

Research on Quality Control and Acceptance Standards in the Construction of Wind Turbine Hybrid Towers

Yongdi Jin Jinlong Li Zhigang Yuan Yifu Wang Liang Li

Huaneng (Dalian Pulandian) New Energy Co., Ltd., Dalian, Liaoning, 116200, China

Abstract

With the rapid development of wind power technology, the application of wind turbine hybrid towers is becoming increasingly widespread, and their construction quality directly affects the safe and stable operation of wind turbines and the overall efficiency of wind power projects. This study deeply and systematically analyzes the key links and acceptance standards of quality control in the construction process of wind turbine hybrid towers, integrates theoretical research results with practical engineering case experience, and constructs a rigorous, complete, and highly practical quality control and acceptance system. The aim is to provide valuable technical references for professionals in the wind power field and promote high-quality and sustainable development of the wind power industry.

Keywords

fan mixing tower; quality control; acceptance criteria

风机混塔施工中的质量控制与验收标准研究

金永帝 李金龙 苑志刚 王轶夫 李亮

华能（大连普兰店）新能源有限公司，中国·辽宁 大连 116200

摘 要

伴随风电技术的迅猛发展，风机混塔的应用日益广泛，其施工质量直接关乎风力发电机组的安全稳定运行以及风电项目的整体效益。本研究深入且系统地剖析风机混塔施工过程中的质量控制关键环节与验收标准，整合理论研究成果与实际工程案例经验，构建一套严谨、完备且具有高度实用性的质量控制与验收体系，旨在为风电领域专业人士提供极具价值的技术参考，推动风电行业高质量、可持续发展。

关键词

风机混塔；质量控制；验收标准

1 引言

在全球积极推动可再生能源发展的大背景下，风力发电作为成熟且高效的清洁能源技术，装机容量持续攀升。传统钢塔筒在应对大功率风机时，暴露出刚度不足、易受疲劳损伤及后期维护成本高昂等缺陷。相比之下，混凝土塔筒（混塔）凭借卓越的结构稳定性、出色的抗风性能和较低的全生命周期成本，在风电领域崭露头角，成为未来发展的重要趋势。然而，混塔结构复杂，施工工艺特殊，其施工质量控制与验收标准尚处于不断探索与完善阶段，诸多关键技术问题亟待深入研究与解决。论文聚焦于此，展开全面深入的探讨。

2 混塔施工质量控制关键点

2.1 原材料选择

在风机混塔施工的原材料选择环节，水泥作为关键胶凝材料，品种与性能至关重要。优先选用普通硅酸盐或矿渣硅酸盐水泥，因其水化热低，可降低温度应力致裂风险，且其强度等级需适配混塔混凝土设计强度，严格控制氧化镁、三氧化硫等有害成分含量^[1]。骨料占混凝土体积比大，细骨料氯离子含量应控在 0.06% 以内（以干砂质量计），颗粒级配宜选细度模数 2.3~3.0 的中砂以保障工作性与填充性，粗骨料注重强度、粒径（5~25mm 且连续级配）与形状（针片状颗粒含量≤10%）以减少空隙率并避免对和易性与强度的不利影响。而掺合料如粉煤灰、矿渣粉可替代部分水泥降低水化热、提后期强度与耐久性，外加剂如减水剂降水胶比提强度与工作性、缓凝剂延凝时间利大体积施工、引气剂增抗冻抗渗性，实际应用中需依混塔设计要求（强度等级、耐久性指标等）、施工环境（气温、湿度等）及原材料特性

【作者简介】金永帝（1983-），男，中国辽宁盖州人，本科，工程师，从事风电项目管理、风电场检修及维护研究。

经严谨试验确定掺合料与外加剂种类及最佳掺量。例如，在高温环境下施工时，适当增加缓凝剂掺量，可延缓混凝土凝结时间，防止因过快失水导致裂缝。在寒冷地区，适当提高引气剂掺量，能增强混凝土抗冻性能，相关原材料质量控制指标见表1。

表1 原材料质量控制指标

原材料	控制指标
水泥	强度等级、品种、水化热
骨料	粒型、集配、氯离子含量
掺合料	种类、掺量
外加剂	种类、掺量、相容性

2.2 混凝土配合比设计

混凝土配合比设计务必严格依循 JGJ 55《普通混凝土配合比设计规程》与 JGJ/T 281《高强混凝土应用规程》等行业标准规范，其为设计赋予科学方法与依据，保障严谨准确。设计时需充分考量混塔混凝土特殊需求，就预应力部分而言，采用预应力技术的混塔，其混凝土配合比要契合预应力施加传递要求，预应力筋张拉时混凝土抗压强度应达设计强度 75% 以上且弹性模量与预应力筋匹配，以保障预应力有效传递分布。针对承载力极限状态，依据混塔在正常运行、极端风荷载、地震作用等工况受力特性经结构力学计算明确所需抗压、抗拉等力学性能指标，通过合理调配水泥、骨料、掺合料与外加剂比例，使混凝土兼具强度与良好变形、韧性能力，如地震多发区适当添加纤维提升抗震性。至于耐久性和工作性，鉴于混塔长期处于复杂恶劣自然环境，应严控水胶比、增加掺合料用量以增强抗渗、抗冻、抗碳化与抗氯离子侵蚀能力，同时保障混凝土有适宜坍落度、良好粘聚性与保水性便于各施工环节操作。例如，在海洋环境下的混塔工程，应将水胶比严格控制在 0.4 以下，增加粉煤灰、矿渣粉等掺合料用量，同时选用高效减水剂，确保混凝土具有良好的抗氯离子侵蚀能力与工作性，混凝土配合比设计要求详见表2。

表2 混凝土配合比设计要求

项目	要求
强度等级	C60 以上，常用 C70-C80，研发 C100 及以上
配合比设计	符合 JGJ 55 和 JGJ/T 281 规定
耐久性	考虑环境条件和长期荷载作用

2.3 施工过程控制

在风机混塔施工过程中控制中，坍落度试验极为关键，它是衡量混凝土工作性的重要指标，施工时需依规定严格检测，当坍落度大于 220mm 时，还需测定坍落扩展度，因大坍落度混凝土的流动性与变形能力取决于二者，综合测定可精准评估工作性以满足工艺要求，如泵送工艺时适宜的坍落度与坍落扩展度可防堵管离析。混凝土浇筑与振捣是关键环节，应遵循分层、分段、连续浇筑原则，分层厚度依振捣方

式、结构特点和钢筋疏密而定，一般不超过 300~500mm，分层浇筑要保下层初凝前被上层覆盖免冷缝，振捣采用合适设备按规定时间与间距操作以排出空气、混合骨料与水泥浆达密实效果，振捣钢筋密集部位需选小直径振捣棒并延时长以保密实，且过程中要保护预埋管件、预应力筋等构件免位移损坏。养护环节不可或缺，目的是维持混凝土适宜温湿度促进水化反应、防失水过快或温度变化大导致裂缝，养护时间不少于 14 天，可采用覆盖保湿、洒水、喷涂养护剂等方式，混塔构件顶部等易失水部位应强化养护，如高温干燥季用遮阳篷覆盖并增洒水频率降温减蒸发，寒冷季用保温材料覆盖保障内部温度不低于 5℃。

3 混塔验收标准

3.1 外观检查

混塔外观检查涵盖多方面要点：首先，表面平整度与完整性，需借助靠尺、平整度检测仪等测量，将表面平整度偏差控制在 $\pm 5\text{mm/m}$ 以内，同时留意是否有凹凸不平、蜂窝、麻面等缺陷，因其不仅有损外观，更可能成为应力集中处，降低结构强度与耐久性，像蜂窝、麻面会削弱混凝土表面密实性，为水分与有害气体入侵提供通道，加速钢筋锈蚀与混凝土劣化。其次，裂纹与漏浆检查，要仔细查看表面裂纹，宽度小于 0.2mm 的依其分布、深度及对结构安全影响评估处理，较宽或贯穿性裂纹则需深入结构分析与加固，还需检查模板拆除后有无漏浆，漏浆会致混凝土局部不密实，影响强度与外观，发现漏浆应及时修补。最后，模板拆除后表面光洁度，光洁表面体现模板选型、安装及混凝土浇筑振捣工艺的合理性，不仅美观还可减风阻、提高风机运行效率，检查时关注模板拼缝、粘模及振捣不当致表面不平整问题，不符合要求时需剖析原因并优化模板材质与拼接工艺、调整振捣参数等^[2]。

3.2 质量控制

在混塔质量控制方面，一是混凝土配合比与性能指标的验收，需严格比对实际与设计配合比，核查水泥、骨料、掺和料及外加剂用量是否达标，检测坍落度、抗压强度、抗拉强度等性能指标，按规定养护龄期（如 28 天、56 天）开展标准与同条件养护试件的抗压强度试验，如 C50 混塔混凝土 28 天标准养护试件抗压强度平均值不低于 50MPa 且最小值不低于 46MPa，且依据混塔结构与设计要求，可能还需检测弹性模量、抗渗性、抗冻性等确保符合设计及标准规范。二是焊缝、预应力筋与钢筋检查，对于混塔中的焊接部位（如钢塔筒与混凝土基础的连接焊缝、内部钢结构的焊接节点等），应进行焊缝外观检查与无损探伤检测。焊缝外观应平整，无咬边、气孔、夹渣等缺陷，无损探伤检测结果必须符合相关焊接质量标准要求，如 GB 50661《钢结构焊接规范》。预应力筋检查包括预应力筋的规格、数量、位置以及预应力施加值是否符合设计要求，可通过预应力筋

张拉记录、预应力检测仪器等手段对预应力筋的预应力施加情况进行详细核实，确保预应力筋在混塔结构中能够有效发挥作用。钢筋检查主要聚焦于钢筋的品种、规格、数量、间距以及钢筋的嵌设长度和保护层厚度。钢筋嵌设长度应满足锚固要求，保护层厚度应符合设计规定，一般不应小于 30~50mm，以有效防止钢筋锈蚀，保证混塔结构的耐久性。例如，可采用电磁感应法、雷达法等无损检测技术对钢筋的保护层厚度进行精确检测，确保其在允许偏差范围内，质量控制验收指标见表 3。

表 3 质量控制验收指标

项目	验收标准
混凝土配合比	符合设计要求
坍落度	符合要求，大于 220mm 时需测定扩展度
抗压强度	达到设计强度要求
焊缝	符合相关标准
预应力筋	有充分的嵌设长度和保护层
钢筋	规格、数量、间距符合图纸要求

3.3 耐久性与抗风性能测试

3.3.1 抗风性能测试

混塔作为风力发电机组的支撑结构，其抗风性能直接关系到风机的安全运行。抗风性能测试通常采用风洞试验、数值模拟分析等方法。风洞试验能够模拟实际风场环境，对混塔模型进行不同风速、风向角下的受力测试，获取混塔的风荷载分布特性、风振响应等关键数据。数值模拟分析则利用计算流体力学（CFD）与结构动力学有限元分析软件，建立混塔的三维模型，计算其在风荷载作用下的应力、位移、振动频率等参数。通过抗风性能测试，评估混塔的抗风稳定性与安全性，确保其在设计使用年限内能够承受各种风况作用，不发生倒塌、过度变形等危险情况^[3]。例如，根据风机所在地区的风况资料，确定设计基准风速，在风洞试验或数值模拟分析中，以设计基准风速为基础，考虑一定的安全系数，对混塔的抗风性能进行全面评估。

3.3.2 耐久性评估

耐久性评估是混塔验收的重要内容之一，需要综合考

虑多种环境因素对混塔结构的长期影响。通过对混凝土的抗渗性、抗冻性、抗碳化能力以及钢筋锈蚀情况等耐久性指标进行检测与分析，评估混塔在不同环境条件下的耐久性寿命。例如，在海洋环境下，重点检测混凝土的氯离子侵蚀深度、钢筋的锈蚀速率等指标。在寒冷地区，关注混凝土的冻融循环损伤情况。同时，结合混塔的设计使用年限，判断其是否能够满足长期稳定运行的要求。耐久性评估可采用现场检测与室内加速试验相结合的方法。现场检测可直接获取混塔在实际环境中的耐久性现状数据，室内加速试验则能够在较短时间内模拟长期环境作用，预测混塔的耐久性发展趋势，为混塔的维护与管理提供科学依据。

4 结论

本研究对风机混塔施工中的质量控制关键点与验收标准进行了深入、全面且系统的探讨。从原材料选择、混凝土配合比设计、施工过程控制等方面详细阐述了质量控制的关键环节与技术要点，并针对混塔验收的外观检查、质量控制、耐久性与抗风性能测试等方面提出了明确的验收标准与检测方法。通过紧密结合理论与实践经验，成功构建了一套科学合理、严谨完善的风机混塔施工质量控制与验收体系。该体系的建立与应用，有助于显著提高风机混塔施工质量的可可靠性与稳定性，有力保障风力发电机组的安全高效运行，推动风电行业朝着更加健康、可持续的方向蓬勃发展。展望未来，随着风电技术的持续创新与进步，风机混塔施工的质量控制与验收标准仍需不断优化与完善，以更好地适应新的技术要求与工程挑战，为全球可再生能源事业的发展贡献更大力量。

参考文献

[1] 彭国祥,朱坤奇.高塔架风电机组吊装设备对比分析[J].现代制造技术与装备,2024(4).

[2] 张晓钊,周绪红,王宇航,等.风电机组钢-混凝土混合结构塔筒自振频率实用计算方法研究[J].特种结构,2022(3).

[3] 中国风电行业市场前景及投资研究报告(下)[J].电器工业, 2022(2).