

风电混塔项目质量管理的关键因素分析与控制措施

毕志超

国家能源集团科学技术研究院有限公司 江苏南京 210046

摘要: 随着风电产业向大容量、高海拔、复杂环境方向发展,混合式塔筒因兼具混凝土塔的稳定性和钢塔的轻量化优势,成为风电塔架的重要发展方向。混塔项目融合了混凝土施工与钢结构安装等多专业技术,其质量管理涉及设计、材料、施工、供应链等多个环节,复杂度远高于传统单一结构塔架。本文基于质量管理理论,结合混塔项目的技术特性,深入剖析影响项目质量的关键因素,助力提升混塔项目质量稳定性与可靠性。

关键词: 风电混塔; 项目质量管理; 关键因素; 控制措施; 全流程管控

引言

在“双碳”目标驱动下,风电产业作为清洁能源的核心组成部分,实现了规模化发展。随着风电机组单机容量不断提升,塔架高度持续增加,传统全钢塔架面临运输受限、成本攀升等问题,全混凝土塔架则存在施工周期长、自重过大等短板。混合式塔筒通过下部混凝土段与上部钢塔段的组合设计,有效平衡了稳定性、经济性与施工效率,在100米以上高海拔风电项目中得到广泛应用^[1]。混塔项目的质量直接决定风电机组的运行安全与寿命,其施工过程涉及混凝土浇筑、钢结构制作与安装、防腐处理等多道工序,各环节质量相互关联、相互影响,任一环节出现问题都可能引发塔架变形、承载力不足等重大质量隐患。因此,深入分析混塔项目质量管理的关键因素,构建科学的质量控制体系,对于推动风电混塔技术的成熟应用、保障风电项目整体质量具有重要现实意义。本文围绕混塔项目质量管理的核心环节,挖掘关键影响因素,提出系统性控制措施,为项目质量提升提供解决方案。

一、风电混塔项目质量管理的关键因素分析

(一) 设计阶段的参数匹配与工艺适配性

设计阶段是混塔项目质量控制的源头,其设计成果直接决定项目的质量基准与实施可行性。混塔的核心设计逻辑是通过混凝土段与钢塔段的力学性能匹配,实现整体结构的稳定性与经济性平衡,因此设计阶段的参数匹配度与工艺适配性是影响质量的首要因素^[2]。在参数匹配方面,混凝土段与钢塔段的连接节点设计是关键,需精准计算两者的刚度衔接、荷载传递路径,若连接节

点的强度设计不足或刚度突变过大,易导致塔架在运行过程中出现应力集中,引发疲劳损伤。同时,塔架的抗风、抗震参数设计需结合项目所在地的气候与地质条件,若忽略地域环境差异导致参数设计保守或不足,会造成质量过剩或安全隐患。

(二) 材料采购与进场检验的全流程管控

材料质量是混塔项目质量的物质基础,混塔的核心材料包括混凝土原材料、钢材、防腐材料等,各类材料的质量特性直接决定塔架的结构性能与耐久性。材料采购环节的供应商选择与质量标准约定是关键控制点,若选择的供应商缺乏相应的生产资质或质量管控能力,易导致材料性能不达标。例如,混凝土用水泥的强度等级不足、砂石的含泥量超标,会直接降低混凝土的抗压强度;钢材的屈服强度与韧性不符合设计要求,会影响钢结构的承载能力;防腐材料的附着力与耐候性不足,会缩短塔架的使用寿命^[3]。进场检验环节的管控缺失会导致不合格材料流入施工环节。部分项目存在进场检验流程不规范的问题,如仅对材料外观进行检查,未按标准要求抽样送检,或未对材料的质量证明文件(出厂合格证、检测报告)进行严格核验,导致如高强度螺栓的力学性能不达标、混凝土外加剂的适配性不佳等隐性质量问题未被发现。此外,材料的存储与保管环节也易被忽视,如钢材在存储过程中未采取防雨防潮措施导致锈蚀,混凝土原材料的堆放混乱导致混杂使用,都会影响材料的最终使用质量。

(三) 施工过程中的工序协同与技术交底

混塔施工是多工序、多专业协同作业的过程,混凝土施工、钢结构安装、连接节点处理、防腐施工等工序

的衔接质量与施工精度直接决定项目整体质量。工序协同性不够是施工质量问题的主要原因之一。钢塔段吊装要保证混凝土段施工完成后达到设计强度后才能吊装,如果没有严格控制养护时间提前吊装,会使混凝土段开裂;钢结构安装时,不和测量放线工序同步协同,会造成塔架垂直度偏差超标。同时,由于各专业施工队伍之间沟通不畅,也会带来质量问题,如混凝土施工队伍对混凝土段的顶面平整度没有向钢结构安装队伍交底,会增加钢结构拼接的难度,造成连接节点的应力集中^[4]。技术交底不到位,施工人员对质量标准理解偏差。混塔施工中涉及许多专项技术,如混凝土的泵送工艺、钢结构的焊接工艺、连接节点的灌浆工艺等,如果对技术交底仅停留在书面文件传递中,不结合现场实操进行讲解,施工人员就可能因为操作不当而造成质量缺陷。譬如焊接作业中未按交底要求控制焊接电流与焊接速度,造成焊缝出现夹渣、未焊透等缺陷;灌浆作业中未按要求控制灌浆料的水灰比与振捣时间,造成连接节点的承载性能受影响。此外,施工中隐蔽工程验收不严格,混凝土浇筑前对钢筋绑扎质量不进行验收,使隐蔽部位的质量问题无法追溯。

(四) 质量追溯机制的供应链管理

混塔项目的供应链包含原材料采购、零部件加工、成品运输等一系列环节,供应链的复杂性给质量责任追溯带来了较大的难度,完善的质量追溯机制是供应链质量的保障。某些项目供应链管理分散,各环节质量信息没有实现有效联通,例如原材料供应商没有提供批次可追溯的信息,钢结构加工厂没有记载钢材使用批次和焊接人员信息,导致出现质量问题时无法精准定位责任环节。例如,当检测出钢结构焊缝有质量缺陷时,如果不能追溯到焊接人员、使用的钢材批次和焊接设备参数,就无法针对性地整改。供应链中的运输与交付环节也存在质量管控盲区。混塔的钢结构构件体积大、重量重,在运输过程中若不采取有效的固定与防护措施,容易使构件变形;混凝土原材料在运输过程中不控制运输时间与搅拌速度,影响混凝土的和易性^[5]。同时交付环节的验收流程不规范,对运输后的构件没有进行变形检测,对混凝土的坍落度没有进行现场测试,会造成不合格产品流入施工环节。另外,供应链缺乏应急反应能力,当某一批次材料出现质量问题时,如果不能及时调配合格材料,可能导致中断施工或使用替代材料,影响项目质量。

二、风电混塔项目质量管理控制措施

(一) 加强设计阶段质量管控:从源头上保证设计合理

提升设计阶段质量管控水平,建立“参数优化+工艺适配+多方评审”的全流程设计管控机制。在参数设计方面,引入数字化模拟技术,通过有限元分析软件对混塔的整体结构力学性能进行仿真计算,重点优化连接节点的刚度匹配与荷载传递路径,保证节点设计满足强度与疲劳性能要求。同时结合项目所在地的风资源、地质条件等环境参数,进行专项气候适应性设计,避免参数设计盲目性。例如,针对高海拔地区的低温环境,优化混凝土的抗冻融参数与钢结构的低温韧性参数。在工艺适配性设计方面,建立设计与施工的协同机制,聘请施工技术人员参加设计评审,保证设计方案符合现场施工条件^[6]。比如,根据现场吊装设备的性能优化钢结构的分段长度,根据混凝土搅拌站的产能设计浇筑批次,避免因工艺不匹配而造成的质量问题。另外,编制详细的设计技术交底文件,明确各工序的质量标准、施工工艺要求及验收规范,如明确混凝土养护的温度控制范围、钢结构焊接的焊缝等级要求等,把设计意图传到施工环节。建立设计变更严格的审批流程,任何设计变更都需要进行技术论证和质量评估,避免随意变更导致的质量风险。

(二) 构建材料全生命周期质量管控体系:从采购到使用全程把关

材料质量管控需覆盖采购、进场、存储、使用全生命周期,建立“供应商准入+精准检验+动态管控”的管控体系。在采购环节,实施严格的供应商准入制度,通过资质审核、业绩评估、样品检测等方式筛选优质供应商,建立合格供应商名录并动态更新。与供应商签订明确的质量协议,约定材料的性能指标、质量证明文件要求及质量责任条款,如明确钢材的化学成分、力学性能及探伤检测要求,混凝土外加剂的减水率、含气量等指标。在进场检验环节,制定专项检验方案,实行“双人验收+抽样送检”制度。对混凝土原材料,除检查外观与质量证明文件外,按批次抽样检测水泥强度、砂石级配、外加剂适配性等指标;对钢结构构件,采用无损检测技术(如超声波探伤、磁粉探伤)检测焊缝质量,检查构件的几何尺寸与表面防腐涂层厚度;对连接螺栓等关键零部件,进行力学性能试验。建立材料质量追溯台账,记录材料的采购批次、供应商信息、检验结果、使

用部位等信息，实现质量问题的精准追溯。在存储与使用环节，划分专门的材料存储区域，对不同类型材料采取针对性防护措施，如钢材涂刷防锈漆并防雨防潮，混凝土原材料分区堆放并做好标识；施工时实行“先进先出”原则，对过期或变质材料坚决禁用^[7]。

（三）优化施工过程的工序质量管控：强化协同与动态巡检

施工过程质量管控需聚焦工序协同与技术落地，建立“样板引路+协同作业+动态巡检”的管控模式。实施工序样板引路制度，在各分项工程正式施工前，制作施工样板，明确施工工艺、质量标准及验收要求，组织施工人员进行现场交底与实操培训，待样板验收合格后再全面展开施工。例如，在连接节点灌浆施工前，制作灌浆样板，明确灌浆料的搅拌工艺、浇筑顺序及养护要求，确保施工人员掌握操作要点。加强各工序的协同管理，建立跨专业施工协调机制，明确各工序的施工顺序与衔接节点，制定混凝土浇筑与钢结构吊装的协同计划，明确混凝土养护达到设计强度后的吊装时间节点。推行“三检制”（自检、互检、交接检），上一道工序验收合格后方可进入下一道工序，重点加强隐蔽工程的验收管控，如钢筋绑扎、预埋件安装等隐蔽部位，需经监理单位与建设单位联合验收合格后才能进行后续施工。建立动态巡检机制，配备专职质量巡检人员，采用数字化巡检工具（如巡检APP）实时记录施工质量情况，对发现的质量问题下达整改通知并跟踪整改落实情况，形成“发现—整改—复查”的闭环管理。

（四）搭建供应链协同质量管理平台：实现质量信息全程追溯

供应链质量管控需打破信息壁垒，构建“信息共享+全程追溯+应急响应”的协同管理平台。依托数字化技术搭建供应链质量管理信息系统，整合原材料采购、零部件加工、成品运输各环节的质量信息，实现供应商、加工厂、施工单位、监理单位等多方信息实时共享。例如，供应商通过系统上传材料的生产批次、检测报告等信息，加工厂上传构件加工进度与质量检测数据，施工单位上传材料使用与施工质量信息，确保各环节质量信息可追溯。加强运输与交付环节的质量管控，与运输单位签订质量保障协议，明确构件固定、防护及运输路线要求，对大型钢结构构件采用专用运输设备并配备全

押运人员，实时监控运输过程中的构件状态。交付验收时，严格核对构件的质量证明文件与运输过程记录，对存在变形、损坏的构件坚决拒收。建立供应链应急保障机制，针对关键材料建立安全库存，与备选供应商签订合作协议，当主供应商材料出现质量问题时，可及时调配备选供应商的合格材料，避免施工中断。定期开展供应链质量审核，对供应商的质量管控能力进行评估，推动供应链整体质量提升^[8]。

结论

风电混塔项目的质量管理是一项涵盖设计、材料、施工、供应链等多环节的系统工程，其质量水平直接决定风电机组的运行安全与长期稳定性。本文通过分析发现，设计阶段的参数匹配与工艺适配性、材料全流程管控、施工工序协同与技术交底、供应链质量追溯机制以及质量管理体系运行效能是影响混塔项目质量的关键因素，各因素相互关联、相互作用，共同决定项目的整体质量水平。

参考文献

- [1] 吴子俊. 风电混塔安全设计研究[J]. 现代工程科技, 2025, 4(18): 17-20.
- [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] 黄继明, 董焕峰, 张后祥, 陈固定, 杨梁春, 熊泽峰, 李盼. 大型风电项目钢混塔筒综合建造技术[J]. 安装, 2022, (S1): 257-258.
- [4] 胡小坚. 混塔风电项目安全技术管理探讨[J]. 中国电力企业管理, 2022, (15): 93.
- [5] 本刊讯. 全球首个Double 16X批量风电混塔项目首吊成功[J]. 电器工业, 2022, (01): 3.
- [6] 王军, 刘文龙, 罗西, 等. 风电混塔预制C100混凝土管片裂缝分析与控制技术[J]. 混凝土与水泥制品, 2025(7).
- [7] 朱东, 吕伟荣, 徐伟. 频率法在风电机组混塔预应力索索力检测中的可行性分析[J]. 四川水泥, 2024(12): 43-45.
- [8] 张后祥. 风电混塔行业技术发展现状及标准体系分析[J]. 能源, 2023(7): 61-67.