

文章编号: 1001-3806(2008)05-0527-04

## 激光划痕法膜基界面的温度场及应力场分析

冯爱新, 程 昌, 殷苏民, 周建忠, 唐翠屏  
(江苏大学 机械工程学院, 镇江 212013)

摘要: 为了对膜基系统的温度分布和应力分布进行模拟研究, 采用 ANSYS 有限元分析软件, 对高斯移动激光加载条件下 TN 薄膜的温度场和由温度场产生的应力场进行了稳态分析。研究表明, 温度场随激光光源的移动而移动, 温度场中温度最大点在激光光斑中心处, 且激光光源移动方向后方的温度场有较大的迟滞现象。在膜基系统中产生的应力场主要集中在薄膜内部。温度场和应力场的研究对探讨膜基系统失效进程具有重要意义。

关键词: 激光技术; 温度场; 应力分布; 有限元法; 薄膜  
中图分类号: O484 文献标识码: A

### Study on temperature and stress field of film-substrate system irradiated by laser scratching

FENG Aixin, CHENG Chang, YIN Sumin, ZHOU Jianzhong, TANG Cuiping  
(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract** The temperature and stresses distributions on film systems were simulated. A steady-state analysis of the temperature field and stress field of TN film irradiated by a moving Gaussian laser was made with finite element analysis program. As a result the temperature field is moving along with the lamp, the largest temperature of temperature field is in the center of laser facula and there is an obvious sluggish phenomenon in the backside temperature field of laser facula moving way. The stress field of film-substrate mainly concentrates in the film. The study of temperature and stress field is important for the research of film shape deformation.

**Key words** laser technique; temperature field; stress distribution; finite element method; film

### 引 言

膜是表面涂层、表面镀膜和表面改性层的统称。目前已经提出的检测膜基界面结合性能的方法有激光层裂法、划痕法、压痕法、界面压入法等计 355 种之多<sup>[1-3]</sup>。这些方法在理论分析和测量技术上都存在有待进一步解决的问题, 其原因是所测得的值是界面附着力和薄膜与基体的弹性和弹塑性行为、摩擦及有关试验参量的综合结果, 即工程结合强度, 而人们至今尚未弄清表面膜破坏临界值与界面结合强度之间的真正关系, 尚未找到适用于所有情形的界面结合性能测试技术, 直接定量测定界面结合强度仍然是困扰各国同

行的世界性难题<sup>[4,5]</sup>。

界面结合强度由激光参量、测量参量和薄膜脱粘时物理参量来表征。作者采用 40Cr 及 TN 材料, 进行了高斯移动激光加载下的温度场和应力场的模拟分析。

### 1 初始边界条件及计算模型

将激光能量分布设置为高斯分布模型, 高斯激光能量密度计算公式为:

$$Q_{\text{laser}} = Q_{\text{max}} \times \exp\left\{-\frac{I \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}}{x_0 + y_0}\right\} \quad (1)$$

式中,  $Q_{\text{max}}$  为光斑中心最大能量密度;  $x_0, y_0$  为光斑中心坐标。移动热源的模型在固定热源的简化基础上, 将试样模型修改为半无限大的双层平板, 激光模型采用  $a \times b$  的矩形光斑, 能量均匀分布, 并以匀速  $v$  沿平行于矩形一边的方向移动, 设移动距离为  $d$ , 则其在某一金属单元上的加热时间为  $t = d/v$ 。

在笛卡尔坐标系中, 材料表面为  $x-y$  平面, 光斑移动方向平行于  $x$  轴,  $z$  轴为深度方向, 同时光斑轴线平行于  $y$  轴, 无内热源的 1 维无限大介质热传导方程为:

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50405035); 江苏省研究生创新计划资助项目 (XM04-24 XM05-32); 江苏省自然科学基金资助项目 (BK2007512); 先进数控机床技术江苏省高校重点实验室开放基金资助项目 (KXJ07126)

作者简介: 冯爱新 (1970-), 男, 副教授, 主要从事激光加工与检测技术研究。

E-mail: aixfeng@ujs.edu.cn

收稿日期: 2007-07-18 收到修改稿日期: 2007-08-07

$$\frac{\partial T^2}{\partial^2 x} = \frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

由于无边界条件, 令  $t = 0$  时介质的温度分布为  $T = \phi(x)$ 。微分方程 (2) 式可以通过分离变量法来求解, 其特解可表示为:

$$T = \int_0^\infty \exp(-a\lambda^2 t) [A(\lambda) \cos \lambda x + B(\lambda) \sin \lambda x] d\lambda \quad (3)$$

式中,  $A(\lambda) = \frac{1}{\pi} \int_0^\infty \Psi(x) \cos \lambda x dx$ ,  $B(\lambda) = \frac{1}{\pi} \times \int_0^\infty \Phi(x) \sin \lambda x dx$ 。

所以有:

$$T = \frac{1}{2\sqrt{a\pi t}} \int_0^\infty \Psi(x') \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{4at}\right] dx' \quad (4)$$

将结果推广到 3 维空间, 则  $t$  时刻介质内的温度场为<sup>[5]</sup>:

$$T = \frac{1}{(2\sqrt{a\pi t})^3} \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \Psi(x', y', z') \times \exp\left[-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4at}\right] dx' dy' dz' \quad (5)$$

若从  $t = 0$  开始输入一功率密度随时间变化的体热源  $P(x, y, z, t)$ , 则根据温度场的线形叠加性质, 在  $t(t > 0)$  时刻介质中的温度场分布为<sup>[6-7]</sup>:

$$T = \int_0^t \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{P(x', y', z', t')}{8k\sqrt{a[\pi(t-t')]^{3/2}}} \times \exp\left[-\frac{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}{4a(t-t')}\right] dt' dx' dy' dz' \quad (6)$$

而由此产生的热应力可以由下式得出<sup>[6]</sup>:

$$\sigma_\theta(r, \theta) = \frac{2a\alpha E \eta I_0}{k h b^2} \sum_{m=1}^\infty \left\{ \left[ \frac{J_1(\beta_m r)}{\beta_m r} - J_0(\beta_m r) \right] \times \frac{J_1(\beta_m a)}{\beta_m^2 [J_0(\beta_m b)]^2} [1 - \exp(-\beta_m^2 D t)] \right\} \quad (7)$$

式中,  $\alpha$  为吸收系数,  $\alpha = \alpha(x, y, z, T)$ ;  $D$  为热传导系数,  $D = k/(\rho c)$ ;  $k$  为传热系数;  $\rho$  为材料的密度;  $c$  为比热容;  $h$  为薄膜厚度;  $I(r, t)$  为激光照射的光斑的功率密度;  $\beta_m b$  为第一类 1 阶贝塞尔函数的根,  $r, \theta$  为对应极坐标系下变量,  $E$  为材料弹性模量,  $\eta$  为材料膨胀系数,  $I_0$  为激光光斑中心的功率密度。

## 2 温度场和应力场的模拟

激光作用在薄膜上, 设激光加载时初始温度  $27^\circ\text{C}$ , 对流系数为  $100$  激光半径为  $5\text{mm}$ , 光斑中心能量密度为  $100\text{mJ}/\text{cm}^2$ , 移动速度为  $0.1\text{mm}/\text{s}$  光加载时

间为  $10\text{s}$

为节省计算时间, 取模型的一半进行计算, 在切面上加对称约束。薄膜厚度为  $1\text{mm}$ 。薄膜和基体的材料特性如表 1 和表 2 所示。

Table 1 The material characteristics of TN film

thermal conductivity $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	specific heat capacity	density	elastic modulus	Poisson ratio	expansivity
24 28	570	4.93	380E+9	0.27	10.1E-6

Table 2 The material characteristics of 40Cr substrate

temperature/ $^\circ\text{C}$	100	200	400	600
thermal conductivity $/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	43.7	43.7	37.8	31.8
specific heat capacity	490	520	590	750
density	7.2			
elastic modulus	30E+6			
Poisson ratio	0.3			
expansivity	12.6E-6			

## 3 结果及分析

### 3.1 温度场

移动高斯激光加载下膜基系统的分析模型如图 1 所示, A 为薄膜, B 为基体, 点 1~点 10 为所选基点编号。模拟的薄膜表面的温度场如图 2 所示。

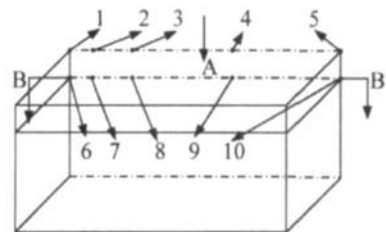


Fig. 1 The film-substrate system irradiated by Gaussian moving laser

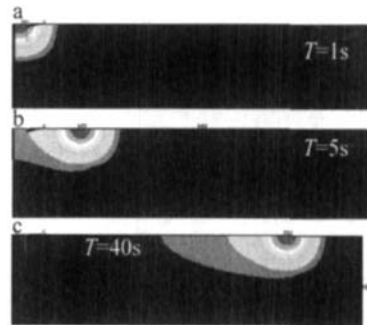


Fig. 2 The temperature distributions on film surface under Gaussian moving laser

由图 2 中可以看到, 激光光斑中心处的温度场等温度线为圆形, 激光移动轨迹前方等温线为圆形, 在激光移动轨迹后方有迟滞的温度场。等温线为鸭蛋形, 但温度较低。光斑中心的温度最高, 约为  $212^\circ\text{C}$  等强度激光相比, 最高温度较高, 但作用区域较小。

从图 3 中可以看到, 结合面的温度较低, 且移动过

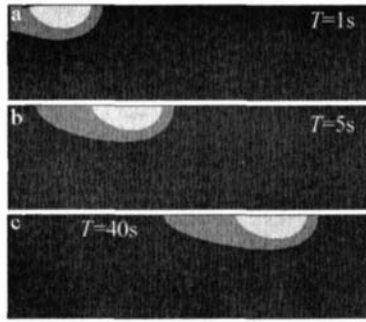


Fig 3 The temperature distributions on interface-film under Gaussian moving laser

程中变化不大,其分布规律同薄膜表面的温度大致相同。光斑中心对应处的温度最高约为 75℃。

由图 4a 中可见,膜表面激光光斑中心点温度最高,约为 204℃。激光移动轨迹后方的温度较未经激

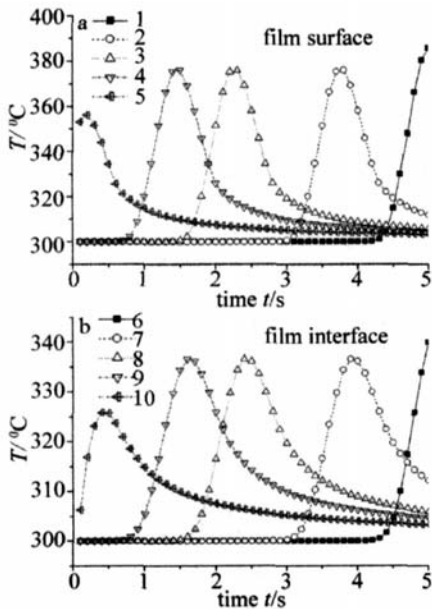


Fig 4 The temperature curve of different points on the symmetry at different times

光加载处的温度高 17℃左右,迟滞温度的大小与激光能量密度和激光移动速度有关。由于激光光源轨迹后方迟滞的温度场的作用,使得薄膜表面温度最高点并不是在激光光斑作用处。

由图 4b 中可以看到,在膜基结合处模型边缘的温度有较大的变化,但在模型中间激光光斑轨迹上的各点的温度变化曲线相同,温度最高点出现在激光光斑对应点的后方,约为 162℃。由于经过薄膜的热传递,使得温度的最高点与薄膜表面温度最高点有一段距离,约为 0.2mm<sup>[8-9]</sup>。

### 3.2 应力场

由图 5 中可以看到,在激光光斑中心处应力最大,约为 119MPa。应力云图为不规则圆形。随着光源的移动应力场也随之移动,随着时间的增加,应力的分布区域增加。在模型的边缘,由于薄膜的热变形,产生了

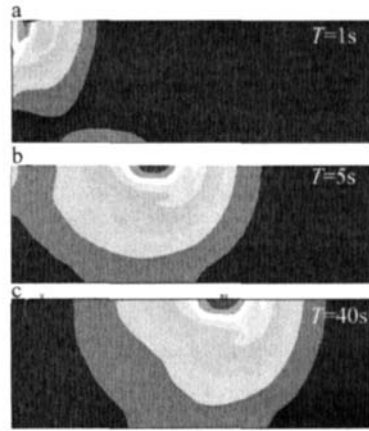


Fig 5 The stress-field distributions on film surface

应力释放,所以应力较小。

薄膜表面的应力密度如图 6 所示,可见激光光斑

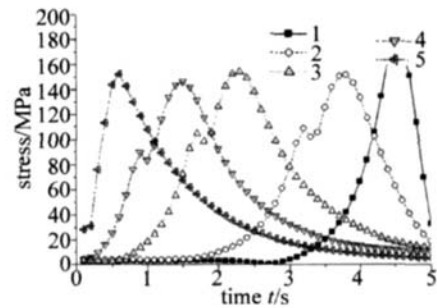


Fig 6 The stress curve of different points on film surface

中心点应力密度最大,且在模型中心处应力密度最大,约为 155MPa。由于薄膜表面受热膨胀,使激光移动轨迹前方的薄膜受到挤压,在轨迹前方上有一较小的应力回升,回升值约 10MPa。在激光光斑移动轨迹后方应力为光滑曲线。模型边缘的应力状态比较复杂,这与模型边缘的薄膜和基体的变形引起的应力释放有关。

由图 7 中可以看到,薄膜表面 x 方向的应力为压应力,激光光斑中心压应力最大,约为 15MPa。激光光斑轨迹前后方 x 方向应力基本相等。模型边缘的 x 方

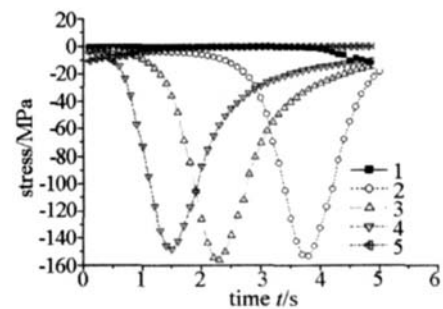


Fig 7 The x-direction stress curve of different points on film surface

向应力较小,与其变形引起的应力释放有关。

由图 8 中可以看到薄膜表面的 y 方向的应力场。y 方向的应力场在路径上变化较大,光斑半径范围内为压应力,光斑中心处为最大的压应力约为 2MPa。半径中间应力约减小至 0。在激光半径范围外侧,产生

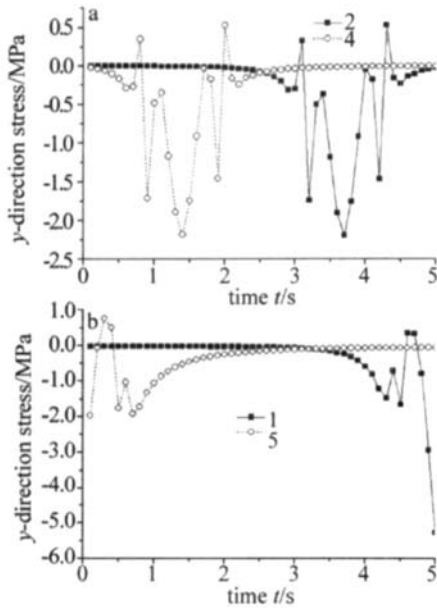


Fig 8 The  $y$ -direction stress curve of different points on film surface symmetry at different times

的拉应力与同等强度激光相比,其分布趋势大致相同,但应力值相差较大,等强度激光的拉应力较大,高斯激光在光斑中心有较大的压应力<sup>[10]</sup>。

#### 4 结论

(1)经激光加载后,得到了高斯移动激光加载下的温度场分布。温度场随激光光源的移动而移动,温度场中温度最大点在激光光斑中心处,且激光光源移动方向后方的温度场有较大的迟滞现象。

(2)在膜基系统中产生的应力场主要集中在薄膜

内部,在薄膜表面和轴线上都是逐渐递减的,膜基界面结合处产生的应力较大,会导致薄膜的脱粘。

#### 参考文献

- [1] KEDA R, CHO H, SAWABE A. Laser spallation method to measure strength against mode-I decohesion of CVD diamond films [J]. *Diamond & Related Materials*, 2005, 14(3): 631-636.
- [2] MITTAL K L. Adhesion measurement of films and coatings [C] // *The First International Symposium on Adhesion Measurement of Films and Coatings*. Netherlands USA: VSP, 1995: 1-435.
- [3] MITTAL K L. Adhesion measurement of films & coatings [C] // *The Second International Symposium on Adhesion Measurement of Films and Coatings*. Boston: VSP, 2001: 1-351.
- [4] FENG A X, ZHANG Y K, XIE H K. A study on the new method of laser scratch testing technique to characterize interfacial adhesion between thin film and substrate [J]. *Key Engineering Materials*, 2004, 259/260: 615-619.
- [5] FENG A X, ZHANG Y K, XIE H K. A study on the failure procedure of the film-substrate interface based on the laser scratch testing technique [J]. *Materials Science Forum*, 2004, 471/472: 746-749.
- [6] TANG C P, FENG A X, ZHANG Y K, *et al.* Study on the temperature and stress field of film-substrate system irradiation by gauss laser [J]. *Applied Laser*, 2006, 26(6): 361-364 (in Chinese).
- [7] LI D J. The numerical simulation of welding stress and distortion [D]. Wuhan: Wuhan Science and Technology University, 2003: 3 (in Chinese).
- [8] YANG J, LIU S H, WAN P T, *et al.* 3-D numerical study on laser bending of sheet metal [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(2): 97-99 (in Chinese).
- [9] ZHANG J Q, LUO Q, LIU F, *et al.* The distribution of the thermal stress in the cylinder produced by the laser radiation [J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 1999, 16(4): 123-129 (in Chinese).
- [10] LIM H, LU A G, SONG Y Z. A numerical simulation for temperature and thermal stress distribution in Nd:YAG amplifiers [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(2): 86-88 (in Chinese).
- [11] length crystals [J]. *JO SA*, 1964, 54(10): 1267-1269.
- [6] ZHANG J, LI N L R, ZHOU Y, *et al.* Flattening optimization of spectral transmittance for birefringent filter [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, 23(4): 426-430 (in Chinese).
- [7] BARTELT H, LOHMANN A W, SICRE E E. Optical logical processing in parallel with theta modulation [J]. *JO SA*, 1984, A1(9): 949-951.
- [8] MASELTIP. Thin film thickness measurement: a comparison of various techniques [J]. *Thin Solid Films*, 1985, 124(3/4): 249-257.
- [9] SUN H B, HE Y B, WU G Zh, *et al.* Crystal thickness determination based on spectroscopic methodology [J]. *Optical Instruments*, 2003, 25(1): 3-7 (in Chinese).
- [10] YAO Q J. *Optics tutorial* [M]. Beijing: Higher Education Press, 1989: 338-339 (in Chinese).
- [11] FENG T Zh, WU F Q, LI G H. Optical measurement of the thickness along the quartz crystal axis [J]. *Laser Technology*, 2003, 27(2): 124-125 (in Chinese).

(上接第 522 页)

的光学方法。实验结果表明,该系统具有简单实用、测量范围广、测量精度高等优点,有着广泛的应用前景。

#### 参考文献

- [1] LEIX Y, LI H, DING F, *et al.* Novel application of a perturbed photonic crystal high quality filter [J]. *A P L*, 1997, 71(20): 2889-2891.
- [2] FORESI J S V, LENCUCV P R, FERRERA J. Photonic-band gap microcavities in optical waveguides [J]. *Nature*, 1997, 390(6656): 143-145.
- [3] MEKCKIS A. High transmission through sharp bends in photonic crystal waveguides [J]. *Phys Rev Lett*, 1996, 77(18): 3787-3790.
- [4] KNIGHT J C, BROCKNG J B, RKS T A, *et al.* Photonic band gap guidance in optical fibers [J]. *Science*, 1998, 282(5393): 1476-1478.
- [5] HARRIS S E, AMMANN E Q, CHANG I C. Optical network synthesis using birefringent crystals I: synthesis of lossless networks of equal-