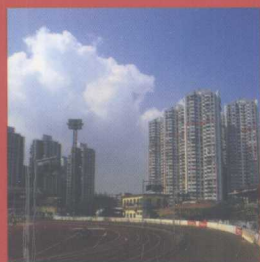




国际建筑业先进技术译丛

钢筋混凝土结构的腐蚀



Corrosion in Reinforced Concrete Structures

(瑞士) 汉斯·博尼 (Hans Böhni) 编著

蒋正武 龙广成 孙振平 译



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



钢筋混凝土是人类使用的最大宗建筑结构材料。然而,钢筋混凝土结构由于受到各种环境条件的侵蚀,往往在服役寿命期间而破坏。纵观钢筋混凝土的各类破坏机理,钢筋锈蚀、冻融循环、碱集料反应、硫酸盐侵蚀和收缩开裂等是钢筋混凝土劣化的主要原因。引进、出版有关钢筋混凝土腐蚀及防护方面书籍对提高我国钢筋混凝土结构的耐久性具有重要的作用。本书主要研究了钢筋混凝土的钢筋腐蚀及腐蚀保护方面的重要方法。可供国内从事钢筋混凝土领域的研究、设计、施工、教学、生产等人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

钢筋混凝土结构的腐蚀/(瑞士)汉斯·博尼(Böhni, H.)编著;
蒋正武,龙广成,孙振平译. —北京:机械工业出版社, 2009.3
(国际建筑业先进技术译丛)

ISBN 978-7-111-26404-0

I. 钢… II. ①汉…②蒋…③龙…④孙… III. 钢筋混凝土结构—
腐蚀 IV. TU375

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 026330 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 马 宏 责任编辑: 范秋涛 版式设计: 霍永明

责任校对: 王 欣 封面设计: 张 静 责任印制: 李 妍

北京振兴源印务有限公司印刷厂印刷

2009 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·13.75 印张·258 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-26404-0

定价: 48.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 68327259

封面无防伪标均为盗版

译者前言

钢筋混凝土是人类使用的最大宗建筑结构材料。然而，钢筋混凝土结构由于受到各种环境条件的侵蚀，往往在服役寿命期间而破坏。纵观钢筋混凝土的各类破坏机理，钢筋锈蚀、冻融循环、碱集料反应、硫酸盐侵蚀和收缩开裂等是钢筋混凝土劣化的主要原因。引进、出版有关钢筋混凝土腐蚀及防护方面书籍对提高我国钢筋混凝土结构的耐久性具有重要的作用。

英国 Woodhead 出版公司与美国 CRC 出版公司出版的《钢筋混凝土结构的腐蚀》一书主要研究了钢筋混凝土的钢筋腐蚀及腐蚀保护方面的重要方法。因此，译者非常乐意将其翻译成中文，供国内从事钢筋混凝土领域的研究、设计、施工、教学、生产等人员参考。

本书翻译工作的具体分工为：同济大学蒋正武博士翻译第 1 章、第 6 章、第 8 章及前言等；同济大学孙振平博士翻译第 2 章、第 7 章；中南大学龙广成博士翻译第 3 章、第 4 章及第 5 章。全书由蒋正武博士统审、校核。

本书得以出版，首先感谢机械工业出版社各位编辑的支持和帮助，其次感谢同济大学、中南大学研究生的协助以及同行专家的关心。

corrosion 有“腐蚀、锈蚀”之意，本书中译为腐蚀，其涵盖面包括锈蚀及与之相关的行为。同样，从专业角度，将 chloride 译为氯离子而非氯化物。因本书翻译基本忠于原书，书中很多内容、试验方法等均按照欧洲相关标准方法而获得，如读者有疑惑，请参考原书及其提供的参考文献。由于我们水平有限，书中难免存在不足之处，还望广大读者不吝赐教。

译者

原书前言

钢筋混凝土是一种广泛应用于桥梁、建筑、平台及地下结构如隧道、钢筋混凝土管道等领域的结构材料。一般来说，钢筋混凝土是一种非常耐久的材料，可承受各种恶劣环境如海洋、工业和高山气候等条件。尽管大部分钢筋混凝土结构表现出良好的长期性能与高耐久性，仍然有许多因早期钢筋锈蚀引起的混凝土结构破坏的案例。因混凝土的碳化或氯离子侵入混凝土引起钢筋钝化层的破坏，从而导致快速的钢筋腐蚀，引起钢筋截面面积的显著减小。从科学的角度来看，因不同的环境暴露条件、不同的材料选用及结构设计等因素的相互作用，钢筋钝化层破坏及相应的腐蚀反应是非常复杂的。从经济的角度来看，在美国，每年仅因使用去冰盐引起的钢筋混凝土桥梁的腐蚀损失费用在 32.5~100 亿美元之间。在澳大利亚、欧洲、中东地区也有相似的统计结果。尤其是处于海洋环境与温暖气候条件下的地区，混凝土中钢筋腐蚀过程会显著增大。

本书的各章节涵盖了钢筋混凝土腐蚀及腐蚀保护领域的所有重要方法，并提供了这一领域科学技术发展的最新资料。本书的内容主要着眼于钢筋的腐蚀，因此混凝土本身的腐蚀与劣化并没有论述。另外，预应力混凝土的耐久性也没有包括在其中。有兴趣的读者可参考有关这一专业主题与领域的专家的出版物。

本书讨论了混凝土结构腐蚀的两个主要方面。在前 4 章中，论述了钢筋腐蚀的基本过程与机理，包括重要的速率控制参数。而后面的几章中，主要论述了近期发展的腐蚀防护技术的最新进展。每章均提供给读者足够的科学技术参考资料，以便使读者能够理解在后面章节中所讨论的实际应用。另外，有兴趣的读者可以据此找到更多有关具体主题的详细资料、参考文献或著作。对腐蚀与腐蚀保护有更广泛兴趣的读者，可参考最新版本的 Uhlig's 腐蚀手册。

第 1 章主要讨论了混凝土中钢筋腐蚀过程的基本知识及影响腐蚀过程的重要因素。总的腐蚀过程是相当复杂的，在钢筋混凝土界面不仅有电化学、化学反应，而且也有侵蚀介质与混凝土内反应产物的迁移过程。直到 20 世纪中期，混凝土碳化才被认为是钢筋腐蚀的主要原因。目前，因去冰盐的广泛使用或恶劣的海洋环境条件引起的氯离子诱导腐蚀也变得非常严重。对于氯离子诱导腐蚀，侵蚀通常发生在局部区域，形成宏观原电池，通常具有高腐蚀率。

在第 2 章中，主要论述了各种无损监测技术。另外，也讨论了最新发展的在线监测方法。这些方法采用了高尖端的计算机数据采集与评价技术。这些方法首次可以直接测量局部环境条件对实际混凝土结构腐蚀发展速率的影响。结果清楚

地表明,混凝土结构的微观气候条件在很大程度上决定了钢筋的腐蚀行为。

钢筋混凝土结构腐蚀研究通常十分费时,且因混凝土是非均质结构,要求的试件十分巨大。因此,在近些年来,除了费力的试验研究外,用来模拟钢筋混凝土的腐蚀过程及容许参数研究的数字方法也明显地引起了人们的注意。第3章对这一主题的现状进行了全面的综述。除了经验方法外,本书提出了基于声-电化学背景的模式,也讨论了其科学及实践的重要性。

第4章中,论述了混凝土的组成与微结构对钢筋混凝土结构腐蚀行为的影响。除硅酸盐水泥外,改性水泥作为胶凝材料在混凝土中的使用正在稳定增长。鉴于此,本章提供的结果对预测采用改性水泥的混凝土结构的性能与耐久性十分重要。

本书的第二部分讨论了不同的腐蚀防护方法。首先,第5章讨论了不锈钢作为钢筋材料的应用。不同的研究与现场试验清楚地表明,不锈钢钢筋的性能明显比普通钢筋好。如果在施工现场进行合理的选择与处理,将会获得优良的长期性能。不锈钢钢筋已经在不同国家得到使用,英国、德国、丹麦和意大利等,均有相应的应用标准。不锈钢钢筋的典型应用是在那些暴露于恶劣环境中的结构,如广泛使用去冰盐地区的桥梁。第5章中有一节讨论了不锈钢经常使用的紧固件与连接件,在这些应用中,安全也十分重要。

第6章对表面处理与涂层的腐蚀防护方法的基本知识进行了全面的评述。这一章在组织结构上根据最近出版的欧洲新标准 EN 1504 编写。作者讨论了目前使用的不同技术以及必要的基层处理与质量保证。这些方法对在设计、施工阶段或维修期间处理耐久性问题的工程师和建筑师,毋庸置疑,是非常有价值的。

最后两章主要讨论了近些年日益引起人们注意的两个主题的基本知识。在第7章中,具体讨论了阻锈剂的应用。作者提供了必要的科学基础知识与不同阻锈剂作为外加剂应用在混凝土中以及在现有结构中的具体实践经验。这些讨论也包括在选择合适的腐蚀防护方法之前必须考虑的环境方面的因素。

在对钢筋混凝土结构的修补与维护方面,电化学技术十分有意义。第8章全面综述了阴极保护、电化学脱氯与电化学再碱化技术的模型与应用,也讨论了这些方法的优点、限制以及经济性。最近应用于钢筋混凝土结构腐蚀保护与维护方面的电化学技术肯定是十分有益,也是十分有前途的方法。然而,在实际应用之前,应仔细评价这些方法。

总之,本书不仅包含了钢筋混凝土腐蚀与腐蚀保护的各个重要方面,也讨论了最新的主题与有前途的最新发展。此外,这些论述都建立在合理的科学基础上,并且不同主题已经在实际应用中得到了仔细的论证。理论与实践的结合使得这本著作是工程师与材料科学家的十分有用的工具书。

汉斯·博尼
瑞士联邦技术研究院

译者前言

原书前言

第 1 章 钢筋混凝土的腐蚀：过

程与机理 1

1.1 引言 1

1.2 混凝土中钢筋腐蚀的

基本理论 1

1.3 氧气的可获性 6

1.4 混凝土作为电解质 8

1.5 混凝土中气体、水、离子的

传输过程 11

1.6 混凝土碳化诱导的腐蚀 16

1.7 氯离子诱导腐蚀 22

1.8 腐蚀速率 26

1.9 腐蚀防护的基本知识 32

1.10 参考文献 36

第 2 章 钢筋混凝土结构的

腐蚀监测 40

2.1 引言 40

2.2 监测目的 40

2.3 监测技术的类型 41

2.4 用于混凝土的传感器 46

2.5 连续监测/在线监测 47

2.6 未来的信息资源与建议 58

2.7 参考文献 58

第 3 章 混凝土中钢筋腐蚀的

数值模拟 60

3.1 引言 60

3.2 钢筋腐蚀的电化学原理 61

3.3 数值模拟方法 64

3.4 数值模型的应用 70

3.5 钢筋腐蚀模型的

实际应用建议 73

3.6 参考文献 73

第 4 章 混凝土组成对钢筋腐蚀的

影响 77

4.1 引言 77

4.2 抗碳化性能 79

4.3 抗氯离子侵入性能 81

4.4 氯离子浓度 95

4.5 临界氯离子阈值 98

4.6 腐蚀速率 104

4.7 改性水泥混凝土的

使用建议 107

4.8 常用的缩写和符号 107

4.9 更多的信息来源与建议 107

4.10 参考文献 108

第 5 章 混凝土结构中的

不锈钢筋 114

5.1 不锈钢筋 114

5.2 不锈钢的连接 127

5.3 更多的信息来源与建议 133

5.4 参考文献 133

第 6 章 腐蚀防护用表面

处理和涂层 136

6.1 引言 136

6.2 混凝土钢筋防腐的

主要原理与方法 137

6.3 基层处理 142

6.4 质量保证和材料使用的 总论	144	7.7 参考文献	175
6.5 填充混凝土中的裂缝与 孔洞	145	第8章 电化学技术在腐蚀的防 护和维护中的应用	179
6.6 砂浆与混凝土	148	8.1 引言	179
6.7 混凝土表面的保护层	150	8.2 可用的电化学技术种类	179
6.8 钢筋表面的涂层	156	8.3 电化学方法的基本原理	180
6.9 参考文献	157	8.4 一般的应用方面	181
第7章 钢筋混凝土阻锈剂	158	8.5 阴极保护	184
7.1 引言	158	8.6 电化学脱氯法	187
7.2 化学阻锈剂	159	8.7 电化学再碱化法	190
7.3 阻锈剂在混凝土中的应用	165	8.8 电化学方法的优点和局限 性: 预应力结构	193
7.4 阻锈剂在混凝土结构中的 实际应用	169	8.9 经济性	194
7.5 结语	174	8.10 更多的信息来源与建议	194
7.6 更多的信息来源	175	8.11 参考文献	195
		参考术语表	200

第 1 章

钢筋混凝土的腐蚀：过程与机理

F HUNKELER

Technical Research and Consulting on Cement and Concrete, TFB, Switzerland

1.1 引言

人们很容易理解导致钢筋混凝土结构中钢筋腐蚀的条件。然而，许多现有的结构通常在使用不久的情况下便表现出明显的腐蚀，导致需要昂贵的维修费用。在多数案例中，往往要么结构耐久性不够要么是忽略了正常合理的维护。而预埋混凝土中的钢筋腐蚀引起了大部分混凝土结构的破坏。19 世纪 50 年代之前，混凝土碳化是腐蚀的主要原因。在这之后，对于暴露在含氯离子（去冰盐、海洋气候、含盐集料）的环境中的结构来说，氯离子诱导腐蚀变得十分严重。

下面的章节主要介绍了混凝土中钢筋腐蚀的基本知识与影响腐蚀速率的重要因素，也描述了氯离子与水在混凝土中的迁移机理，还有一些腐蚀防护措施的基本知识。混凝土本身的腐蚀与劣化过程在本章中并没有讨论。

1.2 混凝土中钢筋腐蚀的基本理论

1.2.1 一般性质

一般情况下，混凝土中孔溶液的高碱性（pH 值大于 12.5）在钢筋表面形成钝化层，使得腐蚀侵蚀降低到可以忽略的程度。只要钝化层持续存在，腐蚀便不会发生。以下两个主要过程会破坏这层保护膜：

- 1) 混凝土碳化。
- 2) 氯离子的侵蚀。

钢筋的腐蚀常表现出不同形式，从大范围的全面腐蚀到非常小的局部侵蚀（点蚀）。全面腐蚀，大部分是碳化混凝土，导致混凝土的早期开裂与剥落，常伴随着钢筋截面积相对减小。而因氯离子引起的局部腐蚀，会形成蚀坑，随机分布在钢筋上（图 1-1a、b）。这些蚀坑的深度在混凝土表面出现劣化的征兆时已经很大了。

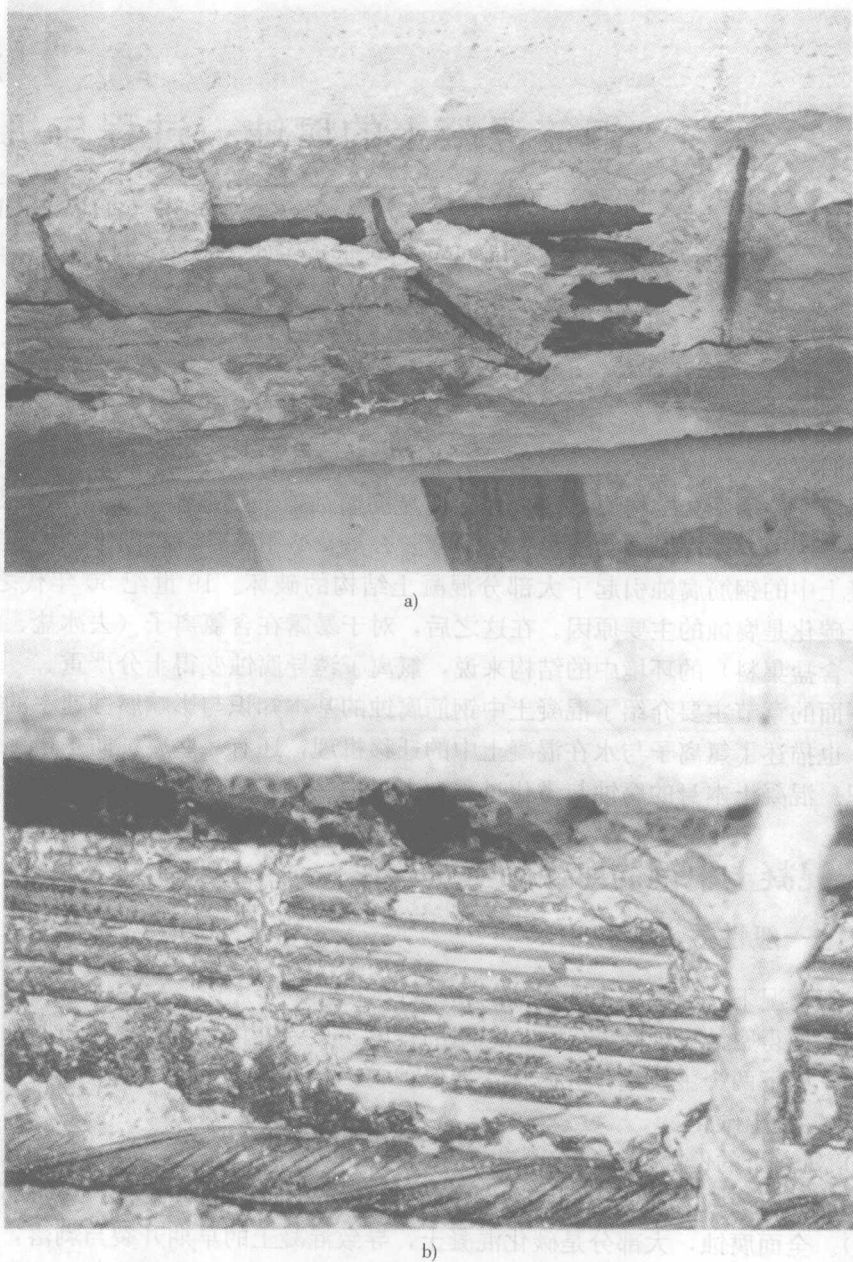


图 1-1 桥梁中钢筋混凝土梁的腐蚀

a) 因碳化与氯离子引起的混凝土剥落

b) 因氯离子诱导腐蚀引起严重腐蚀及开裂的预应力钢丝

1.2.2 腐蚀条件

腐蚀过程的发生与持续必须满足四个条件，其总结在表 1-1 与图 1-2 和图 1-3 中。

表 1-1 混凝土中钢筋的腐蚀条件

混凝土中钢筋腐蚀条件	需实现的条件
1. 发生阳极反应时	钢筋保护层的破坏，钢筋去钝化发生；这可因混凝土碳化（孔溶液的 pH 值下降）与氯离子扩散混凝土达到一定临界值时造成
2. 发生阴极反应时	作为腐蚀过程的驱动力的氧气在钢筋界面处达到适当的量
3. 阳极反应部位与阴极反应部位之间形成离子流时	阳极反应与阴极反应部位之间的环境或电解质传导良好
4. 形成电子流时	阳极反应与阴极反应部位之间有金属连接；对于整个钢筋混凝土结构，这个条件通常很容易实现

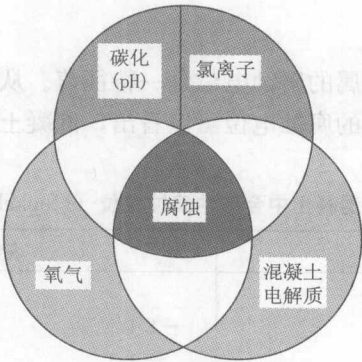


图 1-2 混凝土中钢筋腐蚀的条件

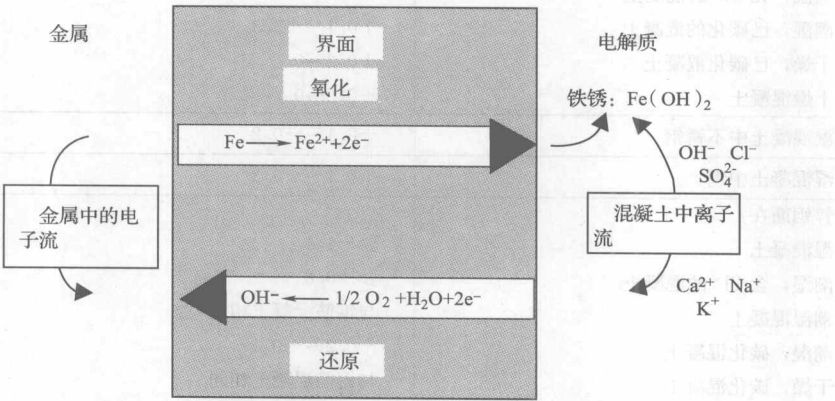
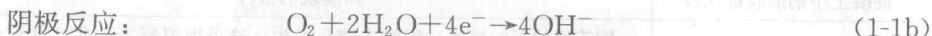
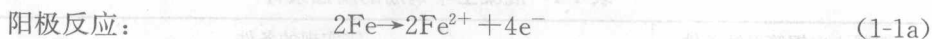


图 1-3 腐蚀作为电化学过程（Hunkeler 1994）

1.2.3 作为电化学过程的腐蚀

金属腐蚀通常是一个电化学过程(图 1-3)。对混凝土中钢筋,会发生下列反应:



阳极反应表示金属的溶解。离子与电子流均可作为腐蚀速率的测量依据,其可表示为单位时间、单位面积的质量损失,单位时间的厚度的减小,或电流密度(单位面积的电流)。对铁和钢,下列表述均是有效的:

$$\text{离子/钢筋: } 1\text{mA}/\text{cm}^2 \cong 11.6\text{mm}/\text{年} \cong 250\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{天})$$

$$1\mu\text{A}/\text{cm}^2 \cong 11.6\mu\text{m}/\text{年} \cong 0.25\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{天})$$

1.2.4 腐蚀电位

在特定的电解质中金属的腐蚀电位是一特征值。从表 1-2 中给出的混凝土中钢、不锈钢、铜及镀锌钢的腐蚀电位可以看出,混凝土中钢筋的腐蚀电位可能相差几百毫伏。

表 1-2 混凝土中金属的腐蚀电位 (Hunkeler 1994)

电极/金属	腐蚀电位/mV ^①
钢筋在:	
饱和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶液	-1.1
无氧气的水饱和混凝土	≥ -1.1
潮湿, 含 Cl^- 的混凝土	≥ -0.6
潮湿, 无 Cl^- 的混凝土	+0.1~-0.1
潮湿, 已碳化的混凝土	+0.1~-0.3
干燥, 已碳化混凝土	+0.2~0
干燥混凝土	+0.2~0
潮湿混凝土中不锈钢	+0.1~-0.2
潮湿混凝土中铜	+0.1~-0.2
镀锌钢筋在:	
湿混凝土	≥ -1.1
潮湿, 含 Cl^- 的混凝土	≥ -0.8
潮湿混凝土	与钢筋混凝土相同
潮湿, 碳化混凝土	+0.2~-0.1
干燥, 碳化混凝土	与钢筋混凝土相同
干混凝土	与钢筋混凝土相同

①原文是 mV_{CSE} , 是指相对于甘汞电极测定的腐蚀电位。

1.2.5 腐蚀的引发与发展

早期混凝土结构中的钢筋是完全受到保护的：孔溶液的 pH 值高（图 1-4），且如果在混凝土生产过程中没有受使用氯离子污染的组分（如含氯离子的水、集料或外加剂），混凝土中仅含少量的氯离子。在可能发生腐蚀前混凝土达到这些条件是需要一段时间的（图 1-5）。

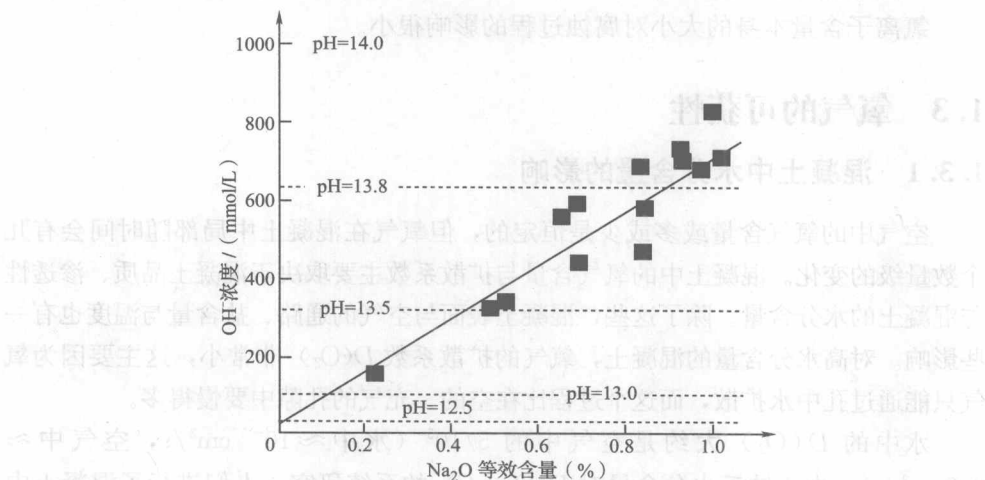


图 1-4 水泥浆体中孔溶液的 OH^- 浓度与 Na_2O 等效含量 (Na_2O 等效含量 = Na_2O 含量 (%) + $0.659\text{K}_2\text{O}$ 含量) 的函数关系 (Hunkeler 1994, 第 1992 页中数据)

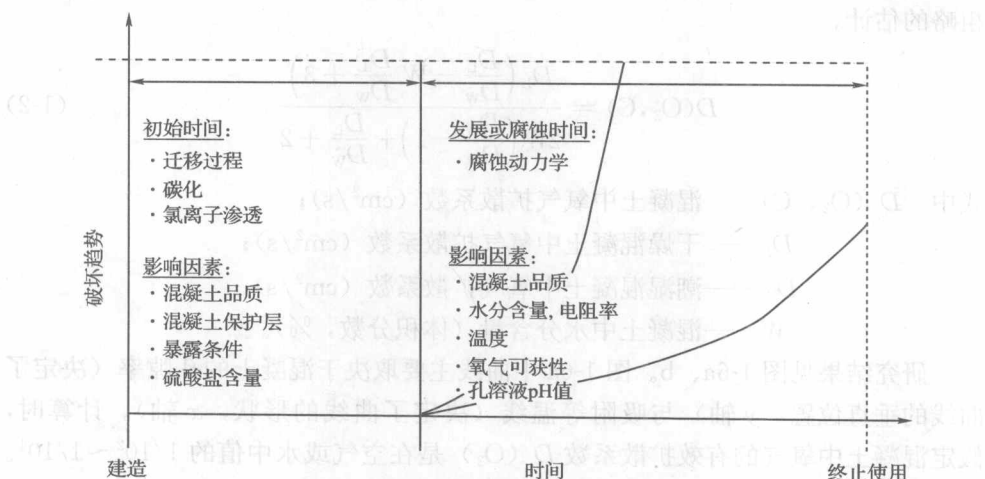


图 1-5 随时间的腐蚀破坏程度

(注：初始阶段取决于许多参数，如混凝土品质与混凝土保护层厚度；发展阶段主要受电解质电阻控制，其又受温度、水分含量及部分受电化学反应电阻的影响。)

对给定的混凝土品种, 腐蚀发生后的腐蚀速率(发展与腐蚀阶段)主要取决于下列因素(见 1.8 节):

- 水分含量与混凝土的电阻;
- 温度;
- 氧气可获得性;
- 孔溶液的 pH 值。

氯离子含量本身的大小对腐蚀过程的影响很小。

1.3 氧气的可获得性

1.3.1 混凝土中水分含量的影响

空气中的氧气含量或多或少是恒定的, 但氧气在混凝土中局部随时间会有几个数量级的变化。混凝土中的氧气含量与扩散系数主要取决于混凝土品质、渗透性与混凝土的水分含量。除了这些, 混凝土表面与空气的通路、盐含量与温度也有一些影响。对高水分含量的混凝土, 氧气的扩散系数 $D(\text{O}_2)$ 非常小, 这主要因为氧气只能通过孔中水扩散, 而这个过程比在空的、充气的孔隙中要慢得多。

水中的 $D(\text{O}_2)$ 大约是空气中的 $5/10^5$ (水中 $\approx 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{s}$, 空气中 $\approx 0.2 \text{ cm}^2/\text{s}$)。由于缺乏水分含量对 $D(\text{O}_2, C)$ 的系统研究, 人们进行了混凝土中氧气扩散系数 $D(\text{O}_2, C)$ 作为水分含量的函数的计算尝试 (Hunkeler 1994)。根据用于电阻率计算的麦克斯韦方程, 水分含量的影响可通过等式 (1-2) 进行粗略的估计。

$$D(\text{O}_2, C) = \frac{D_L \left(\frac{D_L}{D_W} - W \frac{D_L}{D_W} + 3 \right)}{2W \left(\frac{D_L}{D_W} - 1 \right) + \frac{D_L}{D_W} + 2} \quad (1-2)$$

式中 $D(\text{O}_2, C)$ ——混凝土中氧气扩散系数 (cm^2/s);

D_L ——干燥混凝土中氧气扩散系数 (cm^2/s);

D_W ——潮湿混凝土中氧气扩散系数 (cm^2/s);

W ——混凝土中水分含量 (体积分数, %)。

研究结果见图 1-6a、b。图 1-6a 中曲线主要取决于混凝土的孔隙率 (决定了曲线的垂直位置, y 轴) 与吸附等温线 (决定了曲线的形状, x 轴)。计算时, 假定混凝土中氧气的有效扩散系数 $D(\text{O}_2)$ 是在空气或水中值的 $1/10^2 \sim 1/10^4$ 。图 1-6 的曲线表明试验结果的基本一致性 (Houst 1992, Houst 与 Wittmann 1994, Ehrenberg 与 Diederichs 1994, Hilsdorf 1995)。必须指出的是, 对给定的混凝土, 当这种混凝土的吸附等温线已知时, 才能进行这种计算。

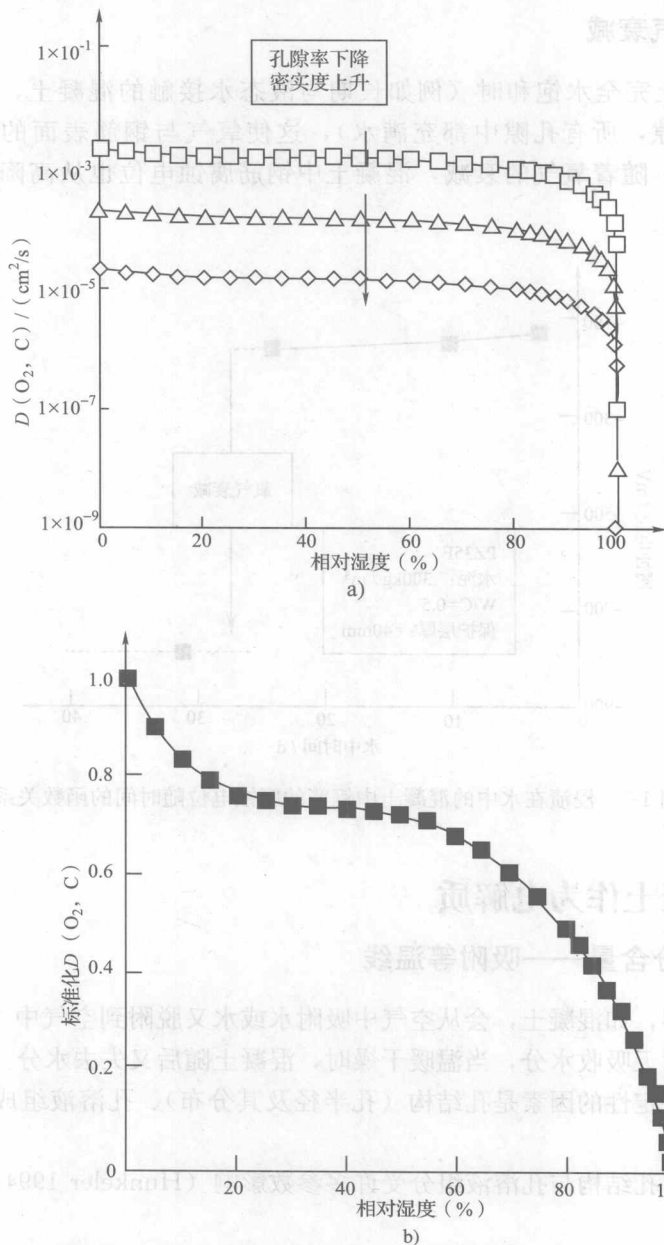


图 1-6 混凝土中水分含量对氧气的影响

a) 氧气扩散系数 $D(O_2, C)$ 与相对湿度的函数关系 (Hunkeler 1994;一定相对湿度 RH 下的水分含量来自图 1-9 中的吸附等温线)b) 相对湿度函数的标准化扩散系数 $D(O_2, C)$ (Hunkeler 1994)

1.3.2 氧气衰减

当混凝土完全水饱和时（例如长期与液态水接触的混凝土，除了大的气孔与封闭孔隙，所有孔隙中都充满水），这使氧气与钢筋表面的通道下降到非常低的值。随着氧气的衰减，混凝土中钢筋腐蚀电位也从高降到很小的负值（图 1-7）。

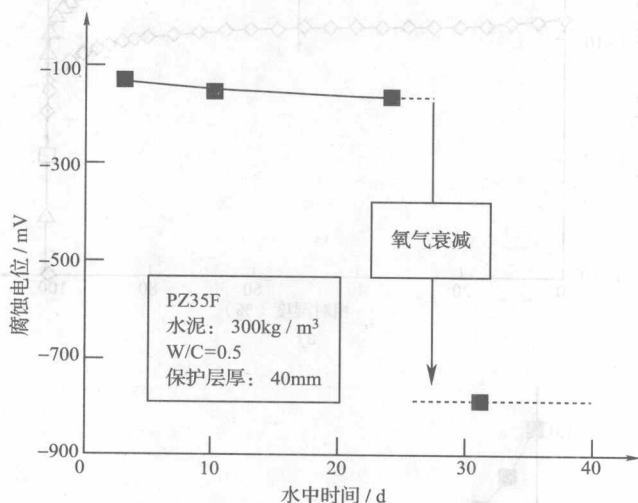


图 1-7 浸渍在水中的混凝土中钢筋的腐蚀电位随时间的函数关系

1.4 混凝土作为电解质

1.4.1 水分含量——吸附等温线

多孔材料，如混凝土，会从空气中吸附水或水又脱附到空气中。图 1-8 表明混凝土会在雨天吸收水分，当温暖干燥时，混凝土随后又失去水分。对吸附与脱附过程，其决定性的因素是孔结构（孔半径及其分布）、孔溶液组成与空气相对湿度（RH）。

混凝土中孔结构与孔溶液组分受许多参数影响（Hunkeler 1994）。最主要的因素包括：

- 水泥类型与用量，化学外加剂与矿物掺合料（如，粉煤灰、硅灰）；
- 水灰比；
- 养护条件；
- 龄期。

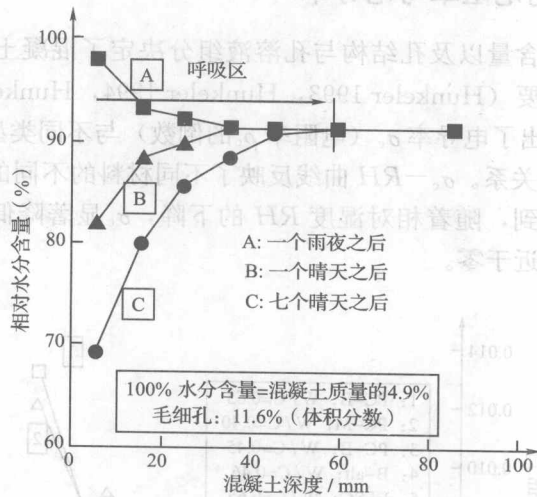


图 1-8 混凝土表层在经历一个雨天与干燥的夏天后的水分含量
(Hunkeler 1994, 数据来自 Rehm 1988)

图 1-9 给出了混凝土的典型吸附等温线。当 RH 小于 40% 时，水吸收主要是发生在混凝土孔隙内表面的吸附过程。单水分子层建立，并通过吸附作用牢牢地粘结在表面。与当 RH 大于 40% 时混凝土因毛细作用力引起的毛细凝结吸水相比，这些水分子是不可移动的。

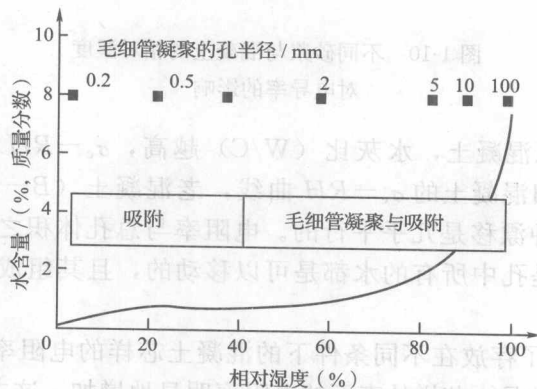


图 1-9 混凝土的典型吸附等温线
(Hunkeler 1994, Hunkeler 与 Holtzhauer 1994)