

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2108737

光纤传感技术在航空发动机温度测试中的应用*

韩国庆^{1,2}, 刘显明^{1,2}, 雷小华^{1,2}, 章鹏^{1,2}, 周峰^{1,2}

(1. 重庆大学光电工程学院 重庆 400044; 2. 光电技术及系统教育部重点实验室 重庆 400044)

摘要:温度测试对于航空发动机设计与研制具有极其重要的意义。航空发动机的测温环境具有高温、高压、高速气流冲击、高转速、安装空间狭小等特点,还要求测温系统具有大量程、高精度和高稳定性的工作性能,可供选择的测温方法非常有限。光纤温度传感器具有体积小、抗电磁干扰、极端环境下的安全可靠和使用灵活等优点,并具有串联复用的准分布式传感能力,在航空发动机温度测试中有很好的应用前景。本文对比总结了基于光纤布拉格光栅、光纤法布里-珀罗、光纤超声和光纤辐射等几类典型的光纤温度传感器的传感原理、制造工艺和技术特点,分析了航空发动机研制中不同对象和场景的温度测试需求,对光纤温度传感技术在航发测温领域中的应用研究现状进行了分类整理和发展水平综述,对其在未来实际应用中存在的不足进行了分析,最后对其在未来研究及应用的发展方向进行了展望,为后续航发测温领域研究及应用提供参考。

关键词:航空发动机; 光纤布拉格光栅; 光纤法布里-珀罗; 超声测温; 辐射测温

中图分类号: TH811 TN253 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Application of optical fiber sensing in aero-engine temperature test

Han Guoqing^{1,2}, Liu Xianming^{1,2}, Lei Xiaohua^{1,2}, Zhang Peng^{1,2}, Zhou Feng^{1,2}

(1. College of Optoelectronic Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. The Key Laboratory of Optoelectronic Technology and System of Ministry of Education, Chongqing 400044, China)

Abstract: Temperature test is extremely important for the design and development of the aero-engine. The working environment of the aero-engine has the characteristics of high temperature, high pressure, high-speed airflow, high-speed rotating, and narrow space. It also requires the measurement system to have the performance of large range, high precision and high stability. At present, the available methods are very limited. The optical fiber temperature sensor has advantages of small size, anti-electromagnetic interference, safety and reliability in extreme environment, which is flexible to be utilized. It has the quasi-distributed sensing capability of series multiplexing, which has a good application prospect in the temperature test of the aeroengine. This article compares and summarizes the sensing principles, manufacturing processes and technical characteristics of several optical fiber temperature sensors, such as fiber Bragg grating, Fabry-Perot, fiber ultrasonic and fiber radiation. Temperature test requirements in different conditions of the aero-engine are analyzed. The application research progress of the optical fiber temperature sensing technology is classified and summarized. The deficiencies and future development directions of optical fiber sensing technology in the application of temperature measurement are analyzed and prospected to provide reference for follow-up research.

Keywords: aero-engine; fiber Bragg grating; Fabry-Perot; ultrasonic thermometry; radiation thermometry

0 引言

航空发动机是国之重器,被誉为“工业皇冠上的明珠”。

航空发动机研制涉及空气动力、工程热物理、材料、强度、自动控制等众多基础学科和工程科学技术领域,是现代尖端科技的有机结合体^[1-4]。随着发动机性能的不断升级和对可靠性、安全性和经济性越来越高的要求,航

收稿日期:2021-10-20 Received Date: 2021-10-20

* 基金项目: 国家自然科学基金(61875023, 51975077, 52175530, 51675068)、国家重大专项(J2019-V-0002-0093)、重庆市自然科学基金(cstc2019jcyj-msxmX0036)项目资助

空发动机的温度测试系统必须具备准确度高、灵敏度高、通道多、小型化、量程广、抗恶劣环境、动态响应好、智能化等特性,才能适应航空发动机研制和使用要求。发动机试验测试结果必须符合设计要求的准确度,才能为航空发动机研制提供扎实有力的支持^[5-8]。

在航空发动机温度测量领域,传统的测温技术有热电偶、热电阻、示温漆、晶体测温和红外辐射测温等。热电偶^[9-18]、热电阻^[19-20]等电学传感方法因其成本低、精度高、读数可靠和易于操作的优点而广泛应用,但在部分应用场合下存在易受电磁干扰、多点测温时线路复杂,测温元件高温情况易氧化失效导致稳定性和可重复性差等不足。示温漆^[21-22]和晶体测温^[23-26]只能测量最高温度,且无法进行实时温度测量。非接触式红外辐射测温^[27]要求先获取试验件材料发射率的准确数值,而且受周围环境影响大,精度一般比较低。

以光纤作为载体的光纤温度传感技术^[28-34],具有体积小、抗电磁干扰、可在易燃/易爆环境下工作、传感器端无需供电、耐高温以及便于组成传感器网络等优点,在航空发动机的极端环境下能完成传统传感器很难甚至不能完成的任务。本文首先介绍航空发动机的具体测温需求和传统测温方法,再对光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)、光纤法布里-珀罗(Fabry-Perot, F-P)、光纤超声和光纤辐射测温等典型光纤测温技术的测温原理进行介绍,分析各技术的优势与不足,并进一步阐述其在航空发动机测温领域的应用情况,最后分析其在航空发动机测温应用中存在的不足及未来发展方向。

1 航空发动机测温需求

航空发动机主要由进气道、压气机、燃烧室、涡轮和尾喷管等组成。其中进气道与压气机温度较低,称为冷端;燃烧室、涡轮与尾喷管温度较高,称为热端。在航空发动机测试中,常常需要测量某些典型截面的参数,这些截面根据气流流经发动机结构的先后顺序进行数字标识,即1代表进气道进口,2代表压气机进口,3代表压气机出口或燃烧室进口,4代表燃烧室出口或涡轮进口,5代表涡轮出口,6代表尾喷出口,如图1所示。对应温度通常按 T_1 、 T_2 等进行表示。

在航空发动机全流程测试中,需要数百个各种型号的温度传感器^[35]。根据测温对象的不同,可分为两类,即针对气路中不同截面处的气流温度测量和针对不同结构部件的温度测量。

首先是气流温度测量。在航空发动机研究领域,气流温度通常指的是气流总温,即气流绝热滞止时,它的动能转化为内能时反映出来的温度。气流总温测量中存在稳态误差和动态误差,其中稳态误差包括速度误差、导热

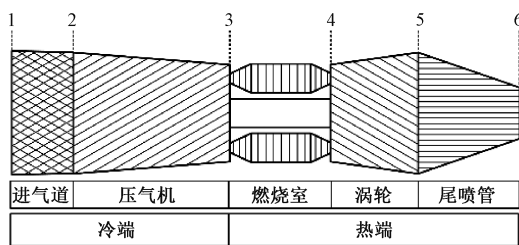


图1 航空发动机的基本组成及截面标识

Fig. 1 Elements and cross section of the aero-engine

误差和辐射误差。总温传感器在进行气动结构设计时,需要在各类误差中实现最佳平衡。这需要综合考虑传感器总体结构的设计、材料的选取及加工制作等多方面问题^[36]。

目前,气流总温传感器大多会采用滞止罩式的气动结构设计^[9-10]。高速气流经滞止罩及感温元的双重滞止,速度迅速减小,动能将尽可能多地转变为内能,从而减小速度误差。在高温气流测量中,还需要考虑导热误差和辐射误差的影响。降低导热误差的措施有:减小来流总温和安装支架的温度差,增加感温元长径比,增加感温元表面传热系数和降低感温元材料的导热系数等措施。另外,滞止罩本身作为屏蔽罩,可以减少从壁面到感温元的辐射影响。因此,传感器结构设计需要考虑滞止罩进出口面积比、滞止罩长径比、感温元长径比以及感温元、滞止罩与支架三者的空间位置关系等,还需要考虑实际加工的可行性,是一项复杂的系统工程。

其次是针对结构部件的温度测量,包括压气机、燃烧室、涡轮部件和尾喷管等结构件的温度测量,这是对发动机运行状态和故障表征预警的关键参数。温度传感器往往布置在结构表面,进行表面测温。在结构表面温度测试中,传感器需要满足多方面的要求。首先,传感器应与结构表面进行有效接触,从而感受真实的表面温度。其次,感温元尺寸和传感器结构需尽可能小,以减少传感器对部件表面导热和外部气流的影响。在航发测试过程中,各种旋转件、气流流场的不均和强烈扰动都会产生大量复杂和随机的振动,从而造成各部件的振动,其中对薄壁构件产生的影响尤为剧烈。因此,传感器的结构强度要求高,能耐受环境振动等影响,可靠性高,从而保障工作期间性能稳定。此外,一般都要求传感器能测量高温和具有较高的测试精度。

2 传统接触式测温方法与应用

虽然非接触测温方法可以获得大面积的结构表面温度场,但由于安装限制、易受干扰导致精度较低、无法获得气流温度等问题,在航空发动机测温领域实际的工程

应用非常困难。目前主要采用的是接触式测温技术,包括热电偶、热电阻、示温漆、晶体测温等。

热电偶是基于热电效应进行测温的^[37]。在航空发动机实际测温应用中,常采用滞止罩热电偶测量稳态气流温度,采用贵金属热电偶测量高温气流温度,采用裸丝热电偶测量气流温度的动态变化。针对热端部件的温度测量需求,根据加工以及安装方式,可以分为埋敷式热电偶(包括敷设式和埋设式)和薄膜热电偶两种。敷设式热电偶制作安装工艺简单,但对被测壁面温度场影响较大。埋设式热电偶安装中的开槽会严重破坏壁面结构强度,影响内部传热和温度分布。薄膜热电偶^[38-40]是利用真空蒸镀、真空溅射或电镀等技术,将两种厚度仅为几微米的热电极薄膜直接镀在沉积有绝缘材料层的表面制备而来,其热接点薄,热容量小,因此对壁面或流体温度场干扰小。在燃烧室、涡轮叶片等实际工况测试下,薄膜热电偶存在断裂、膜与细丝引线开焊^[38,41]、损坏率高和使用寿命短^[39,42]等问题。

电阻测温法是基于电阻的热效应进行温度测量,测量精度高,性能稳定^[43]。主要包括金属电阻^[44]测温法和热敏电阻测温法^[45-46]。金属电阻使用的材料包括铂、金、银、铜和镍,其中铂电阻^[19-20,47-48]的性能最优,它在中低温区具有较高测量精确度,常作为温度测量的校准基准。

一般而言,电阻体积较大,热响应慢,另外存在耐振动和耐冲击性差,测点少,在高温下金属探头易氧化等问题。

示温漆是一种变色涂料,将其加热到某一温度,其颜色会发生变化。不同示温漆,具有不同的变色温度与颜色的对应关系^[22,49-50]。示温漆具有测量大面积温度场分布,不破坏物体表面形状、不影响气流状态和测量结果直观等优点,在测量旋转件或表面形状复杂工件壁面温度方面具有很大的优势。但是,示温漆测温精度相对较低,只能测量最高温度,无法进行实时监测。另外,判读过程主要依赖人工目测,判读精度、可重复性和效率依然很低,虽有一些示温漆自动判读技术^[51],但依然存在较大的误差,有待进一步改进。

晶体测温技术的原理是被高能粒子辐照过的晶体会产生大量晶格缺陷,这些缺陷在不同温度下会逐渐消除,因此根据残余缺陷浓度进行温度判读^[23-26]。晶体测温技术具有尺寸小、无引线、对被测对象温度场干扰小、测温上限高、精度高的特点,可应用于发动机高温高速旋转部件的壁温测量,如涡轮转子叶片的壁温测量^[23]。但是此方法只能离线测量,事后判读。另外,在晶体安装和拆除的过程中,极易受到损坏,需要进一步改进工艺技术。

综合上述介绍分析,将现有的航空发动机常规测温技术进行对比,如表1所示。

表1 航空发动机传统接触式测温技术对比

Table 1 Comparison of the conventional contact temperature measurement technology for the aero-engine

现有技术	量程/°C	优点	不足之处	应用场景
热电偶	-270~1 800	技术成熟、测温范围广、实时测量	对电磁干扰敏感,旋转件引线困难,多点测量线路复杂	进气道 ^[10,52] 、燃烧室 ^[42,53-55] 、涡轮 ^[37,39-40,53] 、尾喷管 ^[37,53]
铂电阻	-260~960	技术成熟、性能稳定、精度高、实时测量,常作为温度基准	体积大,热响应慢,耐振动和耐冲击性差,旋转件引线困难,多点测量线路复杂	进气道 ^[19-20] 、压气机 ^[47-48]
示温漆	150~1 200	大面积温度场分布,不破坏物体表面形状、不影响气流状态和测量结果直观	只能显示最高温度,不能实时监测,判读精度、可重复性和效率较低	燃烧室 ^[50] 、涡轮 ^[49-50]
晶体	150~1 430	尺寸小、测温上限高	数据判读难度高,只能显示最高温度,安装、拆卸复杂,一次性使用	燃烧室 ^[56] 、涡轮 ^[57] 、尾喷管 ^[56]

3 光纤测温技术

光纤测温技术主要包括 FBG、F-P、超声和辐射等4种测温技术。

3.1 光纤结构与材料

光纤是利用光的全反射原理进行光信号传输的纤维状材料,根据折射率不同可分内层纤芯和外层包层,纤芯的折射率比包层的折射率大,从而构成全反射条

件,使得满足一定入射条件并在其中传输的光波被束缚在纤芯内,且沿着光轴方向前进^[58]。光纤折射率的改变可通过纤芯掺杂或包层掺杂等方式实现。为了保护光纤,包层外通常还有涂层等各类保护层。光纤温度传感器通过在光纤上进行结构设计,实现对温度的感知,并体现在光信号的特征参数中。针对航空发动机具体对象的需求,可以利用不同的感温原理,有针对性地开发出高精度、高速响应和耐高温的长寿命温度传感器。

制约光纤温度传感器高温应用的一大因素就是光纤的材料,包括纤芯、包层和涂层的材料。常见的光纤纤芯和包层材料是石英,本身的熔点较高,可满足大部分的航空发动机测温应用需求。但仅有纤芯和包层的裸光纤往往易碎,需要有涂覆层进行保护才能适应弯曲、振动等应用环境。而光纤涂覆层的耐温较低,不同商用光纤涂层工作温度如表2所示。常规通信光纤的涂覆层材料丙烯酸酯,耐温不超过200℃。聚酰亚胺涂层耐温约300℃,镀金光纤耐温700℃。在超过700℃测温应用时,若采用石英光纤,一般采用无涂覆层的光纤,在传感器制作时需要非常小心,以防光纤的断裂。

表2 光纤涂层工作温度

Table 2 Working temperature of the optical fiber coating

光纤规格型号	涂层材料	工作温度/℃
Corning, SMBI-5-XMT	丙烯酸酯	-60~+180
Fibercore, SM1250SC(9/125)	聚酰亚胺	-190~+350
Fiberguide, AFS105/125/155A	铝	-269~+400
Fiberguide, AFS105/125/155G	金	-269~+700

随着越来越高的测温需求,为进一步提升光纤的高温稳定性,研究人员开始利用高温稳定性更好的单晶材料进行单晶光纤制备。例如蓝宝石、氧化锆等单晶介质,通过激光加热基座法和导模法制备成单晶光纤,其中蓝宝石光纤的研制较为成熟,王楠楠等^[30]和Wang^[34]等详细描述了蓝宝石光纤高温测试技术的研究现状和发展趋势。不同光纤材料的熔点如表3所示。

表3 不同光纤材料的熔点

Table 3 Melting point of the different optical fiber materials

材料	熔点/℃
石英(SiO ₂)	1 330 ^[59]
钇铝石榴石(Y ₃ Al ₅ O ₁₂)	1 950 ^[60]
蓝宝石晶体(Al ₂ O ₃)	2 040 ^[61-62]
镁铝尖晶石(MgAl ₂ O ₄)	2 500 ^[63]
氧化锆晶体(ZrO ₂)	2 715 ^[64]

这些单晶光纤具有高熔点,可适应高温应用环境。但由于生长技术的限制,目前这些单晶光纤还不具有包层结构,即只有单晶材料作为纤芯。虽然单晶纤芯与外部空气层也能实现全反射条件,但大芯径意味着光传输时具有多个模式,往往会导致信号质量的降低,一定程度上影响测温性能。

3.2 光纤布拉格光栅测温

FBG具有体积小、易于制造、与其他光纤兼容等优点,是广泛应用于光网络、波分复用光通信系统和光纤传

感器的最流行的光学元件之一^[65]。FBG是一种无源光器件,通过一定方法使光纤纤芯的折射率发生周期性调制而形成的衍射光栅。当一束宽带光通过FBG时,满足FBG布拉格条件的波长将产生反射,如图2所示。FBG的布拉格波长(反射光谱的谐振波长) λ_B 由光栅的周期 Λ 和纤芯的有效折射率 n_{eff} 决定。

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

外界温度 T 和应变 ε 变化直接使得FBG的有效折射率 n_{eff} 和周期 Λ 发生变化, λ_B 亦发生相应的变化,通过探测反射光谱谐振波长 λ_B 的变化便可求出外界温度和应变的变化,即:

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = K_T \cdot \Delta T + K_\varepsilon \cdot \Delta\varepsilon \quad (2)$$

式中: K_T 和 K_ε 分别代表FBG的温度和应变灵敏系数。上述公式中,可以发现FBG中心波长在温度和应变的共同作用下发生漂移,存在温度应变交叉敏感问题。因此需采用特殊结构或解调算法消除应变影响。

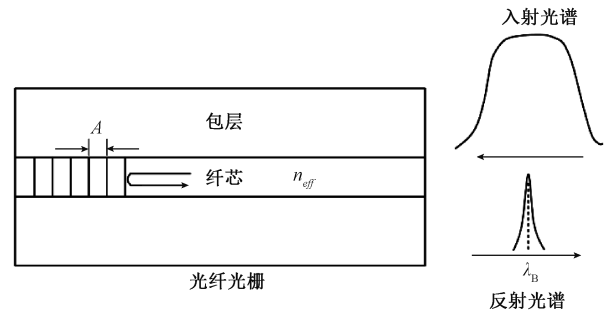


图2 FBG测温原理示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the FBG temperature measurement principle

为在光纤中实现光栅结构,需用到光刻工艺。准分子激光相位掩模法和飞秒激光逐点直写法是目前最常用的两种FBG制备工艺,如表4所示。紫外激光相位掩模法工艺成熟,在光通讯器件及普通光纤传感领域大量应用。加工过程需要繁琐的光纤载氢预处理;成栅中需先剥除涂覆层后加工,待加工完毕再进行光纤涂覆保护。而且紫外激光能量密度不高,折射率调制深度较低,导致所刻写的光栅在高温下会发生性能退化,因此不适宜高温环境测量。飞秒激光脉冲借助极短的脉冲宽度和极高的峰值功率,可以在石英或特种光纤内产生较大的折射率调制,具有出色的热稳定性。

3.3 光纤法布里-珀罗测温

光纤F-P传感器是基于多光束干涉原理。当两个反射面(反射率分别为 R_1 、 R_2)形成一个长为 L 的F-P腔,强度及波长分别为 I_0 和 λ 的光束入射到F-P腔内时(如图3所示),其反射光强 I_R 如式(3)所示^[66]。

$$I_R = \frac{2(R_1 + R_2)[1 - \cos(4\pi nL/\lambda)]}{1 + R_1R_2 - 2(R_1 + R_2)\cos(4\pi nL/\lambda)} \cdot I_0 \quad (3)$$

表 4 FBG 制备工艺比较

Table 4 Comparison of the FBG inscription

制备工艺	准分子激光相位掩模法	飞秒激光逐点直写法
光纤特性	涂层的去除和重涂的过程可能会影响光纤强度; 纯石英、蓝宝石、氟化物等特种光纤无法或难以写入	透过涂层直写光栅, 对光纤和涂层材料几乎无要求
光栅特性	折射率调制低	折射率调制高
耐高温性	较低, 400℃ 后即开始退化	较高, 可达 900℃ 以上

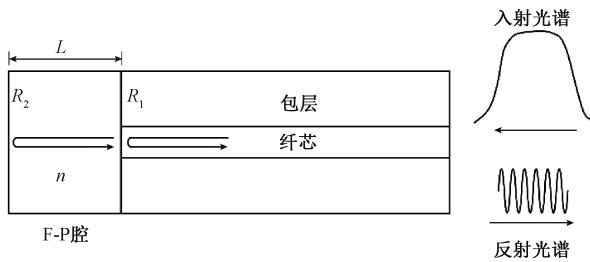


图 3 光纤 F-P 测温原理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the optical fiber F-P temperature measurement principle

当反射面的反射率较小时, 成为低精细度 F-P 腔, 多光束干涉退化为双光束干涉, 其反射光强 I_R 可以简化为:

$$I_R = 2(R_1 + R_2)[1 - \cos(4\pi nL/\lambda)] \cdot I_0 \quad (4)$$

外界温度 T 变化直接使得 F-P 腔折射率和腔长变化, 通过反射光谱便可求出外界温度变化, 其温度灵敏度为:

$$K_{F-P} = \frac{d(nL)}{dT} \quad (5)$$

F-P 温度传感器结构简单, 应用灵活, 可以通过改变 F-P 的材料和长度灵活改变折射率和腔长, 从而改变传感器的温度灵敏度^[67-69]。

按照结构可分为本征型和非本征型, 重庆大学陈伟民等^[66]详细描述了光纤 F-P 腔的结构及加工工艺。本征型工艺关键是如何在纤芯内加工出高质量的反射面, 目前常用的有飞秒激光法。飞秒激光可以直接在单模光纤纤芯中加工出高质量反射面^[70]或者引入折射率变化^[71]从而制造 F-P 腔, 此类型传感器的测量温度可达 1 000℃, 接近单模光纤的熔点。与后者类似的有, 直接在蓝宝石衍生光纤中纤芯区域产生结晶从而诱导折射率调制, 可以实现 1 600℃ 的温度测量^[72]。

非本征型工艺主要包括空气腔工艺和光纤端面工艺等。空气腔工艺是直接控制两段光纤的空隙距离形成空气腔, 或在光纤上利用激光烧蚀或化学腐蚀形成空气腔等微结构后, 再与膜片键合形成空气腔^[73]。光纤端面工艺是采用镀膜或者粘接工艺直接将 F-P 腔薄膜或薄片材料附着于光纤端面^[74-75], 可以工作到 1 000℃ 以上。非本征型 F-P 制作方法简单, 结构稳定, 但在高温环境中需要可靠的机械支撑和附着效果, 需要综合考虑材料的适配和工艺的交叉影响。

3.4 光纤超声测温

超声波测温技术属于声波测温范畴, 是一种典型的接触式测温技术^[76]。研究表明, 超声波在气体、液体、固体中传播时, 其声速与介质温度具有一定的函数关系。根据被测介质和超声波传输介质的关系, 可将测温方法分为两类^[77], 一类是被测介质本身作为超声波传输介质, 比如测量航空发动机涡轮叶片或者喷嘴导向叶片等固体结构的温度; 另一类是与被测介质处于热平衡的感温元件作为超声波传输介质, 比如压气机、燃烧室或涡轮气流温度测量, 其中单晶光纤波导因其耐高温、良好的波导特性等优点作为超声波传输介质。

对于光纤超声测温法, 某一温度下超声波的声速与光纤材料的弹性模量 E 和密度 ρ 有关^[78], 即:

$$V(T) = \sqrt{\frac{E(T)}{\rho(T)}} \quad (6)$$

当声速已知时, 便可知道光纤材料的温度, 即被测介质的温度。典型光纤超声传感器如图 4 所示。

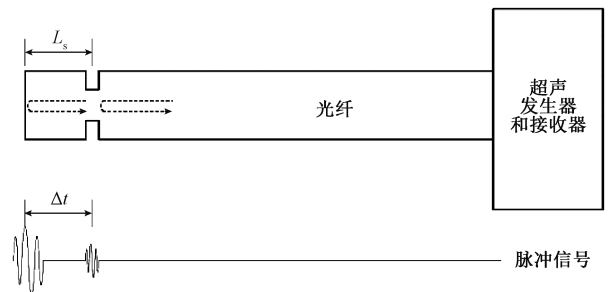


图 4 光纤超声测温原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the optical fiber ultrasonic temperature measurement principle

由图 4 可知, 超声波声速为:

$$V(T) = \frac{2L_s}{\Delta t} \quad (7)$$

其中, L_s 为凹槽到光纤端头的长度, 即感温元长度, Δt 为超声波在感温元传输的时间。

光纤超声测温技术工作温度高, 上限可以接近光纤材料自身的熔点, 精度高, 可用于高温环境测量。但是,

为获得较高的测量精度,要求光纤端头 L_s 较长,通常在厘米量级,导致该技术只能测量环境的平均温度,且采用的光纤直径往往较大,以获得更大的声波导结构强度,但会进一步降低其动态测温性能。

3.5 光纤辐射测温

目前国内外应用最为广泛的非接触式测温法是辐射测温法。辐射测温以普朗克定律为基础通过测量物体发射的红外辐射来反演温度。一定温度下,黑体的光谱辐射强度为^[30]:

$$M_0(\lambda, T) = \frac{C_1}{\lambda^5 [e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1]} \quad (8)$$

其中, λ 为物体的辐射波长(单位为 m), T 为物体的绝对温度(单位为 K), C_1 、 C_2 分别为第一和第二辐射常数,且 $C_1 = 3.718 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$, $C_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$ 。

对于实际物体,要考虑其实际发射率 $\varepsilon(\lambda, T)$ 的影响,因此其辐射强度为:

$$M(\lambda, T) = \varepsilon(\lambda, T) \cdot M_0(\lambda, T) \quad (9)$$

在基于光纤的辐射测温应用中,光纤仅作为信号传输介质,并不参与传感。根据是否与待测对象接触,光纤辐射测温可分为两类。一类是光纤黑体腔辐射测温,将耐高温光纤的一端做成黑体,另一端与普通光纤耦合,这种黑体辐射光纤温度计已用于航空发动机高速气流温度测量。另一类是光纤辐射非接触测温,利用光纤接收并传输待测对象发射的辐射能量,可用于航发涡轮叶片等旋转部件的非接触温度测量。

光纤黑体腔辐射测温系统一般包括黑体腔、传输光纤和探测器3部分组成。典型的接触式光纤黑体辐射测温原理示意图如图5(a)所示。黑体腔是热辐射测量中的辐射敏感元件,是传感器中最重要的部件。由于测量

对象是高温温度场,所以对黑体腔材料的要求很高,主要考虑耐高温的金属材料和非金属氧化物。

光纤红外辐射非接触测温方法,如图5(b)所示,包括全辐射测温、亮度测温、比色(双波长)测温以及多光谱(多波长)测温法^[27]。亮度测温法是目前比较成熟的测温方法,测量温度时响应时间短、灵敏度高,在高温测量中应用广泛;为消除发射率的影响,比色测温法通过求解物体在两个不同的波长下的光谱辐射强度之比与温度之间的函数关系进行温度测量,可消除发射率和一些介质的影响^[79]。

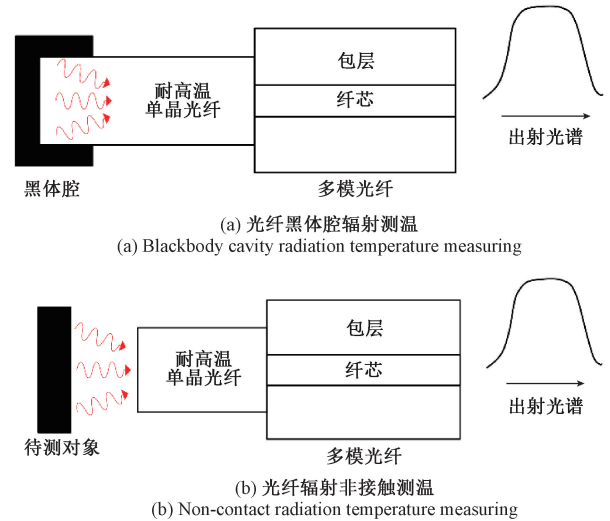


图5 光纤辐射测温原理示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the fiber radiation temperature measurement principle

以上几种典型光纤测温技术对比如表5所示。

表5 光纤测温技术比较

Table 5 Comparison of the optical fiber temperature measurement

光纤测温技术	优点	缺点
FBG 测温	可串联复用,工艺成熟	参数交叉敏感,耐高温性较差
光纤 F-P 测温	结构简单,耐高温	难以串联复用
光纤超声测温	测温上限高	只能测量环境的平均温度
光纤黑体腔辐射测温	结构简单,对流场、温度场无干扰,高温测量	低温无法测量,黑体腔材料发射率受影响因素多,具有不确定性
光纤辐射测温	结构简单,对流场、温度场无干扰,可适用于高速旋转物体的表面高温测量	低温无法测量,要求材料具有高发射率,而且受环境影响大

4 光纤传感在航空发动机测温中的应用

目前,大批研究学者针对航空发动机的极端应用环

境,在光纤温度传感器特性分析、传感器制造、传感系统构建和温度解调方法等方面开展相关研究,取得了一系列的研究成果,使光纤温度传感器展示出巨大的应用潜力。需要特别指出的是,航空发动机和燃气轮机工作原

理基本相同,因此后文也包括了部分燃气轮机光纤测温的研究进展。

4.1 压气机

压气机是航空发动机压缩系统的核心部件,它将进气来流压缩后送入燃烧室。在压气机效率测试中,如何准确测量截面平均温度显得尤为关键。其中,压气机温度测试包括压气机进出口的高精度温度测试和级间高频动态温度的测试。

2014 年,德国慕尼黑应用科大开展用于压气机进口气流测试的 FBG 总温探针研究(如图 6 所示)。在马赫数 0.3~0.8 下进行测试,FBG 总温探针表现出良好的机械鲁棒性和恢复系数,证明了利用 FBG 作为感温元件测量高速气流总温是可行的,与热电偶方案相比可以有效减小探针体积^[80]。2016 年,他们在此基础上进行了理论分析并改进结构设计^[81],进一步验证了此技术的可靠性,并表明基于 FBG 的传感技术是满足航空发动机总温测量需求的重要发展方向。

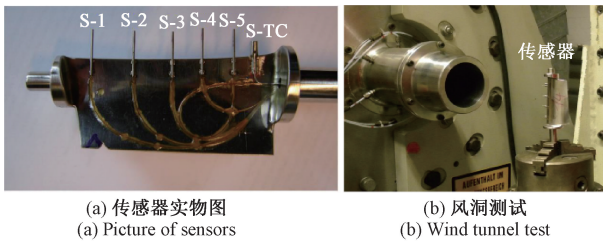
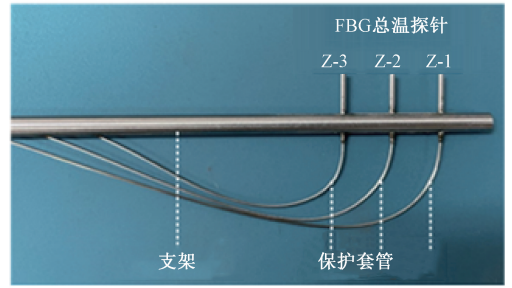


图 6 压气机进口总温测量^[81]

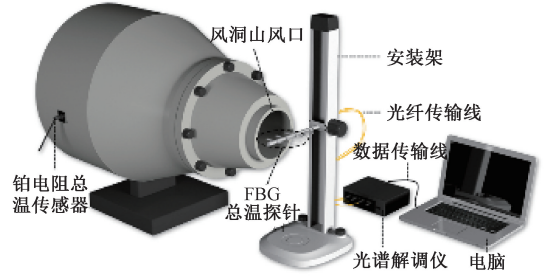
Fig. 6 Total temperature measurement of compressor inlet^[81]

但是,上述总温传感器的 FBG 栅区位于光纤中部,会削弱滞止效果,而且其采用传统带涂覆层的光纤和光栅,增加了导热层厚度,这些都会导致测温速度和精度的降低。针对以上问题,重庆大学采用数值模拟方法深入研究 FBG 总温探针气动结构,探究了结构参数对总温测量结果的影响^[82];在此基础上,制作了 FBG 总温探针,搭建了总温测量数据处理系统,并通过亚音速风洞试验测试了 FBG 总温探针的工作性能(如图 7 所示)。结果表明,在马赫数为 0.3~0.8 亚音速气流冲击下,FBG 总温探针具有良好的滞止效果和稳定性,马赫数大于 0.5 时其复温系数达到 0.8 以上,在马赫数为 0.8 时达 0.99。所制作的微型 FBG 总温探针直径低至 0.8 mm,结构尺寸远低于传统热电偶探针,在满足总温精准测量的同时,可有效降低对流场的干扰。

FBG 气流总温测量技术主要用于高精度的温度测量,要获得高的响应速度,光纤 F-P 是更好的选择。2015 年,美国内布拉斯加大学林肯分校完成一种基于晶体硅柱的快速响应光纤 F-P 温度传感器研发(如图 8 所示)。F-P 腔是利用紫外固化胶将一段直径 80 μm、长度为 200 μm 的双面抛光晶体硅柱粘接在 SMF 端面而成。得



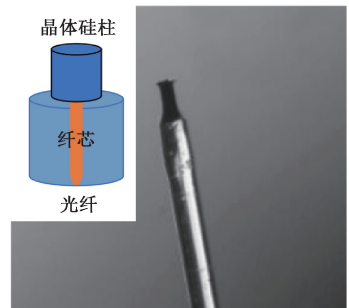
(a) 传感器实物图
(a) Picture of sensors



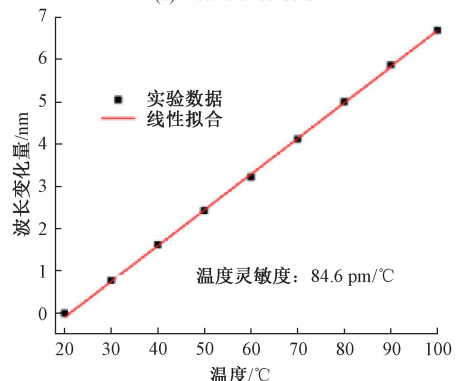
(b) 风洞测试
(b) Wind tunnel test

图 7 重庆大学开展 FBG 总温测量研究^[82]

Fig. 7 FBG for total temperature measurement of the high velocity airflow by Chongqing University^[82]



(a) 传感器实物图
(a) Picture of sensors



(b) 标定结果
(b) Calibration results

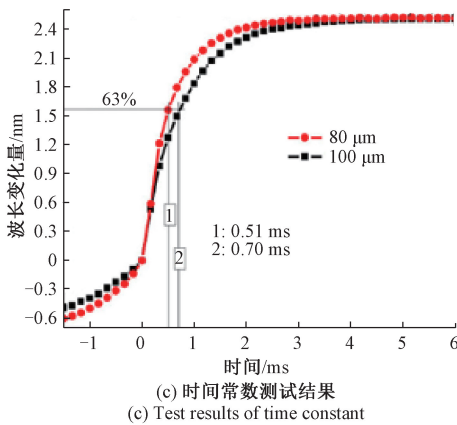


图8 压气机高精度测温^[83]

Fig. 8 High precision temperature measurement of compressor^[83]

益于晶体硅的较高的热光系数、热膨胀系数和热扩散率,传感器具有 84.6 pm/°C 的温度灵敏度,响应时间可低至 0.51 ms,表明传感器具有约 2 kHz 的响应频率,在航空发动机风扇/压气机动态温度畸变测试应用中具有一定的潜力^[83]。

针对高速压气机中非定常流的温度测试,英国赫瑞-瓦特大学与国防评估研究局(DERA)于1995年开展高速气流光纤 F-P 温度传感器研究(如图9所示)。其利用真空气相沉积技术在普通单模光纤的端面沉积 2.4 μm 厚的硒化锌光学涂层。在空气动力学测试评估中,温度变化频率约为 10 kHz 情况下具有 1 K 的气流温度分辨率^[84]。

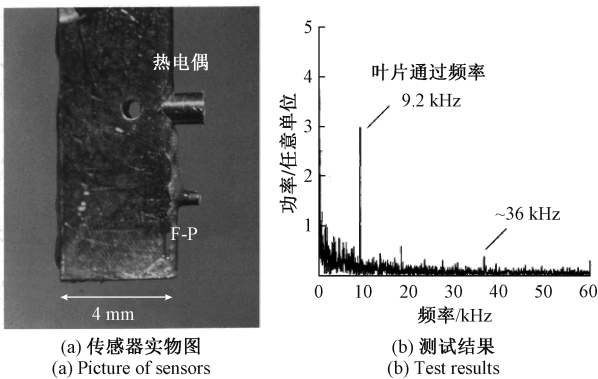


图9 压气机级间高频测温^[84]

Fig. 9 Inter-stage high frequency temperature measurement of compressor^[84]

为进一步将该传感器实用化并用于级间高频温度测量,上述团队与牛津大学合作进行优化改进,完成多层 F-P 温度传感器研制。在原有硒化锌薄膜与光纤之间镀上 10 nm 镍薄膜增强信号对比度,在硒化锌薄膜表面镀 100 nm 铝薄膜以避免来流气流中的油雾污染。改进后

的传感器直径为 3 mm(如图10所示)。在 20°C ~ 120°C 温度范围内的静态标定具有良好线性度,温度分辨力为 0.1 K。双传感器结构总温传感器被安装在等熵轻活塞实验台的转子出口流动区域。测量结果显示,在 10 kHz 的叶片通过频率下,气流温度波动通常为 4 K 峰峰值。在温度信号功率谱中检测到的 3 次谐波分量,即表明温度传感器具有大约 30 kHz 的响应频率^[85-86]。

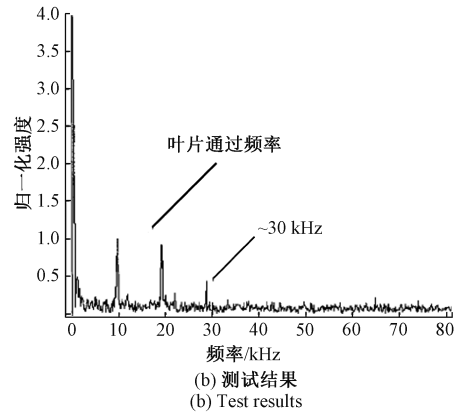
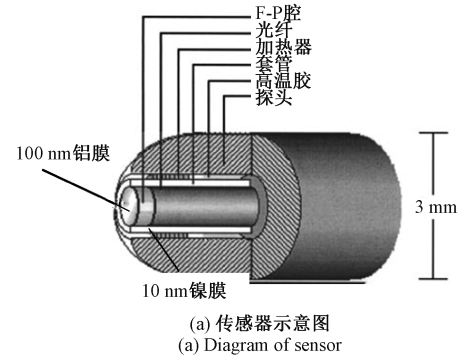


图10 改进后压气机级间高频测温^[85-86]

Fig. 10 Improved inter-stage high frequency temperature measurement of compressor^[85-86]

对于 F-P 传感器而言,其采用的镀膜方式对膜层材料和工艺要求极高,材料需有高热光系数并易于沉积,还必须保障膜层和光纤端面具有极高的附着力,否则在高速气流冲击下膜层易脱落。另外,还可以使用诸如硅或碳化硅之类的材料作为传感层,这些材料拥有比硒化锌更高的热扩散系数和热光系数。

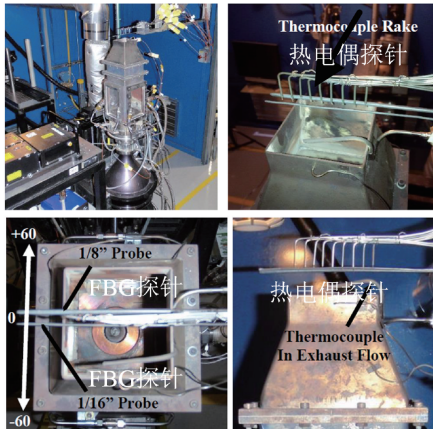
4.2 燃烧室

经压气机压缩增压后的空气,进入燃烧室与燃油混合燃烧成为高温高压燃气。燃烧室温度测试包括燃烧室出口高温燃气的总温测试和燃烧室部件的表面温度测试。

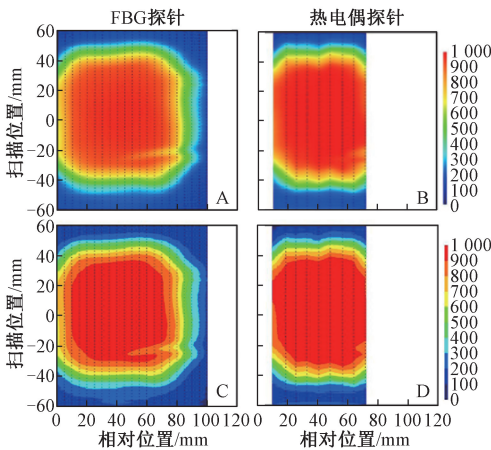
2019年,OptoXense公司和美国空军研究实验室(AFRL)合作开展基于石英光纤和蓝宝石光纤的燃烧室出口温度传感器研究,并对石英光纤温度传感器进行实

实验室测试和验证。该传感器外壳采用耐温可达 2 200℃ 的陶瓷材料, 光纤端头倾斜可减少假反射信号和共振的影响, 光纤末端可以自由地经历热膨胀和收缩, 从而实现机械应变和温度的解耦分离。测试结果表明, 可在高达 1 050℃ 下工作, 使用蓝宝石光纤代替石英光纤后有望将工作温度提高到 1 700℃^[87]。

加拿大国家研究委员会 (NRC) 对飞秒刻写 FBG (fs-FBG) 进行了大量深入研究。2017 年, 该机构利用 800 nm、350 fs 的飞秒激光器和相位掩模板, 采用剥离和重涂法在聚酰亚胺涂覆的标准掺锗单模光纤上刻写最多可达 24 个 II 型飞秒红外 FBG。上述 FBG 阵列被分别封装在直径为 1/16 英寸和 1/8 英寸的不锈钢管。在封装后和安装前, 将每个传感器在管式炉中进行多次 1 100℃ 循环退火。由于封装和安装精度, 某些情况下, FBG 与热电偶的的测量温度相差 5% 到 10%^[88] (如图 11 所示)。后续可通过原位校准或改进封装设计来修正温度差异。



(a) 传感器测试示意图
(a) Schematic diagram of sensors test



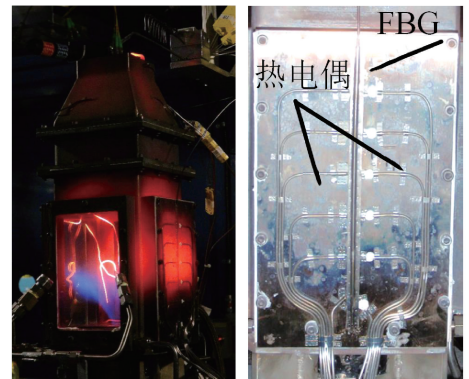
(b) 测试结果
(b) Test results

图 11 燃烧室排气口温度测量^[88]

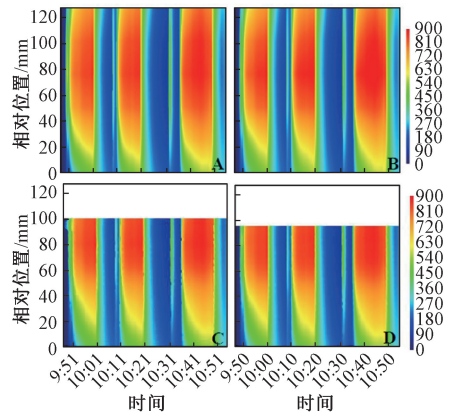
Fig. 11 Temperature measurement of combustor exhaust^[88]

很多研究机构在燃烧室测试台上开展了壁面温度测量研究。西门子公司和莱布尼茨光子所 (IPHT) 合作利用飞秒激光在蓝宝石光纤上刻写的 FBG, 进行了 20℃ ~ 1 750℃ 的温度测试, 随后将其与热电偶一起安装到燃烧室测试台的隔热瓦上。在几周的时间内, 燃烧室在 900℃ 的温度下数小时内连续燃烧 10 次, 蓝宝石 FBG 与热电偶保持一致的温度趋势^[89]。

为实现多点串联测温, 需要在同一支光纤刻写更多的光栅。NRC 利用聚酰亚胺涂覆的标准掺锗单模光纤, 采用剥离和再涂覆方法刻写 24 个 II 型 FBG, 分别在富氧流化床燃烧室壁面和燃气轮机燃烧室模拟器侧壁面进行了实际测试 (如图 12 所示)。实验结果表明, 在长达 13 个热循环周期 (5 个月) 内, 纯硅 FBG 和热电偶在高达 1 025℃ 的温度下也表现出良好一致性^[88]。在侧壁面测试中, 两种不同封装 (封头和不封头) 的热电偶和 FBG 传感器温度结果存在差异, 一方面是由于 3 种传感器安装位置的实际温度有差异, 另一方面是传感器封装形式带来的测量误差。原位校准已封装的传感器可以降低测量误差, 从而更精确表征壁面实际温度。



(a) 传感器测试图
(a) Diagram of sensors test

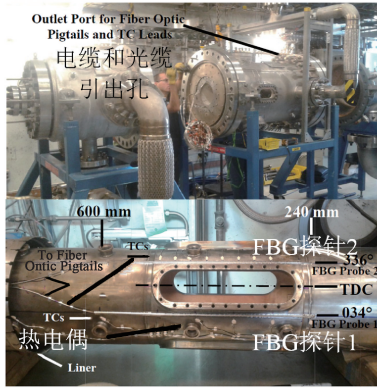


(b) 测试结果
(b) Test results

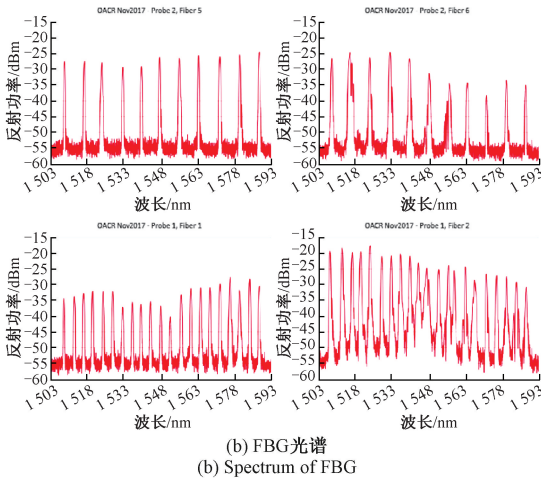
图 12 燃烧室侧壁面温度测量^[88]

Fig. 12 Temperature measurement of combustor sidewall^[88]

2018年,加拿大NRC^[90]利用上述fs-FBG用于监测燃烧室火焰筒上的温度梯度(如图13所示)。这些传感器经受住了多次热循环和高达900℃的持续温度,显示出与热电偶的合理一致性。但是,与安装的热电偶相比,FBG与热电偶的平均温度差值为8.7%可能由于两种传感器的封装和安装工艺导致结果差异。



(a) 传感器测试图
(a) Diagram of sensors test



(b) FBG光谱
(b) Spectrum of FBG

图13 燃烧室火焰筒温度测量^[90]

Fig. 13 Temperature measurement of combustor flame tube^[90]

针对航空发动机燃烧室等部件高温甚至超高温的工作环境,一些科研机构开展了基于FBG、F-P、辐射和超声等光纤高温传感器的基础研究。虽未有实际应用报道,但具有技术应用的潜力。

在传感器工艺方面,借助于短脉宽和高峰值功率优势,飞秒激光可以在石英或特种光纤内产生较大的折射率调制,具有出色的热稳定性。香港理工大学^[91]研究表明,在100℃预退火处理的石英光纤上飞秒激光刻写的FBG可在1200℃温度下稳定工作20h以上,光栅反射率退化不明显。德国莱布尼茨光子所(IPHT)^[92]利用飞秒激光在多模单晶蓝宝石光纤刻写了FBG,测量温度高达1900℃,是目前报道的FBG的最高工作温度(如图14所示)。

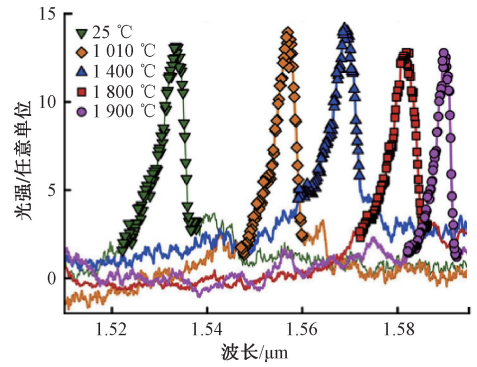


图14 1900℃高温测量的FBG温度传感器^[92]

Fig. 14 FBG temperature sensor for high-temperature (1900℃) measurement^[92]

利用端面工艺或飞秒激光可以直接在蓝宝石等特种光纤端面或者内部直接制作F-P腔,具有简单可靠、耐高温的优点。天津大学完成了F-P高温传感器研发,其高温部分由蓝宝石晶片、蓝宝石光纤和蓝宝石插芯组成,通过高温胶固定在一起,其中蓝宝石晶片构建了一个低细度的固体F-P腔,低温部分采用多模石英光纤。该传感器在130℃至1080℃的温度范围内进行了测试,测量误差小于±3℃^[93]。2020年,北京航空航天大学开展了蓝宝石F-P高温传感器研究,将蓝宝石晶片固定在蓝宝石光纤的端面上,并将传感器封装在氧化铝陶瓷管-陶瓷套管结构中,以提高结构稳定性。实验表明,该传感器具有25℃~1550℃的宽温度测量范围,在1550℃高温段附近温度灵敏度达到32.5 pm/℃^[94]。上海大学^[72]通过电弧放电使蓝宝石衍生光纤的纤芯区域结晶,引起折射率的调制,从而构成F-P腔。该传感器可耐受1600℃的高温,并在1200℃下稳定工作6h(如图15所示)。

光纤黑体腔辐射测温技术因其结构简单,对流场、温度场无干扰,也常用于高温测量。1998年,英国谢菲尔德大学研究了使用高熔点光纤作为发射源,作为满足燃烧环境实际工程需求的一种手段,提出了两种设计,一种基于水冷低温传输光纤,另一种基于全陶瓷结构^[95]。探针在高达2600℃的气体环境和高达1850℃的短时温度中反复循环进行了长时间的操作,并展示了它们在1400℃~1600℃范围内的可再现输出方面的性能。2005年,中北大学开展了具有1200℃~2000℃测量范围的高温测试系统研究,系统具有1℃的测量不确定度^[96]。只要进一步解决传感器的防护,该系统可以适用于航空发动机高温部件的温度测试。2010年,燕山大学为解决瞬态高温测量难题,研制了一种基于黑体辐射的光纤高温测量系统。系统兼有接触式测温直接、准确的特点和非接触式测温的耐腐蚀、耐高温等优点,可实现从800℃到1200℃的测量范围,其中在1200℃下最大偏差为3℃^[97]。

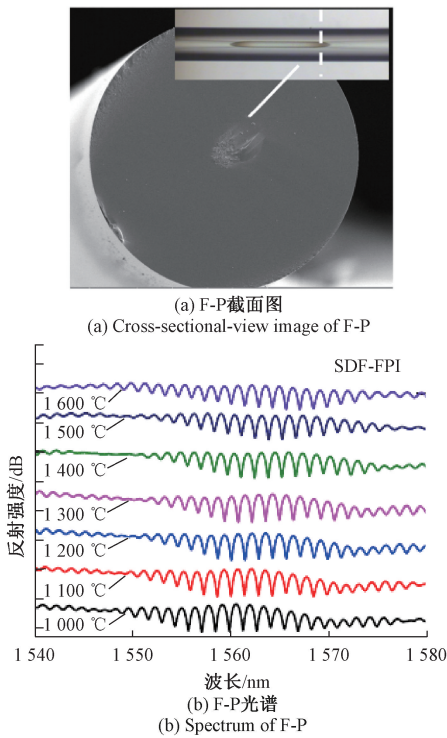
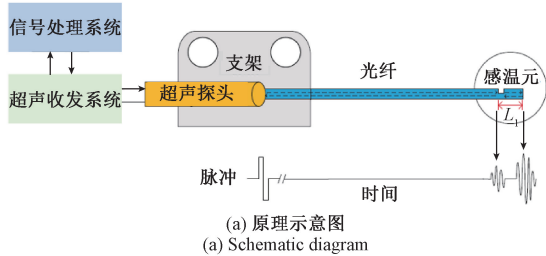
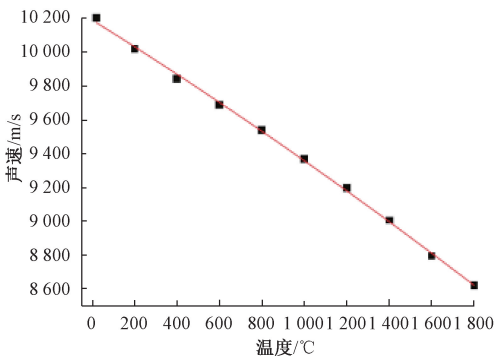


图 15 1 600°C 高温测量的 F-P 温度传感器^[72]
 Fig. 15 F-P temperature sensor for high-temperature (1 600°C) measurement^[72]

2017 年,中北大学完成单晶蓝宝石光纤超声温度传感器研发^[78]。其中,蓝宝石光纤采用激光加热基座生长法(LHPG)制作而来,长度 340 mm、直径为 0.7 mm。该传感器稳定性好、重复性高、声速与温度线性度好,在 1 600°C 下连续工作 6 h,测温上限高达 1 800°C(如图 16 所示),具有在航空发动机燃烧室等高温监测应用中的潜力。



(a) 原理示意图
 (a) Schematic diagram



(b) 标定结果
 (b) Calibration results

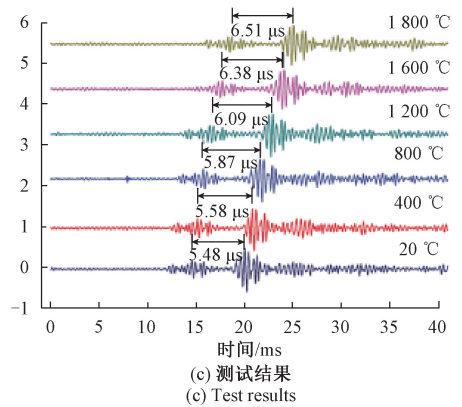


图 16 1 800°C 高温测量的光纤超声温度传感器^[78]
 Fig. 16 Sapphire Ultrasonic temperature sensor for high-temperature (1 800°C) measurement^[78]

4.3 涡轮

燃烧室中的高温高压燃气进入涡轮进行膨胀做功。涡轮温度测试包括涡轮出口的燃气总温测试和叶片等涡轮部件的表面温度测试。

为提高涡轮叶片的高温耐温性,常常对其进行气冷处理,因此监控其冷却路径的温度可以有效预警温度超限情况。德国西门子公司旗下机构利用 FBC 开展 200 MW 燃气轮机叶片冷却路径温度测量研究。准分子激光刻写的 FBC 传感器进行长达数月的各种现场测试,测量温度最高达 400°C,传感器不同温度趋势表征了冷却路径上不同的温度分布^[89]。

针对航空发动机涡轮叶片温度的测量方法,电子科技大学等研究机构总结了热电偶、示温漆和辐射等测温方法的研究现状^[79]。对于辐射测温技术,涡轮叶片温度测量的准确性涉及到叶片表面的发射率、燃烧气体的影响以及来自周围环境的辐射能的反射等。哈尔滨工业大学和哈尔滨工程大学合作利用多光谱辐射测温技术,综合建立叶片表面发射率模型、不同工况下燃烧气体影响模型^[98]和环境辐射反射模型^[99],并提出一种叶片温度迭代算法^[100]。在燃气轮机叶片温度的测量中,测量范围可以达到 800~1 300 K,温度高于 1 000 K 情况下误差小于 0.34%(如图 17 所示)。

氧化钇稳定氧化锆(yttria-stabilized zirconia, YSZ)因其极佳的高温性能,成为使用最广泛的涡轮叶片热障涂层材料。哈尔滨工程大学提出一种针对 YSZ 陶瓷涂层的多光谱辐射测温的发射率模型^[99]。在该模型中,光谱波长范围为 3.5~3.9 μm,涂层厚度为 330 μm,涡轮气流环境温度为 1 273 K,YSZ 涂层温度范围为 800~1 200 K,结果表明在无噪声和存在白噪声的情况下测温误差分别小于 1%和 1.5%。

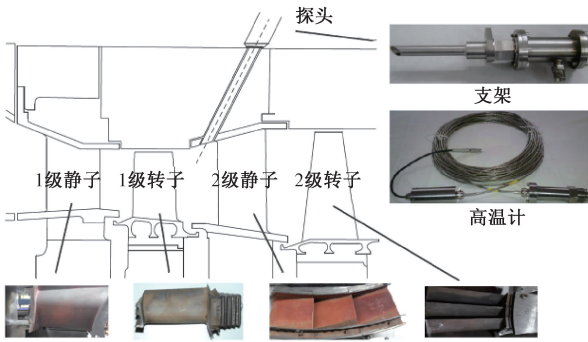


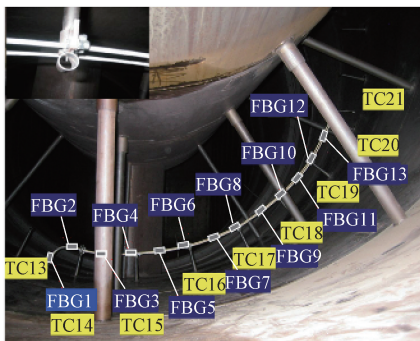
图 17 涡轮叶片光纤辐射温度传感器^[100]

Fig. 17 Fiber radiation pyrometer of turbine blade^[100]

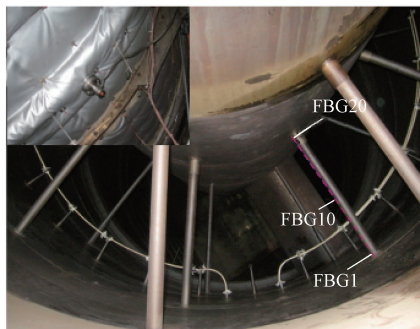
4.4 尾喷管

在航空发动机中,尾喷管的主要作用是使涡轮排出的燃气继续膨胀,以高速向后喷出产生反作用推力。尾喷管温度测试包括尾喷排气路径的总温测试和尾喷壁面部件的表面温度测试。

西门子公司进一步研究了 fs-FBG 在燃气轮机测温中的应用。在 200 MW 燃气轮机的排气路径上安装了 60 个 fs-FBG 温度传感器,所有传感器在 600℃ 的温度下稳定工作了 8 个多月,充分展示了 FBG 的长期可靠性^[101]。2013 年,通用电气公司开展高功率紫外激光刻写 FBG 监测燃气轮机排气路径中的圆周和径向温度分布的研究(如图 18 所示)。在完成室温 ~650℃ 范围内的



(a) 传感器周向测试图
(a) Diagram of sensors circumferential test



(b) 传感器径向测试图
(b) Diagram of sensors radial test

图 18 燃气轮机排气路径温度测量^[102]

Fig. 18 Temperature measurement of the exhaust duct^[102]

温度校准后,FBG 在 650℃ 等温条件下研究了热稳定性或漂移趋势,结果表明热变化引起的温度偏移约为 $\pm 0.4^\circ\text{C}/1000\text{ h}$,理论寿命可达 10 年^[102]。

2018 年,德国慕尼黑应用科大利用再生 FBG (regenerated fiber Bragg grating, RFBG) 开展 MGT6100 燃气轮机尾喷管测温研究。将刻有 3 个 RFBG 的光纤放入 1.6 mm 外径的毛细管,并置于法兰安装支架中,与另外 5 个热电偶支架一起沿周向均匀分布在(如图 19 所示)。在发动机怠速和满载操作模式下,工况最高温度可达 520℃,RFBG 和热电偶的测温数据都非常吻合^[103]。这表明可以在燃气轮机排气流的恶劣环境中使用多点 RFBG 进行可靠的温度测量。

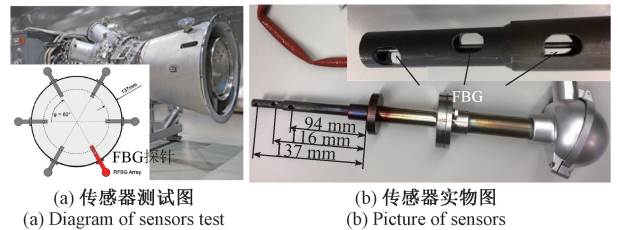
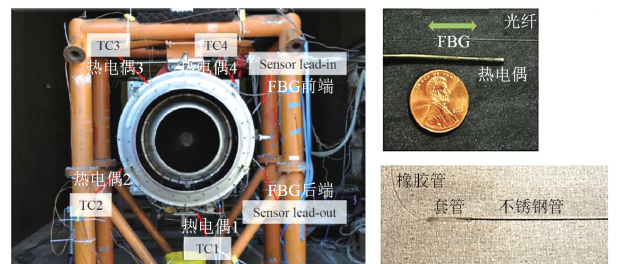


图 19 燃气轮机排气路径温度测量^[103]

Fig. 19 Temperature measurement of the exhaust duct^[103]

弗吉尼亚理工大学开展了准分子激光刻写 FBG 用于尾喷壁面温度测量研究^[104]。FBG 刻写前,在保证强度基础上增强其耐温性,去除光纤表面的丙烯酸酯涂层,重涂覆盖厚度为 60 μm 的银涂层;为了提高 FBG 传感器的重复性和稳定性,还对其进行 600℃ 长达 2 h 的退火处理。在进行了室温 ~600℃ 的温度标定后,将 FBG 和 4 个热电偶一起安装到发动机尾喷管的同一圆周截面上(如图 20 所示)。结果表明,FBG 传感器在发动机测试中一直持续稳定工作,在发动机测试中测得的最高温度约为 290℃。利用一支光纤便可测量尾喷管的某一圆周的温度分布,实现准分布式的温度测量。与热电偶相比,FBG 传感器具有更快的响应时间,并且不受电磁干扰的影响。



(a) 传感器测试图
(a) Diagram of sensors test

(b) 传感器实物图
(b) Picture of sensors

图 20 尾喷壁面温度测量^[104]

Fig. 20 Temperature measurement of the nozzle wall^[104]

5 航空发动机光纤测温技术应用存在的不足

目前,光纤测温技术在航空发动机温度测试领域的应用仍然处于探索阶段,各类基于光纤传感的测温方法,除了存在表5中所列的缺点外,相比现有的电类传感技术,还存在一些通用的问题,限制了其发展。具体包括:

1) 传感器方面:热电偶所产生的热电势大小只与材料成分和两端温差有关,影响信号输出的因素相对较少。而对于应用最多的光纤光栅温度传感器,光纤材料、纤芯和包层结构尺寸,光栅结构设计,光栅成栅工艺,涂覆层材料等等因素,都会对光谱输出造成较大影响。要进行精准测温,目前只能通过预先标定完成,在应用上相比热电偶存在很大的不便。

2) 信号处理方面:电类传感输出电压或电流信号,针对不同测量参数,有通用的信号调理设备,形成了成熟的信号处理方法和体系。而基于光谱分析的光纤传感信号,对应不同光谱波段、不同采集速度和精度时,可能采用完全不同的光谱采集系统。此外,对光纤传感的信号分析,不同于单一电学参数(电压、电流),需要从一组光谱数据中提取特征参数,作为待测物理参数的标定依据。采用不同的特征数据提取方法,将导致不同的测量结果,而目前对光谱信号处理的方法尚缺乏标准和规范。

3) 现场应用方面:光纤与电缆不同,在进行切割、连接时都需要有专业的切割刀、熔接机、接线盒等特种装备,在难以预设线缆长度且需要传感器现场安装时,光纤传感测试的方法相比电学传感方法在实际应用中的灵活性较差。

6 结 论

本文介绍了航空发动机的具体测温对象和测温环境特点,对比分析了FBG、光纤F-P、光纤超声和光纤辐射等典型的光纤测温技术的测温原理和技术特点,根据航空发动机的结构部位归纳了光纤传感技术在航空发动机测温领域的研究现状。结合航空发动机的发展趋势和测温需求,以及光纤传感技术的发展趋势,可以预测到光纤传感技术在航空发动机测温领域未来重点研究方向主要包括:

1) 高温、超高温测温技术研究

光纤材料是决定光纤温度传感器用于高温测试环境的基础。传统基于石英的光纤传感器的最高工作温度限制在熔点温度(1 330℃)以下,无法满足航空发动机高温测试需求。目前研究方向是寻找高温稳定性更好的单晶介质,并突破其在光纤温度传感应用的限制。比如,应用

逐渐成熟的蓝宝石单晶光纤,其理化性能稳定,熔点高达2 040℃。但由于其大折射率、大光纤直径和无包层的结构产生的多模模间干涉限制性能提升,需要进一步探索研制具有包层结构的蓝宝石及其它耐温单晶材料的光纤。从单晶蓝宝石和石英外包层拉丝而成的蓝宝石衍生光纤(sapphire-derived fiber, SDF)在保证耐高温特性的基础上,克服了单晶蓝宝石无包层和多模的缺点。上海大学对基于SDF的FBG、F-P等传感器技术进行了系统深入的研究^[105]。除了蓝宝石光纤,浙江大学、山东大学和国防科技大学等机构开展了耐温更高的单晶光纤研究^[106]。山东大学自主设计研发国内首台微下拉生长炉等单晶光纤生长平台,并已成功生长出直径从 μm 到 mm 的高质量单晶光纤,如YAG、 Al_2O_3 、CGA等。利用LHPG法成功生长出高质量 ZrO_2 单晶光纤(熔点高于2 700℃),克服了超高熔点氧化物晶体光纤的生长难题,有望进一步拓宽单晶光纤的应用领域^[64]。

2) 高精度测温技术研究

光纤测温系统一般由光纤传感器和温度解调系统组成。高精度测温技术的实现依赖于二者的有机统一。通过感温元件和传感器结构的优化设计,可以提高传感器温度灵敏度。镀多层二硫化钼的FBG传感器温度灵敏度可达到 $0.01^\circ\text{C}/\text{pm}$ ^[107];采用双金属温度增敏结构的FBG传感器的温度灵敏度可达 $0.0014^\circ\text{C}/\text{pm}$,精度达 $\pm 0.05^\circ\text{C}$ ^[108]。对于解调系统而言,需要开发精度更高的光源和光谱仪等光学仪器设备。另外,高精度的解调算法可以进一步保证系统的解调精度。对于FBG,常用解调算法包括直接寻峰法、拟合法、相关法、变换法和深度学习学习方法^[109]。对于F-P,常用解调算法包括强度法、条纹峰值追踪法、傅里叶变换解调法、相关解调法^[66]。重庆大学针对恶劣环境中的不同畸变恶化光谱,深入探讨了不同解调算法的适应性和鲁棒性,以满足高精度测试需求^[110]。

3) 准分布式和分布式测温技术研究

准分布式测温技术,如FBG,需要研究如何在不同类型和不同尺寸的光纤上制备数量更多、耐温性能更加优异的光栅,从而实现更高空间分辨率、更高精度和更高温度的测量。基于光纤拉丝塔的光栅阵列光纤在线制备工艺可以实现数十万个弱反射率光纤光栅在线制备;采用时分复用、波分复用、空分复用等复用技术可以构建大规模温度/应变传感网络^[111]。分布式测温技术,如采用超短脉冲激光器和光电探测器,实现在测量距离、测温空间分辨率和测温精度三者的最佳平衡。加拿大渥太华大学深入研究了基于布里渊散射的分布式光纤温度技术,在6 m熊猫型保偏光纤中实现了空间分辨率为20 cm的应变和温度同时测量,其中温度和应变精度分别为 0.4°C 和 $9\ \mu\text{e}$,量程分别可达 700°C 和 $14\ \text{me}$ ^[112],进一步改进

后,在实现 6.5 mm 的空间分辨率下,温度和应变精度仍达到 0.8℃和 7 $\mu\epsilon$;通过优化差分脉冲对布里渊光时域分析技术(DPP-BOTDA),进一步在 2 km 的传感光纤上实现 2 cm 的空间分辨率,测温精度为 2℃^[113]。分布式测温技术可大幅减少电学测温的节点和线路,对于航空发动机结构表面温度场分布的大面积获取具有重要意义。

4) 多参数融合测量技术研究

航空发动机试验测试对象繁多,测试项目复杂,常常需要数百个传感器完成数十种参数的测量,典型的参数包括温度、应变、压力、振动、间隙等。如果能在一根光纤上实现多参数的融合测量,将极大降低测试的成本和复杂度。目前,光纤传感应用的一大困难在于多参数的交叉敏感,若能通过结构和算法等方面研究,将多参数敏感劣势转化为多参数测量的优势。比如,采用光纤光栅法布里-珀罗腔^[114-115]和包层/涂层处理^[116-117]等结构设计、偏振光的引入^[118],可实现温度/应变的双参数解调测量,采用法布里-珀罗腔和光纤光栅串联的结构设计,可实现温度/压力的双参数解调测量^[119]。这方面的研究将有助于进一步扩展光纤传感的技术应用领域。

5) 加工和封装工艺研究

航空发动机运行时,光纤传感器必须适应强振动、高速气流冲击等恶劣环境。裸光纤本身难以承受外界环境冲击,必须针对传感器的感温元和关键部件进行一定的结构保护,以适应不同对象的测温需求。总温测试中,需要优化滞止罩的结构尺寸和材料特性;壁温测试中,需要感温元热阻足够小,与被测对象紧密接触且干扰其表面温度场。重庆大学针对航空发动机动态温度及小温升测试需求,设计了一系列光纤总温探针及其测量系统^[82,120-121],有望进一步开拓光纤传感技术在航空发动机的应用。发展出结构更加稳定、环境适应性更强的传感器特种封装与现场安装技术,是实现光纤传感器在航空发动机极端恶劣条件下成功应用的关键。

6) 完善光纤传感技术标准和规范

国际和国内已经形成大量完善的电学类温度测量系统标定的标准和规范,而相应的光纤类测温系统尚没有形成统一的标准和技术规范。目前,光纤传感器的设计指南与加工工艺,以及光谱解调设备的硬件选型和信号处理都缺乏相应的标准和规范。基于光纤传感的技术尚未列入航空发动机相关测试技术规范中,包括接口、协议都缺乏标准化。若能逐步建立和完善光纤测温技术的使用规范,将会极大促进光纤传感技术在航空发动机领域的应用推广。

参考文献

- [1] KOFF B L. Gas turbine technology evolution: A designers perspective [J]. Journal of Propulsion and Power, 2004, 20(4) :577-595.
- [2] PEREPEZKO J H. The hotter the engine, the better[J]. Science, 2009, 326(5956) :1068-1069.
- [3] LI F, ZHOU L, LIU J X, et al. High-entropy pyrochlores with low thermal conductivity for thermal barrier coating materials [J]. Journal of Advanced Ceramics, 2019, 8(4) :576-582.
- [4] WEI Z Y, ZHANG S G, JAFARI S, et al. Gas turbine aero-engines real time on-board modelling: A review, research challenges, and exploring the future [J]. Progress in Aerospace Sciences, 2020, 121 (2020) : 1-16.
- [5] LI Y G, NILKITSARANONT P. Gas turbine performance prognostic for condition-based maintenance[J]. Applied Energy, 2009, 86(10) :2152-2161.
- [6] VOLPONI A J. Gas turbine engine health management: Past, present, and future trends [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2014, 136(5) :1-20.
- [7] TAHAN M, TSOUTSANIS E, MUHAMMAD M, et al. Performance-based health monitoring, diagnostics and prognostics for condition-based maintenance of gas turbines: A review [J]. Applied Energy, 2017, 198: 122-144.
- [8] XIAO Y L, CAO Z B, WANG C W. The effect of dilution air jets on aero-engine combustor performance[J]. International Journal of Turbo & Jet-Engines, 2019, 36(3) :257-269.
- [9] ZEISBERGER A. Total temperature probes for turbine and combustor applications[C]. International Symposium on Air Breathing Engines, 2007:1-8.
- [10] VILLAFANE L, PANIAGUA G. Aero-thermal analysis of shielded fine wire thermocouple probes[J]. International Journal of Thermal Sciences, 2013, 65:214-223.
- [11] SCHETZ J A, VINCENT T, LOWE K T. Analysis of base-cooled total temperature probes with radiation[C]. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE), 2016.
- [12] REARDON J, SCHETZ J A, LOWE K T. Computational modeling of total-temperature probes [J]. Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2017, 31 (3) : 609-620.
- [13] BONHAM C, BREND M, SPENCER A, et al. Impact of flow unsteadiness on steady-state gas-path stagnation temperature measurements[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2018, 140(12) :1-12.
- [14] VILLAFANE L, PANIAGUA G. Aerodynamic impact of

- finned heat exchangers on transonic flows [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2018, 97: 223-236.
- [15] ZOU Z, YANG W, ZHANG W, et al. Numerical modeling of steady state errors for shielded thermocouples based on conjugate heat transfer analysis [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2018, 119:624-639.
- [16] VINCENT T G, ROLFE E N, LOWE K T, et al. Aerodynamic analysis of total temperature probe thermal performance using conjugate heat transfer[J]. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 2019, 33 (3): 830-843.
- [17] YEPIFANOV S V, LI Q. Analysis of the error in the gas temperature and the thermocouple time constant measuring through gas turbine engine tests [C]. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2020: 325-336.
- [18] POWERS S W, SCHETZ J A, LOWE K T, et al. Analysis of stresses in metal sheathed thermocouples in high-temperature flows[C]. *AIAA Journal*, 2021:1-15.
- [19] TAGAWA M, KATO K, OHTA Y. Response compensation of thermistors; Frequency response and identification of thermal time constant [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(3) :1350-1358.
- [20] KAR K, DADD M, BAILEY P, et al. Fast response temperature measurements in stirling cycle cryocooler components [C]. *Cryogenic Engineering Conference*, 2008:1675-1682.
- [21] BISWAS S K, PILGRIM C C, SOLLAZZO P Y, et al. Thermal history paints-principles and progress [C]. *IET & ISA 60th International Instrumentation Symposium 2014*, 2014:1-6.
- [22] FEIST J P, KARMAKAR BISWAS S, PILGRIM C C, et al. Off-line temperature profiling utilizing phosphorescent thermal history paints and coatings [J]. *Journal of Turbomachinery*, 2015, 137(10):1-8.
- [23] SHUKIN S, ANNERFELDT M, BJORKMAN M. Siemens SGT-800 industrial gas turbine enhanced to 47 MW: Design modifications and operation experience [C]. *Asme Turbo Expo; Power for Land, Sea & Air*, 2008.
- [24] BROWN J, DEVOE J, GINZBURSKY L. The challenges of uniform crystal temperature sensor (UCTS) application in turbomachinery [C]. *ASME Turbo Expo 2013; Turbine Technical Conference and Exposition*, 2013.
- [25] MALAK M, LIU J, MOLLAHOSSEINI K. Further investigation into hot gas ingestion into turbine shroud cavity using uniform crystal temperature sensors measurement for baseline configuration [C]. *ISABE*, 2015.
- [26] VOGEL G, THOMAS A, GINZBURSKY E, et al. Long duration uniform crystal temperature sensor application in industrial gas turbine for cooling design validation [C]. *ASME Turbo Expo 2020; Turbomachinery Technical Conference and Exposition*, 2020.
- [27] 戴景民. 辐射测温的发展现状与展望 [J]. *自动化技术与应用*, 2004, 23(3) :1-7.
- DAI J M. Survey of radiation thermometry [J]. *Techniques of Automation and Applications*, 2004, 23(3) :1-7.
- [28] 廖延彪, 苑立波, 田芊. 中国光纤传感 40 年 [J]. *光学学报*, 2018, 38(3) :1-19.
- LIAO Y B, YUAN L B, TIAN Q. The 40 years of optical fiber sensors in China [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(3) : 1-19.
- [29] 童杏林, 何为, 张翠, 等. 光纤光栅与光纤法珀传感器在航空航天领域的研究与应用进展 [J]. *激光杂志*, 2018, 39(7) :1-7.
- TONG X L, HE W, ZHANG C, et al. Research and application progress of fiber Bragg grating and Fabry-Perot sensors in the field of aeronautics and astronautics [J]. *Laser Journal*, 2018, 39(7) :1-7.
- [30] 王楠楠, 师钰璋, 王高, 等. 蓝宝石光纤高温测量技术进展 [J]. *计测技术*, 2018, 38(6) :64-71.
- WANG N N, SHI Y ZH, WANG G, et al. Review of high temperature measurement with sapphire monocrystalline fiber [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2018, 38(6) :64-71.
- [31] LIU B, BURIC M P, CHORPENING B T, et al. Design and implementation of distributed ultra-high temperature sensing system with a single crystal fiber [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(23) :5511-5520.
- [32] MIKOLAJEK M, MARTINEK R, KOZIOREK J, et al. Temperature measurement using optical fiber methods: Overview and evaluation [J]. *Journal of Sensors*, 2020, 2020:1-25.
- [33] ZHU C, GERALD R E, HUANG J. Progress toward sapphire optical fiber sensors for high-temperature applications [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2020, 69(11) :8639-8655.
- [34] WANG B, NIU Y, QIN X, et al. Review of high

- temperature measurement technology based on sapphire optical fiber[J]. *Measurement*, 2021, 184:1-14.
- [35] 张宝诚. 航空发动机试验和测试技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2005.
ZHANG B CH. Aero engine test technology [M]. Beijing: Beihang University Press, 2005.
- [36] SARAVANAMUTTOO H I H. Recommended practices for measurement of gas path pressures and temperatures for performance assessment of aircraft turbine engines and components[R]. NATO, 1990.
- [37] 黄春峰, 蒋明夫, 毛茂华. 国外航空发动机薄膜热电偶技术发展研究[J]. *航空发动机*, 2011, 37(6): 53-57.
HUANG CH F, JIANG M F, MAO M H. Development on thin-film thermocouples technology for foreign aeroengine[J]. *Aeroengine*, 2011, 37(6):53-57.
- [38] WRBANEK J D, FRALICK G C. Thin film physical sensor instrumentation research and development at nasa glenn research center[R]. NASA, 2006.
- [39] DENG J, ZHANG L, HUI L, et al. Indium tin oxide thin-film thermocouple probe based on sapphire microrod[J]. *Sensors*, 2020, 20(5):1-8.
- [40] JI Z, DUAN F L, XIE Z. Transient measurement of temperature distribution using thin film thermocouple array on turbine blade surface [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(1):207-212.
- [41] WRBANEK J D, FRALICK G C, FARMER S C, et al. Development of thin film ceramic thermocouples for high temperature environments[C]. 40th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, 2004.
- [42] JIN X H, MA B H, QIU T, et al. ITO thin film thermocouple for transient high temperature measurement in scramjet combustor [C]. 2017 19th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS), 2017.
- [43] MALLETT T C. Aging in commercial thick-and thin-film resistors: Survey and uncertainty analysis [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2019, 68(11):4190-4204.
- [44] SIROKA S, FOLEY B M, BERDANIER R A, et al. Application of 3-omega method for thin-film heat flux gauge calibration [J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(11):1-12.
- [45] ALEKSIC S O, MITROVIC N S, LUKOVIC M D, et al. A ground temperature profile sensor based on NTC thick film segmented thermistors: Main properties and applications[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018, 18(11): 4414-4421.
- [46] KIM J. Electrical and thermal properties of a (Ba_{1-x}Sr_xCa_y)TiO₃-based PTC thermistor for preheating light oil[J]. *Functional Materials Letters*, 2018, 11(5):1-4.
- [47] 杨晨. 压气机转子叶片表面温度测试[J]. *测控技术*, 2004, 23(1):3-5.
YANG CH. Research on the measurement of the compressor rotor blade surface temperature [J]. *Measurement & Control Technology*, 2004, 23(1):3-5.
- [48] LENHERR C, KALFAS A I, ABHARI R S. High temperature fast response aerodynamic probe[J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 2011, 133(1):1-10.
- [49] 熊庆荣, 石小江, 徐芳, 等. 基于示温漆的高压涡轮导向器表面温度测试[J]. *燃气涡轮试验与研究*, 2014, 27(3):44-48.
XIONG Q R, SHI X J, XU F, et al. Surface temperature measurement of turbine nozzle based on temperature-sensitive paint [J]. *Gas Turbine Experiment and Research*, 2014, 27(3):44-48.
- [50] YANG L, ZHI-MIN L. The research of temperature indicating paints and its application in aero-engine temperature measurement [J]. *Procedia Engineering*, 2015, 99:1152-1157.
- [51] 王展. 基于示温漆图像的温度自动判读算法研究[D]. 成都:电子科技大学, 2018.
WANG ZH. Research on automatical temperature interpretation algorithms based on temperature sensitive paint image [J]. *Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China*, 2018.
- [52] LEE B, KIM C, YANG I, et al. Performance evaluation of a rake used for measuring total pressure and total temperature inside an engine inlet duct[J]. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, 2019, 20(2):346-354.
- [53] 周颖锋, 崔在甫, 李鑫, 等. 航空发动机高温薄膜热电偶研究概况[J]. *航空制造技术*, 2020, 63(6): 82-89.
ZHOU Y F, CUI Z F, LI X, et al. Review on high temperature thin film thermocouple for aero-engine[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2020, 63(6): 82-89.
- [54] LIU K, XU L. Study on combustor outlet temperature field of gas turbine [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 138:962-966.

- [55] 杨灿, 吴伟力, 熊义彬, 等. 航空发动机燃烧室出口高温热电偶校准技术[J]. 航空动力学报, 2016, 31(4):769-774.
YANG C, WU W L, XIONG Y B, et al. Calibration technology of high-temperature thermocouple for combustor exit of an aero-engine [J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(4):769-774.
- [56] 童剑, 黄梦薇. 航空发动机辐照晶体测温技术研究[J]. 航空动力, 2019, 10(5):52-54.
TONG J, HUANG M W. Research on temperature measurement with irradiated crystal [J]. Aerospace Power, 2019, 10(5):52-54.
- [57] 李杨, 殷光明. 航空发动机涡轮叶片晶体测温技术研究[J]. 航空发动机, 2017, 43(3):83-87.
LI Y, YIN G M. Research on crystal temperature measurement technology for aeroengine turbine blade [J]. Aeroengine, 2017, 43(3):83-87.
- [58] 廖延彪, 黎敏. 光纤光学(第2版)[M]. 北京:清华大学出版社, 2013.
LIAO Y B, LI M. Fiber optics(second edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.
- [59] LIAO C R, WANG D N. Review of femtosecond laser fabricated fiber bragg gratings for high temperature sensing[J]. Photonic Sensors, 2013(2):97-101.
- [60] SOLEIMANI N, PONTING B, GEBREMICHAEL E, et al. Coilable single crystals fibers of doped-YAG for high power laser applications [J]. Journal of Crystal Growth, 2014, 393:18-22.
- [61] MERBERG G N, HARRINGTON J A. Optical and mechanical properties of single-crystal sapphire optical fibers[J]. Applied Optics, 1993, 32(18):3201-3209.
- [62] HAI X, JIANGDONG D, PICKRELL G, et al. Single-crystal sapphire fiber-based strain sensor for high-temperature applications [J]. Journal of Lightwave Technology, 2003, 21(10):2276-2283.
- [63] 魏林, 王高, 高志强, 等. 高温光纤传感器传感头材料[J]. 光电技术应用, 2011, 26(2):56-60.
WEI L, WANG G, GAO ZH Q, et al. Sensing head materials of high temperature optical fiber sensor [J]. Electro-Optic Technology Application, 2011, 26(2):56-60.
- [64] WANG T, ZHANG J, ZHANG N, et al. Single crystal fibers: Diversified functional crystal material [J]. Advanced Fiber Materials, 2019, 1(3):163-187.
- [65] RAO Y J. In-fibre Bragg grating sensors [J]. Measurement Science and Technology, 1997, 8(4):355-375.
- [66] 陈伟民, 雷小华, 张伟, 等. 光纤法布里-珀罗传感器研究进展[J]. 光学学报, 2018, 38(3):132-145.
CHEN W M, LEI X H, ZHANG W, et al. Recent progress of optical fiber fabry-perot sensors [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3):132-145.
- [67] LEE B H, KIM Y H, PARK K S, et al. Interferometric fiber optic sensors [J]. Sensors, 2012, 12(3):2467-2486.
- [68] ISLAM M R, ALI M M, LAI M H, et al. Chronology of fabry-perot interferometer fiber-optic sensors and their applications: A review [J]. Sensors, 2014, 14(4):7451-7488.
- [69] HUANG Y W, TAO J, HUANG X G. Research progress on F-P interference based fiber-optic sensors [J]. Sensors, 2016, 16(9):1-14.
- [70] 王文轶, 文建湘, 庞拂飞, 等. 飞秒激光制备的全单模光纤法布里珀罗干涉高温传感器[J]. 中国激光, 2012, 39(10):1-5.
WANG W Y, WEN J X, PANG F F, et al. All single-mode fiber fabry-pérot interferometric high temperature sensor fabricated with femtosecond laser [J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(10):1-5.
- [71] PENGCHENG C, XUEWEN S. Refractive-index-modified-dot Fabry-Perot fiber probe fabricated by femtosecond laser for high-temperature sensing [J]. Optics Express, 2018, 26(5):5292-5299.
- [72] LIU H, PANG F, HONG L, et al. Crystallization-induced refractive index modulation on sapphire-derived fiber for ultrahigh temperature sensing [J]. Optics Express, 2019, 27(5):6201-6209.
- [73] YANG S, FENG Z, JIA X, et al. All-sapphire miniature optical fiber tip sensor for high temperature measurement[J]. Journal of Lightwave Technology, 2020, 38(7):1988-1997.
- [74] HUANG C, LEE D, DAI J, et al. Fabrication of high-temperature temperature sensor based on dielectric multilayer film on Sapphire fiber tip [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2015, 232:99-102.
- [75] YU X, WANG S, JIANG J, et al. Self-filtering high-resolution dual-sapphire-fiber-based high-temperature sensor [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(4):1408-1414.
- [76] YULE L, ZAGHARI B, HARRIS N, et al. Surface temperature condition monitoring methods for aerospace turbomachinery: Exploring the use of ultrasonic guided

- waves[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(5):1-19.
- [77] 原东方, 李仰军, 王高, 等. 基于超声波的蓝宝石温度传感器[J]. *科学技术与工程*, 2017, 17(24):45-48.
- YUAN D F, LI Y J, WANG G, et al. Sapphire temperature sensor based on ultrasonic wave[J]. *Science Technology and Engineering*, 2017, 17(24):45-48.
- [78] LIANG H, YANG F, YANG L, et al. Research and implementation of a 1800 °C sapphire ultrasonic thermometer[J]. *Journal of Sensors*, 2017:1-7.
- [79] 王超, 苟学科, 段英, 等. 航空发动机涡轮叶片温度测量综述[J]. *红外与毫米波学报*, 2018, 37(4):501-512.
- WANG CH, GOU X K, DUAN Y, et al. A review of aero-engine turbine blade temperature measurement[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2018, 37(4):501-512.
- [80] POLZ L, BERGHAUS T, KLOSE M, et al. Miniaturized total temperature probe based on fibre Bragg gratings[C]. *OFS2014 23rd International Conference on Optical Fiber Sensors*, 2014.
- [81] POLZ L, ZEISBERGER A, BARTELT H, et al. Total temperature measurement of fast air streams with fiber-optic Bragg grating sensors[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2016, 16(17):6596-6603.
- [82] 周震, 刘显明, 韩国庆, 等. 基于光纤光栅的高速气流总温测量方法[J/OL]. *仪器仪表学报*:1-11[2021-12-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2179.TH.20210826.1444.016.html>.
- ZHOU ZH, LIU X M, HAN G Q, et al. Total temperature measurement of high-speed air flow based on fiber Bragg grating[J/OL]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 1-11[2021-12-15]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2179.TH.20210826.1444.016.html>.
- [83] LIU G, HAN M, HOU W. High-resolution and fast-response fiber-optic temperature sensor using silicon Fabry-Pérot cavity[J]. *Optics Express*, 2015, 23(6):7237-7247.
- [84] KIDD S R, BARTON J S, MEREDITH P, et al. A fiber optic probe for gas total temperature measurement in turbomachinery[J]. *Journal of Turbomachinery*, 1995, 117(4):635-641.
- [85] BARTON J. Optical fibre probes for total pressure and total temperature measurement in a turbine test rig[C]. *13th International Conference on Optical Fiber Sensors*, 1999.
- [86] KILPATRICK J M, MACPHERSON W N, BARTON J S, et al. Measurement of unsteady gas temperature with optical fibre Fabry-Perot microsensors[J]. *Measurement Science and Technology*, 2002, 13(5):706-712.
- [87] PAKMEHR M, COSTA J, BEHBAHANI A R, et al. Extreme environment sensor system development: Optical turbine inlet temperature (TIT) sensing for jet engine[C]. *AIAA Propulsion and Energy 2019 Forum*, 2019.
- [88] WALKER R B, DING H, COULAS D, et al. Combustor deployments of femtosecond laser written fiber Bragg grating arrays for temperature measurements surpassing 1 000°C [C]. *Micro and Nanotechnology Sensors, Systems, and Applications IX*, 2017:101941Q.
- [89] BOSSELMANN T. Innovative applications of fibre-optic sensors in energy and transportation [C]. *17th International Conference on Optical Fibre Sensors, Pts 1 and 2*, 2005:188-193.
- [90] WALKER R, YUN S, DE SILVA M, et al. High temperature measurement of a low emission, high pressure combustor using femtosecond laser written fiber Bragg gratings[C]. *SPIE Commercial, Scientific Sensing and Imaging*, 2018.
- [91] LI Y, YANG M, WANG D N, et al. Fiber Bragg gratings with enhanced thermal stability by residual stress relaxation [J]. *Optics Express*, 2009, 17(22):19785-19790.
- [92] HABISREUTHER T, ELSMANN T, PAN Z, et al. Sapphire fiber Bragg gratings for high temperature and dynamic temperature diagnostics[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2015, 91:860-865.
- [93] JIANG J F, WANG S, LIU K, et al. Development of optical fiber temperature sensor for aviation industry[C]. *2016 15th International Conference on Optical Communications and Networks*, 2016.
- [94] WANG B T, NIU Y X, ZHENG S W, et al. A high temperature sensor based on sapphire fiber fabry-perot interferometer[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2020, 32(2):89-92.
- [95] EWAN B C R. A study of two optical fibre probe designs for use in high-temperature combustion gases [J]. *Measurement Science and Technology*, 1998, 9(8):1330-1335.
- [96] 王高, 徐兆勇, 周汉昌. 基于蓝宝石光纤传感器的瞬态高温测试及校准技术[J]. *光电子·激光*, 2005(4):

- 441-443.
- WANG G, XU ZH Y, ZHOU H CH. Transient high temperature measurement based on sapphire fiber sensor and calibration technology [J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2005(4):441-443.
- [97] 王玉田, 杨丽丽, 鲁信琼. 瞬态高温测量系统[J]. *压电与声光*, 2010, 32(3):346-348,352.
- WANG Y T, YANG L L, LU X Q. Transient high-temperature measurement system [J]. *Piezoelectrics & Acoustooptics*, 2010, 32(3):346-348,352.
- [98] GAO S, WANG L, FENG C, et al. Analyzing the influence of combustion gas on a gas turbine by radiation thermometry[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2015: 184-193.
- [99] KIPNGETICH K D, FENG C, GAO S. Reflection error correction of gas turbine blade temperature[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2016, 75:153-159.
- [100] GAO S, FENG C, WANG L, et al. Multi-spectral temperature measurement method for gas turbine blade[J]. *Optical Review*, 2016, 23(1):17-25.
- [101] WILLSCH M, BOSSELMANN T, FLOHR P, et al. Design of fiber optical high temperature sensors for gas turbine monitoring [C]. *20th International Conference on Optical Fibre Sensors*, 2009.
- [102] XIA H, BYRD D, DEKATE S, et al. High-density fiber optical sensor and instrumentation for gas turbine operation condition monitoring[J]. *Journal of Sensors*, 2013, 2013:1-11.
- [103] DUTZ F J, LINDNER M, HEINRICH A, et al. Multipoint high temperature sensing with regenerated fiber bragg gratings [C]. *Fiber Optic Sensors and Applications XV*, 2018.
- [104] YU L, WANG D Y, WANG Y, et al. Engine test for wavelength-multiplexed fiber Bragg grating temperature sensor [C]. *SPIE Defense, Security, and Sensing*, 2013.
- [105] 庞拂飞, 马章微, 刘兔兔, 等. 蓝宝石衍生光纤及传感器研究进展[J]. *应用科学学报*, 2018, 36(1): 59-74.
- PANG F F, MA ZH W, LIU H H, et al. Research progress of sapphire-derived fibers and sensors [J]. *Journal of Applied Sciences*, 2018, 36(1): 59-74.
- [106] 王涛, 张健, 张娜, 等. 单晶光纤制备及单晶光纤激光器研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(17):159-170.
- WANG T, ZHANG J, ZHANG N, et al. Research progress in preparation of single crystal fiber and fiber lasers[J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2019, 56(17):159-170.
- [107] SRIDHAR S, SEBASTIAN S, ASOKAN S. Temperature sensor based on multi-layer MoS2 coated etched fiber Bragg grating[J]. *Applied Optics*, 2019, 58(3):535-539.
- [108] 李阔, 周振安, 刘爱春. 基于光纤光栅的高精度测温传感器研究[J]. *地球物理学进展*, 2008, 23(4): 1322-1325.
- LI K, ZHOU ZH AN, LIU AI CH. The application of fiber Bragg grating sensor to high precision temperature measurement [J]. *Progress in Geophysics*, 2008, 23(4):1322-1325.
- [109] TOSI D. Review and analysis of peak tracking techniques for fiber bragg grating sensors[J]. *Sensors*, 2017, 17(10):2368.
- [110] ZHANG W, LEI X, YU Z, et al. Evaluating the effect on demodulation with a comprehensive model of distortions of fiber bragg grating sensing signals [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 36(24): 5823-5832.
- [111] 桂鑫, 李政颖, 王洪海, 等. 基于大规模光栅阵列光纤的分布式传感技术及应用综述[J]. *应用科学学报*, 2021, 39(5):747-776.
- GUI X, LI ZH Y, WANG H H, et al. Review of distributed optical fiber sensing technology and application based on large-scale grating array fiber[J]. *Journal of Applied Sciences*, 2021, 39(5):747-776.
- [112] DONG Y, CHEN L, BAO X. High-spatial-resolution time-domain simultaneous strain and temperature sensor using brillouin scattering and birefringence in a polarization-maintaining fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, 22(18):1364-1366.
- [113] DONG Y, ZHANG H, CHEN L, et al. 2 cm spatial-resolution and 2 km range Brillouin optical fiber sensor using a transient differential pulse pair [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(9):1229-1235.
- [114] XU O, LU S, FENG S, et al. Proposal and analysis of two-cavity Fabry-Perot structures based on fiber Bragg gratings[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2009, 26(3):639-649.
- [115] LI G, JI L, LI G, et al. High-resolution and large-dynamic-range temperature sensor using fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity[J]. *Optics Express*, 2021, 29(12):18523-18529.

- [116] BHOWMIK K, PENG G D, LUO Y H, et al. High intrinsic sensitivity etched polymer fiber bragg grating pair for simultaneous strain and temperature measurements [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16(8):2453-2459.
- [117] SAMPATH U, KIM D G, KIM H, et al. Fiber-optic sensor for simultaneous strain and temperature monitoring in composite materials at cryogenic condition[C]. 25th International Conference on Optical Fibre Sensors (OFS), 2017.
- [118] UCHIMURA R, WADA A, TANAKA S, et al. Fiber fabry-perot interferometric sensor using bragg gratings in polarization maintaining fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 2015, 33(12):2499-2503.
- [119] HAO L, PINGGANG J, JIA L, et al. Diaphragm-free fiber-optic fabry-perot interferometric gas pressure sensor for high temperature application[J]. Sensors, 2018, 18(4):1-11.
- [120] 刘显明, 韩国庆, 章鹏, 等. 一种可实现导热误差校正的光纤光栅总温测量装置, 202110932328.7 [P/OL]. 2021-8-13.
- LIU X M, HAN G Q, ZHANG P, et al. Total temperature measurement device with conduction error correction based on fiber grating, 202110932328.7 [P/OL]. 2021-8-13.
- [121] 刘显明, 单智超, 陈昱如, 等. 吸气式光纤光栅总温探针及其测量系统, CN111811681A [P/OL]. 2020-10-23.

LIU X M, SHAN ZH CH, CHEN Y R, et al. Aspirating total temperature probe and its measurement system based on fiber grating, CN111811681A [P/OL]. 2020-10-23.

作者简介



韩国庆, 2015 年于重庆科技学院获得学士学位, 现为重庆大学博士研究生, 主要研究方向为光纤传感。

E-mail: guoqinghan18@163.com

Han Guoqing received his B. Sc. degree from Chongqing University of Science and Technology in 2015. He is currently a Ph. D. candidate at Chongqing University. His main research interest is optical fiber sensing.



刘显明 (通信作者), 2005 年于山东大学获学士学位, 2010 年于中国科学院光电技术研究所获博士学位, 现为重庆大学副教授、博士生导师, 主要研究方向为传感与测试技术。

E-mail: xianming65@163.com

Liu Xianming (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Shandong University in 2005 and received his Ph. D. degree from Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences in 2010. He is currently an associate professor and a Ph. D. advisor at Chongqing University. His main research interest is sensing and testing technology.