

## 基于均匀化激光双面辐照的热力耦合测试方法研究

王家伟 李斌 张检民 冯国斌 刘卫平 韦成华 韩永超 王娜

### Thermo-mechanical coupling test method based on uniform double-sided laser irradiation

Wang Jiawei, Li Bin, Zhang Jianmin, Feng Guobin, Liu Weiping, Wei Chenghua, Han Yongchao, Wang Na

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20220329>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 激光冲击对K403合金激光熔覆修复微观组织和性能的影响

Effect of laser shock processing on microstructure and properties of K403 alloy repaired by laser cladding

红外与激光工程. 2017, 46(9): 906003 <https://doi.org/10.3788/IRLA201746.0906003>

#### X射线望远镜超薄镜片装配结构的粘结强度探究

Research on bonding strength of ultra-thin glass in assembly of X-ray telescope

红外与激光工程. 2019, 48(2): 218001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0218001>

#### 铝合金T型接头双侧激光焊接气孔缺陷影响规律研究

Study on the influence rule of porosity defects for double-sided laser beam welding of aluminum alloy T-joint

红外与激光工程. 2018, 47(9): 906004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0906004>

#### 热处理对激光选区熔化成型CoCrMo合金性能影响研究

Influence of heat treatment on the performance of selective laser melting manufacturing CoCrMo alloy

红外与激光工程. 2018, 47(1): 106004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0106004>

#### 脉冲激光大光斑辐照空间碎片冲量耦合特性研究

Analysis of the impulse coupling characteristics of space debris irradiated by pulsed laser with big spot

红外与激光工程. 2018, 47(12): 1243001 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1243001>

#### 纳秒激光毫米级光斑辐照典型金属材料冲量耦合特性

Impulse coupling characteristics of typical metal materials irradiated by nanosecond laser with a millimeter-scale spot size

红外与激光工程. 2021, 50(8): 20200390 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200390>

## 基于均匀化激光双面辐照的热力耦合测试方法研究

王家伟<sup>1,2</sup>, 李斌<sup>1</sup>, 张检民<sup>2</sup>, 冯国斌<sup>2</sup>, 刘卫平<sup>2</sup>, 韦成华<sup>2</sup>, 韩永超<sup>2</sup>, 王娜<sup>2</sup>

(1. 西北工业大学航空学院, 陕西西安 710072;

2. 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:** 为了研究以激光为热源开展材料高温力学性能测试的可行性, 建立理论模型与数值模型, 分析了材料在双面均匀激光光斑加热下的表面及内部温升。结果表明, 理想情况下采用均匀化激光双面辐照的加热方式可以在试件加热区域内形成较均匀的温度场。为验证上述结论, 建立了光斑均匀化度达 92% 的激光双面辐照热力耦合测试试验平台, 并基于相关测试方法获取了传统加热方式难以快速加热的 CFRP 层合板高温拉伸强度。结果表明, 试件在激光加热中心测试区域 (10 mm×10 mm) 内的温度均匀性良好。试件在均匀化激光双面辐照下可被快速加热至 923 °C, 测试区域内的最大温度波动为 6.8%。文中提出的基于均匀化激光双面辐照的热力耦合测试方法相比传统测试方法具有通用性好、温升率高、测试温度高、测试效率高等一系列的优点。该研究可为进一步研制通用型材料/结构高温升率、高温力学性能试验系统提供关键技术支持。

**关键词:** 双面辐照; 均匀激光; 高温; 拉伸强度; CFRP

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220329

## Thermo-mechanical coupling test method based on uniform double-sided laser irradiation

Wang Jiawei<sup>1,2</sup>, Li Bin<sup>1</sup>, Zhang Jianmin<sup>2</sup>, Feng Guobin<sup>2</sup>, Liu Weiping<sup>2</sup>,  
Wei Chenghua<sup>2</sup>, Han Yongchao<sup>2</sup>, Wang Na<sup>2</sup>

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

**Abstract:** In order to study the feasibility of testing the high temperature mechanical properties of materials with laser as heat source, a theoretical model and a numerical model were established to analyze the surface and internal temperature rise of materials heated by double-sided uniform laser spot. The results show that the uniform temperature field can be formed in the heating area of the specimen by using the double sided uniform laser irradiation under the ideal condition. In order to verify the above conclusions, a thermo-mechanical test platform of laser irradiation with spot uniformity of 92% is established, and the high temperature tensile strength of CFRP laminates which are difficult to be heated quickly using traditional method is obtained based on the relevant test methods. The results show that the temperature uniformity of the specimen in the test area of laser heating center (10 mm×10 mm) is good. The specimen can be rapidly heated to 923 °C under uniform double-sided laser irradiation, and the maximum temperature fluctuation in the test area is 6.8%. The thermo-mechanical test method based on uniform laser double-sided irradiation has many advantages such as good generality, high temperature

收稿日期: 2022-05-13; 修订日期: 2022-06-11

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金 (SKLLIM1802)

作者简介: 王家伟, 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事激光辐照效应方面的研究。

rise rate, high test temperature and high test efficiency. It provides a key technical support for further development of a universal test system of material/structure with high temperature rise rate and high temperature mechanical properties.

**Key words:** double-sided irradiation; uniform laser; high temperature; tensile strength; CFRP

## 0 引言

随着新材料技术的发展,耐高温材料在航空航天领域发挥着越来越重要的作用<sup>[1-2]</sup>。目前,对材料的高温力学性能的研究尚不充分,主要原因是缺乏高温力学性能测试的相关装置<sup>[3]</sup>。这些装置研制的主要难点是如何营造高温环境。国内外已经有很多学者针对这一问题开展了相关研究。比较常见的是采用环境辐照加热技术<sup>[4-6]</sup>实现高温环境下材料的力学性能测试,这种方法具有温度场均匀,热惯性小,便于控制的优点。但是也有加热或冷却周期时间长,成本高,难维护等缺点。近几年,有学者采用通电电阻加热的技术实现了材料高温下的力学性能测试,这种方法的优点是温度均匀性好,升温速率较快。例如,哈尔滨工业大学的李明旭<sup>[7]</sup>等人搭建了通电电阻加热的超高温力学性能试验系统,可以实现 C/C 复合材料从常温至 3 300 °C 的拉伸强度测试,最高温升速率达到 40 °C/s。但该方法的缺陷是只适用于导体,且夹具与试件结合部位往往存在较大的温度梯度。近几年,电磁感应加热技术也被运用于材料高温力学性能测试中<sup>[8-9]</sup>。杨旭<sup>[10]</sup>等人采用感应加热的方式研制了一套高温力学性能测试系统,最高温升速率达到 800 °C/min,实现了对石墨从常温至 1 000 °C 的测量。但是该方法同样只适用于导体,且加热过程中存在较大的温度梯度。石英灯、卤素灯等辐射式热环境模拟试验技术应用也较为普遍,该方法加热具有热惯性好,加热功率大等优点。北京航空航天大学的吴大方<sup>[11]</sup>等人采用石英灯加热的方式,建立了一套超高温气动热环境试验模拟系统。但是该加热方法受石英灯加热管外石英玻璃融化温度的限制,加热的极限温度有限,一般为 1 400~1 500 °C。采用电弧风洞加热<sup>[12]</sup>可以有效模拟各种不同的气动加热试验环境,但是大型风洞试验设备非常昂贵,运行维护成本很高,故主要用于大型结构件的试验研究。

激光加热材料具有温升率高、加热温度高、通用性好等优点。近几年,随着激光技术的不断发展,已

经有不少学者开始采用激光加热的方式开展材料高温力学性能测试,获取材料在高温下的力学性能。例如,中国科学院力学研究所的宋宏伟等人<sup>[13]</sup>建立了一套基于激光加热的高温力学性能试验系统,开展了材料在模拟火灾条件高温、高温升率条件下的力学性能的测试。中国飞机强度研究所的张宇<sup>[14]</sup>等人采用激光加热搭建了一套高温力学性能试验系统,可以实现针对金属材料或复合材料在高温下的力学性能快速测试,上述工作均为将激光运用于材料高温力学性能测试提供了一种新的思路。但是由于传统的高斯激光束在加热面内功率密度分布存在差异,容易引起材料激光加热区域内存在较大温度梯度,导致测试得到的材料高温力学性能无法表征。因此,目前关于激光加热运用于材料高温力学性能的试验研究还未见公开报道。为此,笔者<sup>[15]</sup>提出了采用均匀激光双面辐照加热试件的方法,将激光光斑均匀化处理后,通过特殊的光路设计实现两束均匀激光光斑同时加热试件表面,待温度到达平衡后开展力学性能测试的方式,实现激光对材料的均匀加热,并最终将其运用于材料的高温力学性能测试中。文中尝试针对均匀化光斑加热方法开展理论分析与试验研究,探索开展适用于多种材料的热力耦合测试方法,为进一步建立基于激光加热的高温升率、超高温力学性能试验系统提供技术支持。

## 1 理论分析

材料对激光的吸收通常可以等效为表面薄层的面吸收。传统高斯激光加热下材料温度分布不均主要有两个原因:一是传统高斯激光束在激光加热区域内功率密度分布有差异,导致激光加热过程中不能作为均匀的热流;二是激光属于表面加热,试件在厚度方向会存在一定的温度分布差异。从上述两个原因分析,针对传统的长条形力学测试试件,若采用双面均匀化激光加热的方式可以显著改善激光加热区域内的温度分布差异。图 1(a) 为均匀激光双面辐照加热试件的侧视图,给出了两面激光同时辐照试件同一



激光加热区域为 10 mm×50 mm 的加热条件下,CFRP 材料在激光加热中心区域内 10 mm×10 mm 范围内经激光辐照约 36 s 近似达到热平衡状态,材料初始温升速率约 40 °C/s,表面最高温度约 693 °C。激光加热区域内表面最高温度与试件内部中心位置最低温度之差约为 25 °C,温度均匀性良好。

为进一步说明试件厚度对激光加热下材料温度均匀性的影响,取试件加热面中心点与试件中间层的中心点的温度差异作为表征,计算了激光功率密度为 10 W/cm<sup>2</sup> 时,不同厚度 CFRP 材料在激光加热下温度达到稳态时的分布,如表 1 所示。

表 1 数值模型计算得到的稳态温度结果

Tab.1 Steady-state temperature results obtained by numerical model calculation

Thickness/mm	The highest temperature of surface/°C	The lowest temperature of center/°C	Temperature difference/°C	Relative deviation
0.5	702.5	683.0	19.5	2.8%
1	692.5	668.8	23.7	3.5%
2	671.8	638.7	33.1	5.2%
3	651.1	604.3	46.8	7.7%
4	627.7	561.9	65.8	11.7%
5	602.8	512.7	90.1	17.6%

结果表明,随着试件厚度的增加,试件在厚度方向的温度梯度逐渐变大。若要采用双面均匀激光辐照实现对材料的均匀加热,试件的厚度应越小越好。从力学测试的角度看,将该方法运用于材料的高温拉伸性能测试是较好的选择。当试件的厚度在 1 mm 的范围内,加热时表层与内部的温度差异可以控制在 3.5% 以内。上述结果表明在一定控温精度要求范围内,双面激光辐照加热可以在试件加热区域内产生较均匀的温度场。

## 2 试 验

### 2.1 试验准备

针对传统加热方式较难快速加热的 T700/9A16 碳纤维环氧树脂复合材料 (CFRP) 开展了高温拉伸强度测试研究。试中的试件尺寸为 250 mm×10 mm×1 mm,单铺层厚度 0.125 mm,共 8 层,铺层顺序为 [0°/90°/0°/90°/0°/90°/0°/90°],为方力学加载,材料的两端粘贴有加强片,试件规格如图 4 所示。

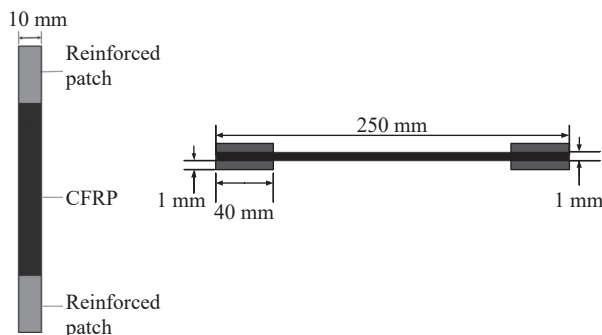


图 4 试件规格

Fig.4 Specifications of specimen

在激光器的选型上,试验中采用了多模光纤激光作为加热源,波长 1080 nm。为实现激光光斑的匀化,文中使用多根光纤合束后经方形光纤输出激光的方式获取了较为均匀的方形光斑。图 5 为到靶光斑二维形貌及光斑中心横向和纵向剖面功率密度分布。

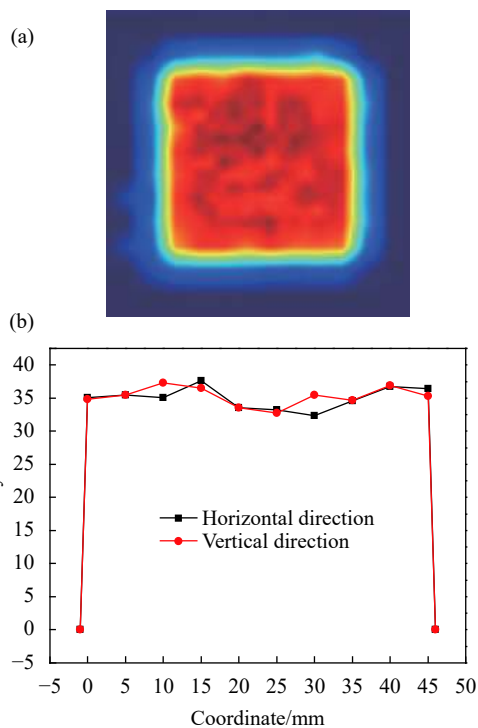


图 5 光斑二维形貌及剖面功率密度分布

Fig.5 Two-dimensional morphology of speckle and power density distribution of profile

计算激光光斑匀化度的公式为:

$$U = 1 - \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (5)$$

式中:  $U$  为激光光斑的匀化度;  $I_{\max}$  为激光加热区域内的最大光强;  $I_{\min}$  为激光加热区域内的最小光强。通

过上式计算, 光斑均匀化度为 92.45%。说明激光光斑在加热面内的均匀性较好, 激光可近似为一个均匀的面热流。

### 2.2 基于均匀化光斑加热的 CFRP 材料高温拉伸强度试验

试验光路如图 6 所示。CFRP 试件夹持于万能试验机的夹具上施加拉伸载荷, 45 mm×45 mm 的准直均匀方形激光光斑辐照于试件表面, 剩余约 35 mm×45 mm 的光斑经全反镜反射辐照于试件的后表面。全反镜表面针对 1080 nm 激光镀膜, 反射率可达 99% 以上, 故可近似认为激光经全反镜反射后功率密度没有衰减, 实现了等功率密度激光同时两面辐照试件同一区域的效果。由于 CFRP 在激光加热时的热解产气会阻挡部分入射激光能量, 试验中在试件附近加装了排风扇去除其影响。试验中载荷加载与激光加热同时开始, 万能试验机加载速率为 4 mm/min, 直至试件发生断裂, 取试件发生断裂位置中心附近 10 mm×10 mm 区域内的热像仪记录平均温度作为测试温度的表征。

试验中使用热像仪记录试件在激光加热下的温度变化, 热像仪发射率设置为 0.9。图 7 为激光加热

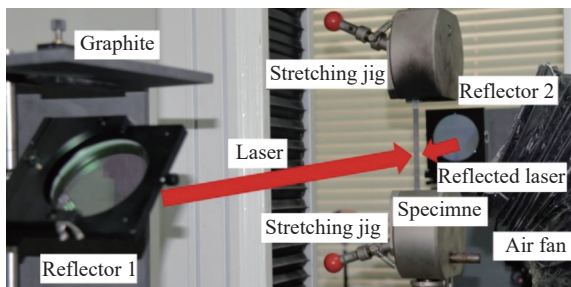


图 6 激光双面辐照加热试验场景

Fig.6 Experimental scene of double-sided laser irradiation heating

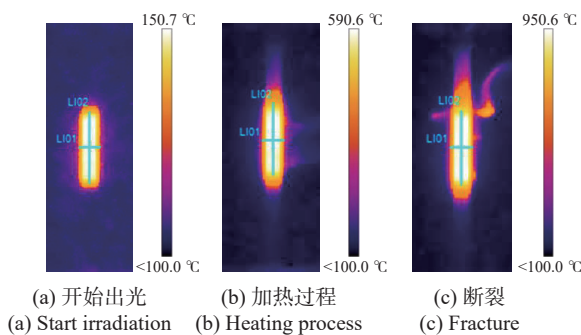


图 7 热像仪记录的典型图像

Fig.7 Typical image recorded by a thermal imager

过程中热像仪记录的典型图像, 图中对试件沿中心横向和纵向的温度分布线进行了标注。从热像仪图像上可以看出, 试件在激光加热下在横向与纵向均出现了轻微的热膨胀, 试件在即将发生断裂时的热影响区范围较出光时刻明显变大。

### 3 结果分析

图 8 给出了热像仪记录得到的激光加热下试件温度到达稳态后试件沿中心横向和纵向的典型温度分布, 此时激光加热平均功率密度约为 21.8 W/cm<sup>2</sup>。图中横坐标为长度, 纵坐标为温度。结果表明, 在边缘热对流较强的区域, 横向温度相对较低。由于试件纵向存在热传导, 故激光光斑边缘处纵向温度分布存在较大的温度差异, 但在激光加热区域的中部, 温度分布整体较为均匀。试件中心 10 mm×10 mm 范围内可以得到较为均匀的温度场, 在后续的 CFRP 高温拉伸强度试验中, 取该区域内的平均温度作为测试温度的表征。

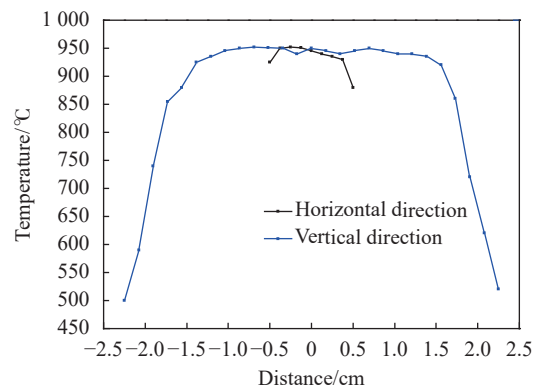


图 8 典型温度分布

Fig.8 Typical temperature distributions

图 9 为试件在激光加热过程中, 表征测试温度的区域内最高温度、平均温度、最低温度的变化。结果表明, 激光加热过程中, 试件的最高温度与平均温度相差较小, 说明激光加热的大部分区域内的温度一致性较好, 最低温度出现在试件加装排风扇的一侧的边缘。

试件在加热的初始阶段温升速率约为 88 °C/s, 加热超过 400 °C 时, 表面开始出现明显热解。继续加热至 10 s 时, 当温度达到约 700 °C, 试件开始出现明显火焰。当激光继续加热, 试件热解完全后火焰逐渐消失。当试件发生断裂时, 用于表征温度的测试区域内

的温度已经基本达到稳态,整个高温强度测试过程持续约 45 s。试件发生断裂时,加热区域内的平均温度为 923 °C,最低温度为 860 °C,最高温度 953 °C,最大温度波动范围为 6.8%。

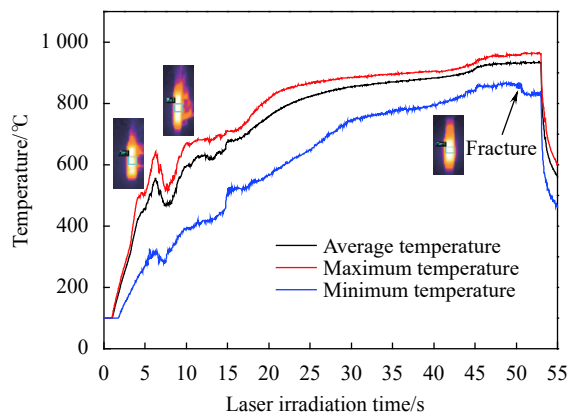


图 9 激光辐照下的温升曲线

Fig.9 Temperature rise curves under laser irradiation

进一步地,调节不同的激光出光功率,改变试件在激光加热下的温升历程,基于相同的步骤测试得到激光加热至不同温度的 CFRP 材料拉伸强度。图 10 为红外热像仪记录得到的不同激光功率密度加热下的材料测试区域内从激光加热开始至发生断裂期间的温升历程。结果表明,当较低功率密度激光加热时(如功率密度 1.3 W/cm<sup>2</sup> 和 2.9 W/cm<sup>2</sup>),由于试件温度没有达到热解温度,试件在激光加热下逐渐达到热平衡,温升规律与图 3 中的数值模型计算结果相近,且平衡温度随激光辐照功率密度的增加而增加。当功率密度较高时(如功率密度 9.2 W/cm<sup>2</sup> 和 16.9 W/cm<sup>2</sup>),在激光加热的初期瞬时温度达到约 400 °C,试件开始剧烈放热,表面出现热解气体,热像仪记录的温度数据受热解气体的干扰出现抖动。当材料本身的放热结束后,试件在激光持续加热下温度进一步升高,最终在高温和拉伸载荷共同作用下断裂。激光加热功率密度越高,试件从开始加载到发生断裂的时间越短。

图 11 为基于文中方法测试得到的 CFRP 层合板高温拉伸强度。结果表明,在激光诱导的高温升速率加热下,随着温度的升高,试件的拉伸强度出现退化。温度持续升高的过程中,在某一阶段也可能出现拉伸强度的增强(如 300 °C 左右),这一结论在其他文献中也有类似佐证<sup>[4-6]</sup>,具体原因还有待进一步研

究。随着温度的进一步升高,试件的强度开始出现剧烈下降。当温度达到 450 °C 左右,试件的强度只有常温下的约 30%。若温度继续升高到 923 °C 以上,试件几乎不能承受拉伸力学载荷。受限于 CFRP 材料高温力学性能到 923 °C 即接近失效的原因,试验中没有再进一步测试更高温度下 CFRP 拉伸强度,但文中系统对复合材料的极限测试温度还可大幅度提高。

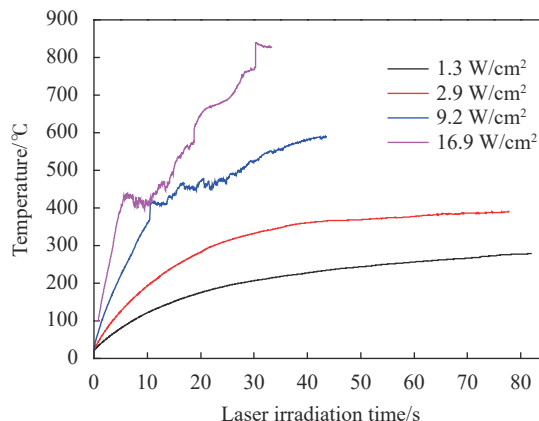


图 10 不同激光功率密度下的 CFRP 典型温升曲线

Fig.10 Typical temperature rise curves of CFRP with different laser power densities

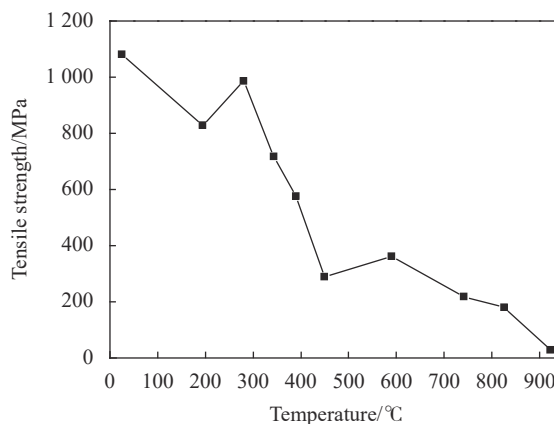


图 11 基于激光加热的 CFRP 高温拉伸强度

Fig.11 High temperature tensile strength of CFRP based on laser heating

试验结果同时表明,激光功率密度 21.8 W/cm<sup>2</sup> 可加热至约 923 °C,在此功率密度激光加热的温度下试件已接近完全失效,再进一步提高功率密度意义不大;考虑到传统的加热炉加热的方式较难实现 300 °C 以上的高温力学性能测试,对应激光加热功率密度约为 2.9 W/cm<sup>2</sup>。故分析认为激光功率密度

2.9~21.8 W/cm<sup>2</sup> 范围适合利用激光作为热源开展 CFRP 材料的高温力学性能测试。

图 12 为三个典型温度下 (194 °C、343 °C 和 923 °C) 试件断裂后的形貌。从试件断裂的位置来看, 试件在 194 °C 下发生断裂的位置在激光加热区域的边缘, 根据激光加热区域内中心高边缘低的温度分布结果, 说明激光加热中心区域较高温度的强度有可能高于边缘较低温度下的强度。温度 343 °C 和 923 °C 下, 试件的断裂位置位于激光加热区域中温度最高的中心区域, 说明该温度下拉伸强度随温度的升高下降明显。试件在 194 °C 下呈现脆性断裂, 断裂形貌与常温状态下拉伸强度试验相近。343 °C 下试件断裂呈硬质毛刷状, 而 923 °C 下试件断裂位置处的环氧树脂已几乎热解完全只剩下细软的碳纤维。

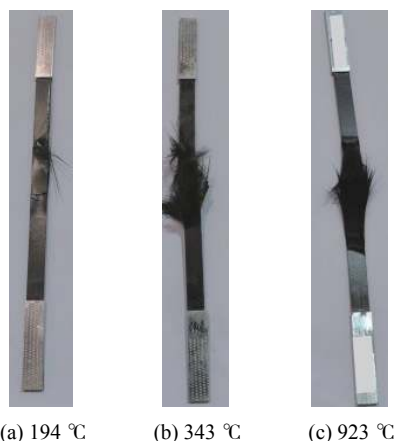


图 12 试件断裂形貌

Fig.12 Fracture morphology of specimen

图 13 为 343 °C 和 194 °C 下试件断口横截面形貌。当温度较高时, 试件在激光加热与载荷联合作用下逐渐断裂, 断口呈毛刷状; 在激光加热温度较低时, 试件发生脆断, 断口整齐。从断口横截面形貌看, 无



图 13 试件断口横截面形貌

Fig.13 Cross section morphology of specimen fracture

论何种温度下, 试件断口处表面与内部形貌无明显差异, 这也证明了试件在激光加热区域内沿厚度方向的温度均匀性较好。

## 4 结 论

(1) 文中研究了基于均匀化激光双面加热的热力耦合测试方法。建立的理论模型与数值模型表明, 使用均匀化激光双面加热的方式能在试件特定加热区域内形成较为稳定的均匀温度场, 对厚度为 1 mm 的 CFRP 试件温度波动可控制在 3.5% 以内, 在一定的温控精度要求范围内, 使用均匀化激光双面辐照的方式开展对 CFRP 一类较难加热的复合材料的高温力学性能测试具备可行性。

(2) 在理论分析基础上, 建立了光斑均匀化度达 92% 的激光双面辐照热力耦合测试试验平台, 针对 T700/9 A16 型 CFRP 层合板开展了双面均匀激光加热下的拉伸试验。试验结果表明, 通过改变激光加热功率密度, 可以快速测试得到 CFRP 试件从常温至 923 °C 之间典型温度点下的拉伸强度。系统可实现对 CFRP 的快速均匀加热, 温度达到 923 °C 时, 测试区域内最大温度波动为 6.8%。T700/9 A16 型 CFRP 层合板高温拉伸强度随温度的升高总体呈下降趋势, 当温度达到 923 °C 左右时已经几乎不能承受拉伸载荷, 试件发生断裂的位置主要集中于激光加热中心区域内。但在温度持续升高的过程中, 某一阶段也可能出现拉伸强度的增强 (如 300 °C 左右), 此时试件受拉伸载荷发生断裂的位置在激光加热区域的边缘, 相关机理值得进一步研究。

(3) 文中提出的基于均匀化激光双面加热的热力耦合测试平台及相关测试方法相对传统加热方法具有通用性好、温升率高、测试温度高、测试效率高、无需设计特殊高温夹具、便于观察等一系列的优点。研究可为进一步建立基于激光加热的通用型高温升率、高温力学性能试验系统打下基础, 为耐高温材料的高温、高温升率下的快速力学性能测试提供关键技术支撑。

## 参考文献:

[1] Rosenstein A H. Overview of research on aerospace metallic structural materials [J]. *Materials Science & Engineering A*,



- 1991, 143(1-2): 31-41.
- [2] Schmidt D L, Davidson K E, Theibert L S. Unique applications of carbon-carbon composite materials [J]. *Sampe Journal*, 1999, 35(3): 27-39.
- [3] Du S. High Temperature Solid Mmechanics [M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese)
- [4] Gao Y, Shi Y, Wang K, et al. High-temperature mechanical properties of carbon fiber reinforced polyimide resin matrix composites MT300/KH420(I)-tensile and interlaminar shear properties [J]. *Acta Materiae Compositae Sinica*, 2016, 33(6): 1206-1213. (in Chinese)
- [5] Dong S. The analysis of mechanical properties on composite laminated plate and honeycomb panel under the environment of high temperature[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2013. (in Chinese)
- [6] Chen M. Mechanical properties testing and analysis of T300/AG80 laminated plate[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [7] Li M. Experimental study on ultra-high temperature tensile mechanical properties of needle-punched C/C composites[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021. (in Chinese)
- [8] Ma Y. Development of a high-temperature mechanical test apparatus using induction heating[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020. (in Chinese)
- [9] 隋信栋, 闵峻英, 张华, 等. 一种高温环境金属材料拉伸试验系统: 中国, CN111579384A[P]. 2020-08-25.
- [10] Yang X. Development and performance testing of a high-temperature mechanical testing apparatus[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021. (in Chinese)
- [11] Wu D, Pan B, Zheng L. Aerodynamic heating simulation method and testing technique for materials and structures of hypersonic flight vehicles [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2012, 29(3): 250-258. (in Chinese)
- [12] Ou D, Chen L, Dong Y, et al. Ablative test of anti-oxidation carbon/carbon composites under stress[C]//Chinese Conference on Mechanics, 2013. (in Chinese)
- [13] 宋宏伟, 黄晨光, 赵伟娜. 一种基于激光辐照加热的材料高温力学性能试验系统及方法: 中国, CN106053247A[P]. 2016-05-12.
- [14] 张宇, 王彬文, 刘小川, 等. 一种基于激光辐照的材料可控高温试验装置与方法: 中国, CN110940570A[P]. 2020-03-31.
- [15] 王家伟, 朱永祥, 韦成华, 等. 基于激光双面辐照加热的高温力学性能测试系统及方法: 中国, CN108195662A[P]. 2018-03-13.