

混凝土结构耐久性丛书

钢筋混凝土的

全寿命过程与预计

Performance and Prediction of Reinforced Concrete
in Full Service Life Due to Corrosion Damage

姬永生 著

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

混凝土结构耐久性丛书

钢筋混凝土的全寿命 过程与预计

姬永生 著

中国铁道出版社

2011年·北京

内 容 简 介

本书根据作者十余年来从事混凝土结构耐久性、尤其是混凝土内钢筋锈蚀行为的研究成果,并参阅国内外文献写成,试图对钢筋混凝土全寿命过程及预计的研究现状及其有待深入探讨的问题作一个全面阐述。书中重点论述了硅酸盐水泥基混凝土的材料特征、混凝土碳化、氯离子在混凝土内的传输、混凝土内钢筋的锈胀发展、混凝土内钢筋锈蚀速率的时变预计模型、加速试验方法对钢筋混凝土退化过程的影响等内容。

本书可供土木工程专业领域的科学研究人员、工程技术人员以及研究生、本科生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

钢筋混凝土的全寿命过程与预计 / 姬永生著. —北京:中国铁道出版社, 2011.2

(混凝土结构耐久性丛书)

ISBN 978-7-113-12183-9

I. ①钢… II. ①姬… III. ①钢筋混凝土-耐用性-研究
IV. ①TU528.571

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 224796 号

书 名: 混凝土结构耐久性丛书
钢筋混凝土的全寿命过程与预计
作 者: 姬永生 著

责任编辑: 洪学英 电话: 010-51873656
封面设计: 冯龙彬
责任校对: 孙 玫
责任印制: 郭向伟

出版发行: 中国铁道出版社(100054, 北京市宣武区右安门西街8号)
网 址: <http://www.tdpress.com>
印 刷: 三河市华丰印刷厂
版 次: 2011年2月第1版 2011年2月第1次印刷
开 本: 720 mm × 1 000 mm 1/16 印张: 18.25 字数: 344 千
书 号: ISBN 978-7-113-12183-9
定 价: 40.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版的图书,如有缺页、倒页、脱页者,请与本社读者服务部联系调换。

电 话: 市电(010)51873170, 路电(021)73170(发行部)

打击盗版举报电话: 市电(010)63549504, 路电(021)73187

《混凝土结构耐久性丛书》序

我国正处于土木工程基础设施大规模建设阶段,钢筋混凝土材料仍是土木工程基础设施中最重要的建筑材料,水泥基混凝土用量已达到了人均世界第一的水平。但是,我们必须清醒地看到,土木工程基础设施的百年大计问题,特别是混凝土结构耐久性方面,尚有很多问题需要去解决。值得庆幸的是,混凝土结构的耐久性问题不仅得到了学术界的重视,而且也得到了工程界的关注。在混凝土结构耐久性设计方法、使用寿命预测,以及既有结构耐久性加固修复等方面,学术界已开展了广泛的研究,同时在工程实践过程中,特别是重大工程,其耐久性问题也得到了高度重视。

中国矿业大学混凝土结构耐久性课题组在国家自然科学基金的多次资助下,经过十余年的不懈努力,在混凝土结构耐久性方面获得了较系统的研究成果,在国内外重要学术刊物和重要学术会议上发表了近百篇论文。为进一步推动混凝土结构耐久性研究的深入开展,现将本课题组所得到的研究成果汇总成这套丛书。

本丛书所论述的混凝土结构耐久性问题主要包括两个方面:一是大气环境氯盐侵蚀引起的地面混凝土结构钢筋锈蚀耐久性问题,二是岩土环境硫酸盐侵蚀引起的地下结构混凝土腐蚀耐久性问题。

丛书由以下五本著作组成:

- (1) 钢筋混凝土的全寿命过程与预计
- (2) 混凝土构件的钢筋锈蚀与退化速率
- (3) 锈蚀混凝土构件的承载性能评估与设计
- (4) 锈蚀混凝土结构的耐久性修复与保护
- (5) 地下结构混凝土硫酸盐腐蚀机理及性能退化

前四部著作以论述大气环境氯盐侵蚀引起混凝土内钢筋锈蚀所产生的一系列耐久性问题为主线,分别从不同角度、途径对此进行深入论述,相互之间又存在着衔接、递进的关系。著作(1)将钢筋起始锈蚀条件、钢筋锈胀力分布和发展、钢筋锈胀开裂预计和锈胀开裂后的锈蚀演进联系起来,考察混凝土结构的全寿命过程,提出了钢筋锈蚀速率变化的时变模型,可以预计全寿命过程的各个时段长度。著作(2)通过混凝土内钢筋锈蚀速率的研究,将混凝土结构的服役时间、锈蚀程度联系起来;在基本电化学预测模型基础上,综合了构件受荷载作用引起横向裂缝的影响,以及构件钢筋骨架配筋的影响;钢筋锈蚀速率模型可以预测与时间相关的钢筋锈蚀量。著作(3)基于人工气候和自然气候氯盐侵蚀环境的试验研究,论述了普通混凝土结构和预应力混凝土结构内钢筋的力学性能及粘结性能以及构件结构性能的退化规律,建立了与锈蚀程度相关的钢筋强度与构件承载能力预计概率模型,提出了锈蚀混凝土构件

承载性能评估与设计的体系与方法。著作(4)论述混凝土结构的耐久性修复问题,其中重点考虑了本体混凝土与修复材料之间存在的早期物理、力学性能与电化学性能相容性问题;如不很好解决加固修复中的不相容问题,将不能达到恢复结构耐久性的目的。

著作(5)以地下混凝土结构为对象,考虑岩土环境硫酸盐侵蚀作用,介绍了混凝土受硫酸盐腐蚀的试验和检测方法,论述了侵蚀物类型、浓度、地下水压力以及荷载应力等因素对混凝土腐蚀速率的影响,建立了混凝土腐蚀速率预计模型;论述了混凝土强度及粘结性能,以及构件结构性能的退化规律,提出了受硫酸盐腐蚀构件结构性能评估方法及抗硫酸盐腐蚀的设计建议。

《混凝土结构耐久性丛书》的作者均是本课题组主要研究人员。每部著作均以作者本人研究成果为主,同时还综合历届研究生相应成果撰写而成;另外,为达到论述系统、便于阅读的目的,每部著作还兼顾介绍了有关的背景和基础知识。

感谢国家自然科学基金会对《混凝土结构耐久性丛书》相关研究工作的资助,感谢中国矿业大学深部岩土力学与地下工程国家重点实验室和煤矿深井建设技术国家工程实验室对本丛书出版的资助。

中国矿业大学教授



2010年8月

前 言

随着我国经济建设规模和建设领域的不断扩张,大量土木工程结构已经和即将建造在海洋环境、盐湖环境、盐碱环境、除冰盐环境、腐蚀工业环境、高湿大气环境等各种侵蚀环境中,侵蚀环境作用引起的耐久性问题相当突出,体现在土木工程科学研究领域,目前已逐渐将其重心由结构初期强度与变形问题转到结构耐久性问题。

中国矿业大学混凝土结构耐久性课题组在袁迎曙教授的带领下,经过十余年的不懈努力,在侵蚀环境作用及其响应的规律与定量模型、结构抗力衰变规律与定量模型、结构性能评估与全寿命周期设计理论、侵蚀环境作用与地震作用耦合下的结构性能退化规律等方面开展了较为系统的研究工作。作者近年来有幸参与其中,在袁迎曙教授的指导下,重点对钢筋混凝土的全寿命过程及预计问题进行了研究。本书即为作者十余年来主要研究成果的总结和概括,主要内容包括硅酸盐水泥基混凝土的材料特征、混凝土碳化、氯离子在混凝土中的传输、混凝土内钢筋的锈胀发展、混凝土内钢筋锈蚀速率的时变预计模型以及加速试验方法对钢筋混凝土退化过程的影响等。希望藉此抛砖引玉,与同行携手共同促进混凝土结构耐久性的深入研究。

由于目前我国大量既有混凝土结构采用的多为硅酸盐水泥基普通混凝土,特别是有10~20年使用期的混凝土结构,所以本专著主要论述硅酸盐水泥基普通混凝土。至于在普通混凝土基础上改性的其他混凝土(如粉煤灰混凝土),其矿物掺和料对混凝土全过程性能影响尚未进行论述。

本书写作得到了恩师袁迎曙教授的细心指导、帮助和审阅;得到了课题组吴庆博士、牟艳君硕士、冯瑞硕士、彭涛硕士提供的数据和资料支持;得到了课题组李果老师、李富民老师、耿欧老师、杜健民老师的细心审阅;另外,本书写作中还参阅、引用了大量本课题组其他研究生及国内外专家的有关文献资料。作者对上述各方面的帮助表示衷心感谢!

本书写作虽然倾注了作者艰苦的努力,但鉴于混凝土耐久性的复杂性和作者的学术水平所限,本书对所阐述问题的理解,对所引用资料的认识,以及对某些观点的讨论可能有不当之处,片面之处更是在所难免,请各位读者批评指正。



2010年9月

符号与注释

- a_i ——离子加速度；
 B ——Stern-Geary 常数；
 c ——混凝土保护层厚度；
 c' ——水泥中 CaO
 C_t ——总氯离子含量；
 C_f ——自由氯离子含量；
 C ——水泥用量；
 C_s ——混凝土表面的 CO_2 浓度；混凝土表面的氯离子浓度；
 C_i ——混凝土中的 CO_2 浓度；混凝土中的氯离子浓度；
 C_t ——总的氯离子浓度；
 C_b ——结合氯离子的浓度；
 C_{bc} ——化学结合氯离子浓度；
 C_{bp} ——物理吸附氯离子浓度；
 $C_{s, \max}$ ——混凝土表面氯离子浓度可达到的最大值；
 C_{sa} ——理论上的表面氯离子浓度；
 C_{s0} ——对流区的表面氯离子浓度；
 $C_{x,t}$ ——为 t 时刻 x 深度处的氯离子浓度；
 C_0 ——混凝土中氯离子的初始浓度；
 $\frac{\partial C_b}{\partial C_f}$ ——混凝土中氯离子结合能力；
 D ——扩散系数；
 $D_{\text{Cl}^-}^e$ ——氯离子在混凝土中的有效扩散系数；
 $D_{\text{CO}_2}^e$ ——为 CO_2 气体在混凝土中的扩散系数；
 $D(\theta_s)$ ——溶液的水力渗透系数；
 $D(\theta)$ ——水的水力渗透系数；
 d_a ——钢筋表面距离混凝土保护层最近的一点的半径损失；
 d_b ——背向保护层一侧的钢筋半径损失的平均值；
 d_θ ——钢筋表面极角为 θ 处的半径损失；
 d ——钢筋直径；混凝土孔隙直径；
 d_a ——最大半径损失值；

d_w ——水分子直径;
 d_k ——开尔文直径;
 e ——电子电量;
 $\text{erf}()$ ——误差函数;
 E ——电极体系的相对电极电位;活化能;
 E_e ——平衡电极电位;
 E_e^0 ——标准平衡电极电位;
 $E_{e,c}$ 、 $E_{e,a}$ ——阴、阳极电极反应的平衡电位;
 E_c 、 E_a ——阴、阳极电极反应电位;
 E_c^0 、 E_a^0 ——阴、阳极电极反应的标准电位;
 E_{corr} ——腐蚀电池的混合电位,即腐蚀电位;
 $E_{\text{corr}2}$ ——钢筋活化区的锈蚀电位;
 $E_{\text{corr}1}$ ——钢筋钝化区的锈蚀电位;
 ΔE ——腐蚀电池的电动势;
 $E_{s,c}^A$ ——人工气候环境下锈蚀钢筋名义弹性模量;
 E_{s0} ——未锈变形钢筋弹性模量。
 $E_{s,c}^G$ ——通电加速锈蚀钢筋名义弹性模量;
 E_c ——混凝土的弹性模量;
 E_s ——钢筋的弹性模量;
 f_c ——混凝土轴心抗压强度设计值;
 $f_{cu,k}$ ——混凝土立方体抗压强度标准值;
 f_{cu} ——混凝土立方体抗压强度;
 f_d ——孔隙密度函数;
 f_b ——离子在连续介质中所受到的黏滞阻力;
 F ——法拉第常数;
 F_c ——毛细力;
 f_e ——离子在电场中受到的电场力;
 $f_{y,c}^A$ 、 $f_{u,c}^A$ ——人工气候环境下锈蚀变形钢筋名义屈服强度和极限抗拉强度;
 f_{y0} 、 f_{u0} ——未锈变形钢筋的屈服强度和极限抗拉强度;
 $f_{y,c}^G$ 、 $f_{u,c}^G$ ——通电加速下锈蚀变形钢筋名义屈服强度和极限抗拉强度;
 G ——吉布斯自由能;
 h_c ——毛细管上升高度或毛细压力水头;
 I ——腐蚀电流;
 I_a ——阳极反应的腐蚀电流;
 I_c ——阴极反应的腐蚀电流;

- I_{corr} ——腐蚀电池的混合电位对应的腐蚀电流；
- I_{corr1} ——钢筋钝化区的腐蚀电流；
- I_{corr2} ——钢筋活化区的腐蚀电流；
- I_{total} ——钢筋的总腐蚀电流；
- i_a ——阳极腐蚀电流密度；
- i_c ——阴极腐蚀电流密度；
- J_i ——电迁移所产生的离子通量；
- J_{CO_2} —— CO_2 气体在混凝土孔隙中的扩散通量；
- K_i ——离子的黏滞性系数 ($\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$)；摩擦系数；
- K ——水力渗透系数；氯离子的固化速率系数；
- k ——化学反应速率常数；混凝土表面的氯离子浓度累积率；
- K_g ——气膜传质系数；
- K_{sp} ——溶度积；
- L ——试样厚度；湿传输影响深度；
- m_i ——离子质量；
- M ——物质的摩尔质量；
- m_0 ——单位体积混凝土中可碳化物质的量；
- n ——金属的价数；电极反应中传递的电子数；一昼夜的干湿循环次数；
- N ——金属的相对原子质量/价数；
- n_c ——阴极反应单位氧的电子数；
- n_a ——阳极反应的电子数；
- N_A ——传质速率；
- $[\text{OH}^-]_{\text{eq}}$ ——混凝土毛细孔水中的 $[\text{OH}^-]$ 浓度；
- p ——湿空气的压力；大气压力；
- p_c ——毛管的压强；
- p_v ——湿空气的水蒸气分压；
- p_a ——湿空气的干空气分压；
- p_s ——湿空气的饱和蒸汽压；
- p_{s0} ——平液面湿空气的饱和蒸汽压；
- p_{s1} ——凹液面湿空气的饱和蒸汽压；
- p_{s2} ——凸液面湿空气的饱和蒸汽压；
- PS ——混凝土孔隙水饱和度；
- p_w ——水的压强；
- P_c, P_a ——阴、阳极电极反应的极化电阻；
- Q ——腐蚀时阳极通过的电量；
- q ——单位面积上水的渗流速率；

Q_i ——循环吸水量;

$\frac{\partial q}{\partial t}$ ——流体(水)流速;

R_{con} ——腐蚀电池阴阳极间溶液(或混凝土)电阻;

R ——腐蚀(锈蚀)电路总电阻;钢筋初始半径;

r ——混凝土孔隙半径;

r_1 ——混凝土孔隙水弯月面的曲率半径;

R_p ——腐蚀体系的极化电阻,又称极化阻力;

R ——气体常数;钢筋半径;

RH ——相对湿度;

S ——面积;

S_h ——活化区域面积;

S_d ——钝化区域的面积;

S_{ha} ——活化区域微电池的阳极面积;

S_{hc} ——活化区域微电池的阴极面积;

S_i ——循环失水量;

t ——锈蚀时间;摄氏温度;

t_{wi} ——单次湿润时间;

t_d ——露点温度;

t_{di} ——单次干燥时间;

T ——绝对温度;

v ——比容;

v_p ——压力渗透引起的孔隙液流速;

v_c ——毛细作用引起的孔隙液流速;

v_0 ——非饱和渗流引起的孔隙液流速;

v_i ——离子的迁移速度;

w ——顺筋裂缝宽度;水膜厚度;

ΔW ——金属试件失重量;

W ——水用量;

W_T ——混凝土中钢筋的锈蚀量;

W_p ——需要填充到孔隙区域的锈蚀量;

W_{crit} ——引起保护层胀裂临界锈蚀量;

W_i ——残余吸水量;

x ——垂直于混凝土表面的深度;

x_a ——完全碳化区的长度;

x_b ——pH 值变化区长度;

x_c ——pH 值稳定范围的碳化反应区长度；
 Δx ——对流区深度；
 Z ——频率因子；
 z_i ——离子电价；
 α ——表面张力；
 α_{Cl^-} ——氯离子活度；
 β_a, β_c ——阳极和阴极过程的 Tafel 斜率；
 $\delta_{s,c}^A$ ——人工气候环境下锈蚀变形钢筋相对伸长率；
 δ_{s0} ——未锈变形钢筋的相对伸长率；
 $\delta_{s,c}^G$ ——通电加速锈蚀变形钢筋相对伸长率；
 ε_c ——混凝土的总孔隙率；
 ε_k ——小于开尔文直径被水充满的孔隙率；
 ε_p ——为水泥浆体的孔隙率；
 θ ——混凝土湿含量；湿润边角；
 θ_s ——混凝土饱和湿含量；
 θ_r ——环境大气湿度为 100% 时混凝土的湿含量；
 θ_0 ——混凝土平衡湿含量；
 θ_d ——混凝土气干状态下的湿含量；
 θ_0 ——稳定湿含量；
 θ_e ——平衡湿含量；
 $\Delta\theta$ ——湿润过程结束时与风干过程结束时的湿含量差；
 φ ——电极系统的电极电位；湿空气的相对湿度；
 λ ——钢筋锈蚀损伤率；
 ρ ——密度；
 ρ_v ——湿空气的绝对湿度；
 ρ_v'' ——湿空气的饱和绝对湿度；
 ρ_{con} ——混凝土的电阻率；
 ρ_c, ρ_w, ρ_a ——水泥、水和骨料的密度；
 η ——过电位；钢筋锈蚀率；
 Ψ ——毛细势能（浸润）；
 σ ——干湿时间比。

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 钢筋混凝土全寿命过程与预计的重要性	1
1.1.1 混凝土中钢筋锈蚀问题的严重性	1
1.1.2 钢筋混凝土的全寿命过程与预计的重要性	3
1.2 钢筋混凝土全寿命过程研究的主要科学问题	4
1.2.1 混凝土内钢筋锈蚀起因与发展过程	4
1.2.2 混凝土碳化过程研究	6
1.2.3 氯盐侵蚀过程研究	7
1.2.4 混凝土内钢筋锈蚀的电化学过程	8
1.2.5 混凝土内钢筋的锈胀发展过程研究	9
1.2.6 加速试验方法对钢筋混凝土退化过程的影响	9
1.3 本书的主要内容和结构体系	10
第 2 章 硅酸盐水泥基混凝土的材料特征	13
2.1 硅酸盐系列水泥和硬化水泥浆体	13
2.1.1 硅酸盐系列水泥的分类	13
2.1.2 硅酸盐系列水泥熟料的成分	15
2.1.3 硅酸盐水泥的水化硬化	15
2.1.4 水泥石的结构	18
2.1.5 水泥石中水的存在类型	19
2.1.6 混合材料	20
2.2 硅酸盐水泥基混凝土的材料特征	24
2.2.1 混凝土的孔隙结构和传输性能	25
2.2.2 混凝土中的水	27
2.2.3 大气中的水蒸气	29
2.2.4 混凝土中水和大气中水蒸气的动态平衡	33
2.2.5 混凝土孔隙水饱和度	34
2.3 小 结	41
第 3 章 混凝土碳化	42
3.1 硅酸盐水泥基混凝土的碳化机理	42

3.1.1	混凝土中的可碳化物质	43
3.1.2	混凝土的碳化反应	43
3.1.3	混凝土碳化速率的影响因素	45
3.1.4	混凝土的碳化过程	48
3.2	pH 值变化区对混凝土碳化过程的影响	53
3.2.1	意义	53
3.2.2	部分碳化区(pH 值变化区)长度的影响因素	54
3.3	混凝土碳化深度的测定方法	57
3.3.1	酚酞试剂测定法	58
3.3.2	彩虹指示剂测定法	58
3.3.3	pH 计测定法	58
3.3.4	X 射线衍射法	58
3.3.5	热重分析法	59
3.3.6	化学分析法	59
3.4	混凝土的碳化过程的再认识	60
3.4.1	混凝土孔隙液的物质组成和碱度	61
3.4.2	混凝土的碳化过程的再认识	63
3.4.3	混凝土碳化区域划分的试验验证	64
3.5	混凝土碳化(扩散-反应)过程的机理分析	67
3.5.1	CO ₂ 气体在混凝土中物质传递的机理分析	67
3.5.2	混凝土碳化发展阶段的机理分析	68
3.6	小 结	70
第 4 章	氯离子在混凝土中的传输	71
4.1	氯离子引起钢筋锈蚀机理	71
4.1.1	破坏钝化膜	71
4.1.2	形成腐蚀电池	72
4.1.3	去极化作用	72
4.1.4	导电作用	72
4.2	混凝土中氯离子的来源	73
4.2.1	海洋环境	73
4.2.2	道路化冰(雪)盐	77
4.2.3	盐湖、盐碱地	77
4.2.4	工业环境	78
4.3	混凝土中氯离子的存在形式	78
4.3.1	结合的氯离子	79
4.3.2	游离的氯离子	80

4.4 混凝土氯化物含量的测定	80
4.4.1 取样方法	80
4.4.2 从混凝土粉样中萃取氯离子的方法	82
4.4.3 氯离子含量的测试方法	82
4.5 氯离子在混凝土中的传输机制	87
4.5.1 浓度梯度作用下的扩散过程	87
4.5.2 压力梯度作用下的渗透过程	90
4.5.3 毛细吸收过程	91
4.5.4 湿度梯度作用下的非饱和渗流过程	93
4.5.5 电迁移过程	94
4.5.6 多机制作用下的氯离子输运过程	96
4.6 海洋环境混凝土中水分输运过程分析	97
4.6.1 水分在混凝土内部的运动规律	97
4.6.2 海洋环境不同区位混凝土中水分输运过程的试验研究	102
4.7 不同环境混凝土中氯离子传输机理	109
4.7.1 海洋环境	109
4.7.2 道路化冰盐环境	112
4.7.3 盐湖和盐碱地	113
4.8 混凝土中氯离子传输相关问题的再认识	113
4.8.1 混凝土中 Cl^- 浓度的临界值	113
4.8.2 混凝土表面的氯离子浓度	118
4.8.3 混凝土表层对流区的界定	124
4.8.4 海洋环境混凝土中氯离子的传输速率模型	127
4.9 小 结	129
第5章 混凝土内钢筋的锈胀发展	132
5.1 混凝土内钢筋的锈胀过程	132
5.1.1 混凝土中的钢筋/混凝土界面的细观特征	132
5.1.2 混凝土内钢筋的锈胀过程	133
5.2 混凝土中钢筋锈蚀层的细观结构和物相组成	135
5.2.1 钢筋锈蚀层的细观结构	135
5.2.2 混凝土中钢筋锈层横断面的元素分布	136
5.2.3 锈层的物相组成	137
5.2.4 混凝土中钢筋表面锈蚀产物的生成机理	139
5.3 钢筋锈蚀产物的体积膨胀倍数	141
5.3.1 锈蚀产物中不同锈蚀成分的体积膨胀倍数	141
5.3.2 混凝土中钢筋锈蚀产物的体积膨胀倍数	143

5.4 混凝土中钢筋表面锈蚀特征与分布规律	143
5.4.1 钢筋锈蚀层轮廓曲线的测定	143
5.4.2 钢筋表面锈蚀层厚度分布特征	144
5.5 混凝土锈胀裂缝开裂时的钢筋锈蚀量预测	145
5.5.1 钢筋锈胀力分布模型	146
5.5.2 锈胀力定量分析	147
5.5.3 锈胀开裂时的钢筋锈蚀率(量)预测	148
5.6 小 结	149
第6章 混凝土内钢筋锈蚀速率的时变预计模型	151
6.1 电化学腐蚀基本原理	151
6.1.1 原电池	151
6.1.2 腐蚀原电池	152
6.1.3 腐蚀电池的有关参数	153
6.1.4 $\text{Fe}-\text{H}_2\text{O}$ 体系的电位—pH 图	156
6.1.5 腐蚀电池的极化	161
6.2 混凝土中钢筋的锈蚀速率检测	164
6.2.1 半电池电位法	165
6.2.2 混凝土电阻率检测法	167
6.2.3 线性极化法	168
6.2.4 交流阻抗谱法	171
6.3 混凝土内钢筋的锈蚀特征及机理分析	172
6.3.1 腐蚀电池的类型和腐蚀形态	172
6.3.2 混凝土中钢筋的表观锈蚀形态	177
6.3.3 混凝土中钢筋锈蚀形态的机理分析	177
6.4 混凝土中钢筋的腐蚀电流分布	178
6.4.1 混凝土中钢筋锈蚀的阴阳极极化曲线	178
6.4.2 混凝土中钢筋的腐蚀电流分布	180
6.4.3 腐蚀平衡电位	183
6.4.4 混凝土内腐蚀电流分布的试验验证	184
6.5 混凝土中钢筋锈蚀过程的控制因素	186
6.5.1 钢筋锈蚀控制因素的研究现状	186
6.5.2 混凝土中钢筋锈蚀过程控制因素的试验研究	189
6.5.3 混凝土中钢筋锈蚀过程控制因素变化的机理分析	192
6.6 阴阳极反应共同控制的钢筋锈蚀速率预计模型	195
6.6.1 锈蚀钢筋阴阳极面积的确定	195
6.6.2 钝化区和活化区中钢筋的自腐蚀电流和自锈蚀电位	196

6.7 钢筋锈蚀全过程的时变模式	197
6.7.1 钢筋锈蚀全过程的时变模式	197
6.7.2 钢筋锈蚀层构造与发展	199
6.7.3 钢筋锈蚀速率时变机理分析	202
6.8 钢筋锈蚀速率时变计算模型	204
6.8.1 时间效应和环境温湿度对阳阴极反应 Tafel 斜率的影响	204
6.8.2 考虑时变效应和环境温湿度影响的钢筋锈蚀速率预计模型	208
6.9 小 结	209
第7章 加速试验方法对钢筋混凝土退化过程的影响	211
7.1 研究混凝土内钢筋加速锈蚀的目的与途径	211
7.1.1 混凝土内钢筋加速锈蚀试验方法的重要性	211
7.1.2 混凝土内钢筋加速锈蚀试验方法	212
7.1.3 人工气候环境简介	214
7.2 高浓度人工加速碳化和自然条件下混凝土碳化规律研究	215
7.2.1 自然和高浓环境混凝土碳化的对比试验研究方案	215
7.2.2 碳化混凝土横断面 pH 值变化规律	216
7.2.3 混凝土碳化层物相的 X 射线衍射分析	217
7.2.4 碳化混凝土的热重分析	219
7.3 海洋环境混凝土结构氯离子侵蚀过程的试验室模拟方法	221
7.3.1 氯离子在混凝土中传输性能试验方法的研究概况	221
7.3.2 海洋潮差区混凝土结构氯离子侵蚀过程的试验室模拟方法	225
7.3.3 海洋环境潮差区与试验室干湿循环条件下氯离子传输过程 的相关性分析	226
7.4 不同条件下混凝土内钢筋的锈蚀机理	228
7.4.1 混凝土中钢筋的表观锈蚀形态	228
7.4.2 混凝土中钢筋表观锈蚀形态的机理分析	230
7.5 恒电流、人工气候(氯盐外侵)的钢筋加速锈蚀比较	232
7.5.1 钢筋环向锈蚀分布比较	233
7.5.2 混凝土内钢筋锈蚀量分布模型	235
7.5.3 钢筋锈胀性能比较	237
7.5.4 锈蚀钢筋力学性能比较	239
7.6 小 结	247
参考文献	249
后 记	264