

文章编号: 1001-3806(2015)04-0541-04

双曝光全息术用于水平圆管温度场的重建

朱进容^{1,2}, 代金梅², 姚育成², 成纯富²

(1. 武汉理工大学 材料科学与工程学院, 武汉 430070; 2. 湖北工业大学 理学院, 武汉 430068)

摘要: 双曝光全息术因可输出直观反映波面畸变的无限宽条纹而广泛应用于温度场的可视化。为了获取水平圆管周围的温度场, 采用双曝光全息术记录了直径 25mm、长 350mm 自然对流水平圆管壁温从 72℃ 降至 22℃ 的简单干涉条纹。采用条纹中心法提取不同周向角的条纹位移量, 通过干涉图中 R 分量的峰、谷极值点来识别明、暗条纹中心, 确定级数分布, 最后反演温度场。壁面反演温度值与热电偶测量值的最大相对误差为 0.059。结果表明, 双曝光全息术获取的数据真实可靠。该项研究对简单快速反演温度场是有帮助的。

关键词: 测量与计量; 温度场; 双曝光全息; 水平圆管; 条纹

中图分类号: O438.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.04.025

Reconstruction of temperature field around horizontal cylinder based on double-exposure holography

ZHU Jinrong^{1,2}, DAI Jinmei², YAO Yucheng², CHENG Chunfu²

(1. School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China; 2. School of Science, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

Abstract: Double-exposure holography is widely adopted in temperature field visualization because of the output of infinite fringes which directly present the wavefront distortion. When the wall temperature of the natural convection horizontal cylinder in 25mm diameter and 350mm length dropped from 72℃ to 22℃, the simple interferometric fringes were obtained using the double-exposure holography to study temperature field. Stripe displacements at different angles were extracted by fringe center method. Peak values and valley values of R channel of interferogram were corresponding to the centers of bright and dark fringes. Distributions of fringe orders were achieved and temperature field was inversed. The maximum of relative error of wall temperature between inversion values and thermocouple measurement values was 0.059. The results show that the data of double-exposure holography is feasible and reliable. The study is helpful for simple and fast inversion of temperature field.

Key words: measurement and metrology; temperature field; double-exposure holography; horizontal cylinder; fringe

引言

在能源与动力、火力发电、石油化工等工业中, 温度直接关系到生产安全、效率、经济效益等, 热电偶法和干涉法是目前测温技术的两大主流。热电偶法将探针直接接触被测对象, 达到热学平衡后测量温度, 存在时间延迟效应。干涉法将被测量的变化通过光程差编码于干涉图中, 实现了响应快、高精度的非接触测量, 是流场可视化的强有力工具^[1-3]。对此, 国内外研究者

从数值和实验方面进行了积极的探索。SAITOH 等人^[4]采用基准解法详细给出了水平圆管的温度场分布, 高精度的 4 阶有限差分法和坐标变换同时解除了计算机运行时间和所用实验方法分辨率的限制。然而, 自然对流中温度差引发密度分布不均匀产生浮升力, 水平圆管上方受其影响较大呈羽状, 与边界层的假设不符, 故各种近似求解难免有所误差。作为经典的干涉仪, Mach-Zehnder (M-Z) 干涉仪被成功地运用于燃烧室火焰等实时监测中^[5-6]。为避免一般横向剪切法繁琐的重建算法^[7], 作者^[8]曾选用大剪切量横向剪切干涉仪研究了 400℃ 高壁温水平圆管的温度场, 输出了类似于 M-Z 干涉仪的简单条纹, 但需记录背景条纹。

全息术以感光干版作为记录介质, 利用波前重建实现再现, 同时记录相位和光强信息, 大大放宽了对高品质光学元件的要求^[9]。双曝光全息干涉术分别曝

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61475044); 湖北工业大学科技计划资助项目 (BSQD12080)

作者简介: 朱进容 (1978-), 女, 博士后, 讲师, 现主要从事热物理激光测试的研究。

E-mail: jrzh@foxmail.com

收稿日期: 2014-06-26; 收到修改稿日期: 2014-10-31

光扰动前后的物光波,消除了空间载频、光学系统像差、光学元件表面等三大类附加相差,得到直接反映被测量变化的完美无限宽条纹,物理意义十分明确^[10]。对于同一长度、不同直径、壁温 60℃ ~ 260℃ 的水平圆管, HERRAEZ 等人^[11]选用双曝光全息干涉术,拟合出特定周向上距管壁 x 处温度场的函数关系式 $T = f(x)$,但定位不准确使得干涉图不严格对称。为研究均匀磁场对火焰温度分布的影响, SHARMA 等人^[12]采用傅里叶变换数字全息干涉术,实现了信号处理的多样性。

作者通过双曝光全息干涉装置实验研究了自然对流下水平圆管的温度场,配合精确定位装置,记录了管壁从 72℃ 降至环境温度 22℃ 全过程的清晰干涉图,编程自动识别条纹中心,进而反演圆管周围的温度场。与圆管壁面热电偶的测量值进行对比,以分析实验结果和误差。

1 实验原理与装置

热圆管向外界传热,造成周围空气的折射率分布不均匀。热圆管周围可看作 2 维流场,沿光束传播方向的折射率呈均匀分布,故所激发的相位畸变 $\Delta\varphi$ 为:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} [n(x, y) - n_{ref}] L = 2\pi m(x, y) \quad (1)$$

式中, λ 为光波波长; L 为圆管长度; $n(x, y)$ 和 n_{ref} 分别为热空气、环境空气的折射率; $m(x, y)$ 为条纹位移量,即后文中的 m 。

根据 Gladstone-Dale (G-D) 公式和理想气体状态方程,即:

$$\begin{cases} n - 1 = K\rho \\ \rho = \frac{Mp}{R_0 T} \end{cases} \quad (2)$$

式中, n 为折射率; ρ 为密度; K 为 G-D 常数,取为 $2.26 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{kg}$; M 为空气分子质量,取为 $28.97 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{mol}$; p 为压强,取为 $1.015 \times 10^5 \text{ Pa}$; R_0 为普适气体常数,取为 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T 为温度。联立(1)式、(2)式,若环境温度为 T_{ref} ,则待测温度场 $T(x, y)$ 为:

$$\frac{1}{T(x, y)} - \frac{1}{T_{ref}} = \frac{m(x, y)\lambda R_0}{pKML} \quad (3)$$

双曝光全息干涉术的实验光路如图 1 所示。整个光路置于 1500mm × 1000mm 精密光学防震平台上,并保证物参光程近似相等。以 He-Ne 激光($\lambda = 632.8\text{nm}$)为光源,通过可调束分器后分为参考光和物光,经扩束准直系统(短焦距球透镜和 500mm 焦距的平凸透镜组合)后成为口径 100mm 的平行光并记录于全息干版。分别曝光未加热和加热后的测试段,经显影定影等化

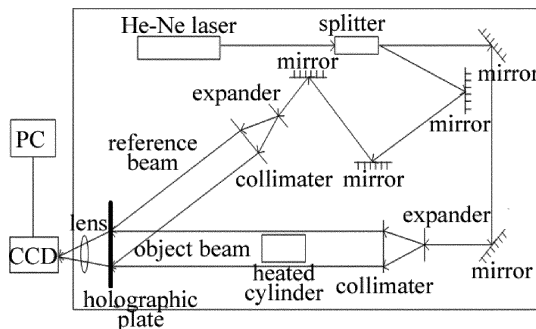


Fig. 1 System of double-exposure holography

学处理后遮挡物光而仅用参考光再现,用 CCD 采集干涉图并存储于 PC 端。实验对象为直径 $D = 25\text{mm}$ 、长度 $L = 350\text{mm}$ 且绝热性和导热性良好的圆管,水平放置,配合特殊装置精确定位。采用热水加热圆管,水温通过恒温器调节,以获得反映不同恒壁温圆管周围温度场空间分布的干涉条纹。壁温越高,条纹越密集,对定位误差越敏感。此外,相同壁温下,管长越大条纹越多。为了获取较精确的定位和确保足够的分辨率,水加热至 72℃。

2 条纹位移量的提取

实验中的环境温度为 22℃,圆管加热至壁温 t_w 为 42℃, 52℃, 62℃, 72℃ 时的双曝光全息干涉图分别对应图 2a ~ 图 2d。随着壁温的升高,条纹(等温区)越来越密,条纹总数从 42℃ 的 18 条增加到 72℃ 的 42 条,约为 0.8 条/℃。中心大面积的黑色部分为圆管阴影,左侧上部阴影为热水注入口,其它 3 条细长阴影为定位装置。对于每个稳态的干涉图,越远离壁面,条纹间距越大,温度越低,最后为环境区对应的明亮无限宽条纹,条纹级数为 0。图 2a 中标注了稳态 42℃ 的级数

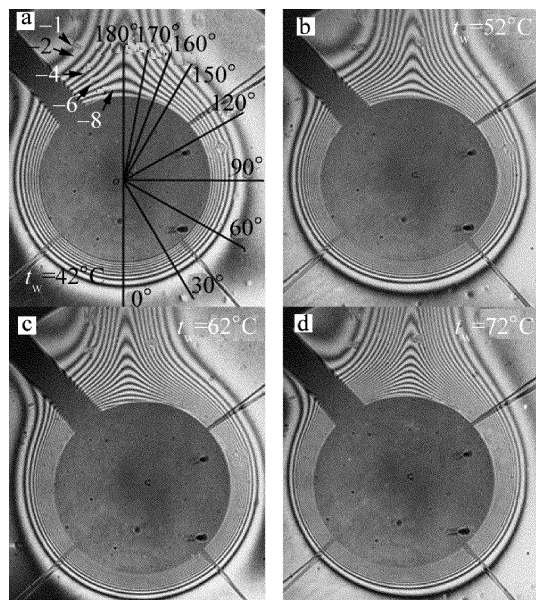


Fig. 2 Holographic interferograms at 4 wall temperatures

分布,从环境到管壁,明暗条纹级数以 0.5 为间隔依次递减,亮条纹为整数,其它稳态类似。

温度场成对称性分布,圆管中、下部等温线分布均匀,圆管右上方则受浮升力影响较大条纹稀疏呈羽状。如图 2a 所示,以圆管中心为原点、1 倍圆管直径范围内,分别以 30° 和 10° 为间隔,从下至上逆时针(0° ~ 180°)标定。由于 He-Ne 激光下 R 分量的响应范围最大,所以以彩色干涉图 RGB(red, green, blue) 三色通道中的 R 分量代表图像特征。取出径向的 R 分量,其峰谷点分别对应明暗条纹的中心。与标定图对应,条纹中心准确无误后,确定级数即得到条纹位移量。以 42℃ 的 90° 和 180° 为例,如图 3 所示。由图可知, R 的分布起伏大,峰谷点突出,非常利于条纹中心的识别。90° 的 R 分布较密集,180° 较稀疏,这种分布特征正好与条纹密集趋势一致。

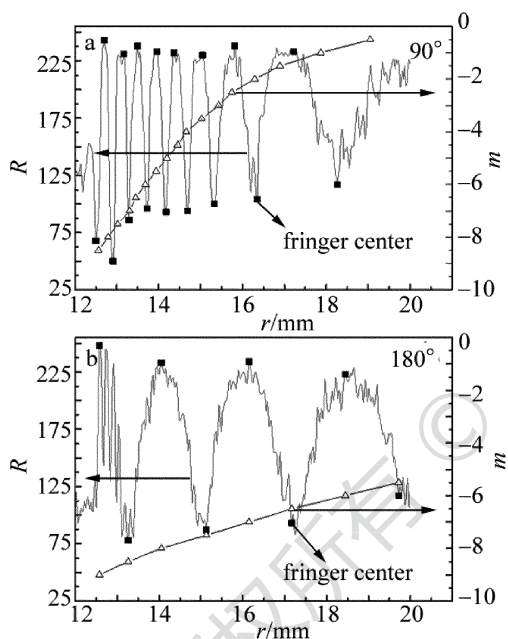


Fig. 3 Distributions of R, fringe centers and stripe displacements at 90° and 180°

将中间黑色阴影的边沿视为壁面,并设待测点到圆管壁面的距离 $r = 0\text{mm}$,此处条纹易受圆管轮廓的影响而不易识别,故采用拟合得到条纹级数。各个稳态在 0° ~ 180° 内的级数分布如图 4 所示。分析图可知,壁面处($r = 0\text{mm}$)各个角度的条纹级数并未重合,壁温越高,这种差异越明显。从实验上分析,水平圆管的定位不能做到绝对水平,存在竖直方向的倾角。从数据处理方面,圆管中心识别不准确和分辨率的限制,造成圆管真实边界识别有误。0° ~ 90° 的条纹位移量分布几乎重合,120° ~ 180° 则较为离散。0° 附近的壁面级数梯度大,180° 附近的壁面级数梯度小,两者相差多达 3 条暗条纹。

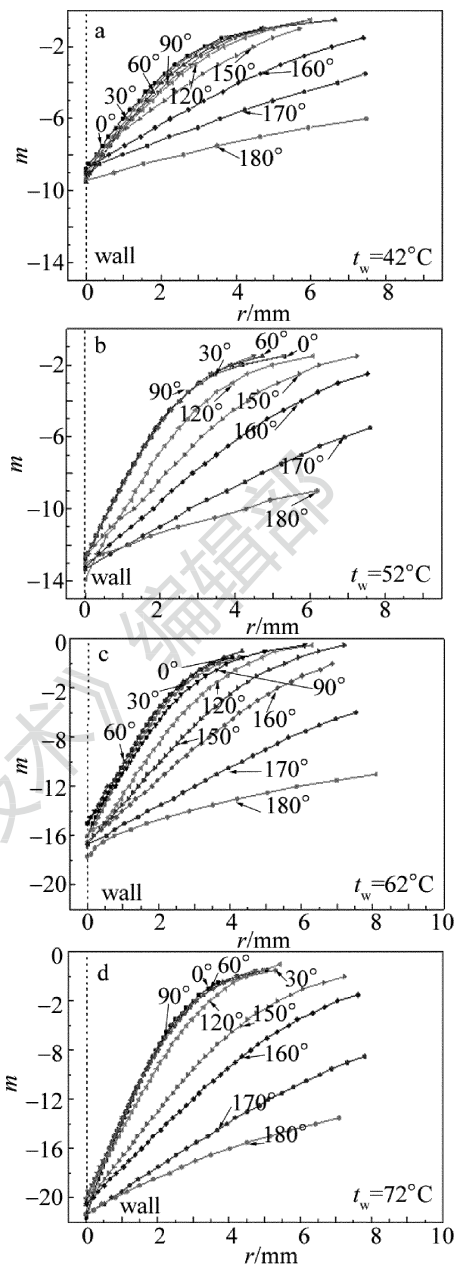


Fig. 4 Stripe displacement at 4 wall temperatures

3 温度场的重建

图 5 为将条纹位移量 m 代入(3)式计算得到的温度场。由图可知,0° ~ 180°,管壁外等距离处的温度值逐渐增大,梯度逐渐减小;0° ~ 90° 的温度分布几乎重合,说明此区域的等温区为同心圆环;120° ~ 180°,浮升力的存在使得相同距离下的温差变大。4 个稳态在 0° 壁面反演的温度值分别为 40.58℃, 49.56℃, 57.61℃, 70.99℃,与热电偶测量值的误差平均值为 2.32℃;180° 则对应为 41.99℃, 50.25℃, 61.74℃, 71.18℃,误差平均值为 0.71℃。可见前者对定位带来的误差更为敏感,后者的结果更吻合热电偶测量值,故 180° 处最接近圆管真实轮廓。0° ~ 180° 内,4 个稳

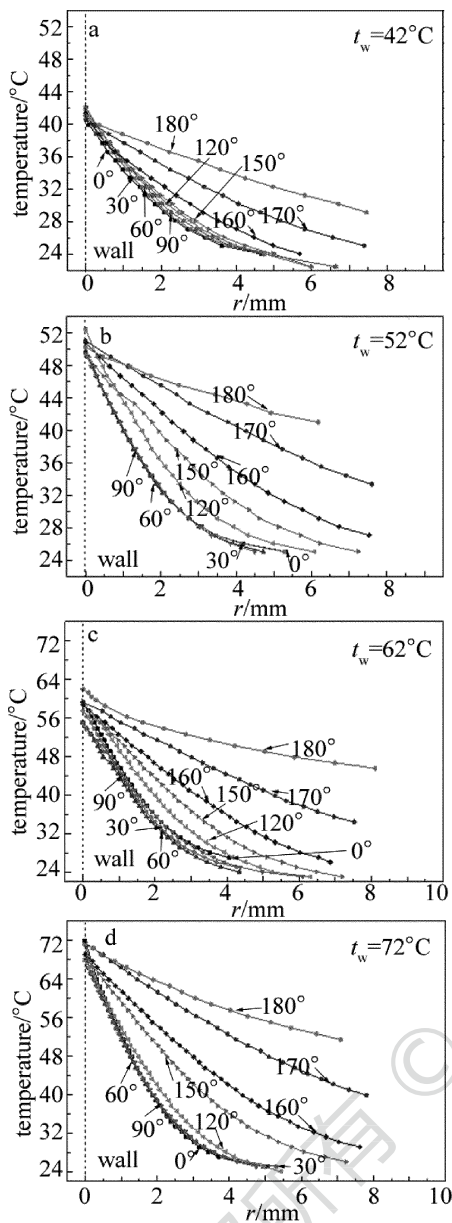


Fig. 5 Temperature fields at 4 wall temperatures

态壁温与热电偶测量值的相对误差范围分别为:0.029 ~ 0.002, 0.052 ~ 0.008, 0.012 ~ 0.004, 0.059 ~ 0.0003, 最大相对误差为 0.059, 表明两者结果一致。

4 结 论

双曝光全息术不仅沿袭了全息术对光学元件要求低等特点,而且由于再现的两物光波总是定位在一起,更易获得清晰的干涉条纹,直接反映待测量的变化。利用该技术记录水平圆管壁温从 72°C 自然降至环境

22°C 的过程,实验结果表明,不同周向角壁温反演值与热电偶测量值的最大相对误差为 0.059,两者吻合得很好。双曝光全息干涉不仅能够以等温区的形式直观显示温度分布,而且测温结果真实可靠,可为实际工程应用提供有效的测量途径。

参 考 文 献

- [1] AMBROSINI D, RASTOGI P K. Optical methods in heat transfer and fluid flow[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2006, 44(3/4): 155-158.
- [2] MAUGER C, MEES L, MICHARD M, et al. Shadowgraph, schlieren and interferometry in a 2-D cavitating channel flow[J]. Experiments in Fluids, 2012, 53(6): 1895-1913.
- [3] LI G B, LI Q, CHEN Z M, et al. Measurement of FBG reflection spectra by white light interferometry[J]. Laser Technology, 2013, 37(1): 20-23 (in Chinese).
- [4] SAITOH T, MARUHARA K. Bench mark solutions to natural convection heat transfer problem around a horizontal circular cylinder[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1993, 36(5): 1251-1259.
- [5] QI J A, WONG W O, LEUNG C W, et al. Temperature field measurement of a premixed butane/air slot laminar flame jet with Mach-Zehnder interferometry [J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(14/15): 1806-1812.
- [6] ZHANG R, JIANG S, YAN Q Z, et al. All-fiber perimeter alarm system based on Mach-Zehnder interference [J]. Laser Technology, 2013, 37(3): 334-337 (in Chinese).
- [7] LI X H, QIAN X F, XU Z, et al. Application of lateral shearing principle to carrier removal in grating projection[J]. Laser Technology, 2013, 37(6): 843-848 (in Chinese).
- [8] ZHU J R, LÜ W, ZHOU H C. Nature convection heat transfer of horizontal cylinder with lateral shearing interferometry [J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2012, 63(10): 3034-3039 (in Chinese).
- [9] WANG D Z, HUANG Z, ZHANG L F. The development of laser technique applied in the field of fuel spray experiment [J]. Laser Technology, 1995, 19(1): 26-33 (in Chinese).
- [10] KATZ J, SHENG J. Applications of holography in fluid mechanics and particle dynamics [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 2010, 42(1): 531-555.
- [11] HERRAEZ J V, BELDA R. A study of free convection in air around horizontal cylinder of different diameters based on holographic interferometry. Temperature field equations and heat transfer coefficients [J]. International Journal of Thermal Science, 2002, 41(3): 261-267.
- [12] SHARMA S, SHEORAN C. Temperature measurement of axisymmetric flame under the influence of magnetic field using lensless Fourier transform digital holography [J]. Applied Optics, 2012, 51(19): 4552-4562.