

浅谈延迟应力对风机塔筒的影响

王蕊 李远 陈文凯

国家电投集团中国电能成套设备有限公司技术支持部 北京 100000

【摘要】：风机塔筒作为风力发电机组的核心承载结构，长期服役于野外复杂环境，需承受风载荷、重力、振动等多类载荷作用。延迟应力作为一种随时间累积的隐性应力，会随塔筒服役周期逐渐显现，对结构安全性、力学性能及使用寿命产生显著影响。本文从延迟应力的产生机制入手，分析其作用于风机塔筒的核心原因，阐述延迟应力对塔筒结构的具体影响，并针对性提出材料优化、结构设计改进、制造工艺控制及运维监测等应对措施，为风机塔筒的长期安全服役提供理论参考。

【关键词】：风机塔筒；延迟应力；产生原因；结构影响；应对措施

DOI:10.12417/2811-0722.25.11.005

1 引言

随着风电产业向规模化、大型化发展，风机塔筒的高度与直径持续增加，其服役环境也呈现出高风速、强腐蚀、大温差的特点。作为连接机舱与基础的关键结构，塔筒需长期承受动态交变载荷与静态载荷的叠加作用。延迟应力区别于瞬时应力，其产生与材料特性、结构设计、服役环境的长期作用相关，不会在载荷施加初期立即引发明显损伤，却会随时间推移逐步累积，导致塔筒材料力学性能衰退、结构裂纹萌生，甚至引发突发性结构失效。因此，深入分析延迟应力对风机塔筒的影响原因，制定科学的应对措施，对保障风力发电机组的长期安全运行具有重要现实意义。

2 风机塔筒延迟应力的产生原因

2.1 材料特性与微观结构演变

风机塔筒多采用低合金高强度钢，这类材料的微观结构会随服役时间发生缓慢演变，进而诱发延迟应力。一方面，钢材中的合金元素（如碳、锰、铬）会随时间推移发生时效硬化，即原子在晶格内缓慢扩散并形成细小析出相，导致材料内部应力分布不均，形成局部应力集中；另一方面，塔筒制造过程中残留的位错缺陷，在长期载荷作用下会发生位错滑移与堆积，当滑移受阻时，便会在缺陷处累积延迟应力，且该过程会随服役时间延长持续加剧。

2.2 结构与制造残余应力释放

塔筒的结构设计与制造工艺缺陷，是延迟应力产生的重要诱因。其一，塔筒为分段焊接的圆筒形结构，焊接过程中局部高温加热与冷却会导致焊缝及热影响区产生焊接残余应力，这类应力在塔筒出厂时处于暂时稳定状态，但在长期服役的动态载荷作用下，会逐步释放并重新分布，形成随时间变化的延迟应力；其二，部分塔筒结构设计存在刚度突变问题，此类区域在载荷传递过程中易出现应力集中，且集中应力不会随载荷稳定而消失，反而会随载荷循环次数增加逐步累积，形成延迟应力。

2.3 服役环境与载荷的长期作用

野外复杂环境与长期载荷的叠加，会加速延迟应力的产生与发展。从环境角度看，塔筒服役区域的温度交替变化会导致材料热胀冷缩，当结构约束限制热变形时，便会在材料内部产生热应力延迟效应，且昼夜温差、季节交替会使该效应反复叠加；同时，沿海或高湿度区域的腐蚀介质会侵蚀钢材表面，破坏材料表层应力平衡，诱发表层与内部的应力差，形成延迟腐蚀应力。从载荷角度看，风机塔筒承受的风载荷脉动叶片旋转振动载荷均为长期交变载荷，这类载荷会使材料处于疲劳应力状态，应力循环过程中，材料内部的微小损伤会逐步扩展，进而导致局部应力重新分布，形成延迟疲劳应力。

3 延迟应力对风机塔筒的核心影响

3.1 破坏结构完整性

延迟应力对塔筒结构完整性的破坏并非突发性，而是遵循微观缺陷萌生→局部损伤扩展→宏观结构失效的渐进路径，其核心作用点集中于塔筒的应力敏感区域，具体可分为两个关键阶段。

3.1.1 微观裂纹萌生阶段

延迟应力的长期累积会打破塔筒材料内部的应力平衡状态，在原子尺度与微观结构层面诱发初始缺陷。从材料微观机制来看，一方面，塔筒钢材（如 Q345 钢）内部的位错在延迟应力作用下会发生持续性滑移。当应力水平低于材料屈服强度时，位错虽无法实现大范围运动，但会在晶界、析出相等障碍处缓慢堆积，形成位错塞积群；当塞积应力超过晶界结合力时，会在晶界处产生微裂纹，这类微裂纹隐藏于材料内部，常规目视检测或普通超声检测难以识别。另一方面，对于焊接区域，延迟应力会与焊接残余应力发生叠加效应。塔筒焊接过程中形成的残余应力在服役初期处于暂时稳定状态，但延迟应力的持续输入会打破这种平衡，使残余应力向焊缝熔合线、热影响区转移，导致该区域的晶格畸变加剧，最终在熔合线附近萌生沿晶微裂纹。这类裂纹因与焊缝组织方向一致，初期仅表现为材料局部塑性变形能力下降，不易被察觉。

3.1.2 宏观损伤扩展阶段

当微观裂纹完成萌生后,延迟应力会通过两种机制加速损伤向宏观尺度扩展,最终引发结构完整性破坏。延迟应力会使裂纹尖端形成应力集中场,根据断裂力学理论,裂纹尖端的应力集中系数会随延迟应力的累积逐步增大,导致裂纹尖端的实际应力远超材料的局部抗拉强度;同时延迟应力的时间依赖性会使裂纹尖端的材料处于持续受力状态,无法通过弹性回复释放应力,进而驱动裂纹沿材料薄弱方向缓慢扩展,扩展速率通常为 $0.1\text{--}1\text{ }\mu\text{m}/\text{年}$,当裂纹长度超过临界值时,会出现裂纹失稳扩展。延迟应力会使裂纹尖端的材料表面保护膜发生破裂,暴露的新鲜金属表面与腐蚀介质发生电化学反应,形成阳极溶解区;同时,延迟应力会加速腐蚀介质向裂纹内部渗透,使裂纹内部形成闭塞腐蚀电池,导致裂纹尖端的pH值降至3-4,进一步加速金属溶解,最终使裂纹扩展速率提升3-5倍,甚至引发塔筒局部穿孔。

3.2 衰退材料力学性能

延迟应力对塔筒材料力学性能的影响,本质是应力诱导的材料微观结构演变。通过改变钢材的晶体结构、缺陷状态,导致其核心力学指标全面劣化,最终降低塔筒的承载能力,具体可细化为三个维度的性能衰退。

3.2.1 强度指标衰退

对于低合金高强度钢而言,其强度依赖于固溶强化与析出强化。延迟应力的长期作用会使这两种强化机制逐步弱化。一方面,持续的应力输入会加速原子扩散,使固溶态的合金元素向晶界迁移,导致晶内固溶度降低,固溶强化效果减弱;另一方面,析出相会在延迟应力作用下发生粗化。细小的析出相颗粒会缓慢聚集形成大尺寸颗粒,降低对滑移位错的阻碍作用,析出强化效果衰退。这种劣化直接表现为,塔筒钢材的屈服强度每年下降约1%-2%,抗拉强度同步下降;更关键的是,材料的弹性极限降低。原本可承受的弹性应力范围缩小,在同等级载荷作用下,材料更易进入塑性阶段,导致塔筒的刚性承载能力下降。

3.2.2 韧性指标劣化

延迟应力会显著降低塔筒钢材的韧性,使材料从塑性材料向脆性材料转变,增加突发载荷下的断裂风险。从微观机制来看,一是延迟应力会导致材料内部的韧性储备消耗,钢材的韧性依赖于晶界的塑性变形能力与位错的运动协调性,延迟应力引发的位错堆积会使晶界处于高应力状态,当受到冲击载荷时,晶界无法通过塑性变形吸收能量,反而会成为断裂源,导致材料的冲击功大幅下降。二是延迟应力会加剧氢致脆化的风险,塔筒服役环境中的水汽、腐蚀介质会使钢材表面发生电化学腐蚀,产生氢原子;延迟应力会加速氢原子向材料内部扩散,并在微裂纹尖端、位错塞积处聚集,形成氢分子气泡。气泡产

生的内压会与延迟应力叠加,进一步削弱材料的韧性,使塔筒在遭遇轻微冲击时便可能发生脆性断裂,且断裂面通常表现为典型的沿晶断裂特征。

3.2.3 变形协调性下降

延迟应力还会破坏塔筒材料的变形协调性,导致结构内部应力分布进一步失衡,形成局部过载-变形受限的恶性循环。一方面,延迟应力会使材料的泊松比发生变化。原本均匀的横向变形能力因微观损伤的存在而出现差异,例如塔筒变径段的材料在延迟应力作用下,横向变形系数可能从0.3降至0.25-0.28,导致该区域在承受轴向载荷时,无法与相邻直筒段实现同步变形,进而在变径过渡处产生附加弯矩,加剧局部延迟应力的累积。另一方面,对于法兰连接部位,延迟应力会导致法兰与塔筒筒壁的变形协同性失效。当塔筒承受风载荷引起的倾覆力矩时,法兰根部无法通过弹性变形缓冲应力,导致应力集中系数进一步增大,形成变形受限-应力叠加的恶性循环,最终加速法兰根部的裂纹扩展。

3.3 缩短服役寿命

3.3.1 设计寿命偏离

延迟应力会打破塔筒损伤-寿命的线性关系,使损伤累积速率呈现非线性加速特征,导致实际寿命大幅偏离设计预期。从寿命计算机制来看,塔筒设计寿命的核心依据是疲劳寿命理论。延迟应力与循环风载荷会形成交互作用,使每次载荷循环产生的损伤量不再恒定,而是随延迟应力的累积逐步增加,最终导致塔筒的实际疲劳寿命缩短至设计寿命的50%-70%。

3.3.2 运维成本激增

延迟应力引发的隐性损伤会迫使运维策略从预防性维护转向被动修复性维护,导致运维成本呈阶梯式上升,具体可分为检测成本与修复成本两部分。在检测成本方面,为识别延迟应力诱发的隐性损伤,需提升检测频次与检测技术等级,常规运维中,塔筒焊缝的超声检测频次需从每年1次增至每6个月1次;同时,需引入更高精度的检测技术。这类技术的单次检测成本是常规超声检测的3-4倍,且需专业技术人员操作,进一步增加人力成本。

3.3.3 安全风险升级

延迟应力引发的损伤若未及时干预,会从设备级故障升级为环境级安全风险,形成多维度的危害连锁反应。从设备自身风险来看,延迟应力导致的结构损伤会使塔筒的承载冗余度大幅下降。设计阶段预留的20%-30%承载冗余,会因材料强度衰退、结构裂纹扩展被逐步消耗,当遭遇极端天气时,塔筒可能发生突发性失稳。

4 应对风机塔筒延迟应力的关键技术措施

4.1 优化材料选择, 提升材料抗延迟应力能力

材料是抵御延迟应力的基础, 需从材料成分设计与微观结构调控两方面优化选型。其一, 优先选用抗时效硬化的低合金高强度钢, 通过调整合金元素配比, 抑制原子扩散与析出相形成, 减少时效硬化引发的延迟应力; 其二, 对钢材进行预处理改性, 如通过调质热处理优化材料的晶粒尺寸, 使晶粒均匀细化, 提升材料的抗位错堆积能力, 从微观层面降低延迟应力的累积速率; 同时, 可在钢材表面采用渗氮处理或涂层防护, 增强材料表层的应力稳定性, 减少腐蚀环境对延迟应力的诱发作用。

4.2 改进结构设计与制造工艺, 减少残余应力

结构设计与制造工艺的优化, 是从源头减少延迟应力产生的关键。在结构设计方面, 需避免刚度突变, 对法兰连接、变径段等易应力集中区域, 采用圆弧过渡设计, 通过增加过渡区域的曲率半径, 使应力分布更均匀, 减少局部应力集中; 同时, 可在高应力区域增设加强筋或过渡段, 通过优化载荷传递路径, 分散延迟应力的累积。在制造工艺方面, 重点控制焊接残余应力。一方面, 采用低线能量焊接工艺(如窄间隙埋弧焊、气体保护焊), 减少焊接过程中的高温热输入, 降低焊缝及热影响区的温度梯度, 从源头减少残余应力产生; 另一方面, 焊接后需进行焊后热处理(如整体退火、局部消应力热处理), 通过缓慢加热与冷却, 使焊接残余应力充分释放, 避免其在服役过程中转化为延迟应力。

4.3 加强运维监测与主动干预, 减缓延迟应力发展

后期运维与监测是及时发现并控制延迟应力的重要保障, 需建立长期监测+主动干预的运维体系。在监测方面, 可在塔筒高应力区域安装光纤光栅传感器或应变片, 实时监测应力变化趋势, 通过数据分析识别延迟应力的累积速率, 当应力达到预警阈值时及时发出警报; 同时, 定期开展无损检测(如年度超声检测、每3年一次的相控阵检测), 重点排查微观裂纹与应力腐蚀损伤, 避免延迟应力引发的隐性损伤扩大。在主动干预方面, 对监测发现的高应力区域, 可采用应力释放孔或局部应力松弛热处理技术, 主动释放累积的延迟应力; 对已出现微小裂纹的区域, 可通过焊接补强或粘贴碳纤维复合材料的方式, 抑制裂纹扩展, 同时分散局部延迟应力, 延长结构使用寿命。

5 结论

延迟应力作为风机塔筒长期服役中的隐性风险因素, 其产生与材料微观演变、结构设计缺陷、服役环境及长期载荷密切相关, 会通过破坏结构完整性、衰退材料力学性能、缩短服役寿命, 对塔筒安全运行产生显著影响。针对这一问题, 需从材料优化、结构设计与制造工艺改进、运维监测与主动干预三个维度制定应对措施, 通过源头控制减少延迟应力产生, 过程优化抑制延迟应力发展, 后期保障及时干预延迟应力引发的损伤, 最终实现风机塔筒的长期安全、稳定服役。随着风电技术向大型化、深远海发展, 风机塔筒面临的延迟应力问题将更为复杂, 需进一步结合新材料技术、智能监测技术, 持续完善延迟应力的防控体系, 为风电产业的高质量发展提供更坚实的技术支撑。

参考文献:

- [1] 汪亚洲,王子涵,顾文虎,等.风电机组塔架门洞结构焊缝稳定性研究[J/OL].机械工程师,1-7[2025-10-12]
- [2] 汪亚洲,王子涵,顾文虎,等.风电机组塔架门洞结构焊缝稳定性研究[J/OL].机械工程师,1-7[2025-10-12].
- [3] 高峥骥,罗文斌,曹应斌,等.风电塔架全自动四丝窄间隙埋弧焊技术[J/OL].金属加工(热加工),1-7[2025-10-12].
- [4] 周忠明.风电塔架焊接热输入对结构强度的影响研究[J].中国机械,2025,(01):83-86+90.
- [5] 杨昊,张悦,葛翔凯,等.在制风电塔筒焊缝的超声检测工艺研究[J].无损探伤,2023,47(04):18-22