

# 非接触散斑干涉法测量高温物体应变的研究

王淑荣 李志刚

(中国科学院长春光学精密机械研究所, 应用光学国家重点实验室, 长春 130022)

**摘 要** 描述了散斑干涉高温物体应变测试实验装置工作原理及其实验结果。对钨和石墨的测量表明: 该装置可实现高温状态下材料应变测试, 测试精度达  $1 \mu\text{m}$ 。选择波长  $632.8 \text{ nm}$ 、半宽  $2.4 \text{ nm}$  的窄带滤光片, 配之预处理电路, 对  $632.8 \text{ nm}$  辐射散射能力较强的材料(诸如钨带等)可实现  $2300^\circ\text{C}$  高温非接触应变测量; 对  $632.8 \text{ nm}$  辐射散射能力较差的材料(诸如石墨等)可实现  $1500^\circ\text{C}$  高温非接触应变测量。

**关键词** 散斑, 干涉, 非接触应变仪。

## 1 引 言

经典的应变仪要求与被测件机械接触, 因而有许多缺点, 尤其对于材料高温应变的测量更是难以实施。随科技和工业进步, 迫切需要研制新型高应变分辨率、大动态范围并能承受样品本身电磁和热辐射的非接触应变测试仪。非接触应变测量方法目前有全息术、散斑成像及预先设置网格条纹的表面成像等。一般讲, 这些都是非实时的, 都包括有化学的或电学的中介过程。本文所讨论的是纯实时的散斑干涉应变测量技术。Bastias<sup>[1]</sup>及 Hercher<sup>[2]</sup>等人曾就这一方法做过详细分析, 并描述了  $-40^\circ\text{C} \sim 400^\circ\text{C}$  的低温材料的应变测量的实验结果。本文探讨这一方法在更高温度下的应用。

## 2 原 理

若两束相干激光以  $2\theta$  角相交, 则干涉的明暗条纹分别处于平分两光束夹角并且间隔

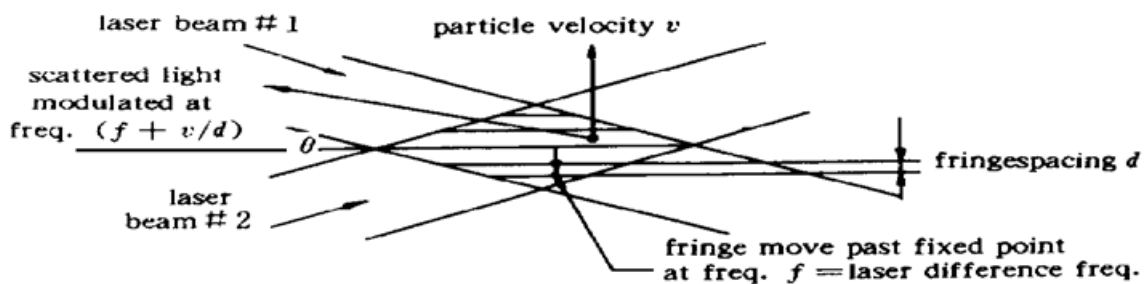


Fig. 1 Particle in fringe pattern

$d = \lambda / (2 \sin \theta)$  的一系列平面内( $\lambda$  为激光波长), 如图 1 所示。当一运动的粒子通过干涉场时, 实际上是通过一系列亮暗带。受亮暗条纹调制, 其散射光调制频率  $f' = v/d$ , 其中,  $v$  是粒子运动速度垂直于干涉条纹平面的分量。从多普勒频移角度看, 粒子沿两光束传播方向的运动分量分别为  $\pm v \sin \theta$ , 探测器方向速度为零。光束 1 散射回波的多普勒频移为  $- (v/c) \sin \theta$ , 而光束 2 散射回波的多普勒频移为  $+ (v/c) \sin \theta$ , 其中,  $v$  为光频( $\approx 4.7 \times 10^{14}$  Hz),  $c$  为光速。这样, 两个多普勒频移散射场相互干涉将产生频差为  $f'$  的调制光<sup>[3]</sup>。

$$f' = [ + (v/c) \sin \theta ] - [ - (v/c) \sin \theta ] = (2v/\lambda) \sin \theta = v/d,$$

其中,  $c \equiv v\lambda$ 。

这一原理已广泛用于激光多普勒速度计, 适于居中精度的单向速度测量。对于要求知道运动方向的速度测试, 则需用运动的干涉条纹代替静止的条纹。

图 1 中, 若两光束光频不同, 那么干涉图样将以速度  $(v_1 - v_2)/d$  运动, 即干涉以  $f = (v_1 - v_2)$  频率通过固定点。若两种频率的光是时间相干的, 则在某时刻, 瞬时位相差不仅取决于初位相还将取决于频差。利用塞曼效应使激光谱线分裂成两束不同频率的激光可满足这一条件。作者所选用的双频激光器频差为  $f = 90$  kHz。当粒子静止时, 其散射光调制频率为  $f$ ; 如果粒子运动速度为  $v$  (和干涉条纹运动方向相反时取正, 反之为负), 则散射光调制频率  $f' = f + v/d = f + (2v/\lambda) \sin \theta$ 。设两光束夹角为  $3.3^\circ$ ,  $d = 5.4 \mu\text{m}$ , 粒子速度为  $\pm 17$  mm/s, 则调制频率为  $90 \text{ kHz} \pm 3.2 \text{ kHz}$ , 给出速度对时间积分即可算出位置, 因而可直接测量位移。

图 2 为用双频氦氖激光器作光源进行横向位移非接触测量的光学示意图。双频激光器的输出由两个偏振方向相互垂直的共路组元组成, 频差 90 kHz。激光输出经过分束器后, 分成振动平面相互垂直的反射光和透射光。其透射光经反射镜改变方向, 与反射光平行, 再经  $1/2$  波片使其偏振方向旋转  $90^\circ$  (与反射光偏振方向一致)。最后, 两束光经主透镜会聚, 形成运动的干涉图样。在干涉场中, 样品粒子的散射光由探测器接收形成回波信号。双频激光器的拍频形成参考信号, 两信号同时在示波器上显示。用于探测粒子散射光的探测器为日本滨松公司 R928 光电倍增管, 工作电压为  $-500$  V 至  $-1100$  V, 阳极负载电阻  $150 \text{ k}\Omega$ 。输出直接馈入示波器和数字位相计。光电倍增管前放置了直径  $\phi 1 \text{ mm}$  的光栏, 通过主透镜成像, 选取样品光斑直径为  $1 \text{ mm}$ 。当样品粒子静止时, 激光器拍频信号(参考信号)和回波信号均调制到  $90 \text{ kHz}$ , 示波器上两波形保持稳定; 一旦样品粒子运动, 回波信号调制频率改变, 相对于参

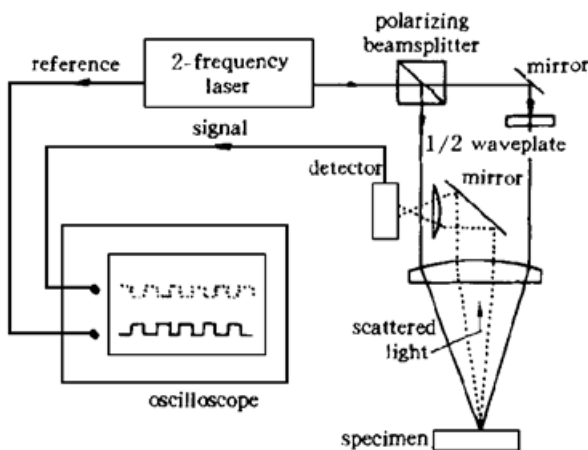


Fig. 2 The principle of the non-contacting strain measurement system

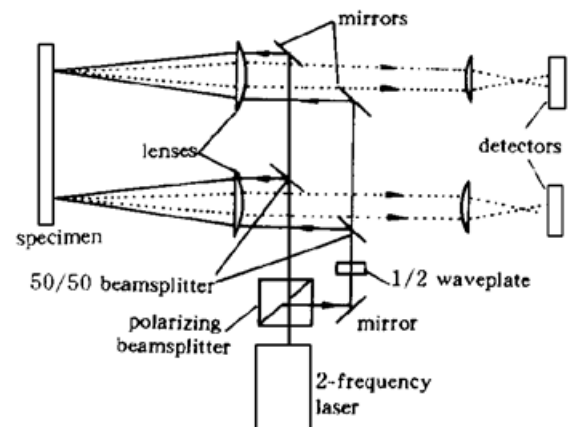


Fig. 3 Optical layout of the non-contacting strain experimental system

考信号运动,位相差发生变化。当样品粒子移动距离为  $d$  时(一个条纹间隔),示波器上两信号相对移动一个周期。因此,根据两信号的位相差可直接测出横向位移。所显示的位相差以 90 kHz 速率更新,测量频度和精度极高。

图 3 为非接触应变测试仪的光路。测量过程中需记录激光器拍频参考信号及样品上两个参考点的起始和终止回波信号,根据位相差的变化给出样品伸长量,从而计算出应变变量。装置中,工作距离为 300 mm,条纹间隔为 5.4  $\mu\text{m}$ 。原理实验装置中相关指标参数如表 1 所示。

Table 1. The parameter of the non-contacting strain measurement system

fringe spacing	5.4	$\mu\text{m}$
laser power	1.5	mW
wavelength	632.8	nm
bandwidth of filter	2.4	nm
stand-off distance	300	mm
angle between beams	3.3	degree

为压低噪声,作者根据多普勒频移带宽,设计了一个以双频激光器的差频频率为中心频率的窄带滤波器。该滤波器与前后阻抗匹配电路及放大电路共同组成了信号预处理电路。它使有用信号通过,而衰减无关频率的噪声分量。实验表明,这是信号预处理的一种切实可行的方法。

### 3 实验结果及分析

利用图 2 所示的实验装置,在常温下检测了利用非接触散斑干涉术进行应变测量的精度。样品以 10 mm/s 速度运动时,对应 1  $\mu\text{m}$  位移,示波器上两正弦波波形相对运动达 30°左右,可明显判读。本实验装置应变测量精度优于 1  $\mu\text{m}$ 。

为探讨该实验装置在高温状态下检测材料应变的可行性,分别以标准钨带灯的钨带及石墨真空炉中的石墨电极作为高温试样进行了检测。

实验中发现:由于在常温及 1000°C 左右高温情况下,背景光中不参与干涉的 632.8 nm 波长的光与 632.8 nm 干涉信号相比可忽略或不起主导作用,因而,干涉信号通过预处理电路可接收、处理。然而,高温情况则不同。表 2 给出光电倍增管高压为 -700 V 时,分别测量标准钨带灯和石墨电极所得到的实验数据。

Table 2. The variation of S/N ratio with the temperature

temperature /°C	tungsten		graphite	
	signal /mV	noise /mV	signal /mV	noise /mV
room temp.	2.0	0.05	0.4	0.03
1200	2.0	0.3	0.4	0.2
1300	2.4	0.5	0.5	0.4
1400	3.0	0.8	0.7	0.6
1500	3.5	1.4	1.2	1.2
1700	4.0	1.7	1.6	1.6
2300	2.2	2.0		

表 2 中, signal 是指预处理电路最终输出信号幅度,其中含有背景噪声及电噪声。noise

是指激光干涉信号遮挡后,完全由被测体光辐射产生的噪声(含电噪声)。这里电噪声较小,且不随背景光强变化,因此可忽略电噪声影响。

由维恩位移定律可知,任何温度下的黑体光谱辐射都有一个极大值,这个极大值所对应的波长  $\lambda_m$  与绝对温度  $T$  成反比,即:

$$\lambda_m T = b = 2.898 \times 10^{-3} \text{ mK}$$

在常温下,黑体辐射的极大值在红外区,随着黑体温度的增高,其辐射的极大值向可见区移动。

在本实验中,被测体在常温下辐射的极大值在红外区。这时背景光中能通过 632.8 nm 窄带滤光片的光与有用干涉信号相比可忽略,因此通过预处理电路,可判读并能精确给出测量结果。随着样品温度逐渐增高,辐射的极大值逐步向可见区移动,背景光中 632.8 nm 波长的光强度不断上升,当温度达到 3300 K 时,黑体辐射波长的极大值近似为 880 nm,这已十分接近激光波长 632.8 nm。因此高温情况下,由于背景光中 632.8 nm 波长的光能量相当强,且能和干涉信号同时通过窄带滤光片被光电倍增管接收,而干涉信号与之相比非常微弱,致使信噪比小于 1,无法进行判读与测量。

实验表明:样品对 632.8 nm 辐射散射能力直接影响干涉信号的强弱。标准钨带灯干涉信号远大于石墨电极(从表 2 中常温情况可看出)。常温及 1000℃左右时,背景光影响较小,样品本身散射能力的影响并不突出。随着温度的升高,背景光增强,样品对 632.8 nm 辐射散射能力将显著影响到所能实现测量的最高温度。试样对 632.8 nm 辐射散射能力强,则试样散射的干涉信号强,信噪比高,随温度的升高信噪比下降得慢(钨带灯色温 2300℃时,信噪比仍大于 1);试样对 632.8 nm 辐射散射能力差,则干涉信号弱,随温度升高,信噪比下降得快(石墨电极色温为 1500℃时,信噪比已等于 1)。因此,用同样条件测试,钨带灯能测到 2300℃,而石墨样品在 1500℃时干涉信号就淹没在背景光之中了。

实验装置中,632.8 nm 窄带滤光片是提高信号质量的关键元件,其半宽度越窄,截掉的背景光越多,所能进行应变测量的样品温度就越高。

**结 论** 本文着重讨论了利用散斑干涉术测量材料应变的原理、方法、适用的温度范围及材料对 632.8 nm 辐射散射能力对测量结果的影响。证明利用散斑干涉术对材料进行高温应变测量是切实可行的方法。选择半宽度 2.4 nm 的窄带滤光片,配之预处理电路,对 632.8 nm 散射能力较强的材料(诸如钨带灯等)可实现 2300℃高温下非接触应变测量;对 632.8 nm 散射能力较弱的材料(诸如石墨等)可实现 1500℃高温下非接触应变测量。若选择更窄的滤光片,测试温度还将大大提高。

### 参 考 文 献

- [1] P. C. Bastias, S. M. Kulkarni, K. Y. Kim *et al.*, Noncontacting strain measurements during tensile tests. *Experimental Mechanics*, 1996: 78~ 83
- [2] Michael Hercher, Geert Wyntjes, Herman DeWeerd, Non-contact laser extensometer. *Proc. SPIE-The Int. Soc. for Opt. Engng.*, 1987, **746**: 185~ 191
- [3] 王之江主编, 光学技术手册, 北京: 机械工业出版社, 1994: 1172~ 1173

## Non-Contacting High Temperature Strain Measurement

Wang Shurong      Li Zhigang

*(State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,  
The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)*

(Received 15 September 1997; revised 8 December 1997)

**Abstract** The working principle and the experimental results of a non-contacting strain measurement system is described based on laser speckle interference for high temperature sample. The measurement results for tungsten and graphite specimens show that the system can be used in the high temperature material strain measurement with a  $1\ \mu\text{m}$  accuracy. Equipped with a narrow band filter of central wavelength  $0.633\ \mu\text{m}$  and bandwidth  $2.4\ \text{nm}$  and a suitable processing circuit, the highest temperature of strain measurement reaches  $2300^\circ\text{C}$  for low roughness material such as tungsten ribbon, and reaches  $1500^\circ\text{C}$  for high roughness material such as graphite.

**Key words** speckle, interference, non-contacting strain measurement system.