

文章编号: 1001-4322(2003)11-1065-03

# 芳纶纤维复合材料对激光的吸收特性研究\*

王贵兵, 刘仓理

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 利用双积分球光电管系统实验研究了不同厚度的芳纶纤维复合材料在不同强度的 1.06 $\mu\text{m}$  激光辐照下(低于烧蚀阈值的激光强度)的反射和透射特性,在材料厚度一定时,反射率随着激光功率密度的增加而增加,透射率则呈现指数衰减;激光功率一定时,反射率随着材料厚度的增加而增加,透射率则呈现衰减。通过反射率和透射率可以确定出表面吸收和体吸收的激光能量份额。

**关键词:** 双积分球; 激光; 吸收特性; 复合材料; 表面吸收

**中图分类号:** TN247

**文献标识码:** A

芳纶纤维复合材料具有高强度、高模量、高冲击强度、纵向负热膨胀系数等特点,其应用范围非常广泛<sup>[1-3]</sup>。芳纶纤维复合材料对波长 1.06 $\mu\text{m}$  的激光的透光性,以及材料表面和内部存在的密度间断区导致该材料对激光的吸收有表面吸收和体吸收<sup>[4,5]</sup>两种方式。而体吸收和表面吸收的激光能量在材料与激光相互作用过程中的影响是不同的。因此研究这种材料与激光的相互作用,确定面吸收和体吸收各自的份额对于准确数值计算温度场和后期的破坏效应有重要的意义。

本文通过设计的双积分球实验系统测试了芳纶纤维复合材料对 Nd:YAG( $\lambda = 1.06\mu\text{m}$ )激光的反射率和透射率,然后通过简单的理论模型计算出体吸收系数,通过对实验数据的拟合得到表面吸收能量份额。我们提供的方法在确定数值模拟参数方面具有一定的意义。

## 1 复合材料对激光吸收的特性参数

为了对问题进行简化,采用均匀介质假定,即把层合板复合材料看成某种均匀等效的物质。这样,对固定波长激光,该材料对激光的体吸收系数  $\nu$  和透射率  $T$ (包括后向散射光)与材料的热物理性能和材料厚度及内部反射面(密度间断面)的数量有关,材料的表面反射率  $R_{S}$  只与材料表面温度有关。但是由于层合材料内部反射面的作用导致的反射和前向散射光对反射率也有贡献,这种效应统称为体积反射率  $R_{V}$ (Snyder and Wan, 1998)。上面的参数定义如下:反射率  $R = R_{S} + R_{V} = E_{R}/I_{0}$ ; 透射率  $T = I_{T}/I_{0}$ ; 吸收率  $a = I_{a}/I_{0}$ ; 体吸收系数  $\nu = -(I_{0} - I_{R})^{-1}dI_{a}(h)/dh$ 。其中,  $I_{0}$  为激光入射总能量,  $I_{R}$  为表面反射能量(包括反射和前向散射光的能量),  $I_{T}$  为激光的透射能量(包括透射和后向散射光能量),  $I_{a}$  为材料吸收的激光能量,  $I_{a}(h)$  为厚度为  $h$  的材料吸收的激光能量。由能量守恒可以得到:  $\nu = (I_{0} - I_{R})^{-1}[d(I_{R} + I_{T})/dh]$ ; 进一步计算可以得到:  $\nu = I_{0}(I_{0} - I_{R})^{-1}[d(I_{R}/I_{0} + I_{T}/I_{0})/dh] = (1 - R)^{-1}d(R + T)/dh$ 。

通过反射率和透射率的拟合曲线令  $h = 0$  并利用能量守恒可以得到材料表面对激光能量的吸收率,然后可以得到对应材料的体积能量吸收率。

## 2 实验测试方法和结果

### 2.1 测试原理和系统

实验选用的材料对激光的反射光和透射光分布在一定的空间立体角之内,为了准确测量,需要对反射光和透射光进行收集,因此实验采用双积分球系统<sup>[6,7]</sup>,即反射光和透射光均采用积分球收集,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: # 1 积分球标定采用反射率为 99.9% 的全反片代替材料; # 2 积

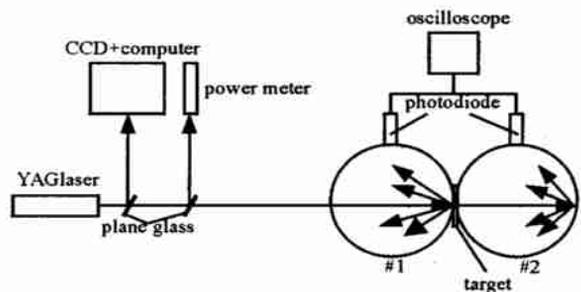


Fig. 1 Schematic graph of the experimental system

图 1 实验装置图

\* 收稿日期:2002-08-27; 修订日期:2003-08-05

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机理研究工作;绵阳市 919-113 信箱。

分球则直接让激光进入积分球内部。然后通过实验将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和透射率。实验前对激光功率、两个积分球分别进行标定,激光功率标定采用标准功率计。

## 2.2 材料的选择

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  $200 \text{ g/m}^2$ 。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, 2, 4 和  $6 \text{ mm}$ 。铺层之间均为  $0^\circ$ 。

## 2.3 激光器输出特性

实验用激光器为 Nd:YAG 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,中心能量分布基本上呈现一个平台。

## 2.4 实验结果

利用上述实验系统,测量了 4 种厚度的复合材料在波长为  $1.06 \mu\text{m}$  的 4 种激光功率密度下的表面反射率和透射率。图 3 和图 4 为在不同的激光平均功率时透射率和反射率随材料厚度的变化,图 5 为材料对激光能量的吸收率,图 6 为材料体吸收系数与材料厚度的关系曲线。

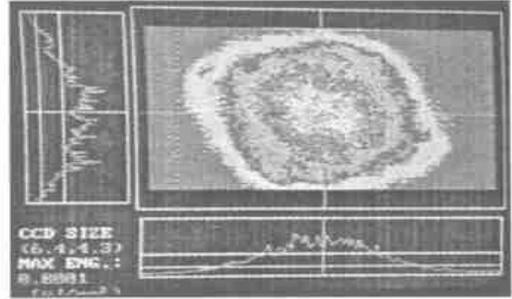


Fig. 2 Energy distribution of the spot of the laser  
图 2 激光光斑能量分布图

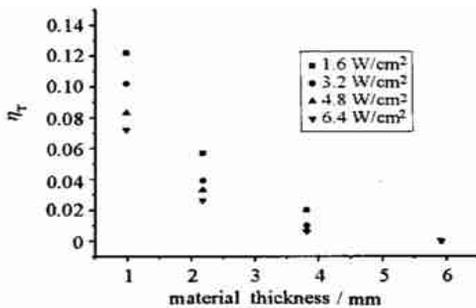


Fig. 3 Transmissivity of the material  
图 3 透射率随材料厚度的变化

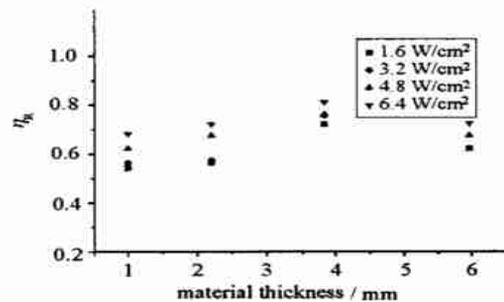


Fig. 4 Reflectivity of the material  
图 4 反射率随厚度的变化

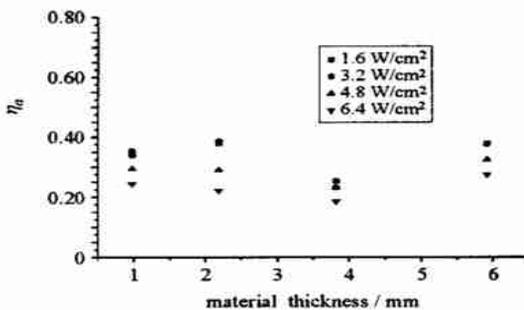


Fig. 5 Laser absorption ratio of the material  
图 5 材料对激光能量的吸收率与材料厚度的变化曲线

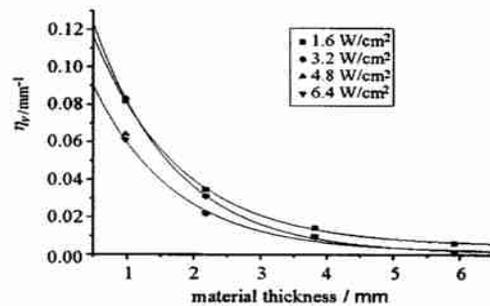


Fig. 6 Volumetric absorption coefficient of the material  
图 6 材料体吸收系数与材料厚度的变化曲线

## 3 实验结果讨论

从图 3 和图 4 可以看出,材料反射率随着材料厚度的增加而增加,这种增加是由于材料内界面的后向反射和前向散射而引起的,对应的就是材料的体积反射率的变化趋势,因为表面反射率在这个过程中没有发生变化(实验使用的激光功率密度低于材料的表面烧蚀阈值,表面没有发生变化)。但是实验数据点在材料厚度为  $3.82 \text{ mm}$  时偏高,具体原因有待进一步分析。当材料厚度趋于零时,材料表面反射率和透射率均趋于一个常数;随着材料厚度的增加,材料内部分层增多,反射面也相应增多,材料内部的反射增强,同时材料内部的散射光也会对测试的反射率有相应的贡献,但是随着材料厚度的进一步增加,内部反射面和散射面反射和前向散射的光传输到前表面的光减弱,因此厚度到达某个值后反射率达到极值,将不随材料厚度的变化而变化。从图 3

和图 4 还可以看出,透射率随着材料厚度的增加而减小,随着功率的增加也是减小的。对于材料厚度增加而言,相应的吸收和反射会增加,因此透射率会减小;而对于激光功率的增加而言,由图 7 可以看出,反射率会由于后向反射的增加而增加,相应的吸收也增加,因此透射率也会减小。对于传统的材料与激光相互作用的理论可知透射率随材料厚度呈现指数衰减。测试得到的数据基本上也反映这样的规律。

由图 5 可以看出,对应同一种功率,当材料厚度增加,此时吸收的能量份额增加;对应同一种厚度,材料对激光的吸收率随激光能量平均功率密度的增加是减小的;当材料厚度趋于零时,吸收率就对应表面吸收率(材料表面存在密度间断区域,因此会产生表面吸收)。体吸收率为对应材料厚度和平均功率密度的总吸收率减去表面吸收率。实验时材料厚度为 3.82mm,由于反射率偏高,所以导致该厚度的吸收率数据偏低,但总的趋势是可以看出来的,即吸收率先随厚度增加然后趋于稳定。

由图 6 可以得到,当激光功率一定时,材料的体吸收系数随着材料厚度的增加呈指数衰减。当材料厚度一定时,材料的体吸收系数随激光功率的增加是减小的。体吸收系数的曲线与前面反射率和透射率的变化趋势是吻合的,与理论模型是基本吻合的。

## 4 结 论

由以上的分析可知:(1)在激光功率一定的情况下,该材料的体积反射率随着厚度的增加而增加;材料的透射率随材料厚度的增加而衰减;(2)在材料厚度一定的情况下,该材料的体积反射率随激光功率的增加而增加,直到激光功率密度达到材料表面烧蚀阈值;此时材料的透射率随激光功率的增加而衰减;(3)在材料厚度一定的情况下,材料对激光能量的吸收率随着激光功率的增加是减小的;(4)材料厚度一定时,材料的体吸收系数随着激光功率的增加是减小的;激光功率一定时,材料的体吸收系数随材料厚度的增加呈指数衰减。

感谢:本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] Thangaratnam R K, Palaninathan R, Ramachandran J. Thermal buckling of laminated composite shells[J]. *AIAA Journal*, 1990, **28**(5): 859—860.
- [2] Chen J K, Sun C T, Chang C I. Failure analysis of a graphite/epoxy laminate subjected to combined thermal and mechanical loading[J]. *Journal of Composite Material*, 1985, **19**(5): 408—423.
- [3] Ballantyne A, Woodroffe J A, Cronburg T L. Modeling of the interaction of 10.6 $\mu\text{m}$  laser radiation with reinforced plastics[J]. *AIAA Journal*, 1981, **19**(6): 731—738.
- [4] Stavridi M, Gnneken B, Koenderink J J. Surface bidirectional reflection distribution function and the texture of bricks and tiles[A]. SPIE[C]. 1996, **2599**: 406—417.
- [5] Zaworski J, Welty R, Drost M K. Measurement techniques for bidirectional reflectance of engineering materials[A]. ASME[C]. 1993, **244**: 172—177.
- [6] 葛新石,陈则韶.量热技术和热物性测定[M].合肥:中国科学技术大学出版社,1990。(Ge X S, Chen Z S. Calorimetric technology and measurement of thermophysical properties. Hefei: Press of University of Science and Technology of China, 1990)
- [7] 朱德忠.热物理测量技术[M].北京:清华大学出版社,1990。(Zhu D Z. Thermophysical measuring technology. Beijing: Tsinghua University Press, 1990)

## Absorption characteristics of the composite reinforced by polyaryl amide fibers irradiated by high power laser

WANG Gui-bing, LIU Cang-li

(Institute of Fluid Physics, CAEP, P. O. Box 919-113, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The absorption characteristics of the composite reinforced by polyaryl amide fibers irradiated by laser beam with a wavelength of 1.06 $\mu\text{m}$  were investigated using two integrated spheres and photodiode system. The intensity of laser beam, surface and volumetric reflectivity, volumetric absorption coefficient, transmissivity were obtained from the experiments. Experiments results show that volumetric reflectivity increases with both material thickness and laser intensity, volumetric absorption coefficient increases with material thickness, but decreases with laser intensity. A reasonable explanation is suggested based on the results and the material properties.

**Key words:** Bi-integrated sphere; Laser; Absorption characteristics; Composite; Surface absorption