

# 亚音速切向气流下连续激光对玻璃纤维增强树脂基复合材料的穿孔效应

陈庚, 唐杰, 周义青, 潘云香\*, 张宏超\*\*, 李泽文, 沈中华, 陆健

南京理工大学理学院, 江苏 南京 210094

**摘要** 采用波长为 1070 nm 的连续激光对亚音速切向气流下玻璃纤维增强树脂基复合材料(GFRP)的穿孔效应进行了研究。通过实验研究了功率密度(848~1556 W/cm<sup>2</sup>)和切向气流流速(0~1 个马赫数)对穿孔形貌、穿孔点温度和穿孔时间的影响。结果表明:切向气流流速为 0.5 个马赫数(Ma)时靶材穿孔时间随功率密度的增加而减小,最大减小了 46%;功率密度为 848 W/cm<sup>2</sup>时穿孔时间随气流流速的增加呈先减小后增加的规律,与无气流(0 Ma)时相比,最大仅减小 8%。激光功率密度的增加加速了热解气体的产生,使得孔隙压力升高,促进了靶材的剥蚀。切向空气流对作用过程的影响主要包括:降低树脂基体热解所产生的残炭含量,进而改变靶材吸收方式;产生切向剪切力,加速靶材的力学剥蚀;加速对流换热,降低靶材表面温度。当切向气流速度较小( $\leq 0.4$  Ma)时,切向气流的作用主要是促进树脂热解,降低残炭含量,转变靶材吸收方式;当切向空气流速较大(0.8~1.0 Ma)时,气流的冷却作用表现得较为明显。

**关键词** 激光光学; 激光损伤; 连续激光; 玻璃纤维增强树脂基复合材料; 切向空气流; 穿孔效应

中图分类号 TN249

文献标志码 A

DOI: 10.3788/CJL221066

## 1 引言

复合材料因为轻质量、低成本、易成型、高比强度和比模量、高抗疲劳性和抗腐蚀性、低导热系数和低膨胀系数等优势被广泛运用在航空航天、交通运输、电子产品、医疗器械、体育器材、工业建筑等方面<sup>[1]</sup>。其中,透波性能优异的玻璃纤维增强树脂基复合材料(GFRP)因为强度高、质量轻和电性能优异而成为光电子学器件、微波介电材料和低马赫飞行器天线罩材料的首选<sup>[2]</sup>。随着高能激光技术的发展,研究激光对玻璃纤维增强树脂基复合材料的作用机理具有十分重要的意义。

国内外研究者对激光作用下复合材料的烧蚀机理进行了大量的研究。Henderson 等<sup>[3]</sup>实验探究了高温下复合材料的热物性参数的变化规律,根据大量实验数据得到了复合材料的导热系数随温度的变化规律。Dimitrienko 等<sup>[4-5]</sup>研究了高温下复合材料的温度场、热应力分布,发现高温下树脂热解碳化产生的大量气体会使靶材的力学性能发生显著的变化。梁晗等<sup>[6]</sup>基于各向异性传热原理研究了激光扫描角度对复合材料去除率的影响规律,结果表明,激光扫描角度越大,预热效应越弱,去除效率越低,去除质量越差。郭亚林等<sup>[7]</sup>利

用 CO<sub>2</sub> 激光器研究了不同激光参数下硅基复合材料的质量损失速率,实验发现靶材的质量损失速率受入射激光强度和光斑直径的影响较大,受辐照时间的影响较小。彭国良等<sup>[8-9]</sup>通过仿真计算发现力学剥蚀极大地降低了 GFRP 穿孔所需的能量,激光功率密度较低时靶材烧蚀效率较高。相对于金属材料,激光作用于树脂基类复合材料时具有明显不同的能量耦合过程,初始阶段的能量耦合率较低,材料以沉积式的体吸收为主,随着材料热解的进行,大量不完全热解的残炭附着在材料表层,只有较少的能量到达材料内部,此时材料的吸收方式则以面吸收为主<sup>[10-12]</sup>。

激光作用于 GFRP 时外部气流的存在会对靶材的烧蚀机制产生极大的影响。陈敏孙等<sup>[13-14]</sup>实验发现:一方面,切向空气流的加载会削弱热解气体对激光的屏蔽作用,提供充足的氧气助燃,加速树脂基体的热解;其次,切向气流的存在会加强对流换热,进而加速材料表面的冷却。此外,气流的流速、种类都会对材料的质量损失、温度分布以及材料的加工效率产生一定的影响<sup>[15-18]</sup>。

激光去除材料具有非接触、效率高、加工精度高等其他加工技术无法比拟的诸多优势,目前已被广泛应用于激光打孔、激光切割、激光烧蚀、激光光刻等领

收稿日期: 2022-07-19; 修回日期: 2022-08-22; 录用日期: 2022-09-28; 网络首发日期: 2022-10-09

基金项目: 国家自然科学基金(61805120)

通信作者: \*yunxiangpan@njjust.edu.cn; \*\*hongchao@njjust.edu.cn

域<sup>[19]</sup>。目前国内外关于激光烧蚀复合材料的研究主要集中于材料的质量损失速率、烧蚀形貌、力学性能变化、靶材的烧蚀机制转变等,对切向空气流作用下材料的穿孔效应的研究较少。本文通过实验研究了切向空气流作用下连续激光(波长为 $\lambda=1070\text{ nm}$ )辐照 GFRP 的穿孔效应,分析了不同激光功率密度和不同切向空气流速下 GFRP 的温度分布、烧蚀形貌和穿孔规律。

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示,实验采用最大输出功率为 20 kW 的光纤激光器( $\lambda=1070\text{ nm}$ )与 GFRP 相互作用。经分光镜分光后小部分能量的激光入射至功率计,对激光功率进行实时记录;大部分能量的激光经透镜聚焦后垂直入射至 GFRP 表面。实验时可通过调节透镜与 GFRP 表面之间的距离来控制光斑大小,本实验中采用的光斑直径为 3 cm。在材料表面施加切向空气流,切向气流由空气压缩机和喷嘴提供,采用皮托管法测量气流速度,实验中采用的空气流速范围为 0~1

个马赫数(Ma)。实验中通过压力计实时测量喷嘴输出的切向空气流的压力,进而对气流的稳定性进行监测。使用两台红外热像仪分别记录靶材前、后表面的温度变化情况。红外热像仪的响应时间为  $6\text{ }\mu\text{s}$ ,发射率为 0.01~1.00 可调,最小的取样间隔为 20 ms,温度测量范围为  $350\sim 3500\text{ }^\circ\text{C}$ ,测量时红外热像仪的发射率设置为 0.8<sup>[20-21]</sup>。靶材表面温度随着激光辐照时间的增长而升高,靶材出现穿孔时穿孔位置的温度明显小于周围材料温度,对应的温度分布图中穿孔位置的颜色有别于周围区域,提取该穿孔位置处不同时刻的温度数据,绘制穿孔点处温度随时间的变化曲线,将曲线出现急剧下降的时刻定义为靶材的穿孔时刻。采用的靶材为编织结构的 GFRP,尺寸为  $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}\times 8\text{ mm}$ ,喷嘴中心与光斑中心的距离为 3 cm,激光垂直辐照靶材的中心。实验在一个相对密闭的金属靶室中进行,降低外界环境对实验的影响。靶室中安装排烟装置,用以排除激光烧蚀产生的热解气体。

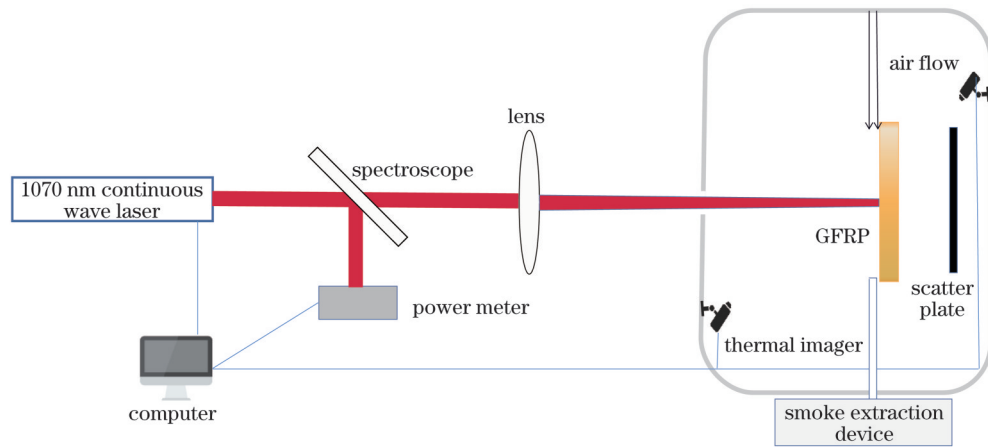


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

采用上述实验装置分别研究切向空气流速不变 ( $0.5\text{ Ma}$ ) 时激光功率密度 ( $848\sim 1556\text{ W/cm}^2$ ) 以及激光功率密度不变 ( $848\text{ W/cm}^2$ ) 时切向空气流速 ( $0\sim 1.0\text{ Ma}$ ) 对材料烧蚀形貌、温度场分布和穿孔时间的影响。每组参数下进行三次重复实验以确保实验数据的准确性。

## 3 实验结果与分析

### 3.1 激光功率密度对 GFRP 穿孔的影响

图 2 给出了切向空气流速为  $0.5\text{ Ma}$  时不同激光功率密度作用下的靶材穿孔形貌。在显微镜下观察到,激光烧蚀 GFRP 穿孔点附近主要有玻璃纤维熔融后冷却凝结而成的乳白色球状物、空心球状熔融二氧化硅、树脂热解生成的残炭<sup>[18]</sup>。在激光功率密度达到  $848\text{ W/cm}^2$  时,在靶材中靠近下风区处出现穿孔区域,且穿孔区尺寸小于光斑直径,未穿孔区域的机械强度

很弱,极易从靶材上脱落。当功率密度达到  $990\text{ W/cm}^2$  时,穿孔直径已与光斑直径 ( $3\text{ cm}$ ) 相仿。此后,随着功率密度的进一步增加,靶材穿孔区域的大小没有出现明显的变化。受切向气流和重力的共同作用,大量熔融的玻璃纤维粘附在靶材下风区的表面上(图 2 中椭圆内部),且粘附区域的大小随功率密度的增加而逐渐增大。此外,切向气流携带的热流导致下风区出现不同程度的热解,在功率密度为  $1556\text{ W/cm}^2$  时,GFRP 下风区已出现明显的层状剥蚀现象,如图 2(f) 方形框所示。

图 3(b) 为空气流速为  $0.5\text{ Ma}$ , 功率密度分别为  $848, 1131, 1556\text{ W/cm}^2$  时 GFRP 穿孔点的温升曲线。与低功率密度相比,高功率密度激光作用下 GFRP 穿孔点的温升速率更快,达到最高温所需的时间更短,靶材所能达到的最高温更高。复合材料温升曲线出现较大幅度的波动,与金属材料中较为稳定的局部温升曲线具有明显的不同<sup>[22]</sup>,这主要与 GFRP 层状剥蚀效应和



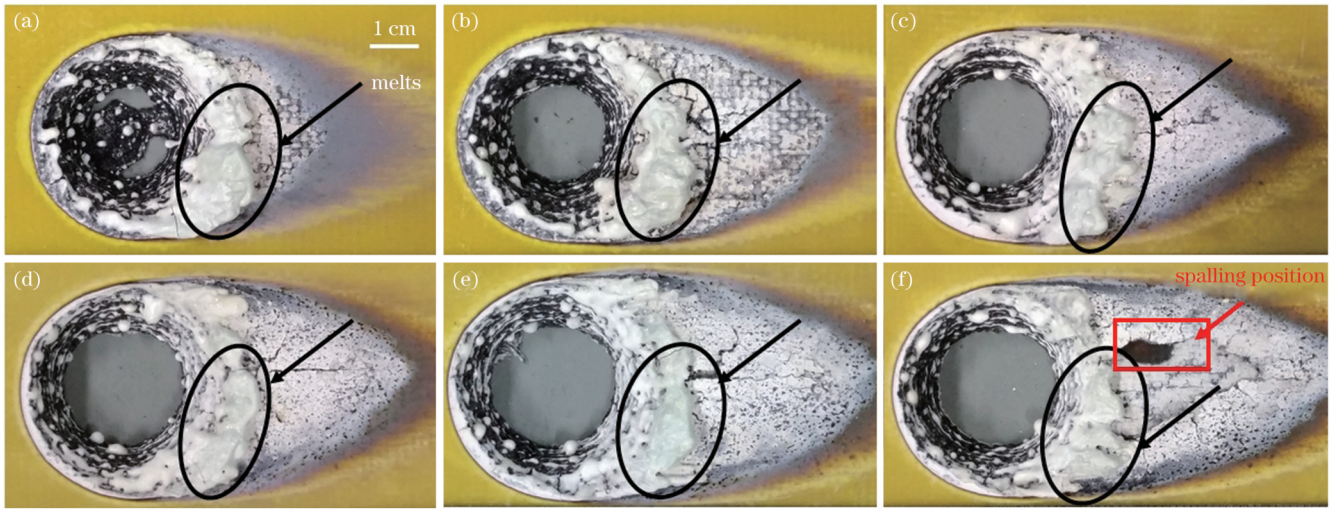


图 2 切向空气流速为 0.5 Ma 时不同激光功率密度下的 GFRP 烧蚀形貌。(a) 848 W/cm<sup>2</sup>; (b) 990 W/cm<sup>2</sup>; (c) 1131 W/cm<sup>2</sup>; (d) 1273 W/cm<sup>2</sup>; (e) 1414 W/cm<sup>2</sup>; (f) 1556 W/cm<sup>2</sup>

Fig. 2 Ablation morphologies of GFRP under different laser power densities at tangential air flow rate of 0.5 Ma. (a) 848 W/cm<sup>2</sup>; (b) 990 W/cm<sup>2</sup>; (c) 1131 W/cm<sup>2</sup>; (d) 1273 W/cm<sup>2</sup>; (e) 1414 W/cm<sup>2</sup>; (f) 1556 W/cm<sup>2</sup>

穿孔点烧蚀产物的成分变化有关。同时,高功率密度下两相邻温度波动幅值之间的时间间隔更短,意味着高功率密度下编织结构的 GFRP 层状剥蚀速率更快,这是因为高温下靶材更容易在较短时间内积聚大量

的热解气体,孔隙内所能达到的气压更大。随着靶材剥蚀速率的加快,高功率密度下 GFRP 更快出现温度下降拐点,如图 3(a) 所示,即靶材穿孔所需时间更短。

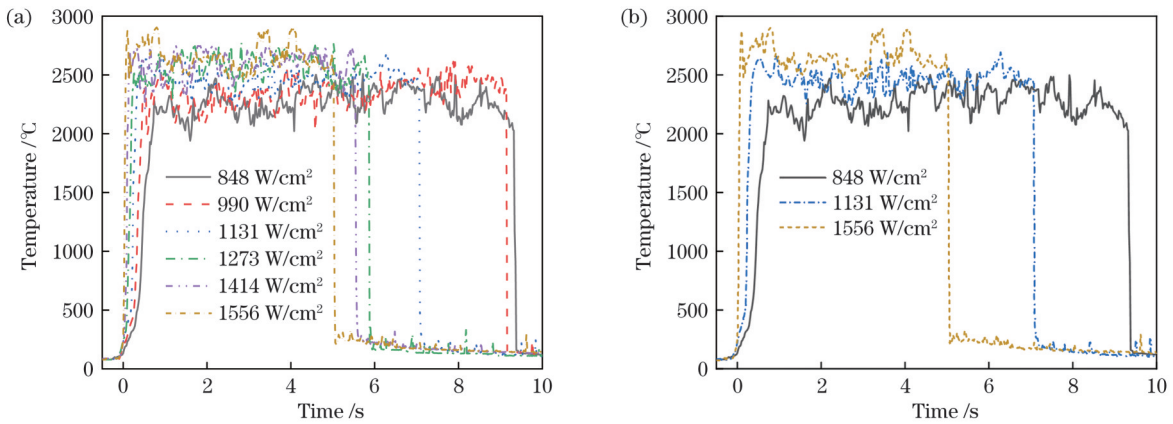


图 3 切向空气流速为 0.5 Ma 时的 GFRP 穿孔点升温曲线。(a) 激光功率密度为 848~1556 W/cm<sup>2</sup>; (b) 图 3(a) 的局部放大

Fig. 3 GFRP perforation point temperature rise curves when tangential air flow rate is 0.5 Ma. (a) Laser power density is 848-1556 W/cm<sup>2</sup>; (b) partial enlargement of Fig. 3 (a)

切向空气流速为 0.5 Ma 时 GFRP 穿孔时间随激光功率密度的变化如图 4 所示。功率密度为 848 W/cm<sup>2</sup> 时靶材的穿孔时间为 (9.32±0.08) s, 功率密度为 990 W/cm<sup>2</sup> 时靶材的穿孔时间为 (9.22±0.19) s, 两种情况下的穿孔时间相差较小。当激光功率密度增加到 1131 W/cm<sup>2</sup> 时, 靶材的穿孔时间出现较大幅度的下降, 为 (7.06±0.10) s。功率密度较低时靶材碳化层的温度较低, 沿着靶材深度方向的温度梯度较小, 由碳化层传递到内部热分解层的能量较少, GFRP 热分解的速率较低, 因此靶材单位时间的质量损失较少; 另一方面, 低功率密度下温度较低时 GFRP 孔隙内的热解气体较少, 热解气体的压强较低, 热解气体的

冲刷和剥离速率较低, 因此靶材穿孔时间较长。在高功率密度下, GFRP 热分解速率加快, 热解气体的冲刷和剥离作用变大, 导致靶材的穿孔时间急剧下降。当功率密度进一步增加时 (>1131 W/cm<sup>2</sup>), GFRP 穿孔时间的下降速率开始下降, 可能的原因是孔隙内的高温热解气体含量趋向饱和, 孔隙内气压不会出现较大幅度的增加, 同时气流供氧加速树脂热解的效应也趋向饱和, 最终穿孔时间的下降速率下降。当激光功率密度为 1556 W/cm<sup>2</sup> 时 GFRP 的穿孔时间为 (5.04±0.11) s, 相对于功率密度为 848 W/cm<sup>2</sup> 时的穿孔时间降低了 4.28 s, 可见功率密度对靶材的穿孔影响十分明显。



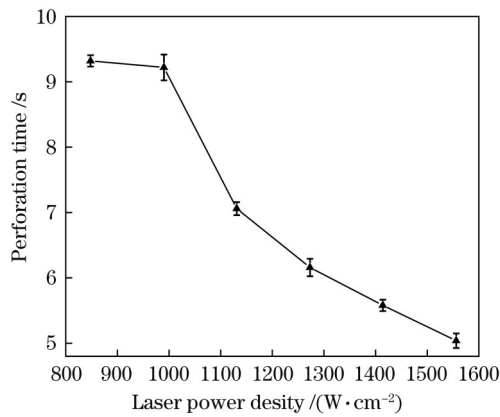


图 4 空气流速为 0.5 Ma 不同功率密度作用下 GFRP 的穿孔时间

Fig. 4 Perforation time of GFRP under different power densities with air flow rate of 0.5 Ma

### 3.2 切向空气流速对 GFRP 穿孔的影响

图 5 给出了激光功率密度为 848 W/cm<sup>2</sup> 时不同切向空气流速下的靶材穿孔形貌, 图 6 给出了激光辐照 3、6、9 s 时靶材表面的温度分布图。由图 5(a)、6(a) 可知, 无切向气流时靶材表面分布着大量的不完全热解的残炭, 并产生了大量热解气体, 靶材表面温度较高。当加载切向空气流速时, 切向气流提供的大量氧气使得热解残炭充分氧化, 残炭含量大幅度降低, 另一方面切向气

流提供的切向剪切力使热解残炭难以附着在靶材表面, 二者共同作用使得残炭的含量相较于无气流时大大降低。残炭含量的降低使得靶材吸收激光的方式转变, 这有利于 GFRP 的穿孔。随着切向空气流速的持续增加, 光斑外树脂热解区域出现先增大后缩小的变化趋势, 主要原因是流速较低时气流以热解(其携带的热量加速光斑外区域即下风区)为主, 流速较大时气流以冷却作用和力学剥蚀为主。随着流速的增加, 烧蚀坑内的球状玻璃纤维熔融物的尺寸逐渐减小, 与此同时, 下风区粘附的纤维熔融物逐渐增多。此外, 图 5 显示, 有切向气流时穿孔位置出现在下风区, 这与文献 [23] 中的实验结果吻合, 即随着切向气流速度的增大, 烧蚀坑的中心位置不断向下风区偏移。其仿真结果显示, 烧蚀坑中心相对激光光斑中心的偏移与靶材表面气流的流动特性有关, 随着烧蚀深度的增加, 烧蚀坑内部形成涡流, 其对氧气浓度分布产生影响。由图 6 可知, 切向气流的存在极大削弱了热解气体对激光的屏蔽作用。在远离激光光斑的区域, 材料表面不存在激光能量的直接累积, 其温度的提高主要依赖于切向气流的对流传热和靶材自身的热传导, 随着流速的增大, 气流的冷却作用增强, 靶材的热影响区逐渐缩小(以树脂热解温度 300 °C 为基准判定热影响区)。

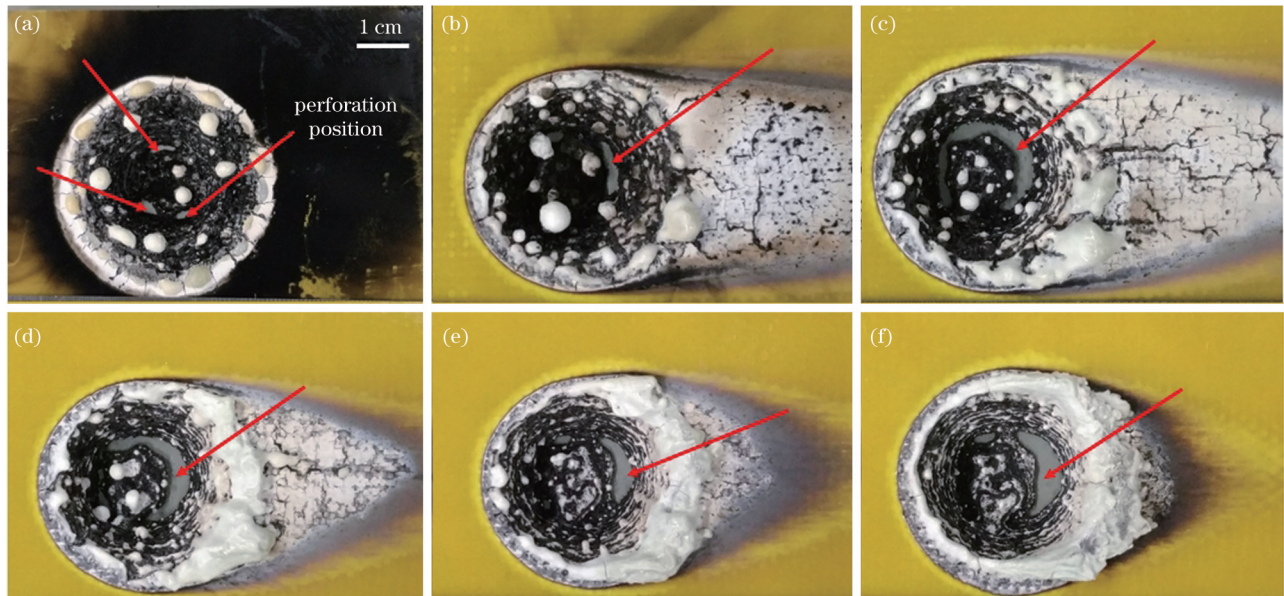


图 5 激光功率密度为 848 W/cm<sup>2</sup> 时不同切向空气流速下的 GFRP 烧蚀形貌。(a) 0 Ma; (b) 0.2 Ma; (c) 0.4 Ma; (d) 0.6 Ma; (e) 0.8 Ma; (f) 1.0 Ma

Fig. 5 Ablation morphologies of GFRP under different tangential air flow rates with laser power density of 848 W/cm<sup>2</sup>. (a) 0 Ma; (b) 0.2 Ma; (c) 0.4 Ma; (d) 0.6 Ma; (e) 0.8 Ma; (f) 1.0 Ma

在明显差异。相对于功率密度, 切向空气流速对 GFRP 温升速率的影响较小。由图 7(a) 可知, 随着切向空气流速的增加, GFRP 穿孔点温度没有出现较明显的下降趋势, 相对较稳定, 意味着当流速 ≤ 0.4 Ma 时, 气流对 GFRP 的冷却作用表现得不是特别明显。

在明显差异。相对于功率密度, 切向空气流速对 GFRP 温升速率的影响较小。由图 7(a) 可知, 随着切向空气流速的增加, GFRP 穿孔点温度没有出现较明显的下降趋势, 相对较稳定, 意味着当流速 ≤ 0.4 Ma 时, 气流对 GFRP 的冷却作用表现得不是特别明显。

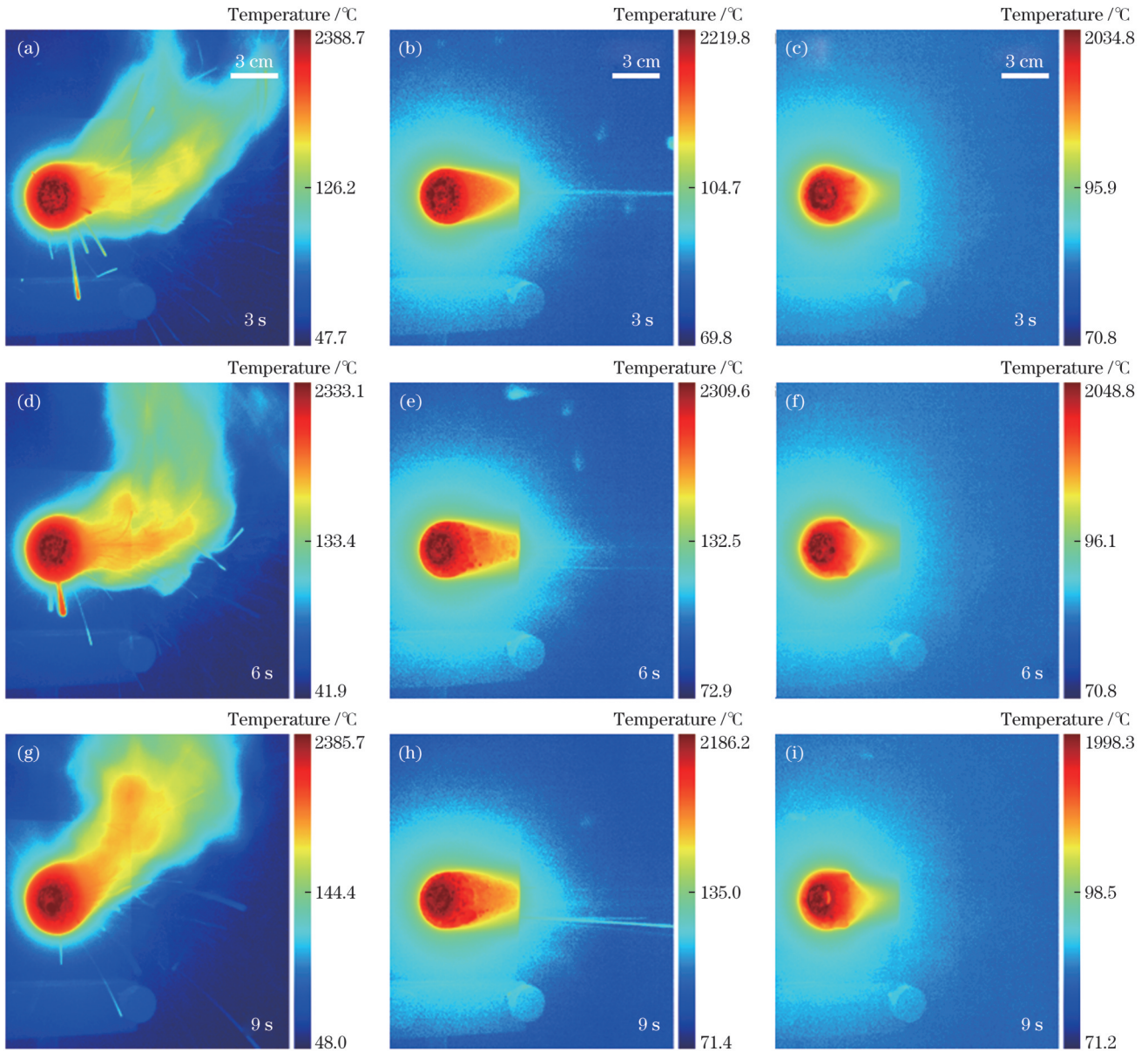


图 6 激光功率密度为  $848 \text{ W/cm}^2$  时不同时刻的 GFRP 表面温度分布。(a) 0 Ma; (b) 0.4 Ma; (c) 1.0 Ma  
 Fig. 6 Temperature distributions on GFRP surface under different moments with laser power density of  $848 \text{ W/cm}^2$ . (a) 0 Ma; (b) 0.4 Ma; (c) 1.0 Ma

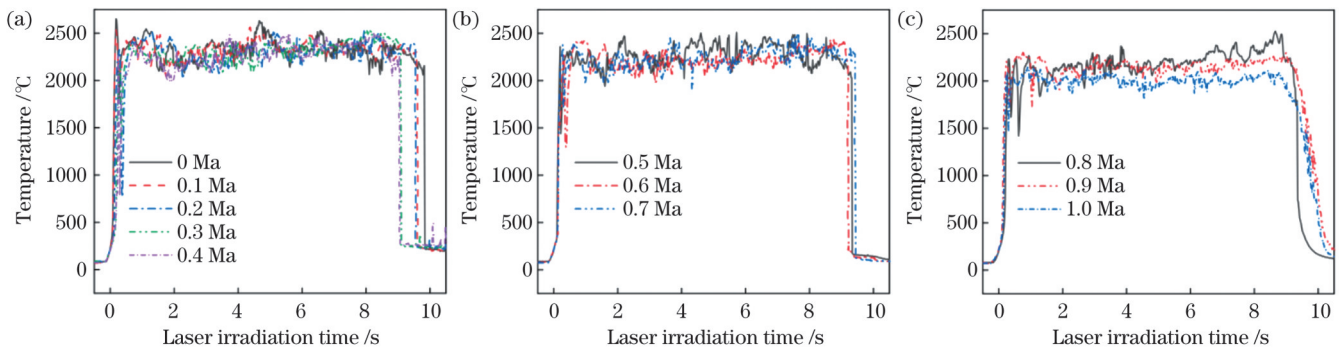


图 7 激光功率密度为  $848 \text{ W/cm}^2$  时不同切向空气流速下的 GFRP 穿孔点温升曲线。(a) 0~0.4 Ma; (b) 0.5~0.7 Ma; (c) 0.8~1.0 Ma  
 Fig. 7 Temperature rise curves of GFRP perforation point under different tangential air flow rates with laser power density of  $848 \text{ W/cm}^2$ . (a) 0~0.4 Ma; (b) 0.5~0.7 Ma; (c) 0.8~1.0 Ma



由图 7(c) 知, 当切向空气流速为 0.8~1.0 Ma 时, 切向气流对 GFRP 的冷却作用表现得较为明显, 随着流速的升高, 穿孔点的温度出现了比较明显的下降趋势。结合图 5(a)~(c) 所示的烧蚀形貌及图 6 所示的温度分布可知, 切向气流的作用主要表现为: 降低热解残炭含量, 进而转变靶材吸收方式; 削弱热解气体对激光的屏蔽作用; 加速空气对流, 降低靶材表面温度。

激光功率密度为 848 W/cm<sup>2</sup> 时 GFRP 穿孔时间随切向空气流速的变化如图 8 所示。随着切向空气流速的增加, GFRP 的穿孔时间表现为先下降后升高最终趋向稳定的趋势。在切向空气流速为 0~0.4 Ma 的区间内, 靶材的穿孔时间依次为 (9.82±0.16)s、(9.60±0.14)s、(9.53±0.1)s、(9.06±0.18)s 和 (9.03±0.13)s, 呈下降趋势。此后, 穿孔时间随空气流速的增加而增加, 即切向空气流速为 0.4 Ma 时对应的穿孔时间最短。无气流时 (流速为 0 Ma) 对应的穿孔时间最长, 此时靶材表面残炭含量很大 [图 5(a)], 靶材的吸热方式以面吸收为主, 不利于热解气体的产生和孔隙压力的升高, 致使 GFRP 的穿孔时间相对较大。有气流加载后, 表面残炭的含量下降, 靶材对激光的吸收由面吸收逐渐转变为体吸收, 靶材内部更易发生热解, 产生的气压加速了靶材的分层和剥蚀; 同时, 气流的力学剥蚀效应随着气流速度的增加而增强。这两个过程均起到了缩短穿孔时间的作用。在切向空气流速为 0.5~1.0 Ma 的区间内, 靶材的穿孔时间依次为 (9.32±0.09)s、(9.21±0.07)s、(9.41±0.15)s、(9.38±0.03)s、(9.48±0.06)s、(9.5±0.05)s, 呈现波动上升的趋势。在该阶段内, 表面热解残炭含量进一步降低, 靶材吸收方式以体吸收为主, 有利于靶材的穿孔; 同时, 随着气流速度的增加, 气流的力学剥蚀效应和冷却效应增强, 前者起到促进靶材穿孔的作用, 后者则会增加靶材的穿孔时间。如图 8 所示, 在 0.5~1.0 Ma 的区间内, 穿孔时间增加, 表

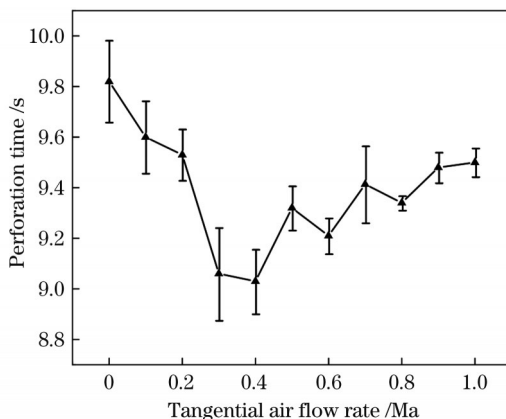


图 8 激光功率密度为 848 W/cm<sup>2</sup> 时不同切向空气流速下 GFRP 的穿孔时间

Fig. 8 Perforation time of GFRP under different tangential air flow rates with laser power density of 848 W/cm<sup>2</sup>

明切向空气流对靶材表面的冷却作用越来越显著。

流速改变导致穿孔时间差最大仅为 0.78 s, 相较于功率密度带来的时间差较小, 因为 GFRP 穿孔主要是由靶材孔隙压力升高产生的层状剥蚀造成的, 高功率密度下靶材能够达到更高的温度, GFRP 在较短时间内产生大量热解气体, 靶材孔隙压力升高。而切向空气流速的改变对温度的影响较小, 仅当流速  $\geq 0.8$  Ma 时才出现较明显的温度波动。流速引起的改变更多表现在改变靶材吸收方式和切向剪切力大小, 对穿孔时间的影响较小。

## 4 结 论

采用波长为 1070 nm 的连续激光对不同激光功率密度 (848~1556 W/cm<sup>2</sup>) 和切向空气流速 (0~1.0 Ma) 下的 GFRP 穿孔效应进行了研究。实验结果表明: 穿孔时间随功率密度的增加而下降, 主要原因是在高功率密度下靶材更容易在较短时间内生成大量热解气体, 进而产生较高的孔隙压力, 促进了靶材的剥蚀过程。切向空气流对 GFRP 穿孔过程的影响包括: 降低表面残炭含量, 促进靶材的体吸收过程; 加速靶材表面的对流换热; 提供切向剪切力, 产生力学剥蚀效应。切向空气流带来的上述三种影响在靶材的穿孔过程中存在着较明显的竞争关系。在激光功率密度为 848 W/cm<sup>2</sup> 的情况下, 当切向空气流速  $\leq 0.4$  Ma 时, 切向气流主要表现为促进树脂热解, 降低残炭含量, 转变靶材吸收方式, 此时靶材穿孔时间随流速的增加呈现下降趋势; 当切向空气流速处于 0.8~1.0 Ma 区间时, 气流的冷却作用表现得较为明显, 靶材的穿孔时间随流速的增加呈现缓慢上升的趋势。此外, 与切向气流速度相比, 功率密度的改变对 GFRP 穿孔时间的影响更为显著。

## 参 考 文 献

- [1] 吴良义. 先进复合材料的应用扩展: 航空、航天和民用航空先进复合材料应用技术和市场预测[J]. 化工新型材料, 2012, 40(1): 4-9, 91.  
Wu L Y. The application extend of advanced composite materials: technology markets of ACM application in aeronautics, astronautics and civil aviation[J]. New Chemical Materials, 2012, 40(1): 4-9, 91.
- [2] 张加波, 张开虎, 范洪涛, 等. 纤维复合材料激光加工进展及航天应用展望[J]. 航空学报, 2022, 43(4): 132-153.  
Zhang J B, Zhang K H, Fan H T, et al. Progress in laser processing of fiber composite materials and prospects of its applications in aerospace[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2022, 43(4): 132-153.
- [3] Henderson J B, Wiebelt J A, Tant M R. A model for the thermal response of polymer composite materials with experimental verification[J]. Journal of Composite Materials, 1985, 19(6): 579-595.
- [4] Dimitrienko Y I. Internal heat-mass transfer and stresses in thinwalled structures of ablating materials[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997, 40(7): 1701-1711.
- [5] Dimitrienko Y I. Thermomechanical behaviour of composite materials and structures under high temperatures: 1. materials[J]. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1997, 28

- (5): 453-461.
- [6] 梁哈, 赵树森, 姜璐, 等. 碳纤维复合材料激光热-机械剥蚀机制研究[J]. 中国激光, 2022, 49(10): 1002405.  
Liang H, Zhao S S, Jiang L, et al. Mechanism of laser thermo-mechanical ablation of carbon fiber composites[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(10): 1002405.
- [7] 郭亚林, 梁国正, 丘哲明, 等. 激光参数对碳纤维复合材料质量烧蚀率的影响[J]. 复合材料学报, 2006, 23(5): 84-88.  
Guo Y L, Liang G Z, Qiu Z M, et al. Effect of laser parameters on mass ablative rate of carbon fiber reinforced composite[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2006, 23(5): 84-88.
- [8] 彭国良, 张相华, 高银军, 等. 激光辐照玻璃纤维/环氧树脂复合材料的力学剥蚀研究[J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0106001.  
Peng G L, Zhang X H, Gao Y J, et al. Research to mechanics erosion effect of laser irradiating glass/epoxy composites[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0106001.
- [9] 陈敏孙, 江厚满, 刘泽金. 玻璃纤维/环氧树脂复合材料热分解动力学参数的确定[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(9): 1969-1972.  
Chen M S, Jiang H M, Liu Z J. Determination of thermal decomposition kinetic parameters of glass-fiber/epoxy composite [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(9): 1969-1972.
- [10] 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.  
Li Y D, Wu P, Ma X M, et al. The tests of carbon fiber/epoxy laminated composites under continuous laser irradiation[J]. Fiber Composites, 2010, 27(2): 21-24.
- [11] 彭国良, 杜太焦, 刘峰, 等. 激光烧蚀玻璃纤维/环氧树脂复合材料的能量耦合率模拟研究[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0203001.  
Peng G L, Du T J, Liu F, et al. Simulation study of laser energy coupling coefficient in the process of ablating glass fiber/epoxy composites[J]. Chinese Journal of Lasers, 2014, 41(2): 0203001.
- [12] Chippendale R D, Golosnoy I O, Lewin P L. Numerical modelling of thermal decomposition processes and associated damage in carbon fibre composites[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2014, 47(38): 385301.
- [13] 陈敏孙. 切向气流作用下激光对纤维增强树脂基复合材料的辐照效应研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.  
Chen M S. Research on the laser irradiation effects on fiber reinforced resin composites subjected to tangential gas flow[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
- [14] 陈敏孙, 江厚满, 焦路光, 等. 切向气流作用下玻璃纤维复合材料的激光辐照效应[J]. 强激光与粒子束, 2013, 25(5): 1075-1080.  
Chen M S, Jiang H M, Jiao L G, et al. Laser irradiation effects on glass fiber composite subjected to tangential gas flow[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(5): 1075-1080.
- [15] 彭国良, 张相华, 高银军, 等. 气流环境中碳纤维/环氧树脂复合材料烧蚀羽烟对激光透射率的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0206004.  
Peng G L, Zhang X H, Gao Y J, et al. Influence of error from plume on transmittivity during laser irradiating carbon/epoxy composites in gas flow[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2): 0206004.
- [16] 高贺, 张智, 陈连忠, 等. 硅基防热材料表面流动特性研究[J]. 空气动力学学报, 2019, 37(3): 406-411.  
Gao H, Zhang Z, Chen L Z, et al. Surface flow character study of silicone thermal protection material[J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2019, 37(3): 406-411.
- [17] 张检民, 马志亮, 冯国斌, 等. 切向空气流速度对玻璃纤维增强树脂基复合材料激光烧蚀热的影响[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0306004.  
Zhang J M, Ma Z L, Feng G B, et al. Influence of tangential airflows velocity on ablation heat of laser irradiated glass fiber reinforced resin composites[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0306004.
- [18] 贺佳, 张黎, 张永强, 等. 表面气流环境下激光辐照碳纤维复合材料实验研究[J]. 应用激光, 2014, 14(2): 118-121.  
He J, Zhang L, Zhang Y Q, et al. The test of laser ablation of carbon fiber composites materials in airflow environment[J]. Applied Laser, 2014, 14(2): 118-121.
- [19] 胡晓冬, 李元龙, 白少状, 等. 激光在材料去除加工中应用的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(5): 0500008.  
Hu X D, Li Y L, Bai S Z, et al. Research progress of laser application in material removal[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(5): 0500008.
- [20] 时圣波, 梁军, 刘志刚, 等. 高硅氧/酚醛复合材料烧蚀环境下的吸热机理[J]. 固体火箭技术, 2013, 36(1): 113-118.  
Shi S B, Liang J, Liu Z G, et al. Endothermic mechanism of silica/phenolic composite under ablative environment[J]. Journal of Solid Rocket Technology, 2013, 36(1): 113-118.
- [21] 徐善成. 切向空气流下连续激光辐照玻璃纤维增强树脂基复合材料烧蚀特性的研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2020.  
Xu S C. Study on ablation characteristics of glass fiber reinforced resin matrix composites by CW laser irradiation under tangential air flow[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2020.
- [22] 张晓腾, 李泽文, 周义青, 等. 在亚音速气流作用下连续激光辐照铝合金的穿孔效应[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(2): 20210883.  
Zhang X T, Li Z W, Zhou Y Q, et al. Perforation effect of CW laser irradiation on aluminum alloy under subsonic flow[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(2): 20210883.
- [23] Nan P Y, Li X, Pan Y X, et al. Shift of the laser ablation center on CFRP induced by the vortex in the boundary layer of tangential airflow[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(5): 2523-2533.

## Perforation Effect of Continuous Laser on Glass Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites Under Subsonic Tangential Airflow

Chen Geng, Tang Jie, Zhou yiqing, Pan Yunxiang\*, Zhang Hongchao\*\*, Li Zewen, Shen Zhonghua, Lu jian

School of Science, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China

### Abstract

**Objective** Glass fiber reinforced polymer (GFRP) with excellent wave-transparent properties are the preferred choice for optoelectronic devices and microwave dielectric materials owing to their high strength, light weight, and excellent electrical properties. Traditional cutting techniques for processing GFRP have problems such as severe tool wear, low efficiency, and low accuracy. The application of laser processing can solve these problems and has broader application prospects. However, some

problems remain in the processing of reduced materials by a single laser beam, such as the shielding of the subsequent laser by the pyrolysis gas, transformation of the target absorption mode due to incomplete pyrolysis of the residual carbon, and irregularity of the ablation morphology. The laser processing assisted by tangential air flow can solve these problems and improve the efficiency of material processing. In this study, a detailed investigation on the target perforation time, ablation morphology, and temperature distribution on the ablation surface under different power densities and tangential air flow was carried out. These results are helpful for improving the processing efficiency and profile of GFRP.

**Methods** A fiber laser (wavelength of 1070 nm) with a maximum output power of 20 kW was used to interact with the GFRP in a relatively confined metal target chamber. Tangential air flow was provided by an air compressor and flowed out through a nozzle, and the air flow rate was measured using the Pitot tube method. A manometer was used to measure the pressure of the tangential air flow output from the nozzle; therefore, the stability of the air flow was monitored. The range of air flow rate used in the experiment was 0–1.0 Ma. The temperature evolution from the front and rear surfaces of the target was recorded using an infrared thermometer imager. The temperature data of the perforation point was extracted to draw a temperature change curve with time, and the perforation time was obtained from the falling edge of the temperature curve.

**Results and Discussions** The perforation effects of GFRP are investigated at different laser power densities (848–1556 W/cm<sup>2</sup>) and tangential air flow velocities (0–1.0 Ma). It is found that the effect of increasing the laser power density on the ablation rate of GFRP is more significant than that of varying the tangential air flow rate (Figs. 4 and 8). With an increase in the tangential air flow rate, the perforation time shows a decreasing trend and then a slow increase (Fig. 8). This behavior is related to three effects caused by the tangential air flow: reducing the surface residual carbon content to promote the bulk absorption of the target (Fig. 5), enhancing the heat convection on the target surface to accelerate the cooling (Fig. 7), and providing tangential shear force to produce a mechanical erosion effect.

**Conclusions** The perforation effect of GFRP at different laser power densities (848–1556 W/cm<sup>2</sup>) and tangential air flow rates (0–1.0 Ma) is investigated using a continuous laser with a wavelength of 1070 nm. The experimental results show that the perforation time decreases with increasing power density. A large amount of pyrolysis gas is generated in a shorter time period at higher power densities, which further results in a higher pore pressure and promotes the exfoliation process of the target. The effects of tangential air flow on the GFRP perforation process include reducing the surface residual carbon content to promote the bulk absorption process of the target, enhancing the cooling effect on the target surface, and providing a tangential shear force to produce a mechanical erosion effect. The three effects caused by tangential air flow have an obvious competitive relationship in the perforation process of the target. For the laser power density of 848 W/cm<sup>2</sup>, when the tangential air flow rate is  $\leq 0.4$  Ma, the effect of tangential air flow is mainly used to promote resin pyrolysis, reduce the residual carbon content, and change the target absorption mode. Hence, the target perforation time decreases with an increase in the air flow rate. When the tangential air flow rate is in the range of 0.8–1.0 Ma, the cooling effect is more obvious. Therefore, the perforation time of the target material increases slowly with an increase in the air flow rate. In addition, compared with the tangential air flow rate, the effect of the power density on the perforation time of the GFRP is more significant.

**Key words** laser optics; laser damage; continuous laser; glass fiber reinforced polymer; tangential airflow; perforation effect