糙度的增加, Cu 膜表观裂纹密度有逐渐降低的趋势. 将糙化界面简化为正弦曲线形式, 分析了 Cu 膜外表面为平直状和与膜基界面相同的曲线状两种计算模型. 结果表明, 曲线状薄膜的表面拉伸应力分布随着曲线形式的不同呈现出较大差异. 相对于平直界面情况, 含曲线界面的薄膜表面在波谷处具有较大的沿拉伸方向应力, 该应力在远离波谷方向迅速降低. 基底糙化处理可显著改变金属薄膜在拉伸状态下的表面拉伸应力分布, 从而达到抑制金属表面裂纹的扩展及降低裂纹密度的作用.

利用内聚力模型, 进一步考虑了曲线型界面的破坏, 计算了在不同拉伸应变条件下界面的损伤分布和裂纹扩展情况. 结果表明, 相对于平直界面, 曲线型界面的损伤区范围和界面裂纹长度均随振幅比的增大而减小, 也就是说基底表面粗糙程度较高的高分子基底所对应的膜基体系更不容易发生界面破坏.

曲线型界面既有利于减小薄膜表面出现开裂的范围,也有利于减小膜基界面发生破坏的范围.曲线型的界面设计为提升高分子基金属薄膜的延展性提供了崭新的思路.

参考文献

- [1] 许巍, 卢天健. 柔性电子系统及其力学性能[J]. 力学进展, 2008, 38 (2): 137-150. (Xu W, Lu T J. Flexible electronics system and their mechanical properties [J]. Advances in Mechanics, 2008, 38 (2): 137-150. (in Chinese))
- [2] 滕林, 杨邦朝, 崔红玲, 杜晓松. 金属薄膜附着性的改进[J]. 电子元件与材料, 2003, 22 (6): 41-44. (Teng L, Yang B C, Cui H L, Du X S. Improvement of adhesion between metallic films and substrates [J]. Electronic Components & Materials, 2003, 22 (6): 41-44. (in Chinese))
- [3] Xiang Y, Li T, Suo Z, Vlassak J J. High ductility of a metal film adherent on a polymer substrate [J]. Applied Physics Letters, 2005, 87 (16): 161910.
- [4] Jeon B J, Lee S, Lee J K. Adhesion characteristics of copper thin film deposited on PET substrate by electron cyclotron resonance-metal organic chemical vapor deposition [J]. Surface & Coatings Technology, 2008, 202 (9): 1839-1846.
- [5] Lin Y S, Liu H M. Enhanced adhesion of plasma-sputtered copper films on polyimide substrates by oxygen glow discharge for microelectronics [J]. Thin Solid Films, 2008, 516 (8): 1773-1780.
- [6] Kim S H, Na S W, Lee N E, Nam Y W, Kim Y H. Effect of surface roughness on the adhesion properties of Cu/ Cr films on polyimide substrate treated by inductively coupled oxygen plasma [J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 200 (7): 2072-2079.
- [7] Kim S H, Cho S H, Lee N E, Kim H M, Nam Y W, Kim Y H. Adhesion properties of Cu/ Cr films on polyimide substrate treated by dielectric barrier discharge plasma [J]. Surface & Coatings Technology, 2005, 193 (1-3): 101-106.
- [8] Hong J H, Lee Y, Han S, Kim K J. Improvement of adhesion properties for Cu films on the polyimide by plasma source ion implantation [J]. Surface & Coatings Technology, 2006, 201 (1-2): 197-202.
- [9] 俞汉清. 表面粗糙度标准及应用[M]. 北京: 中国计量出版社, 1997. (Yu H Q. Standards and Application of Surface Roughness [M]. Beijing: China Metrology Publishing House, 1997. (in Chinese))
- [10] Li T, Suo Z. Ductility of thin metal films on polymer substrates modulated by interfacial adhesion [J]. International Journal of Solids and Structures, 2007, 44 (6): 1696-1705.
- [11] ABAQUS Standard User's Manual, Version 6.7 [M]. Rhode Island: DS SIMULIA Inc., 2007.
- [12] Balzani C, Wagner W. An interface element for the simulation of delamination in unidirectional fiber-reinforced composite laminates [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2008, 75 (9): 2597-2615.
- [13] Tsui T Y, Mc Kerrow A J, Vlassak J J. Constraint effects on thin film channel cracking behavior [J]. Journal of Materials Research, 2005, 20 (9): 2266-2273.
- [14] Zhang Z, Li T. Effects of grain boundary adhesion and grain size on ductility of thin metal films on polymer substrates [J]. Scripta Materialia, 2008, 59 (8): 862-865.
- [15] 陆毅中. 工程断裂力学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1987. (Lu Y Z. Engineering Fracture Mechanics [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1987. (in Chinese))
- [16] Li T, Suo Z, Lacour S P, Wagner S. Compliant thin film patterns of stiff materials as platforms for stretchable electronics [J]. Journal of Materials Research, 2005, 20 (12): 3274-3277.

DUCTILITY OF POLYMER-SUPPORTED METAL FILMS WITH CURVED INTERFACES

Wei Xu Jinshui Yang Fei Wang Tianjian Lu

(MOE Key Laboratory for Strength & Vibration, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049)

Abstract Electronic components in modern flexible electronics are connected by interconnects, having typically the form of metal films on polymer substrates. Firstly, this paper studies experimentally the ductility of a polyimide-supported Cu film with rough interface (due to sandblasting treatment) and show that, upon tensile loading along the direction of film surface, the density of surface cracks can be reduced by increasing the substrate surface roughness. The distribution of tensile stresses in the film and their effects on film cracking (initiation and propagation) are subsequently studied using the method of finite elements. It is found that a rough (curved) interface can reduce the tensile stresses along the film surface so as to restrain the cracking of the film. Finally, we employ the cohesive zone model to study the initiation and spreading of damage in the film and interfacial cracking of the curved interface. It is demonstrated that both the damage and length of interfacial crack are reduced due to interface roughening.

Key words flexible electronics, metal films, ductility, interface roughening, cohesive zone model

<http://www.ixueshu.com/>

论文降重、修改、代写请加微信（还有海量Kindle电子书哦）



免费论文查重，传递门 >> <http://free.paperyy.com>

阅读此文的还阅读了：

1. [金属薄膜——陶瓷基组件热载屈曲失效](#)
2. [高分子膜材料及人工脏器](#)
3. [含曲线型膜基界面的高分子基金属薄膜延展性能](#)
4. [金刚石薄膜膜基界面结合强度测量技术的研究进展](#)
5. [CVD金刚石薄膜及膜-基界面形态](#)
6. [高分子透析膜的现状](#)
7. [等离子辅助化学气相沉积制备可延展的硅薄膜](#)
8. [高分子界面分子模拟的研究进展](#)
9. [全反射红外逐层检测含重氮高分子薄膜的生长](#)
10. [鼓泡法定量测量金刚石薄膜膜基界面结合强度的实验研究](#)