

紧包光纤的布里渊频移和应变测量研究

王传琦, 王晓锋, 伍历文, 王辅东, 陈焕新

(深圳市特发信息股份有限公司, 广东 深圳 518057)

摘要: 针对布里渊散射应力监测领域中的光纤涂层材料选择, 分别将 9 组加载力施加在海翠和尼龙紧包光纤传感线路上, 测试了加载力变化对紧包光纤的布里渊频移谱线和应变值影响, 结合材料机械性能参数对比分析。实验结果表明, 海翠紧包光纤的频移谱线仅局部发生变宽现象, 并且其应变值在全区间保持线性变化。与尼龙材料相比, 海翠材料凭借抗干扰性能、应变敏感度方面的优势, 更适用于光纤传感应力监测领域。

关键词: 布里渊频移; 频移谱线; 应变; 紧包光纤

中图分类号: TN929.11; TQ334.1 文献标识码: A 文章编号: 1002-5561(2018)04-00037-03

DOI: 10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2018.04.010

Research on the Brillouin frequency shift and strain measurements in tightly buffered fiber

WANG Chuanqi, WANG Xiaofeng, WU Liwen, WANG Fudong, CHEN Huanxin

(Shenzhen SDG Information Co., Ltd., Shenzhen Guangdong 518057, China)

Abstract: In order to select the optical fiber coating material in the strain monitoring field of Brillouin scattering, this paper used nine groups of loading force change on the Hytrel and Nylon tightly buffered fiber sensing circuit respectively, tested the loading force change affect of the spectral line of frequency shift and strain values of tightly buffered fiber, combined with the contrast analysis of materials mechanical performance parameters. The experimental results showed that the spectral line frequency shift of Hytrel tightly buffered fiber become wider only in local, and the strain value of Hytrel tightly buffered fiber will keep linear change. Hytrel material that is more suitable for the field of fiber sensor stress monitoring than Nylon materials based on the advantages of anti-jamming performance and strain sensitivity.

Key words: Brillouin frequency shift; spectral line of frequency shift; strain; tightly buffered fiber

0 引言

基于布里渊散射的分布式应变和温度传感光纤系统具备应变与温度同时测量, 以及高精度、高空间分辨率和远距离等优点, 在抗电磁干扰、抗高温和长距离监测需求的石油燃气管道^[1]、高压输电线路^[2,3]和海底电缆^[4,5]等领域中得到了快速发展。该技术也成为国内外传感监测领域的研究热点^[6-9]。

近年来, 国内有关分布式光纤传感技术在温度和应力监测领域的应用研究日趋增多^[10,11], 贾振安等提出了一种基于分布式光纤布里渊散射的油气管道的应

力监测方法^[12], 通过分析应变与布里渊频移之间的关系, 研究了油气管道的形变侦测报警。本文以砝码作为加载力模拟应力监测环境, 研究布里渊光时域分析(BOTDA)分布式光纤传感技术在不同紧包光纤涂层材料中的适用性。

1 实验原理与设计

1.1 实验原理

由于布里渊频移与应变和温度之间均存在线性关系, 首先, 通过高采样速率的采集卡进行时间的高精度分辨, 再利用时间和位置的一一对应关系, 可准确得到采样信息的位置, 并对接收的反射回来的光信号进行分析。其次, 布里渊光纤传感器有良好的线性

收稿日期: 2017-12-04。

作者简介: 王传琦(1984-), 男, 博士, 工程师, 主要研究方向为光通信、特种光缆及光纤传感器。

输出性能,通过一系列相干检测的方法处理光信号,可得到布里渊频移变化,再将数据传入中心控制计算机进行计算分析,从而得到精确的应变和温度数据。最后,当光纤材料特性受到应变和温度的影响时,由于光纤材料声子的特性与布里渊频移大小有直接关系,通过检测布里渊频移变化,便可精确计算出沿光纤链路上相对位置的应变和温度。具体计算公式如下:

$$\nu_B(T'\epsilon) = \nu_B(T_0'0) + C_{T'\nu}(T - T_0) + C_{\epsilon'\nu}\epsilon \quad (1)$$

$$P_B(T'\epsilon) = P_0 + C_{T'p}(T - T_0) + C_{\epsilon'p}\epsilon \quad (2)$$

式(1)中, $\nu_B(T'\epsilon)$ 为测试温度 T 和应变 ϵ 下的布里渊频移, $\nu_B(T_0'0)$ 为参考温度 T_0 下的布里渊频移; $C_{T'\nu}$ 与 $C_{\epsilon'\nu}$ 分别为布里渊频移温度系数和应变系数;式(2)中, $P_B(T'\epsilon)$ 为测试温度 T 和应变 ϵ 下的布里渊功率, P_0 为参考温度 T_0 下的布里渊功率; $C_{T'p}$ 与 $C_{\epsilon'p}$ 分别为布里渊功率温度系数和应变系数。

1.2 实验设计

BOTDA 应变测试实验系统如图 1 所示,该系统由分析仪、紧包光纤、导轮和定量砝码组成。为达到传感线路同位置验证的目的,本文将尼龙紧包光纤(A段)和海翠紧包光纤(B段)两端分别与 BOTDA 线路连接形成测试回路,并利用导轮和定量砝码对紧包光纤在加载力作用下的应变进行测试。

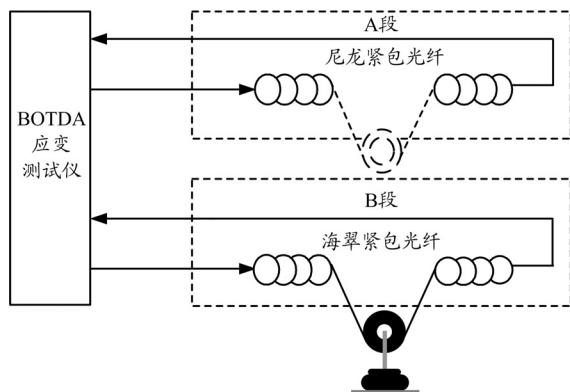


图 1 BOTDA 应变测试实验系统

1.3 实验设备和选用光纤

本文选用的分析仪中激光器的工作波长为 1550nm,扫描范围设置为 10~13GHz,采用差分脉冲技术实现了 1m 的空间分辨率。较传统 BOTDA,本系统可提供分布式应变和温度的同时测量,当空间分辨率为 1m 时,测量理论范围可达 15km,测量精度为 20 $\mu\epsilon$ 。

实验选用的尼龙紧包光纤和海翠紧包光纤的外径分别为 0.869mm 和 0.831mm,两者外径较为

接近。其中,紧包光纤涂层所用尼龙的拉伸模量为 1400MPa、断裂伸长率为 280%;所用海翠材料的拉伸模量为 525MPa、断裂伸长率为 450%,形成紧包光纤后的最小弯曲半径动态为 20D,静态为 10D。

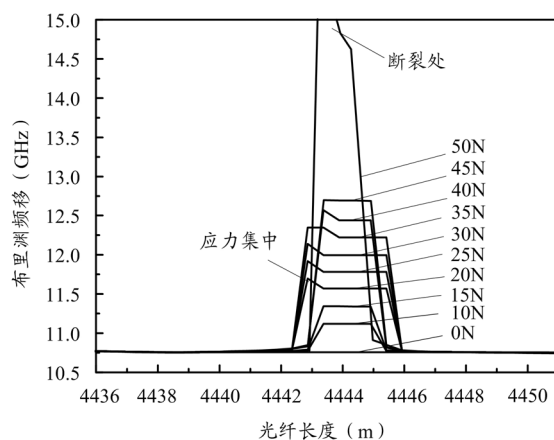
1.4 应变监测实验

图 1 中,我们在传感光纤线路的 A 段和 B 段两个测试回路分别加载砝码,等同加载力在 20~100N 区间,每隔 10N 加载一次,利用滑轮接触紧包光纤,滑轮外侧有带底座的吊钩放置砝码。换算为单根紧包光纤的受力是 10N、15N、20N、25N、30N、35N、40N、45N 和 50N,两个实验均在室温 27℃ 下进行,温度对两种紧包光纤的布里渊频移影响可忽略。

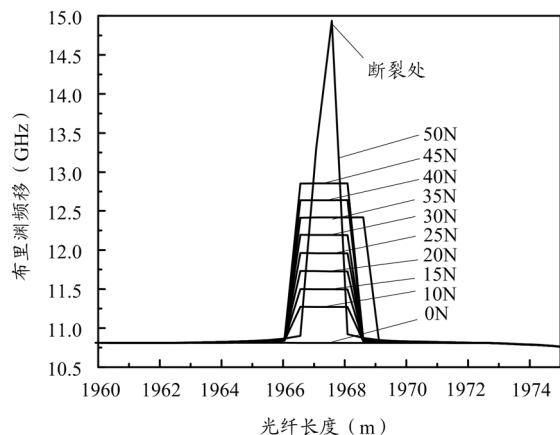
2 应力测量数据分析与讨论

2.1 加载力与布里渊频移的关系

BOTDA 测量尼龙和海翠紧包光纤的加载力与布里渊频移关系如图 2 所示,在单根施加力为 10~50N 的阶梯测试过程中,紧包光纤的布里渊频移值呈现出较



(a) 尼龙紧包光纤



(b) 海翠紧包光纤

图 2 加载力与布里渊频移的对应关系

为规律的变化,均在 50N 时发生破断。通过比对光缆表面计米位置,发现应力峰值位置与载荷施加处吻合。

分析图 2 中的布里渊频移曲线可以发现,频移峰范围顶部宽 1.5m,底部宽 2.5m,满足空间分辨率为 1m 的标准。在图 2(a)中,频移谱线在加载力 20~40N 区间内出现尖角或变宽的现象,尼龙紧包光纤尖角的出现表示其易发生应力集中;而图 2(b)仅在其加载力为 35N 时频移谱线发生变宽的现象。具体原因可借助材料的机械性能参数进行分析,尼龙的拉伸模量为 1400MPa,远高于海翠的 525MPa,说明尼龙在受到加载力时发生的形变能力弱于海翠,相对于海翠涂层,其发生局部应力集中的几率要高。而涂覆在光纤表面的海翠涂层使得测试线路上的紧包光纤在抗干扰性上更具有优势,这也说明海翠紧包光纤更适用于布里渊监测应力领域。

2.2 加载力与应变值的关系

两种紧包光纤所受加载力与应变值的线性关系分布如图 3 所示,可以看出在加载力为 20N 以下时,尼龙和海翠紧包光纤的应变值处于线性变换区,说明两种涂层在此受力范围内将应力传导至内部光纤引起的形变均匀,应变值变化规律。而当载荷至 20N 以上时,尼龙紧包光纤的应变值增加由线性向曲线变化,并持续到 45N,说明尼龙在受力加大时通过它传入光纤的力值发生偏差,进而导致了应变值偏移,在测试精度上会有偏差,需要校对。而海翠紧包光纤的加载力与应变值的关系在全区间保持线性变化,说明海翠材质传力值到内部光纤是较为均匀的,避免了区间力值波动对光纤形变的影响,与传感光纤的匹配性好。这是因为海翠为热塑性聚酯弹性体,断裂延伸率为 450%,而尼龙的断裂延伸率为 280%,在同一加载力作用下,海翠紧包光纤的应变值均大于尼龙紧包光纤,海翠涂层的应变敏感度优于尼龙涂层。结合图 2

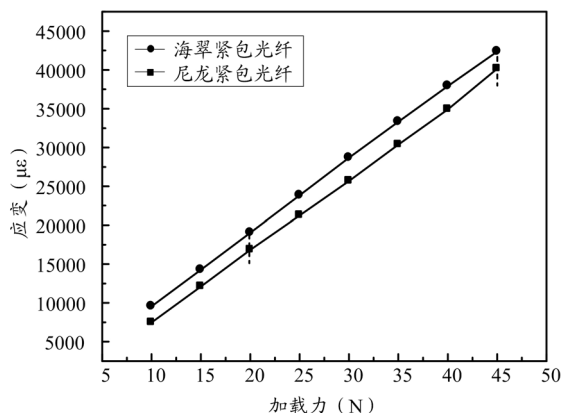


图 3 紧包光纤加载力与应变值的线性关系

进一步说明,在分布式光纤布里渊散射测应力领域,选择海翠涂层紧包光纤更为适合。

3 结束语

本文研究了同一传感线路上不同材质紧包光纤的加载力变化对布里渊频移和应变值的影响,并分别使用 9 组加载力对海翠和尼龙紧包光纤传感线路进行了实验。实验结果表明,紧包光纤的布里渊频移值在测试过程中呈现较为规律的梯度变化;在频移谱线表现上,海翠紧包光纤仅局部发生变宽的现象,而尼龙紧包光纤在多区间出现尖角或变宽的现象,将更易发生应力集中,影响测试精度;在应变值表现上,海翠紧包光纤的应变值在全区间保持线性变化,而尼龙紧包光纤的应变值当加载力超过 20N 时发生曲线变化。依据两种涂层材料机械性能参数的对比分析,我们得出紧包光纤涂层使用海翠材料在抗干扰性、应变敏感度等方面优于尼龙材料,更适用于分布式布里渊光纤传感技术在应力监测领域的应用。

参考文献:

- [1] MIRZAEI A, BAHRAMPOUR A R, TARAZ M, et al. Transient response of buried oil pipelines fiber optic leak detector based on the distributed temperature measurement [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013(65): 110-122.
- [2] 连纪文,卓秀者. 基于 BOTDA 的 OPPC 温度和应力监测研究与应用 [J]. 光通信技术, 2016, 40(1): 26-28.
- [3] 王丽, 罗健斌. 城市电网高压电缆光纤传感在线监测技术对比试验研究 [J]. 高压电器, 2015, 51(7): 63-68, 73.
- [4] 吕安强,李永倩,李静,等. 基于 BOTDR 的光纤复合海底电缆应变/温度监测 [J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 533-539.
- [5] 李永倩,赵丽娟,杨志,等. 基于 BOTDR 的海缆 3D 立体监测系统设计与实现 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(5): 1029-1036.
- [6] 李永倩,李晓娟,安琪. 提高布里渊光时域反射系统传感性能的方法 [J]. 光学学报, 2015, 35(1): 0106003-1-0106003-10.
- [7] 姜芸, 贾新鸿, 王子南, 等. 基于随机分布式反馈光纤激光器的 100km 布里渊光时域分析系统 [J]. 光电子·激光, 2013, 24(1): 45-49.
- [8] 张超,饶云江,贾新鸿,等. 基于双向拉曼放大的布里渊光时域分析系统 [J]. 物理学报, 2010, 59(8): 5523-5527.
- [9] 毕卫红,杨希鹏,李敬阳,等. 布里渊光时域反射系统中布里渊散射信号的前向和后向拉曼放大研究 [J]. 中国激光, 2014, 41(12): 1205007-1-1205007-6.
- [10] 王传琦,王辅东,李志鹏,等. 尼龙紧包光纤的布里渊频移和温度监测研究 [J]. 光通信技术, 2017, 41(11): 57-59.
- [11] 王传琦,伍历文,刘阳. 分布式光纤温度和应变传感系统研究进展 [J]. 传感器与微系统, 2017, 36(4): 1-4, 7.
- [12] 贾振安,王虎,乔学光,等. 基于分布式光纤布里渊散射的油气管道应力监测研究 [J]. 光电子·激光, 2012, 23(3): 534-537.