

文章编号: 0258-7025(2004)Supplement-0329-03

界面结合强度激光划痕测量新方法

冯爱新¹, 张永康¹, 谢华锬², 周明¹, 蔡兰¹

(¹江苏大学 机械工程学院, 江苏 镇江 212013)
(²成都工具研究所, 四川 成都 610056)

摘要 薄膜-基体界面结合性能是直接关系膜基体系最终使用性能和可靠性的关键因素和首要指标。在分析界面结合强度划痕试验法和激光层裂法的研究与应用现状的基础上,提出了界面结合强度红外激光划痕和远紫外激光划痕测量新方法,并分析了其技术优势。最后研究了激光划痕机理和相关的界面结合状态诊断技术。

关键词 薄膜技术; 界面结合强度; 划痕试验法; 激光层裂法

中图分类号 O484

文献标识码 A

New Method of Laser Scratching to Determine the Bond Strength of the Film-Substrate Interface

FENG Ai-xin¹, ZHANG Yong-kang¹, XIE Hua-kun², ZHOU Ming¹, CAI Lan¹

(¹Institute of Laser Technology, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)
(²Chengdu Tool Research Institute, Chengdu, Sichuan 610056, China)

Abstract The bond strength of film-substrate interface is often the predominant factor and chiefly target in determining the performance and reliability of film-substrate system. A new method of infrared and deep UV radiation laser scratch testing technique is presented in the article to determine the bond strength of film-substrate interface. The laser scratching mechanism and diagnosis technology of the bonding state of the film-substrate interface are studied on the bases of analyzing the technological advantages of the laser scratching technique.

Key words film technique; bond strength; scratch testing; laser spallation

1 引言

如何定量测定膜-基界面结合强度是困扰世界各国科学家的世界性难题。

针对激光层裂技术与传统划痕试验技术的研究与应用现状,提出界面结合强度激光划痕检测技术。激光直接加载于薄膜表面,利用脉冲远紫外激光的冷态刻蚀加工机理和长脉冲红外激光的准静态热加工机理,在薄膜表面形成深度逐渐增加的划痕,用膜-基界面破坏时的激光束参量、检测参量和薄膜以及基体材料物性参量来表征膜基界面结合强度^[2,3]。

2 激光划痕法的技术优势

2.1 划痕试验法和激光检测技术的研究与应用现状分析

划痕法具有操作简便、直观、量化、方法成熟、工

程应用广泛、应用效果良好等优点,是目前唯一能够有效测量硬质耐磨薄膜与基体界面结合强度的一种方法,但存在临界载荷的影响因素繁多、划痕机理复杂、接触式测量、破坏性测量、声发射信号检测模式的局限性等问题^[1,4]。

激光层裂法以短脉冲(脉宽:2 ns~8 ns)激光经过约束层和能量吸收层高应变率($10^7\sim 10^8$)加载试样的无膜表面,利用从薄膜自由表面反射形成的拉伸波与入射压缩应力波在膜-基界面处相遇时受拉产生层裂^[4]。

近年来,江苏大学蔡兰教授等人在该领域进行了大量的系统深入研究,取得了突破性进展^[5]。但其测得的是界面动态本征结合强度,而膜基系统大多在静态、准静态条件下工作,工程中往往采用工程界面结合强度来表征其结合性能,至今尚未建立两者

基金项目: 江苏大学微纳米科学技术研究中心开放基金(1291400001)资助项目。

作者简介: 冯爱新(1970-),男,江苏大学机械工程学院讲师,博士生,主要从事激光技术、机械制造及其自动化、模具技术方面的研究。E-mail: aixfeng@ujs.edu.cn

之间的定量关系。另外,激光层裂法对膜基材料的声阻抗以及试样厚度的要求比较严格,目前只能对平面试样进行检测。

2.2 激光划痕法的技术优势分析

激光划痕法将激光技术与传统划痕法结合起来,综合了传统划痕法激光测量方法的优点,经初步分析,可形成如下技术优势:

- 1) 激光划痕法测得的是工程界面结合强度,具有划痕试验法的操作简便、直观、便于工程应用的优点。
- 2) 激光划痕法以激光直接作用于试样的薄膜表面,无需约束层和能量吸收层,可对工件和产品进行直接检测,对工件形状也无特别要求,适用于平面和曲面等复杂形状的试件。
- 3) 非接触测量,无机械力和摩擦的作用,薄膜与基体的弹塑性变形小。测量结果较划痕法更能反映界面的结合状况和结合质量。

4) 红外激光划痕法测得的是界面准静态结合强度,这与膜-基系统静态、准静态工作环境相一致。

3 激光划痕原理

激光划痕原理包括两方面内容,即长脉冲红外激光准静态热力耦合机理和脉冲远紫外线激光冷态刻蚀加工机理。

3.1 长脉冲红外激光准静态热力耦合机理

长脉冲红外激光束经入射激光束光路系统直接辐射薄膜试样表面,利用激光束对薄膜表面几十nm厚薄层的准静态加热,以及随后的热量热传导,在试件中形成温度场,由于薄膜、基体材料的热膨胀系数和温度的差异,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,进一步发生界面裂纹扩展、翘曲、贯穿裂纹形成与扩展和剥落(图1)。



图1 界面处失效过程

Fig.1 The failure process of film substrate interface

激光能量连续增加,同时试件相对于激光束作进给运动,从而在薄膜表面形成划痕。

3.2 脉冲远紫外线激光冷态刻蚀机理

连续加载的脉冲远紫外激光束直接作用于试件的薄膜表面,通过APD光解剥离过程,即通过光离解、光致变价、形成晶格缺陷、等离子化等作用(对有些材料,光子甚至可直接打破分子或晶体之间的结合键)实现对材料的冷态剥蚀加工,使薄膜材料逐层地剥离。同时,试件相对与激光束作进给运动,从而在薄膜表面形成深度逐渐增加的划痕,直至膜-基体界面破坏。

图2为紫外激光对薄膜的冷态刻蚀过程(消融机理)示意图。整个过程是在瞬间完成,一般与激光的脉冲宽度相近的,对周边区域的热影响小,可忽略

热效应的影响。图2(a)薄膜吸收超过其剥离阈值的能量阶段。图2(b)为薄膜吸收激光能量后,进行光化学分解和热分解,化学键断裂、分解成“气态”的“粉末”过程示意图,此时,微小局部比容急剧增加。图2(c)为高温的气态粉末急剧膨胀、爆炸,以体爆炸的形式喷射出表面过程示意图。

4 膜-基界面结合状态诊析技术研究

4.1 应力-应变诊析技术

红外激光使薄膜失效是一个脱粘、裂纹扩展、翘曲、贯穿裂纹形成与扩展和剥落的过程,在界面分离的各个阶段,应力、应变以及位移等信号产生突变。以信号发生突变时的激光束参量,结合应力-应变检测参量以及薄膜、基体材料物性参量可表征界面结合性能。

4.2 光声诊析技术和等离子诊析技术

由于膜-基界面往往是膜-基体系中最薄弱的环节,当脉冲远紫外激光刻蚀至膜-基界面时,必然会发生材料气氛浓度和粒度的突变,利用光声技术和等离子技术检测这一突变并据此判断膜基界面破坏的临界点。用此时所对应的激光束参量,结合检测参量以及薄膜、基体材料物性参量可表征界面结

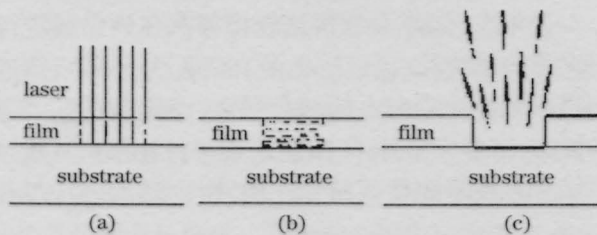


图2 远紫外激光冷态刻蚀加工机理

Fig.2 The cold denudation mechanism of far-UV radiation laser

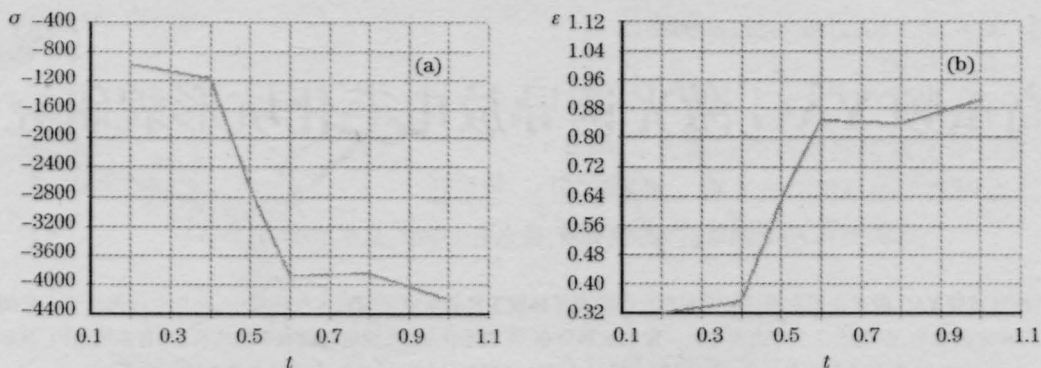


图3 薄膜中心节点的应力和应变变化规律

Fig.3 Epicenter stress and strain of film

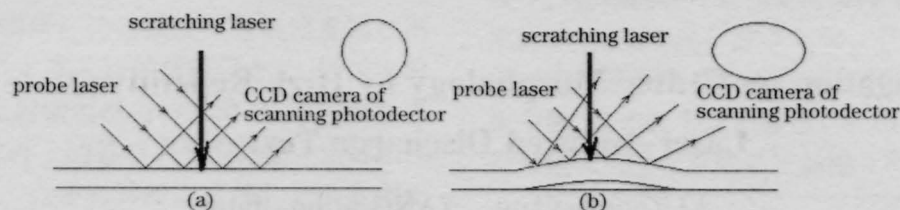


图4 表面热镜诊断原理

Fig.4 Principle of surface thermal lensing diagnosis

合性能。

4.3 表面热镜诊断技术

在红外激光划痕过程的薄膜翘曲变形时, 薄膜曲率半径发生突变, 从而使检测激光经薄膜表面后的热反射信号也发生相应的突变, 用 CCD 或能量探测器记录该突变信号, 并用发生突变时所对应的激光束参数, 结合检测参数与薄膜、基体材料物性参数可表征界面结合性能。

5 结论

激光划痕法综合了传统划痕法和激光测量方法的优势。是一种全新的膜基界面结合性能评定方法, 具深远的科学研究价值和广阔的工程应用前景。

激光划痕法的划痕机理分别为脉冲远紫外激光冷态刻蚀机理和长脉冲红外激光划痕热力耦合机理。

参考文献:

1 K.L.Mittal. Adhesion measurement of films & coatings[C]. The Second International Symposium on Adhesion Measurement of

Films and Coatings. BOSTON USA: VSP .2001.1~351

2 Y. K. Zhang, A. X. Feng *et al.*. A method and equipment of deep UV radiation laser scratching technique to characterize the bond strength of film-substrate interface [P]. Chinese patent apply No.:02138512.2

张永康, 冯爱新, 周明, 谢华锴, 蔡兰. 界面结合强度的远紫外激光划痕测量方法及装置[P]. 中国专利, 申请号:02138512.2

3 A. X. Feng, Y. K. Zhang, *etc.* A method and equipment of laser scratching technique to characterize the quasi-static bond strength of film-substrate interface [P]. Chinese patent apply No.:02138511.4

冯爱新, 张永康, 周明, 谢华锴, 蔡兰. 界面结合强度的准静态激光划痕测量方法及装置[P]. 发明专利, 申请号:02138511.4

4 A. X. Feng, Y. K. Zhang *et al.*. Characterization of interfacial adhesion and bond strength between thin film coating and substrate by scratch testing[J]. *J. Jiangsu University*, 2003, 24(2):15-19

冯爱新, 张永康, 谢华锴等. 划痕试验法表征薄膜涂层界面结合强度[J]. *江苏大学学报*, 2003, 24(2): 15-19

5 Zhou Ming. Doctor degree article: study on the quantitative determination and diagnosis technique of the adhesive strength by laser spallation technique[D]. Doctoral dissertation, 2002.11

周明. 激光层裂法定量测试界面结合强度与诊断技术研究[D]. 博士论文, 2002.11