

风电工程土建施工桩基础技术分析

张志杰

(中电建新能源集团股份有限公司河北分公司, 河北 石家庄 050000)

摘 要 在风电工程土建施工中, 桩基础技术是确保风机运行稳定的关键环节, 其对风电场长效运营效益具有决定性影响。然而, 面对日益复杂的荷载要求, 传统桩基施工在垂直度控制、承载力稳定性及防腐耐久性方面仍存在诸多技术挑战。本文结合风电工程特点, 提出构建实时纠偏垂直监测系统、开发桩端土体改良加固技术、建立多层复合防腐涂层工艺及优化预应力桩疲劳寿命的策略, 旨在为提高桩基础的施工精度提供参考。

关键词 风电工程; 土建施工; 桩基础技术

中图分类号: TU753.3; TM614

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.20.012

0 引言

风电工程是清洁能源基础设施的核心, 其桩基结构承载性能直接决定风机系统的使用寿命。预应力高强度混凝土管桩作为常见的风电桩, 具有良好的承载能力和耐久性, 但在复杂地质环境下面临着垂直度控制、荷载传递效率及耐久性保障等多重挑战。因此, 施工人员亟需构建涵盖设计理论、施工控制以及运维监测的全链条技术体系。

1 风电工程常见桩基础类型

1.1 预应力高强度混凝土管桩基础结构

预应力高强度混凝土管桩结构的核心原理是利用高强度混凝土管桩承载风机荷载, 施工人员在风电工程中常采用该结构。该材料具有较高的抗弯刚度, 能够适应海上或陆地的复杂地质条件。另外, 预应力高强度混凝土管桩在液压锤击下垂直贯入土层, 顶端与风机塔筒法兰连接形成整体传力路径, 荷载依靠桩身均匀传递至地基深处^[1]。该结构对桩体垂直度控制要求严格, 施工过程中需实时监测钢管贯入姿态, 确保桩身轴线与塔筒中心线精确对正。设计钢管壁厚时需综合考量风电机组动态荷载及地质勘探数据, 通常会采用改变截面形式来优化材料用量。

1.2 多桩承台连接体系

施工人员在设计阶段需根据地质勘察数据确定桩的布置形式, 采用对称排列或梅花分布以优化荷载传递效率。多桩承台体系的优势在于把塔筒荷载分散至多个支撑点, 适用于承载力较弱或土层分布不均的场地条件。承台结构作为荷载分配中枢, 须具备足够的强度以平衡各桩受力差异, 混凝土材料因其抗压性能成为主要承台构筑材料。桩基间距设计需考虑群桩效

应影响, 避免相邻桩体应力叠加导致地基整体失稳。在软土地基中, 桩端要穿透软弱土层进入持力层, 桩侧阻力与桩端阻力共同承担垂直荷载。施工过程中需重点控制承台与桩顶的连接精度, 确保灌浆料充分填充接触面空隙。

2 风电工程常见桩基础技术应用中存在的不足

2.1 沉桩垂直度控制精度不足

施工人员在预应力高强度混凝土管桩或多桩承台施工时, 桩体轴线偏移易造成基础偏心受力, 导致塔筒法兰连接面应力集中。垂直度偏差超出允许范围时, 桩身与地基土体的接触压力分布不均, 会削弱桩侧摩擦阻力的有效发挥, 土层压缩差异会放大倾斜桩体的弯矩效应。打桩过程中液压锤击能量传递路径若与桩体实际轴线存在夹角, 就会引发桩锤—桩—土系统动力响应失衡, 进一步加剧桩身偏移。传统监测手段在动态工况下存在数据滞后性, 无法实时反馈桩体三维姿态变化, 致使纠偏措施缺乏时效性。预应力桩焊接与法兰端面加工误差会形成初始垂直度缺陷, 在后续打桩阶段缺陷值呈非线性增长。同时, 桩顶法兰与塔筒底法兰之间的匹配精度因垂直度偏差产生连锁反应, 影响高强螺栓紧力的均匀分布。

2.2 复杂地层桩端承载力不稳定

地质构造复杂区域桩端可能悬空或嵌入破碎岩体, 接触面咬合强度不足削弱桩端阻力发挥效果。桩端穿过软弱夹层时, 下卧硬土层厚度不足会引发刺入破坏, 承载力随时间发生固结沉降。在动态荷载作用下, 桩土接触面反复剪切致使桩端阻力软化, 易产生液化现象加剧承载力衰减^[2]。预应力管桩贯入时桩端土体过度挤密形成“土塞效应”, 实际端阻力低于理论计算值,

同时桩端检测手段受地层界面反射干扰, 导致低应变法难以准确识别实际持力层状况。除此之外, 季节性地下水位波动会改变桩端土体有效应力, 端阻力会呈现周期性变化。

2.3 桩基防腐涂层耐久性欠缺

环氧树脂涂层在长期暴晒下容易老化开裂, 潮湿环境中会扩大涂层细小裂缝, 腐蚀性物质渗入裂缝后钢材基体加速氧化生锈, 焊接部位因高温加工导致材料结构改变, 涂层易从焊缝边缘翘起脱落。另外, 多雨或多尘环境中涂层长期受颗粒物冲刷磨损, 表面粗糙度增大后更易附着污染物, 滋生微生物进一步侵蚀涂层结构。安装电流保护装置不当时, 涂层与辅助防护系统协同效果下降, 过强电流区域会产生气体使涂层鼓包分离。钢管内外壁防腐处理差异也会造成腐蚀速率不同步, 内部密闭空间积水形成局部腐蚀环境加速材料损耗。施工时空气湿度过高会引起涂层表面形成微孔, 腐蚀性粒子依靠孔隙侵入钢材界面。安装过程中螺栓孔周边涂层易受机械刮擦, 破损处形成锈蚀扩散起点。

3 风电工程常见桩基础技术分析

3.1 构建实时纠偏垂直监测技术

风电工程常用的预应力高强度混凝土管桩、多桩承台等结构对桩体垂直度要求极高, 细微偏差会导致基础受力不均, 影响风机运行稳定。传统测量方法依靠人工定时检查, 数据更新慢, 难以及时发现施工过程中的偏移问题。桩身倾斜会造成顶部连接位置压力集中, 长期可能引发金属疲劳。实时监测技术可持续跟踪桩体姿态, 在施工全过程动态掌握垂直度变化, 为施工人员进行精准调整提供可靠依据。

施工人员在施工时应按在预应力高强度混凝土管桩表面每隔 2 米安装角度测量仪, 此设备可检测桩体倾斜数据, 测量仪外壳使用防震材料, 内部配备温度调节功能, 避免打桩震动或天气变化影响数据准确性。桩顶安装高精度激光仪, 帮助施工人员实时监控顶部平面倾斜情况, 对于多桩承台施工, 在固定支架周围加装扫描设备, 用微波反射原理计算桩体与支架间的位置偏差。所有的监测数据由无线网络实时传输到控制室电脑, 系统自动过滤施工噪声干扰, 结合地质预测模型分析偏移风险。屏幕上用红黄绿三色标记桩体状态: 绿色代表正常, 黄色表示轻微偏移, 红色表示需要立即调整, 一旦发现超标倾斜, 立刻启动纠偏装置。施工流程分为监测、预警、调整、确认四个环节, 开工前施工人员用三维模型模拟不同土层的打桩过程,

设定动态预警标准: 前 10 米打桩阶段允许少量偏差, 超过 10 米后严格控制在 0.3 度以内。每打入 3 米深度就启动全桩扫描, 生成电子报告记录调整过程。质量管控采用区块链技术, 把所有操作记录实时加密存储, 防止篡改, 同时开发手机监控软件, 现场人员或总部专家可同步查看数据, 当累计调整量超出安全范围时, 系统自动要求重新检测桩基结构安全。

3.2 开发桩端土体改良加固技术

桩端土体改良可改变土体物理力学性质, 形成高强度加固区, 有效扩大桩端承载面积并提升整体稳定性。该技术能显著降低桩身应力集中风险, 改善荷载传递路径, 促使桩基适应更广泛的地质条件^[3]。与此同时, 土体改良可抑制液化或蠕变现象, 保障风电基础设施在全寿命周期内的安全运行。

在实际操作中, 施工人员需按照不同的土体进行差异化治理, 在砂质地层作业时, 采用高压旋喷注浆法形成固结体, 浆液与砂粒胶结形成混凝土状加固区。在注浆过程中, 施工人员要实时监测压力变化, 当压力骤降时立即补充速凝剂防止浆液流失; 黏土地层则采用深层搅拌法, 利用螺旋钻杆将生石灰粉与黏土强制混合; 岩层破碎带处理使用微型预应力桩加密技术, 在桩端位置呈放射状打入螺纹钢, 管间距保持 30 厘米, 管内灌注水泥浆料。钢管群形成网状支撑结构, 凭借注浆压力将裂隙岩体重新胶结, 还可采用地质雷达扫描岩体裂隙分布, 动态调整钢管布置密度, 加固主裂隙交叉区域。针对有机质含量高的淤泥层, 引入微生物诱导技术, 向桩端土体注入巴氏芽孢杆菌溶液, 细菌代谢产生碳酸钙晶体可充分填充土体孔隙。质量控制需建立全过程监测体系, 注浆施工时施工人员同步开展电阻率检测, 依靠电极阵列测量土体电阻率变化, 实时判断加固区扩散范围是否达标。加固区域应在顶部预埋光纤传感器, 监测运营阶段土体应力变化, 数据异常时自动触发预警。设备选型要注重高效, 配置自带废浆回收系统的注浆设备, 把溢出浆液过滤后循环使用, 减少材料损耗, 同时研发可拆卸式搅拌头, 适应不同土层硬度需求: 在密实砂层切换锯齿刀头, 软土层使用螺旋叶片刀头。建立标准化施工流程, 从钻孔定位、材料配比到质量检测形成规范化操作, 可提升砂土地基桩端承载力, 减少黏土地基沉降量, 为风电桩基的可持续发展奠定基础。

3.3 建立多层复合防腐涂层工艺

复合涂层依靠不同材料的特性互补, 形成物理隔绝与化学防护的协同作用。底层涂料紧密附着钢材表

面, 填补微观孔隙; 中间层提供抗渗透屏障; 面层抵抗紫外线或外力磨损, 这种分层防护体系可延缓腐蚀介质渗透速度, 降低涂层开裂剥落风险^[4]。对于海上风电桩基, 复合涂层的抗生物附着特性还能减少海洋生物对涂层的侵蚀。多层结构设计促使防腐系统具备自我修复能力, 局部损伤不易扩散至整体, 延长基础结构维修周期。

施工人员应首先对预应力高强度混凝土管桩表面进行喷砂处理, 彻底清除锈迹或杂质, 让表面粗糙度达到涂层附着标准。接下来, 使用三层复合体系: 底层为富锌环氧涂料, 用无气喷涂设备均匀覆盖, 形成阴极保护层; 中间层为玻璃纤维增强型聚氨酯, 手工填补焊缝凹陷后机械喷涂, 厚度控制在0.8毫米; 面层使用氟碳树脂涂料, 添加二氧化硅提升耐磨性, 每层涂装间隔严格遵循材料固化时间。焊缝区域实施加强处理, 先用弹性密封胶填充焊缝咬边缺陷, 再缠绕玻璃纤维带形成过渡层, 避免涂层在应力集中部位开裂。螺栓孔边缘采用橡胶刮刀手工涂刷环氧底漆, 确保棱角处涂层厚度达标。涂层完全固化后, 用电磁测厚仪进行全表面扫描, 局部厚度不足区域标记补涂。建立全周期质量控制体系, 记录每道工序实施影像, 重点监控喷砂清洁度、涂层流平性及界面结合状态, 实验室定期抽检涂层试片的抗冲击性能, 模拟老化试验验证配比可靠性。现场配备便携式电火花检测仪, 对涂层针孔缺陷进行全数排查, 发现漏点立即修补。材料储存与施工环保同步优化, 涂料库房保持恒温通风, 双组份材料启用前用电子秤精确配比, 废弃涂料桶设置专用回收装置。除此之外, 还要研发水性环保涂料替代传统溶剂型产品, 在风电工程试点应用生物基环氧树脂, 降低挥发性有机物排放。

3.4 优化设计预应力桩疲劳寿命

风电工程中预应力高强度混凝土管桩长期承受风机运行产生的交变荷载, 桩身反复受力易引发金属材料疲劳损伤。传统设计方法侧重于静力强度, 对动态荷载作用下的应力累积考虑不足。桩体在波浪冲击、叶片转动等复杂荷载组合下, 应力集中区域易产生微观裂纹^[5]。优化设计需施工人员平衡结构轻量化与耐久性需求, 改善应力分布, 降低疲劳损伤速率。另外, 施工人员合理设计桩壁厚梯度能有效分散应力峰值, 延长关键部位的疲劳寿命。

在设计阶段, 施工人员可在桩体上部采用渐变加厚管壁方案, 改变桩身不同位置的厚度匹配实际受力需求。桩顶与塔筒连接处设计为大圆弧过渡段, 避免直角连接造成的应力突变。材料选用抗疲劳性能更好

的专用钢材, 经由特殊热处理后, 提升金属内部晶粒的均匀性, 增强抗裂纹扩展能力。制造环节重点优化焊接工艺, 使用新型焊接技术缩小焊缝热影响区, 减少焊接高温对材料性能的损伤。焊后对焊缝表面进行精细打磨, 消除凹凸不平的焊瘤, 促使焊缝与母材平滑过渡。钢管对接时, 使用专用固定装置保持接口平整, 防止错位导致的局部应力集中。对所有焊缝进行探伤检测, 重点排查熔合不充分或存在气泡的缺陷点。防腐处理与结构设计协同配合, 在钢管表面先涂覆含金属粉末的底漆, 形成主动防锈保护层; 中间层使用弹性材料覆盖, 缓冲外力冲击对涂层的破坏; 最外层采用耐磨面漆, 在易受海水冲刷的部位也可加缠纤维增强带。需要注意的是, 要把防腐涂层与钢管的热胀冷缩特性相匹配, 防止温度变化引起涂层开裂。施工阶段建立全周期监测系统, 施工人员在桩顶安装传感器网络, 实时监测桩体振动, 同时数据采集系统设定安全预警线, 当检测到异常振动或变形时自动提示风险。运营期间定期检查桩体表面状态, 需重点观察焊缝区域的涂层完整性, 发现锈斑或裂纹要及时修补。为进一步加强钢材性能, 还应建立预应力桩健康档案, 记录每次检测结果并分析疲劳损伤趋势, 以便动态调整维护计划。

4 结束语

创新风电工程桩基础技术是保障基础设施安全高效运行的核心支撑, 可有效解决传统桩基存在的垂直度失控、承载力波动、腐蚀损伤与疲劳失效等问题。未来, 需重点关注多物理场耦合作用下桩基性能演变规律, 开发自修复型智能桩基材料, 并建设基于数字孪生的全生命周期管理平台, 为全球能源结构转型提供更为坚实的技术保障。

参考文献:

- [1] 孙小强. 建筑工程土建施工中桩基础技术的应用分析[J]. 建材发展导向, 2025, 23(01): 109-111.
- [2] 张占兵. 风电工程土建施工桩基础技术分析[J]. 居业, 2024(06): 43-45.
- [3] 张博宁. 风电工程土建施工桩基础技术分析[J]. 居业, 2023(02): 49-51.
- [4] 李庆林. 建筑工程土建施工中桩基础技术的应用分析[J]. 中国建筑金属结构, 2022(03): 70-71.
- [5] 王潇. 桩基础技术在建筑工程土建施工中的应用分析[J]. 化工管理, 2020(15): 167-168.