

文章编号:1671-6833(2006)03-0030-04

受氯离子侵蚀钢筋混凝土结构的耐久性检测诊断

赵卓¹, 张敏², 曾力¹

(1. 郑州大学土木工程学院, 河南郑州 450002; 2. 河南科学技术情报所, 河南郑州 450003)

摘要: 基于电化学理论, 考虑不同腐蚀阶段, 研究探讨了氯离子的侵蚀作用机理、结构混凝土中氯离子含量界限值、氯离子的扩散等有关问题, 简要分析了不同腐蚀阶段结构钢筋锈蚀检测的几种常用电化学方法, 介绍了混凝土抗氯离子渗透性的相关检测技术, 并基于不同腐蚀控制策略, 结合工程实际, 提出了针对氯离子腐蚀的结构防护对策。

关键词: 氯离子; 钢筋混凝土结构; 耐久性; 检测诊断

中图分类号: TU 503

文献标识码: A

0 引言

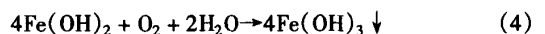
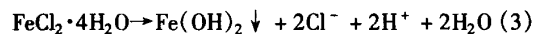
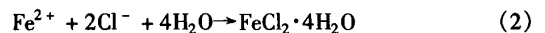
我国幅员辽阔, 氯离子广泛存在于海洋环境、道路化冰、盐湖和盐碱地、工业环境、特种行业(如医院)等各类环境中, 由氯离子所引起钢筋锈蚀是结构设计使用期内一个不容回避的问题, 而钢筋的锈蚀是混凝土结构耐久性降低甚至破坏的首要原因。氯盐不仅通过对钢筋的锈蚀作用而导致钢筋混凝土结构的破坏, 对结构混凝土也有一定的破坏作用, 如盐结晶腐蚀、加速冻融破坏及激发碱集料反应等。因此, 需要对氯离子侵蚀环境下在役钢筋混凝土结构的耐久性相关问题进行研究, 并基于结构受腐蚀损伤的特点, 提出相应的设计、施工及使用维护措施, 以保证结构在设计寿命内的正常使用。笔者基于电化学理论, 考虑不同腐蚀阶段, 研究探讨了氯离子的侵蚀作用机理、结构混凝土中氯离子含量界限值、氯离子的扩散等有关问题, 简要分析了钢筋锈蚀检测的几种常用电化学方法, 介绍了混凝土抗氯离子渗透性的相关检测技术, 并基于不同腐蚀控制策略, 提出了针对氯离子侵蚀的结构防护对策。

1 氯离子侵蚀机理

在氯离子侵蚀环境下, 结构周围环境中氯离子的含量一般较高, 对结构混凝土中钢筋易造成严重的腐蚀损伤。

当由于种种原因, 结构混凝土中具有充分的

可溶性氯离子时, 钢筋表面的钝化层将会立即遭到破坏, 并能导致钢筋的腐蚀、混凝土的开裂, 在严重的情况下, 还能导致混凝土保护层的脱落。裂缝的形式一般是沿主受力钢筋的直线方向。腐蚀过程的主要反应式如下:



从以上反应可以看出, 氯离子本身虽然并不构成腐蚀产物, 在腐蚀中也不消耗, 但为整个腐蚀过程的进行起到了加速催化的作用。应该注意的是, 在混凝土结构中常见的由氯离子所引起的钢筋腐蚀主要是局部的坑蚀, 这主要是由于氯离子一般首先在较小区域的钢筋表面破坏钝化膜, 形成小阳极, 与大部分表面钝化膜完好的钢筋区域——即大阴极间形成腐蚀电偶, 使坑蚀的发展较为迅速。

2 混凝土中氯离子含量的临界值^[1~3]

当由于种种原因, 氯离子含量在钢筋周围达到某一临界值时, 钢筋的钝化膜开始破裂, 丧失对钢筋的保护作用, 从而引起钢筋锈蚀。对结构混凝土而言, 氯离子的来源主要由两部分组成: 一部分是由拌和水、水泥、细骨料、粗骨料、矿物掺和料以及各种外加剂等各种混凝土组成材料带进混凝土的氯离子, 一部分是通过混凝土保护层由外界环境渗透进入混凝土内部的氯离子。因此, 为保证混

收稿日期: 2006-04-29; 修订日期: 2006-05-30

基金项目: 河南省杰出青年科学基金(0312000600)

作者简介: 赵卓(1970-), 男, 河南郑州人, 郑州大学副教授, 博士, 主要结构损伤诊断及耐久性方面的研究。

凝土的耐久性,应根据混凝土种类、环境条件等对混凝土拌和物中氯化物总量加以限制。

关于引起钢筋锈蚀的氯离子临界值,目前看法并不一致,研究者所用的材料、规定的试验条件的不同,其结果也有一定差异,但一般界定于占水泥重量的 0.35%~1% 范围内。

JTJ275-2000 对预应力混凝土和钢筋混凝土分别规定混凝土拌和物中氯离子的最高限值(以水泥质量百分率计)为 0.06% 和 0.1%。

我国各行业规程、规范对氯盐含量最高限值的规定差异较大,其中,GB50010-2002 考虑不同环境类别,对最大氯离子含量、最大水灰比等相关因素做出了相应规定,如表 1 所示。

表 1 结构混凝土耐久性的基本要求

Tab.1 The basic requirements of concrete structural durability

环境类别	最大水灰比	最小水泥用量 (kg·m ⁻³)	最低混凝土强度等级	最大氯离子含量/%	最大碱含量/ (kg·m ⁻³)	
一	0.65	225	C20	1.0	—	
二	a	0.60	250	C25	0.3	3.0
	b	0.55	275	C30	0.2	3.0
三	0.50	300	C30	0.1	3.0	

针对混凝土中氯离子含量的最高限值,国外的有关规定要求也不尽一致。其中,“FIP 海工混凝土结构的设计与施工建议”(1986)考虑了气候的影响,对混凝土拌和物中氯离子含量的最高限制(按水泥质量的百分率)做出了相应规定,如表 2 所示。表 3 列出了美国混凝土学会(ACI)的相关规定。

表 2 FIP 氯离子含量的最高限值

Tab.2 The limit content of chloride ions in concrete of FIP %

环境条件	钢筋混凝土	预应力混凝土
热带气候	0.1	0.06
温带气候	0.4	0.06
极冷地区	0.6	0.06

表 3 ACI 混凝土中允许的氯离子含量最高限值(水泥质量百分比)

Tab.3 The limit content of chloride ions in concrete of ACI (% ratio of cement)

类型	ACI ₂₀₁	ACI ₃₁₈	ACI ₂₂₂	
预应力混凝土	0.06	0.06	0.08	
普通 混凝土	湿环境、有氯盐	0.10	0.15	0.20
	一般环境、 无氯盐	0.15	0.30	0.20
	干燥环境或 有外防护层	—	1.0	0.20

表 4 列出了英国 BS6235-1982 和 BS8110-1985 考虑不同水泥类型,对混凝土拌和物中氯离子限值的相关规定。

对氯离子侵蚀环境下的在役钢筋混凝土结构,在现场检测中,为分析混凝土结构中钢筋的腐蚀发展情况,需要测定结构混凝土中氯离子的含量,一般常采用硝酸银滴定法测定。该试验方法基本原理是在混凝土试样的硝酸溶液中加入过量的硝酸银标准溶液,使氯离子完全沉淀以最终获得混凝土中的氯离子含量。

表 4 混凝土中氯离子含量的最高限值

Tab.4 The limit content of chloride ions in concrete %

结构种类	水泥品种	BS6235-1982	BS8110-1985
钢筋	符合 BS12 的水泥或相当水泥	0.35	0.40
	符合 BS4207 的水泥或相当水泥	0.60	0.20
预应力	各种水泥	0.06	0.10

3 氯离子侵蚀过程各阶段的检测诊断

当预测在服役结构的剩余寿命时,采用图 1 所示的 Tunti^[4]模型来定性描述结构受腐蚀损伤的发展过程是较符合实际的。

从图 1 可以看出,为准确描述结构腐蚀的整个进程,并对受腐蚀结构的剩余使用寿命做出合理预测,结构腐蚀的初始时间的确定是至关重要的,对预应力混凝土结构而言则更为重要。对于预应力混凝土结构而言,可以偏安全地近似将结构的初始腐蚀时间 t_0 作为结构或构件的腐蚀破坏临界状态。而初始时间 t_0 (或去钝时间)的确定则取决于结构防护程度及有害介质离子的渗透速率。

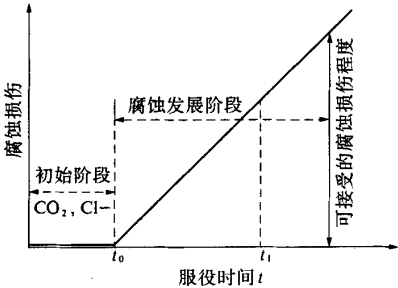


图 1 Tunti 腐蚀损伤过程模型

Fig.1 The corrosion damage phase model of Tutti

在腐蚀发展阶段,已有的研究通常采用阳极电流密度表示钢筋锈蚀的速度,且假定锈蚀速度为一常数或随结构服役时间变化的随机变量,并不受水灰比、保护层厚度、裂缝等的影响.实际上,在结构混凝土未开裂前,锈蚀速度取决于钢筋表面氧气和水分的可利用程度,而钢筋表面氧气量依赖与混凝土质量(水灰比)、保护层厚度及环境条件等.一般情况下,混凝土中的钢筋锈蚀在大多数条件下主要是阴极氧气的扩散控制,只有当混凝土比较干燥时,才是混凝土电阻控制.而在混凝土结构开裂后,由于混凝土对钢筋保护的丧失,其腐蚀过程将有所不同.因此,整个腐蚀过程应分为3个时间阶段^[5]:即结构腐蚀的初始时间 t_0 阶段、混凝土的腐蚀开裂时间 t_{cr} 阶段和混凝土开裂后的腐蚀发展破坏阶段.

3.1 结构腐蚀的初始时间阶段

3.1.1 氯离子的扩散系数

在结构腐蚀的初始时间 t_0 阶段,主要是氯离子通过混凝土到达钢筋表面并集聚到临界氯离子浓度的渗透过程.

氯离子在混凝土中的渗透过程被视为扩散过程,扩散模型沿用典型的 Fick 第二扩散定律来描述.通常情况下,在氯离子侵蚀环境下,当选用不含有氯离子成分的原材料时,结构腐蚀的初始时间 t_0 为

$$t_0 = \frac{x^2}{4D} \left[\operatorname{erf}^{-1} \left(1 - \frac{C_{cr}}{C_s} \right) \right]^2 \quad (5)$$

其中: C_s 为结构表面处的浓度, C_{cr} 为临界氯离子浓度; D 为扩散系数.

可以看出,氯离子扩散系数 D 是用来反映混凝土对氯化物侵蚀抵抗能力的重要参数,与混凝土的抗渗性能有较大关系.氯离子在混凝土中的扩散受到许多因素的影响,如水灰比、水泥品种、骨料级配、外加剂种类和掺量、养护条件、暴露时间、环境温湿度等.

在常规的 Fick 扩散方程中,取氯离子扩散系数 D 为不随时间和其它相关参数变化的常量,但实际上混凝土是一种水硬性材料,其水化过程需要经过很长时间才能完成,随着混凝土的不断水化,其内部结构越来越密实.水灰比是反映混凝土密实程度的主要因素之一,而混凝土密实度是抗氯离子扩散能力的主要因素.从许多试验结果中可以观察到当水灰比增大时,混凝土的渗透性、氯离子的扩散系数都有不同幅度的提高.

3.1.2 混凝土渗透性的快速检测技术^[3]

混凝土渗透性的高低是反映混凝土耐久性好坏的重要指标之一,混凝土渗透性快速检测技术在近20年来发展迅速,目前常规采用的主要有渗水法(包括渗水高度法、渗水标号法及渗水系数法等)、电量法(包括 ASTM C1202 方法及其改良方法等)、电导率法(包括直流和交流电法等)、氯离子扩散系数法(主要包括自然浸泡法、电迁移法及饱盐电导率法等)以及极限电压法等.

3.2 混凝土的腐蚀开裂时间 t_{cr} 阶段^[6]

当混凝土中结构钢筋开始腐蚀后,腐蚀电流密度 i_{corr} 是描述腐蚀进程及确定腐蚀开裂时间 t_{cr} 的重要参数.目前,电化学方法是最适宜检测钢筋混凝土结构中钢筋锈蚀情况的非破损检测方法^[6].根据现场的实际应用情况,最常用的方法有半电池电位法、混凝土电阻率检测法、直流线性极化电阻法以及交流阻抗法等.应该指出的是,目前在国内广泛采用的半电池电位法及混凝土电阻率检测法仅为定性的检测方法,且受到诸多因素的影响,而可以获得测时腐蚀电流密度值的直流线性极化电阻法和交流阻抗法等,则基本仍处于初步推广阶段,有待于进一步的工程验证.

4 氯离子腐蚀的防护对策

鉴于通过种种途径进入结构混凝土的氯离子可能引起钢筋锈蚀,并最终引发钢筋混凝土结构的耐久性问题,因此应采取必要的防腐对策,以保证钢筋混凝土结构在氯离子侵蚀环境下的正常服役.

对混凝土原材料中氯离子含量的严格控制,是防治混入型氯离子进入混凝土的主要措施,因此,应加强对施工用水、砂、石及各类外加剂等材料中的氯离子含量严格控制,并应慎重考虑钢筋阻锈剂或钝化剂的使用.

由于混凝土本身固有的多孔性而存在着宏观与微观的缺陷等原因,应采取必要的防护措施阻止或防止外界环境的氯离子渗入混凝土内部.根据防腐对策原理等的不同,在工作时需要由外部输入能量的防腐对策方法,可称为“积极腐蚀控制”方法;不需要输入能量的,称为“消极腐蚀控制”方法.其中,消极腐蚀控制方法主要有:①采用高性能混凝土;②钢筋或结构混凝土表面的无机涂层;③钢筋或结构混凝土表面的有机涂层等.

这些消极的腐蚀控制措施,其基本出发点在于采用各种措施提高结构的防护能力,增强结构的耐久性,以尽量延长腐蚀初始时间 t_0 ,具有造价

低、施工方便、在一段时期内免于人工维护的优点,然而,这些防护材料的使用寿命一般受一定的限值,在结构的设计使用期内,均需要不同程度的维修或更换,从很大程度上提高了结构全寿命期内的总投资维修费用,因此存在一个材料、措施的合理选择与优化设计问题。

与消极的腐蚀控制相对应,各类积极腐蚀控制方法在一定程度上遵从相同的机理,通过外加电流影响或改变混凝土、钢筋、钢筋与混凝土接触面的特性以及混凝土内部的液体流动系统,各方法之间的主要不同点在于外加电流的大小、钢筋的实际可获得电流以及通过混凝土碱性化过程加入混凝土中的特殊电解质。这些积极的腐蚀控制方法主要有:阴极保护法、混凝土电化学碱化法以及混凝土电化学除氯法等,在此不再赘述。

5 结论

氯离子侵蚀环境下钢筋混凝土结构的腐蚀研究是一项非常复杂的课题,作者基于不同腐蚀过

程阶段,对在役结构耐久性的检测诊断进行了系统的分析研究,并基于不同腐蚀控制策略,提出了基于工程实践,针对氯离子腐蚀的结构防护对策,为今后这方面进一步的研究提供了经验。

参考文献:

- [1] JTJ275-2000,海港工程混凝土结构防腐蚀技术规范[S].
- [2] GB50010-2002,混凝土结构设计规范[S].
- [3] CCES 01-2004,混凝土结构耐久性设计与施工指南[S].
- [4] TUTTI K. Corrosion of steel in concrete [R]. Swedish Cement and Concrete Research Institute Report, Stockholm: 1982
- [5] 赵卓,马亚丽,李锋. 氯离子环境下钢筋腐蚀速度分阶段模型[J]. 工业建筑, 2005, 35(382): 1~4.
- [6] 赵卓,张玲,赵磊. 酸性环境下结构受弯构件的加速腐蚀试验[J]. 郑州工业大学学报, 2000, 21(3): 57~60.

Structural Durability Detection and Diagnosis of R.C. Structure under Chloride Environment

ZHAO Zhuo¹, ZHANG Min², ZENG Li¹

(1. School of Civil Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. Henan Scientific & Technical Information Institute, Zhengzhou 450003, China)

Abstract: According to the theory of electrochemical mechanism and based on the different phase corrosion model, the mechanism of chloride ions invasion, boundary value of chloride ions content in R.C. Structures and chloride ions diffusion etc. are studied, and several electrochemical methods used to monitor the corrosion of the reinforcement are studied. The detection technology of the resistance for chloride ions' permeability in concrete is introduced and the protection measures for prevention of chloride ions' invasion are also put forward.

Key words: chloride ions; R.C. structure; structural durability; detection and diagnosis