

考虑混凝土碳化影响的钢筋腐蚀速率研究

彭江衡

中铁建设集团有限公司, 北京

收稿日期: 2024年10月15日; 录用日期: 2024年11月9日; 发布日期: 2024年11月20日

摘要

为探究钢筋混凝土(RC)结构中钢筋锈蚀速率的影响因素,建立了RC结构中考虑碳化影响的钢筋锈蚀速率模型,进而以常益长铁路常德站站房RC结构为研究对象,探究了混凝土碳化指数、混凝土保护层厚度、钢筋直径、暴露时间等参数对钢筋锈蚀速率的影响。结果表明:(1)钢筋锈蚀速率随碳化指数增大而显著增大,混凝土碳化规律的对钢筋锈蚀速率影响较大。(2)钢筋锈蚀速率随混凝土保护层厚度的减小而显著增大,当混凝土保护层厚度不能满足设计要求时,RC结构将更快锈蚀。(3)钢筋锈蚀速率随钢筋直径增大而减小,碳化指数越大,钢筋直径对钢筋锈蚀速率的影响越大。(4)钢筋锈蚀速率随暴露时间增大而显著增大,并大致呈线性关系。

关键词

混凝土碳化, 钢筋锈蚀速率, 耐久性

Study on the Corrosion Rate of Steel Bars Considering the Influence of Concrete Carbonation

Jiangheng Peng

China Railway Construction Group Co., Ltd., Beijing

Received: Oct. 15th, 2024; accepted: Nov. 9th, 2024; published: Nov. 20th, 2024

Abstract

In order to explore the influencing factors of steel corrosion rate in reinforced concrete (RC) structures, a model of steel corrosion rate considering the influence of carbonization in RC structures was established. Then, taking the RC structure of Changde Station of Changyi-Changde Railway as the research object, the effects of concrete carbonization index, concrete cover thickness, steel bar

文章引用: 彭江衡. 考虑混凝土碳化影响的钢筋腐蚀速率研究[J]. 土木工程, 2024, 13(11): 2073-2080.

DOI: 10.12677/hjce.2024.1311226

diameter and exposure time on steel corrosion rate were investigated. The results show that: (1) The corrosion rate of steel bars increases significantly with the increase of carbonization index, and the carbonization law of concrete has a great influence on the corrosion rate of steel bars. (2) When the concrete cover thickness cannot meet the design requirements, the RC structure will be corroded faster. (3) The corrosion rate of steel bar decreases with the increase of steel bar diameter. The larger the carbonization index, the greater the influence of steel bar diameter on the corrosion rate of steel bars. (4) The corrosion rate of steel bar increases significantly with the increase of exposure time, and it is roughly linear.

Keywords

Concrete Carbonization, Corrosion Rate of Steel Bars, Durability

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

现阶段,随着我国建筑业的迅速发展,RC 结构被广泛使用,钢筋混凝土的耐久性问题越来越受关注。目前混凝土碳化以及由此引起的钢筋锈蚀是影响钢筋混凝土结构耐久性的最主要因素。钢筋锈蚀在房屋建筑、桥梁、公路等混凝土结构中都普遍存在,钢筋锈蚀会严重影响结构的耐久性,容易造成各种安全隐患,危害人民的生命安全。

为明晰钢筋锈蚀的原因,国内外学者对钢筋锈蚀通过数值模拟及试验研究作出了积极的尝试。Francois, R 等[1]通过试验研究了已经存在裂缝的情况的钢筋混凝土构件在腐蚀环境下的钢筋锈蚀速率,研究表明钢筋锈蚀速率受裂缝宽度的影响。张伟平等[2]提出了不同环境下 RC 结构中钢筋的锈蚀机理,以及通过试验提出了钢筋加速锈蚀和自然锈蚀间的相关性和钢筋锈蚀量的预测方法。Yoon, S.等[3]提出钢筋的锈蚀快慢受混凝土保护层厚度的影响,而裂缝宽度对钢筋锈蚀速率影响较小。刘西拉等[4]对钢筋锈蚀进行了定量分析,提出了钢筋腐蚀的理论模型。尽管国内外学者对混凝土碳化、钢筋锈蚀做了大量试验,但考虑碳化影响的钢筋锈蚀速率仍不明晰。常益长铁路常德站站房主体为钢筋混凝土框架结构,该站由渝长厦、呼南以及石长常岳九铁路在此交汇而成,其地理位置可谓极为重要。深入研究其混凝土结构中的钢筋腐蚀速率,能够切实保证站房结构的使用年限,确保其结构的承载力完全符合相关标准要求。因此,本文以常益长铁路常德站站房钢筋混凝土框架结构为背景,提出了一种较为简单的方法来评价钢筋锈蚀速率影响因素,建立了 RC 结构中考虑碳化影响的钢筋锈蚀速率模型。本研究的结果既可作为现有 RC 结构修复、加固或拆除的重要参考依据,也可为以后常德站站房钢筋混凝土框架结构的后续养护工作提供重要参考依据,确保其正常使用的安全性。

2. 建立 RC 结构中考虑碳化影响的钢筋锈蚀速率模型

为了研究 RC 结构中钢筋锈蚀的原因,并建立 RC 结构中考虑碳化影响的钢筋锈蚀速率模型,应做出以下一些基本假设:

- (1) 仅考虑混凝土碳化而导致钢筋的锈蚀。
- (2) O_2 在混凝土中的扩散遵循菲克第一定律。
- (3) 假定当大气相对湿度超过钢筋锈蚀的临界湿度时,就能为钢筋在 RC 结构中的锈蚀提供足够的水。

分, 从而满足钢筋锈蚀发生的条件。

(4) RC 结构中的钢筋在常压下的腐蚀属于微电池腐蚀, 阳极电极和阴极电极紧密接触。

根据法拉第定律[5], 钢筋腐蚀电池的腐蚀电流密度 $i_c(t)$ 如下式所示:

$$i_c(t) = n_{O_2} F J_c(t) \quad (1)$$

其中 $i_c(t)$ 为阴极电极在 t 时刻时的电流密度, 下标 c 表示阴极电极, $J_c(t)$ 为 O_2 在时间 t 时在钢筋表面的扩散流量, n_{O_2} 为 O_2 分子参与化学反应获得的电子数, 取 n_{O_2} 为 4, F 为法拉第常数 ($F = 96485 \text{ C/mol}$)。

根据电化学原理, O_2 在混凝土中的扩散流量等于 O_2 在混凝土中的扩散系数与 O_2 在扩散方向上的浓度的一阶导数的乘积, 即:

$$J_c(t) = D_{O_2} \frac{\partial C(x)}{\partial x} \quad (2)$$

其中 D_{O_2} 为 O_2 在混凝土中以 ($\text{mm}^2/\text{年}$) 为单位的扩散系数, $C(x)$ 为 O_2 在混凝土中的浓度分布, x 为扩散方向上的空间坐标。

由于之前的假设 O_2 在混凝土中的扩散遵循菲克第一定律, 即从混凝土表面的最大值到混凝土碳化前沿的零值, 扩散层区域的 O_2 浓度呈线性变化, 可得出下式:

$$\frac{\partial C(x)}{\partial x} = \frac{C_{O_2} - C_{gi}}{D} \quad (3)$$

其中 C_{O_2} 是混凝土表面 O_2 的浓度, 取 $C_{O_2} = 4.47 \times 10^{-8} \text{ mol/mm}^3$ (O_2 的密度和原子量分别为 1.429 g/l 和 32 g/mol 。 C_{O_2} 是 O_2 的密度与原子量之比), C_{gi} 是 O_2 在钢筋表面上的浓度 (mol/mm^3), D 是混凝土完全碳化深度 (mm)。

由于假设 RC 结构中的钢筋锈蚀由 O_2 及混凝土中的孔隙水控制, 即 C_{gi} 在上式取为零, 则上式可表示为:

$$\frac{\partial C(x)}{\partial x} = \frac{C_{O_2}}{D} \quad (4)$$

整理可得到式 5:

$$i_c(t) = \frac{n_{O_2} F D_{O_2} C_{O_2}}{D} \quad (5)$$

钢筋在时间 $t \sim t + dt$ 范围内的腐蚀量如下式所示:

$$dW_{gi}(t) = \frac{i_c(t)}{n_{Fe} F} M_{Fe} A_{gi} dt \quad (6)$$

其中 dW_{gi} 为在时间 dt 内钢筋锈蚀量, 单位为克; A_{gi} 为 RC 结构中的钢筋在 t 时刻锈蚀的表面积, M_{Fe} 为 Fe 的原子量 (钢筋主要成分为 Fe, 且主要参与锈蚀化学反应的为 Fe 元素, Fe 的原子量为 55.85 g/mol), n_{Fe} 是铁离子的电荷量, 取 $n_{Fe} = 2.8$ 。需要指出的是, O_2 的扩散由阴极控制反应过程, 阳极电流等于阴极电流。

以 1 毫米的单位长度计算 A_{gi} 的值, 获得:

$$A_{gi} = 2r \arccos \frac{r+c-D}{r} = d \arccos \frac{d+2c-2D}{d} \quad (7)$$

其中 r 为钢筋半径 (mm), d 为钢筋直径 (mm), c 为混凝土保护层厚度 (mm)。

混凝土碳化深度与暴露时间[6]如下式所示:

$$D = \alpha t^\lambda \quad (8)$$

其中 α 为碳化速度系数, λ 为碳化指数, t 为 RC 结构暴露时间。 α 和 λ 可由最小二乘法拟合得到。

D_{O_2} 在式 5 中可由下式表示[7]:

$$D_{O_2} = 3.1536 \times 10^{-5} \left(\frac{32.15}{f_{cu}} - 0.44 \right) (\text{mm}^2/\text{年}) \quad (9)$$

其中 f_{cu} 是混凝土立方体抗压强度(N/mm²)。

将式(5)、式(7)、式(8)代入式(6)可得:

$$dW_{gi}(t) = 3.566 \times 10^{-6} \frac{D_{O_2} d}{\alpha t^\lambda} \arccos \frac{d + 2c - 2\alpha t^\lambda}{d} dt \quad (10)$$

当 $t_1 \leq t \leq t_2$ 时, 将 $dW_{gi}(t)$ 进行积分可得下式:

$$W_t = \beta P_{RH} \int_{t_1}^{t_2} dW_t \quad (11)$$

其中 P_{RH} 是当考虑钢筋锈蚀的临界相对湿度小于大气相对湿度时, 发生概率为 60% 的钢筋锈蚀修正系数 [8], β 为仅考虑 O_2 在水中才与钢筋发生反应的修正系数, 取 O_2 在水中的溶解度是 0.028 [9]。

在 $t_1 \leq t \leq t_2$ 的条件下成立, t 是钢筋锈蚀预测时间, $t_1 = (c/\alpha)^{1/\lambda}$ 为钢筋开始发生锈蚀的时间, $t_2 = (c + d/\alpha)^{1/\lambda}$ 是钢材表面整体腐蚀的开始时间, t 、 t_1 、 t_2 均以年为单位。

当 $t < t_1$ 时, $A_{gi} = 0$, 将 $dW_{gi}(t)$ 进行积分可得下式:

$$W_t = 0 \quad (12)$$

当 $t > t_2$ 时, $A_{gi} = \pi d$, $D = c + d$, 将 $dW_{gi}(t)$ 进行积分可得下式:

$$W_t = \beta P_{RH} \left(\int_{t_1}^{t_2} dW_t + \int_t^{t_2} dW_t \right) \quad (13)$$

其中当 $t > t_2$ 时, $dW_t = (3.566 \times 10^{-6} \pi D_{O_2} d) / (c + d) dt$ 。

通常采用钢筋锈蚀率衡量钢筋锈蚀程度 ($\rho = W_t / W_0$), 其中 W_0 为钢筋的理论重量。假定采用 1 mm 长度的钢筋, 则 $W_0 = \pi r^2 \times 7.85 \times 10^{-3} = 1.9625 \times 10^{-3} \pi d^2$ (g)。

钢筋锈蚀率 ρ 可表示为:

$$\rho = 0, t < t_1 \quad (14)$$

$$\rho = 1.817 \times 10^{-3} \frac{\beta D_{O_2} P_{RH}}{\pi \alpha d} \int_{t_1}^{t_2} \frac{\arccos \frac{d + 2c - 2\alpha t^\lambda}{d}}{t^\lambda} dt, t_1 \leq t \leq t_2 \quad (15)$$

$$\rho = 1.817 \times 10^{-3} \frac{\beta D_{O_2} P_{RH}}{\pi \alpha d} \left[\frac{\pi \alpha (t - t_2)}{c + d} + \int_{t_2}^{t_1} \frac{\arccos \frac{d + 2c - 2\alpha t^\lambda}{d}}{t^\lambda} dt \right], t > t_2 \quad (16)$$

假设 $\lambda = 0.5$, 则对式(14)~(16)积分可得:

$$\rho = 0, t < t_1 \quad (17)$$

$$\rho = 1.817 \times 10^{-3} \frac{\beta D_{O_2} P_{RH}}{\pi \alpha^2 d} \left[\sqrt{d^2 - (d + 2c - 2\alpha \sqrt{t})^2} - (d + 2c - 2\alpha \sqrt{t}) \arccos \frac{d + 2c - 2\alpha \sqrt{t}}{d} \right], t_1 \leq t \leq t_2 \quad (18)$$

$$\rho = 1.817 \times 10^{-3} \frac{\beta D_{O_2} P_{RH}}{d} \left[\frac{t-t_2}{c+d} + \frac{d}{\alpha^2} \right], t > t_2 \quad (19)$$

至此, RC 结构中考虑碳化影响的钢筋锈蚀速率模型推导完毕, 此式可以直观地算出各参数对钢筋锈蚀速率的影响强弱, 为提高 RC 结构耐久性提供参考。

3. 各参数对钢筋锈蚀速率的影响

RC 结构中钢筋锈蚀会严重降低结构的力学性能及耐久性, 为了直观说明碳化指数、混凝土保护层厚度、钢筋直径、暴露时间对钢筋锈蚀速率的影响, 以常益长铁路常德站为背景, 常德站站房主体为 RC 框架结构, 通过 RC 结构中考虑碳化影响的钢筋锈蚀模型进行分析和比较。假定站房结构采用 C30 混凝土, 受力钢筋采用 $\phi 16$, 各参数取 $D = 20 \text{ mm}$ 、 $P_{RH} = 0.5$ 、 $\beta = 0.028$ 。

3.1. 碳化指数

将钢筋直径、混凝土保护层厚度、暴露时间设定为设计值, 仅考虑碳化指数对钢筋锈蚀速率的影响, 假定 $c = 25 \text{ mm}$ 、 $d = 16 \text{ mm}$ 、 $t = 30 \text{ y}$ 。RC 结构在不同碳化指数工况下钢筋锈蚀速率的变化规律如图 1 所示。

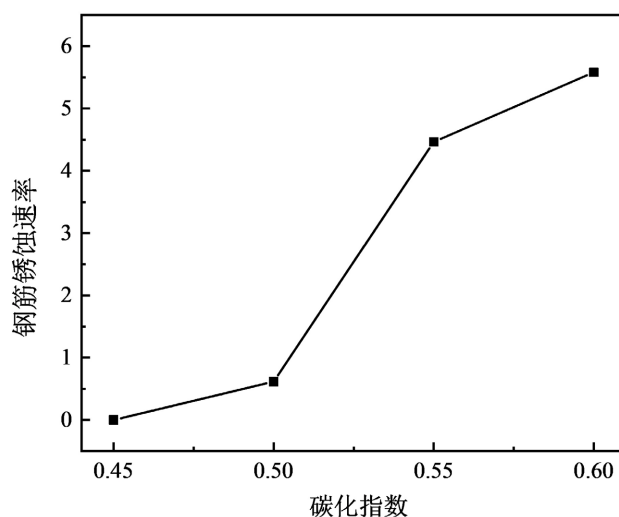


Figure 1. The variation law of steel corrosion rate under different carbonization index conditions

图 1. 不同碳化指数工况下钢筋锈蚀速率的变化规律

由图 1 可知, 钢筋锈蚀速率随碳化指数增大而显著增大, 钢筋锈蚀速率在碳化指数 0.50~0.55 范围内有显著的变化, 碳化指数为 0.55 时的钢筋锈蚀速率是碳化指数为 0.5 时的 6.93 倍。因此, 想要准确预测钢筋锈蚀速率时, 必须考虑混凝土碳化规律的影响。

3.2. 混凝土保护层厚度

将钢筋直径、暴露时间设定为设计值, 假定 $d = 16 \text{ mm}$ 、 $t = 30 \text{ y}$, RC 结构在不同混凝土保护层厚度工况下钢筋锈蚀速率的变化规律如图 2 所示。

由图 2 可知, 钢筋锈蚀速率随混凝土保护层厚度的减小而显著增大。通过模型计算, 混凝土保护层厚度为 10 mm 时的钢筋锈蚀速率是厚度为 25 mm 的 9.82 倍。当混凝土保护层厚度不能满足设计要求时, RC 结构将更快锈蚀, 混凝土保护层厚度对 RC 结构的耐久性影响较大。

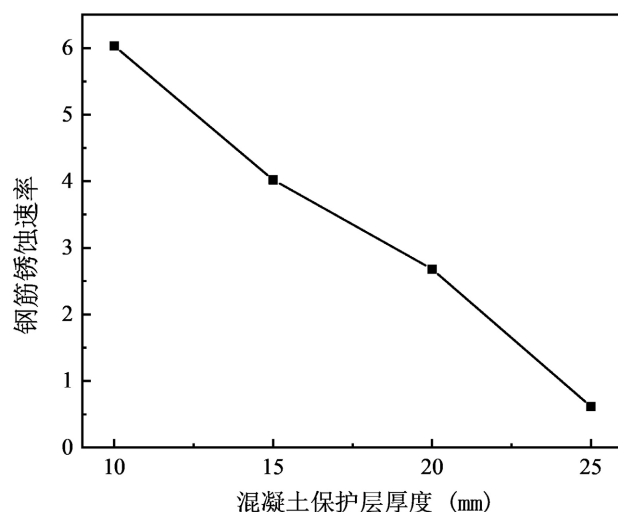


Figure 2. The variation law of steel corrosion rate under different concrete protective layer thicknesses

图 2. 不同混凝土保护层厚度工况下钢筋锈蚀速率的变化规律

3.3. 钢筋直径

将混凝土保护层厚度、暴露时间设定为设计值，假定 $c = 25 \text{ mm}$ 、 $t = 30 \text{ y}$ ，RC 结构在不同碳化指数下钢筋锈蚀速率与钢筋直径之间的关系如图 3 所示。

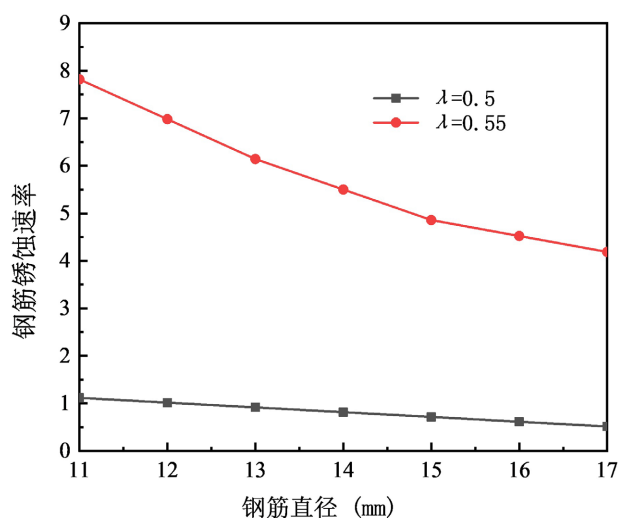


Figure 3. The relationship between steel corrosion rate and steel diameter under different carbonization indices

图 3. 不同碳化指数下钢筋锈蚀速率与钢筋直径之间的关系

由图 3 可知，在碳化指数 $\lambda = 0.55$ 时，钢筋锈蚀速率随钢筋直径增大而显著减小；在碳化指数 $\lambda = 0.5$ 时，钢筋锈蚀速率随钢筋直径增大呈减小趋势。碳化指数越大，钢筋直径对钢筋锈蚀速率的影响越大。当碳化指数一定时，可以选择较大直径的钢筋来降低 RC 结构的锈蚀速率。

3.4. 暴露时间

将钢筋直径、混凝土保护层厚度设定为设计值，假定 $c = 25 \text{ mm}$ 、 $d = 16 \text{ mm}$ ，不同暴露时间工况下

钢筋锈蚀速率的变化规律如图 4 所示。

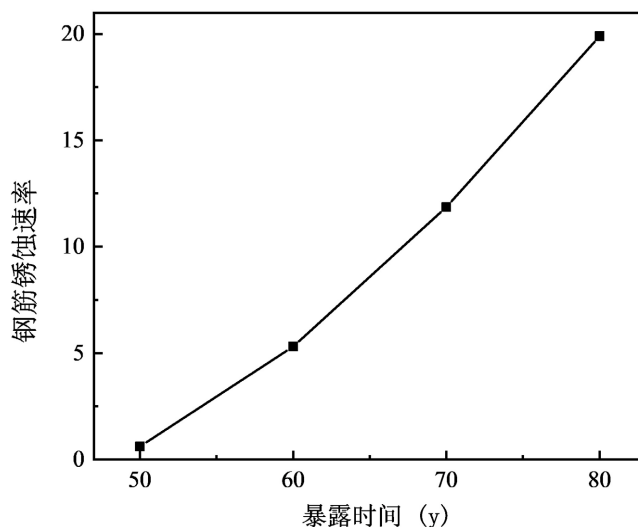


Figure 4. The variation law of steel corrosion rate under different exposure time conditions

图 4. 不同暴露时间工况下钢筋锈蚀速率的变化规律

由图 4 可知, 钢筋锈蚀速率随暴露时间增大而显著增大, 并大致呈线性关系。RC 结构在超过其使用年限后, 钢筋锈蚀速率将显著增加。

4. 结论

本文基于法拉第定律、菲克第一定律提出了建立 RC 结构中考虑碳化影响的钢筋锈蚀速率模型。进而以常益长铁路常德站站房 RC 结构为研究对象, 探究了碳化指数、混凝土保护层厚度、钢筋直径、暴露时间等参数对钢筋锈蚀速率的影响规律。主要研究结论如下:

(1) 钢筋锈蚀速率随碳化指数增大而显著增大。(2) 钢筋锈蚀速率随混凝土保护层厚度的减小而显著增大, 当混凝土保护层厚度不能满足设计要求时, RC 结构将更快锈蚀, 混凝土保护层厚度对 RC 结构的耐久性影响较大。(3) 钢筋锈蚀速率随钢筋直径增大而减小, 碳化指数越大, 钢筋直径对钢筋锈蚀速率的影响越大。当碳化指数一定时, 可以选择较大直径的钢筋来降低 RC 结构的锈蚀速率。(4) 钢筋锈蚀速率随暴露时间增大而显著增大, 并大致呈线性关系。本文提出的 RC 结构中考虑多参数影响的钢筋锈蚀速率模型应进一步通过实测来进行验证。

参考文献

- [1] François, R. and Arliguie, G. (1999) Effect of Microcracking and Cracking on the Development of Corrosion in Reinforced Concrete Members. *Magazine of Concrete Research*, **51**, 143-150.
<https://doi.org/10.1680/mac.1999.51.2.143>
- [2] 张伟平, 顾祥林, 金贤玉, 等. 混凝土中钢筋锈蚀机理及锈蚀钢筋力学性能研究[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(S1): 327-332.
- [3] Yoon, S., Wang, K. and Weiss, W.J. (2000) Interaction between Loading, Corrosion, and Serviceability of Reinforced Concrete. *ACI Materials Journal*, **97**, 637-644.
- [4] 刘西拉, 苗澍柯. 混凝土结构中的钢筋腐蚀及其耐久性计算[J]. 土木工程学报, 1990(4): 69-78.
- [5] 华彤文. 普通化学原理[M]. 北京: 北京大学出版社, 1989.
- [6] 张誉. 混凝土结构耐久性概论[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2003.

- [7] 牛荻涛, 王林科, 王庆霖. 氧气在混凝土中扩散系数的确定[J]. 西安建筑科技大学学报, 1996(1): 10-13.
- [8] 牛荻涛, 王庆霖, 王林科. 锈蚀开裂前混凝土中钢筋锈蚀量的预测模型[J]. 工业建筑, 1996(4): 8-10+62.
- [9] 北山健治, 楠兄善男. 化学计算必备[M]. 天津: 天津科学技术出版社, 1984.