

# 节镍型不锈钢钢筋在混凝土环境中腐蚀研究现状及进展

骆鸿<sup>1</sup>, 董超芳<sup>2</sup>, 肖葵<sup>2</sup>, 李晓刚<sup>2</sup>

(1. 河海大学, 南京 210098; 2. 北京科技大学, 北京 100083)

**摘要:** 通过参考现有的工程实例, 对节镍型不锈钢钢筋混凝土的应用进行了分析, 阐述了目前国内外节镍型不锈钢钢筋在混凝土环境中腐蚀研究的现状、科学问题及其进展, 同时对其在后续应用过程中存在的问题进行了探讨, 为未来大规模推广使用节镍型不锈钢钢筋混凝土提供参考。

**关键词:** 节镍不锈钢; 混凝土; 腐蚀; 结构

**中图分类号:** TG172      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-3660(2015)03-0063-06

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2015.03.011

## Research Status and Progress on Corrosion of the Low-nickel Stainless Steel Rebar in the Concrete Environment

LUO Hong<sup>1</sup>, DONG Chao-fang<sup>2</sup>, XIAO Kui<sup>2</sup>, LI Xiao-gang<sup>2</sup>

(1. Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**ABSTRACT:** In this paper, through the reference of the existing engineering examples of stainless steel reinforced concrete, the application of low-nickel stainless steel rebar was analyzed. The status, scientific problems and progress of corrosion research for low-nickel stainless steel rebar in concrete environment as well as the existing problems in the process of its subsequent application were discussed. This paper provides the reference for the large-scale promotion and use of low-nickel stainless steel reinforced concrete in future.

**KEY WORDS:** low-nickel stainless steel; concrete; corrosion; structure

普通钢筋混凝土普遍存在耐久性不足的缺陷, 尤其在严酷的环境条件下, 其结构使用寿命和服役安全存在很大的问题。造成混凝土耐久性不足的主要原因之一是由于钢筋的腐蚀造成的, 采用不锈钢钢筋, 尤其是节镍型不锈钢钢筋替代普通碳素钢筋, 不但能

够有效节约造价成本, 而且能够大幅度提高混凝土结构的耐久性、使用年限和服役安全。普通钢筋混凝土在建筑工程、桥梁与交通工程、水利与港口工程以及地下工程等领域中得到了广泛的应用。钢筋腐蚀引起混凝土结构的过早破坏已成为世界各国普遍关注

收稿日期: 2014-10-22; 修订日期: 2015-01-18

Received: 2014-10-22; Revised: 2015-01-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(51401076); 江苏省自然科学基金项目(BK20140849)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51401076) and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (BK20140849)

作者简介: 骆鸿(1980—), 男, 江苏人, 博士后, 讲师, 主要研究方向为金属材料及腐蚀防护。

Biography: LUO Hong(1980—), Male, from Jiangsu, Postdoctor, Lecturer, Research focus: metal materials, corrosion and protection.

的主要灾害之一,其耐久性下降与氯离子、混凝土碳化有密切的关系。因氯离子造成的钢筋腐蚀损失巨大,由此引起的事例遍及绝大部分的混凝土结构物<sup>[1-2]</sup>。每年欧洲、海湾国家都有以氯盐为主的混凝土结构被腐蚀破坏,美国每年因腐蚀问题用于维修或重建的混凝土结构费用高达 3000~4000 亿美元。我国“海砂屋”事件、宜宾大桥倒塌、澎湖大桥、北京西直门立交桥、中国国际广播电台大楼等,使用仅不到 10 年就出现钢筋严重腐蚀,需修理或重建<sup>[3-4]</sup>。钢筋混凝土结构的耐久性下降成为威胁全世界的主要灾害之一,深入剖析钢筋混凝土结构耐久性下降或破坏的很大一部分原因是由于混凝土中钢筋的腐蚀所造成的<sup>[5-6]</sup>。众多研究表明<sup>[7-14]</sup>,混凝土环境中钢筋的腐蚀与氯离子以及混凝土碳化有密切关系,其中氯离子引起的腐蚀是最有害的。加州大学 Metha 研究也指出造成混凝土结构破坏的主要因素,按重要性递降的排列顺序依次是:钢筋腐蚀、寒冷气候的冻害、侵蚀环境的物理化学作用<sup>[15]</sup>。

目前,世界各国学者对混凝土中钢筋的腐蚀问题进行了深入研究,分别从物理、化学或结构方面提出了多种防腐蚀的方法<sup>[16-22]</sup>。如增加混凝土厚度、采用高性能混凝土、混凝土表面保护层、钢筋表面涂镀层、混凝土阻锈剂、阴极保护等。由于混凝土的多孔、粗糙、局部显微裂纹,上述方法只能暂时阻隔或延缓钢筋的腐蚀,并不能从根本上解决钢筋的腐蚀问题。相反上述保护措施一旦失效,钢筋便会加速腐蚀使结构性能迅速衰退,提高钢筋材料自身的耐蚀性已成为重点发展方向之一。目前而言,在混凝土构件中使用不锈钢不但能够有效地提高混凝土结构的耐久性、降低混凝土保护层和维护费用、延长使用寿命、提高介质侵蚀性作用等,而且也是该研究领域的一项重大创新。由于不锈钢或节镍不锈钢有良好的综合性能、长的生命周期以及低的维护成本,目前已经在混凝土结构、跨海大桥以及盐渍土地区工程中被广泛使用,如香港昂船洲大桥、美国俄勒冈州大桥、阿布扎比 Sheik Zayed 大桥等<sup>[23-24]</sup>。

文中通过调研国内外文献,阐述了节镍不锈钢材料的特性,总结了目前不锈钢及节镍型不锈钢在混凝土环境中腐蚀研究的现状、进展及存在问题。同时对节镍不锈钢钢筋应用过程中存在的问题进行了分析和探讨,为后续大规模开展推广节镍不锈钢钢筋在混凝土环境中的运用奠定基础。

## 1 节镍型不锈钢钢筋及其混凝土结构

早在在 20 世纪中叶,美国及欧洲国家就开始对不锈钢钢筋混凝土以及不锈钢混凝土的环境特性进行了大量的理论和试验研究,取得了较多的成果<sup>[25-34]</sup>,并且在实际工程中已经较多使用不锈钢混凝土结构,成效显著。同时也制定了相应的标准和规范,如美国材料试验协会(ASTM)、英国公路局(HA)以及日本不锈钢协会(JSSA)都制订了专门的标准和设计手册来指导不锈钢作为钢筋在混凝土环境中的使用<sup>[35]</sup>。考虑不锈钢钢筋的初期成本约为相同普通碳素钢结构的 46 倍,相关设计规范不完全成熟,构件截面没有规格化,工程设计人员对不锈钢结构综合效益的理解不足,不锈钢大规模应用于建筑结构仍有不少障碍限制,只有在一些特殊的场合才部分使用不锈钢钢筋材料。

近年来国外学者转向资源节约型、成本较低的节镍型不锈钢(节镍奥氏体不锈钢、节镍双相不锈钢)在混凝土环境中的理论和试验研究,逐渐成为不锈钢混凝土腐蚀领域研究新的热点。普通碳钢、不锈钢、节镍不锈钢在模拟混凝土环境中的点蚀电位比较如图 1 所示,可以看出,不锈钢钢筋有巨大的优势<sup>[34]</sup>。我国是一个镍资源相对缺乏的国家,国内镍资源的供给无法满足不锈钢产业增长对镍的需求,且镍价格波动非常大。通过替代或减少镍是不锈钢生产过程中降低成本的要求,同时也是环境保护方面的要求<sup>[36]</sup>。不同类型钢筋的力学性能对照见表 1,可以看出,不锈钢综合力学性能要高于普通碳钢。

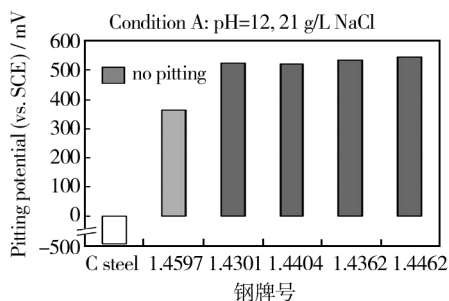


图 1 不同钢的点蚀电位比较

Fig. 1 Comparison of pitting potential of different steel

从节约镍资源在不锈钢中应用的角度,铬锰氮奥氏体不锈钢和低镍双相不锈钢等经济节镍型不锈钢的发展成为了研究热点。国内由于条件限制,起步较晚,有关研究相对不足,直到 2004 年我国才提出有关

表 1 不同类型钢筋力学性能的对照

Tab.1 The contrast of mechanical properties for different kinds of steel

	$R_m$	$R_{p0.2}$	$R_m/R_{p0.2}$	$A_{gt}$	$A_{5d}$
	/MPa	/MPa		/%	/%
Carbon steel	600	560	1.07	7.5	12
Stainless steel	880	670	1.31	21	35

不锈钢在混凝土环境下的使用指南<sup>[37]</sup>,尚未开展相关的试验和研究,工程设计所需要的关键基础数据处于空白,工程建设缺乏充分的科学依据。有关奥氏体不锈钢在混凝土中钝化膜的环境特性和服役安全的基础研究,已成为制约我国不锈钢钢筋混凝土结构大范围使用的瓶颈问题。

2 腐蚀研究

目前,国外现有关于节镍奥氏体不锈钢在混凝土环境中腐蚀方面的研究集中在如下几方面。

1) 仅仅考虑混凝土环境对不锈钢钝化膜成分或结构的影响。如用 X 光电子能谱(XPS)、二次离子质谱(SIMS)来表征环境与节镍奥氏体不锈钢钝化膜特性,很少阐述混凝土环境改变与不锈钢钝化膜成分、结构以及半导体特征之间的关系。Bautista<sup>[38]</sup>研究了 204Cu,304,2205 不锈钢在钢筋混凝土环境下的钝化膜特性,同时分析了氯离子和碳化作用对不锈钢钝化膜的影响。进一步揭示了氯离子的存在不会影响表面钝化膜的成分,仅轻微地改变腐蚀速率。节镍不锈钢的钝化性能要低于奥氏体和双相不锈钢,钝化膜中出现了少量 Mn 的氧化物,其 Cr 元素含量要低于其他两类不锈钢。Fajardo<sup>[39]</sup>用 SIMS 研究了节镍奥氏体不锈钢和 304 不锈钢在模拟混凝土孔隙液介质中钝化膜的成分和结构,认为钝化膜为双层结构,内层由富铬的氧化物组成,外层由富铁的氧化物组成。氯离子浓度的改变能够改变钝化膜的成分,但两种不锈钢的钝化膜中都没有氯离子的存在。Freire<sup>[40]</sup>用 XPS 研究了 304 和 316 不锈钢在混凝土孔隙模拟液和开路电位下形成的钝化膜的差异,也阐明氯离子对钝化膜的影响。

2) 单独研究混凝土环境中不锈钢钝化膜破裂、氯离子与点蚀的敏感性。用电化学参量如极化曲线、阻抗等拟合参数作为参量来表征钝化膜的电化学特

性和抗点蚀能力。Fajardo<sup>[41]</sup>对比分析了节镍不锈钢、304 不锈钢和碳钢在混凝土孔隙液环境中的耐蚀性,研究认为节镍不锈钢和 304 不锈钢耐蚀性相当,要远高于普通碳钢。García-Alonso<sup>[42]</sup>研究了灰浆中氯离子含量的改变与碳钢、节镍奥氏体不锈钢耐蚀性之间的关系,进一步揭示了节镍奥氏体不锈钢的氯离子腐蚀门槛值要高于碳钢。Bautista<sup>[43]</sup>用极化曲线研究了 204Cu,304,304L,316,316L,316Ti 等 6 种不锈钢材料在含有不同浓度氯离子的模拟混凝土孔隙液中的腐蚀电化学行为,结果证实 204Cu 不锈钢在碳化和非碳化孔隙液条件下具有较好的耐腐蚀性。Criado<sup>[44]</sup>用腐蚀电位、极化阻抗和电化学阻抗谱研究了节镍不锈钢、304 不锈钢以及碳钢材料在质量分数为 0.4% 和 2% 的氯离子碱性粉煤灰混凝土环境中的腐蚀行为。研究结果表明,当混凝土中加入含有 NaOH 或含水玻璃的 NaOH 后能够改变材料的钝化状态。在两种氯离子浓度环境中,节镍不锈钢和 304 不锈钢腐蚀电位非常接近,节镍不锈钢在阻抗谱上呈现为 2 个时间常数,分别归因于钝化膜容抗和双电层容抗。Freire<sup>[43]</sup>用多种电化学手段如循环伏安(CV)、临界点蚀温度(CPT)以及表面分析技术如能谱(EDX)、扫描电子显微镜(SEM)对比分析了铁素体不锈钢(AISI 434)、节镍奥氏体不锈钢(AISI 204 Cu)和奥氏体不锈钢(AISI 304)在含有氯离子的混凝土孔隙模拟液中的腐蚀性能。研究认为,节镍奥氏体不锈钢的点蚀电位和临界点蚀温度要高于铁素体不锈钢,节镍奥氏体不锈钢的耐蚀性要差于 304 不锈钢,同时阐明了铜元素在提高节镍奥氏体不锈钢耐蚀性的作用。Criado<sup>[44]</sup>用电化学阻抗谱研究了节镍奥氏体不锈钢在模拟混凝土孔隙液环境下的腐蚀行为,用阻抗谱的拟合参数如电荷转移电阻( $R_{ct}$ )、Warburg 扩散系数表征钝化膜的稳定性,同时也探讨了氯离子对该不锈钢腐蚀性能的影响。

3) 有关在混凝土环境中不锈钢材料的应力腐蚀研究相对较少,尤其是在节镍型不锈钢应力腐蚀方面基本为空白。很多学者认为不锈钢混凝土很难发生应力腐蚀,往往不太重视这方面的研究。事实上,许多钢筋混凝土结构由于结构载荷、流速作用、预应力、残余应力等普遍存在局部应力,相当多的混凝土结构在服役环境中,不仅接触大量的腐蚀介质,还承受各种应力和载荷。这些结构或构件的服役期长,难以检测和维持,一旦失效,极易引发应力腐蚀而导致灾难性后果,将严重威胁混凝土结构的安全性和可靠性。

早在 20 世纪中后期,国外就发生过多起由于氯



离子引起不锈钢应力腐蚀断裂,造成混凝土结构发生失效而引发重大事故的案例<sup>[45—46]</sup>。Correia<sup>[47]</sup>用慢拉伸技术研究了 3 类不锈钢材料在混凝土孔隙模拟液中的应力腐蚀敏感性。Anhvu<sup>[48]</sup>研究预应力混凝土钢筋的应力腐蚀,并分析其断裂寿命和力学性能的劣化。结果表明,预应力钢筋上的点蚀常会发展成应力腐蚀,在较高应力水平下,点蚀引起的应力集中会明显影响其力学性能。如在 80% 弹性极限时,点蚀会使其所在截面处的强度减少 20% 左右。此外,钢筋的应力腐蚀程度与应力大小密切相关,在 70% 弹性极限的条件下无明显的氢脆现象;在 80% 弹性极限条件下,钢筋的寿命为 264 天;当试样承受载荷到达 100% 弹性极限时,其寿命只有 165 天。Schroeder<sup>[49]</sup>在含有  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  的混凝土模拟孔隙液和含 20% 硫氰酸根的溶液中,通过极化曲线、慢拉伸技术研究了电位、温度以及回火温度等因素对 AISI1080 预应力混凝土结构用钢腐蚀行为的影响。研究结果表明,在 470 °C 调质处理的试样和在 150 °C 调质处理的缺口,断裂时间明显缩短,氢脆加剧。此外,含硫氰酸根溶液的腐蚀性比混凝土模拟孔隙液的腐蚀性更强,但是在模拟孔隙液中各电位下的 AISI1080 试样都表现出明显的脆性。因此,系统地开展混凝土环境中节镍奥氏体不锈钢腐蚀的研究,既为推进节镍奥氏体不锈钢腐蚀相关作用机理的深层次研究积累经验,又能为大规模提高混凝土耐久性寿命解决关键问题,具有重大的科学意义和实际价值。

### 3 存在的问题

#### 3.1 粘结问题

在钢筋混凝土结构中,钢筋和混凝土两种性质完全不同的材料之所以能够共同工作,其基础是依靠钢筋材料与混凝土之间的粘接作用,使得两者能够共同工作。节镍不锈钢钢筋能否 1:1 代替普通钢筋工作,最主要的关键问题就是其与混凝土的粘结强度与普通钢筋是否相同,两者之间能否有非常好的粘接力。如果节镍不锈钢钢筋和混凝土的粘接强度小于普通钢筋,那么需要增加其锚固长度和搭接长度。目前国内外对节镍不锈钢钢筋与混凝土的粘结滑移性能研究较少<sup>[50]</sup>。

#### 3.2 焊接问题

混凝土结构中钢筋的连接方式可分为搭接、焊接

和机械连接。不同的连接方式有其不同的综合性能,钢筋连接需要满足强度、刚度、延性、恢复性能、耐久性和疲劳性能的要求。采用绑扎搭接和机械连接方式对钢筋耐蚀性和整体混凝土结构的寿命基本没有影响。节镍不锈钢由于其特殊的焊接性能,当采用焊接方式连接时,节镍不锈钢钢筋焊缝及其热影响区部位的耐腐蚀性能会降低,且由于焊缝处的组织不均匀、焊接缺陷等非常容易造成节镍不锈钢钢筋混凝土的耐久性。因此,节镍不锈钢钢筋的焊接问题也是需要考虑的问题<sup>[51]</sup>。

#### 3.3 其他问题

目前,国外对不锈钢筋与混凝土温度变形差研究、不锈钢筋与碳素钢筋结合使用时的相互作用、不锈钢钢筋混凝土结构的动力性能(如疲劳性能、抗震性能)方面的研究基本是空白。对其在各种情况下的非线性有限元的模拟分析研究方面的内容亦很少,仍需进一步研究。

### 4 应用前景与展望

相对于碳素钢筋混凝土而言,不锈钢筋混凝土具备优良的耐久性能,具有可观的优势。由于不锈钢筋混凝土在国内缺少相关设计规范以及工程实例,设计人员缺少相关指导。加之不锈钢筋价格偏高,造成不锈钢筋混凝土的初期造价较高,这是目前限制其应用的主要障碍之一。正因如此,节镍型不锈钢钢筋的使用会很大程度上减少其成本,耐蚀性与常规的不锈钢相似甚至提高。节镍不锈钢钢筋与其他不锈钢钢筋、防腐材料和涂层相比,具有强度高、防腐蚀性能强、耐久性好、使用方便和施工简便等优点,可以广泛用于各种混凝土结构中。

#### 参考文献

- [1] AHMAD S. Reinforcement Corrosion in Concrete Structures, Its Monitoring and Service Life Prediction—A Review[J]. Cement & Concrete Composites, 2003, 25(4/5): 459—71.
- [2] BENTUR A, DIAMOND S, BERKE N S. Steel Corrosion in Concrete: Fundamentals and Civil Engineering Practice [M]. London: E & FN Spon, 1997.
- [3] 洪乃丰. 盐与钢筋腐蚀[C]//第二届海峡两岸材料腐蚀与防护研讨会论文集. 台湾: 成功大学, 2000.  
HONG Nai-feng. Salt and Corrosion of the Steel Rebar

- [C]//The Second Annual Conference on Material Corrosion and Protection on Both Sides of the Taiwan Straits. Taiwan: National Cheng Kung University, 2000.
- [4] 贾福萍, 秦杰. 锈蚀钢筋混凝土研究现状和方向[J]. 化工腐蚀与防护, 1997, 25(3): 24—30.
- JIA Fu-ping, QIN Jie. The Research Status and Direction of Corroded Reinforced Concrete[J]. Chemical Corrosion and Protection, 1997, 25(3): 24—30.
- [5] 孙成, 李洪锡, 张淑泉. 钢筋混凝土研究综述[J]. 材料导报, 2000, 14(3): 27—28.
- SUN Cheng, LI Hong-xi, ZHANG Shu-quan. Review of Research on Corrosion of Reinforced Concrete[J]. Materials Review, 2000, 14(3): 27—28.
- [6] 于福洲. 金属材料的耐腐蚀性[M]. 北京: 科学出版社, 1982.
- YU Fu-zhou. The Corrosion Resistance of Metal Materials [M]. Beijing: Science Press, 1982.
- [7] ROSENBERG A, HANSSON C M, ANDRADE C. Mechanisms of Corrosion of Steel in Concrete[J]. Materials Science of Concrete I, The American Ceramic Society, 1989: 285—313.
- [8] LI L, SAGUES A A. Chloride Corrosion Threshold of Reinforcing Steel in Alkaline Solution-cycle Polarization Behavior[J]. Corrosion, 2002, 58(4): 304—346.
- [9] VALCARCE M B, VÁZQUEZ M. Carbon Steel Passivity Examined in Solutions with a Low Degree of Carbonation: The Effect of Chloride and Nitrite Ions[J]. Materials Chemistry and Physics. 2009 115(1): 313—321.
- [10] 黄可信, 吴兴祖(编译). 钢筋混凝土结构中钢筋腐蚀与防护[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1983.
- HUANG Ke-xin, WU Xing-zu (Compiled). Reinforced Steel Bar Corrosion in Concrete Structures and Protection [M]. Beijing: China Building Industry Press, 1983.
- [11] SHIN C B, KIM E K. Modeling of Chloride Ion Ingress in Coastal Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 2002, 32(5): 757—762.
- [12] AHMAD S. Assessment of Service Lives of RC Structures Subjected to Cl-induced Rebar Corrosion[J]. Journal of Structural Engineering, 1997, 23(4): 177—82.
- [13] BERTOLINI L, ELSENER B, PEDEFERRI P, et al. Corrosion of Steel in Concrete Prevention, Diagnosis, Repair [M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2004.
- [14] BERKE N S, PFEIFER D W, WEI T G. Protection Against Chloride-induced Corrosion[J]. Concrete International: Design and Construction, 1988, 11(12): 45—55.
- [15] MEHTA P K. Concrete Durability-fifty Years Progress [C]// In: Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete Durability. ACI SP 126-1, 1991: 1—31.
- [16] SANCHEZ M A, PARRA L A, PEREZ O A. Electroless Nickel Coating for Reinforcing Steel in Chloride Contaminated Concrete [J]. Corrosion Reviews, 2001, 19(2): 105—118.
- [17] HARTT W H. Analytical Evaluation of Galvanic Anode Cathodic Protection Systems for Steel in Concrete[J]. Corrosion, 2002, 58(6): 513—518.
- [18] ERDOGDU S, BREMNER T W, KONDRATOVA I L. Accelerated Testing of Plain and Epoxy-coated Reinforcement in Simulate Seawater and Chloride Solutions[J]. Cement and Concrete Research, 2001, 31(6): 861—867.
- [19] DEBAIKY A, GREEN M, HOPE B. Carbon Fiber-reinforced Polymer Wraps for Corrosion Control and Rehabilitation of Reinforced Concrete Columns[J]. ACI Materials Journal, 2002, 99(2): 129—37.
- [20] YEOMANS S R. Performance of Black, Galvanized and Epoxy-coated Reinforcing Bars in Chloride-contaminated Concrete[J]. Corrosion, 1994, 50(1): 72—81.
- [21] RAMIREZ E, GONZALEZ J A, BAUTISTA A. The Protective Efficiency of Galvanizing Against Corrosion of Steel In Mortar and in  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  Saturated Solutions Containing Chlorides[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(10): 1525—36.
- [22] BAUTISTA A, GONZALEZ J A. Analysis of the Protective Efficiency of Galvanizing Against Corrosion of Reinforcements Embedded in Chloride Contaminated Concrete[J]. Cement and Concrete Research, 1996, 26(2): 215—24.
- [23] LILJAS M, JOHANSSON P, LIU H P, et al. Development of a Lean Duplex Stainless Steel[J]. Steel Research International, 2008, 79(6): 466—73.
- [24] 王映梅. 不锈钢钢筋在混凝土结构中的应用[J]. 甘肃广播电视大学学报, 2010, 20(3): 54—56.
- WANG Ying-mei. Application of Stainless Steel Bars to Concrete Structures[J]. Journal of Gansu Radio & TV University, 2010, 20(3): 54—56.
- [25] CASTRO H, RODRIGUEZ C, BELZUNCE F J, et al. Mechanical Properties and Corrosion Behaviour of Stainless Steel Reinforcing Bars[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 143—44: 134—137.
- [26] BERTOLINI L, PEDEFERRI P. Laboratory and Field Experience on the Use of Stainless Steel to Improve Durability of Reinforced Concrete[J]. Corrosion Reviews, 2002, 20(1/2): 129—152.
- [27] DI S L, ELNASHAI A S, NETHERCOT D A. Seismic Performance Assessment of Stainless Steel Frames[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2006, 62(1/2): 93—104.
- [28] FLINT G N, COX R N. The Resistance of Stainless Steel Partly Embedded in Concrete to Corrosion by Seawater[J]. Magazine of Concrete Research, 1988, 40: 142—144.

- [29] KILWORTH S R, FALLON J. Stainless Steels for Reinforcement, Development of the Paper, Fusion Bonded Coated Reinforcement in the Gulf [C]//International Conference on Corrosion and Protection of Reinforced Concrete. Dubai, 1994.
- [30] TAE S H, LEE H S, NOGUCHI T, et al. Corrosion Resistance of Cr-bearing Rebar in Concrete with Chloride Ion Content[J]. ISIJ International, 2006, 46(7): 1075—1080.
- [31] BAUTISTA A, BLANCO G, VELASCO F, et al. Corrosion Performance of Welded Stainless Steels Reinforcements in Simulated Pore Solutions [J]. Construction and Building Materials, 2007, 21(6): 1267—1276.
- [32] BERTOLINI L, GASTALDI M, PEDEFERRI M P, et al. Experiences on Stainless Steel Behaviour in Reinforced Concrete [C]//Proceedings from EUROCORR'98- Solutions to Corrosion Problems. Utrecht, 1998.
- [33] KIN H L, KENG H C, NASIR S. Some Aspects of Using Stainless Steel as Concrete Reinforcing Bars and Recent Developments in High Nitrogen, Low Nickel Stainless Steels [J]. Recent Patents on Mechanical Engineering, 2011(4): 234—242.
- [34] BOURGIN C, CHAUVEAU E, DEMELIN B. Stainless Steel Rebar; the Choice of Service Life [J]. Metallurgical Research & Technology, 2006, 103(2): 89—95.
- [35] 杨峰, 赵尚传, 王淞波. 海洋环境下不锈钢筋耐腐蚀性能研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2013(4): 169—171.  
YANG Feng, ZHAO Shang-chuan, WANG Song-bo. The Corrosion Resistance Research of Stainless Steel in the Marine Environment [J]. Highway Traffic Science and Technology (Application Technology), 2013(4): 169—171.
- [36] WANG J, UGGOWITZER P J, MAGDOWSKI R, et al. Nickel Free Duplex Stainless Steels [J]. Script Materialia, 1998, 40(1): 123—129.
- [37] CCES01—2004, 混凝土结构耐久性设计与施工指南 [S].  
CCES01—2004, The Durability of Concrete Structure Design and Construction Guide [S].
- [38] BAUTISTA A, BLANCO G, VELASCO F, et al. Changes in the Passive Layer of Corrugated Austenitic Stainless Steel of Low Nickel Content Due to Exposure to Simulated Pore Solutions [J]. Corrosion Science, 2009, 51(4): 785—792.
- [39] FAJARDO S, BASTIDAS D M, RYAN M P, et al. Low-nickel Stainless Steel Passive Film in Simulated Concrete Pore Solution: A SIMS Study [J]. Applied Surface Science, 2010, 256(21): 6139—6143.
- [40] FREIRE L, CATARINO M A, GODINHO M I, et al. Electrochemical and Analytical Investigation of Passive Films Formed on Stainless Steels in Alkaline Media [J]. Cement & Concrete Composites, 2012, 34(9): 1075—1081.
- [41] BAUTISTA A, BLANCO G, VELASCO F. Corrosion Behaviour of Low-nickel Austenitic Stainless Steels Reinforcements: A Comparative Study in Simulated Pore Solutions [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36(10): 1922—1930.
- [42] CRIADO M, BASTIDAS D M, FAJARDO S, et al. Corrosion Behaviour of a New Low-nickel Stainless Steel Embedded in Activated Fly Ash Mortars [J]. Cement & Concrete Composites, 2011, 33(6): 644—652.
- [43] FREIRE L, NÓVOA X R, PENA G, et al. On the Corrosion Mechanism of AISI 204Cu Stainless Steel in Chlorinated Alkaline Media [J]. Corrosion Science, 2008, 50(11): 3205—3212.
- [44] CRIADO M, FAJARDO S, BASTIDAS J M. Corrosion Behaviour of a New Low-nickel Stainless Steel Reinforcement: A Study in Simulated Pore Solutions and in Fly Ash Mortars [J]. International Journal of Corrosion, 2012, 847323: 1—8.
- [45] GALVELE J R, TORRESI R M, CARRANZA R M. Passivity Breakdown, Its Relation to Pitting and Stress-Corrosion-Cracking Processes [J]. Corrosion Science, 1990, 31: 563—571.
- [46] GLUSZEK J, NITSCH K. The Correlation between the Properties of the Passive Film on 304L steel and Its Susceptibility to SCC in Chloride Media [J]. Corrosion Science, 1982, 22(11): 1067—1078.
- [47] CORREIA M J, SALTA M M. Stress Corrosion Cracking of Austenitic Stainless Steel Alloys for Reinforced Concrete [J]. Materials Science Forum, 2006, 514—516: 1511—1515.
- [48] ANHUU N, CASTEL A, FRANCOIS R. Effect of Stress Corrosion Cracking on Stress-Strain Response of Steel Wires Used in Prestressed Concrete Beams [J]. Corrosion Science, 2009, 51(6): 1453—1459.
- [49] SCHROEDER R M, MÜLLER I L. Stress Corrosion Cracking and Hydrogen Embrittlement Susceptibility of an Eutectoid Steel Employed in Prestressed Concrete [J]. Corrosion Science, 2003, 45(9): 1969—1983.
- [50] 袁焕鑫, 王元清, 石永久. 不锈钢筋混凝土初探及应用前景 [J]. 建筑科学, 2011, 27(5): 101—105.  
YUAN Huan-xin, WANG Yuan-qing, SHI Yong-jiu. Preliminary Study and Application Prospect of Stainless Steel Reinforced Concrete [J]. Building Science, 2011, 27(5): 101—105.
- [51] 张国学, 吴苗苗. 不锈钢钢筋混凝土的应用及发展 [J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2006, 24(2): 10—13.  
ZHANG Guo-xue, WU Miao-miao. Application and Development of Stainless Steel Rebars for Reinforced Concrete Structures [J]. Journal of Foshan University (Natural Science Edition), 2006, 24(2): 10—13.