

风电机组基础大体积混凝土浇筑冷缝控制技术研究

刘旭升

西藏开投藏东南青杰能源发展有限公司 西藏 昌都 854000

【摘要】：风电机组基础大体积混凝土浇筑冷缝的防控是保障工程结构稳定性的核心课题。冷缝的形成与材料特性、施工工艺及环境条件密切相关，若防控不当会降低混凝土整体性与耐久性，引发结构安全隐患。通过优化材料配比、改进施工组织、强化温控措施等技术手段，可有效减少冷缝产生概率，提升浇筑质量。研究聚焦冷缝防控关键技术要点，结合工程实践探讨实用防控方案，为风电机组基础施工提供技术参考。

【关键词】：风电机组基础；大体积混凝土；冷缝控制；浇筑技术；结构耐久性

DOI:10.12417/2705-0998.25.22.081

引言

大体积混凝土在风电机组基础工程中应用广泛，其浇筑质量直接关系到机组长期安全运行。冷缝作为浇筑过程中易出现的质量问题，源于混凝土浇筑间隔超出初凝时间，导致新旧混凝土结合不紧密，形成薄弱界面。这类缺陷会破坏混凝土结构连续性，降低抗渗、抗裂及承载能力，严重时可能引发基础沉降或结构损坏，影响风电机组使用寿命。深入分析冷缝形成机理，探索科学有效的防控技术，对提升工程施工质量、降低后期维护成本具有重要意义。基于工程实际需求，围绕冷缝防控核心环节展开技术探讨，为相关工程施工提供实践指导。

1 大体积混凝土冷缝形成核心影响因素解析

1.1 混凝土材料自身特性的影响

混凝土的初凝时间、和易性及水化热释放规律是影响冷缝形成的内在因素。不同强度等级的混凝土初凝时间存在差异，若选用的水泥凝结速度过快，或外加剂适配性不佳，会缩短有效浇筑时间窗口，增加冷缝出现风险^[1]。混凝土拌合物和易性不足，会导致浇筑过程中流动性差、布料困难，延长浇筑作业时间，使先浇筑的混凝土在后续部分完成前已进入初凝状态。大体积混凝土水化热集中释放，若散热不及时会造成内外温差过大，引发早期收缩开裂，间接加剧冷缝带来的结构损伤。

1.2 施工组织与操作工艺的影响

施工组织不合理是导致冷缝产生的重要外部因素。浇筑方案缺乏针对性，未根据基础体量、结构形式制定分层分段浇筑计划，可能造成浇筑流程混乱、衔接不畅。布料设备配置不足或运行故障，会导致混凝土浇筑中断，若中断时间超过初凝时间，必然形成冷缝。振捣作业不规范，如振捣不到位或过度振捣，会影响混凝土密实度与均匀性，降低界面结合质量，即使未形成明显冷缝，也会留下隐性薄弱环节。模板支护稳定性不足、接缝密封不严，可能导致漏浆或模板变形，间接影响浇筑连续性，增加冷缝防控难度。

1.3 环境条件与温控措施的影响

环境温湿度变化对混凝土凝结速度影响显著。高温天气

下，混凝土水分蒸发加快，会加速水泥水化进程，缩短初凝时间，同时表面失水收缩易产生裂缝；低温环境则会延缓水化反应，降低混凝土早期强度发展，若保温措施不到位，可能导致混凝土受冻，破坏凝结效果。风雨、日照等天气因素会干扰浇筑作业正常进行，迫使施工中断，为冷缝形成创造条件。温控措施缺失或不完善，无法有效控制混凝土内部与表面、新老混凝土之间的温差，会加剧体积变形，破坏界面粘结性能，促使冷缝形成并扩展。

2 冷缝防控的材料优化与配比调整技术

2.1 水泥与外加剂的合理选型

针对大体积混凝土浇筑需求，优先选用水化热低、凝结时间适宜的水泥品种，通过降低水泥用量减少水化热释放，延长有效浇筑时间。外加剂的选型需结合水泥特性与施工环境，选用缓凝型高效减水剂，在保证混凝土强度的前提下，延长初凝时间，提升拌合物和易性与流动性，为浇筑作业提供充足时间^[2]。可掺入适量矿物掺合料，如粉煤灰、矿渣粉等，替代部分水泥，不仅能降低水化热峰值，还能改善混凝土微观结构，提升界面粘结强度，增强抗裂与抗渗能力，为冷缝防控奠定材料基础。

2.2 混凝土配合比的科学设计

配合比设计需兼顾工作性、强度与耐久性，通过试验确定最佳水胶比、砂率及骨料级配。合理控制骨料粒径与级配，选用连续级配的粗骨料，减少空隙率，降低胶凝材料用量，同时提升混凝土密实度与流动性。调整水胶比至适宜范围，避免因水胶比过大导致混凝土收缩率增加，或过小影响和易性。通过优化配合比，使混凝土具备良好的流动性、黏聚性与保水性，确保在浇筑过程中不易离析、泌水，能够快速均匀布料，缩短浇筑作业持续时间，减少冷缝形成可能性。

2.3 拌制与运输过程的质量管控

混凝土拌制需严格按照配合比计量投料，控制搅拌时间与速度，确保拌合物均匀一致，避免因搅拌不充分导致和易性下降。运输环节需选用密封性能良好的搅拌运输车，根据运输距

离与环境温度调整运输时间，避免混凝土在运输过程中出现初凝、离析或坍落度损失过大等问题。夏季高温时可采取遮阳、洒水降温等措施，冬季低温时需做好保温防护，防止混凝土受冻。运输到施工现场后，需及时检测混凝土坍落度、扩展度等指标，不符合要求的严禁浇筑，确保浇筑用混凝土质量稳定。

3 施工过程冷缝防控的关键工艺优化

3.1 分层分段浇筑方案的制定与实施

根据风电机组基础的结构尺寸、形状及施工场地条件，制定科学合理的分层分段浇筑方案。分层厚度需结合混凝土初凝时间、振捣能力等因素确定，确保在下层混凝土初凝前完成上层混凝土浇筑^[3]。分段划分需遵循“对称浇筑、循序渐进”的原则，避免出现施工冷缝集中区域。浇筑过程中需明确各施工班组的作业范围与衔接时间，配备专人负责协调指挥，确保上下层、各分段之间浇筑连续顺畅，减少施工中断时间。如图 1：



图 1 风电机组基础混凝土浇筑施工现场

3.2 浇筑节奏与振捣作业的规范化操作

控制混凝土浇筑速度与节奏，严格按照预设方案保持均匀连续浇筑，避免因浇筑过快导致振捣不及时、过慢引发先浇混凝土初凝的施工衔接问题。布料时采用多点布料、分层推进的方式，合理规划布料顺序与范围，确保混凝土覆盖均匀饱满，杜绝局部堆积或漏浇现象。振捣作业需选用功率适配的振捣器，严格遵循“快插慢拔、分层振捣”原则，振捣点按规范均匀分布，确保振捣到位使混凝土密实度达标，同时避免振捣过度造成骨料离析。振捣过程中密切关注混凝土表面泛浆情况，动态调整振捣时间与频率，保障新老混凝土结合紧密，最大程度减少界面缺陷。

3.3 施工中断应急处理措施的落实

提前制定施工中断应急预案，针对可能出现的设备故障、天气突变等突发情况，明确应急处理流程与责任分工。若因特殊情况导致浇筑中断，需立即采取措施保护已浇筑混凝土表面，如覆盖保湿材料、进行二次振捣等，延缓初凝时间。当中断时间接近混凝土初凝时间时，需在后续浇筑前对已浇筑混凝土表面进行凿毛处理，清除浮浆与松散颗粒，铺设同配合比的水泥砂浆或混凝土界面剂，增强新老混凝土的粘结力，降低冷

缝形成风险。

4 温控与养护措施对冷缝防控的保障作用

4.1 浇筑过程中的动态温控技术应用

浇筑过程中采用动态温控监测系统，实时监测混凝土内部与表面温度，及时掌握温度变化趋势。通过在混凝土内部埋设温度传感器，结合外部环境温度监测数据，分析温差变化情况，当温差超过规定限值时，及时采取降温或保温措施^[4]。夏季高温浇筑时，可在混凝土拌合物中掺入冰水、采用预冷骨料等方式降低入模温度；冬季低温浇筑时，采取加热骨料、保温搅拌等措施提升入模温度，控制混凝土内外温差在合理范围，减少温度应力引发的裂缝与冷缝协同作用。

4.2 浇筑后的保湿保温养护方案实施

混凝土浇筑完成后，及时开展保湿保温养护工作，这是防止冷缝扩展、提升结构耐久性的关键环节。根据环境温度与混凝土特性，选用合适的养护材料，如土工布、保湿膜、保温被等，对混凝土表面进行全覆盖，保持表面湿润，防止水分快速蒸发导致收缩开裂。养护时间需满足规范要求，一般不少于 14 天，大体积混凝土养护时间应适当延长。养护过程中定期监测混凝土温度与湿度，及时调整养护措施，确保混凝土在适宜的温湿度环境下强度稳步发展，提升界面粘结性能，降低冷缝对结构的不利影响。

4.3 特殊环境下的针对性养护措施

针对高温、低温、大风、降雨等特殊环境条件，采取针对性的养护措施。夏季高温时，除常规保湿外，可采用喷雾降温、搭设遮阳棚等方式降低环境温度，延缓混凝土水分蒸发；冬季低温时，采用覆盖保温被、设置加热装置等措施进行保温养护，防止混凝土受冻破坏，确保强度正常发展。大风天气时，加强养护材料的固定，避免被风吹起导致混凝土表面失水；降雨天气时，及时覆盖防雨布，防止雨水冲刷混凝土表面，影响浇筑质量与养护效果，确保冷缝防控措施全面到位。

5 冷缝防控效果的现场检测与质量提升

5.1 冷缝防控效果的直观检测方法

通过现场外观检查、锤击法等直观检测手段，对混凝土浇筑完成并达到一定强度后的表面质量进行全面细致检测，重点排查是否存在明显的冷缝、裂缝、蜂窝、麻面、露筋等质量缺陷。外观检查过程中，需近距离观察混凝土表面颜色是否均匀一致，有无因新旧混凝土结合不良形成的条带状接缝痕迹、色泽差异或局部疏松区域，对疑似冷缝的部位做好清晰标记并记录位置、长度等关键信息。锤击法操作时，选用重量适宜的检测锤，沿混凝土表面均匀布点敲击，通过聆听敲击产生的声音特性判断内部密实度与界面结合状态，声音清脆浑厚表明混凝土质地均匀、新老结合紧密，若出现沉闷、空洞或回音异常等

情况,则大概率存在冷缝、内部疏松等缺陷,为后续开展针对性复核检测与处理提供明确方向。如图2:



图2 风电机组基础混凝土冷缝现场图示

5.2 无损检测技术在质量评估中的应用

采用超声波检测、回弹法等成熟可靠的无损检测技术,对风电机组基础大体积混凝土内部质量与冷缝分布情况进行全面、精准的评估。超声波检测时,将发射与接收探头对称布置在混凝土测试面,通过仪器测量超声波在混凝土内部的传播速度、幅值及波形变化,结合相关技术规范分析数据,混凝土内部密实、无缺陷时超声波传播顺畅,速度稳定、幅值衰减小,若检测到传播速度异常降低、幅值显著衰减或波形畸变等现象,则提示该区域可能存在冷缝、裂缝或内部空隙等界面缺陷,同时可初步判定缺陷的大致位置与范围^[5]。回弹法检测需严格遵循操作规范,选取具有代表性的测试区域,避开钢筋、预埋件等部位,通过回弹仪测量混凝土表面回弹值,再结合现场实测的混凝土碳化深度,依据对应强度曲线换算混凝土表面抗压强度,间接反映混凝土浇筑质量与界面结合效果,若局部强度明显偏低,需结合超声波检测结果进一步排查是否存在冷缝等质量问题。无损检测技术的核心优势在于无需破坏混凝土结构,可实现大面积、非接触式检测,既保证了检测结果的客观性与准确性,又避免了破坏性检测对基础结构完整性造成的影

响,为冷缝防控效果评估提供科学依据。

5.3 基于检测结果的防控技术优化完善

在全面汇总现场直观检测与无损检测数据的基础上,对冷缝防控技术的实施效果进行系统复盘与深度分析,精准查找防控过程中各环节存在的不足与薄弱点。针对检测中发现的冷缝缺陷,结合施工记录、材料性能参数及环境监测数据等,深入剖析缺陷产生的根本原因,明确是材料配比不合理、外加剂适配性不足,还是施工过程中分层分段控制不当、浇筑节奏失衡、振捣不规范,或是温控养护措施不到位、环境因素干扰等具体问题,进而制定针对性强、可操作的整改与补救措施。结合工程实践积累的经验,对材料选型标准、配合比设计方案、施工工艺参数、温控养护流程等关键环节的技术方案进行迭代优化完善,整合形成一套适配风电机组基础施工特点、可复制、可推广的冷缝防控技术体系,不仅为当前工程的质量整改提供技术支持,更为后续同类大体积混凝土浇筑工程的冷缝防控提供更可靠、更高效的技术参考,持续优化防控策略,不断提升冷缝防控的整体水平与工程应用效果。

6 结语

本文围绕风电机组基础大体积混凝土浇筑冷缝控制技术展开系统探讨,明确了冷缝形成的核心影响因素,提出了材料优化、工艺改进、温控养护等多维度防控方案。通过材料配比调整、施工工艺规范化、温控措施强化及质量检测评估等一系列技术手段,可有效降低冷缝产生概率,提升混凝土结构的整体性与耐久性。这些技术方案贴合工程实际需求,具有较强的实用性与可操作性,为风电机组基础施工提供了科学指导。未来需在工程实践中持续积累经验,不断优化防控技术细节,推动大体积混凝土浇筑质量的进一步提升,为风电机组安全稳定运行筑牢基础。

参考文献:

- [1] 黄冬平,宋志强,曹东,等.筒型基础在风电机组“以大代小”基础原位改造中的应用[J].风能,2025,(06):74-81.
- [2] 孙浩安,吴金峰.混塔风电机组基础混凝土质量控制[J].建筑科技,2025,9(05):148-152.
- [3] 张春生.陆上风电机组混合塔筒施工技术及其质量控制要点研究[J].电力设备管理,2025,(09):212-214.
- [4] 史家洋,符鹏程,姜少辉,等.关于风电机组混凝土塔架关键风险点管控的思考[J].风能,2024,(05):106-108.
- [5] 冯立志,张永,郑亮.装配式技术在风电机组结构基础施工中的应用[J].大众科技,2024,26(01):82-85+93.