DOI: 10.19666/j.rlfd.202507122

风力发电机组混塔结构安全性研究

兰 昊[1]，李国庆[2]，闫俞廷[1]，李晓博[1]，于博文[1]，丁伯松[3]，王 超[3]，王亮亮[4]
（1. 西安热工研究院有限公司，陕西 西安 710054；
2. 华能新能源股份有限公司，北京 100036；
3. 华能安徽风电分公司，安徽 合肥 230031；
4. 西安益通热工技术服务有限责任公司，陕西 西安 710032）

［摘 要］【目的】风电混塔结构凭借其优异的刚度和稳定性，已成为低风速区域风力发电机组的重要支撑结构。然而，混塔结构施工过程复杂，塔筒错台、结构胶缺失等缺陷频发，严重威胁塔体结构的安全性，进而影响风电项目的整体可靠性与经济效益，急需安全施工与高效运维指导。【方法】以某风场 4.2 MW 事故风机混塔结构为研究对象，采用有限元分析软件 ABAQUS 分别建立了多种缺陷下塔体结构的精细化有限元模型，系统分析了错台、缺胶、垫板超高、钢绞线松弛等多种潜在风险因素对塔体结构力学性能的影响机理，并给出了相应的工程建议。【结果】混凝土塔筒间垫板过高或结构胶施工不当将显著削弱塔体结构的安全性，亟需强化施工过程的质量控制；混凝土强度不足或钢绞线松弛对塔体结构的安全性影响较大，施工中应留有安全冗余；混凝土塔筒间小距离错台对塔体结构的力学性能有一定影响。基于上述研究成果，提出了针对性的工程优化建议。

［关 键 词］风力发电；混塔结构；有限元分析；施工缺陷；结构安全性

［引用本文格式］兰昊，李国庆，闫俞廷，等. 风力发电机组混塔结构安全性研究[J]. 热力发电，2026, 55(5): 82-89. LAN Hao, LI Guoqing, YAN Yuting, et al. Research on the safety of hybrid tower structures for wind turbine generators[J]. Thermal Power Generation, 2026, 55(5): 82-89.

Research on the safety of hybrid tower structures for wind turbine generators

LAN Hao[1], LI Guoqing[2], YAN Yuting[1], LI Xiaobo[1], YU Bowen[1], DING Bosong[3], WANG Chao[3], WANG Liangliang[4]
(1. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;
2. Huaneng Renewables Corporation Limited, Beijing 100036, China;
3. Huaneng Anhui Wind Power Generation Co., Ltd., Hefei 230031, China;
4. Xi'an Yitong Thermal Technology Service Co., Ltd., Xi'an 710032, China)

Abstract: [Objective] Hybrid tower structures have emerged as crucial supporting structures for wind turbine generators in low-wind-speed regions. However, the hybrid towers have a complicated construction process, leading to frequent occurrences of defects such as tower step misalignment and structural adhesive deficiency. These defects pose a significant threat to the structural integrity of the tower, thereby impacting the overall reliability and economic efficiency of wind power projects. There is an urgent need for safe construction and efficient operation and maintenance guidance. [Method] Taking the damage of a 4.2 MW concrete-steel hybrid tower as a case, ABAQUS was used to establish finite element models of the tower structure under various defect scenarios, including joint misalignment, insufficient adhesive at joint interfaces, and excessive pad height, to investigate the influence mechanism on structural performance and derive engineering recommendations. [Results] Excessive pad height, insufficient adhesive application, inadequate concrete strength, joint misalignment, and insufficient pretensioning of steel strands collectively contribute to the degradation of the tower structure's safety. Based on the aforementioned

收 稿 日 期：2025-07-06 修 回 日 期：2025-08-01 接 受 日 期：2025-08-08
基 金 项 目：中国华能集团科技项目（TP-24-HJK42）；西安热工研究院自主科技项目（TP-24-TZK35）
Supported by: Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (TP-24-HJK42); Independent Technology Project of Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd. (TP-24-TZK35)
第一作者简介：兰昊（1991），男，硕士，工程师，主要研究方向为风力发电机组可靠性与安全性，Lanhao@tpri.com.cn。
通信作者简介：闫俞廷（1994），男，硕士，工程师，主要研究方向为风力发电机组可靠性与安全性，Yanyuting@tpri.com.cn。

research findings, this paper proposes targeted engineering optimization recommendations.
Key words: wind power; hybrid tower structure; finite element analysis; construction defects; structural safety

随着风电建设迅猛发展，我国适宜开发的平均风速较高的风力发电区域日益减少，资源稀缺性凸显[1]。为了在有限的资源条件下提高风力发电效率，风电机组的轮毂高度持续提升，风机整体质量也随之显著增加[2]。这一趋势对支撑结构提出了更高要求，亟需更高、更稳定的支撑混塔来确保机舱和叶轮系统能够稳固在预设的设计高度，以充分发挥风电机组的高效运行潜力[3]。然而，随着钢塔设计高度加大，钢塔的壁厚大幅增加，自振频率却随之降低，这不仅使得钢塔的运输和加工面临诸多技术难题，还导致其经济性大幅下降。此外，传统钢塔柔性较大，在风载作用下塔顶摆幅较大，难以满足风机发电机组的稳定性要求，进而影响风电机组的安全运行[4]。

在此背景下，混凝土-钢组合混塔结构凭借其优异的稳定性和刚度，成为低风速区风力发电机组的主流支撑结构之一。尽管组合混塔结构在理论上具有诸多优势，但其施工过程较为复杂。施工过程中易出现塔筒错台、结构胶缺失、预应力不足等施工缺陷，这些缺陷将直接威胁到塔体结构的安全性，进而影响风电机组的稳定运行和寿命[5]。目前，针对此类风险因素对混塔结构受力性能影响机理的研究尚不完善，相关理论和实践经验的缺乏在很大程度上制约了我国风电行业的进一步发展[6]。具体而言，现有研究多集中于单一缺陷的影响，缺乏对多种缺陷耦合效应的系统分析；同时，施工现场环境复杂多变，理论研究结果在实际应用中往往存在偏差，亟需建立更精准的模型和更全面的评估体系。

深入研究组合混塔结构在复杂施工条件下的力学行为及其安全性影响因素，不仅是提升风电塔结构设计与施工水平的关键，更是推动我国风电行业健康和可持续发展的必由之路。为此，本文以某风场发生的 4.2 MW 事故混凝土-钢组合风机混塔为典型案例，依托有限元分析软件 ABAQUS，系统地开展了混塔结构在建设过程中多种潜在风险因素对其受力性能影响机理的深入研究，揭示了多个缺陷因素在不同工况下的作用机制及其对结构安全性的潜在威胁，定量评估了各风险因素对混塔结构性能的负面影响程度，探讨了多种缺陷耦合作用下的综合效应，为风电行业混塔结构的安全设计与高效施工提供科学依据和实践指导，有效提升风电项目的整体可靠性和经济性。

1 研究对象

事故风机混塔位于 A 风场，额定功率为 4.2 MW，采用预制混凝土-钢组合混塔结构，混凝土塔筒部分高 131 m，钢塔筒部分高 27 m，轮毂中心高 160 m。混凝土塔筒部分采用变径构造，沿高度方向分为 3 段等截面塔筒，每段由若干塔节组成，各段之间通过转换段连接。塔节编号从低到高分别为 A0—A7、TD1、B1—B8、TD2、C1—C15、TD3 以及钢转接段，其中 A0 段与基础浇筑为一体。混凝土塔筒部分采用体外预应力锚索锚固，塔节之间采用结构胶粘接。

2 荷载与工况

2.1 荷载作用

风机混塔的分析计算需考虑塔体结构自重、设备荷载、塔体风荷载以及附加弯矩[7-8]。设备荷载包括机舱与叶轮系统自重、轮毂扭矩以及叶轮所受风推力[9]。

2.1.1 恒荷载

恒荷载主要由塔体结构及设备自重组成。塔体结构自重通过有限元软件自动计算，重力加速度取 9.8 m/s^2。将机舱与叶轮系统等效为集中质量，施加于有限元模型中机舱-叶轮系统形心所在的参考点。

2.1.2 塔体风荷载

塔体结构只考虑顺风向响应。风荷载参照《高耸结构设计标准》（GB 50135—2019）与《建筑结构荷载规范》（GB50009—2012）从严计算。基本风压按 50 年重现期取为 0.55 kN/m^2，地面粗糙度为 B 类。沿混塔高度将混塔的每个塔节视为 1 段，风荷载分段计算。计算时考虑 0°、45°和 90°3 个风向角，以涵盖结构的最不利角度。

2.1.3 叶轮所受风推力

叶轮所受风推力为：

$$F_{\mathrm{XN}} = P_{\mathrm{N}} A \tag{1}$$

$$P_{\mathrm{N}} = \frac{C_{\mathrm{FB}} \rho \upsilon_{\mathrm{R}}^2}{2} \tag{2}$$

式中：P_{N} 为作用在叶轮扫掠面积上的平均风压力；

C_{FB} 按 Betz 公式计算；ρ为空气密度；υ_R 为额定风速；A 为叶轮扫掠面积。

2.1.4 轮毂扭矩

塔顶所受轮毂扭矩为：

$$M_{XN}=\frac{P_{el}}{\omega\eta} \tag{3}$$

式中：ω为风轮角速度，rad/s；η为发电机和齿轮箱的总效率，保守取为 0.9；P_{el} 为风机的最大输出电功率。

2.2 工况设置

对事故风机混塔进行现场勘察，发现塔体结构存在的缺陷主要包括：塔节连接处结构胶缺失，塔段连接处垫板超高，塔段错台以及混凝土强度未达到设计标准。对此，本文分别设定了相应工况进行计算分析。此外，本文还特别设置了“钢绞线松弛”工况，以深入分析单根最不利钢绞线松弛对结构安全性的潜在威胁；同时，增设了“塔段接触面增大粗糙”工况，系统探讨塔段接触面粗糙度增大对组合混塔结构力学性能的综合影响。

经过实地测量，发现事故混塔中塔筒连接处垫板高度约为 4 cm，缺胶宽度约为 50~70 mm。因此，“垫板超高”工况下塔体结构中垫板高度取 4 cm，“缺胶”工况下塔体结构各截面均缺胶 60 mm。考虑实际工程缺陷，“错台”工况下塔体结构的错台间距取为 5 cm。塔筒的设计混凝土强度等级为 C75，但对塔筒进行无损检测后发现混凝土的实际立方体抗压强度为 65~70 MPa。为了在数值模拟中考虑最不利工况，在数值模拟时统一将混凝土的强度进行折减，即混凝土强度等级取 C65。此外，参考规范 GB/T 5224—2023[10]及 T/CEC 5008—2018[11]，本文预应力松弛为 5%。本研究的工况设置如表 1 所示。

表 1 工况设置

Tab.1 Working conditions

序号	工况名称	混凝土设计强度/MPa
1	原设计方案	33.80
2	垫板超高	33.80
3	顺风向错台	33.80
4	逆风向错台	33.80
5	垂直风向错台	33.80
6	缺胶	33.80
7	混凝土强度不足	29.70
8	塔段接触面增大粗糙度	33.80
9	钢绞线松弛（5%）	33.80

3 模型建立

为更精确地模拟结构的非线性行为，本文采用有限元分析软件 ABAQUS 对装配式混凝土-钢组合混塔结构进行精细化建模与弹塑性分析计算，计算时综合考虑了材料非线性和塔体结构的几何非线性[12-13]。

3.1 单元选取与网格划分

为提高模型的收敛能力，塔体结构中所有混凝土、钢结构及结构胶部件均采用 8 节点六面体线性缩减积分单元（C3D8R）模拟，钢筋及钢绞线采用两节点线性三维桁架单元（T3D2）模拟。经过多次试算，塔体结构的网格尺寸为 500 mm 时，有限元模型的计算精度高且求解速度较好，因此，本文模型网格尺寸均取 500 mm。塔体结构的网格划分如图 1 所示。

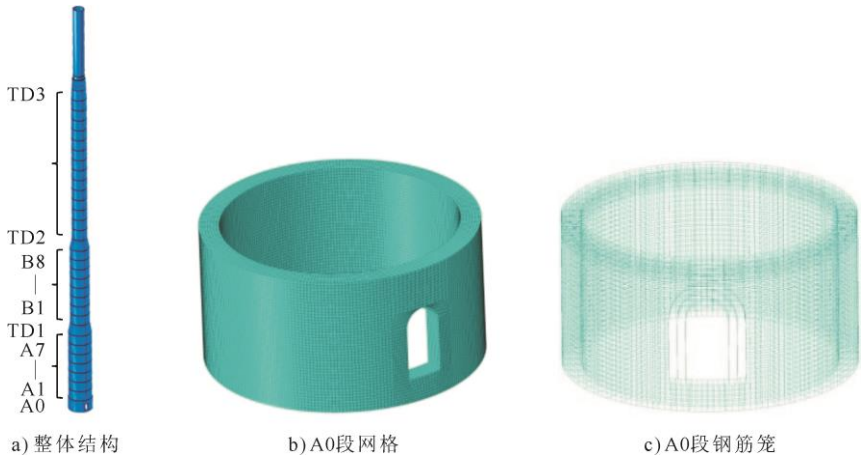


图 1 塔体结构网格划分

Fig.1 Mesh generation for the tower

3.2 材料的本构模型

为更好地模拟混凝土材料的非弹性开裂破坏行为，本文采用混凝土塑性损伤本构模型（concrete damaged plasticity，CDP）模拟混凝土材料的连续性损伤行为。该模型作为一种在塑性连续介质基础上的损伤本构模型，假定各向同性的受压和受拉导致了材料的损伤开裂破坏，在对混凝土的非弹性行为进行模拟时，采用各向同性的损伤弹性、拉伸及压缩塑性来描述。混凝土单轴受压及受拉的应力与应变的关系参考文献[14]确定。

混凝土材料在达到初始屈服应力值前，其本构关系为线弹性；在达到初始屈服应力时，材料开始进入硬化阶段；当结构的应力值超过其极限应力值后，结构的微裂缝大量出现，从而造成其宏观力学特性产生软化。混凝土材料的受拉、受压损伤通过损伤因子确定，损伤因子是介于 0—1 的标量，0 表示混凝土无受拉或受压损伤，1 表示混凝土受拉或受压完全损伤。

3.3 边界条件及加载方式

根据风力发电混塔结构受力特点，塔体底部固定约束（图 2），钢筋网嵌入到相邻的混凝土部件中。钢绞线两端通过耦合的方式与上下端混凝土部件连接组成混塔结构体系（图 3）。混凝土与结构胶界面采用绑定约束相互连接[15]。

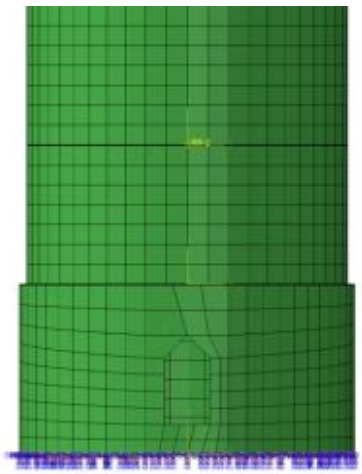


图 2 塔体底部约束
Fig.2 Constraints at bottom of the tower



图 3 钢绞线部件
Fig.3 Strand component

为模拟荷载的施加过程，在各塔节顶端截面的形心位置设置参考点，将参考点与相应的塔节顶端截面设置为耦合约束，塔段所受风荷载与设备荷载施加在参考点上（图 4）。钢绞线的预拉应力采用降温法施加，塔筒其他部件不进行降温处理。降温法施加预应力是一种通过温度变化使构件产生预压应力的施工方法，主要利用材料的热胀冷缩特性，先对受力钢筋（或钢索）进行加热，使其伸长，待固定位置后冷却，钢筋因收缩会对混凝土（或其他基体材料）产生压缩应力，从而实现预应力施加。

$$\Delta t = \frac{N}{\alpha EA} \tag{4}$$

式中：Δt 为所需施加的温降值；A 为预应力构件的截面积；α为预应力构件的线膨胀系数；E 为预应力构件的弹性模量；N 为所需施加的预应力。

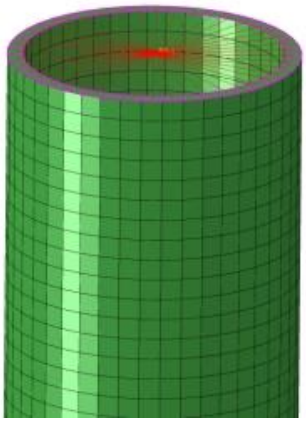


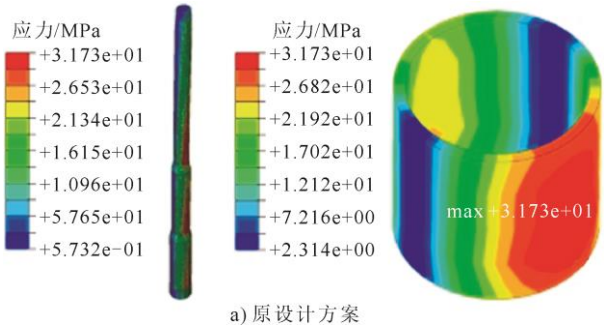
图 4 塔节参考点设置
Fig.4 Reference points setting for a tower section

4 计算与分析

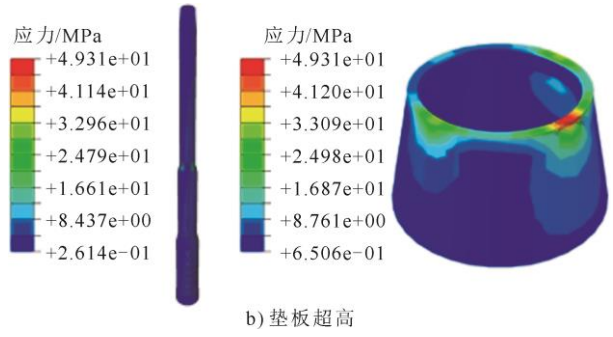
4.1 模型计算

4.1.1 原始设计方案校核

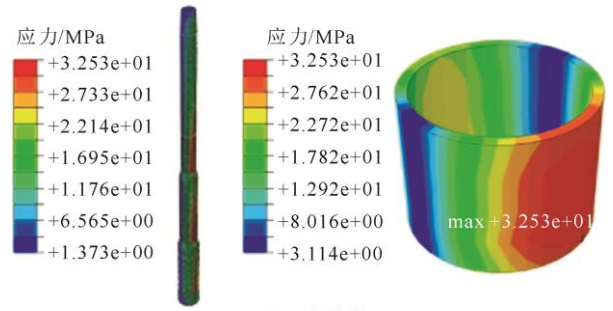
为全面校核该混塔结构的原始设计方案，利用已建立的精细化有限元模型，对混凝土塔筒进行了详细的应力变形分析，结果如图 5 所示。



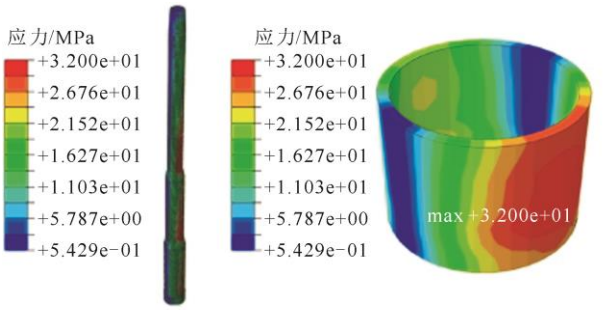
a) 原设计方案



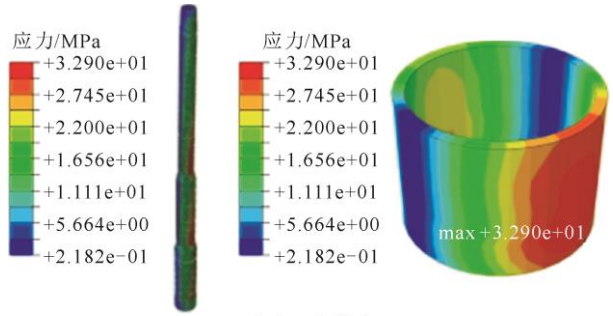
b) 垫板超高



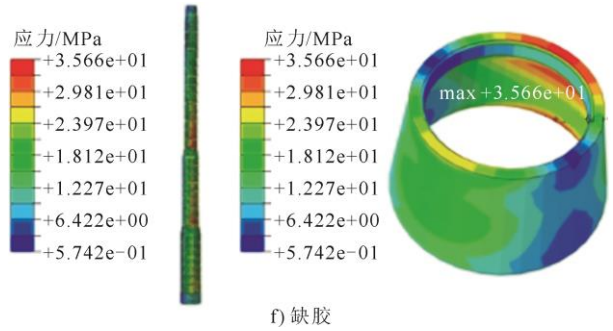
c) 顺风向错台



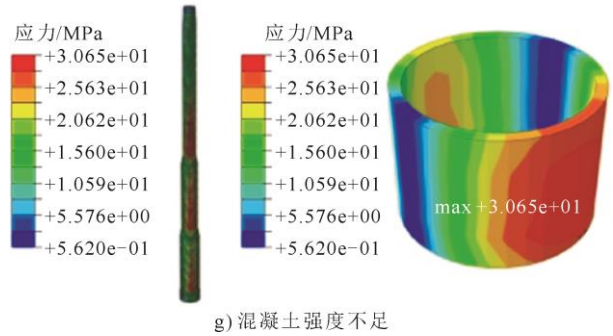
d) 逆风向错台



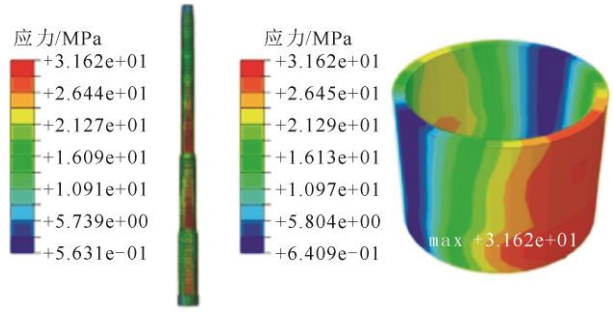
e) 垂直风向错台



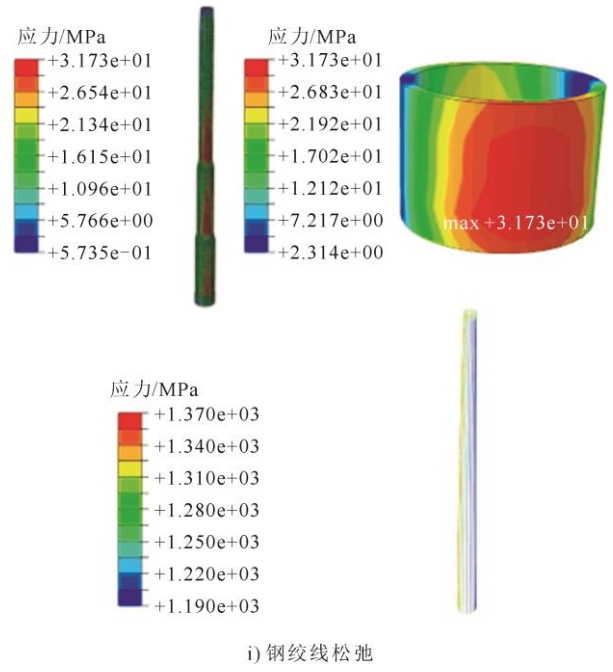
f) 缺胶



g) 混凝土强度不足



h) 接触面增大粗糙度



i) 钢绞线松弛

图 5 塔体结构应力变形分析结果

Fig.5 Stress and deformation analysis results for the tower

由图 5a)可见，塔筒应力最大值出现在变截面段 TD2-C1 界面附近，具体最大应力值为 31.73 MPa，未超过塔体所用混凝土材料的强度设计值 33.80 MPa，表明该工况混凝土塔筒的应力水平处于安全范围内。值得注意的是，由于 TD2-C1 段几何形状和材料特性的变化，更易出现应力集中现象，这可能是变截面导致的几何不连续性和材料特性差异所致。进一步分析发现，塔顶水平位移角为 0.009 83 rad，小于设计规范中规定的限值 0.01 rad，

表明塔体在水平荷载作用下的变形控制在允许范围内。应力分布呈现出明显的非线性特征，尤其在变截面段及其相邻区域，应力集中现象较为显著，可能与塔筒的几何形状突变、材料特性差异以及荷载分布等因素有关。

4.1.2 垫板超高缺陷影响分析

垫板超高现象极有可能引发塔筒局部应力集中，进而导致混凝土塔筒出现开裂甚至发生结构性破坏。由图 5b)混凝土塔筒的应力分布情况可见，应力最大值出现在 TD2-C1 界面附近，具体数值高达 49.31 MPa，这一应力水平已显著超出塔体所用混凝土等级 C75 的强度设计值 33.80 MPa，显然无法满足设计要求，暴露出结构安全性的严重隐患。此外，混塔塔顶的水平位移角为 0.010 63 rad，超过了设计规范中规定的限值 0.01 rad，同样未能满足设计要求，进一步加剧了结构变形的风险。由此可见，垫板超高不仅直接影响了塔筒的应力分布，还对整体结构的稳定性和安全性构成了显著威胁。

4.1.3 顺风向错台缺陷影响分析

当塔筒出现错台现象时，塔筒间的有效接触面积显著减小，这一变化极有可能增加混塔结构的事故风险。利用有限元分析方法，对混凝土塔筒在顺风向的应力分布进行细致模拟，结果如图 5c)所示。分析发现，塔筒应力最大值依然位于 TD2-C1 界面附近，具体最大应力为 32.53 MPa，虽未超过混凝土的强度设计值，但已接近临界范围，需引起高度重视。此外，塔顶水平位移角为 0.009 88 rad，虽未超过设计规范中规定的限值 0.01 rad，满足设计要求，但错台现象对结构整体稳定性的潜在影响仍不容忽视。因此，塔筒错台虽在当前工况下未导致应力超标或位移角超限，但其对混塔结构安全性的潜在威胁仍需通过进一步分析和优化设计加以防范。

4.1.4 逆风向错台缺陷影响分析

与顺风向错台情况不同，在逆风向条件下，混凝土塔筒的应力分布呈现出新的特征（图 5d)）。分析结果显示，塔筒应力最大值依然出现在 TD2-C1 界面附近，具体最大应力为 32.00 MPa，虽未超过混凝土的强度设计值，但已接近设计极限，需引起足够重视。此外，塔顶水平位移角为 0.009 85 rad，略低于设计规范中规定的限值 0.01 rad，但在实际工程中仍需谨慎对待。逆风向错台对塔筒应力分布和结构变形的影响虽未超标，但其潜在风险不容忽视，建议在设计和施工过程中采取相应的预防措施，以确保混塔结构在复杂风场条件下的长期稳定性和安全性。

4.1.5 垂直风向错台缺陷影响分析

在垂直风向错台工况下，混凝土塔筒的应力分布情况如图 5e)所示。经分析，塔筒应力最大值出现在 TD2-C1 界面附近，其最大应力值为 32.90 MPa，该值虽未超过混凝土的强度设计值，但已接近设计极限，需予以密切关注。此外，塔顶水平位移角为 0.009 80 rad，未超过设计规范中规定的限值 0.01 rad，符合设计要求。尽管如此，垂直风向错台对塔筒应力分布和结构变形的影响仍需进一步评估，以确保在极端工况下混塔结构的整体稳定性和安全性。建议在后续设计和施工中，针对垂直风向错台可能带来的风险，应采取相应的预防措施，以提升结构的安全冗余度。

4.1.6 缺胶缺陷影响分析

根据现场勘察结果，截面缺胶量设定为 60 mm。在该工况下，混凝土塔筒的应力分布情况如图 5f)所示。分析表明，塔筒应力最大值出现在 TD2-C1 界面附近，其最大应力值为 35.66 MPa，已超过混凝土的强度设计值，表明该工况下塔筒存在应力超标的风险。此外，塔顶水平位移角为 0.010 03 rad，超过了设计规范中规定的限值 0.01 rad，未能满足设计要求，进一步揭示了结构变形控制的不足。截面缺胶显著影响了塔筒的应力分布和整体结构的变形性能，建议在施工过程中严格控制胶结质量，以确保混塔结构的安全性和可靠性。

4.1.7 混凝土强度不足缺陷影响分析

事故现场的混凝土取样测试结果揭示，部分混凝土的实际抗压强度未能达到设计标准。依据实测数据，混凝土等级被调整为 C65，对应的抗压设计强度为 29.70 MPa。在调整后的混凝土等级下，混凝土塔筒的应力分布如图 5g)所示。分析显示，塔筒应力最大值出现在 TD2-C1 界面附近，其最大应力值为 30.65 MPa，超过了混凝土强度设计值，表明在该工况下塔筒的应力水平超出了安全范围。此外，塔顶水平位移角为 0.010 08 rad，超过了设计规范中规定的限值 0.01 rad，不满足设计要求。因此，混凝土强度不足对塔筒的应力分布和整体结构的变形性能产生了显著影响，施工过程中应确保混凝土质量以确保混塔结构的安全性和可靠性。

4.1.8 接触面增大粗糙度影响分析

在接触面增大粗糙度工况下，混凝土塔筒的应力

分布如图 5h)所示。分析结果显示，塔筒应力最大值出现在 TD2-C1 界面附近，其最大应力为 31.62 MPa，该值未超过混凝土的强度设计值，符合设计要求。与原设计方案相比，增大接触面粗糙度后，塔体的最大应力值有所降低，应力分布更为均匀，表明接触面粗糙度的增加在一定程度上改善了结构的应力状态。此外，塔顶水平位移角为 0.009 77 rad，未超过设计规范中规定的限值 0.01 rad，满足设计要求，显示出结构在水平荷载作用下的变形控制在可接受范围内。因此，增大接触面粗糙度有助于提高结构的整体稳定性和安全性。

4.1.9 钢绞线松弛影响分析

在钢绞线松弛工况下，混凝土塔筒的应力分布如图 5i)所示。分析结果表明，塔筒应力最大值出现在 TD2-C1 界面附近，其最大应力为 31.73 MPa，该值未超过混凝土的强度设计值，符合设计要求。然而，塔顶水平位移角为 0.013 19 rad，超过了设计规范中规定的限值 0.01 rad，不满足设计要求，揭示了结构在水平荷载作用下的变形控制存在不足。因此，尽管塔筒的应力水平保持在安全范围内，但塔顶过大的水平位移角表明结构在抵御风载作用时的稳定性需要进一步优化。

4.2 影响因素分析

表 2 为各计算工况下的结果汇总。由表 2 可知，原设计方案中塔体结构的承载能力满足规范要求，但施工及设计过程中可能出现的多种风险因素对结构的受力性能有较大影响。

表 2 各工况下计算结果
Tab.2 Calculation results under each condition

工况名称	最大应力值/MPa	最大应力部位	塔顶水平位移角/rad	是否超限
原设计方案	31.73	TD2-C1 界面	0.009 83	否
垫板超高	49.31	TD2-C1 界面	0.010 63	是
顺风向错台	32.53	TD2-C1 界面	0.009 88	否
逆风向错台	32.00	TD2-C1 界面	0.009 85	否
垂直风向错台	32.90	TD2-C1 界面	0.009 80	否
缺胶	35.66	TD2-C1 界面	0.010 03	是
混凝土强度不足	30.65	TD2-C1 界面	0.010 08	是
接触面增大粗糙度	31.62	TD2-C1 界面	0.009 77	否
钢绞线松弛	31.73	TD2-C1 界面	0.013 19	是

1）所用垫板超高时，塔段连接处荷载的传力面积显著减小，导致界面附近的混凝土塔筒出现局部应力集中，显著增加了塔体结构的应力及位移水平，致使结构安全超限。

2）错台时，塔段连接处的荷载传递面积并未大幅减小，塔体局部应力集中现象不显著，最大应力接近设计限值，但并未超过。

3）结构胶部分缺失时，由于相邻塔段间接触面积减小，导致界面附近混凝土出现局部应力集中，超出应力限值。

4）混凝土养护较差导致未能达到设计强度时，塔体承载能力明显降低，导致局部应力超限，塔体变形显著增加[16]。

5）增大接触面粗糙度时，由于相邻塔筒间混凝土—结构胶界面的黏结力增大，减弱了塔筒相接部位的应力集中现象，相较于原设计方案，塔体应力分布更均匀，最大应力值更低。

6）钢绞线发生松弛后，绞线自身的应力显著降低，对塔体水平位移的约束作用减小，塔顶位移明显增大，超过设计限值；同时，塔体的重力二阶效应增大[17]，但锚固端对混凝土产生的竖向荷载减小，两者相互抵消，因此塔体的混凝土应力并未显著增加。

5 工程建议

在风力发电机组混塔结构的工程建设过程中，针对潜在的风险因素，应采取一系列严格的质量控制和安全管理措施，以确保结构的长期稳定性和安全性。

1）*工程材料管理* 钢筋、水泥等关键工程材料应得到妥善的储存和管理，避免露天存放，防止水泥因吸潮而硬化、钢筋因暴露于腐蚀性环境而表面腐蚀，从而确保材料性能不受损害，满足设计强度要求。

2）*混凝土养护* 混凝土构件的养护应在控制适宜的湿度和温度条件下进行，以促进水泥水化反应的充分进行，确保混凝土强度达到设计标准，避免因养护不当而导致的强度不足问题。

3）*施工质量管理* 施工现场应加强质量监督管理，对结构胶、垫板等材料的使用进行严格监控，防止因不当使用造成塔段接触面附近出现严重的局部应力集中，从而威胁塔体结构安全。

4）*结构安全检测* 塔体结构应定期进行安全检测，包括对关键部位进行定期的无损检测、应力监测和变形监测，及时掌握塔体结构的服役状态，发现潜在缺陷和损伤，确保风机混塔的长期安全运行。

5）*接触面处理* 在结构施工过程中，可适当增加混凝土塔段端面的粗糙度，并通过科学的填胶工艺，提高接触面的黏结性能，增强结构的整体性和抗裂性能。

6）钢绞线锚固　在钢绞线锚固施工过程中，必须确保锚固措施得到严格执行，并进行严格的预应力张拉控制，同时预留一定的安全冗余，以防止钢绞线松弛，保障结构的整体稳定性。

实施上述措施，可以在工程建设过程中有效控制潜在风险，确保风力发电机组混塔结构的安全性和可靠性，为风电行业的健康发展提供坚实的技术保障。

6 结　论

为确保陆上低风速区风力发电混塔结构的安全服役，本文采用有限元方法进行了模拟，分析了施工期间的各不利因素对混塔受力性能的影响机理，并给出了相应的工程建议。

1）塔段间垫板与结构胶的施工质量对塔体结构的安全性影响较大，施工中应进行重点管理。

2）混凝土强度对组合混塔结构的力学性能有较大影响，施工过程中应注意各类建筑材料的存放及混凝土构件的养护。

3）施工及使用过程中应定期对塔体结构的错台、结构胶、垂直度等进行检测，实时掌控结构的施工状态。

4）钢绞线的锚固性能对组合混塔结构的安全性有较大影响，设计及施工时应留有一定的安全冗余。

［参 考 文 献］

［1］ 许斌, 李泽宇, 陈洪兵. 预应力混凝土-钢组合风电塔架塔段优化研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2016, 43(7): 25-31.
XU Bin, LI Zeyu, CHEN Hongbing. Geometry optimization on prestressed concrete and steel segments of wind turbine towers[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2016, 43(7): 25-31.

［2］ 孟欣, 许川川. 风电机组混合塔筒施工关键技术[J]. 武汉大学学报, 2021, 54(增刊 1): 170-173.
MENG Xin, XU Chuanchuan. Key technologies of the construction of the mixing tower of wind turbine[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54 (Suppl.1): 170-173.

［3］ 金海军, 唐伟, 滕岩. 预制预应力混凝土风力发电塔筒生产工艺及质量控制[J]. 建筑技术, 2021, 52(9): 1074-1077.
JIN Haijun, TANG Wei, TENG Yan. Research on production technology and quality control of precast prestressed concrete wind power tower[J]. Architecture Technology, 2021, 52(9): 1074-1077.

［4］ 周瑞权. 风电机组钢-混凝土混合塔筒结构设计[J]. 风能, 2022(1): 62-67.
ZHOU Ruiquan. Design of steel-concrete hybrid tower structure for wind turbine unit[J]. Wind Energy, 2022(1): 62-67.

［5］ 张曼生, 张国军, 黄威振. 预应力装配式高耸风电塔架受力性能研究[J]. 建筑结构学报, 2022, 43(5): 62-78.
ZHANG Mansheng, ZHANG Guojun, HUANG Weizhen. Study on mechanical performance of pre-stressed assembled towering wind tower[J]. Journal of Building Structures, 2022, 43(5): 62-78.

［6］ 张宇豪, 吴香国, 张明熠. 横向拼接缝胶结缺陷对混塔极限状态受力特性的影响分析[J]. 混凝土与水泥制品, 2024(10): 27-33.
ZHANG Yuhao, WU Xiangguo, ZHANG Mingyi. Analysis of the influence of transverse joint bonding imperfections on the ultimate state loading behaviors of hybrid towers[J]. China Concrete and Cement Products, 2024(10): 27-33.

［7］ LI S Z, ZHOU X H, WANG Y H. Closed-form solution of fundamental frequency of steel-concrete hybrid wind turbine tower[J]. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2023, 23(3): 2350031.

［8］ QUILLIGAN A, O'CONNOR A. Fragility analysis of steel and concrete wind turbine towers[J]. Engineering Structures, 2012, 36: 270-282.

［9］ SINGH A N. Concrete construction for wind energy towers[J]. The Indian Concrete Journal, 2007, 81(9): 43-49.

［10］ 预应力混凝土用钢绞线: GB/T 5224—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023: 12.
Steel strand for prestressed concrete: GB/T 5224—2023[S]. Beijing: Standards Press of China, 2023: 12.

［11］ 风力发电机组预应力装配式混凝土塔筒技术规范: T/CEC 5008—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018: 15.
Technical specification for prestressed prefabricated concrete tower of wind turbine generator sets: T/CEC 5008—2018[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2018: 15.

［12］ 曹雨奇, 阳荣昌, 刘慧群. 体外预应力混凝土风力发电塔地震易损性分析[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(11): 1501-1507.
CAO Yuqi, YANG Rongchang, LIU Huiqun. Seismic fragility analysis for external prestressed concrete wind tower[J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2018, 46(11): 1501-1507.

［13］ 李静平, 徐龙河. 钢及预应力钢筋混凝土风电塔筒模态分析[J]. 风机技术, 2012(5): 58-63.
LI Jingping, XU Longhe. Modal analysis of steel and prestressed reinforced concrete wind tower[J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2012(5): 58-63.

［14］ 谢维维. 风力发电机塔架的轻量化构型与参数优化的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021: 14-17.
XIE Weiwei. Research on lightweight configuration and parameter optimization of wind turbine tower[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021: 14-17.

［15］ MA H, MENG R. Optimization design of prestressed concrete wind-turbine tower[J]. Science China (Technological Sciences), 2014, 57(2): 414-422.

［16］ 谭克锋, 刘涛. 早期高温养护对混凝土抗压强度的影响[J]. 建筑材料学报, 2006(4): 473-476.
TAN Kefeng, LIU Tao. Effect of high temperature curing on compressive strength of concrete[J]. Journal of Building Materials, 2006(4): 473-476.

［17］ 刘志鹏, 郑城, 胡良明. 钢绞线对预制混凝土高塔筒结构的影响分析[J]. 建筑结构, 2023, 53(增刊 2): 1694-1700.
LIU Zhipeng, ZHENG Cheng, HU Liangming. Analysis of influence of steel strand on precast concrete high tower structure[J]. Building Structure, 2023, 53(Suppl.2): 1694-1700.

（责任编辑　杨嘉蕾）