

极端气候条件下工业建筑混凝土施工质量保障技术研究

赵宏丽

河南省豫西建设工程有限责任公司 河南 三门峡 472399

摘要：本文系统分析了高温、低温、大风及强降雨等典型极端气候对混凝土拌合、运输、浇筑、振捣及养护全过程的影响机理，重点探讨了由此引发的塑性收缩裂缝、温度应力开裂、强度发展受阻、碳化加速及冻融破坏等质量问题。在此基础上，从原材料优选、配合比优化、施工工艺改进、智能监测与信息化管理等多个维度，构建了一套适用于极端气候条件下的工业建筑混凝土施工质量综合保障技术体系。研究表明，通过采用缓凝型高性能减水剂、低热水泥、纤维增强、相变材料调温、智能温控养护系统及BIM+物联网协同管理平台等关键技术，可显著提升混凝土在恶劣环境下的施工适应性与长期性能。本文研究成果可为极端气候区工业建筑混凝土工程提供理论支撑与实践指导，对保障国家重大基础设施安全具有重要意义。

关键词：极端气候；工业建筑；混凝土施工；质量保障；温度控制；智能养护；裂缝防治

引言

工业建筑作为国家经济发展的物质基础，广泛应用于能源、化工、冶金、制造等领域，其结构安全与耐久性直接关系到生产连续性与人员安全。混凝土作为工业建筑最主要的结构材料，其施工质量受环境因素影响显著。近年来，全球气候变暖趋势明显，极端天气事件呈现频率增加、强度增大、持续时间延长的特点。据世界气象组织（WMO）报告，2020—2024年是有记录以来最热的五年，同时极寒、强对流、持续干旱或暴雨等极端气候在全球多地频发。此类气候条件严重干扰了传统混凝土施工工艺的正常实施，极易导致混凝土早期性能劣化、结构缺陷增多，甚至引发重大工程事故。当前，国内外学者对常规气候下混凝土施工技术已有较深入研究，但针对极端复合气候（如高温伴随大风、低温伴随降雪）下工业建筑混凝土施工的系统性研究仍显不足。现有规范（如GB50666《混凝土结构工程施工规范》）虽对温控措施有所规定，但多为原则性条款，缺乏针对不同极端气候场景的精细化技术方案。因此，亟需构建一套科学、高效、可操作的质量保障技术体系，以应对日益严峻的气候挑战。

1 极端气候对混凝土施工质量的影响机理

1.1 高温环境的影响

高温（通常指日最高气温 $\geq 35^{\circ}\text{C}$ ）对混凝土施工的影响主要体现在以下几个方面：（1）水分蒸发加速：高温显著提高混凝土表面水分蒸发速率。当蒸发速率超过泌水速率时，表层混凝土迅速干燥，产生塑性收缩应力，导致早期塑性裂缝。裂缝深度可达数厘米，严重影响结构整体性与耐久性。（2）凝结时间缩短：水泥水化

反应速率随温度升高而加快，导致混凝土初凝和终凝时间大幅缩短^[1]。这不仅压缩了运输与浇筑窗口期，还易造成冷缝（施工缝）形成。（3）坍落度损失加剧：高温下减水剂分解加速，水泥颗粒吸附作用增强，导致混凝土工作性迅速下降，泵送困难，振捣不密实。（4）后期强度与耐久性降低：高温养护虽可加速早期强度发展，但会降低28天及后期强度，并增大混凝土内部孔隙率，加速碳化与氯离子渗透。

1.2 低温环境的影响

低温（通常指日平均气温 $\leq 5^{\circ}\text{C}$ ，或最低气温 $\leq 0^{\circ}\text{C}$ ）对混凝土的危害更为隐蔽且严重：（1）水化反应受抑：水泥水化是放热反应，低温显著降低反应速率。当温度低于5°C时，强度发展极其缓慢；低于0°C时，拌合水结冰，体积膨胀9%，对水泥石结构造成不可逆损伤。（2）早期冻害风险：若混凝土在达到临界强度（通常为设计强度的30%）前受冻，将导致强度损失高达50%以上，且抗渗性、抗冻性严重劣化。（3）温差应力开裂：大体积混凝土在低温环境下内外温差更大，易产生温度应力裂缝。尤其在寒潮突袭时，表面急剧冷却而内部仍处于高温状态，拉应力集中于表面，引发贯穿性裂缝。（4）施工效率降低：低温下模板拆除周期延长，施工进度受阻，增加成本。

1.3 大风与强降雨的影响

（1）大风：加速混凝土表面水分蒸发，加剧塑性收缩；干扰泵送与布料作业，造成离析；吹散养护覆盖物，降低保温保湿效果。（2）强降雨：冲刷新浇混凝土表面，造成水泥浆流失、骨料裸露；改变水胶比，降低强度；雨水渗入未终凝混凝土内部，形成薄弱层或冷缝。

2 极端气候下混凝土施工质量保障关键技术

2.1 原材料优选与配合比优化

2.1.1 高温环境对策

(1) 水泥选择：优先选用中低热水泥，如P·O42.5中热硅酸盐水泥或专用于大体积混凝土的P·MH型中热水泥。此类水泥C3A和C3S含量较低，水化速率平缓，可显著降低水化热峰值（通常可减少15%~25%），有效缓解因内外温差过大引起的温度应力集中。（2）掺合料应用：大量掺加优质粉煤灰（20%~40%）或粒化高炉矿渣粉（30%~50%）。这些矿物掺合料不仅可替代部分水泥，降低单位体积水化热，还能通过后期火山灰反应填充孔隙，改善微观结构密实度，提高抗渗性和耐久性^[2]。同时，其缓凝效应有助于延长施工操作时间，适应高温下快速失水的不利条件。（3）外加剂优化：采用缓凝型聚羧酸高性能减水剂，在保证高减水率（≥25%）的同时，将初凝时间延长至6~8小时，满足长距离运输与复杂结构连续浇筑需求；同步添加引气剂，控制混凝土含气量在3%~5%之间，形成均匀分布的微小封闭气泡，有效缓冲水分蒸发引起的表面干缩应力，显著提升抗裂性与抗冻融性能。（4）骨料降温措施：对粗细骨料采取喷淋冷水、覆盖遮阳网或置于阴凉棚内储存；拌合水可掺入冰屑（冰水混合物比例根据气温动态调整），使混凝土出机温度严格控制在30℃以下。实践表明，每降低1℃出机温度，内部最高温升可减少约0.8~1.0℃，对控制温度裂缝具有显著效果。

2.1.2 低温环境对策

(1) 早强防冻剂：选用无氯型复合早强防冻剂（如亚硝酸钙+三乙醇胺体系），既可将拌合水冰点降至-10℃以下，又可加速C3S水化，促进1d、3d强度快速增长，确保混凝土在负温环境中仍能获得足够早期强度，避免冻融循环造成的结构性损伤。（2）低水胶比设计：严格控制水胶比≤0.40，最大限度减少自由水含量，降低孔隙率与冻胀压力。研究表明，水胶比每降低0.05，抗冻等级可提升1~2个等级（如F150→F200），显著增强混凝土在寒冷地区的服役能力。（3）纤维增强技术：掺加聚丙烯纤维（0.9kg/m³）可有效抑制塑性阶段的表面龟裂；钢纤维（20~40kg/m³）则显著提升混凝土的韧性、抗拉强度与抗冲击性能，对温度应力引起的微裂缝具有良好的桥接与阻裂作用，尤其适用于设备基础、地坪等易受温变影响的部位。（4）预热措施：拌合水加热至40~60℃（严禁超过80℃以防水泥假凝），骨料采用蒸汽或热风预热至5~10℃，确保混凝土入模温度不低于10℃，为早期水化提供必要热环境，防止因初始温度过低导致强度发展

停滞。

2.2 施工工艺创新

2.2.1 高温施工工艺

(1) 避开高温时段：合理安排施工计划，优先选择夜间或清晨气温较低时段（通常为凌晨4:00~10:00）进行混凝土浇筑，减少阳光直射与高温蒸发影响，降低表层失水速率。（2）分层分块浇筑：单次浇筑厚度控制在500mm以内，缩短单仓作业时间（建议≤2小时），避免因长时间暴露导致表层失水过快；大型基础或超长结构宜采用跳仓法分段施工，减少整体约束应力。（3）二次抹面与即时覆盖：在初凝前（约浇筑后2~3小时）进行二次抹压，消除表面泌水通道与微裂缝；随即覆盖湿麻袋+塑料薄膜复合层，形成“内保湿、外隔绝”的双重养护屏障，防止水分快速蒸发引发塑性收缩裂缝。（4）喷雾降温系统：在作业面周边布设自动喷雾装置，结合温湿度传感器联动控制，维持空气相对湿度>70%，营造适宜养护微环境。部分项目已采用无人机搭载喷雾设备，实现大面积均匀雾化，提升效率与覆盖精度。

2.2.2 低温施工工艺

(1) 综合蓄热法：采用高保温性能模板体系（如木模板外贴50mm岩棉板或聚氨酯保温板），浇筑后立即覆盖双层草帘+塑料薄膜，形成“内蓄热、外保温”结构；对关键部位可内置电热毯或碳纤维加热带辅助升温，确保混凝土在初凝阶段维持正温环境。（2）暖棚法施工：对重要结构节点、大体积设备基础或冬季关键工期部位搭设封闭式暖棚，内部配置暖风机、热风炉或电加热器，确保棚内温度持续维持在5℃以上，并定期监测CO₂浓度与通风状况，防止有害气体积聚^[3]。（3）延长拆模时间：侧模拆除须待混凝土强度达到设计值的75%以上，且构件表面温度与环境温差不超过20℃。过早拆模易导致表面骤冷产生温度裂缝，甚至引发结构表层剥落。建议采用红外测温仪实时监控构件表面温度，科学判定拆模时机。

2.3 智能温控与养护技术

引入基于物联网（IoT）、大数据与自动控制的智能养护系统，实现“感知—分析—响应”闭环管理，推动混凝土养护由“被动应对”向“主动调控”转变。（1）埋入式传感器网络：在混凝土关键截面（如中心、1/4厚度、表层）预埋分布式光纤或无线温度、湿度及应变传感器，实时采集内部温升曲线、湿度变化及早期应变发展数据，上传至云端平台进行动态建模与预警分析。部分项目已实现7×24小时连续监测，误差控制在±0.5℃以内。（2）相变材料（PCM）调温技术：在模板内侧复

合石蜡类相变材料层（相变温度28~32℃），白天吸收多余热量，夜间释放储存热能，有效平抑昼夜温差波动。实验表明，PCM可使混凝土内部最大温差降低6~10℃，显著减少温度梯度应力。（3）自反馈养护系统：系统根据传感器反馈自动调控养护设备。例如，当表面温度>35℃且相对湿度<60%时，自动启动高压雾化喷淋；当内部温度梯度超过25℃/m时，激活预埋冷却水管进行循环降温；低温环境下则联动电加热装置维持适宜养护温度。该系统已在多个大型工业厂房项目中成功应用，养护合格率提升至98%以上。

2.4 裂缝综合防治技术

需采取“主动释放+被动引导+事后修复”三位一体策略，实现全生命周期裂缝控制。（1）跳仓法施工：取消传统永久伸缩缝，在大体积或超长结构中采用“跳仓浇筑+后期封仓”工艺，利用间隔浇筑释放早期收缩应力，减少约束裂缝。该方法已在电子厂房、重型装备制造基地等项目中广泛应用，裂缝发生率降低70%以上。（2）诱导缝设置：在应力集中区域（如转角、孔洞周边、截面突变处）预设V形或U形诱导缝，深度约为构件厚度的1/4~1/3，间距控制在20~30m。诱导缝通过削弱局部刚度，引导裂缝沿预定路径规则开展，避免无序开裂影响结构安全与外观^[4]。（3）环氧注浆修复：对已形成的贯穿或深层裂缝，采用低压慢注工艺（压力0.2~0.4MPa）注入改性环氧树脂，填充裂缝并恢复结构整体性与防水性能。注浆材料具备高粘结强度（≥10MPa）、低粘度（<20mPa·s）与良好渗透性，可有效修复宽度0.1mm以上的裂缝。

3 信息化管理平台构建

为实现极端气候下混凝土施工的精细化管理，有必要构建基于建筑信息模型（BIM）与物联网（IoT）融合的智能管理平台。该平台首先将施工方案、材料参数、传感器布点、养护计划等信息集成于BIM模型中，实现三维可视化交底与施工模拟，提前识别潜在风险点。现

场部署的各类传感器通过LoRa或NB-IoT等低功耗广域网络，将温度、湿度、应变等实时数据上传至云端服务器。平台后台集成人工智能算法，如长短记忆神经网络（LSTM），可基于历史数据与实时输入，预测混凝土未来24~72小时的强度发展趋势及开裂风险概率。一旦预测结果超出预设安全阈值，系统将自动向管理人员推送预警信息，并建议相应处置措施，如调整养护参数、暂停浇筑或加强覆盖。所有指令与反馈均可通过移动端APP实现，支持远程监控与协同决策，打破信息孤岛，提升应急响应能力。

4 结语

本文研究极端气候对工业建筑混凝土施工质量的影响，提出综合保障技术体系。高温会加速水分蒸发等引发问题，低温抑制水化等威胁早期强度，需材料改性与工艺调整应对。通过优化配合比、引入外加剂和纤维、实施温控措施，可提升混凝土适应能力。智能温控养护系统与BIM+IoT管理平台应用，让质量控制从“经验驱动”转为“数据驱动”，精准性和前瞻性大幅提升。未来研究可聚焦纳米材料改性混凝土长效性能、深化数字孪生技术应用，探索建立基于气候风险评估的施工保险与责任机制，为重大基础设施安全服役提供科技支撑。

参考文献

- [1]李果,许峻鹏,陈泉,等.工业建筑混凝土施工方案研究[C]//《施工技术》杂志社,亚太建设科技信息研究院有限公司.2023年全国土木工程施工技术交流会论文集(上册).中国建筑第二工程局有限公司核电建设分公司;2023:958-960.
- [2]马云星.工业建筑主体结构混凝土施工质量控制[J].中国井矿盐,2025,56(01):26-27.
- [3]李崇智,等.寒冷地区混凝土防冻技术研究进展[J].建筑材料学报,2020,23(4):601-610.
- [4]王有亮.高温环境下工业建筑混凝土耐久性施工技术探索[J].新城建科技,2025,34(05):145-147.