

公路桥梁施工中大体积混凝土温控技术研究

孙 勇

新疆北新路桥集团股份有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要：公路桥梁施工中，大体积混凝土因水化热积聚易产生温度应力，导致结构开裂，影响耐久性。温控技术核心在于控制内外温差（一般 $\leq 25^{\circ}\text{C}$ ）、降低绝热温升峰值及延缓降温速率。通过选用低热水泥、掺加粉煤灰与矿渣粉优化配合比，结合分层浇筑与冷却水管系统，配合保温保湿养护，可有效缩小温差、减少热应力。同时，利用实时温度监测与数值模拟技术，动态调整温控参数，实现裂缝风险预警与控制，保障桥梁结构安全与耐久性。

关键词：公路桥梁施工；大体积混凝土；温控技术

引言：在公路桥梁建设中，大体积混凝土应用广泛，如桥梁墩台、基础等关键部位。然而，大体积混凝土在浇筑后，水泥水化热大量释放，内部温度急剧上升，与表层形成较大温差，进而产生温度应力，极易引发裂缝，严重影响桥梁结构的安全性与耐久性。这不仅会增加后期维修成本，还可能缩短桥梁使用寿命。因此，开展大体积混凝土温控技术研究迫在眉睫。通过科学有效的温控措施，可降低温度应力、减少裂缝产生，对保障公路桥梁建设质量具有重要意义。

1 公路桥梁施工中大体积混凝土温控基础理论

1.1 大体积混凝土定义与特性

(1) 尺寸标准与热工参数：公路桥梁工程中，大体积混凝土通常指浇筑体最小几何尺寸不小于1m，且因水化热积聚易产生温度应力的混凝土结构。其关键热工参数包括导热系数、比热容量、体积热膨胀系数等，其中导热系数一般为 $1.5\text{--}2.5\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，比热容量约 $900\text{--}1100\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ，这些参数直接影响温度场演化规律，是温控方案设计的核心依据。(2) 水化热释放规律与温度场分布：水泥水化热释放呈现“先快后慢”的特征，浇筑后3-7天达到峰值，随后逐渐衰减。温度场分布呈非线性变化，核心区域温度最高，向表层逐步递减，形成明显的温度梯度。在桥梁墩台、基础等构件中，往往出现中心与表面温差达 30°C 以上的情况，易引发结构损伤。

1.2 温度裂缝形成机理

(1) 内因：水泥水化热产生大量热量导致内部温度急剧升高，而混凝土硬化过程中会发生干缩、徐变等收缩变形，当变形受到抑制时，内部产生拉应力。当拉应力超过混凝土抗拉强度极限，便会引发裂缝。(2) 外因：环境温度骤降会加剧内外温差；桥梁结构的支座约束、钢筋约束等限制变形的约束条件，会放大温度应力；浇筑速度过快、振捣不密实等施工工艺缺陷，会降

低混凝土密实度和抗拉性能，为裂缝产生创造条件。

1.3 温控技术核心目标

(1) 控制内外温差（一般 $\leq 25^{\circ}\text{C}$ ）：通过保温养护、分层浇筑等措施，缩小混凝土内部与表层的温度差值，避免温差过大产生的热应力超过混凝土抗拉强度。(2) 降低绝热温升峰值：采用低热水泥、掺加矿物掺合料等方式，减少水泥水化热总量，降低混凝土内部的最高温升，从源头控制温度应力。(3) 延缓降温速率：通过合理的养护措施延长降温时间，使混凝土有足够的时间完成徐变变形，释放部分温度应力，防止降温过快导致裂缝产生。

2 公路桥梁施工中大体积混凝土温控关键技术

2.1 原材料选择与配合比优化

(1) 低热水泥、粉煤灰、矿渣粉等掺合料应用：低热水泥（如低热矿渣硅酸盐水泥）水化热释放速率慢、总量低， 3d 水化热可控制在 230kJ/kg 以下，能有效降低混凝土绝热温升。粉煤灰需选用Ⅱ级及以上优质灰，按胶凝材料总量20%-30%掺加，可替代部分水泥减少水化热，同时改善混凝土和易性；矿渣粉掺量通常为30%-50%，能优化胶凝材料颗粒级配，提升混凝土密实度，延缓温度上升速度。在桥梁墩台施工中，采用“低热水泥+粉煤灰+矿渣粉”复合胶凝体系，可使混凝土 7d 绝热温升降低20%-25 $^{\circ}\text{C}$ 。(2) 骨料级配与含泥量控制：粗骨料优先选用连续级配的碎石，粒径 $5\text{--}31.5\text{mm}$ ，空隙率 $\leq 40\%$ ，以减少胶凝材料用量，降低水化热；细骨料采用中砂，细度模数 $2.3\text{--}3.0$ ，含泥量 $\leq 3\%$ ，泥块含量 $\leq 1\%$ 。若含泥量过高，会吸附外加剂降低其效能，还会增加混凝土收缩变形，加剧温度裂缝风险。某跨江大桥基础施工中，通过严格控制骨料含泥量（碎石 $\leq 1\%$ 、砂 $\leq 2\%$ ），混凝土收缩率降低15%，温控效果显著提升^[1]。(3) 外加剂的作用机理：缓凝剂（如葡萄糖酸钠）可延长水泥水

化诱导期，使水化热释放峰值推迟至浇筑后5-7d，避免短时间内温度骤升，缓凝时间通常控制在4-8h，确保混凝土浇筑施工连续性。高效减水剂（如聚羧酸系）减水率 $\geq 25\%$ ，在保证混凝土工作性的前提下，可减少单位用水量15%-20%，间接降低水泥用量，减少水化热产生；同时能改善混凝土内部微观结构，提高密实度和抗拉强度，增强抗裂性能。

2.2 施工工艺控制

(1) 分层分段浇筑与间歇时间设计：采用分层浇筑法，每层厚度30-50cm，层间间歇时间控制在混凝土初凝前（一般4-6h），避免出现施工冷缝。分段浇筑时，根据结构尺寸划分施工段，段间设置后浇带，宽度80-100cm，待两侧混凝土浇筑完成28d后，采用补偿收缩混凝土浇筑，释放部分温度应力。某高速公路桥梁承台施工中，分3层浇筑，每层厚度40cm，层间间歇5h，成功控制了浇筑过程中的温度累积。(2) 预埋冷却水管系统设计：冷却水管选用Φ40-50mm的镀锌钢管，采用梅花形或行列式布置，管间距1.0-1.5m，距结构边缘 $\geq 50\text{cm}$ 。浇筑完成后24h内通循环水，进水温度 $\leq 25^\circ\text{C}$ ，流量根据混凝土温度动态调整，初期流量1.5-2.0m³/h，当内部温度超过60℃时，增大流量至2.5-3.0m³/h，使混凝土内部温度匀速下降，降温速率 $\leq 2^\circ\text{C}/\text{d}$ 。某跨海大桥塔柱施工中，通过优化冷却水管布置与流量控制，混凝土内外温差始终控制在25℃以内。(3) 保温保湿养护措施：混凝土浇筑完成后，表面及时覆盖土工布+阻燃棉被+塑料膜的三层保温层，保温层厚度根据环境温度调整，冬季 $\geq 5\text{cm}$ 、夏季 $\geq 3\text{cm}$ ，确保表层温度缓慢下降。同时采用自动喷淋系统，每隔2-3h喷淋一次，保持混凝土表面湿润（含水率 $\geq 90\%$ ），防止干缩裂缝。在严寒地区施工时，还可在保温层内设置电伴热装置，维持混凝土表面温度 $\geq 5^\circ\text{C}$ ^[2]。

2.3 温度监测与预警系统

(1) 传感器选型：热电偶传感器响应速度快（ $\leq 1\text{s}$ ），测量范围-50-300℃，精度 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ，适用于单点温度监测，常用于混凝土表层、内部及环境温度测量。光纤传感器（如分布式光纤）可实现连续测温，测量长度可达数千米，精度 $\pm 0.3^\circ\text{C}$ ，能实时获取混凝土温度场分布情况，适合大体积混凝土整体温度监测。实际应用中常采用“热电偶+光纤”组合监测方式，兼顾单点精度与整体分布。(2) 监测点布置原则：在混凝土中心、距表面5cm处、距边缘10cm处及冷却水管附近设置监测点，每个监测断面不少于3个点，确保覆盖高温区、温差变化大区域。监测点需避开钢筋密集区和预埋件，便于传感

器安装与数据采集，同时做好防护措施，防止施工过程中损坏。某铁路桥梁墩身施工中，每10m高度设置1个监测断面，每个断面布置5个监测点，全面掌握了混凝土温度变化规律。(3) 实时数据分析与预警阈值设定：通过数据采集仪实时传输监测数据，当出现内部温度 $\geq 65^\circ\text{C}$ 、内外温差 $\geq 25^\circ\text{C}$ 或降温速率 $\geq 2^\circ\text{C}/\text{d}$ 时，系统自动发出预警（声光报警+短信通知），管理人员及时采取加强保温、调整冷却水流速等措施。同时每日生成温度变化报告，分析温度趋势，为后续温控方案优化提供依据。

2.4 数值模拟与预测技术

(1) 有限元软件应用：MIDAS Civil可建立桥梁结构整体模型，模拟混凝土浇筑、养护全过程的温度场变化，计算精度高，能快速输出各时段温度云图；ANSYS可通过热-结构耦合分析模块，模拟温度应力分布，预测裂缝风险区域。在某斜拉桥主塔施工前，采用MIDAS Civil模拟温控过程，提前发现塔柱根部易出现高温区，通过调整冷却水管布置成功规避风险。(2) 温度场-应力场耦合分析：将温度场计算结果作为荷载输入应力场分析，考虑混凝土弹性模量、徐变、收缩等参数随龄期的变化，计算不同施工阶段的温度应力。通过耦合分析，可准确判断混凝土是否产生拉应力超过抗拉强度，为温控措施制定提供量化依据。某特大桥基础施工中，通过ANSYS耦合分析，优化了分层浇筑厚度，使最大温度应力降低18%^[3]。(3) 施工过程动态模拟与参数优化：根据施工进度计划，动态模拟不同浇筑速度、冷却水流速、保温措施下的温控效果，对比分析各方案的温度指标（绝热温升、内外温差等），优化参数取值。例如模拟显示，当冷却水流速从1.5m³/h提升至2.5m³/h时，内部最高温度降低8℃，据此确定最优流量参数，确保施工过程温控达标。

3 公路桥梁施工中大体积混凝土温控技术优化与创新

3.1 新材料与新技术应用

(1) 相变材料（PCM）控温：相变材料可在特定温度区间吸收或释放热量，将其以微胶囊形式掺入混凝土（掺量一般为胶凝材料总量的5%-10%），当混凝土内部温度升高至相变温度（通常40-50℃）时，PCM吸收热量发生相变，抑制温度骤升；当温度下降时，PCM释放热量，减缓降温速率。在某跨河大桥承台施工中，掺入石蜡基PCM微胶囊，混凝土绝热温升峰值降低12℃，降温速率控制在1.5℃/d以内，有效缩小内外温差，减少裂缝风险。此外，将PCM封装于钢管中预埋在混凝土内部，可重复利用，降低材料成本，进一步提升温控灵活性。

(2) 智能温控混凝土：通过在混凝土中掺入碳纤维、纳米传感器等功能材料，实现自感知功能，实时监测内部温度、应力变化，数据可通过无线传输至管理平台。同时，该类混凝土具备自调节能力，当监测到温度过高时，内置的温控组件（如可降解温控微球）自动释放降温剂，或通过改变自身导热性能调节温度。某高速公路桥梁墩身施工中应用智能温控混凝土，成功实时捕捉到3处局部高温点，并通过自调节功能将温度控制在安全范围，大幅减少人工干预成本。

3.2 绿色施工与节能措施

(1) 冷却水循环利用：传统冷却水管系统的冷却水多直接排放，造成水资源浪费。通过构建“冷却用水-沉淀池-过滤装置-冷却塔-循环泵-冷却水管”的闭环系统，将使用后的冷却水经沉淀、过滤去除杂质，再通过冷却塔降温至25℃以下，重新用于混凝土冷却。某跨海大桥施工中，该系统使冷却水重复利用率达90%以上，单日节约用水300m³，同时减少污水排放，符合绿色施工要求。此外，可在循环水中添加缓蚀剂，降低管道腐蚀风险，延长冷却水管使用寿命。(2) 太阳能辅助温控系统：在桥梁施工区域搭建太阳能集热板与储能装置，冬季利用太阳能加热保温层内空气或循环水，提升混凝土表层温度，避免低温冻害；夏季通过太阳能驱动喷淋系统，增加表层散热效率。某山区公路桥梁施工中，采用太阳能辅助温控系统，冬季混凝土表层温度提升5-8℃，夏季喷淋频率提高至每1.5h一次，内外温差控制效果提升20%，且全程无额外电力消耗，实现节能降耗。

3.3 基于BIM的温控管理平台

(1) 三维模型集成温度数据：在BIM三维模型中关联温度监测传感器信息，将实时采集的混凝土内部温度、表层温度、环境温度等数据，按监测点位置同步映射至模型对应区域，形成可视化温度场分布。通过模型可直

观查看不同部位温度差异，快速定位高温区或温差超标区域。某特大桥主塔施工中，借助该功能，管理人员在BIM平台上发现塔柱顶部一处监测点温差达28℃，立即调整保温措施，24h内将温差降至23℃^[4]。(2) 施工过程动态可视化：将温控施工流程（如分层浇筑、冷却水管通水、保温养护）与BIM模型时间维度关联，模拟施工全过程温度变化趋势，同时实时更新现场施工进度与温控措施执行情况。通过动态可视化功能，可提前预判施工过程中可能出现的温控问题，如模拟显示某施工段若延迟24h覆盖保温层，温差将超标，据此及时调整施工计划。此外，平台支持多方协同，建设、施工、监理单位可实时共享温控数据与模型信息，提升管理效率。

结束语

公路桥梁施工中，大体积混凝土温控技术是保障结构质量与耐久性的关键。通过合理选材、优化配合比、精细施工工艺以及完善的温度监测与数值模拟，能有效控制内外温差、降低绝热温升并延缓降温速率，显著减少温度裂缝风险。未来，随着新材料（如相变材料）、新技术（如智能温控混凝土、BIM管理平台）及绿色节能措施的应用，温控技术将更加高效、智能与环保，为公路桥梁建设的高质量发展提供坚实的技术支撑。

参考文献

- [1] 吴仕鹏.花江峡谷大桥主塔承台大体积混凝土温控技术研究[J].公路交通技术,2025,41(1):81-83.
- [2] 张志涛.公路桥梁承台大体积混凝土施工关键技术[J].石河子科技,2025,(05):44-45.
- [3] 李良平.大体积混凝土抗裂技术在桥梁承台施工中的应用[J].工程技术研究,2024,9(13):66-68.
- [4] 毕进安.高速公路桥梁承台大体积混凝土配合比设计与温控防裂研究[J].交通科技与管理,2024,5(03):45-47.