文章编号:1673-9469(2024)03-0108-05

DOI:10. 3969/j. issn. 1673-9469. 2024. 03. 015

# 飞秒激光切割 CFRP 质量实验及模拟研究

张王艺,张寰臻\*,李 超,张 都

(河北工程大学 数理科学与工程学院,河北 邯郸 056038)

摘要:为了探究飞秒激光切割碳纤维增强树脂基复合材料(CFRP)的主要影响因素,采用控制变量法探究了不同能量密度和光斑重叠率对热影响区宽度、表面粗糙度及切缝锥度的影响规律,基于双温方程,采用时间差分法模拟了飞秒激光与碳纤维相互作用时电子-晶格的温度场演变过程。 实验结果显示:在脉冲频率不变条件下,提高激光功率可使切缝热影响区宽度增加,粗糙度及切缝锥度加大,切割质量下降;在固定激光功率并单一提升脉冲频率条件下,切割质量随脉冲频率 增加而降低并趋于饱和。模拟结果显示:能量密度越大,电子和晶格的平衡温度越高,达到热平 衡所用的时间越长,热效应越明显。分析指出光斑重叠率和脉冲能量密度是影响加工质量的两 个重要因素,激光功率及脉冲频率的改变可改变脉冲能量密度和光斑重叠率,间接影响加工 质量。

关键词: 飞秒激光;CFRP;双温模拟;切割 中图分类号:TN249

文献标识码:A

# Experimental and Simulation Study on the Quality of Femtosecond Laser Cutting CFRP

ZHANG Wangyi, ZHANG Huanzhen\*, LI Chao, ZHANG Du

(School of Mathematical Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China)

Abstract: In order to explore the main influencing factors of femtosecond laser cutting of carbon fiber reinforced resin matrix composites (CFRP), the influence of different energy densities and spot overlap rates on the width of the heat affected zone, surface roughness, and slit taper was investigated using the controlled variable method. Based on the dual temperature equation, the temperature field evolution process of the electron lattice during the interaction between femtosecond laser and carbon fiber was simulated using the time difference method. The experimental results show that under the condition of constant pulse frequency, increasing laser power can increase the width of the heat affected zone of the cutting seam, increase the roughness and taper of the cutting seam, and decrease the cutting quality; Under the condition of fixed laser power and a single increase in pulse frequency, the cutting quality decreases but tends to saturate as the pulse frequency increases. The simulation results show that the higher the energy density, the higher the equilibrium temperature of electrons and lattice, the longer it takes to reach thermal equilibrium, and the more obvious the thermal effect. The analysis points out that the overlap rate of light spots and the pulse energy density are two important factors affecting the processing quality. Variations in laser power and pulse frequency can change the pulse energy density and overlap rate of light spots, indirectly affecting the processing quality.

Key words: femtosecond laser; CFRP; two-temperature simulation; cutting

收稿日期:2023-06-02

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51675013);邯郸市科学技术研究与发展计划项目(21422111223);河北工程大学创新基金项目 (SJ210100412)

作者简介:张王艺(1999-),女,河北邢台人,硕士研究生,从事激光先进制造方面的研究。

<sup>\*</sup>通信作者:张寰臻(1982-),女,河北邯郸人,博士,副教授,从事激光先进制造方面的研究。

碳纤维复合材料 (Carbon Fiber Reinforced Plastic,CFRP)具有密度低、比强度高、比模量高等 优异的物理性能,广泛应用在航空航天、汽车、医 疗、军事等行业<sup>[1]</sup>。这些领域对 CFRP 的加工质 量要求高,但由于 CFRP 各向异性,传统机械加 工、电火花加工、水射流切割难以满足加工精度 要求[2]。近几年来,超快激光以其高精度、冷加 工和不受材料限制等优点成为材料加工研究热 点。针对树脂基体和碳纤维热学、光学性质差异 大<sup>[3]</sup>,激光加工产生热影响区的问题,国内外研 究学者主要从激光参量、机械参量等方面展开研 究。在激光参量调控方面:张开虎等[4]研究发现 皮秒、飞秒激光能实现高质量切割;张瑄珺等<sup>[5]</sup> 使用不同波长激光对 CFRP 的加工精度影响展开 探究,结果显示波长越短,加工效果越好。在激 光加工机械参量调控方面: Zhong 等<sup>[6]</sup>发现在低 重复频率下,增加脉冲能量对材料去除效率影响 不大,高重复频率下即使减小脉冲能量,热损伤 仍然很大,并且去除效率低:Finger 等<sup>[7]</sup>发现增加 加工速度能避免热累积和脉冲间相互作用、改善 加工质量。实验研究之外,国内外研究学者对激 光加工 CFRP 进行了模拟研究,例如底才翔等<sup>[8]</sup> 分析了激光与 CFRP 相互作用时热量在纤维和树 脂中的传输规律,以及激光参量对切割质量的影 响规律:钟勉等<sup>[9]</sup>研究发现激光烧蚀后表面温度 场、应力场与激光能量密度、光斑直径有密切 联系。

目前的研究显示,采用短脉宽、短波长、低重 频、高速扫描方式可获得更好的加工效果。为了 进一步优化飞秒激光对 CFRP 的切割质量,本文从 实验及理论模拟角度出发,采用 515 nm 绿光飞秒 激光切割 CFRP,并研究切缝热影响区宽度、切缝 锥度及切缝表面粗糙度随飞秒脉冲能量、脉冲频 率的变化规律。进一步采用双温模型模拟飞秒激 光作用于 CFRP 时材料表面电子-晶格系统温度场 的演变过程。最后结合实验结果与模拟结果,提 出使用略高于 CFRP 阈值的激光能量在低光斑重 叠率下进行切割的工艺方案,为优化飞秒激光切 割 CFRP 质量提供新思路。

# 1 实验条件与结果

#### 1.1 实验条件

选用 0.4 mm 厚环氧树脂基体碳纤维增强复合材料板,采用 TruMicro 5000 绿光飞秒激光器

(功率1.5~75 W、脉冲频率0~600 kHz、扫描速度0~5000 mm/s、光斑直径50 μm)对材料板进行多遍扫描直至切透。采用控制变量法,探究不同激光功率、脉冲频率下热影响区宽度、表面粗糙度及切缝锥度。实验结束后采用金相显微测量切缝两侧热影响区宽度,三维表面结构仪测量粗糙度,扫描电镜观察切缝截面、切面形貌。

#### 1.2 实验结果

在脉冲频率 600 kHz、扫描速度 2 500 mm/s 恒 定不变条件下,选取激光功率分别为 20、30、40、 50、60 W,从而获得能量密度分别为 17.0、25.5、 33.9、42.4、50.9 J/cm<sup>2</sup>。图 1 所示为切缝热影响 区宽度、切缝锥度及切缝粗糙度随激光功率及 脉冲能量密度变化规律。结果显示,切缝热影 响区宽度、表面粗糙度、切缝锥度均随激光功 率、脉冲能量密度增加而增大,即激光能量密度 越大,加工质量越差。当激光功率为 60 W、脉 冲能量密度为 50.9 J/cm<sup>2</sup> 时,热影响区宽度、表 面粗糙度、切缝锥度分别可达 20.82 μm、4.74°、 4.71 μm。





选取激光功率为 20 W、扫描速度 2 500 mm/s 恒定不变条件下,通过改变脉冲频率分别为 50、 100、200、300、600 kHz,获得光斑重叠率分别为 0%、50%、75%、83.3%、91.7%,切割质量随脉冲频 率及光斑重叠率的变化曲线如图 2 所示。随着脉 冲频率增加、光斑重叠率增大,热影响区宽度从 2.21 µm 增加到 6.77 µm,表面粗糙度从 1.63 µm 增加到 2.4 µm,切缝锥度从 1.54°增加到 2.01°。 当脉冲频率大于 300 kHz 时热影响区宽度、切割表 面粗糙度趋于饱和。





## 2 双温模拟及结果

飞秒激光绿光波长短,在材料加工时光化学 反应占主要优势。此外飞秒激光脉宽小于电子-声 子耦合弛豫时间(1~10 ps)<sup>[10]</sup>。由此飞秒激光作 用材料过程均使用双温模型对脉冲作用过程中电 子、晶格温度变化独立描述<sup>[11]</sup>。

双温方程如公式(1)(2)所示,分别表示超快 激光作用时电子、晶格热传导方程:

$$C_{e} \frac{\partial}{\partial t} T_{e} = \frac{\partial}{\partial z} k_{e} \frac{\partial}{\partial z} T_{e} - G(T_{e} - T_{1}) + \Sigma(z, t) \quad (1)$$
$$C_{1} \frac{\partial}{\partial t} T_{1} = G(T_{e} - T_{1}) \quad (2)$$

式中,
$$T_e$$
、 $T_1$ 分别为电子系统、晶格系统的温度,K;  
 $C_e$ 、 $C_1$ 分别为电子、晶格系统比热容,J/(m<sup>3</sup> · K);  
 $k_e$  为电子导热率,J/(m · K · s); G 为电子-晶格耦  
合系数,W/(m<sup>3</sup> · K);  $\sum (z,t)$ 为能量源项, z 为  
激光进入材料深度,m。

受电子系统温度影响,电子热导率 $k_e$ 及比热容  $C_e$  遵从 $k_e = k_{0,e}T_e/T_1 \ C_e(T_e) = C'_eT_e$ 关系。其中  $k_{0,e}$  为与温度相关的电子导热率,J/(m·K·s),  $C'_e$ 为与电子密度相关的电子比热容,J/(m<sup>3</sup>·K)<sup>[12]</sup>。

采用时间有限差分法对材料表面(即 z = 0)电子、晶格系统温度进行数值模拟并进行约化处理, 对公式(1)(2)进行差分得到方程(3)(4):

$$T_{0,j+1}^{e} = \left(\frac{T_{0,j}^{e}}{1+a} + \frac{aT_{0,j+1}^{l}}{(1+a)(1+g)} + \frac{\Delta t \sum (z,t)}{C(1+a)}\right) / (1 - \frac{ag}{(1+a)(1+g)})$$
(3)

$$T_{0,j+1}^{e} = \left(\frac{T_{0,j}^{e}}{1+a} + \frac{gT_{0,j+1}^{l}}{(1+a)(1+g)} + \frac{g\Delta t \sum_{i} (z,t)}{ag}\right)$$

$$\frac{\frac{g - r}{2} \frac{2}{(1+a)(1+g)}}{(1+a)(1+g)}) / (1 - \frac{ag}{(1+a)(1+g)})$$
(4)

式中,  $T_{0,j+1}^{e}$  为电子系统温度, K;  $T_{0,j+1}^{l}$  为晶格系统 温度, K;  $a = G\Delta t / C_{e}$ ,  $g = G\Delta t / C_{1}$ ,  $\Delta t$  为差分时间间 隔, s<sub>o</sub>

半导体材料由于缺少自由电子,在高光强下 通过电离产生自由电子。电离半导体视为高密 度等离子体且已具有金属性质。但由于材料表 面光学性质已发生根本改变,需重新计算材料表 面电子密度演化,并依此确定材料光学及热学参 量。主要包含:利用电子密度连续性方程计算获 得不同时刻下的电子密度<sup>[13]</sup>;利用 Drude 模型计 算复折射率、反射率、吸收系数、光学穿透长度等 光学参数<sup>[14]</sup>;计算金属化半导体的电子、晶格比 热容<sup>[15]</sup>。

使用表1中参量对飞秒激光作用碳纤维材料进行双温模拟。在环境温度273 K及不同能量密度条件下飞秒激光作用碳纤维电子、晶格温度演变结果如图3 所示。

表1 双温模拟基本常量

#### Tab. 1 Basic constant of the Two-Temperature simulations

常量	数值
电子质量 m <sub>e</sub> /kg	9. 11×10 <sup>-31</sup>
基本电量 e/c	$1.60 \times 10^{-19}$
晶格密度 n <sub>a</sub> /m <sup>-3</sup>	9. 28×10 <sup>28</sup>
普朗克常量 h/(J・s)	6. 63×10 <sup>-34</sup>
泊尔兹曼常数 K <sub>B</sub> /(J・K <sup>-1</sup> )	$1.38 \times 10^{-23}$
C-C 键键能 Eg/ev	3. 45 <sup>[5]</sup>
电子晶格耦合系数 <i>G</i> /(W・K <sup>-1</sup> ・m <sup>-3</sup> )	$3.80 \times 10^{6}$



图 3 不同能量密度下碳纤维电子和晶格温度场演变 Fig. 3 The electron and lattice temperatures vary with time

图 3 显示,脉冲能量密度越大热平衡所需时间越长,电子-晶格热平衡温度越高且晶格升温加快,达到材料气化所需时间越短。采用 0.6~1.7 J/cm<sup>2</sup>能量密度作用碳纤维材料时,电子-晶

格在 3~7 ps 范围建立热平衡, 热平衡温度在 3 346~8 728 K 范围, 远小于热传导开始的特征 时间 100 ps<sup>[12]</sup>。

图 4 所示为双温模拟的电子-晶格系统达到的 热平衡温度随脉冲能量密度的变化。脉冲能量密 度越大,电子-晶格热平衡温度越高。在脉冲能量 密度 0.7 J/cm<sup>2</sup>时,平衡温度达到 4 012 K,略高于 碳纤维的汽化温度 3 900 K。由此可知,碳纤维蚀 除阈值在 0.7 J/cm<sup>2</sup> 附近。



图 4 碳纤维电子和晶格平衡温度随能量密度的变化曲线 Fig. 4 Variation curve of electron and lattice equilibrium temperature of carbon fiber with energy density

# 3 分析讨论

脉冲能量密度 F 是指单脉冲照射到材料表面 单位面积的能量,由功率P、脉冲频率f、光斑半径 D决定,如公式(5)。从能量平衡、吸收转化过程 考虑,材料吸收的激光能量转化为材料升温、相 变、气化所需能量,从而实现蚀除[15]。因此,脉冲 能量密度直接影响材料是否发生气化、材料去除 深度以及脉冲刻蚀率。模拟结果如图3显示,能量 密度是影响电子-晶格升温速度、平衡温度、达到平 衡温度所需时间的关键因素,能量密度越大,电子-晶格升温越快、平衡温度越快、达到平衡温度所需 时间越长。图5为脉冲能量密度随脉冲功率、频率 的变化规律,在脉冲频率不变条件下,脉冲能量密 度随激光功率线性增加;当激光功率不变时,脉冲 能量密度与重复频率成反比例关系。图1、图2显 示加工质量随脉冲功率、脉冲能量密度增加而降 低,其原因主要在于脉冲能量密度越大电子晶格 热平衡所需时间越长,激光作用 CFRP 材料的热效 应越显著。纤维向基体的传热加速基体气化蚀 除[16],从而出现热影响区增大、切缝表面粗糙度增 加、加工质量下降的结果。



图 5 能量密度随功率、重复频率的 3D 变化图 Fig. 5 3D variation diagram of energy density with power and repetition frequency





图 6 中绿色虚线为双温方程模拟所得的碳纤 维电子-晶格刻蚀阈值,在重复频率为 50 kHz 时, 达到刻蚀阈值所需的功率为 0.7 W,在重复频率为 600 kHz 时,达到刻蚀阈值所需的激光功率为 8.3 W, 脉冲重复频率越高,达到刻蚀阈值所需的激光功 率越高。当激光功率为 20 W 时,增加脉冲频率反 而使脉冲能量密度降低,但光斑重叠率升高,如公 式(6)所示。

$$overlap = 1 - v/Df$$
(6)

光斑重叠率作为相邻光斑重叠比率,取决于 振镜扫描速度 v、脉冲频率f,在刻蚀率及热累积方 面具有重要调节作用<sup>[17]</sup>:一方面,光斑重叠率会影 响前一脉冲诱导的等离子体与次脉冲相互作 用<sup>[10]</sup>,实际到达材料能量减小;另一方面,光斑重 叠率越高,同一位置连续接收的脉冲数越多,会造 成叠加升温,形成热累积。因此,降低光斑重叠率 是提升加工精度的有效方法。正如图2所示,当脉 冲频率降低时,加工质量升高。当脉冲频率为 50 kHz时,光斑重叠率为50%,CFRP的热影响区 宽度仅为2μm。实验中调节脉冲频率在50~ 600 kHz时,脉冲能量密度对应在20.371~1.697 J/ cm<sup>2</sup>,光斑重叠率为50%~91.7%。虽然脉冲频率 增加使得脉冲能量密度降低,加工质量应有提高, 但光斑重叠率增加产生的热累积效应会使热影响 区增大,粗糙度增加,加工质量下降。综合考虑脉 冲频率增加造成脉冲能量密度下降、光斑重叠率 升高,脉冲能量密度下降使加工质量提升,光斑重 叠率升高使加工质量下降,最终呈现加工的热影 响区宽度、表面粗糙度和切缝锥度趋于饱和的 结果。

### 4 结论

1)在脉冲频率不变的条件下,提升激光功率时 电子晶格达到热平衡所需时间越长,热影响区宽度、 表面粗糙度、锥度随之增加,造成加工质量下降。

2)在激光功率不变的条件下,脉冲频率增加 使脉冲能量密度下降、光斑重叠率增加,光斑重叠 率越高、热累积越明显,造成加工质量下降,但脉 冲能量密度的同步降低可缓解加工质量恶化,最 终使得切缝热影响区、粗糙度及锥度随脉冲频率 缓慢增加,并趋于饱和。

3)针对飞秒激光加工 CFRP 仍存在热累积、产 生热影响区问题,提出采用略高于碳纤维切割阈 值的脉冲能量密度、低光斑重叠率的策略对 CFRP 进行加工,可使热影响区减小、加工质量提高。

#### 参考文献:

- [1] 钟明建,胡炜杰,廖晓恬,等.碳纤维复合材料部件 加工技术现状及发展趋势[J].复合材料科学与工程, 2022(05):110-119.
- [2] 徐纪豪,白一凡,孙圣元,等.碳纤维复合材料激光 切割技术研究进展[J].电加工与模具,2022(S1):
   4-13.
- [3] 薛博,徐洁洁,张寰臻,等.碳纤维增强树脂基复合 材料飞秒激光精密切割工艺研究[J].电加工与模具, 2022(05): 35-40.
- [4] 张开虎,于洋,张夏明,等.纤维增强树脂基复合材
  料激光切割热影响探析[J].导航与控制,2019,18
  (05):60-66.

- [5]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(01):86-90.
- [6] ZHONG Z, HUANG G, FEND W J, et al. Efficiency and quality of infrared (IR) femtosecond laser processing of carbon-fibre reinforced polymer (CFRP) composites[J]. Lasers in Engineering (Old City Publishing), 2023, 54: 169-197.
- [7] FINGER J, WEINAND M, WORTMANN D. Ablation and cutting of carbon-fiber reinforced plastics using picosecond pulsed laser radiation with high ave-rage power [J]. Journal of Laser Applications, 2013, 25 (4): 042007.
- [8] 底才翔, 孙艳军, 王 菲, 等. 激光切割碳纤维复合材料的温度场仿真[J]. 激光技术, 2020, 44(05): 628-632.
- [9] 钟 勉,杨 涛,谢威夷,等.碳纤维复合材料激光表面 去除仿真研究[J]. 兵器材料科学与工程,2021,44 (04):40-44.
- [10] 肖荣诗,张寰臻,黄 婷. 飞秒激光加工最新研究进 展[J]. 机械工程学报, 2016, 52(17): 176-186.
- [11] BULGAKOVA N M, ROSENFELD A, EHRENTRAUT L, et al. Modeling of electron dynamics in laser-irradiated solids: Progress achieved through a continuum approach and future prospects [C]//International Conference on Lasers, Applications, and Technologies 2007: Laser-assisted Micro-and Nanotechnologies. SPIE, 2007, 6732: 21-35.
- [12] CHICHKOV B N, MOMMA C, NOLTE S, et al. Femtosecond, picosecond and nanosecond laser ablation of solids[J]. Applied Physics A, 1996, 63: 109-115.
- [13] BURAKOV I M, BULGAKOVA N M, STOIAN R, et al. Theoretical investigations of material modification using temporally shaped femtosecond laser pulses [J]. Applied Physics A, 2005, 81: 1639-1645.
- [14] GAMALY E G. The physics of ultra-short laser interaction with solids at non-relativistic intensities [J]. Physics Reports, 2011, 508(4-5): 91-243.
- [15] 张寰臻. 碳化硅颗粒增强铝基复合材料脉冲激光刻 蚀规律研究[D].北京:北京工业大学,2018.
- [16] 张瑄珺, 王健超, 沈佳骏. 碳纤维复合材料激光加工 热损伤问题的研究现状[J]. 应用激光, 2019, 39 (06): 1041-1044.
- [17] FREIGAG C, WIEDENMANN M, NEGEL J P, et al. High-quality processing of CFRP with a 1.1-kW picosecond laser[J]. Applied Physics A, 2015, 119: 1237-1243.

(责任编辑 王利君)