

# 单层碳纤维复合材料激光多向切割的温度场模拟

于冬洋, 王续跃

大连理工大学机械工程学院, 辽宁 大连 116024

**摘要** 研究了激光切割碳纤维复合材料(CFRP)过程中碳纤维的铺设方向和树脂含量对激光能量传递方向以及切割质量的影响。根据复合材料混合定律设定材料物理参数,建立了碳纤维铺设角度为 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ ,树脂含量由30%增至50%的单层CFRP三维有限元模型。数值模拟结果表明,激光多向切割单层CFRP时,烧蚀前沿的能量传递方向由激光切割方向主导;随着纤维铺设角度的增大,传递方向的角度增大;稳定切割时能量传递主要沿纤维铺设方向。随着纤维铺设角度的增大,切缝倾角增大,表面碳纤维烧蚀宽度几乎不变,温度场变宽,最高温度降低。切割不同树脂含量单层CFRP时,热影响区宽度和最高温度随树脂含量的增加都呈近似线性变化。与试验结果相比,数值模拟结果中的表面碳纤维被烧蚀宽度的平均误差为10.66%,热影响区宽度的平均误差为13.09%。

**关键词** 激光技术; 激光切割; 单层碳纤维复合材料; 纤维铺设方向; 树脂含量

**中图分类号** TN249 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP54.111409

## Temperature Field Simulation of Single-Layer Carbon Fiber Reinforced Plastics in Multi-Directional Laser Cutting

Yu Dongyang, Wang Xuyue

*School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China*

**Abstract** The effects of carbon fiber orientation and resin content on the laser energy transfer direction and cutting quality during laser cutting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) are studied. According to the mixture rule of composites, the parameters are set, and the three dimensional finite element models for single-layer CFRP with carbon fiber orientations of  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ , and  $90^\circ$ , and resin contents of 30% to 50% are established. The numerical simulation results show that, during the multi-directional laser cutting of single-layer CFRP, the energy transfer direction is mainly dependent on the laser cutting direction, and the angle of transfer direction increases with the increase of fiber orientation angle. As for the steady cutting, the energy transfer is mainly along the fiber orientation direction. With the increase of the fiber orientation angle, the dip angle of kerfs increases as well, the width of burned carbon fibers on the surface does not essentially change, the temperature field becomes wider, and the maximum temperature decreases. When the single-layer CFRP with different resin contents are cut, the width of heat affected zone and the maximum temperature both have approximately linear relationships with the resin content. Compared with the experimental results, the average errors from numerical simulations for the burned zone width and the heat affected zone width on carbon fiber surface are 10.66% and 13.09%, respectively.

**Key words** laser technique; laser cutting; single-layer carbon fiber reinforced plastics; fiber orientation; resin content

**OCIS codes** 140.3390; 350.3390; 140.3538

## 1 引言

碳纤维复合材料(CFRP)是一种以树脂为基体、以高强度碳纤维为增强相的先进复合材料,具有比强度

**收稿日期:** 2017-06-08; **收到修改稿日期:** 2017-06-28

**基金项目:** 国家自然科学基金(51375073,51321004)

**作者简介:** 于冬洋(1991—),男,硕士研究生,主要从事激光切割CFRP方面的研究。E-mail: 1374811304@qq.com

**导师简介:** 王续跃(1960—),男,教授,博士生导师,主要从事精密与特种加工方面的研究。

E-mail: wbzdz@dlut.edu.cn(通信联系人)

和比刚度高、密度小、可设计性好等优点,因此被广泛应用于航空航天<sup>[1-3]</sup>、汽车工业<sup>[4]</sup>等领域。多层 CFRP 一般由多个不同铺设方向的单层 CFRP 通过树脂结合而成,因此具有明显的各向异性。碳纤维的铺设方向可根据实际应用需求进行设计,铺设方向以  $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $\pm 45^\circ$  最为典型。激光扫描方向与碳纤维铺设方向一致的切割称为同方向切割,激光扫描方向与碳纤维铺设方向不同向的切割称为多方向切割。为了保证 CFRP 的强度和韧性,通常情况下树脂含量(体积分数,全文同)为  $30\% \sim 50\%$ 。激光切割 CFRP 时,碳纤维的铺设角度和树脂含量对激光能量的吸收和传递有重要影响,进而影响切缝宽度、热影响区(HAZ)宽度和切割质量。本课题组已对单层 CFRP 激光同方向切割时的温度场进行了数值模拟研究<sup>[5]</sup>,有必要对单层不同铺设角度的 CFRP 激光切割进行研究,并利用有限元方法模拟铺设角度一定时,不同树脂含量(指体积分数,下同)对激光切割单层 CFRP 的影响规律。这将为多层不同碳纤维铺设角度 CFRP 板材的激光切割试验和应用奠定基础。

激光切割由于切割速度快、加工效率高、不存在刀具磨损和机械振动等问题,是一种发展前景广阔的 CFRP 切割方式。国内外学者针对 CFRP 激光切割的建模、数值模拟和试验已经开展了大量研究。在理论模型建立和数值模拟方面,Cenna 等<sup>[6]</sup>根据能量守恒定律,考虑激光能量的分布、激光与材料的作用时间、材料的热物理参数以及材料对激光的吸收率等因素,提出了一个关于切缝宽度、材料去除率与激光工艺参数关系的理论模型。Mucha 等<sup>[7-8]</sup>在 CFRP 内部埋下热传感器,对激光切割 CFRP 后的温度场进行了定标,并且将 HAZ 划分为两个区域,即树脂直接升华区和树脂基体被破坏但未完全去除区,建立了一维热流模型,计算得到的 HAZ 宽度与试验数据之间的误差为  $\pm 5\%$ 。Negarestani 等<sup>[9]</sup>建立了一种激光切割  $90^\circ$  纤维铺设方向单层 CFRP 的三维有限元模型,模拟了瞬态温度场和材料去除情况,并进行了试验验证。Tomomasa 等<sup>[10-11]</sup>考虑树脂的氧化作用对 HAZ 形成的影响,建立了二维有限元模型,计算了 CFRP 内部的温度分布情况,结果表明,树脂氧化作用产生的热量对树脂有一定去除作用,但对碳纤维没有影响,说明研究激光切割 CFRP 的 HAZ 形成应当考虑树脂氧化作用的影响。在 CFRP 激光切割的试验研究方面,Dirk 等<sup>[12]</sup>利用脉冲和连续激光分别对多层 CFRP 材料进行了切割,发现激光切割后材料的静力强度取决于纤维铺设方向,且随 HAZ 宽度的增加而呈线性减小,对于  $90^\circ$  铺设方向和  $45^\circ$  铺设方向,HAZ 宽度每增大 1 mm,静力强度分别减小 84 MPa 和 35 MPa。吴恩启等<sup>[13]</sup>利用红外热成像技术,研究了 CFRP 在纤维束平面内的热传导规律,并通过激光调制加热,推导了纤维束平面内热扩散系数和相位梯度的关系。

碳纤维和树脂的热物理性能存在巨大差异,导致激光切割 CFRP 后产生 HAZ,从而影响材料的力学性能,包括拉伸强度、弯曲强度等,进而影响材料的实用范围。不仅如此,两种材料的复合和碳纤维铺设角度的不同使得 CFRP 具有明显的各向异性,只有把握碳纤维铺设角度和材料中树脂含量对激光切割 CFRP 的影响,才能进行有效的数值模拟和试验研究。

目前,在不同碳纤维铺设角度和树脂含量下,激光切割单层 CFRP 的研究还需要进一步深入,基于其各向异性的建模还需完善。本文建立了单层 CFRP 的三维几何模型,模拟了激光切割三种典型碳纤维铺设角度单层 CFRP 的过程,通过温度场研究了 CFRP 激光切割时纤维铺设方向对激光能量的吸收、传递过程的影响及影响机理。针对激光垂直方向切割单层 CFRP 的模型,通过改变模型中树脂含量进行了数值模拟,由温度场分析了一定条件下树脂含量对激光切割 CFRP 的影响。最后数值模拟和试验得到了表层碳纤维被烧蚀宽度和 HAZ 宽度的变化曲线。

## 2 试验条件与数值模拟方法

初始材料为多层 CFRP 板材,基体为环氧树脂,增强相为碳纤维,纤维体积分数为  $65\%$ ,共 4 个单层,每层厚度为  $150 \mu\text{m}$ ,铺设方向分别为  $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $0^\circ$ 。进行试验时,为获得单层 CFRP,用酒精灯烧蚀多层 CFRP 板材,使部分树脂基体熔化,各层碳纤维分层,得到同一铺设方向的单层 CFRP。CFRP 板材如图 1 所示。

CFRP 材料在常温下的主要参数见表 1。

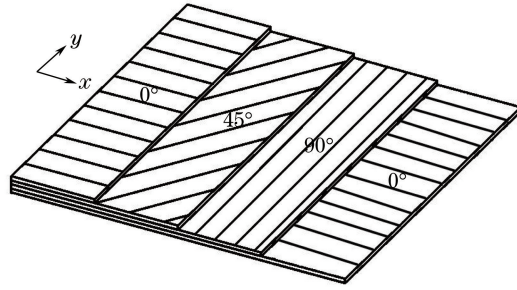


图1 CFRP 板材示意图

Fig. 1 Schematic of CFRP board

表1 单层 CFRP 材料参数

Table 1 Parameters of single-layer CFRP material

Parameter	Fiber	Matrix	Composite
Density / ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	1.76	1.30	1.60
Thermal conductivity / ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	84 (axial), 8.4 (radial)	0.2	55 * (axial), 5.5 * (radial)
Specific heat / ( $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	795	1200	937 *
Coefficient of thermal expansion / ( $10^{-6} \text{K}^{-1}$ )	-0.41	57	0.26 (axial), 33.7 (radial)

Note: \* denotes calculated value

CFRP 属于非金属材料,对  $\text{CO}_2$  激光的吸收性较好,因此采用  $\text{CO}_2$  激光器。北京正天恒业数控技术有限公司生产的 SCH-1290 型  $\text{CO}_2$  激光器,功率为百瓦级,输出波长为  $10.6 \mu\text{m}$ 。试验所用激光功率为 50 W,扫描速度为 20 mm/s,光斑直径为 2 mm,辅助气体为空气,辅助气压为 0.6 MPa。

激光切割 CFRP,实质上是材料吸收光能转化为热能,通过热传导再转换为材料的机械能,其中的关键是热传导。在直角坐标系中,材料内任意一点满足热传导方程

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z}\right) + \phi = \rho c \frac{\partial T}{\partial t}, \quad (1)$$

式中  $\phi$  为物体的内热源,此处设为 0;  $\rho$  为材料的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ );  $c$  为材料的比热容 [ $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ];  $T$  为某时刻材料某点  $(x, y, z)$  的温度 (K);  $\lambda$  为材料的热传导系数 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )。对于单层和单丝排列的 CFRP 来说,不同方向上的  $\lambda$  不同,反映了 CFRP 各向异性条件下的能量传递。

初始条件为激光未作用于材料时的温度场分布:

$$T|_{t=0} = T_0(x, y, z), \quad (2)$$

式中  $T_0$  为初始条件室温,  $T_0 = 293 \text{ K}$ 。在激光切割 CFRP 的过程中,同时存在热对流和热辐射,为第三类边界条件,其边界条件的表达式为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_3} = h(T - T_0), \quad (3)$$

式中  $h$  为换热系数。(1)式和定解条件(2)、(3)式构成了瞬态热传导的定解问题。

复合材料混合定律是一种将材料各组分加权求平均值,以此来预测纤维增强复合材料多种性能的方法。以导热系数为例,假设树脂的导热系数为  $\lambda_1$ ,体积分数为  $V_1$ ,碳纤维材料沿铺设方向的导热系数为  $\lambda_2$ ,则整体 CFRP 沿碳纤维铺设方向的导热系数为

$$\lambda = \lambda_1 V_1 + \lambda_2 (1 - V_1). \quad (4)$$

进行数值模拟时,还需要连续激光热源的能量分布表达式。假设连续激光的能量符合高斯分布:

$$I(x, y) = AI_0 f(x, y) g(t), \quad (5)$$

式中  $A$  为 CFRP 对激光的吸收系数,  $I_0$  为激光中心处功率密度,  $f(x, y)$  为连续激光的空间分布。对于高斯热源,有

$$f(x, y) = \exp\left[-2 \frac{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}{r_0^2}\right], \quad (6)$$

式中  $r_0$  为光强下降到中心光强  $1/e$  时的光斑半径,  $(x_0, y_0)$  为光斑中心位置坐标。

### 3 有限元模型建立

考虑碳纤维铺设角度对材料物性参数主方向的影响,利用有限元分析软件 ANSYS 单元坐标系功能,首先建立典型铺设角度( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ )的单层 CFRP 三维有限元模型,进行激光切割单层 CFRP 的数值模拟。由于碳纤维铺设角度为  $90^\circ$  时,HAZ 宽度变化最明显,故针对  $90^\circ$  铺设角,改变材料的树脂含量,再次进行数值模拟,研究树脂含量对激光切割单层 CFRP 的 HAZ 宽度和切割质量的影响。

与激光同方向切割单层 CFRP 不同,激光多方向切割建模须设定局部坐标系,设定材料参数主方向。以碳纤维铺设角度  $45^\circ$  为例,ANSYS 默认的材料单元主方向平行于笛卡儿坐标系,建立一个工作平面,在此工作平面原点创建一局部坐标系,将单元坐标系旋转  $45^\circ$  调整到此工作平面;设定材料参数后还原工作平面和局部坐标系,进行几何建模,在划分网格时重新激活局部坐标系,使得单元主方向在  $45^\circ$  方向上,再次还原局部坐标系,输入激光参数和程序即可。利用局部坐标系设定材料单元主方向,只需设定不同角度的局部坐标系,可以方便地模拟任意碳纤维铺设方向的单层 CFRP 激光切割。

为完整表达激光扫描过程中 CFRP 对激光能量的吸收和传递,使其能代表实际情况下激光的稳定切割状态,并且尽可能减小数值模拟的计算量,将几何模型的长度定为 20 mm。为了完整表达激光热源扫描后的温度场,使其不超出几何模型的宽度,基于试验经验,将几何模型的宽度定为 10 mm。几何模型的厚度与实际单层 CFRP 厚度相同,为  $150\ \mu\text{m}$ 。单元选择三维热实体单元 SOLID70,利用平面网格划分单元 mesh200 划分网格;为了同时施加激光热流和空气对流,在激光扫描区域增加表面效应单元 surf152。对激光直接作用区域的网格进行加密,保证计算效率的同时可提高计算精度。有限元网格划分后的模型如图 2 所示。

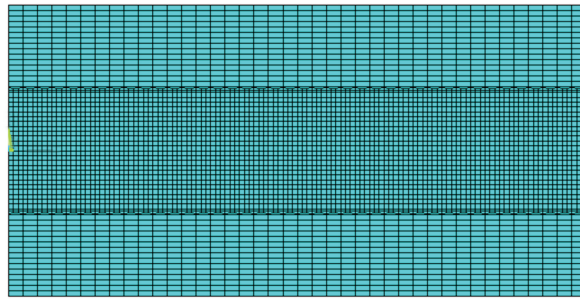


图 2 单层三维有限元模型

Fig. 2 Single-layer 3D finite element model

为了制备得到单层 CFRP,需要对树脂进行加热、烧蚀,经过这一处理,单层 CFRP 的树脂含量降低。对于不同树脂含量的单层 CFRP 有限元模型,树脂含量的改变会直接影响材料的导热系数、比热容等物理参数。在输入参数时,需要依照碳纤维和树脂的各项物理参数和树脂含量,根据复合材料混合定律,计算得到不同树脂含量下的单层 CFRP 各项物理参数。

单层 CFRP 有限元模型基于如下条件和假设:

- 1) 碳纤维直径与激光光斑直径之比小于 1:10,即通过参数平均化,单层 CFRP 可被视作匀质的复合材料处理,只需考虑碳纤维和树脂复合后作为整体材料的参数;
- 2) 激光在材料宽度的 1/2 处,从左至右沿着平行于长度的方向切割;
- 3) 材料对激光的吸收率不变;
- 4) 激光束为高斯光束,热流密度为高斯分布。

## 4 数值模拟结果与讨论

### 4.1 三种典型碳纤维铺设方向的单层 CFRP 激光切割模拟与分析

模拟了三种典型碳纤维铺设方向( $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ )单层 CFRP 的激光切割。由于激光切割 CFRP 过程中材料对激光能量的吸收、传递以及加工质量都与温度场密切相关,因此主要通过后处理温度场进行研究。选取了三种典型碳纤维铺设方向单层 CFRP 同一时刻的温度场,如图 3 所示。

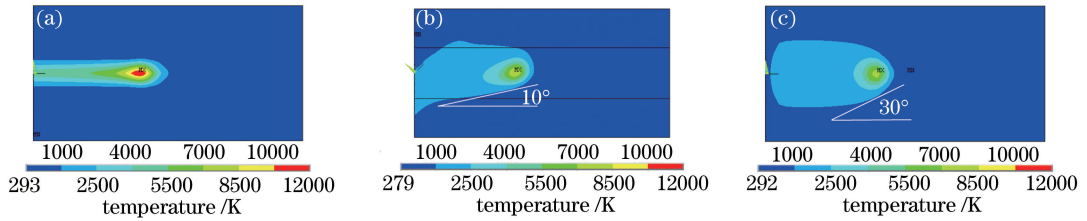


图3 典型铺设角度的单层 CFRP 同一时刻激光切割温度场。

(a)碳纤维铺设角度为 $0^\circ$ ; (b)碳纤维铺设角度为 $45^\circ$ ; (c)碳纤维铺设角度为 $90^\circ$

Fig. 3 Temperature fields of laser cutting single-layer CFRP in typical orientations at the same moment.

(a) Carbon fiber orientation of  $0^\circ$ ; (b) carbon fiber orientation of  $45^\circ$ ; (c) carbon fiber orientation of  $90^\circ$

分析温度场等温线分布可知,在三种典型铺设角下,随着角度的增加,单层 CFRP 在同一时刻的温度场宽度明显逐渐变宽,这与单层 CFRP 的各向异性有直接关系。由于碳纤维沿其纤维轴向的导热系数远大于径向的,因此激光能量作用于材料时,能量沿纤维轴向(即纤维铺设方向)的传播速度明显高于纤维径向的,表现为同一时刻的温度场宽度逐渐变宽。三种铺设角度的温度场也有其各自规律。对于 $0^\circ$ 铺设方向的单层 CFRP,温度场能量传递和扩散方向主要沿 $0^\circ$ 方向,而沿 $90^\circ$ 方向的传递较少。对于 $45^\circ$ 铺设方向的单层 CFRP,由图3中温度场可以看出,稳定切割时能量的扩散主要沿 $45^\circ$ 方向,而激光烧蚀前沿的能量扩散则主要沿着 $10^\circ$ 方向。这是因为材料吸收激光能量后,最易沿纤维轴向即纤维铺设方向 $45^\circ$ 传递,但激光热源沿着 $0^\circ$ 方向以 $20\text{ mm/s}$ 的速度从左至右进行扫描,能量本身就在沿着 $0^\circ$ 方向移动和传递,在这两者的综合作用下,激光烧蚀前沿温度场表现为沿 $10^\circ$ 左右方向传递(图3);而经激光扫描后能量的传递没有受到激光热源移动作用的影响,因此基本由纤维自身导热性主导,主要沿 $45^\circ$ 方向传递。同理,对 $90^\circ$ 铺设方向,稳定切割时能量主要沿 $90^\circ$ 方向传递扩散,而烧蚀前沿的能量传递沿 $30^\circ$ 左右方向。

在设定扫描速度下( $20\text{ mm/s}$ ),热源的移动方向对烧蚀前沿能量的传递方向起主导作用,但随着碳纤维铺设角度的增大,单层 CFRP 在垂直于激光扫描线方向的导热性增强,烧蚀前沿的能量传递方向受碳纤维铺设方向的影响也增大,表现为烧蚀前沿能量传递方向的角度增大、烧蚀前沿的 HAZ 宽度增加。 $0^\circ$ , $45^\circ$ , $90^\circ$ 铺设方向的碳纤维烧蚀前沿能量传递方向的角度分别为 $0^\circ$ , $10^\circ$ , $30^\circ$ ;烧蚀前沿宽度按照图3所示的光斑中心点等温线宽度计算,分别为 $2349.66$ , $2913.60$ , $3403.86\ \mu\text{m}$ 。

从温度大小分析,在三种典型铺设角度下,材料的最低温度都在 $293\text{ K}$ 左右,与设定的室温相差不大。铺设方向为 $0^\circ$ , $45^\circ$ , $90^\circ$ 时,最高温度分别为 $11555$ , $8213$ , $7725\text{ K}$ ,逐渐降低。材料在激光热源直接作用处的温度最高,而 $0^\circ$ 铺设方向的单层 CFRP 吸收激光能量后,主要沿着 $0^\circ$ 方向传递,不易向两侧扩散,因此能量主要集中在激光作用区域,此处温度最高;对于 $45^\circ$ 和 $90^\circ$ 铺设方向的单层 CFRP,激光作用后能量迅速沿纤维轴向向外传递和扩散,因此最高温度相对于 $0^\circ$ 铺设方向的都有明显降低,又以 $90^\circ$ 铺设方向时能量扩散最快,因此温度最低。

此外,碳纤维的含碳量(质量分数)为 $93\%$ ,因此其熔化气化温度可以参考碳的熔化气化温度。碳的熔点为 $3773\text{ K}$ ,气化点为 $5100\text{ K}$ 。考虑到树脂的熔化气化温度与碳相比都很低,因此碳纤维的熔化气化温度低于碳的。三种情况下激光切割单丝排列 CFRP 时,能够去除碳纤维,这符合实际情况。

#### 4.2 不同树脂含量的单层 CFRP 激光切割模拟与分析

树脂含量对 CFRP 的强度、刚度、耐热性等性能有重要影响,激光切割 CFRP 时,材料中的树脂含量对材料吸收和传递激光能量也有重要作用。由前文可知,碳纤维铺设方向为 $90^\circ$ 的单层 CFRP 激光切割后温度场最宽,温度扩散最快,因其变化相较于其他铺设方向的更为明显,因此选择 $90^\circ$ 铺设方向来研究不同树脂含量单层 CFRP 激光切割的温度场。

一般而言,CFRP 的树脂含量为 $30\%\sim 50\%$ ,树脂含量过高会使 CFRP 存在强度不足等缺点,而树脂含量过低则会使材料较脆。本文采用的 CFRP 树脂含量为 $35\%$ ,模拟了树脂含量分别为 $30\%$ , $35\%$ , $40\%$ , $45\%$ , $50\%$ 五种情况下激光切割碳纤维 $90^\circ$ 铺设方向单层 CFRP 的过程,得到某一相同时刻的温度场,如图4所示。

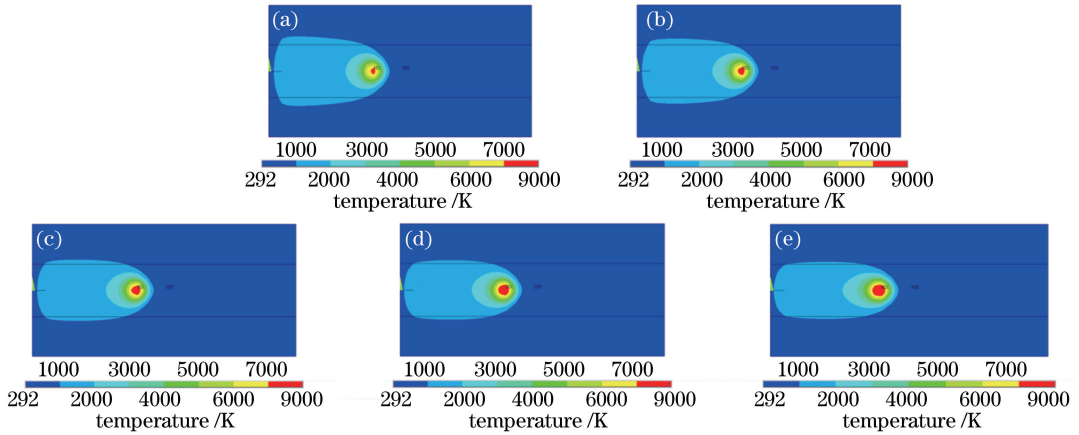


图 4 不同树脂含量的单层 CFRP 温度场。(a) 30%；(b) 35%；(c) 40%；(d) 45%；(e) 50%

Fig. 4 Temperature fields of single-layer CFRP with different resin contents.

(a) 30%；(b) 35%；(c) 40%；(d) 45%；(e) 50%

由图 4 可知,随着材料树脂含量的增加,温度场逐渐变窄,最高温度逐渐增大,依次为 7465,7725,7990,8305,8648 K;测量各图温度场最宽处的 HAZ 宽度分别为 5275.23,4935.66,4659.30,4536.27,4365.81  $\mu\text{m}$ ,宽度依次降低 6.44%,5.60%,2.64%,3.76%,而最高树脂含量 50%与最低树脂含量 30%的温度场相比,宽度降低了 17.24%。这是因为树脂的导热性远低于碳纤维的,树脂含量的增加会使整体材料的导热系数减小,并且树脂对激光能量的吸收比碳纤维的好,材料吸收能量后传递能力变差,传递变慢,且激光热源作用处的树脂吸收量增加,所以在相同情况下,同一时刻树脂含量高的 CFRP 能量传递距离小于树脂含量低的 CFRP,温度更集中于激光光斑的中心处,表现为温度场变窄缩短且最高温度逐渐升高。这样的温度场宽度变化说明树脂含量对 CFRP 吸收和传递激光能量有重要影响,进而改变激光切割 CFRP 的 HAZ 宽度,影响加工质量。如图 5 所示,对各树脂含量的最高温度数据进行拟合,发现其符合线性规律,随着树脂含量的均匀增加,瞬时温度场最高温度呈线性增长。如图 6 所示,对各树脂含量的 HAZ 宽度数据进行拟合,也符合线性规律,随着树脂含量的增加,激光切割 CFRP 的 HAZ 宽度呈线性下降。

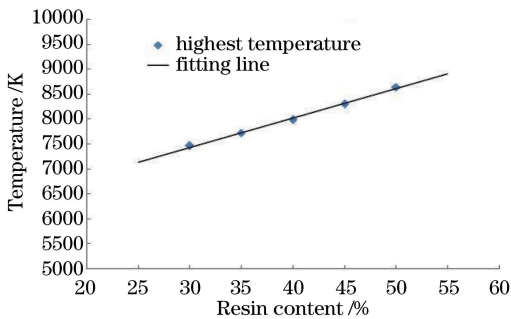


图 5 激光切割不同树脂含量单层 CFRP 的最高温度

Fig. 5 Highest temperatures in laser cutting of single-layer CFRP with different resin contents

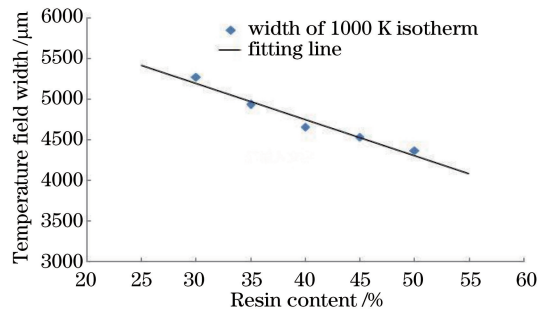


图 6 激光切割不同树脂含量单层 CFRP 的 HAZ 宽度 (1000 K 时)

Fig. 6 HAZ widths (at 1000 K) in laser cutting of single-layer CFRP with different resin contents

## 5 单层 CFRP 激光多向切割试验验证

为了验证数值模拟结果的正确性,对单层 CFRP 进行了激光切割试验,试验的基本参数和试验条件如第 2 节所述。试验和数值模拟采用相同的激光参数。试验后通过日本 KEYENCE 公司生产的 VHX-600 型超景深显微镜观测三种碳纤维铺设方向的单层 CFRP,如图 7 所示。

如图 7 所示,在与数值模拟相同的激光参数条件下, $\text{CO}_2$  激光能够完全切透三种典型碳纤维铺设方向的单层 CFRP,并且切缝宽度均匀一致。切缝周围白色区域就是 HAZ,可以看出,随着碳纤维铺设角度的变

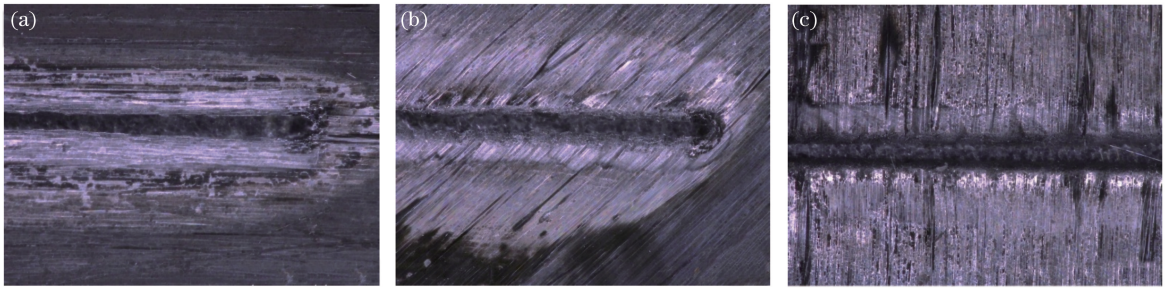


图7 激光切割典型碳纤维铺设角度后的单层 CFRP。

(a)碳纤维铺设角度为  $0^\circ$ ; (b)碳纤维铺设角度为  $45^\circ$ ; (c)碳纤维铺设角度为  $90^\circ$

Fig. 7 Single-layer CFRP with typical fiber orientations after laser cutting. (a) Carbon fiber orientation of  $0^\circ$ ; (b) carbon fiber orientation of  $45^\circ$ ; (c) carbon fiber orientation of  $90^\circ$

化,HAZ 的宽度逐渐增大,与数值模拟得到的结果相同,且形状吻合。对每个试件进行多次测量发现,三种典型铺设角度的单层 CFRP 经激光切割后,正面切缝宽度平均值分别为  $258.20, 271.71, 278.92 \mu\text{m}$ ,背面切缝宽度平均值分别为  $133.31, 126.56, 122.85 \mu\text{m}$ ,切缝倾角分别为  $22.60^\circ, 25.82^\circ, 27.48^\circ$ 。切缝宽度变化规律如图 8 所示。

随着纤维铺设角度在  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内增加,上表面切缝宽度增大,下表面切缝宽度减小,切缝倾角增大,即切口垂直度降低,加工质量降低。这是因为在所采用的工艺条件下,碳纤维铺设角度为  $0^\circ \sim 90^\circ$  时,随着碳纤维铺设角度的增加,切缝两侧垂直于切割方向的材料导热性越来越好,激光初作用于材料表面时瞬时能量很大,材料立刻被熔化气化,故上表面切缝宽度增大,随着能量的进一步传递,碳纤维铺设角度越大,能量传递离开切缝的速度越快,至下表面时切缝处剩余能量越少,故下表面切缝宽度减小。

以  $45^\circ$  碳纤维铺设方向为例,利用超景深显微镜变焦功能将其局部放大 1000 倍后的图像如图 9 所示。

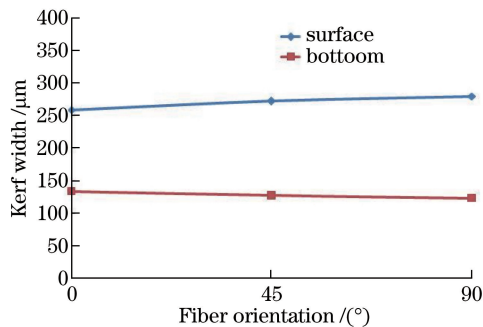


图8 单层 CFRP 上下表面切缝宽度

Fig. 8 Surface and bottom kerf widths of single-layer CFRP

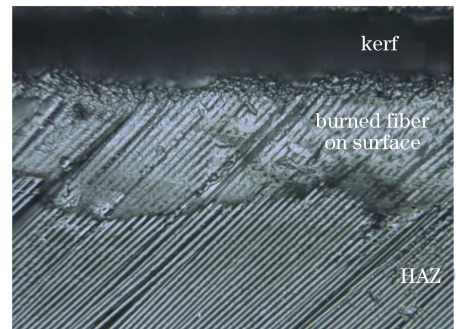


图9 碳纤维铺设角度为  $45^\circ$  时表面碳纤维被烧蚀区域

Fig. 9 Burned zone on carbon fiber surface when carbon fiber orientation is  $45^\circ$

紧靠切缝两侧 HAZ 颜色与远离切缝的相比有一定变化,如图 9 中标注,称其为表面碳纤维烧蚀区域。可以看出,该区域碳纤维已经被激光热源烧蚀,但没有形成切缝。表面碳纤维烧蚀区域与外围 HAZ 有明显的边界,外围 HAZ 与表面碳纤维烧蚀区域相比,碳纤维的形貌比较完整。

这种现象的出现与连续激光热源的时空分布特性有关。激光热源在空间上呈高斯分布,激光热源中心处的能量最高、功率密度最大。在时间上,在一定的扫描速度下,激光能量以高斯热源分布形式由中心处向外扩散。因此,试验中材料表面的颜色变化和数值模拟中的温度场都与输入材料的激光热源的时空分布是对应的。与金属材料或其他各向同性材料相比,CFRP 中碳纤维和树脂的热物理性能不同,其各项异性导致这种现象更加明显。

材料表面碳纤维烧蚀宽度的平均值分别为  $1202.80, 1101.14, 1040.26 \mu\text{m}$ ,HAZ 整体宽度的平均值分别为  $2094.52, 2831.50, 3216.12 \mu\text{m}$ 。在数值模拟中,可以根据得到的温度场等温线来推断试件的 HAZ 大小。由于激光切割最终形成的切缝宽度不仅与温度分布有关,还是功率密度、作用时间等综合因素共同作用的结

果, 仅从温度场无法直观得到, 因此主要通过表面的碳纤维烧蚀宽度和 HAZ 宽度来对比数值模拟和试验结果。根据几何模型尺寸和温度分布, 可以得到数值模拟三种典型铺设方向单层 CFRP 激光切割的表面碳纤维被烧蚀宽度分别为 1243.35, 1178.90, 1264.61  $\mu\text{m}$ , HAZ 整体宽度分别为 2349.66, 3105.38, 3775.87  $\mu\text{m}$ 。利用试验数据与数值模拟结果, 分析了表面碳纤维被烧蚀宽度和 HAZ 宽度的变化, 如图 10 所示。

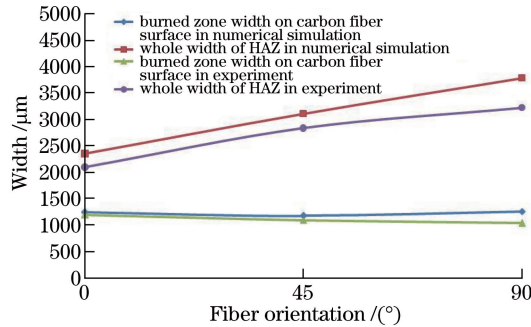


图 10 表面碳纤维被烧蚀宽度和 HAZ 整体宽度

Fig. 10 Burned zone width on carbon fiber surface and whole width of HAZ

进一步分析图 10 可知, 数值模拟与试验所得 HAZ 宽度最大相差 0.560 mm, 平均误差为 10.66%; 表面碳纤维被烧蚀宽度最大相差 0.224 mm, 平均误差为 13.09%。虽然数值模拟得到的数值总体上略大于试验数值, 但其变化趋势一致。数值模拟中表面碳纤维被烧蚀宽度随碳纤维铺设角度的变化不大, 这是因为激光能量初作用于材料表面时, 能量传递没有受纤维铺设方向的影响, 所以表面碳纤维被烧蚀宽度与碳纤维铺设角度几乎无关。HAZ 宽度随着碳纤维铺设角度在  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内的增大而明显增大, 试验结果与数值模拟结果一致。

切缝的垂直度和 HAZ 宽度是评价激光切割加工质量的重要标准, 碳纤维铺设角度在  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内时, 随着碳纤维铺设角度的增加, 激光多方向切割单层 CFRP 的切割质量下降, 而激光同方向切割单层 CFRP 的切缝倾角最小, HAZ 宽度最小, 加工质量最好。

## 6 结 论

通过建立单层 CFRP 三维有限元模型, 模拟了  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  三种典型碳纤维铺设角度和  $90^\circ$  纤维铺设方向下不同树脂含量的单层 CFRP 激光切割过程, 并进行了三种典型碳纤维铺设角度单层 CFRP 激光切割的验证试验, 得到如下结论。

1) 激光切割  $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  三种典型碳纤维铺设方向单层 CFRP 的同一时刻温度场逐渐变宽, 能量沿纤维铺设角度的传递明显快于垂直于纤维铺设角度方向的。激光扫描速度为 20 mm/s 时, 激光烧蚀前沿的能量传递方向由激光扫描方向主导, 随着碳纤维铺设角度由  $0^\circ$  增大至  $90^\circ$ , 烧蚀前沿能量传递方向的角度增大。而稳定切割时激光能量的传递方向主要沿纤维铺设方向。三种方向最高温度逐渐降低, 依次为 11555, 8212, 7726 K。

2) CFRP 的树脂含量对其吸收和传递激光能量有重要作用, 影响切割后切缝宽度、HAZ 宽度和加工质量。激光切割树脂含量分别为 50% 和 30% 的单层 CFRP, 后者的温度场宽度减小了 17.24%。随着树脂含量的增加, 激光切割 CFRP 的 HAZ 宽度线性下降, 最高温度线性增加。

3) 进行单层 CFRP 激光多方向切割试验。在  $0^\circ \sim 90^\circ$  范围内, 随着碳纤维铺设角度增大, 单层 CFRP 切缝倾角增大, HAZ 宽度增大, 加工质量下降。激光同方向切割单层 CFRP 加工质量最佳。与试验结果相比, 数值模拟 HAZ 宽度的平均误差为 13.09%, 表面碳纤维被烧蚀宽度的平均误差为 10.66%。

## 参 考 文 献

- [1] Luo Yifeng. R&D goals and development trends of advanced composite materials[J]. Hi-Tech Fiber & Application, 2013, 38(4): 1-10.



- 罗益锋. 先进复合材料的研发目标与发展方向[J]. 高科技纤维与应用, 2013, 38(4): 1-10.
- [2] Wu Enqi, Xu Zihong, Guo Xinxin, *et al.* Influence of porosity on photothermal radiometry of carbon fiber reinforced polymers[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0706006.  
吴恩启, 徐紫红, 郭新欣, 等. 孔隙率对碳纤维增强复合材料光热辐射信号的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(7): 0706006.
- [3] Gu Zhuowei, Perton M, Kruger S E, *et al.* Bonding quality detection of composite structure by laser shock wave[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(3): 0308002.  
谷卓伟, Perton M, Kruger S E, 等. 利用激光冲击波检测碳纤维材料中的粘接质量[J]. 中国激光, 2011, 38(3): 0308002.
- [4] Tan Xianghu, Shan Jiguo, Tang Lei, *et al.* Study on laser surfi-sculpt of GMW2 autobody sheet steel for carbon fiber reinforced polymer/steel dissimilar joint[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(3): 0303002.  
谭向虎, 单际国, 唐磊, 等. 面向碳纤维增强树脂基复合材料/钢异质结构连接的汽车钢板高速激光毛化工艺研究[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0303002.
- [5] Yu Dongyang, Wang Xuyue. Temperature field simulation of single layer carbon fiber reinforced plastics in parallel laser cutting [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(4): 041401.  
于冬洋, 王续跃. 激光同向切割单层碳纤维复合材料的温度场模拟[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(4): 041401.
- [6] Cenna A A, Mathew P. Analysis and prediction of laser cutting parameters of fibre reinforced plastics (FRP) composite materials[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2002, 42(1): 105-113.
- [7] Mucha P, Berger P, Weber R, *et al.* Calibrated heat flow model for the determination of different heat-affected zones in single-pass laser-cut CFRP using a cw CO<sub>2</sub> laser[J]. Applied Physics A, 2015, 118(4): 1509-1516.
- [8] Mucha P, Weber R, Speker N, *et al.* Calibrated heat flow model for determining the heat conduction losses in laser cutting of CFRP[J]. Physics Procedia, 2014, 56: 1208-1217.
- [9] Negarestani R, Sundar M, Sheikh M A, *et al.* Numerical simulation of laser machining of carbon-fibre-reinforced composites[J]. Journal of Engineering Manufacture. 2010, 224(7): 1017-1027.
- [10] Ohkubo T, Tsukamoto M, Sato Y. Numerical simulation of laser beam cutting of carbon fiber reinforced plastics[J]. Physics Procedia, 2014, 56: 1165-1170.
- [11] Ohkubo T, Tsukamoto M, Sato Y. Numerical simulation of combustion effects during laser processing of carbon fiber reinforced plastics[J]. Applied Physics A, 2016, 122: 196.
- [12] 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.
- [13] Wu Enqi, Shi Yufang, Li Meihua, *et al.* In-plane thermal conduction of woven carbon fiber reinforced polymer[J]. Chinese J Lasers, 2016, 43(7): 0703004.  
吴恩启, 石玉芳, 李美华, 等. 编织碳纤维复合材料平面内热传导规律研究[J]. 中国激光, 2016, 43(7): 0703004.