

光纤法布里-珀罗传感器及其高温应用*

毛国培, 李金洋, 史 青
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 随着航天技术不断发展, 大推力运载火箭等精细化设计需求日益增加, 飞行器高温工况结构及流场状态感知已成为当前研究的关键环节。基于法布里-珀罗干涉结构的光纤传感器在高温、高压、狭小空间等特殊环境展现出独特优势, 被视为下一代高温原位测量工具。介绍了法布里-珀罗传感器的基本结构及原理, 并分别从温度、应变和压力监测方面介绍了法布里-珀罗高温传感技术研究进展以及未来的发展趋势。基于石英光纤的法布里-珀罗传感器能够应用于 1000°C 以下环境, 对于 1000°C 以上环境, 需要以蓝宝石光纤作为敏感元件和传光介质。

关键词: 光纤光学; 法布里-珀罗腔传感器; 高温测量; 温度; 应变; 压力

中图分类号: TP219.9 **文献标识码:** A **文章编号:** CN11-1780(2020)06-0012-08

Optic fiber Fabry-Perot sensor and its applications in high temperature

MAO Guopei, LI Jinyang, SHI Qing

(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: With the continuous development of aerospace technology, the demand for fine design of high-thrust launch vehicles and other related equipment is increasing. The aircraft structure and flow field state perception under high temperature working condition have become critical in current research. Fiber optic sensor based on Fabry-Perot cavity, which is regarded as the next generation measuring tool of high temperature in situation measurement, gradually shows the superiority in special environments such as high-temperature, high-pressure and narrow space. The basic structure and principle of Fabry-Perot sensor are introduced, as well as describes its recent progress and future development trends from the measurements of temperature, strain and pressure. The Fabry-Perot sensor based on silica fiber can be applied below 1000 °C, for environments more than 1000 °C, sapphire fiber is needed as the sensing element and light-transmission medium.

Key words: Fiber optics; Fabry-Perot sensors; High temperature measuring; Temperature; Strain; Pressure

引 言

随着我国航天事业发展, 运载火箭载荷负载能力和发射频次不断提高。以大推力重型运载火箭为代表的新一代航天飞行器, 其工况更加恶劣, 发动机燃烧室管路、涡轮、喷管等结构承受严苛的热、力交变载荷, 对结构及发动机流场状态提出了新的挑战, 亟需开展精细化设计, 提升火箭可靠性。

另一方面, 开展有效设计的前提是准确识别运载火箭实际载荷分布、结构和流场状态。同时, 运载火箭结构空间构型复杂, 传统高温原位测量技术手段已经难以满足测试需求。

光纤传感作为一种新兴传感技术, 具有尺寸小、质量轻、耐高温、抗电磁干扰、易于复用等优点。光纤密度为 2.32g/cm³, 是金属铜的四分之一, 光纤直径仅为 125μm, 相较传统的电信号传感器, 不仅减少了传输线缆的数量, 单根光缆的质量也小于电缆质量。利用光纤传感器进行结构健康监测, 可以大幅减少监测系统的质量, 对于航空航天等领域具有重大意义^[1]。不同类型的光纤传感器, 如光纤布拉格光栅、法布里-珀罗 FP (Fabry-Perot) 传感器、长周期光纤光栅以及它们之间的组合传感器, 都已经成功应用于应变、温度、压力、位移等物理量的监测。其中, 光纤布拉格光栅局限于紫外调制的制作机理, 高温下栅区会发生退化, 难以长时间工作在大于 200°C 的高温环境。长周期光纤光栅存在结

*基金项目: 民用航天“十三五”第三批预先研究项目 (B0104); 中国科协青年人才托举工程 (2018QNRC001)

收稿日期: 2020-06-28 收修改稿日期: 2020-10-15

构缺陷，导致机械性能较差，而且高温响应不具有重复性^[2]。

本文主要围绕 FP 传感器，阐述其在高温温度、高温应变、高温压力方面的应用进展。光纤 FP 传感器根据形成法珀腔结构的不同可以分为本征型光纤法珀传感器（IFPI）和非本征型光纤法珀传感器（EFPI）。IFPI 传感器调制区位于光纤内，光纤既是传光介质，也是敏感元件，通过调制区光学性质变化实现传感监测；EFPI 传感器是借助其它敏感元件感知被测信息，光纤只起到传导光的作用，不是连续的。1988 年 C. E. Lee 等通过磁控溅射在光纤端面形成了 TiO₂ 反射膜，成功制作了首支 IFPI 传感器^[3]。随后 Kent A. Murphy 等人将两根光纤相对插入准直毛细管内，并采用环氧树脂将光纤和毛细管粘接固定，从而形成了最早的 EFPI 传感器，并成功应用于 F15 战斗机^[4,5]。EFPI 传感器中法珀腔由空气或者其它导光介质构成，结构更加灵活，选择更加多样，尤其是大动态范围的测量，IFPI 受限于光纤性能难以胜任，因此，EFPI 在实验研究和工程应用中更加普遍。

1 FP 传感器结构及原理

光纤 FP 传感器是一种干涉型光纤传感器，通过光纤端面间的多次反射形成干涉光谱，以 EFPI 传感器为例，两个光纤端面可以视为反射面，入射光在两个反射面之间多次反射形成干涉，如图 1 所示。

由于两根单模光纤材质相同，设两个反射端面的反射率均为 R ，入射光波长为 λ ，光强为 I_0 ，相邻两束干涉光的相位为 φ ，FP 腔折射率为 n ，长度为 L ，入射光与反射端面之间的夹角为 θ ，根据多光束干涉原理可知，FP 腔发射光强为

$$I_R = \frac{2R(1 - \cos\varphi)}{1 + R^2 - 2R\cos\varphi} I_0 \quad (1)$$

其中，相位差为

$$\varphi = \frac{4\pi nL}{\lambda} \cos\theta + \pi \quad (2)$$

单模光纤中入射光通常是正入射到 FP 腔中，因此 $\cos\theta \approx 1$ ，附加的相位 π 为光疏介质入射到光密介质发生反射时产生的半波损耗引起的相位差。对于端面处理良好的光纤， $R \approx 0.04$ ， $R \ll 1$ ，此时，多光束干涉可简化为双光束干涉，故式（1）可写为

$$I_R \approx 2R(1 - \cos\varphi) I_0 \quad (3)$$

在相位解调过程中，干涉光谱为余弦谱线。当干涉光谱的光强为极大值和极小值时，分别满足如下关系式

$$2m\pi = 4\pi nL / \lambda \quad m = 0, 1, 2 \dots \quad (4)$$

$$(2m - 1)\pi = 4\pi nL / \lambda \quad m = 0, 1, 2 \dots \quad (5)$$

当外界环境发生变化时，腔长变为 $L + \Delta L$ ，此时，对应的干涉光谱波峰位置也会发生位移，波长变为 $\lambda + \Delta\lambda$ ，满足

$$2m\pi = \frac{4\pi(L + \Delta L)}{\lambda + \Delta\lambda} \quad m = 0, 1, 2 \dots \quad (6)$$

联合式（4）和式（6），在腔长变化范围小于波长的情况下，可得

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta L}{L} \quad (7)$$

光纤传感器利用光纤对某些特定物理量敏感的特性，能够将外界物理量的变化转换成光信号的变

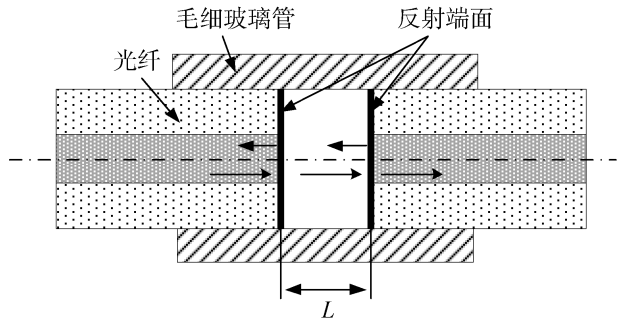


图 1 EFPI 干涉示意

Fig. 1 A schematic diagram of the EFPI interference

化。当被测结构的温度、压力、应变、位移等物理量中的一种发生变化时, 这种变化作用到光纤 FP 传感器上, 引起 FP 腔长 L 发生变化, 因此, 通过监测干涉光谱波峰波长变化获取腔长 L , 就能对这种变化的物理量进行监测。

2 高温应用

2.1 高温温度

在温度测量方面, 航空航天发动机、油井勘探、钢铁冶炼等应用场景往往会面临数百甚至上千摄氏度的高温。虽然石英光纤耐温极限超过 1000°C , 但是各种研究表明, 光纤涂覆层是其耐温最薄弱环节, 普通光纤的丙烯酸脂涂层耐温极限不超过 250°C , 采用聚酰亚胺涂层可以将耐温极限提升至 400°C , 使用镀金涂层的光纤可以工作在 800°C 环境^[6]。对于 1000°C 以上的工作环境, 需要采用耐温性能更好的蓝宝石光纤。蓝宝石光纤熔点高达 2043°C , 在 1600°C 以上的超高温环境下仍然具有良好的光学性能, 是目前超高温光纤传感的唯一选择。

L Xu 等人通过将一小段单模 PCF 光纤与普通单模光纤进行熔接, 熔接时 PCF 光纤的空气孔塌陷, 从而形成法珀腔, 该传感器可以在 800°C 以下的环境中长时间工作^[7]。南京大学 J Kou 等人将石英光纤进行拉锥, 通过激光刻蚀在锥区得到一个约 $4.4\mu\text{m}$ 的空气微腔, 该传感探头温度灵敏度达到 $20\text{pm}/^{\circ}\text{C}$, 可以在超大温度梯度的复杂环境中工作, 并且需要的安装空间较小^[8]。M Yang 等人通过物理气相沉积的方法在多模光纤端面先后镀上 ZrO_2 、 Al_2O_3 、 ZrO_2 薄膜, 传感器可以实现 $250^{\circ}\text{C}\sim 750^{\circ}\text{C}$ 温度测量, 其灵敏度约 $5.4\text{pm}/^{\circ}\text{C}$ ^[9]。美国 Luna 公司的 Elster 等人将 EFPI 温度传感器应用在波音公司的飞机结构健康监测系统中, 该试验完成了高温传感系统安装流程、数据处理及传感器耐温性能的验证^[10]。

对于蓝宝石高温温度传感器的研究, 美国弗吉尼亚大学 A Wang 团队成功在蓝宝石光纤端面制作 FP 腔, 然后与单模光纤熔接形成光纤 FP 温度传感器, 实现了 $310^{\circ}\text{C}\sim 976^{\circ}\text{C}$ 温度测量, 温度分辨率达到 0.2°C ^[11]。在之后的研究中, 该团队通过把蓝宝石晶片安装在蓝宝石光纤的一端形成 FP 腔, 蓝宝石晶片产生的干涉信号经过蓝宝石光纤和石英光纤传输至分光计, 随后对干涉信号进行解调。在实验室条件下实现了 1593°C 的高温测量, 并且测试误差小于 1°C ^[12]。

电子科技大学的饶云江等通过激光微加工技术, 在石英光纤和蓝宝石光纤端面制备微型 FP 腔, 并分别与石英光纤熔接, 形成的 FP 温度传感器均能实现 $100^{\circ}\text{C}\sim 1100^{\circ}\text{C}$ 温度测量, 经过对比, 蓝宝石 FP 腔的温度灵敏度是石英 FP 腔的 5 倍^[13]。

天津大学刘铁根等采用蓝宝石芯片和蓝宝石光纤形成 FP 腔, 并通过在非高温区熔接普通多模光纤的方法得到了成本可控的超高温光纤温度传感器, 该传感器在 $130^{\circ}\text{C}\sim 1080^{\circ}\text{C}$ 范围内的灵敏度能够达到 $3.11\text{nm}/^{\circ}\text{C}$, 测试温差小于 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ ^[14]。该传感器结构简单, 性能稳定, 并且具有较高测试精度, 对于航空航天等高温工业应用具有一定的参考价值。

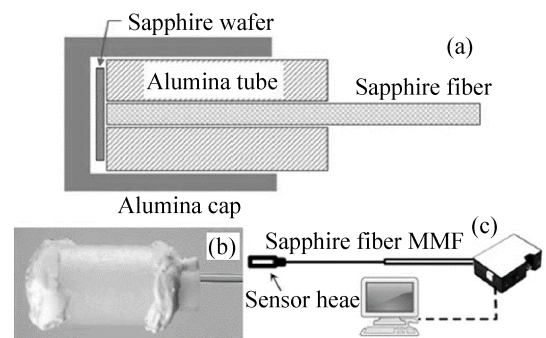


图 2 蓝宝石光纤 FP 腔传感器

Fig. 2 Sapphire fiber sensor based on FP cavity

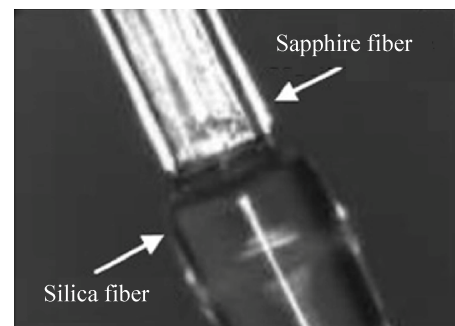


图 3 蓝宝石光纤与石英光纤熔接

Fig. 3 Schematic diagram of sapphire fiber and quartz fiber fusion

在实验室条件下，利用蓝宝石光纤已经能够对 1600℃ 以下的温度进行监测，并且误差较小，但是距离实际工程应用还有较大的差距。工程化应用不仅需要能够在恶劣的环境下对温度变化做出快速、准确响应的传感探头，还需要针对测试环境设计可靠的安装方案。缺乏稳定、可操作性强的安装方案已经成为制约高温光纤传感器应用的重要原因之一。目前，高温环境下光纤传感器的安装方式主要分为胶粘、焊接、等离子喷涂三种。胶粘可以适用于大部分工况，但是选择一款粘接性强、性能稳定、固化简单的胶需要大量筛选实验；焊接对于安装环境要求高，可适用范围小，并且随着测试温度不断升高，传感器各组件材料热膨胀系数差异带来的影响越来越明显，焊接安装容易引入一个较大的内部应力。等离子喷涂系统庞大，难以运输到安装现场，并且不适用于狭窄的安装面。因此，在未来的一段时间内，对于 FP 高温温度传感器工程化应用的研究，将主要集中在传感器安装工艺方面的攻关。

2.2 高温应变

监测结构在高温环境下的力学特性，尤其是结构的应变特性，是结构健康评估、力学性能优化的关键。结构高温状态下的应变测试方法有很多种，如图 4 所示。美国 NASA 研究指出，普通箔式应变片只能工作在 400℃ 以下的环境中，1000℃ 以上的环境只能选用线扰式应变计或者光纤传感器^[15]。在光纤高温应变测试方法中，主要有光纤光栅和光纤 FP 测试技术两种。本节主要讨论光纤 FP 传感器在高温环境下的应变测试应用。

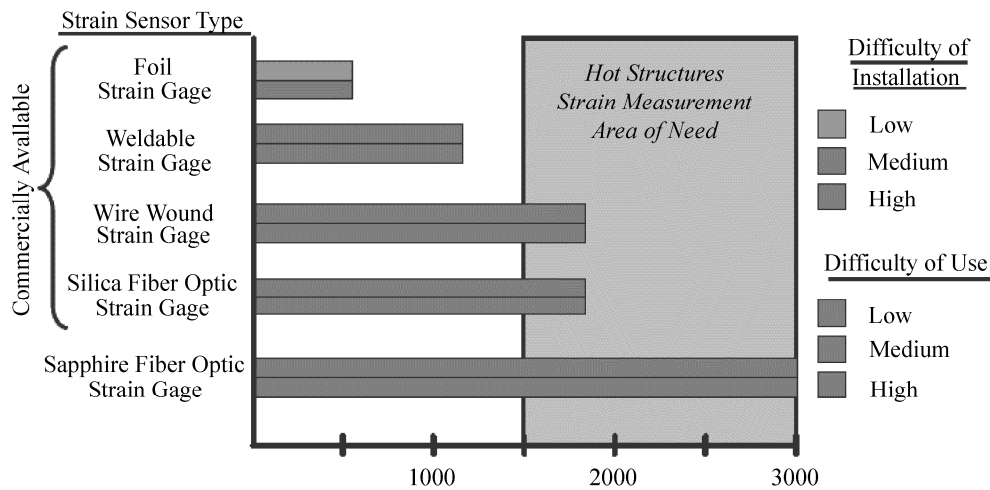


图 4 高温应变测试技术对比

Fig. 4 Comparison of high temperature strain testing techniques

电子科技大学饶云江等采用 157nm 激光制作的光子晶体光纤法布里-珀罗传感器，应变灵敏度为 5.93nm/με，实验表明，该微腔不受温度的影响，800℃ 范围内腔长变化仅 20nm，温度与应变的交叉灵敏度约为 0.075με/°C^[16]。

X Liao 等结合长周期光栅和 FP 腔实现温度和应变的同时测量，完成了 500℃ 环境 500με 的测量^[17]。重庆大学的 M Deng 通过将多模光子晶体光纤与普通单模光纤焊接，完成了 750℃ 高温环境下 1850με 测量^[18]。A Wang 等通过激光热熔技术将光纤和准直毛细管焊接在一起，采用该方法制作的 FP 应变传感器成功避免了高温退化等问题^[19]。但是采用刻蚀熔接形成的 FP 腔在结构上具有缺陷，应变测量范围有限。在之前的报道中，这类结构测量温度甚至可以达到 1000℃，但是应变普遍小于 3000με。采用非连续光纤的 EFPI 传感器则没有这种限制。

武汉大学熊丽等在发表的论文中采用两段自由光纤在毛细管中形成 FP 腔结构，实现了 500℃ 下 10000με 的测量^[20]。Y Huang 等提出一种结合 EFPI 和 LPFG 的准分布光纤传感器，能够实现 700℃ 环境下 12%应变测量，局限于试验条件，完成了 700℃、60000με 的同时测试试验，该传感器可以用于建筑物在地震等大应变条件下的健康监测^[21]。

光纤 FP 高温应变传感器的工程化应用一直是一个难题。NASA 德莱顿飞行研究中心针对 X37 飞行器的襟副翼和方向升降舵进行了详细的仿真和试验研究, 并提出了基于光纤 EFPI 高温应变传感器。光纤 EFPI 高温应变传感器如图 5 所示, 由镀金光纤和石英套管构成, 并由等离子喷涂工艺固定在待测结构体上^[15]。

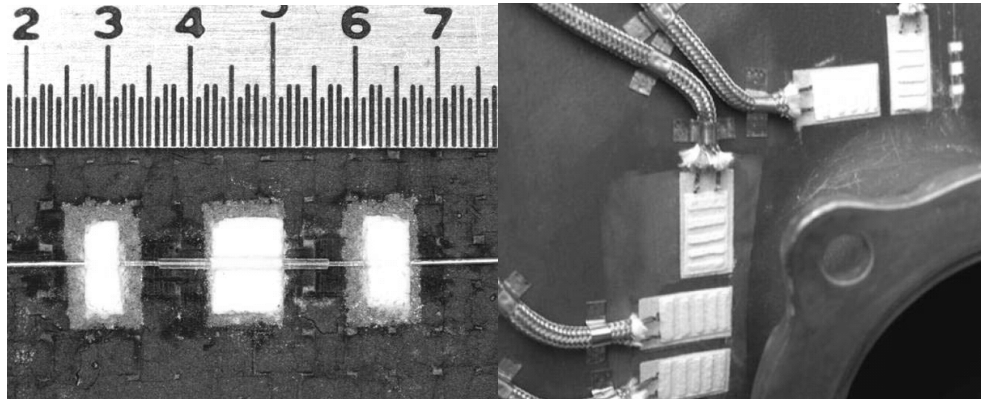


图 5 NASA 制作的高温应变传感器

Fig. 5 High temperature strain sensor made by NASA

美国 Missouri 大学的 Kaur 等人提出了一种耐高温可嵌入式光纤 EFPI 应变传感器。采用飞秒激光器加工的传感器能够在 800°C 环境下稳定工作, 并且验证了传感器与航天用复合材料拥有良好的兼容性。如图 6 所示, 该团队将传感器嵌入航天用复合材料中, 在 0~4000 $\mu\epsilon$ 的测试范围内, 传感器展示了高度的线性应变特性^[22]。

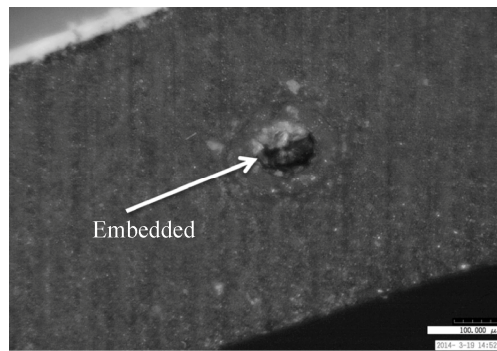


图 6 传感器嵌入示意图及显微图像

Fig. 6 An image of a sensor embedded under a microscope

应变监测对于航天飞行器、运载火箭、弹道导弹等国防基础科研具有重要指导意义。近年来, 美国及欧洲发达国家不断增加研发费用, 抢占耐温超过 800°C 应变传感器研制技术的制高点。目前, 美国、德国、俄罗斯、日本都已经成功研发出超过 800°C 的高温应变传感器, 处于技术领先状态, 但这些先进传感器始终对中国禁运。国内相关技术发展较晚, 与国际领先水平仍然有一定差距, 基本都是模仿国外技术路线。基于 EFPI 的高温应变传感探头结构简单、易于制作, 但是和高温温度传感器一样, 高温应变传感器也面临着传感器安装困难的技术难点。除此之外, 国内没有高温应变传感器的专用测试设备, 测试设备基本都是由研究单位改造得到。目前, 已经有多家单位建立了高温应变传感器攻关团队, 如北京遥测技术研究所、天津大学、电子科技大学、北京环境强度研究所等, 但是距离工程应用还有一定距离。

2.3 高温压力

光纤压力传感器的研究起始于上世纪七十年代,目前,全球范围内已经有几家机构推出了光纤 FP 压力传感器,但受限测试系统的可靠性、温度与压力的交叉影响、传感器的封装与现场安装等关键技术难题,还没有一家能够完全解决高温压力精密测试,只能满足部分实际需求^[23]。由于传感器制作依赖手工,测试重复性差,导致传感器目前仍然无法量产和工程化。光纤原理的压力传感器国内研究较少,美国 NASA、英国 Oxsensis、欧洲航空局、美国 Luna 公司、Florida 大学、Virginia 理工大学,都相应开展了基于 FP 腔超高温压力传感器的研究,其研究方向集中在利用 MEMS 技术与光纤技术相结合,实现全 SiC 或全蓝宝石结构的敏感芯片。

英国 Oxsensis 公司从 2005 年开始研制基于光纤 FP 干涉原理的高温压力传感器,并与阿尔斯通、西门子、斯奈克玛等公司合作广泛,近年来,该公司已推出多款商业化高温压力产品,可以连续工作在 750°C 高温下,并可以短时间耐受 1000°C 的高温^[24,25],传感器如图 7 所示。2016 年, Oxsensis 公司参与了由 Rolls-Royce 公司和英国航空工业研究所发起的发动机健康监测系统 E2EEHM (the end engine health management programme) 的研发,旨在利用光纤传感器系统一体化解决发动机关键参数的原位监测难题。

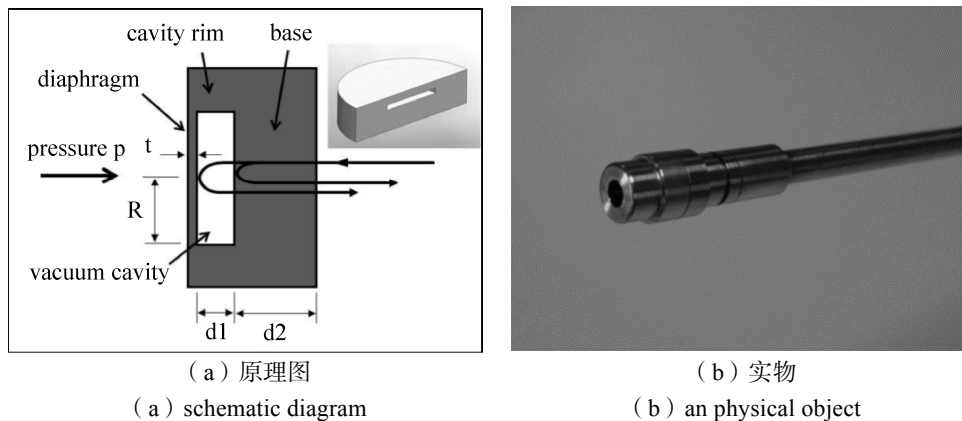


图 7 英国 Oxsensis 公司高温压力传感器
Fig. 7 High temperature pressure sensors for the company of Oxsensis

美国 Luna Innovation 公司在光纤传感领域享有盛名,其光纤高温传感器主要面向 NASA 和美国空军。该公司集中利用 MEMS 技术与光纤技术相结合,实现了全 SiC 或蓝宝石结构的敏感头制备,其传感器测量参数覆盖温度、压力、加速度、摩擦力等,耐温性能分别达到 1400°C、800°C、850°C、870°C^[26]。

Pulliam 等人对 EFPI 压力传感器在涡轮发动机及高速燃烧室中的应用进行探讨,并在涡轮发动机研究中心完成了对跨声速风扇的测试^[27]。

电子科技大学饶云江课题组采用 157nm 深紫外激光,在石英和光子晶体光纤上加工制作微腔,分别实现了 400°C 和 700°C 高温压力的测量^[28]。

天津大学刘铁根等开发了微型光纤 FP 压力传感器、声压传感器以及相应的多通道解调仪,还对传感器的封装进行了一定研究^[29,30]。西北工业大学单宁等将 EFPI 压力传感器用于航空发动机叶片裂纹的监测^[31]。Fusiek 等针对石油井下压力测量需求,研究了专用光纤 FP 压力传感器,并对实际应用工况进行了考核^[32]。但是这些传感器使用温度普遍较低。

目前,为了解决超高温压力传感器的需求和压力传感器耐温低之间的矛盾,在实际应用中主要采用以下两种替代方法:一是采用水冷或者气冷的压力传感器,其工作温度可以达到 1000°C。二是引压管结合常温压力传感器的测量方法,温度范围更高。这两种方法都具有明显的缺点:水冷式或气冷系统比较复杂,将导致重量大大增加以及水冷或气冷产生的安全问题,限制了该类型传感器在航空发

动机中的应用;在引压管结合常温压力传感器的测量方法中,引压管起着传递压力和隔离热量传递的功能,这样不但会导致非原位测量准确度不高,而且引压会降低测量的动态特性,不能满足实时动态压力测量需求。因此,高温环境下的压力测量仍然是目前测量技术的一个瓶颈。

3 结束语

光纤 FP 传感器自二十世纪九十年代问世以来,受到各国学者的广泛关注,经过二十多年的发展,高温温度、高温应变、高温压力等方面的研究硕果累累,并成功在石油煤矿、航空航天、电力系统等领域实现应用。基于石英光纤的法布里-珀罗传感器能够应用于 1000°C 以下的工作环境,不同环境温度使用不同涂覆材质,丙烯酸脂、聚酰亚胺及镀金涂层耐温极限分别为 250°C、400°C、800°C,对于 1000°C 以上环境,目前,只能选择蓝宝石光纤作为敏感元件和传光介质。光纤 FP 传感器在特殊、恶劣环境中应用优势明显,但是传感器制作依然依赖手工,测试稳定性、重复性较差,制作的传感器需要逐个标定,严重制约批量化生产。随着工程应用的深入,今后的研究方向将围绕恶劣环境应用需求,重点突破 FP 腔自动化、规模化生产工艺,传感器现场安装技术以及传感系统的长期可靠性等关键技术。可以预见,光纤 FP 传感器高温应用将会是光纤传感器未来的重点发展方向之一。

参考文献

- [1] 吴梦绮. 基于 EFPI 与 RFBG 的高温光纤应变传感技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2018.
WU Mengqi. Research on high temperature strain sensing technology based in EFPI and regenerated fiber Bragg grating[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2018.
- [2] 王久玲, 饶云江, 朱涛. 截面折变非对称型长周期光栅高温应变特性[J]. 中国激光, 2007, 34(3): 389–392.
WANG Jiuling, RAO Yunjiang, ZHU Tao. High temperature strain characteristics of cross section folding asymmetric long period grating[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 34(3): 389–392.
- [3] LEE C E. Interferometric optical fiber sensors using internal mirrors[J]. Electronic Letter, 1988(24): 2.
- [4] MURPHY K A, GUNTHER M F, VENGSARKAR A M, et al. Fiber optic smart structures and Skins 1V[C]. SPIE, 1991.
- [5] MURPHY K A, GUNTHER M F, VENGSARKAR A M, et al. Fabry-Perot fiber-optic sensors in full-scale fatigue testing on an F-15 aircraft[J]. Applied Optics, 1992, 31(4): 431–433.
- [6] TRAN T, GREENE J, MURPHY K, et al. EFPI manufacturing improvements for enhanced performance and reliability[C]. Smart Structures and Materials, 1995, 2447: 312–323.
- [7] XU L, DENG M, DUAN D, et al. High-temperature measurement by using a PCF-based Fabry-Perot interferometer[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2012, 50(10): 1391–1396.
- [8] KOU J, FENG J, YE L, et al. Miniaturized fiber taper reflective interferometer for high temperature measurement[J]. Opt. Express, 2010, 18(13): 14245–14250.
- [9] LEE D, YANG M, HUANG C, et al. Optical fiber high-temperature sensor based on dielectric films extrinsic Fabry-Perot cavity[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2014, 26(21): 2107–2110.
- [10] ELSTER J L, TREGO A, CATTERALL C, et al. Flight demonstration of fiber optic sensors[C]. Smart Structures and Materials 2003, Smart Sensor Technology and Measurement Systems, 2003: 34–42.
- [11] WANG A, GOLLAPUDI S, MURPHY K A, et al. Sapphire-fiber-based intrinsic Fabry-Perot interferometry[J]. Optics Letters, 1992, 17(4): 1021–1023.
- [12] TIAN Z, YU Z, WANG A. Sourceless optical fiber high temperature sensor[J]. Optics Letters, 2016, 41(2): 195–198.
- [13] RAN Z, CHEN Y, RAN Y, et al. 1100°C Fiber-optic high-temperature Fabry-Perot sensors fabricated by laser-micromachining[J]. International Conference on Optical Fiber Sensors, 2011, 775317: 1–4.
- [14] 江俊峰, 吴凡, 刘铁根. 蓝宝石光纤法布里-珀罗高温传感的实验研究[J]. 光电子激光, 2017, 28(4): 347–353.
JIANG Junfeng, WU Fan, LIU Tiegeng. Experimental study of sapphire fiber Fabry-Perot high temperature sensing[J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2017, 28(4): 347–353.
- [15] PIAZZA A. High-temperature instrumentation[C]. Reports of NASA, 2008, 0815(4703): 1–27.
- [16] 饶云江, 邓洪有. 用 157nm 激光制作的光子晶体光纤法布里-珀罗传感器[J]. 光学学报, 2008, 28(2): 255–258.

- RAO Yunjiang, DENG Hongyou. Photonic crystal fiber Fabry-Perot sensor fabricated with 157nm laser[J]. Acta Optica Sinica, 2008, 28(2): 255–258.
- [17] LIAO X, RAO Y, RAN Z. Simultaneous measurement of high-temperature and strain using a combined long-period fiber grating/Fabry-Perot sensor fabricated by laser pulses[J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(6): 884–888.
- [18] DENG M, TANG C, ZHU T, RAO Y. PCF-based Fabry-Perot interferometric sensor for strain measurement at high temperatures[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2011, 23(11): 700–702.
- [19] WANG A, XIAO H, MAY R, et al. Optical fiber sensors for harsh environments[C]. SPIE, 2000, 4077: 2–6.
- [20] XIONG L, ZHANG D, LI L, et al. EFPI-FBG hybrid sensor for simultaneous measurement of high temperature and large strain[J]. Chinese optics Letters, 2014, 120605: 1–5.
- [21] HUANG J, CHEN G, XIAO H, et al. A quasi-distributed optical fiber sensor network for large strain and high temperature measurements of structures[C]. SPIE, 2011, 798317: 1–12.
- [22] KAUR A, ANANDAN S, YUAN L, et al. Strain monitoring of bismaleimide composites using embedded microcavity sensor[J]. Optical Engineering, 2016, 55(3): 037102.
- [23] 吕涛. 非本征法布里-珀罗腔光纤压力传感器研究进展[J]. 仪表技术与传感器. 2015, 7: 1–6.
LYU Tao. Research progress of non-intrinsic Fabry-Perot cavity fiber optic pressure sensor[J]. Instrument Technique and Sensor, 2015, 7: 1–6.
- [24] HARPIN A. Optical sensor for harsh environments[J]. Sensor and Test Conference, 2009: 89–94.
- [25] PECHSTEDT R D. Fibre optic pressure and temperature sensor for applications in harsh environments[J]. Fifth European Workshop on Optical Fibre Sensors, 2013, 879405: 1–4.
- [26] FIELDER R, STINSON K, PALMER M. Harsh-environment fiber optic sensors for structural monitoring applications[J]. Smart Structures and Materials, 2004, 5388: 399–409.
- [27] PULLIAM W J, RUSSLER P M, FIELDER R S. High-temperature high-bandwidth fiber optic MEFS pressure-sensor technology for turbine engine component testing[C]. Fiber Optic Sensor Technology and Applications, 2002: 229–238.
- [28] 柳珊. 高温光纤压力传感器的制作及其特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2014.
LIU Shan. Fabrication and characterization of high temperature optical fiber pressure sensor[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2014.
- [29] 刘铁根, 王双, 江俊峰, 等. 航空航天光纤传感技术研究进展[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1681–1692.
LIU Tiegeng, WANG Shuang, JIANG Junfeng, et al. Research progress of optical fiber sensing technology in aerospace[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(8): 1681–1692.
- [30] 吴振海, 刘铁根, 江俊峰, 等. 热应力和残余气压对光纤法布里-珀罗压力传感器温度性能的影响[J]. 光学学报, 2015, 35(3): 0328005.
WU Zhenhai, LIU Tiegeng, JIANG Junfeng, et al. Effects of thermal stress and residual air pressure on temperature performance of fiber optic Fabry-Perot pressure sensors[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(3): 0328005.
- [31] 单宁, 史仪凯, 刘霞. 光纤法-珀传感器在飞机发动机叶片裂纹检测中的应用[J]. 无损检测, 2009, 31(3): 206–207.
SHAN Ning, SHI Yikai, LIU Xia. Application of fiber optic Fabry-Perot sensor in the detection of blade crack of aircraft engine[J]. Nondestructive Testing, 2009, 31(3): 206–207.
- [32] FUSIEK G, NIEWCZAS P, BURT G M. Preliminary evaluation of a high-pressure, high-temperature downhole optical sensor[C]. Proceedings of 2011 IEEE Sensors, 2011: 409–412.

[作者简介]

毛国培 1992年生, 硕士, 工程师, 主要研究方向为高温光纤传感技术应用。

李金洋 1988年生, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为高温光纤传感技术应用。

史青 1982年生, 博士, 研究员, 主要研究方向为光学传感系统设计和光学传感器工程化。