

Research on the release law of hydration heat and optimization of temperature control parameters of precast beam concrete under low temperature environment

Yunjie Wen

China Railway Third Bureau Group Construction and Installation Engineering Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, 030031, China

Abstract

The production of prefabricated beams for bridge engineering in cold regions faces significant temperature control challenges in winter. Low temperature conditions weaken the hydration reaction rate of concrete, leading to insufficient early temperature rise and delayed strength growth, which has become a common problem. In construction environments where the temperature remains consistently below 5 °C, even dropping to -10 °C to -15 °C, traditional insulation steam curing systems are difficult to achieve effective hydration heat accumulation and temperature regulation. This study indicates that by optimizing the implementation of the system, the peak hydration temperature can be increased by 8-12 °C, the early strength growth rate can be significantly accelerated, the risk of surface cracks induced by temperature differences can be significantly reduced, and the overall production cycle can be effectively shortened. This study provides a scientific basis for the engineering application of prefabricated bridge beams in winter construction in cold regions.

Keywords

precast beam; Low temperature environment; Hydration heat; Temperature field; Temperature control optimization

低温环境下预制梁混凝土水化热释放规律及温控参数优化研究

文云杰

中铁三局集团建筑安装工程有限公司, 中国 · 山西 太原 030031

摘要

寒冷地区桥梁工程的预制梁生产在冬季面临显著的温控挑战。低温条件削弱混凝土水化反应速率, 使早期温升不足与强度增长滞后成为常见问题。在温度始终低于 5 °C, 甚至降至 -10 °C 至 -15 °C 的施工环境中, 传统的保温—蒸汽养护体系难以实现有效的水化热积聚与温度调控。本研究表明, 通过优化体系的实施, 水化峰值温度可提升 8-12 °C, 早期强度增长速率显著加快, 温差诱发的表层裂纹风险大幅降低, 整体生产周期得到有效缩短。本研究为寒区桥梁预制梁冬季施工提供可工程化应用的科学依据。

关键词

预制梁; 低温环境; 水化热; 温度场; 温控优化

1 引言

随着中国基础设施建设向高海拔、高纬度和严寒地区持续推进, 预制梁场冬季施工已从季节性难题转变为常态化技术需求。混凝土早期性能高度依赖温度条件, 而低温不仅削弱水化热积聚, 还可能造成局部冻结, 使材料微结构在尚未胶前即遭受损伤。本文的研究目标在于通过实验观测、模型推导与工程监测相结合的方法, 深入揭示低温条件下预制梁水化热的时空演化过程, 明确温控措施对水化热动力学

的调节作用, 并进一步构建科学、高效且可实施的温控参数优化体系。研究结果对寒冷地区桥梁建设具有直接的工程应用价值。

2 低温条件下预制梁内部温度场的演化特征与水化热响应规律

预制梁浇筑后的温度场演化受多重因素共同控制, 包括水化热释放过程、梁体几何特征、模板与保温层的热工性能、外界温度变化与风速扰动等。在低温环境下, 这一演化过程呈现显著的非对称性: 内部温度虽然随水化反应上升, 但其峰值幅度低、上升速度慢; 而表面温度因对流散热增强而迅速下降, 形成极大的表—里温差。

【作者简介】文云杰 (1984-), 男, 中国山西孝义人, 本科, 高级工程师, 从事桥梁工程研究。

大量监测数据显示,当环境温度为 -10°C 时,预制梁表层温度在浇筑 4 小时后便可降至接近环境温度,而内部温度却仍未进入水化加速期,导致梁体截面存在超过 20°C 的温差。随着水化反应缓慢启动,内部温度在 18~22 小时达到低峰值,但此时表层温度仍保持极低状态,温度梯度持续拉大。这种“表冷心弱”的模式使梁体在早龄期呈现高度应力敏化特征,尤其是翼缘板和腹板交界区域,由于几何突变与散热增强,更容易产生裂缝。模板体系对温度场分布的影响在低温环境中被极大放大。金属模板的高导热性使其成为结构表面散热的主要通道;若未采取有效保温措施,模板可带走超过 50% 的内部热量,使内部水化反应难以达到自升温条件。因此,在低温环境中,温控措施的核心任务之一便是限制模板散热,从而为水化热积聚创造条件。

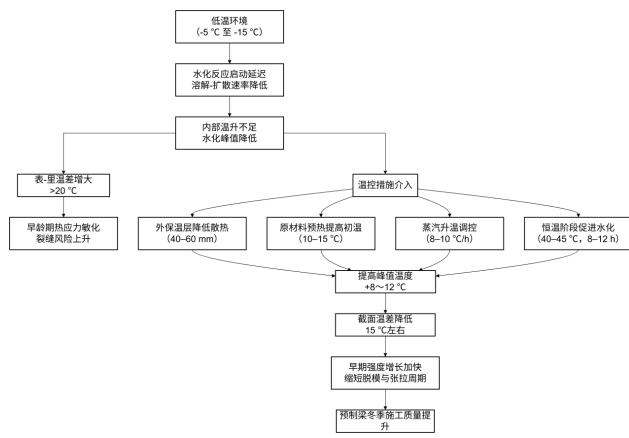


图 1 温控条件下预制梁水化热与温控过程机理示意图

图 1 展示了低温条件下预制梁混凝土水化热释放过程中的关键影响因素及温控措施介入后的作路径。可以看到,温控体系通过调节初始温度、抑制模板散热与构建稳定的恒温区间,使水化反应得以维持连续且高效的能级状态,从而有效改善峰值温度、截面温差及早龄期力学性能。

3 温控体系对水化热演化的调节作用及关键参数分析

3.1 温控措施对水化热释放过程的调节机理

在低温环境下,混凝土早期水化行为呈现出峰值低、启动慢、过程滞后的明显特征,使预制梁内部温度难以维持水化反应所需的温度。温控体系的作用并不仅限于提高混凝土的初始温度,而在于通过改变材料初始能级、控制外界散热与调整水化反应的能量平衡,使内部温度场在早龄期形成相对稳定的热环境。水泥水化属于放热过程,而低温条件下溶解—扩散—成核的动力被显著削弱,导致放热强度不足以抵抗外部散热,因此外保温、骨料预热与模板预热在启动阶段起着改变反应初始条件的关键作用。实践表明,当混凝土拌和物入模温度由 5°C 提高至 12°C 左右时,诱导期显著缩短,水化反应更快进入加速阶段,内部温度上升曲线也呈现

更陡的增长趋势,为后续的蒸汽升温与恒温调控奠定基础。

在温控体系中,外保温层承担了防止结构表面快速散热的首要功能。预制梁的钢模板具有较高的导热性,使其在低温环境下成为热量流失的主要通道;若无保温覆盖,混凝土表层温度在浇筑数小时内即可下降至接近环境温度,而核心区水化尚未充分启动,截面温差迅速拉大,导致热应力集中。外保温层通过降低模板—空气界面的换热系数,使表层温度保持在水化反应可持续进行的区间,为内部热量的积聚创造必要条件。温控体系的综合调节效果体现在水化热峰值高度、峰值出现时刻及截面温差等多个响应指标中。通过对不同温控方案的对比发现,保温、预热与升温制度的组合不仅可以将峰值温度提高 $8\text{--}12^{\circ}\text{C}$,还可将峰值时间提前 4~6 小时,使混凝土早期强度增长曲线发生显著改善;同时,由于表层温度得到有效维持,截面温差由未温控时的 25°C 以上下降至 15°C 左右,使热应力敏感性显著降低。可以看出,温控体系对水化热演化的调节并非单一措施的线性叠加,而是通过在不同阶段改变能量输入与散失模式,使水化反应从低温抑制状态转入可控的升温—恒温—降温路径,形成更适宜强度发展的热环境^[1]。

3.2 关键温控参数的敏感性特征与优化方向

在低温施工条件下,温控体系涉及的参数众多,且不同参数对温度场的影响程度差异显著。保温层厚度、原材料预热温度、蒸汽升温速率、恒温温度与恒温时长等因素共同塑造了水化热演化的时空特征,而参数之间存在明显的耦合关系,使温控过程呈现高敏感性与高非线性。研究表明,在 -10°C 环境中,保温厚度每增加 10 mm ,内部峰值温度可提高 $2\text{--}4^{\circ}\text{C}$;但当厚度超过 60 mm 后,温升增益逐渐趋缓。这说明保温层存在合理区间,其作用机理在于控制模板的散热强度,使内部水化释放的热量能够维持温度增长,从而推动反应持续向前。对于预制梁这种表面散热显著的结构类型,适宜的保温厚度往往比普通构件更高,实际工程中 $40\text{--}60\text{ mm}$ 区间具有较强适用性^[2]。

原材料遇热的敏感性同样突出。骨料和拌和水作为混凝土的主要热容量组分,其温度直接决定了入模温度的初始水平;入模时温度每提升 5°C ,峰值温度可提升 $3\text{--}5^{\circ}\text{C}$,峰值时间提前 2~3 小时。然而若预热温度过高,表层可能因快速散热形成倒置温差,反而增加裂缝风险,因此预热策略需在提高初始能级和控制温差之间取得平衡。蒸汽升温制度在整个温控体系中具有最高的灵活性,其升温速率、恒温阶段的设定温度以及加热持续时间直接影响水化反应的能量输入方式。当升温速率控制在 $8\text{--}10^{\circ}\text{C}/\text{h}$ 时,内部温度曲线平稳且温差可控;升温过快则易导致外冷内热的不均衡现象,使应力积累加剧。恒温阶段的设置可以显著提升水化反应强度,使峰值温度在低温环境中重新获得可控性,恒温温度维持在 $40\text{--}45^{\circ}\text{C}$ 的范围内可使水化反应进入最有效的能量转化区间。

4 温控参数优化体系构建及工程化应用验证

4.1 温控参数优化的理论依据与综合评估方法

在严寒环境下,预制梁混凝土温度场的调控属于典型的多变量耦合问题,其温控效果既取决于单项措施的有效性,也依赖于各参数之间的协同关系。由于水化热释放过程受温度驱动的特性十分明显,只要任一环节在时间或空间上出现不连续,都会使反应路径被迫重构,从而影响整体温升与早期强度增长。因此,温控参数优化的核心在于构建一种能使人模期、升温期、恒温期与降温期之间保持热过程连续性的动态调控体系。在前期研究中,通过大量温度场监测数据与热力耦合模型的拟合,可以明确不同参数对峰值温度、峰值时间及截面温差的敏感性规律,为参数优化提供量化依据^[3]。

温控参数的优化不能仅依赖传统经验判断,而需基于系统的综合评估方法。在实际过程中,可将峰值温度的可达性、温差的可控性、强度增长的充分性以及能耗水平纳入同一评价框架中,通过构建具有权重差异的指标体系实现不同方案的比较。理论上,当内部峰值温度维持在40℃以上、峰值时间不超过18小时、截面温差保持在20℃以内时,混凝土的早期强度与体积稳定性均能保证达到工程要求。为了使优化过程更具可操作性,需将保温厚度、原材料预热温度、升温速率、恒温温度与恒温时长等五类关键参数纳入多目标调控模型,通过寻求一组在热工、安全与能耗之间取得平衡的参数组合来实现优化目标。

从大样本数据分析可以看出,当外保温厚度处于40–60mm区间、原材料预热温度维持在10–15℃之间、升温速率控制在8–10℃/h、恒温温度保持在40–45℃时,结构内部的水化反应可以维持稳定且连续的释放模式,温度曲线呈现平缓上升、适度峰值与缓降过程,使结构处于最有利的热环境中。实践中通过在梁端及翼缘薄弱部位配置可控加热装置,可以使表层温度不再出现早期骤降现象,从而显著降低表层裂缝的敏感性。由此可见,温控参数优化需要在整体性调控框架下实现动态匹配,而并非对单一措施进行强化。

4.2 工程化实施策略与应用效果分析

温控参数的工程化实施不仅要求理论可行,更依赖于现场资源条件、施工组织方式与梁场生产节奏的多重制约。为确保优化参数能够在严寒环境下稳定落地,必须构建一套

具备可重复性、可调节性与安全性的实施策略。在实际工程中,预制梁场通常采用定槽蒸汽养护系统作为主控手段,而保温体系与原材料预热体系则与其形成互补关系,使温控过程从混凝土拌和开始,到脱模与张拉结束的全过程均具有可控性。以某寒冷地区高铁项目梁场为例,当冬季最低气温降至-15℃时,通过实施优化后的温控组合措施,使混凝土的人模温度稳定在12℃左右,在升温阶段达到较为均匀的增长速度,恒温阶段保持在42℃上下波动,从而使内部温度峰值顺利达到41–43℃的目标范围。

在工程应用过程中,优化参数的实施效果不仅体现在温度曲线的改善上,更体现在早期强度增长速率、裂缝控制表现以及生产节奏的提升上。监测数据显示,优化措施实施后,混凝土在24小时龄期的抗压强度比未优化前提高超过60%,并可在30–32小时达到张拉要求,使梁体的周转周期明显缩短。更为重要的是,梁体表层裂缝发生率显著下降,翼缘板边缘等易裂部位的温度梯度得到有效控制,使结构的体积稳定性明显提升。

5 结语

低温环境下预制梁混凝土水化热释放过程具有峰值低、滞后明显、温差大和早期强度缓慢等特征,使冬季施工在质量控制和施工效率方面面临严峻挑战。本文从水泥水化动力学出发,揭示了低温对水化机理与温度场演化的系统性影响,并通过大量监测数据和模拟分析明确了水化热演化的关键规律。在此基础上,构建的温控参数优化体系能够有效提升内部温升、降低截面温差并加速早期强度增长,工程验证证明该体系具有显著的可实施性与经济价值。未来可将数字孪生技术、智能传感与自动化控制引入温控体系,实现温度场预测、能耗优化与过程自适应调控,为寒冷地区预制梁全生命周期质量管理提供更加先进的技术支撑。

参考文献

- [1] 刘林田,林家兴,杨彤薇,等.掺粉煤灰、石灰粉对大体积混凝土水化热性能影响分析[J].建筑技术开发,2025,52(03):142-144.
- [2] 侯艳娟,单世龙,李正宁,等.玻化粉煤灰微珠混凝土基本力学性能及水化热释放研究[J].铁道勘察,2023,49(04):7-12+34.
- [3] 代金鹏.钻孔灌注桩混凝土水化热与冻土环境耦合作用下时变温度场研究[D].兰州交通大学,2020.