

风电混塔施工中的混凝土性能与应用

吕文健

中电投东北新能源发展有限公司

DOI:10.12238/pe.v3i3.13606

[摘要] 风电混塔作为当代清洁能源基础设施的核心承载结构,其混凝土性能直接决定工程质量与使用寿命。本文深入探讨风电混塔施工中混凝土应用价值,剖析其在提升项目经济效益与延长混塔使用年限方面的显著贡献。研究确立了安全性、科学性与整体性三大应用原则,强调结构稳定性与长期可靠性的重要性。针对风电混塔特殊环境条件与载荷特征,提出多维度性能需求的定制化设计策略,详述全流程精细化控制与装备升级途径,构建全寿命周期防护体系。实践案例表明,高品质混凝土配合比优化、严格施工工艺控制与科学养护管理能显著提升混塔结构耐久性。研究成果为风电混塔建设提供技术支撑,对推动风电产业高质量发展具有重要指导意义。

[关键词] 风电混塔; 施工建筑材料; 混凝土性能

中图分类号: TU5 **文献标识码:** A

Concrete properties and applications in wind power hybrid tower construction

Wenjian Lv

China Power Investment Northeast New Energy Development Co., LTD.

[Abstract] As the core load-bearing structure of modern clean energy infrastructure, the concrete performance of wind turbine hybrid towers directly determines the quality and service life of the project. This paper delves into the application value of concrete in the construction of wind turbine hybrid towers, analyzing its significant contributions to enhancing project economic benefits and extending the service life of the hybrid tower. The study establishes three major application principles: safety, scientificity, and integrity, emphasizing the importance of structural stability and long-term reliability. In response to the special environmental conditions and load characteristics of wind turbine hybrid towers, a customized design strategy with multi-dimensional performance requirements is proposed, detailing the entire process of precise control and equipment upgrades, and establishing a full lifecycle protection system. Practical cases show that high-quality concrete mix optimization, strict construction process control, and scientific maintenance management can significantly enhance the durability of hybrid tower structures. The research findings provide technical support for the construction of wind turbine hybrid towers and have important guiding significance for promoting the high-quality development of the wind power industry.

[Key words] wind power hybrid tower; construction building materials; concrete performance

引言

风力发电作为可再生能源领域的重要组成部分,正以惊人速度融入全球能源结构。风电混塔作为风力发电系统的核心支撑结构,承担着传递载荷、稳定风机运行的关键功能。混凝土因其优异的力学性能、经济适用性及可塑性,在风电混塔建设中扮演着不可替代的角色。风电场建设环境多样,从滨海盐雾区到高原冻土带,从沙漠戈壁到丘陵山地,混凝土均需适应复杂严苛的自然条件。风电混塔结构高耸,受力复杂,承受垂直重力荷载、水平风荷载及周期性振动,对混凝土性能提出极高要求。随着风电

机组单机容量增大,塔架高度攀升,混凝土承载能力与稳定性面临严峻挑战。风电场多建于偏远地区,施工条件受限,气候变化无常,混凝土质量控制难度倍增。长期服役环境中,混凝土还需抵抗氯离子渗透、碳化作用、冻融循环等侵蚀因素。

1 风电混塔施工中的混凝土应用价值

1.1 提升项目经济效益

风电混塔施工中混凝土的应用价值在经济效益层面体现出显著优势。混凝土作为风电混塔的核心材料,其性价比远超其他选材方案。混凝土材料的本地化采购减轻了物流成本压力,缩短

了供应链周期,使项目资金流动更为顺畅。原材料来源广泛导致采购议价空间扩大,降低了整体投入成本。混凝土在风电混塔施工中展现出卓越的适应性,可根据设计需求调整配比,实现性能与成本之间的平衡。这种灵活性使项目方能在保证工程质量的前提下控制材料投入,优化资源配置。施工期间,混凝土固化周期可预测,便于精确安排施工计划,减少窝工现象,提高劳动力利用率。

1.2 延长混塔使用年限

混凝土作为风电混塔的主体材料,其性能直接决定了混塔的使用寿命。优质的混凝土配方能 在风电场恶劣气候条件下表现出卓越的抗侵蚀能力,减缓混塔结构在长期风雨侵袭下的劣化过程。严格管控混凝土的水灰比与骨料选择,有效提升混凝土密实度与抗渗性,使混塔在潮湿环境中保持良好的结构完整性。适当添加高效减水剂与抗裂纤维,显著改善混凝土的抗冻融性与抗疲劳特性,增强混塔在温差变化与交变载荷下的稳定性。精细控制混凝土养护工艺,促进水泥水化反应充分进行,形成更为致密的内部结构,提升混凝土的耐久性指标。合理设计混凝土保护层厚度,构建多层次防护体系,有效隔绝外界侵蚀因子对钢筋的腐蚀作用,确保混塔核心结构的长期安全。科学的混凝土裂缝控制技术,降低环境介质渗入风险,维持混塔整体结构的完整性与承载能力。这些混凝土技术的综合应用,为风电混塔提供了坚实可靠的材料基础,使其在全寿命周期内保持稳定的结构性能,实现使用年限的有效延长^[1]。

2 风电混塔施工中的混凝土应用原则

2.1 安全性原则

风电混塔施工中混凝土应用安全性原则建立在结构力学与材料科学的基础理论之上,旨在确保整体结构稳定性与长期可靠性。混凝土配比需严格控制水灰比,保证强度等级满足设计要求,确保承载能力与抗裂性能。施工过程中温度控制尤为关键,混凝土内外温差过大易导致早期温度应力集中,引发裂缝隐患。振捣工艺须符合规范要求,消除空隙气泡,防止蜂窝麻面现象出现。对于风电混塔这类高耸结构,混凝土抗风压性与抗震性两项指标尤为重要,必须在配方设计阶段予以充分考量。养护工作对混凝土最终性能影响深远,应依据气候条件与混凝土特性确定养护方案,保证强度发展曲线符合预期。质量检测贯穿全程,从原材料进场到浇筑完成,形成完整闭环。风电混塔承受动态荷载状况复杂,混凝土耐久性设计须兼顾疲劳性能,确保在全生命周期内保持结构完整。总之,混凝土应用安全性原则是风电混塔工程质量与使用安全的根本保障,必须严格执行。

2.2 科学性原则

风电混塔施工中的科学性原则深植于材料工程学与结构力学的基础理论之上。混凝土配比需依据分子结构特性与化学反应机理精确调控,确保其在特定风载荷下表现出最佳的力学性能。温度梯度与水化热原理直接关联混凝土内部微观结构形成,进而决定宏观强度与耐久性。结构受力分析须纳入风电塔身高度、横截面变化及地质条件等因素,构建精确受力模型。混凝土

振捣密实度与养护制度遵循物理学定律,使内部气泡排出,水泥水化反应完全。长期性能预测依赖材料老化机理研究,综合考量环境侵蚀因素与荷载时效性。科学合理的混凝土应用体系构建,实质上是多学科交叉融合的系统工程,需平衡技术可行性与经济合理性,为风电混塔提供坚实可靠的结构基础^[2]。

2.3 整体性原则

风电混塔结构整体性原则强调混凝土各构件间形成有机统一体,确保荷载传递路径明确且连续。混凝土设计配比须保障结构内部各层次间紧密结合,避免因材料异质性导致应力集中现象。塔体基础与主体间连接处混凝土配置尤为关键,应实现力学性能一致性,减少结构薄弱环节。塔体混凝土浇筑过程中应当维持各分段间的化学键合效应,高度注重接缝处理技术。混凝土养护制度设计应整体规划,考虑季节性温度变化对结构整体收缩特性的影响。配合比调整工作须立足全局,平衡抗压与抗拉特性,确保结构在复杂风荷载作用下表现出统一的力学响应。整体性原则延伸至塔体长期性能维护,混凝土抗渗性与耐久性应视为整体结构安全的基础保障。混凝土材料选择需综合考量构件间相容性,避免因材料差异产生的界面弱化。风电混塔作为承载风机设备的关键结构,其混凝土整体性原则实质上反映了结构力学与材料科学的深度融合,是确保风电塔安全耐久的理论基石。

3 风电混塔施工中的混凝土应用与性能优化策略

3.1 基于多维度性能需求的定制化设计

风电混塔基于多维度性能需求的定制化设计必须综合考量结构承载力、环境适应性与使用寿命等关键因素。混凝土作为主体材料,其性能定制需满足垂直荷载、风荷载及地震作用下的刚度与强度要求,同时兼顾耐久性指标。优质的定制化混凝土配方应当在严苛温度变化条件下保持结构稳定性,减少微裂纹产生。在沿海地区,抗氯离子渗透性能尤为重要;高海拔区域则需重点关注抗冻融性能。结构底部承压区往往要求C60及以上高强度混凝土,而上部可适当降低至C40-C50,形成强度梯度分布,实现材料优化与经济性的平衡。

典型风电混塔C50混凝土施工案例中,配合比设计采用P•042.5水泥425kg/m³,水胶比控制在0.32,掺加粉煤灰15%、硅灰5%及高效减水剂1.8%。施工准备阶段应确保模板刚度与精度,钢筋间距符合设计间隙。混凝土泵送前预先湿润输送管道,避免初始混凝土离析。浇筑速率控制在250-300mm/h,确保分层浇筑间隔时间不超过2小时。振捣采用插入式振动棒,间距为振动半径的1.5倍,保证混凝土密实度。养护期间覆盖保湿材料并维持适宜温度,浇筑后3-7天内混凝土表面温差不宜超过20℃,防止温度应力导致裂缝产生。质量控制应重点监测每批次混凝土的坍落度、含气量及试块强度^[3]。

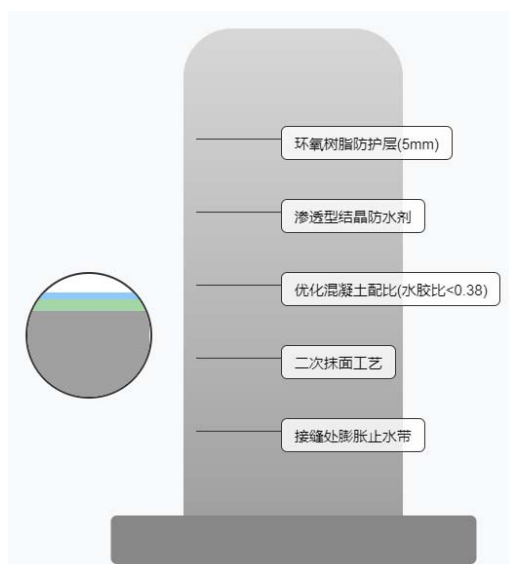
3.2 全流程精细化控制与装备升级

全流程精细化控制在风电混塔混凝土施工中体现为对原材料选择、配比设计、拌制过程、运输环节、浇筑作业及养护管理等各环节的精准把控。先进装备是实现精细化控制的物质基础,现代数据分析技术则为决策提供科学依据。风电混塔施工装

备升级主要涉及高性能搅拌站、智能化浇筑系统及养护监测设备等领域,这些装备能够精确掌控混凝土各项关键参数,根据实时数据调整生产工艺,在高温、低温、强风等极端气候条件下保持混凝土品质稳定,确保结构性能符合设计要求。

在华北某风电场混塔施工实践中,精细化控制体现在多个关键环节。混凝土原材料检验时,采用XRD矿物分析与激光粒度仪双重检测水泥活性,水泥掺量精确控制在 $\pm 2\text{kg}/\text{m}^3$ 范围内;配比阶段引入三参数优化算法,根据环境温度、风速生成定制配方,C60混凝土水胶比精确控制在 0.32 ± 0.01 ;生产环节采用变频智能搅拌站,实现 $\pm 3\%$ 的计量精度,出机温度控制在 $16\sim 20^\circ\text{C}$;运输采用GPS管理系统,从搅拌至浇筑时间严格限制在90分钟内;浇筑时配置液压式智能布料控制系统,浇筑速率维持在 $25\pm 3\text{m}^3/\text{h}$,分层厚度控制在30cm;养护期间布置超声波传感器网络,监测强度发展,养护温度梯度控制在 $15^\circ\text{C}/\text{m}$ 以内,确保混凝土内外温差不超过 25°C ,有效防止温度应力开裂^[4]。

3.3全寿命周期防护体系构建



图(一)风电混塔全寿命周期防护体系

风电混塔全寿命周期防护体系基于材料科学与结构工程学原理,将防护策略贯穿设计、施工、运维各环节。该体系立足混凝土耐久性理论,融合环境作用机理分析,构建多重屏障防御机制。防护设计需考量混塔所处气候区特性,将外部侵蚀因子如氯离子渗透、碳化作用、冻融循环等纳入评估范畴。以混凝土配比优化作为基础,辅以表面处理技术、内部阻锈剂添加、结构细部防护等综合措施,形成立体防护网络。混凝土基体改性技术显著提升密实度,使结构抵抗侵蚀能力倍增。防护体系设计应依据寿命预测模型,确定各防护层参数,形成科学合理的防护策略,确

保混塔在极端气候条件下仍能保持结构完整性与功能稳定性。

风电场某滨海混塔工程实践中,防护体系施工严格遵循全寿命周期理念。混凝土原料选用低碱硅酸盐水泥,掺加适量粉煤灰与矿渣微粉改善微观结构,水胶比控制在0.38以下。施工时采用二次抹面工艺,第一次抹面完成后静置2小时,待表层微观结构初步形成,再进行第二次抹面,增强表层密实度。硬化混凝土养护期间,覆盖湿麻袋并定期喷水,养护温度控制在 $15\sim 25^\circ\text{C}$,相对湿度保持在95%以上,养护期延长至28天。混凝土终凝后12小时内,涂刷渗透型结晶防水剂,形成自修复功能层。随后涂覆聚合物改性环氧树脂防护层,厚度5mm,确保表层抗渗性。竖向施工接缝处增设膨胀止水带,并采用高弹性密封胶封闭。基座与主体连接区域增设阴阳角加强筋,提升抗裂能力。施工完成后,定期检测结构电化学参数,建立健康监测数据库,为后期维护提供科学依据^[5]。

4 结语

风电混塔作为现代风力发电系统的核心支撑结构,其混凝土性能直接决定风电场安全运行与经济效益。本研究系统梳理了混凝土在风电混塔建设中的价值体现,构建了安全性、科学性、整体性三位一体的应用原则框架,提出了切实可行的性能优化策略。混凝土技术创新为风电混塔建设注入新活力。多维度性能需求定制化设计打破传统配比局限,精准匹配不同气候区域特点;全流程精细化控制与装备升级显著提升施工质量,确保理论设计与实际施工协调统一;全寿命周期防护体系构建则从源头解决混凝土耐久性问题,为风电混塔提供长期结构安全保障。

【参考文献】

- [1]黄赐荣,张栋梁.装配式风电混塔胶黏拼缝的内聚力本构模型及塔筒承载力研究[J].振动与冲击,2025,44(4):71-81.
- [2]全球首台UHPC150风电混塔进入工程化应用[J].江西建材,2024,(02):76.
- [3]张后禅.风电混塔行业技术发展现状及标准体系分析[J].能源,2023,(07):61-67.
- [4]袁国发,施液峰,张婷,等.低净空下地铁车站深基坑施工对高架桥桩变形影响研究[J/OL].三峡大学学报(自然科学版),1-8[2025-04-12].
- [5]李玉琼.钢混组合梁混凝土桥面板受力安全性及工业化预制技术[J/OL].铁道建筑技术,1-5[2025-04-12].

作者简介:

吕文健(1990--),男,满族,辽宁宽甸人,本科,工程师,从事的研究方向:电力工程技术。