

文章编号: 1001-3806(2021)05-0636-06

## 高功率激光辐照 CFRP 的温度场和应力场的数值分析

张潇允, 张巍, 夏盛强, 马遥, 金光勇\*  
(长春理工大学 理学院 物理系, 长春 130022)

**摘要:** 为了研究高功率激光致碳纤维/环氧树脂复合材料的热损伤规律, 采用 COMSOL 软件对多层结构的碳纤维/环氧树脂复合材料的热应力进行模拟计算, 取得了不同功率密度激光辐照复合材料的瞬态温度场与应力场的时空分布及变化规律。测量得到不同功率密度的激光作用碳纤维/环氧树脂后的损伤面积和损伤形貌, 与数值模拟结果的趋势吻合。结果表明, 靶材表面辐照中心点温度在 872K 时出现温度平台, 即相变潜热期与逆相变潜热期, 并随着激光功率密度变化; 激光辐照靶材对上表面碳纤维产生了极大的轴向压应力, 功率密度为  $293\text{W}/\text{cm}^2$  时, 压应力差值约为  $1.87\text{MPa}$ ; 功率密度为  $3453\text{W}/\text{cm}^2$  时, 压应力差值约为  $1.42\text{MPa}$ 。这一结果对高功率激光致碳纤维/环氧树脂复合材料的热损伤研究提供了理论基础。

**关键词:** 激光技术; 热应力; 数值模拟; 复合材料; 损伤特性

中图分类号: TN249 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2021.05.017

## Study on numerical analysis of temperature field and stress field of carbon fiber reinforced polymers irradiated by high power laser

ZHANG Xiaoyun, ZHANG Wei, XIA Shengqiang, MA Yao, JIN Guangyong

(Department of Physics, College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130000, China)

**Abstract:** In order to study the thermal damage law of carbon fiber reinforced epoxy composite induced by high power laser, the thermal stress of carbon fiber reinforced epoxy composite with multilayer structure was simulated by COMSOL software. Theoretical analysis and experimental verification were carried out. The temporal and spatial distribution and change of the transient temperature field and stress field of composite materials irradiated by laser with different power densities were obtained. The damage area and morphology of carbon fiber/epoxy resin treated with different laser power density were measured, which was consistent with the trend of numerical simulation results. The results show that, when the temperature of the irradiation center of the target surface is 872K, a temperature plateau appears, that is, the latent heat period of phase change and the latent heat period of reverse phase change, and changes with the laser power density. The laser irradiation target material produced a great axial compressive stress on the upper surface of the carbon fiber. When power density is  $293\text{W}/\text{cm}^2$ , the compressive stress difference is about  $1.87\text{MPa}$ ; when power density is  $3453\text{W}/\text{cm}^2$ , the compressive stress difference is about  $1.42\text{MPa}$ . This result provides a theoretical basis for the research on the thermal damage of carbon fiber/epoxy resin composites caused by high-power lasers.

**Key words:** laser technique; thermal stress; numerical simulation; composite material; damage characteristics

### 引言

碳纤维/环氧树脂复合材料(carbon fiber reinforced polymers, CFRP)是一种重要的增强型复合材

料,是交通运输、航天领域、工业化工领域等高新技术领域中不可缺少的原材料<sup>[1-2]</sup>。与传统的复合材料、金属材料相比,CFRP 具有两种材料的特殊层状结构,是一种复杂的新型材料,具有耐冲击、耐烧蚀等优秀的力学性能。激光作为一种非接触工具,不需要处理与材料相关的刀具磨损,也不受基体材料相对于纤维的刚度差异的影响。近年来,激光与复合材料相互作用的研究十分活跃,但大多数研究都集中在不同脉冲宽度的脉冲激光器上。例如,HERZOG 等人 3 种大功率的脉冲激光器对 CFRP 材料进行切割,并找出了合适的切

基金项目:吉林省科技厅自然科学基金资助项目(20200201194JC)

作者简介:张潇允(1995-),女,硕士研究生,现主要从事连续激光辐照复合材料热损伤方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail:jgycust@163.com

收稿日期:2020-10-16;收到修改稿日期:2020-12-14

削参量<sup>[3]</sup>。DITTMAR 等人对 HERZOG 的研究结果进行了深入研究,发现激光参量对碳纤维增强环氧树脂的加工质量和加工时间的影响<sup>[4]</sup>。RODDEN 等人开展了长脉冲 Nd:YAG 激光对多层碳纤维复合材料打孔研究,发现惰性气体环境抑制了等离子体的形成,改变了打孔的能量阈值<sup>[5]</sup>。BOLEY 等人开发了激光与复合材料相互作用的模型,以确定吸收能力、吸收深度和光功率增强内的材料,以及角度分布的反射光<sup>[6]</sup>。FREITAG 等人以菲涅耳方程为基础,建立了碳纤维布和碳纤维增强塑料吸收率的理论模型,得到了碳纤维及其复合材料的光学性能<sup>[7]</sup>。ZHANG 等人发现,功率密度为  $10^2 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2}$  量级的激光辐照复合材料时环氧树脂能发生融化并达到热解温度,并发生了明显的质量迁移<sup>[8]</sup>。WAN 等人得到了在不同功率密度连续激光辐照条件下,树脂基复合材料的微观组织变化及其拉伸性能的变化规律<sup>[9]</sup>。上述多为激光辐照复合材料的烧蚀和损伤形貌等研究,对热应力学行为研究较少,针对激光辐照 CFRP 的热应力仿真报道更是鲜有人知<sup>[10-11]</sup>。

为此,作者将深入分析连续激光辐照复合材料产生热效应的热应力损伤过程<sup>[12-13]</sup>。基于 COMSOL Multiphysics 有限元分析软件,对高功率激光辐照 CFRP 温度场和应力场进行仿真研究。激光对复合材料的损伤是一个复杂的物理过程<sup>[14]</sup>,不同的激光条件会对同一种材料产生不同的作用效果,由于材料表面的树脂基的汽化点很低,在本文中模拟的温度场和应力场从碳纤维层开始研究,得到了热应力损伤的 3 维变化分布及变化规律。这项研究的结果为激光损伤复合材料实验研究提供了理论依据。

## 1 理论模型

### 1.1 物理模型

实验中所用的 CFRP 是由碳纤维和环氧树脂铺层固化成形,由于树脂基体与碳纤维的热物性差异较大,导致了材料复杂的温度分布并产生热应力,因此将碳纤维和基体两者分层建模。激光在空间中为高斯分布,为了监测轴向、径向热应力的演化特征,采用 2 维轴对称为激光辐照复合材料的几何模型。

图 1 所示为高功率激光损伤复合材料物理模型。激光垂直辐照靶材中心,材料半径  $a = 25 \text{ mm}$ ,环氧树脂单层厚度  $d = 0.1 \text{ mm}$ (共 3 层),碳纤维单层厚度  $h = 0.35 \text{ mm}$ (共 2 层)。

采用的材料和激光参量如表 1 和表 2 所示。使用

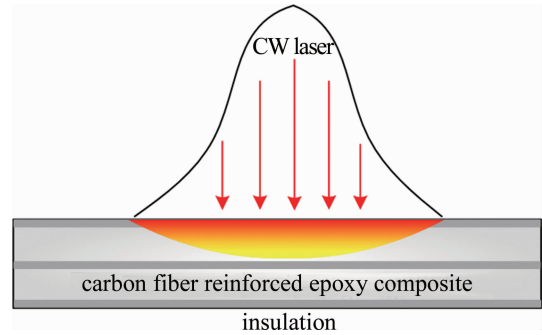


Fig. 1 Geometric model of carbon fiber reinforced epoxy composite irradiated by continuous wave (CW) laser

Table 1 Laser parameters

radius $r/\text{mm}$	wavelength $\lambda/\text{nm}$	radiation time $t/\text{s}$	power density $E/(\text{W} \cdot \text{cm}^{-2})$
1	1064	1	293 ~ 3453

Table 2 Carbon fiber reinforced epoxy composite parameters

parameter	epoxy resin	carbon fiber
thickness/mm	0.3	0.7
absorptivity	0.8	0.8
material density/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	1200	1500
coefficient of thermal expansion/ $\text{K}^{-1}$	$-4.1 \times 10^{-6}$	$5.5 \times 10^{-6}$
Young's modulus/GPa	8.4	230
Poisson ratio	0.38	0.32

COMSOL Multiphysics 有限元分析软件对高功率激光损伤复合材料进行温度场和应力场仿真研究。

### 1.2 数学模型

连续激光辐照 CFRP 进行能量交换的过程中,由于辐照时间较长,激光与复合材料相互作用的主要过程是热传导过程,忽略复合材料与外界的对流和辐射效应,复合材料所吸收的能量全部转化为热能。为了分析连续激光辐照复合材料的温度场及应力场分布,作者在柱坐标系下的热传导过程开始讨论激光作用 CFRP 的热应力模型。

其热传导方程可表示为<sup>[15-16]</sup>:

$$\frac{\partial T_i(r, z, t)}{\partial t} = \frac{\kappa_i}{\rho_i c_i} \left[ \frac{\partial^2 T_i(r, z, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_i(r, z, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_i(r, z, t)}{\partial z^2} + \frac{q_i(r, z, t)}{\kappa_i} \right] \quad (1)$$

式中,  $T_i(r, z, t)$  表示在  $t$  时刻的温度分布;  $r, z$  分别是轴对称坐标系中径向和轴向位置;  $\rho_i, c_i$  和  $\kappa_i$  分别表示材料的密度、比热容和导热系数,  $i$  分别代表碳纤维或环氧树脂。上述热传导方程的热源可表示为:

$$q_i(r, z, t) = \alpha_i (1 - R_i) I_0 f(r) m(z) g(t) \quad (2)$$

$$f(r) = \exp\left(-\frac{2r^2}{r_0^2}\right) \quad (3)$$

$$m(z) = \exp(-\alpha_i z) \quad (4)$$

$$g(t) = 1, (0 \leq t \leq \tau) \quad (5)$$

式中,  $\alpha_i$  代表碳纤维或环氧树脂的吸收系数;  $R_i$  是碳纤维和环氧树脂的反射率;  $I_0$  是激光辐照中心功率密度;  $r_0$  是激光的光斑半径;  $f(r)$  和  $g(t)$  分别是连续激光的空间分布和时间分布;  $\tau$  为连续激光辐照时间。

在连续激光辐照 CFRP 过程中, 材料内部产生不均匀分布的温度场, 复合材料的连续性限制各部分不能自由膨胀, 从而产生热应力。在轴对称坐标系下, 与热传导方程相耦合的平衡微分方程可以表示为<sup>[17-18]</sup>:

$$\nabla^2 u_{ri} - \frac{u_{ri}}{r^2} + \frac{1}{1-2\mu_i} \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial r} - \frac{2(1+\mu_i)}{1-2\mu_i} \beta_i \frac{\partial T_i}{\partial r} = 0 \quad (6)$$

$$\nabla^2 u_{zi} + \frac{1}{1-2\mu_i} \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial z} - \frac{2(1+\mu_i)}{1-2\mu_i} \beta_i \frac{\partial T_i}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

式中,  $\nabla$  为梯度微分算子;  $u_r, u_z$  分别表示位移在  $r, z$  方向上的分量;  $\varepsilon_i, \mu_i, \beta_i$  分别表示体应变、泊松比和材料的热应力系数。设置位移为 0、速度为 0 的初始条件, 设置底面边界  $z$  方向位移为 0, 其它边界为自由边界条件。

## 2 数值模拟结果与分析

### 2.1 温度数值模拟与分析

基于连续激光辐照 CFRP 的数学模型, 结合材料参量和物理模型, 开展了连续激光辐照复合材料的仿真研究。由于靶材上表面环氧树脂材料汽化分解温度为 615K ~ 782K, 激光辐照 1s 后, 靶材上表面的环氧树脂已经完全汽化。在分析靶材的温度场和应力场中, 激光与复合材料相互作用后, 碳纤维为复合材料的上表面研究对象。

连续激光的功率密度  $E$  分别为 293W/cm<sup>2</sup>, 664W/cm<sup>2</sup>, 1311W/cm<sup>2</sup>, 2109W/cm<sup>2</sup> 和 3453W/cm<sup>2</sup> 时, 复合材料上表面中心点 ( $r=0.0\text{mm}, z=0.0\text{mm}$ ) 的温度随时间的变化趋势如图 2 所示。其中图 2a 为辐照时间为 1s 的升温图像。随着激光功率密度的升高, 靶材中心点的最高温度也逐渐升高, 且温升在辐照初期的温升速度变快。这是因为激光辐照到碳纤维, 材料的吸收系数随温度的升高而增大。当上升到一定温度时, 温升变缓,  $t=1\text{s}$  时辐照停止, 温度瞬间下降。在温度为 872K 的温升区域出现相变平台期(升温平台期), 图 2b 所示为升温平台期局部放大图。可以看出, 碳纤维材料存在相变潜热期, 中心点温度达到相变潜热期热焓值, 碳纤维的吸收率下降, 使其吸收的激光能量变小, 导致温度升高变得缓慢<sup>[19]</sup>。随着激光功率

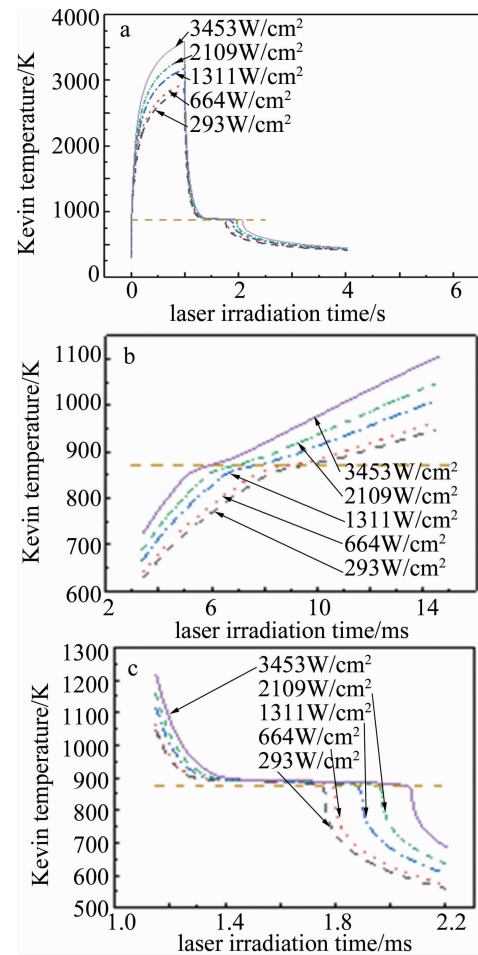


Fig. 2 The temperature of the center point of the upper surface varies with time under different continuous laser power density conditions

密度的增大, 相变潜热期越短, 激光提供能量使碳纤维材料温度升高, 使得相变潜热期阈值迅速饱和, 相变的平台期被迅速打破, 加速碳纤维材料的相变过程。同样, 当温度下降到 872K 附近出现相变平台期(降温平台期), 图 2c 所示为降温平台期局部放大图。在这个过程中碳纤维材料发生逆相变, 即激光停止辐照后, 随着激光功率密度的增大, 温度下降的时间越长。

图 3 中给出了不同功率密度的激光辐照 CFRP 在  $t=1\text{s}$  时径向温度随空间的变化趋势。径向温度变化趋势类似于高斯分布, 在上表面中心点 ( $r=0.0\text{mm}$ ) 为最高温度, 较高温度分布在光斑辐照区域, 随着入射激光功率密度的增大, 靶材的径向温度随之升高。不同激光功率密度辐照条件下, 在  $r=1\text{mm}$  附近均存在拐点, 出现这一现象的原因有两点: (1) 激光的光斑半径为 1mm, 由于激光辐照时间较长, 导致碳纤维吸收激光能量后出现较大的温度烧蚀, 未辐照区域与辐照边缘有较大温度差; (2) 复合材料的径向温度达到碳纤维相变潜热区热焓值, 材料发生了物性改变, 未辐照区域的

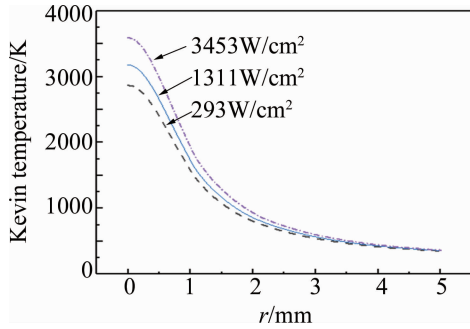


Fig. 3 Variation of radial temperature with space under different CW laser power densities

碳纤维物性参量相对完好,这两个区域的材料导热率等参量出现差异,使径向温度在空间上存在拐点。

不同功率密度的激光条件下,  $t = 1\text{s}$  时 CFRP 轴向温度随空间的变化趋势如图 4 所示。在上表面中心点 ( $z = 0.0\text{mm}$ ) 的轴向为最高温度,下表面中心点 ( $z = 0.9\text{mm}$ ) 的轴向为最低温度。特别观察到,在  $z$  为  $0.35\text{mm}, 0.45\text{mm}, 0.8\text{mm}$  轴向位点发现明显温度拐点。 $z = 0.35\text{mm}$  处为上表面碳纤维层与环氧树脂层交界处,由于温度超过环氧树脂层汽化温度,所以在  $0.35\text{mm} \leq z \leq 0.45\text{mm}$  的区间内为汽化后的环氧树脂。气态的环氧树脂热传递到碳纤维层材料,  $z = 0.45\text{mm}$  处出现轴向温度拐点。 $z = 0.8\text{mm}$  时的拐点是碳纤维材料热传递到后表面的环氧树脂材料,当能量密度较低时,后表面环氧树脂轴向温度未超过环氧树脂分解温度。CFRP 是特殊的层状结构,复杂的物性参量对温度传递是有影响的。激光辐照靶材时轴向温度产生多层次的温度梯度,激光功率密度越高,温度梯度越明显。

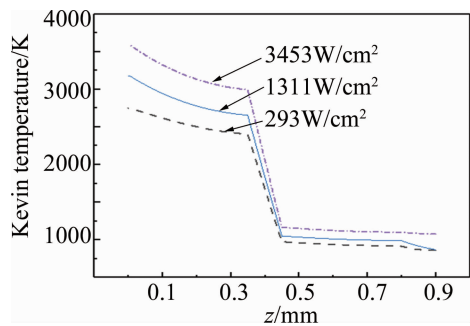


Fig. 4 Variation of axial temperature with space under different CW laser power densities

## 2.2 应力数值模拟与分析

不同功率密度激光条件下,在  $t = 1\text{s}$  时 CFRP 上表面径向应力随空间的变化趋势如图 5 所示。不同功率密度的激光辐照靶材时径向应力在空间的应力分布均表现为压应力。复合材料上表面中心点 ( $r = 0.0\text{mm}$ )

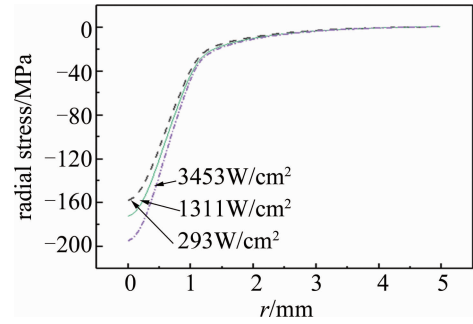


Fig. 5 Variation of radial stress with space under different CW laser power densities

存在最大应力值,随着激光功率密度的增大在激光辐照中心点的压应力随之增大。并观察到,压应力的数值在  $0\text{mm} \leq r \leq 1.2\text{mm}$  快速减小,随后缓慢减小,最终趋近于零。与图 3 对比,径向应力与径向温度在空间上的变化均呈现高速分布的趋势。激光辐照复合材料后,被辐照区的温度升高会导致复合材料的热膨胀,辐照区与未辐照区交界处也会出现明显的温度梯度<sup>[20-21]</sup>。碳纤维材料的连续性成为热膨胀的阻碍,因此复合材料上表面产生了热应力,使径向应力也出现了极高的应力梯度,热效应与应力效应相辅相成,热力耦合效应成为连续激光致 CFRP 热应力损伤的重要因素。

图 6 所示为不同功率密度的激光条件下,  $t = 1\text{s}$  时 CFRP 轴向应力随空间的变化趋势。由图 6 可知,激光辐照靶材时轴向应力空间分布表现压应力居多且观察到有拉应力存在。可以观察到,  $0.0\text{mm} \leq z \leq 0.35\text{mm}$  轴向区域为上表面的碳纤维层,在  $z = 0.35\text{mm}$  轴向位点存在轴向应力断裂。随着不同激光功率密度的变化,断裂位点在同一轴向空间出现不同的压应力差值,如  $E = 293\text{W/cm}^2$  时,断裂位点压应力差值约为  $1.87\text{MPa}$ ;当  $E = 3453\text{W/cm}^2$  时,断裂位点压应力差值约为  $1.42\text{MPa}$ ,  $z = 0.35\text{mm}$  这个特征位点是碳纤维与环氧树脂的交界处。在  $z = 0.185\text{mm}$  附近存在最大压应力值  $12.10\text{MPa}$  ( $E = 3453\text{W/cm}^2$ ),  $z = 0.185\text{mm}$  位于此区域的轴向中心点附近,可见连续激光辐照靶材对上表面碳纤维产生了极大的轴向压应力。 $0.45\text{mm} \leq z \leq 0.8\text{mm}$  轴向区域为邻近下表面的碳纤维层,在  $z$  为  $0.45\text{mm}$  和  $0.8\text{mm}$  轴向位点存在轴向应力断裂。随着激光不同功率密度的变化,轴向应力随空间的变化趋势发生差异性演化。当激光功率密度  $E = 293\text{W/cm}^2$  时,应力断裂区域中出现的轴向应力主要表现为较小的压应力 ( $0.00\text{MPa} \sim 1.74\text{MPa}$ );当激光功率密度  $E = 3453\text{W/cm}^2$  时,应力断裂区域中出现

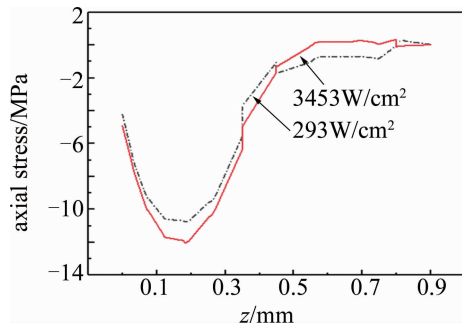


Fig. 6 Variation of axial stress with space under different CW laser power densities

的轴向应力主要表现为较小的拉应力(0.0MPa ~ 0.32MPa)。

### 3 实验验证

#### 3.1 实验装置和样品

测试连续激光辐照 CFRP 的温度实验装置由激光器、分光镜、点温仪、中波红外热像仪、聚焦透镜、可移动 3-D 样品平台、功率计组成。实验装置图如图 7 所示。

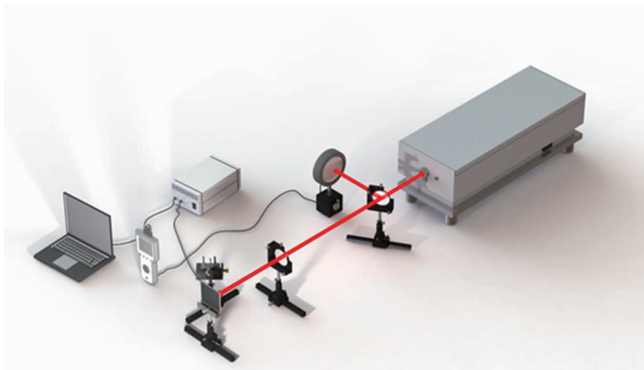


Fig. 7 Schematic diagram of the experimental device

其中激光器使用的是德国 IPG 公司光纤激光器,其输出激光波长为 1064nm,激光功率范围为 0W ~ 500W 可调节,激光辐照时间范围为 0.5s ~ 2.5s,时间变化步长为 0.5s。激光强度的空间分布为近似高斯型,出口光束直径约为 2cm。聚焦透镜焦距 500mm,CFRP 目标表面置于透镜焦点前 52mm。实验中采用 CFRP,材料结构为多层 2 维正交编织结构。材料为黑色薄板,由多层纤维碳/环氧树脂薄层叠加凝固而成,表面尺寸为 50mm × 50mm,厚度为 1mm。

#### 3.2 实验结果与分析

图 8 中为激光辐照后损伤面积与功率密度的关系。材料表面损伤面积随着功率密度的增大而增大;激光辐照时间越长,损伤面积越大,激光辐照时间为 2s 时,激光损伤面积的斜率最大。实验中光斑面积 3.14mm<sup>2</sup>,当激光功率密度为 3453W/cm<sup>2</sup> 时,损伤面积

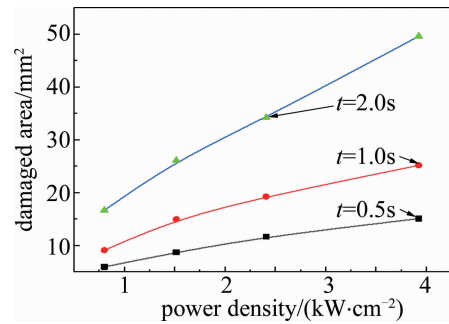


Fig. 8 Relationship between damage area and power density after laser irradiation

达到光斑尺寸的 5 倍 ~ 15 倍。同时,图 8 与图 3 中给出的温度变化趋势相吻合,即随着激光功率密度的变大,复合材料表面的热反应区增大,使材料的损伤面积随之增大。

图 9 是激光功率密度为 3453W/cm<sup>2</sup>、辐照时间为 1s 时,连续激光致 CFRP 的损伤形貌图。从图中可以看出,激光辐照中心点是一个半径约为 0.9mm 的烧蚀坑。图 9b 是图 9a 的放大图。结合图 6 和图 4 可知,在连续激光辐照下 CFRP 产生热应力,复合材料中应力断裂引起复合材料层间结合强度的下降,温度升高碳纤维束在热应力的作用下发生熔断使材料变表面出现损伤。

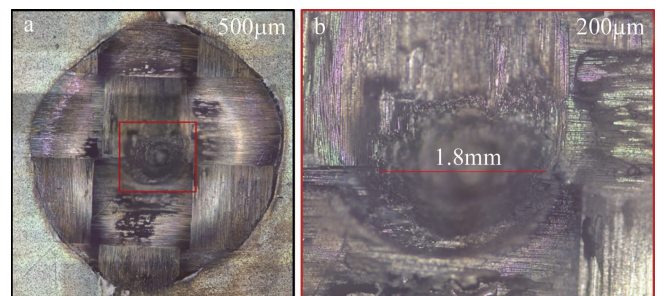


Fig. 9 Damage morphology

实验结果与模拟结果基本吻合,但是还存在一定的差异,这是因为:为了便于找到 CFRP 的热损伤规律,在数值模拟中只考虑了温度对热导率的影响,实际上在其辐照的过程中材料的吸收系数随着温度变化的;并且复合材料的环氧树脂中的杂质等也同样会影响对激光能量的吸收。这些都会造成实验结果和模拟结果的差异。

### 4 结论

针对高功率激光致多层结构 CFRP 热损伤研究,利用 COMSOL 计算了材料表面及内部各层的瞬态温度场与应力场的变化情况,得到了不同功率密度激光辐照 CFRP 的温度和应力的变化特征及规律。

(1)相变潜热是使激光辐照复合材料温度变化过程存在平台区的重要因素,且随激光功率密度而改变。

(2)环氧树脂与碳纤维之间的物性差异与层状结构是导致连续激光辐照复合材料产生较高温度梯度与应力梯度的关键因素。

(3)压应力是轴向应力对材料产生应力损伤的重要因素,且随着连续激光功率密度的变化,邻近后表面的碳纤维材料表现出拉应力与压应力差异性转换。温度和应力是材料表面损伤形貌产生的关键,仿真结果为高功率连续激光辐照多层结构 CFRP 研究奠定了理论基础。

### 参 考 文 献

- [1] MIYAJI G, MIYAZAKI K. Nanostructure formation process in low-fluence femtosecond-laser ablation of thin film surface[J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(s1): S201-S203.
- [2] DI C X, SUN Y J, WANG F, *et al.* Temperature field simulation of laser cut carbon fiber reinforced plastics [J]. Laser Technology, 2020, 44(5): 628-632 (in Chinese).
- [3] HERZOG D, JAESCHKE P, MEIER O, *et al.* Investigations on the thermal effect caused by laser cutting with respect to static strength of CFRP[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2008, 48(12/13):1464-1473.
- [4] DITTMAR H, G BLER F, STUTE U. UV-laser ablation of fibre reinforced composites with ns-pulses[J]. Physics Procedia, 2013, 41: 266-275.
- [5] RODDEN W S O, KUDESIA S S, *et al.* A comprehensive study of the long pulse Nd:YAG laser drilling of multi-layer carbon fibre composites[J]. Optics Communications, 2002, 210(3/6):319-328.
- [6] BOLEY C D, RUBENCHIK A M. Modeling of laser interactions with composite materials [J]. Applied Optics, 2013, 52(14): 3329-3337.
- [7] FREITAG C, WEBER R, GRAF T. Polarization dependence of laser interaction with carbon fibers and CFRP[J]. Optics Express, 2014, 22(2):1474-1479.
- [8] ZHANG J L, WANG W P, LIU C L. Ablation characteristics of 2-D braided carbon fiber/epoxy composites under laser irradiation [J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2017, 34(3): 494-500 (in Chinese).
- [9] WAN H, HU K W, MU J Y, *et al.* Damage analysis of fiber reinforced resin matrix composites irradiated by CW laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(1):6-10 (in Chinese).
- [10] GAO X, GUO X N, LIU J. Bonding technology of composite materials and application in vertical wing box of an aircraft[J]. Trainer, 2014(2):21-27 (in Chinese).
- [11] ROMAIN E, MICHEL B, FABIENNE T, *et al.* A study of composite material damage induced by laser shock waves[J]. Composites Pan: Applied Science and Manufacturing, 2013, A53:54-64.
- [12] JIANG Sh Sh, CAI J X, JIN G Y, *et al.* Research of damage morphology of carbon fiber epoxy resin irradiated by millisecond/nanosecond pulsed laser[J]. Laser Technology, 2018, 42(6): 775-779 (in Chinese).
- [13] JIANG Y, CHEN G Y, ZHOU C, *et al.* Research of carbon fiber reinforced plastic cut by picosecond laser [J]. Laser Technology, 2017, 41(6): 821-825 (in Chinese).
- [14] OHKUBO T, TSUKAMOTO M, SATO Y. Numerical simulation of combustion effects during laser processing of carbon fiber reinforced plastics[J]. Applied Physics, 2016, A122(3): 196-203.
- [15] SALAMA A, LI L, MATIVENGA P, *et al.* High-power picosecond laser drilling/machining of carbon fibre-reinforced polymer (CFRP) composites[J]. Applied Physics, 2016, A122(2): 73-81.
- [16] TANG S, HU C. Design, preparation and properties of carbon fiber reinforced ultra-high temperature ceramic composites for aerospace applications; A review[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2017, 33(2): 3-16.
- [17] JIA Zh Y, SU Y L, NIU B, *et al.* Deterioration of polycrystalline diamond tools in milling of carbon-fiber-reinforced plastic[J]. Journal of Composite Materials, 2017, 51(16):2277-2290.
- [18] STAEHR R, BLUERNEL S, JAESCHKE P, *et al.* Laser cutting of composites—Two approaches toward an industrial establishment[J]. Journal of Laser Applications, 2016, 28(2): 192-203.
- [19] ZHANG L L, JIANG Zh H, ZHANG W, *et al.* A review of laser processing fiber-reinforced flexible composite material [J]. Applied Laser, 2012, 32(3):238-243(in Chinese).
- [20] NEGARESTANI R, LI L, SEZER H K, *et al.* Nano-second pulsed DPSS Nd:YAG laser cutting of CFRP composites with mixed reactive and inert gases[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 49(5/8):553-566.
- [21] WEBER R, HAFNER M, MICHALOWSKI A, *et al.* Minimum damage in CFRP laser processing [J]. Physics Procedia, 2011, B12:302-307.