

# 智能维修装备自动喷涂性能研究

行九晖<sup>1</sup>, 张 菁<sup>1</sup>, 王 珂<sup>1</sup>, 陈灼宁<sup>1</sup>, 张 帅<sup>1</sup>, 张玉霞<sup>1</sup>, 刘 源<sup>1</sup>, 林 斌<sup>2</sup>, 陈有为<sup>2</sup>, 冯景飞<sup>2</sup>  
(1.中广核新能源华南分公司,广东 深圳 518000; 2.深圳国能宸泰科技有限公司,广东 深圳 518000)

**摘要:** 本研究旨在解决风机塔筒锈蚀导致的故障问题,降低人工运维成本并提高安全性。为此,研究人员开发了一种风电塔筒防腐维修智能作业装备,并对其喷涂模块的自动喷涂性能进行了研究。研究结合了风机塔筒的腐蚀环境特点和装备喷涂特性,进行了一系列室内加速腐蚀测试,包括紫外老化、耐盐雾、耐碱性、耐水性等方面的评估。通过这些测试,研究人员评估了常用风电防腐涂料体系的性能,并选择了适用于风电塔筒防腐维修自动喷涂模块的涂料体系。这些选择旨在满足人工喷涂要求,并适应塔筒常规环境下的防腐维修施工条件。

**关键词:** 流挂; 干膜厚度; 附着力

中图分类号:TQ639 文献标志码:A 文章编号:1007-9548(2024)08-0040-03

## Research on Automatic Spraying Performance of Intelligent Maintenance Equipment

XING Jiu-hui<sup>1</sup>, ZHANG Qiang<sup>1</sup>, WANG Ke<sup>1</sup>, CHEN Zhuo-ning<sup>1</sup>, ZHANG Shuai<sup>1</sup>, ZHANG Yu-xia<sup>1</sup>,  
LIU Yuan<sup>1</sup>, LIN Bin<sup>2</sup>, CHEN You-wei<sup>2</sup>, FENG Jing-fei<sup>2</sup>

(1.South China Branch, CGN New Energy Shenzhen Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China;

2.Shenzhen Guoneng Chentai Technology Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China)

**Abstract:** This study aims to address the issue of failures caused by corrosion in wind turbine towers, with the goals of reducing manual maintenance costs and improving safety. To achieve this, researchers have developed an intelligent equipment for corrosion protection and maintenance of wind turbine towers, and conducted research on the automatic spray performance of its coating module. The study combines the corrosion environment characteristics of wind turbine towers with the coating properties of the equipment, and carries out a series of indoor accelerated corrosion tests, including evaluations of UV aging, salt fog resistance, alkali resistance, and water resistance. Through these tests, the researchers evaluated the performance of commonly used anti-corrosion coating systems in wind turbines and selected a coating system suitable for the automatic spray module used in the corrosion protection and maintenance of wind turbine towers. These choices aim to meet the requirements of manual spraying and adapt to the conditions of corrosion protection and maintenance in typical tower environments.

**Key words:** sagging; dry film thickness; adhesion

## 0 引言

风机塔筒锈蚀是导致风机倒塌事故发生的元凶之一,为防止风机出现锈蚀而发生故障,风场只能花费高

额的维修费用来对风机进行防腐处理,采用人工防腐维修,人工搭乘吊篮、吊板、或者用安全绳的方式进行维修<sup>[1]</sup>。这些方式存在工作效率低、劳动强度大、施工周期长、成本高、安全风险高等问题,且维修停机造成的发电损失也是一种隐性成本支出。

风机塔筒防腐智能维修装备在国内外都是很前沿的研究课题,目前尚无实际成熟应用的智能装备。本文

收稿日期:2024-02-06

作者简介:行九晖(1973—),男,本科,高级工程师,主要从事风力发电相关工作。E-mail:105773879@qq.com。

希望设计优选出智能维修装备喷涂模块及对应涂料体系,匹配风电塔筒防腐维修智能作业装备整套方案,实现对风机塔筒外壁自动涂装作业的施工。

## 1 主要难点

为了满足风电塔筒防腐维修涂料喷涂施工工作要求并适配防腐维修智能作业装备,我们需要对风机塔筒防腐施工作业环境进行了解,并分析防腐维修智能作业装备研发需求<sup>[2-3]</sup>。经过初步调研分析,本项目的关键技术难点包括以下几个方面。

**自动喷涂轻量化:** 风机塔筒表面涂层并没有很高的强度,加上其本身所处环境比较复杂,防腐维修作业最高需要到达 100 m 的高度,智能维修装备质量过大不仅会对风机塔筒原有的涂层造成损伤,也会增加安全隐患。智能维修装备在保证轻量化的同时还需能够携带足够的涂料,以避免频繁的加注涂料,影响作业效率。

**高可靠性:** 较人工喷涂而言,自动喷涂可控性较差,很难根据实际喷涂情况进行调整。另外风机所处环境风力较大,在可作业条件下如何保证自动喷涂质量也是一个难点。

**适配设计:** 如何在满足喷涂质量要求的前提下很好地适配防腐维修智能作业装备同样也是需要解决的问题,在保证轻量、稳固的同时还需方便拆卸安装<sup>[4-5]</sup>。

## 2 喷涂模块优化

涂料喷涂模块技术相对成熟,保证能够满足风电行业维修标准即可,不过需要能够自主识别喷涂区域,喷涂效率高,操作简单灵活,故障自诊断,结构模块化设计,拆解方便易于维护喷涂<sup>[4]</sup>。初期主要的设计方向以不外接管线为前提,在智能维修装备本体上加装气源及稳定系统为设计思想,初步概念见图 1~2。

经初步测试发现,在使用自带气源时,受限于喷涂压力,喷涂工艺参数无论怎样调整都无法保证良好的喷涂效果,且喷涂 1 遍时多数位置涂层干膜厚度无法满足要求,涂层外观也有较多瑕疵。通过系列测试调

整,更改喷涂方案设计,使用外接气源,保证足够的喷涂压力,提高喷涂质量同时也减少了喷涂次数,可以大幅提高喷涂效率。此外,为保证喷涂后的质量,采用高清视觉系统实时对喷涂质量进行确认,确保不会出现漏涂等现象。

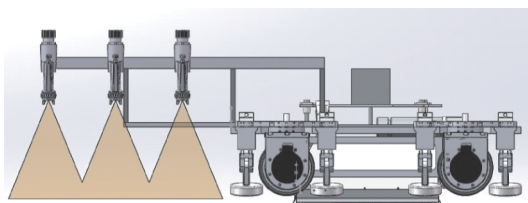


图1 喷涂模块侧面概念

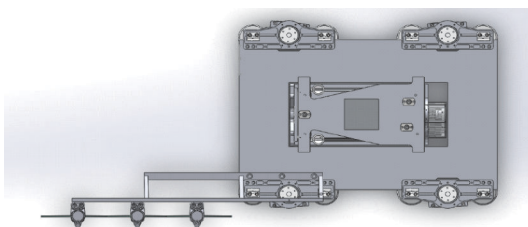


图2 喷涂模块俯视图概念

## 3 涂料选型测试

### 3.1 测试方案

本次智能维修装备防腐涂料喷涂性能测试,主要针对不同涂料体系之间可能产生的差异进行试验,再结合风机塔筒常规的腐蚀环境特点,确保能够筛选出适合自动喷涂的涂料体系及工艺参数。本次涂料选型测试针对常规环境下塔筒维修涂料的可行性进行测试检验,项目主要是外观评价、循环老化试验(紫外老化/耐盐雾/耐碱性/耐水性)、涂层厚度及附着力测试等<sup>[6-9]</sup>。

根据初步的调研及选型评价结果,最终确定 5 种涂料体系,见表 1,为方便叙述和标记,下文按顺序分别简称为 01C、02C、03C、04C、05C 涂料体系。

表1 选取的5种涂料体系

涂料体系	品牌	底漆	面漆
01C	海虹	海虹富锌环氧底漆 17360(每道厚度 80 μm,共 2 道 160 μm)	海虹聚氨酯面漆 55210-17760(每道厚度 40 μm,共 2 道 80 μm)
02C	海虹	海虹富锌环氧底漆 17360(每道厚度 80 μm,共 2 道 160 μm)	海虹氟碳面漆 55LCN-11150(每道厚度 40 μm,共 2 道 80 μm)
03C	海虹	海虹快干环氧底漆 15560(每道厚度 80 μm,共 2 道 160 μm)	海虹聚氨酯面漆 55210-17760(每道厚度 40 μm,共 2 道 80 μm)
04C	国际	富锌环氧底漆 Interzinc 52(每道厚度 70 μm,共 2 道 140 μm)	聚氨酯面漆 Interthane 990(每道厚度 50 μm,共 2 道 100 μm)
05C	佐敦	富锌环氧底漆 Barrier 80(每道厚度 80 μm,共 2 道 160 μm)	聚氨酯面漆 Hardtop XP(每道厚度 40 μm,共 2 道 80 μm)

本次测试将每个涂料体系制作成 40 块测试样板(包含留样),其中附着力测试除了新的样板,部分进行

老化加速试验后的样板也需要测附着力,其中涂层厚度每块样板按要求需要测试 10 个点,附着力测试点数

根据实际情况酌情选取。

### 3.2 结果分析

通过测试老化加速试验前后涂层厚度、涂层附着力、外观等指标的变化,能够对不同涂料体系自动喷涂质量进行比对,且能直观地比较出多种涂料体系的优劣好坏。

#### 3.2.1 外观对比

不同老化加速试验后样板的情况有明显差异,其中耐盐雾、耐碱性测试结束后样板表面涂层变化并不明显,但是紫外老化和耐水测试后部分涂层体系的测试结果较差。

通过试验对比可以看出,部分样板可能因为喷涂过厚出现流挂,5种涂料体系整体外观表现良好,在喷涂施工方面基本能够满足现场使用要求。但是对比涂料原始状态与各加速测试周期结束后的宏观形貌可以看出,不同体系的涂料遭受腐蚀的严重程度不尽相同。在涂料刚完成涂覆时,涂层表面光滑,无流挂,无裂缝,光泽度较高,表面仅有一条人为制造的腐蚀加速线。而01C号、04C涂料体系在耐水、紫外老化试验过后涂料腐蚀加重,表面出现了不同程度的鼓泡、开裂、剥离,甚至发生涂层脱落,而且多是从腐蚀加速线或开孔及破损的应力集中处萌生并扩展。除了部分测试板的划痕、剥落以及边缘部分的金属基体存在轻微锈蚀,其余部分腐蚀防护控制得很好。由各加速腐蚀测试周期结束后的宏观形貌综合对比表明,02C、03C、05C涂料体系抗腐蚀性能相对较好,涂层能与钢材紧密结合,能够有效阻碍腐蚀液体从腐蚀加速线渗入内部进行破坏。

#### 3.2.2 涂层干膜厚度测试

本次试验设计涂层厚度均为240 μm,对所有测试前后样板进行涂层厚度测试,取平均值,测试结果见表2。通过检测发现:01C涂料体系有2块号板涂层厚度低于设计值,02C涂料体系有8块板低于设计值(2块在设计值的75%~90%,其余均不低于90%),03C涂料体系则有28块样板厚度低于设计值,04C、05C涂料体系表现良好,不过整体厚度相对偏厚。在加速腐蚀测试后,部分涂层由于腐蚀液体渗入内部,涂层厚度偏大或偏小,使得测量结果不精确。但从整体情况来看,涂层在受到腐蚀后,涂层厚度减小不明显。在涂层厚度方面01C、02C、04C、05C涂料体系是可以满足的现场应用要求的,但是具体施工工艺还需要优化,保证涂层干膜厚度满足设计要求。

#### 3.2.3 涂层附着力测试

涂层附着力测试每个涂料体系各选取了6块样板,具体数据见表3,其中“/”代表着对应样板涂层受

损严重,无法进行涂层附着力测试。

表2 涂层干膜厚度测试结果

样板	涂层干膜厚度平均值/μm				
	01C	02C	03C	04C	05C
测试前	437.85	314.83	295.97	396.17	363.35
测试后	453.78	329.61	335.39	408.39	371.22

表3 测试板涂层附着力测试记录

涂料体系	样板附着力/MPa					
	1	2	3	4	5	6
01C	/	/	/	4.81	4.23	3.59
02C	6.15	5.36	7.11	5.88	5.98	5.22
03C	3.15	4.66	4.71	5.12	4.21	3.33
04C	/	/	/	3.78	5.42	4.95
05C	4.75	/	/	4.58	6.18	5.55

上述附着力测试选取的部分样板由于涂层受损严重,未完成测试便中途停止的未列入表格。为满足防腐维修阶段的附着力要求,在不进行老化测试加速试验时附着力一般要求 $\geq 5$  MPa,由上述5、6号板测试结果显示,只有02C、04C及05C涂料体系能够满足要求。再结合其他经过老化测试加速试验的样板附着力测试结果来看,只有02C涂料体系表现最好,测试前后整体的附着力并未发生明显降低,04C和05C两种涂料体系虽然未经过老化测试的附着力符合要求,但是老化测试后的涂层并不完好,实际测试数据相对于未测试的样板也有了明显的下降。

## 4 结语

1)通过自动喷涂涂料外观及性能测试比对表明:在一系列的性能优化之后,自动喷涂系统表现良好,可以达到正常人工塔筒防腐维修的水平。实际现场还应结合当时的环境状态对涂料及喷涂参数进行适当微调,试喷合格方可进行批量涂料喷涂作业。

2)通过对5种涂料体系在自动喷涂测试样板的外观、涂层膜厚及涂层附着力等方面进行比较,分析得出:02C涂料体系在常规的塔筒腐蚀环境下喷涂性能相对最优,05C涂料体系次之,01C、03C、04C号涂料体系相对较差。

3)本次涂料选型性能测试样品数量相对较多,试验过程中发现整体表现较好的样板中仍存在相对较差的结果,尤其是在附着力测试完成后,样板的性能与样板制作过程中表面处理的效果存在较大的关系,部分样板由于表面处理较差造成整个测试结果不佳;所以除了合格的涂料体系,现场的施工质量与过程质量控制也不可忽视,只有把每一个步骤都(下转第53页)