

基于带通滤波成像的高温数字图像相关方法

潘 兵 吴大方

(北京航空航天大学固体力学所, 北京 100191)

摘要 提出一种用于高温物体表面全场变形测量的高温数字图像相关方法。该方法采用带通光学滤波成像技术以有效减小高温物体表面热辐射对相机采集图像亮度增强的影响, 在物体表面温度高达 1000 °C 时仍可获得可被数字图像相关方法直接分析处理的高质量数字图像。用该方法测量了铬镍奥氏体不锈钢在 1000 °C 高温时的全场热变形以及从室温到 1000 °C 温度范围内的热膨胀系数, 结果显示提出的高温数字图像相关方法测量原理简单, 抗干扰能力强, 测量精度高, 具有重要的工程应用前景。

关键词 测量; 高温; 数字图像相关方法; 热辐射; 热变形; 热膨胀系数

中图分类号 O348 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201131.0212001

High-Temperature Digital Image Correlation Method Based on Optical Band-Pass Filtering Imaging

Pan Bing Wu Dafang

(*Institute of Solid Mechanics, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China*)

Abstract Digital image correlation (DIC) technique based on band-pass filtering imaging for full-field deformation measurement of high-temperature objects is proposed. The DIC technique employs a narrow band-pass optical filter to alleviate the influence of thermal radiation of high-temperature sample on the captured images. As a result of this approach, high-quality digital image of the test sample surface at 1000 °C can be acquired and can be directly processed by DIC to extract full-field deformation. The full-field thermal deformation and coefficient of thermal expansion of a chromiumnickel austenite stainless steel sample at the temperature range of 16.5 °C ~ 1000 °C are measured to verify the proposed technique. Experimental results clearly indicate that the proposed technique can achieve high-accuracy measurements with simple principle and implementation, and is expected to find more engineering applications.

Key words measurement; high temperature; digital image correlation method; thermal radiation; thermal deformation; coefficient of thermal expansion

OCIS codes 120.0120; 120.3940; 120.6650

1 引 言

高速飞行器材料、航空发动机中的零构件、高压蒸汽锅炉、汽轮机以及化工炼油设备中的许多材料和构件都要求一定时间或长期在高温环境下工作。在对材料的高温力学性能进行测试时, 由于载荷可通过与高温环境箱配合的材料力学实验机直接获

得, 因此如何精确测量被测物体在高温环境下的表面变形就成为材料高温力学性能测试中最为关键的问题。此外, 直接测量由温度变化引起的热变形对于材料的热膨胀系数测定以及确定构件在热变形后的形状也至关重要。

由于光学测量方法可在不改变被测试样表面力

收稿日期: 2010-05-24; **收到修改稿日期:** 2010-07-27

基金项目: 国家自然科学基金(11002012)、汽车安全与节能国家重点实验室开放基金(KF10041)、高等学校博士学科点专项科研基金(20101102120015)和中央高校基本科研业务费专项资金资助课题。

作者简介: 潘 兵(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要从事光测力学方法和应用等方面的研究。

E-mail: panb04@mails.tsinghua.edu.cn

本文电子版彩色效果详见中国光学期刊网(<http://www.opticsjournal.net>)

学性能的情况下对其表面高温变形进行非接触式测量,因此在高温实验力学方法研究中备受关注。例如,Volkl等^[1]在研究超高温合金的力学性能时,在哑铃型标准拉伸合金试样的两侧边加工了四个尖角凸起标记,并利用数字图像处理中的角点提取算法精确跟踪四个尖角标记变形后的位置以实现横向和纵向高温变形的测量。此外,Anwander等^[2]用激光照明被测高温物体,测量过程中用两个相距一定的CCD相机分别记录物体表面反射光波相互干涉形成的散斑场,再利用互相关算法跟踪不同相机记录的散斑图像中两个激光散斑颗粒的距离变化来测量物体表面的高温变形。显而易见,基于特征点跟踪的图像处理方法和激光散斑法只能测量两个标记(或散斑颗粒)之间的平均变形,对于非均匀高温变形场测量则不适用。为了测量高温物体表面的全场变形,可采用基于激光光波干涉的光学测量方法。例如,Lockberg等^[3]用电子散斑干涉法成功地获得了高温物体表面的高对比度条纹;王国韬等^[4]采用云纹干涉法测试了大电流热冲击下受拉铝板表面的变形情况。电子散斑干涉法和云纹干涉的测量灵敏度高,并具有测量结果直观可视的优点,但这些方法的测量原理和测量过程较为复杂且对测量环境要求苛刻,测量通常只能在实验室暗室中的光学隔振平台上进行,因此在实际的高温变形测量中有较多限制。

作为一种代表性的非干涉全场光学测量方法,数字图像相关方法也可用于高温变形测量^[5~7]。例如,Lyons等^[5]将数字图像相关方法(DIC)与高温环境箱结合测量了铬镍超合金材料在最高650℃高温下的弹性模量和热膨胀系数。作者最近也将数字图像相关方法和瞬态气动热环境模拟系统结合实现了550℃高温热变形的精确测量^[6]。与以上所述的其它各种非接触高温变形光学测量方法相比,数字图像相关方法具有以下一些特殊的优势:1)直接对被测物体成像,实验设备和实验过程简单(与激光散斑法、电子散斑干涉法和云纹干涉法相比);2)全场测量(与文献[1]中的基于数字图像处理的方法和激光干涉法相比);3)无需激光光源,采用白光照明,对测量环境和隔振要求较低,容易实现现场测量(与激光散斑法、电子散斑干涉法和云纹干涉法相比)。由此可见,数字图像相关方法在高温物体表面变形场测量上有其它方法不可替代的优势,但该方法对相机所采集图像的质量要求较高。之前的许多实验^[5~7]都观察到,采用普通光学成像系统记录高温物体表面的图像,当物体表面温度超过500℃时,由

于高温物体表面热辐射的影响,相机所采集图像的质量会出现明显退化,出现所谓的“退相关效应”并导致数字图像相关分析失败^[6]。因此,如何在高温下仍能获得高质量的数字图像就成为高温数字图像相关方法研究中的关键^[7]。

为使数字图像相关方法适合于超过500℃高温物体表面全场变形的精确测量,本文从实际的高温实验结果和高温物体表面热辐射的理论分析出发,讨论了普通光学成像系统的局限性。并根据实际所用相机的量子效率曲线设计了窄带通光学滤波成像系统,由于带通光学滤波片仅允许位于带通范围内的光波进入相机传感器靶面,因而可有效减小高温热辐射对相机采集图像亮度强化的影响,在物体表面温度高达1000℃时仍能获得可被数字图像相关方法直接分析处理的高质量数字图像。随后测量了铬镍奥氏体不锈钢试样从室温到1000℃温度范围内的全场热变形和热膨胀系数,并将测量结果与航空材料手册中的已有的热膨胀系数数据相比较。

2 数字图像相关方法

作为一种基于图像的变形测量方法,数字图像相关方法通过处理不同状态下被测物体表面的两幅数字图像直接获得各感兴趣像素点的位移信息^[8~12]。通常将变形前记录的数字图像称为“参考图像”,将变形后记录的数字图像称为“变形后图像(或目标图像)”。数字图像相关方法的基本原理是在参考图像中取以某待求像素点 $P(x_0, y_0)$ 为中心的 $(2M+1) \text{ pixel} \times (2M+1) \text{ pixel}$ 大小的正方形参考图像子区,在变形后图像中通过一定的搜索方法按预先定义的相关函数来进行相关计算寻找与参考图像子区的互相关系数为最大值或最小值(取决于所选择的相关函数)的以 $P'(x'_0, y'_0)$ 为中心的目标图像子区以确定 $P(x_0, y_0)$ 点在 x, y 方向的位移分量 u, v 。为得到被测物体表面的全场变形信息,在利用数字图像相关进行计算时通常将参考图像中感兴趣的待计算区域划分成虚拟网格形式,通过计算每个网格节点的位移得到全场变形信息。文献[10]的研究显示,零均值归一化最小平方距离相关函数(ZNSSD)与常用的零均值归一化互相关函数(ZNCC)等价,对于目标图像子区灰度的线性变化不敏感,因此具有最强的抗干扰能力。但与ZNCC相关函数相比,ZNSSD相关函数的优化更为简便。本文下面即使用ZNSSD相关函数作为评价变形前后图像子区的相似程度的相关函数:

$$C_{\text{ZNSSD}}(\mathbf{P}) = \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M \left[\frac{f(x,y) - f_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x,y) - f_m]^2}} - \frac{g(x',y') - g_m}{\sqrt{\sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x',y') - g_m]^2}} \right]^2, \quad (1)$$

式中 \mathbf{P} 是描述图像子区变形状态的参数矢量,

$$f_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [f(x,y)],$$

$$g_m = \frac{1}{(2M+1)^2} \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M [g(x',y')]$$

分别为参考图像子区和目标图像子区的灰度平均值。从(1)式可见,ZNSSD 相关函数是待求变形参数矢量 \mathbf{P} 的非线性函数,可用 Newton-Raphson^[10] 方法进行优化。由于 ZNCC 相关函数的取值范围位于 $[-1,1]$,可更直观地表示参考图像子区和目标图像子区的相似程度,因此计算结束时 ZNSSD 相关系数可根据 $C_{\text{ZNCC}} = 1 - 0.5 \times C_{\text{ZNSSD}}$ 转化为 ZNCC 相关系数并引导相关计算时的具体计算路径^[12]。

3 窄带通光学滤波成像系统

3.1 普通光学成像系统的局限性

任何物体在任何温度下都在发射各种波长的电磁波,物理学中将这种由物体中分子、原子受到热激发而发射电磁波的现象称为热辐射。热辐射具有连续辐射能谱,波长自远红外区延伸到紫外区,但辐射能波长的分布主要由物体的温度决定。在物体表面温度小于 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 时,物体表面的热辐射主要以波长较长且肉眼不可见的红外光进行辐射。一般相机感光芯片对波长较长的红外光波不敏感,因此对所采集图像的亮度无任何影响。但理论分析和实际实验都表明,随着被测物体表面温度的升高,相应的热辐射波长向可见的短波方向移动并进入相机感光芯片的敏感波长区域,使得普通光学成像系统所采集的物体表面图像亮度显著增强并可能出现严重的饱

和,从而导致参考图像和变形后图像出现严重的退相关效应,并最终造成数字图像相关分析失效。这里首先需要说明的是,本文所用的数字图像采集系统由一个 CMOS 相机(型号为 DH-1302UM,北京大恒图像有限公司,中国)和一个变焦镜头(型号为 SL08551, AVENIR lens, NSK Ltd, Japan)组成。该 CMOS 相机感光芯片的量子效率曲线如图 1 所示,该相机对波长在 $390\sim 1030\text{ nm}$ 范围内的光波敏感,且波长为 550 nm 光波的量子效率最高。

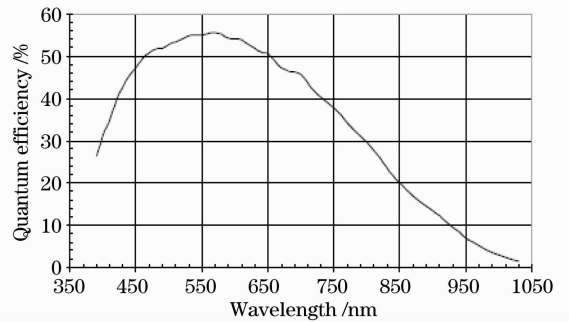


图 1 本文所用 CMOS 相机感光芯片的量子效率曲线
Fig. 1 Quantum efficiency of the CMOS camera used

图 2 为用该 CMOS 相机和变焦镜头组成的光学成像系统记录的铬镍奥氏体不锈钢表面温度分别为 $20\text{ }^\circ\text{C}$, $550\text{ }^\circ\text{C}$ 和 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 时的 3 幅图像。当物体表面温度达到 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 时,可从图 2(b)观察到所采集图像上多个局部区域的灰度出现了明显变化,即出现了所谓的“退相关效应”。图 2(c)为物体表面温度达到 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 时采集的图像,从该图可见图像整体亮度显著加强,图像中心区域的亮度出现饱和。将图 2(c)与图 2(a)的参考图像比较,由于图像整体亮度增加图像对比度减小导致了变形载体信息消失,

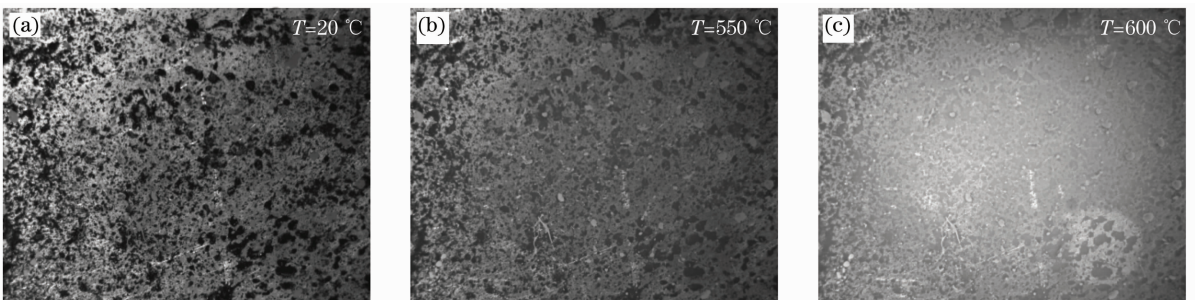


图 2 采用普通光学成像系统拍摄的不同温度下试样表面的数字图像

Fig. 2 Captured surface speckle image of the test specimen surface using an ordinary optical imaging system at different temperatures

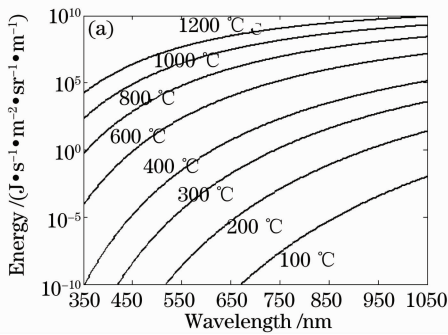
此时用任何先进的数字图像相关算法都无法从这两幅图中可靠地提取变形信息。因此测量超过 500 °C 高温物体的表面变形,必须要考虑并尽可能减小高温辐射对图像质量亮度增强的影响。

3.2 热辐射和普朗克公式

为了清晰地说明热辐射对相机所采集图像亮度的影响,将讨论物理学中热辐射波长与温度的关系,并基于普朗克公式分析带通滤波成像系统设计的必要性和有效性。在一般温度下,物体的辐射主要在肉眼不可见的红外区。而维恩位移定律表明,受热物体表面热辐射的峰值波长,会随着物体表面温度的增加而向短波长方向移动,从而辐射出可被人眼和相机探测的可见光。物体热辐射中波长与温度的定量关系可用普朗克公式描述:

$$I(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1}, \quad (2)$$

式中 $I(\lambda, T)$ 为由波长 λ 和温度 T 表示的辐射强度, h 为普朗克常数, c 为真空中的光速, k 为玻尔兹曼



常数。

图 3(a)为从 100 °C~1200 °C 温度范围内由普朗克公式计算得到的热辐射能量与波长的关系曲线(注意该图中热辐射能量用对数坐标绘出)。该图显示当物体表面温度小于 400 °C 时,热辐射的峰值波长主要在不可见的红外区。而当物体表面温度高于 500 °C 后,位于相机感光传感器可探测波长范围内光波的辐射强度显著增加。图 3(b)绘制了从 0 °C~1200 °C 温度范围内,单位时间内从物体表面单位面积发射的波长为 450 nm 光波的辐射能量。图 3(b)显示当物体表面温度小于 400 °C 时,波长为 450 nm 光波的辐射强度可忽略不计。然而随着温度的进一步升高,该波长光波的辐射强度将迅速增加。例如物体表面温度从 800 °C 增加到 1000 °C 时,450 nm 波长的光波辐射强度增加了 100 倍。而物体表面温度从 1000 °C 增加到 1200 °C 时,相应的辐射强度又增加了约 30 倍。

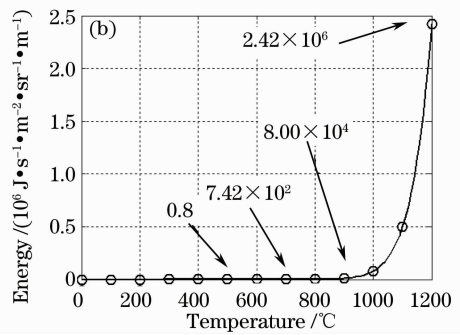


图 3 (a)根据普朗克公式得到的不同温度下的波长-热辐射能量曲线, (b) 450 nm 光波的温度-热辐射能量曲线
Fig. 3 (a) Thermal radiation energy as a function of wavelength at various temperatures, (b) thermal radiation energy as a function of temperature for optical wave with 450 nm wavelength

3.3 带通滤波成像系统

实验结果和理论分析都表明,受热物体随着其表面温度的升高会辐射出波长较短且可被相机感光芯片接收的光波,从而增强相机采集图像的亮度并降低图像对比度,并造成高温下所采集图像与常温下采集图像之间相似程度大幅降低,最终使数字图像相关方法的匹配算法失效。为减小高温物体表面热辐射对相机所采集图像亮度的影响,在成像镜头前安装了窄带宽带通光学滤波片。图 4 为该光学带通滤波片的透射光谱曲线及实物图,该带通光学滤波片的中心波长为 450 nm、半带宽约为 20 nm,中心波长透射率高于 80%。由于该带通光学滤波片仅可使波长在 430~470 nm 范围内的光波通过,因此可有效阻隔高温辐射中波长较长且辐射强度高的光波进入相机靶面。下面的实验将表明采用带通滤波成像能有效减小高

温辐射对图像亮度增强的影响,使相机能获得高温物体表面无退化的高质量数字图像,并可被数字图像相关方法直接处理以提取全场变形信息。

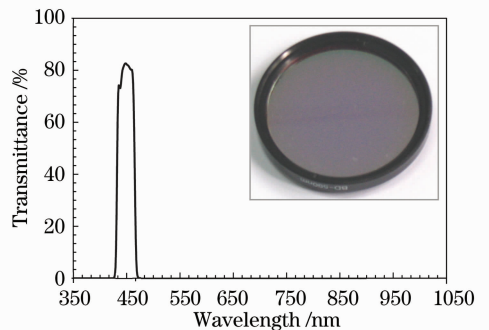


图 4 带通光学滤波片透射光谱曲线及其实物照片
Fig. 4 Transmission spectrum and photo of the optical band-pass filter

4 实验验证

4.1 试样及实验准备

将测量铬镍奥氏体不锈钢(材料牌号为1Cr18Ni9Ti)的全场热变形和热膨胀系数以验证高温数字图像相关方法的测量精度。铬镍奥氏体不锈钢因具有良好的塑性、韧性以及冲压性能而广泛用于航空航天以及化工等行业^[13]。被测铬镍奥氏体不锈钢试样的尺寸为100 mm×100 mm×2 mm,无约束地垂直放置在瞬态气动热环境模拟系统的红外辐射器正前方处约200 mm的样品台上。由于数字图像相关方法需利用试样表面的随机灰度变化作为变形信息载体以给数字图像相关方法匹配提供信息^[14]。在被测不锈钢试样表面时按文献[6]中的方法制作了可耐受1200 ℃高温的人工散斑颗粒。

4.2 高温变形测量系统

如图5所示,被测试样由放置在背面的瞬态气动热实验模拟系统^[15,16]加热并由放置在正前方的带通光学滤波数字图像采集系统采集不同温度下的表面图像。瞬态气动热实验模拟系统的组成如图5(a)所示。该系统由红外辐射加热装置、温度传

感器、信号放大器、模拟/数字(A/D)转换器、数字/模拟(D/A)转换器、电功率调节装置和控制用计算机组成。系统工作时,由焊接在被测试样表面或背面的热电偶实时采集连续变化的温度值,信号经过放大后送入A/D进行模/数转换。将测量到的温度值与设定温度值进行比较后将偏差送入控制程序,计算机通过控制算法对采样数据进行计算得到控制量,再经过D/A转换成模拟信号后驱动电功率调节装置,调节红外辐射加热装置上的电功率,从而实现被测试样表面温度设定过程的自动控制。采用基于红外辐射加热装置和闭环控制的瞬态气动热实验模拟系统可对被测试样施加快速和精确可控的热载荷,温度加载范围可从室温最高到1200 ℃,加温速度可达100 ℃/s,被测试样表面的温度控制的读数判别精度可达0.1 ℃。由于瞬态气动热实验模拟系统对试样加热时,试样无需放置在高温环境箱中,因此与常用的高温环境箱相比可避免加热过程中空气折射率不均匀以及观察窗口玻璃质量对图像的影响,所采集的图像质量更高,测量精度更高且结果更为稳定可靠。

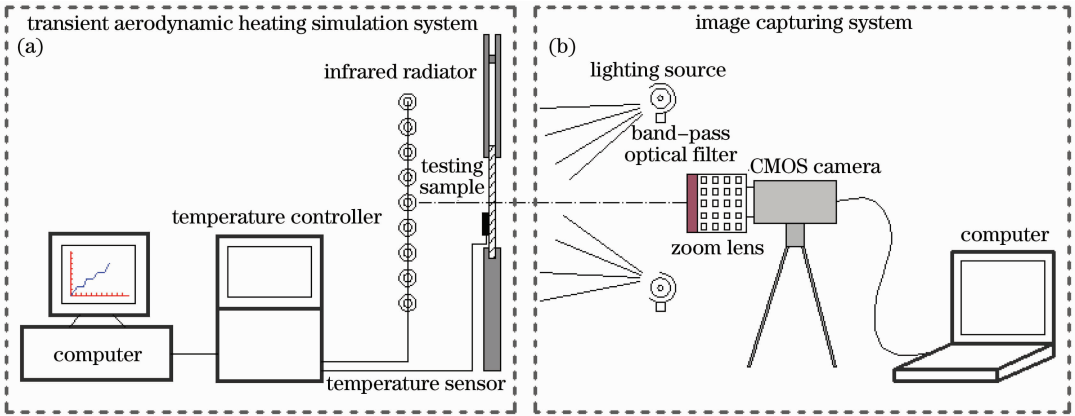


图5 基于瞬态气动热环境模拟系统和带通滤波成像的非接触高温变形测量系统示意图

Fig. 5 Schematic drawing of the non-contact high-temperature deformation measuring system based on transient aerodynamic simulation system

放置在被测试样正前方的带通滤波成像系统用于采集不同温度下被测试样表面的数字图像,该系统包括由CMOS摄像机、变焦镜头、窄带通光学滤波片以及照明光源组成。如前所述,为减小热辐射对摄像机所采集图像亮度的影响,在摄像机成像镜头前安装了窄带通光学滤波片,该窄带通光学滤波片可有效阻挡其它波长光波进入摄像机靶面,从而有效减小高温辐射对图像亮度增强的影响。为配合带通光学滤波片的可透射波长范围,实验过程中试样表面由中心波长在450 nm附近的LED光源照明。

4.3 实验步骤

实验时利用瞬态气动热实验模拟系统将试样表面的初始温度加至16.5 ℃(略高于实验时的环境温度),并采集相应的数字图像作为参考图像。需要注意的是,在调焦清晰后可将光圈调至较小的数值以获得最大的视场,清晰成像时图像中的每像素所对应的空间尺寸约为59 μm。随后,利用瞬态气动热实验模拟系统将试样表面温度从初始温度依次升温100 ℃直至1000 ℃。每次加热到达预定温度后采集预定温度下试样表面的10幅数字图像作为变形

后状态下的图像。图 6 显示的是不同温度下试样表面的图像，与使用普通光学成像系统所获得的图像(图 2)相比，从图 6(c)可以看出，尽管由于高温热

辐射的影响，图像的整体亮度有所增加，但使用带通滤波成像技术在物体表面温度达 1000 °C 时仍可获得高质量的图像。

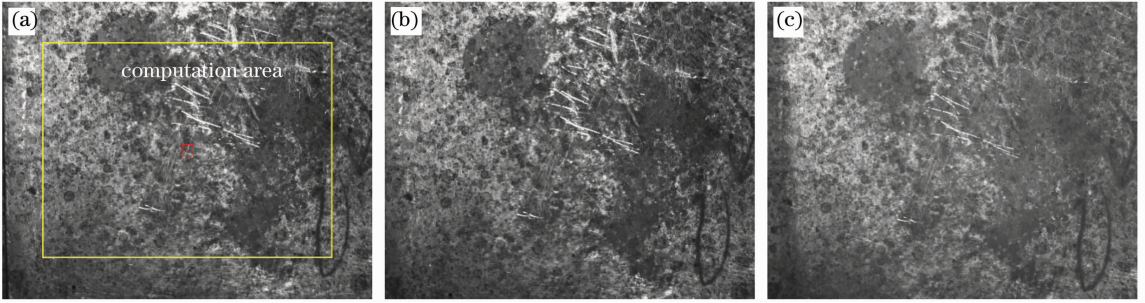


图 6 采用窄带宽带滤波成像系统拍摄的温度分别为(a) 16.5 °C, (b) 800 °C和(c) 1000 °C时试样表面的数字图像
Fig. 6 Captured surface speckle image of the test specimen surface using an optical band-pass filtering imaging system at temperature of (a) 16.5 °C, (b) 800 °C and (c) 1000 °C

记录下的从 100 °C ~ 1000 °C 的 10 幅图像可用数字图像相关方法分析以提取热变形信息，以进一步计算不同温度下的热膨胀系数(CTE)。在利用数字图像相关方法分析计算前，需首先在图 6(a)的参考图像中选取了一个矩形的感兴趣计算区域[如图 6(a)中的矩形所示]，分析该区域内均匀分布的 7575(为 101×75)个离散像素点的位移，计算时所用图像子区大小为 41 pixel×41 pixel，相邻计算点

之间的距离为 10 pixel。

4.4 实验结果

图 7(a), (b)是利用数字图像相关方法对试样表面温度为 1000 °C 时所采集的图像进行计算得到的 x, y 方向热变形场，图 7(c)中的箭头和等值线分别代表各计算点的径向位移矢量和位移矢量幅值的等位移线。从图 7(c)中可以更清晰地看到该不锈钢材料受热后围绕计算区域的中心点向四周均匀膨

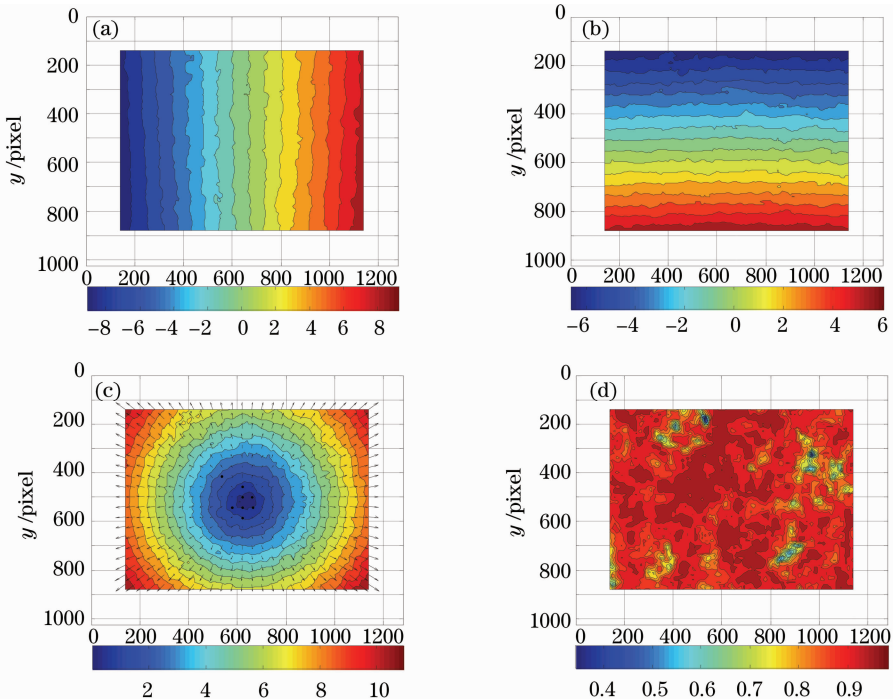
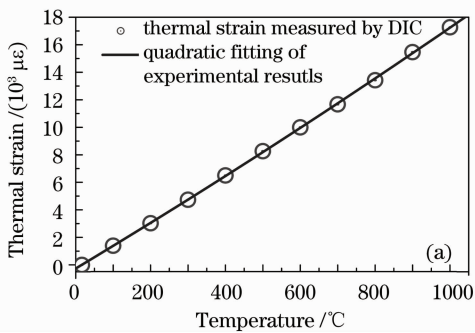


图 7 试样表面温度 $T=1000$ °C 时，由数字图像相关方法计算得到的热变形场：(a) u 场位移，(b) v 场位移，(c) 径向位移矢量和径向位移等值线图，(d) 各点的 ZNCC 相关系数

Fig. 7 Measured surface thermal deformation of the stainless steel sample at temperature of 1000 °C. (a) u field displacement, (b) v field displacement, (c) radial displacement vector superimposed on the radial displacement contours, (d) ZNCC correlation coefficient map

胀。需要注意的是,受热过程中试样的整体刚体位移和微小刚体转动已按作者之前提出的方法^[17]消除。从图 7(c)可以看到由热变形引起的计算区域边缘点最大位移可达 10 pixel(约为 0.6 mm)。由于该不锈钢材料受热后产生均匀的热变形,因此可对热变形场进行线性平面拟合^[17]以计算平均热变形。用这种方法计算出 x 和 y 方向的热应变分别为 $17180 \mu\epsilon$ 和 $17350 \mu\epsilon$ 。图 7(d)给出了图像中各计算点的相关系数(该值反应了相关计算结果的可靠程度),图中可以看出,绝大多数计算点的 ZNCC 相关系数都高于 0.9,平均相关系数为 0.9093,这证明了利用带通滤波成像技术采集的物体表面温度为 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 时的图像与参考图像相比几乎没有出现“退相关效应”,即带通滤波成像技术可有效减小高温辐射对相机所采集图像质量退化的影响。



由数字图像相关方法可计算在 $16.5 \text{ }^\circ\text{C} \sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内不同温度下铬镍奥氏体不锈钢试样表面 x 和 y 方向的热应变,如图 8(a)离散圆点所表示。由于 x, y 方向的热应变几乎相等,因此图 8(a)中纵坐标所对应的热应变取为 x 和 y 方向热应变的平均值。对图 8(a)所示的温度-热应变离散数据用二次多项式进行拟合后,可根据拟合多项式的系数计算不同温度下的热膨胀系数,结果如图 8(b)所示。该图显示该不锈钢材料的热膨胀系数随着温度的增加而增加。图 8(b)中的圆点为航空材料手册^[13]中给出的铬镍奥氏体不锈钢热膨胀系数,对比显示本文方法测量结果与已有数据符合得很好,两者之间最大误差不超过 $0.3 \times 10^{-6} / \text{ }^\circ\text{C}$ 。但航空材料手册中采用的方法的最高适用测量温度为 $500 \text{ }^\circ\text{C}$,而本文方法不但可获得全场高温变形而且适用温度可高达 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

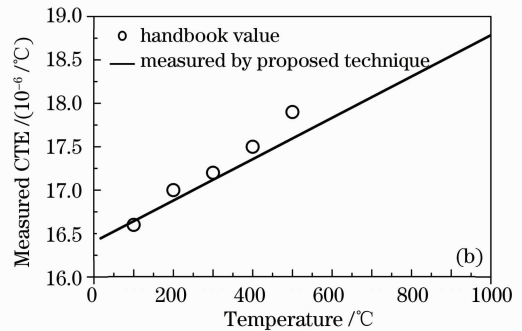


图 8 由数字图像相关方法测量的铬镍奥氏体不锈钢从 $16.5 \text{ }^\circ\text{C} \sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 范围内的(a)温度-热变形曲线和(b)热膨胀系数

Fig. 8 Experimental temperature-thermal strain data and (b) coefficients of thermal expansion coefficient for chromiumnickle austenite stainless steel sample in the temperature range of $16.5 \text{ }^\circ\text{C} \sim 1000 \text{ }^\circ\text{C}$

5 结 论

提出基于带通滤波成像技术的高温数字图像相关方法,实验表明采用带通光学滤波成像技术可获得 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 高温物体表面可直接被数字图像相关方法分析处理的高质量图像,使数字图像相关方法真正成为高温和超高温物体表面全场变形测量的一种有效手段。本文还定量测量了铬镍奥氏体不锈钢从室温到 $1000 \text{ }^\circ\text{C}$ 温度范围内的全场热变形和热膨胀系数,并与航空材料手册中的已有数据进行了比较,结果显示本文提出的高温数字图像相关方法可用于各种材料和结构在高温环境下表面变形的高精度测量,在高温合金材料设计、高温实验力学方法和应用研究中都有着广泛和重要的应用前景。

参 考 文 献

1 R. Volkl, B. Fischer. Mechanical testing of ultra-high temperature alloys[J]. *Experimental Mechanics*, 2004, **44**(2):

121~127

- 2 M. Anwander, B. G. Zagar, B. Weiss *et al.*. Noncontacting strain measurements at high temperatures by the digital laser speckle correlation [J]. *Experimental Mechanics*, 2000, **40**(1): 98~105
- 3 O. J. Lockberg, J. T. Malmo, G. A. Slettemoen. Interferometric measurement of high temperature objects by electronic speckle pattern interferometry [J]. *Appl. Opt.*, 1985, **24**(19): 3167~3172
- 4 Wang Guotao, Xie Huimin, Dai Fulong *et al.*. Experimental study on the dynamic deformation of LY12 aluminum plate heated by strong current with moiré interferometry [J]. *J. Experimental Mechanics*, 1997, **12**(3): 449~456
王国韬, 谢惠民, 戴福隆等. 大电流快速加热条件下 LY12 铝板动态变形的云纹干涉法实验研究 [J]. *实验力学*, 1997, **12**(3): 449~456
- 5 J. S. Lyons, J. Liu, M. A. Sutton. High-temperature deformation measurement using digital image correlation [J]. *Experimental Mechanics*, 1996, **36**(1): 64~70
- 6 B. Pan, D. F. Wu, Y. Xia. High-temperature field measurement by combining transient aerodynamic heating system and reliability-guided digital image correlation [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2010, **48**(9): 841~848
- 7 B. M. B. Grant, H. J. Stone, P. J. Withers *et al.*. High-

- temperature strain field measurement using digital image correlation[J]. *J. Strain Analysis for Engineering Design*, 2009, **44**(4): 263~271
- 8 B. Pan, K. M. Qian, H. M. Xie *et al.*. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review [J]. *Measurement Science and Technology*, 2009, **20**(6): 062001
- 9 B. Pan, H. M. Xie, B. Q. Xu *et al.*. Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, **17**(6): 1615~1621
- 10 Pan Bing, Xie Huimin. Full-field strain measurement based on local least-square fitting for digital image correlation method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(11): 1980~1986
潘 兵, 谢惠民. 数字图像相关中基于位移场局部最小二乘拟合的全场应变测量[J]. *光学学报*, 2007, **27**(11): 1980~1986
- 11 Pan Bing, Xie Huimin, Xia Yong *et al.*. Large deformation measurement based on manual initial guess for digital image correlation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(2): 400~406
潘 兵, 谢惠民, 夏 勇 等. 数字图像相关中基于人机交换变形初值估计的大变形测量[J]. *光学学报*, 2009, **29**(2): 400~406
- 12 B. Pan. Reliability-guided digital image correlation for image deformation measurement [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(8): 1535~1542
- 13 China Aeronautical Materials Handbook Redaction Committee. China Aeronautical Materials Handbook[M]. Beijing: Standards Press of China, 2002. 565
中国航空材料手册编辑委员会. 中国航空材料手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 2002. 565
- 14 B. Pan, Z. X. Lu, H. M. Xie. Mean intensity gradient: an effective global parameter for quality assessment of the speckle patterns used in digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Eng.*, 2010, **48**(4): 469~477
- 15 Wu Dafang, Fang Yuanpeng, Zhang Min. Experimental simulation system of transient aerodynamic heating for high-speed flight vehicle [J]. *Aviation Metrology & Measurement Technology*, 2003, (23): 9~11, 14
吴大方, 房元鹏, 张 敏. 高速飞行器瞬态气动热实验模拟系统[J]. *航空计量技术*, 2003, (23): 9~11, 14
- 16 D. F. Wu, H. Song, Y. T. Li *et al.*. A study on mechanical properties of 5A06 Al-Mg alloy at transient heating [J]. *J. Experimental Mechanics*, 2006, **21**(5): 591~595
吴大方, 宋 昊, 李永亭 等. 铝-镁合金 5A06 在瞬态热冲击条件下的力学性能研究[J]. *实验力学*, 2006, **21**(5): 591~595
- 17 B. Pan, H. M. Xie, T. Hua *et al.*. Measurement of coefficient of thermal expansion of films using digital image correlation method[J]. *Polymer Testing*, 2009, **28**(1): 75~83