

文章编号: 1001-3806(2004)02-0202-03

## 低膨胀固体材料线膨胀系数的干涉测量方法

严 琴<sup>1</sup> 李东风<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学 应用物理系, 南京 210094; 2. 南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094)

**摘要:** 固体材料的线膨胀系数在精密仪器产业及高精度实验领域是一个非常重要的物理量, 要实现对该线膨胀系数较低的固体材料进行测量, 通常采用激光干涉的方法。采用光路补偿的方法, 即激光干涉仪中两干涉臂同支架来测量低膨胀固体材料的线膨胀系数, 不但能够抵消支架膨胀对材料受热伸长的影响, 还有效地抵消了地面振动对干涉仪的影响, 并能够对线膨胀系数在  $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  量级的材料的线膨胀系数进行测量。如果改进试验工艺, 且采用条纹稳定技术, 该方法可以用于更高量级的线膨胀系数的测量。

**关键词:** 线膨胀系数; 激光干涉仪; 光路补偿; 低膨胀固体材料; 陶瓷

**中图分类号:** TH744.3 **文献标识码:** A

### Measurement of linear thermal expansion coefficient of low expansion materials using interferometry

YAN Qin<sup>1</sup>, LI Dong-feng<sup>2</sup>

(1. Department of Applied Physics, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. School of Mechanic Engineer, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

**Abstract:** The linear thermal expansion coefficient of materials is very important in the fields of precision instruments and high precision experiments. To measure the linear thermal expansion coefficient of some ultra low expansion (ULE) materials, the laser interferometer is usually used. In our experiments, the two interferential arms of the laser interferometer are fixed on one bracket, whose the purpose is to compensate the optical path changes caused by other effect except the elongation of the materials. Using this interferometer, not only the linear thermal expansion of the bracket can be counteracted, but also the ground vibration can be counteracted effectively. We measure the linear thermal expansion coefficient of the materials at the level of  $10^{-6}/^{\circ}\text{C}$  by this laser interferometer. If the technique of the experiment is improved on and interferential stripes are stabilized, this kind of interferometer can used to measure the linear thermal expansion coefficient at higher level.

**Key words:** linear thermal expansion coefficient; laser interferometer; light of beam compensation; low expansion materials; ceramics

### 引 言

在精密仪器产业及高精度实验领域, 固体材料的线膨胀系数  $\alpha$  是一个非常重要的参数, 其中  $\alpha$  可表示为<sup>[1]</sup>:

$$\alpha = (L - L_0) / L_0 T \quad (1)$$

式中,  $L_0$  为绝对零度时固体的长度,  $L$  为温度是  $T$  时固体的相应长度。如果对温度范围比较小的范围进行测量, 往往不从绝对零度开始, 而是以室温  $T_1$  作为温度起点进行测量, 固体材料的线膨胀系数可

$$\text{用右式来表示: } \alpha = \frac{L - L_1}{L_1(T - T_1)} = \frac{\Delta L}{L_1(T - T_1)} \quad (2)$$

式中,  $\Delta L$  为温度由  $T_1$  升至  $T$  时物体的伸长量。对一般的非金属固体材料来讲,  $\Delta L$  是很小的, 需要借助精密位移测量系统来测量, 常见的测量线膨胀系数的仪器是杆进式膨胀计<sup>[2]</sup>。这种膨胀计能够在较大的温度范围内 ( $23^{\circ}\text{C} \sim 1550^{\circ}\text{C}$ ) 对固体材料的线膨胀系数进行测量, 精度可达  $10^{-7}/^{\circ}\text{C}$ 。但是, 这种方法对长度测量的要求较低, 只达到  $1\mu\text{m}$ 。如果要在比较小的温度范围内精确测得长度对温度改变的响应, 必须提高长度的测量精度。因此, 笔者设计了一种激光干涉的方法在较小的温度范围内对固体材料的线膨胀系数进行测量, 长度测量精度可达  $0.01\mu\text{m}$ 。

作者简介: 严 琴 (1976-), 女, 助教, 主要从事物理方面的教学工作。

E-mail: yqgammy@163.com

收稿日期: 2003-04-07; 收到修改稿日期: 2003-08-19

### 1 测量原理及测量系统组成

为了抑制支架膨胀以及周围环境的影响,一个思路是充分补偿或抵消反射镜支架热膨胀效应,即采用光路补偿的方法。基于这种思想,采取两个干涉臂共用一个支架的方式,即在干涉仪中,两个干涉臂由同一支架支撑,如图 1 所示,He-Ne 激光器发出

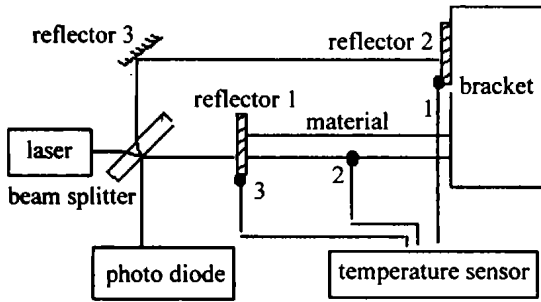


Fig. 1 Schematic diagram of thermal expansion coefficient measurement  
 的激光经分束镜分束后,其中一束垂直入射到反射镜 1 上,另一束经反射镜 3 入射到反射镜 2 上,两束激光经反射镜 1,2 反射后,在分束镜处形成干涉,干涉信号被光电接收器接收。被测物和支架受热膨胀伸长将带动反射镜 1 运动,同时支架受热膨胀也将带动反射镜 2 运动,理想情况下,两反射镜等厚,而且二者的温差为 0(实验中两反射镜的厚度差  $\leq 0.1\text{mm}$ ,它们之间的温差  $\Delta T \leq 2\text{ }^\circ\text{C}$ ),则两束光的光程差的变化就来源于待测材料的热膨胀,光电探测器接收的干涉光强信号可表达为:

$$U = \frac{U_{\max} + U_{\min}}{2} + \frac{U_{\max} - U_{\min}}{2} \cos \left[ \frac{2\pi}{\lambda} \times \Delta + \Delta \phi_0 \right] = \bar{U} + \Delta U \left[ \frac{2\pi}{\lambda} \times \Delta + \Delta \phi_0 \right] \quad (3)$$

式中,  $U_{\max}$  为干涉输出信号的极大值,  $U_{\min}$  为干涉输出信号的极小值,  $\bar{U}$  和  $\Delta U$  分别为干涉信号的极大值和极小值的平均值和差值,  $\lambda = 0.633\mu\text{m}$ ,  $\Delta \phi_0$  为两束干涉光的初始相位差,  $\Delta$  为它们之间的光程差。通过监测干涉输出信号可以得到材料长度的伸长或收缩的长度。同时,在这套干涉仪中的反射镜 1,2 及被测物上都安装了温度传感器的探头——热敏电阻(RS 公司生产,型号为 151-237),来实时监测材料的温度变化。知道了一个实验过程中被测物体的温度变化和对应的伸长(或缩短)的长度,就可以通过(2)式拟合得出被测物体的线膨胀系数。利用这种方法,可以测量陶瓷、微晶玻璃等线膨胀系数较小的材料。上述实验装置中,待测材料被卡在金属支架上,反射镜 1,2 则采用粘合剂(上海回天化工新

材料有限公司生产,5298 加成型有机硅导热胶,固化后线膨胀系数  $1.4 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ ) 分别粘在待测材料和金属支架上。整个实验装置被封装在一个封闭的带有玻璃(楔角  $\alpha \leq 3''$ ,使穿过的两束激光产生大小为  $\Delta \theta = \sqrt{2} (n - 1) \alpha$  的夹角,  $n$  为玻璃的折射率)窗口的盒子里。

### 2 温度的测量

温度的测量由热敏电阻及其后继传感电路组成的测温系统来实现。热敏电阻的线性区间在  $10\text{ }^\circ\text{C} \sim 40\text{ }^\circ\text{C}$  之间,在此温度范围内测量系统可实现温度的精确测量( $10^{-3}\text{ }^\circ\text{C}$ )。如果要采用此方法在较大的温度范围内测量线膨胀系数,可选择线性区间较大的热敏电阻。实验中的温度变化可由测得的温度信号根据温度探测器定标拟合结果得出。温度传感器输出的 3 路温度信号和光电探测器测得的光强信号被同时送入数据采集卡中,以实时记录待测材料的伸长和温度变化之间的关系。

### 3 实验结果

选择一长度为  $50.3\text{mm}$  未知线膨胀系数的陶瓷作为待测材料。图 2 显示了一组典型实验过程中

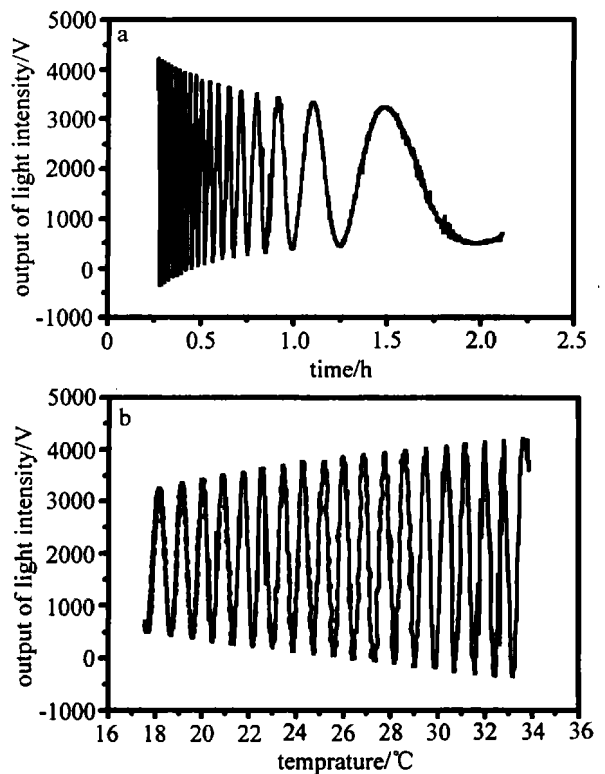


Fig. 2 Measurement result of light intensity changing with the time and temperature

记录的时间-光强曲线和将实时记录的温度探测器输出电压变换为温度后作出的温度-光强曲线。从

图2中可以看到,干涉条纹随着时间越来越稀疏,这是因为开始记录数据时,陶瓷棒温度比较高,与室温之间的温差比较大。温度变化很快,陶瓷棒缩短得很快(这里我们测量降温过程)。随着时间的增加,陶瓷棒的温度降低过程中,其与室温之间的温差不断减小,缩短的速率也会越来越慢。由图2所显示的温度-光强曲线可以看出,条纹之间的间隔是比较均匀的,这意味着每升高单位温度材料的相对伸长量相同,即在较小温度范围内,材料线膨胀系数基本上是一个常数。

#### 4 结果分析

在对线膨胀系数进行拟合之前,首先要根据温度传感器的定标曲线将其输出的电压信号转换成温度信号,这样,就将数据采集卡记录的时间光强数据序列 $\{t_i, U_i\}$ 转换成了温度光强数据序列 $\{T_i, U_i\}$ ,再通过光强找出同一时间所对应的光程差。(4)式给出了光电探测器输出的光强信号与材料伸长量之 $\Delta L(t)$ 间的关系。当伸长量达到 $\lambda/2$ 的整数倍时,出现一个条纹,具体而言光电探测器记录的光强将随温度的变化而作周期性的变化。探测器电压输出为:

$$U = \bar{U} + \frac{\Delta U}{2} \cos \left[ \frac{4\pi}{\lambda} \Delta L(t) + \Delta \phi_0 \right] \quad (4)$$

相邻的两个极大值或极小值之间对应的陶瓷的伸长为 $\lambda/2$ ,相邻的极大和极小值之间对应的陶瓷的伸长为 $\lambda/4$ ,相邻的平衡点之间对应的陶瓷的伸长也为 $\lambda/4$ 。这里采取找平衡点的方法来得到温度与相应的伸长量的数据列 $\{T_k, k\lambda/4\}$ , $k$ 为整数。对此数据列通过最小二乘法进行拟合,拟合直线的斜率就是陶瓷的线膨胀系数。图3中给出了图2测量数据的拟合结果。

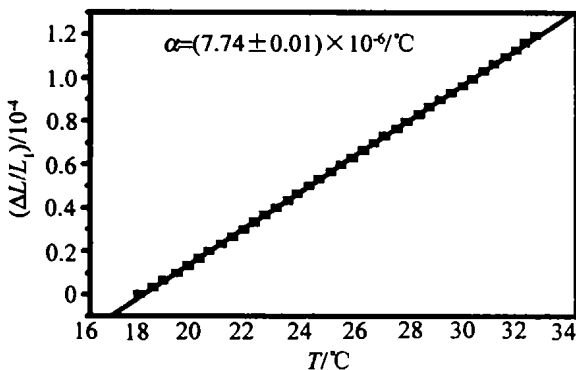


Fig. 3 Fitting result of thermal expansion coefficient of the ceramics

实验过程中系统误差的主要来源有:(1)温度传感器定标,所引入的误差为 $\Delta\alpha/\alpha \approx 0.06$ ;(2)用来定

标的温度计,所引入的误差为 $\Delta\alpha/\alpha \approx 0.02$ ;(3)支架倾斜,所引入的误差为 $\Delta\alpha/\alpha \approx 10^{-6}$ ;(4)两条测量光线不平行,所引入的误差为 $\Delta\alpha/\alpha \approx 10^{-5}$ ;(5)两个反射镜之间的温差( $\leq 2^\circ\text{C}$ ),所引入的误差为 $\Delta\alpha/\alpha \approx 0.005$ ;(6)反射镜厚度的测量误差,所引入的误差为 $\Delta\alpha/\alpha \approx 0.02$ ;(7)陶瓷原长度的伸缩,所引入的误差为 $\Delta\alpha/\alpha \approx 10^{-5}$ ;(8)粘合剂受热膨胀(固化厚度0.2mm),所引入的误差为 $\Delta\alpha/\alpha \approx 10^{-6}$ ;(9)玻璃窗口的影响(楔角 $\alpha \leq 3''$ , $\Delta\theta \leq 2''$ ),所引入的误差为 $\Delta\alpha/\alpha \approx 10^{-8}$ ;(10)空气折射率的变化,所引入的误差为 $\Delta\alpha/\alpha \approx 10^{-4}$ 。可以看出,对实验结果影响最大的是温度传感器的定标带来的系统误差,相对误差达到0.06,系统误差对实验结果的综合影响达到0.07。

表1中给出了一组待测陶瓷线膨胀系数的测量结果,其中 $\alpha_i$ ( $i=1,2,\dots,10$ )为陶瓷线膨胀系数的单次测量值, $\Delta\alpha_i$ ( $i=1,2,\dots,10$ )为陶瓷线膨胀系数单次测量值的拟合误差与系统误差的综合。可以看出,单次测量值在 $1\sigma$ 的误差范围内相互吻合。实验结果表明,所选待测陶瓷棒的线膨胀系数 $\alpha = (7.60 \pm 0.07 \pm 0.53) \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

Table 1 Result of thermal expansion coefficient of ceramics

No.	$\alpha_i$ ( $10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )	$\Delta\alpha_i$ ( $10^{-7} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ )
1	7.75	5.4
2	7.87	5.5
3	7.65	5.4
4	7.74	5.4
5	7.39	5.2
6	7.25	5.1
7	7.34	5.1
8	7.30	5.1
9	7.40	5.2
10	7.52	5.3
result	7.60 ± 0.07	5.3

#### 5 结束语

采用光路补偿的方法可以对一些线膨胀系数较低的固体材料进行测量,目前的测量精度约在 $10^{-6}/^\circ\text{C}$ 量级,如果改进实验工艺,另外利用干涉条纹稳定技术,提高测量精度( $\lambda/100$ ),这样可以进一步缩小温度调制的变化范围,以减小温度测量的要求。上述问题解决之后,采用该方法可对更高量级线膨胀系数的固体材料进行测量。

#### 参考文献

- [1] 黄淑清. 热学教程. 北京: 高等教育出版社, 1994. 321~322.
- [2] YAMADA N, ABE R, OKAJI M. Meas Sci Technol, 2001 (12): 2121~2129.