

新世纪

水工、桥梁结构腐蚀控制

曹备 张琳 主编



云南科技出版社

新世纪水工、桥梁结构 腐蚀控制

——'2003 全国水工、桥梁结构
防腐蚀工程技术交流会论文集

曹备 张琳 主编

云南科技出版社

图书在版编目(CIP)数据

新世纪水工、桥梁结构腐蚀控制:2003 年全国水工、桥梁结构防腐蚀工程技术交流会论文集/曹备,张琳主编. —昆明:云南科技出版社,2003.9

ISBN 7-5416-1878-0

I. 新... II. ①曹...②张... III. ①水工结构 - 防腐 - 学术会议 - 文集②桥梁结构 - 防腐 - 学术会议 - 文集 IV. ①TV3 - 53②U445.7-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 084575 号

云南科技出版社出版发行
(昆明市环城西路 609 号云南新闻出版大楼 邮政编码:650034)
北京瑞兴印刷有限公司印刷
全国新华书店经销
版权专有 不得翻印

开本 787×1092 1/16 印张 13 字数 300 千字
2003 年 10 月第 1 版 2003 年 10 月第 1 次印刷
印数:1~1000



书号:ISBN 7-5416-1878-0/TV·7

定价:38.00 元

编辑委员会

主 编：曹 备 张 琳

编 委：（以姓氏笔画为序）

刘 颖 吴荫顺 张小阳 杜存山

陈仲德 陈光章 荆秀芬 袁玉珍

黄哲龙 谢育铮 韩文礼 李金桂

主 办 单 位

中国腐蚀与防护学会防腐蚀工程专业委员会

协 办 单 位

中铁大桥局集团
铁道部大桥工程局桥梁科学研究院
《桥梁建设》编辑部
水利部水工金属结构质量检验检测中心
北京航空材料研究院
铁道科学研究院金属及化学研究所

支 持 单 位

北京中腐防蚀工程技术有限公司
北京市燃气集团输配分公司
中国石油工程技术研究院
北京航材百慕新材料技术工程有限公司
水利部水工金属结构质量检验检测中心
北京松晕管道有限公司
深圳市甘泉建设监理有限公司
常州市凯星涂料厂
河南省武陟华宇镁业有限公司
沛县防腐保温工程总公司

序

“江山如此多娇”。我国山水优美、文化悠久，是旅游产业的重要资源。1995年5月，在北京科技大学毕业生文艺晚会上，我曾借《三国演义》第一回“临江仙”词牌，反其情调，倍其篇幅，颂祖国四江如此多娇：

（一）长江

滚滚长江浪推浪，一年一度沧桑。校内璇歌送栋梁。

春风仍健在，桃李更芬芳。

（二）珠江

茫茫珠江绣南疆，改革开放橱窗。东西游客叹无双。

政策威力在，兴旺更远航。

（三）松花江

沧沧松江爱故乡，昔日悲歌流浪。今朝工农共盛强。

历史真理在，南北入海洋。

（四）黄河

滔滔黄河绕心房，迷恋中原风光。风吹草低见牛羊。

锦绣河山在，创思谱新章。

沿江上下，有利于运输；横流则需轮渡，妨碍人流和物流。“一桥飞架南北，天堑变通途”；在兴国途中，钢桥遍布锦绣山河。

冷静的老子四千年前已认识到：“天下莫柔弱于水，而攻坚者莫之能胜。”古朴的李耳只是总结了“柔能胜刚”这

条真理；我们确需要借助于现代自然科学，从物理现象去揭示钢的电化学腐蚀机理，并寻求防腐蚀措施。

本文集汇编了四十余篇学术论文，它们是国内在这个领域的顶级科研成果和宝贵实践。我深信，它们的应用和推广，必将有益于祖国的现代化建设。

中科院院士

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '俞', '镇', and '美'.

2003 年 4 月

前 言

关注 21 世纪的发展，关注科技的进步，与时俱进已经成为我国经济建设的发展方向；与工农业生产和人民生活息息相关的水工桥梁结构等基础建设理应首当其冲。水工和桥梁结构由于其所处内陆和海洋环境因素的作用，存在着不同程度的腐蚀倾向，产生了各种各样的腐蚀问题和安全隐患。为了及时有效地解决建设和生产中的有关问题，提高安全生产和管理水平，广泛推广防腐蚀新技术、新材料、新工艺、新设备在实践中的应用，以中国腐蚀与防护学会防腐蚀工程专业委员会为主办单位，联合中铁大桥局集团、铁道部大桥工程局桥梁科学研究院、《桥梁建设》编辑部、水利部水工金属结构质量检验检测中心、北京航空材料研究院和铁道科学研究院金属及化学研究所等单位，于 2003 年 12 月在美丽的广西北海市举办‘2003 全国水工、桥梁结构防腐蚀工程技术交流会。

本次会议得到了全国有关方面的关注和支持，收到论文 40 余篇，作者来自腐蚀与防护方面的专家学者和生产第一线的科技工作者，具有广泛的代表性。论文就跨江、海大桥结构的耐久性，三峡等工程闸门、堤坝结构的腐蚀问题及防护技术，水工结构的腐蚀控制措施等进行了广泛而深入的探讨，总结了水工桥梁结构、腐蚀控制工程设计、施工、管理及监理经验，在其检验及验收标准规范等方面也进行了广泛

的阐述。这些论文对我国的经济建设发展有很好的参考价值，具有较强的学术性、实用性及前瞻性，代表了水工、桥梁结构腐蚀控制工程技术的发展方向；展示了近年来水工、桥梁结构腐蚀控制工程技术的成果和经验。我们将其汇编成册奉献给广大的读者，希望其中的先进技术和成果能够在伟大祖国的现代化建设中得到推广和应用，共同促进我国腐蚀控制工程技术在新世纪的飞速发展。

本书在编写过程中，得到了有关专家和论文作者的支持和帮助，在此一并表示感谢！由于时间仓促，编者水平有限，本书中难免有错误与不足之处，望读者谅解并批评指正。

编 者

2003 年 9 月

目 录

1. 钢结构桥梁的腐蚀控制	李金桂 曹 备 (1)
2. SL 105—95《水工金属结构防腐蚀规范》修订要点	张小阳 张志修 (11)
3. 杭州湾大桥结构耐久性设计	黄燕庆 邵长宇 (15)
4. 我国铁路钢桥防腐蚀及涂装概况	杜存山 (19)
5. 钢筋混凝土桥梁耐久性设计中需要注意的几个问题	路新瀛 (24)
6. 我国桥梁结构面临的腐蚀问题与分析	荆秀芬 (28)
7. 三峡二期工程金属结构防腐蚀涂装体系设计	田连治 (33)
8. 浅论长江三峡永久船闸钢结构的防腐蚀	张文保 (38)
9. 三门峡水电站过流部件抗磨蚀防护	薛敬平 耿宏伟 (42)
10. 水工钢闸门的腐蚀原因分析与防护措施	易春龙 庞训安 沈亚郊 王洪涛 吴 萍 (46)
11. 双曲线冷却塔破坏成因与修补技术	高 垠 朱冠宏 辛亚平 (50)
12. 海水循环泵腐蚀与防护技术应用	庞其伟 颜 民 程 虹 (55)
13. 妈湾电厂海水冷却水系统防腐方案	钟佰宏 (58)
14. 大跨度桥梁的耐久性保证措施探讨	吴海军 陈艾荣 (61)
15. 杭州湾跨海大桥非通航孔桥基础方案与耐久性设计	王东晖 邵长宇 黄燕庆 (66)
16. 我国铁路钢筋混凝土桥梁病害评估及防治技术现状及趋势	祝和权 李海燕 杜存山 (70)
17. 预应力混凝土桥梁结构的耐久性问题及对策	徐 栋 徐海军 (75)
18. 我国钢海洋环境腐蚀研究进展	黄桂桥 邓永生 (80)
19. 钢筋混凝土桥梁结构防水防腐问题探讨	朱海涛 (85)
20. 卢浦大桥钢结构桥梁除湿技术浅谈	王 蓓 贺舒平 (88)
21. 热喷涂技术在钢铁构筑物上的应用	杨朝晖 韩 冰 邱焕勇 魏兆成 (90)
22. 热喷涂 Ac 铝合金在钢铁构件防腐中的应用	孙 越 陈伟杰 (93)
23. 钢筋混凝土桥梁防腐蚀技术措施研究	孙家瑛 黄成华 (96)
24. 跨海钢结构大桥的长效防腐新技术	杨仁宝 (100)
25. 临海大桥的涂装体系	杨树梅 陈仲德 (103)

26. 钢结构桥梁防腐蚀工艺研究与应用	王世潜 张 铮 王 毅 贺光华 (107)
27. 海洋大气环境中钢管混凝土拱桥的防腐及涂装	张 宁 (111)
28. 浸透型一体化桥梁防水新概念	樊丽辉 (114)
29. 经济高效地做好黄浦江斜拉桥钢结构的防腐工程	朱新达 陶建民 (117)
30. 云南祥临澜沧江大桥钢箱防腐体系的选择	周咏涛 胡 伟 周军生 周 洲 (119)
31. 云南小湾大桥钢箱防腐涂装工艺	周咏涛 周军生 周 洲 (123)
32. 湖北某钢管拱大桥长效防腐设计和涂装工艺	董旭红 (127)
33. 从锌、铝喷涂层的气孔试验谈其合理应用	张志修 胡广武 张小阳 (130)
34. 环氧喷涂钢绞线在水工、桥梁结构中的应用	赵靖钊 方中予 (133)
35. 熔结环氧树脂对钢筋的防腐保护	沈 路 (136)
36. 环氧涂层钢筋及其应用	吴金岳 吴松贵 徐旭峰 徐乃欣 (139)
37. 北方地区公路混凝土防撞墙防护涂层选择与应用	李晓南 姜小刚 赵宗礼 黄哲龙 (143)
38. 在潮湿自然环境中大型钢结构的腐蚀和防护措施	赵全奎 (146)
39. 溶剂型无机富锌涂料	高建东 (150)
40. 迁移型阻锈剂对大桥吊杆钢丝的腐蚀抑制效果评价	赵永韬 吴建华 王朝臣 刘昌飞 林昌应 (153)
41. 混凝土活性掺合料改善抗杂散电流腐蚀性能	陈基成 陈迅捷 欧阳幼玲 张燕驰 (159)
42. 桥梁混凝土结构表面防护技术现状分析	黄哲龙 杨海山 胡立明 (165)
43. 脱盐处理对钢样-砂浆界面微观结构的影响	李森林 朱雅仙 朱秀娟 (170)
44. 灰色聚类在低合金钢大气腐蚀研究中的应用	唐其环 (174)
45. 原子扩散工艺技术防腐应用可行性	马汉堡 (177)
46. MSBR 工艺设计及系统调试	李 杰 谢均宜 钟佰宏 (181)
47. 阴极保护的实际推广应用	钟佰宏 晋春云 曹 备 (185)
48. 强化除磷氧化沟工艺在深圳市罗芳污水处理厂二期的应用介绍	谢均宜 冯启峰 钟佰宏 (188)
49. 钢结构管道防腐油漆配套推荐方案	卞大荣 冯友富 (191)

钢结构桥梁的腐蚀控制

李金桂 (北京航空材料研究院) 曹 备 (北京科技大学)

摘 要: 本文比较全面地阐述了我国钢结构桥梁中钢箱梁、钢缆等的涂装体系,并介绍了日本钢结构桥梁的涂装体系与施工工艺。认为只要采取了合适的防护,这些桥梁可以使用百年以上,汇总的意见有参考价值。

关键词: 钢桥腐蚀控制

The Corrosion Control of Steel-Structure Bridges

Li Jingui Cao Bei

Abstract It is described that coating system on the steel structure bridge beam and steel cable in China and Japan. The steel structure bridges may be used one hundred above if they have been protected. The key words are "properly protected".

Key Words steel bridge corrosion control

1 前言

我国是一个人口众多、地域辽阔、海岸线很长并拥有大大小小许许多多河流的大国,因而拥有各种类型的桥梁也特别多,例如,竹排桥、木板桥、砖砌桥、石板桥、水泥桥、大型钢筋混凝土桥、铁索桥、吊桥、钢结构桥等数以万计。从性能与作用区分,桥还可分为人行桥、公路桥、过街天桥、铁路桥、过江大桥、海湾大桥、悬索桥、海运码头引桥等。我国拥有世界上最早最多的砖砌拱桥、石砌拱桥,但钢结构桥梁却少得可怜,只有兰州黄河第一桥,天津、上海市区的解放桥,大渡河上钢索桥等屈指可数的几座,解放后,1953年原苏联援助建设了第一座铁路公路两用的武汉长江大桥,揭开了我国钢结构大桥的建设史,1978年改革开放以后迎来了我国桥梁建设的蓬勃发展的新时代。以长江为例,目前已建成21座长江大桥,正在兴建11座,仅三峡水库区就有34座桥梁即将完工,这些桥梁几乎都是钢结构桥梁。最长的一条,将是投资53亿元,北起扬州,南接镇江丹徒,全长35.66公里的润杨长江大桥,这是一座大型钢结构悬索桥,居中国第一,世界第三,润杨长江大桥的建设标志着我国已进入世界建桥的先进行列。我国正在迅速兴建高速公路,北京至上海的高速公路长为1262公里,共有980座公路桥。北京地区的桥就有1000座,其中就有设计精美的立交桥近200座。目前我国高速公路已达1.6万公里(世界第三),大约已有近万座公路桥,我国大型公路桥、精美立交桥的建设事实

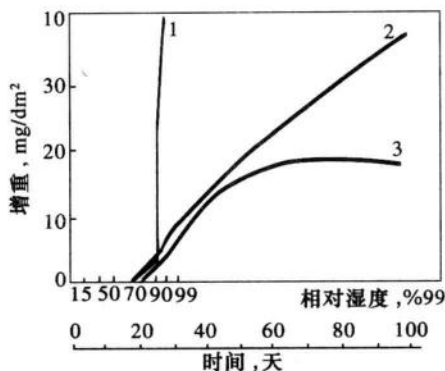
标志着我国的桥梁水平已处于世界先进水平。在这种令人鼓舞的新形势下,作为腐蚀防护科技工作者需要认真考虑的是:我国所建设的这些桥梁的防护水平是否也处于世界先进水平?是否能预防这些桥梁免遭环境条件的侵蚀,确保安全、可靠地运行,确保长寿命的使用?美国是世界上拥有高速公路最长的国家,据美国1984年报道,钢筋混凝土桥梁57.5万座,一半以上出现钢筋腐蚀破坏,40%承载力不足,需要修复和加固。

腐蚀在世界各国、各行各业造成过重大损失,飞机坠毁,钢铁桥梁突然断塌、混凝土工程出现渗漏溶蚀、裂缝、钢筋断裂,输电塔杆倒塌,水轮机叶轮出现空泡腐蚀、腐蚀损伤、停电维修以至有的电厂突然停电,引起用电工厂成片停产。按美国官方指定的部门调查,美国腐蚀损失1975年为\$700亿(占GNP4.2%),1986年为\$1260亿,1995年达\$3000亿。

我国地处四个地带六个区:热带湿热区;亚热带亚湿热区;亚热带干热区;温带温和区等,长沙以南相对湿度超过80%的时间在200天以上;我国是一个发展中国家,环境治理还很有限,相当广阔的区域 SO_2 污染严重,还下着酸雨,pH值在5~6之间;地球上海洋面积为 361×10^6 平方千米,我国海岸线长达一万多公里,沿海五千多个大小岛屿,海水和海洋大气中的 Cl^- 离子弥漫在一些地区;我国水深200米以内的大陆架占世界大陆架总面积的23%,这些事实说明,我国要建设的桥梁很多,而周围环境又比较苛刻。

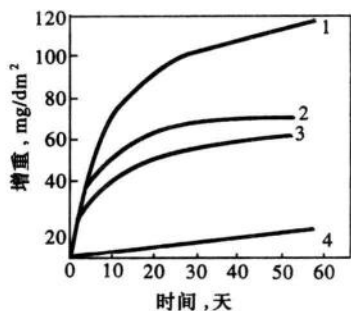
再说具体地区环境,以三峡为例,三峡的大气环境是属于南温带和亚热带过渡地带的气候,夏热、冬暖,年平均气温 $21 \sim 22^{\circ}\text{C}$,极端高温达到过 43.5°C (在丰都县),年平均湿度多超过 70%。RH 大于 80% 的天数在 200 天以上,年降雨多达 120 ~ 130 天, $\text{pH} = 5.5 \sim 6.0$ (酸雨),空气污染含有 SO_2 、 Cl 、 NH_3 、 CO_2 等,其特点是高温、高湿、风小、雾多、雨多。长江水质污染, pH 达 $8.8 \sim 9.1$,偏碱性,含有大量泥沙。

这样的环境对我国各地钢结构桥梁的建设会产生什么样的影响?要采取什么措施预防这些影响?



SO_2 浓度 0.01%; 1—铁; 2—锌; 3—铜

图1 达到临界相对湿度后金属的腐蚀时间变化



1, 2, 3—0.01% SO_2 ; 4—纯净大气
1—RH = 90%; 2—RH = 75%;
3—RH = 70%; 4—RH = 99%

图2 二氧化硫气体和空气的相对湿度对铁的腐蚀的影响

在周围环境作用下,材料的退化和变质是一种自然现象,包括金属的腐蚀和非金属的老化。在相对湿度较低时,金属的腐蚀速度非常缓慢,到达临界相对湿度时,腐蚀速度突然加大,这一临界值随金属种类、金属表面状态和潮湿空气中所含污染程度而有所不同,一般来说,金属的临界相对湿度在

70%左右,如图1、图2所示,铁、锌、铜的临界值均在70%左右,而这些潮湿空气(在金属表面上形成水膜)一旦含有 SO_2 、 Cl_2 等污染物时,腐蚀速度呈几十上百倍地增加。

CO_2 、 H_2S 、 NH_3 等污染物也促进腐蚀, CO_2 遇水溶解后生成 H_2CO_3 促进了金属的腐蚀(但也有人认为, CO_2 的存在使铜和铁的腐蚀都各有下降); H_2S 溶入水膜后,使水膜酸化、导电度上升,阳极去极化容易,所以潮湿空气中含少量 H_2S 也强烈加速腐蚀, NH_3 的溶入水膜,使其 pH 显著上升,含 13% ~ 25% NH_3 时, pH 可达 9 ~ 10,显著加速铜的腐蚀。

温度升高,显著加速化学或电化学反应,加速腐蚀。

在环境侵蚀同时,存在静应力(使用应力和残余应力),某些合金会引起应力腐蚀,存在循环应力,绝大部分材料会引起腐蚀疲劳。某些钢出现应力腐蚀开裂的应力源包括残余应力、装配应力和使用应力。据统计,有些合金其引起应力腐蚀开裂的比例分别为 40%、25%、25%,可见,要谨慎设计使用应力,处理好装配应力和残余应力,才能有效地避免应力腐蚀开裂。

以上分析可以总结下述认识:

(1) 我国地处较为严酷的气候条件,所建钢结构桥梁普遍会存在腐蚀,恶劣的环境污染又显著地加速腐蚀,国外已有钢结构大桥因为应力腐蚀而突然塌落,以及三座预应力桥梁因压浆不饱满使钢绞线钢筋严重锈蚀而突然倒塌的报道,这是我们必须面对的事实,也就是说,我国任何钢结构桥梁的建设,必须从设计开始,贯穿制造过程和维护保养过程,进行卓有成效的腐蚀控制,使每一座建在我国大地上的钢铁桥梁都是一座美丽、壮观、安全、长寿、维护少的艺术精品。

(2) 卓有成效的腐蚀控制措施可包括:①控制和治理环境污染,我国自上而下拥有一支庞大的强有力的环境保护领导、管理和科技队伍,环境治理成效显著,这对减缓钢结构桥梁的腐蚀意义重大,然而一个国家的环境治理决非易事,没有几十年花大力气是达不到理想境界的;②隔离污染的环境侵蚀,例如悬索桥钢缆采用不干性密封胶隔离侵蚀环境,高强度钢螺栓与钢梁的连接部分选用密封胶密封;③选用耐蚀材料,例如选用耐候钢、不锈钢,不过价格过于昂贵,对于发展中国家也有困难;④选用先进制造技术,例如预应力钢绞线是桥梁的心藏,这是确保桥梁使用寿命的关键之一,传统压浆

工艺常造成压浆不饱满,造成钢绞线锈蚀,选用真空辅助压浆新工艺克服了这个问题,提高了质量;⑤研制和使用保护涂层,这是最现实、最有效、最经济、几十年实践证明为最好的措施,本文将突出介绍涂层技术。

2 长江大桥钢结构保护层的沿革

1952年准备,1953年2月动工,1957年10月通车的铁路公路两用的武汉长江大桥是我国第一座横跨长江的大型钢结构桥梁,气势雄伟,颇为壮观。正如表1所示,它采用的红丹底漆是当时我国性能较为优良的钢铁用防锈底漆,它的保护作用是红丹(Pb_2O_3)颜料促进钢材的阴极极化、并促进阳极反应 $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$ (不溶化合物)形成的。面漆采用的是长油度醇酸磁漆(又称316面漆)。这种面漆耐候性差,再加上当时的制漆水平与施工质量,使用寿命很短,故有从南岸涂到北岸,南岸钢梁上的漆又需要重涂之说,在那个“大革命”期间,年复一年地重复。1968年12月我国自行设计制造的南京长江大桥试用了1966年铁道科学研究院研制成功灰色66面漆(灰铝锌醇酸磁漆),1976年武汉与南京长江大桥钢箱梁均改为表1中所介绍的二底(云铁酚醛底漆)二面(云铁醇酸钢桥漆)。这套涂层体系使用寿命可达10年,普遍推广到重庆九龙坡大桥、坦赞铁路、缅甸仰光大桥等。1971年9月通车的枝城长江大桥,已出现采用质量更好价钱更贵的聚氨酯底漆

和面漆,并在高强度螺栓连接处钢板表面首次采用了无机富锌底漆。改革开放之后,铁道科学研究部门沿着这类涂层体系继续提高,芜湖长江大桥采用了环氧富锌底漆+环氧云铁中间漆+丙烯酸聚氨酯面漆新体系,在西陵长江大桥和莲沱大桥都采用了无机富锌底漆+环氧云铁中间漆+丙烯酸聚氨酯面漆新体系。在三峡库区多年的大气暴晒试验表明:在大气环境下防腐蚀最好的体系:

喷锌或富锌底漆+环氧云铁中间漆+丙烯酸聚氨酯面漆;

喷锌或富锌底漆+改性环氧中间漆+丙烯酸聚氨酯面漆。

从表2所示海湾大桥防护体系这种三层体系表达得更为充分,可以归纳成为目前较为理想的方案:

无机富锌底漆或喷锌或环氧富锌底漆+环氧云铁中间漆+丙烯酸聚氨酯面漆或氯化橡胶厚浆漆。

铁道科学研究院杜存山先生总结了我国铁道钢结构桥梁的涂装防护体系(见表3),将我国铁道系统进行桥梁涂装防护的历史演变(见表3-I~IV)及发展趋势(见表3-V)表达得十分清晰。就防护体系的角度,无论表1的长江大桥防护,还是表2的上海杨浦、南浦大桥防护或厦门、虎门海滨大桥都有异途同归、逐步一致的看法,就是:三层(底、中、面)、多道、重防腐、美观、耐久、维护少、寿命长。

表1 长江大桥涂装防护体系沿革

桥名称	长江大桥防护体系沿革	备 注
武汉长江大桥	武汉长江大桥(1953.2动工,1957.10通车) 底漆:红丹防锈底漆;面漆:长油度醇酸磁漆(316灰色面漆) 1976年更换为: 底漆:云母氧化铁酚醛桥梁底漆(二道);面漆:云母氧化铁醇酸钢桥漆(二道) 四道总厚度:200~300 μm	鸭绿江大桥、重庆九龙坡大桥、坦赞铁路、缅甸仰光大桥等都采用了1976年防护体系方案,效果良好
南京长江大桥	南京长江大桥(1960.1动工,1968.12通车) 底漆:红丹防锈底漆;面漆:灰铝锌醇酸磁漆(66灰色面漆) 1976年更换为:与上述武汉长江大桥同	
枝城长江大桥	枝城长江大桥(1965.11动工,1971.9通车) 钢梁: 底漆:硼钡酚醛防锈底漆 面漆:灰铝锌醇酸磁漆;灰铝锌有机硅醇酸磁漆 铁路纵梁上盖板:底漆:棕黄聚氨酯底漆;面漆:灰聚氨酯桥板漆 高强度钢螺栓连接处钢板表面:底漆:无机富锌底漆;面漆:灰聚氨酯桥板漆	

续表

桥名称	长江大桥防护体系沿革	备 注
九江长江大桥	九江长江大桥：(2000 年通车) 钢梁：底漆：红丹酚醛防锈底漆(二道)；面漆：云铁醇酸面漆(三道) 总共大于 190 μm	
九江长江大桥	铁路纵梁上盖板：底漆：棕黄聚氨酯底漆(二道)；面漆：银灰聚氨酯 桥板漆(三道) 总共大于 270 μm 高强度钢螺栓连接处钢板表面：底层：热喷 + 锌黄酚醛底漆(二道)；面漆：云铁醇酸 面漆(三道) 总共大于 300 μm	
鞠湖长江大桥	鞠湖长江大桥：(2001 年通车) 钢箱梁等钢构件：底漆：无机富锌底漆；中间漆：环氧云铁中间漆；面 漆：脂肪族丙烯酸酯聚氨酯面漆	
西陵长江大桥 莲沱大桥 (1995)	西陵长江大桥(1997 年建成) 钢箱梁外表面：底漆：无机硅酸锌车间底漆(SZ-1C)(一道) 底漆：无机富锌底漆(SZ-1G)(一道) 中间漆：环氧云铁中间漆(881D)(二道) 面漆：脂肪族丙烯酸酯聚氨酯面漆(881YM)(二道) 钢桥板面：第一层：无机硅酸锌车间底漆(SZ-1C) 第二层：无机富锌底漆(SZ-1G) 钢箱梁内壁、U 型肋内外壁：第一层：无机硅酸锌车间底漆(SZ-1C) 第二层：无机富锌底漆(SZ-1G) 第三层：无机富铝面漆(一至二道)	三峡库区莲沱 大桥钢箱梁外露 部分同西陵大桥

表 2 海滨大桥防护体系

桥名称	钢箱梁外部	钢箱梁内部	钢 桥 桥 面
厦门海仑大桥 (2000 年通车)	1、无机富锌车间底漆 2、醇溶无机富锌底漆 3、环氧型封闭漆 4、环氧云铁中间漆 5、聚氨酯面漆	1、无机富锌底漆 2、厚浆改性环氧防锈漆 (钢箱梁内设除湿机)	1、无机富锌车间底漆 2、醇溶无机富锌底漆 3、加铺钢筋混凝土及聚合物沥青路面
虎门珠江大桥 (1999 年通车)	1、无机富锌底漆 2、环氧云铁中间漆 3、氯化橡胶厚浆漆	1、无机富锌底漆 2、环氧云铁中间漆 3、环氧沥青厚浆面漆	1、无机富锌底漆 2、氟凝防水涂料 3、加铺钢筋混凝土及聚合物沥青路面
上海南浦大桥	1、环氧富锌底漆 2、环氧云铁中间漆 3、氯化橡胶厚浆面漆	1、无机富锌底漆 2、环氧云铁中间漆 3、环氧沥青厚浆面漆	
上海杨浦大桥	1、环氧富锌底漆 2、环氧云铁中间漆 3、氯化橡胶云铁面漆	1、无机富锌底漆 2、环氧云铁中间漆 3、环氧沥青厚浆面漆	防撞栏杆、人行观光护栏： 1、无机富锌底漆 2、环氧云铁中间漆 3、丙烯酸聚氨酯面漆

表 3 我国铁路钢桥防腐蚀涂装体系

号	钢 桥 涂 装 体 系	表面除锈等级 (至少)	使用年限	备注
I	底漆: 红丹酚醛防锈底漆、红丹醇酸防锈漆 面漆: 长油度醇酸磁漆 (316 灰色面漆) 灰铝锌醇酸磁漆 (66 灰色面漆)	手工 Sa2	底面漆各二道, 7~8 年	
II	底漆: 红丹酚醛防锈底漆 红丹醇酸防锈底漆 面漆: 云母氧化铁醇酸钢桥漆	手工 Sa2	底面漆各二道, 10 年	
III	底漆: 环氧富锌底漆 面漆: 灰云铁氯化橡胶面漆	喷砂 Sa2	氯化橡胶面漆, 少用	
IV	底漆: 环氧富锌底漆 (二道) 中间漆: 环氧云铁中间漆 (一道) 面漆: 灰铝粉石墨醇酸面漆 (018 灰色面漆)	喷砂 Sa2	面漆二、三道, 15~20 年	
V	底漆: 无机富锌底漆、热喷锌、铝、锌铝合金 中间漆: 环氧云铁中间漆 面漆: 脂肪族丙烯酸聚氨酯面漆 氯碳涂料	喷砂 Sa2.5	底层保证 30 年以上	

注: 取自铁道部科研院杜存山论文《提高我国铁路钢桥防腐涂装保护效果的对策》, 表中 V 是本文作者所列。

3 长效防腐蚀涂层的关键是底层的选用

防腐蚀涂装体系中, 底漆直接与钢结构表面结合, 若底漆使用得当可能起到对钢铁表面的钝化作用、屏蔽作用、甚至阴极保护作用, 底漆完整无损, 钢材就不会腐蚀, 因而底漆对防止钢材腐蚀起着直接的至关重要的作用。

世界上有一种得到许多科学家赞同的看法是: 只要钢结构拥有合适的防护, 就能使用几个世纪。问题是如何获得这个“合适的防护”? 钢铁材料出现之后, 即伴随出现生锈腐蚀的问题, 数以千种材料用于钢的表面以阻止它从可用的金属变为不可用的氧化物。试图用于钢的保护材料中, 发现锌是最成功的。其实例是 1840 年法国 Sorel 工程师发明的热浸镀锌。澳大利亚人维克多·查尔斯·耐汀果尔 (Victor Charles Nightingall) 首先用锌粉加入硅酸钠并涂于钢件表面通过加热 (250°F) 固化, 形成了一种硅酸锌涂层, 这就是世界上第一份无机富锌涂层, 1942 年悉尼的供水系统 Woronora Pipeline 管道采用了这种涂层, 1944 年 250 英哩长的 Morgan Whyalla 建成, 也选用了这种涂层, 而且保证 20 年的使用寿命, 1965 年检查, 涂层完好, 专家们当时认为经烘烤加热固化的无机硅酸锌涂层是像石头一样, 是非常耐蚀的涂层, 1970 年南澳大利亚政府, 使用同样的工艺又模拟复制了一条管道。与澳大利亚人研究无机富锌涂层的相同时间, 英国人研究有机富锌, 研

究过许多树脂, 二次世界大战后, 环氧树脂进入涂层领域, 才研制成功有机富锌涂料——环氧富锌, 并以推广。

1956 年水剂、后固化型无机富锌涂料 (I A) 用于美国佛罗里达州的潮汐河 (Tidal river) 的钢结构吊桥表面, 15 年后检查还具有良好保护性能; 澳大利亚跨度为 675 英尺长的 Batman 钢桥表面也用的同样的涂层; 美国旧金山的跨度 8940 英尺的金门大桥是世界上最著名的钢结构桥梁, 所遭遇的环境条件十分恶劣, 1962 年采用水剂、自固化型无机富锌涂料 (I B) 涂覆后外加红-桔黄有机面漆, 不仅保护钢构桥梁免遭腐蚀, 还提供一天 80000 辆汽车和乘客的安全运行, 其有更长的寿命。

美国钢结构油漆理事会编辑 SSPC - PS12.00 (Sept. 1 1994) 油漆系统指南将富锌涂料分为: I A 型为水剂、后固化型无机富锌涂料; I B 型为水剂、自固化型无机富锌涂料; I C 型为溶剂、自固化型无机富锌涂料; II A 型热塑性有机富锌涂料; II B 型热固性有机富锌涂料。一般讲, 选用硅酸钠为粘结剂形成后固化型, 选用硅酸钾、硅酸锂为粘结剂形成自固化型。近年又研究开发了铬酸盐型 (如 Dacromet) 和磷酸盐型 (如 Dowell) 无机富锌涂料以及复合型复锌涂料 (如 ZINGA), 表 4 对这些底涂进行了比较, 表中数据说明, 我国防护底漆的研究、实用水平已显著提高, 耐盐雾能力高于红丹底漆几十倍。但有几点需要说明: ①数据取自各自的报道,

不是统一实验的结果,不能从表中数据看出那个好那个差,只能说他们已进行了多长的实验;②这些结果并没有标清实验底漆的厚度、是否进行了封闭处理,例如热喷锌层,是否封闭,结果差异显著;③钢桥使用这些底漆,其环境条件是十分复杂的:桥桩浸泡在水中,有不同水质;临海桥桥桩还面临潮差冲刷的作用;不同水深含氧量不同;水面以上的部分为承受大气腐蚀,也就是水膜下的腐蚀,这与各地的相对湿度、下雨酸度水平、污染物(SO_2 、 CO_2 、 CO 、 NH_3 、 Cl^- 等)严重程度密切相关,这么复

杂而又具动态变化的现实条件,如何进行实验室模拟,并通过实验室结果推断使用寿命,这是一项世界性的课题,例如我国筹建第一批环境实验站的北京航空材料研究院的李牧铮先生历时 50 年户内外对比实验与研究,还研制成功对环境侵蚀模拟性更好的周期浸润试验和多功能环境侵蚀实验设备,企图能获得对比结果,事实并不如意;④企图单一地应用表 4 所列盐雾试验数据推论出“使用年限”的做法是不科学的,不可取的。

表 4 底漆的盐雾试验结果

底涂层种类		耐盐雾试验(小时)
红丹底漆		200 ~ 400
环氧富锌底漆		2100 ~ 2500
醇溶无机富锌底漆(如 ZS-1)		5000
无机富锌底漆	硅酸盐型(如 E06-11、SZ-1C)	5000
	铬酸盐型(如 DCROMET)	1000
	磷酸盐型(如 DOWELL)	10000
电镀锌层+有机富锌漆(如 ZINGA)		1000(酸性盐雾)
热喷锌、铝		6000

4 钢缆的防护技术

从我国广西境内第一座斜拉悬索桥的建成到“中国第一、世界第三”的润杨长江大桥的建设,我国已有几十座悬索桥建成或正在建设中,例如汕头海湾大桥、西陵长江大桥、厦门海沧大桥、重庆鹅公岩长江大桥、重庆忠县长江大桥、宜昌长江大桥等等。钢丝主缆是悬索桥的主要承重构件,在大桥的使用期内是不可更换的,是整个悬索桥的“生命线”,整个主桥面的自重和载荷都是通过主缆传递到混凝土主塔的,要求主缆的寿命与整个桥梁一致。百年大计、百年以上寿命,要求不为过。正如本文前言所述,钢铁材料只要有“合适的防护”是可以几个世纪的。问题是什么是钢缆的“合适的防护”?

20 世纪 50 年代瑞典建成世界上第一座斜拉桥(Stromsund 大桥),拉索主要采用封闭钢丝束,但德国汉堡 60 年代建成的 Kulbrand 大桥、委内瑞拉 70 年代建成的 Maracalbo 大桥防腐性能不太好,后者甚至发现 500 多处腐蚀断丝,“封闭钢丝束”逐步淘汰。60 年代欧洲开发了 Hi-Am 斜拉桥专用钢丝,1989

年法国开发了“可单根安装和更换绞线的平行钢绞线拉索”,得以迅速推广至欧洲、南美、北美,这种新拉索的镀锌钢丝通过单根包蜡裹高密度聚乙烯(HDPE),然后平行地穿入 HDPE 外护管形成多层保护。

概括而论,斜拉桥或悬索桥钢缆的防护,国际上采用下列技术:

(1) 外套钢管或塑料管,待应力调整后,压注灰浆;

(2) 预制混凝土索套,待应力调整后,压注水泥砂浆;

(3) 用环氧沥青、聚氨酯、橡胶等有机涂料,对钢绞线进行的刷、浸涂,再用玻璃纤维缠包;

(4) 个别采用封闭索的桥,采用电镀锌或热浸锌保护。

在这里要特别提到我国在这个领域对世界所作的新贡献:

(1) 我国的访欧学者侯引程,在实践现场发现 1989 年法国人的单根包蜡并加外护套管形成多层保护的技术,存在严重问题:在包蜡钢绞线束和外护套管之间存有水分和潮气,并汇积于梁端锚固点,