

陆上风电机组塔筒防腐维护与延寿技术研究

贾益军 倪 郡

新化大熊山风力发电有限公司 湖南 娄底 417604

【摘 要】：陆上风电塔筒是风电机组的核心承重和支撑结构，长时间处于户外复杂的自然环境之中，受到大气腐蚀、温变疲劳、应力耦合等多种因素的影响，很容易造成涂层老化、钢材锈蚀、结构损伤等问题，直接影响到机组的运行安全和服役寿命。本文根据陆上风电各个场区的环境特点，对塔筒腐蚀失效机理进行系统的分析，整理出目前防腐防护技术的应用情况和不足，有针对性地提出常态化防腐维护体系、精细化修复工艺以及结构延寿优化技术方案。结合工程实测数据验证技术的可行性，可以给陆上风电机组塔筒长效防护、故障防控、寿命延长和降本增效提供技术上的参考，促进风电设备全生命周期高效运维。

【关键词】：陆上风电机组；塔筒；防腐维护；腐蚀机理；延寿技术

DOI:10.12417/2705-0998.26.11.052

引言

我国陆上风电场大多分布在山地、丘陵、旷野等地，各个区域的湿度、温差、大气介质存在较大的差别，塔筒长时间处在干湿交替、紫外线照射、风沙冲刷和机械振动的环境下，防腐涂层容易出现破损脱落的情况，基材钢材会持续锈蚀，从而造成壁厚变薄、应力增大、结构疲劳等问题，严重时还会引起塔筒变形、开裂，导致机组停机。目前陆上风电塔筒运维存在重故障抢修、轻日常防护，重表层修复、轻结构延寿的现象，传统防腐维护工艺针对性不够、维护周期固定、修复质量良莠不齐，造成塔筒腐蚀问题不断出现，运维成本逐年增加。因此，本文从陆上塔筒腐蚀失效规律入手，对防腐施工及维护工艺进行改进，创建起全生命周期防腐延寿技术体系，从而改善塔筒的耐蚀性及结构稳定情况，延长设备的服役年限，削减风电运维综合成本。

1 陆上风电塔筒腐蚀类型与失效机理

选择湖南某山地风场 5 台 XE 型风机塔筒为试验对象，陆上风电塔筒材质主要为 Q345E 低合金高强度钢，整体为分段式钢结构，用法兰螺栓连接成形，内外表面涂有防腐涂层。根据陆上风场环境特点，塔筒腐蚀主要是大气腐蚀，同时还伴随着应力腐蚀、疲劳腐蚀、局部缝隙腐蚀等多种复合型腐蚀损伤，不同腐蚀类型失效特征和演化规律也存在很大差别。

1.1 主要腐蚀类型及特征

根据陆上风电运维现场检测数据，统计各个区域塔筒腐蚀损伤占比，具体见下表。

表 1 主要腐蚀类型及特征

腐蚀类型	高发部位	损伤占比	核心损伤特征
大气均匀腐蚀	塔筒外表面整体区域	42.3%	涂层粉化、褪色、整体薄蚀，钢材均匀锈蚀
缝隙腐蚀	法兰连接缝、螺栓贴合面	28.6%	缝隙积水积尘，局部点状锈蚀，腐蚀速率快

凝露腐蚀	塔筒内壁、平台区域	16.8%	内壁潮湿结露，涂层鼓包脱落，大面积锈蚀
应力疲劳腐蚀	塔筒焊缝、变截面区域	12.3%	应力集中叠加腐蚀，出现微裂纹、局部锈蚀坑

大气均匀腐蚀是陆上塔筒最常见的腐蚀形式，长期紫外线照射会使涂层树脂老化，破坏涂层的致密性，空气中的氧气、水汽慢慢渗透到基材表面，造成钢材氧化锈蚀。缝隙腐蚀主要发生在塔筒法兰、螺栓连接等装配缝隙处，缝隙内部容易积水、灰尘、湿气，形成密闭潮湿的环境，氧气浓度差异引起电化学腐蚀，隐蔽性强，常规巡检很难发现，腐蚀速率比表层均匀腐蚀高得多。塔筒内壁凝露腐蚀属于陆上风场高发隐患，塔筒内部为密闭空间，昼夜温差变化会造成内部空气水汽凝结，形成持续潮湿环境，梅雨季节、低温天气，凝露现象更加严重，直接导致内壁涂层鼓包、开裂、脱落，引起基材锈蚀。应力疲劳腐蚀多发生在塔筒焊缝、变截面等应力集中处，风机运行时的持续振动造成此处存在交变应力，再加上腐蚀介质的作用，使得微裂纹迅速发展并扩大，从而引发腐蚀疲劳复合损伤，对结构的安全性构成严重威胁。



图 1 腐蚀情况

1.2 腐蚀失效核心影响因素

陆上风电塔筒腐蚀失效是由环境、工艺、结构、运维等各方面因素共同作用所造成的。环境因素上，山地风场湿度大、昼夜温差大、旷野风场风沙冲刷严重、城郊和工矿周边风场大气中含微量腐蚀性介质，都会加快涂层的老化和钢材的腐蚀。施工工艺因素上塔筒出厂及现场涂装时，表面除锈不彻底、涂层厚度不均、涂装环境温湿度不达标、多层涂层配比不合理等都会造成涂层附着力差、防护性能低，缩短防腐年限。结构及运行因素上，塔筒分段连接处的缝隙结构、焊缝残余应力、风机长时间运转造成的交变载荷都会不断破坏涂层的完整性，加重局部腐蚀损伤。运维因素上，传统的运维模式缺少常态化的检测，腐蚀隐患的发现较晚，修复工艺粗糙，局部补涂的质量不好，造成腐蚀问题反复蔓延，逐渐演变为结构性损伤。

2 现有塔筒防腐技术应用现状及短板

2.1 主流防腐技术体系

目前陆上风电塔筒的通用防腐体系是多层涂装工艺，基材表面经过喷砂除锈处理之后，依次涂刷底漆、中间漆、面漆，从而形成复合防护涂层。底漆一般使用环氧富锌底漆，依靠锌粉的阴极保护作用来达到基材防锈的目的；中间漆选用环氧云铁中间漆，提高涂层厚度和致密性，阻止腐蚀介质渗透；面漆选用聚氨酯面漆，具有良好的耐候性、抗紫外线、抗老化性能，适合户外复杂环境。塔筒内壁加设除湿装置、密封胶封堵等辅助防护措施，法兰缝隙用密封填充工艺来减小介质的渗入。

2.2 现有技术应用短板

根据多年的现场运维经验可知，目前的防腐体系在服役时间长之后会出现很多不足。一是涂装适配性不够，通用防腐涂层没有区分不同的风场环境，高湿山地风场常规涂层耐湿性差，风沙大地区面漆抗冲刷能力弱，造成涂层提前老化失效。二是施工质量控制不到位，现场补涂修复大多采用简易人工涂刷的方式，表面处理不达标，涂层厚度、均匀度无法保证，修复区域与原涂层的兼容性差，容易出现起皮、脱落等问题。三是防护体系单一，主要依靠涂层防护，忽略了结构应力、凝露、振动等间接腐蚀因素，内壁凝露、缝隙积水等问题没有得到根治，隐性腐蚀不断产生。第四是运维模式落后，固定周期维护模式缺少针对性，轻微腐蚀隐患没有及时处理，严重腐蚀之后的修复费用高，缺少延寿改良的技术手段，塔筒的实际服役寿命大多低于设计年限。

3 塔筒精细化防腐维护技术优化

3.1 基材表面预处理工艺优化

基材表面处理质量的好坏直接影响到涂层的附着力和防腐耐久性，是防腐施工的重要环节。抛弃传统的简单打磨工艺，用机械喷砂除锈标准化工艺，使基材表面粗糙度保持在合适的范围内，把钢材表面的氧化皮、锈蚀、油污、灰尘等杂质彻底

清除干净，表面清洁度达到行业标准。对局部焊缝、边角、缝隙等死角进行手工打磨、高压吹扫辅助处理，保证没有杂质。

预处理后严格控制施工间隔，在基材表面没有返锈、没有潮湿的情况下及时进行涂装施工，防止二次污染。同时根据环境温度和湿度来调节施工参数，低温高湿天气停止露天涂装作业，防止出现涂层起泡、脱层等质量问题。

3.2 分层防腐涂层体系优化

根据各个场区的环境特点来设计三层涂装体系，对腐蚀环境进行精准匹配，优化后的涂层参数见下表。

表2 优化后的涂层参数

涂层类型	常规风场 涂层厚度	高湿山地 风场厚度	风沙旷野 风场厚度	核心优化特点
环氧富 锌底漆	80 μm	100 μm	80 μm	提升锌粉含量，强化 阴极保护效果
环氧云 铁中间 漆	120 μm	150 μm	130 μm	增加涂层致密性，阻 隔水汽渗透
聚氨酯 面漆	80 μm	80 μm	100 μm	增强抗风沙冲刷、抗 紫外线老化性能
总涂层 厚度	280 μm	330 μm	310 μm	适配不同环境腐蚀 强度

高湿山地风场主要提高底漆和中间漆的厚度，加强防水防渗的能力，抑制凝露腐蚀和电化学腐蚀；风沙旷野风场加大面漆涂层的厚度，提高表面耐磨、抗冲刷性能，减少风沙对涂层的磨损破坏。另外选择高兼容性涂料来保证多层涂层牢固、不松脱。内壁涂装加装防潮专用涂料，改善密闭空间耐凝露腐蚀性能，从根源上削减内壁锈蚀危险。

3.3 局部腐蚀隐患专项治理

对容易产生缝隙腐蚀、焊缝腐蚀、凝露腐蚀等局部问题的制定专门的治理工艺。法兰、螺栓连接缝隙清理干净后用耐候密封胶填充封堵，压实抹平，阻断水汽、灰尘进入缝隙，杜绝缝隙电化学腐蚀。塔筒焊缝、变截面等应力集中区的涂装，涂刷遍数应比常规增加，保证涂层均匀覆盖，对焊缝锈蚀、微裂纹要定期检测，及时修补。

塔筒内壁设置除湿防护系统，常态投放智能除湿设备调节内部湿度，保持塔筒内干燥；封堵塔筒底部、平台孔洞减少内外空气对流，降低凝露发生概率。对局部涂层破损、轻微锈蚀

的地方用局部打磨除锈、分层补涂的方式进行精细化修复，防止大面积整体涂刷，降低运维成本，保证修复区与原涂层无缝对接。

3.4 常态化防腐运维管控体系

建立差异化的、全过程的运维巡检制度，抛弃固定的时间段进行巡检维护的方式，按照风场环境的腐蚀程度、塔筒的服役年限来制订分层的巡检维护计划。新建塔筒前五年采用季度巡检的方式进行检查，主要对涂层完整性和密封封堵状态进行检查；服役五年以上的塔筒增加每月的专项检测，主要对焊缝、法兰、内壁等高危部位进行腐蚀情况检查，并且同步检测钢材壁厚和结构应力状态。

建立塔筒腐蚀运维台账，对每次巡检结果、修复工艺、维护时间进行记录，达到腐蚀隐患动态追踪的目的。根据雨季、高温、冬季等特殊时期提前进行专项防护检查，及时消除积水、密封老化、涂层脆化等隐患，做到腐蚀隐患早发现、早干预、早修复，防止小隐患变成结构性损伤。

4 塔筒结构延寿关键技术研究

4.1 结构应力优化延寿技术

塔筒疲劳损伤大多是由应力集中和交变载荷叠加腐蚀引起的，结构优化可以减小应力损伤。对塔筒焊缝、变截面、法兰连接处等应力集中区，采用平滑过渡设计，减小应力集中系数。对老旧塔筒焊缝残余应力用振动时效、局部打磨抛光的方法消除残余应力，减小交变载荷下裂纹产生的风险。

同时对风机的运行调控进行规范，优化机组的启停、变桨控制逻辑，减小极端工况下出现的剧烈振动和冲击载荷，降低塔筒交变应力幅值，减缓结构疲劳老化速度，达到结构长期稳定的目。

4.2 腐蚀损伤修复与强化技术

对塔筒轻微锈蚀、局部壁厚减薄、微小裂纹等早期损伤，用无损强化修复技术恢复结构性能。微小锈蚀坑打磨干净之后，用专用防腐修补材料填充找平，再分层涂装防护；对轻微壁厚减薄处采用碳纤维复合补强工艺，提高局部结构强度和刚度，弥补钢材腐蚀引起的性能下降。

该修复工艺不需要大面积拆除原有的结构，施工方便，对机组的运行影响小，修复后可以提高塔筒的抗腐蚀、抗疲劳性能，减缓结构的损伤发展，延长设备的使用寿命。与传统的补焊修复相比，碳纤维补强工艺没有焊接应力，安全性能更好，延寿效果更加稳定。

4.3 智能监测延寿辅助技术

在塔筒高危区设置腐蚀传感器、应力传感器、温湿度监测装置等轻量化智能监测设备，对塔筒腐蚀速率、结构应力、内部环境进行实时监测。对腐蚀发展数据分析、结构损伤发展情

况分析，可预见隐患，提前采取预防性维修，防止抢修。

依靠监测数据改进维护周期和修补计划，防止出现过度维护或者维修过晚的问题，准确把握防腐修补、结构加固的最佳时机，充分发挥防腐修补、结构加固的延寿作用，保证塔筒长时间的安全稳定运行。

4.4 工程应用效果分析

采用本文优化的防腐维护和延寿技术体系进行改造应用，运行监测一年后，对比传统运维工艺的应用效果，各项指标均有明显提高，具体对比数据见下表。

表 3 具体对比数据

检测指标	传统运维工艺	优化后运维工艺	优化提升效果
涂层附着力	3.2MPa	4.5MPa	提升 40.6%
年度腐蚀隐患发生率	18.6%	4.2%	降低 77.4%
塔筒局部应力集中系数	3.1	1.9	降低 38.7%
年度运维成本	1.82 万元/台	1.15 万元/台	降低 36.8%
预估剩余服役年限	12 年	18 年以上	寿命提升 50%以上

工程应用结果表明，改进后防腐涂装工艺明显改善了涂层防护性能，很好地抵抗了山地高湿环境的腐蚀破坏，专门治理隐患和应力优化技术完全消除缝隙腐蚀、应力疲劳损伤等常见问题，塔筒结构稳定性明显提高。常态化的主动运维模式可以减少故障性的维修次数，大大降低运维成本，而且可以有效地延长塔筒的使用寿命，具有较好的技术经济性和安全性，有广泛的推广价值。

5 结论

陆上风电机组塔筒腐蚀失效是环境腐蚀、施工工艺、结构应力、运维管理等各方面共同作用的结果。本文所提出的差异化分层涂装、局部隐患专项治理、常态化分级运维、结构应力优化、损伤补强修复一体化技术体系，可以很好地解决陆上塔筒各种腐蚀损伤问题，提高涂层防护耐久性 & 结构稳定性，大大降低运维成本，延长设备服役年限。经过工程实践的验证，该技术体系可以适应山地、旷野等各种陆上风电场环境，具有较好的实用性以及经济性。

参考文献:

- [1] 庞红雨,马乐.风电机组塔筒高耐久防腐涂层的研究进展与应用[J].当代化工研究,2026,(10)9-11.
- [2] 李继旭,孙传宗,田浩男,等.多腐蚀期龄浮式风电机组动态响应分析[J].太阳能学报,2024,45(9)475-482.
- [3] 王岳峰,黄虎,王晓东,等.海上风电机组除湿盐雾系统研究[J].机械工程与自动化,2024,(5)206-207+210.
- [4] 胡茵,胡鹏,杨少华,等.风电机组结构件常用防腐工艺的耐盐雾腐蚀性能研究[J].风能,2023,(4)78-81.
- [5] 刘涛,张克功,郝延,等.风电机组塔筒在线监测技术之研究[J].装备制造技术,2022,(11)211-214.