

文章编号:1001-4888(2020)04-0557-10

真空环境下钨材料高温形变的 数字相关测量技术研究*

乔美霞, 潘志伟, 黄生洪, 苏勇, 张青川

(中国科学技术大学 材料力学行为和设计重点实验室, 安徽合肥 230026)

摘要: 钨是目前聚变堆偏滤器及第一壁结构中首选的面向等离子体材料,其服役条件下的力学性能在聚变工程中具有重要参考价值和研究意义。本文采用数字图像相关测量设备在真空高热流综合实验平台上,开发了基于碳化钨的散斑材料及制备工艺,设计和实现了基于外加光源和自身辐射光源的测量光路方案,测量了钨材料试件在 25℃ 至 2000℃ 温度范围的热膨胀变形,所得结果与文献提供的钨材料热膨胀应变结果吻合,误差小于 1%,验证了测量技术方案的准确性和可行性,为进一步发展聚变工程材料在高热流冲击工况下的观测技术打下了基础。

关键词: 面向等离子体材料; 钨; 碳化钨; 高温环境; 数字相关测量

中图分类号: O34 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-19-066

0 引言

钨具有高熔点、高导热率、高密度、低热膨胀系数、低蒸气压、低氩滞留、低溅射产额和高自溅射阈值等优异性能,是目前聚变堆偏滤器及第一壁结构中首选的面向等离子体材料。由于直接承受聚变堆高温等离子体辐射热流作用,其在高温环境下的力学特性一直受到广泛的关注。

从国内外文献调研^[1-12]来看,目前对钨在常温至中低温度范围内($<1000^{\circ}\text{C}$)的力学性能已有较多研究,但针对钨在 1000°C 以上高温范围内的力学性能测量偏少。从文献报道来看,失效钨部件表面的宏观裂纹多数出现在高温加载及瞬态高热流冲击作用后,但由于缺少高温环境下的实验观测或可靠的理论模拟数据,关于钨的高温裂纹产生机制及与此相关的疲劳蠕变特性尚未有完整清晰的认识,进而难以有效预测用于核聚变反应堆钨构件的安全性。因此,有必要搞清高温环境下钨材料疲劳蠕变特性及裂纹产生机制,这将有利于采取针对性措施来提高其抗疲劳与抗热冲击特性,避免产生失效裂纹,为未来聚变堆更高性能地面向等离子体部件研制打下坚实的理论和力学基础。这就迫切需要针对钨材料开展高温环境下力学性能的直接观测研究。

对于大于 1000°C 的高温环境条件,应变片等传统接触式传感器由于自身材料限制,已无法满足测量要求。随着计算机图形学和计算机硬件的发展,以图像处理为基础的非接触式光学测量是目前超高温实验力学领域的主流技术,可用于动态变形场、静态变形场、应变场、冲击振动以及断裂和疲劳过程测量等,是实现高温下材料特性与失效监测的有效方法。根据成像技术和处理方法的不同,目前主要包括数字图像相关技术和电子散斑图干涉技术。其中数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)技术最早由 Yamaguchi 和 Peters 等人^[13,14]于 20 世纪 80 年代提出,其基本原理是跟踪物体表面纹理点在变

* 收稿日期: 2019-04-23; 修回日期: 2019-06-10

基金项目: 国家磁约束聚变专项资助 2015GB121007

通讯作者: 黄生洪,男,博士,副教授,主要研究领域:工程力学。Email: hshnpu@ustc.edu.cn

形前后的位置变化。数字图像相关测量方法由于设备简单、测量精度高、隔振要求低等一系列优势,已广泛应用于航空、航天、材料、生物等领域,成为光测实验力学领域最受欢迎的形貌、变形和应变测量方法。1996年 Lyons 等^[15]首次使用 LSI 氮化硼和氧化铝基陶瓷涂层在样品表面制作散斑的方法,采用数字图像相关方法测得了铬镍铁超合金材料从室温到 650℃ 时的热膨胀系数及弹性模量。2009年 Grant 等^[16]提出了一种不使用表面标记或斑点来获得高温下样品表面良好图像且适合于应变测量的方法,该方法使用滤波器和蓝色照明来抑制黑体辐射,可以准确测量环境温度至 1000℃ 镍基高温合金的杨氏模量和热膨胀系数。2012年奥克兰大学的 Chen 等^[17]使用单色光源研究了含有铝和氧化锆陶瓷材料的散斑性能,提出了高温下需要提前对散斑进行热处理固化的技术措施,以便实验时能够较好识别散斑,并通过实验测量了 1100℃ 下试件的变形结果。针对高温自发光干扰问题, Berke 等^[18]提出利用紫外波段的光源和紫外相机,通过滤镜将物体自发可见光滤掉,只留紫外光图像进行 3D-DIC 测量的技术路线。该研究由于加载条件限制只进行了最高 1125℃ 的测量,但结论认为可以推广到更高温度范围。近年来,随着国内航空航天技术领域高温部件研究的推进,清华大学冯雪团队针对高温/超高温环境,也发展了高温光学及其光电系统,研制了可视化测量方法、高温实验技术等^[19-22]。北京航空航天大学潘兵团队推进了基于图像的非接触、高精度、全场变形测量方法的理论研究进展,并成功将相关测试技术用于国防领域高超声速飞行器极端高温环境地面考核实验。最新报道的温度条件为 1868℃ (采用紫外光源,材料表面自然纹理)^[23-26]。中国科学技术大学光力学实验室则长期开展系列基础研究,并研发了具有完全自主知识产权的通用三维数字图像相关测量系统 PMLAB 3D-DIC,应用于多种领域,取得了一系列成果^[27-31]。

综合来看,目前针对高温条件下的数字相关图像测量方法,尤其是 1000℃ 以上的观测方法还面临以下几方面难题:首先是试件表面散斑的耐高温性能。不仅要耐高温,且制斑工艺不能损害基体材料的表面性状;其次,高温情况下的黑体辐射较强,被测材料自身会发出可见光,与光源的光相互干扰,影响图像质量,导致采集的图像无法计算分析出准确的结果甚至根本无法计算;最后,在一般有气氛环境条件下,高温易导致较强的气动光学现象,进而影响成像的散斑特征,且很难消除。因此,研究高温条件下的 3D-DIC 测量问题,需要针对性地开发新型制斑材料、制斑工艺及先进的成像技术和方法。

本文利用真空环境的高热流综合实验平台,采用基于蓝光光源的 3D-DIC 测量系统,开发了新型制斑材料及工艺,设计和实践了基于外加光源和自身辐射光源的测量技术方案,测量了偏滤器靶板钨材料试件从 25℃ ~ 2000℃ 温度范围的热膨胀变形,并与文献提供的热膨胀应变经验公式值进行了对比,验证了测量技术方案的准确性和可行性,为进一步发展相关测量技术打下了基础。

1 测量设备及方法

1.1 实验设备及测量设备配置

本文使用的高热流综合实验平台,其系统图如图 1 所示。实验平台主要分为:(1)真空系统;(2)电子束扫描加热系统;(3)真空室循环水冷系统;(4)测控系统;(5)安全防护系统。其中真空系统可将密闭真空室压力抽至 10^{-3} Pa 量级,形成实验要求的真空环境。电子束扫描加热系统利用发射的电子动能直接撞击材料表面产生热能,通过高频扫描实现均匀的面加热,是较为理想的高热流加热设备。真空室循环水冷系统保证冷却水在真空室内壁冷屏中循环带走真空室内被加热体辐射的热量,保证真空室可以长时间开展实验测量。测控系统用来控制和监视整个系统和实验按预定实验方案正常运行,包括真空箱门的开关、抽真空时不同阀门的开关控制、冷却水控制、同步采集控制等。安全防护系统包括电子束自带的安全防护系统及外置的封闭铅房,用来屏蔽电子束轰击材料发出的 X 射线,从而避免辐射伤害。

测量设备主要包括红外单点测温仪、双比色红外测温仪和三维数字图像相关测量设备。其中,红外单点测温仪可以通过精密镜头得到测量点的清晰成像(型号:KELLER MSR PA 20 AF),进而获得成像点区域的平均温度,其测温范围为 250℃ ~ 2000℃,测量频率为 2Hz,像点区域大小为:Φ6.5mm ~ Φ8mm 圆形区域。测温设备可同时与热/机械加载系统耦合,实现不同的加载模式。三维数字图像相关测量设备采用基于蓝光光源的 PMLAB 3D-DIC 测量系统,该系统采用数字图像相机拍摄带有散斑的

试件变形前后表面形貌特征图像,通过 3D-DIC 系统软件识别被测物体表面散斑,利用相关匹配算法,得到表面的三维形貌特征,再通过计算分析选择测量区域内各点的三维形貌的变化,得到被测物体的三维位移分布及应变分布。

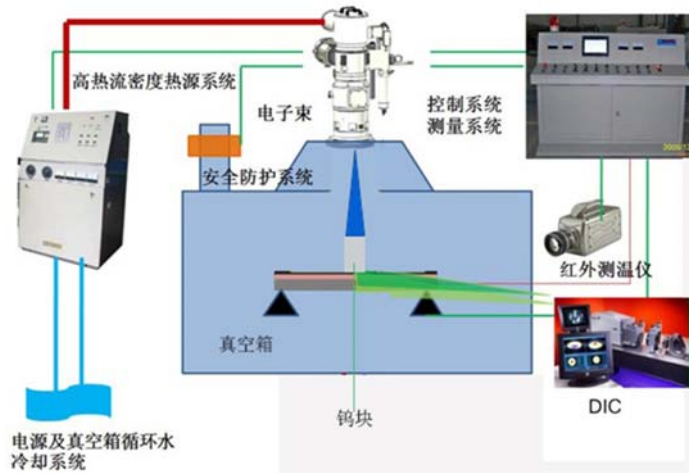


图 1 高热流综合实验平台系统图

Fig. 1 Diagram of a comprehensive experimental platform equipped with high heat flux loading system

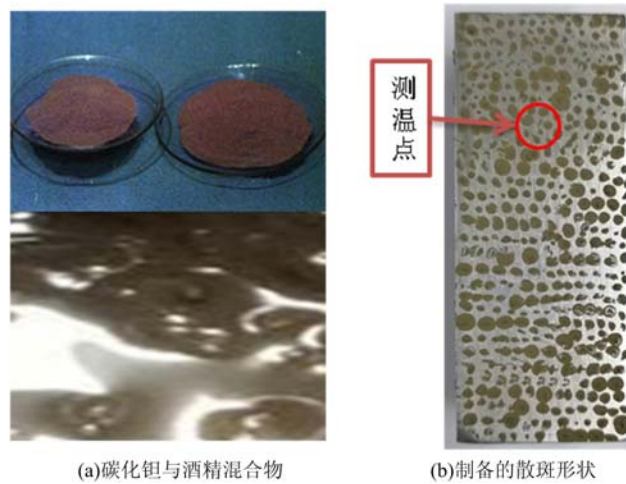


图 2 散斑制备的材料和形式

Fig. 2 Speckle materials and styles; (a)Tantalum carbide and alcohol mixture; (b)style of speckles

1.2 测量方案及实验步骤

被测试件是尺寸为 20mm×20mm×50mm 的纯钨块,3D-DIC 测试需要在试件表面制成随机分布和对比度分明的散斑图样。本研究将碳化钽粉末作为散斑材料,主要原因是碳化钽能耐 3800℃ 高温,热膨胀系数低,在钨材料表面吸附能力强,同时与钨材料光谱性质差异大,可形成对比鲜明的散斑。为了将碳化钽粉末固定于试件表面,首先用无水酒精清洗钨表面,将碳化钽粉末和酒精混合得到膏状混合物(碳化钽平均粒度为 1μm,纯度为 99%),如图 2(a)所示。用针管尖端在被测表面随机点涂混合物制成随机分布的散斑,放置 12 小时左右,酒精完全蒸发后,碳化钽粉末将自然吸附在钨表面,从而形成固定的散斑,如图 2(b)所示。

图 3 为真空箱及其内部布置。在真空环境中,被测钨块可以避免氧化,且真空条件可以避免热对流诱导气动光学效应干扰 3D-DIC 图像,形成误差。本文设计了两种 3D-DIC 测试光路系统来测量高温状态下钨材料变形。

- (1) 使用蓝光光源作为照明光源,添加滤光片 Bi440(425nm~455nm 带通),确保滤掉其他光段的

杂光或自发光干扰。光源及相机镜头前同时装有偏振片,用于调整相机采集图片的明暗。既要保证图片有足够的亮度,又要尽可能避免钨表面反光造成过度曝光。经过调试后,可以采集到从常温至1400℃左右的清晰图像。

(2) 滤光片和偏振片保持不变。测试光路系统调整方式:关闭蓝光光源,将钨高温状态的自发蓝光波段辐射作为唯一光源加以利用。由于高温下自发光随温度的升高而增强,不同的温度区间将通过降低曝光时间来减小高温表面过度曝光的区域。进行调试后,可以分段采集到从1400℃至2000℃左右的实验图像。



图3 真空箱及其内部布置

Fig. 3 Vacuum cabin and its internal arrangement

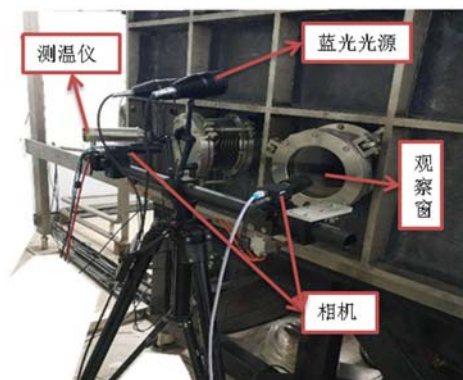


图4 红外测温仪和3D-DIC设备配置

Fig. 4 Infrared thermometers and 3D-DIC instruments arrangements

图4显示了红外测温仪和3D-DIC两个测量系统在试验台观察窗口的实物配置,使用同步通信接口相互关联,保证温度和应变同步开始采集。接下来需要做的是保证3D-DIC系统的相机采集图像的亮度与对比度符合要求即可得到准确的测试结果。

实验具体测试过程包括以下步骤:

(1) 将试件放在真空箱内,上表面中心对准电子束加热对应的位置。下部垫上绝热陶瓷板以免传热到真空箱内基座。

(2) 调整红外测温仪,使红外测温仪在钨块靠近上表面15mm位置聚焦测温点。

(3) 调整蓝光光源,使试件上光线分布均匀。通过窄带滤光成像,调整3D-DIC相机位置及相关设置,保证左右两相机可以采集到清晰的图像。

(4) 使用标定板对试件所在位置的周围区域进行标定,确定两相机相关参数,标定后,固定相机位置不动。

(5) 关闭并密封真空室门,陆续打开两个真空旋叶机械泵、分子泵抽真空至真空度为 1×10^{-3} Pa的高真空环境。只有在高真空环境下,电子才能高速运动冲击试件。

(6) 在控制3D-DIC设备的电脑上设置适当的采集频率和总采集时间,同时打开红外测温仪,并使用同步信号控制二者同时采集数据。

(7) 打开电子束对钨表面进行高热流加载。

图5为测试时红外测温仪及电子束下束时的图片。图6为3D-DIC左右相机初始采集到的清晰散斑图像,散斑与钨材料的对比度好,满足DIC计算要求。

2 结果与讨论

2.1 25℃~1400℃温度范围测试结果

首先进行了从25℃加热至1400℃范围的实验。实验中采用基于蓝光光源的测试光路系统。图7显示了不同温度时的散斑图像和测温点区域的DIC计算结果,可见:

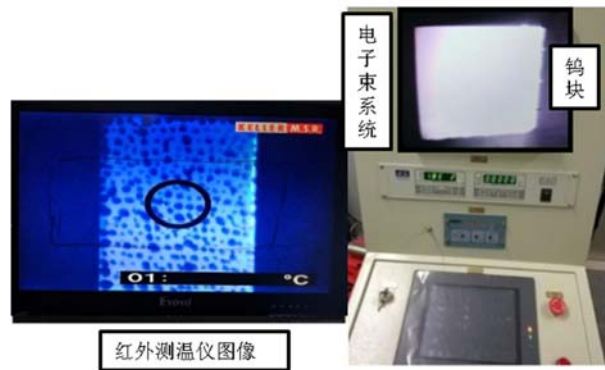


图 5 测试时红外测温仪和电子束视频

Fig. 5 Infrared thermometer and electron beam video during testing

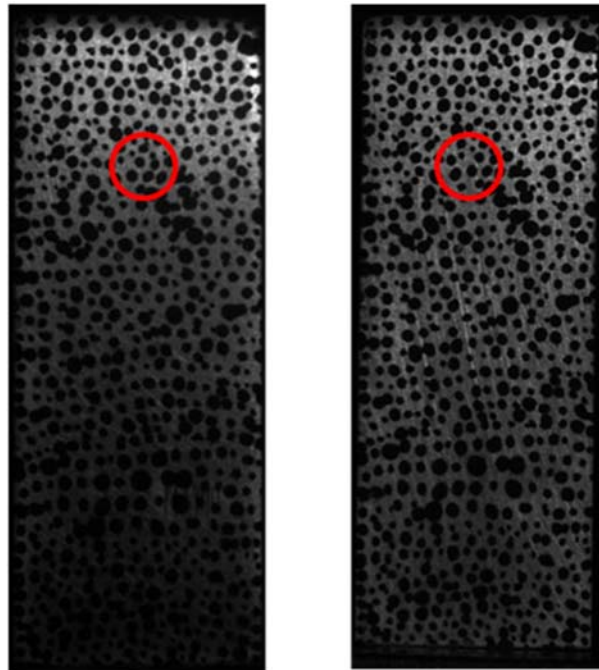


图 6 3D-DIC 左右相机初始采集图像

Fig. 6 Initial images captured from 3D-DIC left and right camera respectively

(1) 在 $25^{\circ}\text{C}\sim 1200^{\circ}\text{C}$ 温度范围, 钨自发光较弱, 可获得清晰的散斑图像。

(2) 当温度超过 1200°C , 钨自发蓝光开始逐渐增强, 表现为图像整体略有变亮。不过 DIC 处理表明, 1400°C 条件下, 仍可获得较理想的应变场计算结果。

(3) 从测温点区域的应变场计算结果来看, 随着钨块温度上升, 表面应变值呈现连续上升趋势, 显然符合预期的线性膨胀变形。

进一步获得应变随时间的变化曲线, 如图 8 所示, 可见温度与应变同步变化, 验证了温度和应变同步测量的可靠性。

2.2 $1400^{\circ}\text{C}\sim 2000^{\circ}\text{C}$ 高温 3D-DIC 采集结果

采用基于自发光的测量光路, 即关闭外加蓝光光源, 利用钨在高温时的自发蓝光辐射作为实验光源, 获得了 $1400^{\circ}\text{C}\sim 2000^{\circ}\text{C}$ 的散斑图像。由于测温范围较宽, 自发光强度随温度增加而增强, 需在不同的测温区间采用不同的曝光时间, 以获得被测区域清晰的散斑图像。经反复测量, 获得各测温区间拍摄的曝光时间设置如下:

(1) 1400℃~1600℃ 区间:15ms;

(2) 1600℃~1700℃ 区间:10ms;

(3) 1700℃~1900℃ 区间:5ms;

(4) 1900℃~2000℃ 区间:2ms。

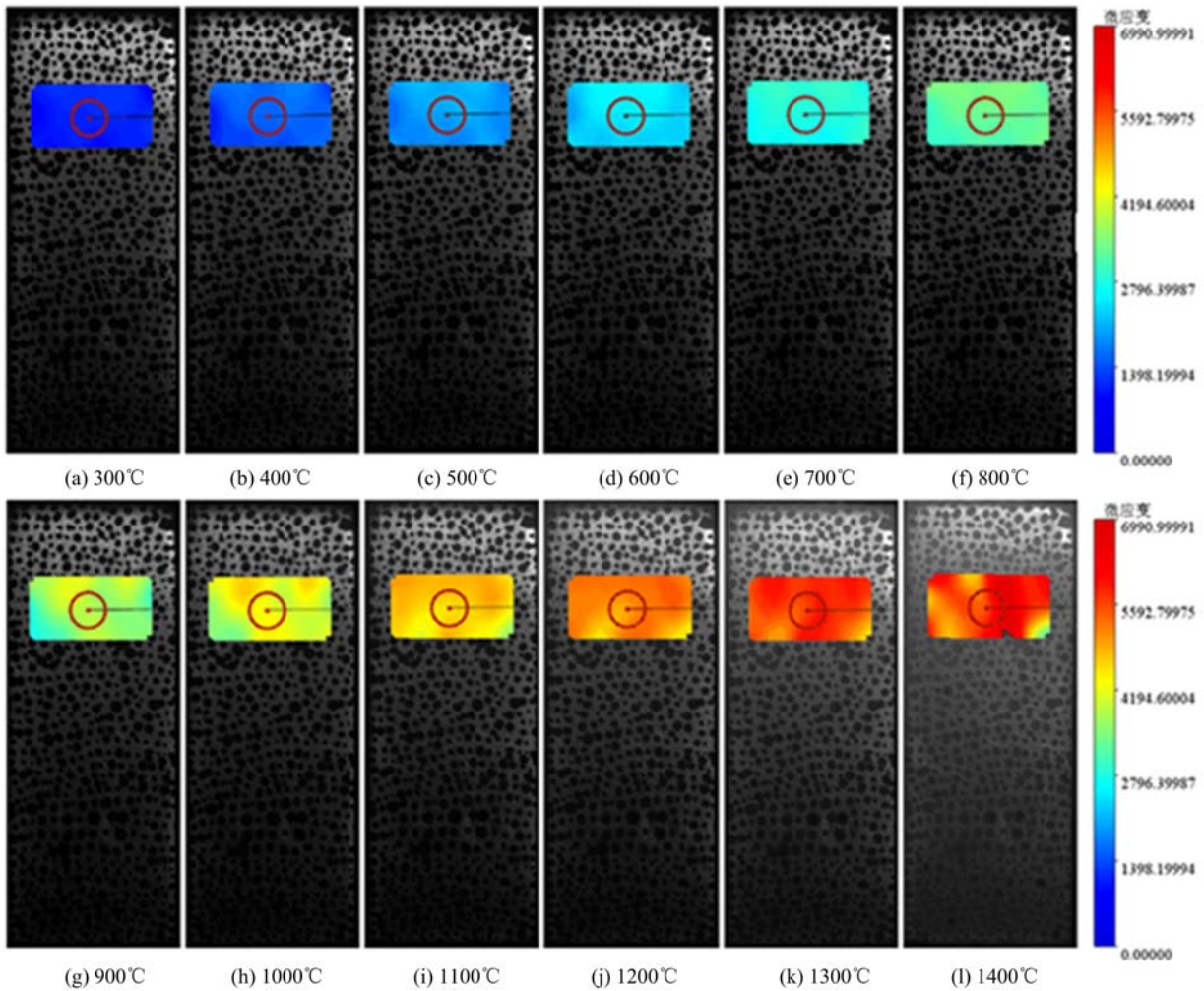


图 7 300℃~1400℃ 温度范围内被测面的散斑图像和 DIC 计算获得的测温点区域应变云图

Fig. 7 Speckle images of the tested surface and the strain contours on target point zone of infrared thermometer calculated by DIC under the conditions of $T=300^{\circ}\text{C}\sim 1400^{\circ}\text{C}$

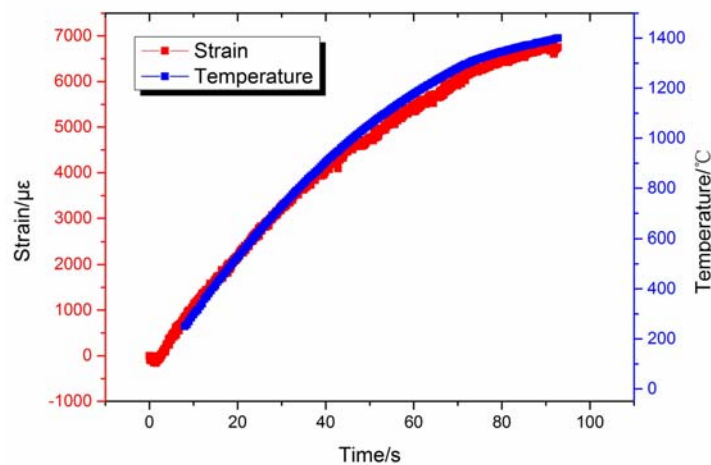


图 8 试件观测点区域从 25℃ 加热到 1400℃ 时的温度与应变随时间变化曲线

Fig. 8 Temperature and strain time history curves of target point zone on test piece heated from 25℃ to 1400℃

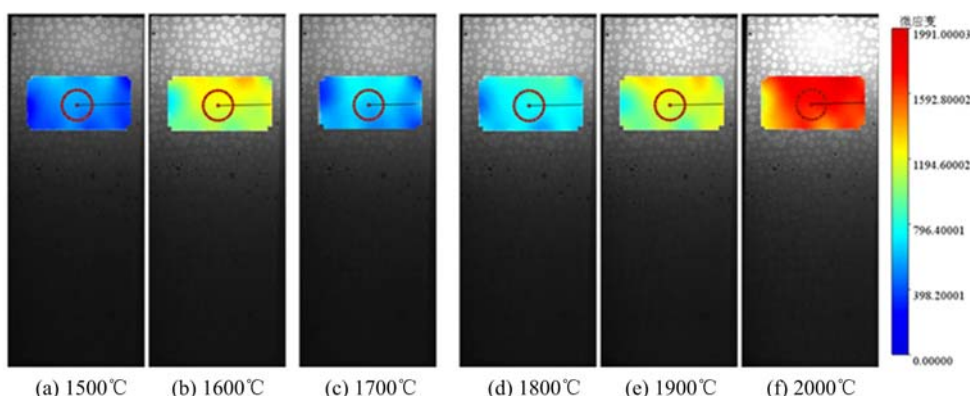


图 9 1500℃~2000℃温度范围内的散斑图像和 DIC 计算获得的测温点区域相对应变场云图

Fig. 9 Speckle images of the tested surface and the relative strain contours on target point zone of infrared thermometer calculated by DIC under the conditions of $T=1500^{\circ}\text{C}\sim 2000^{\circ}\text{C}$

图 9 显示了不同曝光时间下采集到的散斑图像,与 1400℃ 以前采用第一种光路获得的图像相比,存在以下区别:散斑形状相同,但亮度呈相反特征:即外加光源情况下,碳化钨散斑呈暗色,钨区呈亮色;而在自发光情况下,碳化钨散斑呈亮色,钨区呈暗色,因此,无法直接采用常温下的散斑图像作为参考开展高温下的应变场 3D-DIC 计算。本文采取了应变分段叠加计算的处理方法,具体步骤如下(以 x 方向为例):

x_A 是初始单元长度,在本文中是 25℃ 时的单元长度, x'_A 是加热后 T_1 的单元长度, x''_A 是加热后 T_2 的单元长度,公式(1)是位移 u 的表达式,公式(2)是拉格朗日应变 E_{xx} 的表达式。

$$u = \frac{\partial u}{\partial x} x' = x'_A - x_A \tag{1}$$

$$E_{xx} = \frac{\partial u}{\partial x'} = \frac{x'_A - x_A}{x''_A} = 1 - \frac{x_A}{x'_A} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} E_{xx\ 25^{\circ}\text{C}\sim T_2} &= 1 - \frac{x_A}{x''_A} = 1 - \frac{(1 - E_{xx\ 25^{\circ}\text{C}\sim T_1}) \times x'_A}{\frac{x_A}{1 - E_{xx\ T_1\sim T_2}}} \\ &= E_{xx\ 25^{\circ}\text{C}\sim T_1} + E_{xx\ T_1\sim T_2} - E_{xx\ 25^{\circ}\text{C}\sim T_1} \times E_{xx\ T_1\sim T_2} \quad (\text{略去高阶小量}) \\ &= E_{xx\ 25^{\circ}\text{C}\sim T_1} + E_{xx\ T_1\sim T_2} \end{aligned} \tag{3}$$

式(3)中 $E_{xx\ 25^{\circ}\text{C}\sim T_1}$ 为本文的基础应变,是钨块从 25℃ 升高到 T_1 时以 25℃ 为起点的线性热膨胀应变值; $E_{xx\ T_1\sim T_2}$ 是以 T_1 的散斑图像作为参考图像计算得到的温度为 T_2 时的相对应变。需要指出的是,由于第一种光路与第二种光路的重叠温度区间是 1400℃,而高于 1400℃ 以后的图像均采用第二种光路获得。由于曝光时间差异,各段获得的图像亮度不完全相同。为消除图像亮度差异带来的 DIC 计算误差,各温度区间可确定各自的基准图像,再进行应变叠加计算。具体如下所示:

(1) 选取 $T_1 = 1400^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 1600^{\circ}\text{C}$, 可根据图像计算获得 $E_{xx\ 25^{\circ}\text{C}\sim 1400^{\circ}\text{C}} = 6747\ \mu\epsilon$, $E_{xx\ 1400^{\circ}\text{C}\sim 1600^{\circ}\text{C}} = 1164.5\ \mu\epsilon$, 则 $E_{xx\ 25^{\circ}\text{C}\sim 1600^{\circ}\text{C}} = 7903.64\ \mu\epsilon$ 。

(2) 选取 $T_1 = 1600^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 1700^{\circ}\text{C}$, 根据图像计算出 $E_{xx\ 1600^{\circ}\text{C}\sim 1700^{\circ}\text{C}} = 626.5\ \mu\epsilon$, 而 $E_{xx\ 25^{\circ}\text{C}\sim 1600^{\circ}\text{C}}$ 则可根据(1)的结果直接叠加得到 $E_{xx\ 25^{\circ}\text{C}\sim 1700^{\circ}\text{C}} = 8525.19\ \mu\epsilon$ 。

(3) 以此类推,选取 $T_1 = 1700^{\circ}\text{C}$, $T_2 = 2000^{\circ}\text{C}$, 根据图像计算出 $E_{xx\ 1700^{\circ}\text{C}\sim 2000^{\circ}\text{C}} = 1700\ \mu\epsilon$, 而 $E_{xx\ 25^{\circ}\text{C}\sim 1700^{\circ}\text{C}}$ 则可根据(2)的结果直接叠加得到 $E_{xx\ 25^{\circ}\text{C}\sim 2000^{\circ}\text{C}} = 10210.69\ \mu\epsilon$ 。

除此之外,为了保证应变叠加的有效性,利用 3D-DIC 软件计算分析 1400℃ 以上区间的应变场时,使用的是与 1400℃ 以下图像中相同的计算区域文件(由于测试过程中保证了相机位置和光路不动,只是关闭光源,因此前后获得的图像在几何上是完全一致的),从而确保了后续分段计算的区域与种子点选取的一致性。

图 9(a)与图 9(b)分别是以 $T_1 = 1400^{\circ}\text{C}$ 的采集图像为基准计算的 $T_2 = 1500^{\circ}\text{C}$ 与 1600°C 相对的应

变场结果,图 9(c)是以 $T_1 = 1600^\circ\text{C}$ 时的采集图像为基准计算的 $T_2 = 1700^\circ\text{C}$ 的相对应变场结果,图 9(d)(e)(f)是以 $T_1 = 1700^\circ\text{C}$ 时的采集图像为基准计算的 $T_2 = 1800^\circ\text{C}, 1900^\circ\text{C}, 2000^\circ\text{C}$ 的相对应变场结果。从散斑图像和计算的相对应变场云图来看,上述各图的散斑图像清晰,计算获得的相对应变值均在合理区间。

为了验证测量方法与应变叠加算法的准确性,本文将实验获得的应变-温度曲线与 ITER 手册^[32]提供的线性热膨胀应变-温度经验公式(基于实验测量结果)进行了对比:

$$\Delta L/L = -2.7227 \times 10^{-2} + 3.7142 \times 10^{-3} \times T + 7.6913 \times 10^{-7} \times T^2 \quad (4)$$

式中, T 的单位是 $^\circ\text{C}$ 。根据公式(4)可计算出对应温度下的线膨胀应变值。

图 10 显示了本文测量值和经验公式(4)给出的参考值的曲线对比,可见二者吻合很好,特别是常温至 1600°C 区间,误差小于 1%。 1600°C 至 2000°C 范围实测值略有毛刺变化(拟合值较光滑),这可能与 DIC 不断变化图像计算起点引起的相关性累积误差有关。不过,总的误差仍未超过 1%,说明本文采用 3D-DIC 设备和测量方法精确地测出了常温至 2000°C 范围的线性热膨胀应变。

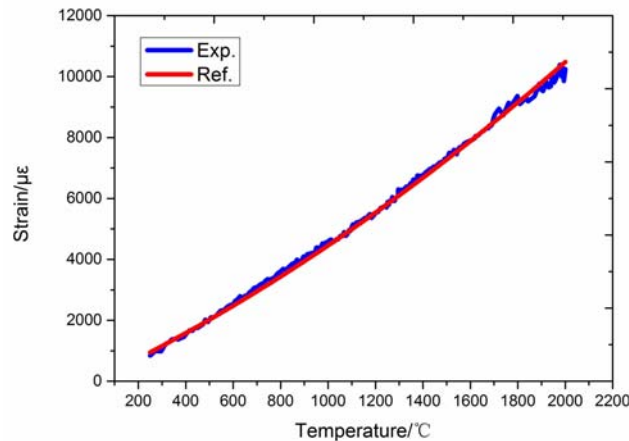


图 10 DIC 测量的钨在 $25^\circ\text{C} \sim 2000^\circ\text{C}$ 温度范围内的热膨胀应变与参考文献值对比

Fig. 10 Comparison of thermal expansion strain of tungsten at $T = 25^\circ\text{C} \sim 2000^\circ\text{C}$ between results measured by present DIC and reference

3 结论

基于高热流综合实验平台,采用数字图像相关测量设备,设计不同光路,测量了真空环境中钨 $25^\circ\text{C} \sim 2000^\circ\text{C}$ 温度范围内的热膨胀应变,主要获得以下结论:

(1) 采用热膨胀系数小,能耐高温的碳化钼粉末材料成功地在试件表面制成随机分布和对比度分明的散斑图样。高温加热实验证明,在真空环境下,碳化钼粉末可以较好地吸附于被测表面,并展示了满足 DIC 计算要求的散斑特征。

(2) 在 $25^\circ\text{C} \sim 1400^\circ\text{C}$ 范围,利用传统蓝光光源照射,钨自发光较弱,可获得清晰的散斑图像;当温度超过 1200°C ,钨自发蓝光开始逐渐增强,表现为图像整体略有变亮。不过, DIC 应变场计算结果表明, 1400°C 条件下,仍可获得较理想的应变场计算结果。

(3) 高于 1400°C 条件下,钨块在高温状态下的自发光较强,采用传统蓝光光源照射已无法获得清晰图像。利用钨在高温时的自发蓝光辐射作为光源,获得了从 $1400^\circ\text{C} \sim 2000^\circ\text{C}$ 左右的散斑图像。由于测温范围较宽,自发光强度随温度增加而增强,需在不同的测温区间采用不同的曝光时间,以获得被测区域清晰的散斑图像。

(4) 采取应变分段叠加的处理方法克服了在不同光路条件下,散斑形状相同而图像亮度相反的问题,获得了 $25^\circ\text{C} \sim 2000^\circ\text{C}$ 范围的线性热膨胀应变,并与参考文献提供的经验公式计算的应变值完全对应,误差小于 1%,证明了本文采取的测试方法和处理方法的正确性和合理性。

参考文献:

- [1] Gavila P, Riccardi B, Constans S, et al. High heat flux testing of mock-ups for a full tungsten ITER divertor[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2011, 86(9-11):1652-1655.
- [2] Ezato K, Suzuki S, Seki Y, et al. R&D activities on manufacturing plasma-facing unit for prototype of ITER divertor outer target in JADA[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2012, 87(7-8):1177-1180.
- [3] Riccardi B, Gavila P, Giniatulin R, et al. Effect of stationary high heat flux and transient ELMs-like heat loads on the divertor PFCs[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2013, 88(9-10):1673-1676.
- [4] Zhang X, Yan Q, Lang S, et al. Thermal shock and fatigue resistance of tungsten materials under transient heat loading[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2014, 455(1-3):537-543.
- [5] Loewenhoff T, Linke J, Pintsuk G, et al. ITER-W monoblocks under high pulse number transient heat loads at high temperature[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2015, 463:202-205.
- [6] Liu X, Lian Y, Chen L, et al. Experimental and numerical simulations of ELM-like transient damage behaviors to different grade tungsten and tungsten alloys[J]. *Journal of Nuclear Materials*, 2015, 463:166-169.
- [7] Gwon H, Matsuda S, Kasada R, et al. Evaluation of thermal structural behavior of divertor under ELM[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2015, 98-99:1318-1322.
- [8] Qian X Y, Peng X B, Wang L, et al. Evaluation of performance for the EAST upgraded divertor targets during type I ELMy H-mode[J]. *Nuclear Fusion*, 2016, 56(2):026010.
- [9] Hirai T, Panayotis S, Barabash V, et al. Use of tungsten material for the ITER divertor[J]. *Nuclear Materials and Energy*, 2016, 9:616-622.
- [10] Habainy J, Lovberg A, Iyengar S, et al. Fatigue properties of tungsten from two different processing routes[J]. *Journal of Nuclear Materials*[J]. *Nuclear Fusion*, 2018, 506:83-91.
- [11] Gunn J P, Carpentier-Chouchana S, Escourbiac F, et al. Surface heat loads on the ITER divertor vertical targets [J]. *Nuclear Fusion*, 2017, 57(4):046025.
- [12] Kovalenko D V, Klimov N S, Podkovyrov V L, et al. Behavior of divertor and first wall armour materials at plasma heat fluxes relevant to ITER ELMs and disruptions[J]. *Nuclear Materials and Energy*, 2017, 12:156-163.
- [13] Yamaguchi I. A laser-speckle strain gauge[J]. *Journal of Physics E Scientific Instruments*, 2000, 14(11):1270.
- [14] Peters W H. Digital imaging technique in experimental stress analysis[J]. *Optical Engineering*, 1982, 21(3):427-431.
- [15] Lyons J S, Liu J, Sutton M A. High-temperature deformation measurements using digital-image correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 1996, 36(1):64-70.
- [16] Grant B M B, Stone H J, Withers P J, et al. High-temperature strain field measurement using digital image correlation[J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2009, 44(4):263-271.
- [17] Chen X, Xu N, Yang L, et al. High temperature displacement and strain measurement using a monochromatic light illuminated stereo digital image correlation system[J]. *Measurement Science & Technology*, 2012, 23(12):125603.
- [18] Berke R B, Lambros J. Ultraviolet digital image correlation (UV~3D-DIC) for high temperature applications[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85:045121.
- [19] Li Y, Fang X F, Lu S Y, et al. Effects of creep and oxidation on reduced modulus in high-temperature nanoindentation[J]. *Materials Science and Engineering*, 2016, 678:65-71.
- [20] Dong X, Fang X, Feng X, et al. Oxidation at high temperature under three-point bending considering stress-diffusion coupling effects[J]. *Oxidation of Metals*, 2016, 86(1-2):125-133.
- [21] Su H, Fang X, Qu Z, et al. Synchronous full-field measurement of temperature and deformation of C/SiC composite subjected to flame heating at high temperature[J]. *Experimental Mechanics*, 2015, 56(4):659-671.
- [22] Qu Z, Fang X, Su H, et al. Measurements for displacement and deformation at high temperature by using edge detection of digital image[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(29):8731.
- [23] Pan B. Thermal error analysis and compensation for digital image/volume correlation[J]. *Optics and Lasers in*

- Engineering, 2018, 101:1–15.
- [24] Pan B, Yu L P, Zhang Q B. Review of single-camera stereo-digital image correlation techniques for full-field 3D shape and deformation measurement[J]. Science China Technological Sciences, 2018, 61(1):2–20.
- [25] Pan B. Reliability-guided digital image correlation for image deformation measurement[J]. Applied Optics, 2009, 48(8):1535–1542.
- [26] Yali D, Bing P. In-situ 3D shape and recession measurements of ablative materials in an arched wind tunnel by UV stereo-digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 116:75–81.
- [27] Su Y, Zhang Q, Xu X, et al. Quality assessment of speckle patterns for DIC by consideration of both systematic errors and random errors[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2016, 86:132–142.
- [28] Gao Z, Zhang Q, Su Y, et al. Accuracy evaluation of optical distortion calibration by digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2017, 98:143–152.
- [29] Cheng T, Xu X, Cai Y, et al. Investigation of Portevin-Le Chatelier effect in 5456 Al-based alloy using digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 65:89–92.
- [30] 张弦, 苏勇, 张勇, 等. 基于 DIC 的印制电路板三维形貌高精度测量[J]. 实验力学, 2018, 33(4):499–508 (ZHANG Xuan, SU Yong, ZHANG Yong, et al. High precision three-dimensional morphology measurement of printed circuit board based on digital image correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2018, 33(4):499–508 (in Chinese))
- [31] 苏勇, 张青川. 数字图像相关的噪声导致系统误差及散斑质量评价标准[J]. 实验力学, 2017, 32(5):699–717 (SU Yong, ZHANG Qingchuan. Noise-induced bias and evaluation criterion of speckle quality in digital image correlation[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2017, 32(5):699–717 (in Chinese))
- [32] The ITER Joint Central Team. ITER material properties handbook[R]. ITER Document No. S74MA2, File Code: ITER-AM01-3114, 2005.

Investigation on digital image correlation measurement technique for high temperature deformation of tungsten materials in vacuum environment

QIAO Mei-xia, PAN Zhi-wei, HUANG Sheng-hong, SU Yong, ZHANG Qing-chuan

(CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: The mechanical behavior of tungsten under high temperature conditions has great significance and important reference value in fusion reactor engineering as tungsten is currently the first choice of plasma facing materials of the divertor and the first walls. In this paper, the thermal expansion deformation of tungsten material in temperature range of 25°C and 2000°C is measured by a digital image correlation (DIC) equipment based on a vacuum high-heat-flux comprehensive experimental platform, in which a special speckle preparation technique using tantalum carbide powder is developed and two kinds of DIC light path arrangements with external and self-radiation blue light source respectively are designed and realized. The measurement results are in good agreement with those calculated by an empirical correlation equation provided from material handbook (the general error is less than 1%), validating the feasibility and accuracy of adopted measuring techniques. The techniques developed in present investigation lay good foundation for further development of measurement technology of materials under high heat flux shock in fusion engineering.

Keywords: plasma facing material; tungsten; tantalum carbide; high temperature; digital image correlation measurement