

风电混塔基础施工中裂缝控制技术研究

王柱年*, 陈本杰, 陈洪健, 陈华清

大唐云南发电有限公司滇中新能源事业部, 云南 昆明

收稿日期: 2026年5月26日; 录用日期: 2026年6月18日; 发布日期: 2026年6月30日

摘要

风电混塔基础施工过程中出现裂缝会影响风机塔筒垂直度与长期运行稳定性。本文结合风电混塔基础的结构特点与施工难点, 系统分析裂缝产生的力学机理与关键影响因素, 在借鉴普通大体积混凝土裂缝控制成熟技术的基础上, 构建集原材料优选、配合比优化、全过程温度控制、精细化施工工艺、智能监测预警于一体的综合裂缝控制体系, 总结并给出施工流程与温控测点布置方案。研究成果可为同类型风电混塔基础工程的裂缝防控提供理论参考与技术支持。

关键词

风电混塔基础, 大体积混凝土, 裂缝控制, 温度监测, 施工工艺

Research on Crack Control Technology in Construction of Hybrid Wind Turbine Tower Foundations

Zhunian Wang*, Benjie Chen, Hongjian Chen, Huaqing Chen

Dianzhong New Energy Division, Datang Yunnan Power Generation Co., Ltd., Kunming Yunnan

Received: May 26, 2026; accepted: June 18, 2026; published: June 30, 2026

Abstract

Cracks occurring during the construction of hybrid wind turbine tower foundations can affect the verticality of the wind turbine tower and its long-term operational stability. Combining the structural characteristics and construction difficulties of hybrid wind turbine tower foundations, this paper systematically analyzes the mechanical mechanism and key influencing factors of crack formation. Drawing on mature crack control technologies for ordinary mass concrete, a comprehensive

*通讯作者。

crack control system is established, integrating raw material selection, mix proportion optimization, whole-process temperature control, refined construction technology, and intelligent monitoring and early warning. The construction process and temperature monitoring point layout scheme are summarized and proposed. The research results can provide theoretical reference and technical support for crack prevention and control in similar hybrid wind turbine tower foundation projects.

Keywords

Hybrid Wind Turbine Tower Foundation, Mass Concrete, Crack Control, Temperature Monitoring, Construction Technology

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在国家“双碳”战略纵深推进背景下，陆上风电产业正向大容量、高塔筒、结构复合化方向快速升级，混凝土-钢混合塔筒凭借整体刚度大、工程造价经济、抗倾覆性能优良等优势，已在山地及丘陵高地风电场得到广泛应用。风电混塔基础普遍采用大体积混凝土一次性整体浇筑成型，结构体量庞大、截面构造复杂、底部受地基强约束，且多处于野外山地复杂气候环境[1][2]。施工过程中水泥水化大量放热，受混凝土导热系数低、内部散热缓慢影响，基础内外形成显著温度梯度并产生温度应力，极易诱发温度裂缝；同时，混凝土硬化过程产生的塑性收缩、干燥收缩与自生收缩变形，在地基垫层及内部钢筋约束作用下进一步产生附加拉应力，叠加风电场昼夜温差大、大风加速表面水分蒸发、季节气温波动剧烈等外部条件耦合作用，进一步增大基础开裂风险[3][4]。

裂缝作为风电混塔基础大体积混凝土最典型的结构性病害，不仅破坏结构整体性、降低耐久性与服役寿命，还易造成风机基础不均匀沉降及塔筒垂直度偏差，严重威胁风电机组长期安全平稳运行[5][6]。目前，国内外学者针对普通建筑、道路桥梁、常规风机承台及海上风电大体积混凝土裂缝控制已开展大量研究，在水化热释放机理、配合比优化设计、常规温控养护、有限元温度场仿真等方面形成较为完善的研究体系[7][8]。国外研究聚焦风电基础热力耦合损伤演化、山地环境收缩开裂机制、混塔专用混凝土抗裂配合比优化等方向，结合试验测试与数值模拟建立大体积混凝土温控设计方法与规范准则[9]-[11]；国内多从温度场演化规律、现场施工工艺管控、单一温控措施应用等层面总结常规风机基础裂缝防控技术[12][13]，部分研究尝试引入智能感知、BIM数值仿真等技术开展温度预测与裂缝预警研究[14][15]。

现有研究仍存在明显不足与研究空白：第一，现有成果多针对常规实心风机承台、海上风电承台开展研究，专门面向风电混塔异形大体积基础的多因素耦合开裂机理、强约束应力演化规律研究较为匮乏，直接套用通用大体积混凝土防控经验易出现控裂失效问题[6][12]；第二，多数研究仅从原材料、配合比、温度控制或施工工艺单一维度开展分析，缺少集源头选材、配比优化、全过程温控、精细施工、智能监测预警于一体的全链条闭环控制体系构建[14][16]；第三，针对山地风电场大风、昼夜大温差、冬夏季极端气候等特殊工况的差异化裂缝防控方案研究不足，温控测点与冷却水管布置缺乏适配混塔基础结构特征的标准化布设范式[4][17]；第四，现有文献多停留在工程经验总结层面，学术层面的机理解构、体系架构提炼不足，理论系统性与工程落地性有待提升。

基于上述研究现状与不足，本文立足风电混塔基础结构特殊性、施工复杂性与环境敏感性，系统揭

示裂缝萌生与扩展的力学机理及主控影响因素，借鉴大体积混凝土成熟控裂理论与工程实践，构建多维度一体化综合裂缝控制技术体系，梳理标准化施工流程及温控测点、冷却水管优化布设方案。研究突破传统单一技术总结局限，形成机理分析 - 体系构建 - 工艺落地 - 智能监测完整逻辑链条，实现从工程经验归纳向学术机理探究与标准化技术范式输出升级，可为同类风电混塔基础大体积混凝土裂缝防控提供理论依据与工程借鉴。

2. 风电混塔基础裂缝产生机理与影响因素

2.1. 裂缝产生机理

风电混塔基础大体积混凝土裂缝成因复杂、多因素耦合作用显著，整体表现为温度裂缝为主、收缩裂缝为辅的发育特征，同时受结构约束效应与野外复杂环境叠加影响，裂缝萌生与扩展呈现明显阶段性与关联性[3][6]。

水泥水化热是诱发温度裂缝的核心内因[2][7]。混凝土浇筑早期，水泥水化反应剧烈并集中释放大量的水化热，受大体积混凝土自身导热性能差制约，内部热量积聚、温升速率快，而基础表面与大气接触散热较快，形成显著温度梯度。升温阶段，混凝土内部受热膨胀受外部约束产生压应力，表层混凝土受拉应力作用，当拉应力超过混凝土早期抗拉强度时即产生表面裂缝；降温阶段，内部混凝土冷却收缩变形受地基及周边结构强约束，持续产生拉应力，进而诱发深层甚至贯穿性裂缝，危害基础整体结构安全[8][18]。

收缩变形是收缩裂缝形成的主要诱因[10][12]。混凝土收缩主要包含塑性收缩、干燥收缩和自生收缩三类：浇筑初凝阶段混凝土处于塑性状态，山地风电场大风天气加速表面水分蒸发，水分散失速率远超泌水补给能力，易形成早期浅表塑性裂缝；硬化阶段，内部自由水分持续散失引发干燥收缩，水泥水化固相体积变化产生自生收缩，双重收缩变形在地基与钢筋约束下无法自由释放，进而生成规律性收缩裂缝。此类裂缝初始宽度较小，后期在温度变化与长期服役荷载作用下易持续扩展，与温度裂缝交织形成复杂裂缝网络[16]。

约束效应是裂缝发育扩展的必要边界条件[8][13]。风电混塔基础底部与垫层、地基固结形成外部强约束，内部密集配筋形成局部内部约束；同时基础尺寸大、局部截面突变位置易出现应力集中，限制混凝土温度变形与收缩变形自由释放，进一步放大温度应力与收缩应力，显著提升开裂概率[17]。

野外风电场环境是裂缝产生的重要外部诱因[4][9]。陆上风电场多选址于山地丘陵区域，昼夜温差大、气温季节波动剧烈，进一步拉大混凝土内外温差，增大温度应力幅值；常年大风工况加速表层水分蒸发，加剧塑性与干燥收缩；高温暴晒、寒潮降温等极端天气易造成混凝土表面温度骤变，诱发突发性开裂，传统常规养护方式难以适配野外复杂环境的控裂要求[19]。

2.2. 裂缝关键影响因素

风电混塔基础裂缝萌生、扩展与空间分布受多重因素交叉叠加影响，可归纳为原材料与配合比、温度场变化、施工工艺、结构约束、环境条件五大主控类别，各因素相互关联、协同作用[5][6][8]。

原材料性能是混凝土抗裂的基础保障[11][16]。水泥水化热大小及释放速率直接决定早期温升峰值，单方水泥用量过大会显著增大开裂风险；骨料级配、粒形与含泥量直接影响混凝土密实度与体积稳定性，级配不良、含泥量超标将增大收缩变形、降低抗拉韧性；外加剂与矿物掺合料的选型、掺量及与水泥相容性，对调控水化放热、改善工作性、减小收缩具有关键作用，选型或掺量不当将显著增加裂缝隐患[3][12]。

配合比优化是提升混凝土抗裂性能的核心手段[11][16]。配合比设计需在满足结构强度、耐久性、抗

渗性及泵送施工要求的前提下,遵循低水化热、低水胶比、低收缩、高密实度原则;水胶比、砂率、水泥与矿物掺合料掺量配置不合理,将加剧温升与收缩变形,必须通过多组试配、水化热测试与收缩性能试验确定最优施工配合比[2]。

温度场演化特征是温度裂缝的直接诱因[7][8]。混凝土内部最高温升、内外温差、降温速率三项指标决定温度应力水平。工程实践表明,内外温差超过 25°C 、日均降温速率大于 $2^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 时,裂缝发生概率急剧增大,可作为风电混塔基础温控刚性控制阈值[2][8]。

施工工艺规范性直接决定混凝土成型质量与早期抗裂能力[8][17]。浇筑分层厚度、连续浇筑控制、振捣密实度、初凝二次抹压、养护起始时机与养护周期等关键工序管控缺失,易产生蜂窝麻面、冷缝、表层疏松等初始缺陷,为裂缝萌生提供发育通道,必须实施全过程精细化工序管控[13]。

结构约束条件决定裂缝分布特征与风险等级[6][18]。风电混塔基础属于典型强约束大体积结构,基础厚度、截面突变、构造配筋、地基刚度均会改变约束程度与应力分布;设计阶段通过体型优化、增设构造配筋,可弱化应力集中效应、降低约束开裂风险[1]。

野外环境条件是不可忽视的外部控制变量[4][10]。高温、大风、低温寒潮、昼夜大温差等工况均劣化混凝土早期抗裂性能;工程中应针对夏季、冬季、大风天气制定差异化温控、保温保湿与防风养护方案,实现全季节裂缝风险稳定受控[19]。

3. 风电混塔基础裂缝控制核心技术体系

结合风电混塔基础大体积混凝土的裂缝产生机理与影响因素,在借鉴道路桥梁大体积混凝土成熟控裂技术的基础上,构建“源头控制、过程管控、监测预警、闭环优化”的全过程一体化裂缝控制体系,从材料、温度、施工、监测四个维度实现综合防控,确保裂缝风险处于可控范围。

3.1. 原材料优选与配合比优化技术

原材料优选是裂缝源头控制的基础环节,应优先选择低水化热、低收缩、高强度、高稳定性的材料,从根本上降低温升与收缩,提升混凝土抗裂能力。水泥宜选用低热硅酸盐水泥或低热矿渣硅酸盐水泥,严格控制 3d 与 7d 水化热,降低水化热释放速率与峰值,减少温度上升幅度。粗骨料优先选用质地坚硬、级配连续、粒形良好的碎石。细骨料选用洁净中粗砂,细度模数控制在 $2.6\sim 3.0$,含泥量不大于 3% ,保证混凝土和易性与体积稳定性。外加剂采用与水泥相容性好的聚羧酸高效减水剂,减少单位用水量,降低水胶比,改善混凝土工作性,减少收缩变形。掺合料优先选用可降低水化热、改善内部结构、提高高密实度与耐久性的材料。所有原材料进场必须严格检验,不合格材料严禁使用,确保材料性能稳定可靠。

配合比优化是裂缝主动控制的核心手段,应在满足设计强度、耐久性、抗渗性、工作性的前提下,以“低水化热、低收缩、低水胶比、高密实度”为目标进行试验试配与优化。严格控制水泥用量,在满足强度要求的基础上尽可能降低单方水泥用量,减少水化热来源;大幅提高矿物掺合料掺量,利用粉煤灰与矿粉的微集料效应与活性效应,改善混凝土内部孔结构,提高体积稳定性;严控水胶比减少用水量,降低干燥收缩与塑性收缩;合理确定砂率,在保证泵送与施工工作性的前提下尽可能降低砂率,减少砂浆用量与收缩变形。配合比确定前必须进行水化热测试、收缩试验、强度试验,验证温控与抗裂效果,确保满足现场施工条件与裂缝控制需求,形成最终施工配合比。

3.2. 全过程温度控制技术

全过程温度控制是抑制温度裂缝的关键,贯穿混凝土搅拌、运输、浇筑、养护全阶段,目标是控制入模温度、降低内部温升、减小内外温差、放缓降温速率,使温度应力低于混凝土抗拉强度。搅拌与运

输阶段,夏季对骨料遮阳、洒水降温,用冰水或低温水拌合,控温不超 25°C ;冬季对骨料保温,必要时加热水搅拌,确保入模温度不低于 5°C ,避免高低温影响。运输中采取保温或隔热措施,缩短运输与等待时间。浇筑阶段合理分层、连续施工,加快浇筑速度,采用斜面分层、薄层推移方式,分层厚度 $300\sim 500\text{mm}$,初凝前完成覆盖与振捣。厚基础预设冷却水管,浇筑后通循环冷却水,水管蛇形布置。养护阶段是核心,浇筑完成、表面初凝后立即保温保湿养护,用塑料薄膜与保温毡双层覆盖,覆盖严密,养护不少于14天,特殊环境适当延长,保持表面湿润。拆模依温度监测确定,温差不宜超 20°C ,拆模后继续覆盖。全过程严格执行温控指标:内外温差不超 25°C ,降温速率不超 $2^{\circ}\text{C}/\text{d}$,表面与环境温差不超 20°C ,确保温度应力安全。

3.3. 精细化施工工艺控制技术

精细化施工工艺是保障裂缝控制效果的重要支撑,通过规范浇筑、振捣、抹面、养护等关键工序,提高混凝土密实度与均匀性,消除早期缺陷,降低裂缝风险。混凝土浇筑应连续、均匀、分层进行,采用泵送入模,布料均匀,避免集中下料冲击钢筋与模板,每层浇筑厚度均匀一致,确保上下层结合良好,不出现冷缝。振捣采用插入式振捣器,遵循快插慢拔原则,振捣点均匀布置,不漏振、不过振,保证混凝土充分密实,消除蜂窝、麻面、空洞等内部缺陷,提高整体强度与抗裂能力。振捣完成后及时进行表面整平,在初凝前进行二次抹压处理,闭合早期塑性收缩裂缝,提高表面密实度与平整度,减少表面干缩裂缝。

养护施工应遵循“及时、连续、稳定、长效”的原则,覆盖式保湿保温养护是最适合风电混塔基础的方式,能够同时应对温度与收缩两类裂缝风险。在不同环境下采取差异化养护措施,夏季重点保湿,防止水分快速蒸发;冬季重点保温,防止温度骤降;大风天气增加压重与防风措施,确保覆盖稳定。养护期间严禁随意掀开覆盖层,严禁在混凝土表面踩踏、堆载,避免扰动与损伤。拆模作业应轻柔,避免撞击、敲打造成混凝土缺棱掉角与应力冲击,拆模后及时进行后续回填或覆盖保护,避免长期暴露环境中。全过程施工应做好技术交底与过程记录,明确责任、规范操作,确保每道工序符合裂缝控制要求。

3.4. 智能温度监测与预警控制技术

智能温度监测与预警是精细化裂缝控制的重要保障,通过实时掌握混凝土内部温度场变化,判断温控效果,动态调整养护与冷却措施,形成“监测-分析-预警-调整”闭环控制,避免开裂。温度监测系统由测温传感器、数据采集仪、无线传输模块与后台分析软件组成,传感器预埋在混凝土内部关键位置,采集温度数据并实时传输至后台,自动生成温度曲线等,直观反映温度变化规律。

测温点布置遵循代表性与全面性原则,在基础中心、 $1/2$ 半径、边缘区域分别布设,每个测点沿竖向布置上、中、下三个传感器,全面监测不同位置和深度的温度变化,准确计算内外温差与降温速率。冷却水管区域适当增加测点,保证温控均匀。监测频率在浇筑后前7天加密,后期温度稳定后延长采集间隔。

系统设置多级预警阈值,当内外温差接近 25°C 、降温速率接近 $2^{\circ}\text{C}/\text{d}$ 、表面与环境温差接近 20°C 时自动报警。温差偏大时加强表面保温,降温过快时增加保温层厚度,内部温度过高时加大冷却水流量。通过实时监测与动态调整,确保温度指标稳定可控,从被动防控转变为主动调控,提高裂缝控制可靠性。

4. 施工流程与温控布置说明

4.1. 风电混塔基础裂缝控制施工流程

风电混塔基础裂缝控制施工应遵循标准化流程,以温控为主线、工艺为核心,实现工序衔接与闭环

管控。施工前，完成原材料检验与性能检测，确保材料符合抗裂要求，开展配合比优化试验确定最优配合比。垫层施工后清理基面，保证平整、干净、稳定。钢筋绑扎按图施工，保证间距与保护层厚度，在特定区域增设构造钢筋。冷却水管按方案布设并通水试验，测温传感器精准定位并防护。模板支设牢固、密封严密。混凝土搅拌按配合比计量，控制搅拌时间与性能，夏冬采取温控措施。采用分层连续浇筑，均匀布料、规范振捣，表面初凝前二次抹压，随即覆盖养护。养护期间实时监测温度，动态调整保温与冷却水流量。养护期满且温度达标后拆模，检查外观，确认无有害裂缝后验收。该流程节点清晰、管控到位，可保障裂缝控制效果。

4.2. 温度监测与冷却水管布置说明

温度监测点与冷却水管合理布置是精准温控的前提，需结合基础形状、尺寸与受力特点设计。平面布置以均匀覆盖温度场为目标，在基础中心设一组三层测温点，反映内部最高温度与变化趋势；1/2 半径位置对称设 2~3 组中层测温点，掌握中间区域温度；边缘与阳角设表层测温点，监测表面与环境温差，判断保温与拆模时机。竖向采用三层布置，上层靠近表面，反映散热与养护效果；中层在厚度中心，反映最高温升；下层靠近垫层，反映地基约束区温度变化，三层数据结合可还原竖向温度梯度、计算内外温差。

冷却水管采用蛇形循环布置，水平间距 1.0~1.5 m，上下层间距 1.0 m，保证降温均匀。进、出水口集中在基础一侧，便于连接水泵与水箱，统一控制水流速度、进水温度与通水时间。冷却水用常温清水，浇筑完成后尽早通水，根据内部温升调流量，最高温度稳定下降、内外温差满足要求后逐步停水，防止温度反弹。冷却水管与测温点配合，形成“内部降温、外部保温、全程监测、动态调控”温控系统，支撑裂缝控制。

5. 结论与展望

本文系统研究风电混塔基础施工裂缝控制技术，分析裂缝产生机理与影响因素，构建综合控制体系，明确施工流程与温控方案。主要结论如下：风电混塔基础裂缝以水化热温度裂缝为主，收缩变形、强约束效应及复杂环境加剧开裂风险，须全过程综合防控。原材料与配合比是源头控制核心，选用合适材料、采用特定配合比可降低水化热与收缩值，提高抗裂能力。全过程温度控制是关键，通过控制入模温度、内部降温、表面保温等，可稳定内外温差、控制降温速率，降低温度应力。精细化施工工艺是保障，规范关键工序可消除早期缺陷，减少收缩裂缝。智能温度监测与预警实现温控闭环优化，提升裂缝控制可靠性与精细化水平。

随着风电混塔发展，对基础裂缝控制要求提高。未来研究可深化拓展：结合 BIM 技术与有限元模拟，施工前建立仿真模型，优化温控与施工工艺，实现从经验控制到预测控制转变；推广新型监测技术，提高监测精度与覆盖范围，提升自动化水平；探索基于人工智能的温控决策系统，推动裂缝控制智能化、自适应升级；加强特殊环境下专用抗裂材料与技术研究，提升极端条件下裂缝控制效果。随着技术进步，风电混塔基础裂缝控制将更精准、高效、智能，为风电工程提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 张梅. 风电基础大体积混凝土有限元分析及温度裂纹控制研究[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 山东科技大学, 2019.
- [2] 赵东煜, 栗媛媛, 焦炜, 等. 5 MW 风电基础混凝土浇筑温度特性研究[J]. 山东科学, 2026, 39(3): 113-120.
- [3] 曹磊. 风电场基础大体积混凝土裂缝控制施工技术探微[J]. 广东水利电力职业技术学院学报, 2023, 21(3): 29-32.
- [4] 刘刚伟. 山地大体积风机混凝土基座施工裂缝控制研究[J]. 中国新技术新产品, 2023(5): 90-92.
- [5] 郝佳兴. 风电项目大体积混凝土风机承台温度裂缝控制技术应用分析[J]. 全面腐蚀控制, 2026, 40(1): 308-310.

- [6] 沈宏泉, 林运胜, 周熙. 大体积混凝土裂缝控制研究[J]. 红水河, 2024, 43(4): 28-31.
- [7] 仇安兵. 基于热-力耦合有限元的大体积混凝土裂缝演化分析[J]. 工程科学学报, 2025, 47(5): 995-1004.
- [8] 杨友, 卫洪英, 杜志达, 等. 重力式圆形扩展风机基础温度应力影响因素分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2025, 23(4): 202-210.
- [9] da Silva, W.K.D., de França Filho, P.R.P., Medeiros, M.S. and Cabral, A.E.B. (2026) Thermomechanical Damage Analysis of Pre-Cooled Wind Tower Foundations: Experimental and Numerical Study. *Discover Concrete and Cement*, **2**, Article No. 17. <https://doi.org/10.1007/s44416-026-00057-5>
- [10] Azenha, M. and Faria, R. (2008) Temperatures and Stresses Due to Cement Hydration on the R/C Foundation of a Wind Tower—A Case Study. *Engineering Structures*, **30**, 2392-2400. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.01.018>
- [11] Rebelo, C., Moura, A., Gervásio, H., Veljkovic, M. and Simões da Silva, L. (2014) Comparative Life Cycle Assessment of Tubular Wind Towers and Foundations—Part 1: Structural Design. *Engineering Structures*, **74**, 283-291. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.02.040>
- [12] 彭修宁, 赵起超. 风电大体积混凝土基础裂缝成因与控制措施[J]. 江西建材, 2022(3): 159-160.
- [13] 陈进贵, 黎扬佳, 雒翔宇, 等. 海上风电承台混凝土温度应力反演分析与防裂研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(10): 110-120.
- [14] 马江霖, 王伟. 大体积混凝土温度裂缝协同防控与智能监测体系研究[J]. 建筑与工程, 2025, 1(2): 16-18.
- [15] An, G., Yang, N., Li, Q., Hu, Y. and Yang, H. (2020) A Simplified Method for Real-Time Prediction of Temperature in Mass Concrete at Early Age. *Applied Sciences*, **10**, Article 4451. <https://doi.org/10.3390/app10134451>
- [16] 王国军, 岳伟杰, 储洪强. 抗裂高性能混凝土的制备与性能研究[J]. 广州建筑, 2024, 52(2): 75-79.
- [17] 邹志洋. 风力发电站工程风机基础大体积混凝土施工技术[J]. 建筑技术开发, 2025, 52(2): 61-63.
- [18] 李卫永, 许成凯, 于杰. 超长大体积混凝土结构早期开裂控制分析[J]. 安徽建筑, 2023, 30(11): 99-101.
- [19] 高翔. 风电工程风机基础大体积混凝土施工与质量控制措施[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2025(12): 127-129.