

基于光纤光栅技术的预应力孔道注浆密实性研究

李楠¹, 张军^{1,2}

(1. 甘肃省交通科学研究院集团有限公司, 甘肃 兰州 730030; 2. 甘肃省桥梁隧道健康监测与安全评估技术重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为了研究金属波纹管注浆密实性大小, 采用光纤光栅检测技术对6种不同注浆缺陷(包括无缺陷和缺陷率为7%、10%、13%、16%、100%的共6种工况)进行现场检测, 将密实管和空管作为对照组。通过验证检测结果与设置缺陷的一致性, 经过解调仪采集在不同注浆时间(包括初始、10 min、180 min、1 440 min的共4个时刻)的光纤光栅轴向应变来分析密实程度, 然后用轴向应变反推光纤光栅中心波长变动量值情况。研究结果发现: 对于注浆密实部位应变变化较小, 缺陷部位应变变化明显, 应变变化随着缺陷率的增大而减小; 在注浆180 min时应变变化值最大, 占注浆10 min和1 440 min应变变化值之和的60%以上; 孔道密实性检测结果与缺陷设置处具有较高的一致性, 光纤光栅中心波长变动量随着孔道变形越大越显著。

关键词: 光纤光栅技术; 密实程度; 注浆孔道; 缺陷率; 中心波长

中图分类号: U446; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)12-0307-05

Study on Grouting Compactness of Prestressed Duct Based on Fibre Bragg Grating Technology

LI Nan¹, ZHANG Jun^{1,2}

(1. Gansu Provincial Transportation Research Institute Group Co., Ltd., Lanzhou 730030, China; 2. Gansu Provincial Key Laboratory of Bridge and Tunnel Health Monitoring and Safety Assessment Technology, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To study the grouting compactness of metallic bellows, the fiber bragg grating (FBG) technology is adopted to carry out the on-site detection for six different grouting defects (including six different conditions with no defects and defect rates of 7%, 10%, 13%, 16% and 100%). Fully grouted pipes and empty pipes are served as control groups. By verifying the consistency between detection results and preset defects, the axial strain of the FBG at different grouting time (including the initial, 10 min, 180 min and 1,440 min, a total of four moments) is collected by the demodulation instrument to analyze the compactness, and then, the variation value of the central wavelength of the FBG is inversely deduced using the axial strain. The research findings reveals that for the grouting dense parts, the strain variation is relatively small, while for the defect parts, the strain variation is obvious. The strain variation decreases as the defect rate increases. The strain change is the greatest at 180 min of grouting, which accounts for more than 60% of the sum of the strain change values at 10 minutes and 1,440 minutes after grouting. The detecting results of the duct compactness have a high consistency with those at the defect settings. The variation of the central wavelength of the FBG becomes more significant as the deformation of the duct increases.

Keywords: fibre bragg grating technology; compactness; grouting duct; defective rate; centre wavelength

0 引言

截止目前, 对于国内公路桥梁预应力孔道注浆

密实性的监测方法研究较多, 针对铁路桥梁装配式桥墩孔道注浆密实性研究较少, 监测方法技术也不成熟, 注浆工艺及浆料特性对孔道密实性有着显著影响。1970年, 美国的康宁公司使用高纯度石英材料通过拉制, 做出了吸收损耗为20 dB/km的多模光纤, 预示着光纤向着低损耗方向有了实质性进展, 也为光纤通信的诞生埋下伏笔^[1-2]。1977年, 美国海军研究属相继研制定了将光纤传感技术使用到航空航天领域监测中的计划, 接着美国宇航局、斯坦福大学等多个知名机构也开始相应研究^[3-5], 从此光纤传感

收稿日期: 2025-05-06

基金项目: 甘肃省公路交通建设集团有限公司科技项目(2022-ZH-061)

作者简介: 李楠(1990—), 女, 本科, 工程师, 从事公路桥梁试验检测及设备管理工作。

通信作者: 张军(1993—), 男, 硕士, 工程师, 从事预制装配式桥梁结构抗震研究、公路桥梁试验检测及复杂桥梁结构健康监测技术研究工作。电子邮箱: 1656884155@qq.com

技术开始蓬勃发展。1978年,加拿大的K.O.HILL等人首次研制出了世界上第一根光纤^[6]。国内袁慎芳等以机翼翼梁结构作为研究对象,同样采用光纤光栅对其表面应变进行检测,进而通过Ko位移理论重构测点处的变形^[7]。2001年,欧进萍等在大桥预应力梁中埋入多个光纤光栅应变传感器对梁的安全性进行监测,同时对大桥在运营中桥梁的损伤状态及通过的车流量进行把控^[8]。史镜名等通过不同形式的传感器技术研究设计了一种测量灵敏度高、布置位置灵活多变、可重复应用的耦合锥结构的光纤光栅超声波传感器^[9]。张帅兵通过光栅传感技术理论对已有解调技术方法进行研究分析,选择具有扫描激光器技术的解调方法,从而设置了操作平台并完成多通道传感技术的工程样机研制^[10]。张军基于预应力桥墩孔道灌浆密实性对其结构力学性能的影响机理研究,采用缩尺模型试验方法对结构进行性能分析,通过多种密实性测试技术中选取较为可行的能够适用于装配式桥梁方面的孔道密实性检测技术^[11]。李鹏飞等利用光纤光栅应变传感技术,对某实际工程土质状况进行囊式扩体锚杆检测^[12]。聂建国等采取布里渊光时域反射传感技术的原理,对预制桩桩身内力、桩周摩阻力等参数进行测试,结果可为设计参数的优化提供依据^[13]。

本文基于某一实际工程预制装配式桥墩项目,建立预应力波纹管不同灌浆缺陷的密实性检测技术,通过设置6种不同大小的缺陷率来检测应变变化,从而定性判断孔道内注浆密实程度。

1 光纤光栅基本原理

基于光纤布拉格光栅(FBG)技术的多功能光纤光栅在线智能监测系统,利用波长携带了被测信息,较多的用于应变、温度、位移、压力等指标的监测。光纤布拉格光栅的纤芯呈现周期性条纹状布置,并会出现布拉格光栅效应,当一束宽谱带光源在光栅区域传输时,相应频率的入射光被反射回来,其余频率的光谱不受影响,从另一端透射出来^[14],见图1。

1.1 温度传输效应

对于光纤的材料特性,环境温度的变化会影响内部热效应,进而引起热膨胀、热传导导致的波形变化。因此,仅考虑外界温度变化的光纤光栅中心波长变动量关系式为:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(\alpha_n + \alpha_\Lambda)\Delta T = K_T\Delta T \quad (1)$$

式中: K_T 为光纤传感器的温度灵敏度系数; ΔT 为测

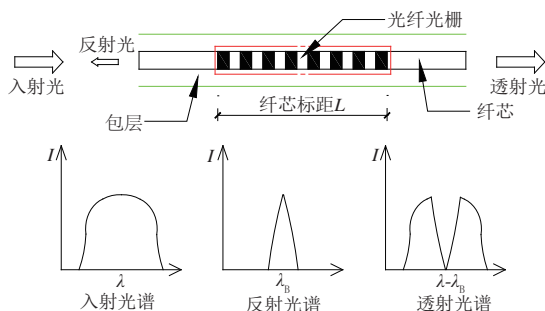


图1 光纤布拉格光栅结构图

量温度改变量; $\alpha_n + \alpha_\Lambda$ 为与材料本身有关的系数; λ_B 为光栅布拉格波长。

由式(1)可知,光纤光栅中心波长变动量与测量温度改变量满足线性变化,因而利用光纤光栅进行外界温度测试前,要先对光纤光栅的温度灵敏度进行精确标定。

1.2 应变传输效应

当检测对象受到外界作用会发生应变变化,这种变化会作用到固定的光纤光栅上,这时影响导致光纤纤芯折射率周期和有效折射率发生改变,因而仅考虑待测对象轴向应力作用的光纤光栅中心波长变动量关系式为:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\Delta\varepsilon = K_\varepsilon\Delta\varepsilon \quad (2)$$

式中: K_ε 为光纤传感器的应变灵敏度系数; $\Delta\varepsilon$ 为光纤轴向应变改变量; p_e 为弹光系数,对于普通掺锗石英光纤的弹光系数取为0.217; λ_B 为光栅布拉格波长。

1.3 解调技术

光纤布拉格光栅的解调技术是利用了多种光纤传感系统中可调谐的边缘滤波法。如图2所示为其中一种最为常用的解调技术,称为边缘滤波解调法,由图2可知,1个简谐波长变化可通过参照光栅(FBG-0)来扫描跟踪传感光栅(FBG-1~FBG-n)的简谐波长变化,并没有参与传感测量。FBG-0的简谐波长变化主要是由压电陶瓷等驱动原件控制,其波长的变化范围要能确保覆盖传感光栅的波长变化区间,且与驱动电压间有可靠的数量关系^[2]。所以,只要测试驱动元件的电压信号,便可获得传感光栅的中心波长漂移量,进而达到解调^[9]。

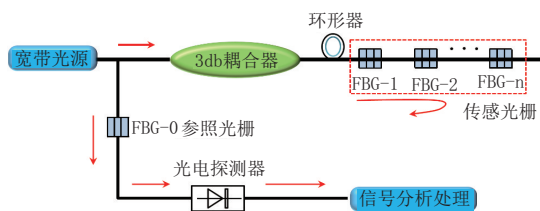


图2 可调谐光纤光栅边缘滤波法

2 孔道缺陷设置与监测

2.1 设计方案

试验用波纹管采用钢带增强聚乙烯(PE)螺旋波纹管,表面无破损漏浆,从中截取长为 120 cm、直径为 50 mm 的 6 根短管作为试验对象,管口下端封闭、上端开口。在距下端口 15 cm 的位置处开一小孔,作为压浆孔使用。基于核心混凝土缺陷率设计对钢管混凝土承载力的影响^[15-16],室内设计时考虑的参数为:波纹管缺陷率(分为无缺陷和缺陷率为 7%、10%、13%、16%、100% 的共 6 种工况,缺陷率为缺陷体积占总体积的比例);缺陷位置为距波纹管开口端某一高度处。具体设计参数见表 1。

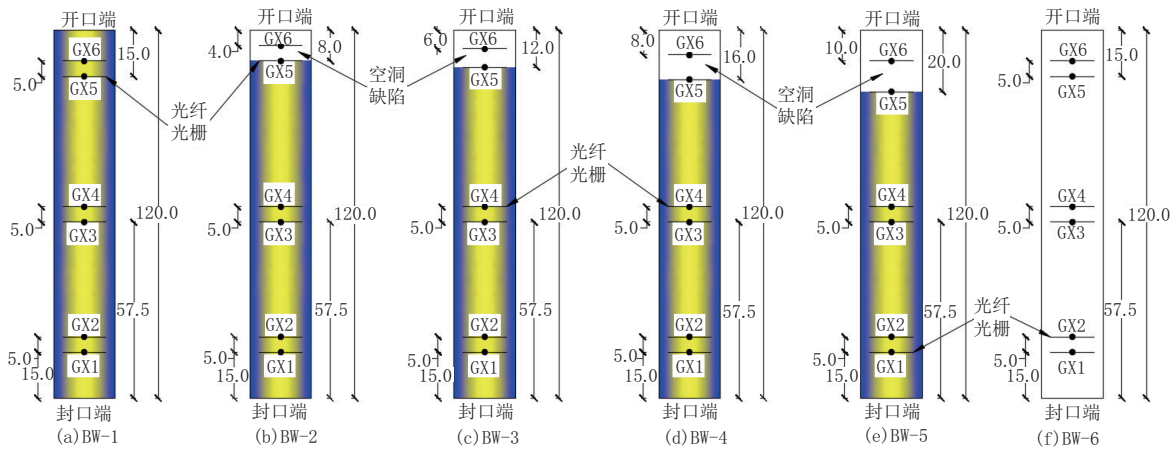


图3 光纤光栅粘贴位置示意图

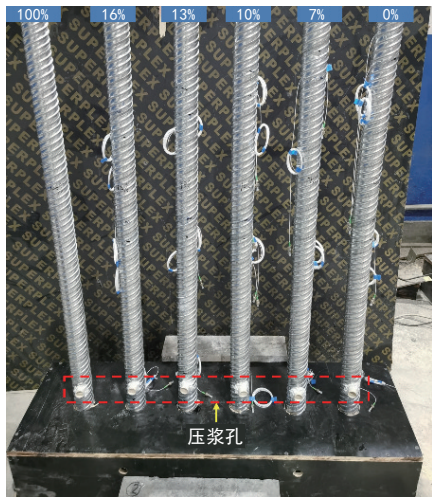


图4 光纤光栅粘贴位置实际图

在数据采集前,将解调仪与电脑通过 1 根网线连接,解调仪采用智性科技南通有限公司提供的 ZX-FP-C32-100 型光纤光栅解调仪(频率为 100 Hz、通道数为 32 个)。每根金属波纹管粘贴 6 个,编号从上到下为 GX1~GX6,具体设置情况见表 2,同时,在测试前进行光栅成活率检验,将光栅对应的接入到仪器

表 1 金属波纹管缺陷设计参数

波纹管编号	BW-1	BW-2	BW-3	BW-4	BW-5	BW-6
缺陷率/%	0	7	10	13	16	100
缺陷位置高度/cm	—	8	12	16	20	120

注:BW-1 管为灌浆密实、BW-6 管为未灌浆(空管),通常可作为参照组。

压浆前标注光纤光栅粘贴位置,粘贴过程中采用 UV 无影胶和紫外线灯,将胶水涂抹于需要粘贴光纤光栅的波纹管外壁处,即刻用紫外线灯照射 10 s,胶水瞬间会发生固化,这时将光纤光栅粘贴于波纹管标注位置。光纤光栅粘贴位置确定见图 3 和图 4。

通道上,保证仪器、电脑和光栅都已连接到位,启动仪器进行连接,检查被接入的通道上是否有读数,如果有读数说明粘贴良好,反之说明粘贴不好。

表 2 光纤光栅连接设置汇总

波纹管编号 BW-1 (缺陷率 0%)						
光纤光栅编号	GX1	GX2	GX3	GX4	GX5	GX6
通道编号	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6
波纹管编号 BW-2 (缺陷率 7%)						
光纤光栅编号	GX1	GX2	GX3	GX4	GX5	GX6
通道编号	CH7	CH8	CH9	CH10	CH11	CH12
波纹管编号 BW-3 (缺陷率 10%)						
光纤光栅编号	GX1	GX2	GX3	GX4	GX5	GX6
通道编号	CH13	CH14	CH15	CH16	CH17	CH18
波纹管编号 BW-4 (缺陷率 13%)						
光纤光栅编号	GX1	GX2	GX3	GX4	GX5	GX6
通道编号	CH19	CH20	CH21	CH22	CH23	CH24
波纹管编号 BW-5 (缺陷率 16%)						
光纤光栅编号	GX1	GX2	GX3	GX4	GX5	GX6
通道编号	CH25	CH26	CH27	CH28	CH29	CH30

2.2 试验监测

正式检测中,主要对光纤光栅初始值、灌浆过程

变化值(10 min)、3 h膨胀值及24 h终凝值的应变值进行采集,并做好记录保存。通过检测粘贴位置处光栅应变变化,从而定性判断密实情况,压浆时应保持压浆过程平稳缓慢进行,浆液试验配比为每立方米水泥:压浆剂:水=1 407:156:437,水灰比为0.28。室内光纤光栅应变检测过程见图5。

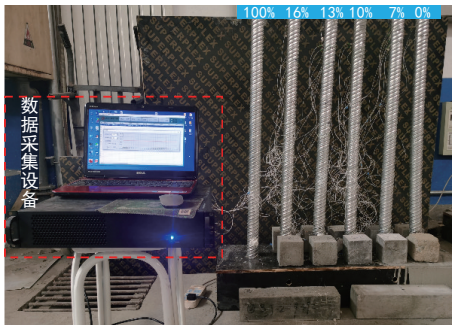


图5 光纤光栅应变检测

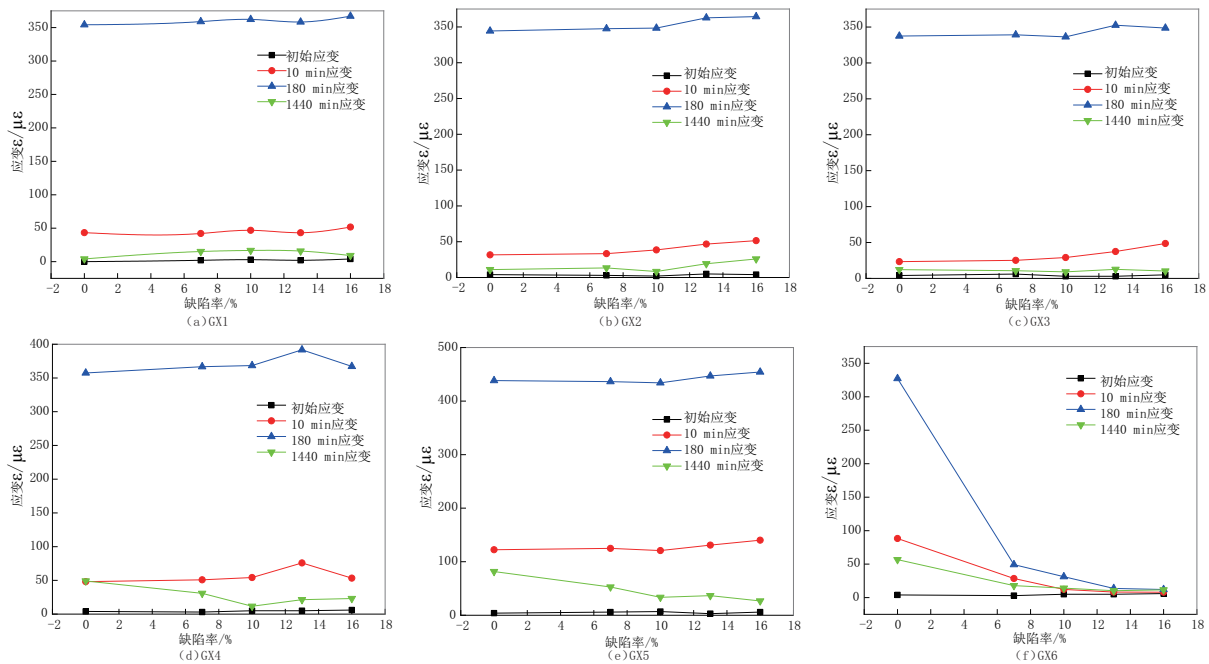


图6 不同缺陷率的应变变化分析

在注浆过程达到180 min时的各测点应变情况见图7,随着缺陷率增加,光纤光栅GX1~GX5的应变值略显变大,而GX6的应变值迅速降低,在密实状态下,各测点应变值差异性不显著。

由式(2)可分析计算出仅考虑待测对象轴向变化作用的光纤光栅中心波长变动量,已知文中所选用光纤光栅为粘贴式光纤光栅GFRP应变传感器,轴向应变灵敏度系数 $K_s=1.2 \text{ pm}/\mu\epsilon$,不同缺陷率的轴向应变值变化见图6。于是通过反推计算得到不同缺陷率下的光纤光栅中心波长变动量变化趋势见图8。

通过分析光纤光栅中心波长变动量发现,在开始注浆到注浆10 min、注浆10~180 min两个阶段内,

3 监测结果分析

不同缺陷率孔道应变分析结果如图6所示,通过图6分析知,不同缺陷率孔道各测点应变有着相似的变化趋势,在孔道注浆达到180 min时各测点在不同缺陷率变化下应变达到最大值,其值占整个注浆过程中总应变的70%~90%,仅有GX6在不同缺陷率下的应变变化值较小,占整个注浆过程中总应变的50%以下。主要原因是在波纹管注浆过程中,测点GX6粘贴在空洞部位,与灌浆料未接触,浆料发生收缩膨胀变形较小。随着缺陷率的增大,各测点应变变化趋势越明显,在压浆达到1 440 min时,应变变化会恢复到与初始应变的相应状态,这时浆液发生膨胀过程已完成,热量释放已耗尽,处于终凝状态,应变不再发生明显变化。

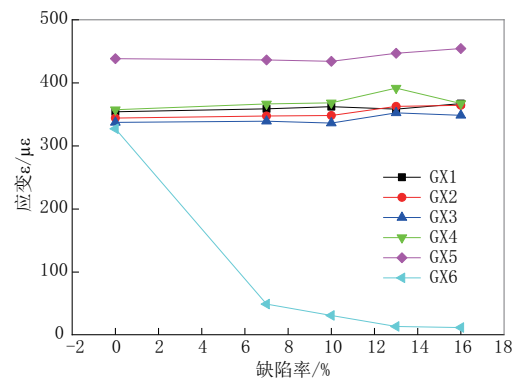


图7 注浆180 min时应变分析

中心波长变动量再逐渐增加,从180~1 440 min阶段内,中心波长变动量再逐渐减弱,这与不同缺陷率下

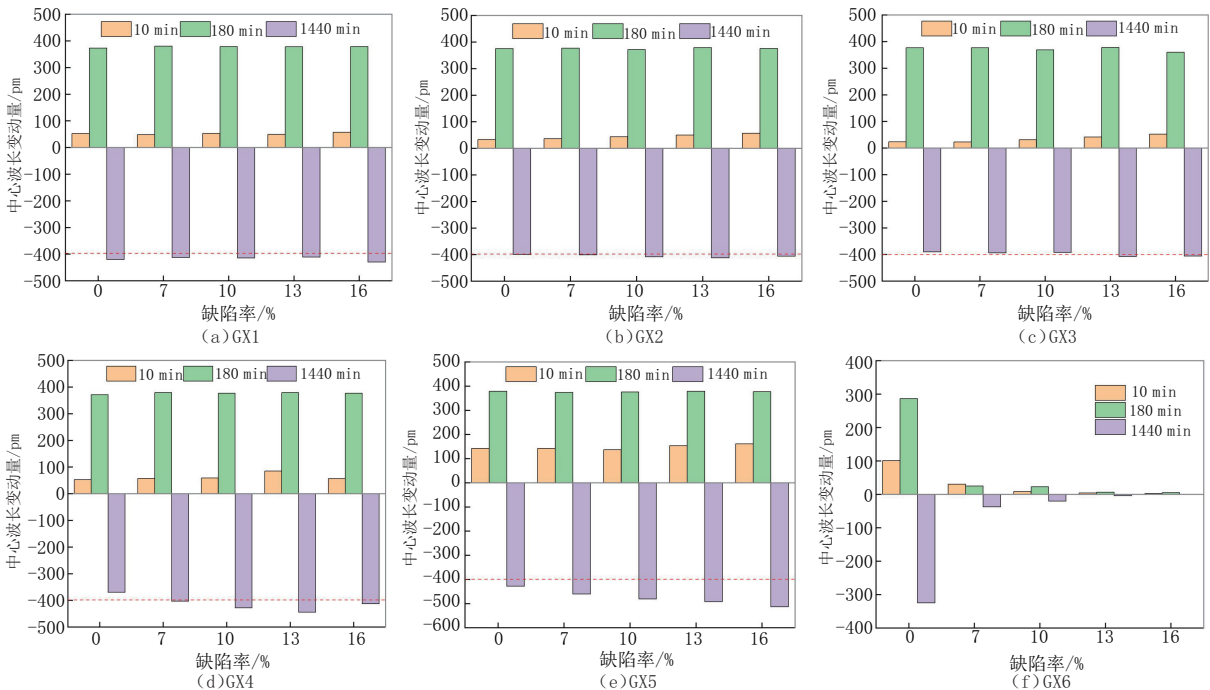


图8 光纤光栅中心波长变动量分析

的波纹管变形量有着必然联系。因GX6布置在波纹管最顶端,在注浆过程中未发生与浆料的接触效应,从而使得光纤光栅中心波长变动量变化趋势不明显。缺陷部位处的波纹管变形越明显,中心波长变动量也越大,最大波长变动量都维持在400 pm左右。

4 结 语

(1)通过设置波纹管缺陷率(分为无缺陷和缺陷率为7%、10%、13%、16%、100%的共6种工况),采用光纤光栅技术进行应变分析,存在缺陷时应变变化显著,无缺陷时变化不明显,随着缺陷率的增大应变变化幅度在6%以内。

(2)在同一缺陷率下,GX5的应变值最大,均超过400 $\mu\epsilon$ 。在同一测点不同缺陷率下,注浆180min时应变值最大,占注浆10 min和1 440 min应变变化值之和的60%以上。

(3)通过轴向应变反推光纤光栅中心波长变动量值情况,中心波长变动量随着缺陷率变化而变化,在注浆到1 440 min时中心波长再减小。GX5在不同注浆时间时变化值最大,最大在缺陷率为16%时产生为519 pm。

(4)对于本文孔道注浆密实性检测,可有效判断缺陷具体位置及定性表征缺陷大小,这可为实际工程中检测预应力孔道灌浆密实性提供了技术支撑和判定依据。

参考文献:

[1] 王燕花. 新型光纤传感系统的研究与实现[D]. 北京:北京交通大学,2009.

[2] 许超宇. 基于光纤光栅的管道压力非侵入式检测方法研究[D]. 青岛:中国石油大学(华东),2018.

[3] Franz, Jain. Optical Communications: Components and Systems[J]. Anthropology&Medicine, 2000, 21(3): 345-356.

[4] Li H N,Li D S, Song G B. Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering[J]. Steel Construction, 2008, 26(11): 1647-1657.

[5] 陈宜扬. 薄壁结构件变形的光纤光栅分布检测研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2018.

[6] Hill, Fuji Y, Johnson, et al. Photosensitivity In Optical Fiber Waveguides: Application to Reflection Filter Fabrication[J]. Applied Physics Letters, 2008, 32(10): 647-649.

[7] 袁慎芳,闫美佳,张巾巾,等. 一种适用于梁式机翼的变形重构方法[J]. 南京航空航天大学学报,2014,46(6):825-830.

[8] 欧进萍,周智,武湛君,等. 黑龙江呼兰河大桥的光纤光栅智能监测技术[J]. 土木工程学报,2004,37(1):46-49.

[9] 史镜名,郑狄,潘炜,等. 基于耦合锥结构的光纤光栅超声波传感器及其无损检测研究[J]. 光学学报,2019,39(12):1-6.

[10] 张帅兵. 光纤光栅温度应变解调仪研究[D]. 太原:太原理工大学,2021.

[11] 张军. 波纹管灌浆密实性对铁路预应力桥墩力学性能的影响研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2023.

[12] 李鹏飞,张汉,何泉. 基于光纤光栅应变传感测量的囊式扩体锚杆检测技术[J]. 施工技术(中英文),2020,49(7):45-48.

[13] 聂建国,郝志鹏,梁大伟,等. 光纤光栅应变检测技术在预制桩中的应用研究[J]. 山西建筑,2023,49(21):52-56.

[14] 刘佳琪. PC梁预应力的锚下及纵向分布测试技术研究[D]. 济南:山东大学,2019.

[15] 张戎令,郝兆峰,马丽娜,等. 核心混凝土缺陷率与缺陷位置对钢管混凝土承载力的影响[J]. 建筑结构,2021,51(2):78-84.

[16] 郝兆峰,张戎令,李志杨,等. 钢管混凝土构件不同缺陷率注浆补强前后承载力试验研究[J]. 建筑结构学报,2019,40(增刊1):241-250.