DOI: 10.3901/JME.2013.24.015

研究 NiTi 合金相变局部化现象的宏观原位多场测试方法及分析*

杜泓飞¹ 曾攀^{1,2} 雷丽萍^{1,2} 赵加清³ 许月杰¹ 何文斌¹

(1. 清华大学机械工程系 北京 100084;

2. 清华大学先进成形制造教育部重点实验室 北京 100084;

3. 清华大学核能与新能源技术研究院 北京 100084)

摘要: 利用光学观测局部化相变场, 数字图像相关(Digital image correlation, DIC)方法测量应变场, 红外热成像技术测量温度场, 设计一种宏观原位多场测试装置, 以研究 NiTi 形状记忆合金中应力诱发马氏体相变中出现的相变局部化和相变带演化规律。此外结合高低温动态冷热循环热力学试验系统和 DIC 方法, 设计一种高低温下宏观原位多场测试的试验装置, 用以研究温度诱导相变失稳引发的局部化。详细阐述 2 种试验方案的设计和安装细节, 分析和讨论 2 套试验方案中影响测量效果和精度的关键参数, 并利用两套测试装置获得了局部化的多场数据。

关键词: 形状记忆合金 局部化 数字图像相关 红外测温 试验设计

中图分类号: TG146

Experimental Design and Analysis for in Situ Macroscopic Multi-fields Measurements on Transformation Localization in NiTi Alloy

DU Hongfei¹ ZENG Pan^{1,2} LEI Liping^{1,2} ZHAO Jiaqing³ XU Yuejie¹ HE Wenbin¹

(1. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084;

2. Key Laboratory for Advanced Material Processing Technology of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084;

3. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: A kind of in situ macroscopic multi-fields experimental setup for investigation on stress induced transformation localization in NiTi alloy has been designed. It is successfully obtained the visual field(by optical camera), strain field(by digital image correlation(DIC)) and temperature field(by infrared thermography) during mechanical testing. Another in situ multi-fields experimental setup in combination with thermo-mechanical testing system of dynamic thermal cycling is designed too. It could record visual field and strain field during temperature induced transformation localization. Tips and tricks for characterizing transformation localization by above two experimental designs would be introduced and discussed in detail.

Key words: Shape memory alloy Localization Digital image correlation(DIC) Infrared temperature measurement Experimental design

0 前言

NiTi 是应用最为广泛的一种记忆合金^[1-3], 国内外学术界除了关注与研究记忆合金稳定材料的超弹性与形状记忆效应以外, 因原位非接触式场测量不

仅具有很高的测量精度, 且可获取更丰富的二维场变量数据, 近 5 年来得到迅速而广泛的应用, 是深入研究相变诱发的材料失稳和局部化现象的新热点。但原位场测量对试验设备要求高, 试验测试方法需要注意的细节较多, 试验设计方案复杂, 因此很难从多方面同步表征应力诱导宏观马氏体带演化的多物理场信息。同时温度诱导马氏体因试验需要精确控制试样的温度变化, 因此对原位场测量提出

* 国家自然科学基金资助项目(51275270)。20130502 收到初稿, 20130923 收到修改稿

了更高的试验条件要求, 试验设计难度更大。

SHAW 等^[4]报道了 NiTi 记忆合金中的应力诱发马氏体相变过程中可出现宏观局部化相变带, 并原位表征出宏观马氏体带相变场和相界面的推移过程(图 1)。LI 等^[5]等随后设计原位试验报道了 NiTi 管材相变过程中也会发生相变失稳及局部化, 从而证明该现象具有一定的普遍性, DALY 等^[6-7]采用数字图形相关(Digital image correlation, DIC)方法原位研究 NiTi 记忆合金中的相变失稳与局部化, FAVIER 等^[8]在 DIC 方法同时引入红外热成像技术, 原位测量应力诱发相变的应变场与温度场变化, 此外 ZHANG 等^[9]设计原位试验, 测试了失稳后马氏体带的表面相变场与温度场, 并研究了马氏体条带随加载速率的变化规律。

受到 LI 等^[5, 9]的原位光学观测局部化相变场的试验方案、DALY 等^[6-7]和 KIM 等^[10]利用 DIC 测量应变场的方案以及 FAVIER 等^[8]利用红外热成像技术测量温度场的方案等 3 种试验方案的启发, 本文设计了一套综合相变场观察、应变场和温度场测量三者结合的原位试验装置, 用以研究和分析应力诱导宏观马氏体带演化的多物理场变化规律。另一方面, 受到 MILLER 等^[11-12]研究温度诱导马氏体相变的控温设计和测试方案启发, 本文设计了综合相变场、应变场和温度控制结合的一套试验装置, 结合相变场观察、应变场测量, 用以原位研究和分析温度诱导宏观马氏体带演化的多物理场变化规律。

1 原位多场测试方法及关键参数

1.1 试验方法光学观测局部化相变场

该方法利用了马氏体和奥氏体在晶体学上的差异^[3], 当固态相变发生后, 局部化的宏观马氏体相变带内与带外会在厚度方向上出现失配和不协调, 马氏体带内部轴向应变较大, 由泊松比可知, 马氏体带厚度则比带外部更薄, 使相变带外部与内部在厚度方向呈凸凹交错状态^[13], 因此采用合适的照明源和照明方法可以清晰地分辨出马氏体带和奥氏体带, 以及相界面的产生和推移。

但如何选择合适的照明源和照明方法是本文的一个挑战和难点, 根据图像视觉检测原理, 通常的照射方式有漫反射、平行光、折射光照明等。漫反射光均匀照射被测物体, 优点是可消除其表面的不平整造成的差异; 而平行光照射则正好相反, 可使表面不平整的特征加以凸显, 而为了更好地观测

相变带厚度方向凸凹不平整, 使相变带成像更清晰凸显, 因此采用(Light emitting diode, LED)平行光作为照明源是设计原位观测试验的最佳选择。

照明角度可分为低角度和高角度照射两种(图 1), 低角度照射指平行光源与被测平面的夹角较低。当采用低角度照射时, 表面平整部位的反光无法进入镜头, 图像亮度较低, 不平整部位反光则比较分散, 容易进入镜头, 图像亮度较高, 主要应用在表面划痕、倒角和坡度监测与识别等场合。考虑到马氏体带和奥氏体带的凸凹交错特性以及相界面存在大的坡度等, 因此用平行光低角度照射为最佳照明角度。

图1 照明角度的选择

从照射方向来看, LED 平行光源可选择照射方向有水平低角度照射和竖直低角度照射两种(图 2)。分别选该两种不同的照射方向拍摄局部化的马氏体带, 从对比样片分析可知, 竖直方向照射最能清晰地表征出马氏体带以及相界面的特征。因此综合三个方面因素, 本文建议试验照明设计方案为竖直方向的 LED 平行光源低角度照射。

图2 照明位置和照射方向选择

1.2 DIC 方法测量局部化变形场

数字图像相关方法是一种光学非接触式位移场、应变场测量方法, 它由美国南卡罗来纳州大学的 PETER 和 RANSON 于 1982 年提出, 后经以

SUTTON 教授课题组为代表的众多学者对 DIC 方法的基本理论进行了深入系统的研究^[14], 历经 30 年的发展, DIC 方法已成为试验力学研究、材料性能测试等众多领域不可或缺的测量手段, 当表面应变场存在较大不均匀性时, DIC 方法的优势显得尤为突出。

ZHAO 等^[15-17]针对以上 DIC 方法计算速度及测量精度展开了深入研究, 采用逆复合最小二乘算法提高了迭代计算速度; 并提出了针对大变形初值计算问题的改进差分进化算法, 不仅使平移、单拉、旋转等问题的初值计算成功率为 100%, 且算法运行时间均小于 0.5 s, 有效提高了初值计算的成功率和速度; 此外 ZHAO 等^[15-17]基于二阶连续 Hermite 高阶单元的平滑方法, 解决了任意复杂计算区域的测量问题, 而且可有效降低原始位移场的噪声, 获得连续的应变场。以上对迭代速度和初值精度的改进均提高了 DIC 方法的测量非均匀应变场的准确度和计算效率, 更有利于本文分析 NiTi 合金中应变局部化分布规律和解释相变和变形机理。

1.2.1 散斑制备

本文的试验条件较复杂, 涉及高应变速率、高低温、载荷循环和温度循环等, 因此对通常的散斑的制备方法易出现表面漆脱落等问题导致测量失败, 此外若漆涂层的厚薄还影响温度场测量的准确性^[18-19]。经过反复尝试, 本试验总结可行的方案为将试样散斑制备分别为 3 步, 首先将试样表面用砂纸做粗糙处理, 然后预先喷涂一层金属底漆, 以增强漆的黏附力, 最后用高压气泵将耐高温的白底黑漆喷涂在试样上。此外保证在试样喷涂完后 3 h 内开始做试验, 避免因表面涂层干燥失去弹性而脱落。

1.2.2 子区大小和计算步长的选择

除算法、试验安装和光照条件等外, 影响 DIC 测量精度的指标还包括散斑大小、散斑灰度分布、子区大小和计算步长等多方面因素^[14,18]。

SCHLOSSER 等^[19-20]指出, DIC 测量方法的平均散斑大小通常控制在是 2~10 像素最好, 本试验结合大恒相机分辨率和散斑喷涂工艺, 最终制备出的散斑大小平均为 7~12 像素。另 PAN 等^[21]分析了散斑灰度分布和测量精度的统计关系, 指出散斑的灰度分布最好保证 0~255 内呈近似正态分布, 并且边缘要有良好的对比。因此, 本试验制备散斑充分考虑了 PAN 等提出的指标, 从试样统计的灰度直方图(图 3)可看出, 在感兴趣区域(Region of interest, ROI)内散斑灰度分布呈近似正态分布, 并且在灰度值 220~245 有明显的梯度过度, 且 0~50 内灰度分

布较少, 由 PAN 等^[21]的结论可知该散斑的计算结果将更准确。

图3 ROI内像素灰度直方图

因马氏体相变局部化发生时, 宏观相界面存在高应变梯度, 因此 DIC 测量需要谨慎分析并选择计算子区大小^[18-19]。从图 4 和图 5 可知 DIC 计算子区越小, 相界面高应变梯度表征越明显, 测量不确定度越低, 计算准确度越高, 但子区越小时可导致算法跟踪失败, 个别计算点丢失(此时子区为 11×11)。相反子区越大, 虽降低了测量不确定度(图 5), 但削弱了应变梯度(图 4), 增加了子区匹配迭代时间。本文综合考虑以上因素, 建议计算子区控制在 15 像素×15 像素~40 像素×40 像素。

图4 子区大小的对相界面应变梯度的影响

图5 子区大小的与测量不确定度的关系

1.2.3 变形场结果的后处理算法

由于散斑大小问题和 DIC 相机分辨率(1 392×

1 040)的匹配关系,后处理计算可能会造成应变场出现图像学中的混叠失真现象^[14],见图 6a。因此直接计算得到的应变场,尤其是马氏体带内的应变场内含有凹凸不平的假频混叠,尽管改善硬件条件,如提高相机分辨率,增大电荷耦合元件(Charge coupled device, CCD)传感器尺寸等是解决问题方案之一,但更重要的是算法上有效处理和消除这类问题,而低通滤波算法是最好的方法之一^[14, 18, 21],因此本文在后处理计算应变场时,应用了高斯低通滤波方法消除相变带内的混叠失真现象,滤波后的马氏体带内的应变场(图 6a)内消除了假频混叠更为符合真实的实际情况。

尽管在 DIC 算法研究中,各学者提出的高级平滑算法更有利于提高应变场的连续性和降低噪声等^[15-16, 20-21],但平滑算法却不适用于应变局部化现象。因为相变诱发的局部化使得马氏体相变带内应变较大,奥氏体带内应变小,因此存在真实的应变台阶状凹凸分布^[22]。而当应变场经过平滑算法处理后,将相界面的梯度严重削弱(图 6b),导致应变场测量结果和相变场实际拍摄的结果不符,而未平滑的应变场结果则与实际较为符合。因此本文建议应变场计算不采用平滑算法做后处理。

(a) 混叠失真现象与低通滤波消除 (b) 平滑与非平滑算法的对比

图 6 变形场结果的后处理算法对比

1.3 红外热像仪测量局部化温度场

红外热成像技术因非接触式、高热灵敏度、高分辨率温度场测量等特点,弥补单点测温设备的不足,因此已在科研、电力系统、石化、医疗等诸多领域广泛应用。但红外热成像技术方法定量准确获得试样表面温度场仍受很多因素困扰^[9, 19, 23]。因温度大于绝对零度的物体均会对外辐射能量,故在观测物体温度场时,热像仪接收的信号不仅来自物体本身的辐射量,还夹杂着通过被测物体反射周围环境辐射量,同时这两种辐射会被测量路径中的大气削弱,因此周围大气本身也成了第三种辐射源。因此合理确定物体辐射率和排除外界干扰尤为必要。

1.3.1 试样的辐射率

从文献[24]可知抛光表面 Ni 或 Ti 金属的表面辐射率 ε 通常小于 0.3,因此直接测量物体表面温度场不准确,而喷涂薄的高辐射率涂层以提高试样表面的发射率是最有效解决途径之一。SHAW 等^[4]用喷涂黑色氧化涂层的方法,ZHANG 等^[9]用黑色蜡粉,SCHLOSSER^[19]采用喷涂黑底白色散斑涂层的方法来提高 NiTi 辐射率,但考虑同时需要兼顾 DIC 应变场测量和光学原位观测相变场,因此温度场测量只能利用 DIC 的散斑涂层。本文试验测得白底黑色散斑涂层在室温(θ_{rom})20 °C 的辐射率 $\varepsilon_{\text{rom}} = 0.92$ 。

但是 SCHLOSSER^[19]通过试验比较两种散斑发现,当白底黑色散斑涂层的辐射率会随着试样表面的温度上升而降低,则测得的物体温度场比实际的温度场偏低,因此本文的做法是参考 SCHLOSSER^[19]数据线性拟合出辐射率随温度变化的曲线对涂层的辐射率 ε 进行线性修正(下式),保证温度场测量的准确性。

$$\varepsilon = 0.395(\theta - \theta_{\text{rom}}) + \varepsilon_{\text{rom}}$$

1.3.2 周围热辐射干扰的排除

周围环境热辐射干扰和环境温度改变的影响需要排除。周围环境热辐射干扰具体的措施包括:在较黑暗的环境中做试验,并采用 LED 冷光源做照明;试验开始前需要将所有设备预热约 30 min,以保证设备处于相对热平衡状态;在试验机夹具周围粘贴高发射率的胶带以避免夹具反射周围辐射源;在试样的周围和背面放置高发射率的板材等。为防止试验过程中环境温度改变,建议在试验开始前 1 h 至试验结束均使用空调和电子温度计以保持室温恒定。

2 试验平台开发与设计

2.1 高低温动态冷热循环热力学试验系统

NiTi 记忆合金在不同温度及温度变化率下表现出独特的热力学响应特性,且该过程存在强烈的热力学耦合,通常将其热力学特性分为热稳态和热瞬态两种。目前现有技术和相关商用热力学试验产品中无法实现对环境温度瞬态速率的不间断精确控制,特别是宽温度范围下,实现大变温速率,温度线性变化控制,使材料在长周期温度高低循环交变作用的瞬态力学响应难以测试。另一方面,DIC 全场应变测量在高温与低温下拍摄一直是目前的难点。该技术除了对高低温环境下的照明条件有特殊的要求外,高温产生的热浪会改变空气的折射率,同时低温又会产生霜雾,能对 DIC 全场应变测量带来巨大

干扰, 甚至容易导致测量失败。

因此为了避免原位测试 NiTi 记忆合金的温度诱导相变而导致的相变场和应变场的局部化, 并且分析获得热稳态和热瞬态相变带变化规律, 本文另行开发研制了一种高低温动态冷热循环热力学试验系统^[25](图 7)。该试验系统包括试验箱, 自增压液氮及余量检测装置, 非接触应变测量观测窗, 除霜除雾装置, 电气控制柜等。该系统已经实现的温度控制范围为 $[-130\text{ }^{\circ}\text{C}, +350\text{ }^{\circ}\text{C}]$, 并且升温降温速度在 $[-20, -0.1] \cup [0.1, 20]\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 可控, 均温区内温度实现线性变化, 且温度波动与偏差均小于 $\pm 3\text{ }^{\circ}\text{C}$, 同时热稳态试验温度范围 $[-185\text{ }^{\circ}\text{C}, +350\text{ }^{\circ}\text{C}]$, 且均温区温度波动和温度偏差小于 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

图 7 高低温动态冷热循环热力学试验系统示意图

2.2 应力诱导马氏体相变原位多场测量的试验设计

为定量原位多场分析 NiTi 合金中应力诱导马氏体相变的局部化现象, 因此在现有试验条件的基础上设计了一套宏观原位多场试验方案(图 8)。试验选用日本 Shimadzu 公司的 AG-X 型(50 kN 载荷传感器)电子万能试验机, 以控制 NiTi 薄板试样加载-卸载。NiTi 薄板表面(+y 方向)做简单抛光处理, 另一面(-y 方向)喷涂白底的黑色散斑。

图 8 应力诱导马氏体相变原位多场测量的试验设计方案示意图

在-y 方向正对薄板试样表面位置架设红外热像仪以原位测量相变过程中的潜热导致的温度场变化, 热像仪选用美国 Flir 公司, 型号 A40, 分辨率为 320×240 , 最高帧率为 30 帧/s, 热像仪距离试样约 25 cm。在热像仪两侧分别架设一台 CCD 相机(图 8 中 3D-DIC 大恒相机 1 和 2)用以原位测试其三维变形场, 相机型号为大恒图像 DH-SV1410FM, 分辨率为 1392×1040 , 最高帧率为 15 帧/s, 同时保证两台 CCD 相机与试样中垂线的夹角 α 约为 20° , 以获得最佳的应变场测量精度^[18]。为了排除对红外热像仪的干扰, 照明源选用冷光源的 LED 矩阵平行光(图 8 中光源 1 和 2), 分别放置在 3D-DIC 大恒相机 1 和 2 两侧, 与相机拍摄轴线的夹角 β 约为 $10^{\circ} \sim 15^{\circ}$ 。

在 NiTi 薄板试样的另一面(+y 方向), 正对试样表面位置架设另一台 CCD 相机用以同步检测其表面形貌和宏观相变场的变化, 相机型号为 Point Grey 公司的 CCD 相机, 分辨率为 800×600 , 最高帧率为 60 帧/s。但是该相机与对面的红外热像仪处在同一轴线上(图 8), 相机自身的热辐射会无法避免地进入热像仪的测量视场内, 干扰试样温度场测量, 因此本试验在 Point Grey 相机前面加装了一块光学有机玻璃, 用以阻挡相机的热辐射, 同时其良好的透射率可保证相变场清晰可见。另外根据第 1.1 节确定的照明方案, 结合具体试验布置条件和安装难易程度, 最终相变场检测的照明设计方案为在斜下方架设 LED 矩阵平行光源 3, 保证与 Point Grey 相机测量轴线夹角 $\theta = 45^{\circ} \sim 60^{\circ}$ 朝上对 NiTi 试样进行照明。

最后将应变场的 3D-DIC 大恒相机 1 和 2, 温度场的红外热像仪 Flir A40, 相变场的 Point Grey 相机共 4 个设备同时与(Transistor-transistor logic, TTL)同步信号发生器连接(图 8), 将所有原位拍摄设备进行数据同步采集。

2.3 温度诱导马氏体相变原位多场测量的试验设计

本试验方案的首要难点和挑战是在热稳态和瞬态热循环时的温度控制、均温区保证, 并在低温和高温交变的情况下准确地拍摄出局部化的相变场和应变场, 而高低温动态冷热循环热力学试验系统恰好满足了试验要求。故试验以本课题组研制的高低温动态冷热循环热力学试验系统为基础。结合日本 Shimadzu 公司的 AG-X 型(50 kN 载荷传感器)电子万能试验机, 设计了如下原位测试方案(图 9)。与第 2.2 节方案类似, NiTi 薄板一面(-y 方向)仍然做简单抛光处理, 另一面(+y 方向)喷涂白底的黑色散斑。

图9 温度诱导马氏体相变原位多场测量的试验设计方案示意图

应变场和相变场原位拍摄的试验设计方案如下所述。首先在+y方向试验箱外部正对薄板试样表面位置架设一台CCD相机(图9中2D-DIC大恒相机)用以原位测试其二维变形场,相机型号为大恒图像DH-SV1410FM,分辨率为1392×1040,最高帧率为15帧/s。由于试验箱内体积限制和工作温度关系,因此同步检测其表面形貌和宏观相变场的另一台CCD相机无法架设在试样的背面,本方案在试样背面(-y方向)的加装一面反光镜,然后在2D-DIC大恒相机的右侧放置另一台相机(两相机的夹角 α 为 $0^\circ\sim 15^\circ$),拍摄方向透过光学玻璃对准反光镜,然后适当转动反光镜的角度,使该相机能正好拍摄到试样背面,其光路图见图9点画线。

照明选择与前面方案不同,高低温环境条件下LED无法在试验箱内正常工作,而将其放在试验箱外部透过光学玻璃照明又无法避免地造成反射光干扰2D-DIC相机拍摄,因此单独设计制备了耐高低温的多点直流条形光源1,2,3置于环境箱内部。直流条形光源1,2,分别放置于箱内前部两侧,与相机拍摄轴线的夹角 β 为 $45^\circ\sim 55^\circ$ (图9)。考虑反光镜固定的原因,相变场检测的照明设计方案为在斜上方架设多点直流条形光源3,保证与相机测量轴线夹角 $\theta=45^\circ\sim 60^\circ$ 朝下对试样背面照射(图9)。

温度控制与测量方面,高低温动态冷热循环热力学试验系统的温度控制器为日本Shimaden公司的FP23可编程双路比例积分微分(Proportion integration differentiation, PID)调节器,与其相连的控温热电阻采用德国Heraeus公司的PT100并放置于环境箱内部右侧,与试样的距离约为15 cm,以控制均温区的温度。同时需要注意本方案为非接触式应变场测量,所以不能在试样的任何一个表面上焊接和黏附热电阻,这会影晌应变测量精度和相变场观察。因此本方案为更为准确地测量温度循环时试样瞬态温度,改进采用控温和测温分离的方式,

在环境箱内部左侧紧贴试样处(与试样距离小于4 cm),自上而下放置4支测温PT100(德国Heraeus),通过AE102型8通道温度采集器读取4支PT100的温度信号,并以这4支热电阻的平均温度来近似取代试样的瞬时温度,同时控温PT100置于合理的位置以保证热稳态和热瞬态时的均温区。

最后将应变场的2D-DIC大恒相机1和相变场的大恒相机2同时与TTL同步信号发生器连接,实现硬件数据同步采集。

2.4 多场测量的数据同步

设计原位测量试验时,为了在同一时刻获得某指定点的各种场测量数据,建议采用数据同步,包括时间尺度同步和空间尺度同步。

2.4.1 时间尺度同步

时间尺度同步目的是保证多场数据在相同时刻被采集,因此本文建议的解决方案为硬件同步触发采集。本试验方案的TTL信号发生器(图8、9)采用单片机编程实现,应变场相机、相变场相机和温度场热像仪均选择上升沿触发采集。考虑所有相机的最高采集频率不同,应力诱发相变原位试验方案中的采集频率最低的设备为相变场相机(10帧/s),因此不同的试验条件时,数据同步的方式有所区别,见图10,其中 f_{view} 表示相变场相机频率, f_{strain} 为2D应变场相机频率, f_{temp} 为热像仪频率, f_{mech} 为试验机采样频率, f_{pt100} 为4支PT100温度传感器采样频率。

图10 时间尺度的数据同步

当应变速率或温度变化速率较低时(图 10a), 所有相机的采集方案为相同时刻开始采集, 且采集频率相同。AG-X 试验机由于无法与相机采集频率同步, 但试验开始时间相同, 因此本文提取载荷-位移数据的做法为提高 AG-X 试验机采集频率 f_{mech} , 并以相机采样时间点为准, 进行线性插值来获得数据的同步。

当应变速率或温度变化速率较高时(图 10b), 由于温度传感器 f_{pt100} 和应变场相机采集频率 f_{strain} 较低, 故试验过程中采集点较少。为了保证其他设备的高数据采样率, 因此所有设备均按照各自的最高频率采样, 但设备开始采集的初始时间相同, 因此选择场数据分析时, 以采样率最小的应变场相机拍摄频率为准, 热像仪 f_{temp} 和相变场相机 f_{view} 取距离应变场相机采集时间最近的帧, 忽略时间误差, AG-X 试验机和温度采集器数据仍以时间为基准做线性插值。

2.4.2 空间尺度同步

不同分辨率在空间尺度同步目的是保证多场数据在同一坐标点下的匹配。因应变场相机分辨率为 1392×1040 , 热像仪分辨率为 320×240 , 而相变场相机分辨率为 640×480 , 三种测量设备分辨率均不同, 场坐标非一一对应, 因此无法直接提取某坐标点在三角场下的数据, 因此本文建议的数据处理方案如下所述。先参照 SCHLOSSER^[19]指出的方法对三种相机的测量区域 ROI 做类似的尺寸标定, 以统一实际的 ROI 测量尺寸, 再以应变场相机 ROI 数据矩阵为基准, 将温度场数据和相变场数据做矩阵插值, 得到相同维度的矩阵, 即可获得多场数据在同一坐标点下的匹配。

3 典型的试验结果

选用典型的超弹性 NiTi 合金薄板作为测试样例, 其奥氏体完全转变温度为 $8.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 试验环境温度约为 $26.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, 因此在该温度下, NiTi 合金试样初始状态为近乎完全的奥氏体状态。应力诱导马氏体相变原位多场测量选用的试验条件为 AG-X 试验机的加载和卸载速度均为 0.1 mm/min 。应变测量软件为课题组自主研发的 DIC-3D 处理软件^[15-17]。试验结果中 ε_{xx} 表示试样 x 方向的 Green-Lagrange 应变, θ' 为温度场, F 为拉伸力, S_0 为初始横截面积, ΔL 为拉伸机十字头位移, L_0 为初始标距长度。

从图 11 的试验结果可知, NiTi 合金在室温状态下呈良好的超弹性状态, 工程应力-应变曲线

($F/S_0-\Delta L/L_0$) 表现为可逆滞回曲线, 并有正逆相变两个应力平台段。虽然 NiTi 合金试样在加载-卸载过程中整体呈现超弹性特征, 但是试样却存在局部化和非均匀的相变特征^[4, 7-8]。选取整个加载-卸载过程中具有代表特征的 P 时刻, 测量得到试样表面相比场、应变场和温度场如图 12 所示。可知应力诱导马氏体相变原位多场测量的试验设计方案成功表征了试样表面的宏观可见的局部相变带, 并且应变场和温度场也被原位同步定量测量。

图 11 工程应力(F/S_0)与工程应变($\Delta L/L_0$)曲线

图 12 P 时刻试样相变场、应变场和温度场

温度诱发马氏体相变原位多场测量选用的试验条件, AG-X 试验机的控制试样工程应力 151 MPa 保持恒定, 环境试验箱以温度变化速度 $v_{\Delta\theta} = 10\text{ }^{\circ}\text{C/min}$ 从 $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 到 $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 做温度循环。

从图 13 的试验结果可知, NiTi 合金在恒定应力下温度循环曲线呈现另一种可逆滞回曲线, 温度诱导马氏体相变依然可导致试样的局部化现象发生。选取整个热循环过程中具有代表特征的 Q 时刻, 测量得到试样表面相比场、应变场(图 14)。由图 14 知恒定应力下的温度诱导相变仍然会出现局部化变形模式, 本文设计的原位多场测量的试验设计方案成功表征了试样表面的宏观可见的局部相变带, 并且应变场也被原位同步定量测量。

图13 环境温度(θ_{atm})与工程应变($\Delta L/L_0$)曲线

图14 Q时刻试样相变场和应变场

4 结论

本文介绍了两种研究 NiTi 合金相变局部化现象的宏观原位多场测试方案及试验安装, 并成功获得了场测试数据。该测试方案利用了光学观测局部化相变场, 数字图像相关方法测量应变场, 红外热成像技术测量温度场, 以及设计高低温动态冷热循环热力学试验系统。通过试验结果证明试验设计方案成功表征了温度和应力诱发相变形成的宏观局部相变带, 并且应变场和温度场也被原位同步定量测量。从分析影响测量效果和精度的关键参数可知, 相变场最佳拍摄方案为竖直方向的 LED 平行光源低角度照射, 应变场处理和计算的散斑灰度分布呈近似正态分布最佳, 且计算参数子区大小选择 15~40 像素为宜, 运用非平滑算法和低通滤波算法后处理应变场可提高测量准确度, 温度场中试样表面辐射率需要随温度而修正。

参考文献

[1] 赵连城, 蔡伟, 郑玉峰. 合金的形状记忆效应与超弹性[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
ZHAO Liancheng, CAI Wei, ZHENG Yufeng. Shape

memory effect and superelasticity in alloys[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.

- [2] 王心美, 岳珠峰, 王亚芳, 等. NiTi 合金的超弹性力学特性及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
WANG Xinmei, YUE Zhufeng, WANG Yafang, et al. NiTi alloy superelasticity mechanics properties and its application[M]. Beijing: Science Press, 2009.
- [3] 张春才, 苏佳灿. 形状记忆材料[M]. 上海: 第二军医大学出版社, 2003.
ZHANG Chuncai, SU Jiakan. Shape memory materials[M]. Shanghai: Second Military Medical University Press, 2003.
- [4] SHAW J A, KYRIAKIDES S. On the nucleation and propagation of phase transformation fronts in a NiTi alloy [J]. Acta Materialia, 1997, 45(2): 683-700.
- [5] LI Z Q, SUN Q P. The initiation and growth of macroscopic martensite band in nano-grained NiTi microtube under tension[J]. International Journal of Plasticity, 2002, 18(11): 1481-1498.
- [6] DALY S, RAVICHANDRAN G, BHATTACHARYA K. Stress-induced martensitic phase transformation in thin sheets of nitinol[J]. Acta Materialia, 2007, 55(10): 3593-3600.
- [7] DALY S, MILLER A, RAVICHANDRAN G, et al. Experimental investigation of crack initiation in thin sheets of nitinol[J]. Acta Materialia, 2007, 55(18): 6322-6330.
- [8] FAVIER D, LOUCHE H, SCHLOSSER P, et al. Homogeneous and heterogeneous deformation mechanisms in an austenitic polycrystalline Ti-50.8 at.% Ni thin tube under tension. Investigation via temperature and strain fields measurements[J]. Acta Materialia, 2007, 55(16): 5310-5322.
- [9] ZHANG X H, FENG P, HE Y J, et al. Experimental study on rate dependence of macroscopic domain and stress hysteresis in NiTi shape memory alloy strips[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2010, 52(12): 1660-1670.
- [10] KIM K, DALY S. Martensite strain memory in the shape memory alloy nickel-titanium under mechanical cycling[J]. Experimental Mechanics, 2011, 51(4): 641-652.
- [11] MILLER D A, LAGOUDAS D C. Thermomechanical characterization of NiTiCu and NiTi SMA actuators: Influence of plastic strains[J]. Smart Materials & Structures, 2000, 9(5): 640-652.

- [12] KUMAR P K. Influence of inelastic phenomena on the actuation characteristics of high temperature shape memory alloys[D]. Texas: Texas A&M University, 2009.
- [13] HE Y J, SUN Q P. Macroscopic equilibrium domain structure and geometric compatibility in elastic phase transition of thin plates[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2010, 52(2): 198-211.
- [14] SUTTON M A, ORTEU J J, SCHREIER H W. Image correlation for shape motion and deformation measurements[M]. New York: Springer, 2009.
- [15] ZHAO J Q, ZENG P, LEI L P, et al. Initial guess by improved population-based intelligent algorithms for large inter-frame deformation measurement using digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(3): 473-490.
- [16] ZHAO J Q, ZENG P, PAN B, et al. Improved Hermite finite element smoothing method for full-field strain measurement over arbitrary region of interest in digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(11): 1662-1671.
- [17] 赵加清. 数字图像相关方法中的快速、高精度算法研究及应用[D]. 北京: 清华大学, 2012.
- ZHAO Jiaqing. Fast and accurate algorithms in digital image correlation and applications[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [18] REEDLUNN B, DALY S, HECTOR L, et al. Tips and tricks for characterizing shape memory wire part 5: Full-field strain measurement by digital image correlation [J]. Experimental Techniques, 2011, 35: 1-17.
- [19] SCHLOSSER P. Influence of thermal and mechanical aspects on deformation behaviour of NiTi alloys[D]. Grenoble: Universite Joseph Fourier de Grenoble, 2008.
- [20] HUA T, XIE H, WANG S. Evaluation of the quality of a speckle pattern in the digital image correlation method by mean subset fluctuation[J]. Optics & Laser Technology, 2011, 43(1): 9-13.
- [21] PAN B, LU Z, XIE H. Mean intensity gradient: An effective global parameter for quality assessment of the speckle patterns used in digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2010, 48(4): 469-477.
- [22] FENG P, SUN Q P. Experimental investigation on macroscopic domain formation and evolution in polycrystalline NiTi microtubing under mechanical force [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2006, 54(8): 1568-1603.
- [23] CHURCHILL C B, SHAW J A, IADICOLA M A. Tips and tricks for characterizing shape memory alloy wire: Part 4-thermo-mechanical coupling[J]. Experimental Techniques, 2010, 34(2): 63-80.
- [24] HOLST G C. Common sense approach to thermal imaging[M]. Bellingham WA, ETATS-UNIS: SPIE Optical Engineering Press, 2000.
- [25] 杜泓飞, 曾攀, 雷丽萍. 一种高低温动态冷热循环力学实验系统: 中国, 201210342923.6[P]. 2013-01-16.
- DU Honfei, ZENG Pan, LEI Liping. The dynamic thermal-mechanical experiment system at low to high temperature cycling: China, 201210342923.6[P]. 2013-01-16.

作者简介: 杜泓飞, 男, 1986 年出生, 博士研究生。主要研究方向为 NiTi 合金中的马氏体相变, 材料失稳, 局部化。

E-mail: dhf528@163.com

曾攀(通信作者), 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为重大装备及智能结构中的设计与分析, 有限元分析及应用, 材料力学, 结构力学。

E-mail: zengp@mail.tsinghua.edu.cn

雷丽萍, 女, 1970 年出生, 博士, 副教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为材料加工中的数值模拟, 结构设计与分析。

E-mail: leilp@mail.tsinghua.edu.cn