

文章编号: 1001-4888(2017)05-0718-07

高温变形测量中热流场造成畸变的修正方法^{*}

张明, 缪泓, 熊宸, 胡文欣, 房尚强, 杨润森

(中国科学技术大学 中科院材料力学行为和设计重点实验室, 安徽合肥 230027)

摘要: 目前高温环境中材料的变形测量是研究的热点, 基于数字图像特征识别的非接触测量方法促进了高温环境变形测量发展, 但由于高温环境的复杂性, 存在很多测量影响因素, 其中高温环境中热流场的存在对数字图像法的影响尤为明显。本文提出了一种对高温变形测量中热流场造成畸变影响的修正方法。针对基于光学成像方法的材料高温变形测量中常见的热流场扰动, 通过数值仿真得到热流场模型及热流场分布状况, 再结合光线追迹原理对热流场造成的图像畸变影响进行分析, 用数值分析结果对高温变形测量实验结果进行修正。对比扰动修正结果与真实位移有很好的一致性, 从而证明了所提方法的可行性和有效性。

关键词: 自动网格法; 光线追迹; 热流扰动; 流场模拟

中图分类号: O348.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-17-307

0 引言

随着航空航天事业的发展, 高速飞行设备引起了广泛的关注, 因其在飞行过程中会产生严重的气动加热现象, 表面材料往往要面对超高温、大热流、非线性气动热等极端工作环境^[1], 因此研究极端高温环境中材料力学特性具有非常重要的意义。

目前的高温应变测量方法, 在接触式方法中, 高温应变片仍然是最重要的方法之一, 例如通过使用特殊合金新电阻材料, 研制的新概念电容型应变计, 可在 960℃ 下正常工作^[2]。在更高的温度区间, 非接触式测量方法越来越成为近年来研究的热点^[3]。由于极端高温环境的特殊性, 使得非接触式测量方法面临很多挑战, 众多专家学者进行了深入研究, 提出了主动成像、制作高温散斑、组合滤镜过滤强光^[4-7]等对基于图像特征识别的高温变形测量方法进行改进, 并取得了显著成果。例如北京航空航天大学实现了 1550℃ 下高温散斑的制作和实验^[8], 清华大学实现了 1600℃ 下 C₃SiC 复合材料高温三点弯曲实验^[9]。

虽然基于图像特征识别的高温环境中的变形测量方法取得了很大的进展, 但由于高温环境中热流场的存在, 导致气流密度分布不均, 从而使得光线的传播发生偏折, 对图像信息的采集造成畸变影响, 所以这种方法在高温环境的变形测量中仍受很大的制约。本文提出了一种通过光线追迹原理^[10]对基于点阵相关的高温环境变形测量中热流场造成畸变的修正方法。在高温环境中, 由于热流场的存在, 对图像传输造成干扰, 引起目标偏移、抖动、错位^[11], 通过数字图像处理方法得到的结果是变形位移与热流场造成图像畸变的耦合结果, 只有修正热流场造成图像畸变带来的影响, 我们才能得到更加准确的测量结果。

本文基于自动网格法对高温变形测量中的热流场扰动展开研究。自动网格法是传统网格法与数字

^{*} 收稿日期: 2017-07-10; 修回日期: 2017-09-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(11372182, 11472267, 11732009)

通讯作者: 缪泓(1968—), 男, 教授, 主要从事实验力学测试技术、数字图像分析等领域的研究。Email: miaohong@ustc.edu.cn

图像技术融合形成的,利用数字图像处理手段,对目标区域设置的标记点进行自动识别,通过对比加载前后标记点位置信息得到目标区域各点对应的位移变化。相比数字图像相关方法对图像灰度信息变化的敏感性,散斑高温易发生氧化,结构被破坏,对测量结果造成影响,自动网格法在高温环境变形测量中具有更强的适应性。

1 光线追迹原理

在均匀介质中,光线沿直线传播,介质两点之间直线的光程最短。如图1所示,非均匀介质中,折射率发生变化,光线的传播发生偏折。高温环境中,由于热流场的影响使得空间局部温度分布不均匀,进而导致气体密度场的变化,在气体组分不变的情况下,气体折射率主要取决于气体密度分布,热流场中气体密度不断变化造成了图像目标的偏移、抖动。

通常情况下气体密度和折射率可以用 Gladstone-Dale 公式^[12]表示:

$$(n-1)/\rho = K_{GD} \quad (1)$$

式中, K_{GD} 是表征气体特性的常数,由 Gladstone 和 Dale 定义为折射度,也称为折射性,它是光波波长的弱函数,在一定条件下几乎与温度和压力无关,在空气中对于可见光波长 $K_{GD} \approx 2.27 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}^{[13]}$; ρ 是气体密度; n 是气体折射率。

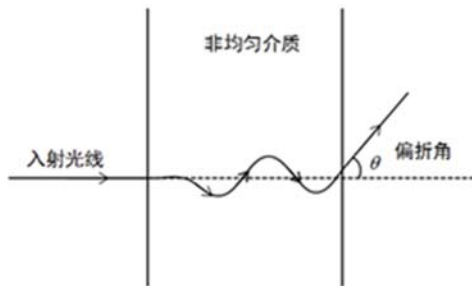


图1 非均匀介质中光线偏折

Fig. 1 Light deflection in inhomogeneous medium

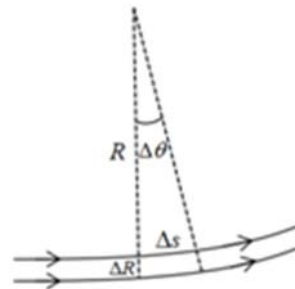


图2 光线的弯曲

Fig. 2 The bending of light

通常状况下,气体折射率变化为连续过程,光线偏折的方向是逐渐改变的,其路径为曲线,可以用光线的当地曲率半径 R 表示偏折。如图2所示,一束光线发生弯曲,取一个很小的偏折角 $\Delta\theta$, Δr 是在一个很小的均匀折射率区域。

根据折射定律,我们知道光线总是朝着折射率较高的方向偏折,偏折量是折射率随距离的变化率,只有垂直于光线的折射率梯度的分量 (dn/dR) 是起作用的,沿着光线的分量产生速度变化^[14],即

$$dn/dR = d\theta/ds \quad (2)$$

在任何给定时间内,可以得到

$$(R + \Delta R) \Delta\theta / R \Delta\theta = (v + \Delta v) / v \quad (3)$$

由 $v = c/n$ 可得

$$dv/dn = -c/n^2 \quad (4)$$

由式(2)~(4)可得出随着光线在连续折射率场中,偏角和折射率梯度之间的关系

$$d\theta/ds = |grad n| \cdot \sin i \quad (5)$$

式中, $grad n$ 为折射率梯度的最大方向; i 是光线入射角。

通过光线追迹原理,可以对已知参数状态的热流场进行分析计算,得到光线在传播过程中由于热流场扰动影响造成的偏移、抖动,从而进一步对自动网格法计算结果进行修正,得到更加准确的高温变形测量结果。

2 热流扰动下的拉伸变形测量实验

2.1 实验系统建立

为了研究热流场的存在对自动网格法变形测量的影响,我们搭建了热流扰动下的拉伸变形测量实验系统,模型图如图 3 所示。拉伸试件为铝标准试件,前表面通过喷漆制点的方式设置标记点,后表面喷制散斑,使用 MTS809 拉扭复合材料实验系统进行拉伸,拉伸过程中试件前表面施加稳定热流场,通过数字图像相关方法和自动网格法同时对试件拉伸过程进行测量。图 4 所示为实验过程图。

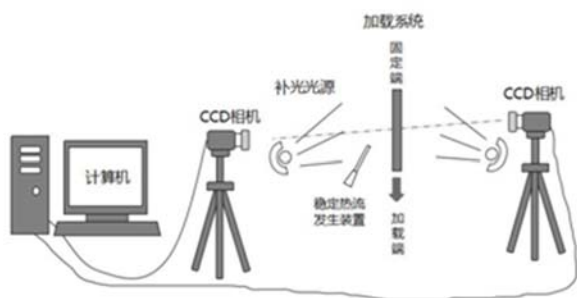


图 3 实验系统模型

Fig. 3 Experimental system model



图 4 实验过程图

Fig. 4 Experimental process diagram

为了获得稳定热流场,我们通过细长金属圆管对施加的热流进行稳流操作(孔径与管场之比为 1:10)。同时通过调整金属管角度,使热流场平行于试件前表面,且不与试件发生接触,在这种情况下,可以将后表面通过数字图像相关方法看做为不受热流场扰动影响的真实变形结果。

本实验中空间分辨率为 $4.5 \times 10^{-2} \text{ mm/pixel}$,相机采图帧率为 1 帧/秒,拉伸过程为等速率拉伸,拉伸速率为 0.01 mm/s 。拉伸过程前表面施加一个稳定柱状热流场,为了防止热流场影响数字图像相关方法测量结果,热流场位于距试件前表面 2cm 处,水平向左,高度与目标中心区域一致,热流场参数通过数字风速仪和红外测温仪测得,风速为 13.65 m/s ,温度为 153.6°C 。试件拉伸过程中,自动网格法测得在存在热流场扰动情况下的拉伸变形结果,数字图像相关方法测得无热流场扰动存在的变形,可以作为参照标准。通过结合光线追迹理论分析光线在稳定热流场中传播的偏折状况,我们可以对自动网格法测量结果进行修正,通过与无热流场扰动下的结果进行对比,来说明修正方法的可行性和有效性。

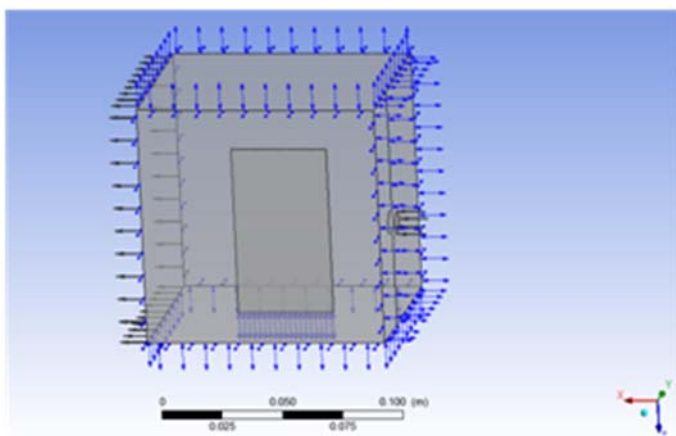


图 5 稳定热流场模型

Fig. 5 Steady heat flow model

2.2 稳定热流场的数值模拟

为了对光线在稳定热流场中的传播偏折情况进行分析,需要对热流场详细参数信息有所了解。目前对高温环境热流场计算逐渐成为研究的热点,涌现出数值仿真、纹影测量^[15]等很多方法,本文通过使用 ANSYS 中流体动力学(CFD)模块,对稳定热流场环境进行了模拟,模型图如图 5 所示。

我们选取试件周围 $100 \times 90 \times 100 \text{ mm}$ 的目标区域进行建模,试件宽度为 40mm,厚度为 2mm,热流入口直径为 10mm,热流入口面对侧壁设为气体出口,气体各侧壁施加远场约束,试件板面无滑移,设置模

型内部气压为一个标准大气压,空气导热系数为 $0.024\text{W/m}\cdot\text{K}$,热流流速为 13.65m/s ,热流温度设置为 426.6K ,热流角度与试件平行。

通过设置迭代次数 300 次,我们得到模型的收敛结果。图 6a 所示为沿热流轴向平面密度场分布。图 6b 所示为目标区域前方垂直于热流轴向平面的密度场分布。

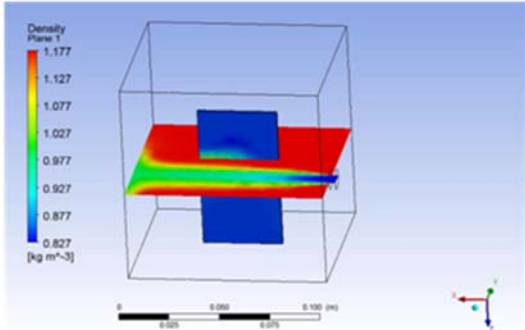


图 6a 沿热流轴向平面密度场分布
Fig. 6a Distribution of axial density field along heat flow

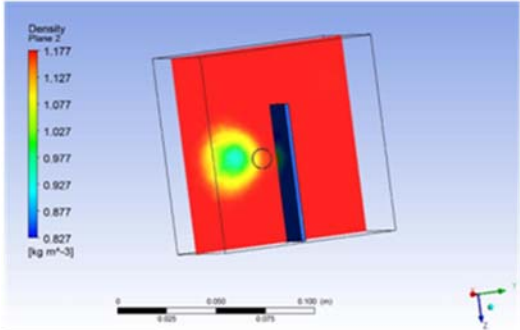


图 6b 垂直于热流轴向平面密度场分布
Fig. 6b Perpendicular to the heat flow axial plane density field distribution

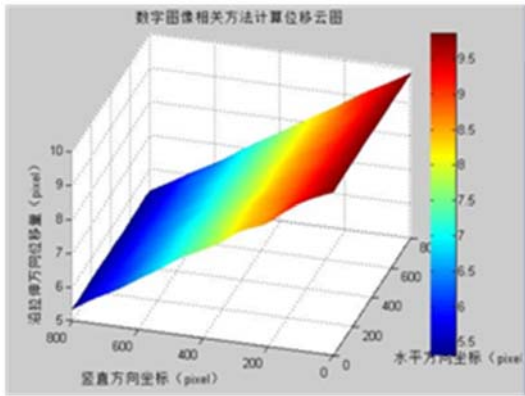


图 7a 第 61s 时拉伸方向数字散斑相关方法测得位移云图
Fig. 7a The direction of the digital speckle correlation method is used to measure the displacement cloud at the 61st moment

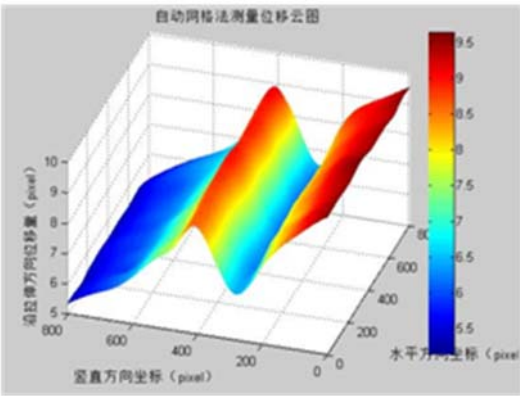


图 7b 第 61s 时自动网格法测量位移云图
Fig. 7b Automatic grid method for measuring displacement cloud at the 61st moment

已知基本参数设定情况下,通过流体模拟软件进行数值模拟可以得到稳定流场区域气体密度分布情况,对于已知气体密度分布的空间,结合光线追迹理论可以对光线在稳定流场区域内的传播情况进行分析,进而得到热流场对光线的影响情况。

3 实验结果分析及扰动模型修正

拉伸过程中,通过数字图像相关方法测量试件变形结果不会受稳定热流场影响发生改变,所以我们将其作为变形真实结果,自动网格法测量结果是包含拉伸变形和热流场畸变的耦合结果,作为测量结果。图 7a、b、c 分别为第 61s 时沿拉伸方向无扰动情况下测得的位移云图、热流扰动情况下测得的位移云图、热流场造成的畸变位移影响

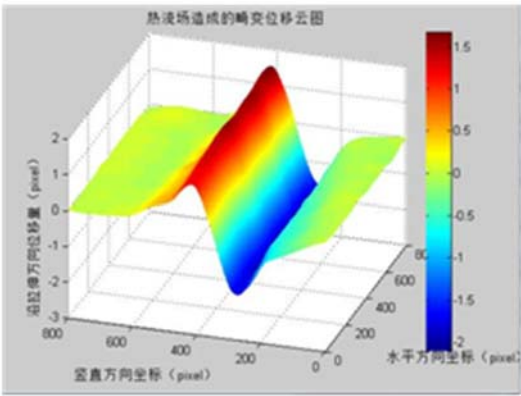


图 7c 61s 热流场造成的畸变位移影响
Fig. 7c Heat flow caused by the distortion of the displacement at the 61st moment

结果。

图 7 中 x, y 坐标为区域位置坐标, z 为 61s 时对应位置的位移量。由图 7a 可知位移沿拉伸方向均匀增加, 区域位移量最大值为 9.54 个像素, 最小值为 5.32 个像素。图 7b 为热流扰动情况下通过自动网格法测得的位移云图。比较数字图像相关方法测得位移云图与自动网格法测量位移云图可以发现, 由于热流场造成的成像畸变影响, 后者测得的位移结果不再是空间内倾斜的平面, 产生了一个折皱弯曲, 通过将同一时刻存在热流场影响的测量结果与无热流场扰动的测量结果相减, 我们可以得到热流场造成的畸变位移影响结果, 如图 7c 所示。位移量最大差值为 2.08 个像素, 同时经过观察 7c 图可以发现, 离热流施加装置近的区域改变的位移量更大, 说明距离热流口位置越近, 热流场造成的影响越大。

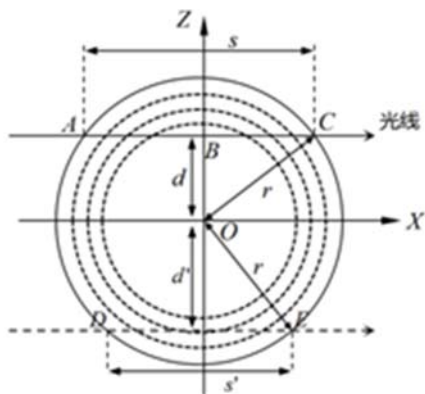


图 8 热流场内光线偏折分析模型图

Fig. 8 Flow chart analysis of light deflection in heat flow field

结合热流场模拟情况, 为了方便通过光线追迹原理分析密度场与光线的偏折关系, 我们需要做一些假定: 温度柱状热流场沿入射轴向均匀旋转对称; 热流场对光线引起的偏折量很小, 因此在流场内的光线仍可以近似看成直线。我们得到热流场光线偏折分析模型, 如图 8 所示。

空气的折射率和密度可以表示为

$$n - 1 = (n_0 - 1) \rho / \rho_0 \quad (6)$$

可得沿 r 方向折射率变化为

$$dn/dr = ((n_0 - 1) / \rho_0) \cdot d\rho/dr = grad n \quad (7)$$

光线由 A 到 C 走过的路程 s_{AC} 由式(5)~(7)可得, 即距离轴心 d 的光线走过路程 s 后的偏角

$$\theta(d) = \frac{n_0 - 1}{\rho_0} \int_0^{s_{AC}} \frac{d\rho}{dr} \sin id x \quad (8)$$

通过热流场仿真模型, 我们可以得到热流场影响区域的密度场分布及密度梯度变化, 结合光线光线偏角公式, 可以计算得到光线经过热流场产生的偏角, 由几何关系, 可以对热流造成的扰动影响进行修正。第 61s 时自动网格法测量位移云图修正结果如图 9 所示。

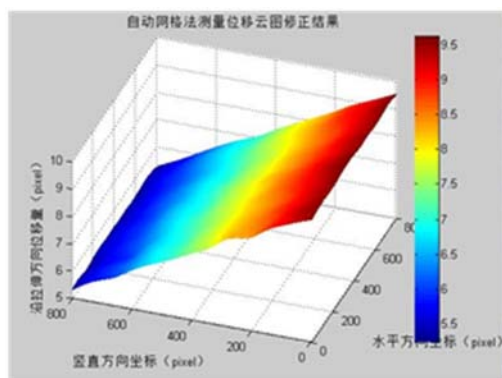


图 9 第 61s 时自动网格法测量位移云图修正结果

Fig. 9 Automatic mesh method for measuring displacement cloud image correction at the 61st moment

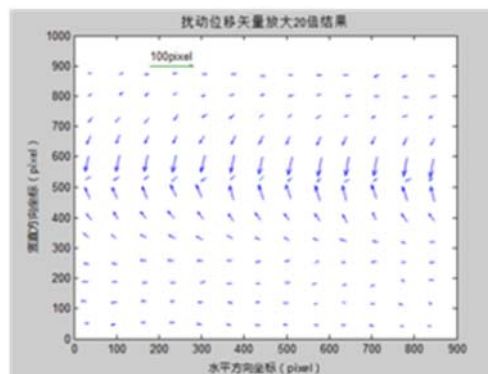


图 10 热流扰动误差位移矢量图

Fig. 10 Heat flow disturbance error displacement vector

图 10 所示为热流扰动造成的位移矢量图。通过矢量图可以看出, 位于热流场上半区域的标记点受到光线偏折的影响产生一个向下的位移畸变, 位于热流场下半区域的标记点受到光线偏折的影响产生一个向上的位移畸变。

对比热流场畸变影响修正前后沿拉伸方向的测量结果误差, 可以发现, 修正前自动网格法测量结果与真实位移结果误差最大可达到 2.08 个像素, 修正后误差保持在 0.1 个像素范围内。由实验结果可以看出, 在已知热流场详细参数的情况下, 通过光追迹理论分析光线在热流场的偏折情况, 用分析结果来

修正实验测量结果能够有效改进结果的准确性。

4 结论

基于数字图像处理方法的非接触变形测量方法具有较高的测量精度,能够达到 0.05 甚至 0.01 个像素级的测量精度,而在热流场存在的情况下,热流场对成像畸变的影响会造成整像素级的偏差(文中实验施加的稳定热流场造成的最大畸变位移量为 2.08 个像素),并且经过分析,这种影响还会随着热流场与成像系统距离的变化而加剧,这无疑影响着测量的准确性,特别是对微小变形的测量过程,可能导致测量结果与真实结果偏差巨大。本文提出通过光线追迹方法分析热流场对光线成像造成的偏折抖动,然后用分析结果修正热流场存在下的自动网格法变形测量结果。文中对光线在空气中非均匀折射率场的传播过程进行了基础性公式推导,得到光线传播过程中偏折角度与密度场变化之间的对应关系,通过搭建特定稳定热流场下的拉伸实验,分析热流场对测量结果的影响。通过使用 ANSYS 中流体动力学(CFD)模块对稳定热流场进行模拟计算得到流场稳定状况的详细参数,结合光线追迹理论,分析热流场内光线偏折情况,并用分析结果对测量结果进行修正,对比扰动条件下测量修正结果与真实结果,验证了本文提出方法的可行性和准确性。

本文通过对稳定热流场存在下的试件变形测量进行研究,提出了高温环境中热流场对变形测量造成畸变影响的修正方法,为高温环境材料变形测量结果修正提供了新的思路。在实际测量过程中,通过流场模拟等众多方法可以获得测量环境的热流场分布情况,已知热流场分布,结合文中提出的方法,可以对热流场造成的测量畸变影响进行有效的修正,使测量结果更加准确。当然高温环境中材料的变形测量结果还会受到其他众多因素的影响,例如标记点的受热膨胀,材料本身受热变形等,所以在高温环境材料变形测量中还需要对这些因素进行进一步研究。

参考文献:

- [1] 吴大方,潘兵,高镇同,等.超高温、大热流、非线性气动热环境试验模拟及测试技术研究[J].实验力学,2012,27(3):255—271(WU Dafang, PAN Bing, GAO Zhentong, et al. On the experimental simulation of ultra-high temperature, high heat flux and nonlinear aerodynamic heating environment and thermo-mechanical testing technique[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(3):255—271 (in Chinese))
- [2] 吴宗岱.恶劣环境中应变测量的国内外发展综述[J].实验力学,1988,3(4):329(WU Zongdai. State of Art: Strain Measurements in Hostile Environments[J]. Journal of Experimental Mechanics, 1988, 3(4):329 (in Chinese))
- [3] Lu S, Gao Y, Xie T, et al. A novel contact/non-contact hybrid measurement system for surface topography characterization[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2001, 41(13):2001—2009.
- [4] Pan B, Qian K, Xie H, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review[J]. Measurement science and technology, 2009, 20(6):062001.
- [5] Peter W H. Digital imaging technique in experimental stress analysis[J]. Optical Engineering, 1982, 21(3):427—431.
- [6] 潘兵,吴大方,高镇同,等.1200℃高温热环境下全场变形的非接触光学测量方法研究[J].强度与环境,2011,38(1):52—59(PAN Bing, WU Dafang, GAO Zhentong, et al. Study of non-contact optical metrology for full-field deformation measurement at 1200℃[J]. Structure & Environment Engineering, 2011, 38(1):52—59 (in Chinese))
- [7] Grant B M B, Stone H J, Withers P J, et al. High-temperature strain field measurement using digital image correlation[J]. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2009, 44(4):263—271.
- [8] 潘兵,江天云,吴大方.时变热辐射环境下高温合金蜂窝板三维热变形测量[J].北京航空航天大学学报,2015,41(6):969—975(PAN Bing, JIANG Yuntian, WU Dafang. 3D thermal deformation measurement of superalloy honeycomb panels in time-varying thermal radiation environment [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2015, 41(6):969—975 (in Chinese))
- [9] Fang X, Jia J, Feng X. Three-point bending test at extremely high temperature enhanced by real-time observation

- and measurement[J]. *Measurement*, 2015, 59:171–176.
- [10] 黄战华, 程红飞, 蔡怀宇, 等. 变折射率介质中光线追迹通用算法的研究[J]. *光学学报*, 2005, 25(5):589–592 (HUANG Zhanhua, CHENG Hongfei, CAI Huaiyu, et al. A study on universal ray tracing algorithm in the medium of variable refractive index[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(5):589–592 (in Chinese))
- [11] Gordeyev S, Jumper E, Ng T M, et al. Aero-optical characteristics of compressible, subsonic turbulent boundary layers[C]//34th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference, 2003:3606.
- [12] Vest C M, Macbain J C. *Holographic Interferometry*[J]. Springer, 1979, 32(10):66–69.
- [13] 陈云云. 高温复杂流场光学特性及其诊断研究[D]. 南京理工大学, 2011 (CHEN Yunyun. A study on optical characteristics and diagnosis of high temperature complex flow field[J]. *Nanjing University of Science and Technology*, 2011 (in Chinese))
- [14] 李桂春. 气动光学[M]. 国防工业出版社, 2007 (LI Guichun. *Aero-optics*[M]. National Defense Industry Press, 2007 (in Chinese))
- [15] Klinge F, Kirmse T, Kompenhans J. Application of quantitative background oriented schlieren (BOS): investigation of a wing tip vortex in a transonic wind tunnel[J]. *Proceedings of PSFVIP-4 F*, 2003, 4097:3–5.

On the Correction Method for Distortion Caused by Heat Flow in High Temperature Deformation Measurement

ZHANG Ming, MIAO Hong, XIONG Chen, HU Wen-xin, FANG Shang-qiang, YANG Run-sen
(USTC CAS Key Laboratory of Mechanical Behavior and Design of Materials, Hefei 230027, Anhui, China)

Abstract: A correction method for the distortion caused by heat flow in high temperature deformation measurement is proposed in this paper. Aiming at the common heat flow field disturbance in high temperature deformation measurement of materials based on optical imaging method, the heat flow field model and its distribution are obtained by numerical simulation. Combined with ray tracing principle, the image distortion caused by heat flow field is analyzed. Finally, experimental results of high temperature deformation measurement are corrected by numerical analysis. The feasibility and effectiveness of proposed method are proved by comparing the disturbance corrected result and the true displacement.

Keywords: automatic mesh method; ray tracing; heat flow disturbance; flow field simulation