

# 氟碳涂料在输电铁塔的应用及前景分析

杨金明<sup>1</sup>, 刘 玺<sup>1</sup>, 黄 鑫<sup>1</sup>, 王文忠<sup>2</sup>

(1.国网江苏省电力有限公司泰州供电分公司, 江苏 泰州 225300; 2.泰州诺盟新材料科技有限公司, 江苏 泰州 225321)

**摘要:** 我国输电铁塔防腐防护工作越来越受到重视, 本文总结了输电铁塔的腐蚀原因及目前采取的主要防腐措施, 介绍了氟碳涂料的主要性能及应用领域, 分析了以氟碳涂料为输电铁塔防腐涂层的优势和目前氟碳涂层在输电铁塔的应用情况, 并展望了氟碳涂料在输电铁塔应用的前景。

**关键词:** 输电铁塔; 氟碳涂料; 防腐防护

中图分类号: TQ639 文献标志码: B 文章编号: 1007-9548(2024)09-0039-04

## Application and Prospect Analysis of Fluorocarbon Coatings in Transmission Tower

YANG Jin-ming<sup>1</sup>, LIU Xi<sup>1</sup>, HUANG Xin<sup>1</sup>, WANG Wen-zhong<sup>2</sup>

(1.State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Taizhou Power Supply Subsidiary Company, Taizhou 225300, Jiangsu, China;

2.Taizhou Nuomeng New Material Technology Co., Ltd., Taizhou 225321, Jiangsu, China)

**Abstract:** More and more attention has been paid to the corrosion protection of transmission towers in China. This paper summarizes the corrosion causes of transmission towers and the main anti-corrosion measures taken at present, introduces the main properties and application fields of fluorocarbon coatings, analyzes the advantages of fluorocarbon coatings as anticorrosive coatings for transmission towers and the current application of fluorocarbon coatings in transmission towers, and looks forward to the application prospect of fluorocarbon coatings in transmission towers.

**Key words:** transmission tower; fluorocarbon coating; corrosion protection

## 0 引言

输电铁塔主要用于高压输电线路的支撑和固定, 将电能从发电厂传输到变电站, 输电铁塔的结构和形状会随架设位置和作用的不同而变化。由于我国能源供需格局等原因, 目前特高压输电已成为电力网重点发展的工程, 输电铁塔的需求量也相应增长, 2022年我国输电铁塔行业需求量约为626.4万t, 同比增长5.1%<sup>[1]</sup>, 行业发展前景广阔。输电铁塔一般是镀锌钢质结构, 常年暴露在户外环境中, 会产生不同程度的腐蚀, 特别是位于滨海或重工业区的输电铁塔腐蚀会更严重。输电铁塔腐蚀后会影响到电力输送的稳定、安全运

行并降低输电铁塔的寿命。为了提高输电铁塔的使用寿命, 输电铁塔的防腐措施越来越受到重视, 特别是新型防腐涂料的开发和应用。氟碳涂料是一种综合性能很高的涂料, 具有高耐候性、自清洁性、耐高低温、耐腐蚀等优异性能, 普遍应用于建筑墙面、桥梁、汽车、航空等领域, 在输电铁塔防腐上的应用也越来越广泛。

## 1 输电铁塔腐蚀原因及主要防腐措施

### 1.1 输电铁塔腐蚀原因

输电铁塔腐蚀的原因主要是所处环境的气候和大气污染, 温度高、湿度大、空气中含有较多的盐分或SO<sub>2</sub>、硫化氢、氮氧化物等污染物均会加速输电铁塔的腐蚀<sup>[2]</sup>。腐蚀机理是较大的湿度使输电铁塔表面积水产生一层液膜, 导致钢材表面形成锈蚀小电池, 空气中盐分较多时也会吸附到液膜中, 增加液膜的导电性, 加速铁塔表面金属部件电化学腐蚀的发生, 对输电铁塔

收稿日期: 2023-11-09

作者简介: 杨金明(1973—), 男, 本科, 高级工程师, 主要从事输电铁塔防腐防护相关研究工作。E-mail: 1844368560@qq.com。

造成锈蚀损坏<sup>[3-4]</sup>；另外，空气中含有二氧化硫、硫化氢会氧化形成三氧化硫，溶于水后形成硫酸，或与输电铁塔表面的铁元素反应生成硫酸铁水解形成硫酸，使输电铁塔形成锈蚀。输电铁塔所处环境不同，产生的腐蚀程度也不尽相同。在内陆村镇地区，空气污染物较少，输电铁塔主要受日晒、雨淋等气候影响，铁塔表面腐蚀轻一些；城市地区的空气则受工厂废气、汽车尾气等大气污染物影响，输电铁塔表面的腐蚀程度较重；在重工业和滨海地区，空气中富含氯离子、硫酸根离子、钠离子、镁离子等多种离子或有害物质颗粒，输电铁塔表面腐蚀会更加严重，可能出现层腐蚀失效、脱落、腐蚀穿孔现象。研究表明，内陆地区输电铁塔镀锌层的消融速度为 1.4  $\mu\text{m/a}$ ，而青岛滨海地区输电铁塔的镀锌层消融速度能达到 3.7  $\mu\text{m/a}$ <sup>[5]</sup>。

## 1.2 输电铁塔主要防腐措施

当前，输电铁塔主要采用热浸镀锌的措施进行防腐，即将通过酸洗、水洗去污除锈后的钢铁材料浸入熔融的锌液，得到铁基底-锌铁合金层-镀锌层的复合保护层，使钢铁与大气、水源隔离，从而起到防腐作用，另外，当镀锌金属部件已经出现细微裂纹或损伤时，金属锌会以牺牲阳极的方式保护金属部件基体的腐蚀<sup>[6-7]</sup>。相关标准有 ASTM A 653/A 653M-2009a《热浸镀锌或锌铁合金镀层钢板标准规范》、GB/T 2694—2010《输电线路铁塔制造技术条件》、DL/T 1425—2015《变电站金属材料腐蚀防护技术导则》等。上述标准中规定镀锌层的厚度至少为 86~120  $\mu\text{m}$ ，为了确保实际使用中构件能满足寿命要求，生产厂家一般将镀锌层的厚度控制为 130~150  $\mu\text{m}$ <sup>[8]</sup>。这些指标基本能满足一般乡村等污染较少的内陆地区的腐蚀防护要求，但不能满足重工业和滨海等重腐蚀区域的防腐设计要求，一般 3~5 年就会失去防护作用，需要再进行涂装防护，增加了后期的维护成本。随着我国经济的发展和技术的进步，为了降低输电铁塔后期的维护成本，更先进的防护措施如镀锌与有机涂层结合、氟碳涂层、耐候钢等技术越来越多地应用在输电铁塔防腐上<sup>[9]</sup>。

## 2 氟碳涂料的性能及应用

### 2.1 氟碳涂料的性能

氟碳涂料是以氟烯烃聚合物或氟烯烃和其他单体的共聚物组成的氟碳树脂为成膜物质的系列涂料的统称。由于氟原子电负性强、极化率低、原子间斥力大，所以使主链变形成螺旋结构，C—C 键被氟原子完全覆盖，起到了很好的屏蔽性保护作用，且树脂中 F—C 键具有很高的键能(485 kJ/mol)，很难被热、光以及化学元素破坏<sup>[10-11]</sup>。因此，氟碳涂料具有显著的耐候性、耐蚀性、强附着性、耐划伤、抗紫外线辐射、不易褪

色等特性，且稳定性极高，逐渐被应用到越来越多的领域，特别是防腐及重防腐领域。研究和实际应用数据表明，普通防腐涂层的防护期只有 2~5 年，而氟碳涂料涂层的防腐保护期可达 8~20 年，因此氟碳涂料特别适用于对防腐要求较高的露天大型的钢架结构<sup>[12-13]</sup>。氟碳涂料产品主要有聚偏二氟乙烯(PVDF)氟碳涂料、聚四氟乙烯(PTFE)氟碳涂料和聚三氟氯乙烯(FEVE)氟碳涂料三种类型，其中 FEVE 氟碳涂料可溶性强、能在常温下固化，除具有氟碳涂层超高的耐腐蚀性和耐候性外，还具有灵活的施工性，使氟碳涂层的应用领域更为广泛。FEVE 氟碳涂层的耐酸性、耐碱性等主要性能指标远高于工业钢结构、混凝土道桥等的防腐要求，因此在工业防腐领域越来越受到重视，逐渐成为工业防腐领域的首选涂料。

### 2.2 氟碳涂料的应用

氟碳涂料具有多种优异的性能，在建筑、桥梁、船舶、航空等众多领域具有广泛的应用，但 PVDF、PTFE 和 FEVE 氟碳涂料的应用领域不同。PVDF 氟碳涂料需要在高温下作业，因此主要用于建筑和汽车行业中不锈钢、铝单板等的喷涂，比如商场、广场的铝幕墙；PTFE 氟碳涂料具有优异的自洁性和耐高温性，主要用于不粘锅、管道内壁的涂层；FEVE 氟碳涂料可以在常温固化，主要应用于施工要求不高的桥梁、电视塔、大型钢结构等露天大型物件的防腐，日本的大森桥、明石海峡跨海大桥、多多良大桥、白鸟大桥、来岛大桥等桥梁均使用了 FEVE 氟碳涂料进行防腐防护<sup>[14]</sup>。我国大连振邦、常熟中昊化工在 20 世纪 90 年代相继研发出 FEVE 氟碳涂料，并实现产业化。经过多年的推广，FEVE 氟碳涂料在我国的应用也取得了很大进步，四方台大桥、郑州黄河二桥、宜昌夷陵长江大桥、重庆嘉陵江大桥、杭州湾跨海大桥等钢结桥梁工程也使用了 FEVE 氟碳涂料防腐，并且具有较好的应用效果<sup>[15]</sup>。

## 3 氟碳涂料在输电铁塔的应用及前景

### 3.1 氟碳涂料用于输电铁塔防腐的优势

由于 FEVE 氟碳涂料常温固化技术的发展，越来越多涂刷成本高、难重复涂刷的户外大型钢结构建筑防腐开始使用 FEVE 氟碳涂料，输电铁塔的防腐防护工程便是其中之一。相比传统防腐涂料，FEVE 氟碳涂料应用于输电铁塔的防腐防护具有更多优势：氟碳树脂结构稳定使涂层具有极好的化学惰性，可以隔绝各种腐蚀物质对输电铁塔的腐蚀，有效地保护基底涂层及钢结构；氟碳涂层表面能极低，因此具有极小的摩擦系数，表面灰尘可通过风雨自洁，自洁功能强、免维护；氟碳涂料耐候性强，在相同的使用环境、相同的配套涂装中，普通涂料更易失光、失色、黄变，而氟碳涂料受外

部环境引起的失光、失色过程缓慢,色泽可以多年艳丽如新,氟碳涂料防腐期限更长,使用寿命长达 20 年;氟碳涂料可以使用辊涂、刷涂、喷涂等多种方式涂覆,形成的氟碳涂层附着力大、硬度高,涂一次可以维持许多年,节约了大量后期的维护费用。

### 3.2 氟碳涂料在输电铁塔的应用

由于氟碳涂料的优异防腐性能及相对较高的价格,目前主要作为重防腐涂料应用于对防腐要求较高的重工业区、海洋等强腐蚀环境的大型建设工程防护。与传统防腐涂料相比,重防腐涂料具有更长的防腐防护期,在重工业、滨海等环境苛刻地区使用寿命能达 10~15 年。因此,我国氟碳涂料最早在输电铁塔的应用也是需要重防腐的跨海电力铁塔上,例如,2008 年武汉铁神化工有限公司开发的氟碳重防腐面漆 TSF-800 应用于舟山跨越 370 m 铁塔,该铁塔镀锌表面依次涂覆改性型 HE-1 特制环氧防腐底漆、改性型 HE-8 环氧云铁防腐中间漆、TSF-800 氟碳重防腐面漆,干膜厚度分别为 50  $\mu\text{m}$ 、50  $\mu\text{m}$  和 80  $\mu\text{m}$ ,实现了很好的防护效果<sup>[6]</sup>,该方案可以用在重工业和滨海等强腐蚀环境的钢结构铁塔,防腐年限长达 20 年。TSF-800 氟碳重防腐面漆由甲、乙两组分组成,其中甲组分包括四氟氟碳树脂、金红石型钛白粉、特种抗氧剂、高级颜料、紫外线吸收剂、助剂和溶剂,乙组分为德国拜耳 Desmodur N3390 固化剂,使用时甲乙组分按照配方量混合,常温固化成涂膜,所得氟碳面漆的性能指标见表 1<sup>[7]</sup>。TSF-800 一次涂膜厚度可达到 120  $\mu\text{m}$  以上,除舟山跨越 370 m 铁塔外,该产品现已应用在多座跨海、跨江电力铁塔工程上,如 2011 年应用在巴西中北部输电线工程亚马逊河大跨越铁塔;2012 年应用在汉川电厂三期 500 kV 输电线路工程铁塔;2013 年应用在乐清湾大跨越、岱山-龟山大跨越铁塔;2016 年应用在 220 kV 岱山输电线路改造工程 K11# 大跨越塔;2017 年应用在舟山输电线路工程 380 m 大跨越高塔;2018 年应用在舟山 500 kV 联网输变电工程高塔。

随着氟碳涂料行业的不断发展和电力行业防腐需求的增加,氟碳涂料会越来越多地应用于输电铁塔的防腐,应用范围也会逐渐从沿海输电铁塔转移到内陆输电铁塔。宁亮等<sup>[8]</sup>采用改性环氧底漆和改性氟碳面漆制备了一种输电铁塔用高适应性防腐涂料,并于 2014 年应用于辽宁省电力有限公司南水线 21 号输电铁塔的腐蚀防护,具有较好的施工效果,4 年后回访考察发现氟碳涂层无明显失光、粉化、变色等情况,起到了良好的腐蚀防护作用。游运通等<sup>[9]</sup>选用环氧树脂和氟碳树脂基料进行交联改性,得到了综合性价比比较高的氟碳改性涂料,并进行了应用测试,2 年后氟碳涂层

同样无脱落、粉化、开裂等腐蚀现象。

表 1 TSF-800 氟碳防腐面漆性能指标

项目	技术指标
漆膜颜色及外观	漆膜平整、光亮
黏度(涂-6 杯)/s	$\geq 30$
表干时间(25 $^{\circ}\text{C}$ )/h	2
实干时间(25 $^{\circ}\text{C}$ )/h	$\leq 24$
细度/ $\mu\text{m}$	$\leq 50$
附着力(拉开法)/MPa	$\geq 10.5$
不挥发物含量/%	$\geq 55$
耐冲击性/cm	$\geq 50$
柔韧性/mm	$\leq 2$
适用期/h	5
耐酸性(5% $\text{H}_2\text{SO}_4$ )	240 h 涂层无异常
耐碱性(5% $\text{NaOH}$ )	240 h 涂层无异常
耐盐性(3% $\text{NaCl}$ )	240 h 涂层无异常
耐盐雾性	2 000 h 不起泡、不脱落
人工加速老化(紫外线 60 $^{\circ}\text{C}$ 、4 h, 冷凝 50 $^{\circ}\text{C}$ 、4 h, 循环, 共 5 000 h)	轻微变色、无粉化、无裂纹

## 4 氟碳涂料在输电铁塔的应用前景

由于我国输电铁塔需求的不断增加及所处环境的污染和恶化,输电铁塔后期防腐维护工作越来越繁重,维护成本也逐渐增加。为减少防腐维护成本、满足输电铁塔长期的防腐要求,各种防腐新涂层与新技术逐渐应用于输电铁塔,其中氟碳涂料用于输电铁塔防腐具有更突出的经济价值和社会效益。氟碳涂料在滨海输电铁塔的应用实例为氟碳涂料开拓了新的应用市场,并为我国氟碳涂料技术的发展奠定了基础。随着我国氟碳涂料企业的迅速壮大,也促使其市场需求扩大,输电铁塔腐蚀防护将会成为氟碳涂料的一个重要应用领域。相关防腐标准的制定与实施,也为氟碳涂料在输电铁塔防腐领域的广泛应用提供了依据与保障。在不久的将来,氟碳涂料必将成为输电铁塔腐蚀防护领域的领军者。

### 参考文献:

- [1] 2023 年中国电力铁塔行业发展政策、竞争格局及未来前景分析[EB/OL].[https://www.sohu.com/a/718723702\\_120956920](https://www.sohu.com/a/718723702_120956920).
- [2] 李文翰,尹学涛,周学杰,等.电网输变电设备钢结构和镀锌构件的大气腐蚀与防护措施[J].材料保护,2018(10):114-118.
- [3] 陈耀财,安贞基.输电铁塔腐蚀分析与有机涂料防护设计[J].现代涂料与涂装,2010(10):23-27.
- [4] 陈云,强春媚,王国刚,等.输电铁塔的腐蚀与防护[J].电力

- 建设,2010(8):55-58.
- [5] 马东伟,王平,仁汉涛. 滨海输电线路铁塔腐蚀与防护技术探讨[J].全面腐蚀控制,2013(11):37-38.
- [6] 胡家元,李延伟,刘栓,等. 输电铁塔塔脚防护用无溶剂环氧涂料的研制及其防腐性能研究[J].中国材料进展,2019(7):705-708.
- [7] 施昆. 输电铁塔的腐蚀与防护探微[J].现代工业经济和信息化,2015(11):29-30.
- [8] 程灵,马光,陈新,等. 输变电工程中钢结构的腐蚀与防护[J].钢结构,2014(2):76-79.
- [9] 张霞. 纳米环氧复合涂料应用于输电铁塔的实验研究[D].保定:华北电力大学,2011.
- [10] 严晓宇. 碳纳米管复合水性氟碳涂料的制备及性能研究[D].大连:大连理工大学,2018.
- [11] 马丽,孟贵云,夏杰. 浅谈水性氟碳涂料的研究进展[J].有机氟工业,2013(4):42-45.
- [12] Wang B, Price J S, Giebink N C. Durable broadband ultralow index fluoropolymer antireflection coatings for plastic optics [J]. OPTICA, 2017, 4(2): 239-242.
- [13] Zhuang Q, Geddis P, Clements B, et al. Corrosion-resistant coating development with potential application in equipment of low-temperature waste heat recovery [J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 2018, 96(1): 101-106.
- [14] 李运德,杨振波,黄玫梅. 常温固化氟碳涂料在桥梁领域的应用[J].电镀与涂饰,2008(1):49-53.
- [15] 张冀蜀,苗苾. 氟碳涂料在我国钢结构桥梁防护中的应用现状与前景[J].涂料技术与文摘,2009(11):25-29.
- [16] 施铭德,曾福生,周爱,等. 氟碳重防腐面漆在世界第一高跨海铁塔镀锌表面的涂装应用[J].现代涂料与涂装,2009(11):40-42.
- [17] 罗永乐,谢倩红,黄相璇,等. 重防腐涂料发展现状与未来[J].化工新型材料,2014(10):23-24.
- [18] 宁亮,陈云,杨凯,等. 一种输电铁塔用高适应性防腐涂料的研制和应用[J].腐蚀科学与防护技术,2019(2):149-154.
- [19] 游运通,冯汉民. 自干型氟碳改性环氧富锌涂料在电力铁塔上的应用[J].涂料与应用,2007(2):24-25. ◆

(上接第 32 页)是完全相同,所以,在这里只阐述优化思路,具体方法因地适宜。

1) 常规做法——过喷浪费优化:为了尽量减少过喷浪费,采用常规举措,通过与质量部门的密切合作,梳理图纸要求,识别非喷涂区域,对过喷区域采用喷涂轨迹优化,减少过喷。

2) 创新做法——反弹浪费优化,全面提升上漆率:重点介绍下反弹浪费、过程中浪费,结合几个梯度试验和数据收集归纳出了一个突破性的优化方向——降低空气减小油漆反弹,拉近枪距(突破物理极限),提高电压;保证有效扇面的同时尽可能地加强静电吸附效果,减少过程中浪费与过喷浪费。这种喷涂方式称之为“滩涂”,类似于 3D 打印,将油漆直接刷在车身表面,大幅度减少浪费,提高上漆率。

### 3 项目实施

通过在青岛工厂现场的机器人进行全面的仿形调试、喷涂参数优化后,上漆率提升 10%~15%,油漆整体耗量得到明显降低;另一方面,通过数据测量,外表漆膜膜厚及外观状态与参数调整前保持一致,甚至在喷涂均匀度方面还有 10%左右提升。同时,也带来了大量的附加效益,这里面包括 VOC 排放的降低,清洗溶剂的减少,还有一些辅材使用量的减少,如机器人衣服,格栅板等。注:由于本方案的实行,空气中掉落、过喷的油漆大量减少,那么导致浪费部分喷涂于机器人衣服与格栅板的油漆大量减少。

### 4 风险把控

在上漆率提升优化过程中由于工艺参数的变化可能导致以下两种潜在风险。

- 1) 质量风险:主要包括漆渣、漆雾、橘皮等;
- 2) 停台风险:主要包括空气环污染、手轴磨损等。

针对于以上风险我们采取了自主开发的“离线模拟”“质量监控闭环”“设备预测性监控”“空气环清理模式优化”等控制方案进行合理有效规避。

### 5 结语

本研究基于 ABB RB1000 喷涂设备,通过突破设备极限、示教全新喷涂仿形、喷涂参数重点优化等措施,实现了面漆喷涂上漆率的显著提升。需要注意的是,以上讨论的上漆率提升方向和具体方法,对各个主机厂的上漆率提升具有一定的参考意义,这为汽车工厂的喷涂工艺改进提供了实践指导。

### 参考文献:

- [1] 张慧,华云,郭雅莉.汽车涂装喷漆上漆率研究[J].现代涂料与涂装,2021,24(12):61-63.
- [2] 潘成成.关于雾化器的雾化能力研究[Z].现代涂料与涂装,2019,22(9):49-51.
- [3] 高文化,和军强.汽车车身内表面喷涂技术的应用[J].电镀与涂饰,2016,35(22):1194-1199.
- [4] 安涛,陈静,梁方璞,等.喷涂机器人工艺参数调试优化[J].涂料工业,2021,51(4):71-74. ◆