

真空热环境下不同涂覆层光纤传输损耗特性影响研究

张景川¹, 张 雯², 杨晓宁¹, 裴一飞¹

(1. 北京卫星环境工程研究所, 北京 100094; 2. 中国空间技术研究院 通信卫星事业部, 北京 100094)

摘 要: 为满足光纤光栅传感技术在高真空热环境下的应用, 分析了丙烯酸酯和聚酰亚胺 2 种不同涂覆层单模紧套光纤作为传输光纤, 在高真空热环境下对 FBG 峰值功率的影响, 并进行了实验验证。首先, 设计了高真空热环境下传输光纤等效模型; 接着, 设计了不同涂覆层光纤传输损耗特性影响实验方案, 搭建了硬件在环检测平台; 最后, 进行了实验验证, 探索了在高真空热环境条件下, 不同涂覆层单模传输光纤随着温度、真空度变化对 FBG 反射谱功率峰值影响规律。实验结果表明: 真空度从常压降至 10^{-4} Pa 水平再恢复至常压, 丙烯酸酯和聚酰亚胺 2 种不同涂覆层单模传输光纤温度从常温降至 -196 °C 再恢复至常温, 历经 224 h, FBG 反射谱功率峰值均不发生变化, 为光纤传感技术在高真空 (压力约为 10^{-4} Pa 水平)、热环境 ($-196\sim 25$ °C 循环) 中应用提供理论及实验依据。

关键词: 高真空热环境; 光纤光栅; 涂覆层; 反射谱

中图分类号: TN253 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.1118002

Research on influence of characteristic of optical fiber transmission loss with different covers in vacuum thermal environment

Zhang Jingchuan¹, Zhang Wen², Yang Xiaoning¹, Pei Yifei¹

(1. Beijing Institute of Spacecraft Environment Engineering, Beijing 100094, China;

2. China Institute of Telecommunication Satellite, China Academy Space Technology, Beijing 100094, China)

Abstract: To satisfy the application of fiber grating sensor technology in high vacuum thermal environment, FBG on two different kind of sleeve compactly single model fiber covered by acrylate and polyimide were researched. Influence of the cover on the peak wavelength power of FBG in high vacuum thermal environment was analyzed and verified. Firstly, experimental program of influence on FBG reflection spectrum characteristics was designed and then a hardware-in-the-loop detection platform was set up. Finally, the influence of temperature and vacuum on the reflection peak power of FBG in different coating single-mode transmission fiber under high vacuum thermal environment was studied and verified. Experimental results indicated that: when vacuum varied from normal pressure to 10^{-4} Pa level and then return to normal pressure, temperature of two different coating single-mode transmission fiber dropped to -196 °C from room temperature and then returned to room temperature, after 224 hours, the peak power of the FBG reflectance spectrum did not change. It provides the theoretical and experimental basis for the application of optical fiber sensing technology in high vacuum (pressure about 10^{-4} Pa level) and thermal environment ($-196\sim 25$ °C temperature cycle).

Key words: high vacuum thermal environment; fiber grating; cover; reflectance spectrum

收稿日期: 2019-07-05; 修订日期: 2019-08-15

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ030915)

作者简介: 张景川(1982-), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事光纤在航天领域测温测应变方面的研究。Email: jcw1014@163.com

0 引言

随着我国航天器型号研制要求不断提高,对在地面模拟空间高真空热环境下,实时监测航天器结构状态参数(如加速度、应变等)及环境参数(如温度、湿度、压力等)的需求已非常迫切^[1-2]。光纤光栅多参量复合传感技术可以满足整星及其外露结构件(如网状天线、桁架结构、太阳翼等)真空热试验应用需求^[3]。航天器真空热试验在地面空间环境模拟设备(以下简称,环模设备)内完成,环模设备可以模拟太空的高真空、冷黑背景^[4-5]。

光纤光栅多参量复合传感系统中,传输光纤安置在环模设备内部极端环境中,需要能够承受高真空(压力约为 10^{-4} Pa 水平)、热环境(-196~150 °C 温度循环)因素影响,光纤传输质量不会产生不可接受的劣化。麦克唐纳-道格拉斯与洛克希德-马丁公司研究表明,光缆中的 Teflon、ETFE 氟化塑料,Hytrek 和 Kynar 材料经历高低温变化会面临热膨胀和低温收缩问题,引起传输损耗增加,同时会改变传输光的极化,影响偏振态。NASA 戈德堡宇航中心研究表明,光缆的组成材料(缓冲层,加强件和护套)发生收缩或膨胀,而涂覆光纤保持原始长度,光纤性能不会改变^[6]。国内外专家也同步开展了射线

辐射对光纤的辐射效应研究,测量并分析光纤在辐射作用下参数的变化,如光纤受辐射而产生的感生损耗等。利用实验结果,评估在辐射环境下光纤传输性能变化及使用寿命,减小辐射对光纤性能影响^[7-8]。上述研究只是集中于光纤在地面常压环境下的单环境因素实验,在空间高真空、热环境综合因素影响下的光纤传输性能及其空间环境试验方法研究还未见报道。

为满足光纤光栅传感技术在高真空热环境下的应用,文中开展空间高真空热环境下不同涂覆层光纤传输性能试验方法研究,采用丙烯酸酯和聚酰亚胺 2 种不同涂覆层单模紧套光纤作为传输光纤,设计了光纤布拉格光栅传感器 (Fiber Bragg Grating, FBG) 反射谱峰值功率影响实验方案,进行高真空热环境条件下实验验证,探索了不同涂覆层单模传输光纤随着温度、真空度变化对 FBG 反射谱功率峰值影响规律,为光纤传感技术在空间高真空热环境中的应用提供依据与试验数据参考。

1 实验方案

1.1 实验设计

航天器真空热试验过程中,光纤传感系统现场布置位置如表 1 所示。

表 1 光纤传感系统布置位置

Tab.1 Position of fiber sensor system

Module	Location	Environment	Environment parameters
Fiber grating sensor	Located on the space vehicle surface in the chamber	High vacuum thermal environment	Pressure is 10^{-4} Pa; Temperature cycled of -196~150 °C
Fiber in chamber	Hanged in the chamber space and shroud	High vacuum thermal environment	Pressure is 10^{-4} Pa; Temperature cycled of 25--196~25 °C
Fiber out of chamber	Out of the chamber	Normal pressure and temperature	Pressure is 10^5 Pa; Temperature is 25 °C
Demodulator	Out of the chamber	Normal pressure and temperature	Pressure is 10^5 Pa; Temperature is 25 °C

为了满足解调仪免受环模设备内部高真空度与高低温循环影响,北京卫星环境工程研究所研制了一种高气密性多芯光纤穿舱密封连接器,漏率 $<1.0 \times 10^{-7}$ Pa·L/s (以下简称,光纤穿舱连接器,已申请专利),实现了光纤高气密性无插拔直通密封,目的是保证光信号无损传输,同时保持环模设备内部高真空度,利用该连接器可以满足光纤传感系统无电器件(传感器与

传输光纤)置于环模设备内部,解调仪(光源、光电转换模块与数采模块等带电元器件)置于环模设备外部,免受环模设备内部空间环境影响。

为了探索航天器真空热试验过程中,不同涂覆层单模紧套传输光纤随着温度、真空度变化对 FBG 反射谱功率峰值影响规律,不引入 FBG 本身由于空间环境因素影响,而导致 FBG 反射谱功率峰值而产

生附加波动,文中设计了高真空热环境下传输段光纤等效模型,如图 1 所示。

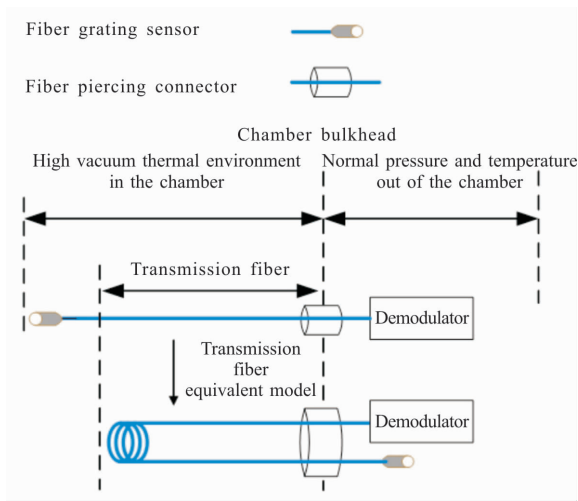


图 1 传输段光纤等效模型示意图

Fig.1 Equivalent model of the transmission part of the fiber

以单根光纤为例,如图 1 所示,解调仪置于环模设备外部大气室温环境下正常工作,将 1 根单模紧套光纤首端通过 FC/APC 接口连接解调仪,通过光纤穿舱连接器进入环模设备内部,再打圈折回通过光纤穿舱连接器,光纤尾端连接 FBG,实现了只考核不同涂覆层单模紧套传输光纤随着温度、真空度变化对 FBG 反射谱功率峰值影响的目的。

文中采用 2 根丙烯酸酯和 2 根聚酰亚胺涂覆层单模紧套光纤作为研究对象,将不同涂覆层单模紧套光纤首端通过 FC/APC 接口连接解调仪,依次通过光纤穿舱连接器进入环模设备内部,再打圈折回通过光纤穿舱连接器,光纤尾端连接 FBG,组成实测传输光纤链路。

1.2 实验系统

图 2 为不同涂覆层光纤对光栅反射谱特性影响实验系统原理图。它主要由环模设备、光纤穿舱连接

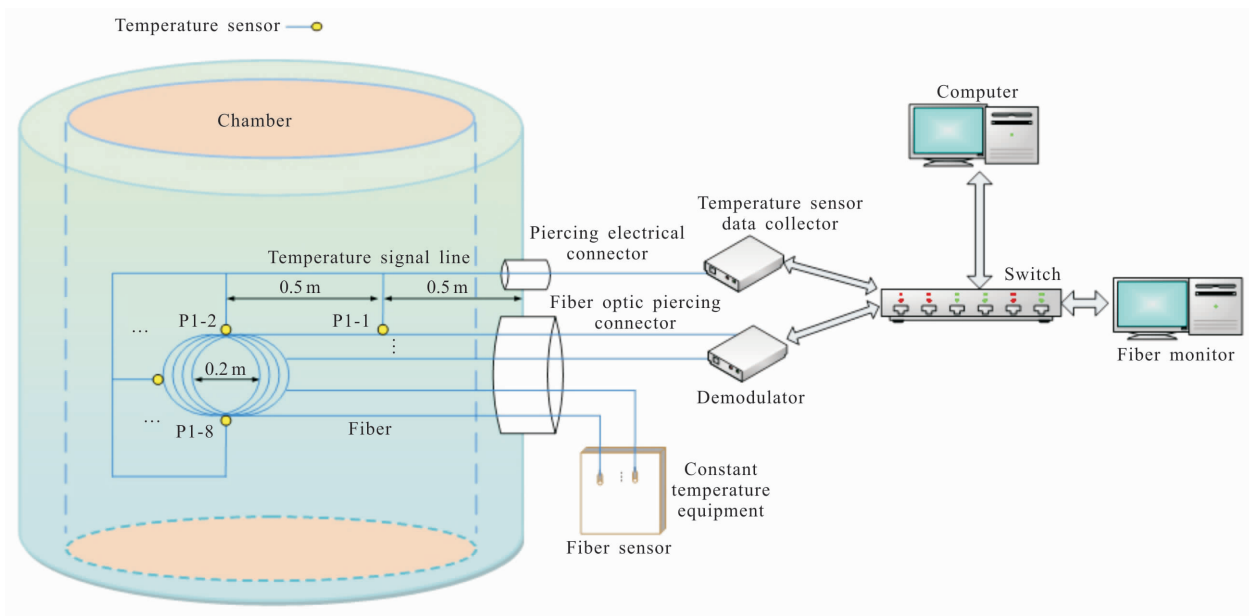


图 2 系统组成原理框图

Fig.2 Block diagram of the system composition

器、光纤传感系统及温度测量系统组成,实验系统各部分功能如下:

- (1) 环模设备模拟太空的高真空、冷黑背景;
- (2) 在环模设备内部传输光纤表面均匀布置 8 个铂电阻温度传感器,温度测量系统完成光纤表面温度的测量;
- (3) 采用光纤穿舱连接器将不同涂覆层单模紧套光纤组成传输光纤链路;
- (4) 采用 4 支光纤光

栅,置于容器外部的恒温设备内部,光纤传感系统完成光栅功率谱的数据采集。

1.3 实验工况

文中根据航天器真空热试验过程,设计了 4 个试验工况,工况设置见表 2,每个工况条件下均实时监测光纤外表面温度,环模设备内部真空度与 FBG 功率谱。

表 2 实验工况

Tab.2 Test conditions

Working condition	Environment	Environment parameters
1	Normal pressure and temperature	Pressure is 10^5 Pa; Temperature is (25 ± 5) °C
2	Vacuum precooling	Pressure decrease from 10^5 Pa to 10^{-4} Pa; Temperature decrease from 25 °C to (-196 ± 10) °C
3	Vacuum and deep cold	Pressure is 10^{-4} Pa; Temperature is (-196 ± 10) °C
4	Temperature and pressure reply	Pressure increase from 10^{-4} Pa to 10^5 Pa; Temperature increase from (-196 ± 10) °C to (25 ± 5) °C

2 实验结果与分析

2.1 实验现场

文中采用丙烯酸酯 (Acrylate, Acr) 和聚酰亚胺 (Polyimide, Pol) 2 种不同涂覆层单模紧套光纤: 包层外径 (124.8 ± 1) μm; 涂覆层外径 (245 ± 7) μm; 紧套光纤外径 (900 ± 50) μm。光纤光栅传感解调仪采用 MOI 公司的 SM125, 采用北京卫星环境工程研究所的 KM 系列空间环模设备模拟空间高真空热环境: 极限真空度可达: 7×10^{-5} Pa; 温度范围: $-200\sim 150$ °C。温度测量系统、真空测控系统与光纤传感系统采集时钟同步。检测实验现场如图 3 所示。

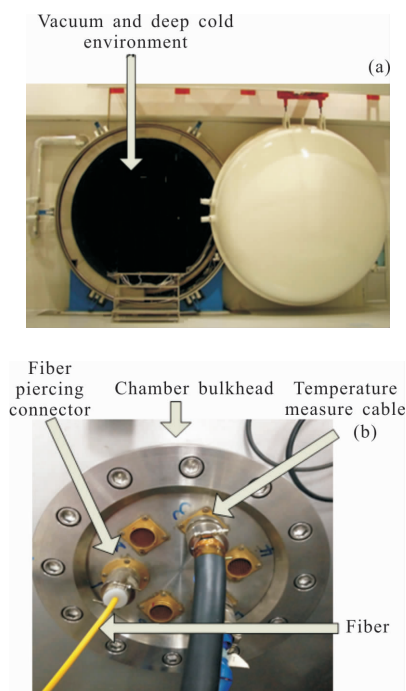


图 3 实验现场图
Fig.3 Test in field

实验期间, 温度测量系统对环模设备内部光纤链路的 8 个测温点进行了温度测量, 采集周期为 60s, 历经 224 h, 共计采样 13 480 个, 温度曲线如图 4 所示。

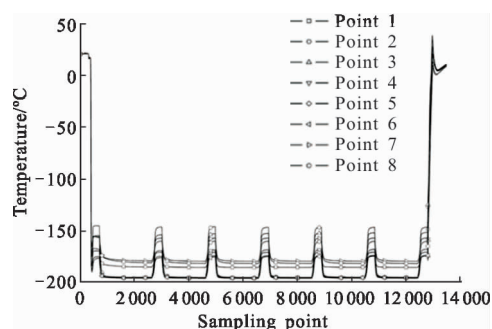


图 4 测点温度曲线图
Fig.4 Curves of temperature at test point

真空测控系统对环模设备内部真空度进行了测量与控制, 采集周期为 60 s, 历经 224 h, 共计采样 13 480 个, 文中计算环模设备内部真空度 P' 为对数取值, 其表达式为:

$$P' = \lg P \quad (1)$$

式中: P 为环模设备内部真空度; P' 为真空度对数取值, $P' \in [-4, 5]$ 。文中对光纤链路的 8 个测温点求平均值 T'

$$T' = \frac{\sum_{i=1}^8 T_i}{8} \quad (2)$$

真空度与测点平均温度曲线如图 5 所示。

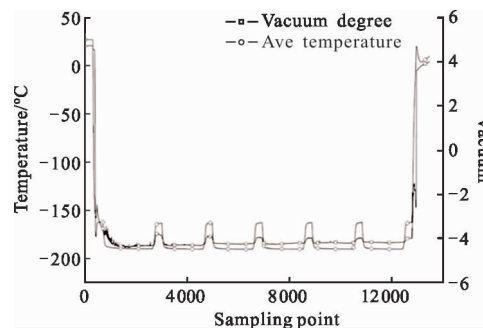


图 5 真空度与测点平均温度曲线图

Fig.5 Curves of average temperature and vacuum of the test point

由图 4 与图 5 可知, 环模设备充分模拟了高真空热环境, 光纤链路在容器内部经历了抽真空复压

($10^5 \sim 10^{-4} \sim 10^5$ Pa)、低温热循环(-196~25 °C)过程,符合实验工况设计要求。

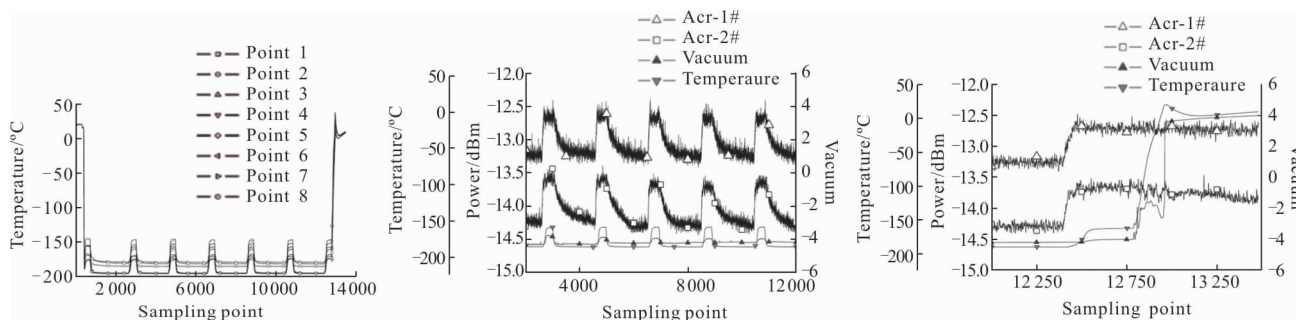
2.2 光功率结果

2.2.1 丙烯酸酯涂覆层光纤

解调仪对丙烯酸酯涂覆层光纤连接的恒温设备

内部 Acr-1#FBG 与 Acr-2#FBG 进行了功率谱峰值测量,采集周期为 60 s,历经 224 h,共计采样 13 480 个,数据曲线如图 6 所示。

如图 6 所示,各工况条件下 FBG 功率峰值数据统计分析如下,具体参数见表 3。



(a) 工况 1 和工况 2 阶段曲线

(b) 工况 3 阶段曲线

(c) 工况 4 阶段曲线

(a) Curves of working condition 1 and 2

(b) Curves of working condition 3

(c) Curves of working condition 4

图 6 不同工况数据曲线

Fig.6 Curves of different working conditions

表 3 实验工况数据

Tab.3 Data of test conditions

Working condition	Environment	Count number	Environment parameters	Acr-1#FBG/dBm	Acr-2#FBG/dBm
1	Normal pressure and temperature	0-310	Pressure is 10^5 Pa; Temperature is (25 ± 5) °C	-12.75 ± 0.25	-13.81 ± 0.18
2	Vacuum precooling	310-750	Pressure decrease from 10^5 Pa to 10^{-4} Pa; Temperature decrease from 25 °C to (-196 ± 10) °C	-12.71 ± 0.29	-13.72 ± 0.29
2	Vacuum precooling	750-1 000	Pressure decrease from 10^5 Pa to 10^{-4} Pa; Temperature decrease from 25 °C to (-196 ± 10) °C	Decrease from -12.71 to -13.06	Decrease from -13.72 to -13.91
2	Vacuum precooling	1 000-2 500	Pressure decrease from 10^5 Pa to 10^{-4} Pa; Temperature decrease from 25 °C to (-196 ± 10) °C	-13.18 ± 0.38	-14.20 ± 0.29
3	Vacuum and deep cold	2 000-12 000	Pressure is 10^{-4} Pa; Temperature is (-196 ± 10) °C	-13.05 ± 0.61	-14.06 ± 0.58
4	Temperature and pressure reply	12 250-12 750	Pressure increase from 10^{-4} Pa to 10^5 Pa; Temperature increase from (-196 ± 10) °C to (25 ± 5) °C	Increase from -13.33 to -12.77	Increase from -14.3 to -13.68
4	Temperature and pressure reply	12 750-13 500	Pressure increase from 10^{-4} Pa to 10^5 Pa; Temperature increase from (-196 ± 10) °C to (25 ± 5) °C	-12.72 ± 0.3	-13.77 ± 0.31

(1) 在工况 1 常压常温阶段, Acr-1#FBG 功率峰值稳定在-12.75 dBm, Acr-2#FBG 功率峰值稳定在-13.81 dBm;

(2) 当进入工况 2 抽真空预冷阶段, 压力由 10^5 Pa 水平降至约 10^{-317} Pa 水平, 温度由 25 °C 降至 (-178.5 ± 5) °C 整个过程, Acr-1#FBG 功率峰值稳定在-12.71 dBm, Acr-2#FBG 功率峰值稳定在-13.72 dBm, 与工况 1 常压常温阶段相比, FBG 功率峰值没有发生变化;

(3) 在工况 2 阶段, 当压力由 10^{-317} Pa 水平降至约 10^{-416} Pa 水平, 温度由 (-178.5 ± 5) °C 降至 (-188.5 ± 5) °C 整个过程, Acr-1#FBG 功率峰值缓慢下降了 0.3 dBm 并稳定在-13.06 dBm, Acr-2#FBG 功率峰值缓慢下降了 0.1 dBm 并稳定在-13.91 dBm, 这是由于光纤经历高低温变化发生了低温收缩, 同时由于光纤局部温度不同, 发生热变形程度不同, 引起传输损耗增加;

(4) 当进入工况 3 高真空冷黑阶段, 压力保持在

$10^{-4.4}$ Pa 水平, 温度在 (-189.89 ± 5) °C 与 (-163.1 ± 5) °C 之间交替循环, Acr-1#FBG 功率峰值并稳定在 (-13.05 ± 0.61) dBm, Acr-2#FBG 功率峰值稳定在 (-14.06 ± 0.58) dBm, 但如图 11 所示, Acr-1#FBG 与 Acr-2#FBG 功率峰值随着温度单调变化;

(5) 当进入工况 4 复压回温阶段, 压力由 $10^{-4.16}$ Pa 水平升至约 $10^{-3.17}$ Pa 水平, 温度由 (-188.5 ± 5) °C 升至 (-178.5 ± 5) °C, Acr-1#FBG 功率峰值由 -13.33 dBm 升至 -12.77 dBm, Acr-2#FBG 功率峰值由 -14.3 dBm 升至 -13.68 dBm, 这是由于光纤经历高低温变化发生了受热膨胀, 光纤弯折半径变大, 降低了传输损耗;

(6) 在工况 4 阶段, 压力由 $10^{-3.17}$ Pa 水平升至约

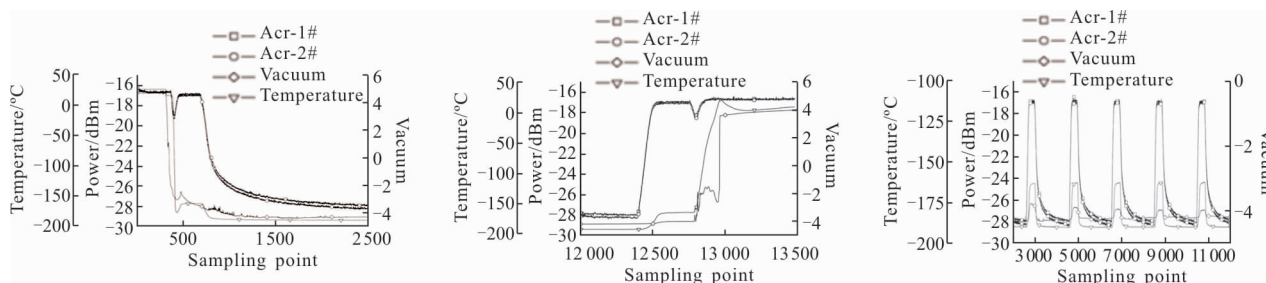
10^5 Pa 水平, 温度由 (-178.5 ± 5) °C 升至 25 °C, 整个过程, Acr-1#FBG 功率峰值稳定在 (-12.72 ± 0.3) dBm, Acr-2#FBG 功率峰值稳定在 (-13.77 ± 0.31) dBm, FBG 功率峰值恢复至工况 1 常压常温阶段水平。

2.2.2 聚酰亚胺涂覆层光纤

解调仪对聚酰亚胺涂覆层光纤连接的恒温设备内部 Pol-1#FBG 与 Pol-2#FBG 进行了功率谱峰值测量, 采集周期为 60 s, 历经 224 h, 共计采样 13 480 个, 数据曲线如图 7 所示。

如图 7 所示, 各工况条件下 FBG 功率峰值数据统计分析如下, 具体参数见表 4。

(1) 在工况 1 常压常温阶段, Pol-1#FBG 功率峰



(a) 工况 1 和工况 2 阶段曲线

(b) 工况 3 阶段曲线

(c) 工况 4 阶段曲线

(a) Curves of working condition 1 and 2

(b) Curves of working condition 3

(c) Curves of working condition 4

图 7 不同工况数据曲线

Fig.7 Curves of different working conditions

表 4 实验工况数据

Tab.4 Data of test conditions

Working condition	Environment	Count number	Environment parameters	Pol-1#FBG/dBm	Pol-2#FBG/dBm
1	Normal pressure and temperature	0-310	Pressure is 10^5 Pa; Temperature is (25 ± 5) °C	-16.65 ± 0.25	-16.67 ± 0.23
2	Vacuum precooling	310-500	Pressure decrease from 10^5 Pa to $10^{-2.83}$ Pa; Temperature decrease from 25 °C to -175.3 °C, and then increase to (-162.5 ± 5) °C	Decrease from -16.65 to -17.03 , and then increase to -16.82	Decrease from -16.67 to -17.2 , and then increase to -17.07
3	Vacuum and deep cold	500-2 000	Pressure decrease from $10^{-2.83}$ Pa to $10^{-4.16}$ Pa; Temperature decrease from (-162.5 ± 5) °C to (-188.5 ± 5) °C	Decrease from -16.82 to -27.76	Decrease from -17.07 to -27.94
3	Vacuum and deep cold	2 000-12 000	Pressure is $10^{-4.40}$ Pa; Temperature cycling of (-189.89 ± 5) °C to (-163.1 ± 5) °C	Cycling between -27.82 ± 0.18 and -17.88 ± 0.6	Cycling between -28.14 ± 0.16 and -18.12 ± 0.5
4	Temperature and pressure reply	12 000-12 600	Pressure increase from $10^{-4.40}$ Pa to 10^{-4} Pa; Temperature increase from (-189.89 ± 5) °C to (-162.55 ± 5) °C	Increase from -27.82 to -17.01	Increase from -28.14 to -17.08
4	Temperature and pressure reply	12 600-13 500	Pressure increase from 10^{-4} Pa to 10^5 Pa; Temperature increase from (-162.55 ± 5) °C to 25 °C	-16.6 ± 0.25	-16.7 ± 0.23

值稳定在 -16.65 dBm, Pol-2#FBG 功率峰值稳定在 -16.67 dBm;

(2) 当进入工况 2 抽真空预冷阶段, 压力由

10^5 Pa 水平降至约 $10^{-2.83}$ Pa 水平, 温度由 25 °C 降至 -175.3 °C 又升至 (-162.5 ± 5) °C 过程, Pol-1#FBG 功率峰值由 -16.65 dBm 降至 -17.03 dBm 又升至 -16.82 dBm,

Pol-2#FBG 功率峰值由 -16.67 dBm 降至 -17.2 dBm 又升至 -17.07 dBm, 这是由于光纤经历高低温变化发生了低温收缩与升温膨胀, 引起传输损耗波动变化;

(3) 在工况 2 阶段, 当压力由 $10^{-2.83}$ Pa 水平降至约 $10^{-4.16}$ Pa 水平, 温度由 (-162.5 ± 5) °C 降至 (-188.5 ± 5) °C 整个过程, Pol-1#FBG 功率峰值缓慢下降了 9.94 dBm 并稳定在 -16.82 dBm, Pol-2#FBG 功率峰值缓慢下降了 9.87 dBm 并稳定在 -27.94 dBm, 这是由于光纤经历高低温变化发生了低温收缩, 引起传输损耗增加;

(4) 当进入工况 3 高真空冷黑阶段, 压力保持在 $10^{-4.4}$ Pa 水平, 温度在 (-189.89 ± 5) °C 与 (-163.1 ± 5) °C 之间交替循环, Pol-1#FBG 功率峰值在 -27.82 dBm 与 -17.88 dBm 间交替, Pol-2#FBG 功率峰值在 (-28.14 ± 0.16) dBm 与 (-18.12 ± 0.5) dBm 间交替, 但如图 7 所示, Pol-1#FBG 与 Pol-2#FBG 功率峰值随着温度单调变化, 但是当温度稳定时, 光纤变形状态固化后, 功率峰值不在波动;

(5) 当进入工况 4 复压回温阶段, 压力由 $10^{-4.16}$ Pa 水平升至约 10^{-4} Pa 水平, 温度由 (-188.5 ± 5) °C 升至 (-162.55 ± 5) °C, Pol-1#FBG 功率峰值由 -27.82 dBm 升至 -17.01 dBm, Pol-2#FBG 功率峰值由 -28.14 dBm 升至 -17.08 dBm, 由此可以认为, 当真空度没有变化时, 温度是光纤传输损耗影响主要因素, 这是由于光纤经历高低温变化发生了受热膨胀, 光纤弯折半径变大, 降低了传输损耗;

(6) 在工况 4 阶段, 压力由 10^{-4} Pa 水平升至约 10^5 Pa 水平, 温度由 (-162.55 ± 5) °C 升至 25 °C, 整个过程, Pol-1#FBG 功率峰值稳定在 (-16.6 ± 0.25) dBm,

Pol-2#FBG 功率峰值稳定在 (-16.7 ± 0.23) dBm, FBG 功率峰值恢复至工况 1 常压常温阶段水平。

2.2.3 不同涂覆层光纤实验结果对比

由图 8、图 9 和表 5 所示, 随着温度、真空度变

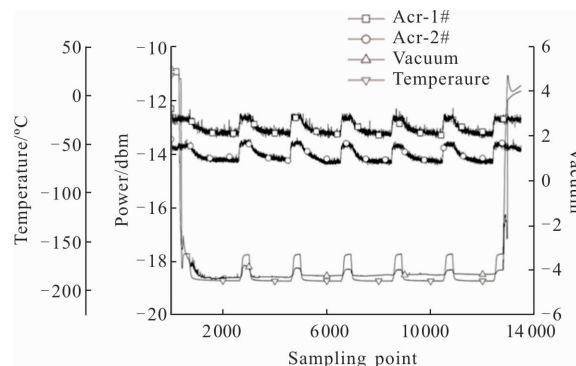


图 8 丙烯酸酯涂覆层光纤真空热实验阶段数据曲线

Fig.8 Curves of test on acrylate covered fiber in vacuum thermal environment

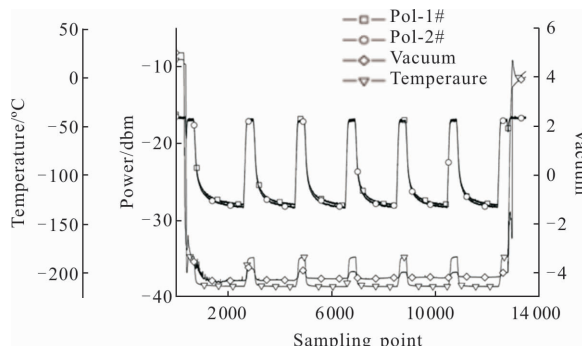


图 9 聚酰亚胺涂覆层光纤真空热实验阶段数据曲线

Fig.9 Curves of test on polyimide covered fiber in vacuum thermal environment

表 5 实验工况数据不同涂覆层数据对比

Tab.5 Comparison of different cover data under test conditions

Working condition	Environment	Count number	Environment parameters	Pol-1#FBG/dBm	Pol-2#FBG/dBm
1	Normal pressure and temperature	0-310	Pressure is 10^5 Pa; Temperature is (25 ± 5) °C	-16.65 ± 0.25	-16.67 ± 0.23
2	Vacuum precooling	310-500	Pressure decrease from 10^5 Pa to $10^{-2.83}$ Pa; Temperature decrease from 25 °C to -175.3 °C, and then increase to (-162.5 ± 5) °C	Decrease from -16.65 to -17.03 , and then increase to -16.82	Decrease from -16.67 to -17.2 , and then increase to -17.07
3	Vacuum and deep cold	500-2 000	Pressure decrease from $10^{-2.83}$ Pa to $10^{-4.16}$ Pa; Temperature decrease from (-162.5 ± 5) °C to (-188.5 ± 5) °C	Decrease from -16.82 to -27.76	Decrease from -17.07 to -27.94
3	Vacuum and deep cold	2 000-12 000	Pressure is $10^{-4.40}$ Pa; Temperature cycling of (-189.89 ± 5) °C- (-163.1 ± 5) °C	Cycling between -27.82 ± 0.18 and -17.88 ± 0.6	Cycling between -28.14 ± 0.16 and -18.12 ± 0.5
4	Temperature and pressure reply	12 000-12 600	Pressure increase from $10^{-4.40}$ Pa to 10^{-4} Pa; Temperature increase from (-189.89 ± 5) °C to (-162.55 ± 5) °C	Increase from -27.82 to -17.01	Increase from -28.14 to -17.08
4	Temperature and pressure reply	12 600-13 500	Pressure increase from 10^{-4} Pa to 10^5 Pa; Temperature increase from (-162.55 ± 5) °C to 25 °C	-16.6 ± 0.25	-16.7 ± 0.23

化,丙烯酸酯涂覆层光纤作为传输光纤对 FBG 反射谱功率峰值影响最小,聚酰亚胺涂覆层光纤对 FBG 反射谱功率峰值影响相对较大,但是丙烯酸酯涂覆层与聚酰亚胺涂覆层光纤在容器内部经历了抽真空复压($10^5\sim 10^{-4}\sim 10^5$ Pa)、低温热循环($-196\sim 25$ °C)过程,传输光纤工作正常,传输质量没有产生不可接受的劣化,并且可以恢复到原始常温常压状态,光纤可以重复使用。

3 结 论

为满足光纤光栅传感技术在高真空热环境下的应用,文中分析了丙烯酸酯和聚酰亚胺 2 种不同涂覆层单模紧套光纤作为传输光纤,在高真空热环境下对 FBG 反射谱功率峰值的影响,并进行了实验验证。实验结果表明:

(1) 丙烯酸酯和聚酰亚胺 2 种不同涂覆层单模传输光纤经历了抽真空复压($10^5\sim 10^{-4}\sim 10^5$ Pa)、低温热循环 ($-196\sim 25$ °C), 历经 224 h, 光纤工作正常, FBG 反射谱功率峰值均不产生不可接受的劣化,并且可以恢复到原始常温常压状态,光纤可以重复使用;

(2) 丙烯酸酯涂覆层光纤作为传输光纤对 FBG 反射谱功率峰值影响最小(下降 11.17 dBm),聚酰亚胺涂覆层光纤对 FBG 反射谱功率峰值影响相对较大(下降 11.47 dBm),建议丙烯酸酯涂覆层光纤优选作为传输光纤使用,为光纤传感技术在高真空(压力约为 10^{-4} Pa 水平)、热环境($-196\sim 25$ °C 温度循环)中的应用提供了理论及实验依据。

参考文献:

- [1] Fan Hanlin, Wen Yaopu. Research on the thermal balance test for spacecraft [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2007, 24(2): 63–68. (in Chinese)
- [2] Li Weijie, Li Xiaolong. Design of bond-layer thickness of thermal protection structure under alternating temperature condition [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2013, 30(4): 421–425. (in Chinese)
- [3] Zhang Xianchen. Simultaneous strain and temperature measurements using fiber birefringence effect [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2005, 26(8): 20–21. (in Chinese)
- [4] Huang Bencheng, Liu Guoqing, Cheng Zhixiang, et al. Vacuum technology of extra large and ultra-high vacuum space environment simulator [J]. *Vacuum Science and Technology*, 2001, 21(1): 1–4. (in Chinese)
- [5] Jing Jiarong, Jiang Jian, Chen Jianxia. Design of space environmental simulation facility for calibration of microwave and infrared instruments [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2012, 29(1): 104–107. (in Chinese)
- [6] Melanie N Ott, Jeannette Plante. Fiber optical cable assemblies for space flight applications: issues and remedies [C]//World Aviation Congress, 1997.
- [7] Williams G M, Putnam M A, Friebele E J, et al. Space radiation effects on erbium-doped fibers [C]//SPIE, Conference on Optical Fiber Reliability and Testing, 1996, 2811: 271–280.
- [8] Liu Fuhua. Effects of pulse Gamma-ray radiation on optical fibers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2010, 22(7): 1668–1671. (in Chinese)
- [9] Xin Jianjiao, Shen Shuchang, Wang Jiabao. Preparation and XPS study of polyimide solid phase microextraction coating [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2015, 6: 115–119. (in Chinese)
- [10] Jiang Liuqing, Zhu Guoliang, Jiang Chao. Effect of coat to long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses [J]. *Journal of Hubei Normal University (Natural Science)*, 2015, 4: 64–68. (in Chinese)
- [11] Chen Xiaogang, You Renguo, Lei Musheng, et al. Research progress in photocuring of polyimide coating [J]. *Insulating Materials*, 2015, 12: 12–16. (in Chinese)
- [12] Lin Yao. Study on the packaging technology and characteristics of fiber grating humidity sensor [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015. (in Chinese)
- [13] Sun Keyuan. Temperature resistant fiber production process and application [J]. *Modern Transmission*, 2015, 3: 42–43. (in Chinese)