

低碳供热和制冷： 克服世界上最重要的净零碳挑战之一

简介

供热和制冷能源，或者热能，应该是脱碳议程的重点，因为与电力和交通相比，它是世界上最大的能源终端使用形式，也是最大的碳排放来源。世界各地的住宅、商业和工业场所为供热和制冷制定了各种低碳解决方案。有些解决方案处于早期采用阶段，需要扩大应用规模，有些处于

试验阶段，需要进行集中研发和部署 (RD&D)。本简报重点介绍了通过提高能源效率、应用可替代化石燃料供热和制冷的技术选择，以及在热能储存和运输方面进行创新来减少排放量的途径。

深刻见解

- 住宅、工业和商业场所的供热和制冷是二氧化碳排放的主要来源，因此，其优劣在净零碳战略中占据突出地位，有自己专门的目标。
- 不同的国情和传统将需要一系列的方法来减少供热和制冷过程中的二氧化碳排放量。但是，还有更大的国际合作和交流空间。
- 任何脱碳计划的首要目标应该是通过改进隔热性、热反射和其他方式为建筑供热或制冷，从而减少能源的使用量。
- 与化石燃料系统相比，许多低碳供热和制冷形式仍处于起步阶段，需要大量的试验和部署来测试其相对成本效益。
- 低碳供热和制冷的关键研发和部署领域包括：热泵、电暖气、分区系统、可再生热能和氢能。
- 各种有趣的选择不断涌现，创造了供热和制冷的新方法，即在一个地方产生所需的热能，经过储存和运输，供另一个地方使用，有时包括从电能转化为热能，或者从热能转化为电能。

1. 供热、制冷与气候变化

全球约 50% 的热能用于工业部门。另外 46% 用于建筑供热。

供热和制冷能源（或热能）为空间、水、烹饪、工业过程、空调和制冷提供热能和冷能。据估计，该领域约占世界最终能源用量的一半，并占能源使用产生的全球二氧化碳（CO₂）排放量¹的 40%。化石燃料是供热的主要来源，而生物质以外的可再生能源只能满足全球需求的 10% 左右²。全球约 50% 的热能用于工业部门。另外 46% 用于建筑供热，主要用于空间供热和水加热。国际能源署 (IEA) 预计，到 2030 年，能源效率的提高、化石燃料被取代以及脱碳发电可将空间供热排放量减少 30%³。

若“一切如常”，2010 至 2050 年，住宅和商业建筑的供热和制冷预计会增长约 80%⁴。气候变化预计将减少对供热的预期需求，增加对制冷的需求⁵，部分预估数据预测，到 2060 年，空间制冷在全球能源需求中的占比将高于空间供热⁶。

供热和制冷很难实现脱碳，因为它们的产生和使用方式多种多样且高度分散，不像电力有大型集中式发电设施和配电系统。供热和制冷有多种方式，从简单的明火到燃气锅炉和空调机组，丰富多彩。通常将其作为独立的设备安装在住宅或者办公大楼和工厂的大型系统中，但通常会同时采用几种不同的解决方案，例如冬季用燃气供热，夏季用电制冷。从家用锅炉到工业用高温热源，热能的产生和使用往往在同一地点进行。

分区供热是一个例外，它是在某一中心点产生热能并通过管道输送至建筑内部，为北欧家庭提供了大量的热能。在奥地利和丹麦等国，管道输送低温热的距离长达 80 千米⁷。

工业用热能产量约占全球 CO₂ 排放量的 20%⁸。工业中供热方法的选择取决于多个因素，包括工艺参数（控制、温度、清洁度等）、所需热量和成本。例如熔化、干燥、烘烤、裂解（分解分子）和再供热。工业运营通常在需要的时间和地点使用电力、化石燃料或生物质来产生热能。因此，将需要各种零碳供热选择。

供热和制冷领域的低碳转型需要对新技术和基础设施进行更新；进行投资，以扩大规模；以及对数百万家庭和工业单位进行改造。

2. 研发和部署所需采取的行动

在实现净零碳的道路上，热能似乎是一个难以逾越的障碍，但世界各地提出了许多解决方案，有些已经成熟，但仍存在挑战，有些则刚刚问世。这些解决方案包括：更高效地利用热能、采用替代的供热和制冷零碳技术以及采用新技术储存热能并从源头输送至使用点。

2.1 不要损失热能 — 提高能源效率

对热能进行脱碳的最简单方法是通过提高能源效率、提高隔热性能以及废热回收和利用率来减少热能的使用。在许多国家/地区，住宅空间的供热强度或单位建筑面积的能耗已得到显著改善。芬兰、法国、德国和韩国自 2000 年来减少了 30% 以上⁹。

到目前为止，大多数工作都集中在住宅和商业建筑上。工业和能量转化过程引起的热损失尚未得到有效解决，是一个重要的研究领域。

2.2 无碳供热和制冷

2.2.1 家庭供热和制冷脱碳

虽然能源效率可以降低能源需求，但需要新的选择来提供住宅仍然需要的零碳供热和制冷。

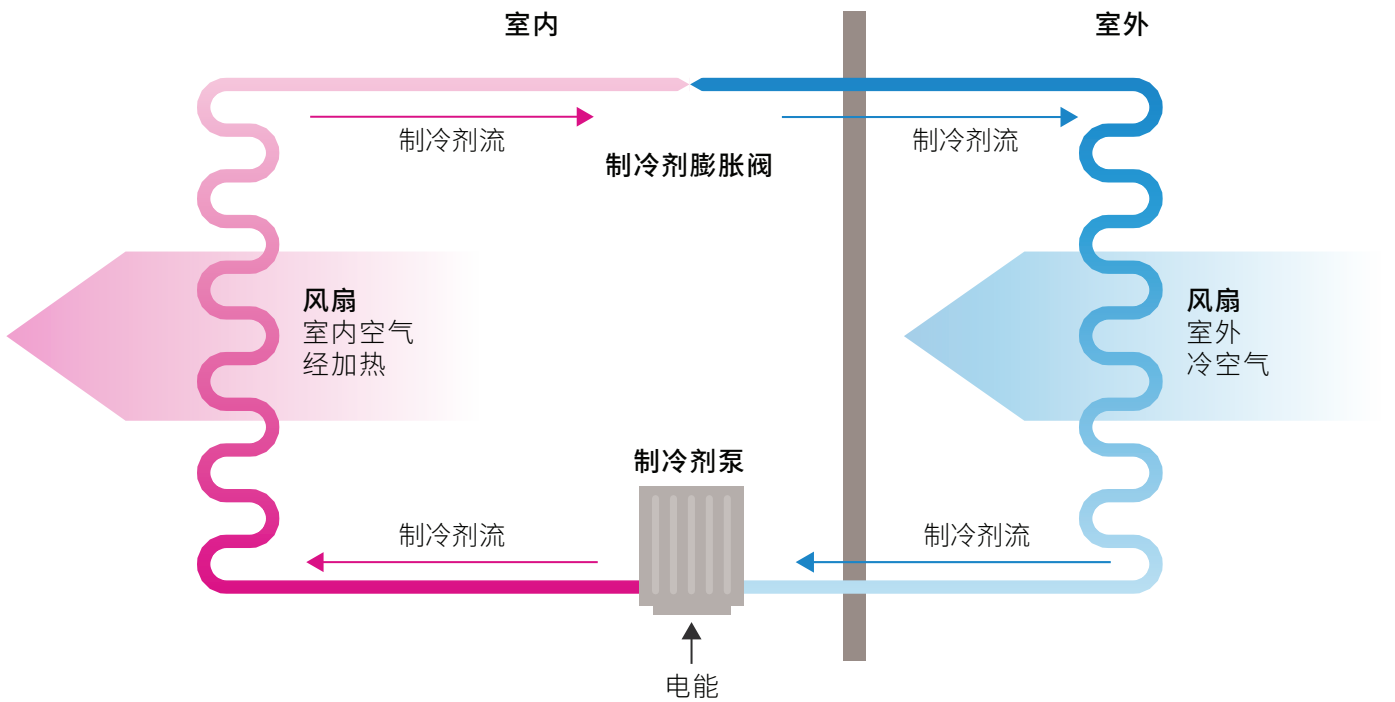
电供热

电阻式供热器在世界许多地方仍在使用，如果由低碳电力供热，则可以实现安装成本低廉的低碳选择。但是，如果更广泛地使用，将需要提高发电能力并对电网进行加固¹⁰。现代蓄热式供热器使用陶瓷砖（例如 Dimplex Quantum 供热器）和复合相变材料模块（例如 Jinhe PCM 供热器）来储存和释放热能，可以提供一种经济高效的选择，该选择采用的是非高峰或过剩电能，并减少了对电网加固的需要¹¹。

或者，可以使用由低碳电力驱动的热泵，由于它们主要是移动热量而非产生热量，因此比直接用电供热耗电量低¹²。从本质上讲，它们的工作原理就像冰箱的反转模式（图 1），采用类似的技术来为空间供热而非制冷。蒸发器从建筑外的空气、水或地面收集低温热，然后通过压缩过程将其升级至冷凝器中，用于为建筑供热。热泵的性能通过一个称为性能系数 (COP) 的参数来衡量，该参数是供热/制冷供应量与电力输入之间的比率。COP 通常在 2 至 5 之间，COP 越高，效率越高。可逆热泵也可以为空调提供制冷，如果房主在夏季选择这种方式，用电量可能会增加。

图 1

空气源热泵示意图。用制冷液将热量从建筑外部传递到内部。



例如，美国约 40% 的新建住宅配备了热泵。

人们普遍将热泵视为领先的低碳解决方案，例如，到 2030 年，英国热泵的使用量预计将达到 550 万台¹³，2050 年有望达到 2,100 万台¹⁴。放眼全球，截至 2019 年，热泵仅满足 5% 的住宅供热需求，虽然其在某些地区取得了显著增长。例如，美国现在约有 40% 的新建住宅配备了热泵¹⁵，欧盟市场正以每年 12% 左右的速度增长¹⁶。在美国气候较温和且电价较便宜的地区，空气源热泵的成本与燃气锅炉不相上下¹⁷。相反，在寒冷和潮湿条件下，其使用难度较大，因为供热需求最大时，其效率最低¹⁸。研究还指出，前期采购成本和电价是主要障碍¹⁹，同时还需要大幅扩大电网规模。

研究人员在研究提高性能的方法，例如设计新型冷凝器²⁰ 以及使用小温差风机盘管²¹ 作为空气源泵的终端。

天然气替代物

从基础设施的角度来看，用低碳或零碳替代气体取代天然气管网中的天然气非常具有吸引力。

一种过渡性选择是将天然气与可再生生物甲烷混合，后者由有机废物产生，欧洲是全球领先的生产商。它目前仅占燃气供应结构的一小部分，2019 年为 20 亿立方米 (BCM)，市场总量为 5,140 BCM，但研究表明，到 2030 年，可增长至燃气供应量的 3%^{22, 23}。

一些国家/地区正在考虑采用一种低碳的燃气供热方式，用通过电解可再生能源生成的“绿色”氢或者由天然气通过碳捕获和储存 (CCS) 制成的“蓝色”氢来替代网络中的部分或全部天然气。但是，这一选择面临多个挑战。绿色和蓝色氢的成本目前无法与化石燃料衍生氢的成本竞争²⁴。锅炉改造成本高昂，比如在英国，每户预计要花费 2,000 – 4,000 英镑。氢气也会使传统的铁或钢气体网络管道脆化²⁵，但可将其改造为适用于氢气的塑料管道^{26, 27}。还需要考虑公众对其安全性的接受度。2020 年代的示范项目应指出是否可以克服这些挑战。在英国，一个名为 H21 的重大项目正在筹备过程中，将为数百万家庭提供 100% 的氢气。在荷兰，小型“阿莫兰天然气加氢”项目示范了在管网中混合高达 20% 的绿色氢²⁸。

(见简报 4: 氢和氨在应对净零碳挑战中的作用。) 另外，热电联供系统 (CHP) 中的燃料电池也可以使用氢气。在日本，国家氢能基本战略计划到 2030 年安装 530 万台家用 CHP 机组 (称为 Ene-Farm 家用燃料电池)²⁹，既可以供热，也可以分布式发电。

太阳能供热

欧盟和中国等一些地方正在用中温 (80 – 150°C) 太阳能供热来替代化石燃料锅炉供热。太阳能系统小至家用的小型热水装置，大至大型太阳能热电厂的集中式系统。在制冷回路中使用太阳能集热板进行的太阳能制冷也越来越受欢迎，因为它们可将耗电量降低 30% 以上³⁰。

集中供热和制冷

许多国家/地区都在采用低碳集中或分区水加热和空间供热或空间制冷，特别是已经安装集中或分区供热或制冷系统并且可以进行脱碳的国家/地区³¹，但城市地区的新建住宅也可以采用这种供热或制冷方式。在阿联酋，分区制冷占全国冷负荷的 23%³²。由热电联供机组提供服务的网络正在被低碳“第 5 代”版本所取代，后者根据热泵的需要升级低温热并匹配供热和制冷，例如用超市制冷为住宅区供热³³。

集中供热的热能可以来自多个零碳热源。利用地壳热量的地热能在全球供热中只占很小的一部分，但在萨尔瓦多、新西兰、肯尼亚和菲律宾等火山活动频繁且可利用温泉的国家却发挥着重要作用³⁴。2016 年，冰岛地热能提供了约 65% 的一次能源，包括约 27% 的电力³⁵。核电站产生大量热量 (通常约为 3.4GW)，一般用于发电。可将废热 (约 60%) 用于分区供热。也可以将产生的热量 (可达到 300°C 至 800°C) 直接用于大规模分区供热或为工业过程提供动力³⁶。

图 1 显示了一个典型的英国 3 居室燃气集中供热房屋的零碳家庭供热选择的大致安装成本、能源和优缺点。

在阿联酋，分区制冷占全国冷负荷的 23%。

表 1

家用供热系统安装成本³⁷、能量来源、优势和挑战的比较。

供热类型	大致安装成本	能量来源	优势	挑战
热泵	10,000 英镑。	清洁电能和外部热能。	电力的 COP >1 — 每千瓦时热量输出的用电量更少，使用现有的供电网络 — 减少了加固/更新电网的需要。	地面/水源热泵占地面积大。空气源热泵在低环境温度下性能不佳。温度输出较低时，需要对家用中央供热系统进行更改。
氢气锅炉	3,000 英镑。	化学能（绿色氢）。	部分使用现有的燃气输配管网和中央供热系统（需要新建锅炉）。	需要大规模绿色氢供应、高压传输/扩大管道规模，材料兼容性问题，安全性和公众接受度问题。
蓄热式电供热器	2,000 英镑。	清洁电能。	采用公众熟知的技术，使用现有电力网络。可用于时移电力负荷。	不太灵活/即时，可能需要更换中央供热系统。
电供热器（不蓄热）	约 1,000 英镑。	清洁电能。	采用公众熟知的简单技术，使用现有供电网络，对家庭布线的改动最小。	对电力供应造成额外负荷 — 可能需要额外发电和加固电网，造成需求高峰。

2.2.2 工业供热脱碳

在工业中替代化石燃料的使用非常依赖于应用的用途，其中，主要的低碳选择如下。由于所需的能源规模巨大，因此对重工业使用的热量进行脱碳是一项特殊挑战。一种方法是继续使用化石燃料，但通过二氧化碳捕获和储存 (CCS) 来消除部分 CO₂ 排放。（见简报 5：二氧化碳捕获和储存。）

低碳电力

低碳电供热技术发展良好，而化石燃料的其他替代品（见下文）大部分处于非常早期的试验阶段。电供热是一项成熟的技术，控制方便，温度范围广。例如，用于炼钢的电弧炉，其中，用于熔炼废钢的感应炉在 1000°C 以上运行。但是，与其他选择相比，在水泥、玻璃和陶瓷生产等应用中使用电供热很可能成本高昂。能源价格将一如既往地重要。

氢

低碳氢可能是钢铁、水泥、玻璃和化学品等行业的合适热源，因为它的燃烧温度非常高。但是，尽管拥有消除工业供热排放的二氧化碳的技术潜力，氢仍然是生物能源的昂贵替代品，即使 CO₂ 的价格达到 \$100/tCO₂³⁸。（见简报 4：氢和氨在应对净零碳挑战中的作用）

生物质

生物质可用于高温供热，但受到资源可用性和成本的限制³⁹。生物质已经为全球水泥生产提供了 6% 的总热能⁴⁰。它还用于可使用生物质残渣满足热量需求的行业，例如制糖、木材加工、纸浆和造纸。除非采用 CCS，否则生物质最多只能属于低碳，而不是零碳。

替代热源

太阳能热技术已经小规模用于纺织、食品和造纸等行业，用于在低于 250°C 的温度下进行干燥、洗涤和消毒等功能⁴¹。然而，虽然涌现了一些早期的商业项目，但太阳能供热工艺在工业中的应用仍主要处于研究和试验阶段⁴²。世界各地的研究人员现在正在研究如何将聚光太阳能 (CSP) 用于超高温工业过程。例如，欧洲一家公司开发了一项技术，使用大约 500 个活动反射镜将陶瓷颗粒加热至 1000°C。意大利的一家面食工厂正在建造一个试验工场⁴³。如上文所述，核反应堆产生的热量还可用于直接驱动化学过程，例如制氢。

工业和住宅都可以使用热泵进行相对低温的供热。研究已经表明，可以在造纸、食品和化学品等行业使用热泵⁴⁴。另一种低温选择是直接利用风能进行供热，即采用风力热能系统 (WTES) 将旋转时产生的能量通过制动机制等方法转化为热量。

2.3 未来的热能储存、运输和分配 — 通过时间和空间转移热能。

虽然未来的空间和工业供热选择主要沿用在使用地点产生供热和制冷的模式，但越来越多的研究开始考虑是否可以将热量或冷量从其产地随时转移至其需求地。工业过程会不可避免地产生废热或多余的热量，可将其回收并用于替代化石燃料工热，这一点尤为重要。

可将废热直接回收利用，也可以通过热泵升级改造后回收利用，世界各地目前在如火如荼地开展工业用热再利用项目⁴⁵。例如，在瑞典，工业废热回收占住宅分区供热所需热量的 9%⁴⁶。一个由英国资助的项目拟采用相变材料 (PCM) 将“尖峰负荷”发电厂产生的废热储存起来，用于为当地建筑供热⁴⁷。Tata Steel 正与斯旺西大学合作，从其塔尔博特港钢铁厂收集和再利用废能，每年可抵消超过 100 万吨的二氧化碳排放量⁴⁸。

2.3.1 热能储存

热能储存是指以热量或冷量的形式储存能量，以便日后用于供热、制冷或发电 — 无论是几小时、几天、几周还是几个月。系统从人们熟悉的家用热水箱或蓄热式加热器到目前处于试验阶段的新型 PCM，再到处于研究阶段的热化学程序，种类繁多⁴⁹。但是，社会和文化障碍可能会影响该技术的采用⁵⁰。热能储存众多方法选择的部分示例如下。

一家公司开发了一种技术，使用大约 500 个活动反射镜将陶瓷颗粒加热至 1000°C。

建造了一座 130 兆瓦时热量/30 兆瓦电热岩石仓库，为德国汉堡电网提供支持。

通过化学反应储存热量

可以通过可逆化学反应储存热能。例如，可以运输能量密度与化石燃料差不多的金属铁，然后用空气或水等介质氧化以产生热量，提供潜在的高能量密度低成本解决方案⁵¹。在将铁进行氧化用于工业用途后，还可使用氢气再次生成铁，实现潜在的无碳循环（图 1）⁵²。

储存太阳能热量

近年来出现了一些超大型的聚光太阳能发电装置，它们可以大规模储存热量，也可以发电。例如，亚利桑那州的 280MW Solana 发电厂拥有超过 3,000 个 400 英尺长的反射镜，可将阳光反射至含有传热流体 (HTF) 的管道上，进而将管道加热至约 400°C。部分 HTF 用于产生蒸汽，用于发电，而其余 HTF 则流入熔盐储罐，在没有阳光时，这些储罐会将保留的热量转化为电能⁵³。

卡诺电池

“卡诺电池”以岩石、相变材料或熔盐热量的形式储存可再生能源发电产生的余能。该技术有时也称为热泵储电技术或电热储电技术。可在需要时将热量转化回电能，成为在以可再生能源为主的电网中储存电能的一种选择。该系统具有潜在的灵活性，可以使用各种材料和转化方法来储存热量、冷量或电能，并指出所有

转化过程都会损失能量。保留的热量可以直接使用，也可以用于供热、制冷和发电。但是，它目前所面临的挑战是，使用热泵将温度提升至较高水平会降低性能系数。几个原型和示范项目已经建成，包括为支持德国汉堡电网而建造的 130 兆瓦时热量/30 兆瓦电热岩石仓库⁵⁴。

低温能量储存

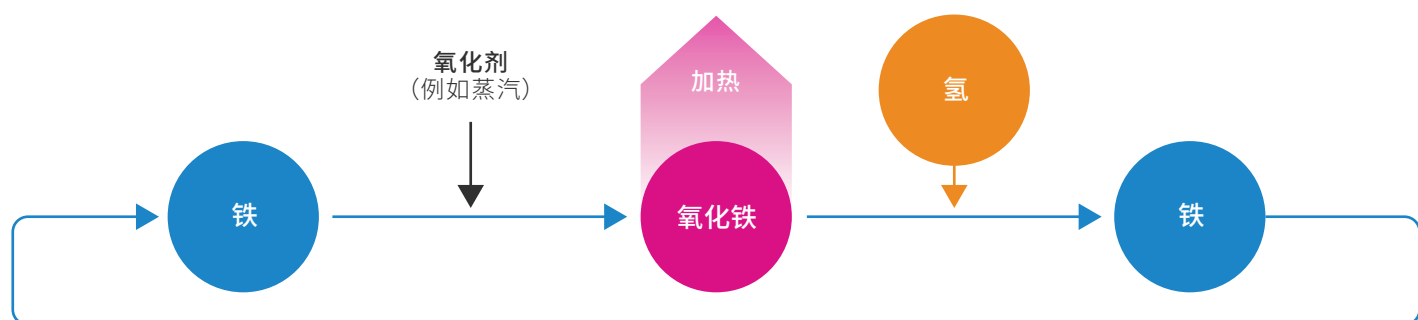
欧盟的 CryoHub 等项目正在研究将可再生能源储存为低温液体，例如液态空气 (-194°C)，可用于为工业设施提供制冷，同时可以进行储存，也可以通过涡轮机煮沸发电⁵⁵。

冷链新选择

已证明 PCM 可以用于制冷和供热。在一个冷藏“冷链”供应项目中，英国科学家与中国铁路车辆公司 — 中国中车石家庄车辆有限公司制造了世界上首个使用以盐水储存冷量的 PCM 的货运集装箱。该集装箱用于运输新鲜农产品，一次充电约需要两小时，可将温度保持在 5 – 12°C 下长达 190 小时，可实现跨越不同气候区的运输，公路运输里程可达 35,000 千米，铁路运输里程可达 1000 千米⁵⁶。

图 2

铁加热循环。氢还原过程的能量输入。



冷冻芯货物: 运输南极冰样本的绿色解决方案

为了研究气候变化, 将通过一种创新的零碳制冷技术使从南极冰中钻取的冰柱在运往欧洲实验室的途中保持冷冻状态。英国南极调查局 (BAS) 的研究包括钻探、包装、转移、储存从格陵兰岛和南极洲开采的冰芯, 并将其运输至英国进行分析 (图 3)。

但是, 面临的一个主要挑战是必须将货物装在隔热箱中, 放在由柴油发动机驱动的冷藏集装箱中进行运输。现在, BAS 与一所英国大学展开合作, 开发一种零排放冷链系统, 用于运输冰芯。关键技术在于一种复合相变材料 (cPCM), 结合真空隔热技术, 可使冰芯任何部位的温度保持在 -45 C 以下超过 20 个小时 (图 4)。

图 3

将冰芯从南极洲运往欧洲。

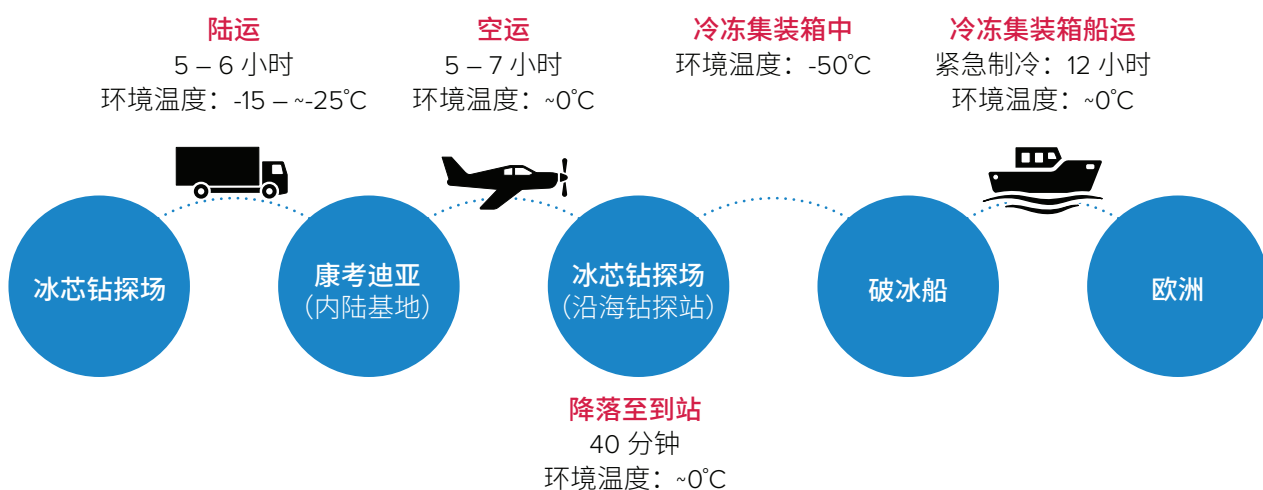
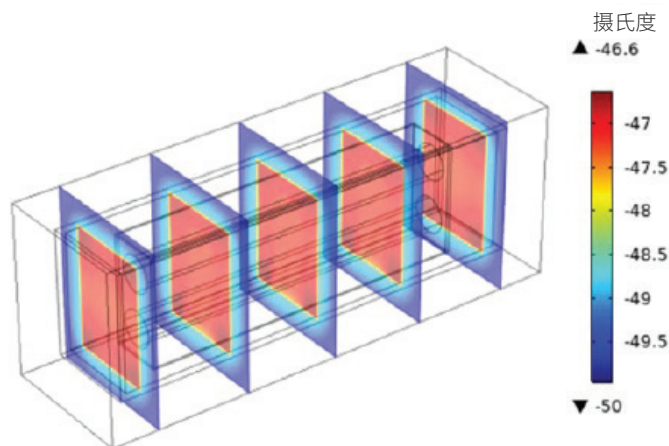


图 4

冰芯储存的热截面。



2.3.2 热量分配

在 PCM 和热化学储能材料等材料中储存和运输热量和冷量的能力为获取、储存、运输、贸易和使用低碳热能开辟了一系列新方式。

原则上，未来的服务站不仅可以为电动汽车提供氢气泵、生物燃料和充电点，还可以为汽车或家庭提供热能或冷能电池组。可将此类电池组放置在车上特制的腔室 — “供热和制冷槽” 中 — 在电池充电时也会为其充满电。据估计，在寒冷气候下，轿厢供热所使用的电力会使电动汽车 (EV) 的续航里程缩短约 50%⁵⁷。空调在低温下将电力转化为热能的 COP 较低，并且拥有自己的能量来源比使用 EV 电池能够更好地提供服务。家用时，可使用较大的模块为房

屋供热或制冷，每周更换和充电一次。卫生服务也可以采用类似的技术，将疫苗等药物保持在所需的温度。

2.3.3 热量储存和分布的净零碳之路

到 2030 年，世界各地将涌现出新的热能储存行业，主要将加油站等现有能源基础设施转变为多方位能源中心，或者为无电网基础设施的地区提供新的供热和制冷方法。

到 2050 年，全新的热能供应链可为净零碳目标的实现提供支持，通过热能储存向当地无法产生热量或冷量的地方供热和制冷。消费者通常可以从当地的能量分配点获取车用和家用的热能和冷能。

3. 结论

供热和制冷技术专家指出，有必要以类似于可再生能源和电池等其他领域的方式加强合作，这些领域已经建立了国家和国际合作伙伴关系，旨在加快研发和部署的进度。

IEA 建议“各个国家/地区和利益相关者”应共同采取行动。加大国际协调力度以加快开发全球最大碳排放来源的解决方案，对于将新技术投入大规模使用和打造未来低碳供热和制冷行业至关重要。

本简报是探讨科技如何支持全球实现净零排放以及适应气候变化的一系列展望之一。该系列旨在向世界各地的决策者提供 12 个问题的信息，以便在每个国家/地区制定自己的 2050 年零排放路线图时，可以为其提供科学的信息，帮助其达成谅解和采取行动。

若要查看整个系列，请访问 royalsociety.org/climate-science-solutions

若要查看简报的贡献者，请访问 royalsociety.org/climate-solutions-contributors

本文件的文本在知识共享署名许可的条款下许可使用，其使用不受限制，但要注明原作者和来源。可从以下网站获取该许可：
creativecommons.org/licenses/by/4.0

发布日期：2021 年 6 月 DES7533 © The Royal Society

参考文件

1. IEA. 2019年。Energy-related CO₂ emissions 2019.Heat 40%.Power 35%.Transport 25% (2019年能源使用产生的二氧化碳排放量: 供热40%, 发电35%, 运输25%) (来源: 2021年4月28日的电子邮件)
2. IEA. 2019年。Renewables 2019: Heat (2019年可再生能源: 热能)。参见 <https://www.iea.org/reports/renewables-2019/heat> (2021年4月15日访问)
3. IEA. Heating (供热)。参见 <https://www.iea.org/reports/heating> (2021年4月15日访问)
4. Lucon O. 等。2014年: 建筑。来源: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change (2014年气候变化: 减缓气候变化)。Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (第三工作组对政府间气候变化专门委员会第五次评估报告的贡献)。参见 https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_chapter9.pdf (4月15日访问)
5. Arent, D.J. 等。2014年: Key economic sectors and services (关键经济部门和服务)。来源: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability (2014年气候变化: 影响、适应和脆弱性)。Part A: Global and Sectoral Aspects (A部分: 全球和部门层面)。Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (第二工作组对政府间气候变化专门委员会第五次评估报告的贡献)。参见 https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap10_FINAL.pdf (2021年4月15日访问)
6. Isaac M, van Vuuren D. Modeling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change (模拟气候变化背景下全球住宅部门对供热和空调的能源需求) *Energy Policy (能源政策)* **37** 507-521 (<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.09.051>)
7. Euroheat & Power 和奥地利国家技术研究院。2020年。The barriers to waste heat recovery and how to overcome them? (废热回收面临的障碍以及如何克服) 参见 https://ec.europa.eu/futurium/en/system/files/ged/20200625_discussion_paper_v2_final.pdf (2021年4月15日访问)
8. IEA. 2019年。Renewables 2019: Heat (2019年可再生能源: 热能)。参见 <https://www.iea.org/reports/renewables-2019/heat> (2021年4月15日访问)
9. IEA, 2020年, Energy Efficiency Indicators (能源效率指标)。参见 <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-indicators-overview> (2021年4月15日访问)
10. 英国天然气电力市场办公室 (Ofgem)。2016年。Future Insights Series: The Decarbonisation of Heat (未来洞察系列: 热脱碳)。参见 https://www.ofgem.gov.uk/system/files/docs/2016/11/ofgem_future_insights_programme_-_the_decarbonisation_of_heat.pdf (2021年4月15日访问)
11. Darby, S.J.。Smart electric storage heating and potential for residential demand response (智能蓄电供热及满足住宅需求的潜力)。Energy Efficiency (能源效率) **11**, 67-77 (2018)。 <https://doi.org/10.1007/s12053-017-9550-3>
12. 能源效率和可再生能源办公室。Heat Pump Systems (热泵系统)。参见 <https://www.energy.gov/energysaver/heat-and-cool/heat-pump-systems>。(2021年4月15日访问)
13. 气候变化委员会。2020 Sixth Carbon Budget (2020年第六次碳预算)。参见 <https://www.theccc.org.uk/publication/sixth-carbon-budget/> (2021年4月15日访问)
14. 气候变化委员会。2021年。Development of trajectories for residential heat decarbonisation to inform the Sixth Carbon Budget (Element Energy) (住宅热脱碳的发展轨迹, 为第六次碳预算提供信息 (元素能源))。参见 <https://www.theccc.org.uk/publication/development-of-trajectories-for-residential-heat-decarbonisation-to-inform-the-sixth-carbon-budget-element-energy/> (2021年4月15日访问)
15. 全国住宅建筑商协会。2019年。Air Conditioning and Heating Systems in New Homes (新住宅空调和供热系统)。参见 <https://eyeonhousing.org/2019/12/air-conditioning-and-heating-systems-in-new-homes-4/> (2021年4月15日访问)
16. IEA. 2020年。Heat Pumps tracking report (热泵跟踪报告)。参见 <https://www.iea.org/reports/heat-pumps> (2021年4月15日访问)
17. 哥伦比亚大学国际与公共事务学院 (SIPA) 全球能源政策中心。2019年。Decarbonizing space heating with air source heat pumps (空气源热泵空间供热的脱碳) <https://www.energypolicy.columbia.edu/research/report/decarbonizing-space-heating-air-source-heat-pumps> (2021年4月15日访问)
18. 哥伦比亚大学国际与公共事务学院 (SIPA) 全球能源政策中心。2019年。Decarbonizing space heating with air source heat pumps (空气源热泵空间供热的脱碳) <https://www.energypolicy.columbia.edu/research/report/decarbonizing-space-heating-air-source-heat-pumps> (2021年4月15日访问)
19. 哥伦比亚大学国际与公共事务学院 (SIPA) 全球能源政策中心。2019年。Decarbonizing space heating with air source heat pumps (空气源热泵空间供热的脱碳) <https://www.energypolicy.columbia.edu/research/report/decarbonizing-space-heating-air-source-heat-pumps> (2021年4月15日访问)
20. Byeongsu Kim, Sang Hun Lee, Dong Chan Lee, Yongchan Kim. Performance comparison of heat pumps using low global warming potential refrigerants with optimized heat exchanger designs (使用低全球变暖潜势制冷剂的热泵与优化设计的热交换器的性能比较)。 *Applied Thermal Engineering (应用热工程)* **171** (<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.114990>)
21. Liu D., Li P.K., Zhai X.Q., Wang R.Z., Liu M. (2017) Small Temperature Difference Terminals (小温差终端)。Handbook of Energy Systems in Green Buildings (绿色建筑能源系统手册)。Springer (https://doi.org/10.1007/978-3-662-49088-4_23-2) Byeongsu Kim, Sang Hun Lee, Dong Chan Lee, Yongchan Kim. Performance comparison of heat pumps using low global warming potential refrigerants with optimized heat exchanger designs (使用低全球变暖潜势制冷剂的热泵与优化设计的热交换器的性能比较)。 *Applied Thermal Engineering (应用热工程)* **171**。 (<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.114990>)。
22. Wood Mackenzie。2020年。Can biomethane decarbonise Europe's gas market? (生物甲烷能使欧洲天然气市场脱碳吗?) 参见 <https://www.woodmac.com/news/opinion/can-biomethane-decarbonise-europes-gas-market/> (2021年4月15日访问)
23. 欧洲沼气协会。Biomethane with bright opportunities towards the 2030 target (生物甲烷拥有光明的前景可实现2030年目标) 参见 <https://www.europeanbiogas.eu/biomethane-bright-opportunities-towards-2030-target/> (2021年4月15日访问)
24. 欧盟委员会。2020年。A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe (实现欧洲气候零负荷的氢能战略)。参见 https://ec.europa.eu/energy/sites/ener/files/hydrogen_strategy.pdf (2021年4月15日访问)
25. 气候变化委员会。2018年。Hydrogen in a low carbon economy (低碳经济中的氢能)。参见 <https://www.theccc.org.uk/wp-content/uploads/2018/11/Hydrogen-in-a-low-carbon-economy-CCC-2018.pdf>。(2021年4月15日访问)
26. 能源网络协会。2020年。Replacing Britain's old gas pipes and laying the foundations of a zero-carbon gas grid (更换英国的旧燃气管道, 为零碳燃气管网奠定基础)。参见 <https://www.energynetworks.org/newsroom/replacing-britains-old-gas-pipes-from-safeguarding-the-public-to-laying-the-foundations-of-a-zero-carbon-gas-grid> (2021年4月15日访问)。
27. 欧洲塑料管道和配件协会。Plastic pipe data around Europe (欧洲各地塑料管道数据)。参见 <https://www.teppfa.eu/media/reference-projects/french-gas-company/> (2021年4月15日访问)。

28. Kiwa Technology。2012年。Management Summary “Hydrogen blending with Natural Gas on Ameland” (“阿莫兰天然气加氢项目”管理摘要) 参见 https://www.netbeheernederland.nl/_upload/Files/Waterstof_56_7c0ff368de.pdf (2021年4月15日访问)。
29. 日本经济产业省(METI)。2019年。The Strategic Road Map for Hydrogen and Fuel Cells (氢能电池和燃料电池战略路线图)。参见 https://www.meti.go.jp/english/press/2019/pdf/0312_002b.pdf (2021年4月15日访问)。
30. XiaoZhi Lim。How heat from the Sun can keep us all cool (太阳的热量如何为我们制冷)。 *Nature (自然)* **542**。(http://doi:10.1038/542023a)
31. C40 全球城市气候领袖群。How to decarbonise your city's heating and cooling systems (如何为城市的供热和制冷系统脱碳)。参见 https://www.c40knowledgehub.org/s/article/How-to-decarbonise-your-city-s-heating-and-cooling-systems?language=en_US (2021年4月15日访问)。
32. 国际可再生能源机构(IRENA)。2017年。Renewable energy in district heating and cooling a sector roadmap for remap (可再生能源分区供热和制冷路线图)。参见 <https://www.irena.org/publications/2017/Mar/Renewable-energy-in-district-heating-and-cooling> (2021年4月26日访问)。
33. Millar, M.-A.; Elrick, B.; Jones, G.; Yu, Z.; Burnside, N.M.。Roadblocks to Low Temperature District Heating (低温分区供热的障碍)。 *Energies* **2020**, **13**。(https://doi.org/10.3390/en13225893)
34. 国际可再生能源机构。参见 <https://www.irena.org/geothermal> (2021年4月16日访问)
35. 冰岛政府。参见 <https://www.government.is/topics/business-and-industry/energy> (2021年4月16日访问)
36. 英国皇家学会。2020年。Nuclear Cogeneration: civil nuclear in a low-carbon future (核热电联供: 低碳未来的民用核电)。参见 <https://royalsociety.org/topics-policy/projects/low-carbon-energy-programme/nuclear-cogeneration>。(2021年4月16日访问)
37. Delta Energy and Environment, 2018年。The Cost of Installing Heating Measures in Domestic Properties (住宅物业安装供热措施的成本)。英国商务能源与产业战略部(BEIS) 研究论文编号: 2020/028Final
38. IEA。2019年。The Future of Hydrogen (氢能的未来)。参见 <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen> (2021年4月16日访问)
39. IEA。2018年。Clean and efficient heat for industry (为工业清洁高效供热)。参见 <https://www.iea.org/commentaries/clean-and-efficient-heat-for-industry> (2021年4月16日访问)
40. 全球碳捕获与储存研究院。2019年。Bioenergy and carbon capture and storage (生物能源与碳捕获和储存)。参见 https://www.globalccsinstitute.com/wp-content/uploads/2019/03/BECCS-Perspective_FINAL_18-March.pdf (2021年4月16日访问)
41. 国际能源署能源技术系统分析计划(IEA-ETSAP)和国际可再生能源机构(IRENA)。2015年。Solar Heat for Industrial Processes (用于工业过程的太阳能热量)。参见 <http://www.inship.eu/docs/sh5.pdf> (2021年4月16日访问)
42. 国际能源署能源技术系统分析计划(IEA-ETSAP)和国际可再生能源机构(IRENA)。2015年。Solar Heat for Industrial Processes (用于工业过程的太阳能热量)。参见 <http://www.inship.eu/docs/sh5.pdf> (2021年4月16日访问)
43. Hiflex 项目。An Innovative Renewable Energy System (创新可再生能源系统)。参见 <http://hiflex-project.eu/> (2021年4月16日访问)
44. Kosmadakis, G.。Estimating the potential of industrial (high-temperature) heat pumps for exploiting waste heat in EU industries (评估工业(高温)热泵在欧盟工业中利用废热的潜力), *Applied Thermal Engineering (应用热工程)*, **156**。(https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.04.082.)
45. van de Bor D, Ferreira, C, Kiss, A. Low grade waste heat recovery using heat pumps and power cycles (利用热泵和动力循环回收低品位废热)。 *Energy*. **89**。(https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.030)
46. Euroheat & Power 和奥地利国家技术研究院。2020年。The barriers to waste heat recovery and how to overcome them? (废热回收面临的障碍以及如何克服) 参见 https://ec.europa.eu/futurium/en/system/files/ged/20200625_discussion_paper_v2_final.pdf (2021年4月15日访问)
47. Amp Clean Energy。2019年。AMP Clean Energy and The University of Birmingham to develop ground-breaking heat storage solution (AMP Clean Energy 与伯明翰大学合作开发突破性蓄热解决方案)。参见 <https://www.ampcleanenergy.com/news/amp-clean-energy-and-the-university-of-birmingham-to-develop-ground-breaking-heat-storage-solution> (2021年4月15日访问)。
48. 斯旺西大学。Decarbonising the steel industry (钢铁行业脱碳)。参见 <https://www.swansea.ac.uk/business-and-industry/business-partnerships/tata-steel/research-collaborations/decarbonising-the-steel-making-process/> (2021年4月30日访问)。
49. 英国商业、能源和工业战略部。2016年。Evidence Gathering: Thermal Energy Storage (TES) Technologies (证据收集: 热能储存(TES)技术)。参见 https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/545249/DELTA_EE_DECC_TES_Final__1_.pdf (2021年4月16日访问)
50. Simó-Solsona M, Palumbo M, Bosch M, Fernandez AJ. Why it's so hard? Exploring social barriers for the deployment of thermal energy storage in Spanish buildings (为什么难度如此之大? 探讨在西班牙建筑中部署热能储存的社会障碍)。 *Energy Research & Social Science (能源研究与社会科学)*. **76**。2021年。(https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102057)
51. Zhongliang Yu 等。Iron-based oxygen carriers in chemical looping conversions: A review (化学循环转化中的铁基氧载体: 综述), *Carbon Resources Conversion (碳资源转化)*, **2**。(https://doi.org/10.1016/j.crcon.2018.11.004)
52. Swinkels Family Brewers。2020年。参见 <https://swinkelsfamilybrewers.com/content/bcorporate/en/media/persberichten/tu-e-demonstrates-iron-fuel-at-brewery-bavaria--a-new-circular-a.html> (2021年4月16日访问)
53. Power Technology。Solana Solar Power Generating Station, Arizona, USA (美国亚利桑那州 Solana 太阳能发电站)。参见 <https://www.power-technology.com/projects/solana-solar-power-generating-arizona-us/> (2021年4月16日访问)
54. Siemens Gamesa Renewable Energy GmbH & Co. 参见 <https://www.siemensgamesa.com/en-int/-/media/siemensgamesa/downloads/en/products-and-services/hybrid-power-and-storage/etes/siemens-gamesa-etes-ad-teaser-industrial-decarbonization.pdf> (2021年4月16日访问)
55. Cryohub。Cryogenic Energy Storage for Renewable Refrigeration and Power Supply (用于可再生能源制冷和供电的低温能量储存)。参见 <https://cryohub.info/en-gb/> (2021年4月16日访问)
56. 伯明翰大学。2018年。UK and China scientists develop world-first cold storage road/rail container (中英科学家合作开发世界首个冷藏公路/铁路运输集装箱)。参见 <https://www.birmingham.ac.uk/news/latest/2018/12/scientists-develop-world-first-cold-storage-roadrail-container.aspx> (2021年4月16日访问)
57. Zhang Ziqi, Wang Dandong, Zhang Chengquan 和 Chen Jiangping. Electric vehicle range extension strategies based on improved AC system in cold climate – a Review (基于改进交流系统的寒冷气候下电动汽车续航里程扩展战略—综述)。 *International Journal of Refrigeration*. **88**。(https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.12.018.)