复合材料在热真空下的尺寸稳定性测试方法

岳丽清,张继友

(北京空间机电研究所,北京 100190)

摘　要:航天光学遥感器在轨运行时的环境与地面装调时有很大差异,对于采用复合材料的遥感器而言,在轨运行时由于材料受湿气解析的影响其几何尺寸将发生变化,进而影响遥感器的成像质量。因此,模拟在轨环境下复合材料几何尺寸稳定性测试,分析其在轨条件下的几何尺寸变形是十分必要的。提出了一种在热真空环境下,采用激光双频干涉原理对复合材料几何尺寸变形量的高精度测试方法,对该方法进行了方案验证与精度分析。针对采用碳纤维蒙皮/铝蜂窝夹层结构复合材料的某相机前镜筒进行了实际的热真空环境下几何尺寸变形量测试。结果表明,试验数据与理论数值在数量级上相同,提出的测试方案可行,为复合材料模拟在轨环境下几何尺寸变形量提供了一种测试手段。

关键词:尺寸稳定性;　复合材料;　热真空

中图分类号:V443.5　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1007-2276(2014)11-3713-05

Dimensional stability testing method of composite materials in thermal vacuum environment

Yue Liqing, Zhang Jiyou

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100190, China)

Abstract: The in-orbit environment for space remote sensor is much more different from that in the ground; the deformation of the composite materials which is affected by the moisture desorption will result in the imaging quality of space remote sensor. The methods of measurement for the dimensional stability of the composite materials must be studied specially. A method which was using the principle of laser interference for measuring the deformation of the composite materials when subjected to the in-orbit thermal-vacuum environmental conditions was proposed. The method was verified and the precision was analyzed. It indicates that the method has higher precision than others. A experience which was based on the carbon fiber/aluminous honeycomb core composite materials was done to analyze the dimensional stability of the composite materials. The results show that the experimental data and theoretical data are the same in order of magnitude. The method is feasible and can be used in testing the dimensional stability of composite materials.

Key words: dimensional stability;　composite materials;　thermal vacuum

收稿日期:2014-03-10;　**修订日期**:2014-04-13

基金项目:国家重大科技专项工程

作者简介:岳丽清(1984-),女,工程师,硕士,主要从事光学装调与检测方面的研究。Email:yueli002@gmail.com

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

0 引 言

复合材料是由两种或两种以上不同性质的材料,通过物理或化学的方法,在宏观上组成具有新性能的材料。各种材料在性能上互相取长补短,产生协同效应,使复合材料的综合性能优于原组成材料而满足各种不同的要求。由于复合材料具有重量轻、强度高、加工成型方便、弹性优良、耐化学腐蚀和耐候性好等特点,已逐步取代木材及金属合金,广泛应用于航空航天、汽车等领域,在近几年更是得到了飞速发展[1-2]。

材料是制造航天光学遥感器的基础,遥感器的结构与机构采用的复合材料主要由纤维和基体构成[3]。航天光学遥感器在轨运行时环境与地面装调时有很大差异,对于复合材料而言,主要受到湿气解析附、温度变化和温度梯度变化的影响,加之复合材料自身具有组分多元性、结构多重性、失效模式多样性,这些特点使得复合材料结构性能演化预测十分复杂[4-5]。鉴于复合材料在湿热环境下性能变化比较复杂,因此,分析复合材料的湿热性能成为使用者非常关心的问题,对复合材料在热真空环境下的尺寸稳定性研究成为光学遥感领域亟待解决的问题。文中提出了一种材料在热真空环境下的尺寸稳定性测试方法,分析了测试精度,试验验证该方法切实可行。

1 测量原理

对复合材料热真空环境下的尺寸稳定性测试拟采用激光双频干涉原理实现,把被测材料放置在真空罐内,在被测件的两端固定线性(或者角度)反射镜和干涉镜,激光头放在真空罐的外边,出射的激光通过真空罐的窗口玻璃照射到反射镜和干涉镜上,调整好光路,便可进行试验测量。激光双频干涉仪可实现 1 nm 分辨率的长度测量,在角度测量中分辨率为 0.01″,能满足实际测试精度要求。具体测量原理如下文所述。

1.1 线性测量原理

利用激光双频干涉仪进行线性测量的原理如图1 所示,由激光头出射的光束经过分光镜后分为两束:参考光束和测量光束,参考光束经固定的角锥棱镜反射后重新回到分光镜,而测量光束则经过一个可移动的角锥棱镜反射后返回分光镜,两束光叠加并发生干涉,最后重新回到激光头内部,由探测器记录干涉条纹。如果测量光路长度发生改变,干涉光束的相对相位也会随之变化,由此产生的相长干涉和相消干涉循环导致叠加光束强度的周期变化。角锥反射镜每移动半个波长,就会出现一个光强变化的循环。通过计算这些循环可测量角锥反射镜的位移量[6]。

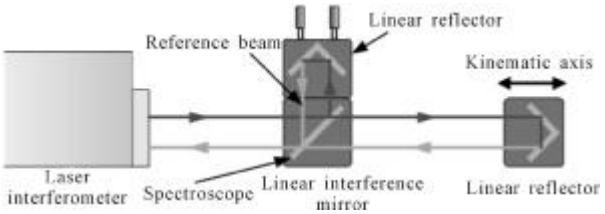

图 1 线性测量原理

Fig.1 Principal of linear measurement

1.2 光路架设

测试时,被测件置于真空罐内,并通过控温套进行控温。将激光头放置于真空罐外,线性干涉镜(即参考镜)和反射镜(即移动镜)均置于真空罐内,并通过光具座牢固的固定在待测工件上,如图 2 所示。在整个测试过程中,需保证任何时刻光路均不被障碍物所阻挡。如果参考镜和移动镜之间的距离在试验中发生了微量变化,就可以通过主机读出。

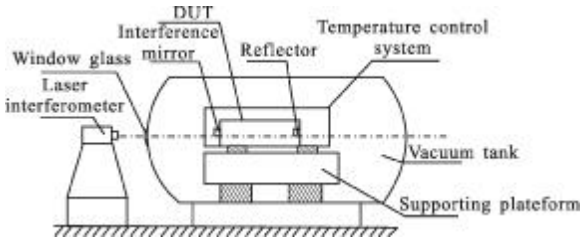

图 2 测试示意图

Fig.2 Test schematic

1.3 影响因素分析

这种测试方案主要受两个因素影响:真空罐窗口玻璃面形;抽真空时空气折射率的变化对测量光路光程的影响。

(1) 真空罐窗口玻璃面形的影响

由于测量光束需要经过真空罐的窗口玻璃,因此在测试中必须考虑到窗口玻璃本身的面形以及其在真空状态下的面形变化对测试精度的影响。经试验发现如果窗口玻璃面形较差将会破坏整个测量光路的干涉信息,进而降低测量信息的灵敏度甚至使

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

测量仪器不能正常工作;但若采用光学窗口玻璃,其整体面形虽然也不是非常高,但是局部任意 5 mm 直径区域内面形均可达到 0.001 甚至更高, 对测试系统带来的影响非常小,可以忽略。

(2) 抽真空瞬间空气折射率变化的影响

真空罐在抽真空瞬间空气折射率会发生较大变化,这个因素在测量过程中需要重点考虑。

1966 年,Edlen 提出了一个基于空气温度、湿度、压强的折射率经验公式(1)、(2)[7],它适用于波长从红外到紫外的频谱范围,精度为$\pm 5\times 10^{-8}$。1996 年,B. K. Birch[8]通过实验和比对,提出了改进的 Edlen 公式(2)、(3),不确定度为$\pm 3\times 10^{-8}$:

$$(n-1)_s\times 10^8=8\,343.05+\frac{2\,406\,294}{130-\sigma^2}+\frac{15\,999}{3.89-\sigma^2} \quad (1)$$

$$(n-1)_{tp}=\frac{p(n-1)_s}{96\,095.45}\times\frac{[1+10^{-8}(0.601-0.009\,72t)p]}{1+0.003\,661t} \quad (2)$$

$$(n_{tpf}-n_{tp})\times 10^{10}=-f(3.734\,5-0.040\,1\sigma^2) \quad (3)$$

公式(1)中,$(n-1)_s$ 是标准状态下的空气折射率;σ 是真空中的波数(单位 μm^{-1});公式(2)中,$(n-1)_{tp}$ 是标准空气在温度 t(单位℃),压力 **P**(单位 Pa)时的折射率;公式(3)表示含有 f(单位 Pa)水蒸气分压力的潮湿空气和总压力相同的干燥空气的折射率之差。公式中适用的标准空气是指空气中各主要组分的摩尔百分含量为 78.09%的氮,20.95%的氧,0.93%的氩和 0.03%的二氧化碳的干燥空气[9-12]。

将公式(3)微分,把公式(1)和(2)代入,得到:

$$dn_{tpf}=\frac{\partial n_{tpf}}{\partial p}dp+\frac{\partial n_{tpf}}{\partial t}dt+\frac{\partial n_{tpf}}{\partial f}df \quad (4)$$

结合实验室的环境参数:温度 t=20 ℃,压强 **P**=101 325 Pa;半导体激光器波长为 0.632 8 μm。可由公式(4)得到实验室空气折射率随压强、温度和湿度的变化公式:

$$\Delta n=(0.287\,76\Delta p-0.267\,4\Delta t-0.003\,6\Delta f)\times 10^{-8} \quad (5)$$

试验过程中, 被测物体以及测量光路均放置在恒温装置中。由于湿度变化的系数非常小,空气湿度变化对折射率的影响可以忽略不计。压强和测试光路中温度的变化可以实时采集和记录, 通过后期数据处理消除其带来的影响。

1.4 测量方案验证

验证试验如图 3 所示, 真空罐窗口上安装的是光学玻璃, 将激光双频干涉仪的线性反射镜固定不动, 线性干涉镜固定在一维平移台上并随平移台做相应移动,将该装置放入真空罐内。利用双频激光干涉仪透过窗口对一维电动平移台进行位移精度标定(由于激光双频测试精度非常高,目前笔者课题组还没有可以标定其仪器, 因次此次试验采用双频标定高精度一维平移台)。分别在抽真空之前以及 1 000 Pa 时移动一维平移台(平移台分别做正向和负向移动),并记录数据。通过比对常压和 1 000 Pa 时的测试数据进而验证光学窗口玻璃在真空状态下的面形变化对测试的影响。在整个测试过程中一维平移台一直处于加电状态。

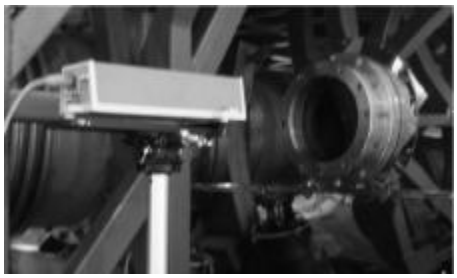

图 3 真空状态下激光双频干涉仪对一维平移台进行测试

Fig.3 Test for one-dimensional translation table using a laser interferometer in vacuum station

表 1 为 1 000 Pa 时激光双频测得的一维平移台移动的数值与理论数值的比较,其中修正因子 k_1=

表 1 1 000 Pa 时激光双频干涉仪测得的平移台的移动误差

Tab.1 Error of the translation table movement tested by laser interferometer under 1 000 Pa

Value tested by laser interferometer under 1 000 Pa/μm	Theoretical value of translation table /μm	Accuracy of translation table/μm
-1 246.69	-1 248.38	1.69
-2 490.24	-2 496.75	6.51
-3 741.68	-3 745.13	3.45
-4 989.17	-4 993.50	4.33
-6 238.64	-6 241.88	3.24
-7 485.25	-7 490.25	5.00
-8 734.72	-8 738.63	3.91
-9 980.35	-9 987.00	6.65
-11 233.00	-11 235.40	2.4
-12 483.70	-12 483.80	0.1
-13 730.40	-13 732.10	1.70
PV		6.55
RMS		2.04

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

0.999 0,此数值已经剔掉折射率的影响,在真空状态下测得平移台的平移精度为 6.585 μm(PV)。表 2 为在常压状态时激光双频测得的一维平台的移动量与理论值的差,修正因子 k_2=0.998 7,在常压状态下测得平移台的精度为 6.870 μm(PV)。

表 2 常压时激光双频干涉仪测得的平移台的移动误差

Tab.2 Error of translation table movement tested by laser interferometer under normal pressure

Value tested by laser interferometer under 1 000 Pa/μm	Theoretical value of translation table /μm	Accuracy of translation table/μm
-1 244.40	-1 248.75	4.35
-2 490.99	-2 497.50	6.51
-3 742.93	-3 746.25	3.32
-4 990.56	-4 995.00	4.44
-6 238.03	-6 243.75	5.72
-7 487.25	-7 492.50	5.25
-8 736.47	-8 741.25	4.78
-9 981.81	-9 990.00	8.19
-11 232.20	-11 238.75	6.55
-12 486.20	-12 487.50	1.30
-13 733.00	-13 736.25	3.25
PV		6.89
RMS		1.89

表 1 与表 2 的 PV 值之差为 0.34,RMS 值之差为 0.15。因此试验数据具有可信性,即采用激光双频干涉原理进行材料热真空环境下的尺寸稳定性测试是可行的。

2 某相机前镜筒热稳定性试验

采用激光双频干涉仪对某相机的前镜筒进行尺寸稳定性测量,首先进行湿气解析试验,解析完成后再检测镜筒在温度循环条件下的尺寸稳定性。

2.1 试验介绍

试验装置示意图见图 2 所示。相机镜筒放置在真空罐内,用激光双频干涉仪监测相机镜筒在湿气解析和温度循环试验中的轴向尺寸稳定性变化。其中解析试验中当镜筒变形不明显,湿气接近 0%时停止试验;温度循环试验中每次循环在最高、最低温度时保持时间视镜筒无明显变化为准。

2.2 试验结果

2.2.1 湿气解析试验

该项试验共进行了 18 天,前镜筒线性变化曲线如图 4 所示。以下给出的结果已经删除粗大误差并修订由于折射率改变引入的误差。

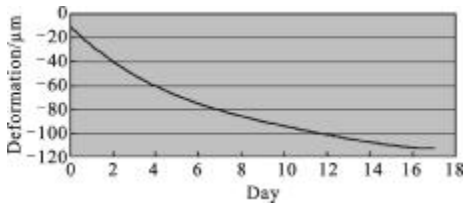

图 4 湿气解析附试验中前镜筒轴向变形随时间变化的曲线

Fig.4 Axial displacement curve of lens barrel affected by moisture desorption

2.2.2 温度循环试验

共进行了 6 个高低温循环试验,其中低温循环的结果如图 5 所示,高温循环的结果如图 6 所示。

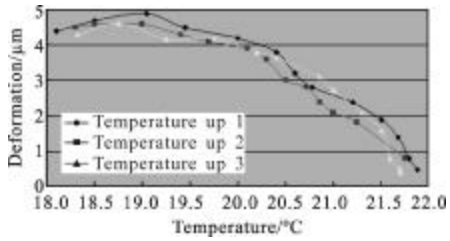

图 5 高温循环试验中前镜筒轴向变形曲线

Fig.5 Axial displacement curves of lens barrel in high-temperature cycle test

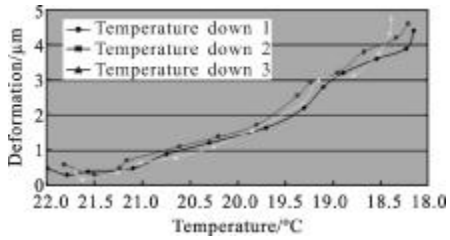

图 6 低温循环试验中前镜筒轴向变形曲线

Fig.6 Axial displacement curves of lens barrel in low-temperature cycle test

通过方案论证和误差的剔除,两个工况的测试结果与材料的理论性能进行比对,结果表明采用激光双频干涉仪对前镜筒尺寸稳定性的测试具有一定的可行性,能够准确反映前镜筒的变化。

3 试验误差分析

3.1 误差源

(1) 折射率改变对测量光路的影响

湿气解析附试验中真空罐内环境的改变会引起空气折射率的变化,从而使得光程的理论值发生改变进而影响激光双频干涉仪示数的准确性。

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com

(2) 周围环境扰动对激光双频干涉仪测量的影响

由于激光双频干涉仪具有很高的测量灵敏性,因此外界环境的扰动会对试验结果造成一定的影响。

3.2 误差源的分析与剔除

(1) 测量光程变化量与压强变化量的关系

因为:

$$\Delta L=\Delta n\times L \tag{6}$$

已知反射镜和干涉镜之间的距离为 $L=1\,396$ mm,将公式(5)带入公式(6)可得:

$$\Delta L=(0.401\,71\Delta p-0.373\,29\Delta t)\times 10^{-2} \tag{7}$$

利用公式(7)可以把折射率对光程的影响剔除。

(2) 周围环境的扰动

可以通过将试验装置放置在同一独立隔振地基上来减小该项扰动。

各个误差源的情况及影响见表 3。

表 3 试验误差分配情况

Tab.3 Test error distrbution

Test error	Method to eliminate the error
Effect of refractive index	Using calculation to eliminate the error
Ambience	Using shake insulation toft when experimented

4 结 论

(1) 用双频激光干涉原理进行复合材料热真空环境下的尺寸稳定性测试在原理上看是完全可行的。为复合材料模拟在轨环境下几何尺寸变形量测试提供了一种有效的测试手段。

(2) 通过试验验证手段,将真空条件下对测试造成的影响完全剔除,测试精度与在大气状态下一致,能够满足目前对复合材料模拟在轨环境下几何尺寸变形量的测试要求。

(3) 该方法已经在某相机前镜筒稳定性试验中得到了应用,试验结果与理论数值在数量级上相同,能够准确反映前镜筒在湿气解吸和温度循环时的尺寸变化。

参考文献:

[1] Wang Yongxian, Li Jinglin, Xu Yanjun, et al. Application of high volume fraction SiC/Al composite material in satellite remote sensor [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(7): 1299-1304. (in Chinese)
王永宪, 李景林, 许艳军, 等. 高体份 SiC/Al 复合材料在星载遥感器中应用[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(7): 1299-1304.

[2] Wo Xiyuan. Development and application of the foreign advanced compound material in satellite structure [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 1994, 15(3): 53-62. (in Chinese)
沃西源. 国外先进复合材料发展及其在卫星结构中的应用[J]. 航天返回与遥感, 1994, 15(3): 53-62.

[3] Tan Weizhi, Hu Jingang. Spacecraft System Engineering[M]. Beijing: China Science & Technology Press, 2009. (in Chinese)
谭维炽, 胡金刚. 航天器系统工程 [M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2009.

[4] Johnson Robert R. Thermal expansion properties of composite materials[R]. NASA CR-165632, 1981: 20-29.

[5] Fang Baodong, Zhang Jiangang, Shen Zhichun, et al. The thermal deformation analysis of honeycomb sandwich structure composite materials in spacecraft [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2007, 28(3): 44-48. (in Chinese)
方宝东, 张建刚, 申智春, 等. 航天器蜂窝夹层结构复合材料热变形分析[J]. 航天返回与遥感, 2007, 28(3): 44-48.

[6] Su Junhong. Research on the technology measurement of length by double wavelength laser interference using phase shift[J]. Infrared and Laser Engineering, 2003, 32(4): 359-363. (in Chinese)
苏俊宏. 双波长激光干涉移相式测量长度技术研究[J]. 红外与激光工程, 2003, 32(4): 359-363.

[7] Edlen B. The refractive index of air [J]. Metrologia, 1966, 28(2): 71-80.

[8] Birch K P, Downs M J. An updated Edlen equation for the refractive index of air[J]. Metrologia, 1993, 30: 155-162.

[9] Ye Xiaoyou, Gan Xiaochuan, Chang Haitao, et al. The improvement of measuring precision for refractive index of air using the method of Edlen equation calculating with environmental parameters of air [J]. Acta Metrologica Sinica, 2008, 29(4A): 69-73. (in Chinese)
叶孝佑, 甘晓川, 常海涛, 等. 提高环境参量法测量空气折射率精度的研究[J]. 计量学报, 2008, 29(4A): 69-73.

[10] Bonsch G, Potulski E. Measurement of the refractive index of air and comparison with modified Edlen's formulael [J]. Metrologia, 1998, 35: 133-139.

[11] Han Yan, Qiang Xiwen, Feng Jianwei, et al. Height distribution profiles and its application of atmosphere refractive index[J]. Infrared and Laser Engineering, 2009, 38(2): 267-271. (in Chinese)
韩燕, 强希文, 冯建伟, 等. 大气折射率高度分布模式及其应用[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(2): 267-271.

[12] Beer J S, Penzes W B. The NIST length scale interferometer [J]. Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology, 1999, 104: 225-252.

PDF 檔案使用 "pdfFactory Pro" 試用版本建立 www.pdffactory.com