

Study on temperature crack control technology of large volume concrete construction for wind turbine foundation in mountainous areas of high altitude

Tong Li Xinjie Wang

China Power Construction Group Hebei Engineering Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei, 050021, China

Abstract

In the context of energy transition, the development scale of mountain wind farms in high-cold regions has been gradually expanding. However, temperature crack control in the construction of large-volume concrete foundations for wind turbines in these areas presents significant challenges. The concrete foundation structures, with diameters of 20-30 meters and thicknesses of 3-4 meters, are reinforced concrete structures designed to withstand substantial loads. Due to factors such as low temperatures, strong winds, large diurnal temperature variations, complex terrain, poor transportation infrastructure, and limited construction conditions in high-cold regions, the heat generated during concrete hydration cannot be effectively dissipated. This results in significant temperature differences between the interior and exterior, causing thermal stress that may lead to cracks and pose safety hazards. Combining practical engineering experience from high-cold regions, this study investigates four dimensions: raw material selection, mix design optimization, thermal insulation and moisture retention curing, and temperature monitoring. Targeted control technologies are proposed to reduce thermal stress and regulate temperature differences, providing valuable references for similar projects.

Keywords

High-cold regions; Mountain wind farms; Wind turbine foundations; Temperature cracks; Construction control

高寒地区山地风电场风机基础大体积混凝土施工期温度裂缝控制技术研究

李通 王新杰

中国电建集团河北工程有限公司, 中国·河北 石家庄 050021

摘要

在能源转型背景下,高寒山区山地风电场开发规模逐步扩大,但该区域风电机组基础大体积混凝土施工中的温度裂缝控制面临显著挑战。风电机组基础大体积混凝土为直径20-30m、厚度3-4m的钢筋混凝土结构体,需承受较大荷载。受高寒山区低温、大风、昼夜温差大、地形复杂、交通不便及施工条件受限等因素影响,混凝土水化热难以有效散发,导致内外温差显著,产生温度应力,易引发裂缝,进而形成安全隐患。本文结合高寒山区工程实际,从原材料选择、配合比优化、保温保湿养护及温度监测四个维度开展研究,围绕降低温度应力、控制温差的核心目标提出针对性控制技术,可为后续同类工程应用提供参考。

关键词

高寒地区; 山地风电场; 风机基础; 温度裂缝; 施工控制

1 引言

随着高寒山区风电场建设推进,区域风电场数量增加。风机基础是风电机组核心承载结构,其完整性与安全性决定机组运行安全及寿命,且采用大体积混凝土浇筑。水泥水化释热难散致内外温差大、生温度应力;高寒区气温低使混凝土

强度发展慢、冻害风险高,大风加速表面水分蒸发与散热,进一步扩大温差、加剧应力;山区地形还制约原材料运输、场地平整及裂缝防治。故开展该基础温度裂缝防治研究,对提升风电场工程质量意义重大。

2 高寒地区山地风电场风机基础大体积混凝土温度裂缝成因分析

2.1 大体积混凝土自身特性引发的温度应力

大体积混凝土以体积大为基本特征,如风机基础直径20-30m、厚3~4m,因受力需求水泥用量大于普通混凝土。水泥水化每1kg产热300-400kJ,内部发热且混凝土导热系

【作者简介】李通(1980-),男,中国河北衡水人,本科,工程师,从事重点建设风电、光伏发电基地及配套储能基础设施研究。

数仅 1.5-2.5W/(m·k)，热量难散致内部温达 60-70℃。表面受气温、风速影响，散热快于内部 3-5 倍，温差 30-50℃左右，内外胀缩差异产生温度应力^[1]。混凝土早期抗拉强度低，温度应力超其强度易裂，后续裂缝可能发展扩大，甚至致结构破坏。

2.2 高寒地区环境因素的叠加影响

高寒地区的特殊气象条件也会增加温度裂缝的萌生可能性。一是气温较低，混凝土强度发展缓慢，若浇筑温度低于临界温度，会导致内部水分冻结，水泥水化产物结构遭到破坏，强度下降，混凝土抗拉强度降低，易受温度应力开裂；二是温差较大，白天混凝土吸热温度升高，夜间气温骤降，混凝土表面温度下降快、内外温差较大，温度应力较大；三是晴朗天气下，混凝土表面水分蒸发速率加快，一方面导致表面干缩开裂，另一方面会带走表面热量，内外温差进一步增大，温度应力随之升高；四是有效施工工期短，为追赶工期，施工过程中可能出现养护不到位等情况^[2]。

2.3 山地地形对施工与裂缝防控的制约

山地风电场场地地形复杂，给风机基础混凝土施工及温度裂缝防治带来困难。一是地形不均致原材料运输不便，易缺料或预拌混凝土离析，降低其匀质性、力学及抗裂性能；二是施工条件受限，大型设备难到位，浇筑易出间歇长、振捣不足问题，形成冷缝或孔隙，抗裂性下降；三是山地小气候显著，降雨、狂风影响浇筑养护，破坏表面结构，增加温度裂缝风险^[3]。

3 高寒地区山地风电场风机基础大体积混凝土温度裂缝控制技术

3.1 适配性原材料选择技术

原材料选择需兼顾耐裂性能与高寒山区施工适应性，从源头降低温度裂缝产生风险。水泥应选用低热矿渣硅酸盐水泥或中热硅酸盐水泥，此类水泥通过调整熟料矿物组成，使 C₃S 含量减少至 45-55%、C₃A 含量控制在 8% 以下，水化放热速率较普通硅酸盐水泥慢 30-40%，最高温升降低 15-20%，可避免混凝土内部最高温度骤变，且后期强度无倒缩现象，28d 抗压强度达 42.5MPa 以上，能够承受风机基础的倾覆力矩与振动荷载。

骨料选用连续级配碎石与中砂，其中 5-31.5mm 碎石含量 30-40%、16-25mm 碎石含量 40%-50%、25-31.5mm 碎石含量 10-20%；连续级配可减小骨料间隙，降低水泥用量，提升混凝土密实度，进而提高抗裂强度（抗裂强度可提高 15-20%）。细骨料选用细度模数 2.3-3.0 的中砂，含泥量 < 3%、泥块含量 < 1%，防止泥土延缓水泥水化反应。考虑到山区运输不便，骨料优先采用就地取材（距施工场地 50km 范围内），经冻融试验验证，其在 200 次冻融循环后，质量损失 < 5%、抗压强度损失 < 25%，满足高寒地区使用要求^[4]。

掺合料采用 I 级粉煤灰（烧失量 < 5%）与 S95 级磨细矿渣粉（比表面积 > 400m²/kg）复配，其中粉煤灰替代水泥用量的 30-40%，磨细矿渣粉替代水泥用量的 20-30%，总

替代率控制在 50-60%。粉煤灰中的活性组分可与水泥水化产物发生反应生成凝胶体，优化混凝土内部结构密实度；磨细矿渣粉可促进混凝土后期强度提升，二者复配使用可使混凝土 7d 水化热降低 20-25%，且抗冻等级达 F200、抗渗等级达 P8，满足高寒大风天气的使用条件。

外加剂选用引气型高效减水剂（减水率 > 25%），可降低用水量 15%-20%，从而控制混凝土干缩；同时可引入直径 0.05-0.2mm 的封闭气泡（体积含量 3-5%），以提升混凝土抗冻融性能并缓冲温度应力。外加剂需具备缓凝性能，确保混凝土初凝时间为 8-10h、终凝时间为 12-16h，避免浇筑过程中出现施工冷缝；经 -5℃ 低温试验验证，外加剂无结晶、混凝土不离析，满足高寒施工要求。

3.2 优化配合比设计技术

配合比设计遵循“低水化热、高抗裂、易施工”的原则，结合风机基础受力特性与高寒地区环境要求进行优化。水胶比选用范围为 0.40-0.45：水胶比 < 0.40 时，混凝土和易性较差，无法满足泵车输送要求（坍落度 ≥ 160mm）；水胶比 > 0.45 时，混凝土干缩率 > 0.4‰，抗裂性能显著降低。试验表明，当水胶比为 0.42 时，混凝土 28d 抗压强度 ≥ 35MPa（满足 C30 强度要求），干缩率为 0.3‰，坍落度为 180 ± 20mm，完全符合施工与受力要求。

水泥用量控制在 ≤ 300kg/m³，掺合料用量进一步优化；以 C30 混凝土为例，胶凝材料总量为 480kg/m³，其中水泥 280kg/m³、粉煤灰 120kg/m³、磨细矿渣粉 80kg/m³，掺合料总替代率为 58.3%。试验数据显示，该配合比下胶凝材料 7d 水化热峰值为 250kJ/kg，较纯水泥石混凝土（350kJ/kg）降低 28.6%，混凝土内部最高温度 ≤ 55℃，可有效缩小内部温降幅度^[5]。

砂率控制范围为 38%-42%：砂率 < 38% 时，易出现骨料离析、混凝土和易性变差；砂率 > 42% 时，需增加水泥浆用量，导致水化热升高。当砂率为 40% 时，混凝土坍落度达 190mm、扩展度达 550mm，且无泌水现象，骨料空隙率 < 40%，水泥浆用量最省，温度裂缝产生风险最低。

外加剂掺量按胶凝材料总量计算：引气型高效减水剂掺量为 1.0%-1.2%，缓凝剂掺量为 0.01%-0.02%，可使混凝土初凝时间延长至 9h 左右。经 -5℃ 低温试验验证，混凝土初凝时间 ≥ 7h、终凝时间 ≥ 14h，28d 抗压强度损失率 ≤ 10%。正式使用前需制作 1m³ 试块进行模拟试验，确保混凝土 7d 强度 ≥ 设计强度的 60%、28d 强度 ≥ 设计强度的 100%，且混凝土内外温差 ≤ 25℃、无裂缝产生，方可应用于实际工程。

3.3 精细化保温保湿养护技术

结合高寒地区大风频发的气候特点，制定多层智能保温保湿养护方案。混凝土浇筑完成后 2-3h（初凝前），立即进行覆盖养护：先铺设 2 层土工布（搭接宽度 ≥ 300mm），再覆盖 1 层阻燃保温被（导热系数 ≤ 0.04W/(m·k)，搭接宽度 ≥ 200mm），并采用重物镇压保温被，防止大风将其掀起。

根据当地实时气温按需调整保温措施,智能调控逻辑如下:当气温处于0℃-5℃时,在原有覆盖层基础上增设2层保温被;当气温处于-5℃-0℃时,铺设1层功率为50W/m²的电热毯;当气温≤-5℃时,铺设地暖管加热,地暖管铺设间距为200mm,供水温度控制在40-50℃,确保混凝土内部温度≥5℃,避免受冻。

养护期保湿采用高压喷湿器作业,湿度控制标准为:当混凝土表面湿度处于60%-80%时,每2小时喷水1次;当表面湿度<60%时,每1小时喷水1次,确保表面湿度始终≥80%,防止混凝土因干缩开裂。风机基础侧面采用50mm厚聚苯板(导热系数≤0.03W/(m·k))包裹防护,接缝处用防水胶带密封,外侧搭设防护架子,进一步抵御大风对养护层的破坏。

养护周期≥14d,其中前7d为关键养护阶段,需24h不间断监控:若表面湿度<80%,立即增加喷水频次;若混凝土内部温度<5℃,及时增设电热毯或提高地暖管供水温度。每50m²布置1个温湿度传感器,监测数据实时同步上传至管控平台;同步监测混凝土内外温差,当温差>20℃时,增加保温被层数;当温差≤25℃时,维持当前保温措施。养护第8-14d,控制混凝土缓慢降温,降温幅度≤2℃/天,避免因降温过快产生温度应力导致裂缝。

3.4 全周期温度监测技术

在《高寒地区山地风电场风机基础大体积混凝土施工期温度裂缝控制技术研究报告》中,从混凝土浇筑至养护完成,需建立全周期温度监测系统,实现温度数据采集、传输、预警及处理功能。

传感器布置规则:按混凝土浇筑截面每1m高度设1个监测截面,每个截面布3-5个防水热电偶传感器(精度±0.5℃),用钢筋固定防移位;其中1个设于截面中心(测内部最高温),1个近表面(测表面温,距表面50mm),1个距表面1m处(测中部温)。

数据收集与传输:每个监测截面对应1个无线数据终端,采集频率按养护阶段调整,浇筑后1-3天每2小时1次,4-7天每4小时1次,8-14天每8小时1次;数据即时传至管控平台,自动生成温度曲线,便于掌握温度动态。

分级预警机制:温差达20℃触发一级预警,需查保温层并判断是否增厚;达23℃触发二级预警,暂停周边作业并调保温保湿措施;达25℃及以上触发三级预警,先排查传感器,确认后采取降温控温措施,务必将温差降至20℃以下。

同时同步监测混凝土强度:制3组标准养护试块与3组同条件试块,分别在3d、7d、14d、28d测抗压强度,结合温度数据关联分析;若降温快但强度发展慢,需延长养护,确保强度达标后结束养护,数据需记录存档,为同类工程提供参考^[6]。

4 温度裂缝控制技术的可行性与效益分析

4.1 技术可行性验证

从材料的适宜性、施工便捷性、适应性三个方面进行

技术验证。材料选择上采用低热水泥、优质掺合料、引气减水剂,该组合已在高寒地区成功应用;实验室试验中,通过最优配合比试验,混凝土7d抗压强度高于设计强度的60%以上,抗冻强度达到F200,具备良好的高寒气候适应性;施工便捷性上,保温保湿养护采用土工布、保温被、电热毯等材料,便于运输且操作简便,适合在山区狭窄地段使用;温度监测系统采用无线传输方式,无需布线,可实现即插即用;适应性上,通过调整保温层厚度、加热装置功率,可适应高寒地区-20℃至10℃的气温变化;在大风天气下封严保温被,减少缝隙以降低热量散失,技术稳定性良好。

4.2 工程效益分析

该温度裂缝控制技术的质量效益、经济效益和社会效益较优,具体如下:质量效益:通过控制混凝土内外温差及表面湿度,混凝土裂缝率可控制在3%以下,有效延长风机基础的使用寿命;经济效益:通过就地取材、优化材料配置,可降低成本10%-15%;通过精细化养护及温度监测,可减少返修成本;通过保障有效施工工期,可降低工期延误损失。经测算,单座风机基础可节约成本8-12万元;社会效益:该项技术的成功应用,有效保障了高寒山区风电场建设进度与质量,推动风电产业在高寒山区的健康发展,为实现能源革命及“双碳”目标提供有力支撑。

5 结语

对高寒地区山地风电场风机基础大体积混凝土温度裂缝的控制,是保障项目工程建设质量的重要环节,需结合高寒地区风机基础自身特性、温度裂缝成因、区域环境特点及山地施工条件等因素综合考量。通过梳理温度裂缝的具体成因,从原材料选取、配合比设计、保温保湿养护、温度监测四个维度构建控制技术体系,可有效降低水化热影响,减小环境及地形对施工条件的制约,将温度裂缝控制在可控范围之内,为今后同类工程提供参考。后续可结合智能技术,研发智能养护系统,为温度裂缝控制提供更精准的调控及养护措施,为高寒地区风电场建设提供更多技术支持。

参考文献

- [1] 任兆鹏,吕刚.风机基础大体积混凝土施工温度及收缩裂缝的控制研究[J].散装水泥,2025,(02):64-66.
- [2] 颜仕熊.风电场工程风机基础大体积混凝土施工策略研究[J].工程技术研究,2024,9(17):105-107.
- [3] 徐慧,卢国华.风机基础大体积混凝土施工质量控制措施探究[J].建筑机械化,2024,45(04):80-84.
- [4] 马成军.浅谈高山风电场工程风机基础大体积混凝土施工质量控制[J].低碳世界,2019,9(09):73-74.
- [5] 周克敏,陈维维.山区风电场风机基础大体积混凝土质量控制措施[J].湖南水利水电,2019,(06):73-74.
- [6] 李建林.大体积混凝土基础温度裂缝控制施工技术研究[D].同济大学,2015.