

文章编号: 1001-3806(2013)02-0139-04

## 不同 WC 含量下 WC/Cu 复合材料弹性模量实验研究

俞海<sup>1</sup> 郭荣鑫<sup>1,2\*</sup> 夏海廷<sup>1,2</sup> 颜峰<sup>1</sup> 张玉波<sup>1</sup>

(1. 昆明理工大学 工程力学系, 昆明 650500; 2. 昆明理工大学 云南省先进材料力学行为与微观结构设计高校重点实验室, 昆明 650500)

**摘要:** 为了研究数字图像相关方法运用于小试样下 WC/Cu 复合材料弹性模量测定的准确性, 采用粉末冶金法制备出了 WC 含量不同的 WC/Cu 复合材料, 对试件表面用白漆配合碳粉方法进行制斑, 并在万能材料试验机上进行拉伸实验, 用 CCD 相机记录其散斑图。对记录的散斑图进行相关运算, 并通过畸变校正理论校正位移计算结果, 计算出小应变范围内 WC/Cu 复合材料的应力应变曲线, 得到弹性模量; 与传统电测方法结果进行对比, 数据吻合较好。结果表明, 采用数字图像相关方法和小试样制斑方法运用于 WC/Cu 复合材料弹性模量的测定是较为精确可靠的。

**关键词:** 激光技术; 图像处理; 弹性模量; 数字图像相关; WC/Cu 复合材料; 梯度法

中图分类号: O348.1

文献标识码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.02.001

### Experimental study on the elastic modulus of WC/Cu composite material with different WC content

YU Hai<sup>1</sup>, GUO Rong-xin<sup>1,2</sup>, XIA Hai-ting<sup>1,2</sup>, YAN Feng<sup>1</sup>, ZHANG Yu-bo<sup>1</sup>

(1. Department of Engineering Mechanics, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Key Laboratory of Yunnan Higher Education Institutes for Mechanical Behavior and Microstructure Design of Advanced Materials, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

**Abstract:** In order to study the accuracy of determination for elastic modulus of WC/Cu composites by digital image correlation method, WC/Cu composites with different WC content were prepared by powder metallurgy method. On the surface of specimens speckles were made by white paint with carbon powder. The tensile tests of these specimens were made in the universal material testing machine. Meanwhile the speckle figures were recorded by CCD camera. Correlation calculation was performed for the recorded speckle figures. And the calculation results were corrected according to the distortion correction theory. Then the stress-strain curve and elastic modulus of WC/Cu composites under small strain were given. The experimental results are in accordance with the results got by traditional electrical measurement. That means the measurement of elastic modulus of WC/Cu composites by digital image correlation applied to the small samples is correct and reliable.

**Key words:** laser technique; image processing; elastic modulus; digital image correlation; WC/Cu composites; gradient method

### 引言

WC/Cu 复合材料是由高导电、导热性的金属基体铜与高硬度、高熔点、低热膨胀系数的碳化钨复合而成的新材料。这种材料的优点是能够很好地发挥 WC 和

铜各自的优良性能, 弥补各自的不足, 扬长避短, 同时, 又使材料在整体性能上, 既具有金属良好的导电导热性能、力学性能, 又具有较高的强度、耐高温和耐磨损性能, 是一种极具应用前景的大电流滑动触头耐磨材料<sup>[1]</sup>, 受到广泛的关注<sup>[2]</sup>。目前这类材料大多采用粉末冶金法制备, 难以获得大尺寸的材料, 因此, 获得的试样也比较小, 材料力学性能的影响因素多, 测试相对比较困难。另外, 在复合材料的损伤断裂研究中, 需要获得试件某一区域的形变场, 所以, 小试样形变场的精确测量在材料力学性能测试和材料损伤断裂分析中具有重要的作用。

数字图像相关方法(digital image correlation method, DICM)是近年来发展起来的光测力学新方法。该方

基金项目: 云南省应用基础研究计划资助项目(2011FB029); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20105314110006); 云南省教育厅科学研究基金资助项目(2010Y385)

作者简介: 俞海(1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事光测实验力学的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: guorx@kmust.edu.cn

收稿日期: 2012-06-07; 收到修改稿日期: 2012-07-09

法可用于面内位移或变形测量,具有非条纹、非接触、高精度、全场测量的优点。它与不同放大倍数的显微成像设备结合,可以对宏观、细观、微观、甚至纳观尺度的变形进行有效的测量,可应用于实验力学及其它科学研究领域和工程实践。HU<sup>[3]</sup> ZHANG 等人<sup>[4]</sup>分别用数字图像相关法对低弹性模量的橡胶和高弹性模量的钢绞线进行了弹性模量的测定,但其均采用尺寸相对较大的试件,这样对其制斑要求相对较低。另外,对于金属材料,传统的电测法虽然精度高,但其测量有很大的局限性,不适合于高温测量,虽然现已有高温下可以工作的应变片,但其成本高昂,不适用于常规实验测量。而数字图像相关方法具有非接触的优点,可以很好地解决高温下电测难的问题。本文中通过数字图像相关方法,对 WC 体积分数不同的 WC/Cu 复合材料在常温下的弹性模量进行测定,为下一步用数字图像相关方法对 WC/Cu 复合材料高温下弹性模量的测定提供依据。

## 1 数字图像相关方法的基本原理

数字图像相关法(DICM)是对运动、变形前后所采集得到的物体表面的两幅数字图像(散斑图像)进行相关运算,以测量物体的位移、应变及场分布。当物体表面变形时,物体表面的散斑随物体变形而运动,散斑的运动包含了物体的变形信息,可以通过测量散斑的运动来分析物体的变形。图1是数字图像相关技术原理图。

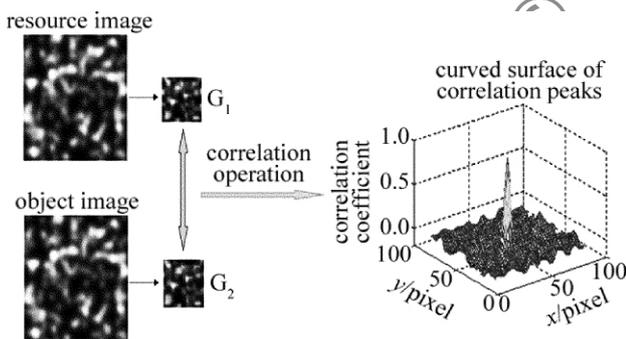


Fig. 1 Principle diagram of digital image correlation technology

记  $\Pi$  是表示  $f(x, y)$  和  $g(x', y')$  的相似程度的相似性度量函数:

$$\Pi = \Pi[f(x, y), g(x', y')] \quad (1)$$

式中  $f(x, y)$  和  $g(x', y')$  分别表示变形前、变形后的子区图像。将  $g(x', y')$  对  $\Delta x$  和  $\Delta y$  进行 1 阶泰勒展开并舍去高阶小量,可得:

$$g(x + u + \Delta x, y + v + \Delta y) = g(x + u, y + v) + \Delta x \cdot g_x(x + u, y + v) + \Delta y \cdot g_y(x + u, y + v) \quad (2)$$

式中  $u$  和  $v$  分别为原图像中所求位移点  $(x, y)$  的整像素位移;  $\Delta x$ 、 $\Delta y$  分别为与  $x, y$  方向整像素位移对应的

亚像素位移;  $g_x$  和  $g_y$  为灰度的 1 阶梯度,灰度梯度算子取为 Barron 算子<sup>[5]</sup>。

真实的位移使得函数满足条件  $\frac{\partial \Pi}{\partial \Delta x} = 0, \frac{\partial \Pi}{\partial \Delta y} = 0$ ,

由此便可求出  $\Delta x$  和  $\Delta y$ :

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = A^{-1}C \quad (3)$$

式中  $A$  和  $C$  为系数矩阵,其值由  $\Pi$  的具体形式决定。PAN 等人在对亚像素位移测量算法的对比研究中<sup>[6]</sup>指出,梯度法<sup>[7]</sup>中图像子区较大时,亚像素位移为 0.0pixel ~ 0.3pixel 和 0.7pixel ~ 1.0pixel 时的标准差与 N-R 方法计算结果的标准差几乎相等,而梯度法的计算效率为 N-R 方法的 30 倍左右。本文中拉伸试验的相邻两幅散斑图在对应级差下,试件计算区域位移量在 0.15pixel ~ 0.35pixel 之间,这样在保证精度的前提下,提高了计算效率。根据 WU 对图像相关技术的亚像素位移算法与实验研究<sup>[8]</sup>,选择梯度法中相似性度量函数为如下形式时计算精度和稳定性最佳:

$$\Pi = \frac{\left\{ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [F(x, y) \cdot G(x', y')] \right\}^2}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [F(x, y)]^2 \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m [G(x', y')]^2} \quad (4)$$

式中  $F(x, y) = f(x_i, y_j) - \bar{f}$ ,  $G(x', y') = g(x'_i, y'_j) - \bar{g}$ ,  $\bar{f}$  和  $\bar{g}$  分别表示  $f(x, y)$  和  $g(x', y')$  的均值。此时相似性度量函数其实为标准化协方差函数的平方,因此,本文中梯度法采用上述相似性度量函数进行计算。

## 2 试样制备

金属基复合材料基本上可分为纤维增强和颗粒增强两大类。制造金属基颗粒复合材料的方法有多种,按照增强相的引入方式来分类颗粒增强金属基复合材料的制备方法<sup>[9]</sup>有:粉末冶金法、铸造法、逐步熔融凝固法、原位自生法、直接氧化法、机械合金法和共晶定向凝固法等方法。本文中用粉末冶金的方法制备 WC/Cu 复合材料,所选用的原材料为四川科汇实业有限公司生产的电解铜粉和株洲硬质合金有限公司生产的碳化钨颗粒,具体参量见表 1。

Table 1 Performance parameters of copper powder and tungsten carbide

	grain size/ $\mu\text{m}$	purity/%	apparent density/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
WC	2~4	—	15.63
Cu	70	99.9	8.96

按碳化钨体积分数分别为 0.03、0.06、0.09、0.12 和 0.15,将碳化钨和铜粉分别放入球磨机中球磨混粉,将

混好的粉末分别装入石墨热压模具中,然后将模具放置到真空热压烧结炉内。为了防止烧结体氧化,在加热烧结之前,要对炉腔抽真空,使炉腔内的大气压在 10Pa 以下,然后以 15℃/min 升温到 200℃,压力保持在 1MPa,再以较低的升温速度 10℃/min 升至烧结温度 950℃,匀速加压至 30MPa,保温保压 2h,最后随炉冷却至室温。图 2 为用粉末冶金方法所制试样(WC 体积分数分别为 0.03、0.06、0.09、0.12 和 0.15,以下将其分别对应为 1#~5# 试样)在扫描电镜放大 500 倍下 WC 在 Cu 基体中的分布图(白色颗粒为 WC)。

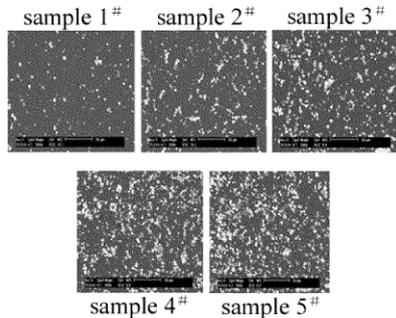


Fig. 2 Scanning electron micrograph

### 3 实验过程

本文中用粉末冶金方法制备的 WC/Cu 复合材料试样为圆饼形状,用线切割方法把圆饼试样加工成如图 3 中所示的无孔夹持试样。准静态加载使用的设备为 GW1100-A 型电子万能材料试验机,实验中采用位移加载控制方式,因为受模具大小的限制,加工的试样相对较小,所以采用相对较小的加载速率,为 0.2mm/min。采集散斑图的 CCD 分辨率为 2048pixels × 1536pixels,成像区域为 30mm × 22.5mm。在实验过程中,试样表面的散斑尺寸对 DICM 的测量精度有很重要的影响,不同的散斑制作方法得到的散斑点尺寸和均匀性有很大差异。由参考文献[8]可知,散斑颗粒理想大小为 4pixels~6pixels。人工散斑大都是通过试样表面反复喷洒黑白油漆制作而得,本文中由于试样较小,制斑时先在试样表面喷洒一层白漆,然后配合碳粉制备出颗粒细小、均匀的散斑(如图 4 所示),适合于小试样制斑。

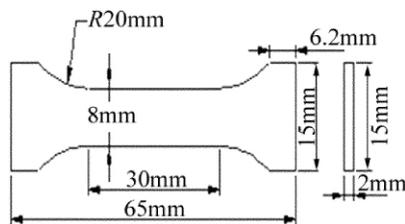


Fig. 3 Specimens schemes

实验共分 5 组试样(WC 体积分数分别为 0.03、0.06、0.09、0.12、0.15),由于工作量原因,每组 4 个试

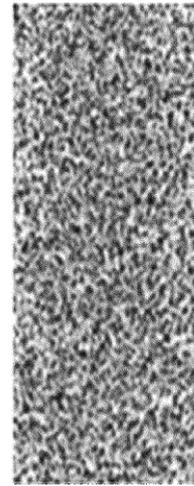


Fig. 4 Artificial speckle image

件,其中两个用于电测法,另外两个用于 DICM 法。由静拉伸实验知,WC/Cu 复合材料的拉伸曲线没有明显的屈服点,只能计算其相对屈服极限,而且相对屈服极限随 WC 体积分数的增加而增加。为了使每组试样拉伸过程中在其相对屈服极限内取相同的数据点,采用不同的加载级差进行加载:1# 试样为 100N;2#、3# 试样为 150N;4#、5# 试样为 200N。采用自动分级加载,先对试样预加载 200N 的力,然后逐级加载采集数据和散斑图,共加载 6 次。为了得到相对稳定的数据,每个试样重复加载 5 次,采集后 3 次的数据和散斑图进行计算。

### 4 数据处理及分析

通常使用低成本的固定焦距镜头或变焦镜头的摄像系统都存在一定程度的成像畸变,对位移测量结果有很大的影响。为获得高精度的位移测量结果,必须通过刚体平移实验对摄像系统的成像畸变进行估计和校正。研究表明<sup>[10]</sup>影响位移测量结果的主要因素为镜头的径向畸变。本文中采用径向畸变模型校正畸变对位移的测量结果。具体方法原理参考相关文献<sup>[3,10-12]</sup>。

运用数字图像相关方法对试样所采集的数字图像进行相关运算时,对每组试样中每相邻两张散斑图(参考图像和目标图像)进行一次相关运算,得出两张散斑图在对应级差下的位移场。计算区域为 200pixels × 1000pixels,μ 方向计算 11 个点,每两个点间距为 20pixels,ν 方向计算 21 个点,每两个点间距为 50pixels。选取计算区域时,应选择图像中试样中间较清晰的部位,以减少边界效应和镜头畸变的影响。通过位移场拟合计算区域的平均应变,最后对每组试样应力应变数据进行线性拟合得到对应试件的弹性模量。由图 5 中给出的应力应变曲线可知,各数据点离散性较小,与电测法相比较,两者吻合较

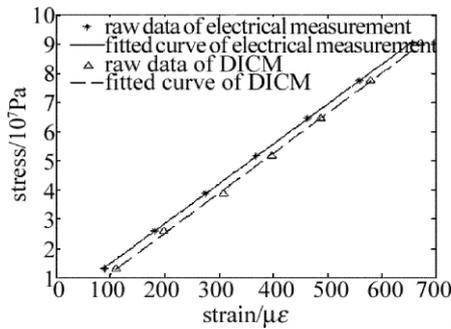


Fig.5 Stress-strain curves fitting diagram of DICM and electric measurement( sample 5#)

好。从表2可以看出随着WC含量的增加其弹性模量 $E$ 呈现递增的趋势。

Table 2 Calculated result from two methods

specimens serial number	DICM $E$ /GPa	electrical measurement $E$ /GPa	relative error/%
1	105.5	107.4	-1.8
2	110.6	113.7	-2.7
3	120.8	123.2	-1.9
4	131.4	129.7	1.3
5	137.3	136.5	0.6

## 5 结论

采用白漆配合碳粉的方法制备出的散斑颗粒细小而且十分均匀,适合于小试件制斑。小应变下镜头畸变对实验结果有一定影响,原始数据经畸变校正后相对误差减小。实验结果显示,DICM数据线性度较好,与传统电测法相比较,相对误差在 $\pm 3\%$ 以内,两者吻合较好。本文中采用的数字图像相关方法和小试件制斑方法经过畸变校正理论校正,计算结果运用于WC/Cu复合材料弹性模量的测定切实可靠,此方法不仅可以测定高温下WC/Cu复合材料弹性模量,也可运用于其它相关材料弹性模量的测量。

## 参考文献

- [1] PENG J C, GUO R X, XIA H T. Effect of Cu/WC functionally graded materials microstructure on its properties [J]. Science Technology and Engineering 2010, 10(12): 1-2 (in Chinese).
- [2] WANG M J, LOU Y, ZHANG H, et al. A study of aluminium oxide dispersion strengthened copper electrodes [J]. Mining and Metallurgical Engineering 2001, 22(4): 48-51 (in Chinese).
- [3] HU B, HE L F, ZHANG R. Digital image correlation method for rubber elastic modulus measurement [J]. Journal of Experimental Mechanics 2011, 26(2): 3 (in Chinese).
- [4] ZHANG R, HE L F. Elastic modulus measurement of strand wire using digital image correlation [J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition) 2010, 31(4): 409-413 (in Chinese).
- [5] PAN B, XU B Q, LI K J. Performance of gradient operators in algorithm of gradient-based subpixel registration [J]. Optical Technique 2005, 31(1): 26-31 (in Chinese).
- [6] PAN B, XIE H M, DAI F L. An investigation of sub-pixel displacements registration algorithms in digital image correlation [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics 2007, 39(2): 245-252 (in Chinese).
- [7] GUO R X, CAI G C, MA K, et al. A comparative study on the sub-pixel displacement calculation methods used in digital speckle measurement [J]. Laser Journal 2005, 25(5): 2-3 (in Chinese).
- [8] WU W P. Sub-pixel displacement algorithm and the experimental research of image correlation technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology 2009: 24-28 (in Chinese).
- [9] FU Z L, CHU J C, MAO X P. Summarization on preparation for particle reinforced metal matrix composites [J]. Modern Electric Power, 2002, 19(6): 2-4 (in Chinese).
- [10] LUO P F, CHAO Y J, SUTTON M A, et al. Accurate measurement of three-dimensional displacement in deformable bodies using computer vision [J]. Experimental Mechanics, 1993, 33(2): 123-132.
- [11] PAN B, XIE H M, CHEN P W, et al. Assessment and correction of lens distortion for digital image correlation [J]. Acta Metrologica Sinica 2009, 30(1): 62-67 (in Chinese).
- [12] SU X H, ZHAO J G, ZHANG H X. Research on distortion of CCD camera [J]. Physics Experimentation, 2003, 23(9): 39-41 (in Chinese).