

# 桥梁工程绿色化建材的应用与节能减排效益分析

朱伟

南京瀚森建设有限公司

DOI:10.32629/ems.v8i3.18704

**[摘要]** 在全球应对气候变化与推动可持续发展的宏观背景下,桥梁工程作为基础设施建设的核心组成部分,其绿色转型具有紧迫的现实意义与深远的环境价值。本文系统探讨了绿色化建材在桥梁工程中的应用实践及其全生命周期的节能减排效益。本文首先界定了桥梁工程绿色化建材的内涵与范畴,阐述了其发展的紧迫性。进而,通过具体工程案例,分析其主要绿色化路径的技术特点与应用成效。并从全生命周期视角出发,综合评估绿色化举措在建设期、运营维护期及端部处理阶段的节能减排效益,揭示它的综合优势。最后从构建评价体系、完善政策环境、展望技术趋势三个维度,提出了推动桥梁工程深度绿色化的对策与建议。研究表明,绿色化建材的应用不仅是材料层面的替代,更是涵盖设计、施工、运维全过程的系统性革新,对实现桥梁工程乃至整个基础设施建设行业的低碳可持续发展具有关键性作用。

**[关键词]** 桥梁工程;绿色建材;节能减排;全生命周期评价;可持续发展

## 1. 绿色化建材的定义与桥梁工程减排的紧迫性

桥梁作为交通基础设施的重要组成部分,它的建设与运营伴随着大量的资源消耗与碳排放。在全球应对气候变化、推动可持续发展的背景下,桥梁工程的绿色转型已成为行业发展的必然方向。绿色化建材,指在全生命周期内对自然资源消耗少、对生态环境影响小、碳排放强度低,且具有高耐久性、可循环利用特性的工程材料。这类材料的应用是实现桥梁工程节能减排的核心途径之一。

当前,基础设施建设领域的碳排放在全球碳排放总量中占据显著比重。据统计,部分地区钢筋、钢材及水泥的生产过程中,估计排碳量约占整体碳排放量的10%。这凸显了在桥梁等大型工程中推广绿色建材、革新建造工艺的紧迫性。推动工程减碳,不仅需要从材料本身入手,还需贯穿于规划、设计、施工、运营维护直至拆除回收的全过程。交通运输部门作为公共工程建设的主力,正通过制定减碳指引、建立碳排放系数数据库、引入第三方认证等方式,系统性引导产业低碳转型。

桥梁工程的绿色化超越了单一的“材料替代”概念,它是一套融合了新材料、新结构、新工艺和新理念的综合性系统解决方案。其核心目标是在保障结构安全、耐久和功能的前提下,最大限度降低对不可再生资源的依赖,减少环境污染与温室气体排放,实现与周边自然和社会环境的和谐共生。从四川入选国家级可持续发展技术清单的钢管混凝土桁梁桥技术,到广西浔江大桥创新的免开挖锚碇基础,中国桥梁建设者正在工程实践中不断探索并丰富着绿色化的内涵。

## 2. 主要绿色化建材类型及其在桥梁工程中的应用实践

### 2.1 高性能复合结构材料

高性能复合结构材料通过优化材料组合,发挥协同效应,在减少材料用量的同时提升结构性能。钢管混凝土是其中的典型代表。四川交通部门研发的钢管混凝土桁梁桥技术,巧妙利用钢管对核心混凝土的约束作用,使构件抗压承载能力显著提高。其核心绿色效益体现在材料节约上,与同等承载能力的钢结构桥梁相比,可节省钢材约38%、混凝土约37%;与混凝土桥梁相比,则能节省混凝土用量高达55%。这种“1+1>2”的效果,使得桥梁在实现相同安全储备时,从材料生产源头就大幅降低了能源消耗与碳排放。该技术已成功应用于干海子大桥、汶川克枯大桥等高海拔、复杂环境下的桥梁工程,体现了其可靠性与普适性。

### 2.2 工业固废与地方性材料的资源化利用

将工业副产品或工程本地产生的“废料”转化为有用的工程材料,是实现循环经济、降低环境压力的关键路径。在贵州花江峡谷大桥的建设中,项目团队面临粉煤灰、矿渣粉等传统混凝土掺合料匮乏的难题。他们创新性地利用路基开挖产生的白云岩石粉,经过工艺处理后,替代传统掺合料用于锚碇等大体积混凝土浇筑。这项举措不仅实现了“就地取材、变废为宝”,避免了开采和运输外部材料带来的环境冲击与成本,还因为石粉极细的颗粒提高了混凝土的密实度与强度。仅此一项,预计为整个项目节约成本超过500万元,取得了环境与经济的双重效益。

低碳胶凝材料是另一重要方向。研发团队利用工程渣土研发的石灰石煅烧黏土水泥低碳胶凝材料,可替代部分传统水泥,使混凝土胶凝材料的二氧化碳减排幅度达30%至40%。除此之外,利用尾矿、煤矸石等构建全固废胶凝体系的技术,也为建材行业的循环发展提供了有力支撑。

### 2.3 低碳智能化功能性建材与系统

绿色化也体现在通过智能系统提升材料与能源的使用效率上。公路隧道“随车照明”低碳控制系统虽然主要应用于隧道,但其“按需供给”的智能化理念对桥梁附属设施节能具有重要借鉴意义。该系统通过实时感知交通流状态,自动调节照明亮度,避免无车时的能源空耗,显著降低了运营期的能耗与维护成本。

在提升结构耐久性以减少全生命周期维护需求的特种功能材料方面,疏水混凝土、微生物自修复混凝土等技术已开始应用。例如,微生物自修复混凝土可使微裂缝的自主修复率超过90%,这对延长桥梁使用寿命、减少维修次数和材料消耗至关重要。

### 2.4 绿色建造工艺与结构体系创新

绿色化不仅是材料革命,也是设计理念与施工工艺的革新。苍容涪江大桥是世界最大跨径独柱式三塔空间缆悬索桥,其设计建造充分体现了这一点。该桥在国内悬索桥中首次采用了免开挖的“桩墙组合结构锚碇基础”。与传统需要大规模开挖和回填的锚碇相比,这项创新直接减少了约3.6万立方米混凝土和4.8万立方米土石方的工程量,并缩短工期达7个月,从源头上大幅削减了资源消耗和施工碳排放。

同样,在马鞍山长江公铁大桥的建设中,项目团队首创了“零排放”循环施工工艺,建立了全封闭式混凝土搅拌系统,实现了对长江水质的全方位保护。而在西十高铁汉江特大桥的施工中,为了保护南水北调核心水源区,建设者采取了“泥不落江、水不外流、尘不飞扬”的极致环保措施,包括回收处理所有施工泥浆和养护用水,树立了在生态敏感区进行绿色施工的典范。

## 3. 全生命周期视角下的节能减排效益综合分析

评估绿色化建材的效益,必须摒弃仅关注建设阶段的传统思维,采用覆盖原材料获取、构件生产、施工建造、运营维护直至拆除回收的全生命周期评价(LCA)方法。只有通过LCA,才能全面、科学地量化绿色建材的真实环境效益。

### 3.1 建设阶段的直接减碳效益

#### 3.1.1 材料生产环节

使用石粉、矿渣等工业固废替代部分水泥或骨料,直接减少了高能耗水泥熟料的生产。研究显示,高性能混凝土外加剂的应用,可减少水泥熟料使用,间接实现可观的碳减排。使用LC3低碳胶凝材料,可实现胶凝材料碳减排30%—40%。

#### 3.1.2 材料运输环节

例如花江峡谷大桥那样就地利用开挖石粉,完全省去了外购掺合料的运输过程,消除了相关的燃油消耗与尾气排放。

### 3.1.3 施工建造环节

涪江大桥的免开挖锚碇技术,通过优化结构设计,避免了数万方混凝土的浇筑和土石方的开挖回填,其节省的能源和减少的排放是立竿见影的。马鞍山大桥的全封闭搅拌系统,则在施工过程中杜绝了扬尘和废水污染,降低了环境治理的隐含碳排放。

### 3.2 运营维护阶段的长期隐性效益

运营维护阶段跨度长达数十年甚至百年,其累积的能耗与排放不容忽视,绿色建材在此阶段的效益往往更具决定性。

#### 3.2.1 降低运营能耗

“随车照明”系统是降低桥梁隧道运营期电耗的典型案例。虽然它本身不属于建材,但这种与建筑一体化的智能节能系统,其长期减排贡献巨大。

#### 3.2.2 延长使用寿命,减少大修次数

这是高性能绿色建材最核心的长期效益之一。例如,微生物自修复混凝土能自动修复微裂缝,防止钢筋锈蚀,从而极大延缓结构劣化,避免了频繁且耗材巨大的加固维修工程。疏水混凝土能有效抑制水分和侵蚀性介质侵入,提升桥梁在恶劣环境下的耐久性。使用寿命的每一次延长,都意味着避免了重建或大修所带来的新一轮巨量资源消耗和碳排放。

#### 3.2.3 便捷维护与可更换性

四川的锚墩式主动防护网边坡加固技术,其防护单元网可通过解开缝合绳快速分离更换。这种设计便于对受损部分进行针对性维护,而不必进行大规模翻修,节省了维护的材料和能源。

### 3.3 端部处理阶段的循环经济潜力

桥梁达到设计寿命终点后,其材料的可回收性至关重要。绿色化设计应提前考虑材料的解构性与循环利用潜力。例如,钢结构桥梁相较于混凝土桥梁,其钢材的回收再利用率高得多了。未来,对混凝土骨料的再生利用技术若取得突破,将能进一步闭合桥梁材料的循环链条,减少对原生资源的开采和废弃物的填埋。

### 3.4 综合效益量化与评估工具的发展

为了精准核算和比较上述综合效益,需要科学的工具。四川省开发的“蜀新绿碳排放核算平台”,正是针对基础设施全生命周期碳排放核算的痛点而设计。它通过建立详细的碳足迹因子库,能够对建设期和运营期的碳排放进行相对精确的核算,帮助项目管理者摸清碳底数,识别减排重点环节,从而为决策提供数据支持。学术界也在积极探索融合层次分析法和概率成分估算模型等方法的低碳桥梁评价体系,以推动可持续工程实践。

#### 4. 推动绿色化发展的评价体系、政策环境与未来趋势

##### 4.1 构建全生命周期低碳评价体系

建立权威、统一的桥梁工程全生命周期碳足迹核算标准与评价体系是当务之急。这一体系应涵盖碳排放、能源消耗、资源效率、环境影响和经济成本等多维度指标。其作用在于提供决策依据,在规划设计阶段,就可以对不同方案进行全生命周期的碳成本比对,引导选择真正的低碳优化方案;规范市场秩序,为绿色建材、绿色技术和绿色工程提供权威的认证和标签,防止“绿色洗白”,促进公平竞争;引导技术创新,借助明确的评价指标指引研发方向,推动产业界针对减排重点环节进行技术攻关。

##### 4.2 完善政策激励与标准规范

###### 4.2.1 制定强制性与激励性政策

交通运输部门正在推动所属机构研订工程减碳指引,设定碳排基线,并要求未来项目通过类似 PAS2080 的第三方碳管理认证。这从项目源头建立了减碳约束。同时,应在政府采购、项目招投标中明确设置低碳评分权重,对达到超低排放或碳中和水平的示范项目给予资金补贴或政策优惠。

###### 4.2.2 更新设计与施工标准规范

现行桥梁设计规范多以安全、经济、适用为核心,需尽快将全生命周期碳排放作为一项重要的控制指标纳入规范体系。同时,要为新型绿色建材的工程应用制定或修订产品标准和应用技术规范,扫清市场准入障碍。

##### 4.3 技术融合发展未来趋势

###### 4.3.1 绿色与智能融合

如同马鞍山大桥实践所示,绿色建造与智能建造将深度协同。BIM 技术可用于进行精确的材料用量计算和施工模拟,减少浪费;物联网和大数据技术赋能的结构健康监测,能实现预测性维护,优化养护策略,延长使用寿命。人工智能可用于优化混凝土配合比,在满足性能前提下最大限度地利用固废材料。

###### 4.3.2 高度工业化与装配化

钢管混凝土桁架桥技术实现了 80% 的工厂作业量,现场作业仅占 20%。这种高度装配化的模式,不仅能提高质量、缩短工期,还能大幅减少现场湿作业、降低施工扰民与环境污染,是绿色施工的重要形式。

###### 4.3.3 材料与结构体系协同创新

未来将进一步发展适应绿色材料特性的新型结构体系。例如,研发更适合采用再生骨料混凝土或低碳水泥的桥型与构件形式。同时,超高性能混凝土、纤维增强复合材料等更高性能、更长寿命的材料,将为桥梁工程的轻量化、长寿化

打开新的空间。

#### 5. 结论

桥梁工程绿色化建材的应用与推广,是一场从材料科学、结构工程到施工工艺、运维管理乃至设计理念的深刻变革。从高性能复合材料的节材增效,到工业固废的资源化利用,再到智能化系统的精准赋能,实践已证明,绿色化路径能带来显著且多维的节能减排效益。这些效益不仅体现在建设初期材料与能耗的直接节约上,更蕴含在结构全生命周期内耐久性的提升、维护需求的降低和运营效率的优化之中。

然而,要充分释放绿色化的巨大潜力,仍需跨越评价体系不完善、标准规范滞后、初期成本较高等现实障碍。这需要政府、学界、业界的共同努力,通过构建科学的全生命周期碳评价体系来指引方向,通过制定有力的政策与标准来创造市场,通过持续不断的技术创新来提供解决方案。

推动桥梁工程的绿色转型,不仅是为了应对气候变化的全球挑战,更是为了建设更耐久、更经济、与自然环境更和谐共生的基础设施。它代表了工程建设领域从资源消耗型向资源循环型、从追求短期经济成本向关注长期综合价值的根本性转变。随着“绿智融合”的不断深入,未来的桥梁将不仅是跨越天堑的交通纽带,更是彰显可持续发展理念的工程丰碑。

#### [参考文献]

- [1]陈峰,吴刚,周健.2023.白云岩石粉在花江峡谷大桥大体积混凝土中的应用研究[J].桥梁建设,53(1):1-8.
- [2]何军,张亚梅,李宗津.2021.石灰石煅烧黏土水泥的研究进展与工程应用展望[J].硅酸盐学报,49(9):1815-1825.
- [3]李志强.2021.绿色桥梁工程的内涵与发展路径探讨[J].公路交通科技,38(4):89-94.
- [4]刘建勋.2023.苍容浔江大桥超大跨径悬索桥创新设计与绿色建造[J].中国公路学报,36(6):1-12.
- [5]孙利民.2022.智能建造技术在桥梁工程中的应用与发展趋势[J].土木工程学报,55(3):1-12.
- [6]王磊,聂建国,樊健生.2020.钢管混凝土桁架桥梁技术发展与应用[J].工程力学,37(S1):1-10.
- [7]王元清,石永久,周晖.2019.钢结构桥梁的可持续性与全生命周期评价[J].建筑结构学报,40(2):1-11.
- [8]吴泽南.2020.疏水与自修复混凝土在提升桥梁耐久性中的应用研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学.
- [9]张华,刘肖群,王景全.2022.中国基础设施建设的碳排放特征与减排策略[J].中国环境科学,42(5):2450-2460.