

文章编号: 1001-4888(2009)04-0269-07

# 结合数码显微镜的数字散斑相关方法精度分析及应用\*

侯方<sup>1</sup>, 雷冬<sup>1,2</sup>, 龚兴龙<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学 近代力学系, 合肥 230027; 2. 河海大学 工程力学系, 南京 210098)

**摘要:** 结合数字散斑相关方法和一种新型的显微镜——数码显微镜, 提出了一种测量多晶材料晶粒尺度面内变形的新技术, 并通过零变形校准实验、重聚焦实验和平移实验等一系列验证实验分析了该方法的精度和实用性。作为应用实例, 对一种镍基合金试件进行了单向拉伸和疲劳实验, 得到了晶粒尺度下具有较大应变梯度的应变分布图像。结果表明, 该方法能够得到精确的位移测量数据, 是一种理想的测量晶粒尺度变形的光测方法。

**关键词:** 数字散斑相关; 数码显微镜; 多晶材料

**中图分类号:** TH741      **文献标识码:** A

## 0 引言

多晶材料在今天的工业生产中已经获得了广泛的应用, 对这类材料的力学性能的研究已经成为了机械工程和材料科学领域的重要课题。过去的研究大多集中在宏观尺度, 近年来, 材料微观尺度上的力学行为开始受到关注, 尤其是晶粒尺度的材料力学行为。对于微细观力学理论来说, 定量的基于晶粒尺度的研究, 是验证其模型和理论分析正确性与合理性的重要手段。同时, 对晶粒内部的变形、晶间相互作用、异质材料的影响等的了解, 无疑会给多晶材料的微观理论的发展和数值模拟奠定基础<sup>[1]</sup>。

然而, 微尺度力学量的定量测量是实验力学中的一个难题。晶粒尺度下的变形常处于亚微米量级, 大多数传统测量方法无法应用于如此微小的尺度。实际上, 由显微镜拍摄的高倍放大照片, 只要微观结构灰度对比度足够大, 就形成了广义散斑图。散斑本身包含了变形过程的大量信息, 而光测力学中的数字散斑相关方法<sup>[2,3]</sup>最适合于提取两张散斑图之间的几何差别信息。因此, 结合高倍显微装置, 应用数字散斑相关技术, 可以解决微区的定量测量问题。近年来, 国内外对微观数字散斑相关方法的研究已经取得了丰富的成果<sup>[4-6]</sup>。

对数字散斑相关方法而言, 能否获得高分辨率的散斑图像, 是决定实验成败的关键。传统的光学显微镜放大倍数有限, 并且存在着小景深和镜头畸变的问题, 所以大多数研究采用的是电子类显微镜。然而电子显微镜同样存在着空间和时间畸变。虽然近来有学者提出了一些补偿方法来减小误差<sup>[6-8]</sup>, 但是比较复杂, 甚至可能成为微观数字散斑技术应用的障碍。

基于上述研究现状, 本文采用了一种新型的显微设备——数码显微镜来作为实验的载体。数字散斑相关方法与其结合起来, 作为一种定量测量材料晶粒尺度变形的技术, 在国内外的文献中鲜有报道。本文对该方法的精度和误差进行了实验分析。作为应用实例, 对航空材料 GH4169 合金单轴拉伸以及疲劳循环中晶粒尺度的力学行为进行了研究。

\* 收稿日期: 2009-03-27; 修订日期: 2009-05-30

通讯作者: 雷冬(1978-), 男, 博士后。主要研究方向: 实验力学, 材料的疲劳断裂。E-mail: leidong@ustc.edu.cn

# 1 数码显微镜下的数字散斑相关方法

## 1.1 数字散斑相关方法简介

数字散斑相关方法(Digital Speckle Correlation Method, DSCM)又称数字图像相关方法(Digital Image Correlation Method, DICM)是上世纪80年代初由美国南卡罗来纳大学的 W. H. Peter 和 W. F. Ranson<sup>[2]</sup>以及日本的 I. Yamaguchi<sup>[3]</sup>等人同时独立提出的。经过多年发展,已经成为实验力学领域中一种广为人知并有着众多应用的非接触无损光学测量方法。DSCM 通过图像匹配的方法分析试件表面变形前后的散斑图像,跟踪试件表面几何点的运动得到位移场,具有光路简单、非接触、全场、环境适应性好、测量范围广等优点。近年来,DSCM 在理论研究方面取得了很大的进展,提出了数种精度高运算速度快的亚像素定位算法<sup>[9-12]</sup>。基于计算精度与效率的综合考虑,本文选择了基于梯度的亚像素位移算法<sup>[14]</sup>。

另外,由于 DSCM 得到的位移场均含有噪声,直接差分计算应变会带来很大的误差。本文实验采用了逐点最小二乘法<sup>[13]</sup>对位移场进行降噪处理再计算应变。

## 1.2 数码显微镜

数码显微镜是显微镜中的新秀。早期的数码显微镜实际是在一台光学显微镜上配备成像装置,再将拍摄的图片传送到电脑上进行实时预览以及后期处理。而新型数码显微镜的光路优化程度与图像处理能力都远远超过了以前。本文使用的是 KEYENCE 公司出产的 VHX-100 型数码显微镜(图1)。这种新型数码显微镜的景深很大,其内置光源还能够大大降低外界环境对图像质量的影响,能够得到高放大倍数、高分辨率的彩色金相图像。



图1 VHX-100 型数码显微镜  
Fig. 1 VHX-100 Digital Microscope

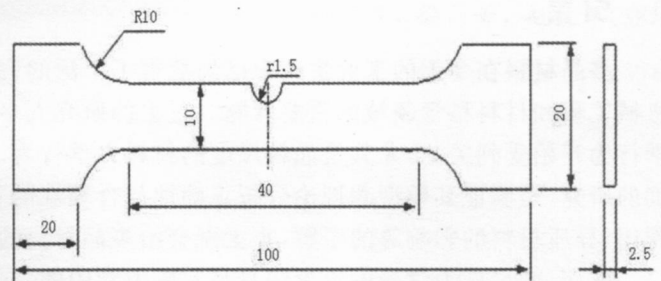


图2 试件的形状和尺寸(单位:mm)  
Fig. 2 Shape and dimension of specimens(units: mm)

## 1.3 数码显微镜下数字散斑相关方法的精度分析

DSCM 的理论位移测量精度能够达到 0.01 像素,然而在实际应用中影响其精度的因素很多,导致误差会显著大于理论值。由于它是利用图像灰度直接进行相关计算的测量方法,因此这种方法的测量精度很大程度上取决于图像质量的好坏。就显微尺度而言,各种类型的显微图像采集系统都或多或少的存在着内部噪声、放大倍数不稳定以及镜头畸变等问题,这些都会影响到所拍摄的图像质量。为了定量把握各种因素对测量精度的影响,本文进行了实验方面的研究。实验材料 GH4169 镍基高温合金拥有很细的晶粒(小于 15  $\mu\text{m}$ ),目前被广泛应用于航空航天领域。为了满足 DSCM 的要求,对试件进行打磨和抛光,然后用体积比为 1 : 1 : 1 的  $\text{H}_2\text{O}_2 + \text{HNO}_3 + \text{HCL}$  溶液对抛光部位进行腐蚀。经过以上工序,就可以在扫描电镜下得到清晰并具有足够对比度的微观组织图像。试样的形状与尺寸见图 2。

### (1) 测试系统的精度

为了了解系统所能精确测量的最小位移值,即系统精度,进行了零变形的校准实验。将一腐蚀过的 GH4169 试件放在显微镜的观测台上,保持试件位置、图像放大倍数、亮度和对比度等不变,在不同时刻采集两幅微观图像。移动试件的位置,再在不同时刻采集两幅图像。重复此过程 10 次,所采集的图像对分别称为图像对 1 ~ 10。然后把每对图像中的第一幅视为变形前图像,第二幅视为变形后图像,用

DSC 软件进行处理。每个图像对的计算面积为 1200 ×800 像素,计算点数为 9801 个,计算子区尺寸为 61 ×61 像素。

尽管事实上试件无位移,但由于系统误差(主要是算法误差)和随机误差的存在,使得计算出的位移不为零。这个虚假的位移反映了整个系统对位移的敏感性,可以认为是该系统的位移精度。根据数理统计知识,计算结果的平均值能够反映系统误差的大小,而标准差则可以反映随机误差的大小,因此可以将它们综合起来衡量系统的精度。结果如图 3 和图 4 所示。

从图 3 可以看出,系统误差很小。放大 3000 倍与 500 倍的系统误差基本在同一水平,最大误差不超过 0.06 像素。从图 4 可知,随机误差随放大倍数增大而增大,放大 3000 倍时与 500 倍时相比有量级上的差异。这是因为随着放大倍数的增大,光源的不稳定性以及内部噪声等因素对显微图像质量的影响也越来越大,而图像的质量直接关系到测量精度。3000 倍下标准差的最大值为 0.034 像素。根据数理统计知识,测量的极限误差为标准差的 4 倍,即 0.136 像素,这个误差很小。因此我们可以得出结论,在数码显微镜下应用 DSCM 进行变形场的测量,测试系统的精度足以满足需要。

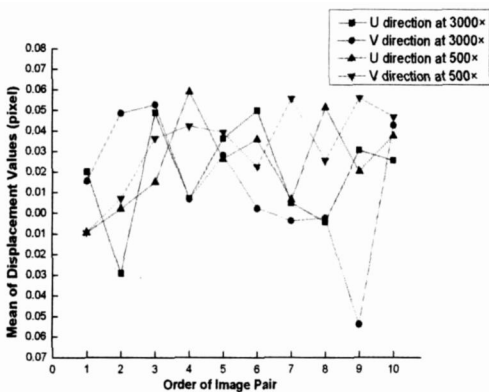


图 3 系统误差分析

Fig. 3 Analysis of systematic errors

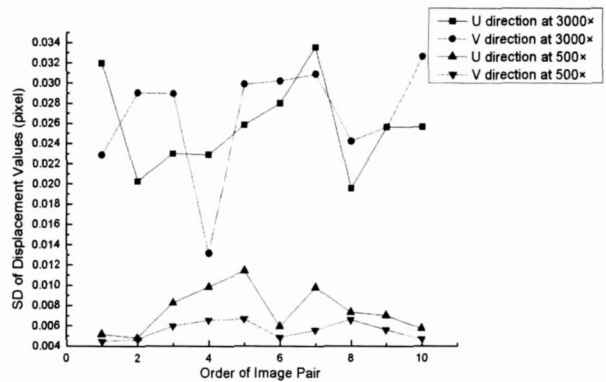


图 4 随机误差分析

Fig. 4 Analysis of random errors

### (2) 重聚焦带来的影响

用 DSCM 测量的是物体表面的面内位移,而在实际情况下离面位移总是存在的,在宏观尺度实验中,由于 CCD 镜头与试件表面的距离很大,离面位移带来的影响可以忽略。而微尺度下的物距很小,被离面位移改变的物距会显著影响测量的相关度<sup>[20]</sup>。同时,物距的改变也会使变形前后的图像放大倍数发生变化,进而影响测量值。根据图像放大原理和坐标变换知识可以推导出,在变形前后图像放大倍数发生变化的情况下,用 DSCM 测量得到的应变值(只考虑横向应变  $\epsilon_x$  和纵向应变  $\epsilon_y$ )相当于真实的应变值加上放大倍数的变化率。举例来说,当变形前图像放大倍数为 500 倍,变形后图像放大倍数为 501 倍时,放大倍数变化率为 0.2%,此时测得的横向与纵向应变值与真实值之间的误差也为 0.2%。为了减小误差,在拍摄变形后的图像之前必须进行重聚焦,保证变形前后的物距相同,从而使放大倍数一致。

然而在实际操作中重聚焦不可能精确回到原位,因此总会存在放大倍数不一致所造成的误差。为了确定这种误差的大小,进行了一系列重聚焦实验。先采集一副基准图,然后保证其他条件不变,对同一位置重新聚焦采集另一幅图像,将两幅图像作为一个图像对进行处理,共处理 10 对图像对。相关计算所用参数与上文相同,在这里研究的是横向与纵向应变。

如果重聚焦很精确,使物距保持不变,那么重聚焦实验也就相当于上文提到的测量系统精度的实验了,此时所测得的应变应等于系统的应变精度。根据数理统计理论,由于系统应变精度是由系统位移精度的随机误差值计算得到,因此其平均值也应该和随机误差的平均值一样趋于零(上文的精度实验中所有图像对的最大应变平均值没有超过  $2 \times 10^{-5}$ 。受篇幅限制,在此就不单独列出结果了)。然而在实际操作中放大倍数的改变总是存在的,根据上文,改变的放大倍数会给应变加上一个值,此时应变平均值

就不会趋于零了。因此可以用所有测量点的横向或纵向应变平均值来衡量放大倍数改变引起的误差大小,结果如图5所示。

从图5可以看出,  $\epsilon_x$ 、 $\epsilon_y$  在放大500倍时的误差远远大于3000倍时的误差,这是因为显微镜的景深是随着放大倍数的增大而减小的,景深越小,越容易保证重聚焦的精确度。放大3000倍时,最大误差不超过300个微应变,这个精度是能够满足晶粒尺度测量的要求的。实际上,由于数码显微镜能够采集到清晰的彩色图像,非常有利于人眼进行重聚焦。

另外可以看出,对一对图像对而言,横向和纵向应变大小基本是相同的,这一点可以验证上文叙述的放大倍数改变对应变的影响。

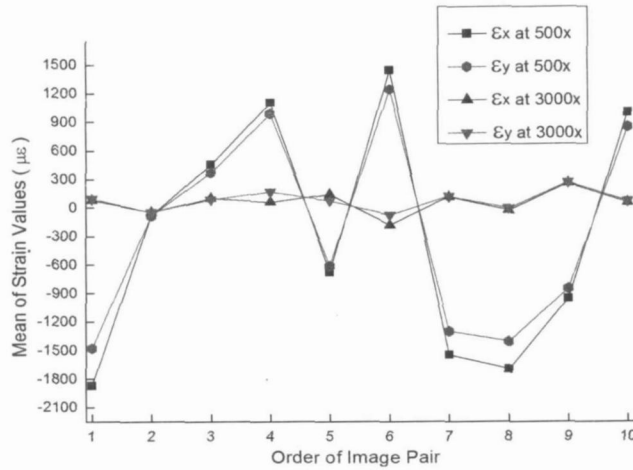


图5 放大倍数的不稳定性对应变测量的影响

Fig. 5 Effect of magnification variance on strain measurement

(3) 平移实验

为了衡量系统对微小位移的测量精度,进行了一系列的试样平移实验。一个用于扫描电镜内的平移实验台在此处被用来对试样进行精确平移。实验分别在放大倍数为500倍和3000倍下进行。将平移前后的图像视为一对图像对,数字散斑相关计算所用参数与上文相同。位移方向为水平方向。将相关计算所得结果与实际位移值进行比较,结果如表1所示。

表1 平移实验结果

Tab. 1 Result of translation experiment

放大倍数	图像对	真实位移	计算位移 (pixels)	
			平均值	标准差
500 ×	1	10µm(28 pixels)	28.4	0.033
	2	15µm(41 pixels)	41.5	0.028
	3	20µm(55 pixels)	54.9	0.052
	4	30µm(83 pixels)	83.3	0.061
	5	40µm(110 pixels)	110.1	0.067
3000 ×	6	1µm(17 pixels)	18.4	0.15
	7	2µm(33 pixels)	35.1	0.09
	8	3µm(50 pixels)	54.5	0.12
	9	5µm(83 pixels)	83.3	0.22
	10	8µm(132 pixels)	135.3	0.36

可以看出,500 倍下计算出的位移值与实际值非常接近,最大偏差没有超过 1 像素。并且,虽然 3000 倍下计算值与实际值的最大偏差超过了 5 像素,但转换成实际尺寸后可以发现仍然在平移台的定位精度范围之内。显然,测量精度是很高的。

应用光学显微镜进行数字散斑相关测量时,镜头畸变是影响精度的一个严重问题。实际上,平移实验的结果完全可以用来衡量镜头畸变所造成的影响<sup>[14]</sup>。一次测量中所有位移值的标准差可以反映镜头畸变的严重程度。从表 1 可以看出 3000 倍下的镜头畸变更严重一些,但总的来说仍然在可以接受的范围内。另一方面,当位移较大的时候,比如超过 100 像素,镜头畸变的影响比较严重。基于以上结果,可以采取以下措施来减小镜头畸变的影响:采集图像时,应该把样品尽量移回到采集上一幅图像时的位置,保证没有太大的刚体平移。这一措施同时也可以减少局部亮度改变对计算的影响。

## 2 应用实例

为了验证本文方法的实用性,进行了单向拉伸与疲劳实验。图像的放大倍数为 3000 倍,计算子区的尺寸为  $61 \times 61$  像素。加载方向为竖直方向,应变图中的应变  $\epsilon$  平行于加载方向。拉伸实验是在位进行的,施加的载荷为 2kN。循环加载实验在 MTS-810 材料测试系统上进行,试件在室温下承受循环加载,载荷信号为正弦波,加载频率为 10Hz,应力比为 0。载荷幅值为 14kN。在一定的疲劳循环周次之后停机(一般每隔 1000 次循环停机一次),然后将试件转移到数码显微镜下进行观察,并对感兴趣的区域拍摄显微图像。研究区域在试件上的位置如图 6 所示,拉伸实验研究的是图中的 2 区,疲劳实验研究的是 1 区。这些图像最终由 DSC 软件进行处理,得到疲劳残余应变分布。结果如图 7 和图 8 所示。

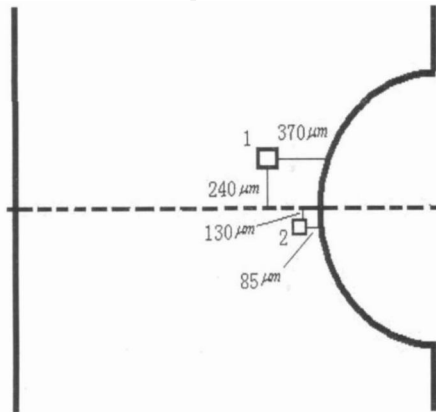


图 6 研究区域在试件上的位置

Fig. 6 The studied areas on the specimen

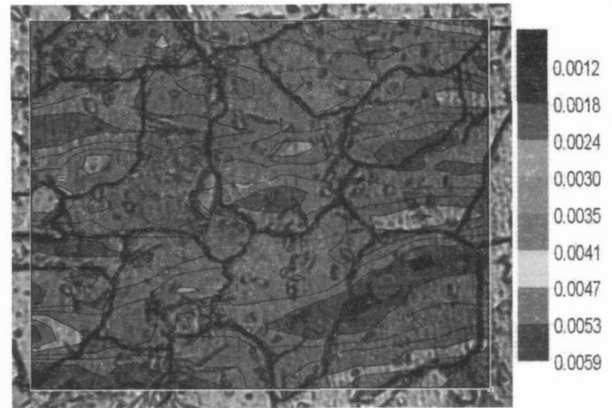


图 7 拉伸实验的应变分布

Fig. 7 Strain distribution under tensile loading

从图 7 和图 8 可以看出,微区的应变梯度比通常所认为的要大很多。图 8 显示出疲劳残余应变有一个累积的趋势,并有少量的大应变区出现在晶界上或者晶界附近。不过,除了少数的几个大应变区之外,其余区域之间的残余应变值差别并不是很明显,这说明材料晶界的强度比较高,沿着晶界分布的第二相(相)颗粒起了一定的增强作用。这个结论也可以和观察到的材料断裂方式联系起来:绝大部分是穿晶断裂,小部分是沿晶断裂。

## 3 结论

本文结合数码显微镜和数字散斑相关方法,提出了一种测量多晶材料晶粒尺度变形的实验技术,并对于该技术的精度和误差进行了分析。结果表明,该技术的测量精度能够满足晶粒尺度变形测量的要求。作为应用的实例,对镍基合金试件进行了单向拉伸和疲劳实验,得到了晶粒尺度的应变分布图像。

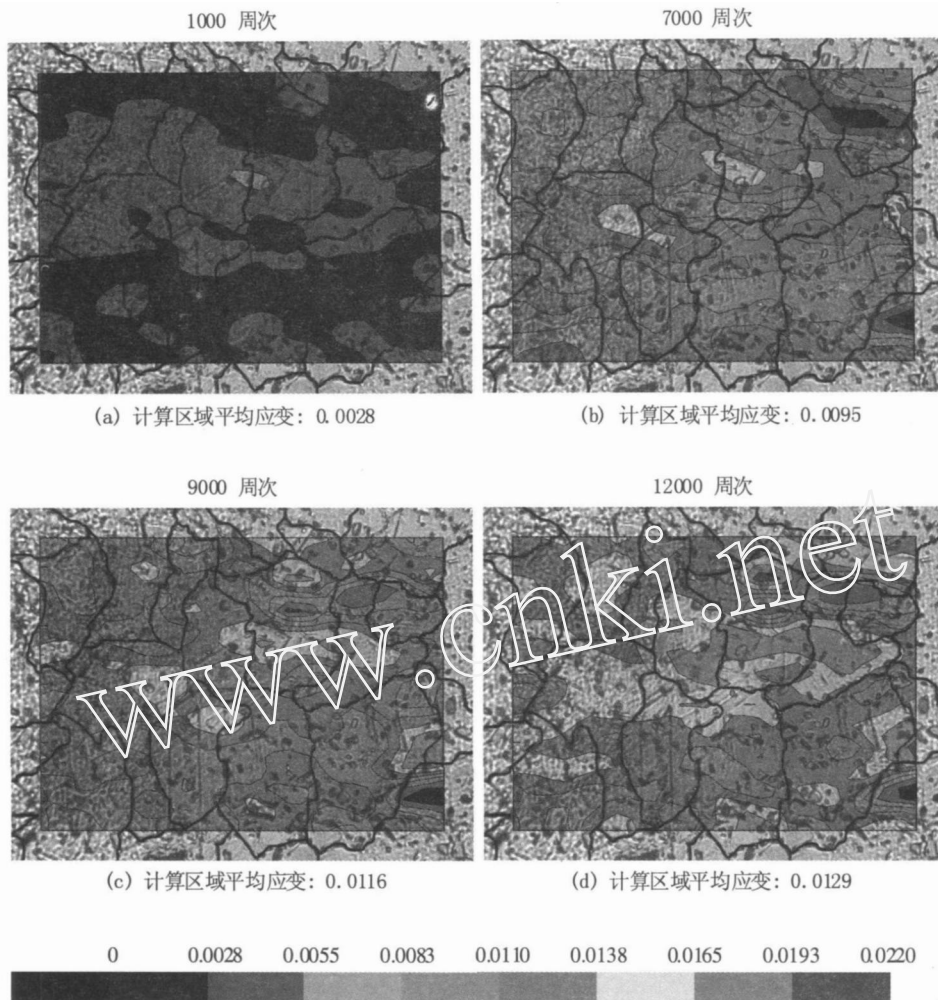


图 8 不同周次的疲劳残余应变分布

Fig. 8 Evolution of cumulative fatigue residual strain distribution

## 参考文献:

- [1] 李喜德,杨燕,魏成等. 基于光学和扫描显微平台的微尺度实验力学检测技术和装置研究[J]. 实验力学,2006,21(4): 427 - 438 (Li X D, Yang Y, Wei C, et al. Measurement of Microscale Experimental Mechanics Based on Stage of Optical and Scanning Microscopes [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006,21(4): 427 - 438 (in Chinese))
- [2] Peters W H, Ranson W F. Digital imaging techniques in experimental stress analysis [J]. Optical Engineering, 1982,21(3): 427 - 431.
- [3] Yamaguchi I. A laser-speckle strain gauge[J]. Journal of Physics(E), 1981,14(5): 1270 - 1273.
- [4] Lockwood W D, Reynolds A P. Use and Verification of Digital Image Correlation for Automated 3D Surface Characterization in the Scanning Electron Microscope[J]. Materials Characterization, 1999, 42 (2): 123 - 134.
- [5] Pascal D, Michel B. Micromechanical Application of Digital Speckle Correlation Techniques[M]. In Interferometry in Speckle Light: Theory and Applications, Springer, 2000:67 - 74.
- [6] Zhang D S, Luo M, Arola D D. Displacement/ strain measurements using an optical microscope and digital image correlation[J]. Optical Engineering, 2006,45(3): 033605.
- [7] Schreier H W, Garcia D, Sutton M A. Advances in light microscope stereo vision[J]. Experimental Mechanics, 2004, 44(3): 278 - 288.
- [8] Sutton M A, Li N, Garcia D, et al. Metrology in a scanning electron microscope: Theoretical developments and experimental validation[J]. Measurement Science and Technology, 2006, 17(10): 2613 - 2622.

- [9] Bruck H A , McNeil S R , Sutton M A , et al. Digital image correlation using Newton-Raphson method of partial differential correction[J]. *Experimental Mechanics* , 1989 , 29(3) : 261 - 267.
- [10] Lu H , Cary P D. Deformation measurement by digital image correlation: implementation of a second-order displacement gradient[J]. *Experimental Mechanics* , 2000 , 40(4) : 393 - 400.
- [11] Wang H W , Kang Y L. Improved digital speckle correlation method and its application in fracture analysis of metallic foil[J]. *Optical Engineering* , 2002 , 41(11) : 2793 - 2798.
- [12] Zhang J , Jin G C. Application of an improved subpixel registration algorithm on digital speckle correlation measurement[J]. *Optics & Laser Technology* , 2003 , 35 : 533 - 542.
- [13] 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 (Pan B , Xie H M. Full-Field Strain Measurement Based on Least-Square Fitting of Local Displacement for Digital Image Correlation Method[J]. *Acta Optica Sinica* , 2007 , 27(11) : 1980 - 1986(in Chinese))
- [14] Sun Z L , Lyons J S , McNeill S R. Measuring microscopic deformations with digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering* , 1997 , 27 : 409 - 428.

## Analysis of Digital Image Correlation Method Coupling with Digital Microscopy and Its Application

HOU Fang<sup>1</sup> , LEI Dong<sup>1,2</sup> , GONG Xing-long<sup>1</sup>

(1. Dept. of Modern Mechanics, University of Science & Technology of China, Hefei 230027, China;

2. Department of Engineering Mechanics, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract :** A new approach for investigation on the in-plane displacement on a grain scale for polycrystalline materials is proposed in this paper based on coupling digital image correlation method and a new type of microscope - digital microscope. The accuracy and practicability of this approach have been analyzed through a series of validation tests, including non-displacement calibration experiments, refocus experiments and rigid translation experiments. As an example of application, uniform tension test and fatigue experiment were carried out for a Ni based alloy specimen, and strain distribution maps on a grain scale with high strain gradient were obtained. Results show that accurate displacement data may be obtained by this approach; so it is a ideal optical measuring method for deformation measurement on a grain scale.

**Keywords :** digital image correlation; digital microscope; polycrystalline materials