

文章编号: 0258-7025(2010)08-2160-05

基于优选算法的界面结合强度激光 离散划痕装置

曹宇鹏^{1,2} 冯爱新¹ 徐传超¹ 孙淮阳¹

(¹ 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)
(² 南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226019)

摘要 提出了涂层-基体界面结合强度的单脉冲激光离散划痕快速检测的新方法, 针对该方法设计了一种实现离散划痕的自动化装置。通过检测典型涂层失效建立失效数据库; 激光器系统采用优选算法逼近使涂层失效的激光功率密度范围; 检测系统通过功率计检测涂层表面红外光束反射得出涂层表面形貌的特征参数; 将检测系统得出的参数与失效数据库进行比较, 得出激光器下一点激光输出功率。逐步逼近, 最终实现对涂层失效阈值的确定, 智能化地实现了离散划痕任务。

关键词 激光技术; 优选算法; 划痕装置; 激光划痕

中图分类号 TN249; TG665 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103708.2160

Device of the Laser Discrete Scratching for Test Interfacial Bonding Strength Based on Optimization Algorithm

Cao Yupeng^{1,2} Feng Aixin¹ Xu Chuanchao¹ Sun Huaiyang¹

(¹ School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)
(² School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong, Jiangsu 226019, China)

Abstract A new detecting method of pulse laser discrete scratching is presented to estimate the bond strength of film-substrate interface and a device is designed to achieve the automation of discrete scratch. Through detecting typical coatings failure the database is established. The optimal algorithm method is applied to the laser system in which it immediately approaches the power density range of laser with coating failed. Through the power meter detecting infrared beam reflective surface of the coating surface morphology of coatings, detection system obtains characteristic parameters; which will be compared with the failure database to arrive next point laser output power. Asymptotic approximation is used to determine the fact coating failure threshold and the design achieve intelligent discrete scratches.

Key words laser technique; optimization algorithm; scratch device; laser scratch

1 引 言

涂层技术是一种重要的表面处理和材料复合的先进技术, 其核心是保证涂层在寿命期内与基体具有良好的结合性能^[1,2]。激光划痕法是一种基于长脉冲红外激光准静态热力耦合原理的全新结合强度检测方法^[3,4], 采用涂层失效时的激光束参数表征涂层与基体的结合性能。但该方法所产生的划痕路

径较长, 且由于激光对涂层表面的单点重复加载, 影响了测试结果的处理^[5]。

由于涂层破坏临界值与界面结合强度之间关系复杂, 涂层破坏临界点不容易确定, 提出了激光离散划痕法, 本文针对该方法提出了以优选法为核心激光功率输出算法, 设计了检测涂层失效临界点的装置, 实现了激光离散划痕的智能化。

收稿日期: 2009-10-21; 收到修改稿日期: 2009-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(50405035)、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)和先进数控技术江苏省高校重点实验室开放基金(KXJ07126)资助课题。

作者简介: 曹宇鹏(1981—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光检测技术的研究。E-mail: cyp19812004@126.com

导师简介: 冯爱新(1970—), 男, 博士, 副教授, 主要从事激光加工与检测技术的研究。E-mail: aixfeng@ujs.edu.cn

2 理论分析

当激光强度为 I_0 的脉冲激光束打到涂层上,如图 1 所示,该模型采用气体动力学理论中的能量、动量和质量守恒方程来描述。E-特勒等^[6]根据物质相分解边界条件得到等离子体对固相界面的压强 p 为

$$p = 0.34\alpha^{-0.125}\tau^{-0.125}I_0^{0.75}, \quad (1)$$

式中 α 为吸收系数, τ 为激光脉冲宽度。

短脉冲激光离散划痕过程中,主要是冲击效应起作用,其他的作用可以近似忽略不计。由(1)式可推知:当 α 与 τ 越小且 I_0 越大时,脉冲激光产生的冲击波峰值压力越大。冲击压力以应力波的形式在一定速度下由涂层表面向试样内传播,并且波在界

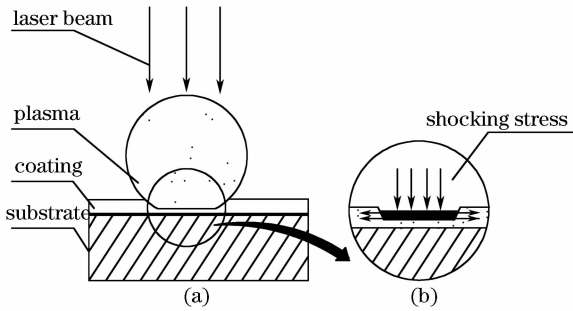


图 1 脉冲激光冲击涂层原理示意图

(a) 激光冲击模型; (b) 涂层变形示意图

Fig.1 Schematic diagram of shocking coating by pulsed laser. (a) mode of laser shock; (b) schematic diagram of coating's deformation

面处反射、折射和叠加等对材料的变形产生了复杂的影响。假设冲击波为一维平面压缩波^[7],在沿冲击波传播方向上,挤压表层产生纯单轴向压缩,同时在平行于挤压表面的平面内使冲击区表层发生伸长,如图 1(b)所示。当该压力达到一定值时,塑性变形产生的应力超出了涂层-基体的结合力导致涂层失效。用涂层-界面破坏的临界点对应的激光参数,结合涂层、基体材料的物性参数来表征界面结合强度^[8]。

3 离散划痕与优选原理

激光离散划痕法综合了激光划痕法和优选法的优点,是一种基于短脉冲激光新型的涂层测量技术。利用优选法快速获得了涂层失效的激光功率密度范围,在该范围内通过采用脉冲激光对涂层进行单点单次加载,形成了深度逐渐增加的点状离散划痕,以较短的划痕长度即可确定涂层失效临界点(失效阈值)^[5]。通过上述理论分析可知对应失效临界点的激光参数,结合涂层、基体材料的物性参数即可表征界面结合强度。

激光离散划痕实验由激光器系统、工作平移台系统、界面结合状况检测诊断系统等组成,如图 2 所示。检测系统、人工监控与失效数据库组成了界面结合状况检测诊断系统。失效数据库是一种事先编好的表征各种涂层失效的各种征兆的数据库。

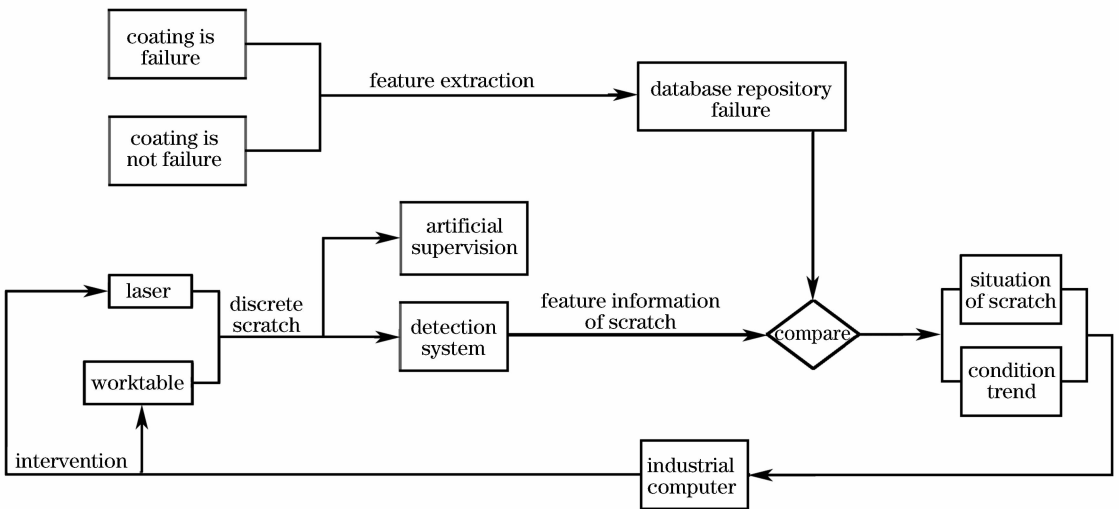


图 2 离散划痕实施过程

Fig.2 Implementation process of discrete scratch

短脉冲激光束经 YAG 激光器直接作用在试样的涂层表面(试样固定在二维平移台上),激光器功率按优选算法输出且激光器和工作台由工控机统一

控制。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,被实验操作者用于实时监控。检测系统的核心功率计放在样品被测

区域(成像面)的一侧,对应的另一侧放置可见光源,利用功率计检测涂层被激光加载后的形貌。根据采集的波形图分析涂层的表面状况,提取出划痕后涂层的特征信息,将特征信息与失效数据库进行对比,把涂层此时状况归属到某一已知的样板模式中去,并根据划痕状况预测状态趋势。工控机与检测系统进行通信,根据涂层是否失效对激光器输出功率范围进行赋值,由优选算法确定下一点激光输出功率。通过优选法迅速逼近涂层失效的激光功率密度范围,从而提高了划痕效率,减少了涂层的破坏。以上参数经 VC 程序统一调用,根据激光强度、涂层表面形貌、划痕图像等综合分析判断涂层界面工程结合强度破坏的临界点。

以优选法为核心激光功率输出算法是该实验方案的关键。所谓优选法,是指华罗庚发明的一种可以尽可能减少试验次数、尽快地找到最优方案的方法。优选法分为单因素方法和多因素方法两类。单因素方法有平分法,0.618法(黄金分割法),分数法,分批试验法等;多因素方法很多,主要有降维法、爬山法、单纯形调优胜、随机试验法、试验设计法等。

本文方案借用单因素黄金分割规律来简化试验次数找到最佳的数值。优选法基本步骤:1) 选定优化判据(试验指标),确定影响因素,优选数据是用来判断优选程度的依据;2) 优化判据与影响因素直接的关系称为目标函数;3) 优化计算。如图 3 所示,估计包含最优点的试验范围,假设 a 表示下限, b 表

示上限,试验范围为 $[a, b]$;从激光器电压范围黄金分割点所对应值对应的激光功率密度 g_1 开始,通过检测系统在线检测单脉冲激光加载后涂层的形貌,结合优选算法可将涂层失效的激光功率密度范围收敛于极小区间,在该范围内所进行的单脉冲激光离散划痕使路径长度得以缩短,从而有效地提高划痕效率和减少涂层破坏,可实现生产现场和生产过程的实时无损检测等优点。

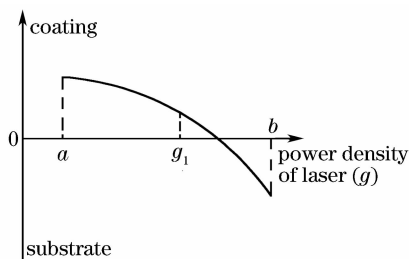


图 3 优选法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of optimization algorithm

4 基于优选算法的划痕装置

4.1 硬件组成

如图 4 所示,划痕装置由 SGR-10 YAG 固体激光器,MINTRON 63X11 CCD 相机,PM120 功率计,JGH-25Y-I He-Ne 激光器,MAC-3002SSP4 运动控制卡,光栅传感器,数据采集卡,工控机,平移工作台,反射镜和聚焦透镜组成。

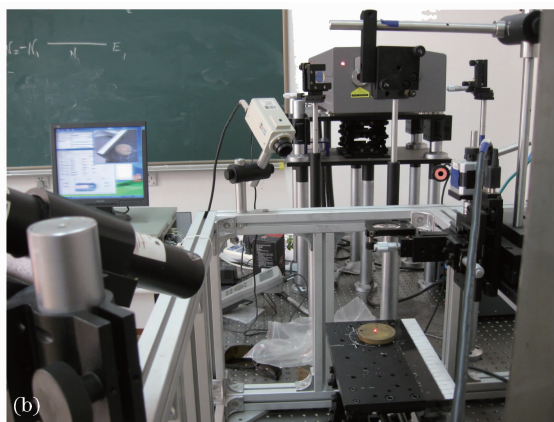
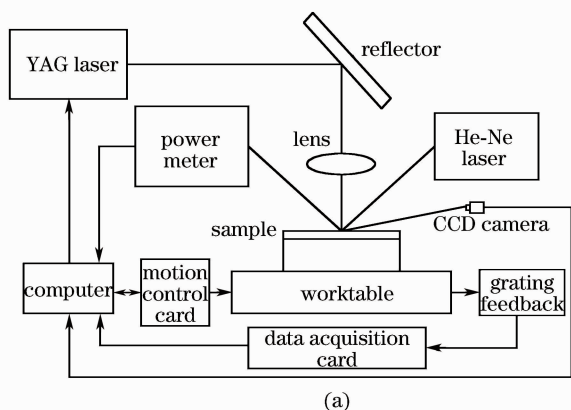


图 4 硬件组成。(a) 原理图;(b) 实物图

Fig. 4 Composition graph of hardware. (a) schematic diagram; (b) pictorial diagram

4.2 软件开发

激光划痕检测系统的软件开发包括 YAG 激光器模块、界面结合状况检测诊断系统模块、工作台控制模块 3 大部分。通过 3 节分析可知,包含涂层特征采集与失效数据库的界面结合状况检测诊断系统

模块是优选法实现的前提;YAG 激光器模块包含以优选法为核心激光功率输出算法是该软件开发的关键。

4.2.1 YAG 激光器模块

根据集成化设计开发自动划痕及检测系统的思

路,采用通信协议自主开发控制软件实现对激光器的自动控制。在激光系统中,通过通信协议让上位工控机对其进行远程自动控制。上位机与激光器通信采用 RS232 接口电缆,发送指令对其进行激光功率、电压、频率和波长等的控制。短脉冲激光束经由反射镜和聚焦透镜组成的外光路直接作用在试样的涂层表面。利用 Remon Spekreijse 提供的免费串口类 CSerialPort,搭好串口通信框架,完成串口编程任务。

根据优选法思想,本系统的流程图如图 5 所示。系统的人机界面采用 Visual C++ 开发,实现对象化设计,主要功能有:控制单脉冲激光输出;根据检测系统与库文件的对比,依据优选法确定下一点激光的输出功率;读取激光器系统的信息反馈;自动逼近涂层失效阈值。

4.2.2 界面结合状况检测诊断系统模块

该模块包含涂层特征采集与失效数据库,是优选法实现的前提。检测系统通过功率计采集涂层特征与失效档案库对比,根据特征信息确定涂层状况。例如以丙烯酸有机高分子材料作为涂层,激光功率密度逐步变化,功率计采集的光强度数值通过 RS232 接口实时与计算机通信,系统程序根据功率计采集的数据在窗口绘出曲线,如图 6 所示。图 6 中所有 P 点涂层均从基体剥离,其中 P1 为涂层首次出现失效。图 6(a)所示 Q1, Q2 为激光对试样 1

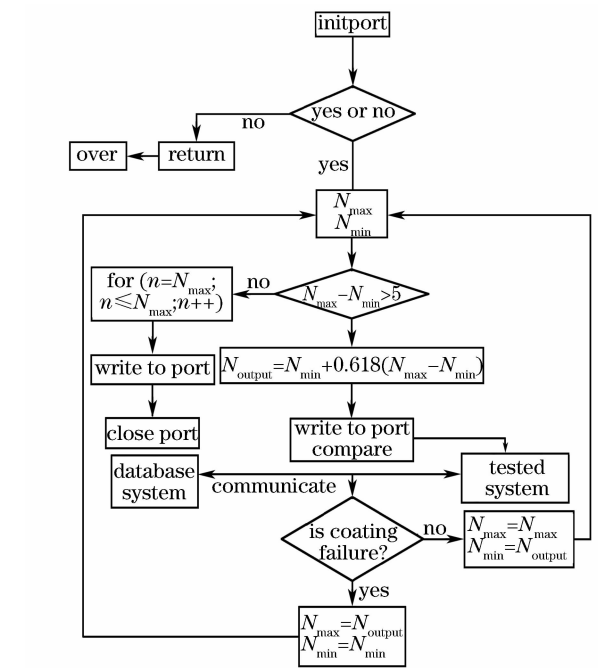
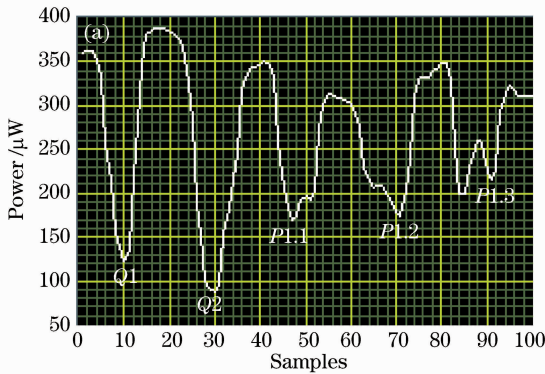


图 5 基于优选法的激光器系统控制流程图
Fig. 5 Program flow of the laser control system based on optimization algorithm

涂层加载后未剥离的两点。由此可知,该涂层激光加载时的显著特征为: He-Ne 激光器发出的光在加载点处反射光功率值范围和曲线的拐点数。读 PM120 的检测数据,根据反射光功率值和拐点个判断涂层状况。

人工监控是利用 CCD 拍摄激光划痕图像,对划

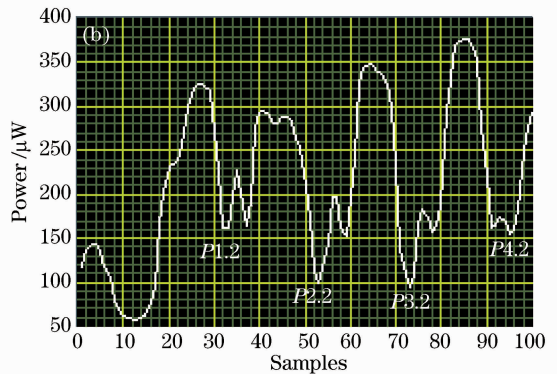


图 6 划痕时采样点处反射的光强度。(a)试样 1;(b)试样 2

Fig. 6 Reflected light density at sampling points as being scratched. (a) sample 1; (b) sample 2

痕检测过程实时监控。利用 Matlab 对原始图像进行二维中值滤波^[9], Delphi 负责前台管理,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^[10]。

4.2.3 工作台控制模块

MAC-3002SSP4 运动控制卡配备了功能强大、内容丰富的运动控制函数库,使用支持 Windows 标

准动态链接库调用的开发工具 Visual C++ 编制所需的用户界面程序,并把它与运动控制卡的动态链接库链接起来,开发出辅助实现离散划痕的工作台控制系统^[8]。

5 结 论

1) 提出了以优选法为核心的激光功率输出算

法,迅速逼近涂层失效的激光功率密度范围,设计出检测涂层失效临界点装置,从而提高了划痕效率,减少了涂层的破坏,智能化地完成了激光离散划痕。

2) 通过功率计采集到激光加载后涂层形貌特征,并提取出划痕后涂层的特征信息,确立各类失效的样板模式,从而建立起失效档案库。该方法需要对各种涂层进行大量的实验,提取特征信息建立失效库,从而确保库信息的准确性。

参 考 文 献

- 1 Yin Sumin, Ye Yong, Feng Aixin *et al.*. Theoretical analysis and testing research of stress-strain of coating scratched by infrared laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9):1423~1428
殷苏民,叶 勇,冯爱新等. 红外激光划痕涂层的应力应变理论分析与试验研究[J]. 中国激光, 2008, **35**(9):1423~1428
- 2 Yang Banquan, Chen Guangnan, Zhang Kun *et al.*. Interfacial bonding strength between coating and substrate [J]. *Advances in Mechanics*, 2007, **37**(11):67~79
杨班权,陈光南,张 坤等. 涂层/基体材料界面结合强度检测方法的现状与展望 [J]. 力学进展, 2007, **35**(11):67~79
- 3 Kong Dejun, Zhang Yongkang, Chen Zhigang *et al.*. Effects of laser heat treatment on properties of Ni-P alloy film by chemical deposition [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6):871~875
孔德军,张永康,陈志刚等. 激光热处理对化学沉积 Ni-P 合金薄膜性能的影响 [J]. 中国激光, 2007, **34**(6):871~875
- 4 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]. *Journal of 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
- 5 Feng Aixin, Cao Yupeng, Ye Yong *et al.*. Optimization method of route testing and experimental research on pulse laser scratching technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1):236~241
冯爱新,曹宇鹏,叶 勇等. 一种脉冲激光划痕检测路径优化方法与实验研究[J]. 中国激光, 2010, **37**(1):236~241
- 6 Duan Zhiyong, Wu Hongxing, Wang Shengbo *et al.*. Theoretically study on magnitude and time characteristics [J]. *Laser Journal*, 2000, **21**(3):20~22
段志勇,吴鸿兴,王声波等. 激光冲击波的幅度和时间特性的理论研究[J]. 激光杂志, 2000, **21**(3):20~22
- 7 Ni Minxiong, Zhou Jianzhong, Yang Chaojun *et al.*. Analysis on residual stress field by laser shock peening [J]. *Laser Journal*, 2006, **27**(5):79~83
倪敏雄,周建忠,杨超君等. 激光冲击强化诱导的残余应力场分析[J]. 激光杂志, 2006, **27**(5):79~83
- 8 Yin Sumin, Cheng Chang, Feng Aixin *et al.*. Testing method of the laser scratching based on image acquisition system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6):947~951
殷苏民,程 昌,冯爱新等. 界面结合强度的激光划痕综合检测装置的设计[J]. 中国激光, 2008, **35**(6):947~951
- 9 Xie Yanjiang. Computer image buildup application in getting rid of image disorder [J]. *Journal of Xiangnan University*, 2004, **25**(2):75~77
谢燕江. 中值滤波在图像去噪中的应用[J]. 湘南学院学报, 2004, **25**(2):75~77
- 10 Jin Wei, Fan Zhengyu, 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