

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.03.017

特大跨度自锚式悬索桥主缆系统防护体系设计

孟祥勇, 李春燕, 张胡芝

(四川西南交大土木工程设计有限公司, 四川 成都 610031)

摘要:以云龙湾大桥主桥为背景,系统介绍了(30+80+205+80+30)m双塔自锚式悬索桥主缆系统防护体系设计情况。大桥共设置2根主缆,竖直平行索面^[1]。单根主缆由27股索股组成,每股索股包含91丝高强镀锌铝合金平行钢丝。通过对国内悬索桥主缆防护体系应用现状调研分析,设计采用在传统缠丝涂装防护体系基础上,增加主缆除湿系统进行主缆防护,于缆内持续循环通入干燥空气,以保证运营阶段大桥主缆耐久性。同时对主缆相应配件进行防腐设计,并为方便检修,在主缆顶面设检修道。通过防护体系、检修措施的设计,保证了主缆的长久耐用,可为悬索桥相关设计提供一定参考。

关键词:双塔自锚式悬索桥;主缆;防护体系;除湿系统;检修道

中图分类号:U443.38

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2023)03-0072-04

1 工程概况

成都云龙湾特大桥主桥采用(30+80+205+80+30)m双塔自锚式悬索桥,桥宽48.5m。大桥主缆采用缠丝“S”形镀锌缠绕钢丝+涂装体系进行防护,并配备有除湿系统,使得缆内干燥空气能贯穿整个主缆。同时针对主缆相应配件采取相应防腐措施,进而保证主缆系统的耐久性。

大桥主缆采用PPWS法施工,工厂预制平行钢丝索股,现场猫道上逐股安装架设。

2 主缆设计

云龙湾大桥主缆为3跨双索面,理论跨径布置为83.2m+205m+83.2m,中跨矢跨比为1:5.125,跨中处主缆中心线距主桥中心线处桥面高度为3.385m^[1]。

全桥共2根主缆,主缆、吊杆索面位于竖直平面内^[1]。每根主缆大桥单根主缆由27股索股组成,每股索股包含91丝高强镀锌铝合金钢丝,钢丝抗拉强度标准值不低于1770MPa,钢丝镀锌铝合金后直径为5.3mm,每根主缆含2457丝高强镀锌铝钢丝,钢丝面积为54205mm²。索夹处主缆直径为290.1mm,索夹外主缆直径为293.7mm。主缆松弛率为II级松弛(低松弛)。27根索股在主缆内排列成竖向的近似六边形,紧缆后为圆形,索夹内孔隙率为

18%,索夹外取20%,设计基准温度为20℃。

主缆两端采用热铸锚头,锚杯材料为40Cr,在锚杯内浇筑锌铜合金使主缆钢丝与锚杯相连。

在主缆两端,主缆经散索套发散为27个索股,按近似矩形排列锚固于主纵梁内的钢锚箱内。主缆断面索股排列图见图1。

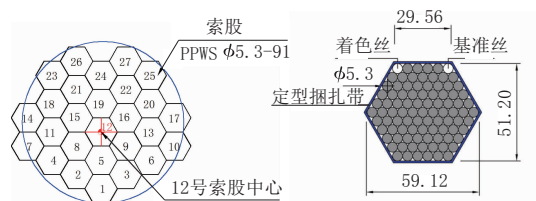


图1 主缆断面索股排列及索股标准断面

3 我国悬索桥主缆防护体系现状

悬索桥主缆作为主要承重构件,腐蚀问题一直是影响结构长效安全营运的技术难题,也是主缆防护体系设计研究的主要内容。

我国现阶段悬索桥建设项目中采用的主缆防护体系主要包括传统的缠丝+涂装防护体系、缠丝+涂装+主缆除湿防护体系及缠包带防护体系。

传统防护体系通过主缆腻子缠圆钢丝或S型钢丝涂装,使悬索桥主缆形成主缆钢丝镀锌和防锈油膜、腻子、缠绕钢丝、表层涂料涂装四大保护层构成的铠装防护。多年来这一体系延续应用,得到不断改进和完善^[3]。我国交通部针对传统防护体系,于2007年颁布实施了《悬索桥主缆系统防腐涂装技术条件》,为其提供可靠应用依据。但由于涂装材料性能的良莠不齐、施工技术水平的差异,我国已建传统防护体系下

收稿日期:2022-04-24

作者简介:孟祥勇(1985—),男,硕士,高级工程师,从事市政道桥设计工作。

的主缆锈蚀问题比较突出。究其原因,主要在于雨水腐蚀,涂装前主缆索股间水分未能及时排出及运营中涂装材料撕裂、破损致使雨水渗入主缆内部。

通过讨论传统的主缆防护体系,结合工程实践,日本最早提出了“S形钢丝缠绕+软性涂料涂装+主缆内部干燥空气除湿”综合防护体系。该综合防护体系施工主要包括主缆缠丝、缠丝表面涂装、索夹等构件密封、主缆除湿等。根据该综合防护体系的特点,并探讨实际施工方法,首次成功应用于明石海峡大桥工程中。主缆缠丝采用S形镀锌缠绕钢丝进行缠丝保护,可大大提高主缆的密封性,使得缆内干燥空气能贯穿整个缆索系统,充分发挥主缆除湿系统的除湿作用^[3]。

缠包带防护体系是在圆形镀锌低碳钢丝基础上,应用复合材料防护带代替表层涂料涂装进行主缆防护。这一传统的涂装防护体系大大缩短工期,且施工环保,在国外应用较多,国内近几年部分桥梁进行了试点应用,由于国内尚无明确标准、规范对复合材料防护带材料的强度、耐候、耐老化等性能、技术指标做统一明确规定,而且国内各地区气候条件差异大,材料适用性一般通过专项科研课题进行研究确定。

4 云龙湾大桥成套主缆防护体系设计

云龙湾大桥针对主缆这一至关重要的“生命线”,在传统缠丝“S形镀锌缠绕钢丝+涂装”体系防护基础上,增加主缆除湿系统,使得缆内干燥空气能贯穿整个主缆。同时为方便检修,在主缆顶面设主缆检修道,保证了主缆的长久耐用。

4.1 表面处理及防腐涂装

主缆缠丝采用S形镀锌缠绕钢丝进行缠丝保护,可大大提高主缆的密封性,使得缆内干燥空气能贯穿整个缆索系统,充分发挥主缆除湿系统的除湿作用。主缆防护涂装采用《悬索桥主缆系统防腐涂装技术条件》(JT/T 694—2007)^[5]里规定的有S形钢丝的防腐涂装,材料性能、工艺、验收标准均需符合规范要求。主缆系统防护涂装示意图见图2,涂装参数见表1。

4.2 主缆配件防护

锚具、螺栓、螺母、叉耳、销轴、挡板等钢结构配件均采用热浸镀锌防腐处理,锌层厚度不低于90 μm。热浸镀锌的工艺及验收标准需符合《金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层技术要求及试验方法》(GB/T

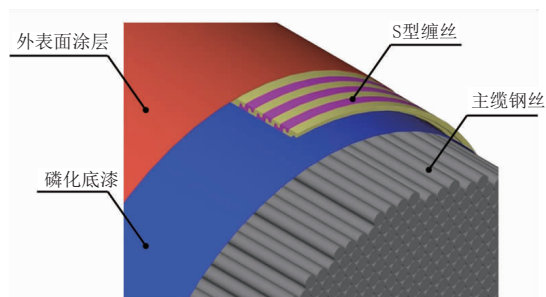


图2 主缆系统防护涂装示意图

表1 主缆系统防护涂装参数

涂装对象	配套油漆	厚度/μm
主缆缠绕区	磷化底漆	均匀着色
	缠绕钢丝(3.0 mm厚)	S形钢丝
	磷化底漆	均匀着色
	环氧底漆	100
	硫化型橡胶密封剂	2 000
	柔性氟碳面漆	80
主缆非缠丝区 (索鞍出口至第一个 紧固索夹段)	磷化底漆	均匀着色
	环氧底漆	100
	硫化型橡胶密封剂	5 000
	高强玻璃布	1 200
索鞍、锚箱内裸露索股	柔性氟碳面漆	80
	磷化底漆	均匀着色
	环氧底漆	100
结构缝隙(索夹环缝、对 接缝、索鞍顶口处等)	硫化型橡胶密封剂	2 000
	非硫化型橡胶密封腻子	结构缝内密封
	硫化型橡胶密封剂	结构缝外密封

13912—2002)^[6]的要求。

4.3 主索鞍防护

主索鞍外表面采用《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》(JT/T 722—2008)^[7]中S07配套体系进行防腐涂装,对应的腐蚀环境为C5-I,鞍槽内表面按防滑摩擦面涂装。主索鞍防腐涂装见表2。

表2 主索鞍防腐涂装

涂装对象	配套油漆	涂装道数	厚度/μm
主索鞍外表面	喷砂除锈(Sa3.0)		
	环氧富锌底漆	1	80
	环氧云铁中间漆	2	2 × 80
	氟碳树脂面漆	1	40
	氟碳面漆	1	40
鞍槽内表面、隔 板及高强螺栓孔 区域外表面	喷砂除锈(Sa3.0)后热喷锌	1	200
	环氧封闭漆	2	2 × 40

鞍槽内隔板与鞍槽焊接后,应将焊缝磨平,露出均匀的金属光泽,除锈等级达到St3级或《涂覆涂料

前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第3部分:焊缝、边缘和其他区域的表面缺陷的处理等级》(GB/T 8923.3—2009)^[8]规定的P3级,处理后的钢材表面粗糙度为Rz60~100 μm,表面处理后再重新喷锌,锌层厚度为200 μm,再涂2道40 μm的环氧封闭漆。

进行摩擦面处理的部位在喷锌后,表面抗滑移系数初始值应不小于0.55,在鞍座吊装完毕高强螺栓安装前,抗滑移系数不得小于0.45。

各孔、平面的加工表面需涂防锈脂。

4.4 索夹及散索套

索夹及散索套的外表面采用《公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件》(JT/T 722—2008)^[9]中S09配套体系进行防腐涂装,对应的腐蚀环境为C5-M,内表面按防滑摩擦面涂装。索夹及散索套涂装见表3。

表3 索夹及散索套涂装

涂装对象	配套油漆	涂装道数	厚度/ μm
索夹、散索套外表面	喷砂除锈(Sa3.0)		
	无机富锌底漆	1	80
	环氧封闭漆	1	30
	环氧铁中间漆	2	2×80
	氟碳树脂漆	1	40
索夹、散索套内表面及高强螺栓孔区域外表面	氟碳面漆	1	40
	喷砂除锈(Sa3.0)后热喷锌	1	200
	环氧封闭漆	1	2×40

5 主缆除湿系统设计

主缆防护的主要目的是防止潮湿环境主缆钢丝发生电化学腐蚀,延长主缆的使用寿命,确保大桥的安全。较长的主缆施工周期、防护材料施工滞后、缠绕钢丝碰损等问题,使得主缆钢丝镀锌层损伤,在内部积存大量水汽时,将发生电化学腐蚀。针对以上问题,云龙湾大桥共设计了2套主缆除湿系统,对主缆进行长期除湿及在线监测。

5.1 主缆除湿系统原理

主缆除湿系统通过将除湿系统制造的干燥气体送入主缆,使得主缆内部处于一个相对封闭、干燥的环境中,主缆内部的相对湿度保持在一定临界值之下。此临界值低于主缆开始发生锈蚀的临界相对湿度(一般是60%RH)电化学腐蚀速率大大降低,控制在50%以下钢丝的理论寿命可长达200 a,本工程控制在40%~50%之间,以排气出口湿度值为准,兼顾

经济性与耐久性),不但有效地清除了主缆施工期进入的残留水分,还可继续阻止使用过程中水分的再进入。

5.2 干风送气参数

在温度20℃、相对湿度60%RH时,主缆除湿设备单机除湿量大于3 kg/h。单套主缆除湿系统最大功率不大于9.5 kW。主缆除湿设备送入主缆的干空气经过一、二、三级空气过滤,待系统稳定后,在外界气温小于40℃条件下,进气夹处的送气温度应小于50℃,送气相对湿度低于20%RH。单气夹除湿送风量在0.1~0.45 m³/min,送气点压力为P控制在低于4 000 Pa,压力值波动不超过±500 Pa。

5.3 主缆除湿系统布置方案

全桥主缆除湿系统共布置2套除湿系统,分别安装在两个桥塔上横梁内(见图3)。除湿系统制造的干空气通过进气夹进入主缆,沿主缆内部钢丝缝隙不断吸收内部水分,气体湿度由低湿到高湿不断升高,送到排气夹后通过排气管道高湿气体排至主缆外部。而离鞍室及锚室最近的排气夹则将空气排入锚室/鞍室内,对气体进行回收利用。干燥空气通过主缆钢丝间隙输送,降低了主缆内部的含水率,从而达到主缆防腐目的。

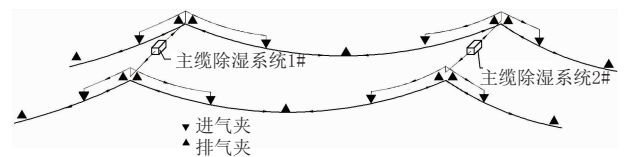


图3 主缆除湿系统布置示意图

主缆除湿系统由新风三级过滤、再生能量回收、转轮除湿、自动均压混风、干风回风冷却、送风高压风机、控制柜、动力柜等功能段组成。

5.4 除湿监测系统

(1) 监测设备技术要求

除湿系统采用PLC监控来监测全桥除湿系统中所有的温湿度传感器、压力传感器数据,控制除湿系统的安全运行,如除湿机的启停、故障报警、运行指示,过滤段的压差报警,风机的启停等。数据采集频率为0.1 Hz,数据存储频率为1 Hz,数据采集精度为12位。

(2) 监测方案

主缆除湿:每个进(排)气夹连接数据采集箱,采集箱内安装模拟量采集模块,采集气夹内的温湿度、压力数据通过485总线连接到PLC。PLC对这些数据进行采集,并把数据传送到主程序,根据数据自动

调整系统的运行。主缆除湿系统监测配置见表4。

表4 主缆除湿系统监测配置

监测内容	配置方案
主缆进气夹对应送气管干空气的温湿度	每路送气安装1只温湿度传感器,共8只
主缆排气夹排气的温湿度	每个排气夹排风各安装1只温湿度传感器,共14只
主塔上横梁内大气环境(新风)温湿度	每个上横梁内安装1只温湿度计,共2只
主缆进气夹对应送气管干空气的压力	每路送气安装1只压力传感器,共8只
主塔上横梁内气站的送风空气压力	每个气站安装1只压差计,共2只

此外,CHUSHI主缆除湿系统的累计运行时间(本地及远程显示)、除湿机组运行状态(包括启停、故障报警、运行状态)和累计运行时间(本地显示)、高压风机及加压风机的启停,也应进行监测。

(3)控制方案

每套除湿系统均配置一套主控PLC,且每套主控PLC均设置一个用于现场监控的HMI触摸屏。触摸屏实现的HMI功能包括采集参数设定,传感器数据接入,逻辑控制、报警和数据存储等功能。

全桥主缆除湿系统共用2套,分别置于南北主塔上横梁内,2台主控。主控PLC接受并管理来自主缆上远程采集模块的数据和每套除湿系统的数据,通过主控PLC远程通信和干预,实现对各除湿系统的控制。

为保证除湿机组的运行安全,除湿系统的PLC自成系统,可以本地或远程进行控制(本地优先原则)。

(4)通信方案

除湿系统传输通信采用3层结构。第一层为工业现场总线,使用RS485总线实现,使用屏蔽双绞信号线作为通信线路,主要用于传输模拟量采集模块采集的气夹温湿度、压力等数据。第二层为工业以太网光纤环网,使用光缆作为通信线路,主要用于除湿机、除湿系统、主控PLC和监控中心交换机间的通信。第三层为监控中心局域网,使用超五类网线,为监控中心人员工作网络。

除湿系统交换机接入大桥健康监测通信环网,形成新的通信网络。

(5)软件系统

主缆除湿系统软件采用图形化界面,直观方便,

软件使用基于C/S架构与B/S架构相结合的混合架构模式,C/S软件实现数据采集及设备控制,B/S软件实现远程数据访问查看,并可通过与C/S软件通信实现控制功能。

工作站实现对外场数据的采集,并提供操作控制服务,实现通信平台功能,用于C/S用户读取实时数据和控制设备运转。B/S用户也可以通过Web服务器与应用软件服务通信实现实时数据的读取及设备控制。

存储服务加载数据库,存储应用软件服务器采集的外场数据、报警信息,记录用户对系统登录信息、操作信息等,并对数据进行整理生成统计信息等,便于用户快速进行分析。

6 主缆检修道

为方便主缆检修人员通行,在主缆顶面设主缆检修道。在主缆两侧设由钢芯钢丝绳制成的栏杆索及扶手索,钢丝绳上端锚固与主索鞍处塔壁上,边跨下端锚固与散索套防护罩上,中间通过立柱支撑在索夹上。栏杆索和扶手索的矢度与主缆矢度一致。

7 结 语

为保证主缆这一受力“生命线”使用寿命,云龙湾大桥主缆防护措施在采用传统缠丝“S形镀锌缠绕钢丝+涂装”体系防护基础上,增加主缆除湿系统,使得缆内干燥空气能贯穿整个主缆,使得主缆经久耐用。大桥主缆于2018年10月架设完成,全桥于2020年1月建成通车,目前运营状况良好。

参考文献:

- [1] 云龙湾大桥施工图[Z].成都:四川西南交大土木工程设计有限公司,2016.
- [2] 罗杰.悬索桥主缆综合防护体系的应用[J].桥梁检测与加固,2013:45-47.
- [3] 叶觉明,李荣庆.现代悬索桥主缆防护现状与展望[J].桥梁建设,2009(6):67-71.
- [4] JTG/T D65-05—2015,公路悬索桥设计规范[S].
- [5] JT/T 694—2007,悬索桥主缆系统防腐涂装技术条件[S].
- [6] GB/T 13912—2002,金属覆盖层 钢铁制件热浸镀锌层技术要求及试验方法[S].
- [7] JT/T 722—2008,公路桥梁钢结构防腐涂装技术条件[S].
- [8] GB/T 8923.3—2009,涂覆涂料前钢材表面处理 表面清洁度的目视评定 第3部分:焊缝、边缘和其他区域的表面缺陷的处理等级[S].