

doi: 10.11933/j.issn.1007-9289.20170612001

新型热扩散法制备耐海洋环境腐蚀钢筋及其耐蚀性

李翔, 程学群, 李晓刚

(北京科技大学 腐蚀与防护中心, 北京 100083)

摘要: 通过热扩散工艺在自行研制的钢筋原坯表面形成一层化学成分满足不锈钢要求且耐蚀性能优异的“类不锈钢”表面层。采用XRD、SEM及EDS对热扩散层的相结构、表面形貌和截面成分分布进行了分析和表征。通过浸泡加速腐蚀试验、动电位极化曲线和电化学阻抗谱研究了HRB400、316L以及“类不锈钢”钢筋试样在含氯离子混凝土模拟孔隙液中的腐蚀行为及规律。结果表明, 热扩散层主要由 Cr_{23}C_6 、Fe-Cr和 Cr_2N 等相组成。在含有氯离子的混凝土模拟孔隙液中, “类不锈钢”钢筋的耐蚀性比HRB400提高了287.4倍, 比316L提高了1.4倍。“类不锈钢”钢筋的腐蚀电流密度是HRB400的1/299, 是316L的1/223。“类不锈钢”钢筋的极化电阻 R_p 值是HRB400的28.7倍, 是316L的4.5倍。因此, “类不锈钢”钢筋在混凝土模拟孔隙液中的耐氯离子腐蚀性能优于316L和HRB400。

关键词: 腐蚀; 钢筋; 氯离子; 混凝土; 阻抗

中图分类号: TG172.5; O658.63

文献标志码: A

文章编号: 1007-9289(2017)06-0043-07

A Novel Thermal Diffusion Method to Produce Marine Corrosion Resistant Steel Bar and Its Corrosion Resistance

LI Xiang, CHENG Xue-qun, LI Xiao-gang

(Corrosion and Protection Center, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract: The thermal diffusion treatment was performed on a self-developed steel bar to form a stainless-steel-like surface layer with stainless steel chemical composition and excellent corrosion resistance. The phase structure, surface morphology and cross-section composition distribution of the thermal diffusion layer were analyzed and characterized by XRD, SEM and EDS. Immersion test, potentiodynamic polarization and electrochemical impedance spectroscopy were used to study the corrosion behavior and mechanisms of HRB400, 316L and stainless-steel-like steel bar in simulated concrete pore solution with chloride ions. Results show that the thermal diffusion layer is mainly composed of Cr_{23}C_6 , Fe-Cr and Cr_2N phases. In simulated concrete pore solution with chloride ions, the corrosion resistance of stainless-steel-like steel bar is 287.4 times better than HRB400, and 1.4 times better than 316L. The corrosion current density of stainless-steel-like steel bar is 1/299 of HRB400 and 1/223 of 316L. The polarization resistance R_p of stainless-steel-like steel bar is 28.7 times larger than that of HRB400 and 4.5 times larger than that of 316L. Therefore, the corrosion resistance of stainless-steel-like steel bar in simulated concrete pore solution with chloride ions is obviously better than that of 316L and HRB400.

Keywords: corrosion; steel bar; chloride ions; concrete; electrochemical impedance spectroscopy

收稿日期: 2017-06-12; 修回日期: 2017-11-10

网络出版日期: 2017-11-14 16:05; 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20171114.1605.006.html>

通讯作者: 程学群(1977—), 男(汉), 副教授, 博士; 研究方向: 金属表面处理、工业环境腐蚀与防护; **E-mail:** chengxuequn@ustb.edu.cn

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0300604, 2016YFE0203600); 国家自然科学基金(51671028)

Fund: Supported by National Key Research and Development Program (2016YFB0300604, 2016YFE0203600) and National Natural Science Foundation of China (51671028)

引文格式: 李翔, 程学群, 李晓刚. 新型热扩散法制备耐海洋环境腐蚀钢筋及其耐蚀性[J]. 中国表面工程, 2017, 30(6): 43-49.

LI X, CHENG X Q, LI X G. A novel thermal diffusion method to produce marine corrosion resistant steel bar and its corrosion resistance[J]. China Surface Engineering, 2017, 30(6): 43-49.

0 引言

钢筋混凝土结构是现今土木工程中应用最为广泛的结构形式之一，其成本低廉、坚固耐久、用途广泛等优点，使之很快成为广受欢迎的建筑材料^[1]。随着人类对海洋资源的开发，在海洋环境服役的钢筋混凝土设施处于高浓度的氯离子环境，因钢筋锈蚀诱发的结构耐久性急剧下降问题日益严峻^[2-3]。在一些大量使用氯盐融雪剂的寒冷地区也面临同样的难题。通常情况下普通钢筋在混凝土中具有较好的耐蚀性，这是因为钢筋在高碱性环境中会形成致密的钝化膜，这层致密的钝化膜会阻止腐蚀的发生和发展^[4]。而一旦混凝土中的氯离子浓度超过某个临界值时，这层钝化膜稳定性会急剧下降甚至被击穿，最终将导致钢筋发生明显腐蚀，腐蚀产物的膨胀作用则加速钢筋混凝土结构的失效^[5-6]。

在一般使用条件下，钢材失效多源于表面。表面强化技术可以使材料表面的成分、组织、结构发生变化，起到提高表面性能的作用，不但可以延长材料使用寿命，也可以降低使用成本^[7]。表面渗铬技术是金属表面强化的常见方法，长久以来被广泛应用，以提高基体的硬度、强度、耐磨性、抗腐蚀性、耐高温性等^[8]。吕寿丹^[9]等人对表面纳米化(SNC)处理后的热作模具钢 AISIH13 钢进行热扩散渗铬处理，经 600℃ 及1 050℃ 的复合渗铬处理后，SNC 样品表面形成了厚约 30 μm 连续渗层，AISIH13 钢经渗铬处理后耐磨性得到显著提高，但表面纳米化会使试样的耐腐蚀性能下降^[10]，而且该复合渗铬工艺温度高，处理时间长，成本较高。因此，开发一种耐氯离子腐蚀性低成本钢筋产品，具有较大应用前景。文中通过中低温热扩散工艺，在自行炼制的钢筋原坯表面形成一层化学成分满足不锈钢要求且耐蚀性能优异的“类不锈钢”表面层，以实现基材仍为低成本、高强度的低合金钢，而表面层是耐蚀性能优异的“类不锈钢”，可在一定范围内替代不锈钢钢筋，拓宽低合金钢的应用范围，降低成本。

1 材料与方法

1.1 “类不锈钢”钢筋的制备

基体材料为一种自行炼制的钢筋原坯，化学成分设计时考虑到获得更厚的 Fe-Cr 固溶扩散层，

减小表面碳化铬的形成，钢筋原坯当中碳含量要求尽量低；另一方面，在钢筋原坯中加入 5% 铬(质量分数)可以提升钢筋的耐蚀性能，铬是铁素体稳定元素，铬在铁素体内的扩散速率比在奥氏体内大，因此在钢筋原坯中添加一定量的铬元素有利于表面热扩散层的形成。其具体化学成分见表 1。

表 1 试验用钢筋原坯的化学成分
Table 1 Chemical composition of steel bar for experiment (w/%)

Element	C	Mn	P	S	Si
Content	0.04	0.12	0.02	0.000 05	0.2
Element	Ni	Cr	Cu	Ti	Fe
Content	0.13	5.06	0.28	0.017	Bal.

将钢筋原坯线切割处理成 10 mm×10 mm×5 mm 的试样，在进行热扩散处理前，对试样表面进行高能喷丸处理，选取直径 0.6 mm 的不锈钢钢丸，喷丸压力 0.5 MPa，喷嘴距试样表面 50 mm，喷丸时间 3 min。

采用热扩散剂配比为：50%Cr 粉+47%Al₂O₃+3%NH₄Cl+1%NaF。热扩散剂中各组成成分作用：Cr 粉提供铬源，Al₂O₃ 作填充剂，NH₄Cl 作助热扩散剂，氟化钠作为表面清洁剂(防止热扩散处理后的试样从容器中取出时表面粘结热扩散剂)。热扩散处理前，为充分混合均匀各组分(NH₄Cl 除外)，热扩散剂需经过 10 h 球磨处理。

具体热扩散试验步骤为：先于自制不锈钢容器底部预铺上一层热扩散剂，高度约为容器高度的 1/3；将 4 片待处理试样两两对称地埋入热扩散剂中，保持 4 片试样在一个平行高度上(约为容器高度的 1/4)；接着将剩余热扩散剂倒入容器内，倒完后稍稍压实，再在表面覆盖一层还原铁粉；最后盖上盖子，用耐火粘土做预封处理，辅以螺栓和螺母进一步固定。完成后，将密封好的容器放入马弗炉中加热至 900℃，保温 2 h，随炉冷却至室温后将试样取出。

1.2 热扩散层的微观表征

采用 FEI Quanta250 环境扫描电子显微镜(SEM)及其配备的能谱仪(EDS)获得热扩散层的表面微观形貌、截面成分分布、扩散厚度等信息。采用 UltimaIV X 射线衍射仪来确定热扩散层的相结构，测试选用 Cu 靶，管电压 40 kV，管电流 40 mA，扫描范围为 20°~100°。

1.3 浸泡腐蚀试验

为模拟混凝土钢筋服役条件下的腐蚀介质, 腐蚀溶液采用混凝土模拟孔隙液。表 2 给出了不同 pH 的混凝土模拟孔隙液的配制方案, 所有腐蚀溶液均采用去离子水及分析纯化学试剂配制, 所配溶液均需静置 24 h 并校准 pH 值后方可使用。

表 2 不同 pH 值的混凝土模拟孔隙液的配制

Table 2 Preparation of concrete simulated pore solutions with different pH values (g/L)				
pH	12.68	11.68	10.68	9.68
Ca(OH) ₂	Saturated	2.5	2.5	2.5
NaHCO ₃	0	3.5	4.8	10.8

浸泡加速腐蚀试验采用 pH=9.68、NaCl 质量分数为 10% 的混凝土模拟孔隙液来加速试样的腐蚀, 以此来研究“类不锈钢”钢筋在模拟的高氯低碱环境下的腐蚀特征, 并将其和 HRB400 碳钢钢筋和 316L 不锈钢钢筋作比较。在浸泡试验完成后, 观察浸泡试样的宏观形貌, 除锈后观察表面微观形貌, 通过计算 3 种试样的腐蚀失厚 $D(\text{mm/a})$ 以表征各自的腐蚀速率, 其计算公式如下^[11]:

$$D = 10(W_t - W_0) * \frac{365}{S\rho T} \tag{1}$$

式中 $(W_t - W_0)$ 为钢筋浸泡后的失重, g; T 为试样浸泡时间, d; S 为试样腐蚀面积, cm^2 ; ρ 为试验钢的密度, 7.8 g/cm^3 。

1.4 电化学性能测试

动电位极化曲线测试在 Gmary 电化学工作站上进行, 试验采用传统的三电极体系, 饱和甘汞电极 (SCE) 作为参比电极, 铂电极作为辅助电极, 待测钢筋电极为工作电极。腐蚀溶液: pH=12.68, NaCl 质量分数为 3.5% 的混凝土模拟孔隙液。试验前, 试样经 150~1 200 号砂纸逐级打磨, 用去离子水、无水乙醇清洗, 冷风吹干后备用。动电位极化曲线的测量是在开路电位稳定后, 从相对于开路-250 mV 处正向以 1 mV/s 的速率进行动电位极化扫描, 电流密度达到 10^{-4} A/cm^2 时停止扫描。

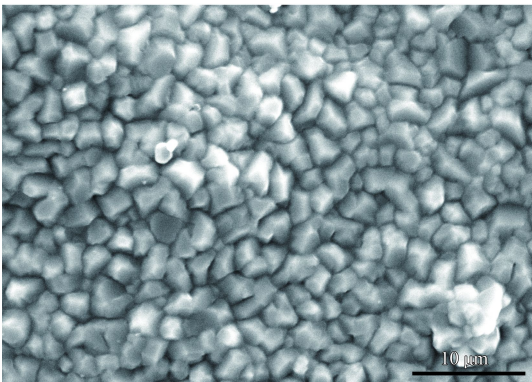
交流阻抗的测量在 PARSTAT2273 电化学工作站上进行, 测试频率范围为 $10^5 \sim 10^{-2} \text{ Hz}$, 阻抗谱测量信号幅值为 10 mV 的正弦波^[12]。腐蚀溶液取 pH=12.68, NaCl 质量分数为 3.5% 的混凝土模拟孔隙液。阻抗数据经计算机采集后, 利用

ZSimpWin 软件进行数据处理及阻抗谱的等效电路模型分析。

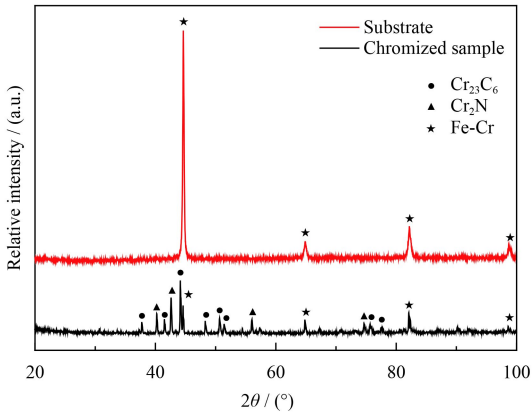
2 结果与分析

2.1 热扩散层的微观形貌及厚度

图 1(a) 为经过热扩散处理后试样的表面形貌。由图 1(a) 可见, 热扩散处理后试样表面均匀、致密地分布着许多细小颗粒, 其尺寸接近且与表层结合良好, 并紧密聚集在热扩散层表面, 更好地保护了基体。从图 1(b) 热扩散层和基体的 XRD 图谱分析可知, 这些致密的颗粒主要是 Cr_{23}C_6 和 Cr_2N 等铬和碳、氮等原子形成的碳化物和氮化物^[13]。在热扩散过程中, 基体内的 C 向表层扩散, 符合上坡扩散规律, 因此表层的碳含量高于基体, 碳原子与铬原子在试样表面形成碳化铬。碳化铬具有很高的硬度, 其维氏硬度可以达到 1 372 HV^[14], 因此通过热扩散处理后的试样具有良好的耐磨性能, 其表面维氏硬度可达 952 HV。



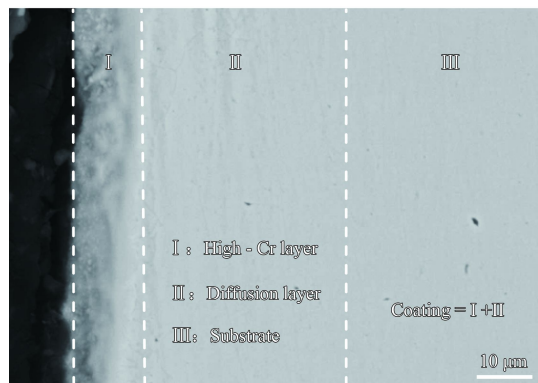
(a) Surface morphology of the thermal diffusion layer



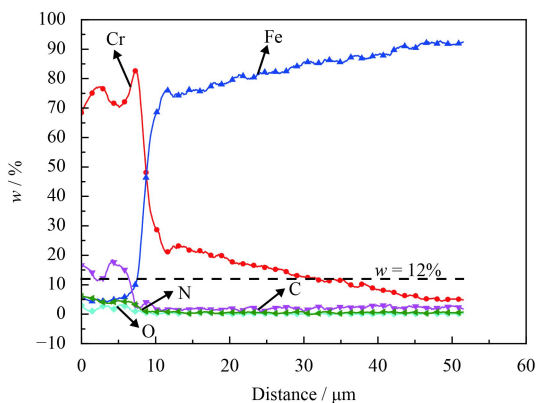
(b) XRD patterns of the thermal diffusion layer and substrate

图 1 热扩散层表面形貌及热扩散层和基体的 XRD 图谱
Fig.1 Surface morphology and XRD patterns of the thermal diffusion layer and substrate

图 2 为热扩散处理后试样的截面形貌以及对应 EDS 能谱线扫描得到的 C、N、O、Cr、Fe 的 5 种元素质量分数随扫描距离变化的关系曲线。从图中可知,热扩散层成分包括主要成分为碳化铬的富铬层和主要成分为 Fe-Cr 固溶体的扩散层。一般钢中的 Cr 质量分数在 12% 以上时才能在表面形成致密的钝化膜,具有良好的耐蚀性^[15],所以文中试验取 Cr 质量分数大于 12% 的部分为有效热扩散层。



(a) Section morphology of the sample after thermal diffusion treatment



(b) Corresponding composition distribution

图 2 热扩散处理后试样的截面形貌,以及对应热扩散层的 EDS 线扫描成分分布

Fig.2 Section morphology of the sample after thermal diffusion treatment and the corresponding composition distribution by EDS linear scanning

由图 2 可见,热扩散层与基体结合紧密、无裂缝且都是由富铬层+扩散层两部分构成,其中富铬层的厚度约为 $7.5\ \mu\text{m}$,扩散层厚度约为 $22.5\ \mu\text{m}$,热扩散层与基体之间为成分渐变的冶金结合,对于富铬层和扩散层,由于二者成分不同,显现出深浅不同的颜色^[16-17]。热扩散层中 Cr 元素符合固态扩散规律由表面向里呈梯度分布,随着距表面距离的增大,Cr 含量先增加后迅速降低;Fe 元素

含量随铬元素含量的下降而上升,在热扩散层和基体的界面处停止大幅上升,直到完全进入基体达到稳定;C 元素分布符合上坡扩散规律,基体内的 C 向表层扩散,但只在近表层区域内含量稍高,随后迅速降低,与基体趋于一致;试样表面的 N 是由热扩散剂中氯化铵在高温下受热分解渗入的,因此试样表层发现少量的 N 元素;O 元素也只在近表层含量稍高,这表明热扩散过程几乎未发生氧化反应。

从图 2 中可以看出,试样经过热扩散处理后铬元素扩散至基体的扩散深度为 $46\ \mu\text{m}$,Cr 元素质量分数大于 12% 的有效热扩散层厚度 $30\ \mu\text{m}$ 。

2.2 浸泡腐蚀试验

图 3 分别为 HRB400、316L、“类不锈钢”钢筋 3 种材料在 $\text{pH}=9.68$,质量分数为 10%NaCl 的混凝土模拟孔隙液中浸泡 20 d 后的宏观腐蚀形貌,在碱性的混凝土孔隙液中,试样处于钝化状态,当孔隙液中的 Cl 浓度达到某一特定值时,会使钢筋表面钝化膜破裂,形成“大阴极-小阳极”的腐蚀电池,钢筋发生局部腐蚀。从图 3 中可以看出,HRB400 发生了明显的均匀腐蚀,以及大量局部腐蚀特征,腐蚀最严重,而“类不锈钢”钢筋和 316L 无明显腐蚀特征。比较 3 种材料在相同介质条件下的宏观腐蚀形貌可知,316L 和“类不锈钢”钢筋的耐氯离子腐蚀性能要明显优于 HRB400。

图 4 分别为 HRB400、316L、“类不锈钢”钢筋 3 种材料在 $\text{pH}=9.68$,质量分数为 10%NaCl 的

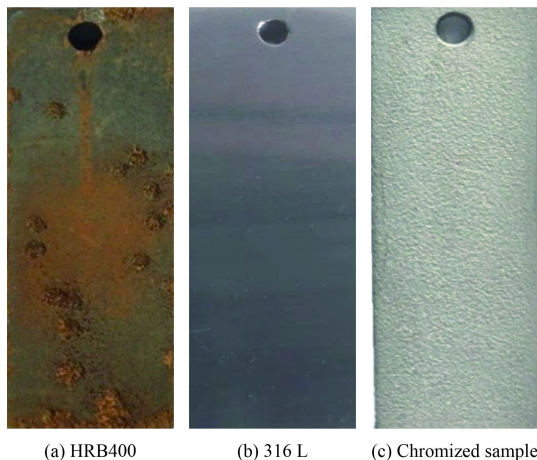


图 3 3 种材料在混凝土模拟孔隙液中浸泡 20 d 后的宏观腐蚀形貌

Fig.3 Corrosion morphologies of three kinds of material immersed for 20 days ($w_{\text{NaCl}}=10\%$, $\text{pH}=9.68$)

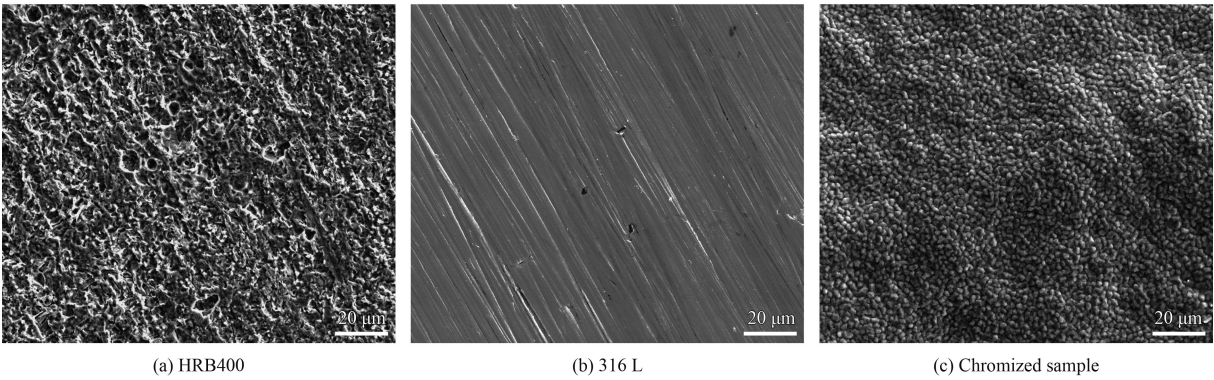


图4 3种材料在混凝土模拟孔隙液中浸泡20 d去腐蚀产物后表面微观形貌

Fig.4 Micro corrosion morphologies of three kinds of material immersed for 20 days after removing the corrosion products ($w_{\text{NaCl}}=10\%$, $\text{pH}=9.68$)

混凝土模拟孔隙液中浸泡20 d去腐蚀产物后表面微观形貌。HRB400的表面腐蚀情况最严重, 腐蚀坑较多且尺寸较大, 316L表面出现少量点蚀坑, 而“类不锈钢”钢筋表面无明显腐蚀特征。

通过计算3种试样的腐蚀失厚 $D(\text{mm/a})$ 以表征腐蚀速率, 如表3所示, “类不锈钢”钢筋的耐蚀性比HRB400提高了287.4倍, 比316L提高了1.4倍。浸泡腐蚀试验表明“类不锈钢”钢筋在3种材料中腐蚀速率最低, 其耐氯离子腐蚀性能优于316L和HRB400。

表3 3种材料在混凝土模拟孔隙液中浸泡20 d后的腐蚀速率

Table 3 Corrosion rate of the three different material immersed for 20 days ($w_{\text{NaCl}}=10\%$, $\text{pH}=9.68$) ($\text{mm}\cdot\text{a}^{-1}$)

Types of material	Corrosion rate
HRB400	0.459 8
316L	0.002 3
Chromized sample	0.001 6

2.3 极化曲线测试结果

图5给出了3种材料在Cl质量分数为3.5%, $\text{pH}=12.68$ 的混凝土模拟孔隙液中浸泡2 h后的电化学极化曲线结果。在强极化区, 极化电位与净电流密度遵循Butler-Volmer公式^[18-19]:

$$i=i_{\text{corr}}\left\{\exp\left[\frac{2.303(E-E_{\text{corr}})}{b_a}\right]-\exp\left[\frac{2.303(E_{\text{corr}}-E)}{b_c}\right]\right\}$$
(2)

式中 i_{corr} 代表腐蚀电流密度, E_{corr} 代表腐蚀电位, 拟合结果见表4, 从表中可知, 3种材料中, “类不锈钢”钢筋的腐蚀电位比316L和HRB400更正, 腐蚀电位越正, 金属的热力学腐

蚀倾向越小, 耐蚀性越好^[20]。“类不锈钢”钢筋的腐蚀电流密度是HRB400的1/299, 是316L(维钝电流密度)的1/223, 3种材料中“类不锈钢”钢筋的腐蚀电流密度最小, 这表明“类不锈钢”钢筋的耐氯离子腐蚀性能优于316L和HRB400。

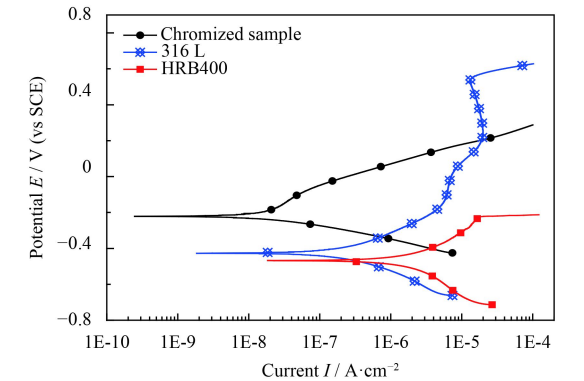


图5 3种材料在混凝土模拟孔隙液中的动电位极化曲线

Fig.5 Potentiodynamic polarization curves of the three different samples in simulated concrete pore solution ($w_{\text{NaCl}}=3.5\%$, $\text{pH}=12.68$)

表4 极化曲线拟合数值

Table 4 Fitting parameters for the polarization curves of steels

Types of material	$E_{\text{corr}}/\text{mV}$	$i_{\text{corr}}/(\mu\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$
HRB400	-468	3.891
316L	-461	2.895
Chromized sample	-217	0.013

2.4 交流阻抗测试结果

图6分别给出了3种材料在3.5%NaCl质量分数, $\text{pH}=12.68$ 的混凝土孔隙液中浸泡2 h后的电化学阻抗谱。容抗弧半径的大小则直接反映了测试试样的耐蚀性, 半径越大, 表明其溶解阻力越

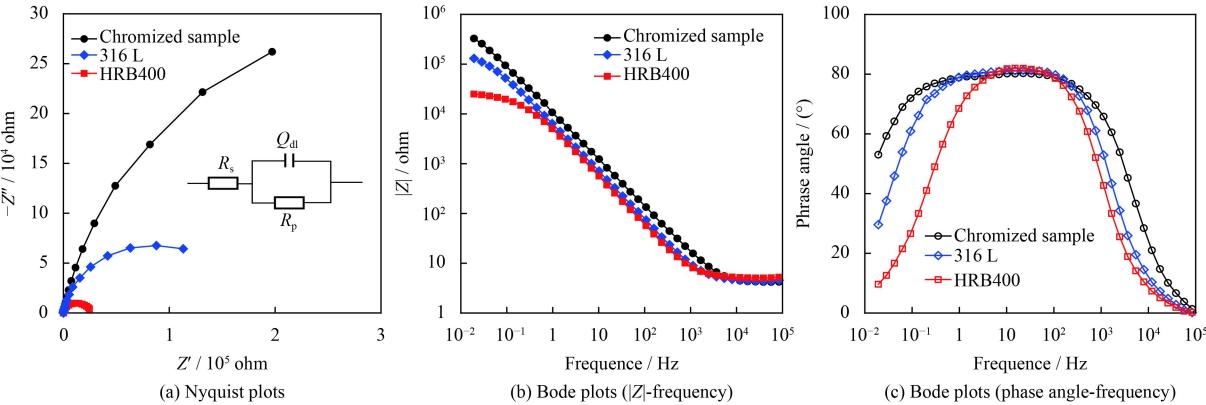


图 6 3 种材料在混凝土模拟孔隙液中浸泡 2 h 后的电化学阻抗谱

Fig.6 EIS plots of three kinds of samples immersed in concrete simulated solution for 2 h ($w_{\text{NaCl}}=3.5\%$, $\text{pH}=12.68$)

大，即在腐蚀介质中的稳定性越好。图 6 表明“类不锈钢”钢筋的溶解阻力最大，其次为 316L，最差的是 HRB400。等效电路中 R_s 代表溶液电阻， R_p 表示由电荷转移反应引起的极化电阻， Q_{dl} 表示相位角元件 (CPE)，代表双电层电容^[21]。 R_p 由钝化膜电阻 R_f 和电荷转移电阻 R_{ct} 组成，钝化膜的防护性能可以通过 R_p 表征，其值越大耐腐蚀性能越好^[22]。

表 5 给出了等效电路中各元件的拟合值。由拟合结果可知，“类不锈钢”钢筋的 R_p 值是 HRB400 的 28.7 倍，是 316L 的 4.5 倍。交流阻抗的测试结果与前述试验结果是一致的。

表 5 等效电路各元件的拟合值

Table 5 Fitting values of various units in simplified equivalent circuit

Types of material	HRB400	316L	Chromized sample
$R_s/(\Omega \cdot \text{cm}^2)$	5.090	4.408	4.012
$Q_{dl}/10^{-5}$	5.47	4.48	2.71
n	0.916 3	0.908 2	0.890 4
$R_p/(10^4 \text{k}\Omega \cdot \text{cm}^2)$	2.40	15.5	68.9

3 结 论

(1) 通过热扩散工艺在自行研制的钢筋原坯表面形成一层化学成分满足不锈钢要求且耐腐蚀性能优异的“类不锈钢”表面层，试样表面铬元素扩散深度 46 μm ，有效热扩散层厚度 30 μm ，热扩散层与基体结合紧密、无裂缝且都是由富铬层+扩散层两部分构成，热扩散层主要由 Cr_{23}C_6 、Fe-Cr 和 Cr_2N 等相组成，且均匀、连续。

(2) 比较 3 种材料在含有 10%NaCl 的混凝土模拟孔隙液 ($\text{pH}=9.68$) 中浸泡 20 d 后的宏观腐蚀

形貌和去腐蚀产物后表面微观形貌可知，HRB400 的腐蚀情况最为严重，316L 发生了轻微腐蚀，而“类不锈钢”钢筋表面无明显腐蚀特征。浸泡腐蚀试验结果表明“类不锈钢”钢筋的耐蚀性比 HRB400 提高了 287.4 倍，比 316L 提高了 1.4 倍。

(3) 在含有 3.5%NaCl 的混凝土模拟孔隙液 ($\text{pH}=12.68$) 中，动电位极化曲线测试结果表明“类不锈钢”钢筋的腐蚀电流密度小于 HRB400 和 316L。交流阻抗测试结果表明“类不锈钢”钢筋的极化电阻 R_p 值大于 HRB400 和 316L。“类不锈钢”钢筋在混凝土模拟孔隙液中的耐氯离子腐蚀性能优于 HRB400 和 316L。

参考文献

[1] 洪定海. 混凝土中钢筋的腐蚀与保护[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1998: 5-10.
HONG D H. Corrosion and protection of steel bars in concrete[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1998: 5-10 (in Chinese).
[2] 李金贵, 曹备. 钢结构桥梁的腐蚀控制[J]. 中国表面工程, 2004, 17(5): 5-10.
LI J G, CAO B. Corrosion-controlling of the steel structure bridge[J]. China Surface Engineering, 2004, 17(5): 5-10 (in Chinese).
[3] 田惠文, 李伟华, 宗成中, 等. 海洋环境钢筋混凝土腐蚀机理和防腐涂料研究进展[J]. 涂料工业, 2008(8): 62-67.
TIAN H W, LI W H, ZONG C Z, et al. Research progress on corrosion mechanism of reinforced concrete and anti-corrosion coatings in marine environment[J]. Paint and Coatings Industry, 2008(8): 62-67 (in Chinese).
[4] BERTOLINI L, ELSENER B, PEDEFERRI P, et al. Corrosion of steel in concrete: prevention, diagnosis, repair[M]. Cambridge: Wiley-VCH, 2004.

- [5] 陈文标. 混凝土裂缝对氯离子侵蚀作用的影响研究[D]. 长沙: 中南大学, 2014.
CHEN W B. Study on the effect of concrete cracks on chloride corrosion[D]. Changsha: Central South University, 2014 (in Chinese).
- [6] 施锦杰, 孙伟, 耿国庆. 模拟混凝土孔溶液对钢筋钝化的影响[J]. 建筑材料学报, 2011(4): 452-458.
SHI J J, SUN W, GENG G Q. Influence of simulated concrete pore solution on reinforcing steel passivation[J]. Journal of Building Materials, 2011(4): 452-458 (in Chinese).
- [7] COJOCARU L, UCHIDA S, SANEHIRA Y, et al. Surface treatment of the compact TiO_2 layer for efficient planar heterojunction perovskite solar cells[J]. Chemistry Letters, 2015, 44(5): 674-676.
- [8] 赵晓博. 低温固体粉末热渗铬机理的研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
ZHAO X B. The research of low temperature solid power chromizing mechanism[D]. Jinan: Shandong University, 2011 (in Chinese).
- [9] 吕寿丹, 王镇波, 卢柯, 等. 表面纳米化 AISI316 钢的渗铬处理及其耐磨性[J]. 宝钢技术, 2011(2): 32-37.
LV S D, WANG Z B, LU K, et al. Chromizing treatment of the surface nano-crystallized AISI316 steel and its wear resistance[J]. Baosteel Technology, 2011(2): 32-37 (in Chinese).
- [10] 李雪莉, 李瑛, 王福会, 等. USSP 表面纳米化 Fe-20Cr 合金的腐蚀性能及机制研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2002, 22(6): 326-329.
LI X L, LI Y, WANG F H, et al. Corrosion behavior of Fe-20Cr alloy treated by ultrasonic shot peening technique[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2002, 22(6): 326-329 (in Chinese).
- [11] WANG Z, LIU J, WU L, et al. Study of the corrosion behavior of weathering steels in atmospheric environments[J]. Corrosion Science, 2013, 67(2): 1-10.
- [12] 林乃明, 谢发勤, 吴向清, 等. 渗铬层 P110 钢在 CO_2 饱和模拟油田采出液中的耐蚀性[J]. 沈阳工业大学学报, 2012(1): 41-47.
LIN N M, XIE F Q, WU X Q, et al. Corrosion resistance of chromized P110 steel in CO_2 -saturated simulated oilfield produced liquid[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2012(1): 41-47 (in Chinese).
- [13] LIN N, XIE F, WU X, et al. Influence of process parameters on thickness and wear resistance of rare earth modified chromium coatings on P110 steel synthesized by pack cementation[J]. Journal of Rare Earths, 2011, 29(4): 396-400.
- [14] 林化春, 丁润刚. 镍基合金-碳化铬复合涂层耐磨特性的研究[J]. 摩擦学学报, 1996(7): 277-281.
LIN H C, DING R G. Study on the antiwear behavior of Ni base alloy chromium carbide composite coating[J]. Tribology, 1996(7): 277-281 (in Chinese).
- [15] 罗永赞. 铁素体不锈钢的进展[J]. 材料开发与应用, 1996(4): 41-48.
LUO Y Z. Development of ferrite stainless steels[J]. Development and Application of Materials, 1996(4): 41-48 (in Chinese).
- [16] 刘长禄, 崔红. 铬稀土元素共渗及其渗层性能的研究[J]. 金属热处理, 1990(6): 22-27.
LIU C L, CUI H. Study on the RE-chromizing and processes and the properties of the diffusing layer[J]. Heat Treatment of Metals, 1990(6): 22-27 (in Chinese).
- [17] XING X, WANG H, LU P, et al. Influence of rare earths on electrochemical corrosion and wear resistance of RE-Cr/Ti pack coatings on cemented 304 stainless steel[J]. Surface & Coatings Technology, 2016, 291: 151-160.
- [18] WANG R, LUO S, LIU M, et al. Electrochemical corrosion performance of Cr and Al alloy steels using a J55 carbon steel as base alloy[J]. Corrosion Science, 2014, 85(1): 270-279.
- [19] CÁCERES L, VARGAS T, HERRERA L. Determination of electrochemical parameters and corrosion rate for carbon steel in un-buffered sodium chloride solutions using a superposition model[J]. Corrosion Science, 2007, 49(8): 3168-3184.
- [20] 谢伟杰, 李获, 胡艳玲, 等. 用自腐蚀电位预测 LY12CZ 铝合金的腐蚀损伤[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1999(4): 95-99.
XIE W J, LI D, HU Y L, et al. Application of free corrosion potential to predict corrosion damage of LY12CZ aluminum alloy[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1999(4): 95-99 (in Chinese).
- [21] 曹楚南, 张鉴清. 电化学阻抗谱导论[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 45-50.
CAO C N, ZHANG J Q. Introduction of electrochemical impedance spectroscopy[M]. Beijing: Science Press, 2002: 45-50 (in Chinese).
- [22] LIU M, CHENG X, LI X, et al. Corrosion behavior of Cr modified HRB400 steel rebar in simulated concrete pore solution[J]. Construction and Building Materials, 2015, 93: 884-890.