

氯盐环境下钢筋 HRB400 的腐蚀行为与力学性能研究

郑恒伟, 钟 浪, 邬昌丽, 刘金鸿, 施佳欢, 余俊锋

(重庆科技学院, 重庆 401331)

[摘 要] 为了给工程安全使用提供借鉴,采用浸泡腐蚀法研究钢筋 HRB400 在 3.5%NaCl 溶液中裸露和镶入混凝土 2 种环境下腐蚀行为及腐蚀后的力学性能,对于钢筋 HRB400 镶入混凝土这种环境,采用制作钢筋混凝土及模拟混凝土孔隙液 2 种方法,首先将裸露和镶入混凝土 2 种情况下的钢筋 HRB400 浸泡在 3.5%(质量分数)NaCl 溶液中,并将钢筋 HRB400 浸泡在饱和氢氧化钙溶液中[加入 3.5%(质量分数)NaCl 溶液],然后分别计算不同腐蚀时间下各钢筋 HRB400 相应的失重率、腐蚀率,最后采用 MTS 试验机测试钢筋 HRB400 腐蚀后的力学性能。结果显示:随着浸泡腐蚀时间延长,3 种环境下的钢筋 HRB400 平均腐蚀速率逐渐降低,失重率增加,屈服强度、抗拉强度均下降,钢筋 HRB400 在 3.5%NaCl 溶液中裸露或镶入混凝土时伸长率随浸泡时间延长而降低,在饱和氢氧化钙(加入 3.5%NaCl)中则呈现有升有降趋势。

[关键词] 钢筋 HRB400; 氯化钠溶液; 腐蚀率; 屈服强度; 抗拉强度; 伸长率

[中图分类号] TG172 **[文献标识码]** A **doi:** 10.16577/j.issn.1001-1560.2024.0064

[文章编号] 1001-1560(2024)03-0118-05

Study on the Corrosion Behavior and Mechanical Properties of HRB400 Reinforcement Steel in Chloride Environments

ZHENG Hengwei, ZHONG Lang, WU Changli, LIU Jinhong, SHI Jiahuan, YU Junfeng

(Chongqing Science and Technology College, Chongqing 401331, China)

Abstract: In order to provide references for the safe use in engineering applications, the corrosion behavior and post-corrosion mechanical properties of HRB400 reinforcement steel, exposed to a 3.5% NaCl solution in two distinct environments-bare and embedded in concrete were investigated through immersion corrosion test. For HRB400 reinforcement steel embedded in concrete, two approaches were employed; the fabrication of reinforced concrete and the simulation of concrete pore fluid. Initially, HRB400 reinforcement steel, both in bare form and embedded in concrete, was immersed in a 3.5% (mass fraction, the same below) NaCl solution. And soaking the HRB400 reinforcement steel in a saturated calcium hydroxide solution (with addition of 3.5% NaCl solution). The weight loss rate and corrosion rate of the HRB400 reinforcement steel under different corrosion times were calculated separately. Subsequently, the mechanical properties of the corroded HRB400 reinforcement steel were assessed using MTS testing machine. Results showed that as the immersion corrosion time prolonged, the average corrosion rate of HRB400 reinforcement steel across the three environments gradually decreased, while the rate of weight loss increased. Additionally, there was a decline in yield strength, tensile strength, and elongation rate. In the 3.5%NaCl solution, the elongation of HRB400 reinforcement steel in bare form and embedded in concrete decreased with the extension of soak time. However, in the saturated calcium hydroxide solution (with addition of 3.5%NaCl solution), the elongation showed a trend of increasing and decreasing.

Key words: HRB400 reinforcement steel; sodium chloride solution; corrosion rate; yield strength; tensile strength; elongation

收稿日期: 2023-04-09; 修订日期: 2023-07-16

Received: 2023-04-09; Revised: 2023-07-16

基金项目: 国家自然科学基金(11602042); 重庆自然科学基金(cstc2019jcyj-msxm1870); 重庆市基础与前沿研究项目(cstc2015jcyjA50010); 重庆科技学院硕士研究生创新计划项目(YKJCX2120648)资助

Funding: National Natural Science Foundation of China(11602042); Chongqing Natural Science Foundation(cstc2019jcyj-msxm1870); Chongqing Basic and Frontier Research Project(cstc2015jcyjA50010); Chongqing University of Science and Technology Postgraduate Innovation Plan Project(YKJCX2120648)

通信作者: 郑恒伟(1983-), 副教授, 博士, 主要从事复合材料力学, 腐蚀与断裂研究, E-mail: Weiwei11001@126.com

Corresponding Author: ZHENG Hengwei (1983-), Associate Professor, Ph.D., Research Focus: Composite Mechanics, Corrosion and Fracture, E-mail: Weiwei11001@126.com

0 前 言

钢筋混凝土是现代社会最重要的建筑产物之一,是利用钢筋的高抗拉强度特征与混凝土的高抗压强度特征组成的复合材料,广泛应用在现代建筑中^[1,2]。近几年,我国对海洋经济的发展愈发重视,然而氯化物对钢筋混凝土的危害性极大,在海洋含有大量氯化物的情况下,钢筋腐蚀而引发的桥梁、码头等大型建筑物耐久性不足的问题尤其突出,造成了巨大的经济损失,处于海洋中的钢筋混凝土腐蚀破坏的危害性和采取防护措施的重要性引起重视。

在混凝土的养护过程中,水泥通过水化反应生成以饱和氢氧化钙为主的孔隙液。而在碱性溶液的长期作用下,钢筋表面能够生成稳定且具有保护性的钝化膜^[1-3]。钝化膜的存在能够在一定程度上抑制钢筋阳极溶解反应的进行,从而减缓钢筋受到其他外界因素的腐蚀,大大降低钢筋的腐蚀速率。然而随着时间的推移,混凝土自身不断劣化,在以氯离子为代表的侵蚀性离子的作用下,钢筋的钝化膜将遭到破坏并失去对钢筋基体的有效保护,造成钢筋快速腐蚀,从而致使钢筋混凝土的使用寿命达不到设计要求。

虽然钢筋混凝土中会发生一系列的反应使得钢筋受到不同程度的腐蚀,从而减短了混凝土结构耐久性,但是由于混凝土的劣化历程尤为漫长,并且混凝土本身又是一个复杂多变的活性体系,因此在研究钢筋在不同环境下的腐蚀行为时,研究人员往往通过配制混凝土模拟液的方式来直接作用于钢筋试样^[4-8]。而模拟实验便是将钢筋置于混凝土模拟液中浸泡,使得其表面生成一层稳定的钝化膜,而后再就带有钝化膜的钢筋进行后续研究^[6-8]。

关于钢筋混凝土腐蚀行为以及腐蚀后的耐久性问题,李敢等^[9]利用电化学测试探究了氯离子对模拟混凝土孔隙液中钢筋腐蚀行为的影响,Guo 等^[10],Ma 等^[11]研究了各种环境中钢筋腐蚀疲劳扩展的机理,金南国等^[12]采用自主通电加速钢筋锈蚀试验方法模拟了钢筋实际非均匀锈蚀情况,陈嘉帅等^[13]利用外加直流电法对钢筋进行加速研究了锈蚀后的力学性能,张德尧等^[14]研究了环境因素与荷载共同作用下产生的应力腐蚀对混凝土力学性能的影响。相关的这些研究用不同的方法和环境等对钢筋混凝土腐蚀行为及耐久性问题进行了探讨,但研究方法与实际情况贴合较差,且对于钢筋裸露与镶入混凝土 2 种情况下腐蚀行为及腐蚀后力学性能的区别研究较少。因此,本工作采用浸泡

腐蚀法研究了钢筋 HRB400 在 3.5%(质量分数) NaCl 溶液中裸露和镶入混凝土 2 种环境下腐蚀性能及腐蚀后的力学性能,通过对比分析两者钢筋锈蚀行为及锈蚀后的力学性能,希望能为工程安全使用提供借鉴。

1 试 验

1.1 试件制备

试件采用高强度纯钢筋 HRB400 以及钢筋 HRB400 和混凝土组成的钢筋混凝土 2 种试件,试液采用 3.5%(质量分数,下同) NaCl 溶液以及混凝土模拟液(饱和氢氧化钙溶液中加入 3.5%NaCl 溶液)。所用的钢筋 HRB400 试样的直径为 14 mm、长度为 500 mm,是由同一厂家制备;钢筋混凝土试样首先以表 1 中材料配合比进行搅拌,然后倒入直径为 112 mm、长度为 560 mm 的半圆柱体胶管中,把处理过且称好质量的钢筋横截面一半镶入混凝土中,最后对钢筋混凝土进行 28 d 养护。试件钢筋 HRB400 的密度为 7 850 kg/m³,钢筋混凝土试件密度为 2 400 kg/m³。混凝土组成材料的配合比以及试样钢筋 HRB400 的主要化学元素含量如表 1、表 2 所示。

表 1 混凝土材料配合比

Table 1 Mixture of concrete materials	
材料	水 : 水泥 : 砂 : 碎石
配合比	1.00 : 0.49 : 1.60 : 3.39

表 2 钢筋 HRB400 主要化学成分(质量分数) %

Table 2 Main chemical composition of rebar HRB400(mass fraction)							%
元素	C	Si	Mn	S	P	V	Fe
w/ %	0.17~0.25	0.40~0.80	1.20~1.60	≤0.04	≤0.04	0.03~0.06	余量

1.2 试验方法

采用浸泡腐蚀法进行 3 组试验研究 3.5%NaCl 溶液对钢筋 HRB400 在不同条件下的腐蚀行为及力学性能的影响。试验 1,钢筋 HRB400 在 3.5%NaCl 溶液中浸泡试验:以处理好的钢筋 HRB400 为试验材料,使用电子秤称重(精确至 0.001 g)并记录,然后浸泡在制作好的 3.5%NaCl 溶液中,浸泡腐蚀时间为 15,30,45 d。试验 2,钢筋混凝土试样在 3.5%NaCl 溶液中的浸泡试验:制作钢筋混凝土之前使用电子秤称取钢筋质量,再以制作好的钢筋混凝土作为试验材料,使用电子秤称取钢筋混凝土质量并记录,然后将钢筋混凝土浸泡在制作好的 3.5%NaCl 溶液中,浸泡腐蚀时间为 15,30,45 d。试验 3,将处理好的钢筋 HRB400 放入混凝土模拟

液饱和和氢氧化钙溶液中(加入 3.5%NaCl 溶液)进行浸泡,浸泡腐蚀时间为 10,25,40 d。3 组试验的试样经各个时间段浸泡腐蚀后,为除去表面的腐蚀产物,取出先在 5%(体积分数)的稀盐酸溶液中浸泡 1 h(钢筋混凝土试样先去除混凝土再对钢筋 HRB400 进行除锈处理),再经清水冲洗及无水乙醇干燥后称重并记录,以计算腐蚀率、失重率,最后使用液压式万能试验机对 3 组试样进行拉伸试验,测量 3 组腐蚀试验后钢筋的力学性能,包括屈服强度、抗拉强度、伸长率。

2 结果与讨论

2.1 钢筋的腐蚀行为

2.1.1 失重率、腐蚀率

根据试验测出的各个时间段的试样质量,计算出各组试验试样的失重率、平均腐蚀率,计算方法为^[15,16]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \eta(n,t) = \frac{\Delta m(n,t)}{m(n,t_0)} \times \% \\ \Delta m(n,t) = m(n,t_0) - m(n,t) \end{array} \right. \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \nu(n,t) = \frac{\Delta m(n,t)}{A(n,t)t} \\ \Delta m(n,t) = m(n,t_0) - m(n,t) \\ A(n,t) = \pi D(n,t)L(n,t) + \pi D^2(n,t)/2 \end{array} \right. \quad (2)$$

式中: $\eta(n,t)$ 为浸泡腐蚀 t 小时后第 n 根试件的失重率,%; $\nu(n,t)$ 为浸泡腐蚀 t 小时后第 n 根试件的每小时的平均腐蚀速率; $A(n,t)$ 为浸泡腐蚀 t 小时后第 n 根试件的表面积; $D(n,t)$ 为浸泡腐蚀 t 小时后第 n 根试件的直径; $L(n,t)$ 为浸泡腐蚀 t 小时后第 n 根试件的长度; $\Delta m(n,t)$ 为浸泡腐蚀 t 小时后第 n 根试件的质量损失; $m(n,t_0)$ 为第 n 根试件的初始质量; $m(n,t)$ 为浸泡腐蚀 t 小时后第 n 根试件的质量。

利用公式(1)计算得到了 3 组试验试样失重率曲线见图 1。从图 1 可以看出,高强度钢筋 HRB400 在氯化钠环境下失重率随浸泡时间逐渐增加而增大,同时纯钢筋 HRB400 在纯氯化钠溶液中腐蚀失重率最大。

利用公式(2),计算出钢筋 HRB400 在 3 种试验条件下的腐蚀速率数据见图 2。由图 2 可知,钢筋 HRB400 在 3 种条件下每小时平均腐蚀速率随浸泡时间延长逐渐缓慢,同时可以看出在相同时间内钢筋 HRB400 在纯氯化钠溶液中的腐蚀速率最快。

2.1.2 反应机理分析

钢筋 HRB400 浸泡在纯氯化钠溶液中时,不与氯化钠反应,但是氯化钠溶液作为电解质溶液会使钢筋

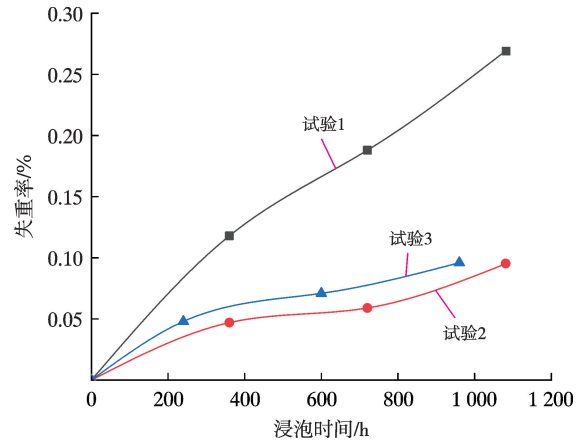


图 1 钢筋 HRB400 的失重率-侵蚀时间曲线

Fig. 1 Weight loss rate VS erosion time of steel Bar HRB400

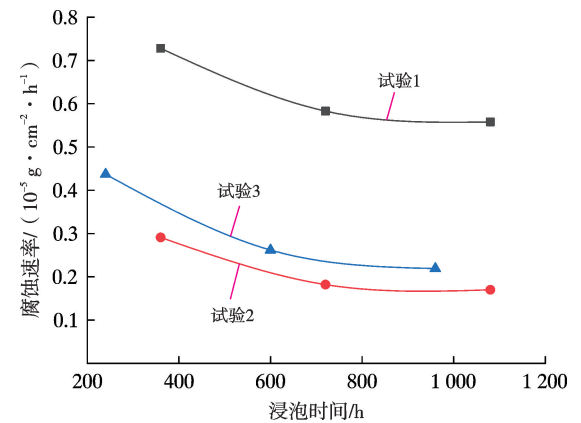


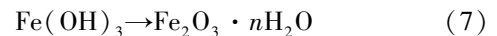
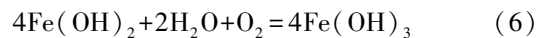
图 2 钢筋 HRB400 每小时的平均腐蚀率

Fig. 2 Hourly average corrosion rate of steel Bar HRB400

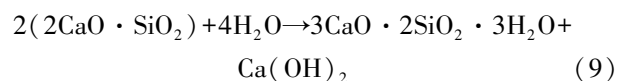
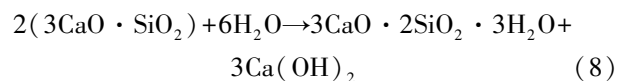
HRB400 发生吸氧腐蚀,进而加速钢筋快速锈蚀,其电极反应方程式如下:



钢筋 HRB400 在氯化钠溶液中上部分反应较快,在上部分会生成大量肉眼可见的棕红色锈物($Fe_2O_3 \cdot nH_2O$),反应方程如下:



试验 2、3 都为钢筋 HRB400 提供碱性环境,试验 2 中钢筋混凝土会发生水化反应生成大量氢氧化钙,其反应方程式:



相对于在中性环境下,钢筋 HRB400 在碱性环境下会迅速钝化成膜,阻止本身进一步锈蚀,腐蚀速率会

变缓慢。

2.2 钢筋的力学性能

2.2.1 屈服强度、抗拉强度

屈服强度是指钢材在受到外力拉力作用下,随着拉力的增大,钢材进入屈服状态开始丧失对变形的抵抗能力,并产生大量塑性变形而所对应的上下波动应力,上屈服强度是钢材发生屈服而力首次下降前的最大应力,下屈服强度是在屈服期间,不计初始瞬时效应时的最小应力。抗拉强度是指钢材能够承受最大拉力所对应的应力,它表示抵抗破坏能力。考虑到实际工程中,钢筋的上屈服强度值不够准确且不够稳定,给工程安全带来了很大隐患,所以本工作测试的钢筋屈服强度是以工程实际中以钢筋的下屈服强度为准,钢筋 HRB400 下屈服强度和抗拉强度与腐蚀时间的关系如图 3 和图 4 所示,随氯化钠侵蚀时间不断延长,3 种条件下钢筋的屈服强度以及抗拉强度都不断减小,其中钢筋在纯氯化钠溶液中浸泡相比其他两组试验时下屈服强度、抗拉强度在浸泡相同时间内的值是最大的。

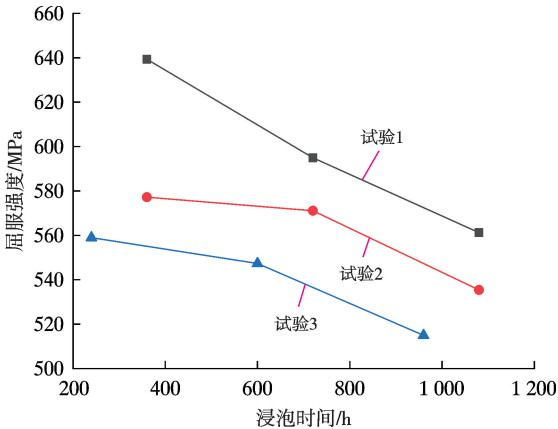


图 3 钢筋 HRB400 的屈服强度与浸泡时间的关系
Fig. 3 Yield strength VS immersion time of steel Bar HRB400

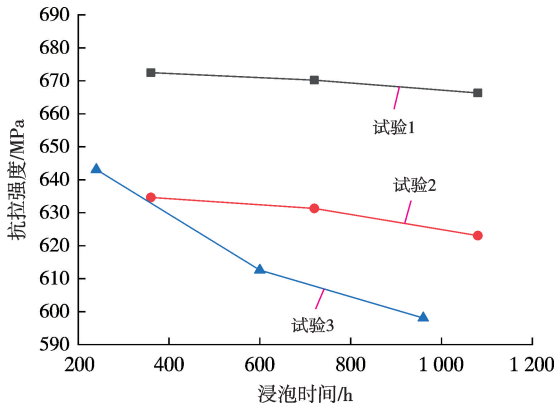


图 4 钢筋 HRB400 的抗拉强度与浸泡时间的关系
Fig. 4 Tensile strength VS immersion time of steel Bar HRB400

2.2.2 伸长率

伸长率是钢材受拉力作用断裂时,伸长量与原有长度的百分比,它表示钢材塑性变形能力。钢筋的伸长率与钢筋含碳量相关,钢筋的含碳量不同伸长率也会相应不同。分别测试了 3 组腐蚀试验后钢筋的伸长率如图 5 所示。其中钢筋 HRB400 浸泡在混凝土模拟液(饱和氢氧化钙溶液中加入 3.5%NaCl 溶液)中时,经过腐蚀后测量其伸长率发现,其值并不是随着浸泡时间增加而逐渐下降而是有升有降,相对于试验 3,另外 2 种条件下钢筋浸泡在纯 3.5%NaCl 溶液中时,不管纯钢筋还是含有混凝土的钢筋的伸长率都是随着浸泡时间的延长而逐渐降低的。

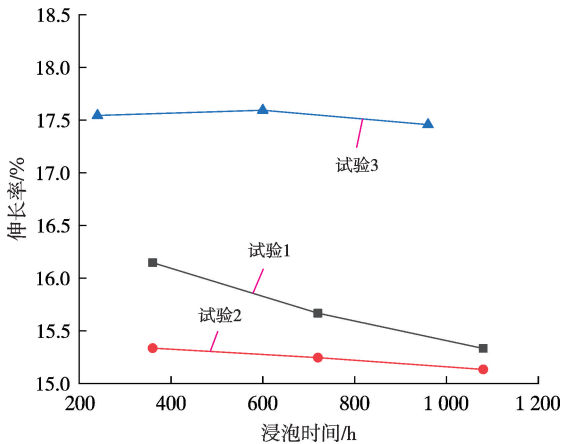


图 5 钢筋 HRB400 的伸长率与浸泡时间的关系
Fig. 5 HRB400 elongation VS immersion time

2.2.3 力学性能结果分析

钢筋浸泡在纯氯化钠溶液中发生全面均匀锈蚀,对钢筋本身结构影响不大,因此试验 1 中钢筋 HRB400 屈服强度、抗拉强度比另外 2 组试验后钢筋的相应强度要大。钢筋混凝土并不是完全密实的,钢筋在混凝土提供的碱性环境下,表面上会形成一层致密的钝化膜,阻止钢筋进一步的腐蚀。由于混凝土并不是完全密实的,所以空气中的二氧化碳以及氯化钠溶液环境中的氯离子都会侵入到混凝土中,继而混凝土中会发生一系列的化学反应,其中碳化反应会减弱钢筋周围碱性环境[Ca(OH)₂+CO₂→CaCO₃+H₂O]。钢筋混凝土中发生的碳化反应会使钢筋周围碱性环境逐步减弱,又因氯离子侵入到钢筋表面的钝化膜上时,能够将钝化膜上的氧原子排挤掉,然后和钝化膜中的阳离子结合成可溶性氯化物破坏钢筋上的钝化膜。二氧化碳的侵入会减弱钢筋所在的碱性环境,氯离子的侵入会局部破坏钝化膜使得钢筋表面上发生局部腐蚀,钢筋表面长时间的局部腐蚀会形成腐蚀坑,导致钢筋结构受到很大影响。在对钢

筋进行拉伸试验时钢筋表面上的腐蚀坑处会形成应力集中,使得钢筋的屈服强度、抗拉强度、伸长率较小。

3 结 论

(1)在 3.5%NaCl 溶液中不管钢筋 HRB400 裸露或镶入混凝土中还是在饱和氢氧化钙溶液中,随浸泡腐蚀时间延长,其失重率逐渐增大,平均每小时腐蚀速率逐渐缓慢,且钢筋 HRB400 裸露情况下在 3.5%NaCl 溶液中失重率最大,平均每小时腐蚀速率最快。

(2)在 3.5%NaCl 溶液中不管钢筋 HRB400 裸露或镶入混凝土中还是在饱和氢氧化钙溶液中,随浸泡腐蚀时间延长,其屈服强度、抗拉强度逐渐降低,且钢筋 HRB400 裸露情况下在 3.5%NaCl 溶液中屈服强度、抗拉强度最大。

(3)钢筋 HRB400 裸露或镶入混凝土中 2 种情况下在 3.5%NaCl 溶液中腐蚀,其伸长率会随着浸泡腐蚀时间延长而逐渐降低,且在 3.5%NaCl 溶液中钢筋 HRB400 在裸露情况下伸长率比镶入混凝土中略大。

(4)钢筋 HRB400 浸泡在饱和氢氧化钙(加入 3.5% NaCl 溶液)中时,随浸泡腐蚀时间增加,其伸长率不是单一降低趋势,而是随浸泡时间逐渐延长呈现有升有降趋势。

[参 考 文 献]

- [1] 商百慧. 混凝土劣化历程对两种钢筋腐蚀行为影响的研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2019.
SHANG B H. A study on the influence of concrete deterioration process on the corrosion behavior of two types of steel bars[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2019.
- [2] 葛 燕,朱锡昶,李 岩. 混凝土结构钢筋腐蚀控制-锌与锌合金的应用[M]. 北京:科学出版社,2015.
GE Y, ZHU X H, LI Y. Corrosion control of reinforcement in concrete structure-application of zinc and zinc alloy [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [3] 侯宝荣. 中国腐蚀成本[M]. 北京:科学出版社, 2017.
HOU B R. Corrosion Cost in China [M]. Beijing: Science Press, 2017.
- [4] 王羊洋,祝 雯,黄石明. 氯离子对混凝土中钢筋锈蚀行为的影响[J]. 广州建筑,2019,47(2):24-28.
WANG Y Y, ZHU W, HUANG S M. Influence of chloride ions on corrosion behavior of steel bars in concrete [J]. Guangzhou Architecture, 2019, 47(2):24-28.
- [5] 曹凤婷,魏 洁,董俊华,等. 20SiMn 钢在恒定 pH 值的碳酸盐溶液中的腐蚀行为[J]. 金属学报, 2016, 50:

674-684.

- CAO F T, WEI J, DONG J H, et al. Corrosion behavior of 20SiMn steel in carbonate solution with constant pH value [J]. Acta Metallurgica Sinica, 2016, 50:674-684.
- [6] 商百慧,马元泰,孟美江,等. 混凝土养护期间 hrb400 钢筋钝化行为研究[J]. 材料研究学报, 2019, 33(9): 659-665.
SHANG B H, MA Y T, MENG M J, et al. Study on passivation behavior of HRB400 steel bars during concrete curing [J]. Journal of Materials Research, 2019, 33(9): 659-665.
- [7] LIU G, ZHANG Y, NI Z, et al. Corrosion behavior of steel submitted to chloride and sulphate ions in simulated concrete pore solution [J]. Construction and Building Materials, 2016, 115:1-5.
- [8] LIU M, CHENG X, LI X, et al. Corrosion behavior of Cr modified HRB400 steel rebar in simulated concrete pore solution [J]. Construction & Building Materials, 2015, 93(15):884-890.
- [9] 李 敢,童水明,喻 强,等. 氯离子对混凝土钢筋腐蚀行为的影响[J]. 黑龙江交通科技, 2016, 39(9): 140-141.
LI G, TONG S M, YU Q, et al. Chloride ion the influence of reinforcement corrosion behavior of concrete [J]. Journal of Heilongjiang Traffic Science and Technology, 2016, 33(9):140-141.
- [10] GUO Z, MA Y, WANG L, et al. Corrosion Fatigue Crack Propagation Mechanism of High-Strength Steel Bar in Various Environments [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(6):04020115.
- [11] MA Y, LIU X, GUO Z, et al. Predicting corrosion fatigue crack propagation behavior of HRB400 steel bars in simulated corrosive environments [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(6):04021127.
- [12] 金南国,何家豪,付传清,等. 钢筋加速非均匀锈蚀试验方法和锈蚀形态研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2020, 54(3):483-490.
JIN N G, HE J H, FU C Q, et al. Study on test method and corrosion form of accelerated non-uniform corrosion of Steel Bar [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering and Technology), 2020, 54(3):483-490.
- [13] 陈嘉帅,贺 其,封伟庆,等. 钢筋锈蚀对其力学性能退化规律的影响研究[J]. 科技创新与应用, 2015(25):15-16.
CHEN J S, HE Q, FENG W Q, et al. Study on the effect of Steel Corrosion on the degradation of Mechanical Properties [J]. Science & Technology Innovation and Application, 2015(25):15-16.

(下转第 129 页)

- Technology, 2020, 12(4): 1-11.
- [6] 王 勇, 郑玉贵, 王建强, 等. 铁基非晶涂层在 NaCl 和 H_2SO_4 溶液中的钝化行为[J]. 金属学报, 2015, 51(1): 49-56.
- WANG Y, ZHENG Y G, WANG J Q, et al. Passivation behavior of Fe-based amorphous coatings in NaCl and H_2SO_4 solution[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2015, 51(1): 49-56.
- [7] 屈怀超, 白江虎, 薛海军. 铁基非晶带材 1K101 在氯离子溶液中的腐蚀行为研究[J]. 重型机械, 2021, 69(4): 20-24.
- QU H C, BAI J H, XUE H J. Corrosion Behavior of Fe-based Amorphous Strip 1K101 in Chloride Solution [J]. Heavy Machinery, 2021, 69(4): 20-24.
- [8] ZHANG H, GONG Y, ZHANG B, et al. Corrosion and adhesion behaviors of HVOF-sprayed Fe-based amorphous coatings for marine applications[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2019, 28(1): 283-290.
- [9] MA H R, LI J W, CHANG C T, et al. Passivation behavior of Fe-based amorphous coatings prepared by high-velocity air/oxygen fuel processes [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2017, 26(8): 2 040-2 047.
- [10] 刘冬艳, 王 成, 张海峰, 等. 铁基块状非晶合金的制备及性能[J]. 金属学报, 2005, 50(2): 209-213.
- LIU D Y, WANG C, ZHANG H F, et al. Preparation and properties of Fe-based bulk amorphous alloys [J]. Acta Metall Sin, 2005, 50(2): 209-213.
- [11] LU W, WANG D, WANG Q, et al. Sensitivity of corrosion behavior for Fe-based amorphous coating to temperature and chloride concentration [J]. Coatings, 2021, 11(3): 331-344.
- [12] REBAK R B, DANIEL DAY S, LIAN T, et al. Environmental testing of iron-based amorphous alloys[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2008, 39(2): 225-234.
- [13] 曹楚南, 张鉴清. 电化学阻抗谱导论[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- CAO C N, ZHANG J Q. Introduction to electrochemical impedance spectroscopy[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [14] 于 洋, 陈 吉, 史艳华, 等. 沉积时间对纳米晶 Ni-Fe 合金电沉积层耐蚀性的影响[J]. 电镀与环保, 2011, 31(6): 23-26.
- YU Y, CHEN J, SHI Y H, et al. Effect of deposition time on corrosion resistance of electrodeposited nanocrystalline Ni-Fe alloy [J]. Electroplating and Environmental Protection, 2011, 31(6): 23-26.
- [15] 孙 波, 徐安桃, 张振楠, 等. 基于 EIS 特征参数的有机涂层腐蚀行为研究[J]. 军事交通学院学报, 2016, 18(9): 89-94.
- SUN B, XU A T, ZHANG Z N, et al. Corrosion Behavior of Organic Coatings Based on EIS Characteristic Parameters [J]. Journal of Military Transportation University, 2016, 18(9): 89-94.
- [编校: 魏兆军]

(上接第 103 页)

- [14] LIU H, SUN S, ZHANG T, et al. Effect of Si addition on microstructure and wear behavior of AlCoCrFeNi high-entropy alloy coatings prepared by laser cladding[J]. Surface and Coatings Technology, 2020, 405(10): 126522.
- [15] ELHEFNAWAY M, SHUAI G L, LI Z, et al. On dry sliding wear of ECAPed Al-Mg-Zn alloy: Wear rate and coefficient of friction relationship [J]. Alexandria Engineering Journal, 2021, 60(1): 927-939.
- [16] 马 瑞, 李克用, 周 娟, 等. Ni 对 Fe_3Si 化合物硬度影响的微观组织结构和电子结构研究[J]. 原子与分子物理学报, 2017, 34(4): 793-798.
- MA R, LI K Y, ZHOU J, et al. Microstructure and electronic structure study of the effect of Ni on the hardness of Fe_3Si compounds [J]. Journal of Atomic and Molecular Physics, 2017, 34(4): 793-798.

[编校: 郑 霞]

(上接第 122 页)

- YOU C, CHEN M F, SUN J S, et al. Study on the organisation and anti-temperature oxidation mechanism of Fe-Cr-Si alloy spray weld layer [J]. Weapon Materials Science and Engineering, 2003(6): 23-25.
- [14] 张德尧, 张永军. 应力腐蚀对混凝土结构力学性能影响[J]. 低温建筑技术, 2015, 37(1): 37-39.
- ZHANG D Y, ZHANG Y J. Stress corrosion of concrete structure mechanics performance influence [J]. Cryogenic Architectural Technology, 2015(1): 37-39.
- [15] LI S, XU Y, ZHU S, et al. Probabilistic deterioration model of high-strength steel wires and its application to bridge cables[J]. Structure and Infrastructure Engineering, 2014, 11(9): 1 240-1 249.
- [16] SUN H, XU J, CHEN W, YANG J. Time-Dependent Effect of Corrosion on the Mechanical Characteristics of Stay Cable [J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(5): 04018019.
- [编校: 魏兆军]