

上海超低能耗建筑技术实践与 LCA 碳排放分析

汤民^{1,2} 李峥嵘²

(1. 中国建筑技术集团有限公司 / 同济大学, 上海 200092; 2. 同济大学, 上海 200092)

[摘要] 本文介绍了上海超低能耗项目案例技术实践情况, 并根据全生命周期 LCA 碳排放计算模型分析了项目的碳排放。得出项目隐含碳和运行碳是全生命周期碳排放中占比最大的两个部分, 超低能耗建筑建设时增加的隐含碳将会在 1-2 年内因运行碳的降低而实现中和, 预估了超低能耗建筑碳减排对上海市建筑行业降碳的作用。

[关键词] 超低能耗建筑; 碳排放; 隐含碳; 运行碳

Technical Practice and LCA Carbon Emission Analysis of Ultra-low Energy Buildings in Shanghai

Tang Min^{1,2}, Li Zhengrong²

(1. China Building Technique Group Co., Ltd., Shanghai, 200092; 2. Tongji University, Shanghai, 200092)

Abstract: This paper introduces the technical practice of ultra-low energy project in Shanghai, and analyzes the project carbon emission according to the LCA carbon emission calculation model. It is pointed out that the project embodied carbon and operation carbon account for the largest proportion of carbon emissions in the life cycle assessment. The increased embodied carbon during the construction of ultra-low energy buildings will be neutralized due to the reduction of operation carbon within 1-2 years, which could estimate the role of carbon emission reduction of ultra-low energy buildings in reducing carbon emissions in Shanghai construction industry.

Keywords: ultra-low energy building, carbon emission, embodied carbon, operation carbon

降低温室气体排放已经成为全球可持续发展的重点任务。2020 年习近平总书记在联合国大会上提出, 我国二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和。建筑碳排放是全国碳排放的重点, 据统计^[1], 2019 年中国建筑全过程能耗总量为 22.33 亿 tce, 碳排放总量为 49.97 亿 tCO₂, 占全国碳排放的 51%。

住房和城乡建设部提出^[2], 到 2025 年, 城镇新建建筑全面建成绿色建筑, 建设超低能耗、近零能耗建筑示范项目 0.5 亿平方米以上。上海市自发布《关于推进本市超低能耗建筑发展的实施意见》(沪建建材联〔2020〕541 号) 以来, 大力扶持鼓励超低能耗建筑的规划建设, 并在项目设计、施工、竣工验收阶段加强超低能耗建筑全过程监管。

建筑全生命周期 (Life Cycle Assessment, 简称 LCA) 碳排放是建材生产及运输、施工、运行和拆除阶段产生的温室气体排放总和^[3,4], 本文以上海超低能耗建筑案例为研究对象, 分析全生命周期碳排放的强度和影响, 评估超低能耗建筑对上海节能减碳的贡献。

1 超低能耗技术实践

本文超低能耗建筑案例位于上海市宝山区罗南镇, 主要功能为办公, 地上六层, 地下一层, 项目总建筑面积 7200m², 主立面朝西, 见图 1。

设计方案参照《上海市超低能耗建筑技术导则(试行)》《近零能耗建筑技术标准》(GB/T51350-2019), 并荣获中国建筑节能协会超低能耗建筑认证。项目采用高性能聚氨酯外墙保温、三玻氨气 LOW-E 聚

DOI: 10.16116/j.cnki.jskj.2022.15.015

表 1 项目超低能耗建筑技术体系

超低能耗办公建筑关键技术措施列表					
150mm 聚氨酯喷涂外保温	三玻氩气聚氨酯外窗	电动卷帘外遮阳	全热回收新风空调	高效机电设备	能耗监管系统
150mm 聚氨酯喷涂外墙保温 + 岩棉防火隔离带	6+12 Ar +6+12 Ar +6 三玻双腔聚氨酯窗	织物卷帘活动外遮阳	70% 高效全热回收	LED 智能照明	能耗监测
200mm 聚氨酯喷涂屋顶保温	双银 LOW-E 涂层	电机控制	新风空调一体机	节能电梯	用量分析
热桥节点处理	氩气腔体	SC=0.3	低耗运行策略	变频水泵	室内环境品质
隔气膜和透汽膜	气密性 8 级	固定遮阳	恒温恒湿恒净	节能变压器	新风联动



图 1 超低能耗建筑案例效果图



图 2 南向外墙热桥部位红外检测效果



图 3 防水隔气膜现场施工图

氨酯外窗、电动卷帘外遮阳、全热回收新风空调一体机等超低能耗技术，如表 1 所示。

1.1 高性能围护结构

本项目外墙保温采用 150mm 喷涂聚氨酯，防火隔离带采用岩棉，外墙传热系数 K 值为 $0.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。屋面保温采用 200mm 喷涂聚氨酯，传热系数 K 值为 $0.13 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。架空层底板采用 100mm 聚氨酯板，与土壤接触外墙和地面均采用 50mm 聚氨酯板。

聚氨酯保温材料，导热系数在 $0.017 \sim 0.022 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 区间，优于岩棉和 XPS 等材料。围护结构热工性能大幅优于《上海市超低能耗建筑技术导则（试行）》参考

表 2 夏热冬冷地区甲类公共建筑围护结构热工性能 K 值，单位： $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$

部位	本项目	上海市超低能耗建筑技术导则（试行）		GB/T51350-2019	GB55015-2021
		参考值	约束值		
外墙	0.20	0.40	0.72	0.15~0.40	0.80
屋面	0.13	0.30	0.45	0.15~0.35	0.40
架空楼板	0.25	-	-	-	0.70

值要求，且满足《近零能耗技术标准》（GB/T51350-2019）和《建筑节能与可再生能源利用通用规范》（GB 55015-2021），见表 2。

外墙、屋面、架空楼板、结构柱等全部采用聚氨酯喷涂，减少围护结构热桥效应，如图 2 所示。处理热桥节点时重点做到：（1）出屋面管道与套管之间采用填充保温层，向下延伸 400mm，保温延伸至管道顶部。（2）聚氨酯保温延伸到女儿墙顶部全覆盖。（3）外窗安装时采用嵌入式安装方式，窗外侧与保温层齐平，窗两侧及上口采用保温材料对窗框进行局部包覆，降低外窗与结构墙体连接部位的热桥效应。

在新风排风穿墙口、外窗与结构连接处等位置设置了防水隔气膜和防水透汽膜，提升围护结构气密性，减少热损失，图 3 所示。

1.2 三玻聚氨酯外窗

项目采用 6+12Ar+6+12 Ar +6 三玻双腔玻纤聚氨酯复合外窗，整窗传热系数 $K=0.9 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ，镀有 Low-E 涂层，内充氩气惰性气体降低热能量的传递，气密性达到 8 级。聚氨酯型材是以玻璃纤维为增强材料，以聚氨酯为基体的新型复合材料。在温度变化时不会与墙体产生缝隙，具有良好的密封性，并具有高隔热性、高耐候性、抗老化等性能。

1.3 电动卷帘外遮阳

项目外窗全部采用了织物卷帘电动外遮阳，见图 4，具有良好的遮阳和透光性能，遮阳系数 $SC=0.3$ 。根据不同房间需求分别控制，有效降低夏季得热，增加冬季

太阳辐射。

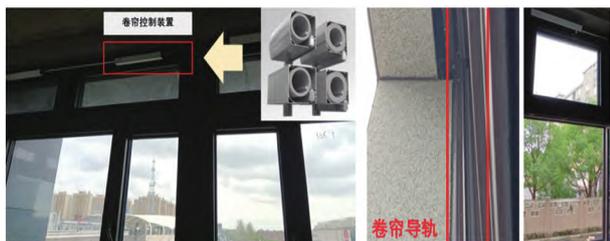


图4 活动卷帘外遮阳安装实景图

同时，本项目西立面窗墙比 0.18，外窗退进外墙 15cm，五楼采用凸出挑檐造型形成自遮阳效果。南立面设置固定隔栅外遮阳，如图 5 所示。

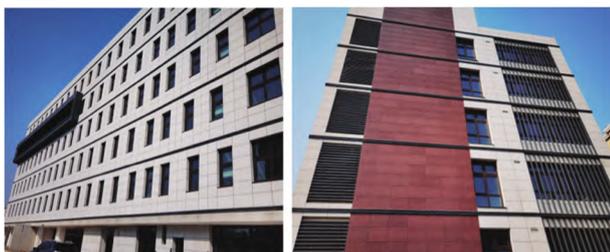


图5 建筑自遮阳和建筑外遮阳布置图

1.4 全热回收新风空调一体机

项目空调和新风系统选用的是吊顶式全热回收新风空调一体机，能满足不同气候条件下的新风、除霾、制冷、采暖、除湿等需求，设备使用了纳米光离子净化保证室内空气的质量。

夏季制冷 COP 达到 4.8，冬季制热 COP 达到 5.9，在过渡季节可以进入免费供冷制热模式，即停掉压缩机，仅仅依靠风机进行室内外的冷热交换。

一体机设置热回收模块，热回收机组的显热回收效率为 75%，全热回收效率为 70%，同时机组在过度季和梅雨季实现冷凝热回收再热，除湿能效较高。

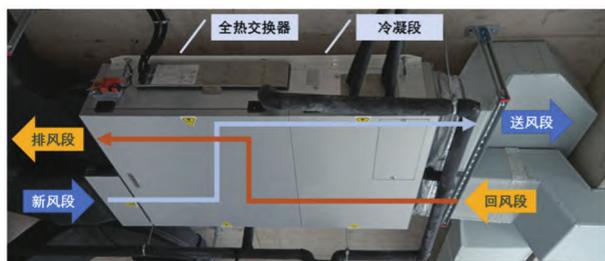


图6 全热交换空调系统安装实景图

图 6 为全热回收空调机组的安装实景图，换热机组分为全热交换器和冷凝段两部分，新风先经过回风换热处理后再经过冷凝段二次处理从而进行送风。安装时，在新风段和排风段均采用保温材料，防止冷凝而造成结露。

1.5 能耗监管系统

项目采用能耗监管系统，通过数字化物联网技术手段动态监管建筑能耗总量和强度，提升用能监管效率，也是评价超低能耗建筑实际用能水平的必备工具，功能界面如图 7 和图 8 所示。

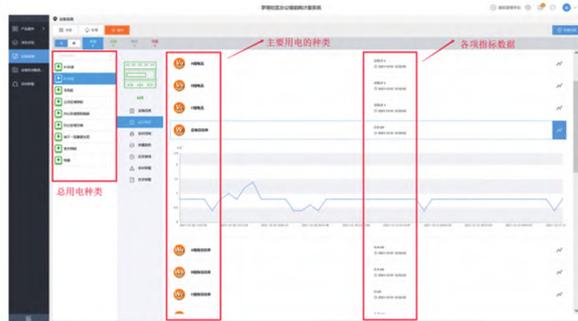


图7 能耗监管系统

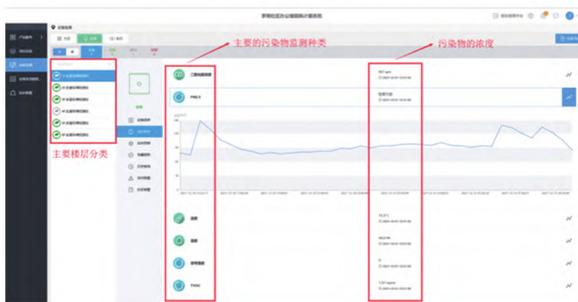


图8 空气污染物监测功能

项目的智能电表通过 NB 传输信号，进行能耗智能监管、分项计量和数据分析。按照上海市超低能耗建筑的要求，对项目的总用电量及各区域的空调用电、照明插座用电、车库用电、特殊用电和室外照明用电等部分进行分项计量，能耗监管平台具备能耗报表查询功能，支持一键导出。

该能耗监管平台系统包含室内环境质量监测模块，采用多合一环境传感器，实时监控室内空气质量，包括

温度、相对湿度、CO₂、PM2.5、TVOC 五个指标，并与新风一体机设备联动控制，为人们提供一个安全、健康、舒适的室内环境。

2 LCA 碳排放分析

目前上海市及全国都在推行超低能耗建筑，主要执行标准有《上海市超低能耗建筑技术导则（试行）》《近零能耗建筑技术标准》（GB/T 51350-2019），但是标准中都没有关于碳排放的计算规定。国内外学者对建筑全生命周期 LCA 碳排放的研究相对成熟，有分建设阶段和运行阶段 2 个阶段^[5]，也有分建材生产、建材运输、施工、运行、建筑拆除废弃阶段 5 个阶段^[6]。

2.1 边界与模型

本文的建筑全生命周期 LCA 碳排放计算模型参照《建筑碳排放计算标准》（GB/T51366-2019），采用碳排放因子法，将全生命周期 LCA 碳排放定义为建材生产及运输、建造及拆除、运行阶段产生的温室气体排放的总和。

计算公式 $E_m = AD \times EF$

式中 E_m 为温室气体排放量；AD 为建筑活动水平，是指建筑全生命周期内直接活动或间接活动水平的数据，比如建造过程中消耗的建材用量、各项活动中消耗的能源总量等；EF 为排放因子，是指单位建筑活动所产生的二氧化碳当量，又称为碳排放系数。

建筑全生命周期碳排放计算公式为：

$$E_{sum} = E_{pt} + E_c + E_{om} + E_{end}$$

式中 E_{sum} 为全生命周期碳排放，kgCO₂

E_{pt} 为建材生产及运输阶段碳排放，kgCO₂

E_c 为建造施工阶段碳排放，kgCO₂

E_{om} 为运营维护阶段碳排放，kgCO₂

E_{end} 为拆除处置阶段碳排放，kgCO₂

2.2 各阶段碳排放计算

基于如上建筑全生命周期 LCA 碳排放计算边界和模型，采用项目工程清单数据、能耗模拟数据、预测估算数据相结合的方式对各阶段碳排放计算。

建材生产和运输阶段：该阶段主要的碳排放来源于原材料的开采、工厂加工、产品运输等过程中产生的温室气体，即建材的隐含碳，是研究城市或者行业整体碳排放的重点。本项目主要建材用量来源于工程量清单，如表 3 所示，建材产品以长三角为主，运输距离按照

表 3 主要建材用量清单和碳排放因子

建材	用量	单位	碳排放因子 kg/单位
混凝土	1600	m ³	270
砂子	400	m ³	683
水泥	200	t	730
钢材	100	t	2310
聚氨酯保温	465	t	4330
外窗	744	m ²	62.4
抗裂砂浆	40	t	190
网格布	32000	m ²	3.28

100km 考虑。经测算， E_{pt} 为 3321698 kgCO₂。

运行阶段：超低能耗建筑主要目的是降低建筑运行能耗，运行阶段碳排放包括使用燃油和燃气产生的直接碳排放，以及用电产生的间接碳排放。本项目尚未正式投入使用，通过能耗软件模拟计算得出单位面积年能耗指标为 71.25 kWh/(m²·a)，较 2020 年上海市办公建筑能耗指标 81.5 kWh/(m²·a)^[7] 低 12.6%。结合华东电网碳排放因子 0.7035t/MWh，本项目运行阶段碳排放为 50.12kg/(m²·a)。

建造和拆除阶段：建造和拆除阶段的碳排放占建筑全生命周期 LCA 碳排放比例较小，通常缺乏数据来源，本项目直接采用经验公式^[8]进行计算。

建造阶段碳排放计算公式：

$$E_{ca} = X + 1.99$$

拆除阶段碳排放计算公式：

$$E_{enda} = 0.06X + 2.01$$

式中， E_{ca} ：单位建筑面积建造阶段碳排放，kg CO₂/m²；

E_{enda} ：单位建筑面积拆除阶段碳排放，kg CO₂/m²；

X：层数。

根据经验公式本项目建造阶段碳排放为 46.02 kgCO₂/m²，拆除阶段碳排放为 kgCO₂/m²。

2.3 结果和分析

结果表明，本项目建筑全生命周期 LCA 碳排放总量为 21785.81t。建材生产和运输阶段碳排放量 3321.7t，即隐含碳为 3321.7t，单位建筑面积隐含碳

461.3 kg/m²。施工阶段 331.34t，运行阶段（50 年）18043.2t，拆除阶段 89.57t。其中运行阶段（建筑按照 50 年使用寿命考虑）碳排放量占比 83%，如图 9 所示。因此关注长期运行阶段节能减排效果的超低能耗建筑具有重大意义。

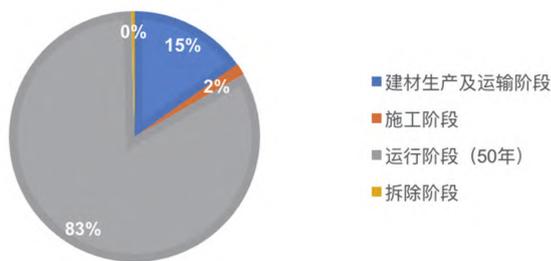


图 9 超低能耗建筑全生命周期 LCA 碳排放占比图

经计算，本项目每年碳排放为 435.7 t/年，单位面积每年碳排放为 60.52kg/(m²·a)，其中运行阶段单位面积每年碳排放强度为 50.12kg/(m²·a)。根据 2020 年上海市办公建筑能耗指标测算，上海市公共建筑单位面积每年碳排放强度为 57.33kg/(m²·a)，本项目超低能耗建筑运行阶段每年碳排放强度降低了 12.8%，具有明显的节能减排效果。



图 10 超低能耗建筑增加的隐含碳回收中和分析图

当前，关于超低能耗建筑的技术选用对建筑隐含碳排放指标的影响，尚未有完整研究。考虑到本项目超低能耗建筑设计标准提高，选用的建材性能有所提升，比如聚氨酯保温增加到 150mm，外窗升级到三玻窗、采用电动卷帘遮阳等，但是对于建筑的主要用材量没有太大影响，比如混凝土用量、钢筋用量等。根据本项目工程清单用量和建材隐含碳权重比例研究^[8]，超低能耗建

筑将会比常规建筑增加 5% 的隐含碳。但经进一步分析，超低能耗建筑技术选用增加的隐含碳可以在 1—2 年内通过运行碳减排实现中和，详见图 10。

3 小结

本案例作为已经建成落地的上海超低能耗建筑示范项目，采用了新型实用的节能技术措施。经过 LCA 碳排放分析发现，其运行阶段碳排放占比 83%，超低能耗建筑因技术选用而增加的隐含碳可以在 1—2 年内通过运行碳减排实现中和。上海市 2021 全年竣工建筑面积 9232 万平方米，如果全部按照超低能耗建筑标准建设，则投入运行后每年碳减排 66.6 万吨。

建筑全生命周期 LCA 碳排放研究的重点在于边界条件确定和数据获取。本文在进行 LCA 碳排放分析时，选用了主要建材来计算隐含碳，未考虑机电设备、室内装修等影响，同时运行阶段的数据来源于建筑能耗模拟预测，实际运行情况会存在差异，这就需要发挥能耗监管系统的动态监测作用，这些都值得后续深入研究。■

参考文献

- [1]《中国建筑能耗研究报告（2020）》，中国建筑节能协会。
- [2]《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》。
- [3]《建筑碳排放计算标准》GB/T51366-2019。
- [4] Hao Cai, Whole-building life-cycle analysis with a new GREET® tool Embodied greenhouse gas emissions and payback period of a LEED-Certified library, Building and Environment 209 (2022) 108664.
- [5] Saynajoki A, Heinonen J, Junnila S. A scenario analysis of the life cycle greenhouse gas emission of a new residential area[J]. Environmental Research Letters, 2012, 7(3): 34-45.
- [6] 陈奕, 张建等. 绿色建筑全生命期碳排放研究——以天津市建筑设计院新建业务用房项目为例 [J]. 城市, 2019(01):75-79.
- [7]《2020 年上海市国家机关办公建筑和大型公共建筑能耗监测及分析报告》。
- [8] 张又升, 建筑物生命周期二氧化碳减量评估 [D], 台湾成功大学, 2002.