

# 耐蚀性钢筋耐蚀性能评价研究

陈洁, 吕尚霖

中冶检测认证有限公司, 国家建筑钢材质量监督检验中心, 北京

收稿日期: 2022年2月2日; 录用日期: 2022年2月28日; 发布日期: 2022年3月7日

## 摘要

采用周浸试验及半电池电化学测试等方法, 研究了不同Cr含量耐蚀钢筋的腐蚀行为, 对不同Cr含量耐蚀钢筋在氯离子环境下的耐蚀性能进行了评价, 用光学显微镜和扫描电子显微镜观察了试样的显微组织和锈层形貌。获得了不同钢筋的临界氯离子浓度数值, 并分别计算了钢筋的耐蚀能力指数。研究表明, 合金元素Cr使得钢筋表面形成富Cr的致密稳定、粘附性好的内锈层, 阻滞了钢筋锈蚀反应的物质传输, 同时阻碍了Cl<sup>-</sup>侵蚀钢筋基体, 控制好硫化锰夹杂可以有效控制点蚀的发生, 从而提高临界氯离子浓度。

## 关键词

耐蚀钢筋, 电化学性能, 合金元素, 耐蚀能力指数

# Study on Evaluation of Corrosion Resistance of Corrosion-Resistant Steel Bar

Jie Chen, Shanglin Lyu

National Construction Steel Quality Supervision and Test Centre, Inspection and Certification Co., Ltd., MCC, Beijing

Received: Feb. 2<sup>nd</sup>, 2022; accepted: Feb. 28<sup>th</sup>, 2022; published: Mar. 7<sup>th</sup>, 2022

## Abstract

The corrosion behavior of corrosion-resistant steel bars with different Cr content was studied by means of cyclic immersion test and semi battery electrochemical test. The corrosion resistance of corrosion-resistant steel bars with different Cr content in chloride ion environment was evaluated. The microstructure and rust morphology of the samples were observed by optical microscope and scanning electron microscope. The critical chloride concentration of different steel bars was obtained, and the corrosion resistance index of steel bars was calculated. The results show that the alloy element Cr makes the steel surface form a dense and stable inner rust layer, and it blocks the

**material transport of corrosion reaction. At the same time, it prevents chloride ion from corroding the steel base. Controlling the content of MnS inclusions can effectively prevent pitting, so as to improve the critical chloride ion concentration.**

## Keywords

**Corrosion-Resistant Steel Bar, Electrochemistry Performance, Alloy Content, Corrosion Resistance Index**

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

钢筋混凝土结构在我国乃至全世界都是最为重要的建筑结构之一, 然而由于钢筋混凝土结构在设计使用年限尚未到期之前而过早失效, 由之引发的安全事故, 人员伤亡以及经济损失已经渐渐成了不容忽视的问题[1]。钢筋锈蚀是导致钢筋混凝土结构提前失效的主要原因之一, 目前普遍认为氯离子的侵害主要多发于沿海地区建筑以及由于除冰盐带入建筑物内部, 其危害程度已经大大超过了混凝土碳化的危害[2]。混凝土在上述外因作用下, 其材料使用的耐久性就会变差, 因而会慢慢丧失对钢筋的保护作用。当保护钢筋的混凝土开裂以后, 钢筋直接接触到氯离子, 钢筋表面的钝化层就会被破坏, 并且发生腐蚀电化学反应。受到腐蚀危害的钢筋不仅体积受到损失, 各项力学性能也迅速衰退, 从而严重影响整个结构的使用性能与承载能力。钢筋的腐蚀还会造成体积胀大使得混凝土保护层进一步开裂, 然后继续加剧腐蚀的速度。

一般情况下虽然  $\text{Cl}^-$  含量的增大会导致钢筋被腐蚀的危险性增大, 但是并不是说如果混凝土中混入了  $\text{Cl}^-$  钢筋就会被立刻腐蚀, 只有当混凝土中的孔隙液中的  $\text{Cl}^-$  浓度达到一定的程度, 并且具备腐蚀反应的其他条件比如氧气和水的时候钢筋才会发生腐蚀, 通常把可以引发钢筋锈蚀的最低氯离子浓度叫做临界氯离子浓度。

混凝土结构中的钢筋在腐蚀过程中可以分为两个阶段, 腐蚀开始发生的阶段和腐蚀发展的阶段。首先在开始腐蚀的发生阶段伴随着混凝土的碳化和氯离子浓度的提高,  $\text{pH}$  值会不断的降低并且  $\text{Cl}^-$  浓度会逐渐接近临界水平。当  $\text{pH}$  值下降到足够小并且氯离子浓度达到临界水平时, 即钢筋脱离了碱性保护层, 钢筋被去钝化, 开始出现点蚀, 并正式进入了腐蚀发展的阶段。在腐蚀发展阶段, 腐蚀产物不断出现, 钢筋的横截面积开始减小, 随着腐蚀产物的张力会使混凝土保护层被进一步破坏, 当这些有害程度超过结构可承受范围的时候, 混凝土结构正式失效[3], 如图 1 所示:

当混凝土结构暴露在氯离子环境下, 一旦腐蚀开始发展, 腐蚀会迅速开始, 在大约三年的时间即可让混凝土保护层开裂然后发生剥落。增强混凝土耐久性的方法之一就是增强钢筋本身的耐蚀性, 应用耐蚀性钢筋。近几年国内外开始广泛研究用低合金含量来实现生产耐蚀钢筋, 配合技术领先的炼钢和轧钢技术, 加上各种合金元素如铜、镍、铬、矾等元素复合生产低合金耐蚀钢筋。其特点是低成本实现耐蚀性能[4]。由于其合金含量低远远低于不锈钢钢筋要求的合金含量, 因此就生产成本可以接受, 并且施工与普通钢筋一样, 均采用普通的热轧态交货, 与混凝土的粘结性能也不错, 很可能以后会逐步取代不锈钢钢筋和涂层钢筋, 成为恶劣环境下选用钢筋的首选。本文期望通过对不同种 Cr 含量耐蚀钢筋进行耐腐

蚀性能测试, 通过模拟海洋环境来测试耐蚀钢筋对海洋环境的耐蚀效果, 并对结果进行分析, 探究耐蚀机理, 并对耐蚀性能进行评价。

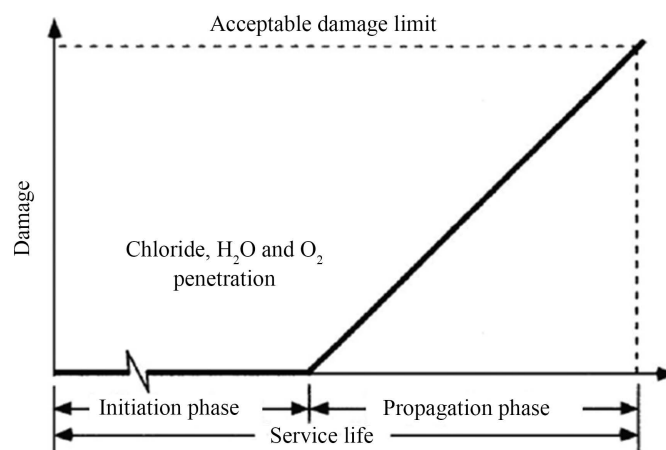


Figure 1. Life analysis of steel corrosion in concrete

图 1. 混凝土中钢筋锈蚀的寿命分析

## 2. 试验材料与方法

### 2.1. 材料

#### 2.1.1. 材料选择

选用福建三宝钢铁有限公司生产的普通钢筋 HRB400 及耐蚀性钢筋 HRB400C、HRB500a、HRB500C 进行试验。HRB400 普通钢筋作为对比试样, 后面称之为 0#, 铬含量约为 0.30%, 0.35%, 0.40% 的低铬含量的耐蚀钢筋后文称之为 1#、2#、及 3#, 其中 1#, 2# 牌号为 HRB400C 钢筋, 3# 牌号为 HRB500a 钢筋, 以及铬含量约为 1.5% 和 5% 的高铬含量的耐蚀钢筋后文称之为 4#, 5#, 4# 牌号为 HRB400C 钢筋; 5# 牌号为 HRB500C 的钢筋。试验钢筋序号及牌号如表 1 所示:

Table 1. Serial number and brand name of test reinforcement

表 1. 试验钢筋序号及牌号

序号	Cr 含量	牌号
0#	无	HRB400
1#	0.30%	HRB400C
2#	0.35%	HRB400C
3#	0.40%	HRB500a
4#	1.5%	HRB400C
5#	5%	HRB500C

#### 2.1.2. 化学成分

试验钢化学成分如表 2 所示, 可以看出此 1#, 2#, 3# 钢筋除了铬元素含量和镍元素含量以外, 其它元素没有明显不同, 铬元素含量为 0.30% 左右, 0.35% 左右和 0.40% 左右, 镍元素含量分别为 0.30% 左右, 0.35% 左右和 0.50% 左右, 与生产预期基本相当。

4# 与 5# 钢筋的元素含量与其他钢筋差异较大, 首先是硫含量控制很低分别为 0.005% 与 0.004%, 有

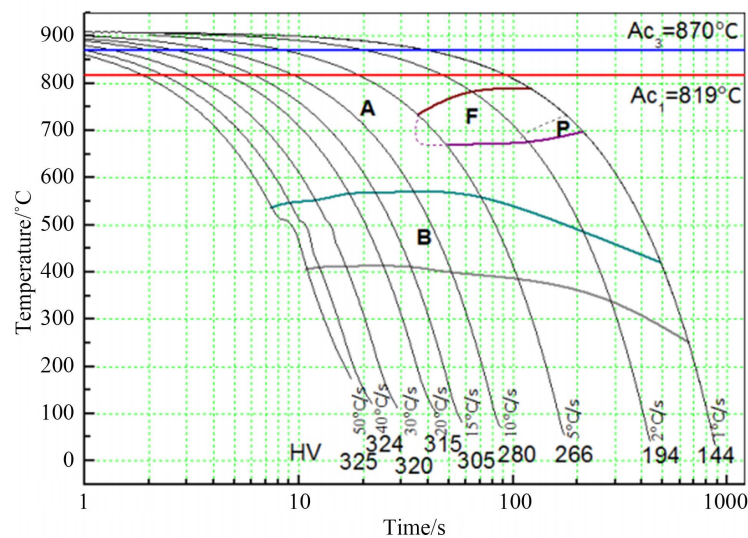
效的控制了表面硫化锰夹杂, 在显微镜下几乎不可见硫化锰夹杂。然后是铬含量分别为 1.5%左右和 5%左右, 含量相对其它钢筋比较高。铜含量分别为 0.4%左右与 0.3%左右, 相对较高。镍含量为 0.20%与 0.15%左右, 仅相对略高。

**Table 2.** Chemical composition of test steel (mass fraction)/%

**表 2.** 试验钢化学成分(质量分数)/%

编号	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	V	Cu	Mo
0#	0.243	0.456	1.370	0.020	0.023	0.001	0.002	0.047	0.013	0.004
1#	0.210	0.380	1.370	0.030	0.027	0.290	0.320	0.071	0.014	0.003
2#	0.180	0.34	0.99	0.028	0.022	0.36	0.34	0.008	0.015	0.003
3#	0.200	0.360	1.200	0.072	0.028	0.420	0.490	0.057	0.210	0.003
4#	0.148	0.694	1.049	0.014	0.005	1.562	0.185	0.049	0.410	0.006
5#	0.054	0.241	0.187	0.014	0.004	5.094	0.140	0.018	0.312	0.010

耐蚀钢筋生产需要再普通热轧钢筋的基础上进行工艺调整。首先是熔炼部分精准控制各个微合金元素的含量, 添加了 Cr、Ni、Cu 等元素。并且尽量控制并减少 S 含量, 以追求更好的耐蚀效果。其次在轧钢时的控轧控冷技术也需要严格的把控。图 2 为 1.5% Cr 含量钢种的 CCT 曲线:



**Figure 2.** CCT curve for controlled rolling and controlled cooling of 1.5% Cr corrosion resistant steel

**图 2.** 1.5% Cr 耐蚀钢筋控轧控冷 CCT 曲线图

从图 2 中可以看出, 高 Cr 耐蚀钢筋的  $Ac_1 = 819^\circ\text{C}$ ,  $Ac_3 = 870^\circ\text{C}$ 。当冷速控制在  $5^\circ\text{C/s}$  以上时, 钢的组织以贝氏体组织为主。冷速在  $5^\circ\text{C/s}$  以下时, 组织以铁素体加贝氏体为主。

## 2.2. 试验方法

采用德国 Zwick 型号为 Z100 拉力试验机对 6 种耐蚀钢筋力学性能进行验证; 用日本 Olympus 型号为 GX51 的显微镜进行金相组织观察; 采用捷克 FEI Republics.r.o 扫描电镜型号为 QUANTA 250 FEG 进行微观组织分析, 并结合美国 EDAX 型号 APOLLO XP 能谱仪进行组织化学成分分析; 采用上海辰华型号 6043E 电化学工作站进行耐蚀钢筋自腐蚀电位测试来确定临界氯离子浓度。

耐蚀钢筋自腐蚀电位测定步骤如下:

- 1)、将钢筋加工成直径为 10 mm 长度为 30 mm 的小样, 并且光洁度不低于 6;
- 2)、分别用两遍汽油, 酒精清洗油污, 然后迅速用热风机吹干;
- 3)、将试样的一段与铜制导线焊接上;
- 4)、用环氧树脂将钢筋涂覆 30 mm 长, 树脂固化后, 放入干燥器内备用;
- 5)、将彻底干燥的试样露在外的一段打磨, 依次打磨 400, 600, 800, 1000, 1500, 2000 号砂纸, 然后再抛光抛亮;
- 6)、将所有制备好的样品放入混凝土模拟空隙液中浸泡 7 天, 让钢筋外露表面形成钝化膜, 模拟空隙液为碱性过饱和的  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶液;
- 7)、将具有有效钝化膜的钢筋小样浸泡在电解槽溶液中, 溶液为不同浓度的 NaCl 溶液, 并恒温保持  $30^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ , 在每种浓度的 NaCl 溶液中放置不同种类钢筋的 3 个平行试样。浸泡 24 小时以后开始测定腐蚀点位(参比电极使用氯化银)。图 3(a)为加工好的浸泡试样, 图 3(b)为将试样放置在混凝土孔隙液中的浸泡过程, 图 3(c)在水浴锅内调整混凝土孔隙液温度, 以达到试验要求, 图 3(d)为电化学测试过程。

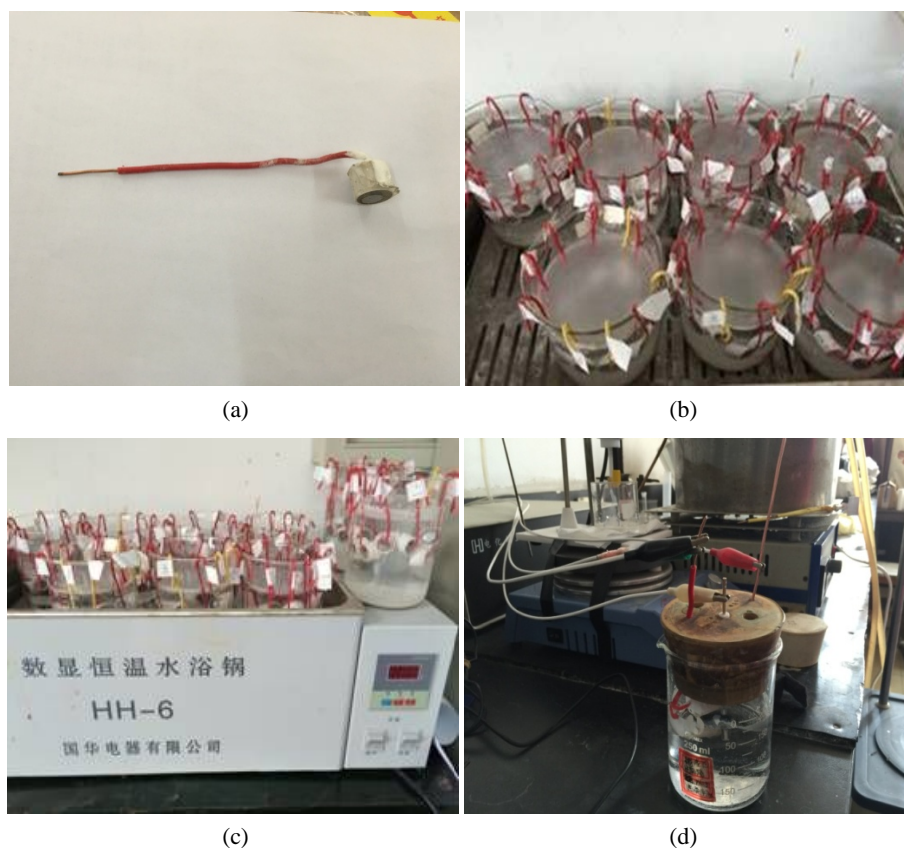


Figure 3. Electrochemical test sample and test process  
图 3. 电化学试验样品及试验过程

### 3. 试验结果与分析

#### 3.1. 力学性能

6 种钢筋的力学性能如表 3 所示: 从表中可以看出, 0#, 1#, 2#, 4#钢的屈服强度在 420~445 MPa

范围, 抗拉强度在 565~590 MPa 范围, 延伸率在 29%~31% 范围。3#和 5#钢屈服强度在 550~565 MPa 范围。表明耐蚀钢筋各项力学性能均符合表 4, GB/T 33953-2017 的耐蚀钢筋力学性能的规定[5]。

**Table 3.** Mechanical properties of test reinforcement

**表 3.** 试验钢筋力学性能表

编号	规格	ReL/MPa	Rm/MPa	A/%	Agt/%
0#	16	430	580	29	15.6
1#	16	420	570	30	14.8
2#	16	425	565	31	15.9
3#	16	550	690	28	13.5
4#	16	445	590	30	15.4
5#	16	565	700	31	15.8

**Table 4.** Standard values specified in GB/T 33953-2017 (not less than)

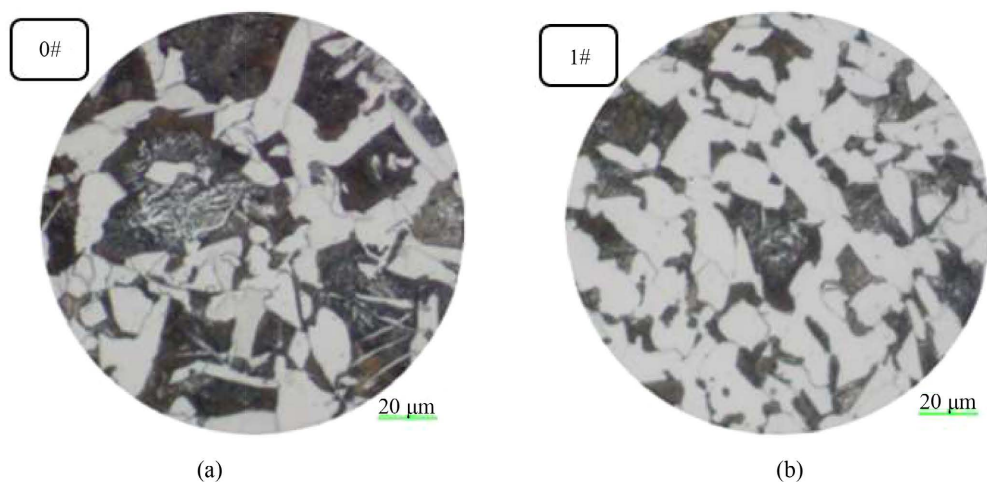
**表 4.** GB/T 33953-2017 规定的标准值(不小于)

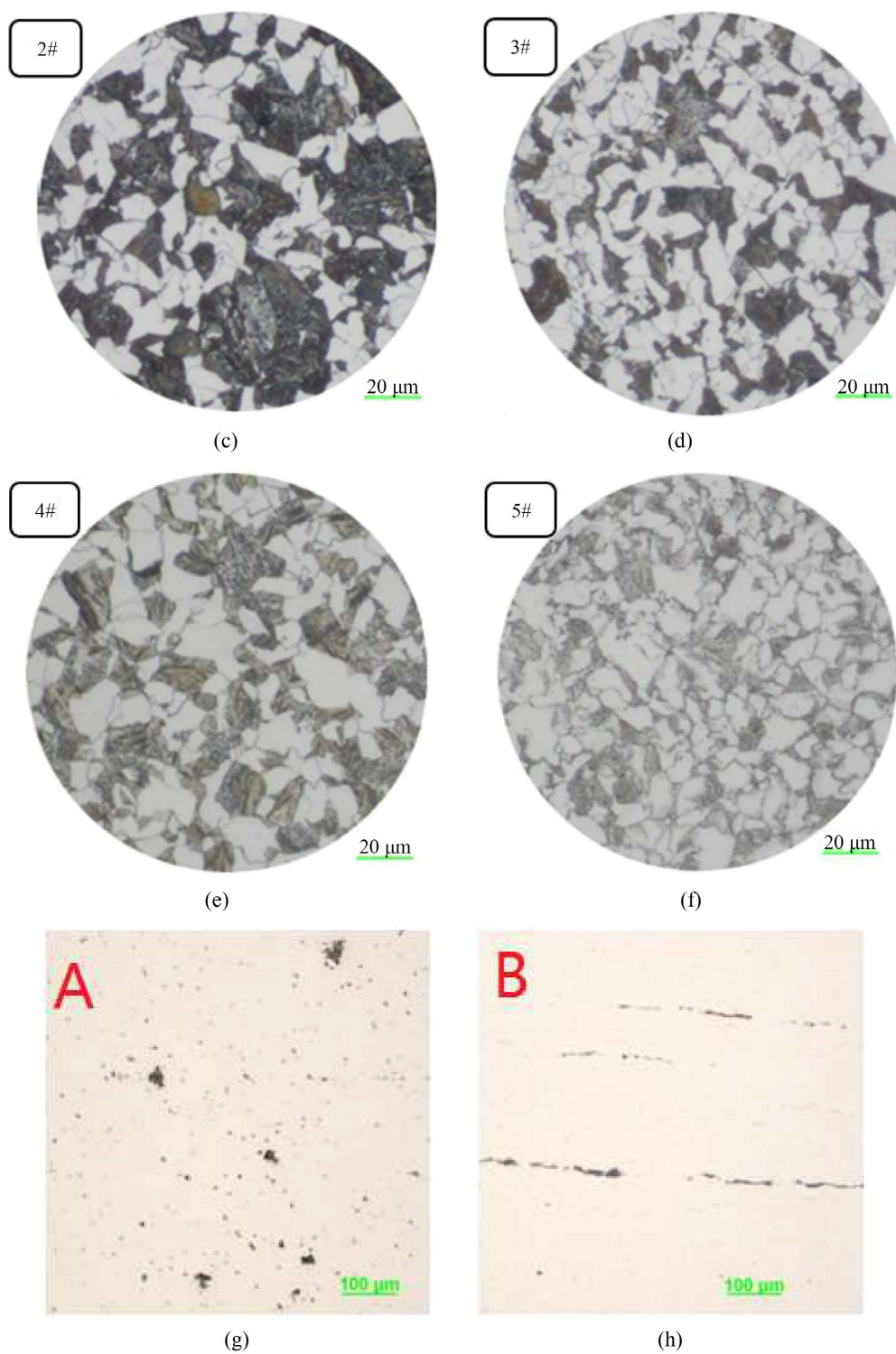
牌号	ReL/MPa	Rm/MPa	A/%
HRB400	400	540	16
HRB500	500	630	15

对总共的 6 批次钢筋分别做了弯曲以及疲劳试验, 弯曲试验全部符合国家标准, 疲劳试验按照英标 BS4449:2005 的要求进行试验, 频率为 75 Hz, 振幅为 200 MPa, 应力比为 0.2 [6]。试验结果均满足两百万次疲劳性能要求。

### 3.2. 金相组织

6 种耐蚀钢筋的金相组织如图 4(a)到图 4(f)所示: 从图中可以看出各个钢筋主要由铁素体与珠光体以及一定量的贝氏体组成, 5#钢筋的晶粒度晶粒尺寸高, 边部晶粒更加细小。对比所有 400 级别(0#, 1#, 2#, 4#)钢筋晶粒度从大到小依次为: 4#, 2#, 1#, 0#, 晶粒度为 8.5, 9, 9.5, 9.5。对比所有 500 级别钢筋晶粒度为 5#号为 10, 3#为 9.5, 并且 5#的渗碳体含量较少。从心部和边部的组织对照来看, 其组织差异较小。





**Figure 4.** Metallographic diagram of reinforcement  
**图 4.** 钢筋金相图

0#到 3#在显微镜下均可见到不同程度的长条状与点状硫化锰夹杂如图 4(e), 4#与 5#显微镜下几乎见不到硫化锰夹杂。

### 3.3. 电化学测试

腐蚀电位与浓度关系趋势如图 5 所示, 由图中可以发现:

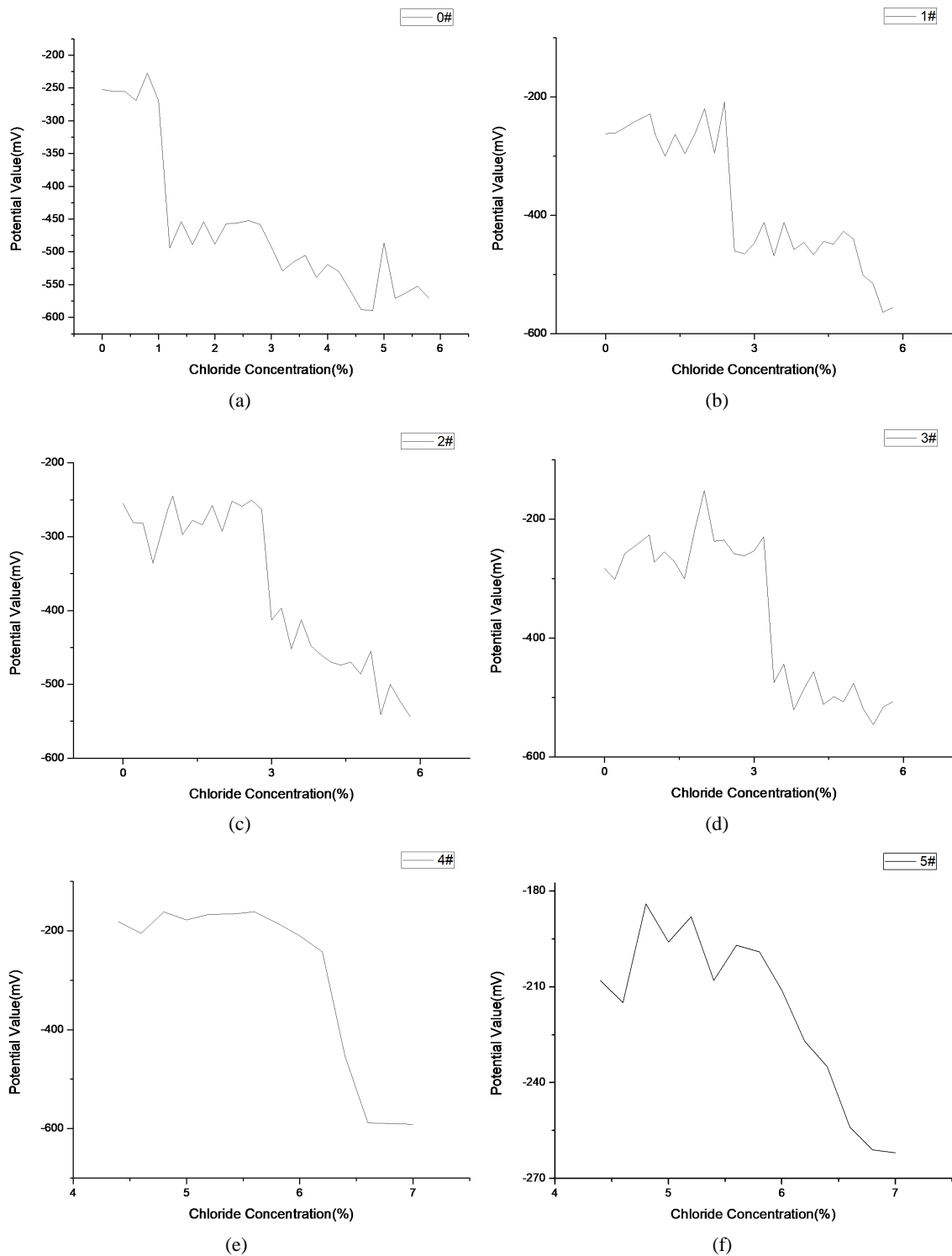


Figure 5. Relational trend chart of corrosion potential of reinforcement and chloride concentration

图 5. 钢筋腐蚀电位与氯离子浓度关系趋势图



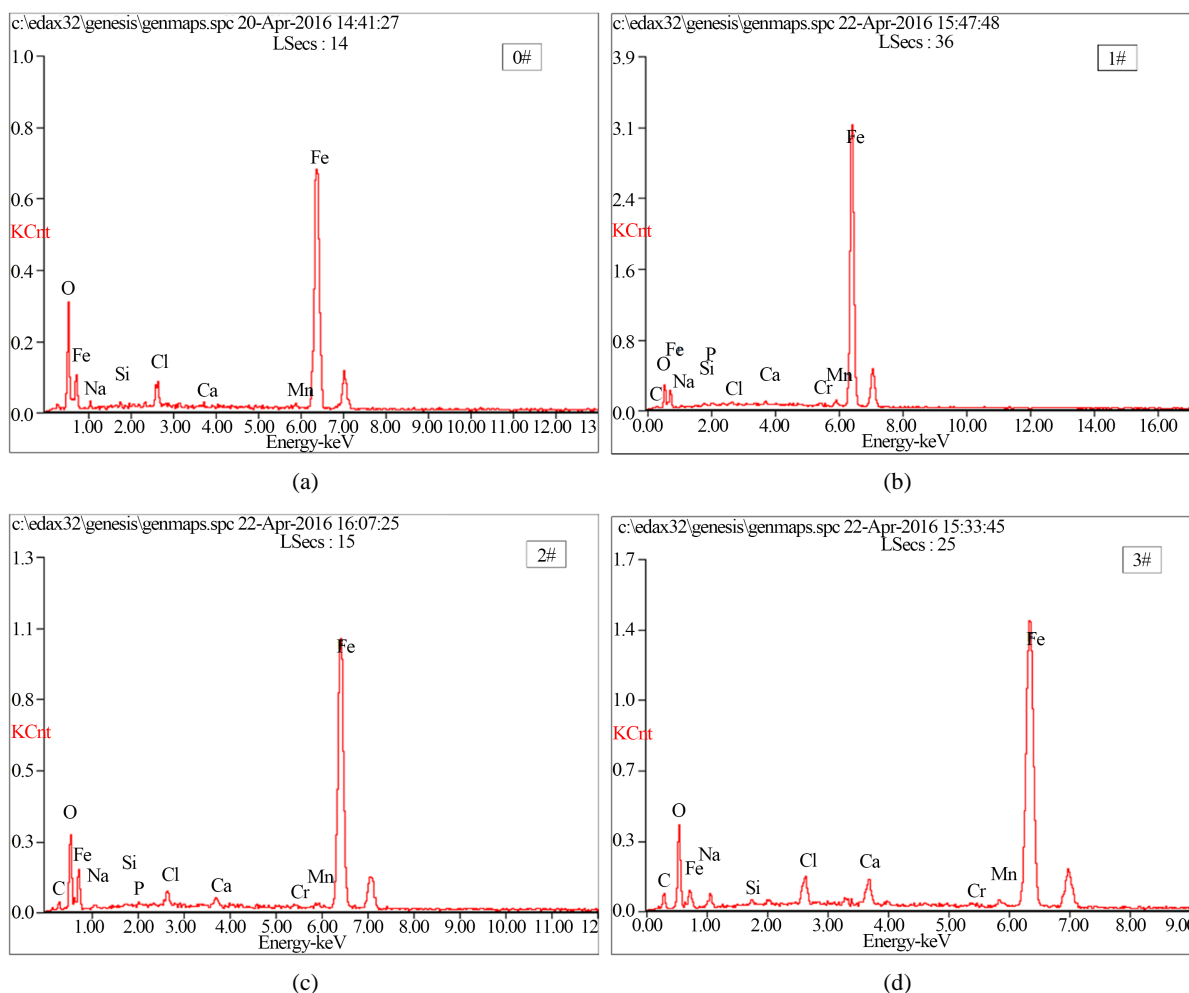
通过图5我们可以发现0#钢筋的临界氯离子浓度很低, 大概在1.1就会开始发生腐蚀, 即当少量氯离子渗透到混凝土保护层, 接触到钢筋使孔隙液含氯离子浓度为1.1%时, 钢筋就会迅速开始发生电化学反应, 并开始生成腐蚀产物, 耐腐蚀效果并不理想。同时也可以看出来氯离子对于普通钢筋的破坏相当迅速, 只要1%左右就会迅速的侵蚀钢筋。

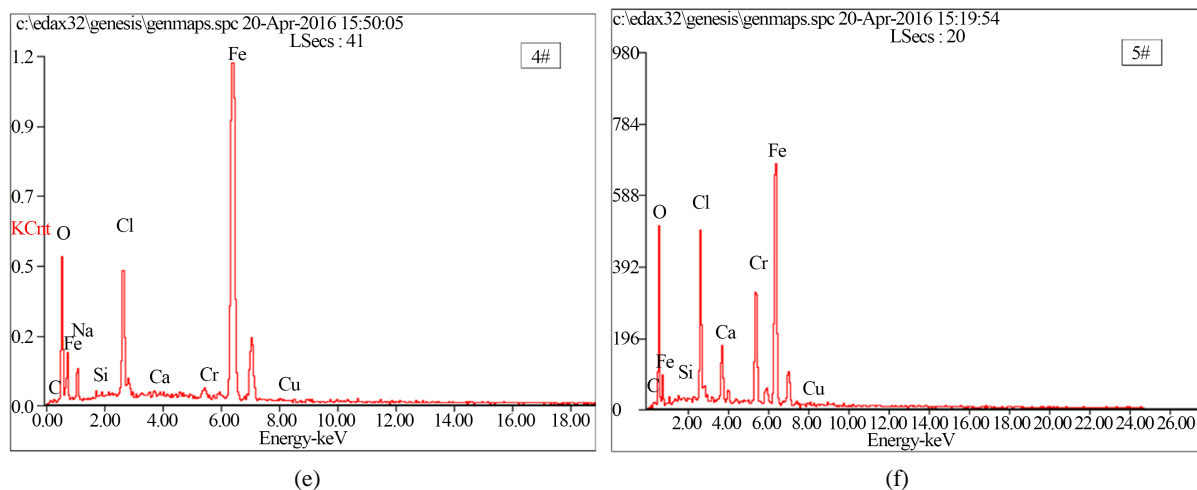
1#, 2#和3#相对于0#对比钢筋添加了少量合金元素。1#钢筋的临界氯离子浓度约在2.5%, 2#钢筋约为2.9%, 3#钢筋为3.3%左右, 由此可见, 少量的耐蚀合金元素的添加就使得耐蚀性能有了显著的提高, 3#钢筋的临界氯离子浓度已经基本与海水相当, 配合性能较好的混凝土保护层, 可以很好地提高建筑物的耐久性, 从而抵御钢筋在非严苛海洋的环境下的腐蚀行为。

4#和5#钢筋的耐腐蚀性能相对于0#, 1#, 2#和3#钢筋表现得更好, 4#的临界氯离子浓度大约在6.3%左右, 已经大大地超过海水的浓度, 基本上可以满足浸泡在海水(浓度3.5%左右)中服役的条件, 在一般的海洋环境下不会迅速发生腐蚀, 并且可以抵御一些其它氯离子环境下的侵蚀。5#钢筋中添加的Cr含量达到5%, 具有较好的耐蚀性, 当将NaCl浓度提高为7%时, 5#钢筋尚未有明显的电化学反应, 说明5#钢筋的临界氯离子浓度超过7%的, 基本满足除严苛海洋下的氯离子的侵蚀, 可用于大型重点耐久性工程。

### 3.4. 腐蚀产物分析

使用扫描电镜对各种钢筋试样的腐蚀产物进行扫描得到以下结果:

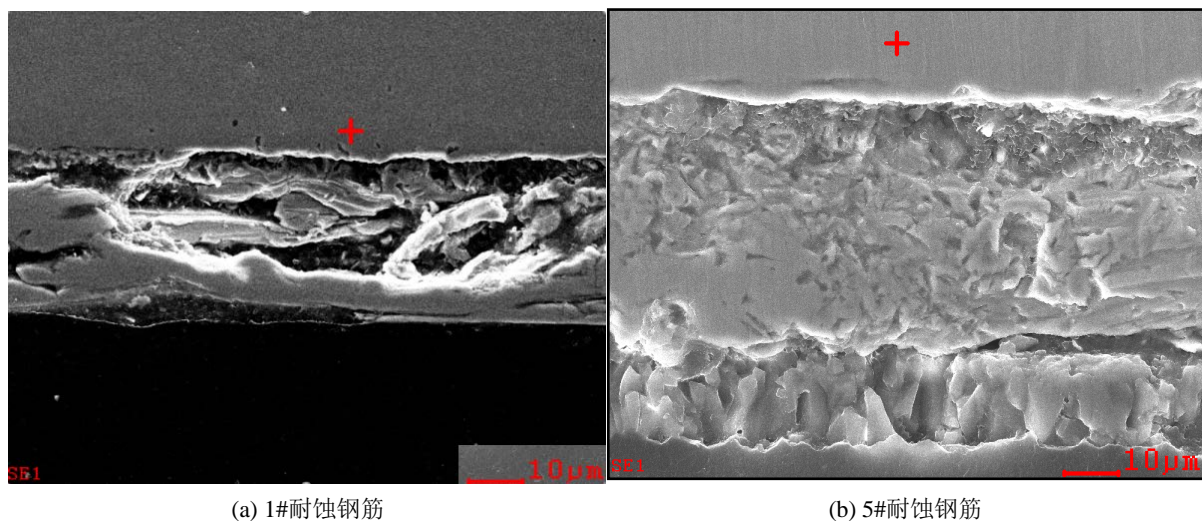




**Figure 6.** Energy spectrum of corrosion products of steel bars  
**图 6.** 钢筋锈蚀产物能谱图

通过图 6(a) 可以看到 0# 对比钢筋在氯离子环境下生成的锈蚀产物中主要成分为氧化铁和氯化铁, 没有合金元素的富集, 所以不能受到合金元素的保护。图 6(b)、图 6(c)、图 6(d) 为 1#, 2# 和 3# 钢筋的锈蚀产物能谱图。可以看到 1#, 2# 和 3# 钢筋在添加少量铬元素及其他合金元素的情况下, 钢筋表面的锈蚀产物有铬的富集, 形成了铬的氧化物保护钢筋进一步发生腐蚀, 但是铬元素含量并不多, 不能很有效地保护钢筋。图 6(e)、图 6(f) 为高铬含量钢筋能谱图, 从图中可以看出锈蚀产物中的铬元素含量很高, 尤其是 5# 钢筋的锈蚀产物中铬含量高达 14.16, 明显形成了致密的钝化膜, 能够保障钢筋不受腐蚀, 从而使得耐蚀钢筋具有优良的耐蚀性能。

腐蚀产物组织形貌如图 7。



**Figure 7.** Section of rust layer  
**图 7.** 锈层剖面图

从图 7(a) 为低铬合金腐蚀产物可以看出腐蚀产物比较疏松, 细小, 这样的钝化膜比较容易被破坏掉, 不能有效保护钢筋进一步被腐蚀。

图 7(b)为 5% 铬含量的耐蚀钢筋, 其腐蚀产物极为致密, 在这样致密的氧化铬钝化膜中钢筋可以受到相当不错的保护。

### 3.5. 腐蚀寿命评级

采用周浸腐蚀实验。试验依照《YB/T 4367-2014 钢筋在氯离子环境中腐蚀试验方法》标准进行。初始溶液为 2% (wt) 的 NaCl 溶液, 溶液总量为 30 L, pH 值在 6.5~7.5 范围内。补给液为去离子水。实验温度控制在  $45^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 。每个干湿循环为 60 min, 浸湿时间为 12 min, 干燥时间为 48 min。试验周期为 72 h。试验结果见表 5。

**Table 5.** Results of cyclic immersion test

**表 5.** 周浸腐蚀实验结果

试样名称	腐蚀速率(mm/a)	相对耐蚀性能(%)
0#	8.09	1.0000
1#	7.56	0.9344
2#	7.18	0.8875
3#	7.16	0.8850
4#	6.59	0.8145
5#	5.18	0.6403

#### 1) 试验结果分析

按预定的评定方法, 在混凝土模拟液中待测钢筋与对比钢筋的相对耐蚀性能(第一阶段的使用寿命之比)为:

$$\frac{T_{11}}{T_{10}} = \frac{\left[ \operatorname{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{C_{c1}}{C_s} \right) \right]^{-2}}{\left[ \operatorname{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{C_{c0}}{C_s} \right) \right]^{-2}}$$

式中:  $T_{10}$  为对比钢筋的寿命;  $T_{11}$  为待测钢筋的寿命;  $C_s$  为表面混凝土中的氯离子浓度;  $C_{c1}$  为待测钢筋表面的临界氯离子浓度;  $C_{c0}$  为对比钢筋表面的临界氯离子浓度。

以《YB/T 4367-2014 钢筋在氯离子环境中腐蚀试验方法》, 《YB/T 4368-2014 钢筋工业大气环境中腐蚀试验方法》得到的待测钢筋与对比钢筋的腐蚀速率分别为  $V_{21}$  和  $V_{20}$ 。

第二阶段的相对耐蚀性之比(使用寿命之比)为:

$$\frac{T_{21}}{T_{20}} = \frac{V_{20}}{V_{21}}$$

本文设定钢筋耐蚀能力指数  $\text{NSZS} = \frac{T_{11}}{T_{10}} + \frac{T_{21}}{T_{20}}$ , 即服役过程中钢筋的相对耐蚀性能。用钢筋耐蚀能力

指数作为钢筋耐蚀性评价指标。

$$\text{NSZS} = \frac{T_{11}}{T_{10}} + \frac{T_{21}}{T_{20}} = \frac{\left[ \operatorname{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{C_{c1}}{C_s} \right) \right]^{-2}}{\left[ \operatorname{erf}^{-1} \left( 1 - \frac{C_{c0}}{C_s} \right) \right]^{-2}} + \frac{V_{20}}{V_{21}}$$

以水  $W = 150 \text{ kg/m}^3$ 、灰  $C = 300 \text{ kg/m}^3$  ( $W/C = 0.5$ )，水合率  $h = 20\%$  的混凝土为例，将钢筋在饱和氢氧化钙混凝土模拟溶液中的氯离子含量换算成混凝土中的氯离子浓度，换算过程如下：

#### 1) 细孔溶液量的计算

混凝土中单位体积的细孔溶液量  $p$  (%)：容积比)可根据水量  $W$  ( $\text{kg/m}^3$ )、水泥量  $C$  ( $\text{kg/m}^3$ )及水泥水合率  $h$  (%)进行计算。

$$p = \frac{W - C \times h}{1000}$$

$$p = (150 - 300 \times 0.2) \div 1000 = 9.0\%$$

#### 2) 自由氯离子浓度的计算

混凝土中的自由氯离子浓度  $C_v$  ( $\text{kg/m}^3$ )可根据单位体积的细孔溶液量  $p$  (%)：容积比)及模拟溶液中的  $\text{Cl}^-$  浓度  $a$  (%)：质量比)进行计算。

$$C_v = 1000 \times \frac{a}{100 - a} \times p$$

#### 3) 结合氯元素浓度的计算

结合氯元素浓度  $a_{\text{fix}}$  (%)：水泥质量比)以氯离子量与结合氯的量的关系进行计算。

$$a_{\text{mob}} < 0.358 \text{ 时 } a_{\text{fix}} = 4.74 \times a_{\text{mob}}$$

$$a_{\text{mob}} \geq 0.358 \text{ 时 } a_{\text{fix}} = 0.240 \times a_{\text{mob}} + 1.615$$

$a_{\text{mob}}$  为单位质量的水泥中氯离子含量的百分质量比，可由模拟溶液中的氯离子浓度换算而成。

$$a_{\text{mob}} = a \times \frac{W}{C}$$

#### 4) 结合氯离子浓度的计算

混凝土中的结合氯离子浓度  $C_{\text{fix}}$  ( $\text{kg/m}^3$ )根据结合氯元素浓度  $a_{\text{fix}}$  及水泥量  $C$  进行计算。

$$C_{\text{fix}} = C \times \frac{a_{\text{fix}}}{100}$$

#### 5) 全氯离子浓度的计算

全氯离子浓度为自由氯离子浓度与结合氯离子浓度的和。混凝土中的全氯离子浓度表示如下：

$$C_{\text{tot}} = C_v + C_{\text{fix}}$$

#### 6) 试样的临界氯离子浓度

按上述公式计算氯离子浓度，结果见表 6。

**Table 6.** Critical chloride concentration of sample  
**表 6.** 试样的临界氯离子浓度

试样编号	临界 NaCl wt%	Cl%	$C_v$	$C_{\text{fix}}$	$C_{\text{tot}}$
0#	1.1	0.7	0.6	5.1	5.7
1#	2.5	1.5	1.4	5.4	6.8
2#	2.9	1.8	1.6	5.4	7.0
3#	3.3	2.0	1.8	5.4	7.2

Continued

4#	6.3	3.8	3.5	6.0	9.5
5#	8	4.8	4.7	6.4	11.1
表面溶液氯离子浓度	13	7.8	7.7	7.7	15.4
	20	12.1	12.4	9.2	21.6

在海洋环境中, 混凝土表面氯元素浓度与所处的区域息息相关, 一般大气区较低, 潮差、浪溅区较高。侯保荣[7]等研究发现, 16年的桩梁式码头, 梁部位混凝土的表面氯离子浓度为0.6% (wt); 第四航务工程局科研所张宝兰等[8]报导试样表面氯离子浓度的最高值约为0.58% (wt)。以此, 混凝土表面氯元素浓度选择应稍大于0.6% (wt)较为合理。混凝土密度取 $2400 \text{ kg/m}^3$ , 按0.6% (wt)计算, 表面氯元素浓度为 $14.4 \text{ kg/m}^3$ , 对应的表面溶液氯化钠浓度为12%。按稍高的原则, 我们选取混凝土表面溶液中氯化钠的浓度为13%。计算得到的钢筋耐蚀能力指数NSZS见表7。

**Table 7.** Estimation of corrosion resistance index of reinforcement when the concentration of sodium chloride in concrete surface solution is 13%

**表 7.** 混凝土表面溶液中氯化钠浓度为 13%时的钢筋耐蚀能力指数估算

试样编号	$T_{11}/T_{10}$	$T_{21}/T_{20}$	NSZS
0#	1.00	1.0	2.00
1#	2.2	1.0	3.2
2#	2.4	1.0	3.4
3#	2.6	0.8	3.4
4#	8.6	0.8	9.6
5#	75.3	0.8	76.1

根据钢筋耐蚀指数的定义, 普通钢筋HRB400的NSZS为2。建议: 若采用氯化钠溶液中的氯离子浓度计算NSZS, 建议: 将NSZS > 4的钢筋称作耐蚀钢筋, 将NSZS > 6的钢筋称作高耐蚀钢筋。若采用水泥中氯离子的浓度计算NSZS, 建议: 将NSZS > 3的钢筋称作耐蚀钢筋, 将NSZS > 4的钢筋称作高耐蚀钢筋。

#### 4. 结论

1) 在Ni元素的配合下Cr元素在电化学作用下可以形成致密的钝化膜来保护钢筋。通过阻止氯离子的进一步侵入不被腐蚀。而且在Ni元素的配合下Cr元素含量越高耐蚀性能效果越好。

2) 控制好硫化锰夹杂可以有效控制点蚀的发生, 可以很好地提高临界氯离子浓度。4#与5#优异的耐蚀性能与S含量的有效控制是密不可分的, 因为点蚀一般都是从MnS夹杂物开始发生并发展。

3) 周浸试验及电化学试验表明, 耐蚀钢筋的耐腐蚀性能明显优于普通钢筋, 对钢筋寿命进行了评级计算, 在不同环境下可以钢筋耐蚀指数作为参考来选择耐蚀钢筋。

#### 参考文献

- [1] 袁承斌, 张德峰, 刘荣桂, 等. 混凝土耐久性设计及实务[C]//海峡两岸高性能混凝土研究与应用学术会议. 新世纪高性能混凝土研究与应用学术会议论文集. 上海: 同济大学出版社, 2002: 237.
- [2] 洪乃丰. 混凝土中钢筋腐蚀与防护技术(3)——氯盐与钢筋锈蚀破坏[J]. 工业建筑, 1999, 29(10): 60-63.
- [3] Tuutti, K. (1980) Service Life of Structures with Regard to Corrosion of Embedded Steel. *Journal of the American*

*Concrete Institute*, **77**, 380-381.

- [4] Presuel-Moreno, F., Scully, J.R. and Sharp, S.R. (2010) Literature Review of Commercially Available Alloys That Have Potential as Low-Cost, Corrosion-Resistant Concrete Reinforcement. *Corrosion*, **66**, 1542-1546.  
<https://doi.org/10.5006/1.3479955>
- [5] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局中国国家标准化管理委员会. GB/T 1499.2-2018 钢筋混凝土用钢第2部分: 热轧带肋钢筋[S]. 北京, 2018.
- [6] European Committee for Standardization (2005) BS-EN 10080-2005, Steel for the Reinforcement of Concrete. Weldable Reinforcing Steel, General. Brussels.
- [7] 侯保荣. 海洋钢筋混凝土腐蚀与修复补强技术[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [8] 张宝兰, 卫淑珊. 华南海港钢筋混凝土暴露十年试验[J]. 水运工程, 1999(3): 6-13.