

无溶剂聚脲涂料在风电叶片防护中的应用

杜愈拓, 姚改宁, 董天宁, 狄正文, 陈辉辉

(西北永新涂料有限公司, 兰州 730046)

摘要: 简要介绍了风电叶片材料的构成、腐蚀及防护的重要性, 并且针对异物腐蚀造成的叶片结构损坏进行分析, 将聚脲涂料应用在叶片防护领域, 并介绍了一种无溶剂聚脲涂料的制备方法及其性能检测。

关键词: 风电叶片; 叶片结构; 腐蚀; 聚脲涂料

中图分类号: TQ637 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-9548(2025)05-0024-05

Application of A Solvent-free Polyurea Coating for the Protection of Wind Turbine Blades

DU Yu-tuo, YAO Gai-ning, DONG Tian-ning, DI Zheng-wen, CHEN Hui-hui

(Northwest Yongxin Coating Co., Ltd., Lanzhou 730046, China)

Abstract: The composition of wind turbine blade materials, corrosion and the importance of protection are briefly introduced, the structural damage to the blade caused by foreign body corrosion is analysed, and the application of polyurea coatings in the field of blade protection is introduced to present the preparation method and performance testing of a solvent-free polyurea coating.

Key words: wind turbine blade; blade structure; corrosion; polyurea coating

0 引言

由于人口的持续增长和工业化的完善, 对电子、电气设备的依赖日益增加, 全球的能源需求不断上升, 日益增长的全球能源需求和有限的化石燃料资源及环境污染等问题, 使得可再生能源的扩张成为满足需求的必要条件, 而水、风、太阳能是可再生能源的三大来源。风力发电机是一种将风的动能转化为机械能的机器, 然后通过发电机把机械能转换成电能。风力发电机的性能取决于风力的强度、叶片的合理设计以及叶片结构的耐久性, 因此在设计阶段注重叶片结构的耐久性是尤为重要的。如果叶片材料的抗腐蚀性能差, 将导致叶片运行年限达不到设计要求, 并且有可能破坏叶片结构的完整性。

收稿日期: 2024-08-13

基金项目: 甘肃省重点研发计划-工业类项目 22YF7GA049 资助。

作者简介: 杜愈拓(1993—), 男, 本科, 工程师, 主要从事风电涂料的技术研发工作。E-mail: 654941527@qq.com。

因此, 开发用于保护叶片的抗腐蚀涂层非常重要, 这既能降低平准化度电成本, 又能保持叶片结构的完整性, 避免质量失衡。本文通过对叶片材料的构成及腐蚀损害重要性进行研究, 制备无溶剂聚脲涂料并在叶片防腐中应用, 所制备的无溶剂聚脲涂料具有高固含、高性能等优点, 可以有效解决风电叶片防腐中的问题, 具有重要的意义。

1 叶片腐蚀与防护

1.1 叶片的腐蚀

研究发现, 叶片结构的失效过程由 4 个阶段组成: 上部核心破损、下部核心破损、前缘核心破损和后期腐蚀破坏。风力发电机的大部分结构损坏都发生在涡轮机的叶片和塔架上。据报道, 风机总成本的 15%~20% 用于叶片的制造和安装, 而叶片维修是风机维护中最昂贵、最耗时的过程。目前, 风机制造商通常使用高弹性、机械性和耐磨性能优良的涂料应用于叶片的防腐工作, 高弹性和耐磨性优异的材料, 在撞击时可作为能量吸收器, 由于高弹性而具有形状记忆, 这些涂层可保护叶片基材在运行中免受异物的撞击。

风电叶片主要受两种空气动力的作用,即升力和阻力,叶片类属悬臂梁,长度可达100 m。其中叶片的主梁仿生了树叶的主脉结构,能够以最小的质量实现最大的强度和刚度。因此,叶片的质量是选择叶片材料的重要因素之一。

叶片的不同部分会承受压缩载荷、拉伸载荷或压缩和拉伸的组合载荷,在选择材料时,应确保叶片在运行期间的各种载荷下都能保持确定的形状,所以叶片材料必须具有足够的强度以抵抗极端载荷,具有足够的刚度以避免弯曲,并防止在极端载荷下与塔架发生碰撞,此外,叶片材料还必须满足疲劳载荷下维持涡轮机的设计寿命(20~30年)。

纤维增强聚合物复合材料通常用于制造风力发电机的叶片和机舱,而发电机和塔架则由金属制造,因为它们具有满足以上要求的所有特性。目前,叶片结构中使用最多的是玻璃纤维增强聚合物和碳纤维增强聚合物复合材料。玻璃纤维具有较好的比强度、较低的比刚度且价格低廉,而碳纤维具有较高的比强度,刚度约为玻璃纤维增强聚合物的5倍,但价格较高。使用碳纤维增强聚合物可减少叶片尖端的偏转,还能让制造商制造更长的叶片,但成本要高得多。叶片材料的未来发展趋势是转子直径不断增大将导致更高的叶尖速度,在考虑运行过程中受异物撞击的影响时,叶尖速度是造成腐蚀破坏的关键因素,而叶片的腐蚀会引起湍流,导致升力下降,阻力增加,发电效率降低。研究表明,根据叶片前缘的腐蚀程度,阻力可增加6%~500%;阻力每增加80%将使风力发电机组的年发电量降低5%,因此腐蚀过度会损坏叶片结构,导致叶片完全失效。对于叶片较大、叶尖速度较高的海上风机来说,叶片防腐比陆上风机更为重要。

1.2 叶片涂层现状的调研分析

截至2023年底,全国累计并网风电装机超4.41亿kW,在役风电机组数量高达18万台,随着风电装机容量与运行年限的不断增长,我国风电市场将持续保持高速发展态势。但是,风电机组长期处在恶劣环境下工作,需要经受不同环境地域的考验,其自身材料不足以防御风、雪、雨等恶劣天气的侵蚀和磨蚀。因此,恶劣的环境条件对于风电机组涂料有更高的性能要求。

通过走访不同风场,调研在役叶片涂层防腐蚀现状,不同风场、不同运行年限的叶片涂层均有不同程度的破损,腐蚀的具体表现如下:

1) 涂层剥落。叶片前缘腐蚀现象最先发生在距叶尖10~15 m处,白色耐磨涂层出现点状剥落,随后逐渐扩大至涂层全部脱落,基体出现腐蚀。

2) 表面磨损。叶片叶尖速度可达70 m/s以上,风

沙和雨水的冲蚀作用导致涂层磨损,降低叶片的气动性能。

3) 盐雾侵蚀。在沿海地区,盐雾中的氯离子会与金属发生化学反应,生成强酸性物质,破坏涂层和金属基体。

同时,不同区域叶片涂层的腐蚀情况如下:

1) “三北”地区(东北、西北、华北)。这些地区风沙频繁,叶片涂层在运行3年后,涂层基本被磨蚀严重,甚至玻璃钢基材被破坏。特别是在风沙严重地区,叶片迎风面的涂层磨损更为明显,导致叶片表面出现砂眼和剥落。

2) 西南、东南沿海地区。沿海风电场叶片主要受盐雾侵蚀和湿热环境影响,运行1~2年后,叶片表面因静电吸附灰尘等,形成黑色条状物,同时后缘在盐雾作用下被风化。同时,冬季低温情况下,叶片容易结冰,影响运行及安全。

1.3 叶片涂层防护体系的研究

国内风机叶片生产厂家原来普遍仅采用胶衣来保护玻璃钢叶片,但是胶衣的抗风沙性能很差,且运输过程中抗刮擦能力低,因此近年来叶片生产商已广泛应用涂层体系保护叶片。目前常见的风机叶片涂层体系包括:溶剂型环氧厚浆底漆+聚氨酯面漆;溶剂型聚氨酯底漆+面漆;单道聚天门冬氨酸体系;水性聚氨酯体系等。其中,溶剂型聚氨酯底漆+面漆是目前应用最普遍、技术最成熟的风机叶片涂层体系,其性能优异,同时价格适中。脂肪族丙烯酸聚氨酯涂料体系的涂膜具有较好的耐老化性能,但涂膜硬度高、刚性强,经风沙撞击后容易损伤脱落,对底材失去保护作用,所以应选择具有一定弹性的聚酯改性丙烯酸树脂,弹性涂膜受到沙粒的冲击后,漆膜受力形变,冲击力消失后,漆膜又恢复,兼有耐老化和抗风沙侵蚀性能。此外,改性溶剂型和水性丙烯酸树脂面漆、氟碳树脂面漆等产品近年来在风机叶片涂料领域也有应用。

国外涂料品牌基本以溶剂型为主,而这些产品的VOC含量高达40%~50%,在制造过程或施工应用中均使用有机溶剂,施工过程中释放出来的挥发性有机物(VOC)总量很大,对人类生态环境构成了严重威胁。另一方面,国外风电叶片涂料产品可适应欧洲优良的大气环境,但在中国风沙很大的风场环境就不能有效抵抗风沙的冲击和磨损,只能作为一种装饰漆,在沙尘暴冲击区域耐久性差,使用期很短,难以满足我国风电装备发展的实际需要。

因此叶片涂料除了要具有比普通涂层更好的附着力和装饰性以外,还须具备超强的耐候性、超强的耐磨性、较好的弹性、优异的耐高低温性等。针对以上特

性,西北永新新能源研究中心采用“无溶剂聚酯腻子+无溶剂聚天门冬氨酸酯胶衣+水性丙烯酸聚氨酯面漆”配套作为环保型风电叶片的防护涂层体系,其中无溶剂聚酯腻子能够有效填充叶片表面的不平整部位,提供良好的平整度,为后续涂层的施工提供更好的基底;无溶剂聚天门冬氨酸酯胶衣具有高固体含量和低黏度的特点,施工方便,可实现厚膜一次性施工,减少施工时间和劳动力成本;水性丙烯酸聚氨酯面漆具有优异的耐候性及保光保色性能和良好的耐磨性及防结冰特性,能够有效减少冰层附着,降低叶片因结冰导致的运行阻力和损坏风险。本文将着重介绍无溶剂聚天门冬氨酸酯涂料在风电叶片中的应用。

2 试验部分

叶片胶衣在整个叶片涂层配套体系中主要起到增加涂层厚度,提升防腐年限,给予涂层足够的弹性。适应风机叶片在运行过程中发生的形变以及提高抵御风沙等侵蚀的能力,在选择材料时,应确保叶片在运行期间的各种载荷下都能保持确定的形状,所以叶片材料必须具有足够的强度以抵抗极端载荷,具有足够的刚度以避免弯曲,并防止在极端载荷下与塔架发生碰撞,因此要求叶片胶衣本身具备一定的伸长模量,防止漆膜开裂、脱落、风沙侵蚀等。所以本文采用弹性优异的聚天门冬氨酸酯体系,在减少涂层道数、提高效率的同时满足叶片形变带来的损伤。

聚脲是由异氰酸酯与氨基化合物反应获得的一种弹性材料,聚脲材料家族目前有3个分支,分别为芳香族聚脲、常规脂肪族聚脲和聚天门冬氨酸酯聚脲。

聚天门冬氨酸酯是继芳香族聚脲和常规脂肪族聚脲后出现的一种低活性、高性能脂肪族聚脲,具有凝胶时间可控、高耐候耐水耐化学介质腐蚀、与基材附着力强等优点,是一种新型无溶剂、高反应性的绿色喷涂技术,不仅能满足叶片涂层对弹性的要求,又符合环保要求,本文以聚天门冬氨酸酯聚脲为主要成膜物进行叶片防护涂料的制备。

2.1 原材料与仪器设备

原材料:聚天门冬氨酸酯树脂,科思创聚合物(中国)有限公司;异氰酸酯固化剂,巴斯夫新材料有限公司;分子筛,上海久宙化工有限公司;二氧化钛(金红石型),上海颜钛实业有限公司;流变助剂,雷福斯;分散剂、消泡剂,德国毕克公司;活性稀释剂,市售工业品。

仪器设备:高速分散机,广州标格达有限公司;斯托默黏度计,上海现代环境;混合震荡机,郑州三华科技实业有限公司;万能试验机,济南时代仪器有限公司;盐雾试验箱,四川思创倍科科技有限公司;马弗炉,

西尼特科技有限公司。

2.2 制备工艺

无溶剂聚天门冬氨酸酯涂料的基础配方见表1。

表1 聚天门冬氨酸酯涂料的基础配方

组分	原料名称	质量分数/%
A	聚天门冬氨酸酯树脂 1 [#]	8~12
	聚天门冬氨酸酯树脂 2 [#]	13~17
	聚天门冬氨酸酯树脂 3 [#]	28~32
	润湿分散剂	0.5~0.8
	分子筛	1~3
	消泡剂	0.1~0.3
	钛白粉	15~20
	流平剂	0.1~0.3
	流变助剂	0.1~0.5
	活性稀释剂	1~2
B	HDI 三聚体 1 [#]	12~18
	HDI 三聚体 2 [#]	12~18

A组分制备工艺:按配方量依次加入聚天门冬氨酸酯树脂 1[#]、聚天门冬氨酸酯树脂 2[#]、聚天门冬氨酸酯树脂 3[#]和助剂搅拌均匀,然后加入分子筛和钛白粉,搅拌均匀后进行研磨,细度达到要求后加入活性稀释剂调整黏度。

2.3 检测样板制备

性能检测样板的制备均按照相关行业标准的要求进行,样板制备完成后,养护7d再进行性能检测,养护环境温度为(23±2)℃,相对湿度为(55±5)%。

2.3.1 马口铁基材性能检测

附着力(划格法/画圈法)、柔韧性、耐冲击、硬度、干燥性能样板漆膜采用刷涂法制备,基材为标准马口铁板,干膜厚度均为(23±2)μm。

2.3.2 玻璃钢基材性能检测

拉开法附着力、耐酸碱盐性能、耐纯水、耐中性盐雾性能样板漆膜采用刷涂法制备,基材为玻璃钢板,干膜厚度均为(120±10)μm。

2.3.3 其他类型基材性能检测

耐磨性样板漆膜制备采用圆形铝板制备,干膜厚度为(120±10)μm。

拉伸强度、断裂伸长率均依据GB/T 528—2008进行试验样品的制备,干膜厚度均为(120±10)μm。

3 结果与讨论

3.1 聚天门冬氨酸酯树脂的选择

本文所制备的无溶剂聚脲涂料选用高固低黏的聚天门冬氨酸酯树脂作为主要的成膜物质,需要具备合适的混合适用期及漆膜干燥时间,A、B组分混合后胶

化过快会加大施工的困难度,而聚天门冬氨酸酯结构中的取代基 X 是控制其与异氰酸酯反应速度及胶化时间的重要因素,分子结构如图 1 所示。

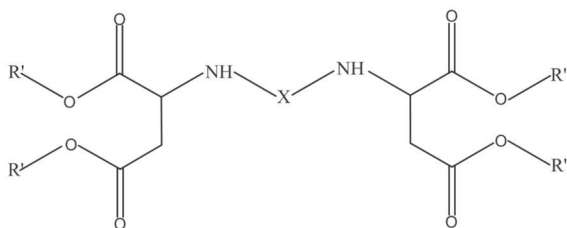


图 1 聚天门冬氨酸酯树脂分子结构

本文采用 3 种不同结构取代基 X 的聚天门冬氨酸酯树脂,通过单独或混拼使用(混合比例见表 2),筛选出具备最佳施工性能及漆膜外观的树脂比例。

表 2 树脂混合比例

试验方案	聚天门冬氨酸酯树脂	选用比例
A	1 [#]	100%
B	2 [#]	100%
C	3 [#]	100%
D	1 [#] :2 [#]	1:1
E	1 [#] :3 [#]	1:1
F	2 [#] :3 [#]	1:1
G	1 [#] :2 [#] :3 [#]	1:1:1
H	1 [#] :2 [#] :3 [#]	1:1.5:2
I	1 [#] :2 [#] :3 [#]	1:1.5:3
J	1 [#] :2 [#] :3 [#]	1:2:3

通过对比 3 类树脂不同混合比例的胶化时间、施工性能、干燥时间,筛选出最佳混合比例,不同比例树脂基本性能检测结果见表 3。

表 3 不同比例树脂基本性能检测结果

试验方案	胶化/min	表干/h	实干/h	混合黏度	施工性	漆膜软硬
A	10	2	4	初始黏度大	不易拉刷	较硬
B	70	5	12	初始黏度稍大	刷涂性稍好	稍软
C	40	4	8	初始黏度适中	刷涂性好	硬
D	40	4	9	初始黏度较大	刷涂性稍好	较硬
E	30	3	6.5	初始黏度稍大	刷涂性稍好	硬
F	50	4.5	9	初始黏度适中	刷涂性好	较软
G	40	4	8.5	初始黏度适中	刷涂性好	硬
H	50	4.5	9	初始黏度适中	刷涂性好	较软
I	55	4	8	初始黏度适中	刷涂性好	硬
J	60	4.5	10	初始黏度适中	刷涂性好	较硬

通过筛选,当聚天门冬氨酸酯树脂 1[#]:聚天门冬氨酸酯树脂 2[#]:聚天门冬氨酸酯树脂 3[#]混合比例为 1:1.5:3 时,试验样品具有适当的适用期、表干时间、实干时间及施工性能。

3.2 固化剂的选择

无溶剂聚脲涂料由于反应速度快、胶化时间短,因此在成膜过程中由于内聚力过大可能会导致对基材的润湿不足,会出现起泡、针孔、附着力差等漆膜弊病,所以选择 HDI 作为试验的固化剂,其具备黏度低、固含量高、稳定好等特点。本试验选择两种 HDI 混拼使用作为无溶剂聚脲涂料的固化剂,混拼比例为 HDI1[#]:HDI 2[#]=1:1,施工性能检测结果见表 4。

表 4 施工性能检测结果

检测项目	检测结果
胶化时间/min	45
表干时间/h	2.5~3.0
实干时间/h	5
漆膜软硬程度	有弹性
施工性	刷涂性较好

3.3 助剂的选择

3.3.1 消泡剂

聚脲涂料固含量高,反应速度快,在涂装过程中会出现一些漆膜弊病,其中最典型的就刷涂或辊涂过程中会产生气泡,位于漆膜表面的气泡会影响漆膜的外观;位于漆膜内的气泡使漆膜不致密,会导致其防腐性能下降。本试验选择有机硅类消泡剂,能够有效解决施工过程中漆膜出现表面气泡和暗泡的问题。

3.3.2 流平剂

为了提升无溶剂聚脲体系涂层的流平性,本试验选择了氟改性聚丙烯酸酯共聚物类的流平剂,能够针对无溶剂涂料体系快速地降低其表面张力,可为其提供优异的流平性及重涂性,增强底材润湿及防止出现缩孔、针孔等漆膜弊病。

3.3.3 胶化延缓物(分子筛)

无溶剂体系涂料的固含量高,反应快,为了使无溶剂聚脲具备合适的适用期及施工性,本试验通过筛选,考察乙酰丙酮、活性稀释剂、分子筛对无溶剂聚脲体系适用期、干燥性能的影响。从试验数据可以得出,加入乙酰丙酮对延长胶化时间(适用期)作用不大;加入活性稀释剂有一定效果,但胶化仍过快,不建议采用;加入分子筛后,胶化时间(适用期)、干燥均比较理想,将采用其为胶化延缓物,具体见表 5。在实际施工中,配方原材料、环境、设备中存在的水分会加速涂料的固化,

而对施工造成很大的不便,而分子筛可以吸收配方原材料中携带的水分,有效增加产品的适用期,能够满足施工要求。

表5 胶化延缓物的筛选

项目	胶化时间/min	干燥时间
原配方	5	30 min 表干,1 h 实干
1%乙酰丙酮	6	30 min 表干,1 h 实干
10% 1214	10	40~50 min 表干,3 h 实干
30% 1214	17	2.0~2.5 h 表干,7~8 h 实干
5% 3A 分子筛	20~25	3~4 h 表干,7~8 h 实干

3.4 常规性能及防腐性能检测

依据叶片涂料的行业标准,对本试验所制备的无溶剂聚脲涂料进行全项性能检测,具体见表6。

表6 无溶剂聚脲涂料进行全项性能检测

测试项目	检测方法	检测结果
漆组分细度/ μm	GB/T 1724	35
漆组分密度/ $(\text{g}\cdot\text{mL}^{-1})$	GB/T 6750	1.24
固化剂密度/ $(\text{g}\cdot\text{mL}^{-1})$	GB/T 6750	1.16
混合后密度/ $(\text{g}\cdot\text{mL}^{-1})$	GB/T 6750	1.21
漆组分稠度/cm	GB/T 1749	>16
漆组分固含/%	GB/T 1725	97.50
固化剂固含/%	GB/T 1725	99.88
混合后固含/%	GB/T 1725	98.30
流挂/ μm	GB/T 9264	250
遮盖力/ $(\text{g}\cdot\text{mL}^{-1})$	GB/T 1726	72
NCO(固化剂)/%	GB/T 18446	24.33
表干时间(25 $^{\circ}\text{C}$)/h	GB/T 1728	3
实干时间(25 $^{\circ}\text{C}$)/h	GB/T 1728	8
耐冲击性/cm	GB/T 1732	50
柔韧性/mm	GB/T 1731	1
光泽/%	GB/T 1743	83
摆杆硬度	GB/T 1730	0.22
断裂伸长率(23 $^{\circ}\text{C}$,200 mm/min)/%	GB/T 528	46.6
拉伸强度(23 $^{\circ}\text{C}$,200 mm/min)/MPa	GB/T 528	27.8
耐磨性(1 000 g/1 000 r)/mg	GB/T 1768	47.6
附着力(拉开法)/MPa	GB/T 5210	13.81
耐酸性(5% H_2SO_4)	GB/T 9274	90 d 完好
耐碱性(5% NaOH)	GB/T 9274	90 d 完好
耐盐水性(3% NaCl)	GB/T 9274	90 d 完好
耐纯水性	GB/T 9274	90 d 完好
耐中性盐雾性	GB/T 1771	90 d 完好

4 结语

目前,用于保护风电叶片免受环境影响的防护系

统有多种类型,例如叶片保护薄膜、涂层防护系统、溶剂-凝胶衍生涂层技术等,而使用涂料进行叶片的防护是最简便的方式。因此,本文研制的无溶剂聚脲叶片涂料经久耐用,能够有效保护叶片受环境腐蚀的破坏,具有广阔的前景。

现在以及未来叶片防护涂料必须具备以下特性:1)薄层涂层。对叶片质量的影响微乎其微,不会影响发电机的效率;2)多功能特性涂层。耐腐蚀、耐磨损、防结冰,同时具有柔韧性;3)绿色环保。整个涂层配套体系具备低VOC或零VOC特性;4)优秀的机械性能。具备高拉伸强度和柔韧性,与基材有良好的附着力,并且化学性质稳定。

参考文献:

- [1] 胡兴兰,刘会成,王新征.无溶剂聚脲涂料的设计与研究[J].涂料工业,2015,45(10):21-24
- [2] 张朋,杨孝庆.风电叶片面漆的风场暴露环境和应用损伤分析[J].涂料工业,2023,53(5):48-52.
- [3] 唐荆,陈啸,杨科.风电叶片全寿命周期性能研究[J].风能,2017(1):58-61.
- [4] 蓝伟生,颜永先,强家宽,等.超高固含聚天冬氨酸酯聚脲面漆的研制及其在跨海大桥中的应用[J].电镀与涂饰,2022,41(22):1579-1585. ◆

(上接第23页)种加固方式的对比,增加立柱与加固横梁会大幅控制塔的变形,最大应力值也会大大降低。因此,为满足项目需求,超高出口塔在增加壁厚的基础上,通过增加立柱与横梁来提高塔的整体稳定性能。

表3 超高出口塔加固方式对比

加固方式	最大形变量/mm	形变量减小/%	最大等效应力值/MPa	模型安全系数	安全系数增大/%
常规结构	18.8		199.8	1.2	
增加壁厚	16.7	11	187.9	1.3	8
增加立柱	13.5	19	151.3	1.6	23
增加横梁	9.9	27	99.0	2.4	50

3 结语

本文基于项目需求,在常规高度出口塔的基础上进行结构改进,提出了3种加固方式,进行ANSYS仿真,通过仿真结果与刚度和强度要求对比,给出了一种超高摆杆出口塔优化结构。在后续项目中,为避免塔的高度过高,可以在前期设计中考虑塔的分层结构,防止因塔超高导致挠度和应力过大。本文的分析和讨论,对于提高车身质量及涂装效果是一次有益的探讨。◆