

双碳目标下大跨度公共建筑绿色建造技术研究

王 健

中国五冶集团有限公司, 上海 201900

[摘要]在双碳战略目标的推动下,大跨度公共建筑由于具有空间大、单位面积碳排放强度高等特点,成为了建筑行业碳减排的主要领域。文中以海口湖科科创岛企业研发中心(东区)项目为工程依据,对框架结构体系下大跨度公共建筑全生命周期碳排放特点及减排问题进行了分析,并提出了绿色施工过程碳减排关键技术以及大跨度建筑运维阶段降碳与智慧能源技术。研究表明大跨度公共建筑的绿色建造通过施工阶段的装备电动化替代、垃圾资源化利用,在运维阶段依靠光伏建筑一体化和数字孪生平台的动态优化控制来达到全生命周期碳排放控制的目标。

[关键词]双碳目标;大跨度公共建筑;绿色建造;智慧运维

DOI: 10.33142/ect.v4i6.19944

中图分类号: TU984

文献标识码: A

Research on Green Construction Technology for Large-span Public Buildings under the Dual Carbon Target

WANG Jian

China MCC5 Group Corp. Ltd., Shanghai, 201900, China

Abstract: Driven by the dual carbon strategy goals, large-span public buildings have become the main area of carbon reduction in the construction industry due to their characteristics of large space and high carbon emission intensity per unit area. Based on the Haikou Lake Science and Technology Innovation Island Enterprise R&D Center (East District) project, this article analyzes the carbon emission characteristics and reduction issues of large-span public buildings throughout their entire life cycle under the framework structure system, and proposes key carbon reduction technologies for green construction processes, as well as carbon reduction and smart energy technologies for large-span building operation and maintenance stages. Research has shown that the green construction of large-span public buildings requires the electrification of equipment during the construction phase, the utilization of waste resources, and the dynamic optimization control of photovoltaic building integration and digital twin platforms during the operation and maintenance phase to achieve the goal of full lifecycle carbon emission control.

Keywords: dual carbon target; large span public buildings; green construction; smart operation and maintenance

引言

2022 年我国住房和城乡建设部、国家发展改革委联合印发了《城乡建设领域碳达峰实施方案》,提出城乡建设领域碳达峰的时间表和路线图。建筑行业是碳排放大户,全过程碳排放占全国碳排放总量的 50%,建筑运行阶段占到 20%,公共建筑运行碳排放占建筑运行碳排放的 40%^[1]。大跨度公共建筑由于功能空间尺度大、人员密度高、用能系统复杂等特点,单位面积碳排放强度比一般公共建筑要高得多,是需要突破的低碳建造技术难点领域。

1 大跨度公共建筑碳排放特征与双碳挑战

大跨度公共建筑的碳排放涉及全生命周期,运行阶段占总碳排放的 70%~90%,建材生产占总碳排放的 10%~

30%,施工和拆除阶段各占 1%。但施工阶段的碳排放强度高,减排需求同样紧迫。框架结构建筑中混凝土、钢筋生产碳排放占建材阶段主要部分,大跨度空间梁柱截面增大又加大了材料消耗。该项目 A 座 13,239.01m³ B 座 7,106.82m³ C 座 4,810.76m³ 混凝土和钢材用量大,材料端碳排放不容忽视。大空间造成空调、照明、通风等系统的能耗规模也很大。因此,减碳要从施工和运维两个方面一起推进,施工阶段用装配式工艺、数字化管控、清洁能源装备来实现低碳建造,运维阶段用智慧能源管理来实现运行碳排放的持续优化。

2 基于低碳策略的设计优化技术

2.1 大跨结构体系轻量化与低碳材料应用

框架结构大跨度建筑结构轻量化主要是通过改善结构布置、使用高效材料来达到的。空心楼盖技术是解决大跨度结构高自重的途径之一。大跨度厂房项目使用芯模-空心楼盖技术之后,比传统的工艺节省了 35%的混凝土、22%的钢材,减少了建筑自重 31%,楼盖刚度提高了 40%,减排二氧化碳 5800t。企业研发中心(东区)项目单体跨度为 8.1m,属于中等大跨度,楼盖系统轻量化设计有明显的减碳潜力^[2]。超高性能混凝土预制构件的发展给大跨度框架结构的低碳建造提供了一种新的选择,经过优化的预制板可以实现楼板轻量化和大尺寸建造的协同突破。

2.2 建筑形态与围护结构气候适应性设计

围护结构性能提高是减少运行碳排放的直接方法。按照建筑节能与可再生能源利用通用规范的要求,新建建筑的碳排放强度要达到 2016 年节能设计标准平均值的 40% 以下。企业研发中心(东区)位于沿海地区,其围护结构的设计要同时考虑隔热、保温和抗风性能。用高性能保温材料、高效外窗系统可以使得建筑运行能耗降低 30% 以上。对于 16.05m 高的厂房类建筑来说,外墙保温系统连续、气密性十分重要,不能因为大跨度造成热桥集中。

3 绿色施工过程碳减排关键技术

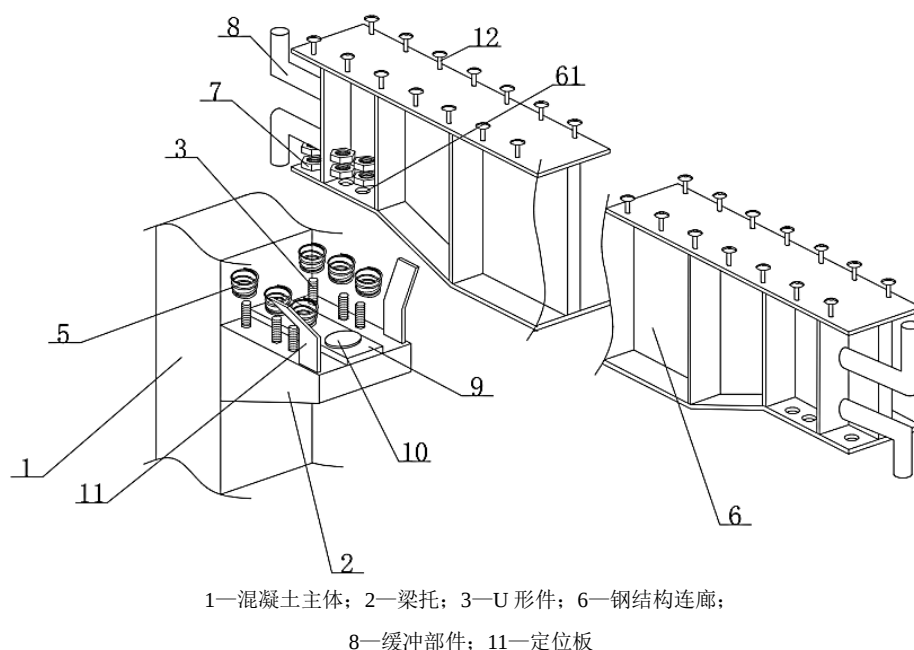
3.1 大跨装配式结构数字化预拼装与安装

大跨度公共建筑结构构件尺寸大、重量重、安装精度要求高,传统现场浇筑或者散装方式存在材料浪费大、误差累积多、工期不可控等缺点。装配式建造技术同 BIM

技术融合起来,给破解这一难题赋予了可行途径。

装配式建造方式使楼梯、楼板、墙板等构件在工厂预制,现场只做拼接安装,大大降低资源消耗和碳排放。装配式建筑比传统的现浇方式可以减少建筑垃圾 80%、节约木材 60%、缩短工期 50%、节约水耗 40%、节约材料耗 40%。更重要的是,装配式建造方式依靠工厂化生产的标准化控制,可以避免施工现场由于天气、人力等各方面因素造成的质量波动,从根本上减少返工和材料浪费。

数字化预拼装技术属于装配式大跨度框架结构施工主要的技术手段。以大跨度钢构件安装为例,用数字化预拼装可以将现场安装精度误差控制在 2mm 以内,减少由于误差造成的切割、补焊等返工作业,从而大大降低施工阶段材料损耗。在实际的大跨度钢结构连廊支座安装中,为了克服吊装过程中因风力和外力导致的小幅度摆动,实现快速精准就位,设计了一种集成缓冲与定位功能的连接装置。如图 1 所示,该装置通过在混凝土主体(1)外侧设置梁托(2),并在梁托内侧固定设置定位板(11),当钢结构连廊(6)被吊机逐渐下放时,其可沿着定位板(11)的内侧壁向下滑落,以此对钢结构连廊(6)进行高效的左右定位。同时,配合钢结构连廊(6)前后两端固定连接的缓冲部件(8),可以迅速结束其小幅度摆动,实现前后方向的快速定位。这种将结构定位与缓冲辅助相结合的数字化预拼装构造,使得连廊端部的螺栓孔(61)能够精准地贯穿 U 形件(3),极大地方便了工人进行后续的紧固作业。



1—混凝土主体; 2—梁托; 3—U 形件; 6—钢结构连廊;
8—缓冲部件; 11—定位板

图 1 支座连接装置整体组装置示意图

3.2 施工装备电动化与清洁能源替代

传统的施工现场大量使用柴油驱动的机械设备,柴油燃烧时产生的碳排放和污染物排放量大,污染严重。零排放施工机械用电能、氢能等清洁能源做动力,从源头上实现了减污降碳,是建筑行业低碳转型的突破口。

大跨度公共建筑施工时,土方工程、混凝土浇筑、构件吊装等环节都存在着大量的机械作业。福建某个试点工程使用了增程式电动强夯机、电动装载机、运输车等清洁设备之后,能够实现 40%的二氧化碳减排率。以福建某试点工程为例,采用增程式电动强夯机、电动装载机、电动商砼车等清洁设备后,实现二氧化碳减排率约 40%。其中,纯电动装载机较传统燃油装载机单日能源成本降低约 76%,年节省费用达 20 万元以上。

企业研发中心(东区)项目包括三个单体的主体施工和大跨度楼盖系统安装,所用到的施工机械种类繁多。在该工程中全面推行电动化施工装备代替,结合施工现场临时用电的清洁化供应,可以使得施工直接碳排放大幅度降低。施工装备电动化的核心不是用电本身,而是电力的清洁化水平,施工现场如果接入市政电网,那么其间接碳排放就取决于当地电网的电源结构。因此施工阶段清洁能源替代要从电动化装备和绿电供给两方面同时推进。

3.3 施工过程碳排放实时监测与智能管控

施工过程碳排放精准计量是进行有效管控的前提。BIM、IoT、AI 三者融合起来的数字化碳管理平台正在建筑行业逐渐被使用。利用施工全过程的碳足迹图谱来识别和管理施工碳排放节点。采用物联网技术对施工机械的运行状况、能耗和用料等实行实时监测并加以动态评价,从而可以快速找出碳排放的异常之处并加以预警调节。

企业研发中心项目施工管理中,用 BIM 模型作为信息载体,把各个施工工序的碳排放系数集成到三维模型里,可以实现混凝土浇筑、钢筋绑扎、构件吊装等重要工序碳排放的实时核算和可视化展示。施工决策者根据此可以对施工方案进行动态调整,改善机械的配备及作业时间,削减空驶以及等待所造成的能源损耗。经过实践可知,在施工阶段使用数字化碳管控平台可以使施工阶段碳排放减少 10%~15%。

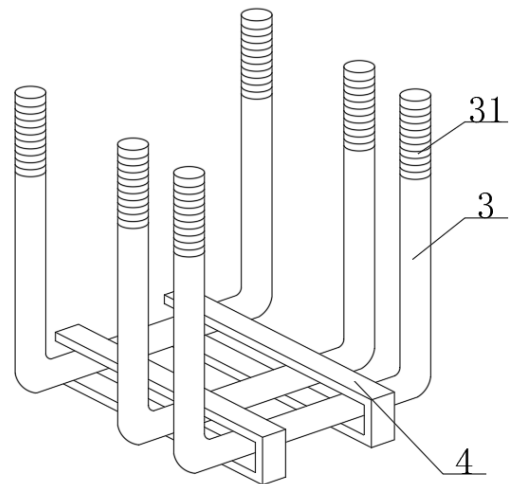
3.4 建筑垃圾源头减量与资源化利用

建筑垃圾治理同减污、降碳有着直接的联系。据住房和城乡建设部测算,我国城市建筑垃圾年产生量超过 20 亿 t,占城市固体废物总量的 40%。大跨度框架结构建筑施工时,混凝土余料、废钢筋、模板废料、砌块碎屑等是

主要的垃圾来源。

建筑垃圾源头减量要遵循减量化、资源化、再利用三原则。在深化设计阶段改善构件拆分方案,削减异形、非标构件的数量,改善材料的利用情况。其次,在施工过程中实行分类收集,将废混凝土、废砖瓦等可再生物料就地破碎加工成再生骨料,用作回填或临时道路垫层^[3]。项目用移动式建筑垃圾处理设备累计处理废弃混凝土 3500t,生产再生砖 35 万块,碳减排 300t。

在构件连接件的深化设计与加工阶段,通过优化零部件的成型工艺,也能从源头减少材料损耗。如图 2 所示,本连接装置中的核心传力构件 U 形件(3),其底部外侧并非采用复杂的切削或铸造一体成型,而是通过左右对称设置的卡件(4)进行焊接连接。这种分体焊接成型的方式不仅保证了构件的整体刚度和精准定位,还大大提高了材料的利用率。卡件(4)的对称设计使得板材下料时能够进行合理的排样,减少了异形切割产生的钢废料,从构件生产层面实现了固废源头减量。同时,U 形件(3)顶部外侧预先开设的螺纹(31),为实现无焊接化的机械连接提供了基础,避免了现场安装时因动火作业产生的废气排放和安全隐患。



3—U 形件; 4—卡件; 31—螺纹;

图 2 U 形件与卡件的固定结构示意图

企业研发中心项目基坑开挖及地下室施工阶段土方量大。B、C 座设置一层地下室,地下建筑面积达 7,867.87m²。基坑开挖产生的工程弃土若直接外运,会产生大量的运输碳排放和填埋占地。优化场地标高设计可以达到土方场内平衡的目的,减少土方外运量 40%~60%。同时将废弃混凝土、碎砖经破碎筛分后用于地下室外墙回填、场区道路垫层,可使建筑垃圾 100%资源化利用,施

工碳排放强度进一步降低。从表 1 可知，大跨度框架结构施工阶段各种主要碳减排技术的实施途径、预期效果都已经形成了一个完整的清单。

4 建筑运维阶段降碳与智慧能源技术

4.1 屋面光伏光热一体化集成技术

大跨度公共建筑屋面光照充足、应用范围广，是光伏建筑一体化最有可能实现的场所。把光伏组件和建筑屋面一体化集成起来，可以从能源消耗者变成能源的生产者，大幅度减少建筑运行期间对化石能源的依赖。建筑光伏一体化技术在全国 10.5 亿 m² 建筑表面有年发电潜力达 5.73 万亿 kWh 的太阳能资源，对公共建筑“自发自用+余电上网”的运营模式特别适合。

4.2 大空间自然通风与混合式环境调控

大跨度公共建筑层高高、冬季和夏季冷负荷都大，全年空调耗电比例最高。复合通风系统适用于净高大于 5m、

体积大于 1 万 m³ 的大空间建筑，采用自然通风与机械通风相结合的方式，可以节约风机和制冷能耗 10%~50%。经过现场实测可知，自然通风、混合通风系统可以分别使该中型办公建筑的冷却负荷减少 11.4kWh、7.4kWh。

复合通风系统的关键之处在于运行控制策略的改善，即优先使用自然通风，当室外环境不能达到热舒适标准的时候，依靠楼宇自控系统自动转换或者加入机械通风。对 16.05m 高大空间要考虑到温度分层问题，用机械辅助方式加强底部区域的空气流动，防止冷热分层造成空调能耗浪费。企业研发中心三座单体总建筑面积大于 3.3 万 m²，在过渡季节全盘实行复合通风策略，相比纯粹的空调模式可削减制冷能耗约 25%~30%，室内空气品质明显改善。图 3 为大跨度建筑混合通风运行模式，是室外环境监测和控制策略决定的，自动调节自然通风和机械通风。

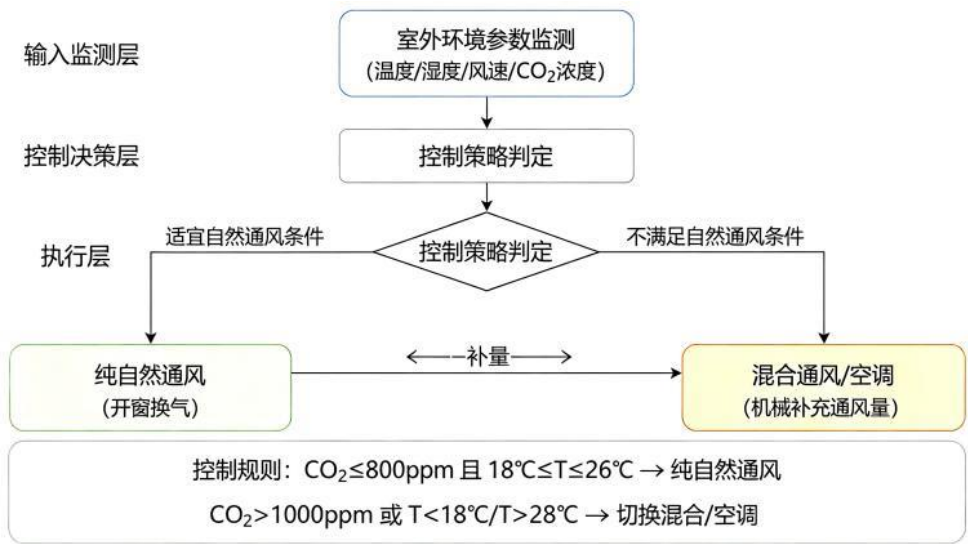


图 3 企业研发中心大跨度建筑混合通风运行模式示意

表 1 大跨度框架结构施工阶段主要碳减排技术及实施路径

技术环节	主要碳减排路径	实施要点	预期减排效果
数字化预拼装	BIM 虚拟预拼装，激光扫描精度校准	构件标准化率≥85%，配合缓冲部件与定位板快速纠偏，误差≤2 mm	减少返工损耗 20%~30%
装配式构件应用	预制叠合楼板、预制楼梯工厂化生产	关键节点采用 U 形卡件组合，装配率≥30%，工厂预制率≥90%	减少垃圾 80%、节约材耗 40%
施工装备电动化	纯电动装载机、电动自卸车、电动塔吊	新能源装备替代率≥60%	施工碳排放降低 40%
垃圾资源化利用	土方场内平衡，废混凝土破碎再生	优化连接件排样，减少异形切割废料，废弃资源利用率≥90%	碳减排 300 吨以上

4.3 建筑能碳数字孪生平台与优化调度

数字孪生技术把建筑物理空间和虚拟数字模型及时联系起来,通过物联网设备 24h 不间断地收集能耗数据,实现碳排放的可计量、可改进、可交易。其主要价值就是把“沉默碳排”变成可以被动态可视化的决策依据,从而达到对能耗异常的及时预警和处置的目的。

能碳数字孪生平台一般会包含以下功能,基于 IoT 分钟级数据采集的用能实时监测、BIM 融合的逐区域碳排放精细化核算、机器学习驱动的能耗预测和异常识别、基于历史数据优化设备运行策略的智能调度^[4]。利用建筑能耗数据的 AI 大模型分析和动态仿真,可以不断优化能源策略,使能耗年度总费用下降 15.6%。平台实时获取温度、湿度、CO₂ 浓度等参数,再通过设备联动控制来实现空调、照明、新风系统自调节。

对于大跨度钢结构连廊等人流密集的通行区域,运维阶段的结构健康监测同样可以接入数字孪生平台。如上图 1 所示,连廊与支座之间创新性地设置了多重减振构造。在梁托(2)的上表面铺设缓冲垫片(9),其内侧集成了阻尼器(10)。当大量人员踩踏通行引发震动时,钢结构连廊(6)底端面会挤压 U 形件(3)外侧的弹簧(5)提供一阶柔性缓冲。若振动幅度加剧,缓冲垫片(9)内嵌的阻尼器(10)将介入耗能,提供强大的二阶减震能力。这种“弹簧初阶减振+阻尼器高阶耗能”的协同工作模式,有效避免了人员走动过程中引发结构共振的风险。通过实时采集阻尼器(10)的位移与耗能数据,并将其反馈至数字孪生平台,运维人员可以对连廊支座节点的长期性能衰减进行动态评估与预警,从而以极低的运维碳排放代价,保障大跨度附属结构的全生命周期安全。

企业研发中心项目投入运营之后,依靠该平台可以创建起动态改良的能碳管理方式。根据人员密度的变化来调节各个区域的空调、照明、新风系统运行参数,保证室内热舒适度和空气质量的同时达到节能降碳的目的。平台在运行期间不断累积能源数据和建筑使用数据,给以后类似工程的碳排放核算以及设计改进赋予可靠的根基支撑。

4.4 全生命周期碳排放核算与后评估体系

绿色建造技术的最终效果要依靠全生命周期碳排放精确计算来检验。以企业研发中心项目为依托,应该建立从建材生产、施工安装、运营维护到最终拆除的全生命周期碳排放核算体系,包括所有的碳排放源,对各个阶段的

减排措施进行量化评价。核算结果可以成为评价绿色建造技术效果的主要依据,给同类大跨度公共建筑低碳设计、绿色施工、智慧运维提供数据积累和经验反馈。

在具体操作时要依照全生命周期评价(LCA)的思想,对钢材,水泥,玻璃这些主要建筑材料的生产运输过程中的碳排放展开统计分析,还要对施工机械所消耗的燃料,临时设施的用电情况,施工过程中资源的耗费实施动态监测。建筑运行阶段的重点为空调系统、照明系统、电梯设备等其他机电设施的能耗,还要从可再生能源利用角度分析建筑运行碳排放特点。建筑拆除及材料回收阶段还要考虑废弃物运输、处理、再利用所造成的碳排放和碳减排效益。创建数字化碳排放数据库以及全过程监测平台,对碳排放数据展开实时采集、动态分析并不断优化,准确找到高碳排放环节,制订出相应的减排举措,给建筑行业的绿色低碳转型以及“双碳”目标达成赋予科学支撑。

5 结束语

大跨度公共建筑绿色建造要以全生命期管控为主线,以数据驱动为手段。企业研发中心(东区)的施工阶段、运维阶段均能通过集成快速定位与减振功能的装配式节点构造、数字化预拼装、装备电动化、垃圾资源化利用来达到减碳的目的。未来要继续完善碳排放核算标准,推进低碳建材和清洁装备的规模化使用,使能碳平台互通互联,给大跨度公共建筑绿色转型筑牢根基。

[参考文献]

- [1]吴彦,周勤欣,罗德成,等.“双碳”背景下大型公共建筑碳排放控制指标研究——以广阳岛功能建筑为例[J].建筑节能(中英文),2024,52(5):31-37.
 - [2]山如黛,唐欢,赖婉玉,等.严寒地区城镇居住建筑降本低碳改造的人工智能驱动多目标优化[J].济南大学学报(自然科学版),2026,40(3):417-425.
 - [3]黄科杰,卢仁子,姜马棋,等.川西北地区夯土和改性夯土建筑冬季热湿性能对比分析[J].建筑节能(中英文),2026,54(5):100-105.
 - [4]李伟,杨茜,姚文龙,等.基于数字孪生的既有公共建筑节能管理研究[J].建筑节能(中英文),2026,54(5):69-74.
- 作者简介:王健(1991—),男,安徽安庆人,工程师,重庆工商大学环艺设计专业毕业,现就职于中国五冶集团有限公司,从事工程施工管理工作。