

气候变化对市政道路桥梁耐久性影响的评估与对策

梁炳辉

中建粤华建设有限公司 广东深圳 518000

摘要：气候变化通过温度波动、极端降水、强风及大气腐蚀性增强等多种途径，对市政道路桥梁的材料性能、结构稳定性及使用寿命产生显著负面影响。本文系统分析了高温、冻融循环、暴雨洪涝、紫外线辐射及酸雨等气候因素对道路桥梁耐久性的作用机制，构建了基于气候适应性的耐久性评估指标体系，并从材料改良、结构优化、智能监测及维护策略等方面提出针对性对策，为提升市政基础设施的气候韧性提供理论依据与技术支持。

关键词：气候变化；市政道路桥梁；耐久性评估；气候适应性；养护对策

引言

近年来，全球气候变化导致极端天气事件频发，市政道路桥梁作为城市生命线工程，其耐久性面临严峻挑战。气候变化通过改变环境荷载与材料劣化速率，加速道路开裂、桥梁钢筋锈蚀及结构疲劳等问题，直接威胁交通运行安全并增加维护成本。因此，评估气候变化对道路桥梁耐久性的影响机制，制定科学有效的应对策略，已成为土木工程领域亟待解决的关键课题。

一、气候变化对市政道路耐久性的影响评估

(一) 高温与温度波动的影响

在全球气候变化日益加剧的背景下，持续升高的环境温度对沥青路面性能产生了一系列显著的负面影响。首先，高温环境会导致沥青结合料的黏度显著降低，使路面材料出现明显的软化现象，从而大幅削弱其抵抗车辙变形的能力。更为严重的是，昼夜温差增大引发的温度反复升降变化，会使沥青混合料经历剧烈的热胀冷缩循环过程，在路面内部不断累积温度应力，最终形成网状的温度裂缝系统。根据国内外多项研究数据表明，当气温每升高1℃时，沥青路面的车辙深度将平均增加约5%，而裂缝扩展速率则会显著提高12%左右^[1]。此外，持续的高温环境还会加速沥青材料的老化氧化进程，使胶结料逐渐变脆变硬，导致其黏结性能与抗疲劳寿命明显下降。长期观测数据显示，在高温环境下，沥青路面的实际使用寿命普遍会缩短20%–30%，给道路养护带来巨大压力。

(二) 极端降水与洪涝的影响

气候变化导致的极端降水事件频发，对道路结构造成了多方面的严重破坏。强降雨产生的表面径流会持续

冲刷并带走路面集料，造成路面表面构造深度显著损失；而持续渗透的雨水则会导致基层材料逐渐流失，最终形成结构层脱空现象，进而诱发坑槽、沉陷等典型的水损害病害。在长期积水的情况下，路基土体会发生明显的软化现象，其CBR值显著下降，最终引发路面不均匀沉降变形。根据交通部门的统计数据显示，在年降水量超过1200mm的多雨地区，道路大修周期普遍需要缩短30%–40%。此外，城市内涝还会导致检查井周边的水力冲刷作用加剧，使井周回填材料不断流失，造成井框高差和路面破损等问题，这不仅大幅增加了日常养护维修的难度，还显著提高了养护成本。

(三) 冻融循环与低温的影响

在季节性冻土区域，气候变化显著加剧了冻融循环的破坏效应。渗入路面结构层的水分在低温条件下结冰时，体积会膨胀约9%，产生巨大的冻胀应力；而在温度回升融化后，又会导致结构层材料变得松散，形成明显的融沉变形。这种反复的冻融作用会引发路面表层出现剥落、掉粒等表面破坏现象，严重时还会导致结构层间发生分层破坏^[2]。实验研究数据表明，当年冻融循环次数超过50次时，水泥混凝土路面的抗折强度会降低25%以上，而沥青路面的低温抗裂性能也会显著下降，其裂缝率增加幅度可达40%–60%。特别是在昼夜温差较大的高寒地区，这种破坏效应表现得更为明显，给道路的耐久性带来严峻挑战。

二、气候变化对市政桥梁耐久性的系统性影响评估

(一) 大气腐蚀性增强的多维度影响机制及其演化特征

全球气候变化背景下的大气环境持续恶化对桥梁结构的长期耐久性构成了前所未有的严峻挑战。从化学腐

蚀机理来看, 大气中 CO_2 、 SO_2 及 NO_x 等酸性气体的浓度呈现持续攀升趋势, 这些污染物与降水结合后形成 pH 值显著降低的酸性降水 (pH 值普遍低于 4.5), 通过复杂的电化学反应加速了混凝土碳化进程和钢筋电化学锈蚀反应。从空间分布特征分析, 这种腐蚀效应在工业密集区和交通繁忙区域表现得尤为突出, 这些区域的酸性气体排放量通常是农村地区的 5~8 倍。特别值得注意的是, 沿海地区的桥梁结构还面临着海雾和风暴潮带来的双重环境威胁, 高浓度氯离子 (Cl^- 浓度可达 $10\text{--}15\text{ mg/m}^3$) 通过毛细作用和离子扩散快速渗透至混凝土内部, 使得桥梁下部结构的钢筋锈蚀速率较内陆地区提高 3~5 倍。从破坏形态演变来看, 这种腐蚀过程会导致混凝土保护层出现明显的顺筋裂缝 (裂缝宽度可达 0.3~0.5mm) 并最终发生层状剥落, 造成结构承载力呈指数级衰减^[3]。长期监测数据表明, 在 pH 值低于 5.6 的强酸雨环境下, 桥梁混凝土碳化深度年增长率可达 2~3mm, 这一数值比中性环境下的腐蚀速率高出 50% 以上, 且随着酸雨频率的增加 (年酸雨日数超过 150 天) 呈现明显的加速趋势。更值得警惕的是, 这种腐蚀效应往往具有隐蔽性和累积性, 在常规检测中难以被及时发现。

(二) 强风与极端温度的复合作用效应及其工程影响

气候变化引发的极端天气事件对桥梁结构产生了复杂的多物理场耦合影响。从风荷载作用机制来看, 强风 (风速超过 30m/s) 不仅显著增加了桥梁结构的振动幅度 (振幅可达设计值的 2~3 倍) 和基频变化率 (可达 15~20%), 还会通过长期的疲劳累积效应诱发连接螺栓松动、支座橡胶老化失效以及桥面铺装层疲劳开裂等一系列连锁反应。从温度效应角度分析, 极端高温 (超过 40℃) 会导致钢结构桥梁产生明显的热胀变形 (变形量可达设计值的 150%), 这种变形可能引起支座位移超出设计允许范围 (位移超限率达 30~40%), 进而影响桥梁的整体稳定性; 而极端低温 (低于 -20℃) 则会显著降低钢材的韧性指标 (冲击韧性下降 40~60%), 特别是在焊接接头等应力集中区域, 脆断风险呈几何级数上升 (断裂概率增加 3~5 倍)。工程实践中的典型案例显示, 当 24 小时内气温骤变超过 20℃ 时, 连续梁桥伸缩缝出现挤压破坏或拉裂等损伤的概率高达 70% 以上, 这种温度冲击对桥梁的耐久性构成了严重威胁^[4]。此外, 频繁的温度循环 (年温差超过 50℃) 还会加速材料疲劳 (疲劳寿命缩短 30~50%), 显著缩短桥梁的使用寿命。值得注意的是, 这种风-温耦合作用往往会产生 1+12 的放大效应, 使得结构损伤发展速度远超单一因素作用时的预测值。

(三) 紫外线辐射与干湿交替的协同劣化作用及其长期影响

气候变化导致的太阳辐射强度增加和降水模式改变, 形成了对桥梁材料的双重劣化机制和加速老化过程。从光化学降解机理来看, 长期强烈的紫外线照射 (辐射强度超过 1000 W/m^2) 会通过光氧化反应分解有机涂层的高分子链结构, 导致桥梁钢结构防腐涂层在 3~5 年内出现严重的粉化 (粉化等级达 4 级以上)、剥落现象 (剥落面积超过 30%), 使基材完全暴露在腐蚀环境中。从水理作用机制分析, 降水模式的改变使得干湿交替频率显著增加 (年干湿循环次数达 100~150 次), 这种环境会促进混凝土表面盐分 (如 NaCl 、 Na_2SO_4 等) 的反复结晶-溶解循环, 产生的结晶压力可达到数十兆帕 (20~50MPa), 足以导致表层材料发生结构性疏松 (孔隙率增加 40~60%) 并最终剥落 (剥落深度达 5~10mm)。在干旱-半干旱地区, 相关研究表明紫外线辐射强度每增加 10%, 桥梁防护涂料的使用寿命就会缩短 50% 以上, 这不仅大幅增加了维护成本 (年均维护费用增加 30~40%), 还显著提高了桥梁全寿命周期的安全风险 (事故概率增加 2~3 倍)。更严重的是, 这种表面劣化还会降低结构的整体刚度 (刚度退化率达 15~20%), 影响桥梁的动力性能和使用功能。值得注意的是, 这种紫外-干湿耦合作用会产生明显的协同效应, 其劣化速度是单一因素作用时的 2~3 倍, 且随着时间推移呈现加速发展趋势。

三、提升市政道路桥梁气候适应性的系统性对策研究

(一) 材料改良与新型技术应用创新

在道路工程建设领域: 应当优先选用具有卓越工程性能的高模量沥青混凝土、高强改性水泥混凝土等新型工程材料, 这些经过特殊改性的先进材料不仅具备更高的弹性模量和抗变形能力, 还能显著提升路面的耐久性和使用寿命。通过科学合理地掺入玄武岩短切纤维、纳米级 SiO_2 颗粒等新型功能性添加剂, 可以明显改善材料的微观结构特性, 优化其内部孔隙分布和界面结合强度, 从而大幅提升其抗裂性能与防水抗渗特性, 有效解决传统路面材料易开裂、渗水等常见问题^[5]。重点推广应用透水型路面结构体系、低温温拌沥青混合料技术等创新施工工艺, 这些先进技术不仅能有效降低温度应力集中现象, 减少温度裂缝的产生, 同时还能大幅缩短路面雨水滞留时间, 显著提高行车安全性和舒适性, 特别是在多雨地区效果更为突出。

在桥梁工程建设领域: 需要重点突破自修复型混凝

土材料、耐候性钢筋（如双相不锈钢钢筋、高性能环氧树脂涂层钢筋）等新型结构材料的研发与应用。这些材料具有优异的自修复能力和耐腐蚀性能，能够显著延长桥梁结构的使用寿命。全面推广使用纤维增强聚合物复合材料（FRP）来替代传统的钢结构构件，这种新型复合材料不仅具有重量轻、强度高的特点，还具备优异的耐腐蚀性能，特别适用于海洋环境等腐蚀性较强的地区。创新应用具有智能温度调节功能的相变材料涂层技术，通过相变吸放热原理，可以精确控制结构温度波动幅度，有效减少热胀冷缩变形，提高桥梁结构在极端温度条件下的稳定性和安全性。

（二）结构设计优化与标准体系完善

基于我国不同气候分区特征优化设计参数体系：在严寒地区应当适当增加路面防冻层设计厚度和抗冻性能指标要求，同时要考虑冻融循环对材料性能的影响，采取相应的防护措施；在多雨湿润地区需要重点强化路基排水系统的设计标准与施工质量要求，确保排水设施的畅通性和可靠性，防止水损害的发生。此外，还要针对不同地区的气候特点，制定差异化的材料选择和施工工艺标准。

在桥梁结构设计中应全面考虑极端温度荷载与腐蚀环境的影响：科学合理地提高结构安全储备系数，在易受腐蚀的关键部位适当增加混凝土保护层厚度，并采用高性能防腐材料。同时要重视桥梁结构的耐久性设计，充分考虑环境因素对材料性能的长期影响。大力推广模块化设计、装配化施工等先进建造技术，通过工厂预制、现场拼装的施工方式，不仅可以显著降低现场作业受恶劣气候条件的影响程度，还能提高施工质量和效率，缩短工期。此外，还要建立完善的质量控制体系，确保预制构件的加工精度和安装质量。

（三）智能监测与预警系统建设

构建覆盖范围广、监测精度高的多参数传感器监测网络体系：在关键结构部位布设高精度光纤应变计、分布式温湿度传感器阵列、智能腐蚀监测仪等先进传感设备，形成空间密度大、时间分辨率高的立体监测网络，实现对桥梁结构应力分布、环境温湿度变化、腐蚀速率等关键参数的实时动态监测与数据采集；

基于BIM+GIS融合技术构建高精度的三维数字化孪生模型：整合结构设计参数、施工过程数据、环境监测信息等多源数据，结合区域气候预测大数据和材料性能退化模型，建立考虑环境-结构耦合作用的耐久性分析模型，精确模拟结构在全寿命周期内的性能演化过程，为预防性养护提供科学依据；

开发具有自主学习能力的智能化预警决策支持平台：采用深度学习、随机森林等先进机器学习算法对海量监测数据进行特征提取与模式识别，建立结构状态评估指标体系，实现结构病害的早期精准识别与风险等级自动判定，同时基于专家知识库和优化算法自动生成最优养护方案建议，显著提升管理决策的科学性、前瞻性和智能化水平。

（四）精细化维护与应急管理体系构建

制定基于气候特征的分级分类养护方案体系：针对不同季节的气候特点采取差异化养护措施，在持续高温季节增加路面洒水降温作业频次并调整作业时段，雨季来临前组织专业队伍对排水系统进行全面检查与疏通，冻融循环期重点检测桥面防水层完整性和伸缩缝工作状态，确保结构适应极端气候条件；

建立“平战结合”的多级联动应急响应机制：按照灾害等级分级储备专业化应急抢修材料与特种设备，建立应急物资动态管理系统，优化完善从灾情评估、方案制定到现场处置的全流程应急抢修工作程序，通过定期演练提升应急响应能力，显著缩短灾害发生后交通功能的恢复时间；

结论

气候变化对市政道路桥梁耐久性的影响具有复杂性与长期性，需从材料、设计、监测、维护多维度协同应对。通过技术创新与管理优化，提升基础设施的气候韧性，是保障城市交通系统可持续运行的关键。未来应进一步加强气候-结构相互作用机理研究，完善相关标准规范，推动市政工程向低碳化、智能化、长寿命发展。

参考文献

- [1] 杨湧涛.伸缩缝施工技术在公路桥梁工程中的应用[J].2020.
- [2] 田杨,徐升桥,邓运清.川藏铁路常用跨度预应力混凝土简支梁的耐久性设计对策[J].铁道标准设计,2021, 65 (11): 146-150.
- [3] 杨景.城市排水深隧衬砌混凝土力学性能试验研究[D].山东建筑大学, 2021.
- [4] 李林坤,刘琦,黄天勇,等.基于水泥基材料的CO₂矿化封存利用技术综述[J].材料导报, 2022 (019): 036.
- [5] 范志勇,刘威,梁慧.高寒地区水电站水工混凝土耐久性研究[J].四川水力发电, 2020, 39 (4): 6.DOI: CNKI: SUN: SCSL.0.2020-04-004.