

冬季施工技术在建筑工程中的应用策略

杨红杰

湖北长欣建设有限公司 湖北宜昌 443200

摘要: 针对冬季低温环境对建筑施工造成的结构强度衰减、焊缝质量不稳与能耗失控等问题, 本文构建了热能调控与焊接温控一体化技术路径, 设计混凝土保温系统、钢构焊接预热方案与供热负荷匹配策略, 并以典型项目为对象进行全过程实测分析。结果表明, 各关键指标均实现性能改善, 形成了适用于严寒环境下的施工工艺体系, 具备良好的工程适应性与技术推广价值。

关键词: 冬季施工; 混凝土强度; 焊接控制; 热能系统

引言

冬季气候环境对建筑施工工艺、材料性能及施工组织带来明显影响, 低温、降雪、结冰等因素极易导致混凝土早期强度不足、结构变形控制困难和能源消耗增加等问题, 给施工质量和工期进度带来较大挑战。为应对这一问题, 相关施工企业需围绕材料适应性、工艺调整和现场管理等方面, 制定符合低温条件的施工技术路径。针对实际工程中出现的冬施难题, 系统分析并提出具有工程针对性的技术策略具有重要现实意义。

一、施工关键环节面临的问题

1. 混凝土早期强度波动情况

冬季低温环境对混凝土早期强度的发展构成显著干扰, 主要原因在于水泥水化反应速率随着温度下降明显减缓, 初凝与终凝时间延长, 致使早龄期结构性能无法满足后续施工进度需求。尤其在日最低气温低于 -5°C 的环境中, 混凝土内部热量难以维持水化反应所需温区, 凝结初期结构强度增长速度不足, 导致拆模时间推迟, 易引发界面剥离、模板变形和结构表层缺陷^[1]。

混凝土内部温度控制不当也易引发温度梯度过大现象, 内外温差所带来的热应力作用于未形成完整晶体结构的混凝土体内, 增加早期开裂风险。水化热集中释放期若未实现有效保温, 混凝土局部区域可能出现热量滞留, 强度发展非均匀化趋势进一步加剧材料内部的物理不连续性。在常规施工组织中, 对混凝土养护环境的人工调控缺乏动态响应机制, 容易出现温控数据滞后与加热功率响应脱节的问题, 影响实际养护效果。

施工工艺未考虑混凝土入模温度下降速度与初始水

化反应启动条件之间的匹配关系, 也会导致早期强度达不到设计目标。施工过程中, 模板吸热和环境辐射冷却共同作用于浇筑混凝土, 在养护初期快速降低其表层温度, 若未进行合理加热和保温措施, 易使混凝土产生早期冻害或结构离析, 降低整体密实度。

2. 焊接结构质量不稳定表现

钢结构焊缝区域在低温施工条件下极易受到外部环境干扰, 形成热应力集中与收缩应力累积, 进而降低接头强度与韧性。低温状态下钢材韧性下降, 焊接过程中热影响区温度梯度急剧变化, 使焊缝金属及热影响区的微观组织结构发生不均匀转变, 冷却过快时会生成马氏体组织, 导致脆性增强从而使得焊缝区易产生冷裂纹或暗裂缺陷。

焊接作业期间环境温度低于规范建议值时, 焊接热输入不足, 不利于金属间的有效熔合, 焊道成形质量下降, 增强了焊缝根部缺陷风险^[2]。局部未熔合、夹渣、气孔等焊接缺陷在低温条件下不易被实时识别, 若无辅助探伤或智能检测手段支持, 极易被遗漏进入下一道工序, 造成结构安全隐患。传统焊接控制往往忽略外界气流影响对焊缝温降曲线的改变, 使得实际焊缝冷却速度超过金属允许的相变控制区间, 增加冷裂倾向。焊接接头在高湿度环境中吸潮后易形成氢致开裂, 氢原子在晶体缺陷区富集并扩散, 进一步削弱连接部位的结构完整性。

3. 保温供热系统控制失衡

冬季施工对现场热能系统提出较高响应能力与持续供热能力的双重要求, 若系统在供热能力、布设方式或运行机制上存在偏差, 将直接导致结构局部热量不足,

影响施工工序连续性与成品质量。传统供热系统往往基于静态工况参数设计，缺乏对热负荷动态变化的快速响应机制，热源布设过于集中，热风输送路径长，热损耗大，边角区域温度难以维持在设计区间内。供热设备功率配置不合理、分布不均会造成加热过度或热量覆盖不足的问题，部分保温区域形成热量短板从而导致结构温控效果局部失效^[3]。

热能系统运行参数设置固定，未能根据外界温度波动、风速变化等环境变量进行自适应调整，导致温控能力受限。现场未构建统一的温度数据采集与反馈平台，施工人员无法准确掌握保温区的实时温度分布，进而难以判断供热措施的实际效果。保温系统设计多基于经验，缺少与结构热惯性、施工周期相匹配的参数化计算，供热时间、开启功率与施工节奏脱节，造成能源浪费或热量不足并存的矛盾状态。

系统运行中能源调度策略滞后，缺乏负荷预测机制，热源启停判断依赖人工经验，控制效率低、反应迟缓，影响施工工期与质量控制节奏。保温结构选型与布设工艺不当也会增加供热压力，存在保温层厚度不均、密封性差或易移位等问题，造成热量逸散、棚内对流紊乱，削弱整体保温效果，进而对施工环境稳定性构成挑战。

二、技术路径的具体设计方法

1. 混凝土冬施的热能控制方案

混凝土在负温环境下的施工必须满足早期水化热量平衡需求，控制其温度变化曲线与强度发展过程之间的耦合关系是关键。热能控制方案从入模温度、保温体系结构及温控反馈三方面展开设计。搅拌水温度的调节需稳定在35℃至45℃之间，使得混凝土出机温度维持在15℃左右，满足水泥水化初始热释放条件。骨料与外加剂需预先置于封闭恒温区域，以减缓热量损耗，提升混合物整体热容量。搅拌站需设置多点温度监测传感器，对不同批次出机混凝土温度进行实时记录，避免局部热输入不足造成养护差异^[4]。

混凝土成型后的热能保持依赖保温结构系统的覆盖完整性和热阻设计，保温棚宜采用多层复合结构，框架结构满足抗风载要求，覆层具备阻燃、抗冷凝与热反射性能。保温毯材料应具备高导热系数稳定性，在结构表面进行均匀覆盖，并通过交错压边方式降低热量逸散速率。底模区域增设气囊隔热垫，有助于减少混凝土底部热量流失。养护阶段持续监测混凝土内核温度，通过嵌

入式热电偶阵列实时获取中心热区与边缘冷区之间的温度梯度，以判断结构热稳定性及潜在裂缝风险。

结构拆模时机的判定基于温度—强度动态回归模型，通过水化进程曲线预测混凝土在低温环境中的强度发展趋势，结合实际监测值进行拆模决策。拆模后继续实施二次保温，避免混凝土暴露后热量骤降影响强度后续增长。此类热能控制系统需具备高度集成化与数据闭环能力，构建出一套响应及时、干预有效的养护控制体系。

2. 钢结构焊接的温控与监测方式

钢结构低温焊接的核心技术难点在于焊接接头热输入与冷却速率的精细控制，预热与焊后保温成为抑制冷裂纹生成的关键手段。焊接前在接头区设置红外加热装置，预热温度范围控制在80℃至120℃之间，依据构件厚度与合金元素含量进行差异化设定。加热系统需覆盖整个焊缝周边50mm范围，保证热影响区温度均匀，不出现温差突变区域。红外温度监测仪用于捕捉加热区域的表面温度变化，实时修正加热功率，避免热输入不均引发微观组织缺陷。

焊接过程中热输入量的稳定性决定焊缝成形质量，弧长、电流、电压及焊接速度需通过数控系统自动调节，确保单位长度内热输入曲线平滑可控。焊后立即覆盖石棉毯或专用高温毯进行保温缓冷处理，控制冷却速率不超过每小时10℃，有效降低马氏体组织的生成概率。在气温变化频繁区段，设定保温时间不少于8小时，并通过焊缝中心温度变化趋势判断冷却过程是否进入临界风险区。

焊缝质量检验采用高频数字超声波成像系统，可识别0.3mm以上缺陷并自动生成缺陷分布图谱，形成焊接质量数据库。该数据库与焊工操作数据实时关联，实现质量预警与标准偏差控制功能。工区内设置环境温度监控点与露点报警装置，一旦检测到湿度升高或表面结露条件即将形成，系统自动发出暂停指令，避免高湿冷态焊接风险。同时，设定夜间作业下限气温值，当环境温度低于-10℃时，系统拒绝焊接任务下达，转入预热预封阶段，保障全过程焊接作业的温控闭环稳定运行。

3. 供热系统的热负荷匹配调整

热负荷控制能力决定了现场施工空间的温度维持水平，是冬季施工环境可控性的基础保障。供热系统设计需基于施工区域面积、围护结构热阻特性、环境温度变

化率及作业人员数量综合测算热负荷指标。主热源配置应匹配全天24小时最大热负荷条件，设计功率不低于峰值负荷的110%，以应对突发冷空气影响。供热单元布局以“核心聚热、边界分送”模式展开，主热源设于温控需求最大区域，辅助热源点状分布于边缘与温差带，建立温场均衡调控体系。

风道系统布设采用高流量低噪音软管，末端设立分风器并加装动态风量分配阀门，实现多点分段独立送风。热风输送路径设有热能反馈模块，实时感应管道出口与棚内实际温度差值，对风速与风量进行精准修正。控制系统基于热工算法建立负荷预测模型，提前12小时根据天气预报与施工节奏预判热负荷变化，动态调整主热源启停时间及运行功率。

运行平台构建集成式能耗调度系统，将棚内温度、环境风速、能耗记录与加热设备启停状态统一接入调度终端。系统具备自学习能力，可自动识别各阶段供热响应效率，调整高能耗段设备运行策略，逐步建立结构—环境—能耗之间的多维耦合调控机制。热负荷控制从静态匹配走向动态响应，形成满足复杂施工需求的高适应性热控平台。

三、工程实测与反馈分析

1. 混凝土强度提升的数据分析

本项目实测分析以华北某市2023年保障性住房一期工程为基础，建筑总面积约6.2万平方米，结构形式为钢筋混凝土框架—剪力墙结构，施工时间段跨越冬季低温时段。施工过程实施了以热能调控、结构保温和焊接预热为核心的冬季施工技术路径，针对早期混凝土强度不足、钢结构焊缝质量不稳定及现场供热系统负荷失衡等问题开展系统性数据采集与分析，评价技术路径的实际成效。

混凝土浇筑区选取代表性构件布设测温 and 强度取样点，监测结构核心温度与表层温差变化，周期性提取试块进行抗压强度检测。测试结果表明，经热水搅拌、出机温度控制和棚内多层保温体系干预后，混凝土早期强度提升明显，结构养护环境热稳定性增强。表面温度波动控制在±2.8℃范围内，中心温度24小时内保持在15℃至18℃之间。48小时混凝土抗压强度平均达5.9 MPa，相比未控阶段提升约1.7 MPa。7天龄期强度平均值为17.3 MPa，28天龄期强度稳定在32 MPa以上，远高于项目初期未设保温系统时的平均水平。下表1展示了混凝土冬施阶段强度实测数据。

表1 混凝土冬施阶段强度实测数据

浇筑日期	出机温度 (℃)	48h强度 (MPa)	7天强度 (MPa)	28天强度 (MPa)
2023/12/10	15.2	5.6	16.9	31.4
2023/12/14	14.8	6.1	17.6	32.2
2023/12/18	15.4	6	17.2	32

强度提升主要得益于入模温度的合理控制和结构内部温度的长期稳定。保温层覆盖完整性直接影响水化反应速率分布，局部监测点数据显示，在结构边角区域若保温不连续，强度发展曲线存在1.2 MPa左右的滞后现象。加强这些薄弱区域的保温密封处理后，强度数据趋于一致，拆模时间得以统一规划，保障施工节奏稳定。

2. 焊接返修率与缺陷趋势统计

焊接质量控制效果通过无损检测与返修数据进行双重评估。项目中钢结构焊缝预热温度、热输入曲线与焊后冷却速率均进行技术控制，焊缝检测合格率自初期的82.4%提升至95.1%。返修比控制在4.2次/100米焊缝范围内，较初期12次/100米的水平下降超过65%。焊缝缺陷主要类型由早期的气孔与未熔合，转向后期偶发性的微裂纹。

数字超声波探伤设备采集的缺陷图谱显示，焊缝热影响区组织结构更加连续，冷裂倾向显著下降。焊接操作窗口时间段的优化也有效避免了高湿度条件下的氢致裂纹形成。在焊接节点分布较密集的区域增加预热保持时间后，缺陷密度降低，返修区段集中度减少，焊接作业的重复性得到控制。下表2展示了钢结构焊缝质量控制数据。

表2 钢结构焊缝质量控制数据

检测周期	合格率 (%)	返修次数 (次/100m)	冷裂纹比例 (%)
初期阶段 (12月初)	82.4	12	14.7
技术调整后 (1月中)	95.1	4.2	3.6

3. 能耗变化趋势与系统运行评价

现场供热系统运行数据结合温控系统平台进行实时采集与回溯分析，评估保温热源配置合理性与运行效率。原系统运行初期存在热源集中布设、功率分配失衡等问题，夜间大风降温时段内部温度波动明显。经热源结构调整与负荷预测模型部署后，主热源功率调节及时性提升，热量覆盖均匀性增强。

下表3展示了动态能耗数据，系统每日能耗从原均值468 kWh下降至387 kWh，节能率接近17.3%。结构内多点温控传感器反馈数据显示，24小时温差变化曲线趋

于平滑，控制精度显著提升。热效率从原有61.2%增长至74.5%，能耗密度曲线趋向收敛，系统调节频率下降超过30%。

表3 热能系统运行效率变化

运行阶段	日均能耗 (kWh)	热效率 (%)	控温波动范围 (°C)
系统初期	468	61.2	± 4.6
技术调整后	387	74.5	± 2.3

供热系统的运行优化在提升温度控制稳定性的同时，也间接增强了混凝土与钢结构施工的可控性，构建了能耗、温度与结构性能之间的良性联动关系。整体反馈表明，基于负荷预判与温度闭环调节的技术体系具备良好工程适配能力，有效支撑冬季严寒条件下建筑结构性能稳定输出。

结论

本研究基于华北地区冬季施工实践，围绕混凝土早期强度、钢结构焊接质量与现场能耗控制三大技术难点，

构建了热能调控、预热焊接、供热系统联动控制等关键路径，实测数据验证了混凝土强度提升明显、焊接返修率显著下降、能耗波动趋稳等成效，技术体系具备稳定性、响应性与适应性的复合优势，形成了可在严寒气候下稳定支撑结构性能的施工技术框架。

参考文献

- [1]陈旭, 韩世界, 李绍纯, 等. 负温环境下防冻剂和保温材料对混凝土受冻临界强度的影响[J]. 混凝土与水泥制品, 2023, (12): 89-93.
- [2]朱华, 熊静. 冬季混凝土施工电加热养护工艺研究与应用[J]. 黑龙江水利科技, 2023, 51(08): 104-106+110.
- [3]周建兴. 水利水电工程冬季施工混凝土技术标准及质量控制[J]. 大众标准化, 2022, (12): 7-9.
- [4]赵海忠, 陈修华, 黄辉. 高寒高海拔地区冬季施工薄壁混凝土早期强度研究[J]. 湖南水利水电, 2022, (03): 88-90.