

### 水雾对激光加工CFRP的影响特性研究

周辽, 龙芋宏, 焦辉, 张光辉, 蔺泽, 赵臻, 黄宇星, 黄平

#### Study on the effect of water-mist on laser processing of CFRP

引用本文:

周辽, 龙芋宏, 焦辉, 张光辉, 蔺泽, 赵臻, 黄宇星, 黄平. 水雾对激光加工CFRP的影响特性研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(6): 786-794.  
ZHOU Liao, LONG Yuhong, JIAO Hui, et al. Study on the effect of water-mist on laser processing of CFRP[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 47(6): 786-794.

#### 您可能感兴趣的其他文章

##### 1. 不同冷却方式对激光加工CFRP的影响研究

引用本文: 张炳涛, 周辽, 焦辉, 等. 不同冷却方式对激光加工CFRP的影响研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(2): 253-259.

##### 2. 基于CFRP纤维编织网格分块扫描的激光除胶工艺算法

引用本文: 朱小伟, 胡龙, 杨文锋, 等. 基于CFRP纤维编织网格分块扫描的激光除胶工艺算法[J]. *激光技术*, 2021, 45(6): 745-750.

##### 3. 基于水导激光平面缩流喷嘴内流场仿真研究

引用本文: 杨林帆, 焦辉, 黄宇星, 等. 基于水导激光平面缩流喷嘴内流场仿真研究[J]. *激光技术*, 2020, 44(6): 754-761.

##### 4. 碳纤维复合材料皮秒激光切割工艺研究

引用本文: 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.

##### 5. CFRP与不锈钢激光焊接的有限元分析

引用本文: 王强, 焦俊科, 王飞亚, 等. CFRP与不锈钢激光焊接的有限元分析[J]. *激光技术*, 2016, 40(6): 853-859.

文章编号: 1001-3806(2023)06-0786-09

## 水雾对激光加工 CFRP 的影响特性研究

周 辽, 龙芋宏, 焦 辉, 张光辉, 蔺 泽, 赵 臻, 黄宇星, 黄 平\*

(桂林电子科技大学 机电工程学院 广西制造系统与先进制造技术重点实验室, 桂林 541004)

**摘要:** 为了研究水雾对激光加工碳纤维复合材料(CFRP)的影响,采用水雾辅助激光加工 CFRP 的方法,通过正交实验、多元线性回归分析和光学仪器进行了理论分析和实验验证,得到了水雾对激光加工 CFRP 的影响规律并优化了工艺参数。结果表明,随着喷嘴高度、喷嘴角度增加和气体压力减小,激光光斑直径逐渐减小;随着喷嘴角度增加和气体压力减小,激光损失率逐渐减小,喷嘴高度对激光功率影响小;当喷嘴角度 50°、气体压力 0.2 MPa 和喷嘴高度为 30 mm 时,可以获得最大 5.303 的深宽比,此时激光损失率为 1.473%;建立的水雾参数与加工质量之间的经验公式可以预测切缝内部特征;与气体辅助激光加工 CFRP 相比,水雾辅助激光加工 CFRP 可以获得更小的截面热影响区和更大的槽深。该研究可为激光低损伤加工 CFRP 提供参考。

**关键词:** 激光技术;水雾;激光光斑直径;激光功率;碳纤维复合材料

中图分类号: TN249;TH162 文献标志码: A doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2023.06.009

## Study on the effect of water-mist on laser processing of CFRP

ZHOU Liao, LONG Yuhong, JIAO Hui, ZHANG Guanghui, LIN Ze, ZHAO Zhen, HUANG Yuxing, HUANG Ping

(Guangxi Key Laboratory of Manufacturing Systems and Advanced Manufacturing Technology, School of Mechanical & Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** To study the effect of water-mist on laser processing of carbon fiber reinforced plastic (CFRP). A method was used to process CFRP with a water-mist assisted laser. Theoretical analysis and experimental verification were carried out by orthogonal experiment, multiple linear regression analysis, and optical instruments. The effect of water-mist on the laser processing of CFRP was obtained, and the process parameters were optimized. The results show that the spot diameter of the laser gradually decreases with the increase of nozzle height, nozzle angle, and the decrease in gas pressure. As the nozzle angle increases and the gas pressure decreases, the laser loss rate decreases gradually. The nozzle height has little effect on laser power. When the nozzle angle is 50°, the gas pressure is 0.2 MPa, and the nozzle height is 30 mm, a depth-width ratio up to 5.303 can be obtained, and the laser loss rate is 1.473%. The internal characteristics of the kerf can be predicted by establishing empirical formulas between the water-mist parameters and the machining quality. Finally, compared with the gas-assisted laser processing of CFRP, smaller cross-section heat-affected zone and larger groove depth can be obtained by the water-mist-assisted laser processing of CFRP. This study provides a reference for laser low-damage processing of CFRP.

**Key words:** laser technique; water-mist; laser spot diameter; laser power; carbon fiber reinforced plastic

基金项目:国家自然科学基金资助项目(62004050; 52165056);广西科技基地和人才专项基金资助项目(2021AC18026);广西青年教师教育项目(2020KY05020);广西自然科学基金重点资助项目(2019JJD160010);广西研究生教育创新计划资助项目(YCSW2022287;YCBZ2022114);广西中青年科研基础能力提升项目(2022KY0178);广西博士后专项经费资助项目(C22RSC90YX0C)

作者简介:周 辽(1996-),男,硕士研究生,现主要从事激光微加工技术方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail:1985251027@qq.com

收稿日期:2022-09-01;收到修改稿日期:2022-09-30

## 引 言

碳纤维复合材料(carbon fiber reinforced plastic, CFRP)作为一种新型复合材料具有比强度高、低密度和抗疲劳性好等优异的力学性能,被广泛应用于航空、医疗设备、军工产品等<sup>[1]</sup>领域。在 CFRP 装配过程中,对 CFRP 进行开槽、钻孔等二次加工是不可避免的。CFRP 常规的加工方法有铣削<sup>[2]</sup>、磨料水射流<sup>[3-4]</sup>、钻孔<sup>[5]</sup>、电火花加工<sup>[6]</sup>等。然而,CFRP 具有复杂的各项异性且层间强度低,这些常规的加工方法加工 CFRP 时易出现材料分层、纤维断裂、毛刺和刀具磨

损严重等缺陷<sup>[2,7-8]</sup>。

与常规的加工方法相比,激光加工具有无刀具磨损、无接触应力等优点,被广泛用于材料加工。HEJ-JAJI 等人<sup>[9]</sup>实施了常规钻孔和激光加工玻璃纤维复合材料和 CFRP 的实验研究,结果表明,激光加工效率更高。YE 等人<sup>[10]</sup>对比了激光打孔和机械钻孔两种加工方式的特点,结果表明,两种加工方式下拉伸性能基本相近,但激光打孔具有更高的表面加工质量。但是激光加工 CFRP 容易造成较大的热影响区、纤维拔出和纤维末端膨胀等热损伤<sup>[11-12]</sup>。RIVEIRO 等人<sup>[13]</sup>研究发现,虽然激光加工产生的热损伤是不可避免的,但是可以通过优化工艺参数使热损伤最小化。LEONE 等人<sup>[14]</sup>使用波长 1064 nm、平均功率为 150 W 的 Nd:YAG 脉冲激光加工 1 mm 厚的 CFRP 板并优化了工艺参数,实验中热影响区(heat-affected zone, HAZ)低至 170 μm。与此同时,发现在激光加工过程中增加辅助装置可以有效降低加工产生的热损伤。SOBRI 等人<sup>[15]</sup>研究了辅助气体对激光加工 CFRP 的影响,结果表明,施加辅助气体有利于降低 HAZ。

然而,辅助气体对降低 HAZ 有限。TANGWAR-ODOMNUKUN 等人<sup>[16]</sup>对比了激光在空气和水中的加工质量,结果表明,水辅助激光加工可以获得更小的热损伤。采用水辅助激光加工时,由于水对激光传输的影响大,不恰当的供液方式容易造成激光能量损失严重,导致加工效率下降<sup>[17]</sup>。WEE 等人<sup>[18]</sup>在使用薄水

层辅助激光加工时发现,当水层厚度超过某个临界值之后,将无法实现材料去除。因此,为了减少水对激光损失的影响,必须减薄流动水层厚度并提高水层流速。GUO 等人<sup>[19]</sup>采用水雾辅助激光加工化学气相沉积金刚石时发现,水雾撞壁形成的流动水层薄且流速快,可以获得较好的加工质量,适用于辅助激光加工<sup>[20]</sup>。

综上所述,采用水雾辅助激光加工 CFRP 有望实现低损伤高效率加工的可能。但迄今为止,鲜有使用水雾辅助激光加工 CFRP 的报道;更重要的是,水雾参数对激光传输的影响尚未被实验研究。本文作者研究了 CFRP 的水雾辅助激光加工技术,采用光束分析仪和激光功率计研究了水雾对激光传输的影响规律;采用正交实验优化方法,得到了最优工艺参数组合;最后通过回归分析建立了工艺参数和加工质量之间的经验公式。该研究为激光低损伤加工 CFRP 提供了参考。

## 1 材料、设备与方法

### 1.1 材料

本实验中使用的工件材料是 CFRP 单向层压板。CFRP 厚度为 1 mm,由异面正交状态的单层结构 CFRP 组成,共有 14 层,碳纤维丝束直径约为 5 μm~10 μm,如图 1a 和图 1b 所示。碳纤维的体积分数为 70%,树脂的体积分数为 30%,CFRP 样品的主要热物性参数如表 1 所示。本文中截面 HAZ(后文简称 HAZ)、槽深和深宽比作为加工质量的评价指标,具体

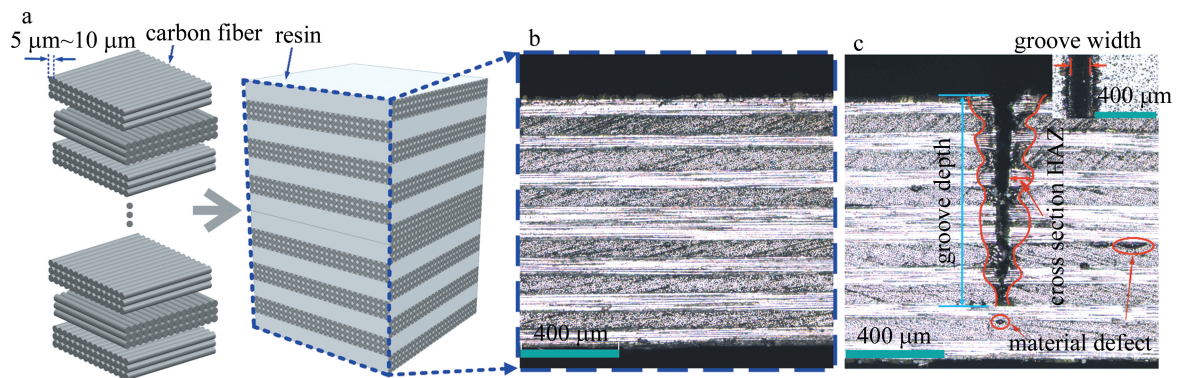


图 1 CFRP 微观结构

a—单向多层正交的 CFRP 结构模型 b—CFRP 横截面 c—加工质量定义

Fig. 1 Microscopic structure of CFRP

a—unidirectional multi-layer orthogonal CFRP structure model b—cross-section of CFRP c—definition of machining quality

表 1 CFRP 的主要热物性参数

Table 1 Physical properties of CFRP

| index        | density/<br>(kg · m <sup>-3</sup> ) | thermal conductivity/<br>(W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ) | specific heat capacity/<br>(J · kg <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> ) | vaporization<br>temperature/K | latent heat/<br>(kJ · kg <sup>-1</sup> ) | volume<br>fraction/% |
|--------------|-------------------------------------|---|--|-------------------------------|--|----------------------|
| epoxy resin  | 1200                                | 0.1   | 1884   | 698                           | 1000                                     | 30                   |
| carbon fiber | 1850                                | 50(axial);5(radial)   | 710  | 3900                          | 43000                                    | 70                   |

定义如图 1c 所示,其中深宽比是指槽深与槽宽的比值,HAZ 的数值取截面最大的 HAZ。

## 1.2 设备

水雾辅助激光加工实验系统如图 2 所示。系统使用的激光器为武汉荣科激光自动化有限公司生产的准连续光纤激光焊接/切割一体机(型号:WCM-IQCW450),激光器采用 IPG 准连续光纤激光器(型号:YLM-450\_4500-QCW),准连续光纤激光的主要参数如表 2 所示,能够在连续激光和脉冲激光模式下工作。

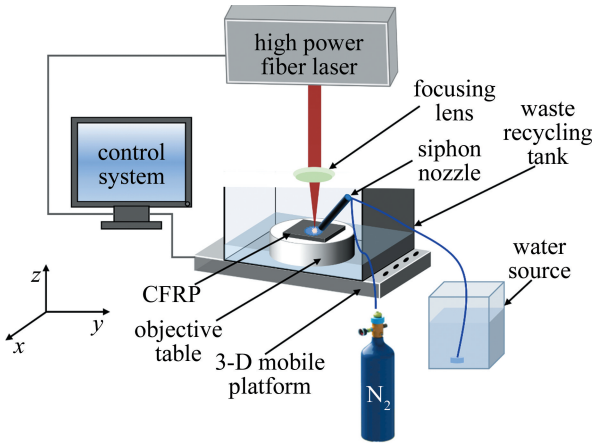


图 2 水雾辅助激光加工 CFRP 的实验系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the experimental system of water-mist assisted laser processing of CFRP

表 2 准连续激光器系统主要参数

Table 2 Main parameters of quasi-continuous fiber laser system

| parameter             | values    | parameter   | values    |
|-----------------------|-----------|---|-----------|
| wavelength/nm         | 1064      | peak laser power/W                                | 4500      |
| pulse width/ms        | 0.1~50    | focused spot radius/ $\mu\text{m}$                | $\geq 50$ |
| single pulse energy/J | $\leq 45$ | scanning speed/ $(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$ | 0~200     |

工件被固定在 XY 运动平台上的载物台表面。水雾系统包括气源(氮气)、管道、流量调节阀、虹吸式喷嘴、回收容器和水箱。实验中采用氮气作为辅助气体,纯净水作为水源。高速流动的气体通过虹吸原理将水吸入到喷嘴中,在气体的作用下实现雾化。喷嘴以旁轴的形式将水雾射流喷射在 CFRP 表面,形成快速流动的薄水膜并流过激光消融区域以实现冷却效应。使用光束分析仪(测量光斑直径范围为  $22 \mu\text{m} \sim 3.2 \text{ mm}$ ) 测量不同条件下激光能量空间分布形态;使用激光功率计(最大测量激光功率 50 W,检测波长范围  $19 \text{ nm} \sim 11 \text{ 000 nm}$ ) 测量不同条件下激光功率损失情况。使用测量激光显微镜观察烧蚀形貌并测量烧蚀数据。

## 1.3 方法

在本文中,水雾射流撞击 CFRP 壁面实际效果如

图 3a 所示。喷嘴高度  $h$  是指喷嘴出口中心到 CFRP 表面的投影距离,喷嘴倾角  $\phi$  是指喷嘴中心线与水平方向的夹角(锐角),如图 3b 所示,气体压力  $p$  是指辅助气体的表压。为了探索喷嘴高度、喷嘴倾角和气体压力变化时对激光加工 CFRP 的 HAZ、槽深和深宽比的影响规律,设计了三因素四水平共 16 组正交实验对 CFRP 进行单次切割实验,实验参数如表 3 所示。本实验中采用的激光工艺参数:激光功率为 1800 W,激光频率为 60 Hz,切割速率为 3 mm/s,脉宽为 0.1 ms。激光烧蚀点与水雾射流冲击点相距 16 mm,如图 3b 所示。为了降低实验误差,本实验中每个工艺参数将会重复进行 4 次,实验结果将取 4 次数据的平均值作为最终结果。同时与相同参数下的传统气体辅助激光切割质量进行对比。

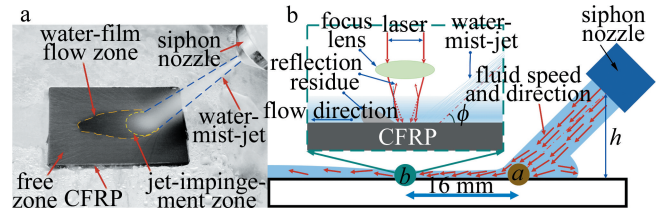


图 3 水雾冲击效果图

a—水雾冲击实物图 b—水雾对激光影响的示意图

Fig. 3 Effect diagram of water-mist impact

a—diagram of water-mist impact physical b—schematic diagram of the effect of water-mist on the laser

表 3 正交实验参数配置表

Table 3 Configuration of orthogonal experiment parameters

| factors | nozzle height/mm | gas pressure/MPa | nozzle angle/ $(^\circ)$ |
|---------|------------------|------------------|--------------------------|
| level 1 | 10               | 0.2              | 20                       |
| level 2 | 20               | 0.3              | 30                       |
| level 3 | 30               | 0.4              | 40                       |
| level 4 | 40               | 0.5              | 50                       |

## 2 实验结果与讨论

### 2.1 水雾辅助激光加工 CFRP 正交实验结果分析

统计分析可以用来证明实验中控制因素在 95% 的置信水平上是显著的(表 4 中表示不拒绝原假设程度的  $P$  值小于 0.05)。本文中通过数理统计分析了实验因素中对各加工质量影响的主次顺序、显著性以及各实验因素的最优水平组合。研究表明,表 4 中表示整个拟合方程显著性的  $F$  值越大,对加工质量的影响和贡献越大<sup>[21]</sup>,  $R^2$  为相关系数。

水雾参数对 HAZ、槽深和深宽比的方差分析结果如表 4 所示。统计分析中  $R^2$  均大于 75%,这表明了该结论是可信的。从表 4 可以看出,对于 HAZ 而言,喷

表 4 水雾辅助激光加工 CFRP 的方差分析

Table 4 Variance analysis of water-mist assisted laser processing of CFRP

| response factor   | control factor   | degrees of freedom | sum of squares | mean square | F            | P            | R <sup>2</sup> |
|-------------------|------------------|--------------------|----------------|-------------|--------------|--------------|----------------|
| cross section HAZ | nozzle angle/(°) | 3                  | 23.543         | 7.848       | 0.614        | 0.630        | 0.781          |
|                   | gas pressure/MPa | 3                  | 109.129        | 36.376      | 2.848        | 0.127        |                |
|                   | nozzle height/mm | 3                  | 140.066        | 46.689      | <b>3.656</b> | <b>0.083</b> |                |
|                   | residual         | 6                  | 76.633         | 12.772      |              |              |                |
|                   | total            | 15                 |                |             |              |              |                |
| groove depth      | nozzle angle/(°) | 3                  | 24174.156      | 8058.052    | <b>4.127</b> | <b>0.066</b> | 0.829          |
|                   | gas pressure/MPa | 3                  | 19038.062      | 6346.021    | 3.250        | 0.102        |                |
|                   | nozzle height/mm | 6                  | 13537.219      | 4512.406    | 2.311        | 0.176        |                |
|                   | residual         | 3                  | 11714.750      | 1952.458    |              |              |                |
|                   | total            | 15                 |                |             |              |              |                |
| depth-width ratio | nozzle angle/(°) | 3                  | 1.482          | 0.494       | <b>6.953</b> | <b>0.022</b> | 0.843          |
|                   | gas pressure/MPa | 3                  | 0.351          | 0.117       | 1.646        | 0.276        |                |
|                   | nozzle height/mm | 3                  | 0.449          | 0.150       | 2.106        | 0.201        |                |
|                   | residual         | 6                  | 0.426          | 0.071       |              |              |                |
|                   | total            | 15                 |                |             |              |              |                |

嘴高度具有一定的影响,其余因素都不具有显著影响;从图 4 可以看出,当气体压力逐渐增加时,HAZ、槽深和深宽比均逐渐减小。原因可能是:当切向气体压力增加时,更多的冷却介质克服材料蒸汽反冲压力并进入到切缝内部进行有效冷却,减小了 HAZ;同时造成激光能量损失大,材料去除量减少,所以槽深和深宽比逐渐减小。由表 4 中的结果可计算出喷嘴角度、气体压力和喷嘴高度对 HAZ 的贡献大小分别为 8.632%, 40.012%和 51.356%。因此,各因素对 HAZ 的影响大小排序为:喷嘴高度>气体压力>喷嘴角度。该结果与极差法所得结果一致,如图 4 所示,结论可信。

对于深宽比,仅有喷嘴角度具有显著影响。喷嘴角度对槽深有一定影响,其余因素对槽深没有显著影响。从图 4 可以看出,当喷嘴角度增加时 HAZ 逐渐增加,而槽深和深宽比先减小后迅速增大。原因可能是:当喷嘴角度较小时,CFRP 壁面的液膜均匀性被破坏,更多的小液滴撞击 CFRP 表面后反弹到空气中,干扰激光传输,造成较大的激光能量损失,具体原因将在第 2.2.1 节中解释。切缝内部吸收的激光能量引起的热效应和水雾冷却效应达到一种相对的冷热平衡状态,有利于降低 HAZ。CFRP 吸收的激光能量减少,材料去除量减少;同时水雾射流运行距离长,导致机械应力冲击降低,所以槽深和深宽比有下降的趋势。

当喷嘴角度较大时,液膜稳定且小液滴对激光造成的损失减小,CFRP 吸收的激光能量增加,提高了材料去除量;同时,水雾射流传播距离较短,水雾射流速度和冲击力大,可以通过机械应力冲蚀的方式提高材

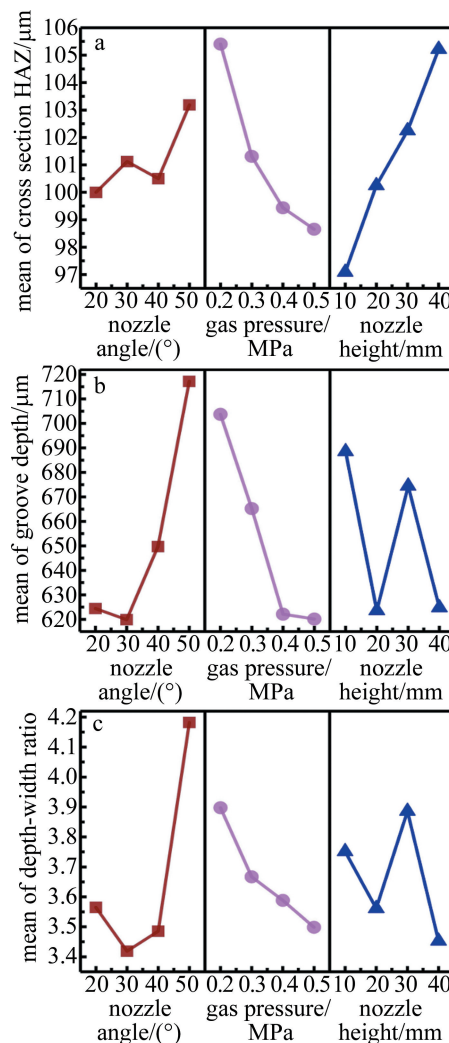


图 4 主效应图

Fig. 4 Diagram of main effect

料去除率,所以提高了深宽比和槽深。但水雾将会在切缝中形成积水导致激光散射<sup>[17]</sup>,破坏了切缝内部水雾冷却效应与激光热效应的冷热平衡状态,导致 HAZ 增加。由表 4 中的结果可计算出喷嘴角度、气体压力和喷嘴高度对槽深的贡献大小分别为 42.599%、33.547% 和 23.854%。因此,各因素对深度的影响大小排序为:喷嘴角度>气体压力>喷嘴高度。由表 4 中的结果可计算出喷嘴角度、气体压力和喷嘴高度对深宽比的贡献大小分别为 64.915%、15.374% 和 19.711%。因此,各因素对深宽比的影响大小排序为:喷嘴角度>喷嘴高度>气体压力。该结果与极差法所得结果一致,如图 4 所示,结果可信。

众所周知,深宽比越大,在一定程度上代表加工质量越好。因此,本文将进一步研究深宽比的最优水平组合。根据图 4c 可知,当喷嘴角度 50°、气体压力 0.2 MPa 和喷嘴高度为 30 mm 时可以获得更大的深宽

比。16 组正交实验中深宽比最大的参数组合为喷嘴角度 50°、气体压力 0.3 MPa 和喷嘴高度为 30 mm,此时深宽比为 4.41。正交优化所得工艺参数组合深宽比为 5.303,提高了 20.958%。同时本文中对比了相同工艺参数下气体辅助激光加工的实验结果(HAZ 为 101.333  $\mu\text{m}$ 、深宽比为 5.579、槽深为 781.000  $\mu\text{m}$ ),如图 5 所示。与气体辅助激光加工相比,水雾辅助激光加工 CFRP 的 HAZ 为 85.875  $\mu\text{m}$ ,降低了 15.255%;槽深为 812.750  $\mu\text{m}$ ,提高了 4.065%;但深宽比有所下降,降低了 4.947%。水雾辅助激光加工产生的热损伤小主要是在于水雾对加工残余热量的及时冷却;水雾辅助激光加工 CFRP 的深宽比小、槽深大,这主要是因为水雾辅助时形成的槽宽大,导致深宽比下降。研究表明<sup>[22]</sup>,较大的热损伤将会影响 CFRP 的机械强度,所以水雾更适合用来辅助激光加工 CFRP。

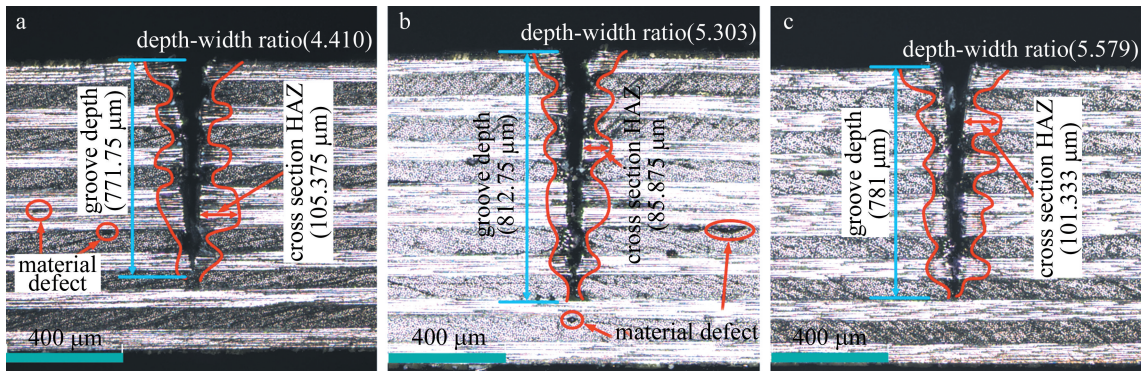


图 5 不同工况下激光加工 CFRP 的形貌对比

a—实验最优组 b—正交优化最优组 c—气体辅助加工

Fig. 5 Morphology comparison of laser processed CFRP under different conditions

a—experimental optimal group b—orthogonal optimization optimal group c—gas-assisted processing

## 2.2 水雾参数对激光传输的影响规律研究

当激光从空气介质中传输到水介质时,由于空气和水的特性不同,激光在空气-水界面时传输特性将会发生改变,如图 3b 所示。此时激光传输将会出现 3 种情况:(a)部分激光被反射;(b)部分激光被水吸收;(c)大部分激光将会在空气-水界面发生折射。水对激光的反射和吸收都将造成激光能量损失,降低加工效率。而水对激光的折射将会改变激光焦点,甚至改变激光能量在空间的分布形态。本文中使用水雾辅助激光加工 CFRP 时,水雾射流在 CFRP 表面撞击将会形成流动水膜<sup>[19]</sup>。由于空气和水介质光学特性不同,将会对激光造成较大的影响。然而,现有的报道缺乏水雾对激光的影响规律的研究,这不利于加速推动水雾辅助激光加工的工业应用。因此,本节中将采用

光束分析仪和激光功率计研究水雾对激光的影响规律。

为了避免高功率激光对检测设备造成损坏,将在低功率激光模式下进行测量,并在光束分析仪的上方将会放置一激光能量衰减片(厚度为 1 mm),同时光束分析仪位于激光焦点的下方。因此,本文中测得的激光光斑直径将会比焦点光斑直径大,但这并不影响总体的变化趋势。当无水雾辅助激光加工时,激光在空间的分布呈现高斯形态(后文简称为原始光斑直径),如图 6 所示。图中纵坐标为相对数值,其值越接近 1,代表激光强度越高。同时采用激光功率计测量了不同条件下水雾对激光能量损失的影响。为了避免水雾影响设备的正常使用,需要在设备上方放置一石英玻璃,石英玻璃的透过率为 93.967%。

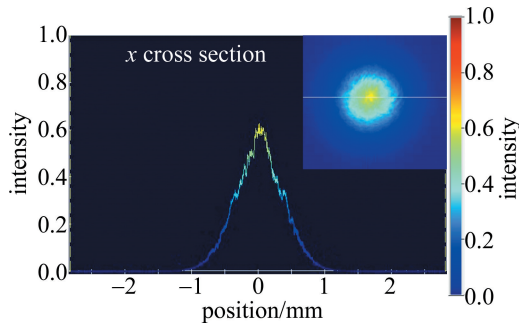


图 6 激光原始分布形态

Fig. 6 Original distribution shape of the laser

2.2.1 喷嘴角度对激光的影响规律 图 7 为喷嘴高度为 30 mm、气体压力为 0.2 MPa 时不同喷嘴角度对激光分布形态的影响。从图 7 可以看出,当喷嘴角度为 20°时光斑直径最大,且大于激光在空气中的光斑直径。随着喷嘴角度的增加,光斑直径有变小的趋势,甚至比原始光斑直径更小。图 8a 为激光经水雾损失后辐照在 CFRP 表面的激光功率。结合表 3,由图 8b 可知,随着喷嘴角度增加,水雾对激光功率的损失逐渐减小。原因可能是:当喷嘴角度较小时,根据勾股定理可知,为了保证偏置距离保持不变,势必要延长水雾射流在空气中传输距离,假设液滴在空间中充分发展,将会导致较多的小液滴在气体的作用下在空气中随机运动。当激光遇到液滴时传输方向会发生改变,同时大液滴撞击 CFRP 表面将会发生反弹和径向扩展<sup>[23]</sup>,导致液膜内部的剪切力增加,CFRP 表面形成液膜的均匀性将会被破坏,以上将会导致激光发散,扩大激光光斑直径。由于水对激光的吸收和小液滴对激光的发散将会造成能量损失严重,如图 8b 所示。

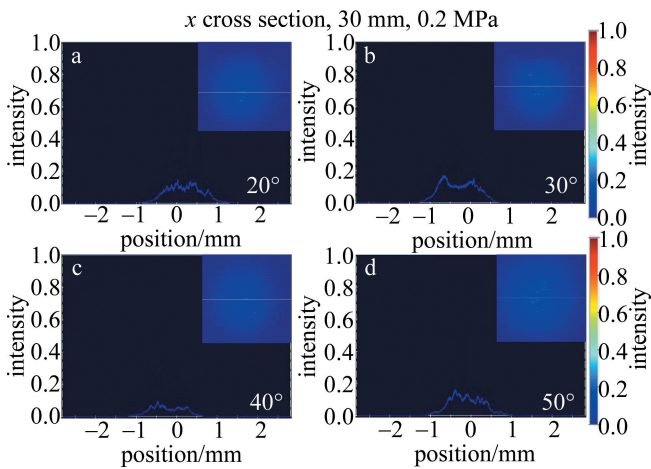


图 7 喷嘴角度对激光在空间分布形态的影响

Fig. 7 Effect of nozzle angle on the spatial distribution of the laser

当喷嘴角度较大时,液滴在水雾射流冲击处主要发生吸附和破碎,仅有较少部分破碎的小液滴才会被

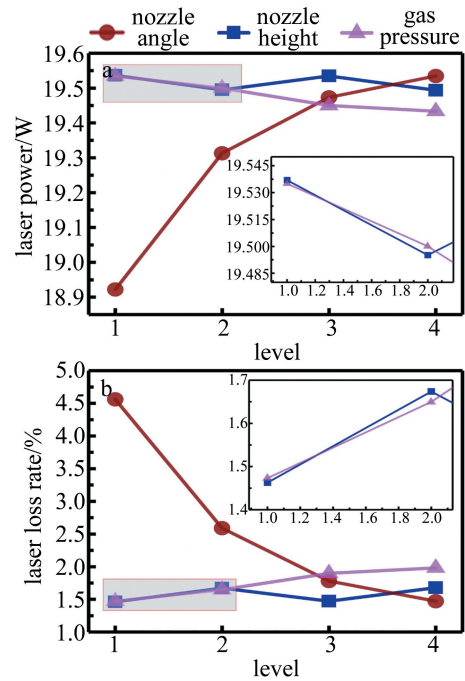


图 8 水雾对激光的影响

Fig. 8 Influence of water-mist on laser

反弹到空气中,对激光的影响将会变小。结合表 3,由图 8b 可知,当喷嘴角度为 20°、30°、40°、50°时水雾对激光的损失率分别为 4.563%、2.591%、1.782% 和 1.473%。因此,当喷嘴角度增加时,激光光斑直径和激光损失率均会减小。由于水的折射率(1.333)大于空气(1.000),当激光穿过空气-水膜界面时将会发生折射,缩小激光的光斑直径。因此,当喷嘴角度增加时光斑直径变小甚至小于原始光斑直径,如图 7 所示。

2.2.2 喷嘴高度对激光的影响规律 图 9 为喷嘴角度为 50°、气体压力 0.2 MPa 时不同喷嘴高度(10 mm, 20 mm, 30 mm, 40 mm)对激光空间分布形态的影响。从图 9 可知,当喷嘴高度为 10 mm 时,激光光斑直径

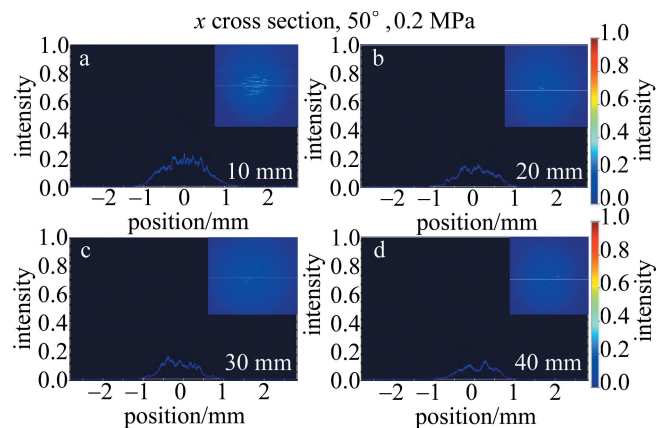


图 9 喷嘴高度对激光在空间分布形态的影响

Fig. 9 Effect of nozzle height on the spatial distribution of the laser

最大且大于原始光斑直径。随着喷嘴高度增加,激光光斑直径逐渐减小且略小于原始光斑直径。图 8a 表明,喷嘴高度变化时激光功率基本维持在一个水平,所以喷嘴高度对激光功率的影响较小。本文将水雾射流撞击 CFRP 表面形成的 3 个区域分为:水雾射流冲击区、水膜流动区和自由区,如图 3a 所示。水膜流动区的水层厚度薄、流速较快且稳定,对激光的影响小,适合用来辅助激光加工<sup>[19]</sup>。

研究表明,当喷嘴高度降低时壁面有效冷却范围将会降低<sup>[23]</sup>。随着喷嘴高度降低,稳定水膜流动区域范围将会减小。因此,当喷嘴角高为 10 mm 时,激光将会作用在自由区。自由区是指水雾射流冲击区和水膜流动区之外的区域。从图 3a 可知,自由区由快速流动的细长水丝组成,该区域的液滴将会对激光传输造成严重的影响,使其激光随机传输,导致光斑直径增大。随着喷嘴高度增加,水膜流动区将会扩张,此后激光作用在水层厚度薄且快速流动的水膜流动区,在水的作用下激光光斑直径将会被缩小。因此,随着喷嘴高度增加,激光光斑直径逐渐减小。由第 2.2.1 节中的分析可知,当喷嘴角度较大时液滴在 CFRP 表面主要发生吸附和破碎作用,仅有少量的小液滴被反弹到空气中,此时激光功率的损失主要来自水膜对激光的反射和水对激光的吸收。因此,改变喷嘴高度时水雾对激光功率的影响保持在一个较为稳定的水平。

**2.2.3 气体压力对激光的影响规律** 图 10 为喷嘴角度 50°、喷嘴高度为 30 mm 时不同气体压力对激光在空间分布形态的影响。当气体压力增加时,激光光斑直径将会逐渐增加,且大于原始光斑直径,激光在空间的分布形态也更接近原始光斑形态,如图 10 所示。随着气体压力的增加,激光损失率将会逐渐增加,这是因

为气体压力增加可以使较大的液滴破碎成更小的液滴,将会使喷雾中的液滴颗粒变得更加均匀<sup>[23]</sup>。由于气体的扩散性强,当气体压力增加时水雾射流直径将会被扩张;在气体的冲击作用下,部分较小的液滴更容易脱离水雾射流散入空气中。与喷嘴角度较小时情况类似,部分小液滴撞击 CFRP 将会发生反弹散入到空气中。当激光传输遇到液滴时将会发生折射、反射等光学现象,导致激光原有传输路径被改变,增加光斑直径。气压越大,飘入到空气中的小液滴越多。因此,随着气体压力的增加,激光光斑直径逐渐增加。当水雾射流撞击在 CFRP 表面时,液膜厚度会随着气体压力的增加而变薄<sup>[23]</sup>,将会减小水膜对激光功率的影响,激光功率损失少。但随着气体压力增大,飘入到空气中的液滴增多,将会增加液滴对激光的散射严重,激光功率损失增加。因此,当气体压力为 0.2 MPa, 0.3 MPa, 0.4 MPa 和 0.5 MPa 时,激光损失率分别为 1.473%, 1.649%, 1.899% 和 1.983%, 如图 8b 所示。

### 2.3 水雾辅助激光加工 CFRP 多元线性回归分析

为了评估激光加工 CFRP 的加工质量,需要对 CFRP 横截面打磨、测量,这将会增加一系列繁琐的操作且耗时,还会增加加工成本。为了减少加工后处理成本,本文中采用多元线性回归方法建立了喷嘴高度  $h$ 、喷嘴角度  $\phi$  和气体压力  $p$  与 HAZ 和槽深之间的经验公式。深宽比可以通过预测的槽深和槽宽计算,因此,本文中不讨论深宽比的经验公式。正交实验所得 HAZ 和槽深的数据如表 5 所示。假设 CFRP 的

表 5 水雾辅助激光加工 CFRP 正交实验的实验数据表

Table 5 Orthogonal experimental data sheet of water-mist-assisted laser processing of CFRP

| group number | nozzle angle/ (°) | gas pressure/ MPa | nozzle height/ mm | cross section HAZ/ $\mu\text{m}$ | groove depth/ $\mu\text{m}$ |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| 1            | 20                | 0.2               | 10                | 98.625                           | 745.000                     |
| 2            | 20                | 0.3               | 20                | 95.375                           | 592.750                     |
| 3            | 20                | 0.4               | 30                | 102.875                          | 611.250                     |
| 4            | 20                | 0.5               | 40                | 101.125                          | 548.750                     |
| 5            | 30                | 0.2               | 20                | 106.125                          | 613.750                     |
| 6            | 30                | 0.3               | 10                | 98.625                           | 676.750                     |
| 7            | 30                | 0.4               | 40                | 101.625                          | 555.250                     |
| 8            | 30                | 0.5               | 30                | 96.125                           | 633.750                     |
| 9            | 40                | 0.2               | 30                | 102.625                          | 681.000                     |
| 10           | 40                | 0.3               | 40                | 103.875                          | 619.750                     |
| 11           | 40                | 0.4               | 10                | 93.625                           | 666.250                     |
| 12           | 40                | 0.5               | 20                | 99.875                           | 632.000                     |
| 13           | 50                | 0.2               | 40                | 112.250                          | 775.250                     |
| 14           | 50                | 0.3               | 30                | 105.375                          | 771.750                     |
| 15           | 50                | 0.4               | 20                | 97.625                           | 655.750                     |
| 16           | 50                | 0.5               | 10                | 95.500                           | 666.000                     |

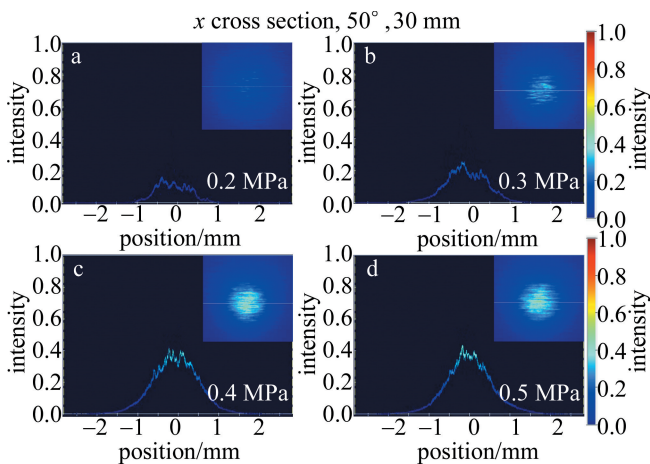


图 10 气体压力对激光在空间分布形态的影响

Fig. 10 Effect of gas pressure on the spatial distribution of the laser



HAZ 宽度  $H$  和槽深  $G$  的经验公式分别为<sup>[24-25]</sup>：

$$H = \beta_1 h^{\beta_2} \phi^{\beta_3} p^{\beta_4} \quad (1)$$

$$G = \gamma_1 h^{\gamma_2} \phi^{\gamma_3} p^{\gamma_4} \quad (2)$$

式中,  $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \gamma_4$  为待求解常数系数。

将(1)式、(2)式两边同时取以 10 为底的对数,由对数运算法则可得:

$$\lg H = \lg \beta_1 + \beta_2 \lg h + \beta_3 \lg \phi + \beta_4 \lg p \quad (3)$$

$$\lg G = \lg \gamma_1 + \gamma_2 \lg h + \gamma_3 \lg \phi + \gamma_4 \lg p \quad (4)$$

为了便于求解,令  $Y_1 = \lg H, K_1 = \lg \beta_1, X_1 = \lg h, X_2 = \lg \phi, X_3 = \lg p, Y_2 = \lg G, K_2 = \lg \gamma_1$  上述(3)式、(4)式可改写为:

$$Y_1 = K_1 + \beta_2 X_1 + \beta_3 X_2 + \beta_4 X_3 \quad (5)$$

$$Y_2 = K_2 + \gamma_2 X_1 + \gamma_3 X_2 + \gamma_4 X_3 \quad (6)$$

求解之前需将表 5 中的数据转换为以 10 为底的对数关系数据,并代入到(5)式和(6)式,求解线性方程组,可得到以下关系式:

$$Y_1 = 1.854 + 0.055X_1 + 0.026X_2 - 0.073X_3, (R^2 = 0.729) \quad (7)$$

$$Y_2 = 2.598 - 0.055X_1 + 0.144X_2 - 0.147X_3, (R^2 = 0.590) \quad (8)$$

最后将(7)式、(8)式代入到(3)式、(4)式中,并求解出 HAZ 宽度  $H$  和槽深  $G$  的经验公式分别为:

$$H = 10^{1.854} h^{0.055} \phi^{0.026} p^{-0.073}, (R^2 = 0.729) \quad (9)$$

$$G = 10^{2.598} h^{-0.055} \phi^{0.144} p^{-0.147}, (R^2 = 0.590) \quad (10)$$

相关性检验,查表可知:  $F_{0.01}(3, 12) = 5.950, F_{0.05}(3, 12) = 3.490; F_H = 10.747 > F_{0.01}(3, 12) = 5.950,$  所以经验公式(9)式具有高度显著;  $F_G = 5.763 > F_{0.05}(3, 12) = 3.490,$  所以经验公式(10)式是显著的。

本文中通过多元线性回归方法建立了 CFRP 的 HAZ 和槽深的经验公式,从相关性检验可以看出,所建立的经验公式中,HAZ 的经验公式具有高度显著;槽深的经验公式相关性为显著,比 HAZ 的相关性低;根据方程拟合的  $R^2$  可以看出,HAZ 的经验公式  $R^2$  较大,拟合精度较高,参考价值较高;槽深的  $R^2$  小于 HAZ 的  $R^2$ ,说明 HAZ 的经验公式精度要高于槽深的经验公式精度。这些经验公式可以在未对 CFRP 做后处理便推算出切缝内部特征,尤其是对力学性能影响较大的 HAZ。预测的结果可以减少后处理程序,节约加工成本;同时可以对加工参数的设置提供参考。

### 3 结 论

(a)通过光束分析仪研究了水雾参数对激光光斑

直径的影响。随着喷嘴高度、喷嘴角度增加,激光光斑直径不断减小;随着气体压力增加,激光光斑直径不断增加。

(b)通过激光功率计研究了水雾参数对激光功率的影响。随着喷嘴高度增加,激光损失率变化较小;随着喷嘴角度增加和气体压力减小,激光损失率逐渐减小。

(c)通过正交实验分析了水雾参数对加工质量的影响规律和主效应,喷嘴角度对深宽比具有显著性影响。当喷嘴角度  $50^\circ$ 、气体压力 0.2 MPa 和喷嘴高度为 30 mm 时,可以获得最大 5.303 的深宽比,此时激光损失率为 1.473%。与气体辅助激光加工 CFRP 相比,水雾辅助激光加工可以获得更小的 HAZ 和更大的槽深。

(d)通过多元非线性回归分析建立了工艺参数(喷嘴高度、喷嘴角度和气体压力)和加工质量(HAZ 和槽深)之间的经验公式,为预测水雾辅助激光加工 CFRP 的切缝内部特征提供了一种手段。

### 参 考 文 献

- [1] SOUTIS C. Fibre reinforced composites in aircraft construction[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2005, 41(2): 143-151.
- [2] WANG F J, WANG D, YIN J W, et al. Analysis of surface damage formation mechanism in milling of CFRPs[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(13): 195-204 (in Chinese). 王福吉, 王东, 殷俊伟, 等. CFRP 复合材料铣削表层损伤形成机制分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(13): 195-204.
- [3] YOUSSEF H A, EL-HOFY H A, ABDELAZIZ A M, et al. Accuracy and surface quality of abrasive waterjet machined CFRP composites [J]. Journal of Composite Materials, 2021, 55(12): 1693-1703.
- [4] CHEN Zh W, RUAN X F, ZOU J L, et al. Surface roughness tests of CFRP cutting by AWJ[J]. China Mechanical Engineering, 2019, 30(11): 1315-1321 (in Chinese). 陈正文, 阮晓峰, 邹佳林, 等. 磨料水射流切割碳纤维复合材料的表面粗糙度试验[J]. 中国机械工程, 2019, 30(11): 1315-1321.
- [5] IQBAL A, ZHAO G L, ZAINI J, et al. CFRP drilling under throttle and evaporative cryogenic cooling and micro-lubrication[J]. Composite Structures, 2021, 267: 113916.
- [6] HABIB S, OKADA A. Influence of electrical discharge machining parameters on cutting parameters of carbon fiber reinforced plastic[J]. Machining Science and Technology, 2016, 20(1): 99-114.
- [7] HAN L, ZHANG J J, LIU Y, et al. Effect of fiber orientation on depth sensing intra-laminar failure of unidirectional CFRP under nano-scratching[J]. Composites Part, 2021, B224: 109211.
- [8] GAO Y F, YANG X, XIAO J H, et al. The development of an ultrasonic vibration hand-held pneumatic drill for hole-machining on CFRP composite materials[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 114(5/6): 1635-1652.
- [9] HEJJAJI A, SINGH D, KUBHER S, et al. Machining damage in FRPs: laser versus conventional drilling[J]. Composites Part, 2016, A82: 42-52.

- [10] YE Y Y, JIA Sh H, XU Z F, *et al.* Research on hole drilling in carbon fiber reinforced composite by using laser cutting method[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2019, 62(18): 50-55 (in Chinese).  
叶逸云, 贾少辉, 徐子法, 等. 碳纤维复合材料激光切割制孔工艺研究[J]. *航空制造技术*, 2019, 62(18): 50-55.
- [11] 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*, 2019, 101(9/12): 2965-2975.
- [12] LEONE C, MINGIONE E, GENNA S. Laser cutting of CFRP by quasi-continuous wave (QCW) fibre laser: Effect of process parameters and analysis of the HAZ index[J]. *Composites Part*, 2021, B224: 109146.
- [13] RIVEIRO A, QUINTERO F, LUSQUINOS F, *et al.* Laser cutting of carbon fiber composite materials[C]//7th Manufacturing-Engineering-Society International Conference (MESIC). Vigo, Spain: Elsevier Science, 2017, 13: 388-395.
- [14] LEONE C, GENNA S. Heat affected zone extension in pulsed Nd: YAG laser cutting of CFRP[J]. *Composites Part*, 2018, B140: 174-182.
- [15] SOBRI S A, HEINEMANN R, WHITEHEAD D. Development of laser drilling Strategy for thick carbon fibre reinforced polymer composites (CFRP)[J]. *Polymers*, 2020, 12(11): 2674.
- [16] TANGWARODOMNUKUN V, CHEN H Y. Laser ablation of PMMA in air, water, and ethanol environments[J]. *Materials and Manufacturing Processes*, 2015, 30(5): 685-691.
- [17] ZHANG B T, ZHOU L, JIAO H, *et al.* Research on effect of laser machining of CFRP with different cooling methods[J]. *Laser Technology*, 2023, 47(2): 253-259 (in Chinese).  
张炳涛, 周辽, 焦辉, 等. 不同冷却方式对激光加工 CFRP 的影响研究[J]. *激光技术*, 2023, 47(2): 253-259.
- [18] WEE L M, KHOONG L E, TAN C W, *et al.* Solvent-assisted laser drilling of silicon carbide[J]. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 2011, 8(6): 1263-1276.
- [19] GUO Z F, GUO B, ZHAO Q L, *et al.* Optimisation of spray-mist-assisted laser machining of micro-structures on CVD diamond coating surfaces[J]. *Ceramics International*, 2021, 47(15): 22108-22120.
- [20] GEIGER M, BECKER W, REBHAN T, *et al.* Increase of efficiency for the XeCl excimer laser ablation of ceramics[J]. *Applied Surface Science*, 1996, 96(8): 309-315.
- [21] KUMARAN S T, KO T J, LI C P, *et al.* Rotary ultrasonic machining of woven CFRP composite in a cryogenic environment[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 698: 984-993.
- [22] LI H N, YE Y X, DU T T, *et al.* The effect of thermal damage on mechanical strengths of CFRP cut with different pulse-width lasers[J]. *Optics and Laser Technology*, 2022, 153: 108219.
- [23] WEI Ch. The study on pretreatment of diamond coated cemented carbide substrate based on the coupling of spray cooling and laser etching[D]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2020: 42-62 (in Chinese).  
魏超. 基于喷雾冷却—激光刻蚀的金刚石涂层硬质合金衬底复合预处理方法研究[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2020: 42-62.
- [24] QI L T, LIU F C, ZHANG Y D. Experimental investigation on 266nm ultraviolet solid-state laser cutting of carbon fiber reinforced plastics[J]. *Laser Technology*, 2022, 46(3): 402-407 (in Chinese).  
齐立涛, 刘凤聪, 张耀东. 266nm 紫外固体激光切割碳纤维复合材料的实验研究[J]. *激光技术*, 2022, 46(3): 402-407.
- [25] LI Y Y. Experimental design and data processing[M]. 3rd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 104-136 (in Chinese).  
李云雁. 试验设计与数据处理[M]. 第 3 版. 北京: 化学工业出版社, 2008: 104-136.