

文章编号:1007-9629(2025)03-0276-07

碳化对带裂缝混凝土中钢筋腐蚀的影响

宋昌坤¹, 张志成¹, 江乐鑫², 李晓珍², 柳俊哲^{1,2,*}

(1. 青岛农业大学 建筑工程学院, 山东 青岛 266109;

2. 宁波大学 土木工程与地理环境学院, 浙江 宁波 315211)

摘要:为探究碳化作用下带裂缝混凝土中钢筋的腐蚀特征,通过控制裂缝参数,研究了带裂缝硬化水泥浆体的碳化规律,分析了碳化作用下带裂缝硬化水泥浆体中钢筋的腐蚀面积率、失重率和电化学腐蚀参数特征.结果表明:养护早期带裂缝水泥硬化浆体的裂缝宽度相较于水灰比对钢筋腐蚀的影响更为显著,养护后期裂缝宽度对钢筋腐蚀的影响仍逐渐增加,并占主导地位;碳化作用下带裂缝水泥硬化浆体的 Nyquist 图存在 2 个容抗弧,其中低频区容抗弧随着碳化龄期的增加逐渐收缩,钢筋表面双电层的传递电阻降低,钢筋开始脱钝;在一定的裂缝宽度范围内,较小的水灰比可以抑制硬化水泥浆体中的钢筋腐蚀.

关键词:带裂缝混凝土;碳化;裂缝参数;水灰比;钢筋腐蚀

中图分类号:TU528.571

文献标志码:A

doi:10.3969/j.issn.1007-9629.2025.03.011

Effect of Carbonization on Corrosion of Steel Bars in Concrete with Cracks

SONG Changkun¹, ZHANG Zhicheng¹, JIANG Lexin², LI Xiaozhen², LIU Junzhe^{1,2,*}

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Qingdao Agricultural University, Qingdao 266109, China;

2. School of Civil and Environment Engineering and Geography Science, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

Abstract: In order to explore the corrosion characteristics of steel bars in cracked concrete under carbonation, the carbonation law of hardened cement pastes with cracks under carbonation was studied by controlling crack parameters, and the corrosion area rate, weight loss rate and electrochemical corrosion parameter characteristics of steel bars in hardened cement pastes with cracks were clarified. The results show that the crack width of the hardened cement paste with cracks in the early stage of curing has a more significant effect on the corrosion of steel bars than the water-cement ratio, and the influence of the crack width on the corrosion of steel bars gradually increases and plays a dominant role in the later stage of curing. There are two capacitive arcs in the Nyquist diagram of a cracked hardened cement paste under carbonization. As the age of carbonization increases, the capacitive arc resistance in the low-frequency region gradually shrinks, the transfer resistance of the electric double layer on the surface of the steel bar decreases, and the steel bar begins to remove the passivate film. Within a certain range of crack width, when the water-cement ratio is small, the corrosion of steel bars in hardened cement pastes can be suppressed.

Key words: concrete with crack; carbonization; crack parameter; water-cement ratio; corrosion of steel bar

钢筋混凝土结构在水化热、干燥收缩、干湿交替、冷热交替、突加荷载等不利因素的作用下,会产生不同程度的裂缝,降低其耐久性^[1-2]. 由于水泥在水化过程中生成大量的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 使混凝土孔隙中充

收稿日期:2024-03-15; 修订日期:2024-09-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52178223,51778302);浙江省教育厅科研项目(Y202146609)

第一作者:宋昌坤(2001—),男,山东青岛人,青岛农业大学硕士生. E-mail:15563951073@163.com

通讯作者:柳俊哲(1964—),男,黑龙江哈尔滨人,青岛农业大学教授,博士生导师,博士. E-mail:junzhe.liu@163.com

满了饱和碱性溶液,该碱性介质对混凝土内钢筋具有良好的保护作用,使钢筋表面生成一层由 Fe_2O_3 和 Fe_3O_4 组成的致密钝化膜^[3-4]。

多项研究^[5-7]表明,混凝土碳化是引起钢筋混凝土结构中钢筋腐蚀的主要原因之一。混凝土裂缝为外界环境中 CO_2 进入结构内部提供了通道,导致结构内部碳化进程加快,钢筋表面水泥浆碱性降低,钢筋腐蚀加快。目前,国内外对带裂缝混凝土研究较为广泛,主要集中在裂缝产生的原因、裂缝控制与修复、数值模拟及带裂缝混凝土中钢筋的腐蚀模型等^[8-10],而对于碳化条件下带裂缝混凝土中钢筋腐蚀的研究较少。因此,研究碳化作用下带裂缝混凝土内钢筋的腐蚀机理,对改善钢筋耐腐蚀性能显得尤为重要^[11-12]。

本文分析了带裂缝水泥硬化浆体的物相组成,表征了硬化水泥浆体的碳化深度,利用交流阻抗Nyquist曲线、Tafel曲线、自然电位、钢筋失重率和腐蚀面积率评价了带裂缝硬化水泥浆体中钢筋的腐蚀程度,阐明了裂缝宽度对硬化水泥浆体中钢筋腐蚀的影响,为钢筋混凝土结构的耐久性设计提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 原材料

水泥为宁波海螺水泥有限公司生产的P·O 42.5普通硅酸盐水泥;钢筋为宁波浙东建材厂生产的直径为8 mm的HPB 300级光圆钢筋。

1.2 试件制备

试件的水灰比(m_w/m_c)设为0.30,裂缝宽度(W_{crack})设为0.1、0.2和0.3 mm。

钢筋去钝化处理:首先,将钢筋用质量分数为10%的柠檬酸铵溶液浸泡5 d后,用清水冲洗干净并放入烘箱中烘干;然后,依次使用粒度为38、25、23 μm 的砂纸打磨至光亮;最后,用保鲜膜包裹备用。

裂缝的产生:将不同厚度(0.1、0.2、0.3 mm)的薄铜片插入新拌水泥浆中15 mm,水泥浆初凝前将薄片拔出,拔出后的空隙即为裂缝。

用于测定Nyquist曲线和Tafel曲线的试件,采用尺寸为50 mm×50 mm×50 mm的模具,浆体浇筑模具后静置5 min,随后将钢筋插入试件中央,并将不锈钢丝网插入试件一侧^[13-14],静置24 h后脱模并标准养护至规定龄期,最后进行相关测试。成型前后试件的示意图如图1所示。

为测定钢筋的失重率、腐蚀面积率及自然电位值,制备尺寸为100 mm×100 mm×280 mm的试件

(见图2)。将钢筋插入水泥浆体中,静置24 h脱模后将裸露在外的钢筋用环氧树脂包裹。试件标准养护28 d后,用于检测试件中钢筋在碳化7、14、28、90、120、180、240、330 d的自然电位,并在360 d后将试件压碎,测定钢筋失重率和腐蚀面积率。

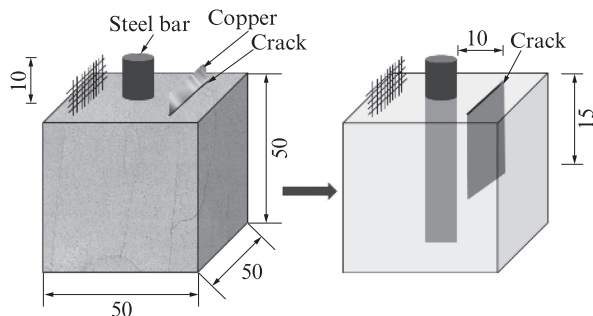


图1 用于测定Nyquist曲线和Tafel曲线的试件示意图
Fig. 1 Schematic diagram for test of Nyquist and Tafel curves (size: mm)

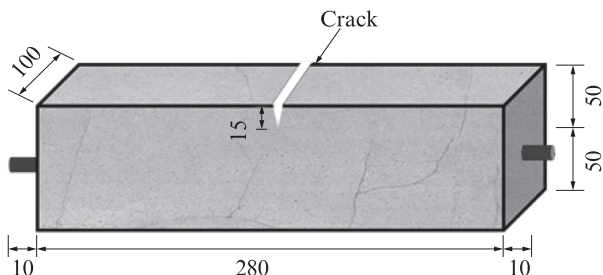


图2 用于测定钢筋自然电位、失重率和腐蚀面积率的试件示意图
Fig. 2 Schematic diagram for test of spontaneous potential, corrosion area rate and weight loss rate of steel bars (size: mm)

1.3 测试方法

1.3.1 X-射线衍射仪(XRD)

XRD采用日本Rigaku Smartlab SE型号仪器,测试范围为 $5^\circ \sim 90^\circ$,扫描速率为 $5^\circ/\text{min}$,光源为Cu-K α 射线,电流为40 mA,管电压为40 kV。

1.3.2 电化学工作站

本试验通过交流阻抗谱法(EIS)和线性极化法(Tafel)评价钢筋腐蚀状态^[15-17],利用普林斯顿PARSTAT3000A型电化学工作站检测硬化水泥浆体(标准养护28 d后)在碳化0、7、14、28、90 d时的电化学参数,利用ZSimpWin软件拟合分析相应的电化学参数,并将测得的电化学参数进行拟合处理,最后分析其腐蚀程度。交流阻抗谱(EIS)的频率范围为1 Hz~10 kHz,幅值为5 mV,应用电压范围为 $\pm 6 \text{ V}$ ^[18]。

采用线性极化法测试时,从相对开路电位 -10 mV 至 $+10 \text{ mV}$ 进行扫描,扫描速率为 $9 \text{ mV}/\text{min}$ 。数据采集后采用ZView软件分析其极化曲线,

解析各元件参数,评价钢筋锈蚀程度,测量硬化水泥浆体中钢筋在相应碳化龄期下的电化学参数。

1.3.3 自然电位法

自然电位法是利用电化学原理来判断混凝土中钢筋腐蚀程度的一种方法。钢筋锈蚀后,钢筋表

面会形成腐蚀电流,钢筋表面与混凝土之间形成电位差,电位差的大小与腐蚀概率有关,根据 ASTM C876-15 *Standard test method for corrosion potentials of uncoated reinforcing steel in concrete* 钢筋电位与腐蚀概率之间的关系如表1所示。

表1 钢筋电位与腐蚀概率之间的关系

Table 1 Relationship between the potential and the corrosion probability of steel bars

Measuring frequency potential/mV	Probability of steel corrosion
> -200	$< 10\%$
$[-200 \sim -350]$	Indeterminacy
< -350	$> 90\%$

1.3.4 钢筋失重率和腐蚀面积率^[19-20]

(1)钢筋失重率 R 将试件压碎,取出钢筋后称重,记为 m_0 ;再将钢筋浸泡在柠檬酸铵溶液中,去除表面腐蚀物,用水冲净后,烘干表面水分并称重,记为 m ,利用式(1)计算:

$$R = \frac{m_0 - m}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

(2)钢筋腐蚀面积率 P 将试件压碎取出钢筋,两端各截去30 mm,用透明硫酸纸包裹钢筋并将腐蚀部分涂黑,利用相关软件通过式(2)计算 P :

$$P = \frac{s}{s_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: s_0 为钢筋原表面积, mm^2 ; s 为钢筋腐蚀面积, mm^2 。

2 结果与分析

2.1 碳化作用下水化产物的演变

图3为碳化14 d时试件(水灰比0.35)裂缝(裂缝宽度0.2 mm)面下不同距离处水泥硬化浆体的XRD图谱。由图3可见,碳化作用下,距裂缝面越近,该处的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰强度越低;同时,水化产物中出现了碳酸盐物质的衍射峰,主要以方解石为主;在距裂缝面10 mm处,浆体中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的衍射峰极弱,说明距裂缝面10 mm以内的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 几乎完全被碳化,这一区域可被认为是完全碳化区;距裂缝面15、20 mm处的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 仍有部分未被碳化,这一区域可被认为是部分碳化区。

2.2 水灰比对碳化深度的影响

图4为水灰比对带裂缝硬化水泥浆体碳化深度的影响。由图4可见,当碳化龄期相同时,随着水灰比的增加,试件的表面及裂缝处的碳化深度均不断增加,且这一趋势随着碳化龄期的增加愈加显著。相较于碳化7、14 d,碳化21 d时,水灰比为0.40的试件的碳化深度明显大于水灰比为0.30和0.35的试件,表

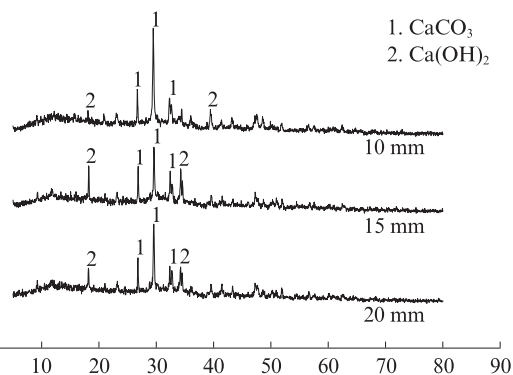


图3 裂缝面下不同距离处水泥硬化浆体的XRD图谱

Fig. 3 XRD patterns of hardened cement pastes located at different depths under crack surfaces

明水灰比对试件的碳化深度影响比较显著。由于裂缝的存在,在裂缝与硬化水泥浆体表面形成双向碳化,裂缝处的碳化影响区随水灰比增加而增大,碳化对裂缝附近硬化水泥浆体的影响范围基本在裂缝左右5 mm之内,在此范围内碳化对硬化水泥浆体影响较为显著。

2.3 碳化时间对钢筋腐蚀的影响

图5为不同水灰比和裂缝宽度下各碳化龄期试件的交流阻抗Nyquist图。由图5可见:(1)拟合曲线有2段容抗弧,即有2个时间常数,说明受碳化作用的带裂缝硬化水泥浆体中的钢筋腐蚀为均匀腐蚀,钢筋表面腐蚀产物分布均匀。(2)碳化14 d时Nyquist曲线低频区斜率明显降低,说明钢筋表面水泥硬化浆体开始碳化;虽然此时钢筋保护层完好,但水泥硬化浆体碱度降低,钢筋表面钝化膜稳定性降低,钢筋出现明显脱钝趋势。(3)随着养护龄期增加,Nyquist曲线向着 Z' 增大的方向移动,一方面可能因为碳化作用下硬化水泥浆体中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与 CO_2 反应生成 CaCO_3 ,硬化水泥浆体内部孔隙减少^[21],孔径细化,硬化水泥浆体内导电通道减少,导致阻抗增大;另一方面,随着碳化龄期增加,钢筋表面水泥浆体碱度降

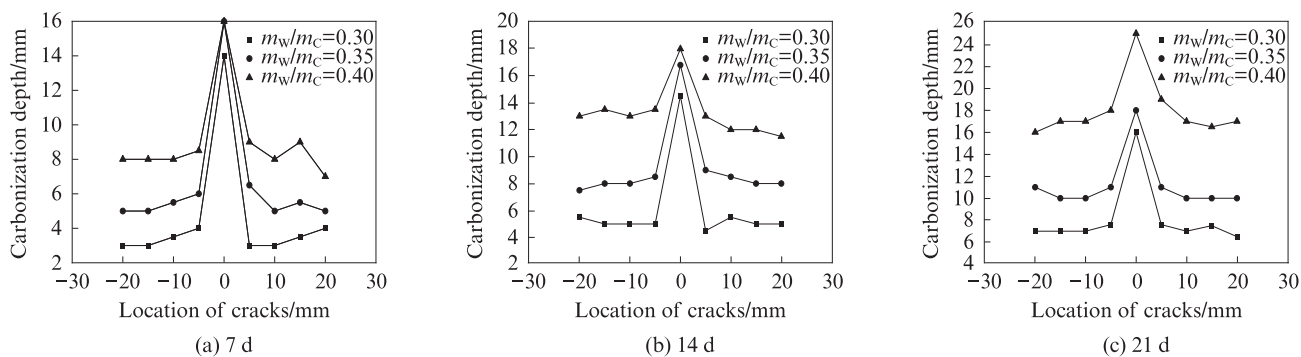


图4 水灰比对带裂缝硬化水泥浆体碳化深度的影响

Fig. 4 Effect of water-to-water ratios on carbonation depth of hardened cement pastes with cracks

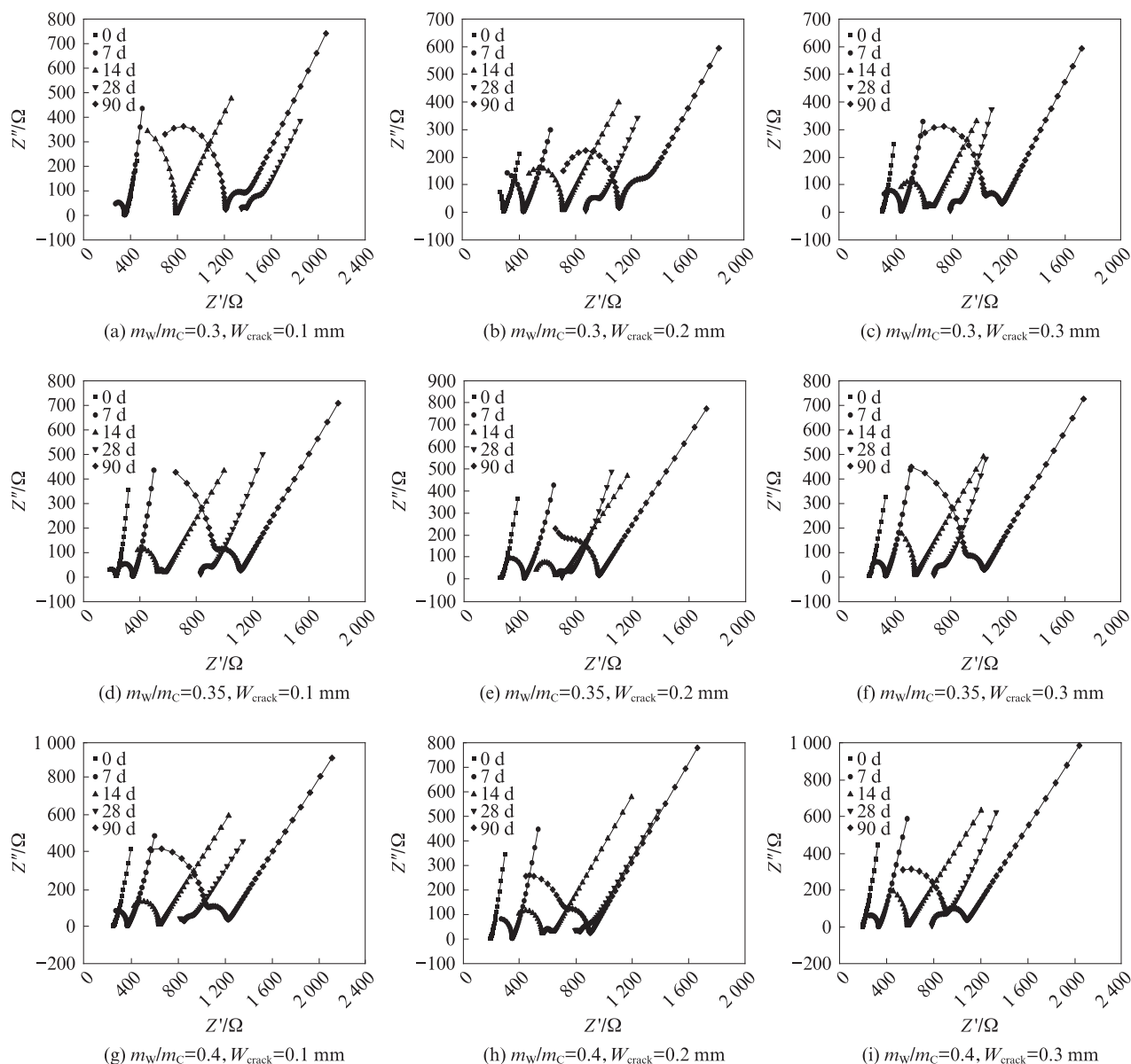


图5 不同水灰比和裂缝宽度下各碳化龄期试件的交流阻抗Nyquist图

Fig. 5 EIS Nyquist curves of specimens with different water-to-cement ratios and crack depth after carbonation

低,诱导致密性较高的FeO转化为质地疏松且性质不稳定的 Fe^{3+} 物质,导致钢筋表面的传递电阻增大。(4)碳化早期,裂缝宽度引起的钢筋腐蚀差异较大,当

裂缝宽度相同时裂缝宽度0.1 mm的硬化水泥浆体中水灰比引起的钢筋腐蚀差异较大,裂缝宽度0.2 mm、0.3 mm的水泥硬化浆体中钢筋腐蚀情况受水灰比影

响较小。(5)养护28 d钢筋Nyquist曲线低频区容抗弧斜率相较于养护90 d有所增大,这是因为钢筋的腐蚀与钝化是可逆反应,虽然钢筋已经脱钝,但由于钢筋表面的硬化水泥浆体碱度较高,钢筋未发生腐蚀。随着养护龄期的增加,碳化90 d时水灰比不同引起的钢筋腐蚀差异较小。

2.4 裂缝宽度对钢筋极化曲线的影响

图6为不同裂缝宽度(0.1、0.2、0.3 mm)的硬化水泥浆体(水灰比0.35)在碳化7、14、28、90 d时内部钢筋的Tafel曲线,图中 J 为净电流密度, E 为电势。由图6可见:(1)随着裂缝宽度的增大,极化曲线向着腐蚀电位降低、腐蚀电流增大方向移动,钢筋腐蚀程度加大;裂缝越宽,极化曲线阳极区斜率越大,钢筋腐蚀速率

越快,说明腐蚀电极在阳极的腐蚀速率加快;当裂缝宽度从0.1 mm增大到0.2 mm时,Tafel曲线变化明显,钢筋腐蚀程度随着碳化龄期的延长而加重;裂缝宽度从0.2 mm增大到0.3 mm时,Tafel曲线变化较小,钢筋腐蚀程度随碳化龄期变化较小。(2)与裂缝宽度0.1 mm的硬化水泥浆体相比,裂缝宽度0.3 mm的硬化水泥浆体中钢筋极化曲线阳极区变化明显。说明裂缝宽度对钢筋腐蚀的影响存在临界值。随着养护龄期增加,不同裂缝宽度的水泥硬化浆体中的钢筋腐蚀电流均有不同程度减小。钢筋腐蚀电流的减小可能是因为随着碳化龄期增加,钢筋表面腐蚀产物堆积,导致钢筋表面阻抗增大,极化曲线发生左移,钢筋腐蚀电流减小。

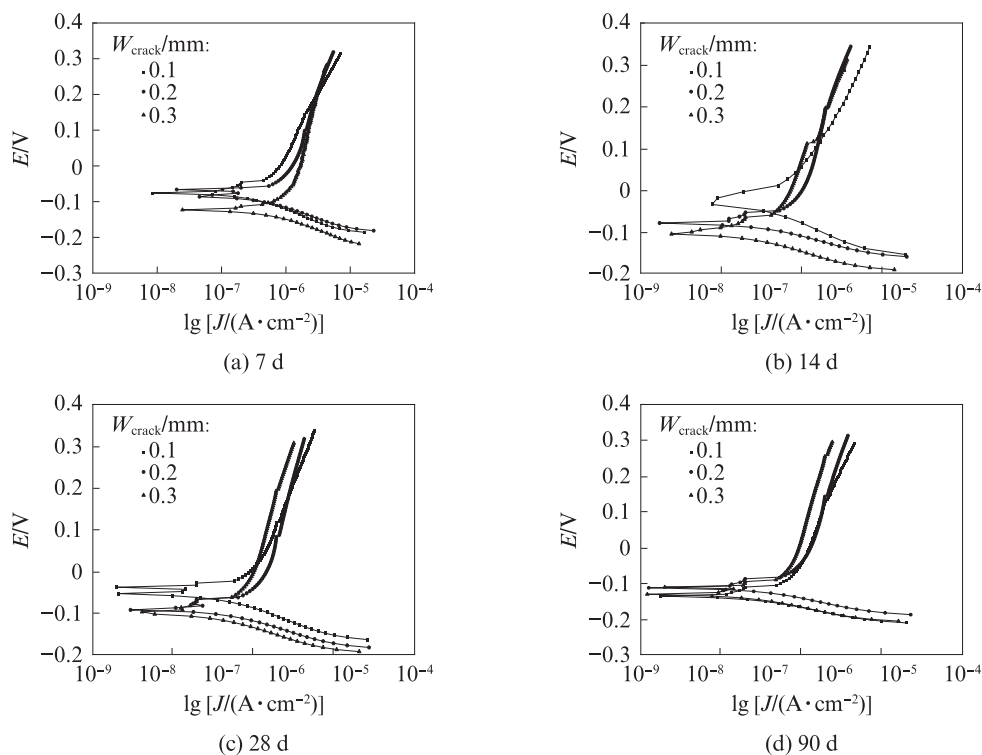


图6 不同裂缝宽度的硬化水泥浆体在碳化7、14、28、90 d时内部钢筋的Tafel曲线

Fig. 6 Tafel curves of steel bars in the hardened cement pastes with different crack widths after carbonization for 7, 14, 28, 90 d

2.5 碳化龄期和裂缝宽度对钢筋自然电位的影响

图7为不同水灰比和裂缝宽度下水泥硬化浆体中钢筋自然电位随碳化龄期的变化趋势。由图7可见:钢筋在碳化早期的自然电位值较高,表现出较高的抗腐蚀性;随着养护龄期增加,自然电位值不断下降,钢筋的自然电位差异值逐渐明显;碳化90 d时,自然电位值基本低于 -350 mV,钢筋大概率发生腐蚀,并且自然电位值随着裂缝宽度和水灰比的增大而降低;碳化超过90 d时,相同水灰比条件下,不同裂缝宽度水泥硬化浆体中钢筋自然电位差异较大,裂缝对钢筋腐蚀的影响逐渐明显;与碳化240 d时自

然电位相比,碳化330 d的自然电位值变化不大,说明碳化到240 d时钢筋附近的硬化水泥浆体完全碳化。

2.6 裂缝宽度对钢筋腐蚀面积率和失重率的影响

图8为带裂缝硬化水泥浆体中钢筋的腐蚀面积率和失重率。由图8可见:(1)对于水灰比在0.30~0.40之间的试件,钢筋的失重率和腐蚀面积率均随着裂缝宽度的增加而增大。(2)对于裂缝宽度在0.1~0.3 mm的试件,钢筋腐蚀面积率和失重率均随水灰比的增加而增大:相对于水灰比为0.30的试件,水灰比为0.40的试件的钢筋腐蚀面积率和失重率分别增加了80%和300%。

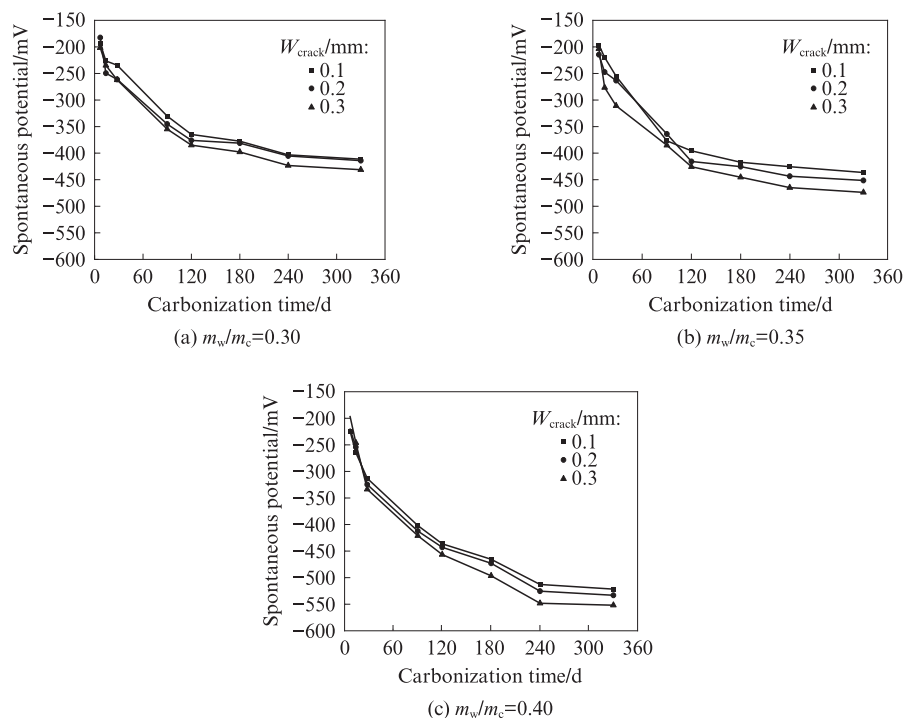


图7 不同水灰比和裂缝宽度下硬化水泥浆体中钢筋自然电位随碳化龄期的变化趋势

Fig. 7 Change of spontaneous potential of steel bars in hardened cement pastes with different water-to-cement ratios and crackwidths

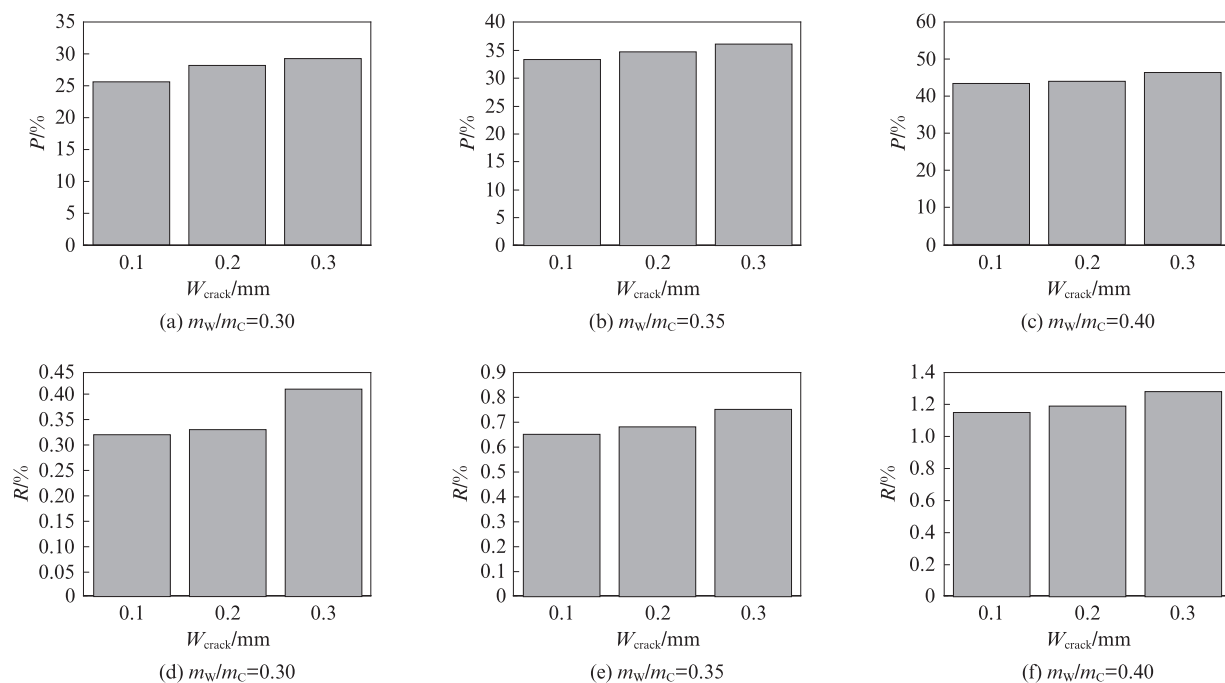


图8 带裂缝水泥硬化浆体中钢筋腐蚀面积率和失重率

Fig. 8 Corrosion area rate and weight loss rate of steel bars in hardened cement paste with cracks

3 结论

(1) 养护早期,相较于水灰比,带裂缝硬化水泥浆体的裂缝宽度对钢筋腐蚀的影响更为明显;养护后期,裂缝宽度对钢筋腐蚀的影响仍逐渐增加,在相同水灰比条件下,裂缝宽度引起的钢筋腐蚀差异逐

步明显,裂缝宽度对钢筋腐蚀的影响占主导地位.在一定的裂缝宽度范围内,较小的水灰比可以有效地抑制钢筋腐蚀.

(2) 碳化作用下带裂缝硬化水泥浆体的 Nyquist 曲线存在 2 个容抗弧,即 2 个时间常数,可以有效评价钢筋钝化与腐蚀程度;随着碳化龄期的增加,低频

区的容抗弧逐渐收缩,容抗弧半径减小,钢筋表面双电层的传递电阻降低,钢筋开始腐蚀。

(3)随着裂缝宽度的增加,钢筋腐蚀电位下移,耐腐蚀性变差;随着碳化龄期的增加,极化曲线阳极区斜率逐渐增大,阴极区斜率逐渐减小,在相等的极化电位下电流密度的变化速度增大,此时电极在阳极溶解过程中遇到的阻力变小,腐蚀速度加快,电阻抗值随着龄期增加而减小,钢筋更易腐蚀。

参考文献:

- [1] TIAN Y P, BAO J W, GUO W A, et al. Autogenous self-healing of cracked concrete exposed to the marine tidal zone [J]. Construction and Building Materials, 2022, 357: 129336.
- [2] CHEN J Y, YE G. A lattice Boltzmann single component model for simulation of the autogenous self-healing caused by further hydration in cementitious material at mesoscale[J]. Cement and Concrete Research, 2019, 123:105782.
- [3] SONG Y R, WIGHTMAN E, BU H, et al. Rebar corrosion and its interaction with concrete degradation in reinforced concrete sewers[J]. Water Research, 2020, 182:115961.
- [4] 张铖,王玲,姚燕,等.逐层磨粉pH值法测定混凝土碳化深度的试验研究[J].材料导报,2022,36(7):21030009.
- ZHANG Cheng, WANG Ling, YAO Yan, et al. Determination of concrete carbonation depth by testing the pH value of layer-by-layer grinding concrete samples[J]. Materials Reports, 2022, 36(7):21030009. (in Chinese)
- [5] LI Y, SU Y Q, TAN X T, et al. Pore structure and splitting tensile strength of hybrid basalt-polypropylene fiber reinforced concrete subjected to carbonation[J]. Construction and Building Materials, 2021, 297:123779.
- [6] WANG L, LI Y J, MEI K Z, et al. Evaluation of combined addition of nitrite and chloride on the corrosion behavior of steel bars in modified magnesium oxysulfate cement paste [J]. Construction and Building Materials, 2024, 422:135794.
- [7] MARCOS-MESON V, MICHEL A, SOLGAARD A, et al. Corrosion resistance of steel fibre reinforced concrete—A literature review[J]. Cement and Concrete Research, 2018, 103:1-20.
- [8] WANG X, BA M F, YI B, et al. Experimental and numerical investigation on the effect of cracks on chloride diffusion and steel corrosion in concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 86:108521.
- [9] KANWAL M, KHUSHNOOD R A, KHALIQ W, et al. Synthesis of pyrolytic carbonized bagasse to immobilize bacillus subtilis; application in healing micro-cracks and fracture properties of concrete[J]. Cement and Concrete Composites, 2022, 126: 104334.
- [10] 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]. Construction and Building Materials, 2019, 223:185-197.
- [11] 王晓磊,梁志权.内埋聚氨酯胶管混凝土自修复效果计算式[J].建筑材料学报,2020,23(4):794-800.
- WANG Xiaolei, LIANG Zhiqian. Calculation formula of self-repairing effect of concrete with polyurethane rubber hose embedded [J]. Journal of Building Materials, 2020, 23(4): 794-800. (in Chinese)
- [12] HUANG A L, CHEN Q, XIE L J, et al. EIS based assessment of electro deposition effect of concrete cracks: Experiment and equivalent model[J]. Construction and Building Materials, 2023, 377:131080.
- [13] WANG X, BA M F, YI B, et al. Experimental and numerical investigation on the effect of cracks on chloride diffusion and steel corrosion in concrete[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 86:108521.
- [14] WANG H, ZHANG A L, ZHANG L C, et al. Hydration process of rice husk ash cement paste and its corrosion resistance of embedded steel bar [J]. Journal of Central South University, 2020, 27:3464-3476.
- [15] 巴明芳,张丹蕾,赵启俊,等.碳化与氯盐复合作用下硫氧镁胶凝材料的护筋性[J].建筑材料学报,2021,24(5):946-951.
- BA Mingfang, ZHANG Danlei, ZHAO Qijun, et al. Corrosion resistance of steel bars of magnesium oxy-sulfate cementitious material under the combined action of carbonation and chloride salt [J]. Journal of Building Materials, 2021, 24(5):946-951. (in Chinese)
- [16] 孙佳,金祖权,秦一琦.钢筋非均匀锈蚀与混凝土开裂试验与数值模拟研究[J].建筑材料学报,2024,27(4):309-319.
- SUN Jia, JIN Zuquan, QIN Yiqi. Experimental and numerical simulation study on non-uniform corrosion of steel bar and concrete cracking[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(4): 309-319. (in Chinese)
- [17] 刘俊阳,王艳,孙丛涛,等.LDHS-BTA的制备及其对钢筋的阻锈性能[J].建筑材料学报,2024,27(6):503-513.
- LIU Junyang, WANG Yan, SUN Congtao, et al. Preparation of LDHS-BTA and its inhibition for corrosion of rebar[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(6):503-513. (in Chinese)
- [18] WANG H, ZHANG A L, SHI F T, et al. Development of relationships between permeability coefficient and electrical and thermal conductivity of recycled aggregates permeable cement concrete[J]. Construction and Building Materials, 2020, 254: 119247.
- [19] 郭群,李晓珍,宋屹林,等.钢筋阻锈剂在碳化钢筋混凝土中的阻锈作用[J].建筑材料学报,2023,26(1):21-28.
- GUO Qun, LI Xiaozhen, SONG Yilin, et al. Effect of steel bar corrosion inhibitors in carbonated reinforced concrete[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(1):21-28. (in Chinese)
- [20] MEI K Z, HE Z M, YI B, et al. Study on electrochemical characteristics of reinforced concrete corrosion under the action of carbonation and chloride [J]. Case Studies in Construction Materials, 2022, 17:e01351.
- [21] WANG D C, XIAO J Z, DUAN Z H, et al. Strategies to accelerate CO₂ sequestration of cement-based materials and their application prospects[J]. Construction and Building Materials, 2022, 314:125646.