

# Key technologies and economic analysis of fan mixing tower structure construction in high wind speed areas

Shuaicheng Liang Weibo Li

China Water North Survey and Design Research Co., Ltd., Tianjin, 300222, China

## Abstract

High-wind-speed regions, where abundant wind energy resources are concentrated, represent a crucial frontier for renewable energy development. However, strong wind loads pose severe challenges to the structural integrity of wind turbine towers. Traditional all-steel towers are susceptible to wind-induced vibrations, while all-concrete towers face application limitations due to excessive self-weight. The hybrid tower combining concrete and steel structures has emerged as an ideal solution for high-wind environments, leveraging its advantages in stiffness and lightweight design — Its lower concrete section provides lateral stiffness, while the upper steel structure reduces vertical loads, achieving a balance between wind resistance and cost-effectiveness. Nevertheless, constructing hybrid towers in high-wind conditions faces technical bottlenecks including wind-resistant equipment selection and precision control of joint connections, with economic viability requiring breakthroughs in initial costs. Therefore, exploring key construction technologies for such structures and evaluating their application value through cost-benefit analysis holds significant importance for advancing efficient wind power development in high-wind regions.

## Keywords

high wind speed area; fan mixing tower; key construction technology; economic analysis

## 高风速地区风机混塔结构施工关键技术及经济性分析

梁帅成 李伟博

中水北方勘测设计研究有限责任公司, 中国·天津 300222

## 摘要

高风速地区风能资源富集, 是新能源开发的重要领域, 但强风荷载对风机塔筒结构提出严苛挑战。传统全钢塔筒易受风致振动影响, 全混凝土塔筒因自重过大限制应用, 混凝土-钢结构组合的混塔凭借刚度与轻量化优势, 成为适配高风速环境的理想选择——其下部混凝土段提供抗侧刚度, 上部钢结构段降低顶部荷载, 在抗风与经济性间形成平衡。然而, 高风速环境下混塔施工面临抗风设备选型、节点连接精度控制等技术瓶颈, 且其经济性需突破初期成本局限。因此, 探究此类结构的施工关键技术, 结合成本与收益分析其应用价值, 对推动高风速地区风电高效开发具有重要意义。

## 关键词

高风速地区; 风机混塔; 施工关键技术; 经济性分析

## 1 引言

风能作为清洁低碳能源, 在“双碳”目标推动下, 高风速地区(如沿海、高原风区)开发加速。风机塔筒作为核心承载结构, 其性能直接影响机组安全与效率。混塔结构通过材料协同优化, 弥补传统塔筒缺陷, 但高风速环境加剧了施工复杂性: 强风干扰吊装精度与混凝土浇筑稳定性, 节点连接质量关乎结构整体性, 同时其经济性争议(初期成本与长期收益平衡)亟待厘清。

【作者简介】梁帅成(1982-), 男, 中国吉林人, 本科, 高级工程师, 从事电气工程研究。

## 2 高风速地区风机混塔结构特点及设计要求

### 2.1 混塔结构组成与优势

下部设置混凝土段, 依托材料自身刚度抵御强风荷载带来的侧向推力, 为整体结构提供稳定支撑; 上部采用钢结构段, 通过轻量化设计降低顶部风荷载作用下的惯性力, 减少结构振动响应。

混凝土材料多选用 C40/C50 高性能混凝土, 其配比设计兼顾抗压强度与韧性, 可有效抵抗强风环境下的反复应力作用, 减少裂缝产生, 同时具备良好的抗渗性, 适应高湿度沿海或高原风区<sup>[1]</sup>。钢结构采用 Q355ND 等耐候钢, 其低温冲击韧性与耐大气腐蚀性能优异, 与混凝土的弹性模量形成梯度匹配, 避免连接部位因变形差异产生应力集中。

抗风设计结合高风速地区湍流特性, 计算阵风系数与脉动风荷载, 确保结构在 50 年一遇极端风速下的承载安全。

通过结构模态分析,使塔筒自振频率避开风机运行激振频率及风荷载主导频率,防止共振效应引发的疲劳破坏,提升长期运行稳定性。

## 2.2 高风速地区对混塔施工的特殊要求

当风速达到 10m/s 及以上,吊装作业需严格管控,起重吊臂稳定性下降可能引发构件摆动,此时应暂停主吊作业;高空作业平台抗风能力面临考验,作业人员移动及操作精度受气流干扰,需启用平台锁止系统。

轴线偏差需控制在 5mm/m 以内,通过激光投点仪实时校准模板或钢构件定位;垂直度偏差同样不得超过 5mm/m,每施工段需进行不少于 3 次全站仪监测,确保过渡段法兰面贴合严密。

混凝土表面需采取碳化防护,浇筑后 24 小时内喷涂渗透型养护剂,形成致密保护膜;钢结构除锈等级需达到 Sa2.5 级,涂装体系采用氟碳面漆,干膜厚度不小于 80  $\mu\text{m}$ ,抵御风沙颗粒长期冲刷导致的涂层磨损。

## 3 高风速地区风机混塔施工关键技术

### 3.1 施工前期准备与方案优化

施工前需收集项目区域近 10 年风资源数据,包括逐时风速、风向频率及极端风速出现时段。通过风玫瑰图分析主导风向与风速分布规律,结合施工工序耗时,划定有效施工窗口期<sup>[2]</sup>。例如沿海地区需避开 6-10 月台风季,选择春秋季节日均风速  $\leq 8\text{m/s}$  的时段进行混凝土浇筑与钢结构吊装。针对突发性阵风,需建立 1 小时滚动风速预警机制,当预测风速将在 2 小时内达到 10m/s 时,提前安排工序暂停与设备加固。

为匹配高风速环境作业需求,履带式起重机应配备超起装置,通过增加配重与臂架支撑强度,使额定工作风速提升至 12m/s 以上,确保吊重状态下的稳定性。主吊机械需加装风荷载补偿系统,实时调整吊绳张力以抵消阵风引起的构件摆动。防风型模板体系优先选用液压爬模,其附墙装置与塔筒预埋件的连接强度需满足抗风载  $\geq 0.5\text{kPa}$  要求,模板面板采用加厚钢板与加强肋组合结构,抵御强风对混凝土浇筑面的冲击。

场地周边设置连续式防风围挡,采用 H 型钢立柱与彩钢板组合结构,高度  $\geq 6\text{m}$ ,底部与混凝土垫层锚固连接,整体抗风载能力  $\geq 0.6\text{kPa}$ ,降低围挡内侧施工区域风速。材料堆放区按材料特性分区设置防风固定设施,钢结构构件堆放采用型钢支架与地锚组合固定,单堆构件通过钢丝绳呈三角形拉结,确保在 10m/s 风速下无位移;袋装水泥堆放区搭设封闭式防护棚,棚体骨架采用螺栓连接,顶部覆盖防水帆布并加压型钢条,防止强风掀翻覆盖物。

### 3.2 下部混凝土塔筒施工

模板体系抗风设计是核心环节。液压爬模的附墙装置采用 M30 高强度锚栓,数量较常规配置增加 20%,锚栓间

距控制在 1.5m 以内,通过植筋工艺嵌入混凝土墙体深度不小于 200mm,配合双螺母锁紧结构形成多重抗拔防线。模板侧向支撑选用 16 号工字钢,一端与爬模桁架刚性连接,另一端通过耳板与塔筒预埋件销轴连接,预埋件采用十字形加劲肋设计,预埋位置偏差控制在  $\pm 5\text{mm}$  内,确保支撑体系在 10m/s 风速下的侧向刚度。

高风速 6-10m/s 条件下,混凝土浇筑采用阶梯式分层推进工艺,每层浇筑厚度控制在 300mm 以内,布料机出口加装防风导流罩,减少风力对混凝土下落轨迹的干扰。振捣作业选用高频振动棒,振捣频率提升至 150Hz,插入点间距加密至 300mm,每点振捣时间延长至 30-40s,确保骨料在风力扰动下仍能充分密实。混凝土初凝前,表面先覆盖 30mm 厚阻燃保温被,再覆盖 2 层防风无纺布,边缘用钢管压实,形成防风保湿保护层,避免表面因风速过大产生塑性收缩裂缝。

强风环境下混凝土养护采用双重防护体系。浇筑完成 8 小时后,先喷涂渗透型硅烷养护剂,喷涂压力控制在 0.4MPa,确保药剂均匀渗透至混凝土表层 5mm 深度;2 小时后覆盖 0.12mm 厚聚乙烯塑料薄膜,接缝处重叠宽度不小于 100mm,并用胶带密封,薄膜外再压设 U 型槽钢,防止被强风掀起。养护周期延长至 14 天,期间每日监测薄膜内湿度,低于 85% 时及时补喷养护剂,确保混凝土强度增长不受风力干燥影响。

### 3.3 上部钢结构塔筒施工

分段吊装在 8-12m/s 风速下进行,采用 250t 与 150t 履带吊双机抬吊工艺。主吊机站位距塔筒基础中心 18m,吊臂长度 36m,主吊角度控制在  $60^\circ$  以内;辅助吊机承担 30% 吊重,通过变幅调整使构件呈  $15^\circ$  倾斜状态,减少风荷载迎风面积。吊装索具选用  $\Phi 36\text{mm}$  高强度钢丝绳,与构件吊耳采用轴销连接,索具夹角控制在  $45^\circ - 60^\circ$  之间。临时支撑采用  $\Phi 273\text{mm}$  螺旋钢管,底部与混凝土基础预埋钢板焊接,顶部通过万向节点与钢塔筒法兰连接,支撑间距 4.5m,单根支撑轴向刚度  $\geq 20\text{kN/m}$ ,侧向设置斜向拉索,形成三角形稳定体系。

焊接作业需搭建全封闭防风棚,棚体采用轻型钢框架与防火帆布组合结构,骨架节点采用螺栓连接,底部与钢塔筒外壁磁吸固定,确保在 10m/s 风速下无晃动。棚内安装轴流风机与温湿度传感器,当监测到棚内风速  $> 2\text{m/s}$  时自动启动排风调节。环境温度  $< 5^\circ\text{C}$  时,采用电加热片对焊接区域预热,加热范围为焊缝中心两侧各 150mm,通过红外测温仪实时监测,确保预热温度达到 80-120 $^\circ\text{C}$ ,层间温度保持不低于 150 $^\circ\text{C}$ ,焊接完成后立即覆盖保温棉缓冷。

混凝土 - 钢结构过渡段法兰面施工时,先采用全站仪定位法兰螺栓孔位,再用激光测平仪按直径方向布 8 个测量点,逐点校准平整度,误差控制在 2mm 以内<sup>[3]</sup>。高强螺栓终拧采用智能扭矩扳手,配备风荷载传感器,当监测到瞬

时风速 > 6m/s 时, 扳手自动补偿扭矩值 (每增加 1m/s 风速补偿 3% 扭矩)。终拧分两次进行, 第一次达到设计扭矩的 80%, 间隔 30min 后进行第二次终拧至设计值, 全过程采用无线传输记录扭矩-转角曲线, 确保每个螺栓受力均匀。

### 3.4 施工过程监测与风险控制

布设多层次感知网络实时监测风荷载: 在塔筒顶部 3m 高度处安装超声波风速传感器, 采样频率设定为 1Hz, 数据通过 4G 模块实时传输至中控系统。吊装设备的吊臂顶部及操作室分别加装风速变送器, 测量范围覆盖 0-40m/s, 精度达  $\pm 0.3\text{m/s}$ 。当监测到瞬时风速超过 12m/s (吊装作业) 或 10m/s (高空作业) 时, 系统自动触发声光报警, 同时切断起重设备动力电源, 强制停止作业, 待风速降至安全阈值以下且稳定 10 分钟后, 方可手动解锁。

采用全站仪监测结构变形, 按施工段分层控制。每完成一个混凝土浇筑段或钢结构吊装段, 需进行 3 次垂直度测量: 首次在工序完成后 2 小时内, 第二次在 12 小时后, 第三次在 24 小时后。监测点沿塔筒外壁圆周方向均匀布设 4 个, 采用强制对中基座, 测量精度控制在  $\pm 2\text{mm}$ 。当任一监测点垂直度偏差超过 10mm 时, 立即启动纠偏程序: 混凝土段通过调整模板支撑丝杆进行微调, 每次调整量不超过 5mm; 钢结构段通过临时支撑顶推校正, 单次顶推力不超过构件自重的 15%。

高空作业安全防护实施多重保障。作业平台两侧加装防风锁止器, 当风速超过 8m/s 时, 锁止器与塔身导轨自动咬合, 制动距离  $\leq 100\text{mm}$ 。平台周边设置 1.2m 高防护栏杆, 底部张设 300mm 高挡脚板, 栏杆内侧悬挂密目安全网, 网目密度  $\geq 2000$  目 /  $100\text{cm}^2$ 。作业人员配备双钩防坠安全带, 两个挂钩分别连接不同的生命线节点, 生命线采用  $\Phi 12\text{mm}$  镀锌钢丝绳, 每隔 1.5m 设置一个固定锚点, 锚点抗拔力  $\geq 15\text{kN}$ , 确保任一锚点失效时仍能提供有效保护。

## 4 高风速地区风机混塔经济性分析

### 4.1 初期成本对比

混塔下部混凝土段采用 C40/C50 混凝土配合普通钢筋, 上部钢结构段选用 Q355ND 耐候钢, 较全钢塔减少 30%-40% 的高强度钢用量。全混凝土塔需消耗大量钢筋混凝土, 基础材料用量比混塔增加 25% 以上, 因自重过大导致的基础配筋量提升进一步推高成本。

抗风型起重机、防风模板等设备租赁费用较常规设备溢价 15%-20%, 吊装机械闲置时间增加使单位台班成本上升。施工窗口期压缩导致人工效率降低 10%-15%, 窝工费用占人工费比例达 8%。防风围挡、焊接防护棚等措施费约占总施工费的 6%-8%, 高于普通风区 3-4 个百分点。某沿海风场 2.5MW 风机数据显示, 混塔初期总成本约 850 万元, 较全钢塔 (920-950 万元) 低 8%-12%, 较全混凝土塔 (800-810 万元) 高 5%-8%, 材料节省抵消部分施工附加成本后仍具

比较优势。

### 4.2 运维成本与收益

混塔下部混凝土段无结构性维护需求, 仅需每 10 年进行表面碳化检测; 上部钢结构段采用氟碳涂层体系, 每 5 年开展一次防腐处理, 单塔维护费用约 8 万元<sup>[4]</sup>。全钢塔因整体暴露于强风环境, 每 3 年需进行一次全面防腐, 单塔年均维护成本较混塔高 60%。全混凝土塔受温度应力与风荷载反复作用, 裂缝修补频率达每年 1-2 次, 单次修补费用随塔高增加呈线性上升。

高风速环境下, 混塔组合结构刚度分布合理, 风致振动振幅较全钢塔降低 30%-40%, 机组因振动超限的停机率下降 2%-3%。按年等效利用小时数 2800h 计算, 单塔年发电量可增加 1.5%-2%, 折合度电收益提升约 12 万元 / 年。以 20 年为全生命周期, 采用 8% 折现率计算, 混塔净现值 (NPV) 约 420 万元, 较全钢塔 (365-380 万元) 高 10%-15%, 全混凝土塔因发电效率偏低, NPV 比混塔低 8%-10%。

### 4.3 敏感性

钢材价格波动  $\pm 10\%$  时, 混塔初期成本随之变动 6%-7%, 全钢塔成本波动幅度达 11%-13%。当钢材涨价 10%, 混塔全生命周期净现值 (NPV) 下降 5%-6%, 全钢塔 NPV 下降 9%-10%; 钢材降价 10%, 混塔 NPV 提升 4%-5%, 全钢塔 NPV 提升 8%-9%。

风速变化  $\pm 5\%$  对经济性影响更直接。风速提高 5%, 混塔年发电量增加约 4%-5%, 带动 NPV 上升 8%; 风速降低 5%, 年发电量减少 4%-5%, NPV 下降 7%-8%。此影响幅度远超材料价格波动带来的变化。

施工周期延误  $\pm 1$  个月, 混塔初期成本增加 2%-3%, NPV 下降 2%-2.5%; 提前 1 个月完工, 成本减少 1.5%-2%, NPV 提升 1.5%-2%。相较而言, 其对经济性的扰动小于材料价格与风速因素。

## 5 结语

综上所述, 风机混塔结构通过优化抗风工艺与节点控制, 保障了工程安全与效率; 又从全生命周期视角阐明其经济性优势, 为新能源项目投资提供科学依据, 推动风能开发与成本控制的协同发展。今后需探索新型复合材料与智能施工技术的融合, 提升结构抗风冗余度与经济性, 助力高风速地区风电产业向高效、可持续方向演进。

### 参考文献

- [1] 宋宁, 赵新宏, 潘启科, 等. 混凝土塔筒风机基础有限元模拟计算及结构优化研究[J]. 科学技术创新, 2025, (10): 121-125.
- [2] 喻文超, 罗国甘, 黄声富, 等. 基于光纤传感的混塔结构风机安全监测系统的研究与应用[J]. 中国设备工程, 2024, (S1): 60-67.
- [3] 宋波, 卢晨虎, 徐明磊, 等. 储液高度对氧化风机塔结构抗震性能影响的研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2023, 45(01): 98-104.
- [4] 王经亚. 陆上风电塔筒产品发展趋势探析[J]. 中国设备工程, 2022, (10): 223-226.