

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

张检民 马志亮 冯国斌 贺敏波 刘卫平 韦成华

西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024

摘要 烧蚀热可用于材料抗激光加固性能表征和材料的激光加工效率描述。实验研究了亚音速表面切向空气流速度和激光功率密度对玻璃纤维/树脂复合材料烧蚀热的影响规律, 结果表明, 相同气流速度下, 烧蚀热在 100~500 W/cm² 激光功率密度范围内先迅速降低然后趋于稳定, 转折点约位于 200 W/cm²; 相同激光作用下, 功率密度较低时, 烧蚀热随着气流速度提升而变大, 功率密度高于一定值(约 200 W/cm²)后, 烧蚀热随气流速度提升而降低。分析认为材料内部扩散、热解气体燃烧、残碳氧化放热、辐射能量损失、气流剥蚀等多个因素的竞争是激光能量利用效率变化的原因。

关键词 激光光学; 激光辐照效应; 烧蚀热; 玻璃纤维复合材料; 切向气流速度; 激光功率密度

中图分类号 TN249 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201542.0306004

Influence of Tangential Airflows Velocity on Ablation Heat of Laser Irradiated Glass Fiber Reinforced Resin Composites

Zhang Jianmin Ma Zhiliang Feng Guobin He Minbo Liu Weiping Wei Chenghua

*State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology,
Xi'an, Shaanxi 710024, China*

Abstract Ablation heat can be not only used to represent the capability in laser-hardening of composite, but also to describe the laser processing efficiency. Experiments are conducted to analyze the influence law of tangential airflows velocity at low subsonic and laser intensity on laser ablation heat of glass fiber reinforced epoxy resin composites. It shows that laser ablation heat decreases rapidly with the incident laser intensity firstly and then become stable at the same airflow velocity, when the laser irradiance is in the range of 100~500 W/cm². The pivotal point of the ablation heat is about 200 W/cm². On the condition that the laser intensity is below about 200 W/cm², laser ablation increases with the airflow velocity with the same laser irradiation. On the contrary, laser ablation decreases with the airflow velocity. Ablation mechanism analysis indicates that the variation of utilizing efficiency of incident laser energy is attribute to the competition of multiple factors which include thermal diffusivity in material, surface combustion of pyrolysis gas, oxidative ablation of pyrolytic charcoal, radiation induced energy loss, and airflow denudation effect.

Key words laser optics; laser irradiation effect; ablation heat; glass fiber composite; tangential gas flow velocity; laser intensity

OCIS codes 140.3460; 140.3330; 140.3390

1 引 言

复合材料在航空航天以及诸多民生领域应用日益广泛、激光技术日益成熟、激光加工技术被引入飞行器制造与维修^[1],使得复合材料的激光加工效率与质量^[2-3]以及材料自身的抗激光加固等已成为人们必须考虑的

收稿日期: 2014-09-26; 收到修改稿日期: 2014-10-27

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室专项预研基金(12111301)

作者简介: 张检民(1982—),男,硕士,副研究员,主要从事激光与物质相互作用方面的研究。E-mail: zhangjianmin@nint.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

问题,复合材料激光辐照效应研究因此受到人们的高度重视^[4-5]。激光防护设计中,常关心材料背表面温度和材料自身抗烧蚀能力,而激光加工中,则较为关心激光对材料的烧蚀效率。烧蚀热定义为烧蚀单位质量物质所需要的入射激光能量^[6],可较好地满足上述两类应用中关于材料性能表征和激光加工效率描述的需求。

玻璃纤维增强树脂基复合材料作为第一代航空复合材料,常被用作非主要承力件。关于激光与玻璃纤维材料相互作用的研究始于20世纪七八十年代^[7-8],但至今热度不减,涉及效应现象实验研究、效应机理分析、数值建模、模型参数确定及模型校验等多个方面。近年的代表性工作包括连续激光对玻璃纤维树脂基复合材料的损伤效应实验研究^[9],切向气流作用下玻璃纤维复合材料的激光辐照效应实验研究^[10],表面气流作用下玻璃纤维复合材料碳化与烧蚀效应三维建模^[11],激光作用过程中玻璃纤维/环氧复合材料耦合特性随温度的变化规律测量^[12],基于光线追迹方法的玻璃纤维复合材料吸收率、吸收深度以及光功率增强效应分析^[13],无须经验参数的玻璃纤维/环氧复合材料激光烧蚀过程中的能量耦合率模拟^[14]等。其中,陈敏孙^[15]测量给出了较大速度范围(0.12~0.8 Ma)内976 nm连续波激光烧蚀所致材料质量损失随空气气流速度的变化规律,认为质量损失随速度增大先增加后减小,速度拐点约为0.4 Ma,即低亚音速条件下烧蚀热随气流速度增大而降低,该结果在固定激光功率密度(295 W/cm²)下测得,激光强度改变后是否亦如此,目前未见报道。

本文通过实验研究了不同强度短波红外连续波激光作用下,低亚音速切向气流速度对玻璃纤维/环氧材料烧蚀热的影响规律,发现功率密度较低时烧蚀热随着气流速度提升而增加,当功率密度高于某值后,变化趋势出现反转,烧蚀热随气流速度变大而降低。综合烧蚀形貌和试样热失重测试数据,分析了材料的分阶段烧蚀机理,对激光能量利用效率的变化原因做出了解释。

2 实验设计

低亚音速表面切向气流作用下复合材料激光辐照效应实验装置如图1所示。激光经组合透镜及整形元件进行光斑尺寸控制和光束匀化,表面气流模拟装置提供稳定均匀的表面流场,作用在试样前表面,样品表面烧蚀形貌演变过程由大动态范围相机记录,背表面温度场由热电偶监测。探测器用于测量激光作用时间,防护板对穿透样品的激光进行遮挡吸收,保护实验设备及人员安全。靶面功率以激光器自带的输出功率测量模块监测,光路透射率、靶面光斑分布在实验前测量。激光辐照前后以分辨率为0.1 mg的微量天平对材料烧蚀失重进行测量,计算不同功率密度下的烧蚀热。

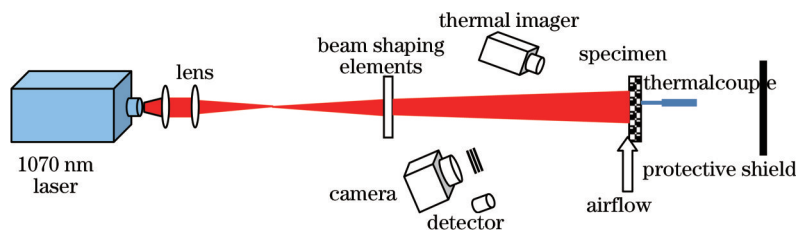


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schema of experimental setup

玻璃纤维布层压板试样由西安某材料研究所制作,以0.21 mm厚2×2斜纹玻璃布压制,环氧树脂为E-51型。玻璃纤维质量分数为68%,软化温度约为1100 ℃,玻璃纤维布层压板的密度约为2.0 g/cm³。样品尺寸为20 mm×25 mm,厚度为2 mm,对1070 nm激光的反射率为33%,透射率为11%。

为进一步研究样品的特性,通过热失重测试分析了环氧树脂固化体(基体)和玻璃纤维布层压板两种试样的热稳定性,该测试给出的热失重曲线(TG)、微分热失重曲线(DTG)和差示扫描量热曲线(DSC)可辅助分析复合材料的烧蚀过程。环氧树脂固化体测试升温范围为室温至800 ℃,升温速率为10 ℃/min,与文献[16]结果结合分析可知,E-51环氧树脂在300~500 ℃之间发生剧烈热分解反应,到600 ℃时热分解基本完成,树脂裂解产生的疏松残碳在空气氛围中快速氧化,材料最终几乎完全失重。本文所用试样的失重峰位于350 ℃和384 ℃附近。

玻璃纤维布层压板测试升温范围为室温至1400 ℃,分别在氮气和空气氛围中进行,升温速率为20 ℃/min,图2为测试结果。两种气氛下,温度低于100 ℃时,质量损失速率(DTG)不为零,主要源于材料水分蒸发。环

氧树脂自 300 °C 开始发生热解反应,到 620 °C 时热解基本完成;空气氛围使得树脂裂解残碳快速氧化,而氮气氛围中的氧化过程持续时间较长。空气氛围中,330 °C 附近出现一个失重峰和放热峰,源于树脂裂解小分子产物燃烧,420 °C 附近出现第二个不太明显的失重峰,对应树脂的加速裂解,550 °C 附近出现明显的失重峰,且 DSC 中出现很强的放热峰,对应裂解残碳在空气中的剧烈氧化,即空气中树脂裂解小分子产物燃烧和残碳氧化过程对材料失重有明显影响。残碳氧化完成后,材料几乎不再失重,剩余质量分数为 69%,与层压板中玻璃纤维的质量分数 68% 接近。此外,玻璃纤维软化至熔化温度区间(1200 °C 附近)存在吸热现象。与文献[17]对比可见,不同厂家的相近规格玻璃纤维增强树脂基复合材料,热失重过程与机理相似。实际上,环氧树脂基复合材料的热解温度随升温速率提高而提高^[18],且反应程度亦有所不同^[17],但整体而言,这些差别并不会影响对材料烧蚀机理的分析。

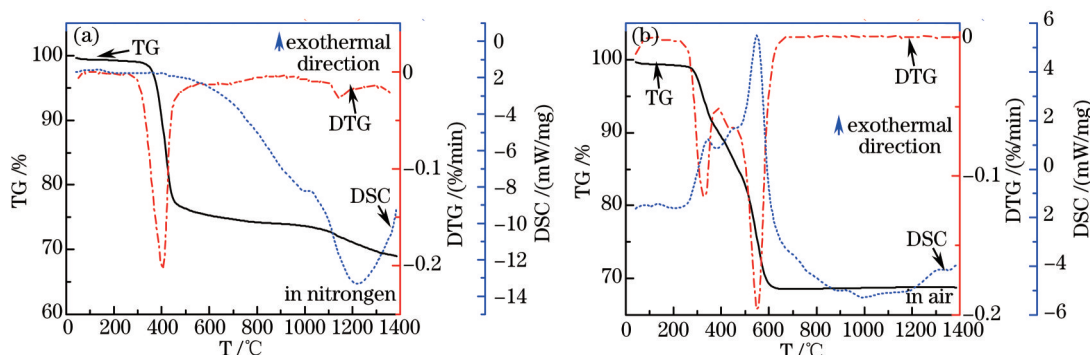


图 2 玻璃纤维布层压板在氮气(左)和空气(右)氛围中的热分析曲线

Fig.2 Thermogravimetric analysis of glass fiber laminate in nitrogen (left) and air (right)

树脂裂解残碳氧化、玻璃纤维熔融等过程皆属材料质量损失中的决定性因素,不同气流条件带来不同的表面换热环境和氧气供应条件,影响烧蚀产物对激光的屏蔽,亦可能影响其气动力作用过程。实验中选定的代表性气流速度水平为(30, 50, 70) m/s 三档。

以烧蚀质量为目标物理量分析不同功率密度下辐射系数、对流换热系数、热解速率、热导率、树脂含量及热容等参数的相对敏感性,认为树脂含量及辐射系数是较敏感的参数,且其相对敏感度随激光功率密度变化较大^[19]。文献[17]亦曾给出,升温速率越慢,环氧树脂基体的裂解残碳在空气中的氧化反应越充分,玻璃纤维增强环氧树脂复合材料最终的剩余质量分数越小。可见,不同功率密度激光辐照下的材料烧蚀过程将有较大不同。根据前期摸底实验,靶面光斑功率密度水平设定为(100, 200, 300, 400, 500) W/cm² 5 档。

摸底实验显示,相同激光功率密度下,烧蚀质量损失近似随辐照时间线性增加,其他研究人员的结果亦印证了该结论^[20],因此,研究中激光辐照时间统一设定为 5 s。

3 实验结果与分析

激光光斑近似方形,尺寸约为 7 mm×6 mm,实际靶面激光功率密度范围为 104~510 W/cm²。为更清晰地观察烧蚀热随激光功率密度变化的拐点,在预设档位的基础上增加两个位于 100~200 W/cm² 间的功率密度点。

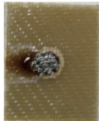

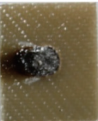

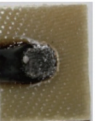
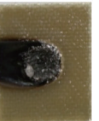
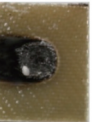

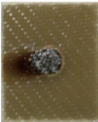



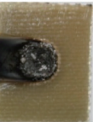





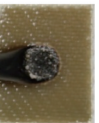
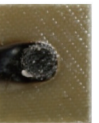
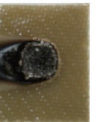
3.1 烧蚀形貌

不同功率密度激光及不同速度表面空气流作用下的试样烧蚀形貌见表 1,玻璃纤维材料激光烧蚀过程典型大动态范围图像如图 3 所示。可见,同一速度气流加载条件下随着激光功率密度增加试样表面烧蚀程度逐渐加深,具体表现为试样烧蚀碳化区域变大、烧蚀区下游树脂热解碳化产物颗粒吸附量增加,烧蚀坑深度、面积逐渐增大等。激光功率密度为 104 W/cm² 时,试样的损伤以受照部位环氧树脂的热解碳化为主,玻璃纤维布结构基本保持完整;激光功率密度达到 129 W/cm² 时,玻璃纤维布的结构已经发生变化,烧蚀区域中心的玻璃纤维被激光加热熔化,从大动态范围相机记录的烧蚀过程图像中可以看出玻璃纤维熔化为液体并被气流从烧蚀区移除(部分熔融物在剪切力和表面张力作用下部分熔融可能形成玻璃珠)。相同功率密度激光辐照下,不同速度气流作用下烧蚀形貌稍有差异,表现为功率密度低于 206 W/cm² 时,随着气流速度增加烧蚀区域面积减小,烧蚀区下游热解产物吸附量减少;功率密度高于 311 W/cm² 时,烧蚀区面积基本相同,

只是烧蚀区下游热解产物吸附量减小。

表 1 不同功率密度激光及不同速度表面空气流作用下玻璃纤维层压板烧蚀形貌

Table 1 Laser ablating morphologies of glass fiber laminates at different laser intensities for three airflow states

| velocity $v/(m/s)$ | Average laser intensity $I/(W/cm^2)$ | | | | | | |
|-----------------------|---|---|---|---|--|---|---|
| | 104 | 129 | 149 | 206 | 311 | 405 | 510 |
| 30 |  |  |  |  |  |  |  |
| 50 |  |  |  |  |  |  |  |
| 70 |  |  |  |  |  |  |  |

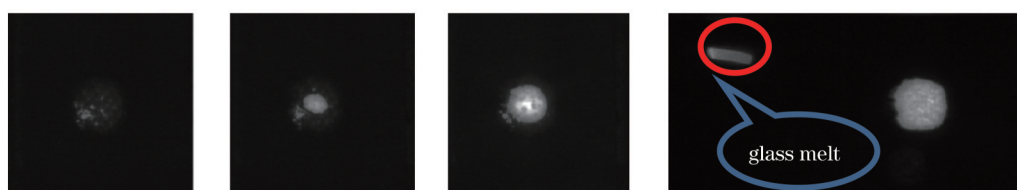


图 3 玻璃纤维复合材料典型烧蚀过程的大动态范围图像

Fig.3 Typical high dynamic range pictures of laser ablating glass/epoxy composites

3.2 烧蚀热随激光功率密度变化规律

不同速度气流加载下材料质量损失和烧蚀热随激光强度变化曲线如图 4、图 5 所示。可见,低亚音速气流作用时,烧蚀热均是先随激光功率密度增加迅速降低,激光功率密度达到 $206 W/cm^2$ 之后变化放缓,超过 $300 W/cm^2$ 后趋于稳定。

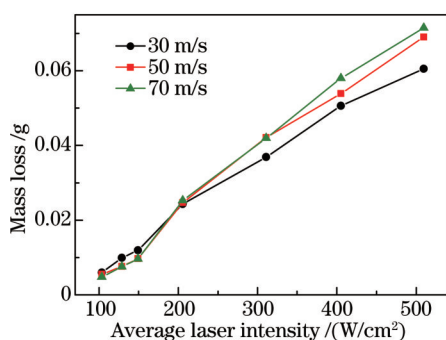


图 4 质量损失随光强变化曲线

Fig.4 Variation of mass loss versus laser intensity

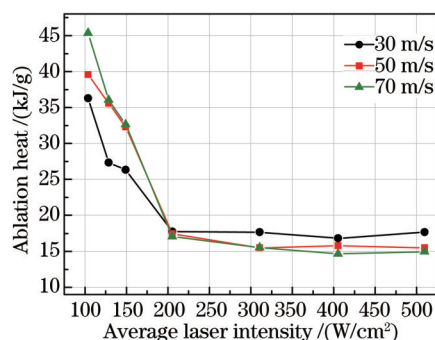


图 5 烧蚀热随光强变化曲线

Fig.5 Variation of ablation heat versus laser intensity

激光功率密度较低时,受辐照区域的环氧树脂发生热解,释放的小分子产物被气流带往气流下游。激光变强后,试样内部材料达到热解温度的区域变大,能量利用效率上升;此时热解气体增多,且气体温度升高,导致下游非辐照区域亦出现热解,整体烧蚀效率显著提高。对实验样品而言, $104 W/cm^2$ 时仅出现轻微的树脂热解,此时激光以体吸收为主,“无益热扩散”(部分激光能量被用于加热靶内纵深区域的材料,但这些材料温度较低,未发生热解,即这种热扩散对提高材料烧蚀效率无有益帮助)导致烧蚀效率非常低。功率密度提高后,辐照区及热影响区域内达到热解温度的材料增多,烧蚀效率提高。激光更强时,热解气体被引燃(热重分析显示空气中热解气体燃点在 $330\text{ }^\circ\text{C}$ 左右,而树脂基体的燃点温度大于 $450\text{ }^\circ\text{C}$ ^[21]),气流下游受热效果更显著。

较高功率密度下,树脂热解充分并大量成碳,激光吸收方式转变为面吸收,且耦合效率大幅提高(从约60%提高到约90%),玻璃纤维迅速升温达到其熔化温度附近(前文热重分析结果显示为1200℃左右)后不再升高。该温度点处的热辐射损失上限为 $\sigma(T_m^4 - T_\infty^4) \approx 26 \text{ W/cm}^2$,其中 σ 为玻尔兹曼常数, T_m 为熔化温度, T_∞ 为环境温度。相对辐照激光而言热辐射损失是恒定小量,可以忽略。玻璃纤维吸收相当于熔化潜热(约10 kJ/g)的热量后发生熔化,液态玻璃被气流带走,因熔化潜热为定值,若认为此时内部扩散热流亦为定值,则烧蚀热趋于定值;若考虑内部扩散热流随着温度梯度降低而变小,则烧蚀热将继续缓慢降低,该结论与实验数据更加吻合。

若激光功率密度足够高,玻璃纤维发生汽化烧蚀,辐射损失不可忽略,激光烧蚀热上升;随着激光功率密度继续提高,因材料气化烧蚀点恒定,辐射损失与入射激光功率之比下降,烧蚀热将再次下降。

3.3 烧蚀热随气流速度变化规律

进一步绘制不同功率密度下烧蚀热随空气速度的变化曲线如图6所示,可见,激光功率密度小于149~206 W/cm²间的某一值时,烧蚀热随气流速度提升而增加;激光功率密度高于该值时,烧蚀热随气流速度提升而降低。

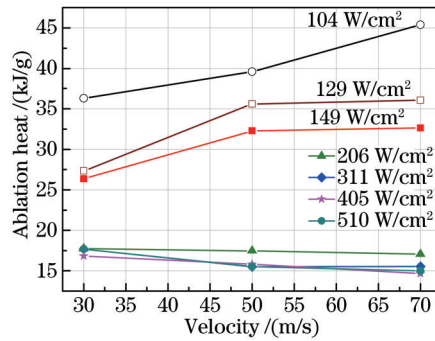


图6 不同激光功率密度时烧蚀热随空气速度变化曲线

Fig.6 Variation of ablation heat versus airflow velocity for different laser intensities

计入热解过程但不考虑气流剥蚀作用,并假设热解气体为不可压缩理想气体,且材料内部气体与固体处于热平衡状态,则材料激光烧蚀过程的能量守恒方程为

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) - c_g \rho_g V \cdot \nabla T - Q \frac{\partial \rho}{\partial t} + q_{\text{laser}}, \quad (1)$$

式中 ρ 、 c 分别为固体的密度及热容, T 为材料温度, ∇ 为空间梯度算子, k 为热导率, ρ_g 、 V 、 c_g 分别为热解气体的密度、速度及热容, Q 为热分解潜热, q_{laser} 为体吸收激光热量。考虑热辐射、空气及热解气体对流换热、热解气体燃烧加热或热解残碳氧化放热、材料表面气化烧蚀等因素,受辐照表面的边界条件为

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha I - \varepsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4) + h(T_f - T) + Q_a - \rho v H, \quad (2)$$

式中 n 代表法向, α 为激光耦合系数, I 为激光功率密度, ε 为材料表面发射率, T_f 为材料表面流体温度, h 为对流换热系数, Q_a 为燃烧加热或氧化放热, v 为表面材料烧蚀速率, H 为表面材料气化潜热。(1)、(2)式离散化可得控制体上的能量平衡方程,其源项的形式与前两式一致,不再列出,据此对烧蚀热变化规律进行如下分析。

试样在激光作用下的热解产物向外喷出,对入射激光有一定屏蔽作用。表面切向空气流吹走热分解产物,称之为气流的清洁作用。清洁作用可提高激光能量耦合效率,即(2)式中 α 变大,烧蚀效率提高;清洁作用亦会使得热解产物被吹散而不易点燃, Q_a 变小,整体烧蚀效率降低。空气流携带的氧气有助于表面固体材料的氧化烧蚀和流出界面的热分解产物的氧化,称为供氧作用。供氧作用可使 Q_a 变大。表面气流通过强迫对流换热使试样降温,称为冷却作用。低亚音速时,(2)式中试样表面对流换热系数可用层流边界层平均换热系数 \bar{h} 估算。

$$\bar{h} = N_u k_g / x = 0.664 P_r^{1/3} R_e^{1/2} k_g / x, \quad (3)$$

式中 N_u 、 P_r 、 R_e 分别为努赛尔数、普朗特数、雷诺数, k_g 为气流热导率, x 为沿表面气流方向的长度。 $P_r = \nu / a$,其中 ν 为运动黏度, a 为导温系数; $R_e = x \rho_g v_x / \mu$,其中 ρ_g 为流体密度, v_x 为流体特征速率, μ 为流

体粘性系数。计算室温下(30, 50, 70) m/s 三种速度状态所对应的热流密度曲线如图 7 所示, 其中试样表面温度范围取室温至玻璃纤维熔化温度 1200 °C。可见, 对流所致能量损失最大为 14 W/cm², 最小为 9 W/cm², 相差很小。在实验功率密度水平下, 损耗比例范围为 2%~15%。

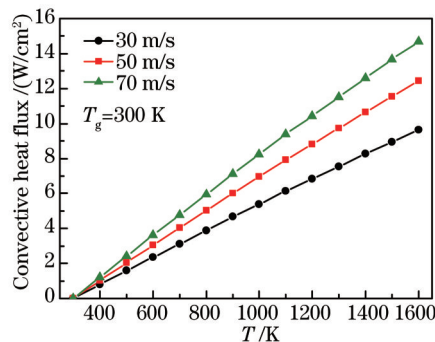


图 7 不同速度下对流换热热流随试样表面温度变化

Fig.7 Convective heat flux versus temperature of front surface for different airflow velocity

烧蚀形貌显示气流速度增加烧蚀区域面积减小, 烧蚀区下游热解产物吸附量减少, 表明低功率密度(约 100 W/cm²)时树脂热解程度低, 产生的热解气体偏少。提高气流速度, 对流换热加剧, 数值方法估算此时的材料表面温度不超过 580 °C, 实验气流速度水平下, 对流换热所致能量损失增量不超过辐照激光的 5%, 而实测的烧蚀效率降低量为 25%。对前文所述影响因素逐一分析排除, 可认为此时热解气体少, 气流速度提高后, 热解气体更易被吹散而难以点燃, 对下游区域的加热效果变弱, 进而使得烧蚀热变大。

功率密度逐步提高(100~200 W/cm²), 树脂热解变得充分, 热解加剧使得(1)式右侧第二项表征的热解气体在材料内部的换热量增大, 但此时热解气体逐渐丰富而易被点燃, 表面热解残碳开始被烧蚀。随着功率密度增大, 供氧作用逐步占据主导地位, 最终使得烧蚀热曲线变化规律慢慢反转。燃烧和残碳烧蚀需氧量有限, 气流速度达到一定程度后, 该因素所致的烧蚀效率增速放缓。

功率密度足够高(大于 200 W/cm²)时, 玻璃纤维软化、熔融, 气流剥蚀作用显现, 烧蚀效率随着气流速度提升再次增加。雷诺数 $R_e < 10^6$ 时切向气流产生的剪切力为^[22]

$$\tau = 0.5C_f \rho_g v_x^2 = 0.664R_e^{1/2} \rho_g v_x^2, \quad (4)$$

即剪切力与气流速率平方成正比(C_f 为粘滞阻力系数)。气流剪切力大于熔融层粘附力或者软化后的纤维强度时, 熔融物被吹除、纤维被剥落。速度提升, 剪切力变大, 剥蚀作用强烈, 材料质量损失增加, 烧蚀热变小。剪切力大到一定程度后, 熔融物出现即被剥离, 气流速度的影响力降低, 体现为烧蚀热曲线下速度放缓。

4 结 论

通过开展表面气流加载环境中的玻璃纤维布层压板激光烧蚀效应研究, 获得了烧蚀热随激光功率密度、气流速度的变化规律, 认为不同情况下激光能量利用效率的变化源于内部传热所致的能量耗散、树脂热解气体燃烧对下游非辐照区的加热、树脂残碳的氧化放热、辐射损失的能流密度、气流剥蚀等诸多因素的竞争作用。相同气流速度下, 烧蚀热在实验功率密度范围内先迅速降低然后趋于稳定。相同激光功率密度下, 随着激光强度提高, 烧蚀热先随气流速度提升而变大, 之后逐步演化为随气流速度提升而变小。进一步分析可得推论, 内部能量传递使得烧蚀效率随试样厚度增加而降低; 平均功率密度相近但能量集中度不同的光斑作用下, 均匀光斑作用时的“无益热扩散”消耗的能量占比更大, 能量利用效率降低。

烧蚀热随激光强度增加单调下降并趋近定值的变化规律, 使得激光加工中选择相对较低的功率密度即可取得最佳效果。烧蚀热对能量集中度的敏感性要求提高激光光束质量, 获得更好的聚焦效果。加工中辅以较高速度的切向气流, 可有效提高加工效率。

参 考 文 献

- 1 Hu Fangyou, Hui Li, Yi Dexian, et al.. Laser repair of aircraft battle damage[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(9): 2245-2250.
胡芳友, 回 丽, 易德先, 等. 飞机损伤的激光抢修技术[J]. 中国激光, 2009, 36(9): 2245-2250.

- 2 F Schneider, N Wolf, D Petring. High power laser cutting of fiber reinforced thermoplastic polymers with CW- and pulsed lasers[J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 415-420.
- 3 I A Choudhury, P C Chuan. Experimental evaluation of laser cut quality of glass fibre reinforced plastic composite[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2013, 51(10): 1125-1132.
- 4 Peng Guoliang, Zhang Xianghua, Wang Yuheng, *et al.*. Effect of laser parameters on C/SiC composites material ablation heat[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(11): 1103010.
彭国良, 张相华, 王玉恒, 等. 激光参数对 C/SiC 复合材料烧蚀热的影响[J]. *中国激光*, 2013, 40(11): 1103010.
- 5 Zhu Kai, Long Lianchun. Numerical simulation and experiment contrast about laminated plate under laser irradiation[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0103004.
朱 凯, 龙连春. 激光辐照层合板的数值模拟与试验对比[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0103004.
- 6 Li Qingyuan. *Damage Effects of Vehicles Irradiation by Intense Lasers*[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House Press, 2012.
李清源. 强激光对飞行器的毁伤效应[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2012.
- 7 George Y J J. *Thermomechanical Ablation*[D]. Ohio: Air Force Institute of Technology, 1976.
- 8 P K Wu, R G Root. Single pulse laser irradiation of fiberglass[J]. *AIAA Journal*, 1980, 18(7): 857-859.
- 9 Wan Hong, Hu Kaiwei, Mu Jingyang, *et al.*. Damage analysis of fiber reinforced resin matrix composites irradiated by CW laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(1): 6-10.
万 红, 胡凯为, 穆景阳, 等. 树脂基复合材料在连续激光作用下的损伤[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(1): 6-10.
- 10 Chen Minsun, Jiang Houman, Jiao Luguang, *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.
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.
- 11 V S Vladimir, F M Timothy. Modeling of laser charring and material removal in fiberglass materials[J]. *Journal of Directed Energy*, 2006, 2(1): 5-21.
- 12 R K Freeman, F A Rigby, N Morley. Temperature-dependent reflectance of plated metals and composite materials under laser irradiation[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2000, 14(3): 305-312.
- 13 C D Boley, A M Rubenchik. Modeling of laser interactions with composite materials[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(14): 3329-3337.
- 14 Peng Guoliang, Du Taijiao, Liu Feng, *et al.*. Simulation study of laser energy coupling coefficient in the process of ablating glass fiber/epoxy composites[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(2): 0203001.
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.
- 15 Chen Minsun. *Research on the Laser Irradiation Effects on Fiber Reinforced Resin Composites Subjected to Tangential Gas Flow* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012.
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.
- 16 Chen Bo, Wan Hong, Mu Jingyang, *et al.*. Ablative mechanism of carbon-fiber/epoxy composite irradiated by repetition frequency laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(4): 547-552.
陈 博, 万 红, 穆景阳, 等. 重频激光作用下碳纤维/环氧树脂复合材料热损伤规律[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(4): 547-552.
- 17 Chen Minsun, Jiang Houman, Liu Zejin. Determination of thermal decomposition kinetic parameters of glass-fiber/epoxy composite [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(9): 1969-1972.
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.
- 18 Shu Fang. *Preparation and Properties of Epoxy Matrix Composites*[D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2014.
疏 芳. 环氧树脂基复合材料的制备及性能研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2014.
- 19 Peng Guoliang, Yan Hui, Liu Feng, *et al.*. Numerical simulation of laser ablation of fiber-reinforced composite materials[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 216-222.
彭国良, 闫 辉, 刘 峰, 等. 纤维增强复合材料激光烧蚀效应的数值模拟[J]. *中国光学*, 2013, 6(2): 216-222.
- 20 He Jia, Zhang Li, Zhang Yongqiang, *et al.*. The test of laser ablation of carbon fiber composites materials in airflow environment[J]. *Appl Laser*, 2014, 34(2): 118-121.
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, 34(2): 118-121.
- 21 J K Chen, C T Sun, C I Chang. Failure analysis of a graphite/epoxy laminate subjected to combined thermal and mechanical loading [J]. *Journal of Composite Materials*, 1985, 19(5): 408-423.
- 22 Guo Yonghuai. *Handout of Boundary-Layer Theory*[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2008.
郭永怀. 边界层理论讲义[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2008.

栏目编辑: 张浩佳