

热泵技术在烟草行业碳中和路径中的应用研究

邵振栋, 胡博闻, 刘晓茂

上海烟草集团有限责任公司, 上海

收稿日期: 2025年8月18日; 录用日期: 2025年9月10日; 发布日期: 2025年9月17日

摘要

随着碳中和目标的推进, 烟草行业亟需通过技术创新降低能耗与碳排放。热泵技术作为一种高效节能技术, 在生活热水供应领域具有显著优势。本文通过建立能源模型, 计算对比某卷烟厂浴室热水不同供热技术方案的能耗情况, 分析了热泵技术在烟草行业碳中和路径中的应用潜力。研究表明, 采用二氧化碳热泵机组替代传统蒸汽锅炉, 可降低能源成本约83.1%, 年节约标煤104.05吨, 减少碳排放约276.77吨, 热水单耗下降约48%。热泵技术不仅能够显著提升能源利用效率, 还能为烟草行业实现碳中和目标提供可行路径。

关键词

热泵技术, 烟草行业, 能耗, 节能

Research on the Application of Heat Pump Technology in Carbon Neutrality Pathway of Tobacco Industry

Zhendong Shao, Bowen Hu, Xiaomao Liu

Shanghai Tobacco Group Limited Liability Company, Shanghai

Received: Aug. 18th, 2025; accepted: Sep. 10th, 2025; published: Sep. 17th, 2025

Abstract

As the carbon neutrality goal progresses, the tobacco industry urgently needs to reduce energy consumption and carbon emissions through technological innovation. Heat pump technology has significant advantages in the field of domestic hot water supply as an efficient and energy-saving technology. This paper established an energy model to calculate and compare the energy consumption of different heating technology schemes for hot water supply in the bathrooms of a cigarette factory,

and analyzed the application potential of heat pump technology in the tobacco industry's carbon neutrality pathway. The study indicated that energy cost was reduced by approximately 83.1%, 104.05 t of standard coal was saved annually, and 276.77 tons carbon emissions was reduced approximately by replacing traditional steam boilers with carbon dioxide heat pump units, so hot water consumption per unit was decreased by approximately 48%. Heat pump technology not only improves energy utilization efficiency significantly, but also provides a feasible pathway for the tobacco industry to achieve its carbon neutrality goals.

Keywords

Heat Pump Technology, Tobacco Industry, Energy Consumption, Energy Saving

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在双碳背景下，构建新型能源体系是我国实现碳中和的战略需求。传统能源转换的路径是“燃料—热量—电”，即“热变电”，而化石燃料燃烧是最大的碳排放源，为了落实双碳目标，将电能转换为热或者直接做功，即“电变热”是未来能源应用领域的发展趋势[1]。热泵是一种高效的能源转换设备，通过电能实现环境热能和工业余热的回收并提供热能，可以大大消减能耗和相关的二氧化碳排放，契合终端用能电气化发展的需求，被认为是 21 世纪全球最具价值的节能减碳技术之一[2]，是目前研究的热点。

烟草行业作为高能耗产业之一，其生产过程中的蒸汽、热水供应系统能耗占比显著，热力系统的节能降碳是烟草行业实现碳中和的关键环节[3]。热泵技术是通过消耗能源做功，把处在较低温度下的热量提升到较高的温度水平下释放出来，以满足热量的使用要求，是用热领域实现零碳的最好技术路径[4]。在众多热泵技术中，空气源热泵以室外空气为热源(或热汇)，最具有普适性的热泵形式，对于存在大量低位热源的烟草制造业来说更为适用，可用于提供生活热水、工艺供热等。本文建立能源模型分析某卷烟厂热水系统不同供热方案的能耗和节能潜力，探讨热泵技术在烟草行业碳中和中的应用。

2. 热泵技术应用现状分析

热泵可以通过电力驱动，从低温热源中提取热能，在较高温度下释放，对工业节能减碳有重要意义。我国在分布式能源领域和供热领域有明确的发展机遇和清晰的发展路径[5]，不仅可提高电力系统消纳可再生能源的比例，还助力供热行业提高能效和低碳转型。根据中国统计年鉴，分析了中国 19 个典型用热工业部门的节能减碳潜力[6]，如图 1 所示，19 个部门采用热泵累计年节能量为 51.12 亿 GJ，2022 年我国非化石能源发电量占比已达到 34%以上，在这种情境下，年减碳量约为 3.261 亿吨二氧化碳，随着可再生能源的发展，电力的碳排放因子将进一步降低，热泵的减碳潜力更巨大。

全球热泵市场正在持续增长，热泵满足着全球将近 5%的供热需求[2]。国际能源署(IEA)在 2023 年的报告中预测，到 2024 年全球热泵安装量可能突破 2 亿台(包括家庭和商业用途)，其中家庭用户占比约 80%~85%，即约 1.6 亿~1.7 亿户家庭在使用热泵。欧洲热泵协会(EHPA)数据显示，仅欧洲 2023 年热泵存量已超 2000 万台，2024 年可能增长至 2500 万台(占全球约 15%)。在德国等国家，新建建筑中热泵供热面积已持续超过燃气供热面积，其中，其中空气源热泵的销量较高。根据国际能源署预测，到 2050 年全球实现“净零”排放情景下，到 2030 年、2050 年热泵占供暖需求的份额将分别达 20%、55%，安装的

热泵数量将分别达 6 亿台、18 亿台。我国热泵产业发展规模和应用面积位居世界首位，尤其是空气源热泵市场应用规模已超过全球的一半。据中国节能协会数据统计，中国热泵产品年产量大致占到全球的 60% 以上。

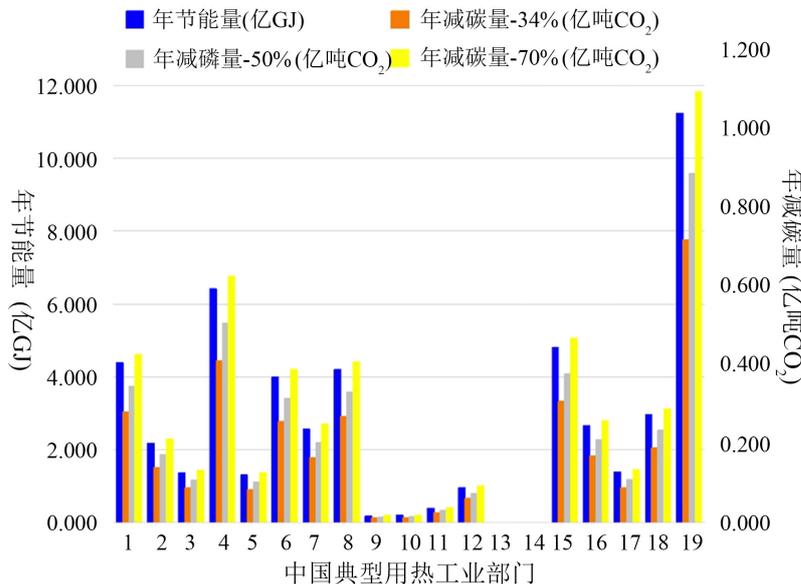


Figure 1. Analysis of energy saving and carbon reduction of heat pumps in typical heat-using industrial sectors in China
图 1. 中国典型用热工业部门的热泵节能减碳分析

采用更为高效的创新热交换器技术，如微通道热交换器，可以大幅度地减少热能的损失，范围在 10% 至 15% 之间，这将大大提高系统在各种环境条件下的表现。另外环境温度对于热泵装置 COP (性能系数) 也同样不可忽略。在冬季寒冷的天气中，热泵装置的 COP 会显著下降，而在夏季高温时则有所提高。所以，对于低温环境下的热泵装置进行优化设计，如使用强化型热交换器或者变频调节技术等，能够有效降低环境温度对于 COP 带来的负面影响，从而提高设备整体性能这就决定了在对热泵装置进行设计与选择的时候，必须要对它在具体环境情况下的运行特点进行深入的思考，与此同时，在对装置进行运行的时候也需要执行有效的控制策略与维护措施来保证热交换器可以高效地运行。

3. 基于能源模型的供热方案分析

本文基于热力学分析方法，对某卷烟厂职工浴室生活热水供应系统采用不同供热方案进行建模，通过计算分析不同供热方式对系统能耗的影响。目前选用三种经典的供热技术方案，分别是天然气蒸汽锅炉供热技术、热泵机组供热技术及电蒸汽锅炉供热技术。通过计算分析不同方案下供热系统的能耗及经济效益，以此评估热泵技术在碳中和技术路径中的作用。

3.1. 案例背景介绍

某卷烟厂现职工浴室生活热水系统原热源为蒸汽，由于浴室热水为非生产用汽，其使用带来的瞬时流量高负荷和厂休日使用率较低的情况均会给日常生产供汽带来一定运行隐患及降低用能能效。浴室配置 2 个 35 t 敞开水箱，一共 200 个淋浴头，满足洗浴人数约为 700 人、洗浴时间约 4 小时的用水需求，热水入口温度为 20℃，出口温度为 65℃。设计热负荷分别采用人均热水定额计算法、浴室器具热水定额计算法[6]及逐时蒸汽耗量计算，其中，在计算蒸汽耗量时，采用冬季最冷月(1 月)逐日蒸汽消耗量

记录数据计算。

浴室设计热负荷计算结果如表 1 所示。为保障所需洗浴热水的使用稳定性，本案设计中选取日耗热量最大的计算方案作为负荷设计依据。根据计算，最高日生活热水热负荷为：

$$Q = 24200000 \text{ KJ}/3600 = 6722 \text{ kWh}$$

Table 1. Bathroom design heat load results

表 1. 浴室设计热负荷结果

序号	计算方法	设计小时耗热量 Q_h (GJ/h)	日耗热量 Q_d (GJ/d)	设计日热水量 Q_{rd} (m ³ /d)
1	人均热水定额计算	3.88	13.6	48.0
2	浴室器具热水定额计算	5.76	20.2	71
3	逐时蒸汽耗量计算	6.92	24.2	85

3.2. 不同技术方案分析

天然气蒸汽锅炉、电蒸汽锅炉供热技术都是传统的热热水供热方法。采用天然气蒸汽锅炉供热技术时，系统能量来自天然气，其碳排放因子较高，且系统能耗损失较大：(1) 长距离蒸汽输送，存在热量输送损失及泄漏损失；(2) 现用的蒸汽 - 水换热器，换热效率低，且散热严重；(3) 锅炉综合运行角度出发，浴室热水为非生产用汽，其使用带来的瞬时流量高负荷和厂休日使用率较低的情况均会给日常生产供汽带来一定运行隐患及降低用能能效。

采用电蒸汽锅炉供热时，系统能量来源于电，但电热转化率低，一般能耗比仅为 0.8 左右，造成能源浪费，运行成本增加。相比之下，空气源热泵驱动能源仍然为电能，但空气源热泵能耗比 >1，因此，具有良好的电热转化效率。

采用二氧化碳热泵机组代替原系统中蒸汽加热供应浴室热水，其供热工作原理示意图如图 2 所示，室外的空气作为热源，进入热泵机组蒸发器后实现降温，同时使用侧热水进入冷凝器后实现升温，如此往复循环，系统不断吸收空气中的热量，并不断传递给使用侧热水，达到供热目的。

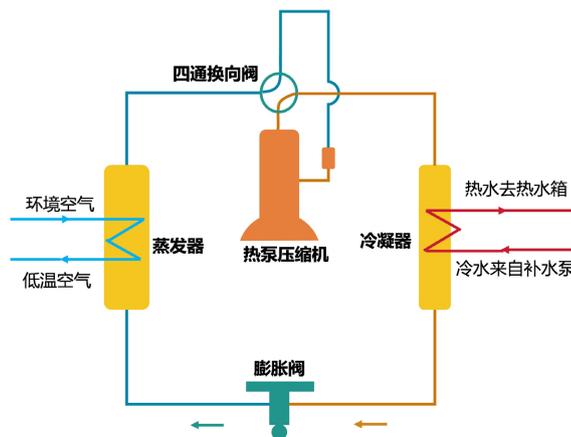


Figure 2. Schematic diagram of carbon dioxide heat pump heating principle

图 2. 二氧化碳热泵供热原理示意图

在本文中，根据计算的热负荷，方案中采用 4 台一次加热式二氧化碳热泵热水机组，低温工况单台制热功率为 180 kW，保证在冬季低温工况下总制热功率为 720 kW，满足日常所需。

3.3. 结果分析

(1) 计算边界条件设置

本文根据应用案例生活用水情况进行热负荷的计算, 计算结果如表 1 所示, 因此热负荷设计为 6722 kWh/天, 热水量为 85 t/天。采用天然气锅炉时, 天然气热值取 33.5 MJ/m³, 锅炉效率为 90%; 采用电蒸汽锅炉时, 锅炉效率为 95%; 采用热泵是性能系数(COP)设置为 3.5。饱和蒸汽参数根据《工程常用物质的热物理性质手册 - 张家荣赵廷元》取值: 压力 0.37 MPa, 温度 140.84℃, 汽化潜热 2142 kJ/kg。根据《综合能耗计算通则》(GB/T 2589-2020), 能耗折标系数取 29.3076 MJ/kgce, 根据上海市工商业用户谷时电价情况, 电价暂按 0.3482 元/kWh, 运行时间按一年 200 天。

单耗计算公式为:

$$e = \frac{Q}{m}$$

e : 单位质量热水的能耗, 即单耗, 单位为 kgce/t;

Q : 设计热负荷下热水总能耗, 单位为 kgce/天;

m : 设计热负荷下产生的热水量, 单位为 t/天。

(2) 能耗分析

对三种不同供热方案下的能耗进行计算分析, 由于三种方案中所用能源种类不同, 为了方便对比分析, 能耗单位统一折算为标准煤进行比较, 计算结果如图 3 所示。从图中可以看出, 三种不同供热方案中, 采用天然气锅炉单耗最高, 1 t 热水需要消耗标准煤 12.53 kg, 采用电蒸汽锅炉单耗次之, 而采用热泵机组单耗最低, 即 1 t 热水需要消耗标准煤 6.41 kgce, 相较于传统的燃气锅炉供热方案, 单耗下降 48%。年能耗。进一步分析年能耗情况可以看出, 采用天然气锅炉是总能耗为 213.02 tce/a, 采用热泵机组时能耗为 108.97 tce/a, 因此, 采用热泵机组一年可节省标准煤 104.05 tce 大大降低了能源消耗量。

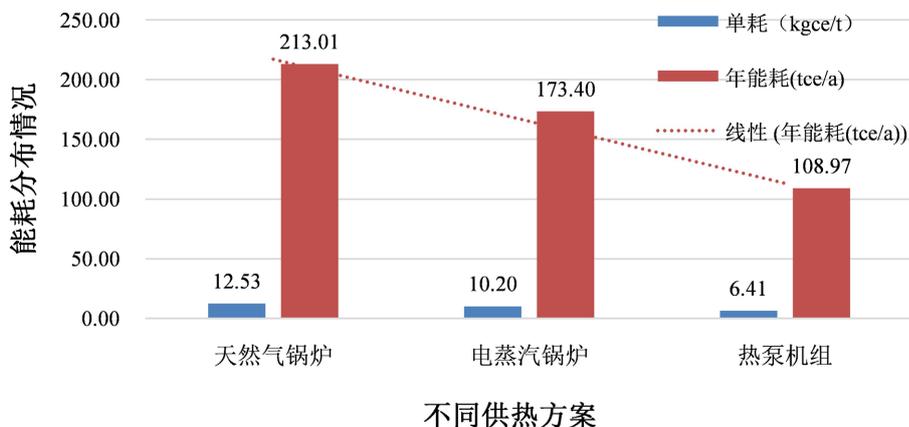


Figure 3. Analysis of energy consumption under different heating scenarios

图 3. 不同供热方案下能耗分析

(3) 经济效益分析

对采用三种不同方案时的热水能源成本进行计算来分析其经济效益。通过图 4 可以看出, 采用天然气锅炉时能源成本最高, 采用电蒸汽锅炉时次之, 采用热泵机组最低, 用热泵热水机组生产热水比采用蒸汽加热少 35.57 元/t, 热泵热水机组的年运行成本远低于蒸汽加热, 全年热水的能源成本可节省约 65.47 万元, 节能能源成本约 83.1%, 能源成本可大幅下降。

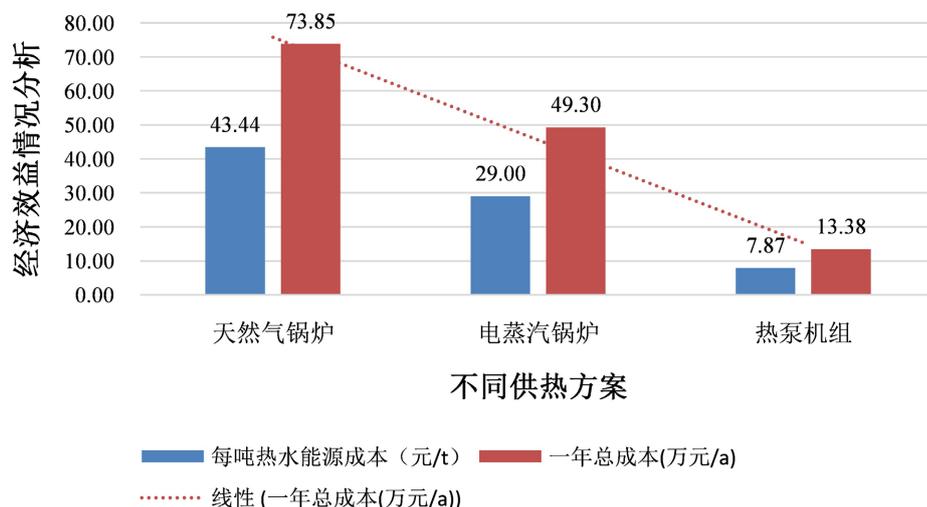


Figure 4. Analysis of energy consumption under different heating scenarios
图 4. 不同供热方案下经济效益分析

通过以上分析可以看出，相比较传统的天然气锅炉、电蒸汽锅炉等供热方式，采用热泵机组供热能耗及能源成本都有明显地下降。对比天然气锅炉供汽供热，采用热泵机组每年热水的标准煤耗可下降约 104.05 tce，根据中国国家发改委和生态环境部的碳排放折标系数 2.68 tCO₂/tce，相当于一年减少碳排放约 276.77 吨，每吨热水单耗下降约 48%，实现工厂节能降碳。对比分析表明，热泵技术不仅能够显著提升能源利用效率，还能为烟草行业实现碳中和目标提供可行路径。同时，在热水项目中相较于利用空气源热泵替代燃气设备及电加热设备作为供热设备，在运行管理、车间环境、环保要求、防爆、运行成本等方面均有优势。

3.4. 热泵技术应用面临的挑战

热泵技术在烟草行业的应用前景广阔，可以拓展多个应用场景，如可推广到工艺烘干、热水系统、空调系统等，还可以结合物联网技术实现负荷动态调节以提升能效等，实现节能减碳的重要技术之一。但热泵技术也存在一些问题和挑战，热泵的推广还需要解决技术成熟度和经济性问题，尽管热泵的运营成本低，但热泵的初始投资通常较高，在应用推广中影响投资意愿，需要探索新的能源积极模式；热泵业的快速发展可能导致专业技术人员的短缺，同时热泵技术的整合及其在能源转型中的广泛应用需要跨学科的协同，急需培养更多的跨学科专业人才；中国幅员辽阔和经济发展水平存在差异也制约热泵技术的推广，如热泵装置在各种环境情况下其性能呈现显著差异，常规热交换器在严寒天气下热能损失较多，从而使设备整体性能降低，因此需要制定因地制宜的热泵推广策略。

4. 结论

热泵技术通过高效节能和低碳排放特性，为烟草行业碳中和提供了切实可行的技术路径。本文通过对某卷烟厂生活热水不同供热方案下能耗及能源成本，探讨适用于烟草行业节能降碳的碳中和技术路径。结果表明，采用二氧化碳热泵机组替代传统蒸汽锅炉，可降低能源成本约 83.1%，年节约标煤 104.05 吨，减少碳排放约 276.77 吨，热水单耗下降约 48%。该技术可显著降低能源成本和碳排放，且具备良好的扩展性，当然也存在一些亟待解决的问题，未来随着技术迭代和政策支持，热泵技术有望成为烟草行业能源转型的核心解决方案之一。

参考文献

- [1] 中国节能协会热泵专业委员会. 工业热泵发展白皮书[EB/OL]. <https://www.ditan.com/static/upload/file/20240329/1711683673178098.pdf>, 2025-07-30.
- [2] 杨良就. “碳中和”目标下的欧洲热泵政策[J]. 上海节能, 2022(9): 1165-1171.
- [3] 张占佳. 烟草行业的节能减排研究及设计[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2012.
- [4] 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.
- [5] 段洁仪. 热泵助力能源低碳转型的机遇与路径[J]. 可持续发展经济导刊, 2024(8): 16-18.
- [6] 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. 建筑给水排水设计标准(GB 50015-2019) [S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.