

文章编号:1000-582X(2010)02-0087-05

## 钢筋非均匀锈蚀轮廓线理论解

王桂林<sup>a,b</sup>, 陈庆玉<sup>a</sup>, 徐洪<sup>a</sup>, 张永兴<sup>a,b</sup>

(重庆大学 a. 土木工程学院; b. 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室, 重庆 400045)

**摘要:**基于金属腐蚀的电化学原理,结合钢筋混凝土结构中钢筋锈蚀的实际过程,从理论上推导了一般大气环境条件下钢筋的锈蚀速度以及不同服役时间,钢筋各部位的锈蚀深度及锈蚀后的体积变化规律,得到了钢筋非均匀锈蚀轮廓线的理论计算模型,并与相关文献模型及实测的数据进行对比分析,验证了其正确性。

**关键词:**碳化;锈蚀;轮廓线;锈蚀深度;锈胀

中图分类号:TU375

文献标志码:A

## Theoretical Contour Line of Reinforcement Bar of Non-uniform Corrosion

WANG Gui-lin<sup>a,b</sup> CHEN Qing-yu<sup>a</sup> XU Hong<sup>a</sup> ZHANG Yong-xing<sup>a,b</sup>

(a. College of Civil Engineering; b. Key Laboratory of Construction and New

Technology of Mountain Cities, Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** Most of the previous studies on corrosion of the steel bar in reinforced concrete structures is based on the assumption that the bar is uniformly corroded. The actual measurement in projects proved that most of the reinforcement bar is in non-uniform corrosion state. Based on electrochemical principles of metal corrosion and combined with the real corrosion course of the bar in concrete structures, a theoretical model of the contour line of reinforcement bar due to non-uniform corrosion is established, through deducing the speed of corrosion and theoretical corrosion penetration and volume changes due to corrosion of reinforcement in general air at different position and different time. At the same time, the model is verified with the results from relative references and measured data.

**Key words:** carbonation; corrosion; contour; corrosion penetration; expansion due to corrosion

目前国内外对钢筋混凝土中钢筋锈蚀的研究大多以钢筋的锈蚀为均匀锈蚀这一假设<sup>[1-4]</sup>为前提。而实际工程中的钢筋往往处于非均匀锈蚀状态<sup>[5]</sup>,夏宁<sup>[6]</sup>认为非均匀腐蚀钢筋锈蚀轮廓线形状与弧形地基反力分布曲线类似,并通过弧形地基反力分布曲线方程式讨论了钢筋截面不同锈蚀角对应的锈蚀外轮廓线。孙文静,李永和<sup>[7]</sup>,牟艳君等<sup>[8]</sup>认为钢筋锈蚀层外轮廓线近似于椭圆形状,并以此为基础分

析了任意处的锈蚀厚度。但是以上模型在建立过程中均是事先对钢筋锈蚀后的轮廓形状做出了假设,带有较大的主观因素。为此笔者拟以钢筋锈蚀的电化学原理为基础,以混凝土的碳化为钢筋锈蚀的诱导因素,根据不同锈蚀部位的锈蚀电流密度和锈蚀时间的不同,推导钢筋的锈蚀深度以及相应的体积变化规律,建立钢筋非均匀锈蚀轮廓线的理论计算

收稿日期:2009-08-15

基金项目:国家杰出青年科学基金资助项目(5062824);国家重大水专项资助项目(2008ZX07315-001);重庆市自然科学基金资助项目(CSTC,2008BB0318);重庆市建设科研计划资助项目(城科学 2006 第 62 号)

作者简介:王桂林(1970-),男,重庆大学副教授,主要从事岩土工程研究,(Tel)023-65121982,(E-mail)glw@cu.edu.cn。

模型,为研究钢筋混凝土锈胀开裂及其耐久性提供理论依据。

## 1 任意时刻钢筋的锈蚀深度分析

混凝土内部的钢筋锈蚀是一种电化学反应,由法拉第定律,单位长度钢筋在  $dt$  时间内由于锈蚀导致的质量损失与腐蚀电流存在如下关系:

$$dW = \gamma dh = \frac{M}{nF} i dt, \quad (1)$$

式中:  $dW$  为  $dt$  时间内钢筋单位表面面积的质量损失,  $g$ ;  $M$  为铁的原子量,取  $56 \text{ g/mol}$ ;  $n$  为锈蚀产物中铁离子所带的电荷数,  $n = 3$ ;  $i$  为  $t$  时刻的腐蚀电流密度,  $F$  为法拉第常数,  $\gamma$  代表铁的密度,  $dh$  为  $dt$  时间内的腐蚀深度  $t$ 。

上式两边同时积分,考虑到  $i$  与  $t$  无关(见式 5) 得腐蚀深度

$$h = \frac{Mit}{\gamma nF}, \quad (2)$$

可见在其余条件不变的情况下,材料的腐蚀深度与腐蚀时间成正比。对于一般处于大气环境中的钢筋混凝土结构而言,其钢筋的锈蚀主要由氧气的扩散来控制,则在钢筋某点处的腐蚀电流密度可表示为<sup>[9]</sup>

$$i = \frac{4}{3} \alpha n_0 F D_{O_2} \frac{C_{O_2}}{x}, \quad (3)$$

式中:  $x$  为计算点到混凝土表面的距离;  $\alpha$  为氧在水膜中的溶解度,其值为  $0.0298$ <sup>[9]</sup>;  $n_0$  为阴极反应单位氧分子得到的电子数,  $n_0 = 4$ ;  $C_{O_2}$  为混凝土表面的氧气浓度,其值可取为  $8.93 \times 10^{-9} \text{ mol/mm}^3$ ;  $D_{O_2}$  为氧气在混凝土中的有效扩散系数,  $\text{mm}^2/\text{s}$ ; 其值可按式计算<sup>[9]</sup>

$$D_{O_2} = 3.1536 \times \left( \frac{32.15}{f_{\text{cuk}}} - 0.44 \right) \times 10^5, \quad (4)$$

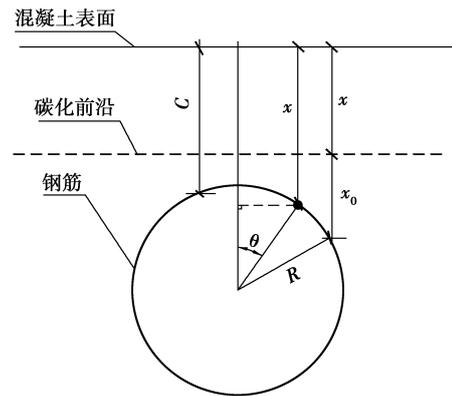
从式(3)可以看出,在钢筋的锈蚀过程中,某一点处的锈蚀电流密度与该点到保护层表面的距离成反比,由于在钢筋的锈蚀过程中,其任意点到混凝土表面的距离不变,因此该点处的腐蚀电流密度也可认为是恒定的。由图 1 可知,锈蚀范围某点处的腐蚀电流密度表示成角度  $\theta$  的函数:

$$i = \frac{4}{3} \alpha n_0 F D_{O_2} \frac{C_{O_2}}{R(1 - \cos\theta) + c}, \quad (5)$$

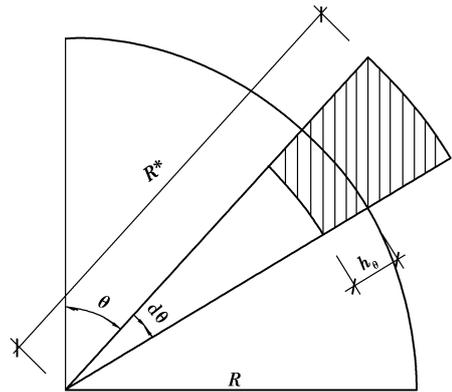
式中  $R$  为钢筋半径;  $c$  为混凝土保护层厚度。

混凝土中的钢筋锈蚀是电化学腐蚀,钢筋锈蚀的前提条件是钢筋表面的钝化膜破坏,而一般大气环境下钢筋钝化膜破坏的主要原因是混凝土保护层碳化,大量工程调查和试验结果表明,并非碳化深度达到钢筋表面钢筋就开始锈蚀,大多数混凝土结构

在碳化未达到钢筋表面时钢筋即开始锈蚀,当然也有碳化已经到达钢筋表面而钢筋也没有锈蚀的情况<sup>[9]</sup>。因此可以定义碳化残量  $x_0$  为钢筋开始锈蚀时碳化前沿到钢筋表面的距离。如果假定混凝土的碳化是导致钢筋锈蚀的唯一因素,则钢筋的锈蚀范围是碳化深度的函数,如果以  $X$  表示碳化深度,则上式中角度  $\theta$  的极限值为:  $\theta_i = \arccos\left(\frac{R+c-X-x_0}{R}\right) = \frac{1}{2}\alpha$ ,  $\alpha$  为锈蚀轮廓对应的圆心角,称为锈蚀角。于是式(5)中的角度  $\theta$  取值范围为:  $0 \leq \theta \leq \theta_i \leq 180^\circ$ 。



(a) 锈蚀过程计算模型



(b) 体积膨胀计算模型

图 1 分析模型示意图

一般大气环境下混凝土碳化过程遵循 Fick 第一扩散定律<sup>[10-14]</sup>,即混凝土的碳化深度与碳化时间存在如下关系:

$$X = K_c \sqrt{t}, \quad (6)$$

式中:  $K_c$  为混凝土的碳化系数,可参考相关文献选取<sup>[7,11,13]</sup>。不同碳化深度所需的碳化时间为

$$t = \left( \frac{X}{K_c} \right)^2, \quad (7)$$

由此得出角度  $\theta$  处的钢筋开始锈蚀的时间  $t_\theta$  为

$$t_\theta = \left( \frac{x - x_0}{K_c} \right)^2 = \left( \frac{R(1 - \cos\theta) + c - x_0}{K_c} \right)^2, \quad (8)$$

在钢筋的锈蚀范围内,  $t$  时刻角度  $\theta$  处的锈蚀时间为

$$\Delta t = t - t_0 = t - \left[ \frac{R(1 - \cos\theta) + c - x_0}{K_c} \right]^2, \quad (9)$$

将其代入式(2)中,则  $t$  时刻,角度  $\theta$  处的钢筋锈蚀深度为

$$h_\theta = \frac{4\alpha n_0 MD_{O_2} C_{O_2}}{3\gamma m [R(1 - \cos\theta) + c]} \cdot \left\{ t - \left[ \frac{R(1 - \cos\theta) + c - x_0}{K_c} \right]^2 \right\}, \quad (10)$$

## 2 混凝土内钢筋的锈蚀体积膨胀过程分析

在一般大气环境下的钢筋混凝土结构中,钢筋锈蚀的前提条件是混凝土碳化至钢筋表面  $x_0$  处,随着碳化深度的增加,锈蚀首先在钢筋靠近混凝土表面的一侧发生,然后逐渐向内部扩展,相应的锈蚀角度也逐渐扩大。

取  $1/4$  模型进行分析,如图 1(b)所示。在任意角度  $\theta$  处取一微小角度  $d\theta$ ,对该部分面积进行分析,如果  $\theta$  处的钢筋锈蚀深度为  $h_\theta$ ,则相应的  $d\theta$  范围内的锈蚀体积为

$$\Delta V = \frac{1}{2} [R^2 - (R - h_\theta)^2] d\theta, \quad (11)$$

如果忽略锈蚀产物沿切向扩展量,则微元  $d\theta$  范围内的钢筋在锈蚀后的总体积为

$$V = \frac{1}{2} (R - h_\theta)^2 d\theta + \frac{m}{2} [R^2 - (R - h_\theta)^2] d\theta = \frac{(R^*)^2}{2} d\theta, \quad (12)$$

由此得出在锈蚀后,该处的扩展半径为

$$R^* = \sqrt{(m - 1)(2Rh_\theta - h_\theta^2) + R^2}, \quad (13)$$

式中的  $m$  为铁锈蚀后的体积膨胀倍数,其取值范围为  $2 \sim 6$ ;  $R^*$  为锈蚀后  $\theta$  处的扩展半径。

将式(9)代入上式,便可得到  $t$  时刻锈蚀角度为  $\alpha = 2\theta_i$  时锈蚀外轮廓线方程:

$$R^* = \left\{ mR^2 - (m - 1) \left[ R - \frac{4\alpha n_0 MD_{O_2} C_{O_2}}{3\gamma m [R(1 - \cos\theta) + c]} \cdot \left[ K_c^2 t - [R(1 - \cos\theta) + c - x_0]^2 \right]^2 \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (14)$$

为了直观地分析钢筋锈蚀后的体积变化过程,这里用实例说明。取钢筋半径  $R = 6 \text{ mm}$ ,保护层厚度  $c = 25 \text{ mm}$ ,混凝土抗压强度标准值为  $16.7 \text{ MPa}$ ,碳化系数按照文献[7]进行选取,则由式(7)可知碳化至钢筋表面的时间  $t_0 \approx 26$  年,锈蚀后的体积膨胀系数  $m = 2$ ,假定碳化至钢筋表面钢筋即开始

锈蚀,即取碳化残量为 0,由式(10)和式(14)计算钢筋不同服役时间各角度下的锈蚀深度及锈蚀后的半径,其结果如图 2 所示:

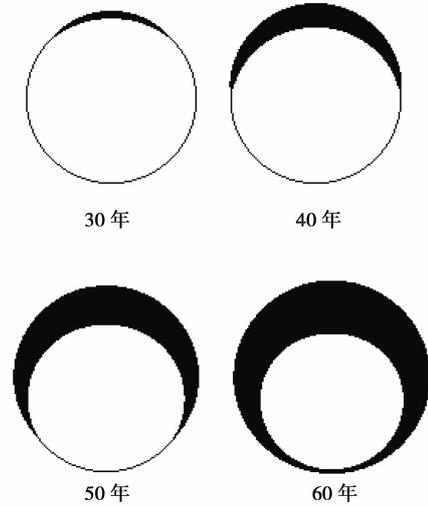


图 2 钢筋锈蚀体积变化过程图

图 2 完整显示了钢筋在混凝土中的锈蚀及其体积和外轮廓线的变化过程。在钢筋的锈蚀过程中,靠近混凝土表面一侧的钢筋由于碳化最先到达,因此该处首先发生锈蚀,且其腐蚀电流密度也最大,因而其锈蚀深度较大,而背离混凝土表面一侧则反之。

## 3 结果对比分析

### 3.1 锈蚀量相同时各模型结果对比分析

为了验证上述模型的合理性,以一个具体实例将文中模型与文献[6-7]中所提出的模型在钢筋有相同锈蚀量时的锈蚀轮廓加以比较。仍然取上节中的参数,对于文献[6-7]中需要用到的钢筋锈蚀量,采用式(11)在  $[-\frac{\alpha}{2}, \frac{\alpha}{2}]$  范围内积分求得。

#### 3.1.1 最大扩展半径比较

将上节计算的不同时间下钢筋的锈蚀角度及其锈蚀量代入到文献[6-7]的模型中,取计算后各自的最大扩展半径列于表 1。

表 1 最大锈蚀半径比较

比较对象	不同服役时间下的最大扩展半径			
	/mm			
服役时间/a	30	40	50	57.5
文献[6]	6.27	7.03	7.74	8.17
文献[7]	6.15	7.0	-	-
文中理论解	6.23	6.76	7.19	7.47

从上表可以看出,在服役时间为 30 年和 40 年时,3 个模型计算结果均比较接近。当服役年限超过 40 年后,锈蚀角度将超过  $180^\circ$ ,由于文献[7]假定锈蚀仅分布在钢筋上半面,因此文献[7]不再适用,文献[6]计算出的最大扩展半径较理论模型略大。

### 3.1.2 不同部位扩展半径比较

由于文献[7]的计算方法不适用于锈蚀角度超过  $180^\circ$  的情况,故在比较过程中仅选取文献[6]的计算结果与文中的结论进行比较。不同服役时间各角度处钢筋锈蚀后的半径变化过程比较如下。

从图 3 可以看出,理论模型计算所得轮廓线与文献[6]结果比较吻合,形状稍平缓,原因可能是一方面文献[6]模型是基于观察实际钢筋锈蚀后轮廓所得,而实际钢筋锈蚀轮廓受多种复杂因素影响,具较大离散性且不易准确测量,因而模型受样本影响较大;另一方面理论模型完全建立在电化学理论之上,考虑的锈蚀条件较理想,与实际情况有所不同。但文中计算结果从理论上证明了文献[6-7]基于实际锈蚀现象所揭示的钢筋不均匀锈蚀规律:锈蚀首先在钢筋距混凝土表面较近的一侧发生,然后逐渐向内部扩展,相应的锈蚀角度也逐渐扩大。因此越靠近顶点位置,其锈蚀时间越长,相应的锈蚀深度也就越大。

### 3.2 最大半径增量相同时各模型结果对比分析

由于文献[6-7]模型计算时的最重要参数为最大半径扩展量,因此采用文献[15]实际测得的钢筋最大半径增量分别采用本文及文献[6-7]的模型进行计算,将所得到的不同角度处的半径增量与实测值进行比较,以验证文中模型。

文献[15]实测的钢筋直径为 7 mm,保护层厚度为 20 mm,细石混凝土强度等级为 C20,最大半径增量为 0.220 1 mm。计算结果见表 2。

可见在  $30^\circ$  处各模型结果均比实测值略大,在  $60^\circ$  处文献[7]较实测值大,文献[6]与理论模型较实测值小,文中模型在  $60^\circ$  处与实测值差别最小。

表 2 半径增量比较

角度 $\theta$	各角度处半径增量/mm		
	$0^\circ$	$30^\circ$	$60^\circ$
实测值	0.220 1	0.133 85	0.050 75
文献[6]	0.220 1	0.150 89	0.024 46
文献[7]	0.220 1	0.163 1	0.053 1
理论模型	0.220 1	0.177 58	0.049 03

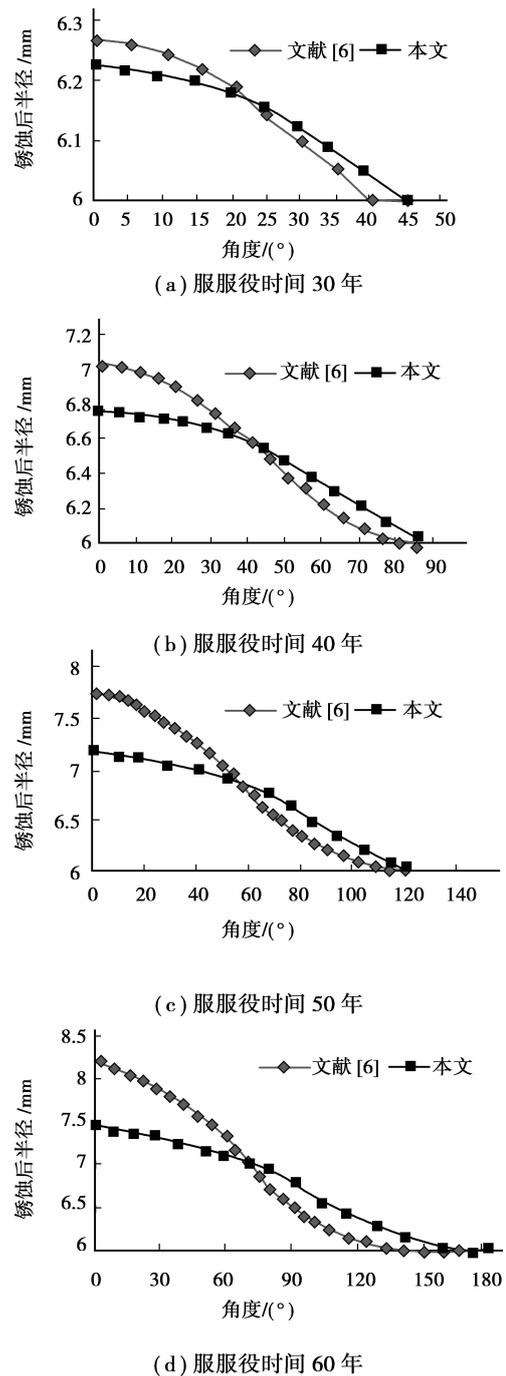


图 3 钢筋锈蚀半径随锈蚀角度的变化

实测钢筋锈蚀可能受多种因素影响<sup>[16]</sup>,而理论模型假定钢筋仅受混凝土碳化引起的电化学腐蚀,且模型中各参数的选取如  $K_c$ 、 $D_{O_2}$ 、 $x_0$  等也有不确定性,实际应用时可先取样对模型参数进行修正。

## 4 结 论

结合钢筋混凝土结构中钢筋锈蚀过程的实际情况,推导出了钢筋非均匀锈蚀轮廓线的理论解,但由于钢筋锈蚀轮廓受环境影响的复杂性及测量上的困

难,仅对非常有限的实测数据进行了对比,尽管理论解有一定偏差,有待更多的实测资料加以验证,但证明了钢筋锈蚀的非均匀性,形象地再现了混凝土中钢筋的腐蚀过程,为进一步研究钢筋混凝土锈胀开裂提供了理论依据。

#### 参考文献

- [1] 王显利,李雪艳,孟宪强. 钢筋混凝土锈胀开裂耐久寿命的预测[J]. 东北林业大学学报,2007,35(8):54-57.  
WANG XIAN-LI, LI XUE-YAN, MENG XIAN-QIANG. Service life prediction for concrete cracking induced by corrosion product expansion of reinforced concrete [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2007,35(8):54-57.
- [2] TAMER E, KHALED S. A model for prediction of time from corrosion initiation to corrosion cracking [J]. Cement and Concrete Composites, 2007, 29 (1): 168-175.
- [3] KAPILESH B, GHOSH Y M, RAMANUJAM. Model for cover cracking due to rebar corrosion in RC structures [J]. Engineering Structures, 2006, 28(1): 1093-1109.
- [4] WILLIAMSON S J, CLARK L A. Pressure required to cause cover cracking of concrete due to reinforcement corrosion[J]. Magazine of Concrete Research, 2000, 52 (6):455-467.
- [5] YOUPING L, RICHARD E W. Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures[J]. ACI Materials Journal, 1998, 95 (6):675-681.
- [6] 夏宁,任青文. 混凝土中钢筋的不均匀锈胀的数值模拟及锈蚀产物量的预测[J]. 水利学报, 2006, 37(1): 70-74.  
XIA NING, REN QING-WEN. Numerical simulation of cover layer cracking due to expansion of non-uniform corrosion of reinforcement bar and prediction of corrosion products[J]. Journal of Hydraulic, 2006, 37 (1):70-74.
- [7] 孙文静,李永和. 在役结构剩余寿命预测[J]. 上海大学学报:自然科学版,2004,10(6):635-648.  
SUN WEN-JING, LI YONG-HE. Quantitative prediction of residual life for in-service structures [J]. Journal of Shanghai University: Natural Science, 2004, 10(6):635-648.
- [8] 牟艳君,袁迎曙,姬永生. 基于钢筋锈蚀膨胀的混凝土应力分析方法[J]. 淮海工学院学报, 2006, 15(1): 66-70.  
MU YAN-JUN, YUAN YING-SHU, JI YONG-SHENG. Concrete stress analysis based on steel corrosion expansion[J]. Journal of Huaihai Institute of Technology, 2006,15(1):66-70.
- [9] 牛荻涛. 混凝土结构耐久性与寿命预测[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [10] 耿大新,李辉. 钢筋混凝土结构寿命预测与评估方法研究[J]. 混凝土,2007(10)18-23.  
GENG DA-XIN, LI HUI. Method to evaluate or to forecast life of reinforced concrete structure [J]. Concrete, 2007,10:18-23.
- [11] MATHER B. Concrete durability [J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(1):3-4.
- [12] ISGOR O B, RAZAQPUR A G. Finite element modeling of coupled heat transfer, moisture transport and carbonation processes in concrete structures[J]. Cement & Concrete Composites, 2004, 26(1):57-73.
- [13] 王春芬,牛荻涛. 钢筋混凝土铁路桥梁碳化寿命预测[J]. 四川建筑科学研究, 2006, 32(3):61-71.  
WANG CHUN-FEN, NIU DI-TAO. Life forecast for carbonation of reinforced concrete railway bridge [J]. Sichuan Building Science, 2004, 34(4):571-579.
- [14] SAETTA A V, VITAIANI R V. Experimental investigation and numerical modeling of carbonation process in reinforced concrete structures-Part I-Theoretical formulation [J]. Cement & Concrete Research, 2004, 34(4): 571-579.
- [15] 袁迎曙,姬永生,牟艳君. 混凝土内钢筋锈蚀层发展和锈蚀量分布模型研究[J]. 土木工程学报, 2007, 40(7):7-8.  
YUAN YING-SHU, JI YONG-SHENG, MOU YAN-JUN. Propagation and model of distribution for corrosion of steel bars in concrete [J]. China Civil Engineering Journal, 2007, 40(7):7-8.
- [16] BERKE N S, HICKS M C. Predicting long-term durability of steel reinforced concrete with calcium nitrite corrosion inhibitor [J]. Cement and Concrete Composites, 2004, 26(3):191-198.

(编辑 陈移峰)