

文章编号: 1672-8785(2022)08-0017-09

光纤布拉格光栅热式流量 传感技术研究

贾振安^{1,2,3,4} 任 杰^{1,2,3,4*} 党 硕^{1,2,3,4} 高 宏^{1,2,3,4} 白 燕^{1,2,3,4}

(1. 西安石油大学理学院, 陕西 西安 710065;

2. 陕西省油气资源光纤探测工程技术研究中心, 陕西 西安 710065;

3. 陕西省油气井测控技术重点实验室, 陕西 西安 710065;

4. CNPC 测井重点实验室——油藏光纤动态监测研究室, 陕西 西安 710065)

摘 要: 光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)热式流量传感技术具有测量阈值低、灵敏度高等优点, 是近年来流量测量领域的研究热点。概述了 FBG 热式流量传感原理, 总结了当前该技术研究的重点和难点问题(主要分为传感器加热、结构设计、温度补偿和封装增敏四个方面), 旨在发现问题、展望未来。从近年来的典型研究成果入手, 分析了电加热、光加热两种传感器加热方式和热线式传感结构。温度补偿和封装增敏部分则作为专题来研究, 其中温度补偿旨在解决传感器加热换热与环境温度交叉敏感问题。最后归纳分析了该技术在大流量时的低灵敏度特性, 并讨论了提升传感器灵敏度未来可能的研究方向和相关方法。

关键词: 光纤布拉格光栅; 流量测量; 热式流量传感器; 灵敏度

中图分类号: TN253 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.08.004

Research on Fiber Bragg Grating Thermal Flow Sensing Technology

JIA Zhen-an^{1,2,3,4}, REN Jie^{1,2,3,4*}, DANG Shuo^{1,2,3,4}, GAO Hong^{1,2,3,4}, BAI Yan^{1,2,3,4}

(1. School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China;

2. Shaanxi Engineering Research Center of Oil and Gas Resource Optical Fiber Detection, Xi'an 710065, China;

3. Shaanxi Key Laboratory of Measurement and Control Technology for Oil and Gas Wells, Xi'an 710065, China;

4. Research Laboratory for Optical Fiber Dynamic Detection of Oil Reservoirs,
Key Laboratory of CNPC, Xi'an 710065, China)

Abstract: Fiber Bragg Grating (FBG) thermal flow sensing technology has the advantages of low measurement threshold and high sensitivity, and has become a research hotspot in the field of flow measurement in re-

收稿日期: 2022-04-10

基金项目: 陕西省教育厅重点实验室科研计划项目(18JS093); CNPC 测井重点实验室基金项目(20216328)

作者简介: 贾振安(1959-), 男, 陕西咸阳人, 教授, 主要从事纤维光学、光纤传感、光纤通信和光电子学等领域的研究。

*通讯作者: E-mail: 484966872@qq.com

cent years. In this paper, the principle of FBG thermal flow sensing is summarized, and the key and difficult problems in the current sensing technology are summarized (including sensor heating, structure design, temperature compensation and package sensitization), aiming at finding problems and looking into the future. Based on the typical research results in recent years, two kinds of heating methods and hot-wire sensing structure of electric heating and optical heating are analyzed. Temperature compensation and package sensitization are studied as special topics. Among them, temperature compensation aims to solve the cross-sensitivity problem of heat transfer and ambient temperature. Finally, the low sensitivity characteristics of the sensor technology under high flow are summarized and analyzed, and the possible research directions and related methods for improving the sensor sensitivity in the future are discussed.

Key words: fiber Bragg grating; flow measurement; thermal flow sensor; sensitivity

0 引言

在生产、生活及科学研究中, 流量测量仪器类型众多。传统热式质量流量计是一类利用传感器与流体间换热热量和待测流体流量存在的准确计算关系来实现测量的流量计^[1]。理论上只要发生微弱热量交换就可实现有效测量, 所以它天然具有测量启动值较低的特性。光纤传感技术是传感领域的一门新兴技术, 其中尤以 FBG 传感最为突出。FBG 是制造在光纤纤芯上的短周期光纤光栅, 会反射通过纤芯的宽带光源中的特定波长。该中心反射波长会随外界温度和应力的变化而漂移, 因此通过对 FBG 进行波长解调可以实现对外界物理量的传感。由于 FBG 拥有抗电磁干扰、体积小、灵敏度高优点^[2], 基于 FBG 的热式流量传感技术具有低测量阈值和高灵敏度的特性。

国内外基于 FBG 的热式流量传感技术研究涵盖了水和空气两类流体在微流量至大流量较宽范围内的测量。大多数研究集中在 FBG 级联光纤微结构的热线式流量计 (Hot Wire Flow meter, HWF) 上, 也有专注解决 nL 量级流量测量问题的微流控式传感器相关研究。此外, 光学加热是研究的前沿。当前这种传感技术仍面临以下几个问题: (1) 一些研究并未讨论传感器加热换热与环境温度交叉敏感问题; (2) 传感器封装技术研究较少; (3) 研究大多相对独立, 较多集中在新结构、新材料的研发上, 缺少对该技术的全面性分析。

已有一些基于 FBG 传感的流量测量相关

研究成果的报道^[3-4], 但这些描述通常包含了压差式、应变式等各类方法, 而缺少针对热式测量的集中研究。本文旨在专门研究 FBG 热式流量传感技术, 主要分析了 FBG 热式流量传感技术中的重难点问题。首先, 对该技术的基本原理进行了概括; 然后以问题为核心分析了传感器加热和传感器结构设计两大部分, 并主要讨论了电加热、光加热两种加热方式和热线式结构各自的优缺点以及存在的问题; 接着深入讨论了传感器加热换热与环境温度交叉敏感问题的解决方法和传感器封装技术; 最后对近年来典型研究成果的数据进行了归纳, 分析了流量传感特性并总结了传感器灵敏度提升的相关方法。通过对 FBG 热式流量传感技术的研究分析, 理清了该技术中的关键问题, 为后续研究指明了方向。

1 FBG 热式流量传感原理

FBG 的中心反射波长 λ_b 取决于光纤栅距 Λ 和纤芯有效折射率 n_{eff} :

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

式中, Λ 和 n_{eff} 具有对温度和应变同时敏感的属性^[5]。FBG 热式流量传感器不管横向还是径向置于管道中, 其沿流体方向的投影面积都非常小。这意味着流体的机械冲击力极小, 即应变作用因素可以忽略不计, λ_b 仅与温度有关。

FBG 热式流量传感原理如图 1 所示: 主动加热传感器使其温度升高, 初始 λ_b 会增大至 λ'_b , 流体流过传感器带走热量使 FBG 区域降温, λ'_b 会减小至 λ''_b 。根据传热学基本原理, 流

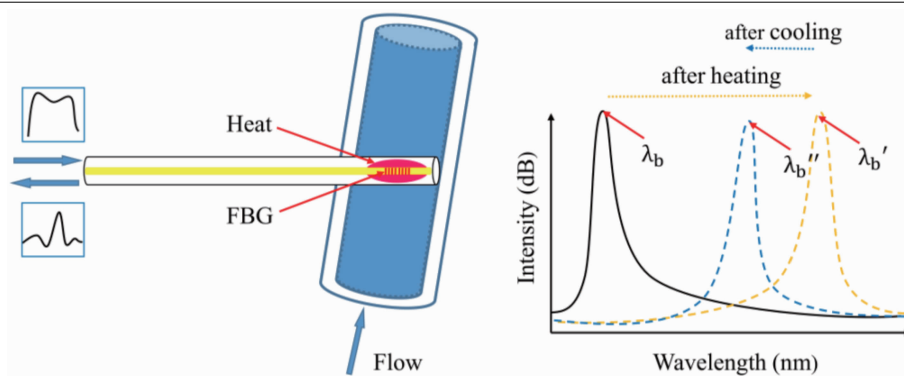


图 1 FBG 热式流量传感原理图

体与传感器发生的热量交换方式主要是热对流^[6], 满足:

$$\Phi = hA(T - T_0) \quad (2)$$

式中, Φ 为换热量, h 为对流换热系数, A 为传感器换热面积, $T - T_0$ 为传感器表面温度与流体温度的温差。当传感器材料、尺寸和流体物性确定时, Φ 与 $T - T_0$ 唯一对应。流过的流体流量大小不同, 则 Φ 不同, 传感器表面温度 T 不同, λ_b 漂移量也不同。研究 λ_b 漂移量与流量间的一一对应关系即可实现流量测量。

2 FBG 热式流量传感技术的重难点问题分析

2.1 传感器加热

传感器加热方法分为电加热和光加热两种。石化行业存在易燃易爆的安全隐患, 因此电加热不适用。由于光纤具有不受电磁干扰等优点, 通过光源激励实现光纤自发热是研究的前沿。但光纤中光功率沿程衰减也是不可忽略的。对于水、空气等常规流体测量中电加热即可满足测量要求的情况, 电加热依然具有重要研究意义。此外, 研究结果表明, 传感器温度越高, 灵敏度越高^[7-9]。

2.1.1 电加热

电加热是利用电阻的热效应来实现的, 最简单的是电阻丝直接加热。此外, 还有涂敷金属薄膜材料加热、非金属电加热等方法。电加热需要考虑材料制备技术的复杂程度、材料性质等因素。电阻直接加热的优点是成本低、制作简单。2012 年, Sohn K R 等人采用镍铬线

圈外围缠绕来加热传感器。实验中传感器与流体温差约为 300°C ^[10], 证实了电阻丝加热能提供较高数值的温度上限。1998 年, Limberger H G 等人提出 Pt 涂层电加热 FBG 的方法^[11]。这类采用直流溅射等制备技术在光纤表面上进行金属薄膜涂敷的制作方法的优点是可以制成一体化式传感器。在同等输入功率下, 电热敏性能好的材料能将更多的电能转换为热量以提高传感器温度, 进而提高传感系统的灵敏度并减小电能损耗。2001 年, Sundeen J E 等人在硅基金属陶瓷电阻薄膜的热传感特性研究中发现, Ni-ZrO₂ 金属陶瓷薄膜的热敏性优于 Pt 和 Ti 薄膜^[12]。这启示了电加热的一个重要方向——研究开发高电热敏系数的材料。

2.1.2 光加热

在掺铒光纤放大器等器件的使用过程中发现存在温度较高的现象, 其原因如下: 掺杂光纤通入高功率光源时, 掺杂离子吸收能量从基态跃迁至激发态, 随后激发态离子将能量传递给晶体点阵引起热振动^[13-14]。光加热就是利用这种热效应来使传感器温度升高的。与电加热一样, 采用光热敏系数更高的掺杂光纤能提高传感器的灵敏度。可掺杂的元素主要是钒、钴等过渡金属元素和铒、镱等稀土元素^[15]。图 2 所示分别为典型的掺钴、掺钒、掺镱和铒镱共掺四种光纤的吸收光谱。尽管吸收系数还受泵浦光功率和掺杂浓度等因素的影响, 但对比图 2 可以看出, 掺钴光纤的吸收系数远远高于稀土元素掺杂光纤, 并在 $650 \sim 1550 \text{ nm}$ 甚至更

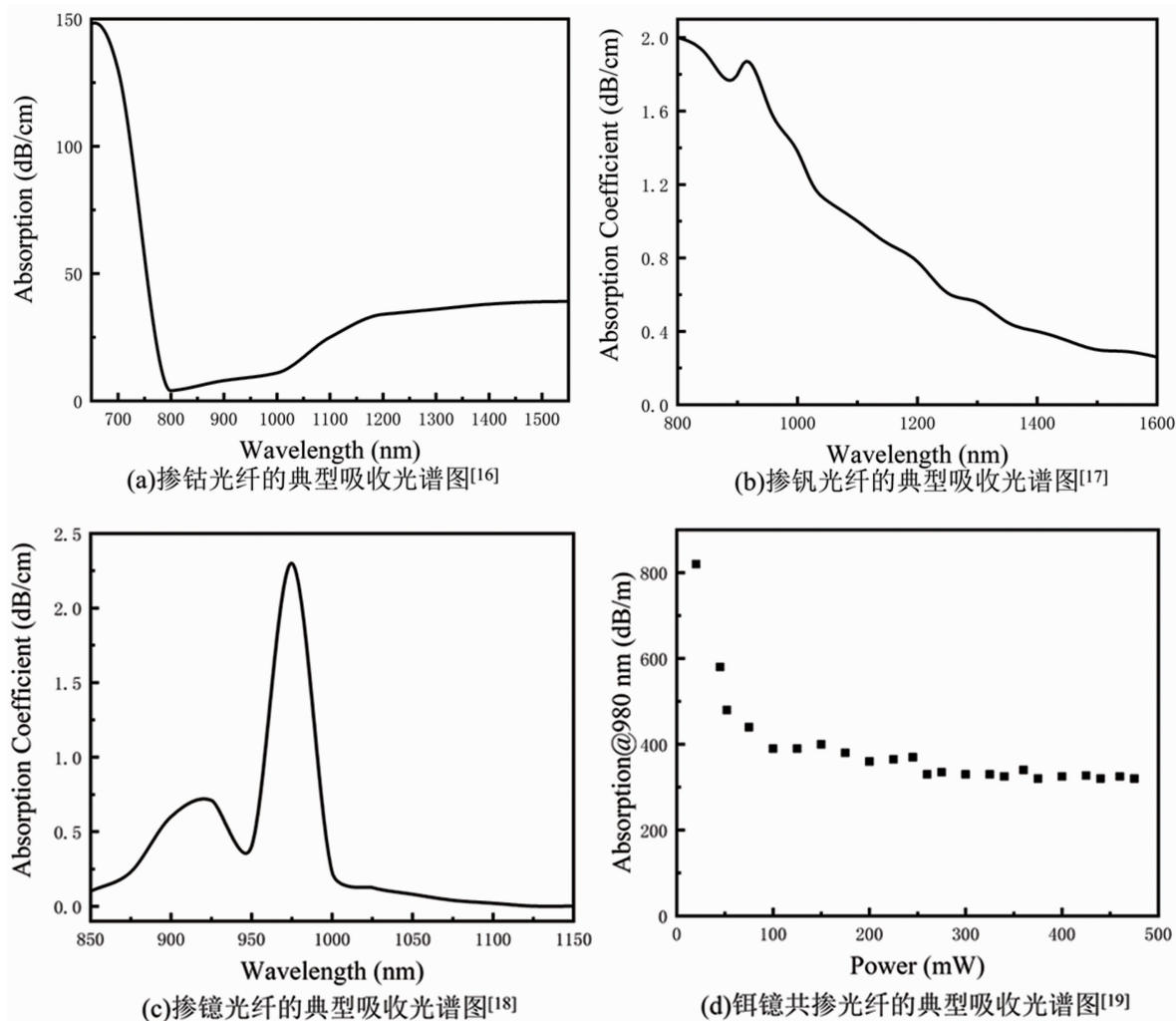


图 2 四种掺杂光纤的典型吸收光谱图

宽的波段内均具有较好的吸收效果，因此拥有更广的适用范围。

银在 420 nm 波长附近具有最大吸收率^[20]，镀银被证实具有较高的光热转换效率。将纤芯模式的光耦合至包层模式并在包层处镀银以实现光纤自发热，是第二类研究较多的光致生热方法^[21-26]。为提高传感器灵敏度，应设计增强银膜的吸光能力。典型的辅助增强手段有包层磨砂和包层刻蚀等。2019 年，Chen X 等人提出镀银联合氢氟酸刻蚀包层的方法^[21]，利用了刻蚀表面易发生强漫反射的原理。同年，Yang J 等人提出镀银联合包层磨砂的方法。在同等 264 mW 功率的 1480 nm 泵浦光下，磨砂与未磨砂 FBG 的最高灵敏度分别为 738.95 pm/(m·s⁻¹) 和 398.06 pm/(m·s⁻¹)^[22]。

实验数据表明，包层磨砂有效提高了灵敏度。

2.2 结构设计

FBG 热式流量传感器结构设计是在参考国标 GB/T 20727-2006^[27] 和相关检定指南^[28] 的基础上进行的。当前，HWF 因体型较小、性能稳定而成为研究最多的一种结构。

HWF 一般是内部封装有 FBG 和加热部件的一体式细长柱状结构，故称为热线式。图 3 (a)所示为 HWF 的一类典型结构，其电阻线圈缠绕刻有 FBG 的单模光纤并通入电流加热。这类结构的特征是仅由 FBG 实现传感。HWF 的另一类结构特征为 FBG 级联光纤微结构，典型结构如图 3(b)所示。该结构为腰形放大光纤锥，由两段光纤重叠熔接而成。纤芯直径沿程急剧增大和急剧收缩，导致光传播至最大

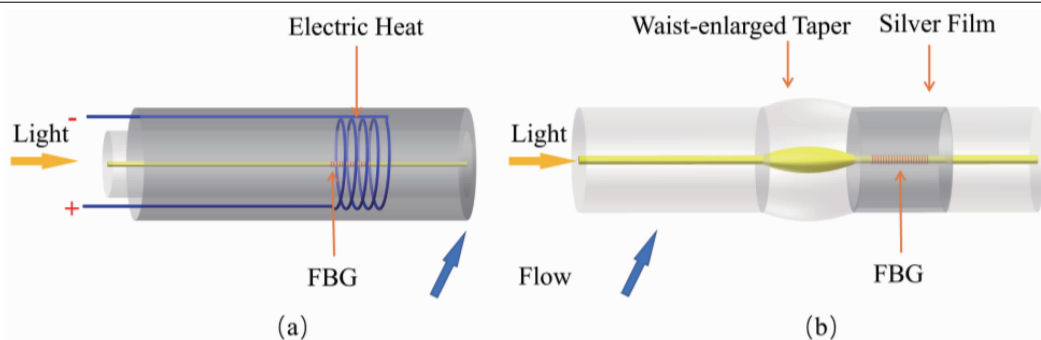


图 3 典型 HWF 结构示意图

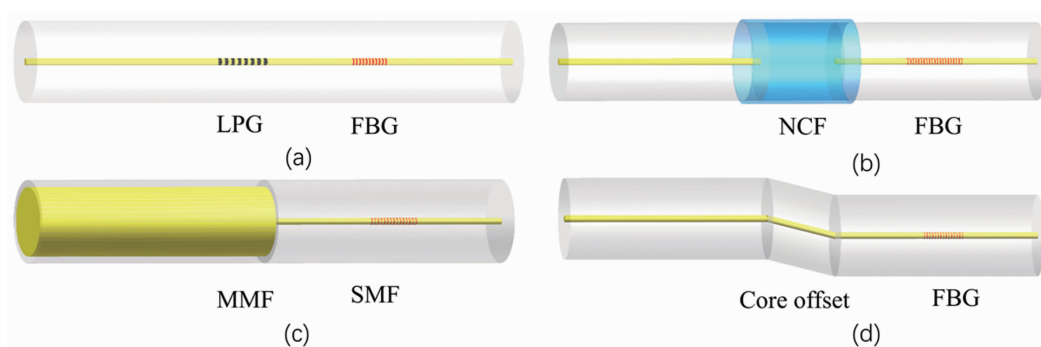


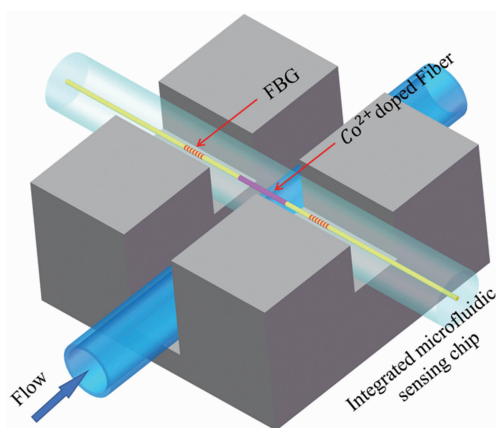
图 4 四种光纤微结构的典型示意图

截面后无法响应纤芯截面收缩, 随后逸出至下游光纤包层中。

除腰形光纤放大锥^[21-22]外, 目前研究所涉及的微结构还有长周期光栅-布拉格光纤光栅级联(LPG-FBG)^[23]、无芯光纤(NCF)^[24]、多模光纤-单模光纤级联(MMF-SMF)^[29]、芯偏置^[30]等(见图 4)。光纤微结构的共同目的是将纤芯模式的光耦合至包层模式, 并采用镀银等方法将光功率转换为热量以加热 FBG。其中, 微结构的光耦合系数是关键参数。Wang X 等人^[24]的研究表明, 耦合微结构效率低, 不仅光功率损耗大, 而且热效应的预期并没有那么高。在 2012 年 Dong X 等人的研究中, 芯偏置所导致的传输损耗约为 5 dB, 约 70% 的激光耦合到 FBG 的包层中, 芯偏置的耦合效率高于 MMF-SMF^[30]。当前的 HWF 结构研究应集中在光纤微结构的创新设计上, 即设计出耦合系数更高的微结构, 以期提高传感灵敏度。

微电子机械系统(Micro-Electro-Mechanical System, MEMS)是一种高集成度、精密加工的微型化片状系统装置。此外, 由于毛细管尺寸

微小, 现在已有一些研究将 MEMS 与毛细管联合用于微流量测量。图 5 为典型 FBG 级联法布里-珀罗干涉(FPI)的微流控式传感器示意图。与毛细管交叉部位光纤掺钻为传感提供热源, 流体从毛细管中流过并带走热量, 引起 FP 腔共振波长偏移, 从而实现流量测量。目前的一些研究能将检测流速做到很小的尺度。2014 年, Liu Z 等人提出一种由玻璃毛细管包覆的一体式微流量计, 其最小检测流速为 16 nL/s^[31]。

图 5 基于 FPI 的微流控式流量计示意图^[8]

2.3 温度补偿

鉴于 FBG 对温度变化高度敏感,在 FBG 热式流量传感过程中,当传感器所处位置的环境温度随空间、时间发生变化时,环境温度的影响会带来较大的误差乃至错误,因此需要采取温度补偿的方法来消除该影响。温度补偿有两种常见方法:一是参考光栅法;二是温度自校准。

参考光栅法将用额外 FBG 单独测量的环境温度值作为参考温度 T_1 ,而传感器测量环境温度和加热换热后的温度为 T_2 ,则实际用于流量计算的温度 T 为 $T_2 - T_1$ 。但该方法理论上要求 T_1 和 T_2 测量点处的环境温度完全相同,这在实际测量中很难实现。2021 年,张天熙设计了一种内外侧分别粘贴 FBG 的套管分离装置^[32]。水流流过套管内外侧,内侧 FBG₁ 测量 T_1 ,外侧 FBG₂ 测量 T_2 。该实验进行的是较大流量的水流测量,且 FBG 粘贴位置较为合理,故宏观上实现了 FBG₁ 和 FBG₂ 所处环境温度近乎相同,成功去除了环境温度的影响。

温度自校准则是仅通过结构的设计就使环境温度和加热换热后的温度相互关联,实现实时自动的温度补偿。2006 年, Jewart C 等人创新使用了电源开闭的方法。电源关闭时, FBG 仅用于测量流体环境温度;电源开通时, FBG 同时测量传感器换热和环境温度^[29]。2016 年, Zhou B 等人设计了一种双 FBG 组成的非本征法布里-珀罗干涉(EFPI)的热式流量传感器^[9]。该结构中的 FBG 仅受周围环境流体温度的影响,而 EFPI 腔同时受环境温度和热源的影响。经过仿真模拟和实验发现, FBG 和 EFPI 结构对流体温度的灵敏度相同,故 FBG 消除了环境温度的影响,为测量实现了温度自校准。

2.4 封装增敏

裸石英光纤材质极脆,在工况下极易受到机械冲击而损毁,并且其本身传感灵敏度也不高。光纤及 FBG 封装正是在保证光纤不被物理破坏的情况下,最大程度地将外界待测物理

量传导至光纤上,扩大单位外界物理量变化对 FBG 中心波长的作用,从而实现灵敏度增强。典型的封装方法如下:采用热传导系数、热膨胀系数较大的介质填充光纤与传感器壁面的间隙。这些介质能起到间接扩大光纤应变的作用, FBG 也就能获得更大的形变,从而实现增敏。2021 年,贾振安等人在基于 FBG 的热式流量传感器的封装研究中将 FBG 粘贴在一片黄铜片上,并将后者与加热陶瓷固接。与将 FBG 直接粘贴在加热陶瓷上相比,黄铜片能起到增敏的作用^[33]。同年,张天熙采用了石英玻璃管和单端粘接的封装方法。单端粘接利于光栅自由伸长,且作为热量良导体的玻璃管同时为 FBG 提供了一个稳定的测试环境。结果表明,封装后的传感器灵敏度较未封装时提高了一倍^[32]。这证实了合理封装是提高传感器灵敏度的重要途径。

3 归纳与总结

图 6 所示为近年来 FBG 热式流量传感器在气体(空气)、微流量液体(水)、大流量液体(水)测量方面的典型数据归纳。三类数据的共同特征是中心波长漂移-流速曲线的斜率均随流速的增大而减小。这表明 FBG 热式流量传感在大流量下具有低灵敏度的特性。流量大时流体已经充分地将热量带走,继续增大流量并不会显著降低传感器的温度,只有继续提高输入功率才能弥补这个缺陷。Li Y 等人的三组数据对比(见图 6(b))证实了增大输入功率可以提高大流速时的灵敏度这一结论。采用固定输入功率存在以下问题:低流量时存在功率投入过剩的可能,而高流量时又有功率提升的需求。因此,应研究可调谐激光源或可调节电源,使输入功率随流速实时提升。

综上所述,为提升 FBG 热式流量传感系统的灵敏度,可以从以下几点展开研究:

(1)增大输入功率。增大输入电流(光源功率),或者采用输入功率随流量增大的可调谐激光源(可调节电源)。

(2)提升电热(光热)转换效率。采用更高

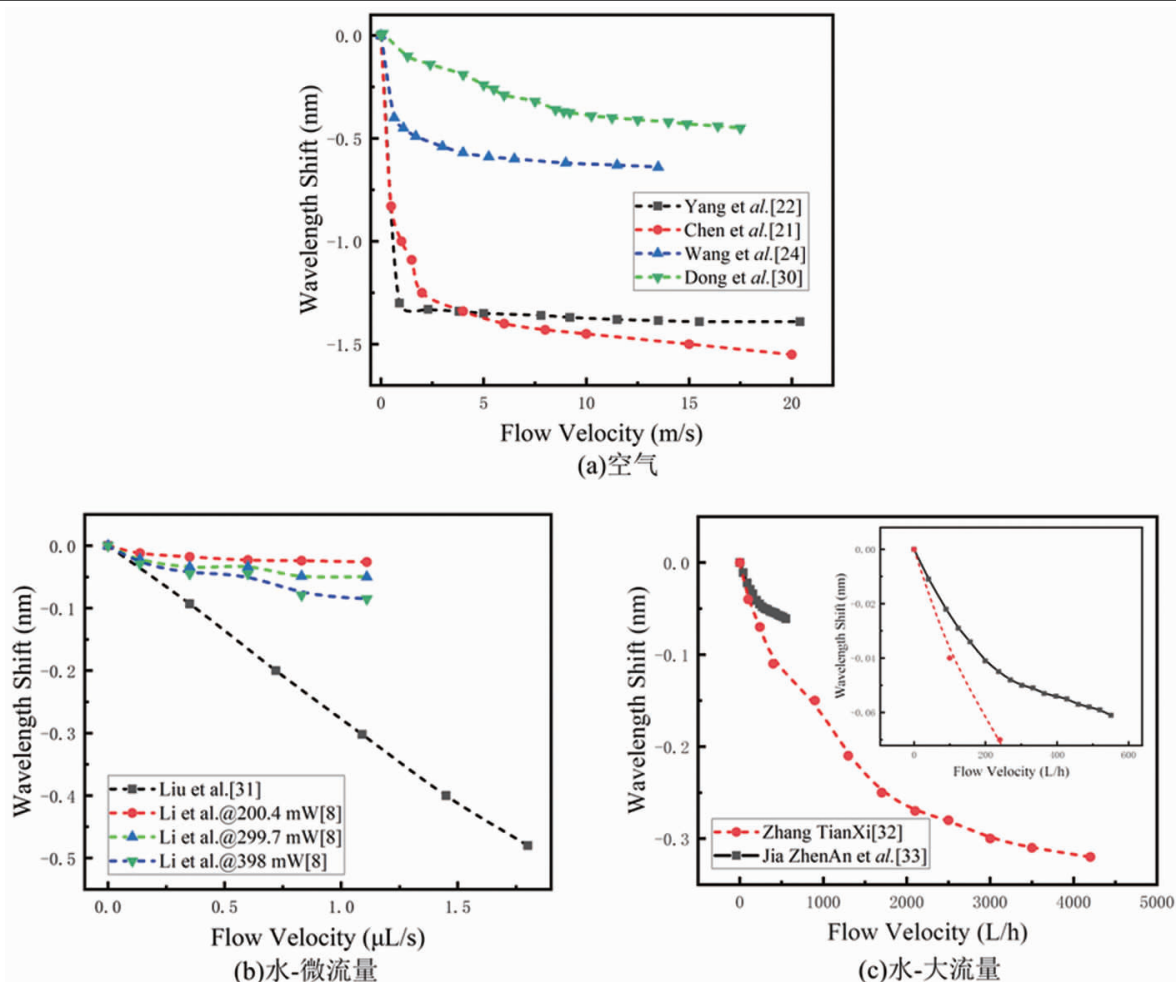


图 6 三类流体流量测量数据

系数的电(光)热敏材料、高衰减系数的掺杂光纤以及更高耦合系数的光纤微结构。

(3)封装增敏。通过用热膨胀系数较高的材料进行封装等措施,增强每单位温度增长对FBG中心波长漂移的作用效果。

4 结束语

本文专门研究了FBG热式流量传感技术,在总结研究现状和现存问题的基础上,对传感器加热、结构设计、温度补偿和封装增敏四个部分中的重难点及技术细节进行了讨论分析,并给出了传感器灵敏度提升方法的学术见解,为后续的相关研究提供了参考和方向。

作为一个新兴方向,FBG热式流量传感技术的现有研究较少且主要处于实验室阶段。同时,光学流量计成本高昂的现状亟需改善。该技术具备灵敏度高和微小流量测量的优势,

有望在低渗透油田、生物医学等领域获得广泛应用。随着新材料的研发和集成微光机电系统技术的发展,未来FBG热式流量计将朝着微型化、低功耗和多通道信号处理的方向发展。

参考文献

- [1] 苏彦勋, 李金海. 流量计量 [M]. 北京: 中国计量出版社, 1991.
- [2] Kim J H, Lee Y G, Park Y, et al. Temperature-compensated strain measurement of full-scale small aircraft wing structure using low-cost FBG interrogator [C]. SPIE, 2013, **8692**: 86922P.
- [3] Mescia L, Prudeniano F. Advances on optical fiber sensors [J]. Fibers, 2013, **2**(1): 1-23.
- [4] Gupta H, Arumuru V, Jha R. Industrial fluid flow measurement using optical fiber sensors: A

- review [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, **21** (6): 7130–7144.
- [5] Zhao M, Wang S, Luo B, et al. Theoretical study on the cross sensitivity of fiber Bragg grating sensor affected by temperature and transverse pressure [C]. Chengdu: IEEE 2010 Symposium on Photonics and Optoelectronics, 2010.
- [6] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第3版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [7] Gao S, Zhang A P, Tam H Y, et al. All-optical fiber anemometer based on laser heated fiber Bragg gratings [J]. *Optics express*, 2011, **19** (11): 10124–10130.
- [8] Li Y, Yan G, Zhang L, et al. Microfluidic flowmeter based on micro “hot-wire” sandwiched Fabry-Perot interferometer [J]. *Optics Express*, 2015, **23**(7): 9483–9493.
- [9] Zhou B, Jiang H, Lu C, et al. Hot cavity optical fiber Fabry-Perot interferometer as a flow sensor with temperature self-calibrated [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2016, **34** (21): 5044–5048.
- [10] Sohn K R. Fiber Bragg grating-tuned feedback laser flow sensor system [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2012, **179**: 1–4.
- [11] Limberger H G, Ky N H, Costantini D M, et al. Efficient miniature fiber-optic tunable filter based on intracore Bragg grating and electrically resistive coating [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, **10**(3): 361–363.
- [12] Sundeen J E, Buchanan R C. Thermal sensor properties of cermet resistor films on silicon substrates [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2001, **90**(1–2): 118–124.
- [13] Davis M K, Digonnet M J F, Pantell R H. Thermal effects in doped fibers [J]. *Journal of lightwave technology*, 1998, **16**(6): 1013.
- [14] Xu Y Z, Tam H Y, Liu S Y, et al. Pump-induced thermal effects in Er-Yb fiber grating DBR lasers [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1998, **10**(9): 1253–1255.
- [15] 李莹. 基于掺铈光纤的光纤光栅器件应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
- [16] Davis M K, Digonnet M J F. Measurements of thermal effects in fibers doped with cobalt and vanadium [J]. *Journal of lightwave technology*, 2000, **18**(2): 161–165.
- [17] Matjasec Z, Campelj S, Donlagic D. All-optical, thermo-optical path length modulation based on the vanadium-doped fibers [J]. *Optics express*, 2013, **21**(10): 11794–11807.
- [18] 傅永军. 稀土掺杂光纤的研制 [D]. 北京: 北京交通大学, 2005.
- [19] Qi L, Jin L, Guan B O. Optically heated fiber Bragg grating in active fibers for low temperature sensing application [C]. *SPIE*, 2013, **8924**: 892404.
- [20] 张万忠, 乔学亮, 陈建国. 纳米银的合成及其 UV-Vis 光谱特性 [J]. *稀有金属材料与工程*, 2007, **36**(3): 64–70.
- [21] Chen X, Dong X, Sun Y, et al. Hot-wire Anemometer Based on Etched Fiber Bragg Grating Coated with Silver Film [C]. Huangshan: 18th International Conference on Optical Communications and Networks (ICOON), 2019.
- [22] Yang J, Chen X, Dong X. Hot-wire anemometer based on frosted fiber Bragg grating coated with silver film [C]. Hefei: 2019 International Conference on Optoelectronic Science and Materials, 2019.
- [23] Caldas P, Jorge P A S, Rego G, et al. Fiber optic hot-wire flowmeter based on a metallic coated hybrid long period grating/fiber Bragg grating structure [J]. *Applied Optics*, 2011, **50**(17): 2738–2743.
- [24] Wang X, Dong X, Zhou Y, et al. Hot-wire anemometer based on silver-coated fiber Bragg grating assisted by no-core fiber [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2013, **25**(24): 2458–2461.
- [25] Zhu W J, Cheng J, Huang Z W, et al. Simulation of the Gas Flow Sensing Probe Based on Silver-Coated Fiber Bragg Grating [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, **321**: 286–292.
- [26] Wang X, Dong X, Zhou Y, et al. Optical fiber anemometer using silver-coated fiber Bragg grating and bitaper [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*

- cal, 2014, **214**: 230–233.
- [27] 中国国家标准化管理委员会. 中国标准书号: GB/T 20727–2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [28] 全国流量容量计量技术委员会秘书处. 热式气体质量流量计、旋进漩涡流量计、热水水表、水表检定装置 [M]. 北京: 中国质检出版社, 2018.
- [29] Jewart C, McMillen B, Cho S K, et al. X-probe flow sensor using self-powered active fiber Bragg gratings [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, **127**(1): 63–68.
- [30] Dong X, Cheng J, Zhou Y, et al. Fiber-optic thermal anemometer based on metallic coated fiber Bragg grating [C]. Beijing: 22nd International Conference on Optical Fiber Sensors, 2012.
- [31] Liu Z, Zhang A P, Tam H Y. Microfluidic device integrated with FBG in Co^{2+} -doped fiber to measure flow rate with nL/s sensitivity [C]. Santander: 23rd International Conference on Optical Fiber Sensors, 2014.
- [32] 张天熙. 光纤热线式低启动流量传感技术研究 [D]. 西安: 西北大学, 2021.
- [33] 贾振安, 杨凯庆, 赵显锋, 等. 一种新型 FBG 热式液体流量传感器 [J]. *光子学报*, 2021, **50**(2): 45–51.