

金涂覆光纤传输损耗特性及修正方法研究

马 骢, 陈青松, 毛国培, 李金洋, 史 青, 于 勇
(北京遥测技术研究所 北京 100076)

摘要: 普通的丙烯酸酯涂覆光纤的工作温度通常为 -65°C ~ 80°C , 常见的耐高温聚酰亚胺涂覆光纤工作温度最高为 300°C 。在更高温度工况下, 通常采用金属涂覆的特种光纤进行信号传输, 如铝涂覆、铜涂覆、金涂覆光纤。本文通过测试金涂覆光纤在不同环境温度下的传输损耗, 发现在环境温度变化时, 金涂覆光纤的传输损耗变化较大。针对基于黑体辐射原理的光纤温度传感器, 传输损耗变化引入的误差可超过 60°C 。在此基础上, 本文基于不同波段的光在金涂覆光纤中的传输特性, 提出了一种双波段修正方法, 能够对环境温度引起的光纤传输损耗进行修正。修正之后, 传输损耗引起的误差小于 15°C 。

关键词: 金涂覆光纤; 传输损耗; 环境温度; 黑体辐射

中图分类号: TN818

文献标志码: A

文章编号: 2095-1000(2025)03-0070-06

DOI: 10.12347/j.ycyk.20241210003

CSTR: 32406.14.ycyk.20241210003

引用格式: 马骢, 陈青松, 毛国培, 等. 金涂覆光纤传输损耗特性及修正方法研究[J]. 遥测遥控, 2025, 46(3): 70-75.

Research on Transmission Loss Characteristics and Correction Methods of Gold-Coated Optical Fibers

MA Cong, CHEN Qingsong, MAO Guopei, LI Jinyang, SHI Qing, YU Yong
(Beijing Research Institute of Telemetry, Beijing 100076, China)

Abstract: The operating temperature of common acrylic-coated optical fibers is usually -65°C to 80°C , and the working temperature of common high-temperature polyimide-coated optical fibers is up to 300°C . At higher temperatures, metal-coated special optical fibers, such as aluminum-coated, copper-coated, and gold-coated fibers, are usually used for signal transmission. In this paper, the transmission loss of gold-coated fibers is tested at different ambient temperatures, and it is found that the transmission loss of gold-coated fibers varies greatly when the ambient temperature changes. For fiber optic temperature sensors based on the blackbody radiation principle, the error introduced by the variation in transmission loss can exceed 60°C . On this basis, based on the transmission characteristics of light in different bands in gold-coated fibers, a dual-band correction method is proposed, which can correct the transmission loss of optical fibers caused by ambient temperature. After the correction, the error caused by the transmission loss is less than 15°C .

Keywords: Gold-coated fiber; Optical loss; Temperature; Blackbody radiation

Citation: MA Cong, CHEN Qingsong, MAO Guopei, et al. Research on Transmission Loss Characteristics and Correction Methods of Gold-Coated Optical Fibers[J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2025, 46(3): 70-75.

0 引言

作为现代通信领域的基础, 光纤已广泛应用于长距离信息传输。在此基础上, 研究人员正在探索光纤在长距离感知领域的应用。借助 OFDR (光频域反射仪)^[1]、BOTDR (布里渊光时域反射仪)^[2]、BOTDA (布里渊光时域分析)^[3]、FBG (光纤布拉格

光栅)^[4]等原理, 已实现海底光缆、周界安防、航天航空、铁路运输、电力输送等众多场景的应用。

光纤传感器因其体积小、灵敏度高和抗电磁干扰能力强等特点, 在温度^[5]、应变^[6]、位移^[7]、加速度^[8]和电磁场^[9]等物理量的测量中广泛应用。其中, 光纤温度传感器的研究始于 20 世纪 70 年代^[10]。相比传统电阻温度传感器, 光纤温度传感器具有

电绝缘性和耐腐蚀性的优点,已逐渐替代传统温度传感器,在电力系统^[11]和矿业开采^[12]等领域得到广泛应用。

普通通信光纤采用丙烯酸酯(ACrylate)^[13]作为涂覆层,对石英光纤进行保护,其工作温度范围仅为 $-60\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 85\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。在更高温度环境下,该涂覆层会迅速热氧老化,甚至燃烧碳化,从而丧失对光纤的保护作用。随着应用领域拓展,高温特种工况应用需求日益增加,为了得到在高温下正常工作的特种光纤,通常将耐高温金属材料紧覆在石英光纤上,得到金属涂覆光纤。常见的金属涂覆光纤包括铝涂覆^[14]、铜涂覆、金涂覆光纤。其中金涂覆光纤采用高纯金作为涂覆层,尽管价格较为昂贵,由于其具有柔韧性、密封性、耐高温性强^[15]等优点,仍是目前综合性能最佳的金属涂覆光纤之一。

目前较为常见的测温原理为光谱吸收原理、法布里-珀罗干涉原理与黑体辐射原理^[16]。其中,黑体辐射测温原理是当前高温区间最为成熟的测温手段之一。黑体辐射原理是通过收集物体向外界发射的辐射光信号,根据辐射光信号强弱与温度的对应关系,进而得到待测物体温度值的方法。黑体辐射原理通常采用强度法进行解调,即通过光电二极管感知光强的变化得到温度值。这种解调方式对光纤传输损耗的变化极为敏感。然而,金涂覆光纤虽然解决了光纤耐温性不足的问题,但同时也增大了涂覆层与包层之间的热膨胀系数差异,较大的热膨胀系数差异可能引入巨大的内部应力,从而导致光纤传输损耗的变化。本文针对这一现象,通过研究不同温度下金涂覆光纤的传输损耗特性,提出了一种双波段修正方法,可以有效补偿不同温度环境下的传输损耗,从而减小基于黑体辐射原理的金涂覆光纤温度传感器的测温误差。

1 实验原理

1.1 黑体辐射

由辐射原理可知,一切有温度的物体都会向外界连续发射热辐射,并以电磁波的形式表现出来。根据普朗克公式,单位时间内,单位面积黑体向半球空间所有方向发射的某特定波长的单位波长间隔的辐射能量(单色辐射度)为:

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

其中, λ 为物体的辐射波长, T 为物体绝对温度, $C_1=3.741\ 8\times 10^{-16}\ \text{W}\cdot\text{m}^2$ 、 $C_2=1.438\ 8\times 10^{-2}\ \text{m}\cdot\text{K}$ 分别为第一、第二辐射常数;黑体辐射光谱随温度的变化规律^[17],如图1所示。黑体辐射是目标结构自发辐射的广谱光信号,随工作温度升高而增大,且峰值波长向短波方向漂移。

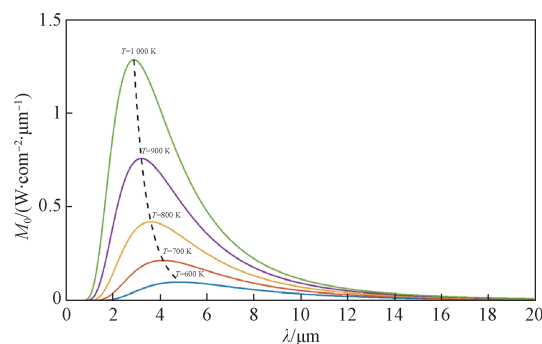


图1 黑体辐射光谱变化规律

Fig. 1 Schematic diagram of blackbody radiation spectral variation

1.2 金涂覆光纤

金涂覆光纤由纤芯、包层、金涂覆层及保护材料构成,可承受 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的高温,其横截面结构如图2所示。目前金涂覆光纤的制备技术日趋成熟,但其光学性能稳定性与普通通信光纤相比仍存在一定性能差异。研究团队在实验中发现,金涂覆光纤的传输损耗会随环境温度的变化而变化。该特性使得金涂覆光纤在长距离应用中引入了额外的传输损耗,并对基于黑体辐射原理的测量精度产生显著影响。

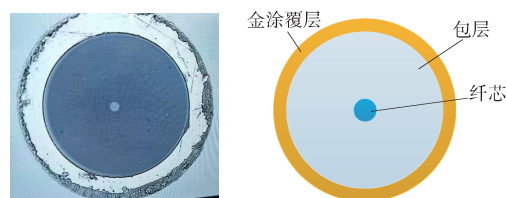


图2 金涂覆光纤横截面结构示意图

Fig. 2 Cross-sectional structure of gold-coated optical fiber

金涂覆光纤的供应商主要为美国Fiberguide公司和英国FiberCore公司,本文选用了Fiberguide公司的金涂覆光纤ASI9/125/115G型金涂覆光纤作为传输光纤,如图3所示。基于黑体辐射原理的传感测量系统,对金涂覆光纤在不同环境温度下的传输损耗特性进行分析,并进一步研究该传输损耗

的修正方法。



图3 Fiberguide公司金涂覆光纤
Fig. 3 Fiberguide gold-coated fiber

2 实验测试与分析

本文采用卤钨灯作为稳定光源模拟黑体辐射光信号, 采用温箱对金涂覆光纤进行加热, 测试不同温度下金涂覆光纤的传输损耗特性, 测试系统如图4所示。金涂覆光纤一端连接卤钨灯, 接收光信号并将信号传输至另一端的光电探测器。中间的金涂覆光纤通过盘绕放入温箱内, 被加热的金涂覆光纤长度约 28 m。为防止测试过程中金涂覆光纤损坏, 采用碳纤维编制套管对金涂覆光纤进行保护。



图4 金涂覆光纤传输损耗测试系统
Fig. 4 Gold-coated fiber transmission loss test system

测试系统中卤钨灯采用秋籁科技公司生产的 KWELAB HLS-1 型卤钨灯, 其输出光信号强度稳定, 可以使初始状态下光路损耗保持恒定。温箱采用 101-0B 型电热鼓风干燥箱, 可提供室温~200 °C 恒温环境, 温度波动小于 2 °C。光电探测器选用 InGaAs 光电二极管, 其为北京敏光科技有限公司所生产的 LSIPD 系列二极管, 工作波长覆盖 850 nm~1 700 nm, 输出电压与输入光信号总强度成正比。

实验过程中, 设置鼓风干燥箱自动加热至 200 °C, 达到最高温度后停止加热, 自然冷却至常温后再次升温, 共进行 3 次温度循环实验。监测整个实验过程中光电探测器输出, 得到光电探测器

输出信号随时间的变化关系, 如图 5 所示。

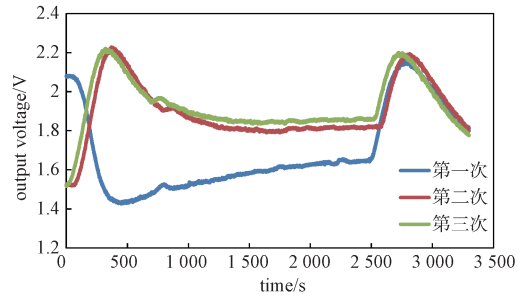


图5 温循过程中输出电压随时间的变化情况
Fig. 5 The change of the output voltage of the photodetector with time during the temperature cycle

从数据可以看出, 第一次测试数据与第二次、第三次测试数据存在较大差异。分析认为, 金涂覆光纤是在高温状态下进行涂覆, 涂层冷却后因热膨胀系数差异等原因, 在金涂覆层和石英光纤之间存在较大的内部应力。第一次温循实验相当于对金涂覆光纤进行退火, 退火后形成新的内部应力分布。第二次温循和第三次温循变化趋势基本一致, 说明金涂覆光纤内部应力达到相对稳定的状态。

进一步分析第二次温循和第三次温循变化趋势, 以第二次温循数据为例, 如图 6 所示。图中 A、B、C、D 四个区域体现了升温 and 降温全过程, A 和 B 区域为升温阶段, C 和 D 区域为降温阶段。由于金和石英存在较大的热膨胀系数差异, 导致温度变化时, 金涂覆层和石英光纤之间会产生一个相互应力。相互应力的释放体现为电压信号增加, 即传输损耗减小; 相互应力的增加体现为电压信号降低, 即传输损耗的增大。因此, 传输损耗变化的本质原因是材料之间的热膨胀系数差异, 难以有效避免。

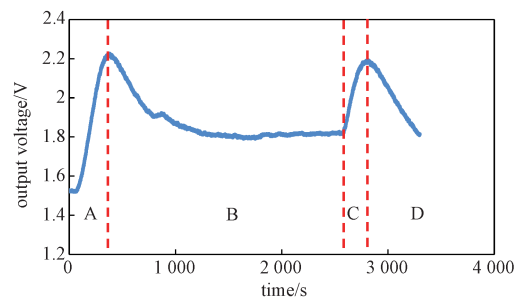


图6 第二次温循的电压随时间变化情况
Fig. 6 The voltage of the second temperature cycle changes over time

3 补偿修正方法

针对上述实验现象, 本文提出一种基于双波段信号进行传输损耗修正的方法, 如图7所示。该方法通过光纤分路器将辐射光信号分为两束光, 其中一束光直接被光电探测器接收并转换为电压信号输出, 记为信号A。另一束光首先经过光纤滤波器, 将部分波段的光滤除, 剩余波段的光被光电探测器接收并转换为电压信号输出, 记为信号B。

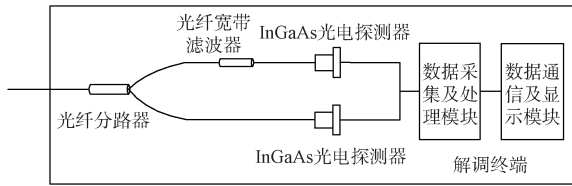


图7 双波段修正解调系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of dual-band correction demodulation system

当光纤因环境温度变化导致传输损耗变化时, 信号A和信号B均随之变化, 并且信号A和信号B呈现固定比例关系。此时通过修正算法可以计算得到具体的传输损耗数值, 从而实现传输损耗的修正。具体的修正过程如下:

① 当光纤环境温度为室温时, 通过标定得到信号A和信号B随黑体辐射温度变化规律, 进一步处理实验数据得到光信号与温度的拟合函数。为了方便叙述修正方法, 下文以二次函数代表拟合函数进行说明。定义信号A和信号B的输出为 V_A 、 V_B , 则 V_A 、 V_B 与黑体辐射温度 T 的关系为:

$$V_A = aT_A^2 + bT_A + c \quad (2)$$

$$V_B = jT_B^2 + kT_B + l \quad (3)$$

其中, a 、 b 、 c 、 j 、 k 、 l 均为通过标定得到的已知常数。

② 设光纤环境温度引起的传输损耗变化量分别为 ΔV_A 、 ΔV_B , 则消除该影响后的真实信号强度(认为室温下的传输损耗为0)为:

$$V_{A1} = V_A - \Delta V_A \quad (4)$$

$$V_{B1} = V_B - \Delta V_B \quad (5)$$

假设1: 黑体辐射源恒定时, 不同环境温度下的 V_A 、 V_B 始终为固定比例关系, 则:

$$\Delta V_A = \alpha \times \Delta V_B \quad (6)$$

③ 联立公式(2)、(3)、(4)、(5)、(6), 可得到

$$V_{A1} = aT_A^2 + bT_A + c - \alpha \times \Delta V_B \quad (7)$$

$$V_{B1} = jT_B^2 + kT_B + l - \Delta V_B \quad (8)$$

④ 由于信号A和信号B是由一束光分光得到, 在同一时刻 $T_A = T_B = T$, 即公式(7)与(8)可写作:

$$V_{A1} = aT^2 + bT + c - \alpha \times \Delta V_B \quad (9)$$

$$V_{B1} = jT^2 + kT + l - \Delta V_B \quad (10)$$

式中, V_{A1} 与 V_{B1} 是实时测量得到的值, a 、 b 、 c 、 j 、 k 、 l 为常数, α 可以通过测试提前得到。因此联立式(9)和式(10), 即可得到 ΔV_B , 进而完成信号修正。

4 修正方法实验验证

按照上述修正方法对解调系统进行改进, 增加光纤分光器和光纤滤波器后, 信号A覆盖850 nm~1 700 nm, 信号B覆盖850 nm~1 460 nm。再次采用鼓风干燥箱对同一段金涂覆光纤进行传输损耗特性测试, 测试结果如图8所示。

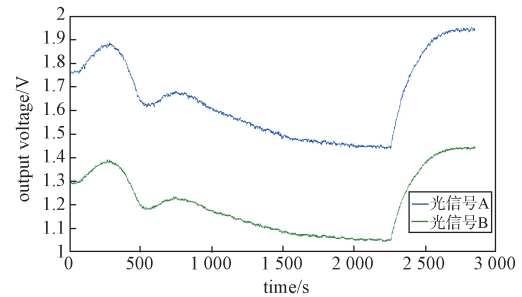


图8 双波段修正解调下的传输损耗特性

Fig. 8 Transmission loss characteristics under dual-band correction demodulation

测试数据表明: 光纤传输损耗随温度的变化趋势与图5基本一致。同时信号A和信号B在不同环境温度下始终保持线性关系, 如图9所示, 说明假设1成立, 且本次测试得到的 α 系数为1.22。

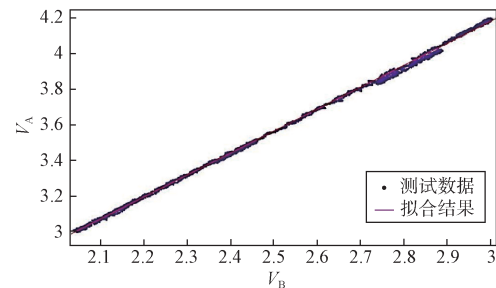


图9 信号间关系特性

Fig. 9 Relationship characteristics between dual-band signals

进一步采用高温马弗炉标定信号A和信号B随黑体辐射温度变化规律。实验采用的高温测试设备为合肥科晶材料技术有限公司生产的KSL-1700X-A3型高温马弗炉,该设备采用8根硅钼棒同时加热,最高可实现1700℃稳定温度环境。为了方便进行黑体辐射测试,高温马弗炉后壁定制了一个直径20mm的引线孔,如图10(a)所示,传感器可通过引线孔接收高温辐射信号。实验中采用耐火砖作为黑体辐射源,如图10(b)所示。金涂覆光纤通过工装放置在氧化铝陶瓷管中,方便放入引线孔中进行测试,如图10(c)所示。

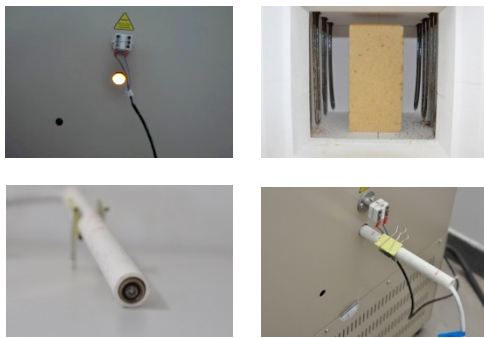


图 10 高温测试现场示意图

Fig. 10 Diagram of high-temperature test setup

测试温度区间设置为900℃~1300℃,间隔50℃记录一次输出,得到的测试数据如图11所示。测试数据表明: V_A 、 V_B 均随温度升高而增加,且趋势一致。进一步对数据进行拟合可以看出, V_A 、 V_B 与温度分别呈二次函数关系,进行数据拟合后可以得到公式(2)和公式(3)的各项系数。

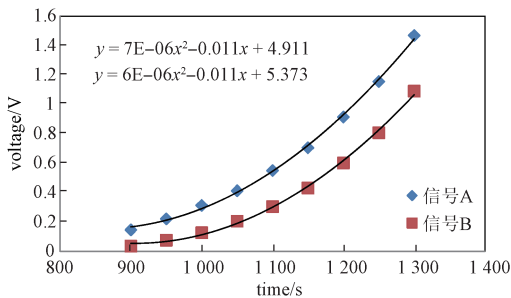


图 11 数据拟合处理

Fig. 11 Data fitting processing

最后通过高温马弗炉营造1050℃黑体辐射环境,同时进行室温~200℃温度下光纤传输损耗测试,得到的测试数据如图12所示。随后将各项系数带入修正公式(9)和(10),对测试数据进行修正,

得到图12中的修正曲线。对比发现,不使用修正方法时,金涂覆光纤由于环境温度变化导致的温度波动超过60℃。采用双波段修正方法后,环境温度变化导致的输出信号波动明显变小,整体信号波动范围小于15℃。大幅降低了金涂覆光纤传输损耗受环境温度变化的影响程度,表明本方法兼具低成本和有效性,在实际工程中具有良好应用价值。

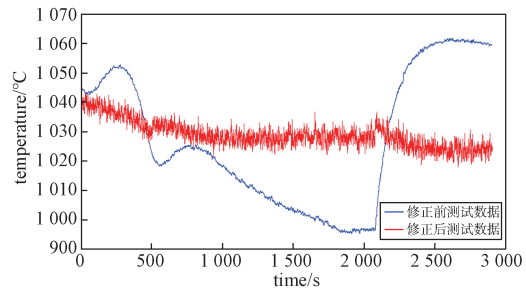


图 12 修正前后温度测量结果对比

Fig. 12 Comparison of temperature measurement results before and after correction

5 结束语

本论文以美国Fiberguide公司金涂覆光纤为研究载体,深入分析了金涂覆光纤传输损耗与环境温度的关系,并提出了一种双波段光信号温度补偿方法,采用该修正方法后,有效将温度误差从60℃降低至15℃,显著降低了环境温度波动对于金涂覆光纤的辐射测温传感器测量精度的影响。

参考文献

[1] 张敏捷, 李佳康, 张峰, 等. 基于OFDR技术的分布式光纤-砂土界面耦合性试验与评价模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2024, 43(S1): 3557-3567.
ZHANG Minjie, LI Jiakang, ZHANG Feng, et al. Research on experiment and evaluation model of interface coupling between distributed optical fiber and sand based on OFDR[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2024, 43(S1): 3557-3567.

[2] 范敏, 张明红, 朱阳, 等. 基于拉曼放大的长距离BOTDR传感系统研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2024, 38(6): 267-273.
FAN Min, ZHANG Minghong, ZHU Yang, et al. Research on long-distance BOTDR sensing system based on Raman amplification[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2024, 38(6): 267-273.

[3] 张立欣, 田敏, 李永倩, 等. 基于少模光纤的末端

- BOTDA 温度传感研究[J]. 半导体光电, 2023, 44(6): 938-941. DOI:10.16818/j.issn1001-5868.2023081901.
- ZHANG Lixin, TIAN Min, LI Yongqian, et al. Research on single-ended BOTDA temperature sensing system based on few-mode fiber[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2023, 44(6): 938-941. DOI: 10.16818/j.issn1001-5868.2023081901.
- [4] 彭福祥, 陶传义, 郭涛, 等. 基于薄膜铌酸锂的光子集成FBG解调系统[J/OL]. 光电子·激光[2024-10-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1182.04.20240920.1150.006.html>.
- [5] 陈彧芳, 万洪丹, 陈乾, 等. 基于稀土光纤双花生结的高灵敏度光纤温度传感器[J]. 中国激光, 2020, 47(1): 267-272.
- CHEN Yufang, WAN Hongdan, CHEN Qian, et al. High sensitivity optical fiber temperature sensor based on rare-earth-doped double-fiber peanut[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(1): 267-272.
- [6] 方莎莎, 吴许强, 张刚, 等. 基于游标效应的高灵敏光纤温度和应变传感器[J]. 中国激光, 2021, 48(1): 1-16.
- [7] GHAFAR A, HOU Y L, LIU W Y, et al. Two-dimensional displacement optical fiber sensor based on macro-bending effect[J]. Optics and Laser Technology, 2019, 120: 105688.
- [8] 易杰, 赵斌, 张文涛, 等. 新型光纤加速度传感器在振动台试验中的应用[J]. 振动与冲击, 2024, 43 (19): 43-51. DOI:10.13465/j.cnki.jvs.2024.19.006.
- YI Jie, ZHAO Bin, ZHANG Wentao, et al. Application of new fiber optic jerk sensor in shaking table tests[J]. Journal of Vibration and Shock, 2024, 43 (19): 43-51. DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2024.19.006.
- [9] WANG J, ZHANG Z, LI S G, et al. Micro-structured optical fiber, magnetic field sensor based on magnetic fluid filling[J]. Modern Physics Letters B, 2019, 33(31): 1950380.
- [10] 孟瑜, 于兰, 王亚杰, 等. 光纤温度传感器的原理及应用研究[J]. 现代营销(信息版), 2020(5): 60-62.
- [11] 王璠. 光纤温度传感器在电力设备监测中的应用[J]. 自动化应用, 2018(6): 60-61.
- [12] 周海军, 黄佳. 渤海油气田光纤式井下压力温度监测系统的研发与应用[J]. 机电信息, 2020(24): 54-55.
- [13] 张银亮, 徒芸, 涂善东. 多层金属涂覆光纤的界面结合强度[J]. 机械工程材料, 2016, 40(3): 6-9, 14.
- ZHANG Yinliang, TU Yun, TU Shandong, et al. Interfacial bonding strength of multilayer metal-coated optical fiber[J]. Materials For Mechanical Engineering, 2016, 40 (3): 6-9, 14.
- [14] 滕睿, 宋士惠, 申人升, 等. 石英光纤的金属镍锡涂敷工艺研究[J]. 光学技术, 2008, 34(S1): 87-88, 91.
- TENGRui, SONG Shihui, SHEN Rensheng, et al. Study on electroless plating of nickel and electroplating of stannum on quartz optical fiber[J]. Optical Technique, 2008, 34(S1): 87-88, 91.
- [15] 张建华. 分布式光纤测温系统的原理及应用[J]. 设备管理与维修, 2022, (8): 125-127.
- [16] 刘扬, 潘登, 陈文, 等. 纳米光学辐射传热: 从热辐射增强理论到辐射制冷应用[J]. 物理学报, 2020, 69(3): 7-24, 127. DOI: 10.16621/j.cnki.issn1001-0599.2022.04D.68.
- [17] 朱桓正. 基于热辐射光谱调控的红外隐身技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.

[作者简介]

- 马 隼 1997年生, 硕士, 在读博士。
陈青松 1972年生, 硕士生导师, 研究员。
毛国培 1992年生, 硕士, 工程师。
李金洋 1988年生, 博士, 研究员。
史 青 1982年生, 博士, 研究员。
于 勇 1971年生, 博士, 研究员。

(本文编辑: 杨秀丽)