

doi: 10.11823/j.issn.1674-5795.2018.06.13

蓝宝石光纤高温测量技术进展

王楠楠¹, 师钰璋^{2,3}, 王高^{2,3}, 周汉昌^{2,3}, 熊季军², 梁海坚^{2,3}, 刘争光²

(1. 中国航发贵阳发动机设计研究所, 贵州 贵阳 550000; 2. 测试研究所, 山西 太原 030051;

3. 中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 温度是表征物体状态的参数之一, 在科学研究和工程应用中具有重要的理论意义和价值。在氧化、高温、腐蚀、电磁干扰等恶劣环境下, 温度的准确测量一直是难题。传感器材料是进行温度测量的基础。蓝宝石单晶光纤具有物理化学性能稳定、熔点高、机械性能强等优点, 是进行高温测试的一种首选材料。本文介绍了利用蓝宝石单晶光纤进行温度测量的几种方法, 即蓝宝石光纤辐射高温测试技术、蓝宝石光纤光栅高温测试技术、蓝宝石光纤珪珀高温测试技术、蓝宝石超声波导高温测试技术的原理、现状、优缺点及发展趋势, 并进行了比较, 为蓝宝石光纤温度测量应用奠定基础。

关键词: 蓝宝石光纤; 温度; 研究现状; 发展趋势; 优缺点

中图分类号: TB9

文献标识码: A

文章编号: 1674-5795(2018)06-0061-08

Review of High Temperature Measurement with Sapphire Monocrystalline Fiber

WANG Nannan¹, SHI Yuzhang^{2,3}, WANG Gao^{2,3}, ZHOU Hanchang^{2,3},XIONG Jijun², LIANG Haijiang^{2,3}, LIU Zhengguang²

(1. Aecc Gui Yang Engine Design Research Institute, Guiyang 550000, China;

2. Testing Institute, Taiyuan 030051, China;

3. School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Temperature is one of the parameters that characterize the state of an object and has important theoretical significance and value in scientific research and engineering applications. Accurate measurement of temperature has been a problem in harsh environments such as oxidation, high temperature, corrosion, and electromagnetic interference. The sensor material is the basis for the temperature measurement. Sapphire monocrystalline fiber has the advantages of stable physical and chemical properties, high melting point and strong mechanical properties, and is a preferred material for high temperature testing. This paper introduces several methods for temperature measurement using sapphire monocrystalline fiber, namely sapphire fiber radiation, sapphire fiber grating, sapphire fiber optic and sapphire ultrasonic high temperature test technologies. The principles, current status, advantages and disadvantages, and development trends of these test technologies are introduced. The comparison will lay the foundation for sapphire fiber temperature measurement applications.

Key words: sapphire fiber; temperature; research status; development trend; advantages and disadvantages

0 引言

温度是体现物质状态的重要参数之一, 它的准确测量在科学研究、军事、航空及工业生产中都具有十分重要的意义。在工业上, 冶金行业双辊铸轧生产中, 熔池中钢水的温度直接会影响到钢坯的质量, 必须准确快速地测量出熔池中钢水的温度; 军事上, 对炮筒、枪膛等内部温度的监测, 以及对爆炸时产生的火焰温度测量, 火焰温度高、冲击力强、持续时间短, 都增加了测温的困难; 航空领域中, 燃烧效率是航空发动机最重要的技术指标之一, 对发动机内部温度的实时

监测是保障发动机高效率稳定运行的必要技术手段, 温度传感技术特别是高温传感技术在航空航天领域具有十分重要的作用^[1]; 化工领域, 温度不仅会影响到化学反应进行的效率, 而且对化学过程的温度监测也十分重要, 稍有不慎, 就会给操作人员和财产带来损害。总之, 这些领域的测温环境都十分恶劣, 对传统的测温材料及测温方法提出了挑战。

传统热电偶在高温环境下抗腐蚀能力差、抗电磁干扰性能差、寿命短、消耗大(探头为一次性, 每次测量后必须更换探头)、体积大、响应速度较低、不能连续或高频率测温、测温范围小、测量精度低等。市面

上使用最多的铂铑合金热电偶, 由于铂铑合金稀缺, 而使得热电偶的成本很高, 且铂、铑在高温环境下极易氧化。最新的铱铑合金测温方法, 国内没有标准, 且这些金属依然十分昂贵, 限制了使用。另一种比较常见的非接触式红外测温方法, 易受环境因素的影响, 限制了其在恶劣环境中的应用。

陶瓷等非金属是优良的测温材料。蓝宝石单晶光纤物理化学性能稳定, 熔点高达 2045 °C, 具有良好的光传输性能, 800 nm 以上的红外波段蓝宝石单晶具有接近 90% 的透射率, 对近红外和红外光的传输损耗较小, 已有报道用于热辐射传感^[2]。制作成的蓝宝石光纤在 1800 °C, 仍有很强的机械性, 满足高温恶劣环境测量温度的需求^[3], 且具有良好的声传输性能。基于以上优点, 蓝宝石单晶光纤成为测量高温的良好材料, 在测温领域有广泛的应用。本文介绍了利用蓝宝石单晶光纤进行温度测量的几种方法, 即蓝宝石光纤辐射高温测试技术、蓝宝石光纤光栅高温测试技术、蓝宝石光纤珐琅高温测试技术、蓝宝石光纤超声波导高温测试技术和蓝宝石光纤荧光高温测试技术的原理、现状、优缺点及发展趋势。

1 蓝宝石光纤温度传感技术

1.1 蓝宝石光纤辐射高温测试技术

1.1.1 蓝宝石光纤辐射高温测试技术原理

辐射测温是利用黑体热辐射与温度的 Planck 定理来测量物体温度的方法。

Planck 定律给出了辐射场能量密度按频率的分布, 即在一定温度下, 单位面积黑体在单位时间、单位波长间隔内及单位立体角内辐射量 M_0 为

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

式中: λ 为物体的辐射波长; T 为物体的绝对温度; C_1 , C_2 分别为第一和第二辐射常数, 它们的值分别为 $C_1 = 3.718 \times 10^{-16} \text{ W m}^2$, $C_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ mk}$ 。

1.1.2 蓝宝石光纤辐射高温测试技术进展

美国 Dils R R 博士于 1982 年首次研制出蓝宝石单晶光纤辐射高温计。利用溅射方法, 在直径为 0.25 mm、长度为 0.05 m 的蓝宝石光纤的一端制作了小型黑体腔, 在另一端利用普通硅材料光纤进行信号的传输, 将辐射信号传输到探测器, 并且对该蓝宝石单晶光纤辐射高温计进行了单点温度校准。该仪器具有高精度度和灵敏度、响应速度快的优点, 测温范围达到 600 ~ 2000 °C, 可广泛应用于科研和工业领域。

该方法于 1988 年在美国获得专利, 美国国家标准局将其作为新的温度测量标准范围内的 630 ~ 1064 °C^[4]。

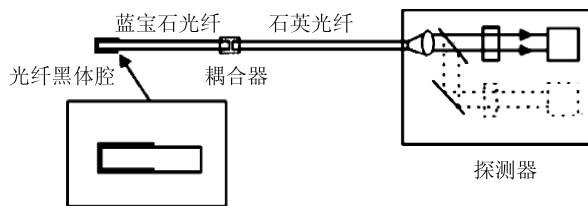


图1 蓝宝石单晶光纤辐射高温计

1989 年 1 月, 清华大学周炳琨等人申请了光纤黑体腔温度传感器专利。专利指出, 传感器结构稳定可靠、体积小、成本低, 测量范围为 400 ~ 1300 °C, 灵敏度可达 0.1 °C, 空间分辨力为几百微米, 响应时间达毫秒量级^[5]。

1997 年, 蓝宝石单晶光纤高温仪由浙江大学叶林华、沈永行等人首次研制成功, 分析了蓝宝石光纤高温传感头特性。测温范围为 800 ~ 1700 °C, 测温精度在 1000 °C 时达到 0.2%, 分辨力为 1 °C, 已经应用于炉膛温度监测^[6]。

2001 年, 华南理工大学王洪开发出一种基于黑体辐射原理的新型蓝宝石高温光纤传感器和光纤温控仪, 仪器测温范围为 600 ~ 1800 °C, 分辨力优于 0.1 °C, 空间分辨力达到 1.5 cm, 可用于科研及工业生产中特殊环境条件下的温度测量^[7]。

2004 年, 中北大学的周汉昌、王高等人利用蓝宝石光纤、锥形高温光纤等研制了瞬态高温测试系统, 动态响应时间小于 30 ms, 误差为 1%, 能在恶劣环境下对 1200 ~ 2000 °C 的瞬态高温进行测量^[8], 并且在镀膜材料、电路处理、校准、工程应用等方面进行了更为深入的研究。

近年来, 中国航空航天动力研究院^[9]、南京师范大学^[10], 北京长城计量测试技术研究所^[11]等单位也对蓝宝石光纤辐射高温测试技术进行了一定研究和实验, 进一步深化了研究。

国外, 利用该方法生产的高温仪已经产品化, Accufiber^[12] 等公司已经生产出了应用在燃气轮发动机、涡轮发动机等高温环境下的蓝宝石光纤温度仪。

1.1.3 优缺点与发展趋势

蓝宝石光纤辐射高温测试技术的优点: ①环境适应性强, 适合各种环境, 稳定性好, 寿命长; ②符合普朗克定律, 可以单点标定保证全量程测量不确定度; ③量程高, 蓝宝石光纤熔点为 2045 °C, 可长期工作在

1900 ℃ 的环境，瞬态可达 2000 ℃；④响应速度比较快。缺点：①量程下限比较高，一般在 400 ℃，与光纤直径、传输损耗、探测器灵敏度有关；②系统相对比较复杂，制作工艺也比较复杂；③信号与温度关系为非线性；④成本较高，推广困难，适合特殊应用场合。

随着氧化镁、氧化锆、氧化钨等高温透明陶瓷和单晶发展，超高温单晶光纤辐射测试技术测温上限有望超过 2000 ℃，达到 2700 ℃，但测温下限也有待拓展。

1.2 蓝宝石光纤光栅高温测试技术

1.2.1 蓝宝石光纤光栅高温测试技术原理

在相位掩膜技术基础上，利用飞秒激光器将布拉格光栅写入蓝宝石光纤中。宽带光源发出的宽带光谱入射到光纤布拉格光栅后，满足布拉格条件的光波被反射，反射回窄带光谱信号。当光纤布拉格光栅所处环境温度变化时，反射波长会发生相应的改变，通过对反射回的波长信号进行解调，从而得到待测温度值。

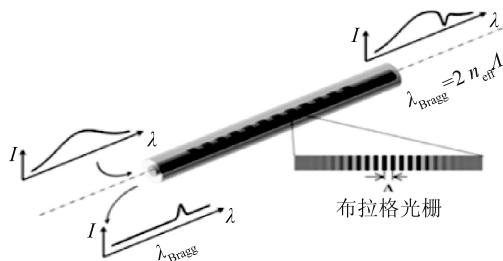


图2 布拉格光栅测温原理

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2 n_{\text{eff}} \Lambda \quad (2)$$

式中： n_{eff} 为布拉格光栅的有效折射率； Λ 为光栅周期。

1.2.2 蓝宝石光纤光栅高温测试技术进展

1978 年，加拿大通信研究中心的 Hill K O 等人利用 488 nm 的氩离子激光器，通过将掺杂了锆的硅材料光纤暴露于强烈的相反传播的相关光束下，使光纤纤芯折射率发生周期性扰动，制造出了一种光纤滤波器，通过实验得出了滤波器能够对固定波长的光波进行反射，其它波长的光波不受影响的结论，表面滤波器反射特定光波是因为纤芯折射率的改变，且发现了其输出响应受到了环境温度和机械压力的剧烈影响，为光纤光栅在测温领域的应用奠定了基础。在这样的条件下，制造出了历史上第一根光纤光栅，且反射率将近达到 100%^[13]。

2004 年，Grobnic D 等人首次报道并在多模蓝宝石晶体光纤中刻写了反射式布拉格光栅，利用 800 nm 的

飞秒激光和相位掩模的方法，且在温度为 1500 ℃ 的环境下，在布拉格光栅谐振过程中，并没有观察到反射光信号的衰减和滞后，温度灵敏度达到 25 pm/℃^[14]。

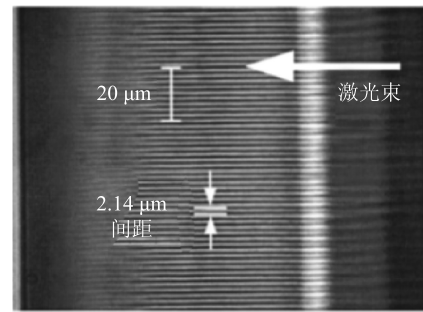


图3 飞秒激光刻写的 FBG 结构

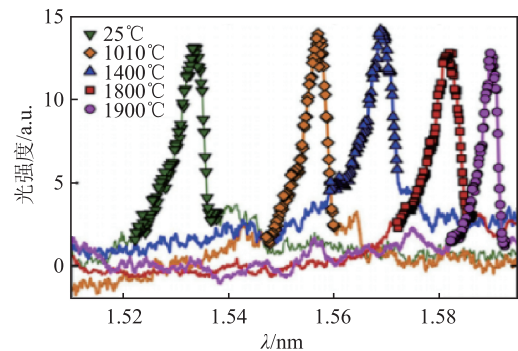


图4 室温到 1900 ℃ 蓝宝石光栅光谱

2015 年，Habisreuther 等人利用刻录成多模单晶蓝宝石光纤的光纤光栅制造了高温传感器，该传感器有良好的动态性能，测量 1900 ℃ 的温度，误差在 2 ℃ 范围内，分辨力为 $\pm 2k$ ，并且实现了温度的监测，监测频率 20 Hz^[15]。

2016 年，孙洪波等人利用飞秒激光直写技术制备了 FBG 与 LPFG 并联集成结构和微孔布拉格光栅，FBG 周期为 1.07 μm，长度为 2.4 mm，LPFG 刻写在并联 FBG 偏心 1.8 μm 的位置，周期为 60 μm，长度为 2.4 mm。集成的温度传感器，FBG 温度灵敏度为 12.98 pm/℃，LPFG 为 10.93 pm/℃，可同时进行温度和折射率的传感，而微孔布拉格光栅主要是进行折射率的传感^[16]。

2017 年，Shuo Yang 等人利用脉宽为 100 fs 红外激光器将光栅逐点写入直径为 125 μm 的蓝宝石光纤中，然后在 330 ℃ 的环境中，用酸溶液去蚀刻蓝宝石光纤，将其直径缩小，最后在高温炉中以 1400 ℃ 的温度退火 6 h，利用这种方法制成测温上限为 1400 ℃ 的蓝宝石光纤光栅，其灵敏度达到 26.5 pm/℃，是普通石英光纤光栅的两倍多^[17]。

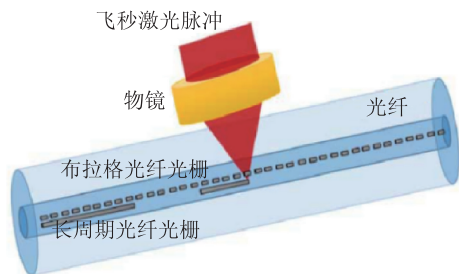


图5 集成传感器结构示意图

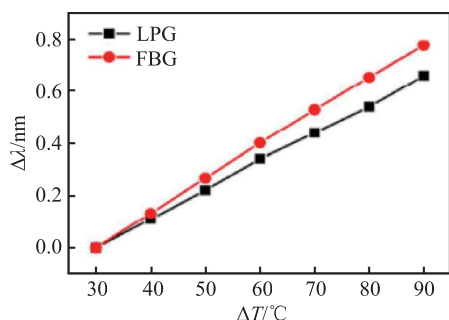


图6 FBG与LPFG温度线性图

2018年,王义平等首次报道了利用飞秒激光逐行写入技术,在单晶蓝宝石光纤中写入光纤光栅,分析了光纤直径、刻痕长度以及光栅周期数对光栅反射率的影响,制备出的光纤光栅能够测试室温到1612℃的温度,高温区灵敏度为36.5 pm/℃^[18]。

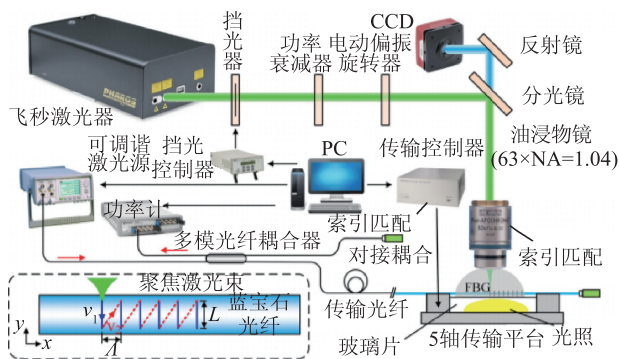


图7 飞秒激光逐行扫描制备SFBG技术

此外,国内武汉理工大学^[19]、香港理工大学^[20]等学校也进行了蓝宝石高温光纤光栅的制备以及高温传感的研究。美国Photran和Sapphire Fibers公司已经对其展开了广泛的研究和应用。

1.2.3 优缺点及发展趋势

蓝宝石光纤光栅高温测试技术优点:①精度较高、反应迅速、灵敏,可实现瞬态测量^[21];②具有线性自

参考功能,可实现温度、应变等多参数同时传感^[21];③可通过并联、叠加和级联等复用方式,实现多点、准分布式光纤传感^[21];④光源起伏、光纤弯曲损耗、连接损耗和探测器老化等因素不会对传输信号构成影响^[21]。缺点:光以多个模式在蓝宝石光纤中进行传输,测温精度提高困难,由于制作光栅需要大功率飞秒激光器,制作系统复杂、维护困难、成本较高,限制了应用。

未来应该通过一定方法降低蓝宝石光纤传输模式,从而进一步提高测温精度;改善光纤光栅封装,加长光纤光栅寿命;提高光检测波长分辨力;进行宽光谱、高功率光源研究;消除交叉敏感等^[23]。

1.3 蓝宝石光纤法珀高温测试技术

1.3.1 蓝宝石光纤法珀高温测试技术原理

基于多光束干涉原理,光在法珀腔两反射端面中进行反射,形成多光束干涉。当外界环境温度发生变化时,将引起蓝宝石的热膨胀系数和热光系数发生改变,导致蓝宝石晶片的厚度或折射率发生变化,进而导致两反射光的光程差发生改变,最终引起反射光干涉波长发生移动,对光谱进行解调从而实现对外界环境温度的传感。

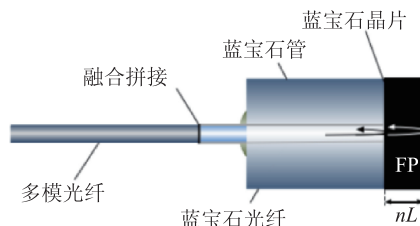


图8 蓝宝石光纤F-P腔

$$\lambda_{\text{dip}} = \frac{4nL}{2m+1} \quad (3)$$

式中: λ_{dip} 为法珀腔的中心波长; n 为法珀腔反射面之间介质的折射率; L 为腔长。

1.3.2 蓝宝石光纤法珀高温测试技术进展

最早利用光纤法珀腔进行光纤传感的是日本大学T. Yoshino等人在1982年单模光纤中制作了法珀腔,分析了光纤法珀腔的机械应变、温度和声波的传感特性,利用其成功地进行了温度的监测。

1995年,维吉尼亚理工学院的A. B. Wang教授首次提出外腔(非本征型)法布里-珀罗干涉型蓝宝石光纤高温传感器,并研制了基于45°抛光表面贴装的蓝宝石光纤干涉仪,实现了650℃的温度测量。2007年,他们又在原来的基础上,提出了基于蓝宝石片-蓝宝石光

纤的白光干涉仪，运用精密的加工方法和算法，实现了1600℃的高温测量，精度达到±0.2%，并可实现传感器的批量制造。

2010年，Wang J等人利用两段蓝宝石光纤构成空气间隙法珀腔制成EFPI型传感器，测温范围230℃到1000℃^[27]；随后Zhu Y等人通过将蓝宝石光纤端面研磨成45°角的方法，使蓝宝石晶片与蓝宝石光纤平行排列，避免了垂直固定的难度，但对蓝宝石光纤研磨的过程提出了更高的要求^[28]。

2015年，上海大学的Pengfei Chen等人通过棒管熔接的方法制作了特殊的蓝宝石衍生光纤，将其与直径相同的标准单模光纤熔接，在熔接处形成了空气腔，空气腔和蓝宝石衍生光纤的端面一起形成了法珀腔，测温范围为室温到1000℃，灵敏度为15.7 pm/℃^[29]。

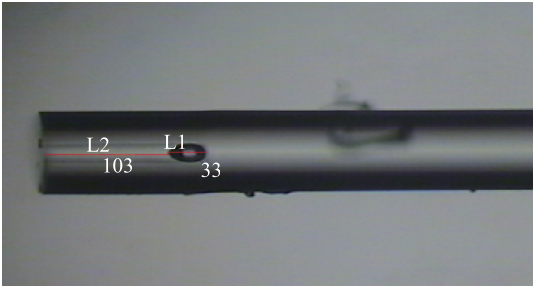


图9 蓝宝石光纤一端的法珀腔

2017年，武汉理工大学的Yao, Yi-Qiang等人利用蓝宝石晶片制作法珀腔，形成高温传感器，测温范围为20~1000℃，该传感器具有体积小、成本低、制作简单、重复性好的特点^[30]。

此外，暨南大学^[31]、东北大学^[32]、天津大学^[33]等高校也进行了法珀腔高温传感器的研究。

1.3.3 优缺点及发展趋势

蓝宝石光纤法珀高温测试技术优点：①传感器制作方法简单，结构稳定、成本较低、避免了光纤光栅高温传感器制作系统复杂的问题；②灵敏度高，可通过改变法珀腔腔长实现不同灵敏度要求；③测温范围下限较低、克服了光纤辐射型传感器的低温区域测温限；④分辨力高。缺点：①干涉仪需要能经受高温作用的机械支撑和粘附，所以传感器的耐温特性和机械性能都会收到各组件热膨胀系数的适配和复杂的制作工艺的影响；②解调需要复杂的快速傅里叶变换解调技术；③测温精度较低、响应时间长。

改进传感器的封装方式，增加稳定性，提高温度响应时间和温度分辨力，缩小传感器系统尺寸，使之

实现微型化；减小噪声干扰，改善信号解调；研究F-P腔的规模化生产工艺、传感器的特种封装与现场安装技术、传感系统的长期稳定性与可靠性、大规模现场应用的工艺技术。

1.4 蓝宝石超声波导高温传感技术

1.4.1 蓝宝石超声波导高温传感技术原理

超声波在液体、固体、气体中传播时，其声速与介质温度有固定的函数关系。在固体中，当温度升高时，声速传播速度减小，且声速与温度的单值函数关系较好。使用中可通过测量超声波在待测介质中的传播速度，反演待测温度。

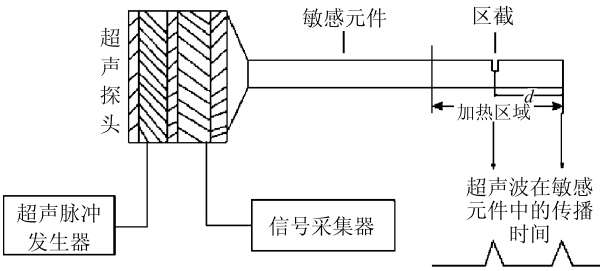


图10 蓝宝石超声波导测温原理示意图

将带有区截结构的蓝宝石光纤插入待测介质中，达到热平衡时，通过测量超声波在区截和敏感元件端面间的传播时间得出敏感温度。

声速计算公式为

$$V(T) = \frac{2d}{\Delta t} \tag{4}$$

式中： d 为区截与敏感元件端面的距离； Δt 为声波在区截与敏感元件端面之间传输的时间； $V(T)$ 为敏感元件中超声波声速。

1.4.2 蓝宝石超声波导高温传感技术进展

120年前，著名的声学专家Mayer发现了声速与介质温度的平方根成正比的重要结论。

20世纪60年代，美国的L. C. Lyn-Nworth等人首次提出超声脉冲测温方法，并分别在气体、液体和固体等介质中进行了试验，这些被测介质的温度均达到1000 K以上^[34]。

2012年，爱达荷州国家实验室，使用不锈钢，钼等材料作为温度测量元件，使超声波温度传感器在核反应堆内部温度。（虽然只有1300℃）的测量，但对于超声波温度传感器的材料和结构设计等进行了详细的研究，并对超声波信号采集和处理等特点进行了详细的分析，促进超声波温度传感器的发展^[35-36]。

2017年，中北大学王高等人利用长度为340 mm，

直径为 0.7 mm 蓝宝石光纤制作了超声温度传感器, 测温上限达到 1800 ℃ 高温。此传感器稳定性好、响应时间快、声速与温度线性度好, 可以用于测量航空发动机和工业高温炉的温度测试^[37]。

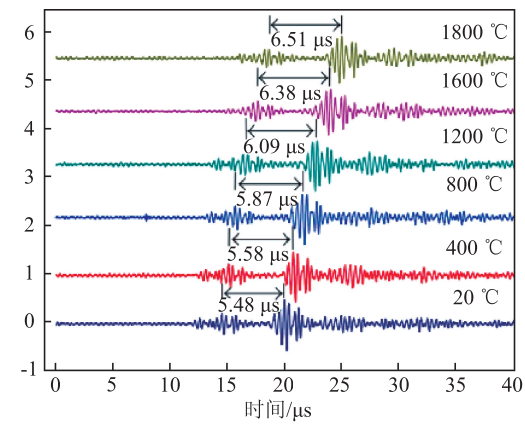


图 11 测得的波形

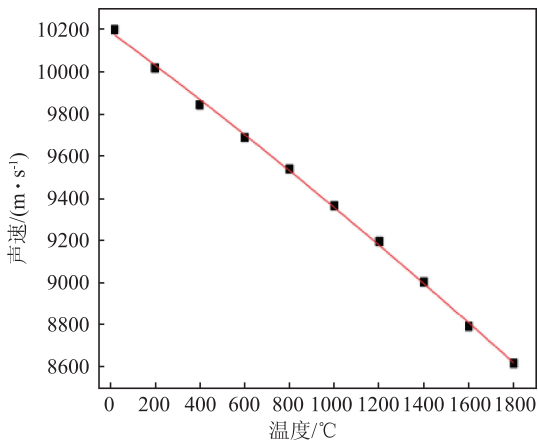


图 12 超声波传播速度随温度的变化关系图

1.4.3 优缺点及发展趋势

蓝宝石超声波导高温传感技术优点：①检测范围广、测温上限达到材料熔点^[38]；②灵敏度高、使用方便、响应速度快；③精度高、没有温漂，不受被测介质的颜色、亮度等的影响；④可以应用在粉尘、烟雾、有毒气体以及电磁干扰等环境下；⑤实时在线连续温度测量，便于维护和低成本使工业远程控制和连续在线测量成为可能。缺点：①传感器体积较大，测得的温度值为环境中的平均温度；②超声声速受到杨氏模量、材料密度、泊松比、材料的非均匀性等因素的影响^[39]；③超声换能器的技术性能直接影响超声信号质量和信号接收效果，进一步影响超声波传输时间的精度测量；④测温机理比较复杂，需采用实验标定的方法，对固体结构内部超声声速与温度之间的关系进行

确定，且无法从机理上解释热/声/固多场耦合特性和内部作用机制^[39]。

研究适用于超声测温的滤波去噪方法，提高超声信号的信噪比，选取更加合适的敏感元件材料，研究对超声多回波信号更加精确有效的分析方法。未来利用氧化镁、氧化锆等更高熔点的材料制作传感器，进一度提高超声波导的测温上限。

2 分析与比较

上面描述了四种光纤测温方法的国内外相关文献，本部分对几种测温方法的量程、分辨力、相应速度和制作工艺等参数进行分析比较，如表 1 所示。几种测温方法各有优劣，用户可参照表格数据，结合自身所做实验的要求和测温环境条件，快速选择得到最适合的测温方法。综上所述，蓝宝石单晶光纤是一种可以长期工作在 1800 ℃ 氧化环境的高温传感器材料。各种方法分辨力都优于 1%，可以对各种环境的静态温度进行测试。辐射测温、FBG 测温和超声波波导测温可以对航天领域的部分动态温度进行测试。最后，合理的高温结构封装(高温陶瓷)和高温校准技术也是解决高温测试难题的关键技术。各种技术的工程化应用有许多工作可以开展。

表 1 几种测温方法相关参数的分析比较

测温方法	量程/℃	制作工艺	响应速度	分辨力
辐射测温	400 ~ 1800	金属薄膜高温 溅射、真空蒸 发镀膜	毫秒级	0.03 ~ 1℃
FBG 测温	10 ~ 1900	刻刀刻划技术、 等离子刻蚀技 术、飞秒激光 加工技术	250 ms	0.04 ~ 0.9℃
Fabry-Perot 测温	20 ~ 1600	镀膜法、 熔接法、 腐蚀法	无	0.01 ~ 3℃
超声波 波导测温	12 ~ 1800	机械或激光加工	90 ms	1%

3 总结

综上所述，由于蓝宝石单晶光纤良好的物理、力学、化学、光学及机械特性，在高温应用领域已经得以应用，发展了几种测温方法，各有特色，用户可根据测量环境的具体情况，依据测温量程、响应速度、

分辨力等要求选择最合适的测温方法。未来,随着材料和科学技术发展,可能会出现新的测温材料(氧化锆)以及测温方法(光谱)丰富高温测试技术,不断满足工程需求。

参 考 文 献

- [1] Davies M A, Ueda T, MSaoubi R, et al. On The Measurement of Temperature in Material Removal Processes [J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2007, 56(2): 581 - 604.
- [2] ZHANG Yuefang, YE Linhua, QIU Yanqing. Study on Optical Properties of Sapphire Fiber under High Temperature[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2008, 30: 1001 - 5868.
- [3] WANG Xiaojun, YU Miao, ZHU Yong. Research of the Demodulation Method of the Single Crystal Sapphire High - temperature Sensor[J]. Journal of Optoelectrics Laser. 2012, 23(2): 209 - 214.
- [4] Dils RR. Blackbody Radiation Sensing Optical Fiber Thermometer System[P]. U. S. Patent #4, 750, 139, 1988.
- [5] 周炳琨, 陈家骅, 王志海. 光纤黑体腔温度传感器: 中国, 89200371. 5 [P]. 1989. 10. 18.
- [6] Ye Linhua, Shen Yonghang. Study on the Single Crystal Sapphire High - temperature Optical Fiber Sensor[J]. Journal of Zhejiang University (Natural Science Edition), 1997, 31(5): 700 - 705.
- [7] Wang Hong, Yue Zeting, Huang Mingde. A Study on Sapphire Optical Fiber High - temperature Sensor[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science), 2001, 29(6): 47 - 50.
- [8] Wang Gao, Zhou Hanchang, Xu Zhaoyong. Transient High Temperature Measurement based on Sapphire Fiber Sensor and Calibration Technology [J]. Journal of Optoelectronics Laser, 2005, 16(4): 441 - 443.
- [9] Wei W, Xiaotian S, Ying W. Sapphire Fiber - optic Temperature Sensor Based on Blackbody Radiation Law [J]. Procedia Engineering, 2015, 99: 1179 - 1184.
- [10] Guo Y, Xia W, Hu Z, et al. High - temperature Sensor Instrumentation with a Thin - film - Based Sapphire Fiber [J]. Applied Optics, 2017, 56(8): 2068 - 2073.
- [11] Zhang Jie, Wang Zhongyu, Yang Yongjun. Study of Blackbody Cavity Photoelectric Pyrometer [J]. Acta Metrologica Sinica, 2007, 28: 35 - 38.
- [12] Kim Y C, Masson J F, Booksh K S. Single - Crystal Sapphire - Fiber Optic Sensors Based on Surface Plasmon Resonance Spectroscopy for In Situ Monitoring [J]. Talanta, 2005, 67(5): 908 - 917.
- [13] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity on Optical Fiber Waveguides: Application to Reflection Filter Fabrication [J]. Applied Physics Letters, 1978, 32(10): 647 - 649.
- [14] Grobnc D, Mihailov S J, Smelser C W, et al. Sapphire Fiber Bragg Grating Sensor Made Using Femtosecond Laser Radiation for Ultrahigh Temperature Application [J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2004, 16(11): 2505 - 2507.
- [15] 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.
- [16] 梁居发, 孙洪波. 新型光纤光栅传感器飞秒激光制备及其特性研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [17] Shuo Yang, Daniel Homa, Gary Pickrell, et al. Fiber Bragg Grating Fabricated in Micro - single - crystal Sapphire Fiber [J]. Optics Letters, 2018, 43: 62 - 65.
- [18] Xu Xizhen, He Jun, Liao Changrui, et al. Sapphire Fiber Bragg Gratings Inscribed with a Femtosecond Laser Line - by - line Scanning Technique [J]. Optics Letters, 2018, 43: 4562 - 4565.
- [19] Zhao Yujia, Pan Ling, et al. Multi - wavelength FBG based on Thermal Diffusion and Phase Mask Techniques [J]. Optics Communications, 2018, 427: 257 - 260.
- [20] LIAO C R, WANG D N. Review of Femtosecond Laser Fabricated Fiber Bragg Gratings for High Temperature Sensing [J]. Photonic Sensors, 2013, 3(2): 97 - 101.
- [21] 陈超, 孙洪波. 耐高温光纤光栅的飞秒激光制备及其应用研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [22] 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.
- [23] Zhou Guangli, E Shulin, DENG Wenyan. Development and Application of Optical Fiber Temperature Sensor [J], 2007. DOI: 10. 13921/j. cnki. issn1002 - 5561.
- [24] Yoshino T, Kurosawa K, Itoh K. Fiber - optic Fabry - Perot Interferometer and its Sensor Applications [J]. IEEE J QUANTUM ELECTRON, 1982, 18(10): 1624 - 1633.
- [25] Wang A, Gollapudi S, May R G, et al. Sapphire Optical Fiber - based Interferometer for High Temperature Environmental Applications [J]. Smart Materials and Structures, 1995, 4(2): 147 - 151.
- [26] Yizheng Zhu, Fabin Shen, Zhengyu Huang, et al. Fiber - optic High - temperature Sensing System and its Field Application [J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2007: 675704 - 675712.
- [27] Wang A, Dong B, Lally E, et al. Multiplexed High Temperature Sensing with Sapphire Fiber Air Gap - based Extrinsic Fabry - Perot Interferometers [J]. Optics Letters, 2010, 35(5): 619 - 621.

- [28] Wang A, Shen F, Zhu Y, et al. Sapphire – fiber – based White – light Interferometric Sensor for High – temperature Measurements [J]. *Optics Letters*, 2005, 30(7): 711 – 713.
- [29] Chen P, Pang F, Zhao Z, et al. Fabry – Perot Cavity based on Sapphire – derived Fiber for High Temperature Sensor[C]//*Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering*, 2015: 9634.
- [30] Yao Y, Liang W, Gui X. Sapphire Fabry – Perot High – temperature Sensor Study[C]//*Proceedings of SPIE. The International Society for Optical Engineering*, 2017: 10323.
- [31] Chen Z, Xiong S, Gao S, et al. High – Temperature Sensor Based on Fabry – Perot Interferometer in Microfiber Tip [J]. *Sensors*, 2018, 18(1): 202.
- [32] Chen M, Zhao Y, Xia F. High Sensitivity Temperature Sensor Based on Fiber Air – microbubble Fabry – Perot Interferometer with PDMS – filled Hollow – core Fiber[J]. *Sensors and Actuators A*, 2018, 275: 60 – 66.
- [33] Liu T, Yin J, Jiang J, et al. Differential – pressure – based fiber – optic temperature sensor using Fabry – Perot interferometry[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(6): 1049 – 1052.
- [34] Huger M, Fargeot D, Gault C. High – temperature Measurement of Ultrasonic Wave Velocity in Refractory Materials[J]. *High Temperature – High Pressures*, 2002, 34 (2): 193 – 201.
- [35] 原东方, 李仰军. 蓝宝石超声温度传感器关键技术的研究[D]. 太原: 中北大学, 2018.
- [36] Daw J, Rempe J, Crepeau, John. Update on Ultrasonic Thermometry Development at Idaho National Laboratory[J]. *NPIC – HMIT*, 2012, 24(6): 607 – 9.
- [37] Liang H, Yang F, Yang L, et al. Research and Implementation of a 1800° C Sapphire Ultrasonic Thermometer[J]. *Journal of Sensors*, 2017: 9710763: 1 – 9710763: 7.
- [38] Malyarenko E, Heyman J, Chen – Mayer H. WE – D – L100J – 07: High – Resolution Digital Ultrasonic Thermometers[J]. *MEDICAL PHYSICS*. 2007, 34(6): 2597.
- [39] 施超, 胡斌, 梁晓瑜. 固体结构内部温度的超声测量[J]. *中国计量大学学报*, 2016, 27(4): 355 – 365.
- [40] Tian M, Wang G, Liu Z. A Preliminary Study of Pulse – echo Ultrasonic Thermometry[J]. *Technical Acoustics*, 2017, 36(1).

收稿日期: 2018 – 10 – 22

基金项目: 国家重大基础研究项目(6132410201); 山西省自然科学基金(201701D121061)

作者简介

王楠楠(1983 –), 男, 汉族, 河北石家庄人, 工程师, 硕士, 2012 年毕业于中北大学光学工程专业, 之后工作于中国航发贵阳发动机设计研究所测试计量中心工作, 主要从事各型号的发动机性能测试测量、发动机性能各参数测量试验, 并负责相关总温总压探针设计。



王高(1973 –), 山西侯马人, 教授, 硕士生导师, 主要研究航空、航天、兵器、船舶等领域温度、速度、压力等物理信息的探测与处理。主持国家自然科学基金、国防“973”基础重大项目专题、国家重大专项、装发预研、总装基础预研, 山西省留学基金和多项横向科研项目。获省部级科技进步奖 3 项, 主编教材 3 部, 获国家发明专利 15 项, 在 *Optics Express* 等杂志发表 SCI 文章 33 篇。

