

土木工程新材料应用与环境可持续发展关系研究

杨鑫

海江建设集团有限公司 宁夏回族自治区 银川 750000

摘要: 本文旨在系统探讨土木工程新材料的应用现状、技术特性及其与环境可持续发展的内在关联。文章首先阐述了环境可持续发展对土木工程提出的时代要求,继而分类梳理了高性能混凝土、再生骨料材料、纤维增强复合材料(FRP)、自修复材料、相变储能材料及光催化材料等代表性新材料的技术原理与工程实践。在此基础上,深入剖析了新材料在全生命周期视角下对节能减排、资源循环、生态修复及韧性提升等方面的积极贡献,并客观指出了当前面临的成本、标准、耐久性及回收难题。最后,文章提出了构建以全生命周期评价(LCA)为核心、多学科交叉融合、政策法规协同驱动的未来发展方向,以期为推动土木工程行业迈向高质量、绿色、低碳的未来提供理论参考与实践指引。

关键词: 土木工程; 新材料; 环境可持续发展; 全生命周期评价; 绿色建筑

引言

21世纪人类文明处于关键十字路口,工业化带来繁荣也引发全球生态危机,IPCC报告警示全球温升超1.5°C将有灾难性后果,“可持续发展”成全球行动纲领。土木工程作为构筑人类生存空间的基石产业,活动贯穿全周期,消耗大、能耗高、排放多,是实现可持续发展目标(SDGs)的关键领域。传统土木工程材料高能耗、高排放、不可再生,凸显不可持续性,如水泥生产、河砂开采、钢铁冶炼等都有诸多弊端,寻求新一代工程材料成学科发展核心命题。新材料科学与技术进步带来曙光,创新材料兼具力学性能与环境友好性,但走向大规模应用面临多重障碍。本文围绕“土木工程新材料应用与环境可持续发展关系”展开系统性研究,分析新材料特性、环境影响及推广挑战与对策,为构建未来土木工程体系提供方向。

1 环境可持续发展对土木工程的时代要求

1.1 资源效率最大化

地球上的自然资源并非取之不尽。土木工程必须大幅减少对原生矿产资源(如石灰石、铁矿石、天然砂石)的依赖。这要求一方面提高材料的利用效率,用更少的材料实现更强的结构性能;另一方面,大力开发和利用工业固废(如粉煤灰、矿渣、钢渣)、建筑垃圾以及城市矿产等二次资源,将其转化为有价值的工程材料,实现“变废为宝”。

1.2 能源消耗与碳排放最小化

土木工程项目的每一个环节都伴随着巨大的能源消耗。可持续发展要求全产业链的深度脱碳。这包括采用低能耗、低碳排的生产工艺(如新型低碳水泥),推广装配式、智能化的施工技术以减少现场能耗,以及在建筑

运营阶段利用新材料提升能效(如保温隔热材料、相变储能材料),从而显著降低全生命周期的碳足迹。

1.3 生态环境影响最小化

工程建设不应以牺牲生态环境为代价。新材料的应用应有助于减少施工过程中的粉尘、噪音和水污染,保护生物多样性。更重要的是,未来的基础设施应具备一定的“生态服务”功能,例如,透水铺装可以补充地下水、缓解城市内涝;光催化材料可以分解空气中的污染物,改善城市微环境;绿色屋顶和垂直绿化则能调节小气候、增加城市绿量。

1.4 结构韧性与耐久性提升

可持续性不仅关乎环境,也关乎经济和社会。频繁的维修、加固乃至重建本身就是巨大的资源浪费^[1]。因此,提升结构的耐久性和抵御自然灾害(如地震、洪水、极端天气)的韧性,延长其服役寿命,是实现长期可持续发展的内在要求。新材料,特别是具有自感知、自修复能力的智能材料,为此提供了全新的解决方案。

2 土木工程新材料的主要类型与应用

面对上述时代要求,一系列具有前瞻性的新材料应运而生,并在工程实践中展现出广阔前景。

2.1 高性能与功能化混凝土

混凝土是全球使用最广泛的建筑材料。其可持续化改造是重中之重。(1)绿色胶凝材料:通过大量掺加粉煤灰、粒化高炉矿渣、硅灰等工业副产品,部分或完全替代高碳排的硅酸盐水泥熟料。例如,地聚物混凝土(Geopolymer Concrete)利用碱激发铝硅酸盐原料(如偏高岭土、粉煤灰)形成胶凝体,其生产能耗和CO₂排放可比传统水泥降低60%-80%。(2)超高性能混凝土(UHPC):通过优化颗粒级配、掺入钢/合成纤维,UHPC

的抗压强度可达150MPa以上,且具有极佳的韧性和耐久性。其高强特性允许构件截面尺寸大幅减小,从而节省材料用量,减轻结构自重,特别适用于大跨桥梁、高层建筑节点等关键部位。(3)自修复混凝土:模仿生物体的愈合机制,通过内置微生物(微生物诱导碳酸钙沉淀)、微胶囊(包裹修复剂)或形状记忆合金等方式,使混凝土在出现微裂缝时能自动修复,有效阻止水分和侵蚀性介质侵入,极大延长结构寿命,减少后期维护成本。

2.2 再生骨料与循环利用材料

建筑垃圾是城市固体废弃物的主要组成部分。将其资源化利用是循环经济的典范。(1)再生骨料混凝土(RAC):将废弃混凝土破碎、筛分、清洗后得到的再生粗、细骨料,重新用于生产新的混凝土。尽管其物理力学性能略低于天然骨料混凝土,但通过合理的配合比设计和强化处理(如碳化、聚合物浸渍),已能满足非承重结构、路基、人行道等大量应用场景的要求,有效缓解了天然砂石资源短缺和填埋占地问题^[2]。(2)废旧轮胎橡胶改性沥青/混凝土:将废旧轮胎加工成橡胶粉或颗粒,掺入沥青混合料中可显著改善路面的抗裂性、降噪性和行车舒适性;掺入混凝土中则能提高其韧性、抗冲击性和保温隔热性能,同时解决了“黑色污染”难题。

2.3 纤维增强复合材料(FRP)

FRP以其高强、轻质、耐腐蚀、非磁性等优异特性,成为传统钢筋和钢结构的理想替代品或补充。(1)GFRP/CFRP筋:玻璃纤维(GFRP)和碳纤维(CFRP)增强聚合物筋材,用于替代钢筋配制混凝土结构。其突出优势在于完全避免了钢筋锈蚀问题,特别适用于海洋工程、化工厂、除冰盐环境等严酷腐蚀条件下的结构,可免除昂贵的防腐措施和后期维修,全生命周期成本优势明显。(2)FRP加固技术:将FRP板材或布粘贴于既有混凝土梁、板、柱表面,可快速、高效地提升其承载力和抗震性能,是既有建筑绿色改造和加固的主流技术之一。

2.4 相变储能材料(PCM)与智能调温材料

这类材料通过在特定温度下发生相变(如固-液转变)来吸收或释放大潜热,从而调节室内温度波动。将微胶囊化的PCM掺入石膏板、混凝土或砂浆中,制成建筑围护结构。在白天吸收多余热量,夜晚释放热量,可有效平抑室温,减少空调和采暖系统的启停频率与能耗,提升建筑能效,为实现“近零能耗建筑”提供关键技术支撑。

2.5 光催化与环境净化材料

以二氧化钛(TiO_2)为代表的光催化剂,在紫外光照射下能产生活性氧,分解空气中的氮氧化物(NO_x)、

挥发性有机物(VOCs)等污染物。将纳米 TiO_2 掺入外墙涂料、混凝土或铺路砖中,可使建筑物本身成为一个巨大的“空气净化器”。意大利米兰的“光之塔”(Bosco Verticale)等项目已成功应用此技术,为改善城市空气质量、应对雾霾提供了创新思路。

3 新材料对环境可持续发展的贡献路径分析

新材料的价值不仅在于其卓越的物理化学性能,更在于其在整个生命周期中对环境产生的积极影响。这种影响可以从以下几个层面进行量化和分析:

3.1 全生命周期节能减排

全生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是衡量材料环境影响的金标准。研究表明:UHPC虽然单位体积的隐含能耗较高,但由于其高强特性可使结构构件体积减少30%-50%,综合计算,其单位承载力的碳排放远低于普通混凝土。FRP筋虽然生产能耗高于钢筋,但其超长的服役寿命(预计可达100年以上)和免维护特性,使得其在整个生命周期内的总能耗和碳排放显著低于需要周期性防腐维护的钢筋混凝土结构。

3.2 促进资源循环与废物利用

新材料是连接“城市矿山”与新建工程的桥梁。再生骨料混凝土的大规模应用,直接将建筑垃圾转化为宝贵的建材资源,减少了对天然矿产的开采压力,同时也避免了垃圾填埋造成的土地占用和土壤、水体污染^[3]。据估算,每利用1吨建筑垃圾生产再生骨料,可节约1.5吨天然砂石,减少0.85吨 CO_2 排放。这不仅是资源的循环,更是价值的再生。

3.3 提升基础设施的生态服务功能

超越单纯的结构支撑功能,新材料赋予了基础设施主动改善环境的能力。透水混凝土铺装能让雨水自然下渗,补充地下水资源,缓解城市“热岛效应”和内涝风险。光催化材料则将被动的建筑表皮转化为主动的环境治理单元,持续净化周边空气。这些功能使得未来的城市基础设施网络本身就能构成一个良性的、自我调节的生态系统。

3.4 增强结构韧性与延长服役寿命

“长寿”是最深刻的可持续。自修复混凝土通过自动愈合微裂缝,从根本上延缓了结构劣化进程。FRP材料的卓越耐腐蚀性,则彻底消除了钢筋锈胀开裂这一混凝土结构最主要的病害根源。这些新材料的应用,使得基础设施的设计使用年限有望从50年、100年向200年甚至更长迈进。服役寿命的倍增,意味着在同等服务时间内,所需的重建次数和资源投入将成倍减少,其长期的环境效益是巨大的。

4 当前面临的挑战与制约因素

尽管前景光明,但新材料的推广应用仍面临诸多现实挑战:(1)初始成本较高。许多新材料(如UHPC、CFRP、微胶囊PCM)的生产成本远高于传统材料。高昂的初始投资成为阻碍其大规模应用的首要障碍,尤其是在对成本高度敏感的民用建筑市场。(2)标准规范滞后。工程建设是一个高度依赖规范和标准的行业。新材料的性能、设计方法、施工工艺往往缺乏统一、权威的国家或行业标准。工程师在设计时缺乏可靠的依据,业主和监管方也存在安全顾虑,形成了“不敢用、不会用”的局面。(3)长期性能与耐久性数据不足。大多数新材料问世时间较短,缺乏长达数十年的现场暴露数据来充分验证其在复杂环境下的长期性能演变规律。这种不确定性增加了工程风险,限制了其在重要、永久性结构中的应用。(4)回收与再利用难题。并非所有新材料都是“绿色”的终点。例如,FRP材料由热固性树脂和纤维组成,目前尚无经济有效的回收技术,废弃后可能成为新的环境负担^[4]。如何设计“为回收而生”的新材料,建立闭环的回收体系,是未来必须解决的问题。

5 未来展望与协同发展策略

为了加速新材料赋能土木工程的绿色转型,需要采取系统性的策略:

5.1 强化全生命周期评价(LCA)导向

政策制定者、业主和设计师应摒弃仅关注初始造价的短视思维,全面采用LCA方法评估材料的综合环境效益。政府可通过绿色采购政策、碳交易机制等,对具有显著LCA优势的新材料给予激励,使其市场竞争力得以体现。

5.2 加快标准体系建设与工程示范

主管部门应组织产学研力量,加快编制和完善新材料的设计、施工、验收规范。同时,设立国家级或区域级的重大工程示范项目,通过实际工程检验新材料的性能,积累宝贵数据,消除市场疑虑,形成可复制、可推广的经验。

5.3 推动多学科交叉融合创新

未来的新材料研发将更加依赖材料科学、化学、生

物学、信息科学与土木工程的深度融合。例如,结合物联网(IoT)技术,开发具有自感知、自诊断、自适应能力的智能结构材料;借鉴仿生学原理,创造出性能更优越、环境更友好的新一代复合材料。

5.4 构建完善的回收产业链

针对FRP等难回收材料,应提前布局,投入研发化学解聚、热解等回收技术,并探索建立生产者责任延伸制度(EPR),明确材料生产者在产品废弃后的回收责任,从源头推动材料的可循环设计。

6 结语

土木工程新材料与环境可持续发展之间存在着深刻而紧密的共生关系。新材料不仅是提升工程性能的技术工具,更是实现资源节约、环境友好、安全韧性等可持续发展目标的战略支点。从绿色胶凝材料到再生骨料,从FRP到自修复混凝土,这些创新成果正在逐步改变土木工程高耗、高排的传统形象。然而,从实验室的突破到市场的广泛接纳,依然有很长的路要走。这需要我们以全生命周期的宏观视野审视其价值,以系统工程的思维破解成本、标准、回收等瓶颈,并通过政策引导、标准先行、示范引领和跨界创新,共同构建一个以新材料为引擎的绿色土木工程新生态。唯有如此,我们才能真正筑就一个既能承载人类文明、又能与自然和谐共生的可持续未来。

参考文献

- [1]黄文波.土木工程中的新材料与技术创新[C]//广西网络安全和信息化联合会.第一届工程技术管理与数字化转型学术交流会议论文集.漳州华侨城置业有限公司,2024:94-96.
- [2]殷祺泰.浅谈土木工程中新材料的应用[J].河南建材,2020,(02):71.
- [3]周卫洪.土木工程中绿色建筑材料的的应用与可持续发展研究[C]//广西网络安全和信息化联合会.第十二届工程技术管理与数字化转型学术交流会议论文集.浙江省地矿建设有限公司,2025:253-255.
- [4]马振宇.可持续性材料在土木工程中的应用与评价[J].石河子科技,2025,(04):69-71.