

2007 全国大型桥梁和水工结构防腐蚀技术研讨会论文集

DAXINGQIAOLIANGHESHUIGONGJIEGOUFANGFUSHIJISHU

大型桥梁 和 水工结构 防腐蚀技术

中国腐蚀与防护学会 主编

中国方正出版社

大型桥梁和水工结构防腐蚀技术

中国腐蚀与防护学会 主编

中国方正出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

大型桥梁和水工结构防腐蚀技术/中国腐蚀与防护学会主编.

- 北京: 中国方正出版社, 2007. 10

ISBN 978 - 7 - 80216 - 300 - 3

I. 大… II. 中… III. 防腐蚀 - 研究 - 文集 IV. D25

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 144573 号

大型桥梁和水工结构防腐蚀技术

中国腐蚀与防护学会 主编

责任编辑: 王相国

出版发行: 中国方正出版社

地 址: 北京市西城区平安里西大街 41 号

邮政编码: 100813

经 销: 新华书店

印 刷: 北京荣玉印刷有限公司

开 本: 787 × 1092 毫米 1/16

印 张: 24.5

字 数: 658 千字

版 次: 2007 年 10 月第 1 版

2007 年 10 月北京第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 80216 - 300 - 3

定价: 100.00 元

(版权所有 侵权必究)

大型桥梁和水工结构防腐蚀技术

编辑委员会

主任委员：陈光章

副主任委员：左 禹 乔利杰 韩恩厚 陆 峰 林 安 杨 武
张启富 吴荫顺 高克玮

委 员：王 健 左 禹 卢绮敏 甘复兴 白新德 乔利杰
乔培新 刘坐镇 朱 锋 齐慧滨 安云歧 严川伟
张小红 张启富 张鉴清 吴荫顺 张 炼 李 荻
李文涛 李光福 李玺林 李荣俊 李晓刚 杜存山
杨 武 杨德钧 孙明先 刘剑卿 杨 武 陆 峰
陈 冬 周国定 林 安 林昌健 唐子龙 胥元达
洪乃丰 郭兴蓬 高克玮 崔 严 唐伦科 曹 备
喻 奇 黄玖梅 韩恩厚 路民旭 管恒荣 魏无际

执行主编：张小红

目 录

特 邀 报 告

1. 杭州湾跨海大桥基础钢管桩长效重腐蚀防护技术 柯 伟 等(3)
2. 桥梁的腐蚀与防护 陈光章 等(13)
3. 海洋工程结构浪花飞溅区腐蚀及其控制技术 侯保荣 (19)
4. 桥梁防腐设计及其发展方向 蔡景旺 (27)
5. 混凝土桥梁结构表面涂层防腐技术 李运德 等(38)
6. 桥梁重防腐涂装技术相关规范及标准综述 王 健 等(49)

研究报告与技术交流

7. 现代桥梁腐蚀防护技术的发展趋势 曾荣昌 等(59)
8. 东海大桥耐久性设计及防腐蚀措施 李振岭 (64)
9. 厦门海沧大桥防腐蚀工程管理 刘金顶 等(71)
10. 现代桥梁结构防腐技术水平分析 朱 平 等(77)
11. 桥梁钢结防腐标准及典型涂层系统 李 君 (84)
12. 滨海某码头钢筋混凝土上部结构现状调查与分析 李森林 等(89)
13. 福厦铁路钢系杆拱桥正交异性钢桥面板防护体系设计 郭建勋 等(94)
14. 海洋环境混凝土结构防腐保护 许 雪 等(100)
15. 沿海地区钢筋混凝土桥梁的腐蚀与防护设计 闻宝联 等(105)
16. 万州长江铁路大桥混凝土结构防护涂装体系的设计与施工 蒋益民 (111)
17. 海洋工程混凝土潮差带涂层防腐的两个难点及 EURONAVY 解决方案 ... 李兆祥 等(117)
18. 混凝土的腐蚀与表面涂装防护 于法鑫 等(122)
19. 混凝土中的热镀锌钢筋 Stephen R Yeomans (128)
20. 桥梁钢筋混凝土结构热喷涂锌防护涂层 沈亚郊 等(134)
21. 热喷涂锌、铝及其合金防腐性能的研究 李 朋 等(139)
22. 环氧钢筋在某跨海大桥试桩承台中的应用 张必准 (144)
23. 海洋环境中氯离子侵蚀与混凝土碳化诱发钢筋锈蚀失效概率的对比分析 赵尚传 (148)
24. 混凝土桥梁耐酸雨防腐蚀保护技术 徐雪峰 等(152)
25. 铁路混凝土桥梁裂缝修补材料的研究 杜存山 等(157)

26. 某石化公司混凝土管架腐蚀状况的普查、抽检及评价 雷俊等(162)
27. 混凝土桥梁表面防护用有机硅渗透剂 孙红尧等(169)
28. 大型钢筋混凝土冷却塔的涂料防护 剧灵芝等(173)
29. 高性能防腐面漆在钢结构桥梁上的应用和展望 刘新(177)
30. 钢结构桥梁防护涂料与涂装 李荣俊等(181)
31. 桥梁混凝土结构表面防护涂装 林绍基等(191)
32. 水工钢结构防腐涂料与涂装 李荣俊等(199)
33. Ac 铝合金复合涂层性能及其在桥梁水工建设中的应用 翟云皓等(207)
34. 钢结构桥梁的维修涂装 刘新(213)
35. 硅氧烷聚合物的水性金属重防腐涂料 傅晓平等(218)
36. 水性环氧富锌硅烷金属重防腐涂料的研制 陈永福等(224)
37. 大气区钢结构的防腐蚀涂料试验研究 孙红尧等(231)
38. 环境友好型四氟化氟碳涂料在钢结构防护领域中的应用 鹤下知也等(236)
39. ET-98 无机磷酸盐富锌(铝)涂料性能与应用 卞大荣等(246)
40. 用于钢结构桥梁表面漆膜的水性脱漆剂研究进展 乔淑媛等(249)
41. 万州长江大桥钢梁防腐涂装体系设计与研究 段雪炜(255)
42. 钢桥桁梁摩擦面的复合涂层防腐蚀技术 孙寅等(260)
43. 桥梁钢结构用涂料质量指标体系及其检测 苏春海(264)
44. 非亚硝酸盐钢筋阻锈剂试验研究 唐修生等(273)
45. 近海桥梁水工钢结构阴极保护工程设计及新技术应用研究 武烈等(277)
46. 国外桥梁钢筋混凝土结构阴极保护技术 葛燕等(292)
47. 海洋钢结构阴极保护方式的选择 高健等(298)
48. 浅析钢筋混凝土阴极保护系统 Miki Funahashi 等(302)
49. 天津港南疆 3#4#泊位阴极保护系统的维护 马龙等(310)
50. 码头钢管桩外加电流阴极保护系统设计及施工 马龙等(315)
51. 曹妃甸煤码头钢板桩防腐蚀设计 何小松等(321)
52. 大连长兴岛公共港区 1#~3#通用泊位钢管桩牺牲阳极阴极保护 包振昌等(325)
53. 阴极保护用变压整流器及其远程监控系统 江小雪等(330)
54. 锌阳极在活性砂浆中电化学性能的初步研究 李岩等(334)
55. 桥梁结构钢在波动载荷下的应力腐蚀行为研究 曹备等(338)
56. 晶粒大小对桥梁钢在海洋大气下腐蚀的影响 彭冲等(343)
57. 界面偏聚与耐候钢的初期腐蚀行为研究 张崑等(348)
58. 长尺电联接钢样在实海中的电偶法研究 张万灵等(353)
59. 桥梁钢结构焊缝的防腐蚀施工 易春龙等(358)
60. SEBF 熔结环氧涂层预应力钢绞线的研究和开发 陆卫中等(362)
61. 非损伤微测技术在金属桥梁防腐蚀研究中的应用 何杰等(370)
62. 高品质超细活性锌粉的生产与应用 王爱平等(374)
63. 高渗透改性环氧涂料对提高混凝土耐久性及其在防腐工程中的应用 叶林宏(378)

特
邀
报
告

杭州湾跨海大桥基础钢管桩 长效重腐蚀防护技术

柯 伟 李 京 张立新 陆卫中 赵 健
高 英 贺智端 李晓东 史杰智 刘宝昌

(中国科学院金属研究所)

宋宝天 (哈尔滨焊接研究所)

【摘 要】2002 年杭州湾大桥的总体设计对钢管桩寿命提出了服役期超过 100 年的要求,世界上尚无先例。这对跨海大桥的基础结构钢管桩的防腐蚀和耐久性提出了更高的技术指标,实际上成为建桥的前提条件。为实现这一目标,我们提出“以高性能复合涂层为主,辅以可更换牺牲阳极的综合腐蚀防护方案”解决跨海大桥钢管桩的腐蚀控制难题。

根据钢管桩不同部位的腐蚀环境、施工和服役条件,开发了新型涂料体系来满足抗渗透能力、结合力、抗冲击和磨损、耐老化和化学稳定性以及耐阴极剥离性能等各项技术要求。

在采用优质高性能防护涂层的基础上,阴极保护采用“承台连防、水下安装、水上馈电焊接”的全新技术,该方法在施工中具有不破坏高性能涂层,并缩短工期的优势,已在现场成功地应用。

经过一年多实际运行,测试了每个钢桩承台保护效果,保护电位在 $-0.94 \sim -1.10\text{V}$ (SCE),且在钢桩各处电位分布均匀,都达到设计要求。结果表明“以高性能复合涂层为主,辅以可更换牺牲阳极的桥梁钢管桩综合防护技术方案”是合理的,性价比优越,与常规阴极保护方法相比,经济效益在 3 倍以上。

【关键词】杭州湾大桥 改性熔结环氧涂层 牺牲阳极保护

1 前言

杭州湾大桥北起嘉兴,横跨杭州湾止于宁波慈溪,全长 36 公里,可将宁波到上海间的陆路路程缩短 120 余公里。她超过美国切萨皮克海湾桥 (Chesapeake - Bay Bridge - Tunnel) 和沙特阿拉伯的巴林道堤桥 (Saudi Arabia - Baharian Cause Way),成为目前世界上最长的跨海大桥。

大桥按双向六车道高速公路设计,设计行车时速 100 公里/小时,投资预算 118 亿人民币。2004 年开始施工以来,工程进展顺利,已于 2007 年 7 月 26 日举行全线贯通仪式,预期 2008 年奥运会前建成通车。杭州湾大桥无论在建桥速度和成本上都取得了建桥史上突破性的进步。

设计杭州湾跨海大桥时,根据杭州湾海域复杂的海况,特别是为了降低成本,缩短施工周期,希望尽可能采用预制构件,变海上施工为陆上施工,提出了“集桩式桥墩”设计概念。作为基础结构的每个桥墩由 10-12 个的钢管桩组成。杭州湾大桥所采用的钢管桩长 88m,管径 1.6m,壁厚 22mm 是很难维修不可更换的水下构件,要求服役期超过 100 年。因此,基础结构钢管桩在海水中的长效耐腐蚀性和全面腐蚀控制方案实际上成为实现这种建桥设计构想的先决条件。在世界建桥史上如何解决这类桥桩的腐蚀问题尚无先例。

2002 年中科院金属研究所国家腐蚀控制工程技术研究中心重腐蚀防护技术及工程化项目组,根据十多年的研究成果和防腐技术实施经验,正式向杭州湾大桥建设指挥部提出《复合结构型熔融结合环氧涂层和高效牺牲阳极联合保护方案》作为大桥钢管桩的防护方法。首先在腐蚀专家组技术研讨会讨论,继而在武汉大桥设计院对钢桩耐腐蚀技术原理和施工作了说明并得到认同。这种保护方法的基础和前提是高性能涂层材料和涂装工艺;而长效阴极保护技术和监控则是结构完整性和安全的保证。这个任务很艰巨,因为当时世界上除一条阿拉斯加海底工程实验管线采用过类似的技术外,还没有桥梁钢管桩使用过这类保护技术。

2004 年杭州湾跨海大桥开始工程施工,目前这项重腐蚀防护技术已经在工程上成功地获得应用。实践证明,在防腐效果和施工方法上具有明显的优点,为解决海洋工程材料长效腐蚀防护提供了一套具有深远意义和发展前景的配套技术。

我们在第三届海峡两岸腐蚀研讨会上曾以“复合涂层与牺牲阳极联合保护技术在桥梁钢管桩上的应用”为题报道过有关的研究成果和设计理念^[1]。本文将着重报道我们采用《复合结构型熔融结合环氧涂层和高效牺牲阳极联合保护》方案在杭州湾跨海大桥工程上实施所取得的工程经验和效果。

2 杭州湾跨海大桥钢管桩防腐蚀设计的主要思路

海洋环境下钢结构腐蚀防护方法大致有如下发展过程:

(1) 预留腐蚀余量:早期工业发达国家大桥钢管桩主要依靠钢材自身的腐蚀余量达到设计寿命,如选用大口径(直径 4-6m)壁厚(40-80 mm)钢管结构。这种方法浪费大量钢铁,制造和安装费用高,施工周期长,在海洋腐蚀环境下由于局部腐蚀等不可预见性的破坏导致桥梁过早地损坏。我国也不具备生产超长壁厚钢管桩的冶金装备和产品。因此,采用小口径(直径 1.5-1.6m)薄壁(20-25 mm)群桩的结构是经济可行的办法,但必须解决长效腐蚀控制问题。

(2) 耐海水合金钢:近 50 年来研制了多种耐海水用合金钢,包括 10CrMoAl、316L 和蒙纳尔合金等,虽然其腐蚀速率较普通碳钢低很多,但价格昂贵,且在焊接和应力集中处容易产生局部腐蚀,严重降低了使用的安全性。

(3) 阴极保护:在桥梁的腐蚀和防护中应用得相当普遍,例如海上采油平台。但由于海水中裸钢所需的阴极保护电流密度较高,阳极消耗较大,而由于裸钢系统的电绝缘性差,阳极的保护电位差较大,有效的保护范围小,需要安装的阳极块数较多,长期安全运行的可靠性和整体维护的经济性较差。设计寿命通常控制在 20~30 年以下。

(4) 涂层防护:采用环氧煤沥青、玻璃钢、金属喷涂层加有机涂层封闭体系、普通多层有机涂层、水泥聚合物砂浆和环氧涂层等保护,但保护涂层还只是用在大气区、飞溅区和潮差区的范围,而在海水全浸区和泥下区还是另外采用阴极保护单独进行防护。涂层和阴极保护分别在不同的区域起作用。

(5) 涂层加牺牲阳极联合保护-以优质长效涂层体系防护为主,牺牲阳极为辅的钢管桩整

体防腐方案

杭州湾大桥地处钱塘江强潮河口、潮差大、水流急、泥砂含量高。为确保大桥设计寿命达到100年,根据钢桩不同部位的腐蚀环境,即泥下区、水中区和浪溅区分别采用单层、双层和复合三层高性能熔结环氧涂层。目前环氧涂层只有埋地管线30年使用寿命的现场数据,新型优质环氧涂层体系预期在海水中的寿命至少可达50年以上。

经熔结环氧涂装的钢材所需阴极保护电流密度最小,比其它涂层要小1-2个数量级。以埋地管道为例,一般金属裸管保护电流密度在 $10-300\text{mA}/\text{m}^2$,现行常见涂层在 $10-10^3(\text{A}/\text{m}^2)$ 左右,而熔结环氧涂装时仅为 $5(\text{A}/\text{m}^2)$,而且已有经验证明使用十余年后仍保持这个水平。

为了在施工中不破坏高性能涂层,阳极安装避免水下焊接,主要采用悬挂铝合金阳极“承台连防、水下安装、水上馈电焊接”的全新技术。结果表明,这种方案是经济、有效和可行的,已经初步取得了成功。

考虑到涂层可能会发生的局部破损和脱落,大桥采用动态牺牲阳极保护设计和可更换阳极,更换周期为35年。当桥梁达到无限寿命时相当于过渡到全裸钢桩的阴极保护状态。

为了避免意外,在典型桥位采用了腐蚀监控系统可以对钢桩的腐蚀状况进行在线监测。钢管桩预留了相当于可支持运行15年寿命的一定厚度的腐蚀余量。

3 关于熔结环氧复合涂层材料结构和性能的研究和讨论

钢管桩不同部位,包括泥下区、海水区和浪溅区腐蚀环境的施工和服役条件是不一样的。因此,针对这三个不同的区域腐蚀环境和施工的特点,须要对一般的熔结环氧涂层进行改性并采用多层涂装工艺,把三种粉末涂料在钢管桩不同位置一次涂装完毕。

①泥下区:由于大桥钢管桩的泥下地质多数为沙土、粉沙土,而且该区域海洋生物和细菌种类及数量较多,对钢管桩具有较大的腐蚀能力。超长钢管桩(摩擦桩)对泥下区的机械损伤和稳定性要有足够的可靠性。

②水下区:杭州湾海域泥砂含量较高,流速快,还受到海生物和工业、生活污水的侵蚀。涂层必须具备抗渗透、抗冲击、耐磨损、抗污损、抗化学侵入的要求。

③浪溅和潮差区:主要受到海水飞溅和日照造成的干湿交替环境。由于海水飞溅,供氧充分,干燥时间短,很难形成保护性的膜层;加之海浪和漂浮物的冲击作用腐蚀和磨蚀的环境最为苛刻。因此,潮差区涂层体系应具有最好的抗机械划伤和抗磨损能力,并且外层涂料应具有良好的耐候性,能抵抗紫外线的辐照,减少外层涂层的粉化和失色现象。

因为熔融结合环氧涂层具有优异的防腐蚀性能,抗冲击强度高($>24\text{J}$)、结合力强($>90\text{MPa}$),抗水渗透性和阴极剥离性能强。熔结环氧涂层的抗阴极剥离性能是各种涂层中最突出的,因其所需阴极保护电流很小,这就又进一步控制了阴极剥离。熔结环氧涂层对阴极保护电流没有屏蔽作用,不致影响阴极保护的效果。而这正是另一些抗渗水性较好的防腐层(如聚乙烯等)的缺陷。因而,我们选择熔融结合环氧涂层体系作为基础,成功开发了SEBF-6-1, SEBF-6-2和SEBF-6-3钢管桩用系列涂料。有关实验结果我们过去已经作过报道^[1] 本文不再重复,这里着重讨论防蚀工程密切关注的一些问题。

3.1 抗阴极剥离性能评价

如果我们将涂层的主要性能指标:抗阴极剥离性能、涂层的抗渗透性、附着力、抗 Cl^- 渗透特性进行比较,从上世纪60年代到上世纪末,熔结环氧粉末涂料的研究逐步深入,涂料的组成

不断改进,性能也不断提高,其发展大体上经历了三个阶段,即A体系—上世纪60年代产品,B体系—上世纪80年代产品,C体系—上世纪末新产品。从图1可以看到1965年前后,涂层对阴极剥离的抵抗力低下,剥离量达30mmr,第二阶段八十年代该性能在提高,剥离量降至10mmr,到上世纪末第三阶段,剥离量继续下降至约3mmr。

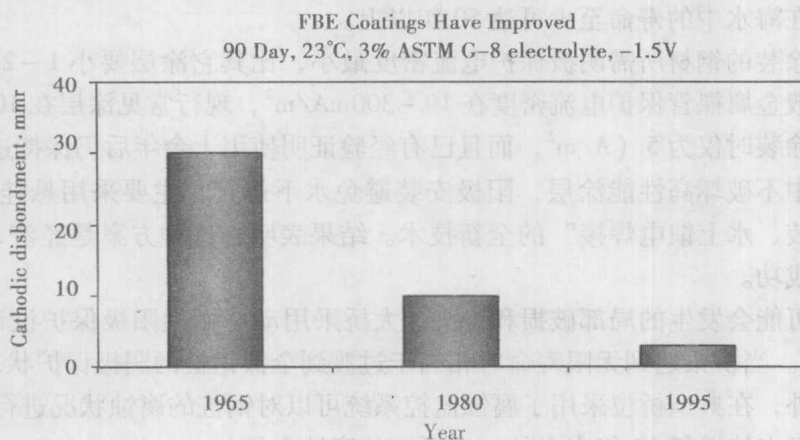


图1 熔融结合环氧涂层抗阴极剥离性能的改善^[2]

3.2 涂层的抗渗透性评价

杭州湾大桥所用涂料(SEBF-6-X)属于C体系。在60℃蒸馏水,3.5,涂层的% NaCl浸泡45天后其增重率分别为1.19%和0.55%。远远优于其它同类商品,较性能良好的B系列又有了很大提高。见图2a,2b。

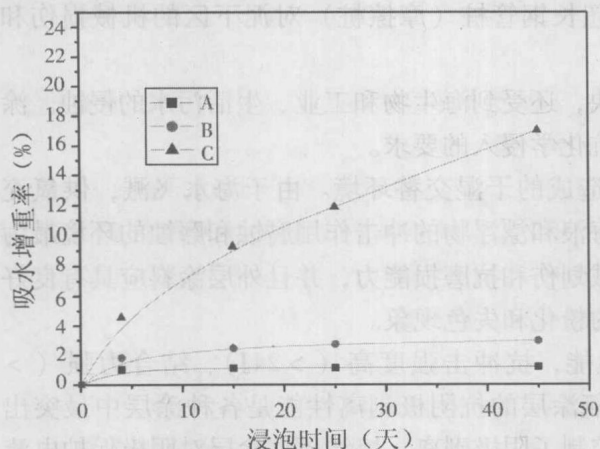


图2a 不同涂层在60℃蒸馏水中的吸水增重曲线

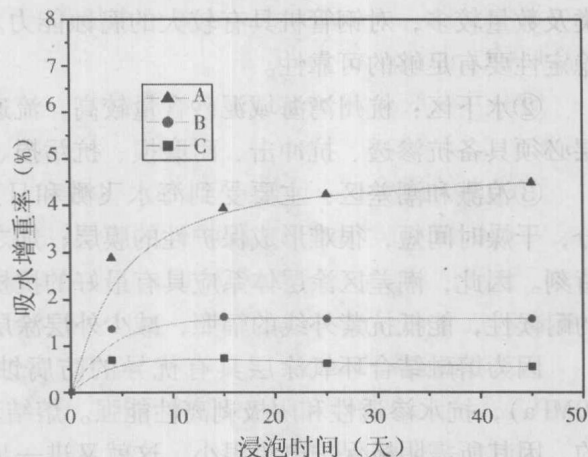


图2b 不同涂层在60℃,3.5% NaCl溶液中的吸水增重曲线

3.3 涂层的附着力评价

A系列涂层附着力测试采用常温划格法测试,要求技术指标达到1-4级。

B系列涂层的附着力在国内外以往标准中规定为 $95^{\circ} \pm 3^{\circ}$ 浸泡1天,要求达到1-2级。

C系列90℃浸泡25天,要求达到1-2级附着力。

A、B、C系列涂层体系附着力测试结果(90℃蒸馏水连续浸泡,涂层厚度在300-400 μm)

见表1。

表1 A、B、C系列涂层附着力分析结果

涂料系列	附着力, 1天	附着力, 4天	附着力, 15天	附着力, 25天
A	1-2级	5级	5级	5级
B	1-2级	2级	3级	4级
C	1级	1级	1级	1级

3.4 抗 Cl^- 离子渗透特性

本实验的水样是依据“ISO14655-1999 预应力混凝土用环氧涂装的钢绞线”标准“氯离子渗透率”试验方法制取的。涂层对氯离子的阻隔性能用45天的试验来评价, 见表2。

表2 A、B、C系列涂层抗 Cl^- 渗透分析结果

涂料型号	涂层抗氯离子渗透性水样中 氯离子含量 (mol/l)	标准要求 (mol/l)	结论
A系列	0.00037	<0.0001	不合格
B系列	0.000013	<0.0001	合格
C系列	0.000001	<0.0001	合格

3.5 综合性能评价

现场工程实践已经证明, A系列涂层防腐年限可达10年左右, B系列涂层可达30年, C系列涂层各方面性能较A、B系列涂层提高了很多, 可以期望达到50年以上的寿命。

研究开发成功的SEBF-6-1, SEBF-6-2和SEBF-6-3等属于C系列涂料具有以下优点:

①优良的抗海水渗透性; ②优良的耐海水的化学稳定性; ③优良的耐冲刷磨蚀和气蚀性; ④优良的抗机械划伤性; ⑤优良的抗应力腐蚀和抗腐蚀疲劳性能; ⑥优良的耐紫外线辐射老化性能; ⑦适当的底层涂层表面粗糙度; ⑧优良的抗阴极剥离和阴极屏蔽性能; ⑨优良的电绝缘性; ⑩优良的抗生物污损性; 此外还具有良好的可施工性、配套性及修补性等优点。

主要性能指标如下:

①黏结强度: SEBF-6-1黏结强度>70MPa, 达到国家标准的2倍。

②附着力: 按标准要求, 一般涂层试样在95℃蒸馏水中浸泡一天, 取出, 达到一级的撬剥标准, SEBF-6-1, SEBF-6-2和SEBF-6-3涂层试样95℃蒸馏水中浸泡30天, 同样达到一级的撬剥标准, 湿附着力远远超出普通涂料。

③抗划伤能力: SEBF-6-3划伤深度 $250\mu\text{m}$ <标准指标 $500\mu\text{m}$ 。

④抗紫外老化能力: SEBF-6-3涂层的抗老化色差值比常规环氧涂层低60%。

4 高性能多层熔结环氧涂层的涂装工艺和生产流程

高性能的粉末涂料和配套的涂层结构是获得优异涂层体系的前提条件, 而可靠和高效的涂装生产线以及正确可控的涂装工艺是实现优异涂层结构的载体和途径。

大桥基础钢管桩设计采用桩长71m至88m, 桩径为 $\Phi 1600\text{mm}$ 和 $\Phi 1500\text{mm}$ 两种规格的开口

变壁厚(820/822mm)的螺旋焊缝钢管桩。钢管桩数量和防腐面积巨大,结构复杂,工期要求紧迫。为此专门设计并建立了一条三层外防腐全自动涂敷工艺生产线,配置了齐全的质量检测设备,避免了天气及人为等因素对防腐涂敷质量的影响,确保涂敷生产线具有高效、连续、稳定、24小时生产的特点。这条生产线由宁波三鑫公司建成并已投入生产。

研制完成的三层涂敷生产线采取串联式的布局,设备布置如图3。生产线全长240m。其中抛丸前及涂敷冷却后的传输带(兼检测平台)安装在室外;钢管桩予热、抛丸除锈、吸尘、中频加热、粉末喷涂、固化和水冷却设备布置在室内,生产线长54m,出冷却区后在室外的传输带上降温至常温后进行涂敷后的质量检测一次性预热后将三种粉末按时序相继涂敷在钢管桩外壁不同长度区间内。为此,必须研究胶化和固化过程的热特性并调整生产线的总体布局和功能。必须充分掌握钢管桩单层、双层和三层结构的涂装参数,然后再通过多种工艺的优选来制定能够保证涂层质量稳定性和涂装高效性的工艺规范。

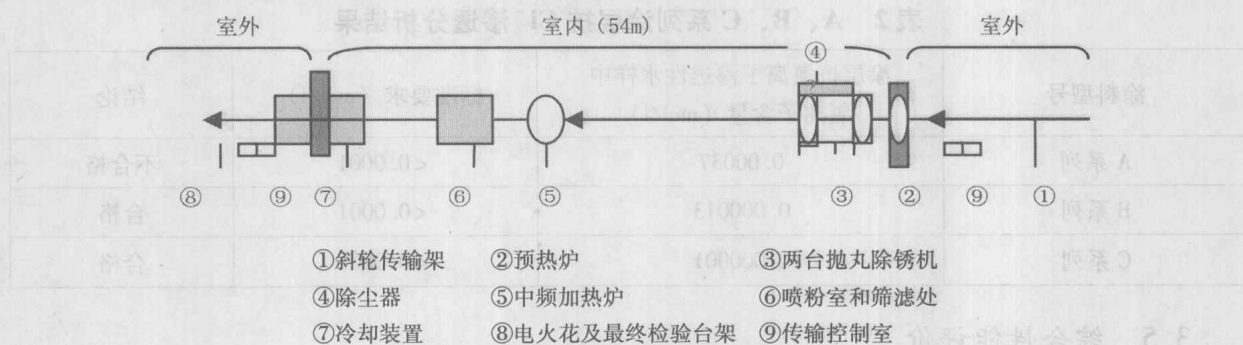


图3 三层涂敷工艺自动化生产线平面图

(1) 泥下区: 在泥下部位即承台以下约40m至桩尖的范围, 采用改性SEBF-6-1型重防腐型环氧粉末涂料, 涂层厚度 $\geq 300\mu\text{m}$ 。该层涂层表面的粗糙度与钢管桩原材质粗糙度相当, 大约在30-80 μm 左右。

(2) 水中区: 即承台以下约8m至40m的范围内, 采用普通双层结构, 内层采用重防腐型SEBF-6-1型涂料, 最小厚度为300 μm ; 外层采用耐划伤抗冲击耐磨防污的环氧粉末涂层SEBF-6-2, 厚度最小为300 μm ; 双层涂层的厚度为 $\geq 600\mu\text{m}$, 以满足钢管桩水下部位泥砂和水流长期冲击、抗磨损的需要。

(3) 潮差区和浪溅区: 承台以下约8m范围内为潮差区和浪溅区, 采用加强级双层环氧涂层, 即三层涂层结构, 内层采用重防腐型SEBF-6-1型涂料, 涂层最小厚度为300 μm ; 中间层采用耐划伤抗冲击耐磨的环氧粉末涂层SEBF-6-2, 涂层厚度最小为300 μm ; 外层采用耐划伤和耐候性好的SEBF-6-3涂层, 厚度最小为200 μm ; 三层总体涂层厚度 $\geq 800\mu\text{m}$ 。该涂层体系不仅具有最好的抗机械划伤和抗磨损能力, 而且耐老化性和抗紫外线的辐射, 减少外层涂层的粉化和失色现象。

基于上述涂装工艺和全套设计, 科鑫腐蚀控制工程技术中心在生产现场建立了240m长的涂装生产线, 生产能力为单日涂敷钢管桩6000-6500 m^2 , 相当于日产14支70吨大型涂层钢管桩的能力, 高质量地完成了5千余根钢管桩的涂装, 并已全部安全地弃入海湾。

5 阴极保护设计与施工的特点

与传统方法不同, 阴极保护系统设计需要充分考虑涂层对阴极保护系统的影响。

5.1 针对全寿命的动态设计

为了确保阴极保护系统在寿命期内始终有效地发挥作用,必须动态地考虑钢管桩上高性能熔融结合环氧粉末防腐涂层破损率的变化。为此,分别利用初期阴极保护电流密度、平均阴极保护电流密度和末期阴极保护电流密度计算海水中钢管桩阴极保护所需要的阳极数量。

为了降低建桥初期投入的成本,我们按 35 年运行周期来估算可更换阳极的重量。

从实际计算结果来看,利用末期阴极保护电流密度计算出的阳极数量确实高于利用初期和平均阴极保护电流密度计算出的结果,如果不采用针对全寿命的动态设计,很有可能在阴极保护系统使用末期,阳极材料尽管还存在,却无法提供足够的保护。

5.2 合理选择阳极材料和型式

为了减少大桥基础钢管桩的负荷,选用高效铝合金牺牲阳极。

考虑到镉型阳极具有较高的可靠性并已经在海底管道工程中广泛使用,我们采用镉型牺牲阳极来保护大桥基础钢管桩。根据美国腐蚀工程师协会标准 NACE RP 0492-99,镉型阳极分为两种类型:一类是由两个半圆形阳极组成的半壳形式镉型阳极;一类是由多个单块阳极组成的组合形式镉型阳极。考虑到钢管桩的管径较大,所以,在钢管桩的阴极保护中采用组合形式镉型阳极。

5.3 确保最小电位准则

国内外的相关规范都规定施加阴极保护后被保护结构电位应该达到比 -0.80V (相对于海水银/氯化银参比电极) 或者 -0.85V (相对于铜/饱和硫酸铜参比电极) 更负。

目前我们已完成大部分钢管桩阴极保护(牺牲阳极)工程施工。钢管桩阴极保护电位水平完全可以得到保证。结果见表 3。

表 3 阴极保护后钢桩的电位分布

CO ₂ -10 钢桩	CO ₂ -11 钢桩	CO ₂ -12 钢桩	CO ₂ -13 钢桩	CO ₂ -14 钢桩
-1.038V	-1.054V	-1.046V	-1.051V	-1.045V
CO ₂ -15 钢桩	CO ₂ -16 钢桩	CO ₂ -17 钢桩	CO ₂ -18 钢桩	
-1.046V	-1.053V	-1.054V	-1.053V	

从测试得到的数据来看,由于各个钢管桩通过承台内的钢筋实现了彼此间的电连接;而且在大桥基础钢管桩表面涂有高性能熔融结合环氧粉末复合涂层,因此,阴极保护电流传输得很远。安装阳极组的钢桩和相邻两个钢桩上各点的电位均在 $-1.03\text{V} \sim -1.06\text{V}$ 之间,达到了设计要求的初期阴极保护电位应该在 $-0.90\text{V} \sim -1.10\text{V}$ (相对于铜/饱和硫酸铜参比电极) 之间的指标范围。

为了确保大桥基础钢管桩上始终具有合适的电位分布,进行了末期阴极保护电位分布的推算。利用美国大西洋大学的 Hartt 教授等人经多年研究、提出的一套计算钢管桩或海水管道表面的阴极保护电位分布的公式,推算出了在阴极保护系统的有效使用寿命末期时钢管桩表面的阴极保护电位分布^[1,3]。从计算结果来看,当钢管桩表面涂层破损率达到 15% 时,钢管桩表面各处电位均比 -0.80V (银/氯化银参比电极) 更负,说明钢管桩表面各处均能始终得到保护。

5.4 阴极保护施工

基于上述设计思想,同时为了使防腐涂层的破坏降低到最低,增加阳极固定的可靠性,确保在较短时间内能完成安装施工,采用集中布设手镯型阳极组结构以及陆上组装、水下固定阳极组结构、水上焊接导电装置的设计方案,安装后的基本结构如图4所示。

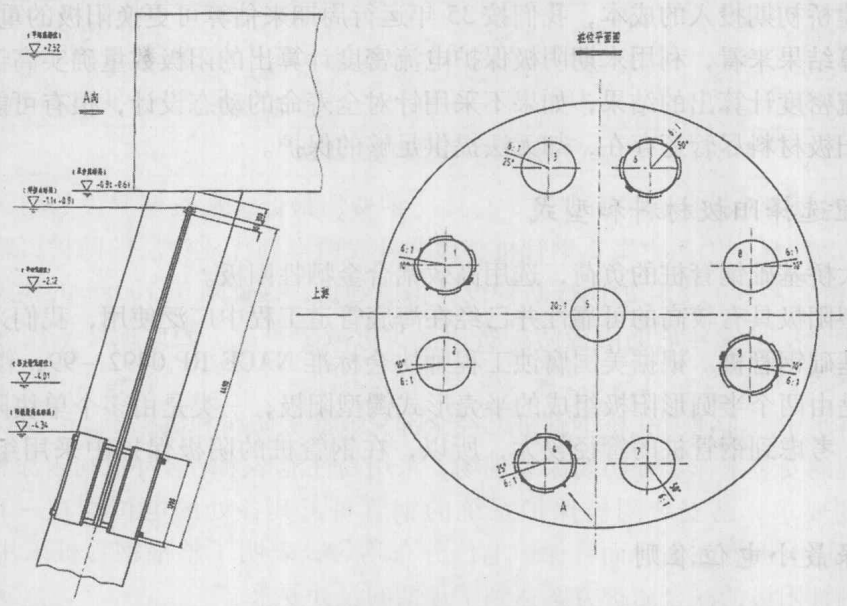


图4 镯型阳极安装结构示意图

在阴极保护系统安装的过程中有以下关键技术需要注意:

(1) 杭州湾风浪大、水流急,海水能见度差。平潮期时间很短,一般只有40~60分钟,仅利用平潮期工作很难按期完成任务,必须克服大水流影响。在如此恶劣的环境条件下,将重达几百公斤的阳极组顺利、准确、牢固地装焊在水下钢桩设定位置上,是施工中首要关键技术,已经得到解决。

(2) 优质快速焊牢导电角钢并作好防腐处理,是施工中的另一关键技术。按照标准要求,将牺牲阳极安装在低于最低潮位300mm以下部位。为便于对导电连接焊缝进行防腐处理,将电连接点设在承台下500mm处,导电体选用100×100×10的角钢。为确保工程质量,焊接和作防腐时,海水不能溅到焊缝处,而每个潮期钢桩露出水的时间很短,必须在很短的时间内完成焊接和防腐工作。

5.5 防腐蚀设计方案实施效果及相关的经济分析

结合高性能熔结环氧涂层和阴极保护设计的研究成果,对不同涂装情况下的防腐蚀方案进行了比较分析。钢管桩阴极保护寿命按照35年设计,假定阴极保护初期钢管桩上涂层的破损率为1%,阴极保护末期钢管桩上涂层的破损率为15%。

表4列出了单根钢管桩在不同涂装方案下所需的熔融结合环氧粉末涂料、涂装费用和阴极保护费用。

表4 不同防腐方案防护费用的比较

方 案	1 潮差区和浪溅区涂装 + 阴极保护	2 全部涂装 + 阴极保护	3 阴极保护 (钢管桩不涂装)	4 泥上区涂装 + 阴极保护
涂料及涂装费 (一次性)	C	6.5C	0	2.34C
阳极材料费	7A	A	10.5A	2.5A
阳极安装施工费	7B	B	10.5B	2.5B
合计 (前面三项和)	2.1D	D	3D	1.1D
备 注	A、B、C、D 分别代表单项费用的基数。			

方案2、4的费用比较接近，而方案2总体防护费用最低，从长期服役的耐久性考虑，方案2的防护效果更为明显，因为方案2钢管桩整体的外表面得到优质涂层的防护，整体防护效果可延长至50年。相应之下，35年的阴极防护设计得以延长，因此可望100年的整体防护费用方案2要比方案4的低，即35年后的阴极防护费用至少可减少一次。因此最终采用方案2作为钢管桩整体防腐蚀方案。

目前，全桥水中区非通航孔桥钢管桩已经全部完成涂层防腐和沉桩施工，部分钢管桩已完成了阴极保护系统的安装工作。在防腐涂装现场，采用高性能熔融结合环氧粉末涂料涂装的钢管桩全部满足检验的要求，已安装阴极保护系统的钢管桩，其各处的电位均在-1.10~-0.85V (Cu/CuSO₄)参比电极)左右，而且保护电位分布均匀，表明了整根钢管桩采用涂敷高性能复合防腐涂层和牺牲阳极的联合防护方案达到了预期的设计要求。

表5为钢管桩三层复合涂层型式试验检测汇总资料，表6为同一墩位不同位置钢管桩的不同高度上电位测量结果。

表5 三层复合防腐涂层型式试验检测资料汇总表

序号	试验项目	技术指标	测试结果	结论	执行标准
1	阴极剥离 (65℃, 48h)	≤6 mm	3.27 mm	合格	SY/T0413-2002 附录 C
2	抗 15°弯曲 (0℃)	无裂纹	无裂纹	合格	Q/CNPC38-2002 附录 D
3	抗 15J 冲击	无针孔	无针孔	合格	Q/CNPC38-2002 附录 E
4	附着力 (24h, 95℃)	1 级	1 级	合格	SY/T0315-97 附录 H
5	底层断面孔隙率	1 级	1 级	合格	SY/T0315-97 附录 E
6	底层粘结层孔隙率	1 级	1 级	合格	SY/T0315-97 附录 E
7	耐 50kg 划伤	≤500μm (无漏点)	350μm (无漏点)	合格	Q/CNPC38-2002 附录 F

表6 各类钢管桩表面不同高度点上的电位测量结果

	相对海床面 0m	相对海床面 约 3m	相对海床面 约 6m	相对海床面 约 9m
安装阳极组的钢管桩	-0.958V	-0.967V	-1.015V	-0.995V
与安装阳极组的钢管桩相距最近的钢管桩	-0.912V	-0.955V	-0.980V	-0.960V
承台中心的钢管桩	-0.905V	-0.908V	-0.954V	-0.942V
与安装阳极组的钢管桩相距最远的钢管桩	-0.850V	-0.856V	-0.880V	-0.927V