

文章编号: 1000-4750(2016)05-0001-10

厦门翔安海底隧道钢筋腐蚀监测技术

雷 鹰, 郑翥鹏

(厦门大学建筑与土木工程学院, 福建, 厦门 361005)

摘 要: 海底隧道由于其特殊及地质环境的复杂性, 为保证海底隧道钢筋混凝土的耐久性与结构服役能力, 对其腐蚀状态进行监测尤为迫切。该文研究了翔安隧道钢筋腐蚀监测系统的设计, 包括商用的以及基于电化学和物理方法的自主研发的腐蚀传感器, 腐蚀监测断面与测点的布置、腐蚀传感器的安装, 以及腐蚀数据库的建立。通过现场采集的腐蚀监测数据, 评价了翔安海底隧道目前的腐蚀状况。最后介绍了基于超声导波的钢筋腐蚀监测研究新进展。

关键词: 海底隧道; 腐蚀监测; 腐蚀传感器; 光纤光栅; 超声导波; 电化学技术; 数据库

中图分类号: U459.5 **文献标志码:** A **doi:** 10.6052/j.issn.1000-4750.2015.06.ST02

STRUCTURAL MONITORING TECHNIQUES FOR XIAMEN XIANG'AN SUBSEA TUNNEL

LEI Ying, ZHENG Zhu-peng

(School of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361005, China)

Abstract: Due to the particular and complex engineering environment of subsea tunnels, it is especially imperative to monitor the condition of steel corrosion in reinforced concrete (RC) of subsea tunnels for structural serviceability and durability of RC structures. In this paper, the largest excavation section subsea tunnel - Xiamen Xiang'an subsea tunnel is studied. Especially, the design of corrosion monitoring system is focused due to its complexity. Both the commercial corrosion sensors and the developed corrosion sensors based on electrochemical and fiber Bragg grating (FBG) techniques are adopted. The arrangement of the corrosion monitoring sections, their location, the installation of the sensors and the establishment of corrosion database are discussed. Then, the evaluation of corrosion in subsea tunnel is established based on the monitoring data of reinforced concrete collected in field. Based on the monitoring data collected in the field of the subsea tunnel, the status of stress and corrosion in Xiamen Xiang'an subsea tunnel can be evaluated. Finally, the promising technique based on ultrasonic guided waves for monitoring steel corrosion in RC is also discussed.

Key words: subsea tunnel; corrosion monitoring; corrosion sensor; fiber Bragg grating (FBG); ultrasonic guided waves; electrochemical techniques; database

近些年来, 重大工程结构的健康监测研究越来越受到工程界的广泛重视^[1-6], 这对结构变异的提前预警或在灾害发生后评估结构的损伤程度及其剩余寿命, 对结构长期受力形态的研究及后期的结

构维修养护均具有重要意义^[7-15]。在众多土木工程结构中, 海底隧道以其诸多的优点, 已被公认是跨海峡交通的首选方式, 全世界已建、在建的跨海隧道有 20 多条。海底隧道由于其特殊及地质环境的

收稿日期: 2015-06-25; 修改日期: 2016-01-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(51378445), 福建省闽江学者科研资助项目, 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(20720160076)

通讯作者: 雷 鹰(1966), 男, 福建人, 教授, 博士, 主要从事结构健康监测等研究(E-mail: ylel@xmu.edu.cn).

作者简介: 郑翥鹏(1978), 男, 福建人, 助理教授, 博士, 主要从事结构监测、结构设计等研究(E-mail: xpeng@xmu.edu.cn).

复杂性，为保证其安全，需要进行全寿命期间的结构健康监测。但是由于设计理念不同或基于工程造价等因素的考虑，以往对隧道结构进行健康监测研究的工程案例并不多见。

翔安海底隧道是我国大陆地区第一座大断面海底隧道，同时也是全球最大开挖断面的隧道。隧道最深处位于海平面以下约70 m。工程场区地质条件、岩性相对复杂，海域段隧道不良地质为F1、F2、F3三处全强风化深槽和F4风化囊，是隧道设计施工及后期维修养护需主要关注的困难区段。为了延长隧道结构的使用寿命和使用功能并保证其运营安全，对这些区域的施工和结构长期监测研究就显得特别有意义^[16-18]。

海底的地下水对隧道有强腐蚀性，在隧道运营期间，其腐蚀程度直接影响到衬砌的安全性。因此，监测钢筋的腐蚀情况对翔安海底隧道衬砌结构的耐久性非常重要。迄今为止，针对钢筋混凝土结构中钢筋的腐蚀监测已有多种技术见诸报道^[19-22]。目前对于钢筋腐蚀监测主要采用的方法是电化学方法，包括：半电池电位法、线性极化法等。这类传感器是利用钢筋锈蚀这一电化学过程中，周边混凝土环境中各种参数的变化，测试推断钢筋腐蚀情况的一大类传感器。近些年来出现的物理方法，主要是通过测定与钢筋腐蚀相关的电阻、电磁、热传导、谐波等物理特性的变化反映钢筋的腐蚀程度。它不但作为化学方法的补充^[23-32]，同时可以更加精确的测定钢筋腐蚀^[33]。但是，因为钢筋埋置在混凝土里，这些监测钢筋腐蚀的物理方法在实际应用时仍然面临着许多挑战和困难。因此，开发用以监测钢筋腐蚀的技术仍然很迫切。

基于上述的原因，对于复杂地质条件下的翔安海底隧道，急需建立长期健康监测系统，包括早期腐蚀的监测，这对于海底隧道的维修将起到重要辅助作用。

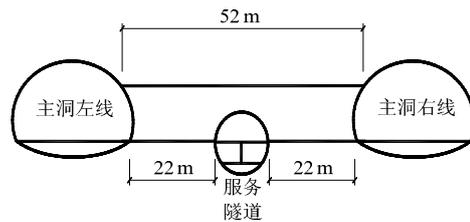
1 翔安海底隧道工程背景

厦门翔安海底隧道位于厦门岛东北部，连接厦

门本岛和大陆翔安区，如图 1(a)所示。它是中国大陆第一条大断面的隧道，其开挖断面达到 170 m²，居全球之首。工程全长 8.695 km，其中海底隧道长 6.05 km，跨越海域宽约 4.2 km，工程设计采用三孔隧道方案，两侧为行车主洞，各设置 3 车道，中孔为服务隧道。主洞隧道侧线间距为 52 m，服务隧道与主洞隧道净间距为 22 m。如图 1(b)所示。



(a) 厦门翔安海底隧道地理位置



(b) 厦门翔安隧道断面布置示意图

图1 厦门翔安海底隧道概况

Fig.1 Overview of Xiamen Xiang'an Subsea Tunnel

隧道最深处为海平面下70 m，如图2所示，工程场区总体地质条件较好，主要不良地质现象包括隧道两端陆域及浅滩段全强风化地层，海域段F1、F2、F3三处强风化深槽和F4全强风化深囊。沿线主要不良地质段分布如图2所示，其中，左线有3处在

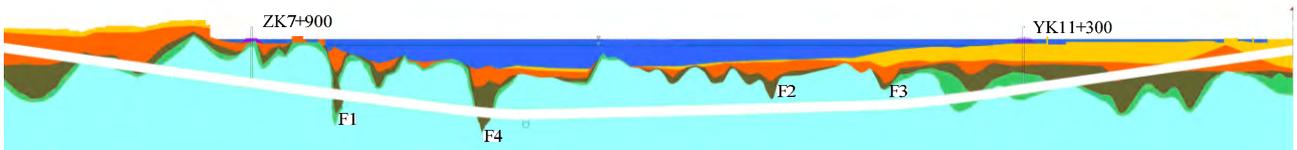


图 2 厦门翔安海底隧道地质剖面图(左线)

Fig.2 Geological profile of Xiamen Xiang'an subsea tunnel (Left side tunnel)

风化槽内穿过,右线及服务隧道均有4处在风化槽内穿过。

2 翔安海底隧道的钢筋腐蚀监测技术及监测系统

2.1 海底隧道腐蚀监测断面及测点的布置

根据翔安海底隧道所处的地理位置和隧道结构部位的不同,对于处在海底隧道的引线部分,由于靠近洞口,存在干湿交替环境的作用,支护结构中的钢筋比较容易受到腐蚀,此外,全强风化深槽F1~F4与浅滩沙砾层处海水渗透比较严重位置,因此优先考虑这些截面作为二次衬砌钢筋腐蚀监测位置,在这些断面埋入腐蚀传感器,监测初期支护和二次衬砌中氯离子浓度、pH值、具体监测断面和数量见表1。

表1 腐蚀监测断面及传感器安装

Table 1 Selected sections and installed sensors for corrosion monitoring

隧道名称	断面编号	断面里程	腐蚀传感器类型			
			商用传感器		独立研发传感器	
			数量	位置	数量	位置
主洞 左线	1	ZK8+283	2	拱顶拱腰各1个	2	商用传感器附近
	2	ZK8+288	2	拱顶拱腰各1个	5	商用传感器附近
	3	ZK8+925	2	拱顶拱腰各1个	2	商用传感器附近
	4	ZK8+930	4	拱顶拱腰各2个	2	商用传感器附近
	5	ZK8+935	4	拱顶拱腰各2个	2	商用传感器附近
	6	ZK8+940	2	拱顶拱腰各1个	2	商用传感器附近
	7	ZK10+020	0	—	14	拱顶、拱腰
	8	ZK10+170	0	—	6	拱顶、拱腰
服务隧道 主洞右线	9	NK8+970	2	拱顶拱腰各1个	7	商用传感器附近
	10	YK10+681	4	拱顶拱腰各2个	6	商用传感器附近
	11	YK10+686	2	拱顶拱腰各1个	—	—

结合隧道支护的力学特性,认为拱顶和拱脚是受力最大的位置,应该设置监测点。包括商用和独立研发的腐蚀传感器的监测点如表1所示。

2.2 海底隧道腐蚀监测传感器

为了长期监测钢筋混凝土结构的腐蚀情况,厦门翔安海底隧道采用多种传感器构成合理的腐蚀监测系统:1)基于电化学技术的腐蚀传感器,包括商用传感器 CorroWatch 以及厦门大学自主研发的两款电化学腐蚀传感器;2)由本文作者研发的基于光纤光栅的腐蚀传感器。

2.2.1 基于电化学技术的腐蚀传感器

2.2.1.1 商用多探头传感器 CorroWatch

该传感器由丹麦Force公司的CorroWatch多探

头腐蚀传感器和ERE20参比电极组成。标准型CorroWatch多探头传感器包含四个黑钢阳极和一个贵金属阴极,以及一条电缆连接线。4个阳极固定在底环上,其高度是变动的,可根据混凝土保护层厚度进行调整。阴极固定在底环的外围上。CorroWatch安装还需结合一个ERE-20参比电极与钢筋连接。同时还可以添加其他辅助传感器,例如,温度或温度补偿器。对于CorroWatch腐蚀仪,温度传感器已嵌入在CorroWatch结构内,用来观测CorroWatch腐蚀仪的温度。

2.2.1.2 阶梯型电化学传感器

厦门大学基于电化学技术研制开发了阶梯型电化学腐蚀传感器^[34]。它包含一个参比电极和四对按照高度梯度分布的阴阳极传感探头,阴极传感探头由黑钢柱和不锈钢外壳组成,探头和混凝土表面之间的距离可调,钢筋混凝土结构的腐蚀可能性可通过测量阴阳极宏电流和与参比电极的相对电位,监测氯离子扩展峰面的位置提前预报。与现有商用传感器相比,该传感器阴阳极一一对应,阴阳极面积比和距离确定。克服了数据出现不稳定和不可比性。

2.2.1.3 XMUCT-08 多功能腐蚀探头

厦门大学研制开发了XMUCT-08钢筋混凝土结构腐蚀安全多功能监测探头^[35],其由一个pH值探针,氯离子探针和一个参比电极构成,可同时长期跟踪监测钢筋混凝土内部化学环境(混凝土中pH值、Cl⁻浓度等)和钢筋在混凝土中腐蚀状态及安全性(腐蚀电位,腐蚀速度)^[25,35-36]。

2.2.2 光纤光栅腐蚀传感器

尽管已有多种电化学技术用于测试钢筋腐蚀,但都不是通过直接评价或测试钢筋的状态来监测腐蚀的。作为监测腐蚀的工具这一,近年来出现不少物理方法,通过直接测定与钢筋腐蚀相关的电阻、电磁、热传导、谐波等物理特性的变化,可以更加精确的测定钢筋腐蚀。在这些方法中,基于光纤光栅技术的测试技术具有较多优势,因为光纤传感器具有很多优点,例如,敏感度高、抗电磁干扰、防腐蚀、体积小、重量轻、模式多样、可以多测点测试,因此它可用于钢筋腐蚀的监测。近年来,作者已研制新型的基于光纤光栅(FBG)的钢筋腐蚀传感器及行之有效的封装方式,通过实验验证研制的传感器可有效用以监测钢筋的早期腐蚀,并获知钢筋腐蚀程度,基于这些优点,将该传感器成功应用

于厦门翔安海底隧道。

基于混凝土中钢筋腐蚀后体积变化的事实,如果能够测量混凝土结构中钢筋因腐蚀而产生体积膨胀的体积变化量,就能实时地监测混凝土结构中钢筋的腐蚀状况。先将 FBG 固定在钢筋表面上,应用光纤光栅反射波长的改变,可以测量钢筋因腐蚀而产生的体积变化,将传感器埋入混凝土结构内,能实时地反映由于钢筋腐蚀而产生的体积变化,从而掌握混凝土结构中钢筋的腐蚀状况。钢筋腐蚀时,光纤光栅的拉应变随着钢筋直径的增加而增加。腐蚀程度可以通过 FBG 的波长漂移来表达,如下式所示:

$$\rho = \frac{\Delta V}{V} = \frac{(D + \Delta D)^2 - D^2}{D^2} = \left(1 + \frac{\Delta D}{D}\right)^2 - 1 = (1 + \varepsilon)^2 - 1 = \left(1 + \frac{\Delta \lambda_b}{\kappa_\varepsilon}\right)^2 - 1 \quad (1)$$

式中: D 为钢筋初始直径; ΔD 为钢筋直径的变化量,也即光栅拉长量; $\Delta \lambda_b$ 是光纤光栅中心波长变化量或称波长漂移量; κ_ε 是应变灵敏度系数; V 为钢筋原始体积; ΔV 为钢筋体积变化量; ρ 为钢筋体积锈蚀率。

基于 FBG 的腐蚀传感器设计步骤为: 1) 在变形钢筋的表面上机械抛光 20 mm 宽的凹槽; 2) 在抛光区域,将 FBG 紧贴钢筋表面绕一圈,在交叉点位置用环氧树脂粘牢; 3) 将宽度大于 20 mm 的一片铁丝网覆盖在抛光区域上,伸出的两端用橡皮圈固定在钢筋上。铁丝网可以保护 FBG 在浇筑混凝土时不被破坏,通过上面的网洞,水汽可以达到其覆盖区域的钢筋表面,因此该区域所处的腐蚀环境与其他位置相同,同时它与 FBG 之间有一定的间隙,FBG 可以自由的伸缩。埋置在混凝土内部的钢筋开始锈蚀后,其锈蚀产物受到周边混凝土的阻碍,滞留在钢筋表面上,引起钢筋体积膨胀,钢筋直径增大,紧贴在钢筋表面上的 FBG 的拉应变随着钢筋直径的增大而增大,最终 FBG 被拉断而使传感器失效。

通过加速腐蚀进行了试验测试,测量结果如图 3 所示,波长随时间的增长逐渐增加,虽然有些波动,但总体趋势是增长的,从图 3 明显地可以看出,曲线可以分成三个阶段,从 A 点到 B 点为第一阶段,波长漂移随时间增长迅速增加,因为在初始阶段,钢筋周围的混凝土孔隙较多,锈蚀产物积累在这些

孔隙里而使钢筋体积膨胀较明显;第二阶段,从 B 点到 C 点,波长的增加相对较小,同时有些波动,这是因为混凝土较之前密实,而且由于钢筋锈蚀膨胀产生一定的微裂缝; C 点为波长漂移的拐点,此时光纤光栅波长增长为 1553.15 nm,过了 C 点后为最后一个阶段,因为较大裂缝的出现,发展至试块表面而使锈蚀产物溶解于溶液中,钢筋体积随腐蚀增加而缩小,因而波长随时间增长而下降,光纤光栅的波长不能再测出钢筋直径的变化,传感器失效。

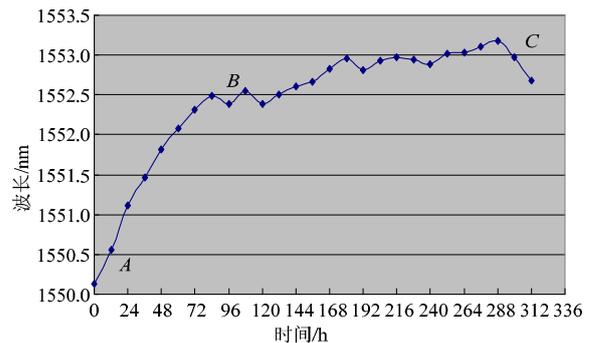


图3 光纤光栅波长随时间变化曲线

Fig.3 Wavelength of FBG vs. elapsed time

为了验证试验结果,采用商用腐蚀测量仪 CANNIN(型号:EN-0503)同步监测,当波长从初始 1550.15 nm 发展至最高点 1553.15 nm 时,CANNIN 上读出的电位数据是 500 mV~400 mV,这表明有轻度腐蚀,与 FBG 表征的腐蚀变化一致。实验结束后将混凝土试块剖开,如图 4 所示,从图中可以看出,抛光区域与其他区域有较大区别,这表明在光纤光栅所在的区域确实有腐蚀发生(图中虚线框区域所示)。



图4 腐蚀后的钢筋

Fig.4 Corroded bar

传感器采用与翔安海底隧道实际工程应用一样的钢筋制作,同时,为补偿温度引起的光栅波长漂移,采用同样的光纤光栅制作温度传感器并用 PVC 管封装,安装在传感器附近,如图 5 所示。

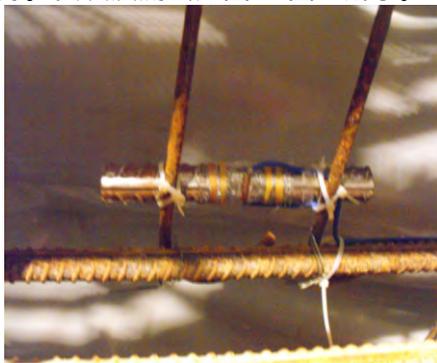


图5 光纤光栅腐蚀传感器

Fig.5 Fiber-optic corrosion sensor

2.3 腐蚀传感器实地安装与测试

翔安海底隧道工程钢筋腐蚀长期监测系统是国内大型重点工程结构中第一次建立的大规模钢筋腐蚀检测系统。整个系统包含埋入在隧道二次衬砌中 24 套商用 CorroWatch 和 ERE20 电化学腐蚀传感器, 10 套阶梯型电化学腐蚀传感器, 13 套 XMUCT-08 多功能腐蚀探头和 21 套光纤物理腐蚀传感器。包括左右主隧道以服务隧道总共 13 个埋设断面, 基本上处于结构分析提出的危险断面和关注断面, 与结构监测传感器相对应。安装后经过测试, 除 10 套 XMUCT-08 多功能腐蚀探头和 16 套光纤物理腐蚀传感器存活, 其他传感器安装后无损, 工作良好。安装及测试如图 6~图 7 所示。



(a)



(b)

图6 腐蚀传感器现场安装

Fig.6 In-situ installation in of corrosion sensors



(a)



(b)

图7 现场测试

Fig.7 In-situ measurements

3 部分测试结果

3.1 腐蚀监测数据

在隧道内不同位置安装了 21 个 FBG 传感器, 混凝土浇筑完之后马上进行检测, 存活 16 个。从 2010 年 4 月投入使用开始采集数据, 每年采集数据一次, 迄今为止, 传感器监测的数据如图 8 所示。从图 8 可以看出, 所有存活的传感器仍然正常工作, 同时, 隧道内所监测的区域迄今没有明显的腐蚀。其它电化学传感器包括商用的 CorroWatch 传感器在同个位置测试的数据如表 2~表 3 所示。

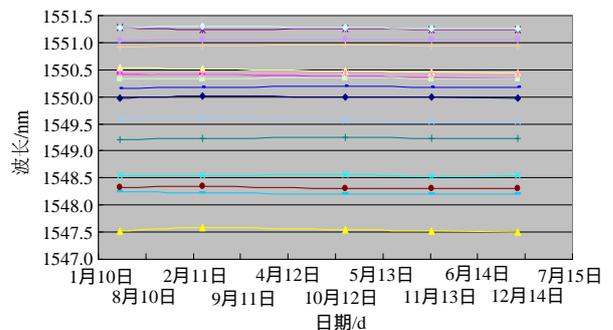


图8 FBG腐蚀传感器测试结果

Fig.8 Monitoring results of FBG corrosion sensors

表2 CorroWatch 阶梯型传感器测试数据(时间 :2012-11-27)
Table 2 Test data from CorroWatch and ladder type of sensor
(date: 2012-11-27)

传感器类型	传感器 温度/ ()	腐蚀电位/(mV)				腐蚀电流密度/($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)			
		1	2	3	4	1	2	3	4
CorroWatch	27.15	-370.8	-377.5	-366.1	-349.9	-0.022	0.711	0.508	0.616
阶梯型		-206.6	-267.8	-286.7	-275.9	-0.046	0.126	0.136	0.196

表3 多功能探头XMUCT-08测试数据(时间 :2012-11-27)
Table 3 Test data from multifunctional sensor of XMUCT-08
(date: 2012-11-27)

断面	编号	pH	Cl^- /(mol/L)	Ecorr/mV	Rp/ Ω	V/(mm/a)	结论
YK10+681	2	12.27	2.4×10^{-3}	-193	359594	0.0006	没有腐蚀
	5	12.62	7.8×10^{-3}	-302	529978	0.0004	
	6	12.94	3.4×10^{-3}	-340	388583	0.0006	
ZK8+288	1	12.07	1.0×10^{-3}	-660	251805	0.0009	
	3	12.89	1.7×10^{-2}	-692	135509	0.0017	
ZK8+920	4	12.89	2.6×10^{-3}	-520	752609	0.0003	
	7	12.45	8.7×10^{-3}	-309	861497	0.0002	
ZK10+020	8	12.36	7.5×10^{-3}	-491	390080	0.0006	
	12	12.07	6.2×10^{-2}	-586	999999	0.0002	
	13	12.36	1.4×10^{-2}	-212	420024	0.0005	

表4 腐蚀监测数据收集(断面里程数/监测点 :ZK10+020/拱顶, 时间 :2011-04-04)

Table 4 Collected data of corrosion monitoring (Section/Point: ZK10+020/apex, date: 2011-04-04)

传感器类型	CorroWatch 和 ERE20		阶梯型传感器		XMUCT-08		FBG			
数据类型	电位/(mV)	电流密度/($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	电位/mV	电流密度/($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)	pH	Cl^- /(mol/L)	电位/(mV)	腐蚀速度/(mm/a)	波长/nm	波长漂移/nm
基准值	>-500	<1.0	>-500	<1.0	>11	0.1	>-250	0.0012	1549.97	<3
	1/-109.9	1/-0.098	1/216.1	1/-0.057						
测试值	2/-187.5	2/-0.09	2/111.6	2/-0.092	12.26	3.8×10^{-2}	-615	0.0032	1549.99	0.02
	3/-267.2	3/-0.087	3/-75.26	3/-0.095						
	4/-130.4	4/-0.094	4/112.5	4/-0.078						
评价	安全									

腐蚀数据库的建立会按照各点实际传感器类型及测试数据填写整理。另外, pH值和 Cl^- 在不同的体系、不同阶段, 会有不同的判断标准, 在腐蚀界还没有统一的国家或国际标准, 这里将结合多种参数判断钢筋的腐蚀情况, 比单一参数的判断更加可靠, 探讨翔安隧道支护结构内钢筋混凝土腐蚀数据库的建立。

3.3 海底隧道腐蚀监测评价系统

针对不同类型腐蚀传感器测试的不同数据信号, 设计了不同腐蚀数据评价标准:

1) 根据大量的实验数据、实际工程中的运行情况 and 厂家意见, 针对 CorroWatch 和阶梯型腐蚀传感器测试得到阴极和阳极之间宏电流密度值, 阳极与参比电极之间的电压值, 限定宏电流密度值小于 $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 参比电压介于 $-500 \text{ mV} \sim 250 \text{ mV}$ 时, 表示传感器探头没有钝化, 即没有腐蚀: 测试数据超

表 2 中的数据结果显示, 电压大于 -400 mV , 电流低于 $1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 数据在安全的范围内。因此从表 3 中多探头 XMUCT-08 的测试数据也表明, FBG 安装位置的测试区域没有明显的腐蚀。接下来的几年将会继续采集所有传感器的数据, 用于分析建立详细的钢筋腐蚀性能数据库。

3.2 腐蚀监测数据库的建立

对埋设的各类腐蚀传感器定时(每半年测试一次)监测。通过几种不同类型传感器测试得不同类型数据, 对每一断面的每一监测点, 按照腐蚀电流密度、腐蚀电位、腐蚀速度、氯离子浓度、pH值和光纤波长等类型记录整理数据, 并制定统一表格, 进行系统分析, 多方位的, 多角度的分析测试数据所反映的混凝土内环境和钢筋的腐蚀状况。每个监测点建立一份统计表格, 所有的数据整理分析表格构成翔安隧道二次衬砌钢筋混凝土结构的腐蚀数据库。具体数据整理分析示意表, 见表 4 所示。

过这个范围, 判断传感器探头有可能被腐蚀, 表面开始钝化。2) 针对 XMUCT-08 多功能探头, 采用专用的阵列电极测试设备, 测量出每个电极的电位和电流, 再通过公式换算获得腐蚀电位、腐蚀电流密度、pH值和氯离子浓度。所得数据与国家或国际标准比较, 如数值在一定范围内即说明混凝土环境安全, 钢筋没有被腐蚀, 若超过一定阈值, 说明混凝土环境易于发生钢筋锈蚀, 腐蚀电流密度可换算成钢筋的腐蚀速度。

3) 针对光纤光栅物理传感器, 通过将预留的光纤接头接入连接器, 经由光谱仪射入激光, 读取传感器的光栅中心波长。通过式(1), 每个传感器中心波长的变化量换算钢筋的体积变化, 与原始数据比较, 从而评价钢筋的腐蚀程度。对于厦门翔安隧道二次衬砌中所使用的钢筋, 其直径为 25 mm , 因此, 腐蚀评价标准如表 5 所示。

表5 翔安海底隧道中FBG传感器腐蚀评价标准

Table 5 Standard for corrosion evaluation using FBG sensors in Xiamen Xiang'an tunnel

波长漂移值 $\Delta\lambda_b/nm$	腐蚀率 $\rho(\%)$	腐蚀程度
0~3	0~0.5	轻微
4~6	0.5~1	中度
7~9	1~1.5	严重

3.4 超声导波检测技术

光纤光栅传感器尽管具有对早期腐蚀敏感,腐蚀程度直观可测的优点,但是它是点域式的测试,测试位置人为主观判断,具有一定的局限性,如果能将测试区域突破,将腐蚀监测范围从单点拓展到一段长度内,就可以提高钢筋腐蚀监测的技术水平,超声导波检测技术具有这样的特点。

3.4.1 超声导波特点

超声导波检测技术是近年来发展起来的一种能够进行快速、大范围、相对低成本的无损检测方法。它具有两个明显的特点^[37]。第一,由于导波本身的特性(沿传播路径衰减很小),它可以沿构件传播较远的距离。第二,由于超声导波在管材或板材的内外表面或上下表面和中部都有质点的振动,声场遍及整个壁厚或板厚,因此,利用超声导波可以同时检测构件内部和表面的缺陷。

超声导波法与传统的检测方法相比,具有较大的优势,它衰减小,传播距离远,声波的振动遍及整个检测构件,因此它可以检测构件内外缺陷^[38],同时导波具有多模态特征,针对不同缺陷,通过选择适当的激励频率可以激起对所检测缺陷较敏感的特征模态。可以检测一段长度内钢筋的腐蚀状况,而不是一个点,提高了腐蚀检测效率,由于这些优点,超声导波法用于腐蚀监测方面及其他结构健康监测领域的研究越来越多^[39-48]。但目前基于导波技术的腐蚀监测方法还存在如下的主要问题:

1) 导波用于测试钢筋混凝土的腐蚀有一个劣势,与导波在其他多层结构(例如,空气中的金属管道)的传播不同,导波在埋置于混凝土的钢筋内传播时,由于泄漏到周围介质中,波的能量传播会有较大的衰减。要选择最低衰减的模态,需研究导波在钢筋混凝土里的传播及衰减特性。

2) 随着钢筋腐蚀程度的增加,可能引起钢筋与混凝土间的分层增加而导致接收信号增加,也可能因钢筋表面粗糙程度的增大而引起信号强度的降低。在钢筋腐蚀过程中,这两种现象可能同时发生或发生于腐蚀的不同阶段,最终的接收信号强度可

能增强或减弱,取决于两种现象的强弱程度,当两种效应刚好相互抵消时,接收信号也可能不变,这是基于导波技术的腐蚀监测的另一困难。为研究哪种效应起控制作用,需充分了解导波在钢筋混凝土内的传播影响因素,衰减的模式。在现有文献中,对于钢筋混凝土体系中,混凝土对钢筋内导波传播的影响程度和主要影响因素及影响规律鲜见报道,作者对其进行了研究^[48]。

3.4.2 混凝土对钢筋内导波传播特性的影响

作者详细推导了钢筋-混凝土体系中纵波传播的频散方程,编写了相应的计算程序对其进行求解。对于埋置在混凝土的钢筋,混凝土的存在并不会影响到其速度频散曲线,而仅仅影响到其衰减频散曲线。

埋置在混凝土中的钢筋,对应能量衰减快慢的是无量纲波数的虚部,其大小取决于钢筋与混凝土之间的剪切模量比和密度比。如图 9~图 10 所示,混凝土剪切模量和密度越小,无量纲虚波数就越小,波的扩散衰减也就越缓慢,传播的距离就越远;无量纲虚波数越大,波的扩散衰减也就越快,传播的距离就越短。

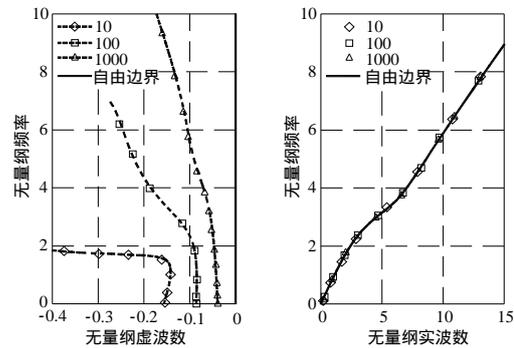


图9 钢筋与混凝土剪切模量比对 L(0, 1)模态频散的影响

Fig.9 Influence of steel-bar-concrete shear modulus ratio on real and imaginary parts of L(0, 1)

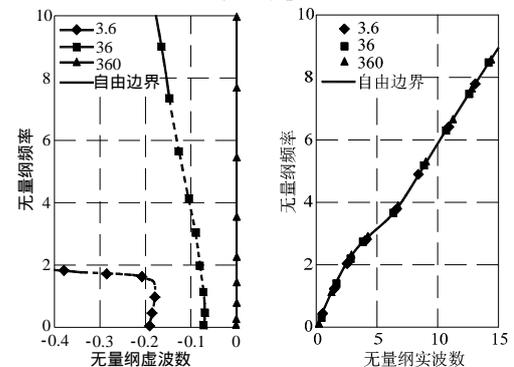


图10 钢筋与混凝土密度比对 L(0, 1)模态频散的影响

Fig.10 Influence of steel-bar-concrete density ratio on real and imaginary parts of L(0, 1)

埋置在普通混凝土中，分别计算当钢筋直径 $d=14\text{ mm}$ 、 $d=22\text{ mm}$ 、 $d=30\text{ mm}$ 时， $L(0, 8)$ 纵向模式对应的衰减频散曲线如图 11 所示。由图看出，同种材料的钢筋，埋在同样的混凝土中，钢筋的直径越大，扩散到混凝土中的能量就越少，钢筋中波的能量衰减就越缓慢，能够传播的距离就越远；钢筋的直径越小，波就越容易扩散到混凝土中，衰减就越快，能够传播的距离就越短。

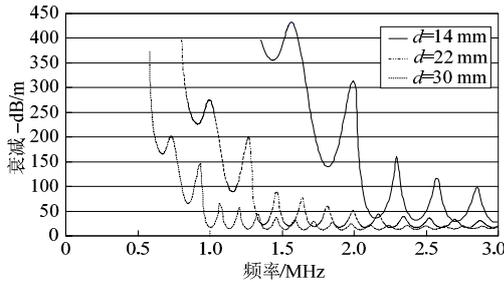


图11 混凝土中不同钢筋直径对应的L(0, 8)衰减频散曲线
Fig.11 Attenuation disperse curves of mode L(0,8) in steel bars with different diameters embedded in concrete

3.4.3 导波用于钢筋混凝土结构腐蚀监测的数值模拟

作者进行了导波在钢筋混凝土构件传播的数值模拟，基于导波的理论分析和试验结果，对钢筋上的点蚀缺陷定位进行有限元模拟，计算结果与模型中缺陷的存在位置比较基本一致，说明了有限元法模拟钢筋混凝土导波检测是可行的。由于导波泄露到混凝土，钢筋上传播的导波能量衰减较大，接收信号非常微弱，同时伴有其他形式的微弱杂波，缺陷反射信号难以直观识别，采用小波分析方法，将小波变换的时频局部化特性应用到钢筋混凝土腐蚀监测领域，通过合理选取小波基函数以及相应的尺度，实现了导波应用于钢筋混凝土构件中腐蚀缺陷的识别。图 12 为原始检测放大信号，可看出，大量的微弱脉冲式杂波与缺陷反射波混杂在一起，真实的缺陷反射信号难以从中辨别。采用小波变换后，结果如图 13 所示。

为了最大限度的反映出小波基函数与缺陷反射信号之间的相似程度，也就是：使缺陷反射信号在同一尺度变换下的小波系数最大化，通过计算，选择尺度 89 进行小波变换，得到反映缺陷反射信号的小波变换图如图 14 所示。对比图 13~图 14 可看出，检测信号采用适当的尺度进行小波变换后，在时间坐标 0.28 ms 处可以清晰地看到缺陷反射信号。同时，该结果与模型中预设缺陷的回波所需要的时间是相同的，这证明了作者所用方法是可行的。

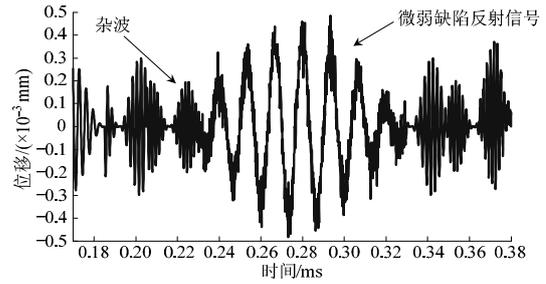


图12 原始检测信号放大图
Fig.12 Amplification of original signal

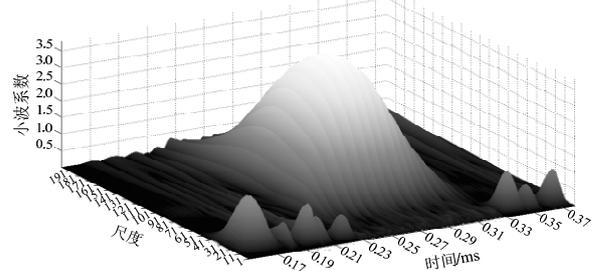


图13 不同尺度的检测信号小波变换图
Fig.13 WT of detection signals at different scales

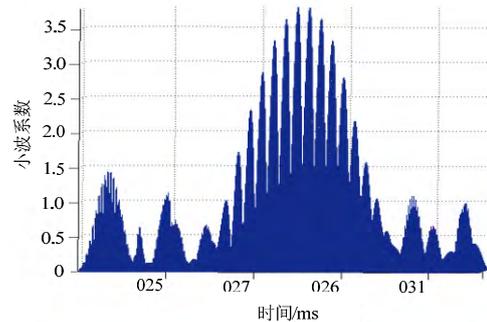


图14 小波变换尺度为89的检测信号图
Fig.14 Detection signals after wavelet transform at scale of 89

4 结论

海底隧道由于其特殊及地质环境的复杂性，为保证其安全，采取有效的结构健康监测技术，包括钢筋混凝土的腐蚀监测是非常必要的。海底隧道的腐蚀监测是项艰巨任务，需要同时采用各种不同类型的腐蚀传感器。本文中，对厦门翔安海底隧道腐蚀监测技术进行了研究，除了采用商用的腐蚀传感器外，还依据海底隧道腐蚀的特点自主研发了长期监测的电化学和物理腐蚀传感器，探讨了超声导波技术应用于腐蚀监测的研究状况，并对厦门翔安海底隧道腐蚀监测系统进行了设计，优化选择了腐蚀监测传感器以及数据采集仪器，建立海底隧道腐蚀监测数据库；同时建立了海底隧道腐蚀监测评价系统，依据腐蚀监测数据对厦门翔安隧道腐蚀程度进行评价。厦门翔安隧道的监测技术也为其他海底隧

道的健康监测提供经验。

超声导波法与传统的检测方法相比,具有较大的优势,它衰减小,传播距离远,声波的振动遍及整个检测构件。采用超声导波法进行钢筋腐蚀监测是值得进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] Ou J P, Li H. Structural health monitoring in mainland china: review and future trends [J]. *Structural Health Monitoring-An International Journal*, 2010, 9(3): 219 231.
- [2] Li H N, Li D S. Safety assessment, health monitoring and damage diagnosis for structures in civil engineering [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 2002, 22(3): 82 90.
- [3] Swartz R A, Lynch J P, Zerbst S, Sweetman B, Rolfes R. Structural monitoring of wind turbines using wireless sensor networks [J]. *Smart Structures and Systems*, 2010, 6(3): 183 196.
- [4] Ni Y Q. Special issue on SHM benchmark for high-rise structures preface [J]. *Smart Structures and Systems*, 2012, 10(4/5): 411 426.
- [5] Wu Z S, Feng M Q. Health monitoring of structures introduction [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2013, 28(3): 161 161.1p.
- [6] Teng J, Lu W, Wen R F, Zhang T. Instrumentation on structural health monitoring systems to real world structures [J]. *Smart Structures and Systems*, 2015, 15(1): 151 167.
- [7] Li H N, Li D S, Song G B. Recent application of fiber optical sensors to health monitoring in engineering [J]. *Engineering Structures*, 2004, 26(11): 1647 1657.
- [8] Ni Y Q, Li B, Lam K H, Zhu D P, Wang Y, Lynch J P, Law K H. In-construction vibration monitoring of a super-tall structure using a long-range wireless sensing system [J]. *Smart Structures and Systems*, 2011, 7(2): 83 102.
- [9] Kurata M, Kim J, Lynch J P, van der Linden G W, Sedarat H, Thometz E, Hipley P, Sheng L H. Internet-enabled wireless structural monitoring systems: development and permanent deployment at the new carquinez suspension bridge [J]. *Journal of Structural Engineering-ASCE*, 2012, 139(10): 1688 1702.
- [10] Ni Y Q, Xia H W, Wong K Y, Ko J M. In-service condition assessment of bridge deck using long-term monitoring data of strain response [J]. *Journal of Bridge Engineering-ASCE*, 2012, 17(6): 876 885.
- [11] Zhou H F, Ni Y Q, Ko J M. Structural health monitoring of the Jiangyin Bridge: system upgrade and data analysis [J]. *Smart Structures and Systems*, 2013, 11(6): 637 662.
- [12] Teng J, Lu W, Cui Y, Zhang R G. Temperature and displacement monitoring to steel roof construction of Shenzhen bay stadium [J]. *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 2015, 7(2): 10.1142/S0219455416400204.
- [13] Zhang J, Hong W, Tang Y S, Yang C Q, Wu G, Wu Z S. Structural health monitoring of a steel stringer bridge with area sensing [J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2014, 10(8): 1049 1058.
- [14] Yi T H, Li H N, Gu M. Sensor placement for structural health monitoring of Canton Tower [J]. *Smart Structures And Systems*, 2012, 10(4/5): 313 329.
- [15] Yi T H, Li H N, Zhang X D. Health monitoring sensor placement optimization for Canton Tower using immune monkey algorithm [J]. *Structural Control & Health Monitoring*, 2015, 22(1): 123 138.
- [16] Li D W. Research on the stress features of tunnel lining in the fault-rupture zone [D]. Gansu: Lanzhou Jiaotong University, 2004.
- [17] 赵东平. 海底隧道维修养护若干问题的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005.
Zhao Dongping. Study on some problems of maintenance and repair in undersea tunnel [D]. Chengdu: South West JiaoTong University, 2005. (in Chinese)
- [18] 苏洁, 张顶立, 牛晓凯, 房倩. 海底隧道结构健康监测设计研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2007, 26(2): 3785 3792.
Su Jie, Zhang Dingli, Niu Xiaokai, Fang Qian. Research on design of subsea tunnel structure health monitoring [J]. *Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2007, 26(2): 3785 3792. (in Chinese)
- [19] Cai J P, Lyon S B. A mechanistic study of initial atmospheric corrosion kinetics using electrical resistance sensors [J]. *Corrosion Science*, 2005, 47(12): 2956 2973.
- [20] Broomfield J P. Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair [M]. 2nd ed. New York: Taylor & Francis, 2007.
- [21] Loh K J, Lynch J P, Kotov N A. Inductively coupled nanocomposite wireless strain and pH sensors [J]. *Smart Structures and Systems*, 2008, 4(5): 531 554.
- [22] Sharma S, Mukherjee A. Nondestructive evaluation of corrosion in varying environments using guided waves [J]. *Research in Nondestructive Evaluation*, 2013, 24(2): 63 88.
- [23] Zheng Z P, Sun X N, Lei Y. Monitoring corrosion of reinforcement in concrete structures via fiber Bragg grating sensors [J]. *Frontiers of Mechanical Engineering in China*, 2009, 4(3): 316 319.
- [24] Lee J R, Yun C Y, Yoon D J. A structural corrosion-monitoring sensor based on a pair of prestrained fiber Bragg gratings [J]. *Measurement Science & Technology*, 2010, 21(1): 209 213.
- [25] Dong S G, Lin C J, Hu R G, et al. Effective monitoring of corrosion in reinforcing steel in concrete constructions by a multifunctional sensor [J]. *Electrochim. Acta*, 2011, 56(4): 1881 1888.
- [26] Gao J Q, Wu J, Li J, Zhao X M. Monitoring of corrosion in reinforced concrete structure using Bragg grating sensing [J]. *Ndt & E International*, 2011, 44(2): 202 205.

- [27] Chen W, Dong X P. Modification of the wavelength-strain coefficient of FBG for the prediction of steel bar corrosion embedded in concrete [J]. *Optical Fiber Technology*, 2012, 18(1): 47–50.
- [28] Ali-Alvarez S, Ferdinand P, Magne S, Nogueira R P. Corrosion detection and evolution monitoring in Reinforced Concrete Structures by the use of Fiber Bragg Grating sensor [C]. *Proceeds of SPIE, Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems*, San Diego, California, USA, 2013, 8692: 86924U1-7.
- [29] Pacheco C J, Bruno A C. A noncontact force sensor based on a fiber bragg grating and its application for corrosion measurement [J]. *Sensors*, 2013, 13(9): 11476–11489.
- [30] Huang Y, Gao Z, Chen G, Xiao H. Long period fiber grating sensors coated with nano iron/silica particles for corrosion monitoring [J]. *Smart Materials & Structures*, 2013, 22(7): 182–187.
- [31] Zheng Z P, Lei Y. Effects of concrete on propagation characteristics of guided wave in steel bar embedded in concrete [J]. *Shock and Vibration*, 2014, 2014: 1–14.
- [32] Zheng Z P, Lei Y, Xue X. Numerical simulation of monitoring corrosion in reinforced concrete based on ultrasonic guided waves [J]. *Scientific World Journal*, 2014, 2014: 1–9.
- [33] Pei H F, Teng J, Yin J H, Chen R. A review of previous studies on the applications of optical fiber sensors in geotechnical health monitoring [J]. *Measurement*, 2014, 58(3): 207–214.
- [34] Zhou Z D, Zheng Q M, Cheng X. An embedded corrosion sensor in reinforce concrete [P]. Patent, China, No. ZL 200910112880.0.2009.
- [35] Lin C J. Novel electrochemical techniques with spatial resolution and its application in the investigation of localized corrosions [J]. *Tends in Physical Chemistry*, 2004, 10(3): 207–213.
- [36] Du R G, Hu R G, Huang R S, Lin C J. In-situ measurement of Cl-concentrations and pH at the reinforcing steel/concrete interface by combination sensors [J]. *Analytical Chemistry*, 2006, 78(9): 3179–3185.
- [37] 焦敬品, 何存富, 吴斌, 费仁元, 王秀彦. 基于时间-空间变换的超声导波检测新技术研究[J]. *工程力学*, 2005, 22(5): 89–93.
Jiao Jingpin, He Cunfu, Wu Bin, Fei Renyuan, Wang Xiuyan. A new technique of guided waves for non-destructive testing methods based on time-space transform [J]. *Engineering Mechanics*, 2005, 22(5): 89–93. (in Chinese)
- [38] 何存富, 孙雅欣, 吴斌, 王秀彦, 刘增华. 高频纵向导波在钢杆中传播特性的研究[J]. *力学学报*, 2007, 39(4): 538–544.
He Cunfu, Sun Yaxin, Wu Bin, Wang Xiuyan, Liu Zenghua. Propagation characteristics of high frequency longitudinal guided waves in steel rod [J]. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2007, 39(4): 538–544. (in Chinese)
- [39] Sohn H, Dutta D, Yang J Y, et al. Delamination detection in composites through non-contact guided wave imaging [J]. *Journal of Composites Science and Technology*, 2011, 71(9): 1250–1256.
- [40] Song G B, Mo Y L, Otero K, Gu H. Health monitoring and rehabilitation of a concrete structure using intelligent materials [J]. *Journal of Smart Materials and Structures*, 2006, 15(2): 309–314.
- [41] Wang R L, Gu H, Mo Y L, Song G. Proof-of-concept experimental study of damage detection of concrete piles using embedded piezoceramic transducers [J]. *Journal of Smart Materials and Structures*, 2013, 22(4): 853–863.
- [42] Schöpfer F, Binder F, Wöstehoff A, Schuster T. A mathematical analysis of the strip-element method for the computation of dispersion curves of guided waves in anisotropic layered media [J]. *Journal of Mathematical Problems in Engineering*, 2010, 2011(1024-123X): 241–256.
- [43] Luca D M, Emanuele B, Giampaolo C, et al. Warped Wigner-Hough transform for defect reflection enhancement in ultrasonic guided wave monitoring [J]. *Journal of Mathematical Problems in Engineering*, 2012(7): 1695–1698.
- [44] Zhu X Q, Hao H, Fan K Q. Detection of delamination between steel bars and concrete using embedded piezoelectric actuators/sensors [J]. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 2013, 3(2): 105–115.
- [45] Wang X J, Tse W P, Mechefske C K, Meng H. Experimental investigation of reflection in guided wave-based inspection for the characterization of pipeline defects [J]. *International Journal NDT & E*, 2010, 43(4): 365–374.
- [46] Iyer S, Sinha S K, Pedrick M K, Tittmann B R. Evaluation of ultrasonic inspection and imaging systems for concrete pipes [J]. *Journal of Automation in Construction*, 2012, 22(4): 149–164.
- [47] Zhu X P, Rizzo P, Marzani A, Bruck J. Ultrasonic guided waves for nondestructive evaluation/structural health monitoring of trusses [J]. *Journal of Measurement Science and Technology*, 2010, 21(4): 89–94.
- [48] 郑翥鹏. 钢筋混凝土腐蚀监测的若干物理方法[D]. 福建: 厦门大学, 2014.
Zheng Zhupeng. Some physical methods for corrosion monitoring of reinforced concrete [D]. Fujian: Xiamen University, 2014. (in Chinese)

注：该文在第 24 届结构工程学术会议(2015 厦门)应邀作特邀报告