第 49 卷第 8 期
2021 年 8 月

硅 酸 盐 学 报
JOURNAL OF THE CHINESE CERAMIC SOCIETY

Vol. 49，No. 8
August，2021

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

DOI：10.14062/j.issn.0454-5648.20200881

混凝土模拟孔溶液中有机钢筋阻锈剂的加速评价及等效性分析

周霄骋[1,2]，穆 松[1,2]，马 麒[1,2]，蔡景顺[1,2]，刘建忠[1,2]，洪锦祥[1,2]

(1. 高性能土木工程材料国家重点实验室，江苏省建筑科学研究院有限公司，南京 210008；2. 江苏苏博特新材料股份有限公司，南京 211103)

摘 要：针对有机钢筋阻锈剂在混凝土模拟液与混凝土中作用效果偏差大的问题，搭建了基于混凝土模拟孔溶液与温湿度可控的钢筋阻锈剂干湿循环加速评价试验箱，研究了 4 种加速试验制度对钢筋锈蚀的加速效果及试验偏差。结果表明：通过精确控制试验环境参数与优化干湿加速制度，可明显降低钢筋阻锈剂试验结果的偏差，且模拟液与混凝土中钢筋的干湿循环加速试验结果具有较好的相关性。同时，有机阻锈剂咪唑啉、羧酸胺、氨基醇均可有效抑制氯盐干湿循环环境钢筋锈蚀的快速发展。

关键词：钢筋；锈蚀；干湿循环；加速评价；等效分析；有机钢筋阻锈剂
中图分类号：TU503　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：0454–5648(2021)08–1713–09
网络出版时间：2021–07–19



Accelerated Evaluation of Organic Steel Corrosion Inhibitor in Simulated Pore Solution of Concrete and Its Equivalence Analysis

ZHOU Xiaocheng[1,2], *MU Song*[1,2], *MA Qi*[1,2], *CAI Jingshun*[1,2], *LIU Jianzhong*[1,2], *HONG Jinxiang*[1,2]

(1. State Key Laboratory of High Performance Civil Engineering Materials, Jiangsu Research Institute of Building Science Co. Ltd, Nanjing 210008, China; 2. Jiangsu Sobute New Materials Co. Ltd., Nanjing 211103, China)

Abstract: In view of the large deviation of the effect of organic steel corrosion inhibitor in simulated pore solution and concrete, a dry-wet cycles test apparatus for accelerated evaluation of organic steel corrosion inhibitor was developed based on the concrete simulated pore solution and the controllable temperature and humidity. Four test systems were used to examine acceleration effects and test deviations of steel corrosion. The deviation of the test results of the organic steel corrosion inhibitors is significantly minimized *via* accurately controlling the test environment parameters and optimizing the acceleration systems. The results of the steel bars in the simulated pore solution and the concrete have a stronger correlation. Also, organic steel corrosion inhibitor, such as imidazoline, carboxylic acid amine and amino alcohol, effectively inhibits the rapid corrosion of steel bars under the condition of dry-wet cycles in chloride salt environment.

Keywords: steel bar; corrosion; dry-wet cycles; accelerated evaluation; equivalent analysis; organic steel corrosion inhibitor

钢筋阻锈剂作为保护钢筋的有效措施，因其经济且便捷的施工方式，在钢筋混凝土腐蚀防护中得到大量应用[1–2]。由于在混凝土中进行钢筋阻锈剂试验往往需要较长的试验周期，所以通常将钢筋浸泡在模拟的混凝土孔溶液开展试验研究，进而通过电化学及浸泡试验来近似等效钢筋的服役状况[3]。尽管如此，在海洋潮差、浪溅作用下，混凝土中钢筋受海水周期性涨落影响，其实际暴露环境为氯盐干湿循环，因此阻锈剂在模拟孔溶液中与干湿循环的混凝土试块中对钢筋锈蚀的抑制作用呈现不同的趋

收稿日期：2020–11–26。　修订日期：2021–01–22。
基金项目：国家自然科学基金-高铁联合基金(U1934206)；“川藏高寒地区隧道衬砌混凝土裂缝控制与抗冻关键技术合同”(院科(川藏)20–16–2)；中国铁路总公司科技研究开发计划课题“川藏铁路关键技术方案及工程对策前期研究”(P2018G047)。
第一作者：周霄骋(1991—)，女，硕士，工程师。
通信作者：穆 松(1982—)，男，博士，高级工程师。

Received date: 2020–11–26.　**Revised date:** 2021–01–22.
First author: ZHOU Xiaocheng (1991–), female, Master, Engineer.
E-mail: zhxc512@126.com
Correspondent author: MU Song (1982–), male, Ph. D., Senior Engineer.
E-mail: musong@cnjsjk.cn

势[4]。模拟孔溶液环境未能较好地等效钢筋的实际服役环境，给快速、准确评价阻锈剂的作用效果带来困难，不利于阻锈剂的筛选和阻锈机理研究。

就混凝土内部钢筋腐蚀环境而言，干湿循环使混凝土电阻率较低且氧气供应充分，该特点与长期干燥或长期湿润状态下混凝土电阻控制和氧扩散控制不同。此外，混凝土内部钢筋表面湿度的周期性变化将导致钢筋腐蚀速度加快[5–6]。因此，采用全浸泡混凝土模拟孔溶液的方法评价海洋潮差、浪溅区混凝土中钢筋阻锈剂的作用效果将难以和实际环境建立较好的相关性，导致试验结果偏差较大。针对上述问题，本研究设计并试制了精确控制环境温湿度、干湿循环时间的阻锈剂加速评价试验箱，优选了重复性好、变异系数小的试验制度，研究了 3 种已知阻锈效果的典型有机阻锈剂的锈蚀面积。其次，开展了含 3 种典型有机阻锈剂的混凝土中钢筋干湿循环加速试验，通过破型试验证明了优化试验制度条件下，基于混凝土模拟孔溶液的干湿加速试验方法具有较好准确性。

1 实验

1.1 有机阻锈剂

咪唑啉阻锈剂属于一种咪唑啉季铵盐。咪唑啉季铵盐中的 N^+对钢筋等金属表面强烈的螯合作用，N3 上烷基疏水碳链取代，能够阻止水分子和氯离子的侵蚀[7–8]。咪唑啉阻锈剂作用下，扫描 Kelvin 探针技术(Scanning Kelvin Probing，SKP)测试结果表明碳钢试样的电位差减小，腐蚀原电池发展得到全面抑制[9]。

羧酸胺阻锈剂属于一种多羟基的羧酸与胺缩合的产物。该阻锈剂通过—OH、—NH^2 在钢筋基体表面化学吸附，同时—C═O 键也加强了分子在金属表面的吸附，从而使得碳钢试样的动电位极化扫描测试结果的点蚀电位降低，阳极极化得到显著抑制，点蚀难以扩展[10–11]。

氨基醇阻锈剂为含有 2 个氮原子和烷基给电子链。其可通过 N 原子与 Fe 原子的相互作用形成化学吸附，同时非极性碳链将靠近碳钢表面，通过表面张力固定在碳钢表面[12–13]；电化学阻抗谱测量结果表明该类型阻锈剂使碳钢试样电荷转移电阻增大，从而抑制锈蚀发展[14–15]。

1.2 加速试验装置

结合试验稳定性及试验操作简便的需求，设计与试制了阻锈剂加速评价试验箱[16]，如图 1 所示。试验箱整体尺寸为 420 mm×520 mm×560 mm，箱内增设加热棒、制冷压缩机，箱门做密封处理，风扇对称设置，实现了试验挂片风量的均衡，且有效保证了箱内风循环，达到了控制箱内温湿度的目的。温度控制范围 20~40 ℃，控制精度±1 ℃，湿度控制范围 40%~80%，控制精度±5%。增加了在线监测装置，并可通过手机进行远程控制，从而实现远程监控。试验箱下方设可推万向轮，方便试验箱的运输。

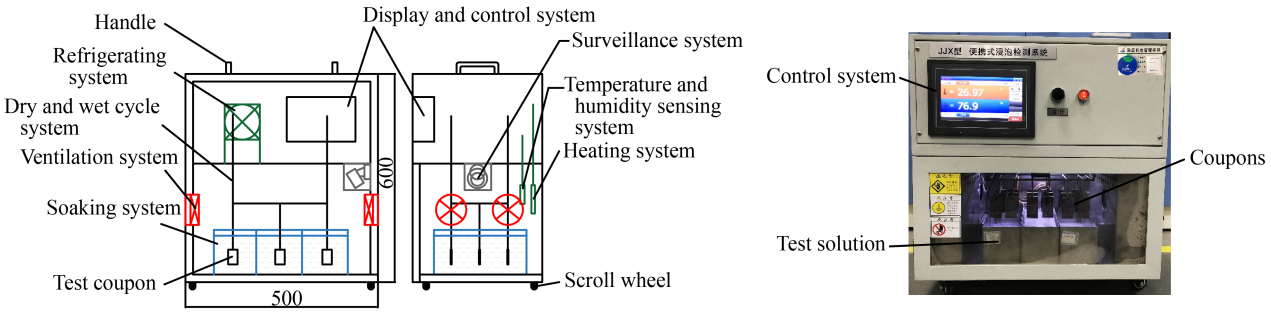


图 1 有机钢筋阻锈剂加速评价试验箱

Fig. 1 Aaccelerated evaluation test apparatus for organic steel corrosion inhibitor

1.3 模拟液干湿循环加速实验

采用 50 mm×25 mm×2 mm 的 Q235 标准腐蚀挂片(I 型)[17]，试验前将挂片进行除油、清洗，吹干后备用。基准模拟液采用含 3.5% NaCl 的饱和 $Ca(OH)_2$ 溶液，阻锈剂模拟液在基准模拟液中添加 0.4% (质量分数)咪唑啉、羧酸胺、氨基醇的阻锈剂。干湿循环试验在阻锈剂加速评价试验箱中进行。试验完成后，取出 Q235 挂片吹干，进行宏观形貌观察，并用 Image-pro plus 6.0 软件对挂片锈蚀面积比进行测量、计算。

1.4 混凝土干湿循环加速试验

选用直径 6 mm、长度 120 mm 的 HPB235 钢筋，表面粗糙度等级为 6.3 μm，钢筋试件采用乙醇清洗后干燥备用。以 3.5% NaCl 拌合基准混凝土及含

0.4% (占胶凝材料)钢筋阻锈剂(咪唑啉、羧酸胺、氨基醇)的混凝土，混凝土配合比及阻锈剂的种类、掺量如表 1 所示。水泥为 P·I 42.5 基准水泥；粉煤灰细度为 0.8% (45 μm 方孔筛筛余)，比表面积 417 m^2/kg；矿粉流动度比 104%，比表面积 380 m^2/kg；细集料为河砂，细度模数为 2.3；粗集料采用粒径 5~16 mm、16~25 mm 的玄武岩，表观密度分别为 2 860、2 870 kg/m^3。

表 1　混凝土干湿循环试验采用的配合比

Table 1　Mix proportion used in wet-dry cycles test of concrete　　kg/m^3

Mix No.	Cement	Slag	Fly ash	Sand	Coarse aggregate (5–16 mm)	Coarse aggregate (16–25 mm)	Water	Inhibitor	Types of inhibitor
1	230	60	60	815	363	674	175.0		
2	230	60	60	815	363	674	173.6	1.4	Imidazoline
3	230	60	60	815	363	674	173.6	1.4	Carboxylic acid amine
4	230	60	60	815	363	674	173.6	1.4	Amino alcohol

钢筋混凝土试块成型过程中采用端头板对钢筋进行定位，24 h 后再在试块两头浇灌砂浆以保护端头钢筋，72 h 后拆模并移至标准养护室中养护，7 d 后混凝土试块转移至 80 ℃烘箱中烘干 24 h，取出并冷却后采用环氧密封材料将砂浆与混凝土缝隙进行密封，待环氧密封材料凝固后进行干湿循环试验。干湿循环在 3.5% NaCl 的盐水中进行，试块浸泡 96 h 后转移至 60 ℃烘箱中干燥 72 h，此为 1 个循环。循环 5 次后剖出混凝土试块中的钢筋，并对钢筋的锈蚀面积进行统计。

1.5　微观观察及腐蚀产物分析

混凝土模拟液中干湿循环后的腐蚀挂片经 HCl 溶液除锈后以无水乙醇清洗吹干；混凝土干湿循环后的试样则是切取钢筋-混凝土截面，经打磨后以无水乙醇清洗吹干。二者的微观腐蚀形貌均采用 QUANTA250 扫描电子显微镜(SEM)进行观察。

混凝土模拟液中干湿循环后腐蚀挂片的锈蚀产物组成分析时，是以无水乙醇清洗吹干后的挂片直接在 X-ray Powder Diffraction (XRD)下扫描；混凝土干湿循环后钢筋的锈蚀产物组成分析时，则是刮取钢筋周围混凝土上附着的产物粉末并进行 XRD 扫描。

2　结果与讨论

2.1　混凝土模拟液干湿循环加速制度

设置 4 种试验箱环境及干湿循环制度的组合(如表 2 所示)。制度 A、B、C 的干湿循环制度相同，均为浸泡 30 min，干燥 60 min。制度 A 始终在室温环境下进行，试样不置于干湿循环试验箱内，而是置于室内，相对湿度随室内环境变化而变化，作为空白对照组；制度 B 将实验箱内相对湿度设置为可使钢筋锈蚀发展较快的 75%；制度 C 将实验箱内相对湿度设置为 45%，有利于 Q235 挂片的快速干燥。制度 D 与制度 B 的温湿度相同，但缩短了干湿循环周期，浸泡 10 min，干燥 10 min。

表 2　试验箱环境及干湿循环制度的组合

Table 2　Combination of test chamber environment and dry-wet cycles system

System number	Cycle system	Temperature/humidity in the test chamber
A	Soaking for 30 min, drying for 60 min	20 ℃, 55%–85%
B	Soaking for 30 min, drying for 60 min	(25±1) ℃, (75±5)%
C	Soaking for 30 min, drying for 60 min	(25±1) ℃, (45±5)%
D	Soaking for 10 min, drying for 10 min	(25±1) ℃, (75±5)%

共进行 20 个干湿循环周期，试验结束后记录不同试验环境及干湿循环制度下 Q235 碳钢挂片的宏观锈蚀形貌，如图 2 所示。制度 A 下 Q235 碳钢挂片的锈蚀较为严重，但各平行试样间锈蚀发展不均匀，这可能是环境温/湿度差较大导致的。制度 B 下 Q235 挂片锈蚀发展充分，各平行试样间锈蚀也较均匀。制度 C 和 D 下 Q235 挂片锈蚀较轻，不利于以其为基准挂片评价阻锈剂的阻锈效果。

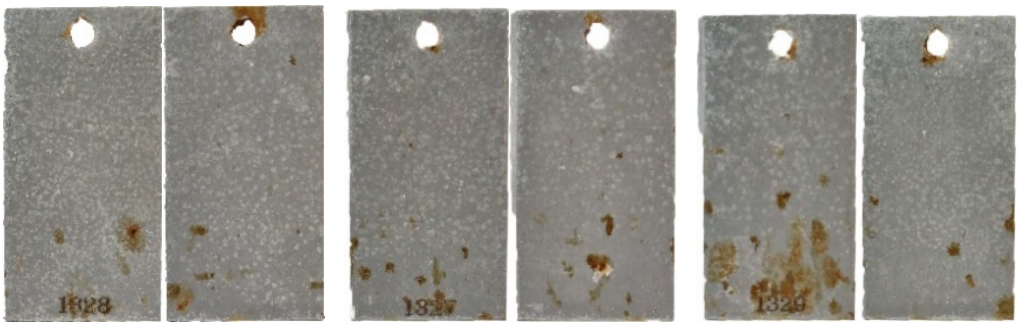
试验结束后各挂片的锈蚀面积及平行试样的离散系数如表 3 所示。由表 3 可知，制度 B 下 Q235 挂片的锈蚀面积最大且平行试样间的离散系数最低。结合图 2 宏观形貌，优选出浸泡 30 min、干燥 60 min、(25±1) ℃、(75±5)%相对湿度的干湿循环制度。



(a) System A



(b) System B



(c) System C



(d) System D

图 2 不同循环制度作用下 Q235 挂片的宏观锈蚀形貌

Fig. 2 Macro-corrosion morphology of Q235 coupons under different circulation systems

2.2 阻锈剂在模拟液中氯盐干湿循环条件下的阻锈效果

采用优选出的制度 B 对 3 种阻锈剂进行阻锈效果加速评价。在基准模拟液(含 3.5%NaCl 的饱和 $Ca(OH)_2$)中分别添加 0.4%咪唑啉、0.4%羧酸胺、0.4%氨基醇有机阻锈剂，试验后挂片的宏观锈蚀形貌如图 3 所示。由图 3 可知，添加了这 3 种有机阻锈剂后，Q235 挂片的锈蚀发展得到有效抑制，表现

为腐蚀挂片锈蚀面积显著降低。咪唑啉阻锈剂作用下挂片锈蚀产物颜色较浅，可能是锈蚀产物较均匀、厚度较薄；羧酸胺和氨基醇阻锈剂作用下挂片在个别点发生锈蚀。

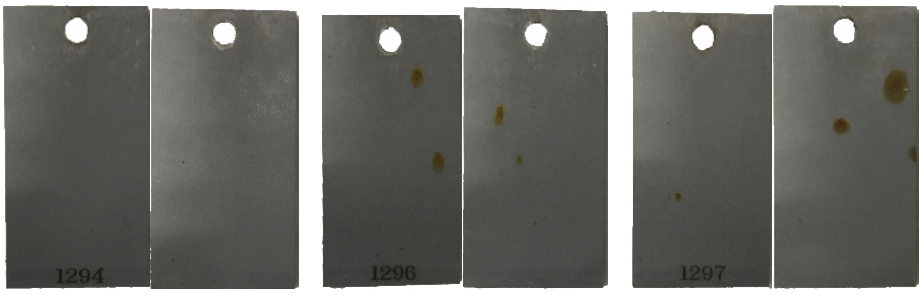
表 3　挂片锈蚀面积及变异系数

Table 3　Corrosion area and coefficient of variation of coupons

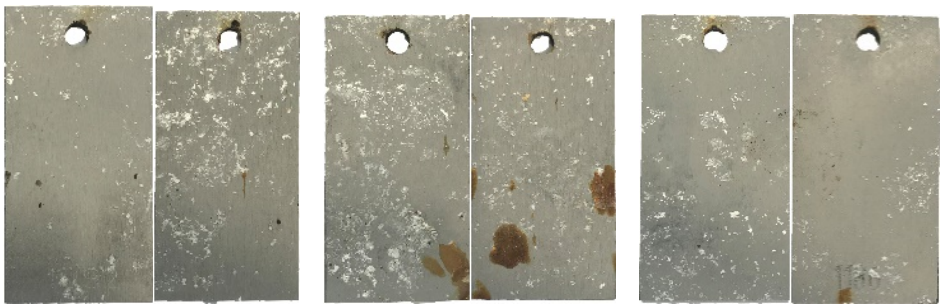
System number	Parallel specimen	Total corrosion area/mm^2	Total corrosion area ratio/%	Average corrosion area ratio of parallel specimens/%	Standard deviation	Coefficient of Variation
A	1	246	9.85	20.30	14.21	0.70
	2	912	36.48			
	3	364	14.58			
B	1	1 389	55.56	59.48	5.14	0.09
	2	1 439	57.57			
	3	1 632	65.30			
C	1	71	2.83	4.55	2.89	0.64
	2	73	2.93			
	3	197	7.89			
D	1	33	1.32	0.57	0.65	1.15
	2	5	0.19			
	3	5	0.20			



(a) 0.4% imidazoline



(b) 0.4% carboxylic acid amine



(c) 0.4% amino alcohol

图 3　制度 B 下含阻锈剂的模拟液中 Q235 挂片的宏观锈蚀形貌

Fig. 3　Macro-corrosion morphology of Q235 coupons in simulated liquid containing inhibitor under system B

Q235 挂片的锈蚀面积统计结果(如表 4 所示)表明，羧酸胺阻锈剂作用下 Q235 挂片的锈蚀面积最少，根据式(1)其阻锈效率为 99.08%；咪唑啉和氨基醇阻锈剂作用下 Q235 挂片锈蚀面积处于相当水平，阻锈效率分别为 97.31%、96.70%。

钢筋的阻锈效率

$$\eta = \frac{S_R - S_I}{S_R} \times 100\% \quad (1)$$

其中：S_I 为阻锈剂组金属的锈蚀面积；S_R 为基准组金属的锈蚀面积。

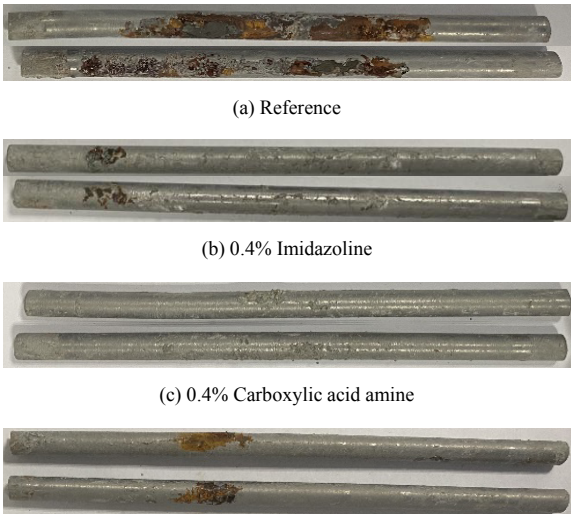
表 4 制度 B 下含阻锈剂的模拟液中 Q235 挂片的锈蚀面积

Table 4 Corrosion area of Q235 in simulated pore solution containing inhibitor under system B

Inhibitor	Total corrosion area/mm^2	Total corrosion area ratio/%
Imidazoline	24	0.94
	46	1.85
	54	2.17
Carboxylic acid amine	1	0.04
	13	0.51
	28	1.10
Amino alcohol	9	0.38
	127	5.08
	11	0.44

2.3 阻锈剂在混凝土氯盐干湿循环条件下的阻锈效果

将混凝土试块剖出，得到混凝土氯盐干湿循环条件下钢筋锈蚀形貌，如图 4 所示。由图 4 可知，基准试块中钢筋发生的锈蚀较为严重，锈蚀面积为 57.23%；咪唑啉、羧酸胺、氨基醇阻锈剂使钢筋的耐蚀性能显著提升，体现为相同干湿循环加速条件下锈蚀面积显著减少(锈蚀面积分别为 1.21%、0.22%、3.48%，如表 5 所示)；羧酸胺阻锈剂阻锈效果最为优异，钢筋基本未发生锈蚀，其阻锈效率达到 99.62%，而咪唑啉和氨基醇阻锈剂的阻锈效率分别为 97.89%、93.92%。



(a) Reference

(b) 0.4% Imidazoline

(c) 0.4% Carboxylic acid amine

(d) 0.4% Amino alcohol

图 4 混凝土氯盐干湿循环环境下 HPB235 钢筋的宏观锈蚀形貌

Fig. 4 Macro-corrosion morphology of HPB235 in chlorine salt dry-wet cycling environment of concrete

表 5 混凝土氯盐干湿循环环境下 HPB235 钢筋的锈蚀面积

Table 5 Corrosion area of HPB235 in chlorine salt dry-wet cycling environment of concrete

Sample	Parallel specimen	Total corrosion area/mm^2	Total corrosion area ratio/%	Average corrosion area ratio of parallel specimens/%
Reference	1	1 273.73	56.34	57.23
	2	1 313.98	58.12	
Imidazoline	1	26.68	1.18	1.21
	2	2 8.02	1.24	
Carboxylic acid amine	1	4.75	0.21	0.22
	2	5.20	0.23	
Amino alcohol	1	77.77	3.44	3.48
	2	79.58	3.52	

结合模拟液中氯盐干湿循环条件下钢筋的宏观锈蚀形貌、锈蚀面积和阻锈效率等数据，发现混凝土中钢筋的干湿循环锈蚀发展及阻锈剂对锈蚀的抑制效果与模拟液中制度 B 条件下的结果有较好的一致性。

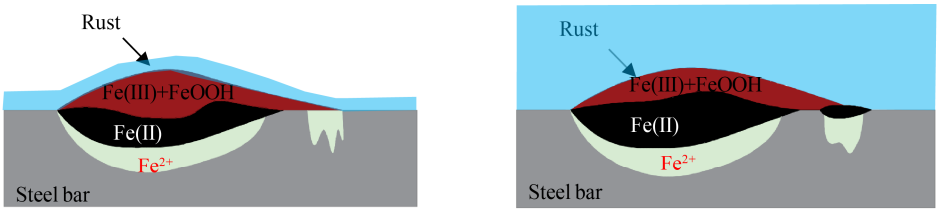
2.4 讨论与分析

钢筋锈蚀是钢筋表面 OH^-、阻锈剂分子吸附与氯离子侵蚀破坏钝化膜的竞争吸附作用的结果[14]；氯盐加入模拟液中，氯离子会破坏钝化膜较薄弱的位置，进而引发钢筋基体发生腐蚀形核、发展。

干湿循环条件下钢筋锈蚀机制如图 5 所示。碳钢在干燥过程中，表面形成湿润薄液膜，此时钢筋表面湿度较高，氧气充足，氧溶解穿过薄液膜供给到阴极表面，促进钢筋锈蚀发展，并生成可还原性腐蚀产物 γ-FeOOH；在浸泡周期，钢筋基体继续阳极溶解并消耗氧气，即便氧气消耗殆尽，可还原性腐蚀产物 γ-FeOOH 的增多仍会促进二价铁氧化物的生成，锈蚀向新生锈蚀区扩张，使循环初期钢筋锈蚀得以迅速发展，且腐蚀持续更长时间，加速了钢筋腐蚀的整个过程[18]。模拟液制度 B 中，在干燥周期设定湿度为 75%，这有利于钢筋表面薄液膜的形成；浸泡周期时间较长则有利于模拟实际混凝土浸泡过程中继续消耗氧气带来的阳极溶解和缺氧带来的 γ-FeOOH 转化，故在机理上有较好的相关性。

为进一步理解模拟液中制度 B 对混凝土中钢筋锈蚀加速效应的一致性，对模拟液中和混凝土中的

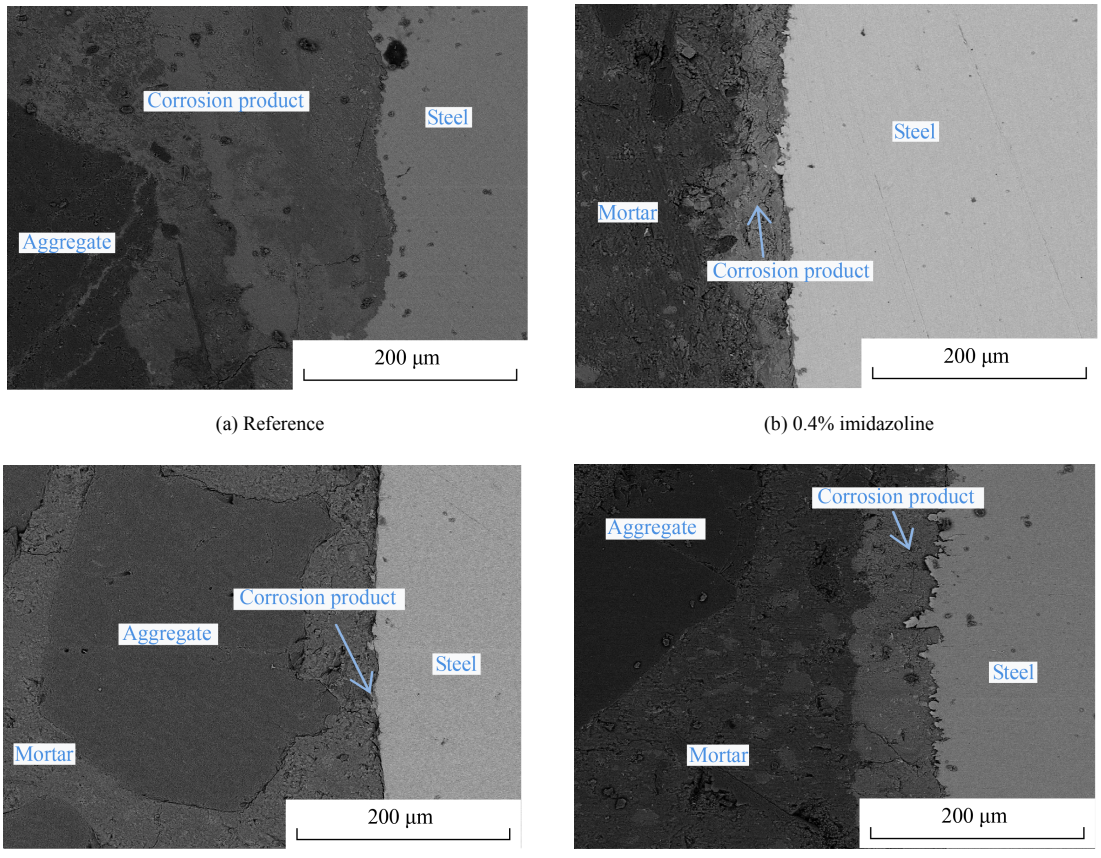
钢筋锈蚀特点进行观察。对混凝土中 HPB235 钢筋锈蚀部分试块进行 SEM 观察，结果如图 6 所示。由图 6 可知，基准试块中钢筋严重锈蚀，锈蚀产物较厚(最厚位置＞200 μm)，已发展至粗骨料位置，且锈蚀产物存在裂纹；咪唑啉阻锈剂作用下，钢筋锈蚀产物较均匀，锈蚀发展也较均匀，锈蚀产物较薄，约 45 μm；羧酸胺阻锈剂作用下，钢筋腐蚀发展较轻，锈层几乎不可见，锈层厚度＜10 μm；氨基醇阻锈剂作用下，锈蚀产物厚度约 35 μm，锈蚀产物在钢筋表面分布类似“锯齿”状，似多点蚀共同发展。



(a) Drying process　　(b) Wetting process

图 5　氯盐干湿循环环境下钢筋锈蚀机理

Fig. 5　Corrosion mechanism of reinforced concrete under chlorine salt dry-wet cycling environment



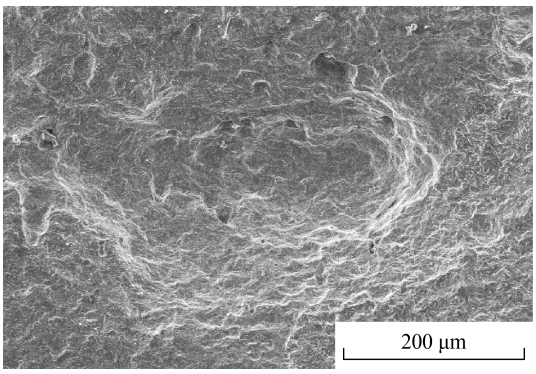
(a) Reference　　(b) 0.4% imidazoline

(c) 0.4% carboxylic acid amine　　(d) 0.4% amino alcohol

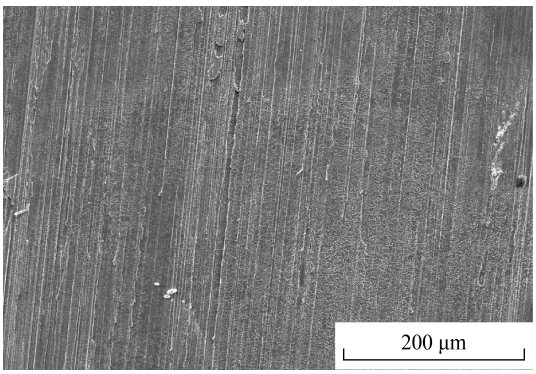
图 6　氯盐干湿循环条件下钢筋混凝土截面微观形貌

Fig. 6　Microstructure of reinforced concrete cross section under chlorine dry-wet cycling environment

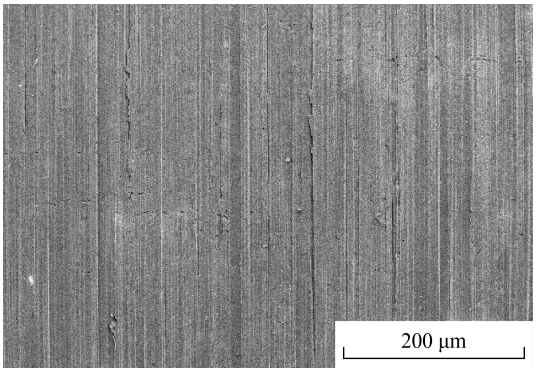
对制度 B 下含阻锈剂模拟液中 Q235 挂片进行 SEM 观察，结果如图 7 所示。由图 7 可知，基准模拟液中 Q235 挂片锈蚀部位蚀坑最大、最深；咪唑啉阻锈剂作用下，Q235 挂片锈蚀发展较浅，且向平面扩展，表现为麻面腐蚀形貌；羧酸胺阻锈剂作用下，Q235 挂片局部锈蚀以小的点蚀为主；氨基醇阻锈剂作用下，Q235 挂片锈蚀出现较大的独立的蚀坑。结合图 6 所示结果，可知模拟液及混凝土的干湿加速下钢筋锈蚀发展特征相似，这在一定程度上印证了在模拟液中浸泡 30 min、干燥 60 min、



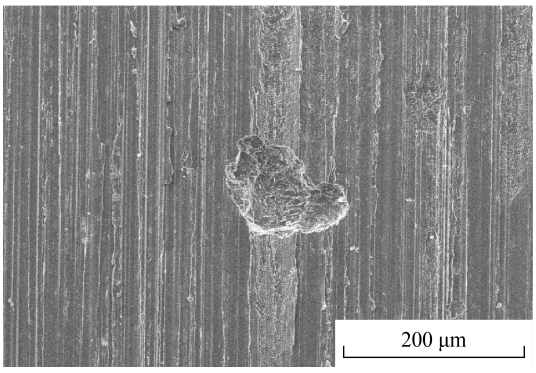
(a) Reference



(b) Imidazoline



(c) Carboxylic acid amine



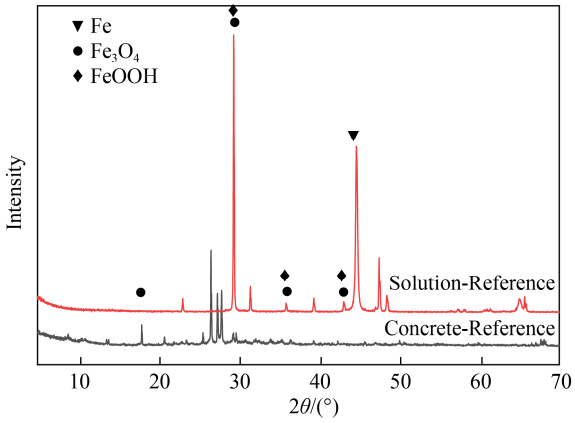
(d) Amino alcohol

图 7 制度 B 下含阻锈剂的模拟液中 Q235 挂片 SEM 微观锈蚀形貌

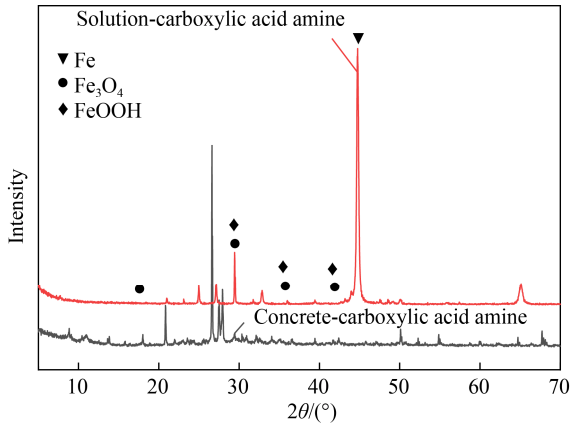
Fig. 7 Micro-corrosion morphology of Q235 coupons in simulated solution containing inhibitor under system B

(25±1) ℃、(75±5)%相对湿度的加速制度 B 可以有效地模拟钢筋在混凝土中的服役情况，可快速地评价钢筋锈蚀的发展及阻锈剂的作用效果。

图 8 为混凝土和模拟液制度 B 条件下基准及含羧酸胺阻锈剂试样的钢筋表面锈蚀产物的 XRD 谱图。需要说明的是，模拟液中锈蚀产物的分析是将挂片直接进行 XRD 扫描，故而图谱中显示有单质 Fe 存在；由于羧酸胺阻锈剂对钢筋腐蚀的抑制作用，故挂片中单质 Fe 的特征峰较弱；混凝土干湿循环后钢筋锈蚀产物成分分析时则是刮取钢筋附着物粉末进行 XRD 扫描，故混凝土组中铁的氧化物特征峰整体较弱，且含有水泥水化产物的特征峰。尽管如此，混凝土和模拟液制度 B 下 Fe 的氧化物组成一致，均以 Fe_3O_4、FeOOH 为主。这说明经过模拟液的干湿循环加速，并没有改变混凝土干湿循环



(a) JZ



(b) Carboxylic acid amine

图 8 混凝土和模拟液制度 B 条件下基准及含羧酸胺阻锈剂试样的钢筋表面锈蚀产物的 XRD 谱

Fig. 8 XRD patterns of the surface rust products of the reference and carboxylic acid amine group reinforcement in the simulated solution under system B and concrete

加速下钢筋锈蚀的产物组成，从而佐证了模拟液中采用制度 B 可以有效地模拟钢筋在混凝土中的服役情况。

3　结论

1) 搭建可精确控制环境温湿度、干湿循环时间的阻锈剂加速评价试验箱，建立了模拟液浸泡 30 min、干燥 60 min、(25±1) ℃、(75±5)%相对湿度的干湿循环制度，与混凝土干湿循环过程中钢筋面临的薄液膜-溶液腐蚀环境相似，模拟液中与混凝土中钢筋的干湿循环加速试验结果在钢筋锈蚀机理、锈蚀面积、锈蚀特点及锈蚀产物上具有较好的一致性，为混凝土中钢筋有机阻锈剂的加速评价提供了参考方法

2) 咪唑啉、羧酸胺、氨基醇有机阻锈剂对氯盐干湿循环条件下钢筋锈蚀均具有抑制效果，其中羧酸胺最为优异；三者作用机制不同，羧酸胺阻锈剂对钢筋局部和均匀腐蚀均有较好的抑制作用，咪唑啉阻锈剂抑制钢筋点蚀向深度方向扩展，氨基醇阻锈剂抑制均匀腐蚀的发生。

参考文献:

[1] 金伟良, 赵羽习. 混凝土结构耐久性研究的回顾与展望[J]. 浙江大学学报(工学版), 2002(4): 27–36+59.
JIN Weiliang，ZHAO Yuxi. J Zhejiang Univ (Eng Sci) (in Chinese), 2002(4): 27–36+59.

[2] 洪乃丰. 钢筋阻锈剂的发展与应用[J]. 工业建筑, 2005(6): 68–70.
HONG Naifeng. Ind Constr (in Chinese), 2005(6): 68–70.

[3] BEN MANSOUR H, DHOUIBI L, IDRISSI H. Effect of phosphate-based inhibitor on prestressing tendons corrosion in simulated concrete pore solution contaminated by chloride ions[J]. Constr Build Mater, 2018, 171: 250–260.

[4] 陈云翔, 冯丽娟, 蔡建宾, 等. 新型复配阻锈剂在混凝土模拟液和试块中对钢筋锈蚀的抑制[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2018, 4: 343–350.
CHEN Yunxiang, FENG Lijuan, CAI Jianbin, et al. J Chin Soc Corros Pro (in Chinese), 2018, 4: 343–350.

[5] 李果, 刘涛, 费金新, 等. 干湿循环混凝土内钢筋腐蚀加速效应机理的研究[J]. 四川建筑科学研究, 2005, 31(5): 108–111.
LI Guo, LIU Tao, FEI Jinxin, et al. Sichuan Build Sci (in Chinese), 2005, 31(5): 108–111.

[6] NISHIMURA T. Electrochemical behavior of steel in concrete under wet and dry condition with NaCl solution[J]. J Mater Eng Perform, 2019, 28: 1500–1508.

[7] CAI J S, LIU J P, MU S, et al. Corrosion inhibition effect of three imidazolium ionic liquids on carbon steel in chloride contaminated environment[J]. Int J Electrochem Sci, 2020, 15: 1287–1301.

[8] 赵旦, 刘建忠, 蔡景顺, 等. 烷基碳链取代的咪唑离子液对钢筋锈蚀行为的影响[C]//2016 年第九届全国混凝土耐久性学术交流会, 浙江宁波, 2016: 341–349.
ZHAO Dan, LIU Jianzhong, CAI Jingshun, et al. Effect of imidazole ionic liquid substituted by alkyl carbon chain on corrosion behavior of reinforcement[C]// 9th National Conference on Concrete Durability Academic Exchange, Ningbo, China, 2016: 341–349.

[9] 周霄骋, 蔡景顺, 石亮, 等. 一种咪唑离子液对混凝土模拟液中 Q235 钢筋阻锈作用的电化学研究[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(增刊 1): 158–162.
ZHOU Xiaocheng, SHI Liang, CAI Jingshun, et al. Corros Prot (in Chinese), 2018, 39(suppl 1): 158–162.

[10] CAI J, CHEN C C, LIU J Z, et al. Influence of organic inhibitor on corrosion resistance of steel in simulated concrete pore solution[C]// 4th International Conference on the Durability of Concrete Structures. West Lafayette, USA, 2014: 83–86.

[11] 周霄骋, 石亮, 蔡景顺, 等. 混凝土模拟孔溶液中羧酸胺阻锈剂对碳钢的阻锈行为研究[J]. 新型建筑材料, 2019(8): 69–72.
ZHOU Xiaocheng, SHI Liang, CAI Jingshun, et al. New Build Mater (in Chinese), 2019(8): 69–72.

[12] CAI J, CHEN C, LIU J, et al. Influence of alkyl chain length of 1,3-bis-dialkyla mino-2-propanol on the adsorption and corrosion behavior of steel Q235 in simulated concrete pore solution[J]. Int J Electrochem Sci, 2012, 7(11): 10894–10908.

[13] CHEN C C, CAI J S, LIU J Z, et al. Use of aminoalcohol as inhibitor in chloride-contaminated steel reinforced concrete[J]. J Chin Ceram Soc (Eng), 2015, 43(4): 37–43.

[14] LIU J P, CHEN C C, CAI J S, et al. 1,3-Bis-dibutyla minopropan-2-ol as inhibitor for reinforcement steel in chloride-contaminated simulated concrete pore solution[J]. Mater Corros, 2014, 64(12): 1075–1081.

[15] 缪昌文, 周伟玲, 陈翠翠. 模拟混凝土孔溶液中有机阻锈剂对钢筋的保护作用[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2010, 40(增刊 2): 187–191.
MIAO Changwen, ZHOU Weiling, CHEN Cuicui. J Southeast Univ (Nat Sci) (in Chinese), 2010, 40(Suppl 2): 187–191.

[16] 刘加平. 一种便携式全自动加速腐蚀试验装置[P]. CN Patent, 201721247743.4. 2018–08–21.
LIU Jiaping. Portable fully automatic accelerated corrosion test device (in Chinese). CN Patent, 201721247743.4. 2018–08–21.

[17] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. HG/T3523-2008 冷却水化学处理标准腐蚀试片技术条件[S]. 北京: 化学工业出版社, 2008.

[18] 董杰, 董俊华, 韩恩厚, 等. 低碳钢带锈电极的腐蚀行为[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2006, 18(6): 414–417.
DONG Jie, DONG Junhua, HAN Enhou, et al. Corros Sci Prot Tech (in Chinese), 2006, 18(6): 414–417.