

光纤光栅增敏封装工艺及装置研究现状

李玉龙, 温昌金, 赵 诚

(南昌大学机电工程学院江西省机器人及焊接自动化重点实验室, 江西 南昌 330031)

摘 要: 光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)具有许多独特的优点, 广泛应用于工程中。然而, 裸光栅存在细小质脆、温度和应变灵敏度低等问题, 工程应用中须对其进行增敏和封装保护。本文简要分析了 FBG 传感原理, 系统总结了国内外 FBG 增敏、保护封装工艺及装置的研究进展, 对各自的优缺点进行了分析讨论; 对 FBG 增敏封装后使用中可能出现的问题进行了分析, 有针对性地提出了解决方法。

关键词: 光通信技术, 光纤光栅, 增敏封装, 温度传感, 应变传感

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2013.11.02

Research status of the sensitivity enhancing and encapsulation technologies & devices of the fiber Bragg grating

LI Yu-long, WEN Chang-jin, ZHAO Cheng

(Key Lab for Robot & Welding Automation of Jiangxi Province, Mechanical & Electrical Engineering School, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: Fiber Bragg Grating (FBG) has the potential to be widely used in the engineering because of its unique advantages. However, bare fiber grating has the disadvantages of brittleness and low sensitivity of temperature and strain. Hence, it is necessary to protect the bare grating as well as enhancing the sensitivity before application. the sensing principle of the FBG is briefly analyzed; the research progress of the FBG sensitization protective packaging technologies and devices is systematically summarized; the merits and shortcomings of those technologies and devices are discussed; the potential issues of the FBG are analyzed after sensitization encapsulation and some corresponding effective methods are put forward.

Key words: optical communication technology; fiber Bragg grating; encapsulation and enhanced sensitivity; temperature sensing; strain sensing

1 引 言

光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)在光通信技术领域作为一种新型的无源器件, 因其具有耐腐蚀、体积小、可实现多点式分布测量、不受光强波动影响、自参考的绝对测量、便于单光源波分复用和光集成等优良特性, 近年来国内外对其进行了系统的研究。目前, FBG 存在的诸如交叉敏感等问题已经得到部分解决, 其研究已经进入实用化阶段。美、日、欧等国家和地区已经将 FBG 成功应用于航空航天、建筑工程、石油化工业、电力工业、智能机器

人等领域^[1-3]。

主要成分为 SiO₂ 的裸光栅细小质脆, 尤其是其抗剪能力很差, 直接将其作为传感器在工程实际应用中遇到了很多问题: 例如, 温度、应变灵敏度低, 容

基金项目: 国家自然科学基金(51265035); 江西省青年科学家项目(2010DQ01000)资助。

作者简介: 李玉龙(1978-), 男, 工学博士, University of Kentucky 博士后, 副教授, 硕士生导师。从事光纤传感、焊接工艺与装备相关的研究和教学工作, 发表论文 40 篇。E-mail: liyulong1112ster@gmail.com

收稿日期: 2013-04-22

易损坏,布设工艺困难等。因此,必须对 FBG 进行增敏封装保护。针对 FBG 应用中存在的问题,研究人员进行了相应的工作,报道了多种封装方法及与其配合的装置装备。尽管解决了部分问题,但各种方法和装置都存在各自的局限。例如,本文作者研究表明金属保护温度增敏灵敏度倍数偏低、中心波长稳定性较差,而且金属保护温度增敏后压力灵敏度有所降低;聚合物增敏的传感器作为温度传感时,温度响应速度慢,而且存在易老化等问题;结构增敏存在工艺复杂等问题。因此,对 FBG 的增敏封装进行深入研究对其工程实用化具有重要意义。

2 FBG 传感原理

FBG 温度、应变传感基本原理:用激光干涉条纹侧面辐照掺杂光纤技术在光纤内部制作光栅,当光栅周围的温度、应变等发生变化时,将导致光栅周期或纤芯折射率变化,从而产生布拉格反射峰值波长漂移,通过检测布拉格反射峰值波长漂移,即可获得温度、应变的变化量;由于 FBG 存在温度、应变交叉敏感效应,测量时需进行温度、应变补偿。

2.1 温度传感模型

由耦合模理论可知,均匀周期 FBG 反射峰中心波长(布拉格波长)满足^[4]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda \quad (1)$$

式中, n_{eff} 为有效折射率; Λ 为光栅周期。

由式(1)可知,布拉格波长是随 n_{eff} 和 Λ 而改变的。当光栅所处的外界环境温度发生变化时,可导致 FBG 本身的温度发生变化。由于光纤材料的热光效应,光纤的折射率会发生变化;由于光纤材料的热胀冷缩效应,光栅的条纹周期也会发生变化,从而引起 n_{eff} 和 Λ 的变化,最终导致光栅布拉格波长 λ_B 的漂移。漂移的幅度与温度的改变量呈线性关系^[5]:

$$\Delta\lambda_T = (\alpha + \xi)\Delta T\lambda_B \quad (2)$$

式中, $\Delta\lambda_T$ 表示温度变化引起的 λ_B 的漂移幅度; $\xi = (1/\Lambda)(\Delta\Lambda/\Delta T)$ 为光纤材料的热膨胀系数; $\xi = (1/n_{eff})(\partial n_{eff}/\partial T)$ 为光纤材料的热光系数; ΔT 为温度变化量。对于石英光纤, $\alpha \approx 0.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, $\xi \approx 6.7 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。

当 FBG 被粘贴于基底材料表面时,基底材料的形变和热膨胀通过相互作用力作用于 FBG,使其中心波长发生漂移。若用 α_s 表示基底材料的热膨胀系数,则此时 FBG 的温度响应可表示为^[6]:

$$K_T = \frac{d\lambda_B/dT}{\lambda_B} = \alpha + \xi + (1 - P_e)(\alpha_s - \alpha) \quad (3)$$

式中, K_T 为温度灵敏度系数,一般情况下裸光纤光栅的 $K_T = 6.72 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$; $P_e = (n_{eff}^2/2)[P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})]$ 为光纤的有效弹光系数;其中 P_{11} 和 P_{12} 为光纤弹光系数; ν 为泊松比。

2.2 应变传感模型

FBG 不但具有温度传感特性外还具有应变传感特性,即 FBG 的中心波长随应力的变化特性。一方面是由于光栅介质受应力作用而引起折射率的变化,这种现象称为弹光效应;另一方面介质受应力作用其微观质点将发生位移,亦即改变了光栅的周期,总的作用结果是使光栅的中心波长发生漂移。漂移幅度与应变也呈线性关系^[7]:

$$\Delta\lambda_s = (1 - P_e)\Delta\varepsilon\lambda_B \quad (4)$$

式中, $\Delta\lambda_s$ 表示应变引起的 λ_B 的漂移幅度; P_e 是光弹性常数; $\Delta\varepsilon$ 为应变幅度。对于石英单模光纤, $P_e = 0.22$,当 $\lambda_B = 1500 \text{ nm}$ 时,光栅的应变灵敏度系数为 $1.29 \text{ pm}/\mu\varepsilon$ 。

2.3 温度补偿模型

FBG 测量应用时,温度、应变交叉敏感使 FBG 温度传感器不能直接反映温度变化。为此,要进行温度、应变补偿,应使 $\Delta\lambda_T + \Delta\lambda_s = 0$,或者写成:

$$(\alpha + \xi)\Delta T + (1 - P_e)\Delta\varepsilon = 0 \quad (5)$$

其中, $\xi = \frac{dn}{ndT}$, $P_e = -\frac{dn}{nd\varepsilon}$, $\alpha = \frac{dl}{ndl}$ 。

一般的,中心波长为 1550 nm 的 FBG,其温度灵敏度系数约为 $10.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}$,应变灵敏度系数为 $1.209 \text{ pm}/\mu\varepsilon$ (或 $-2.05 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$)。但是,由于光纤的差别、写入光栅工艺的不同以及退火工艺的差别造成不同 FBG 的传感灵敏度会有所差异。因为封装材料的性能参数^[8](包括泊松比、弹性模量、热膨胀系数及封装厚度)与 FBG 的材料性能参数不一致,所以经过封装后的 FBG,其温度、应变传感特性会因为封装材料不同而受到不同程度的影响。

3 FBG 封装工艺及装置

3.1 封装材料和结构

目前已研究的用于 FBG 封装的材料较多,可分为两大类,即金属(钛合金、不锈钢、铝合金等)和非金属(聚合物、陶瓷等)。封装材料的性能参数(包括泊松比、弹性模量、热膨胀系数及封装厚度)与 FBG 材料性能参数不一致,因此不同的封装材料对 FBG 的温度、应变传感特性具有不同程度的影响。温度灵敏度系数随着热膨胀系数、泊松比及封装厚度的增大而增大。当希望温度灵敏度系数增大时,应当选择热膨胀系数、泊松比较大的材料,而且封装

厚度要适当增加;但材料本身不是决定封装增敏效果的唯一因素,使用相同的封装材料,封装过程采用不同处理工艺和不同封装结构,对 FBG 的传感特性

也会有不同影响。近年来,国内外许多研究通过采用不同的材料及封装方法对 FBG 进行了增敏封装和保护,具有代表性的研究结果如表 1 所示。

表 1 光纤光栅封装技术研究成果

	封装材料	封装方式	研究结果	
			温度灵敏度系数(K_T)	应变、应力灵敏度系数(K_ε 、 K_p)
金属	不锈钢 ^[9-11]	管式封装	[9] K_T 为 $28.9/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$, 是裸光栅的 2.7 倍; [11] K_T 为 $15.4/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	[10] 压力灵敏度系数为 $0.0155/(\text{nm} \cdot \text{psi}^{-1})$
	铝合金 ^[12]	铝槽封装	K_T 为 $39.8/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$, 是裸光栅的 3.6 倍	
	TC4 ^[13]	片状封装	K_T 为 $19.76/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$, 是裸光栅的 1.76 倍	K_ε 为 $1.255/(\text{pm} \cdot \mu\varepsilon^{-1})$, 基本不变
	Cu-Ni ^[14,15]	化学电镀封装	[14] 镀层厚度达到 $337.5/\mu\text{m}$ 时, K_T 达到 $25.86/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$; [15] 镀镍部分, K_T 达到 $26.1/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$, 未镀镍部分与裸光栅相同	[15] 30 ~ 90/ $^\circ\text{C}$ 期间镀镍部分的 K_p 为 $82/(\text{pm} \cdot \text{N}^{-1})$
	锰钢 ^[16]	基片封装	K_T 为 $18.64/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$, 分辨力为 $0.04/^\circ\text{C}$	
	铝、铅 ^[17]	金属镀层封装	100 ~ 170/ $^\circ\text{C}$, 铝层封装 FBG 的 K_T 为 $14.23/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$, 镀铅 FBG 的 K_T 为 $13.28/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$; 170 ~ 200/ $^\circ\text{C}$, 铝层封装 FBG 的 K_T 为 $14.99/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$, 镀铅 FBG 的 K_T 为 $16.21/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	
	铜合金 ^[18-20]	管式封装 ^[18,20] ; 片状封装 ^[19]	[19] -6 ~ 40/ $^\circ\text{C}$, K_T 为 $40.286/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$, 是裸光栅的 4 倍; [20] K_T 为 $13.675/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	[18] K_p 为 $-2.44 \times 10^{-3}/\text{MPa}^{-1}$, 约为裸光栅的 1200 倍
非金属	合金钢 ^[21]	管式封装	从 -20 ~ 80/ $^\circ\text{C}$, 中心波长漂移小于 $0.0005/(\text{nm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	
	聚合物 ^[22-25]	以聚合物为基底封装 ^[22,23] ; 聚合物管状封装 ^[24,25]	[22] K_T 为 $82.69/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$, 提高了 12.3 倍; [24] 20 ~ 130/ $^\circ\text{C}$ 时, K_T 为 $50/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$; 130 ~ 180/ $^\circ\text{C}$ 时, K_T 为 $220/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	[23] K_ε 为 $-62.8/(\text{pm} \cdot \mu\varepsilon^{-1})$, 是裸光栅的 31.7 倍; [25] 30/ $^\circ\text{C}$ 时, K_ε 为 $-36/(\text{pm} \cdot \mu\varepsilon^{-1})$; 180/ $^\circ\text{C}$ 时, K_ε 为 $-175 \text{ pm}/\mu\varepsilon$
	硅橡胶 ^[26-27]	嵌入圆柱硅橡胶 ^[26] ; 硅橡胶填充铝合金管 ^[27]		[26] 侧压力灵敏度系数为 $0.3 \times 10^{-6}/\text{MPa}^{-1}$, 提高大约 7 倍; [27] K_p 为 $-2.2 \times 10^{-2}/\text{MPa}^{-1}$, 比裸光栅高 10900 倍;
	陶瓷水泥 ^[28]	片状封装	K_T 为 $24.37/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$, 为裸光栅的 2.7 倍	K_ε 为 $1.25/(\text{pm} \cdot \mu\varepsilon^{-1})$, 基本不变
	硅酸盐玻璃 ^[29]	玻璃毛细管封装	K_T 为 $17.3/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$, 为裸光栅的 1.4 倍	
	聚合物 PP-1 ^[30]	以聚合物为基底封装		K_p 为 $-1.10 \times 10^{-3}/\text{MPa}^{-1}$, 是裸光栅的 558 倍
	聚四氟乙烯 ^[31]	以聚合物为基底封装	在 77/K 时, K_T 为 $39/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$; 在室温 300/K 时, K_T 为 $150/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	
	有机玻璃 ^[32]	玻璃毛细管封装		K_p 为 $-21.2 \times 10^{-6}/\text{MPa}^{-1}$
	PMMA ^[33]		试验温度范围 77 ~ 303/K, K_T 为 $39/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$	
	聚合物 (对苯二甲酸乙二醇酯) ^[34]	以聚合物为基底封装	K_T 为 $237/(\text{pm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$, 是裸光栅的 23 倍	

采用各种材料和结构对 FBG 进行封装以后,其传感特性得到显著提升:有的使温度灵敏度得到提高,有的使应力应变灵敏度得到提高,也有的使两者都不同程度的提高。从表 1 中的增敏数据可以得出结论:(1)以金属为封装材料的 FBG 封装工艺基本不改变 FBG 应变灵敏度^[9,13],对 FBG 温度灵敏度有所提升,但是提升幅度相对于以聚合物为封装材料的 FBG 要偏低。金属封装后的 FBG,其温度灵敏度系数可达到 $40.286 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ ^[19],而聚合物封装 FBG 后,其温度灵敏度系数可达到 $237 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ ^[34]。(2)聚合物封装 FBG 虽然可以大幅度提高其温度、应变传感特性,但存在聚合物易老化、使用寿命短、熔点低、适用温度范围小等缺陷。因此,如何解决金属封装增敏效果以及如何提高聚合物封装 FBG 环境适应性有待进一步研究。(3)裸光栅中心波长稳定,但是经过封装后的 FBG 在使用过程中存在中心波长稳定性差的问题,对 FBG 在工程测量中可能会造成不良影响。

3.2 温度增敏封装

裸光纤光栅的温度灵敏度约为 0.1°C ,温度灵敏度偏低。因此,需要对其进行适当的封装,提高其温度灵敏度。1995 年,Inoue 等人^[35]首先将 FBG 粘贴在铝片上进行温敏实验,增敏效果不显著。同年, G. W. Yoffe 等人^[36]提出了采用二氧化硅毛细管与铝合金毛细管双层封装 FBG 的方法,并进行实验研究。2000 年,刘启云等人^[37]利用聚合物材料封装光栅的方法提高 FBG 的分辨力,使温度传感器的分辨力达到 0.3°C 。2001–2004 年, Li X. C. 等人^[38]采用激光烧结的方法将金属涂层保护下的 FBG 嵌入不锈钢基体,进行了 250°C 以下的温度传感测试。从 2005 年起,本实验室研究小组研究了光纤金属化保护方法,建立了金属化保护条件下的传感模型,分别采用钎焊和超声波焊的方法成功的将 FBG 嵌入 42CrMo 钢和铝合金中^[39–42],封装后 FBG 温度灵敏度显著提高。系统研究了镀层厚度对 FBG 温度传感特性的影响,在研究中发现,由于镀层与光栅之间的直接接触引起的接触应力造成波长稳定性降低。针对这一新的问题,本文作者提出了封装后 FBG 中心波长稳定性差的解决方法,并正在进行深入研究。

根据封装材料及结构特点,FBG 封装增敏主要分为金属结构封装增敏、非金属封装增敏以及复合式封装增敏。

3.2.1 金属结构封装增敏

1)金属管式封装增敏。张燕君等人^[9]提出了

一种 FBG 的毛细钢管封装工艺,通过材料力学多功能实验台和恒温箱对其应变与温度传感特性进行了研究,结构如图 1 所示。结果表明,与裸光栅相比,毛细钢管封装工艺基本不改变 FBG 的应变灵敏度,温度灵敏度达到 $28.9 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,约为裸光纤光栅的 2.7 倍,且线性度、重复性良好,为 FBG 在温度测量领域的应用提供了一个很好的封装方法。

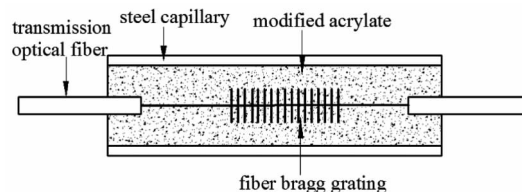


图 1 光纤光栅毛细管封装示意图^[9]

2)金属片状封装增敏。于秀娟等人^[13]采用钛合金对 FBG 进行片状封装,结构如图 2 所示。提出了 FBG 钛合金片封装工艺,理论分析了应变和温度传感特性,通过实验进行了验证。结果表明,与裸 FBG 相比,钛合金片封装方法基本不改变 FBG 应变灵敏度;温度灵敏度系数提高到 $19.76 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$,为裸光栅的 1.76 倍;经过钛合金片封装后的 FBG 可以探测到 $1 \mu\epsilon$ 的应变变化和 0.05°C 的温度变化。这种封装结构简单、易操作,但是温度灵敏度提高幅度不大,有待进一步研究,使其增敏效果显著提高。

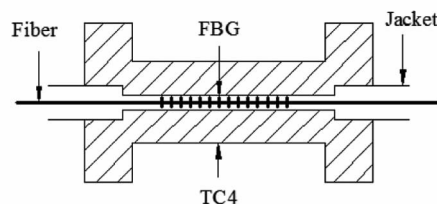


图 2 钛合金片封装 FBG 示意图^[13]

3)金属镀层封装增敏。本文作者在前人研究的基础上提出了采用化学镀和电镀相结合的方法^[14,41]对 FBG 进行镀铜、镀镍及化学复合镀金属化保护。对镀层和光栅之间的结合力、镀层的可焊性、导电性进行了系统研究,并得到随着镀层厚度的增加,对 FBG 温度传感器的增敏效果也增加。当镀层厚度达到 $337.5 \mu\text{m}$ 时,温度灵敏度系数达到 $25.86 \text{ pm}/^{\circ}\text{C}$ 。金属镀层保护之后,再采用钎焊方法^[14]将 FBG 嵌入 42CrMo 中;采用超声波焊方法^[41]将镀镍 FBG 嵌入铝合金薄片。研究结果表明,先对 FBG 金属镀层保护,再将其嵌入金属材料中,其温度灵敏度得到显著提高。该金属化保护过程操作简单,成本低,能有效地保护 FBG 并提高其温度灵敏度。目前,本实验室研究小组正在进行对 FBG 镀锌封装,研究结果表明,镀锌 FBG 温度灵敏度可达到 50

pm/°C 以上。

3.2.2 聚合物封装增敏

Toru Mizunami 等人^[31]采用热膨胀系数大的有机聚合物为封装材料,将中心波长为 1.55 μm 的 FBG 封装在两块有机聚合物基板中间,结构如图 3 所示。实验温度由 77 K 到 300 K。研究表明,两块聚合物封装的 FBG 当温度为 77 K 时,温度灵敏度系数为 39 pm/°C,是相同温度条件下,PPMA 基板封装 FBG 的 1.5 倍、铝合金封装 FBG 的 2 倍;当温度为 300 K 时,温度灵敏度系数高达 150 pm/°C。用单块聚合物封装,与两块聚合物封装相比,温度灵敏度系数下降 5%。实验数据与理论计算值比较,两者相吻合。这种封装工艺简单、成本低、增敏效果好,但是聚合物存在易老化等问题,使封装的 FBG 使用寿命较短。

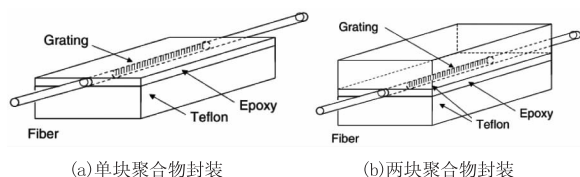


图 3 聚合物封装 FBG 的结构图^[31]

3.2.3 复合式封装增敏

与金属封装相比较,聚合物封装大幅度提高温度灵敏度,并且制作工艺简单,成本低廉,易于实现。这是因为聚合物具有更大的热膨胀系数,但是由于聚合物本身的其他性质,如存在易老化、使用寿命短、熔点低、适用温度范围小等缺陷,使得聚合物封装的 FBG 使用环境受到限制。为了保留聚合物封装与金属封装各自的优点,研究人员提出了一种金属与聚合物复合式封装增敏方法。

孙安等人^[24]采用向金属管中注入高热膨胀系数的液体聚合物,并添加稳定剂以及抗老化剂。管内留有一定的空间裕度,使聚合物材料的热膨胀性能不受影响,然后对光纤光栅进行灌封,最后高温固化 5 h。经过这种封装后,FBG 可实现 20 ~ 80°C 范围内对温度高灵敏测量。研究结果表明,聚合物填充金属管复合封装的 FBG 传感器温度响应灵敏度在 20 ~ 130°C 为 50 pm/°C,在 130 ~ 180°C 达到了 220 pm/°C,并在两个区域保持较好的重复性。此结构传感器封装工艺简单,易于实现,可用于高温恶劣环境下的温度单参量测量,然而温度传感特性线性度不好。

3.3 应力应变增敏封装

裸光栅压力灵敏度较低,在 70 MPa 的高压

下,裸光栅中心反射波长仅漂移了 0.22 nm^[43],压力灵敏度系数仅为 $-1.98 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$,这给信号检测带来了不便,制约了光栅在压力测量中的应用。一直以来,国内外研究人员就如何提高 FBG 压力灵敏度进行了大量研究,而且取得了很大的进展。1996 年, M. G. Xu 等人^[32]将 FBG 固定于中空的玻璃球结构中,使其压力灵敏度提高了一个数量级,压力灵敏度系数提高到 $-21.2 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$,但这种方法存在 FBG 在压缩过程中容易损坏的缺点,因此具有一定局限性。随后, Liu Qiyun 等人^[6]提出了一种新的 FBG 聚合物封装方法,进行了压力传感测试,结果表明 FBG 压力灵敏度得到显著提高。2004 年, B. K. A. Ngoi 等人^[26]采用硅橡胶对 FBG 进行封装,并进行了测应力和波长漂移关系的测试,同时应用 ANSYS 进行模拟。2007 年, Hanidreza 等人^[44]将中碳钢块加工出方形空腔,在空腔中浇铸 Sn-Pb 合金,在铸造的过程中将 FBG 埋入中碳钢中,进行了应力和波长漂移关系的测试。2012 年, 杨吉祥等人^[45]利用复合材料封装 FBG,在霍普金森压杆上对封装前的裸光栅和封装后的 FBG 应变传感器分别进行了高速冲击试验,试验表明:封装后的 FBG 传感器的瞬态响应上升时间小于 20 μs,具有良好的动态响应特性,可以用于工程中混凝土结构内高速冲击下的动态应变测试。

FBG 传感器的增敏效果主要取决于封装材料和封装工艺。根据封装材料特点,FBG 应变增敏的封装方式主要有金属管材封装增敏和聚合物封装增敏。

3.3.1 金属管材封装增敏

Liu Lihui 等人^[18]采用向铜管中注入有机聚合物对 FBG 进行封装,如图 4(a) 所示。封装前对 FBG 施加预应力,避免因聚合物收缩凝固造成啁啾效应。实验研究了 FBG 的应变传感特性,如图 4(b) 所示。结果表明,封装后的 FBG 应变灵敏度提高到 $-2.44 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$,约为裸光栅的 1200 倍;避免了温度和应变的交叉敏感问题,得到与温度无关的 FBG 压力传感器。这种封装应变增敏效果好,别无啁啾效应。

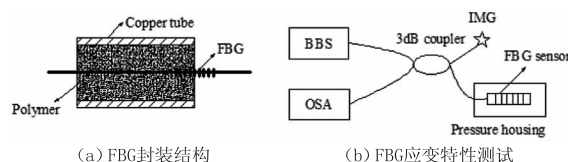


图 4 FBG 的封装结构及应变特性测试^[18]

3.3.2 聚合物封装增敏

Wen Qingzhen 等人^[30]采用杨氏模量为 9.0×10^6 MPa、泊松比为 0.49 的聚合物 (PP-1) 封装 FBG 压力传感器,封装结构如图 5 所示。并且合成了从羟基封端从羟基封端的聚环氧丙烷低聚物,甲苯二异氰酸酯 (TDI), 1,4-丁二醇作为扩链剂、催化剂、泡沫剂和泡沫稳定剂。结果表明,封装后的 FBG 的应变灵敏度系数提高到裸光栅的 558 倍,即应变灵敏度系数为 $-1.10 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$ 。实验数据与理论计算结果 ($-1.73 \times 10^{-3} \text{ MPa}^{-1}$) 较吻合,并且中心波长与应变具有良好的线性度。

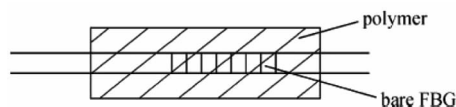


图 5 PP-1 封装 FBG 结构示意图^[30]

3.4 温度补偿封装

由于 FBG 对温度和应变存在交叉敏感的问题,当 FBG 作为应变传感器时,需要对 FBG 进行温度补偿。因此,如何通过封装消除温度、应变的交叉敏感问题,对于光纤光栅的实际应用具有重要意义。近几年来,研究人员对 FBG 交叉敏感问题进行了大量研究。1991 年,美国的 William W. Morey 等人^[46]申请了一种温度补偿装置专利。2000 年, Sungchul Kim 等人^[47]研究了 FBG 温度、应变交叉敏感问题,提出了相应的解决对策,研制了与温度无关的 FBG 压力传感器。2002-2003 年, Yu-Lung Lo 等人^[48]提出无需预加载机构对 FBG 进行金属镀层封装,进行了温度应变传感实验,实验结果表明温度补偿效果良好。2006 年, Y. S. Hsu 等人^[49]提出了一种新的对温度不敏感的压力传感测量装置,实验表明压力灵敏度得到显著提高,并且在 $10 \sim 60^\circ\text{C}$ 期间中心波长对温度不敏感。在前人的研究基础上, Wentao Zhang 等人^[50]提出了一种新型的具有温度补偿功能的 FBG 压力传感器,结构如图 6 所示。通过实验对 FBG 的应变特性进行了测试,结果表明,应变灵敏度达到 $93.7 \text{ pm}/\mu\epsilon$; 温度灵敏度为 $20 \text{ pm}/^\circ\text{C}$, 在应变测量时,温度引起的波长漂移得到很好的补偿。

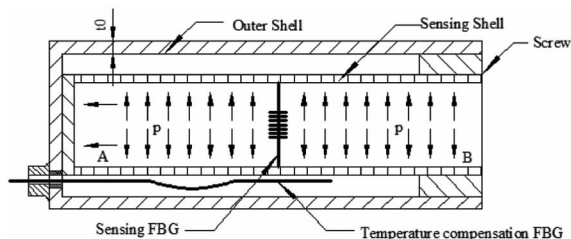


图 6 FBG 应变传感器结构^[50]

3.5 封装装置

封装装置是实现 FBG 保护、增敏封装的重要因素,一个结构设计良好的封装装置能使封装增敏效果更佳,同时也能降低封装成本。因此,深入研究 FBG 封装装置,以提高光纤光栅中心波长的稳定性和重复性,是近几十年来研究人员的主要工作。美国的 Morey 等人^[46] (1991 年)、Lemaire 等人^[51] (1998 年)分别申请了一种无源式、通过封装材料的长度变化改变光纤光栅所受应力而使之抵消由折射率变化产生的影响,从而达到温度补偿的效果的温度补偿装置专利。2004 年,欧进萃等人^[52]申请了毛细管式封装装置专利。其装置能够保证光纤光栅在毛细管内很好的与轴线对中,且具有结构简单,操作方便等优点。2007 年,欧攀等人^[53]申请了一种光纤光栅温度补偿装置专利。该装置设计了对 FBG 施加预应力的机构,补偿了温度变化对 FBG 造成的影响。2008 年,乔学光等人^[54]申请了一种新的封装装置国家专利。该装置也设计了施加预应力机构,通过在对 FBG 施加预应力的情况下进行高温固化封装,从而达到所封装的 FBG 传感器无啁啾和波形畸变现象,保证了传感器的重复性和线性度。

以上各种封装装置都能实现对 FBG 进行封装,且结构简单,占用空间小,操作方便。然而,由于其结构简单,依靠手工操作,尤其是对 FBG 施加预应力时,手工操作难以保证施加应力的精确度,这样会给温度补偿带来误差。为了避免人为因素产生的误差,进一步研究封装装置使其施加预应力机构实现智能控制,是今后研究封装装置的一个新方向。

4 结束语

本文从封装材料(金属和非金属)、封装结构及装置等方面总结了国内外 FBG 增敏保护封装工艺的研究进展,对各自优缺点进行了分析和讨论。通过采用不同的封装材料和封装结构及装置,FBG 传感器的温度、应力应变灵敏度可分别从 $10.3 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 提高到 $237 \text{ pm}/^\circ\text{C}$ 、从 $-2.05 \times 10^{-6} \text{ MPa}^{-1}$ 提高到 $-2.2 \times 10^{-2} \text{ MPa}^{-1}$, 甚至更高,量程也可从几千帕提高到上百兆帕。其中,利用聚合物封装的 FBG 的温度、应力灵敏度提高幅度较其他材料封装的更高,这样使得 FBG 能够探测到更小的温度、应变变化;聚合物存在易老化等问题,使聚合物封装的 FBG 使用寿命短,动态响应速度慢。利用金属结构对 FBG 进行封装,可以使 FBG 具有更广的温度适应范围,动态响应速度快,但是其封装结构复杂、增敏幅度有限。各种封装工艺除了各自独特的优缺点外,还具

有共同的不足之处,即与裸光栅相比,各种封装后的FBG仍存在温度、应变交叉敏感效应以及中心波长稳定性变差等问题。因此,今后研究FBG封装工艺有待解决的问题有:(1)如何提高聚合物FBG的使用寿命和动态响应速度,扩大服役温度范围;(2)如何提高金属结构封装FBG增敏效果,怎样解决金属镀层保护后FBG中心波长不稳定的问题;(3)如何消除温度、应变交叉敏感效应;(4)研制新型封装结构,使其易操作,控制精度高。针对这些问题,国内外许多科研人员正在采取各种方案对其系统研究。本文作者正在针对金属化封装中出现的增敏幅度低、中心波长稳定性差等问题进行深入研究。

参考文献:

- [1] Mou C B, Saffari B, Li D Z, et al. Smart structure sensors based on embedded fiber Bragg grating arrays in aluminum alloy matrix by ultrasonic consolidation[J]. Measurement Science and Technol. 2009, 20(3): 1-6.
- [2] Wang Hongliang, Wu Huachun, Feng Dequan, et al. Research on the FBG sensor used for high temperature-pressure wells[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2011, 22(1): 16-19. (in Chinese)
王宏亮, 邬华春, 冯德全, 等. 高温高压油气井下光纤光栅传感器的应用研究[J]. 光电子·激光, 2011, 22(1): 16-19.
- [3] Muhdsatar N J, Abdrahman M K. Optical fiber sensor for smart structure monitoring[J]. Progress of physics research in malaysia, 2010, 1250: 137-140.
- [4] G. Meltz. Overview of fiber grating based sensors[C]. SPIE, 2000, 2838: 2-22.
- [5] Guan Baiou, Liu Zhiguo, Kai Guiyun, et al. Temperature sensor based fiber Bragg grating[J]. Transduction Technol, 1996, (2): 89-93.
- [6] Liu Qiyun, Guo Zhuanyun, Zhang Ying, et al. Simultaneous pressure and temperature measurement with polymer-coated fiber Bragg grating[J]. Electron. Lett, 2000, 36(6): 564-566.
- [7] Hill DJ. Gain in hydrostatic pressure sensitivity of coated fiber Bragg grating[J]. Electronics Lett, 1999, 35(15): 1268-1270.
- [8] Xie Jianfeng, Zhang Hua, Zhang Guoping, et al. Analysis on influence of clad materials on temperature sensitivity of fiber Bragg grating[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2008, 19(9): 1158-1162. (in Chinese)
谢剑锋, 张华, 张国平, 等. 封装材料性能对光纤布拉格光栅温度灵敏度影响分析[J]. 光电子·激光, 2008, 19(9): 1158-1162.
- [9] Zhang Yanjun, Wang Haibao, Chen Zegui, et al. Study on FBG sensors steel capillary packaging technique and sensing properties[J]. Laser & Infrared, 2009, 39(1): 53-55. (in Chinese)
张燕君, 王海宝, 陈泽贵, 等. 光纤光栅毛细钢管封装工艺及其传感特性研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(1): 53-55.
- [10] Harith Ahmad, Wu Yichong, et al. High sensitivity fiber Bragg grating pressure sensor using thin metal diaphragm[J]. IEEE Sensors Journal, 2009, 9(12): 1654-1659.
- [11] P Biswas, S Bandyopadhyay, K Kesavan, S et al. Investigation on packages of fiber Bragg grating for use as embeddable strain sensor in concrete structure[J]. Sensors and Actuators A: Physical. 2010, 157(1): 77-83.
- [12] Zhan Yage, Cai Haiwen, Xiang Shiqing, et al. Study on high resolution fiber Bragg grating temperature sensor[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(1): 83-86. (in Chinese)
詹亚歌, 蔡海文, 向世清, 等. 高分辨率光纤光栅温度传感器的研究[J]. 中国激光, 2005, 32(1): 83-86.
- [13] Yu Xiujuan, Yu Youlong, Zhang Min, et al. Strain and temperature sensing characteristics of FBG packaged by the Titanium Alloy Slice[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2006, 17(5): 564-567. (in Chinese)
于秀娟, 余有龙, 张敏, 等. 钛合金片封装光纤光栅传感器的应变和温度传感特性研究[J]. 光电子·激光, 2006, 17(5): 564-567.
- [14] Li Yulong, Zhang Hua, Feng Yan, et al. Metal coating of fiber Bragg grating and the temperature sensing character after metallization[J]. Optical Fiber Technology, 2009, 15(4): 391-397.
- [15] Li Yulong, Feng Yan, Peng Xingling, et al. Simultaneous measurement of the temperature and force using a steel cantilever soldered with a partially nickel coated in-fiber Bragg grating[J]. Optics Communications, 2012, 285(21-22): 4275-4279.
- [16] Li Wei, Li Yongwei, Han Xingde, et al. The study of enhancing temperature sensitivity for FBG temperature sensor[J]. Machine Learning and Cybernetics, 2009, 5: 2746-2749.
- [17] Rajam Sekar, B N Shivananju, K P Lakshmi, et al. Dual functional performance of fiber Bragg gratings coated with metals using flash evaporation technique[J]. Optical Fiber Technology, 2012, 18: 183-185.
- [18] Liu Lihui, Zhang Hao, Zhao Qida, et al. Temperature-independent FBG pressure sensor with high sensitivity[J]. Optical Fiber Technology, 2007, 13(1): 78-80.
- [19] Li Yongqian, Guo Wei, Xie Yang. Temperature and strain

- characteristics of fiber Bragg grating packaged by brass slice[J]. *Measuring Technology and Mechatronics Automation*, 2010, 3: 734 – 737.
- [20] Wang Peng, Liu Jie, Li Chao, et al. Temperature sensing experiment of fiber Bragg grating packaged by copper capillary without strain[J]. *Optoelectronics and Microelectronics Technology*, 2011, 68 – 72.
- [21] Ning Tigang, Pei Li, Liu Yan, et al. Package for fiber Bragg gratings (FBG) and a comparative study on their polarization mode dispersion (PMD) at varying temperature[J]. *Optica Applicata*, 2005, (2): 277 – 282.
- [22] He Wei, Xu Xiandong, Jiang Desheng. High-sensitivity fiber Bragg grating temperature sensor with polymer jacket and its low-temperature characteristic[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(10): 1316 – 1319. (in Chinese)
何伟, 徐先东, 姜德生. 聚合物封装的高灵敏度光纤光栅温度传感器及其低温特性[J]. *光学学报*, 2004, 24(10): 1316 – 1319.
- [23] Liu Qiyun, Guo Zhuanyun, Liu Zhiguo, et al. High-sensitivity fiber Grating pressure sensor with polymer jacket[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(3): 211 – 214. (in Chinese)
刘启云, 郭转运, 刘志国, 等. 聚合物封装的高灵敏度光纤光栅压力传感器[J]. *中国激光*, 2000, 27(3): 211 – 214.
- [24] Sun An, Qiao Xueguang, Jia Zhenan, et al. The experimental study of large range enhanced temperature sensitivity concerning fiber Bragg grating temperature sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, 24(11): 1491 – 1493. (in Chinese)
孙安, 乔学光, 贾振安, 等. 大范围光纤布拉格光栅温度传感器增敏实验研究[J]. *光学学报*, 2004, 24(11): 1491 – 1493.
- [25] Sun An, Qiao Xueguang, Jia Zhenan, et al. Temperature and pressure responsive characteristics of polymer packaged fiber Bragg grating with large dynamic range[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(2): 224 – 227. (in Chinese)
孙安, 乔学光, 贾振安, 等. 聚合物封装光纤布拉格光栅传感器温度压力特性研究[J]. *中国激光*, 2005, 32(2): 224 – 227.
- [26] B K A Ngoi, J Paul, L P Zhao, et al. Enhanced lateral pressure tuning of fiber Bragg gratings by polymer packaging[J]. *Optics Communications*, 2004, 242(4 – 6): 425 – 430.
- [27] Sheng Haojan, Fu Mingyue, Chen Tzu – Chiang, et al. A lateral pressure sensor using a fiber Bragg grating[J]. *IEEE Photonics Technology Lett*, 2004, 16(4): 146 – 148.
- [28] Vincent P Wnuk, Alexis Méndez, Steve Ferguson, et al. Process for mounting and packaging of fiber Bragg grating strain sensors for use in harsh environment applications[J]. *Smart Structures and Materials*, 2005, 5758: 46 – 53.
- [29] Seongmin Ju, Won-Taek Han. Enhanced sensitivity of the FBG temperature sensor based on the PbO-GeO₂-SiO₂ glass optical fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2010, 28(18): 2697 – 2700.
- [30] Wen Qingzhen, Zhu Jinhua, Gong Shenguang, et al. Design and synthesis of a packaging polymer enhancing the sensitivity of fiber grating pressure sensor[J]. *Progress in Natural Science*. 2008, 18(2): 197 – 200.
- [31] Toru Mizunami, Hiroaki Tatehata, Hideo Kawashima. High-sensitivity cryogenic fibre-Bragg-grating temperature sensors using Teflon substrates[J]. *Measurement Science and Technology*. 2001, 12(7): 914 – 917.
- [32] Xu M G, Geiger H, Dakin J P. Fiber grating pressure sensor with enhanced sensitivity using a glass – bubble housing[J]. *Electron. Lett.*, 1996, 32(2): 128 – 129.
- [33] D Sengupta, M Sai Shankar, et al. An improved low temperature sensing using PMMA coated FBG[C]. *Communications and Photonics Conference and Exhibition*, 2011: 1 – 5.
- [34] Guan Baiou, Hwa-Yaw Tam, Helen L W, et al. Temperature-tuned erbium-doped fiber ring laser with polymer-coated fiber grating[J]. *Optics Communications*, 2002, 202(4 – 6): 331 – 334.
- [35] Inoue A, Shigehara M, Ito M, et al. Fabrication and application of fiber Bragg grating review[J]. *Optoelectron. Dev. Technol*, 1995, 10: 30 – 119.
- [36] G W Yoffe, P A Krug, F Ouellette, et al. Passive temperature-compensating package for optical fiber gratings[J]. *Appl. Opt.*, 1995, 34(30): 6859 – 6861.
- [37] Liu Qiyun, Guo Zhuanyun, Zhang Ying, et al. Research on the simultaneous measurements of pressure and temperature using one fiber grating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, A27(11): 1002 – 1006. (in Chinese)
刘云启, 郭转运, 张颖, 等. 单个光纤光栅压力和温度的同时测量[J]. *中国激光*. 2000, A27(11): 1002 – 1006.
- [38] Li XC, Prinz F. Analytical and experimental study on non-contact sensing with embedded fiber-optic sensors in rotating metal parts[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(7): 1720 – 1727.
- [39] Li Yulong, Zhang Hua, Feng Yan, et al. A plating method for metal coating of fiber Bragg grating[J]. *Chinese Optics letters*, 2009, 7(2): 115 – 117.

- [40] Feng Yan, Zhang Hua, Li Yulong, et al. Temperature sensing of metal-coated fiber Bragg grating[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2010, 15(4): 511-519.
- [41] Li Yulong, Liu Wen, Feng Yan, et al. Ultrasonic embedding of nickel-coated fiber Bragg grating in aluminum and associated sensing characteristics[J]. Optical Fiber Technology, 2012, 18(1): 7-13.
- [42] Zhu Zhengqiang, Chen Yanjun, Zhang Yifu. The temperature sensitivity of fiber Bragg gratings embedded in an Al 6061 matrix by ultrasonic welding[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2011, 22(18): 2173-2181.
- [43] Xu M G, Reekie L, Chow Y T. et al. Optical in-fiber grating high pressure sensor[J]. Electron. Lett., 1993, 29(4): 398-399.
- [44] Hamidreza Alemohammad, Ehsan Toyserkani, Christ P. Paul. Fabrication of smart cutting tools with embedded optical fiber sensors using combined laser solid freeform fabrication and moulding techniques[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2007, 45(10): 1010-1017.
- [45] Yang Jixiang, Yu Shangjiang, Chen Xian. Shock test for a fiber Bragg grating strain sensor on a SHPB[J]. Journal of Vibration and Shock. 2012, 31(1): 61-63. (in Chinese) 杨吉祥, 余尚江, 陈显. 光纤 Bragg 光栅应变传感器在霍普金森压杆上的冲击试验研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(1): 61-63.
- [46] Morey, Glomb W W, Walter L. Incorporated Bragg filter temperature compensated optical waveguide device[P]. US Patent. G02b, 5042898.
- [47] Sungchul Kim, Jaejoong Kwon, Sungwoo Kim, et al. Temperature-independent strain sensor using a chirped grating partially embedded in a glass tube[J]. IEEE Photonics Technology Lett., 2000, 12(6): 678-680.
- [48] Yu-Lung Lo, Chih-Ping Kuo. Packaging a fiber Bragg grating with metal coating for an athermal design[J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(5): 1377-1383.
- [49] Y S Hsu, Likarn Wang, Wen-Fung Liu, et al. Temperature compensation of optical fiber Bragg grating pressure sensor[J]. IEEE Photonics Technology Lett., 2006, 18(7): 874-876.
- [50] Zhang Wentao, Li Fang, Liu Yuliang. FBG pressure sensor based on the double shell cylinder with temperature compensation[J]. Measurement, 2009, 42(3): 408-411.
- [51] Lemaire, Shevchuk P J, John G. Fiber grating package[P]. US Patent. G02b, 5841920.
- [52] Ou Jinping, Zhou Zhi, Zhang Zhichun. FBG sensors capillary packaging technique and isolated plant; Chinese Patent, ZL03132410. X[P]. 2004-12-08. (in Chinese) 欧进萍, 周智, 张志春. 光纤光栅毛细封装工艺及专用装置: 中国, ZL03132410. X[P]. 2004-12-08.
- [53] Ou pan, Zhang Chunxi, Cao Bin, et al. A temperature-compensate package for fiber Bragg grating; Chinese Patent, 200710178617. 2[P]. 2008-06-18. (in Chinese) 欧攀, 张春熹, 曹彬, 等. 一种光纤光栅温度补偿装置: 中国, 200710178617. 2[P]. 2008-06-18.
- [54] Qiao Xueguang, Wang Hongliang, Feng Dequan, Zhou Hong. Pre-stressing packaging system for fiber Bragg grating sensor; Chinese Patent, 200810150477. 2[P]. 2008-12-17. (in Chinese) 乔学光, 王宏亮, 冯德全, 周红. 光纤光栅传感器施加预应力的封装装置: 中国, 200810150477. 2[P]. 2008-12-17.