

数字图像相关技术在高温热膨胀系数测量中的应用

徐忠营, 王伟, 孟松鹤, 解维华, 易法军

(哈尔滨工业大学 复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150080)

摘要: 目的 测量热结构材料在高温环境下的热膨胀系数, 方法 将数字图像相关(DIC)技术和通电加热技术相结合, 建立高温热变形测量系统。该系统使用CCD相机采集不同温度下试样的表面图像, 经DIC方法分析处理得到被测材料随温度升高产生的变形和应变, 进一步计算得到相应温度下的热膨胀系数。测量紫铜、石墨分别在600~800℃, 600~1200℃范围内的热膨胀系数, 并与文献数据进行比较。结果 使用该实验系统测量得到了紫铜和石墨分别在600~800℃, 600~1200℃范围内的热膨胀系数, 与文献参考值吻合较好。结论 该测量方法可精确得到导电材料的热应变及热膨胀系数, 测量温度上限可达1200℃。

关键词: 高温; 热变形; 数字图像相关技术; 石墨; 热膨胀系数

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2016.03.006

中图分类号: TJ06 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2016)03-0037-06

Application of Digital Image Correlation Technique in Measuring Coefficient of Thermal Expansion at High Temperature

XU Zhong-ying, WANG Wei, MENG Song-he, XIE Wei-hua, YI Fa-jun

(Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

ABSTRACT: Objective To measure thermal expansion coefficient (CTE) of heat structures materials at high temperature. **Methods** Combining the digital image correlation (DIC) method and energized resistance heating technology, a test system for measuring high-temperature deformation and strain was established. After recording the surface images at different temperatures by a CCD camera, DIC method was used to analyze all the images to obtain the deformation and strain along with increasing temperature, and the corresponding thermal expansion coefficients at different temperatures were further calculated. This paper measured the thermal expansion coefficients of copper in the range of 600~800℃, and measured the graphite's CTE in the

收稿日期: 2016-01-25; 修订日期: 2016-02-20

Received: 2016-01-25; Revised: 2016-02-20

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(11272107); 国家重点基础研究发展计划(2015CB655200)

Foundation: Supported by the National Natural Science Foundation of China(11272107) and the National Basic Research Program of China(2015CB655200)

作者简介: 徐忠营(1991—), 男, 黑龙江人, 硕士研究生, 主要研究方向为防热材料及其表征。

Biography: XU Zhong-ying(1991—), Male, from Heilongjiang, Master graduate student, Research focus: thermal protection materials and characterization.

通讯作者: 孟松鹤(1969—), 男, 内蒙古人, 教授, 博导, 主要研究方向为超高温防热材料的测试与表征。

Corresponding author: MENG Song-he(1969—), Male, from Inner Mongolia, Professor, Doctoral tutor, Research focus: testing and characterization of ultra-high temperature heat-resistant materials.

range of 600 ~1200 °C, comparing with literature data. **Results** The CTE of copper was in the range of 600 ~800 °C and graphite in the range of 600~1200 °C as, measured by this system, showing that the data were in good agreement with the literature. **Conclusion** This method showed the ability to accurately measure thermal strain and CTE of conductive material, and its temperature limit reached up to 1200 °C.

KEY WORDS: high temperature; thermal deformation; digital image-related techniques; graphite; thermal expansion coefficient

科学技术日新月异,如今的高速飞行器速度可达数马赫,高速飞行的飞行器将与空气发生剧烈摩擦产生气动加热现象,这会使飞行器表面材料和结构产生热应变,使得材料的强度发生变化,因此研究材料的高温热膨胀及热应变具有重要的意义。

测量高温热变形主要有接触式和非接触两种方法,接触式测量元件要与试件接触,因此会影响测量的精度,非接触式则没有此缺点。数字图像相关技术是一种重要的非接触式测量方法^[1],同时也是一种测量应变和位移的强大工具^[2-6]。Bora Gencturk^[7]通过数字图像相关方法测量了混凝土的结构元件的预应力,结果与其他常规仪器结果对比发现,数字图像相关技术测量应变是准确可行的。在高温测量方面,Anwander 和潘兵等人^[8-10]对 DIC 方法在高温测量实验的应用进行了研究。Hao Zhang 等人^[11]通过实验证实了紫外线 DIC 可以实现高温测量,并能有效地除去高振动和噪音的干扰。X Chen 等^[12]通过在表面涂氧化锆的方式防止试件表面在高温下被氧化。Holzweissig^[13]揭示了热辐射是不可避免的,并不能通过实验的方法消除热辐射,但是通过改进实验设备的方式可以减少热辐射的影响。Leplay 等人^[14]使用蓝宝石滤光镜减少了热辐射对图像信息采集的影响。Wang Shen^[15]等人通过建立灰度水平与热辐射之间的关系,对所得光学图像进行矫正从而减少热辐射的影响。

对于高温环境下尤其是高于 600 °C 的温度下的热变形,一直没有既简单又有效的设备与技术。为了测量超高温材料的热膨胀系数,笔者搭建了一种新的基于数字图像相关方法的超高温热变形测量系统,通过测量紫铜和石墨的膨胀系数,验证了该方法测量材料在超高温下热膨胀系数的可行性。

1 热变形测量原理

1.1 DIC 方法的原理

数字图像相关方法是通过记录并分析被测试

样表面变形前后(参考图像和目标图像)两幅数字图像的位移信息,找出匹配信息,从而计算全场位移的一种光学测量方法。其基本原理如图 1 所示,选取像素大小为 $(2M+1) \times (2M+1)$ 的正方形参考子区,特征点 P 为中心。图 1b 为变形后图像,通过一定的匹配追踪方法和相关计算算法,来自动追踪匹配变形后的特征点,该点所对应的目标函数达到极值,由以 P' 为中心的目标图像子区的空间位置即可得到所选特征点变形后在二维空间的位移分量 u, v 。为了得到被测物体表面全场的位移信息,当利用 DIC 方法进行计算时常常将参考图像中感兴趣的待计算区域划分为虚拟的网格形式,通过计算每个节点的位移得到全场的位移。从图 1 可以看出,目标图像子区与参考图像子区相比,中心位置和形状都发生了变化。

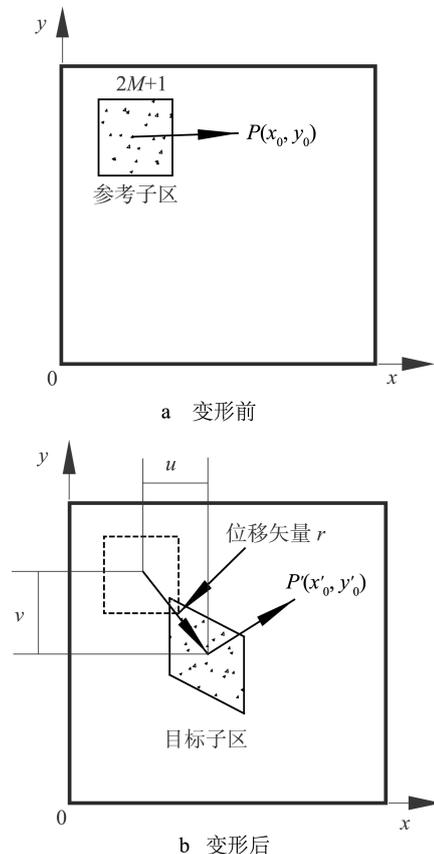


图 1 DIC 方法的基本原理

Fig.1 The basic principle of DIC method

为了表征图像子区在变形前后两幅散斑图像相似程度，定义了如下的相关函数^[16]：

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

式中： f_m ， g_m 分别为参考图像子区和目标图像子区灰度的平均值， $f_m = \frac{1}{2M+1} \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M (f(x,y))^2$ ， $g_m = \frac{1}{2M+1} \sum_{x=-M}^M \sum_{y=-M}^M (g(x',y'))^2$ ； $f(x,y)$ 为参考图像子区中坐标为 (x,y) 点的灰度； $g(x',y')$ 为目标图像子区中点 (x',y') 的灰度； \bar{p} 为待定参数矢量。

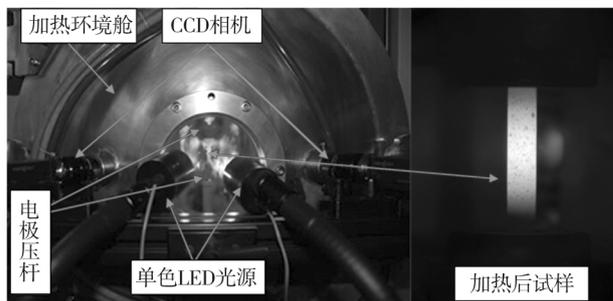


图 2 高温热变形测量系统

Fig.2 High-temperature thermal deformation measurement system

1.2 热膨胀系数的计算原理

由 DIC 的方法得到试样的表面随温度变化的数据后，对该数据进行二次多项式拟合，即多项式：

$$\varepsilon(T) = AT^2 + BT + C \quad (2)$$

拟合多项式可得到 A ， B 和 C 的值，其中膨胀系数可用式 (2) 得到：

$$\alpha = \frac{\Delta L}{L \cdot \Delta T} = \frac{\varepsilon}{\Delta T} \quad (3)$$

求得应变与温度的关系后，将公式 (2) 对温度 T 求导可得膨胀系数 α 与温度 T 的关系，从而可得试样各个温度的膨胀系数。如果 DIC 所测的应变是准确的，那么所得到的热膨胀系数就是较精确的。

2 实验

2.1 高温热变形测量系统

高温热应变测量系统的结构如图 2 所示。试件、夹具与电极紧密连接形成通电回路，当试件中流通有较大电流时，试件由于焦耳效应会发热。文中使用了蓝光带通滤镜，以及单色 LED 光源补光等设备。图像采集设备为 Point Gray 公司的工业 CCD 相机（型号 GRAS-50S5M-C，镜头为 Schneider Kreuznach Xeonplan f/2.8-50 mm）。相机的一些参数：最大分辨率为 2448(H) × 2048(V)；像素大小为 4.40 μm × 4.40 μm；快门速度为 0.02 ms ~ 10 s。

2.2 准确性验证

为了验证该系统测量的热应变及热膨胀系数的准确性，采用紫铜进行 600~800 °C 温度范围的验证实验，试件尺寸为 10 mm × 10 mm × 50 mm，制备 3 个试样进行测量。实验过程如图 3 所示，分两个阶段：

1) 将紫铜放入加热环境舱，关闭反应舱使压力降至 5 Pa 以下，并保持真空度。通过电极压杆施加 100 N 预载荷，设定力传感参数。

2) 保持 100 N 预载荷，设定好升温速率，打开水冷，开始升温，温度达到 600 °C 时采集试样表面应变信息，并记录加热温度数据，到 800 °C 结束。

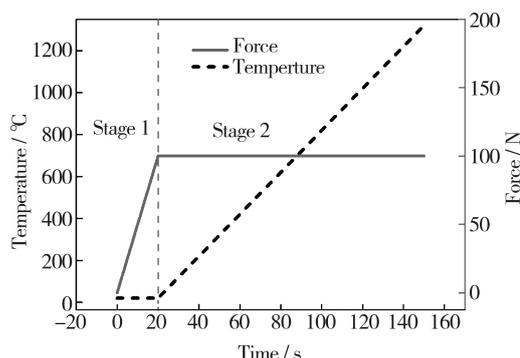


图 3 试件升温及载荷加载过程曲线

Fig.3 Specimen temperature increasing and loading curves

紫铜表面比较光滑，对光线有很强的反射能力，因此制作高温散斑时先喷涂一层白色高温基底，再喷涂黑色高温散斑，提高散斑的高对比度。涂了一层白色基底，并喷涂了高温散斑的紫铜试件

如图 4a 所示, 受热后的位移场如图 4b 所示。由图 4 可知, 位移场变化是比较均匀的, 说明紫铜试样在受热后均匀膨胀。

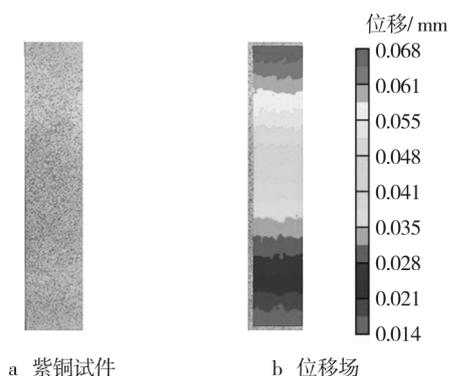


图 4 紫铜试件及其位移场

Fig.4 Copper specimen and its displacement field

试件的横向和纵向应变曲线如图 5 所示, 可以看出, 紫铜在两个方向的应变基本一致, 因此施加的 100 N 荷载对试件的热膨胀系数不会产生明显的影响。

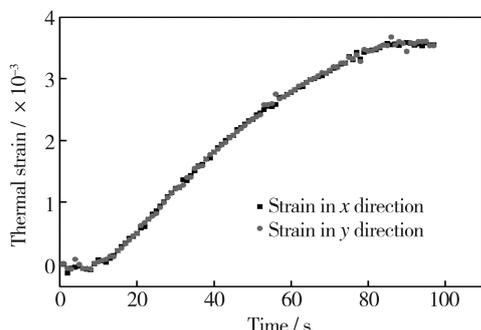


图 5 横向和纵向的应变随时间的变化曲线

Fig.5 Transverse and longitudinal strain-time curves

为了计算紫铜的热膨胀系数, 首先利用实验所得数据绘制出紫铜应变随温度的关系曲线, 然后利用公式 (3) 对所得温度应变数据进行二次多项式拟合, 如图 6 所示, 可得拟合曲线方程为:

$$\varepsilon(T) = 8.28 \times 10^{-9} T^2 + 1.01 \times 10^{-5} T - 9.03 \times 10^{-3} \quad (5)$$

最后再将方程 (5) 对温度 T 求导得到温度-热膨胀关系曲线方程为:

$$\alpha = 1.66 \times 10^{-8} T + 2.03 \times 10^{-5} \quad (6)$$

由方程 (6) 绘制出的温度-膨胀系数曲线如图 7 中 600~800 °C 温度区间的虚线所示, 实线是在 MatWeb (可搜索的在线工程材料数据库网站) [17] 中查到的在不同温度下紫铜热膨胀系数数据。由图 7 可知, 所测得的热膨胀系数与文献参考值吻合较

好, 表明了文中方法测量得到的高温热膨胀系数的准确性。

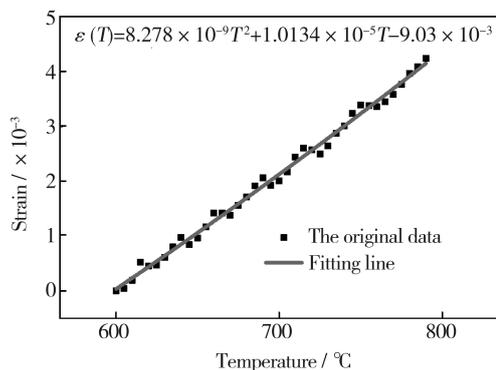


图 6 实验获得的紫铜的温度-应变曲线

Fig.6 Temperature-strain curve of copper obtained by DIC

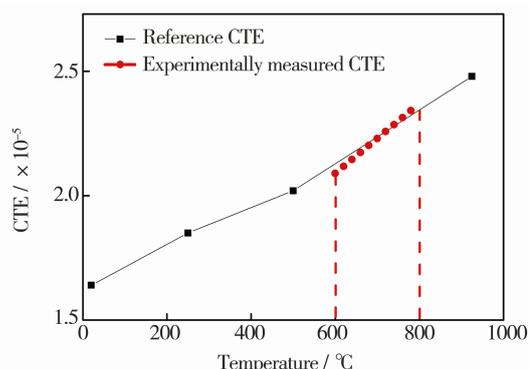


图 7 600~800 °C 范围内紫铜的热膨胀系数

Fig.7 Expansion coefficient of copper in the temperature range of 600~800 °C

2.3 更高温度可行性验证

为了验证该方法在更高温度下的可行性, 进行了石墨在 600~1200 °C 温度范围内的高温验证实验。所选高强石墨的尺寸为 10 mm×10 mm×50 mm, 制备 3 个试样进行测量。石墨表面经 800 目和 1000 目砂纸先后打磨, 用棉签和酒精将表面杂质清洗干净。使用耐高温涂料在石墨表面制作高对比度的散斑, 如图 8a 所示, 其纵向位移场如图 8b 所示, 可以看出, 位移场变化是比较均匀的, 说明石墨试样在超高温的环境中均匀膨胀。

与上述测量紫铜 CTE 步骤相同, 首先绘制石墨在温度 600~1200 °C 下的温度-应变曲线, 如图 9 所示。经二次多项式拟合及求导可分别得到拟合曲线方程 (7) 和热膨胀曲线方程 (8):

$$\varepsilon(T) = 1.67 \times 10^{-9} T^2 + 3.28 \times 10^{-6} T - 2.53 \times 10^{-3} \quad (7)$$

$$\alpha = 3.34 \times 10^{-9} T + 6.56 \times 10^{-6} \quad (8)$$

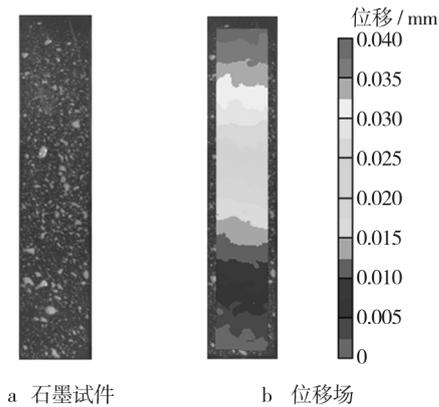


图 8 石墨试样及其位移场

Fig.8 Graphite sample and its displacement field

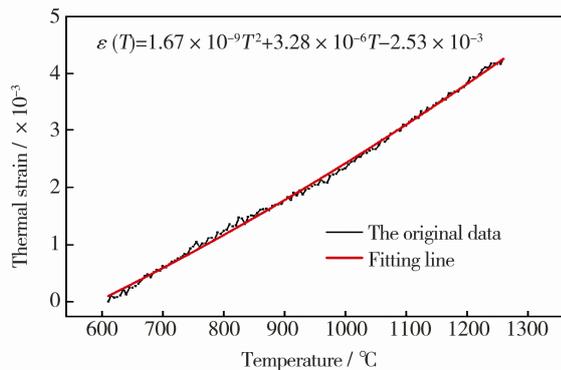


图 9 温度-应变曲线

Fig.9 The temperature-strain curve

由方程(8)绘制出石墨在 600~1200 °C 情况下温度-热膨胀系数曲线,如图 10 所示。

实验结果表明,试件在 600~1200 °C 温度范围内,高温产生的干扰光线并没有对图像信息的采集产生影响,这预示文中方法在测量更高温度下导电材料的热膨胀系数的可行性及潜力。同时文中的设备还具有多功能性,不但可以测量材料的热膨胀系数,而且也可以同时测量材料一些力学性能。

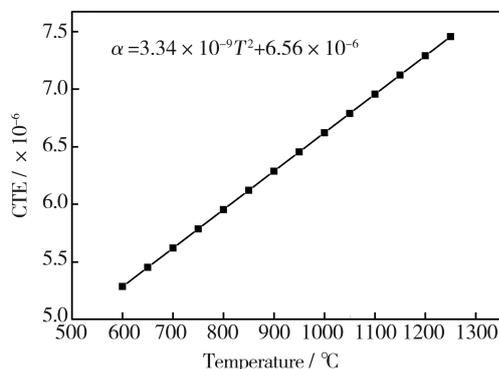


图 10 600~1200 °C 范围内石墨的热膨胀系数

Fig.10 Expansion coefficient of graphite in the temperature range of 600~1200 °C

3 结果讨论

在高温条件下,基于数字图像相关方法测量热膨胀系数的方法还存一些误差,会影响结果的精度,主要总结为以下几个方面:试件被加热后本身强光以及观察窗对采集图像信息的影响;实验环境对实验结果的影响,如振动噪声等;空气扰动以及试件表面在高温条件下发生氧化,影响散斑的质量,从而对结果的精度产生影响。

针对以上误差的可能来源,特对该套实验设备实施了一些解决方法。

1) 使用了蓝光带通滤镜,滤掉除 425~475 nm 以外的干扰光线,并使用单色蓝色 LED 光源对试件进行光照补偿。同时观察窗为石英玻璃制成,具有耐高温、热膨胀系数小、强度高优点,减小观察窗对实验结果精度的影响。

2) 实验时安装固定好 CCD 相机,尽量减少实验过程中可能出现的振动源,为了测得更好的图像信息,使用高质量的 CCD 相机及其辅助设备。

3) 实验设备中的加热环境舱的真空度可达 5 Pa 以下,可以提供近乎真空的实验环境,因此该真空系统也可以消除热空气扰动对测量的影响。同时可以避免在高温的情况下试件被氧化而影响散斑的质量,文中还使用了高温散斑,防止散斑在高温的情况下发生脱落破坏。

4 结论

1) 文中结合数字图像相关方法与通电加热技术,搭建了一套高温应变测量系统。该系统可以进行 600~1200 °C 温度范围内的全场热应变测量。

2) 通过测量紫铜在 600~800 °C 温度范围的热膨胀系数,并与文献参考值进行对比验证,充分证明了该方法的准确性。

3) 通过进行石墨在 600~1200 °C 温度范围的验证实验,充分证明文中方法在更高温度范围内的有效性及潜力。

参考文献:

- [1] LI N, SUTTON M, LI X, et al. Full-field Thermal Deformation Measurements in a Scanning Electron Microscope by 2D Digital Image Correlation[J]. Experimental Mechanics, 2008, 48(5): 635—646.

- [2] ZHU Fei-peng, BAI Peng-xiang, ZAHNG Jing-bin, et al. Measurement of True Stress-strain Curves and Evolution of Plastic Zone of Low Carbon Steel under Uniaxial Tension Using Digital Image Correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 65(2): 81—88.
- [3] SCHREIER H, ORTEU J, SUTTON M. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurement[M]. New York: Springer Science Business Media, 2009: 2—10.
- [4] LYONS J S, LIU J, SUTTON M A. High Temperature Deformation Measurement Using Digital Image Correlation[J]. Exp Mech Papers, 1996, 36(1): 64—70.
- [5] MA Yin-ji, YAO Xue-feng, ZHANG Dan-wen. Axially Symmetrical Tresses Measurement in the Cylindrical Tube Using DIC with Hole-drilling[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 66: 174—180.
- [6] MEYER P, WAAS A M. Measurement of in Situ-Full-Field Strain Maps on Ceramic Matrix Composites at Elevated Temperature Using Digital Image Correlation[J]. Experimental Mechanics, 2015, 55(5): 795—802.
- [7] GENCTURK B, HOSSAIN K, KAPADIA A, et al. Use of Digital Image Correlation Technique in Full-scale Testing of Prestressed Concrete Structures[J]. Measurement, 2014, 47(1): 505—515.
- [8] PAN Bing, WU Da-fang, GAO Jian-xin. High-temperature Strain Measurement Using Active Imaging Digital Image Correlation and Infrared Radiation Heating[J]. Strain Analysis, 2014, 49(4): 224—232.
- [9] ANWANDER M, ZAGAR B G, WEISS B, et al. Non-contacting Strain Measurements at High Temperatures by the Digital Laser Speckle Technique[J]. Experimental Mechanics, 2000, 40(1): 98—105.
- [10] BLABER J, ADAIR B S, ANTONIOU A. A Methodology for High Resolution Digital Image Correlation in High Temperature Experiments[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(3): 03511.
- [11] HAO Zhang, WANG Yong-hong, LI Chen, et al. High Temperature Deformation Measurement Based on Ultraviolet DIC[C]// International Conference on Experimental Mechanics. 2015:1—7.
- [12] CHEN X, Yang L, XU N, et al. Cluster Approach Based Multi-camera Digital Image Correlation: Methodology and Its Application in Large Area High Temperature Measurement[J]. Laser, 2014, 57: 318—326.
- [13] HOLZWEISSING M J, KANNAGAREJAH P, MAIER H J. Digital Image Correlation at High Temperatures for Fatigue and Phase Transformation Studies[J]. Strain Analysis for Engineering Design, 2014, 49(4): 204—211.
- [14] LEPLY P, RETHORE J, MEILLE S, et al. Identification of Asymmetric Constitutive Laws at High Temperature Based on Digital Image Correlation[J]. European Ceramic Society, 2012, 32 (45): 3249—3258.
- [15] WANG Shen, YAO Xue-feng, QUAN Yun, et al. High Temperature Image Correction in DIC Measurement Due to Thermal Radiation[J]. Measurement Science and Technology, 2015, 26(9): 095006.
- [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): 1961—1968.
- PAN Bing, WU Da-fang, GAO Zhen-tong. A Non-contact High-temperature Deformation Measuring System Based on Digital Image Correlation Technique[J]. Journal of Aeronautics, 2010, 31(10): 1961—1968.
- [17] MatWeb. The Online Materials Database[DB/OL]. <http://asia.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=AMECu00>.