

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.04.017

光纤环时效处理的有效性分析

杨纪刚, 毕聪志, 李丽坤, 冯 喆

(北京自动化控制设备研究所, 北京 100074)

摘要:作为光纤陀螺的核心敏感元件, 光纤环质量的优劣直接决定了光纤陀螺的精度。而目前光纤环制作工艺仍处于不断完善阶段。针对光纤环成环过程的温度时效工艺的处理效果进行了重点实验分析, 实验结果充分显示了温度时效处理对当前光纤线圈的应力释放效果。同时, 还讨论了振动时效处理方法释放光纤环残余应力的作用效果, 结果表明, 该方法在释放残余应力方面更为有效。

关键词:光纤陀螺; 光纤环; 应力; 温度时效; 振动时效

中图分类号: V241.5

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2017)04-0109-04

Effectiveness Analysis of Aging Treatment of Optical Fiber Ring

YANG Ji-gang, BI Cong-zhi, LI Li-kun, FENG Zhe

(Beijing Institute of Automatic Control Equipment, Beijing 100074, China)

Abstract: As the core sensing element of fiber optic gyro (FOG), the quality of optical fiber ring directly determines the precision of FOG. At present, the manufacturing process of the fiber ring is still in the perfecting stage. In this paper, the effect of temperature aging on optical fiber ring is analyzed by detecting the change of the stress state of the optical fiber ring before and after temperature aging. The results show that, the current temperature aging method has little effect on releasing the residual stress of optical fiber ring. By the time, the effect of vibratory stress relief (VSR) method is analysed, and the VSR is more effective than temperature aging treatment.

Key words: Fiber optic gyro; Fiber coil; Stress; Temperature aging; VSR

0 引言

光纤陀螺^[1]具有耐冲击、全固态、体积小、检测灵敏度高、动态范围宽、启动时间短等特点^[2]。经过多年的研究和发展, 干涉式光纤陀螺完成了从实验室研发到产品化的过程, 中低精度的光纤陀螺已经商品化, 并在多领域内广泛应用^[3]。高精度光纤陀螺的开发和研制也进入成熟阶段, 已经开始工程化应用。目前, 国外的光纤陀螺研制水平领先于国内, 主要原因包括其起步时间远早于国内的研制单

位; 另外, 国外先进国家在材料加工与控制设备领域都相对国内有着绝对的优势。我国由于起步较晚, 设备相对落后, 因而在光纤陀螺的研制方面仍然存在许多不足, 主要包括光纤材料性能、光纤环的绕制、光学器件的稳定性等方面。作为光纤陀螺的核心敏感元件, 目前, 光纤环的成环工艺流程仍然是国内光纤陀螺领域的重点研究内容。由于设备不足等因素, 对光纤环成环各个工艺阶段缺乏针对性的检测和验证, 仅在光纤环绕制完成后进行整表性能测试, 无法具体分析光纤环的成环过程中各

收稿日期: 2017-04-13; 修订日期: 2017-04-28

基金项目: 国防科工局基础研究项目(JCKY2013204B004)

作者简介: 杨纪刚(1988-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事高精度惯性器件方面的研究。E-mail: 786327235@qq.com

个阶段的问题。本文采用分布式应力测试设备对光纤环在缠绕完成后的时效处理方法的有效性进行了深入的理论分析和实验验证。

1 分布式光纤传感技术

分布式光纤传感技术具有传感合一、分布式测量等优点,可以对空间连续变量场进行测量^[4]。目前利用布里渊散射的分布式光纤传感技术的测量精度最高,技术最为成熟。基于受激布里渊散射^[5]的布里渊光时域分析技术(Brillouin Optical Time Domain Analysis, BOTDA)是目前分辨率最高、测量长度最长的分布式光纤传感技术。

BOTDA的原理如图1所示,在光纤两端分别射入光波频率固定的泵浦光和频率可调的连续光。当泵浦光在光纤中传播,受到外界环境温度或应力扰动时,在扰动点产生的受激布里渊散射会发生一定比例的频移,而另一端射入的连续光通过调整频率,使其与受激布里渊散射频率一致时,连续光功率将被放大。通过探测器检测连续光频率与泵浦光的频率差,即可得到外界环境温度或应力扰动的大小。根据探测到受激布里渊散射与泵浦光发射的时间差即可得到扰动点的位置,实现分布式检测。

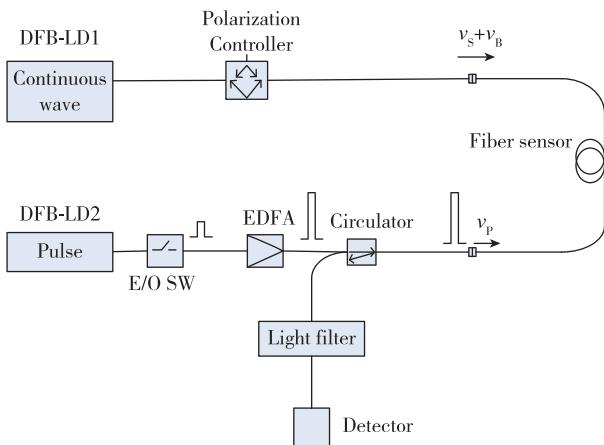


图1 BOTDA原理图

Fig. 1 The scheme of BOTDA

布里渊中心频移与光纤折射率的关系为

$$\nu_B = 2n\nu_A/\lambda_p \quad (1)$$

其中, ν_B 为布里渊中心频移; n 为光纤折射率; ν_A 为声速; λ_p 光波平均波长。

而光纤折射率则是与温度和应力的变化呈线性关系

$$n(T, \epsilon) = n(T_0) + \frac{\partial n}{\partial T}(T - T_0) + \frac{\partial n}{\partial \epsilon} \epsilon \quad (2)$$

其中, $\frac{\partial n}{\partial T}$ 为折射率温度系数; $\frac{\partial n}{\partial \epsilon}$ 为折射率应变系数; $n(T_0)$ 为零应力状态下 T_0 温度的折射率; ϵ 为应变。

根据式(1)和式(2),在温度稳定的情况下,应力分析仪就可以准确测得光纤中的应力状态。

本文以基于BOTDA的高精度保偏光纤应力分析仪作为主要检测设备。重点分析了光纤环成环过程中的温度时效处理方法和振动时效(VSR)处理方法释放残余应力的效果。

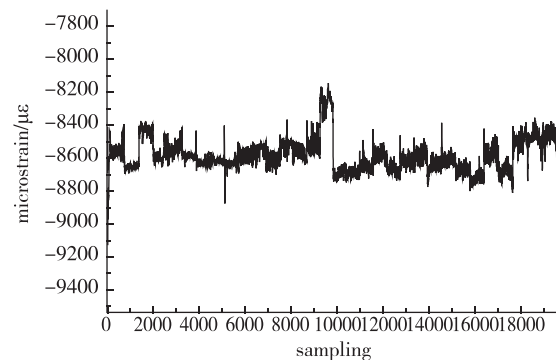
2 光纤线圈的时效处理方法的验证与分析

目前,绕线机绕制光纤线圈过程中存在的主要问题包括两个方面:第一是绕线机的张力控制系统存在一定缺陷,机械结构配合度无法达到高稳定性要求;第二方面是在绕线过程中人为干预过多,当操作者发现绕线过程中出现爬层或缝隙过大时会进行停机、倒车、重新绕制。由于以上两方面原因,光纤线圈内部沿光纤存在比较明显的应力波动和跳跃,影响了光纤环的互易性温度性能。目前,工艺上广泛采用的改善措施是对绕制完成后的光纤线圈进行温度时效处理,目的是释放掉光纤线圈绕制过程中产生的残余应力。

2.1 温度时效处理方法的验证与分析

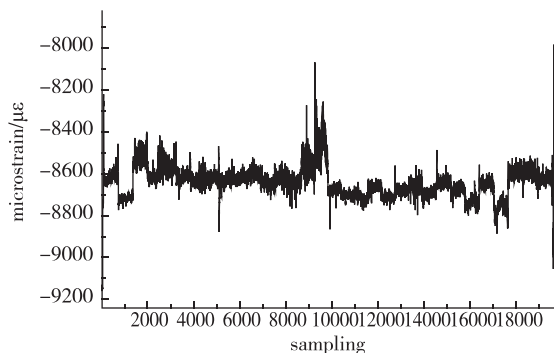
本文通过应力分析仪检测光纤线圈温度时效处理前后的应力分布状态,对当前温度时效处理方法释放残余应力的实际效果进行了验证。如图2所示。

对比图2中光纤线圈在温度时效处理前后的应力曲线,可以看出,其应力分布状态并没有什么明显的变化。为了加强对比,将时效处理前后的应力



(a) 时效处理前

(a) Before aging treatment



(b) 时效处理后

(b) After aging treatment

图 2 光纤线圈应力分布曲线

Fig. 2 The stress distribution curve of fiber coil

曲线放在一起,如图 3 所示。从图 3 中可以看出,温度时效处理后,光纤线圈的应力曲线的波动状态没有产生明显的变化。

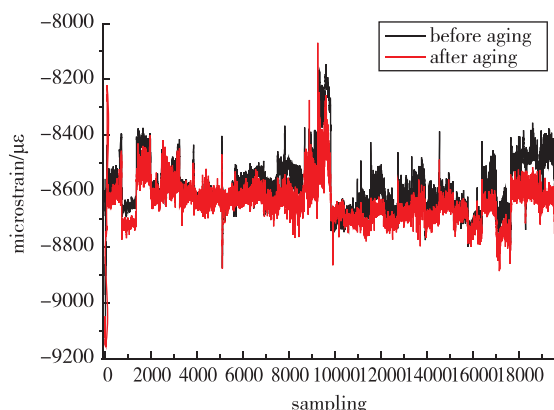


图 3 光纤线圈应力分布曲线

Fig. 3 The stress distribution curve of fiber coil

分析温度时效处理效果欠佳的原因:其一是光纤线圈绕制需要多层叠加,由内层到外层光纤受到一定的挤压作用,使绕制过程中产生的畸变状态很难舒展开;第二,如图 4 所示,光纤线圈绕制在工装骨架上,在每一层内,有上百匝光纤紧密缠绕并受到两侧夹板的限制,其相互挤压作用也比较明显,增大了光纤间的摩擦力,从而阻碍了具有扭曲状态的光纤的应力释放;另外,根据光纤结构,光纤内部的应力主要来自光纤包层和涂覆层,而涂覆层主要为丙烯酸酯类高分子材料,不耐高温,因此,温度时效处理在 $-40 \sim 80^{\circ}\text{C}$ 循环,温度范围较小,无法激发光纤内部应力的弹性释放。基于以上问题,导致最终温度时效处理的作用并不明显。

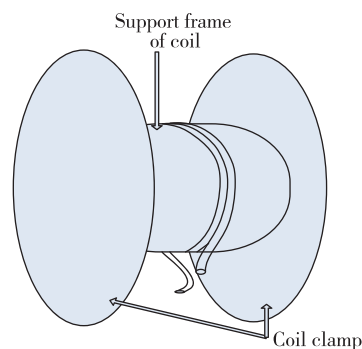


图 4 光纤线圈绕制工装

Fig. 4 The winding equipment of fiber coil

在对光纤线圈进行温度时效处理前后,对光纤线圈的光功率损耗以及消光比的变化进行了测试,结果表明,在温度时效处理前后,光纤线圈的光功率损耗和消光比均无明显变化。

2.2 关于 VSR 处理方法的研究

2.2.1 VSR 处理方法机理

对于某一系统的残余应力可以从以下两个方面理解^[6-7]:一是从宏观方面,系统由于在安装、转移、碰撞等过程中,在各个器件单元的接触面和螺钉装卡位置产生了相互间不匹配引起的挤压应力;二是从微观方面,由于器件在生产成型过程中,由于高温转换等原因导致器件内部晶粒错位或高分子扭曲异位而产生内部应力。总体上来说,应力是由于系统内部各个单元位错而处于亚稳定状态产生的。

VSR 处理的机理^[8]就是对系统提供一定的动应力,促使系统内部处于亚稳态个体单元获得能量而剧烈运动,克服临近其他个体单元的束缚而回到更加稳定低能的平衡位置上,从而使系统内部个体单元位错减少,达到削弱残余应力的目的。

对于刚绕制完成的光纤线圈,其残余应力的分析需要借用上述微观方面残余应力的分析方法:光纤线圈的横截面示意图如图 5 所示,将其中的每一匝光纤看作整个光纤线圈的微观个体单元,在光纤绕制过程中,由于光纤的圆整度不一致、绕线机控制精度有限和人为操作等原因,各匝光纤会形成图中残余应力区所示的挤压和位错,从而使光纤处于一种亚稳定状态,形成残余应力。

采用 VSR 方法,就是对光纤线圈提供一定的动应力,给各匝光纤提供一定的能量,使其摆脱相邻光纤的挤压束缚回到更加稳定的位置,从而减小其扭曲变形,降低光纤的残余应力。

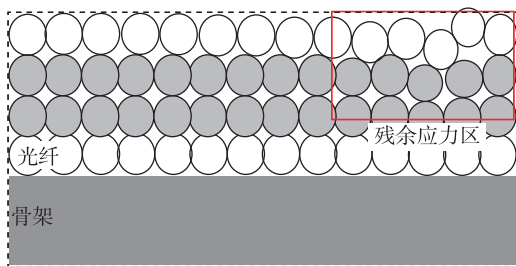


图5 光纤线圈横截面示意图

Fig. 5 The cross section of fiber coil

2.2.2 VSR 实验结果分析

本文对绕制完成的光纤线圈进行了 VSR 处理, 并采用高精度保偏光纤应力分析仪在时效处理前后对光纤线圈的应力状态进行了检测分析。其 VSR 前后的应力状态如图 6 所示。

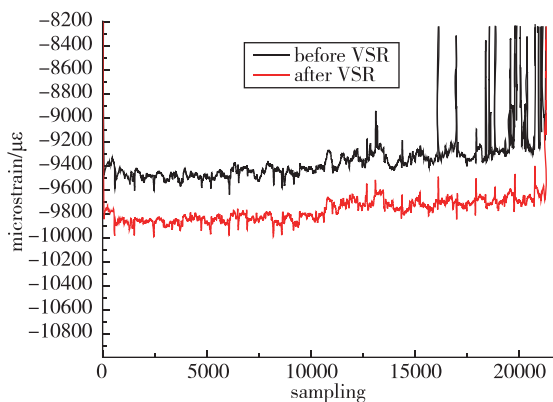


图6 光纤线圈应力分布曲线

Fig. 6 The stress distribution curve of fiber coil

从图 6 中的应力曲线可以看出, VSR 处理前后, 光纤线圈的应力分布状态得到了明显的改善。该光纤线圈在 VSR 处理前, 应力测试曲线存在较多明显的失真跳数, 且应力状态波动较大, 根据应力分析仪的检测原理, 光纤中的应力测试曲线存在较大的跳数, 表明光纤中的应力存在较大的跳变, 光纤局部残余应力较大, 光纤内部的应力均匀性较差。经过振动处理后, 从光纤线圈的应力测试曲线可以看出, 光纤中局部较大的残余应力得到了有效释放, 光纤中的应力状态均匀性更加一致。

2.3 温度时效处理与 VSR 处理的对比分析

在实验过程中, 通过一些宏观参数的检测发现, 光纤线圈在 VSR 处理前后的光功率损耗与消光比都得到了一定的改善, 经过 VSR 后的光纤线圈传

光效果更好; 而经过温度时效处理后, 光纤线圈的光功率损耗和消光比等并未有明显变化, 同时根据应力分布测试曲线可以看出, 经过温度时效后, 光纤中某些局部应力反而增大。

温度时效由于存在温度范围的限制, 温度时效对光纤线圈的作用效果是有限的, 且可调节空间较小, 同时温度时效时间周期较长, 在能源和人力等方面的消耗较大; VSR 的优势在于, 时效周期短, 能源消耗较小, 工作效率高, 同时 VSR 的作用强度可以通过调节振动时间和频率进行调节。

3 结论

本文通过实验验证与理论分析, 对当前光纤线圈的时效处理方法进行了重点研究。通过对温度时效处理前后的光纤线圈的应力状态检测, 充分显示了温度时效处理方法对于光纤线圈的残余应力的释放的作用效果; 同时对 VSR 处理方法对光纤线圈的作用效果进行了验证, 结果表明, VSR 处理方法在处理过程的灵活性与残余应力的释放效果方面具有一定的独特优势。后续将对光纤环灌封固化后的时效方法进行研究。

参考文献

- [1] Vali V, Shorthill R W. Fiber ring interferometer [J]. Applied Optics, 1976, 15(5): 1099-1100
- [2] Lefever H C. The fiber-optic gyroscope [M]. Norwood: Artech House INC, 1993.
- [3] 王巍. 惯性技术研究现状及发展趋势[J]. 自动化学报, 2013, 39(6): 723-729.
- [4] 丁振扬, 姚晓天, 刘铁根, 等. 采用分布式偏振串扰检测保偏光纤环质量的研究[J]. 光电子激光, 2010, 21(3): 430-434.
- [5] Demarest F C. Simultaneous distributed fibre temperature and strain sensor using microwave coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter [J]. Measurement Science & Technology, 2001, 12(7): 834-842.
- [6] 王壬炎, 王时英. 超声振动时效的机理及实验研究[J]. 中国农机化学报, 2015, 36(2): 59-62.
- [7] 张磊, 王时英. 超声振动时效可行性分析及实验研究[J]. 机械设计与制造, 2013(7): 140-143.
- [8] 庆光蔚. 振动时效衍生新型工艺技术特点与应用[J]. 热加工工艺, 2015, 44(8): 8-11.