

文章编号：1001-3806(2006)02-0168-02

## 芳纶纤维复合材料激光烧蚀损伤形貌研究

王贵兵,罗飞,刘仓理,王春彦

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 绵阳 621900)

**摘要：**通过不同功率的激光辐照芳纶纤维复合材料烧蚀实验回收样品的微观分析, 得到在不同的激光参数下, 芳纶纤维增强树脂基体复合材料的热损伤形态和损伤物理化学过程。结果表明, 热损伤的关键在于化学变化, 焦化和炭化使树脂和纤维剧烈收缩, 收缩所产生的应力促使性能变坏的复合材料损伤。

**关键词：**激光; 芳纶纤维; 微观分析; 热损伤

**中图分类号：**TG156.99      **文献标识码：**A

### The research of the ablation morphology of the composite reinforced by polyaryl amide fibers irradiated by laser

WANG Gui-bing, LUO Fei, LIU Cang-li, WANG Chun-yan

(Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** There exist a series of complicated physicochemical changes in the composite reinforced by polyaryl amide fibers irradiated by laser. The damage configuration and physicochemical process of different laser parameters are obtained through the micro-analysis of the recovery samples after experiments. Thermal damage relies on the chemical changes critically.

**Key words:** laser; micro-analysis; polyaryl amide fibers; thermal damage

## 引言

激光与材料相互作用过程取决于激光特性和材料特性, 还与作用的外界环境有关<sup>[1~3]</sup>。与激光特性有关的因素主要有: 激光的波长、能量、功率、作用时间, 以及脉冲激光的脉宽、脉冲结构、重复率等。与材料特性有关的因素主要取决于材料的种类和性质, 对于给定的材料, 则材料微观结构、表面性质是关键因素。

通过对实验回收样品的微观分析, 得到在整个激光加载过程中材料的损伤过程和模式。

## 1 材料

实验所用的材料为一种新型的芳纶/环氧复合材料。材料中增强纤维代号 F-12, 与通常使用 kevlar49 相比, 采用了新的二胺或第三单体合成, 性能有了较大的提高。材料基体中, 主体树脂为双酚 A 环氧树脂, 是由含多官能基的小分子化合物构成, 常温下处于玻璃态, 具有可溶、可熔性质。固化剂为混合芳香胺类。环氧树脂加热至某一温度范围时, 树脂熔融和流动而被塑化, 在塑化过程中, 树脂分子链上的官能基起固化

作者简介: 王贵兵 (1975-), 男, 博士研究生, 主要从事激光与材料相互作用研究。

E-mail: guibing\_wang@163.com

收稿日期: 2004-10-28; 收到修改稿日期: 2005-02-16

反应从而使分子链扩链、支化(分子量增加)和交联, 最终形成交联体形结构的大分子。

## 2 实验方法和设备

实验加载激光为 Nd YAG 连续波固体激光器 (1.064 μm), 最大输出功率 1000W。激光输出功率采用标准功率计监测。温度使用热电偶测量。材料前面放置一块普通的光学 K9 玻璃回收挥发物。复合材料烧蚀后的表面和断面, 在离子溅射纯金涂层后, 用扫描电镜观察分析; 用偏振光显微镜分析复合材料的各相异性。

## 3 实验结果与讨论

激光作用于复合材料, 一部分激光能量被反射, 一部分透射, 大部分能量被材料所吸收, 芳纶/环氧复合材料对 1.064 μm 激光够吸收 64% ~ 75% 的激光能量。芳纶/环氧复合材料对于 1.064 μm 近红外激光是可透光的, 激光的透射率随材料的厚度呈指数衰减<sup>[4,5]</sup>, 因而芳纶/环氧复合材料吸收的激光能量可认为是一定深度的体热源。热的作用下, 复合材料发生一系列的物理、化学变化, 基本过程为: 沿纤维方向起皱 → 树脂基体挥发、分解 → 树脂和纤维焦化、炭化及横向和纵向开裂 → 炭化层剥离。

图 1 为复合材料原始表面。当激光功率较低时, 复合材料温升尚不能使环氧树脂基体分解。在激光辐

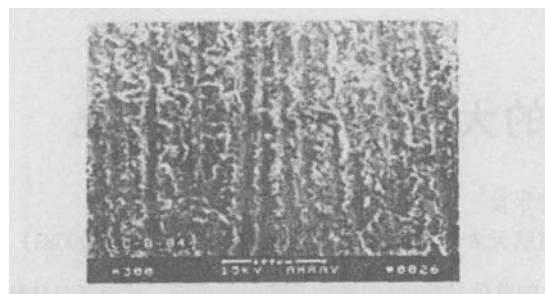


Fig 1 Initial surface of the composite

照区域内,可以观察到复合材料表面有起皱,皱折方向沿着表层纤维方向。当激光功率密度到达一定值( $30W/cm^2$ 左右)时,有挥发物产生,分析回收的玻璃片,凝结在其上的棕黄色物体为环氧树脂,可认为复合材料在热的作用下首先是树脂基体熔融挥发。随激光功率的增加和辐照时间的延长,挥发物或分解产物燃烧,但由于玻璃片的阻挡,燃烧并不充分而产生浓烟。冷却后,光照区域大面积的焦化、炭化,直径为12mm圆形的光照区域内,焦化、炭化区域的长轴为11.5mm,短轴为10.7mm的椭圆形,面积约占光照区域的86%,并伴有横向和纵向的开裂,如图2、图3所示;从图4中还可以观察到炭化物剥离。



Fig 2 Charry and dehiscence of the irradiated zone



Fig 3 Strenuous dehiscence

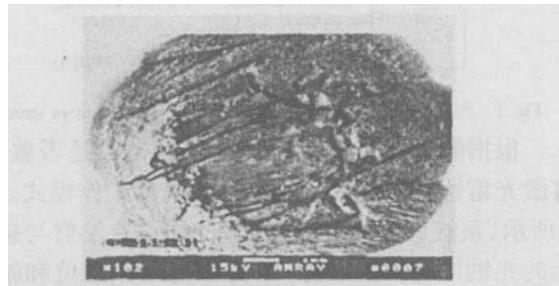


Fig 4 Carbide stripping

复合材料基体中,主体树脂为双酚A环氧树脂,是由含多官能基的小分子化合物构成,常温下处于玻璃态,具有可熔性质。环氧树脂加热至某一温度范围

时,树脂熔融和流动而被塑化,材料纵横两向热膨胀大小不同,而且在辐照区外,材料温度变化十分微小,可以视为圆形约束,在横向产生的压应力作用导致材料失稳,故沿纤维方向起皱。在塑化过程中,树脂分子链上的官能基起固化反应从而使分子链扩链、交联(分子量增加)和交联,最终形成交联体形结构的大分子。交联过度而使环氧树脂基体变硬、发脆使物理力学性能变坏。基体的脆性导致其不能有效传递因受热而产生的应力,开始应力集中于材料中有缺陷处。这样,在材料内部的平均应力还没有达到它的理论强度,在缺陷部位首先达到该材料的强度临界值,材料便从那里开始损伤。但凯芙拉纤维具有良好的热稳定性,在胶联反应温度范围内仍然具有一定的强度。从回收的实验样品来看,材料光照区略变颜色,但表面没有发现裂纹。

激光功率的增加(大于 $60W/cm^2$ )和辐照时间的延长,材料开始焦化,即树脂基体过度交联而固结,并且交联的大分子链发生降解反应,失去强度。此时温度达到纤维灰化温度 $400^\circ C$ ,纤维强度几乎完全损失,基体的裂纹便穿过纤维扩展,产生宏观开裂,如图5所示。当温度达到纤维的点燃温度 $495^\circ C$ ,发生燃烧,分解温度 $500^\circ C \sim 520^\circ C$ 。

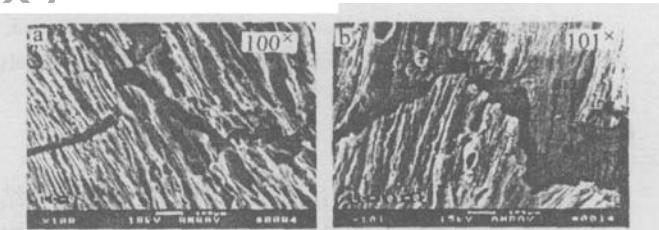


Fig 5 The composite crack induced by thermo-stress

从膨胀到收缩,沿轴向产生大的拉应力,基体材料力学性能较差,因而产生裂纹,随时间进行而扩展;纤维焦化前受热收缩引基体的膨胀受到抑制,当基体收缩时,共同收缩产生较大应力,而此时复合材料抗拉强

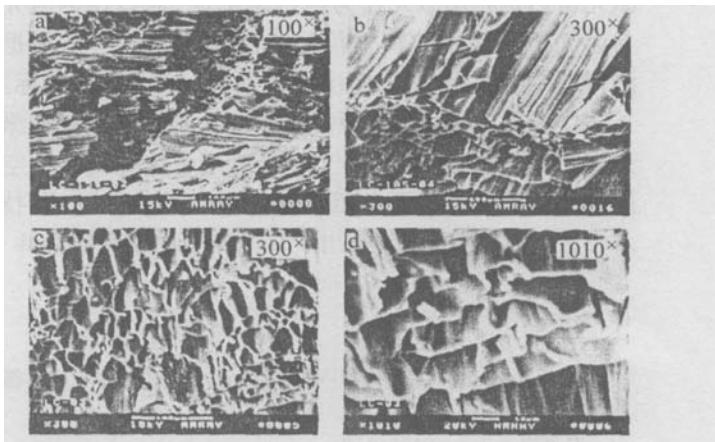


Fig 6 Fracture morphology of the composite

(下转第180页)

是随着透明薄膜厚度的增加,系统的振动体力源位置也随之深入到物体内部。在无覆盖薄膜和薄膜很薄时,振动体力源的上表面为自由表面或受到的约束较小,而随着透明薄膜厚度的增加,振动体力源的上表面的约束也随之增加,因此,双极脉冲波形振幅增大。由图4b还可看出双极脉冲波形的波形加宽,脉冲波形有一定宽度是因为振动体源产生超声波在接受点处的高频衍射效应产生的,随着透明薄膜厚度的增加,衍射效应更加明显,波形加宽。图4a、图4b中双极脉冲波形后出现了振荡波形,是由于纵波在透明薄膜中的多次反射形成的。

### 3 结 论

有限元数值模拟研究了激光热弹激发的瞬态超声波及其传播过程,建立起激光输入参数以及材料参数和产生的对心波形特征之间的定量关系。在分析温度场的基础上得到了玻璃/铝系统中由脉冲激光激发的对心近场超声波形,研究了透明薄膜厚度对对心近场超声波形的影响,结果表明,对心波形中的双极脉冲波形振幅和脉宽随透明薄膜厚度增加而变大。对心近场波形的纵波(特别是双极脉冲波形)和横波波形中包含有薄膜厚度、基底材料和界面性质等信息,通过对超声波信号进一步分析可以了解材料的性质及参数,为薄膜材料的特性及厚度等的无损检测和评价提供了理论依据。

### 参 考 文 献

- [1] SCHNEIDER D, STIEHL E, HAMMER R *et al* Nondestructive testing of damage layers in semiconductor materials by surface acoustic waves

(上接第169页)

度显著降低,损伤就随之发生。

从图6非常齐整的段口可以发现,复合材料的损伤是整体炭化后的损伤,没有纤维拔出的痕迹。

### 4 结 论

激光能量沉积在复合材料内造成一定深度的体热源。在热的作用下复合材料发生一系列的物理化学变化:树脂的热膨胀、纤维的热收缩以及树脂和纤维的分解、炭化等。热损伤的关键在于化学变化,焦化和炭化使树脂和纤维剧烈收缩,收缩所产生的应力促使性能变坏的复合材料损伤。激光热效应的影响区域很小,复合材料的物理化学变化仅发生在光照区域。激光功率高于烧蚀阈值时,辐照时间对材料的炭化面积、炭化深度、开裂程度等有很大影响。

前期的实验和后期的显微分析得到了罗飞同志的大力支持,以及李建明、李晓兰等同志的帮助,特此感

- [J]. Proc SPIE, 2002, 4692: 195~211.
- [2] ZHANG Sh Y. Laser ultrasound and materials nondestructive evaluation [J]. Applied Acoustics, 1992, 11(4): 1~6.
- [3] XU B Q, SHEN Zh H, NIX W *et al* Time/frequency analysis of laser-generated ultrasonic wave in coating/substrate systems [J]. Laser Technology, 2004, 28(6): 609~612 (in Chinese).
- [4] CHEN X, XU R Q, SHEN Zh H *et al* Reflected laser ultrasonic sensor for testing thickness and its application [J]. Laser Technology, 2003, 27(6): 557~559 (in Chinese).
- [5] McDONALD A F. On the precursor in laser-generated ultrasound waveform in metals [J]. APL, 1990, 56(3): 230~232.
- [6] ROSE L R F. Point-source representation for laser-generated ultrasound [J]. J Acoust Soc Amer, 1984, 75(3): 723~732.
- [7] HU W X, QIAN M L. Numerical and experimental study on the ultrasonic displacement field generated by a laser line source [J]. Acta Acustica, 2000, 25(4): 345~350 (in Chinese).
- [8] CHENG J C, ZHANG S Y. Quantitative theory for laser-generated Lamb waves in orthotropic thin plates [J]. APL, 1999, 74(14): 2087~2091.
- [9] ROSA G, PSYLLAKIP, OLTRA R *et al* Simultaneous laser generation and laser ultrasonic detection of the mechanical breakdown of a coating-substrate interface [J]. Ultrasonics, 2001, 39(5): 355~365.
- [10] ROSA-G, OLTRA R, NADAL M. Evaluation of the coating-substrate adhesion by laser-ultrasonics modeling and experiments [J]. JAP, 2002, 91(10): 6744~6753.
- [11] XU B Q, SHEN Zh H, LU J *et al* Numerical simulation of laser-induced transient temperature field in film-substrate system by finite element method [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46(25): 4963~4968.
- [12] XU B Q, SHEN Zh H, NIX W *et al* Numerical simulation of laser-induced ultrasonic by finite element method [J]. JAP, 2004, 95(4): 2116~2123.
- [13] WANG GQ. Practical numerical simulation technology in engineering and practice in ANSYS [M]. Xi'an: Publishing Company of Northeast University, 2001. 151~164 (in Chinese).

谢。

### 参 考 文 献

- [1] LATHAM W P, BERAUN J E. Laser effects research and modeling to support high energy laser systems [J]. Proc SPIE, 2001, 4376: 5~14.
- [2] SUN Ch W, FAN Zh X, CHEN Y Zh *et al* Laser radiation effects [M]. Beijing: Publishing House of Defense Industry, 2002. 6~7 (in Chinese).
- [3] SUN Ch W. High power laser interaction with materials and damage mechanism [A]. High Power Laser Technology Analysis and Comments [C]. Mianyang: Chinese Academic of Engineer and Physics, 1989. 224~251 (in Chinese).
- [4] WANG GB, LIU CL. Absorption characteristics of the composite reinforced by polyaryl amide fibers irradiated by high power laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 11(15): 1065~1067 (in Chinese).
- [5] STAVR D I M, GINNEKEN B, KOENDER NK J J. Surface bi-directional reflection distribution function and the texture of bricks and tiles [J]. SPIE, 1996, 2599: 406~417.
- [6] ZAWORSKI J, WELTY R, DROSTM K. Measurement techniques for bi-directional reflectance of engineering materials [J]. ASME, 1993, 244: 172~177.