

风电场风机基础预应力锚栓安装精度控制技术探讨

田宇龙

大唐七台河发电有限责任公司 黑龙江 154600

【摘要】：随着风电行业的快速发展，风电场风机规模持续扩大，对风机基础结构稳定性要求愈发严格。预应力锚栓作为连接风机塔筒与基础的关键部件，其安装精度直接关乎风机运行的安全性与可靠性。本文深入剖析风电场风机基础预应力锚栓安装过程中影响精度的各类因素，包括设计与材料、施工工艺、人员操作等。详细阐述提升安装精度的技术手段，如高精度测量仪器的运用、先进施工工艺的实施、安装流程的优化等。通过对相关技术的研究，为风电场风机基础预应力锚栓的精准安装提供有力技术支撑，保障风电场的高效稳定运行。

【关键词】：风电场；风机基础；预应力锚栓；安装精度；控制技术

DOI:10.12417/2811-0536.25.11.001

引言

风能作为清洁可再生能源，在全球能源结构中占比不断提升。风电场建设规模的持续扩张，使得风机基础的稳定性成为保障风电可靠运行的关键。预应力锚栓连接塔筒与基础，承受复杂的荷载作用，其安装精度对风机整体性能影响重大。如何在施工中精准控制预应力锚栓的安装精度，成为亟待解决的重要问题，关乎风电场的长期稳定运行与经济效益。

1 分析影响安装精度的设计因素

1.1 地质条件适配性对安装精度的影响

地质条件是决定预应力锚栓安装精度的基础要素。不同类型的地质结构呈现出显著差异：软土地基具有高压缩性和低承载能力，若设计时未充分考虑其特性，锚栓可能因土体在施工荷载下的不均匀沉降而产生倾斜；岩石地基虽强度高，但存在裂隙发育、风化层厚度不均等问题，锚栓钻孔时若遇到破碎岩层，极易导致孔径偏差或孔位偏移。地下水活动对地质条件的影响不容忽视，长期浸润的土壤会降低抗剪强度，导致锚栓锚固力不足，而承压水的存在则可能在钻孔过程中引发涌水现象，破坏孔壁稳定性，最终影响锚栓定位精度。设计阶段必须结合详细的地质勘察报告，科学确定锚栓的埋置深度、直径和锚固的方式，确保锚栓与地基的力学的性能匹配。

1.2 基础结构设计的约束效应

风机基础结构设计直接决定了锚栓安装时的受力状态。基础的形状和尺寸与锚栓的空间布局紧密相关，矩形基础相较于圆形基础，在边角区域易产生应力集中，若锚栓布置未考虑应力分布规律，安装过程中可能因局部应力过大发生弯曲变形。混凝土强度等级的选择同样关键，低强度混凝土在预应力张拉过程中易产生塑性变形，导致锚栓预埋位置偏移；而过高强度

的混凝土则可能因弹性模量过大，在温度变化时产生过大的收缩应力，致使锚栓与混凝土界面出现裂缝。基础内部钢筋的配置方式也会影响锚栓的安装，密集的钢筋网可能干扰锚栓的定位，若未在设计阶段优化钢筋排布，施工时极易出现锚栓与钢筋碰撞，被迫调整安装位置。

1.3 设计图纸标注的规范性作用

设计图纸是施工的直接依据，其标注的准确性直接影响安装精度的实现。图纸中对锚栓安装精度的描述需明确量化指标，包括水平位置偏差、垂直度误差、标高允许范围等，若仅以满足规范要求等模糊表述替代具体数值，施工人员将难以精准把控安装标准。图纸的标注方式也至关重要，复杂的三维空间关系若未通过多视图、剖面图或节点详图清晰呈现，施工人员在理解锚栓与基础其他构件的相对位置时易产生偏差。图纸变更的管理同样不容忽视，若设计变更未及时、准确地传达至施工一线，或变更标注不清晰，新旧设计要求的冲突将直接导致安装错误。

2 解析影响安装精度的材料因素

2.1 锚栓制造精度的直接关联

锚栓的制造精度直接决定其与基础预留孔的适配性。生产过程中的尺寸偏差会引发连锁反应：直径超差导致锚栓无法顺利插入预留孔，强行安装不仅损伤锚栓表面螺纹，还可能破坏基础混凝土结构；直径过小则使锚栓与孔壁间隙过大，灌浆后无法形成有效握裹力，导致锚栓在受力时产生位移。螺纹加工精度同样关键，螺距误差会影响螺母的旋合顺畅度，牙型偏差则降低螺纹连接的承载能力，在预应力张拉过程中可能出现滑丝现象。锚栓直线度偏差会导致其在安装时无法垂直就位，即便通过后期调整强行固定，也会在锚栓内部产生初始应力，影响长期使用性能。

2.2 材料力学性能的稳定性影响

锚栓材料的力学性能直接关系到安装过程中的结构安全与精度保持。强度不足的锚栓在张拉过程中易发生塑性变形,导致长度缩短、位置偏移,无法达到设计的预应力值;韧性不佳的材料则可能在冲击荷载下突然断裂,如在吊装过程中因碰撞产生的瞬时应力超过材料极限。材料的弹性模量也影响安装精度,弹性模量偏差会导致预应力损失计算不准确,实际施加的预应力与设计值不符,进而改变锚栓与基础的协同工作性能。材料的耐腐蚀性对长期精度保持至关重要,在潮湿或盐碱环境下,若锚栓防腐涂层质量不达标,表面锈蚀会逐渐削弱截面尺寸,破坏安装时建立的确位置关系。

2.3 连接件质量的协同作用

螺母、垫片等连接件在锚栓安装精度保障体系中,发挥着不可或缺的协同作用。螺母与锚栓的配合精度,犹如精密仪器中的齿轮咬合,是预应力施加效果的关键所在。螺母内径与锚栓螺纹若配合过松,在张拉过程中,螺母便如同脱缰的野马,极易发生松动,使整个安装结构失去稳定根基;而配合过紧时,施加扭矩的过程就像一场危险的博弈,过大的扭矩可能会无情地损伤螺纹,削弱锚栓的承载能力。垫片同样是决定安装质量的重要一环。它就像是锚栓受力的缓冲地带,其平整度和硬度直接影响着锚栓的受力状态。不平整的垫片,会使锚栓在受力时承受偏心之痛,各个部位受力不均,导致安装后产生肉眼难以察觉却影响重大的微小倾斜;而硬度不足的垫片,在反复荷载的千锤百炼下,如同不堪重负的弹簧,极易发生塑性变形,进而造成预紧力的悄然流失,危及整个结构的稳固性。

3 介绍提升安装精度的测量技术

3.1 基础定位测量的基准建立

风机基础的精确中心定位是锚栓安装的前提。采用全球卫星定位系统(GPS)结合全站仪的测量方式,可实现毫米级定位精度。GPS能够快速获取基础大致坐标,为全站仪测量提供初始参考,全站仪则通过极坐标法或边角交会法,对基础中心进行精确校核和调整。在测量过程中,需考虑地球曲率、大气折光等因素对测量结果的影响,通过设置多个控制点形成闭合导线网,确保测量数据的可靠性。控制点的布设需避开施工干扰区域,并定期复测其稳定性,防止因控制点位移导致后续测量基准失效,从而影响锚栓安装的整体精度。

3.2 安装过程中的实时监测

激光测量仪在锚栓安装过程中发挥着实时监测的核心作用。通过在基础周边架设激光发射器,以水平激光面作为基准平面,施工人员可快速判断锚栓的垂直度偏差。激光束的高精度定位功能能够实时捕捉锚栓的微小位移,一旦超出允许误差范围,系统将自动报警,提示施工人员进行调整。水准仪则用于精确控制锚栓的标高,通过后视、前视测量,将已知水准点的高程传递至基础各部位,确保所有锚栓处于同一设计标高。在复杂地形条件下,还可结合三角高程测量技术,克服水准测量的局限性,实现高精度的高程控制。多种测量仪器的协同使用,形成了对锚栓三维空间位置的全方位监测体系。

3.3 测量系统的质量保障

建立完善的测量控制网是确保安装精度的基础。控制网需覆盖整个风电场区域,包含平面控制网和高程控制网,通过均匀布设控制点,形成相互校核的测量体系。测量仪器的定期校准与维护是保证数据准确性的关键,全站仪的视准轴、横轴误差,水准仪的*i*角误差等,均需按照检定规程定期检测和校正。测量人员的操作规范也至关重要,需严格执行测量操作规程,避免人为读数误差和仪器架设误差。测量数据的记录与处理需采用专业软件进行分析,通过平差计算消除系统误差,确保测量结果真实反映锚栓的实际安装状态。

4 阐述优化安装精度的施工工艺

4.1 基础施工质量的前期保障

基础混凝土浇筑质量直接影响锚栓安装的基础条件。分层浇筑工艺是控制平整度的关键,每层浇筑厚度需根据混凝土流动性和振捣设备性能合理确定,过厚的浇筑层易导致振捣不密实,产生蜂窝、孔洞等缺陷;过薄则增加施工成本和时间。振捣过程中需遵循快插慢拔原则,确保混凝土内部气泡充分排出,同时避免振捣棒直接接触模板和钢筋,防止其移位变形。浇筑完成后,需及时进行表面收光处理,通过多次抹压消除表面裂缝,并采用覆盖薄膜、洒水养护等措施,控制混凝土的收缩变形。基础预埋件的安装精度同样重要,预留孔的位置、尺寸和垂直度需与锚栓设计参数严格匹配,为后续安装创造有利条件。

4.2 锚栓安装工艺的流程优化

科学的锚栓安装顺序能够有效控制整体精度。首先安装定位锚栓作为基准,通过高精度全站仪或激光测量仪反复校准其空间位置,确保定位误差在允许范

围内。定位锚栓固定后，以其为参照，采用由中心向四周或对称安装的方式依次安装其他锚栓，避免安装过程中的累积误差。专用定位工装在安装过程中发挥关键作用，工装需具备足够的刚度和稳定性，能够将锚栓准确定位并固定，防止其在混凝土浇筑过程中发生位移。工装的设计需考虑锚栓的型号、数量和排布方式，确保与基础结构紧密贴合，同时便于安装和拆卸。安装过程中，需对每根锚栓的位置进行实时监测和微调，确保其满足设计要求。

4.3 施工过程的动态控制

混凝土浇筑过程中的动态控制是保障锚栓安装精度的关键环节。浇筑前需对锚栓进行二次校核，确保其位置和垂直度符合要求，并在锚栓顶部设置临时固定装置，增强其抗冲击能力。浇筑过程中，需采用分层、对称浇筑的方式，避免混凝土侧压力导致锚栓偏移。振捣棒的使用需避开锚栓及其定位工装，防止机械振动对锚栓位置产生影响。安排专人对锚栓进行实时监测，若发现位移或倾斜，立即停止浇筑，采用千斤顶、钢丝绳等工具进行调整复位。浇筑完成后，在混凝土终凝前再次对锚栓位置进行校核，确保其最终安装精度符合设计标准。

5 说明保障安装精度的人员管理

5.1 专业技能培训体系的构建

施工人员的专业技能是保障安装精度的基础。培训内容需涵盖理论知识与实践操作两方面：理论培训包括预应力锚栓的工作原理、安装工艺流程、质量验收标准等，帮助施工人员理解安装精度控制的重要性；实践操作培训则侧重于测量仪器使用、锚栓安装技巧、常见问题处理等技能，通过模拟施工现场环境，让施工人员在实际操作中掌握正确的安装方法。培训需采用多样化的教学方式，如现场演示、视频教学、案例分析等，确保不同知识水平的人员均能有效吸收培训内容。培训结束后需进行严格考核，考核合格者方可上岗作业，确保施工队伍整体具备较高的专业素养。

参考文献：

- [1] 李明.风电场风机基础预应力锚栓安装技术优化[J].电力建设,2022,43(5):123-130.
- [2] 王丽.提高风机基础预应力锚栓安装精度的研究[J].新能源技术,2023,35(3):45-52.
- [3] 赵强.风电场预应力锚栓安装精度控制要点分析[J].风力发电,2024,46(2):78-85.
- [4] 刘芳.风机基础预应力锚栓施工技术及其精度保障措施[J].建筑技术开发,2025,52(1):90-96.
- [5] 孙宇.基于高精度安装的风电场预应力锚栓技术研究[J].能源工程,2021,38(4):56-63.

5.2 质量责任制度的落实

建立完善的质量管理责任制是确保安装精度的制度保障。将安装精度控制目标分解至每个施工环节和岗位，明确各岗位人员的质量职责，形成人人有责、层层把关的质量管理体系。项目经理作为质量第一责任人，需统筹协调施工全过程的质量控制工作；技术负责人负责技术方案的制定和实施指导；质检员则对每道工序进行严格检查验收。建立质量追溯制度，对出现安装偏差的环节进行责任倒查，明确责任人并进行相应处理。通过将质量责任与个人绩效挂钩，增强施工人员的质量意识和责任心，促使其主动关注安装精度控制。

5.3 现场管理与激励机制

施工现场的动态管理是保障安装精度的关键。管理人员需加强对施工过程的巡查，及时发现并纠正违规操作行为，如未按规定使用测量仪器、未按顺序安装锚栓等。建立问题反馈机制，鼓励施工人员主动上报安装过程中遇到的技术难题和质量隐患，技术团队需及时提供解决方案，避免问题积累导致安装精度失控。设立质量奖励基金，对在保障安装精度方面表现突出的个人和班组给予物质奖励，并在内部进行表彰宣传，激发施工人员的积极性和创造性。通过正向激励与严格管理相结合的方式，营造全员参与精度控制的良好氛围，确保预应力锚栓安装精度达到设计要求。

6 结语

风电场风机基础预应力锚栓安装精度控制技术，对风机的安全稳定运行起着关键作用。当前，通过对设计、材料、测量、施工工艺及人员管理等多方面的把控，安装精度已得到显著提升。未来，随着科技的不断进步，高精度测量仪器将更加智能化，施工工艺也会持续创新优化。应持续加强对相关技术的研究与应用，进一步提升安装精度，为风电场的大规模、高质量发展奠定坚实基础，助力清洁能源事业迈向新高度。