

文章编号:1001-5078(2021)12-1563-07

· 激光应用技术 ·

激光扫描角度对碳纤维复合材料的热影响研究分析

侯红玲^{1,2}, 吕瑞虎¹, 郝海凌¹, 吴浪¹

(1. 陕西理工大学机械工程学院, 陕西 汉中 723000; 2. 陕西省工业自动化重点实验室, 陕西 汉中 723001)

摘要:为研究激光扫描角度对碳纤维复合材料的热影响作用和扫描角度对激光能量在材料内部传递过程的影响,以常用的纤维铺设角度即 0° 、 45° 和 90° 作为激光扫描角度,进行了有限元模拟和试验验证。结果表明,随扫描角度的增大,激光对材料的热影响范围逐渐增大;当扫描角度为 45° 时,切缝两侧纤维碳化较为严重。通过激光切割试验验证,发现模拟与试验存在误差为7.46%,模拟与试验所呈现出扫描角度对材料的热影响趋势,以及扫描角度对纤维造成碳化的结果特征具有一致性。为降低激光切割对材料的热影响,减小材料的碳化区域,改善材料的激光切割质量,除选用合适的激光参量外,应尽可能的使激光扫描角度与纤维轴向一致。

关键词:激光切割;碳纤维复合材料;扫描角度;热影响;激光能量

中图分类号:TN249 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2021.12.003

Research and analysis of thermal effect of laser scanning angle on carbon fiber reinforced plastics

HOU Hong-ling^{1,2}, LV Rui-hu¹, HAO Hai-ling¹, WU Lang¹

(1. School of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723000, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Industrial Automation, Hanzhong 723001, China)

Abstract: In order to study the thermal effect of laser scanning angle on carbon fiber reinforced plastics and the influence of scanning angle on the laser energy transfer process inside the material, the common fiber laying angles 0° , 45° and 90° were used as the laser scanning angles to carry out finite element simulation and experimental verification. The results show that with the increase of scanning angle, the thermal influence range of laser on material gradually increases; when the scanning angle is 45° , the carbonization of fibers on both sides of the slit is more serious. Through the laser cutting experiment, it is found that the error between the simulation and the experiment is 7.46%. The simulation and experiment show that the scanning angle has a trend of thermal influence on material, and the scanning angle has a consistent result on the carbonization of the fiber. In order to reduce the thermal effect of laser cutting on materials and the carbonization area of materials, and improve the laser cutting quality of materials, in addition to selecting appropriate laser parameters, the laser scanning angle should be consistent with the fiber axis as much as possible.

Keywords: laser cutting; carbon fiber reinforced plastics; laser scanning angle; thermal effect; laser energy

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(No. 2019JM-466);陕西省教育厅专项科研计划项目(No. 18JK0148)资助。

作者简介:侯红玲(1976-),女,副教授,硕士生导师,主要研究方向为精密加工技术及数控技术。E-mail: xjtuhhl@163.com

收稿日期:2020-12-29; **修订日期:**2021-01-27

1 引言

碳纤维复合材料(Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP)的含碳量高于 90 %,具有耐高温、耐摩擦、质量轻和强度高特性。CFRP 因其优良特性,被越来越广泛地应用在航空航天、汽车工业和体育器材等不同领域^[1]。由于 CFRP 受纤维增强体和树脂基体之间的物理性能差异、铺层角度不同等因素的影响,存在层间强度低、各向异性、硬度高、脆性大等特点,使用传统的机械加工方式将会导致材料分层严重,加工之后材料的性能变差,刀具过度磨损,如若频繁更换加工刀具,势必将增加额外的生产时间和加工成本^[2-3],水射流切割虽然具有经济环保的优点,但其切割速度较慢,不适于规模大批量加工生产^[4]。为推进碳纤维复合材料的使用进程,适应当今社会对快速高效、清洁无污染的加工要求,激光切割技术越来越受关注并得到肯定。

激光切割是一种清洁无污染、无磨损、无机械切削力、切割速度快的加工方法,激光切割在碳纤维复合材料加工中具有很大潜力^[5-6]。激光切割作为一种热加工方式难免会对材料产生热影响作用,为进一步了解激光切割对 CFRP 的热影响作用,国内外研究人员已开展了相关研究,Tomomasa OhKubo 等^[7]利用热重分析、差热分析和有限差分法,模拟材料在烧蚀过程中的去除率,提出在研究激光切割 CFRP 产生热影响区时应同时考虑材料的热导率和燃烧效应。张瑄珩等^[8]通过改变激光不同工艺参数,进行 CFRP 激光打孔质量研究,获得最优参数和最好打孔质量效果。花银群等^[9]对比分析了在空气中和水下激光器切割 CFRP 的试验结果,发现水下切割可以获得较好的切割质量。P. Mucha 等^[10]在距切缝不同距离嵌入温度传感器,采用热流模型描述不同纤维取向的各层的平均温度,测定了热传导损耗激光功率高达 30 %。陈敏孙^[11]等通过试验研究发现切向气流可将树脂基体热解产物吹除,促进氧气与碳纤维接触发生氧化作用,利于碳纤维去除形成切缝。Maojun Li^[12]等通过激光切割碳纤维复合材料,发现碳纤维复合材料层合板的破坏形式主要取决于纤维的取向。李雅娣^[13]等人利用电镜从微观分析得到激光对碳纤维复合材料结构造成破坏的模式,并通过热重分析得到碳纤维复合材料的热分解规律。M. FuJita^[14]等人研究了超短脉冲激

光加工 CFRP,发现超短脉冲激光在加工 CFRP 时无热损伤,但其平均功率有限,加工效率太低,不适于批量加工。张家雷^[15]等人分别在真空和大气两种环境条件下,进行了激光辐照碳纤维复合材料的对比试验,发现不同环境条件下激光对碳纤维复合材料的烧蚀效应规律。M. S. Wahab^[16]等通过试验研究提到可通过减少激光对材料的作用时间,来降低激光切割对材料的热影响。

由于纤维热导率和气化温度都高出基体很多,当采用激光切割 CFRP 时,在纤维被去除形成切缝前,基体会因吸收较多的激光能量被烧蚀、热解气化形成热影响区(Heat Affect Zone, HAZ),影响切割质量。纤维轴向热导率大于径向热导率且远大于树脂基体热导率,在研究激光切割对材料造成的热影响时,纤维铺设方向是一个不可忽略的影响因素,因此本文对常用的纤维铺设角度即 0°、45°和 90°进行激光切割模拟和试验研究,并得到相关结论为提高加工质量提供参考。

2 CFRP 参数及模型建立

模拟仿真和激光切割试验所用材料性能参数一致,选用基体为 9A-16 环氧树脂基体,增强体碳纤维为东丽 T300,纤维束在整个模型中的体积含量为 68 %,单丝直径 0.7 μm 。表 1 为碳纤维复合材料性能参数。

表 1 碳纤维复合材料性能参数
Tab. 1 Performance parameters of carbon fiber reinforced plastics

参数	碳纤维	环氧树脂
密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	1760	1250
比热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	710	1200
热导率/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	50(轴向)5(径向)	0.2
热膨胀系数/($1 \times 10^{-6} ^\circ\text{C}^{-1}$)	-0.41	57

由于 CFRP 为纤维增强体和树脂基体共同构成的复合结构,本文重在研究激光扫描角度对材料的热影响,材料厚度方向为次要因素,为使模拟接近激光切割 CFRP 的实际工况,选择具有八节点、三维热传导能力适用于瞬态热分析的 SOLID70 单元,构建碳纤维复合材料模型尺寸为 5 mm $\times$ 5 mm $\times$ 0.15 mm。假设纤维束直径为 0.14 mm、两纤维束间距为 0.01 mm 并由树脂填充粘结,根据纤维体积含量 68 %,经计算得到纤维束的数目约为 33 根,采

用 GLUE 命实现树脂与纤维时间的能量传递作用, 以此建立碳纤维复合材料有限元模型, 并对激光直接作用区域进行网格密化, 得到 CFRP 有限元模型如图 1, 单元总个数为 404561, 其中图 (b) 为 CFRP 有限元模型局部放大图, 编号为 1 和 2 的区域分别代表的是纤维束和树脂基体。

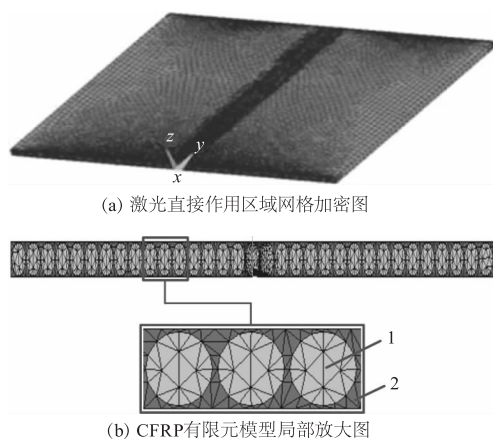


图 1 CFRP 有限元模型

Fig. 1 Finite element model of CFRP

3 热源加载及边界条件

激光加工是经聚焦的高功率密度激光束照射在工件表面使材料热降解、熔化或气化, 借助光束同轴辅助气体, 吹除熔融物, 最终实现材料的去除^[17]。高斯热源能够表征激光切割材料的热流分布特征, 能量以热传导形式在材料内部传递, 三维直角坐标系下材料内部任一点的热传导方程为^[18]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式中, T 是材料内某一点 (x, y, z) 处在某一时刻 t 的温度, 求解该方程, 可以得知温度场的分布情况。

第一类边界条件定义了材料的初始温度值, 本文研究拟在室温下进行, 假设室温为定值, 设置材料初始温度为 20°C ; 第二类边界条件定义了材料上加载的热流密度值, 本文通过加载高斯热源实现激光对材料产生热影响作用, 高斯热源模型如式 (2) 所示; 第三类边界条件定义了材料与周围介质的对流换热系数及周围介质温度, 本研究在高斯热源直接作用区域采用表面效应单元 SURF152 加载随温度变化的对流换热, 设置周围介质温度为 20°C 。

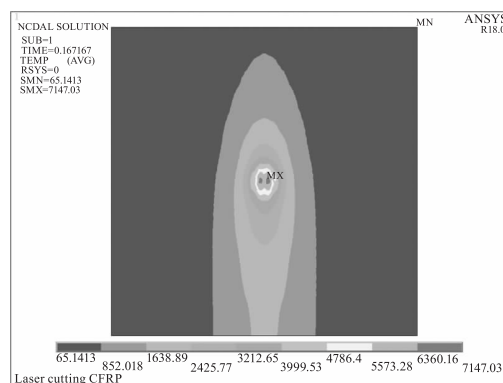
$$q(r) = q_{\max} \exp \left(- \frac{2[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]}{r_0^2} \right) \quad (2)$$

式中, $q(r)$ 为距光斑中心 r 处的热流密度; $q_{\max}$ 为光

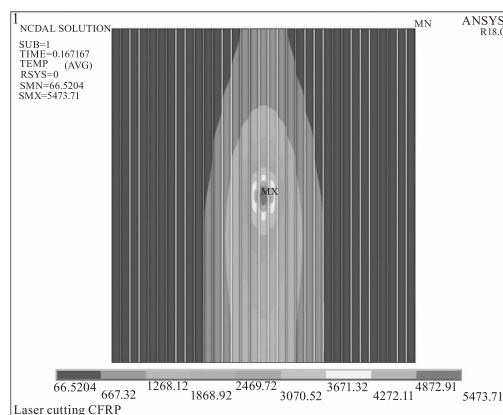
斑中心最大热流密度; r_0 为激光光斑半径。

4 模拟仿真及分析

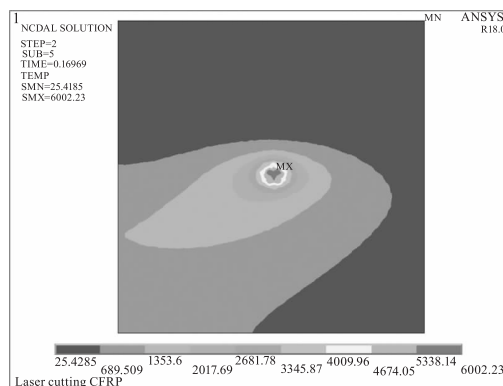
为研究激光扫描角度对 CFRP 的热影响作用和激光能量传播规律, 在激光功率为 300 W , 扫描速度为 15 mm/s , 光斑半径为 0.3 mm 的条件下, 分别以常用的纤维铺设角度即 0° 、 45° 和 90° 作为激光扫描角度。模拟过程中, 激光切割对材料的作用结果直接表现形式为温度场, 因此可通过观测表层基体温度场和内部纤维温度场的分布情况, 表征激光扫描角度对材料的热影响作用, 并对激光能量的传递规律进行研究分析。如图 2 不同扫描角度表层基体和内部纤维同一时刻温度场。



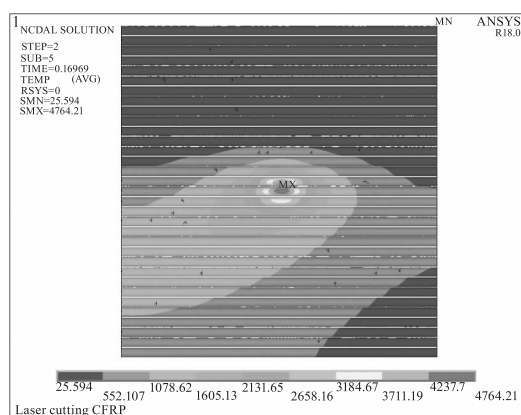
(a1) 表层基体



(a2) 内部纤维
(a) 0° 扫描

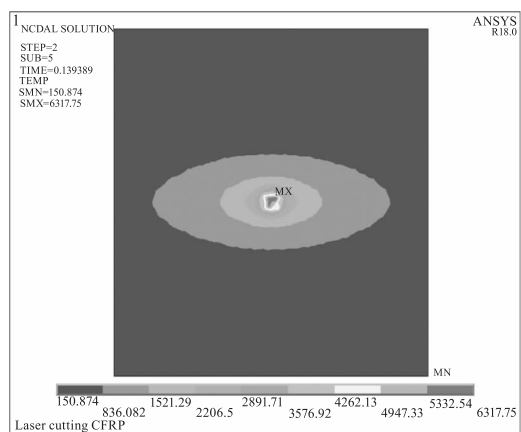


(b1) 表层基体

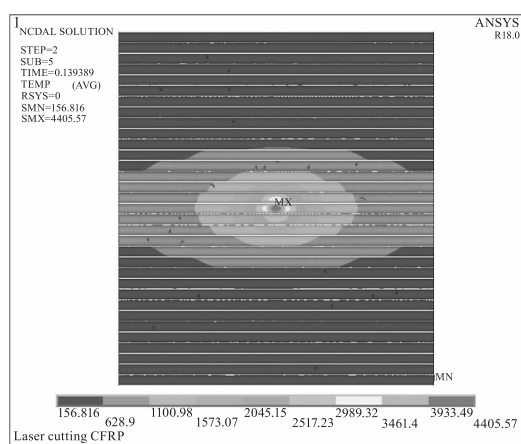


(b2) 内部纤维

(b) 45°扫描



(c1) 表层基体



(c2) 内部纤维

(c) 90°扫描

图 2 不同扫描角度表层基体和内部纤维同一时刻温度场

Fig. 2 Temperature field of surface matrix and inner fiber at the same time with different scanning angles

由图 2 可以看出,三种扫描角度下,内部纤维温度场范围都要比表层树脂基体的广,这一点验证了纤维热导率大于树脂基体热导率的实际情况。随扫描角度的增大,温度场范围逐渐变广,以最外围等温线为界,测量得到扫描角度为 0°时表层基体和内部

纤维温度场宽度分别是 1661.95 μm 、1864 μm ;将 45°扫描时的温度场宽度,定义为左上角和右下角对角线的平行线,与最外围等温线的两个交点之间的最大距离,以此测得表层基体和内部纤维温度场宽度分别 3051.26 μm 和 3206.7 μm ;扫描角度为 90°时,测得表层基体温度场宽度为 3651.74 μm 。上述各工况下,内部纤维温度场始终大于表层树脂基体,说明在实际的激光切割加工过程中,切缝两侧基体存在被烧蚀气化回缩的可能性。温度场扩散方向即材料吸收激光能量的传递方向,其主要沿着纤维轴向进行,说明碳纤维复合材料吸收的激光能传递方向由纤维轴向主导。

由于基体的热导率比碳纤维低很多,会阻碍激光能量的传递,直接表现形式为材料的温度升高,因此为了解扫描角度对激光能量传递的影响作用,取同一时刻不同扫描角度的表层基体和内部纤维最高温度进行观测,如图 3 为同一时刻表层基体和内部纤维最高温度随扫描角度的变化。

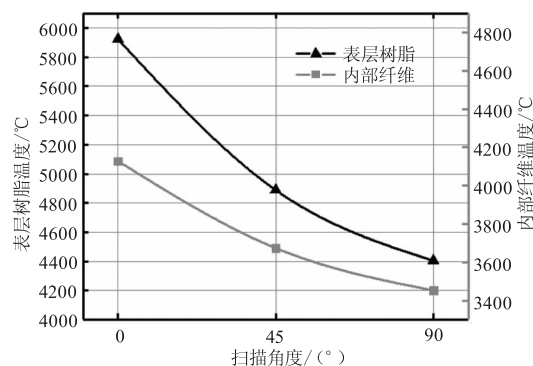


图 3 不同扫描角度时基体和纤维最高温度变化

Fig. 3 Maximum temperature changes of matrix and fiber at different scanning angles

由图 3 可知,随激光扫描角度的增大,表层树脂基体最高温依次为 5922.73 $^{\circ}\text{C}$ 、4888.83 $^{\circ}\text{C}$ 、4405.56 $^{\circ}\text{C}$,内部纤维最高温度依次为 4128.36 $^{\circ}\text{C}$ 、3674.66 $^{\circ}\text{C}$ 、3453.47 $^{\circ}\text{C}$,两者最高温度随激光扫描角度的增大逐渐降低,这主要是因为纤维轴向热导率较大,当激光作用于 CFRP 时,激光能量传递方向易受由纤维轴向主导,树脂的热导率较小,会阻碍相邻纤维之间的能量传递,在树脂和纤维综合作用下,纤维轴向上能量累积较高,由于热积累效应的存在,当沿纤维方向扫描时有温度最高。

为便于分析和表述激光能量在内部纤维上的传递情况,首先对 CFRP 中纤维束和树脂的热导性高

低进行简述。基于假设:

(1) 在水平面上的纤维增强体为正交各向异性、树脂基体为各项同性;

(2) 激光对 CFRP 的起始作用点和终点都在纤维增强体上;

(3) 水平面内纤维增强体的热传导方向仅有 X 方向、 Y 方向;

(4) 激光作用起始点为 O 点, 终点为 N 点。

构建如图 4 CFRP 中纤维束和树脂热导性高低分布示意图。

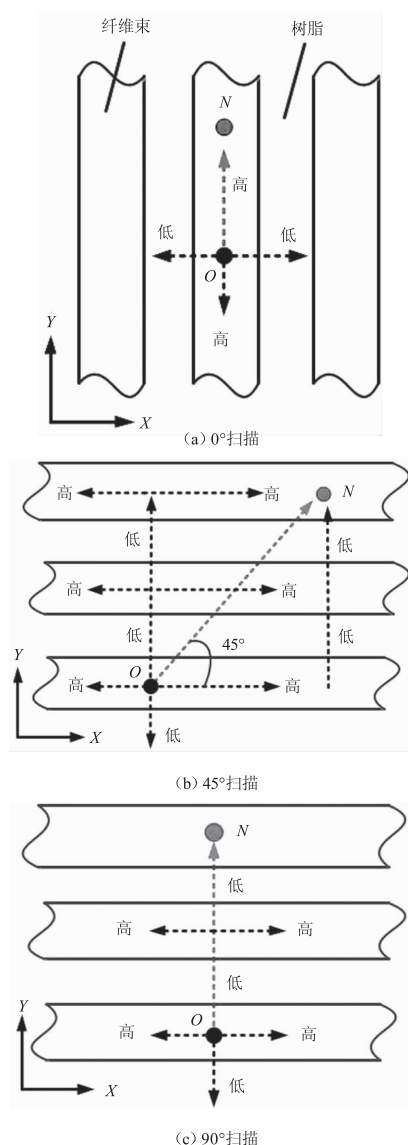


图 4 CFRP 中纤维束和树脂热导性高低分布示意图

Fig. 4 Distribution of thermal conductivity of fiber bundle and resin in CFRP

由图 4 可知, 三种扫描角度相比之下, 0° 扫描时, 激光能量向两侧传递能力较差, 耗损量较低, 激光能量主要由纤维轴向传递, 在终点 N 处热积累量

较高; 扫描角度为 45° 时, 由起始点 O 到终点 N 经过多根纤维束和树脂基体层, 且每根纤维束和每层树脂基体都会进行激光能量传递, 但由于树脂基体热导率较低, 对激光能量的传递有阻碍作用, 因此 45° 扫描时, 由始点到终点路径上热积累量较高; 90° 扫描时, 由起始点 O 到终点 N , 经多根纤维束, 但和 45° 扫描相比, 其向周围传递激光能量较少, 和 0° 扫描相比, 其向周围传递激光能量较多。因此, 当激光沿纤维方向扫描时, 在起始点 O 到终点 N 的扫描路径上有较低的热积累; 当与纤维方向呈 45° 扫描时, 在扫描路径上有较高的热积累, 而垂直于纤维方向扫描时, 在扫描路径上的热积累量介于 0° 扫描和 45° 扫描角度之间。

5 激光切割试验验证

5.1 激光切割设备及检测仪器

激光切割试验采用 YN-CFB1320-2000 型光纤激光切割机, 通过新天 JVC300T 型全自动视频测量仪获取激光切割试件热影响区整体区域, 并采用 VHX-7000 型超景深三维显微镜观测切割试件细节形貌。

5.2 试验结果

为验证模拟分析结果, 采用和模拟一致的激光参量, 进行扫描角度分别为 0° 、 45° 和 90° 的激光切割试验, 并采用 5.1 节所述检测设备, 对切割后得到的试件进行观测, 图 5 所示为激光切割试验结果。

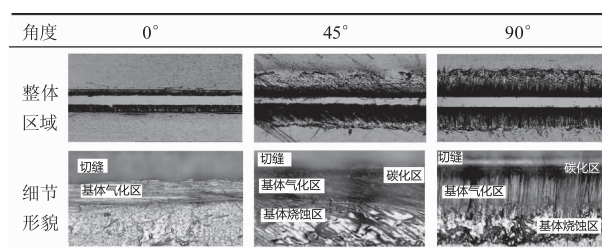


图 5 激光切割试验结果

Fig. 5 Experimental results of laser cutting

对比图 5 中三种扫描角度, 可以发现当扫描角度为 45° 和 90° 时, 基体热解气化导致裸露出的碳纤维呈深黑色, 且扫描角度为 45° 时, 深黑色区域更明显。进一步分析可知, 当激光沿纤维方向扫描时, 靠近切缝区域的树脂被热解气化, 对沿纤维轴向的热传导没有阻碍作用, 不会造成热积累, 而扫描角度为 45° 和 90° 时, 由于基体气化区域有限, 未被热解气化的基体对激光能量的传递有阻碍作用, 造成热积

累,但该热量达不到纤维的气化温度,仅能导致纤维高温碳化。激光能量的传递方向虽然由纤维轴向主导,但同时也在纤维径向上也会缓慢地传递到粘结纤维的树脂基体,且扫描角度为 45° 比扫描角度为 90° 向树脂传递的能量多,从而导致扫描角度为 45° 时热积累更多,造成纤维碳化更明显。

本文将切缝两侧热影响区宽度之和拟定为 HAZ 整体范围,通过超景深三维显微镜观测激光切割后的试件,发现当扫描角度分别为 0° 、 45° 和 90° 时测得 HAZ 整体范围分别为 $1796\ \mu\text{m}$ 、 $3108.2\ \mu\text{m}$ 和 $3705.3\ \mu\text{m}$ 。因为 HAZ 主要是针对树脂基体而言,因此以模拟所测基体温度场范围与激光切割试验所测 HAZ 整体范围拟合,得到图 6 所示热影响范围随扫描角度的变化趋势。

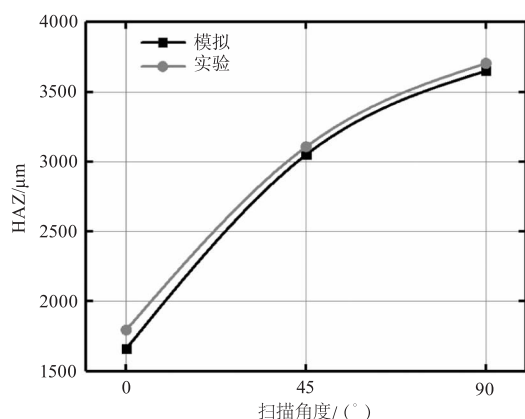


图 6 热影响范围随扫描角度的变化趋势

Fig. 6 Variation Trend of heat affected area with scanning angle

由图 6 可知,模拟分析和激光切割试验对材料造成的热影响范围,随扫描角度的增大,逐渐增大,试验测得 HAZ 范围整体上大于模拟测得 HAZ 范围,最大差值为 $134.05\ \mu\text{m}$,误差为 7.46% ,该误差可能来源于测量误差和试验机床误差等,但其总体变化趋势具有一致性,一定程度上可说明模拟分析的正确性。

6 结 论

以纤维典型铺设角度即 0° 、 45° 和 90° 为基础,研究分析了激光扫描角度对材料的热影响及能量传递过程中热积累影响,并进行了激光切割试验验证。结果表明,随激光扫描角度的增大,激光切割对材料造成的 HAZ 范围逐渐增大,有限元模拟测得 HAZ 范围与激光切割试验所测 HAZ 范围存在一定误差,最大误差为 7.46% ;激光能量的传递方向主要由纤维轴向主导,当扫描角度为 45° 时,激光扫描路径上

热积累较多,切缝两侧纤维碳化较严重,模拟仿真分析与激光切割试验观测结果特征吻合,验证了模拟分析的有效性。

参考文献:

- [1] Lin Gang. Carbon fiber industry release opportunity—2019 global carbon fiber composite market report [J]. Textile Science Research, 2020, (5): 42–63. (in Chinese)
林刚. 碳纤维产业释放良机——2019 全球碳纤维复合材料市场报告 [J]. 纺织科学研究, 2020, (5): 42–63.
- [2] El-Hofy M H, El-Hofy H. Laser beam machining of carbon fiber reinforced composites: a review [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018.
- [3] 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): 238243.
- [4] Hu Shengcheng, Han Ping. Water jet cutting technology and its application [J]. Metal Processing (Thermal Processing), 2014, (6): 60–62. (in Chinese)
胡胜成, 韩萍. 水射流切割技术及其应用 [J]. 金属加工 (热加工), 2014, (6): 60–62.
- [5] Herzog D, Schmidt-Lehr M, Oberlander M, et al. Laser cutting of carbon fibre reinforced plastics of high thickness [J]. Materials & Design, 2016, 92: 742–749.
- [6] Goeke A, Emmelmann C. Influence of laser cutting parameters on CFRP part quality [J]. Physics Procedia, 2010, 5 (part-PB): 253–258.
- [7] 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 (3): 196.
- [8] Zhang Xuanjun, Shen Jiajun, Wang Jianchao. Study on picosecond laser processing of carbon fiber composites [J]. Applied Laser, 2020, 40(1): 86–90. (in Chinese)
张瑄珺, 沈佳骏, 王健超. 碳纤维复合材料皮秒激光加工工艺研究 [J]. 应用激光, 2020, 40(1): 86–90.
- [9] Hua Yinqun, Xiao Tao, Xue Qing, et al. Experimental study on laser cutting carbon fiber composites [J]. Laser Technology, 2013, (5). (in Chinese)
花银群, 肖淘, 薛青, 等. 激光切割碳纤维复合材料的试验研究 [J]. 激光技术, 2013, (5).
- [10] 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_2 laser

- [J]. Applied Physics A, 2015, 118(4): 1509 – 1516.
- [11] Chen Minsun, Jiang Houman. Influence of tangential air flow on laser ablation of carbon fiber composites[J]. Optical Precision Engineering, 2011, (2): 482 – 486. (in Chinese)
陈敏孙, 江厚满. 切向空气气流对激光烧蚀碳纤维复合材料过程的影响[J]. 光学精密工程, 2011, (2): 482 – 486.
- [12] Li Maojun, Gan Guocui, Zhang Yi, et al. Thermal damage of CFRP laminate in fiber laser cutting process and its impact on the mechanical behavior and strain distribution [J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2019.
- [13] Li Yadi, Wu Ping, Ma Ximei, et al. Experimental study on continuous laser ablation of carbon fiber/epoxy composite laminates[J]. Fiber Composites, 2010, 27(2): 21 – 24. (in Chinese)
李雅娣, 吴平, 马喜梅, 等. 碳纤维/环氧树脂复合材料层板连续激光烧蚀试验研究[J]. 纤维复合材料, 2010, 27(2): 21 – 24.
- [14] Fujita M, Somekawa T, Miyana N. Micromachining of CFRP with ultra-short laser pulses[J]. Physics Procedia, 2013, 41(Complete): 636 – 639.
- [15] Zhang Jialei, Wang Weiping, Li Zhaoning. Comparison of ablation experiments of composite materials by laser in vacuum and atmosphere [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(11): 1334 – 1339. (in Chinese)
张家雷, 王伟平, 李昭宁. 真空及大气下激光对复合材料的烧蚀试验对比[J]. 激光与红外, 2016, 46(11): 1334 – 1339.
- [16] Wahab M S, Rahim E A, Rahman N A, et al. Laser cutting characteristic on the laminated Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) composite of aerospace structure panel [J]. Advanced Materials Research, 2012, 576: 503 – 506.
- [17] Sun Feng, Song Yuanyuan, Zhao Qinglong, et al. Study on the influence of off-axis on gas dynamics in laser cutting [J]. China Laser, 2020, 47(4): 82 – 91. (in Chinese)
孙凤, 宋园园, 赵庆龙, 等. 激光切割中离轴量影响气体动力学性能的研究[J]. 中国激光, 2020, 47(4): 82 – 91.
- [18] Jin Liang. Study and numerical simulation of laser welding process for Ta/Mo dissimilar metals [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013. (in Chinese)
金亮. Ta/Mo 异种金属激光焊工艺研究及数值模拟 [D]. 广州: 华南理工大学, 2013.