

中国激光  
*Chinese Journal of Lasers*  
ISSN 0258-7025, CN 31-1339/TN

## 《中国激光》网络首发论文

题目： 基于高温原位观测的高速风洞内强激光诱导的瞬态破坏行为研究  
作者： 马特，王江涛，袁武，宋宏伟，王睿星  
收稿日期： 2022-10-17  
网络首发日期： 2023-01-05  
引用格式： 马特，王江涛，袁武，宋宏伟，王睿星. 基于高温原位观测的高速风洞内强激光诱导的瞬态破坏行为研究[J/OL]. 中国激光.  
<https://kns.cnki.net/kcms/detail//31.1339.TN.20230104.1355.015.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 基于高温原位观测的高速风洞内强激光诱导的瞬态破坏行为研究

马特<sup>1,2</sup>, 王江涛<sup>1,2</sup>, 袁武<sup>1,2,3</sup>, 宋宏伟<sup>1,2,3\*</sup>, 王睿星<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>中国科学院力学研究所流固耦合系统力学重点实验室, 北京 100190

<sup>2</sup>中国科学院大学工程科学学院, 北京 100049

<sup>3</sup>中国科学院力学研究所空天飞行高温气动国家重点实验室, 北京 100190

**摘要** 建立了一种适用于强激光辐照面高温原位观测方法并开展了高速风洞内激光辐照试验, 获得了典型金属材料与复合材料在超声速切向气流条件下的瞬态烧蚀与破坏行为, 基于 Horn-Schunck 光流法分析了各典型材料的烧蚀特征与质点运动速率, 基于粒子图像测速法并结合复合材料铺层结构特征获得了瞬时烧蚀速率。研究表明, 各材料的动态烧蚀行为有很大差异: 在切向气流的作用下熔融态钛合金的流动模式会从燕尾状转换为羽翼状, 而镍基高温合金则呈雨滴状流动, 基于 Kelvin-Helmholtz 机制分析了切向气流加速不同金属材料击穿时间存在差异的原因。超高温陶瓷复合材料的热化学烧蚀与机械剥蚀特征与细观编织结构类型密切相关, 并且在高激光功率密度条件下其抗激光烧蚀性能与碳纤维含量成正比。

**关键词** 激光破坏效应 1; 原位观测技术 2; 瞬态烧蚀形貌 3; 超声速切向气流 4; 光流法 5

**中图分类号** TJ955

**文献标志码** A

## 1 引言

在高速风洞内开展地面激光破坏试验, 是高速目标激光毁伤机理研究的一种重要手段<sup>[1-3]</sup>。强激光辐照下靶材表面迅速升温所形成的高温强辐射, 加之激光辐射以及高速风洞环境干扰等因素, 目前对激光辐照面瞬态烧蚀行为的直接观测还没有实质性进展。通常采用实验结束后对靶材进行测量的方法, 获取最终的烧蚀形貌、烧蚀深度或平均质量烧蚀速率等数据, 利用扫描电镜 (Scanning electron microscope, SEM) 观察材料表面显微组织特征, 采用能谱分析 (Energy dispersive spectrum analysis, EDS) 对材料表面化学成分进行定性和半定量的分析, 或用 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 对材料的相组成进行定性分析, 据此推测出研究对象的激光烧蚀机理<sup>[4-10]</sup>。但上述方法无法为激光烧蚀机理研究提供实时可靠的失效演化过程以及相关实验数据。

国内外众多学者为获取材料的瞬态烧蚀形貌开展了一些研究工作。黄永光等<sup>[11]</sup>通过高速摄影技术分析不同激光功率密度条件下激光辐照碳纤维复合材料的烧蚀行为; 由于火焰和热解气体的影响并没有给出激光辐照区域的烧蚀形貌。孙翔宇等<sup>[12]</sup>利用光学测量技术获得了绝热烧蚀材料的动态烧蚀特性。Qu 等<sup>[13]</sup>在电弧加热风洞试验中采用原位测量光电系统获得了混合连续纤维 (石英纤维、玻璃纤维) 增强复合材料的实时烧蚀图像。Sakai 等<sup>[14]</sup>设

**基金项目:** 国家自然科学基金 (12272379, 11902322)

**通信作者:** \*E-mail: [songhw@imech.ac.cn](mailto:songhw@imech.ac.cn)

计了一种可以实时原位测量烧蚀界面的烧蚀传感器,但该系统的测量区域有限。Martin 等<sup>[15]</sup>开发了一种 X 射线技术来获取烧蚀材料的实时信息。Gangireddy 等<sup>[16]</sup>利用原位显微镜直接观测了 1450~1650 °C 条件下 ZrB<sub>2</sub>-SiC 复合材料的氧化行为。Fang 等<sup>[17]</sup>基于实时原位观测技术分析 SiC 表面在 1800 °C 氧乙炔焰条件下二氧化硅液珠的形成、流动和生长机制。Tang 等<sup>[18]</sup>为了抑制氧乙炔焰高温下烧蚀试样的辐射,采用高功率蓝光光源,并在拍摄相机前安装蓝光带通滤光片,实现了 C/C 复合材料在 2000 °C 以下烧蚀表面演化的实时捕捉。

不同于氧乙炔焰或电弧加热测试条件下烧蚀材料的正表面,激光辐照条件下还存在激光反射导致的过度曝光以及温度更加极端等问题,例如高激光功率密度条件下超高温陶瓷 C/SiC 复合材料的烧蚀温度可达 3000 °C 以上,目前尚未有高速风洞条件下激光诱导高温靶材瞬态烧蚀形貌试验数据的报道。本文提出了一种适用于获取激光诱导极端高温材料烧蚀形貌的原位观测技术,研究了典型金属材料和复合材料在超声速切向气流条件下的动态烧蚀行为,通过图像处理分析了研究对象的烧蚀特征并获得了瞬时烧蚀数据。

## 2 实验系统与原位观测技术

### 2.1 实验方法

实验系统示意图如图 1 所示,主要包括高能激光、超声速风洞和原位观测系统。其中高能激光为连续输出光纤激光器(美国 IPG Photonics 公司的 YLS-2000),波长为 1070 nm,焦距 680 mm,焦点处光斑均匀分布。实验中所用功率为 2000 W,激光光斑直径为 10 mm,激光功率密度为 2546 W/cm<sup>2</sup>,激光辐照时间为 4 s。超声速风洞采用中国科学院力学研究所高温气体动力学国家重点实验室的直连式超声速燃烧实验台,主要由加热器、喷管、实验段及气路供应系统、控制台、测量系统组成,实验测试区包括试件装载区以及测量窗口,其中观察窗口采用光学石英玻璃,主要有以下两点原因:(1)相比于普通玻璃,光学石英玻璃具有更高的使用温度,可在 1100 °C 条件下长时间使用;(2)光学石英玻璃在紫外线到红外线的整个光谱波段均具有更好的透光性能,可见光透过率在 93 % 以上,特别是在红外线光谱区可达 90 % 以上,所以使用光学石英玻璃能够获得更好的测量结果。该风洞可提供马赫数为 1.8~4.0 内的超声速气流环境。在本实验中主要研究马赫数为 3.0 时的高速气流对烧蚀行为的影响,气流总温和总压分别为 815 K 和 1850 kPa。

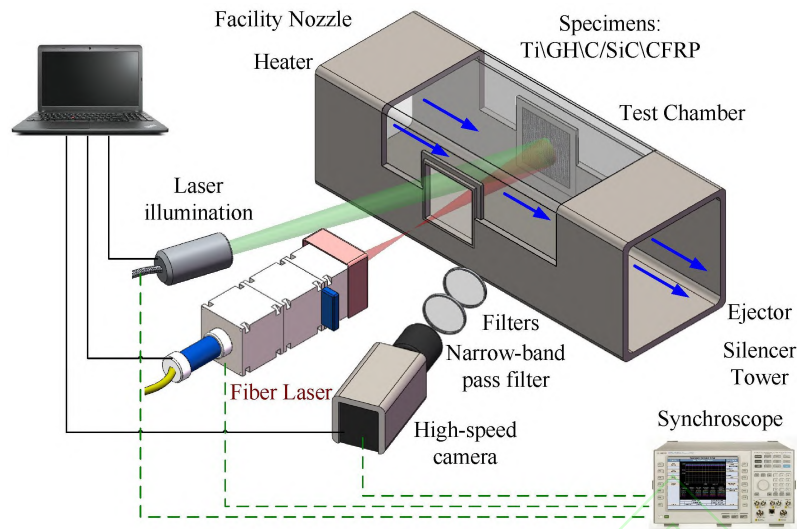


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

获取材料激光辐照面动态烧蚀过程的主要难点在于如何避免激光反射以及材料在激光诱导高温条件下的强辐射所导致的图像过度曝光。为解决以上问题，本文中的原位观测系统主要由高速摄影、辅助照明系统、衰减片和窄带通滤光片组成。其中辅助照明系统提供不同于高能激光波长的背景光源，并结合窄带通滤光片来避免激光反射并降低高温强辐射对图像采集的影响。虽然窄带通滤光片可抑制其余波长光线对高速摄影拍摄的影响，但其本波长范围内的辐射仍可使图像过度曝光，所以还需结合衰减片来降低辐射强度从而获取清晰图像。本文所用高速摄像机为 Vision Research 公司生产的 Phantom v2012，采样频率为 100 Hz，分辨率为  $1280 \times 800$ ；所用辅助照明系统的波长为 810 nm，光源功率为 200 W；窄带通滤光片的中心波长为 810 nm，半峰值带宽为 10 nm，OD 值为 OD3；衰减片为 ND64。在实验过程中，高能激光系统、辅助照明系统和高速摄影通过数字延迟/脉冲发生器作为时序控制器实现统一触发和启动，从而保证采样时间的一致性。实验前激光器以及测量设备均处于外触发模式，首先运行风洞，待风洞稳定出风后，统一触发激光器与原位观测测量系统。

## 2.2 图像处理方法

瞬时烧蚀物理图像也为基于各类图像处理方法获取出更多的烧蚀数据提供了基础，如王福斌等<sup>[19]</sup>就通过改进的小波阈值滤噪和 K 均值聚类分割图像处理方法，获得了飞秒诱导的有效光斑区域。本文运用光流法分析了各典型材料的烧蚀特征与质点运动速率，运用粒子图像测速法（PIV 法）并结合复合材料铺层结构特征获得了瞬时烧蚀速率。

光流法作为运动目标检测的方法，可利用序列图像灰度随时间的变化来确定物体结构及其运动关系<sup>[20]</sup>。将光流法应用于激光破坏效应研究中，可以分析激光诱导的温度场变化、

热变形、烧蚀形貌演变以及高速气流剥蚀作用引起的物质运动速度。光流法的基本原理如下：

设在  $t$  时刻像素点  $(x, y)$  处的灰度值为  $I(x, y, t)$ ；在  $t+\Delta t$  时刻，该像素点更新到位置  $(x+\Delta x, y+\Delta y)$ ，灰度值为  $I(x+\Delta x, y+\Delta y, t+\Delta t)$ ，根据灰度对时间不变原理可得：

$$I(x, y, t) = I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) \quad (1)$$

通过泰勒公式将上式展开得：

$$I(x + \Delta x, y + \Delta y, t + \Delta t) = I(x, y, t) + \frac{\partial I}{\partial x} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{\partial I}{\partial y} \cdot \frac{\Delta y}{\Delta t} + \frac{\partial I}{\partial t} + \varepsilon \quad (2)$$

并将沿  $x$  和  $y$  方向的光流矢量分量  $u(x, y, t)$  和  $v(x, y, t)$  带入式 (2) 中并忽略高阶项，就得到了光流场的基本控制方程：

$$I_x u + I_y v + I_t = 0 \quad (3)$$

由于光流场中有两个变量，但却只有一个基本控制方程，因此无法求出唯一解。Horn 和 Schunck 提出了一种用光流的全局平滑性假设来求解光流的方法，即 Horn-Schunck 算法， $u$  和  $v$  的求解公式为：

$$\begin{aligned} u^{(n+1)} &= \bar{u}^n - I_x \frac{I_x \bar{u}^{(n)} + I_y \bar{v}^{(n)} + I_t}{\lambda + I_x^2 + I_y^2} \\ v^{(n+1)} &= \bar{v}^n - I_y \frac{I_x \bar{u}^{(n)} + I_y \bar{v}^{(n)} + I_t}{\lambda + I_x^2 + I_y^2} \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $\lambda$  为平滑度的约束参数， $n$  代表迭代次数。

粒子图像测速法常用于流场速度的测量，运用多次摄像以记录流场中粒子的位置，分析并测出流动速度。对于一些离散固体比如沙砾，通过该测速法也可获得沙砾的质点流动速度<sup>[21]</sup>。本文以复合材料中的纤维铺设形貌作为示踪粒子，从而计算出纤维的瞬时运动速度。首先将获取到的烧蚀图像导入开源 Matlab 软件 PIVlab 中，然后选取图像上约  $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  的激光辐照中心区域进行分析。数据分析使用三次传递：第 1 次传递 128 像素，第 2 次传递 64 像素，第 3 次传递 32 像素。通过高通滤波器去除图像中的低频噪点信息，最后得到纤维运动速度矢量云图。

### 2.3 实验材料

为了验证原位观测技术在激光诱导的极端高温环境中的适用性，实验研究对象包括钛合金与镍基高温合金两种典型金属材料，超高温陶瓷 C/SiC 复合材料和碳纤维增强环氧树脂 CFRP 层合板两种典型复合材料。

其中钛合金牌号为 TC4，镍基高温合金牌号为 GH625，尺寸均为  $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 2$

C/SiC 复合材料包括两种编织结构：二维编织结构（2D）和三维针刺结构（3DN），增强相为 T300 碳纤维，均由化学气浸渗（CVI）工艺制备而成，并且试件表面沉积了厚度约为 50  $\mu\text{m}$  的 SiC 涂层，试件尺寸为 50 mm $\times$  50 mm $\times$  2 mm，基本性能参数如表 1 所示。

表 1 C/SiC 复合材料基本性能参数

Table 1 The basic parameters of C/SiC composites

Composites	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Porosity (vol.%)	Bending strength (MPa)	Bending modulus (GPa)	Fracture toughness (MPa·m <sup>1/2</sup> )
2D C/SiC	2.0	13	539 $\pm$ 39	—	22.3 $\pm$ 1.0
3DN C/SiC	2.1	18	242 $\pm$ 38	46 $\pm$ 10	18.0 $\pm$ 7.0

CFRP 复合材料的增强相为 T700 碳纤维，基体 BA9916 是一种 180  $^{\circ}\text{C}$  高温固化高韧性环氧树脂，铺层方式为[45 $^{\circ}$ , 0 $^{\circ}$ , -45 $^{\circ}$ , 90 $^{\circ}$ ]<sub>2S</sub>，总计 16 层，每层厚度为 0.15 mm，试件尺寸为 50 mm $\times$ 50 mm $\times$ 2.4 mm，基本性能参数如表 2 所示。

表 2 T700/BA9916 CFRP 复合材料的主要物理和力学性能参数

Table 2 The main physical and mechanical properties of the T700/BA9916 CFRP plates

Physical properties	Parameter	Mechanical properties	Parameter
Matrix Content (wt%)	38 $\pm$ 3	0 $^{\circ}$ Tensile Strength (MPa)	1489
The density of matrix (g/cm <sup>3</sup> )	1.30 $\pm$ 0.04	0 $^{\circ}$ Tensile Modulus (GPa)	132.8
The density of fiber (g/cm <sup>3</sup> )	1.78 $\pm$ 0.04	90 $^{\circ}$ Tensile Strength (MPa)	58.5
Volatile Content (%)	$\leq$ 1.5	90 $^{\circ}$ Tensile Modulus (GPa)	9.7
Porosity (%)	$\leq$ 1.5	Shear Strength (MPa)	121
Lamina Thickness (mm)	0.15 $\pm$ 0.015	Shear Modulus (GPa)	5.3

### 3 结果与讨论

#### 3.1 典型金属材料的激光破坏行为

钛合金在超声速切向气流条件下的激光破坏过程如图 2 所示。图 2 中所给出的结果时间间隔为 0.4 s。其中每个结果图的上图为原位观测系统获取到的瞬时烧蚀形貌，而下图为基于 Horn-Schunck 光流法所获得的计算结果。根据光流法基本原理可知，最终的计算结果代表了序列图像灰度随时间的变化，所以在高速切向气流条件下的激光烧蚀问题中，由于激光诱导的温度升高、材料发生相变后表面状态的改变、切向气流引起的机械剥蚀效应所导致的物质流动等现象都会导致序列图像的灰度变化，所以光流法获得的灰度变化速度云图所代表的物理含义就需要根据实际物理现象进行具体分析。

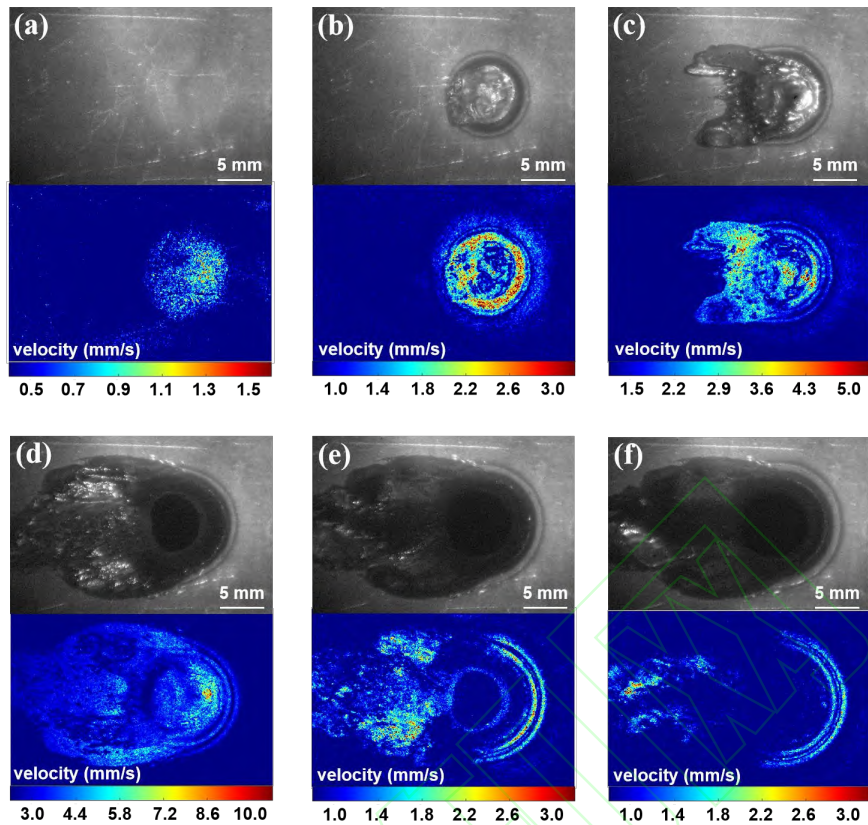


图2 钛合金在激光辐照与超声速切向气流条件下的动态烧蚀形貌。(a) 0.4 s; (b) 0.8 s; (c) 1.2 s; (d) 1.6 s; (e) 2.0 s; (f) 2.4 s; 每幅图中的上图为原位观测结果, 下图为光流法处理结果

Fig. 2 The dynamic laser ablation morphology of Ti alloy exposed to laser irradiation and supersonic tangential airflow. (a) 0.4 s; (b) 0.8 s; (c) 1.2 s; (d) 1.6 s; (e) 2.0 s; (f) 2.4 s; The figure includes two parts: upper figure is obtained by in-situ observation technology, down figure is obtained by optical flow method

从研究结果可以看出, 当激光辐照 0.4 s 时通过光流法计算得到的结果仅在激光辐照区域有光流速度, 结合原位观测结果可知, 此时主要是钛合金的温度场所导致的图像灰度变化。当激光辐照时间至 0.8 s, 如图 2 (b) 所示, 激光辐照区域的钛合金开始发生相变, 此时可将钛合金的激光烧蚀区域分为三个典型区域: 激光辐照中心区域, 黑色过渡区域以及白色边缘区域; 并在超声速切向气流作用下, 熔融态钛合金开始沿气流方向流动, 根据光流计算结果可知, 白色边缘区域之外的热影响区域范围也变大。随着激光与气流的持续作用, 如图 2 (c) 所示, 除了热影响区域的继续扩大, 熔融态钛合金也在机械剥蚀效应的作用下被剥离出激光辐照区域内, 并且尾迹区域呈燕尾状流动, 即熔融态钛合金仅从光斑区域的上下两侧流动; 而光流结果中燕尾的速度分布则代表了熔液在两帧序列图像内的平均流动速度。但当激光辐照时间增加至 1.6 s 时, 如图 2 (d) 所示, 此时的钛合金已出现穿孔, 并且尾迹区域的熔液流动模式也发生了变化, 即过光斑中心母线上的熔液运动速度反而高于燕尾两侧的运动速度, 最终形成激光破坏效应研究中常见的羽翼状尾迹区。钛合金后续的烧蚀行为 (图 2 (e) 和图 2 (f) ) 主要以热影响区域和穿孔尺寸的变化为主, 特别是图 2 (f) 中光流结果

右侧由于热扩散导致的过渡区域以及边缘区域变化速度较为明显，中心区域的穿孔尺寸变化速度较小，而尾迹区的变化速度也开始减小。以上分析结果进一步说明了获取研究对象瞬时烧蚀行为的重要性，不仅可以明确激光诱导的动态变化过程，也为机理分析以及相应的数值模拟提供了更充分且直观的验证性数据。

镍基高温合金在激光与超声速气流联合作用下的瞬时烧蚀行为如图 3 所示。

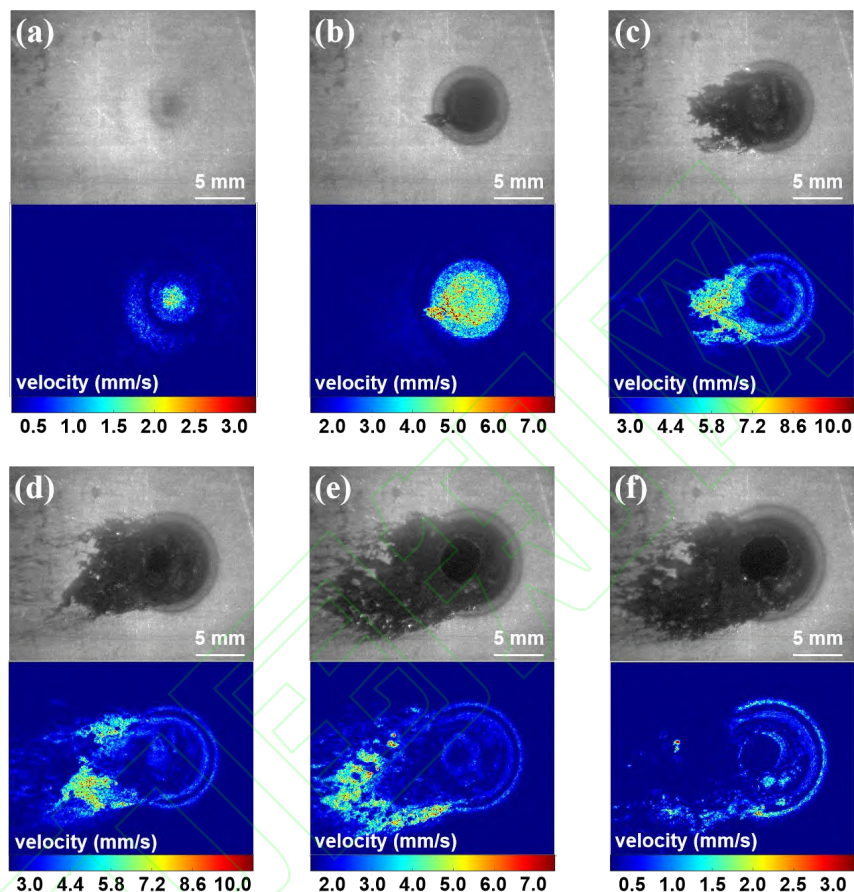


图 3 镍基高温合金在激光辐照与超声速切向气流条件下的动态烧蚀形貌。(a) 0.4 s; (b) 0.8 s; (c) 1.2 s; (d) 1.6 s; (e) 2.0 s; (f) 2.4 s; 每幅图中的上图为原位观测结果，下图为光流法处理结果

Fig. 3 The dynamic laser ablation morphology of Ni-base superalloy exposed to laser irradiation and supersonic tangential airflow. (a) 0.4 s; (b) 0.8 s; (c) 1.2 s; (d) 1.6 s; (e) 2.0 s; (f) 2.4 s; The figure includes two parts: upper figure is obtained by in-situ observation technology, down figure is obtained by optical flow method

在激光辐照时间为 0.4 s 以及 0.8 s 时 (图 3 (a) 和图 3 (b))，与钛合金激光烧蚀行为类似，仅为温度场变化以及激光辐照区域开始呈现为熔融态。在激光辐照时间为 1.2 s 时，高温合金的尾迹区则明显不同于钛合金，形貌主要呈尖笋状。熔液在机械剥蚀作用下的流动模式也有较大区别，钛合金熔液的流动模式类似于火山喷发后的熔浆，流动较为连续；而镍基高温合金熔液的流动模式则类似于暴风中的离散雨滴且受重力影响显著。如图 3 (d)、3 (e) 和 3 (f) 所示，尾迹区明显向下偏移，且有较多的熔液零散的凝固至尾迹区的周围。

钛合金与镍基高温合金两种典型金属材料在激光与切向气流耦合作用下的击穿时间分



别为 1.32 s 和 1.44 s，最终穿孔直径分别为 7.23 mm 和 5.72 mm。造成流动模式以及击穿时间差异的原因主要在于两者不同的熔液表面不稳定性。根据 Kelvin-Helmholtz 机制可知<sup>[22]</sup>，当切向气流的能量耦合到激光诱导的熔融态表面时会形成不稳定的毛细波，随着时间的增加，毛细波的波顶会形成液体小珠，并会被切向气流挟带移走。该机制主要与材料的表面张力和密度正相关，即材料熔融态时的表面张力和密度越大，气流加速击穿的作用越小。因此，虽然钛合金 TC4 的熔点（1670 °C）要高于镍基高温合金 GH625 的熔点（1340 °C），但是在切向气流条件下高密度的镍基高温合金反而具有更好的抗激光击穿性能。

### 3.2 典型复合材料的激光破坏行为

2D C/SiC 复合材料在超声速切向气流条件下的激光破坏过程如图 4 所示。从实验结果中可以清晰的看到二维编织结构烧蚀演变过程，以及激光辐照边缘区的二氧化硅液滴形成与迁移以及白色尾迹区的形成过程。清晰的动态烧蚀过程说明了该极端高温原位观测技术不仅适用于金属材料，同样也可用于复合材料烧蚀行为的观测。

从图 4 (a) 可知，激光辐照 0.4 s 时 2D C/SiC 复合材料的激光烧蚀中心区域已有碳纤维编织结构暴露在环境中，说明 SiC 涂层在此时已发生主动氧化或热分解反应，从而失去其抗氧化能力。随着激光能量持续输入以及在切向气流引起的机械剥蚀效应的耦合作用下，如图 4 (b)、4 (c)、4 (d) 所示，碳纤维层开始出现明显的逐层剥离，并且剥蚀过程以片状剥蚀为主<sup>[23]</sup>。根据光流云图结果可以看出，烧蚀形貌的主要变化也是发生在激光辐照中心区域，特别是如图 4 (c) 所示，光流结果中激光辐照中心的灰度变化最为显著，对应的原位观测结果中该区域灰度明显高于其它区域，造成以上现象的主要原因是位于上层的复合材料在片状剥蚀作用下被瞬间剥离，导致激光辐照面温度不连续所造成的。当激光辐照时间增加至 2.0 s 之后，如图 4 (e)，4 (f) 所示，此时的烧蚀特征以热影响区域以及烧蚀中心区域直径扩大为主，但烧蚀深度方向不再是明显地逐层变化，而是以碳纤维氧化或升华为主的碳纤维束退化过程；从光流结果中也体现出了以上特点，灰度变化云图呈与编织结构相关的散点状分布。造成以上烧蚀现象的原因是机械剥蚀效应不仅与温度、来流速度的大小有关，还与烧蚀区域内的气流流动模式有关<sup>[24]</sup>，即流动模式为闭式流动时，机械剥蚀效应较为明显；而当流动模式转变为开式流动后机械剥蚀的作用开始减弱。随着激光辐照时间增加，辐照面的温度逐渐升高，从而使得后续的激光烧蚀行为以升华机制为主导<sup>[25]</sup>。

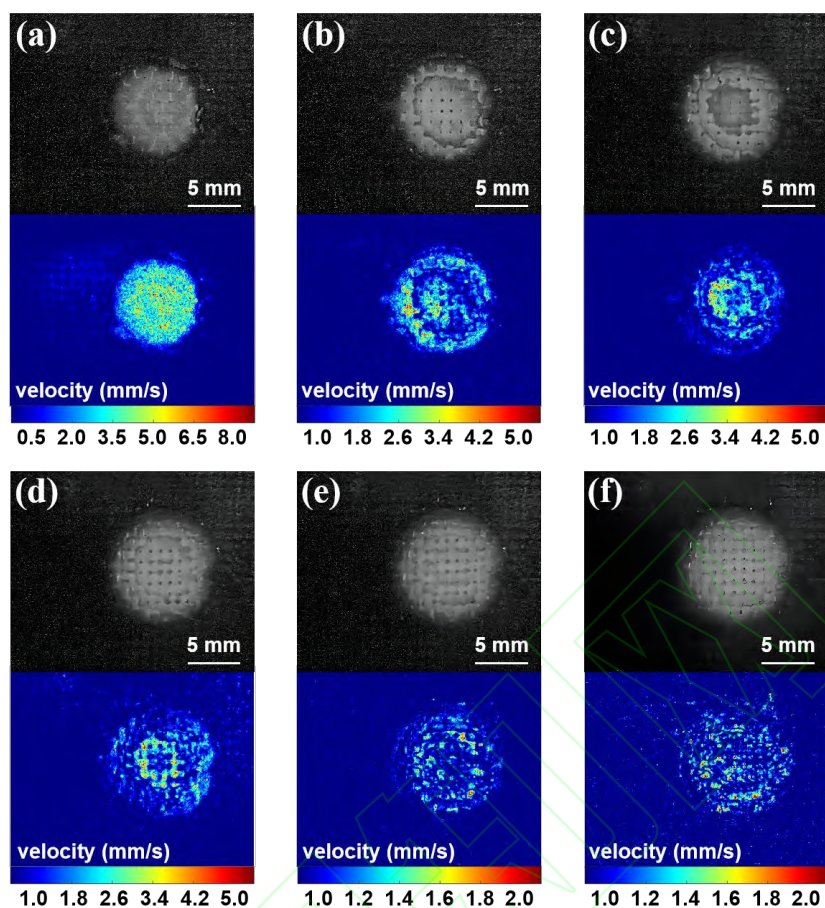


图 4 2D C/SiC 复合材料在激光辐照与超声速切向气流条件下的动态烧蚀形貌。(a) 0.4 s; (b) 0.8 s; (c) 1.2 s; (d) 1.6 s; (e) 2.0 s; (f) 2.4 s; 每幅图中的上图为高速摄影获取结果, 下图为光流法处理结果  
 Fig. 4 The dynamic laser ablation morphology of 2D C/SiC composite exposed to laser irradiation and supersonic tangential airflow. (a) 0.4 s; (b) 0.8 s; (c) 1.2 s; (d) 1.6 s; (e) 2.0 s; (f) 2.4 s; The figure includes two parts: upper figure is obtained by in-situ observation technology, down figure is obtained by optical flow method

图 5 给出了 3DN C/SiC 复合材料在超声速切向气流条件下的激光破坏过程。从图中可以明确观察到 3DN C/SiC 复合材料纤维层结构的逐渐变化。三维针刺碳纤维预制体的制造工艺是, 首先将碳纤维制成胎网层和无纬布 (12K), 然后将单层 90°无纬布、胎网层、0°无纬布等依次循环叠加, 然后进行针刺。根据设计厚度, 经反复叠层、针刺, 最终形成了复合材料中的三维针刺碳纤维预制体。所以图 5 (a) 到图 5 (c), 烧蚀行为主要发生在第一层 90°无纬布层; 当激光辐照至 1.6 s 时 (图 5 (d)), 激光辐照中心区域的 90°无纬布层已退化断裂, 并有胎网层开始裸漏; 而在图 5 (e) 和图 5 (f) 中, 即激光辐照时间为 2.0 s 以及 2.4 s 时开始出现 0°无纬布。

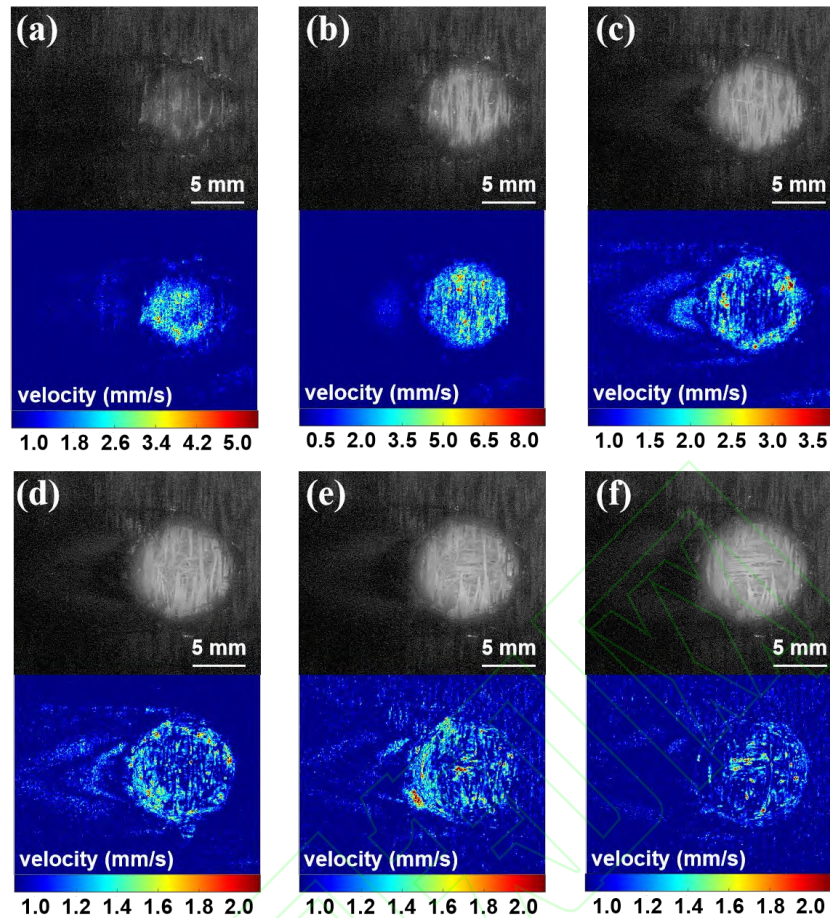


图 5 3DN C/SiC 复合材料在激光辐照与超声速切向气流条件下的动态烧蚀形貌。(a) 0.4 s; (b) 0.8 s; (c) 1.2 s; (d) 1.6 s; (e) 2.0 s; (f) 2.4 s; 每幅图中的上图为高速摄影获取结果, 下图为光流法处理结果

Fig. 5 The dynamic laser ablation morphology of 3DN C/SiC composite exposed to laser irradiation and supersonic tangential airflow. (a) 0.4 s; (b) 0.8 s; (c) 1.2 s; (d) 1.6 s; (e) 2.0 s; (f) 2.4 s; The figure includes two parts: upper figure is obtained by in-situ observation technology, down figure is obtained by optical flow method

不同的编织结构不仅使 C/SiC 复合材料的动态烧蚀行为出现差异, 同时两者的烧蚀深度也有所不同: 2D C/SiC 复合材料的烧蚀深度为 1.13 mm, 而 3DN C/SiC 复合材料的烧蚀深度为 1.23 mm。主要原因在于两者的热物性参数以及碳纤维含量的不同。相比于 2D C/SiC 复合材料, 3DN C/SiC 在厚度方向上的热传导系数更高, 从而导致温度要明显高于 2D C/SiC, 所以其热化学烧蚀速率也会高于 2D C/SiC。同时在激光功率密度为  $2546 \text{ W/cm}^2$  的辐照条件下, 激光辐照中心区域很快达到 SiC 基体的热分解反应温度, 甚至到 C 的升华温度。由于升华反应为吸热过程, 碳纤维含量越高, 能够吸收的激光能量越多, 所以此时 C/SiC 复合材料的抗烧蚀性能还取决于碳纤维含量。3DN C/SiC 的碳纤维含量 (36.0%) 要低于 2D C/SiC (54.2%), 因此其烧蚀深度大于 2D C/SiC。

### 3.3 基于粒子图像法获取瞬时烧蚀速率

图 6 给出了超声速气流为 Ma 3.0, 激光功率为 1000 W (激光功率密度为  $1273 \text{ W/cm}^2$ )

时 CFRP 复合材料的动态烧蚀过程。可以清晰看到 CFRP 复合材料在烧蚀过程中的铺层变化：激光辐照 0.8 s 时裸露的碳纤维铺层角度为 45°，1.6 s 时转变为 0°，2.4 s 时转变为-45°，4.0 s 时铺层角度已转变成了 90°。

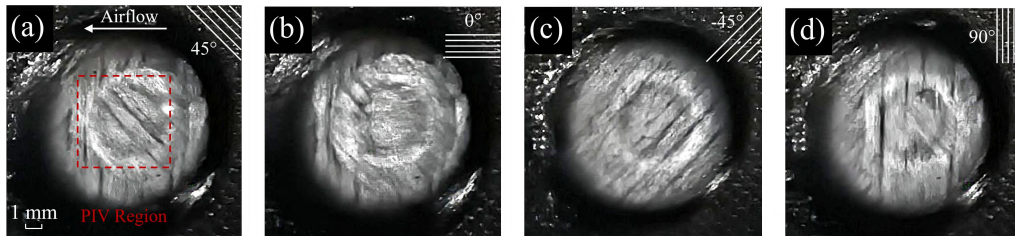


图 6 CFRP 复合材料在激光辐照与超声速切向气流条件下的动态烧蚀形貌。(a) 0.8 s; (b) 1.6 s; (c) 2.4 s; (d) 4.0 s

Fig. 6 The dynamic laser ablation morphology of CFRP composite exposed to laser irradiation and supersonic tangential airflow. (a) 0.8 s; (b) 1.6 s; (c) 2.4 s; (d) 4.0 s

裸露纤维铺层角度的变化也说明了 CFRP 复合材料的烧蚀深度在逐渐变化。以纤维作为参考粒子，基于 PIVlab 获得了 CFRP 的瞬时烧蚀深度，所选计算区域为图 6 (a) 中的红色虚线框，计算结果如图 7 (a) 所示。图 7 (a) 中的速度矢量云图代表了不同铺设角度时纤维的运动方向，当速度矢量方向发生变化时即认为 CFRP 复合材料中的单层已经完全烧蚀，此时记录一次烧蚀深度，进而获得瞬时烧蚀深度。不同于实验后测量方法获得的线性平均烧蚀速率，基于上述方法所获得的瞬时烧蚀深度呈明显的非线性行为。根据图 7 (b) 的瞬时烧蚀深度结果可知，复合材料在超声速切向气流下的激光烧蚀深度与激光功率密度和来流速度均相关，当激光功率密度为 1273 W/cm<sup>2</sup>，来流速度为 Ma 1.8 时的烧蚀深度为 0.36 mm；当来流速度增加至 Ma 3.0 时，烧蚀深度增加至 0.47 mm；当激光功率密度增加至 2546 W/cm<sup>2</sup> 时，烧蚀深度增加至 1.07 mm。说明激光功率密度对激光烧蚀行为有更强的影响。

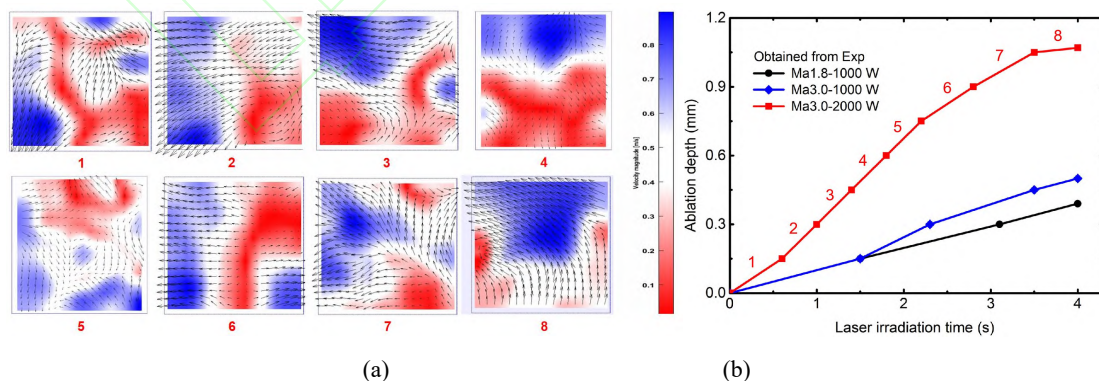


图 7 CFRP 复合材料在超声速切向气流作用下激光烧蚀行为。(a) 速度矢量云图；(b) 不同功率和马赫数下的瞬时烧蚀深度

Fig. 7 Laser ablation behaviors of CFRP composite subjected to supersonic tangential airflow. (a) The velocity vector chart; (b) instantaneous laser ablation depths of different laser power densities and Mach number

## 4 结 论

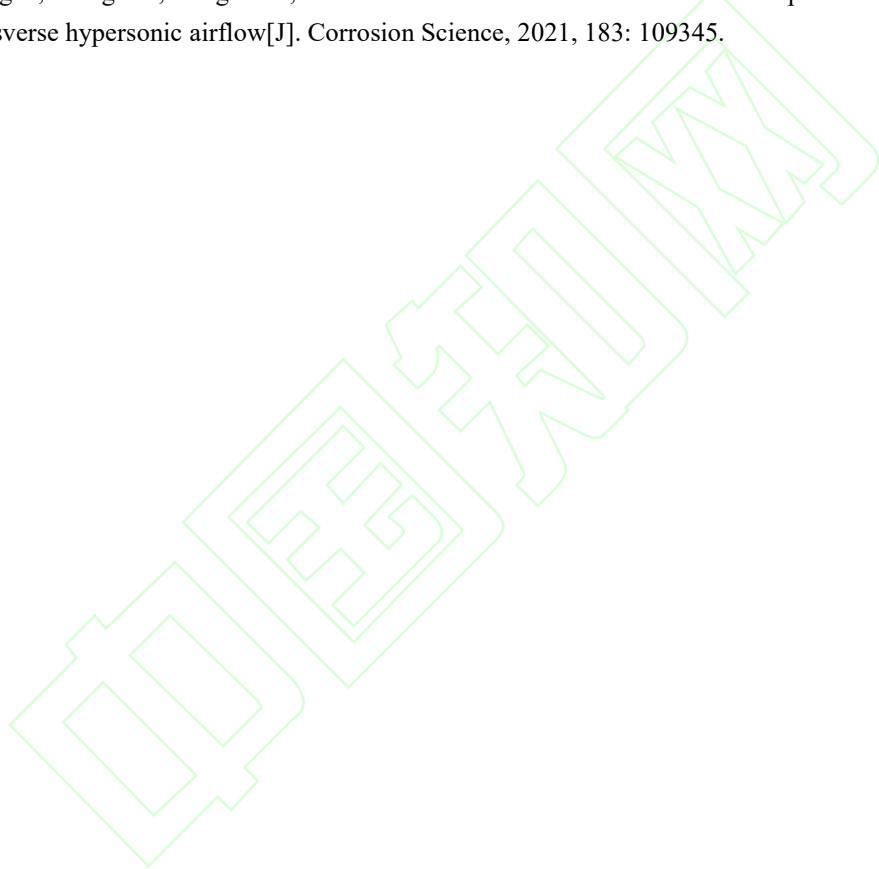
本文提出一种极端高温激光烧蚀原位观测技术,获得了在超声速切向气流作用下激光诱导典型金属和复合材料的动态烧蚀形貌,清晰的瞬时烧蚀图像为理解复杂的激光烧蚀机理提供了更加直观的支持性数据。通过图像处理方法获取更多的实时烧蚀数据,可以清晰地分析不同金属材料熔融尾迹区域形成过程与形貌差异,例如钛合金的尾迹区从燕尾状转换为羽翼状的过程,以及镍基高温合金雨滴状流动过程。基于 Horn-Schunck 光流法还能够获得尾迹区熔融态金属的流动以及热影响区的扩散特征。复合材料的烧蚀行为与其增强相编织结构有关: 2D C/SiC 复合材料的机械剥蚀效应以片状剥蚀为主,而 3DN C/SiC 以及 CFRP 复合材料却以纤维逐层剥蚀为主。此外,基于粒子图像速度法,并以不同铺层方向时纤维的运动方向为判据,获得了 CFRP 复合材料的瞬时烧蚀深度。通过以上分析可知,本文所建立的原位观测技术在极端高温工程,特别是激光破坏效应研究中具有广阔的应用前景。

## 参考文献

- [1] Zhao W N, Ma T, Song H W, et al. Effects of tangential supersonic airflow on the laser ablation of laminated CFRP[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2021, 14: 1985-1997.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Fan X M, Yin X W, Cao X Y, et al. Improvement of the mechanical and thermophysical properties of C/SiC composites fabricated by liquid silicon infiltration[J]. *Composites Science and Technology*, 2015, 115: 21-27.
- [5] Tong Y G, Bai S X, Hu Y L, et al. Laser ablation resistance and mechanism of Si-Zr alloyed melt infiltrated C/C-SiC composite[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(4): 3692-3698.
- [6] Wang J T, Ma Y Z, Song H W, et al. Experimental investigation on laser ablation of C/SiC composites subjected to supersonic airflow[J]. *Optics and Laser Technology*, 2019, 113: 399-406.
- [7] Allheily V, Lacroix F, Eichhorn A, et al. An experimental method to assess the thermo-mechanical damage of CFRP subjected to a highly energetic 1.07 um-wavelength laser irradiation[J]. *Composites Part B-Engineering*, 2016, 92: 326-331.
- [8] Li X, Hou W T, Han B, et al. Thermal response during volumetric ablation of carbon fiber

- composites under a high intensity continuous laser irradiation[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2021, 23: 101032.
- [9] 邓泽超, 刘建东, 王旭, 等. 真空环境中脉冲激光烧蚀制备纳米银晶薄膜的生长特性[J]. *中国激光*, 2019, 46(9): 0903003.  
Deng Z C, Liu J D, Wang X, et al. Growth Characteristics of Ag Nanocrystalline Thin Films Prepared by Pulsed Laser Ablation in Vacuum[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2019, 46(9): 0903003.
- [10] 林嘉剑, 明瑞, 李学坤, 等. 飞秒激光烧蚀面齿轮材料的形貌特征研究[J]. *中国激光*, 2021, 48(14): 1402017.  
Lin J J, Ming R, Li X K, et al. Study on Morphology Characteristics of Femtosecond Laser-Ablated Face Gear Material[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(14): 1402017.
- [11] 黄永光, 刘世炳, 龙连春, 等. Nd: YAG连续激光烧蚀碳纤维复合材料的过程观测[J]. *中国激光*, 2008, 35(12): 2042-2046.  
Huang Y G, Liu S B, Long L C, et al. Observation on the Process of Continuous-Wave Nd: YAG Laser Ablation on Carbon Fiber Composite Material[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(12): 2042-2046.
- [12] 孙翔宇, 张炜, 胡淑芳, 等. 绝热材料动态烧蚀试验方法[J]. *推进技术*, 2011, 32(4): 597-600.  
Sun X Y, Zhang W, Hu S F, et al. Methodology of dynamic ablation test for insulation material[J]. *Journal of Propulsion Technology*, 2011, 32(4): 597-600.
- [13] Qu Z, Wang X, Tang Y L, et al. In Situ Visualization Measurement of Flat Plate Ablation in High-Temperature Gas Flow[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2018, 85: 061006.
- [14] Sakai T, Nakazawa H, Dantsuka Y, et al. Dual-Component Sensor Design for In Situ Ablation Measurement[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2017, 31(2): 307-317.
- [15] Martin H T, Cortopassi A C, Kuo K K. Assessment of the Performance of Ablative Insulators Under Realistic Solid Rocket Motor Operating Conditions[J]. *International Journal of Energetic Materials and Chemical Propulsion*, 2017, 16(1): 1-22.
- [16] Gangireddy S, Karlsdottir S N, Norton S J, et al. In situ microscopy observation of liquid flow, zirconia growth, and CO bubble formation during high temperature oxidation of zirconium diboride-silicon carbide[J]. *Journal of the European Ceramic Society*, 2010, 30: 2365-2374.
- [17] Fang X F, Qu Z, Zhang C X, et al. In-situ testing of surface evolution of SiC during thermal ablation: Mechanisms of formation, flowing and growth of liquid silica beads[J]. *Ceramics International*, 2017, 43(9): 7040-7047.
- [18] Tang Y L, Zhang J S, Yun M K, et al. High-frequency flashing of light source for synchronous measurement of temperature and deformation at elevated temperature[J]. *Optics and Laser in Engineering*, 2021, 137: 106361.
- [19] 王福斌, 孙志林, 等. 飞秒激光烧蚀光斑的亮度特征及分形维数[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(24): 2432001.  
Wang F B, Sun Z L. Brightness Characteristics and Fractal Dimension of Spot Ablated by Femtosecond Laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(24): 2432001.
- [20] 管飞, 王荣. 基于Horn-Schunck光流法的运动目标检测的研究[J]. *仪表技术*, 2015, 2: 43-45.  
Guan F, Wang R. Research on Moving Object Detection Based on Horn-Schunck Optical Flow Algorithm[J]. *Instrumentation Technology*, 2015, 2: 43-45.
- [21] Thielicke W, Stamhuis E J. PIVlab-towards user-friendly, affordable and accurate digital

- particle image velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software*, 2014, 2(1): 1-10.
- [22] Johnson R L, O'Keefe J D. Laser Burnthrough Time Reduction Due to Tangential Airflow-An Interpolation Formula[J]. *AIAA journal*, 1974, 12(8): 1106-1109.
- [23] 黄海明, 杜善义, 吴林志, 等. C/C复合材料烧蚀性能分析[J]. *复合材料学报*, 2001, 18(3): 76-80.  
Huang H M, Du S Y, Wu L Z, et al. Analysis of the ablation of C/C composites[J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2001, 18(3): 76-80.
- [24] Wang J T, Ma T, Wang Z, et al. Three-dimensional flow structures and heat transfer characteristics of compressible flow over a cylindrical cavity[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2022, 122: 107408.
- [25] Wang Z, Wang J T, Song H W, et al. Laser ablation behavior of C/SiC composites subjected to transverse hypersonic airflow[J]. *Corrosion Science*, 2021, 183: 109345.



# High Temperature In-Situ Observation of High-Power Laser Induced Instantaneous Damage Behavior in High-Speed Wind Tunnel

Ma Te<sup>1,2</sup>, Wang Jiangtao<sup>1,2</sup>, Yuan Wu<sup>1,2,3</sup>, Song Hongwei<sup>1,2,3\*</sup>, Wang Ruixing<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Key Laboratory for Mechanics in Fluid Solid Coupling Systems, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

<sup>2</sup> *School of Engineering Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China*

<sup>3</sup> *State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*

## Abstract

**Objective** The laser damage experiment in the high-speed wind tunnel is an important method to study the mechanism of high-speed targets exposed to laser irradiation. There is no substantive progress of the instantaneous ablative behavior of laser irradiated surface due to the high temperature radiation and coupled with factors such as laser radiation and high-speed wind tunnel environment interference. The usual methods are used to obtain data such as final ablation morphology, ablation depth or average mass ablation rate after experiment. However, the traditional methods cannot provide instantaneous and reliable failure evolution process and real-time experimental data. The temperature of the specimen under laser irradiation is more extreme. For instance, the temperature of ceramic-based composites can reach more than 3000 °C under the high laser power density. Nowadays, experimental data on the instantaneous ablative morphology of high temperature targets exposed to the laser irradiation and supersonic tangential airflow have not been reported. In present study, we propose an in-situ observation technology suitable for obtaining the instantaneous laser irradiated ablative morphology of different materials. The real-time ablative behaviors of metal and composite materials under supersonic tangential airflow are caught. The ablative characteristics of specimens are analyzed by image processing methods and the instantaneous ablative data are obtained.

**Methods** Titanium alloy, nickel-based superalloy, ceramic-based C/SiC and carbon fiber reinforced polymer CFRP composites are studied in this paper. First, an in-situ observation technology suitable for laser irradiated extreme high-temperature environments is established, mainly composed of high-speed camera, auxiliary lighting system, attenuating filter and narrow band-pass filter. Then, the laser damage experiments are carried out in the supersonic wind tunnel. The experiment employs the supersonic wind tunnel facility at the State Key Laboratory of High-Temperature Gas Dynamics (LHD) of the Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences. It operates on the oxygen-hydrogen combustion principle and can provide a free-stream of Mach 1.8 to 4.0 in the test section. It is mainly composed of heaters, nozzles, air supply system, console, and measurement system. In the experiments, tangential supersonic airflow is set as Mach 3.0. The total temperature and total pressure of the gas flow are 815 K and 1850 kPa, respectively. Finally, the optical flow method is used to analyze the ablative characteristics and particle motion velocity of



each material and the instantaneous ablation rate is obtained by using PIV method combined with the structural characteristics of the composite material layout.

## Results and Discussions

The burn-through behaviors of titanium alloy and nickel-based superalloy are obtained. The burn-through time under the coupled action of laser and tangential airflow are 1.32 s and 1.44 s, respectively. The final perforation diameters are 7.23 mm and 5.72 mm, respectively. The reason for the difference of flow pattern and burn-through time is mainly the instability of the melt surface. According to the Kelvin-Helmholtz theory, the mechanism of burn-through behavior is mainly related to the surface tension and density of the material. Although the melting point of titanium alloy TC4 (1670 °C) is higher than that of nickel-based superalloy GH625 (1340 °C), the high-density nickel-based superalloy has better resistance to laser breakdown under tangential airflow conditions performance. For the C/SiC composites, the ablative evolution process of the microscopic structure, the formation and migration of silicon dioxide droplets in the edge region of laser irradiation are clearly seen from the experimental images. The results show that the in-situ observation technology can also be used to observe the ablative behavior of composite materials. Different braided structures can influence ablative behaviors and depths. The ablation depth of 2D C/SiC composite is 1.13 mm, while that of 3DN C/SiC composite is 1.23 mm. Compared with 2D C/SiC composite, 3DN C/SiC composite has a higher thermal conductivity in the thickness direction, resulting in a significantly higher temperature than 2D C/SiC composite, so its thermochemical ablation rate is also higher than that of 2D C/SiC. The instantaneous ablative depths of CFRP are obtained based on PIVlab. The results are an obvious nonlinear behavior. The laser ablative depth of CFRP composite under the supersonic tangential airflow is related to the laser power density and airflow velocity. The ablation depth is 0.36 mm when the laser power density is 1273 W/cm<sup>2</sup> and the airflow velocity is Ma 1.8. When the airflow velocity increases to Ma 3.0, the ablation depth increases to 0.47 mm. The laser power density increased to 2546 W/cm<sup>2</sup>, the ablation depth increases to 1.07 mm. The above results indicate that the laser power density has a stronger influence on the laser ablative depth.

**Conclusions** In this paper, an in-situ observation technology of laser irradiated high-temperature is established and the instantaneous ablative morphology of metal and composite materials exposed to laser and supersonic tangential airflow are obtained. The real-time ablative data are calculated by image processing methods. The flow of molten metal in the wake zone and the diffusive characteristics of the heat-affected zone are obtained based on the Horn-Schunck optical flow method. The ablative behaviors of composites are related to the braided structure of the reinforced phase. The mechanical ablation effect of 2D C/SiC composite is mainly sheet-like ablation, while the behaviors of 3DN C/SiC and CFRP composites are mainly fiber-by-layer ablation. The instantaneous ablative depths of CFRP composites are obtained based on the PIV method. The results shown that the in-situ observation technology established in this paper has broad application prospects in extreme high temperature engineering, especially in the study of laser damage effect.

**Key words** laser damage effect; in-situ observation technology; instantaneous ablative morphology; supersonic tangential airflow; optical flow method

## 网络首发:

**标题:** 基于高温原位观测的高速风洞内强激光诱导的瞬态破坏行为研究

**作者:** 马特, 王江涛, 袁武, 宋宏伟, 王睿星

**收稿日期:** 2022-10-17

**录用日期:** 2022-11-28

**DOI:** 10.3788/CJL221334

## 引用格式:

马特, 王江涛, 袁武, 宋宏伟, 王睿星. 基于高温原位观测的高速风洞内强激光诱导的瞬态破坏行为研究[J]. 中国激光, 2023, 50(16): 1602006.

网络首发文章内容与正式出版的有细微差别, 请以正式出版文件为准!

---

## 您感兴趣的其他相关论文:

### 增益开关型双波长同步脉冲Nd : GdVO<sub>4</sub>激光器

宋欢 胡淼 许蒙蒙 李浩珍 毕美华 周雪芳 沈成竹

杭州电子科技大学通信工程学院, 浙江 杭州 310018

中国激光, 2023, 50(6): 0601003

### 2.794 $\mu\text{m}$ 高重复频率Fe<sup>2+</sup>: ZnSe被动调*Q*激光器脉冲特性理论分析与实验研究

熊正东 姜玲玲 程庭清 江海河

中国科学院合肥物质科学研究院健康与医学技术研究所, 安徽 合肥 230031

中国激光, 2023, 50(6): 0601001

### 激光参数对Q235B钢激光熔凝层耐蚀性的影响

余立冬 边填轩 屈云腾 张贝贝 白杨

西北大学光子学与光子技术研究所, 陕西 西安 710127

中国激光, 2023, 50(8): z220866

### 基于光学介电微球阵列的激光微纳图案化加工研究

张弋

北京工业大学材料与制造学部激光工程研究院, 北京 100124

中国激光, 2023, 50(8): z220840

### 工艺参数对20CrMnTi基激光熔覆Ni60A-TiC涂层组织及耐磨性能的影响

任思学 李景彬 史亚盟 温宝琴 王贤斐 李利桥

石河子大学机械电气工程学院, 新疆 石河子 832000

中国激光, 2023, 50(8): z220806