

Views & Comments

热泵在中国实现 2060 年碳中和目标中的作用被低估

闫鸿志^a, 张川^{b,c}, 邵昭^a, Markus Kraft^d, 王如竹^a^a *Institution of Refrigeration and Cryogenics, MOE Engineering Research Center of Solar Energy, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China*^b *Institute of Energy, 5 Yiheyuan Road, Peking University, Beijing 100871, China*^c *Andlinger Center for Energy and the Environment, 86 Olden Street, Princeton University, Princeton, NJ 08544, United States*^d *Department of Chemical Engineering and Biotechnology, University of Cambridge, Philippa Fawcett Drive, Cambridge CB3 0AS, United Kingdom*

1. 供热低碳化对中国 2060 年碳中和至关重要

我国目前的能源结构仍以煤炭等化石能源为主, 实现 2060 年碳中和面临着许多严峻挑战。供热低碳化是实现碳中和目标的重要部分, 应为之配备切实有效的清洁化供热替代方案与策略。如图 1 (a) 所示, 目前建筑和工业部门的能源需求在终端能源需求中的占比超过 70% [1]。在建筑部门, 供暖需求占能源需求的 50% [2], 而在工业部门, 工艺用热则占据了 50%~70% 的能源需求 [3]; 如图 1 (b) [3] 所示, 建筑部门的供暖需求通常要求温度低于 80 °C; 在不同的工业部门, 包括但不限于蒸馏、干燥、染色等, 在各种温度下都存在加热需求, 主要集中在 170 °C 以下, 平均约 40% 的工业热耗在 150 °C 以下 [4]。

因此, 如图 1 (c) 所示, 可以初步计算出 2020 年我国热能需求超过 42.7 EJ (Exajoule, 等于 10^{18} J), 这占到了我国终端能源需求的 41%; 如果将小于 150 °C 的热需求定义为中低温热需求, 则其总计超过 24.2 EJ, 占 2020 年中国终端能源需求的 23% 以上。此外, 如图 1 (d) [1] 所示, 对于建筑部门, 2020 年的终端能源需求为 23.7 EJ [5], 到 2060 年将增加到 33.6 EJ [1], 而大多数热需求的温度低于 100 °C。

虽然预计 2060 年工业终端耗能会低于 2020 年, 但以欧盟工业供热需求为例, 目前平均 41.75% 的工业过程供热温度在 150 °C 以下, 而英国等国家由于产业结构优化, 这一比例较高, 为 53.5% [4]。随着我国产业结构升级和结构调整, 预计中低温热耗在工业部门的比重将进一步提高。这些信息提示我们, 应该更多地关注中低温需求, 特别是在工业部门, 这部分通常被视为需要更高温度, 而难以降低碳排放 [6]。基于燃煤的区域供暖和基于煤/燃气的锅炉分别作为建筑供暖和工业供暖的主流解决方案 [7], 两者都是高碳排放的供热方案。考虑到中低温需求比例较大, 直接电加热可能无法满足这些热量需求, 而热泵可能是在技术性和经济性上都更为可行的解决方案, 因为压缩式热泵可以在利用电能的同时, 成倍地吸收余热和环境热量, 实现热能品位的提升和扩容。

2. 热泵研究与应用的综述和展望

在各种低碳供热技术中 [8–10], 基于逆卡诺循环的热泵在技术上已经相对成熟, 已有 200 多年的历史。如图 2 (a) 所示, 结合清洁电力和“免费”热源 (如环境空气、地下热源、废热通量), 热泵在运行期间几乎没有排放。性能系数 (COP) 是评价热泵设备性能的常用指标, 它是

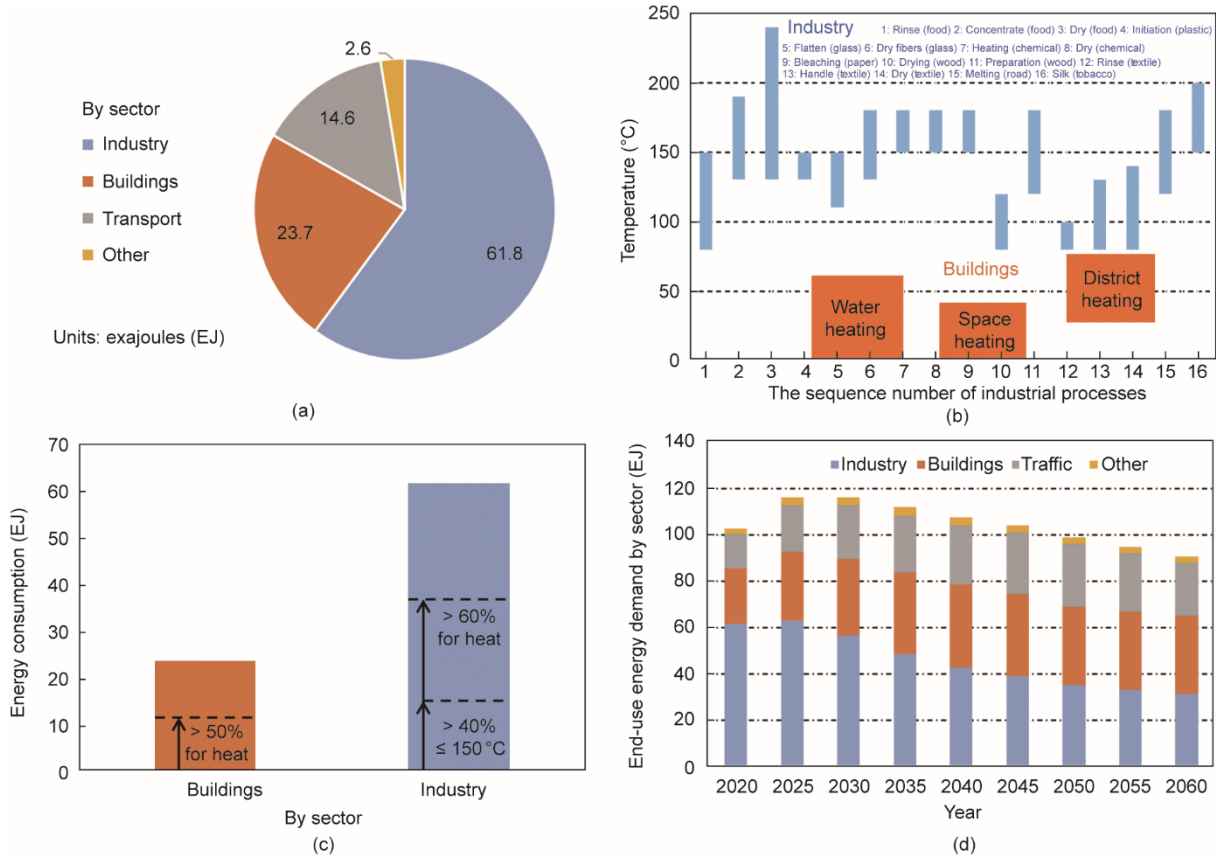


图1. 中国终端能源需求统计。(a) 2020年中国终端能源需求[1]; (b) 建筑和工业用热温度范围[3]; (c) 与热有关的最终用途能源需求; (d) 中国终端能源需求预测[1]。

供热量与耗电量（这里指压缩式热泵）的比值。COP越高，热泵的单位供热能耗越低，因此运营成本越低。值得一提的是，由于吸纳了低温热源的“免费”热量，热泵的COP始终大于1。因此，与其他供暖解决方案相比，热泵技术相对更为节能。

如图2 (b) 所示，目前已有的工业热泵可以提供高达168 °C的温度[11–13]，制热量可达到18 MW [14]。在这个性能范围内，撇开技术经济问题不谈，热泵可以满足几乎所有的建筑用热需求，以及40%的工业过程用热需求[3]。就具体的应用场景而言，热泵可以在如下领域发挥作用：

(1) 在建筑部门的热需求中，考虑到空气是最容易获得的热源，许多场景下可考虑直接采用空气源热泵。空间地域性能分析表明，用于建筑供热的空气源热泵COP较高，在青岛地区其季节平均COP可达3.2，在上海季节平均COP可达3.5 [15]。对于严寒地区（最冷月平均温度低于-10 °C）[16]，单级空气源热泵可能会出现效率低和结霜的问题[17]，需要对循环形式进一步优化[18–19]：例如，采用补气增焓技术[20]，在环境温度低至-15 °C时，空气源热泵的COP可以达到2.7以上。可进一步考虑采用地源

热泵[21]，以获得更高的能效（地源热泵的季节平均COP在青岛地区可达4.32，在上海地区可达4.79 [15]），前提是有足够的地热资源和空间[22]。此外，大型热泵与火电厂或工业余热相结合，可以获得更好的性能。一个经过验证的案例是用于回收钢铁厂余热的离心式热泵系统，可实现180 000 m²的区域供暖并达到6.67的COP [23]。以上案例有些类似第四代区域供热概念[24]，即结合可用的可再生能源和余热资源，形成基于非化石能源的区域供热模式[25]。

(2) 针对工业用热部门，由于各工艺流程对温度要求较高，常采用工业余热作为热源。以120 °C供热的余热型热泵为例，基于90 °C工业余热时，其可实现约5.7~6.5的COP [14,26]；基于50 °C工业余热时，其可实现约2.2~2.8的COP [11,27]。此外，通过多级压缩和吸收循环[28]可以将热泵供热温度提高到180 °C以上。近年来空气源热泵锅炉的研究进展也表明，即使只利用环境空气作为热源，热泵也可以作为可行的工业供热解决方案。已经证实的案例显示，基于空气源热泵和水蒸气压缩系统耦合的空气源热泵锅炉在-18 °C环境温度下可产生120 °C蒸汽，COP超过1.3，在35 °C环境温度下COP可达2.1 [29]。如果采用地

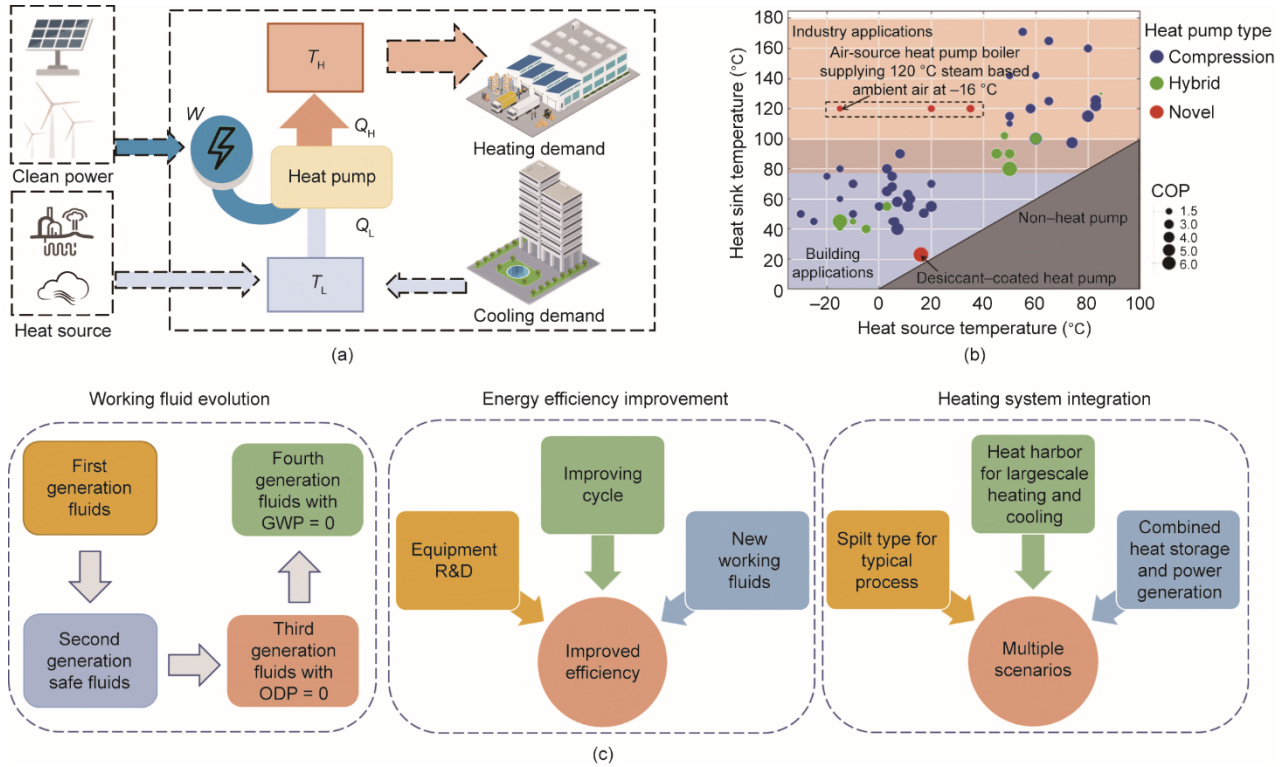


图2. 热泵研究与应用综述和展望。(a) 热泵工作原理, 其中, Q_H 为传递到高温散热器的热量 (T_H), Q_L 为低温热源收集的热量 (T_L), W 为输入功率; (b) 热泵在不同设置下的性能总结; (c) 热泵的发展方向。COP: 性能系数; ODP: 臭氧消耗潜力; GWP: 全球变暖潜势; R&D: 研究和开发。

热能作为热源, 其性能可以进一步提高。这些案例也说明了热泵在工业供热领域的巨大潜力。

综上所述, 目前的热泵已经能够满足各种供暖需求。此外, 根据文献回顾和专业判断, 热泵的研发可进一步在以下方面攻关, 以获得更好的性能和更广泛的应用[图2(c)]。

第一点是低GWP制冷剂(从合成制冷剂到天然工质)的工质替代和应用。目前已经有合成的低GWP制冷剂, 如R1234yf[30]、R1234ze(E)[31]、R1233zd(E)[32], 可以使热泵满足建筑供暖需求和工业供暖需求。近年来, 天然工质[33](如水[34]、氨[35]、碳氢化合物[36]和二氧化碳[37])因其在某些应用场景(如高温加热[11,14]和建筑部门的冷热协同管理[38])的优异性能优势而备受关注。尽管这些天然工质给设备制造带来了一些困难, 但其效率和绝对环保的优势是显而易见的, 也是值得的[39]。

第二点是高效核心组件(如压缩机[40]和换热器[41])、材料(主要是工质和耐热附件)和循环形式的优化[42]。可规模化稳定应用的离心式压缩机将是重要的突破方向[43]。

第三点是将热泵集成到不同的能源系统中。热泵具有加热和冷却的双重作用。第5代区域供热-制冷模式(5GDHC)的最新进展表明, 热泵可以作为区域供热和制

冷需求的能量枢纽[44–46]。在这种情况下, 将热存储系统并入能量网络可以获得更稳定的输出[47]。目前, 欧洲已经存在一些已验证的5GDHC案例, 其季节COP可以达到4以上, 甚至高达6[48], 表明该概念是可行和值得的。然而, 英国的一个验证案例表明, 逐步用热泵替代燃气锅炉时, 在优化泵送控制和温度控制方面存在一些困难[49], 需要进一步优化需求侧的匹配。因此, 考虑到5GDHC所具备的巨大优势和挑战, 我国的相应实践应遵循“自上而下”的统筹设计原则, 尤其是面向大规模的行业和社区[50]。例如, 据估计, 中国数据中心和5G基站的功耗将超过 6×10^{11} kW·h[51], 冷却需求超过7 GJ, 可进一步满足中国北方至少15%的供暖需求, 应充分考虑这一潜力, 并为之配备长期合理的冷热协同管理。此外, 工业过程具有不同温度范围的供热需求[52], 对于具有不同产业集群的工业园区而言尤为如此[53]。在工业园区中, 可以探索热泵与太阳能等其他热源耦合的优点, 实现灵活高效的供热和制冷。同时, 热泵也可以集成到卡诺电池, 用于热电的双向传递[54]。在这种情况下, 热泵可以泵送热量实现温度提升和容量扩大, 促进电力成本降低[55]。总之, 考虑到巨大的供热市场和多样化的供热需求, 我国需要广泛借鉴国际经验, 在不同的场景下使用合适的热泵系统, 切实可行地促进低碳供热发展。

3. 热泵在我国碳减排潜力评估

热泵本质上依托于电力的供热，其能否有效实现低碳供热，本质上取决于电力的清洁性和其自身的效率。就电网碳排放强度而言，其将在2030年达到最高，然后随着可再生电力份额的增加逐渐接近零碳排放[56]。目前，我国电力全生命周期的GHG排放强度仍然相对较高，可达 $717 \text{ g CO}_2 \text{ eq.} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ [57]（直接 CO_2 排放强度约为每千瓦时 589 g [58]），如图3（a）[58]所示，在这种情况下，当热泵COP为3.5时，其等效的碳排放强度就已经小于燃气锅炉；南方温暖气候条件的空气源热泵、地源热泵和余热型高温热泵都可以达到这样的性能系数。随着电网的逐步减碳，2030年后，当热泵COP大于2时，热泵供热的排放强度将低于天然气；此时，基于极端工况设计的空气源热泵锅炉也可以具备可观的清洁效益，更不必说其他多热源集成的工业型热泵了。

在高度清洁化的电力排放情景下（由于2060年时间跨度较大，本文对中国电力生命周期GHG排放强度采用保守估算，即采用 $100 \text{ g CO}_2 \text{ eq.} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$ 作为标准，这样的排放标准已经远高于大多数可再生能源电力[59]），热泵也将释放巨大的碳减排潜力。

然而，目前热泵在这两个部门的市场份额仍然很低（建筑部门低于6%，工业部门甚至更低[57]）。因此，需要进一步提高热泵的市场份额，以实现更好的碳减排效果。为了量化热泵的温室气体减排潜力，我们分析了三种不同的情景[图3（b）]。在这些情景中，热泵在建筑和工业供暖市场中的份额从2020年到2060年不断增加，最终将分别达到最大理论市场份额的30%、60%和90%。换言之，热泵供热在建筑和工业中的比例将分别占两个行业总供热用能的90%（即 $90\% \times 100\%$ ，这里估计热泵能满足建筑100%的需求）和36%（即 $90\% \times 40\%$ ，这里估计热泵能

满足工业40%的供热需求）。通过将数据与电网排放预测数据相结合，可以量化热泵的温室气体减排潜力。虽然在这些情景中，2030年时的碳减排量差距不大，但随着时间的推移，不同推广策略所引起的碳减排差距将进一步扩大。到2060年，三种情景之间的差距将超过 $700 \text{ Mt CO}_2 \text{ eq.}$ 。假设未来热泵市场份额不太乐观，则在热泵渗透率分别为60%和30%的情况下，总体的碳减排潜力将降低至 $1400 \text{ Mt CO}_2 \text{ eq.}$ 和 $700 \text{ Mt CO}_2 \text{ eq.}$ 。而在方案Ⅲ中，建筑供暖和工业供暖的2060碳排放抵消潜力将分别达到 $1470 \text{ Mt CO}_2 \text{ eq.}$ 和 $635 \text{ Mt CO}_2 \text{ eq.}$ ，总体碳减排潜力超过我国目前二氧化碳排放量的20%以上。

4. 展望

尽管热泵具备明显的碳减排优势和长期的碳减排潜力，但目前热泵的市场份额仍然很低，这既有技术经济层面的原因，也有社会政策因素。关于技术经济问题，热泵的初始投资通常是其他供热设施的数倍，高昂的初始投资导致投资回收期长。在社会政策问题上，目前电力侧的减排所受到的关注，远超过供热设施的电气化，而热泵的最新进展尚未完全纳入碳减排途径研究中。对于建筑部门的供暖，热泵在许多情况下与其他供暖方法（如煤、天然气和电锅炉）相比具有相当甚至更低的成本[60–62]，我们之前的研究表明，即使是空气源热泵锅炉（仅使用环境空气作为热源，产生 $120 \text{ }^\circ\text{C}$ 蒸汽，平均COP约为1.7），在中国东南地区，考虑到15年的长寿命，其总成本也比天然气供暖低[63]，更不用说基于余热回收的工业热泵[12, 32]。通过进一步的产学研交融与规模化生产，热泵的经济优势将通过成本降低、效率提升等方面进一步增强。在社会政策问题上，目前人们更多关注的是电力减碳，而不是供热设施的电气化。热泵的最新进展尚未完全纳入许多

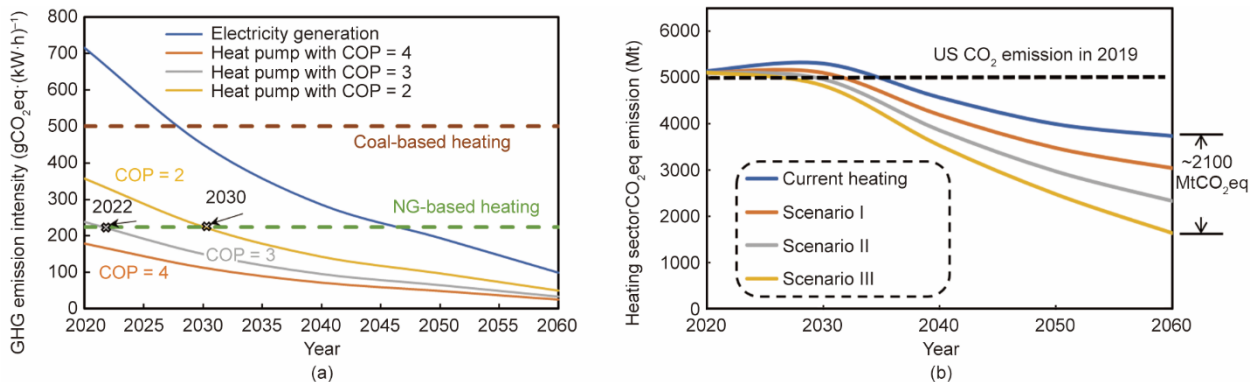


图3. 从现在到2060年基于热泵的排放强度预测以及相应的二氧化碳当量减排潜力。脱碳潜力基于三种情景，到2060年，热泵比例分别增加到30%、60%和90%。(a) 基于热泵的排放强度预测[58]；(b) 热泵的二氧化碳当量排放潜力。NG：天然气。

气候变化路径研究中。尽管热泵已被视为潜在的住宅供暖设施[64]，但在许多情况下，它们被视为独立供暖设施，工业用热泵仅在某些特定场景中被视为辅助设备[6]。

应当充分认识到，供热设施的运行寿命通常设计为15年甚至20年，因此需要把握好2060年的碳中和节点前仅有的几次供热设备更换窗口期，进一步推进热泵的使用。对热泵安装的低估将导致未来供热结构中热泵的比重被低估，从而可能在短期内错过通过电气化容易实现的目标，在长期内无法启动必要的产业学习曲线。在碳中和的未来，更高比例的可再生能源和更大比例的电气化将是两个典型特征。显然需要将研发和政策关注点[65]从供应侧的太阳能/风能[66–67]转移到需求侧的热泵。鉴于热泵有可能带来的巨大的碳减排潜力，迫切需要一个明确的以热泵为导向的发展路线图。我国幅员辽阔，自然条件复杂，经济发展水平各异，需要因地制宜地制定热泵推广策略。原则上余热可用的情况下尽量采用余热热泵。缺乏余热资源时可采用自然热源（水源、地源、空气源）热泵，例如，空气源热泵蒸汽锅炉可以实现100℃以上的热能品位提升，实现1.5~2.0的COP供热系数。就地域推广策略而言，我国东部沿海地区和南部地区占据了超过70%以上的工业产值，考虑到其气候温暖，且天然气价格相对较高，以空气源热泵锅炉为代表的技术路线[63]可以在这些地区率先推广。这些试点示范项目可以进一步促进热泵规模化生产流程，从而降低热泵投资成本。

总结而言，为促成热泵巨大的碳减排潜力，需要进一步提高技术水平，并配备持续合理的政策激励。考虑到客户对产品可靠性和经济优先的核心需求、企业对盈利的需求，以及政策制定者对碳中和目标和社会综合效益的追求，热泵的推广需要政府、制造商、研究者和用户等群体的协同努力。本研究团队希望让热泵从被严重低估的角色转变为受到关注，进一步为我国达成2060年碳中和目标发挥重要作用。

致谢

本研究得到国家自然科学基金重点项目(5203604)的资助。作者衷心感谢挪威研究委员会和HighEFF(未来节能和竞争性产业中心,FME计划下的一个为期8年的研究中心)用户合作伙伴提供的财政支持。

Authors' contributions

As the leading corresponding author, Ruzhu Wang

proposed the concept and guided the whole research. Ruzhu Wang and Chuan Zhang designed the study and planned the analysis. Hongzhi Yan and Chuan Zhang conducted the data analysis and drafted the paper, they contributed equally in this work. Zhao Shao provided the graphical abstract. All authors offered revision suggestions and contributed to the interpretation of the findings.

Reference

- [1] National Grid Energy Research Institute Co. Ltd. China Energy and Power Development Prospect 2020. Beijing: China Electric Power Press; 2020.
- [2] Zheng X, Wei C, Qin P, Guo J, Yu Y, Song F, et al. Characteristics of residential energy consumption in China: findings from a household survey. *Energy Policy* 2014;75:126–35.
- [3] Jia T, Huang J, Li R, He P, Dai Y. Status and prospect of solar heat for industrial processes in China. *Renew Sustain Energy Rev* 2018;90:475–89.
- [4] Kosmadakis G. Estimating the potential of industrial (high-temperature) heat pumps for exploiting waste heat in EU industries. *Appl Therm Eng* 2019;156:287–98.
- [5] National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook. Beijing: China Statistics Press; 2019.
- [6] Thiel GP, Stark AK. To decarbonize industry, we must decarbonize heat. *Joule* 2021;5(3):531–50.
- [7] Eisenberg R, Gray HB, Crabtree GW. Addressing the challenge of carbon-free energy. *Proc Natl Acad Sci USA* 2019;117(23):12543–9.
- [8] Henry A, Prasher R, Majumdar A. Five thermal energy grand challenges for decarbonization. *Nat Energy* 2020;5(9):635–7.
- [9] De Chalendar JA, Glynn PW, Benson SM. City-scale decarbonization experiments with integrated energy systems. *Energy Environ Sci* 2019;12(5):1695–707.
- [10] Creutzig F, Breyer C, Hilaire J, Minx J, Peters GP, Socolow R. The mutual dependence of negative emission technologies and energy systems. *Energy Environ Sci* 2019;12(6):1805–17.
- [11] Arpagaus C, Bless F, Uhlmann M, Schiffmann J, Bertsch SS. High temperature heat pumps: market overview, state of the art, research status, refrigerants, and application potentials. *Energy* 2018;152:985–1010.
- [12] Schlosser F, Jesper M, Vogelsang J, Walmsley TG, Arpagaus C, Hesselbach J. Large-scale heat pumps: applications, performance, economic feasibility and industrial integration. *Renew Sustain Energy Rev* 2020;133:110219.
- [13] Li X, Zhang Y, Ma X, Deng N, Jin Z, Yu X, et al. Performance analysis of hightemperature water source cascade heat pump using BY3B/BY6 as refrigerants. *Appl Therm Eng* 2019;159:113895.
- [14] Jiang J, Hu B, Wang RZ, Deng N, Cao F, Wang CC. A review and perspective on industry high-temperature heat pumps. *Renew Sustain Energy Rev* 2022;161:112106.
- [15] Su C, Madani H, Palm B. Building heating solutions in China: a spatial technoeconomic and environmental analysis. *Energy Convers Manage* 2019;179:201–18.
- [16] Su C, Madani H, Palm B. Heating solutions for residential buildings in China: current status and future outlook. *Energy Convers Manage* 2018;177:493–510.
- [17] Zhang Y, Ma Q, Li B, Fan X, Fu Z. Application of an air source heat pump (ASHP) for heating in Harbin, the coldest provincial capital of China. *Energy Build* 2017;138:96–103.
- [18] Bahman AM, Parikhani T, Ziviani D. Multi-objective optimization of a coldclimate two-stage economized heat pump for residential heating applications. *J Build Eng* 2022;46:103799.
- [19] Zou H, Li X, Tang M, Wu J, Tian C, Butrymowicz D, et al. Temperature stage matching and experimental investigation of high-temperature cascade heat pump with vapor injection. *Energy* 2020;212:118734.
- [20] Wei W, Ni L, Dong Q, Wang W, Ye J, Xu L, et al. Experimental investigation on improving defrosting performance of air source heat pump through vapor injection. *Energy Build* 2022;256:111696.
- [21] Abdel-Salam MRH, Zaidi A, Cable M. Field study of heating performance of three ground-source heat pumps in Canadian single-family houses. *Energy*

- Build 2021;247:110959.
- [22] You T, Wu W, Yang H, Liu J, Li X. Hybrid photovoltaic/thermal and ground source heat pump: review and perspective. *Renew Sustain Energy Rev* 2021; 151:111569.
- [23] Hu B, Liu H, Jiang J, Zhang Z, Li H, Wang RZ. Ten megawatt scale vapor compression heat pump for low temperature waste heat recovery: onsite application research. *Energy* 2022;238:121699.
- [24] Zhang H, Zhou L, Huang X, Zhang X. Decarbonizing a large city's heating system using heat pumps: a case study of Beijing. *Energy* 2019;186:115820.
- [25] Lund H, Werner S, Wiltshire R, Svendsen S, Thorsen JE, Hvelplund F, et al. Fourth Generation District Heating (4GDH): integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. *Energy* 2014;68:1–11.
- [26] Wu D, Jiang J, Hu B, Wang RZ. Experimental investigation on the performance of a very high temperature heat pump with water refrigerant. *Energy* 2020;190:116427.
- [27] Jesper M, Schlosser F, Pag F, Walmsley TG, Schmitt B, Vajen K. Large-scale heat pumps: uptake and performance modelling of market-available devices. *Renew Sustain Energy Rev* 2021;137:110646.
- [28] Giannetti N, Inoue N, Yamaguchi S, Saito K. Multistage type-II absorption heat pump for steam generation up to 180 °C. In: *Proceedings of the 9th Asian Conference on Refrigeration and Air-conditioning (ACRA2018)*; 2018 Jun 10–13; Sapporo, Japan. ACRA; 2018. p. 1–17.
- [29] Yan HZ, Hu B, Wang RZ. Air-source heat pump heating based water vapor compression for localized steam sterilization applications during the COVID-19 pandemic. *Renew Sustain Energy Rev* 2021;145:111026.
- [30] Al-Sayyab AKS, Navarro-Esbrí J, Barragán-Cervera A, Kim S, Mota-Babiloni A. Comprehensive experimental evaluation of R1234yf-based low GWP working fluids for refrigeration and heat pumps. *Energy Convers Manage* 2022; 258:115378.
- [31] Yan HZ, Wu D, Liang J, Hu B, Wang RZ. Selection and validation on low-GWP refrigerants for a water-source heat pump. *Appl Therm Eng* 2021;193:116938.
- [32] Jiang J, Hu B, Wang RZ, Liu H, Zhang Z, Li H. Theoretical performance assessment of low-GWP refrigerant R1233zd(E) applied in high temperature heat pump system. *Int J Refrig* 2021;131:897–908.
- [33] Bamigbetan O, Eikevik TM, Nekså P, Bantle M. Review of vapour compression heat pumps for high temperature heating using natural working fluids. *Int J Refrig* 2017;80:197–211.
- [34] Wu D, Yan HZ, Hu B, Wang RZ. Modeling and simulation on a water vapor high temperature heat pump system. *Energy* 2019;168:1063–72.
- [35] Ahrens MU, Loth M, Tolstorebrov I, Hafner A, Kabelac S, Wang R, et al. Identification of existing challenges and future trends for the utilization of ammonia-water absorption-compression heat pumps at high temperature operation. *Appl Sci* 2021;11(10):4635.
- [36] Bamigbetan O, Eikevik TM, Nekså P, Bantle M, Schlemminger C. The development of a hydrocarbon high temperature heat pump for waste heat recovery 2019;173:1141–53.
- [37] Song Y, Cui C, Yin X, Cao F. Advanced development and application of transcritical CO₂ refrigeration and heat pump technology—a review. *Energy Rep* 2022;8:7840–69.
- [38] Qin X, Zhang Y, Wang D, Chen J. System development and simulation investigation on a novel compression/ejection transcritical CO₂ heat pump system for simultaneous cooling and heating. *Energy Convers Manage* 2022; 259:115579.
- [39] Bamigbetan O, Eikevik TM, Nekså P, Bantle M, Schlemminger C. Theoretical analysis of suitable fluids for high temperature heat pumps up to 125 °C heat delivery. *Int J Refrig* 2018;92:185–95.
- [40] Liu H, Zhao B, Zhang Z, Li H, Hu B, Wang RZ. Experimental validation of an advanced heat pump system with high-efficiency centrifugal compressor. *Energy* 2020;213:118968.
- [41] Sim J, Lee H, Jeong JH. Optimal design of variable-path heat exchanger for energy efficiency improvement of air-source heat pump system. *Appl Energy* 2021;290:116741.
- [42] Yan HZ, Wang R, Du S, Hu B, Xu Z. Analysis and perspective on heat pump for industrial steam generation. *Adv Energy Sustain Res* 2021;2(5):2000108.
- [43] Meroni A, Zühlendorf B, Elmegaard B, Haglind F. Design of centrifugal compressors for heat pump systems. *Appl Energy* 2018;232:139–56.
- [44] Boesten S, Ivens W, Dekker SC, Eijndems H. Fifth generation district heating and cooling systems as a solution for renewable urban thermal energy supply. *Adv Geosci* 2019;49:129–36.
- [45] Meibodi SS, Loveridge F. The future role of energy geostructures in fifth generation district heating and cooling networks. *Energy* 2022;240:122481.
- [46] Reiners T, Gross M, Altieri L, Wagner HJ, Bertsch V. Heat pump efficiency in fifth generation ultra-low temperature district heating networks using a wastewater heat source. *Energy* 2021;236:121318.
- [47] Barco-Burgos J, Bruno JC, Eicker U, Saldaña-Robles AL, Alcántar-Camarena V. Review on the integration of high-temperature heat pumps in district heating and cooling networks. *Energy* 2022;239:122378.
- [48] Buffa S, Cozzini M, D'Antoni M, Baratieri M, Fedrizzi R. Fifth generation district heating and cooling systems: a review of existing cases in Europe. *Renew Sustain Energy Rev* 2019;104:504–22.
- [49] Gillich A, Godefroy J, Ford A, Hewitt M, L'Hostis J. Performance analysis for the UK's first 5th generation heat network—the BEN case study at LSBU. *Energy* 2022;243:122843.
- [50] Zhao Y, Ma L, Li Z, Ni W. The development of regional smart energy systems in the World and China: the concepts, practices, and a new perspective. *WIREs Data Min Knowl Discov* 2021;11(6):e1409.
- [51] Greenpeace. The road to decarbonization of China's digital infrastructure: data center and 5G carbon reduction potential and challenges (2020–2035). Report. Amsterdam: Greenpeace; 2021 May.
- [52] Becker H, Maréchal F. Targeting industrial heat pump integration in multiperiod problems. *Comput Aided Chem Eng* 2012;31:415–9.
- [53] Guo Y, Tian J, Chen L. Managing energy infrastructure to decarbonize industrial parks in China. *Nat Commun* 2020;11(1):981.
- [54] Steinmann WD, Jockenhöfer H, Bauer D. Thermodynamic analysis of hightemperature Carnot battery concepts. *Energy Technol (Weinheim)* 2020; 8(3):1900895.
- [55] Liu S, Bai H, Jiang P, Xu Q, Economic-Taghavi M., energy and exergy assessments of a Carnot battery storage system: comparison between with and without the use of the regenerators. *J Energy Storage* 2022;50:104577.
- [56] Shu Y, Zhang L, Zhang Y, Wang Y, Lu G, Yuan B, et al. Carbon peak and carbon neutrality path for China's power industry. *Chin J Eng Sci* 2021;23(6): 1–14. Chinese.
- [57] Knobloch F, Hanssen SV, Lam A, Pollitt H, Salas P, Chewprecha U, et al. Net emission reductions from electric cars and heat pumps in 59 world regions over time. *Nat Sustain* 2020;3(6):437–47.
- [58] Guidelines for accounting methods and reporting of greenhouse gas emissions by enterprises power generation facilities 2021. Report. Beijing: Ministry of Ecology and Environmental Protection; 2021. Chinese.
- [59] Jacobson MZ, Delucchi MA, Bauer ZAF, Goodman SC, Chapman WE, Cameron MA, et al. 100% clean and renewable wind, water, and sunlight allsector energy roadmaps for 139 countries of the world. *Joule* 2017; 1(1): 108–21.
- [60] Liu S, Li Z, Dai B. Energy, economic and environmental analyses of the CO₂ heat pump system compared with boiler heating system in China. *Energy Procedia* 2017;105:3895–902.
- [61] Xie L, Huang S, Ye Y, Zhang X. Regional suitability of heating tower heat pumps based on technical and economic performance maps. *Energy Build* 2021; 245:111048.
- [62] Wang Y, Ye Z, Song Y, Yin X, Cao F. Energy, economic and environmental assessment of transcritical carbon dioxide heat pump water heater in a typical Chinese city considering the defrosting. *Energy Convers Manage* 2021; 233: 113920.
- [63] Yan H, Hu B, Wang R. Air-source heat pump for distributed steam generation: a new and sustainable solution to replace coal-fired boilers in China. *Adv Sustain Syst* 2020;4:2000118.
- [64] Zhou M, Liu H, Peng L, Qin Y, Chen D, Zhang L, et al. Environmental benefits and household costs of clean heating options in northern China. *Nat Sustain* 2022;5(4):329–44.
- [65] Riahi K, Bertram C, Huppmann D, Rogelj J, Bosetti V, Cabardos AM, et al. Cost and attainability of meeting stringent climate targets without overshoot. *Nat Clim Change* 2021;11(12):1063–9.
- [66] Meng J, Way R, Verdolini E, Diaz AL. Comparing expert elicitation and modelbased probabilistic technology cost forecasts for the energy transition. *Proc Natl Acad Sci USA* 2021;118(27):e1917165118.
- [67] Grant N, Hawkes A, Napp T, Gambhir A. Cost reductions in renewables can substantially erode the value of carbon capture and storage in mitigation pathways. *One Earth* 2021;4(11):1588–601.