doi：10.11823/j.issn.1674－5795.2018.06.03

石英套管封装光纤光栅温度传感器

张欣颖，陈爽
（航空工业北京长城计量测试技术研究所，北京 100095）

摘　要：针对光纤光栅温度传感器管式封装时，高温下环境聚合物粘接材料性能不稳定的问题，提出一种无胶封装方法，选用石英套管作为封装材料，利用高频 CO_2 激光脉冲加热，使传输光纤与石英套管实现可靠焊接，并对封装后的传感器的温度特性进行测试，实验结果表明：石英套管封装的光纤光栅温度传感器在室温至 300 ℃具有很好的线性，可实现对环境温度的测量。

关键词：光纤光栅；温度传感器；管式封装；激光焊接
中图分类号：TB9　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**1674－5795(2018)06－0011－04

FBG Temperature Sensor with Quartz Casing Package

ZHANG Xinying，CHEN Shuang
(Changcheng Institute of Metrology & Measurement，Beijing 100095，China)

Abstract：In order to solve the problem of unstable performance of polymer bonding material in high temperature environment when fiber Bragg grating temperature sensor is encapsulated in tube，a non-adhesive encapsulation method is proposed. Quartz sleeve is selected as the encapsulation material and heated by high frequency CO2 laser pulse. The transmission fiber and quartz sleeve can be reliably welded and the encapsulated sensor can be used. The temperature characteristics of the device are tested. The experimental results show that the fiber grating temperature sensor encapsulated by quartz sleeve has a good linearity from room temperature to 300 C，and can be used to measure the ambient temperature.

Key words：FBG；temperature sensor；tube packaging；laser welding；

0　引言

传统的热电偶式和辐射式温度传感器易受外界电磁场的干扰，测试距离、黑度系数、辐射系数对测量准确度会产生很大影响。光纤光栅传感器由电绝缘、耐腐蚀的光纤作为传输介质，利用光波传播信息，可避免电磁干扰，与传统温度传感器相比，具有结构简单、设计灵活等优点，已成为解决高温环境下关键参数测量的主要技术手段[1-2]，被广泛应用于民用工程结构、航空航天业、船舶航运业、石油工业、电力工业等领域。光纤光栅传感器的封装工艺可靠性直接影响光纤光栅传感器在高温下性能的稳定，目前，用于传输光纤与圆柱形中空管的封装材料多数为聚合物材料[3]，这些材料的蠕变、老化特性以及其热膨胀系数与光纤光栅的不匹配，都会引起热应力，造成传感器性能不稳定[4]。

本文选用石英套管作为封装材料，利用高频 CO_2 激光脉冲使传输光纤与石英套管加热熔合实现无胶可靠封装，研究表明，封装后的传感器，在室温至 300 ℃的温度范围内，光纤光栅的布拉格波长随环境温度的变化呈良好的线性关系。

1　光纤光栅温度测量原理

如图 1 所示，当光在光纤中传输并通过光纤光栅时，满足布拉格条件的光波被反射回来，即为光纤布拉格光栅的基本工作原理。光纤光栅中心反射波长为

$$\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda \tag{1}$$

式中：λ_B 为光栅中心波长；n_{eff} 为有效折射率；Λ 为光栅周期。

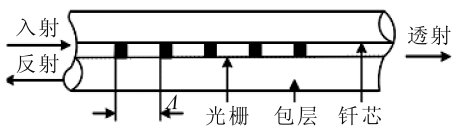

图 1　光纤光栅传感原理

光栅中心波长 λ_B 随 n_{eff} 和 Λ 变化而变化，光纤光栅自身的温度会随着所处环境温度变化而变化，当外界温度改变时，光纤光栅中心波长表达式 $\lambda_B = 2 n_{eff} \Lambda$

的变分形式为

$$\Delta\lambda_B = 2\left\{\frac{\partial n_{eff}}{\partial T}\Delta T + (\Delta n_{eff})_{ep} + \frac{\partial n_{eff}}{\partial a}\right\}\Lambda + 2n_{eff}\frac{\partial \Lambda}{\partial T}\Delta T \quad (2)$$

式中：$(\Delta n_{eff})_{ep}$ 为热膨胀引起的弹光效应；$\partial n_{eff}/\partial a$ 为热膨胀引起的光纤纤芯变化而产生的波导效应 。

可得光纤光栅灵敏度系数的表达式为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B \cdot \Delta T} = \xi + \frac{1}{n_{eff}}K_{wg} \cdot \alpha + \alpha \quad (3)$$

式中：ξ 为光纤光栅的热光系数；K_{wg} 为波导效应引起的光纤光栅波长漂移系数；α 为光纤的热膨胀系数。

对波导效应而言，由于它对温度灵敏系数的影响微乎其微，所以在分析光纤光栅温度灵敏度系数时，可忽略其产生的影响。则可得光纤光栅的相对温度灵敏度系数为

$$K_T = \alpha + \xi \quad (4)$$

由式(4)可知，光纤光栅的温度灵敏度系数基本上是与材料系数相关的常数，理论上保证了光纤光栅做为温度传感器可以得到很好的输出线性，对熔融石英光纤而言，其热光系数 $\xi = 0.68 \times 10^{-5}℃^{-1}$，线性热膨胀系数 $\alpha = 5.5 \times 10^{-7}℃^{-1}$。

2 传感器封装工艺

光纤光栅温度传感器封装结构如图 2 所示，传感器由石英套管和光纤光栅构成，采用光纤光栅单端固定的封装方式，可保证光纤光栅一端始终保持自然松弛状态，从而避免外界应力对光栅产生的干扰。为了最大限度地发挥光纤光栅温度传感器体积小的优势，选用外径为300 μm、内径为200 μm、长度为 15 mm 的石英套管作为传感器的封装套管。准分子激光器的紫外光采用相位掩模版技术，在掺锗单模光纤上实现紫外写入。通过 CO_2 激光脉冲加热实现光纤与石英套管的焊接。本文选用连续额定输出功率为 70 W，脉冲频率为 5 kHz 的 CO_2 激光器，该激光器控制程序输出一定频率的控制方波信号，实现对激光器的输出激光和功率的调控，通过调整控制方波信号的占空比，改变输出激光的功率。CO_2 激光器焊接系统如图 3 所示。

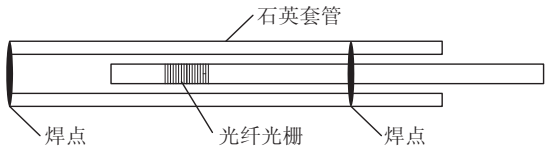

图 2 光纤光栅玻璃管封装示意图

传感器制作过程为：①将切断尾纤的光纤光栅穿入切割平整的石英套管内；②套好石英套管光纤光栅用夹具固定，置于 CO_2 激光焊接上，调节位置，将光纤光栅分别与光源和光谱仪连接，通过光谱信号的损耗判断光纤光栅与石英套管的焊接质量；③设定 CO_2 激光器的工作参数，启动 CO_2 激光器激光输出，完成石英套管与光纤光栅焊接；④调节传感器位置，设定 CO_2 激光器的工作参数，启动 CO_2 激光器激光输出，完成石英套管尾端密封，完成传感器制作。

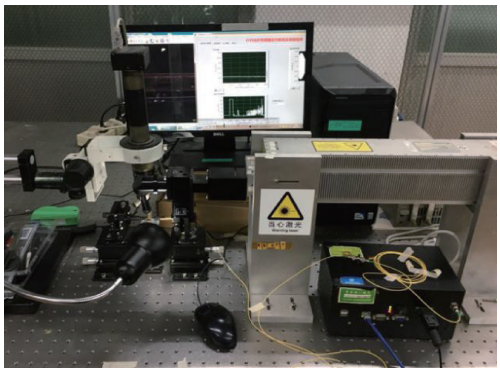

图 3 CO_2 激光器焊接系统

3 激光参数的选择

熔融石英对 10.6 μm 波长的透射率和吸收率分别为 40% 和 60%[5]，60% 的光能量被熔融石英套管吸收，以保证热熔区域升温软化，40% 的光能量透过石英套管入射到光纤包层，使得热熔区域升温软化，从而使石英套管与光纤包层牢固焊接。

选用的石英套管厚度较薄，若输出较大激光能量，即占空比较大时，石英套管吸收能量过大，透射出去的激光能量作用于光纤时，可能会对纤芯造成损伤，影响光在纤芯中传输；输出脉冲能量过小时，由于激光被石英套管表面反射部分能量，透过石英套管的激光能量不足以使得光纤包层的热熔区达到可焊接的软化度，光纤与石英套管不能形成牢固的焊接点，影响传感器封装效果。所以需要选取合适的占空比完成石英套管与光纤的可靠焊接。

本文通过调节激光器占空比大小，观察石英套管与切好端面的石英光纤在不同占空比下的焊接结果，同时将传输光纤接入光源和光谱仪，通过传输光能量的损耗情况判断不同激光能量对光纤纤芯的损伤情况，以此选择合适的占空比。图 4 为不同占空比下石英套管与光纤的焊接结果，图 5 为不同占空比焊接的光纤信号强度。

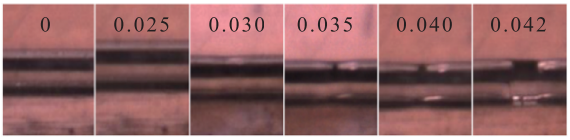

图 4　不同占空比焊接结果

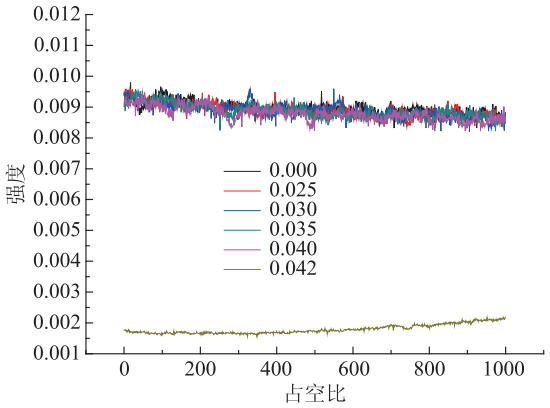

图 5　不同占空比焊接的光纤信号强度

由图 4 与图 5 可知，占空比为 0 时(即激光器不输出能量)，石英套管与光纤结构没有发生改变；当占空比为 0.025 时，石英套管表面没有明显变化，激光加热区域不明显；占空比为 0.030 时，石英套管表面发生细微凹陷，受热区域有微小变化，但吸收的热量不足以使受热区域熔化；占空比为 0.035 时，石英套管与光纤在激光器作用处形成一条细小的焊缝，但稍微施加一个径向的力时，石英管会从光纤上脱落；占空比为 0.040 时，石英套管与光纤焊接牢固，形成一条明显焊缝，且光纤反射率与初始状态保持一致，说明纤芯未受到损伤；占空比为 0.042 时，石英套管与光纤形成较宽焊缝，光纤端面反射能量下降明显，激光能量过强，对光纤纤芯造成损伤，影响传感器的使用。所以，当激光器的占空比为 0.040 时，可以实现石英套管与光纤牢固的焊接，同时保证光在纤芯中稳定传输。

4　传感器温度特性

测试石英套管封装光纤光栅温度传感器在高温下的温度特性，将封装好的传感器放入可控恒温槽中，如图 6 所示，设置恒温箱的温度为 50 ℃，每次温度调节步进为 50 ℃，直至升温至 300 ℃，待充分保温(20 min以上)使恒温箱中温度保持恒定后，采集光谱信息及中心波长值，升温过程重复三次。传感器在进行温度测量的同时，在恒温箱中放置一只标准温度传感器进行数据对比。

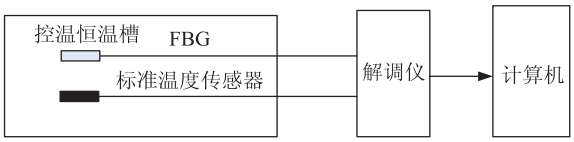

图 6　实验系统框图

取 3 次相同温度下的测量结果平均值，其测量数据结果如表 1 所示。

表 1　测量数据

温度/℃	波长平均值/nm
21	1542.618
50	1542.907
100	1543.457
150	1544.035
200	1544.661
250	1545.310
300	1546.011

图 7 为石英套管封装的 FBG 温度传感器与标准温度传感器在室温至 300 ℃温度范围内的温度波长响应曲线，石英套管封装的 FBG 温度传感器的光纤光栅中心波长与温度之间的关系为 $\lambda_{FBG} = 0.0122T + 1542.264$，线性相关度为 $r^2 = 0.998$ 。

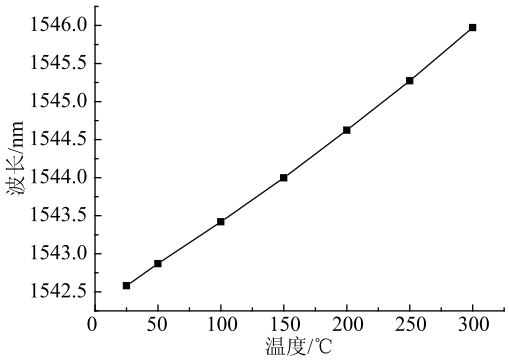

图 7　温度-波长响应曲线

表 2 为石英套管封装传感器与标准温度传感器在不同温度点下的温度测量结果。与标准传感器相比，石英套管封装传感器的最大偏差为 1.94 ℃，出现偏差的原因是两传感器在恒温箱中温度场位置稍有偏差，导致所测的温度出现不同程度的偏差。

表 2 石英套管封装传感器与标准温度计温度测量结果 ℃

FBG	标准温度计	偏差
52.73	52.98	-0.25
97.79	96.89	0.90
145.14	143.74	1.39
196.50	195.11	1.39
249.70	247.76	1.94
307.16	306.91	0.25

5 结论

本文提出了一种耐高温光纤光栅温度传感器无胶封装方法。这种封装结构消除了外力对光纤光栅的影响，可对光纤光栅进行有效的保护。利用 CO_2 激光器脉冲实现石英套管与光纤光栅之间的可靠焊接，实验表明：采用额定功率为 70 W，脉冲频率为 5 kHz 的 CO_2 激光器，占空比过小时，石英套管与光纤不能牢固焊接；占空比过大时，激光对纤芯造成损伤，影响光的传输；采用占空比为 0.040 的激光输出能量时，可实现光纤与石英套管永久封装，且保证光的稳定传输。封装后的光纤光栅在室温至 300 ℃ 温度范围内波长与温度依然保持非常好的线性关系。这种传感器封装方法避免了聚合物材料封装的热膨胀系数不匹配、材料老化等问题，工艺简单。封装后的传感器线性度高、稳定好性，可对环境温度进行测量。

参 考 文 献

[1] Lowder T L, Smith K H, Ipson B L, et al. High-Temperature Sensing Using Surface Relief Fiber Bragg Gratings[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2005, 17(9): 1926-1928.

[2] 周智，赵雪峰，武湛君，等. 光纤光栅毛细钢管封装工艺及其传感特性研究[J]. 中国激光，2002，29(12)：1080-1092.

[3] 信思金，柴伟. 光纤 BRAGG 光栅温度传感器封装方法研究[J]. 传感器与微系统，2004，23(4)：10-12.

[4] 甘望，王华强，谢忱，等. 光纤光栅管式封装工艺研究[J]. 光学仪器，2016，38(6)：544-548.

[5] Mclachlan A D, Meyer F P. Temperature Dependence of the Extinction Coefficient of Fused Silica for CO(2) Laser Wavelengths[J]. Applied Optics, 1987, 26(9): 1728.

收稿日期：2018 - 07 - 20；**修回日期**：2018 - 09 - 10

作 者 简 介

张欣颖(1992 -)，女，硕士，主要研究方向为导电高分子材料。2013 年 6 月毕业于武汉工程大学，获理学学位；2016 年 6 月毕业于武汉工程大学材料科学工程学院，获得理学硕士学位。

全国温度计量发展与应用技术年会专题报道

近日，中国计量测试学会温度计量专业委员会在湖南长沙主办了温度计量发展与应用技术学术交流会。会议结合国内外温度计量发展新趋势、国家强检信息平台建设、产业计量发展动态等温度前沿研究及温度计量应用技术、在线监测现状与发展进行了研讨，并对当前温度检测技术热点、行业应用及温度有关规程、规范的修订、制定等内容展开了广泛深入的技术交流。国内各计量技术机构、科研院所从事温度计量的 200 多名技术人员和行业专家出席了本次会议。

福禄克公司计量校准部应邀参加本次年会。在此次年会上，福禄克计量校准部的专家为观众详细介绍和讲解了“研究水银温度计替换工作”相关的最新的解决方案和产品，以及 5128A 温湿度发生器和广受业界好评的 1595A 超级电阻测温仪。福禄克计量校准部丰富的行业经验和专业的技术资讯，吸引了业界众多人士的咨询和交流。现场观众的积极反馈更是吸引了宜兴当地的各媒体，《计测技术》杂志对福禄克计量校准部的参会详情进行了现场和会后的专题报道。

中国计量科学研究院党委书记、副院长、温度专业委员会主任委员段宇宁为与会者带来了温度计量发展新动态的报告。产业计量专家、北京市药品检验所的楼舸老师也针对当前引发社会热议的疫苗问题，就与之相关的冷链计量需求方面的问题进行了详尽的阐述。

（刘倩倩）