

常见装配式绿色建材的环保性能对比分析

吴静

河套学院，内蒙古自治区巴彦淖尔市，015000；

摘要：研究聚焦于装配式绿色建材的环境友好性，并综合运用了文献比较、实际案例验证以及生命周期评估(LCA)等多种方法进行分析，对装配式混凝土、轻质墙体和钢结构三类典型材料在节能、减排、循环利用等方面的性能进行定量和定性对比分析。发现不同系统在能耗和碳排结构方面表现出显著差异：钢结构有最大的材料回收率和构件再利用的潜力，轻质墙体运输和施工阶段耗能最小，但优化配比后预制混凝土热惰性和结构稳定性性能优异。研究表明构件标准化、材料复合化和信息化管理是促进绿色建材全生命周期环保效益提高的关键手段。研究提出未来装配式绿色建筑应从数字化碳核算体系和可追溯构件管理机制的构建入手，形成由投产至退役闭环式建造模式。

关键词：装配式建筑；绿色建材；节能减排；循环利用

DOI：10.64216/3080-1494.25.09.066

引言

装配式绿色建材是建筑业转型升级发展的重要依托，其环保性能的好坏直接影响着建筑领域碳化、碳中和等目标能否得以实现。目前建筑能耗在社会总能耗中占有较大的比重，材料浪费和施工污染等问题仍然比较突出。引入工业化生产和装配式施工体系可以从源头降低能源和资源的消耗，明显提高建造效率和环境绩效。研究选取了典型的装配式绿色建材作为研究对象，全面分析了其在节能、减排和循环利用方面的特性，目的是为建筑行业在实现可持续建设方面提供实用的技术途径和数据支持。

1 装配式绿色建材的概述

1.1 装配式建筑的发展背景与绿色理念

装配式建筑是建筑业工业化、绿色化的大环境下出现的一种新的建造方式。传统的现浇施工耗能大、污染严重、效率低下，很难适应“双碳”目标和现代化城市建设的需要。装配式建筑以工厂化预制和现场装配的方式实现了施工过程的清洁化和资源利用的高效化，明显降低了建筑垃圾和碳排放^[1]。同时将绿色理念渗透于设计、制造、运输、安装和运维等整个过程中，强调建筑全生命周期节能减排和环境友好。它的核心是通过工业化生产来提高建筑品质，通过信息化管理来减少能耗和浪费，达到人与自然和谐相处的可持续发展，促进建筑业从粗放型到集约化和低碳化发展。

1.2 常见装配式绿色建材的类型与特征

装配式绿色建材作为一种低碳、节能和可循环的材料被应用于装配式建筑体系，其主要有预制混凝土构件、轻质墙体材料以及装配式钢结构几种。预制混凝土构件具有较高强度和耐久性，并且可以掺加再生骨料或者工业固废来减少碳排放；ALC板、石膏基板等轻质墙体材料，具有重量轻、保温隔声性能优越、施工方便等优点；装配式钢结构的特点是高强度、高可回收性和短施工周期。这类材料一般采用工厂化生产和干式施工，有利于促进施工精度的提高，降低能耗和废弃物的排放量，充分体现绿色建筑节能，环保及循环利用的特点。

2 主要装配式绿色建材的环保性能分析

2.1 装配式混凝土构件的节能与可再利用性能

增强装配式混凝土构件环保性能，关键是对原材料体系和构件全生命周期进行优化设计。当与高掺量的矿物掺合料，例如30%的粉煤灰和20%的矿渣微粉结合使用时，可以在确保其力学特性的同时，将每立方米的碳排放减少大约25%。通过将再生骨料的替代率维持在30%至50%的范围内，并配合碱活化剂的改良，能够明显提升再生骨料界面的附着力。在构件的生产过程中，应当采用BIM+ERP的联合系统，以确保模具的复用率能够超过80%，从而减少一次性木模的使用。在运输过程中可以利用构件的标准化和装车的优化技术，使运输的能源消耗减少大约15%。

2.2 轻质墙体材料的环保特性与应用效果

轻质墙体材料绿色化的核心是原料利用、生产能效

和施工方式三者之间的系统协同^[2]。通过使用工业副产品如石膏、粉煤灰或脱硫灰作为主要原料,并采用低温蒸压或气化发泡的方法,单位产品的能源消耗可以比传统的黏土砖减少超过 40%。在 ALC 板的制造过程中,采用余热回收和循环水冷技术,可以节约近 60%的水资源,并确保生产线上的废浆料再掺比维持在 5%—10%的范围内。施工环节要引入干法装配和可拆式连接工艺并结合标准化龙骨体系使装配误差小于±2mm。为了减少运输和吊装的能量消耗,板材模数可以标准化到 600mm×2400mm 的规格以便于机械化组装。

2.3 装配式钢结构材料的循环利用与减排优势

装配式钢结构减排潜力主要取决于材料闭环管理和连接体系可逆化设计,优先选择废钢占比超过 70%的电弧炉炼钢产品,这样可以将单位吨碳排放从 2.1 吨 CO₂e 减少到 1.2 吨以下。构件设计阶段要引入参数化模块化体系以保证截面和孔距的通用化和构件在不同工程之间的交叉重用。节点连接建议采用高强摩擦型螺栓连接或者插接式节点连接,通过螺纹锁定结构进行防松以实现全生命周期的拆装和再安装。为了保护构件的表面,可以选择使用无铬的锌铝镁涂层,这可以替代传统的热镀锌方法,从而减少大约 60%的重金属排放。在整个施工过程中,采用了数字化的装配监测系统,并通过优化吊装路径和最小化吊次的策略,成功地减少了机械燃料的消耗,降低了 15%。以杭州亚运会的部分临时建筑为研究对象,采用了可拆卸的钢桁架和螺栓节点系统。赛事结束后,构件的回收率高达 96%,其中 80%被直接用于后续的公共建筑项目,从而形成了一个近乎封闭的绿色建筑模式。

3 装配式绿色建材环保性能的比较研究

3.1 能耗、碳排放与资源利用效率对比

装配式建筑体系下不同材料体系能耗和碳排放的区别,主要由原料来源和生产工艺路径决定^[3]。预制混凝土构件可以通过调整配合比和提高热能利用效率来实现能耗的减少,例如可以采用“回收低熟料水泥加蒸汽的余热”的双控制模式,该生产线的整体能源消耗降低了大约 18%,同时采用了再生骨料的替代方案,达到了 40%,从而显著减少了对原生砂石资源的使用。对于钢结构应该加强废钢的回收机制,优先考虑使用电弧炉进行短流程炼钢,并通过区域再制造基地的支撑构件进行闭环流通,可以确保每吨钢材的碳排放控制在 1.3 吨 CO₂e 以下。通过采用全自动发泡和冷凝成型技术,轻质

墙体体系成功地将干燥过程中的能量消耗限制在 40kWh/m³ 以下。如果按照单位建筑面积来计算,钢结构体系的碳强度比传统的现浇混凝土低大约 30%,而轻质墙体在材料利用率和运输能效方面表现得更好。

3.2 施工阶段环保效益比较

施工阶段环境绩效主要由施工方式、机械配置和资源调度策略决定。装配式混凝土项目可以采用“构件采用分区吊装加智能排布”的方式来减少塔吊待机的能耗大约 20%,并且可以配合现场灌浆自动配料系统,实现砂浆的精准投放和零余料。轻质墙体工程适宜采用模块化堆放与机械化转运工艺,将运输周转次数降低 30%,同时引入预拼装工位制度,使安装精度和施工速率同步提升。在钢结构的现场装配中,可以选择干式施工结合预制螺栓的连接方式,并利用数字化吊装路径的优化技巧,从而使单一建筑的装配周期减少 40%,同时将噪音的峰值控制在 75 分贝之内。以成都天府新区组装示范工程为例,通过钢框架加 ALC 板体系将场地垃圾强度由传统建设的 35kg·m² 降低到 10kg·m² 以下。实践证明通过实施标准化的构件堆场管理、现场信息化排程和再生材料的即时回收,能够将施工阶段的环境负荷控制在最低水平,从而实现“高装配率,低扰动化等”的绿色建设理念。

3.3 生命周期环境影响综合分析

全生命周期视角下装配式绿色建材环境绩效,既取决于生产端的碳足迹又取决于运行期能效和拆解后资源回收闭环机制。以钢结构系统为研究对象,通过构建一个“设计—制造—组装—循环”的数字追踪平台,确保了构件的编码和物料的流通都是透明的,这有助于延长单一构件的使用寿命超过 20 年。在混凝土构件的设计过程中,应预先设置拆卸节点,并使用可逆连接方式,同时结合再制造技术,以提高构件的二次利用率至 45%。通过模块化的更新和表面可拆卸的面板技术,轻质墙体材料可以实现空间的灵活改造,从而减少翻新废弃量大约 60%。运营阶段,利用 BIM 运维模型和能耗监测系统可以对能效衰减情况进行实时跟踪,并对节能改造方案进行预先规划。依据清华大学建筑节能中心在 2023 年的实际测量数据,使用装配式钢-混凝土组合体系的办公建筑,在其 50 年的使用寿命内,其综合碳排放量可以比传统体系减少大约 32%。这说明生命周期优化要从结构设计延展到运维和退役阶段,并形成可量化和可追溯低碳管理闭环。

4 装配式绿色建材的应用建议

4.1 装配式绿色建材在建筑工程中的应用价值

装配式绿色建材最核心的价值是在工程全流程高效协同,可持续性转化^[4]。以北京冬奥会张家口赛区的综合服务中心为研究对象,该项目使用了装配式钢结构和预制混凝土楼板的混合系统,其中构件在工厂的预制率高达 85%,与传统的建筑方式相比,现场组装的时间减少了三分之一,同时碳的总排放量也下降了大约 28%。本工程采用构件标准化、节点模块化、高精度安装等技术,显示了装配式绿色建材对复杂地形和寒冷气候的适应力。在工程完工之后部分临时建设的设施已经完成了全面的拆装和转运,再利用率达到了超过 90%,从而有效地延长了构件的使用寿命。这一案例说明装配式绿色建材在改变传统施工时间逻辑的同时,也重构了建筑生命周期中资源循环方式,实现了建筑由“消耗型”财产向“可再生型”承载方式的转变,以期对今后城市低碳更新工作提供现实路径和技术模板。

4.2 优化选材与施工以提升环保效益

提高装配式建筑的环保效益,关键是材料体系优化和施工工艺细化协同。对于混凝土构件,建议使用“低碳胶凝加高活性掺合料”的混合比例,并确保熟料的使用量不超过每立方米 250 公斤,与聚羧酸减水剂、再生骨料等复合可以显著减少水泥用量而又能维持其强度。在钢结构项目中可以设立一个“区域闭环加工中心等”,通过采用标准化的截面设计和数字化的下料技术,能够显著减少钢材边角废料的数量减少 10%以上。对于轻质墙体体系应该加强模数的协调和复合保温的设计,通过机械化的干法施工和模块化的吊装方法,可以将装配误差控制在 ± 2 毫米的范围内。在施工过程中建议采用“能耗动态监测加废料瞬间回收”的综合系统,以便对吊装机械的能耗和材料损失进行实时的数据反馈,从而实现碳排放的优化。上海临港智能制造产业园的组装项目通过全流程的 BIM 监控和构件的智能配送,成功实现了 20%的能耗减少和 55%的现场固废减量,这充分证明了智能化施工在绿色建设中的核心价值。

4.3 加强标准化与质量控制促进绿色建材应用

绿色建材体系要普及,必须依靠标准化和质量控制等制度支撑。以雄安新区公民服务中心为例,该工程从设计阶段就制定统一的模数体系和构件编码标准,预制

构件全部采用数字建模和二维码溯源,实现“设计—制造—运输—安装—接受”全链条质量闭环^[5]。在施工现场安装了装配精度的实时监控系統,确保构件的安装误差控制在 3 毫米之内,这大大提高了装配的准确性和节点的密封性。为了确保绿色特性的可验证性,该项目使用了第三方 EPD 环境产品声明认证,所有使用的材料都符合 GB/T 35601《绿色建材评价标准》。这一严格标准化管理在保证项目质量稳定的同时,也为后续构件再利用和碳排核算等工作提供可量化依据。从行业观察看,未来的装配式建筑质量体系应当兼顾“构件通用化,工艺数字化和性能可追溯化”,唯有将标准化设计与质量监测机制深度融合,才能够真正使绿色建材的长效化应用和工程实践的价值兑现成为可能。

5 结论

研究显示装配式绿色建材的能源利用效率、碳排控制及再生资源回收等优势显著。不同材料体系的性能侧重各有特色,但是都可以通过标准化设计、信息化管理和模块化施工达到最大的环境绩效。钢结构适于构件循环和拆装再用的特点,轻质墙体适于在节能改造和快速组装方面推广应用,混凝土体系则具有结构耐久和保温性能的综合竞争力。今后绿色建筑发展要加强设计一体化和碳核算机制建设,构建可追溯和可量化全生命周期管理系统,使建筑行业向高效度转变。

参考文献

- [1] 张双艺. 环保净味沥青材料路用性能和施工减排效果对比分析[J]. 城市道桥与防洪, 2025, (06): 84-86+99.
- [2] 侯翠翠, 魏石梅. 绿色环保建筑材料的力学性能与耐久性分析[J]. 居舍, 2025, (10): 50-52.
- [3] 何红桃. 绿色环保建材性能评估指标体系构建与分析[J]. 新城建科技, 2025, 34(02): 58-60.
- [4] 张健, 王川, 李召峰, 等. 赤泥基绿色高性能注浆材料工程特性试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2022, 41(S2): 3339-3352.
- [5] 高云霞, 邱添, 邢凌龙. 环保型绝缘漆与聚酯亚胺绝缘漆的对比研究[J]. 电机技术, 2020, (05): 55-58+64.

项目名称: 基于预制装配式绿色住宅建筑节能指标的研究与应用, 编号: HYZY202010。