

用于评估钢筋混凝土结构的传感器

埃塞俄比亚塔夫糖，乌比舍特尼古西

隶属机构：芬兰土木工程系

摘要：这项工作研究了钢筋混凝土结构自主腐蚀评估的技术可行性。由碳化或氯化物渗透引起的钢筋（钢筋）腐蚀是全球混凝土结构劣化的主要原因之一。通过混凝土中的pH值和氯离子（Cl⁻）浓度对碳化进行持续无损的在役监测对于早期检测腐蚀和做出适当的决定是必不可少的，这最终使RC结构的生命周期管理从资源和安全角度优化。对pH和Cl⁻传感器的最新审查表明，尽管实验进行的时间相对较短，但大多数传感器在混凝土环境中具有高灵敏度、可靠性和稳定性。在审查过的作品中，只有三个尝试无线监测Cl⁻，尽管范围很短。

关键词：传感器；自主腐蚀评估；腐蚀；钢筋混凝土

Sensors Involved in Assessment of Reinforced Concrete Structures

Ethiopia Taffese, Woubishet Nigussie

Affiliation: Department of Civil Engineering, Finland

Abstract: In this work, technological feasibility of autonomous corrosion assessment of reinforced concrete structures is studied. Corrosion of reinforcement bars (rebar), induced by carbonation or chloride penetration, is one of the leading causes for deterioration of concrete structures throughout the globe. Continuous nondestructive in-service monitoring of carbonation through pH and chloride ion (Cl⁻) concentration in concrete is indispensable for early detection of corrosion and making appropriate decisions, which ultimately make the lifecycle management of RC structures optimal from resources and safety perspectives. Critical state-of-the-art review of pH and Cl⁻ sensors revealed that the majority of the sensors have high sensitivity, reliability, and stability in concrete environment, though the experiments were carried out for relatively short periods. Among the reviewed works, only three attempted to monitor Cl⁻ wirelessly, albeit over a very short range.

Keywords: Sensors; autonomous corrosion assessment; corrosion; reinforced concrete

引言：

钢筋混凝土（RC）结构代表了世界物理基础设施的很大一部分，具有重要的经济意义。建筑和基础设施占世界国内生产总值的47%。尽管它们对经济做出了贡献，但工业化国家的大量基础设施正接近其使用寿命，并遭受相当程度的恶化。

钢筋的腐蚀是全世界钢筋混凝土结构退化的主要原因之一，尤其是那些暴露在腐蚀性环境中的钢筋。研究表明，钢筋的腐蚀已经达到了惊人的水平，全球每年相关的维护和维修成本超过数十亿美元。在发达国家，腐蚀成本估计在其GDP的3.5-4.5%范围内。修复后的钢筋混凝土结构中持续的钢筋腐蚀甚至造成37%的失效模式，从而导致昂贵的维修费用。

由于混凝土的孔隙溶液呈碱性，pH值为12-13，因此混凝土保护层自然地嵌入的钢筋提供了高水平的防腐蚀保护。在此碱度下，钢筋会持续钝化。然而，由于Cl⁻的存在或混凝土的碳化，钢筋的钝化被破坏。碳化是一种自然的物理化学过程，由邻近环境中的二氧化碳通过基体中的孔隙渗透到混凝土中而引发，二氧化碳与水合水泥发生反应。虽然碳化引起的碱度降低改变了混凝土的化学成分，但其主要结果是它破坏了钢筋的钝化氧化层，最终引发腐蚀。Cl⁻的渗透也是混凝土环境中钢筋腐蚀的主要原因。与碳化一样，Cl⁻的渗透通常不会直接对混凝土造成伤害。尽管如此，当钢筋处的Cl⁻浓度达到一定阈值时，会发生去钝化，从而导致腐蚀开始。事实上，氯化物阈值水平相当分散在很宽的值范围内（按

粘合剂的质量计,从接近零到大约 2.5 wt% Cl^-),因为它受多个因素控制,包括混凝土的成分、钢筋的类型、和曝光条件。碳化和氯化物引起的腐蚀都会减小钢筋的横截面积和阻力。这会导致严重的开裂以及基础设施的承载能力降低。开裂的混凝土允许额外的水分、腐蚀性气体和离子进入,加剧钢筋腐蚀和混凝土退化。随后,基础设施的可维护性、强度和安全性受到不利影响。

必须精确估计腐蚀开始时间,以便及时做出具有成本效益的维护决策,以防止 RC 结构受到腐蚀引起的损坏。为此,持续评估混凝土的 pH 值和混凝土中的 Cl^- 浓度是至关重要的。测量混凝土的 pH 值可以指示由碳化引起的腐蚀风险。评估混凝土中碳化和 Cl^- 含量的传统方法通常是半破坏性的、耗时的,并且需要定期重复。在这些方法中,混凝土中的碳化深度和 Cl^- 浓度的数量是使用从在役结构中采集的样品的化学和/或物理实验室测试来确定的。由于这些事实,常规技术不能用于频繁测量。此外,在现场或实验室(通过从结构中取样)对 RC 结构进行性能调查通常会产生大量的直接和间接成本。例如,传统的现场检查和维护计划造成的交通延误成本估计在建设成本的 15-40% 范围内。在评估样品中的碳化前沿和氯化物浓度后,通常使用传统的经验模型来预测结构的剩余寿命。这些模型基于 Fick 的第二扩散定律,包括几个假设和简化,在预测钢筋腐蚀开始的时间时产生了相当大的不确定性。这种不确定性可能会对检查和维护计划产生严重影响,进而对结构的使用寿命产生不利影响并增加生命周期成本。因此,可靠、具有成本效益和在役监测混凝土中的 pH 值和 Cl^- 浓度以及准确的腐蚀评估方法是必不可少的,这最终使 RC 结构的使用寿命管理从经济和安全的角度变得有效。这项工作的目的是对钢筋混凝土结构中碳化和氯渗透引起的钢筋腐蚀进行自主评估的可行性研究。

一、电位传感器

在过去的几十年中,已经开发了几种基于电位离子选择电极(ISE)的电化学传感器来监测混凝土中 Cl^- 浓度的变化。ISE 已牢固建立,并已在多个领域得到采用。例如,在分析化学领域,一些特定物种的离子活性已经使用电位测量进行了检查。电位传感器的工作原理是在没有电流流动的条件下,感测离子相对于参考 ISE 的化学活性引起的电位变化。

通常,此类电极主要是基于膜的装置,包括离子传导可渗透材料,将样品与电极内部隔离。其中一个电极是工作电极或指示电极,其电位由其环境决定。第二电极是

具有固定电位的反电极或参比电极。由于对电极的电位是恒定的,所以电位差值可以与溶解离子浓度相关联。

二、电位氯离子传感器

尽管基于电位 ISE 的传感器的基本原理已经确立并广泛应用于电化学领域,但必须评估它们在混凝土中的适用性。可安装在混凝土中的传感器应在高碱性环境和广泛的 Cl^- 浓度范围内长时间工作,同时提供准确可靠的结果。此外,应确保 Cl^- 传感器对 pH 变化和其他主要干扰离子(来自环境和/或混凝土成分)的稳定性。

Ag/AgCl 电极是最常用和市售的氯离子选择性电极。它包括一根由银(Ag)制成的线,上面涂有氯化银(AgCl)的转换层。1990 年代初,人们首次尝试在硬化砂浆中使用 Ag/AgCl 电极测量 Cl^- 的活性。从那时起,已经开发了几种基于 Ag/AgCl 电极的 Cl^- 传感器。

Femenias 等人研究了 Ag/AgCl 电极对可能来自周围环境和/或混凝土混合成分的其他干扰物质的敏感性。调查结果表明,氟化物、硫酸盐和羟基的干扰微不足道,但溴化物和硫化物的干扰却很大。在完全不含氯化物的碱性溶液中,ISE 随时间不稳定,但在 Cl^- 到达时,它可靠地测量 Cl^- 浓度。作者得出结论,Ag/AgCl 电极可以令人满意地用于监测暴露于氯化物环境中的 RC 结构中的 Cl^- 量。Montemor 等人评估了 Ag/AgCl 电极在混凝土环境中对 Cl^- 进行在线监测的适用性。评估是在不同深度的砂浆和混凝土样品中通过暴露于广泛的 Cl^- 浓度进行的。报告的结果表明,基于 Ag/AgCl 的氯化物传感器相当稳定。

三、电位 pH 传感器

监测混凝土的 pH 值至关重要,因为混凝土的碱度对于保护嵌入钢筋免受腐蚀至关重要。尽管使用电位传感器测量 pH 值是各种应用领域的常见做法,但它在监测混凝土孔隙溶液的 pH 值方面的用途非常有限。Femenias 等人利用基于热氧化铱/氧化铱(IrOx)电极的嵌入式电位 pH 传感器。随着时间的推移,他们在加速碳化的砂浆样品中持续监测不同深度的 pH 值。作者声称,使用的 pH 传感器可以深入了解碳酸化过程和动力学过程,例如传输和相变。这些作者在另一项工作中检验了 IrOx 电极在混凝土环境中长期连续监测 pH 值的可行性,重点关注其再现性、稳定性、准确性和氧依赖性。传感器暴露在高碱性溶液(pH 9-13.5)中大约两年,它们能够以 0.5 pH 单位的最大误差进行测量。他们还通过在砂浆中嵌入约 160 天来检查其性能。作者得出结论,基于 IrOx 电极的传感器稳定、准确、不依赖氧气,并且在混凝土环境中具有出色的 pH 监测能力。形成的(10-

25 μm) 氧化层厚度有利于混凝土结构的长期稳定性。事实上, 作者指出了 IrO_x 电极在强碱性溶液中调节至少 3-4 个月的重要性, 以实现精确和可重复的电位响应。电极的响应时间对于混凝土环境中的 pH 值监测来说是足够快的。

四、电位集成氯离子和 pH 传感器

监测钢筋/混凝土界面处的 Cl^- 浓度和 pH 值对于早期检测钢筋腐蚀和做出合理决策是必不可少的。在这方面, 有一些尝试表明集成氯化物和 pH 传感器以同时监测两个参数 (Cl^- 浓度和 pH 值) 的可能性。例如, Du 等人开发并展示了一种集成传感器单元, 用于监测钢筋和混凝土界面处的 pH 值和 Cl^- 浓度。pH 和氯化物传感器分别基于 Ir/IrO_2 和 Ag/AgCl 电极。传感器嵌入混凝土中, 以同时监测孔隙溶液的 pH 值和 Cl^- 浓度的量。报告的测试结果表明, 集成传感器稳定且坚固, 表明该传感器具有实现混凝土中 pH 和 Cl^- 浓度连续在线监测的潜力。

还有 pH 和 Cl^- 传感器, 它们与其他传感器集成在一起, 用于监测混凝土环境中的不同参数。例如, Yu 和 Caseres 开发了一个集成多功能传感器单元的嵌入式原型。它包含 Ag/AgCl 电极、金属氧化物 (MO)、多电极阵列传感器 (MAS) 和四针 (Wenner) 阵列不锈钢, 用于监测 Cl^- 浓度、pH、微池腐蚀电流和局部具体电阻率, 分别。原型传感器的长期灵敏度和可靠性通过将其嵌入水泥浆筒中进行评估。声称的结果 (基于一年的监测) 表明 pH 值和其他集成传感器可靠且稳定, 显示出其在实际 RC 结构中实施的潜力。

五、光纤传感器

作为 ISE 测量, 光学技术是检测化学分析物的最古老和成熟的方法之一, 并为多种化学传感器奠定了基础。基于光学的传感技术不是基于单一概念, 而是基于可用于测量范围广泛的化学和物理参数的各种光学现象。低成本高质量光纤的发展促进了光纤传感器的广泛开发和采用。最简单形式的光纤传感器 (FOS) 包括光纤、光源、传感元件和检测器。光纤传感器的基本工作原理是传感元件调制光学系统的一个或多个参数 (例如波长、色度、相位和偏振), 从而导致检测器处的光信号特性发生变化。FOS 可以影响传输光纤的导光特性, 并将特定属性与光的变化相关联。基本原理是通过改变通过光纤内部和沿光纤的光束的光学特性来评估外部物理参数。因此, 光纤既是传输介质又是传感元件。

在过去的四年中, 在开发用于化学和物理分析物的基于光纤的传感器方面进行了大量的研究尝试。因此,

已经制定了几个有趣的方案, 并继续成为重要研究的主题。化学分析的应用领域涉及基于实验室的分析、环境监测和临床诊断应用。每个特定应用领域在选择性、灵敏度、准确性、稳健性和成本方面都有其自身的先决条件。分析物的研究物理状态包括气体、溶解气体、液体、溶液中的离子和固体。使用 FOS, 通常可以使用各种方法在原位和实时进行化学分析, 这些方法包括: 荧光、散射、颜色变化、吸收、倏逝波相互作用和折射率变化。光纤荧光技术已被用于测量各种类型的离子, 例如氯离子、碘离子、铁离子、钪离子和硫酸根离子。它也已扩展到测量 pH 值。

六、光纤氯离子传感器

最近, 开发了一些基于光纤的传感器来监测混凝土环境中的 Cl^- 浓度。Ding 等人开发了使用悬芯光纤进行现场实时监测的 Cl^- 传感器。悬芯光纤的主要特性是其贯穿整个长度的大气孔, 因此敏感材料可以储存在孔中。这种类型的光纤具有延长的相互作用长度、强大的光物质相互作用和少量样品的利用。他们引入了一种溶胶-凝胶膜, 使用浸涂技术将光泽精 (用作荧光敏感材料) 固定在悬芯光纤的内壁上。测试了混凝土中可能出现的干扰离子 (Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 和 OH^-) 传感器的性能。作者声称该传感器在高碱性环境中工作。 Na^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 对光纤传感器的 Cl^- 检测影响较小, 并且大量 SO_4^{2-} 略微阻碍光泽精淬灭过程。 OH^- 对传感器的 Cl^- 检测有主要干扰。基于结果, 作者声称开发的传感器可以成功地应用于混凝土结构中的 Cl^- 监测。Laferrrière 等人开发了用于实时和连续监测混凝土孔隙中 Cl^- 浓度的光纤。它使用对 Cl^- 敏感的荧光指示染料。在两种模拟气候条件下, 在不同深度的砂浆样品中测试了所开发传感器的性能: (i) 炎热的海洋和 (ii) 寒冷的环境。作者报告说, 可以精确量化两种气候条件下的 Cl^- 浓度, 表明其适用于科学研究和混凝土结构的状态监测。

七、光纤 pH 传感器

尽管光纤荧光技术已应用于各个研究领域的 pH 测量, 但其在具体环境中的应用仍然有限。Nguyen 等人制作了一种光纤传感器, 使用对 pH 值敏感的荧光聚合物来监测混凝土孔隙的 pH 值。作者表示, 该传感器在混凝土的适当 pH 值范围内提供响应, 可接受的速率约为 50 分钟, 并在 20 个月内保持稳定。他们还报告说, 该传感器在一系列测试中对离子强度具有微不足道的交叉敏感性和出色的光稳定性。所有这些特性使传感器适用于混凝土中 pH 值的长期在役监测。McPollin 等人制备了定制的

基于光纤的溶胶-凝胶 pH 传感器，旨在在混凝土环境中具有更合适的特性。它是通过将溶胶-凝胶涂层（由原硅酸四乙酯（TEOS）制成）施加到芯径为 600 μm 的塑料包层二氧化硅纤维上而制成的。采用的指示染料是甲酚红，其 pH 值范围为 8-13。盐酸（HCl）用作催化剂溶液。通过将传感器嵌入水泥砂浆立方体中超过 18 个月来评估传感器的性能，并且在整个测试期间都可以正常工作。

八、电位传感器和光纤传感器的比较

如前所述，电位传感器和光纤传感器的操作技术是不同的。由于这两种类型的传感设备都基于各自的特定原理；它们受不同参数的影响。因此，它们之间的比较集中在它们的生产过程、侵入性和性能上。

电位传感器的生产过程简单，采用众所周知的电化学工艺，而光纤传感器技术含量高且复杂。关于侵入性，两种类型的传感设备对基础设施的结构行为的影响可以忽略不计，因为它们与所研究的结构元素的尺寸相比很小。在测量混凝土元素中的 Cl^- 和 pH 值时，它们对周围环境也没有影响。

电位传感器的整体性能在很大程度上取决于电极的类型和制备方法。电位传感器和光纤传感器都会受到一些干扰离子的影响。然而，与 FOS 相比，更多类型的离子会干扰基于电位计的传感装置。发现光纤传感器比电位传感器在化学上更稳定。

结论

以可靠且具有成本效益的方式持续监测引起腐蚀的因素对于为 RC 结构规划准确的基于状态的维护策略至关重要。本文对用于监测混凝土环境中碳化前沿和 Cl^- 浓度的最先进的 pH 和 Cl^- 传感器进行了批判性审查。根据其测量原理，用于监测 pH 和 Cl^- 浓度的混凝土环境中的传感器可分为两种：电位计和光纤。尽管实验进行的时间相对较短，但大多数研究的 pH 和 Cl^- 传感器在混凝土环境中都表现出高灵敏度、可靠性和稳定性。审查工作还确定了三个试图在混凝土中无线监测 Cl^- 的案例，尽管范围很短。此外，这项工作推测未来可能会导致 RC 结构的腐蚀状况评估。随着传感器技术的发展以及基于物联网的系统和机器学习，以具有成本效益的方式远程进行自主腐蚀状况评估将变得可行。工程师和科学家可以进一步分析收集到的传感器数据，以更好地了解复杂的腐蚀现象。新的科学知识将帮助科学家设计最佳解决方案，以提高基础设施的耐用性并制定积极的维护计划。

参考文献：

[1]Peng, J.; Li, Z.; Ma, B. Neural network analysis of

chloride diffusion in concrete. *J. Mater. Civ. Eng.* 2002, 14, 327 - 333.

[2]Inthata, S.; Kowtanapanich, W.; Cheerarot, R. Prediction of chloride permeability of concretes containing ground pozzolans by artificial neural networks. *Mater. Struct.* 2013, 46, 1707 - 1721.

[3]Bog˘ a, A.R.; Özt ü rk, M.; Topçu, I .B. Using ANN and ANFIS to predict the mechanical and chloride permeability properties of concrete containing GGBFS and CNF. *Compos. Part B Eng.* 2013, 45, 688 - 696.

[4]Yasarer, H.; Najjar, Y.M. Characterizing the permeability of Kansas concrete mixes used in PCC pavements. *Int. J. Geomech.* 2014, 14, 04014017.

[5]Taffese, W.Z.; Sistonen, E. Neural network based hygrothermal prediction for deterioration risk analysis of surface-protected concrete façade element. *Constr. Build. Mater.* 2016, 113, 34 - 48.

[6]Song, H.-W.; Kwon, S.-J. Evaluation of chloride penetration in high performance concrete using neural network algorithm and micro pore structure. *Cem. Concr. Res.* 2009, 39, 814 - 824.

[7]Kim, Y.-Y.; Lee, B.-J.; Kwon, S.-J. Evaluation technique of chloride penetration using apparent diffusion coefficient and neural network algorithm. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2014, 2014.

[8]Hodhod, O.A.; Ahmed, H.I. Developing an artificial neural network model to evaluate chloride diffusivity in high performance concrete. *HBRC* 2013, 9, 15 - 21.

[9]Parichatprecha, R.; Nimityongskul, P. Analysis of durability of high performance concrete using artificial neural networks. *Constr. Build. Mater.* 2009, 23, 910 - 917.

[10]Barroca, N.; Borges, L.M.; Velez, F.J.; Monteiro, F.; G ó rski, M.; Castro-Gomes, J. Wireless sensor networks for temperature and humidity monitoring within concrete structures. *Constr. Build. Mater.* 2013, 40, 1156 - 1166.

[11]Cabezas, J.; S ú nchez-Rodr í guez, T.; G ó mez-Gal á n, J.A.; Cifuentes, H.; Carvajal, R.G. Compact embedded wireless sensor-based monitoring of concrete curing. *Sensors* 2018, 18, 876.

[12]Strangfeld, C.; Johann, S.; Bartholmai, M. Smart RFID sensors embedded in building structures for early damage detection and long-term monitoring. *Sensors* 2019, 19, 5514.