

“双碳”目标下零碳建筑电气化研究*

Research on Electrification of Zero Carbon Buildings under "Dual Carbon" Goal

田 靖, 左嘉源, 郝翠彩, 刘少亮

(河北省建筑科学研究院有限公司, 河北 石家庄 050227)

摘要: 鉴于建筑用能全面电气化是实现零碳、低碳运行的最佳途径, 根据供暖、炊事、生活热水现状调研分析零碳建筑电气化, 分别通过居住建筑和公共建筑工程实例进行供暖、炊事、生活热水有无电气化的碳减排计算, 进而研究零碳建筑电气化潜力, 得出采用高效的空气源热泵制热可以有效降低建筑供暖的碳排放, 电炊具比燃气炊具产生更多的碳排放, 采用电热水器碳排放高于燃气热水器, 但采用空气源热泵热水器、太阳能等方式能有效降低碳排放。同时, 分析了“双碳”目标下零碳建筑电气化中存在的问题, 如在超高温热泵、大容量高温热泵、超大容量热泵领域有待深入开展研发, 能源价格体系改革等, 最后提出零碳建筑电气化未来技术展望。

关键词: 零碳建筑; 电气化; 供暖; 热泵; 炊事; 生活热水

中图分类号: TU855 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2024) 05-0125-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2024.05.023

TIAN Jing, ZUO Jiayuan, HAO Cuicai, LIU Shaoliang

(Hebei Academy of Building Research Co., Ltd., Shijiazhuang 050227, China)

Abstract: In view of the fact that the comprehensive electrification of building energy is the best way to achieve zero-carbon and low-carbon operation, the electrification of zero-carbon buildings is analyzed according to the investigation of the current situation of heating, cooking and domestic hot water, and the carbon emission reduction of heating, cooking and domestic hot water is calculated through the examples of residential buildings and public buildings respectively, and then the electrification potential of zero-carbon buildings is studied. It is concluded that the use of efficient air source heat pump heating can effectively reduce the carbon emissions of building heating, electric cookers produce more carbon emissions than gas cookers, the use of electric water heater carbon emissions are higher than gas water heaters, but the use of air source heat pump water heater, solar energy and other ways can effectively reduce carbon emissions. At the same time, the paper analyzes the problems existing in the electrification of zero carbon buildings under the goal of "dual carbon", such as the need for in-depth research and development in the field of ultra-high temperature heat pump, large capacity high temperature heat pump, super capacity heat pump, energy price system reform, and finally puts forward the future technology outlook of zero carbon building electrification.

Keywords: zero carbon building; electrification; heating; heat pump; cooking; domestic hot water

* 基金项目: 住房和城乡建设部研究开发项目 (2022-K-124); 河北省重点研发计划 (22374501D); 河北省建设科技研究项目 (2023-2108)。

作者简介: 田 靖 (1988—), 女, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 节能建筑 (超低能耗建筑、绿色建筑) 研究。

通信作者: 左嘉源 (1993—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 节能建筑 (超低能耗建筑、绿色建筑) 研究。

收稿日期: 2023-07-19

建筑节能

0 引言

2021年10月24日,中共中央、国务院印发的《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意见》(中发〔2021〕36号)中指出:“加快推动建筑用能电气化和低碳化”“大幅提高建筑采暖、生活热水、炊事等电气化普及率”^[1]。建筑电气化主要包括建筑供暖、炊事、生活热水及特殊建筑蒸汽用能的全面电气化。建筑用能全面电气化是实现零碳、低碳运行的最佳途径。建筑能源需求通常包括冷、热(含生活热水等)、电等方面,建筑能源系统是建筑碳排放的最重要来源,寻求建筑领域的低碳技术路径、构建适应双碳目标要求的低碳建筑能源系统,对实现全社会的双碳目标具有重要意义^[2]。

当前,北方地区的城镇供暖以热电联产和燃煤、燃气锅炉为热源的集中供热为主,另辅有热泵、工业余热、可再生能源等多种热源形式。此外,也有地区采用燃气供暖热水炉、户式燃煤炉、空调和直接电加热等形式的分散供暖^[3-4]。双碳目标提出后,有学者认为煤炭、天然气燃烧均会增加碳排放,建议以电气化的手段完成供暖用能的脱碳^[5]。电气化形式供暖,即用热泵取代直接燃烧的设备供暖(煤改电,乃至气改电)^[6]。

传统厨房基本以使用燃油(燃气)为主,大多数未经过除油烟处理,通过下水道或直接排放,存在着高污染、高能耗、高噪音等缺点,而且使用过程中由于产生明火容易引发火灾等事故^[7]。公共建筑厨房通常采用天然气作为燃料,又属于高温、高湿环境,近几年厨房发生火灾、甚至爆炸的事故频现^[8]。炊事电气化即采用电灶具代替燃气灶具。

随着人民生活水平的提高和居民住房环境的改善,热水器的需求迅速增长,尤其在城镇热水器保有量已达到比较高的水平^[9]。目前,城市居民家庭主要使用电、燃气或太阳能制备热水,用于满足洗浴和厨房热水使用需求。电、燃气、太阳能和空气源热泵是生活热水最为主要的热源形式,随着可再生能源建筑的推广,太阳能和空气源热泵热水规模还将不断增加。

基于此,以住宅和公建近零能耗建筑工程项目

为例,采用能耗模拟软件进行建筑供暖、供冷和照明能耗和碳排放计算,研究零碳建筑供暖、炊事、生活热水各设施电气化降碳贡献率,提出零碳建筑电气化的可行性和潜力路径,总结当前阶段建筑电气化存在的难点和问题,探讨零碳建筑电气化未来技术发展趋势,以此为实现零碳建筑电气化提供一定的技术支持。

1 降碳贡献率分析

零碳建筑用的空调设备主要包括多联式(空调)热泵机组、天氟地水二联供机组、天水地水二联供机组、热泵型新风环境控制一体机、三联供机组、石墨烯发热膜。

炊事领域要实现碳中和,主要考虑如何改变居民长期以来“无火不成灶,无灶不成厨,无厨不成家”的明火烹饪习惯,推进全电气化炉灶技术创新,实现零排放^[10]。

在碳达峰碳中和目标约束下,减少燃气热水器使用,推广电热水器和以电为辅助热源的可再生能源热水系统是实现生活热水电气化的主要方向。^[11]

通过项目案例计算零碳建筑供暖、炊事、生活热水电气化的降碳贡献率,研究零碳建筑电气化潜力。

1.1 碳排放计算公式与碳排放因子

碳排放计算公式如下:

$$C = E \times EF \quad (1)$$

式中: C 为单位建筑面积碳排放量, kgCO_2/m^2 ; E 为能源消耗量, 单位/a; EF 为能源碳排放因子。

根据 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》附录 A^[12],天然气的单位热值含碳量为 15.3 tC/TJ ,单位热值 CO_2 排放因子为 $55.54 \text{ tCO}_2/\text{TJ}$ 。根据《关于做好 2023—2025 年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知》,电力碳排放因子取值为 $0.5703 \text{ tCO}_2/\text{MWh}$ ^[13]。

1.2 项目概况

居住建筑以一栋近零能耗住宅楼为例,项目位于河北省保定市。建筑类型为高层居住建筑,总建筑面积为 $14\,835.86 \text{ m}^2$ 。每层 5 户,共计 90 户,规划建筑高度为 58.50 m ,消防建筑高度 56.95 m ,建筑结构形式为剪力墙结构。

公共建筑以一栋近零能耗医院建筑为例,项目

位于河北省张家口市。总建筑面积为9 762 m²。地上四层，使用功能为医院急诊及医技。建筑高度为18.35 m，建筑结构形式为框架结构。

1.3 电气化形式供暖碳减排

1.3.1 居住建筑电气化形式供暖碳减排情况

对比两种供暖方式：方案1采用市政集中供暖；方案2采用电气化形式供暖的热泵型新风环境控制一

体机，其冷热源为低温型空气源热泵。“计算结果见表1。”开始修改为：热泵型新风环境控制一体机每年合计碳排放为171.65 tCO₂，市政集中供暖每年合计碳排放236.48 tCO₂。对比市政集中供暖，采用热泵型新风环境控制一体机能够有效减少碳排放，每年减碳量约64.83 tCO₂，降低碳排放27%。具体情况如图1所示。

表1 示范住宅项目能耗和碳排放计算结果

Table 1 Calculation results of energy consumption and carbon emissions for demonstration residential projects

| 指标名称 | 热泵型新风环境控制一体机 | | 集中供暖 | | | 电气化降碳 | |
|------|----------------------------------|--|----------------------------------|--|--|--|-------------|
| | 电耗 /[kWh/(m ² ·a)] | 碳排放 /[kgCO ₂ /(m ² ·a)] | 电耗 /[kWh/(m ² ·a)] | 燃气消耗 /[m ³ /(m ² ·a)] | 碳排放 /[kgCO ₂ /(m ² ·a)] | 碳减排 /[kgCO ₂ /(m ² ·a)] | 减排百分比 /% |
| 年供暖 | 5.14 | 3.77 | 3.93 | 1.88 | 8.14 | 4.37 | 54 |
| 年供冷 | 8.10 | 4.62 | 8.10 | 0 | 4.62 | 0 | 0 |
| 年照明 | 5.58 | 3.18 | 5.58 | 0 | 3.18 | 0 | 0 |
| 合计能耗 | 18.82 | 11.57 | 17.61 | 0 | 15.94 | 4.37 | 27 |

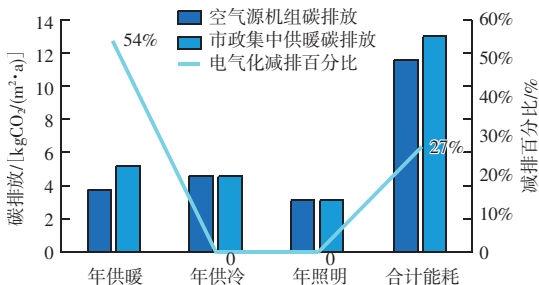


图1 示范住宅项目能耗和碳排放计算结果

Fig. 1 Calculation results of energy consumption and carbon emissions for demonstration residential projects

上述结果针对的是寒冷地区情况，不同气候区减碳情况会不同。此外，采用不同电气化形式供暖，其减碳情况也不一样。针对不同气候区不同电气化形式供暖进行计算分析，结果显示天氟地水二联供减碳量最多，石墨烯发热膜减碳量最少；严寒地区减碳量最多，夏热冬暖地区减碳量最少。不同电气化形式供暖在各气候区的减碳量结果如图2所示。

通过对燃气供暖和电气化形式供暖的计算分析，结果显示对比采用燃气供暖，采用石墨烯发热膜技术反而会增加碳排放。随着现阶段国家减少发电使用的化石燃料的比例，采用石墨烯发热膜的碳排放量也会逐步降低。但针对零碳建筑，采用空气源热泵减碳效果要远优于采用石墨烯发热膜等直接电加热的方式，因此建议采用能效等级高的空气源热泵设备进行采暖。

1.3.2 公共建筑电气化形式供暖碳减排情况

根据调研与测算，若位于同一气候区，学生宿

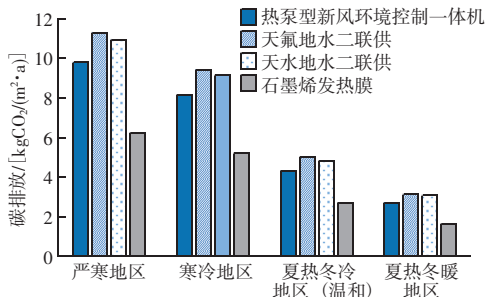


图2 不同电气化形式供暖在各气候区减碳量

Fig. 2 Carbon reduction by different forms of heating electrification in each climate zone

舍、办公建筑、医院建筑等不同建筑类型的近零能耗公共建筑的供暖能耗基本相似，因此可认为同一气候区、不同建筑类型的电气化形式供暖影响相对较小。不同气候区的变化情况可参照居住建筑在不同气候区的减碳量。公共建筑（近零能耗医院建筑）能耗和减碳量见表2。空气源热泵碳排放354.17 tCO₂，燃气锅炉供暖合计碳排放433.24 tCO₂，对比燃气锅炉供暖，采用空气源热泵供暖能够有效减少碳排放，每年减碳量约79.07 t，采用此种方式能够减少碳排放18%。具体计算结果如图3所示。

对于公共建筑，采用空气源热泵设备无论在成本上还是在实施难度上都优于直接电加热的发热膜。空气源热泵产品能够有效减少公共建筑的碳排放，减少的碳排放占总体能耗的15%以上。因此，公共建筑采用空气源热泵产品能够有效减少建筑的碳排放，建议公共建筑采用空气源热泵供暖设备来达到“低碳”或“零碳”运行。

建筑节能

表2 示范公建项目能耗和碳排放计算结果

Table 2 Calculation results of energy consumption and carbon emissions for demonstration public construction projects

| 指标名称 | 空气源热泵 | | 燃气锅炉供暖 | | | 电气化减排 | |
|------|----------------------------------|--|----------------------------------|--|--|--|-------------|
| | 电耗 /[kWh/(m ² ·a)] | 碳排放 /[kgCO ₂ /(m ² ·a)] | 电耗 /[kWh/(m ² ·a)] | 燃气消耗 /[m ³ /(m ² ·a)] | 碳排放 /[kgCO ₂ /(m ² ·a)] | 碳减排 /[kgCO ₂ /(m ² ·a)] | 减排百分比 /% |
| 年供暖 | 44.07 | 21.92 | 5.64 | 19.17 | 30.02 | 8.10 | 27 |
| 年供冷 | 10.20 | 5.82 | 10.20 | 0 | 5.82 | 0 | 0 |
| 年照明 | 14.99 | 8.55 | 14.99 | 0 | 8.55 | 0 | 0 |
| 合计能耗 | 69.25 | 36.28 | 30.83 | 19.17 | 44.38 | 8.10 | 18 |

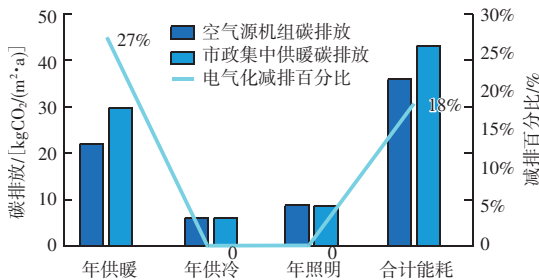


图3 示范公建项目能耗和碳排放计算结果

Fig. 3 Calculation results of energy consumption and carbon emissions for demonstration public construction projects

1.4 炊事电气化碳减排

电炊具额定功率约为 1 000 W, 热效率达 90%, 待机状态功率 < 2 W。电炊具使用时间估算依据 GB/T 51350—2019《近零能耗建筑技术标准》附录 A 中设备使用率进行估算; 燃气炊事采用某具体项目的炊事用量, 经测算, 每户每年平均燃气用量约为 109.71 m³; 测算采用 90 户住户的居住建筑, 计算的结果见表 3。

表3 炊事电气化减碳量计算对比

Table 3 Comparison of carbon reduction calculations for electrification of cooking

| 炊事形式 | 每户碳排放/kgCO ₂ | 总计碳排放/tCO ₂ |
|-------|-------------------------|------------------------|
| 电-炊事 | 1 041.45 | 93.73 |
| 燃气-炊事 | 214.39 | 19.30 |

相比采用电炊具, 采用燃气炊具每户每年减碳量约 827.06 kg, 90 户共计减碳量 74.44 t。由此可见, 采用电炊具比采用燃气炊具产生更多的碳排放。但是电气化仍然是有必要的, 随着国家电力系统中的绿电比例上升, 化石燃料电比例的下降, 各地区的电力系统的碳排放因子也会逐年下降。根据现有数据, 当前化石能源发电装机容量占比不足 49.1%, 非化石能源发电装机容量占比已超过化石能源发电装机容量的占比, 因此, 炊事电气化是未来建筑减碳的重要方式之一。

1.5 生活热水电气化碳减排

主要使用热水的建筑包括住宅建筑、带有热水需求的公共建筑。由于带有热水需求的公共建筑用

水量与建筑类型、建筑功能相关性不大, 主要涉及使用人数, 因此本次研究主要针对居住建筑。

人均生活热水定额结合 GB 50015—2019《建筑给水排水设计标准》与居民生活用水习惯确定, 住宅日平均生活热水定额为 20~60 L/人, 实际调研中居民日均生活热水量集中在 20~40 L^[14], 本次计算每人每日最高日用水量定额取范围中间值 30 L/天/人, 热水使用天数取 80%。

因本次研究针对零碳建筑, 应尽可能减少能耗, 因此选用的辅热设备、主要加热设备均采用一级能效的产品。计算结果见表 4。

表4 不同生活热水制备系统减碳量计算对比
Table 4 Comparison of carbon reduction calculations for different domestic hot water preparation systems

| 热水制备类型 | 每平方米碳排放 /[kgCO ₂ /(m ² ·a)] | 总计碳排放 /tCO ₂ | 电气化碳排放 降低比例/% |
|------------|--|----------------------------|------------------|
| 电热水器 | 2.78 | 41.24 | -44.91 |
| 空气源热泵热水器 | 1.58 | 23.38 | 17.85 |
| 太阳能光热+电辅热 | 0.67 | 9.90 | 65.22 |
| 太阳能光热+燃气辅热 | 0.46 | 6.83 | 76.00 |
| 燃气热水器 | 1.92 | 28.46 | 0.00 |

采用电热水器碳排放高于燃气热水器, 但采用空气源热泵热水器、太阳能等方式能有效降低碳排放; 随着未来化石能源发电占比降低, 当碳排放系数降低至 0.491 以下时, 电热水器碳排放量会低于燃气热水器的碳排放, 由于前化石能源发电装机容量占比不足 49.1%, 因此进行电气化是有必要的。

2 建筑电气化存在的问题

电气化形式供暖、炊事电气化、生活热水电气化在替代过程中需要重点关注几个技术问题:

第一要开发适合各气候区、各类负荷特征的高效空气源热泵。

第二需要解决能源价格调整的问题。当前大部分地区执行的商业气、电价格, 基本可以支撑生活热水和供暖的电气化替代, 但是炊事方面电气化替代的成本比较高, 所以需要进行价格调整。

2.1 热泵供暖存在的问题

热泵是符合建筑电气化发展趋势的高效电热转换设备,是电力—热量转换的最佳方法;它是利用低品位可再生能源实现低碳化供热的有效途径;可灵活的实现电网协同消纳绿电。热泵自身的碳排放强度低,是实现碳中和的关键支撑技术,也是建筑实现零碳的必然选择。热泵供暖在零碳建筑更好的应用和发展存在如下问题:

(1) 由于热泵机组全年运行工况变化范围较大,对热泵机组运行的环境适应性要求较高,如何确保变工况下热泵机组的性能稳定,及提高热泵机组使用寿命有待深入研究。^[15]

(2) 目前热泵及制冷设备的制冷剂(无论 HFC 类,还是混合物制冷剂),其性能均有待进一步提高。

2.2 炊事电气化存在的问题

受现有建筑物用电条件制约、受烹饪习惯制约、受价格导向制约等原因,城镇家庭厨房用能电气化推行难度很大;而且电磁厨房改造将带动用电量增加,部分区域电网短期内可能不具备接入条件,电网建设改造压力大。

2.3 生活热水电气化存在的问题

经济性和舒适性是居民选择热水器产品时首要考虑的两个因素。太阳能热水和空气源热泵热水在运行能耗及费用上优势明显,但空气源热泵热水器价格要高于其他类型热水器^[11]。受“不坏不换”理念制约,燃气热水器用户不会因为超过了寿命期或者为了节能减排而主动更换新的热水器,因此会给燃气热水器的电气化替代带来一定的难度^[1]。同时,天然气和电的价格差异也是生活热水电气化阻碍的一大原因。

3 未来技术展望

研究表明,零碳建筑供暖、炊事、生活热水电气化均有成熟的产品,但当前北方地区的风电和光伏装机容量远不能满足电气化形式供暖所带来的耗电量,且目前各城市执行的气、电价格很难推动全面电气化改革。未来要进行建筑电气化改革还有很多问题需要解决。主要如下:

(1) 不同气候区冷热需求不同,热泵类型也不同,开发适合各气候区、各类负荷特征的高效空气源热泵成为下一步推进建筑电气化很重要的一环。

(2) 对于建筑中的炊事用燃气,电气化替代、相应的电气化炊具等也已日渐得到开发应用,全电厨房、全电建筑等正得到越来越多示范推广;进一步地,仍需要开发适应全面电气化需求的各类电器设备,以便为建筑能源系统的全面电气化提供支撑。

(3) 生活热水电气化应从强制性政策法规、设备购置补贴等方面推动替代燃气热水器。

(4) 鼓励利用可再生能源电力满足建筑供暖、炊事、热水等用能需求,才是提高建筑电气化率的真正途径。

参 考 文 献

- [1] 王瑰晴. 北京市城镇家庭厨房用能电气化推广难点和建议 [J]. 环境与生活, 2021, 164 (10): 70-72.
- [2] 刘晓华, 张涛, 刘效辰, 等. 面向双碳目标的建筑能源系统再认识 [J]. 力学学报, 2023, 55 (3): 699-709.
- [3] 吴聪, 陈志光, 秦朝葵, 等. 北方地区电气化形式供暖的挑战及其影响 [J]. 煤气与热力, 2022, 42 (11): 1-8. DOI: 10.13608/j.cnki.1000-4416.2022.11.015.
- [4] 清华大学建筑节能中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2021 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2021: 38-39.
- [5] 北京绿色金融与可持续发展研究院, 高瓴产业与创新研究院. 迈向 2060 碳中和—聚焦脱碳之路上的机遇和挑战 [R]. 北京: 北京绿色金融与可持续发展研究院, 2021: 3.
- [6] 龙惟定, 梁浩. 我国城市建筑碳达峰与碳中和路径探讨 [J]. 暖通空调, 2021, 51 (4): 1-17.
- [7] 陈梦冰. 厨房电气化改造工程浅谈 [J]. 农村电工, 2017, 25 (8): 5-6. DOI: 10.16642/j.cnki.ncdg.2017.08.005.
- [8] 杨金川. 公共建筑中(燃气)厨房电气设计中的规范问题分析 [J]. 四川建筑, 2022, 42 (5): 65-67.
- [9] 国家信息中心《全国居民消费意向调查》课题组. 中国热水器市场需求现状调查 [J]. 电器制造商, 2001 (3): 28-29.
- [10] 林波荣. 建筑行业碳中和挑战和实现路径探讨 [J]. 可持续发展经济导刊, 2021, 22 (Z1): 23-25.
- [11] 王珊珊, 丁洪涛, 刘幼农. 生活热水电气化发展现状及对策研究 [J]. 建设科技, 2022, 462 (19): 23-26. DOI: 10.16116/j.cnki.jskj.2022.19.005.
- [12] 中华人民共和国住房和城乡建设部、国家市场监督管理总局联合发布. 建筑碳排放计算标准: GB/T 51366-2019 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [13] 生态环境部办公厅. 关于做好 2023—2025 年发电行业企业温室气体排放报告管理有关工作的通知: 环办气候函 [2023] 43 号. 2023-02-07. 000014672/2023-00030.
- [14] 张时聪, 王珂, 杨芯岩, 等. 低碳、近零碳、零碳居住建筑碳排放控制指标研究 [J]. 建筑科学, 2023, 39 (2): 11-19, 57. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2023.02.02.
- [15] 张建国. “碳中和”目标下, 热泵供热技术前景展望 [J]. 中国能源, 2021, 43 (7): 12-18.