

装配式建筑低碳技术研究

二〇二四年十月

北京精瑞人居发展基金会

目 录

第一章 概述.....	1
1.1 相关定义.....	1
1.2 装配式建筑绿色低碳发展现状.....	2
1.3 装配式建筑绿色低碳政策及研究现状.....	15
1.4 建筑碳排放计算标准、方法及全寿命期建筑碳排放.....	33
第二章 基本要求.....	42
2.1 建筑专业.....	42
2.2 结构专业.....	43
2.3 机电专业.....	44
第三章 建筑专业.....	47
3.1 建筑设计原则.....	47
3.2 非砌筑围护墙和内隔墙.....	48
3.3 装配式装修.....	52
3.4 整体厨卫.....	60
3.5 低碳建材.....	62
3.6 结论及建议.....	69
第四章 结构专业.....	71
4.1 标准化设计.....	71
4.2 结构材料低碳选型.....	79
4.3 预制墙板碳排放研究.....	85
4.4 预制楼板碳排放研究.....	106
4.5 结论及建议.....	127
第五章 给排水专业.....	129
5.1 标准化设计.....	129
5.2 集成设计.....	132
5.3 管线分离.....	134
5.4 可再生能源.....	137

5.5 结论及建议.....	138
第六章 暖通专业.....	139
6.1 标准化设计.....	139
6.2 集成设计及产品.....	143
6.3 管线分离.....	148
6.4 可再生能源.....	156
6.5 结论及建议.....	157
第七章 电气专业.....	158
7.1 标准化设计.....	158
7.2 管线分离.....	160
7.3 集成设计与产品.....	162
7.4 可再生能源.....	163
7.5 结论及建议.....	165
7.6 低碳设计计算.....	165
参考文献.....	167
附 录.....	175
附录A 预制墙板工程量计算.....	175
附录B 预制楼板工程量计算.....	182

第一章 概述

1.1 相关定义

1.1.1 装配式建筑

由预制部品部件在工地装配而成的建筑。

装配式建筑主要包括预制装配式混凝土结构、钢结构、木结构、竹结构建筑等。

装配式混凝土建筑是指建筑结构系统由混凝土部件（预制构件）构成的装配式建筑；装配式钢结构建筑是指建筑结构系统由钢部（构）件构成的装配式建筑；装配式木结构建筑是指建筑结构系统由木部（构）件构成的装配式建筑；装配式竹结构建筑是指建筑的结构系统由竹结构承重构件组成的装配式建筑。



图1.1.1-1 装配式混凝土结构



图1.1.1-2 装配式钢结构



图1.1.1-3 装配式木结构



图1.1.1-4 装配式竹结构

1.1.2 低碳建筑

指采用综合建筑设计方法，在建筑材料与设备制造、施工建造和建筑物使用全寿命期内，减少煤炭、石油、天然气等化石能源的使用，提高能效，充分利用

建筑本身和场地产生的可再生能源，实现低碳排放的建筑。

1.1.3 低碳设计

以降低碳排放为目标，通过被动式设计、使用高效设备设施和低碳建材、利用可再生能源等措施，实现碳排放性能优化的建筑设计。

1.2 装配式建筑绿色低碳发展现状

1.2.1 国外装配式建筑绿色低碳发展现状

1. 装配式建筑发展

西方发达国家开展工业化建造之路较为领先。在众多典型国家中，日本是最早实现将住宅在工厂中批量生产的国家；美国对于其装配式住宅提出了舒适性、多样性和个性化等要求；法国开创了工业化建筑的先河，且众多工业化程度较高的国家均已研发其装配式建筑专用体系。国外典型国家装配式建筑应用情况如表1所示。

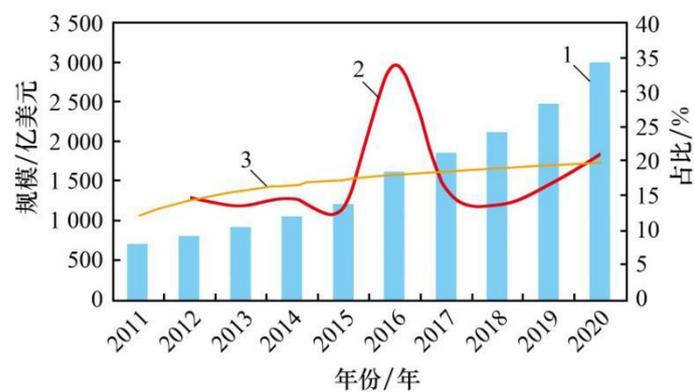
表 1.2.1 国外装配式建筑应用情况

典型国家	装配式占比/%	主要成就	建筑体系
法国	85	最早推行工业化建筑的国家之一	预应力装配框架体系
美国	90	装配式住宅应用最广泛的国家	以装配式混凝土结构装配式钢结构体系为主
日本	90	在工厂中批量生产的国家	多层装配式集合住宅体系
丹麦	80	最早实现参数化、模数化的国家	设计产品目录的住宅通用体系
瑞典	80	最早应用装配式住宅的国家之一	通用部件的住宅通用体系

2011—2020 年全球装配式建筑市场规模如图 1 所示。由图 1 可知：截止到

2019 年，全球范围内装配式建筑市场规模已达到 2 468 亿美元，同期增长速度保持在 15% 以上（同期增长率 = (结束值/起始值) / 期间数 × 100%），预计 2020 年全球装配式建筑市场规模将达到 2987 亿美元，其增长率达到 21.3%。

2019 年全球各地区装配式建筑市场占比如图 2 所示。截止到 2019 年，亚洲地区装配式建筑市场占全球市场 54.85%，欧洲市场占 25.8%。对于我国装配式建筑发展而言，虽然起步相对较晚，但是在国家政策支持下，自 2013 年以来，逐步进入快速发展阶段。截止到 2019 年，中国装配式建筑市场规模已经攀升到全球比重 42.75%。



1—市场规模； 2—同期复合增长率； 3—对数（同期复合增长率）

图 1.2.1-1 2011—2020 年全球装配式建筑市场规模

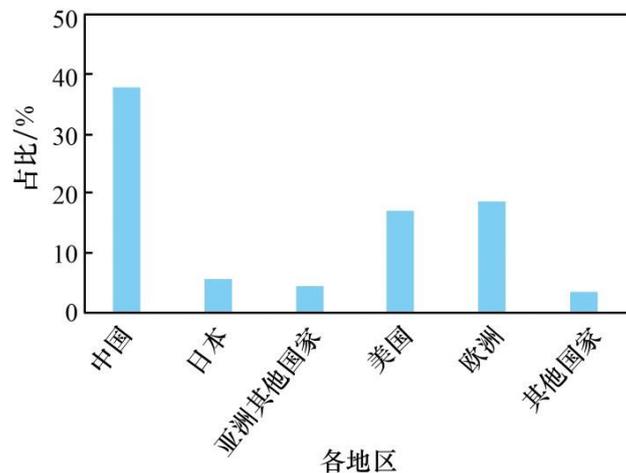


图 1.2.1-2 2019 年全球各地区装配式建筑市场占比

(1) 美国装配式建筑

美国的装配式建筑起源于 17 世纪的移民浪潮，当时采用的木构架拼装房屋就是一种装配式建筑。在经历了二十世纪 40 年代二战后移民高潮、50 年代塔式起重机的出现、60 年代专业工人短缺、70 年代的能源危机以及法律体系的不断

健全后，美国的装配式建造体系更加标准化与规范化，且形式更加多样。

美国国会在 1976 年通过了国家工业化住宅建造安全法案。同年，美国联邦政府住房和城市发展部 (HUD) 颁布了美国工业化住宅建设和安全标准 (简称为 HUD 标准)，对设计、施工、强度和持久性、耐火等方面进行了规范。

随后出台了联邦工业化住宅安装标准，用于审核所有生产商的安装手册和州立安装标准。美国低收入人群是装配式住宅的主要购买者。在各地城市郊区的低收入家庭中，购买装配式住宅高达 35%；在农村地区有 63% 的家庭购买装配式住宅。这是因为对于中、低收入家庭，通过租用土地而自己拥有一套装配式住宅，与租住一套公寓相比，前者是更为经济的选择。

美国的装配式建筑中，大城市住宅的结构类型以混凝土装配式和钢结构装配式住宅为主，在小城镇多以轻钢结构、木结构住宅体系为主 (其中木结构占比达 80% 以上，其余为钢结构)，这主要与美国人的居住习惯相关。为了摆脱装配式住宅“低等”“廉价”形象，HUD 与全国装配建筑界一方面在质量和美观上下功夫，使之符合房地产的普通标准，逐渐摆脱传统的火柴盒式外观，与传统建造的住宅外观及特点非常相似；另一方面大力发展中高端装配式住宅产品，低端活动房屋从 1998 年总建量 23% 下降至 2016 年的 0.15%，而中高端装配式住宅产量则由 1998 年的 0.5% 增加到 2016 年的 85%。

目前，美国装配式建筑构件和部品的标准化、系列化、专业化、商品化、社会化程度较高，具有结构性能好、通用性高且易于机械化生产的特点。美国的装配式建筑经历了从追求数量到追求质量、从传统行业中低档品种到产业化中高档品种的阶段转变，并且融入新环保绿色理念的技术正在市场需求中加快成长，以最大限度地节能、节地、节水、节材，保护环境和减少污染。



图 1.2.1-3 近年美国装配式建筑市场规模

(2) 日本装配式建筑

日本早在 1963 年便成立了预制建筑协会，于 1968 年提出装配式住宅的概念，并在 1969 年制定了《推动住宅产业标准化五年计划》。此后每五年都会颁布住宅建设五年计划，每一个五年计划都有明确的促进住宅产业发展和性能品质提高方面的政策和措施，从而推动了住宅标准化建设。二十世纪 70 年代，日本又通过建立优良住宅部品认定制度、住宅性能认定制度以及住宅技术方案竞赛制度等一系列制度体系来推动住宅产业化。预制建筑协会还出版了各种工业化模式的详细设计规范，先后建立 PC 工法焊接技术资格认证制度、预制装配住宅装潢设计师资格认证制度、PC 构件质量认证制度、PC 结构审查制度等，先后编写了《预制建筑技术集成》丛书，包括剪力墙预制混凝土 (W-PC)、剪力墙式框架预制钢筋混凝土 (WR-PC) 及现浇同等型框架预制钢筋混凝土 (R-PC) 等。

从建筑结构类型来看，2017 年日本已开工建筑面积中，木结构占比 41.70%，钢结构占比 37.71%，混凝土结构占比 18.02%，钢混结构占 1.84%，其他类型结构占 0.73%，钢结构占比仅次于木结构建筑。由于日本属于地震频发的国家，且森林资源较为丰富，钢结构虽有良好的抗震性能，但与木结构相比占比仍低一些。自上世纪 80 年代以来，已开工建筑面积中钢混结构占比下降了 9%，而钢结构和混凝土结构的占比较为稳定，其中钢结构建筑开工面积占比稳定在 30% 以上。

日本装配式建筑追求中高层住宅配件化的生产体系，以满足日本人口比较密集的住宅市场需求，同时通过立法来保证预制构件的质量，在装配式住宅方面制定了一系列的方政策和标准，形成了统一的模数标准，使得日本装配式建筑的

发展逐渐标准、规范且日趋多样化。



图 1.2.1-4 近年日本建筑结构呈稳定态势

(3) 欧洲装配式建筑

欧洲各个国家装配式建筑的发展历程及结构形式有所不同，但建筑工业化大发展均源于二战后。社会环境上，一方面战后欧洲经济发展迅速，人口向城市集中，但战争损坏大量房屋，房荒严重；另一方面劳动力不足，传统技工紧缺，且传统的建筑施工效率较低，不能适应当时所面临的房屋增长的迫切需要。技术条件上，欧洲的工业基础雄厚，战后恢复和发展较为迅速，且充裕的水泥、钢材和施工机械等，为建筑工业化的推行提供了更为有利的条件。

法国 1891 年就已推行装配式混凝土建筑，迄今已有 130 年的历史。法国建筑工业化以混凝土体系为主，钢、木结构体系为辅，多采用框架或板柱体系，并逐步向大跨度发展。近年来，法国建筑工业化呈现出三方面特点，一是焊接连接等干法作业流行；二是结构构件与设备、装修工程分开，减少预埋，使得生产和施工质量提高；三是主要采用预应力混凝土装配式框架结构体系，装配率达到 80%，脚手架用量减少 50%，节能可达到 70%。

德国的装配式住宅主要采用叠合板、混凝土、剪力墙结构体系，剪力墙板、梁、柱、楼板、内隔墙板、外挂板、阳台板等构件，采用装配式混凝土结构，耐久性较好。德国是世界上建筑能耗降低幅度发展最快的国家，直至近几年提出零能耗的被动式建筑。从大幅度的节能到被动式建筑，德国都采取了装配式建筑来推动实施，这就需要装配式住宅与节能标准之间的相互充分融合。

瑞典开发了大型混凝土预制板的工业化体系，大力发展以通用部件为基础的

通用体系，瑞典的住宅预制构件达到了95%之多。瑞典的建筑工业化特点，一是在完善标准体系基础上发展通用部件，二是模数协调形成“瑞典工业标准”(SIS)，实现了部品尺寸、对接尺寸的标准化与系列化。

丹麦则将模数法制化应用于装配式住宅，国际标准化组织 ISO 模数协调标准即以丹麦的标准为蓝本编制。丹麦推行建筑工业化的路径实际上是以产品目录设计为标准的体系，使部件达到标准化，然后在此基础上实现多元化的需求。

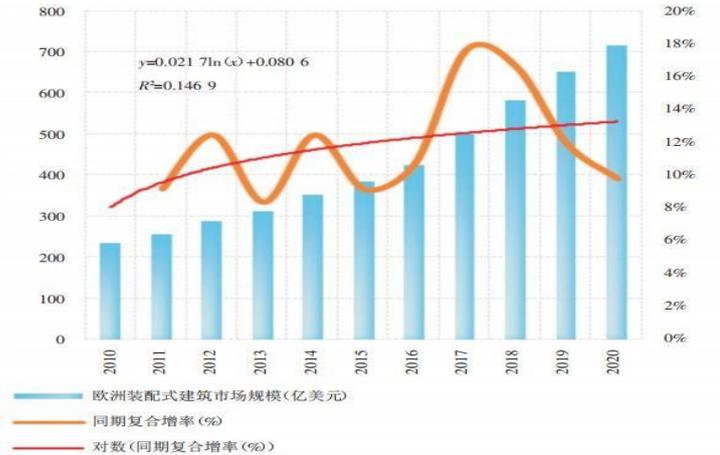


图 1.2.1-5 近年欧洲装配式建筑市场规模

(4) 新加坡装配式建筑

新加坡经历过三次建筑工业化尝试，1963 年引进法国大板预制体系，但由于本地承包商缺乏技术与管理经验，宣告失败；1971 年引进大板预制体系，同时引入合资企业，设立构件厂，但由于施工管理方法不当，并遇上石油危机，再一次宣告失败；1981 年，同时引进澳洲、法国、日本等多种体系，并率先在保障房大规模推广，最后发展成具有新加坡特色的预制装配整体式结构。

新加坡政府在发展装配式建筑方面作用显著，装配式施工技术强制应用于组屋建设，其开发出 15 层到 30 层的单元化装配式住宅（塔式或板式混凝土多高层建筑）占全国总住宅数量的 80%以上，并且通过平面的布局、标准化以及以设计为核心的工业化，使其装配率达到了 70%。

2. 绿色低碳发展

(1) 美国

美国建筑业低碳法律法规的关注重点为建筑节能。1975 年《能源政策和节能法案》要求联邦政府实施有效的节能计划，开始了美国建筑节能的道路；1977

年《新建筑物结构中的节能法规》规定了新建建筑的强制节能标准；1978年出台的《节能政策法》建立了关于住宅建筑节能程序体系；2007年的《节能建筑认证法案》和《能源独立和安全法》分别规定了新型节能技术的应用规范和提高建筑产业的能源利用率的要求。

美国强制性的节能标准主要由两部分组成。国际规范委员会制定的《国际节能规范》(IECC)适用于低层居住建筑的节能设计；美国供暖制冷和空调学会(ASHRAE)颁布的《除低层居住建筑外的建筑节能规范》适用于所有公共建筑及3层以上的居住建筑。各州可以直接采用以上两个标准，也可以在标准的基础上提高要求编制二级标准(如加利福尼亚州、纽约州等)。美国能源部每年为标准提供经费保障，用于标准的修订与执行，致力于在2030年时，实现零能耗建筑在技术与经济上的可行性。此外，LEED认证体系由美国绿色建筑委员会(USGBC)于1998年建立，它是一个第三方认证、适用于多种建筑、可量化评估的绿色建筑评估体系。

LEED认证体系分为公共建筑的设计与施工、建筑运营与维护、住宅设计与施工、室内装修设计与施工、社区开发五个分册，每个分册又根据不同建筑用途分为若干个独立的评估系统，其覆盖不同规模建设项目的不同生命周期，适用面广。LEED从选址与交通、可持续场地、节水、能源与大气、材料与资源、室内环境质量、创新性、材料地域、整合过程九个方面评价建筑物，最后根据建筑物总得分的多少确定绿色建筑等级。美国建立多元化的补贴体系。一方面对建筑节能活动与低碳建筑投资直接进行补贴，譬如实施低收入家庭节能计划，在一定额度内免费对低收入家庭进行节能改造；通过对容积率的奖励，鼓励开发商新建绿色住宅。另一方面，对相关费用进行减免，譬如对新建节能建筑给予税收优惠。在IECC推出不久后，政策即规定：如果新建建筑的节能标准高于IECC标准的30% (50%)以上，每套住房可以减免1000美元 (2000美元) 税收；鼓励银行为居民购买“能源之星”认证住宅提供优惠贷款。“能源之星”是一项由美国环保署主导的自愿性能源节约计划，最早应用于认证电子产品的能耗与碳排放，1996年评价范围牵头扩展到了建筑。“能源之星”的评价对象主要为商业建筑和新建住宅建筑，由第三方评价机构评估自愿参与业主的建筑物能源使用状况，评价范围包括建材、照明、取暖和制冷、节能窗等。“能源之星”还提供了网络

评估工具，帮助既有建筑使用者选择节能改造方案，推动既有建筑的节能改造工程。1999年颁布的13123号行政命令《加强节能管理创建绿色政府》规定联邦政府必须采购具有“能源之星”标志的建筑、电器等产品；2009年颁布的13514号行政命令《联邦政府对环境、能源和经济方面的导向》对联邦政府管理和使用的建筑提出强制性节能要求：自2020年起，所有新建建筑的设计准则均要以趋于或达到零能耗为目的而进行。

(2) 日本

《建筑基准法》是日本最基本的建筑法律，其中“节能标准规程”一章规定了建筑施工开始至拆除阶段全生命周期的节能要求。《节约能源法》是日本在节能方面的专门法规，在2006年第六次修订版中提出的“节能措施申报义务”规定建筑商新建或扩建2000平方米以上的建筑，必须向当地管理部门提交节能措施报告书；2008年第七次修订版针对碳减排，要求建设单位增加新技术节能设备维护保养；2013年第八次修订版要求建筑商必须提交每年提升节能效率1%或以上定期报告与中长期计划。其他法律譬如《住宅节省能源基准》对住宅能源消耗标准提出了要求、《建筑废弃物再资源化法》对建筑物废弃物的回收作了严格的规定，《低碳城市促进法》详细定义了低碳建筑物，规定了低碳建筑物的认证条件及优惠措施。日本的低碳建筑评价标准较多，其中最为著名的是日本可持续建筑协会(JSBC)颁布的“建筑环境性能综合评估系统(CASBEE)”，该系统的关注重点在于“环境效率”，将评估体系分为建筑环境与质量(Q)与建筑环境负荷的减少(L)，L类指标中的自然能源利用、建筑热负荷、材料循环利用等均是对于低碳发展的要求。

CASBEE为一个强制与自愿结合的评价标准，部分城市面积达到2000平方米以上的建筑物必须进行CASBEE认证。2012年，JSBC发布了LCCM住宅认证，从全生命周期的角度评价建筑二氧化碳排放总量，其评价重点不仅在于建筑物运营阶段的节能，还需考虑建材生产、建筑建造、建筑拆除。2014年，日本开始实施了低碳建筑物认证制度，认证对象为城市化区域新建的建筑物，并配套制定了低碳建筑认定标准，从围护结构热工性能、一次能源消耗量、低碳措施三个方面，以定性和定量相结合的方式对建筑物的低碳性能进行了规定。此外，日本还有绿色建材认证制度、环境共生住宅认证基准、住宅节能标识制度等，他

们从不同的方面对建筑物的环境性能进行评价，构成了日本建筑业低碳的评价体系。不同方式的补贴制度构成了日本建筑业低碳发展体系。

日本具有多元化的低碳建筑财政补助体系，一是颁布多种补助事业制度，譬如“住宅和建筑减排先导事业”对采用先进低碳技术的建筑结构施工费和效果核证费给予补助，“可持续建筑先导事业”对有助于低碳、节能等技术推广的建筑进行补助，二是实施住宅生态积分制度，对符合标准的新建或改造低碳节能住宅奖励积分，积分可以用以购买商品或补贴建造费用。在优惠政策方面，日本从贷款利率、税金、容积率三个方面给予优惠，譬如对低碳住宅和 CASBEE 认证项目提供贷款利率优惠，住房贷款利率可下调一定幅度；对节能改造项目提供税收优惠，包括所得税、住宅登记税；对非住宅类低碳项目提供容积率优惠，对一些低碳设备所占的建筑面积，在容积率计算时不计入总面积。为推广低碳建筑，日本通过推出表彰相应单位，增加低碳的认知度，其中具有代表性的计划有“领跑者”能效计划和表彰制度。“领跑者”计划旨在找到市场上最优能效的产品，然后以此为规范树立标准，并要求所有同类产品在一定时间内达到该水准，对于不能达到此标准的企业给予一定的惩罚。“领跑者”计划覆盖多个行业，包括居住建筑节能、家电、建材行业，推动着日本建筑低碳化的发展。表彰制度旨在鼓励住宅开发商和施工单位建造可持续建筑，表彰对象为对可持续建筑做出贡献的开发商、建筑设计单位、工程施工企业等，通过表彰奖励的方式树立可持续项目标杆，宣传和推广可持续建筑。

(3) 德国

德国的低碳建筑法律体系建设开展较早，1976 年便颁布了第一部节能法规《建筑节能法》，首次以法律的形式要求新建建筑必须采取节能措施，要求建筑开发商出具建筑物的能源消耗证明。在该法律框架下，衍生出了一系列建筑节能条例，譬如《建筑保温条例》《供暖设备条例》，这些法律规定了不同领域的建筑节能要求，促进建筑碳排放的减少。2002 年，上述两个条例合二为一成为新的《建筑节能条例》，该条例制定了建筑材料生产的能耗标准，规范了供暖设备的节能技术指标和建筑材料的保暖性能，2007 年版《建筑节能条例》推出了可操作程度高的建筑能耗证书体系，目前《建筑节能条例》已更新至 2016 版，已经成为德国建筑低碳化最为重要和适用的一份文件，其适用于新建建筑、既有建筑改

造、建筑设备等，规定了建筑的节能标准。在标准发展过程中，其对于指标的要求越来越严格，对于指标的选取也越来越广，早期的标准主要控制传热系数这一单一指标，逐渐增加到对暖通空调、照明、热水、温室气体排放、建筑材料生产等多指标的要求。2007年后，《建筑节能条例》对建筑的一次性能源消耗量做出了要求，用于更准确地衡量建筑物的能源消耗，有利于统筹能源生产与使用，控制建筑的温室气体排放。德国可持续建筑委员会于2006年推出了德国可持续建筑评价标准（DGNB），目前最新版为2018年版，和LEED类似，DGNB也是由非政府性组织推出的自愿性标准。该标准着眼于建筑全生命周期，评价对象不仅覆盖住宅建筑、工业建筑、办公建筑等多种建筑业态，还包括城市街区、办公商业区、工业区等，从经济、生态、功能、技术、过程、选址六个评价指标出发，最后根据建筑物总得分的多少确定绿色建筑等级，将可持续发展、减少能源消耗和温室气体排放的理念融入建筑，推动建筑行业节能减排、减少污染、降低成本，实现建筑行业的可持续发展。

德国的成本补贴主要通过德国复兴银行资助与优惠的形式来体现。在资助政策方面，第一，修改住宅租金条例，若房主在可持续住宅建造前期就为节能环保投入资金，那么房主可以此为依据提高年租金；第二，对私人新建的可持续住宅提供补助，当私人新建的住宅达到可持续住宅的设计建造标准时，便可得到住宅总投资额一定比例的补助；第三，对私人住宅进行的节能改造提供补助，即对达到可持续住宅标准的节能减排措施提供总投资额一定比例的补助；第四，对采用可持续能源的住宅提供补助，对采用生物能装置、地热装置、太阳能集热器等可持续能源的建筑提供一定比例的补助。德国的间接补贴政策主要通过德国复兴银行贷款优惠的形式来实现，向具备“节能建筑”资格的新建住宅项目、可持续住宅改造项目、利用可再生能源的住宅项目等符合条件的建设项目提供低息贷款。在德国建筑业发展过程中，产生了具有代表性的强制制度，其中最具有代表性的有建筑能源证书制度和既有建筑改造制度。建筑能源证书制度针对建筑物能耗和碳排放开展的低碳标准监管，能源证书上载明能源需求、能源消耗及改善能效的建议，强制规定新建建筑审批、既有建筑改造、建筑物买卖与出租等过程必须使用出具“建筑能耗证书”，以确保建筑物的节能减排性能，同时引导公众的对于节能减排的积极性。

随着节能标准的提高，越来越多的老建筑不符合新的标准，因此德国建立了鼓励对老建筑进行节能改造的既有建筑改造制度，对建筑物外墙、屋顶、窗户、设备等部件的改造制定标准，对不符合标准的设备强制淘汰，通过设立基金与投入低息贷款用于既有建筑节能改造，推进建筑节能，减少环境污染。

1.2.2 我国装配式建筑绿色低碳发展现状

1. 装配式建筑发展

我国的装配式建筑起步于二十世纪五十年代，经历了开创、发展、低潮及恢复再发展四个阶段。20世纪50年代，第一个五年计划中提出借鉴前苏联、东欧国家经验，推行标准化、工厂化、装配式施工的房屋建筑建造方式，并于1955年在北京东郊百子湾兴建北京第一建筑构件厂；20世纪60-80年代，各类建筑标准不高、形式单一，容易采用标准化方式建造，且房屋建筑抗震性能要求不高，总体建设量不大，预制构件厂供应基本可满足需求，全国多地形成了设计、制作和施工安装一体化的装配式混凝土工业化建筑模式，装配式混凝土建筑和采用预制空心楼板的砌体建筑成为两种最主要的建筑体系，应用普及率达70%以上；20世纪90年代，大板住宅建筑等出现渗漏、隔音差、保温差等使用性能方面的问题，我国建筑建设规模急剧增长，建筑设计出现个性化、多样化、复杂化等特点，房屋建筑抗震性能要求提高，装配式建筑发展停滞。与此同时，各类模板、脚手架的应用普及，商混普及，现浇施工技术大发展，现浇结构更适应这一时期的国情；21世纪至今，随着我国经济发展模式逐步从投资拉动向质量发展转变，对绿色建筑、生态环境、建筑能耗等要求不断提高，同时，随着劳动力成本的不断上升，预制构件加工精度与质量、装配式建筑施工技术和管理水平的提高以及国家政策因素的推动，装配式建筑慢慢恢复、发展、创新，逐步形成技术体系和技术标准，开展推广应用。

根据住房和城乡建设部统计，2015年全国新建装配式建筑面积为0.73亿平方米，占当年新建建筑面积的比例为4.7%。2016年开始我国建筑工业化步入快速发展期，进入“十三五”以来，国务院发布《关于进一步加强城市规划建设管理工作的若干意见》后，装配式建筑市场规模呈显著增长态势。2016年全国新建装配式建筑面积为1.14亿平方米，同比增长56%，占新建建筑面积的比例为6.8%。

2017 年我国装配式建筑面积约 1.5 亿平方米，同比增长 32%，新建装配式建筑面积占本年新开工房屋面积比例已达到 8.4%。“十三五”期间，累计建成装配式建筑面积达 16 亿平方米，年均增长率为 54%。其中，2021 年新开工装配式建筑占新建建筑的比例达到了 20.5%。2020 年全国新开工钢结构建筑 1.9 亿平方米，较 2019 年增长 46%，占新开工装配式建筑的比例为 30.2%。其中，新开工的钢结构住宅约 1200 万平方米，较 2019 年增长了 33%。



图 1.2.2 近年我国新建装配式建筑面积变化趋势

2. 绿色低碳发展

中国于 2016 年 9 月 3 日加入《巴黎气候变化协定》，成为第 23 个完成批准协定的缔约方。不同国家的发展阶段不同，低碳城市建设的主要内容也会存在一定差异。一般来说，在发达国家，交通和建设领域是主要排放源，这两项约占总排放量的 70%-80%，而生活和工业生产的碳排放约占 20%。相比发达国家，中国正处于工业化和城镇化快速发展阶段，能源和工业排放是主要碳排放源，其次是建设和交通领域。在长期的工业化和城镇化进程中，中国的资源供需矛盾、生态环境破坏等问题逐渐凸显。由于中国的工业化和城镇化重点在城市，相对于以农业发展为主的农村，碳排放的管控主要在于城市。

近几年，我国开始对低碳建筑进行了探索与实践。2008 年，国家建设部和世界自然基金会和上海和保定两市率先开展了低碳城市的试点工作。目前，低碳试点城市已经扩展到全国 42 个城市，各城市按照国家发改委要求编制低碳发展规划，制定支持政策，建立管理体系，探索适合本地区的发展模式，积累了丰富的经验，也走了不少弯路，这些都是中国低碳城市基本支撑体系的初步探索与实践。例如上海世博会建筑群，苏州绿色建筑科技馆，深圳光明示范区等。2008 年，国家住房和城乡建设部、深圳市政府签署了《关于建设光明新区绿色建筑示范区合

作框架协议》，光明新区被列为国家级“绿色建筑示范区”。作为太阳能及可再生能源领域最全面的示范应用基地，全国首批可再生能源建筑应用示范工程，与普通的大型工业园相比，光明新区拓日工业园的“低碳元素”引人注目——建筑物安装了非晶硅光伏电池幕墙、单晶硅光伏电站、新型平板式太阳能热水器、新型风力发电系统。据测算，其光伏和光热应用年发电量达 49.64 万千瓦时，产生热量 1839600 兆焦，节约 231 吨标准煤，减少温室气体 689 吨。新区的许多市政道路、住宅、企业厂房等重点建设项目都按照“绿色新城”建设指标进行规划建设。这些项目在不同程度上都具备“绿色建筑”的标准和特征，体现了“四节二环保”（节地、节能、节水、节电，室内环保及室外环保）的绿色建筑理念，使用绿色环保和再循环材料建设，采用绿色建材一次性装修，采用先进的技术和环保材料控制环境噪声和光热辐射。

以上试点城市虽已取得了积极的成效，但仍然存在着多方面问题。主要包括以下几个方面：

第一，中国低碳城市建设缺乏顶层的制度设计和整体规划。中国虽然是低碳城市建设的先行者，但总体上仍然处于原创性政策探索和创新阶段。尚没有在中央层面形成明确的低碳城市建设制度和法律保障，也未形成一套完整的评价体系和考核机制。

第二，低碳城市建设存在发展领域不平衡不充分问题。低碳城市建设是一项长期、系统的工程，“双碳”发展的本质是要实现社会经济发展与温室气体排放脱钩，并不是降低发展而是要转变发展方式，实现高质量发展。但一些城市往往只关注一个或者少数几个方面，如盲目发展新兴产业，忽视传统工业的提质升级，甚至忽视了能源链、粮食链和产业链、供应链安全，结果是只谈低碳，放弃了城市发展的其他目标。同时，不同区域和城市之间的低碳城市建设容易各自为政，违背了区域和城市之间的关联性。

第三，低碳发展投入激励不足，公众和社会力量的参与度较低。目前，低碳城市建设主要靠政府的财政投入为主。社会资本的参与意愿不够强烈，缺少市场力量的推动。另外，一般公众对低碳城市的关注度较少，缺乏对低碳城市建设的热情和认知。

1.3 装配式建筑绿色低碳政策及研究现状

1.3.1 国家政策

近年来，由于装配式建筑能有效节省资源、不太受环境制约且操作模式机械化、缩短工期、可减少建筑垃圾和污染排放等，受到了国家政策的大力支持。2016-2022年期间，中共中央、国务院、国家住房和城乡建设部、科技部、工信部等多部门都陆续印发了支持装配式建筑行业的发展政策和指导意见。其中，2016年2月中共中央、国务院出台的《关于进一步加强城市规划建设管理工作的若干意见》中提出要大力推广装配式建筑，制定装配式建筑设计、施工和验收规范，鼓励建筑企业装配式施工，加大政策支持力度，力争用10年左右时间，使装配式建筑占新建建筑的比例达到30%。2017年3月由住房和城乡建设部提出的《“十三五”装配式建筑行动方案》指出，到2020年，全国装配式建筑占新建建筑的比例达到15%以上，其中重点推进地区达到20%以上，积极推进地区达到15%以上，鼓励推进地区达到10%以上。2018年3月住房和城乡建设部建筑节能与科技司制定的《住房和城乡建设部建筑节能与科技司2018年工作要点》提出加强装配式建筑产业基地建设，培育专业化企业，提高全产业链、建筑工程各环节装配化能力，整体提升装配式建筑产业发展水平。2021年6月住房和城乡建设部发布的《关于加强县城绿色低碳建设的意见》中指出要发展装配式钢结构等新型建造方式，全面推行绿色施工。2022年5月由中共中央、国务院出台的《关于推进以县城为重要载体的城镇化建设的意见》提出要大力发展绿色建筑，推广装配式建筑、节能门窗、绿色建材、绿色照明，全面推行绿色施工。近年我国装配式建筑相关政策汇总如下：

表 1.3.1 近年中国装配式建筑及绿色低碳相关政策汇总

颁布时间	颁布主体	政策名称	政策内容
2016年2月	中共中央、国务院	《关于进一步加强城市规划建设管理工作的若	大力推广装配式建筑，减少建筑垃圾和扬尘污染，缩短建造工期，提升工程质量。制定装配式建筑设计、施工和验收规范。完善部品部件标准，实现建筑部

颁布时间	颁布主体	政策名称	政策内容
2016年7月	国务院	《“十三五”国家科技创新规划》	品部件工厂化生产。鼓励建筑企业装配式施工，现场装配。建设国家级装配式建筑生产基地。加大政策支持力度，力争用10年左右的时间，使装配式建筑占新建建筑比例达到30% 加强装配式建筑设计理论、技术体系和施工方法研究。研究装配式混凝土结构、钢结构、木结构和混合结构技术体系、关键技术和通用化、标准化、模数化部品部件。研究装配式装修集成技术。构件装配式建筑的设计、施工、建造和检测评价技术及标准体系，促进绿色建筑及装配式建筑实现规模化、高效益和可持续发展。
2016年9月	国务院	《关于大力发展装配式建筑的指导意见》	要求不断提高装配式建筑在新建建筑中的比例，以京津冀、长三角、珠三角三大城市群为重点推进地区，常住人口超过300万的其他城市为积极推进地区，其余城市为鼓励推进地区，因地制宜发展装配式混凝土结构、钢结构和现代木结构等装配式建筑。
2017年3月	住房和城乡建设部	《“十三五”装配式建筑行动方案》	到2020年，全国装配式建筑占新建建筑的比例达到15%以上，其中重点推进地区达到20%以上，积极推进地区达到15%以上，鼓励推进地区达到10%以上。
2018年1月	住房和城乡建设部	《装配式建筑评价标准》	住建部日前印发通知，批准《装配式建筑评价标准》，自2018年2月1日起

颁布时间	颁布主体	政策名称	政策内容
月		准》	实施。原国家标准《工业化建筑评价标准》同时废止。
2018年3月	住房和城乡建设部建筑节能与科技司	《住房和城乡建设部建筑节能与科技司2018年工作要点》	加强装配式建筑产业基地建设，培育专业化企业，提高全产业链、建筑工程各环节装配化能力，整体提升装配式建筑产业发展水平。评估第一批装配式建筑示范城市和产业基地。评定第二批装配式建筑示范城市和产业基地。
2019年2月	住房和城乡建设部	《关于开展农村住房建设试点工作的通知》	到2020年，各省（区、市）试点县（市、区、旗）建成一批可复制可推广的示范农房，形成可复制可推广的农房涉及和建设管理经验。探索装配式建筑、被动式阳光房等建筑应用技术，注重绿色节能技术实施与农房的一体化设计。
2020年2月	人力资源和社会保障部、市场监管总局、统计局	《关于发布智能制造工程技术人员等职业信息的通知》	明确装配式建筑施工员定义及装配式建筑施工员主要工作任务。
2020年2月	国家卫生健康委、住房和城乡建设部	《新型冠状病毒肺炎应急救治设施设计导则（试行）》	结构形式选择应当因地制宜，方便快捷加工、运输、安装，优先考虑轻型钢结构等装配式建筑，轻质结构应当充分考虑抗风措施，构件连接安全可靠。
2020年4月	住房和城乡建设部	《装配式住宅建筑检测技术标准》	对三大装配式结构（PC结构、钢结构、木结构）分别从材料、构件、连接进行了详细规定，并对装配式建筑结构系

颁布时间	颁布主体	政策名称	政策内容
			统、外围护系统、设备与管线系统、装饰装修系统的检测进行了全面规范。
2020年7月	住房和城乡建设部、国家发改委、教育部、工信部等	《绿色建筑创建行动方案的通知》	大力发展钢结构等装配式建筑，提高装配式建筑构配件标准化水平。推动装配式装修。打造装配式建筑产业基地，提升建造水平。
2021年1月	住房和城乡建设部、国家发改委、科技部、工信部、人力资源和社会保障部、生态环境部等	《关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见》	大力发展装配式建筑、推动建立以标准部品为基础的专业化、规模化、信息化生产体系。装配式建筑工厂打造“机器人”应用场景，推动建立智能建造基地。
2021年2月	国务院	《关于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》	以节能环保、清洁生产、清洁能源等为重点率先突破，做好与农业、制造业、服务业和信息技术的融合发展，加快实施钢铁、石化、化工、有色、建材、纺织、造纸、皮革等行业绿色化改造。鼓励企业开展绿色设计、选择绿色材料、实施绿色采购、打造绿色制造工艺、推行绿色包装、开展绿色运输、做好废弃产品回收处理。
2021年6月	住房和城乡建设部、科技部、工信部	《关于加强县城绿色低碳建设的意见》	加快推行绿色建筑和建筑节能节水标准，加强设计、施工和运行管理，不断提高新建建筑中绿色建筑的比例。发展

颁布时间	颁布主体	政策名称	政策内容
	部等	见》	装配式钢结构等新型建造方式，全面推行绿色施工。
2021年6月	住房和城乡建设部	《住房和城乡建设部2021年政务公开工作要点》	加强宣传引导，推广装配式钢结构等农房建设方式。多渠道做好装配式建筑标准体系政策解读，大力推广钢结构建筑，深入实施绿色建筑创建行动。
2021年10月	国务院	《关于印发2030年前碳达峰行动方案的通知》	推广绿色低碳建材和绿色建造方式，加快推进新型建筑工业化，大力发展装配式建筑，推广钢结构住宅，推动建材循环利用，强化绿色设计和绿色施工管理。加强县城绿色低碳建设。
2021年10月	中共中央、国务院	《关于推动城乡建设绿色发展的意见》	“十三五”期间，累计建成装配式建筑面积达16亿平方米，年均增长率为54%。其中，2021年新开工装配式建筑占新建建筑的比例达到了20.5%。2020年全国新开工钢结构建筑1.9亿平方米，较2019年增长46%，占新开工装配式建筑的比例为30.2%。其中，新开工的钢结构住宅约1200万平方米，较2019年增长了33%。
2021年12月	民航局	《推动民航智能建造与建筑工业化协同发展行动方案》	加大装配式建筑应用比例。机场航站区和工作区的建筑按不低于各地装配式建筑实施要求执行。鼓励具备实施条件的直属单位建设项目优先选用装配式方式建造。拓展飞行区装配式应用场景，鼓励在充分论证的基础上采用装配

颁布时间	颁布主体	政策名称	政策内容
2022年4月	生态环境部等	《“十四五”时期“无废城市”建设工作方案》	<p>式建造方式。挖掘装配式产业体系资源，充分利用当地装配式构件智能制造生产线及信息化工厂生产机场装配式构件。</p> <p>大力发展节能低碳建筑，全面推广绿色低碳建材，推动建筑材料循环利用。落实建设单位建筑垃圾减量化的主体责任，将建筑垃圾减量化措施费用纳入工程概算。以保障性住房、政策投资或以政府投资为主的公建项目为重点，大力发展装配式建筑，有序提高绿色建筑占新建建筑的比例。</p>
2022年2月	国务院	《国务院于加快建立健全绿色低碳循环发展经济体系的指导意见》	<p>全方位全过程推行绿色规划、绿色设计、绿色投资、绿色建设、绿色生产、绿色流通、绿色生活、绿色消费，使发展建立在高效利用资源、严格保护生态环境、有效控制温室气体排放的基础上，统筹推进高质量发展和高水平保护，建立健全绿色低碳循环发展的经济体系，确保实现碳达峰、碳中和目标，推动我国绿色发展迈上新台阶。</p>
2022年2月	国家发展改革委、国家能源局	《关于完善能源绿色低碳转型体制机制和政策措施的意见》	<p>“十四五”时期，基本建立推进能源绿色低碳发展的制度框架，到2030年，基本建立完整的能源绿色低碳发展基本制度和政策体系。</p>

颁布时间	颁布主体	政策名称	政策内容
2022年4月	国务院	《关于进一步释放消费潜力促进消费持续恢复的意见》	推动绿色建筑规模化发展，大力发展装配式建筑，积极推广绿色建材，加快建筑节能改造。
2022年5月	中共中央、国务院	《关于推进县城为重要载体的城镇化建设的意见》	大力发展绿色建筑，推广装配式建筑、节能门窗、绿色建材、绿色照明，全面推行绿色施工。
2022年6月	住建部、发改委	《城乡建设领域碳达峰实施方案》	2030年前，我国城乡建设绿色低碳发展政策体系和体制机制基本建立；“大量建设、大量消耗、大量排放”基本扭转；城市整体性、系统性、生长性增强，“城市病”问题初步解决。
2022年11月	住房和城乡建设部	《装配式建筑发展可复制推广经验清单（第一批）》	对装配式建筑政策引导、技术支撑、产业发展、能力提升、监督管理、创新发展等方面进行明确阐述。

1.3.2 地方政策

为了促进装配式建筑的发展，各地也相继出台了装配式建筑发展目标。其中，北京市人民政府在2022年4月发布的《关于进一步发展装配式建筑的实施意见》中提出到2025年，实现装配式建筑占新建建筑面积的比例达到55%，基本建成以标准化设计、工厂化生产、装配化施工、一体化装修、信息化管理、智能化应用为主要特征的现代建筑产业体系的目标。上海市委、市政府于2022年7月印

发的《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的实施意见》提出要实施工程建设全过程绿色建造，全面推广装配式建筑和全装修住宅。广东省住房和城乡建设厅等部门在2022年9月发布的《关于加快新型建筑工业化发展的实施意见》明确了到2025年底，全省装配式建筑占新建建筑面积比例达到30%以上，其中重点推进地区达到35%以上，积极推进地区达到30%以上，鼓励推进地区达到20%以上的发展目标。各省市政策中关于装配式建筑的相关建设重点或任务如下：

表 1.3.2-1 近期中国部分地区有关装配式建筑及绿色低碳政策汇总

颁布地区	颁布时间	政策名称	政策内容
	2022年5月	《2022年北京市高精尖产业发展资金实施指南》	对在污染治理、污水资源化利用、高效节能设备利用、低碳发展、工业互联网+绿色制造等领域开展专项提升，或在清洁生产、节能节水、碳减排等方向实现绩效提升的项目给予奖励
北京市	2022年4月	《关于进一步发展装配式建筑的实施意见》	到2025年，实现装配式建筑占新建建筑面积的比例达到55%，基本建成以标准化设计、工厂化生产、装配化施工、一体化装修、信息化管理、智能化应用为主要特征的现代建筑产业体系。
	2022年4月	《北京市“十四五”时期能源发展规划目录》	绿色建筑和装配式建筑占新增建筑比重显著提升。大力发展绿色建筑，装配式建筑，积极推广超低能耗建筑。
上海市	2022年12月	《上海市推进重点区域、园区等开展碳达峰碳中和试点示范建设的实施方案》	鼓励综合性区域、产业园区、居民社区、建筑楼宇、企事业单位根据自身特点，综合利用各种低碳技术、方法和手段，创新机制模式，在能源、工业和新基建、城乡

颁布地区	颁布时间	政策名称	政策内容
			建设、交通运输等、循环经济、碳汇、碳排放管理、机制体制创新等领域最大限度地减少温室气体排放。
	2022年7月	《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的实施意见》	推进城乡建设和管理模式低碳转型，实施工程建设全过程绿色建造，全面推广装配式建筑和全装修住宅。
	2021年7月	《上海市住房发展“十四五”规划》	扎实推进装配式建筑发展，公共租赁住房项目全部采用全装修方式。推进绿色建筑与装配式建筑融合发展，稳步推进装配式建筑示范住宅小区建设。
天津市	2022年12月	《天津市工业领域碳达峰实施方案》	重点通过积极构建绿色低碳技术和绿色制造支撑“两个体系”，着力推动产业结构高端化、能源消费低碳化、资源利用循环化、生产过程清洁化、产品供给绿色化、生产方式数字化“六个转型”。
	2021年8月	《天津市加快发展新型消费实施方案》	推广钢结构装配式等新型建造方式，逐步提高装配建筑在新建建筑中的比例。
重庆市	2022年8月	《重庆都市圈发展规划》	构建绿色城市标准化支撑平台，推广绿色建材、装配式建筑和钢结构住宅。
	2022年6月	《重庆市城市更新提升“十四五”行动计划》	重点培育装配式部品部件生产制造业，以发展装配式建筑为重点，积极推进建筑工业化，推广装配式建筑集成化、标准化设

颁布地区	颁布时间	政策名称	政策内容
			计，加快形成标准化、模数化、通用化的部品部件供应体系。
			健全绿色低碳循环发展的生产体系、流通体系、消费体系，加快基础设施绿色升级，构建市场导向的绿色技术创新体系，加快实施重点行业绿色化改造。推行产品绿色设计，建设绿色制造体系，创建一批绿色工厂、绿色园区。
	2021年10月	《重庆市人民政府关于加快建立健全绿色低碳循环经济体系的实施意见》	
河北	2022年1月	《河北省生态环境保护“十四五”规划》	大力推广绿色建材，推行装配式建筑、钢结构建筑及装配化装修。
		《山西省“十四五”	
	2021年9月	“两山七河流域”生态保护和生态文明建设、生态经济发展规划》	大力发展装配式建筑，推动新建公共建筑优先采用钢结构。开展钢结构装配式住宅试点，稳步推进装配式混凝土建筑。
山西	2021年4月	《山西省“十四五”新基建规划》	引导预制模块化装配式建筑等绿色先进技术。
			大力发展装配式建筑、绿色建筑、超低能耗建筑。将装配式建筑产业基地（园区）纳入自治区重点示范园区范围，享受新型工业化示范园区相关政策。装配式部品部件生产基地按照工业用地政策提供用地支持。支持各盟市因地制宜研究制定容积率
内蒙古	2022年8月	《内蒙古自治区促进建筑业高质量发展的若干措施》	

颁布地区	颁布时间	政策名称	政策内容
			奖励政策。符合条件的自治区装配式建筑示范项目，利用固废生产建筑材料、部品部件的企业按规定享受有关税费优惠政策。装配率超过50%的装配式建筑可按照技术复杂类工程项目进行招投标。
辽宁	2022年8月	《关于推动城乡建设绿色发展的实施意见》	大力推广应用装配式建筑。发挥沈阳、大连国家级装配式建筑示范城市引领作用，带动中小城市装配式建筑发展。推动钢结构装配时间住宅建设，鼓励学校、医院等公共建筑优先采用钢结构。
吉林	2022年7月	《吉林省碳达峰实施方案》	大力发展绿色建材、装配式部品部件，强化绿色设计和绿色施工管理。
黑龙江	2021年3月	《关于加快推进新增工业用地“标准地”出让的实施意见》	住建部门负责提出区域新建建筑的建筑节能、绿色建筑、装配式建筑等控制性指标，组织做好工程全过程施工管理与联合验收。
江苏	2022年6月	《江苏省促进绿色消费实施方案》	加强高品质绿色低碳建筑建设，稳步发展装配式建筑，积极推广可再生资源建筑应用示范，推进超低能耗、近零能耗、零碳建筑试点示范。
浙江	2022年7月	《关于进一步支持建筑业做优做强的若干意见》	加快推动装配式构件和部件标准化，推广应用一批成熟的装配式建筑结构体系。
安徽	2022	《安徽省“十四五”	大力发展装配式建筑，推进装配式建筑示

颁 布 地 区	颁布 时间	政策名称	政策内容
徽	年6 月	《节能减排实施方案》	范城市建设,到2025年城镇新建建筑中装配式建筑比例超过30%。
福 建	2022 年8 月	《福建省推进绿色经济发展行动计划(2022-2025年)》	加快推进新型建筑产业化,持续推进福州、厦门、漳州等重点区域装配式建筑发展,到2025年装配式建筑占新建建筑面积达到35%以上。
江 西	2022 年5 月	《江西省住房城乡建设领域推进数字经济“一号发展工程”实施意见》	推行装配式建筑深化设计、施工BIM技术应用,研发推广BIM构件从深化设计、工程建造、现场安装全程信息共享和联动体系。
	2021 年11 月	《江西省“十四五”产业技术创新发展规划》	大力发展装配式建筑构件、建筑墙体、屋面系统材料、新型透水材料和产品,以及节能门窗、型材、整体厨房、整体卫生间产品和建筑部品等新型产品。
山 东	2022 年7 月	《山东省“无废城市”建设工作方案》	积极推行绿色建造方式,大力发展装配式建筑。从源头减少建筑垃圾,合理布局建筑垃圾转运调配,消纳处置和资源化利用设施,形成与城市发展需求相匹配的建筑及处理体系。到2025年,新开工装配式建筑占新建建筑比例达到40%。
河 南	2022 年7 月	《河南省加快材料产业优势再造换道领跑行动计划(2022-2025年)》	打造集水泥熟料、砂石骨料、商品混凝土、精品石材、装配式建筑部品部件等为一体的绿色建材综合生产基地。
	2022	《河南省进一步释放	大力发展绿色建筑和装配式建筑,加大绿

颁 布 地 区	颁布 时间	政策名称	政策内容
	年7 月	消费潜力促进消费持 续恢复方案》	高质量发展“十四
湖 北	2022 年6 月	《进一步加强建筑业 重点企业培育的通 知》	
	2022 年3 月	《关于侧近全省工程 勘察设计行业高质量 发展的若干措施》	
湖 南	2022 年8 月	《湖南省“十四五” 节能减排综合工作实 施方案》	
	2022 年9 月	《关于完整准确全面 贯彻新发展理念推进 碳达峰碳中和工作的 实施意见》	
广 东	2022 年7 月	《关于完整准确全面 贯彻新发展理念推进 碳达峰碳中和工作的 实施意见》	
广 西	2021 年12	《广西工业和信息化	

色
建
材
推
广
力
度,
加
快
既
有
建
筑
节
能
改
造,
结
合
城
镇
老
旧
小
区
改
造,
积
极
推

进绿
色社
区创
建。
各级
住建
主管
部门
在对
企业
优质
工程
创建、
省级
装配
式建
筑示
范产
业基
地
(项
目)
认定、
工法
评定、
改革
试点、
评先
评优
等活
动中

应遵循优先推荐原则。

大力发展装配式建筑，不断提升构件标准化设计水平，推动形成完整产业链，推动智能制造和建筑工业化协同发展，提高工程建设绿色化水平。

发展超低能耗建筑和装配式建筑，积极推进既有建筑绿色节能改造，推动可再生能源的建筑规模化应用。

大力发展绿色、超低能耗和近零能耗建筑，推广绿色建材和绿色建造，大力发展装配式建筑。

立足新发展阶段、贯彻新发展理念、构建新发展格局，把碳达峰、碳中和纳入生态文明建设整体布局 and 经济社会发展全局，坚定不移走生态优先、绿色低碳的高质量发展道路，确保如期实现碳达峰、碳中和。重点发展水泥、玻璃、陶瓷、新型装配式建筑材料。新型装配式建筑材料重点发展

颁布地区	颁布时间	政策名称	政策内容
	月	五”规划》	预制外墙、内墙、楼梯板、楼板等预制建筑部品及节能门窗。
海南	2022年8月	《海南省碳达峰实施方案》	推进装配式建筑高质量发展，2022年新建装配式建筑占比达60%以上，带动建筑业转型升级。
四川	2022年5月	《关于推动城乡建设绿色发展的实施方案》	大力发展装配式建筑，重点推动钢结构装配式住宅建设。实施装配式建筑发展质量提升五年行动，完善装配式建筑技术标准体系，提高装配式建筑信息化、标准化、智能化水平。
贵州	2021年9月	《贵州省“十四五”新型建材产业发展规划》	装配式部品、特种玻璃等新兴产业和高端产品比重加大。
云南	2022年5月	《云南省“十四五”环保产业发展规划》	全面推进绿色建筑、抗震建筑、智慧建筑、装配式建筑等绿色低碳抗震建筑技术研发和应用。大力发展建筑模块化技术、装配式建筑部品部件。
陕西	2021年11月	《陕西省“十四五”制造业高质量发展规划》	积极开发与装配式建筑相适用的产品体系，拓展在住宅、公共建筑、工业建筑、市政景观、基础设施等领域的应用。
甘肃	2022年6月	《关于推动城乡建设绿色发展的实施意见》	大力发展装配式建筑，重点推动钢结构装配式住宅建设。
宁夏	2021年9月	《宁夏回族自治区新型城镇化“十四五”	实施建筑能效提升工程，推广使用装配式建筑、绿色建材和低碳建材，鼓励建设超

颁布地区	颁布时间	政策名称	政策内容
自治区	2022年5月	《关于做好装配式建筑评价工作的通知》	为促进自治区装配式建筑发展，规范装配式建筑评价工作，提升评价质量和效率，开展装配式建筑评价工作。
西藏自治区	2022年4月	《西藏自治区房屋建筑和市政基础设施工程推广应用绿色建材实施方案》	在政府投资项目中推广可循环利用建材、高强度高耐久建材、节水节能建材等绿色建材，积极推广应用装配式等新型建造方式，提高智能化水平，到2025年绿色建材应用占比达到70%以上。 积极推广装配式混凝土建筑，支持装配式PC构件生产企业发展。到2025年，西宁市、海东市装配式建筑占新建建筑的比例达到20%以上，其他各州装配式建筑占新建建筑比例达到10%以上。
青海省	2021年12月	《关于推动智能建造与新型建筑工业化协同发展的实施意见》	达到20%以上，其他各州装配式建筑占新建建筑比例达到10%以上。

为了促进装配式建筑的发展，各地也相继出台了装配式建筑发展目标。北京市提出，2025年实现装配式建筑占新建建筑比例达到55%；四川省提出新开工装配式建筑占新建建筑40%，装配式建筑单体建筑装配率不低于50%。全国31个省市2025年装配式建筑占新建建筑面积比例发展目标如下：

表 1.3.2-2 “十四五”期间中国各省份装配式建筑行业发展目标

省市	占新建建筑面积比例 (%)	省市	占新建建筑面积比例 (%)
----	---------------	----	---------------

全国	30	安徽	30 (城镇)
北京	40 (2022 年) 55 (2025 年) 100 (新开工住宅、公共建筑项目)	浙江	50
天津	90 (符合条件的新建建筑原则上)	江西	40
上海	60 (全市装配式建筑的单体预制率) 90 (全市装配式建筑装配率)	福建	35
重庆	30	广东	30 30 (符合条件的新建建筑原则上)
黑龙江	30	广西	30 (符合条件的新建建筑原则上)
吉林	30	海南	80
辽宁	35	陕西	30
河北	30	甘肃	30
山西	30	宁夏	25
内蒙古	30	青海	30
河南	40	新疆	30
湖北	30	四川	40
湖南	40	贵州	30
山东	50	云南	30
江苏	50	西藏	30 (城镇)

1.3.3 研究现状

联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change) 研究报告显示, 气候变化危机已经成为当前人类必须共同面临的最迫切挑战之一, 由人类各项活动产生的 CO₂ 和其他温室气体则是全球气温上升的主要原因。根据 Energy & Climate Intelligence Unit 发布的《净零排放跟踪表》统计结果显示, 截至目前, 全球已有 136 个国家制定碳中和目标。为应对气候变化带来的威胁, 实现我国经济社会绿色可持续发展, 践行大国责任和担当, 2020 年 9 月, 我国在第七十五届联合国大会一般性辩论上郑重宣布: “中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 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。”

建筑业因其资源和能源消耗巨大, 已成为各行碳排放之首。联合国环境规划署 (UNEP) 《2021 年全球建筑建造业现状报告》中指出, 建筑领域能源消耗占总消耗的 36%, 建筑领域二氧化碳排放占全球总排放的 37% (如图 7 所示)。建筑业碳排放对全球排放总量影响巨大, 是碳减排的关键领域之一。

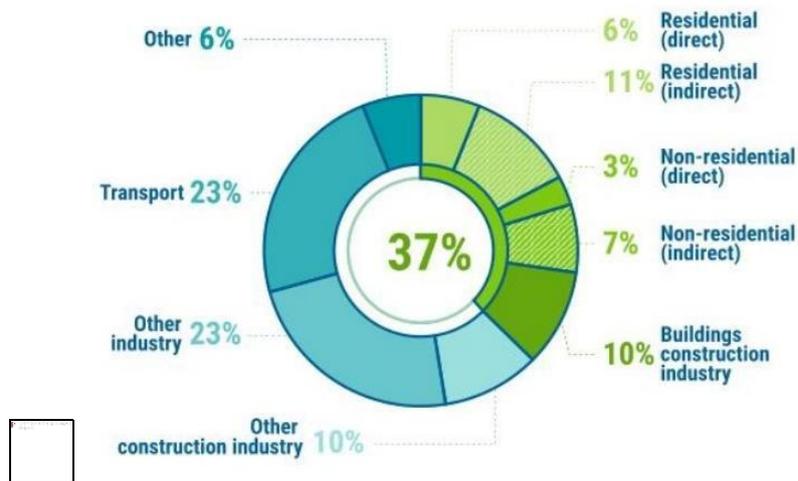


图 1.3.3-1 建筑领域碳排放占全球总排放比例示意图

2019 年全国建筑全过程碳排放总量为 49.97 亿吨, 占全国碳排放总量的 50.6%, 且排放量仍呈现上升趋势, 成为碳排放的主营阵地之一。因此, 建筑行业的碳排放控制在节能减排中起着越来越重要的作用。降低建筑碳排放量, 已经成为当今和未来建筑全生命周期中必须要考虑的关键问题。

建筑全过程碳排放（亿tCO₂）



图 1.3.3-2 “十一五”到“十三五”期间建筑碳排放趋势

建筑碳排放是建材生产及运输、建筑建造和拆除、建筑使用阶段所消耗化石能源产生的二氧化碳排放的总和，其中使用阶段的碳排放量占总排放量的 80% 以上。同时，建筑设计及建造阶段的节能降碳技术措施直接影响建筑使用阶段能耗。因此，鼓励建筑的低碳发展，降低建筑碳排放，提高建筑节能技术水平，对于实现碳达峰、碳中和具有重要贡献。近年来，我国政策的推动极大地利好了装配式建筑的发展，装配式建筑占新建建筑比例不断提高，装配式发展成效显著，同时带来了生产效率、建筑质量及材料节约等诸多方面减碳效益的显著提升，装配式建筑因其标准化、装配化的自身特点，具有一定的节能减碳性能，符合低碳建筑、低能耗建筑的一些特点，但装配式建筑并不完全是节能低碳建筑。

重庆市《低碳建筑评价标准》DBJ50/T 139-2012 虽对住宅建筑和办公、商业、旅馆建筑的规划、设计、施工、运营环节提出相关低碳化要求，但该标准仅针对重庆市的建筑要求，具有较强的地域性。且该评价标准于 2012 年施行后未有更新修订，既有的标准评价体系与现今的建筑技术存在一定的差异，在现有的技术背景下，缺乏适用性，对以装配式建筑低碳性能为实现载体的建筑领域碳排放管理工作指导力不足。

北京市《低碳建筑（运行）评价技术指导》（DB11/T 1420-2017）仅对低碳建筑运行阶段的基本要求、评价体系和计算方法进行了规定，并未涉及规划、设

计、生产、施工、拆除回收等建筑阶段的评价。

因此，在当今建筑技术发展背景下，立足于全国适用范围，基于装配式建筑全寿命期，针对规划设计阶段的关键内容进行规范和指导的技术准则，目前暂时处于空白阶段。课题的研究将填补装配式建筑节能减碳领域的空白，实现从“0”到“1”的突破，指导装配式建筑节能减碳工作的开展。

1.4 建筑碳排放计算标准、方法及全寿命期建筑碳排放

1.4.1 计算标准

国际上，多个研究机构提出了碳排放核算标准。如联合国政府间气候变化专门委员会编制的《IPCC 国家温室气体清单指南》、世界资源研究所（WRI）的《温室气体核算体系》（GHG Protocol）、国际标准化组织的 ISO 14060 族温室气体核算标准体系、英国标准协会的《商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范》（PAS 2050）等。各核算标准适用范围如下表 5:

表 1.4.1-1 国际碳排放计算标准比较

核算层面	标准或规范名称	发布时间	适用范围	制定组织	核算方法
终端消耗碳排放	GHC Protocol	2004	企业、项目	WRI/WBCSD	对企业或项目现有终端排放源的监测和审计
	ISO 14064	2006	企业、项目	ISO	
	《IPCC 指南》	2006	国家、企业、项目	IPCC	
全生命周期碳排放	PAS 2050	2008	产品、服务	BSI	建立数据库和模型，对产品/服务全生命周期碳排放进行估算
	ISO 14040/14044	2006	产品、服务	ISO	

Product and Supply Chain	2011	产品、服务	WRI/WBCSD
GHC Protocol			

其中，《IPCC 国家温室气体清单指南》已得到国际的广泛认可并使用，是《联合国气候变化框架公约》各缔约方指定采用的国家清单编制方法，为各国制定减缓温室气体排放政策和应对气候变化行动有较大的贡献。该指南是针对国家、企业、项目等不同核算对象的温室气体排放量进行核算的标准和编制温室气体清单，包括总论，能源，工业过程和产品使用，农业、林业和其他土地利用，废弃物等5卷。2000年第一版，2019年进行修编，适用中《2019清单指南》需要与《2006清单指南》、《湿地增补指南》联合适用。

在国内，相关部委和协会也发布了适合我国国情的碳排放计算标准，主要包括《省级温室气体清单编制指南（试行）》、《建筑碳排放计量标准》（CECS 374: 2014）、《建筑碳排放计算标准》（GB/T 51366-2019）。各计算标准情况如下表6:

表 1.4.1-2 国内碳排放计算标准比较

标准名称	发布时间	发布组织	适用范围	内容
《省级温室气体清单编制指南（试行）》	2011	国家发展改革委	加强省级温室气体清单编制能力	涵盖能源活动、工业生产过程、农业、土地利用变化和林业、废弃物处理5个方面。
《建筑碳排放计量标准》	2014	中国工程建设标准化协会	新建、改建和扩建建筑以及既有建筑的碳排放计量	规定了建筑从材料生产、施工建造、运行维护、拆解直至回收的全生命周期过程中进行碳排放计量所要采用的方法与原则
《建筑碳排放计算标准》	2019	住房和城乡建设部	民用建筑的碳排放计算	采用排放因子法，给出建筑的运行、建造与拆除、建材

目前,《建筑碳排放计算标准》被广泛应用,并作为建筑行业碳排放计量的主要标准。该标准采用过程分析法,并运用排放因子法对建筑的运行、建造与拆除、建材生产与运输阶段的碳排放给出规定和计算方法。附录中还给出主要能源碳排放因子、建筑物运行特征、常用施工机械台班能源用量、建材碳排放因子、建材运输碳排放因子等相关计算用数据,为建筑行业的碳排放计量推动做出重要贡献。同时,其碳排放因子库的清单有限,后续需要进一步完善。

1.4.2 核算方法

碳排放计算是进行科学控制碳排放的基础,是实现“双碳目标”的前提。目前国内外常用的碳排放核算方法主要有四种:实测法、过程分析法、投入产出分析法(物料衡算法)、混合法。各种方法均有一定的优缺点和适用范围。

(1) 实测法

是碳排放量化的最基本方法,是指采用标准计量工具和实验手段对碳排放源进行直接监测而获得相应数据的方法。理论上,实测法的计量结果来源于对碳排放源的直接监测,能够代表真实的碳排放水平,数据最为可靠;但实际上,受监测条件、计量仪器、成本投入等多方面限制,实测法难以广泛应用于一般性的碳排放分析。

(2) 过程分析法

过程分析法又称清单分析法,是一种“自下而上”计算得到全生命周期碳排放量的方法。根据碳排放源的活动数据以及相应过程的排放系数进行碳排放量化,其基本概念可表示为公式 1。具体而言,过程分析法是将某一生产过程按工序流程拆分,各生产环节的碳排放量以实测碳排放系数与相应活动数据的乘积表示,即排放因子法;进而可根据各环节的碳排放之和,推算全过程的碳排放总量(E)。目前微观层面例如单体建筑的全生命周期碳排放量化研究普遍采用这种方法。

$$E = \sum(\varepsilon \times Q) \quad (1.4.2-1)$$

(3) 投入产出分析法(物料衡算法)

与过程分析法相对应的,在研究宏观层面建筑业全生命周期碳排放研究时,通常采用另一种“自上而下”的碳排放核算方法——投入产出法。这一方法由列昂惕夫于 1970 年提出,是以“投入=产出”的理想化数量模型为基础,建立相应的经济投入产出表,从而综合研究国民经济各部门与各生产环节数量依存关系的分

析方法。

(4) 混合法

过程分析法可针对具体的碳排放过程进行详细评价，获得的结果相对更准确，且便于数据基础的更新，但由于系统边界受限，通常存在截断误差；而投入产出分析法利用经济价值和投入产出表计算，在宏观层面上系统边界更完备，但针对具体碳排放过程的准确性不高。综合两种方法的优点，近年来混合法也在碳排放量化方面得到了广泛的应用。

前三种方法的比较，如下表所示：

表 1.4.2 碳排放核算方法比较

方法	公式	输入	特点及优点	局限性	适用尺度	应用现状
IPCC 排放因子清单法	$E_m = AD \times EF$ ，式中 E_m 为温室气体排放量，AD 为活动数据，EF 为排放因子	排放因子、活动水平	简单明确易于理解，实用性和适用性高，有大量应用实例参考	排放因子的地域性较强，不确定性较大	宏观，中观，微观	广泛应用，方法论的认识统一，权威性高，涉及能源消耗产生的碳排放核算均可使用
物料衡算法	$\sum G_{投入} = \sum G_{产品} + \sum G_{流失}$ ，式中 $G_{投入}$ 为投入物料综合， $G_{产品}$ 为得到产品量总和， $G_{流失}$ 为物料	引入新化学物质量；设施或设备存储（应用或者子应用级）	可反映发生地的实际排放，捕获各类设施和设备之间的差异	计算结果受限于计量设备的准确性；存在统计误差；工作量大，数	宏观，中观	可用来检验其他方法计算结果的准确程度，多应用于核算工业生产过程排放

	和产品流失 量总和			据需求 多			
实测 法	G=KQC, 式 中 G 为某气 体排放量, Q 为介质流 量, C 为介 质中某气体 的浓度, K 为单位换系 数	空气流 量、转 换系 数、排 放浓度	结果精确	成本 高, 数 据难获 取, 代 表性值 得考虑	微观	应用历史较 长; 方法缺陷 最小但数据获 取最难; 应用 范围窄, 小区 域、简单生产 排链的碳排放 源, 或者小区 域、有能力获 得一手监测数 据的自然排放 源, 如土地利 用变化与森林	

基于上表分析, 物料衡算法和实测法均不适用于建筑领域碳排放核算, 建筑领域碳排放宜采用过程分析法, 必要时也可采用混合法。建筑结构碳排放核算没有专门的方法, 可以借鉴整体建筑的碳排放核算方法, 即过程分析法或混合法。

1.4.3 全寿命期建筑碳排放

前全世界主要存在 2 种权威的碳排放核算框架性标准, 即一是基于终端消耗的企业/项目碳排放核算标准, 二是基于生命周期的碳排放核算标准。全寿命期评价 (Life Cycle Assessment, 即 LCA), 是一种用于评价产品或服务相关的环境因素及整个生命周期影响环境的工具。建筑业属于服务性行业, 其更加适用于基于生命期的碳排放核算标准。而在全生命期碳排放核算中, 涉及 3 个关键问题, 一是全生命期的阶段划分, 二是碳排放边界的界定, 三是碳排放因子的确定。

1. 全生命期 (全寿命期) 的阶段划分

国内外研究学者基于全生命期理论, 对其合理的阶段划分、建筑碳排放量核算做了较多的研究。

Jim Hart 等人将全生命期细分为 4 个阶段, 16 个子阶段, 如图 6 所示。4

个阶段是产品阶段、建造过程阶段、实用阶段、拆除阶段。产品阶段分为原材料供应、运输、加工 3 个子阶段；建造阶段分为运输、建造安装 2 个子阶段；使用阶段分为使用、维护、修理、更新、替换、能源消费、水消费 7 个子阶段；拆除阶段分为拆除、运输、废物处理、弃置 4 个子阶段。

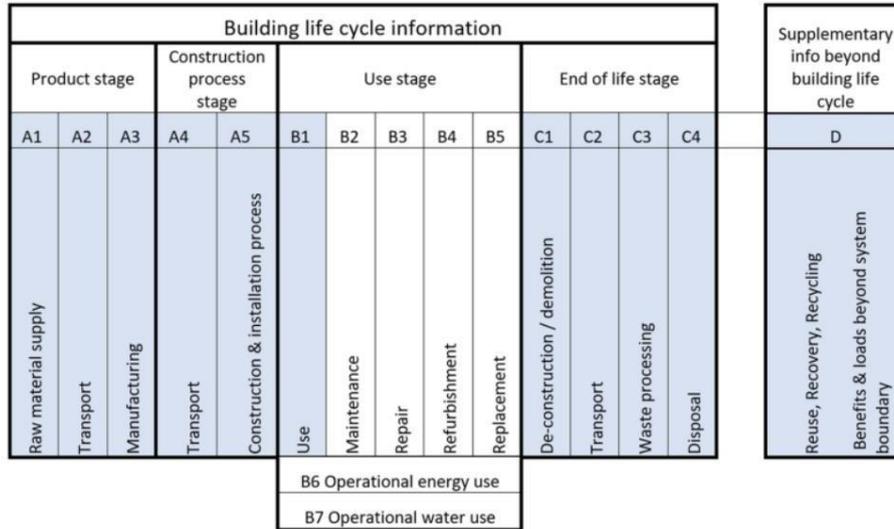


图 1.4.3-1 建筑碳排放全生命周期阶段划分

B. Li 等建议将全生命期分为原材生产阶段、材料运输阶段、建筑施工阶段、建筑运营阶段、回收阶段共 5 个阶段。计算时将 BIM 技术与碳排放分析工具相结合，得到更准确的量化结果，方便在整个施工过程中实施计算材料消耗量和碳排放量。

Shen 等将全生命期分为设计阶段、建材开采与生产阶段、施工阶段、运营维护阶段、拆除与处置阶段。根据工程定额，提出了基于系数法和库存分析的计算模型。

李静等将建筑生命期分为设计阶段、物化阶段、使用维护阶段、拆除回收阶段。将建筑碳排放归结为能源、建材、机械的碳排放，运用排放因子法计算排放量。其中物化阶段细分为建材生产阶段、建材运输阶段、施工过程阶段三部分。

李兵则划分四个阶段来核算碳排放：规划设计阶段、施工安装阶段、使用维护阶段、拆除清理阶段。规划设计阶段直接排放极少，但对后续阶段碳排放影响是巨大的。在设计方案中确定选址、结构类型、材料、施工方案等各方面均与碳排放直接相关；施工安装阶段包括建材碳排放和施工作业碳排放；使用维护阶段包括使用和维护两个阶段；拆除清理阶段包括废弃物处理、运输、可再生材料回

收等产生的碳排放。

L. Luo 等将装配式建筑全生命期碳排放阶段分为：设计阶段、建造阶段、使用阶段、拆除回收阶段共 4 个阶段。以哈尔滨、石家庄、南京、昆明、广州等城市为例，对不同地区碳排放做了研究，认为严寒地区>寒冷地区>夏热冬冷地区>温和地区>夏热冬暖地区。对比各阶段的碳排放，发现使用阶段和建材生产阶段最多，是减碳重点阶段。

郑晓云等认为，装配式建筑全生命期碳排放主要分为建筑建造、使用、废弃3个阶段。其中，建造阶段主要包括建材生产、建材运输、现场装配；使用阶段主要包括拆除运输、回收、填埋等阶段。

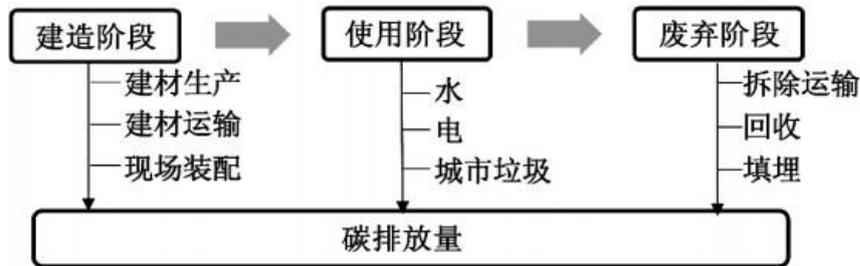


图 1.4.3-2 装配式建筑碳排放全生命周期阶段划分

《建筑碳排放计算标准》（GB/T 51366-2019）中划分为 5 个阶段，即建材生产、运输、建造、运行和拆除阶段。该标准较为详细给出了各阶段计算要求、计算公式和相关参数，是目前建筑领域采用最多的碳排放计算标准。

王有为将建筑碳排放阶段分为建材生产、运输、施工、运营、维修、拆除、废弃物处理等 7 个阶段。并认为运营时间各国基本以 40-60 年为准考虑，中国是以 50 年为准考虑，所以运营的碳排放占比最大，约 80%-90%。

2. 碳排放边界的界定

碳排放边界的界定是进行碳排放核算和评价的一个重要前提。碳排放边界包括 2 个重要的方面，一是核算主体的确定，二是核算期限的确定。

核算主体的确定受各种因素的影响，如技术条件、原始设计、经济核算等因素的影响。

(1) 技术条件是指能源计量设备和能耗监测设备所能达到的范围，如美国环境保护署在进行碳排放核算时，核算主体精确到每一个用能设备，其技术条件是要求电力企业碳排放量可直接通过监测设备来获得。

(2) 原始设计是指能耗计量和监测设备最初的设计安装状态，如果无法对设备的线路条件进行改造，就不能实现对每一个用能设备的碳排放情况进行监测。

(3) 经济核算因素是指由于经济管理体制的因素使核算主体无法进一步分割的状况，如在计划经济体制下，由于产权的不明晰导致能耗设备计量的模糊，只能以总量形式出现，而无法分配到更具体的能耗设备和用能单位，结果造成碳排放主体无法进一步细分，只能以整体形式出现。在全生命期碳排放过程中，核算主体的确定有利于明确各个阶段碳排放主体的责任，从而形成对主体碳排放行为的制约机制。

核算期限的确定，在全生命周期碳排放核算中是颇为关键的一环。常规的碳排放量核算一般以年为单位，但在全生命期核算中，核算时间是不确定的，需要根据核算对象的特定属性来加以确定，如商品和服务在生命周期内的温室气体排放评价规范 (PAS 2050 : 2008) 规定的产品核算期限为 10 年。建筑领域中，核算期限有几种方式，一种是根据建筑设计年限 (结构工作年限)，一般为 50 年；另一种是建筑的产权年限，如住宅为 70 年等。

建筑领域的核算周期宜选择建筑设计年限 (一般为 50 年)，核算主体则需要完善，包括研究、方法和标准。

3、碳排放因子

碳排放因子是指将能源与材料消耗量与二氧化碳排放相对应的系数，用于量化建筑物不同阶段相关活动的碳排放。一般由专业机构根据以往的数据统计计算得出，各家研究机构都有各自的碳排放因子，其中最有名的是 IPCC 给出的因子。在一般碳排放因子数值的核定中，核电等新能源和可再生能源没有碳排放，即排放值为 0，但在全生命期中，它们仍然会有一定的碳排放量，只是与一次能源的碳排放值相比要低很多。

高源雪对各碳排放因子做了详细分析和统计，并对收集的 17 个住宅建筑物做了研究，其中框剪结构 9 个，框架结构 5 个，砖混结构 3 个。不同结构物化阶段的碳排放存在较为明显的差异。分项工程中钢筋混凝土工程、金属结构工程、砌筑工程在物化阶段碳排放中占比最高。碳排放强度即每万元的碳排放与结构形式无显著关联。从结构类型、建筑体量 (面积、高度)、排放源等三个角度，研究住宅建筑物物化阶段碳足迹规律，给出估算公式，对类似项目提供借鉴和参考。

在标准层面,《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366-2019) [13]中的附录给出了建筑领域常用的能源、材料以及材料运输碳排放因子。《深圳市建筑装饰碳排放计算标准》(T/SZZS01 001-2021) [24]中给出了建筑装饰材料及材料运输碳排放因子。中国建筑能耗研究报告(2019)中还给出了全国各年度建筑碳排放综合因子,从而动态评估建筑领域碳排放状态。

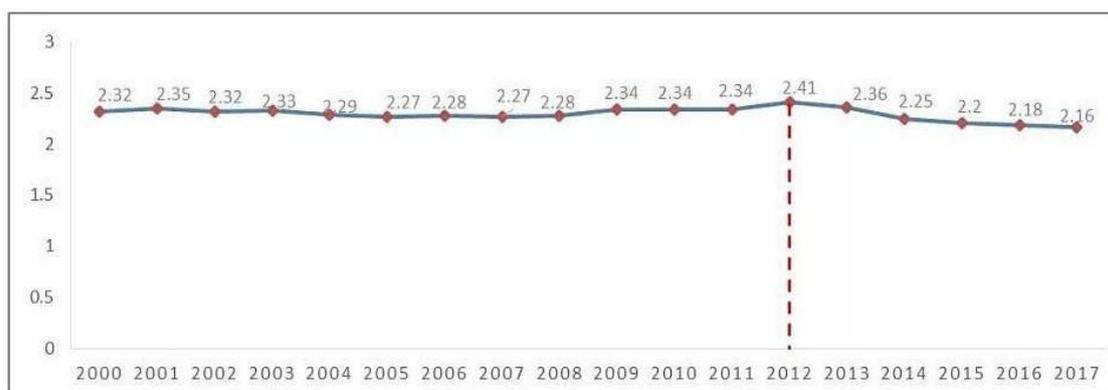


图 1.4.3-3 全国各年度建筑碳排放综合因子分析 (单位建筑能耗碳排放, kgCO₂/kgce)

排放因子数值的选定对碳排放核算结果影响比较大,为避免在碳排放量核算过程中数值被放大的负面影响,核算人员可以参照以下原则进行碳排放因子的评估、选择和确定:

- (1) 选择最接近真实状况的排放因子;
- (2) 选择最容易获取准确活动数据的排放因子;
- (3) 选择目标用户容易接受或对已有利的排放因子。

第二章 基本要求

2.1 建筑专业

2.1.1 低碳策划

装配式建筑的前期策划中应进行低碳策划并确定低碳目标。在建筑设计创作前期根据建筑功能和环境资源条件，通过场地设计、规划、体型、朝向及立面设计，充分利用自然采光、自然通风以及围护结构保温隔热等建筑设计手段，以降低建筑供暖年耗热量和供冷年耗冷热量为目标，降低建筑的用能需求。

2.1.2 被动优先

装配式建筑的低碳设计应遵循被动优先、主动优化的原则，充分利用阳光、自然通风，适应当地气候特征，并在调研当地可再生能源的基础上进行充分利用。

已有研究表明，建筑设计阶段的相关决策对建筑能源、资源消耗及室内环境舒适度的影响巨大，因此被动优先的设计策略是装配式建筑低碳发展的重要环节。

建筑总体规划设计时应根据气候特征和场地条件，营造适宜的微气候，通过优化建筑群规划、建筑外形及空间布局，合理选择和利用景观绿化、构筑物等措施，夏季增强自然通风、降低热岛效应，冬季增加日照、避免冷风侵袭，通过被动式设计降低建筑冷热需求。

建筑单体设计需对体形、朝向、窗墙比、有效通风面积等指标进行优化设计，应有利于自然通风、采光、日照，应尽量提高严寒、寒冷地区和夏热冬冷地区冬季南向房间的得热，降低夏季东侧、西侧房间得热；建筑的朝向宜采用南北向或接近南北向，严寒及寒冷地区的建筑主要房间宜避开冬季主导风向；建筑的体型应规整，减少凹凸变化和多余的装饰性构件；通过优化建筑体表系数，减少建筑与室外空气接触的占比。

2.1.3 可再生能源利用

在设计初期根据低碳策划，综合考虑当地的自然资源、设备成本和运输条件及项目所在场地条件等因素，选择适宜项目的可再生能源利用方式。并在建筑方

案设计中融入相关的内容，如结合光伏构件进行立面、屋面一体化设计等。可再生能源系统不应成为影响建筑外观、围护结构和建筑空间的消极因素，而应作为建筑的一部分。

2.2 结构专业

2.2.1 结构合理化

结构合理化是节约建材使用量，降低碳排放量的有效方法。当前许多建筑物，为不必要的造型变化，设计不合理的建筑结构、不对称不均匀的平面，使建筑材料使用量激增。合理而经济的建筑形态和建筑结构设计，即建筑的跨距合理，平面基本均匀对称，空间简洁，减少不必要的造型结构。另外，应突出抗震设计的重要性，以良好的抗震效果尽可能地延长建筑寿命，谨防地震灾害带来的安全威胁。建筑结构设计阶段，应合理地分析建筑结构抗震性，以合适的方法减少地震造成的损失。融合抗震设计与建筑结构设计理念，从围护结构入手，落实绿色低碳理念。

2.2.2 结构轻量化

建筑结构的轻量化直接降低了建材使用量，减少了建材生产的能源消耗，进而减少了碳排放量。推荐措施如采用轻型结构——钢结构、竹木结构及设计一体化的外围护结构等。

2.2.3 材料低碳化

选择建筑材料要充分考虑材料在生产与制造期间、运输期间的能源消耗，兼顾制造时污染物排放情况，减少材料的使用总量，尽可能地应用环保材料，选用木石材料、竹材料、植物纤维等，促进材料的可回收利用，降低材料能耗。遵循就近的原则确定混凝土搅拌站，避免在施工现场拌制混凝土，防止粉尘和噪声影响环境。

2.2.4 施工协同化

设计过程中应关注以下内容:

- (1) 预制工艺与条件对构件形状、尺寸、重量的限制。
- (2) 运输条件对构件形状、尺寸、重量的限制。
- (3) 制作过程需要的吊点（包括脱模、翻转、吊运吊点）和预埋件的设计协同。
- (4) 构件内钢筋、套筒、箍筋的拥堵对混凝土浇筑的影响。
- (5) 构件存放、运输方式与支垫要求。

同时，在施工过程中应关注以下内容:

- (1) 安装对部品部件形状、尺寸和重量的限制。
- (2) 吊装方式的确定，安装吊点的合理布置。
- (3) 构件安装标高调整装置的设计。
- (4) 临时支撑的要求、支撑点布置与在构件上支撑预埋件的设置。
- (5) 后浇混凝土支模预埋件在预制构件上的设置。
- (6) 施工用安全防护和塔式起重机支扶预埋件在结构构件上的设置，荷载复核。

2.3 机电专业

装配式建筑中要求设备管线优先考虑与结构系统、外围护系统、内装系统等部品部件相分离，并尽可能减少在预制构件上的预留预埋。在设计中应遵循“标准化设计、工厂化生产、装配化施工、一体化装修、信息化管理、智能化应用”的原则，并结合装配式建筑实际情况选择与之相匹配的技术措施，鼓励采用集成化新技术、新产品为装配式建筑服务。

由于装配式建筑的主要部品部件皆在工厂内加工生产而成，在传统建筑中现场完成的工作都必须提前到部品部件生产阶段，装配式建筑中设计的重要性和精确度都大大增加，因此传统建筑设计中的施工配合阶段成为设计工作的必需阶段。装配式建筑机电设计阶段应包含机电所有专业管线综合设计，并将需要预留的孔洞条件落实到建筑结构设计中，由此来保证预制结构部件中管线穿过时，能够做好预留预埋。施工图纸完成后可通过 BIM 等技术进行二次深化设计，对施工进

行精细化管理。

2.3.1 给排水

对于给排水专业，低碳的策划主要体现在三个方面，一是降低运营能耗，主要体现在设备运营的节能方面。二是节水，节约水资源的同时可实现降低水资源在获取处理利用过程中所涉及的碳排放。三是设备设施及管道等方面的材料低碳，在项目设计中可尽量采用同一种或同一产地的设备材料，可减少在运输材料过程中所带来的碳排放。

在装配式建筑的设计中，给水排水设备与管线应与暖通空调、电气智能化、燃气等设备与管线综合设计，并需要与建筑、结构、内装等系统进行协同设计，避免后期拆改带来的碳排放。

2.3.2 暖通

对于暖通专业，建筑寿命期内碳排放主要集中在运行阶段，运行阶段的碳排放以采暖、空调系统占比较大，故在建筑设计初期，应做好建筑采暖空调系统的冷热源策划，充分结合建筑所在地的能源结构、建筑使用特点、建筑负荷等因素，合理选择合适的冷热源形式。同时输配能耗也是暖通系统能耗的重要组成部分，在设计时尽量将设备机房设置在负荷中心，减少输配长度。这两个方面皆需与建筑结构专业配合，纳入建筑结构专业策划设计因素的范畴。

在供暖、空调、通风、冷热源等设备和管材的生产和建造阶段，降低碳排放，主要通过提高制造工艺水平、增加预制化比例、提高管线部件加工预留精度，减少施工安装时间来完成，这就要求在暖通系统设计阶段尽可能准确，与各专业协同配合，并落实到设计成果中。

2.3.3 电气

为了实现“双碳”的目标，建筑用能的再电气化，建筑本体节能和可再生能源的利用是必经的路径，电气专业是建筑能源转型的主要载体。在设计阶段，设计人应充分考虑电能输配的损耗、可再生能源的接入、电能容量的拓展性，建筑电气设备和管路安装的便捷性。充分与建筑、水暖专业沟通，找到最有利的设备配

电方式，以最短的供电路径，最低的电能损耗为建筑配电。同时与结构及精装专业密切对接，做好开洞和预埋，尽量避免后期剔槽开洞、管线追位等问题。

在装配式建筑中，要注意管线密集区域不宜采用预制构件，设备例如光伏组件尽可能采用一体化安装的方式，勇于尝试装配式管井、无线灯具开关、导轨式插座、无线表具等新技术新产品。减少预留预埋和对建筑主体的破坏，充分考虑建筑运维、维修、改造的便利性，尽可能将问题消灭在设计阶段。

第三章 建筑专业

3.1 建筑设计原则

1 装配式建筑应采用标准化设计，遵循少规格、多组合的标准化设计原则，通过标准模块及模块组合的设计方法满足使用者多样化的需求，为工厂化生产和装配化施工创造条件：

(1) 公共建筑通过楼电梯、公共卫生间、公共管井、基本单元等标准化模块进行组合设计；

(2) 住宅建筑可由套型模块和核心筒模块组成单元模块；套型模块由起居室（厅）、卧室、入户过道、餐厅、厨房、卫生间、储藏空间和阳台等功能模块组成，并应根据使用需求采用适宜的空间优先尺寸；核心筒模块主要由楼梯间、电梯井、前室、公共走道、候梯厅、设备管道井、加压送风井等功能模块组成，应根据使用需求进行标准化设计；

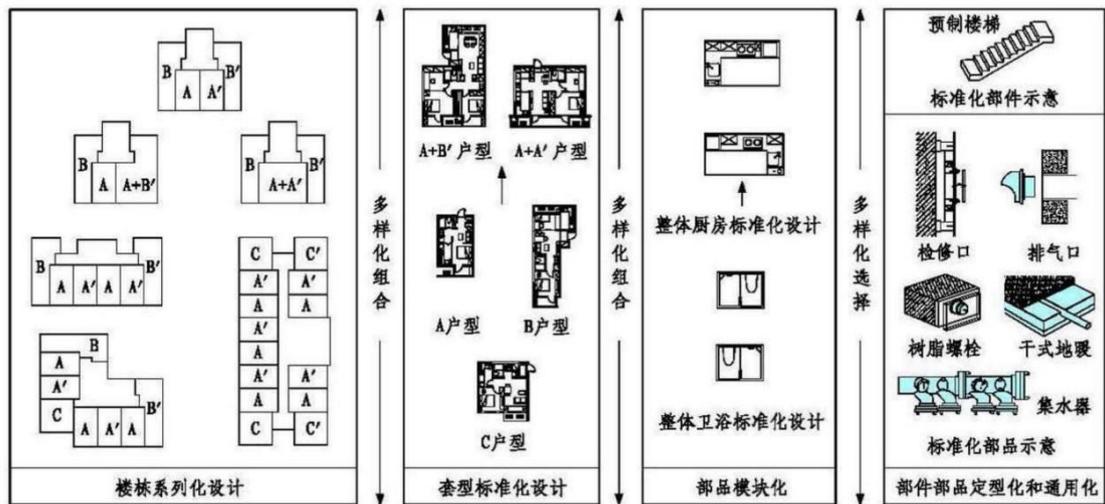


图 3.1-1 装配式住宅的标准化与多样化¹

2 装配式建筑设计应遵循模数协调的基本原则，部件、部品、功能模块、套型及单元均应在模数协调的统一框架内进行设计。建筑设计应采用有利于标准化设计、减少部品部件种类的基本模数（1M=100mm）、扩大模数或分模数。

3 装配式建筑平面应采用灵活布局设计：

(1) 采用大开间大进深、空间灵活可变的布置方式；

(2) 平面布置应规则, 承重构件布置应上下对齐贯通, 外墙洞口宜规整有序;

(3) 设备与管线宜集中设置, 并与主体结构分离。

4 装配式建筑立面设计应遵循少规格、多组合的原则, 建筑立面的围护构件及装饰构件宜采用标准化预制构件, 通过多样性组合的设计手法, 结合材质肌理、色彩等变化实现建筑的多样性与韵律感:

(1) 应采用无热桥设计, 出挑的阳台或设备平台等应作断热桥措施。

(2) 外饰面宜采用轻型装饰挂板或装配式幕墙系统。

(3) 不宜设置凸窗, 建筑东、西、北朝向不应设置凸窗。

5 装配式建筑应对外墙板、幕墙、外门窗、阳台板、空调板与遮阳部件、光伏构件等进行集成设计, 可将透光性光伏发电板与外窗、天窗、遮阳构件相结合。

6 在构造节点设计上, 选用高耐久性的密封材料并通过构造设计降低密封胶的使用率, 减少因密封胶失效导致的漏风、漏水等问题出现, 降低因材料性能衰减导致的建筑能耗问题。

3.2 非砌筑围护墙和内隔墙

在2017年住建部颁布的国家标准《装配式建筑评价标准》GB/T51129-2017中规定了装配式建筑的装配率不低于50%的基本要求, 且对建筑的围护墙和内隔墙提出了不低于10分的得分要求, 当非承重围护墙非砌筑的比例 $\geq 80\%$ 、内隔墙非砌筑的比例 $\geq 50\%$ 时, 即可满足此项要求。

表 3.2-1 《装配式建筑评价标准》评分细则

	评价项	评价要求	评价分值	最低分值
主体结构 (50分)	柱、支撑、承重墙、延性墙板等竖向构件	$35\% \leq \text{比例} \leq 80\%$	20-30	20
	梁、板、楼梯、阳台、空调板等构件	$70\% \leq \text{比例} \leq 80\%$	10-20	20
围护墙和内隔墙 (20分)	非承重围护墙非砌筑	比例 $\geq 80\%$	5	10
	围护墙与保温、隔热、装饰一体化	$50\% \leq \text{比例} \leq 80\%$	2-5	
	内隔墙非砌筑	比例 $\geq 50\%$	5	
	内隔墙与管线、装修一体化	$50\% \leq \text{比例} \leq 80\%$	2-5	
装修与设备	全装修	-	6	6

评价项	评价要求	评价分值	最低分值
管线 (30分)	干式工法楼面、地面	比例 $\geq 70\%$	6
	集成厨房	$70\% \leq \text{比例} \leq 90\%$	3-6
	集成卫生间	$70\% \leq \text{比例} \leq 90\%$	3-6
	管线分离	$50\% \leq \text{比例} \leq 70\%$	4-6

3.2.1 外围护墙

非砌筑的外围护墙可分为预制墙板类、现场组装骨架类、建筑幕墙类。

ALC 墙板是条板体系中的一种常见做法。ALC 墙板又称蒸压加气混凝土板，是以钙质和硅质为主要原料，以铝粉为发气剂，以石膏为调节剂，经蒸压养护等工艺过程而成的多孔高性能新型环保板材。ALC 墙板具有轻质高强、保温隔声性能佳、绿色环保、造价低、施工方便的特点，综合效益显著，适用于装配式建筑中非承重墙板，可作为外围护墙及内隔墙。



图 3.2.1-1 装配式外墙围护系统分类

装配式建筑平面及立面设计应遵循模数协调的原则，进行标准化、规格化设计，基本单元模块的高度与宽度尽可能按照板材的常用规格尺寸（详表3.2.1-1）组合设计，避免出现非模数及非标准的特殊规格板材。

表 3.2.1-1 蒸压加气混凝土板常用规格

长度 L (mm)	宽度 B (mm)	厚度 D (mm)
1800~6000 (300 模数进位)	600	75.100、125.150、175.200、250、300 120、180、240

注：其他非常用规格和单项工程的实际制作尺寸由供需双方协商确定

邱家惠在《ALC 隔墙板施工质量控制及碳减排效应分析》中通过在福建省

的工程应用实例分析，ALC 隔墙板在施工效率上，采用 ALC 隔墙板比普通砌筑混凝土高 3 倍；在碳排放量上，ALC 隔墙板保温隔热强度为普通混凝土墙的 1.5 倍左右，位于福建省的工程案例采用 ALC 隔墙板，由于 ALC 墙板的传热系数比普通外墙小，可通过降低空调冷负荷减少运行阶段 349.14t 的碳排放。

据樊娟莉收集 ALC 墙板制作厂家及施工过程中的数据并进行的碳排放计算研究结果，ALC 墙板全生命期碳排放情况如下表 3.2.1-2 所示，生产过程中碳排放占比最多，达到 43.6%，其次是原料采集过程占比 40.65%。在墙板的原料收集及生产阶段由于厂家所选原材料采集距离较远，且生产设备落后，造成生产及原料采集阶段的碳排放量较大。而在使用过程中，由于 ALC 墙板作为外围护结构，具有良好的保温隔热性能，在使用阶段可以有效减少能源消耗以及碳排放量 0.2506t，相比传统的墙体材料，可以大大减少建筑能耗。

表3.2.1-2 每立方米 ALC 墙板全生命期碳排放计算结果

指标	采集阶段 (t)	生产阶段 (t)	安装阶段 (t)	使用阶段 (t)	总计 (t)
碳排放量	0.2719	0.2916	0.1053	-0.2506	0.4182
占比	40.65%	43.60%	15.74%	--	--

高宇等在《基于 LCA 的装配式建筑建造全过程的碳排放分析》中对常用装配式预制构件（阳台隔板、预制剪力墙、预制非承重外墙、预制内墙、叠合板、叠合梁、阳台、楼梯等）的碳排放量进行了分析：1) 在生产阶段，单位立方的预制外墙构件碳排放量为 846.18kg/m³；2) 运输阶段的碳排放量由运输距离和构件重量决定，单位立方单位公里的预制外墙构件碳排放量最大，为 1.93kg；3) 施工阶段，预制外墙单位立方的碳排放量为 11.78kg，仅次于预制剪力墙 12.48kg；4) 与传统建造方式碳排放对比，传统建造方式物化阶段的碳排放量为 0.114t/m²，装配式建筑的预制构件部分则为 0.056t/m²。传统现浇建筑在生产和运输阶段碳排放所占比重高于装配式建筑，主要因为现场浇筑方式的粗放式管理导致材料消耗量大、浪费多，增加了碳排放量的产生。装配式建筑的运输阶段相对于传统现浇的碳排放所占比重增大。

根据李静等计算的预制外墙板与现浇外墙板的施工阶段碳排放量，预制装配式施工方式下，预制外墙板比现浇方式碳排放减少了为 1.6%，主要体现在模板周转次数、材料损耗率，以及施工机械的差异。

总体来看，装配式非承重外墙与传统砌筑外墙有碳减排的效果，其全生命期碳排放主要集中在构件生产阶段的原材料消耗，以及构件运输阶段。对建筑设计阶段，可通过标准化设计减少非标产品的使用。

3.2.2 内隔墙

为实现全生命期的灵活布局，装配式建筑的平面布局宜采用大开间大进深的形式，宜采用非砌筑的轻质内隔墙进行空间的分隔。传统内隔墙常用材料为多孔砖、混凝土砌块及石膏龙骨隔墙等；而装配式内隔墙板采用非砌筑方式，主要为ALC板、轻钢龙骨内隔墙、木骨架组合墙体等，其中ALC板中间为空心，成品板材工业化生产、现场拼装，其施工效率是传统砖砌体的4-5倍，取消了现场砌筑和抹灰工序；轻钢龙骨内隔墙可根据实际需要采用纤维石膏板或硅酸钙板，并可实现管线分离。

表 3.2.2-1 砌筑内隔墙与非砌筑内隔墙做法对比

做法	优势	优势	成本对比	
传统内隔墙做法	200厚蒸压加气混凝土	1) 技术及施工成熟。	1) 高能耗、低产出；2) 基层平整度较差；3) 管线检修困难；4) 施工工期长。	材料费 320 元/m ³ ，人工费 130 元/m ³ ，合计约 450 元/m ² 。（不包括构造柱、圈梁等措施费用）
装配式非砌筑内隔墙做法	5mm厚ALC条板+50mm厚空腔+75mm厚ALC条板。	1) 节能绿色；2) 轻质安装快；3) 精确度高；4) 性价比；5) 可实现墙体管线分离。	1) 材料及人工成本高。	材料费 600 元/m ³ ，人工费墙做法 400 元/m ³ 。（无额外构造费用）

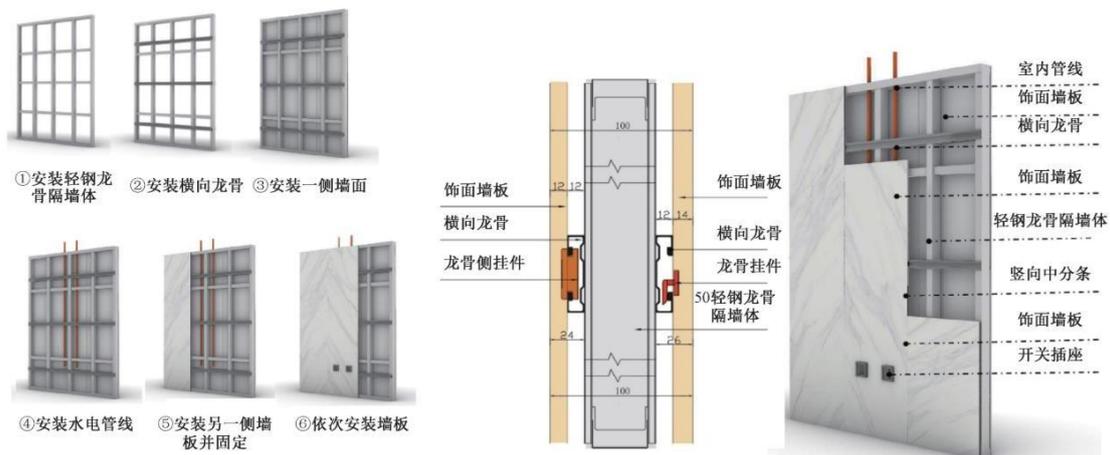


图 6 轻钢龙骨隔墙体示意

图 3.2.2-1 轻钢龙骨隔墙构造示意

采用非砌筑的轻质内隔墙是建筑内装工业化的基本措施之一，隔墙面板选择对内装工业化隔墙至关重要，对隔墙面板的选用，可参考下列方式：

- (1) 普通纸面石膏板：适用于室内吊顶、隔墙和贴面墙系统；
- (2) 耐火纸面石膏板：适用于防火要求高的室内吊顶、隔墙和贴面墙系统；
- (3) 耐水纸面石膏板：适用于卫生间、厨房及其他湿度变化多的场合；
- (4) 管道井芯板：适用于石膏板管井墙系统；

此外装配式内隔墙宜设置架空层，架空层内敷设电气管线、开关、插座、面板等电气元件。

3.3 装配式装修

装配式建筑宜选用装配式装修。据统计仅 2020 年，我国共计完成了超过 7186 万 m^2 建筑面积的装配式装修。装配式装修是采用干式工法，将内装部品、设备管线等在工厂实现模块化集成，再在现场进行组合安装的装修方式。装配式装修具备生产效率高、工期短、资源消耗量少等特点，能有效减少传统装修方式带来的高耗能、噪声、粉尘污染、建筑垃圾多等问题；根据王强等针对北京市密云区长安新村和南菜园新村回迁房项目中装配楼地面部品的碳排放计算，装配式地面比传统地面做法减少的碳排放量高达 73%，具有非常显著的节能减排作用。

装配式装修主要包括内隔墙非砌筑、干式工法楼地面、集成厨房、集成卫生间、管线分离等。

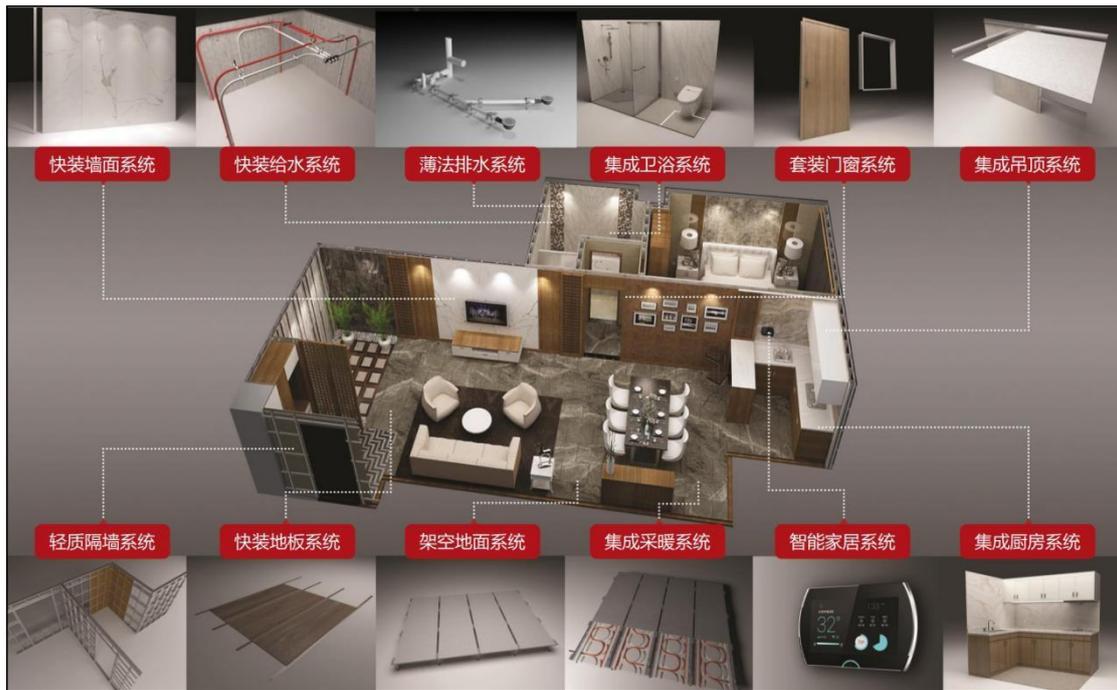


图 3.3.0-1 和能全屋集成装配式装修技术部品体系

3.3.1 装配式装修碳排放

本次进行的装配式装修碳排放计算，为住宅建筑物全生命周期内（包括建材生产、运输、现场作业、建筑使用期间的二次装修、拆除等）各个阶段的碳排放情况，同时将暂不考虑给排水工程和电气工程，主要包括装配式基础地面、装配式基础厨卫、装配式基础墙面和装配式基础隔墙、装配式集成吊顶 5 个部分。

对装配式装修碳排放的计算依托北京和能人居的全屋装配式装修模块的建材用量和安装工艺。和能人居装配式装修模块包括：隔墙类（轻钢龙骨架、和恒隔墙模块-星标系列、各类隔墙辅材等）、墙板类（和润墙板-肤润系列、墙板辅料等）、地面类（和坤地面模块-CS18 系列、模块辅料、复合地板等）、墙面调平类、门窗类（硅酸钙复合门、各类型钢门窗套、门窗套辅料等）、吊顶线脚油漆类、加固类（墙面加固板等），以及电气和给排水等（暂不考虑）。每户按模块装修要求不包括户内隔墙构造。不考虑电气和给排水部品，单户涉及物料约 435 项。

根据《建筑碳排放计算标准》（GB/T 51366-2019）和深圳市《建筑装饰碳排放计算标准》（T/SZZS01 001-2021），本次计算边界包括目标建筑装饰装修部分所需的建材生产、运输、建筑、运行（考虑生命周期内二次装修），以及拆除各

阶段所产生的碳排放情况。

(1) 建材生产阶段

根据和能人居提供工厂生产和产品信息，可计算出其主要装修产品模块所对应碳排放因子如下表所示。计算可知扣除相关给排水和电气部分建材碳排放量后，针对典型户型户内装配式精装修材料单位碳排放为 149.13 kgCO₂e/m²。

表 3.3.1-1 装配式装修模块材料户内单位碳排放量

序号	分类	单位建筑面积碳排放量(kgCO ₂ e/ m ²)
1	骨架隔墙类	9.78
2	推拉门类	6.12
3	墙面调平类	0.84
4	消音填充类	9.84
5	止水类	1.52
6	加固类	0.68
7	吊顶线脚油漆类	7.77
8	隔墙	51.67
9	隔墙辅材	3.72
10	墙板	9.67
11	墙板辅料	6.42
12	模块	3.72
13	模块辅料	2.31
14	地面浇筑类	1.27
15	金属吊顶	0.62
16	地面类	25.46
17	套装门	0.68
18	门窗套	6.55
19	台面类	0.00
20	门窗套辅料	0.45
21	钢制包封类	0.04
合计 (全部)		203.34
合计 (不包括给排水和电气工程)		149.13

(2) 建材运输阶段

和能人居装配式装修模块产品生产工厂位于天津市内，假设建材运输距离为 200km，运输方式假设为重型柴油货车运输，则根据《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366-2019) 计算可得到装配式装修建材运输阶段的单位碳排放为 1.88kgCO₂e/m²。

表 3.3.1-2 装配式装修模块运输阶段碳排放量

建材名称	建材重量 (t/m ²)	运输方式	碳排放因子	运输距离(km)	单位碳排放 (kgCO ₂ e/m ²)
装配式装修模块	0.073	重型柴油货车运输	0.129	200	1.88

(3) 装修建造阶段

装配式装修的模块化安装不需要各类工种工人和各类设备进行装修工作。按95平方米大小单户共计需要64人工/日，则计算单位面积装修安装建造阶段碳排放为0.75 kgCO₂e/m²。

表 3.3.1-3 施工阶段碳排放量

人工数 (工日/m ²)	碳排放因子(kgCO ₂ e/工日)	单位碳排放 (kgCO ₂ e/m ²)
0.674	1.11	0.75

(4) 建筑运行阶段

假设按照项目运行50年设计使用年限，参考《深圳市建筑装饰碳排放计算标准》(T/SZZS01 001-2021)估算方法，室内装饰按10年考虑，因此在目标建筑目标使用寿命内，将会进行4次二次装修，其中包括建材生产、运输、装修及拆除人工，则可得出50年寿命内二次装修单位建筑面积碳排放量为610.0kgCO₂e/m²。

表格 3.3.1-4 装配式装修 50 年寿命内二次装修总碳排放量

分类	单位建筑面积碳排放量 (kgCO ₂ e/m ²)
装修建材生产	596.53
装修建材运输	7.51
装修人工	2.99
装修拆除	2.99
合计	610.02

(5) 建筑拆除阶段

与建造阶段相同，装配式装修化拆除阶段同样不需要各类工种工人和各类设备进行。拆除操作同安装施工流程，按95平方米大小单户共计需要64人工/日，则计算单位面积拆除阶段碳排放为0.75 kgCO₂e/m²。

表 3.3.1-5 施工阶段碳排放量

人工数 (工日/m ²)	碳排放因子(kgCO ₂ e/工日)	单位碳排放 (kgCO ₂ e/m ²)
0.674	1.11	0.75

(6) 装配式装修全生命周期碳排放分析

在不考虑废弃建材拆除后回收利用的情况下，则全屋装配式装修在 50 年全生命周期内所产生的总碳排放量为 762.53 kgCO₂e/m²。其中占比最大的为在房屋运行使用阶段的 4 次二次装修，占比达到了 80%。

表 3.3.1-6 全生命周期内装配式装修的碳排放量

分类	单位建筑面积碳排放量 (kgCO ₂ e/m ²)	占比
建材生产	149.13	19.6%
建材运输	1.88	0.2%
装修阶段	0.75	0.1%
运行阶段	610.02	80.0%
拆除阶段	0.75	0.1%
合计	762.53	100.0%

由于运行阶段二次装修所产生的碳排放计算相当于进行 4 次建材生产、运输和安装的计算步骤。则可知装配式装修在全生命周期内的碳排放来源分布如下图 3.3.1-1，其中近 98%来自建材生产的碳排放。

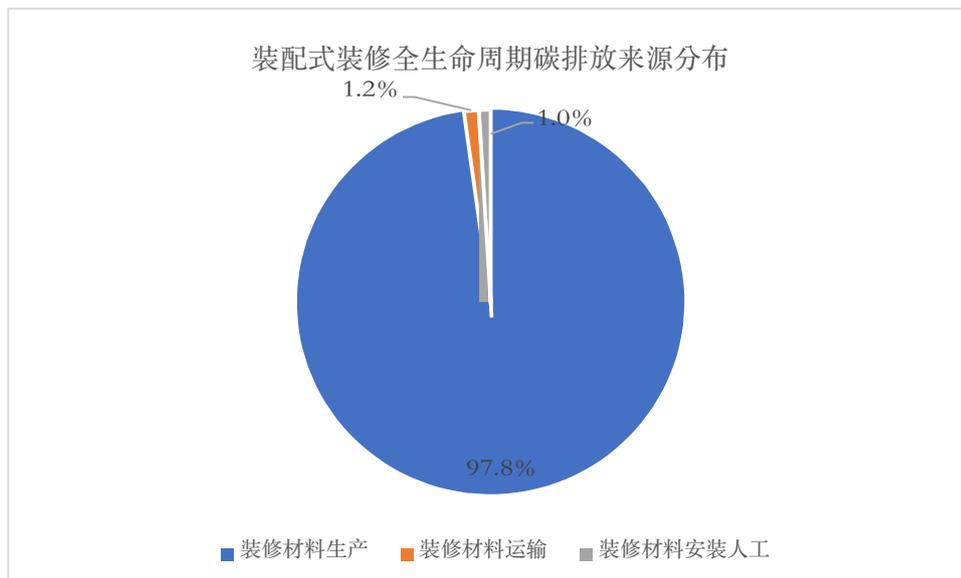


图 3.3.1-1 装配式装修全生命周期碳排放来源分布

表 3.3.1-7 主要装配式建材用量占比

序号	装修材料类型	碳排放量 (kgCO ₂ e/m ²)	占比	累计占比
1	和恒隔墙模块-星标系列	51.675	34.7%	34.7%

2	挤塑板	18.241	12.2%	46.9%
3	轻钢龙骨	15.440	10.4%	57.2%
4	各类胶粘剂	8.687	5.8%	63.1%
5	和裕墙板	6.649	4.5%	67.5%
6	铝塑共挤窗	6.550	4.4%	71.9%
7	铝材	6.452	4.3%	76.2%
8	硅瓷复合地板	5.608	3.8%	80.0%
9	电镀锌钢	5.471	3.7%	83.7%
10	矿岩棉	4.387	2.9%	86.6%
11	石膏粉	4.081	2.7%	89.3%
12	架空地面模块-18 系列	3.721	2.5%	91.8%
13	和润墙板-肤润	3.024	2.0%	93.9%
14	铁件	1.982	1.3%	95.2%
15	硅酸钙板	1.611	1.1%	96.3%

进一步分析装配式模块前 15 位主要装修材料的碳排放占比。其中占比最高的材料为隔墙模块（包括硅酸钙板、岩棉板以及轻钢龙骨）、挤塑板和轻钢龙骨。此外该装配式装修模块大量应用硅酸钙板材料（碳排放因子为 234 kgCO₂e/m³）代替瓷砖、面砖（碳排放因子为 846- 1370.9 kgCO₂e/m³）作为饰面材料，可有效降低装修材料所产生的碳排放量。

3.3.2 常规湿作业装修碳排放

常规户内湿作业装修碳排放计算中，以《房屋建筑与装饰工程消耗量定额》（TY01-31-2019）所给定的湿作业装修各环节标准工程工艺。

同时由于和能人居的模块化装配式装修产品包括了户内隔墙模块，其应用场景户型不需要进行户内隔墙的土建作业，为保证与装配式装修计算边界一致，此处应增加户内隔墙部分的工程量，其中包括户内隔墙的现浇混凝土工程、钢筋工程以及模板工程的工程量，同时对应计算包括地面找平抹灰、地面瓷砖装饰、内墙面抹灰、内墙面瓷砖，以及天花板相关工程量（抹灰、基层板、吸音板和面层）。对应工程量分析如下表 3.3.2-1 所示。

表 3.3.2-1 湿作业装修增加工程内容（假设）

序号	项目	工程分项
1	混凝土工程	直形墙
2	钢筋工程	HPB400 级钢 $\phi 6\text{mm}$, $\phi 8\text{mm}$, $\phi 10\text{mm}$, $\phi 12\text{mm}$
3	模板工程	直形墙

4	楼地面装饰工程	平面砂浆找平层（混凝土或硬基层上 20mm）
5		陶瓷地面砖（水泥砂浆粘贴-0.10 m ² 以 内）
6	墙、柱面装饰工程	一般抹灰（内墙-14+6mm）
7		陶瓷锦砖（水泥石膏砂浆）
8	天棚工程	混凝土天棚（一次抹灰10mm）
9		胶合板基层（5mm）
10		吸音板天棚（矿棉吸音板）
11		木质装饰板天棚面层（方格式-密铺）
12	油漆、涂料、裱糊 工程	内墙涂料（天棚面二遍）

经计算湿作业装修方式在全生命期内碳排放量如下表 3.3.2-2 所示，同样在湿作业装修的运行使用阶段，考虑户内装饰按 10 年装修一次，则可知在目标建筑使用寿命内，将会进行 4 次二次装修，其中每次装修均包括建材生产、运输、装修及拆除人工几个环节。其中进行原装饰面拆除工程所需工程量参考《装配式建筑工程消耗量定额》（TY01-01(01)-2019）的相关额定值进行估算。

表 3.3.2-2 全生命期内湿作业装修的碳排放量

分类	单位建筑面积碳排放量 (kgCO ₂ e/m ²)	占比
建材生产	262.17	24.7%
建材运输	19.78	1.9%
装修阶段	3.45	0.3%
运行阶段	775.93	73.1%
拆除阶段	0.74	0.1%
合计	1062.07	100.0%

由于运行阶段碳排放计算相当于进行 4 次建材生产、运输和安装的计算步骤。则可知湿作业装修在全生命周期内的碳排放来源分布如下图，其中近 90%来自建材生产的碳排放。

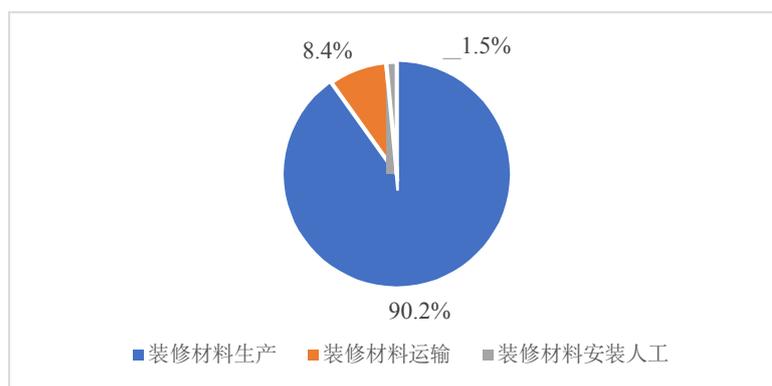


图 3.3.2-1: 湿作业装修全生命周期碳排放来源分布

3.3.3 装配式装修低碳要点

对比分析可知装配式装修在全生命周期内较湿作业装修降低了 299.5 kgCO₂e/m²碳排放量，减排率为 28.2%。除拆除阶段装配式装修碳排量略微高于湿作业装修外，其余所以阶段均低于湿作业装修。分析全生命周期各环节碳排放情况，可知其中隐含碳排放占比最高的是运行阶段（主要来源为装修建材的二次生产）。

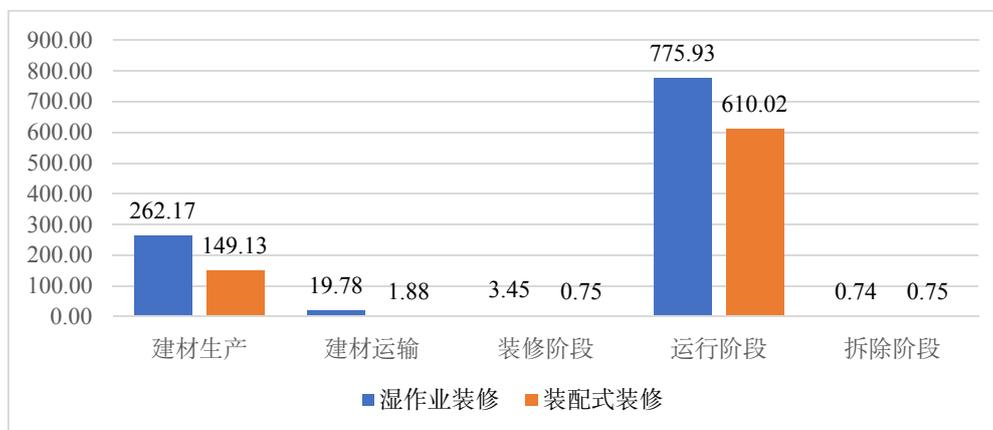


图 3.3.3-1: 装配式装修及湿作业装修全生命周期内隐含碳排放量对比

表 3.3.3-1: 装配式装修对比湿作业装修碳排放减排率

装修全生命周期主要碳排放去向	装配式装修减排率（全生命周期）	装配式装修减排率（同比）
装修材料生产	19.9%	22.1%
装修材料运输	7.5%	89.4%
装修材料安装人工	0.8%	52.4%
合计	28.2%	-

装配式装修对比传统湿作业装修工艺，不仅可以实现节省工期、减少现场施

工复杂性，同时可以有效地降低装修建材的多余损耗，提高材料的利用率，从而降低建筑生产环节的碳排放量。考虑建筑使用寿命内的多次二次装修，装配式装修可实现的碳减排率为 28.2%。

3.4 整体厨卫

3.4.1 整体厨房

整体式厨房是装配式建筑中工业化程度比较高的内装部品，装配式建筑室内装修中设置的厨房宜采用整体厨房的形式，并采用干式工法的施工方式。整体厨房采用标准化、模块化设计方式设计制造标准单元，通过标准单元的不同组合，适应不同空间大小，达到标准化、系列化、通用化的目标。



图 3.4.1-1 整体厨房示意图

整体厨房的选型，应采用标准化内装部品，应综合考虑套内空间的使用面积和厨房设备的种类数量等，并符合国家及地方标准的相关要求。

(1) 整体厨房中组成部品的选择，应在考虑建筑模数化要求的基础上方便使用者的操作习惯；

(2) 对整体厨房中组成部件的模数选择，不应影响厨房整体的模数协调原则，在保证厨房整体模数协调的前提下，合理布置各个组成部件，达到协调统一

的目的；

(3) 整体厨房内装部品的选择，应考虑到厨房炊事工作的特点，并符合人体工程学的要求及建筑模数化的要求。

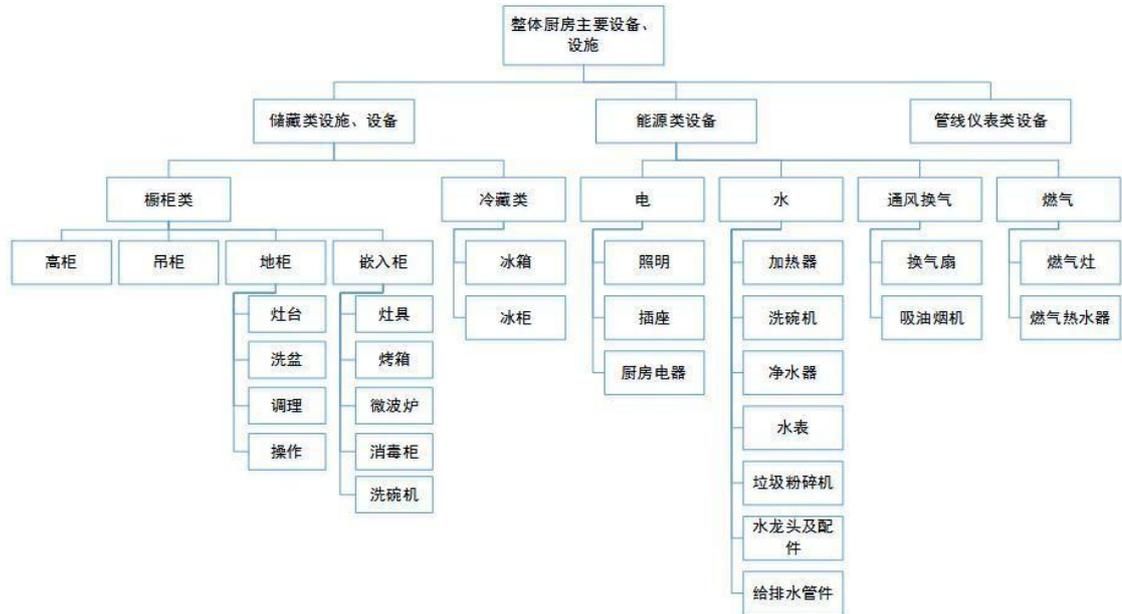


图 3.4.1-2 整体厨房主要设施设备参考图

3.4.2 整体卫生间

装配式建筑宜采用标准化的整体卫浴内装部品，安装应采用干式工法的施工方式。整体卫浴是以防水底盘、墙板、顶盖构成整体框架，结构独立，配上各种功能洁具形成的独立卫生单元，具有洗浴、洗漱、如厕三项基本功能或其功能的任意组合。

整体卫浴是工厂化产品，是系统配套与组合技术的集成，整体卫浴在工厂预制，采用模具将复合材料一次性压制成型，现场直接整体安装，适应建筑长寿化的需求，可方便重组、维修、更换。另外与采用传统做法现场施工的卫生间相比，整体卫浴的工厂生产条件较好、质量管理措施完善，有效提高了建筑质量，提高了施工效率，降低了建造成本，同时也实现了成品化，便于工程质量管理以及保险制度的实施。

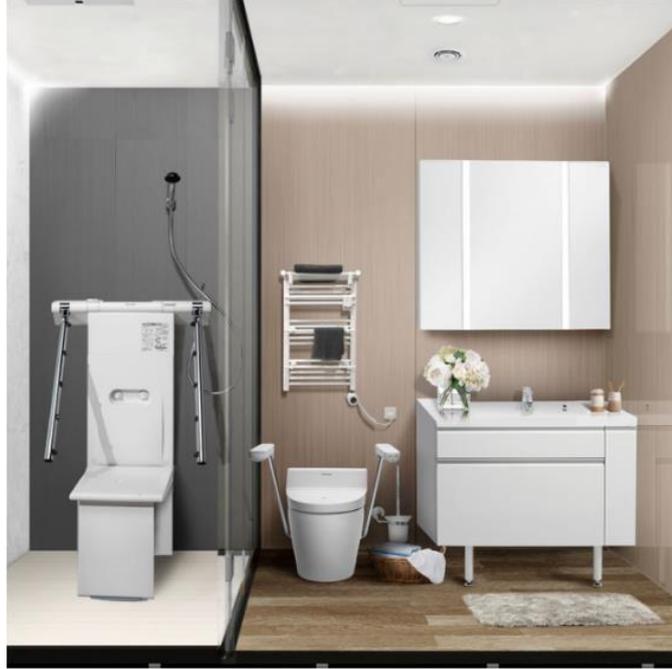


图 3.4.2-1 整体卫浴示意图

整体卫浴设计宜采用干湿分离方式，给排水、通风和电气等管道管线连接应在设计预留的空间内安装完成，并在各专业设备系统预留的接口处设置检修口；整体卫浴的地面不宜高于套内地面完成面的高度。

3.5 低碳建材

3.5.1 竹质建材

采用竹材建造房屋,在国内外均有较长的历史。目前在装配式建筑中竹材使用比较典型的两大类形式：一是将圆竹简单的加工处理后直接用于装配式建筑结构如图 3.5.1-1（左），二是将竹深加工后以工程竹形式用于装配式建筑结构如图 3.5.1-1（中、右）。



图 3.5.1-1 圆竹材（左）、胶合竹板（中）、重组竹板（右）

1. 圆竹材

(1) 圆竹材的物理力学性能

圆竹中空壁薄有节,从物理力学角度看,是一种很好的筒体结构,弯直均可,刚柔并济,具有较大的抗弯性能和稳定性,是一种抗拉性能很好的建筑材料。处理后可直接用于建筑结构中。但圆竹的力学性能受外界影响因素大,易劈裂,耐久性差,如要在工程中推广使用,需对圆竹进行技术处理,以满足工程要求。

(2) 装配式建筑中的应用现状

不管国内还是国外,最传统的竹结构形式是直接采用圆竹作为基本构件建造的竹楼建筑。圆竹具有天然环保和资源丰富的优势,随着绿色环保加工建造新技术的出现,圆竹装配式建筑应用越加广泛,如小跨度的竹编结构和梁板结构,大跨度的拱和穹顶结构等特色建筑。单波等对预制装配式圆竹结构屋架进行设计试验,并依据试验结果和《木结构设计规范》(GB 50005-2017)成功建造了一个约50m²的预制装配式圆竹房屋示范建筑,该示范建筑已使用3年多,目前状况良好,验证了圆竹用于预制房屋的可行性和适用性。

随着圆竹节点连接技术的不断创新,造型新颖的圆竹建筑逐渐增多,且大部分为展馆或公共建筑,如2010年上海世博会的“德中同行之家”展馆、印度展馆、2019年北京世界园艺博览会“竹之眼”展馆等都是现代圆竹装配式建筑的典型之作,充分展示了纯圆竹结构建筑的特色美。



图3.5.1-2 “德中同行之家”展馆



图3.5.1-3 印度展馆



图 3.5.1-4 北京世界园艺博览会“竹之眼”展馆

图 3.5.1-5 2021 年上海花博会竹藤馆

2. 胶合竹板

(1) 胶合竹板的物理力学性能

胶合竹材是一种综合力学性能很好的建筑材料，可作为工程中的梁、柱等受力构件。但大部分已有文献测得的物理力学性能基本是小试样所得，如要在工程中推广使用，仍需要通过足尺试件研究测定，以满足工程技术和规范等要求。

(2) 装配式建筑中的应用现状

目前,装配式胶合竹结构房屋常见的形式有两大类，一类是装配式胶合竹结构板房；另一类是胶合竹轻型竹结构住宅。装配式胶合竹结构板房以竹胶合板为结构主材，木材为辅材,制成竹材墙体、屋面和屋架、连接柱和连系梁等构件,各构件在工厂按照建筑模数制作，在施工现场组装并用螺栓或钉连接，装配成竹结构房屋主体结构后，再铺设防水层和安装门窗。

肖岩课题组在湖南大学内设计建造了一间装配式竹结构试验房屋，并对房屋的屋架力学性能、抗震防火、室内空气质量品质等方面进行了相关试验和测试研究，证明了装配式胶合竹结构的主要构件都可以在工厂预制好，现场安装，且工艺简单，施工迅捷，拆装方便可重复利用、抗震性能和保温隔热性能良好、室内空气质量符合要求、造价低廉等优点，且竹结构板房的防火性和安全稳定性要明显优于轻钢板房。具有代表性的装配式胶合竹结构板房还有肯尼亚基苏木 Maseno 大学校区样板房，全部构件预制，运送到现场后组装而成。

由于胶合竹材可保持外形规整美观，表面平滑，耐久性好，美观大方，既能保持竹材本色，又可以进行多种方式的处理，使其外形丰富色彩。同时，胶

合竹本身防霉防蛀，老化性能好，若在竹结构外采取相应的防护措施，可使竹结构耐腐蚀，延长使用年限，降低维护费用，是一种绿色环保、节约能源和资源的新型建筑。

3. 重组竹板

(1) 重组竹板的物理力学性能

已有文献对重组竹力学性能的研究，大多参考木材相关的测试标准，且为小试样，试验测定的力学性能与足尺大型构件的相应力学指标存在明显差异。试件的尺寸、生产工艺、环境因素均对重组竹的力学性能造成影响。故用于结构设计时，为保证安全、经济合理，应进行足尺构件的力学系统测试研究和理论分析。

(2) 装配式建筑中的应用现状

重组竹材技术经过二十几年的发展，已成为我国竹材加工利用的主流产品和最具有发展潜力的优势产业之一。近年来，随着竹基纤维复合材料的最新制造技术的研发，重组竹的生产效率迅速提升，新制造技术可将毛竹及以往难以工业化利用的丛生竹、散生杂竹和小径毛竹等一次利用率提高至 90%以上，并实现大规模工业化生产。作为新型环保建材，因其轻质高强、弹塑性、韧性，力学性能及抗震性能优越，构件可工业化生产等特点，重组竹在装配式建筑行业逐渐被推广使用，如作为装配式建筑中梁、柱、墙板和楼板等构件。装配式建筑所需的构件可实现工厂预制，工厂组装或施工现场组装，工业化程度高，满足装配式建筑的要求，并在一定程度上能实现“以竹代木”，缓解我国木材资源供应不足的矛盾。

由于重组竹良好的物理力学性能，与传统的建筑材料如水泥、钢铁和玻璃相比是典型的绿色环保低碳材料，极大地满足了建筑结构对绿色低碳材料的需求，因此重组竹在建筑结构领域的应用逐渐提升，较多的科研及建筑单位开始重视重组竹的工程结构应用研究，并取得了重大进展，如 2019 年北京世园会上推出的新型高性能竹基纤维复合材料——竹钢。竹钢在重组竹的基础上开发出来的，制造时不去芯、不去黄，经过技术处理后获得较高强度，且材料的利用率可高达 90%以上，2021 年上海花博会竹藤馆的网架材料就选用了延展性强、柔软性强的新型重组竹材——竹钢。

3.5.2 木制建材

木材是森林碳汇的延续，碳以材料的形式固定在森林中。与其他常用建筑材料相比，木材是唯一可以循环使用的可再生绿色材料。

1. 木制板材

木制板材是以中密度纤维板、刨花板等人造板为主要的原材料加工而成的板材，利用物理及机械方式，将木材或者植物纤维经过打磨，在机械分离和化学处理，以及粘结剂的作用下进行胶接，同时，使用防水剂进行防水处理，加工成耐高温、耐压强的高效能的木制板材。建筑木制板材广泛应用于建筑家具中。对于建筑木制板材的环保特性，其材料大部分是颗粒板，在使用的过程中可以实现白天吸收热量，夜间释放热量，进而形成了较为有效的木制板材环保性能方面的应用。



图3.5.2-1 木制板材



图3.5.2-2 木制型材

2. 木制型材

木制型材，是通过特定的制作工艺，将相应的木制材料制成一定截面的型材，一般应用于相应的建筑结构及建筑装饰类工程中。在木制型材中，应用最为广泛的是木塑复合材料，该材料是利用木纤维或木粉与树脂为原材料，按照一定的比例混合加工而成的木制材料，具有一定的抗压能力和抗紫外线能力，绝缘、绝热能力较好，具备绿色环保产品的相应特性，主要应用于包装、建材、家具、物流等行业。随着人们对木塑复合材料的认识不断提高，以及木塑复合材料技术水平不断提高，其应用范围不断拓展到汽车内装饰、建筑外墙、装饰装潢、户外地板、复合管材、铁路枕木等领域。

3. 木制结构材

木制结构材，是通过刨、削、切等将木材加工成单板、单板条、刨片等，再通过胶黏剂和热压的作用，加工成一定规格的木制材料，包括单板层积材（LVL）、单板条层积材（PSL）、定向刨片层积材（OSL）、胶合木以及由LVL和结构用胶合板或定向刨花板OSB组合加工而成的工字梁、金属件衔接木材桁架等。木制结构材以其强度大、变异性小、允许设计应力高、尺寸稳定性好、防火性能佳等优点，在建筑、桥梁、交通领域广泛作为结构材料。



图 3.5.2-3 木制结构材

3.5.3 可再利用材料、利废建材

1. BM 轻集料连锁砌块



图 3.5.3-1 BM 轻集料连锁砌块

BM 轻集料连锁砌块可应用于内外墙，由高炉水渣、炉渣、粉煤灰、浮石、石屑、再生骨料等材料加水泥搅拌压制、养护而成，70%以上建筑垃圾作为主要原料。其施工优势可分为以下几点：

- (1) BM 砌块芯柱做法：可免除支设、拆除模板等工序，节省钢筋、混凝

土和工期。

(2) BM 砌块水平系梁做法：U 型砌块砌筑，槽内配钢筋，浇筑混凝土形成水平系梁做法可免除模板支设，系梁混凝土浇筑完毕后，即可继续砌，节省钢筋、混凝土和工期。

(3) 墙面直接粉刷 3 ~ 5mm 的粉刷石膏，每个工人每天的成活量 100 m²。

(4) 自身吸水率较加气块小很多。

(5) BM 砌块由于原材为轻集料混凝土则与混凝土主体线性膨胀系数差异较小，故 BM 砌块与加气块相比在抗裂和防空鼓方面效果更好。

(6) 墙体的完整性好，避免二次开槽和封堵的工序和费用。

2. FQ 复合保温砌块



图 3.5.3-2 FQ 复合保温砌块

FQ 复合保温砌块可与外墙保温结构一体化结合使用或应用于框架填充墙，由水泥、粉煤灰、石硝、钢渣、水渣、炉渣、保温板、钢丝等构成。其优势可分为以下几点：

① 使用寿命：FQ 砌块保温材料选用 EPS，复合夹芯于轻集料结构体内部，不与外部环境接触，受环境等外部条件影响破坏较小，故保温与主体同寿命，节省后期的更换和维护

② 防火性能：FQ 保温砌块保温材料外有 50mm 的不燃材料防护层，满足最新《建筑设计防火规范》（GB50016-2014）的性能要求，同时保护层使材料耐火达到 3 小时以上。

③ 安全性能：FQ 砌块墙体，抹灰后可直接做涂料或粘贴瓷砖，与薄抹灰

体系相比，可有效保障墙体整体性，避免出现空鼓开裂或外保温脱落的问题

④ 减少外保温、界面剂等工序，施工步骤属于二次结构，大大降低外围护的施工周期与综合造价。

3. 装配式 BM 连锁墙板



图 3.5.3-3 装配式 BM 连锁墙板

装配式 BM 连锁墙板应用于非承重内隔墙，由工业副产石膏为胶凝材料形成，添加材料是粉煤灰、钢渣、矿粉、炉渣等工业剩余物，添加短纤维、耐碱性玻纤网格布为增强材料；添加减水剂、缓凝剂、憎水剂等功能性材料。其优势为不易开裂、隔声性能好、平整度好、施工速度快、可回收、绿色

3.6 结论及建议

从全生命期的角度来看，随着运行期建筑能耗水平的降低，装配式建筑在物化阶段碳排放占比逐渐提升。通过对常规建筑及低能耗建筑的能耗对比发现，常规建筑物化阶段的碳排放占比在 2%-38%，而低能耗建筑占比则达到 9%-46%之间。

为更好地降低装配式建筑全生命期碳排放，可采用下列措施：

1. 规划阶段，充分利用场地自然条件，如地形、阳光、树荫和风，尽可能营造良好的场地微气候，减少场地内的热岛效应；

2. 设计阶段，遵循“被动优先、主动优化”的原则，充分利用太阳得热、提升围护结构热工性能、保证良好的气密性、设置可调遮阳措施，选用高效节能设备，充分利用可再生能源等设计方法，减少建筑运行阶段的能耗；

3.选用低碳建材，利用可再循环、可回收建材、利废建材等，减少材料采集过程中的碳排放；

4.采用非砌筑外墙及内隔墙，宜选用围护墙与保温、装饰一体化集成的围护墙板；宜利用隔墙的架空层布置管线实现管线与土建分离；

5.采用装配式装修。

第四章 结构专业

4.1 标准化设计

4.1.1 形体宜规则

结构合理化是节约建材使用量，降低碳排放量的有效方法。当前许多建筑物，为不必要的造型变化，设计不合理的建筑结构、不对称不均匀的平面，使建筑材料使用量激增。合理而经济的建筑形态和建筑结构设计，即建筑的跨距合理，平面基本均匀对称，空间简洁，减少不必要的造型结构。根据《建筑抗震设计规范》（GB50011-2010（2016年版）），将建筑形体的规则性分为：规则、不规则、特别不规则、严重不规则。特别不规则的建筑应进行专门研究和论证，不应采用严重不规则的建筑。

1. 碳排放情况

对于严重或特别不规则建筑形体与规则或不规则建筑形体的结构

- 1) 结构材料用量增加 5%~15%，直接增加生产、运输和拆除阶段的碳排放 5%~15%；
- 2) 增加施工作用难度，间接增加建造、拆除阶段的碳排放 5%左右；
- 3) 增加运行期间的维护难度，间接增加运行阶段的碳排放 5%左右。

一般会增加结构碳排放 10%~25%，严重的会增加 50%以上。

2. 布置原则

- 1) 建筑宜选用大开间、

大进深、空间灵活可变的布置方式。2) 承重墙、柱等竖向构件上、下连续。

3) 门窗洞宜上下对齐、成列布置，其平面位置和尺寸应满足结构受力及预制构件的设计要求；剪力墙结构不宜采用转角窗。

4) 厨房和卫生间的平面布置应合理，其平面尺寸宜满足标准化整体橱柜及整体卫浴的要求。

5) 平面布置应规则，外墙洞口宜规整有序。

6) 设备与管线集中布置，并应进行管线综合设计。

3. 案例分析

基于以上论述，分别对两栋装配式建筑的碳排放进行分析，以此论证建筑形体规则性对碳排放的影响。

(1) 样本户型 1

1) 项目概况

- ① 项目名称：北七家某住宅及配套
- ② 建筑类型：装配整体式混凝土剪力墙结构
- ③ 设计使用年限：50 年
- ④ 项目规模（面积）：5572 m²
- ⑤ 层数：17 层
- ⑥ 层高表：

表 4.1.1-1 层高表

层数	1 层	2-15 层	16 层	17 层
层高 (m)	2.94	2.9	3.03	3.9

- ⑦ 装配率：50%
- ⑧ 预制率：40%
- ⑨ 本工程的结构整体计算，采用中国建筑科学研究院编制的 PKPM 系列软件。

2) 平面图



图 4.1.1-1 建筑效果及平面图

3) 碳排放计算

表 4.1.1-2 碳排放计算表

项目	工程量	碳排放量 (kgCO ₂ e)
混凝土 (m ³)	C30	460782.81
	C40	222243.91

	C45	180.04	79451.65
钢筋 (kg)	HPB300	5580.14	13113.33
	HRB400	265792.14	688635.54
	碳排放量合计		1464227.24
碳排放量/建筑面积(kg/m ²)			262.78

(2) 样本户型 2

1) 项目概况

① 项目名称：北京市昌平区昌平镇东环路 136 号（原六亭 饭店）CP00-0205-0021 地块
R2 二类居住用地项目

② 建筑类型：装配整体式混凝土剪力墙结构

③ 设计使用年限：50 年

④ 项目规模（面积）：4947.73 m²

⑤ 层数：地下 3 层，地上 11 层

⑥ 层高表：

表 4.1.1-3 层高表

层数	1-10 层	11 层
层高 (m)	2.9	3

⑦ 装配率：61.72%

⑧ 预制率：水平构件 75.01%，竖向构件 44%

⑨ 本工程的结构整体计算，采用中国建筑科学研究院编制的 PKPM 系列软件。

2) 平面图

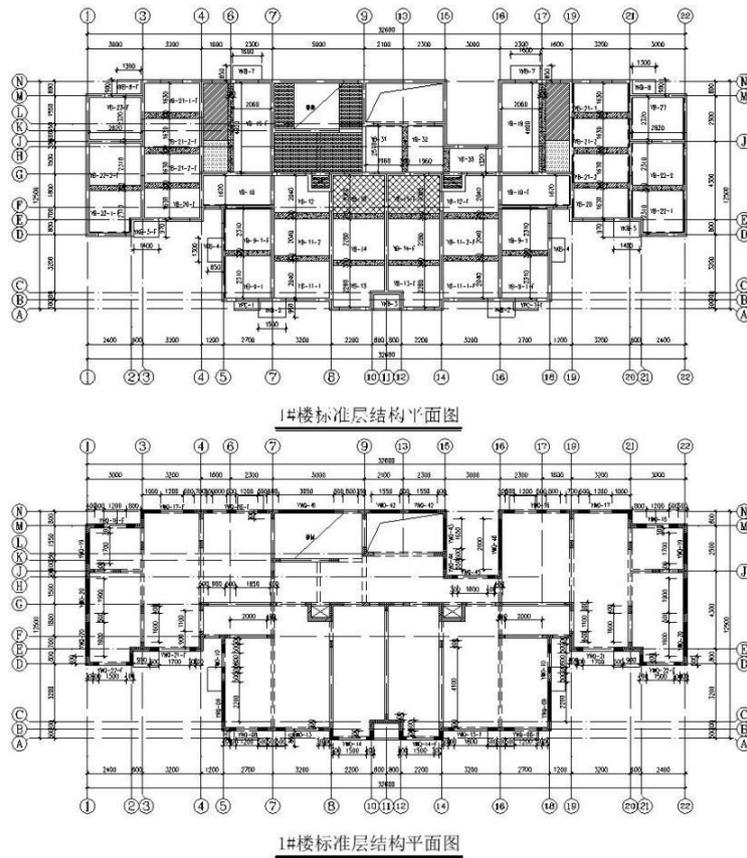


图 4.1.1-2 建筑平面图

3) 碳排放计算

表 4.1.1-4 碳排放计算表

项目		工程量	碳排放量 (kgCO _{2e})
混凝土 (m ³)	C30	1188.88	376161.63
	C35	242.95	88093.67
钢筋 (kg)	HPB300	2819.06	6624.79
	HRB400	179188.62	464256.21
碳排放量合计			935136.31
碳排放量/建筑面积(kg/m ²)			189.00

(3) 结论

根据以上案例分析可知：两个户型均为高层住宅，建筑类型均为装配整体式混凝土剪力墙结构，户型2的装配率及预制率均高于户型1，且户型1从平面图上可见平面不规则，在分析单方碳排放后，户型1的碳排放量明显高于户型2。

4.1.2 少规格多组合

结构设计应本着少规格多重复的原则。模数化对装配式建筑尤为重要，是建筑部品制造实现工业化、机械化、自动化和智能化的前提，是正确和精确装配的技术保障，也是降低成本的重要手段。例如：模具在预制构件制作中占成本比重较大。模具或边模大多是钢结构或其他金属材料，可周转几百次上千次甚至更多，可实际工程一种构件可能只做几十个，模具实际周转次数太少，加大了无效成本。模数化设计可以使不同工程不同规格的构件共用或方便地改用模具。

(1) 剪力墙优选尺寸

装配式剪力墙住宅适用的优选尺寸，我国大多数建筑是剪力墙结构，剪力墙的优选尺寸意义重大。北京地方标准《装配式剪力墙住宅建筑设计规程》（DB11/T 970—2013）中给出了装配式剪力墙住宅适用的优选尺寸，见下表。

表 4.1.2 装配式剪力墙住宅适用的优选尺寸系列

类型	建筑尺寸			预制墙板尺寸			预制楼板尺寸	
部位	开间	进深	层高	厚度	长度	高度	宽度	厚度
基本模数	3M	3M	1M	1M	3M	1M	3M	0.2M
扩大模数	2M	2M/1M	0.5M	0.5M	2M	0.5M	2M	0.1M
类型	门洞尺寸		窗洞尺寸		内隔墙尺寸			
部位	宽度	高度	宽度	高度	厚度	长度	高度	
基本模数	3M	1M	3M	1M	1M	2M	1M	
扩大模数	2M/1M	0.5M	2M/1M	0.5M	0.2M	1M	0.2M	

(2) 楼板优选尺寸:

楼板厚度的优选尺寸序列为 80mm、100mm、120mm、150mm、160mm、180mm。

4.1.3 与生产相协同

下表给出了工厂模台尺寸对预制构件的尺寸限制。

表 4.1.3 工厂模台尺寸限制

工艺	限制项目	常规模台尺寸	构件最大尺寸	说明
固定模台	长度/m	12m	11.5m	主要考虑生产框架体系的梁，也有 14m 长的但比较少
	宽度/m	4m	3.7m	更宽的模台要求订制更大尺寸的钢板，不易实现，费用高
	允许高度/m	-	没有限制	如立式浇筑的柱子可以做到 4m 高，窄高形的模具要特别考虑模具的稳定性，并进行倾覆力矩的验算
流水线	长度/m	9m	8.5m	模台越长，流水作业节拍越慢
	宽度/m	3.5m	3.2m	模台越宽，厂房跨度越大
	允许高度/m	0.4m	0.4m	受养护窑层高的限制

注：本表数据可作为设计大多数构件时的参考，如果有个别构件大于此表的最大尺寸，可以采用独立模具或其他模具制作。但构件规格还要受吊装能力、运输规定的限制。

构件设计应与构件生产工艺结合，满足规格尺寸优化和便于生产加工的要求，建议在设计时考虑以下内容：

- (1) 实现设计、制造、施工各个环节和建设各个专业的互相协调。
- (2) 对建筑各部位尺寸进行分割，确定集成化部件、预制构件的尺寸和边界条件。
- (3) 尽可能实现部品部件和配件的标准化，特别是用量大构件，优选标准化设计。
- (4) 有利于部件、构件的互换性，模具的共用性和可改用性。
- (5) 有利于建筑部件、构件的定位和安装，协调建筑部件与功能空间之间的尺寸关系。
- (6) 对于主体结构部件的定位，采用中心线定位法或界面定位法。
- (7) 对于柱、梁、承重墙的定位，宜采用中心线定位法。
- (8) 对于楼板及屋面板的定位，宜采用界面定位法，即以楼面定位。
- (9) 对于外挂墙板，应采用中心线定位法和界面定位法结合的方法。板的上下和左右位置，按中心线定位，力求减少缝的误差；板的前后位置按界面定位，以求外墙表面平整。
- (10) 在节点设计时考虑安装顺序和安装的便利性。
- (11) 预制构件生产和装配应满足模数和模数协调，并考虑制作公差和安装公差对构件组合的影响。

(12) 预制构件的配筋应进行模数协调，应便于构件的标准化和系列化，还应与构件内的机电设备管线、点位及内装预埋等实现协调。

4.1.4 与施工相协同

第一，构件设计应与施工组织结合，应考虑构件、连接节点形式对模板、支撑、外架系统的影响。同时，预制装配构件与较多现浇部位交叉作业，给现场安装和连接带来非常大的困难，减少后浇混凝土对提高效率、降低成本是非常必要的。拆分设计时需寻求减少后浇混凝土的有效途径。减少后浇混凝土会带来构件三维化、复杂化，尽管是这样，因为现场比工厂更麻烦，宁可选择在工厂预制。

第二，构件尺寸和重量应满足运输和吊装的要求。从安装效率和便利性考虑，构件越大越好，但必须考虑工厂起重机能力、模台或生产线尺寸、运输限高限宽限重约束、道路路况限制、施工现场塔式起重机或其他起重机能力限制等。

1. 吊运重量约束条件

下表给出了工厂及工地常用起重设备对构件重量限制。

表 4.1.4-1 工厂及工地常用起重设备参数

环节	设备	型号	可吊构件重量	可吊构件范围	说明
工厂	桥式起重机	5t	4.2t(max)5t	柱、梁、剪力墙内墙板 (长度3m以内)、外挂 墙板、叠合板、楼梯、 阳台板、遮阳板等	要考虑吊装架及脱模 吸附力
		10t	9t(max)10t	双层柱、夹芯剪力墙板 (长度4m以内)、较大 的外挂墙板	要考虑吊装架及脱模 吸附力
		16t	15t(max)16t	夹芯剪力墙板(4~ 6m)、柱、梁、双莲藕 梁、十字莲藕梁、双T 板	要考虑吊装架及脱模 吸附力
		20t	19t(max)	夹芯剪力墙板(6m以	要考虑吊装架及脱模

塔式 工地 起重 机	QTZ80 (5613)	1.3 ~ 8t(max)	上)、超大预制板、双 T 板 柱、梁、剪力墙内墙板 (长度3m 以内)、外挂 墙板、叠合板、楼梯、 阳台板、遮阳板等 双层柱、夹芯剪力墙 (长度3 ~ 6m)、较大 的外挂墙板、特殊的 柱、双莲藕梁、十字莲 藕梁	吸附力 可吊重量与吊臂工作 幅度有关, 8t 工作幅 度是在 3m 处 1.3t 工 作幅度是在 56m 处 可吊重量与吊臂工作 幅度有关, 16t 工作 幅度是在 3.1m 处; 3.2t 工作幅度是在 70m 处
	QTZ315 (S315K16)	3.2 ~ 16t (max)	夹芯剪力墙板 (6m 以 上)、超大预制板、双 T 板	可吊重量与吊臂工作 幅度有关, 25t 工作 幅度是在 3.9m 处; 9.5t 工作幅度是在 60m 处
	QTZ560 (S560K25)	7.25 ~ 25t (max)		

注: 本表数据可作为设计大多数构件时参考, 如果有个别构件大于此表重量, 工厂可以临时用大吨位汽车式起重机; 对于工地, 当吊装高度在汽车式起重机高度限值内时, 也可以考虑汽车式起重机。塔式起重机以本系列中最大臂长型号作为参考, 制作该表, 以塔式起重机实际布置为准。本表剪力墙板是以住宅为例。

2. 运输尺寸约束条件

运输尺寸约束条件, 下表给出了装配式建筑部品部件运输限制。

表 4.1.4-2 装配式建筑部品部件运输限制

情况	限制项 目	限制 值	部品部件最大尺寸与质量			说明
			普通 车	低底盘 车	加长 车	
正常情况	高度/m	4m	2.8m	3m	3m	
	宽度/m	2.5m	2.5m	2.5m	2.5m	
	长度/m	13m	9.6m	13m	17.5m	

	重量/t	40t	8t	25t	30t	
	高度/m	4.5m	3.2m	3.5m	3.5m	高度 4.5m 是从地面算起总高度
特殊审批情况	宽度/m	3.75m	3.75m	3.75m	3.75m	总宽度是指货物总宽度
	长度/m	28m	9.6m	13m	28m	总长度是指货物总长度
	重量/t	100t	8t	46t	100t	重量是指货物总重量

注：本表未考虑桥梁、隧洞、人行天桥、道路转弯半径等条件对运输的限制。除了车辆限制外，还需要调查道路转弯半径、途中隧道或过道电线通信线路的限高等。

3. 构件形状约束条件

三维立体构件制作和运输都会麻烦一些，圆形截面柱生产比矩形截面柱困难的多。构件拆分设计时应尽量地将异形构件规则化、空间构件平面化进行设计。

4.2 结构材料低碳选型

对于结构材料来说，其在低碳装配式建筑中的重要性不言而喻。结构材料是建筑物生命周期碳排放及其他环境负荷的重要组成部分。建筑的不可持续发展很大程度上是由于结构材料在生产和使用过程中的高能耗、高资源消耗和高污染所致。因此，结构材料的选用是低碳建筑设计与评价中一个很重要的环节。选用低碳建材可以降低建筑材料生产、使用过程中的资源消耗和碳排放。从全生命周期的角度来看，低碳建材承载着节约资源、能源消耗、减少污染物排放和优化生活环境质量等重要作用，对结构材料的合理、科学选用将在很大程度上决定着建筑的“低碳”程度。本报告基于我国较常用的结构材料：混凝土，钢材，竹木作为调研对象，论述结构材料低碳选型策略。

4.2.1 混凝土结构低碳化设计方法概述

我国主要的结构材料形式依然是混凝土结构，其应用比例达到 70%以上，且因其力学与耐久性能、适用性及经济性良好，仍将在当前及未来的气候适应型城市建设中发挥关键作用。然而，混凝土结构的主要原材料水泥与钢筋均为碳排放密集型产品，大宗材料运输与现场施工也为碳排放密集型过程，致使混凝土结构传统建造模式成为人类碳排放持续上升的主要诱因之一。亟须研发混凝土结构低碳设计理论，从以人类需求为中心的单一视角，转向兼顾混凝土结构与环境系统的同步可持续需求，实现混凝土结构全生命期碳减排。

混凝土结构碳排放多指建筑材料生产、运输、建造、拆除及废弃物回收等建设过程中产生的碳排放,即隐含碳排放,与结构的使用情况无关。隐含碳排放又包括直接碳排放和间接碳排放,前者指施工过程的直接排放或一次能源消耗的排放,后者指输入产品或二次能源对应的隐含碳排放。对于建筑而言,隐含碳排放占生命周期碳排放的10%~80%,建筑使用阶段的节能技术进步将提高隐含碳排放占比。通常认为混凝土结构的碳排放来源主要为:材料生产与制备(75%~85%)、运输过程(10%~18%)、施工过程(5%~10%)。水泥与钢材的生产分别造成了7%~10%与7%~9%的全球年碳排放量,而全球约68%的水泥与约23%的钢材用于混凝土结构的建造中,是混凝土结构高碳排放现状的主因。因此,混凝土结构低碳设计应优先围绕水泥和钢材这两个因素开展。由此,混凝土结构低碳设计方法如下:

(1) 碳减量技术

混凝土结构的碳减量可从碳排放强度降低和材料用量降低两个角度实现。降低碳排放强度主要针对水泥进行研发,包括生产工艺以及优化材料及设计。如粉煤灰、矿渣等辅助胶凝材料部分取代水泥,可减少了约24%的水泥相关碳排放;通过石灰石粉、煅烧黏土和硅酸盐水泥的三元混合物替代水泥,提供良好胶凝特性的同时减少了煅烧能耗,相较于普通硅酸盐水泥可实现约30%的碳减排。降低材料用量主要从高性能材料入手,包括高性能混凝土或组合结构形式。如ECC、UHPC通过掺入纤维、活性粉末等实现高效增强增韧,减少了混凝土与钢筋用量需求,为轻量化、减量化与无筋化建造构建技术基础,可降低14%~33%的结构生命周期隐含碳排放;如钢管混凝土结构采用钢管约束改善了混凝土脆性问题,实现了混凝土强度与塑性增长,提升了传统混凝土使用效率,材料用量降低,碳减排效益显著。



图 4.2.1 采用 UHPC 的建筑

(2) 碳再用技术

混凝土结构的碳再用技术主要从既有建筑利用考虑。首先合理提高结构的设计工作年限,进而得到长寿命与高性能提升,为既有混凝土结构部品的再利用提供了有力支撑。其次,成熟的检测和加固改造技术,以及先进的整体结构移位技术,使部分混凝土构件甚至整体混凝土结构被再利用成为可能。最后,“拆建协同”使结构拆解与新建相配合,将原结构中混凝土构件逐件拆卸,并保障拆后构件的完整性,进而依托结构可拆装设计或既有构件的再利用节点构造,应用于新建结构建设中,为城市更新中碳再用的实现提供了更为灵活的路径。

(3) 碳循环技术

混凝土结构的碳循环技术主要考虑混凝土的碳化反应可吸收水泥煅烧反应释放的 CO_2 ,形成基于化学反应的碳循环。实际上,因混凝土结构构件体量较大,比表面积相对小,且混凝土表面覆盖的涂料、瓷砖等装饰材料会延缓混凝土的碳化进程,限制了构件的碳吸收,其中所含水泥熟料生产过程的相关碳排放仅 17%能在结构正常服役期得到吸收。因此,可采用亲水混凝土构件,从而增加碳循环。一般认为再生混凝土碳排放较天然混凝土的差异主要在于水泥用量微增、运输距离减少和骨料储存阶段的碳吸收;如果关注前两类因素,得出的再生混凝土碳排放量级与天然混凝土相近。而考虑不超过 3 个月的储存时间内,再生原料即可实现 $11 \text{ kgCO}_2/\text{t}$ 的碳吸收,从而减少约 5.5%的混凝土结构生命周期隐含碳排放;采用优化的废弃物管理机制可进一步促进再生原料的充分碳化,使水泥煅烧释放 CO_2 的吸收比例提高约 80%,相当于降低约 20%的混

凝土结构隐含碳排放。

此外，在《低碳环保理念下的高层建筑结构设计分析》中，和《低碳环保理念下的高层建筑结构设计探析》中，以及《探究低碳环保理念下的高层建筑结构》中指出，现代高层建筑多采用钢筋混凝土结构，其在低碳环保理念下的高层建筑结构设计应关注：①选择合适的结构材料，包括材料强度和弹塑性性能；②选择合适的建筑形体，降低风荷载作用；③选择合适的结构体系，如钢结构装配式建筑或混凝土装配式建筑；④充分利用自然原理，使结构设计利于自然通风降低机电负荷等。

4.2.2 钢结构低碳化设计方法的概述

钢结构很早便被认为是绿色环保材料，早在2006年《绿色建筑评价标准》（GB/T 50378-2019）中就给出钢结构是资源消耗少、环境影响小的建筑形式，并已形成共识并被广泛接收。当时主要考虑的维度是建造和废弃物拆除，尤其是施工阶段的角度。但如果基于全寿命期考虑到钢结构生产阶段的高碳排放情况，其是否也是低碳的结构形式则需要另行研究。



图 4.2.2 某钢结构枢纽工程

《绿色建筑评价标准》（GB/T 50378-2019）中给出的钢结构低碳化设计方法为采用高强度钢材，如 Q355 或 Q355GJ 及以上钢材。钢结构作为一种新兴发展的建筑结构形式，在节能减排方面有着其独特的优势，必将成为低碳建筑所采用的最重要的结构形式。钢结构建筑在施工阶段、使用阶段和拆除回收利用阶段的碳排放这三个方面与混凝土建筑占据优势，具体分析如下：

第一，对于钢结构建筑，钢材作为主要的建筑材料，具有轻质、高强的特点，一般情况下钢结构多使用截面尽量开展的构件，且构件都比较细长；而混凝土结构都为实心构件，且结构都比较粗壮。所以对于同一幢建筑，从结构层面来说，使用钢结构建成后的结构重量要比使用混凝土小的多。

第二，钢结构的重量比混凝土结构轻很多，在同样的运输距离下，运输钢结构构件所需要

消耗的能源显然较少，碳排放量也就较低；其次，运输商品混凝土需要专门的运输车辆，而运输钢结构构件只需要普通的卡车即可，所以相对于混凝土结构而言，钢结构施工的运输成本较低，碳排放量也较低量。

第三，与混凝土结构的施工过程相比，钢结构施工更加节能环保，不需要消耗水，无需使用模板，需要更少的施工人员，施工周期更短，钢结构所具有的这些优势都能很大程度的减少碳排放量。除此以外，钢结构所需要的施工场地更小，这就带来更少的植被破坏，从另一个角度减少了碳排放量。

第四，钢结构中的结构体系与维护体系分离，在各种气候条件地区可以使用各种不同保温隔热性能与维护体系，而不必依靠增加墙体厚度来达到节能减排的目的，因此推广钢结构，特别是钢结构在住宅上的应用就成为节能环保、减少碳排放量的很好的选择。此外，钢结构在使用阶段的另一个节能减排优势在于其维修加固的方便性。建筑在使用过程中可能会因为地震或者其他罕遇的作用而遭受损坏，或者由于建筑物超过使用年限而需要加固的时候，钢结构就体现出其优势，因为可以对已损坏的构件或节点进行快捷而方便地替换，而对其他构件没有影响，这一点对于混凝土结构来说是无法做到的。

第五，钢材有着可回收利用的特性，钢结构建筑拆除后建材的回收利用率很高。发达国家在建筑上使用的再回收钢材占总用钢量的比重已经很大。我国也正在逐步形成一条较完整的对于废旧钢材的回收利用的产业体系，所以拆除钢结构建筑后所得到的废旧钢结构构件，可以得到很高的回收利用率，相比于混凝土结构来说，其碳排放量更低。此外，钢结构建筑的拆除比混凝土或砖混结构更加方便，这也从另一个方面减少了碳排放量

4.2.3 竹、木结构低碳化设计方法的调研

木结构和竹结构因防火等方面问题，在国内用量一直较少。但随着“双碳目标”的提出，具有低碳性能的木结构和竹结构将会迎来发展的春天。本文把两种结构放在一起进行研究，主要考虑两种结构形式在低碳方面有很多共同点，如材料可再生、有良好的固碳能力、隐含碳排放相对低等。根据调研有以下设计方法。



图 4.2.3 木、竹结构

采用模型分析法对竹、木结构建筑进行物化阶段碳排放量和碳汇评估，得出的结论是竹结构单位建筑面积碳排放量是钢筋混凝土结构和钢结构的 47.30%和57.60%，轻型木结构的对应占比为 35.09%和42.73%，轻型木结构单位建筑面积碳排放量最低。但竹结构单位建筑面积固碳量为碳排放量的 1.27 倍，是负碳建筑；轻型木结构单位建筑面积固碳量为碳排放量的 82.80%，固碳量可以抵消大部分碳排放量，是低碳建筑。同时，不同类型的木结构物化阶段碳排放量也存在较大。井干式木结构单位建筑面积碳排放量最少，是轻型木结构的 55.16%；现代木框架结构最多，是轻型木结构的 1.14 倍。由此，进行低碳结构选型时，在满足相关要求的前提下，优先选择竹结构，其次为木结构；木结构中，优先选用井干式木结构，其次为轻型木结构，最后为现代木框架结构。

指出木结构的空气污染指数最低，钢结构和混凝土结构产生的空气污染为木结构的 1.7 倍和 2.2 倍；木结构的材料对水毒性的影响亦最低，钢结构和混凝土结构为木结构的 3.47 倍和 2.15 倍；木结构建筑的温室效应最低，钢结构和混凝土结构是木结构的 1.2 倍和 1.5 倍；木结构在生产及建造过程中产生的固体废料最少，钢结构的废料是木结构的 1.36 倍；生态资源的使用，经综合评估，木结构攫取的资源最少，钢结构是木结构的 1.16 倍。木材是“绿色建筑”的首选建材。

4.3 预制墙板碳排放研究

本课题选取我国目前常用的三种剪力墙预制形式，预制混凝土夹芯保温外墙板、预制混凝土外墙板以及叠合类墙板为研究对象，围绕各自特点、碳排放因子如何选取等方向对这三种剪力墙预制形式展开碳排放的计算研究。

4.3.1 概述

1. 预制混凝土夹芯保温外墙板

预制混凝土夹芯保温外墙板国外称为“三明治板”。由钢筋混凝土外叶板、保温层和钢筋混凝土内叶板组成。是建筑、结构、保温、装饰一体化墙板，夹芯保温构件的外叶板最小厚度50mm，用可靠的拉结件与内叶构件连接，不会像薄层灰浆那样裂缝脱落，保温层也不会脱落，防火性能也大大提高。但拉结件的选择、锚固和埋入工艺必须可靠。外叶板可以直接做成装饰层或作为装饰面层的基层。夹芯保温构件比粘贴保温层抹薄灰浆的方式增加了外叶板重量和成本，也增加了无使用效能的建筑面积。

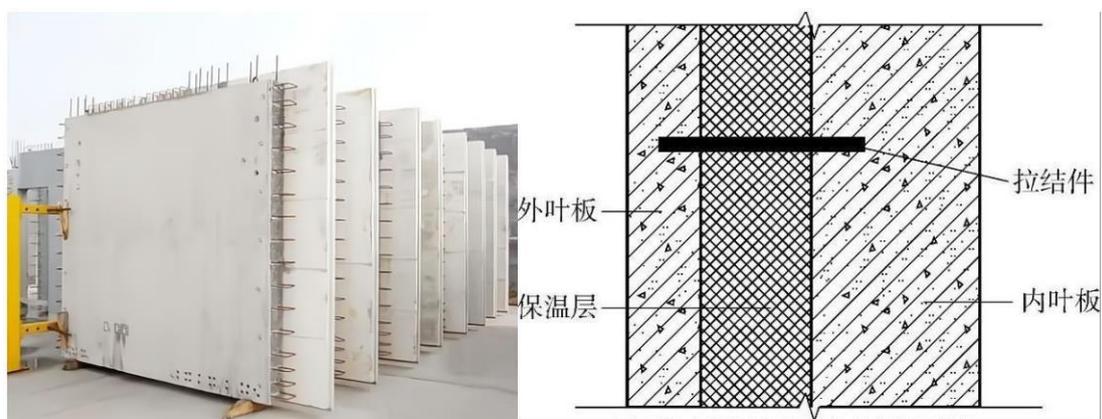


图 4.3.1-1 预制混凝土夹芯保温外墙板

2. 预制混凝土外墙板

预制混凝土外墙板在边缘处通过现浇连接，需要外架以供模板施工。在外墙施工完成后粘贴保温材料，具有整体性，提高保温效果。预制外墙表面需做粗糙面或进行拉毛处理，以方便粘贴保温材料。



图 4.3.1-2 预制混凝土外墙板

3. 叠合类墙板

双面叠合剪力墙结构在欧洲应用较多。预制墙板由两叶 50mm 厚钢筋混凝土板通过桁架筋连接而成，空腔净距不小于 100mm。现场安装后，在空腔内敷设、搭接钢筋，浇筑混凝土，形成剪力墙实心板。双面叠合剪力墙实际上就是永久性的混凝土模板。

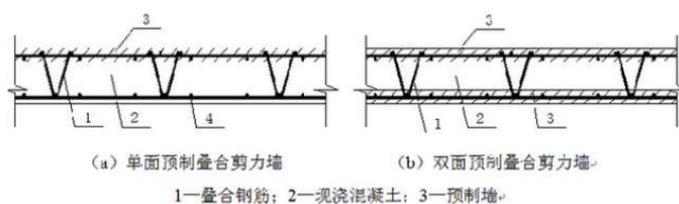


图8.4.1 预制叠合剪力墙的形式

图 4.3.1-3 叠合类墙板

4. 计算模型概述

以15G365-1 预制混凝土剪力墙外墙板 P44~57 页 WQ-2730~WQ-4530 为例，以此作为墙板混凝土及钢筋量计算基础。其中预制混凝土夹芯保温墙板考虑钢筋，混凝土，保温板，灌浆量，灌浆套筒及预埋件量；预制混凝土外墙板考虑钢筋，混凝土，保温体系，灌浆量，灌浆套筒及预埋件量；叠合类墙板考虑钢筋，混凝土及保温体系，相关计算例图见下图。

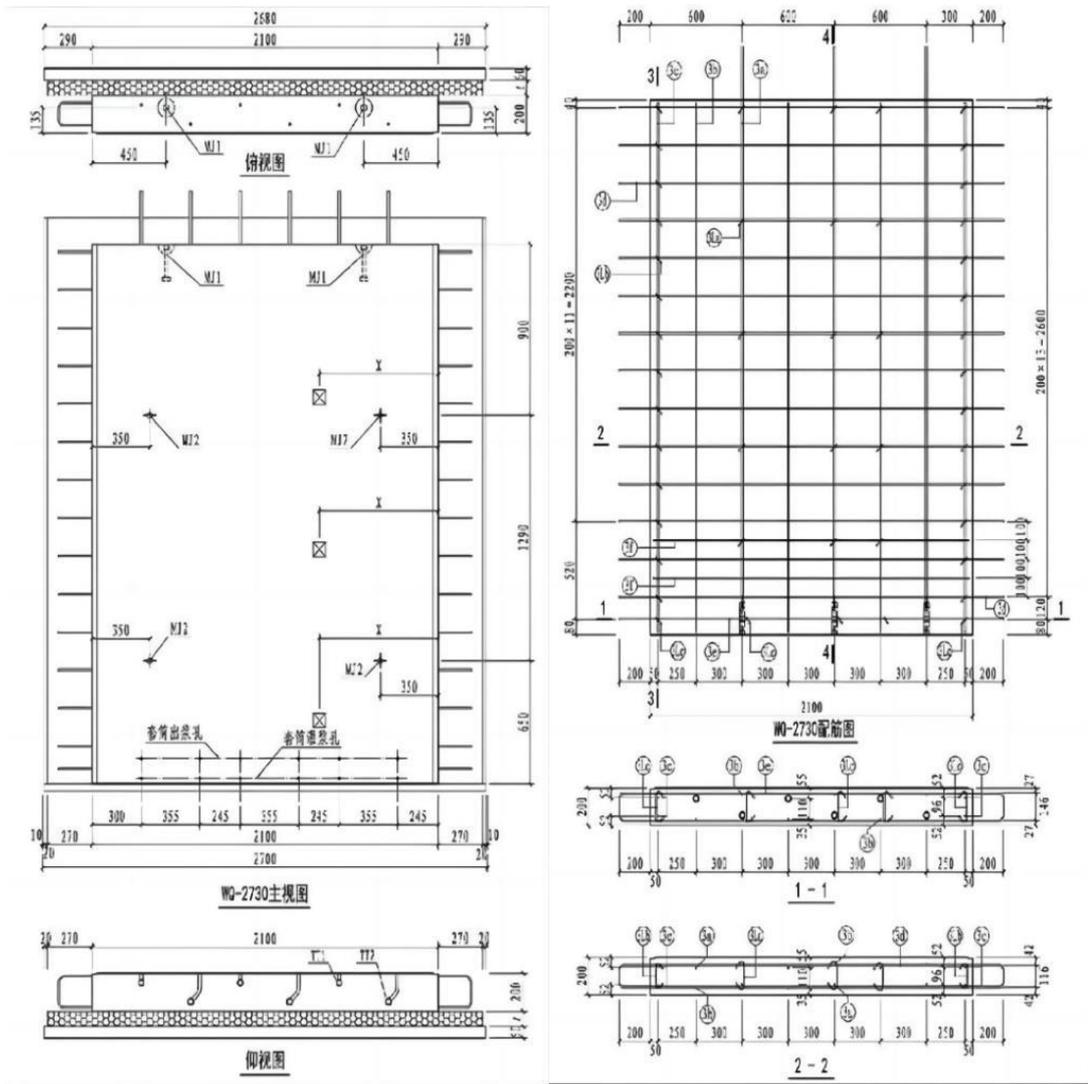


图 4.1.3-4 预制外墙示意图

5. 保温体系介绍

在计算预制混凝土外墙板及叠合类墙板时，考虑施工现场后粘保温板，根据《外墙外保温工程技术规程》（JGJ 144-2019）保温板年限为 25 年，以 50 年设计周期为计算周期，周期内保温板及其保温体系按替换一次考虑，后粘保温体系的做法如下表所示。

表 4.3.1-1 后粘保温体系做法表

系统	清单	预设参数	
安装 1m ² 黏贴保温板+薄抹灰+涂料饰面外墙保温系统	主要组成	粘结层(kg)	1.基于当前建筑工程实际，选取其中应用较广泛的“粘贴保温板+薄抹灰+涂料饰面”外墙外保温系统。 2.保温系统中所涉其他辅助件（如锚固件、防水界面剂、发泡胶、密封条、墙角托架、
	粘结剂	聚合物改性水泥砂浆	

		d=1mm	包角条) 不作考虑。
		S 黏贴=80%S	3. 鉴于粘接砂浆、抹面砂浆、抗裂砂浆成分差异较小, 研究中将抹面砂浆、抗裂砂浆均近似等同于粘接砂浆。松散密度均取
		保温;	
		松散密度	1300kg/m ³
		1300kg/m ³	
		严寒:	4. 鉴于国内有关基础数据库的缺乏, 研究中
		130mm;	中对粘结抹面抗裂砂浆和玻纤网格布采
		寒冷:	用欧洲数据库予以代替。
保温	保温	85mm; 夏	
层 (t)	板	热冬冷:	
		45mm	
		分层	
		d=5mm;	
		抹防	
		裂砂	
抹面	裂砂	松散密度	
层(kg)	浆	1300kg/m ³	
		玻纤	
		网格	
		布	
		单位面积重	
		量 130g/m ²	
		JS 聚合物水	
饰面	外墙	泥防水涂料	
层(kg)	涂料	1.5 ~ 3kg/m ²	

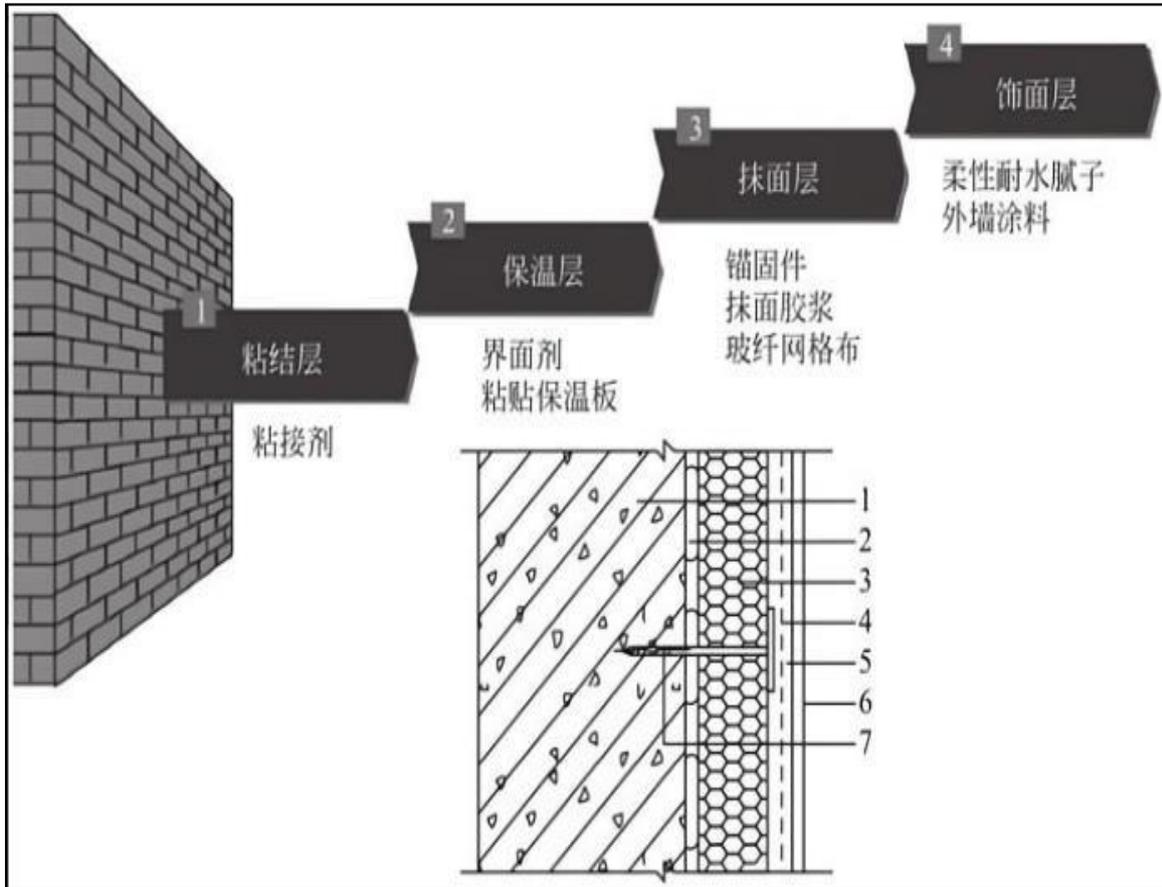


图 4.1.3-5 后粘保温体系做法示意图

6. 碳排放因子选取

本研究的涉及的建筑材料碳排放因子参数如下表所示，参数来源《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366-2019) 的附录 D。

表 4.3.1-2 建筑材料碳排放因子参数

序号	项目	单位	碳排放因子	备注
1	墙板钢筋	kg Co ₂ e/t	2590.88	按 HRB400
2	外叶板钢筋重量	kg Co ₂ e/t	2350	按 HPB300
3	混凝土	kg Co ₂ e/m ³	295	按 C30 混凝土
4	灌浆	kg Co ₂ e/t	735	按水泥
5	保温材料 1	kg Co ₂ e/t	4620	按聚苯乙烯
6	聚合物改性水泥砂浆	kg Co ₂ e/kg	1.102	

序号	项目	单位	碳排放因子	备注
7	防裂砂浆	kg Co ₂ e/kg	1.102	
8	玻纤网格布	kg Co ₂ e/kg	2.633	
9	套筒	kg Co ₂ e/t	2467.5	按 Q355 钢材
10	连接件	kg Co ₂ e/t	2590.88	按 HRB400
11	JS 聚合物水泥防水 涂料	kg Co ₂ e/kg	0.734	

4.3.2 预制混凝土夹芯保温外墙板碳排放分析

1. 不同地区预制混凝土夹芯保温外墙板各材料碳排放比例分析

(1) 严寒地区

表 4.3.2-1 严寒地区预制混凝土夹芯保温外墙板碳排放

WQ- 2730	钢筋	混凝土	灌浆	保温板	聚合物改 性水泥砂 浆	防裂 砂浆	玻纤网 格布	套筒	连接 件	JS 聚合物 水泥防水涂 料
碳排 放 (kg Co ₂ e)	294.67	493.24	16.01	130.85	0.00	0.00	0.00	1.50	0.76	0.00
占比	31%	53%	2%	14%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

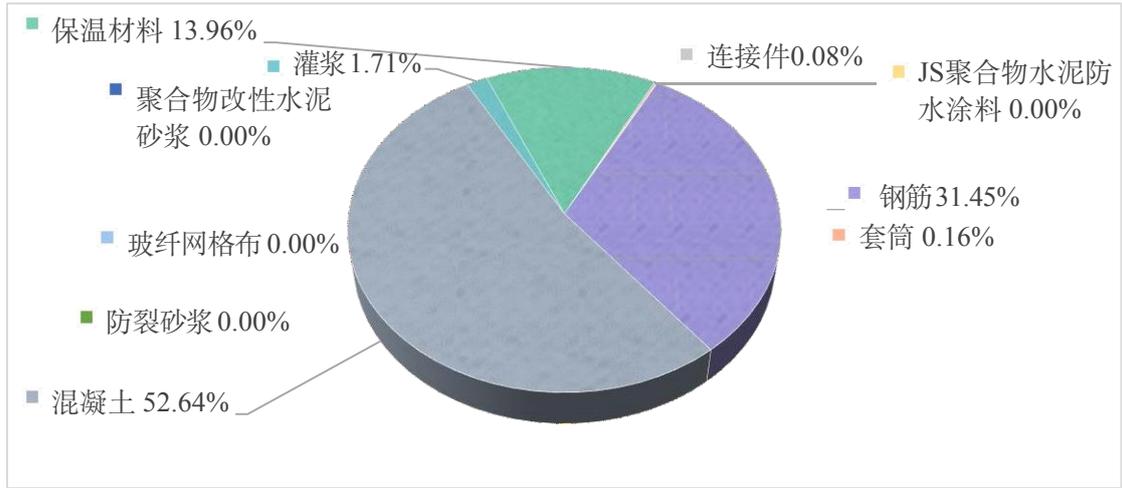


图 4.3.2-1 严寒地区预制混凝土夹心保温外墙板各类材料占比

(2) 寒冷地区

表 4.3.2-2 寒冷地区预制混凝土夹芯保温外墙板碳排放

WQ-2730	钢筋	混凝土	灌浆	保温板	聚合物改性水泥砂浆	防裂砂浆	玻纤网格布	套筒	连接件	JS 聚合物水泥防水涂料
碳排放 (kg CO ₂ e)	294.67	493.24	16.01	87.23	0.00	0.00	0.00	1.50	0.76	0.00
占比	33%	55%	2%	10%	0%	0%	0%	0%	0%	0%

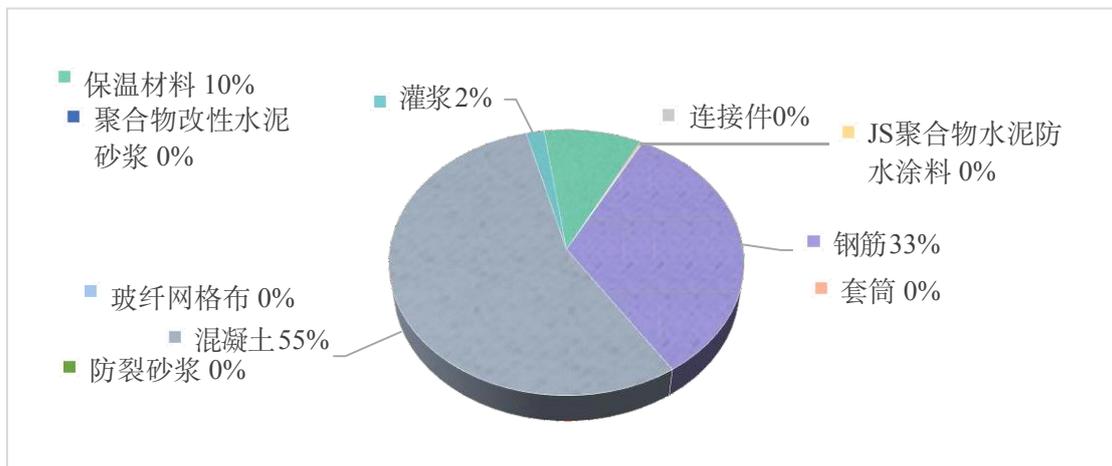


图 4.3.2-2 寒冷地区预制混凝土夹心保温外墙板各类材料占比

(3) 夏热冬冷地区

表 4.3.2-3 夏热冬冷地区预制混凝土夹芯保温外墙板碳排放

WQ-2730	钢筋	混凝土	灌浆	保温板	聚合物改性水泥砂浆	防裂砂浆	玻纤网格布	套筒	连接件	JS 聚合物水泥防水涂料
碳排放 (kg Co _{2e})	294.67	493.24	16.01	43.62	0.00	0.00	0.00	150%	76%	0.00
占比	35%	58%	2%	5%	0%	0%	0%	0.18%	0.09%	0%

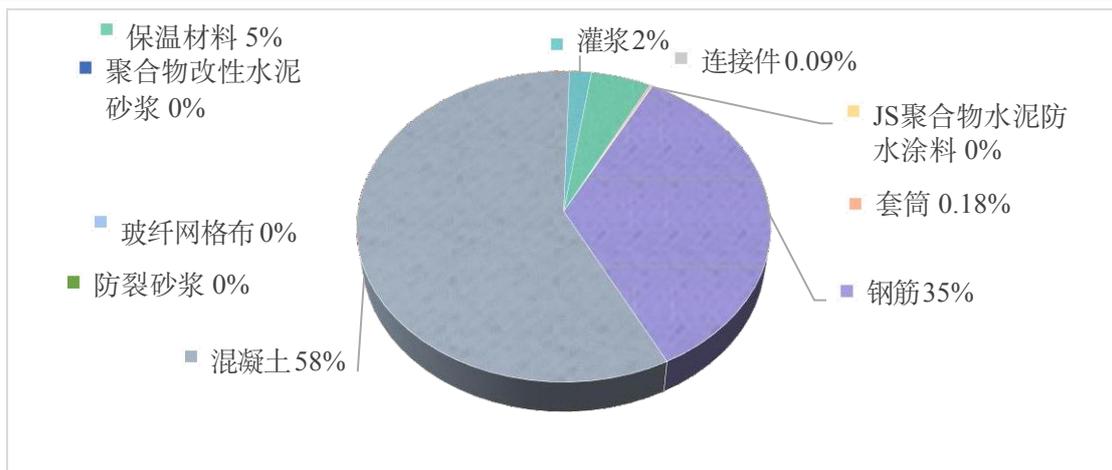


图 4.3.2-3 夏热冬冷地区预制混凝土夹心保温外墙板各类材料占比

2. 各地区及不同规格预制混凝土夹芯保温外墙板碳排放量统计

表 4.3.2-4 不同规格预制混凝土夹芯保温外墙板碳排放 (单位: kg Co_{2e})

预制混凝土夹芯保温外墙板	严寒地区	寒冷地区	夏热冬冷地区
WQ-2730	937.02	893.41	849.79
WQ-3030	994.48	945.91	897.34
WQ-3330	1106.56	1053.03	999.50

WQ-3630	1207.42	1148.93	1090.45
WQ-3930	1326.76	1263.32	1199.88
WQ-4230	1441.23	1372.83	1304.43
WQ-4530	1569.54	1496.19	1422.83

4.3.3 预制混凝土外墙板碳排放分析

1. 不同地区预制混凝土外墙板各材料碳排放比例分析

(1) 严寒地区

表 4.3.3-1 严寒地区预制混凝土外墙板碳排放

WQ-2730	钢筋	混凝土	灌浆	保温板	聚合物改性水泥砂浆	防裂砂浆	玻纤网格布	套筒	连接件	JS 聚合物水泥防水涂料
碳排放 (kg Co ₂ e)	256.41	351.88	16.01	261.69	22.54	112.71	5.39	1.50	0.76	25.99
占比	24%	33%	2%	25%	2%	11%	1%	0%	0%	2%

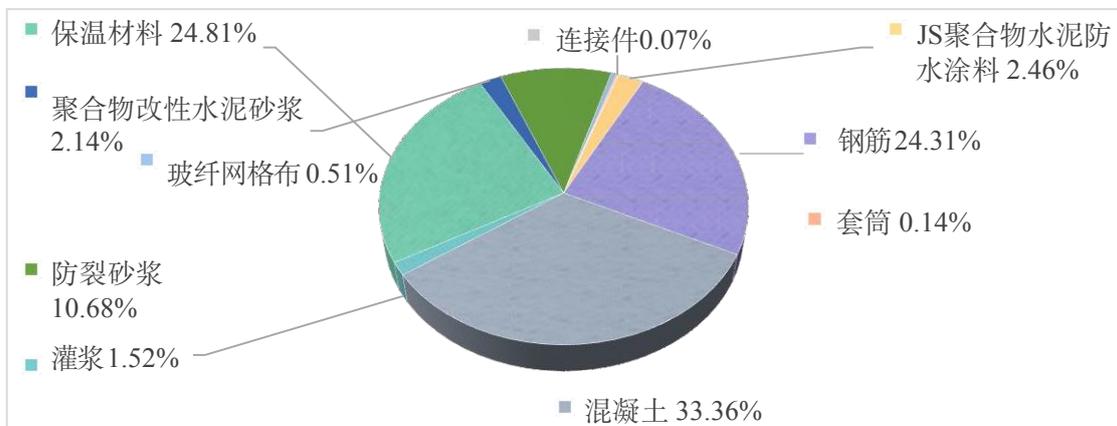


图 4.3.3-1 严寒地区预制混凝土外墙板各类材料占比

(2) 寒冷地区

表 4.3.3-2 寒冷地区预制混凝土外墙板碳排放

WQ-2730	钢筋	混凝土	灌浆	保温板	聚合物改性水泥砂浆	防裂砂浆	玻纤网格布	套筒	连接件	JS 聚合物水泥防水涂料
碳排放 (kg Co ₂ e)	256.41	351.88	16.01	174.46	22.54	112.71	5.39	1.50	0.76	25.99
占比	26%	36%	2%	18%	2%	12%	1%	0%	0%	3%

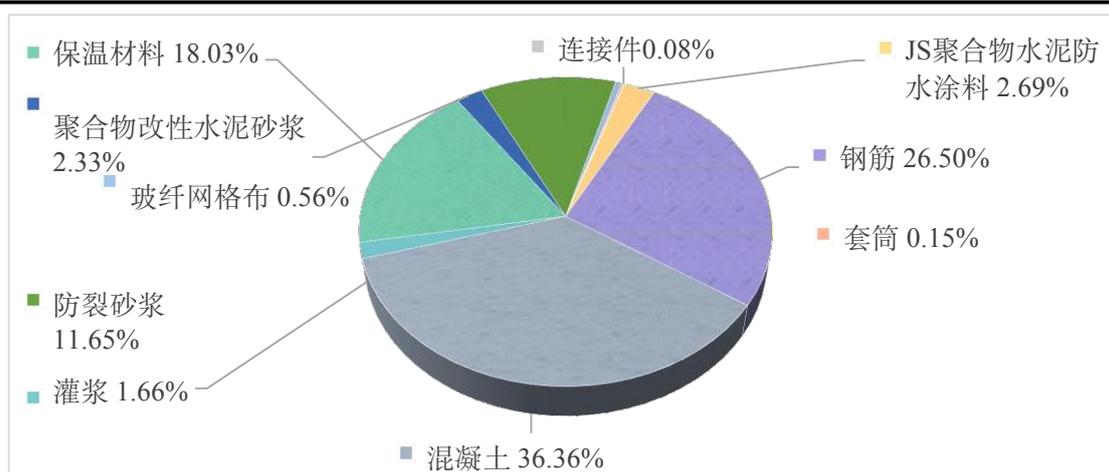


图 4.3.3-2 寒冷地区预制混凝土外墙板各类材料占比

(3) 夏热冬冷地区

表 4.3.3-3 夏热冬冷地区预制混凝土外墙板碳排放

WQ-2730	钢筋	混凝土	灌浆	保温板	聚合物改性水泥砂浆	防裂砂浆	玻纤网格布	套筒	连接件	JS 聚合物水泥防水涂料
碳排放 (kg Co ₂ e)	256.41	351.88	16.01	87.23	22.54	112.71	5.39	1.50	0.76	25.99

Co_{2e}

)

占比	29%	40%	2%	10%	3%	13%	1%	0%	0%	3%
----	-----	-----	----	-----	----	-----	----	----	----	----

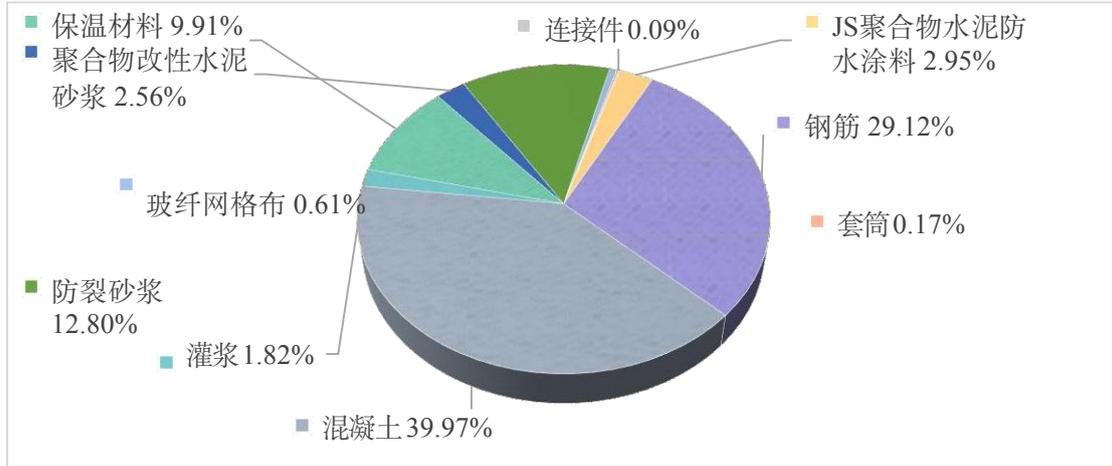


图 4.3.3-3 夏热冬冷地区预制混凝土外墙板各类材料占比

2. 各地区及不同规格预制混凝土夹芯保温外墙板碳排放量统计

表 4.3.3-4 不同规格预制混凝土外墙板碳排放 (单位: kg Co_{2e})

预制混凝土夹芯保温外墙板	严寒地区	寒冷地区	夏热冬冷地区
WQ-2730	1054.87	967.64	880.40
WQ-3030	1126.01	1028.86	931.72
WQ-3330	1251.76	1144.71	1037.65
WQ-3630	1366.30	1249.33	1132.36
WQ-3930	1499.33	1372.44	1245.56
WQ-4230	1627.47	1490.68	1353.88
WQ-4530	1769.46	1618.23	1476.05

4.3.4 叠合类墙板碳排放分析

1. 严寒地区叠合墙板各材料碳排放比例

表 4.3.4-1 严寒地区叠合墙板碳排放

WQ-2730	钢筋	混凝土	灌浆	保温板	聚合物改性水泥砂浆	防裂砂浆	玻纤网格布	套筒	连接件	JS 聚合物水泥防水涂料
碳排放 (kg Co ₂ e)	256.41	355.09	0.00	142.18	11.27	56.35	2.69	0.00	0.00	12.99
占比	30%	42%	0%	17%	1%	7%	0%	0%	0%	2%

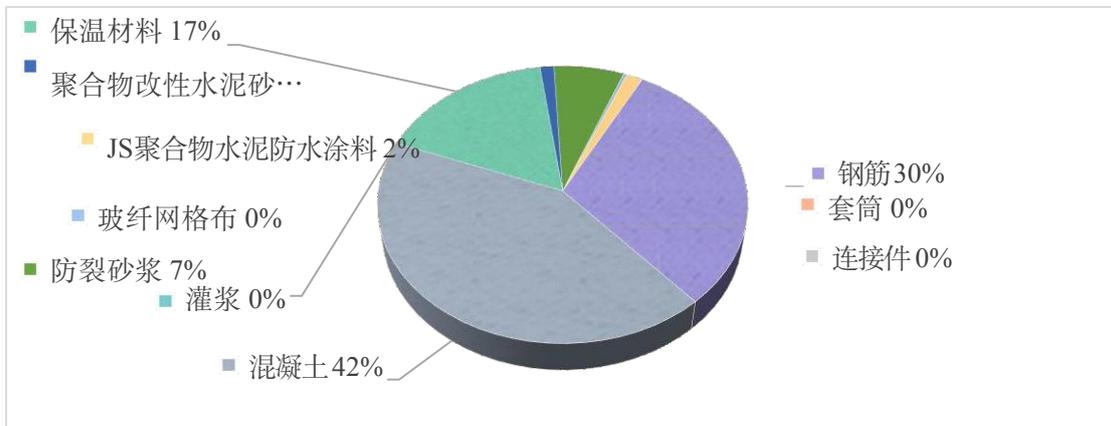


图 4.3.4-1 严寒地区叠合墙板各类材料占比

2. 叠合类墙板碳排放统计 (仅考虑严寒地区)

表 4.3.4-2 叠合类墙板碳排放

预制混凝土夹芯保温外墙板	碳排放 (kg Co ₂ e)
WQ-2730	849.97
WQ-3030	900.37
WQ-3330	1003.13
WQ-3630	1094.66
WQ-3930	1204.69
WQ-4230	1309.83

4.3.5 预制混凝土夹芯保温外墙板 V.S. 预制混凝土外墙板

1. 严寒地区

(1) 总量对比

表 4.3.5-1 严寒地区预制混凝土夹芯保温外墙板与预制混凝土外墙板碳排放对比 (单位: kg Co_{2e})

序号	墙体编号	预制混凝土夹芯保温外墙板 (三明治夹芯板)	预制混凝土外墙板 (光板)	差值
1	WQ-2730	937.02	1054.87	117.85
2	WQ-3030	994.48	1126.01	131.53
3	WQ-3330	1106.56	1251.76	145.20
4	WQ-3630	1207.42	1366.30	158.88
5	WQ-3930	1326.76	1499.33	172.56
6	WQ-4230	1441.23	1627.47	186.24
7	WQ-4530	1569.54	1769.46	199.92

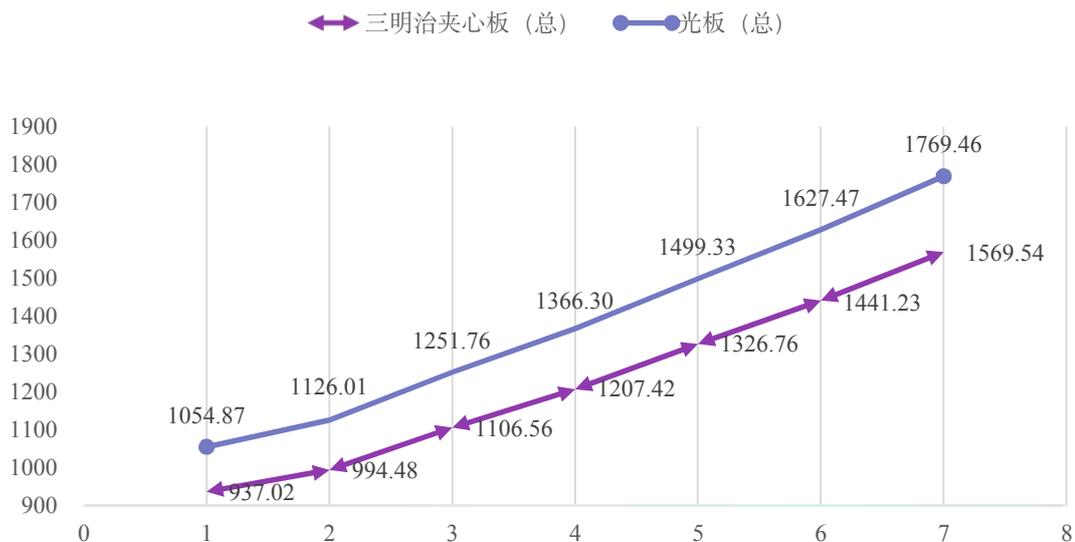


图 4.3.5-1 严寒地区预制混凝土夹芯保温外墙板与预制混凝土外墙板碳排放对比

(2) 差值分析

表 4.3.5-2 严寒地区预制混凝土夹芯保温外墙板与预制混凝土外墙板碳排放差值 (单位: kg Co₂e)

WQ-2730	钢筋	混凝土	灌浆	保温板	聚合物改性水泥砂浆	防裂砂浆	玻纤网格布	套筒	连接件	JS 聚合物水泥防水涂料
预制混凝土夹芯保温外墙板	294.67	493.24	16.01	130.85	0.00	0.00	0.00	1.50	0.76	0.00
预制混凝土外墙板	256.41	351.88	16.01	261.69	22.54	112.71	5.39	1.50	0.76	25.99
差值	38.26	141.36	0.00	-130.85	-22.54	-112.71	-5.39	0.00	0.00	-25.99

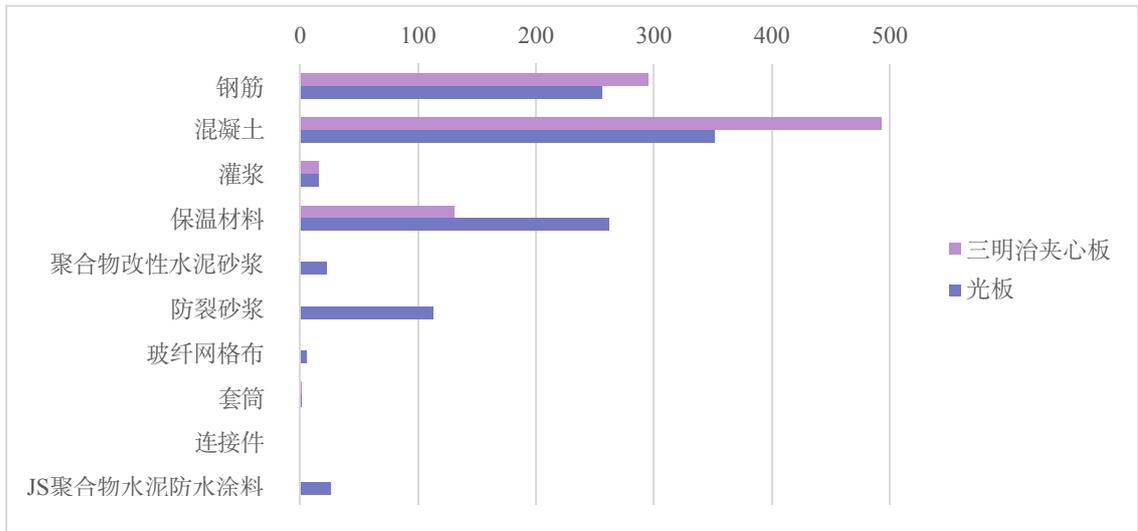


图 4.3.5-2 严寒地区预制混凝土夹芯保温外墙板与预制混凝土外墙板碳排放差值对比

2. 寒冷地区

(1) 总量对比

表 4.3.5-3 寒冷地区预制混凝土夹芯保温外墙板与预制混凝土外墙板碳排放对比 (单位: kg CO₂e)

序号	墙体编号	预制混凝土夹芯保温外墙板 (三明治夹芯板)	预制混凝土外墙板 (光板)	差值
1	WQ-2730	893.40	967.63	74.23
2	WQ-3030	945.91	1028.86	82.95
3	WQ-3330	1053.03	1144.71	91.68
4	WQ-3630	1148.93	1249.33	100.40
5	WQ-3930	1263.32	1372.44	109.12
6	WQ-4230	1372.83	1490.68	117.85
7	WQ-4530	1496.19	1618.23	122.04

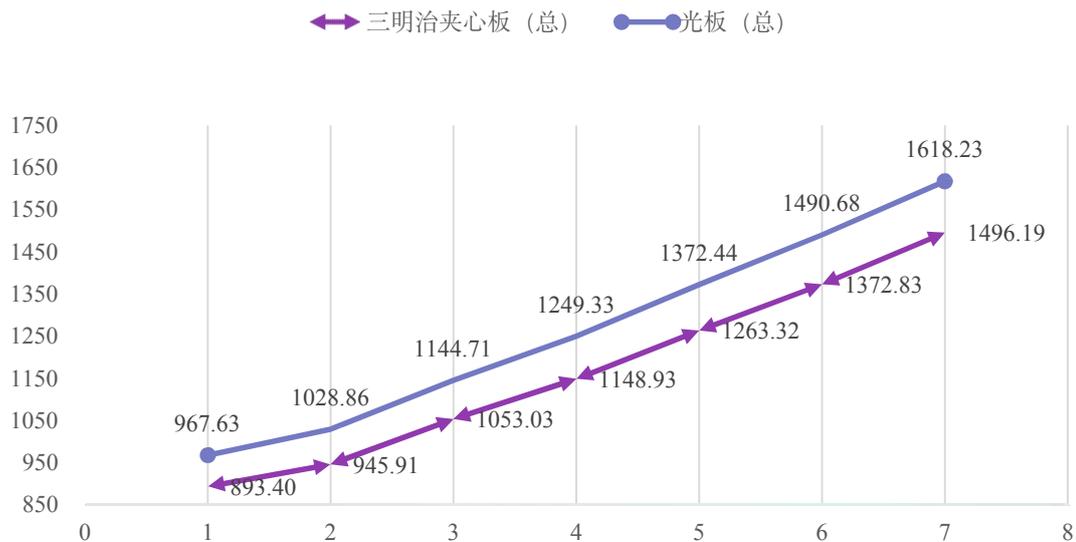


图 4.3.5-3 寒冷地区预制混凝土夹芯保温外墙板与预制混凝土外墙板碳排放对比

(2) 差值分析

表 4.3.5-4 寒冷地区预制混凝土夹芯保温外墙板与预制混凝土外墙板碳排放差值 (单位: kg

CO₂e)

WQ-2730	钢筋	混凝土	灌浆	保温板	聚合物改性水泥砂浆	防裂砂浆	玻纤网格布	套筒	连接件	JS 聚合物水泥防水涂料
预制混凝土夹芯保温外墙板	294.67	493.24	16.01	87.23	0.00	0.00	0.00	1.50	0.76	0.00
预制混凝土外墙板	256.41	351.88	16.01	174.46	22.54	112.71	5.39	1.50	0.76	25.99
差值	294.67	493.24	16.01	87.23	0.00	0.00	0.00	1.50	0.76	0.00

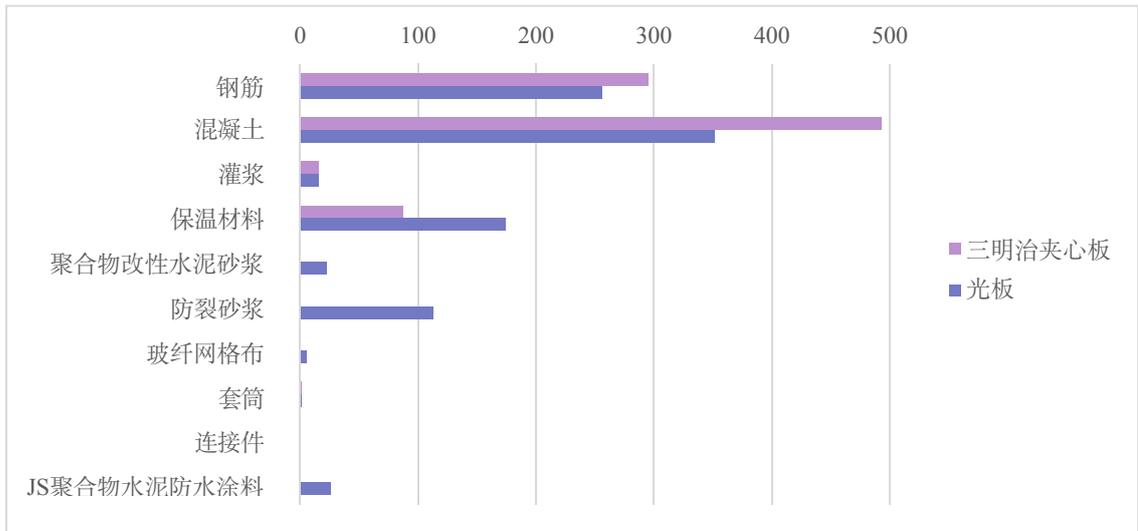


图 4.3.5-4 寒冷地区预制混凝土夹芯保温外墙板与预制混凝土外墙板碳排放差值对比

2. 夏热冬冷地区

(1) 总量对比

表4.3.5-5 夏热冬冷地区预制混凝土夹芯保温外墙板与预制混凝土外墙板碳排放对比 (单位: kg CO₂e)

序号	墙体编号	预制混凝土夹芯保温外墙板 (三明治夹芯板)	预制混凝土外墙板 (光板)	差值
1	WQ-2730	849.79	880.40	30.61
2	WQ-3030	897.34	931.72	34.38
3	WQ-3330	999.50	1037.65	38.15
4	WQ-3630	1090.45	1132.36	41.92
5	WQ-3930	1199.88	1245.56	45.68
6	WQ-4230	1304.43	1353.88	49.45
7	WQ-4530	1422.83	1476.05	53.22

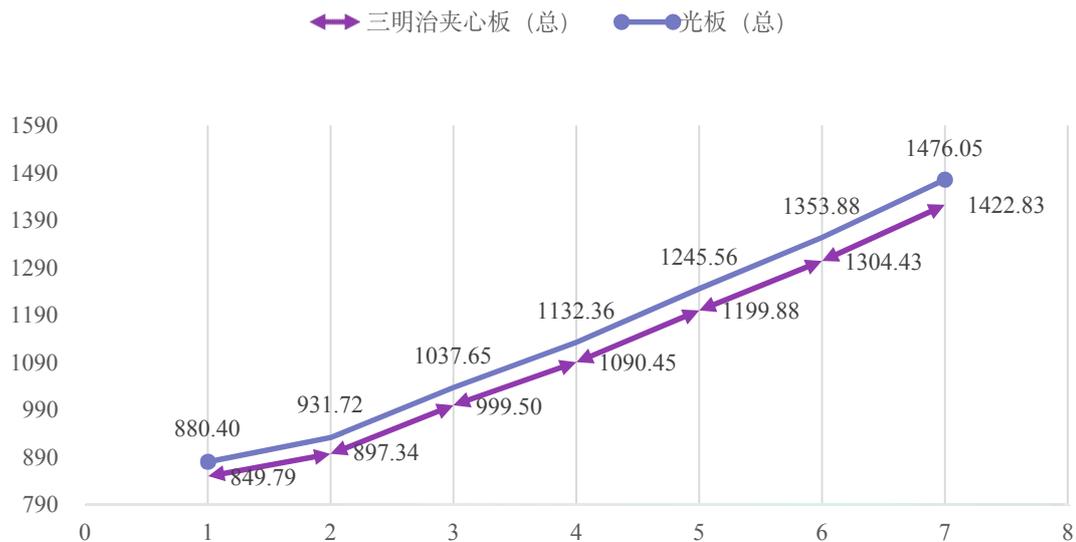


图 4.3.5-5 夏热冬冷地区预制混凝土夹芯保温外墙板与预制混凝土外墙板碳排放对比

(2) 差值分析

表 4.3.5-6 寒冷地区预制混凝土夹芯保温外墙板与预制混凝土外墙板碳排放差值 (单位: kg

Co_{2e})

WQ-2730	钢筋	混凝土	灌浆	保温板	聚合物改性水泥砂浆	防裂砂浆	玻纤网格布	套筒	连接件	JS 聚合物水泥防水涂料
预制混凝土夹芯保温外墙板	294.67	493.24	16.01	43.62	0.00	0.00	0.00	1.50	0.76	0.00
预制混凝土外墙板	256.41	351.88	16.01	87.23	22.54	112.71	5.39	1.50	0.76	25.99
差值	38.26	141.36	0.00	-43.62	-22.54	-112.71	-5.39	0.00	0.00	-25.99

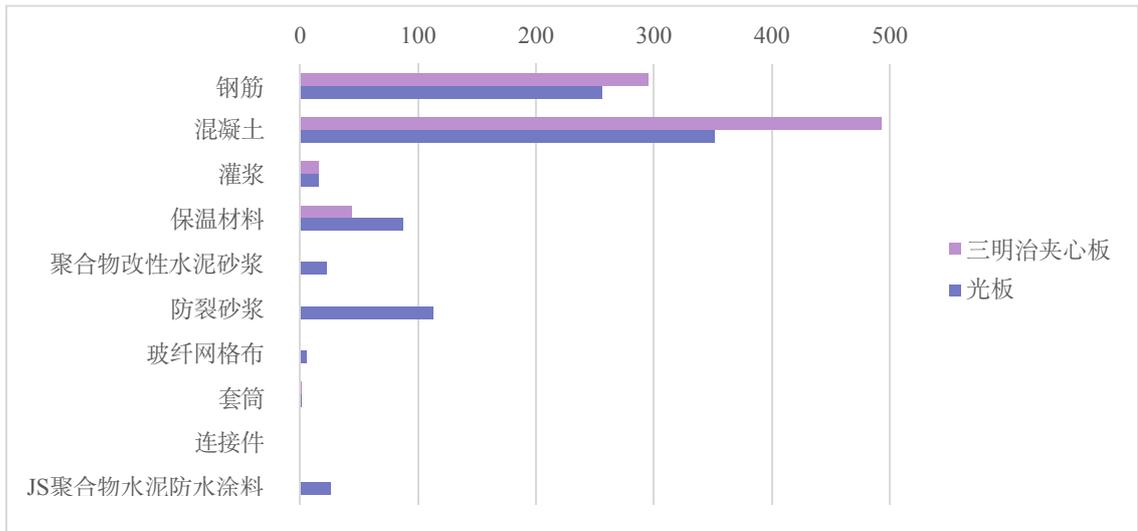


图 4.3.5-6 夏热冬冷地区预制混凝土夹芯保温外墙板与预制混凝土外墙板碳排放差值对比

4.3.6 叠合类墙板体系 V.S. 预制混凝土外墙体系

1. 总量对比

表 4.3.6-1 叠合类墙板与预制混凝土外墙碳排放对比 (单位: kg CO₂e)

序号	墙体编号	预制混凝土夹芯保温外墙板 (三明治夹芯板)	预制混凝土外墙板 (光板)	差值
1	WQ-2730	838.65	851.45	12.80
2	WQ-3030	887.76	901.98	14.23
3	WQ-3330	989.22	1004.88	15.66
4	WQ-3630	1079.47	1096.56	17.09
5	WQ-3930	1188.21	1206.72	18.51
6	WQ-4230	1292.07	1312.01	19.94
7	WQ-4530	1409.77	1431.14	21.37

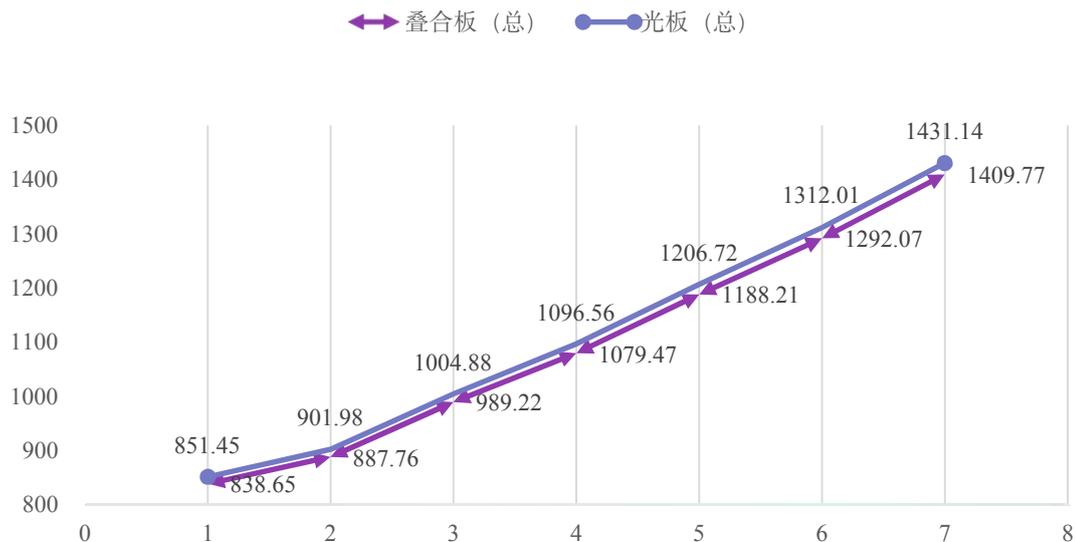


图 4.3.6-1 叠合类墙板与预制混凝土外墙碳排放对比

2. 差值分析

表 4.3.6-2 叠合类墙板与预制混凝土外墙碳排放差值 (单位: kg CO₂e)

WQ-2730	钢筋	混凝土	灌浆	保温板	聚合物改性水泥砂浆	防裂砂浆	玻纤网格布	套筒	连接件	JS 聚合物水泥防水涂料
预制混凝土夹芯保温外墙板	256.41	355.09	0.00	130.85	11.27	56.35	2.69	0.00	0.00	12.99
预制混凝土外墙板	256.41	351.88	16.01	130.85	11.27	56.35	2.69	0.00	0.00	12.99
差值	0.00	3.21	-16.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

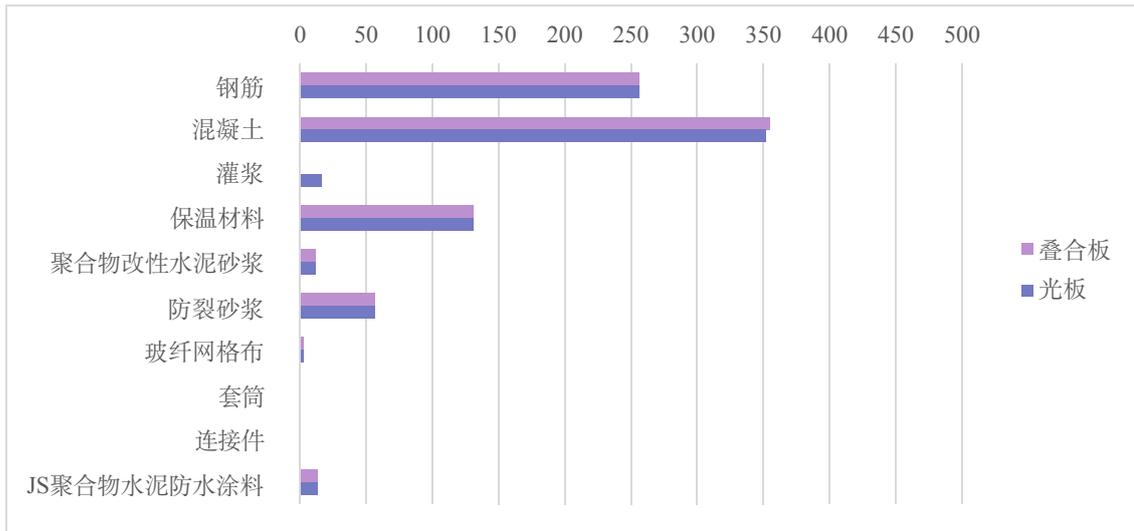


图 4.3.6-2 叠合类墙板与预制混凝土外墙碳排放差值对比

4.3.7 结论

1 基于预制混凝土外墙夹芯保温墙板与预制混凝土外墙板的碳排放对比可知，预制混凝土外墙夹芯保温板在碳排放上更有优势，尤其是在严寒地区的优势更加明显。根据差值分析可知，预制混凝土外墙夹芯墙板在钢筋、混凝土以及相关套筒连接件上的碳排放量更高，预制混凝土外墙板由于保温需要 25 年更换，因此从全生命周期的维度下，预制混凝土外墙夹芯保温板更低碳。随着地区的不同，由于外墙保温板厚度不一样，因此对于夏热冬冷地区，预制混凝土夹芯保温墙板在碳排放上的优势在降低。

2 基于叠合类外墙板与预制混凝土外墙板的碳排放对比可知，预制混凝土外墙板与叠合类墙板的碳排放基本一致，预制混凝土外墙板仅略高于叠合类墙板，主要差异在于，叠合类外墙板的外皮混凝土量，以及灌浆料的差值上。

3 通过对三种不同类型预制墙板分析可知，预制混凝土夹芯保温外墙板在碳排放上更有优势，主要原因在于其做到了外围护一体化，延长了外墙保温的使用周期。

4.4 预制楼板碳排放研究

4.4.1 概述

1. 叠合板

叠合楼板是由预制板和现浇混凝土层叠合而成的装配整体式楼板。预制板既是楼板结构的

组成部分之一，又是现浇混凝土叠合层的永久性模板。叠合板具有施工速度快、方便埋设管线、提高施工质量、节能环保等优点。因此，叠合板是我国装配式混凝土建筑的常用构件

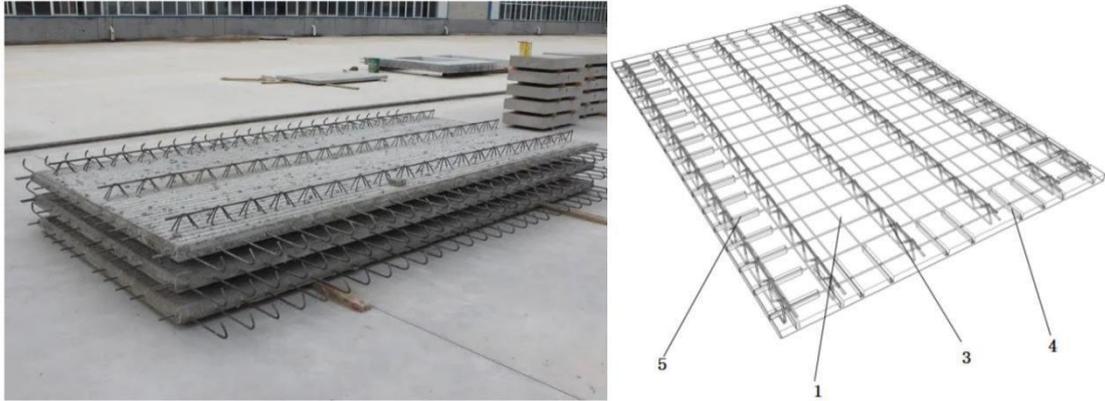


图 4.4.1-1 叠合板示意图

2. 钢筋桁架楼承板

钢筋桁架楼承板是第 3 代压型钢板，在第 1 代非组合压型钢板和第 2 代组合压型钢板的基礎上改进而来。钢筋桁架楼承板由纵向钢筋、腹杆钢筋以及镀锌钢板组成，其中上下弦杆钢筋可以作为使用阶段楼板的受力纵筋使用。上下弦钢筋呈三角形布置，上下弦杆钢筋采用腹杆点焊连接在一起，上下弦杆钢筋、腹杆钢筋、镀锌铁皮三者形成一个稳定的空间三角桁架。这样的空间桁架可以承担部分荷载，通常情况下可以承担施工阶段的自重和施工活荷载。结合镀锌钢板作为底模，钢筋桁架楼承板可以免去施工阶段的脚手架支撑。

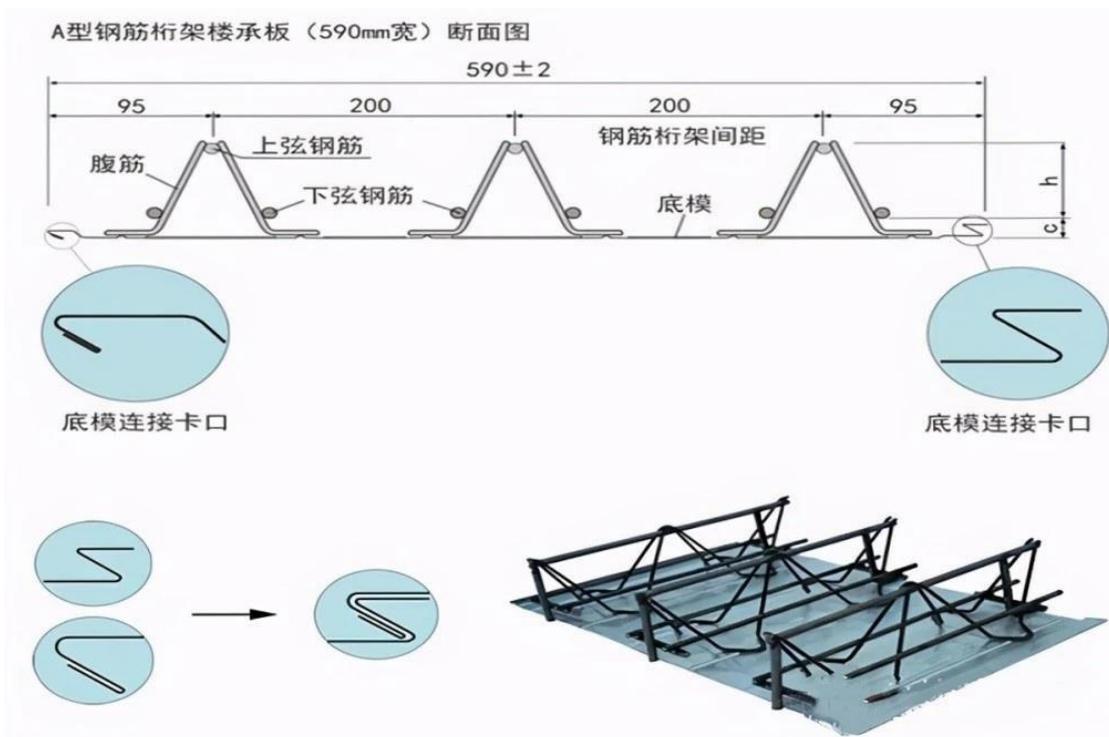


图 4.4.1-2 钢筋桁架楼承板示意图

3. 计算模型

基于15G366-1 桁架钢筋混凝土叠合板图集宽1.2m 双向板为基础研究对象（详见下图），对叠合板与钢筋桁架楼承板进行分析得出：

碳排放分析考虑材料碳排放包含：底板钢筋，混凝土，桁架钢筋，钢筋桁架楼承板的镀锌钢板。

对于桁架钢筋，叠合板间距为 600mm，钢筋桁架楼承板为 200mm。

叠合板最小板厚为 130mm，本次分析以常用尺寸 130mm 及 140mm 为研究对象；钢筋桁架楼承板楼板尺寸以：100mm，110mm，120mm，130mm，140mm 为研究对象。

运输因素：基于叠合板在运输阶段碳排放高于钢筋桁架楼承板，本次碳排放引入运输因子，分别为 1.07，1.15。

考虑负碳：混凝土材料的再利用主要为再生混凝土，因再生混凝土和普通混凝土间的碳排放几乎相同，故认为负碳为 0；再利用的钢筋和钢材则通过电炉炼钢技术可以实现负碳，根据再利用的难易程度，钢筋的再利用比例取 60%，钢材的再利用取 90%，电炉炼钢的碳排放因子为 600 kg CO₂e/t。

详细计算过程详见附录 B

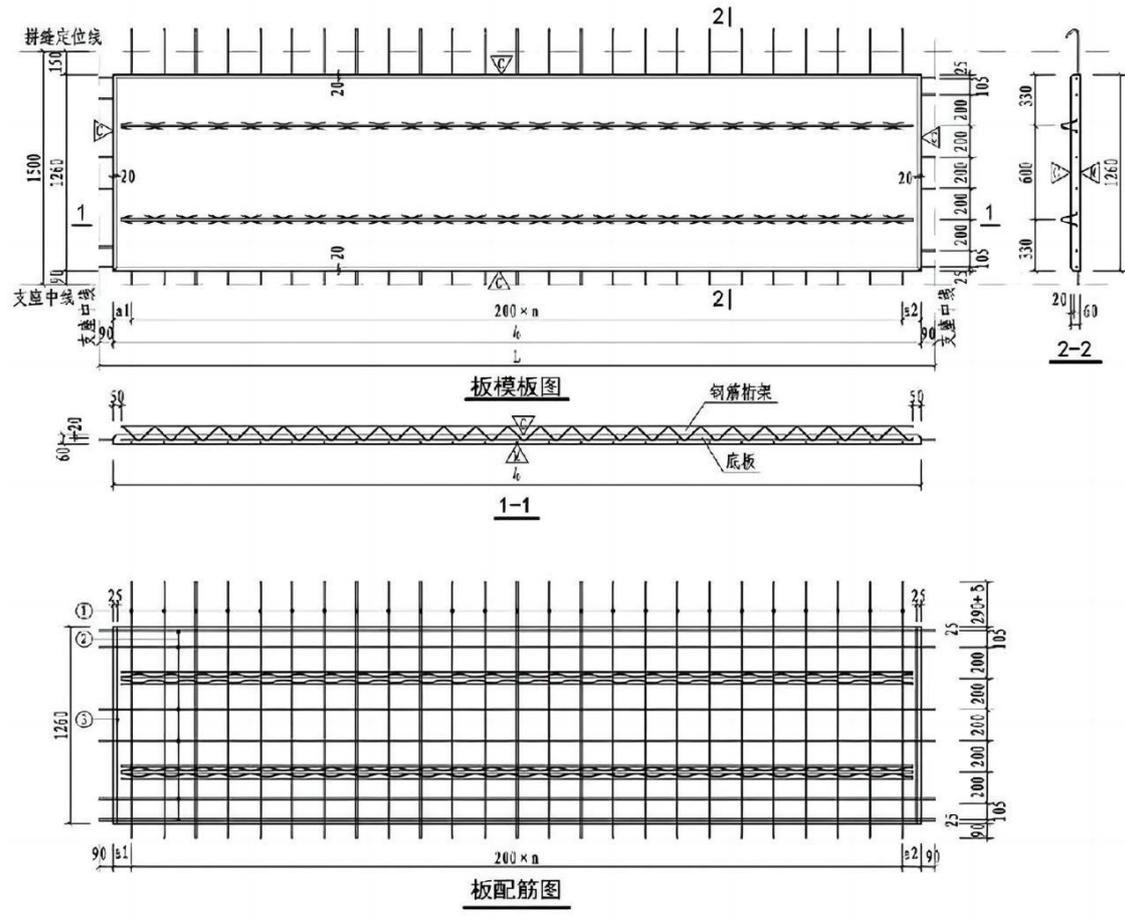


图 4.4.1-3 钢筋桁架楼承板计算简图

4. 碳排放因子选取

本研究的涉及的建筑材料碳排放因子参数如下表所示，参数来源《建筑碳排放计算标准》(GB/T 51366-2019) 的附录 D。

表 4.4.1 建筑材料碳排放因子参数

序号	项目	单位	碳排放因子	备注
1	楼板钢筋	kg Co ₂ e/t	2590.88	按 HRB400
2	镀锌钢板	kg Co ₂ e/t	2350	
3	混凝土	kg Co ₂ e/m ³	295	按 C30 混凝土
4	电炉炼钢	kg Co ₂ e/t	600	

4.4.2 叠合板与钢筋桁架楼承板碳排放对比

1. 建材生产阶段碳排放分析（仅考虑材料碳排放）

(1) 100 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

1) 总量对比

表 4.4.2-1 不同规格装配式楼板碳排放对比（单位：kg Co₂e）

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3012-X1	183.57	188.01	-4.44
DBS1-68-3012-X1	201.30	188.01	13.29
DBS1-67-3312-X1	202.80	207.76	-4.95
DBS1-68-3312-X1	222.28	207.76	14.53
DBS1-67-3612-X1	220.62	226.27	-5.65
DBS1-68-3612-X1	241.88	226.27	15.61
DBS1-67-3912-X1	241.93	249.20	-7.27
DBS1-68-3912-X1	264.96	249.20	15.76
DBS1-67-4212-X1	259.90	267.95	-8.05
DBS1-68-4212-X1	284.72	267.95	16.76
DBS1-67-4512-X1	279.31	287.97	-8.66
DBS1-68-4512-X1	305.88	287.97	17.91
DBS1-67-4812-X1	297.29	306.73	-9.44
DBS1-68-4812-X1	325.66	306.73	18.94
DBS1-67-5112-X1	316.68	326.71	-10.03
DBS1-68-5112-X1	346.83	326.71	20.12

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-5412-X1	334.68	345.50	-10.82
DBS1-68-5412-X1	366.58	345.50	21.08
DBS1-67-5712-X1	354.06	365.48	-11.42
DBS1-68-5712-X1	387.77	365.48	22.29
DBS1-67-6012-X1	372.04	384.23	-12.19
DBS1-68-6012-X1	407.52	384.23	23.29

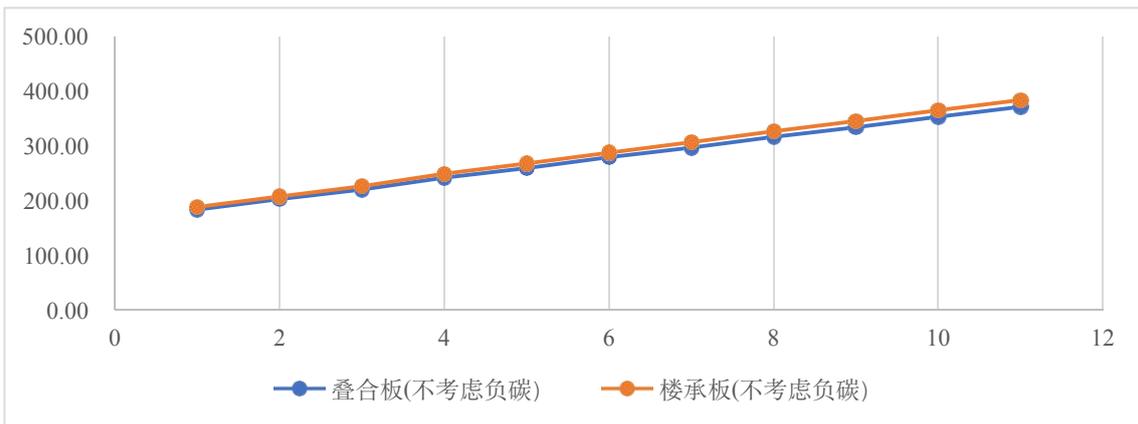


图4.4.2-1 100厚钢筋桁架楼承板与130厚叠合板碳排放对比

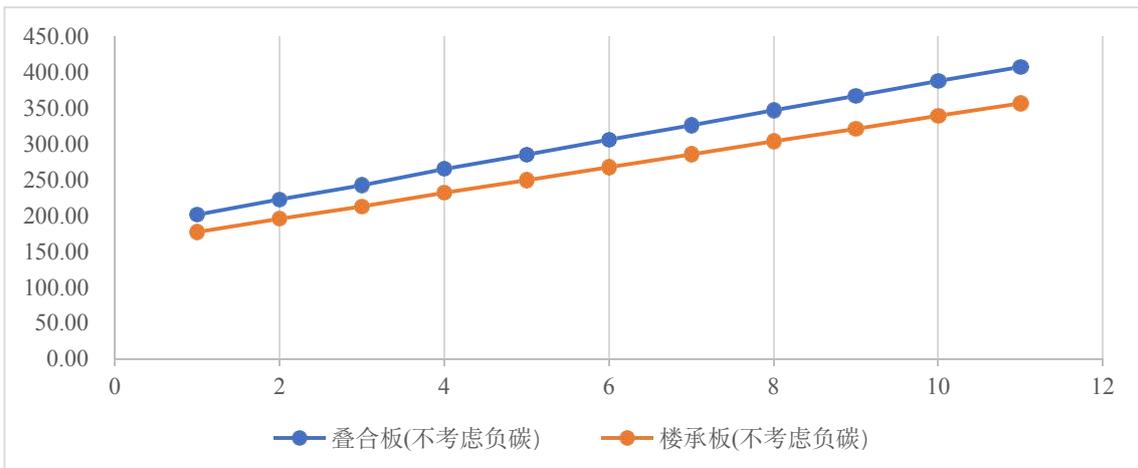


图4.4.2-2 100厚钢筋桁架楼承板与140厚叠合板碳排放对比

2) 差值对比

表 4.4.2-2 不同类型装配式楼板碳排放对比 (单位: kg CO₂e)

	混凝土	钢筋	镀锌钢板
叠合板	138.06	45.51	0.00
钢筋桁架楼承板	106.20	48.57	33.25
差值	31.86	-3.06	-33.25

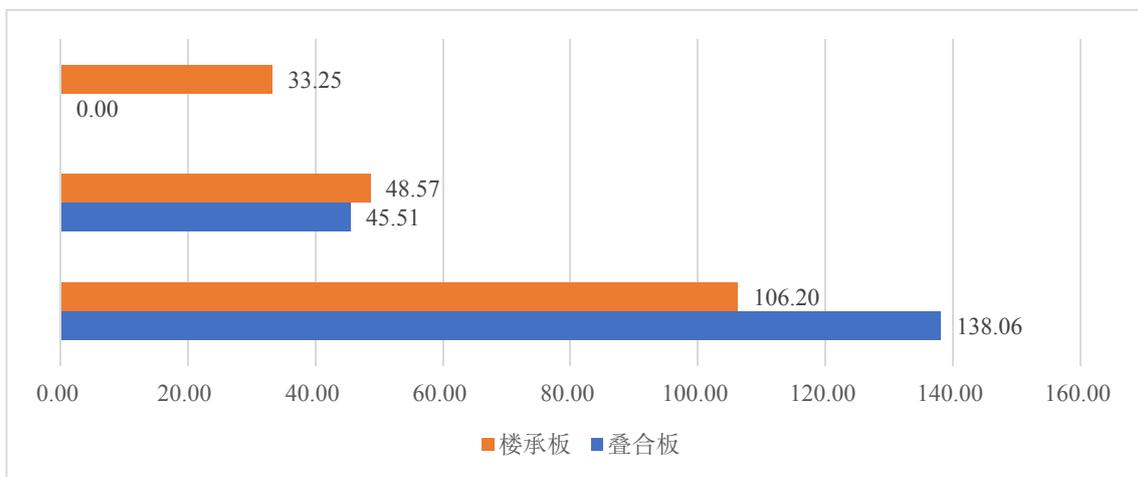


图 4.4.2-3 不同类型装配式楼板碳排放对比

(2) 110 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对

1) 总量对比

表 4.4.2-3 不同规格装配式楼板碳排放对比 (单位: kg CO₂e)

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3012-X1	183.57	200.54	-16.97
DBS1-68-3012-X1	201.30	200.54	0.76
DBS1-67-3312-X1	202.80	221.56	-18.76
DBS1-68-3312-X1	222.28	221.56	0.73

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3612-X1	220.62	241.35	-20.72
DBS1-68-3612-X1	241.88	241.35	0.54
DBS1-67-3912-X1	241.93	265.87	-23.94
DBS1-68-3912-X1	264.96	265.87	-0.90
DBS1-67-4212-X1	259.90	285.92	-26.02
DBS1-68-4212-X1	284.72	285.92	-1.20
DBS1-67-4512-X1	279.31	307.24	-27.93
DBS1-68-4512-X1	305.88	307.24	-1.36
DBS1-67-4812-X1	297.29	327.29	-30.00
DBS1-68-4812-X1	325.66	327.29	-1.63
DBS1-67-5112-X1	316.68	348.57	-31.89
DBS1-68-5112-X1	346.83	348.57	-1.74
DBS1-67-5412-X1	334.68	368.66	-33.98
DBS1-68-5412-X1	366.58	368.66	-2.08
DBS1-67-5712-X1	354.06	389.94	-35.87
DBS1-68-5712-X1	387.77	389.94	-2.17
DBS1-67-6012-X1	372.04	409.99	-37.95
DBS1-68-6012-X1	407.52	409.99	-2.46

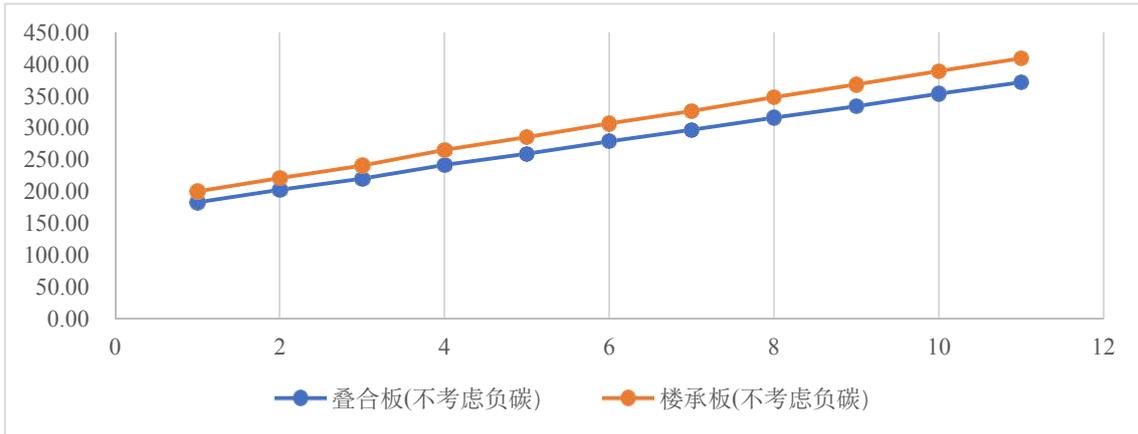


图4.4.2-4 110 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚叠合板碳排放对比

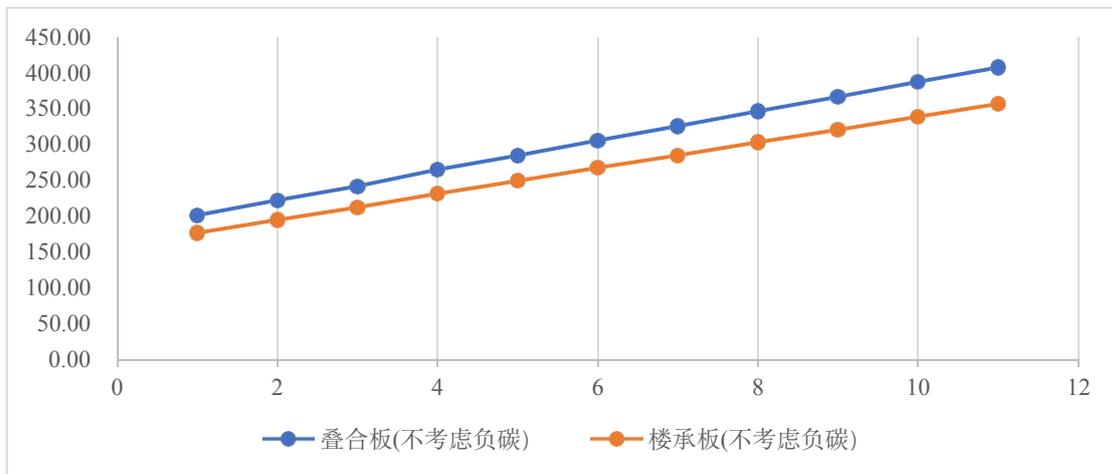


图4.4.2-5 110 厚钢筋桁架楼承板与 140 厚叠合板碳排放对比

2) 差值对比

表 4.4.2-4 不同类型装配式楼板碳排放对比 (单位: kg CO₂e)

	混凝土	钢筋	镀锌钢板
叠合板	138.06	45.51	0
钢筋桁架楼承板	116.82	50.48	33.25
差值	21.24	-4.97	-33.25

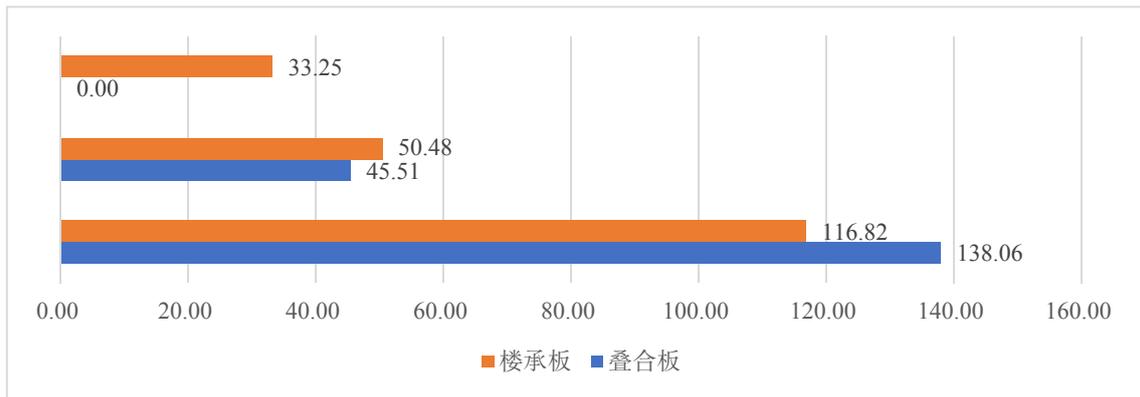


图 4.4.2-6 不同类型装配式楼板碳排放对比

(3) 120 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

1) 总量对比

表 4.4.2-5 不同规格装配式楼板碳排放对比 (单位: kg CO₂e)

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3012-X1	183.57	213.07	-29.50
DBS1-68-3012-X1	201.30	213.07	-11.77
DBS1-67-3312-X1	202.80	235.36	-32.56
DBS1-68-3312-X1	222.28	235.36	-13.08
DBS1-67-3612-X1	220.62	256.42	-35.80
DBS1-68-3612-X1	241.88	256.42	-14.54
DBS1-67-3912-X1	241.93	282.54	-40.61
DBS1-68-3912-X1	264.96	282.54	-17.57
DBS1-67-4212-X1	259.90	303.88	-43.98
DBS1-68-4212-X1	284.72	303.88	-19.17
DBS1-67-4512-X1	279.31	326.51	-47.19

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-68-4512-X1	305.88	326.51	-20.62
DBS1-67-4812-X1	297.29	347.85	-50.56
DBS1-68-4812-X1	325.66	347.85	-22.19
DBS1-67-5112-X1	316.68	370.43	-53.75
DBS1-68-5112-X1	346.83	370.43	-23.60
DBS1-67-5412-X1	334.68	391.82	-57.15
DBS1-68-5412-X1	366.58	391.82	-25.24
DBS1-67-5712-X1	354.06	414.40	-60.33
DBS1-68-5712-X1	387.77	414.40	-26.63
DBS1-67-6012-X1	372.04	435.75	-63.71
DBS1-68-6012-X1	407.52	435.75	-28.22

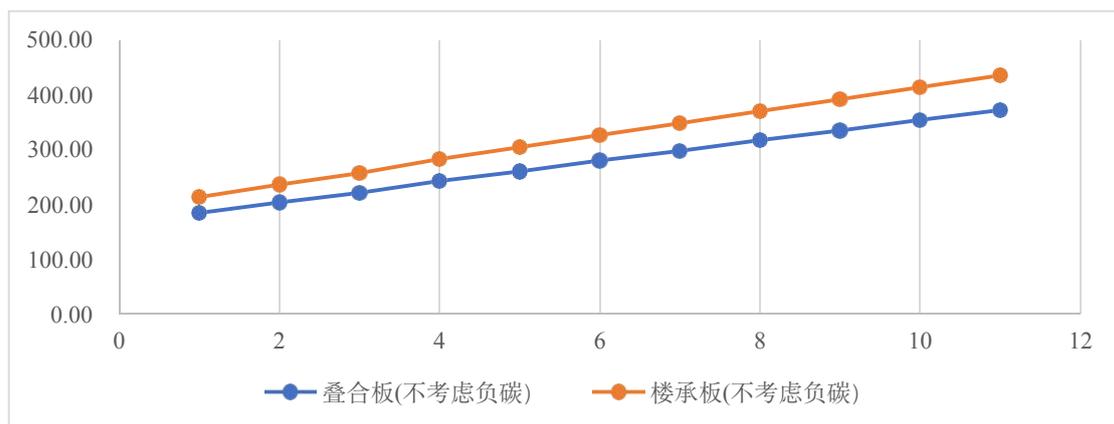


图 4.4.2-7 120 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚叠合板碳排放对比

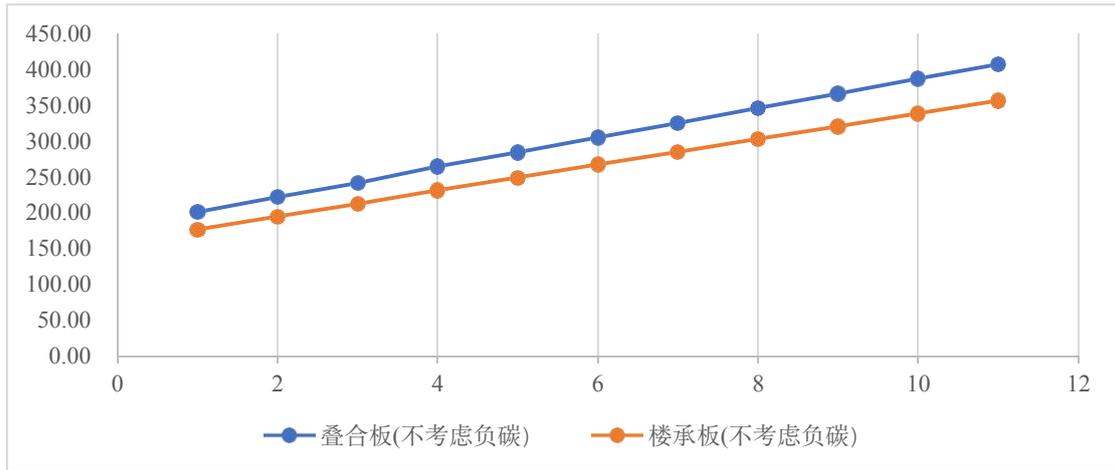


图 4.4.2-8 120 厚钢筋桁架楼承板与 140 厚叠合板碳排放对比

2) 差值对比

表 4.4.2-6 不同类型装配式楼板碳排放对比 (单位: kg CO₂e)

	混凝土	钢筋	镀锌钢板
叠合板	138.06	45.51	0.00
钢筋桁架楼承板	127.44	52.39	33.25
差值	10.62	-6.88	-33.25

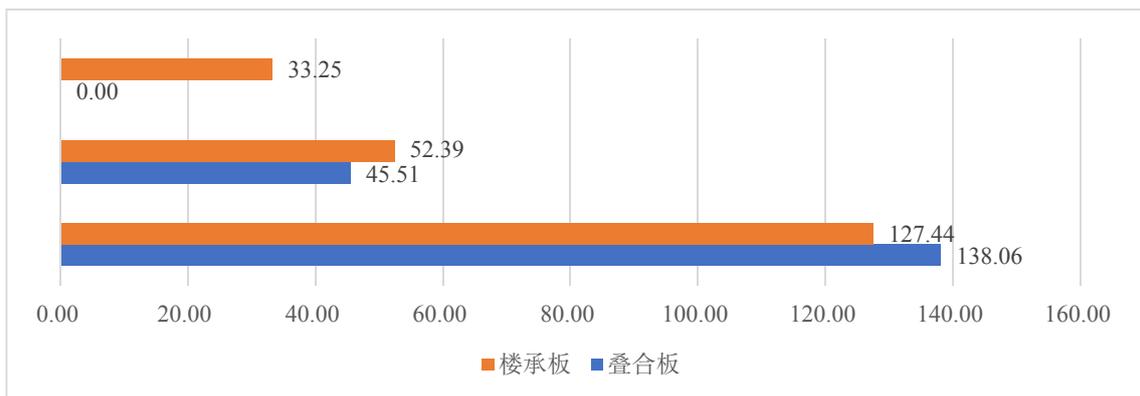


图 4.4.2-9 不同类型装配式楼板碳排放对比

(4) 130 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

1) 总量对比

表 4.4.2-7 不同规格装配式楼板碳排放对比 (单位: kg CO₂e)

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3012-X1	183.57	225.60	-42.03
DBS1-68-3012-X1	201.30	225.60	-24.30
DBS1-67-3312-X1	202.80	249.16	-46.36
DBS1-68-3312-X1	222.28	249.16	-26.88
DBS1-67-3612-X1	220.62	271.50	-50.88
DBS1-68-3612-X1	241.88	271.50	-29.62
DBS1-67-3912-X1	241.93	299.20	-57.28
DBS1-68-3912-X1	264.96	299.20	-34.24
DBS1-67-4212-X1	259.90	321.85	-61.95
DBS1-68-4212-X1	284.72	321.85	-37.13
DBS1-67-4512-X1	279.31	345.77	-66.46
DBS1-68-4512-X1	305.88	345.77	-39.89
DBS1-67-4812-X1	297.29	368.42	-71.13
DBS1-68-4812-X1	325.66	368.42	-42.76
DBS1-67-5112-X1	316.68	392.29	-75.61
DBS1-68-5112-X1	346.83	392.29	-45.46
DBS1-67-5412-X1	334.68	414.98	-80.31
DBS1-68-5412-X1	366.58	414.98	-48.41
DBS1-67-5712-X1	354.06	438.86	-84.79
DBS1-68-5712-X1	387.77	438.86	-51.09
DBS1-67-6012-X1	372.04	461.50	-89.46

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-68-6012-X1	407.52	461.50	-53.98

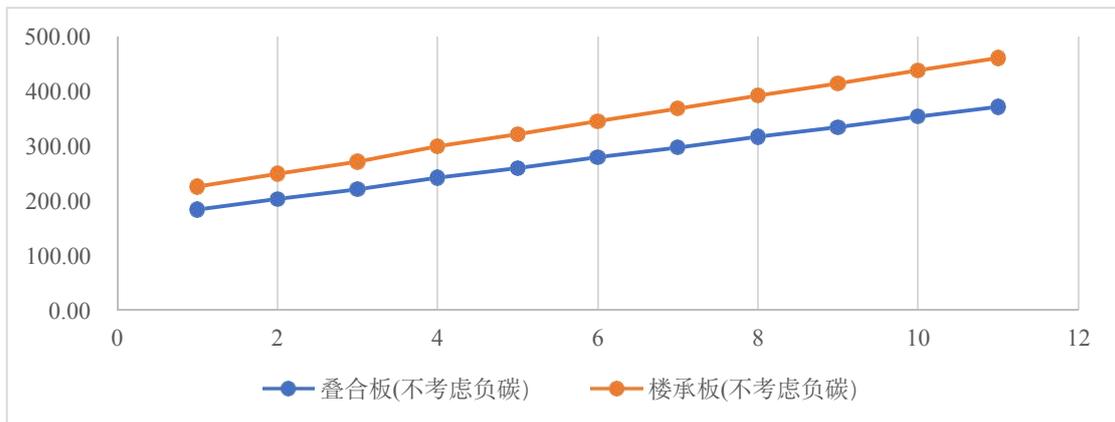


图4.4.2-10 130 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚叠合板碳排放对比

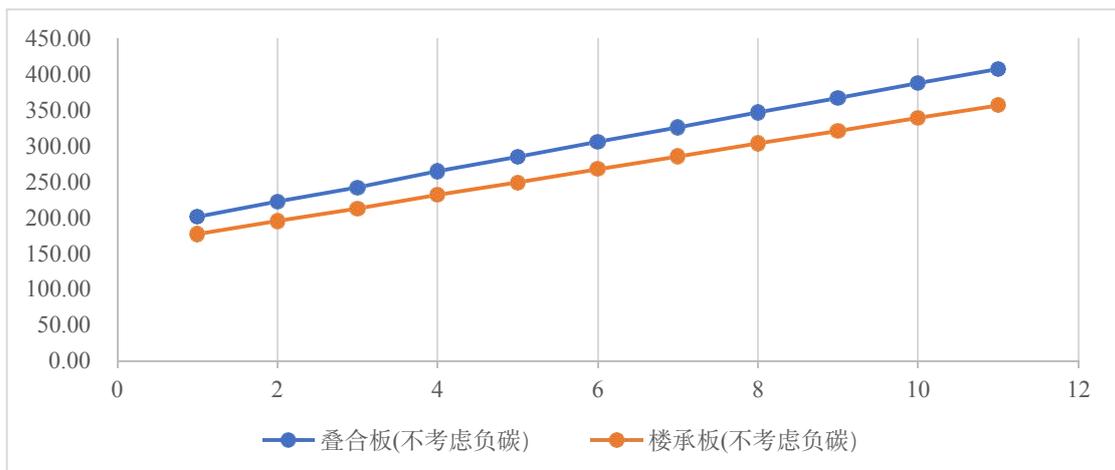


图4.4.2-11 130 厚钢筋桁架楼承板与 140 厚叠合板碳排放对比

2) 差值对比

表 4.4.2-8 不同类型装配式楼板碳排放对比 (单位: kg CO₂e)

	混凝土	钢筋	镀锌钢板
叠合板	138.06	45.51	0.00
钢筋桁架楼承板	138.06	54.29	33.25

差值

0.00

-8.79

-33.25

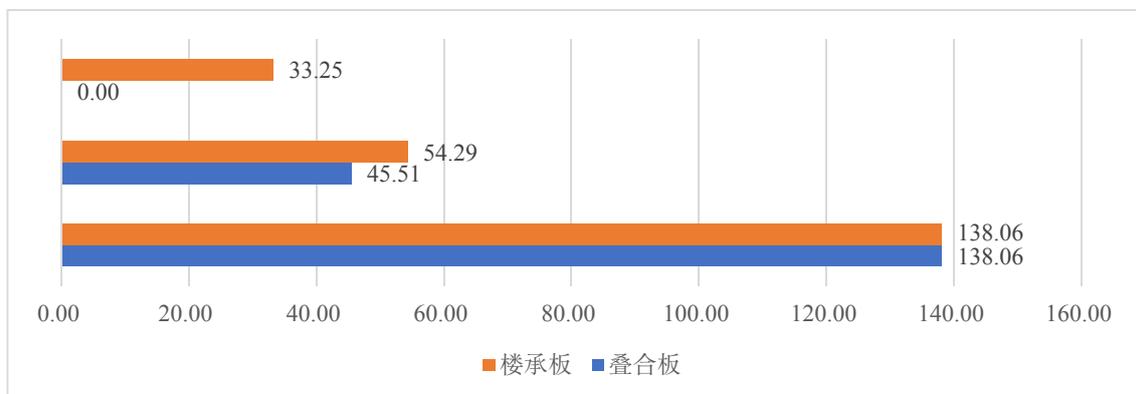


图 4.4.2-12 不同类型装配式楼板碳排放对比

(5) 140 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

1) 总量对比

表 4.4.2-9 不同规格装配式楼板碳排放对比 (单位: kg CO₂e)

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3012-X1	183.57	243.54	-59.97
DBS1-68-3012-X1	201.30	243.54	-42.24
DBS1-67-3312-X1	202.80	268.85	-66.05
DBS1-68-3312-X1	222.28	268.85	-46.57
DBS1-67-3612-X1	220.62	292.99	-72.37
DBS1-68-3612-X1	241.88	292.99	-51.11
DBS1-67-3912-X1	241.93	322.50	-80.58
DBS1-68-3912-X1	264.96	322.50	-57.54
DBS1-67-4212-X1	259.90	346.95	-87.05
DBS1-68-4212-X1	284.72	346.95	-62.23

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-4512-X1	279.31	372.63	-93.31
DBS1-68-4512-X1	305.88	372.63	-66.74
DBS1-67-4812-X1	297.29	397.13	-99.84
DBS1-68-4812-X1	325.66	397.13	-71.46
DBS1-67-5112-X1	316.68	422.80	-106.13
DBS1-68-5112-X1	346.83	422.80	-75.98
DBS1-67-5412-X1	334.68	447.25	-112.57
DBS1-68-5412-X1	366.58	447.25	-80.67
DBS1-67-5712-X1	354.06	472.98	-118.91
DBS1-68-5712-X1	387.77	472.98	-85.21
DBS1-67-6012-X1	372.04	497.43	-125.39
DBS1-68-6012-X1	407.52	497.43	-89.90

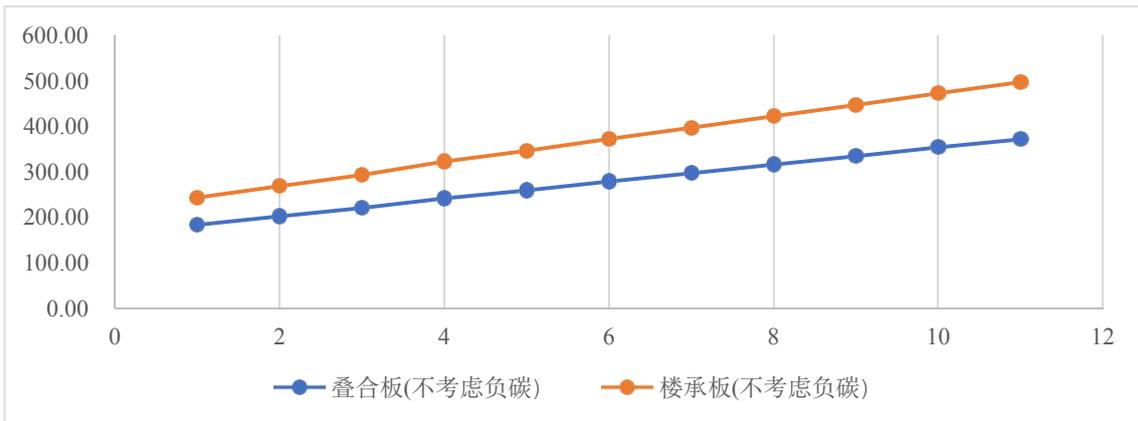


图 4.4.2-13 140 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚叠合板碳排放对比

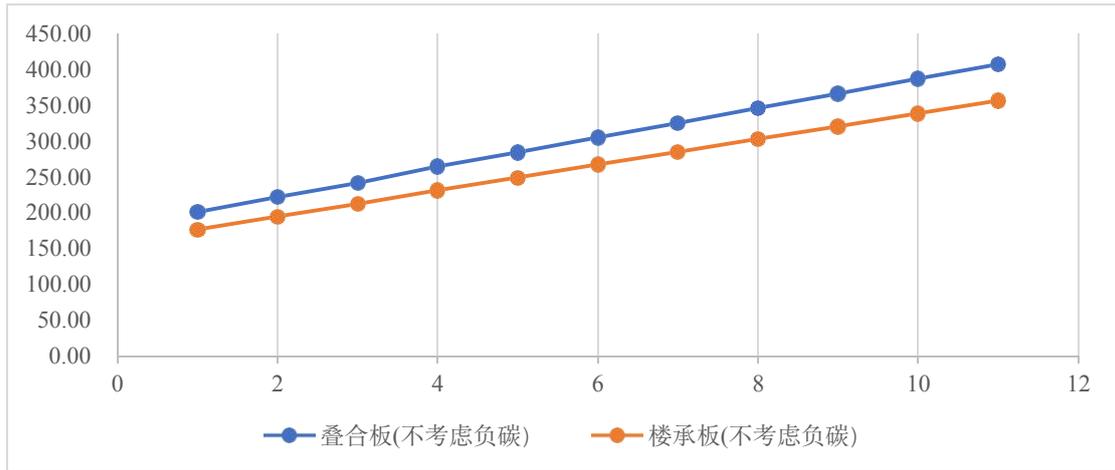


图 4.4.2-14 140 厚钢筋桁架楼承板与 140 厚叠合板碳排放对比

2) 差值对比

表 4.4.2-10 不同类型装配式楼板碳排放对比 (单位: kg CO₂e)

	混凝土	钢筋	镀锌钢板
叠合板	138.06	45.51	0
钢筋桁架楼承板	148.68	61.61	33.25
差值	-10.62	-16.10	-33.25

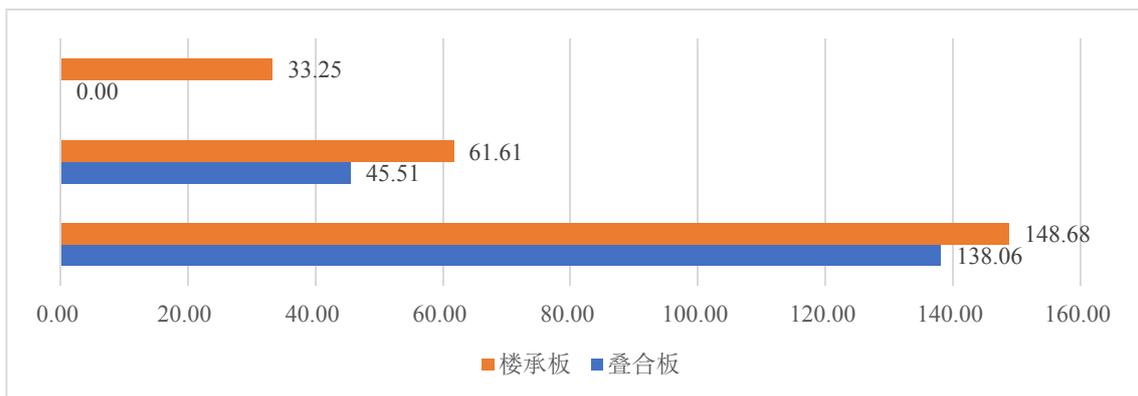


图 4.4.2-15 不同类型装配式楼板碳排放对比

2. 建材生成阶段碳排放分析

基于仅对材料的分析的前提下, 根据结果可知, 叠合板在碳排放上与钢筋桁架楼承板对比有一定优势, 通过差值分析可知, 主要原因在于桁架钢筋与镀锌钢板碳排放量的差异。因此在不考虑负碳, 运输以及层高足够的前提下, 叠合板比钢筋桁架楼承板更具优势, 详细对比数据

见下图表。

表 4.4.2-11 不同厚度及类型装配式楼板碳排放对比 (单位: kg Co_{2e})

	140 钢筋桁架 楼承板	130 钢筋桁架 楼承板	120 钢筋桁架 楼承板	110 钢筋桁架 楼承板	100 钢筋桁架 楼承板
钢筋桁架 楼承板	243.54	225.60	213.07	200.54	188.01
130 厚叠合 板	183.57	183.57	183.57	183.57	183.57
140 厚叠合 板	201.30	201.30	201.30	201.30	201.30

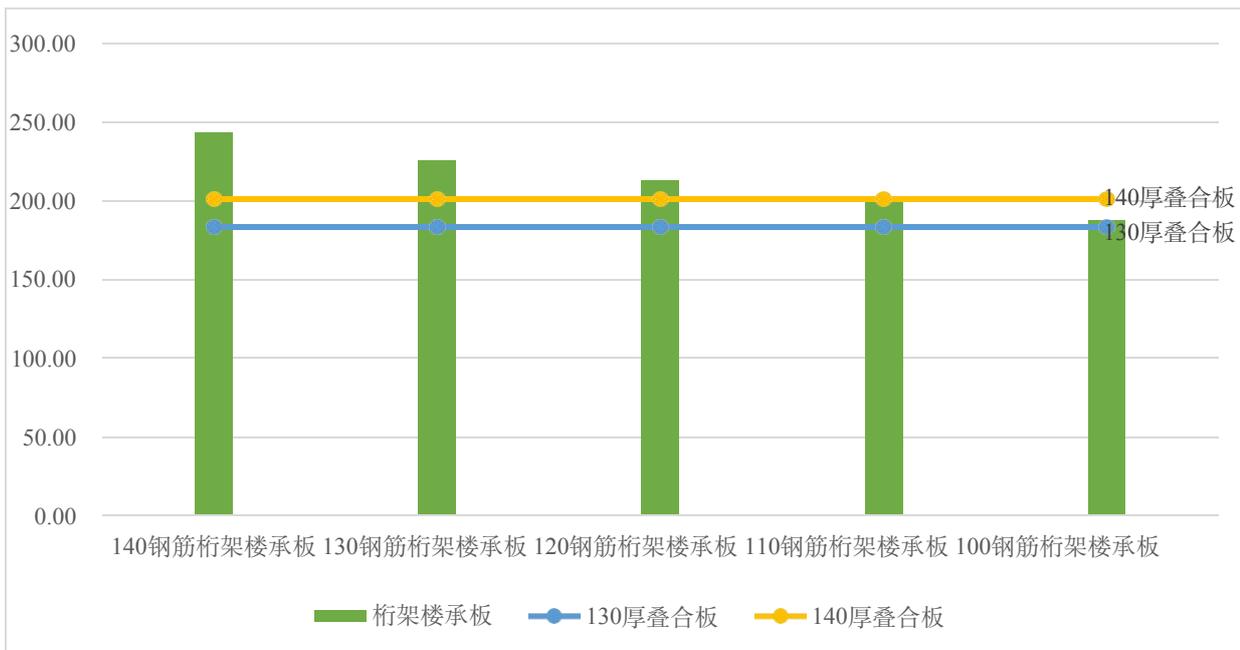


图 4.4.2-16 不同厚度及类型装配式楼板碳排放对比

3. 考虑运输因子碳排放对比分析

在碳排放研究中，运输同样为重要的考虑因素，基于传统建筑对各阶段碳排放分析，运输与建材比例大概为 1: 0.07，因此，运输因子考虑为 1.07。同时，装配式建筑在运输上比传统建筑的碳排放占比更高，综合考虑后，也同时选取运输因子 1.15 进行数据分析。详细计算数据见附录 B.6。

表 4.4.2-12 运输因子 1.07 时不同厚度及类型装配式楼板碳排放对比 (单位: kg Co_{2e})

	140 钢筋桁架	130 钢筋桁架	120 钢筋桁架	110 钢筋桁架	100 钢筋桁架
	楼承板	楼承板	楼承板	楼承板	楼承板
桁架楼承板	243.54	225.60	213.07	200.54	188.01
130 厚叠合板	196.42	196.42	196.42	196.42	196.42
140 厚叠合板	215.39	215.39	215.39	215.39	215.39

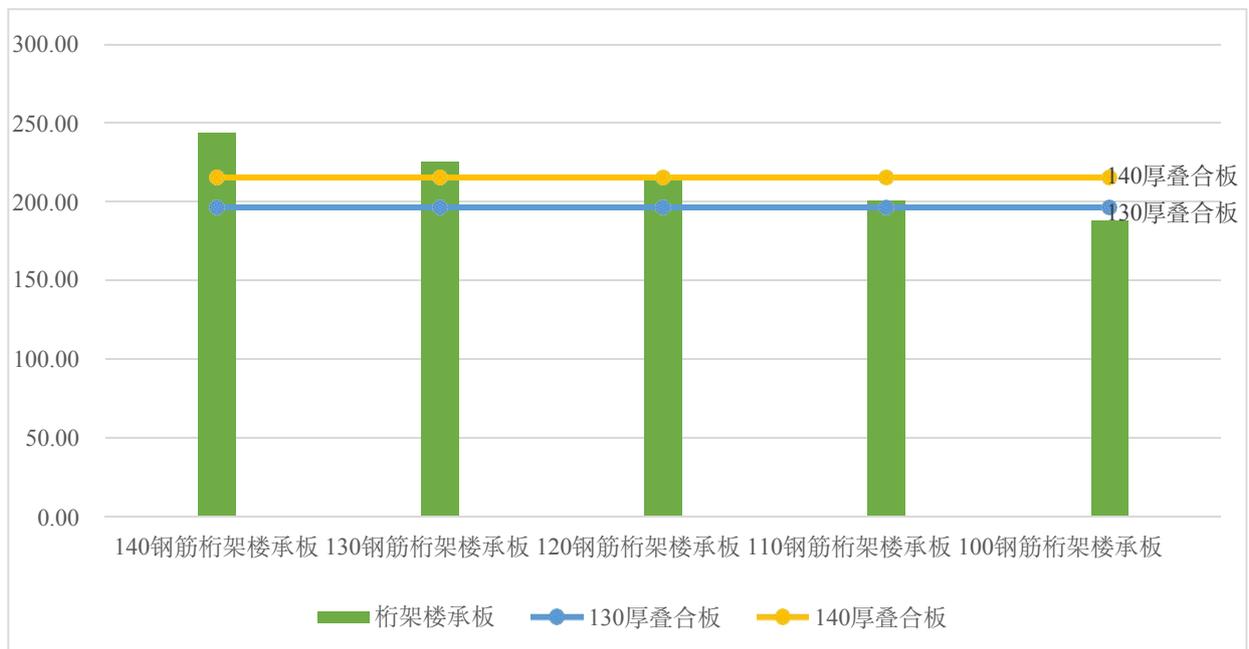


图 4.4.2-17 不同厚度及类型装配式楼板碳排放对比

通过上图表可知，考虑了 1.07 的运输因子后，100 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚叠合板对比碳排放更低，100~120 厚钢筋桁架楼承板与 140 厚叠合板对比碳排放更低。

表 4.4.2-13 运输因子 1.15 时不同厚度及类型装配式楼板碳排放对比（单位：kg CO₂e）

	140 钢筋桁架	130 钢筋桁架	120 钢筋桁架	110 钢筋桁架	100 钢筋桁架
	楼承板	楼承板	楼承板	楼承板	楼承板
桁架楼承板	243.54	225.60	213.07	200.54	188.01
130 厚叠	211.11	211.11	211.11	211.11	211.11

	140 钢筋桁架 楼承板	130 钢筋桁架 楼承板	120 钢筋桁架 楼承板	110 钢筋桁架 楼承板	100 钢筋桁架 楼承板
合板					
140 厚叠 合板	231.49	231.49	231.49	231.49	231.49

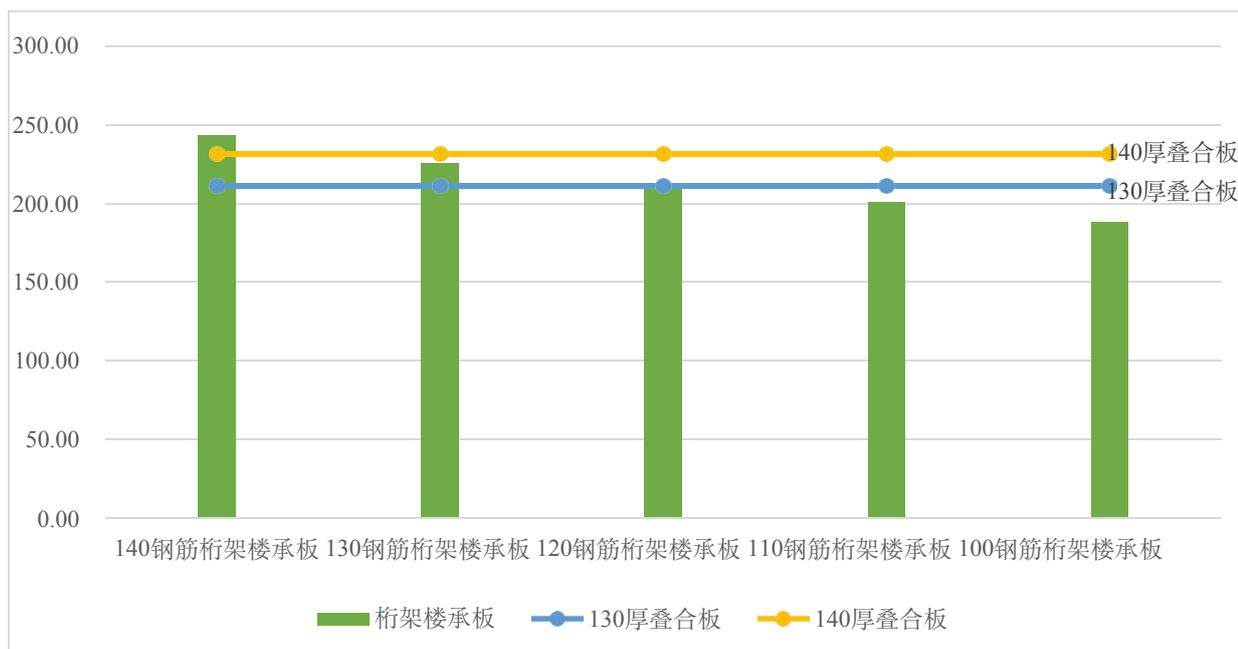


图 4.4.2-18 不同厚度及类型装配式楼板碳排放对比

通过上图表可知，考虑了 1.15 的运输因子后，100~110 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚叠合板对比碳排放更低，100~130 厚钢筋桁架楼承板与 140 厚叠合板对比碳排放更低。

因此，运输因子的引入，影响了仅考虑材料下碳排放的结论，对于装配式建筑应重点考虑材料运输的碳排放，尽量就近选择预制构件厂家，对于较近距离的运输，叠合板碳排放更有优势，对于长距离运输下，钢筋桁架楼承板碳排放更有优势。

4. 考虑负碳排放对比分析

建筑拆除以及回收再利用也是碳排放研究中的重点因素，混凝土材料的再利用主要为再生混凝土，因再生混凝土和普通混凝土间的碳排放几乎相同，故认为负碳为 0；再利用的钢筋和钢材则通过电炉炼钢技术可以实现负碳，根据再利用的难易程度，钢筋的再利用比例取 60%，钢材的再利用取 90%，电炉炼钢的碳排放因子为 600 kg CO₂e/t。详细数据见 B.7

表 4.4.2-14 考虑负碳技术不同厚度及类型装配式楼板碳排放对比（单位：kg CO₂e）

	140 钢筋桁架 楼承板	130 钢筋桁架 楼承板	120 钢筋桁架 楼承板	110 钢筋桁架 楼承板	100 钢筋桁架 楼承板
桁架楼承板	192.85	178.29	166.64	154.99	143.34
130 厚叠合板	162.59	162.59	162.59	162.59	162.59
140 厚叠合板	177.04	177.04	177.04	177.04	177.04

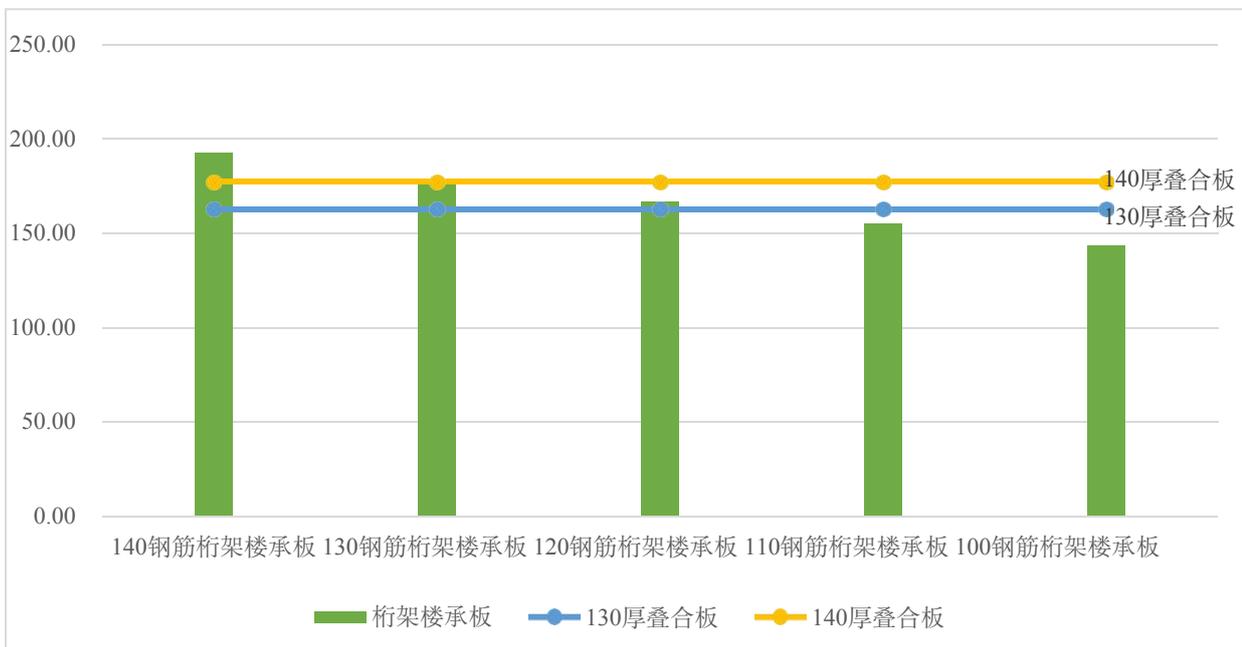


图 4.4.2-19 不同厚度及类型装配式楼板碳排放对比

根据以上图表可知，在考虑了负碳因素下（不考虑运输因子），100~110 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚叠合板对比碳排放更低，100~120 厚钢筋桁架楼承板与 140 厚叠合板对比碳排放更低。

在同时考虑 1.07 的运输因子和负碳下，钢筋桁架楼承板的优势更大，120 厚以下的楼板，采用钢筋桁架楼承板碳排放更低。

4.4.3 结论及建议

1. 结论

在仅考虑材料用量上的碳排放研究可知，叠合板更有优势，主要原因在于钢筋桁架楼承板桁架钢筋与镀锌钢板碳排放较高。

在引入运输因子后，钢筋桁架楼承板由于板厚及运输优势下，100~110厚的钢筋桁架楼承板更有优势。

在考虑负碳后，镀锌钢板考虑90%的回收再利用，钢筋考虑60%的回收再利用，100~110厚的钢筋桁架楼承板更有优势。

同时考虑运输因子及负碳厚，100~120厚的钢筋桁架楼承板更有优势。

2. 建议

通过分析可知，运输因子对碳排放研究有一定影响，因此在实际工程中，对于装配式建筑，应考虑就近选取预制构件厂家。

基于镀锌钢板碳排放因子较高，建议考虑碳排放因子低且强度满足的材料替换。

基于钢筋桁架楼承板上弦钢筋无法充分利用，造成钢筋量提高较大，建议改变其上弦钢筋入支座做法，充分利用起作用。

4.5 结论及建议

序号	类别	建议	不推荐	索引
1	材料选择	使用循环再利用材料	使用全新材料	4.2 结构材料低碳选型
2	材料选择	使用可循环材料	使用一次性材料	4.2 结构材料低碳选型
3	模块化	使用类型较少的材料和组件	使用类型多样的材料及组件	4.1.2 少规格多组合
4	模块化	使用模块	使用非标准尺寸	4.1.2 少规格多组合
5	施工措施	使用标准的施工方法	使用高度专用系统	4.1.4 与施工相结合
6	材料选择	使用轻质材料和组件	使用重质材料和组件	4.2 结构材料低碳选型
7	结构方案	建筑形体规则	建筑形体特别不规则	4.1.1 形体宜规则
8	模块化	剪力墙、楼板采用优选尺寸	剪力墙、楼板选用非标准尺寸	4.1.2 少规格多组合
9	模数化	预制构件配筋模数化	配筋直径及间距多样性	4.1.2 少规格多组合

10	预制构件	预制剪力墙体系采用预 制混凝土夹芯保温外墙 板	采用预制混凝土外墙板 及叠合类墙板	4.3 预制墙板碳排放研 究
11	预制构件	就近选择预制构件厂家	选用较远的预制构件厂 家	4.4 预制楼板碳排放研 究

第五章 给排水专业

5.1 标准化设计

5.1.1 协同设计

装配式建筑不应在施工现场进行“埋设”作业，不应砸墙凿洞或随意打膨胀螺栓，需将所有需要埋设的预埋件、预埋物和预留孔洞均设计到预制构件制作图中。

装配式建筑设计过程中，设备与管线系统内各个专业之间，与建筑、结构、装修系统之间，因集中设计、集成化设计和防止“撞车”等原因。

建议：进行协同设计。协同设计的主要内容包括预制构件预留管线穿过孔洞，墙体、屋面同雨水斗、雨水管的连接与固定等。

5.1.2 模数化设计

喷头的设置可采用模数化设计，使吊顶布置的喷头间距尺寸有规律可循，并应满足规范中对喷头布置间距的要求，做到准确定位，与建筑部件与功能空间的尺寸相协调，满足对消防安全的要求，同时保证精装修的整体视觉效果。

建议：喷头的设置采用模数化设计，实现与灯具、烟感等各个专业的模数协调，以及配合装修网格的模数协调。



图 5.1.2 吊顶喷头

5.1.3 机房设置合理化

装配式建筑中，水加热设备机房的设置位置应靠近给水泵房，并宜靠近耗热量最大或设有集中热水供应的最高建筑，且位于系统的中部；集中热水供应系统当设有专用热源站时，水加热设备机房设置位置还需考虑靠近热源站位置，以减少管道损失，降低能耗，实现低碳节能的设计目标。



图 5.1.3 泵房现场

5.1.4 管井设置合理化

管井是建筑中相对独立、具有特定功能的单元，对于公共建筑，水管井可与楼电梯、公共卫生间等模块进行组合设计；对于住宅建筑，水管井可与楼电梯、公共管井、集成式厨房、集成式卫生间等模块进行组合设计。当与集成式厨房、集成式卫生间等模块进行组合设计时，需设置满足功能要求的接口。

建议：将管井与其他建筑模块单元进行合理的多样化组合，使建筑功能和构造更加合理化。

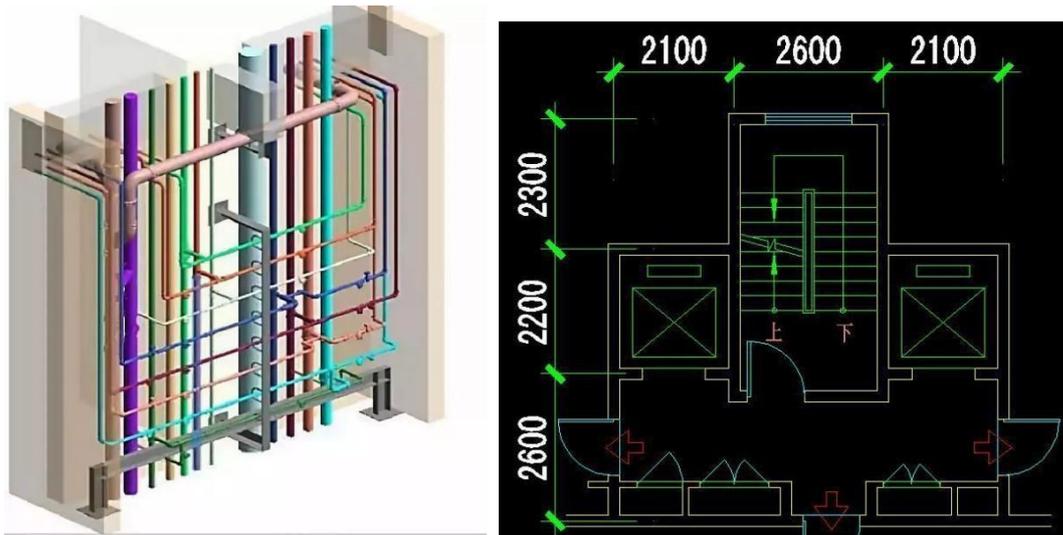


图 5.1.4 管井示意图

5.1.5 同层排水

同层排水简单说，就是本层排水在本层解决，安装、检修不影响下一层。其最常用的方式是楼板降板方式，即使地面设置架空层，也往往同时降板。降板分为局部降板和区域降板两种类型。局部降板是指在卫生间等局部部位降板；区域降板是指楼层的一个区域整体降板。

由于卫生间排水支管繁多，采用传统异层排水将导致管线预留孔洞太多，若不精准，则会造成后期拆改，不符合低碳节能的设计理念。

建议：装配式建筑排水系统采用同层排水，同层排水管道敷设在架空层时，宜设积水排出措施。住宅建筑常用排水管管径为 110mm，同层排水管线长度一般不超过 5m，降板高度一般不超过 300mm。



图 5.1.5 同层排水

5.1.6 预制构件的孔洞预留

对给排水管线在预制构件上预留的套管、开孔、开槽位置尺寸进行综合及优化，形成标准化方案，并做好精细设计以及定位，避免错漏碰缺，降低生产及施工成本，减少现场返工。

建议：给排水管线接口避开预制构件受力较大部位和节点连接区域，避免在接缝处开洞。

5.2 集成设计

集成设计即一体化设计，在装配式建筑设计中指建筑结构系统、外围护系统、设备与管线系统和内装系统的一体化设计。如集成厨卫，包含了建筑、内装、给水、排水、供暖、通风、燃气、电气各专业内容，是建筑系统、设备管线系统和内装系统的集成。集成设计的好处是提高质量、减少失误、提升效率、减少人工、减少浪费和缩短工期。

5.2.1 管线、阀门与水表

集中布置需依据建筑平面设计进行，与结构设计、装修设计协同。其中排水系统竖向管线集中布置只有在实行同层排水且有相应空间高度的前提下才可以实现，并与厨房、卫生间的平面布置有关。

建议：管线、阀门与表箱集中布置在公共区域，有利于维修，竖向管线集中布置于管道井中，且布置在现浇楼板处，减少穿过楼板孔洞数量。



图 5.2.1 管线、阀门、水表集中布置

5.2.2 集成厨卫

集成式厨房是由工厂生产的楼地面、吊顶、墙面、橱柜和厨房设备及管线等集成并主要采用干式工法装配而成的厨房。集成式卫生间是由工厂生产的楼地面、墙面(板)、吊顶和洁具设备及管线等集成并主要采用干式工法装配而成的卫生间。

与给排水专业有关的集成化部品主要是集成化厨房和集成化卫生间。

建议：在做集成化厨房、集成化卫生间的设计时，确认预留的给排水接口是否满足功能要求，并采用标准化接口，统一接口的几何尺寸、材料和连接方式，实现直接或间接连接，还需注意在预留接口连接处设置检修口，方便维修。

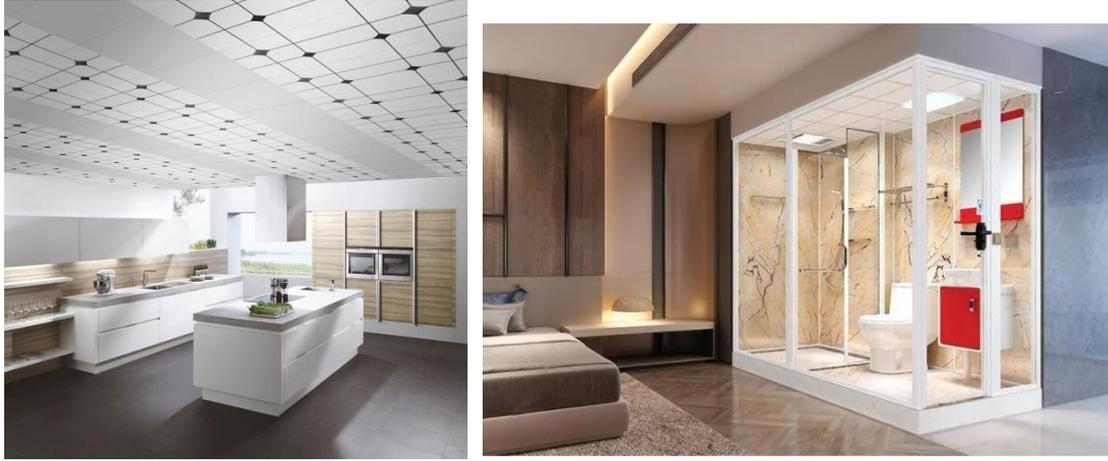


图 5.2.2 集成厨卫

5.2.3 集成泵房

泵房是设备管线最为集中的区域，且通常安装空间小，精度要求高。

建议：采用化零为整的集成方式，如将多台水泵安装于框架内作为一个单元，组合成一个模块，统一运输吊装至机房内，进行安装。既节约工期，又可对质量精准控制。



图 5.2.3 水泵模块预制

5.3 管线分离

设备管线系统暗埋会增加后期运营维护成本并破坏结构。目前我国建设用地使用年限 70 年，建筑设计使用年限一般为 50 年，装修设计使用年限一般仅为 5~10 年。因此在整个建筑的生命周期内，装修要多次更新和维修，再次装修时的凿墙开槽，不仅破坏了主体结构，而且大大增加了维修、更新的成本和难度。

管线分离应进行各个专业管线敷设的综合设计，既要各得其所，又要避免碰

撞。给排水管线宜与主体结构相分离，在安装完成后的预制构件上不进行剔凿沟槽、打孔开洞等。

建议：给排水管线明设于建筑结构体上，通过建筑结构体上预留凹槽、孔洞、建筑隔墙空腔、管道井等途径实现与建筑结构体系的管线分离。还可通过内装系统与建筑结构体系的天、地、墙之间产生的空腔层，从而实现给排水管线与建筑体系的分离。

5.3.1 公区管线

在建筑公区内的给排水管线宜在架空层或吊顶内设置，其中干管和立管应敷设在吊顶、管井、管窿内，支管宜敷设在架空地板或吊顶内，且管线应尽量避免交叉敷设。竖向管线宜集中于管道井中，利用公区管道井实施管线分离，垂直管井设置于电梯间旁或公共走道内，并预留有足够大的检修门，以利于检修更新。

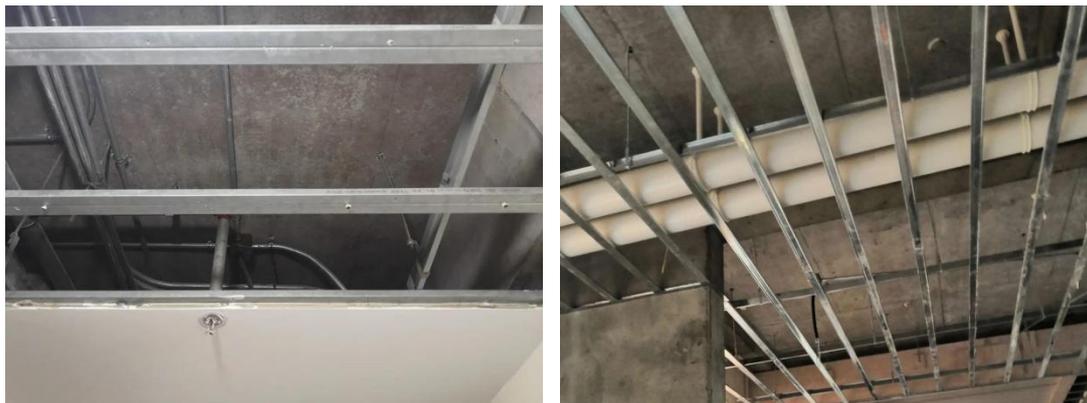


图 5.3.1 吊顶架空管线分离

5.3.3 户内管线

住宅建筑中，给水入户管线、同层排水管线宜在架空地板层设置，在本层本户的架空地板层设置同层排水管，这种设置原则是水管不再贯穿楼板，便于户内的检修和改造，而不会影响到下层任何位置。

排水管道需保持排水坡度加走管空间，地板通常需架空 200mm ~ 300mm 的高度。

建议：为减少地面敷设管线层的厚度（或吊顶的空间），管道尽量避免交叉敷设，且宜将交叉点隐藏在橱柜、洗涤柜等部品后面。



图 5.3.3 地面架空、管线分离

5.3.4 条件受限情况

管线分离时，管线通常敷设于吊顶、管井或管线夹墙、地面架空层、非承重墙体空腔等位置，当受条件限制无法实现管线分离时，则管线只能埋置在结构构件内部、敷设在湿作业地面垫层内或在内隔墙墙面剔槽。

建议：横向布置的设备及管线可结合建筑垫层进行设计，也可在预制墙、楼板内预留孔洞或套管；竖向布置的设备及管线在预制墙、楼板中预留沟槽、孔洞或套管。并且给排水立管、地漏等穿越结构楼板、预制结构部件时，进行准确定位，并预留足够的管件安装空间及距离。

5.3.5 碳排放测算

由于国家规范中对装配式建筑管线系统的推动主要体现在“宜管线分离、宜同层排水”，就此对管线分离与不分离的设计所产生的碳排放量进行对比测算，来验证两种方式的管线敷设对于碳排放量的影响。

以1m的同材质管线为例进行测算，管线敷设于垫层内相比管线敷设于架空吊顶内增加的碳排放量即为这部分垫层做法所增加的碳排放量。垫层范围按长度1m、宽度0.5m、深度0.3m计，则垫层体积为0.15m³，则碳排放量见下表：

表 5.3.5 不同垫材碳排放计算

垫层建筑材料	碳排放量 (kgCO _{2e} /m)
C30 混凝土	44.25
C50 混凝土	57.75

注：C30 混凝土的碳排放因子为 295kgCO_{2e}/m³，C50 混凝土的碳排放因子为 385kgCO_{2e}/m³。

经计算，1m 的同材质管线未进行管线分离敷设于湿作业地面垫层内时，相比于进行管线分离敷设于吊顶区域，碳排放量会增加碳排放量约 50kgCO_{2e}。

建议：经测算，装配式建筑的给排水管线进行管线分离设计，较未进行管线分离的设计可减少约 50kgCO_{2e}/m。

5.4 可再生能源

5.4.1 建筑光热一体化

安装太阳能热水系统的装配式建筑应符合建筑一体化设计和部品通用化的要求，并应满足预留预埋的条件，以避免二次施工破坏建筑主体的安全性、围护结构节能性等整体功能。

建议：合理选择太阳能应用一体化系统类型、色泽、矩阵形式等，在保证热利用效率的前提下，做到与建筑物的外围护结构从建筑功能、外观形式、建筑风格、立面色调等协调一致，使之成为建筑的有机组成部分。

太阳能热水系统的集热器、储水罐等的布置也需与主体结构、外围护系统、内装系统相协调，做好预留预埋。

5.4.2 光热板的可更换性

我国目前有两大类太阳能集热器产品，平板型和真空管型。太阳能集热器安装在建筑的外围护结构上，进行维修更换比较麻烦，故正常使用寿命不能太低。国家规范中要求太阳能热利用系统中的太阳能集热器设计使用寿命应高于 15 年，而民用建筑使用年限为普通房屋和构筑物，设计使用年限为 50 年。

建议：由于光热板的寿命通常会低于建筑使用寿命，光热板的安装连接采用易于更换的方式，以减少拆改成本。



图 5.4.2 屋面太阳能系统

5.5 结论及建议

装配式建筑的设计中，机电系统的设计直接影响着建筑的性能、质量与安全。在装配式建筑的设计、施工以及维修工程等阶段，要将低碳理念贯彻到工程的全过程中。

为更好地降低装配式建筑全生命期碳排放，给排水系统的设计可采用下列措施：

- 1.设计阶段，合理布置机房管井等设备用房，选用高效的节能设备，并充分利用可再生能源，降低能耗，实现低碳节能的设计目标；
- 2.给排水管道采用管线分离设计，较未进行管线分离敷设于湿作业地面垫层的设计更为低碳；
- 3.给水管道宜采用干式施工的方式，如：布置在架空地板内、干式施工地暖管线的绝热层内或嵌墙敷设在专用的管线沟槽内；排水管道宜采用同层排水技术；减少管道拆改过程中的碳排放；
- 4.给排水管道预留洞及预埋套管需做好精细设计及定位；
- 5.适宜采用化零为整的集成设计方式。

第六章 暖通专业

6.1 标准化设计

装配式暖通管线包含空调风系统、空调水系统、供暖系统、通风系统、防排烟系统等。管线种类繁多，安装复杂。暖通管线在设计时应采用模数化、标准化设计，工厂加工成型，现场拼接安装，以提高施工质量，缩短空调设备施工周期。主要表现在以下几个方面：

6.1.1 模数化设计

暖通管线尺寸设计、末端设备定位应需遵循模数协调的原则，配合建筑和内装模数，合理布置设备管线，符合美观、适用的原则。装配式建筑的建筑结构部件均为加工厂标准化生产，其尺寸、精度皆按标准模数执行，在暖通设备管线布置过程中，按照建筑结构模数进行设计，可以减少管线种类，降低施工复杂度。同时，选用标准化的管线设备，也便于采购和生产。

以地板辐射采暖系统为例，目前装配式建筑中常用的干式地暖模块均为工厂化预制，不同品牌产品以及同一品牌不同系列产品的规格尺寸皆不相同，但大多都按标准模数执行。图 6.1.1-1 为某地暖模块技术参数，可见产品尺寸已充分考虑建筑模数影响。

回字型盘管技术参数要求 单位 mm 长×宽×厚

适用管材规格	无蓄热层模块规格	编号	含蓄热层模块规格	编号	间距
8/12	直型 1200×400×20	MYMKHE12-1	直型 1200×400×17	MYMKHE12X-1	100
	L型 400×400×20	MYMKHE12-2	L型 400×400×17	MYMKHE12X-2	
	U型 400×400×20	MYMKHE12-3	U型 400×400×17	MYMKHE12X-3	
12/16	直型 1200×400×25	MYMKHE16-4	直型 1200×400×20	MYMKHE16X-4	200
	L型 400×400×25	MYMKHE16-5	L型 400×400×20	MYMKHE16X-5	
	U型 400×400×25	MYMKHE16-6	U型 400×400×20	MYMKHE16X-6	
16/20	直型 1200×500×28	MYMKHE20-7	直型 1200×500×25	MYMKHE20X-7	250
	L型 500×500×28	MYMKHE20-8	L型 500×500×25	MYMKHE20X-8	
	U型 500×500×28	MYMKHE20-9	U型 500×500×25	MYMKHE20X-9	

图 6.1.1-1 某地暖模块技术参数

在地面辐射采暖系统设计时，地暖模块的布置和选择，需充分考虑建筑空间

间模数，尽量减少产品种类，统一尺寸，减少非标准构件的数量。图 6.1.1-2 为较为科学的布置方式。

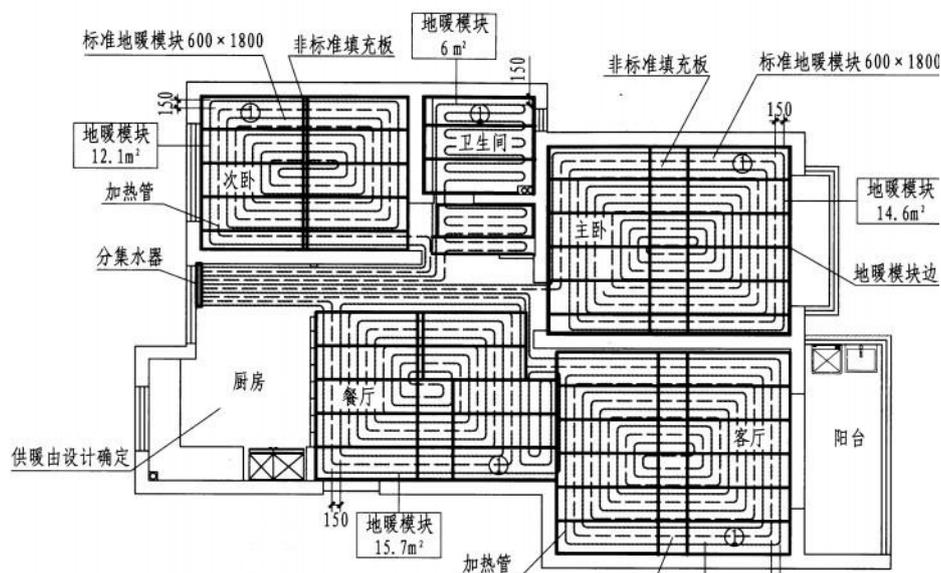


图 6.1.1-2 地暖模块布置示例

建议：暖通专业的末端系统与建筑模数息息相关，在管线布置时，充分考虑整个建筑的模数，尽量减少设备型号的种类，对于同一功能、面积相似的空间，尽量做到设备型号、管线尺寸、安装相对位置一致，以便于管线加工和支吊架预留。

6.1.2 机房设置

暖通专业涉及的机房主要有冷热源机房、锅炉房、换热站、空调/新风机房、通风机房、防排烟机房、热计量间等，从低碳角度来说，机房位置的选择，直接影响输配能耗，因此优先考虑靠近负荷密集处，然而对于锅炉房、防排烟机房，首先应满足安全原则，热计量间应考虑便于查看和维修，区域冷热源还需考虑环境保护因素。



图 6.1.2 区域能源站选址及制冷机房示例

建议：对于公共建筑，空调和新风机房按层设置，设置竖向风系统时需全面考虑输配半径，机房设置时应考虑噪音对周围房间的影响，不宜紧邻对噪音要求较高的房间；对于住宅建筑，空调或新风机房集中设置，或者选用户式系统。制冷机房宜设置在负荷集中处，以便减少输配能耗；对于接市政热力或者区域冷热源的换热站，还需综合考虑接入点位置、室外管线铺设等因素；锅炉房的设置除满足相关规范要求外，还需考虑烟囱爬升的建筑结构条件。对于水源热泵机房，建议靠近取水口位置，对于地源热泵机房，建议设置在地下空间内，并靠近地埋管集管入口处。

6.1.3 管井模块化设计

暖通管井可与给排水管井共用，并与楼电梯、公共卫生间等模块进行组合设计，管井设计时应预留足够的出管空间，同时尽量靠近负荷密集处，以减少管路长度，节约输配能耗，便于水力平衡。

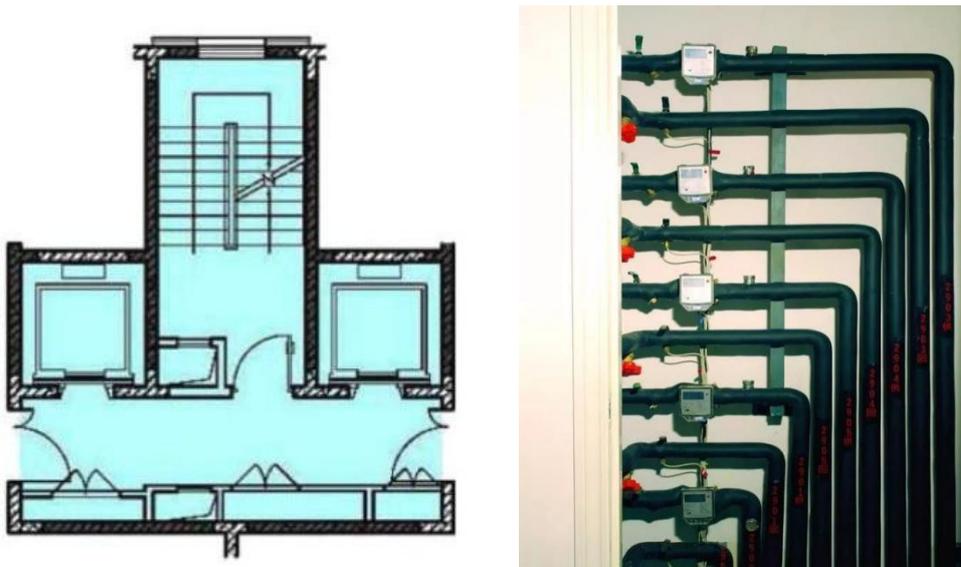


图 6.1.3 管井模块

6.1.4 管线位置合理

不同于传统建筑，装配式建筑结构部件按照标准模数生产，现场安装中必定存在拼接现象，图 6.1.4-1 为装配式内墙和楼板现场情况，由图可见，建筑构件的拼接在设计图纸中是无法体现的，若暖通管线穿越接缝处，预留洞口、套

管等是无法实现的。



图 6.1.4-1 装配式内墙和楼板

建议：暖通管线在路由设计时，充分考虑建筑模数、构架拼接等因素，避免在非承重墙体接缝处穿越管道，同时还应尽量避免管线穿越剪力墙。有条件时可与构件厂家或者施工单位进行沟通，由专业人员对管线预留及部件拼接情况进行建模。

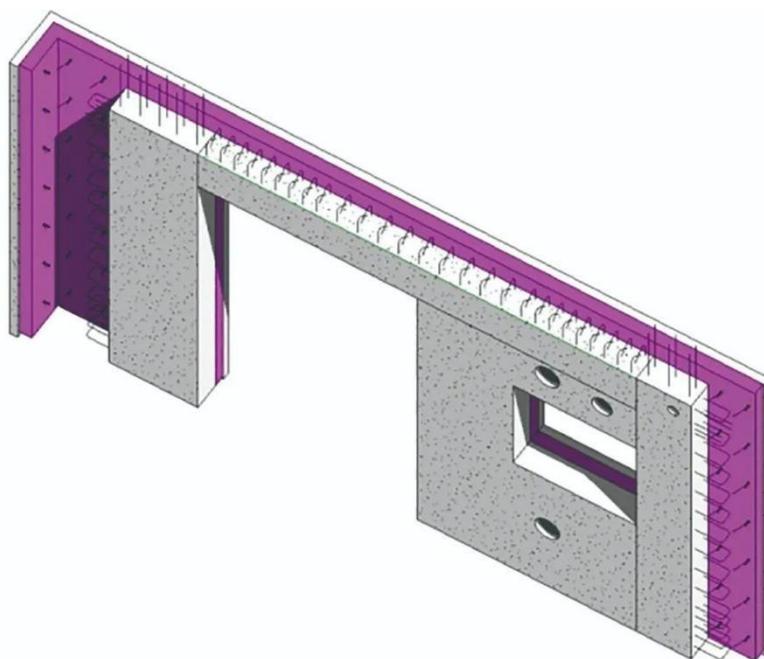


图 6.1.4-2 建筑隔墙建模

6.1.5 维护维修便利

通常来说，建筑使用年限为 50 年。而暖通设备管线无法达到这么长时间，也就是说在建筑使用期内，必然存在更换设备管线的情况。因此暖通设备与管线的选型与安装应与建筑设计年限及更新周期相协调，满足建筑全寿命期的安装、

维护和更新要求。

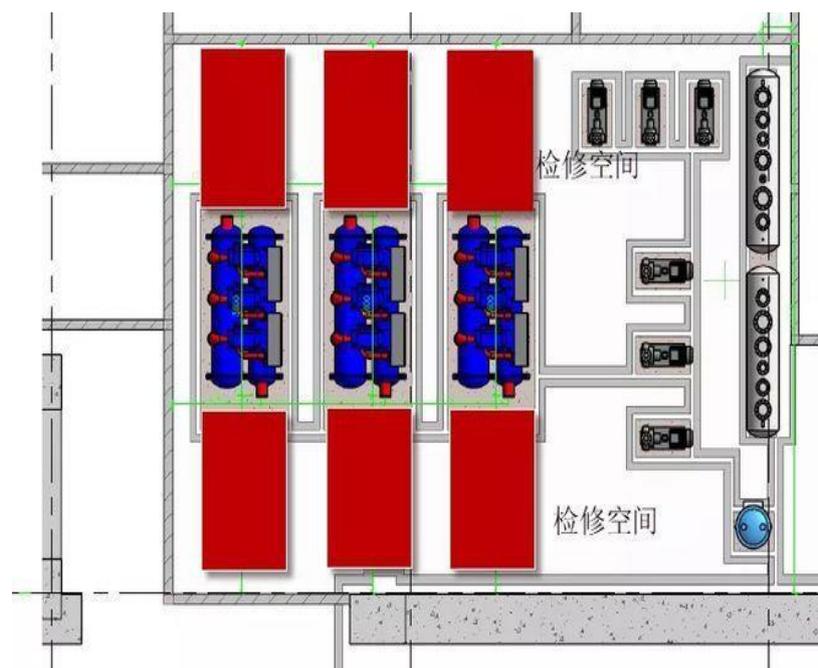


图 6.1.5 制冷机房设备布置

建议：在设计时预留更换设备管线的条件，如大型设备的运输通道、主要机房内维修操作空间等，避免更新维护时大面积拆改建筑主体。

6.2 集成设计及产品

传统建筑在设计时，建筑结构、机电设备等同步进行，相对独立。而装配式建筑，建筑结构、机电设备需进行一体化集成设计，各专业间联系紧密。需要在设计前结合装配式建筑特点，确定合理设计方案，施工图纸完成后需要通过BIM进行二次深化设计，对施工进行精细化管理。因此装配式建筑暖通工作主要分为以下几个步骤：施工图设计→BIM二次深化设计→拆分设计→构件生产、运输→现场施工。

6.2.1 暖通系统与建筑、装修一体化设计

装配式建筑采用建筑、装修一体化设计，在设计初期确定装修风格，用以指导暖通空调系统选择及管路走向。同时，暖通系统构建参与到建筑、装修一体化设计过程中，也可以影响建筑空间布局、装修风格设计等。

现在很多建筑只考虑了建筑的外立面的美观，往往将中央空调的吸风口和排风口设计在一起，致使进入的新风也是污染的气体。国外许多国家为提高新风质

量，往往将空调的进风口选择在建筑周围的树林里或河边，而避免将新风吸口对着含有大量汽车尾气的马路。因此新风口的位置也可以对建筑立面和总平面的设计产生一些影响。暖通系统构建越早地参与到这一过程中，后期设计工作中遇到的平面布局、立面效果问题就会越少。

建筑内装与暖通系统一体化设计，也会影响暖通系统、设备形式的选择。当房间隔墙有装配式装饰层，可考虑散热器系统，当采用架空地板时，可采用辐射采暖系统、地板送风系统。当采用灯带风口一体化吊顶时，末端风口设计需按照吊顶风口形状风格，合理进行气流组织和设备布置。



图6.2.1 装配式吊顶

6.2.2 独立分体式空调

装配式建筑采用独立分体式空调时，其室外机的安装应与建筑进行一体化设计，保证室外机空间充足、安装便利、通风良好；空调冷媒管和凝水管穿墙孔应统一设计并预留，采用专用套管并做好密封。



图 6.2.2 一体化设计的室外机机位

随着装配式建筑技术的发展，与之配套的建筑结构和暖通设备一体化产品和技术也逐渐市场化。装配式建筑暖通设计时应结合装配式建筑实际情况选择与之相匹配的技术措施和相关产品，采用集成化新技术、新产品为装配式建筑服务。从而最大程度地降低施工的成本，并能有效减少后期的运行成本,最终实现低碳节能的效果。以下为一些新技术：

6.2.3 装配式暖通管线

暖通空调系统包含空调风系统、空调水系统、供暖系统、通风系统、防排烟系统等。管线种类繁多，安装复杂。暖通管线在设计时应采用模数化、标准化设计，工厂加工成型，现场拼接安装，以提高施工质量，缩短空调设备施工周期。

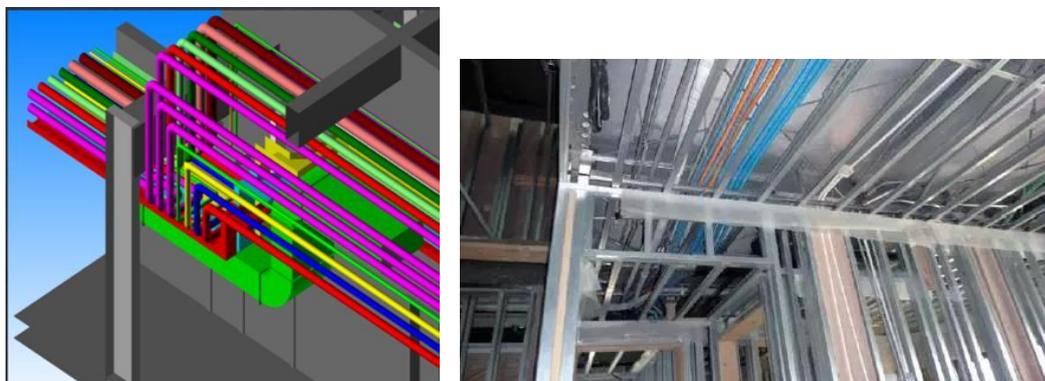


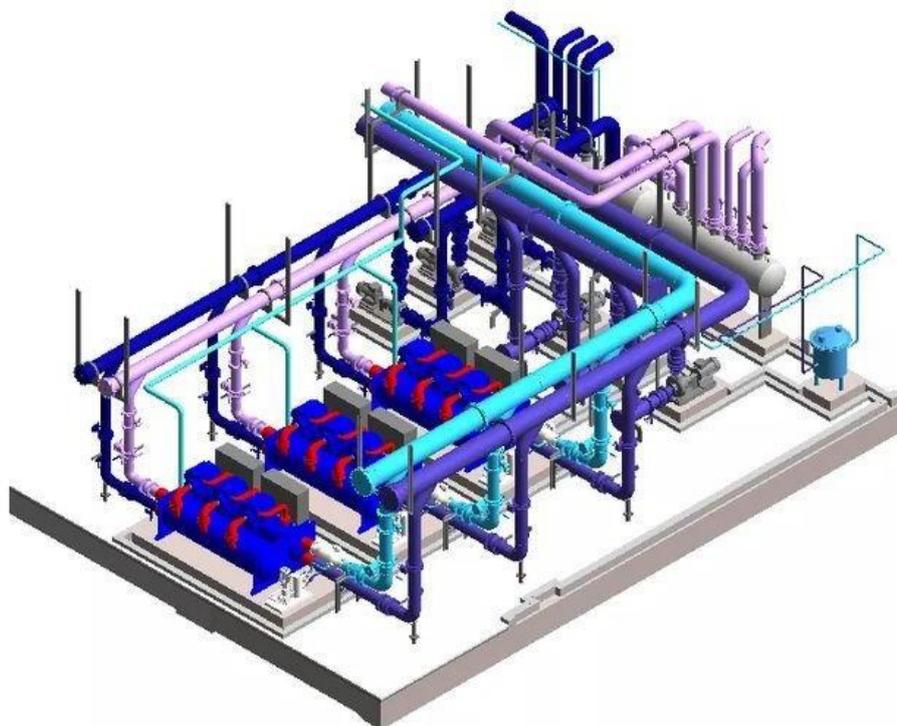
图 6.2.3 装配式管线深化设计与施工

6.2.4 装配式制冷机房

随着 BIM 技术的深度应用，空调制冷机房也逐渐进入到装配式建造阶段。装配式制冷机房历经深化设计、工厂预制加工、现场装配安装三个阶段，将制冷机房各个设备、管道根据安装及组合形式拆成不同的模块单元，最后将各模块单元在工厂内进行标准化生产后，运输至现场进行安装。

深化设计阶段，通过结合各方建议，根据深化设计和设备材料实际规格参数选用情况，及时更新、集成和完善 BIM 模型，以满足设计、使用及后期检修要求。

图 6.2.4-1 装配式制冷机房深化设计



管段工厂预制加工阶段。首先根据模型分解图和材料表的数据信息，采用全自动电脑机械化对管道进行切割分段；其次采用机器人对管段进行焊接，焊接精度高；最后采用机械除锈及喷漆，确保预制管段外形美观。



图 6.2.4-2 装配式制冷机房管道模块

现场装配式安装阶段。首先将制冷机组、水泵、分集水器、换热器等主要设备安装就位；其次安装主管支架及空调水系统预制型钢支架及弹簧减震体系；再对预制主管段进行现场拼装及吊装；最后对管道管件、阀门及支管进行装配式安装。



图 6.2.4-3 装配式制冷机房

6.2.5 装配式支架

装配式支架（包括抗震支架）是成品支架，工厂化预制，现场装配安装，解

决了现场切割、焊接、防腐刷漆等问题，且安装简便、性能可靠，可减少人力成本，缩短工期，便于后期维护。

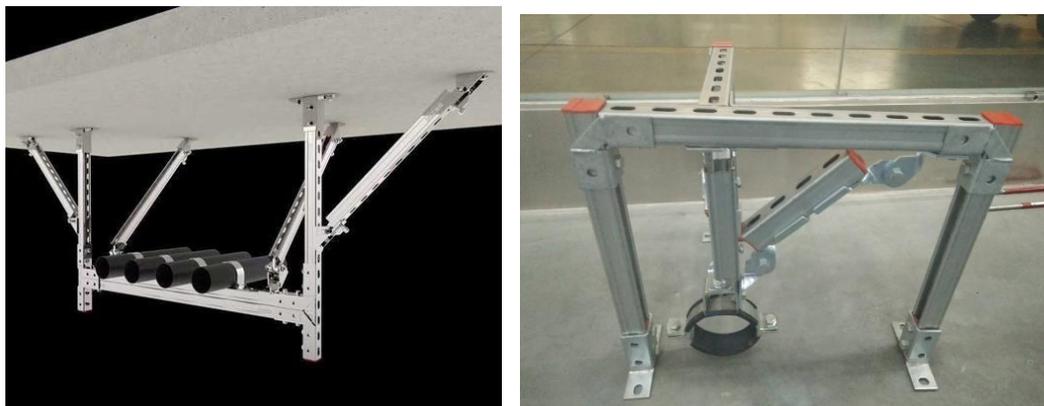


图 6.2.5 装配式支架

6.3 管线分离

装配式建筑中要求设备管线优先考虑与结构系统、外围护系统、内装系统等部品部件相分离，并尽可能减少在预制构件上的预留预埋。这样不仅省去了在结构体内预留预埋设备管线的过程，主要使设备管线具有了可维修性和可更替性，从而延长建筑的使用寿命。通过现阶段工程探索实践，主要采用的技术措施有：

6.3.1 管线综合

空调系统分为空调风系统和空调水系统。通常情况下空调的两个系统都安装在吊顶内，做到了管线分离。竖向系统一般通过管井设置，这与建筑的空间布局息息相关，因此在设计方案时期就应与建筑专业沟通协调。

对于公共建筑，建议优先利用公共管井、吊顶、架空地面等做法实现空调管线与结构分离，竖向系统通过管井、风井设置。对于住宅建筑，当设置空调系统时，集中新风系统的新风机一般设置在屋面或者新风机房，通过竖向风管给每层用户送风，每层支管可根据装修情况，通过架空地面或者吊顶送至户内；也可采用更加灵活的户式新风系统，均可做到管线分离。

6.3.2 散热器采暖系统

对于公共建筑，由于大多有吊顶空间，散热器采暖系统比较容易实现管线分离。对于居住建筑，散热器采暖系统的供回水管，多数安装在地面垫层内，若要

做到管线分离，必须选用干法施工。安装散热器的墙板部（构）件应采取加强措施。

一般情况下，为保证供暖效果，散热器宜在外墙安装。装配式剪力墙住宅建筑的外墙一般采用预制夹芯保温外墙板，无法现场打孔，所以预制外墙上安装的散热器支托架螺栓，必须在工厂预留好。由于不同形式的散热器或同一形式不同片数散热器支托架位置都有所不同，从而增加了预制板的规格数量，基于上述原因，现有预制装配式住宅很少采用散热器供暖的方式。

在设计过程中，应尽量固定散热器的位置，比如统一设置在窗户下侧，尽量减少散热器片数组合，对于类型、面积相似的空间，选用同一规格的散热器，同时，预制板在设计时可适当增加预埋螺栓孔的数量，从而统一预制板的规格，使预制墙板标准化，从而有效减少了预制板数量，降低制造成本。

6.3.3 地板辐射采暖系统

装配式建筑中常用的地板辐射采暖系统主要有预制沟槽保温板地面供暖系统和预制轻薄供暖板地面供暖系统，预制沟槽保温板式和预制轻薄供暖板式地板辐射采暖系统为工厂化预制，施工简便易行，节省人工成本，工作效率高，热反应快，重量轻。

当地板内需敷设给水管线时，预制沟槽保温板式和预制轻薄供暖板式地板辐射采暖系统存在一些不足，主要体现在没有给水管线敷设空间，预制沟槽保温板式需在同一构造层内埋设水管，存在破坏保温板的问题。预制轻薄供暖板式为埋设给水管线，还需要另外增设构造层，没有很好地解决管线与主体分离问题。

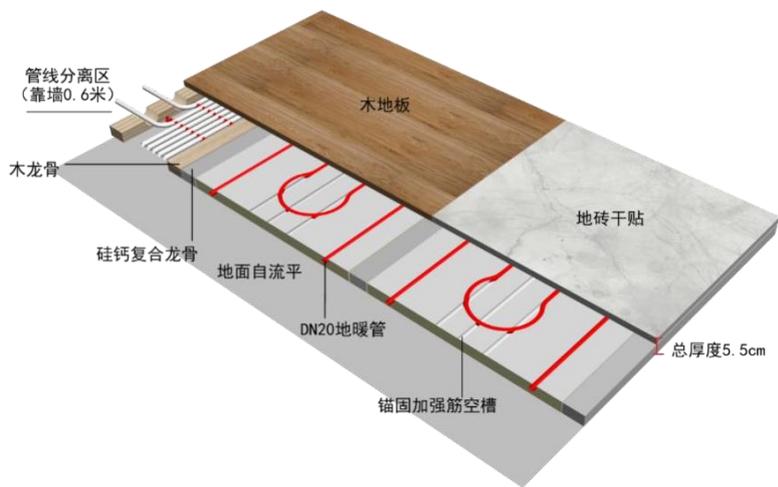
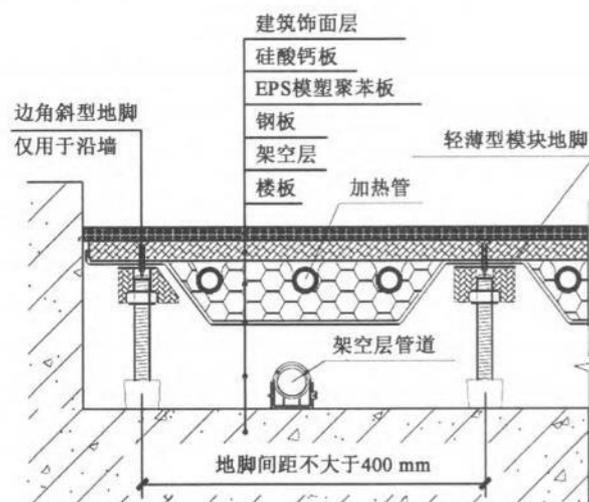


图 6.3.3-1 预制沟槽保温板式地板辐射采暖系统

此时可采用模块式快装地面系统。这种新型地面系统，是在结构板上采用可调节地脚组件架空找平，在地脚组件上铺设可拼装可盘管的地暖模块，地暖模块在工厂制作，现场拼装，操作简便。然后在模块上加附地面散热面材及饰面层，整体形成一体的新型架空地面系统，整个系统高度可在 110 ~ 140 mm 之间调节。这种架空形式的地面系统，留给给水支管电气管线敷设空间，避免了给水管暗埋在建筑垫层内，电气管线埋在叠合楼板现浇层内的弊端，既规避了传统的混凝土填充式湿作业工艺的问题，又满足了部品工厂化生产的需求，构建了装配式装修的供暖地面体



系。其构造见图:

图 6.3.3-2 模块式快装地面供暖构造



图 6.3.3-3 模块式快装地面供暖铺装效果

6.3.4 两种采暖系统碳排放核算

目前装配式建筑中，常规空调系统基本可以做到管线分离，采暖系统管线有干式和湿式两种做法，为对比不同采暖系统碳排放量，本节模拟了干式地暖系统、湿式地暖系统、湿法作业散热器系统全寿命周期的碳排放量，计算结果对于供暖系统的选择具有参考意义。

现阶段，全生命周期评价（Life Cycle Analysis，简称LCA）方法在相关产品开发过程的环境评价应用十分普遍。LCA 是一个全面的环境评价系统，可以将 LCA 方法应用在建筑施工决策的环保产品选择、评估及优化施工工艺等方面。根据LCA 的评价方法，本次碳排放模拟计算将供暖系统的阶段划分为生产阶段、运输阶段、安装阶段、运行阶段以及拆除阶段。针对建筑物的碳排放值计算采用较为简单的排放系数法，相关排放计算方法和碳排放因子主要参考《建筑碳排放计算标准》（GBT 51366-2019）以及《关于做好 2022 年企业温室气体排放报告管理相关重点工作的通知》（环办气候函〔2022〕111号）。

为对比不同采暖系统碳排放差别，建立统一的建筑模型。设定建筑位置为北京，单层，供暖面积为 146 m²，层高 4m，南北向窗墙比 0.4，东西向无外窗，外门为单层实木外门，位于东侧墙。外墙传热系数为 0.35 W/(m²·k)；外门传热系数为 2.5 W/(m²·k)；外窗传热系数为 2.0 W/(m²·k)；屋顶传热系数为 0.5 W/(m²·k)；

冬季室内设计温度为 18℃。采暖热源设定为空气源热泵。考虑到建筑装修周期，本次模拟计算周期设定为 10 年。

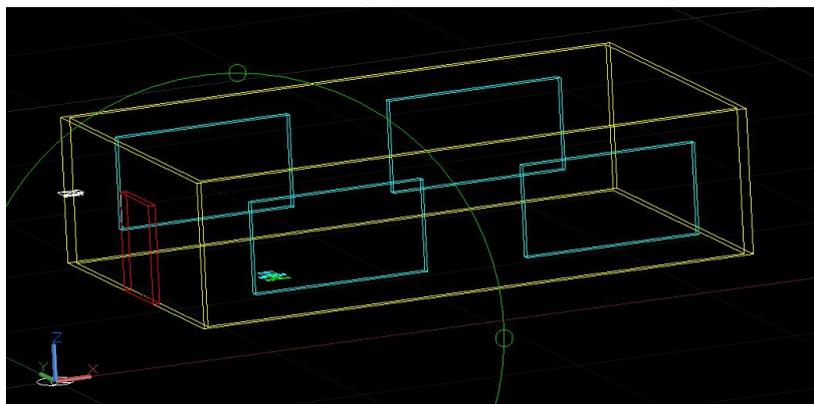


图 6.3.4-1 建筑模型

设定干式辐射采暖采用架空地面系统，由支撑模块、地暖模块、平衡模块、填充模块、辅料等多部品部件构成；湿式地板辐射系统为混凝土填充式；另外设定散热器系统为传统地面做法，散热器管道吊顶敷设，做到管线分离。



图 6.3.4-2 干式采暖地面系统示意

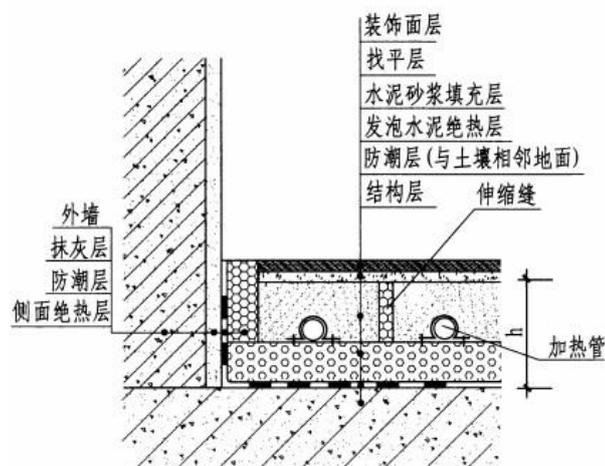


图 6.3.4-3 湿式采暖地面系统示意

经计算，不同采暖系统全寿命周期碳排放情况如表6.3.4-1—表6.3.4-3所示。

表6.3.4-1 干式地暖全寿命周期碳排放情况

各阶段	单位面积碳排放量 (kgCO _{2e} /m ²)	总碳排放量 (kgCO _{2e})	建筑碳排占比 (%)
生产环节	27.88	4085.08	11.60%
运输环节	1.49	218.32	0.62%
安装环节	2.9	424.92	1.21%
拆除环节	1.87	273.90	0.78%
回收环节	0.05	7.33	0.02%
运行环节	20.61	30201.6	85.80%
合计		35381.23	100.00%

表6.3.4-2 湿式地暖全寿命周期碳排放情况

各阶段	单位面积碳排放量 (kgCO _{2e} /m ²)	总碳排放量 (kgCO _{2e})	建筑碳排占比 (%)
生产环节	105.26	15422.76	30.90%
运输环节	3.56	521.02	1.04%
安装环节	11.53	1689.25	3.39%
拆除环节	13.75	2014.59	4.04%
回收环节	0.17	25.06	0.05%
运行环节	20.61	30201.6	60.60%
合计		49874.30	100.00%

表 6.3.4-3 散热器采暖全寿命周期碳排放情况

各阶段	单位面积碳排放量 (kgCO _{2e} /m ²)	总碳排放量 (kgCO _{2e})	建筑碳排占比 (%)
生产环节	58.29	8540.34	16.8%
运输环节	6.52	955.45	1.90%
安装环节	17.34	2540.73	5.00%

各阶段	单位面积碳排放量 (kgCO _{2e} /m ²)	总碳排放量 (kgCO _{2e})	建筑碳排占比 (%)
拆除环节			
回收环节			
运行环节	264.65	38778.2	76.3%
合计		50814.70	100.00%

通过计算结果可见，运行周期为 10 年时，各系统运行环节的碳排放占比最大，因此必须选择低碳的热源，并且通过围护结构保温、合理的设计温度等措施来降低这一阶段的碳排放。湿式地暖生产环节碳排放占比最大。在生产、运输、安装、拆除、回收五个阶段，干式地暖的碳排放量都优于传统湿式地暖系统。在运行环节，地板辐射系统的碳排放量远小于散热器系统。

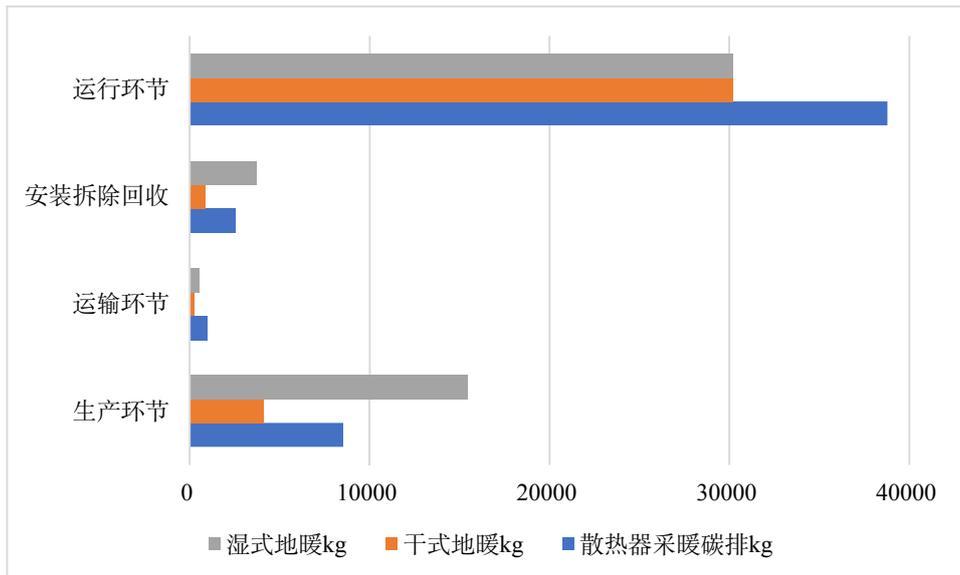


图 6.3.4-4 三种采暖系统各阶段碳排放对比

三种采暖系统的总碳排放量，干式地暖系统最低，散热器系统最高，这是由于运行过程中，散热器系统传热效率较低造成的，湿式地暖系统的总碳排放量比散热器系统略低，虽然在运行阶段湿式地暖系统的碳排放量大大优于散热器系统，但是在生产、安装、拆除、回收阶段，湿式地暖系统碳排放量较大，使得运行阶段的减碳优势并不明显，而散热器系统在管线分离方面比较容易实现，因此在系统选择时，仍具有一定的优势。

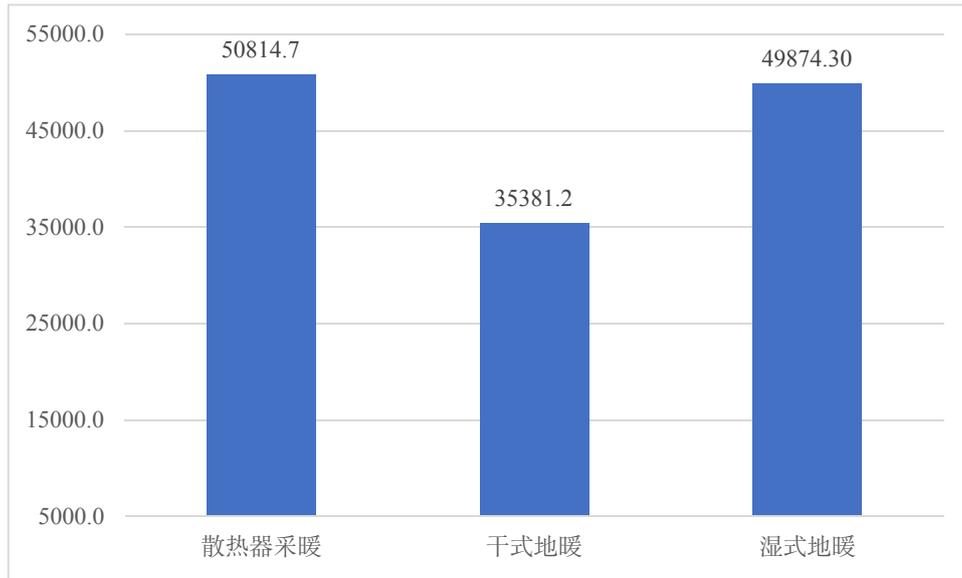


图 6.3.4-5 三种采暖系统总碳排放对比

当管线分离达到 100%时，选用干式地暖系统与散热器系统相比，在生产环节可节约 52.2%的碳排放，在运输环节可节约 77.2%的碳排放，在安装、拆除、回收环节可节约 101.0%的碳排放，在运行环节可节约 22.1%的碳排放。

表 6.3.4-4 碳排放对比情况

各阶段	干式地暖碳排放量 (kgCO _{2e})	传统散热器系统总 碳排放量 (kgCO _{2e})	装配式比散热器系 统节约的碳排放 (%)
生产环节	4085.08	8540.34	52.2%
运输环节	218.32	955.45	77.2%
安装环节	424.92		
拆除环节	443.97	2540.73	101.0%
回收环节	7.33		
运行环节	30201.62	38778.17	22.1%
合计	35381.23	50814.70	30.4%

在一些项目中，由于投资、空间布局、建筑功能等制约只能做到部分管线分离。以干式地暖和湿式地暖为例，当管线分离率不同时，与传统湿式地暖相比，各阶段降低的碳排放百分比见下表：

表 6.3.4-5 不同装配率下碳排放降低对比情况

装配率	100%	90%	80%	70%	60%
生产环节	73.5%	66.2%	58.8%	51.5%	44.1%
运输环节	58.1%	52.3%	46.5%	40.7%	34.9%
安装环节	74.8%	67.4%	59.9%	52.4%	44.9%
拆除环节	78.0%	70.2%	62.4%	54.6%	46.8%
回收环节	70.8%	63.7%	56.6%	49.5%	42.5%
运行环节	-	-	-	-	-
合计	29.1%	26.2%	23.2%	20.3%	17.4%

由表中数据可见，装配率越高，减少的碳排放率越大，干式地暖在生产、按照、拆除、回收环节的节碳优势都很明显，而运行阶段，由于换热方式相同，碳排放量并无差异。

通过本节核算可知，干式地暖系统在全寿命周期内的各个环节都有明显的减碳优势，运行阶段时间越长，地板辐射供暖系统的节碳优势越大，对于临时建筑或者装修比较频繁的建筑，散热器系统既可满足管线分离要求，又可在一定程度上减少碳排放量。

6.4 可再生能源

对于暖通专业，建筑寿命期内碳排放主要集中在运行阶段，运行阶段的碳排放以采暖、空调系统占比较大，故在建筑设计初期，应做好建筑采暖空调系统的冷热源策划，充分结合建筑所在地的能源结构、建筑使用特点、建筑负荷等因素，合理选择合适的冷热源形式。

冷源与热源形式的选择应根据建筑规模、用途、建设地点的能源条件、结构、价格以及国家节能减排等相关规定，在充分调研的基础上综合论证确定，重点研究可再生能源应用可行性。有条件时应优先选择地源热泵、太阳能、空气能等低碳供暖方式，加大可再生能源利用，同时尽量减少化石能源作为热源的燃料。

例如在严寒地区，当地质条件允许时，可采用地源热泵与太阳能系统耦合的供暖系统，冬季地源热泵供热，夏季太阳能系统补热，可保持全年热平衡；在地热资源较为发达的地区，可采用地热能，通过热泵提升热源品质，作为供暖热源；当距离海洋、湖泊较近时，可采用水源热泵系统；在南方地区，可采用地源热泵与单冷机相结合的方式，夏季供冷、冬季供热、全年提供生活热水；在气候温和

区，空气源热泵应用较为广泛。

6.5 结论及建议

装配式建筑暖通设计与传统建筑暖通设计相比，涉及的专业更多，与其他专业的联系更为紧密。装配式办公建筑暖通设计应当是设计—施工—管理全专业全过程参与的一体化设计。暖通专业在设计时应当采用装配式建筑中与暖通相关的新技术、新产品，促进新产业、新动能的发展。最终实现装配式建筑节约资源能源，减少施工污染，提升劳动生产效率和质量安全水平。

第七章 电气专业

7.1 标准化设计

7.1.1 模数化设计

电气和智能化设备应采用模数化设计，并应满足准确定位要求。电气和智能化设备的尺寸和定位宜与建筑模数相协调，尽量统一，做到设计美观、施工安装便捷。工厂预制的墙板和楼板，由于不便于现场剔凿，故要求设计精细化，预留孔洞和接线盒应准确定位。设计时应避免在混凝土板上剔槽，因为剔槽时，会产生混凝土废料。剔槽的深度一般比管直径大 20mm，并不超过混凝土板的四分之一，宽度一般比管径大 10~15mm。设管公称直径为 $d(\text{mm})$ ，剔槽长度为 L ，混凝土废料的碳排放因子为 q ，则剔槽的工程量为： $[(d+20)(d+15)]L$ ，混凝土废料碳排 $[(d+20)(d+15)]Lq$ 。剔槽 100m 混凝土废料碳排放量如下表所示：

表 7.1.1 不同管径线管剔槽 100m 碳排放 (kg)

	SC20	SC25	SC32	SC40
C30	58.233	78.057	104.253	126.378
C50	75.999	101.871	136.059	164.934



图 7.1.1 管线剔凿

7.1.2 机房设置

项目中每个变配电室的供电范围不宜超过 150m，电井的供电范围不宜超过 50m~60m。且变配电室和电井宜设置在负荷中心。减小供电半径意在减小线路损耗，同时减小压降控制电缆截面。室外变配电站在进线处结构实体墙上预留预埋防水套管，便于进线和出线。



图 7.1.2 预装式变配电站

建议：室外变配电站优先选用预装式变配电站。

7.1.3 维护维修便利

用户在后期插座不够时可自行添加插座模块，且能调整插座的位置。因为导轨插座可自行添加插座模块的特点，为了确保导轨插座的负荷承载力，有需求的导轨插座宜采用单独回路配电。

建议：项目内装经常变化区域如住宅的电视墙和厨房、办公的工位、商店的展台等，插座优先采用导轨式插座。

7.1.4 电气设备

插座等电气设备宜安装在轻质隔墙上，不宜安装在可装配的实体结构墙上。插座等设备的接线盒需定位准确，不应设置在装配式构件的接缝处。



图 7.1.4 导轨式插座

7.1.5 孔洞预留

电气管线接口应避开预制构件受力较大部位和节点连接区域，避免在接缝处开洞。做好精细设计以及定位，避免错漏碰缺，降低生产及施工成本，减少现场返工。

7.2 管线分离

7.2.1 电气主干线

电气和智能化系统的主干线应在公共区域设置，例如走道、门厅等，主干线不宜穿越隔墙，有必要穿越隔墙时，应在隔墙留有孔洞及电气套管。预留孔洞及电气套管的位置宜通过管线综合后准确定位，定位不准会造成主干路由无法实施，产生二次返工的工作量。

7.2.2 消防管线

消防电力线路明敷时（包括敷设在吊顶内），应穿金属导管或采用封闭式金属槽盒保护，金属导管或封闭式金属槽盒应采取防火保护措施。在层高允许的前提下，消防管线宜采用明敷刷防火涂料的敷设方式。消防配电线路的敷设是否安全，直接关系到消防用电设备在火灾时能否正常运行，常用保护措施一般可采用

包覆防火材料或涂刷防火涂料。防火涂料用量为 0.12 ~ 0.16kg/m²；假设建筑全生命周期 50 年内需要更换一次管线，那么消防管线明敷和暗敷的碳排对比为：

表 7.2.2 明敷暗敷碳排放对比

	SC20	SC25	SC32	SC40
暗敷剔 C30	58.233	78.057	104.253	126.378
暗敷剔 C50	75.999	101.871	136.059	164.934
明敷刷防火漆	33.912	42.701	52.750	60.288

7.2.3 叠合楼板敷设

当区域内无吊顶等受条件限制且管线必须做暗敷于叠合楼板时，可将管线敷设于现浇层，不宜在预制构件中预埋管线，在预制构件中预埋管线时，管线路由最多有一次交叉。在预制构件中预埋管线可能与构建中的钢筋等发生碰撞影响结构主体，故尽量不在预制构件中预埋管线。

7.2.4 无线设备

灯具的控制面板宜采用无线设备，避免竖向管线在墙壁内敷设时剔槽对墙体造成影响，且能根据家居内装随时更换位置。控制面板宜采用靠手指按压压力发射信号的微电源控制。

设于厨房的燃气表计量可考虑采用无线远传数据技术，需有线通讯的设备预埋的管线与设备接口应相互匹配，并满足燃气表计量及使用功能的要求。随着技术的进步，采用远程抄表技术管理替代传统的抄表方式也越来越多。为了配合远程抄表技术则需要燃气表旁预留网络接口。为了减少弱电管线的预埋，方便集成，采用无线远传技术是可行的。

建议：多尝试使用无线设备减少管线的数量，也利于日后的维护改造。



图 7.2.4 无线灯具开关

7.3 集成设计与产品

7.3.1 集成管井

集成管井需对预埋件进行精确定位，宜采用 BIM 技术对管道、管件、桥架等进行碰撞检查。三维模型有助于对管井的各个构件进行深度优化，防止预埋件等定位有误对施工造成影响。且电气的电井不宜与水井及燃气管井集成设计。电气的桥架和配电箱与水、燃气管道同管井敷设有防爆防潮的要求，故不宜集成设计。住宅的电井设可使用一体化装配式电井。公共建筑的电井不宜采用一体化装配式电井。因为住宅项目电井设备不多容易标准化。

强弱电电井合用时，强电和弱电线路应分别布置在竖井两侧，弱电线路应敷设于金属槽盒之内。

7.3.2 集成设备

厨卫设备包含：电气设备包含壁挂电暖气，镜柜特殊照明，橱柜特殊照明，嵌入式蒸箱、洗碗机电器、移动插座导轨、餐边柜烧水器具、餐桌涮锅、电动窗帘、净水器、小厨宝等，要做好电气设备安装条件的预留，浴室的电气控制开关及等电位接地箱宜置于整体卫浴间外。整体浴室内所有裸露的金属管

线相互连接及接地都已在工厂内预制好，只需通过对外预留的 PE 线的接线端子与预埋在卫生间内的辅助等电位端子箱相连即可。

7.3.3 集成管线

吊顶内只有电路及水路，或换气设备厚度 $\leq 150\text{mm}$ 时，吊顶空间高度宜 $\geq 200\text{mm}$ ；顶部包含电路、水路、换气、取暖， $150\text{mm} <$ 换气、取暖设备厚度 $\leq 250\text{mm}$ 时，吊顶空间高度宜 $\geq 300\text{mm}$ ，不满足以上条件的，吊顶内空间应单独计算考虑。

集成设计时，应对管线，设备，装修进行综合考虑，注意管线、线盒埋深与预制墙体厚度的关系。

7.4 可再生能源

7.4.1 建筑光伏一体化

光伏建筑一体化产品应用于混凝土预制墙体时，宜采用光伏一体化预制构件，其预埋件与镶嵌的光伏组件宜与预制墙体一并生产。装配式建筑采用的光伏建筑一体化产品的技术应尽量减少支撑结构及组件框架的使用，最大限度避免对外墙的破坏的同时，减少辅材的用量；简化安装的步骤。光伏建筑一体化产品宜采用铜铟镓硒柔性覆膜技术。铜铟镓硒光伏薄膜为第三代薄膜发电技术，具有柔性和光电转换效率接近晶硅电池的优点，同时安装时不会破坏主体墙体，且不需要和结构生根，由于技术成熟度及造价高等问题，市场普及度不高，但代表了未来的发展趋势。



图 7.4.1-1 铜钢镓硒覆膜技术

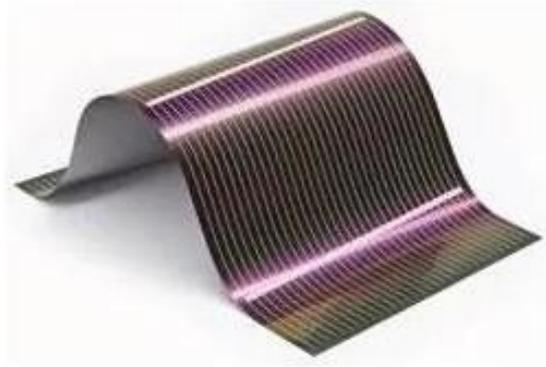


图 7.4.1-2 铜钢镓硒软膜

建议：努力尝试新产品，例如不与结构生根的光伏覆膜技术。

7.4.2 光伏板的可更换性

光伏建筑一体化产品的使用寿命宜与建筑使用寿命相匹配。寿命不匹配的光伏系统的安装方式宜采用易于后期更换光伏组件的安装方式。规范中规定光伏组件的设计使用寿命应高于 25 年，但民用建筑使用年限为普通房屋和构筑物，设计使用年限为 50 年。纪念性建筑和特别重要的建筑结构，设计使用年限为 100 年。与光伏系统使用年限存在不匹配，我们要尽量使用与建筑使用寿命一致的光伏系统减少建筑拆改成本。据了解目前没有 50 年使用寿命的光伏产品，最长有使用 40 年的光伏板的案例，不排除使用寿命 25 年的光伏组件可以使用 50 年，但从一般项目来看需要每 25 年更换一次产品。

建议：采用易于更换的光伏板安装形式或易于更换的建筑光伏一体化产品。

7.4.3 光伏系统发电效率

一体化光伏组件距离外墙的空气层厚度不宜小于 100mm。光伏组件在正常发电时需要散热，热量不及时排除会影响光伏板的发电效率，有研究表明，空气层厚度大于 100mm 时，比没有空气层的光伏组件发电效率提高 3%，同时空气层避免了背板高温对外墙保温层及防水层的影响。

表 7.4.3 不同空气层厚度光伏组件温度及发电效率提升量

空气层厚度 (mm)	0	10	50	100	150	200	250	300
------------	---	----	----	-----	-----	-----	-----	-----

温度 (°C)	47	46	42	41.2	41	39.2	39.2	39.3
发电效率提升量 (%)	0	0.5	2.5	3.0	3.0	4.0	4.0	4.0

7.5 低碳设计计算

夏季一体化光伏组件对建筑地热的影响的减碳计算。

$$E = H_a \times (N_q - N_f \times 1 - N_g \times N_j) \times T \times S \quad (7.6.1-1)$$

式中:

E —光伏一体化系统对建筑夏季得热减少量;

H_a —单位面积该地区的太阳能辐射总量 kWh/m² *a;

N_q —建筑外墙或屋顶的太阳能辐射吸收率, 混凝土可取 0.5~0.6;

N_f —光伏组件的太阳能辐射吸收率, 无数据可取 0.25;

N_g —光伏组件的光电转换效率, 单晶硅可取 20%, 多晶硅可取 15%, 碲化镉光伏薄膜 15%, 铜铟镓硒薄膜可取 18%;

N_j —光伏组件效率修正系数, 东西立面 55%, 南立面 68%, 顶面 100%;

T —夏季的光照时间, 可取 728 小时;

S —光伏组件的辐射面积;

有实测案例, 数据表明某地区夏季平均气温 35°C, 但是安装一体化光伏发电系统以后的房屋, 在最高温天气, 顶层房间温度比原来降低约 6°C 左右。光伏组件利用了太阳能、减少顶层屋面的受热, 从而间接降低顶层房间的气温。用光伏发电, 不仅节省了从电网购买的电能, 还通过降温节省了空调用能。

7.6 结论及建议

电气系统使用年限远小于建筑生命周期且电气设备更新淘汰较快, 在建筑全生命周期运维过程中, 电气系统需要多次翻修改造, 在参与设计装配式建筑时, 电气专业除了考虑一次建设产生的碳排放以外, 需重点关注运维过程中翻新改造产生的碳排放, 设计要充分考虑拆改更新的便利性, 才能有效降低碳排。

随着科技的发展, 电气设计师要关注新技术的普及给行业带来的变化, 主动尝试无线设备、预装式变电站、集成管井、覆膜式光伏系统等新技术。思考新技术在建筑低碳领域带来的变化, 做推广新技术, 探索新方向的领路人。

为更好地降低装配式建筑全生命期碳排放, 可采用下列措施:

1.消防管线采用明敷，刷防火涂料的敷设方式比预埋在楼板里拆改更加方便，且更加低碳。

2.采用无线灯具控制开关，无线表具等无线电气设备比有线设备更加低碳。

3.使用导轨式插座等移动维护便利的电气设备比固定式电气设备更加低碳。

4.尝试集成管径，做好管线桥架的孔洞预留，可以有效节约空间，减少拆改量，减低碳排。

光伏对建筑低碳运行的贡献不局限于所产生的电能，光伏组件在冬夏季对建筑得热和隔热也有很大帮助，建议采用覆膜技术或其他易于更换的组件安装方式。同时，在满足其他限制条件下，优先采用使用寿命更长的光伏组件。

参考文献

- 1 混凝土结构设计规范: GB50010-2010[S].北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- 2 混凝土结构耐久性设计标准: GB/T 50476-2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- 3 钢结构设计标准: GB 50017-2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- 4 建筑碳排放计算标准: GB 51366-2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- 5 建筑碳排放计量标准: T/CECS 374: 2014[S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- 6 工程结构通用规范: GB 55001-2022[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2022.
- 7 装配式住宅建筑设计标准图示: 18J820[S]. 北京: 中国计划出版社, 2022.
- 8 装配式建筑评价标准: GB/T 51129-2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- 9 蒸压加气混凝土制品应用技术标准: JGJ/T 17-2020[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- 10 蒸压加气混凝土板: GB 15762-2008[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.
- 11 深圳市建筑装饰碳排放计算标准: T/SZZS01 001-2021[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.
- 12 房屋建筑与装饰工程消耗量定额: TY01-31-2015[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
- 13 装配式建筑工程消耗量定额: TY01-01(01)-2016[S]. 北京: 中国计划出版社, 2016.
- 14 木结构设计标准: GB 55005-2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- 15 建筑抗震设计规范: GB 50011-2010[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- 16 装配式剪力墙住宅建筑设计规程: DB 11/T 970-2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
- 17 绿色建筑评价标准: GB/T 50378-2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- 18 外墙外保温工程技术规程: JGJ 144-2019[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- 19 刘光学, 郝军亮, 刘帅. 装配式建筑发展研究综述[J]. 建设监理, 2018(10): 44-45, 68.
- 20 梁小青. 日本住宅产业发展的主要政策及措施[J]. 中国建设信息, 2004(11S):

57-59.

- ☞ 贾文芳. 预制装配式建筑发展历程与技术要点研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2020.
- ☞ 罗少帅. 装配式住宅预制构件生产项目调度优化研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
- ☞ 侯志豪. 装配式建筑评价中的细节解读及建议[J]. 山西建筑, 2020, 46(15): 16-17.
- ☞ 顾泰昌. 国内外装配式建筑发展现状[J]. 工程建设标准化, 2014(8): 48-51.
- ☞ 张伟锋, 赖鸿达, 宋苗苗, 等. 装配式建筑发展研究[J]. 广东土木与建筑, 2018, 25(12): 9-12.
- ☞ 夏琳, 夏国胜, 金肖微. 国内外装配式建筑发展综述[J]. 建材与装饰, 2018(38): 177.
- ☞ 赵倩. 国内外装配式建筑技术体系发展综述[J]. 广州建筑, 2018, 46(4): 3-5.
- ☞ 刘琼, 李向民, 许清风. 预制装配式混凝土结构研究与应用现状[J]. 施工技术, 2014, 43(22): 9-14, 36.
- ☞ 张辛, 刘国维, 张庆阳. 法国: 预制混凝土结构装配式建筑[J]. 建筑, 2018(15): 56-57.
- ☞ 蔡强, 赵诣丰. 装配式混凝土建筑的发展与前景[J]. 现代经济信息, 2015(5): 393.
- ☞ 杨闯, 刘香. 我国装配式住宅现存问题及应对策略分析[J]. 建筑技术, 2016, 47(4): 301-304.
- ☞ 蒋勤俭. 国内外装配式混凝土建筑发展综述[J]. 建筑技术, 2010, 41(12): 1074-1077.
- ☞ POLAT G. Factors Affecting the use of precast concrete systems in the United States[J]. Journal of Construction Engineering & Management, 2008, 134(3): 169-178.
- ☞ COLIN DAVIDSON. Housing Industrialization: the combination of organization and technology[A]. International Architecture Center Alliance Conference, 2001.
- ☞ 许鹏. 装配式建筑的历史与现状[D]. 西南交通大学, 2015.
- ☞ LUKASZEWSKA E, Johnsson H, FRAGIACOMO M. Performance of connections for prefabricated timberconcrete composite floors[J]. Materials &

Structures, 2008, 41(9): 1533-1550.

7 PAVESE A, BOURNAS D A. Experimental assessment of the seismic performance of a prefabricated concrete structural wall system[J]. Engineering Structures, 2011, 33(6): 2049-2062.

8 王金岭. 装配式住宅分析与应用——以濮阳新都为例[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2013.

9 张红霞. 装配式住宅全生命周期经济性分析[D]. 泰安: 山东农业大学, 2013.

10 王东辉, 柳旭东, 陈勇. 装配整体式混凝土结构的发展[J]. 混凝土, 2012(1): 113-115.

[41] 肖明. 日本装配式建筑发展研究[J]. 住宅产业, 2016(6): 10-19.

[42] 卢求. 德国装配式建筑及全装修发展趋势[J]. 建设科技, 2018(20): 96-103.

[43] 李中领. 国内装配式建筑的发展前景分析[J]. 绿色建筑, 2018, 10(6): 75-77.

[44] 陈骏, 彭畅, 李超, 等. 装配式建筑发展概况及评价标准综述[J]. 建筑结构, 2022, 52(S2): 1503-1508.

[45] 邱家惠. ALC 隔墙板施工质量控制及碳减排效应分析[J]. 福建建材, 2022(11): 86-100.

[46] 樊娟莉. 轻质蒸压砂加气混凝土墙板的综合性能分析[D]. 西安: 长安大学, 2017.

[47] 高宇, 李政道, 张慧, 等. 基于 LCA 的装配式建筑建造全过程的碳排放分析[J]. 工程管理学报, 2018, 32(2): 30-34.

[48] 李静, 刘胜男. 装配式混凝土建筑物化阶段碳足迹评价研究[J]. 建筑经济, 2021, 42(1): 101-105.

[49] 肖岩, 陈国, 单波, 等. 竹结构轻型框架房屋的研究与应用[J]. 建筑结构学报, 2010, 31(6): 195-203.

[50] 肖岩, 余立永, 单波, 等. 装配式竹结构房屋的设计与研究[J]. 工业建筑, 2009, 39(6): 56-59.

[51] 肖岩, 马健, 单波, 等. 竹结构轻型框架房屋火灾安全性能试验研究[J]. 建筑结构, 2012, 42(2): 165-169.

[52] 肖岩, 陈国, 杨瑞珍, 等. 现代竹结构住宅抗震性能研究[C]//第18届全国

结构工程学术会议. 广州, 2009.

[53] 建筑设计防火规范: GB 50016-2014[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.

[54] 中华人民共和国国家互联网信息办公室. 习近平在七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话 (全文) [Z]. 2020.

[55] 中国建筑能耗与碳排放研究报告 (2021) [R]. 北京: 中国建筑节能协会能耗统计专委会. 2021.

[56] Stein R G, Serber D. Energy Conservation Through Building Design[M]. New York: McGraw HILL, 1979.

[57] ZHANG XIAOCUN, WANG FENGLAI. Life-cycle assessment and control measures for carbon emissions of typical buildings in China[J]. Building and Environment. 2015(86): 89-97.

[58] SUNGHO TAE, SHIN SUNGWO, WOO JEEHWAN. The development of apartment house life cycle Co2 simple assement system using standard apartment houses of South Korea[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011(15): 1454-1467.

[59] 李岳岩, 陈静. 建筑全生命周期的碳足迹[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021.

[60] 肖建庄, 夏冰, 肖绪文, 等. 混凝土结构低碳设计理论前瞻[J]. 科学通报, 2022, 67(12): 1-13.

[61] 王有为. 建设领域双碳实践的若干认知[J]. 建设科技, 2022, Z1(3): 8-12.

[62] 廖礼平. 绿色装配式建筑发展现状及策略[J]. 企业经济, 2019, 38(12): 139-146.

[63] 邵高峰, 赵霄龙, 高延继. 建筑物中建材碳排放计算方法的研究[J]. 新型建筑材料, 2012, 2: 75-77.

[64] 张肖, 吴高明, 吴声浩, 等. 大型钢铁企业典型工序碳排放系数的确定方法探讨[J]. 环境科学学报, 2012, 32(8): 2024-2027.

[65] 燕艳. 浙江省建筑全生命周期能耗和 CO₂ 排放评价研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2011.

[66] 王霞. 住宅建筑生命周期碳排放研究[D]. 天津: 天津大学, 2011.

- [67] 殷素红, 庞翠娟, 穆彦, 等. 水泥生产 CO₂ 排放量化方法分析及数学模型建立[J]. 水泥, 2012, 7: 1-6.
- [68] 李小冬, 王帅, 孔祥勤, 等. 预拌混凝土生命周期环境影响评价[J]. 土木工程学报, 2011, 44(1): 132-138.
- [69] 肖君, 赵平, 刘睿劼. 建筑保温板生命周期环境影响研究[J]. 安全与环境学报, 2013, 7(2): 380-384.
- [70] 张涛, 姜裕华, 黄有亮, 等. 建筑中常用的能源与材料的碳排放因子[J]. 中国建设信息, 2010, 23: 58-59.
- [71] Bribián L Z, Capilla A V, Usón A A. Life cycle assessment of building materials: comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco- efficiency improvement potential[J]. Building and Environment, 2011, 46: 1133-1140.
- [72] 李兵, 李云霞, 吴斌, 等. 建筑施工碳排放测算模型研究[J]. 土木建筑工程信息技术, 2011, 3(2): 5-9.
- [73] 黄志甲, 赵玲玲, 张婷, 等. 住宅建筑生命周期 CO₂ 排放的核算方法[J]. 土木建筑工程信息技术, 2011, 33(S2): 103-105.
- [74] 杨秀, 魏庆茆, 江亿. 建筑能耗统计方法探讨[J]. 建筑节能, 2007, 35(1): 7-10.
- [75] 庄智, 徐强, 谭洪卫, 等. 基于能源统计的城镇民用建筑能耗计算方法研究[J]. 建筑科学, 2011, 27(4): 19-22.
- [76] 陈康海. 建筑工程施工阶段的碳排放核算研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2014.
- [77] 董坤涛. 基于钢筋混凝土结构的建筑物二氧化碳排放研究[D]. 青岛: 青岛理工大学, 2011.
- [78] 杜书廷, 张献梅. 不同结构住宅建筑物化阶段碳排放对比分析[J]. 建筑经济, 2013, 8: 105-108.
- [79] 朱熾, 陈莹. 住宅建筑生命周期能耗及环境排放案例[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(3): 330-334.
- [80] 王上. 典型住宅建筑全生命周期碳排放计算模型及案例研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.

- [81] 张孝存. 建筑碳排放量化分析计算与低碳建筑结构评价方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2018.
- [82] 陈振. 装配式建筑给排水设计与施工技术探讨[J]. 中国建筑金属结构, 2022(8): 148-150.
- [83] 邹飞. 装配式绿色建筑给排水设计管窥—以上海浦东新区某地块住房项目为例[J]. 建筑节能, 2019, 47(11): 123-126.
- [84] 党潇音. 装配式建筑给排水系统的设计及应用[J]. 科技创新与应用, 2020(18): 88-89.
- [85] 张文文, 高冉, 彭鹏. 装配式住宅建筑给排水系统设计与应用研究[J]. 节能, 2019(09): 25-29.
- [86] 戴鼎立, 赵俊, 王昊宇. 装配式建筑给水排水系统应用研究[J]. 给水排水, 2018, 54(12): 60-64.
- [87] 王强, 王伟, 石利汝, 等. 装配式装修基础部品低碳化及重要性研究[J]. 世界建筑, 2021(7): 52-57.
- [88] 易凯, 丁德, 杨毅, 等. 装配式办公建筑暖通应用[J]. 浙江建筑, 2021, 38(5): 62-64.
- [89] 叶浩文. 装配式建筑机电系统设计指南[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [90] 王颖. 装配式混凝土结构住宅机电系统设计整体解决方案研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(2): 148-157.
- [91] 民用建筑供暖通风与空气调节设计规范: GB 50736-2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.
- [92] 建筑给水排水设计规范: GB 50015-2003[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [93] 建筑给水排水及采暖工程施工质量验收规范: GB 50242-2002[S]. 北京: 中国计划出版社, 2002.
- [94] 龚道仁, 陈迪, 袁志钟. 光伏发电系统碳排放计算模型及应用[J]. 可再生能源, 2013, 31(9): 1-4, 9.
- [95] 赵若楠, 董莉, 白璐, 等. 光伏行业生命周期碳排放清单分析[J]. 中国环境科学, 2020, 40(6): 2751-2757.

- [96] 许百春. 基于BIM 技术平台的智慧建造—BIM 技术在国内建筑领域的建造应用[J]. 引文版: 工程技术, 2016(6): 300.
- [97] 尹红东. BIM 技术在东方智慧园商住小区一期建设工程地下管道综合排布中的应用[J]. 青海水力发电, 2015(1): 37-40.
- [98] 李忠实. 太阳能光伏发电系统设计施工与应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2012.
- [99] 毕凯, 宋明中, 林玉杰. 光伏建筑一体化技术及应用[J]. 中国科技信息, 2021(11): 41-42.
- [100] 李梦. 装配式建筑光伏一体化预制构件的电热性能及其对建筑能耗影响的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2020.
- [101] 谢明辉, 白璐, 阮久莉, 等. 以晶体硅太阳能电池产业为例的产业生命周期评价初探[J]. 环境科学研究, 2017, 30(12): 1970-1978.
- [102] 孟昊杰. 装配式建筑施工碳排放计算及影响因素研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
- [103] Jim Hart. Whole-life embodied carbon in multistory buildings Steel, concrete and timber structures[J]. Journal of Industrial Ecology 2021; 25:403 – 418.
- [104] B. Li. Research on the computational model for carbon emissions in building construction stage based on BIM[J]. Structural Survey Vol. 30 No. 5, 2012 pp. 411-425.
- [105] Shen. Research on a Calculation Model and Control Measures for Carbon Emission of Buildings. ICCREM 2018:190-198.
- [106] 李兵. 低碳建筑技术体系与碳排放测算方法研究[D]. 湖北: 华中科技大学, 2012.
- [107] L. Luo, Y. Chen. Carbon emission energy management analysis of LCA-Based fabricated building construction[J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2020, 27(100405): 1-8.
- [108] 郑晓云, 徐金秀. 基于 LCA 的装配式建筑全生命周期碳排放研究: 以重庆市某轻钢装配式集成别墅为例[J]. 建筑经济, 2019, 40(1): 107-111.
- [109] 高源雪. 建筑产品物化阶段碳足迹评价方法与实证研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.

[110] 周新军, 全生命周期碳排放核算方法及其应用[J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2019, 9(4):10-14.

[110] 周新军, 黄茵, 谢汉生, 等. 铁路运输企业温室气体排放量核算方法探讨[J]. 铁路节能环保与安全卫生, 2016, 6(4): 173-178.

附 录

附录A 预制墙板工程量计算

A.1 预制混凝土夹芯保温外墙板

A.1.1 钢筋

(1) 墙板钢筋

表 A.1.1-1 预制混凝土夹芯保温外墙板钢筋计算表

	钢筋 编号	根数	钢筋 直径	钢筋容重 (kg/m)	钢筋加工尺寸	重量 (kg)
竖向	3a	6	16	1.58	5079	48.15
	3b	6	6	0.22	2810	3.74
	3c	4	12	0.89	2810	9.98
水平	3d	14	8	0.40	5232	28.93
	3e	1	8	0.40	5292	2.09
	3f	2	8	0.40	4332	3.42
拉筋	3La	30	6	0.22	190	1.27
	3Lb	28	6	0.22	184	1.14
	3Lc	5	6	0.22	214	0.24
合计						98.97

(2) 外叶板钢筋

表 A.1.1-2 预制混凝土夹芯保温外墙板外叶板钢筋计算表

外叶板钢 筋量	水平根 数	水平长 度	竖向根 数	竖向长 度	容重 (kg/m)	重量 (kg)
	20	2640	18	2940	0.15	16.28

A.1.2 混凝土

表 A.1.2 预制混凝土夹芯保温外墙板混凝土计算表

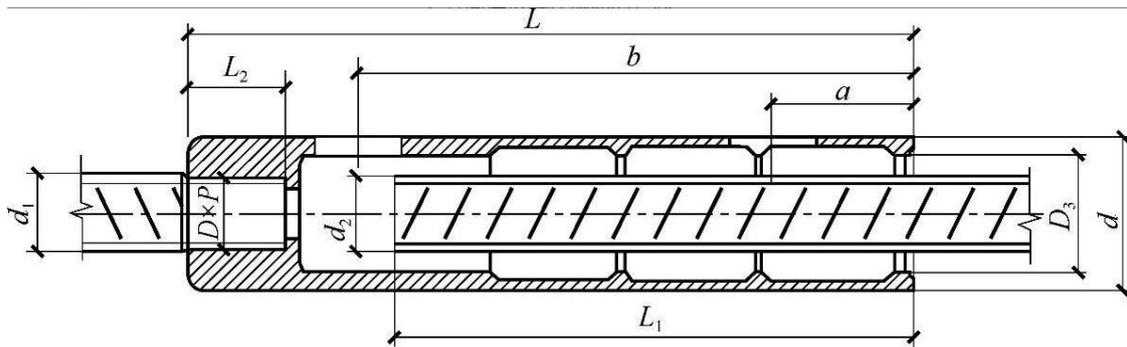
	墙板高	墙板长	墙厚	体积 (m ³)
内叶板混凝土	2840	2100	200	1.19
外叶板混凝土	2980	2680	60	0.48

A.1.3 灌浆量、套筒及连接件

灌浆量考虑水平灌浆缝+灌浆套筒内灌浆量，灌浆套筒采用半灌浆套筒

表 A.1.3-1 预制混凝土夹芯保温外墙板灌浆量、套筒及连接件计算表

	墙板高	墙板长	墙厚	体积 (m ³)	容重 (t/m ³)	重量 (t)
水平灌浆缝	20	2700	200	0.011	2	0.02



图A.1.3 半灌浆套筒示意

表 A.1.3-2 预制混凝土夹芯保温外墙板灌浆量、套筒及连接件数量表

个数	直径 (mm)	钢筋插入长度/埋件长度 (mm)	用钢量	用钢量合计	
TT1	3	28.5	128	0.20	0.61

TT2	3	28.5	128	0.20	
MJ1	2	6.5	220	0.049	0.29
MJ2	4	6.5	220	0.049	

A.1.4 保温板

表 A.1.4 预制混凝土夹芯保温外墙板保温板计算表

区域	墙板 高	墙板 长	墙 厚	体积 (m ³)	容重 (kg/m ³)	重量 (t)
严寒	2980	2640	120	0.94	30	0.028
寒冷	2980	2640	80	0.63	30	0.019
夏热冬 冷	2980	2640	40	0.31	30	0.009

A.2 预制混凝土外墙板

A.2.1 钢筋

(1) 墙板钢筋

表A.2.1 预制混凝土外墙板钢筋计算表

	钢筋编 号	根 数	钢筋直 径	钢筋容重 (kg/m)	钢筋加工尺 寸	重量 (kg)
竖 向	3a	6	16	1.58	5079	48.15
	3b	6	6	0.22	2810	3.74
	3c	4	12	0.89	2810	9.98
水 平	3d	14	8	0.40	5232	28.93
	3e	1	8	0.40	5292	2.09
	3f	2	8	0.40	4332	3.42
拉	3La	30	6	0.22	190	1.27

筋	3Lb	28	6	0.22	184	1.14
	3Lc	5	6	0.22	214	0.24
合计						98.97

A.2.2 混凝土

表A.2.2 预制混凝土外墙板混凝土计算表

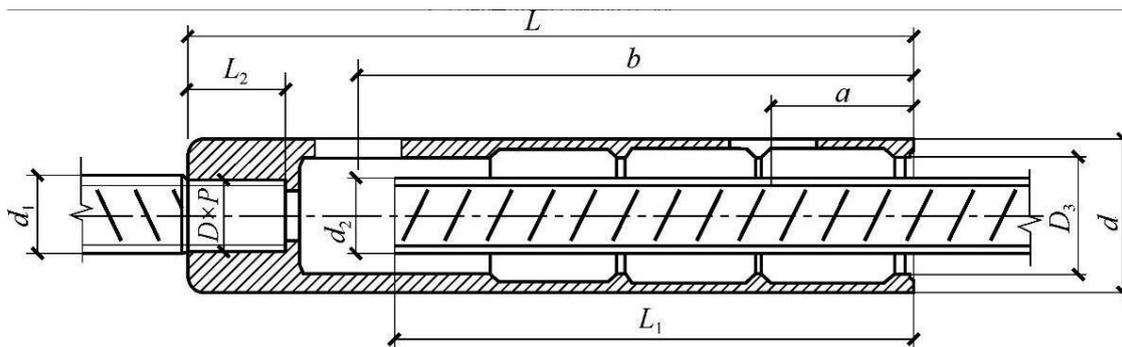
	墙板高	墙板长	墙厚	体积 (m ³)
内叶板混凝土	2840	2100	200	1.19

A.2.3 灌浆量、套筒及连接件

灌浆量考虑水平灌浆缝+灌浆套筒内灌浆量，灌浆套筒采用半灌浆套筒

表 A.2.3-1 预制混凝土外墙板灌浆量、套筒及连接件计算表

	墙板高	墙板长	墙厚	体积 (m ³)	容重 (t/m ³)	重量 (t)
水平灌浆缝	20	2700	200	0.011	2	0.02



图A.2.3 半灌浆套筒示意

表 A.2.3-2 预制混凝土外墙板灌浆量、套筒及连接件数量表

个数	直径 (mm)	钢筋插入长度/埋件长度 (mm)	用钢量	用钢量合计	
TT1	3	28.5	128	0.20	0.61

TT2	3	28.5	128	0.20	
MJ1	2	6.5	220	0.049	0.29
MJ2	4	6.5	220	0.049	

A.2.4 保温板

(2) 保温板量计算

表 A.2.4-1 预制混凝土外墙板保温板计算表

区域	墙板 高	墙板 长	墙 厚	体积 (m ³)	容重 (kg/m ³)	重量 (t)
严寒	2980	2640	120	1.89	30	0.057
寒冷	2980	2640	80	1.26	30	0.038
夏热冬 冷	2980	2640	40	0.63	30	0.019

(3) 保温体系其他材料

表 A.2.4-2 预制混凝土外墙板保温体系其他材料计算表

清单类目	预设参数	严寒 (120mm)	寒冷 (80mm)	夏热冬冷 (40mm)
	聚合物改性水泥砂浆			
粘结剂	d=1mm S _{黏贴} =80%S _{保温} ; 松散密度 1300kg/m ³	10.23	10.23	10.23
分层抹防裂 砂浆	d=5mm; 松散密度 1300kg/m ³	51.14	51.14	51.14
玻纤网格布	单位面积重量 130g/m ²	1.02	1.02	1.02
外墙涂料	JS 聚合物水泥防水 涂料	17.70	17.70	17.70

1.5 ~ 3kg/m²

A.3 叠合类墙板

A.3.1 钢筋

(1) 墙板钢筋

表A.3.1 叠合类墙板钢筋计算表

	钢筋编 号	根 数	钢筋直 径	钢筋容重 (kg/m)	钢筋加工尺 寸	重量 (kg)
竖 向	3a	6	16	1.58	5079	48.15
	3b	6	6	0.22	2810	3.74
	3c	4	12	0.89	2810	9.98
水 平	3d	14	8	0.40	5232	28.93
	3e	1	8	0.40	5292	2.09
	3f	2	8	0.40	4332	3.42
拉 筋	3La	30	6	0.22	190	1.27
	3Lb	28	6	0.22	184	1.14
	3Lc	5	6	0.22	214	0.24
合计						98.97

A.3.2 混凝土

表A.2.2 叠合类墙板混凝土计算表

	墙板高	墙板长	墙厚	体积 (m ³)
内叶板混凝土	2840	2100	200	1.19

A.3.3 保温板

(2) 保温板量计算

表 A.3.3-1 叠合类墙板保温板计算表

区域	墙板 高	墙板 长	墙 厚	体积 (m ³)	容重 (kg/m ³)	重量 (t)
严寒	2980	2640	120	1.89	30	0.057

(3) 保温体系其他材料

表 A.3.3-2 叠合类墙板其他材料计算表

清单类目	预设参数	严寒 (120mm)
粘结剂	聚合物改性水泥砂浆	
	d=1mm	10.23
	S _{黏贴} =80%S _{保温} ; 松散密度 1300kg/m ³	
分层抹防裂砂浆	d=5mm;	51.14
	松散密度 1300kg/m ³	
玻纤网格布	单位面积重量 130g/m ²	1.02
外墙涂料	JS 聚合物水泥防水涂料	17.70
	1.5 ~ 3kg/m ²	

附录B 预制楼板工程量计算

B.1 100 厚楼板工程量计算

表 B.1 100 厚楼板工程量计算表

底板编号	板跨	板宽	板厚	桁架钢筋重 (kg)	底板钢筋 1			底板钢筋 2			底板钢筋 3			叠合板汇总		楼承板汇总					
					规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	镀锌钢板 (kg)
DBS1-67-3012-X1	3	1.2	0.13	4.79	8	0.395	1.38	14	8	0.395	3	4	6	0.222	0.91	2	0.468	17.565	0.360	18.745	14.148
DBS1-68-3012-X1	3	1.2	0.14	4.87	8	0.395	1.38	14	10	0.617	3	4	6	0.222	0.91	2	0.504	20.309	0.360	18.745	14.148
DBS1-67-3312-X1	3.3	1.2	0.13	5.32	8	0.395	1.38	16	8	0.395	3.3	4	6	0.222	0.91	2	0.515	19.660	0.396	20.983	15.563
DBS1-68-3312-X1	3.3	1.2	0.14	5.40	8	0.395	1.38	16	10	0.617	3.3	4	6	0.222	0.91	2	0.554	22.670	0.396	20.983	15.563
DBS1-67-3612-X1	3.6	1.2	0.13	5.85	8	0.395	1.38	17	8	0.395	3.6	4	6	0.222	0.91	2	0.562	21.209	0.432	22.746	16.978
DBS1-68-3612-X1	3.6	1.2	0.14	5.94	8	0.395	1.38	17	10	0.617	3.6	4	6	0.222	0.91	2	0.605	24.496	0.432	22.746	16.978
DBS1-67-3912-X1	3.9	1.2	0.13	7.18	8	0.395	1.38	19	8	0.395	3.9	4	6	0.222	0.91	2	0.608	24.103	0.468	26.214	18.392
DBS1-68-3912-X1	3.9	1.2	0.14	7.28	8	0.395	1.38	19	10	0.617	3.9	4	6	0.222	0.91	2	0.655	27.666	0.468	26.214	18.392
DBS1-67-4212-X1	4.2	1.2	0.13	7.77	8	0.395	1.38	20	8	0.395	4.2	4	6	0.222	0.91	2	0.655	25.712	0.504	28.070	19.807

底板编号	板跨	板宽	板厚	桁架钢筋重 (kg)	底板钢筋 1			底板钢筋 2			底板钢筋 3			叠合板汇总		楼承板汇总					
					规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	镀锌钢板 (kg)
DBS1-68-4212-X1	4.2	1.2	0.14	7.88	8	0.395	1.38	20	10	0.617	4.2	4	6	0.222	0.91	2	0.706	29.552	0.504	28.070	19.807
DBS1-67-4512-X1	4.5	1.2	0.13	8.37	8	0.395	1.38	22	8	0.395	4.5	4	6	0.222	0.91	2	0.702	27.876	0.540	30.415	21.222
DBS1-68-4512-X1	4.5	1.2	0.14	8.48	8	0.395	1.38	22	10	0.617	4.5	4	6	0.222	0.91	2	0.756	31.982	0.540	30.415	21.222
DBS1-67-4812-X1	4.8	1.2	0.13	8.96	8	0.395	1.38	23	8	0.395	4.8	4	6	0.222	0.91	2	0.749	29.485	0.576	32.271	22.637
DBS1-68-4812-X1	4.8	1.2	0.14	9.09	8	0.395	1.38	23	10	0.617	4.8	4	6	0.222	0.91	2	0.806	33.878	0.576	32.271	22.637
DBS1-67-5112-X1	5.1	1.2	0.13	9.55	8	0.395	1.38	25	8	0.395	5.1	4	6	0.222	0.91	2	0.796	31.640	0.612	34.600	24.052
DBS1-68-5112-X1	5.1	1.2	0.14	9.69	8	0.395	1.38	25	10	0.617	5.1	4	6	0.222	0.91	2	0.857	36.308	0.612	34.600	24.052
DBS1-67-5412-X1	5.4	1.2	0.13	10.15	8	0.395	1.38	26	8	0.395	5.4	4	6	0.222	0.91	2	0.842	33.259	0.648	36.471	25.466
DBS1-68-5412-X1	5.4	1.2	0.14	10.29	8	0.395	1.38	26	10	0.617	5.4	4	6	0.222	0.91	2	0.907	38.194	0.648	36.471	25.466
DBS1-67-5712-X1	5.7	1.2	0.13	10.74	8	0.395	1.38	28	8	0.395	5.7	4	6	0.222	0.91	2	0.889	35.413	0.684	38.801	26.881
DBS1-68-5712-X1	5.7	1.2	0.14	10.90	8	0.395	1.38	28	10	0.617	5.7	4	6	0.222	0.91	2	0.958	40.634	0.684	38.801	26.881
DBS1-67-6012-X1	6.0	1.2	0.13	11.33	8	0.395	1.38	29	8	0.395	6	4	6	0.222	0.91	2	0.936	37.022	0.720	40.657	28.296

底板编号	板跨	板宽	板厚	桁架钢筋重 (kg)	底板钢筋 1			底板钢筋 2			底板钢筋 3			叠合板汇总		楼承板汇总					
					规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	镀锌钢板 (kg)
6012-X1			3																		
DBS1-68- 6012-X1	6.0	1.2	0.14	11.50	8	0.395	1.38	29	10	0.617	6	4	6	0.222	0.91	2	1.008	42.520	0.720	40.657	28.296

B.2 110 厚楼板工程量计算

表 B.2 110 厚楼板工程量计算表

底板编号	板跨	板宽	板厚	桁架钢筋重 (kg)	底板钢筋 1			底板钢筋 2			底板钢筋 3			叠合板汇总		楼承板汇总					
					规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	镀锌钢板 (kg)
DBS1-67-3012-X1	3	1.2	0.13	4.79	8	0.395	1.38	14	8	0.395	3	4	6	0.222	0.91	2	0.468	17.565	0.396	19.482	14.148
DBS1-68-3012-X1	3	1.2	0.14	4.87	8	0.395	1.38	14	10	0.617	3	4	6	0.222	0.91	2	0.504	20.309	0.396	19.482	14.148
DBS1-67-3312-X1	3.3	1.2	0.13	5.32	8	0.395	1.38	16	8	0.395	3.3	4	6	0.222	0.91	2	0.515	19.660	0.436	21.801	15.563
DBS1-68-3312-X1	3.3	1.2	0.14	5.40	8	0.395	1.38	16	10	0.617	3.3	4	6	0.222	0.91	2	0.554	22.670	0.436	21.801	15.563
DBS1-67-3612-X1	3.6	1.2	0.13	5.85	8	0.395	1.38	17	8	0.395	3.6	4	6	0.222	0.91	2	0.562	21.209	0.475	23.646	16.978
DBS1-68-3612-X1	3.6	1.2	0.14	5.94	8	0.395	1.38	17	10	0.617	3.6	4	6	0.222	0.91	2	0.605	24.496	0.475	23.646	16.978
DBS1-67-3912-X1	3.9	1.2	0.13	7.18	8	0.395	1.38	19	8	0.395	3.9	4	6	0.222	0.91	2	0.608	24.103	0.515	27.319	18.392
DBS1-68-3912-X1	3.9	1.2	0.14	7.28	8	0.395	1.38	19	10	0.617	3.9	4	6	0.222	0.91	2	0.655	27.666	0.515	27.319	18.392
DBS1-67-4212-X1	4.2	1.2	0.13	7.77	8	0.395	1.38	20	8	0.395	4.2	4	6	0.222	0.91	2	0.655	25.712	0.554	29.265	19.807
DBS1-68-4212-X1	4.2	1.2	0.14	7.88	8	0.395	1.38	20	10	0.617	4.2	4	6	0.222	0.91	2	0.706	29.552	0.554	29.265	19.807

底板编号	板跨	板宽	板厚	桁架钢筋重 (kg)	底板钢筋 1			底板钢筋 2			底板钢筋 3			叠合板汇总		楼承板汇总					
					规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	镀锌钢板 (kg)
DBS1-67-4512-X1	4.5	1.2	0.13	8.37	8	0.395	1.38	22	8	0.395	4.5	4	6	0.222	0.91	2	0.702	27.876	0.594	31.703	21.222
DBS1-68-4512-X1	4.5	1.2	0.14	8.48	8	0.395	1.38	22	10	0.617	4.5	4	6	0.222	0.91	2	0.756	31.982	0.594	31.703	21.222
DBS1-67-4812-X1	4.8	1.2	0.13	8.96	8	0.395	1.38	23	8	0.395	4.8	4	6	0.222	0.91	2	0.749	29.485	0.634	33.649	22.637
DBS1-68-4812-X1	4.8	1.2	0.14	9.09	8	0.395	1.38	23	10	0.617	4.8	4	6	0.222	0.91	2	0.806	33.878	0.634	33.649	22.637
DBS1-67-5112-X1	5.1	1.2	0.13	9.55	8	0.395	1.38	25	8	0.395	5.1	4	6	0.222	0.91	2	0.796	31.640	0.673	36.070	24.052
DBS1-68-5112-X1	5.1	1.2	0.14	9.69	8	0.395	1.38	25	10	0.617	5.1	4	6	0.222	0.91	2	0.857	36.308	0.673	36.070	24.052
DBS1-67-5412-X1	5.4	1.2	0.13	10.15	8	0.395	1.38	26	8	0.395	5.4	4	6	0.222	0.91	2	0.842	33.259	0.713	38.033	25.466
DBS1-68-5412-X1	5.4	1.2	0.14	10.29	8	0.395	1.38	26	10	0.617	5.4	4	6	0.222	0.91	2	0.907	38.194	0.713	38.033	25.466
DBS1-67-5712-X1	5.7	1.2	0.13	10.74	8	0.395	1.38	28	8	0.395	5.7	4	6	0.222	0.91	2	0.889	35.413	0.752	40.453	26.881
DBS1-68-5712-X1	5.7	1.2	0.14	10.90	8	0.395	1.38	28	10	0.617	5.7	4	6	0.222	0.91	2	0.958	40.634	0.752	40.453	26.881
DBS1-67-6012-X1	6.0	1.2	0.13	11.33	8	0.395	1.38	29	8	0.395	6	4	6	0.222	0.91	2	0.936	37.022	0.792	42.400	28.296
DBS1-68-6012-X1	6.0	1.2	0.14	11.50	8	0.395	1.38	29	10	0.617	6	4	6	0.222	0.91	2	1.008	42.520	0.792	42.400	28.296

底板编号	板跨	板宽	板厚	桁架钢筋重 (kg)	底板钢筋 1				底板钢筋 2				底板钢筋 3				叠合板汇总		楼承板汇总		
					规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	镀锌钢板 (kg)
6012-X1			4																		

B.3 120 厚楼板工程量计算

表 B.3 120 厚楼板工程量计算表

底板编号	板跨	板宽	板厚	桁架钢筋重 (kg)	底板钢筋 1				底板钢筋 2				底板钢筋 3				叠合板汇总		楼承板汇总		
					规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	镀锌钢板 (kg)
DBS1-67-3012-X1	3	1.2	0.13	4.79	8	0.395	1.38	14	8	0.395	3	4	6	0.222	0.91	2	0.468	17.565	0.432	20.219	14.148
DBS1-68-3012-X1	3	1.2	0.14	4.87	8	0.395	1.38	14	10	0.617	3	4	6	0.222	0.91	2	0.504	20.309	0.432	20.219	14.148
DBS1-67-3312-X1	3.3	1.2	0.13	5.32	8	0.395	1.38	16	8	0.395	3.3	4	6	0.222	0.91	2	0.515	19.660	0.475	22.620	15.563
DBS1-68-3312-X1	3.3	1.2	0.14	5.40	8	0.395	1.38	16	10	0.617	3.3	4	6	0.222	0.91	2	0.554	22.670	0.475	22.620	15.563
DBS1-67-3612-X1	3.6	1.2	0.13	5.85	8	0.395	1.38	17	8	0.395	3.6	4	6	0.222	0.91	2	0.562	21.209	0.518	24.546	16.978
DBS1-68-3612-X1	3.6	1.2	0.14	5.94	8	0.395	1.38	17	10	0.617	3.6	4	6	0.222	0.91	2	0.605	24.496	0.518	24.546	16.978
DBS1-67-3912-X1	3.9	1.2	0.13	7.18	8	0.395	1.38	19	8	0.395	3.9	4	6	0.222	0.91	2	0.608	24.103	0.562	28.423	18.392

DBS1-68-3912-X1	3.9	1.2	0.14	7.28	8	0.395	1.38	19	10	0.617	3.9	4	6	0.222	0.91	2	0.655	27.666	0.562	28.423	18.392
DBS1-67-4212-X1	4.2	1.2	0.13	7.77	8	0.395	1.38	20	8	0.395	4.2	4	6	0.222	0.91	2	0.655	25.712	0.605	30.461	19.807
DBS1-68-4212-X1	4.2	1.2	0.14	7.88	8	0.395	1.38	20	10	0.617	4.2	4	6	0.222	0.91	2	0.706	29.552	0.605	30.461	19.807
DBS1-67-4512-X1	4.5	1.2	0.13	8.37	8	0.395	1.38	22	8	0.395	4.5	4	6	0.222	0.91	2	0.702	27.876	0.648	32.990	21.222
DBS1-68-4512-X1	4.5	1.2	0.14	8.48	8	0.395	1.38	22	10	0.617	4.5	4	6	0.222	0.91	2	0.756	31.982	0.648	32.990	21.222
DBS1-67-4812-X1	4.8	1.2	0.13	8.96	8	0.395	1.38	23	8	0.395	4.8	4	6	0.222	0.91	2	0.749	29.485	0.691	35.028	22.637
DBS1-68-4812-X1	4.8	1.2	0.14	9.09	8	0.395	1.38	23	10	0.617	4.8	4	6	0.222	0.91	2	0.806	33.878	0.691	35.028	22.637
DBS1-67-5112-X1	5.1	1.2	0.13	9.55	8	0.395	1.38	25	8	0.395	5.1	4	6	0.222	0.91	2	0.796	31.640	0.734	37.539	24.052
DBS1-68-5112-X1	5.1	1.2	0.14	9.69	8	0.395	1.38	25	10	0.617	5.1	4	6	0.222	0.91	2	0.857	36.308	0.734	37.539	24.052
DBS1-67-5412-X1	5.4	1.2	0.13	10.15	8	0.395	1.38	26	8	0.395	5.4	4	6	0.222	0.91	2	0.842	33.259	0.778	39.594	25.466
DBS1-68-5412-X1	5.4	1.2	0.14	10.29	8	0.395	1.38	26	10	0.617	5.4	4	6	0.222	0.91	2	0.907	38.194	0.778	39.594	25.466
DBS1-67-5712-X1	5.7	1.2	0.13	10.74	8	0.395	1.38	28	8	0.395	5.7	4	6	0.222	0.91	2	0.889	35.413	0.821	42.106	26.881
DBS1-68-5712-X1	5.7	1.2	0.14	10.90	8	0.395	1.38	28	10	0.617	5.7	4	6	0.222	0.91	2	0.958	40.634	0.821	42.106	26.881

DBS1-67-6012-X1	6.0	1.2	0.13	11.33	8	0.395	1.38	29	8	0.395	6	4	6	0.222	0.91	2	0.936	37.022	0.864	44.143	28.296
DBS1-68-6012-X1	6.0	1.2	0.14	11.50	8	0.395	1.38	29	10	0.617	6	4	6	0.222	0.91	2	1.008	42.520	0.864	44.143	28.296

B.4 130 厚楼板工程量计算

表 B.4 130 厚楼板工程量计算表

底板编号	板跨	板宽	板厚	桁架钢筋重(kg)	底板钢筋 1			底板钢筋 2			底板钢筋 3			叠合板汇总		楼承板汇总					
					规格	重量(kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量(kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量(kg/m)	加工尺寸	根数	混凝土(m3)	钢筋(kg)	混凝土(m3)	钢筋(kg)	镀锌钢板(kg)
DBS1-67-3012-X1	3	1.2	0.13	4.79	8	0.395	1.38	14	8	0.395	3	4	6	0.222	0.91	2	0.468	17.565	0.468	20.956	14.148
DBS1-68-3012-X1	3	1.2	0.14	4.87	8	0.395	1.38	14	10	0.617	3	4	6	0.222	0.91	2	0.504	20.309	0.468	20.956	14.148
DBS1-67-3312-X1	3.3	1.2	0.13	5.32	8	0.395	1.38	16	8	0.395	3.3	4	6	0.222	0.91	2	0.515	19.660	0.515	23.438	15.563
DBS1-68-3312-X1	3.3	1.2	0.14	5.40	8	0.395	1.38	16	10	0.617	3.3	4	6	0.222	0.91	2	0.554	22.670	0.515	23.438	15.563
DBS1-67-3612-X1	3.6	1.2	0.13	5.85	8	0.395	1.38	17	8	0.395	3.6	4	6	0.222	0.91	2	0.562	21.209	0.562	25.446	16.978
DBS1-68-3612-X1	3.6	1.2	0.14	5.94	8	0.395	1.38	17	10	0.617	3.6	4	6	0.222	0.91	2	0.605	24.496	0.562	25.446	16.978
DBS1-67-3912-X1	3.9	1.2	0.13	7.18	8	0.395	1.38	19	8	0.395	3.9	4	6	0.222	0.91	2	0.608	24.103	0.608	29.528	18.392

底板编号	板跨	板宽	板厚	桁架钢筋重 (kg)	底板钢筋 1			底板钢筋 2			底板钢筋 3			叠合板汇总		楼承板汇总					
					规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	镀锌钢板 (kg)
DBS1-68-3912-X1	3.9	1.2	0.14	7.28	8	0.395	1.38	19	10	0.617	3.9	4	6	0.222	0.91	2	0.655	27.666	0.608	29.528	18.392
DBS1-67-4212-X1	4.2	1.2	0.13	7.77	8	0.395	1.38	20	8	0.395	4.2	4	6	0.222	0.91	2	0.655	25.712	0.655	31.656	19.807
DBS1-68-4212-X1	4.2	1.2	0.14	7.88	8	0.395	1.38	20	10	0.617	4.2	4	6	0.222	0.91	2	0.706	29.552	0.655	31.656	19.807
DBS1-67-4512-X1	4.5	1.2	0.13	8.37	8	0.395	1.38	22	8	0.395	4.5	4	6	0.222	0.91	2	0.702	27.876	0.702	34.278	21.222
DBS1-68-4512-X1	4.5	1.2	0.14	8.48	8	0.395	1.38	22	10	0.617	4.5	4	6	0.222	0.91	2	0.756	31.982	0.702	34.278	21.222
DBS1-67-4812-X1	4.8	1.2	0.13	8.96	8	0.395	1.38	23	8	0.395	4.8	4	6	0.222	0.91	2	0.749	29.485	0.749	36.406	22.637
DBS1-68-4812-X1	4.8	1.2	0.14	9.09	8	0.395	1.38	23	10	0.617	4.8	4	6	0.222	0.91	2	0.806	33.878	0.749	36.406	22.637
DBS1-67-5112-X1	5.1	1.2	0.13	9.55	8	0.395	1.38	25	8	0.395	5.1	4	6	0.222	0.91	2	0.796	31.640	0.796	39.008	24.052
DBS1-68-5112-X1	5.1	1.2	0.14	9.69	8	0.395	1.38	25	10	0.617	5.1	4	6	0.222	0.91	2	0.857	36.308	0.796	39.008	24.052
DBS1-67-5412-X1	5.4	1.2	0.13	10.15	8	0.395	1.38	26	8	0.395	5.4	4	6	0.222	0.91	2	0.842	33.259	0.842	41.156	25.466
DBS1-68-5412-X1	5.4	1.2	0.14	10.29	8	0.395	1.38	26	10	0.617	5.4	4	6	0.222	0.91	2	0.907	38.194	0.842	41.156	25.466
DBS1-67-5712-X1	5.7	1.2	0.13	10.74	8	0.395	1.38	28	8	0.395	5.7	4	6	0.222	0.91	2	0.889	35.413	0.889	43.758	26.881

底板编号	板跨	板宽	板厚	桁架钢筋重 (kg)	底板钢筋 1			底板钢筋 2			底板钢筋 3			叠合板汇总		楼承板汇总					
					规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	镀锌钢板 (kg)
5712-X1			3																		
DBS1-68-5712-X1	5.7	1.2	0.14	10.90	8	0.395	1.38	28	10	0.617	5.7	4	6	0.222	0.91	2	0.958	40.634	0.889	43.758	26.881
DBS1-67-6012-X1	6.0	1.2	0.13	11.33	8	0.395	1.38	29	8	0.395	6	4	6	0.222	0.91	2	0.936	37.022	0.936	45.886	28.296
DBS1-68-6012-X1	6.0	1.2	0.14	11.50	8	0.395	1.38	29	10	0.617	6	4	6	0.222	0.91	2	1.008	42.520	0.936	45.886	28.296

B.5 140 厚楼板工程量计算

表 B.5 140 厚楼板工程量计算表

底板编号	板跨	板宽	板厚	桁架钢筋重 (kg)	底板钢筋 1			底板钢筋 2			底板钢筋 3			叠合板汇总		楼承板汇总					
					规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	镀锌钢板 (kg)
DBS1-67-3012-X1	3	1.2	0.13	4.79	8	0.395	1.38	14	8	0.395	3	4	6	0.222	0.91	2	0.468	17.565	0.504	23.780	14.148
DBS1-68-3012-X1	3	1.2	0.14	4.87	8	0.395	1.38	14	10	0.617	3	4	6	0.222	0.91	2	0.504	20.309	0.504	23.780	14.148
DBS1-67-3312-X1	3.3	1.2	0.13	5.32	8	0.395	1.38	16	8	0.395	3.3	4	6	0.222	0.91	2	0.515	19.660	0.554	26.528	15.563
DBS1-68-3312-X1	3.3	1.2	0.14	5.40	8	0.395	1.38	16	10	0.617	3.3	4	6	0.222	0.91	2	0.554	22.670	0.554	26.528	15.563

底板编号	板跨	板宽	板厚	桁架钢筋重 (kg)	底板钢筋 1			底板钢筋 2			底板钢筋 3			叠合板汇总		楼承板汇总					
					规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	镀锌钢板 (kg)
DBS1-67-3612-X1	3.6	1.2	0.13	5.85	8	0.395	1.38	17	8	0.395	3.6	4	6	0.222	0.91	2	0.562	21.209	0.605	28.823	16.978
DBS1-68-3612-X1	3.6	1.2	0.14	5.94	8	0.395	1.38	17	10	0.617	3.6	4	6	0.222	0.91	2	0.605	24.496	0.605	28.823	16.978
DBS1-67-3912-X1	3.9	1.2	0.13	7.18	8	0.395	1.38	19	8	0.395	3.9	4	6	0.222	0.91	2	0.608	24.103	0.655	33.191	18.392
DBS1-68-3912-X1	3.9	1.2	0.14	7.28	8	0.395	1.38	19	10	0.617	3.9	4	6	0.222	0.91	2	0.655	27.666	0.655	33.191	18.392
DBS1-67-4212-X1	4.2	1.2	0.13	7.77	8	0.395	1.38	20	8	0.395	4.2	4	6	0.222	0.91	2	0.655	25.712	0.706	35.606	19.807
DBS1-68-4212-X1	4.2	1.2	0.14	7.88	8	0.395	1.38	20	10	0.617	4.2	4	6	0.222	0.91	2	0.706	29.552	0.706	35.606	19.807
DBS1-67-4512-X1	4.5	1.2	0.13	8.37	8	0.395	1.38	22	8	0.395	4.5	4	6	0.222	0.91	2	0.702	27.876	0.756	38.494	21.222
DBS1-68-4512-X1	4.5	1.2	0.14	8.48	8	0.395	1.38	22	10	0.617	4.5	4	6	0.222	0.91	2	0.756	31.982	0.756	38.494	21.222
DBS1-67-4812-X1	4.8	1.2	0.13	8.96	8	0.395	1.38	23	8	0.395	4.8	4	6	0.222	0.91	2	0.749	29.485	0.806	40.928	22.637
DBS1-68-4812-X1	4.8	1.2	0.14	9.09	8	0.395	1.38	23	10	0.617	4.8	4	6	0.222	0.91	2	0.806	33.878	0.806	40.928	22.637
DBS1-67-5112-X1	5.1	1.2	0.13	9.55	8	0.395	1.38	25	8	0.395	5.1	4	6	0.222	0.91	2	0.796	31.640	0.857	43.817	24.052
DBS1-68-5112-X1	5.1	1.2	0.14	9.69	8	0.395	1.38	25	10	0.617	5.1	4	6	0.222	0.91	2	0.857	36.308	0.857	43.817	24.052

底板编号	板跨	板宽	板厚	桁架钢筋重 (kg)	底板钢筋 1			底板钢筋 2			底板钢筋 3			叠合板汇总		楼承板汇总					
					规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	规格	重量 (kg/m)	加工尺寸	根数	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	混凝土 (m3)	钢筋 (kg)	镀锌钢板 (kg)
5112-X1			4																		
DBS1-67-5412-X1	5.4	1.2	0.13	10.15	8	0.395	1.38	26	8	0.395	5.4	4	6	0.222	0.91	2	0.842	33.259	0.907	46.231	25.466
DBS1-68-5412-X1	5.4	1.2	0.14	10.29	8	0.395	1.38	26	10	0.617	5.4	4	6	0.222	0.91	2	0.907	38.194	0.907	46.231	25.466
DBS1-67-5712-X1	5.7	1.2	0.13	10.74	8	0.395	1.38	28	8	0.395	5.7	4	6	0.222	0.91	2	0.889	35.413	0.958	49.140	26.881
DBS1-68-5712-X1	5.7	1.2	0.14	10.90	8	0.395	1.38	28	10	0.617	5.7	4	6	0.222	0.91	2	0.958	40.634	0.958	49.140	26.881
DBS1-67-6012-X1	6.0	1.2	0.13	11.33	8	0.395	1.38	29	8	0.395	6	4	6	0.222	0.91	2	0.936	37.022	1.008	51.554	28.296
DBS1-68-6012-X1	6.0	1.2	0.14	11.50	8	0.395	1.38	29	10	0.617	6	4	6	0.222	0.91	2	1.008	42.520	1.008	51.554	28.296

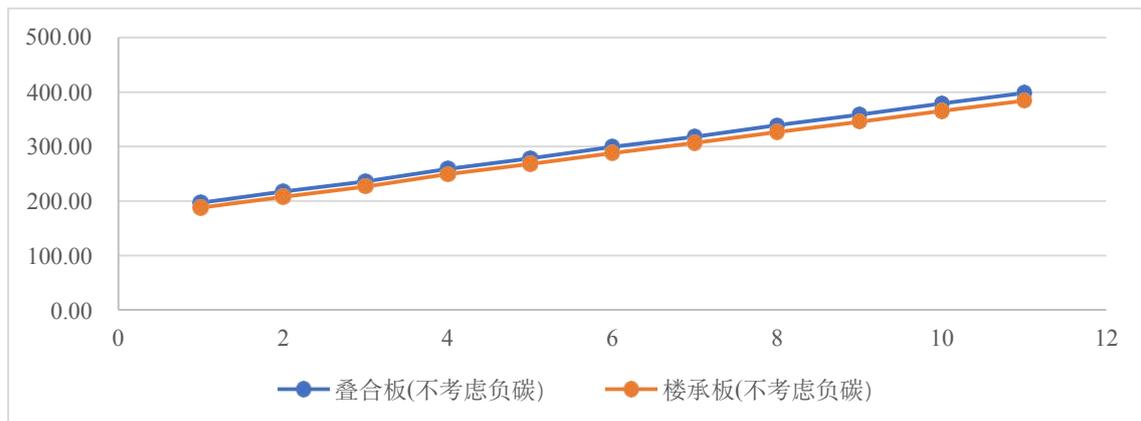
B.6 考虑运输因子碳排放统计

B61 100 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比
(运输因子 **1.07**)

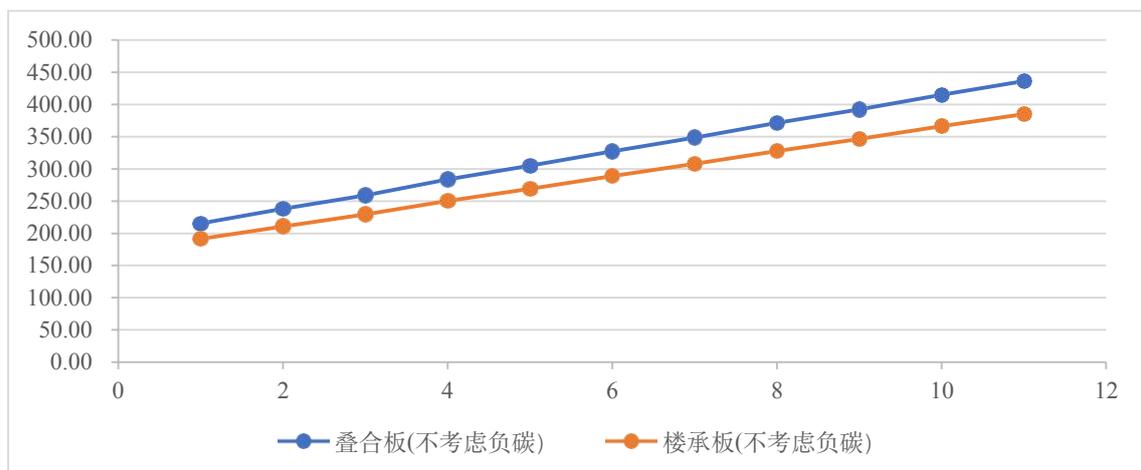
表B.6.1 100 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放计算表

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3012-X1	196.420	188.014	8.405
DBS1-68-3012-X1	215.390	188.014	27.376
DBS1-67-3312-X1	216.998	207.756	9.242
DBS1-68-3312-X1	237.843	207.756	30.087
DBS1-67-3612-X1	236.065	226.270	9.795
DBS1-68-3612-X1	258.813	226.270	32.543
DBS1-67-3912-X1	258.861	249.200	9.661
DBS1-68-3912-X1	283.511	249.200	34.311
DBS1-67-4212-X1	278.094	267.953	10.141
DBS1-68-4212-X1	304.647	267.953	36.694
DBS1-67-4512-X1	298.866	287.973	10.893
DBS1-68-4512-X1	327.294	287.973	39.321
DBS1-67-4812-X1	318.099	306.726	11.373
DBS1-68-4812-X1	348.457	306.726	41.732
DBS1-67-5112-X1	338.844	326.707	12.137
DBS1-68-5112-X1	371.104	326.707	44.398

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-5412-X1	358.105	345.499	12.606
DBS1-68-5412-X1	392.240	345.499	46.741
DBS1-67-5712-X1	378.849	365.480	13.369
DBS1-68-5712-X1	414.915	365.480	49.435
DBS1-67-6012-X1	398.082	384.232	13.850
DBS1-68-6012-X1	436.051	384.232	51.818



图B.6.1-1 130厚叠合板与100厚钢筋桁架楼承板碳排放对比



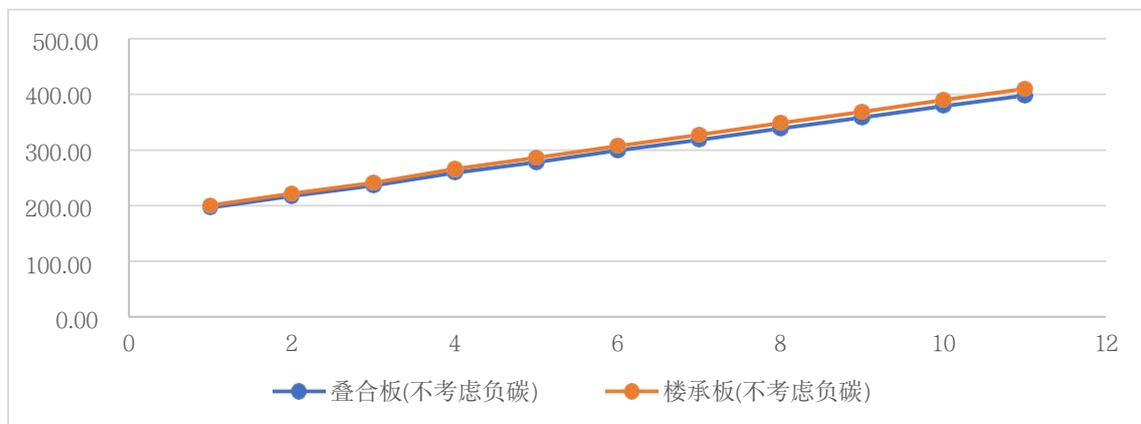
图B.6.1-2 140厚叠合板与100厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

B2 110 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对 (运输因子 1.07)

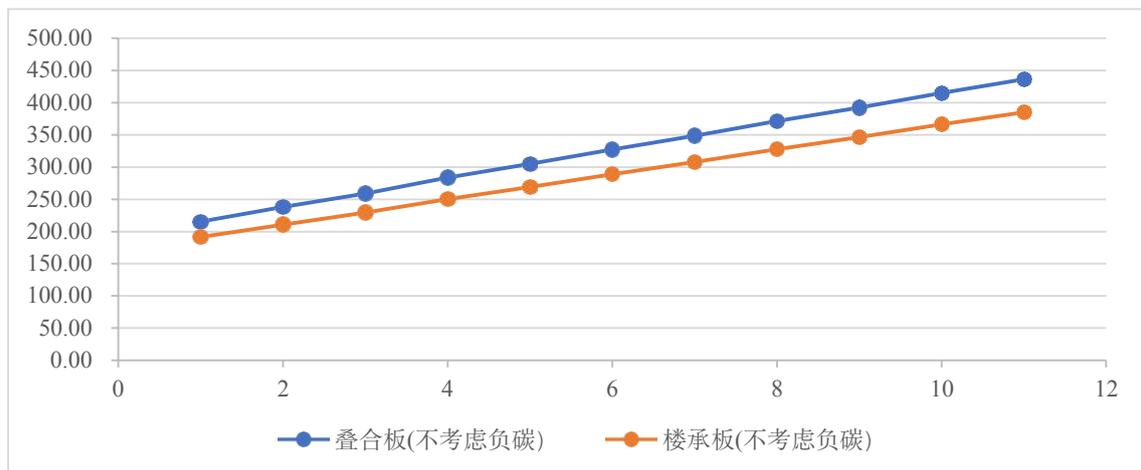
表B.6.2 110 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放计算表

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3012-X1	196.420	200.544	-4.124
DBS1-68-3012-X1	215.390	200.544	14.847
DBS1-67-3312-X1	216.998	221.559	-4.561
DBS1-68-3312-X1	237.843	221.559	16.285
DBS1-67-3612-X1	236.065	241.345	-5.281
DBS1-68-3612-X1	258.813	241.345	17.467
DBS1-67-3912-X1	258.861	265.868	-7.007
DBS1-68-3912-X1	283.511	265.868	17.643
DBS1-67-4212-X1	278.094	285.918	-7.824
DBS1-68-4212-X1	304.647	285.918	18.729
DBS1-67-4512-X1	298.866	307.239	-8.373
DBS1-68-4512-X1	327.294	307.239	20.055
DBS1-67-4812-X1	318.099	327.289	-9.190
DBS1-68-4812-X1	348.457	327.289	21.168
DBS1-67-5112-X1	338.844	348.567	-9.724
DBS1-68-5112-X1	371.104	348.567	22.537
DBS1-67-5412-X1	358.105	368.661	-10.556

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-68-5412-X1	392.240	368.661	23.579
DBS1-67-5712-X1	378.849	389.939	-11.090
DBS1-68-5712-X1	414.915	389.939	24.976
DBS1-67-6012-X1	398.082	409.989	-11.906
DBS1-68-6012-X1	436.051	409.989	26.062



图B.6.2-1 130厚叠合板与110厚钢筋桁架楼承板碳排放对比



图B.6.2-2 140厚叠合板与110厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

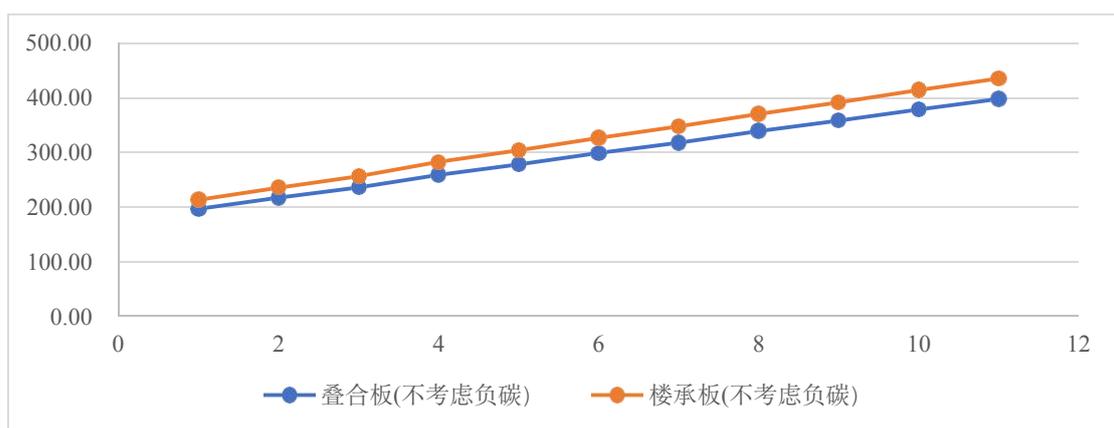
B3 120厚钢筋桁架楼承板与130厚及140厚钢筋桁架楼承板碳排放对比
(运输因子 1.07)

表B.6.3 120厚钢筋桁架楼承板与130厚及140厚钢筋桁架楼承板碳排放计

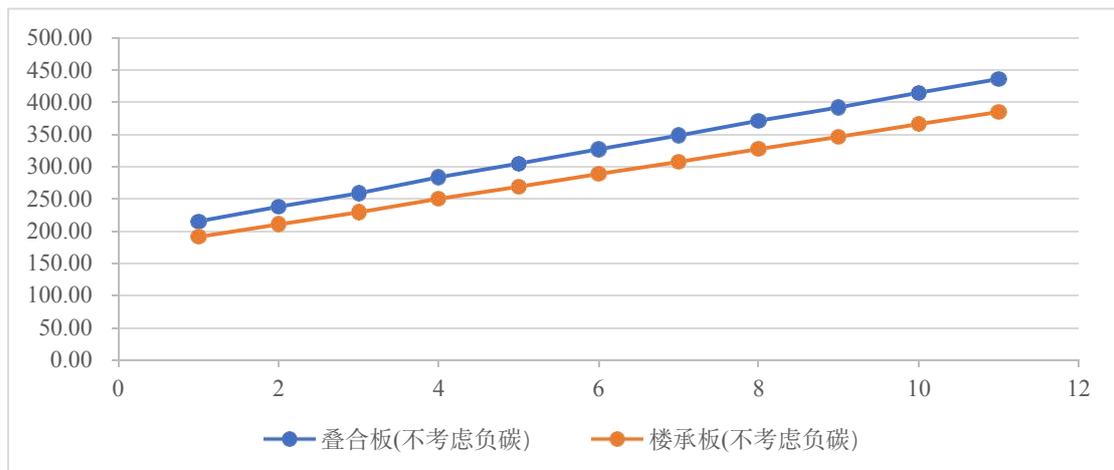
算表

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3012-X1	196.420	213.073	-16.653
DBS1-68-3012-X1	215.390	213.073	2.317
DBS1-67-3312-X1	216.998	235.361	-18.363
DBS1-68-3312-X1	237.843	235.361	2.482
DBS1-67-3612-X1	236.065	256.421	-20.356
DBS1-68-3612-X1	258.813	256.421	2.392
DBS1-67-3912-X1	258.861	282.536	-23.675
DBS1-68-3912-X1	283.511	282.536	0.975
DBS1-67-4212-X1	278.094	303.883	-25.789
DBS1-68-4212-X1	304.647	303.883	0.764
DBS1-67-4512-X1	298.866	326.506	-27.640
DBS1-68-4512-X1	327.294	326.506	0.788
DBS1-67-4812-X1	318.099	347.853	-29.753
DBS1-68-4812-X1	348.457	347.853	0.605
DBS1-67-5112-X1	338.844	370.428	-31.584
DBS1-68-5112-X1	371.104	370.428	0.677
DBS1-67-5412-X1	358.105	391.823	-33.718
DBS1-68-5412-X1	392.240	391.823	0.418
DBS1-67-5712-X1	378.849	414.398	-35.549
DBS1-68-5712-X1	414.915	414.398	0.517

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-6012-X1	398.082	435.745	-37.662
DBS1-68-6012-X1	436.051	435.745	0.306



图B.6.3-1 130 厚叠合板与 120 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比



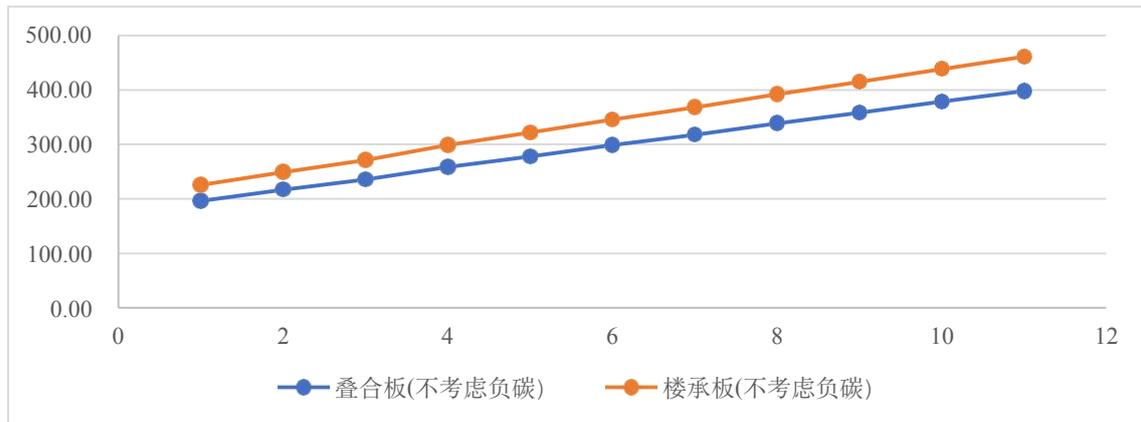
图B.6.3-2 140 厚叠合板与 120 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

B64 130 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比
(运输因子 1.07)

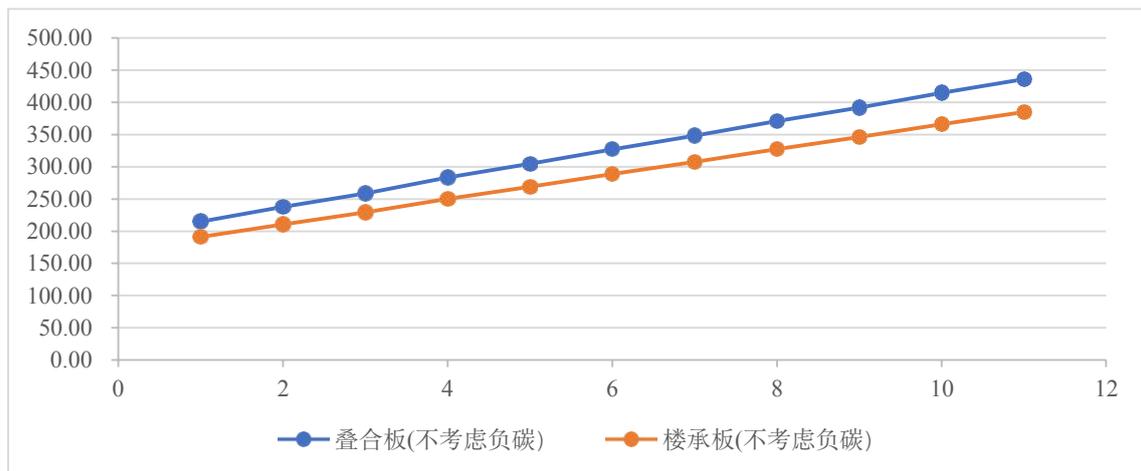
表B.6.4 130 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放计算表

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3012-X1	196.420	225.602	-29.182
DBS1-68-3012-X1	215.390	225.602	-10.212
DBS1-67-3312-X1	216.998	249.164	-32.166
DBS1-68-3312-X1	237.843	249.164	-11.320
DBS1-67-3612-X1	236.065	271.497	-35.432
DBS1-68-3612-X1	258.813	271.497	-12.684
DBS1-67-3912-X1	258.861	299.204	-40.343
DBS1-68-3912-X1	283.511	299.204	-15.693
DBS1-67-4212-X1	278.094	321.848	-43.754
DBS1-68-4212-X1	304.647	321.848	-17.201
DBS1-67-4512-X1	298.866	345.772	-46.906
DBS1-68-4512-X1	327.294	345.772	-18.478
DBS1-67-4812-X1	318.099	368.416	-50.317
DBS1-68-4812-X1	348.457	368.416	-19.959
DBS1-67-5112-X1	338.844	392.288	-53.445
DBS1-68-5112-X1	371.104	392.288	-21.184
DBS1-67-5412-X1	358.105	414.984	-56.880
DBS1-68-5412-X1	392.240	414.984	-22.744
DBS1-67-5712-X1	378.849	438.857	-60.008
DBS1-68-5712-X1	414.915	438.857	-23.942
DBS1-67-6012-X1	398.082	461.501	-63.419

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-68-6012-X1	436.051	461.501	-25.450



图B.6.4-1 130 厚叠合板与 130 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比



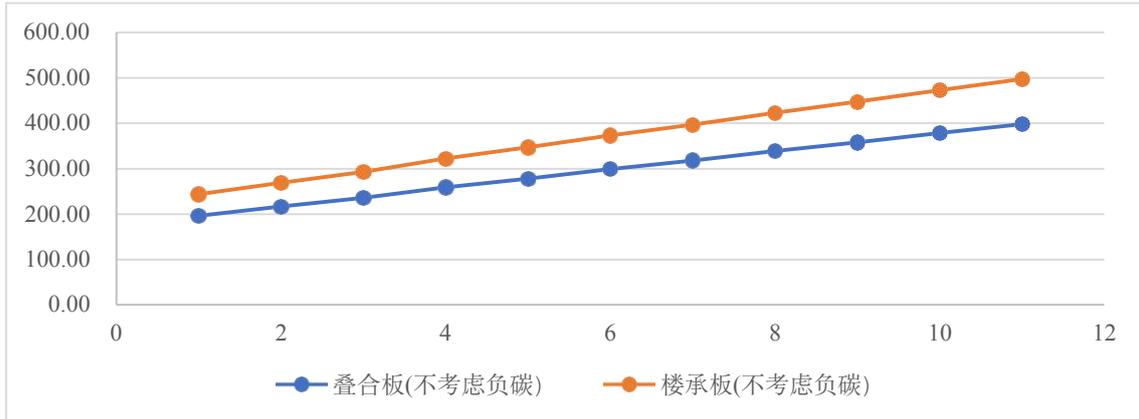
图B.6.4-2 140 厚叠合板与 130 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

B6 140 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比
(运输因子 1.07)

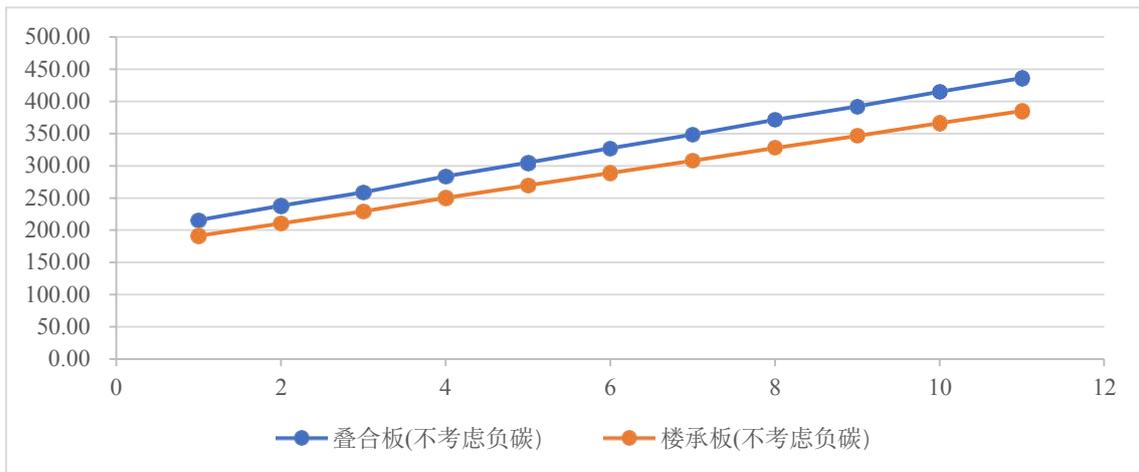
表B.6.5 140 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放计算表

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3012-X1	196.420	243.539	-47.119

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-68-3012-X1	215.390	243.539	-28.149
DBS1-67-3312-X1	216.998	268.852	-51.855
DBS1-68-3312-X1	237.843	268.852	-31.009
DBS1-67-3612-X1	236.065	292.990	-56.925
DBS1-68-3612-X1	258.813	292.990	-34.177
DBS1-67-3912-X1	258.861	322.501	-63.640
DBS1-68-3912-X1	283.511	322.501	-38.989
DBS1-67-4212-X1	278.094	346.949	-68.855
DBS1-68-4212-X1	304.647	346.949	-42.302
DBS1-67-4512-X1	298.866	372.625	-73.759
DBS1-68-4512-X1	327.294	372.625	-45.331
DBS1-67-4812-X1	318.099	397.125	-79.026
DBS1-68-4812-X1	348.457	397.125	-48.668
DBS1-67-5112-X1	338.844	422.801	-83.958
DBS1-68-5112-X1	371.104	422.801	-51.697
DBS1-67-5412-X1	358.105	447.250	-89.145
DBS1-68-5412-X1	392.240	447.250	-55.009
DBS1-67-5712-X1	378.849	472.978	-94.129
DBS1-68-5712-X1	414.915	472.978	-58.063
DBS1-67-6012-X1	398.082	497.426	-99.344
DBS1-68-6012-X1	436.051	497.426	-61.375



图B.6.5-1 130 厚叠合板与 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比



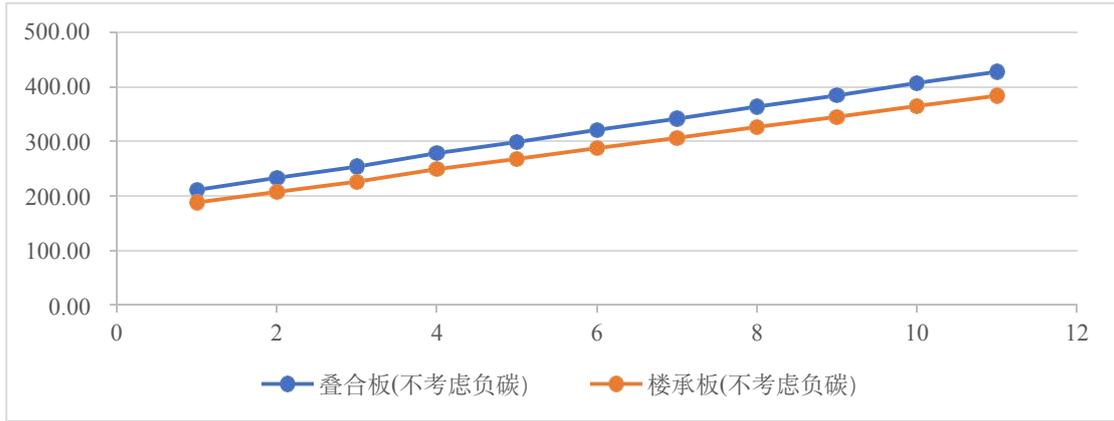
图B.6.5-2 140 厚叠合板与 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

B66 100 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比
(运输因子 1.15)

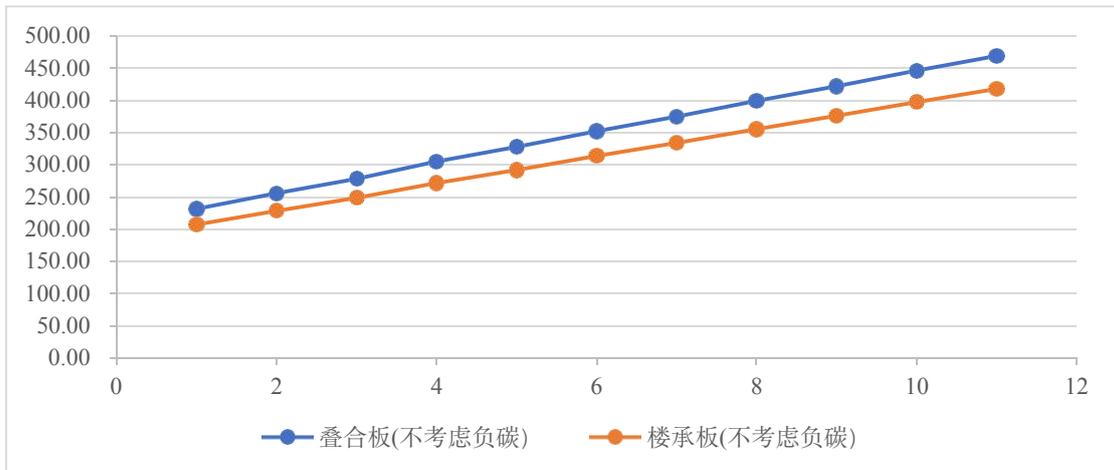
表B.6.6 100 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放计算表

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3012-X1	211.105	188.014	23.091
DBS1-68-3012-X1	231.494	188.014	43.480
DBS1-67-3312-X1	233.222	207.756	25.466

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-68-3312-X1	255.626	207.756	47.870
DBS1-67-3612-X1	253.714	226.270	27.445
DBS1-68-3612-X1	278.163	226.270	51.894
DBS1-67-3912-X1	278.215	249.200	29.015
DBS1-68-3912-X1	304.708	249.200	55.508
DBS1-67-4212-X1	298.886	267.953	30.933
DBS1-68-4212-X1	327.424	267.953	59.472
DBS1-67-4512-X1	321.211	287.973	33.238
DBS1-68-4512-X1	351.764	287.973	63.791
DBS1-67-4812-X1	341.882	306.726	35.157
DBS1-68-4812-X1	374.510	306.726	67.785
DBS1-67-5112-X1	364.178	326.707	37.471
DBS1-68-5112-X1	398.851	326.707	72.144
DBS1-67-5412-X1	384.879	345.499	39.380
DBS1-68-5412-X1	421.567	345.499	76.068
DBS1-67-5712-X1	407.174	365.480	41.694
DBS1-68-5712-X1	445.937	365.480	80.457
DBS1-67-6012-X1	427.845	384.232	43.613
DBS1-68-6012-X1	468.653	384.232	84.420



图B.6.6-1 130厚叠合板与100厚钢筋桁架楼承板碳排放对比



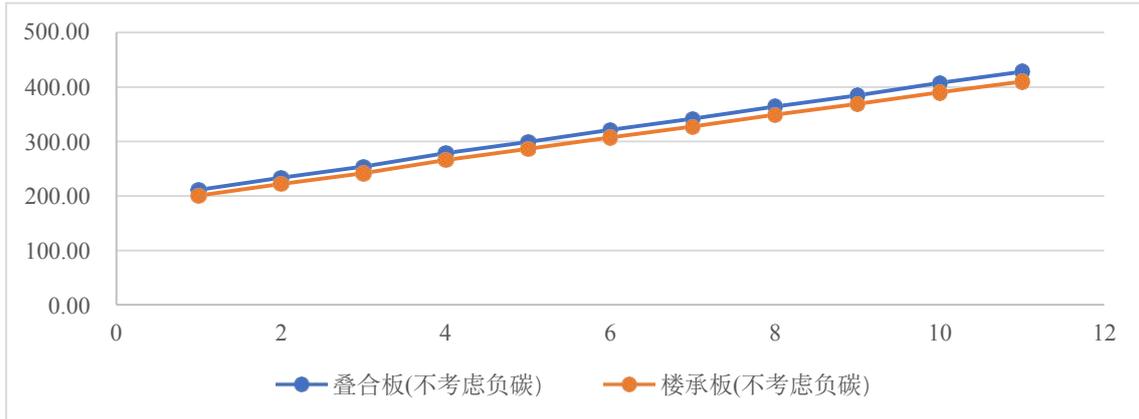
图B.6.6-2 140厚叠合板与100厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

B67 110厚钢筋桁架楼承板与130厚及140厚钢筋桁架楼承板碳排放对比 (运输因子1.15)

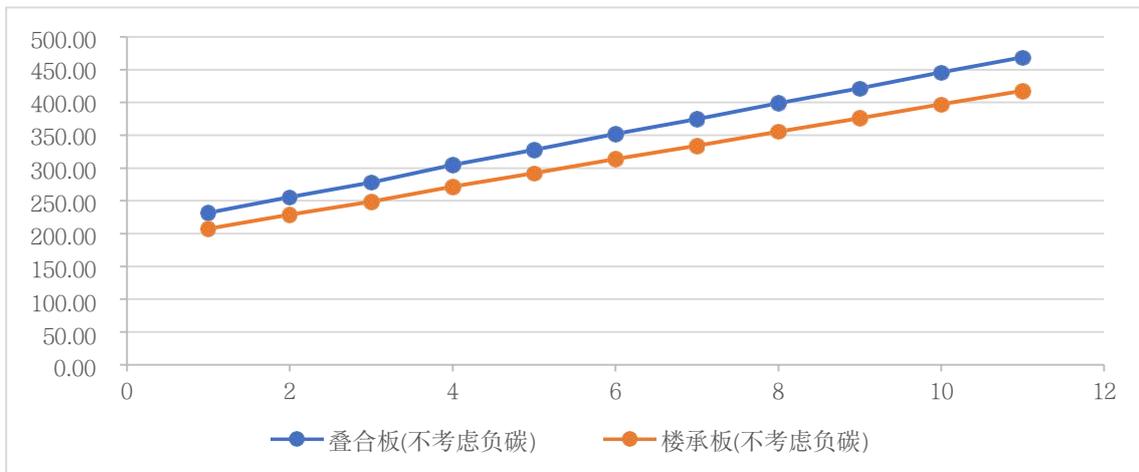
表B.6.7 110厚钢筋桁架楼承板与130厚及140厚钢筋桁架楼承板碳排放计算表

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3012-X1	211.105	200.544	10.562
DBS1-68-3012-X1	231.494	200.544	30.950
DBS1-67-3312-X1	233.222	221.559	11.663
DBS1-68-3312-X1	255.626	221.559	34.067

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3612-X1	253.714	241.345	12.369
DBS1-68-3612-X1	278.163	241.345	36.818
DBS1-67-3912-X1	278.215	265.868	12.347
DBS1-68-3912-X1	304.708	265.868	38.840
DBS1-67-4212-X1	298.886	285.918	12.968
DBS1-68-4212-X1	327.424	285.918	41.507
DBS1-67-4512-X1	321.211	307.239	13.972
DBS1-68-4512-X1	351.764	307.239	44.525
DBS1-67-4812-X1	341.882	327.289	14.593
DBS1-68-4812-X1	374.510	327.289	47.221
DBS1-67-5112-X1	364.178	348.567	15.611
DBS1-68-5112-X1	398.851	348.567	50.283
DBS1-67-5412-X1	384.879	368.661	16.218
DBS1-68-5412-X1	421.567	368.661	52.906
DBS1-67-5712-X1	407.174	389.939	17.235
DBS1-68-5712-X1	445.937	389.939	55.998
DBS1-67-6012-X1	427.845	409.989	17.857
DBS1-68-6012-X1	468.653	409.989	58.664



图B.6.7-1 130 厚叠合板与 110 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比



图B.6.7-2 140 厚叠合板与 110 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

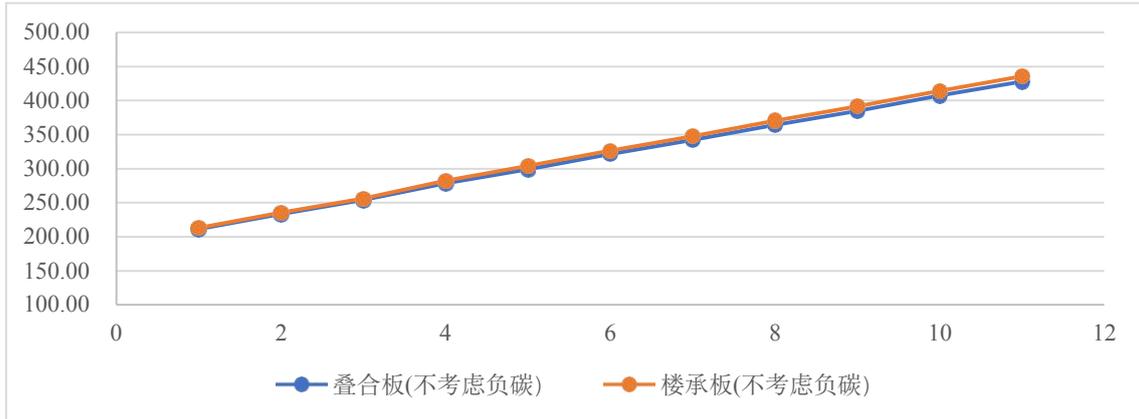
B68 120 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

(运输因子 1.15)

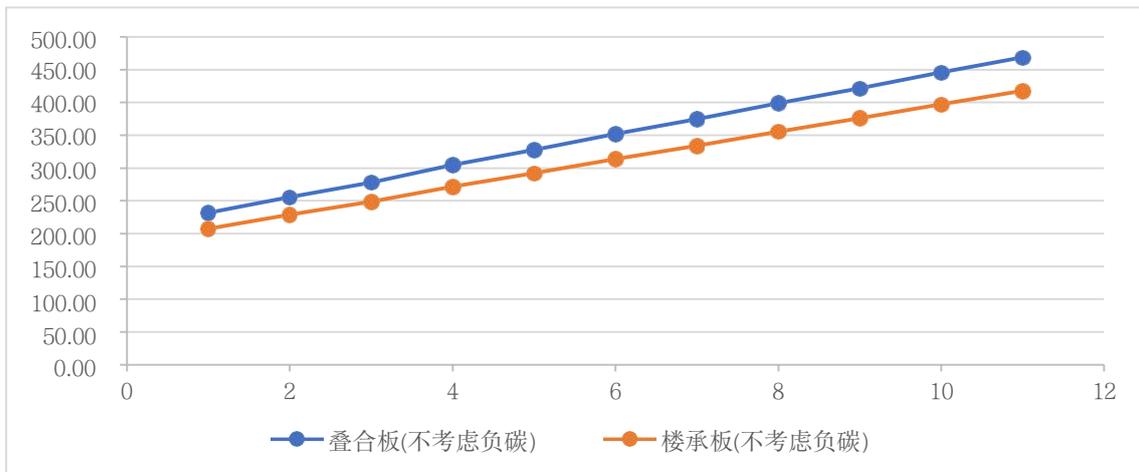
表B.6.8 120 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放计算表

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3012-X1	211.105	213.073	-1.968
DBS1-68-3012-X1	231.494	213.073	18.421
DBS1-67-3312-X1	233.222	235.361	-2.139
DBS1-68-3312-X1	255.626	235.361	20.265

DBS1-67-3612-X1	253.714	256.421	-2.707
DBS1-68-3612-X1	278.163	256.421	21.742
DBS1-67-3912-X1	278.215	282.536	-4.321
DBS1-68-3912-X1	304.708	282.536	22.172
DBS1-67-4212-X1	298.886	303.883	-4.997
DBS1-68-4212-X1	327.424	303.883	23.542
DBS1-67-4512-X1	321.211	326.506	-5.295
DBS1-68-4512-X1	351.764	326.506	25.259
DBS1-67-4812-X1	341.882	347.853	-5.970
DBS1-68-4812-X1	374.510	347.853	26.658
DBS1-67-5112-X1	364.178	370.428	-6.250
DBS1-68-5112-X1	398.851	370.428	28.423
DBS1-67-5412-X1	384.879	391.823	-6.944
DBS1-68-5412-X1	421.567	391.823	29.744
DBS1-67-5712-X1	407.174	414.398	-7.224
DBS1-68-5712-X1	445.937	414.398	31.539
DBS1-67-6012-X1	427.845	435.745	-7.899
DBS1-68-6012-X1	468.653	435.745	32.908



图B.6.8-1 130 厚叠合板与 120 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比



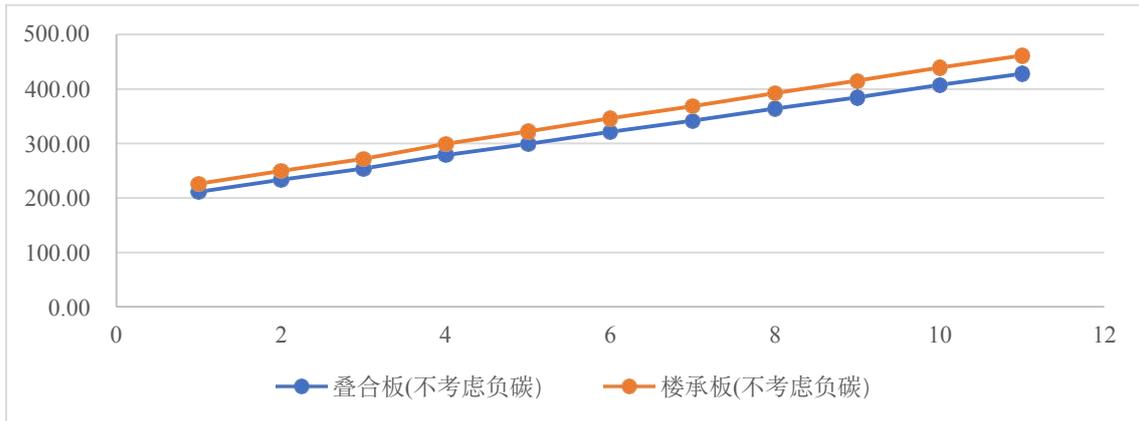
图B.6.8-2 140 厚叠合板与 110 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

B9 130 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比
(运输因子 1.15)

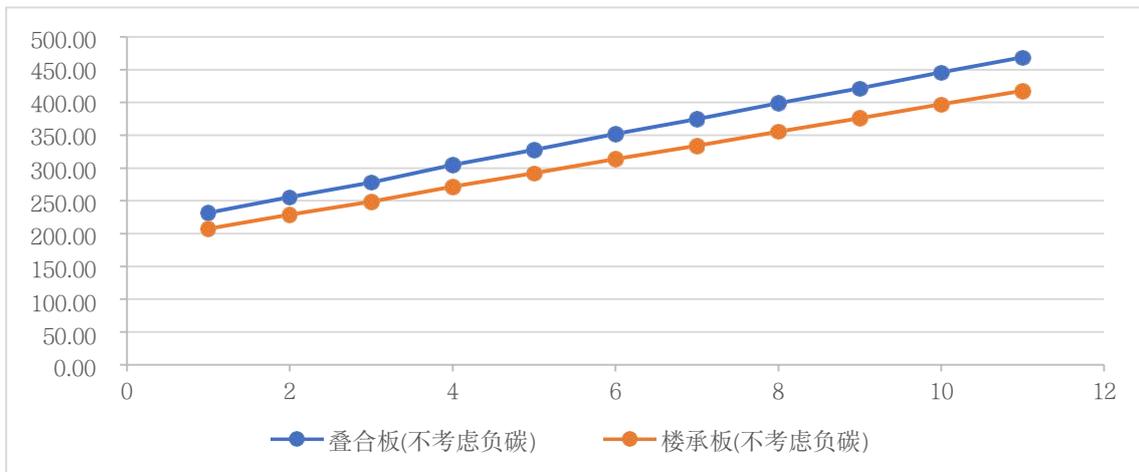
表B.6.9 130 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放计算表

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3012-X1	211.105	225.602	-14.497
DBS1-68-3012-X1	231.494	225.602	5.892
DBS1-67-3312-X1	233.222	249.164	-15.942
DBS1-68-3312-X1	255.626	249.164	6.462

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3612-X1	253.714	271.497	-17.782
DBS1-68-3612-X1	278.163	271.497	6.666
DBS1-67-3912-X1	278.215	299.204	-20.989
DBS1-68-3912-X1	304.708	299.204	5.505
DBS1-67-4212-X1	298.886	321.848	-22.962
DBS1-68-4212-X1	327.424	321.848	5.576
DBS1-67-4512-X1	321.211	345.772	-24.561
DBS1-68-4512-X1	351.764	345.772	5.993
DBS1-67-4812-X1	341.882	368.416	-26.534
DBS1-68-4812-X1	374.510	368.416	6.094
DBS1-67-5112-X1	364.178	392.288	-28.111
DBS1-68-5112-X1	398.851	392.288	6.562
DBS1-67-5412-X1	384.879	414.984	-30.106
DBS1-68-5412-X1	421.567	414.984	6.582
DBS1-67-5712-X1	407.174	438.857	-31.682
DBS1-68-5712-X1	445.937	438.857	7.080
DBS1-67-6012-X1	427.845	461.501	-33.655
DBS1-68-6012-X1	468.653	461.501	7.152



图B.6.9-1 130 厚叠合板与 130 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比



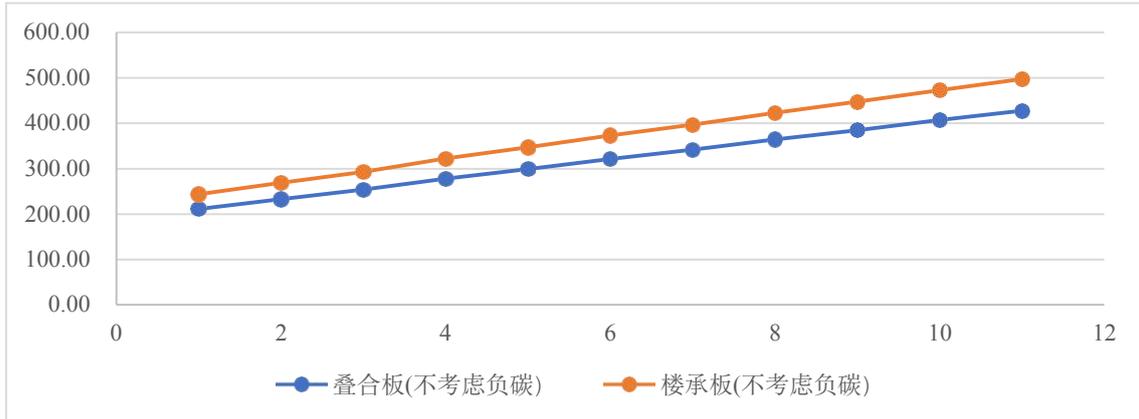
图B.6.9-2 140 厚叠合板与 130 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

B6.10 140 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比
(运输因子 1.15)

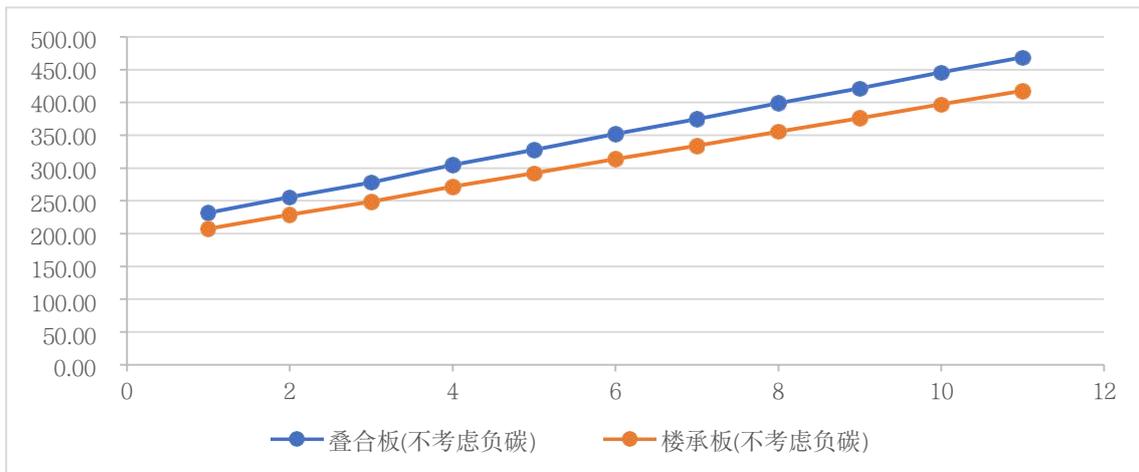
表 B.6.10 140 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放
计算表

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3012-X1	211.105	243.539	-32.433
DBS1-68-3012-X1	231.494	243.539	-12.045
DBS1-67-3312-X1	233.222	268.852	-35.630
DBS1-68-3312-X1	255.626	268.852	-13.227

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3612-X1	253.714	292.990	-39.275
DBS1-68-3612-X1	278.163	292.990	-14.827
DBS1-67-3912-X1	278.215	322.501	-44.286
DBS1-68-3912-X1	304.708	322.501	-17.792
DBS1-67-4212-X1	298.886	346.949	-48.063
DBS1-68-4212-X1	327.424	346.949	-19.524
DBS1-67-4512-X1	321.211	372.625	-51.414
DBS1-68-4512-X1	351.764	372.625	-20.861
DBS1-67-4812-X1	341.882	397.125	-55.243
DBS1-68-4812-X1	374.510	397.125	-22.615
DBS1-67-5112-X1	364.178	422.801	-58.624
DBS1-68-5112-X1	398.851	422.801	-23.951
DBS1-67-5412-X1	384.879	447.250	-62.371
DBS1-68-5412-X1	421.567	447.250	-25.683
DBS1-67-5712-X1	407.174	472.978	-65.804
DBS1-68-5712-X1	445.937	472.978	-27.041
DBS1-67-6012-X1	427.845	497.426	-69.581
DBS1-68-6012-X1	468.653	497.426	-28.773



图B.6.10-1 130 厚叠合板与 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比



图B.6.10-2 140 厚叠合板与 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

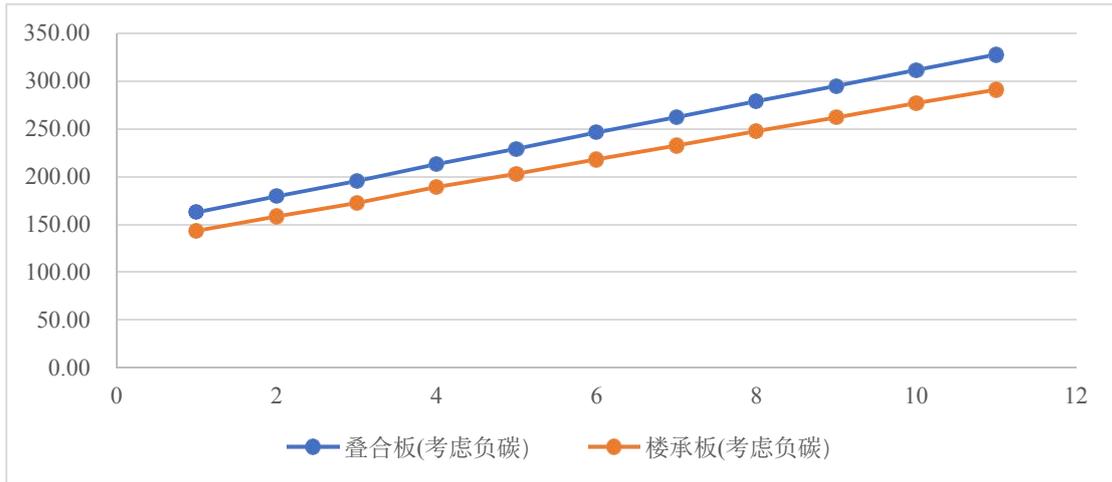
B.7 考虑负碳排放统计

B7.1 100 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

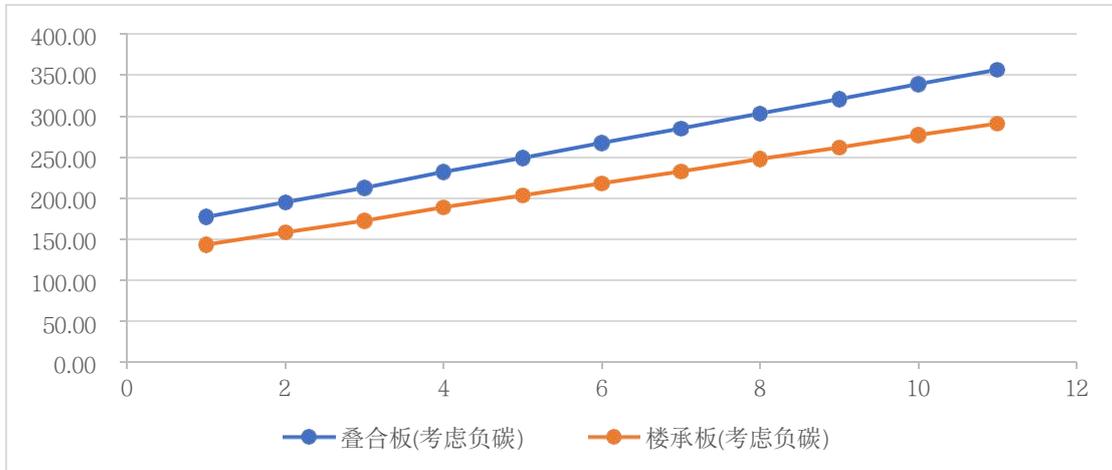
表B.7.1 100 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放计算表

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3012-X1	162.588	143.340	19.248
DBS1-68-3012-X1	177.039	143.340	33.699
DBS1-67-3312-X1	179.318	158.180	21.137

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-68-3312-X1	195.203	158.180	37.023
DBS1-67-3612-X1	195.287	172.359	22.928
DBS1-68-3612-X1	212.620	172.359	40.261
DBS1-67-3912-X1	213.134	188.918	24.216
DBS1-68-3912-X1	231.916	188.918	42.997
DBS1-67-4212-X1	229.187	203.226	25.961
DBS1-68-4212-X1	249.416	203.226	46.191
DBS1-67-4512-X1	246.015	218.217	27.798
DBS1-68-4512-X1	267.678	218.217	49.461
DBS1-67-4812-X1	262.068	232.525	29.543
DBS1-68-4812-X1	285.193	232.525	52.669
DBS1-67-5112-X1	278.882	247.494	31.388
DBS1-68-5112-X1	303.455	247.494	55.961
DBS1-67-5412-X1	294.949	261.823	33.125
DBS1-68-5412-X1	320.956	261.823	59.133
DBS1-67-5712-X1	311.763	276.793	34.970
DBS1-68-5712-X1	339.232	276.793	62.439
DBS1-67-6012-X1	327.816	291.101	36.715
DBS1-68-6012-X1	356.733	291.101	65.632



图B.7.1-1 130 厚叠合板与 100 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比



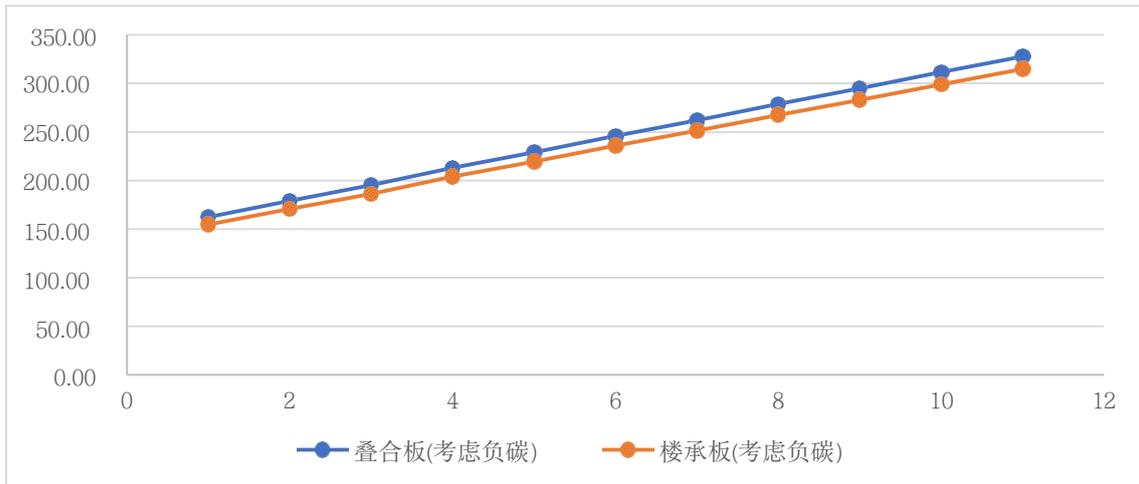
图B.7.1-2 140 厚叠合板与 100 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

B72 110 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

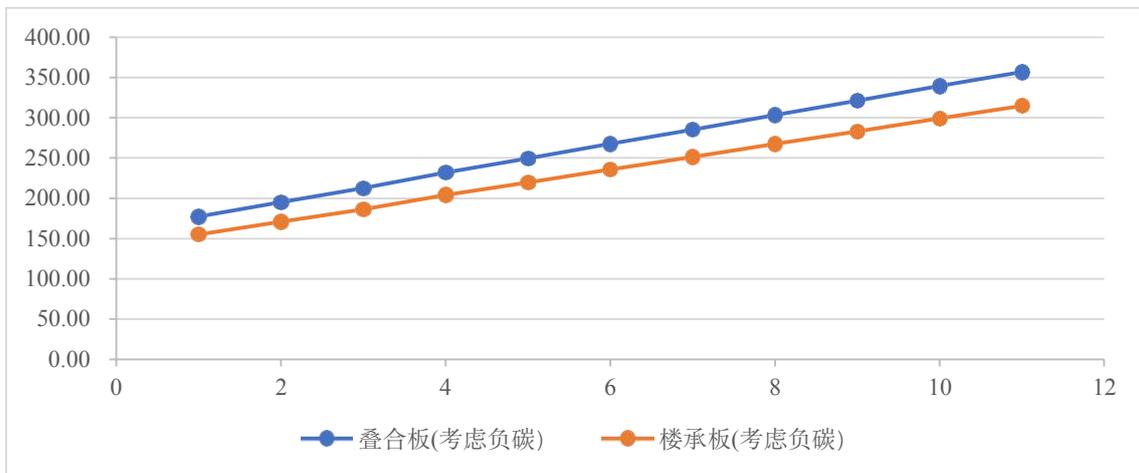
表B.7.2 110 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放计算表

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3012-X1	162.588	154.989	7.599
DBS1-68-3012-X1	177.039	154.989	22.050
DBS1-67-3312-X1	179.318	171.005	8.313
DBS1-68-3312-X1	195.203	171.005	24.198

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3612-X1	195.287	186.360	8.927
DBS1-68-3612-X1	212.620	186.360	26.261
DBS1-67-3912-X1	213.134	204.267	8.867
DBS1-68-3912-X1	231.916	204.267	27.649
DBS1-67-4212-X1	229.187	219.763	9.424
DBS1-68-4212-X1	249.416	219.763	29.653
DBS1-67-4512-X1	246.015	235.945	10.070
DBS1-68-4512-X1	267.678	235.945	31.733
DBS1-67-4812-X1	262.068	251.441	10.626
DBS1-68-4812-X1	285.193	251.441	33.752
DBS1-67-5112-X1	278.882	267.600	11.282
DBS1-68-5112-X1	303.455	267.600	35.855
DBS1-67-5412-X1	294.949	283.120	11.829
DBS1-68-5412-X1	320.956	283.120	37.836
DBS1-67-5712-X1	311.763	299.278	12.485
DBS1-68-5712-X1	339.232	299.278	39.954
DBS1-67-6012-X1	327.816	314.775	13.041
DBS1-68-6012-X1	356.733	314.775	41.958



图B.7.2-1 130 厚叠合板与 110 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比



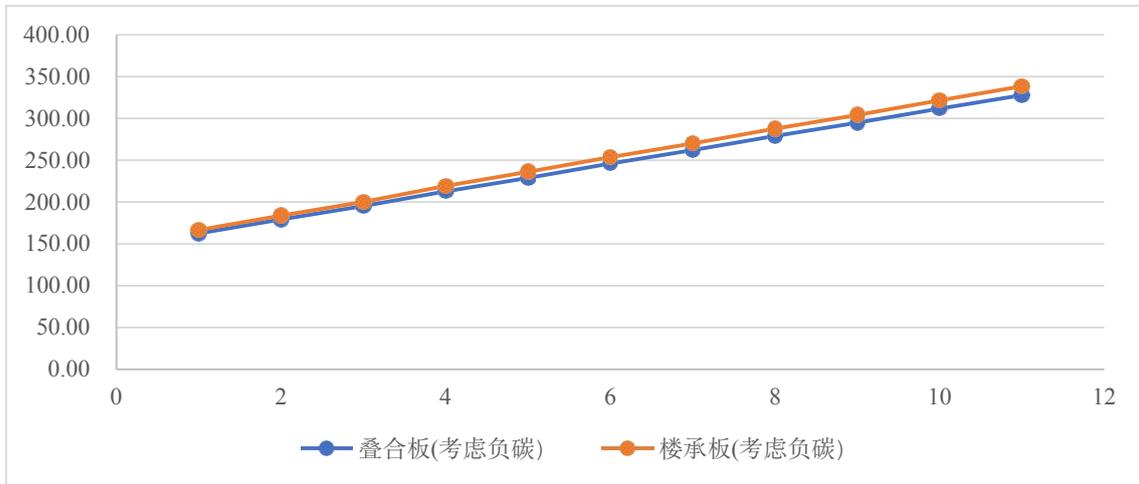
图B.7.2-2 140 厚叠合板与 110 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

B7.3 120 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

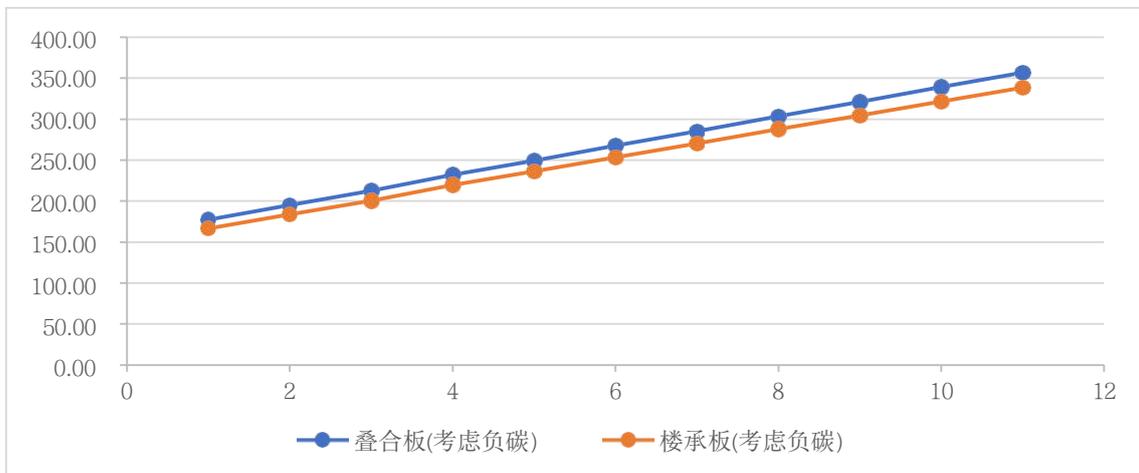
表B.7.3 120 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放计算表

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3012-X1	162.588	166.638	-4.050
DBS1-68-3012-X1	177.039	166.638	10.401
DBS1-67-3312-X1	179.318	183.830	-4.512
DBS1-68-3312-X1	195.203	183.830	11.373

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3612-X1	195.287	200.360	-5.074
DBS1-68-3612-X1	212.620	200.360	12.260
DBS1-67-3912-X1	213.134	219.615	-6.481
DBS1-68-3912-X1	231.916	219.615	12.301
DBS1-67-4212-X1	229.187	236.300	-7.113
DBS1-68-4212-X1	249.416	236.300	13.116
DBS1-67-4512-X1	246.015	253.673	-7.658
DBS1-68-4512-X1	267.678	253.673	14.005
DBS1-67-4812-X1	262.068	270.358	-8.290
DBS1-68-4812-X1	285.193	270.358	14.835
DBS1-67-5112-X1	278.882	287.705	-8.823
DBS1-68-5112-X1	303.455	287.705	15.750
DBS1-67-5412-X1	294.949	304.416	-9.467
DBS1-68-5412-X1	320.956	304.416	16.540
DBS1-67-5712-X1	311.763	321.763	-10.001
DBS1-68-5712-X1	339.232	321.763	17.469
DBS1-67-6012-X1	327.816	338.448	-10.633
DBS1-68-6012-X1	356.733	338.448	18.284



图B.7.3-1 130 厚叠合板与 120 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比



图B.7.3-2 140 厚叠合板与 120 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

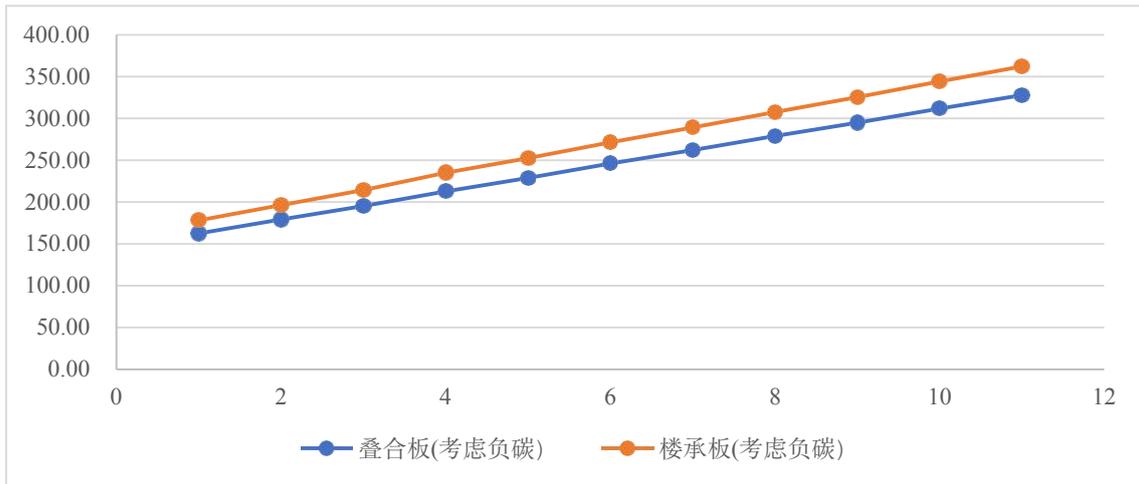
B74 130 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

表B.7.4 130 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放计

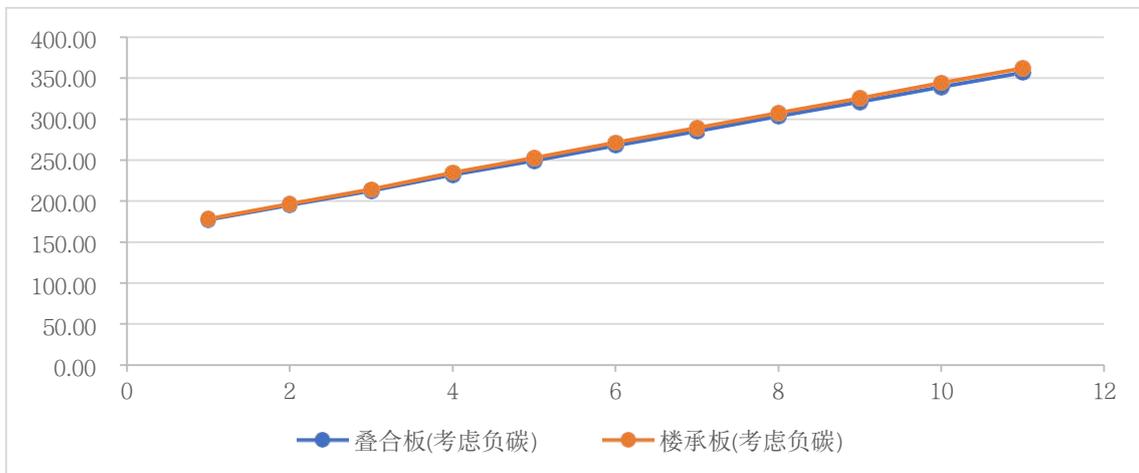
算表

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3012-X1	162.588	178.287	-15.699
DBS1-68-3012-X1	177.039	178.287	-1.248
DBS1-67-3312-X1	179.318	196.655	-17.337
DBS1-68-3312-X1	195.203	196.655	-1.452

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3612-X1	195.287	214.361	-19.074
DBS1-68-3612-X1	212.620	214.361	-1.741
DBS1-67-3912-X1	213.134	234.964	-21.829
DBS1-68-3912-X1	231.916	234.964	-3.048
DBS1-67-4212-X1	229.187	252.837	-23.650
DBS1-68-4212-X1	249.416	252.837	-3.421
DBS1-67-4512-X1	246.015	271.401	-25.386
DBS1-68-4512-X1	267.678	271.401	-3.723
DBS1-67-4812-X1	262.068	289.275	-27.207
DBS1-68-4812-X1	285.193	289.275	-4.082
DBS1-67-5112-X1	278.882	307.811	-28.929
DBS1-68-5112-X1	303.455	307.811	-4.356
DBS1-67-5412-X1	294.949	325.713	-30.764
DBS1-68-5412-X1	320.956	325.713	-4.757
DBS1-67-5712-X1	311.763	344.249	-32.486
DBS1-68-5712-X1	339.232	344.249	-5.017
DBS1-67-6012-X1	327.816	362.122	-34.307
DBS1-68-6012-X1	356.733	362.122	-5.390



图B.7.4-1 130 厚叠合板与 130 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比



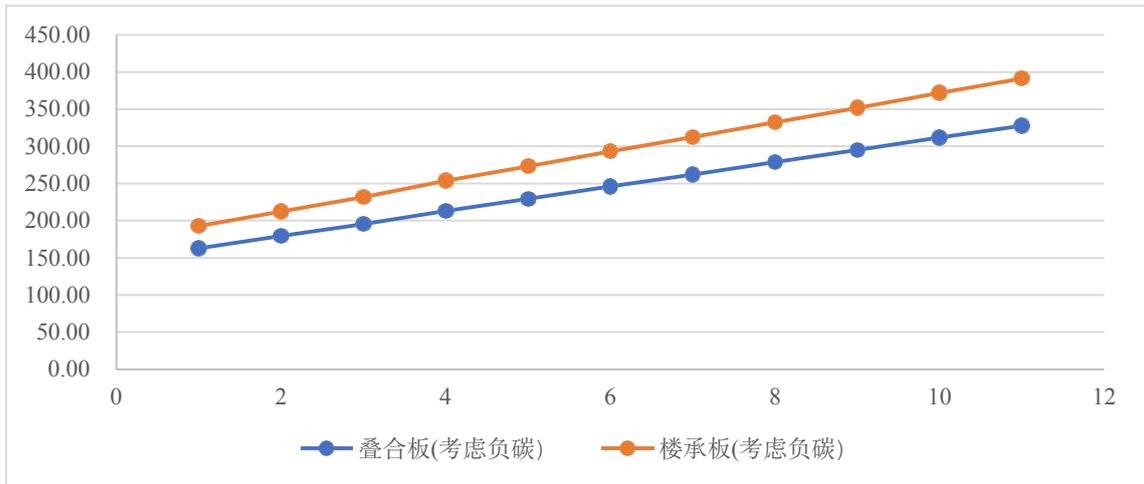
图B.7.4-2 140 厚叠合板与 130 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

B7.5 140 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比

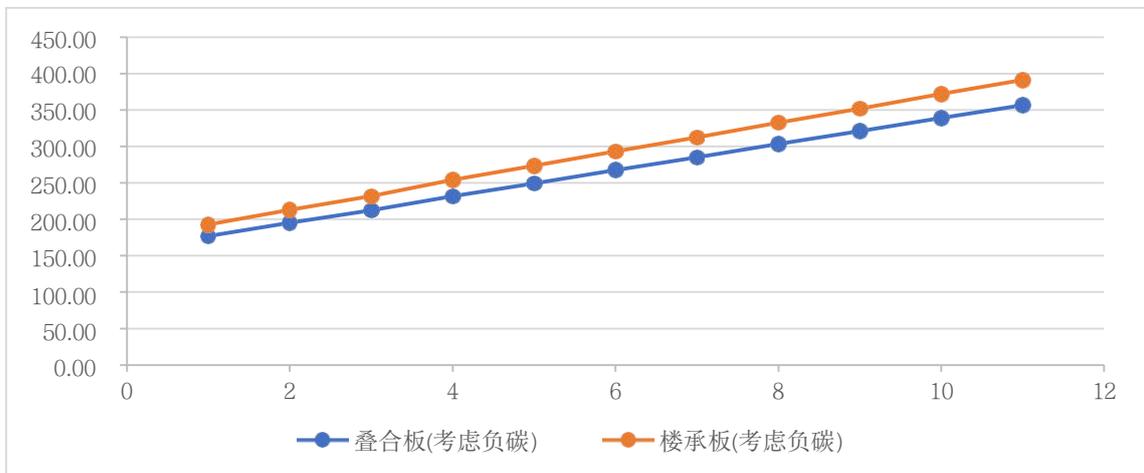
表B.7.5 140 厚钢筋桁架楼承板与 130 厚及 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放计算表

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3012-X1	162.588	192.850	-30.262
DBS1-68-3012-X1	177.039	192.850	-15.811
DBS1-67-3312-X1	179.318	212.652	-33.334
DBS1-68-3312-X1	195.203	212.652	-17.449

底板编号	叠合板	钢筋桁架楼承板	差值
DBS1-67-3612-X1	195.287	231.820	-36.534
DBS1-68-3612-X1	212.620	231.820	-19.200
DBS1-67-3912-X1	213.134	253.885	-40.751
DBS1-68-3912-X1	231.916	253.885	-21.969
DBS1-67-4212-X1	229.187	273.221	-44.033
DBS1-68-4212-X1	249.416	273.221	-23.804
DBS1-67-4512-X1	246.015	293.218	-47.203
DBS1-68-4512-X1	267.678	293.218	-25.540
DBS1-67-4812-X1	262.068	312.582	-50.514
DBS1-68-4812-X1	285.193	312.582	-27.389
DBS1-67-5112-X1	278.882	332.580	-53.698
DBS1-68-5112-X1	303.455	332.580	-29.124
DBS1-67-5412-X1	294.949	351.915	-56.967
DBS1-68-5412-X1	320.956	351.915	-30.959
DBS1-67-5712-X1	311.763	371.941	-60.178
DBS1-68-5712-X1	339.232	371.941	-32.709
DBS1-67-6012-X1	327.816	391.277	-63.461
DBS1-68-6012-X1	356.733	391.277	-34.544



图B.7.5-1 130 厚叠合板与 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比



图B.7.5-2 140 厚叠合板与 140 厚钢筋桁架楼承板碳排放对比