

# 混凝土结构中钢筋腐蚀智能监测技术

吴瑾, 吴文操

南京航空航天大学 土木工程系, 南京 210016

**摘要:**对混凝土结构中钢筋腐蚀监测技术的研究成果进行了综述,同时指出传统监测手段的不足之处,并提出了智能监测技术的要求;着重分析了钢筋腐蚀监测光纤传感器和无线传感器的研究进展,并展望了混凝土结构中钢筋腐蚀智能监测技术的发展方向。

**关键词:**腐蚀监测;钢筋混凝土;智能;无线

**中图分类号:**TG174.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-6495(2007)02-0122-04

## STUDY ON INTELLIGENT MONITORING TECHNIQUES FOR STEEL CORROSION IN CONCRETE STRUCTURES

WU Jin, WU Wen-cao

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016

**Abstract:** The research achievement of monitoring techniques for steel corrosion in concrete structures is reviewed in this paper. The limitations of the traditional monitoring techniques as well as the requirement of the intelligent monitoring technique are put forward. The development of the fiber optic sensors and the wireless sensors in corrosion monitoring is discussed in particular. And directions of future research are also proposed.

**Keywords:** corrosion monitor; reinforced concrete; intelligence; wireless

混凝土结构中钢筋腐蚀导致结构失效的典型工程事故如柏林议会大厅局部倒塌(1982)<sup>[1]</sup>和美国北卡罗来州高速公路桥坍塌(2000)<sup>[2]</sup>。因此近年来混凝土结构中钢筋腐蚀问题已成为土木工程界普遍关注的热点,其中通过对混凝土结构中钢筋腐蚀状态在线监测,实时掌握结构实际损伤程度,不仅可以避免上述恶性事故,而且可以为结构耐久性评定、剩余使用寿命预测和及时加固维修提供重要依据。

目前我国正处于大规模建设时期,许多重大工程与基础设施正在建设或规划之中,如跨海跨江的大跨桥梁、过江隧道,这些工程的混凝土结构耐久性,必须有安全监测加以保证。因此,研究重大工程混凝土结构中钢筋腐蚀智能监测技术,具有重大的战略意义和显著的经济效益。

由于混凝土结构内部钢筋所处环境特殊,使传统腐蚀检测方法的应用存在较大局限性。钻孔取样法虽然检测腐蚀较准确,但它破坏结构的整体性。基于电化学测试技术(如:腐蚀电位测量、腐蚀电池电流测量、线性极化法、电化学噪声、电化学阻抗谱法、恒电量法等)<sup>[3~5]</sup>很早就引入钢筋腐蚀检

测,并应用于实际工程。但是电化学方法检测工作量大,检测结果还容易受到外界因素影响。以上传统腐蚀检测方法的缺点还有测点数有限,耗费人力物力,对难以到达的结构表面(如大跨桥梁、海港码头的梁板底面等)无法检测。因此重大工程混凝土结构中钢筋腐蚀检测的发展方向应该是朝着智能化方向发展,即应用先进传感器技术、光电通讯技术和计算机技术实时监测钢筋腐蚀。在结构中安装能自动获取信号、监测精度高、性能稳定的智能传感器,由传感器将钢筋腐蚀信号传输到计算机,并由计算机进行数据处理,从而实现信号自动采集、传输、分析和处理等功能。为此,目前国内外学者开展了光纤传感和无线传感等技术用于钢筋腐蚀智能监测的研究。

## 1 钢筋腐蚀的光纤监测技术

### 1.1 安全环

Kim D Bennett等<sup>[6]</sup>提出了基于微弯效应的光纤腐蚀传感器,并给出了基本原理图。用钢丝“安全环”作为钢筋的等效物,“安全环”生锈变细而断裂,此时弯曲光纤的曲率将变小甚至为零,通过光纤的光能量会迅速增加。因此可以依据光能量变化来监测钢筋腐蚀。实验研究表明,该传感器能较好地反映出“安全环”的状态。但是在“安全环”发生腐蚀而未断裂前传感器并无响应,即只能作为某种腐蚀状态(单个

收稿日期:2006-10-27 初稿;2006-12-29 修改稿

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK2006193)

作者简介:吴瑾(1965-),男,博士,教授,从事混凝土结构耐久性研究。

Tel:025-84891754 E-mail:wujin@nuaa.edu.cn

阈值)的信息,不能给出多种腐蚀状态(多个阈值)的信息,因此难以反映出腐蚀过程。

### 1.2 光纤镀膜传感器

黎学明等<sup>[7,8]</sup>采用电化学方法在光纤表面沉积碳-铁合金膜,制备了一种用于监测混凝土结构中钢筋腐蚀的光纤传感器。金属膜对纤芯内的光线有较强的散射作用,随着腐蚀的进行,合金膜部分破损,纤芯内传输光受到的散射作用减弱,造成光纤功率的明显变化,根据此变化来监测钢筋腐蚀情况。其方法的优点是采用光纤传感技术,镀膜操作简单,但是需进一步提高镀层的附着力以便增强实用性。李学金等<sup>[9]</sup>直接将镀膜沉积在光纤纤芯上,量测光纤输出功率随钢筋腐蚀的变化情况。此方法的好处是物理成膜简单,膜的机械结合较好,但是研究工作仅限于实验室阶段,膜层厚度有限。

### 1.3 钢筋膨胀(应变)测量

在钢筋腐蚀过程中,由于钢筋表面生成氧化产物,其体积膨胀最大能达到腐蚀前的6倍~7倍。因此通过测量钢筋由于腐蚀而产生的体积变化,可以实时地监测混凝土结构中钢筋的腐蚀状况。严云和江毅<sup>[10]</sup>就采用了光纤布拉格光栅作为监测混凝土结构中钢筋腐蚀的光纤传感器,进行了腐蚀加速实验,证实了此设想的可行性,并解决了光纤光栅的波长受温度影响的问题。

除了采用布拉格光栅光纤之外还可以采用涂层光纤法,其技术路线是:首先将金属蒸发在长周期光栅表面,腐蚀引起光纤直径的改变,进而引起涂层有效折射率的变化,最终导致光栅耦合波长的漂移。这种测试的优点是长周期光栅折射率的灵敏度很高<sup>[11]</sup>。但是现在的研究只是采用了先张法进行了加速腐蚀实验,由于没有在结构中进行实验,所以对传感器进行封装和保护。此外,没有考虑到实际结构中钢筋由于受力而可能引起的应变,若在结构的钢筋上采用光纤进行监测,可能会导致无法区分钢筋的腐蚀应变和受力应变。解决此问题需采用不受力的短钢筋作为待监测钢筋的等效钢筋,通过监测外加的不受力钢筋的腐蚀应变来监测钢筋的腐蚀情况。

## 2 钢筋腐蚀的影响参数监测技术

钢筋腐蚀受到很多参数的影响,有许多方法就是通过对这些影响参数的监测来推断钢筋的腐蚀状况。

### 2.1 氯离子浓度监测

当钢筋周围的混凝土中氯离子浓度达到某临界值时,钢筋将发生锈蚀。因此,通过监测钢筋周围混凝土中的氯离子浓度可以间接判断钢筋是否发生腐蚀。

**2.1.1 采用光纤测量氯离子浓度** 常用的测量氯离子浓度的方法是基于光谱测量的Fajans方法,该方法的原理是用硝酸银溶液滴定氯离子,当氯离子的摩尔数与银离子一样时,沉淀物氯化银呈乳白色;当氯离子过量时,过量的银离子吸附于氯化银表面上,使氯化银带正电荷,吸附二氯荧光黄,呈现出粉红色。利用沉淀物色度(由乳白色转为粉红色)随着氯离子浓度的关系,可以确定氯离子的浓度范围。

Peter L Fuhr 等<sup>[12,13]</sup>将此原理与光纤技术结合,用于测

量钢筋混凝土环境中的氯离子浓度。即在光纤探头上安置荧光分子和硝酸银溶液,通过多孔膜或是溶胶凝胶化合物渗透氯离子,利用分析化学指示剂的显色反应或是荧光物质波长的飘移、颜色调制或是强度调制,设置检测浓度的阈值点,在阈值点光学信号将有明显的改变,从而提供报警指示。但是该方法检测氯离子浓度不连续,只能提供阈值信息;检测反应不可逆;荧光物质要考虑寿命的衰减问题。此外,这些方法只在溶液中进行了试验,在实际混凝土结构中应用还有许多工作要做。

**2.1.2 用核磁共振技术检测氯离子** Haebum Yun 等<sup>[14]</sup>将用于生物、化学领域的核磁共振(NMR)技术引入钢筋混凝土结构的氯离子监测。NMR是根据存在非均匀磁场的小扰动,原子核中非零级轨道上的核子在不同能级转换时产生的信号,检测某些原子存在和含量的技术。用永磁体来提供非均匀磁场,用微线圈在样本中产生小激励磁场,并接受从样本中返回的信号,将信号通过电学设备进行电学滤波和混合,分析样品中的氯离子含量。此技术比较复杂,若要用于实际工程,还有许多地方要进行改进。首先就是体积问题,根据实验,能获得较好信噪比的传感器系统体积较大,无法整个埋入混凝土。可以考虑在混凝土表面施加磁场,但是如何施加这个均匀磁场有待进一步研究。

### 2.2 pH 值监测

由于pH值大小影响钢筋是否发生腐蚀,所以钢筋/混凝土界面环境的pH值的测定一直受到学者的重视,但是传统检测pH值的手段是pH试纸和pH玻璃电极或金属电极难以用于钢筋混凝土结构。直到80年代兴起了光纤pH传感器,才使在钢筋混凝土结构中监测pH值有了进一步发展。

根据被测定物与指示剂之间相互作用引起的光信号变化的特征来分类,光纤pH传感器可分为光吸收式、荧光式和折射率变化式。折射率变化式反应速度快,稳定性和线性度较好<sup>[15]</sup>,一般用于溶液中。由于在混凝土结构中不需要如此快的响应,所以一般不采用折射率变化式,而常采用光吸收式和荧光式。由于有很多可用的pH指示剂,光吸收法易于实现。但是这种方法需要有较高浓度的指示剂或较厚的感应层;此外,由于感光元件要置于导向光纤之间,这种光纤传感器难以小型化。荧光式则更加灵敏,可以用于小型传感器。根据构造,pH传感器可采用滴定法、吸收反射式、敏感膜式。滴定法简单、廉价,但是不适用于混凝土结构的pH值检测。吸收反射式传感器头部敏感部分由指示剂、惰性基与薄膜组成。指示剂随pH值变化而变化;惰性基吸附指示剂,将指示剂光谱特性通过光纤传输到测量装置上;薄膜用来包裹敏感头,被测液体可以渗进惰性基,而惰性基离子不会流失到膜外。敏感膜式是采用物理、化学吸附或共价键绑定等方法将指示剂固定在pH敏感膜上,将该膜固定到光纤端面,使待测物中的H<sup>+</sup>与敏感膜发生作用,改变敏感膜的颜色并导致反射光强变化。与前一种方法相比,敏感膜式提高了测量的稳定性,所以是较为理想的方法。

**2.2.1 普通光纤pH传感器** Weiguo Xie 等<sup>[16]</sup>在通过光纤检测混凝土的pH值变化时使用了吸收谱的方法。吸收谱

代表的是被样本吸收光线的多少,根据反射光强可以计算吸收率,从而计算物质的浓度. P A M Basheer 等<sup>[17]</sup>采用了商用圆片 pH 敏感头和自制的溶胶凝胶敏感头进行了溶液和混凝土中的实验,研究认为要进行混凝土结构的 pH 值监测,不能采用商用敏感头,只能采用自行研制的敏感头. 虽然溶胶凝胶敏感头可以用于混凝土结构中,但是在指示剂以及溶胶凝胶层厚度的选择上还有待研究. 此外,由于光降解或泄漏,指示剂浓度会随时间而降低,这就使基于光强测量结果具有不稳定性,所以这种 pH 传感器的耐久性还需经过实践验证.

Nathalie Dantan 等<sup>[18]</sup>采用了波长比率法,即根据在两个不同波长上的光强的比值进行测量,因为这种强度比率不会因以上的外部因素而改变. 同样,对于荧光式传感器,荧光衰退时间可以作为分析的信号,因为荧光衰退时间对指示剂浓度和光源强度都不敏感. Nathalie Dantan 等对光吸收式和荧光式传感器都进行了研究,光吸收式传感器采用的是波长比率法;荧光式传感器的测量则是基于荧光衰退时间. 通过实验发现:这两种方法都适用于混凝土结构早期的 pH 测量,基于波长比率法的光吸收式传感器有很好的长期化学和机械稳定性. 由于将传感器放在溶液和水泥制品中进行测试,没有将其用于实际构件中,其耐久性缺乏实践检验. 为了增强耐久性与适用性,指示剂的选择与固定方法还有待继续研究. 此外,温度等环境因素对传感器的影响也需考虑.

**2.2.2 小型 pH 传感器** 为了减小传感器的体积,使监测系统小型化, Rengaswamy Srinivasan 等<sup>[19]</sup>省去了光纤系统,而采用简单的发光二极管/滤波器/光敏二极管组成的变换器系统. 发光二极管作为光源,照射含有指示剂的敏感膜,反射光通过滤波器、光敏二极管转换成电信号输出. 省去光纤系统不仅降低了造价,还避开了普通光纤传感器光纤承重和保护的问题. 此外在结构内部就将光信号转变为电信号,有利于传感器朝着无线方向发展.

### 2.3 温度、湿度监测

温度、湿度的监测手段比较常规,温度可以采用热电偶测量,湿度可以采用电阻率测量. 结合光纤技术,湿度监测还可以通过长周期光栅的波长调制机理实现的,即在长周期光栅表面修饰上纤维素的聚合物薄膜,当湿度从 0% 至 95% 变化时,光栅的有效折射率差发生变化,从而引起损耗光谱波长的漂移,通过监测波长的改变推算环境湿度的变化. 文献<sup>[20]</sup>将水凝胶沉积在光纤上,水凝胶吸水后膨胀,引起光纤局部变形,光传播经过膨胀点将发生弯曲损耗,由此推知局部水分子的存在.

### 2.4 碳化深度监测

测量碳化速率对于预测混凝土结构中钢筋的腐蚀及估计距腐蚀发生所剩余的时间来说很重要. 但是由于混凝土碳化中涉及的各种复杂的反应,很难确定碳化的开始. 尖端测试技术,如 X-射线衍射与热-重量分析,可以用来确定由于碳化过程中水泥水化产物的反应过程;但是,这需要从混凝土的不同深度取出混凝土粉末,并在实验室里分析. 其它方法包括化学分析、红外吸收等,这些方法难以用于现场监

测. 到目前为止,还没有研制出能够直接监测碳化深度的传感器. 但是由于碳化与 pH 值的变化密切相关,可以通过监测不同深度处 pH 值来确定混凝土的碳化深度,常用光纤 pH 传感器.

光纤传感器的使用寿命问题还有待进一步研究,现在的实验大多是将光纤传感器埋入结构或构件中几年,来评价传感器的耐久性. 但是这与结构几十年的寿命相比是远远不够的,只有传感器的使用寿命与结构寿命相近了,才能真正实现对结构耐久性的长期监测.

## 3 钢筋腐蚀的无线监测技术

### 3.1 埋入式桥梁腐蚀无线传感器

国外的钢筋腐蚀无线传感器也刚刚起步,研究的也较少,在 2003 年 IEEE 无线通讯技术研讨会上<sup>[21]</sup>及 2004 年天线应用研讨会上<sup>[22]</sup>,美国 Illinois 大学 J T Bernhard 和 Hietpas K 等发表了混凝土桥梁中埋入式腐蚀监测系统的文章. 此传感器应用超声波技术及数据无线传输技术,通过超声波进行钢筋腐蚀情况的检测,再通过宽带微波天线进行数据传输. 这些学者对混凝土环境中的天线单元进行了模拟和测量,对收发器选择和操作进行了研究,并提出了在操作协议、传感器网络和能量来源中研究的不足. 因为使用了超声技术,这种传感器和很多用于结构健康监测的无线传感器一样,成本较高,只有在大型桥梁等特别重要结构中才可能使用. 此外,同现在的很多无线传感器一样,电源是一个很难解决的问题. 由于钢筋出现腐蚀以及腐蚀的发展要经历较长时间,在这过程中传感器的电源可能会用完,这样传感器就无法再继续监测腐蚀的发展情况了.

### 3.2 基于腐蚀钢丝开关的无线传感器

国内在传感器信号无线传输方面起步较晚,很多的无线传感器都是采用外国研制开发的无线传输芯片,自行研制和制作无线传输芯片的较少. 虽然国外已经将无线传输模块集成到一个芯片上了,并且投入了批量生产,但是使用此类芯片传感器成本较高. 为降低成本,美国 Texas 大学<sup>[23]</sup>提出的基于腐蚀钢丝开关的无线传感器就没有采用无线传输芯片,而巧妙地采用简单的电磁振荡电路实现了信号的传输. 此传感器的基础是无线射频(RF)技术. RF 技术可以让传感器无线传输信息并免去了内部能源,这就保证了在结构使用寿命内传感器不会由于电源的原因而失效. 此传感器为一个简单的 LC 电路,通过磁感应读取回路测量其阻抗. 发送/接受装置在无线频段范围内进行频率扫描,由于 LC 电路的特征频率由阻抗相位响应决定(特征频率处相位最小,幅值上有一个变形点<sup>[23]</sup>),可以确定此 LC 电路的特征频率.

为了监测腐蚀,在传感器的 LC 电路上加入了一个外部开关. 由于随着开关加入了第二电容,传感器的特征频率取决于开关的状态:当外部开关合上时,回路在其初始频率时共振;当外部开关断开时,共振频率便有所提高. 为了监测腐蚀,采用钢丝作为外部开关. 由于钢丝和结构中的钢筋在同样的环境中,钢丝和钢筋会同时开始腐蚀,横截面面积会减少. 通过加速腐蚀试验将各个型号钢丝的腐蚀断裂与钢筋的

腐蚀过程联系起来,根据钢丝的断裂情况,可以检测出结构内钢筋的腐蚀情况。

研究初期出现了许多问题,比如说在钢筋腐蚀过程中的传感器信号会丢失等。因此,对传感器进行了一系列改进,增加了参考电路,以避免在钢筋腐蚀过程中的信号丢失,文献[24]给出了研制的传感器图<sup>[24]</sup>。

但是,此传感器还是有很多不足或需要改进的地方:

(1)给出的信息太少,只是单种腐蚀状态的监测。最好能将钢丝腐蚀过程与传感器的特征频率建立联系,就可以对整个腐蚀过程进行监测;若无法实现,至少也要进行多个腐蚀状态的监测,即增加外部开关的数量,采用不同粗细的钢丝对整个钢筋的腐蚀分阶段进行监测。(2)由于钢丝腐蚀过程中电路电阻的增大造成了传感器特征频率的丢失,才需要引进参考电路,既增加了传感器体积,又增加了传感器造价。如果能将外部开关进行改进,使得在钢丝腐蚀过程中电路的电阻不增加,可以省去参考电路。(3)在发送/接受装置与测量仪器之间仍然是有线连接。(4)传感器的密封还存在不足,如应该选择与混凝土有同样的热力学性能的密封材料,以防由于密封材料的原因造成混凝土开裂。

虽然此传感器存在种种不足,但是由于其无线、无内置能源、长寿命、便宜等优点,仍是一种很有发展前途的钢筋腐蚀传感器。

## 4 结论与展望

1. 以前混凝土结构中钢筋腐蚀检测主要是应用电化学方法。电化学方法往往受到很多外界因素的影响,操作时需要将外部测量探头放置于构件上,工作量大,准确性低,不能适应重大工程钢筋腐蚀监测的要求。重大工程混凝土结构中钢筋腐蚀监测应向智能、在线、无线方向发展。

2. 国内研究的钢筋腐蚀传感器主要是光纤镀碳-铁合金膜传感器和布拉格光栅传感器,研究只是限于实验室阶段,尚未开发出实用的定型设备。而无线腐蚀传感器国内还尚未起步,美国则起步较早,美国 Texas 大学 2003 年就提出了基于腐蚀钢丝开关的 LC 振荡电路无线传感器,并在逐步研究和改进。虽然此方案仍有许多问题,但是它给钢筋腐蚀传感器指出了发展的方向。

3. 混凝土结构中钢筋腐蚀监测系统还包括数据的自动处理和腐蚀状态评估与预测软件,关于这两方面的国内外研究未见报道。另外钢筋腐蚀传感器耐久性研究也很少。因此数据的自动处理、腐蚀状态评估与预测软件、传感器耐久性等方面的研究还有许多工作要做。

## 参考文献:

- [1] Isecke B. Failure analysis of the collapse of the Berlin Congress hall[J]. *Materials Performance*, 1982(12):36.
- [2] Sally. Motor speedway bridge collapse caused by corrosion[J]. *Materials Performance*, 2000(7):18.
- [3] 柳俊哲,冯奇,李玉顺. 混凝土中钢筋宏电池腐蚀电流的研究[J]. *建筑材料学报*, 2005, 8(1):90.
- [4] Ralph Baessler, Jurgen Mietz, Michael Raupach, et al. Corrosion monitoring sensors for durability assessment of concrete structures[J]. *SPIE*, 2000, 3988:32.
- [5] 耿欧,李果,袁迎曙. 电化学检测技术在混凝土内钢筋腐蚀研究中的应用现状与展望[J]. *混凝土*, 2005, (2):20.
- [6] K D Bennett, L R McLaughlin. Monitoring of corrosion in steel structures using optical fiber sensors[J]. *SPIE*, 1995, 2446:48.
- [7] 黎学明,张胜涛,黄宗卿,等. 钢筋腐蚀监测的光纤传感技术[J]. *腐蚀科学与防护技术*, 1999, 11(3):169.
- [8] 黎学明,陈伟民,黄宗卿,等. 光纤传感器对混凝土结构钢筋腐蚀监测的研究[J]. *光电子·激光*, 2001, 12(10):1037.
- [9] 李学金,林文山,范平,等. 钢筋腐蚀光纤传感器的研究[J]. *测控技术*, 2001, 20(8):10.
- [10] 严云,江毅, Christopher K Y Leung. 用光纤光栅测量混凝土中钢筋的腐蚀 - 第一部分:基本原理与加速试验的结果[J]. *四川建筑科学研究*, 2005, 31(6):148.
- [11] 董飒英,廖延彪,田芊,等. 光纤传感技术在腐蚀监测中的应用[J]. *分析科学学报*, 2004, 20(5):546.
- [12] Peter L Fuhr, Dryver R Huston, Adam J McPadden, et al. Embedded chloride detectors for road - ways and bridges [J]. *SPIE*, 1996, 2719:229.
- [13] Dryver R Huston, Peter L Fuhr, Eric Udd, et al. Fiber optic sensors for evaluation and monitoring of civil structures [J]. *SPIE*, 1999, 3860:2.
- [14] Haebum Yun, Mark E. Patton, James H. Garrett, et al. Developments in chlorine detection in concrete using NMR [J]. *SPIE*, 2002, 4696:310.
- [15] 吕俊芳,周秀银,姚雅红,等. 光纤 pH 值传感器[J]. *航空学报*. 1994, 15(8):985.
- [16] Weiguo Xie, Tong Sun, Kenneth T. V. Grattan, et al. Fibre optic chemical sensor systems for internal concrete condition monitoring [J]. *SPIE*, 2004, 5502:334.
- [17] P A M Basheer, K T V Grattan, T Sun, et al. Fiber optic chemical sensor systems for monitoring pH changes in concrete [J]. *SPIE*, 2004, 5586:144.
- [18] Nathalie Dantan, Wolfgang R Habel, Otto S Wolfbeis. Fiber optic pH sensor for early detection of danger of corrosion in steel - reinforced concrete structures [J]. *SPIE*, 2005, 5758:274.
- [19] Rengaswamy Srinivasan, Terry E Phillips, C. Brent Barger, et al. Embedded micro-sensor for monitoring pH in concrete structures [J]. *SPIE*, 2000, 3988:40.
- [20] W Craig Michie, B Culshaw, M Konstantaki, et al. Distributed pH and water detection using fiber-optic sensors and hydrogels [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1995, 13(7):1415.
- [21] J T Bernhard, K Hietpas, E George, et al. An Interdisciplinary Effort to Develop a Wireless Embedded Sensor System to Monitor and Assess Corrosion in the Tendons of Prestressed Concrete Girders [A]. In: 2003 IEEE Topical Conference on Wireless Communication Technology [C]. IEEE, 2003:241.
- [22] Hietpas K, Ervin B, Kuchma D A, et al. Wireless embedded rust monitoring systems [A]. *Proceedings of the 2004 Antenna Applications Symposium [C]*. Amherst, MA, USA: Massachusetts Univ., 2004. 27.
- [23] J T Simonen, M M Andringa, Kristi M Grizzle, et al. Wireless sensors for monitoring corrosion in reinforced concrete members [J]. *SPIE*, 2004, 5391:587.
- [24] N P Dickerson, J T Simonen, M M Andringa, et al. Wireless low-cost corrosion sensors for reinforced concrete structures [J]. *SPIE*, 2005, 5765:493.