

文章编号: 1001-4322(2004)06-0681-04

用电子散斑干涉法测量材料热膨胀系数*

陈思颖^{1,2}, 黄晨光², 陈捷³, 王春奎², 段祝平²

(1. 北京理工大学 光电工程系, 北京 100081; 2. 中国科学院 力学研究所 非线性力学国家重点实验室, 北京 100080;
3. 中国兵器工业 52 研究所, 内蒙古 包头 014034)

摘 要: 利用双光束电子散斑干涉法 (ESPI) 对试件受热变形进行了实时观测, 针对一次实验过程中得到的图片较多 (300 ~ 500 幅) 的特点, 在图像处理时摒弃了以往的手动识别等位移线的办法, 用 MATLAB 语言编写了批处理程序, 能够在采集的大量散斑图片中自动快速准确地标定等位移线, 得到相应的位移和应变, 并结合实时测量的温度值, 获得了 45 钢和 LY12 铝合金在不同温升率下的热膨胀系数及其随温度的变化。实验结果表明, 在涉及的温升率范围内, 温升率的改变对材料热膨胀系数的影响不明显, 材料的热膨胀系数随温度的升高略有上升。

关键词: 热膨胀系数; 电子散斑干涉法; 温升率

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A

不同温升率条件下, 研究材料的热膨胀系数及其随温度的变化规律, 在激光对材料加热机理的分析中, 特别是在相关的热物性测试领域里具有重要的地位, 并有着强烈的应用需求^[1]。

关于材料的热膨胀系数测试技术, 已有很多成熟的理论和方法, 并制定了多种标准^[2,3]。其中具有代表性的有光杠杆法、直接观测法、光干涉法、X 光法、电容法、光栅法、机械杠杆法、热调幅法、超声微波法、密度测量法和电阻测量法等等。但是, 一些传统方法 (如顶杆法等) 有明显的局限, 一是实验时温升速率较慢, 难以模拟强激光加热的实际工况, 二是其测试精度相对来说比较低, 只能给出一个较宽温度区间内 (10 K 以上) 的平均热膨胀系数。至于其它的一些方法, 也存在着诸如实验条件苛刻、试样加工要求高等问题, 使其难以推广应用。

电子散斑干涉法 (ESPI) 是 20 世纪 60 年代逐渐发展起来的一种新型光学测试技术, 它利用材料表面的漫反射现象跟踪材料的变形情况^[4~6], 属于非接触性测量, 不仅测试精度高, 而且对测量环境要求低; 测量本身不会对实验现象产生影响。过去, 人们主要利用该方法来测量材料在机械载荷和热载荷下引起的变形^[7~9], 而现在我们可以设计出灵活的加热方式来模拟不同功率的激光对材料的热效应, 并采用 ESPI 方法测量材料在不同温升率下的热膨胀系数。此外该方法能够捕捉到 10^{-1} K 温度变化带来的试样变形, 对测试结果进行求导分析, 便可方便地获得材料每一温度点对应的热膨胀系数。

本文利用 ESPI 技术测量了 45 钢和铝合金 LY12 的热膨胀系数随温度的变化, 并实验研究了温升率对热膨胀系数的影响。

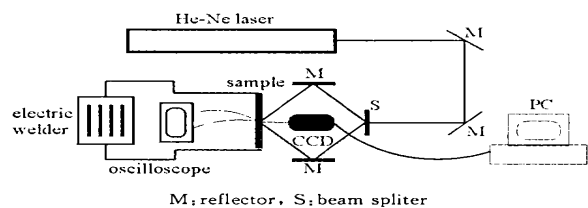
1 装置介绍与测试原理

1.1 实验装置

实验中, 采用工频大电流加热, 我们对购置的直流电焊机进行了改装, 在其两极用较粗的铜电缆与试样两端连接。在电缆和试样间设计加工了一个转接装置, 以降低接触电阻。通过调节电焊机的电压可以方便地控制试件的升温速率。经过测试, 试件的温升率在 3 ~ 500 /s 之间可调控。

我们在试件背后焊接上热电偶的正负极 (热电偶是铬铝型的, 正极是铬, 负极是铝), 通过数字示波器记录热电偶的输出电压来获得试件的实时温度。

实验光源是 40 mW 的 He-Ne 激光器, 运用双光束电子散斑干涉方法来测量物体在升温过程中产生的位



M: reflector, S: beam splitter
Fig. 1 Sketch map of measuring system
图 1 测试和采集系统示意图

* 收稿日期: 2003-04-05; 修订日期: 2004-01-15
基金项目: 国家自然科学基金资助课题 (10002021); 国家 863 计划项目资助课题
作者简介: 陈思颖 (1975 —), 女, 博士, 研究方向为动态光学测试及图像处理。

移,由位移导出应变及对应的热膨胀系数。整个测试系统的结构如图1所示。采用了45钢和硬铝LY12两种材料的试件,它们的具体结构和尺寸如图2所示(单位为mm)。

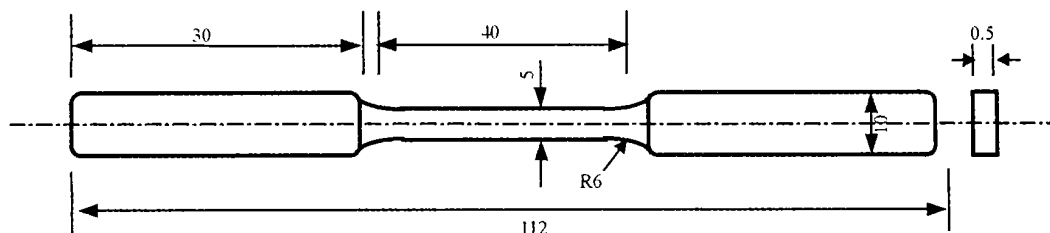


Fig. 2 Structure and dimension of the sample

图2 试件的结构与尺寸

1.2 ESPI 测面内位移的基本原理

当两束准直相干光对称地照射物体表面,如图3所示。每一束光都由物体表面漫反射产生一个散斑场。CCD记录的是这两个散斑场相干叠加的结果。当物体在 x 方向有位移 u ,物体变形前和变形后的两组光波波前相对相位变化为

$$\Delta(x, y) = [(4\pi/\lambda)\sin\theta]u \quad (1)$$

式中: $\Delta(x, y)$ 是两组光波波前相对相位变化值, θ 是照射角; λ 是光波波长; u 是物体沿 x 方向的位移分量。

当 $\Delta(x, y) = 2n\pi$ 时,出现相关条纹,由此可求得位移为

$$u = n\lambda/2\sin\theta \quad (2)$$

实验中,测量精度为 $\lambda/2$,由于光源的波长为 $0.6328\mu\text{m}$,因此精度约为 $0.32\mu\text{m}$ 。实验时采集卡以25帧/秒的速率连续采集,完成后再根据温升率的快慢按照需要的时间间隔与某个时刻的散斑图相减,得到等位移线条纹图,条纹的间距为

$$w = \lambda/2\sin\theta \quad (3)$$

式中: θ 为照射角。则可求出微应变为

$$\varepsilon = \frac{nw}{l \times 10^{-3}} \quad (4)$$

式中: n, l 分别代表条纹数目和测量区域的实际长度。于是得到材料的热膨胀系数

$$\alpha = \varepsilon/\Delta T \quad (5)$$

2 分析方法和实验结果

实验中,我们首先通过处理变形前后的两幅散斑图得到不同时刻试件的位移量,再根据记录的温度随时间变化的结果,就可以得到材料的热膨胀系数随温度的变化规律。不断变化升温速率,便可获得不同升温率下材料热膨胀系数的值。

如前所述,整个测量分为两个方面:(1)温度的实时测量;(2)利用ESPI对试件受热变形进行实时观测。用ESPI进行测量时,我们根据升温时间的长短来设定图像采集卡连续采集的时间,实验中为了仔细跟踪试件的热变形,每次都采集尽可能多的散斑图片,一般一次升温过程采集300~500幅图片。如按照常规方法手动处理如此多的图片,一张张相减,再提取干涉条纹的中心线,其工作量是极其巨大的。如果能够利用计算机进行批处理,自动确定中心线,并根据中心线的距离算得位移及应变,那就方便得多。

因此,在图像处理过程中,我们用MATLAB语言编写了相应程序,对采集的大量散斑图片进行批处理,自动识别提取中心线。在条纹中心线的自动判别这个关键问题上提出了一种新的处理思想:通过直接对两幅图中感兴趣的三个区域进行逐点相关计算,找到相关峰值,并认为相关峰值所在处就是等位移线所在位置。另外,在算法中设定了合适的准则来自动更换参考图像,避免了在试样的变形较大时,条纹过于密集的情况。

为了使结果直观地表示出来,在相减后的等位移线图中,把用相关法计算得出的中心线标识出来,可以看

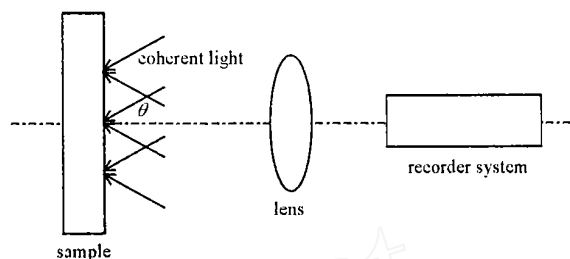


Fig. 3 Simplified schematic of ESPI

图3 双光束散斑干涉的原理

到条纹中心线的寻找是成功的,找到的 3 条中心线基本在一条直线上,随着温度的升高,条纹会不断变密,参见图 4,图 5。

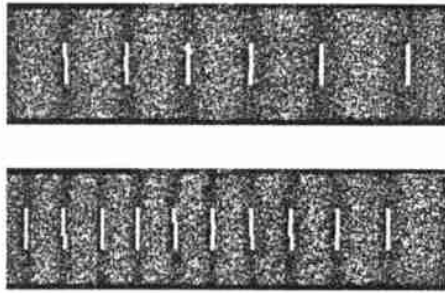


Fig. 4 Typical speckle fringe map in 45 steel sample
图 4 45 钢的等位移线

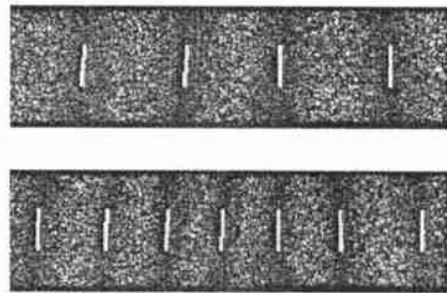


Fig. 5 Speckle fringe map in LY12 Al alloy sample
图 5 LY12 的等位移线

图 6 和图 7 分别显示了实验测得的 45 钢和 LY12 铝合金在不同温升率下的热膨胀系数及其随温度的变化规律。

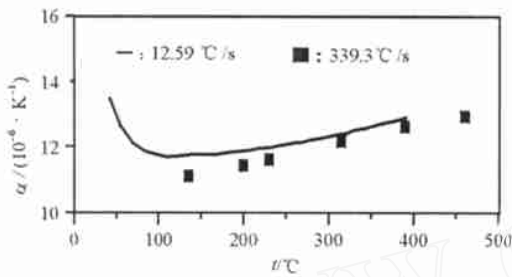


Fig. 6 alpha-t curve of 45 steel

图 6 45 钢在不同温升率下温度和热膨胀系数的关系

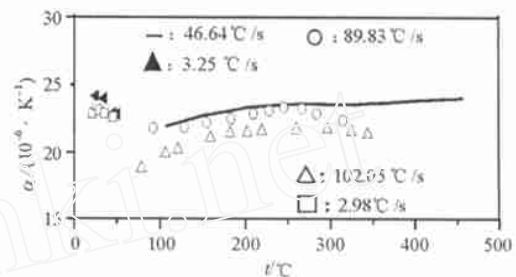


Fig. 7 alpha-t curves of LY12

图 7 LY12 在不同温升率下温度和热膨胀系数的关系

从以上实验结果,我们可以得到两个主要的结论。

当温升率在两个量级内变化时(10⁰~10² °C/s),温升率对材料(45 钢和 LY12 铝合金)热膨胀系数的影响不明显。

随着温度的升高,两种材料的热膨胀系数均有小幅度的上升。表 1 中列出了不同温度下的热膨胀系数。

表 1 材料热膨胀系数(alpha/°C⁻¹)随温度的变化

Table 1 Thermal expansion coefficient of materials vs temperature

material	50°C	100°C	150°C	200°C	250°C	350°C	450°C
alpha(LY12)/°C ⁻¹	2.252	2.180	2.270	2.271	2.332	2.364	2.399
alpha(45 steel)/°C ⁻¹	1.245	1.171	1.175	1.186	1.206	1.260	1.287

比较表明,本文实验测得的热膨胀系数和材料手册上查到的值基本吻合。另外,本文没有测量 45 钢在更高温度的热膨胀系数。因为温度进一步升高时,试样表面的颜色会有明显的变化,这会降低对散斑的识别能力和测量精度,降低实验数据的可靠性。

为了解释实验现象(特别是材料热膨胀系数与温升率无关),此处先简单介绍材料发生热膨胀的原理。G. Mie 引进了原子间相互作用关系的表达式,在一定温度下,原子的振动中心能保持在一定位置,是因为原子受到周围原子的吸引和排斥,在该位置这两种力的作用达到平衡的结果。当温度上升时,原子的振幅增大时,它的位能值相应增大,原子间的平均距离也相应增大,即物体产生了热膨胀。知道了材料发生热膨胀的原理,便可以知道热膨胀的弛豫时间极短(远小于 μs),在我们实验的温升率范围内(加热时间远大于 ms),温升率对膨胀系数的影响可以忽略不计。当然如果要模拟超短脉冲激光对材料的作用,温升率对热膨胀系数等物性参数的影响是应该被重视的。

3 结论

本文利用双光束电子散斑干涉法对试件受热变形进行了实时观测,用 MATLAB 语言编写的程序对采集的散斑图片进行了批处理,获得了 45 钢和 LY12 铝合金在不同温升率下的热膨胀系数。实验结果表明,在我们实验的温升率范围内温升率的变化对材料的热膨胀系数影响不大,同时发现材料的热膨胀系数随温度的升

高略有上升。

此外,本文发展了新的图像处理方法并编制了相应的程序,改变了传统的、对变形前后散斑图像进行手动处理标识等位移线的方式,在实验中起到了关键性的作用。

参考文献:

- [1] Latham W P, Beraun J E. Laser effects research and modeling to support high energy laser systems[A]. Proc of SPIE [C]. 2001, 4376, 5—14.
- [2] 黄晨光. 材料热物理性能实验研究技术调研报告[R]. 北京:中国科学院力学研究所,2003. (Huang C G. Report on experimental techniques of material physical properties. Beijing: Institute of Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, 2003)
- [3] ASTM D 3565. Standard test method for tablewave pattern removal by mechanical dishwasher detergents[S]. ASTM International.
- [4] 佟景伟,安研. 冲击载荷作用下求位移场的激光散斑干涉法及有限元法[J]. 实验力学,1989,4(1):23—29. (Tong J W, An Y. Speckle interferometry and finite methods under impact loading. *Experimental Mechanics*, 1989,4(1): 23—29)
- [5] 张霖,徐平,王光能. 激光电子散斑干涉测微小位移[J]. 物理实验,1998,18(5): 24—26. (Zhang L, Xu P, Wang G N. Mini-displacement measurements using electrical speckle interferometry method. *Physical Experiment*, 1998,18(5): 24—26)
- [6] 佟景伟,张东升,李鸿琦. 撞击载荷下电子散斑干涉测试方法研究[J]. 中国科学E辑,1996,26(2): 145—150. (Tong J W, Zhang D S, Li H Q. Research on electrical speckle pattern interferometry method under impact loading. *Science in China E*, 1996,26(2): 145—150)
- [7] 漆海滨,张正文,邱占武,等. 应用 ESPI 研究强激光作用下金属材料的热变形[J]. 强激光与粒子束,1994, 6(1): 107—111. (Qi H B, Zhang Z W, Qiu Z W, et al. Using ESPI to study the thermal deformation of metal materials induced by high power laser. *High Power Laser and Particle Beams*, 1994,6(1):107—111)
- [8] 漆海滨,张正文,邱占武,等. 电子散斑干涉术(ESPI)在激光加热实验中的应用[J]. 应用激光,1995,15(5): 209—212. (Qi H B, Zhang Z W, Qiu Z W, et al. Application of ESPI in laser-heating. *Applied Laser*, 1995,15(5): 209—212)
- [9] 杨运民,陈裕泽,尹益辉,等. 温升率对预载 LY12 试件热破坏影响的实验研究[J]. 强激光与粒子束 2002,14(2):201—204. (Yang Y M, Chen Y Z, Yin Y H, et al. Experimental study of effect heating speed on mechanical properties of LY12 aluminum alloys. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002,14(2):201—204)

Application of electronic speckle pattern interferometry in thermal expansion coefficient measurements

CHEN Si - ying^{1,2}, HUANG Chen - guang², CHEN Jie³, WANG Chun - kui², DUAN Zhu - ping²

(1. Photoelectricity Department, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. National Key Laboratory of Nonlinear Mechanics, Institute of Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China;

3. The fifty - second Institute of Ordnance Industry of China, Baotou 014034, China)

Abstract: In this paper, the thermal expansion coefficients of LY12 and 45 steel in different temperature - rising ratio are acquired by electronic speckle pattern interferometer (ESPI). For the pictures (300 ~ 500 frames) of each experiment, a batch processing code was designed to identify the central lines automatically instead of the old manual recognition. After displacements and real - time temperature measurements obtained, the thermal expansion coefficients can be deduced. It is proved that in the temperature - rising - ratio range concerned in this paper, the thermal expansion coefficients are almost independence of temperature - rising ratio and at the same time, they increase within a narrow range when the temperature rises.

Key words: Thermal expansion coefficient; Electronic speckle pattern interferometry (ESPI); Temperature - rising ratio