

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20190724001

无损石英光纤表面 Ni-P 镀层的制备及性能

宋启良^{1,2}, 胡振峰¹, 梁秀兵¹, 孔令超¹, 涂 龙¹, 金 国²

(1. 军事科学院 国防科技创新研究院, 北京 100071; 2. 哈尔滨工程大学 材料科学与化学工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对金属镀层光纤制备工艺复杂且技术不成熟的现状, 对石英光纤表面 Ni-P 金属镀层的制备工艺进行优化, 并对优化后镀层的性能进行研究。采用无粗化的前处理工艺化学镀 Ni-P 金属镀层, 利用 SEM、EDS 对镀层的微观组织进行表征, 采用热震试验和拉伸试验对镀层的结合强度和抗拉强度进行测试, 并通过红外热成像仪测试金属镀层光纤导光后的热管理能力。结果表明: 优化后的前处理工艺为去除保护层时丙酮浸泡时间 15 min 以上, 除油时 NaOH 溶液的浓度为 30 g/L, 浸泡时间大于 15 min, 敏化、活化温度均为 35 ℃, 时间 10 min; 光纤表面镀层晶粒分布均匀, 大小均一, 且与基体结合良好, 光纤最大抗拉强度平均为 2783 MPa, 较裸光纤提升 52.93%; 通光后金属镀层光纤表面温度达 100 ℃ 时, 通过功率为 5.74 W, 且功率和工作温度还可继续增加, 能够克服光纤表面温度升高易烧损的缺点。

关键词: 金属镀层光纤; 预处理; 敏化; 活化; 镀层

中图分类号: TG174.44

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2019)06-0090-08

Preparation and Properties of Ni-P Coating on Quartz Fiber Surface

SONG Qiliang^{1,2}, HU Zhenfeng¹, LIANG Xiubing¹, KONG Lingchao¹, TU Long¹, JIN Guo²

(1. National Innovation Institute of Defense Technology, Academy of Military Sciences, Beijing 100071, China; 2. School of Materials Science and Chemical Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In view of the complex and immature preparation process of metal coating fiber, the preparation technology of the metal coating on quartz fiber surface was optimized, and the properties of the optimized coating were studied. The pretreatment without coarsening was used in the experiment. SEM and EDS were used to characterize the microstructure of the coating. The bonding strength and tensile strength of the coated fiber were analyzed by thermal shock test and tensile test, and the thermal management capability of the metal coating fiber after passing light was tested by infrared thermal imager. The results show that: the optimized pretreatment process is as follows when removing the protective layer, the acetone will soak for more than 15 min; when removing oil, the concentration of NaOH solution will be 30 g/L; the soaking time should be more than 15 min. The sensitization and activation temperatures are 35 ℃ and 10 min. The coating grain on the surface of the optical fiber is evenly distributed and uniform in size, and it is well combined with the substrate. The maximum tensile strength is 2783 MPa on average, which is 52.93% higher than that of the bare optical fiber. After light transmission, the passing power reaches 5.74 W, when the tolerable temperature of the surface of the metal coating fiber reaches 100 ℃. The power and temperature can continue to increase, which can overcome the weakness of being easy to burn caused by the fiber surface temperature rising.

Keywords: metal coated optical fiber; pretreatment; sensitization; activation; plating

收稿日期: 2019-07-24; 修回日期: 2019-11-07

通信作者: 胡振峰 (1976—), 男 (汉), 副研究员, 博士; 研究方向: 表面工程与智能再制造; E-mail: hu_zhenfeng@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金 (51605491, 51505484)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51605491, 51505484)

引用格式: 宋启良, 胡振峰, 梁秀兵, 等. 无损石英光纤表面 Ni-P 镀层的制备及性能[J]. 中国表面工程, 2019, 32(6): 90-97.

SONG Q L, HU Z F, LIANG X B, et al. Preparation and properties of Ni-P coating on quartz fiber surface[J]. China Surface Engineering, 2019, 32(6): 90-97.

0 引言

自 1966 年高琨和 George A. Hockham 成功研制出光纤以来,通信的速度和安全性便得到有效提升,光纤及其衍生技术在通信、医学及军事等领域得到了广泛应用^[1-3]。随着科技的进一步发展,装备研发及制造对光纤性能提出了更高的要求,如可焊性、高散热性、耐蚀性等^[4-6]。对光纤进行表面改性处理,制备性能复合的新型传导材料已成为近些年来的研究热点^[7-9]。为保障光纤的使用寿命和传感器灵敏度,同时具有金属特性和良好的力学性能,国内外学者做出了大量的研究^[10]。彭健等^[11]利用化学镀工艺,经过去除保护层、粗化、敏化、活化前处理后,在光纤表面成功制备了 Ni-P-B 复合镀层,并研究了稀土元素对镀层性能的影响。结果表明:稀土元素的添加可以有效的提升镀液稳定性,其镀层表面更加致密、均匀,晶粒得到了细化。姜德生等^[12]利用化学镀镍的方法对光纤金属化处理,通过热震法对镀层的结合力进行了测试,同时对其钎焊性能检测。结果表明:石英光纤表面获得的镀层非常光亮,钎焊性能好,镀层结合力高。朱月红等^[13]对光纤化学镀镍工艺进行了优化,调整了镀液温度和 pH 值,可获得连续光滑的镍镀层,其结合力满足光纤光栅的高低温温度传感监测要求,并且实现了镀液循环使用。美国 Bnbel 等^[14]人进行了表面金属镀层光纤力学性能可靠性研究。福州大学旷戈等^[15]人研究了不同活化方法对光纤表面镀层质量的影响等。传统的光纤化学镀需进行粗化、敏化、活化等预处理工艺,而在粗化过程中会使光纤基体受到较大程度的损伤,进而影响其光学传导特性和力学性能,减少使用寿命。徐海鹏^[16]通过配制胶体钯溶液对光纤进行预处理,制备金属镀层,但该方法在胶体配制中,过程繁琐且胶体钯溶液稳定性等问题还需克服。目前,关于无损光纤表面金属化处理的研究相对较少,且光纤导光后的高温烧损等问题仍是光纤应用的难题。因此,制备优质的金属镀层,且对光纤无损伤的化学镀覆工艺具有广阔的研究前景。

为进一步优化光纤表面镀镍工艺,获得优质的金属镀层。文中去除了前处理过程中粗化环节,避免对光纤基体的损伤,在光纤表面制备了 Ni-P 镀层,利用扫描电镜等设备对镀层的微观组

织进行分析,测试镀层的结合强度及金属镀层光纤的抗拉强度和导光特性。

1 试验与方法

1.1 试验材料及工艺条件

基体材料采用法尔胜公司的型号 20/400 光纤,试验药品包括浓硫酸、丙酮、氯化亚锡(AR)、盐酸(37%, AR)、氯化钯(AR)、六水硫酸镍(AR)、次磷酸钠(AR)、乳酸(AR)、柠檬酸(AR)、无水乙酸钠(AR)、丁二酸(AR)、氢氧化钠(AR)、稳定剂、去离子水等。

1.2 试验仪器

采用 OLS4000 3D 测量激光显微镜观测 Ni-P 镀层金相;采用 JSM-7401 场发射扫描电镜(SEM)表征 Ni-P 镀层光纤微观形貌;利用 X-Max 80 型 X-射线能谱仪(EDS)进行镀层元素分析。

采用 XL-1 箱式高温炉测试 Ni-P 镀层与光纤基体的结合性能,将镀后光纤放入高温炉加热至 180 ℃ 后,空冷至室温(20 ℃),循环次数 20 次。

利用 MPC 7×1 光纤泵浦合束器、Astral S(300 W)激光功率计等测试 Ni-P 镀层光纤的导光性能,以泵浦激光作为光源,经过(7×1)合束器装置耦合后进入金属镀层光纤,最后进入 300 W 功率计。测试过程中通过 FLIR E75 红外热像仪监测金属镀层表面温度,同时记录通过功率、激光透过率。

1.3 试验步骤

在光纤表面进行化学镀主要包括去除保护层、除油、无损敏化和活化、施镀共 4 个步骤,如图 1 所示。

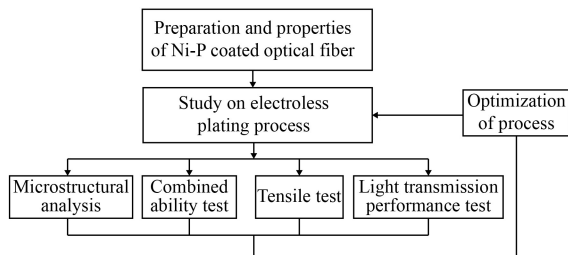


图 1 光纤金属化试验工艺流程图

Fig.1 Experimental process flow chart of metal coated optical fiber

1.3.1 去除保护层

光纤保护层通常为环氧树脂等有机层,其厚度大致为 10~100 μm。光纤基体与有机层间的结

合力较差，且熔点较低，不耐高温，因此镀覆前需将其去除，以提高镀后光纤的耐高温性能和传感灵敏度。去除的方式有机械法和化学法两种，为避免光纤基体损伤对信号传递的影响，文中采用化学法去除保护层。按照所需长度将光纤截取并放入丙酮溶液中，后取出放入事先准备好的浓 H_2SO_4 中处理 1 min，清除杂质和残余有机物。为探究不同丙酮浸入时间对后续镀层性能的影响，设定了 4 组试样，分别在丙酮中处理 5、10、15 和 20 min，取出用去离子水清洗。

1.3.2 除油

试验设定 9 组试样来探究不同浓度的 NaOH 溶液、不同除油时间对镀层的影响。首先将去除保护层的裸光纤试样分别放入 20、25 和 30 g/L 的 NaOH 溶液中除油，并分别超声 10、15 和 20 min。因 NaOH 的附着能力较强，故取出后再用去离子水清洗 2 min。

1.3.3 无损敏化和活化

为获得较高的结合强度，在光纤化学镀前通常需粗化处理，主要用 $\text{HF}+\text{HNO}_3+\text{H}_2\text{O}$ 的混合液对光纤进行刻蚀。但粗化处理不仅会破坏光纤基体表面平整度和降低力学性能，还会降低光纤的

传递敏感性，减少光纤的使用寿命。文中对光纤的敏化和活化处理进行了调整，采用无粗化工艺，避免对光纤表层造成损伤。敏化液组成为 SnCl_2 15 g/L， HCl 30 mL/L；活化液组成为 PdCl_2 0.5 g/L， HCl 5 mL/L。设置了 9 组试样，敏化、活化分别在 15、25 和 35 $^{\circ}\text{C}$ 水浴下进行，处理时间分别 5、10 和 15 min。敏化结束后，利用去离子水冲洗 10 s，再进行光纤活化处理，最后对预处理阶段不同温度和时间条件下的试验结果进行研究。

1.3.4 施镀

Ni-P 镀液按照乳酸 25 g/L、柠檬酸 10 g/L、硫酸镍 30 g/L、次磷酸钠 30 g/L、稳定剂的药品顺序，取适量配制，最后用 NaOH 溶液 (200 g/L) 调节 pH 值至 4.7。由于光纤表面未进行粗化，活化后附着在光纤表面的钯离子容易被破坏，为确保光纤表面钯离子的稳定，可将活化后的光纤直接放入温度 75 $^{\circ}\text{C}$ 的镀液中施镀，时间为 1 h。

2 结果与分析

2.1 丙酮处理时间对保护层去除效果的影响

图 2 为光纤在丙酮溶液浸泡不同时间后的 SEM 形貌。可以看出，浸泡时间不同，光纤有机

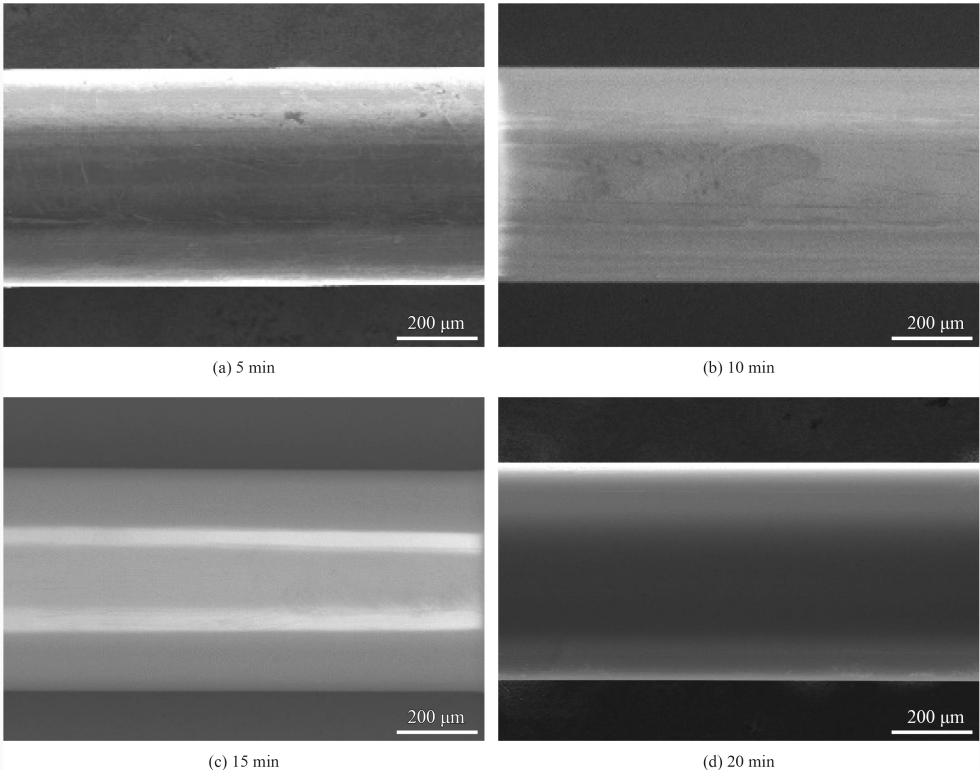


图 2 丙酮浸泡不同时间后裸光纤的 SEM 形貌

Fig.2 SEM images of bare fiber after immersing in acetone at different time

保护层残留程度也不同, 丙酮处理时间对镀层宏观质量影响如表 1 所示。在浸泡 5 和 10 min 的光纤表面有明显的有机层残余, 而浸泡 15 和 20 min 的光纤表面光滑、无杂质, 保护层已完全清除。利用刻刀对不同处理时间的镀层进行刮划发现, 丙酮处理 15 和 20 min 的镀层效果一致, 无剥落现象产生。因此, 在用丙酮去除光纤保护层时, 处理时间应大于 15 min。

表 1 丙酮处理时间对镀层质量的影响

Table 1 Effects of acetone treatment time on coating quality

No.	Time / min	Coating
1	5	Uneven coating, plating leakage
2	10	The plating is rough
3	15	Uniform coating, excellent quality
4	20	Uniform coating, excellent quality

2.2 不同处理工艺对光纤除油效果的影响

当裸光纤表面有油污存在时, 会导致后续活化过程钯离子不能稳定地附着在光纤表面。同时, 也会造成光纤表面出现漏镀、镀层与基体之间结合较差等现象。表 2 为不同处理时间和 NaOH 浓度对镀层质量的影响。通过不同试验组对比, 可以看出, 当除油阶段 NaOH 溶液浓度大于 30 g/L, 除油时间大于 15 min 时, 光纤表面除油效果最好。

表 2 不同处理时间和 NaOH 浓度对镀层质量的影响

Table 2 Effects of time and NaOH concentration on the coating quality

No.	NaOH concentration / (g·L ⁻¹)	Time / min	Coating
5	20	10	Obvious plating leakage, uneven coating
6	20	15	Slight plating leakage, loose coating
7	20	20	Dull color, no plating leakage
8	25	10	Slight plating leakage, loose coating
9	25	15	Dull color, no plating leakage
10	25	20	Coating uniform, dense, bright color
11	30	10	Dull color, no plating leakage
12	30	15	Coating uniform, dense, bright color
13	30	20	Coating uniform, dense, bright color

2.3 不同工艺对无损敏化和活化效果的影响

敏化与活化是非金属化学镀至关重要的一步, 影响着后续镀层均匀性、致密性和结合力。

而影响敏化与活化效果的重要外界因素就是温度和时间, 通过表 3 试验数据可得出, 当敏化与活化温度逐渐增加时, 镀层质量先升高后降低, 达到 35 ℃ 时, 镀层质量最佳; 当温度一定, 随时间的增加, 镀层质量增加。产生这一现象的主要原因为, 在溶液中粒子的运动随温度升高而增强, 当温度高于 35 ℃ 时, 由于溶液中金属钯离子运动过于剧烈, 无法稳定的附着于光纤表面, 使前处理过程的催化作用减弱, 进而影响镀层质量。故光纤表面化学镀 Ni-P 合金的最佳敏化、活化温度为 35 ℃、时间 10 min。

表 3 敏化与活化的温度、时间对镀层质量的影响

Table 3 Effects of temperature and time of sensitization and activation on coating quality

No.	Temperature / ℃	Time / min	Plating Ni-P optical fiber
14	15	5	No metal coating
15	15	10	No metal coating
16	15	15	No metal coating
17	25	5	Blackened
18	25	10	Uneven coating, dark color
19	25	15	Uniform coating, dark color
20	35	5	Uniform coating, light color
21	35	10	Uniform coating, bright color
22	35	15	Uniform coating, bright color
23	45	5	Uneven coating, dark color
24	45	10	Uneven coating, dark color
25	45	15	Uneven coating, dark color

2.4 镀层的微观组织

图 3 为镀覆时间为 1 h 的 Ni-P 金属镀层光纤的金相照片。可以看出 Ni-P 合金镀层已均匀密布于光纤表面, 镀层无漏镀、起皮、脱落等缺陷产

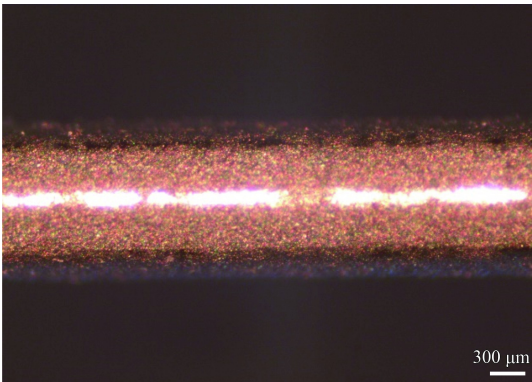


图 3 Ni-P 金属镀层光纤的金相照片

Fig.3 Metallographic picture of the optical fiber Ni-P coating

生，且镀层具有光泽性，表面沉积效果良好。

图 4 为 Ni-P 金属镀层光纤的微观形貌，由图 4(a) 可以看出，Ni-P 合金镀层均匀分布于光纤基体表面，无漏镀现象产生，镀层致密，表面较为平整、光滑，有少量镍瘤析出；由图 4(b) 可得出：Ni-P 镀层表面密布胞状组织，这是由于形核过程中 Ni 原子和 P 原子围绕基体中形核质点进

行，并以胞状形式生长，因沉积速度不同，图中胞状大小也有所不同，但总体晶粒细小，结构致密，形核分布比较均匀，无明显缺陷。图 4(c) 为光纤基体与 Ni-P 镀层截面形貌，不难发现金属镀层均匀地分布在基体表面，与光纤基体结合紧密，无空隙，且镀层内部无裂纹、气孔等缺陷产生；镀厚均匀，镀层厚度在 10~20 μm 之间。

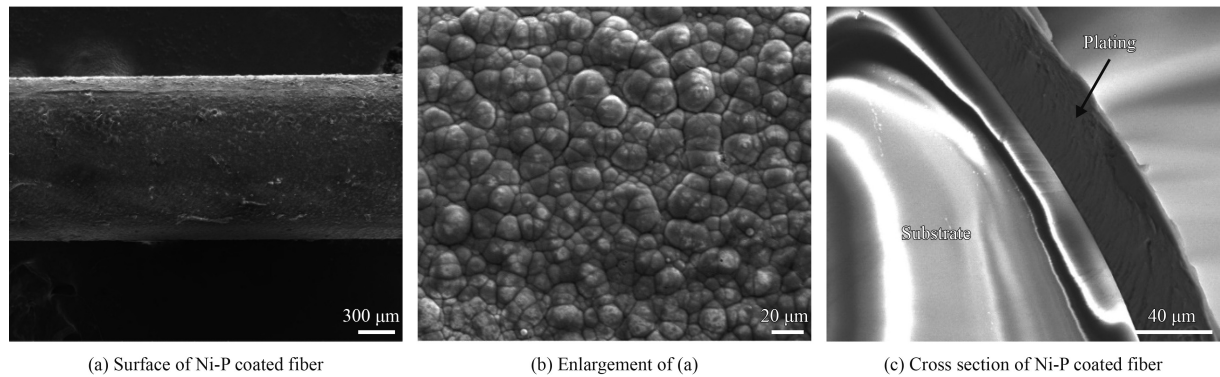


图 4 Ni-P 金属镀层光纤的微观形貌
Fig.4 Microstructure of Ni-P coated optical fiber

为继续验证金属光纤镀层的成分，利用能谱仪 (EDS) 对光纤表面金属镀层进行分析，如图 5 所示。可知镀层主要组成为 Ni、P 两种元素，无其他杂质元素存在，其中 P 的含量 (质量分数) 为 7.96%，Ni 的含量为 92.04%。综上，采用无损前处理工艺可制备出质量优异的 Ni-P 金属镀层，镀覆效果符合光纤表面金属化要求。

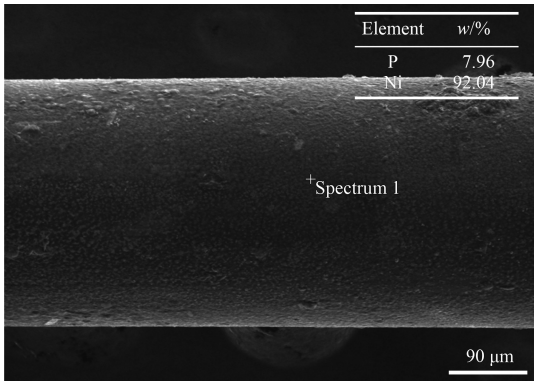


图 5 Ni-P 镀层 EDS 分析
Fig.5 EDS analysis of Ni-P coating

2.5 金属镀层光纤的抗拉强度

采用 GD-7010H 型拉力万能试验机测试金属镀层光纤的抗拉强度。试验拉伸速率为 2 mm/min，因光纤较细，故试样横截面积根据 $S=\pi r^2$ ($r=$

0.2 mm)，统一设定为 0.1256 mm²，选取裸光纤和镀有 Ni-P 合金光纤各 3 根测试，选取平均值，结果如表 4 和图 6 所示。结果表明：裸光纤表面化学镀镍镀层可明显提升抗拉强度，裸光纤平均最

表 4 Ni-P 金属镀层光纤的最大抗拉强度		
Table 4 Maximum tensile strength of Ni-P coated fiber		
Serial number	Bare fiber / MPa	Plating Ni-P optical fiber / MPa
1	1810	2800
2	1850	2730
3	1800	2820
Average value	1820	2783

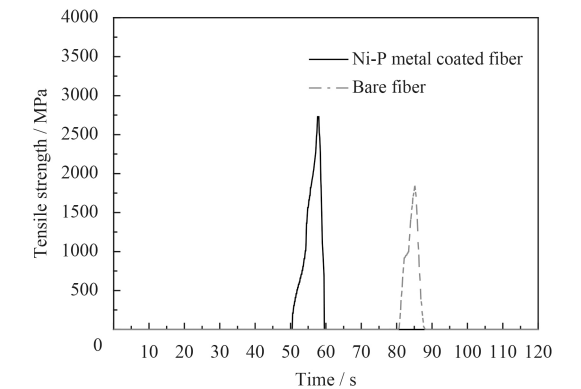


图 6 光纤抗拉强度-时间曲线
Fig.6 Strength-time curves of fiber tensile

大抗拉强度为 1820 MPa; 表面镀 Ni-P 合金的金属镀层光纤平均最大抗拉强度为 2783 MPa。由图 6 可以得出金属镀层光纤断裂为脆性断裂, 符合光纤基体 SiO₂ 的断裂特性。表面镀 Ni-P 镀层光纤的抗拉强度较裸光纤提升了 52.93%, 使光纤可在一定拉应力范围内应用, 提升了光纤的使用寿命。

2.6 金属镀层光纤的结合强度

金属镀层与光纤基体结合强度是评价镀覆效

果的重要指标, 采用热震法对金属镀层光纤进行定性分析, 对于热胀系数有明显区别的基体和镀层, 当骤然冷却时, 若界面热应力大于结合力必会产生开裂现象。热震试验后的金属镀层光纤微观形貌如图 7 所示。从图 7(a) 可以看出镀层表面无大面积起皮、剥落等现象, 且镀层表面形貌良好、结构致密; 从图 7(b) 可知, 镀层与光纤基体无开裂现象产生, 说明其结合力大于界面热应力, 满足金属镀层光纤散热环境的使用要求。

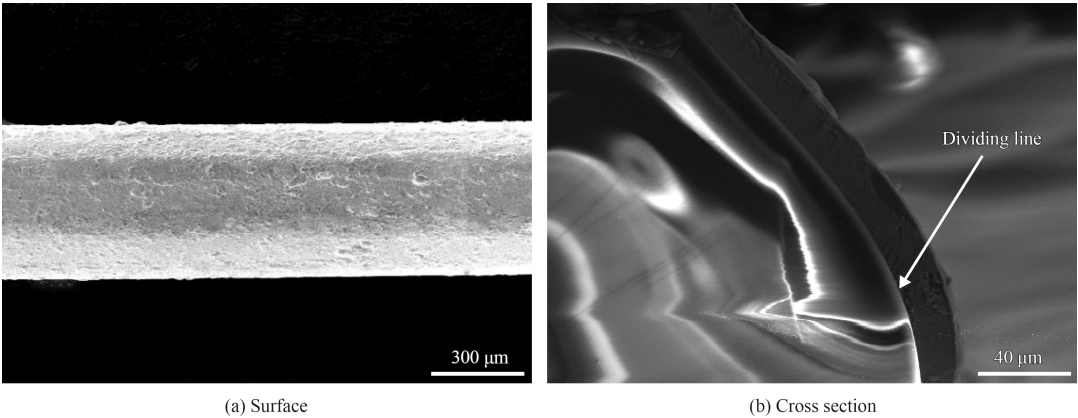


图 7 Ni-P 金属镀层光纤高 / 低温循环 SEM 形貌

Fig.7 SEM images of high / low temperature cycle of Ni-P coated fiber

2.7 金属镀层光纤光导性能

当光源在光纤界面发生反射时, 其中一部分能量会以热能的形式散出, 从而导致表面温度升高, 给光纤的应用带来了诸多限制。而金属是优良的导热介质和耐高温材料, 采用金属镀层替代光纤表面的有机保护层, 既有利于光纤的散热, 还可使光纤的服役温度从几十度提高到上千度。

表 5 为金属镀层光纤在 100 ℃ 的导光性能, 图 8 为金属镀层光纤红外热感图。其中 1 号试样为原始光纤, 2 号试样为表面镀镍时间 0.5 h, 3 号试样为表面镀镍 1.5 h。由表 5 可以看出, 当金属镀层光纤表面温度达到 100 ℃ 时, 2 号试样

通过功率为 1.692 W, 透过率为 80.57%; 3 号试样通过功率为 5.74 W, 透过率为 92.58%。随着镀覆时间的增加, 镀层厚度也增加, 对于光纤表面散热性会有明显提升; 随着镀覆时间增加, 光纤透过功率随之增加, 功率趋近于无损失状态。由图 8(a)(b) 可发现, 金属镀层光纤导光后表面热量集中处 (即最高温度点, 图 8(a) 99.3 ℃ 和图 8(b) 100.5 ℃) 主要在金属镀层与没有金属镀层交界处, 而表面镀有金属镀层位置, 温度场分布均匀, 且表面温度均低于环境平均温度, 可定义为均匀散热。与 1 号原始光纤相比, 金属镀层光纤表面最高温度可持续升高至金属熔点, 通过光源功率可持续增加, 不受原始光纤有机层熔点低的

表 5 Ni-P 金属镀层光纤导光性能
Table 5 Optical conductivity of Ni-P coated fiber

No.	Electricity / A	Input power / W	Through the power / W	Proportion / %	Note
1	14.0	69.5	69.0	99.28	
2	0.88	1.692	1.363	80.57	Ni-0.5h
3	1.55	5.74	5.3	92.58	Ni-1.5h

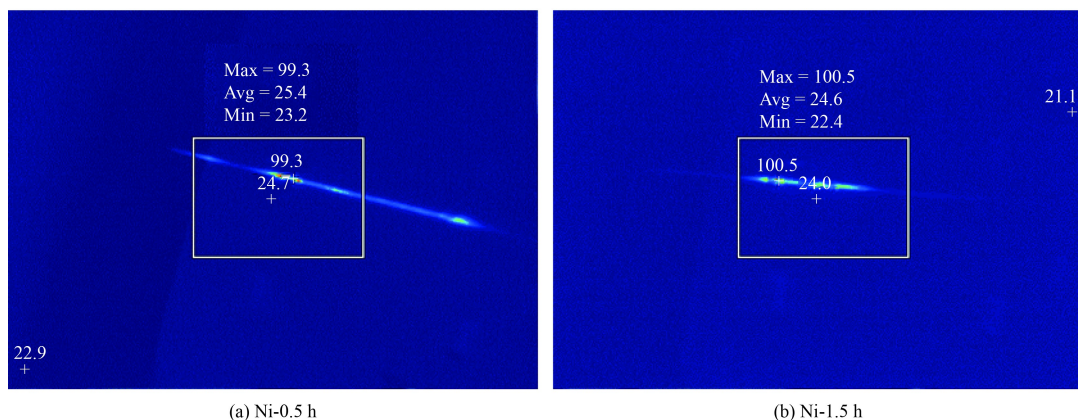


图 8 Ni-P 金属镀层光纤红外热感图

Fig.8 Infrared heat images of Ni-P coated optical fiber

影响,且散热均匀,克服了高温烧损的致命缺点。虽然满足金属镀层光纤散热要求,但在相同条件下金属镀层光纤透过率及通过功率目前仍无法超越原始光纤,也是后续需要解决重要问题。

3 结 论

试验对石英光纤表面无粗化化学镀镍的前处理工艺进行探索,同时对优化工艺后的镀层性能进行检测,主要结论如下:

(1) 化学镀 Ni-P 合金时,优化的前处理条件为:采用丙酮去除保护层的时间应大于 15 min; NaOH 溶液除油浓度应为 30 g/L,时间 15 min 以上;敏化和活化温度均为 35 ℃、时间为 10 min。

(2) 组织观察表明,无粗化化学镀 Ni-P 镀层表面致密平整、晶粒细小均匀,镀层并无漏镀、裂纹、气孔等缺陷,符合光纤表面金属化要求。

(3) 拉伸测试表明,化学镀 Ni-P 合金光纤的抗拉强度 2783 MPa,较裸光纤的抗拉强度 1820 MPa,提升了 52.93%。热震试验表明,金属镀层均无开裂、起皮等现象,镀层结合良好。

(4) 导光测试表明,金属镀层光纤透光性能良好,最高透过功率为 92.58%,满足使用要求。同时,金属镀层光纤能够对光纤表面散热起到作用,克服光纤表面温度过高烧损现象。

文中优化的光纤金属化处理工艺,符合光纤在复杂环境下的工作要求,可提升使用光纤寿命,拓展石英光纤的应用范围。

参考文献

[1] 牟风明,吕公河,曹冰,等. 光纤传感技术在油田监测领域

中的应用[J]. 石化技术, 2019, 26(9): 108-110.

MOU F M, LV G H, CAO B, et al. Application of optical fiber sensing technology in oilfield monitoring[J]. Petrochemical Technology, 2019, 26(9): 108-110.

[2] 王铮. 刍议光纤传感器在军事上的应用与发展[J]. 通讯世界, 2019, 26(9): 35-36.

WANG Z. On the application and development of fiber optic sensors in military field[J]. Communication World, 2019, 26(9): 35-36.

[3] 冯浩,青春,韩冰,等. 军用光纤连接器发展研讨[J]. 机电元件, 2008, 38(4): 50-64.

FENG H, QING C, HAN B, et al. Discussion on development of military optical fiber connectors[J]. Electromechanical Components, 2008, 38(4): 50-64.

[4] 宋启良,胡振峰,杜晓坤,等. 非金属表面化学镀覆的研究现状[J]. 电镀与涂饰, 2019, 38(3): 125-131.

SONG Q L, HU Z F, DU X K, et al. Research status of electroless plating on non-metallic surfaces[J]. Electroplating and Finishing, 2019, 38(3): 125-131.

[5] 姚文历. 光纤光栅金属化工艺及特性研究[J]. 光电技术应用, 2012, 27(6): 46-51.

YAO W L. Study on metallization process and characteristics of fiber grating[J]. Application of Optoelectronic Technology, 2012, 27(6): 46-51.

[6] 温昌金,李玉龙,王裕波. 金属化光纤光栅高温失效及其光谱特性[J]. 激光与红外, 2016, 46(4): 481-485.

WEN C J, LI Y L, WANG Y B. High temperature failure and spectral characteristics of metallized fiber grating[J]. Laser and Infrared, 2016, 46(4): 481-485.

[7] 刘铁根,王双,江俊峰,等. 航空航天光纤传感技术进展[J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(8): 1681-1692.

LIU T G, WANG S, JIANG J F, et al. Advances in aerospace optical fiber sensing technology[J]. Journal of Instrumentation, 2014, 35(8): 1681-1692.

- [8] HSIAO T C, HSIEH T S, CHEN Y C, et al. Metal-coated fiber bragg grating for dynamic temperature sensor[J]. [Optik](#), 2016, 127: 10740-10745.
- [9] 王裕波. 光纤传感器激光焊接封装及其热压传感特性[D]. 南昌: 南昌大学, 2017.
- WANG Y B. Optical fiber sensor laser welding package and its thermal pressure sensing characteristics[D]. Nanchang: NanChang Universit, 2017 (in Chinese).
- [10] 杨珂, 李玉龙, 李学文. 镀镍光纤抗拉强度及其影响因素[J]. [激光与红外](#), 2008, 48(6): 769-774.
- YANG K, LI Y L, LI X W. Nickel plated fiber tensile strength and its influencing factors[J]. [Laser and Infrared](#), 2008, 48(6): 769-774 (in Chinese).
- [11] 彭健, 杨郭, 周宇. 稀土元素对光纤表面化学镀镍的影响[J]. [广州化工](#), 2010, 38(11): 87-88.
- PENG J, YANG G, ZHOU Y. Effect of rare earth elements on electroless nickel plating on optical fiber surface[J]. [Guangzhou Chemical Industry](#), 2010, 38(11): 87-88 (in Chinese).
- [12] 姜德生, 徐海鹏, 李小甫. 适用于高温的石英光纤表面金属化的研究[J]. [武汉理工大学学报](#), 2008, 30(4): 1-4.
- JIANG D S, XU H P, LI X P. Research on the surface metallization of high temperature quartz fiber[J]. [Journal of Wuhan University of Technology](#), 2008, 30(4): 1-4 (in Chinese).
- [13] 朱月红, 文继华. 光纤光栅表面化学镀镍及影响镀层性能的因素[J]. [表面技术](#), 2008, 47(7): 241-245.
- ZHU Y H, WEN J H. Electroless nickel plating on the surface of fiber Bragg grating and the factors affecting the properties of the coating[J]. [Surface Technology](#), 2008, 47(7): 241-245 (in Chinese).
- [14] BNBEL G M, KRAUSE J T, BICKTA B J, et al. Mechanical reliability of metallized optical fiber for hermetic terminations[J]. [Journal of Lightwave Technology](#), 1989, 7(10): 1488-1493.
- [15] 旷戈, 张济宇, 钟赞辉. 光纤表面金属化工艺的研究[J]. [电镀与环保](#), 2004, 24(2): 32-34.
- KUANG G, ZHANG J Y, ZHONG Y H. Research on fiber surface metallization process[J]. [Electroplating and Environmental Protection](#), 2004, 24(2): 32-34 (in Chinese).
- [16] 徐海鹏. 石英光纤光栅表面化学镀镍及其传感特性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2012.
- XU H P. Research of electroless nickel plating on the surface of quartz optic fiber grating and the sensing characters[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2012 (in Chinese).