

绿色建筑理念下可持续土木工程材料的发展与应用

周维孝

海江建设集团有限公司 宁夏回族自治区 银川 750000

摘要: 本文旨在系统探讨绿色建筑理念对土木工程材料提出的新要求,并深入剖析可持续土木工程材料的发展脉络、关键技术、典型应用及未来趋势。文章首先阐述了绿色建筑的核心内涵及其对材料选择的指导原则;其次,重点论述了高性能混凝土、再生骨料混凝土、低碳水泥、工程竹木、相变储能材料以及自修复智能材料等前沿可持续材料的技术原理、环境效益与工程实践;再次,分析了当前可持续材料在推广过程中面临的技术、经济与标准体系障碍;最后,对未来材料科学与信息技术、生物技术深度融合下的发展方向进行了展望。研究表明,发展和应用可持续土木工程材料不仅是技术革新,更是推动建筑业向资源节约、环境友好和高质量发展模式转型的战略举措。

关键词: 绿色建筑; 可持续材料; 土木工程; 低碳水泥; 再生骨料; 智能材料

引言

建筑业作为全球最大的原材料消耗者和温室气体排放源之一(据联合国环境规划署数据,其运营与建造过程合计贡献了近40%的全球能源相关二氧化碳排放),其发展模式的转型已刻不容缓。在此背景下,“绿色建筑”(Green Building)应运而生,并迅速从一种边缘理念演变为全球性的行业共识与政策导向。绿色建筑强调在建筑的全生命周期内,最大限度地节约资源(节能、节地、节水、节材)、保护环境、减少污染,为人们提供健康、适用和高效的使用空间,与自然和谐共生。传统的建筑材料,如普通硅酸盐水泥、天然砂石骨料、钢材等,在生产、运输、使用乃至废弃阶段均伴随着巨大的能耗与环境负荷。例如,水泥生产过程中的石灰石煅烧是工业领域最主要的二氧化碳排放源之一。因此,要实现绿色建筑的目标,必须从源头——材料的选择与创新入手。可持续土木工程材料,即指在其全生命周期内,能够显著降低对自然资源的消耗、减少环境污染、具备良好的耐久性与可循环性,并能提升建筑性能与居住舒适度的新型或改良型建筑材料。

1 绿色建筑理念对土木工程材料的核心要求

1.1 资源效率最大化

这要求材料在生产和使用过程中,尽可能减少对不可再生自然资源(如石灰石、铁矿石、天然河砂)的依赖。具体路径包括:一是提高材料的利用效率,例如通过优化配合比设计,用更少的材料实现同等甚至更高的结构性能(如高性能混凝土);二是大力推广使用可再生资源(如速生林木材、竹材);三是优先选用含有高比例工业固体废弃物(如粉煤灰、矿渣、钢渣、脱硫石膏)或城市建筑垃圾再生骨料的材料,实现“变废为宝”,构

建循环经济模式。

1.2 能源消耗与碳排放最小化

材料的“隐含能”(Embodied Energy)和“隐含碳”(Embodied Carbon)是衡量其环境影响的关键指标。绿色建筑要求材料从原材料开采、加工制造、运输到最终处置的全链条中,能耗和碳排放水平显著低于传统材料^[1]。这催生了对低碳/零碳水泥、低能耗生产工艺(如免烧砖、地质聚合物)以及本地化材料(减少长途运输)的迫切需求。

1.3 环境健康与安全

建筑材料不应在生产和使用过程中释放有害物质,如甲醛、苯系物、挥发性有机化合物(VOCs)、放射性元素等,以免危害施工人员和使用者的健康,并避免对周边土壤、水源和大气造成二次污染。此外,材料的生产过程本身也应符合清洁生产标准,减少废水、废气、废渣的排放。

1.4 耐久性与长寿命

“长寿命即是最根本的可持续”。一种材料如果耐久性差,需要频繁维修或更换,其全生命周期的资源消耗和环境影响将远超一种初始成本较高但寿命极长的材料。因此,绿色建筑强调材料的高耐久性,能够抵抗风化、腐蚀、冻融等自然侵蚀,从而延长建筑的使用寿命,减少未来的拆除和重建需求。

1.5 可循环性与可降解性

理想状态下,建筑材料在其服役期结束后,应能被高效回收再利用,或者在自然环境中安全降解,不产生持久性污染。这要求在材料设计之初就考虑其“终点”(End-of-Life)问题,采用易于分离、拆解和再加工的构造方式。

2 可持续土木工程材料的主要类型与发展现状

2.1 高性能与多功能混凝土

现代混凝土技术已不再仅仅追求强度，而是向着高性能、多功能和环境友好的综合方向发展。高性能混凝土（HPC）和超高性能混凝土（UHPC）通过精细的颗粒级配设计、大量掺入粉煤灰或矿粉等矿物掺合料以及使用高效减水剂，在显著降低水泥用量的同时，实现了强度、密实度和耐久性的飞跃。这使得工程师能够设计出截面更薄、自重更轻的结构构件，在节省材料、降低基础负荷的同时，极大地延长了结构的服役寿命。再生骨料混凝土（RAC）则为解决日益严峻的建筑垃圾问题提供了有效出路，它将废弃混凝土经过破碎、筛分和强化处理后，部分或全部替代天然砂石骨料。尽管再生骨料存在吸水率高、界面性能弱等固有缺陷，但随着预处理技术和配合比优化方法的成熟，其在非承重墙体、道路基层乃至部分承重结构中的应用已日趋广泛。此外，自密实混凝土（SCC）的出现革新了施工方式，它依靠自身重力即可流动并密实填充复杂模板，不仅保证了浇筑质量，还省去了振捣工序，降低了施工噪音与能耗，体现了绿色施工的先进理念。

2.2 低碳胶凝材料体系

目前，最成熟且广泛应用的策略是大量使用辅助性胶凝材料（SCMs），如燃煤电厂的粉煤灰、钢铁厂的粒化高炉矿渣以及硅铁合金生产的硅灰。这些工业副产品不仅能替代高达30%至70%的水泥熟料，大幅削减碳排放，还能通过火山灰效应改善混凝土的微观结构，提升其后期强度和抗侵蚀能力。在此基础上，更具颠覆性的新型低碳水泥正在崛起。硫铝酸盐水泥和铁铝酸盐水泥因其更低的烧成温度和独特的矿物组成，展现出优异的早期强度和耐久性，适用于特殊工程环境。而地质聚合物则代表了胶凝材料的一次范式革命，它完全摒弃了传统的高温煅烧工艺，转而利用富含硅铝的原料（如偏高岭土或粉煤灰）在碱性激发剂作用下发生聚合反应形成坚固的三维网络，其生产过程几乎不产生二氧化碳，且具备出色的耐高温和耐化学腐蚀性能^[2]。更为前沿的是碳捕获与利用（CCU）技术，一些创新水泥能够在养护阶段主动吸收大气中的二氧化碳，并将其矿化为稳定的碳酸盐矿物，从而实现负碳排放，为建材行业迈向碳中和开辟了全新路径。

2.3 可再生生物质建材

利用可快速再生的植物资源作为建筑材料，不仅能减少对不可再生矿产资源的开采，更能将大气中的二氧化碳以生物碳的形式长期封存在建筑体内，是实现负

碳建筑的理想途径。工程竹材和工程木材正是这一理念的杰出代表。竹子以其惊人的生长速度（3-5年即可成材）和卓越的力学性能（比强度超过许多钢材）而备受瞩目，通过现代层压和重组技术，可以制成满足现代建筑结构要求的梁、柱和板材，在中国、东南亚和南美洲已有诸多成功案例。交叉层积木材（CLT）则是木材工程化的巅峰之作，它将多层规格木材以正交方式胶合压制，形成尺寸稳定、强度高、防火性能好的大规格板材，使得建造十几层甚至更高的木结构建筑成为现实。这类“会呼吸的房子”不仅施工速度快、现场污染少，其木材本身就是一个巨大的碳汇。除此之外，农作物秸秆、软木等农业和林业副产品也被开发成墙体、保温或装饰板材，实现了废弃物的高值化利用，丰富了生物质建材的品类。

2.4 功能性与智能材料

可持续材料的内涵已超越了基本的承载功能，开始向主动调节环境、提升建筑能效和舒适度的智能化方向演进。相变材料（PCMs）便是其中的典范，它能在特定的相变温度点吸收或释放大量潜热，如同一个内置的“蓄电池”。当被微胶囊化并掺入石膏板、砂浆或混凝土中时，PCMs能够有效平抑室内的温度波动，在夏季吸收多余热量，在冬季缓慢释放储存的热量，从而显著降低建筑的空调和采暖能耗，是被动式建筑设计的关键技术。光催化材料，尤其是二氧化钛（TiO₂）涂层，则赋予了建筑外墙“自清洁”和“空气净化”的能力。在阳光照射下，涂层表面能分解空气中的氮氧化物等有害污染物，并使雨水更容易带走灰尘，保持墙面洁净，对改善城市微环境具有积极作用^[3]。而自修复材料则将仿生学理念引入土木工程，通过在混凝土基体中预埋含有修复剂的微胶囊或休眠的微生物孢子，当结构出现微裂缝时，这些“智能单元”会被激活，生成新的矿物填充裂缝，从而自动恢复材料的部分性能，极大延长了基础设施的使用寿命，减少了全生命周期的维护成本和资源消耗。

3 可持续材料的应用实践与挑战

3.1 典型工程应用案例

可持续土木工程材料的理念已在世界各地的标志性项目中得到生动诠释。上海中心大厦作为中国超高层建筑的代表，在其建设过程中大量采用了高强高性能混凝土，并掺入了高比例的粉煤灰等工业废料，有效降低了水泥用量和整体碳足迹。在欧洲，阿姆斯特丹的“超级树”公园不仅以其独特的垂直绿化闻名，其内部结构也大量使用了回收钢材和再生混凝土，完美践行了循环经济原则。北欧国家则在木结构建筑领域引领全球风尚，挪威的Mjøstårnet大厦高达18层，其主体结构完全由交叉

层积木材 (CLT) 和胶合木构成, 不仅建造过程高效环保, 更将大量的生物碳长久地储存在城市之中。在中国推进海绵城市建设的浪潮中, 透水混凝土作为一种典型的可持续铺装材料, 被广泛应用于人行道、广场和小区道路, 有效促进了雨水下渗, 缓解了城市内涝问题, 并补充了地下水资源, 展现了材料在解决城市生态问题中的巨大潜力。

3.2 推广应用面临的挑战

尽管前景广阔, 但可持续材料的规模化应用仍面临多重障碍: (1) 技术与性能认知壁垒: 部分新材料 (如 RAC、地质聚合物) 的长期性能数据尚不完善, 设计规范滞后, 导致工程师和业主存在“不敢用”的心理。(2) 初期成本劣势: 许多可持续材料 (如 CLT、UHPC) 的初始采购成本高于传统材料, 虽然其全生命周期成本可能更低, 但在当前以初始投资为导向的市场环境下, 缺乏竞争力。(3) 产业链与标准体系不健全: 从原材料供应、生产加工、质量控制到施工安装, 完整的产业链尚未完全建立。同时, 针对各类新材料的国家或行业标准、检测方法和认证体系亟待完善。(4) 政策激励不足: 虽然各国都在倡导绿色建筑, 但针对使用特定可持续材料的直接财政补贴、税收减免或容积率奖励等精准激励政策仍显不足。

4 未来发展趋势与展望

面向未来, 可持续土木工程材料的发展将呈现以下趋势: (1) 多学科交叉融合: 材料科学将与纳米技术、生物技术、信息技术深度融合。例如, 利用纳米技术改性材料界面, 提升性能; 利用合成生物学设计能感知、响应甚至“生长”的活体建筑材料; 利用物联网 (IoT) 和大数据, 对材料在服役期间的健康状况进行实时监测与预测。(2) 全生命周期思维深化: 从“摇篮到坟墓” (Cradle-to-Grave) 向“摇篮到摇篮” (Cradle-to-Cradle) 的设计理念转变。未来的建筑材料将被设计成营养物, 要么安

全回归自然 (生物降解), 要么成为下一代产品的优质原料 (技术养分)^[4]。(3) 数字化与智能化驱动: 基于 BIM (建筑信息模型) 的材料数据库将帮助设计师在方案阶段就精确评估不同材料选择的环境影响。人工智能 (AI) 将加速新材料的发现、配方优化和性能预测过程。(4) 政策与市场双轮驱动: 随着“双碳” (碳达峰、碳中和) 目标的刚性约束, 政府将出台更严格的建材碳足迹法规和更有力的绿色采购政策。同时, 消费者环保意识的觉醒也将倒逼市场提供更多绿色、健康的建材产品。

5 结语

绿色建筑理念的普及, 从根本上重塑了土木工程材料的价值坐标。可持续不再是一个可选项, 而是材料创新与应用的必然方向。从高性能混凝土到工程竹木, 从低碳水泥到智能自修复材料, 一场深刻的材料革命正在悄然发生。这场革命不仅关乎技术的进步, 更关乎我们对人与自然关系的重新思考。要加速这一进程, 需要产学研用各方的协同努力: 科研机构需持续攻关核心技术, 突破性能与成本瓶颈; 政府部门需完善标准体系, 提供强有力的政策引导; 设计与施工单位需勇于尝试, 积累宝贵的工程经验; 而整个社会则需建立起对可持续材料的价值认同。

参考文献

- [1]王汉东,徐义满.绿色环保建筑材料在土木工程中的应用分析[J].建材发展导向,2025,23(20):136-138.
- [2]周卫洪.土木工程中绿色建筑材料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.第十二届工程技术与数字化转型学术交流论文集.浙江省地矿建设有限公司,;2025:253-255.
- [3]黄小锋.绿色建筑材料在土木工程中的运用[J].大众标准化,2025,(12):80-82.
- [4]翟波波.绿色建筑材料在土木工程中的应用[J].陶瓷,2025,(06):197-199.