

海港混凝土建筑中钢筋的外加电流阴极保护

Impressed current cathodic protection of rebar in concrete structures of marine harbour

黄焕谦

(中交第四航务工程局有限公司, 广东 广州 510231)

中图分类号: TU 761.13

文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2007)07-0086-04

一般认为, 钢筋腐蚀是钢筋混凝土结构耐久性退化的最主要原因, 它所造成的破坏和损失也是最严重的。在所有钢筋腐蚀中, 建造于海洋环境中的各种港工设施的腐蚀占了很大一部分。挪威对 700 座港工混凝土结构调查结果表明, 在浪溅区的梁板因钢筋腐蚀引起的严重破损占 20%; 沙特阿拉伯海滨地区 42 座混凝土框架结构的耐久性调查结果显示, 74% 的结构都有严重的钢筋腐蚀破坏; 日本对 103 座码头调查后证明, 服役 20 年以上的混凝土结构都有相当大的顺筋锈裂^[1]。中国的钢筋腐蚀破坏也很严重, 于 20 世纪 90 年代前兴建的海港工程, 一般在投入使用后 10~20 年就会出现钢筋严重腐蚀破坏。如 60 年代对华南、华东地区 27 座码头调查后发现, 因钢筋锈蚀导致结构破坏的情况占 74%; 1980 年对华南地区 18 座高桩码头调查的结果表明, 80% 以上都发生了严重或较严重的钢筋锈蚀破坏^[2]。

对于混凝土中钢筋的腐蚀破坏, 阴极保护被认为是最有效的防护方法之一, 其中应用外加电流进行保护的混凝土结构面积增长迅速^[3]。20 世纪 70 年代, 外加电流阴极保护被成功地应用于美国混凝土桥面板顶面, 这些混凝土面板受到化冰盐的侵蚀, 造成了严重的钢筋锈蚀破坏^[4]。这次外加电流的保护使用硅铁阳极块做主阳极, 覆盖一层厚度 5 mm 的热沥青焦炭屑的电子导电混合物做为次阳极, 保护面积 300 m², 历经 20 余年仍然状况良好。此后, 外加电流阴极保护不断发展, 技术上不断创新, 目前已经比较成熟, 而且保护效果良好, 成为公认有效的钢筋混凝土防腐方法, 目前保护面积达到几百万平方米。认识

并掌握外加电流保护技术, 对中国海港工程混凝土结构的保护有着重要的意义。

1 混凝土中钢筋的外加电流保护原理

一般说来, 钢筋外的混凝土层具有一定厚度, 而且混凝土内孔隙液的 pH 值为 12.5~13。在这个 pH 值范围内, 钢筋正好处于钝化状态^[5~7]。只要保持这个碱性条件, 钢筋就不会腐蚀。这正是一些钢筋混凝土建筑物能够耐久的重要原因。但是对于海港设施来说, 由于海洋环境的 Cl⁻ 含量比较大, 而 Cl⁻ 又比较容易渗透进入混凝土内部, 造成钝化膜的破坏, 使原来被钝化膜保护着的金属基体暴露出来, 遭受腐蚀(图 1)。

采用外加电流保护, 给钢筋施加阴极电流, 一方面使钢筋的电位负移, 让其位于钝化区内, 保证钢筋本体避免腐蚀; 另一方面, 钢筋和辅助阳极间产生的电场使 Cl⁻ 向辅助阳极移动, 远离钢筋, 避免钢筋外面钝化膜被破坏。这两方面共同作用, 具有良好的防腐效果(图 2)。

2 外加电流技术的发展过程^[7]

辅助阳极是外加电流阴极保护系统最关键的组成部分。外加电流技术的推广应用在很大程度上依赖

收稿日期: 2006-07-10; 修回日期: 2006-11-20

作者简介: 黄焕谦 (1964-), 男, 中交第四航务工程局有限公司高级工程师, 硕士, 主要从事港口工程技术工作, 电话: 020-84420079, E-mail: hhuanqian@gzppcc.com



于辅助阳极的发展。基本上可以说,辅助阳极的发展过程就是外加电流阴极保护系统的发展过程。

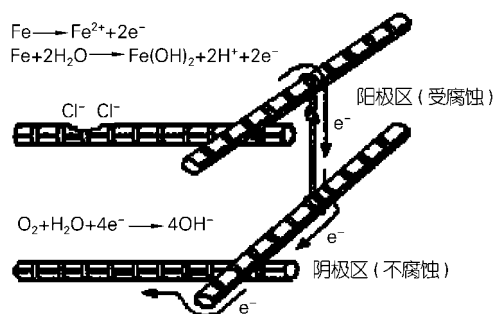


图1 钢筋腐蚀原理示意图

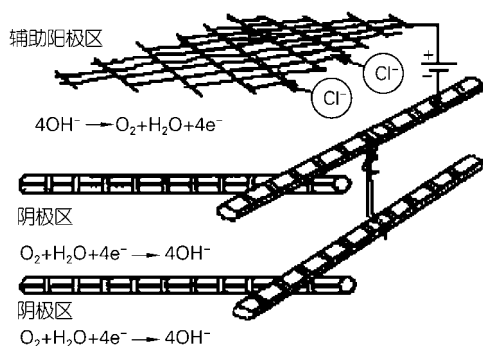


图2 外加电流保护原理示意图

在 20 世纪 50 年代末,人们已经做了大量的实验,应用外加电流技术保护修复被腐蚀的钢筋混凝土构筑物^[8,9]。但由于当时缺少合适的阳极材料,不得不采用 15~200 V 的驱动电压。在这种电压下,由于阴极碱性的增强容易使钢筋与混凝土之间失去附着力,限制了这项技术的进一步应用。

20 世纪 70 年代,由于钢筋受到化雪盐中氯离子的侵蚀,越来越多的公路建筑物发生破坏,造成了巨大的维修费用。外加电流保护技术又重新投入研究^[10],并被逐渐推广应用。在 20 世纪 80 年代中期,各种阳极系统分别被研制出来^[11]。

(1) 主阳极丝+导电聚合物

这种系统是在混凝土表面每隔一定距离凿开沟槽,内埋铜芯包铌镀铂丝作为主阳极丝,再填以掺石墨粉的导电聚合物胶泥或浇入导电混凝土作为次阳

极。这种系统由于主阳极的酸化会腐蚀胶泥和混凝土,后来便不再推广应用。

(2) 喷涂金属层(喷涂锌层)^[12]

在混凝土表面(主要是非摩擦面)热喷涂一层厚约 200~500 μm 锌层作为辅助阳极。这种系统中阳极重量轻,电流分散性好。但这种涂层不耐水、不耐磨,成本较高,因此应用有限。

(3) 导电涂层(或导电油漆)^[13]

主阳极是铜芯包铌镀铂丝或活化钛丝。这种导电涂层成本较低,主要用作次阳极,可在复杂构筑物表面涂敷。虽然涂层不耐磨和冲刷,但较易修补。

(4) 电缆阳极

这是一种掺碳黑填料的导电塑料包裹铜芯线制成的电缆线,绕成网状后固定于混凝土表面作为阳极,再覆盖一层水泥砂浆。但由于该阳极有较大的阳极极化率,目前已不再应用。

(5) 混合金属氧化物钛网阳极^[14-16]

这种阳极是在钛网上覆盖一层钛、钽、铌、铂或钨的氧化物,这些氧化物具有催化作用,在比较高的阳极电流密度下,析氧而不是析氯,所以不会对周围混凝土材料造成侵蚀。这种阳极目前应用最广,具有耐蚀性好,允许通过的最大电流密度大的优点。

3 系统组成

适用于混凝土结构的外加电流阴极保护系统的主要组成部分包括直流电源、辅助阳极、参比电极、控制系统和监测系统。

3.1 直流电源

直流电源要求能够长期、持续的提供稳定的电压或电流,实际工作中常使用变压整流器。因为港口工程的设计寿命至少在 30 a 以上,在此期间要求外加电流系统提供可靠保护,所以对于变压整流器的稳定性要求较高。一方面,在使用期间,要求变压整流器无故障;另一方面,要求提供的电压或电流无大的波动,基本保持恒定。

在实际操作中,变压整流器常常被安装在特殊设计的变压器箱中。变压器箱要求防水、绝缘,并具备一定的抗腐蚀能力和强度。变压器箱的内部设计要求方便接线和检修。在特殊场合,如石油、天然气码头,还要求具有防爆、防火设计。

3.2 辅助阳极

用于混凝土结构的辅助阳极要求具有电化学习



性,阳极化率低,损耗少,使用寿命长。现在应用最广的是混合金属氧化物(Mixed Metal Oxide, MMO)阳极。国外这种阳极产品一般加工成条状,根据宽度和最大电流的不同分成多个型号。

这种 MMO 辅助阳极是外加电流系统的关键材料,在施工中用量较大。但是目前从国外进口价格较高,成为限制外加电流保护在我国推广的关键问题。图 3 为 MMO 辅助阳极安装照片。



图 3 MMO 辅助阳极安装照片

1. 钢筋; 2. MMO 辅助阳极; 3. 水泥垫块; 4. 塑料夹

3.3 参比电极

参比电极在施工过程中被预埋在混凝土内,因此也要求适用于混凝土结构,并能长期准确、可靠地测量钢筋的保护电位。中港圣维可防腐工程有限公司在中国天津港码头混凝土桩的外加电流保护中,同时使用了 Ag/AgCl 参比电极和特制的 Ti 参比电极。Ag/AgCl 参比电极的使用寿命最长在 20 a 左右,在此期间,根据 Ag/AgCl 参比电极校正 Ti 参比电极的数值;20 a 以后, Ti 参比电极起主要作用,负责测量钢筋的电位。

3.4 控制系统和监测系统

控制系统的主要作用是控制变压整流器的输出值,监测系统则自动监测被保护钢筋的时间电位值或电流值。在现代发达的电子技术、通讯技术和计算机技术的支持下,这两个系统往往合而为一。即:工作人员根据设计参数向控制系统输入目标电位或电流值,控制系统自动比较监测系统监测到的钢筋实际电位和设计的目标值,并根据比较的结果自动调整变压整流器的输出值,直到监测电位达到设计要求。而这个过程可以被工作人员通过远程监控实时观察和调整。

4 设计、施工和运行中应注意的问题

外加电流阴极保护在设计时应注意保护电流密度和电流分配的均匀性。保护电流密度的选取应充分考虑混凝土构筑物的状态,所处的环境等条件。保护电流密度不能过大,一般不能使保护电位低于-1100 mV (Vs. Ag/AgCl/0.5 mol/L KCl),对于预应力混凝土,保护电位一般不低于-900 mV (Vs. Ag/AgCl/0.5 mol/L KCl)^[17]。此外,设计时应尽量保证电流均匀分布,这需要详细了解构筑物中的钢筋分布。

阴极保护在施工时要特别注意检查所有被保护钢筋是否保持电连接,阴阳极是否直接接触。在施工完毕,正式通电保护前,要再次检查被保护钢筋的电连接性,阴阳极之间的电阻,确保钢筋电连接完好($<1\ \Omega$),阴阳极没有直接接触。通电保护后,要监测被保护钢筋的电位,针对可能出现的保护不足或过保护现象采取措施。

系统运行一定时间后,应及时检查保护效果。检测保护是否达到要求通常用电位衰减法。美国 NACE 的达标要求是电位衰减 100 mV,即在中断保护电流



4 h 后的电位衰减不小于 100 mV。欧洲标准^[17]的要求是：(1) 中断电流瞬间电位测量(时间要求在 0.1~1s) 值低于-720 mV；(2) 自中断电流开始，24 h 之内的电位衰减超过 100 mV；(3) 自中断电流开始，24 h 后的电位衰减超过 150 mV，以上三个条件只要达到一个就认为满足保护要求。

5 工程实例

国外应用外加电流保护钢筋混凝土的应用实例较多，如：澳大利亚悉尼歌剧院地基部分建筑、昆士兰布里斯班 Breakfast Creek Bridge 的修复、维多利亚波特兰港的维修等。中国在天津港码头用外加电流保护了 18 个桩帽及 20 根预制梁，目前系统运行良好。除此之外，杭州湾跨海大桥的南北航道桥的主塔也设计使用外加电流阴极保护，保护面积超过 7000 多平方米。以上两个工程项目由中港圣维可公司负责实施，为在中国应用该项技术开创了先河，但相对于国内众多的海港码头，外加电流技术还有很大的推广空间。

6 结论

海港工程的设计使用寿命普遍较长，而在所处的海洋环境中受到海水的严重腐蚀，因钢筋腐蚀造成的海港工程的维修费用惊人。因此，必须对此采取有效措施加以防治。外加电流阴极保护是公认的有效防腐蚀措施，技术成熟、可靠，中国应尽快推广该项技术在海港混凝土结构保护中的应用。

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.
- [2] 潘德强. 我国海港工程混凝土结构耐久性现状及对策[A]. 中国工程院土木水利建筑学部. 土建结构工程的安全性与耐久性[C]. 北京：清华大学出版社，2001.
- [3] Clemena G C. Cathodic protection of the concrete pier of two bridges in Virginia using water-based conductive coatings [A]. Malhotra V M. Proc. 2nd Inter. Conf. on Durability of Concrete [C]. Montreal: ACI SP, 1991.679-696.
- [4] 葛燕，朱锡昶. 钢筋混凝土阴极保护和阴极防护技术的状况与进展[J]. 工业建筑，2004，34(5)：18-20.
- [5] 洪乃丰. 混凝土中钢筋腐蚀与防护技术[J]. 工业建筑，1999，29(8)：66-68.
- [6] 魏宝明，储炜，汪鹰. 混凝土中钢筋的腐蚀与防护[J]. 腐蚀防护，1999，20(2)：56-58.
- [7] Baeckmann W Y, Schwenk W, Prinz W. 阴极保护手册[M]. 胡士信, 王向农, 译. 北京：化学工业出版社，2005. 274-275.
- [8] Stratfull R F. The corrosion of steel in a reinforced concrete bridge [J]. *Corrosion*, 1957, 13(3):173-179.
- [9] Stratfull R F. Progress report on inhibiting the corrosion of steel in a reinforced concrete bridge[J]. *Corrosion*, 1959, 15(6):331-334.
- [10] Stratfull R F. Cathodic protection of a bridge deck [J]. *Materials Performance*, 1974, 13 (4)：24-25.
- [11] 杜荣归，黄若双，赵冰, 等. 钢筋混凝土结构中阴极保护技术的应用现状及研究进展[J]. 材料保护，2003，36(4)：11-14.
- [12] Holocomb G R, Covino B S, Russell J H, et al. Humectant use in the cathodic protection of reinforced concrete [J]. *Corrosion*, 2000, 56(11)：1 140-1 157.
- [13] Clemena G C, Jackson D R. Long-term performance of conductive-paint anodes in cathodic protection systems for inland concrete piers in Virginia [J]. *Maintenance and Management of Bridge Structures*, 1998, 1：43-50.
- [14] Daily S F, Kendell K. Cathodic protection of new reinforced concrete structures in aggressive environments [J]. *Materials Performance*, 1998, 37(10)：19-25.
- [15] 李枝河，陈淑仪. 阴极防蚀法在新建构筑物的应用[A]. 成功大学. 第二届海峡两岸材料腐蚀与防护研讨会论文集[C]. 中国台湾：成功大学出版社，2000.
- [16] Green W K, Ali M G, McGee R W. Five years performance of a wharf concrete cathodic protection systems in Australia [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1999，24(2B)：229-242.
- [17] European Standard. Cathodic Protection of Steel in Concrete (S). EN 12696

(本文编辑:张培新)