

# 居住建筑全生命周期碳排放对比分析与减碳策略

李岳岩<sup>1,2</sup>, 张 凯<sup>1</sup>, 李金璐<sup>1</sup>

(1. 西安建筑科技大学 建筑学院, 陕西 西安 710054; 2. 西部绿色建筑国家重点实验室, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 建筑全生命周期碳排放可以全面反映建筑对环境的影响。研究以 2005 年建造的高层居住建筑全生命周期碳排放计算结果作为基准参数, 与两栋低碳建筑的全生命周期碳排放计算结果进行对比分析。结果发现: 通过建造、使用和拆解阶段的全面控制, 可以将建筑全生命周期碳排放强度较 2005 年的基准水平大幅下降, 并针对性地提出了具体的建筑全生命周期减碳策略。

**关键词:** 居住建筑; 全生命周期; 碳排放; 计算分析; 减碳策略

**中图分类号:** TU244

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2021)05-0737-09

## Comparative analysis of carbon emission throughout the life cycle of residential buildings and carbon reduction strategy

LI Yueyan<sup>1,2</sup>, ZHANG Kai<sup>1</sup>, LI Jinlu<sup>1</sup>

(1. School of Architecture, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Western Green Building National Key Laboratory, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Carbon emissions throughout the life cycle of buildings can fully reflect the impact of buildings on the environment. In this study, the calculation results of the full life-cycle carbon emissions of high-rise residential buildings constructed in 2005 are taken as the benchmark parameters and compared with the relevant parameters of two low-carbon buildings. The research finds that through the comprehensive control of the construction, use and dismantling phase, the carbon emission intensity of the building's life cycle can be significantly lower than the 2005 baseline, and based on the research results, specific life-cycle carbon reduction strategies for buildings are proposed.

**Key words:** residential building; life cycle; carbon emissions; computational analysis; carbon reduction strategy

建筑、工业、交通并称为温室气体排放的三大重点领域<sup>[1]</sup>。根据联合国环境署计算, 建筑行业消耗了全球大约 50% 的能源, 并排放了几乎占全球 36% 的温室气体<sup>[2]</sup>。目前我国正处在建筑业高速发展的时期, 根据《中国建筑节能研究报告 2019》中指出, 2017 年中国建筑总运行能耗 9.6 亿 t 标准煤, 占社会总能耗 20%<sup>[3]</sup>。

2015 年 12 月 12 日各国首脑在巴黎的全球气候变化大会通过并于 2016 年 4 月 22 日签署了《巴黎协定》<sup>[4]</sup>。国家主席习近平承诺中国 2030 年单位国内生产总值二氧化碳排放比 2005 年下降 60%~65%, 占国内生产总值逾 7% 的建筑业要实现这一目标, 必须有切实的应对措施。

## 1 案例选取

本文选取三栋建筑作为研究对象(表 1), 案例

一是研究对标建筑, 为西安市(寒冷 B 区)太乙路某小区经济适用房。该类型住宅建筑 2000 年后在我国大规模建造, 具有普遍意义。案例二是低碳建筑设计的代表——“Treet”木结构公寓<sup>[5]</sup>。该建筑位于挪威第二大城市卑尔根, 大楼主体结构全部由胶合木建造, 外围护结构主要为玻璃幕墙。案例三是试验性低碳建筑——“栖居 2.0”<sup>[6]</sup>, 为 2018 中国国际太阳能十项全能竞赛的参赛作品。该建筑为独立式住宅, 全部运行能耗由屋顶的太阳能电池板提供。

这三栋建筑分别代表了三种不同类型的居住建筑: 第一个为我国目前最为常见的住宅类型之一, 其设计建造在 2007 年, 可以作为我国 2005 年住宅建筑碳排放基准的参考, Treet 则是在新材料、新技术下的居住建筑, 虽然建造于挪威, 但

其生态建筑材料和工业化的建造生产代表了当前住宅建筑的发展趋势;案例一、案例二同为高层居住建筑,但建造材料和建造方式的差异可以反映两者碳排的差异性,案例三栖居 2.0 与案例二同为木结构建筑,但不同的是该建筑大量使用主被动式太阳能,充分利用清洁的可再生能源达到碳中和的目标。研究通过对三个完全不同的案例在同一指标下的差异对比,以及分阶段的数据对比,可以看出建筑结构、建造方式、建筑寿命、可再生能源利用等对建筑全生命周期碳排放的影响。

表 1 建筑全生命周期碳排放分析案例一览表

Tab. 1 List of carbon emission analysis cases in the full lifecycle of buildings

项目名称	太乙路 1# 住宅楼	Treet 公寓	栖居 2.0
结构形式	钢筋混凝土结构	木结构	木结构
建筑面积/m <sup>2</sup>	39 173	7 140	185
建筑高度/m	95.4	52.8	5.4
层数	地上 32 层 地下 1 层	地上 14 层 地下 1 层	地上 2 层
建造年代	2007 年	2015 年	2018 年
使用年限/a	50	50	20
项目地点	陕西西安 (寒冷)	挪威卑尔根 (严寒)	山东德州 (寒冷)

## 2 计算模型

本文中建筑全生命周期由三个阶段组成,分别为建造阶段和拆解阶段。其中建筑全生命周期碳排放量是各个阶段的碳排放量之和。目前国际上碳排放计算的主要方法有四种:实测法、投入产出法、物料衡算法、排放系数法。根据不同的计量需要选择不同的计算方法,它们各有优劣又相互补充。

### (1) 实测法

实测法是通过一定的监测手段,或者根据相关部门认定的某些连续计量设施来测量含碳排放气体的流速、流量和浓度,最终用环保部门认可的测量数据最终得出碳排放总量的方法。其数值准确,但其建立在实测基础上,难以对产品碳排放进行预估。

### (2) 投入产出法

投入产出的方法在计算碳排放的时候首先需要获取产品 CO<sub>2</sub> 排放数据或者各部门 CO<sub>2</sub> 排放数据,其次根据投入产出的数学模型来计算整个生产链上用户在获得产品或者接受服务引起的 CO<sub>2</sub> 气体的排放量。投入产出法由于对具体的过程不做深入的分析,所以计算结果存在较大的不确定

性,仅仅适用于宏观层面的计算。

### (3) 物料衡算法

物料衡算法是一种科学、有效地研究整个生产过程中废弃物排放的方法,这种算法把整个生产过程都建立在环境保护的基础之上,例如原材料的使用、能源的消耗以及工艺流程等。这种方法目前作为大部分碳排放量的计算以及基础数据的获得的基础,不仅适用于整个生产系统的碳排放量的计算,同时也适用于部分过程的碳排放的计算。但是这种方法对于建筑碳排放的计算需要对整个建筑物的全生命周期的投入与产出量进行全面的跟踪计算,工作量巨大,工序繁杂。

### (4) 排放系数法

排放系数也称为排放因子。这种方法是在正常的经济和管理条件下,根据生产单位产品所排放的气体数量的统计平均值来计算碳排放量的一种方法。1996 年,IPCC(政府气候变化专门委员会)给出了碳排放的估算方法。这种方法把影响碳排放量的活动数据与单位活动的排放系数相结合,得到总的碳排放量。排放系数法的基本计算式:排放量=活动数据×排放系数

通过上边的公式我们可以得出,排放系数法最主要的应用是确定碳排放的活动数据和碳排放系数。碳排放的数据应与建筑相关的数据资料一致。例如,在建材生产阶段,活动数据指的是各种建筑材料的使用量;在建筑使用阶段,活动数据指的是建筑中各种能源的消耗量。本文对建筑全生命周期碳排放的计算主要采用了排放系数法。

### 2.1 物化阶段碳排放

物化阶段碳排放量=建材生产阶段碳排放+建材运输阶段碳排放+建造施工过程中的碳排放。

物化阶段碳排放计算采用清单分析法,详细计算建筑物建造过程中的主要建筑材料和施工过程的碳排放,该方法计算结果准确度较高,为政府间气候变化专门委员会(IPCC)的推荐采用的方法<sup>[7]</sup>。

本文中案例一和案例三根据建筑工程预算清单的内容和数量进行计算,数据来源于设计单位(西北建筑设计研究院和西安建筑科技大学建筑设计研究院);案例二由于没有工程预算清单,我们根据文献资料建立三维模型,并根据模型信息统计建材使用量。本文中所有数据的碳排放因子综合参考了国内外成熟的数据库和研究成果,主要碳排因子数据来源于建筑碳排放计算标准(GB/

T51366-2019)、四川大学建筑材料碳排放数据库 (CLCD 数据库), 一些不确定的碳排放因子(如胶合木等)参考了国内学者的研究成果和国外数据库<sup>[8-10]</sup>。例如, 木制集成材的碳排放因子就使用了曾杰等对于木结构建材的碳排放因子的研究结论<sup>[11]</sup>。

2.2 使用维护阶段碳排放

使用维护阶段碳排放包括两个方面, 即建筑使用阶段的碳排放和建筑维护的碳排放。建筑使用维护过程碳排放量=建筑使用过程碳排放量+建筑维护过程碳排放量。

建筑使用阶段的碳排放量基本为建筑使用过程中的能耗(主要为采暖、空调、照明和设备能耗构成)所产生的碳排。特别说明的是, 本计算过程中使用能耗统一按照设计定额的参数进行计算, 未考虑居住者的生活习惯所产生的个体能耗差异, 否则难以进行分析。维护阶段的碳排放主要根据维护阶段的设备更换、材料更换和维护施工情况确定。

2.3 拆解阶段碳排放

该阶段碳排计算主要包含建筑物拆除过程的碳排放及建筑拆解再利用的碳排放回收量。拆解过程的碳排放计算与物化阶段的施工过程

碳排放计算相同: 拆解阶段碳排放量=拆解过程碳排放量+运输过程碳排放量-建材回收的碳排放减量。

建筑拆解后, 部分建筑材料的回收利用可以减少原料开采提纯环节产生的碳排放量, 故建材回收利用数量对应着原料开采提纯环节的碳减量, 所以材料回收利用率越高, 建筑拆解的减排效果就越明显<sup>[12]</sup>。

2.4 碳排放参数

建筑全生命周期碳排放有三个主要参数, 即建筑全生命周期碳排总量 CLC(kgCO<sub>2</sub>e)、建筑全生命周期碳排放强度 Ca(kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>)和建筑全生命周期年均碳排放强度 CA(kgCO<sub>2</sub>e/m<sup>2</sup>·a)。其中建筑全生命周期碳排总量受到建筑规模等因素的影响; 碳排放强度可以比较不同面积建筑的碳排放情况; 建筑全生命周期年均碳排放强度可以准确衡量出建筑物对环境的影响程度。

3 分析计算

通过以上计算模型计算得出“1#住宅楼”、“Treet”木结构公寓和“栖居 2.0”三栋居住建筑全生命周期及各阶段碳排放量和分析参数, 具体数据见表 2。

表 2 三栋住宅建筑全生命周期碳排放数据对比

Tab. 2 Comparison of life-cycle carbon emission data of three residential buildings

分析参数		碳排放量			碳排放强度/			年均碳排放强度/		
		CLC/(kgCO <sub>2</sub> e)			Ca(kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> )			Ca(kgCO <sub>2</sub> e/m <sup>2</sup> ·a)		
项目名称	太乙路	Treet	栖居	太乙路	Treet	栖居	太乙路	Treet	栖居	
	1#住宅楼	公寓	2.0	1#住宅楼	公寓	2.0	1#住宅楼	公寓	2.0	
物化阶段	建筑材料	14 599 104.32	1 399 584.00	58 297.25	372.68	196.02	315.17	7.45	3.92	15.75
	运输阶段	450 267.19	234 900.90	705.01	11.49	32.90	3.81	0.23	0.66	0.2
	施工阶段	252 063.12	7 639.80	2 809.35	6.43	1.07	15.19	0.13	0.02	0.75
	临时设施	35 528.36	0.00	0.00	0.91	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00
	阶段总体	15 336 962.99	1 642 124.70	61 811.61	391.52	229.99	334.17	7.83	4.60	16.70
	维护更换	606 115.73	5 694.00	10 570.25	15.47	0.80	157.13	0.31	0.02	1.14
使用阶段	采暖	46 282 379.00	2 564 509.50	119 588.59	1 181.49	359.18	646.53	23.63	7.18	32.33
	照明	18 518 871.00	3 898 054.40	35 523.71	472.75	545.95	192.05	9.45	10.92	9.60
	空调	8 936 274.00	1 641 286.10	27 987.65	228.12	229.87	151.31	4.56	4.60	7.57
	电梯	3 770 754.00	478 560.00	0.00	96.26	67.03	0.00	1.93	1.34	0.00
拆解阶段	产能	0.00	0.00	-361 713.8	0.00	0.00	-1 955.53	0.00	0.00	-97.78
	阶段总体	78 114 393.73	8 588 104.00	-168 043.5	1 994.09	1 202.82	-908.34	39.88	24.06	-47.14
	拆解施工	866 224.47	6 875.82	2 528.42	22.11	0.96	13.67	0.44	0.02	0.27
	材料回收	-4 303 254.09	-628 200.20	-12 989.00	-109.85	-87.98	-70.22	-2.20	-1.76	-3.51
	阶段总体	-3 437 029.62	-621 324.38	-10 460.58	-87.74	-87.02	-56.55	-1.76	-1.74	-2.38
合计		90 014 327.10	9 608 904.32	-116 692.39	2 297.87	1 345.78	-630.77	45.96	26.92	-31.54
去除使用阶段产能碳排合计		90 014 327.10	9 608 904.32	245 021.23	2 297.87	1 345.78	1324.44	45.96	26.92	66.22

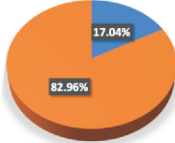
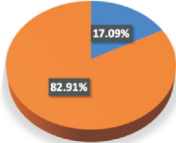
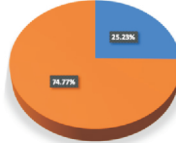
### 3.1 建筑全生命周期碳排放分析

总体来看,建筑全生命周期中使用阶段的碳排放量最大,太乙路1#住宅楼和“Treet”公寓都占到总排放量的83%左右,“栖居2.0”也占到了总排放量的25.23%。其次是物化阶段,基本占据了

剩余量如表3所示。拆解阶段如果不考虑建筑材料的回收再利用,拆解施工的碳排放仅为物化阶段的5%,基本可以忽略,但建筑材料的回收再利用可有效减少建筑全生命周期的碳排放。

表3 建筑全生命周期各阶段碳排放总量对比

Tab. 3 Comparison of the total carbon emissions at all phases of buildings' life cycle

项目名称	太乙路 1#住宅楼	Treet 公寓	栖居2.0	
			含建筑产能	不含建筑产能
碳排总排放量 /(kgCO <sub>2</sub> e)	90 014 327.10	9 608 904.32	-116 692.39	245 021.23
物化阶段碳排放量 /(kgCO <sub>2</sub> e)	15 336 962.99	1 642 124.70	61 811.61	
使用维护阶段碳排放量 /(kgCO <sub>2</sub> e)	78 114 393.73	8 588 104.00	-168 043.5	193 670.3
拆解阶段碳排放量 /(kgCO <sub>2</sub> e)	-3 437 029.62	-621 324.38	-10 460.58	
碳排放占比(橙色为使用维护 阶段、蓝色为物化阶段)				
碳排放强度 /(kgCO <sub>2</sub> e · m <sup>-2</sup> )	2 297.87	1 345.78	1 324.44	-630.77

从全生命周期碳排放强度上看,“Treet”公寓和“栖居2.0”的排放强度分别是对标建筑太乙路1#住宅楼的58.57%和57.64%。两者的全生命周期碳排强度均与对标建筑有大幅度地下降。

### 3.2 物化阶段

从物化阶段的碳排放强度(图1)来看,“Treet”公寓的碳排强度仅为1#住宅楼的58%。

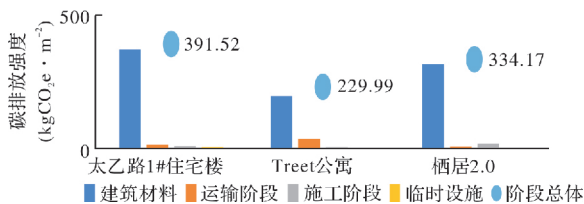


图1 物化阶段碳排放强度对比

Fig. 1 Comparison of carbon emission intensity in the materialized phase

而栖居2.0因为建筑设计年限不同,所以碳排放强度为1#住宅楼的85%,年碳排放强度为1#住宅楼的213%(图2)。太乙路1#住宅楼为钢筋混凝土结构,而“Treet”公寓和“栖居2.0”均为木结构;“Treet”公寓和“栖居2.0”采用了整体装配的干作业施工方式,太乙路1#住宅楼采用的是传统的现浇混凝土湿作业施工方式。

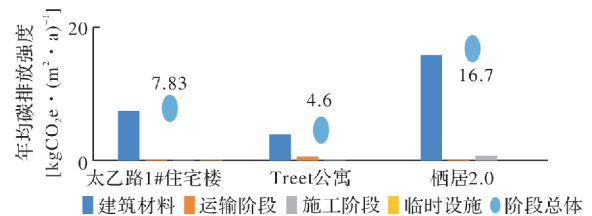


图2 物化阶段年均碳排放强度对比

Fig. 2 Comparison of annual average carbon emission intensity in the materialized stage

#### 3.2.1 建筑结构形式:

“Treet”木结构公寓的承重结构主要由层板胶合木 Glulam(550 m<sup>3</sup>)和木结构复合材料 CLT(385 m<sup>3</sup>)组成。Glulam 又称为集成材。从物理力学性能来看,Glulam 在抗拉和抗压强度方面都优于实体木材。CLT 是一种新型木建筑材料,由至少三层实心锯木或结构复合材,经正交叠放后,使用高强度材料胶合而成<sup>[13]</sup>。CLT 具有刚度、塑性强等优点,其材料强度与钢材相当,并且用 CLT 建成的木结构建筑物具有良好的抗震性能。

“栖居2.0”使用了30 m<sup>3</sup>的30 mm厚定向刨花板(OSB)作为主体结构材料。OSB板相比于胶合板、中密度纤维板等板种,稳定性好,材质均匀,

握螺钉力较高,且纵向抗弯强度比横向大得多,可以做结构材,并可用作受力构件。

两栋建筑均选用木材作为主要结构形式,因为材料本身特性,木材的碳排放量仅有同样体积的混凝土的70%以下<sup>[11]</sup>。可以看出结构形式对于物化阶段的碳排强度有着巨大作用。除此之外,木材本身在生长过程中可以吸收大量CO<sub>2</sub>,1 t树木吸收了大气中1.6 tCO<sub>2</sub>同时向大气中放出1.2 tO<sub>2</sub><sup>[14]</sup>。本文的碳排放计算中此部分的没有计入,若计入的话,物化阶段的碳排放强度还会降低。

### 3.2.2 建造方式

“Treet”公寓和“栖居2.0”均采用了快速装配式的建造模式,大大加快了施工效率。“Treet”木结构公寓由预制的模块化公寓组成。预制化房屋单元首先在爱沙尼亚的一家工厂建造,之后运往卑尔根,尽管初期成本略高于钢和混凝土结构,但建筑安装时间明显缩短。安装时,首先将四层模块叠加在一起,然后在四周安装支承结构和加强层。加强层内是独立的预制模块,之后再叠加四层标准模块,这样重复至安装楼顶。“Treet”木结构公寓施工时仅需3 d就能建造四层楼,整个“Treet”木结构公寓从建材生产到正式投入使用前,仅用1 a建造完成。相较太乙路1#住宅楼3 a的施工周期,可以看出施工效率的提升使得施工碳排放有明显降低。

“栖居2.0”采用了模块式的木格构墙体系,将承重结构和维护结构拆解为木格构墙单元,建造时木格构墙单元拼接成为整体,整栋房屋仅20 d就全部建造完成。但由于建造过程中机械台板浪费较多,造成了“栖居2.0”建造阶段的碳排放强度大幅增加。

### 3.2.3 建造运输

“栖居2.0”和太乙路1#住宅楼的运输碳排放强度要远小于“Treet”公寓。原因在于“栖居2.0”和太乙路1#住宅楼的建筑材料基本采购于当地,运输距离很短。而“Treet”公寓的建筑构件在爱沙尼亚生产,用海运至挪威卑尔根后再用货车运送至工地,运输距离的增加使得其建材运输的碳排放大幅增加。可见就地取材,对于减少碳排具有重要的作用。

## 3.3 使用维护阶段

使用阶段主要对比采暖、空调、照明、电梯运行、设备生产及维护、产能六方面的年均碳排放强度。从使用维护阶段的碳排放构成和碳排放强度对比来看,采暖、照明和空调占据了此阶段

碳排放的94%如图3所示。

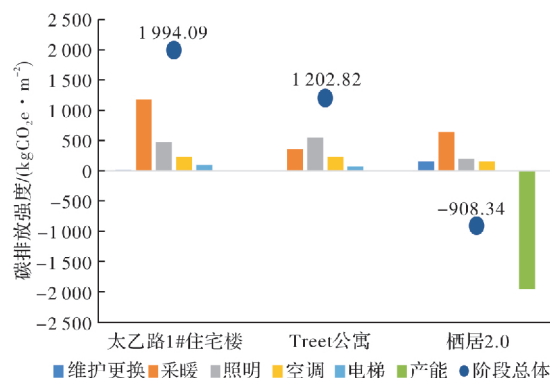


图3 使用维护阶段年均碳排放强度(含产能)

Fig. 3 Annual average carbon emission intensity (including capacity) during use and maintenance period

### 3.3.1 建筑节能

通过数据对比可以看到“Treet”公寓在此阶段的碳排强度为太乙路1#住宅楼的60%,其中采暖一项“Treet”公寓仅为1#住宅楼的30%。挪威比西安更为寒冷,而“Treet”公寓采暖的碳排强度远低于1#住宅楼,说明其能效更高。分析其原因有二,其一,2005年我国虽然已经开始在城市住宅中强制施行建筑节能措施,但还只是在初步阶段,而“Treet”公寓已经达到“被动房”的标准;其二,由于“Treet”公寓的主体框架和主要围护墙体均采用了木结构,良好的隔热性能也让其获得了更好的保温隔热性能。由此可以看出在现有的基础上进一步加强建筑节能可以大幅减少建筑物的碳排放。

### 3.3.2 建筑产能

“栖居2.0”利用太阳能光伏板取代了屋顶面层,形成光伏建筑一体化,其屋顶的太阳能光伏板所提供的电能已远远超出建筑的实际能耗,在山东德州的实际运行测试也证实了这一点。建筑屋顶面层总共铺设59块太阳能光伏板,在竞赛测试期间(2018.08.03—2018.08.17共15 d)的总发电量为:1 219.29 kWh,单位光伏板面积产生的电能:10.65 kWh/m<sup>2</sup>,日均发电量:87.09 kWh。由于测试在8月份,太阳辐射较强,经计算折减(折减近45%)后,全年日均发电14 515 kWh,超额7 167.59 kWh(表4)。

表4 栖居2.0使用阶段各子阶段年均耗电量

Tab. 4 Annual average power consumption of each sub-stage of Habitat 2.0

项目	采暖	空调	照明	太阳能光伏板产能	总计
年均耗电量/kWh	4 798.8	1 123.1	1 425.51	-1 4515	-7 167.59



由此可以看出建筑(特别是低层建筑)自身的产能对于建筑全生命周期减碳作用明显。

### 3.3.3 建筑寿命

从三栋建筑的排放强度对比来看,“Treet”公寓和“栖居 2.0”碳排放优势明显(图 4)而从年均碳排放强度数据对比来看,如果不含建筑产能“栖居 2.0”远超其他两栋建筑,分别是太乙路 1#住宅楼和“Treet”公寓的 1.27 倍和 2.06 倍(图 5)这是由于“栖居 2.0”为临时实验建筑,碳排放强度和年均碳排放强度按照 20 a 进行计算,而太乙路 1#住宅楼和“Treet”公寓为永久建筑,按照 50 a 进行计算。由此可以看出,延长建筑的寿命可以产生长期减碳效果,对环境的压力明显降低。其中建筑使用能耗较大是重要的原因,但同时也因为这是由于“栖居 2.0”为临时实验建筑,碳排放强度和年均碳排放强度按照 20 年进行计算,这意味着物化阶段的碳排放分摊至 20 a 中,而太乙路 1#住宅楼和“Treet”公寓为永久建筑,按照 50 a 进行计算,物化阶段的碳排放分摊至 50 a 中。由此可以看出,延长建筑的寿命可以有效减少建筑物全生命周期年均碳排放强度,从而产生长期减碳效果,对环境的压力明显降低。

### 3.4 拆解阶段

从拆解阶段的碳排放构成和碳排放强度对比(图 6)看,拆解施工阶段的强度碳排放强度虽然差异较大,但是总体产生的碳排放量很小。此阶段对于建筑全生命周期影响最大的是建材回收。从计算结果中可以看出,太乙路 1#住宅楼的回收碳排放强度最高,是“Treet”公寓和“栖居 2.0”的 1.25 倍和 1.56 倍。分析其原因如下,太乙路 1#住宅楼为钢筋混凝土结构,其主要材料为钢材和混凝土,钢材可以进行再加工使用,回收利用率最高;混凝土可以粉碎后作为再生骨料,其回收使用率较高;相较之下木材加工后不易再利用,回收使用率相对较低。各种建材回收利用率及回收后的材料种类见表 5<sup>[16-21]</sup>。

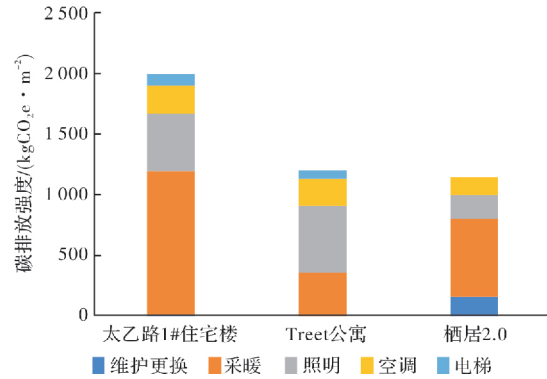


图 4 使用阶段碳排放强度(不含产能)

Fig. 4 Carbon emission intensity in use stage (excluding capacity)

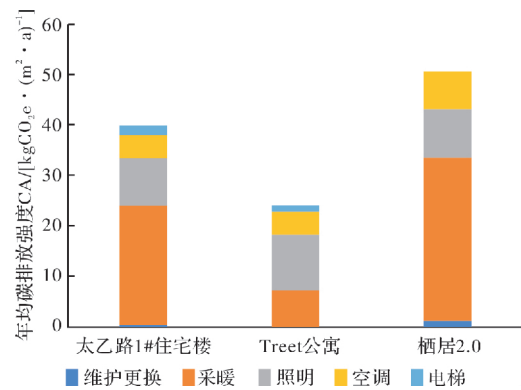


图 5 使用阶段年均碳排放强度(不含产能)

Fig. 5 Annual average carbon emission intensity during use period (excluding capacity)

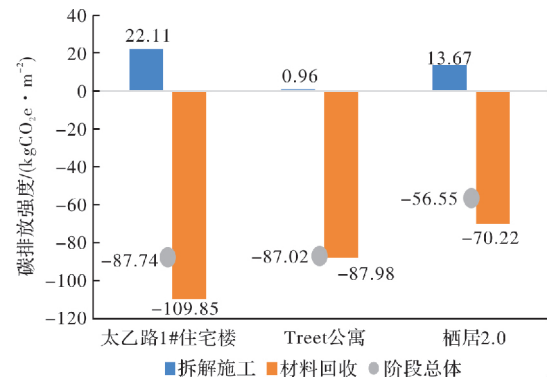


图 6 拆解阶段年均碳排放强度

Fig. 6 Annual average carbon emission intensity in the disassembly stage

表 5 废旧建材回收及利用率

Tab. 5 Recycling and Utilization Rate of Waste Building Materials

废旧建材种类	再利用率	回收利用率	回收后的材料种类	碳排放因子
混凝土	--	0.7	骨料、砾石	6.4 $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{t}$
砖	0.7	--	砖	290 $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{千块标准砖}$
钢材	--	0.9	粗钢	1 942.5 $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{t}$
铜芯电线电缆	--	0.9	粗铜	7.92 $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{kg}$
门窗(铝合金中空)	0.8	--	门窗	10.9 $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}^2$
木材	--	0.65	木材	139 $\text{kgCO}_2\text{e}/\text{m}$

但现阶段我国拆除的建筑物回收利用较少,特别是混凝土和砖石基本作为建筑垃圾处理。若钢筋混凝土没有充分回收利用,则建筑的碳排放会有较大的上升,这也对我国的建材回收提出了更高的要求。

## 4 建筑全生命周期减碳策略

### 4.1 使用阶段减碳策略

使用阶段的碳排放占全生命周期的80%以上,其减碳效果在建筑全生命周期中起着决定性的作用。归结起来,使用阶段减碳主要通过“节流”、“开源”和“延寿”三方面来实现。

“节流”即节能,通过减少建筑的运行能耗来减少建筑的运行阶段碳排放。目前我国虽然已经全面实行了建筑节能的强制性措施,制定了诸多建筑节能的规范,已经实现较1980年建筑基准能耗节能75%的目标,但目前我国的建筑能耗距离发达国家尚有一定距离,通过降低运行能耗降低碳排放还有很大的潜力。“开源”即建筑自身产能,通过自身产能从而少用甚至不用外界能源。这一建筑策略目前也日益得到重视,“零能耗”和“负能耗”建筑已经成为现实,并且很多发达国家已经制定了“零能耗”建筑标准。建筑产能基本通过主动式和被动式两种方式实现,两种方式的具体运用也已经有众多研究成果。“延寿”即延长建筑寿命,通过碳排放计算的分析可以看出,延长建筑寿命可以大大降低建筑全生命周期的年均碳排放强度,减少对环境的影响。通过改造提升建筑的居住条件和性能,减少能耗,也是减少建筑碳排放的有效措施。

### 4.2 物化阶段减碳策略

物化阶段碳排放量占建筑全生命周期碳排放量的近20%。虽然物化阶段的碳排放权重远远小于使用阶段,但是物化阶段的碳排放相对集中,对环境的短期影响显著,并且对建筑产业的产业链影响深远,对于其他行业的节能减排也有着深远的影响。我国当前正处在大规模建设时期,减少物化阶段的碳排放对于实现我国《巴黎协定》的国家承诺有着重要意义。

物化阶段的减碳可通过合理选择结构形式——大幅度降低建筑材料的碳排放;就地取材——减少建材运输的碳排放,提高工业化和装配化——降低施工工期、减少施工机械使用等策略实现。因此,发展推广木结构(特别是复合木材料)、装配式钢结构,加大建筑工业化和装配率是

降低建筑物物化阶段碳排放的有效手段。

### 4.3 拆解阶段减碳策略

拆解阶段建材的回收再利用不仅可以实现碳排放回收,降低全生命周期的碳排放,而且对于环境保护也有着重要的意义。拆解阶段的减碳策略是优化拆除方式,用拆解代替拆除,使各种建材得到充分的回收和再利用。例如钢筋混凝土建筑在拆毁方式下钢铁的回收利用率仅为70%,而水泥、碎石、砖瓦等材料的利用率差更低,拆毁方式使这些材料混合为渣土而无法回收,砖瓦的再利用率仅10%,远远低于拆解方式下的建材回收率<sup>[21]</sup>。在这一方面工业化和装配式的优势就明显显现出来,不仅施工便捷并且材料的回收使用率更高。

## 5 结语

根据碳排放计算即过的分析,“Treet”公寓和“栖居2.0”(不含建筑产能)的排放强度分别是对标建筑太乙路1#住宅楼的58.57%和57.64%,仍未达到碳排放强度对标建筑降低60%~65%的标准。文中引用了挪威的“Treet”公寓案例作为研究对比,虽然这一建筑位于国外,其实际的碳排放应按照当地的计算。但“Treet”木结构公寓所使用的木材均在国内有相同或者类似的产品,因此以“Treet”木结构公寓为蓝本,采用国内碳排放计算因子进行计算,旨在分析不同建筑结构形式的建筑全生命周期碳排放的差异,以及不同建筑材料对于建筑物碳排放强度的影响。可以看出当采用木结构时,建筑物的全生命周期碳排放强度明显降低,并且这还没有计算木材的碳汇(木材在生长过程总对二氧化碳的吸收)。因此,在减碳和“碳中和”的目标下,木结构建筑具有很大的优势。

同时可以看到,当“栖居2.0”加入建筑产能时,其碳排放强度远远低于对标建筑。因此充分利用可再生能源,如分布式光伏等,可以有效降低建筑物的碳排放强度,在满足舒适(适当高耗能)的前提下也能够达到“碳中和”。当然对于高层建筑而言,均摊到单位面积无法获得像低层建筑那样充分的太阳能资源,不过,通过加强节能措施、增加可再生能源的充分利用和通过被动式方式,可以进一步降低能源消耗,降低碳排放强度。同时,高层建筑有着更好的结构耐久性和稳定性,可以通过延长建筑的使用寿命,摊薄物化阶段的碳排放,进一步降低碳排放年均强度,减少对环境的影响。通过多渠道、多方位的减碳措施,我

们相信在2030年实现建筑年均碳排放强度较2005年下降60%~65%的目标是有望实现的。

虽然建筑的碳排放在全生命周期的各阶段产生,但减少建筑全生命周期碳排放是一个系统的工程,需要在建筑建造之前进行全面统筹。因此设计阶段对建筑全生命周期的碳排放控制具有统筹效果。只有综合分析各阶段碳源及其控制措施,从设计入手,才能有效地减少建筑全生命周期碳排放。相较于建筑节能,建筑全生命周期碳排放可以更加全面反映建筑对环境的影响,目前我国建筑行业减碳已进入关键时期,国家已经制定了一些相应的规范和标准,如《建筑碳排放计算标准(GB/T 51366-2019)》等,但对比其他行业建筑行业仍然滞后,仍有漫长的道路和艰巨的工作。

## 参考文献 References

- [1] 林宪德. 绿色建筑[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.  
LIN Xiande. Green building[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2007
- [2] MALMQVIST T, GLAUMANN M, SCARPELLINI S, et al. Life cycle assessment in buildings: The EN-SLIC simplified method and guidelines[J]. Energy, 2011, 36(4): 1900-1907.
- [3] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2019 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.  
Research Center of Building Energy Conservation, Tsinghua University. Annual development research report of China's building energy conservation 2019[M]. Beijing: China Construction Industry Press, 2019.
- [4] 张楠, 杨柳, 罗智星. 建筑全生命周期碳足迹评价标准发展历程及趋势研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(4): 569-577.  
ZHANG Nan, YANG Liu, LUO Zhixing. Research on the development process and trend of building life cycle carbon footprint evaluation standards[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2019, 51(4): 569-577
- [5] 何敏娟, 罗晶, 李征. 多高层木结构建筑的装配化特点及发展展望[J]. 建设科技, 2017(5): 16-20.  
HE Minjuan, LUO Jing, LI Zheng. Assembly characteristics and development prospect of multi-storey and high-rise wood structure buildings[J]. Construction technology, 2017(5): 16-20
- [6] 李建红, 吴冠宇, 李岳岩. 栖居 2.0——“零能耗”太阳能住宅设计[J]. 建设科技, 2018(15): 102-105.  
LI Jianhong, WU Guanyu, LI Yueyan. Dwelling 2.0: "zero energy consumption" solar residential design[J]. Construction Technology, 2018(15): 102-105.
- [7] IPCC. Climate Change: the IPCC Scientific Assessment[R]. Houghton J T, Jenkins G J, Ephraums J J, eds. Cambridge: Cambridge University Press, 1996.
- [8] 罗智星. 建筑生命周期二氧化碳排放计算方法与减排策略研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.  
LUO Zhixing. Research on calculation method and emission reduction strategy of carbon dioxide emission in building life cycle[D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech. 2016
- [9] 周晓. 浙江省城市住宅生命周期 CO<sub>2</sub> 排放评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.  
ZHOU Xiao. Study on life cycle CO<sub>2</sub> emission assessment of urban housing in Zhejiang province[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012
- [10] Leif Gustavsson, Anna Joelsson, Roger Sathre. Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building[J]. Energy and Buildings. 2010, 42(2): 230-242.
- [11] 曾杰, 俞海勇, 张德东, 等. 木结构材料与其他建筑结构材料的碳排放对比[J]. 木材工业, 2018, 32(1): 28-32.  
ZENG Jie, YU Haiyong, ZHANG Dedong, et al. Carbon emission comparison between wood structural materials and other building structural materials[J]. Wood Industry, 2018, 32(1): 28-32
- [12] 王玉, 张宏. 工业化预制装配住宅的建筑全生命周期碳排放模型研究[J]. 华中建筑, 2015(9): 70-74.  
WANG Yu, ZHANG Hong. Study on building life cycle carbon emission model of industrialized prefabricated housing[J]. Huazhong Architecture, 2015(9): 70-74
- [13] 王瑞峰, 贾东. 交错层压木材(CLT)在建筑上的应用研究[J]. 华中建筑, 2016, 34(6): 65-69.  
WANG Ruifeng, JIA Dong. Research on the application of cross laminated wood (CLT) in Architecture[J]. Huazhong Architecture, 2016, 34(6): 65-69
- [14] 孙启祥. 从生命周期角度评估木材的环境友好性[J]. 安徽农业大学学报, 2001(2): 170-175.  
SUN Qixiang. Evaluation of environmental friendliness of wood from the perspective of life cycle[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2001(2): 170-175
- [15] 林伯强, 李江龙. 环境治理约束下的中国能源结构转变——基于煤炭和二氧化碳峰值的分析[J]. 中国社会科学, 2015(9): 84-107.  
LIN Boqiang, LI Jianglong. China's energy structure transformation under the constraints of Environmental



- Governance :Analysis based on the peak value of coal and carbon dioxide[J]. China Social Sciences, 2015 (9): 84-107
- [16] 刘志海. 我国废玻璃回收利用综述[J]. 玻璃, 2018, 45 (10): 1-8.  
LIU Zhihai. Overview of waste glass recycling in China[J]. Glass, 2018, 45 (10): 1-8
- [17] 王立坤, 李超. 浮法玻璃企业 CO<sub>2</sub> 排放量的测算与控制[J]. 中国建材, 2014(7): 105-108.  
WANG Likun, LI Chao. Calculation and control of CO<sub>2</sub> emission from float glass enterprises[J]. China Building Materials, 2014 (7): 105-108
- [18] 朱海峰. 建筑废弃混凝土资源化利用现状与应用探讨[J]. 建设科技, 2018(8): 141-142.  
ZHU Haifeng. Discussion on resource utilization status and application of building waste concrete [J]. Construction Technology, 2018 (8): 141-142
- [19] 贡小雷, 张玉坤. 物尽其用——废旧建筑材料利用的低碳发展之路[J]. 天津大学学报(社会科学版), 2011 (2): 138-144.  
GONG Xiaolei, ZHANG Yukun. Making the best of everything :A low-carbon development road for the utilization of waste building materials [J]. Journal of Tianjin University (Social Science Edition), 2011 (2): 138-144
- [20] 刘宏强, 付建勋, 刘思雨, 等. 钢铁生产过程二氧化碳排放计算方法与实践[J]. 钢铁, 2016(4): 74-82.  
LIU Hongqiang, FU Jianxun, LIU Siyu, et al. Calculation method and practice of carbon dioxide emission in iron and steel production process [J]. Iron and Steel, 2016 (4): 74-82
- [21] 贡小雷, 张玉坤. 物尽其用——废旧建筑材料利用的低碳发展之路[J]. 天津大学学报(社会科学版), 2011, 13(2): 138-144.  
GONG Xiaolei, ZHANG Yukun. Making the best of everything: A low-carbon development road for the utilization of waste building materials [J]. Journal of Tianjin University (Social Science Edition), 2011, 13 (2): 138-144.

(编辑 沈 波)

(上接第 691 页)

- [19] WIERZBICKI T, XUE L. On the effect of the third invariant of the stress deviator on ductile fracture[R]. Cambridge: MIT Impact and Crashworthiness Lab, 2005.
- [20] XUE L. Damage accumulation and fracture initiation in uncracked ductile solids under triaxial loading-Part I: Pressure sensitivity and Lode dependence[R]. Cambridge: MIT Impact and Crashworthiness Lab, 2005.
- [21] HL Yu, DY Jeong. Application of a stress triaxiality dependent fracture criterion in the finite element analysis of unnotched Charpy specimens [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2010, 54(1): 54-62.
- [22] XU Fei, CHEN Ju, TAK-MING Chan. Numerical investigation on compressive performance of CFST columns with encased built-up lattice-angles[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 137: 242-253.
- [23] 沈聚敏, 王传志, 江见鲸. 钢筋混凝土有限元与板壳极限分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.  
SHEN Jumin, WANG Chuanzhi, JIANG Jianjing. Reinforced concrete finite element and limit analysis of slab shell[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
- [24] CEB-FIP Model Code for Concrete Structure MC1990 [M]. Lausame: Comite Euro-International du Beton (CEB), 1990.
- [25] 刘威. 钢管混凝土局部受压时的工作机理研究[D]. 福州: 福州大学, 2005.  
LIU Wei. Research on mechanism of concrete-filled steel tubes subjected to local compression[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2005.
- [26] CECS. 特殊钢管混凝土构件设计规程: CECS 408-2015 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2015.  
CECS. Design specification for specified concrete filled steel tubular members: CECS 408-2015 [S]. Beijing: China Planning Press, 2015.
- [27] ANSI/AISC. Specification for Structural Steel Buildings: ANSI/AISC 360-16 [S]. Chicago: American Institute of Steel Construction, 2016.
- [28] ECS. Eurocode4 design of composite steel and concrete structures [S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2004.
- [29] 哈尔滨工业大学. 钢管混凝土结构技术规范: GB 50936-2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.  
Harbin Institute of Technology. Technical code for concrete-filled steel tubular structures: GB 50936-2014 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.

(编辑 沈 波)