

文章编号: 0258-7025(2008)06-0947-05

界面结合强度的激光划痕综合检测装置的设计

殷苏民 程 昌 冯爱新 赵荣春 刘素霞

(江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

摘要 建立了膜-基界面结合强度的红外激光准静态划痕的检测新方法。采用红外激光对膜层样品进行连续划痕, 通过摄像机, 获得膜-基界面的划痕图像, 经过 Matlab 预处理后准备调用; 同时采用红外热像仪实时在线检测样品表面的受热状态。信号检测系统检测薄膜表面温度和划痕图像等参数, 返回信号处理系统进行分析 and 处理。从而实现对膜-基界面结合强度的检测。

关键词 激光技术; 界面结合强度; 图像处理; 红外热像

中图分类号 TN 249 **文献标识码** A

Testing Method of the Laser Scratching Based on Image Acquisition System

Yin Sumin Cheng Chang Feng Aixin Zhao Rongchun Liu Suxia

(School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

Abstract A new detecting method of infrared laser scratching is presented to estimate the bond strength of film-substrate interface. The infrared laser continuously works on the sample film. The scratching images of the film-substrate interface are obtained by vidicon, and are prepared to be used after Matlab disposal. At the same time, the temperature apparatus system detects the temperature of sample surface in real time. The temperature of sample surface and the scratching image are detected by signal detection system in order to estimate the bond strength of film-substrate interface.

Key words laser technique; interface strength; image processing; infrared image

1 引言

膜是表面涂层、表面镀膜和表面改性层的统称, 膜基界面结合强度检测技术是薄膜技术研究与应用中的关键技术。激光划痕法综合了传统的划痕法和激光测量技术的优点, 是一种新型的薄膜测量技术。采用连续加载的长脉冲或连续波红外激光直接作用试样的膜层表面, 利用红外激光的热作用及随后的热传导, 在试件中形成温度场, 由于薄膜-基体材料的温度和热膨胀系数的差异, 在薄膜中形成热应力, 当热应力达到一定值时, 材料产生脱粘、裂纹扩展, 脱粘层弹性失稳翘曲, 并进一步发生贯穿裂纹萌生、扩展、断裂, 最终薄膜剥落。同时激光束相对于试样作进给运动, 从而在薄膜表面形成划痕。利用声发射应力采集技术检测激光划痕过程中的薄膜应力参数, 并用以分析膜基界面应力分布状况, 用对应的激光层参数, 结合检测参数以及薄膜、基体材料的物性

参数来分析界面结合强度^[1~3]。

针对表面膜破坏临界值与界面结合强度之间的复杂关系, 表面膜破坏临界点不容易确定, 本文提出了基于 CCD 图像传感器及红外热像仪的信号检测诊断方法, 并建立了相应的试验测试系统。

2 理论分析

当激光强度为 $I = I_0 \exp(r^2/d^2)$ (I_0, d 为常数) 的高斯光束打到薄膜上时, 其在空间上是轴对称分布的。由于温度梯度的存在, 在试样的轴向和径向产生热传导。数学模型为^[4]

$$\begin{cases} \frac{\partial \tau}{\partial r} = x^2 \Delta \tau, & x^2 = \frac{k}{c p} \\ \frac{\partial \tau}{\partial z} \Big|_{z=0} = -\frac{k_0}{k} I_0 \exp\left(-\frac{r^2}{d^2}\right) \\ \frac{\partial \tau}{\partial z} \Big|_{z=l} = 20, & \frac{\partial \tau}{\partial r} \Big|_{r=a} = 0, \quad \tau \Big|_{r=0} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

收稿日期: 2007-06-25; 收到修改稿日期: 2007-09-20

基金项目: 国家自然科学基金(50405035)和江苏省自然科学基金青年科技创新人才学术带头人项目(BK2007512)资助课题。

作者简介: 殷苏民(1956—), 男, 江苏人, 教授, 主要从事激光加工与检测技术方面的研究。E-mail: apolocc@yahoo.com.cn

式中 $\Delta = \nabla_2 = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$, a 为试样半径, l 为薄膜厚度, k_0 为表面吸收系数, k 为导热系数, c 为比热, ρ 为圆柱体密度。

由此产生的热应力可表示为^[4]

$$\sigma_0 = \frac{\alpha E_n I_0}{\rho c_p} \left\{ \sum_{m=0}^{\infty} \sum_{n=0}^{\infty} \omega_m(b) R_n(z) s_{mm}(t) \times \left[J_1 \left(\frac{u'_m}{b} \right) \frac{b}{u'_m} - J_0 \left(\frac{u'_m}{b} \right) \right] \right\}, \quad (2)$$

式中

$$\omega_m(b) = \frac{2}{b^2 J_0(\omega_m)} \times \begin{cases} \frac{a^2}{2} (1 - e^{-b^2/a^2}) & m = 0 \\ \left(\frac{b}{\mu_m} \right)^2 \sum_{i=0}^{\infty} \sum_{j=0}^i \frac{(-2)^j \left(-\frac{b^2}{\mu_m^2 a^2} \right)^i \mu_m^{2i+1-j} J_{j+1}(\mu_m)}{(i-j)!} & m \neq 0 \end{cases}$$

$$R_n(z) = \frac{(-\beta z)^n}{n!},$$

$$s_{mm}(t) = \frac{1 - e^{-Dt} \left[\left(\frac{\mu_m}{b} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{h} \right)^2 \right]}{Dt \left[\left(\frac{\mu_m}{b} \right)^2 + \left(\frac{n\pi}{h} \right)^2 \right]},$$

$$D = \frac{\lambda_l}{\rho c_p},$$

α 为线膨胀系数, c_p 为定压比热, b 为试样半径, μ_m 是第一类一阶贝塞耳函数的根, $m = 0, 1, 2, 3, \dots$, β 为吸收系数,

红外激光划痕过程中,主要是热效应起作用,其他的作用几乎可以忽略不计。薄膜自由表面热应力直接反映了薄膜界面承受的真实热应力,而且它具有唯一性、确定性和可测性。从而可以根据激光强度、激光划痕速度、薄膜表面温度、声发射检测图像等参数来判断膜-基界面破坏的临界点,用对应的激光层参数,结合检测参数以及薄膜、基体材料的物性参数来表征界面结合强度^[5,6]。

将激光技术与传统划痕法结合起来,综合了传统划痕法和激光测量方法的优点,具有划痕机制明确、可对试样进行直接检测、标定方便、非接触测量、适用面广、对膜层无特别要求、可实现生产现场和生产过程的实时在线检测等优点。

3 实验检测方案

实验由激光器系统、二维工作平移台系统、激光划痕界面结合状况检测诊断系统等组成,如图 1 所示。

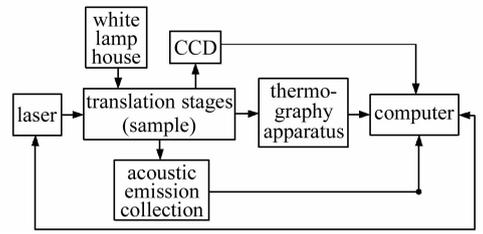


图 1 实验方案

Fig. 1 Scheme of experiment

长脉冲或连续波红外线激光束经半导体激光器直接连续作用在试样的膜层表面(试样固定在二维平移台上),激光器功率可调。在另一侧放置声发射检测系统,利用声发射技术检测薄膜的划痕断裂。根据采集到的声发射图像的波形图来分析涂层应力。可见光成像摄像机放在样品被测区域(成像面)的一侧,对应的另一侧放置可见光源,调整好摄像机与样品的距离,将采集到的划痕图像送入计算机进行实时存储,经过 Matlab 图像处理,被 Delphi 程序调用。红外热像仪放在样品被测区域,配合计算机实时数据采集系统,将膜基界面划痕的温度分布图像实时传送给工控机。以上参数经 Delphi 程序统一调用,根据激光强度、薄膜表面温度、划痕图像及声发射图像等综合分析判断样品膜层界面工程结合强度破坏的临界点^[7]。

4 试样检测平台设计

二维工作平移台系统通过运动控制卡来控制 x, y 二维工作平移台的连轴运动,从而实现对工作平移台上的薄膜样品的连续红外激光划痕,其系统的构建相对比较简单。

4.1 硬件组成

在该运动控制系统中,综合考虑设备工作特点及要求,系统硬件组成如图 2 所示。通过光栅传感器读取二维工作平移台的位置模拟量信号,转换成电压数字量信号后,传送到数据采集卡,上位机可以直接从数据采集卡中读取到二维平移台的位置信

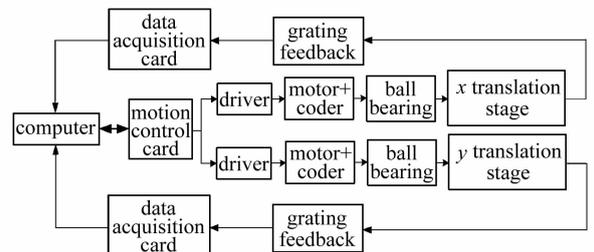


图 2 运动控制系统硬件组成框图

Fig. 2 Hardware composing of motion control system

息,从而提高系统的运动精度,形成全闭环位置控制,实现同一坐标系下的两轴联动。

该系统以计算机为上位机,步进机电有限公司的 MPC03 运动控制卡为下位机,通过 PCI 总线实现计算机与 MPC03 运动控制卡之间的通信。计算机向运动控制器发出运动控制指令,并通过 PCI 总线获取运动控制器的当前状态和相关控制参数,也就是说计算机主要完成人机交互界面的管理和控制系统的实时监控信息的显示等方面的工作。MPC03 卡则负责完成运动控制的所有细节,如实时轨迹规划、位置闭环伺服控制、主机命令处理和 I/O 管理等。电机采用松下伺服电机 MSMD022S1,其驱动器采用 MINAS-A4 系列。

4.2 软件开发

MPC03 配备了功能强大、内容丰富的运动控制函数库,包括各种单轴及多轴的点位运动,连续运动及回原点运动,直线、圆弧、螺旋线插补运动,所有插补运算完全在控制卡子系统中完成,在插补算法和运动函数的执行效率方面采用了更有效的方法,提高了插补精度、插补速度和实时性。

此类板卡编程方法有两种:一种是自己编写控制各种寄存器代码进行数据的采集和输出;另一种是利用其封装的动态链接库(DLL)访问相应的函数进行完成。为了节省时间,提高开发效率,使用第二种方法。实现基本控制功能的库函数为:

```
int auto_set(void); //自动检测和自动设置控制卡
int init_board(void); //对控制卡硬件和软件初始化
int auto_set(void); //自动检测和自动设置控制卡
int init_board(void); //对控制卡硬件和软件初始化
int set_outmode(int ch,int mode,int outlogic); //设置各轴输出模式
int set_home_mode(int ch,int home_mode); //设置回原点模式
int con_vmoving(int ch,int dir); //一轴以常速连续运动
int fast_vmoving(int ch,int dir); //一轴以快速连续运动
int con_hmoving(int ch,int dir); //以常速返回原点
int fast_hmoving(int ch,int dir); //以快速返回原点
```

于 MPC03 运动函数库可以很方便地进行二次开发,用户只要用 Visual C++ 或 Visual Basic 或 Delphi 等支持 Windows 标准动态链接库调用的开

发工具编制所需的用户界面程序,并把它与 MPC03 的动态链接库链接起来,就可以开发出自己的控制系统^[8,9]。本系统的流程图如图 3 所示。系统的人机界面采用 Delphi6.0 开发,实现对象化设计,具有标准 Windows 应用程序的所有特点,界面简洁,使用方便。控制系统的主要功能有:单轴运动、两轴独立运动、两轴插补运动; x, y 坐标显示;单步运行,回零;读取平移台位置信息反馈,进行位移补偿等。

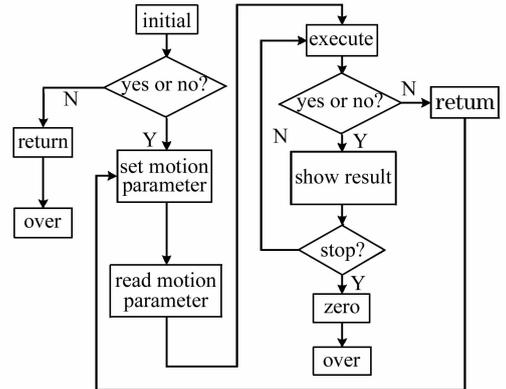


图 3 控制系统的程序流程图

Fig. 3 Program flow of the control system

5 图像采集系统

5.1 CCD 图像采集

随着数码相机技术的成熟,把图像采集、模/数转换、存储、处理、传输等多方面集合到一起,可以直接输出数字信号到上位机,并且具有抗干扰能力强、开发周期短等优点。因此采用 CCD 相机作为激光划痕图片采集系统的采集模块,具有很高的性价比。

本图像采集系统采用台湾敏通企业股份有限公司的 1/3 英寸彩色长型高解析摄像机,型号为 MTC-63X11H,其总像素为 795 pixel × 596 pixel (PAL 制式),扫描系统为 625 线,50 场/s (PAL 制式),信噪比为 52 dB (最小)/60 dB (最大)。

利用摄像机将拍摄到的激光划痕图像通过数据线直接存储到上位工控机。由于测量系统的各个环节均存在畸变和噪声,不利于对激光划痕图像进行分析,因此需要对原始图像进行预处理。采用 Matlab 强大的数字图像处理能力对原始图像进行预处理,既简单易行,处理效果又好。预处理主要是进行图像去噪,从而使图像更加平滑真实。然后通过 Delphi 链接 Matlab,通过接口调用经 Matlab 处理后的图像,与其他参数一起对比分析激光划痕膜基界面的结合强度。

5.1.1 用 Matlab 进行图像处理

图像采集过程中,引入的主要是加性噪声和量化噪声。前者与图像信号强度不相关,是在传输过程中引进的电视摄像机扫描图像的噪声等;后者是数字图像的主要噪声源,其大小显示出数字图像和原始图像的差异。此外,相机中的光敏器件、模/数转换器等,也会使图像含有各种噪声和失真。由于中值滤波能有效地去除脉冲干扰及图像扫描噪声,利用 Matlab 对原始图像进行二维中值滤波^[10]。

中值滤波是一种非线性信号处理方法,它的基本原理是把数字图像或数字序列中的一点值的用该点的一个邻域中的各点值的中值代替。通俗地讲中值滤波就是用一个活动窗口沿图像移动,窗口中心位置的像素灰度用窗口内所有像素灰度的中值来代替。滤波窗口选择 3×4 ,选用这种方法去噪效果比较明显^[11]。

5.1.2 Delphi 与 Matlab 的数据接口

虽然 Matlab 本身是一个完整的程序开发和数据处理环境,但由于本身存在的一些不足,如人机界面设计不方便、不能访问硬件等,需要同其他软件如 Delphi 等交互协同工作。Matlab 负责后台图像分析处理,Delphi 负责前台管理。Matlab 同外部程序的接口方法很多,其中最方便的就是利用 ActiveX 同 Matlab 进行交互^[12]。

ActiveX 是由 Microsoft 制定的一种独立于编程语言的组件集成协议,不受开发环境的限制。可以利用 ActiveX 自动化服务器和自动化控制器技术,实现 Matlab 和 Delphi 接口。

自动化服务器是一种可以由其他应用程序编程驱动的组件,其核心是要包含一个或多个供其他程序创建和连接的基于 IDispatch 的接口。对 Matlab 自动化服务器的使用,系统提供了 5 个调用函数:Excute, PutFullMatrix, GetFullMatrix, MinimizeCommandWindow, MaximizeCommandWindow。

Delphi 提供两个函数用于 ActiveX 接口和对对象编程: GetActiveOleObject 和 CreateOleObject。其中 GetActiveOleObject 用于访问当前运行的 ActiveX 对象表,返回指定的 ActiveX 对象; CreateOleObject 用来创建指定的、已初始化的 ActiveX 对象。可以通过调用这两个函数,创建一个 Matlab 自动化服务器的对象实例。

5.2 红外热像采集

由膜基界面的划痕机制可知,它是利用红外激

光对薄膜加热,在薄膜表面形成温度场,从而在薄膜中形成热应力,当到达一定值时产生薄膜划痕的效果。正是存在这种热效应,本文建立了温度-应力模型,采用美国 Fluke 公司的红外热像仪系统 Ti45HT-FT,建立薄膜外表面温度与其划痕损伤程度之间的关系,并用红外热像仪对薄膜外表面温度进行实时在线监测。

热像仪采用两种存储热图像方式:一种为直接插入热像仪里的存储卡,其大小为 512 M,存入卡内的是热像仪拍摄到的图像表面各个离散点的温度值表,图像点分布为 $1280(\text{纵向}) \times 1024(\text{横向})$;另一种为直接用数据线传递到工控机,所传信息为图片,图片上记录着各个连续点的温度值。为了满足实时在线检测的要求,采用热像仪和上位工控机直接通信的形式,利用 Fluke 公司自带的软件 SmartView 存储并转换图像,可使用 SmartView 导出的图像格式有 JPEG, BMP, TIF, PNG, 然后利用 Delphi 编程统一调用这些参数,综合分析处理。

6 结 论

建立一种膜基界面损坏模型,为开展单层及多层金属薄膜、光学薄膜、有机高分子薄膜和复合材料的界面准静态结合强度表征的研究找到一个新方法,从而进一步研究界面破坏的微观机制。

从傅里叶热传导理论出发,分析了等强度和高斯模型长脉冲连续波红外激光准静态加载作用下膜基系统的温度场及应力场分布;建立移动激光加载下的膜基系统的分析模型,计算等强度激光和高斯激光加载下膜基系统中的温度场和应力场;分析在特定的组合条件下的温度场分布状况和膜基系统中应力场的分布状况。

参 考 文 献

- 1 R. Ikeda, H. Cho, A. Sawabe *et al.*. Laser spallation method to measure strength against mode-I decohesion of CVD diamond films [J]. *Diamond & Related Materials*, 2005, **4**(3-7): 631~636
- 2 K. L. Mittal. Adhesion Measurement of Films and Coatings [M]. Netherlands: VSP, 1995
- 3 Feng Aixin, Zhang Yongkang, Xie Huakun *et al.*. Characterization of interfacial adhesion and bond strength between thin film coating and substrate by scratch testing [J]. *J. Jiangsu University (Science and Technology)*, 2003, **24**(2): 15~19
冯爱新,张永康,谢华琨等. 划痕试验法表征薄膜涂层界面结合强度[J]. *江苏大学学报(自然科学版)*, 2003, **24**(2): 15~19
- 4 Luo Qiang, Ren Qingli. Analysis of the temperature rise and the thermal stress which produced by Gauss laser radiated on an end of the cylinder [J]. *Structure & Environment Engineering*,

- 2001, (3):14~21
- 罗 强,任庆利. 高斯激光束照射圆柱体-端面上引起温升和热应力的分析[J]. 结构与环境工程, 2001, (3):14~21
- 5 Hua Yinqun, Chen Ruifang, Yang Jichang *et al.*. Study on experiments and mechanism of 40Cr steel surface by laser compound processing [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10): 1445~1448
- 花银群,陈瑞芳,杨继昌等. 40Cr 钢表面激光复合强化机理研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(10):1445~1448
- 6 Dai Mingkui, Xu Deyan, Shen Weixing. Measuring scratch width by sampling diffracted-light intensity: experiment [J]. *Acta Optica Sinica*, 1998, **18**(1):90~94
- 戴名奎,徐德衍,沈卫星. 衍射光强取样分析法测定划痕宽度: 实验部分[J]. 光学学报, 1998, **18**(1):90~94
- 7 Wang Huaming, Li Xiaoxuan, Sun Xijun *et al.*. Study of surface mechanical properties of laser shock processed austenitic steel and Ni-based superalloy [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(8):756~759
- 王华明,李晓轩,孙锡军等. 激光冲击处理不锈钢及镍基合金后表面力学性能的研究[J]. 中国激光, 2000, **A27**(8):756~759
- 8 Motion Control Card Manual. Step-Servo Co., Ltd
- 步进机电有限公司. MPC03 运动控制卡操作手册
- 9 Gao Henqiang, Bu Jiawu. Motion control card MPC02 apply in the system of numerical control incision [J]. *Software Guide*, 2006, **2**(6):18~20
- 高恒强,补家武. 运动控制卡 MPC02 在数控切割系统中的应用 [J]. 软件应用, 2006, **2**(6):18~20
- 10 Xie Yanjiang. Computer image buildup application in getting rid of image disorder [J]. *J. Xiangnan University*, 2004, **25**(2): 75~77
- 谢燕江. 中值滤波在图像去噪中的应用[J]. 湖南学院学报, 2004, **25**(2):75~77
- 11 He Xiping, Zhang Qionghua. Image processing and analysis based on MATLAB [J]. *J. CTBU(Nat. Sci. Edit.)*, 2003, **20**(2):22~24
- 何希平,张琼华. 基于 Matlab 的图像处理与分析[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2003, **20**(2):22~24
- 12 Jin Wei, Fan Zhenyu, Jiang Xinhua. Matlab interfacing with ActiveX [J]. *Microcomputer Applications*, 1999, **15**(12):54~56
- 金 玮,范征宇,姜新华. Matlab 的 ActiveX 接口[J]. 微型电脑应用, 1999, **15**(12):54~56