

文章编号: 1001-3806(2009)06-0590-03

复合材料激光辐照过程中的吸收特性分析

张永强, 王贵兵, 唐小松

(中国工程物理研究院 流体物理研究所, 绵阳 621900)

摘要: 为了研究激光辐照过程中芳纶纤维/环氧和碳纤维/环氧两种复合材料吸收特性的变化情况, 采用双积分球-光电管测试系统和对实验回收样品进行微观分析的方法, 得到了两种复合材料在 $1.319\mu\text{m}$ 连续激光辐照过程中吸收率的变化结果。在烧蚀前, 材料的吸收率随激光功率增大而缓慢减小, 芳纶纤维/环氧材料从 0.6 减小到 0.55, 碳纤维/环氧材料从 0.85 减小到 0.8; 当材料发生烧蚀时, 芳纶纤维/环氧材料的吸收率迅速增大, 而碳纤维/环氧材料的吸收率无明显变化。结果表明, 烧蚀对芳纶纤维/环氧材料的吸收特性影响较大, 对碳纤维/环氧材料无明显影响。

关键词: 激光物理; 吸收特性; 双积分球-光电管; 微观分析; 复合材料

中图分类号: TN247

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.06.009

Absorption characteristics analysis of composite irradiated by CW laser

ZHANG Yong-qiang, WANG Gui-bing, TANG Xiao-song

(Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The absorption characteristics of polyaryl amide-fibers/epoxy and carbon-fibers/epoxy composite radiated by continuous wave laser beam at of $1.319\mu\text{m}$ were obtained by means of double integrating spheres-photodiode system and micro-analysis of recovery specimen. When laser power intensity increases before composite ablation, the absorptive of both the composites slowly decreases. It changes from 0.6 to 0.55 for polyaryl amide-fibers/epoxy composite and from 0.85 to 0.8 for carbon-fibers/epoxy composite. When ablation appears on the composite, the absorptivity of polyaryl amide-fibers/epoxy composite rapidly increases. However, it change little for carbon-fibers/epoxy composite. The results show that ablation has obvious effect on the absorption characteristics of polyaryl amide-fibers/epoxy composite and has little effect on carbon-fibers/epoxy composite.

Key words: laser physics; absorption characteristics; double integrating spheres-photodiode; micro-analysis; composite material

引言

纤维增强类复合材料如芳纶纤维/环氧、碳纤维/环氧复合材料, 由于具有比强度高、比模量高等特点, 被广泛地应用于航空、汽车、机械制造等领域。与金属材料不同的是, 当激光与纤维增强类复合材料相互作用时, 由于树脂基体是高分子有机化合物, 激光辐照升温后容易发生热分解引起质量迁移, 材料出现烧蚀; 如果激光继续辐照, 纤维将发生氧化反应, 甚至是起火燃烧形成炭化层^[1], 此时激光与复合材料作用, 因激光作用的材料表面状况发生变化, 烧蚀产物形成等因素, 认为材料对激光能量的吸收特性将发生变化^[2]。因此, 为了能够在激光加工、钻削复合材料^[3-4]等激光与物质相互作用领域中准确计算复合材料在激光作用过程中的温度场、应力场等参量, 必须要确切知道复合材

料的吸收率以及激光作用过程中, 特别是烧蚀过程中吸收率的变化规律。PHIPPS 等人^[5-6]对芳纶纤维/环氧和碳纤维/酚醛材料在脉冲激光作用下的耦合规律进行了研究; 在国内, 针对复合材料的激光烧蚀机理、烧蚀形貌以及热损伤规律等研究工作开展较多^[7-10], 对激光作用下复合材料烧蚀前后吸收特性研究的报道相对较少, WANG 等人^[11]对芳纶纤维/环氧材料在连续激光作用下的吸收特性进行了研究, 但并未涉及到材料发生烧蚀后的情况。

本文中通过双积分球-光电管测试系统, 分别对芳纶纤维/环氧和碳纤维/环氧两种复合材料在 $1.319\mu\text{m}$ 连续激光作用下, 材料从开始受到激光辐照到材料发生烧蚀这一过程中的反射率变化进行了实验测量, 结合实验回收样品的微观分析, 得到了两种纤维增强类复合材料的吸收率, 以及材料在烧蚀前后对激光能量吸收特性。

1 复合材料参量和光学特性

芳纶纤维/环氧和碳纤维/环氧两种复合材料中的

作者简介: 张永强 (1981-), 男, 助研, 主要从事激光与物质相互作用的研究。

E-mail: zqiang6590@sina.com

收稿日期: 2008-09-10; 收到修改稿日期: 2008-10-15

纤维取向同为 $0^\circ/90^\circ$, 环氧树脂均为酸酐固化环氧树脂体系。实验前, 利用分光光度计对厚度为 0.58mm 的芳纶纤维/环氧和厚度为 0.56mm 的碳纤维/环氧复合材料光学特性进行了测量, 波长测量范围为 $0.4\mu\text{m} \sim 4.0\mu\text{m}$ 。两种复合材料的反射、透射光谱如图 1 所示。

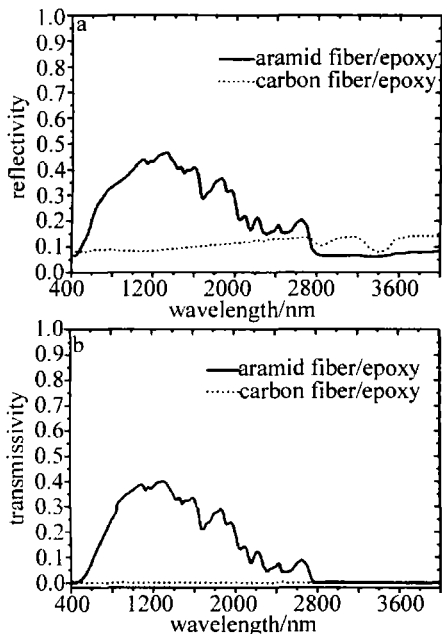


Fig. 1 Reflectivity and transmissivity spectrum of two composites
a—reflectivity spectrum b—transmissivity spectrum

从图 1 中可以看出, 芳纶纤维/环氧复合材料对光的反射、透射具有一定的选择性, 且反射率和透射率随波长的变化比较大, 碳纤维/环氧复合材料对光的反射具有一般性, 随波长的变化不大, 且对光不具有透射性。因此, 芳纶纤维/环氧材料对激光能量的吸收机制属于体吸收, 吸收率与材料厚度有一定的关系; 碳纤维/环氧材料对激光能量的吸收机制属于面吸收, 材料厚度对吸收率应无影响。

另外, 由参考文献[12]可知, 芳纶纤维/环氧复合材料的透射率随材料厚度增加而减小, 且在厚度为 2.74mm 时, 材料对 $1.319\mu\text{m}$ 连续激光的透射率接近 0。为了能够通过仅测量反射率 R 的变化, 利用吸收率 $\alpha = 1 - R$ 来获取两种纤维增强类复合材料在激光作用下, 从开始受到激光辐照到材料发生烧蚀这一过程中的吸收特性, 实验中所用的芳纶纤维/环氧复合材料厚度分别为 2.74mm 和 4.5mm , 碳纤维/环氧复合材料厚度分别为 1.0mm , 2.0mm , 3.4mm 。

2 实验装置

材料对激光能量的吸收率 α 无法直接测量得到, 通常是采用测量激光辐照过程中的反射率 R 和透射率 T (具有透射性的材料), 利用 $\alpha = 1 - R - T$ 计算获取。

为了避免在反射率测量过程中, 激光功率波动对

测量结果的影响, 采用双积分比较法^[8]对激光辐照过程中材料反射率进行测量。测量装置如图 2 所示。

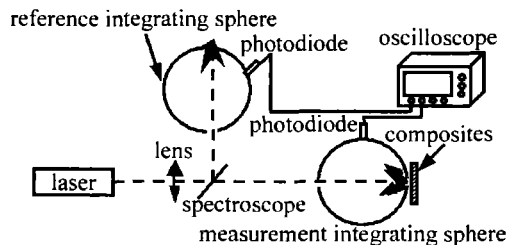


Fig. 2 Sketch of experimental setup

实验中所用激光器波长为 $1.319\mu\text{m}$; 光电管均为铟镓砷光导型; 为了避免激光辐照过程中杂散光的影响, 在光电管前放置了 $1.319\mu\text{m}$ 窄带滤光片。实验时, 入射激光功率从 0 逐渐增大, 直到复合材料发生烧蚀。另外, 为了避免复合材料烧蚀产物对积分球内部的污染, 复合材料样品与积分球之间存在一定间隙。

3 实验结果与分析

芳纶纤维/环氧复合材料表面原始形貌和烧蚀形貌分别如图 3 和图 4 所示。

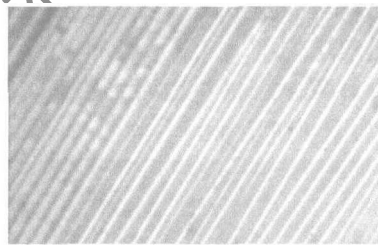


Fig. 3 Initial pattern of polyaryl amide-fibers/epoxy composite

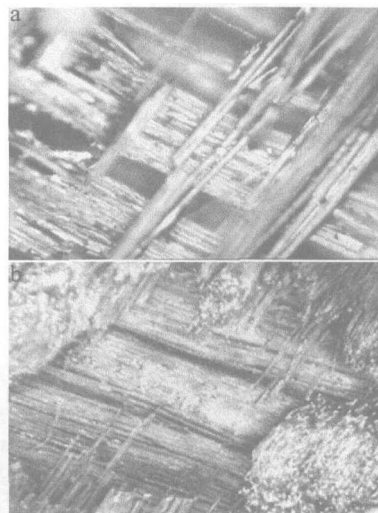


Fig. 4 Ablation pattern of polyaryl amide-fibers/epoxy composite
a—fracture pattern of fibers b—charring layer of material surface

通过测量反射率得到的吸收率变化曲线如图 5 所示。从图 5 中可以看出, 芳纶纤维/环氧复合材料在激光辐照过程中, 吸收率的变化分为两个阶段。第 1 阶段: 从激光开始辐照到材料发生烧蚀前, 随着激光功率的增加, 吸收率从 0.6 缓慢下降到 0.55, 这一过程主

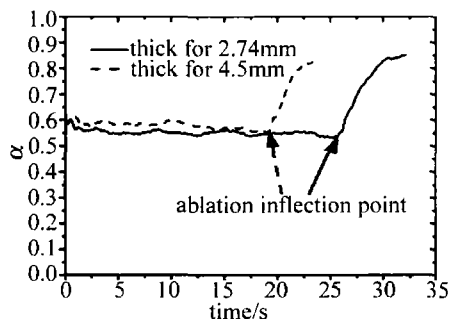


Fig. 5 Absorptivity change of polyaryl amide-fibers/epoxy

要是由于激光功率的增大,导致材料反射率增大所致;第2阶段:材料发生烧蚀时,吸收率迅速增大。结合芳纶纤维/环氧材料的表面原始形貌和烧蚀形貌可以看出,材料发生烧蚀时,树脂基体已发生热分解,纤维经氧化、燃烧(点燃温度 495°C)后在表面形成了如图4b所示的炭化层,由于纤维的断裂,炭化层也出现了在多个方向的开裂,可见,材料在烧蚀时表面形貌发生了显著变化。另外,由于树脂基体的热分解、纤维氧化、燃烧,形成的炭化层中含有裂解残碳及碳化合物等物质,对激光能量有着较强的吸收。因此,芳纶纤维/环氧复合材料在烧蚀时,吸收率发生明显的变化,在烧蚀过程中,吸收率迅速增大。

碳纤维/环氧复合材料表面原始形貌和烧蚀形貌分别如图6和图7所示。

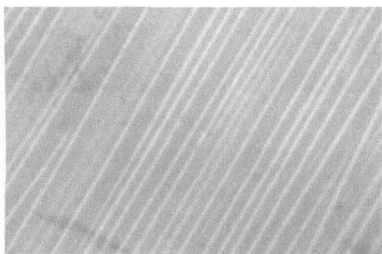


Fig. 6 Initial pattern of carbon-fibers/epoxy composite

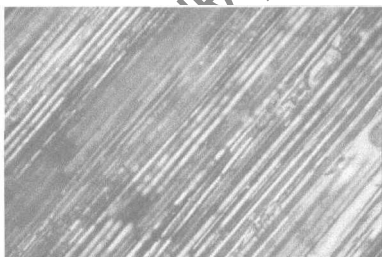


Fig. 7 Ablation pattern of carbon-fibers/epoxy composite

通过测量反射率得到的吸收率变化曲线如图8所示。从图8中可以看出,碳纤维/环氧复合材料在烧蚀前后其吸收率仅发生了较小变化,从初始的0.85减小到0.8,吸收率曲线在烧蚀时并未像芳纶纤维/环氧复合材料那样出现明显的拐点。对比碳纤维/环氧复合材料表面原始形貌和烧蚀形貌可以发现,材料的烧蚀主要是表面具有对纤维均衡载荷能力的树脂基体发生

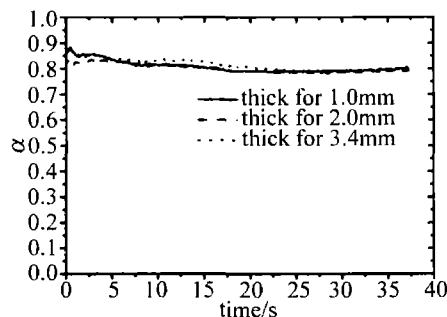


Fig. 8 Absorptivity change of carbon-fibers/epoxy composite

热分解产生气体产物,而碳纤维由于有着较高的氧化反应温度(约 850°C),且汽化温度高达 3300°C ,在烧蚀过程中不会形成炭化层,致使表面状况没有发生较大变化。另外,随着树脂基体热分解气体产物的逸出,激光继续作用在表层的碳纤维和树脂基体热分解后形成的裂解残碳上,而这些物质对激光的吸收较为稳定。因此,碳纤维/环氧复合材料在烧蚀过程中,吸收率无明显变化,仍为0.8左右。

4 结论

采用双积分球-光电管测试系统和对实验回收样品进行微观分析的方法,得到了芳纶纤维/环氧和碳纤维/环氧两种纤维增强类复合材料在 $1.319\mu\text{m}$ 连续激光作用下的吸收特性。结果表明:(1)两种复合材料烧蚀前的吸收率随激光功率增加而缓慢减小,芳纶纤维/环氧材料从0.6变化到0.55,碳纤维/环氧材料从0.85变化到0.8;(2)芳纶纤维/环氧复合材料在烧蚀时,由于表面形貌发生了显著变化,以及材料表面形成了含有裂解残碳及碳化合物的炭化层,在烧蚀过程中吸收率迅速增大;(3)碳纤维/环氧复合材料在烧蚀时,表面形貌无较大变化,烧蚀产物主要是气体,在烧蚀过程中吸收率无明显变化,约为0.8。

参 考 文 献

- [1] SUN C W, LU Q SH, FAN ZH X, *et al.* The effect of laser radiation [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002: 65-68 (in Chinese).
- [2] WANG G B, LIU C L. Experimental research of the ablation threshold of Kevlar/epoxy [J]. Laser Technology, 2003, 27(5): 457-459 (in Chinese).
- [3] CHEN Zh H, LIN Y X, GAO Ch H. A study on laser drilling of resin matrix fiber reinforced composites [J]. Machinery, 2005, 43(10): 55-57 (in Chinese).
- [4] ZHENG H Y, GAN E, LIM G C. Investigation of laser via formation technology for the manufacturing of high density substrates [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2001, 36(4): 355-371.
- [5] PHIPPS C R, TURNER T P, Jr, HARRISON R F, *et al.* Impulse coupling to targets in vacuum by KrF, HF and CO_2 single-pulse lasers [J]. J A P, 1988, 64(3): 1083-1096.

(下转第596页)

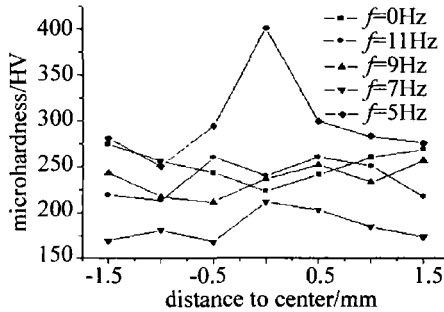


Fig. 11 Effect of frequency on micro-hardness

变化折线图。双焦点的旋转频率主要是从两个方面影响焊缝的硬度,一方面是旋转的双焦点可以改变焊缝各个部分的热量分布,由于双焦点的旋转,可以加快熔池的搅拌,因此,熔池各个部分的能量分布更容易区域均匀,这样各个部分的硬度也趋于均匀。从图 11 中可以看出,在旋转频率为 0 时,也就是不旋转的情况下,由于焊缝中心位于两束激光产生的匙孔的中间,故温度较高,能量较高,这样使得该部分的冷却速度较小,从而中心部分的硬度值明显低于两侧。而通过双焦点的旋转,加速熔池中各部分能量的传递,故各个部分的能量比较均匀。但是另一个方面在旋转频率较低时,由于焊缝中的金属几次受到高温金属溶液的作用,引起了焊缝中心组织的再结晶,因此硬度比周围要高,如图中 $f=5\text{Hz}$ 的状态。随着旋转频率的不断增加,焊缝各部分的硬度也就不断趋于平均。

3 结论

(1) 激光功率和焊接电流对旋转双焦点激光-TIG 复合焊接焊缝组织产生重要影响,这是因为这两者不但影响热源提供能量的大小,更重要的是两者之间耦

合作用的强弱直接影响焊接热源的利用率。

(2) 焊接速度的大小可以改变焊缝冷却速度,影响焊缝组织晶粒度。采用较大的焊接速度,可以加快焊缝冷却,使焊缝中形成细小的晶粒,帮助提高焊缝塑性和韧性,但是这样产生的焊缝熔深较浅。

(3) 双焦点的旋转频率是旋转双焦点激光-TIG 复合焊接中非常重要的工艺参量。一方面旋转频率的大小可以影响晶粒度的大小,另一方面对焊缝的显微硬度影响也较大,在低速旋转时还会引起焊缝的再结晶。

参考文献

- [1] BAGGER C, OLSEN F O. Review of laser hybrid welding [J]. *Journal of Laser Application*, 2005, 17(1): 2-14.
- [2] TUSEK J, SUBAN M. Hybrid welding with arc and laser beam [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 1999, 4(5): 308-311.
- [3] HU Sh S, ZHANG Sh B, ZHAO J R. Arc augmented laser welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 1993, 14(3): 159-163 (in Chinese).
- [4] HARTFORD E. *Stainless steel welding* [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004: 56-68 (in Chinese).
- [5] ZHAO L, CHEN W Zh, ZHANG X D. Microstructure and mechanical properties of laser welded joint of NULCB steel [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(4): 344-346 (in Chinese).
- [6] ZHANG X D, CHEN W Zh. Microstructures and toughness of weld metal of ultrafine grained ferritic steel by laser welding [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2004, 20(6): 755-759 (in Chinese).
- [7] ZHAO L, ZHANG X D, CHEN W Zh. CGHAZ microstructure and properties of RPC steel laser welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, 26(6): 131-135 (in Chinese).
- [8] YIN C Q, ZA X Zh, LU B Zh. Granular bainite in microstructures after welding and its effects on impact toughness in STE355 steel [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2003, 24(2): 55-58 (in Chinese).

(上接第 592 页)

- [6] PHIPPS C R, HARRISON R F. Enhanced vacuum laser-impulse coupling by volume absorption at infrared wavelengths [J]. *Laser and Particle Beams*, 1990, 8(1/2): 281-298.
- [7] WANG G B, LUO F, LIU C L, *et al.* The research of the ablation morphology of the composite reinforced by polyaryl amide fibers irradiated by laser [J]. *Laser Technology*, 2006, 30(2): 168-169 (in Chinese).
- [8] CHEN B, WAN H, MU J Y, *et al.* Ablative mechanism of carbon-fiber/epoxy composite irradiation by repetition frequency laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(4): 547-552 (in Chinese).
- [9] GUO Y L, LIANG G Zh, QIU Zh M, *et al.* Effect of laser parameters on mass ablative rate of carbon fiber reinforced composite [J]. *Acta Materialia Compositae Sinica*, 2006, 23(5): 84-88 (in Chinese).
- [10] YIN J, ZHANG H B, XIONG X, *et al.* Influence of microstructure of pyrocarbon on ablation performances of C/C composites [J]. *Chinese Journal of Material Research*, 2007, 21(1): 10-14 (in Chinese).
- [11] WANG G B, LIU C L. Absorption characteristics of the composite reinforced by polyaryl amide fiber irradiated by high power laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(11): 1065-1067 (in Chinese).
- [12] ZHANG Y Q, WANG W P, TANG X S, *et al.* Coupling rules of two fiber reinforced composites with continuous wave laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(10): 1599-1602 (in Chinese).