

脉冲激光加工碳纤维复合材料板材的数值模拟与实验优化

蔡颂^{1,2}, 宋金潮¹, 陈达¹, 文跃兵², 何志坚², 陶能如², 何国旗^{1*}¹湖南工业大学机械工程学院, 湖南 株洲 412000;²湖南第一师范学院智能制造学院, 湖南 长沙 430100

摘要 利用激光扫描方式建立丝状高斯热源的传热模型,并对其进行数值分析,得到脉冲激光烧蚀碳纤维的演化规律。对碳纤维复合材料(CFRP)板材进行激光烧蚀实验研究以验证所提模型的可行性。结果表明:当激光功率为9 W、激光扫描速度为200 mm/s时,板材表面绝大多数树脂被蒸发,表面粗糙度降至7.20 μm,表征数据稳定性的样本方差为1.889。实验证明了该理论模型的正确性和可行性,为CFRP材料的激光加工研究提供了参考。

关键词 激光光学; 碳纤维复合材料; 脉冲激光; 激光烧蚀; 传热模型; 表面粗糙度

中图分类号 TN249;TB332

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS231493

1 引言

碳纤维复合材料(CFRP)具有耐高温、高强度等优点,已被广泛应用于航空航天、汽车、医疗等领域。近几年,激光加工技术发展迅速^[1-3],具有高精度、高效率的显著优势,对加工后材料的形状精度有明显的提升效果^[4-5],其作为一种非接触式的先进加工技术在复合材料加工领域的应用潜力巨大^[6],因此激光加工CFRP已经成为目前研究的热点^[7-8]。

激光加工CFRP的烧蚀区域周围会出现热影响区(HAZ),这对激光加工CFRP的发展会有一些的阻碍^[9-10]。碳纤维的潜热容量是树脂的43倍^[11],在这种情况下,树脂将首先被加热去除,然后随着温度升高,纤维开始热解。显然,传热和温度特性被认为是研究碳纤维板材加工的关键参数。

科研人员研究了CFRP材料在激光加工过程中的传热行为和热响应,以分析材料的温度变化。Chen等^[12]研究了激光功率和切割速度等工艺参数对热损伤的影响,还建立了修正的热传导模型,将单向CFRP板内的传热与实验结果进行比较分析,研究结果表明,该修正模型可用于高功率纤维激光切割复合材料过程中的热影响区预测。Yang等^[13]基于有限元法的“单元死亡”技术,建立了非均质纤维基体网格上的材料去除的

数值模型,该模型可以准确模拟碳纤维与树脂基体之间的传热过程;研究了激光能量密度、光斑重叠率和相邻扫描线间距对材料去除和衬底峰值温度的影响。结果表明,脉冲激光除漆过程会在树脂层和非均质材料上产生两个高温区,相邻脉冲能量的叠加会显著加快基体升温速度。Sihn等^[14]用波长为1.0692 nm的连续光纤激光器和直径为3.0 cm的平顶光束轮廓对T650碳纤维/双马来酰亚胺复合材料进行辐照,记录复合材料试件正面(激光曝光面)和背面(未曝光面)的温度时空变化,并进行基于导热、对流和辐射换热的非线性有限元分析。然而,目前的大多数对材料加工的热传递研究都是应用计算机辅助设计软件模拟材料内部温度场,用于对材料加工的基础数学模型进行传热模拟的底层算法很少。使用自建的传热数学模型可以提供更高的灵活性和抽象性,而耦合相关特性的物理模型,可以更好地在多个方向探索传热过程中遇到的问题。使用MATLAB软件编写传热模型程序时,可以自定义输入和输出,以及各种参数。这个过程中,可以更深入地理解物理现象背后的数学原理,灵活地调整计算方法并优化模型结构。

本实验采用光纤脉冲红外激光烧蚀CFRP板材,探讨不同激光工艺参数(激光峰值功率、散焦量和激光扫描速度组成^[15-17])下CFRP激光加工质量的变化规

收稿日期: 2023-08-30; 修回日期: 2023-09-25; 录用日期: 2023-10-30; 网络首发日期: 2023-11-17

基金项目: 国家自然科学基金(51705141,51975192)、中国博士后科学基金(2019T120650)、湖南省自然科学基金省市联合基金(2021JJ50033)、湖南省自然科学基金(2019JJ40075)、湖北省自然科学基金委员会(2019 9CFB637)、湖南省教育厅科研项目(17C0472,18C1064)、株洲市科技计划项目([2018]61)

通信作者: *heguoqi11@163.com

律,分析纳秒脉冲激光对 CFRP 的烧蚀机理并建立新型热耦合模型,通过数值模拟分析不同激光功率对 CFRP 表面质量的影响。

2 脉冲激光烧蚀 CFRP 板材过程中传热的数值分析

2.1 热物理耦合模型

纳秒脉冲激光加工 CFRP 材料涉及靶材料烧蚀面——XOY 平面的延展问题和 Z 方向上烧蚀深度的推进问题,由于纳秒脉冲激光的脉冲宽度很小(纳秒量级),热能所能传导的宏观距离(即烧蚀深度)很小;激光能量在烧蚀表面的扩散距离为毫米量级,二者差别较大。相对于激光加工材料烧蚀深度,烧蚀面上热能的扩散和传导距离可视为无穷大,因此脉冲激光加工 CFRP 材料的三维热能传导问题可降为一维问题进行处理,激光束垂直射向 CFRP 材料表面,热能沿径向向靶材传导。

在激光 CFRP 板的加工过程中,激光束具有一定的移动速度,因此需要对热源进行校正。本文提出一种线状高斯热源来模拟激光烧蚀的快速移动温度场。设定激光线扫描速度为 v ,激光扫描长度为 L ,烧蚀时间为 $t=L/v$,烧蚀过程中的总热输入为 Q_z ,则

$$Q_z = tP = \frac{LP}{v}. \quad (1)$$

设定丝状激光高斯热源为

$$q(t) = q_m \exp\left[-\frac{(t-\tau/2)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (2)$$

式中: q_m 为热流密度; τ 为激光脉冲宽度; σ 为可以改变激光脉冲时间形状的参数。两种情况下热源模型具有相等的热能输入,即

$$2 \int_0^L \int_0^\infty q_m \exp\left[-\frac{(y-\tau/2)^2}{2\sigma^2}\right] dx dy = \frac{LP}{v}, \quad (3)$$

$$2Lq_m \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(y-\tau/2)^2}{2\sigma^2}\right] dy = \frac{LP}{v}, \quad (4)$$

$$2\sqrt{2} Lq_m \sigma \int_0^\infty \exp\left[-\frac{(y-\tau/2)^2}{2\sigma^2}\right] d\left(\frac{y-\tau/2}{\sqrt{2}\sigma}\right) = \frac{LP}{v}, \quad (5)$$

$$\sqrt{2} Lq_m \sigma \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{(y-\tau/2)^2}{2\sigma^2}\right] d\left(\frac{y-\tau/2}{\sqrt{2}\sigma}\right) = \frac{LP}{v}, \quad (6)$$

$$Lq_m \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{(y-\tau/2)^2}{2\sigma^2}\right] d(y-\tau/2) = \frac{LP}{v}, \quad (7)$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\frac{(y-\tau/2)^2}{2\sigma^2}\right] d(y-\tau/2) = \sqrt{2\pi}\sigma^2, \quad (8)$$

$$\sqrt{2\pi}\sigma Lq_m = \frac{LP}{v}, \quad (9)$$

$$q_m = \frac{P}{\sqrt{2\pi}\sigma v}, \quad (10)$$

式中: P 为激光功率。将式(3)~(10)代入式(2),得到

$$q(t) = \frac{P}{\sqrt{2\pi}\sigma v} \exp\left[-\frac{(t-\tau/2)^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (11)$$

综上所述,考虑纳秒脉冲激光加工 CFRP 材料过程中的丝状高斯热源总热输入 Q_z ,并在傅里叶传热模型的基础上进行耦合,所建立的纳秒脉冲激光加工 CFRP 材料传热物理模型为

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t}\right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x}\right) + b \exp(-bx) \frac{P}{\sqrt{2\pi}\sigma v} \times \exp\left[-\frac{(t-\tau/2)^2}{2\sigma^2}\right], 0 \leq t \leq \tau, 0 \leq x \leq S(t), \quad (12)$$

式中: k 为热扩散系数; b 为碳纤维材料的吸收率; x 为入射激光与 CFRP 板材表面之间的距离; $q(t)$ 为丝状高斯热源。

设定初始温度为室温(约 300 K),在碳纤维材料表面处热能的传导为材料表面对激光能量的吸收,在材料最大烧蚀深度处无热能的进一步传递,建立如下边界条件:

$$T(x, t) = T_0, \quad t = 0, \quad (13)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = b \frac{P}{\sqrt{2\pi}\sigma v} \exp\left(-\frac{\tau^2}{8\sigma^2}\right), 0 \leq t \leq \tau, \quad (14)$$

$$-k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=\delta} = 0, 0 \leq t \leq \tau. \quad (15)$$

2.2 CFRP 激光烧蚀的数值模拟

时域有限差分(FDTD)方法是一种求解微分方程的数值方法,可用于求解常微分方程和偏微分方程。有限差分方法的基本原理为利用网格节点逼近导数,并建立有限个未知数的代数方程来求解各个网格节点的值。

传热物理模型[式(12)]和边界条件[式(13)~(15)]的有限差分方程可表示为

$$\rho_i c_i \frac{T_i^{j+1} - T_i^j}{\Delta t} = k_i \frac{T_{i+1}^j - 2T_i^j + T_{i-1}^j}{(\Delta x)^2} + b \frac{P}{\sqrt{2\pi}\sigma v} \exp(-bi\Delta x) \exp\left[-\frac{(j\Delta t - \tau/2)^2}{2\sigma^2}\right], \quad (16)$$

$$-k \frac{T_1^j - T_0^j}{\Delta x} = b \frac{P}{\sqrt{2\pi}\sigma v} \exp\left[-\frac{(j\Delta t - \tau/2)^2}{2\sigma^2}\right], 0 < t \leq \tau, \quad (17)$$

$$T_d^j = 0, T_i^0 = 300 \text{ K}. \quad (18)$$

整理后可得到

$$T_i^{j+1} = \frac{k\Delta t}{\rho c(\Delta x)^2} T_{i+1}^j + \left[1 - \frac{2k\Delta t}{\rho c(\Delta x)^2} \right] T_i^j + \frac{k\Delta t}{\rho c(\Delta x)^2} T_{i-1}^j + \frac{\Delta t}{\rho c} b \frac{P}{\sqrt{2\pi}\sigma v} \exp(-bi\Delta x) \exp\left[-\frac{(j\Delta t - \tau/2)^2}{2\sigma^2} \right]. \quad (19)$$

建立网格傅里叶数 $\mathcal{F}_{01} = \frac{k\Delta t}{\rho c(\Delta x)^2}$, 可将式(19)转化为

$$T_i^{j+1} = \mathcal{F}_{01} T_{i+1}^j + (1 - 2\mathcal{F}_{01}) T_i^j + \mathcal{F}_{01} T_{i-1}^j + \frac{\Delta t}{\rho c} b \frac{P}{\sqrt{2\pi}\sigma v} \exp(-bi\Delta x) \exp\left[-\frac{(j\Delta t - \tau/2)^2}{2\sigma^2} \right], \quad (20)$$

式中: i 为空间网格的坐标值; j 为时间网格的坐标值。碳纤维和环氧树脂的热物理参数和计算参数如表 1 和表 2 所示。结合表 1 和表 2, 设定激光功率为 1~9 W, 频率 f 为 200 kHz, 脉宽为 80 ns, 激光烧蚀深度在 X 方

向取为 6 μm ; 时间步长为 0.021 ns, 空间步长为 0.15 μm 。由于 $\mathcal{F}_{01} = 0.0355 \leq 0.5$, 因此该模型的数值解是稳定和收敛的。

表 1 碳纤维和环氧树脂的热物理参数

Table 1 Thermophysical parameters of carbon fiber and epoxy resin

Name	symbol	Unit	Value	
			Carbon fiber	Epoxy resin
Atomic mass	m	kg	1.993×10^{-26}	—
Density	ρ_s	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	1850	1250
Thermal diffusivity	k	$\text{cm}^2\cdot\text{s}^{-1}$	0.38	0.001
Thermal conductivity	k_s	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	5	0.2
Specific heat capacity	c	$\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$	710	1200
Vaporization temperature	T_v	$^{\circ}\text{C}$	3627	527
Decomposition temperature	T_m	$^{\circ}\text{C}$	880	425
Absorption rate	b	—	0.584	—

表 2 数值仿真计算参数

Table 2 Numerical simulation calculation parameters

Name	Symbol	Unit	Value
Laser wavelength	λ	nm	1064
Pulse repetition rate	f	kHz	200
Spot diameter	D	μm	50
Pulse width	τ	ns	80

激光功率设定为 1 W、5 W 和 9 W, 激光扫描速度为 200 mm/s。结合碳纤维的热物理参数(表 1)和数值仿真计算参数(表 2)的组合计算参数如表 3 所示。

表 3 碳纤维垂直方向的数值仿真组合计算参数

Table 3 Numerical simulation combined calculation parameters for carbon fiber along perpendicular direction

Name	Unit	Value
Pulse width	ns	80
Time step	μm	0.021
Spatial step	μm	0.15
$k\Delta t/[\rho c(\Delta x)^2]$	—	0.0355

根据 Xu 等^[18]的研究结果, 在红外激光辐照 CFRP 板的过程中, 碳纤维对红外激光的吸收约占激光吸收的 80%, 碳纤维吸收了大部分激光能量。碳纤维的潜

热容量是树脂的 43 倍^[14], 碳纤维在 CFRP 中起到传热的主导作用。在这种情况下, 树脂首先被碳纤维加热去除, 然后纤维将开始热解。作为 CFRP 板材中树脂基体的环氧树脂对近红外波段的红外激光的透射率接近 90%, 在被红外激光光束穿透后不发生明显的散射或反射。因此, 本模型只考虑碳纤维在板材中的传热情况, 对碳纤维材料进行仿真, 通过模拟激光对碳纤维作用的温度场, 并与实验结果进行对比分析。

在 MATLAB 软件进行计算机编程, 得到脉冲激光烧蚀 CFRP 板的温度演化规律, 如图 1 所示。可以看到, 在激光扫描速度不变的条件下, 碳纤维表面温度随激光功率的增加而逐渐增大。如图 1(a) 所示, 当激光功率达到 1 W 时, 碳纤维材料的最高温度约为 470 K, 低于树脂基体分解温度(698 K)。如图 1(b) 所示, 当激光功率增加到 5 W 时, CFRP 板材表面的最高温度为 1158 K, 超过了树脂材料的分解温度(700 K)和汽化温度(800 K)。

如图 1(d) 所示, 当激光功率达到 20 W 时, CFRP 板材表面的最高温度为 3800 K, 超过碳纤维材料的碳化温度(2573 K), 接近碳纤维材料的汽化温度(3900 K), 将该实验结果作为其他实验的一个参考。图 1(d) 所示为激光器最大功率下, 数值仿真激光加工

板材的结果。该条件下热解和化学反应大量发生,影响激光加工效果。被烧蚀的碳纤维会先被氧化,然后随着温度上升,碳材料与氧气完全燃烧和不完全燃烧分别生成二氧化碳和一氧化碳。还有部分碳纤维没有接触到氧气,但是仍吸收大量能量,在吸收上层碳纤维的能量后部分纯度不高的碳纤维被碳化,其中的杂质被高温提取,碳纤维受到高温影响,在形态上发生

变化。

随着激光功率逐渐增加到 9 W,如图 1(c)所示,CFRP 板材表面的最高温度高达 1500 K,明显超过了树脂材料的汽化温度,超过了碳纤维材料的分解温度(1153 K)。如图 1 所示,当烧蚀深度固定时,由于入射激光为高斯型能量分布,靶材的温度呈现高斯型演化规律。

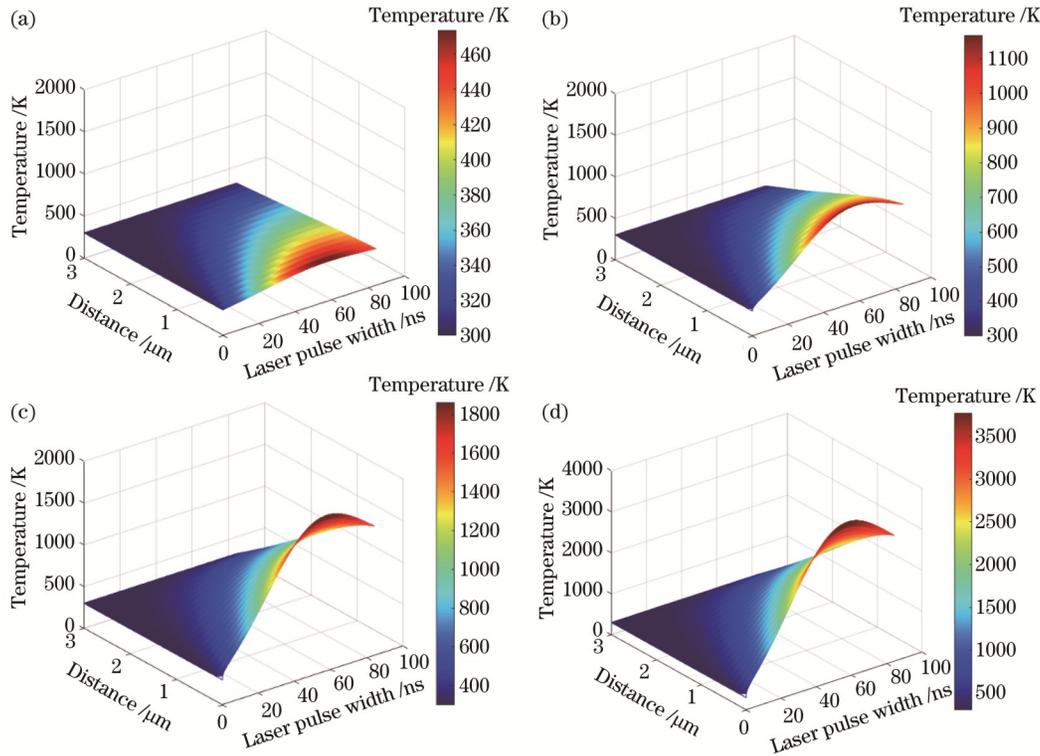


图 1 数值仿真碳纤维材料经脉冲光纤激光处理后的温度变化。(a)激光功率为 1 W;(b)激光功率为 5 W;(c)激光功率为 9 W;(d)激光功率为 20 W

Fig. 1 Numerical simulation of temperature changes in carbon fiber materials treated with pulsed fiber laser. (a) Laser power is 1 W; (b) laser power is 5 W; (c) laser power is 9 W; (d) laser power is 20 W

3 实验研究

3.1 实验平台

纳秒脉冲激光加工 CFRP 的工艺如图 2 所示,激光器的振镜采用动磁式和动圈式偏转的工作方式使激光束发生偏转,偏转后的激光束经场镜聚焦照射在 CFRP 板材上,板材表面激光焦点一定范围内的温度上升,CFRP 板材表面发生相变。

碳纤维在常压下没有液相,汽化碳纤维所需的能量要比激光蒸发树脂基体需要的能量高一个数量级^[11,19]。根据 Xu 等^[18]的研究结果,在红外激光照射 CFRP 板材的过程中,碳纤维对红外激光的吸收约占板材吸收激光的 80%,碳纤维吸收了绝大部分的激光能量,因此,发热使碳纤维 CFRP 板材表面的环氧树脂蒸发。CFRP 板材表面树脂基体吸收激光能量后,会发生汽化,导致微量的树脂基体扩散到空气中,使得空气中具有一定刺激性的气味。随着激光功率增大,

CFRP 板材中的增强材料碳纤维被局部氧化,由固相转变为气相再变成气体扩散至空气中,这才实现 CFRP 板材的烧蚀加工。本实验采用南京春恒激光技术有限公司生产的光纤激光打标机(型号:RC-GX20)。由场镜和驱动器组成的振镜可用于激光扫描,并可进行加工精确定位。由 Ezcad 软件控制输出伺服信号改变透镜偏转角度来定位 XOY 平面上的目标位置^[20],激光束照射到目标点,材料表面出现激光束烧蚀后留下的痕迹。升降轴的高度位置由手轮来人工调整,达到调控 CFRP 材料表面与振镜内部的透镜焦点位置之间纵向距离的目的,这决定了材料表面激光光斑的大小^[21]。

3.2 实验材料及参数

3.2.1 实验材料

本实验中采用的 CFRP 斜纹哑光碳板由广东神扬新材料科技有限公司提供,板材的碳纤维束为 3K 丝束,每束包含 3000 根纱线,碳纤维层由丝束正交排列

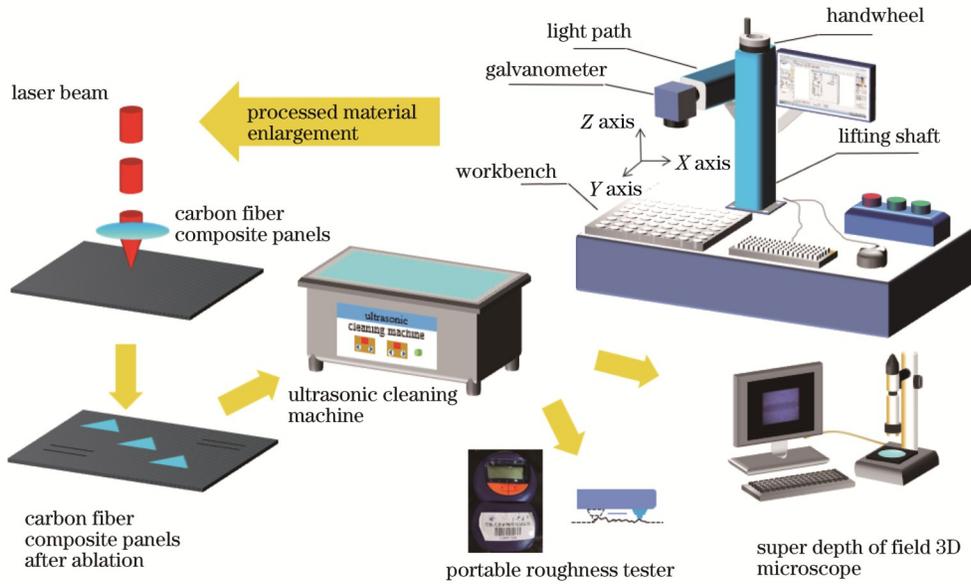


图 2 激光加工 CFRP 的工艺示意图

Fig. 2 Schematic of process of laser processing CFRP

组成。板材表面的花纹基本单位网格包含经纱网格和纬纱网格,其基体为耐温、耐腐蚀、高电绝缘的环氧树脂,长 300 mm,宽 200 mm,厚度为 (0.5 ± 0.1) mm,纤维体积占板材总体积的 60% 以上,纤维铺层的铺设方向为 0° (横束)和 90° (纵束),加上表面编织布料一共 3

层。本实验使用的 CFRP 复合材料板材碳纤维网格表面材料如图 3 所示。场镜将高能量激光束聚焦后照射在工作台的碳纤维板上,在控制器软件上设定程序,使激光在操作台二维 XOY 平面上扫描移动,以实现 CFRP 材料的激光加工。

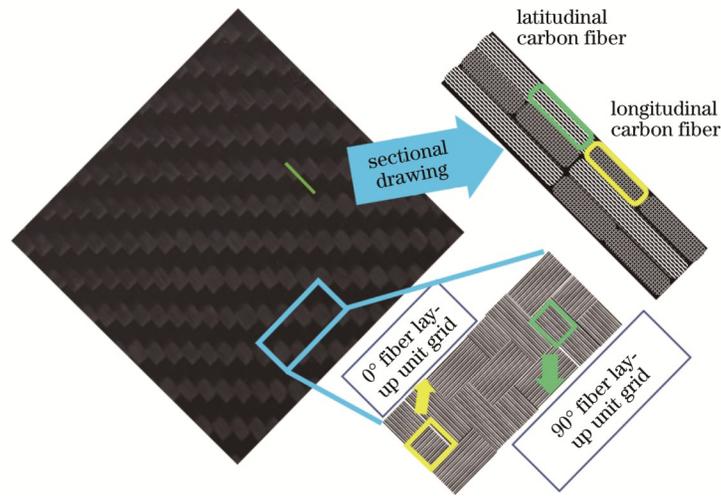


图 3 CFRP 复合板材截面图

Fig. 3 Sectional view of CFRP composite plate

本实验用钰洁公司的 AK-100SD 型号超声波清洗机。打开电源开关后,加热温度被设置为 35°C ,采用 900 W 的最高挡位超声功率,机内温度在 1 min 左右达到设定温度。板材在机器内清洗 5 min,对清洗后的板材进行干燥处理。最后采用超景深三维显微系统观察脉冲激光烧蚀后的 CFRP 材料板材表面的形貌,获得刻蚀线线宽等数据^[22]。

3.2.2 散焦参数的确定

本实验选用的 CFRP 板材由碳纤维束呈 90° 横纵

交错组成。散焦量的选定决定了激光能量的利用率,操控激光器的手轮,调整振镜在 Z 方向升降轴上的高度,以完成激光器的调焦^[23]。用激光器在 CFRP 板材上刻蚀线条,由于材料表面环氧树脂层厚度在纬纱和经纱单位网格之间交界处较网格中心区域更多,分布不均,为保证实验的准确性,选择从正方形网格左边长中点开始,终止于接近横向第 8 个网格右侧边长中点位置,刻蚀线示意图如图 4 所示。

首先,选取用来刻蚀线段的激光扫描速度,参照器

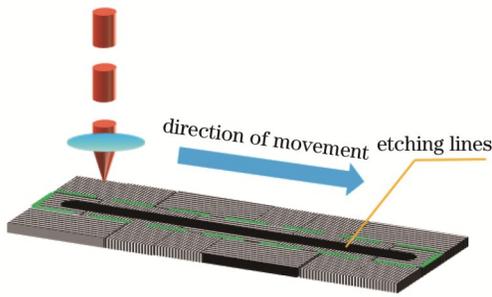


图 4 刻蚀线在材料上的位置

Fig. 4 Position of etching line on the materials

材说明书,将偏振镜与移动轴的连接部件到工作台的距离称为升降轴刻度 h , 选取在聚集激光较强范围内的升降轴刻度 7.4 cm, 在 CFRP 板上分别以 20、40、60、80、100 mm/s 的速度刻蚀线段, 如图 5 所示。可以看到, 80 mm/s 的激光扫描线条较其他线条的连续性较好, 刻蚀线条没有出现明显的由单位网格边缘环氧树脂导致的的中断部分, 故选取 80 mm/s 作为探究最佳散焦量刻蚀线条的激光扫描速度。

以升降轴上的刻度“5 cm”为下限,“10 cm”为上限, 旋转手轮, 每次振镜向上移动 1 cm, 重复实验 6 次, 确保穿过透镜的激光在聚焦后的焦点处于划定的上下限范围内, 如图 6 所示。其中 7 cm 和 8 cm 刻度处刻蚀线线宽最小, 并且是连续的线段, 其他线条几乎都有断点, 且刻蚀深度不明显, 故确定 0 mm 散焦量的位置就在升降轴刻度 7 cm 与 8 cm 之间, 以 7 cm 为起点、0.2 cm 为步长, 在 CFRP 板上刻蚀线条, 直至到达升降轴 8 cm 刻度处, 按照表 4 所示参数进行脉冲激光线段刻蚀后的 CFRP 板材如图 7 所示, 其中 7.6 cm 的刻蚀线条较细且较为连贯。

为保证实验研究在 CFRP 板材找到激光光斑最小的散焦量位置刻度, 故将振镜在 7.6 cm 处沿着升降轴上下各移动 1 mm 的距离, 取升降轴刻度 7.5 cm 和 7.7 cm, 测量该刻度处激光刻蚀线条的宽度。

本实验采用超景深三维显微镜系统(70×)观察激光刻蚀后的线条在 CFRP 板材的纬纱和经纱碳纤维网

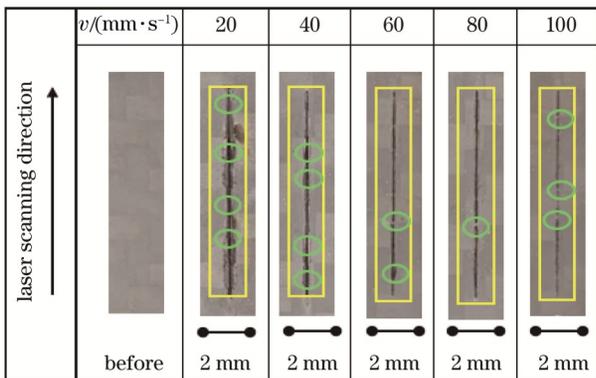


图 5 脉冲激光在不同扫描速度下的刻蚀线

Fig. 5 Etching lines of pulsed laser at different scanning speeds

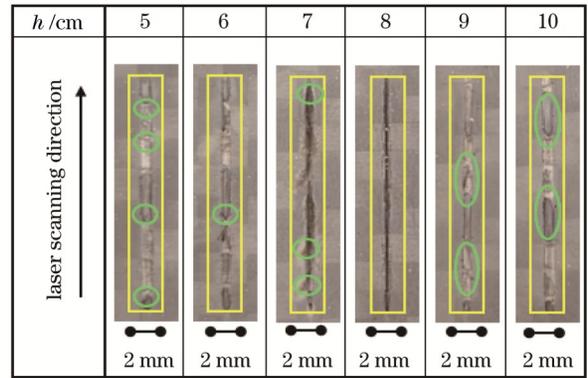


图 6 1 cm 升降轴跨度的刻蚀线

Fig. 6 Etching lines for the span of 1 cm lifting axis

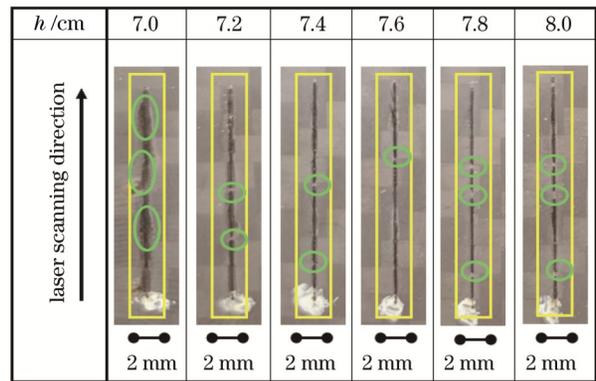


图 7 0.2 cm 升降轴跨度的刻蚀线

Fig. 7 Etching lines for the span of 0.2 cm lifting axis

表 4 刻蚀线条的加工参数

Table 4 Processing parameters of etching lines

Name	Numeric value
Laser power P / W	20
Laser wavelength λ / nm	1064
Repetition frequency f / kHz	200
Scanning time t / s	0.2
Pulse width τ / ns	80
Light out method	Line scanning

格上的表面形貌, 并测量刻蚀线的宽度。考虑到材料有一定的密度缺陷, 刻蚀线段在 CFRP 板材上的形状会有差异。因此, 为了减小实验的误差、保证实验结论严谨, 应测量网格上较宽的线段宽度来确定 0 mm 散焦量在 Z 轴上的位置。刻蚀线 l_1 和 l_2 的长度如表 5 所示, 环境、仪器等多方面因素导致误差产生, 其误差范围为 10%。刻蚀线在不同升降轴刻度下的纬纱单位网格和经纱单位网格的线宽变化规律如图 8 所示。

由表 5 和图 8 可知: 当激光器升降轴刻度 h 由 7.0 cm 逐渐增加至 7.6 cm, 即从下散焦区向零散焦点变化时, 刻蚀线线条在经纱单位网格上的宽度从 575 μm 减少到 378 μm , 此时刻蚀线线条在纬纱单位网格上的线宽从 378 μm 减少到 220 μm , 并且到达最小经纬碳纤维网格的线宽; 当激光器升降轴刻度 h 由

表 5 不同散焦量的刻蚀线线宽

Laser lift axis scale h / cm	Etching longitudinal beam line width l_1 / μm	Etching latitudinal beam line width l_2 / μm
7.0	575 ± 58	378 ± 38
7.2	485 ± 49	328 ± 33
7.4	421 ± 42	288 ± 29
7.5	328 ± 33	246 ± 25
7.6	282 ± 28	220 ± 22
7.7	348 ± 35	267 ± 27
7.8	361 ± 36	302 ± 30
8.0	389 ± 39	374 ± 38

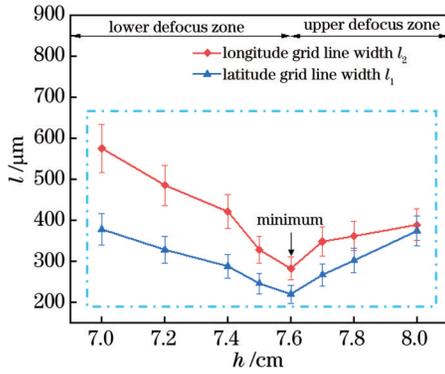


图 8 刻蚀线线宽随激光器升降轴刻度的变化规律

Fig. 8 Variation of etching line width with the scale of laser lift axis

7.6 cm 增加至 8.0 cm, 即从零散焦点向上散焦区变化 (从部分聚焦区域移动到过渡聚焦区域) 时, 刻蚀线条在经纱单位网格上的宽度从 7.6 cm 刻度的 220 μm 增加到 8.0 cm 刻度的 374 μm , 其中 7.6 cm 刻度的经纱、纬纱碳纤维单位网格刻蚀线的线宽最小。图 9 展示了升降轴刻度 h 为 7.4、7.5、7.6、7.7、7.8 cm 时的 CFRP 板材表面形貌图。

如表 5 所示, 随着 l_1 从 575 μm 减小至 282 μm , l_2 从 378 μm 减小至 220 μm 。当 l_1 从 282 μm 增加至 389 μm 时, l_2 从 220 μm 增加至 374 μm 。纬纱单位网格中的碳纤维与激光扫描方向的夹角为 0° 。根据 Chen 等^[12] 的研究结果, 在激光加工 CFRP 过程中, 激光扫描方向与碳纤维的夹角为 0° 时, 几乎没有热影响区。因此, 可将纬纱网格刻蚀线线宽作为激光光斑直径。综上所述, 确定激光光斑的直径为 220 μm , 确定升降轴刻度 7.6 cm 处为 0 mm 散焦量。

3.3 测试结果和分析

根据表 6 中的实验参数, 对 CFRP 板材进行烧蚀。使用超景深三维显微镜以 70 \times 的放大率捕捉脉冲激光烧蚀的 CFRP 板的表面形态。通过观察发现, 不同激光功率烧蚀材料的表面形貌不同。

图 10(a) 显示了激光功率为 1 W 时 CFRP 板的表

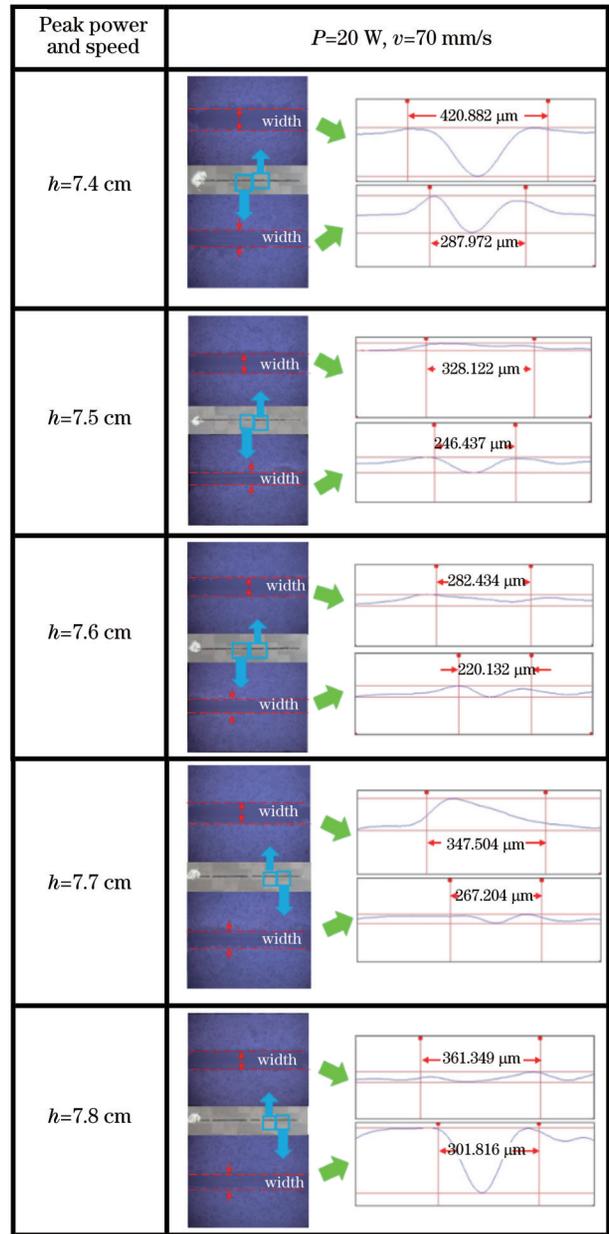


图 9 CFRP 复合材料表面刻蚀线形貌

Fig. 9 Morphology of the surface of CFRP composite by pulsed laser ablation

表 6 脉冲激光烧蚀 CFRP 板的实验参数

Table 6 Experimental parameters of pulsed laser ablation of CFRP plates

Laser power / W	Laser scanning speed / (mm·s ⁻¹)	Repetition rate / kHz	Defocusing distance / mm
1	200	220	0
5	200	220	0
9	200	220	0

面形貌。此时, 材料表面的主要温度接近树脂的分解温度, 树脂在平行排列的碳纤维束区域中呈现熔融状态, 然后沿着碳纤维排布结构固化, 其中部分熔融树脂渗透到碳纤维的间隙中, 与此同时, 碳纤维几乎没有变化。在该条件下树脂层较厚的部分在板材表面并没

有发生变化,但受到其接触碳纤维层的热传导,产生不明显的变化,少部分树脂层发生微小的膨胀,不易发现。图 10(b)显示了激光功率为 5 W 时 CFRP 板的表面形貌。树脂层的较厚部分不仅没有被蒸发,还受到树脂与碳纤维黏附区域的热膨胀压力的影响,形成弯曲的树脂层残片,并插入空气中。当激光功率增加到 9 W 时,如图 10(c)所示,较厚的树脂层被大量蒸发,但

仍有少量残留物,一些碳纤维被分解,碳纤维丝断裂,暴露在空气中。

在 CFRP 板材表面树脂蒸发过程中,部分环氧树脂吸收能量,克服分子化学键之间的结合力,从而导致分子结构断裂,形成来自环氧树脂环氧环的小分子结构。此外,随着能量的增加,这些较小的分子结构可能会继续与其他反应物相互作用,参与其他的化学反应。

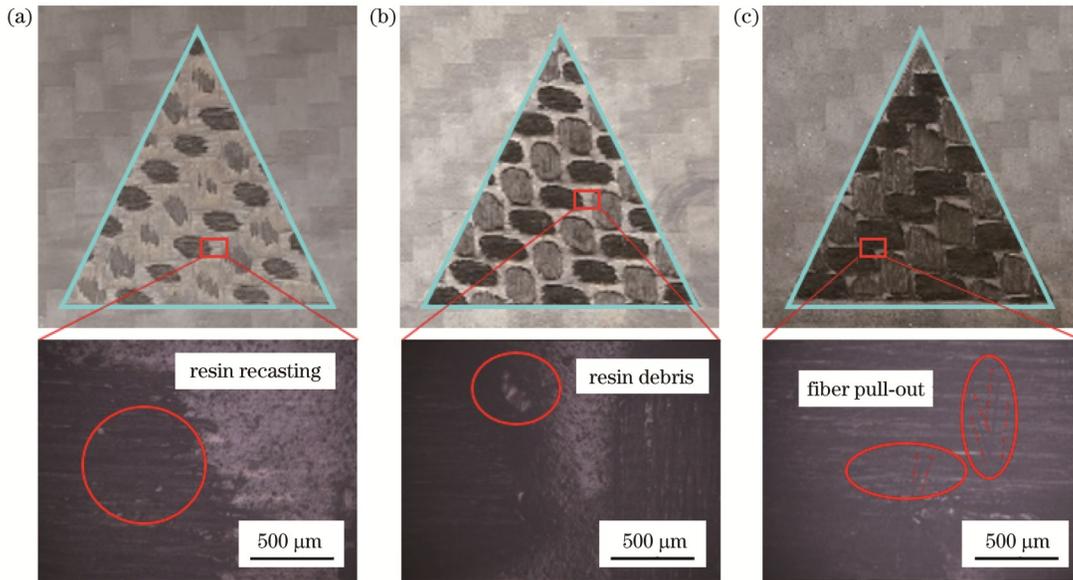


图 10 脉冲激光烧蚀后 CFRP 板的表面形貌。(a)激光功率为 1 W;(b)激光功率为 5 W;(c)激光功率为 9 W

Fig. 10 Morphologies of CFRP plate after pulse laser ablation. (a) Laser power is 1 W; (b) laser power is 5 W; (c) laser power is 9 W

当激光功率为 1 W 时,板表面仍有大量树脂,因此,板材烧蚀并没有达到去除树脂和分解碳纤维的目的,其中经纬网格碳纤维丝束比经纱网格碳纤维丝束的暴露面积大。当脉冲光纤激光器的激光功率达到 5 W 时,板表面会形成大量弯曲的树脂层残片。当脉冲光纤激光器的激光功率达到 9 W 时,板表面的大部分树脂被蒸发,材料表面的烧蚀质量良好。其中,表面少量碳纤维分解断裂会引起纤维拔出,但不足以影响材料的烧蚀质量。

碳纤维具有轴向传导和径向传导的特点,碳纤维吸收激光的能量,而能量在向纤维传导的同时,也向材料深层沉积,因此碳纤维夹杂的树脂会被蒸发掉,碳纤维束朝着板材正面会有微小的纤维丝松散,但是不易被观测到。可见,碳纤维的轴向传导对本模型探究的材料表面影响不大。随着激光功率增加,碳纤维材料的温度升高,可能引起大量碳纤维丝热解。这种热解会导致板材材料内部的裂纹和孔隙大量增加,碳纤维排布松散,因此激光被碳纤维散射或反射,最终导致加工效果变差。

在脉冲激光烧蚀 CFRP 材料的过程中,树脂会蒸发,随着激光功率的增加,碳纤维被分解,板表面的碳纤维会被拔出。实验结果与数值分析结果一致,验证了数值模拟的正确性和可行性。

在 5 W 的激光功率下产生的树脂层碎屑会影响板材在烧蚀过程中的表面质量,为了获得理想的烧蚀效果,需要尽可能地避免碎屑的形成。因此,对于 CFRP 板的激光烧蚀,应选择理想的激光工艺参数。选择激光功率为 9 W 的脉冲光纤激光器对 CFRP 板进行烧蚀,它不仅可以去掉板材上的大量树脂层,还可以适当分解碳纤维束,同时达到良好的烧蚀效果。

4 表面粗糙度实验

4.1 CFRP 板材烧蚀质量的演变规律

提高脉冲激光烧蚀 CFRP 板材的效率,选取激光器升降轴刻度 7.6 cm (0 mm 散焦量),此处激光的光斑面积最小,在经纬纤维单位网格的刻蚀线宽最小。激光烧蚀工艺参数如表 7 所示。

在 CFRP 板材上烧蚀图 11 所示的等腰三角形,考虑到材料的厚度以及 CFRP 的特性等因素,已知激光器的额定功率为 20 W,选取激光功率为 1 W (5%)、3 W (15%)、5 W (25%)、7 W (35%) 和 9 W (45%),烧蚀后的 CFRP 板材如图 12 所示。

CFRP 由碳纤维与有机环氧树脂复合而成,不同激光参数铣削后留下痕迹的形貌、层次、纹理有所不同,因此可引入表面粗糙度(R_a)对激光刻蚀后的表面进行评价。

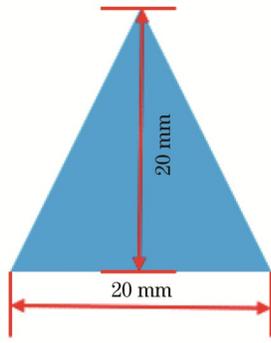


图 11 激光烧蚀 CFRP 板材上的图形
Fig. 11 Pattern of laser ablation CFRP

表 7 实验的加工参数

Table 7 Processing parameters for the experiment

Name	Numeric value
Amount of defocus x / mm	0
Laser wavelength λ / nm	1064
Laser power / W	1, 3, 5, 7, 9
Laser scanning speed v / (mm·s ⁻¹)	80, 200, 320
Light out method	Line scanning

表面粗糙度是指材料加工后表面具有的较小间距和微小峰谷的不平度^[24]。 R_a 越小,测量目标表面越平整。纳秒脉冲激光器是波长为 1064 nm 的红外激光器。碳纤维增强材料的比热容小于环氧树脂,碳纤维的潜在容量是树脂的 43 倍^[11]。因此,CFRP 板表面的环氧树脂不是直接通过激光能量蒸发的,而是通过碳纤维蒸发的。在 CFRP 板表面处理过程中,不同激光功率下产生的激光光斑不同,这是因为某些功率决定的激光光斑直径与少数纤维的直径一样大。因此,不同位置的吸收率可能不同,这也是材料表面形态不均匀性的影响因素。

采用不同的激光功率对 CFRP 复合材料的烧蚀质量进行探究,与此同时,用便携式表面粗糙度测量仪(TAYLOR HOBSON Surtronic DUO, 泰勒霍普森,英国),基于光切法测量光纤脉冲激光烧蚀后的 CFRP 板材的表面粗糙度。测量点数越多, R_a 的测量精度越高,故选取烧蚀区域的 4 个测量点,如图 12 所示,测量点 1~3 顺时针沿等腰三角形 3 条边进行测量,测量点 4 取等腰三角形中线进行测量(图 13)。4 个点的测量结果为一组表面粗糙度数据,计算每组的平均值。

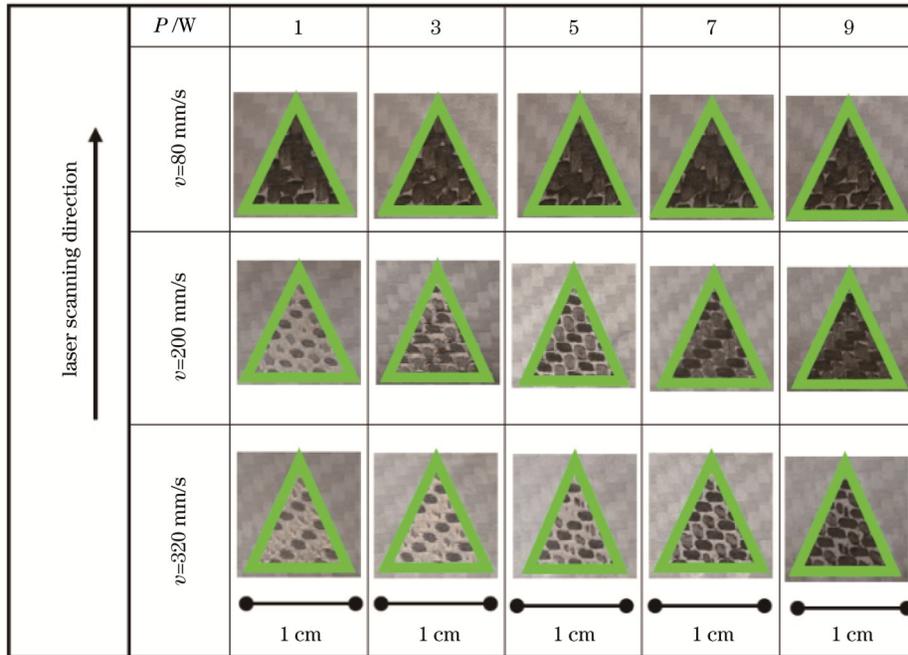


图 12 烧蚀后的 CFRP 板材
Fig. 12 CFRP plate after laser ablation

为得到最佳的激光功率和扫描速度,同时考虑到实验材料厚度,选定激光功率为 1、3、5、7、9 W 及激光扫描速度为 80、200、320 mm/s 进行组合实验。烧蚀后采用粗糙度测量仪检测表面粗糙度值,结果如表 8 所示。由表 8 可知,不同情况下,部分测试点的表面粗糙度相差较大,例如在扫描速度为 80 mm/s、激光功率为 3 W 时,测量点的粗糙度极差(接近 7),可见,激光烧蚀具有一定的不稳定性,因此引入方差来衡量数据波动

和离散性的指标,数据波动越小,离散程度越小,烧蚀稳定性越好。

根据粗糙度数据,求出 4 组数据的平均值,并求出样本方差来直观反映数据的离散情况,其计算公式^[25]为

$$S^2 = \frac{\sum_{\alpha=1}^n (R_{n,\alpha} - R_{av,\alpha})^2}{n - 1}, \quad (21)$$

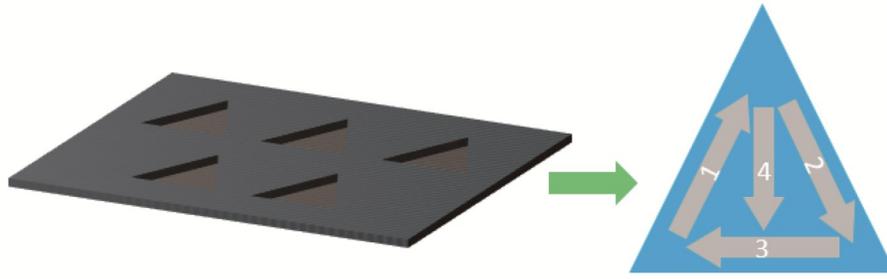


图 13 表面粗糙度测量示意图

Fig. 13 Schematic of surface roughness measurement

表 8 板材清洗后表面粗糙度数据

Table 8 Surface roughness data of plate after cleaning

Laser power P / W	Laser scanning speed $v / (\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	Surface roughness value $R_a / \mu\text{m}$					
		Measuring point 1	Measuring point 2	Measuring point 3	Measuring point 4	Average value	Variance
1	80	8.90	7.58	7.81	4.68	7.2425	3.250
	200	2.62	2.01	3.12	3.13	2.7200	0.281
	320	3.02	3.79	2.87	3.11	3.1975	0.166
3	80	12.48	14.36	9.65	7.90	11.0975	8.291
	200	6.52	5.89	5.72	9.22	6.8375	2.641
	320	3.09	3.45	3.43	3.01	3.2450	0.052
5	80	7.39	7.54	8.82	7.79	7.8850	0.416
	200	9.11	10.54	8.06	9.34	9.2625	1.036
	320	8.47	8.99	6.68	8.14	8.0700	0.981
7	80	6.41	5.74	9.89	5.71	6.9375	3.979
	200	10.36	7.39	11.63	9.70	9.7700	3.159
	320	10.50	11.15	9.89	11.07	10.6525	0.342
9	80	8.94	6.94	13.62	6.17	8.9175	11.191
	200	6.04	6.19	9.01	7.38	7.1550	1.889
	320	13.05	13.67	10.96	9.74	11.8550	3.332

式中： R_a 、 R_{av} 、 α 分别为表面粗糙度、表面粗糙度平均值和测量次数。

表 8 展示了不同条件下的表面粗糙度和粗糙度样本方差。表面粗糙度和表现数据稳定性的样本方差随激光功率和激光扫描速度的演变规律如图 14 所示，其中 $v=200 \text{ mm/s}$ 下的表现数据稳定性较好。

激光烧蚀 CFRP 板材过程中，激光功率增加，单位时间内板材吸收的能量增加。如表 8 所示，当 $P=1 \text{ W}$ 、 $v=200 \text{ mm/s}$ 时，材料受到激光烧蚀，纱线网格的中间区域因其环氧树脂层较薄，最先被碳纤维加热，树脂材料先呈熔融状态，再快速重铸，而靠近网格边缘的部分，因碳纤维纱线束编织的缝隙周围所容纳的环氧树脂比网格中心区域部分厚而未被蒸发，只是吸收热能后颜色加深，烧蚀材料的粗糙度平均值为 $3.20 \mu\text{m}$ ($v=200 \text{ mm/s}$)。

在激光功率 $P=7 \text{ W}$ 、扫描速度 $v=200 \text{ mm/s}$ 下，烧蚀材料表面粗糙度平均值达到峰值 $9.77 \mu\text{m}$ ，网格

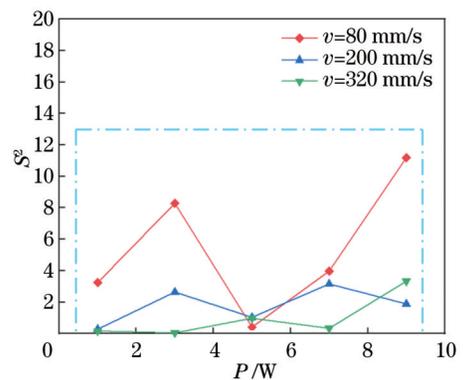


图 14 表面粗糙度的样本方差 S^2 的变化规律

Fig. 14 Variation of sample variance S^2 of surface roughness

中心的环氧树脂被完全蒸发，网格缝隙周围的环氧树脂被大量蒸发，部分环氧树脂单体受热飞溅在碳纤维表面，增加了网格中心区域的粗糙度，而网格缝隙间环氧树脂层较厚且受热不均，加热后与碳纤维局部分离，极大地影响了材料表面粗糙度。

在激光功率 $P=9\text{ W}$ 、扫描速度为 200 mm/s 的条件下,CFRP 表面的温度进一步升高,积累的能量接近蒸发碳纤维纱线束编织的缝隙环氧树脂的阈值,该处的环氧树脂被大量蒸发,材料表面粗糙度值减小到 $7.20\text{ }\mu\text{m}$ 。

选取材料表面粗糙度平均值 R_{av} 来考察表面粗糙度的变化规律。不同激光扫描速度下,激光功率与材料表面粗糙度的变化规律如图 15 所示。当 $v=80\text{ mm/s}$ 时,随着激光功率增加,各组材料的表面粗糙度平均值先增加后减小再增加;当 $v=200\text{ mm/s}$ 时,随着激光功率增加,各组材料的表面粗糙度平均值先增加后减小;当 $v=320\text{ mm/s}$ 时,随着激光功率增加,各组材料的表面粗糙度平均值一直增加。上述结果表明,在不同的激光扫描速度下,随着激光功率发生变化,各组材料的表面粗糙度平均值 R_{av} 并不在同一激光功率下取得最大值。

本实验中激光功率与扫描速度决定了激光烧蚀后

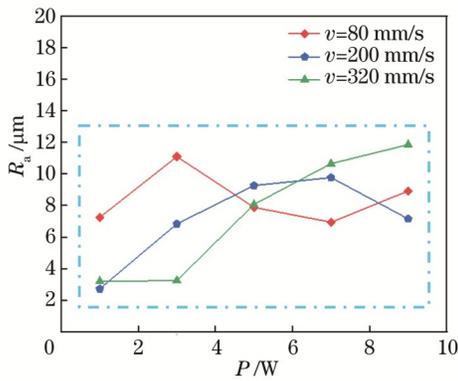


图 15 表面粗糙度的变化规律

Fig. 15 Variation of surface roughness

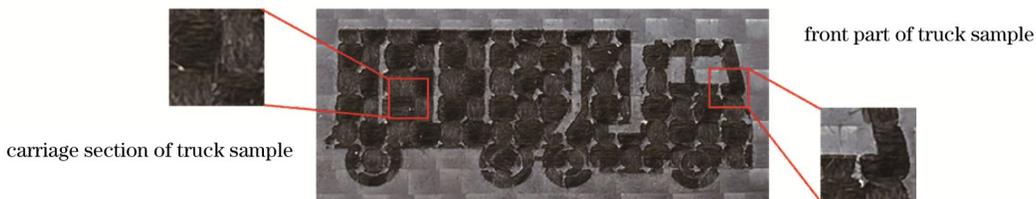


图 16 CFRP 材料工艺样品的脉冲激光烧蚀

Fig. 16 Pulse laser ablation of CFRP material process samples

5 结 论

建立了纳秒脉冲激光烧蚀 CFRP 材料的传热物理模型。为了探索激光烧蚀 CFRP 材料的质量,进行了实验研究,主要结论如下:

1) 基于激光束的线速度,建立了纳秒脉冲激光烧蚀 CFRP 材料的丝状高斯热源传热模型,该模型只需要激光和材料性能等参数。因此,该模型得到广泛应用,为激光烧蚀材料表面传热的研究提供了理论指导。

2) 通过对该模型的数值分析,得出了脉冲光纤激

板材的表面粗糙度。值得注意的是,当激光扫描速度 $v=320\text{ mm/s}$ 时,板材表面粗糙度随着激光功率的增加而增大,然而积累的能量并未使板材达到表面粗糙度最大值,该速度下激光功率由 1 W 到 9 W 的表面粗糙度变化过程相当于扫描速度 $v=200\text{ mm/s}$ 时,板材表面粗糙度在激光功率由 1 W 到 7 W 的变化过程。

当激光扫描速度 $v=80\text{ mm/s}$ 时,板材表面粗糙度在较低的激光功率处达到峰值,随着激光功率增加,表面粗糙度先减小后增加,由于激光功率增加,单位时间内网格吸收的能量增加,碳纤维将网格缝隙处的环氧树脂大量蒸发,表面粗糙度减小,激光功率再次增大,在该速度条件下,激光束烧蚀网格中心区域的碳纤维,部分碳纤维燃烧产生 CO_2 ,残余部分纤维被拔出,从而增大了材料表面粗糙度值。

200 mm/s 扫描速度下的激光功率由 7 W 到 9 W 的表面粗糙度变化过程相当于 80 mm/s 速度下的激光功率由 3 W 到 7 W 的表面粗糙度变化过程。改变激光能量和激光速度是在不同的维度控制材料表面激光能量的积累,最终影响板材表面粗糙度,这是因为板材表面粗糙度不仅与 CFRP 表面环氧树脂层有关,还与吸收激光能量的碳纤维层有关,因此采用激光扫描速度和激光功率组合实验能够较好地控制激光束能量积累对板材加工的影响。

4.2 激光烧蚀技术的应用

由 CFRP 材料烧蚀质量的演变规律可知,当选取 $P=9\text{ W}$ 、 $v=200\text{ mm/s}$ 时,纳秒脉冲激光加工 CFRP 材料的效果较为理想。图 16 所示为选用该激光工艺参数组合加工得到的 CFRP 材料工艺样品。材料表面粗糙度不高,残留的树脂层较少,在此激光工艺参数组合模式下烧蚀的 CFRP 材料能获得最理想的加工效果。

光烧蚀碳纤维的温度演化规律。数值分析表明,当脉冲光纤激光器的输出激光功率达到 9 W 时,板表面的大部分树脂被蒸发,材料的表面烧蚀质量良好。用超景深三维显微镜对碳纤维布板材的表面形貌进行成像分析,实验结果与数值分析结果一致,验证了数值模拟的正确性和可行性。

3) 对 CFRP 板进行激光烧蚀参数的组合实验。用粗糙度检测器测量了烧蚀板的表面粗糙度。结果表明,当激光功率为 9 W 、激光扫描速度为 200 mm/s 时,表面粗糙度值降至 $7.20\text{ }\mu\text{m}$ 。数据稳定性的样本方差

为 1.889, 可以获得良好的加工效果。

参 考 文 献

- [1] 马修泉, 王力波, 朱政武, 等. 厚板高功率激光切割重铸层微观组织研究[J]. 中国激光, 2023, 50(4): 0402015.
Ma X Q, Wang L B, Zhu Z W, et al. Microstructure of recast layer during high power laser cutting of thick plates[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(4): 0402015.
- [2] 侯红玲, 郝海凌, 吕瑞虎, 等. 基于响应面法碳纤维复合材料激光切割工艺参数优化及性能实验[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(13): 1314005.
Hou H L, Hao H L, Lü R H, et al. Parameter optimization and performance test of laser cutting of carbon fiber reinforced plastics based on response surface method[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(13): 1314005.
- [3] 陈亚军, 鲁文婷, 杨雅婷. 基于响应面分析的碳纤维复合材料基体激光除漆工艺优化[J]. 中国激光, 2023, 50(12): 1202208.
Chen Y J, Lu W T, Yang Y T. Optimization of laser paint removal process for carbon fiber composite substrate based on response surface analysis[J]. Chinese Journal of Lasers, 2023, 50(12): 1202208.
- [4] Gruner A, Schille J, Loeschner U. Experimental study on micro hole drilling using ultrashort pulse laser radiation[J]. Physics Procedia, 2016, 83: 157-166.
- [5] 王卉军, 刘文昊, 张阳, 等. CO₂激光烧蚀 PMMA 材料工艺优化[J]. 塑料工业, 2022, 50(5): 75-83.
Wang H J, Liu W H, Zhang Y, et al. Optimization of CO₂ laser ablation of PMMA materials[J]. China Plastics Industry, 2022, 50(5): 75-83.
- [6] Al-Sulaiman F A, Yilbas B S, Ahsan M M, et al. Laser hole drilling of composites and steel workpieces[J]. Lasers in Engineering, 2006, 16(1): 105-120.
- [7] 张玲玲, 姜兆华, 张伟, 等. 超强度纤维柔性复合材料激光加工工艺研究[J]. 应用激光, 2012, 32(3): 238-243.
Zhang L L, Jiang Z H, Zhang W, et al. A review of laser processing fiber-reinforced flexible composite material[J]. Applied Laser, 2012, 32(3): 238-243.
- [8] 雷源忠. 我国机械工程研究进展与展望[J]. 机械工程学报, 2009, 45(5): 1-11.
Lei Y Z. Recent research advances and expectation of mechanical engineering science in China[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(5): 1-11.
- [9] 蒋翼, 陈根余, 周聪, 等. 碳纤维复合材料皮秒激光切割工艺研究[J]. 激光技术, 2017, 41(6): 821-825.
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.
- [10] 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 and Manufacture, 2008, 48(12/13): 1464-1473.
- [11] Weber R, Hafner M, Michalowski A, et al. Minimum damage in CFRP laser processing[J]. Physics Procedia, 2011, 12: 302-307.
- [12] Chen L M, Li M J, Yang X J, et al. Thermal defect characterization and heat conduction modeling during fiber laser cutting carbon fiber reinforced polymer laminates[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2020, 20(2): 61.
- [13] Yang H, Liu H X, Gao R X, et al. Numerical simulation of paint stripping on CFRP by pulsed laser[J]. Optics & Laser Technology, 2022, 145: 107450.
- [14] Sihni S, Pitz J, Gerzeski R H, et al. Experimentally-validated computational model for temperature evolution within laser heated fiber-reinforced polymer matrix composites[J]. Composite Structures, 2019, 207: 966-973.
- [15] Guler M T. Fabricating plasma bonded microfluidic chips by CO₂ laser machining of PDMS by the application of viscoelastic particle focusing and droplet generation[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 73: 260-268.
- [16] Chen Z, Zhou H B, Wu C, et al. A cleaner production method for laser transmission welding of two transparent PMMA parts using multi-core copper wire[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2022, 16: 1-12.
- [17] 平玉清, 江开勇. 脉冲激光参数对聚氨酯表面镀铜线条质量的影响[J]. 塑料工业, 2015, 43(9): 54-56.
Ping Y Q, Jiang K Y. The influence of pulsed laser parameters over the quality of coppered lines on polyurethane surface[J]. China Plastics Industry, 2015, 43(9): 54-56.
- [18] Xu H B, Hu J, Yu Z. Absorption behavior analysis of carbon fiber reinforced polymer in laser processing[J]. Optical Materials Express, 2015, 5(10): 2330-2336.
- [19] Pagano N, Ascari A, Liverani E, et al. Laser interaction with carbon fibre reinforced polymers[J]. Procedia CIRP, 2015, 33: 423-427.
- [20] 李玥华, 赵勃冲, 胡泊, 等. 一种线结构光振镜扫描测量系统通用标定方法[J]. 光学学报, 2022, 42(10): 1015001.
Li Y H, Zhao B C, Hu P, et al. Universal calibration method for line structured light galvanometer scanning system[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(10): 1015001.
- [21] 彭进, 许红巧, 王永彪, 等. 激光光斑尺寸对激光焊接熔池、匙孔行为的影响[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(7): 20220130.
Peng J, Xu H Q, Wang Y B, et al. Effect of laser spot size on the behavior of molten pool and keyhole in laser welding[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(7): 20220130.
- [22] 何智华, 周静波, 吴章勤, 等. 基于超景深三维可视化方案的材料表面显微形貌分析与表征[J]. 理化检验(物理分册), 2018, 54(12): 878-881.
He Z H, Zhou J B, Wu Z Q, et al. Analysis and characterization on material surface micro morphology based on large scene depth and 3D visualization[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A (Physical Testing), 2018, 54(12): 878-881.
- [23] 戴中达, 付兴威, 李正, 等. 基于边缘计算的自适应动态调焦激光切割头控制系统设计[J]. 电加工与模具, 2022(2): 53-56, 66.
Dai Z D, Fu X W, Li Z, et al. Design of the edge computing based adaptive focusing control system for laser cutting head[J]. Electromachining & Mould, 2022(2): 53-56, 66.
- [24] 张五杰, 史润军, 王汝佳, 等. 表面粗糙度对红外漫反射光电传感器的影响[J]. 河南科技, 2022, 41(21): 33-39.
Zhang W J, Shi R J, Wang R J, et al. Influence of surface roughness on infrared diffuse reflection photoelectric sensor[J]. Henan Science and Technology, 2022, 41(21): 33-39.
- [25] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 3版. 北京: 高等教育出版社, 2001: 160.
Sheng Z, Xie S Q, Pan C Y. Probability and mathematical statistics[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2001: 160.

Numerical Simulation and Experimental Optimization of Pulse Laser Processing Carbon Fiber Reinforced Polymer Plate

Cai Song^{1,2}, Song Jinchao¹, Chen Da¹, Wen Yuebing², He Zhijian², Tao Nengru²,
He Guoqi^{1*}

¹*School of Mechanical Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412000, Hunan, China;*

²*School of Intelligent Manufacturing, Hunan First Normal University, Changsha 430100, Hunan, China*

Abstract

Objective The thermal properties during pulse laser processing of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) are significant for optimizing process parameters and strategies. An important factor in laser ablation of CFRP materials is the temperature rise caused by carbon fiber absorption of light. However, most of them employ computer-aided design software to simulate the internal temperature field of materials presently, with few underlying algorithms for heat transfer simulation. We study the ablation of the CFRP plate by optical fiber pulse infrared laser, build a new heat transfer model, and carry out the numerical analysis and the laser ablation experiment of the CFRP plate. The experimental results show that the theoretical model is correct and feasible, thus providing references for laser processing research of CFRP materials.

Methods During laser CFRP plate processing, the laser beams have a certain moving speed. According to this characteristic, a linear Gauss heat source is proposed to simulate the moving temperature field of laser ablation. Based on the Fourier heat transfer model, the heat transfer physical model of the nanosecond pulse laser processing CFRP plate is built, and the finite difference time domain method is adopted to analyze the model. The laser ablation of the isosceles triangle pattern in a 0.5 mm thick CFRP plate is conducted by nanosecond pulse lasers. Then, the surface roughness data after ablation is obtained by a surface roughness tester. According to the above experimental results, we verify the correctness and feasibility of the model and obtain sound process parameters of laser processing CFRP.

Results and Discussions The MATLAB numerical analysis temperature simulation results and comparative analysis on corresponding parameters of the ultra-depth-of-field photos are presented. Fig. 10(a) shows the surface morphology of the CFRP plate when the laser power is 1 W. At this time, the maximum temperature of the material surface [470 K, Fig. 1(a)] is close to the resin decomposition temperature. The resin presents a molten state on the tow area of parallel arranged carbon fiber and then solidifies along the carbon fiber arrangement structure. Part of the molten resin penetrates the gap of the carbon fiber, while the carbon fiber has little change. Fig. 10(b) shows the surface morphology of the CFRP plate under the laser power of 5 W. At this time, the maximum temperature of the CFRP plate surface is 1158 K [Fig. 1(b)], which surpasses the decomposition temperature and gasification temperature of the resin material. The thicker part of the resin surface layer does not evaporate and is also affected by the thermal expansion pressure to form curved resin layer fragments, which is inserted into the air. When the laser power increases to 9 W, as shown in Fig. 10(c), the highest surface temperature of the CFRP plate is as high as 1500 K [Fig. 1(c)], which greatly surpasses the resin gasification temperature and exceeds the carbon fiber decomposition temperature (1153 K). The thicker resin layer is largely evaporated, but there is still a small amount of residue. Meanwhile, we decompose a small amount of carbon fibers, break the carbon filament, and expose it to the air. The evolution rule of surface roughness and the sample variance of performance data stability with laser power and laser scanning speed are shown in Fig. 14. Under the scanning speed of 200 mm/s, the performance data stability is sound and the sample variance is 1.889. At the scanning speed of 200 mm/s and laser power $P=9$ W, the CFRP surface temperature increases, and the epoxy resin is evaporated, with the surface roughness decreasing to 7.20 μm . According to the evolution law of CFRP material ablation quality, when the laser power and laser scanning speed are 9 W and 200 mm/s respectively, the ablation quality of CFRP materials processed by nanosecond pulse lasers is ideal.

Conclusions Based on the linear velocity of laser beams, we build a heat transfer model of filament Gauss heat source for nanosecond pulse laser ablation of CFRP materials. The model only requires parameters such as laser and material properties, and its numerical simulation results are compared with the surface topography photos obtained by the super depth of field three-dimensional microscope. The experimental results are consistent with the numerical analysis results, which verifies the correctness and feasibility of the numerical simulation. This model is universal and widely applicable to provide theoretical guidance for heat transfer research on the surface of laser ablated materials. The combination experiment of laser ablation parameters for CFRP plates is carried out. The surface roughness of the ablated plate is measured with a roughness detector. The results show that good processing performance can be obtained under the laser power of 9 W and laser scanning speed of 200 mm/s. At this time, the surface roughness and sample variance are 7.20 μm and 1.889 respectively.

Key words laser optics; carbon fiber reinforced polymer; pulse laser; laser ablation; heat transfer model; surface roughness