

文章编号: 1001-3806(2003)05-0457-03

## 凯芙拉环氧复合材料烧蚀阈值实验研究

王贵兵 刘仓理

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 绵阳, 621900)

**摘要:** 激光辐照某种材料当其表面未发生任何物理化学变化时, 其表面反射率不会发生任何变化; 当材料表面发生了烧蚀, 产生了物质的变化时, 反射率会集聚下降。通过积分球光电管系统监测表面反射率, 判定反射率变化的拐点来得到 Kevlar/epoxy 材料的激光烧蚀阈值。

**关键词:** 表面反射率; 积分球; 烧蚀阈值; 拐点; Kevlar/epoxy

**中图分类号:** TN247 **文献标识码:** A

### Experimental research of the ablation threshold of Kevlar/epoxy

Wang Guibing, Liu Cangli

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

**Abstract:** The surface reflectivity of Kevlar/epoxy doesn't change when there are no chemical and physical changes of the composite reinforced by polyaryl amide fibers irradiated by laser beam. However it will change. The ablation threshold of the material can be obtained by monitoring its surface reflectivity changes using integrated spheres and photodiode system. This method can trace the increase of the laser power to get the ablation threshold of the material. This paper has proved the feasibility of this method by measuring the threshold of the composite reinforced by polyaryl amide fibers irradiated by laser beam with a wavelength of 1.06 $\mu$ m.

**Key words:** surface reflectivity; integrated sphere; ablation threshold; inflection point; Kevlar/epoxy

### 引言

近几十年来, 由于复合材料所具有的优越性能使其在航天结构中得到了越来越广泛的应用, 尤其是凯芙拉环氧复合材料应用范围更为广泛, 除了民用外, 它被应用于各种导弹的发动机结构上。因此, 研究它与激光的相互作用机理有着重要的用途<sup>[1-3]</sup>。

激光照射下材料表面层因各种机制引起的质量迁移、消蚀或散失现象称为激光(热)烧蚀。金属受激光烧蚀的主要原因是材料的熔化、气化和喷溅。非金属材料还有升华、化学反应、焦化、剥蚀等机制。质量迁移还同入射表面的环境条件、气流运动等情况密切相关, 主要依靠实验确定具体条件下的激光烧蚀参数。而在材料与激光作用过程中材料烧蚀阈值是判断相互作用物理机制的一个关键点。它也可以为相应过程的数值模拟提供参数。在复合材料与激光的相互作用研究中对于烧蚀阈值测试的相关报

道较少。当然, 要精确测量烧蚀阈值的困难很大。

### 1 测试原理

对于材料而言, 当其表面未发生任何物理化学变化时, 固定功率的激光入射到其表面上, 其反射率是不会变化的; 利用前面对 Kevlar/epoxy 材料反射率的实验研究知道, 当材料厚度一定时, 随着激光功率的增加, 其反射率也是增加的, 但是当材料表面发生烧蚀的时候, 其表面反射率会急剧下降, 因为材料表面发生烧蚀后, 材料表面激光作用区域有材料炭化, 这时材料的表面吸收会增强。因此, 只要实时探测材料表面反射率(激光功率逐渐增加), 可以初步得到材料的烧蚀阈值。

### 2 实验测试系统和结果

#### 2.1 测试系统

实验选用材料对激光的表面反射的光分布在一定的空间立体角之内, 为了准确测量需要对光进行收集, 因此实验采用积分球系统<sup>[4,5]</sup>。积分球内表面的光强用光电管探测。实验系统布局如图 1 所示。积分球标定采用对实验激光波长反射率为

作者简介: 王贵兵, 男, 1975 年 6 月出生。硕士研究生。主要从事激光方面的研究。

收稿日期: 2002-10-15; 收到修改稿日期: 2003-02-24

99.9%的全反片代替材料;然后通过实验测到的信号与相应激光功率对应的标定信号相比较得到材料的反射率。实验装置图见图1。

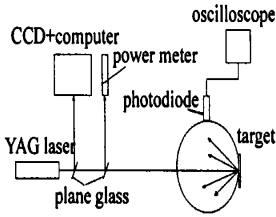


Fig. 1 The schematic graph of the experimental system

## 2.2 材料

芳纶纤维增强环氧树脂基体复合材料中的纤维为荷兰 Axon 公司生产的 CT709, 其面密度为  $200\text{g}/\text{m}^2$ 。基体选用环氧树脂 618 和聚酰胺 651 的平均混合物(体积比为 1:1)。纤维布由纤维正交编织而成, 单层厚度为  $0.3\text{mm}$ , 热压成型后的厚度为  $0.15\text{mm}$ 。材料厚度大致分为 4 种:  $1\text{mm}$ ,  $2\text{mm}$ ,  $4\text{mm}$ ,  $6\text{mm}$ 。铺层之间均为  $0^\circ$  角。

## 2.3 激光器输出特性

实验用激光器为  $1000\text{W}$  的 Nd:YAG 连续激光器, 输出波长为  $1.06\mu\text{m}$ 。激光输出的能量分布如图 2。能量分布基本上呈现某阶高斯分布。

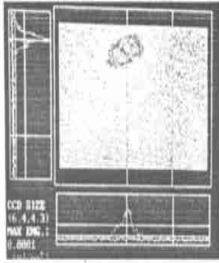


Fig. 2 The energy distribution of the spot of the laser

## 2.4 实验结果

利用上述实验系统, 测量了  $1\text{mm}$ ,  $2\text{mm}$ ,  $4\text{mm}$ ,  $6\text{mm}$  4 种厚度的复合材料在波长为  $1.06\mu\text{m}$  的烧蚀阈值。测量过程中的激光功率由人为慢慢调节(逐渐增加)。典型的实验曲线图如图 3~ 图 10 所示。

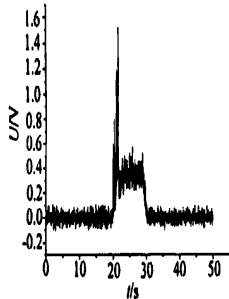


Fig. 3 The reflectivity of the 1mm material

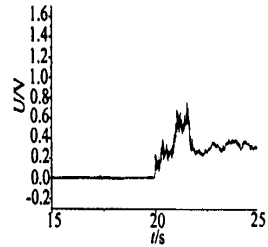


Fig. 4 The smoothed curve ( $U_p = 700\text{mV}$ )

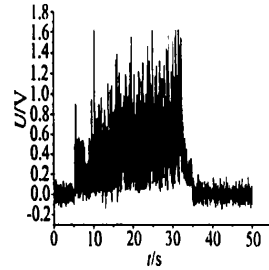


Fig. 5 The reflectivity of the 2mm material

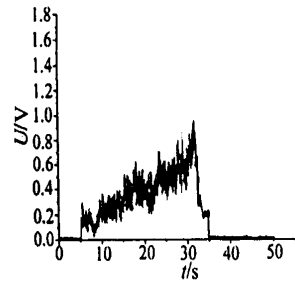


Fig. 6 The smoothed curve ( $U_p = 800\text{mV}$ )

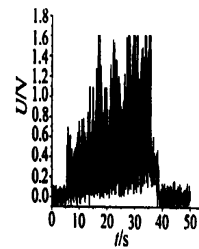


Fig. 7 The reflectivity of the 3mm material

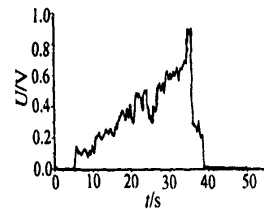


Fig. 8 The smoothed curve ( $U_p = 889\text{mV}$ )

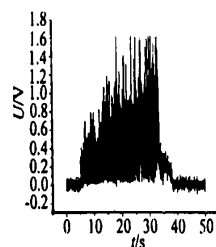


Fig. 9 The reflectivity of the 4mm material

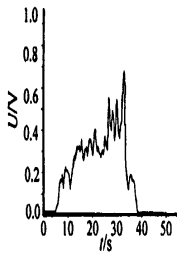


Fig. 10 The smoothed curve(  $U_p = 723\text{mV}$  )

### 3 实验结果分析

由前面测试的数据可以得到, 当 1mm 材料前表面反射的光使在积分球上的光电管电压上升到 700mV 后下降(见图 4), 2mm 材料对应的为 800mV (见图 6), 3mm 材料对应的为 889mV (见图 8), 4mm 材料对应的为 723mV (见图 10)。通过光电管的光电转换性质可以得到 1mm 材料表面对应的烧蚀平均功率为 8.8W, 2mm 材料表面对应的烧蚀平均功率为 10W, 3mm 材料表面对应的烧蚀平均功率为 11.8W, 4mm 材料对应的烧蚀平均功率为 9.7W。通过测量的光斑能量分布图图 2 可以知道, 光束能量的时空分布满足某阶高斯分布。

假设光斑能量分布为一阶高斯分布, 即:

$$I = I_0 \exp(-r^2/r_0^2) \quad (1)$$

两边同时积分有:

$$\int_0^r 2\pi r I dr = \int_0^r 2\pi r I_0 e^{-r^2/r_0^2} dr \quad (2)$$

且  $P = \pi r_0^2 \cdot I$ ,  $P_0 = \pi r_0^2 \cdot I_0$ ,  $F = P/S$ ,  $F_0 = P_0/S$ ,  $S = \pi r_0^2$ , 上式积分后可得:

$$I_0 = \frac{F}{1 - e^{-1}} \quad (3)$$

$P$  为光斑的平均功率,  $F$  为光斑的平均功率密度;  $P_0$  为光斑中心的峰值功率,  $I_0$  为光斑的中心光强; 通过靶斑仪得到光斑直径为 20mm。这样可以通过上面的计算公式得到:  $I_0 = 14\text{W}/\text{cm}^2$  (对应图 3);  $I_0 = 15.8\text{W}/\text{cm}^2$  (对应图 5);  $I_0 = 18.7\text{W}/\text{cm}^2$  (对应图 7);  $I_0 = 15.3\text{W}/\text{cm}^2$  (对应图 9)。

### 4 讨论

由实验和分析得到的结果没有相应的数据进行对比, 但是初步得到的结果还是具有一定的参考意义。上面的测试方法能实时监测功率变化引起材料表面烧蚀的真实物理过程。但是, 由于功率上升过程的热量累积会对烧蚀阈值的测试带来一定的误差, 使测试数据偏小, 在加上实验采集系统的误差来源多, 使得信号的准确分辨很困难, 因此, 实验测得的值只能作为参考值。但只要能够减小热量积累的影响, 降低系统误差, 使得反射率的转折点能精确判断, 该测试方法是可行的。

该论文的实验工作得到了中国工程物理研究院流体物理研究所 113 室的大力支持, 特此感谢!

#### 参 考 文 献

- [1] Klein C A. AIAA J, 1992, 25(5): 705.
- [2] Pering G A. J Composite Material, 1991, 14: 54.
- [3] Griffis C A. J Composite Material, 1991, 15: 427.
- [4] 葛新石, 陈则韶. 量热技术和热物性测定. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1990: 155.
- [5] 朱德忠. 热物理测量技术. 北京: 清华大学出版社, 1990: 205.

(上接第 456 页)

- [2] Kaczmarek S M. SPIE, 1997, 3187: 129~ 134.
- [3] 陈正豪. 物理, 1995, 24(12): 720.
- [4] 丘军林, 程祖海. 工业激光技术. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001: 318.
- [5] Norton D P. Science, 1996, 274: 755.
- [6] Wang Y Q, Huang X T, Wu Ch *et al.* SPIE, 1999, 3862: 493~ 497.
- [7] Bird G. Molecular gas dynamics. Clarendon: Oxford, 1976: 50~ 90.
- [8] Itina E, Tokarev V N, Marine W. J Chem Phys, 1997, 106(21): 8905~ 8912.
- [9] Itina E. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research,

2001, B180: 112~ 116.

- [10] Itina E, Marine W, Autric M. J A P, 1997, 82(7): 3536~ 3542.
- [11] Gamaly E G, Rode A V, Luther-Davies B. J A P, 1999, 85(8): 4213~ 4221.
- [12] Rode A V, Luther-Davies B, Gamaly E G. J A P, 1999, 85(8): 4222~ 4230.
- [13] 刘晶儒, 白 婷. 强激光与粒子束, 2002, 14(5): 646~ 650.
- [14] 周 明, 邵天敏, 马洪涛. 润滑与密封, 2002(2): 41~ 43.
- [15] Siemroth P, Scheibe H J. IEEE Transactions on Plasma Science, 1990, 18(16): 911~ 916.
- [16] Ong C K, Xu S Y, Zhou W Z *et al.* Review of Scientific Instruments, 1998, 69(10): 3659~ 3661.
- [17] Zhou W Z, Chua D H C, Xu S Y *et al.* Supercond Sci Technol, 1999, 12: 388~ 393.