

# 激光冲击波诱导膜-基系统动态应力应变

冯爱新<sup>1,2</sup> 钟国旗<sup>2\*</sup> 薛伟<sup>1</sup> 施芬<sup>2</sup> 庄绪华<sup>2</sup> 何叶<sup>2</sup> 陈风国<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 温州大学机电工程学院, 浙江 温州 325035)  
(<sup>2</sup> 江苏大学机械工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要** 采用不同能量的脉冲激光多点单次冲击 3 种不同界面结合强度的膜-基系统, 利用 X 射线衍射 (XRD) 技术检测膜-基系统残余应力, 并用聚偏二氟乙烯 (PVDF) 传感器技术采集膜-基系统的动态应变信号, 建立了膜-基系统激光冲击波加载模型, 探索了激光离散划痕膜-基系统的失效形式。结果表明, 激光冲击后, 2024 铝合金表面以及膜-基系统冲击光斑中心的残余应力都呈增大的趋势。膜-基系统的动态响应与膜-基界面结合强度及激光能量有关。激光离散划痕膜-基系统的失效形式有两种: 一是反射拉伸波导致薄膜剥落; 二是膜-基系统间的剪切应力导致薄膜剪切失效。

**关键词** 激光技术; 激光冲击波; 膜-基系统; 残余应力; 动态应变

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0603003

## Dynamic Stress-Strain of Film-Substrate System Induced by Laser Shock Wave

Feng Aixin<sup>1,2</sup> Zhong Guoqi<sup>2</sup> Xue Wei<sup>1</sup> Shi Fen<sup>2</sup> Zhuang Xuhua<sup>2</sup>  
He Ye<sup>2</sup> Chen Fengguo<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> College of Mechanical & Electrical Engineering, Wenzhou University, Wenzhou, Zhejiang 325035, China)  
(<sup>2</sup> School of Mechanical Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu 212013, China)

**Abstract** The laser shocks of different pulse energies are used to perform a single impact on every multi-point of three kinds of the film-substrate system with different interface bonding strengths. The residual stress of target surface is detected by X-ray diffraction (XRD) technique, and the dynamic strain signal is collected by polyvinylidene fluoride (PVDF) sensor. Then a loading model of the laser shock wave on film-substrate system is established. Finally, the failure modes of film-substrate system based on laser discrete scratch are explored. The results show that the residual stress both on the surface of the 2024 aluminum alloy and the impact spot center of the film-substrate system increase after laser shock. The dynamic response of film-substrate system is related to the bond strength of film-substrate interface and the energy of laser. There are two failure modes of film-substrate system based on laser discrete scratch, one is the reflect stretch wave lead to membrane detached from the substrate, the other one is the shear stress of film-substrate system lead to film shear failure.

**Key words** laser technique; laser shock wave; film-substrate system; residual stress; dynamic strain

**OCIS codes** 140.3390; 140.3380; 140.3538

## 1 引言

激光离散划痕检测技术是指利用激光的冲击波效应来使膜-基界面效应发生变化, 并以此检测界面

的动态本征结合强度<sup>[1-3]</sup>。高强度短脉冲的激光束作用在试样的薄膜表面时, 冲击区域表层材料因吸收激光能量而瞬间汽化, 在极短的时间内膨胀, 并几乎

**收稿日期**: 2013-11-22; **收到修改稿日期**: 2013-12-27

**基金项目**: 国家自然科学基金(51175237)、“高档数控机床与基础制造装备”科技重大专项(2013ZX04009031-4)、浙江省国际科技合作专项(2013C14007)、江苏省“六大人才高峰”A类项目、中国博士后基金项目(20100481096)、江苏省博士后基金项目(1002029C)、温州市工业科技研究开发项目(J20130033)、温州大学高级人才启动基金项目、江苏省企业博士集聚计划项目

**作者简介**: 冯爱新(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事激光加工与检测技术、机械制造及其自动化等方面的研究。

E-mail: aixfeng@uj.s.126.com

\* **通信联系人**。E-mail: zhong\_nanlian@126.com

同时产生高温、高压、背离材料表面向外喷射的稠密等离子体。等离子体继续吸收激光能量而迅速膨胀爆炸,诱发一个高压冲击波向膜-基系统内部传播<sup>[4]</sup>,使膜-基系统发生动态响应。当冲击波的压力达到膜-基界面破坏阈值时,薄膜破坏<sup>[5-6]</sup>。激光冲击波动态加载及界面破坏在瞬间完成,其所包含的脱粘、裂纹扩展、翘曲、断裂和剥落往往无法分辨。开展脉冲激光作用下膜-基系统的应力应变响应特性研究,能够实现对膜-基系统中冲击波的传播规律和膜-基界面效应进行同时监测,从而有助于进一步揭示激光离散划痕膜-基系统的失效机理。

本文采用脉冲激光对不同结合强度的膜-基系统进行冲击,并采用应力应变检测技术对膜-基系统应

变和应力进行测量。分析了膜-基系统和基体表面的残余应力状态,以及激光能量和界面结合强度对膜-基系统动态响应特性的影响。结合分析结果和冲击动力学理论,建立了膜-基系统激光冲击波加载模型,得出了激光离散划痕膜-基系统的失效形式。

## 2 实验设计

实验采用工业中广泛使用的 2024 铝合金为基体,304 不锈钢箔为涂层,用不同的粘结剂粘结构建不同界面结合强度的膜-基系统理论模型。本实验构建界面结合强度由强到弱的三种试样模型,如表 1 所示。

表 1 试样模型  
Table 1 Sample model

Sample	Substrate	Coat	Adhesive
A	2024 aluminum alloy	SUS 304	Double-sided tape
B			495 glue
C	(Size: 120 mm×60 mm×10 mm)	(Size: 120 mm×60 mm×20 μm)	No adhesive

粘结前用 800 # 砂纸对 2024 铝合金表面进行打磨,然后用乙醇清洗。采用 X 射线衍射仪对 2024 铝合金基体表面冲击点 90°方向的残余应力进行测量,如图 1(a)所示。粘结后沿同一方向测量膜-基系统冲击点的残余应力。激光冲击前,在试样涂层

表面粘贴约 10 μm 厚的黑色胶带作为能量吸收层,沿各试样的涂层表面冲击点径向和横向粘贴聚偏二氟乙烯(PVDF)贴片传感器,两端各并联 50Ω 的电阻,贴片传感器距冲击点 1.5 mm,如图 1(b)所示。

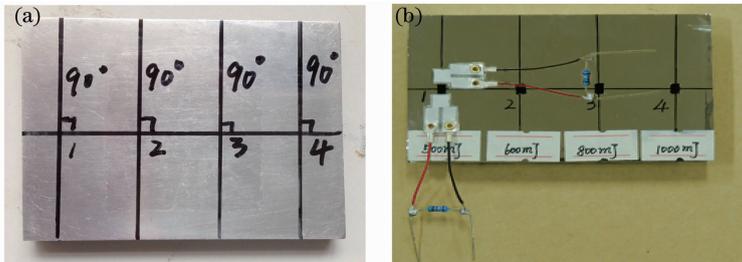


图 1 激光冲击点和应力应变测量方向。(a) 2024 铝合金; (b) 膜-基系统

Fig. 1 Laser shock points and stress-strain measure directions. (a) 2024 aluminum alloy; (b) film-substrate system

实验采用 Nd:YAG 固体激光器,激光波长 1064 nm,脉宽 7 ns,光斑直径 2 mm,能量依次用 500、600、800、1000 mJ 对各试样中 4 个点(1、2、3、4)分别冲击,冲击点间距 3 cm,如图 1(b)所示。激光冲击过程中用 PVDF 贴片传感器检测动态应变。激光冲击后,采用 X 射线衍射仪对膜-基系统冲击点 90°方向的残余应力进行测量,然后去除涂层再次对基体表面的残余应力测量。

样薄膜表面上,膜-基系统的动态应变曲线。从图中可以观察到:脉冲激光作用初始阶段,膜-基系统的应变变化较小,随着时间的推移应变增大,最后应变趋于平稳。激光能量越大,膜-基系统动态响应达到平衡所用的时间越短,最终应变也越大。

分析认为脉冲激光作用下,靶材表面诱导的高压冲击波包括弹性前驱波和塑性加载波,弹性前驱波的波速大于随后的塑性加载波波速。弹性前驱波在膜-基界面处和冲击区域边界处反射回来的弹性稀疏波会与塑性加载波发生迎面卸载,导致塑性加载波被削弱。同时,加载波与反射波对膜-基系统应变的作用效果是相反的,这导致激光作用初始阶段,

## 3 实验结果及分析

### 3.1 动态应变特性分析

图 2 所示是不同能量的脉冲激光作用在三种试

膜-基系统的应变变化较小。冲击波在靶材内部的传播速度通常为每秒数公里,一般在纳秒量级的时间内就能使其经多次来回反射后趋于平衡;冲击波趋于平稳后,激光冲击区域材料由于受到冲击区域周围材料的反作用仍将发生结构响应,这个过程通

常需要经历微秒到纳秒量级或更长的时间才能达到静态平衡<sup>[7]</sup>。激光能量越大,诱导的高压冲击波压力越大,导致膜-基系统的动态响应越激烈,在增大应变的同时也加快了响应速度。

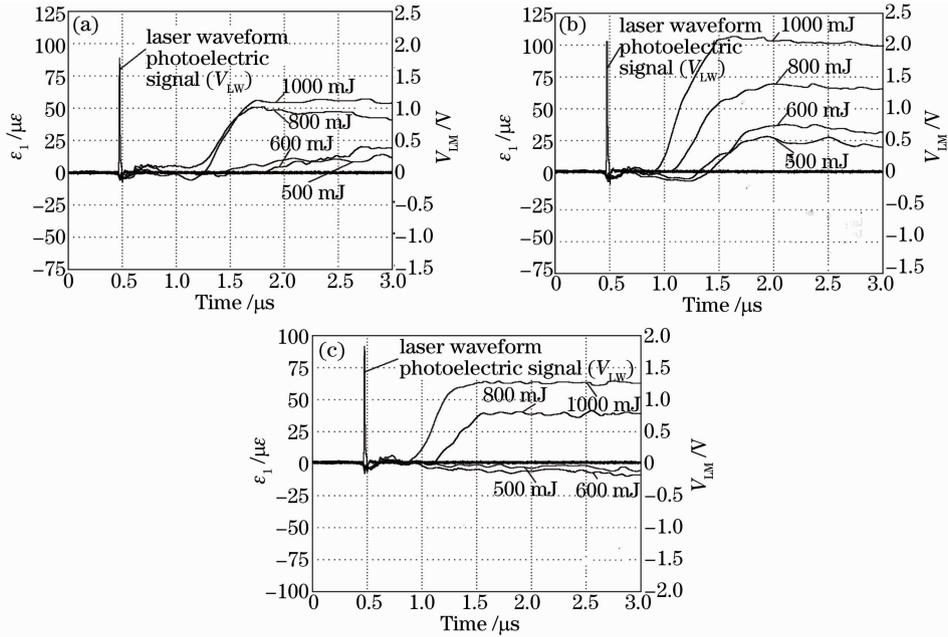


图 2 不同能量的脉冲激光作用下,膜-基系统的动态应变曲线。(a) 样品 A; (b) 样品 B; (c) 样品 C

Fig. 2 Dynamic strain curves of film-substrate system under different pulse laser energies.

(a) Sample A; (b) sample B; (c) sample C

在相同能量的脉冲激光作用下,不同结合强度膜-基系统的动态应变曲线不同,如图 3 所示。脉冲

激光作用在以双面胶为粘结剂的试样薄膜表面时,膜-基系统最终应变变量最大;而作用在无粘结剂的试

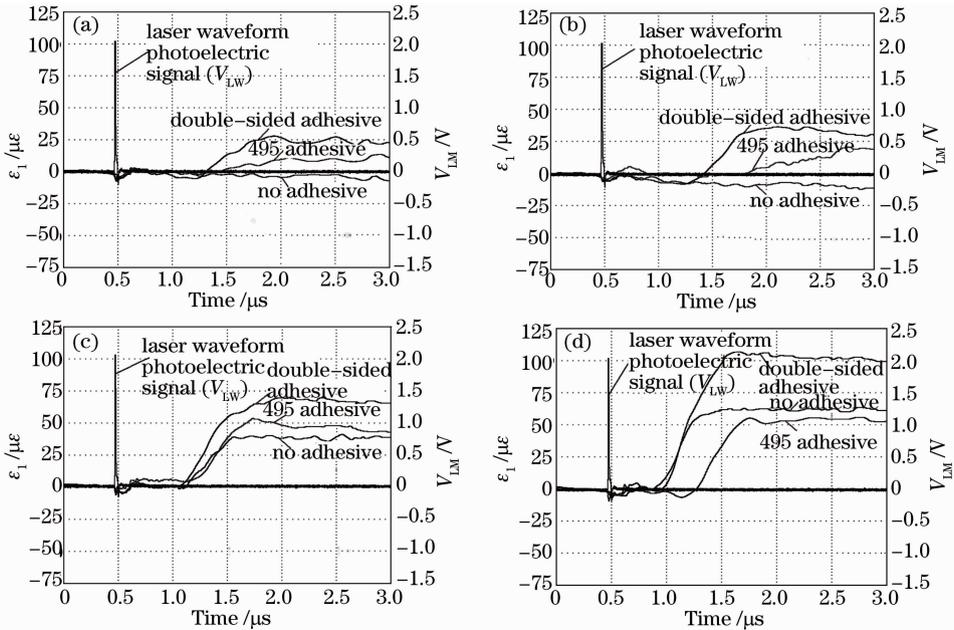


图 3 不同结合强度膜-基系统的动态应变曲线。(a) 500 mJ; (b) 600 mJ; (c) 800 mJ; (d) 1000 mJ

Fig. 3 Dynamic strain curves of film-substrate system under different adhesives.

(a) 500 mJ; (b) 600 mJ; (c) 800 mJ; (d) 1000 mJ

样薄膜表面时,膜-基系统最终应变量最小;作用在以 495 胶为粘结剂的试样薄膜表面时,膜-基系统最终应变量介于两者之间。

冲击波传至膜-基界面处,会发生反射形成一个拉伸应力波,拉伸应力波克服结合力做功,使膜-基界面效应发生变化。结合强度越大,需克服的结合力就越大,反射回来的拉伸应力波对冲击加载波的卸载作用也就越小,导致膜-基系统应变量变大。此外,涂层与基体材料的不同,导致涂层与基体的物性参数不同。脉冲激光作用下,涂层与基体的动态响应不同步,涂层的动态响应会受基体的影响,并且结合强度越大所受影响也越大,这也导致膜-基系统动态响应特性的不同。

### 3.2 残余应力状态分析

激光离散划痕检测技术利用脉冲激光直接加载薄膜表面,采用的是激光冲击的非约束模型。在非约束模型中,可采用气体动力学理论中的能量、动量和质量守恒方程组来描述等离子体的形成过程。克罗欣根据物质相分解边界条件得到了等离子体对固相界面的压强为<sup>[8]</sup>

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

式中  $P$  为峰值压力,单位为 Pa; $\alpha$  为吸收系数,单位为  $\text{cm}^{-1}$ ; $\tau$  为激光脉冲宽度,单位为 s; $I$  为入射激光功率密度,单位为  $\text{W}/\text{cm}^2$ 。

脉冲激光作用后,膜-基系统和 2024 铝合金基体表面各测点的应力值都增大了,且都表现为压应力(如表 2 所示)。因为脉冲激光诱导的高压应力波穿过涂层后在膜-基系统的界面处发生了透射作用,2024 铝合金基体在透射波的作用下发生了塑性变形,所以在变形区域产生了残余压应力<sup>[9]</sup>。但当激光能量为 500 mJ 时,2024 铝合金基体表面的残余应力增幅很小,几乎没有变化。分析认为激光能量较小时,对应产生的冲击波压力也较小,冲击波在涂层材料内部传播时,会发生衰减,并削弱冲击波的强度,同时冲击波传播至膜-基系统界面处时会发生反射和透射,使作用在基体表面的冲击波压力再次减小。当透射波的压力低于基体材料的动态屈服强度时,则不能使其表面发生塑性变形,从而也无法使其表面残余应力发生变化。

表 2 激光冲击前后残余应力测试结果

Table 2 Test result of residual stress before and after laser shock processing

Laser energy		Film-substrate system			2024 aluminum alloy		
		A/MPa	B/MPa	C/MPa	A/MPa	B/MPa	C/MPa
500 mJ	Before	-116 ± 10	-89 ± 12	-140 ± 39	-182 ± 35	-216 ± 38	-133 ± 10
	After	-123 ± 13	-94 ± 26	-138 ± 12	-185 ± 16	-221 ± 28	-149 ± 25
600 mJ	Before	-99 ± 28	-67 ± 45	-181 ± 34	-95 ± 16	-16 ± 10	-138 ± 48
	After	-120 ± 42	-75 ± 21	-186 ± 25	-157 ± 30	-71 ± 48	-177 ± 62
800 mJ	Before	-95 ± 16	-16 ± 10	-138 ± 48	-172 ± 31	-149 ± 29	-136 ± 16
	After	-157 ± 30	-71 ± 48	-177 ± 62	-184 ± 7	-184 ± 10	-184 ± 14
1000 mJ	Before	-94 ± 18	-27 ± 18	-132 ± 33	-181 ± 28	-158 ± 2	-128 ± 27
	After	-177 ± 20	-95 ± 60	-187 ± 33	-201 ± 38	-207 ± 36	-204 ± 23

由图 4(a)可以看出,激光能量越大,膜-基系统光斑中心的残余应力增幅越大,并且增幅的大小因

界面结合强度的不同而不同。脉冲激光作用在试样 A 薄膜表面时残余应力增幅最大;而作用在试样 C

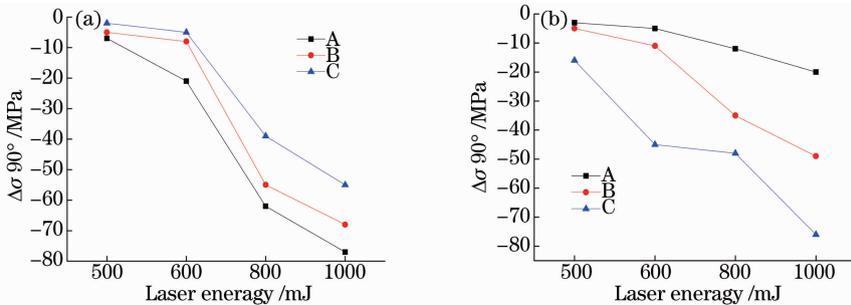


图 4 激光冲击后光斑中心的残余应力增幅。(a) 膜-基系统;(b) 2024 铝合金

Fig. 4 Amplification of residual stress in the spot center after laser shock processing.

(a) Film-substrate system; (b) 2024 aluminum alloy

薄膜表面时增幅最小；作用在试样 B 薄膜表面时，增幅介于两者之间。这与激光作用过程中膜-基系统的动态应变变化相对应，这说明残余应力增幅与应变之间存在某种关系，可以根据采集到的应变来衡量残余应力的大小。

从图 4(b)中可以观察到，脉冲激光作用下，基体表面的残余应力增幅因膜-基系统的结合强度不同而不同，且随激光能量的增大而增大。脉冲激光作用在试样 C 薄膜表面时，基体表面残余应力增幅最大。因为无粘结剂时，基体和薄膜之间无粘结力，基体的残余主力增幅不会受薄膜的影响，只与透射波的强度有关。

### 3.3 膜-基系统激光冲击波加载模型

结合已有研究成果<sup>[10-12]</sup>和冲击动力学理论<sup>[13]</sup>以及实验得到的脉冲激光诱导的膜-基系统应力应变特性，建立激光冲击波在膜-基系统中传播的理论模型，如图 5 所示。

高强度短脉冲的激光作用在膜-基系统的涂层表面时，随着激光辐照强度的增强诱发一系列的高压冲击波  $S_1$ ，并在涂层表面发生反射和透射，反射波为  $S_2$ ，透射波为  $S'_1$ ，如图 5(a)所示。透射波  $S'_1$ 向涂层内部传播，挤压涂层，在涂层表面产生一个向四周传播的表面平面波  $P_1$ ；冲击区域材料在表面平面

波的作用下向外膨胀，挤压冲击区域周围材料，使冲击区域周围材料局部发生弹塑性变形；对于高斯分布的脉冲激光，激光光强达到最大值后开始衰减，使涂层表面烧蚀压也随之减小，在涂层表面产生一个稀疏波  $R_1$ ，如图 5(b)所示。透射波  $S'_1$ 传播至膜-基界面处时，会在膜-基界面上再次发生反射和透射，透射波  $S''_1$ 向基体内部传播，使基体表面产生一个向四周传播的表面平面波  $P_2$ ，反射波  $S_3$ 向涂层自由面传播，并在传播的过程中与稀疏波  $R_1$ 发生迎面卸载，反射回稀疏波  $R'_1$ ，向涂层内部传播；同时向四周传播的表面平面波  $P_1$ 由于受到冲击区域周围材料对它的约束作用，传至冲击区域边界处时会产生表面稀疏波  $R_{P1}$ ，向冲击区域中心传播，并与随着稀疏波  $R_1$ 传播产生的表面稀疏波  $R_{R1}$ 相碰，反射回一个表面稀疏波  $R'_{R1}$ ，在冲击区域内反复传播衰减，使冲击区域残余应力状态发生改变，如图 5(c)所示。反射稀疏波  $R'_1$ 传至膜-基界面处时继续发生反射和透射，反射波  $R'_2$ 和透射波  $R''_1$ 仍然是稀疏波，稀疏波  $R'_1$ 以当地声速传播，而透射冲击波  $S''_1$ 对波后介质是亚声速传播的，这样  $R'_1$ 必然赶上  $S''_1$ ，从而使  $S''_1$ 衰减，基体表面在透射稀疏波  $R''_1$ 的传播作用下产生一个表面稀疏波  $R''_{R1}$ ，如图 5(d)所示。

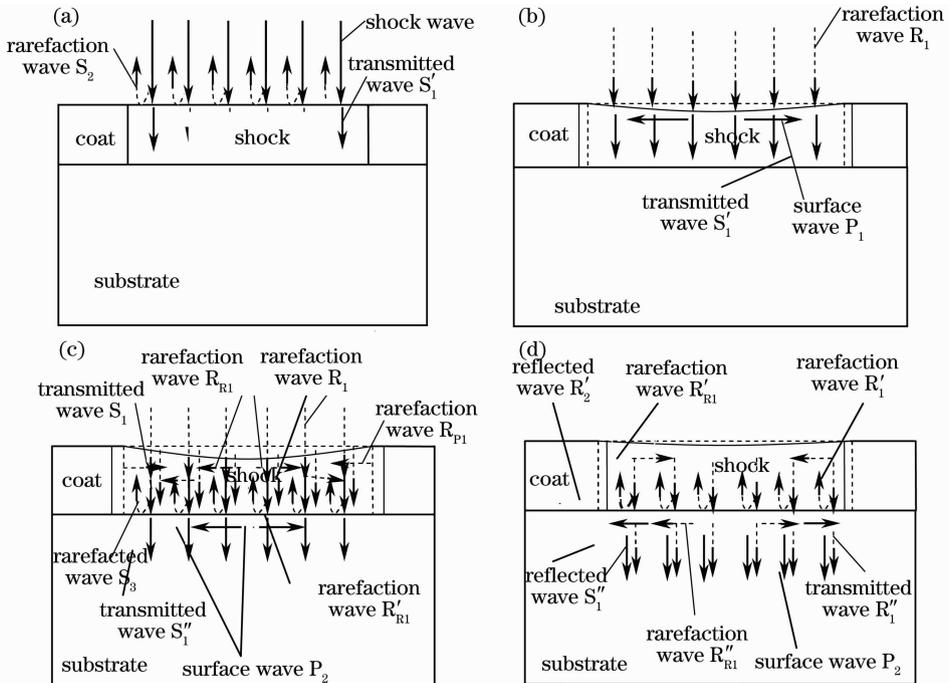


图 5 激光冲击波在膜-基系统中传播的理论模型

Fig. 5 Theoretical model of laser shock wave transmission in the film-substrate system

由上述冲击波的作用过程可知，激光离散划痕膜-基系统的失效形式有两种：一种是当冲击波压力足

够大时，冲击波透过涂层作用在基体表面，在膜-基界面处发生反射和透射，一般涂层材料的波阻抗大于基

体材料的波阻抗,反射波为拉应力波,而透射波为压应力波,两者的相互作用使薄膜脱落;另一种是由于涂层和基体材料的物性参数不同以及冲击波对涂层和基体的加载情况不同,导致涂层和基体的形变不同步,涂层与基体之间存在剪切应力,当该剪切应力大于膜-基系统的剪切破坏阈值时,薄膜破坏。

## 4 结 论

1) 在脉冲激光作用下,界面结合强度越大,膜-基系统最终应变量越大。激光能量越大,膜-基系统的动态响应越剧烈,膜-基系统动态响应达到平衡所用的时间越短,膜-基系统最终应变量越大。

2) 激光作用后,2024 铝合金基体以及膜-基系统冲击光斑中心的残余应力都呈增大的趋势,且随着激光能量的增大,残余应力增幅也都呈增大的趋势。

3) 激光离散划痕膜-基系统的失效形式有两种:一种是由于反射拉伸波导致的薄膜剥落;另一种是由于膜-基系统间的剪切应力导致的薄膜剪切失效。

## 参 考 文 献

- 1 Feng Aixin. Study on Interfacial Combined Function of Laser Scratch[D]. Jiangsu: Jiangsu University, 2009.  
冯爱新. 界面结合性能激光划痕检测技术基础研究[D]. 江苏: 江苏大学, 2009.
- 2 Hu Shubing, Cui Kun. Physical model and research development of scratch test [J]. Journal of Hubei Automotive Industries Institute, 2001, 15(1): 29-32.  
胡树兵, 崔 崑. 划痕试验法的物理模型及研究状况[J]. 湖北汽车工业学院学报, 2001, 15(1): 29-32.
- 3 Xifang C, Mi Y, Deren Y, *et al.*. A method for predicting critical load evaluation adhesion of coating in scratch testing[J]. Journal of Zhejiang University Science, 2003, 4(6): 709-713.
- 4 Liu Li, Wang Shengbo, Wu Hongxing, *et al.*. Experimental research on high-power laser-induced shock wave [J]. Laser

Technique, 2007, 31(2): 134-136.

- 刘 丽, 王声波, 吴鸿兴, 等. 强激光诱导冲击波的实验研究[J]. 激光技术, 2007, 31(2): 134-136.
- 5 C S Montros, Tao Wei, Lin Ye, *et al.*. Laser shock processing and its effects on microstructure and properties of metal alloys: a review[J]. International J Fatigue, 2002, 24(10): 1021-1036.
- 6 Chen Ruifang, Guo Naiguo, Hua Yinqun. Numerical simulation of effects of laser shock parameters on residual stress field induced by laser shock processing[J]. Chinese J Lasers, 2008, 35(6): 932-936.  
陈瑞芳, 郭乃国, 花银群. 激光冲击参数对参与应力场影响的三维数值模拟[J]. 中国激光, 2008, 35(6): 932-936.
- 7 Yu Xitong. Dynamic plastic response of structures[J]. Explosion and Shock Waves, 1990, 10(1): 85-96.  
余同希. 结构的塑性动力响应[J]. 爆炸与冲击, 1990, 10(1): 85-96.
- 8 Teller E. High Energy Density Physics[M]. Xu Xishen Transl. Bei Jing: Atomic Energy Press, 1982.  
特勒著. 高能密度物理学[M]. 徐锡申译. 北京: 原子能出版社, 1982.
- 9 Nie Guifeng, Feng Aixin, Ren Xudong, *et al.*. Effect of laser shock processing parameters on residual principal stresses and its directions of 2024 aluminum alloy[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(1): 0103006.  
聂贵峰, 冯爱新, 任旭东, 等. 激光冲击参数对 2024 铝合金冲击区域的主应力及其方向的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 0103006.
- 10 Loeb A, Eliezer S. An analytical model for creation and decay of strong shock waves caused by a trapezoidal laser pulse [J]. Physics of Fluids, 1985, 28(4): 1196-1201.
- 11 Yuan Gang, Zhou Guangquan, Tang Zhiping, *et al.*. Propagation and decay of short duration pulsed shock waves with high pressure[J]. Explosion and Shock Waves, 1992, 12(4): 307-312.  
袁 刚, 周光泉, 唐志平, 等. 高压短脉冲激波的传播及衰减[J]. 爆炸与冲击, 1992, 12(4): 307-312.
- 12 Qiang Xiwen, Zhang Jianquan, Li Banggu, *et al.*. Investigation on shock wave propagation in target induced by powerful pulsed laser beams[J]. Infrared and Laser Engineering, 2000, 29(2): 41-45.  
强希文, 张建泉, 李邦固, 等. 高功率脉冲激光产生的激波靶材中的传播[J]. 红外与激光工程, 2000, 29(2): 41-45.
- 13 Ma Xiaoqin. Impact Dyamics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1992.  
马晓青. 冲击动力学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1992.

栏目编辑: 韩 峰