

新能源供热：绿氢还是热泵？

英国建筑采暖经验分享

陈晶盈

睿博能源智库

引言¹

建筑领域绿色低碳转型是中国实现双碳目标的重要战略举措，在碳达峰碳中和“1+N”政策体系下，住房和城乡建设部在2022年3月印发的《“十四五”建筑节能与绿色建筑发展规划》明确了“提高建筑能效水平，优化建筑用能结构”的基本原则，更提出了“推动零碳建筑”和“近零能耗建筑”的项目试点。放眼世界，很多设有“净零碳”排放目标的国家也已经开始计划并实行各种建筑供暖脱碳策略。电能热泵供暖（下面简称“热泵供暖”）和氢能锅炉燃烧绿氢供暖（下面简称“绿氢供暖”）便是正在被各国考虑和讨论的供暖主要路径的两种选择。

热泵供暖是国内比较熟悉的取暖方式，而绿氢供暖虽然小众，但其讨论热度却在逐渐上升。当前，欧洲一些地区正在尝试采用绿氢供暖。对于绿氢供暖的成本效益和可行性进行深入讨论已成为热点议题，尤其在英国，应该推荐哪种技术作为主要供暖方式、其余方式又该提供多少政府扶助等相关争论在英国已经推进了一段时间。本文参考英国的相关研究和讨论，对热泵和绿氢采暖的能效性、经济性和可行性进行了对比和分析，并从中总结了两个可能会对其它设有净零碳目标的国家具有参考意义的观点：

- 热泵具有更高的能源利用效率，并且有助于减污降碳协同、建筑电气化，与电力系统清洁转型等工作推进。
- 热泵供暖的总系统成本较之绿氢供暖更低，能降低社会在供热转型上的经济负担。

¹ 感谢Max Dupuy, 王轩, 何泉对编辑本文的贡献。

尽管本文主要聚焦于英国，但供暖脱碳是一个全球性的挑战，本文希望分享与英国供暖转型相关的一些技术和经济问题可以提供参考借鉴意义。

供暖技术背景

本文讨论了在英国和世界其他国家正在进行的建筑供暖脱碳的两种技术选择，即电能热泵和氢能锅炉。电能热泵有多种形式，包括用于集中供暖系统的大型热泵以及用于空间供暖和烧水的小型分布式热泵（包括一些居民用的“空调”）。与热泵类似，氢能锅炉也有大型集中供暖和小型分布式设备，使用分布式设备的用户需要安装氢能锅炉。这种供暖形式目前在全球范围内普及度较低，但讨论的热度逐渐上升。

值得注意的一点是，若要减少建筑运行的碳排放，提高电力系统的可再生能源渗透率，使热泵使用的电力或氢能锅炉使用的氢气逐渐脱碳便是必然步骤。具体来说，运转热泵的电力应该是由风能或太阳能等可再生能源产生的绿电，氢能供暖的燃料也应该是由可再生能源发电，再通过电解水过程生产的绿氢。所以无论以哪种方式供暖，逐渐脱碳的电力系统通常被视为建筑供暖脱碳的重要前提。

原则上，碳捕集与封存（CCS）也有在建筑供暖脱碳中发挥作用的潜能。一种可行方式是利用CCS捕获电网上余留的燃煤或天然气发电碳排放；另一种方式是利用CCS捕获通过化石燃料制氢所携带的碳排放²。但由于CCS目前成本较高且发展水平较低，CCS应保留给难以减排的领域，如航空和重工业等，用以达成“净零碳”目标³。换句话说，CCS更应该保留给无法通过其它方式实现净零排放的产业。

下面的章节会借鉴英国的讨论，在电力系统已经大面积脱碳的假设下探讨热泵和氢能锅炉的相对运行能效，随后以更广泛的视角考虑了绿氢供暖和热泵供暖的相对系统总成本。

绿氢供暖和电能热泵的运行能效对比

英国政府一度考虑将“氢能锅炉”列为清洁降碳战略的一部分，并于2021年将惠特比和雷德卡选为“氢能示范小镇”。“氢能示范小镇”计划将整个小镇1000-2000家供电点（包含各种类型的居民和商业建筑）从天然气供暖转换为氢能供暖。转换工作由天然气分销商牵头，包括改造燃气输配管网以承载100%氢气和替换用户端燃气设备等⁴。“氢能示范小镇”的测试结果，加上

² 根据制造方式和碳排放量，氢能主要分为三种类型：通过化石燃料转化制造的灰氢、通过化石燃料转化加碳捕集与封存（CCS）制造的蓝氢，以及通过光伏、风电等可再生能源电解水制成的绿氢。通过安装CCS从化石燃料中产生的蓝氢比天然气供暖减少60-85%的碳排放，即便如此，蓝氢仍属于低碳而非零碳。更多讨论见 Climate Change Committee. (2018, November). *Hydrogen in a low-carbon economy*. <https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2018/11/Hydrogen-in-a-low-carbon-economy.pdf>

³ 国际能源署(IEA)表明，CCUS（碳捕获利用与封存）是水泥生产业实现深度减排的唯一技术性方案，更是钢铁、化工等领域减排的经济效益最高的方法，通过二氧化碳和氢生产的合成燃料在长途运输和航空领域也是少数的低碳燃料选项之一。International Energy Agency. (2020). *CCUS in Clean Energy Transitions*. <https://www.iea.org/reports/ccus-in-clean-energy-transitions>

⁴ 详见 Department for Business, Energy & Industrial Strategy. (2022, April 11). *Hydrogen for heat: facilitating a grid conversion hydrogen heating trial*. <https://www.gov.uk/government/consultations/hydrogen-for-heat-facilitating-a-grid-conversion-hydrogen-heating-trial>.

更广泛的研究和测试结果，将用来决定氢能在建筑脱碳中的作用以及是否要更大面积地推行氢能供暖。

这一计划激起了各种绿氢与热泵供暖的对比研究和探讨。虽说技术可行，但这些研究也将氢能供暖的弊端暴露出来。其一便是绿氢供暖系统的运行能效。如下面的例子所示，由于热泵能够从空气、地层，或水体等低位热源中提取热量，且每度电的消耗可以提取3到4度热能，让热泵输出的能量比运作热泵输入的能量更大，热泵的能效可以轻松地超越100%。绿氢供暖各步骤则因为无法从外界吸取能量，因而无法超越100%能效。最终，绿氢供暖相较于热泵供暖需要使用更多的电量来提供相同热量。尽管未来随着电解水规模化和科技创新，电解水制氢的能效可以超越80%，但因为电解槽和氢能锅炉不能运用外界的能量，绿氢供暖的能源利用率难以赶上热泵供暖，绿氢供暖会一直比热泵供暖多使用数倍的电力。不同研究对热泵与绿氢供暖的用电比例存在略微差异，但它们均指向一个结论：相比之下，电气化供暖明显是一种对电量需求较低、更有效利用清洁能源的方式。

举例—英国居民供暖中热泵和绿氢的运行能效对比

假设一间房间使用360兆焦（等于100千瓦时）的热量供暖。

英国居民热泵供暖多使用分布式空气源热泵。根据对291户实际用户的追踪调查，空气源热泵的季节性能系数(Seasonal Performance Factor) 中位数为2.80*（包括热泵和输送系统效率）⁵。英国电力输送损耗大概在8%左右⁶。等于在发电端投入电力只需 $\frac{100kWh}{2.80 \times 0.92} = 38.8kWh$ 。

假设通过绿氢供应相同热量。分布式氢能锅炉的数据较少，但预计平均锅炉性能达到85%，电解水制氢系统效率在80%左右⁷。氢气管道输送损耗的信息比较碎片化，在这里假设一个比较理想的、无任何泄露的情况。由此，制造绿氢的电量需要 $\frac{100kWh}{0.85 \times 0.80} = 147.1kWh$ 。

这个简化的计算得出，绿氢供暖需要用到大约3.8倍的电量。

*季节性能系数指供暖系统向建筑提供的总热量与供暖系统全年使用的电力之商。热泵的性能系数会根据运行环境，如室外温度，变化。在此调查研究报告里，这个数值的范围在2.53至3.09。在严寒地区，热泵性能可能会降到1~2之间，但超低温空气源热泵等新技术研发正在逐步提升热泵性能。

绿氢供暖和电能热泵的系统总成本对比

比较分布式热泵和氢能锅炉的运行效率得出，热泵是更为用能高效并且能消纳可再生能源的供暖选择，因为电力是两个供暖方式共同的源头能源，从能效差距可以简单地推理出热泵的运行成本也更为经济。尽管未来随着产业规模化和科技创新，制氢成本会进一步降低，但由于购电成

⁵ Energy Systems Catapult. (2023). *Interim Heat Pump Performance Data Analysis Report*. <https://es.catapult.org.uk/wp-content/uploads/2023/03/EoH-Interim-Heat-Pump-Performance-Data-Analysis-Report-1.pdf>

⁶ Statista. (2023, July). *Electricity lost in transmission in the United Kingdom (UK) in selected years from 1970 to 2022*. <https://www.statista.com/statistics/550583/electricity-losses-in-transmission-uk/>

⁷ Rosenow, J. (2022). *Is heating homes with hydrogen all but a pipe dream? An evidence review*. [https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351\(22\)00416-0?returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2542435122004160%3Fshowall%3Dtrue](https://www.cell.com/joule/fulltext/S2542-4351(22)00416-0?returnURL=https%3A%2F%2Flinkinghub.elsevier.com%2Fretrieve%2Fpii%2FS2542435122004160%3Fshowall%3Dtrue)

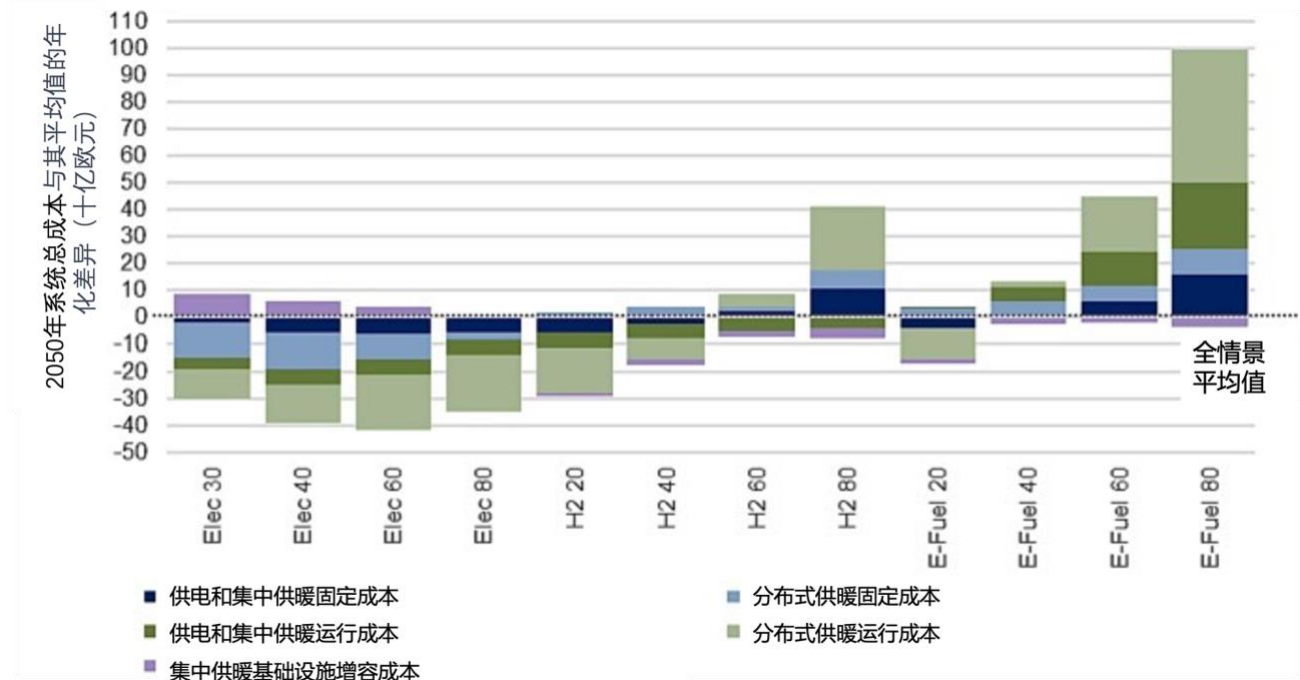
本占电解氢制造总成本的80% - 86%，制氢成本的价格浮动范围与热泵供暖的价格浮动差距保持一致⁸。除了需要消耗更多电量之外，绿氢供暖的运行成本降价幅度恐怕也难以赶上热泵供暖。

若要确定供暖脱碳的最佳路径，除了考虑运行成本以外，更应该对比各个选项的系统总成本。对于上述两种供暖脱碳选项，除了需要考虑热泵和氢能锅炉这类主要设备的购置成本和运行成本外，每个选择都有其他的系统成本需要考虑。例如，假设有一个即将建设新区的城市需要选择一种供暖方式作为主要发展方向，如果该市采用热泵供暖，系统总成本的分析还需要考虑到支持供暖所需的额外可再生能源发电容量增容成本和电网输配容量增容成本，加上根据供暖选用集中供热还是分布式热泵，还需考虑供热网的建设或增容成本。相反，如果该市计划燃烧绿氢供暖，则需要在发电容量增容之上考虑燃气输配管网、交通长途运输、制氢和储氢设备等成本。

英国的供暖讨论受到了许多国内和国际对系统总成本研究的影响。例如，一项新发表的研究对2050年欧盟建筑采暖和热水供应前景进行了分析。该研究通过能源计算分析软件，用最优化模型得出在不同能源构成比例下的，集能源生产、输送和存储等步骤的最低系统总成本，并进行对比。研究发现，假设欧盟27国在2050年实现气候中和，热泵供暖为主的系统总成本将比绿氢供暖为主的系统总成本低11%，政府和社会的累积投资也能降低6%⁹。图1展示了热泵（“Elec”）和绿氢（“H2”）情景下，对比所有情景预测成本平均值的差异和其中的成本组成。可以看出，在欧盟这个建筑存量相对稳定、较少建设新城区的背景下，分布式供暖的运行成本对系统总成本的影响最为显著。在60%和80%热泵供暖情景下，能带来最大化的成本节省；而在60%和80%绿氢供暖的情景里，运行成本则是提高系统总成本的主要因素。在大量使用热泵供暖的情景里，固定成本也能带来不菲的成本节约。

⁸ Rosenow, J. (2020). *Heating homes with hydrogen: Are we being sold a pup?* <https://www.raonline.org/blog/heating-homes-with-hydrogen-are-we-being-sold-a-pup/>

⁹ Billerbeck, A., Kiefer, C., Winkler, J., Bernath, C., Sensfuß, F., Kranzl, L., Müller, A., & Ragwitz, M. (2024). *The race between hydrogen and heat pumps for space and water heating: A model-based scenario analysis.* <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890423011962#s0010>

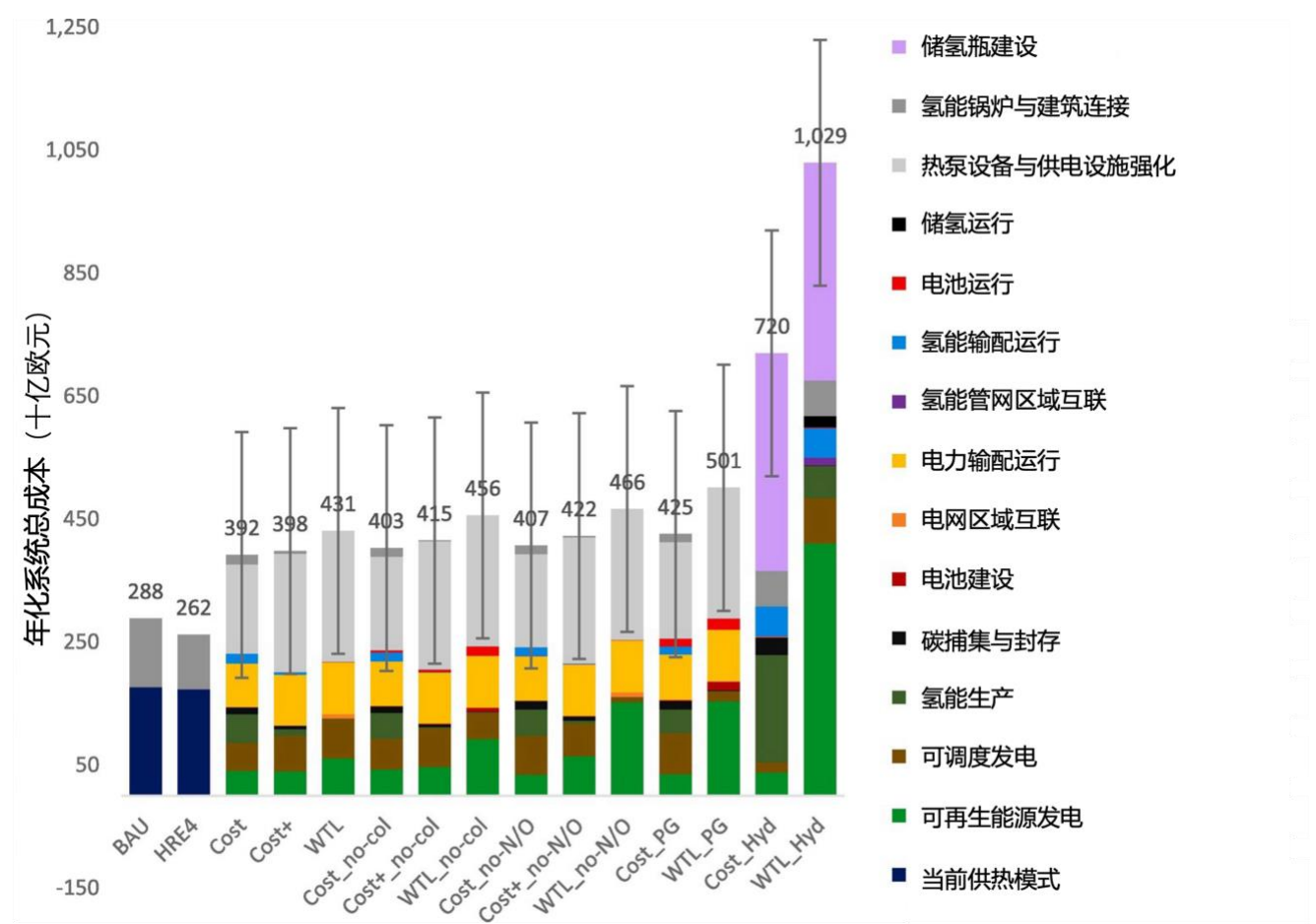
图 1. 不同占比的供暖情景的系统总成本与其平均值的差异对比¹⁰

图中情景由建筑供暖的主要能源载体分类：1）直接电气化（热泵）供暖 (Elec)；（2）采用可再生能源生产的绿氢供暖 (H2)；以及（3）采用可再生能源生产的合成燃料供暖 (E-Fuel)。每个情景后的数字代表特定能源载体的最小份额占比；如，Elec 30 情景代表在 2050 年，所有欧盟成员国中 30% 的供暖面积必须由电力作为能源载体，相当于通过热泵供应热能，其余的供暖份额由模型选择出达成环境目标的最经济的能源组成。

另一项独立研究也对欧盟和英国的建筑供热脱碳途径进行了系统总成本分析¹¹。该研究采用“地球边界”（Planetary Boundaries）概念估算欧洲供暖系统的生命周期成本。研究表明，在所有脱碳情景中，使用绿氢锅炉（“WTL_Hyd”）进行供暖的系统总成本最高，比使用热泵供暖的情景（“WTL”）昂贵两到三倍（见图 2）。在能源输配成本方面，热泵供暖需要的投资成本与绿氢供暖相似。但由于能效的差距，绿氢供暖需要大幅增加可再生能源发电装机规模，绿氢供暖场景下可再生能源发电成本更是热泵供暖的九倍。这部分成本最终会转化为绿氢供暖的运行成本，得出与上一个研究相似的，绿氢供暖运行成本比热泵供暖运行成本更高的结论。全面采用绿氢供暖方案时，储氢瓶建设更是占据了总成本的相当比例。尽管在实际应用中，部分建筑可以连接到供热网或燃气网来减少对储氢瓶的需求。但即便如此也无法完全避免建设储氢设施，而连接到供热网或燃气网也需要一定的固定成本。最终还是得出，无论是在运行成本还是固定成本方面，绿氢供暖都需要投入比热泵供暖更高昂的总成本。

¹⁰ 图片来源见脚注 9。

¹¹ Weidner, T., Guillén-Gosálbez, G. (2023). *Planetary boundaries assessment of deep decarbonisation options for building heating in the European Union.* <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890422013802#b0010>

图 2. 按供暖技术和场景细分欧盟和英国建筑供暖系统总成本¹²

这两项研究都证明了在建筑供暖降碳方面，系统总成本差距使得建筑电气化、热泵供暖成为比使用氢能锅炉燃烧绿氢供暖更为经济的选择。而造成成本差异的最大原因便是绿氢供暖对可再生能源的高度需求。英国气候变化委员会（Climate Change Committee, CCC）对氢能的2050年展望分析指出，实现全氢供暖的情景，需要比热泵加少量绿氢的情景多建设近乎一倍的可再生能源，在此之上还需建造大量的电解槽和储氢设施等配套系统，终究不是对土地和资源的合理利用¹³。

关于绿氢供暖的额外思考

热泵的科技现已基本成熟并且正在广泛投入使用，社会各界也在积极寻找进一步推广热泵的方式。与之对比，氢能锅炉的制造与使用仍然十分有限，并且目前全球绿氢仅占氢生产总量的

¹² 热能供暖需求包括住宅供暖、热水和服务业建筑供暖，不包括工业用热。图片来源见脚注11。

¹³ Climate Change Committee. (2018, November). *Hydrogen in a low-carbon economy*. Figure 4.5. <https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2018/11/Hydrogen-in-a-low-carbon-economy.pdf>

0.1%，其余产量由未使用碳捕集与封存的天然气、煤和燃油生产¹⁴。尽管中国的氢能产量居全球第一，占全球生产量的35%左右，但绿氢的国内生产占比也只有1%，其余多为煤制氢¹⁵。提升绿氢的产出，以满足供暖需求，将是一份任重而道远的发展途径。

虽说可再生能源装机会持续增长，由可再生能源发力大于电力需求而产生的剩余电力也需要一个消纳渠道，但以目前市面上的两种制氢技术来看，利用余电制氢不是最优方案。调查已市场化的两种制氢技术发现，电解碱水制氢技术（ALK）无法适应频率频繁波动、时有时无的可再生能源余电；质子膜电解水制氢技术（PEM）虽然可以适应波动的余电，但成本高昂¹⁶。对于英国来说，即使未来会有更多的剩余电力，其分量也不足以生产足够的绿氢来应对大面积供暖。正如CCC总结：“尽管有机会利用一些‘过剩’的电力（例如来自低需求时段的可再生能源）用于氢气生产，但我们的模型显示，这个数量相对于氢气2050的潜在需求规模而言很可能不足。”¹⁷

当初氢气供暖在英国被提及时，原本的设想是将氢燃料注入天然气输配管网，保留已经投入大量成本建成的天然气管网以免造成沉没成本。但实际上，管道送氢并非能简单的注入现有管道。氢气与天然气具有不同性质。因其微型的分子结构，氢气比天然气更容易泄漏；当混合氢气的氢比重达到一定程度后，现有的天然气管道需要升级替换以承载氢气；氢气具有高度的易燃性，而且在泄漏时难以察觉。即使成功输送到用户端，要正常使用氢气还需要替换现有的燃气表、家用电器中的燃烧器头，甚至可能是整个家用电器¹⁸。总的来说，目前的基础建设还未做好大量供应氢气的准备。

在成本和政策的考虑之外，也需要考虑绿氢对于部分难以减排工业的意义。尤其在化工、炼油和钢铁等重工业领域，绿氢是替代化石原料和燃料的重要途径，发挥着关键的减碳作用。绿氢在建筑领域的广泛使用可能导致由于需求增加而使氢气成本翻倍，推高氢对关键产业的成本。

总结

由于高昂的系统总成本，英国的国家基础设施评估委员会在第二次《国家基础设施评估》(second National Infrastructure Assessment)中已建议政府不提供氢能供暖的推广援助¹⁹。委员会指出，相较于其他供暖路径（如建筑电气化），氢能供暖在价格、输送、环境、恢复力、稳定性上都处于劣势，供暖质量和对经济发展的影响则与其他路径相差无几。回看英国的氢能示范小

¹⁴ International Energy Agency. (2023, December). *Global Hydrogen Review 2023*. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ecdfc3bb-d212-4a4c-9ff7-6ce5b1e19cef/GlobalHydrogenReview2023.pdf>

¹⁵ 曾朵红, 阮巧燕. (2023). 氢能深度：绿氢，第四次能源革命的载体. https://pdf.dfcfw.com/pdf/H3_AP202303071584103849_1.pdf?1678262256000.pdf

¹⁶ 专门用新能源“弃电”制氢是一个伪命题 绿氢产业发展现状、经济性与挑战解析 <https://www.escn.com.cn/20240131/669b733d1bfb48f1aabe90594afec019/c.html>

¹⁷ Climate Change Committee. (2018, November).

¹⁸ 见脚注8。

¹⁹ National Infrastructure Commission. (2023, October). Technical annex: hydrogen heating. <https://nic.org.uk/app/uploads/NIA-2-Technical-annex-hydrogen-heating-Final-18-October-2023.pdf>

镇计划，在2023年7月对惠特比居民的反对做出妥协后，又于12月放弃雷德卡的实验计划²⁰，并且目前没有继续推动示范小镇的计划。

由此可见，在未来的脱碳时代，公共和住宅建筑供暖的理想选择应该是电热泵和低排放的集中供暖。不论是从能效性、经济性还是可行性来讲，热泵都要远优于绿氢供暖。近年来，中国供热领域的热泵产业迅速发展，技术不断创新。2022年3月，国家发改委、国家能源局发布关于印发《“十四五”现代能源体系规划》的通知中提出，因地制宜推广空气源热泵、水源热泵、蓄热电锅炉等新型电采暖设备。这为推广热泵起到了重要作用，也体现出热泵的应用有助于实现建筑电气化、低碳化目标。

²⁰ Department for Energy Security and Net Zero. (2023, December 14). *Hydrogen village trial: open letter to Gas Distribution Networks and further information*. <https://www.gov.uk/government/publications/hydrogen-village-trial-open-letter-to-gas-distribution-networks>



Regulatory Assistance Project (RAP)[®]
Belgium · China · Germany · India · United States

CITIC Building, Room 2504
No.19 Jianguomenwai Dajie
Beijing, 100004

+86 10 8526 2241
china@raponline.org
raponline.org

中国北京市建国门外大街 19 号
国际大厦 2504 室
100004