

# 风电塔基础施工技术优化与质量保障

田永戈 梁瑞琦

中国水利水电第四工程局有限公司 青海西宁 810000

**摘要:** 随着风电产业向高海拔、复杂地形区域拓展,风电塔基础作为承载机组荷载、保障结构安全的核心环节,其施工技术水平与质量控制直接影响风电场的整体稳定性和运营寿命。当前风电塔基础施工面临地形适应性不足、施工效率偏低、质量隐患防控难度大等问题。本文围绕风电塔基础施工技术展开研究,首先分析主流基础类型及施工特点,随后从施工工艺、设备选型、流程管理等方面提出技术优化路径,最后构建全周期质量保障体系,包括事前预防、事中管控、事后检测等环节,为复杂环境下风电塔基础施工提供技术参考,助力风电场建设质量提升。

**关键词:** 风电塔基础;施工技术优化;质量保障;基础类型;工艺改进;全周期管控

## 引言

在风电产业规模化发展背景下,风电场选址逐渐向山地、丘陵、沿海等复杂地形延伸,对风电塔基础的承载能力、抗变形能力及耐久性提出更高要求。基础施工若存在技术缺陷或质量问题,易导致塔架倾斜、结构开裂,甚至引发安全事故,增加运维成本。例如在高海拔地区,昼夜温差大、氧气稀薄的环境不仅会影响施工人员的作业效率,还会对混凝土凝结硬化、钢材焊接质量产生显著影响;而沿海地区的强腐蚀性环境则会加速基础材料的老化,缩短基础使用寿命。因此,针对不同地形条件优化施工技术,建立科学的质量保障体系,对提升风电塔基础可靠性、保障风电场长期稳定运行具有重要现实意义。

## 一、风电塔基础主流类型及施工特点

### (一) 重力式基础

重力式基础依靠自身重量平衡风电塔传来的竖向荷载与水平荷载,多采用钢筋混凝土浇筑,适用于地基承载力较强的平原或缓坡区域。其施工特点为:施工工艺相对成熟,无需复杂支护结构,但混凝土用量大,对场地平整度要求高,需进行大面积基坑开挖与回填,在软土地基区域易出现沉降问题,需通过换填垫层或加固处理提升地基承载力。在实际施工中,重力式基础的基坑开挖通常需要先进行场地平整,清除表层浮土与软弱夹层,若场地存在局部软弱区域,需采用级配砂石或灰土进行换填,换填深度根据地质勘察报告确定,一般不小于1.5米。混凝土浇筑时,需确保模板支撑牢固,防止浇

筑过程中出现模板变形导致基础尺寸偏差,同时要控制混凝土浇筑速度,避免因浇筑过快产生离析现象。此外,重力式基础的回填土需分层夯实,压实系数不小于0.95,确保回填土的承载力满足设计要求,减少基础后期沉降。

### (二) 桩基础

桩基础通过桩体将荷载传递至深层稳定土层,适用于软土地基、山地或沿海滩涂区域,主要包括预制桩与灌注桩两种类型。预制桩施工速度快、质量易控制,但运输与沉桩过程对场地空间要求较高,在岩石地层中适用性受限;灌注桩可根据地质条件灵活调整桩长与直径,适应性强,但成孔过程易受地下水、地层坍塌影响,需严格控制泥浆护壁质量与混凝土浇筑连续性,避免出现断桩、缩颈等缺陷。对于预制桩施工,运输过程中需采用专用运输设备,防止桩体断裂或产生裂缝,沉桩时可根据地质条件选用静压法或锤击法,静压法施工噪音小、对周边环境影响小,适用于城市周边或对噪音敏感区域,锤击法施工效率高,但噪音较大,需做好降噪措施。沉桩过程中要实时监测桩位偏差与沉桩深度,确保符合设计要求,若出现沉桩困难或桩位偏移过大等情况,需及时停止施工,分析原因并采取调整沉桩参数或重新选址等措施。灌注桩施工中,泥浆护壁是关键环节,泥浆的比重、粘度、含砂率等指标需根据地层情况进行调整,在砂层或卵石层中,需适当提高泥浆比重以增强护壁效果,防止孔壁坍塌;混凝土浇筑时采用导管法,导管底部距孔底距离控制在30-50cm,浇筑过程中要及时提升导管,防止导管埋深过深导致混凝土初凝后无法拔出,同时要保证混凝土浇筑连续进行,中断时间不得超过混

凝土的初凝时间,避免出现断桩缺陷。

### (三) 岩石锚杆基础

岩石锚杆基础通过锚杆嵌入岩层内部,利用岩层的抗拔力与抗剪强度承载荷载,适用于山地岩石地层。其施工特点为:无需大规模开挖,对周边环境破坏小,施工周期短,但对岩层完整性要求高,需精准定位锚杆孔位,控制钻孔深度与角度,确保锚杆与岩层紧密结合,同时需严格检验锚杆的抗拔承载力,避免因岩层裂隙导致锚固失效。施工前,需通过地质雷达或钻孔取样等方式查明岩层分布情况与裂隙发育程度,若岩层存在较大裂隙,需采用环氧树脂或水泥浆进行灌浆处理,增强岩层整体性。锚杆孔钻孔时,选用金刚石钻头或硬质合金钻头,根据锚杆设计角度调整钻机位置,钻孔深度需比锚杆设计长度大5-10cm,便于清理孔内岩粉。钻孔完成后,采用高压空气将孔内岩粉吹洗干净,确保孔壁清洁,然后植入锚杆并进行灌浆处理,灌浆材料可选用水泥浆或水泥砂浆,灌浆压力控制在0.5-1.0MPa,确保浆液填满锚杆孔,与锚杆和岩层充分结合。锚杆安装完成后,需进行抗拔承载力试验,试验数量不少于锚杆总数的3%,且不得少于3根,试验结果需满足设计要求后方可进行后续施工。

## 二、风电塔基础施工技术优化方向

### (一) 针对复杂地形的施工工艺优化

在山地地形施工中,传统基坑开挖易引发边坡失稳,可采用“分级开挖+喷锚支护”工艺,根据边坡坡度分层开挖,每层开挖后及时喷射混凝土并植入锚杆,形成支护体系,防止边坡坍塌;同时利用无人机测绘与BIM技术构建地形模型,优化基坑开挖范围与施工路径,减少土方开挖量与植被破坏。在沿海滩涂区域,针对潮汐影响导致的施工难度大问题,采用“围堰筑岛+降水施工”技术,通过钢板桩围堰形成封闭施工区域,抽排区域内积水,创造干燥施工环境,同时选用耐腐蚀钢筋与海工混凝土,提升基础抗海水侵蚀能力<sup>[1]</sup>。钢板桩围堰施工时,需确保钢板桩拼接紧密,防止漏水,围堰高度需高于施工期间最高潮位0.5-1.0米,以避免海水倒灌。降水施工可采用轻型井点或深井井点降水,根据地下水位埋深与土层渗透系数选择合适的降水方式,轻型井点适用于地下水位较浅、土层渗透系数较小的区域,深井井点适用于地下水位较深、土层渗透系数较大的区域。施工过程中要实时监测地下水位变化,确保降水效果满足施工要求,同时要注意保护周边地下水资源,避免过

度降水导致地面沉降。

### (二) 混凝土施工技术优化

混凝土是风电塔基础的核心材料,其施工质量直接影响基础强度与耐久性。在混凝土配合比设计方面,根据基础受力特点与环境要求,优化水泥、骨料、外加剂配比,例如在寒冷地区增加引气剂掺量,提升混凝土抗冻性;在高湿度地区选用低热水泥,减少水化热引发的裂缝。在浇筑过程中,采用“分层浇筑+振捣密实”工艺,控制每层浇筑厚度不超过50cm,使用插入式振捣器振捣,确保混凝土密实度,避免出现蜂窝、麻面等缺陷;同时采用跳仓浇筑技术,将基础分为多个浇筑块,间隔浇筑,减少温度应力导致的裂缝。在养护阶段,采用薄膜养护与喷淋养护相结合的方式,保持混凝土表面湿润,养护时间不少于14天,确保混凝土强度稳定增长<sup>[2]</sup>。对于大体积混凝土基础,还需采取温控措施,在混凝土内部埋设测温传感器,实时监测混凝土内部温度与表面温度,控制内外温差不大于25℃,若温差超过规定值,需及时采取覆盖保温材料或增加喷淋次数等措施,防止混凝土产生温度裂缝。

### (三) 施工设备与机械化水平提升

传统人工施工效率低、质量波动大,需通过设备优化提升机械化水平。在基坑开挖环节,根据地质条件选用合适的开挖设备,如在软土地层使用履带式挖掘机配合螺旋钻,在岩石地层使用液压破碎锤与潜孔钻,提高开挖效率与精度;在钢筋加工环节,采用数控钢筋弯曲机、切断机替代人工操作,确保钢筋尺寸与弯折角度符合设计要求,减少加工误差。在混凝土浇筑环节,使用混凝土输送泵车与布料机,实现混凝土远距离输送与均匀布料,避免人工布料导致的浇筑不均问题;混凝土输送泵车输送距离远、效率高,适用于大体积混凝土浇筑,布料机可360°旋转,确保混凝土均匀分布在浇筑区域。同时引入混凝土回弹仪、超声波检测仪等设备,实时监测混凝土浇筑质量,及时调整施工参数。混凝土回弹仪可快速检测混凝土表面强度,超声波检测仪可检测混凝土内部缺陷,如空洞、裂缝等,通过实时监测,能够及时发现施工中存在的问题并采取整改措施,确保混凝土施工质量。

### (四) 施工流程与进度管理优化

风电塔基础施工涉及多工序协同,需通过流程优化提升施工效率。采用“平行作业+流水施工”模式,在基坑开挖的同时进行钢筋加工与模板制作,缩短工序衔

接时间；制定详细的施工进度计划，明确各工序起止时间与责任人，利用项目管理软件实时跟踪进度，及时调整资源配置，避免工期延误。平行作业时，需合理划分施工区域，确保各工序施工互不干扰，例如将钢筋加工场设置在基坑周边，便于钢筋运输与安装，模板制作可与钢筋加工同步进行，根据施工进度分批将模板运至施工现场。流水施工时，按照施工顺序将各工序划分为若干施工段，每个施工段安排专业施工班组进行施工，实现各工序连续作业，提高施工效率。此外，建立施工班组交底制度，在每道工序开工前，由技术人员向施工班组详细讲解施工工艺、质量要求与安全注意事项，确保施工人员准确掌握操作要点，减少因操作不当导致的质量问题。

### 三、风电塔基础施工质量保障体系构建

#### (一) 事前预防：完善准备与管控机制

施工前需开展全面的前期准备工作，包括地质勘察、设计交底、材料检验等环节。地质勘察阶段，采用钻探与物探相结合的方式，详细查明施工区域地层分布、地下水埋深、岩土力学参数，为基础选型与施工工艺设计提供依据；若发现地质条件与设计不符，及时与设计单位沟通调整方案。设计交底阶段，组织建设、设计、施工、监理单位开展交底会议，明确基础结构尺寸、材料性能、施工难点等关键信息，解决设计图纸中存在的疑问。材料检验阶段，对进场的钢筋、水泥、砂石等原材料进行抽样检测，检验项目包括强度、化学成分、耐久性等，不合格材料严禁进场；同时对混凝土配合比进行试配验证，确保满足设计要求后再用于施工<sup>[3]</sup>。钢筋进场时需查验质量证明书与出厂合格证，外观检查合格后进行力学性能试验，试验合格后方可使用；水泥进场时需查验生产日期、强度等级等信息，按规定批次进行安定性、强度等指标检测；砂石骨料需按批次检测含泥量、颗粒级配等指标。混凝土配合比试配时，需考虑施工环境与施工工艺的影响，如高温天气需适当调整缓凝剂掺量，确保混凝土工作性满足施工要求。

#### (二) 事中管控：强化施工过程监督

施工过程中需建立“监理+施工自检”双重管控机制，确保各工序质量符合标准。在每道工序施工完成后，施工单位先进行自检，自检合格后报监理单位验收，验收通过后方可进入下道工序。施工自检需制定详

细的自检方案，明确自检项目、检验方法与合格标准，配备专业的质检人员与检测设备，确保自检结果真实可靠。监理单位验收时，需严格按照设计图纸与规范要求进行检查，采用抽样检查与全数检查相结合的方式，对于关键工序与重要部位实行全数检查，确保质量符合要求。重点加强关键工序管控，如基坑开挖后，监理单位需检查基坑尺寸、标高、边坡坡度是否符合设计要求，地基承载力是否满足规范规定；钢筋安装完成后，检查钢筋规格、数量、间距、保护层厚度是否达标；混凝土浇筑过程中，监督浇筑速度、振捣情况与养护措施，记录混凝土浇筑时间、强度等级等信息，形成施工日志。基坑开挖验收时，需采用全站仪检测基坑平面尺寸与标高，采用轻型动力触探或静载试验检测地基承载力；钢筋安装验收时，采用卷尺检查钢筋间距与保护层厚度，采用钢筋扫描仪检测钢筋数量与位置；混凝土浇筑过程中，监理人员需全程旁站监督，记录混凝土浇筑方量、浇筑时间、振捣情况等信息，发现问题及时要求施工单位整改。同时引入第三方检测机构，对基础钢筋保护层厚度、混凝土强度等指标进行随机抽检，确保质量管控无死角。

### 结语

风电塔基础施工技术优化与质量保障是风电场建设的核心环节，直接关系到风电项目的安全运行与经济效益。本文通过分析主流基础类型特点，从复杂地形工艺优化、混凝土技术改进、设备机械化提升、流程管理优化等方面提出技术优化路径，并构建事前预防、事中管控、事后检测的全周期质量保障体系。未来，随着新型材料、智能设备与数字化技术的发展，风电塔基础施工将向更高效、更可靠、更绿色的方向发展，为风电产业高质量发展奠定坚实基础。

### 参考文献

- [1] 陈良勇. 风力发电机组混塔施工技术的研究与应用的探讨[J]. 工程施工新技术, 2025, 4(1): 28-30.
- [2] 胡枫, 袁小彬. 浅谈风电混凝土塔筒安装施工技术[J]. 葛洲坝集团科技, 2025(1): 27-29.
- [3] 由淑明. 大型风电钢混塔架施工技术探析[J]. 人民黄河, 2023, 45(S01): 165-166.