

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2023.05.005

## 封闭处理对钢筋磷化膜耐蚀性的影响

冉黎<sup>1</sup>, 李杰<sup>2\*</sup>

(1. 重庆工贸职业技术学院 建筑工程学院, 重庆 408000; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 以HRB400钢筋作为基体材料, 锌-锰系磷化后分别采用脱水防锈油、硅酸盐溶液、铈盐溶液进行封闭处理。采用扫描电镜、能谱仪、测厚仪、接触角测量仪和电化学工作站对常规磷化膜及封闭处理后磷化膜的形貌、成分、厚度和疏水性进行测试分析, 并研究常规磷化膜及封闭处理后磷化膜在模拟混凝土孔隙液中的耐蚀性。结果表明: 磷化后钢筋基体上生成一层覆盖完整、表面呈片状结构的磷化膜, 浸油封闭后磷化膜的形貌、成分、厚度和表面疏水性未出现明显变化, 耐蚀性略有提高。而硅酸盐封闭和铈盐封闭后磷化膜的致密性明显改善, 成分和表面疏水性都发生变化, 耐蚀性明显好于常规磷化膜和浸油封闭磷化膜。采用铈盐溶液封闭后磷化膜的结晶缺陷得到有效修复, 并且表面呈现疏水性, 对腐蚀介质具有更强屏蔽阻挡效果, 增大了腐蚀阻力, 从而明显提高钢筋在模拟混凝土孔隙液中的耐蚀性。

**关键词:** HRB400钢筋; 磷化膜; 封闭处理; 模拟混凝土孔隙液; 耐蚀性

**中图分类号:** TG174

**文献标识码:** A

## Effect of sealing treatment on corrosion resistance of phosphating film on rebar

Ran Li<sup>1</sup>, Li Jie<sup>2\*</sup>

(1. Institute of Construction Engineering, Chongqing Industry &amp; Trade Polytechnic, Chongqing 408000, China; 2. Civil Engineering College, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** HRB400 rebar was treated by zinc-manganese phosphating process, followed by sealing treatment using dehydrated antirust oil, silicate solution and cerium salt solution respectively. Scanning electron microscope, energy dispersive spectrometer, thickness meter, contact angle meter and electrochemical workstation were used to test and analyze the morphology, composition, thickness and hydrophobicity of conventional phosphating film and the phosphating film after sealing treatment, and the corrosion resistance of conventional phosphating film and the phosphating film after sealing treatment in simulated concrete pore solution was studied. The results show that a phosphating film with flaky structure is formed on the surface of rebar matrix. The morphology, composition, thickness and surface hydrophobicity of the phosphating film do not change significantly after oil immersion sealing, and the corrosion resistance is slightly improved. However, the compactness of the phosphating film after silicate sealing and cerium salt sealing is obviously improved, the composition and surface hydrophobicity are changed, and the corrosion resistance is obviously better than that of conventional phosphating film and the phosphating film after sealing treatment. After sealing treatment using cerium salt solution, the

收稿日期: 2022-08-15

修回日期: 2022-11-22

作者简介: 冉黎(1986—), 男, 讲师, 主要研究方向: 建筑工程材料、建筑工程技术等, email: Tech\_ran08@163.com

\*通信作者: 李杰(1978—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向: 材料成型技术、表面工程等, email: lijiewin888@163.com

基金项目: 重庆市科委自然科学基金(cstc2018jscx-msybX0284)

crystallization defects of the phosphating film can be effectively repaired, and the surface is hydrophobic, which has a stronger shielding effect on the corrosive medium and increases the corrosion resistance, thus significantly improving the corrosion resistance of the rebar in the simulated concrete pore solution.

**Keywords:** HRB400 rebar; phosphating film; sealing treatment; simulated concrete pore solution; corrosion resistance

钢筋的腐蚀问题制约着钢筋混凝土结构的服役寿命<sup>[1-2]</sup>。由于混凝土水化作用产生大量氢氧化钙,使得混凝土孔隙液呈强碱性。在强碱性溶液中,虽然钢筋表面会形成一层保护膜,使其处于钝化状态,但是随着混凝土碳化以及空气中CO<sub>2</sub>的扩散,会与孔隙液发生中和反应,使其碱性降低,导致钢筋表面钝化膜逐步被破坏,防护作用下降,继而引发钢筋腐蚀程度加重。因此,采取措施减缓钢筋腐蚀从而保证钢筋混凝土结构的服役寿命具有重要意义。

目前,可行的措施包括改变钢筋成分、钢筋表面处理、混凝土中添加缓蚀剂等。其中,钢筋表面处理易于操作且效果良好,得到较广泛的应用。在诸多表面处理方法中,磷化是一种成本低廉、操作方便、稳定且可控性好的方法,钢筋经磷化处理后耐蚀性得到明显改善。磷化膜作为一种功能性膜层,能有效地延缓腐蚀发展<sup>[3-8]</sup>。然而,磷化膜具有多孔结构,无法提供持久的防护作用,通常对磷化膜进行封闭处理,进一步提高其耐蚀性,从而增强对钢筋的防护作用。

关于磷化膜封闭处理已有一些报道<sup>[9-13]</sup>,但是大多数研究针对某一种或两种方法的封闭效果评价。从进一步提高磷化膜耐蚀性的角度,有必要横向比较和评价3种乃至多种方法的封闭效果,进而优选出最佳方法,获得耐蚀性优良的磷化膜。本文以HRB400钢筋作为基体材料,锌-锰系磷化后分别采用脱水防锈油、硅酸盐溶液、铈盐溶液进行封闭处理。通过研究钢筋基体及不同磷化膜在模拟混凝土孔隙液中的耐蚀性,优选出效果良好的钢筋磷化与封闭处理方法,旨在为提高钢筋在混凝土中的耐蚀性从而保证钢筋混凝土结构的服役寿命提供借鉴。

1 实验材料与方法

1.1 材料与试剂

选用直径 16 mm、长度 60 mm 的 HRB400 钢筋

试样作为基体材料,按照如下流程对试样预处理:(1)依次用 800#、1600#、2000#砂纸打磨试样表面直到无氧化锈蚀层和明显的划痕;(2)试样依次浸在丙酮、无水乙醇中超声波清洗 5 min,取出后用去离子水冲洗;(3)试样浸在体积分数 10% 的盐酸中 1 min,取出后用去离子水冲洗;(4)冷风吹干后将试样装在密封袋中备用。

选用国药集团化学试剂有限公司生产的酸式磷酸锰、硝酸锰、硝酸锌、硝酸镍和氯酸钠配制磷化液,硅酸钠与去离子水配制硅酸盐封闭液,硝酸铈、过氧化氢与去离子水配制铈盐封闭液,以上化学试剂的纯度等级均为分析纯。

1.2 钢筋磷化过程及磷化膜封闭处理

预处理后试样浸在预热至 55 ℃的锌-锰系磷化液中,主要成分见表 1。在设定的温度条件下,试样与磷化液接触表面发生腐蚀溶解、析氢、磷酸根解离和磷酸盐沉淀结晶等多个化学和电化学反应,持续 20 min 结束,生成一层完整的磷化膜覆盖钢筋基体。

表 1 磷化液主要成分

Tab.1 Main composition of phosphating solution

试剂	质量浓度/(g·L <sup>-1</sup> )
酸式磷酸锰	54
硝酸锰	12
硝酸锌	30
硝酸镍	1
氯酸钠	6
柠檬酸钠	2

锌-锰系磷化后的试样分别采用脱水防锈油(市售)、硅酸盐溶液(硅酸钠 25 g/L)、铈盐溶液(硝酸铈 18 g/L、过氧化氢 30 mL/L)进行封闭处理。脱水防锈油封闭在常温条件下进行,硅酸盐溶液封闭在 80 ℃条件下进行,铈盐溶液封闭在 45 ℃条件下进行,封闭时间均为 10 min。为了便于表述,以下将浸

油封闭、硅酸盐封闭和铈盐封闭处理后的磷化膜称为浸油封闭磷化膜、硅酸盐封闭磷化膜、铈盐封闭磷化膜,未封闭的磷化膜称为常规磷化膜。

### 1.3 配制模拟混凝土孔隙液

选用饱和氢氧化钙溶液,添加适量碳酸氢钠调节pH值至12.0左右,然后添加20 g/L氯化钠搅拌均匀后配成模拟混凝土孔隙液<sup>[14]</sup>。

### 1.4 表征与测试

#### 1.4.1 形貌表征及成分测试

采用德国卡尔·蔡司公司的MERLIN Compact型扫描电镜观察钢筋基体和不同磷化膜的原始形貌以及在模拟混凝土孔隙液中浸泡168 h后的腐蚀形貌,并用英国牛津仪器公司的X-max80型能谱仪测试不同磷化膜的成分,设置面扫描模式,得到不同磷化膜中各元素质量分数。

#### 1.4.2 厚度测量

采用北京时代集团公司的TT260型测厚仪测量钢筋基体上不同磷化膜的厚度,在每个试样表面任取3处不同位置,测量结果求平均值。

#### 1.4.3 疏水性测试

采用上海中晨数字技术设备有限公司的JC2000D1型接触角测量仪测量水滴落在钢筋基体和不同磷化膜表面的接触角。为了减小误差,得到准确的测量结果,水滴落在每个试样表面3处不同位置,测量结果取平均值。

#### 1.4.4 耐蚀性测试

采用美国阿美特克集团公司的Parstat 2273型电化学工作站测试不同磷化膜在模拟混凝土孔隙液中浸泡168 h后的极化曲线,同时测试钢筋基体在模拟混凝土孔隙液中浸泡168 h后的极化曲线进行对比。铂电极作为辅助电极,饱和甘汞电极作为参比电极。设定极化曲线的扫描速率为1 mV/s,将测试数据导入PowerSuite软件中,拟合得到腐蚀电位和腐蚀电流密度。

## 2 结果与讨论

### 2.1 原始形貌和成分分析

图1为钢筋基体和4种不同磷化膜的形貌。可知在钢筋基体上生成一层覆盖完整、表面呈片状结构的磷化膜,磷化膜表面存在微米级的凸起与孔隙交错分布。浸油封闭后磷化膜的形貌相比于常规磷化膜未见明显改变,仍然存在较多凸起和孔隙。然

而,硅酸盐封闭和铈盐封闭后,磷化膜的孔隙被有效填充和弥补,致密性明显改善。

结合磷化膜形成机理及封闭机理分析,磷化膜形成过程中伴随着析氢现象,造成晶粒间存在一些孔隙,因此磷化膜微观多孔,显得疏松。浸油封闭使磷化膜表面发生物理吸附形成一层油膜,但浸油封闭后磷化膜的形貌未出现明显改变。硅酸盐封闭过程中,磷化膜的疏松表层及夹杂的水溶性物质被呈碱性的硅酸盐溶液溶解,降低了磷化膜表面凹凸不平度。此外,由于在较高温度条件下进行硅酸盐封闭,易析出硅酸钠固体相,沉积在磷化膜的孔隙中及磷化膜表面,使孔隙得到弥补<sup>[15-16]</sup>。硅酸盐溶液还能与磷化膜发生化学反应生成硅酸锌(如 $\text{ZnSiO}_3$ ),同样起到填充和弥补晶粒间孔隙的效果<sup>[17]</sup>,从而使结晶缺陷得到修复,磷化膜的致密性改善。铈盐封闭过程中,酸性溶液对磷化膜造成腐蚀溶解,产生 $\text{Zn}^{2+}$ 和 $\text{PO}_4^{3-}$ 进入溶液中,与过氧化氢发生还原反应生成的 $\text{OH}^-$ 以及溶液中存在的 $\text{Ce}^{3+}$ 和 $\text{Ce}^{4+}$ 结合形成铈和铈的氢氧化物 $[\text{Zn}(\text{OH})_2, \text{Ce}(\text{OH})_3, \text{Ce}(\text{OH})_4]$ ,沉积在磷化膜孔隙中及表面<sup>[18]</sup>,使磷化膜的致密性得到明显改善。与硅酸盐封闭磷化膜相比,铈盐封闭磷化膜的结晶缺陷较少,致密性更好。此外,观察铈盐封闭磷化膜的局部放大图,由图1(f)发现,铈盐封闭磷化膜表面局部区域形成片状晶粒与簇状颗粒交错分布的特殊结构,这种特殊结构或许会改变磷化膜表面疏水性。

图2为4种不同磷化膜的EDS谱。结合图2(a)和图2(b)可知,浸油封闭磷化膜的主要成分与常规磷化膜相同,都含有Zn、P、O和Mn元素。由图2(c)可知,硅酸盐封闭磷化膜的主要成分为Zn、P、O、Mn、Na和Si元素,Na和Si元素存在表明在硅酸盐封闭过程中会析出硅酸钠固体相掺杂在磷化膜中。由图2(d)可知,铈盐封闭磷化膜的主要成分为Zn、P、O、Mn和Ce元素,Ce元素存在证实了在铈盐封闭过程中生成含铈化合物掺杂在磷化膜中。

### 2.2 厚度和疏水性分析

图3为4种不同磷化膜的厚度,可知浸油封闭、硅酸盐封闭和铈盐封闭对磷化膜的厚度无显著性影响,不同磷化膜的厚度均为10  $\mu\text{m}$ 左右。浸油封闭过程中形成一层很薄的油膜覆盖磷化膜表面,而硅酸盐封闭和铈盐封闭过程中析出硅酸钠固体相、生成新形式硅酸盐化合物或铈和铈的氢氧化物主要沉



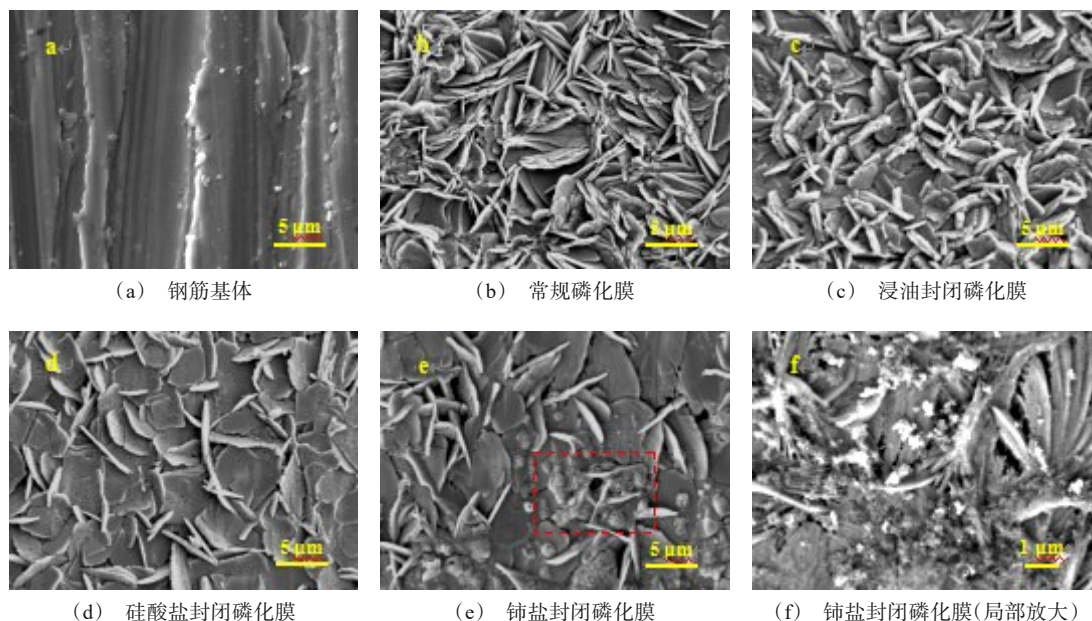


图 1 钢筋基体和 4 种不同磷化膜的形貌

Fig.1 Morphology of rebar matrix and four different phosphating films

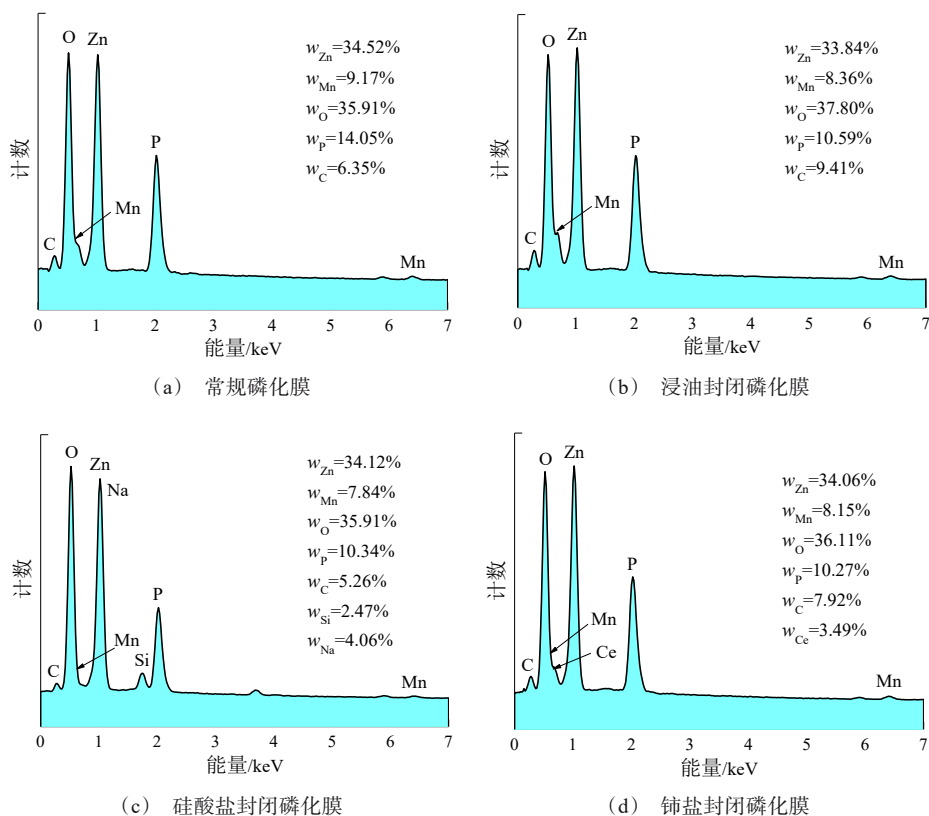


图 2 4 种不同磷化膜的 EDS 谱

Fig.2 EDS spectra of four different phosphating films

积在磷化膜的孔隙中,起到填充效果,虽然也沉积在磷化膜表面,但不足以使磷化膜明显增厚。

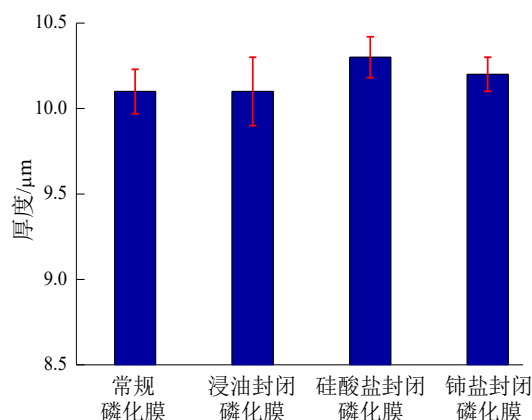


图3 4种不同磷化膜的厚度

Fig.3 Thickness of four different phosphating films

图4为4种不同磷化膜表面水滴接触角。可知常规磷化膜和浸油封闭磷化膜表面水滴接触角均小于 $90^\circ$ ,呈现亲水性。硅酸盐封闭磷化膜表面水滴接触角接近 $90^\circ$ ,呈现临界疏水性。而铈盐封闭磷化膜表面水滴接触角大于 $90^\circ$ ,达到 $124.2^\circ$ ,呈现疏水性。结合铈盐封闭磷化膜的形貌,由图1(e)可见,铈盐封闭磷化膜表面局部区域形成片状晶粒与簇状颗粒交错分布的特殊结构,空气已被截留在这种特殊结构的孔隙或微凹槽处。当水滴与这种特殊表面接触,实际接触方式为固-液-气三相复合接触<sup>[19-21]</sup>,铺展过程受到阻碍,因此,铈盐封闭磷化膜表面呈现疏水性。

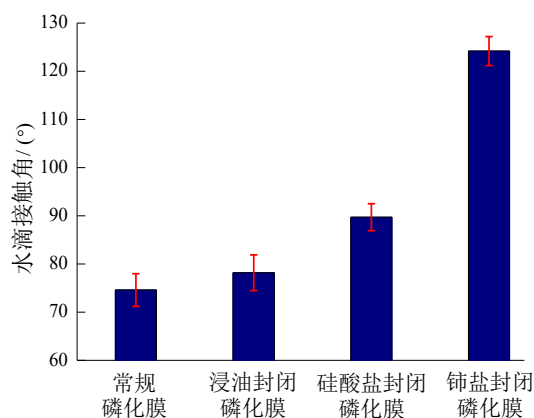


图4 4种不同磷化膜表面水滴接触角

Fig.4 Contact angle of water droplets on surface of four different phosphating films

## 2.3 耐蚀性分析

### 2.3.1 极化曲线分析

图5为钢筋基体和4种不同磷化膜在模拟混凝土孔隙液中浸泡168 h后的极化曲线。从图5可见,4种不同磷化膜的极化曲线相比于钢筋基体的极化曲线都向右下方偏移。结合表2列出的极化曲线拟合结果可知,4种不同磷化膜的腐蚀电位都高于钢筋基体的腐蚀电位,且腐蚀电流密度明显降低,表明4种不同磷化膜在模拟混凝土孔隙液中浸泡168 h后发生腐蚀的倾向与钢筋基体相比仍然较弱。然而,在4种不同磷化膜中,常规磷化膜、浸油封闭磷化膜、硅酸盐封闭磷化膜和铈盐封闭磷化膜的腐蚀电位依次正移,且腐蚀电流密度依次降低。铈盐封闭磷化膜的腐蚀电流密度最低,仅为 $1.82 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ ,相比于钢筋基体降低了接近2个数量级,相比于常规磷化膜降低了超过1个数量级。这表明铈盐封闭磷化膜能较长时间耐受模拟混凝土孔隙液的侵蚀,发生腐蚀的倾向最弱,因此表现出更好的耐蚀性,明显好于浸油封闭磷化膜和硅酸盐封闭磷化膜。

结合磷化膜封闭机理以及4种不同磷化膜的形貌、厚度和表面疏水性分析,浸油封闭过程中在磷化膜表面物理吸附一层油膜,对模拟混凝土孔隙液向磷化膜内部渗透和扩散起到的阻滞作用有限。而硅酸盐封闭和铈盐封闭过程中生成的反应产物都能填充和弥补晶粒间孔隙,使磷化膜致密性得到改善,对模拟混凝土孔隙液向磷化膜内部渗透和扩散起到较强阻挡作用。因此,在厚度基本相同的情况下,硅酸盐封闭磷化膜和铈盐封闭磷化膜在模拟混凝土孔隙液中浸泡168 h后的腐蚀电流密度都低于常规磷化膜和浸油封闭磷化膜。相比于硅酸盐封闭磷化膜,铈盐封闭磷化膜的致密性更好,在厚度相同的情况下,对模拟混凝土孔隙液向磷化膜内部渗透和扩散起到很强阻挡作用。此外,铈盐封闭磷化膜表面呈疏水性,减少了与模拟混凝土孔隙液的接触面积,也有利于增大腐蚀阻力从而延缓腐蚀发展。因此,铈盐封闭磷化膜能较长时间耐受模拟混凝土孔隙液的侵蚀。

### 2.3.2 腐蚀形貌分析

图6为钢筋基体和4种不同磷化膜在模拟混凝土孔隙液中浸泡168 h后的腐蚀形貌。从图6(a)可见,钢筋基体整体腐蚀很严重,表面失去光泽,呈暗黑色。这是由于模拟混凝土孔隙液中的氯离子及其

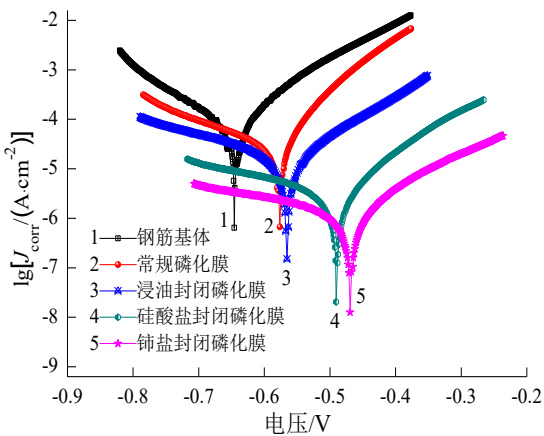


图 5 钢筋基体和 4 种不同磷化膜在模拟混凝土孔隙液中浸泡 168 h 后的极化曲线

Fig.5 Polarization curves of rebar matrix and four different phosphating films after immersion in simulated concrete pore solution for 168 h

它腐蚀介质对钢筋表面造成腐蚀破坏,且破坏作用随着在模拟混凝土孔隙液中浸泡时间延长而累积。从图 6(b)~图 6(e)可见,常规磷化膜、浸油封闭磷化膜、硅酸盐封闭磷化膜和铈盐封闭磷化膜的腐蚀程

表 2 极化曲线拟合结果

Tab.2 Fitting results of polarization curves

不同试样	腐蚀电位/V	腐蚀电流密度/ (A·cm <sup>-2</sup> )
钢筋基体	-0.645	8.50×10 <sup>-5</sup>
常规磷化膜	-0.577	2.83×10 <sup>-5</sup>
浸油封闭磷化膜	-0.565	1.06×10 <sup>-5</sup>
硅酸盐封闭磷化膜	-0.490	3.15×10 <sup>-6</sup>
铈盐封闭磷化膜	-0.469	1.82×10 <sup>-6</sup>

度与钢筋基体相比明显较轻,尤其是铈盐封闭磷化膜,整体腐蚀程度最轻。覆盖一层磷化膜使钢筋基体转变为不良导体,抑制了钢筋基体表面形成微电池,从而延缓局部腐蚀发展。

采用脱水防锈油、硅酸盐溶液和铈盐溶液进行封闭处理,使磷化膜的致密性得到不同程度改善,增大模拟混凝土孔隙液向磷化膜内部渗透和扩散阻力。在厚度基本相同的情况下,铈盐封闭磷化膜的结晶缺陷较少、致密性更好,并且表面呈现疏水性,对模拟混凝土孔隙液具有更强屏蔽阻挡效果,因此能较长时间耐受模拟混凝土孔隙液侵蚀,表现出更好的耐蚀性,与极化曲线分析结果一致。

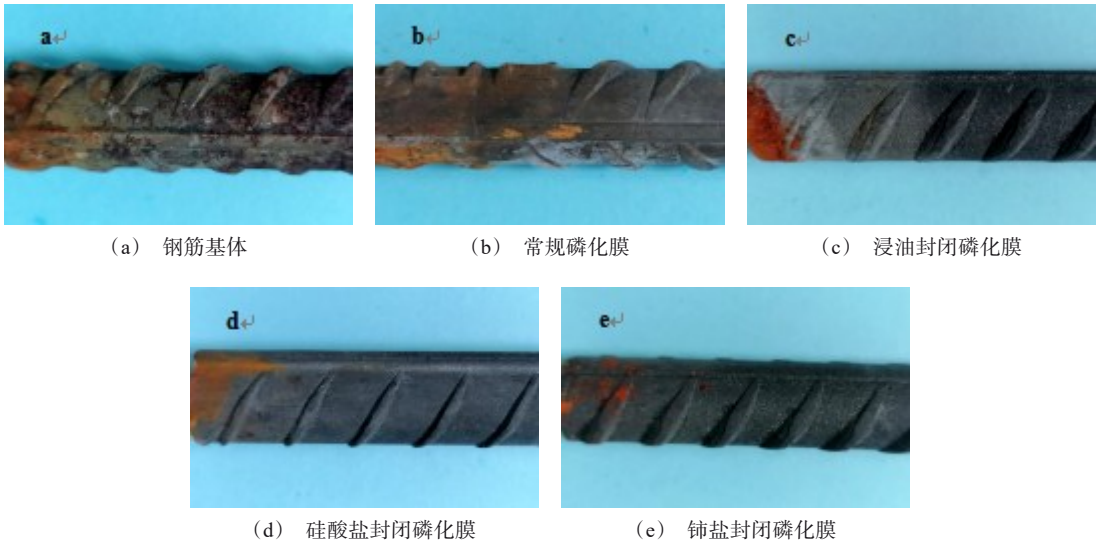


图 6 钢筋基体和 4 种不同磷化膜在模拟混凝土孔隙液中浸泡 168 h 后的腐蚀形貌

Fig.6 Corrosion morphology of rebar matrix and four different phosphating films after immersion in simulated concrete pore solution for 168 h

### 3 结论

(1)采用脱水防锈油封闭处理后,HRB400 钢筋

表面磷化膜的形貌、厚度和主要成分未明显改变,耐蚀性略有提高。采用硅酸盐溶液和铈盐溶液封闭后,磷化膜的厚度均为 10 μm 左右,但致密性明显改

善,主要成分和表面疏水性都发生变化,导致在模拟混凝土孔隙液中的耐蚀性提高,且铈盐封闭后磷化膜的耐蚀性更好。

(2)在模拟混凝土孔隙液中浸泡 168 h 后,铈盐封闭磷化膜的腐蚀电流密度最低,仅为  $1.82 \times 10^{-6}$  A/cm<sup>2</sup>,相比于钢筋基体降低了接近两个数量级,发生腐蚀的倾向最弱。采用铈盐溶液封闭过程中生成铈和铈的氢氧化物沉积在磷化膜孔隙中及表面使结晶缺陷得到有效修复,并且磷化膜表面呈现疏水性,因此能较长时间耐受模拟混凝土孔隙液侵蚀,显著提高钢筋基体在模拟混凝土孔隙液中的耐蚀性。

### 参考文献

- [1] 成璞. 碳化、氯盐侵蚀作用下混凝土内钢筋腐蚀规律研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2015.
- [2] 孙杨, 乔国富. 锈蚀钢筋与混凝土粘结性能研究综述[J]. 材料导报, 2020, 34(3): 116-125.
- [3] Raghu B U, Kondraivendhan B. Corrosion performance of steel reinforcement in concrete admixed with magnesium chloride and sulphate[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2020, 67(1): 106-118.
- [4] 马麒, 蔡景顺, 穆松, 等. 有机氨基醇阻锈剂在混凝土模拟孔隙液和砂浆试块中对钢筋的阻锈作用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2021, 41(5): 659-666.
- [5] Mandal S, Singh J K, Lee D E, et al. Ammonium phosphate as inhibitor to mitigate the corrosion of steel rebar in chloride contaminated concrete pore solution[J]. Molecules, 2020, 25(17): 3785-3795.
- [6] Dong S G, Zhao B, Lin C, et al. Corrosion behavior of epoxy/zinc duplex coated rebar embedded in concrete in ocean environment[J]. Construction and Building Materials, 2012, 28(1): 72-78.
- [7] 万金侠, 仲玉侠. 混凝土结构中钢筋磷化处理及磷化膜的耐蚀性能[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(7): 60-64.
- [8] Bensabrah H, Azzouz N, Chopart J P. Effect of zinc phosphating treatment on the pitting corrosion resistance of steel reinforcement[J]. Revue De Metallurgie, 2013 (110): 153-163.
- [9] 白玉伟, 陈锐. 封闭处理对工程车用件磷化膜形貌和耐蚀性的影响[J]. 电镀与精饰, 2021, 43(3): 1-5.
- [10] Lin B L, Lu J T. Self-healing performance of composite coatings prepared by phosphating and cerium nitrate post-sealing[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science), 2015, 30(4): 813-817.
- [11] 陈力, 陈玉峰, 张鉴达. 镁合金表面硅酸盐封闭磷化膜的腐蚀失效行为[J]. 电镀与精饰, 2022, 44(1): 57-62.
- [12] 孔纲, 林碧兰, 刘军, 等. 热镀锌层磷化膜硝酸铈封闭后处理的研究[J]. 材料保护, 2008, 41(2): 8-10.
- [13] Lin B L, Lu J T. Self-healing mechanism of composite coatings obtained by phosphating and silicate sol post-sealing[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014(8): 2722-2727.
- [14] 陈雯, 杜荣归, 胡融刚, 等. 模拟混凝土孔隙液中钢筋表面膜组成与腐蚀行为的关联[J]. 金属学报, 2011, 47(6): 735-742.
- [15] 马永纯, 徐敏. 硅酸盐封闭对 45 钢锌锰系磷化膜耐蚀性的影响[J]. 电镀与涂饰, 2021, 40(11): 853-858.
- [16] 周殿买, 姜磊, 王美婷, 等.  $\text{Ce}(\text{NO}_3)_3$  浓度及硅酸盐封孔处理对高铁枕梁用 Mg-Zn-Y-Ca 合金表面钙系磷化膜的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2021, 41(6): 849-856.
- [17] 邵红红, 陈婷婷, 祁昌洋, 等. 封闭处理对 316L 不锈钢超声场下磷化膜性能的影响[J]. 中国表面工程, 2017, 30(1): 63-69.
- [18] 翁天宇, 赖德林, 李晓聪, 等. 热浸镀锌层磷酸盐-铈盐复合处理制备超疏水膜层研究[J]. 材料研究学报, 2018, 32(11): 801-810.
- [19] 柯冲, 李中发, 朱志平, 等. 超疏水涂层的制备及其在金属防腐领域的应用研究进展[J]. 材料保护, 2022, 55(2): 145-159.
- [20] 刁桂林, 孙学通, 林怀抒, 等. SLM-Ti 仿生微纳米复合结构超疏水表面的构建[J]. 稀有金属材料与工程, 2021, 50(6): 2144-2148.
- [21] 郭永刚, 罗冰鹏, 朱亚超, 等. 表面超疏水性能的数值模拟研究进展[J]. 材料保护, 2022, 55(1): 203-230.