第 48 卷第 8 期
2020 年 8 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 48，No. 8
August，2020

http://www.gxyb.cbpt.cnki.net

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20190746

氯盐侵蚀作用下混凝土内钢筋锈胀效应的化学–力学转化

宋宇峰[1]，徐亦冬[2,3]，弓扶元[1]，毛江鸿[2,3]

(1. 浙江大学建筑工程学院，杭州 310017；2. 浙大宁波理工学院，浙江 宁波 315100；
3. 浙江大学宁波研究院，浙江 宁波 315100)

摘　要：提出一个将氯盐侵蚀作用下混凝土内钢筋锈胀化学作用转化成力学作用的计算框架，从而将钢筋锈蚀的化学反应引入到宏观力学行为。首先，基于考虑不同湿度条件的钢筋锈蚀速率模型，得到钢筋电流密度 i_{corr} 的计算方程；其次，在 Faraday 定律基础上确定钢筋总锈层厚度 δ 与钢筋电流密度 i_{corr} 的关系；最后，基于均匀锈胀模型得到锈胀应力 q 和总锈层厚度 δ 的关系。数值验证表明：计算框架中的电流密度、总锈层厚度、锈胀应力与文献数值对应情况良好，化学-力学转化框架具有良好适用性。

关键词：混凝土；氯离子；化学-力学转化；锈蚀速率；膨胀应力
中图分类号：TU375.5　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2020)08–1249–07
网络出版时间：2020–06–23

Chemical-mechanical Transformation of Reinforcement Corrosion Expansion Effect on Concrete under Chloride Attack

SONG Yufeng[1], *XU Yidong*[2,3], *GONG Fuyuan*[1], *MAO Jianghong*[2,3]
(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310017, China;
2. NingboTech University, Zhejiang University, Ningbo 315100, Zhejiang, China;
3. Ningbo Research Institute, Zhejiang University, Ningbo 315100, Zhejiang, China)

Abstract: A calculation framework was proposed to transform the chemical action of reinforcement corrosion in concrete into mechanical action, leading the chemical reaction of reinforcement corrosion to the macroscopic mechanical behavior. A calculation equation of current density i_{corr} was obtained by the corrosion rate model under different humidity conditions. A relationship between corrosion layer thickness δ and reinforcement corrosion rate i_{corr} was thus determined based on the Faraday law. Also, a relationship between the corrosion expansion stress q and the corrosion layer thickness δ was obtained by the uniform corrosion expansion model. Based on the numerical results, the corrosion current density, corrosion layer thickness and corrosion expansion stress in the calculation frame could be in reasonable agreement with the reported values, thus indicating that the framework of chemical mechanical transformation is feasible.

Keywords: concrete; chloride ion; chemical mechanical transformation; corrosion rate; expansion stress

氯盐作为典型的环境侵蚀介质，对混凝土结构的危害严重。氯盐侵蚀下的钢筋锈蚀后，产生的铁锈是原钢筋体积的 2~4 倍[1]，由此生成的锈胀力最终将导致保护层开裂剥落，影响混凝土服役性能。目前国内外学者关于氯盐侵蚀问题已做大量研究。

关于钢筋锈蚀速率问题，早期研究常采用理论模型[2]，其基于电化学原理建立理论公式，但公式参数一般较难确定；回归模型[3–4]以几个重要因素得到回归函数，但因关注变量因素不同而难以形成统一的回归模型；半经验模型[5–6]基于电化学原理，并与实际工程结合，文献[5]从不同湿度条件出发得到锈蚀速率模型，但模型中未定义脱钝临界氯离子浓

收稿日期：2019–11–11。　修订日期：2019–12–29。
基金项目：国家自然科学基金(51778577)；宁波市自然科学基金(2018A610229，2019A610401)；长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2019752/KY)。
第一作者：宋宇峰(1996—)，男，硕士研究生。
通信作者：徐亦冬(1980—)，男，博士，教授。

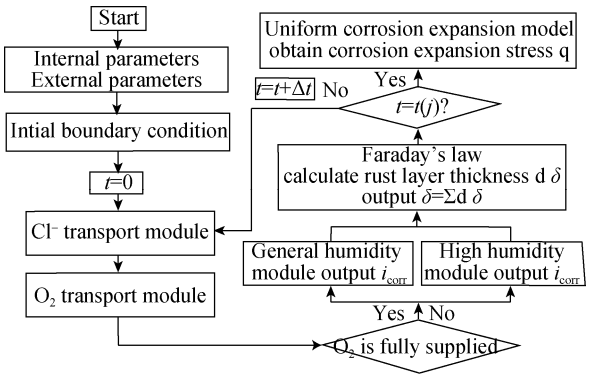
Received data: 2019–11–11.　**Revised date:** 2019–12–29.
First author: SONG Yufeng (1996–), male, Master candidate.
E-mail: 21812180@zju.edu.cn
Correspondence Author: XU Yidong (1980–), male, Ph.D., Professor.
E-mail: xyd@nit.zju.edu.cn

度。在力学研究方面，文献[7]在考虑混凝土的塑性和应变软化基础上，建立混凝土内钢筋临界腐蚀量的解析模型；文献[8]借助复变函数得到混凝土周围应力分量；文献[9]基于断裂力学和非平稳对数正态过程随机模型预测混凝土开裂时间。然而，目前研究[7–10]大多基于已知的钢筋腐蚀速率探究锈胀应力发展和预测混凝土开裂时间，未考虑氯离子和氧气扩散等因素对钢筋腐蚀速率产生的影响。

将氯盐侵蚀所致的钢筋锈胀化学作用转化成力学作用，对于混凝土结构耐久性评估具有重要理论和现实意义。Zuo[11]根据硫酸根离子的传输规律和硫酸盐与铝酸钙之间的化学反应，建立了硫酸盐侵蚀下混凝土膨胀效应从化学作用到力学作用的转化。氯盐侵蚀中的钢筋锈蚀速率[2–6]、锈胀应力导致开裂[7–10]等问题得到了较多研究，而对氯盐腐蚀下锈胀效应从化学作用到力学作用的相关研究比较少。因此，通过建立氯盐腐蚀环境下混凝土结构从物质传输到钢筋锈胀应力发展规律的计算理论和方法，从而将混凝土内钢筋锈蚀产物膨胀的化学反应引入宏观力学行为中，最终实现氯盐锈胀效应的化学-力学等效转化。

1 理论框架

氯盐侵蚀作用下钢筋锈胀效应的化学-力学转化框架的步骤为：(1) 输入内部参数、外部参数，设置边界条件。内部参数如混凝土水灰比、保护层厚度、弹性模量、钢筋直径等；外部参数如温度、湿度、氧气浓度、氯离子浓度等；(2) 从 t=0 开始，逐步计算。根据 t 时刻钢筋锈蚀是否受供氧条件控制分别代入高湿度条件和一般湿度条件计算，得到 t 时刻的腐蚀电流密度 $i(t)$；(3) 基于 Faraday 定律，根据 t 时刻 $i(t)$可确定 Δt 时间内的生成的锈层厚度 $\mathrm{d}\delta$，经过循环结构最终得到 $t(j)$时刻的总锈层厚度 δ；(4)基于均匀锈胀模型，根据 $t(j)$时刻的总锈层厚度 δ 得到 $t(j)$时刻的钢筋锈胀应力 q。理论模型流程详见图 1。



i_{corr}: Corrosion current density

图 1 化学-力学转化框架的流程图

Fig. 1 Flow chart of chemical mechanical transformation framework

2 扩散模型

2.1 氯离子在混凝土内的扩散

氯离子通过传输侵入混凝土，吸附于钢筋表面的钝化膜，使其 pH 值降低。当钢筋表面氯离子浓度达到临界值，钢筋便发生脱钝并开始锈蚀。通过 Fick 第二定律描述氯离子在混凝土中的一维扩散反应，考虑混凝土劣化、氯离子结合能力和氯离子扩散系数时间依赖性，得到扩散方程为[12]：

$$\frac{\partial c_{\mathrm{f}}}{\partial t}=\frac{KD_0{t_0}^m}{1+R_{\mathrm{Cl}^-}}t^{-m}\frac{\partial^2 c_{\mathrm{f}}}{\partial x^2} \tag{1}$$

式中：c_{f} 是自由的氯离子浓度；D_{f} 为氯离子扩散系数；x 为距离混凝土表面的距离；K 为混凝土劣化效应系数；D_0 为 t_0 时刻的氯离子扩散系数；t_0 为水化龄期；R_{Cl^-}为氯离子结合能力，取 3；m 为经验常数，取 0.94；t 为扩散时间。

当初始条件为：t=0，x>0 时，c_{f}=c_0；边界条件为 x=0，t>0 时，c_{f}=c_{s}，得到式(1)的解为：

$$c_{\mathrm{f}}=c_0+(c_{\mathrm{s}}-c_0)\left[1-\mathrm{erf}\frac{x}{2\sqrt{\dfrac{KD_0{t_0}^{\mathrm{m}}}{(1+R_{\mathrm{Cl}^-})(1-m)}t^{1-m}}}\right] \tag{2}$$

式中：c_{s} 为氯离子的边界浓度；c_0 混凝土内氯离子初始浓度；erf 为误差函数，$\mathrm{erf}(u)=\dfrac{2}{\sqrt{\pi}}\int_0^u \mathrm{e}^{-t^2}\mathrm{d}t$。

2.2 氧气在混凝土内的扩散

混凝土作为多孔介质材料，氧气会因混凝土内部孔隙的变化而展现不同的扩散机理[13]。根据 Knudsen 数 K_n 的不同将扩散分为 Fick 型扩散、Knudsen 型扩散和过渡型扩散[5]。

$$K_n=\frac{d_{\mathrm{p}}}{\lambda_0} \tag{3}$$

式中：d_{p} 为孔隙平均直径；λ_0 为氧气分子的平均自由程。

当 K_n≥10 时属于 Fick 型扩散，孔径远大于氧气分子自由程，气体分子和管壁间碰撞少，扩散速度快。K_n≤0.1 时属于 Knudsen 型扩散，因孔径减小，气体分子和管壁间碰撞占主导，扩散速度小于 Fick

型扩散。0.1＜K_n＜10 时属于过渡性扩散，氧气分子自由程和孔径接近，此时气体扩散同时受两种机理的制约，扩散情况介于前述两种扩散之间。

混凝土作为多孔介质材料，有大量的大小不一的孔径存在。因此氧气在混凝土的实际扩散是上述 3 种扩散的综合结果。传统混凝土因为水灰比较大导致毛细孔孔径更大，一般符合 Fick 型扩散。高性能混凝土则因为毛细孔更少更细，一般符合 Knudsen 型扩散和过渡型扩散[13]。本研究对象为传统混凝土，故采用以 Fick 型扩散为基础建立的扩散系数回归模型[14]：

$$D_{O_2}=2.183\times10^{-9}r^{2.346}(T-273)^{0.423}\eta^{-3.247} \quad (4)$$

式中：D_{O_2} 为氧气在混凝土中扩散系数(m²/s)；r 为水灰比；η 为相对湿度。

由式(4)可得，随着水灰比的增加，混凝土孔隙率增大，温度的增加则引起氧气运动速度增大，故氧气扩散速度和水灰比、温度均成正相关。湿度的增加会导致混凝土孔隙被水填充的体积增加，故氧气扩散速度和湿度成负相关。

3　锈胀效应的化学-力学转化

3.1　钢筋锈蚀速率

锈蚀速率是衡量钢筋锈蚀快慢的重要指标，根据氯盐侵蚀下钢筋的宏电池腐蚀特征[15]，腐蚀电流强度 I 取决于混凝土的电阻、阴极极化电阻、阳极极化电阻，见式(5)。

$$I=\frac{\Delta E}{R_c+R_a+R_{con}} \quad (5)$$

式中：ΔE 为阴极、阳极的初始电位差；R_a 为阳极的活化极化电阻；R_c 为阴极的极化电阻；R_{con} 为作为传输路径的混凝土的电阻。

在环境条件相同情况下，阴极氧扩散控制的锈蚀速率 I_d 是该腐蚀体系的最大电流强度，见图 2。空气相对湿度大于 90%，钢筋锈蚀速率主要由阴极控制；空气相对湿度小于 90%，钢筋锈蚀速率由阳极控制[16]。

3.1.1　高湿度条件　在高湿度条件下，钢筋锈蚀所需的水分充足，此时锈蚀速率由氧扩散控制。假设氧气符合稳态扩散，并考虑阴阳极电流相等，此时钢筋阳极电流密度 i_d 为[5]：

$$i_d=an_{O_2}FD_{O_2}\frac{A_c c_{O_2}}{A_s c}\frac{S_c}{S_a} \quad (6)$$

式中：i_d 为阴极腐蚀电流密度(A/m²)；α 为氧气在水中的溶解度，取 0.026；n_{O_2} 为阴极反应氧电子数=4；F 为 Faraday 常数，取 96 500 kC/mol；c_{O_2} 为混凝土构件外部氧气浓度，取大气氧气浓度 9.38 mol/m³ (1 atm，273 K)；D_{O2} 为氧气在混凝土中扩散系数；A_s 为钢筋锈蚀表面积，$A_s=\pi dl$，d 为钢筋初始直径，l 为钢筋长度；A_c 为混凝土透氧表面积，$A_c=L_c l$，L_c 是钢筋透氧长度，由式(7)确定；S_c/S_a 为锈蚀阴极面积和阳极面积之比，由式(8)确定[16]。

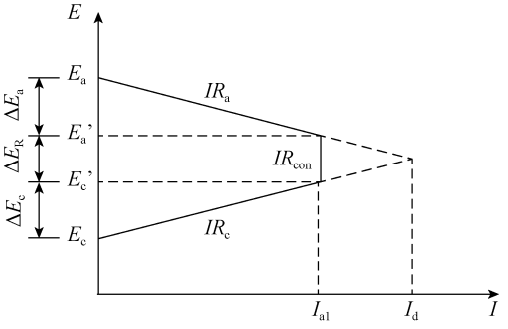
$$L_c=\begin{cases}S+2R_0, & S\leqslant 2C\\ 2C+2R_0, & S>2C\end{cases}\quad \text{中部钢筋}$$
$$L_c=\begin{cases}S+2C+4R_0, & S\leqslant 2C\\ 4C+4R_0, & S>2C\end{cases}\quad \text{角部钢筋} \quad (7)$$

式中：S 是钢筋间距；C 是保护层厚度；R_0 是钢筋原始半径。

$$\frac{S_c}{S_a}=\begin{cases}-2.82P_s+161.9 & P_s<59\\ 1.78+1.14e^{\left[\frac{-(P_s-59.5)}{0.838}\right]}+0.945^{\left[\frac{-(P_s-59.2)}{10.672}\right]} & 59\leqslant P_s<75\\ 2 & P_s\geqslant 75\end{cases} \quad (8)$$

式中：P_s 为孔隙水饱和度。

3.1.2　一般湿度条件　实际工程中大气湿度大约为 60%~90%[5]，即为一般湿度环境。在该环境下氧气充分供应，钢筋锈蚀速率转而由阳极控制，此外混凝土电阻也会影响锈蚀速率。此时的电流强度 I_{a1} 的值小于 I_d，如图 2 所示。



E: Electric potential; *I*: Corrosion current intensity; I_{a1}: Current intensity in general humidity environment; I_d: Current intensity in high humidity environment; R_a: Anode active polarization resistance; R_c: Cathode polarization resistance; R_{con}: Resistance of concrete as transmission path.

图 2　极化曲线示意图

Fig. 2　Schematic diagram of the polarization curve

假设极化曲线均为直线，延长线的交点为 I_d，则 I_{a1} 与 I_d 的关系为：

$$I_{a1}=\frac{\Delta E I_d}{(\Delta E+R_{con}I_d)} \quad (9)$$

式中：I_{a1}为一般湿度环境下钢筋腐蚀电流强度(A)；ΔE 为阳极、阴极初始电位差，$\Delta E=0.841+1.58\times10^{-3}T$；$I_d$为高湿度环境下钢筋腐蚀电流强度(A)；$R_{con}$ 为阴极、阳极间混凝土电阻，由式(11)确定。

一般湿度条件下的腐蚀电流密度 i_{a1} 为：

$$i_{a1}=\frac{I_{a1}}{S_a}=\frac{\Delta E\times i_d}{(\Delta E+R_{con}I_d)} \tag{10}$$

式中：i_{a1} 为一般湿度环境下钢筋腐蚀电流密度(A/m²)。

$$R_{con}=\rho_{con}\frac{l}{s_{con}}=\rho_{con}\frac{l}{3\pi R_0^{\ 2}} \tag{11}$$

式中：s_{con} 为混凝土区域的截面面积；R_0 为钢筋半径。

其中电阻率 ρ_{con} 和氯离子占胶凝材料质量分数 k_{Cl^-} 分别为：

$$\rho_{con}=[k\times(k_{Cl^-}-1.8)+100(\eta-1)^2+40]\times \exp[3000(\frac{1}{T}-\frac{1}{298})] \tag{12}$$

$$k_{Cl^-}=\frac{m_{Cl^-}}{m_b}$$

式中：ρ_{con}为电阻率；k 为和水灰比相关的系数，水灰比在 0.3~0.4 时 k 取–11.1，水灰比在 0.5~0.6 时 k 取–5.6[17]，水灰比在 0.4~0.5 时 k 由线性内插确定；η 为相对湿度，取 40%~100%；T 为环境温度(K)；m_{Cl^-}为钢筋表面自由氯离子浓度(kg/m³)，由式(2)确定；m_b 为胶凝材料用量(kg/m³)。

由式(12)可知，电阻率 ρ_{con} 和相对湿度 η、温度 T 均成负相关，温度 T 和相对湿度 η 的增加会导致电阻降低，从而使电流密度增加。电流密度和氯离子浓度也成一次线性关系，然而在实际工程中，当钢筋表面氯离子浓度达到临界值导致钢筋脱钝后，其对腐蚀电流密度影响逐渐减小直至忽略[18]，此处取氯离子浓度临界值为 0.23%[19]，见式(12)。

3.2 锈胀应力

钢筋锈蚀产物的生成将引起混凝土内部拉应力增长，最终导致混凝土保护层开裂，大致分为 3 个阶段。(1) 锈蚀产物自由膨胀并填充到钢筋与混凝土交界面的毛细孔中；(2) 锈蚀产物填充满孔隙后对混凝土作用使之产生拉应力；(3) 混凝土保护层开裂，裂缝延伸到混凝土表面。

3.2.1 锈层厚度 钢筋因氯盐侵蚀而脱钝后，形成腐蚀电池。钢筋表面不同部位出现较大的电位差，形成阴极和阳极。阳极和阴极分别发生如下反应：

$$Fe\rightarrow Fe^{2+}+2e;\ O_2(g)+2H_20+4e\rightarrow 4OH^- \tag{13}$$

随着腐蚀电池的进行，钢筋质量不断减少。根据 Faraday 定律，t 时刻钢筋锈蚀损失的质量 M_{loss} 为：

$$M_{loss}=\frac{A\cdot A_s}{n\cdot F}\int_o^t i(t)\mathrm{d}t \tag{14}$$

式中：A 为铁的相对原子质量，取 56 g/mol；A_s 为钢筋锈蚀表面积；n 为铁离子的化合价数，取 2.5；$i(t)$是钢筋腐蚀电流密度，由 3.1 节计算得到。

对应的钢筋锈蚀损失体积 V_{loss} 为：

$$V_{loss}=\frac{M_{loss}}{\rho_s}=\frac{A\cdot A_s}{\rho_s\cdot n\cdot F}\int_o^t i(t)\mathrm{d}t \tag{15}$$

式中：ρ_s为钢筋密度，取 7 800 kg/m³。

若 t 时刻钢筋锈蚀造成半径减小 ΔR，此时对应钢筋半径为 R_ρ。ΔR 由式(16)计算[20]；同时总损耗量 ΔR 为 3 个阶段损耗量之和，见式(17)：

$$\Delta R=\frac{V_{loss}}{A_s}=\frac{A}{\rho_s\cdot n\cdot F}\int_o^t i(t)\mathrm{d}t \tag{16}$$

$$\Delta R=\Delta R_1+\Delta R_2+\Delta R_3 \tag{17}$$

式中：ΔR_1、ΔR_2、ΔR_3 分别代表钢筋在第 1、2、3 阶段内的半径损耗量。

因为 Fe^{2+}和 OH^-反应生成 $Fe(OH)_2$、$Fe(OH)_3$ 等锈蚀产物，造成钢筋直径膨胀，膨胀后的钢筋半径为 R_1，锈蚀产物膨胀倍数 r_v 取 2.96[21]，得到总锈层厚度 δ：

$$\delta=(r_v-1)\times\Delta R \tag{18}$$

式中：ΔR 由式(16)和式(17)确定。

3.2.2 锈胀应力 采用均匀锈胀模型[1]分析钢筋锈胀造成的膨胀应力，详见图 3。钢筋初始半径 R_0 和 R_1、R_ρ 间的关系式为：$R_1=R_0+\delta$，$R_\rho=R_0-\Delta R$。此外作如下假定[22]：(1) 钢筋锈蚀过程始终保持均匀；(2) 钢筋周围混凝土看作厚壁圆筒，对应厚度是保护层厚；(3) 只考虑钢筋锈蚀引起混凝土中应力，忽略其它因素。

锈蚀率 ρ 按式(19)计算：

$$\rho=\frac{M_{loss}}{M_s}=1-(\frac{R_\rho}{R_0})^2 \tag{19}$$

式中：M_s为钢筋初始质量。

总锈层厚度 δ 和锈蚀率 ρ 间关系如下：

$$\delta=R_1-R_0=R_0(\sqrt{1+(r_v-1)\rho}-1) \tag{20}$$

锈蚀产物将先填充混凝土和钢筋界面处的空隙，在阶段一内无锈胀应力产生。阶段一对应的钢

筋半径最大损耗量 ΔR_1 按式(21)、式(22)计算：

$$\Delta R_1 = R_0 - \sqrt{R_0^{\,2} - \frac{2R_0\delta_0 + \delta_0^{\,2}}{r_v - 1}} \tag{21}$$

$$\delta_0 = P_{vp} \cdot d_p \tag{22}$$

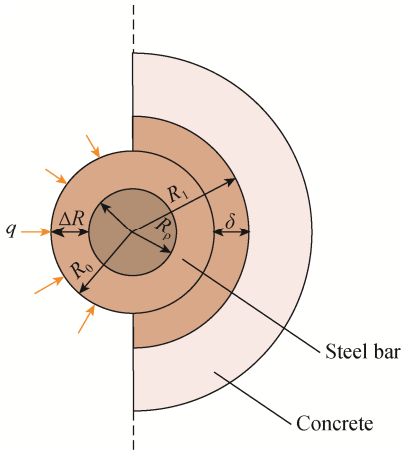
式中：δ_0 是混凝土和钢筋界面处空隙厚度[10]；P_{vp} 是毛细孔占水泥浆体的体积比；d_p 是界面处毛细孔平均直径。

阶段一的锈蚀产物填充满交界面处孔隙后，总锈层厚度 δ 继续增加，根据均匀锈胀模型可得到锈胀应力 q[22]：

$$q = \frac{\delta'}{\dfrac{R_0}{E_{cef}}\left[\dfrac{(R_0+C)^2+R_0^{\,2}}{(R_0+C)^2-R_0^{\,2}}+\mu_c\right]+\dfrac{R_1}{E_r}\dfrac{r_v\rho(1-\mu_r^{\,2})}{[(1+\mu_r)r_v-2]\rho+2}} \tag{23}$$

$$\delta' = \delta - (r_v - 1)\Delta R_1 \tag{24}$$

式中：δ'为实际产生锈胀应力的有效锈层厚度；δ 由式(18)确定；ΔR_1 由式(21)计算得到；C 为保护层厚度；R_0 为钢筋原始半径；E_r 为锈蚀产物弹性模量；μ_r 为锈蚀产物名义 Poisson 比，取 0.3；r_v 为锈蚀产物膨胀倍数；E_{cer} 为混凝土有效弹性模量；μ_c 为混凝土 Poisson 比，取 0.2。



R_0: Original reinforcement radius; R_p: Reduced reinforcement radius due to corrosion; R_1: Reinforcement radius after corrosion expansion; q: Stress.

图 3　均匀锈胀模型

Fig. 3　Uniform corrosion expansion model

随着 δ 不断增加，混凝土和钢筋界面处首先出现内裂纹。之后裂缝不断扩展，直至达到保护层表面。保护层开裂时钢筋锈胀力 q_{ck} 为：

$$q_{ck} = (0.3 + 0.6\frac{C}{d}) f_{tk} \tag{25}$$

式中：f_{tk} 为混凝土抗拉强度。

4　模型验证

4.1　材料和参数

模型参数[23]如下：混凝土保护层 C 为 35 mm，水灰比 r 为 0.5，钢筋直径 d 为 16 mm，初始氯离子浓度为 0，外界氯离子浓度为水泥质量的 0.5%，初始氧浓度 5 g/m^3，外界氧浓度 8.576 g/m^3。外部温度 T 和相对湿度 η 满足式(26)：

$$\begin{aligned} T &= 23.1 + 6\sin(\frac{\pi t}{6} + \frac{5\pi}{4}) \\ \eta &= 0.78 + 0.07\sin(\frac{\pi t}{6} - \frac{\pi}{3}) \end{aligned} \tag{26}$$

式中：T 为温度(℃)；η 为相对湿度；t 为时间(月)。

4.2　钢筋锈蚀速率

3.1 节中根据高湿度条件和一般湿度条件建立了腐蚀电流密度计算式。为探究其适用性，与 Zhang[23]的计算结果作印证。因温度 T 和湿度 η 是关于时间 t 的函数，而这两者的改变会引起电阻 R_{con} 的变化，进而影响电流密度 i_{corr}。由图 4 可见，式(10)的理论电流密度值和文献数值相比：两者均值相近且随着时间和湿度波动的变化情况也一致。

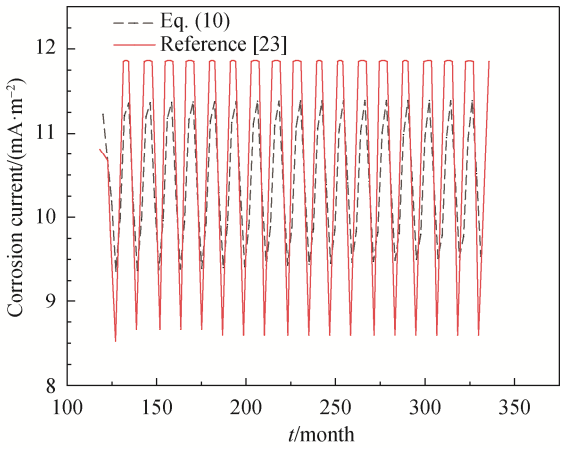


图 4　腐蚀电流密度的验证结果

Fig. 4　Verification results of corrosion current density

4.3　锈层厚度

随着钢筋锈蚀的进行，锈胀后的钢筋半径不断增长，膨胀后钢筋半径 R_1 与总锈层厚度 δ 的关系式为：$R_1 = R_0 + \delta$，膨胀后的钢筋直径 $d_1 = 2R_1$。由式(18)可得总锈层厚度 δ 是与电流密度 i_{corr} 相关的函数，以下分别对动态锈蚀速率和恒定锈蚀速率[24]进行验证，钢筋初始直径 d 为 20 mm，对比 3a 内总锈层厚度 δ 变化。

如图 5 所示，平均电流密度 0.012 A/m²组的动态锈蚀速率模型因为温度和时间波动导致 i_{corr} 的波

动，钢筋直径同样波动增长，而理论验证因为采用恒定的 i_{corr} 值，钢筋直径呈现完全线型增长，两者在 3a 内变化量总体上保持一致。平均电流密度 0.01 A/m^2 组因为文献和理论模型都采用恒定电流密度，钢筋直径均随时间线性增加，式(18)计算结果和文献[24]数值基本一致。由此可得，无论是动态腐蚀模型或恒定腐蚀模型，若电流密度的均值一定，在相同时间内产生的总锈层厚度 δ 是一定的。

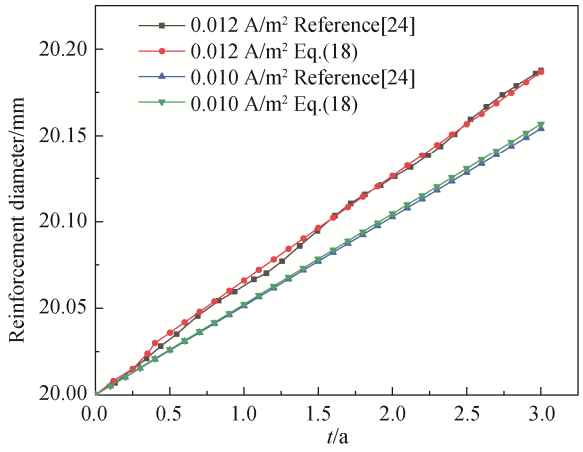
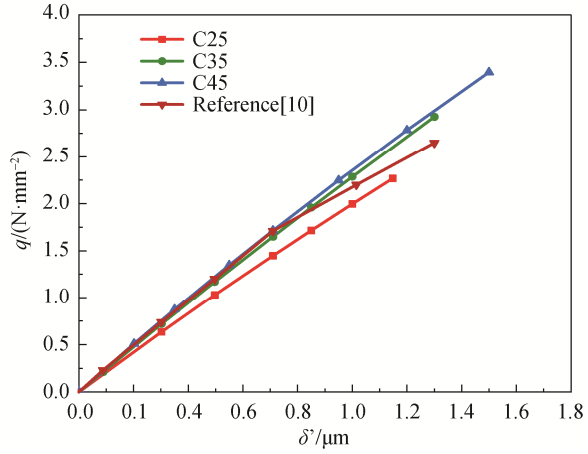


图 5 钢筋锈蚀引起直径变化的验证

Fig. 5 Verification of diameter changes caused by reinforcement corrosion

4.4 锈胀应力

根据式(23)~式(25)，锈胀应力验证情况见图 6。首先选取 C35 混凝土参数进行验证，模型参数和文献[10]一致，理论锈胀应力值和文献数值十分一致，随着锈层厚度 δ'增加，当锈胀应力 q 接近开裂应力 q_{ck}，理论值略大于文献数值，在误差范围内。当混凝土强度提高，抗拉强度 f_{tk} 增大，开裂应力 q_{ck} 也增加，故 C25、C35、C45 的终点纵坐标依次递增。由图 6 可知，当锈层厚度 δ'相同，混凝土等级越高，锈胀应力 q 越大。这是因为随着混凝土强度提高，混凝土弹性模量增加，式(23)的分母项减小，故锈胀应力 q 增大。对于不同强度的混凝土，随着锈层厚度 δ'增大，锈胀应力呈现近似线性增长。



q: Stress; δ': Effective rust layer thickness.

图 6 锈胀应力验证

Fig. 6 Verification of diameter changes caused by reinforcement corrosion

5 结论

1) 基于 Faraday 定律确定总锈层厚度 δ 和腐蚀电流的关系，并根据钢筋均匀锈胀模型确定锈胀应力和总锈层厚度的关系，从而建立了氯盐侵蚀下钢筋锈胀效应的化学-力学转化模型。

2) 随着温度、湿度和氯离子含量增大，电阻值减小，电流密度值增大。在均匀锈胀假定下，若电流密度恒定，总锈层厚度随时间线性增长；若电流密度的均值一定，在相同时间内产生的总锈层厚度是一定的。

3) 对于不同强度的混凝土，随着锈层厚度增大，锈胀应力呈现近似线性增长。当混凝土强度提高，开裂应力增加，相同的锈层厚度'对应的锈胀应力也越大。

参考文献:

[1] 金伟良, 赵羽习, 鄢飞. 钢筋混凝土构件的均匀钢筋锈胀力的机理研究[J]. 水利学报, 2001, 32(7): 57–62.
JIN Weiliang, ZHAO Yuxi, YAN Fei. J Hydraul Eng (in Chinese), 2001, 32(7): 57–62.

[2] BALABANIC G, BICANIC N, DUREKOVIC A. The influence of w/c ratio, concrete cover thickness and degree of water saturation on the corrosion rate of reinforcing steel in concrete[J]. Cem Concr Res, 1996, 26(5): 761–769.

[3] Zhou B B, Gu X L, Guo H Y, et al. Polarization behavior of activated reinforcing steel bars in concrete under chloride environments[J]. Constr Build Mater, 2018, 164: 877–887.

[4] ARGIZ C, SANJUÁN M Á, BORGES P C, et al. Modeling of corrosion rate and resistivity of steel reinforcement of calcium aluminate cement mortar[J]. Adv Civ Eng, 2018, 2018: 1–9.

[5] 耿欧. 混凝土构件的钢筋锈蚀与退化速率[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2010: 52–58.
GENG Ou, Corrosion and degradation rate of steel bars in concrete members (in Chinese). Beijing: China Railway Publishing House, 2010: 52–58.

[6] NOSSONI G, HARICHANDRAN R S. Electrochemical-mechanistic model for concrete cover cracking due to corrosion initiated by chloride diffusion[J]. J Mater Civ Eng, 2014, 26(6): 04014001.

[7] ZHANG K J, XIAO J Z, ZHAO Y X, et al. Analytical model for critical corrosion level of reinforcements to cause the cracking of concrete cover[J]. Constr Build Mater, 2019, 223: 185–197.

[8] LIN X Y, PENG M L, LEI F M, et al. Analytical model of cracking due to rebar corrosion expansion in concrete considering the structure

internal force[J]. AIP Adv, 2017, 7(12): 125328.

[9] LAU I, LI C Q, FU G Y. Prediction of time to corrosion-induced concrete cracking based on fracture mechanics criteria[J]. ASCE J Struct Eng, 2019, 145(8): 04019069.

[10] ZHAO Y X, YU J, JIN W L. Damage analysis and cracking model of reinforced concrete structures with rebar corrosion[J]. Corros Sci, 2011, 53(10): 3388–3397.

[11] ZUO X B, SUN W, YU C, Numerical investigation on expansive volume strain in concrete subjected to sulfate attack[J]. Constr Build Mater, 2012, 6 :404–410.

[12] 余红发, 孙伟, 鄢良慧, 等. 混凝土使用寿命预测方法的研究 I——理论模型[J]. 硅酸盐学报, 2002, 30(6): 686–690.
YU Hongfa, SUN Wei, YAN Lianghui, et al. J Chin Ceram Soc, 2002, 30(6): 686–690.

[13] 耿欧, 袁迎曙, 朱辉, 等. 混凝土氧气扩散性能的预测模型[J]. 中国矿业大学学报, 2010, 39(4): 471–474.
GENG Ou, YUAN Yingshu, ZHU Hui, et al. J China Univ Min Technol(in Chinese), 2010, 39(4): 471–474.

[14] 耿欧, 袁迎曙, 朱辉, 等. 混凝土氧气扩散系数试验研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2006(S2): 191–194.
GENG Ou, YUAN Yingshu, ZHU Hui, et al. J Southeast Univ: Nat Sci Ed(in Chinese), 2006(S2): 191–194.

[15] 阎培渝, 游轶, 崔路, 等. 高含氯混凝土中钢筋宏电池腐蚀速率控制因素[J]. 工业建筑, 2000(05): 6–9.
YAN Peiyu, YOU Yi, CUI Lu, et al. Ind Constr(in Chinese), 2000(5): 6–9.

[16] 宋晓冰, 刘西拉. 混凝土中钢筋腐蚀速度的过程控制[J]. 工业建筑, 2000(6): 53–56.
SONG Xiaobing, LIU Xila. Ind Constr(in Chinese), 2000(6): 53–56.

[17] 弓国军, 宋晓冰, 孔启明. 氯盐污染下混凝土的电阻率[J]. 工业建筑, 2005(12): 5–7.
GONG Guojun, SONG Xiaobing, KONG Qiming. Ind Constr(in Chinese), 2005(12): 5–7.

[18] 施锦杰, 孙伟. 混凝土中钢筋锈蚀研究现状与热点问题分析[J]. 硅酸盐学报, 2010, 38(9): 1753–1764.
SHI Jinjie, SUN Wei. J Chin Ceram Soc, 2010, 38(9): 1753–1764.

[19] 宋晓冰, 孔启明, 刘西拉. 普通硅酸盐混凝土中临界氯离子浓度的试验研究[J]. 土木工程学报, 2007(11): 59–63.
SONG Xiaobing, KONG Qiming, LIU Xila. Chin Civil Eng J(in Chinese), 2007(11): 59–63.

[20] CAO C, CHEUNG M, CHAN B. Modelling of interaction between corrosion-induced concrete cover crack and steel corrosion rate[J]. Corros Sci, 2013, 69: 97–109.

[21] ZHAO Y X, REN H Y, DAI H, et al. Composition and expansion coefficient of rust based on X-ray diffraction and thermal analysis[J]. Corros Sci, 2011, 53(5): 1646–1658.

[22] 陆春华, 赵羽习, 金伟良. 锈蚀钢筋混凝土保护层锈胀开裂时间的预测模型[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(2): 85–92.
LU Chunhua, ZHAO Yuxi, JIN Weiliang. J Build Struct(in Chinese), 2010, 31(2): 85–92.

[23] ZHANG J, CHEUNG M. Modeling of chloride-induced corrosion in reinforced concrete structures[J]. Mater Struct, 2013, 46(4): 573–586.

[24] CHEN D, MAHADEVAN S. Chloride-induced reinforcement corrosion and concrete cracking simulation[J]. Cem Concr Compos, 2008, 30(3): 227–238.