

文章编号: 1000-4750(2017)12-0202-08

线接触作用下超薄膜-基底界面力学分析

聂重阳, 郑德志, 古乐, 张弛, 王黎钦

(哈尔滨工业大学航空宇航摩擦学研究室, 哈尔滨 150001)

摘要: 高副接触的摩擦部件中广泛使用 $1\ \mu\text{m}$ 左右的超薄膜, 其界面失效对部件的工作寿命具有重要影响。该文针对轴承钢基底表面 $1\ \mu\text{m}$ 厚度的硬质和软质超薄膜所构成的膜基系统, 建立了线接触载荷作用下的界面力学分析模型。采用复变函数镜像法求解了单元点力的格林函数解, 并积分获得了界面应力的分布状态。利用匀质模型完成了退化对比验证, 以 DLC 和 MoS_2 两种硬软固体薄膜的线接触为例进行了计算和分析。该方法可用于机械部件表面沉积超薄膜的膜基界面分析与设计。

关键词: 界面力学; 复变函数; 镜像法; 超薄膜; 线接触

中图分类号: TH117.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2016.08.0637

INTERFACE MECHANICAL ANALYSIS OF ULTRA THIN FILM-SUBSTRATE SYSTEM UNDER THE LINEAR CONTACT

NIE Chong-yang, ZHENG De-zhi, GU Le, ZHANG Chi, WANG Li-qin

(Research Lab of Space and Aerospace Tribology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: Ultra-thin films of about $1\ \mu\text{m}$ are widely used in friction pairs with point/line-contact, and their interfacial failures have significant effects on the service life of frictional components. An interface mechanical model of film-substrate system with hard or soft thin films deposited on the bearing steel surfaces is built to analyze the interface stresses and deformations under the linear contact. Using image method of complex function, the solution of unit point force is obtained as the Green's function for evaluating and integrating. The model is verified as a degradation of homogeneous material. The distribution states of interface stresses for a cylindrical contact with DLC and MoS_2 of hard and soft films are calculated and discussed. This model can be used for interfacial analysis and design in the mechanical components with ultra-thin films.

Key words: interface mechanics; complex function; method of images; ultra-thin film; linear contact

在高温、高速、重载等苛刻环境下工作的机械零部件, 摩擦副接触表面常常需要使用固体润滑薄膜来改善其摩擦学特性。固体薄膜和基底通常由两种或多种不同材料组成, 材料属性差异在机械载荷和热载荷作用下都会导致膜基系统的界面应力不匹配, 乃至膜层剥离失效。因此对薄膜与基底材料界面应力与变形的研究对薄膜设计、分析与失效故障

诊断具有重要作用。针对固体薄膜多种多样的应用领域和工况条件, 研究者们从化学^[1]、力学^[2-5]、材料学^[6]和生命科学^[7]等领域对固体膜层制备、固体薄膜特性及其与基材的结合强度等方面加以研究, 力求构建摩擦学特性优异的固体薄膜-基底组合系统。

试验测试是材料学领域评价膜基界面结合强度的常用方法。Mittal 使用剥离法^[8]测定了薄膜的粘附

收稿日期: 2016-08-23; 修改日期: 2016-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(51275125, U1537214, 51475452); 国家重点基础研究发展规划项目(973)(2013CB632305)

通讯作者: 古乐(1975-), 男, 湖北天门人, 教授, 博士, 博导, 主要从事航空宇航摩擦学研究(E-mail: gule@hit.edu.cn).

作者简介: 聂重阳(1985-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士生, 主要从事固体薄膜界面力学分析研究(E-mail: ncy422@163.com);

郑德志(1973-), 男, 黑龙江哈尔滨人, 副教授, 博士, 硕导, 主要从事空间环境运动副失效机理与防护研究(E-mail: dezhi@hit.edu.cn);

张弛(1988-), 男, 安徽滁州人, 博士生, 主要从事固体薄膜界面力学分析研究(E-mail: zhc_hit@163.com);

王黎钦(1964-), 男, 湖南邵阳人, 教授, 博士, 博导, 主要从事苛刻环境和工况下摩擦学研究(E-mail: lqwang@hit.edu.cn).

力; Allen 和 Senturia 采用鼓泡法(Blister)^[9]测试膜层脱粘的临界应力; 压痕法和划痕法^[10-14]也被广泛应用于评定薄膜力学特性。试验测试结果可直接应用于薄膜制备工艺的比较和优选, 但由于测试过程中界面应力状态与实际机械部件摩擦副接触界面应力状态存在一定差异, 其膜基强度数据往往难以直接应用于各类工程实践。光弹试验^[15]则可以直观表现材料应力分布, 但要求薄膜和基底必须具有一定的透光性, 且也只能定性观察应力分布状态。

为准确分析固体薄膜的工作与失效特性, 研究人员采用有限元法^[16-20]或边界元法^[21-22]构建膜-基体系的系统分析模型获得了界面应力、变形的数值仿真解。Scheibert 等^[23]构建了一种圆柱与平面滑动接触模型并计算固体薄膜与基底内部的应力场。Teer 等^[24-25]主要针对金属基二硫化钨和碳基沉积固体薄膜的承载特性进行了研究。Hauert 等^[26]则针对类金刚石碳(Diamond-like Carbon, DLC)硬质膜层在生物医学领域的应用作了总结。Holmberg^[27-29]和 Matthews 等^[30-32]分别采用理论模型、数值仿真和试验的方法对固体薄膜制备和应用进行了大量研究, 比较全面地探索和总结了固体薄膜的摩擦学特性^[33]。也有学者^[34-37]采用数值仿真模拟与试验相结合的方法, 通过总结归纳固体薄膜材料受载与变形关系, 探索膜基系统的力载响应特性。

在轴承、齿轮接触分析中采用有限元方法计算超薄膜-基底的界面应力状态时, 由于薄膜尺度与接触影响区尺度差异较大, 有限元网格划分存在较大困难, 计算量也较大。本文针对轴承钢表面的亚微米尺度超薄膜的工程应用, 考虑建立线接触载荷作用下的膜-基系统界面力学模型, 并通过位势理论镜像法进行求解, 以获得薄膜-基底系统内部的应力与变形分布状态, 为实际工程应用中的薄膜设计和膜基界面分析提供参考。

1 超薄膜-基底系统界面力学建模

对超薄膜-基底系统进行界面力学分析建模时, 根据问题对象采用双材料结合系统, 如图 1 所示。膜基系统在与对偶件接触并发生摩擦的状态下, 薄膜表面在力载的作用下受力变形, 如图 1 中受力变形区域所示。在接触区域中, 薄膜受到与其表面垂直和平行的力系作用。

如图 1 所示, 基底材料 II 表面沉积厚度为 h 的超薄膜材料 I, 在基底与薄膜交界处形成膜基界面,

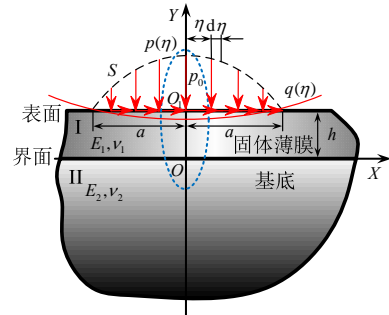


图 1 膜基系统表面力载分布

Fig.1 Surface loads of solid thin film - substrate system

薄膜上表面为自由表面。以膜基界面为 X 坐标轴(实数轴), 过 O_1 点引 X 轴垂线为 Y 坐标轴(虚数轴), 两坐标轴相交于坐标系原点 O , 由此建立全局坐标系 XOY 。设薄膜材料 I 和基底材料 II 的弹性模量分别为 E_1 、 E_2 , 泊松比分别为 ν_1 、 ν_2 。因为超薄膜相对于基底厚度(设厚度为 h)差异极大, 基底可视为半无限大空间。

对于不同大小或分布形式的表面力系, 均可以根据膜基系统表面受基础单位力(单元法向力和单元切向力)作用的解, 通过格林函数的积分形式进行表达: 只需按照表面力系分布形式进行积分或叠加即可获得相应表面载荷问题的解。表面分布载荷可沿作用区域以单位点力的积分表示为:

$$\int_S dL = \int_S [p(\eta) + iq(\eta)]d\eta \quad (1)$$

式(1)中: S 为表面分布载荷作用区域; L 为单元点力载荷; η 为表面力系分布区域的积分变量; $p(\eta)$ 和 $q(\eta)$ 分别为单元法向力和单元切向力。

提取单元力 $p(\eta)$ 和 $q(\eta)$, 由此建立图 2 所示表

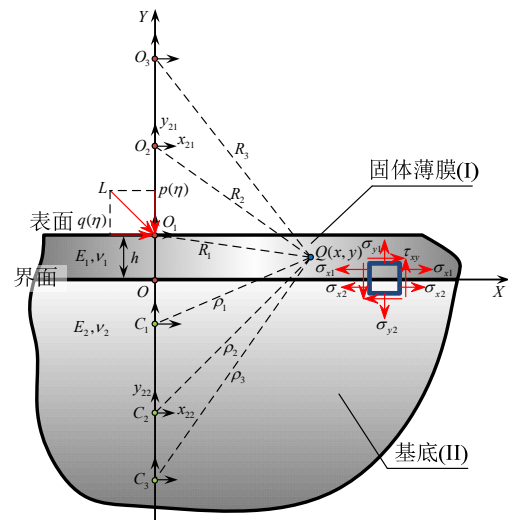


图 2 膜基系统界面力学分析模型

Fig.2 Analysis model of interface mechanics for solid thin film -substrate system

面单元点力作用下膜基系统模型, 作为描述不同接触运动形式、不同表面受载状态下界面力学分析的基础模型。

如图 2 所示, 表面单元点力 L 作用在自由表面上点 O_1 处, 沿全局复数坐标系 XOY 分解表达为 $L = p(\eta) + iq(\eta)$ 。

2 界面力学模型的镜像法求解

图 2 为理想的薄膜-基底双材料系统模型, 包含结合界面和自由表面两个边界条件: 即界面上法向应力和剪切应力, 以及各方向的变形连续; 表面上除接触区内部载荷以外, 无其他应力分量。以数学式表达界面连续条件和自由表面条件为:

$$\begin{aligned} \sigma_{yI} + i\tau_{xyI} &= \sigma_{yII} + i\tau_{xyII}, \\ u_I + iv_I &= u_{II} + iv_{II}, y = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

表面分布载荷作用区域以外:

$$\sigma_{yI} + i\tau_{xyI} = 0, y = h \quad (3)$$

式(2)和式(3)中: 下标 I、II 分别表示材料 I、II 中的应力或变形分量; σ 表示正应力; τ 为剪切应力; u 、 v 表示 x 、 y 方向变形。

为求解图 2 标示的界面应力, 采用复变函数理论的镜像法等效转化边界约束条件, 进而获得膜基结合材料内部应力与变形解。把薄膜与基底结合的膜基界面和薄膜自由表面分别作为反射成像“镜面”, O 点和 O_1 点作为原像点, 将产生无限个 O 点和 O_1 点的镜像点: O_1 点由膜基界面镜像生成 C_1 点, C_1 点由薄膜自由表面镜像生成 O_2 点, 以此类推。以生成的各镜像点为坐标原点依次建立局部坐标系, 则第 k 个镜像点及相应复数坐标系可表示为: (C_{k-1} 点通过薄膜自由表面镜像生成 O_k) O_k : $z_k = x + iy_{lk}$; (O_k 点由膜基界面镜像生成 C_k) 或 C_k : $s_k = x + iy_{lk}$; $k = 1, 2, \dots, \infty$ 。 O_k 坐标系位于界面以上薄膜材料 I 一侧, 而 C_k 坐标系位于界面以下基底材料 II 一侧, 所有镜像坐标系的 x 坐标分量相同, 对应的同阶镜像坐标系(角标相同, 比如 O_k 和 C_k) 以全局 x 坐标轴为对称轴, 所以 y 坐标分量互为相反数 ($y_{lk} = -y_{lk}$), 以罗马数字角标 I、II 加以区分。图 2 中 $Q(x, y)$ 为模型内部任意一点, 它到各局部镜像坐标原点的距离分别为 R_k 及 ρ_k ($k = 1, 2, \dots, \infty$), 则局部坐标与全局坐标的关系为:

$$\begin{cases} R_k = \sqrt{x^2 + z_k^2}, z_k = y - i(2k-1)h, \\ \rho_k = \sqrt{x^2 + \zeta_k^2}, s_k = y + i(2k-1)h \end{cases}$$

$$k = 1, 2, \dots, \infty \quad (4)$$

由式(4)可知, 当考察点取在膜基结合界面(边界条件、“镜面”)上的全局坐标点时, 在对应局部镜像坐标系中的 x 坐标分量相等, 而 y 坐标分量互为相反数 ($y_{lk} = -y_{lk}$), 即满足复变函数的共轭关系 $z_k = \bar{s}k$, 此时微积分的符号推导和运算将十分简洁。

采用古尔萨(Goursat)复变应力函数确立本构方程, 根据弹性理论, 不计单位体积力的各向同性材料, 其表达形式为:

$$\begin{cases} \sigma_x - i\tau_{xy} = \varphi' + \bar{\varphi}' - \bar{z}\varphi'' - \psi' \\ \sigma_y + i\tau_{xy} = \varphi' + \bar{\varphi}' + \bar{z}\varphi'' + \psi' \\ 2\mu(u + iv) = \kappa\varphi - z\bar{\varphi}' - \bar{\psi} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: φ 、 ψ 为复应力解析势函数(Airy 艾里函数), \bar{X} 表示对 X 取共轭; μ 为剪切弹性模量, 与弹性模量 E 和泊松比 ν 之间关系为 $\mu = 0.5E / (1 + \nu)$; 卡帕参数 $\kappa = 3 - 4\nu$ (平面应变) 或 $\kappa = (3 - \nu) / (1 + \nu)$ (平面应力)。参照上海交通大学许金泉教授^[38-41]的镜像法求解过程, 则应力和应变解可表示为式(6)~式(11), 其中 $G_m(z_k, s_k, \eta)$, $m = 1, 2, \dots, 6$ 为格林函数。

$$d(\sigma_{yI} + i\tau_{xyI}) = G_1(z_k, s_k, \eta)d\eta,$$

$$\begin{aligned} G_1(z_k, s_k, \eta) &= \sum_{k=1}^{\infty} [A'_k(z_k - \eta) + \Phi'_k(s_k - \eta)] + \\ &\sum_{k=1}^{\infty} [\bar{A}'_k(z_k - \eta) + \bar{\Phi}'_k(s_k - \eta)] + \\ &(\bar{z} - \eta) \sum_{k=1}^{\infty} [A''_k(z_k - \eta) + \Phi''_k(s_k - \eta)] + \\ &\sum_{k=1}^{\infty} [B'_k(z_k - \eta) + \Psi'_k(s_k - \eta)]. \end{aligned} \quad (6)$$

$$d(\sigma_{xI} + \sigma_{yI}) = G_2(z_k, s_k, \eta)d\eta,$$

$$G_2(z_k, s_k, \eta) = 4 \operatorname{Re} \left(\sum_{k=1}^{\infty} [A'_k(z_k - \eta) + \Phi'_k(s_k - \eta)] \right). \quad (7)$$

$$2\mu d(u_I + iv_I) = G_3(z_k, s_k, \eta)d\eta,$$

$$\begin{aligned} G_3(z_k, s_k, \eta) &= \kappa_1 \sum_{k=1}^{\infty} [A_k(z_k - \eta) + \Phi_k(s_k - \eta)] - \\ &(z - \eta) \sum_{k=1}^{\infty} [\bar{A}'_k(z_k - \eta) + \bar{\Phi}'_k(s_k - \eta)] - \\ &\sum_{k=1}^{\infty} [\bar{B}_k(z_k - \eta) + \bar{\Psi}_k(s_k - \eta)]. \end{aligned} \quad (8)$$

$$d(\sigma_{yII} + i\tau_{xyII}) = G_4(z_k, s_k, \eta)d\eta,$$

$$G_4(z_k, s_k, \eta) = \sum_{k=1}^{\infty} a'_k(z_k - \eta) + \sum_{k=1}^{\infty} \bar{a}'_k(z_k - \eta) + (\bar{z} - \eta) \sum_{k=1}^{\infty} a''_k(z_k - \eta) + \sum_{k=1}^{\infty} b'_k(z_k - \eta) \quad (9)$$

$$d(\sigma_{xII} + \sigma_{yII}) = G_5(z_k, s_k, \eta) d\eta, \quad G_5(z_k, s_k, \eta) = 4 \operatorname{Re} \left[\sum_{k=1}^{\infty} a'_k(z_k - \eta) \right] \quad (10)$$

$$2\mu_{II} d(u_{II} + iv_{II}) = G_6(z_k, s_k, \eta) d\eta, \quad G_6(z_k, s_k, \eta) = \kappa_{II} \sum_{k=1}^{\infty} a_k(z_k - \eta) - (z - \eta) \sum_{k=1}^{\infty} \bar{a}'_k(z_k - \eta) - \sum_{k=1}^{\infty} \bar{b}_k(z_k - \eta) \quad (11)$$

根据实际表面载荷分布情况，将单元点力 L 在作用区域 S 内部对变量 η 进行积分，采用复合求积方法即可得到任意表面分布载荷作用问题的解。

3 模型分析计算结果及讨论

3.1 膜基系统模型退化验证

Johnson 在《接触力学》^[42]中论述了二维匀质半无限体表面受集中力作用的应力变形分析模型：沿坐标系 y 轴分布的，每单位长度强度为 P_y 的集中力载荷垂直作用于半无限弹性体表面所产生的应力。该集中力可以看作是由一个沿 y 轴被压至与半空间接触的刀刃所产生的载荷，其极坐标形式下的应力函数可转换为直角坐标下的对应应力分量，二维匀质半无限体表面受切向集中力 P_x 的应力表达式同理可得。将法向和切向载荷对应的应力表达式相互叠加，即可得到相应的二维匀质半无限体表面受集中力作用结果。

$$\sigma_x = -\frac{2P_y}{\pi} \frac{x^2 y}{(x^2 + y^2)^2} - \frac{2P_x}{\pi} \frac{x^3}{(x^2 + y^2)^2} \quad (12)$$

$$\sigma_y = -\frac{2P_y}{\pi} \frac{y^3}{(x^2 + y^2)^2} - \frac{2P_x}{\pi} \frac{xy^2}{(x^2 + y^2)^2} \quad (13)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{2P_y}{\pi} \frac{xy^2}{(x^2 + y^2)^2} - \frac{2P_x}{\pi} \frac{x^2 y}{(x^2 + y^2)^2} \quad (14)$$

应着重指出的是：在应力、应变和位移的概念中，本文力学模型获得的 u 、 v 为位移解，即通过位移与应变的几何方程关系进行求解，而 Johnson 采用为应变与应力的物理方程关系。此外，应力与外载荷之间均需满足平衡方程关系。

表面原点作用法向集中压力 1 N/mm，切向集中力 1 N/mm，考察表面以下 1 mm 深度处的应力分

量。将本文计算模型统一薄膜和基底材料属性为轴承钢 $E_1=E_2=206 \text{ GPa}$ ， $\nu_1=\nu_2=0.3$ ，并注意统一坐标系。对比验证结果如图 3 所示。

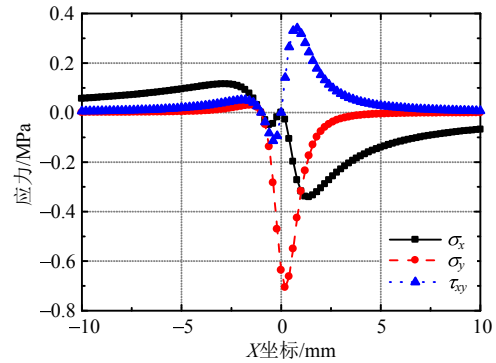


图 3 模型计算结果退化验证

Fig.3 The degraded verification of calculation results

由图 3 可知，膜基系统模型退化为匀质材料后受表面集中载荷作用的计算结果(图 3 中曲线)与文献[42]中的经典公式计算结果(图 3 中数据点)完全一致。

3.2 圆柱-圆柱赫兹线接触作用膜基系统模型算例

圆柱-圆柱赫兹线接触作用下，在 $y=h$ 表面接触区内部压力分布为：

$$p(\eta) = \frac{2W}{\pi a^2} \sqrt{a^2 - \eta^2}, \quad -a \leq \eta \leq a \quad (15)$$

式(15)中： a 为接触区半宽； W 为线接触载荷。

将式(6)~式(11)应力格林函数沿着接触区 $[-a, a]$ 范围积分，获得膜基系统赫兹线接触问题的解。

根据实际机械零部件的使用工况，表面超薄膜材料厚度 $h=1 \mu\text{m}$ ，重载下表面线载荷 $W=100 \text{ N/mm}$ ，接触圆柱体截面等效半径为 1.5 mm，沿 X 坐标轴方向滑动，则摩擦力作用方向为 X 轴负方向，其与薄膜表面材料相对摩擦系数为 0.2。为了便于进行匀质材料^[43]与膜基系统模型的对照，计算应力曲线均为表面下 1 μm 处的次表层应力分布，对应膜基系统模型为界面处应力。薄膜弹性模量与基底比值大于 1 时，定义为硬膜材料，反之则为软膜材料，根据文献[44-45]选取目前常用的 MoS_2 和 DLC 固体薄膜代表软膜和硬膜、基底为轴承钢进行计算，材料参数如表 1 所示，计算结果如图 4 所示。

表 1 膜基系统力学计算材料参数

Table 1 Material parameters of mechanics calculation in coating-substrate system

	软膜 ^[44]	硬膜 ^[45]	基底	接触体
弹性模量/GPa	150	300	206	300
泊松比	0.4	0.2	0.3	0.2

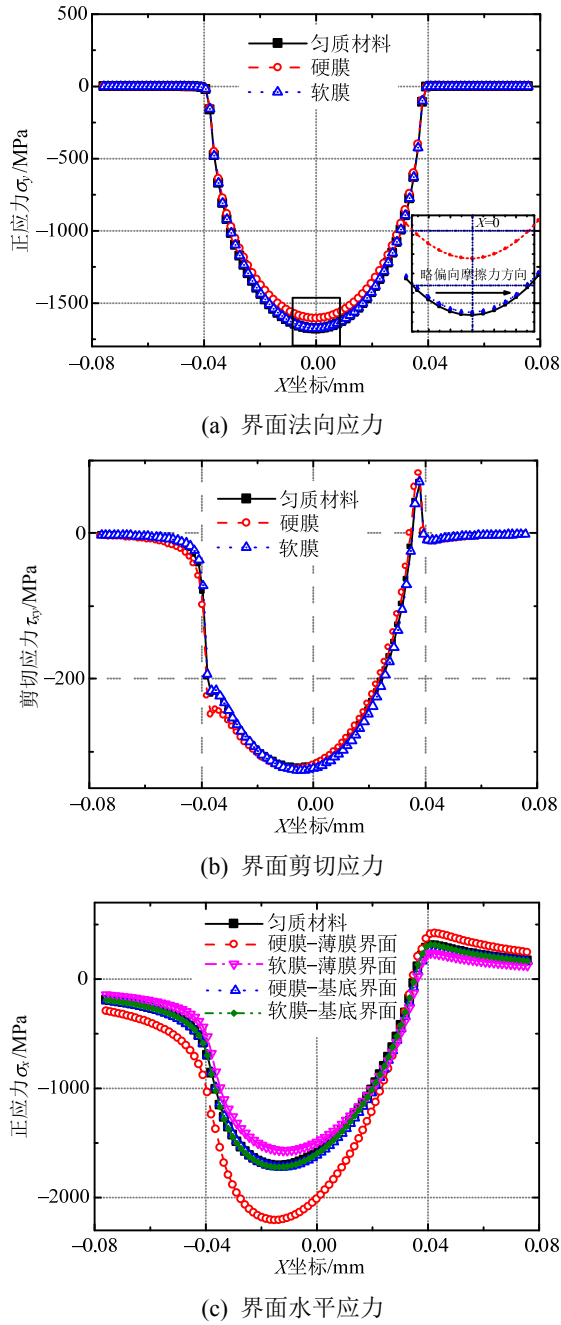


图4 赫兹线接触界面应力计算结果

Fig.4 Calculation results of interfacial stresses under Hertz's linear contact

由图4可知,匀质材料次表层与薄膜-基底系统在界面上的应力值和分布状态相似。相对于匀质材料软或硬的膜层均可以略微改变界面上的法向应力,如图4(a)所示,即使仅仅为1 μm厚的超薄膜,膜层也可以减弱其界面法向应力峰值,同时匀质材料在有滑动摩擦存在时,滑动方向前端和后端接触区域边缘应力略有不同,即薄膜-基底系统可以影响起源于表面接触区域边缘的失效形式(如赫兹环形

裂纹)发生。

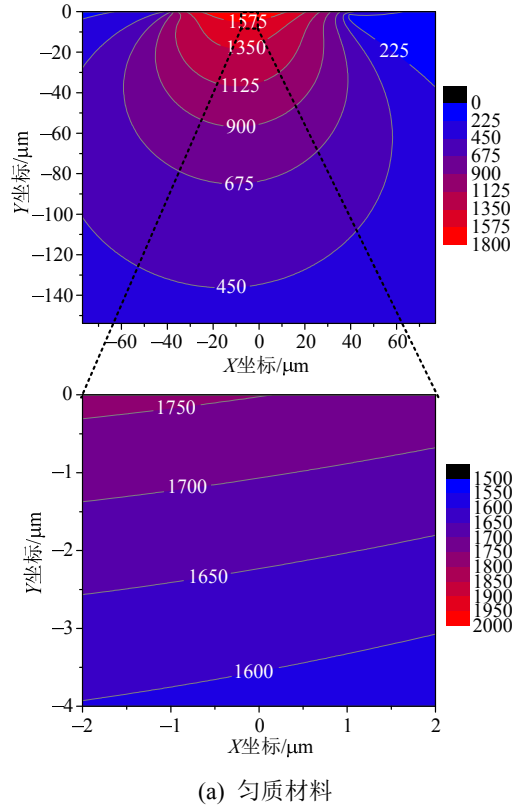
图4(b)表明膜层对于剪切应力的改变影响很小,硬膜界面处滑动方向尾端的局部剪切应力数值略大,在剪切应力作用下,此处薄膜易发生拉伸断裂导致破损失效。

水平方向应力分量 σ_x 在界面处是不连续的,如图4(c)所示,符合式(2)界面条件。由于薄膜和基底存在材料属性差异,界面水平应力存在差异,硬的和软的薄膜界面处水平应力与其弹性模量相关,大于和小于匀质材料相同位置处的水平应力,在基底界面处的水平应力与匀质材料相同。界面水平应力差异是膜基界面发生结合失效的可能原因:软膜多为层状结构,该应力导致其层间发生滑移;硬膜多为脆性材料,该应力导致其界面失配开裂而脱粘。

工程应用中需要考察材料内部的等效应力,如式(16)所示,以作为塑性屈服等失效形式的判断依据。

$$\sigma_v = \sqrt{[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] / 2} \tag{16}$$

匀质材料与采用膜基系统模型计算的薄膜-基底结合材料内部 von Mises 等效应力云图计算结果如图5所示。



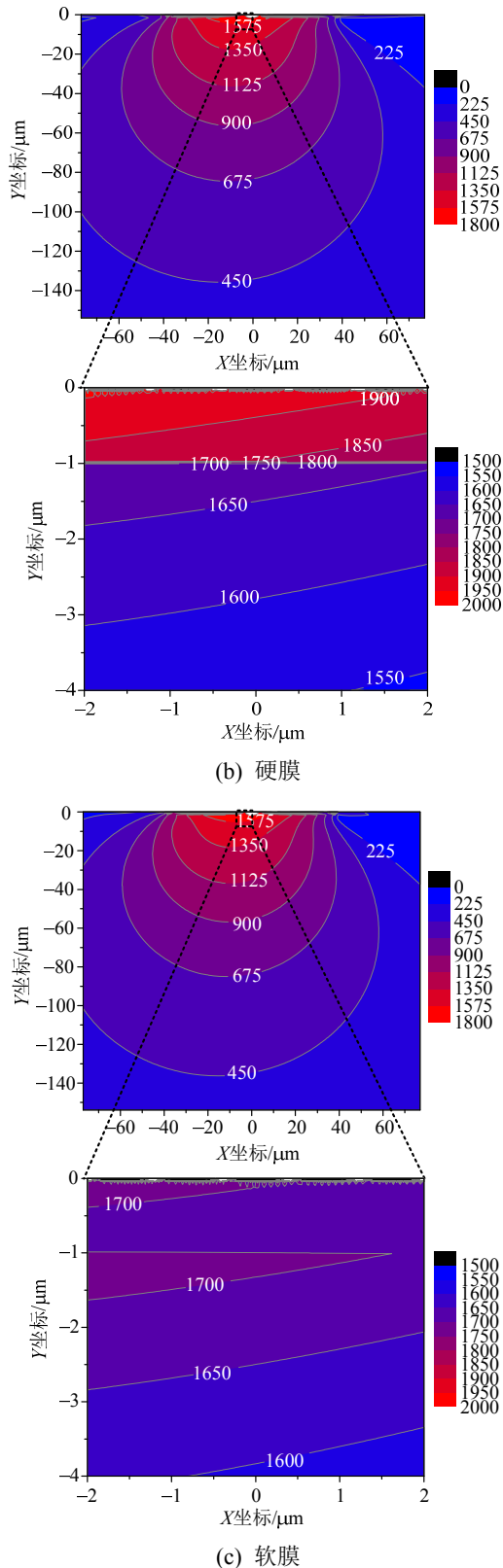


图5 von Mises 等效应力计算结果

Fig.5 Calculation results of von Mises stresses

由图5计算结果可知，在 $y=0$ 界面上，膜基系统模型和匀质材料中的等效应力分布形式差异不大，数值大小略有差异：膜基系统的等效应力极值

主要分布于界面以上的薄膜内部，界面以下等效应力梯度比匀质材料衰减更快。由于水平应力在界面处不连续，薄膜-基底系统的等效应力在界面存在转折。工程实际中使用薄膜材料，除了法向应力引起材料塑性失效和剪切应力引起的裂纹萌生以外，这一水平应力引起的界面等效应力的转折是分析膜基界面结合失效的关键。

4 结论

本文建立了线接触作用超薄膜-基底系统的界面力学数理模型，通过复变函数镜像法原理和接触区域的积分获得了膜基系统界面应力解。采用模型与匀质材料经典解的退化验证以及算例讨论分析，获得以下结论：

(1) 膜基系统界面力学分析模型可以通过表面单元力的解作为格林函数，积分获得线接触作用下的内部各方向应力。

(2) $1\ \mu\text{m}$ 厚度的超薄膜对界面和基底材料内部法向应力、剪切应力均产生影响，水平应力在膜层与基底结合界面处存在差异，可作为分析膜基界面结合失效的关键因素。

本文建立的超薄膜-基底界面力学分析模型可用于薄膜的工程设计和分析评价，可代入固体薄膜材料参数(比如非线性材料参数、表面载荷、摩擦系数等)进行相应界面力学分析；需要指出的是，当材料内部为非理想界面相时，其对材料从固体薄膜层到基底内部的应力连续性将产生影响，第2节的镜像法求解过程需要针对新的界面关系条件加以改变。

参考文献：

[1] Weber S B, Lein H L, Grande T, Einarsrud M A. Influence of the precursor solution chemistry on the deposition of thick coatings by spray pyrolysis [J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 221(221): 53—58.

[2] Guler M A, Alinia Y, Adibnazari S. On the contact mechanics of a rolling cylinder on a graded coating. Part 2: Numerical results [J]. Mechanics of Materials, 2013, 66(4): 134—159.

[3] Alinia Y, Guler M A, Adibnazari S. On the contact mechanics of a rolling cylinder on a graded coating. Part 1: Analytical formulation [J]. Mechanics of Materials, 2014, 68(1): 207—216.

[4] 赵海峰. 反分析确定金属薄膜与陶瓷间界面的力学性能参数[J]. 工程力学, 2008, 25(10): 80—85.

- Zhao Haifeng. Inverse analysis to determine interfacial properties between metal film and ceramic substrate with an adhesive layer [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(10): 80–85. (in Chinese)
- [5] 聂志峰, 肖林京, 韩汝军, 王凯, 李星龙, 吴恒恒. 基于偶应力理论薄膜-基体界面剪应力尺寸效应的研究[J]. *工程力学*, 2014, 31(3): 27–31.
Nie Zhifeng, Xiao Linjing, Han Rujun, Wang Kai, Li Xinglong, Wu Hengheng. Study on size effect of interfacial shear stress between film and substrate based on couple-stress theories [J]. *Engineering Mechanics*, 2014, 31(3): 27–31. (in Chinese)
- [6] Zhang X, Weeks B L. Effects on the surface structure of organic energetic materials using spin coating [J]. *Thin Solid Films*, 2014, 550(1) 135–139.
- [7] Fordham W R, Redmond S, Westerland A, Cortes E G, Walker C, Gallagher C, Medina C J, Waechter F, Lunk C, Ostrum R F, Caputo G A, Hettinger J D, Krchnavek R R. Silver as a Bactericidal Coating for Biomedical Implants [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 253(9): 52–57.
- [8] Mittal K L. Adhesion measurement of thin films [J]. *Electro Component Science and Technology*, 1976, 3(1): 21–42.
- [9] Allen M G, Senturia S D. Analysis of critical debonding pressures of stressed thin films in the blister test [J]. *The Journal of Adhesion*, 1988, 25(4): 303–315.
- [10] Li J, Beres W. Three-dimensional finite element modelling of the scratch test for a TiN coated titanium alloy substrate [J]. *Wear*, 2006, 260(11/12): 1232–1242.
- [11] Sinha S K, Song T, Wan X, Tong Y. Scratch and normal hardness characteristics of polyamide 6/nano-clay composite [J]. *Wear*, 2009, 266(7/8): 814–821.
- [12] 荆翠妮, 古乐, 张传伟, 唐光泽, 王黎钦. 氮化硅陶瓷表面 DLC 膜的制备及摩擦性能研究[J]. *润滑与密封*, 2010, 35(9): 21–25.
Jing Cuini, Gu Le, Zhang Chuanwei, Tang Guangze, Wang Liqin. Preparation and tribological properties research of DLC film on the surface of Si₃N₄ ceramic [J]. *Lubrication Engineering*, 2010, 35(9): 21–25. (in Chinese)
- [13] 荆翠妮. 氮化硅表面沉积 DLC 膜的均匀性与摩擦学特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
Jing Cuini. Study on uniformity and tribological behavior of DLC film on surface of ceramics [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [14] 郎凤超, 邢永明, 朱静. 应用纳米压痕技术研究表面纳米化后 316L 不锈钢力学性能[J]. *工程力学*, 2008, 25(10): 66–71.
Lang Fengchao, Xing Yongming, Zhu Jing. The mechanical properties of 316L stainless steel after surface nanostructure treatment using nanoindentation [J]. *Engineering Mechanics*, 2008, 25(10): 66–71. (in Chinese)
- [15] Nowak T P, Jankowski L J, Jasieńko J. Application of photoelastic coating technique in tests of solid wooden beams reinforced with CFRP strips [J]. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 2010, 10(2): 53–66.
- [16] Yıldız F, Yetim A F, Alsaran A, Çelik A, Kaymaz İ, Efeoğlu İ. Plain and fretting fatigue behavior of Ti6Al4V alloy coated with TiAlN thin film [J]. *Tribology International*, 2013, 66(7): 307–314.
- [17] Ifis A, Bilteryst F, Nouari M. Transient thermomechanical analysis of thin layers using a hybrid “MAX-FEM” model [J]. *Finite Elements in Analysis and Design*, 2013, 69(50) 73–87.
- [18] 赵希淑, 张双寅, 吴永礼. 梯度涂层材料中裂纹问题的非均匀元分析[J]. *工程力学*, 2002, 19(4): 118–122.
Zhao Xishu, Zhang Shuangyin, Wu Yongli. An analysis of a crack in functionally gradient coatings by inhomogeneous finite element [J]. *Engineering Mechanics*, 2002, 19(4): 118–122. (in Chinese)
- [19] 赵杰江, 尹东, 唐力晨, 钱浩, 霍永忠. 微动接触状态对铝合金磨损速率影响的数值计算与分析[J]. *工程力学*, 2016, 33(增刊): 275–282.
Zhao Jiejiang, Yin Dong, Tang Lichen, Qian Hao, Huo Yongzhong. Numerical calculation and analysis of the effect of fretting contact conditions on the wear rate of zircaloy [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(Suppl): 275–282. (in Chinese)
- [20] 甄晓霞, 张卓杰, 王荣辉, 李周. 层间滑移对摩擦型叠梁弯曲特性的影响[J]. *工程力学*, 2016, 33(8): 185–193.
Zhen Xiaoxia, Zhang Zhuojie, Wang Ronghui, Li Zhou. Influence of slip effect on bending characteristics of frictional laminated beams [J]. *Engineering Mechanics*, 2016, 33(8): 185–193. (in Chinese)
- [21] Bagault C, N Lias D, Baietto M C, Ovaert T C. Contact analyses for anisotropic half-space coated with an anisotropic layer: Effect of the anisotropy on the pressure distribution and contact area [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2013, 50(5): 743–754.
- [22] Valefi M, De Rooij M, Mokhtari M, Schipper D J. Modelling of a thin soft layer on a self-lubricating ceramic composite [J]. *Wear*, 2013, 303(1/2): 178–184.
- [23] Scheibert J, Prevost A, Debr Geas G, Katzav E, Adda-bedia M. Stress field at a sliding frictional contact: Experiments and calculations [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2009, 57(12): 1921–1933.
- [24] Chicot D, Gil L, Silva K, Roudet F, Puchi-cabrera E S, Staia M H, Teer D G. Thin film hardness determination using indentation loading curve modelling [J]. *Thin Solid Films*, 2010, 518(19): 5565–5571.
- [25] Navabpour P, Teer D, Su X, Liu C, Wang S, Zhao Q, Donik C, Kocijan A, Jenko M. Optimisation of the

- properties of siloxane coatings as anti-biofouling coatings: Comparison of PACVD and hybrid PACVD-PVD coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2010, 204(20): 3188–3195.
- [26] Hauert R, Thorwarth K, Thorwarth G. An overview on diamond-like carbon coatings in medical applications [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 233(233): 119–130.
- [27] Holmberg K, Laukkanen A, Ronkainen H, Wallin K. Surface stresses in coated steel surfaces—influence of a bond layer on surface fracture [J]. *Tribology International*, 2009, 42(1): 137–148.
- [28] Holmberg K, Laukkanen A, Turunen E, Laitinen T. Wear resistance optimisation of composite coatings by computational microstructural modelling [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 247(4): 1–13.
- [29] Ghabchi A, Sampath S, Holmberg K, Varis T. Damage mechanisms and cracking behavior of thermal sprayed WC-CoCr coating under scratch testing [J]. *Wear*, 2014, 313(1/2): 97–105.
- [30] Avelar-batista Wilson J C, Banfield S, Eichler J, Leyland A, Matthews A, Housden J. An investigation into the tribological performance of Physical Vapour Deposition (PVD) coatings on high thermal conductivity Cu-alloy substrates and the effect of an intermediate electroless Ni-P layer prior to PVD treatment [J]. *Thin Solid Films*, 2012, 520(7): 2922–2931.
- [31] Chen Y, Nie X, Leyland A, Housden J, Matthews A. Substrate and bonding layer effects on performance of DLC and TiN biomedical coatings in Hank's solution under cyclic impact-sliding loads [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 237(237): 219–229.
- [32] Mo J L, Zhu M H, Leyland A, Matthews A. Impact wear and abrasion resistance of CrN, AlCrN and AlTiN PVD coatings [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 215(4): 170–177.
- [33] Kenneth H, Allan M. *Coatings tribology: properties, mechanisms, techniques and applications in surface engineering* [M]. 2nd ed. Radarweg 29, PO Box 211, 1000 AE Amsterdam, The Netherlands, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford OX5 1GB, UK: Elsevier, 2009: 185–316.
- [34] Bouzakis K D, Gerardis S, Skordaris G, Bouzakis E. Nano-impact test on a TiAlN PVD coating and correlation between experimental and FEM results [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2011, 206(7): 1936–1940.
- [35] Sato A, Serris E, Grosseau P, Thomas G, Galet L, Chamayou A, Baron M. Experiment and simulation of dry particle coating [J]. *Chemical Engineering Science*, 2013, 86(5): 164–172.
- [36] Gupta M, Curry N, Nyl N P, Markocsan N, Va En R. Design of next generation thermal barrier coatings — Experiments and modelling [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 220(15): 20–26.
- [37] Kot M, Rakowski W, Lackner J M, Major L. Analysis of spherical indentations of coating-substrate systems: Experiments and finite element modeling [J]. *Materials & Design*, 2013, 43(43): 99–111.
- [38] 许金泉. *界面力学* [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 185–316.
- Xu Jinquan. *Interface mechanics* [M]. Beijing: Science Press, 2006: 185–316. (in Chinese)
- [39] Park H S, Kwon D. An energy approach to quantification of adhesion strength from critical loads in scratch tests [J]. *Thin Solid Films*, 1997, 307(1/2): 156–162.
- [40] 张镇宇, 许金泉. 薄膜涂层材料的界面破坏准则 [J]. *上海交通大学学报*, 2007, 41(6): 983–987.
- Zhang Zhenyu, Xu Jinquan. The interface failure criterion of coating materials [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2007, 41(6): 983–987. (in Chinese)
- [41] Xu J Q, Mutoh Y. Analytical solution for interface stresses due to concentrated surface force [J]. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2003, 45(11): 1877–1892.
- [42] Johnson K L. *Contact mechanics* [M]. Cambridge, U.K.: Cambridge University Press, 1987: 14–17.
- [43] M'Ewen E. XLI. Stresses in elastic cylinders in contact along a generatrix (including the effect of tangential friction) [J]. *London Edinburgh & Dublin Philosophical Magazine & Journal of Science*, 1949, 40(303): 454–459.
- [44] Holmberg K, Ronkainen H, Laukkanen A, Wallin K, Hogmark S, Jacobson S, Wiklund U, Souza R M, St Hle P. Residual stresses in TiN, DLC and MoS₂ coated surfaces with regard to their tribological fracture behaviour [J]. *Wear*, 2009, 267(12): 2142–2156.
- [45] 弗罗伊德(美). *薄膜材料—应力缺陷的形成和表面演化(精)* [M]. 北京: 科学出版社, 2007: 79–80.
- Freund L B (USA). *Thin film materials: Stress, defect formation, and surface evolution* [M]. Beijing: Science Press, 2007: 79–80. (in Chinese)