

文章编号 1004-924X(2013)10-2696-08

# 数字图像相关法在 WC/Cu 复合材料线膨胀系数测量中的应用

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

(1. 昆明理工大学 工程力学系 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, 云南 昆明 650500; 2. 云南大学, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 为了提高数字图像相关曲面拟合法在实际应用中的亚像素定位精度, 对曲面拟合法进行了修正, 并用修正后的曲面拟合法研究了 WC 颗粒大小和含量对 WC/Cu 复合材料线膨胀系数的影响。首先, 分析了曲面相关拟合法在实际应用中的测量误差来源, 并对其进行了修正。然后, 用粉末冶金法制备出 WC/Cu 复合材料, 对表面制备有耐高温散斑的试件进行热膨胀实验, 并利用修正后的曲面拟合法测量了不同温度下 WC/Cu 复合材料的热变形场。最后, 通过一元二次多项式拟合建立了 WC/Cu 复合材料热膨胀系数真值。结果表明: 修正后的曲面拟合法有效地改善了传统方法的亚像素位移在 0.5 像素左右位移场不连续的问题, 减小了亚像素定位误差, 获得了更为准确的测量数据。

**关键词:** WC/Cu 复合材料; 数字图像相关; 曲面拟合法; 亚像素; 线膨胀系数测量

**中图分类号:** O348.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132110.2696

## Application of digital image correlation method in measuring linear expansion coefficients of WC/Cu composites

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

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

\* Corresponding author, E-mail: guorx@kmust.cn

**Abstract:** To improve the sub-pixel registration accuracy of quadratic surface fitting method in digital image correlation, the method was corrected and the corrected quadratic surface fitting method was used to research the effect of sizes and contents of WC on the thermal expansion coefficients of WC/Cu composites. First, the measurement error sources of the quadratic surface fitting method were analyzed in a practical application. Then, WC/Cu composites were prepared by a powder metallurgy method, and thermal expansion tests of the specimen with speckles which can resistant to high temperatures were performed and thermal deformation fields of the WC/Cu Composites under different temperatures were measured by the corrected quadratic surface fitting method. Finally, the truth val-

收稿日期: 2013-04-16; 修订日期: 2013-05-20.

基金项目: 云南省应用基础研究基金面上资助项目 (No. 2011FB029); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目 (No. 20105314110006); 昆明理工大学人才科研启动计划资助项目 (No. 14118195)

ues of the thermal expansion coefficients were given by quadratic polynomials fitting. The experiment result indicates that corrected method effectively improves sub-pixel registration accuracy, especially reduces the displacement fluctuation around 0.5 pixels, and offers more accurate measurement results.

**Key words:** WC/Cu composite; digital image correlation; curved surface fitting method; sub-pixel; linear expansion coefficient measurement

## 1 引言

高强度铜基复合材料是一类具有优良综合性能的新型功能材料。这种材料既有优良的导电性能,又有较高的强度、较好的耐磨性和优越的耐高温性能<sup>[1]</sup>。碳化钨/铜(WC/Cu)复合材料通过在铜基体上添加 WC 颗粒以使铜基增强。这种材料既能够很好地发挥 WC 的高硬度、高熔点、耐磨损的性能,又能发挥铜的高导电、高导热的优良性能,因此常用作需要具有高导电性、高耐磨性、高硬度及抗氧化性的大电流滑动触头的耐磨材料<sup>[2]</sup>。由于基体和颗粒增强材料的热膨胀系数存在差异,使得这类复合材料在加热和冷却过程中,内部会产生局部热应力,这种应力是导致材料产生微裂纹的重要原因<sup>[3]</sup>,会影响材料的疲劳寿命和其它相关性能。若将其应用于精密机械中,温度变化会引起零件尺寸和形状的变化,最终导致机械间相互匹配性能的下降,甚至失效。因此对此类材料热膨胀系数的研究,对于其在复杂热环境中的应用具有重要意义。

数字图像相关方法是一种现代光测力学手段,因其具有对实验环境要求低、可全场测量的优点,被广泛应用于实验力学与工程实际。随着相关技术的发展,新的算法被不断引入。目前从相关文献<sup>[4-10]</sup>中可查到的亚像素位移测量算法的定位精度能达到 0.005~0.1 pixel。其中,有些算法理论上虽具有较高的亚像素测量精度,但实际应用中受散斑质量等各种因素的影响,精度会有所降低,因此,理论上精度相对较高的一些算法还很难用于实际测量中。文献<sup>[11]</sup>指出 Newton-Raphson(N-R)迭代法具有完备的数学、力学理论,目前应用最为广泛;曲面拟合法由于计算简单、精度较高,其应用也相对较多。文献<sup>[12]</sup>对几种常用算法进行了对比研究,得出曲面拟合法较 N-R 迭代法的精度和稳定性低。本文针对这一

问题进行了研究,讨论了测量误差来源,并给出了修正方法。数值实验结果显示,曲面拟合法修正后与 N-R 迭代法的测量均值误差相当,这说明经过修正的曲面拟合法可以有效减小系统的测量误差,提高了测量精度。最后,利用修正曲面拟合法研究了 WC 颗粒大小和含量对 WC/Cu 复合材料线膨胀系数的影响,得到了较为准确的数据,为 WC/Cu 复合材料在实际中的应用提供了参考数据。

## 2 基本原理

### 2.1 曲面拟合法及其修正

相关系数曲面拟合法是以整像素位移点为中心,对其相邻各像素点所在位置处的相关系数进行曲面拟合,通过所拟合曲面上相关系数峰值点

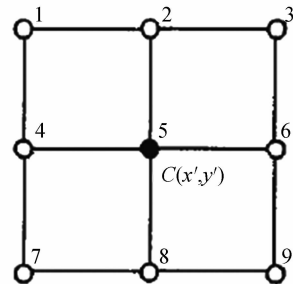


图1 3×3 相关系数曲面拟合法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of curve-fitting method for 3×3 correlation coefficient

的位置来获取物体表面某一点的亚像素位移。一般采用 3×3 小拟合窗口<sup>[13]</sup>对整像素位移搜索到的  $(x', y')$  周围各点的相关系数进行二次多项式拟合。二元二次函数表示为:

$$C(x_i, y_j) = a_0 + a_1 x_i + a_2 y_j + a_3 x_i^2 + a_4 x_i y_j + a_5 y_j^2, \quad (1)$$

式中,  $a_0, \dots, a_5$  可以采用最小二乘法求解。在所拟合曲面相关系数极值点处满足方程:

$$\frac{\partial C(x,y)}{\partial x} = a_1 + 2a_3x + a_4y = 0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial C(x,y)}{\partial y} = a_2 + 2a_5y + a_4x = 0, \quad (3)$$

联立式(2)、式(3),求解便得:

$$x = \frac{2a_1a_5 - a_2a_4}{a_4^2 - 4a_3a_5}, y = \frac{2a_2a_3 - a_1a_4}{a_4^2 - 4a_3a_5}. \quad (4)$$

在实际测量中,受散斑图质量和其他相关因素的影响,用式(1)所示函数形式对相关系数矩阵进行曲面拟合时,所拟合曲面上峰值点位置与实际的亚像素位移会存在一定误差,使得亚像素计算结果与实际亚像素位移发生了一定的偏离。而且当亚像素位移在 0.5 pixels 左右,相邻 2 个计算点的整像素定位不同时,对应的相关系数矩阵会发生较大的非正常波动,这将导致此位置位移的不连续。针对此问题,本文开展了相关研究,通过提高相关系数矩阵中心点的相关系数可以有效减小上述问题带来的测量误差。提高相关系数矩阵中心点相关系数的目的是为了使相关系数曲面相对陡峭,从而减小周围点相关系数随机微小波动对相关系数曲面峰值点定位的影响。具体修正方法如下:

$$C_c = E + lbC, \quad (5)$$

$$C = \begin{bmatrix} C(1,1) & C(1,2) & C(1,3) \\ C(2,1) & C(2,2) & C(2,3) \\ C(3,1) & C(2,2) & C(3,3) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式(5)中  $E$  为对应的 3 阶单位矩阵。

本文采用的相关函数为标准化协方差相关函数<sup>[13]</sup>。式(5)的作用是不同幅度地改变  $C(i,j)$  对拟合曲面峰值点位置的影响因子,即权函数,可以有效减小数据的波动。然后分别从  $x,y$  2 个方向提高相关系数矩阵中心点的相关系数,具体公式如下:

$$c_x = C_c(2,2) + \frac{|C(2,1) - C(2,3)|}{L^k}, \quad (7)$$

$$c_y = C_c(2,2) + \frac{|C(1,2) - C(3,2)|}{L^k}. \quad (8)$$

式(7)、式(8)中的  $L$  为在  $x$  或  $y$  方向上,与相关系数中心点相邻的 2 个点之间的距离,这里  $L = 2, k$  为修正系数。经大量实验研究发现,  $k \in [4, 6]$  时具有较好的修正效果,并且对于质量较高的散斑图要采用较大的  $k$  值,对于质量较差的散斑图要采用较小的  $k$  值来修正。经上述方法修正后,新的相关系数矩阵分别为  $C_{cx}$  和  $C_{cy}$ 。

$$C_{cx} = \begin{bmatrix} C_c(1,1) & C_c(1,2) & C_c(1,3) \\ C_c(2,1) & c_x & C_c(2,3) \\ C_c(3,1) & C_c(3,2) & C_c(3,3) \end{bmatrix}, \quad (9)$$

$$C_{cy} = \begin{bmatrix} C_c(1,1) & C_c(1,2) & C_c(1,3) \\ C_c(2,1) & c_y & C_c(2,3) \\ C_c(3,1) & C_c(3,2) & C_c(3,3) \end{bmatrix}. \quad (10)$$

最后用式(1)所示的二元二次函数分别对  $C_{cx}, C_{cy}$  进行拟合求解,取  $C_{cx}$  的  $x$  解作为修正  $x$  解,  $C_{cy}$  的  $y$  解作为修正  $y$  解。

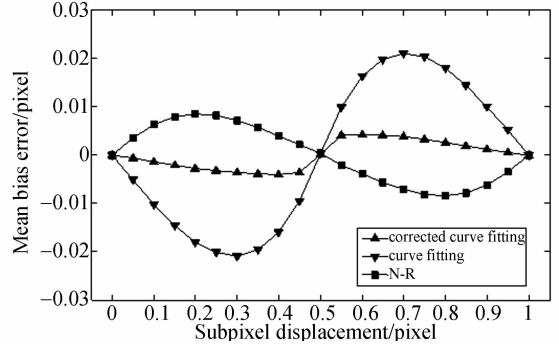


图 2 散斑图刚体平移 0~1 pixels 时,3 种亚像素位移测量方法的均值误差

Fig. 2 Mean errors of three sub-pixel registration algorithms when displacement range of speckle pattern rigid is 0-1 pixels

对由相关实验所获得的散斑图进行模拟平移,再用未修正及修正后的曲面拟合法以及 N-R 方法计算得到在 0~1 pixel 内的平移量的计算均值误差曲线,由图 2 可以看出,修正曲面拟合法的计算均值误差绝对值相对原拟合法的明显减小,与 N-R 方法基本相当,这说明修正方法可以有效减小系统测量误差。图 3、图 4 分别为本文热膨胀实验中某一温度时刻,利用原曲面拟合法和修

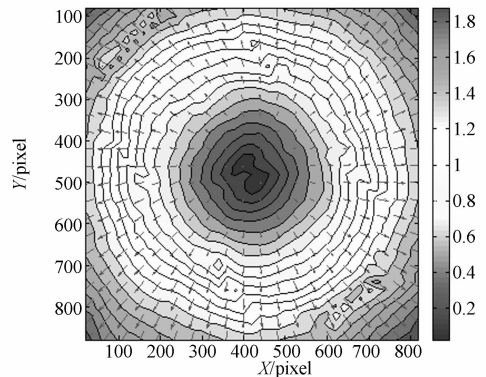


图 3 原曲面拟合法计算得到的热变形场

Fig. 3 Thermal deformation fields calculated by original surface fitting method

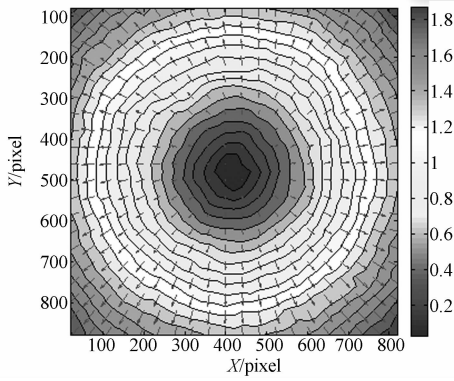


图 4 修正曲面拟合法计算得到的热变形场

Fig. 4 Thermal deformation fields calculated by corrected surface fitting method

正曲面拟合法对同一区域计算得到的热变形场的对比图。可以明显看出,图 4 在亚像素位移为 0.5 pixel 左右的位移等高线相对图 3 光滑,并且没有明显波动。

### 2.2 线膨胀系数真值确定

固态金属的热膨胀是指金属晶体的线度和体积随温度升高而增大的现象。金属的线膨胀系数是表征线膨胀特性的一个物理量。金属材料的伸长和温度的关系,通常用一个经验公式表示:

$$L_2 = L_1 [1 + \alpha(T_2 - T_1)] \quad (11)$$

$L_1, L_2$  分别是温度为  $T_1, T_2$  时物体的长度。

$\alpha$  称为平均线膨胀系数,由式(11)可知:

$$\alpha = \frac{(L_2 - L_1)}{(T_2 - T_1)} \cdot \frac{1}{L_1} \quad (12)$$

令  $L_2 - L_1 = \Delta L; T_2 - T_1 = \Delta T$ 。当  $\Delta T$  趋近于零时,  $L_1$  或用  $L_T$  表示。上式可写成<sup>[14]</sup>:

$$\alpha_T = \frac{1}{L_T} \cdot \frac{dL}{dT} \quad (13)$$

$\alpha_T$  称为材料在温度  $T$  时的线膨胀系数真值。线膨胀系数的单位为  $K^{-1}$  或  $^{\circ}C^{-1}$ 。本文用修正后的曲面拟合法确定了不同温度下试样表面的平均热应变后,对离散的热应变数据进行二次多项式拟合以确定线膨胀系数真值。拟合多项式为:

$$S(T) = aT^2 + bT + c \quad (14)$$

于是,不同温度下被测试样的线膨胀真值为:

$$\alpha_T = 2aT + b \quad (15)$$

## 3 实验

### 3.1 试样制备

本文用粉末冶金法制备 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。所采用的 4 种碳化钨颗粒的平均粒径大小分别为 1.24、3.75、6.75、9.75  $\mu m$ , 5 种碳化钨体积含量分别为 3%、6%、9%、12%、15%。按预先设定的碳化钨平均粒径和体积分数,将碳化钨和铜粉分别放入球磨机中进行球磨混粉,将混合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 10 Pa 以下,然后以 15  $^{\circ}C/min$  的速度使其升温到 200  $^{\circ}C$ ,压力保持在 1 MPa,再以较低的升温速度(10  $^{\circ}C/min$ )使其升至烧结温度 950  $^{\circ}C$ ,匀速加压至 30 MPa,保温保压 2 h,最后随炉冷却至室温<sup>[15]</sup>。

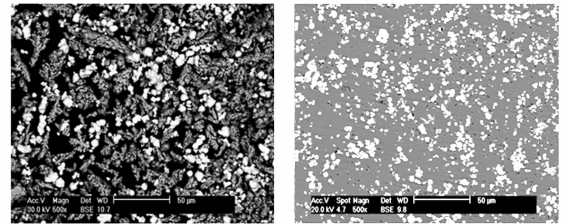


图 5 混合粉末及试件表面形貌图

Fig. 5 Morphology of mixed powder and specimen surface

### 3.2 实验过程

实验之前,对本文用粉末冶金方法制备的毛坯试样进行加工处理。由于本文用数字图像相关方法测量试件受热后的热变形,因此要对试样表面进行制斑处理,如果是常温下,用传统黑白喷漆制备的散斑颗粒已满足测量要求,但是在高温环境下,利用传统方法制备的散斑颗粒会随着环境温度升高被氧化或烧蚀<sup>[16]</sup>,温度较高时会发生明显的退斑现象,不适用于数字图像相关测量方法。本文采用耐高温银色喷漆和碳粉颗粒制备适合于高温环境下的散斑颗粒。采用碳粉可以制备颗粒大小可控,而且十分均匀的散斑场,虽然银色喷漆在高温下会发生局部灰度变化,但碳粉颗粒几乎不会发生任何变化,整体依然可以保持较高的相关性。

实验是在带观察窗的高温炉中进行的,由于受高温炉内部空间的限制,试样尺寸为 20 mm  $\times$  20 mm  $\times$  2 mm。需保证试件不受约束,随温度的

升高可以向四周自由膨胀,并且需保证试件表面与外部 CCD 光轴垂直。实验中采用冷光源照明。图像采集系统采用分辨率为 2 048 pixel×1 536 pixel 的 CCD。计算区域为居于试件中间部分的正方形区域,该区域大小为 800 pixel×800 pixel,对应实际大小为 13 mm×13 mm,计算步长为 20 pixel,子区大小为 71 pixel×71 pixel。高温炉加热速率为 20 °C/min,每个温度值保温 8 min,温差控制在±0.5 °C 内。

3.3 数据处理

数据处理过程以 20 °C 时采集的散斑图作为参考图像,其它温度时刻采集的散斑图作为目标图像。用 2.1 中修正后的曲面拟合法进行计算,得到了不同温度时刻计算区域  $x$  和  $y$  方向的热变形场,通过线性拟合得到对应温度时刻  $x$  和  $y$  方向的热应变。图 6 为 100 °C 时试件(WC 体积含量为 15%、WC 平均粒径为 1.24  $\mu\text{m}$ )表面计算区域的散斑图和与之对应的热变形场。图 7 为 450 °C 时试件表面计算区域的散斑图和与之对应的热变形场。经过线性拟合,可得此时  $x$  和  $y$  方向的热应变分别为 7 922  $\mu\epsilon$ 、7 720  $\mu\epsilon$ ;平均热应变为 7 821  $\mu\epsilon$ ;计算区域内最大位移量达到了 4.5 pixel(刚体位移已消除)。从图 6、图 7 可以看出,450 °C 时计算区域的散斑图灰度值比 100 °C 时虽略有增大,但依然保持良好的相关性。由于篇幅限制,本文仅用 15% 体积含量的 WC 来研究颗粒大小(1.24、3.75、6.75、9.75  $\mu\text{m}$ )对 WC/Cu 复合材料线膨胀系数的影响;用平均粒径为 1.24  $\mu\text{m}$  的 WC 颗粒大小研究 WC 体积含量(3%、6%、9%、12%、15%)对 WC/Cu 复合材料线膨胀系数的影响。图 9、图 10 分别为实验获得的不同颗粒大小及不同含量的热应变随温度变化的曲线。

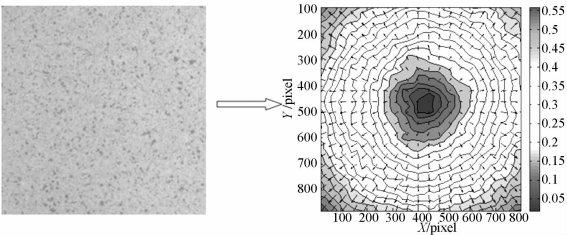


图 6 试样表面温度为 100 °C 时区域散斑图像和热变形场计算结果

Fig. 6 Calculation results of surface speckle image and thermal deformation field for sample with surface temperature of 100 °C

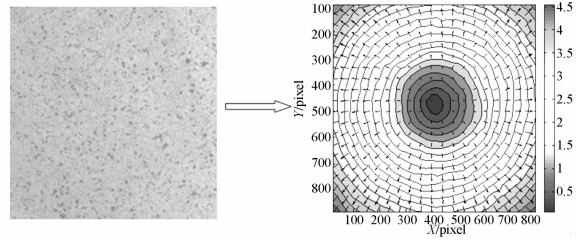


图 7 试样表面温度为 450 °C 时的区域散斑图像和热变形场的计算结果

Fig. 7 Calculation results of surface speckle image and thermal deformation field for sample with surface temperature of 450 °C

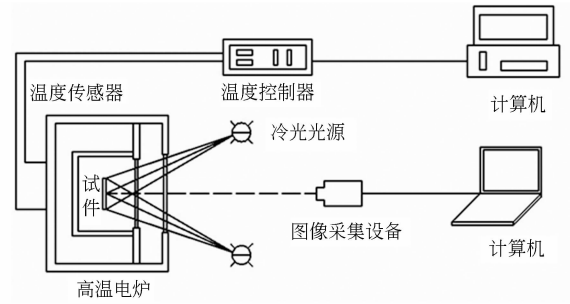


图 8 实验装置示意图

Fig. 8 Schematic diagram of experimental setup

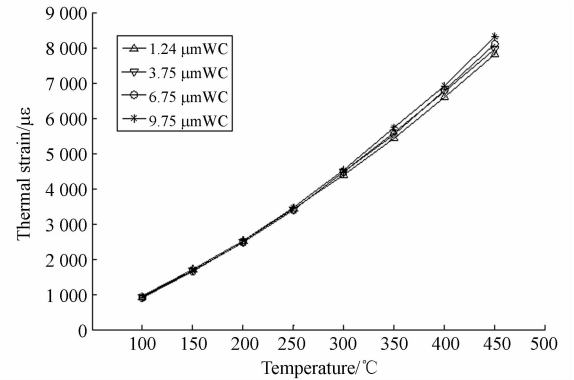


图 9 不同 WC 粒径下 WC/Cu 复合材料在 100~450 °C 时的热应变曲线图

Fig. 9 Thermal strain curves of WC/Cu composite with different WC grain sizes and temperature range of 100–450 °C

用 2.2 所述方法对图 9 的热应变数据进行拟合处理,得到如下方程:

$$\begin{cases} \alpha_{T1.24}(T) = 0.0304T + 11.28 \\ \alpha_{T3.75}(T) = 0.0336T + 11.03 \\ \alpha_{T6.75}(T) = 0.0383T + 10.02 \\ \alpha_{T9.75}(T) = 0.0422T + 9.45 \end{cases} \quad (16)$$

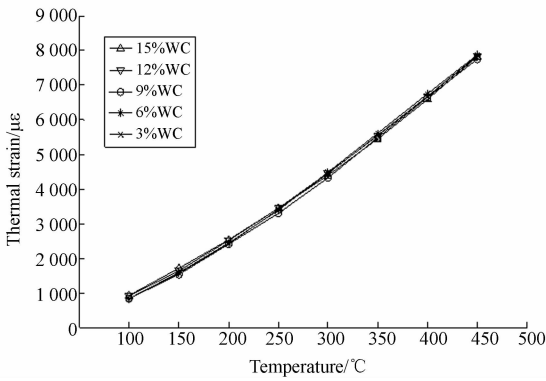


图 10 不同 WC 含量下 WC/Cu 复合材料在 100~450 °C 时的热应变曲线

Fig. 10 Thermal strain curves of WC/Cu composite with different WC contents and temperature range of 100-450 °C

从式(16)可以看出, WC/Cu 复合材料的线膨胀系数随温度的升高而增大。对于相同的体积含量(15%), 式(16)中的一次项系数随 WC 颗粒

的增大而增大, 这说明随着颗粒的增大, WC/Cu 复合材料的线膨胀系数增大, 而且这种影响随温度的升高越来越明显。而在颗粒大小相同(1.24 μm)的情况下, 本文采用的 5 种较低体积分含量的 WC 对 WC/Cu 复合材料的线膨胀系数的影响很微小, 图 10 中, 几种不同 WC 体积分含量的 WC/Cu 复合材料的热应变曲线几乎重叠在一起, 没有呈现一定的规律。这一方面是由材料本身的性质所致, 另一方面是由于采用数字图像相关方法测量热应变的过程中会受到一定因素影响, 主要有 3 个方面: (1) 在热应变测量中, 保持温控设备的控制温度与试件温度一致很重要, 二者的不同步以及温控设备产生的温控误差都会降低测量精度。(2) 高温状态下, 物体表面的热辐射会使相机采集到的图像亮度增强。(3) 随着温度的升高, 虽然经过特殊处理, 但试件表面人工制备的散斑还是会受温度影响, 从而使本身质量有所下降, 并导致测量误差。

表 1 WC/Cu 复合材料线膨胀系数计算值  $\alpha_t$  ( $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )

Tab. 1  $\alpha_t$  ( $\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ) of WC/Cu composites

WC 体积含量	WC 平均粒径/ $\mu\text{m}$	$t/^\circ\text{C}$									
		20	50	100	150	200	250	300	350	400	450
15%	1.24	11.89	12.80	14.32	15.84	17.36	18.88	20.39	21.91	23.43	24.95
	3.75	11.70	12.71	14.39	16.07	17.75	19.43	21.11	22.79	24.47	26.15
	6.75	10.79	11.94	13.85	15.77	17.68	19.6	21.52	23.43	25.35	27.26
	9.75	10.29	11.59	13.70	15.80	17.91	20.02	22.10	24.23	26.34	28.45

表 1 给出了实验温度范围内 WC/Cu 复合材料线膨胀系数真值。而通过实验获取的线膨胀系数一般是常温(20 °C 左右)至另一温度之间的平均值, 对于某一特定温度区间的平均线膨胀系数通过实验较难获取。而通过实验建立线膨胀系数真值, 可以较准确地获取实验温度范围内任意温度区间的平均线膨胀系数。本文用二次多项式拟合建立线膨胀系数真值。计算某一温度区间平均线膨胀系数时取真值  $\alpha_t$  的算术平均数<sup>[17]</sup>。例如:

$$\alpha_{20-450} = \frac{\alpha_{20} + \alpha_{450}}{2} = \frac{11.89 + 24.95}{2} \times 10^{-6} = 18.42 \times 10^{-6} (\text{C})^{-1}.$$

本文通过实验直接获得的数值为  $18.19 \times 10^{-6} (\text{C})^{-1}$ , 相对误差为 1.3%, 这说明针对本文实验用二次多项式拟合来建立线膨胀系数真值是较准确的。表 1 数据仅供参考, 且仅限于相同制备工

艺和相关材料参数。

## 4 结 论

本文通过对数字图像相关曲面拟合法的修正提高了其在实际应用中的测量精度。用修正后的曲面拟合法研究了不同 WC 颗粒大小和不同 WC 含量对 WC/Cu 复合材料线膨胀系数的影响。实验结果显示: 颗粒含量相同时, WC/Cu 复合材料线膨胀系数随颗粒尺寸的增大而增大, 而且随温度的升高这种影响越加明显; 而颗粒尺寸相同时, 在采用较低的 WC 体积分含量的情况下, 含量对 WC/Cu 复合材料线膨胀系数的影响并不明显。这说明 WC 体积分含量较低时, 含量对 WC/Cu 复合材料线膨胀系数的影响不大, 远低于颗粒大小对 WC/Cu 复合材料线膨胀系数影响的程度。因

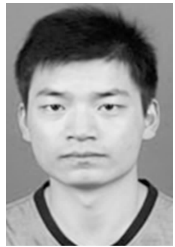
此制备此类材料时,增强颗粒尺寸不易过大,这样可以减小由于热膨胀给材料性能带来的不利影响。本文用一元二次多项式拟合建立了 WC/Cu 复合材料热膨胀系数真值方程,由式(16)计算得

### 参考文献:

- [1] 李晓杰,王占磊,李瑞勇,等. 爆炸粉末烧结法制取 WC/Cu 复合材料的研究[J]. 材料开发与应用, 2006,21(3): 16-17.  
LI X J, WANG ZH L, LI R Y, *et al.*. Experimental study on WC/Cu composites produced by explosive powder compaction [J]. *Development and Application of Materials*, 2006,21(3):16-17. (in Chinese)
- [2] KIYOSHI. Electric conductivity and mechanical properties of carbide dispersion strengthened copper prepared by compocasting [J]. *Materials Transaction JIM*, 1993,34(8): 718-724.
- [3] 花世群, 骆英, 花世荣, 等. 基于条纹跟踪实现热膨胀系数的高精度自动测量[J]. 光电子·激光, 2007,18(11): 1344-1345.  
HUA SH Q, LUO Y, HUA SH R, *et al.*. High precision automatic measurement of thermal expansion coefficient based on tracing interference fringe [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2007, 18 (11):1344-1345. (in Chinese)
- [4] 陈华, 叶东, 陈刚, 等. 遗传算法的数字图像相关搜索法[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(10): 1634-1637.  
CHEN H, YE D, CHEN G, *et al.*. Digital image correlation search method based on genetic algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(10): 1634-1637. (in Chinese)
- [5] 李新忠, 岱钦, 王希军, 等. 多尺度小波降噪的数字散斑相关搜索[J]. 光学 精密工程, 2007, 15(1): 58-62.  
LI X ZH, DAI Q, WANG X J, *et al.*. Digital speckle correlation method of multi-scale wavelet noise reduction [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(1): 58-62. (in Chinese)
- [6] 肖振中, 徐爱珠, 安顺泰, 等. 用基于种子点的三维图像相关法测量连续大变形[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(9): 2278-2282.  
XIAO ZH ZH, XU A ZH, AN SH T, *et al.*. Measurement of large deformation by digital image correlation method based on seed point [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2278-2282. (in Chinese)
- [7] 于起峰. 基于图像的精密测量与运动测量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.  
YU Q F. *Precise Measurement and Motion Measurement Based on Image* [M]. Beijing: Science Press, 2002. (in Chinese)
- [8] 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.
- [9] WANG H W, KANG Y L. Improved digital speckle correlation method and its application in fracture analysis of metallic foil [J]. *Opt. Eng.*, 2002, 41 (11): 2793-2798.
- [10] ZHOU P, GOODSON K E. Sub-pixel displacement and deformation gradient measurement using digital image/speckle correlation [J]. *Opt. Eng.*, 2001, 40 (8): 1613-1620.
- [11] 潘兵, 谢惠民, 续伯钦, 等. 数字图像相关中的亚像素位移定位算法进展[J]. 力学进展, 2005, 35(3): 345-351.  
PAN B, XIE H M, XU B Q, *et al.*. Development of sub-pixel displacements registration algorithms in digital image correlation [J]. *Advances in Mechanics*, 2005, 35(3): 345-351. (in Chinese)
- [12] PAN B, XIE H M, XU B Q, *et al.*. Performance of sub-pixel registration algorithms in digital image correlation [J]. *Measurement Science and Technology*, 2006, 17(6): 1615-1621.
- [13] 潘兵, 续伯钦, 冯娟, 等. 关于数字图像相关中曲面拟合法的几点讨论[J]. 实验力学, 2005, 20: 44-50.  
PAN B, XU B Q, FENG J, *et al.*. Sub-pixel registration using quadratic surface fitting in digital image correlation [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2005, 20: 44-50. (in Chinese)
- [14] 宋学孟. 金属物理性能分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981, 76.  
SONG X M. *Analysis on the Physical Properties of Metal* [M]. Beijing: China Machine Press, 1981, 76. (in Chinese)

- [15] GUO R X, YAN F, XIA H T. Microstructure and properties of WCp/Cu layered functionally graded materials prepared by vacuum hot-pressed sintering [C]. *Applied Materials and Electronics Engineering*, 2012, Part1:47-50.
- [16] 潘兵, 吴大方, 高镇同. 基于数字图像相关方法的非接触高温热变形测量系统[J]. *航空学报*, 2010, 31(10): 1964-1965.
- PAN B, WU D F, GAO ZH T. A non-contact high-temperature deformation measuring system based on digital image correlation technique [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2010, 31(10):1964-1965. (in Chinese)
- [17] 丁鸿章. 工程金属材料线膨胀系数的计算[J]. *浙江工业大学学报*, 2000, 28(4): 358-366.
- DING H ZH. Calculation of linear expansion coefficient of metallic materials [J]. *Journal of Zhejiang University of Technology*, 2000, 28(4):358-366.

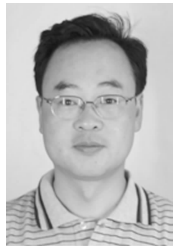
#### 作者简介:



**俞海** (1986—), 男, 甘肃古浪人, 博士研究生, 主要从事数字光测实验力学及金属基复合材料断裂与损伤方面的研究。E-mail: yuhai1212@126.com



**夏海廷** (1977—), 男, 黑龙江双鸭山人, 副教授, 博士研究生, 2000年、2003年于北京航空航天大学获得分别学士、硕士学位, 主要研究方向为损伤与断裂力学、复合材料力学。E-mail: htx-ia2006@163.com



**郭荣鑫** (1964—), 男, 云南江川人, 教授, 博士生导师, 1985年、1988年于华东理工大学分别获得学士、硕士学位, 2009年于昆明理工大学获得博士学位, 主要从事数字光测实验力学, 多场耦合下金属基复合材料的宏微观损伤与断裂研究。E-mail: guorx@kmust.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)