

悬索桥主缆 除湿系统关键技术

江苏省长江公路大桥建设指挥部
江苏省交通规划设计院

著



科学出版社

悬索桥主缆除湿系统关键技术

江苏省长江公路大桥建设指挥部

江苏省交通规划设计院

著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书结合泰州长江公路大桥,开展悬索桥主缆除湿系统自主研发关键技术研究。通过理论分析、模型试验、实桥验证,对主缆内空气流动沿程阻力、局部阻力、主缆内空气与水热质传递机理、主缆除湿系统设计及主缆微正压防潮技术、系统对维护阶段的低能耗运行方法和主缆内部状况监测与需求控制方法等关键技术进行了研究。在科研成果的基础上,进行了设备选型。研发了冷却器、超压自动排气阀等有自主知识产权的设备,建立了主缆除湿中试系统,在中试平台上对主缆除湿工艺、参数、架构、功能、相关设备等进行了全面的试验与验证,实现了系统的全自动控制。在科研与中试成果的指导下,在国内首次自主建设完成悬索桥主缆除湿系统工程。

本书可供从事悬索桥建设、管理、设计、施工、监理的工程技术人员,以及桥梁工程及其他相关专业师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

悬索桥主缆除湿系统关键技术/江苏省长江公路大桥建设指挥部,江苏省交通规划设计院著. —北京:科学出版社,2015.11

ISBN 978-7-03-046463-7

I. ①悬… II. ①江… ②江… III. ①悬索桥—主缆—防潮—研究
IV. ①U448.25

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第278969号

责任编辑:周丹/责任校对:胡小洁

责任印制:徐晓晨/封面设计:许瑞

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015年11月第一版 开本:B5(720×1000)

2015年11月第一次印刷 印张:10

字数:201600

定价:59.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

目 录

第 1 章 主缆除湿系统概论	1
1.1 概述	1
1.2 悬索桥主缆腐蚀机理以及传统防护措施	4
1.2.1 悬索桥主缆的腐蚀机理	4
1.2.2 悬索桥主缆传统防护措施	6
1.3 国外悬索桥主缆防护方法	7
1.4 国内悬索桥主缆的涂装体系	10
1.4.1 江阴大桥体系	10
1.4.2 虎门大桥体系	10
1.4.3 润扬大桥体系	10
1.4.4 北京航材院 (BIAM) 体系	11
1.4.5 国内悬索桥主缆涂装体系	11
1.5 主缆除湿系统的研究应用及问题	12
1.5.1 国外研究及应用现状	12
1.5.2 国内研究及应用现状	14
1.5.3 当前需要解决的问题及研究内容	14
1.6 小结	15
第 2 章 主缆除湿系统理论基础	16
2.1 除湿原理	16
2.1.1 湿空气的性质	16
2.1.2 湿空气焓湿图	23
2.1.3 除湿过程的除湿计算	25
2.2 除湿设备	25
2.2.1 冷冻除湿	25
2.2.2 固体吸收式除湿	28
2.2.3 液体吸收式除湿	32
2.3 除湿系统	34
2.3.1 除湿系统分类	34
2.3.2 悬索桥主缆除湿的空调系统	35

2.4	小结	36
第3章	主缆除湿系统主要参数的研究	37
3.1	概述	37
3.2	存水量的确定	37
3.3	干燥时间的确定	40
3.3.1	主缆中的除湿过程	40
3.3.2	送气量的计算	41
3.3.3	干燥时间的计算	42
3.4	主缆内部空气流动阻力的确定	42
3.4.1	主缆在空气中流动阻力的理论分析	42
3.4.2	主缆模型实验设计	46
3.4.3	FLUENT 模拟	54
3.4.4	实验数据分析	58
3.4.5	实验结果与分析	60
3.5	小结	61
第4章	主缆除湿系统方案比较及能耗分析	62
4.1	概述	62
4.2	干空气不同输送方案的比较	62
4.2.1	直流送气方案	63
4.2.2	闭式循环送气方案	63
4.2.3	悬索桥主缆封闭微正压保持方案	64
4.3	不同阶段送风量的确定	65
4.3.1	除湿阶段送风量的确定	65
4.3.2	维护阶段的送风量	67
4.4	主缆除湿系统的能耗分析	68
4.4.1	罗茨鼓风机能耗模型	68
4.4.2	转轮除湿机能耗模型	71
4.4.3	各方案能耗分析	72
4.5	小结	72
第5章	主缆除湿系统送气余热利用	73
5.1	概述	73
5.2	送气余热利用原理	73
5.3	送气余热利用的节能分析	74
5.4	送气余热利用实验台	75
5.5	实验结果与分析	78

5.6 小结	83
第 6 章 主缆除湿系统监测与控制	84
6.1 概述	84
6.2 悬索桥主缆除湿系统运行方式	85
6.3 传感器	86
6.3.1 传感器布置	86
6.3.2 传感器选型参数	87
6.3.3 传感器配置表	89
6.4 数据采集及网络系统	90
6.4.1 数据采集及网络控制系统定义	90
6.4.2 主要网络技术	90
6.4.3 主缆除湿系统网络构成	92
6.4.4 上位机监控网络	93
6.4.5 除湿机组监控网络	95
6.4.6 悬索桥数据采集网络	97
6.4.7 现场总线的实质和优点	101
6.5 控制系统	102
6.5.1 控制系统的发展	102
6.5.2 控制系统功能与结构	103
6.5.3 主控 PLC 控制逻辑功能	104
6.5.4 上位机监控网络功能	112
6.6 小结	114
第 7 章 密封方案研究	115
7.1 概述	115
7.2 悬索桥主缆涂装	115
7.2.1 悬索桥主缆结构形式与密封方式	115
7.2.2 悬索桥主缆缠丝与涂装	118
7.3 悬索桥主缆敛缝	122
7.4 弹性橡胶条楔封	124
7.5 小结	126
第 8 章 主缆除湿系统集成	127
8.1 概述	127
8.2 施工界面	127
8.2.1 与主体工程之间的界面	127

8.2.2 与其他设备专业间施工界面·····	128
8.3 实施流程·····	128
8.3.1 除湿机组、监测与控制系统等送气设备工程实施流程图·····	128
8.3.2 主缆涂装施工总体流程·····	128
8.3.3 索夹、送排气夹的敛缝施工方法·····	131
8.3.4 送气系统的施工方法·····	132
8.3.5 配电、控制系统的施工方法·····	135
8.4 小结·····	145
第9章 主缆除湿系统运行维护 ·····	146
9.1 主缆除湿送风系统的运行·····	146
9.2 系统运行数据·····	146
9.3 系统设备·····	148
9.4 系统设备维护·····	150
9.5 小结·····	152
主要参考文献 ·····	153

第1章 主缆除湿系统概论

1.1 概述

悬索桥是大跨度桥梁中最自然、美观和经济的桥型，主要由主塔、锚碇、鞍座、主缆、吊索、桥面承载梁体及附件构成，设计寿命一般为 100 年。主缆是通过塔顶鞍座悬挂在主塔上并锚固于两端锚固体中的柔性承重构件，主缆本身又通过索夹和吊索承受活载和加劲梁（包括桥面）的恒载，除此之外，它分担一部分横向荷载并将它直接传递到塔顶。在悬索桥，特别是特大跨径悬索桥中，主缆在其桥梁设计生命周期内是不可更换或者更换极其困难的构件。因此，主缆的寿命直接影响甚至决定着悬索桥的使用年限，如何保证主缆的耐久性至关重要，其防护备受关注。

悬索桥主缆是由直径为 5.0~5.5mm 的热镀锌高强度钢丝采用空中架缆法（Air Spinning，简称 AS 法）或预制平行丝股（Prefabricated Parallel Wire Strands，简称 PPWS 法）技术编制而成的，如润扬长江公路大桥，其主缆有两根，每根主缆中含有 184 股平行钢丝索缆，每股平均长为 2580.8m，每股含 127 丝直径为 5.3mm 的热镀锌高强度钢丝，每根主缆总计含有 23 268 丝；每根主缆重达 10 583.6 吨。主缆长期暴露在大气环境中，经受着各种不利环境的侵蚀，导致主缆钢丝易产生锈蚀。主缆钢丝腐蚀严重地危及悬索桥的安全性，腐蚀减少了有效的索股面积和强度。美国纽约市运输局在最近出版的一份关于悬索桥缆索状况的报告中得出结论：“由于腐蚀，纽约市区的几乎所有大型悬索桥都存在强度损失的问题，主缆强度损失的范围从微乎其微到约 35% [威廉斯堡（Williamsburg）桥]”。

1989 年日本对 1983 年建成的因岛（Innoshima）大桥主缆腐蚀情况进行了检查，打开缠绕钢丝后发现，主缆的底部有水存在，侧面和下部可见有腐蚀产生。除去腐蚀涂料后，发现钢丝的锌皮已耗尽，并有锈蚀，而且主缆侧面的锈蚀最为严重。索缆内的镀锌钢丝也受到了腐蚀，靠近索缆中部的钢丝锈蚀程度轻一些。1990 年日本对 1985 年建成的大鸣（Ohnaruto）门桥主缆腐蚀情况进行了检查，也发现了类似的情况。日本在对濑户大桥的主缆缠丝打开检查的过程中发现，仅仅过了 10 年的时间，主缆表面已产生了较为严重的锈蚀，锈蚀发生在主缆表面与缠绕钢丝接触的部位和一些索股的内层，主要分布在主缆侧面和底部。

1996 年美国对纽约地区的桥梁主缆进行了详细的开放性检测，检查结果表明主缆钢丝的腐蚀相当严重，靠近内层的钢丝腐蚀较轻。但是在美国的许多悬索桥

中，主缆内部也出现了比较严重的腐蚀。如大熊山（Bear Mountain）桥、曼哈顿（Manhattan）桥、威廉斯堡（Williamsburg）桥、中哈德逊（Mid-Hudson）桥、布鲁克林（Brooklyn）桥和本-富兰克林（Ben-Franklin）桥等。将主缆打开后，不同部位的主缆钢束均存在不同类型不同程度的腐蚀，如图 1.1~图 1.4 所示。

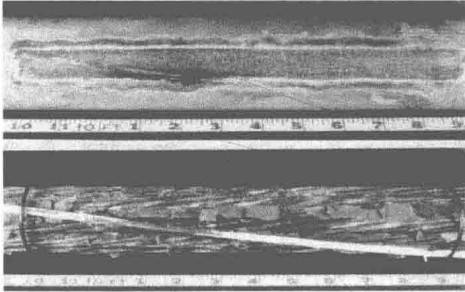


图 1.1 主缆下部的钢绞线腐蚀

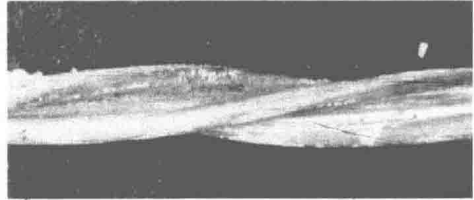


图 1.2 位于缝隙处裸露钢绞线的腐蚀

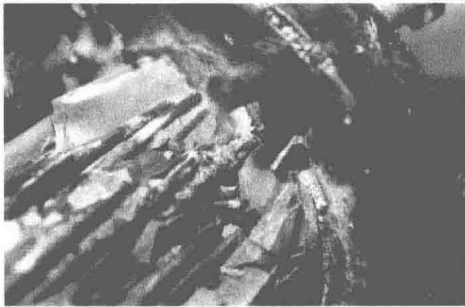


图 1.3 位于与楔块装置之间的腐蚀

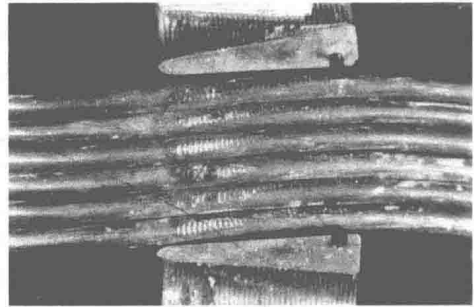


图 1.4 位于索夹附近的腐蚀

2003 年，英国对建于 1964 年的福斯公路桥（Forth Road Bridge）进行了检测，检测结果表明主缆中跨底部位置腐蚀相当严重，甚至有的钢丝已经断裂，如图 1.5~图 1.10 所示。

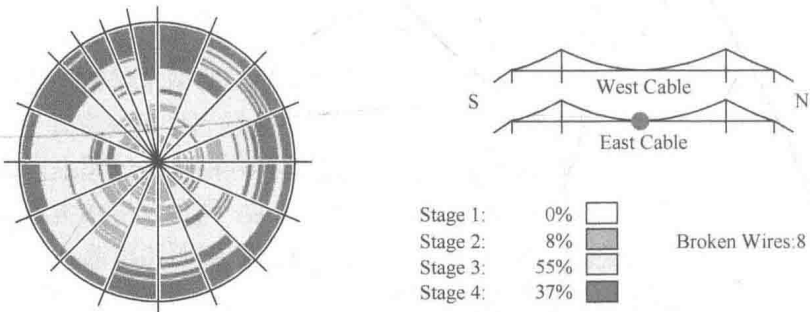


图 1.5 东缆中跨检测结果



图 1.6 东缆中跨表面附近腐蚀情况 (Stage 4)

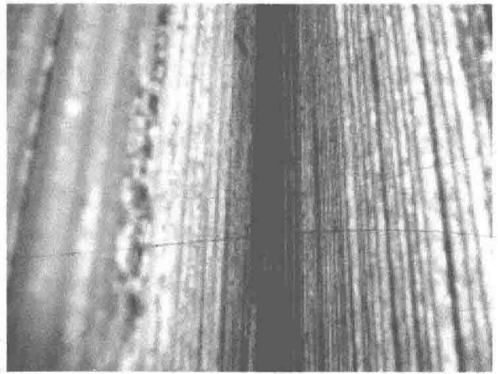


图 1.7 东缆中跨内部腐蚀情况

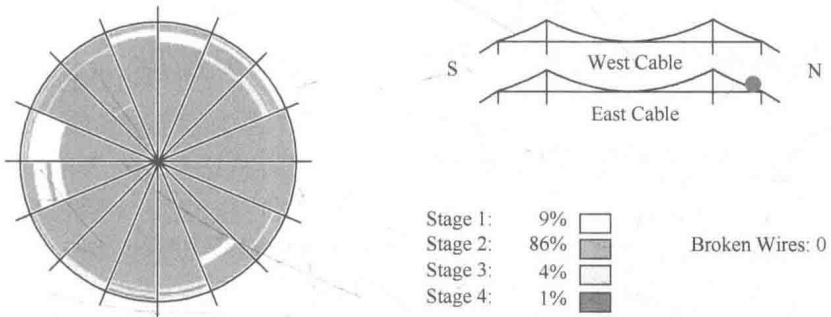


图 1.8 东缆边跨腐蚀检测结果

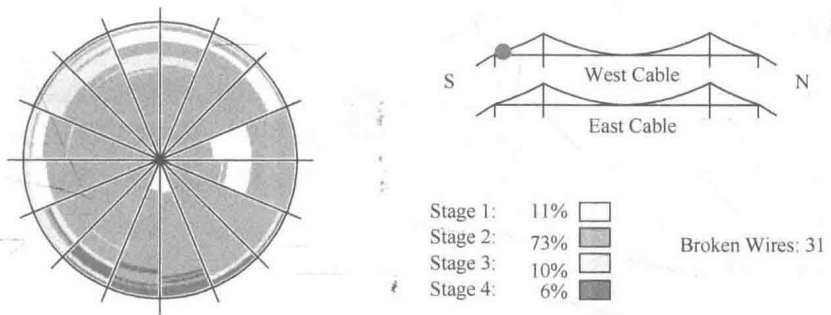


图 1.9 西缆边跨腐蚀检测结果

从国外多座悬索桥主缆缠丝打开检查的过程中发现，主缆表面均产生了较为严重的锈蚀，锈蚀发生在主缆表面与缠绕钢丝接触的部位和一些索股的内层，主要分布在主缆侧面和底部；传统的主缆腐蚀防护技术只能减缓腐蚀速度，而不能彻底阻止腐蚀。这些检测结果说明，早期的悬索桥主缆防腐措施有比较严重的缺陷，尚不能达到使用要求。因此，寻找一种行之有效的防止主缆腐蚀的方法，已

经成为摆在人们面前的一项重要任务。

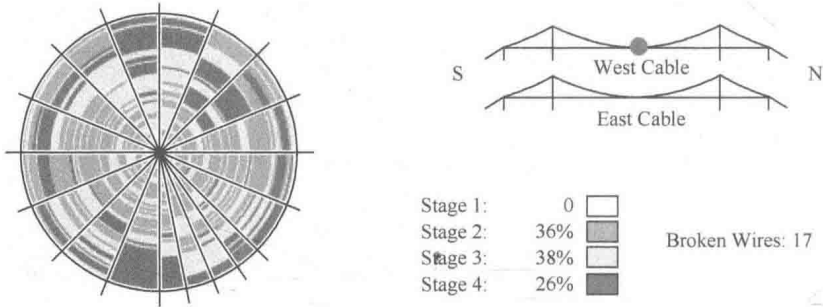


图 1.10 西缆中跨腐蚀检测结果

1.2 悬索桥主缆腐蚀机理以及传统防护措施

1.2.1 悬索桥主缆的腐蚀机理

要解决主缆腐蚀的问题，需要首先从分析腐蚀的机理入手。

众所周知，悬索桥主缆是由高强度的镀锌钢丝制造而成，因此主缆是一种钢铁组成的金属物质。

金属腐蚀从机理上可分为两种类型：

1. 析氢腐蚀

这是由于在钢铁制品中一般都含有碳。在潮湿空气中，钢铁表面会吸附水汽而形成一层薄薄的水膜。水膜中溶有二氧化碳后就变成一种电解质溶液，使水里的 H^+ 增多。这就构成无数个以铁为负极、碳为正极、酸性水膜为电解质溶液的微小原电池。这些原电池里发生的氧化还原反应是：

负极(铁)，铁被氧化 $Fe-2e=Fe^{2+}$ ；正极(碳)，溶液中的 H^+ 被还原 $2H^++2e=H_2\uparrow$ 。

这样就形成无数的微小原电池。最后氢气在碳的表面放出，铁被腐蚀，称为析氢腐蚀。

2. 吸氧腐蚀

金属在酸性很弱或中性溶液里，空气里的氧气溶解于金属表面水膜中而发生的电化腐蚀，叫吸氧腐蚀。

例如，钢铁在接近中性的潮湿的空气中腐蚀属于吸氧腐蚀，其电极反应如下：

负极 (Fe)， $Fe-2e=Fe^{2+}$ ；正极 (C)， $2H_2O+O_2+4e=4OH^-$ 。

钢铁等金属的电化腐蚀主要是吸氧腐蚀。

通过分析金属腐蚀机理,可知在主缆上有以下一些降低腐蚀的方法:

1. 电镀

即通常的镀锌。镀锌的主要功能是防腐蚀,但防腐机理却是牺牲阳极(溶解阳极)。锌属电负性较强的金属,镀锌层对于一般作为基体的钢铁件来说,在潮湿环境中相当于一个短路电池的阳极,而钢铁基体则为阴极,其保护机理就是牺牲阳极的阴极保护,即依靠阳极(镀锌层)的不断溶解(腐蚀)来达到保护阴极(钢铁件)的目的。

钢板表面被镀锌层以完整的物理保护形式覆盖着,发生锌在大气中的腐蚀。由于锌腐蚀生成的产物对自身的保护作用,腐蚀的速度较慢。镀锌层以使钢铁与大气(腐蚀环境)相隔绝的物理方式,保护了钢板不受腐蚀。

在电解质溶液中,阳极(镀锌层)溶解速度急骤加速,即镀锌层的腐蚀加速。镀锌层由于腐蚀或其他原因,使镀锌层中的合金层部分暴露于大气中,这时钢板仍受到与第一种情况形式相同的、完全的保护。只是由于电极电位的不同,电位较负的纯锌层将对电位较正的合金层提供电化学保护而优先腐蚀。

在镀锌层腐蚀过程中,纯锌层腐蚀殆尽,但合金层仍能完整地覆盖钢板表面。这时合金层所发挥的保护作用,仍与前两种情况一样,是隔绝环境的物理方式保护。当镀层部分缺损(局部腐蚀,划伤、切口、冲孔等)使钢板局部裸露于大气中时,情况变得较为复杂。Zn-Fe合金的电极电位在 $-0.59 \sim -0.66\text{V}$ 。其中以锌的电位最负,是电子的优先提供者。而相对于电位较正的Zn-Fe,铁处于阴极状态。这种情况的发生是锌的电化学腐蚀。

当纯锌层消耗殆尽,钢铁部分裸露在大气中时,Zn-Fe合金层由于电位较铁负,仍对铁进行电化学保护,但由于电位较锌正,所以提供的电化学保护能力较差。

当全部镀层作为电化学保护中的阳极而腐蚀尽以后,钢铁便进入受大气腐蚀的过程之中。并由其所处的具体情况来决定其使用寿命。热镀锌钢材表面镀锌层对钢材的保护作用,并不仅仅体现在受大气腐蚀的情况,而在一些电解质溶液中发生电化学腐蚀的情况下,无论电解质或腐蚀产物是增加腐蚀速度,还是抑制腐蚀速度,镀锌层都起着同样的电化学保护作用。

所以从金属腐蚀学理论分析,决定金属耐蚀性的因素有3个,即金属本身、介质特性和环境条件,单纯靠提高金属本身的固有特性来提高耐蚀性是不现实的,应综合考虑其他影响因素。

2. 注入干空气(减少析氢腐蚀)

这是一种改变介质特性的防腐方法,减少了水对主缆的腐蚀。

日本在 20 世纪 90 年代初便开始进行主缆除湿系统的研究, 通过向主缆内部送入干空气, 干空气与主缆内湿空气之间的气压差, 使其在主缆内流动, 降低主缆内空气湿度。这种方法改善主缆内的湿度条件, 使主缆内部保持较低的相对湿度, 在主缆内形成不会产生钢丝锈蚀的环境。这种防护系统从根本上解决了主缆内部积水难以排出的问题, 研究完成以后应用于日本明石大桥、来岛大桥、白鸟大桥、安芸滩大桥和韩国的永宗大桥等项目。

3. 充填惰性气体 (减少吸氧腐蚀)

日本与欧洲的一些国家采用的主缆除湿系统排气口敞开, 这事实上是一种开放的体系, 需要不断地往主缆内部注入干空气。如果取消排气口, 仅保留送气口, 则可以在悬索桥上实现一个封闭的体系。为了彻底隔绝氧气, 在施工期间往封闭体系内注入惰性气体充满整个主缆空间, 同样能够起到改变介质特性减少主缆腐蚀的效果。

该方法的缺点是惰性气体价格不菲, 且对密封体系要求较高, 但由于封闭体系不可避免地会发生少量泄漏, 不得不定期充填惰性气体满容, 惰性气体又必须从厂家购买。养护不方便。

1.2.2 悬索桥主缆传统防护措施

较早的主缆防护系统是在主缆的表面进行防腐涂装。涂抹防护腻子, 并用缠丝缠绕, 外加保护层, 结构形式如图 1.11 所示。

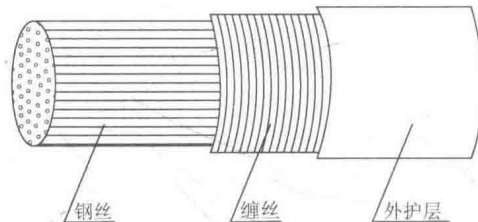


图 1.11 主缆结构

这种传统的主缆防护体系, 实际上是通过对外缆外层进行密封包裹来防止水分侵入其内部以达到防腐目的。在 20 世纪建造的悬索桥中绝大多数主缆都采用这种防护体系。根据国外近年来的调查研究表明, 该防护体系的防护效果并不理想。

由于施工过程中可能受雨水侵袭, 以及使用过程中受动载作用的影响, 防护腻子的老化和外护层的破损, 空气中的水蒸气和雨天中的雨水侵入, 主缆中的钢丝因受潮而产生锈蚀。由于锈蚀减少了主缆索股的有效面积和强度, 严重地危害到悬索桥的安全性。

1.3 国外悬索桥主缆防护方法

1. 欧美国家

欧美国家建造悬索桥梁数量多, 历史长, 其主缆防护一般还是采用常规的、成熟的技术, 即主缆缠丝前: 铅丹油膏或聚氨酯锌粉膏; 缠丝: 圆形钢丝; 主缆缠丝后: 醇酸、环氧、丙烯酸酯、聚氨酯油漆。

1) 圆钢丝缠绕涂层法

圆钢丝缠绕涂层法的首次使用是在匹兹堡 (Pittsburgh) 桥上, 该方法主要由主缆上的防腐油脂和防腐层上的软质退火横向缠绕钢丝组成。整个主缆的防腐系统由内层的镀锌、防腐油脂、镀锌缠绕钢丝和外层缠绕钢丝上的油漆涂层共同组成 (图 1.12)。

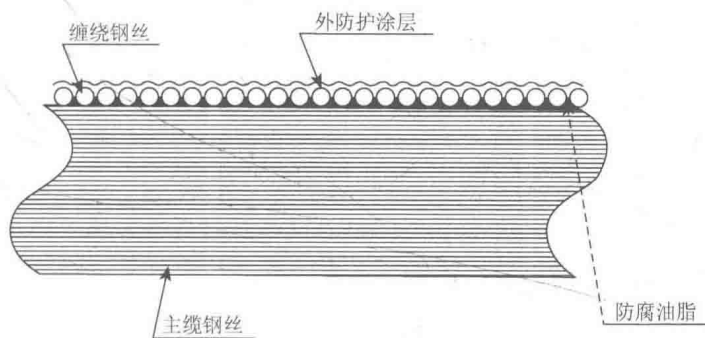


图 1.12 圆钢丝缠绕涂层法示意图

圆钢丝缠绕涂层法的防腐机理是在主缆外设置保护层, 将进入主缆内部的水分控制到最小化。其中, 防腐油脂层在整个防腐系统中起着非常重要的作用。自 20 世纪 40 年代以来, 红铅膏作为一种新的材料, 被广泛应用于悬索桥的防腐油脂层。如美国的布鲁克林 (Brooklyn) 桥, 威廉斯堡 (Williamsburg) 桥、奥克兰海湾 (Oakland Bay) 桥、金门 (Golden Gate) 桥以及切萨皮克 (Chesapeake) 桥都是以红铅膏作为防腐油脂层的。但是, 通过对这些桥梁的检测, 发现作为防腐油脂层的红铅膏已经出现了固化并且干裂现象, 干裂的红铅膏不仅不能起到防止水分进入主缆的作用, 而且由于其多孔性, 它将渗入主缆的水分锁紧在钢丝表面并起到了注水槽的作用阻止渗入的水分流出。这样, 固化的红铅膏起到了与原来设计相反的作用。

圆钢丝缠绕涂层防护法是国内悬索桥主缆目前最常用的防腐方法。从以往的经验来看, 涂层的干裂以及圆钢丝缠绕层的裂缝是防腐失败的主要原因。圆钢丝缠绕涂层防护法要成为一种行之有效的主缆防护措施, 必须解决油膏涂层的固化

问题以及圆钢丝的间隙问题。

2) 合成护套防护法

合成护套法是在 20 世纪 60 年代早期发展起来的一种主缆防护方法，它是圆钢丝涂层法的替代产品，常用合成护套材料是合成聚氯乙烯橡胶缠包带、聚丙烯树脂防护带、异丁橡胶气密材料和双组分改良硅系密封材料。

这种方法采用连续的几层材料包裹在主缆的外层，达到防护效果。目前，应用这种方法的悬索桥主要有日本的明石海峡大桥，日本的彩虹桥、美国加州的 Bidwell Bar 桥和 New Port 桥。但是，通过检测发现，由于缠绕材料在动载情况下也会在搭接处产生渗水裂纹，防护效果并不理想。而且该方法工序复杂，现场施工强度高，工作量相当大，因此，这种防护方法并没有在悬索桥建设中得到推广。

2. 日本

随着战后经济的飞速发展，日本从 20 世纪 70 年代开始进行大规模的道路交通建设。其中建造了一批在世界上著名的悬索桥梁，从早期建成的关门桥、平户桥、大鸣门桥到连接本州四国四县的联络线上的濑户桥和目前世界上最长跨径的明石海峡大桥（主跨 1991m）。其主缆系统的防护技术也进行了不断的更新换代，取得了多项技术专利。

1) 传统的“密封膏+圆形钢丝缠丝+重防腐涂装”体系

大多数悬索桥梁还是采用的该类体系，只是涂装材料采用了更为先进的高分子材料，如：含氟聚氨酯涂料，索夹结构缝隙用改性有机硅、聚硫密封剂等。

2) 白鸟桥体系

其体系为“密封膏+S 形钢丝+柔性重防腐涂料+新型索夹密封结构”。其中索夹密封结构中增加了吸水性能好的防水密封材料。其显著特点是首次采用了 S 形钢丝进行缠丝（图 1.13），钢丝在缠绕后可相互咬合在一起，不会随主缆的伸缩运动而相互错动，因此不会产生涂覆的开裂等损伤，有效提高了结构的密封性，但不能根本解决在施工过程中内部的积水及结露等内部环境干燥问题。另外，还有一个未知的问题就是，相互咬合的 S 形钢丝有可能出现强力消失，从而引起密封结构产生位移动影响主缆防护性能，日本有关学者正在密切关注这一问题。

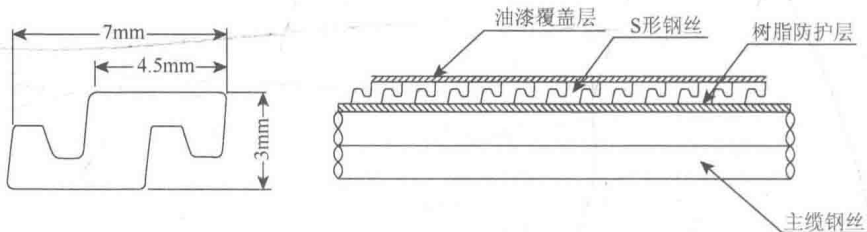


图 1.13 S 形钢丝缠绕示意图

3) 濑户桥体系

濑户桥共有三座悬索桥, 1988 年建成, 当时是采用传统的“密封膏+圆形钢丝缠丝+重防腐涂装”的方案。1993 年对北备瓚濑户大桥(1988 年使用)中跨附近的钢索全面打开调查, 证实有腐蚀倾向。从 1994 年开始开发“送风干燥系统”(进行高气密性的包覆, 缆索内部吹入干空气防腐的方法), 为了证实这一系统的有效性, 进行了模拟缆索的试验和实际大桥上的确认实验。随后逐步将濑户三座桥改建加装送风干燥系统。该送风干燥系统在濑户桥首次开展应用研究, 在世界上也是初次尝试, 研究者认为其长久性能还是未知的部分, 今后在进行充分维护管理的同时, 对其效果必须进一步观测。

4) 明石桥体系

其涂料体系为“圆形钢丝缠丝+橡胶包覆层+送风干燥系统”, 其特点是圆形钢丝缠丝前不用密封膏, 用橡胶包覆层确保主缆的气密性和防水性, 同时第一次完整采用了主缆送风干燥系统。

随后, 日本建成的来岛大桥等为数不多的几座悬索桥梁都是采用了 S 形镀锌钢丝缠绕, 但没有全部采用主缆送风干燥系统, 涂装技术都不尽相同。这说明日本桥梁界在主缆防护涂装技术方面还是处于观察、探索阶段, 有待于不断去完善。

国外悬索桥主缆涂装体系列表见表 1-1。

表 1-1 国外主要悬索桥主缆涂装体系

国家	桥梁	主缆涂装体系	建成年份/年
美国	布鲁克林大桥	铅丹腻子+圆形钢丝缠丝+油漆	1883
美国	金门大桥	铅丹腻子+圆形钢丝缠丝+油漆	1937
美国	韦拉扎诺桥	铅丹腻子+圆形钢丝缠丝+油漆	1964
丹麦	小贝尔特桥	锌腻子+圆形钢丝缠丝+涂料	1970
日本	若户大桥	铬酸锌腻子+圆形镀锌钢丝缠绕+醇酸类涂装	1973
德国	汉堡大桥	铅丹腻子+圆形钢丝缠丝+底涂+环氧树脂涂料(MIO)	1979
日本	大鸣门桥	铅酸钙高分子有机铅+圆形镀锌钢丝缠绕+环氧树脂+聚氨酯树脂面涂	1985
日本	下津井濑户大桥	铅酸钙类密封膏+圆形镀锌钢丝缠绕+环氧树脂底涂+聚氨酯树脂面涂+双组分聚硫密封剂罩面	1988
日本	白鸟大桥	磷酸铝密封膏+S形镀锌钢丝缠绕+柔性环氧树脂·氟树脂罩面	1997
日本	明石海峡大桥	圆形镀锌钢丝缠绕+胶黏剂+橡胶底涂+弹性氯丁橡胶带半搭接包覆+氯磺化聚乙烯涂装+主缆内干空气送气除湿	1998
瑞典	高海岸桥	锌腻子+圆形钢丝缠丝+涂料	1997
丹麦	大贝尔特桥	锌腻子+圆形钢丝缠丝+涂料	1998

续表

国家	桥梁	主缆涂装体系	建成年份/年
日本	白鸟大桥	磷酸铝+S形钢丝缠丝+软性涂料, 后来增加主缆内干空气送气除湿系统	1998
日本	安芸滩桥	S形钢丝缠丝+软性涂料+主缆内干空气送气除湿	2000
美国	塔科马海峡新桥	锌聚合物+圆形钢丝缠丝+弹性涂料	2007
日本	丰岛大桥	S形钢丝缠丝+软性涂料+主缆内干空气送气除湿	2008

1.4 国内悬索桥主缆的涂装体系

1.4.1 江阴大桥体系

江阴大桥体系基本上是采用英国的技术, 是典型的欧美常用体系。其缠丝前采用的油性锌粉密封膏对主缆钢丝有阴极保护作用, 防腐蚀机理是有明显效果的, 但其比重达 7~8, 对主缆的增重较大, 而且黏接性也较差。另外, 在经过缠丝后采用重防护油漆进行外层保护, 在理论上是可行的, 但由于圆形钢丝缠丝不可避免会出现不均匀缝隙, 因此几道油漆不可能完全有效保护, 香港青马大桥也出现过类似问题, 即主缆表面局部地方有油漆开裂脱皮的现象, 从而造成主缆个别部位进水, 每年的维修保养任务较重。江阴大桥已于 2006 年用聚硫橡胶密封剂、聚氨酯油漆进行了主缆防护大修, 提高了主缆防护等级, 取得了明显的效果。

1.4.2 虎门大桥体系

虎门大桥的方案在世界上也是比较独特的, 其主要特点是在缠丝前后均采用了一种美国进口的聚氨酯腻子, 防护总厚度达到 5cm, 形成了一个整体的橡胶防护层, 具有较高的防护等级。该套材料在国外一些桥梁上曾用于维修, 在国内也有几座桥梁使用过, 但由于材料的采购、运输、施工成本较高, 在虎门桥之后, 国内没有再使用过。

1.4.3 润扬大桥体系

润扬大桥方案与日本的来岛大桥相同, 同时采用了 S 形钢丝缠丝加装通干空气系统, 可有效地去除主缆空隙中的水分, 并确保主缆内部保持相对较低的空气湿度 (一般应保持在 55%RH 以下), 从而达到防锈的目的。同时该体系中的防护材料如柔性环氧、含氟聚氨酯涂料, 以及索夹密封用的有机硅密封胶都代表了世