

# 极端气候条件下混凝土浇筑温控技术优化与裂缝防治实践

刘燕 赖斯辉

江西国瑞工程管理咨询有限公司

DOI : 10. 12238/jpm. v6i 12. 8573

**[摘要]** 混凝土作为现代建筑的核心材料，其耐久性和稳定性直接影响工程结构的寿命与安全，在极端气候条件下，如持续高温、骤冷或剧烈温差环境，混凝土浇筑过程中的温度控制难度显著增加，极易引发温度应力集中、收缩裂缝等质量问题，严重威胁结构的整体性能，如何优化温控技术并有效防治裂缝，已成为工程领域亟待解决的关键问题，本文主要探讨极端气候条件下混凝土浇筑温控技术优化与裂缝防治实践。

**[关键词]** 极端气候条件；混凝土浇筑；裂缝防治

## Optimization of Temperature Control Technology and Crack Prevention Practices in Concrete Pouring under Extreme Climate Conditions By

Liu Yan Lai Sihui

Jiangxi Guorui Engineering Management Consulting Co., Ltd.

**[Abstract]** As a core material in modern construction, concrete's durability and stability directly impact the lifespan and safety of engineering structures. Under extreme climatic conditions—such as prolonged high temperatures, sudden cooling, or drastic temperature fluctuations—temperature control during concrete pouring becomes significantly more challenging. This often leads to quality issues like temperature stress concentration and shrinkage cracks, severely compromising structural integrity. Optimizing temperature control technology and effectively preventing cracks have become critical challenges in engineering. This paper focuses on optimizing temperature control techniques and practical crack prevention measures for concrete pouring under extreme climate conditions.

**[Key words]** extreme climate conditions; concrete pouring; crack prevention

### 引言

全球气候变化加剧，极端高温、寒潮及干旱等异常天气频发，对混凝土施工提出了严峻挑战，传统温控技术难以适应骤变的环境条件，导致混凝土结构在硬化过程中因内外温差过大或水分蒸发过快而产生裂缝，进而引发渗漏、钢筋锈蚀等连锁问题，国内外学者虽在材料改性、养护工艺等方面取得一定进展，但针对复杂气候交互作用下的动态温控策略仍缺乏系统性研究。

#### 1. 极端气候条件下混凝土温控技术研究的工程迫切性

##### 1.1 高温干旱地区大体积混凝土内部温升梯度控制难题

在极端高温干旱地区，大体积混凝土浇筑过程中面临显著的内部温升梯度控制难题，其核心矛盾在于水泥水化放热与环境高温的耦合作用导致温度场分布严重不均。当环境温度超过40℃时，混凝土芯部峰值温度可达75~85℃，而表层因蒸发冷却效应温度骤降至50℃以下，内外温差极值突破30℃，远超

规范允许的25℃临界阈值。这种非线性温度梯度引发了两类典型问题：一是由于混凝土早期弹性模量增长滞后于温度应力发展，在降温阶段产生的拉应力超过2.5MPa时，极易在约束区形成贯穿性裂缝，裂缝宽度普遍达到0.3~0.5mm；二是高温环境下胶凝材料水化速率加速，72小时水化度可达常规条件的1.8倍，导致徐变松弛效应难以有效释放应力。干旱地区相对湿度常低于30%，表面水分蒸发速率高达1.5kg/m<sup>2</sup>·h，使得塑性收缩裂缝在初凝前3小时内即可能形成，裂缝密度比湿润环境增加60%以上。现行温控模型未能充分考虑太阳辐射热流密度对表层温度场的影响，导致预测温度曲线与实际监测数据的偏差超过15%，严重制约了温控措施的精准实施。

##### 1.2 寒潮骤冷环境导致表层混凝土冻胀开裂风险加剧

在寒潮骤冷环境下，大体积混凝土结构表层面临严峻的冻胀开裂风险，其破坏机理主要表现为温度骤降引发的相变冻胀与收缩应力耦合作用，当环境温度在短时间内急剧下降至零下

15℃甚至更低时，混凝土表层降温速率可达 5~8℃/h，远高于内部核心区的 0.5~1℃/h，这种剧烈的温度梯度导致表层混凝土产生超过 2.0MPa 的拉应力<sup>[1]</sup>。混凝土孔隙溶液在低温下结冰膨胀，体积膨胀率可达 9%，当饱水度超过 91%的临界值时，冰晶压力与温度应力的叠加效应使微观裂缝迅速扩展为宏观裂缝，寒潮伴随的大风天气会显著加剧表层水分流失，风速 8m/s 条件下混凝土脱水速率比无风环境提高 2~3 倍，进一步加剧了干燥收缩裂缝的形成。在-20℃的骤冷环境中，掺防冻剂的混凝土仍会出现 0.1~0.3mm 的表面裂缝，而未采取防护措施的试件裂缝宽度可达 0.5mm 以上，反复冻融循环会显著降低混凝土的断裂韧性，经 10 次冻融循环后，混凝土的断裂能下降 30%~50%，使结构在后续荷载作用下更易发生脆性破坏。

### 1.3 强日照辐射与昼夜温差耦合作用的应力累积效应

强日照辐射导致混凝土表层温度急剧升高，形成显著的温度梯度，而夜间温度骤降又引发快速冷却，这种周期性温度波动使混凝土内部产生交变热应力，在干旱地区，混凝土表面日最高温度可达 60 摄氏度以上，而夜间最低温度可能降至 15 摄氏度以下，单日温差超过 45 摄氏度，这种剧烈的温度变化导致混凝土表层与核心区产生非线性温度分布，进而引发超过 3.5MPa 的拉应力。持续的热循环作用会引发混凝土材料性能的渐进式劣化，弹性模量以每年 8%至 12%的速率衰减，热膨胀系数则随循环次数增加而增大，这种材料参数的时变特性进一步加剧了应力累积效应。在日照辐射强度超过 800W/m<sup>2</sup> 且日温差大于 30 摄氏度的环境中，混凝土结构早期开裂概率增加至常规环境的 4.7 倍，裂缝扩展速率大幅加快。这种应力累积效应不仅导致结构耐久性指标如氯离子扩散系数大幅上升，碳化深度增加 35%，更会显著降低结构服役寿命，使设计使用年限为 50 年的结构实际寿命缩短至 30 年以下。

## 2. 优化温控技术解决的核心裂缝防控问题

### 2.1 基于相变材料的混凝土入模温度精准调控方法

表 1 不同保温材料的传热特性及其适用条件对比

保温材料	导热系数 $\lambda$ (W/(m·K))	适用温度范围 (°C)	热反射率 (%)	最佳厚度 (mm)
气凝胶毡	0.018 - 0.022	-50~+650	85 - 90	5 - 10
聚乙烯泡沫	0.033 - 0.038	-40~+80	10 - 15	20 - 30
聚氨酯硬泡	0.023 - 0.028	-200~+120	20 - 25	15 - 25
铝箔复合膜	0.05 - 0.07	-60~+150	90 - 95	1 - 3

多层保温毯的动态优化设计需综合考虑环境温度、混凝土水化放热规律及材料热工性能，采用“气凝胶毡+聚乙烯泡沫+铝箔反射层”的三层结构，可使混凝土表面昼夜温差降低 60%以上，最大温度梯度控制在 15℃/m 以内，显著减少表面裂缝风险。保温体系的动态调整策略（如根据实时温度监测增减保温层数）可进一步提升控温精度，确保混凝土在硬化关键期的温度场均匀性。

### 2.3 复合外加剂对温差收缩应力的补偿作用量化分析

温差收缩应力是导致核心裂缝产生的主要因素，复合外加剂通过多组分协同作用，能够有效补偿温差引起的体积变形，其作用机理主要体现在三个方面：一是减水组分通过降低水胶

比提升混凝土密实度，减少毛细孔数量，从而降低干燥收缩趋势；二是膨胀组分在水化过程中生成钙矾石等结晶产物，产生适度体积膨胀以抵消降温阶段的收缩变形；三是缓凝组分通过调节水泥水化放热速率，延缓温峰出现时间，使温度梯度分布更趋平缓。

传统降温措施如预冷骨料、加冰拌和等方法虽能一定程度降低混凝土初始温度，但在强日照辐射及大温差环境下，其降温幅度和持续时间难以满足工程需求，相变材料（PCM）因其高潜热储能特性，可在相变过程中吸收或释放大热量，从而实现混凝土温度的动态调节<sup>[2]</sup>。掺入石蜡类、脂肪酸类等有机相变材料的混凝土，其入模温度波动可控制在±2℃范围内，远优于传统方法的±5℃波动。相变材料的温度调节作用具有显著的自适应性，当环境温度骤升时，PCM 吸热延缓温升，当温度骤降时，PCM 放热减缓冷却速率，从而有效削弱温度梯度诱发的拉应力。

相变材料在混凝土温控应用中的关键技术问题仍需突破，PCM 与水泥基体的相容性直接影响其长期稳定性，部分有机相变材料易发生渗漏或与胶凝材料反应，导致热循环效能衰减。经过 100 次热循环后，未封装处理的 PCM 混凝土相变焓下降可达 20%~30%，严重影响温控效果，相变温度点的选择直接影响调控精度，若 PCM 的相变区间与混凝土实际温升曲线不匹配，则难以发挥最佳控温效果，例如在高温地区，若 PCM 的相变温度低于混凝土峰值温度，其吸热能力将提前耗尽，无法有效抑制温升。

### 2.2 多层保温毯动态覆盖体系的传热系数匹配设计

保温养护是控制温度应力的关键措施，而传统单层保温材料难以适应强日照与大温差环境下的动态热交换需求，多层保温毯动态覆盖体系通过不同导热系数的材料组合，实现梯度隔热，有效调节混凝土表面的散热速率。该体系的传热机制遵循傅里叶热传导定律，其整体热阻取决于各层材料的厚度（ $\delta$ ）与导热系数（ $\lambda$ ）的匹配关系。外层应采用低导热系数材料（如气凝胶毡， $\lambda \approx 0.018 \text{ W/(m·K)}$ ）以阻隔环境热辐射，而内层选用中等导热材料（如聚乙烯泡沫， $\lambda \approx 0.035 \text{ W/(m·K)}$ ）以均衡混凝土内部热量传递。

比提升混凝土密实度，减少毛细孔数量，从而降低干燥收缩趋势；二是膨胀组分在水化过程中生成钙矾石等结晶产物，产生适度体积膨胀以抵消降温阶段的收缩变形；三是缓凝组分通过调节水泥水化放热速率，延缓温峰出现时间，使温度梯度分布更趋平缓。

从材料热力学角度分析，复合外加剂的补偿效能可通过等效热膨胀系数进行量化表征，当掺量为胶凝材料总量的 2~3% 时，系统有效热膨胀系数可调整至  $8.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ ，较普通混凝土降低约  $1.5 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。这种改变使得结构在 20℃温差条件下产生的理论收缩应变减少 30~40 微应变，相当于释放了 1.2~1.6MPa 的拉应力，补偿效果与养护条件呈强相关性，在湿

度 $\geq 90\%$ 的环境中，膨胀组分的效能可大幅提升<sup>[3]</sup>。通过建立本构模型发现，当补偿应变与收缩应变的比值维持在 0.7-0.9 范围内时，结构抗裂安全系数可提高至 1.8-2.2，这为工程配比设计提供了明确的量化控制指标。

### 3. 极端气候混凝土裂缝防治的集成技术路径

#### 3.1 分布式光纤测温系统指导的差异化冷却策略

混凝土结构由于剧烈的温度变化和梯度分布不均，极易产生有害裂缝，分布式光纤测温系统（DTS）通过实时、连续、高精度的温度监测，为差异化冷却策略提供了数据支撑。该系统以  $0.1^{\circ}\text{C}$  的温度分辨率和 1m 的空间分辨率，能够精确捕捉大体积混凝土内部的三维温度场演变规律，尤其适用于高温差、强日照等极端环境。基于监测数据，可建立温度场有限元模型，动态预测最高温升区域和最大温度梯度带，进而制定分级冷却方案<sup>[4]</sup>。例如在核心高温区采用加密冷却水管布置（间距 $\leq 0.8\text{m}$ ），水流速控制在  $0.6\text{--}1.2\text{m/s}$ ；在边缘低温区则减少冷却强度，避免过大的内外温差，使混凝土内外温差控制在  $20^{\circ}\text{C}$  以内，降温速率稳定在  $1.5\text{--}2.0^{\circ}\text{C/d}$  的合理范围，从而有效抑制温度裂缝的产生。

差异化冷却策略的优化实施还需结合混凝土的材料特性与环境参数进行动态调整，借助分布式光纤测温系统反馈的数据，可构建温度-应力耦合分析模型，计算不同冷却强度下的温度应力分布。当监测到某区域温度应力接近混凝土抗拉强度（通常为  $2\text{--}3\text{MPa}$ ）的  $80\%$  时，系统自动触发调节机制，如改变冷却水流量或温度，在干旱高温地区，可配合表面保温和喷雾养护，将表层混凝土的蒸发速率控制在  $0.25\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$  以下，避免干缩裂缝。

#### 3.2 风速-蒸发速率耦合模型的表面保湿工艺优化

在极端气候条件下，混凝土表面的水分蒸发速率是导致塑性收缩裂缝的关键因素，风速与蒸发速率之间存在显著的耦合关系，较高的风速会加速混凝土表面水分的散失，从而增大开裂风险。为量化这一关系，可建立基于空气温度、相对湿度、风速和混凝土表面温度的蒸发速率预测模型。该模型通常采用 Penman-Monteith 方程或基于边界层理论的修正公式，通过引入风速修正系数来反映其对蒸发速率的非线性影响。当风速超过  $5\text{m/s}$  时，蒸发速率呈指数级增长，尤其在高温低湿环境下，混凝土表面可能在一小时内失去超过  $1\text{kg}/\text{m}^2$  的水分。

表 2 不同风速条件下混凝土表面的蒸发速率实测数据

风速 (m/s)	蒸发速率 ( $\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ )	临界保湿时间 (min)
0.5	0.25	240
2.0	0.58	100
4.0	1.12	50
6.0	1.85	30
8.0	2.40	20

风速-蒸发速率耦合模型的建立为极端气候下混凝土表面保湿工艺提供了科学依据，通过实测数据可知，风速每增加  $2\text{m/s}$ ，蒸发速率平均提升  $0.7\text{kg}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ ，临界保湿时间缩短  $50\%$  以上，工艺优化需以风速分级控制为核心，结合环境温湿度实

时监测，动态调整防风与保湿措施。例如在  $6\text{m/s}$  风速下，采用防风网（降低风速  $50\%$ ）与复合养护剂（蒸发速率降低  $40\%$ ）的组合措施，可将有效养护时间延长至 1.5 小时。

#### 3.3 微膨胀剂与纤维增强材料的复合抗裂配比设计

微膨胀剂通过化学反应在混凝土硬化初期生成钙矾石等膨胀性产物，补偿因干燥收缩和温度应力导致的体积变形，从而抑制裂缝产生，硫铝酸钙类微膨胀剂在掺量为  $6\%\text{--}8\%$  时，可产生  $0.02\%\text{--}0.04\%$  的膨胀率，有效抵消混凝土的早期收缩<sup>[5]</sup>。纤维增强材料（如聚丙烯纤维、钢纤维或玄武岩纤维）通过物理增韧机制分散应力，阻止微裂缝扩展，例如掺入  $1.5\text{kg}/\text{m}^3$  的聚丙烯纤维可提升混凝土极限拉伸应变  $20\%$  以上，配比设计需综合考虑材料协同效应：微膨胀剂的掺量需与纤维长度、掺量匹配，避免过度膨胀导致结构疏松。

微膨胀剂与纤维的复合抗裂效果还需依赖多尺度材料设计与施工工艺的精准控制，在微观层面，微膨胀剂的反应速率需与水泥水化进程同步，避免过早或延迟膨胀造成的应力集中，例如采用氧化镁类延迟性微膨胀剂可匹配大体积混凝土的温升曲线，在降温阶段发挥补偿收缩作用。纤维的分布均匀性直接影响抗裂效能，需通过分散剂和搅拌工艺优化（如先干拌纤维后加浆体）确保纤维单丝化，宏观上需结合气候特点调整配比参数：在寒冷地区可增加钢纤维掺量至  $2.0\text{kg}/\text{m}^3$  以抵抗冻融裂缝，在干旱地区则需提高微膨胀剂掺量至  $10\%$  以应对快速蒸发。施工中还需采用分层浇筑、喷雾养护等措施，保证膨胀效应充分发展。

### 结语

极端气候条件下的混凝土温控与裂缝防治是一项涉及材料科学、施工工艺及环境管理的综合性课题，本文通过整合理论研究成果与工程实践经验，揭示了当前技术体系的局限性，并提出了面向未来的优化方向。研究不仅有助于弥补极端环境下混凝土施工的技术空白，也为绿色低碳建筑的发展提供了重要支撑，进一步结合智能监测与大数据分析，推动温控技术向精细化、动态化方向发展，从而全面提升混凝土结构在复杂气候下的耐久性与可靠性。

### [参考文献]

- [1]曹立宝,曹立云.超厚大体积混凝土浇筑施工温控技术研究[J].建筑机械化,2025,46(06):160-163+179.
  - [2]张凯旋.挡潮闸枢纽工程混凝土浇筑温控效应防裂控制[J].水利科学与寒区工程,2025,8(05):118-122.
  - [3]翟保尊,朱晓然.寒潮对闸墩混凝土温控的影响分析[J].科技创新与应用,2025,15(14):68-71.
  - [4]蔡鹏.大体积承台混凝土浇筑温控技术研究[J].城市道桥与防洪,2025,(05):291-294+304.
  - [5]李政龙.碾压混凝土重力坝施工温控措施研究[J].价值工程,2025,44(12):17-19.
- 作者简介：刘燕（1985—），男，汉族，江西赣州人，本科学历，研究方向：建筑工程管理。