风力发电设备防腐涂装

# 李承宇 王会阳

（中国矿业大学材料学院，徐州， 221008 ）

摘要：概括性地介绍了目前风力发电设备的运行环境与腐蚀情况，并对塔架、叶片等不同结构的防腐涂装进行了阐述，最后指出了我国风电装备涂料与涂装中存在的不足，并针对不足提出了相应的建议。

关键词：风电设备；腐蚀环境；涂层

**Anti-corrosion coating of the wind power equipment**

LI Cheng-yu WANG Hui-yang

(School of materials science and technology CUMT, Xuzhou, 221008)

Abstract: The present running environment and the corrosion of wind power equipment are briefly introduced, and described the anti-corrosion coatings of towers, vanes and other different structures. At last, Points out the shortcomings in wind power coatings and the application in China, and gives the advice for the shortcomings.

Key words: Wind power equipment; Corrosion environment; Coating

随着社会的发展以及人们对环境保护意识的提高，现在对节约资源、发展循环经济、保护生态环境的呼声 越来越高。加快建设资源节约型、环境友好型社会，促进经济发展与人口、资源、环境相协调，已经成为我国 的基本国策 [1] 。改革开放以来，我国的发展突飞猛进，但随之也带来的是高污染、高能耗等问题，所以我国乃至全世界的国家都在积极研究开发新的、可再生的、无污染的能源，从而发展低碳经济。

目前在石化能源快速消耗、气候变化日趋明显的形势下，风能作为一种典型可再生的新能源，逐步被人们

所重视， 大力发展清洁能源已是世界各国的共识， 风电产业已经成为了焦点。 我国风电的发展十分迅速， 从 1986年第一个风电场在山东省荣成建成，到 2008 年，风电总装机容量已经达到了 1221 万 kW ，跃居世界第 4 位，位列美、德和西班牙之后。新增装机容量仅次于美国而居于世界第二，超过了 100% 的增长率，增长速度为世界第 一[2] 。随之而来的，是对风力发电设备的大量需求， 从而也带动了风力发电装备涂装防护技术的发展。 许多企业也将风电涂料作为未来发展的重点领域，因此了解风电设备的防腐环境及涂装工艺是很有必要的，本文就这两

个方面进行了分析和综述。

# 风力发电装备运行环境及腐蚀分析

风电设备主要面临的是大气腐蚀环境 [ 划分 : C1 非常低、 C2 低、 C3 中等、 C4 高、 C5-I 很高 (工业 )、C5- M很高 (海洋 )6 个等级 ] 、水和土壤腐蚀环境（ I m1 淡水、 I m2 海水或盐水、 I m3 土壤），这是目前风电机组金属 表面防腐设计的主要依据 [3]。我国的风电场主要集中在北部及西部地区（内蒙古、辽宁、甘肃、新疆等）及少数

沿海地区（江苏、山东等）。防腐涂装的方案也因风电设备所处的腐蚀环境不同而有所不同。

在北部及西部地区，风电设备主要面临的腐蚀是大气中磨损应力 (磨蚀 )，因为风挟带的颗粒 (例如沙粒 )摩擦钢结构、叶片表面而产生破坏，另外是水滴、冰雹、沙尘暴甚至飞鸟等较大物的撞击破坏。这在沙漠戈壁风电

场塔架迎风面及底部、风电叶片表面、箱式落地变压器迎风侧面比较常见和明显，特别是叶片的叶尖在许多情况会因磨损造成结构破坏、效率下降和损失。

在沿海地区，风电设备主要面临的是海洋大气腐蚀环境以及海水飞溅等引发的不同程度的腐蚀现象，因为

一般沿海地区的风力发电设备都海面上、海岸和临海地区，由于环境介质中的氯离子渗入到风电设备的周围 ,达到一定浓度后破坏钢铁的防腐层，引起风电塔架、风电叶片等锈蚀。氯离子与空气中的其他颗粒物在变压器金

属外壳静电的作用下，在变压器表面形成覆盖层， 经过一系列的化学反应后使设备原有的强度遭到破坏，使设备不能达到设计运行要求，给设备安全运行带来严重后果。海洋大气与设备电气元件的金属物发生化学反应后

? 1 ?

使原有的电气性能下降，生成氧化物使电气触点接触不良，它们将导致电气设备故障或毁坏，给风电场的安全、经济运行造成很大的影响 [4] 。

# 风电设备防腐设计

防腐是每个风力发电场所关心的突出问题，长效的涂装防护系统能延长整个风电设备的使用寿命，大大延长涂层的维修周期。针对风力电厂的腐蚀环境特点，塔筒所选用的涂装防护系统应具有良好的防腐性能，同时漆膜要坚硬耐冲击并具有良好的耐候性、耐水性、附着力和装饰等性能。

从涂装防护的角度，基础及支撑结构（塔架）、风轮叶片及机舱罩和整流罩、发电机组、控制电气设备、变压器等部件是重点。

* 1. 风电塔架的防腐设计
		1. 国际标准中的防腐设计

塔架目前普遍使用的是涂层防护。 GB/T19072-2003 风力发电机组 -塔架规定的涂层防护体是：

表 **1 GB/T19072-2003** 中规定塔架防腐涂层

**Table 1 The tower anti-corrosion coating standard in GB/T19072-2003**

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 工序 | 塔架外表面 |  | 塔架内表面 |
| 预处理 | Sa3 |  | Sa2.5 |
| 工艺 1工艺 2 | 电弧喷涂锌或锌铝双组份复合环氧漆 | 60μm 20μm | 环氧富锌 40μm |
| 工艺 3工艺 4 | 双组份复合厚膜环氧漆双组份复合聚氨酯面漆 | 90μm50μm | 环氧厚膜 100μm |

* + 1. 戈壁、沙漠等条件下的防腐设计

目前国际上普遍采用 ISO12944 标准对腐蚀环境分类、涂层体系选择及性能评价，而欧洲普遍采用

NOSAKM501 标准。由于风电场一般远离城市，内陆风电场选择 C3 中等腐蚀环境，但我国新疆、甘肃、内蒙等风电场大多处于戈壁、沙漠，风沙很大，涂层必须考虑耐风沙撞击和磨损的性能要求。

* + 1. 海洋环境下的防腐设计

在海上或近海风力发电设备中，对与海洋接触的变压器等电气设备金属部件，涂、镀层的选择很重要，需选择耐海洋气氛、附着力强、长效的涂、镀层保护，同时最好避免变压器暴露在含盐水空气流中。

海上风电场的腐蚀保护主要是基于其腐蚀环境 ISO12944C5-M ，对于浸水区域按 Im2。推荐的干膜厚度为 320~500 μm（大气腐蚀环境 C5-M ）和 400~1000 μm（海水浸泡环境 Im2 ），可以达到 15 年以上的无需维修使用寿命周期 [5] 。对于近海的钢结构还有 2003 年发布的 ISO20340 标准《色漆和清漆用于近海建筑及相关结构的保

护性涂料体系的性能要求》，这个标准是通用型的，对不同的腐蚀环境都适用，而实际的腐蚀环境更为复杂，

涂装时更要注重微观腐蚀环境和腐蚀因素，海洋环境下的防护可参考表 2 的配套体系。

表 **2** 海洋环境下风电塔架防腐涂层 **[6]**

**Table 2 The tower anti-corrosion coating in marine environment**

序

底漆 二道 三道 四道

号

总厚度 μm

* + - 1. 环氧富锌 80μm 环氧涂料 300μm

环氧涂料

300μm

环氧涂料

聚氨酯面漆

70μm

750

* + - 1. 环氧富锌 80μm 环氧涂料 450μm

450μm

------------- 980

电弧喷涂（锌 85，

3 铝 15）100μm

带有封孔颜料的环

环氧涂料 环氧涂料 1020

氧底漆 20μm

电弧喷涂（锌 85，

4 铝 15）100μm

带有封孔颜料的环氧底漆 20μm

粒子增强型环氧涂料

粒子增强型环氧

涂料 1020

5 单层环氧涂料涂装 1000μm 1000



? 2 ?

电弧喷涂（铝 95，

6 镁 05）350μm

带有封孔颜料的环

氧底漆 40μm ---------- ------------- 390

* + 1. 国外大公司的防腐设计

由于国外此方面的研究较早，所以他们已经根据不同的腐蚀环境、不同的地域建立了不同的有效经济的防腐涂装体系 **[7,8]**，目前国外富锌底漆使用最多的是环氧富锌底漆，这种漆不仅施工方便而且对底材处理要求相对

较低。美国使用水性无机富锌单层底面合一，对涂装工艺要求比较高。欧洲近年推广热喷锌或铝 / 镁合金，它们

对底材处理要求 Sa2.5～ 3 级，而且孔隙率小于 5％。从难修复性出发，德国近几年正在开发可自修复型风电塔外壁涂层，可自动修复机械划伤和风沙撞伤 **[6]**。

表 **3** 国外大公司风电塔防腐涂装设计 **[6]**

**Table 3 The tower anti-corrosion coating design of the foreign big company**

风电塔类型名称 部位 涂层类型

膜厚

/ μm

Tunoe Knob

Vindeby

Utgrunden

Grunden

Horns Rev

Samso

外部

内部

外部

内部

外部

内部

外部

内部

外部

内部

外部

起始 10m

内部

然后

单桩

金属镀层 80

双组分环氧密封剂 100

双组分环氧中间层 100

丙烯酸聚氨酯面涂 50

环氧锌粉底漆 40

双组分高固体分环氧 2×140

金属喷涂层 120

双组分环氧密封剂 100

双组分环氧中间层 100

丙烯酸聚氨酯面涂 50

环氧底漆 /中间层 75

高固体分环氧 150

环氧富锌底漆 75

高固体分环氧中间层 2×110

丙烯酸聚氨酯面涂 50

环氧富锌底漆 70

高固体分环氧 150

双组分环氧密封剂 100

双组分环氧中间层 120

丙烯酸聚氨酯面涂 50

金属喷涂层 80

双组分环氧密封剂 100

双组分高固体分环氧 100

金属喷涂层 100

双组分环氧密封剂 100

双组分环氧中间层 120

丙烯酸聚氨酯面涂 50

金属喷涂层 80

双组分环氧密封剂 100

双组分高固体分环氧 100

金属喷涂层 80

高固体分环氧 120

高固体分环氧 100

丙烯酸聚氨酯面涂 50

金属喷涂层 60

环氧密封剂 200

环氧富锌底漆 50

高固体分环氧 100

高固体分环氧 （直涂于金属底材） ：（外

部/ 冰罩） 3×300

环氧富锌底漆

West Alliance 2002 水线以上

高固体分环氧中间层

? 3 ?

丙烯酸聚氨酯面涂

水线以下 高固分环氧（直涂于金属底材）环氧富锌底漆

Stena Don

水线以上

高固体分环氧中间层

丙烯酸聚氨酯面涂

* 1. 风电设备叶片的防腐设计 **[3]**

水线以下 双组分高固体分环氧（涂于金属底材）



JB/T 10194-2000: 风力发电机组 -风轮叶片中指出， 叶片在一定程度上暴露在腐蚀性环境条件下并且不容易接近，在许多情况下不可能重做防腐层，因此重视设计、材料选择和防腐保护措施特别重要，复合材料叶片应采

用胶衣保护层，但没有相应的指标规定。标准认定的环境条件包括温度、湿度、盐雾、雷电、沙尘、辐射六项。

在“MW级风力发电机组风轮叶片原材料国产化 ”的“863”计划中，要求叶片表面保护涂料能提高叶片耐紫外线老化、耐风沙侵蚀以及耐湿热、盐雾腐蚀能力，适应我国南北方不同极端气候条件下风电场的使用需求，保

证风轮叶片 20 a 的设计使用寿命。具体指标要求是 :

(1) 附着力 ≥ 5MPa；

(2) 自然表干 /8h， 40 ℃烘干 /3h；

(3) 耐磨性 500g/500r ≤ 20m；g

(4) 耐盐雾 ≥ 2000，h 无脱落，附着力保持 80%；

(5) 耐沙尘试验满足 GB2423.37-89 。

目前， 拜耳 [9] 正在主推可用于风电叶片 （包括塔架） 涂料制造的涂料原材料 —— 聚天门冬氨酸酯。 叶片涂料已经成为叶片防护的必要方式，以使用进口涂料为主，但在实际使用中需要考虑风蚀和盐雾腐蚀等情况，以及

冬季可能结冰、冰雹和飞鸟撞击对叶片的损伤也是不容忽视的。

* 1. 风电设备其他部件的防腐设计

（ 1）底座、轮毂、轴承的防腐设计

一般采用与塔架内壁相同的防腐涂料体系。

（ 2）塔架基础的防腐设计 [3]

塔架基础埋地钢筋同样面临腐蚀，但一般被忽视而未采取防腐措施，一旦出现问题则难以处置。其防腐方法可采用一般建筑用钢筋防腐涂料，或者针对性设计和选择涂料品种，在基础浇注前进行防腐涂装。

（ 3）机舱罩、整流罩的防腐设计

都是非金属部件可采用叶片涂料体系。

（ 4）变压器的防腐设计 [3,10]

变压器一般为落地箱式，北方寒旱环境下沙尘、冰冻、紫外线腐蚀比较严重，南方盐雾湿润腐蚀严重，要采用塔架外防护涂料体系。

（ 5）配电箱、电器柜的防腐设计

配电箱 /电器柜等钣金结构件目前一般使用粉末涂料。

（ 6）发电机、齿轮箱的防腐设计 [11]

发电机 /齿轮箱涂料等铸造件涂料防腐性与装饰性兼备，整机制造企业对其涂层保护要求不明显。

# 国内风力发电涂料的研究状况

目前对风电涂料的研究和交流比较活跃，包括了以塔架涂料和叶片涂料为主的风电涂料。 2009 年，对风电涂料的关注成为涂料行业的一个重点和热点，研究的重点是陆地和海上、南方和北方不同环境甚至极端气候条

件下塔架防护涂料的经济性、环保性、稳定性、适宜性、有效性等，研究的热点是叶片涂料耐紫外线老化、耐风沙侵蚀以及耐湿热、盐雾腐蚀的能力 [12]。

? 4 ?

在科技部发布的国家高技术研究发展计划（ 863 计划）新材料技术领域“ MW 级风力发电机组风轮叶片原 材料国产化” 重点项目 [3] 中，风电叶片表面保护涂料规模化制备技术研究作为研究内容列入， 要求突破关键技术，推动国产化，研究提出并形成相关行业标准和技术规范，保障我国风电产业的健康、稳定和快速发展。

虽然风电涂料在整个风电装备投入中所占份额很小，但是，风电装备企业已经逐渐认识到风电涂料存在的不足和重要性，认为腐蚀不仅影响到机组设备的美观、运行维护和发电效率，严重情况下会影响到结构强度， 引发设备安全问题，从性能、成本、质量、保证能力等方面对风电涂料予以关注，寻求和涂料供应商的密切合作，这有利于改进对风电涂料的理解，推进国产化进程。因此可以预料的是，风电涂料的研究及其成果将是涂料技术活动的一个重要领域 [3] 。

# 我国风电设备防腐涂装行业存在的不足及展望

* 1. 我国风电设备防腐涂装行业存在的不足

可以肯定的是，在目前风电防护涂装体系供应商中，国外品牌或公司占有绝对性的市场，运行中的风电设 施涂料几乎全部为进口或国外品牌，也均在设计期限内，但防护效果也存在缺陷，在中国特殊环境条件下出现 了“水土不服” [12] 。国内的涂装企业对风电设备的腐蚀环境缺乏针对性研究，防腐蚀方案少，喷涂时所用进口涂料价格昂贵，成本高，而且实际操作中，由于工艺不合理造成较大浪费和污染。

此外，人们重视对塔架的防护，而忽略了对叶片的表面防护，叶片受风蚀、结冰等损坏平衡性时，会严重影响发电效率。

* 1. 风电设备防腐涂装行业的展望

近几年来，国家大力发展风电行业，因为它不仅绿色环保，而且是可再生资源。也正是我国的风电行业刚刚起步，各方面的技术都不成熟，涂装防护方面也面临较大挑战，但是我们应该深入的研究和了解风电设备的运行环境、腐蚀机理、防护方法等技术，从而相应的开发能够适应中国不同地域气候的防腐涂装工艺。而且随着国内对涂料的不断研发，我们毋须进口国外的品牌，从而使涂料价格更加合理，风电企业、涂装、涂料企业将共同获益。

参考文献：

1. 马凯．贯彻落实节约资源基本国策，加快建设节约型社会 [J] ．管理与财富， 2007, (3) : 6-9.
2. 刘卫东．我国风力发电设备现状和发展趋势 [J] ．现代制造技术与装备． 2008, (4) : 1-4.
3. 田兆会，李华明．风电装备腐蚀环境分析与涂料防护 [J] ．中国涂料． 2009, 24(11) : 6-12.
4. 江玉蓉，符杨，魏书荣，等．海上风电场变压器防腐研究 [J] ．变压器 , 2010,47(3): 40-43.
5. 刘新，赵荣坊．电力工业的防腐及特种涂料要求 [J]．功能型涂料与涂装专刊， 2008,11(7): 48-51.
6. 刘登良．为风电产业保驾护航与风电涂料的发展机遇 [J] ．中国涂料 , 2009,24(11): 1-5.
7. BSH no. 7005 "Design of Offshore Wind Turbines", Federal Maritime and Hydrographic Agency.
8. Det Norske Veritas standard DNV-OS-J101-2007 "Design of offshore wind turbine structures".
9. 樊森．拜耳材料科技：以生态友好和创新解决方案助推风电产业 [J] ．中国涂料 , 2009,24(3): 67.

[10] 梁敏，张志．变压器的防腐研究与实践 [J] ．变压器 , 2003,40(3): 21-24.

1. XING Zuo-xia, CHEN Lei, YAo Xing-jia ． Selection of 0ffshore wind turbine foundation[J] ． Energy Engineering, 2005(6):34-37.
2. 樊森．闻风而动，乘风前行——西北化工文立新总经理畅谈风电涂料的发展 [J] ．中国涂料 , 2009,24(11): 20-22

? 5 ?