

激光同向切割单层碳纤维复合材料的温度场模拟

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 为了揭示激光切割碳纤维复合材料(CFRP)时材料对激光能量的吸收和传递机理,分别建立了激光同向切割单丝排列 CFRP 的三维有限元模型、丝-束直径比例三维模型和纤维-树脂两相三维模型。模拟结果表明,随着丝-束直径比例的减小,切缝宽度从 229.45 μm 降至 95.60 μm ,热影响区(HAZ)宽度从 172.08 μm 降至 156.79 μm 。试验与模拟结果基本一致,切缝宽度和 HAZ 宽度的误差分别为 5.97% 和 1.13%。

关键词 激光技术; 激光切割; 单层碳纤维复合材料; 同向切割; 丝-束直径比例; 纤维-树脂两相模型

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.041401

Temperature Field Simulation of Single Layer Carbon Fiber Reinforced Plastics in Parallel Laser Cutting

Yu Dongyang, Wang Xuyue

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

Abstract In order to reveal the mechanism of energy absorption and transfer of materials in laser cutting of carbon fiber reinforced plastics (CFRP), a three dimensional finite element model for parallel laser cutting of single-fiber arranged CERP, a three dimensional fiber-spot diameter ratio model and a three dimensional fiber-resin double phase model are established, respectively. Numerical simulation results show that, with the decline of fiber-spot diameter ratio, the kerf width decreases from 229.45 μm to 95.60 μm , while the width of the heat affected zone (HAZ) decreases from 172.08 μm to 156.79 μm . The experimental results agree well with the simulation results, and the errors for the kerf width and the HAZ width are 5.97% and 1.13%, respectively.

Key words laser technique; laser cutting; single layer carbon fiber reinforced plastics; parallel cutting; fiber-spot diameter ratio; fiber-resin double phase model

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,具有比强度和比刚度高、密度小、耐高温、可设计性好等优点,被广泛应用于航空航天^[1]、汽车工业^[2]、体育用品、土木工程^[3]等领域。其中,CFRP 在飞机上的应用已由次承力结构应用发展到主承力结构应用^[4],例如美国军用飞机 F22 等采用的 CFRP 质量分数已经超过了 30%^[5]。CFRP 一般由多个铺设方向不同的单层 CFRP 通过树脂结合在一起,其中碳纤维有 0°、90°、±45°等多种铺设方向,因此 CFRP 板材具有明显的各向异性。激光扫描方向与碳纤维铺设方向一致时称为同方向(或称 0°),激光扫描方向与碳纤维铺设方向垂直时称为垂直方向(或称 90°)。激光切割 CFRP 时,单根碳纤维直径与激光光斑直径的比例对热影响区(HAZ)宽度的大小等有重要影响,对于光斑直径较小的激光光源,其影响尤为明显^[6]。而小光斑直径的激光光源由于其切割

收稿日期: 2016-12-06; 收到修改稿日期: 2016-12-13

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,主要从事激光切割碳纤维复合材料方面的研究。E-mail: 1374811304@qq.com

导师简介: 王续跃(1960—),男,博士,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)

CFRP 后能够得到较小宽度的 HAZ,在现阶段已经得到了广泛应用。基于以上原因,有必要针对某一铺设方向的单层 CFRP,在考虑丝-束直径比例和纤维、树脂相互作用的情况下进行激光切割研究,这将为研究任意铺设方向和多层叠加的 CFRP 激光切割奠定基础。

激光切割属于非接触式加工,其与传统加工方式相比具有去除速度快、加工效率高、不存在刀具磨损和机械振动等优点,是一种发展前景广阔的 CFRP 切割方式。目前,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相关研究。在理论模型建立和数值模拟方面,Cenna 等^[7]根据能量守恒定律,考虑激光能量的分布、激光与材料间的作用时间、材料的热物理参数以及材料对激光的吸收率,提出了一种关于切缝宽度、材料去除率与激光工艺参数的理论模型。Negarestani 等^[8]建立了一种激光沿 90°方向切割单层 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。Ohkubo 等^[9]建立了二维平面模型,模拟了激光沿 0°方向切割 CFRP 时 HAZ 的形成机理并进行了验证。在 CFRP 激光切割的试验研究方面,Herzog 等^[10]利用脉冲和连续激光分别对多层 CFRP 进行了加工,并且与其他加工方式进行了对比,测量了切割后 CFRP 的 HAZ 宽度大小、切缝宽度和拉伸、弯曲强度等。吴恩启等^[11]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,并用激光调制加热,推导了纤维束平面内热扩散系数与相位梯度间的关系。花银群等^[12]和宋抒航等^[13]则分别通过水下激光切割 CFRP 和在 CFRP 中增加炭黑颗粒等方式,获得了良好的切割质量,有效地改善了激光切割性能,并对激光切割机理进行了研究。由于激光沿 90°方向切割 CFRP 得到的 HAZ 较宽,不能反映外围温度场的情况,并且二维模型不能反映激光切割整块 CFRP 的温度场,因此有必要建立激光沿 0°方向切割 CFRP 的三维模型。

由于碳纤维和树脂基体的热物理性能差距很大,纤维的熔化、气化温度和热导率都远高于树脂的,因此激光切割 CFRP 时树脂会因吸收过多的能量而发生燃烧和碳化,造成基体回缩,导致碳纤维从树脂基体中拔出、分层等,产生宽度较大的 HAZ。HAZ 会影响材料的力学性能,如拉伸强度、弯曲强度等,进而影响材料的使用,导致激光切割 CFRP 时存在一定的难度。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,在数值模拟建立几何模型和物理模型时存在一定难度,必须要兼顾计算的简便性和模型的准确性,从而有效模拟激光切割 CFRP 的过程。

现阶段,一般用物性参数平均法将 CFRP 描述为匀质复合材料,对于单层 CFRP 的有限元细化模型建立和数值模拟,激光切割 CFRP 时材料各向异性对激光能量的吸收、传递情况的影响还需要进一步深入研究。本文按照碳纤维直径与激光光斑直径的比值(丝-束直径比例),建立了单根碳纤维紧密铺成一层的单丝排列三维有限元模型,其几何模型为体结构。模拟了激光切割时的瞬态温度场,模型中的丝-束直径比例逐渐逼近真实的比例,从而研究 CFRP 激光切割时纤维对激光能量的吸收、传递过程及机理。对该模型进行细化,建立纤维-树脂两相模型,更贴近真实材料结构,并且将树脂基体和碳纤维两种成分分别进行了网格划分。与传统将 CFRP 作为匀质材料建模的处理方法相比,该方法提高了计算精度。在本实验室特定的激光器参数条件下贴近模拟中的丝-束直径比例,使试验和数值模拟条件趋于一致,通过外置铝制狭缝光阑进行了试验验证。

2 试验条件与数值模拟方法

为获得数值模拟中用到的材料参数和激光参数,首先介绍试验条件。取 0°铺设方向的单层 CFRP 作为试验材料,采用的 CFRP 板材基体为 AG-80 环氧树脂,增强相为 T300 碳纤维,体积分数为 65%。除两侧表面为十字编织外,共 25 个单层,其中前 24 个单层为每 6 个单层一个循环,共 4 个循环,每个循环中 6 个单层的铺设方向依次为-45°、90°、45°、0°、45°、90°,第 25 单层为-45°。CFRP 的主要参数见表 1,其中标 * 的为计算值。

表 1 单层 CFRP 参数

Table 1 Parameters of single-layer CFRP

	Fiber	Resin	Composite
Density / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	1.76	1.30	1.60
Thermal conductivity / ($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}$)	84(axial), 8.4(radial)	0.2	55* (axial), 5.5* (radial)
Specific heat / ($\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}$)	795	1200	1058*
Coefficient of thermal expansion / ($10^{-6} \text{ m}^2\cdot\text{s}^{-1}$)	-0.41	57	0.26(axial), 33.7(radial)

进行试验时,为了从整块 CFRP 板材中获得同一铺设方向的单层 CFRP,要将含有多层不同铺设方向碳纤维的 CFRP 板材用酒精灯进行烧蚀。由于基体的熔点较低,大部分基体被熔化或分解,各层碳纤维发生分层,从而得到同一铺设方向的单层 CFRP。由于模拟中单丝排列 CFRP 铺层的情况在实际情况下很难制备得到,因此取单层 CFRP 作为试验材料,二者关系的示意图如图 1 所示。

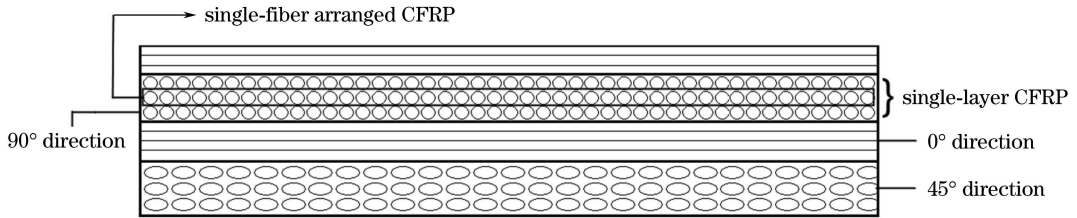


图 1 单层 CFRP 与单丝排列 CFRP 关系示意图

Fig. 1 Relationship between single-layer CFRP and single-fiber arranged CFRP

通过三维模型数值模拟的温度场来研究单丝排列 CFRP 对切割激光能量的吸收、传递问题时,主要观察样品表面的温度场情况,因此保证碳纤维在同一铺设方向的情况下,厚度方向的纤维根数和排列情况属于次要因素,对验证结果影响不大。

对于激光切割 CFRP,大功率的脉冲激光能在保证加工效率的情况下,获得宽度较小的 HAZ。采用英国 GSI Lumonics 公司生产的 JK701H 型脉冲掺钕钇铝石榴石固体激光器,功率为百瓦级,输出波长为 $1.064 \mu\text{m}$ 。与之匹配的四轴联动数控机床为北京机床所精密机电有限公司生产的 LMT-5040 型机床,四轴分别为 X、Y、Z、C。数控系统为日本 FANUC 公司的 Oi 数控系统,控制精度为 0.001 mm ,与激光控制系统耦合,程序按照国际 G 代码标准执行。试验所用激光功率为 50 W ,脉冲频率为 40 Hz ,脉宽为 2 ms ,焦点位置为材料上表面。激光光斑直径为 $200 \mu\text{m}$,T300 碳纤维的直径为 $7 \mu\text{m}$ 。

一般来说,当丝-束直径比例 k 小于 $1:10$ 时,单层 CFRP 可通过参数平均化而被当作匀质的复合材料处理,即只需考虑碳纤维和树脂复合后作为整体材料的参数。正常试验条件下 k 为 $7:200$,近似于 $1:28$ 。数值模拟研究的是 k 为 $1:1$ 、 $1:2$ 、 $1:5$ 的情况,此时 k 大于 $1:10$,将单层 CFRP 认为成匀质材料是不准确的。

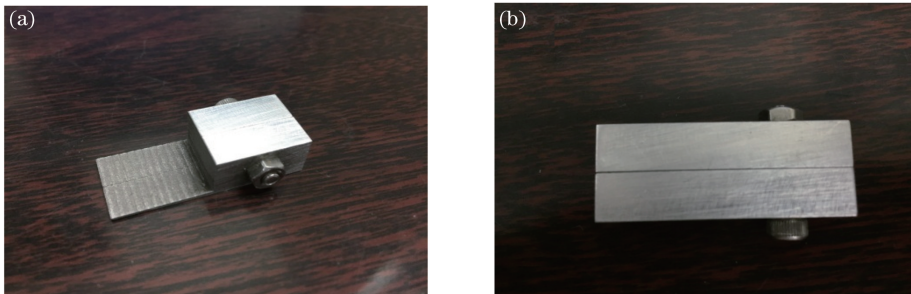


图 2 铝制狭缝光阑。(a)正面;(b)背面

Fig. 2 Aluminum-made slit diaphragm. (a) Front view; (b) back view

单根碳纤维的直径一般在 $5 \sim 8 \mu\text{m}$ 范围,理论上通过改变光斑直径可以进行不同丝-束直径比例下激光同方向切割单层 CFRP 的试验。通过制备外置光阑来改变激光作用于 CFRP 的光斑直径,从而进行不同丝-束直径比例下的试验。制备宽度为 $50 \mu\text{m}$ 的铝制外置狭缝光阑,如图 2 所示。将其置于激光器与试件之间,使实际输入光斑直径减小至 $50 \mu\text{m}$ 左右,以更接近模拟时的丝-束直径比例,试验准备情况如图 3 所示。此时丝-束真实直径比例 k 为 $7:50$,近似为 $1:7$,试验与数值模拟条件趋于一致。

进行数值模拟时,需要建立脉冲激光移动热源的能量分布表达式并设定边界条件。假设脉冲激光的能量符合高斯分布:

$$I(x, y) = AI_0 f(x, y) g(t), \quad (1)$$

式中 A 为 CFRP 对激光的吸收系数, I_0 为激光中心处的功率密度, $f(x, y)$ 为激光脉冲的空间分布, $g(t)$ 为时间分布。

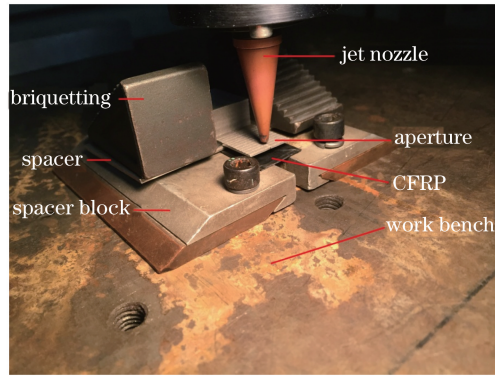


图3 试验装置

Fig. 3 Experimental setup

对于高斯热源,有

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

$$g(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t \leq t_p \\ 0, & t_p < t \leq 1/f \end{cases}, \quad (3)$$

式中 r_0 为光强下降到中心光强 $1/e$ 时的光斑半径, t_p 为激光的脉冲宽度, (x_0, y_0) 为光斑中心位置坐标, f 为激光脉冲频率。

激光未作用在材料上时的温度场分布:

$$T|_{t=0} = T_0(x, y, z). \quad (4)$$

假设初始条件室温 $T_0 = 293$ 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

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Gamma_3} = h(T - T_0), \quad (5)$$

式中 h 为换热系数, λ 为 CFRP 导热系数, Γ_3 表示区域边界(第三类), n 表示区域法向的单位向量大小。对于单层和单丝排列的 CFRP,不同方向上的 λ 不同,反映了 CFRP 各向异性条件下的能量传递。

3 有限元模型建立

采用的 CFRP 板材纤维体积分数为 65%,两侧表面为十字编织,共 25 单层。取 0° 铺设方向的单层 CFRP 作为试验材料,而数值模拟假设 CFRP 是单丝排列的。

3.1 丝-束直径比例有限元模型

令激光的光斑直径保持不变($200 \mu\text{m}$),改变 CFRP 碳纤维的直径,进行激光切割单丝排列 CFRP 的数值模拟。在丝-束直径比例 k 为 1:1、1:2、1:5 三种情况下分别进行三维几何建模,在单丝排列条件下,每种情况下的几何模型厚度即为不同的纤维直径,分别为 $200, 100, 40 \mu\text{m}$ 。为了将激光热源加载后的温度场和 HAZ 表达完整,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 4 mm ,将几何模型的长度定为 10 mm 。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,并在激光扫描区域添加表面效应单元 surf152 以同时施加激光热流和空气对流。对激光作用区域的网格进行加密处理,提高计算精度,同时尽可能降低计算量。以丝-束直径比例 1:5 情况为例,几何模型如图 4 所示。

不同比例碳纤维直径和光斑直径的几何模型基于如下假设:

- 1) 激光沿 0° 铺设的纤维方向从正中间切割;
- 2) 单根 CFRP 为正方形横截面的长方体,且每两根紧密排成一排,没有间隙,形成单丝排列 CFRP;
- 3) 每根碳纤维拥有复合材料的性质。

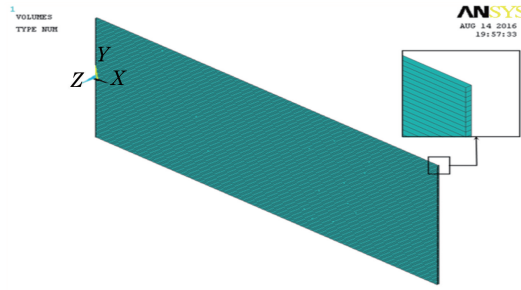


图4 单丝排列 CFRP 几何模型示意图及其局部放大图(1:5)

Fig. 4 Schematic diagram of geometry model for single-fiber arranged CFRP and its partial enlargement (1:5)

3.2 碳纤维-树脂两相有限元模型

按不同丝-束直径比例进行的 CFRP 激光切割模拟,其主要目的是研究二者大小关系对激光切割 CFRP 的影响,因此在参数定义时,均直接采用表 1 中复合材料一栏的参数,而没有在几何模型中刻画树脂。为了反映激光能量对 CFRP 纤维和树脂分别作用的情况,进一步研究激光与 CFRP 的作用机理,需要建立碳纤维-树脂两相有限元模型,其几何模型如图 5 所示。

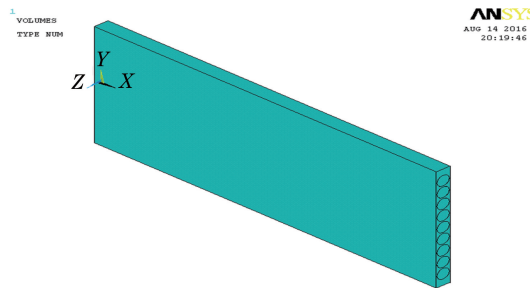


图5 碳纤维-树脂两相 CFRP 几何模型

Fig. 5 Geometry model of carbon fiber-resin double phase CFRP

由于两相模型要定义两种不同的材料参数,并且对碳纤维和树脂分别进行网格划分,单元数多、计算量大,因此几何模型的整体尺寸选择相对更小,为 $5\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 200\text{ }\mu\text{m}$ 。厚度保持与丝-束直径比例 1:1 情况下的几何模型厚度相同,以尽可能减小计算量。仍然考虑单丝排列,纤维为圆柱体,单根纤维之间填充树脂,间距为 $20\text{ }\mu\text{m}$ 。由于厚度与 1:1 模型的相同,且纤维被树脂包裹,因此纤维直径要小一些,设为 $180\text{ }\mu\text{m}$ 。与丝-束直径比例模型相同,选择三维热实体单元 SOLID70,并在激光扫描区域添加表面效应单元 surf152。对于两相模型,选择自由网格划分,同样对激光作用区域的网格进行加密处理,以提高计算精度,同时尽可能降低计算量。

碳纤维-树脂两相模型基于如下假设:

- 1) 激光沿 0° 铺设的纤维方向从正中间切割;
- 2) 单根碳纤维均匀排列为一层,每两根之间间距相等。

4 数值模拟结果与讨论

4.1 不同比例碳纤维直径和激光光斑直径模型

分别模拟了丝-束直径比例 k 为 1:1、1:2、1:5 三种情况下的激光切割单丝排列 CFRP。激光切割 CFRP 的切割质量、能量与材料的作用情况都与切割过程中的温度场紧密相关,因此重点考察数值模拟的温度场。

选取三种比例情况下有代表性的同一时刻温度场,结果如图 6 所示,其中 MX 表示最高温度, MN 表示最低温度,以下同。

从图 6 可以看出,随着丝-束直径比例 k 的减小,温度场宽度逐渐变窄,即形状逐渐变细。这是因为随着 k 的减小,纤维直径减小、纤维排列密集,而碳纤维的热导率远高于树脂基体的,相比于径向,能量就更倾向

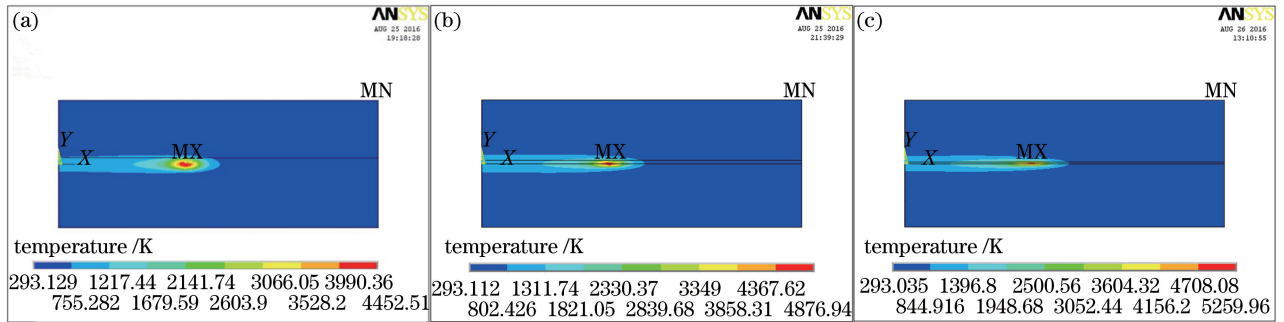


图 6 不同丝-束比例下同一时刻激光切割单丝排列 CFRP 的温度场。(a) $k=1:1$;(b) $k=1:2$;(c) $k=1:5$

Fig. 6 Temperature fields of laser cutting of single-fiber arranged CFRPs with different fiber-spot ratios at the same time. (a) $k=1:1$; (b) $k=1:2$; (c) $k=1:5$

于沿纤维轴向传播。

三种情况下的最低温度相差很小,为模拟时设定的室温 293 K 左右。随着丝-束直径比例 k 的减小,最高温度呈明显的增长,分别为 4453,4877,5260 K。由于单丝排列 CFRP 的厚度就是纤维的直径,随着厚度的减小,碳纤维在厚度方向对热的传导能力降低,不利于热量的扩散,因此温度逐渐升高。此外,东丽 T300 碳纤维的含碳量为 93%(体积分数),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 K,气化点为 5100 K。因为树脂的熔化气化温度与碳相比都很低,所以碳纤维的熔化气化温度要低于碳的。因此,这三种情况下激光切割单丝排列 CFRP,可熔化并去除碳纤维,符合实际情况。

4.2 碳纤维-树脂两相模型

在不同丝-束直径比例模型的基础上,为了更清晰地表达 CFRP 复合材料的特点,建立了碳纤维-树脂两相模型,进一步研究激光能量对 CFRP 的作用机理。

两相模型某一时刻整体温度场和纤维的温度场如图 7 所示。为方便观察横截面情况,选取临近切割末端的位置。

从图 7(a)可以看出,与图 5 相比,两相模型整体的温度场形状更为圆润,近似为椭圆形。这是因为两相

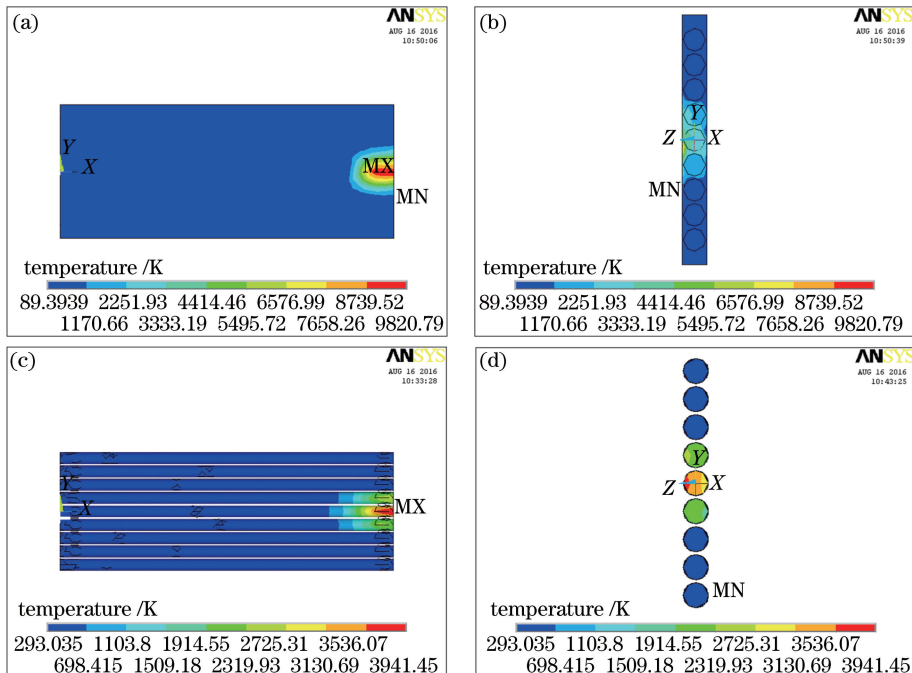


图 7 两相模型同一时刻温度场。(a)整体正视图;(b)整体右视图;(c)纤维正视图;(d)纤维右视图
Fig. 7 Temperature fields of double phase model at the same time. (a) Front view of entire model;
(b) right view of entire model; (c) front view of fiber; (d) right view of fiber

模型的表层是一层均匀的树脂,为匀质材料,在高斯热源的作用下其温度场应该近似为圆形,而能量继续向下传递到纤维上时,由于纤维的热导率($84 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}$)远高于树脂的($0.2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}$),能量趋向于沿着纤维的铺设方向(水平方向)传递,因此在碳纤维和树脂的综合作用下,整体的温度场近似为椭圆形。

从图 7(b)可以看出,在同一时刻下,CFRP 表层树脂的温度场比内部纤维和树脂同时存在时的温度场宽。这也是因为树脂的热导率较碳纤维的低,热量经过表层树脂后传递到碳纤维上,便会沿着碳纤维铺设方向以更快的速度传递;而在纤维的径向上,纤维之间存在树脂,阻碍了热量在垂直于纤维铺设方向上的传递,因此温度场变窄。

对比图 7(a)、(c)可知,同一时刻下,CFRP 内部纤维的温度场比整体的温度场长度更长,这也体现出 CFRP 具有明显的各向异性。由于纤维的热导率远高于树脂的,因此热量更容易沿着纤维的铺设方向传递。

进一步观察图 7(d)可知,热量在单根纤维内部(单丝排列 CFRP 的厚度方向)传递很快,当靠近激光热源处一端的温度达到 3941 K 时,厚度方向上远离热源的一端温度最低为 2725 K,而此时热源两侧相邻的纤维靠近热源一端的温度仅为 2319 K。这也证明了激光能量从纤维跨越树脂传递到其他纤维是比较困难的,能量更易沿着纤维铺设的方向传递。

5 单层 CFRP 激光同方向切割试验验证

为了验证数值模拟结果的正确性,对 CFRP 进行激光切割试验,试验的基本参数和试验条件如第 2 节所述,采用与数值模拟相同的激光参数。首先检查狭缝光阑是否在不失效的情况下有效减小了光斑直径,以便更接近模拟时的丝-束直径比例。狭缝光阑的电子显微镜观测照片如图 8 所示。

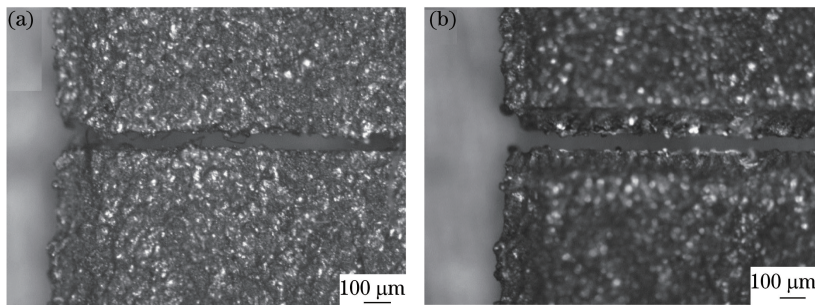


图 8 激光切割前后狭缝光阑的放大照片。(a)切割前正面;(b)切割后正面
Fig. 8 Enlarged photos of slit diaphragm before and after laser cutting process.
(a) Front view before cutting; (b) front view after cutting

从图 8 中狭缝光阑正面的切割情况可以看出,试验后激光烧蚀掉了一部分的铝,但由于狭缝光阑的位置距离焦点较远,激光能量密度不大,没有将狭缝光阑完全烧蚀破坏,仅留下了扫描痕迹,而光阑的狭缝仍然保持试验前的宽度($50 \mu\text{m}$),这说明狭缝光阑起到了减小光斑直径的效果。激光光束呈高斯分布,试验时使光斑中心与狭缝中心线处于一条直线上,以尽可能地提高能量转换率。而狭缝光阑背面在切割前后几乎没有变化,说明激光并没有将其打透,没有透过狭缝的部分均被光阑拦下。因此,狭缝光阑将激光光斑直径限制在了 $50 \mu\text{m}$ 左右,从而保证试验中丝-束直径比例 k 近似为 1:7,接近数值模拟时二者的比例关系,提高了验证的有效性。

在超景深显微镜下,激光稳定切割一段相同铺设方向单层 CFRP 的试验结果如图 9 所示。

从试件试验后的情况来看,激光能在不使光阑失效的情况下,完全切透同一铺设方向的单层 CFRP。从图 9(a)可以看出,激光在稳定切割时,试件上表面切缝宽度均匀一致,在切口附近有白色熔融物。推测这些白色熔融物可能是激光切割试件但还未完全切透时,已被激光熔化的熔融物在辅助气体的作用下被吹到上表面造成的。这种白色熔融物随着激光功率的增大而变多。从图 9(b)可以看出,试件下表面切缝宽度均匀、没有挂渣,切缝两侧有材料颜色明显发白的区域,并且与外围有明显边界,这个区域就是激光切割 CFRP 的 HAZ。因为单层 CFRP 厚度很薄,上下表面 HAZ 的宽度几乎没有差别,而试件正面白色熔融物影响观察,所以在试件背面测定 HAZ 宽度。针对激光稳定切割区域,测得其切缝的平均宽度为 $50.44 \mu\text{m}$,HAZ 的

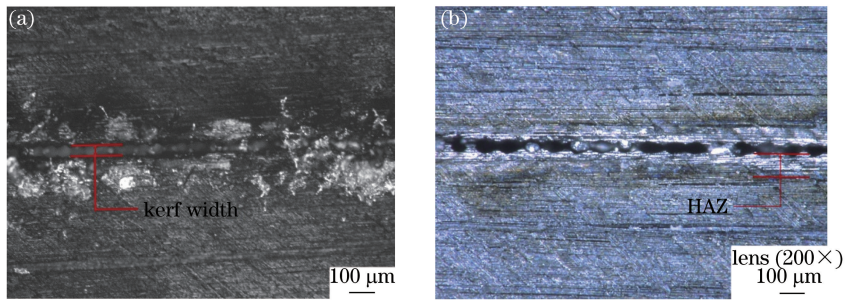


图 9 激光切割后试件的放大照片。(a)试件正面;(b)试件背面

Fig. 9 Enlarged photos of workpiece after laser cutting. (a) Front view of workpiece; (b) back view of workpiece

平均宽度为 $150.46 \mu\text{m}$ 。

由于 CFRP 的 HAZ 是激光切割时高温热源周围的树脂基体烧蚀、回缩、与碳纤维分离而形成的,因此可以根据数值模拟温度,以达到碳纤维和树脂熔化温度时的温度场来推断试件的切缝宽度和 HAZ 宽度。根据数值模拟时几何建模的尺寸,可以得到碳纤维直径与激光光斑直径比为 $1:1$ 、 $1:2$ 、 $1:5$ 时,切缝宽度分别为 229.45 、 118.55 、 $95.60 \mu\text{m}$,而 HAZ 的宽度分别为 172.08 、 160.11 、 $156.79 \mu\text{m}$ 。可以看出,随着 k 值的减小,激光切割单丝排列 CFRP 的切缝宽度和 HAZ 宽度均在减小。

为了进一步验证数值模拟的有效性,利用模拟得到的切缝宽度和 HAZ 宽度数据作拟合曲线,结果如图 10 所示。可以看出,试验条件下(丝-束直径比例 k 近似为 $1:7$)与曲线拟合情况良好,其中切缝宽度误差为 5.97% ,HAZ 宽度误差为 1.13% 。因此建立的模型能够有效预测不同丝-束直径比例 k 下激光切割单层 CFRP 时的切缝宽度。

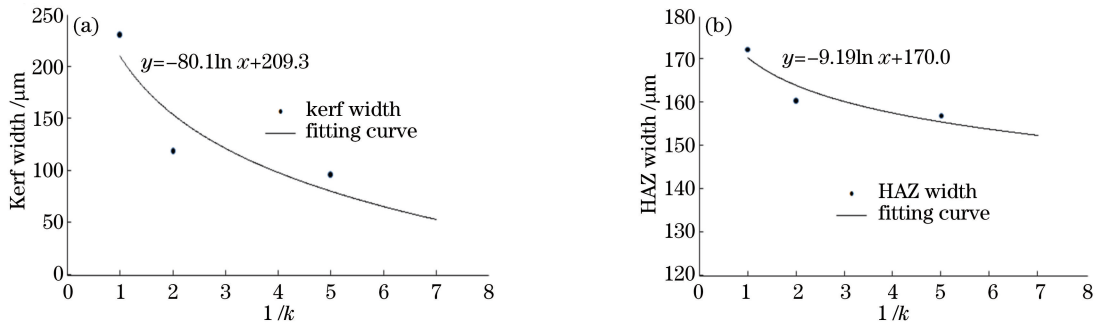


图 10 (a)切缝宽度和(b)HAZ 宽度与丝-束直径比例间的关系

Fig. 10 Relationship between fiber-spot ratio and (a) kerf width and (b) HAZ width

6 结 论

针对单丝排列 CFRP,建立了丝-束直径比例 k 分别为 $1:1$ 、 $1:2$ 、 $1:5$ 的三维有限元模型和碳纤维-树脂两相三维有限元模型,对数值模拟的结果进行了分析,并制备同一铺设方向的单层 CFRP 进行了试验验证。模拟结果表明, k 从 $1:1$ 减小至 $1:5$ 时,瞬时温度场宽度逐渐变窄,切缝宽度从 $229.45 \mu\text{m}$ 降至 $95.60 \mu\text{m}$,HAZ 宽度从 $172.08 \mu\text{m}$ 降至 $156.79 \mu\text{m}$;最高温度明显增大,分别为 4453 、 4877 、 5260K ,而最低温度基本不变(293K)。并发现激光能量更易于沿着碳纤维的铺设方向传递,而树脂对能量的传递性较差。激光功率为 50W 时,在不失效的情况下可完全切透单层 CFRP,且切缝均匀一致,切割质量良好。试验得到的切缝宽度和 HAZ 宽度与数值模拟曲线拟合情况基本一致,误差分别为 5.97% 和 1.13% ,验证了激光切割单层 CFRP 模型的有效性。

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] Tan Xianghu, Shan Jiguo, Tang Lei, *et al.* Study on laser surf-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.
- [3] Chen Jie, Xiong Xiang, Xiao Peng. Research and development of high-thermal conductivity carbon-carbon composites[J]. Materials Review, 2006, 20(7): 431-435.
陈洁, 熊翔, 肖鹏. 高导热 C/C 复合材料的研究进展[J]. 材料导报, 2006, 20(7): 431-435.
- [4] 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.
- [5] Gu Zhuowei, Mathieu Perton, Silvio Kruger, *et al.* Bonding quality detection of composite structure by laser shock wave[J]. Chinese J lasers, 2011, 38(3): 0308002.
谷卓伟, Mathieu Perton, Silvio Kruger, 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.
- [6] Salama A, Yan Y Z, Li L, *et al.* Understanding the self-limiting effect in picosecond laser single and multiple parallel pass drilling/machining of CFRP composite and mild steel[J]. Materials and Design, 2016, 107: 461-469.
- [7] 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 & Manufacture, 2002, 42(1): 105-113.
- [8] Negarestani R, Sundar M, Sheikh M A. Numerical simulation of laser machining of carbon-fibre-reinforced composites[J]. Journal of Engineering Manufacture, 2010, 224(7): 1017-1027.
- [9] Ohkubo T, Tsukamoto M. Numerical simulation of laser beam cutting of carbon fiber reinforced plastics[J]. Physics Procedia, 2014(56): 1165-1170.
- [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 & Manufacture, 2008, 48(12-13): 1464-1473.
- [11] 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.
- [12] Hua Yinqun, Xiao Tao, Xue Qing, *et al.* Experimental study about laser cutting of carbon fiber reinforced polymer[J]. Laser Technology, 2013, 37(5): 565-570.
华银群, 肖淘, 薛青, 等. 激光切割碳纤维复合材料的实验研究[J]. 激光技术, 2013, 37(5): 565-570.
- [13] 宋抒航. 碳纤维复合材料激光切割实验研究[J]. 机械制造, 2015, 53(613): 49-51.