

# 双 CCD 相机法测量制导光纤线管组成材料温度性能

李睿 王晓章 唐峰 原勳捷 段德军

现代控制技术研究, 陕西 西安 710065

**摘要** 光纤线管是光纤制导武器系统的重要组成部分, 由于组成材料热膨胀系数之间的差异, 精确缠绕样式的光纤线包性能会随温度变化而发生显著变化。为保证光纤线包结构稳定性及性能可靠性, 需要对光纤线管各组成部分进行温度性能匹配研究。本文提出了一种基于双 CCD 相机的热膨胀系数测量系统。该系统采用非接触方式双光路成像放大采样, 通过图像处理得出被试样品在某温度变化区间内的轴向膨胀量。利用该系统完成对脱轴裸线包、碳纤维芯轴、聚四氟乙烯调节层以及成品光纤线管的热膨胀系数测试分析, 测试结果与理论分析和实际使用情况一致, 验证了此试验测试方法的正确性与可行性。

**关键词** 测量; 光纤线管; 热膨胀系数; 双 CCD 相机; 线轴

**中图分类号** U285.16 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP52.090604

## Measurement of the Temperature Performance for Guidance Fiber-Optic Coil Materials by using Double CCD Camera

Li Rui Wang Xiaozhang Tang Feng Yuan Mengjie Duan Dejun

*Xi'an Modern Control Technology Institute, Xi'an, Shaanxi 710065, China*

**Abstract** The fiber-optical coil is an important part of fiber-optic guidance weapon system. Due to the difference of the coefficient of thermal expansion (CTE) between the different composition materials, the performance of the accurate winding fiber-optic coil will be significant changed by the temperature. It is necessary to research the temperature matching performance of the fiber-optic coil, in order to ensure the structural stability and performance reliability. This paper presents a system to test the CTE by the double CCD camera, which is a non-contact test method. It uses the double light patch imaging amplification and sampling technology and gets the sample's axial inflation volume in a temperature range by using the image processing method. In the paper, the test and analysis of the CTE of the off-spool fiber-optic coil, carbon fiber mandrel, polytetrafluoroethylene (PTFE) adjustment layer and the complete fiber-optic coil are finished by using the system. The results are the same in the theoretical analysis and the experiment, which proves that this test system is correct and feasible.

**Key words** measurement; fiber-optic coil; coefficient of thermal expansion; double CCD camera; spool

**OCIS Codes** 060.2300; 120.6810; 040.1520

## 1 引言

光纤制导导弹采用制导光纤作为数据链, 相较于导线制导、无线电波制导、红外制导、可见光制导及激光制导导弹具有更突出的性能优点, 如保密性强、隐蔽性好、信息传输容量大、制导精度高, 而且抗电磁干扰、抗核辐射以及抗化学反应能力强, 是近年来国外重点研究的用于对付武装直升机和坦克的一种全新制导技术和制导体制<sup>[1]</sup>。

制导光纤在线轴上缠绕完成后形成的实体, 称为光纤线包, 由制导光纤和光纤专用粘接剂组成<sup>[2]</sup>。线轴由线轴座、调节层和芯轴构成。在恶劣战场使用环境下及长期储存过程中, 线包易受高低温环境影响。由于组成材料热膨胀系数 (CTE) 之间的差异, 特别是线轴与线包热膨胀系数之间的差异, 导致线包性能随温度变化而发生显著变化, 甚至出现低温开裂、高温挤出等缺陷, 导致线包结构稳定性、使用可靠性下降, 严重时会导致线包主要功能失效。基于此技术难题, 本文针对光纤线管组成材料的轴向热膨胀特性进行理论分析

收稿日期: 2015-03-25; 收到修改稿日期: 2015-04-15; 网络出版日期: 2015-07-28

作者简介: 李睿 (1985—), 女, 工程师, 主要从事光纤制导方面的研究。E-mail: li\_rui214@163.com

和试验研究。

目前关于不同材料的热膨胀系数测量技术,已有很多成熟的理论和方法。其中具有代表性的有光杠杆法、光干涉法、光纤光栅法<sup>[3]</sup>、电容法、磁场法、力传感器法<sup>[4]</sup>等。但是由于线轴/线包的体积较大、结构复杂,国内外相关热膨胀系数测试技术不能满足其特殊的测试要求。为了实现对制导光纤线轴/线包的热膨胀系数的测量,本文设计了双 CCD 相机热膨胀系数光学测试系统,测量方法为非接触式,具有测量精度高、对被测样品无破坏等优点。

## 2 组成材料对线轴/线包热膨胀系数的影响

材料的热膨胀是一种由温度变化引起的材料在尺寸上的变化。平均线膨胀系数的定义为在温度  $T_1$  和  $T_2$  间,与单位温度变化量相应的试样长度相对变化的均值,以  $\alpha_m$  表示<sup>[5]</sup>:

$$\alpha_m = (L_2 - L_1) / [L_0(T_2 - T_1)] = (\Delta L / L_0) / \Delta T, \quad (1)$$

式中  $L_0$  是基准温度  $T_0$  下的试样长度,  $L_2$  为温度  $T_2$  下的试样长度,  $L_1$  为温度  $T_1$  下的试样长度,  $\Delta T$  表示  $T_2$  和  $T_1$  间的温度差,  $\Delta L$  表示  $L_2$  和  $L_1$  的差值。

制导光纤由多种材料组成,纤芯为石英材料,内涂层为聚丙烯酸酯材料,编织增强材料为芳纶纤维,外涂层为聚丙烯酸酯类材料。粘接剂的主要成分为有机硅橡胶材料。其中,石英的 CTE 很小,芳纶纤维的径向 CTE 为  $5.9 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$ ;而高分子材料的 CTE 较大,聚丙烯酸酯类材料为  $(1.8 \sim 2.25) \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ ,光纤粘接剂的 CTE 为  $4.1 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ <sup>[6]</sup>。结构组成材料中,编织芳纶约占制导光纤截面积的一半,聚丙烯酸酯类截面积约占总面积的 37%,光纤粘接剂的截面积占总面积的 5%。因此,芳纶和聚丙烯酸酯类材料在光纤线包的热膨胀过程中起主导作用。光纤线包的线性热膨胀系数  $\alpha_{of}$  与其组成材料的横截面积  $A_i$ 、热膨胀系数  $\alpha_i$  和杨氏模量  $E_i$  满足 Turner 模型<sup>[7]</sup>:

$$\alpha_{of} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i E_i \alpha_i}{\sum_{i=1}^n A_i E_i}, \quad (2)$$

$$\varepsilon = \alpha_{of} \Delta T, \quad (3)$$

式中  $\varepsilon$  为温度变化  $\Delta T$  时的应变变量。由于线包缠绕残余应力的存在和粘接剂作用,线包内部的应力分布非常复杂且呈现各向异性。一般来讲,其径向应变很小(受缠绕光纤的约束)而轴向应变很大<sup>[8]</sup>。因此本文主要针对线轴/线包的轴向应变进行测试与分析。

## 3 CTE 光学测试系统测量原理与装置

测量热膨胀系数双 CCD 光学测试系统如图 1 所示。测试系统的测量光路如图 2 所示,被试线包/线轴置于温箱内后,被白光灯照射,被测线包/线轴反射的光分别经过由透镜  $L_1$ 、 $L_3$  和  $L_2$ 、 $L_4$  构成的双通道成像系统进入两个 CCD 相机,其中透镜  $L_1$ 、 $L_3$  的焦距为 1000 mm,  $L_2$ 、 $L_4$  的焦距为 150 mm。由对焦透镜构成双通道望远系统,其与两个分辨率为 600 pixel $\times$ 512 pixel 的 CCD 相机置于高精密度位移平台上。通过光学望远系统将被测线包/线轴两侧边缘处的标志线分别成像于两个 CCD 的感光面,获取标志线图像,再通过图像采集输入计算机,进一步进行图像处理,提取标志线相对温度变化的平移距离,进而计算出随温度变化产生的热膨胀伸长量。

结合精确可控的温度变化,即可获得被测线包/线轴在某一温度区间的平均 CTE。这种测量方法操作方便、可靠性高、又可以实现实时检测。实验装置如图 3 所示。

线轴/线包 CTE 测试过程中,首先开启测试系统中的高低温箱,设置温度并运行,其次启动双 CCD 图像记录设备(即光纤 CTE 测试系统),记录起始温度下线包/线轴标志线区域图像,并由图像采集卡输入计算机。每隔单位时间采集记录一组图像(根据待测对象材质不同而定),将时间间隔前后两幅图像输入图像识别软件进行处理,获得此段时间温度变化引起的线轴/线包膨胀伸长(收缩)量,样品测试过程中膨胀变形量采集图如图 4 所示。

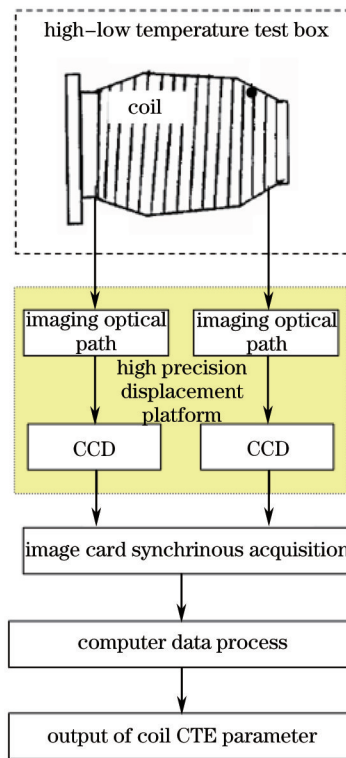


图1 CTE测试系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of CTE test system

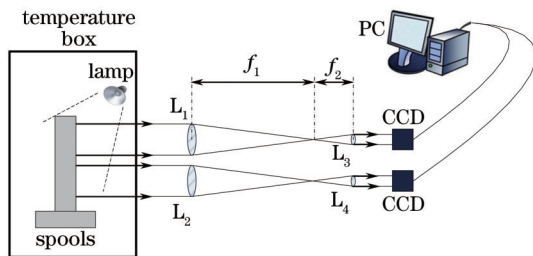


图2 CTE测试系统测量光路

Fig.2 Light path of the CTE test system



图3 线轴/线包热膨胀系数测试系统

Fig.3 Spool/coil CTE test system

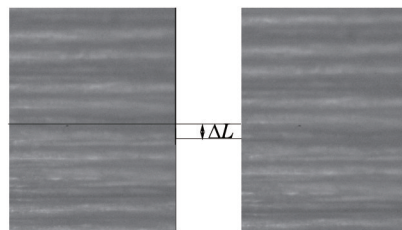


图4 30 °C~40 °C 光纤线包的膨胀变形

Fig.4 Fiber coil expansion from 30 °C to 40 °C

#### 4 热膨胀特性的测试与分析

利用CTE测试系统对光纤线包、碳纤维线轴和聚四氟乙烯调节层CTE的规律性进行测试分析,为了模拟长期储存而可能经历的高低温环境,将样品放置于特制的具有透明玻璃面板的专用高低温试验箱中,试验箱内温度可以在 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 间变化,试验箱上的控制屏幕可实时监测箱内温度变化情况。测试开始时,在初始温度时记录两组图像,然后设置温度,运行试验箱待其内部温度达到设置温度后开始每隔一段时间记录一组图像,样品设置的温度区间为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于各部分材料热学特性差异,其温度差异也较大,因此线包要达到温度平衡状态需要较长的时间。试验中每隔 $5\sim 10\text{ min}$ 记录一组图像,获得每段时间间隔线包/线轴的膨胀(收缩)量,

当某一时间区间的膨胀伸长(收缩)量达到总膨胀量的5%,即可判断线包/线轴达到了温度平衡状态。

以下分别是脱轴裸线包、碳纤维线轴、带聚四氟乙烯调节层碳纤维线轴以及最终成品线包的各温度区间的平均热膨胀系数的试验测试结果。

脱轴裸线包试验中,选用两发精密缠绕成型后的线包进行脱轴处理,不同线包绕制过程中会出现的涂胶不均匀、缠绕张力不均匀等问题<sup>[9]</sup>,使得这两发裸线包内部不同区域的应力分布不同,从而导致低温下的膨胀系数有所差异,由此原因引起的试验误差在允许范围内<sup>[10]</sup>。试验测试结果如图5所示,50℃时线包的热膨胀系数为 $4 \times 10^{-4}/\text{℃}$ ,而当温度降低至-50℃时,其热膨胀系数为 $1.5 \times 10^{-4}/\text{℃}$ 。从试验结果的整体趋势得出,裸线包的热膨胀系数随温度降低而减小。

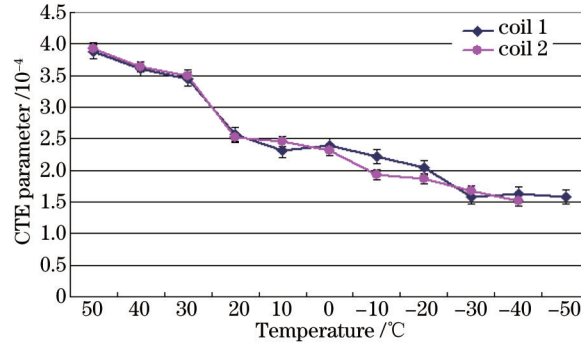


图5 脱轴裸线包热膨胀系数测试结果  
Fig.5 CTE of fiber coil without spools

芯轴热膨胀系数测试试验中,测试用芯轴的组成材料为各向异性的碳纤维复合材料,可使得芯轴与线包在环向上的热膨胀系数得到匹配<sup>[11]</sup>,但在轴向上目前无法做到完全匹配。试验选用H和W两种类型共5个碳纤维线轴进行测试,测试结果如图6所示。从试验结果得出,H型碳纤维线轴热膨胀系数随温度的降低而减小,W型的碳纤维线轴热膨胀系数高低温下变化不大,一直保持在 $3 \times 10^{-5}/\text{℃}$ 左右,整体性能较为稳定,但与裸线包相比膨胀系数相差了一个数量级。

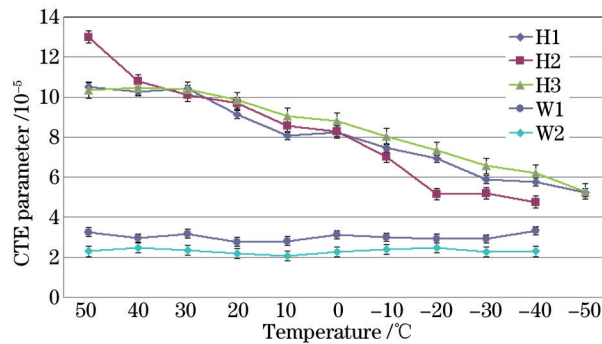


图6 碳纤维线轴热膨胀系数对比  
Fig.6 CTE of carbon fiber spools

采用聚四氟乙烯调节层是解决脱轴裸线包与碳纤维芯轴热膨胀系数匹配的一种方法<sup>[12]</sup>,利用双CCD光学测试系统,对几种加聚聚四氟乙烯调节层的线轴和采用此种线轴缠绕的成品线包进行热膨胀系数测试分析。通过试验测试得出,聚四氟乙烯的热膨胀系数在10℃~20℃间有明显增大,如图7所示,通过聚四氟乙烯材料特性<sup>[13]</sup>可知,出现这一现象是正常的。碳纤维线轴与调节层间加润滑油的线轴在高温下的热膨胀系数略高于不加润滑油的线轴,低温下二者热膨胀系数基本一致。加油线轴热膨胀系数基本与聚四氟乙烯一致。成品线包由于受聚四氟乙烯调节层限制,热膨胀系数小于裸线包,略大于聚四氟乙烯调节层,试验结果如图8所示。测试结果与基于此种线轴缠绕的成品线包实际使用情况一致。

## 5 结 论

针对制导用光纤线包由于各组成部分材料热膨胀系数不匹配而造成的低温开裂、高温挤出等问题,本文设计了一种双CCD相机测量制导光纤线管组成材料温度性能测试系统,此方法为非接触式测量方法,测

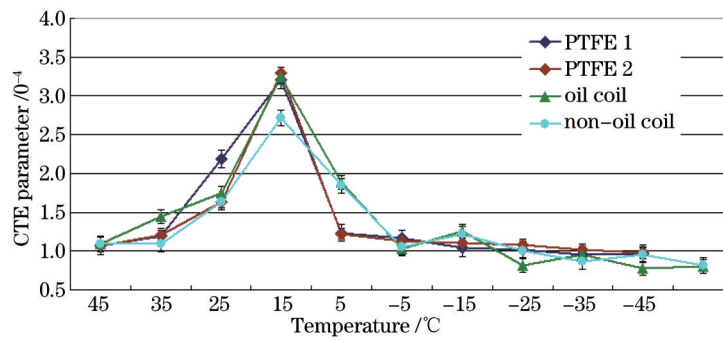


图7 几种碳纤维加聚四氟乙烯调节层线轴膨胀系数对比

Fig.7 Comparison of CTE of carbon fiber spools with regulation layer in polytetrafluoroethylene (PTFE)

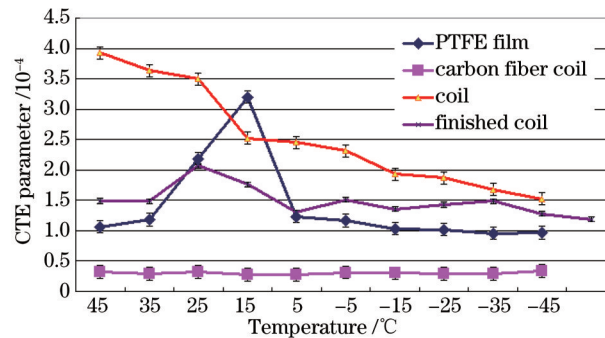


图8 光纤线管与其组成部分热膨胀系数对比

Fig.8 Comparison of CTE of fiber coil, PTFE and spools

量精度高,测量过程对被测样品无损坏。利用此测量系统,对光纤线包、碳纤维线轴以及聚四氟乙烯调节层的轴向热膨胀参数随环境温度变化情况进行试验测试。测试结果表明,碳纤维芯轴与裸线包热膨胀系数相差较大,并且采用聚四氟乙烯调节层设计可以有效实现两者热膨胀系数的匹配。测试结果与理论分析和实际使用情况相同,验证了此测试系统的正确性和可靠性。

### 参考文献

- 1 Wu Jing, Shang Haiying, Wei Zhengshi. Development of fiber optic guidance technologies and devices[J]. Optical Fiber & Electric Cable, 2006, 38(8): 0805004.  
吴静, 商海英, 韦正世. 光纤制导技术及器件的发展[J]. 光线与电缆及其应用技术, 2006, 38(8): 0805004.
- 2 Tang Haolong, Fu Xiuhua, Liu Guojun, *et al.*. Study and fabrication of low loss filter film in torpedo fiber optic guidance system[J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42(11): 1289-1294.  
唐昊龙, 付秀华, 刘国军, 等. 鱼雷光纤制导系统低损耗滤光片的研制[J]. 光子学报, 2013, 42(11): 1289-1294.
- 3 Qiu Yu, Liu Bowei. Optical method for measuring the thermal expansion coefficient[J]. Mechanics in Engineering, 1997, 19(6): 45-46.  
邱宇, 刘伯伟. 材料热膨胀系数的光测法[J]. 力学与实践, 1997, 19(6): 45-46.
- 4 Lu Guan, Xu Yiming, Qiu Zixue. Measure thermal expansion coefficients of ring-shaped spare parts by optical fiber technology[J]. Instrument Technique and Sensor, 2013, (12): 100-102.  
陆观, 徐一鸣, 邱自学. 基于光纤技术的环形零件热膨胀系数测量[J]. 仪表技术与传感器, 2013, (12): 100-102.
- 5 GB/T 4339-2008. Test methods for Thermal Expansion Characteristic Parameters of Metallic Materials[S]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, 2008.  
GB/T 4339-2008. 金属材料热膨胀特征参数的测定[S]. 北京: 国家质量技术监督局, 2008.
- 6 He Jianyun, Liu Yakang. Theoretical prediction and experimental study on linear thermal expansion property of SF-TPU composite[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology, 2000, 27(4): 25-26.  
贺建云, 刘亚康. SF-TPU 复合材料线热膨胀性能研究[J]. 北京化工大学学报, 2000, 27(4): 25-26.
- 7 Turner P S. Thermal-expansion stresses in reinforced plastics [J]. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1946, 37(1-2): 239-245.

- 8 He Tianbo, Bayanheshig, Qi Xiangdong, *et al.*. Diffraction characteristic analysis of reflection volume holographic gratings at non-uniform swelling or shrinking[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(2): 0209018.  
何天博, 巴音贺希格, 齐向东, 等. 非均匀膨胀与收缩下反射体全息光栅衍射特性分析[J]. 中国激光, 2014, 41(2): 0209018.
- 9 Kang Weirui, Ma Baoji, Chen Ruining. Analyse of faculties and causes in the optical fiber precision winding[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2005, 25(4): 246-249.  
康葳蕤, 马保吉, 陈瑞宁. 光纤精密缠绕的缺陷及其原因分析[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(4): 246-249.
- 10 Cai Chunping, Gao Xiumin. Dependence of strength in guided fibers[J]. Journal of Applied Optics, 2003, 24(6): 21-25.  
蔡春平, 高秀敏. 制导光纤强度的依赖关系[J]. 应用光学, 2003, 24(6): 21-25.
- 11 Ma Guofeng, Wu Weiping, Gao Yu. Studies on the orthotropic carbon fiber composite materials bobbin for winding an optical fibre[J]. Fiber Composites, 2011, 28(4): 23-25.  
马国峰, 吴伟萍, 高禹. 光纤缠绕用正交各向异性碳纤维复合材料线轴的研究[J]. 纤维复合材料, 2011, 28(4): 23-25.
- 12 Li Xi, Wang Lingyun, Li Jie, *et al.*. Repetitive high voltage pulsed power for polytetrafluoroethene film surface processing [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(4): 045001.  
李喜, 王凌云, 李杰, 等. 用于聚四氟乙烯表面处理的重复频率高压脉冲电源[J]. 强激光与粒子束, 2014, 26(4): 045001.
- 13 Yan Xiangyu, Yuan Ying, Zhang Shuren. Fabrication and thermal expansion behavior of SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> ceramic filled PTFE composites[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2013, 30(6): 108-113.  
闫翔宇, 袁颖, 张树人. SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>/聚四氟乙烯复合材料的制备及热膨胀性能[J]. 复合材料学报, 2013, 30(6): 108-113.

栏目编辑: 殷建芳