

激光与光电子学进展

耐高温光纤布拉格光栅阵列在线制备与性能研究

唐健冠^{1,2}, 黄姝琪², 郭会勇^{1*}, 范典¹, 杨明红^{1**}¹武汉理工大学光纤传感技术与网络国家工程研究中心, 湖北 武汉 430070;²武汉理工大学信息工程学院, 湖北 武汉 430070

摘要 提出了一种耐高温光纤布拉格光栅阵列(FBGA)的制备方法。通过在拉丝塔上以聚酰亚胺作为涂层材料,利用相位掩模版技术和单脉冲在线刻写光栅,经过多次涂敷、烘干以及最后酰亚胺化,成功得到涂层直径为145~150 μm,中心波长范围为(1551.35±0.1) nm,反射率为0.06%,传输损耗为1.601 dB/km@1550 nm的聚酰亚胺涂层光纤布拉格光栅阵列(PI-FBGA)。然后对PI-FBGA的热稳定性和可靠性进行研究,结果表明,在线制备的PI-FBGA具有良好的热稳定性及可靠性,能够在300 °C以下长期使用,300~400 °C可短期使用。该传感光纤的成功制备扩大了常规在线弱光栅阵列的应用范围,在石油化工、环境监测、航空航天等领域具有广阔的应用前景。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅阵列; 在线制备; 聚酰亚胺; 热稳定性; 可靠性

中图分类号 TN253

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP220434

On-Line Writing and Performance High-Temperature Resistant Fiber Bragg Grating Array

Tang Jianguan^{1,2}, Huang Shuqi², Guo Huiyong^{1*}, Fan Dian¹, Yang Minghong^{1**}¹National Engineering Research Center of Fiber Optic Sensing Technologies and Networks,

Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China;

²School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, Hubei, China

Abstract To enhance the high-temperature performance of the fiber Bragg grating array (FBGA), an on-line writing high-temperature resistant FBGA is proposed. FBGA is coated with polyimide and is written on the drawing tower by single laser pulse with phase mask technology. After continuous processes of repeated coating, drying and final imidization, the final coating diameter, central wavelength, and reflectivity are 145 – 150 μm, (1551.35±0.1) nm, and 0.06%, respectively. The transmission loss of polyimide-coated FBGA (PI-FBGA) is 1.601 dB/km at 1550 nm. Additionally, the thermal stability and reliability of polyimide-coated FBG were studied. The findings reveal that the on-line writing high-temperature resistant PI-FBGA has excellent thermal stability and reliability and can be used for a long term below 300 °C and for a short time between 300 °C and 400 °C. The high-temperature resistant PI-FBGA has vast application potential in petrochemical, environmental monitoring, aerospace, and other fields.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating array; on-line writing; polyimide; thermal stability; reliability

1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)具有抗电磁干扰、耐腐蚀、可塑性强、体积小、质量轻等特点,已被广泛应用于光纤传感、光纤通信、光纤激光器等领域。在传感领域,FBG还具有定位精准、高灵敏度、高信噪比、响应快、可同时测量多参量、易于复用和实现分布式传感等

优点^[1],广泛应用于石油化工^[2]、航空航天^[3]、环境监测^[4]、土木工程^[5]、地质勘探^[6]等各个行业。然而,传统紫外激光制备的FBG方法其效率低、单纤传感数量少、一致性差、需要单点焊接、光纤抗拉强度差、传感器成活率低,已经不适应目前大规模网络需求。随着应用场景的扩展,光纤布拉格光栅阵列(FBGA)在高温下长期稳定性和可靠性的要求越来越高^[7-8]。根据光

收稿日期: 2022-01-04; 修回日期: 2022-02-04; 录用日期: 2022-02-14; 网络首发日期: 2022-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(61975157,62025505)、武汉市科技计划项目(2020010601012179)

通信作者: *ghylucky@whut.edu.cn; **minghong.yang@whut.edu.cn

纤涂覆材料耐温特性可分为聚丙烯酸酯涂层光纤、聚酰亚胺涂层光纤、金属涂层光纤等。目前拉丝塔在线制备 FBGA 可以在光纤拉丝过程中刻写光栅,光栅制备效率高、传感光纤保持原有的机械强度^[9]、易实现规模化大容量生产、传感器封装成缆方便。单个光栅反射率在 0.01% 左右,通过时分与波分混合组网,单根光纤复用容量可超过 10 万个,有利于大容量分布式传感阵列的工程化与网络化^[10]。由于使用紫外光进行固化,其涂覆材料为聚丙烯酸酯,拉丝塔 FBGA 工作温度低于 80 °C^[11],在高温环境无法满足工程应用要求。金属涂层光纤使用熔融法在裸光纤上涂覆金属^[12],可在超高温环境工作,该方法拉丝工艺复杂,金属涂层均匀性差,高低温循环涂层易脱落,成本高,低反射率光纤光栅通过高温炉后,光栅瞬间被退化消失,实现拉丝塔在线制备金属涂层 FBGA 还存在很大的难度。然而,聚酰亚胺作为耐高温光纤涂覆材料,具有良好的耐热性和热稳定性,与裸光纤有良好的黏附性。聚酰亚胺光纤短期耐温达 400 °C,长期使用温度范围为 -200~300 °C^[13]。

本文结合聚酰亚胺光纤良好的耐温性能和在线拉丝塔光栅的优点,在拉丝塔上先通过紫外光单脉冲在线刻写超低反射率光栅后,以聚酰亚胺为光纤涂覆材料,使用多级热固化技术成功制备了一种聚酰亚胺涂层光纤布拉格光栅阵列(PI-FBGA),其光纤直径为 145~

150 μm,1550 nm 波长的传输损耗为 1.601 dB/km,光栅反射率为 0.06%,光栅中心波长波动±0.1 nm。本文对 PI-FBGA 进行动态疲劳实验、200~350 °C 不同温度七天老化实验、250 °C 长期老化实验以及 350 °C 高低温热循环实验,同时观察老化后光纤涂层表面来研究其热稳定性和可靠性。结果表明,PI-FBGA 能够在 300 °C 以下长期使用,在 300~400 °C 之间可短期使用。

2 在线制备 PI-FBGA 技术

光纤拉丝塔为定制生产型拉丝机,在线制备光栅时,拉丝速度为 20~30 m/min。聚酰亚胺材料的杨氏模量较高,采用多级热固化的方式,固化效率低,其固化速度刚好匹配拉丝塔在线刻写光栅速度。聚酰亚胺涂敷厚度、涂敷温度、烘干温度、亚胺化温度、固化时间、拉丝速度等工艺技术均会影响聚酰亚胺光纤性能。

如图 1 所示,本文使用的准分子激光器为相干公司 Compex 205 系列,波长为 193 nm,单脉冲能量超过 100 mJ,可通过电压控制调节。使用弯曲不敏感光纤预制棒,在高温状态下先对预制棒加热进行拉丝,控制拉丝炉温度与拉丝张力,拉丝速度保持 10 m/min,裸纤直径控制在 124 μm。对准分子激光器发出的光斑进行扩束整形,通过柱透镜将光束透过相位掩模版聚焦在裸纤上刻写光栅。在光纤拉丝过程中,系统在直径 124 μm 裸纤上单脉冲在线写入光栅,可以根据需

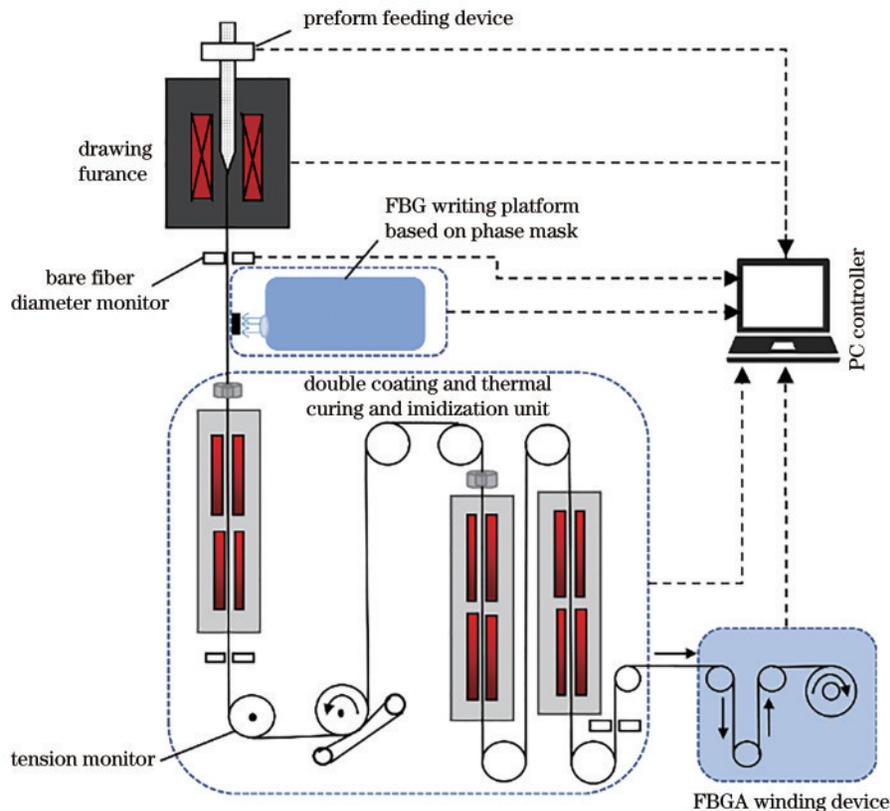


图 1 在线制备 PI-FBGA 系统示意图

Fig. 1 Schematic of the on-line writing PI-FBGA system

要精确控制光栅间隔、反射率、光栅中心波长等参数,相邻光栅的间距在 1 cm 以上任意可调^[14]。使用水浴法控制聚酰亚胺温度,改变聚酰亚胺黏度。光栅刻写完成后,先经过涂覆模具涂上一层聚酰亚胺,使用 1.2~1.5 m 长的管式炉,分区温度设置为 150~250 °C 对其进行烘干、固化,防止温度太高产生涂层气泡。受拉丝塔高度限制,光纤经过主牵引轮后,根据涂覆厚度,再进行多次涂覆和烘干,光纤表面形成均匀的聚酰亚胺酸涂层,最后经过 300~380 °C 的高温使聚酰亚胺酸脱水形成稳定的聚酰亚胺涂层,得到 PI-FBGA 的直径为 145~150 μm。每次涂覆固化后使用丝径仪在线监测光纤直径,并通过实验室研制的分布式光栅测温仪对光栅的谱型和反射率进行监控。

3 聚酰亚胺涂层光纤布拉格光栅阵列性能研究

实验拉制的 PI-FBGA 裸纤直径为 124 μm,涂层单边厚度约为 10 μm,为减小高温对光栅的影响,反射率提高到 0.06%,中心波长为 1551.35 nm。图 2 为 200 个连续光栅的中心波长及反射率分布,中心波长波动 ±0.1 nm,大于常规的拉丝塔光栅波动。由于在弱 FBG 的透射光谱中看不到其反射谷,采用基于端面反射(以无水乙醇作为反射介质)的方法^[15]测量弱光栅反射率,测得 200 个连续光栅的反射率范围为 0.057%~0.068%。图 3 为该 200 个连续光栅的反射谱示意图,反射强度范围为 22 dB~23.2 dB,反射强度波动约为 1.2 dB,光栅反射谱旁瓣对称,信噪比接近 15 dB,可以看到反射强度与反射谱型一致性较好。图 4 为使用 Photon Kinetics 公司的 PK2200 谱损综合分析仪测量 PI-FBGA 的传输损耗谱,1550、1420、1300 nm 窗口的传输损耗分别为 1.601、1.463、1.206 dB/km,由于光栅中心波长在 1550 nm 附近,传输损耗比实际偏大。

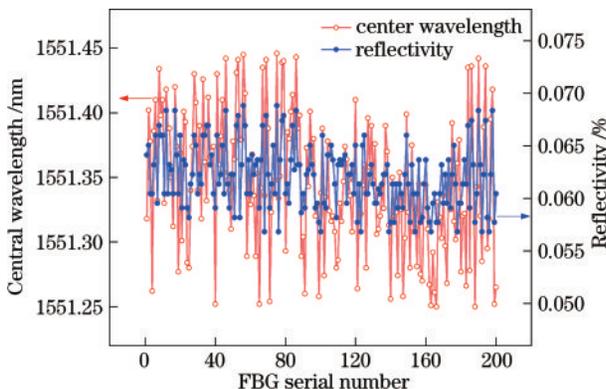


图 2 光栅阵列中 200 个连续光栅的中心波长及反射率分布
Fig. 2 Central wavelength and reflectivity distribution of 200 consecutive gratings in an array

光纤的机械性能是一个重要参数,它涉及到光纤的强度,影响光纤的使用寿命^[16]。光纤在封装成缆、安装、拖曳以及其他工程应用中常见的机械作用都要求

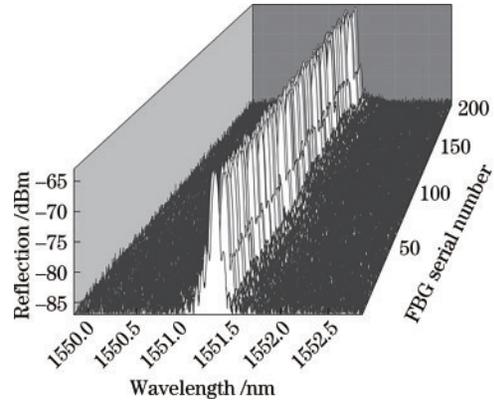


图 3 光栅阵列中 200 个连续光栅的反射谱
Fig. 3 Reflection spectra of 200 consecutive gratings in an array

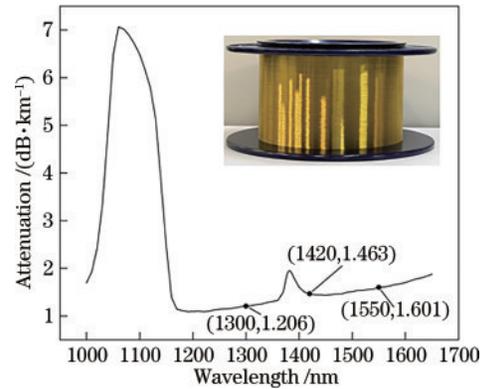


图 4 PI-FBGA 的传输损耗谱
Fig. 4 Transmission loss spectrum of PI-FBGA

光纤具有较高的强度。光纤强度分布由不同尺寸光纤的缺陷统计分布决定,光纤发生断裂的概率 P 可用非对称双参数威布尔分布^[17]表示为

$$P = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma_t}{\sigma_0}\right)^m\right], \quad (1)$$

式中: σ_0 为比例应力; σ_t 为光纤断裂应力。威布尔斜率 m 直接反映断裂强度分布的离散性, m 的值越小,说明断裂强度越分散。采用材料综合力学试验机对在线制备的聚丙烯酸酯涂层光纤和聚酰亚胺涂层光纤分别以 3、30、300 mm/min 拉伸速度进行疲劳试验,每种速度测试 15 次,记录断裂应力并绘制成相对断裂概率图^[17],如图 5 所示。累计断裂概率 P 是关于尺度参数 σ_0 和动态形状 m 的函数^[18],两种涂层光纤累计断裂概率为 0.5 时的中值断裂应力 $\sigma_t(0.5)$ 和威布尔斜率 m 如表 1 所示。随着对试样光纤拉伸速度的增加,光栅的断裂应力也随之增大。根据不同应力速率下的 $\sigma_t(0.5)$ 得到聚丙烯酸酯涂层光纤和聚酰亚胺涂层光纤的动态疲劳参数 n_d ^[19] 分别为 23.59 和 32.42,均符合 GB/T 9771.1—2008 标准。如图 5 所示,聚丙烯酸酯涂层光纤机械强度的威布尔曲线强度分布均匀且狭窄,各应力速率下的 m 值较大,300 mm/min 速率下 m 值最大为 82.53,对应光纤断裂强度范围为 (68.44 ± 1.5) N,光纤强度分布稳定。然而聚酰亚胺涂层光纤

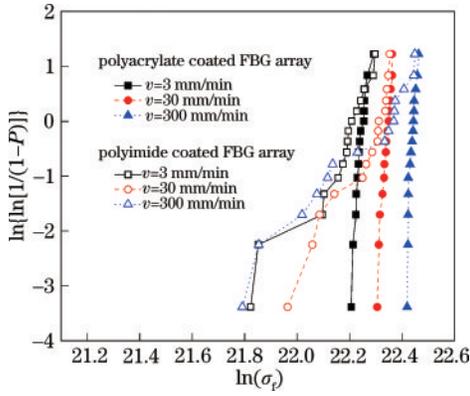


图 5 聚丙烯酸酯和聚酰亚胺涂层光纤的威布尔分布

Fig. 5 Weibull distribution of polyacrylate and polyimide fiber

表 1 两种涂层光纤在不同拉伸速度下中值断裂应力 $\sigma_f(0.5)$ 和威布尔斜率 m

Table 1 Median fracture stress $\sigma_f(0.5)$ and Weibull slope m at different elongation speeds of polyacrylate and polyimide fiber

Fiber	$\sigma_f(0.5)$			m		
	$3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	$30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	$300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	$3 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	$30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$	$300 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$
Polyacrylate fiber	4.55	5.04	5.56	52.35	66.75	82.53
Polyimide fiber	4.35	4.87	5.00	8.28	9.56	5.66

超低反射率光栅在高温中会导致纤芯折射率周期性调制消失。为了提高光栅的热稳定性,调整准分子激光器的电压,使单脉冲能量刻写的光栅反射率从常用的 0.02% 提高到 0.06%。分别采用四种温度进行加速老化,研究 PI-FBGs 在高温中的热稳定性。图 6 为 PI-FBGs 在不同温度下老化 7 天的热衰减曲线,可以看到初始阶段光栅的反射率衰减很快,然后衰减速

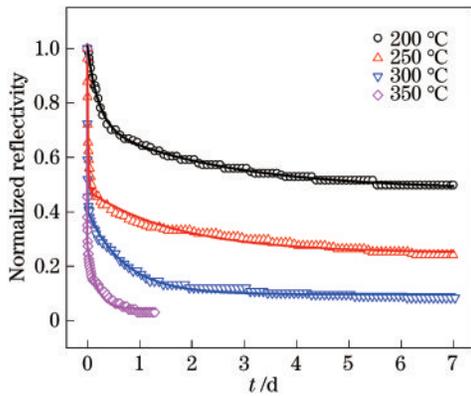


图 6 聚酰亚胺涂层光纤布拉格光栅在不同温度下的热衰减

Fig. 6 Thermal degradation of PI-FBGs at different temperatures

表 2 不同老化温度下的常数项拟合值

Table 2 Constant term fitted values at different aging temperatures

Temperature / °C	A_1	t_1	A_2	t_2	y_0	R^2
200	0.28699	0.21016	0.24160	2.50086	0.48033	0.99859
250	0.47025	0.01674	0.22967	1.73958	0.24935	0.98713
300	0.56953	0.00324	0.30606	0.71279	0.09689	0.99073
350	0.23459	0.17419	0.71297	0.00059	0.04262	0.97971

PI-FBGs 从室温以 $5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 升温至 $250 \text{ }^\circ\text{C}$ 并长期保持恒温,得到的归一化反射率和中心波长变化量如

的威布尔曲线分布较宽且离散,三种应力速率下 m 的最大值仅为 9.56,光纤断裂强度范围为 $(52.53 \pm 10.1) \text{ N}$,光纤的机械强度分布较不稳定,表明在 PI-FBGA 的制造过程中光纤材料的不均匀性以及生产过程中的机械损伤等原因会导致光纤表面产生裂纹。一方面,聚酰亚胺涂层较薄,涂覆工艺复杂,涂层容易出现不均匀、气泡等现象均会降低光纤的机械强度,另一方面,PI-FBGA 采用热固化的方式,固化时间较长,拉丝速率为 $10 \sim 20 \text{ m}/\text{min}$,拉丝效率较低,裸纤出拉丝炉至开始涂覆的时间增加,裸纤受外界环境的影响较大。因此,聚酰亚胺涂覆工艺还需要进一步研究优化。

率逐渐下降直至光栅达到稳定。光栅在高温 $350 \text{ }^\circ\text{C}$ 仅超过 1 天其反射率便衰减为 0,低于 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 在 7 天内逐渐趋于稳定。

使用双指数模型^[20]对弱光栅在不同温度下的归一化热衰减进行拟合,表示为

$$y = A_1 \exp(-t/t_1) + A_2 \exp(-t/t_2) + y_0, \quad (2)$$

式中:两个指数函数表示在低温和高温区间主导光栅的热衰减; y_0 为布拉格光栅热衰减稳定后的归一化反射率; $A_i (i=1,2)$ 为负指数函数分量的系数,表示各组分在一定老化温度下的最大衰减量; $t_i (i=1,2)$ 为时间变量的反比系数, t_i 的值越小,表明光纤光栅归一化反射率在初始老化阶段的衰减速度越快; R^2 为拟合的相关系数。最终得到在线制备的 PI-FBGs 在 200、250、300、350 $^\circ\text{C}$ 时的热衰减,并用双指数模型进行拟合,如图 6 中实线所示,式(2)中常数项的拟合值如表 2 所示。根据拟合式可考虑 FBGs 的工作温度设计合适的初始反射率以及所需的老化温度和时间。从表 2 可以看出,随着温度升高,其稳定后的归一化反射率逐渐降低,分别从 48.03% 降低到 4.26%。在老化温度 $400 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,光栅将在 2 h 后擦除。

图 7 所示,内嵌图为升温过程归一化反射率和中心波长变化量随温度的变化。其中归一化反射率在升温过

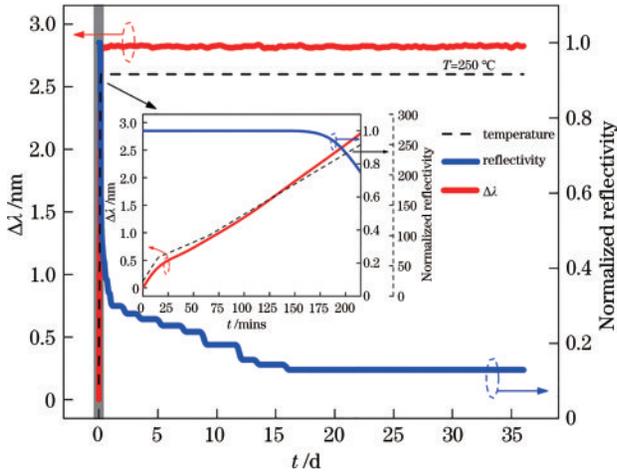


图 7 250 °C 长期老化下归一化反射率与中心波长变化量随时间的变化

Fig. 7 Variation of normalized reflectivity and central wavelength change with time under long-term aging at 250 °C

程中由紫外光引起折射率调制不稳定部分去除,从而导致光栅的大幅衰减,然后衰减速率逐渐下降直至稳定。光栅的归一化反射率在第 16 天开始保持稳定在 13%,一个月后仍保持稳定,且中心波长稳定性好,表明 PI-FBGs 能够在 250 °C 长期稳定使用。

此外,还进行了高低温热循环实验。PI-FBGs 在 25~350 °C 的温度之间循环 3 次,每 50 °C 保温 20 min,在最高温度保持 20 min 后自然降温,归一化反射率和中心波长变化量随温度变化的关系如图 8 所示。三轮热循环中 PI-FBGs 三轮升温 and 冷却曲线可重复,温度灵敏度一致性依次为 13.12、13.14、13.14 pm/°C。PI-FBGs 的归一化反射率在第一轮热循环的高温下大幅衰减,至结束时其值为 20.5%,之后在第二、三轮热循环中归一化反射率衰减较小,整体比较稳定,在三轮热循环结束后归一化反射率为 18.3%。

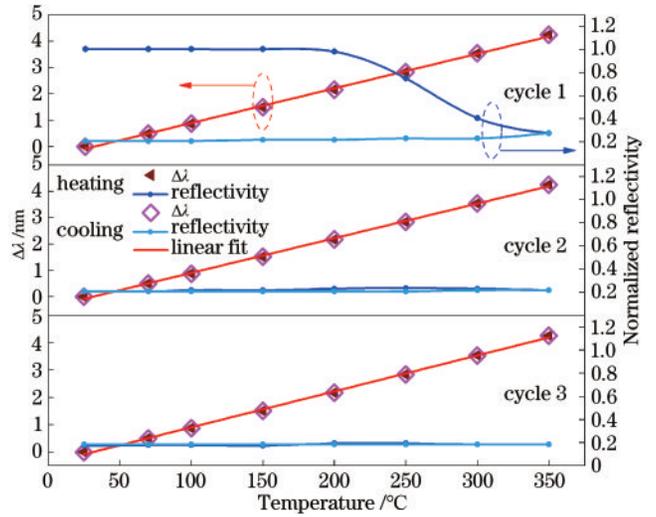


图 8 350 °C 三轮热循环中归一化反射率和中心波长变化量随温度的变化

Fig. 8 Variation of normalized reflectivity and central wavelength change with temperature in the three thermal cycles at 350 °C

石英玻璃作为一种脆性材料,其涂层的完整性决定了光纤的机械强度,在高温下,周围环境中的氧气会使聚合物涂层发生氧化反应而降解,这种反应破坏了涂层的交联网络,导致挥发性副产物的损失。一旦材料损耗达到一个临界点,光纤在光学或机械方面的性能就开始下降^[21]。为了充分了解高温下光纤的机械强度,采用显微镜观察经过不同老化温度及时间后涂层表面的变化,如图 9 所示。图 9(a)是生产拉制的 PI-FBG,涂层均匀,表面呈金黄色,光洁致密,光泽度好,无空洞、气泡、凹坑。图 9(b)~(f)是不同温度与老化时间后的显微镜照片,随着老化温度的升高或老化时间的增长,聚酰亚胺涂层开始发红,颜色逐渐变深,并

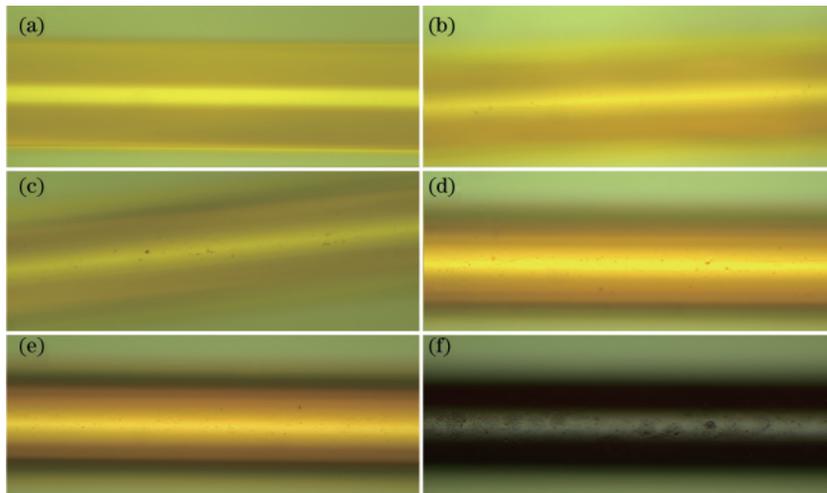


图 9 聚酰亚胺涂层耐高温 FBGs 的显微镜图像。(a) 初始 FBG; (b) 200 °C 老化 45 天; (c) 250 °C 老化 36 天; (d) 300 °C 老化 16 天; (e) 350 °C 老化 4 天; (f) 400 °C 老化 2 天

Fig. 9 Microscope images of PI-FBGs. (a) Initial FBG; (b) aging at 200 °C for 45 days; (c) aging at 250 °C for 36 days; (d) aging at 300 °C for 16 days; (e) aging at 350 °C for 4 days; (f) aging at 400 °C for 2 days

且光纤越来越脆。在 400 °C 温度下, 光纤呈现黑红色, 涂层表面出现凹坑缺陷^[22], 导致光纤机械性能下降。高温下凹坑缺陷及光纤脆性增加, 使得光纤强度与柔韧性降低, 从而影响光纤的机械性能。在 300 °C 温度长时间老化后, 涂层表面有少量凹坑出现, 涂层能够可靠保护裸纤。在 300~400 °C 温度之间, 老化短期时涂层保持完整。

4 结 论

本文采用拉丝塔在线制备聚酰亚胺光纤布拉格光栅阵列, 该工艺通过多级涂覆固化工艺, 光纤直径为 145~150 μm , 中心波长范围为 (1551.35 \pm 0.1) nm, 反射率为 0.06%, 1550 nm 波长的传输损耗为 1.601 dB/km, 其中心波长、反射率及光栅间距 1 cm 以上可控, 具有良好的热稳定性和可靠性。实验结果表明, 该光栅阵列能够在 300 °C 以下长期使用, 在 300~400 °C 可短期使用, 克服了常规光纤光栅阵列只能在低于 80 °C 环境工作的局限性, 这种在线制备的大容量光栅阵列可应用于石油化工、环境监测、航空航天等苛刻环境中的温度监测。

参 考 文 献

- [1] Mihailov S J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments[J]. *Sensors*, 2012, 12(2): 1898-1918.
- [2] Nellen P M, Mauron P, Frank A, et al. Reliability of fiber Bragg grating based sensors for downhole applications[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2003, 103(3): 364-376.
- [3] Kahandawa G C, Epaarachchi J, Wang H, et al. Use of FBG sensors for SHM in aerospace structures[J]. *Photonic Sensors*, 2012, 2(3): 203-214.
- [4] Riza M A, Go Y I, Harun S W, et al. FBG sensors for environmental and biochemical applications: a review[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2020, 20(14): 7614-7627.
- [5] Rodrigues C, Félix C, Lage A, et al. Development of a long-term monitoring system based on FBG sensors applied to concrete bridges[J]. *Engineering Structures*, 2010, 32(8): 1993-2002.
- [6] Hong C Y, Zhang Y F, Zhang M X, et al. Application of FBG sensors for geotechnical health monitoring, a review of sensor design, implementation methods and packaging techniques[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2016, 244: 184-197.
- [7] 詹亚歌, 向世清, 何红, 等. 光纤光栅高温传感器的研究[J]. *中国激光*, 2005, 32(9): 1235-1238.
Zhan Y G, Xiang S Q, He H, et al. Study on high temperature optic fiber grating sensor[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(9): 1235-1238.
- [8] 王雪萍, 赵春柳, 康娟, 等. 光纤高温传感器的研究进展及应用[J]. *光通信技术*, 2012, 36(3): 42-44.
Wang X P, Zhao C L, Kang J, et al. Research progress and development of high-temperature fiber sensors[J]. *Optical Communication Technology*, 2012, 36(3): 42-44.
- [9] Askins C G, Putnam M A, Patrick H J, et al. Fibre strength unaffected by online writing of single-pulse Bragg gratings[J]. *Electronics Letters*, 1997, 33(15): 1333-1334.
- [10] Yang M H, Bai W, Guo H Y, et al. Huge capacity fiber-optic sensing network based on ultra-weak draw tower gratings[J]. *Photonic Sensors*, 2016, 6(1): 26-41.
- [11] Semjonov S L, Sapozhnikov D A, Erin D Y, et al. High-temperature polyimide coating for optical fibres[J]. *Quantum Electronics*, 2015, 45(4): 330-332.
- [12] 俞亮, 郭浩林, 陆国庆, 等. 耐高温光纤的性能与生产工艺[J]. *光通信技术*, 2014, 38(6): 8-11.
Yu L, Guo H L, Lu G Q, et al. Production and performance of heat resistant optical fiber[J]. *Optical Communication Technology*, 2014, 38(6): 8-11.
- [13] Hicyilmaz A S, Bedeloglu A C. Applications of polyimide coatings: a review[J]. *SN Applied Sciences*, 2021, 3(3): 363.
- [14] 余海湖, 郑羽, 郭会勇, 等. 光纤光栅在线制备技术研究进展[J]. *功能材料*, 2014, 45(12): 12001-12005.
Yu H H, Zheng Y, Guo H Y, et al. Research progress in online preparation techniques of fiber Bragg gratings on optical fiber drawing tower[J]. *Journal of Functional Materials*, 2014, 45(12): 12001-12005.
- [15] Guo H Y, Zheng Y, Tang J G, et al. Reflectivity measurement of weak fiber Bragg grating (FBG) [J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2012, 27(6): 1177-1179.
- [16] 吴重阳. 光纤强度[J]. *现代有线传输*, 1994(4): 29-35.
Wu C Y. The strength of optical fiber[J]. *Modern Cable Transmission*, 1994(4): 29-35.
- [17] Ma Z W, Wang Z F, Liu H H, et al. Tensile strength and failure behavior of bare single mode fibers[J]. *Optical Fiber Technology*, 2019, 52: 101966.
- [18] Hagemann V, Trutzel M N, Staudigel L, et al. Mechanical resistance of draw-tower-Bragg-grating sensors[J]. *Electronics Letters*, 1998, 34(2): 211-212.
- [19] Kalish D, Tariyal B K. Static and dynamic fatigue of a polymer-coated fused silica optical fiber[J]. *Journal of the American Ceramic Society*, 1978, 61(11/12): 518-523.
- [20] Liu S, Ding L Y, Guo H Y, et al. Thermal stability of drawing-tower grating written in a single mode fiber[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2019, 37(13): 3073-3077.
- [21] Huang L, Dyer R S, Lago R J, et al. Mechanical properties of polyimide coated optical fibers at elevated temperatures[J]. *Proceedings of SPIE*, 2016, 9702: 97020Y.
- [22] Cusanello V, Jacobson N, Supczak M, et al. A hermetic carbon/polyimide coating combination for adverse environments[C]//*Proceedings International Wire & Cable Symposium*, 44th, 1995: 335-341.