

热泵的未来

International
Energy Agency

中国节能协会热泵专业委员会 译

CHPA
中国节能协会热泵专业委员会
China Heat Pump Association

iea

World Energy Outlook Special Report

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY

The IEA examines the full spectrum of energy issues including oil, gas and coal supply and demand, renewable energy technologies, electricity markets, energy efficiency, access to energy, demand side management and much more. Through its work, the IEA advocates policies that will enhance the reliability, affordability and sustainability of energy in its 31 member countries, 13 association countries and beyond.

This publication and any map included herein are without prejudice to the status of or sovereignty over any territory, to the delimitation of international frontiers and boundaries and to the name of any territory, city or area.

IEA member countries:

Australia
Austria
Belgium
Canada
Czech Republic
Denmark
Estonia
Finland
France
Germany
Greece
Hungary
Ireland
Italy
Japan
Korea
Lithuania
Luxembourg
Mexico
Netherlands
New Zealand
Norway
Poland
Portugal
Slovak Republic
Spain
Sweden
Switzerland
Republic of Türkiye
United Kingdom
United States

The European Commission also participates in the work of the IEA

IEA association countries:

Argentina
Brazil
China
Egypt
India
Indonesia
Kenya
Morocco
Senegal
Singapore
South Africa
Thailand
Ukraine

如今，我们为世界各地包括住宅、办公室、学校和工厂在内的各类建筑物供暖的许多方式，仍然在很大程度上依赖于化石燃料，尤其是天然气。显然这导致了大量的温室气体排放，而当前全球的能源危机正尖锐地提醒人们迫切需要转向更实惠、可靠和清洁的建筑供暖方式。

在这种情况下，能够高效地为建筑和工业领域提供用热需求的热泵技术，成为了使热量供给方式更加安全和具有可持续性的关键技术。热泵技术正在迅速变得更具成本竞争力，吸引了全球越来越多的政府、企业和消费者的兴趣。然而到目前为止，还没有针对热泵现状和其未来在能源系统中发挥的作用的全面全球研究。本《世界能源展望》特别报告旨在填补这一空白。

通过深入分析发现，迄今为止全球各国政府公布的政策计划都表明热泵应用范围将大幅扩大，这将为供暖领域中天然气、石油和煤炭的使用带来明显影响。到2030年，热泵有可能使全球二氧化碳排放量减少至少5亿吨。对于欧洲地区来说，热泵是减少其对俄罗斯天然气依赖性的重要工具，因为热泵可以在2030年将欧洲最大的天然气需求（建筑供暖）减少至少210亿立方米。

同时，这份特别报告也显示，要提高热泵的生产和应用，还有一些关键的瓶颈问题需要解决。政府的支持对于帮助消费者克服前期成本困难和开发热泵可提供的节能效益至关重要，是保护低收入家庭免受能源危机影响的当务之急。此外，也存在缺乏安装热泵的工人的问题，在欧洲和美国，企业已经难以填补电工、技工和建筑工人等工作岗位。

热泵日益重要的作用也要求政策制定者注意其对电力安全的影响。将热泵应用与建筑物的节能改造相结合可以降低此类风险，并且当与适当的电网规划相结合时，利用智能控制可以将热泵转变为电网资产。

我要感谢欧洲复兴开发银行为本报告提供的合作，也要感谢来自世界各地政府、行业和学术界的120多名高级别代表参加了我们2022年10月份在巴黎国际能源署总部举行的热泵研讨会，分享了宝贵的观点和见解。我也非常感谢国际能源署的团队，他们在我的同事Laura Cozzi的出色领导下，迅速编写了这份及时而全面的报告。我相信，这将有助于在这一紧急时刻为世界各地的决策者提供信息，让他们了解如何为热泵在应对能源和气候危机中发挥关键作用扫清道路。

Fatih Birol博士
署长
国际能源署

本研究由可持续发展、技术与展望司的世界能源展望团队与国际能源署（IEA）的其他多个部门合作编写。首席能源模型师和能源需求展望部门主管Laura Cozzi设计和规划了本研究。Yannick Monschauer为本报告的主要作者和协调人。Daniel Wetzel负责项目协调和撰写支持。Stéphanie Bouckaert统筹了模型的开发。

国际能源署内负责该报告的其他主要作者有：Justina Bodláková（劳动力与供应链）、François Briens（成本）、Olivia Chen（就业）、Daniel Crow（气候与影响）、David D'Ambrosio（数据科学）、Víctor García Tapia（展望）、Timothy Goodson（展望与投资）、Pauline Henriot（需求灵活性）、Bruno Idini（成本与报告制作）、Hyeji Kim（可担负性与成本）、Arthur Rogé（政策与欧盟领域）、Fabian Voswinkel（工业、含氟气体与非成本壁垒）。Marina Dos Santos提供了必要的支持。

Chiara Delmastro和Rafael Martínez Gordón负责模型工作，并与能源技术和政策团队一起做出了重要贡献。

做出其他宝贵贡献的人员有Ashley Acker、Ana Alcalde Báscones、Oskaras Alšauskas、Caleigh Andrews、Elisa Asmelash、Yasmine Arsalane、Vittoria Chen、Julie Dallard、Nouhoun Diarra、Michael Drtil、Will Hall、Ilkka Hannula、Paul Hugues、Martin Husek、Martin Küppers、Kazuhiro Kurumi、Toru Muta、Aloys Nghiem、Max Schönfisch、Carlo Starace、Monica Troilo、Gianluca Tonolo和Anthony Vautrin。

报告的责任编辑为Trevor Morgan，文字编审为Erin Crum。

国际能源署的其他高级管理人员和诸多同事也提供了宝贵的意见和反馈。特别是Keisuke Sadamori、Dan Dorner、Tim Gould、Paolo Frankl、Timur Gül、Brian Motherway和Araceli Fernandez Pales。

感谢国际能源署的宣传和数字化办公室在编写报告和网站方面提供的帮助，特别是Jad Mouawad、Curtis Brainard、Hortense de Roffinac、Astrid Dumond、Tanya Dyhin、Grace Gordon、Jethro Mullen、Isabelle Nonain-Semelin、Julie Puech、Robert Stone、Clara Vallois、Gregory Viscusi、Lucile Wall、Therese Walsh和Wonjik Yang。国际能源署的法律顾问办公室、管理和行政办公室以及能源数据中心在整个报告编写过程中提供了协助。

欧洲复兴开发银行（Nigel Jollands、Greg Gebrail、Lyza Rossi）、国际能源署热泵技术合作计划（Caroline Haglund Stignor、Monica Axell、Metkel Yebiyo、Stephan Renz、Morgan Willis、Benjamin Zühlsdorf、Christoph Reichel）和David Wilkinson（独立顾问）提供了外部协助。

这项工作的顺利完成依赖于欧洲复兴开发银行、欧洲热泵协会、西门子能源公司、菲斯曼和国际能源署清洁能源转型计划提供的支持和投入。

2022年10月初，在巴黎的国际能源署总部举行了一个咨询研讨会，来自政府、大型设备厂商和学术界的120名高级代表到场参加，为这项工作提供了宝贵的见解、反馈和数据。在此，对他们的支持表示感谢。

诸多政府官员和国际专家为报告提供了非常有价值的意见和建议，并审查了报告初稿。他们包括：

Dries Acke	欧洲太阳能电力协会
Daniele Maria Agostini	意大利国家电力公司
Monica Axell	瑞典国家研究院热泵中心
Marion Bakker	荷兰企业管理局
Marco Baresi	Turboden
Pascal Barthe	能源转型部（法国）
Aurélie Beauvais	欧洲热能和电力
Veerle Beelaerts	欧洲供热协会（EHI）
Stefano Bellò	Assoclima
Antonio Bouza	美国能源部
Susanne Buscher	联邦经济事务和气候行动部（德国）
Tomas Caha	Sako CZ
Emmanuel Chabut	法国电力集团
Alberto Coronas	罗维拉-威尔吉利大学（西班牙）
Marco Dall'Ombra	Assoclima
Bianca De Farias Letti	气候变化委员会（英国）
Raymond Decorvet	MAN能源解决方案

Stefano Demattè	阿里斯顿
Naoko Doi	日本能源经济研究所
John Dulac	圣戈班
Thomas Fleckl	奥地利理工学院
Duncan Gibb	睿博能源智库
Monique Goyens	欧洲消费者组织
Joan Groizard	能源多样化和节约研究所（西班牙）
Benjamin Haas	Engie
Caroline Hagelund Stignor	瑞典国家研究院热泵中心
Christian Hüttl	西门子能源公司
Taku Inamura	经济产业省（日本）
Nicolas Jensen	博世
Andrej Jentsch	IEA DHC TCP
Nigel Jollands	欧洲复兴开发银行
Arno Kaschl	欧盟委员会（DG气候行动）
Paul Kenny	通信、气候行动与环境部（爱尔兰）
Stephan Kolb	菲斯曼
Sanjeev Kumar	欧洲地热理事会
Pawel Lachman	波兰热泵协会
Rebecca Lamas	欧洲大学学院
Francisco Laverón Simavilla	伊维尔德罗拉
Dong Li	海尔集团
Christian Maaß	联邦经济事务和气候行动部（德国）
Silvia Madeddu	施耐德电气
Josephine Maguire	爱尔兰可持续能源管理局
Tom Marsik	国家可再生能源实验室
Nick Meeten	应用能源
Vincent Minier	施耐德电气
Masashige Morishita	经济产业省（日本）
Thomas Nowak	欧洲热泵协会
Karl Ochsner sen.	奥克斯纳热泵
Zhonghe Pang	中国科学院

致谢

世界能源展望 | 特别报告

Alan Pears	皇家墨尔本理工大学（澳大利亚）
Eloi Piel	欧洲热能和电力
Maurizio Pieve	意大利新技术、能源和可持续经济发展署
Reinhard Radermacher	马里兰大学（美国）
Stephan Renz	IEA HPT TCP
Rowena Rodrigues	GlenDimplex
Hugo Sancho	能源转型部（法国）
Bans Sanli	土耳其常驻经合组织代表团
Wolf-Peter Schill	德国经济研究所
Andreas Scholz	未来数据
Peter Schossig	夫琅和费太阳能系统研究所
Jas Singh	世界银行集团
Shintaro Tabuchi	日本自然资源和能源厅
Tom van Ierland	欧盟委员会（DG气候行动）
Jozefien Vanbecelaere	欧洲热泵协会
Uta Weiß	Agora Energiewende
Mark Winskel	爱丁堡大学英国能源研究中心
Miki Yamanaka	大金
Kristian Yde Agerbo	Lun
Benjamin Zühlsdorf	丹麦能源与气候技术研究所

该报告反映了国际能源署秘书处的观点，但不一定反映个别国际能源署成员国或任何特定资助方、支持方或合作方的观点。国际能源署或为本工作做出贡献的任何资助方、支持方或合作方均不对报告内容（包括其完整性或准确性）做出任何明示或暗示的陈述或保证，也不对使用或依照本报告的行为负责。

该报告和其中包含的任何地图均不影响任何领土的地位或主权，不影响国际边界和边界的划定，也不损害任何领土、城市或地区的名称。

欢迎提出意见和问题，请寄给：

Laura Cozzi

Directorate of Sustainability, Technology and Outlooks
International Energy Agency
9, rue de la Fédération
75739 Paris Cedex 15
France

电子邮件: weo@iea.org

有关《世界能源展望》的更多信息，请访问: www.iea.org/weo.

前言	3
致谢	4
执行摘要	10
引言	14
1 热泵应用展望	15
1.1 引言	16
1.2 供热需求	19
1.3 建筑用热泵	23
1.4 工业用热泵	34
1.5 区域供热用热泵	39
2 加速热泵应用的影响	41
2.1 引言	42
2.2 能源安全	42
2.3 电力系统和需求灵活性	44
2.4 能源可负担性	47
2.5 公共卫生和环境	49
2.6 创造就业机会	54
3 障碍与解决方案	57
3.1 引言	58
3.2 成本壁垒	59
3.3 用户侧非成本因素障碍	67
3.4 制造限制	70
3.5 熟练安装人员短缺	72
附件	77
附件A. 技术费用和财政支持计划	79
附件B. 定义	84
附件C. 参考文献	93

热泵是一种经过验证、安全和可持续的供热的方法

由低排放电力驱动的热泵，是全球范围内向安全和可持续供暖过渡的核心技术。目前市场上可用的热泵能效是天然气锅炉的三到五倍。在目前这个化石燃料价格由于全球能源危机而急速上涨的关头，热泵能够降低居民家庭应对化石燃料价格飙升的风险。全球超过六分之一的天然气需求用于建筑供暖——在欧盟，这一比例为三分之一。到2050年，将有26亿人生活在同时需要供暖和制冷的地区，而许多热泵也可同时提供制冷，这就消除了他们对单独制冷空调的需求。建筑供暖每年产生40亿吨二氧化碳排放量，占全球排放量的10%。即使是在目前的发电组合结构下，安装热泵代替化石燃料锅炉也能在所有主要供暖市场中显著减少温室气体排放——随着电力系统的脱碳，这一优势将进一步增强。

2021年，热泵满足了全球约10%的空间供暖需求，但安装速度正在迅速增长。热泵的供热份额与燃油供热和其他形式的电供热相当，但低于燃气供热（份额40%以上）和区域供热（份额15%）。在一些国家，热泵已经成为最大的供暖来源。在挪威，60%的建筑配备了热泵，瑞典和芬兰的这一比例超过40%，这削弱了热泵不适合寒冷气候的说法。2021年，热泵的全球销售增长了近15%，是过去十年平均水平的两倍。欧盟的热泵销售增长约为35%，考虑到能源危机影响，预计未来这一增长速度还将进一步加快，波兰、荷兰、意大利和奥地利2022年上半年的热泵销量约为去年同期的两倍。中国仍然是热泵最大的新销售市场，而北美目前安装有热泵的家庭数量最多。上述地区与日本和韩国一起，也是热泵主要的制造业中心，即该行业最大企业的所在地。

政府对能源安全的关注和对气候变化的承诺将使热泵成为供暖和热水制备的主要脱碳手段。本报告探讨了一种情景，即世界各国政府全面、及时地履行其宣布的所有能源和气候的相关承诺。在这种情景下，作为一种经过验证的供暖脱碳技术，热泵的全球装机容量将从2021年的1000GW跃升至2030年的近2600GW，使其在建筑总供暖需求中的份额从10%提高到近20%。因此，天然气需求将减少800亿立方米，供暖用燃油每天减少100万桶，煤炭减少5500万吨标准煤。总的来说，这意味着到2030年，热泵将贡献全球建筑供暖化石燃料使用减少量的近一半，其余部分将来自其他节能措施。在另一个符合1.5°C全球气候目标的情景下，热泵的发展速度将更快——到2030年，热泵的应用规模将增长近三倍，在供暖中的份额将达到25%。

热泵还可以满足工业和区域供热的供热需求。目前，大型热泵可以提供高达140-160℃的热量，通过对其进行创新和改进设计还可以达到更高的温度。目前最常见的工业热泵提供的是较低温度的热量。近期造纸、食品和化工行业应用热泵的机会最大，近30%的综合供热需求能够通过热泵解决。仅在欧洲，这三个行业中由于近期天然气价格上涨而受到严重打击的3000个设施就可以提供15GW的热泵安装量。

热泵有助于迅速减少天然气进口，尤其是在欧洲

在欧盟，使用热泵来降低其对天然气供暖依赖的潜力尤其大，天然气是欧盟使用最多的供暖燃料，因此欧盟也是天然气价格上涨最多的地区。在与欧盟气候目标一致的情况下，到2030年，热泵销量将从2021年的200万台增加到700万台，这有助于实现REPowerEU计划中在2030年之前停止从俄罗斯进口天然气的目标。这一部署将使欧盟2025年的天然气消费量减少70亿立方米，到2030年减少210亿立方米，相当于2021年欧盟从俄罗斯进口管道天然气总量的近15%。

与此同时对建筑物进行改造可以减轻电力部门的压力

尽管能源效率和需求响应措施可以大大减少对电力系统的影响，但热泵的加速应用仍不可避免地增加了全球电力需求。如果实现气候承诺，建筑和工业供热的电力份额将在2021年至2030年间增加一倍，达到16%。在此期间，全球电力需求增长25%，而热泵对此增长的贡献还不到10%。对于那些新增热泵设备但不同时提高能源效率的家庭来说，这可能会使他们在冬季的用电峰值需求增加到近三倍。将家庭用电能效等级提高两个等级（例如，在欧洲国家从D级提高到B级）可以将供暖能源的需求减半并降低所需热泵的规模，为消费者节省资金，并将高峰用电需求的增长减少三分之一。再加上精心的电网规划和需求侧管理，这将缓和由供热电气化引起的配电网升级需求，并最大限度地减少到2030年对额外灵活发电能力的需求。

热泵的加速应用带来一系列的好处

在其生命周期内，热泵可以为消费者节省资金，并保护他们免受价格冲击。使用热泵的普通家庭或企业会比使用燃气锅炉的家庭或企业在能源上花费更少。这些节省的费用抵消了目前许多市场上热泵较高的前期成本——在一些市场上，即使在不包括补贴的前提下也可以抵消。在当今能源价格飙升的背景下，热泵的经济性问题得到了改善：

从美国家庭每年节省300美元到欧洲家庭每年节省900美元不等。通过为贫困家庭提供适当的支持来管理前期成本，热泵可以有效地解决能源贫困问题，在不再使用天然气锅炉后，低收入家庭可以通过降低能源开支节省家庭收入的2%至6%。

改用热泵可以减少温室气体的排放，并有助于改善空气质量。根据国家气候目标，加快热泵的应用，到2030年可以使全球二氧化碳排放量减少5亿吨。然而，含氟气体制冷剂（强效温室气体）的意外泄漏可能会损害其对气候的积极影响。使用如今常用的制冷剂，即使是在使用高排放电力的情况下热泵仍然比燃气锅炉减少了至少20%的温室气体排放。在电力系统更加清洁的国家，这一降幅可高达80%。全球由于燃料燃烧为建筑物供暖引起的主要空气污染物排放量也有所下降，尤其是中国的燃煤供暖，而与燃料燃烧供暖有关的其他危害也有所减少。

为满足日益增长的需求而扩大热泵制造和安装将创造更多的就业机会。在我们的模型情景中，到2030年，全球热泵供应行业的就业人数将增加至近三倍，达到130多万人。安装行业的工作岗位增长最快，维修和制造行业的工作岗位也在增长，为工人尤其是中等技能的工人提供了大量的就业机会。

需要采取协调一致的行动，克服加快热泵应用的障碍

加快热泵的应用需要克服一些障碍。其中最主要的问题是与其它供暖方案相比购买和安装热泵设备的前期成本更高；同时还存在其他阻碍消费者选用热泵的非成本因素；生产制造约束；以及合格安装人员的潜在短缺。需要各国政府与热泵行业合作并采取协调一致的行动，解决这些障碍，实现更高的热泵应用率。

尽管可以长期节能，但高昂的前期成本可能会阻止消费者应用热泵。购买和安装一台空气-空气模式热泵的成本通常在3000美元到6000美元之间。然而，即使是最便宜的空气-水热泵，考虑对现有散热器系统的改造，其价格在大多数主要供暖市场上仍比天然气锅炉贵两到四倍。目前，全球有30多个国家实施了对热泵的财政激励措施，覆盖了当今70%以上的供暖需求。这些国家的补贴使得最便宜的热泵选择方案与消费者购买新燃气锅炉的成本相当。还可以针对低收入家庭（如在波兰）和/或高效率模式（如在加拿大）采取额外的激励措施。在一些国家，电费和能源税的设计使热泵相对于化石燃料锅炉处于不利地位，因此关税和税收应该偏向于使消费者选择更清洁、更高效的

用能方式。

一些非成本障碍阻碍消费者应用热泵。这些障碍问题包括信息缺乏、对业主和租户的分散激励以及建筑法规等。一些国家的政府已经采取行动调整建筑规范(如捷克共和国)，为消费者创建“一站式商店”(如在爱尔兰)，并鼓励其他商业模式来解决分割激励问题——尤其是在北美、英国和德国——尽管这还需要做出更大的努力。需要特别注意的是解决在 multi 住宅和商业建筑中安装热泵的障碍，尽管这类建筑目前在销售中所占的份额很低。

合格安装人员的短缺已经成为许多关键供暖市场的瓶颈，这需要对工人进行大规模的二次培训。在我们的情景设想中，到2030年，全球对热泵全职安装人员的需求将增加到原来的四倍。将热泵纳入现有认证体系并对具有类似技能的供热技术人员、管道工和电气工程师进行认证，将有助于减少培训需求。欧洲各地采用的财政激励措施，也可以吸引新员工参加专门的培训项目。

政府需要与行业合作，降低供应方面的障碍

行业领先的热泵制造商最近宣布，计划主要在欧洲投资超过40亿美元用于扩大热泵产能和相关工作。未来四年新安装的热泵数量将大致相当于过去十年安装的热泵数量。以美国为代表的几个国家，正在通过激励措施来增强国内热泵的制造产能，以应对其供应链的脆弱性。在热泵制造商考虑向何处扩张业务时，长期政策的一致性和监管的确定性，以及加强供应链针对性的行动仍然至关重要。特别是，关于含氟气体的法规必须考虑在限制制冷剂排放的需求与成本、安全、能源效率和供应链之间取得平衡。

按照国家气候目标加快热泵的应用指日可待，但需要政策制定者和行业做出进一步努力。为实现国家气候目标，尽管需要进一步加速发展才能实现国际能源署2050年净零排放情景中的路径，但未来十年热泵市场的增长并不会像我们已经看到的太阳能光伏和电动汽车那样迅猛。热泵发展所需的额外前期投资相当可观，到2030年每年将达到1600亿美元，但这些增量成本将被整体经济中的燃料节省成本所抵消，尤其是如果目前的高油价持续保持下去的话。政府和行业在解决持续存在的市场壁垒方面发挥着至关重要的作用，并且使热泵在解决当今最紧迫的问题（能源安全、能源可负担性和快速减排）方面充分发挥作用。

俄罗斯入侵乌克兰及其对欧洲天然气供应的削减，让世界陷入了从上世纪七十年代以来最严重的能源危机。尽管欧洲受到的影响最大，但不断飙升的能源价格正冲击着世界各地的家庭和企业。除此之外，全球气候危机的影响越来越明显，进一步促使各国政府采取紧急措施，以减少对化石燃料的依赖。

该报告评估了热泵在解决能源安全和气候问题方面可以发挥的作用，重点介绍了在2030年之前加快热泵推广所需的具体步骤。热泵可以替代燃气和燃油锅炉，从而减少欧盟对俄罗斯化石燃料的依赖¹。从长远来看，热泵能够在供暖领域的碳减排发挥主导作用，是2050年实现碳中和的重要部分。热泵可以安装在建筑和区域供暖热网中，同时实现供暖和制冷，并在工业中提供低温、中温热量。由于热泵能够高效利用能源，因此可以降低家庭和企业的能源费用。并且热泵由低碳的电驱动，因此其碳排放量远远小于当今的普通供暖设备。

虽然热泵可以实现供暖和制冷（被称为可逆热泵），但本报告重点关注供暖。鉴于欧盟在2022年3月通过的政策目标，即在2030年前消除对俄罗斯进口天然气的依赖，该报告特别关注了热泵在欧洲的推广对该地区天然气需求的影响。

报告结构如下：

- 第1章首先介绍了热泵及其工作原理，然后描述了2050年的供暖需求前景，强调了当前和未来能源结构的差异以及不同地区之间热用户的演变。之后报告重点阐述了到2030年的这段时期，热泵在全球和各地区的建筑、工业和区域供暖中的应用预测，以及对能源需求、排放和投资需求的影响。
- 第2章更详细地阐述了加速热泵推广对能源安全、电力系统、需求灵活性、能源可负担性、公共健康、环境和创造就业机会的影响。
- 第3章评估了热泵推广的主要潜在障碍，包括安装热泵的前期成本、其他市场壁垒、制造商和其他供应链限制、安装人员的短缺，以及解决这些问题的政策支持。

¹参见国际能源署（IEA）减少对俄罗斯天然气进口依赖的10点计划, <https://iea.li/gas-reliance>

热泵应用展望
温度上升？

小 结

- 减少化石燃料在供暖中的使用，对于同时应对紧迫的能源安全风险、保护家庭和企业免受能源价格波动的影响以及实现气候目标至关重要。全球与建筑相关的能源消耗有近一半用于供暖，目前天然气是供暖最主要的能源来源，每年消耗7600亿立方米。在欧盟，这一比例更高，其建筑燃气供暖的天然气消耗量高过其电力系统。算上其他化石燃料，2021年供暖直接和间接排放的二氧化碳超过40亿吨——占全球能源相关二氧化碳排放量的10%。
- 热泵是建筑供暖和提供热水领域降碳的主要手段。如今，安装在建筑物中的热泵总容量超过了1000GW。在承诺目标情景中，假定国家气候和能源安全目标都得以实现，到2030年，热泵总容量将增长到2600GW。这将使热泵在建筑总供热需求中的份额从2021年的近10%提高到20%。其中许多热泵循环是可逆的，也可以制冷。到2050年，26亿人将生活在有大量供暖和制冷需求的地区。
- 在承诺目标情景（APS）中，在2030年，热泵对全球建筑供暖领域化石燃料使用量的减少贡献了近一半。热泵帮助减少了超过800亿立方米的天然气需求和100万桶/日的供暖燃油需求，而煤炭的使用量则下降到可忽略不计的水平。到2030年，热泵贡献约9%的电力需求增量，仅略微增加整个系统的冬季峰值负荷。虽然需要对电网仔细规划以确保电网（尤其是配电网）的稳定性，但大多数地区不需要新的发电容量就可以承受热泵对电力需求的增长。
- 在承诺目标情景（APS）中，由于热泵的作用，欧盟天然气使用量将急剧下降，对实现REPowerEU 中的目标有很大帮助。到2030年，整个欧盟的热泵年安装量将达到近700万台——而2021年仅为200万台。热泵年安装量的快速增长将使天然气消费量在2025年减少70亿立方米，在2030年减少210亿立方米，大致相当于2021年欧盟从俄罗斯进口天然气总量的15%。
- 热泵还可以减少工业对化石燃料的需求，目前工业部门约占天然气消费量的20%。如今，热泵在许多行业可以用于100℃以下的低温工艺加热，但在商业中热泵可用于高达150℃的工艺，在技术上可以实现更高的温度。到2030年，近40%的工业用热需求在热泵所适合的温度下。区域热网也可以使用大型热泵。一些欧洲国家的目标是到2040年实现供热管网脱碳。

1.1 引言

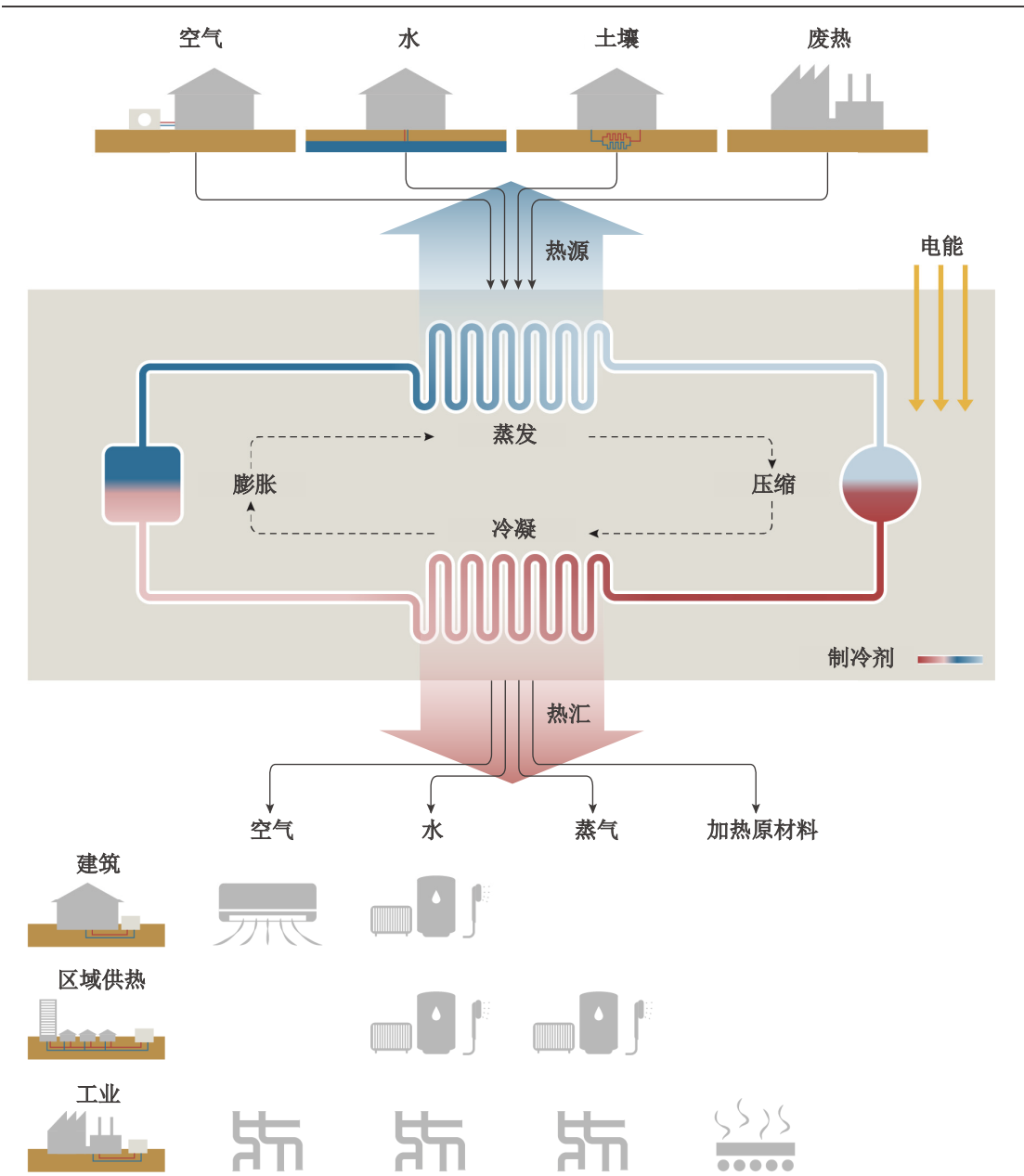
本章根据2022年10月发布的《世界能源展望》（WEO）最新版本中描述的对全系统能源情景的预测，评估了热泵安装的前景及其对建筑和工业供暖能源结构的影响（IEA，2022a）。这里重点描绘的是“承诺目标情景”（APS），该方案假设世界各国政府全部按时、足额履行已宣布的能源和气候相关承诺。在整个报告中，承诺目标情景（APS）与既定政策情景（STEPS）形成了对比，后者假设今天已经实施的政策都有具体的实施计划作为支持，描述了该假设下全球能源系统下将如何演变。这些比较旨在强调在哪些方面需要做出更多努力以加速热泵的应用。我们也将承诺目标情景（APS）与2050年净零排放情景（NZE）在某些方面进行了比较，该方案展示了到2050年将能源净排放减少到零的途径，从而将全球平均气温稳定在比工业化前高1.5℃的水平。有关这些情景和预测的更多细节，请参见《世界能源展望2022》。

热泵使用的技术原理类似于冰箱或空调。它从一个热源中提取热量¹，如周围的空气、储存在地下的地热能、附近的水源或工厂的废热。然后将热量提升温度并传递到需要的地方（图1.1）。由于大部分热量是转移而不是产生的，热泵的效率要远远高于传统的加热技术（如锅炉或电加热器），而且运行成本更低。以热能形式输出的能量通常为热泵提供动力所需能量（通常是电能）的数倍。例如，典型的家用热泵的性能系数（COP）约为4，即输出的热能是用于热泵运行电能的4倍。这使得目前的热泵机组比燃气锅炉的能源效率高3-5倍。热泵也可以与其他供暖系统（通常是燃气供暖）结合，形成混合系统。

热泵本身由压缩机和热交换器组成，前者通过制冷循环使制冷剂流动，后者从热源中提取热量。然后通过另一个热交换器将热量传递给散热器。在建筑物中，热量是通过强制的空气或水循环系统（如散热器或地板供暖）来输送的。热泵可以连接到水箱上，以生产生活热水或提供灵活的水循环系统。许多热泵除了满足冬季的供暖需求外，还可以在夏季制冷。在工业领域，热泵被用来输送热空气、热水、蒸汽或者直接加热原材料。在商业、工业、区域热网中，大型热泵需要提供比住宅应用更高的热源温度，其来源可以是工业生产、数据中心或废水中的废热。

¹在物理学上，只要温度高于绝对零度（在0开尔文或-273℃），就存在热能。

图 1.1 ▶ 热泵的工作原理



IEA. CC BY 4.0.

一个典型的住宅热泵只需要输入1个单位的电力就能够输出4个单位的热量；该循环也可以反向运行制冷。

注：辅助能源也可以是另一种燃料，如天然气，但目前大多数热泵是由电力驱动。

热泵的效率在很大程度上取决于热源。在冬季，地面和外部水源通常保持在比环境空气更高的温度，因此地源和水源热泵会比空气源热泵消耗更少的电力，并得到更高的COP。在寒冷的气候条件下尤其如此，因为空气源热泵的外部组件除霜会消耗额外的能量。然而，地源热泵的安装费用更高，因为它们需要一个地下换热器——一个深入地下的垂直钻孔或一个埋在地表以下至少一米的大型管网。将水源热泵连接到附近的河流、地下水或废水中的费用也比较昂贵。

由于以上原因，地源和水源热泵通常不如空气源热泵常见。在世界范围内，几乎85%的建筑用热泵都是空气源热泵，因为它们的安装工作量最小。其中许多是空气-空气型热泵。而在供暖为主的地区，空气-水（或水循环）热泵的普及率越来越高。在欧洲，空气-水热泵系统比其他地区更常见，占有售出热泵设备的近一半。地源热泵和混合热泵（将热泵与另一种加热源（如燃气锅炉）结合起来的装置），目前在全球热泵销售中只占一小部分。但它们在许多国家占了很大的市场份额。在地源热泵的主要市场瑞典，每四户人家就有一户配备了地源热泵。在中国，地源热泵的市场也在稳步增长，它们常用来取代以煤为基础的供暖系统，这有助于减少二氧化碳（CO₂）的排放，改善空气质量。

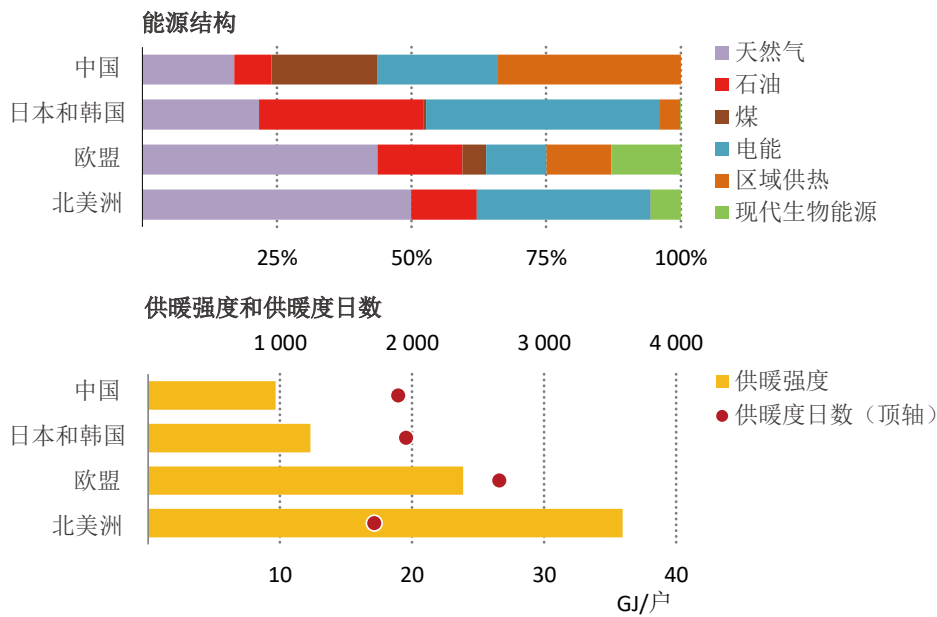
单户住宅和公寓可以使用一个或多个小热泵机组，或者在 multi 户住宅和商业建筑中，使用一个集中的热泵机组为多个单元房间提供供暖和制冷。在亚洲，单独的空气-空气热泵在 multi 户住宅中很常见。然而，由于 multi 户住宅的限制，特别是在欧洲，使得热泵在单户住宅之外不太常见。集中式热泵可以为整栋 multi 户住宅和商业建筑提供热量，但在目前安装的热泵总容量中只占很小的份额。例如2021年在欧洲售出的热泵设备中只有10%是用于 multi 户住宅的大型集中式热泵（EHPA，2022）。商业建筑特别适合使用集中式热泵，因为它们通常在有供暖需求的同时还全年都具有较大的制冷需求，例如医院、超市食品冷藏或者写字楼的大型服务器机房。商业系统可以利用制冷循环产生的余热来满足加热需求，从而实现高效率和最大限度地减少电力消耗。

目前热泵技术已经成熟，其生产和安装原则上可以迅速扩大规模。但是在扩大其应用方面还存在一些障碍，包括安装成本相对较高，以及缺乏技术工人等各种供应链限制。需要通过协调一致的努力来减少市场和监管壁垒并加强供应链。这些努力反映在最近激增的政府鼓励采用热泵的新政策和路线图中，特别是欧盟的REPowerEU计划和美国的《通胀削减法案》，这两个法案都是在2022年通过的。

1.2 供热需求

目前供暖在全球能源消费中占据相当大的份额，也是二氧化碳排放的主要来源之一。2021年，全球为建筑供暖和提供热水的能源需求达到62艾焦，约占建筑物总能源消耗的一半，直接排放25亿吨的二氧化碳，约占建筑物直接排放量的80%。如果考虑到电力和区域供热的间接排放，总二氧化碳排放量将上升到40亿吨。

图 1.2 ▷ 2021年部分国家/地区的建筑供暖情况



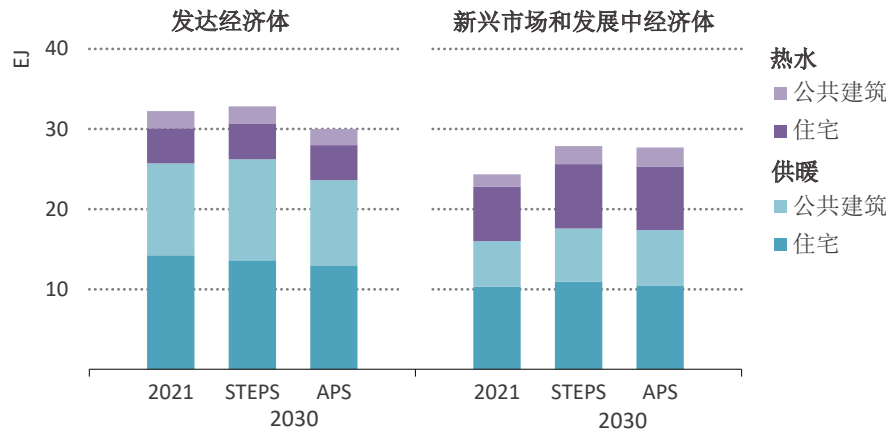
IEA. CC BY 4.0.

天然气是建筑供暖的主要能源形式，满足全球约45%的供暖能源需求。

注：GJ = 十亿焦耳；HDD = 供暖度日数。HDD是衡量供暖需求的标准化指标，可以进行地区之间的比较。它们通过比较实际温度和标准基准温度来测量给定地点的寒冷程度。在此分析中，基准温度假定为18℃，同时也考虑了湿度的影响。

不同国家和地区的家庭能源需求水平差异很大，主要取决于气候、家庭规模、居住空间、建筑隔热程度以及供暖设备的类型和质量(图1.2)。总供热需求中约70%左右用于供暖，其余用于提供生活热水。用于供暖的能源结构也各不相同。天然气是建筑供暖的主要能源形式，满足了全球42%的供暖能源需求。全球六分之一的天然气需求用于建筑供暖——在欧盟，这一数字会上升到三分之一。其次是石油占比15%，然后是电力同样占比15%，集中在中国、北欧、东欧和中亚的区域供热占11%。生物质和煤炭的直接使用弥补了剩余的供暖需求差距。各主要供暖地区的供暖燃料结构有很大差异，但除了东亚以外，其他地区都以天然气为主。

图 1.3 ▷ 2021和2023年，既定政策情景（STEPS）和承诺目标情景（APS）中按地区和部门划分的建筑供暖和热水服务需求



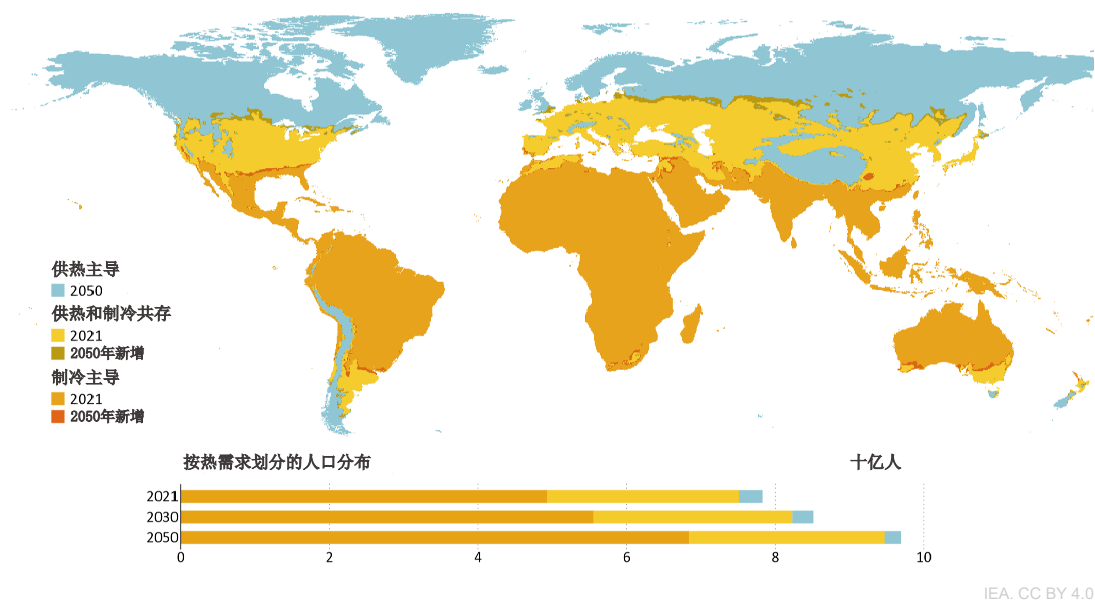
IEA. CC BY 4.0.

在发达经济体，建筑围护结构的改进抑制了供暖服务的需求；而在新兴经济体，不断扩大的建筑群促进了供暖需求。

注：EMDE=新兴市场和发展中经济体

世界上大多数需要供暖的人口已经有相关保障，这使得供暖需求的前景相对可预测。目前，全球近40%的人口生活在每年至少有部分时间需要供暖的周边环境地区。预计未来几十年，这些地区（主要是北半球）的人口数量将大致保持稳定。但日益繁荣的经济可能会推高总体供暖需求，尤其是在新兴市场和发展中经济体。因为人们会搬进新的更大的住宅，并增加对供暖服务（尤其是热水）的使用，不过供热效率的提高可能会抵消部分增长。经济活动的增加也将推高商业建筑的供暖需求。在既定政策情景（STEPS）和承诺目标情景（APS）中，新兴经济体建筑的总体供热需求在2021年至2030年期间显著增长，且主要由热水驱动（图1.3）。相比之下，发达经济体的供暖需求在既定政策情景（STEPS）中基本稳定，因为供热效率的提高抵消了单人家庭数量的增长。而在承诺目标情景（APS）中，为提高建筑效率做出的努力，特别是通过改善建筑围护结构，适度减少了供暖需求。

图 1.4 ▷ 2021和2050年既定政策情景（STEPS）中各地区供暖和制冷需求

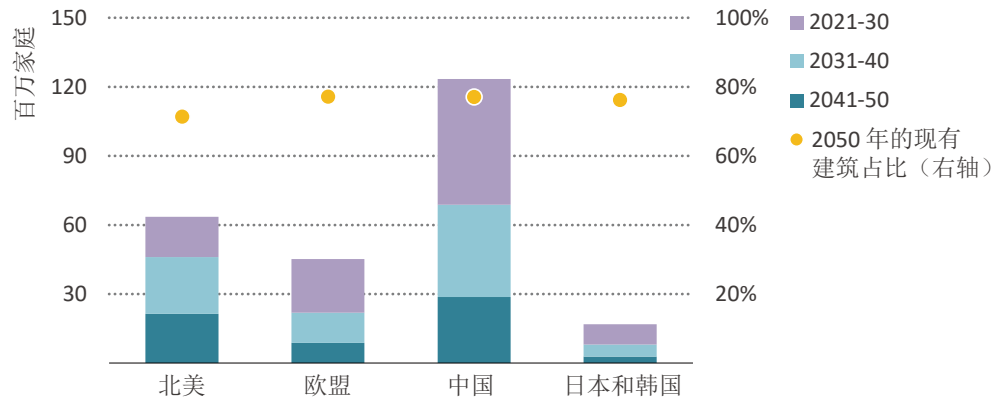


到2050年，需要供暖地区的人口几乎没有增长，而需要制冷地区的人口将增长四分之一

注：供暖是指以基准温度18℃计算的供暖度日数——HDD(18℃)大于或等于1 000(℃天)的地区，制冷是指以基准温度10℃计算的空调度日数——CDD(10℃)大于或等于1 000(℃天)的地区。关于该指标的进一步信息见IEA(2020a)，关于HDD和CDD的进一步信息见IEA(2022b)

从长远来看，由于气候变化，有大量供暖需求地区的总体供暖能源消耗预计将下降（尽管这一下降将在一定程度上被这些地区和其他地区的制冷需求增加所抵消）。相反，到2050年，全球几乎所有人都将面临会引起公共卫生风险的热浪。这促使大多数地区更多地使用空调（另见2022年《世界能源展望》第5.7节关于空间制冷）。热泵既可以供暖也可以制冷，因此在一年中不同时期分别需要供暖和制冷的地区，热泵可能成为新建筑和供暖改造的首选。在既定政策情景（STEPS）中，居住在同时需要供暖和制冷地区的人口数量到2050年将增长约3%，达到26亿人（图1.4）。在大多数需要供暖的地区，如今建造的大部分建筑到2050年仍在使用（图1.5）。这意味着减少供暖中化石燃料的使用需要进行效率改造并转向低碳供暖技术。还需要制定严格的建筑规范，以确保新建筑达到零碳建筑标准，从而实现供暖脱碳。

图 1.5 ▷ 2021-2050年部分国家/地区按十年划分的新增家庭数量



IEA. CC BY 4.0.

2050年四分之三的建筑存量如今已经矗立在北美和欧盟，它们共占目前全球供暖需求的40%以上。

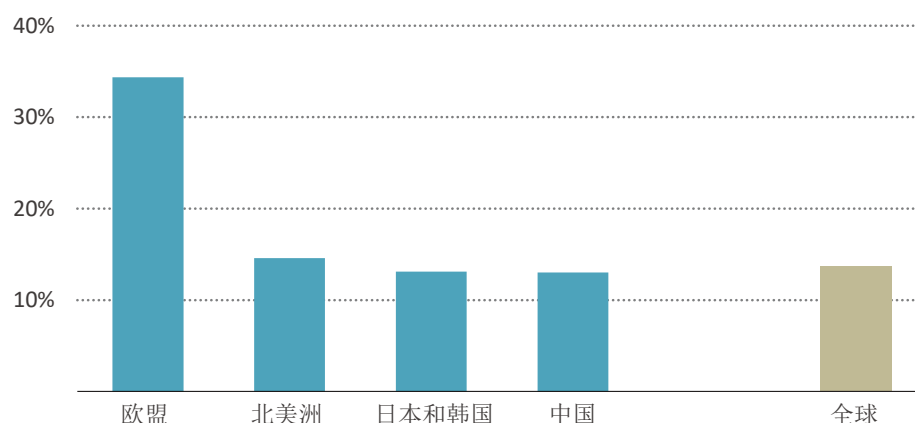
注: 中国的拆迁率假设预计将低于当前的拆迁率

1.3 建筑用热泵

1.3.1 全球展望

2021年全球热泵销售量比2020年增长了13%，其中欧盟增长最快，约为35%（图1.6）。尽管近年来销售量不断上升，但2021年热泵仍仅能满足全球建筑中约10%的供暖需求。目前，应用于住宅和非住宅建筑中的热泵容量超过1000GW²，其中近一半安装在北美地区。许多热泵机组被用于温和或者温暖的气候区，在那里它们主要用于制冷，但仍然是主要的供热源（在一年中的几个月供热）。然而由于长期的政策支持，如今热泵的普及率在欧洲最冷的地区最高。在挪威热泵机组满足了60%的建筑供暖需求，在瑞典和芬兰满足了40%以上（Rosenow et al., 2022）。

图 1.6 ▶ 2021年部分地区建筑用热泵销售的年度增长情况



IEA. CC BY 4.0.

北美安装的热泵最多，中国是最大的市场，但欧盟是当今增长最快的市场

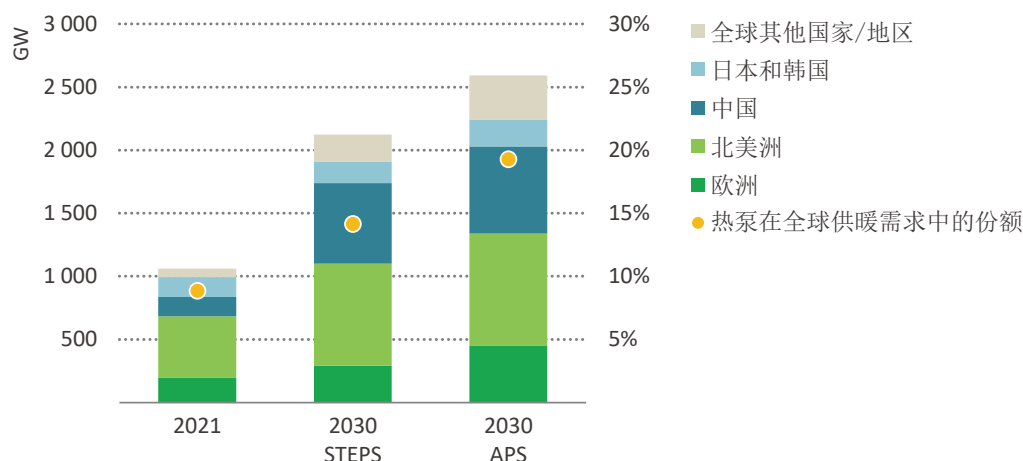
资料来源: IEA基于AHRI（2022），Chinabaogao（2022），EHPA（2021），JRAIA（2022）的分析

如既定政策情景（STEPS）所示，有关热泵的政策和激励措施大幅增加，特别是在美国的通胀削减法案中，这将加速热泵的应用。

在既定政策情景（STEPS）中，到2030年，全球建筑中的热泵容量将增加到2100GW以上，满足全球建筑供暖需求的14%（图1.7）。许多主要供暖地区都有对热泵的政策支持。在目前全球住宅供暖需求中，有70%以上的地区可以获得补贴³。此外，一些国家已经出台了针对现有建筑的最低能源性能标准和针对新建筑的建筑能源法规。而在丹麦、法国、荷兰和挪威等多个国家的国家层面以及美国和加拿大等国家的地方层面，化石燃料锅炉禁令目前已经生效。

²为了方便各地区的交叉比较，热泵容量是以其输出容量的功率来衡量的。不同地区的热泵平均容量差异很大。北美和欧洲等地区平均拥有较大的热泵容量（5kW至10kW），而在亚洲，热泵的平均容量通常较小（3kW至5kW）。在此基础上，全球单个住宅或房间的热泵容量平均约为5kW。热泵规模大小还取决于建筑群和气候。拥有多个住户的建筑其集中式热泵机组容量超过20 kW，而大型商业建筑中的集中式热泵机组容量可能超过100 kW。

图 1.7 ▷ 2021和2030年按国家/地区 and 不同方案划分的建筑热泵容量



IEA. CC BY 4.0.

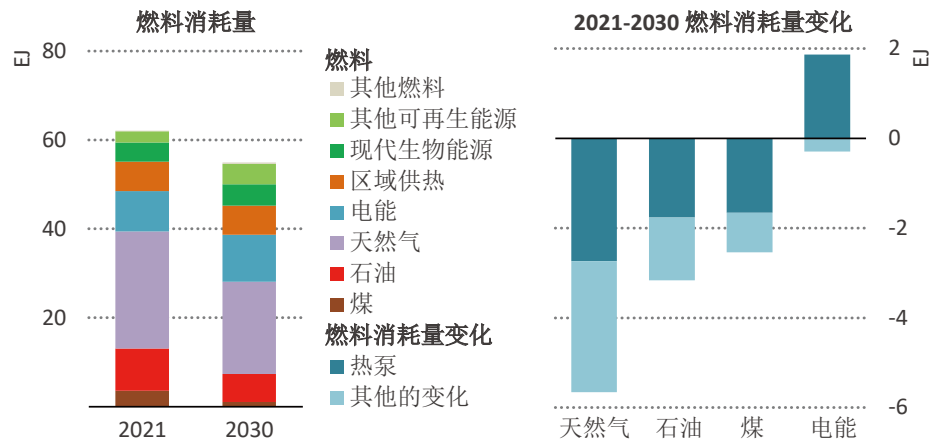
2030年，承诺目标情景（APS）中约有20%的供暖需求由热泵满足，中国、北美洲和欧洲仍然是主要的市场。

为实现国家气候和能源安全目标，需要增加对热泵的政策支持。在假设这些目标全部实现的承诺目标情景（APS）中，到2030年，热泵总容量将增长到近2600GW，满足该行业近20%的供热需求。例如，为了实现REPowerEU的目标，即在2030年前停止从俄罗斯联邦（以下简称“俄罗斯”）进口天然气，欧盟的热泵数量必须增加至目前的三倍，才能达到承诺目标情景（APS）中要求的4500万台左右。

在承诺目标情景（APS）中，热泵在到2030年减少建筑中化石燃料的使用方面发挥了重要作用。在2021年至2030年期间，全球供暖和提供热水的化石燃料直接使用量下降了29%（既定政策情景（STEPS）为16%），其中几乎一半是由热泵贡献的（图1.8）。其余的化石燃料使用量下降来自于建筑能源效率的提高，特别是建筑围护结构，包括对非住宅建筑采用自动家居控制和建筑管理系统。天然气占化石能源节约总量的最大份额，其使用量到2030年将减少约21%，即1600多亿立方米（既定政策情景（STEPS）中的下降量仅为500亿立方米），其中约一半得益于热泵。在承诺目标情景（APS）和既定政策情景（STEPS）这两者下，欧盟贡献了最大的天然气节约量。俄罗斯削减向欧洲输送天然气的决定，以及由此导致的价格飙升，正促使各国政府紧急加强政策，鼓励人们放弃使用天然气和其他化石燃料。其他制定了雄心勃勃的2030年气候目标的主要天然气进口国也发现建筑用气量出现了大幅下降，这在很大程度上是因为增加了热泵的应用。

³这些政策主要包括国家层面的政策，但日本和中国除外，这两个国家的地方政策涵盖了全国供暖需求的很大一部分。

图 1.8 ▷ 承诺目标情景（APS）中2021-2030年全球建筑供暖和热水的能源消耗量



IEA. CC BY 4.0.

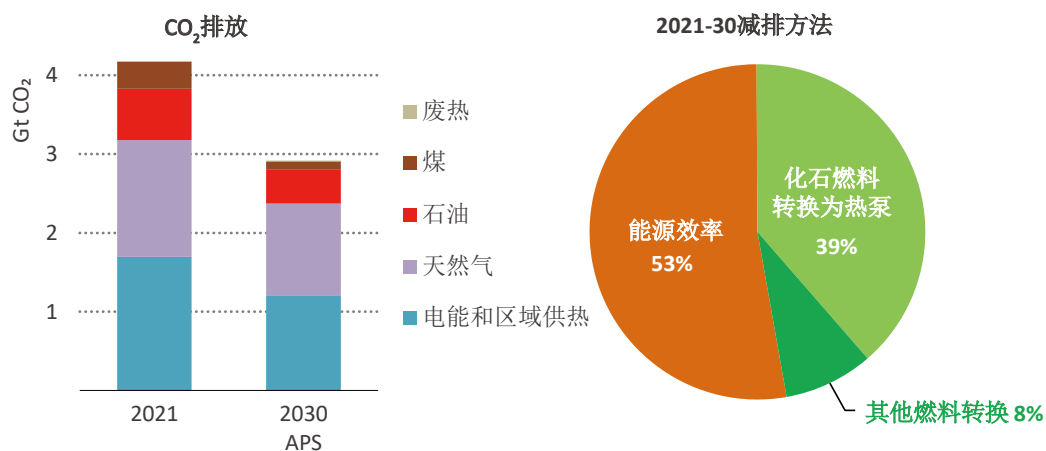
到2030年，承诺目标情景（APS）中热泵对供暖和热水化石燃料29%的需求减少量做出了一半以上的贡献，其天然气需求的减少量最多。

在承诺目标情景（APS）和既定政策情景（STEPS）这两者下，热泵也取代了大量用于建筑物的石油和煤炭供暖方式。目前主要分布在没有天然气分布地区的基于石油的供暖系统，在承诺目标情景（APS）中的比例将继续快速下降，从2021年占全球供暖需求的15%下降到2030年的11%左右——下降速度略快于既定政策情景（STEPS）。热泵是造成这些下降的主要原因。承诺目标情景（APS）情景中，在中国改善空气质量的强有力目标和倡议的引导下，热泵将取代大部分煤炭供暖方式，到2030年家庭中的燃煤供暖几乎被消除，特别是在城市周边和农村地区。

承诺目标情景（APS）中热泵的快速应用推动了全球电力需求的增长，但由于热泵效率更高，节省的化石燃料远远超过了这一影响。热泵的用电量增加了一倍，并攀升了超过500 TWh，占2021-2030年期间电力需求总增长的9%左右。在大多数地区，现有的发电能力足以满足这一需求的增长，但在一些国家则需要额外的投资来升级电力网络，特别是配电系统。在承诺目标情景（APS）下，热泵电力需求增加并没有导致电力部门的化石燃料需求上升，这是因为承诺目标情景（APS）中假设实现了脱碳目标，从而到2030年电力部门的化石燃料使用量将下降近20%。这种下降速度在七国集团（G7）的国家和欧盟中是最快的。到2030年，在承诺目标情景（APS）的供暖和提供热水的燃料组合中，氢气发挥着微不足道的作用。一个关键的原因是，如果考虑到与氢气转换、运输和使用的相关能源损失，那在建筑中使用氢气技术的效率将远低于使用热泵和其他可用的方案（IEA，2022c）。

从化石燃料到电动热泵的转换大大促进了建筑供暖的脱碳。在承诺目标情景（APS）中，到2030年全世界与供暖和提供热水有关的二氧化碳排放量，包括发电产生的间接排放量，将减少超过25%即12亿吨（图1.9）。其中热泵减少的二氧化碳排放量约占5亿吨，即减少近40%，大致相当于加拿大2021年的碳排放量。发达国家，主要是欧盟和美国，得益于热泵的应用，其与供暖相关的碳排放量下降了近四分之三。随着时间的推移，可再生能源发电量的逐步增加将进一步促进热泵的减排效益。

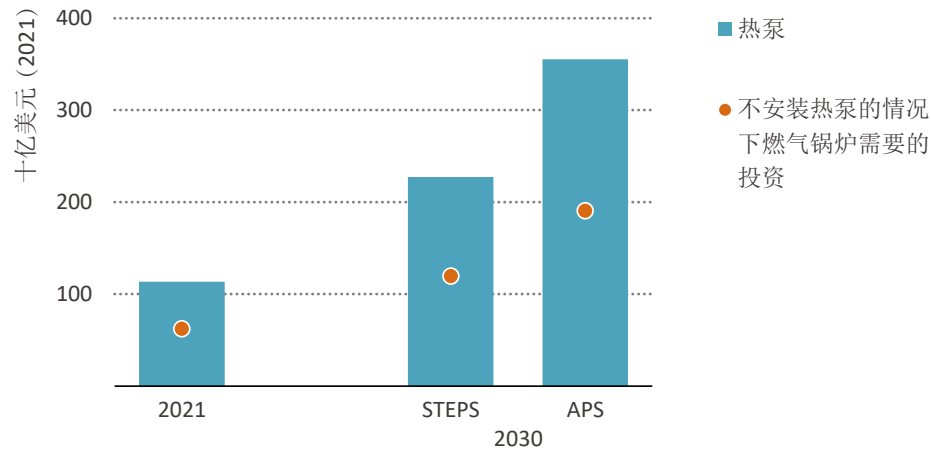
图 1.9 ▶ 承诺目标情景（APS）中2021-2030年全球建筑供暖和提供热水的CO₂排放量



在承诺目标情景（APS）中，热泵到2030年将使全球二氧化碳排放量减少5亿吨，约占建筑供暖和提供热水中直接和间接二氧化碳减排总量的40%。

承诺目标情景（APS）中热泵的应用速度表明住宅和商业建筑的业主在设备及其安装方面的支出将大幅增加。到2030年，热泵全球投资将增加至目前的三倍，达到3500亿美元（按2021年的实际美元计算）（图1.10）。这大致相当于2021年全球对太阳能光伏（PV）和风力发电的投资。到2030年，投资热泵比购买冷凝式燃气锅炉等传统供暖方式的溢价为1600亿美元，但其中大部分已被目前主要市场上的政策激励措施所覆盖（并在既定政策情景（STEPS）中考虑到）。然而，整个经济体在燃料上的费用节省可以抵消这些增加的成本，特别是在全球能源危机持续的情况下（第3章）。

图 1.10 ▷ 2021和2030年两种情景下建筑热泵的全球投资情况

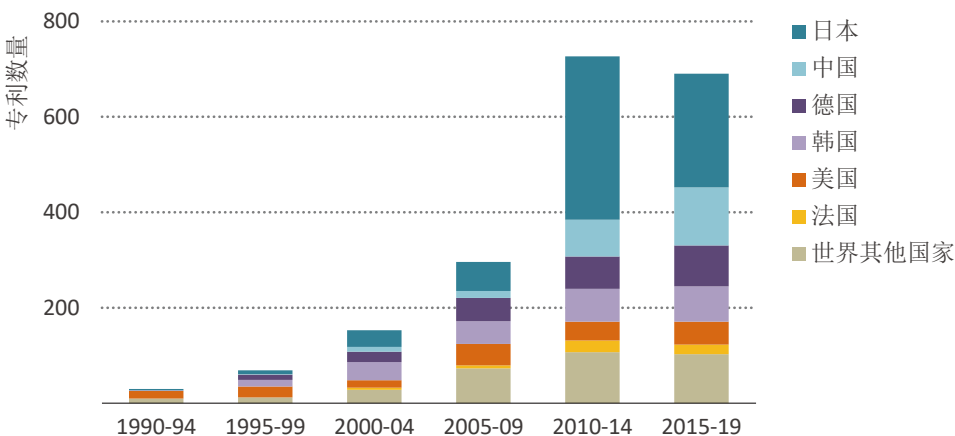


IEA. CC BY 4.4.

在承诺目标情景（APS）中，热泵的投资在2030年将增加两倍，达到3500亿美元。
这比所有新供暖系统都是燃气锅炉所需的投资多1600亿美元。

此外，需要加强与热泵相关的研究、开发和示范（RD&D）投资，以满足研究和创新需求（专栏1.1）。据国际能源署（IEA）报告，每年用于热泵和冷水机组研究的公共支出约为3000万美元，比2010年高出近4倍。2016年至2021年期间，全球对热泵初创企业和扩大规模的投资增长了近6倍（欧盟委员会，2022a）。作为一项衡量技术创新的指标，2015-2019年间热泵的专利数量比2005-2009年增加了一倍多。中国和日本占了所有发明的一半（图1.11）。

图 1.11 ▷ 1990-2019年各国热泵技术的专利数量



IEA. CC BY 4.4.

在中国和日本的带领下，热泵技术的专利数量急剧上升。自2010年以来，
中国和日本的新专利数量占到了一半以上。

资料来源:IEA基于PATSTAT数据的分析

专栏 1.1 ► 新一代热泵的研究、开发和示范 (RD&D)

在过去的几十年里，热泵的性能有了显著的提高，比如在效率和噪音方面。自 20 世纪 90 年代初以来，瑞士的空气 - 水热泵的 COP 已经增加了 70% 以上 (Swiss Office of Energy, 2022)。此外，更多的研究和创新可以产生进一步的好处。目前研发工作重点主要集中在热泵的智能化和灵活性、减少噪音、提高效率、设计紧凑、降低安装难度，以及降低与热泵材料和制冷剂相关的环境影响。分享由政府 and 工业界开展的关键研究、开发和示范项目的进展，有助于在全球范围内加速创新技术的应用，降低成本和排放。

国际能源署的热泵技术研发合作计划 (Heat Pumping Technologies Technology Collaboration Programme, HPT TCP) 和可负担的建筑供暖和制冷创新社区 (Innovation Community on Affordable Heating and Cooling of Buildings) 是推进热泵研发合作的关键论坛。HPT TCP 正在探索通过优化热泵在供暖和制冷方面的使用来提高系统效率和资源效率的潜在改进方式，同时有供暖和制冷需求的商业应用中热泵的优化也包括在内。正在研究的一个领域是热泵在地区或城市的极低温热网中运行时，同时作为热汇和热源使用的双重能力。空调运行时会产生大量的废热，在设计良好的系统中，这些废热可以被回收用于生产生活热水。

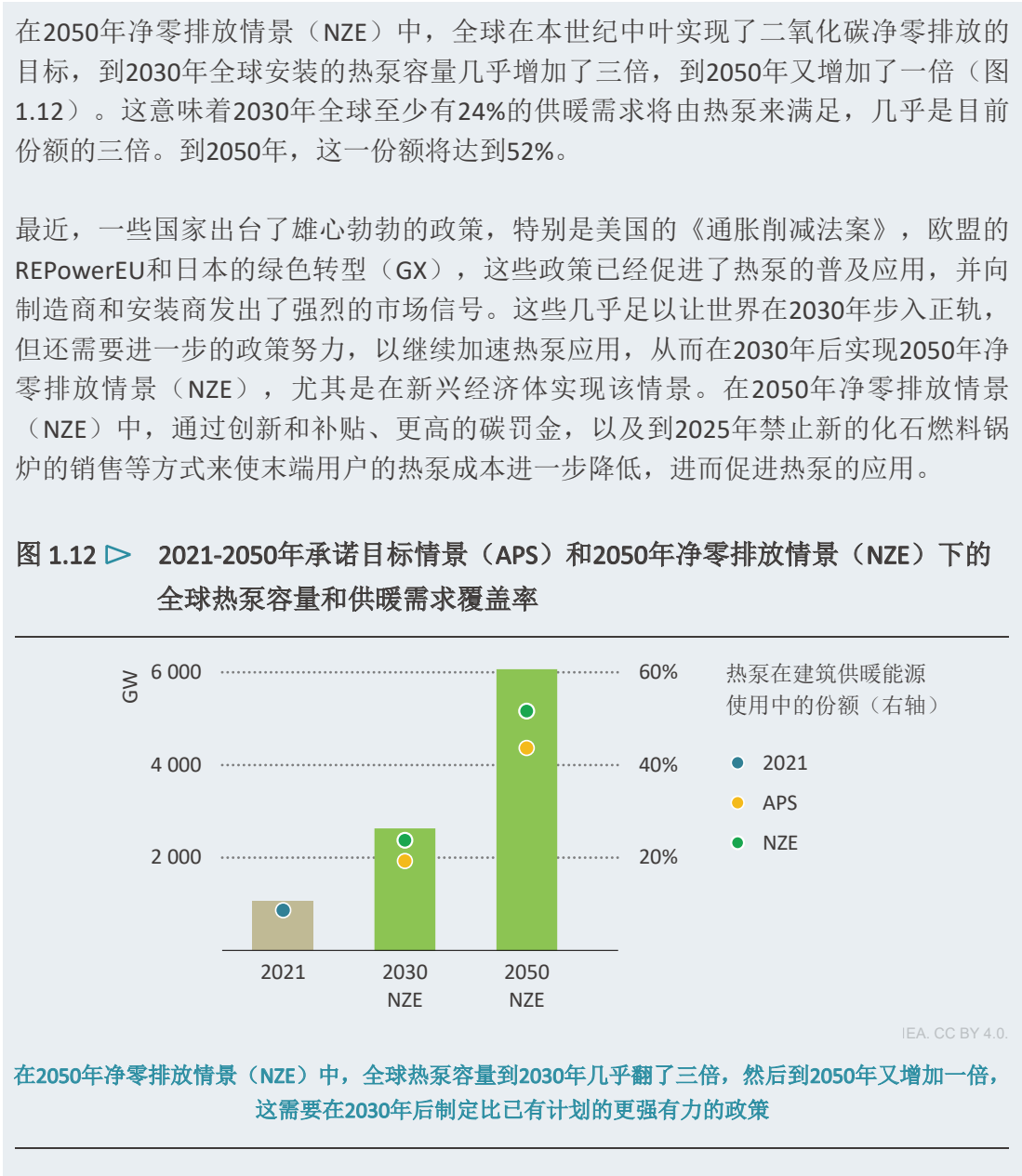
长期的研究、开发和示范工作使热泵成为即使在寒冷气候下也可行的选择。然而为了在极端寒冷的气候中有效地应用热泵技术，下一代热泵将需要在更大的温度范围有更高的效率。在调整热泵以适应建筑改造中非常困难的方面也需要取得进展，例如隔热困难的建筑和需要高温供热系统的建筑。为了实现这一目标，需要对部件开发和系统设计进行持续研究。美国能源部最近启动了住宅寒冷气候热泵技术挑战项目，以加速在极端寒冷气候中的热泵技术应用 (US DOE, 2022)。根据气候需求而差异化的优化热泵解决方案也可以降低设备成本。

此外，还需要加强对远未进入市场技术的研究，以便为开发更高效、更具成本效益的供热解决方案的跨越式发展铺平道路。它们包括热泵的非传统压缩技术，如固态（如磁热、热电和弹热）和气态（如布雷顿循环和斯特林循环）。基于弹热的制冷系统的早期结果尤其有希望。

注:这个专栏是RISE热泵中心Caroline Haglund Stignor、Monica Axell和Metkel Yebiyo以及HPT TCP主席Stephan Renz合作撰写。

实现承诺目标情景（APS）水平的热泵应用将进一步要求加强政策支持，包括更大的财政激励和限制在现有和新建建筑中安装化石燃料锅炉（见第3章）。在2050年净零排放情景（NZE）中，支持热泵应用比承诺目标情景（APS）更快地一个关键措施是，从2025年起禁止销售新的化石燃料锅炉（见专栏1.2）。

专栏 1.2 ▶ 2050年净零排放情景（NZE）中的热泵应用

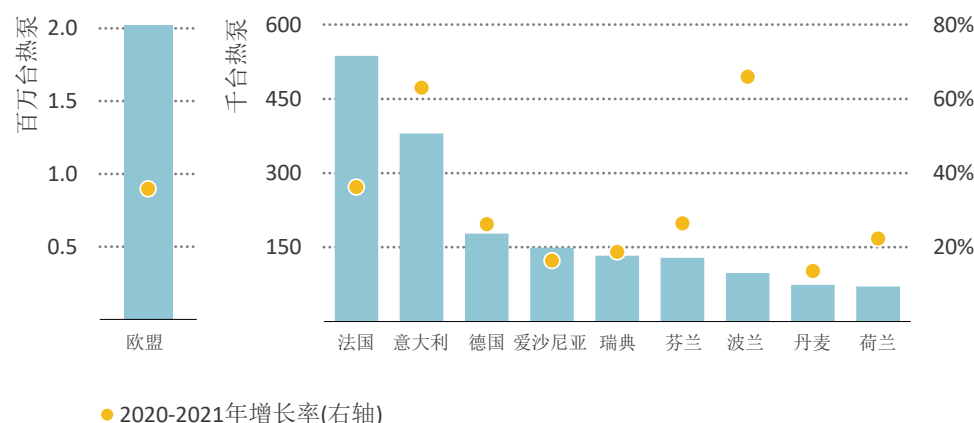


1.3.2 聚焦欧盟

俄罗斯入侵乌克兰以及随后对俄罗斯天然气进口的中断，使欧洲陷入了一场重大的能源危机，并产生了深远的经济和社会影响。作为回应，欧盟委员会于2022年5月发布了REPowerEU计划，旨在迅速淘汰欧盟从俄罗斯进口的化石燃料，并在2030年之前结束其天然气进口——这一目标在承诺目标情景（APS）中已经完全实现。REPowerEU指定了一系列措施，以实现天然气来源的多样化，并加快能源效率的提高和向清洁燃料的转换。这些措施加强了那些已经包括在2021年宣布的欧盟“Fit For 55”一揽子计划中的措施——这是一套修订和更新欧盟立法的建议，旨在到2030年将温室气体（GHG）净排放至少减少55%（相对于1990年）。

通过用热泵取代燃气锅炉来实现建筑物中的天然气使用量的降低是REPowerEU的一个重要组成部分。2021年，欧盟建筑物天然气使用量达1500亿立方米——是欧盟最大的单一天然气使用方式，这超过了电力部门的天然气使用量，并占欧盟与能源有关的二氧化碳排放总量的11%。在法国、意大利和波兰等主要市场强有力的政策支持下，热泵的销量已经在迅速增长，到2021年将增长35%，达到约200万台（图1.13）。在某些情况下，热泵也正在取代燃煤锅炉和燃油锅炉，以及效率低下的电阻加热器。在波兰，出于对空气质量的担忧，清洁能源补贴和地区燃煤锅炉禁令相结合，推动热泵的销量在2021年提高了三分之二（Morawiecka, Rosenow, 2022）。在意大利，Superbonus计划推动热泵的销量激增60%以上。Superbonus计划是一项新冠肺炎的复苏措施，为旨在提高能源效率的建筑翻新成本提供高达110%的税收抵免。

图 1.13 ► 2021年欧盟和部分成员国的热泵销量和增长情况



IEA. CC BY 4.0.

在法国、意大利和波兰等国家强有力的政策支持下，欧盟的热泵销量在2021年增长了约35%，达到200万台。

资料来源：IEA基于EHPA（2022）；PORT PC（2022）的分析。

表 1.1 ▷ 部分欧洲热泵应用的政策目标

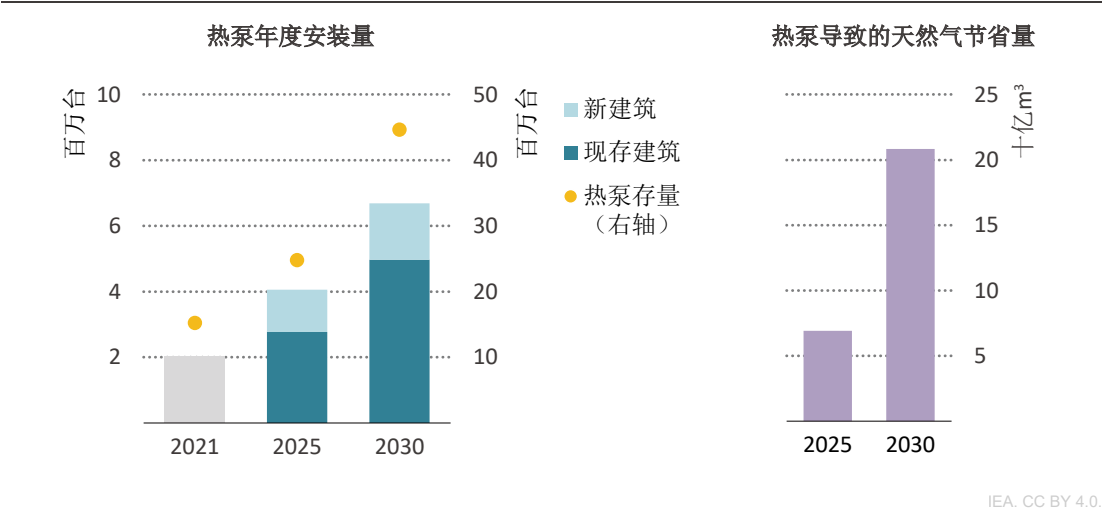
国家	年份	目标
欧盟	2030	与2022年相比，新增安装3000万台热泵
比利时	2030	相比2018年，热泵的最终能源消耗增加五倍
法国	2023	达到270万至290万热泵安装总量
德国	2024 2030	每年安装50万台热泵 热泵存量达到600万台
匈牙利	2030	相比2020年，热泵的最终能源消耗增加六倍
意大利	2030	相比2017年，热泵的最终能源消耗增加两倍
波兰	2030	相比2020年，热泵的最终能源消耗增加三倍
西班牙	2030	相比2020年，热泵的最终能源消耗增加六倍
英国	2028	每年安装60万台热泵

资料来源：European Commission（2022b）；France，Ministry of Ecological Transition（2022）；Clean Energy Wire（2022）；GOV.UK（2020）；Government of Italy（2019）；Government of Spain（2019）；Toleikyte and Carlsson（2021）。

一些欧盟国家最近加强了对热泵的政策支持，使欧盟在2022年的安装量再创新高。波兰的热泵销量在2022年上半年增加了一倍，荷兰、意大利和奥地利也有类似的趋势，芬兰和德国的热泵销售额也有强劲的增长（Mathiesen et al.，2022）。一些欧盟国家以及英国在最近几年宣布了雄心勃勃的热泵应用目标（表1.1）。REPowerEU计划旨在加强和发展当前的政策和市场趋势，目标是在2022年和2030年之间将目前的户式热泵应用率提高一倍，从而安装3000万台新设备。该计划还旨在通过发展现代化区域供热和商业供暖，并将其纳入利用工业热能的新项目中，从而加快大型热泵的应用。

在考虑到上述目标的承诺目标情景（APS）中，欧盟的热泵销量到2025年将达到400万台，到2030年将达到近700万台。这将导致2025年建筑供暖用气减少70亿立方米，到2030年减少210亿立方米，大约相当于目前从俄罗斯进口天然气总量的15%（图1.14）。从现在到2030年，在用于供暖的建筑中，热泵贡献了大约三分之一的天然气使用减少量，剩下的大部分由节能改造构成。在承诺目标情景（APS）中，平均每年有2.5%-3%的现有建筑进行翻新改造，其中大多数涉及热泵的安装。所有欧盟成员国的新建筑能源法规也支持采用热泵。

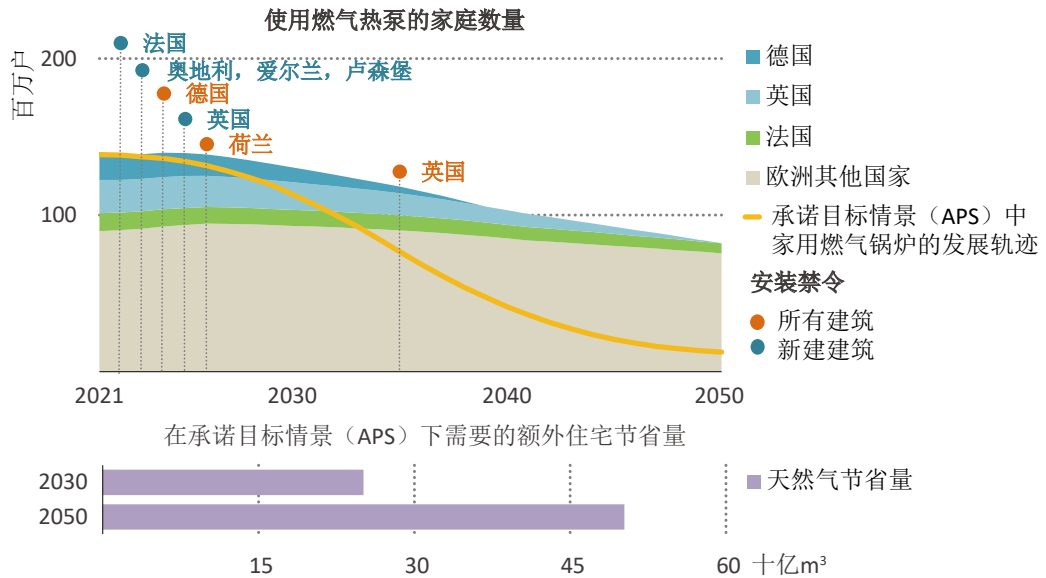
图 1.14 ▷ 2021-2030年，承诺目标情景（APS）中欧盟热泵安装量和存量以及相关天然气累计节约量



在承诺目标情景（APS）中，新的热泵装置到2025年将减少70亿立方米的天然气消耗，到2030年将减少210亿m³的天然气消耗，大约相当于目前从俄罗斯进口天然气量的15%。

为确保欧盟和各国的目标得以实现就需要采取新的政策措施。为包括热泵在内的全面改造提供激励的政策，是目前许多国家能源效率方案的基石。其中包括2020年启动的欧盟革新浪潮（EU Renovation Wave）倡议中所包含的措施，该倡议旨在将目前住房的能源改造率提高一倍。为了进一步激励热泵的应用，九个欧洲国家已经宣布或实施了对燃气和燃油锅炉的全国使用禁令，另有四个欧洲国家宣布只对燃油锅炉实施禁令。其中一些禁令只涉及新建建筑的燃油燃气锅炉安装，而另外一些禁令也涉及现有建筑的更换改造。欧盟目前和已宣布的化石燃料锅炉禁令将要求大约1600万家庭到2030年改用其他供暖方式。其中1000万家庭过去在使用燃气锅炉，改用其他供暖方式将节省75亿立方米天然气。如果所有的新供暖系统都是热泵，那么到2030年，这将占到承诺目标情景（APS）中其他供暖方式转换为热泵的数量的一半左右。如果所有欧盟国家从2025年开始禁止安装新的化石燃料锅炉，到2030年将有4800万家庭需要改用替代供暖设备。即使这些家庭中只有60%改用热泵，改用热泵的数量也将和承诺目标情景（APS）中其他供暖设备转向热泵的数量相等（图1.15）。此外，禁令为制造商提供了一个清晰稳定的长期愿景。

图 1.15 ▷ 2021-2050年，欧洲实施和宣布的燃气锅炉禁令的影响以及与承诺目标情景（APS）剩余供热需求差距



为了在2050年达到承诺目标情景（APS）中的天然气节省量，所有制定2050年净零目标的国家都需要在2030年之前禁止在所有建筑类型中安装新的化石燃料锅炉。

注：丹麦于2013年对新建筑实施燃气锅炉安装禁令，挪威于2017年对所有建筑实施燃气锅炉安装禁令，荷兰于2018年对新建筑实施禁令。在某些情况下，比如德国，禁令并不明确，而是依赖于可再生能源份额义务，而燃气锅炉无法满足这一义务。

尽管欧洲拥有强大的制造基地，但过去几年从亚洲进口的热泵和热泵部件仍有所增加。为了限制对进口的依赖，欧盟委员会计划在必要时为获得融资提供便利，从而提高国内热泵产量。REPowerEU计划还旨在通过加强监管框架、确保生命周期的可持续性和支持创新来加强欧洲热泵供应链并使其更具可持续性。它还建议在欧盟技能公约（EU Pact for Skills）下建立一个大规模的技能伙伴关系，以培训和再培训热泵行业的工作人员（见第3章）。

1.4 工业用热泵

电动热泵在为工业提供生产用热方面有相当大的潜力。由于工业过程的复杂性，热泵通常需要根据具体的特定应用进行定制。与建筑中使用的热泵相比，工业热泵所需的输出温度也明显更高，因此其通常依赖于更高的热源温度。目前工业热泵主要用于100℃以下的低温过程，特别是在造纸、食品和化工行业（表1.2）。然而如果有大约100℃的废热作为输入热源，则输出热量温度已经可以达到150℃。输出温度在150℃和200℃之间的热泵需要特殊的制冷剂和压缩机，这些技术仍处于早期原型阶段。

表 1.2 ▶ 按温度范围划分的工业热泵技术情况

温度范围	技术成熟等级（TRL）	示例工业过程
<80℃	TRL 11: 已证明市场稳定	造纸：脱墨 食品：浓缩 化工：生物反应
80℃ - 100℃	TRL 10: 具有商业性和竞争力，但尚未实现大规模应用	造纸：漂白 食品：巴氏消毒法 化工：沸腾
100℃ - 140℃	TRL 8-9: 在相关环境中的首次商业应用	造纸：干燥 食品：蒸发 化工：浓缩
140℃ - 160℃	TRL 6-7: 预商业化示范	造纸：纸浆煮沸 食品：干燥 化工：蒸馏 各种行业：蒸汽生产
160℃ - 200℃	TRL 8-9: 首次小型MVR系统和热能品位提升系统中的商业应用 TRL 4-5: 早期大型样机	各种行业：高温蒸汽生产
>200℃	TRL 4: 早期样机	各种行业：高温处理

成熟度等级：TRL 1 - 5TRL 6 - 7TRL 8 - 11

备注：MVR = 机械蒸汽再压缩。技术成熟等级可能因特定的工艺或不同的热泵容量而不同。

资料来源：基于Maruf等人（2022）使用IEA扩展的TRLs（IEA，2020b）

当温度升高维持在输入和输出的温差在30-50℃范围内时，工业热泵的效率非常高，COP超过3。对于更高的温升，工业热泵的COP通常较低。虽然调整热泵的配置方式可以限制效率的损失，例如通过加入中间热交换器或复叠循环（即热泵作为两个单级循环通过复叠热交换器耦合在一起运行），但是这种热泵系统的成本通常要高得多。

人们对使用水蒸气的机械蒸汽再压缩（MVR）设备越来越感兴趣，这种设备运行方式与热泵类似（即使用电力将热量提升到更高的温度）。当设备在闭环中运行时，就像在普通热泵中一样，水可以作为循环中的制冷剂。它的物理特性使其能够提供比其他制冷剂液体提供更高的目标温度，而不会受到环境或火灾危险的限制。在一个开式循环配置中，高温蒸汽可以由低压蒸汽或冷凝水产生。由于蒸汽是工业中首选的热载体之一，因此该技术非常适合满足工业加热需求。

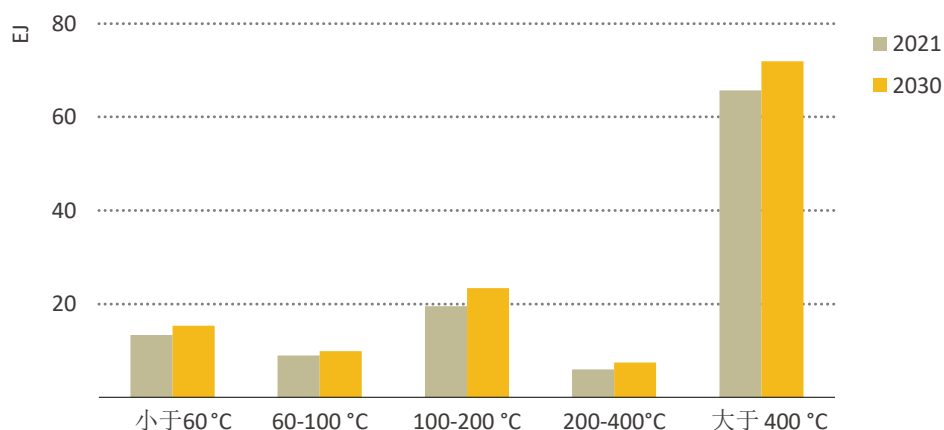
公共资金可以帮助加速解决方案的开发和商业化，这可以为热泵的新应用开辟道路，如汽车行业的金属表面处理或纺织品行业的干燥和洗涤。欧盟创新基金正在支持包括工业应用在内的示范项目，而欧洲地平线计划正在资助该领域的研究和创新项目。

目前当温度超过200°C场合，工业生产过程直接使用电力通常会优于使用热泵 (Madeddu et al., 2020)。一些这类技术正在开发或已经在使用。例如，巴斯夫（BASF）、沙特基础工业公司（SABIC）和林德（Linde）最近开始建造一个试验规模的蒸汽裂解装置。该装置使用电力而不是化石燃料来提供约850°C的必要反应热，以将碳氢化合物原料分解为有价值的化工基础材料（BASF, 2022）。尽管如此，通过创新实现更高温度的热泵是可行的。

氢气燃烧是为工业提供低排放热量的另一个选择。氢气应用的最大潜力是在热泵无法运行和直接电气化困难的高温应用中，但从技术上讲，氢气也可以在锅炉中取代天然气，用于生产低温热和蒸汽。然而与热泵或直接电气化相比，由于通过电解生产低排放的氢气会带来损失和相关的高成本，因此以氢气为基础的热能供给的总体效率很低（见图1.18技术成本比较）。

同其他清洁能源技术一样，热泵在工业热力生产的脱碳方面中发挥着重要作用，特别是对于低温工艺和快速减少化石燃料需求方面。在这十年里，承诺目标情景（APS）中所有温度范围内的生产用热能需求继续增加，且200°C以下生产用热能需求份额仅略低于40%（图1.16）。

图 1.16 ▶ 2021和2030年承诺目标情景（APS）中按温度划分的全球工业生产用热能需求



IEA. CC BY 4.0.

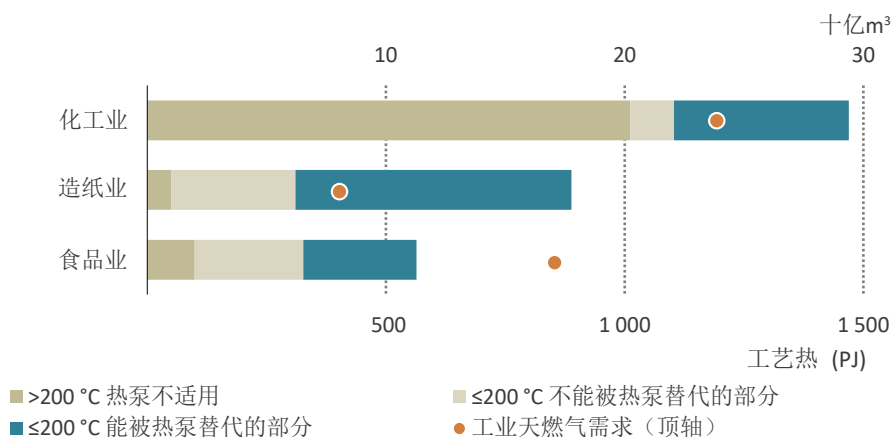
热泵可以在提供工业生产用热能的脱碳化中发挥重要作用，特别是在低温工艺方面。

工业热泵的潜力因行业而异（Marina et al., 2021）。在造纸业，所有温度范围内约65%的生产用热能需求原则上可由工业热泵满足，但可能需要对系统进行实质性的改变。食品行业主要需要高达150°C的温度。由于高温废热的可用性有限，食品行业大约40%的工艺可以用热泵来满足。根据目前的废热供应情况，低于这一阈值的大约三分之二的热需求可以由热泵来满足。但如果从邻近的工业设施中开发额外的热源，或者对工艺进行改造以在较低的温度下运行，例如采用热水而不是蒸汽，那么工业热泵的潜力会更大。在化工业中，大多数工艺需要非常高的温度，热泵只能满足大约25%的工艺热量需求。然而，化工业的低温工艺可以从同一地点的其他工艺中获得大量废热。在这三个行业的综合供热需求中，大约30%可以通过今天的热泵技术来解决。2021年，这些行业用于低温供热的天然气在全球共消耗了600亿立方米。仅在欧洲，总容量为15GW的热泵就可在这三个工业部门的近3000个装置中实施（图1.17）。

工业热泵的设计和技术规格与住宅热泵有很大不同。除了需要更高的输出温度外，工业设施中通常可以使用热工业废水或热气流来为热泵提供所需的热源，从而产生足够高的温度。工业热泵和住宅热泵对制冷剂⁴的要求不同。工业热泵的制冷剂需要提供的温度更高，并且其充注量更大，这就增加了环境破坏和火灾方面的风险。此外，工业热泵通常在更高的压力下运行，需要壁厚更厚的管道，而压缩机则需要能够在更高的温度下运行。

⁴住宅热泵主要使用氢氟烃（HFCs），如R134a或R32，或越来越多地使用碳氢化合物，如丙烷或二氧化碳。而工业热泵则主要依靠氢氟烯烃（HFOs）、氨、异丁烷或环戊烷作为制冷剂。此外，水也可以被用作高温蒸汽工艺的制冷剂。第2章中将对制冷剂进行详细讨论。

图 1.17 ▷ 2019年欧洲按温度和热泵替代潜力划分的工业天然气需求和工艺热需求



IEA. CC BY 4.0.

食品和造纸行业是应用工业热泵的主要候选者。在很大程度上，有助于减少能源使用、天然气需求和二氧化碳排放。

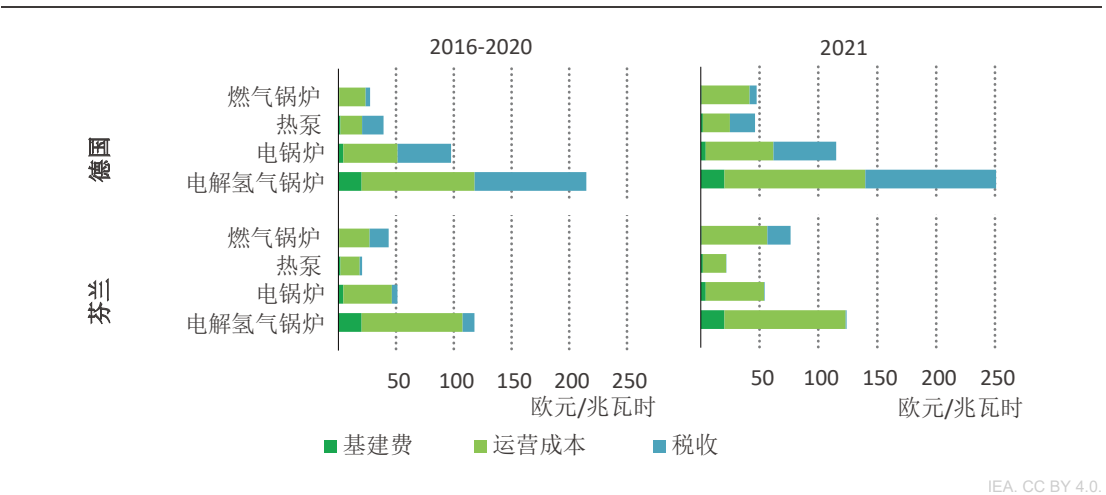
注: PJ = 拍焦 = 1015 J。欧洲 = 欧盟和英国。

来源: IEA的分析基于European Commission (2016) 和Marina et al. (2021)。可行性基于表1.2的TRLs。

在工业流程中改用热泵需要专门的规划、设计、制造和安装。在同一行业内运行类似工艺的设施之间的要求可能有所不同。工业热泵通常是针对特定的工艺和温度需求而设计。这推高了热泵设计和制造成本，限制了其大规模生产的机会。为新工艺安装热泵和用热泵改造现有工艺在成本和可行性方面也存在差异，后者可能要复杂得多。新项目可以在与热泵制造商的合作中受益，为特定工艺和工业分部门的工业热泵建立标准温度设置（例如热源温度和温度提升范围）。这样就可以通过简化设备制造和安装来降低成本。有些行业有特定的操作需求。例如，食品行业热泵中使用的制冷剂因为与产品接触所以需要面临更严格的要求，可能需要额外的热循环来保证食品安全。

与建筑领域相同，工业领域内成本仍然是应用热泵的主要障碍。设备、安装和相关工艺变更的成本通常很高，但其在工业中不如运营成本具有决定性作用。此外，在许多区域，目前的电力市场设计和税收结构往往更倾向于天然气而非电力的工业使用。然而，最近天然气价格的强劲上涨超过了电价的上漲，这加强了热泵在商业案例的使用。而在德国等国家，电力税费相对较高。在2020年之前，燃气锅炉平均来说比热泵更有竞争力（图1.18），而2021年底燃气价格上涨使热泵更加有竞争力。俄罗斯入侵乌克兰后，天然气价格的持续上涨正在加剧这种影响。此外，德国于2022年实施的电价改革大大减少了税费，为工业热泵提供了持续增长的途径。在芬兰，近年来的能源成本已经对热泵更加有利。这要归功于欧盟将工业电力税降低到0.50欧元/MWh的最低水平，旨在阻止化石燃料的使用。

图 1.18 ▷ 德国和芬兰工业热能的平均平准化成本



IEA. CC BY 4.0.

食品和造纸行业是应用工业热泵的主要候选者。在很大程度上，有助于减少能源使用、天然气需求和二氧化碳排放。

注：基建费相对于整体成本非常低，其横条在图中有时看不清。运营成本包括燃气锅炉的能源和输配费用以及二氧化碳价格。电解氢气锅炉的基建费包括对现场制氢的估计；运营成本考虑了电价和氢气电热转换效率。

一些国家已经出台了政策，以降低工业热泵的前期成本和信息壁垒。例如在德国，对商业企业的能源和资源效率联邦资助计划中的补贴可覆盖热泵初始成本的55%，每个项目最高可达1500万欧元。作为能源效率义务计划的一部分，其他欧洲国家也实施了类似的计划或为工业热泵提供支持。在巴西，PotencializEE项目为工业能源效率专家提供培训，帮助工厂确定如热泵等清洁高效的技术。目前还需要额外的激励措施，使更多的废热能够跨工厂使用。蓄热技术可以进一步使更多的废热得到利用。强化工业效率目标，为审计、技术开发、应用第一个商业装置提供资金，是最大限度发挥热泵潜力的关键。最后，一系列工业加热系统可以通过整合废热进一步优化，甚至不需要使用额外的能源输入和热泵，在新兴和发展中经济体中尤其如此。

1.5 区域供热用热泵

在某些情况下，例如在人口密集的城市地区或在工业中，由于技术、经济或其他方面的限制，单个热泵可能不是建筑物的首选供热方式。在这些情况下，为了更有效地利用现有热源，区域供热是一个可行的解决方案。大型热泵可以通过扩大现有供热管网或开发新的管网，为建筑物、商业场所和工业场所提供区域供热。例如在欧盟，目前有 6000 万人生活在有区域供热的地区，另有 8000 万人生活在拥有现存供热管网的城市（Euroheat & Power, 2022）。

目前，区域供热的脱碳潜力在很大程度上还没有得到开发，全球约 90% 的区域供热仍由化石燃料供给。在中国和俄罗斯这两个最大的市场中，化石燃料的份额甚至更高。在占全球区域供热 20% 的欧洲，碳强度比全球平均水平低三分之一以上，然而可再生能源仍然只占供热能源的 25%，热泵仅占 1%。四个欧洲国家（奥地利、丹麦、芬兰和瑞典）目前的目标是在 2030 年和 2040 年之间实现区域热网脱碳。丹麦计划在 2030 年之前用热泵提供近三分之一的区域供热（Euroheat & Power, 2022; Energistyrelsen, 2022）。

使用热泵从废水中回收热量的区域供热系统自 20 世纪 80 年代以来便已经存在。更新近的项目使用或计划使用来自数据中心、地铁隧道、工业设施或电解槽的废热。斯德哥尔摩的 Hammarbyverket 建于 1986 年，是世界上最大的热泵区域供热系统，也是该市整体热网的重要组成部分（HPT TCP, 2018）。2006 年，赫尔辛基的 Katri Vala 公园下面还建造了一个大规模的联合供热和制冷厂（Helen Ltd, 2020）。它利用废水热量进行区域供暖和提供热水，并同时利用冰冷的海水进行区域供冷。废水热能回收项目已在其他欧洲国家以及澳大利亚、加拿大、中国、日本和美国成功实施。

其他用于区域热网的热泵技术也正在兴起。西门子能源公司和 Vattenfall Wärme Berlin AG 公司最近建设完成了一种新型的大型热泵。该热泵可将柏林办公室制冷站所产生的废热输送到该市的区域热网，并将于 2022 年底开始运行。它的热容量高达 8MW，夏季可为约 30000 户家庭提供热水，冬季可为 3000 户家庭供暖和提供热水。欧盟资助的 HEATLEAP 项目旨在证明从能源密集型行业中回收废热对拥有 COP 高达 8 的大型热泵的区域热网的益处（HEATLEAP, 2022）。

利用废水进行区域供热的潜力在很大程度上仍未开发（Wastewater Heat Online, 2022）。来自浴室和厨房的温水携带着大量的热能，可以利用高温热泵和区域热网将其收集并循环回家。最近的一项分析表明，欧洲有近 4000 个污水处理厂靠近现有供热网络（European Commission, 2020）。这些污水处理厂加起来每年可提供 175TWh 的热量，相当于目前欧洲区域供热量的 20% 左右。利用污水管网可以进一步使城市污水系统作为热源使用。

涉及私人和公共实体的伙伴关系和创新的商业模式，如特殊目的供热媒介，可以有效地推动热网转型。然而，区域供热项目通常依赖于公共财政支持。在法国，每年超过5亿欧元的供热基金在推动清洁区域供热的普及发挥了重要作用。德国政府最近启动了一项30亿欧元的资助计划。该计划遵循一种系统性的方法，支持可行性研究和改造计划，以及补贴脱碳区域热网的基建成本和运营成本（BMWK, 2022）。城市和社区在参与供热规划方面也起着至关重要的作用。该供热规划是为了确定适合用可再生资源和废热资源取代单个化石燃料供热的来源。区域供热地区政策，如爱沙尼亚采用的政策，可以允许城市强制要求某些地区的建筑物在超过特定的热消耗阈值的情况下连接到区域热网。

由于工业用户通常需要高温热量，全球区域供热站产生的约40%的热量都流向了工业部门，这影响了供热管网降低输送温度的能力。然而在某些情况下，可以通过使用热泵提高当地换热站的换热温度来解决上述问题。中国在工业区域供热使用方面处于领先地位，2021年占全球总热量使用的55%左右，高于2010年的35%左右。相比之下，俄罗斯的股份从2010年的35%以上降至不到25%。

专栏1.3 ▶ 用于萨拉热窝区域供热的热泵

萨拉热窝是波斯尼亚和黑塞哥维那的首都和最大的城市，其区域供热系统使用天然气或重油作为热源，而没有区域供热服务的家庭主要使用木柴或煤炭供暖。因此，供暖是该市空气质量差的主要原因，在冬季，硫氧化物、氮氧化物和颗粒物经常超过安全水平。

为了减少城市对化石燃料的依赖，欧洲复兴开发银行（EBRD）正在与城市当局合作，引入大规模集中式水源热泵。目前有两个项目被提出并讨论。一个项目耗资2500万欧元，涉及建设一座18MW的热泵站，利用附近污水处理厂全年平均温度为10℃的再生水作为热源。第二个项目将耗资约2100万欧元，涉及建设一座21MW的热泵站，利用全年平均温度为12℃的城市饮用水作为热源。如果这两个项目都得到实施，萨拉热窝区域热网中基于热泵的供热份额将达到近40%。最终投资决定预计将在2023年第一季度做出。

除了改善空气质量和每年减少多达1.6万吨的二氧化碳排放，这些项目还将有助于解决当前能源危机所引发的对天然气供应成本和安全的担忧。从长远来看，萨拉热窝基于热泵的区域供热还有更大的潜力。基于该市废水全部供热潜力的第二阶段项目可以提供18MW的额外容量。

加快热泵应用的影响 燃料转换

小 结

- 全球能源危机正促使人们重新关注能源安全问题。以电力驱动的热泵可以减少对进口化石燃料的依赖。与2021年相比，热泵在承诺目标情景（APS）中的应用将使全球建筑中的天然气需求到2030年时减少800亿立方米，其中欧盟占210亿立方米。用于供暖的石油进口量也将大幅减少，特别是在日本和韩国。然而，新的风险是在停电时如何确保关键供暖服务的可用性。
- 电热泵的加速应用使得承诺目标情景（APS）对电力的需求快速增长，尤其是在建筑方面。在全球范围内，电力在建筑和工业供暖燃料中所占的份额在2021-2030年期间翻了一番，达到16%，总用电量增加了24%。要满足这一需求增长，就需要大幅增加对电力部门的投资，以升级客户连接、配电网、发电能力和灵活性。2021年至2030年期间，欧盟智能运行热泵不仅使得需求侧灵活性倍增，而且在系统灵活性资源中的份额从2021年的8%跃升至2030年的12%左右。
- 平均而言，使用热泵的家庭比使用燃气锅炉的家庭的能耗更少，也更不容易受到价格冲击的影响，尤其是在主要依赖可再生能源的系统中。2021年，从燃气锅炉换成热泵的家庭可以节省大量的能源费用。在低收入家庭中，这些节省的费用可以占到收入的很大一部分，在主要的供暖市场中占到2-6%。电价和燃油税需要进行改革，以确保它们不会阻碍消费者选择热泵。
- 改用热泵有助于减少温室气体排放和改善空气质量。2021至2030年期间，其可以在APS情景中减少15-40%的建筑供暖引起的主要空气污染物排放，并减少与燃料燃烧供暖相关的其它危害。使用现有制冷剂及使用排放密集型电力，与燃气锅炉相比，热泵可至少减少20%的温室气体排放。而在使用清洁电力的国家，这一降幅高达80%。如果不使用含氟制冷剂，减幅范围将是30-90%。对具有巨大全球变暖潜力的含氟制冷剂的监管，必须在控制其排放与成本、安全、能源效率和供应链考虑之间取得平衡，以最大限度地减少净排放。
- 2021至2030年期间，承诺目标情景（APS）在热泵领域的全球就业人数增加了近三倍，超过130万人，其中三分之一的新就业岗位会出现在中国，20%在欧洲，15%在北美，那里的安装和制造能力将以最快的速度增加。大多数的新就业岗位将集中于安装领域。这就需要大规模的招聘和培训新工人。

2.1 引言

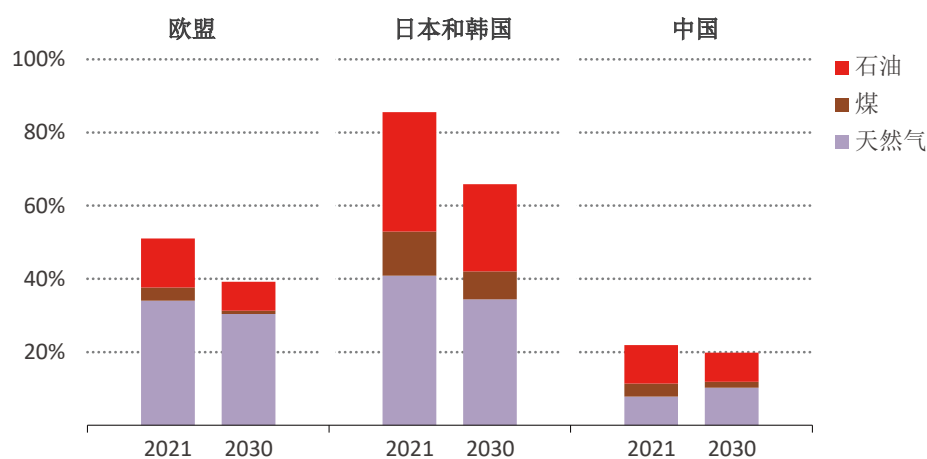
加快热泵的应用将对全球能源产业产生深远影响，除了气候效益外，还将对经济活动 and 环境产生重要的连锁反应。这将减少用于供暖的化石燃料使用，限制对供应中断的影响，有助于减少净进口国的进口费用，并为生产国的出口腾出燃料。但更多的热泵将增加对电力的需求，需要升级电网，并需要电力系统在使用时更加灵活，以确保供应安全，尤其是在冬季。安装热泵的高昂前期成本也加重了贫困家庭的能源负担。尽管在大多数情况下，改用热泵对环境 and 人类健康的影响都是积极的，但并非没有风险：许多制冷循环中使用的含氟气体（F-气体）都是强效温室气体（GHG）。正确的处理可以减少其影响，也可以使用替代制冷剂取代它们，但这两种解决方案都会带来额外的成本和挑战。增加热泵的生产将为经济增长和增加就业创造新的机会，但也要求工人接受制造、安装、维护和认证等方面的培训。本节将依次探讨这些影响，为政策制定者提供如何平衡不同影响优先级的建议。

2.2 能源安全

如今，建筑和工业的热能生产主要由化石燃料主导，其中许多是进口的，这使各国容易受到供应中断的影响。仅建筑物的供暖和热水就直接占全球天然气需求的五分之一，占欧盟天然气使用量的三分之一以上，使建筑物供暖成为欧盟天然气使用量最大的单一用途。如果考虑到天然气在发电和区域供热中的作用，建筑物供暖在欧盟的份额甚至更大，超过40%。在美国和其他几个国家（主要在北半球），供暖也是最大的天然气终端使用部分。

俄罗斯入侵乌克兰再次凸显了人们对能源安全的担忧，尤其是在欧洲，欧洲冬季天然气供应短缺的真实风险可能会使数百万人无法获得足够的供暖，对舒适和健康造成明显的有害后果。热泵的应用加上建筑能效的提高，可以减少对进口化石燃料的依赖。欧盟、日本和韩国严重依赖进口燃料来运行建筑锅炉及发电和建筑供暖。2021，欧盟50%以上的供热能源直接或间接依赖于燃料进口，其中天然气占最大份额。在日本和韩国，进口依赖度接近90%，石油和天然气主导进口（图2.1）。中国的建筑供暖也依赖燃料进口，不过程度要小一些。在承诺目标情景（APS）中，欧盟以及其它国家对进口的依赖有所下降，这在很大程度上归功于热泵的安装，减少了对天然气和石油的需求。

图 2.1 ▶ 承诺目标情景（APS）中选定区域/国家以燃料计算进口化石燃料在建筑物供暖方面所占的份额



IEA. CC BY 4.0.

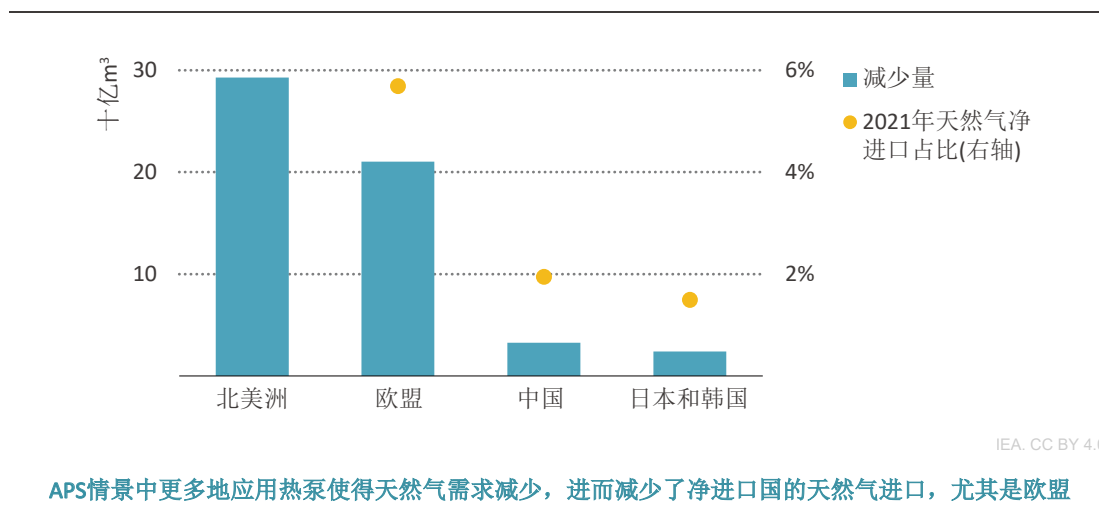
由于热泵对天然气和石油需求的影响，欧盟、日本和韩国对燃料进口的依赖程度大幅下降

注：统计中包括用于发电供暖和燃烧供暖的化石燃料

国际能源署在2022年3月发布了减少欧盟对俄罗斯天然气依赖的十点计划，强调了可以减少天然气需求和缓解潜在短缺的措施（国际能源署，2022a）。控制天然气供暖是该计划的核心，也是国际能源署与欧盟委员会合作制定的“发挥我的作用（Playing My Part）”倡议的核心（国际能源署，2022b）。关键措施是立即采取行动加快热泵的应用和逐步淘汰燃气锅炉的安装。在承诺目标情景（APS）中，增加热泵的安装将使全球建筑行业的天然气需求在2030年比现在减少800亿立方米，其中包括欧盟的210亿立方米（图2.2）。

改用热泵并不是没有其他能源安全方面的担忧。越来越多地使用电力供暖会增加停电的风险，气候寒冷时可能会造成严重的公共健康问题。此外，在对供暖需求最迫切的恶劣天气下，更有可能发生停电。尽管如此，在大多数有供暖需求的国家，长时间的大规模停电是罕见的。在需要不间断供暖的社区内，可以通过设置备用供暖解决方案或紧急供应点，更广泛地应用分布式能源，额外配置电池和蓄热，或在供暖需求高峰时降低电网的压力等方式改善这些问题。采用热泵与化石燃料锅炉相结合的方式可以减少电力中断的影响，特别是在寒冷的气候中，但这样也会阻碍建筑物的完全脱碳。

图2.2 ▷ 2021-2030年承诺目标情景（APS）中选定地区/国家与热泵应用相关的天然气需求减少量



2.3 电力系统和需求灵活性

电热泵的加速应用使得承诺目标情景（APS）对电力的需求增加，尤其是在建筑物中。电力在全球终端能源消费总量中的份额从2021年的20%上升到2030年的24%。在发达经济体，这一比例从22%跃升至27%以上。2021-2030年期间，全球建筑和工业供热燃料组合中的电力份额翻了一番，达到16%。在主要供热地区，这几乎不会增加电力需求，到2030年，约为2021年的1.5%至2.5%。然而，峰值需求却可能大幅增长，这就需要大幅增加对电力行业的投资。对于增设热泵的家庭来说，他们在冬季的峰值电力需求能够增加近三倍。然而，若将家庭的用电效率提高两个等级（例如，在丹麦从D级提高到B级），可以使供暖的能源需求减半，并减少所需热泵的容量，为消费者节省费用，并将其峰值电力需求减少三分之一。

- 升级用户电力接口，通常由消费者承担成本。在许多情况下，安装热泵需要通过升级电力接口来增加容量。
- 在广泛使用热泵以及其他终端技术（如电动汽车）的地区，升级低压配电网将显著增加负荷。
- 增加发电能力或弹性能源，以确保供暖季节的能源充足。需要对特定区域进行评估，以确定增加热泵后所需的额外灵活发电能力。例如，法国输电系统运营商RTE发现，在能效改造达标的情况下，2035年之前的新产能需求是不变的。然而，如果只进行最低限度的建筑能效改造，将需要扩增新的容量。

不同地区的建筑电力接口与投资需求存在差异。在美国，建筑电力接口通常已经考虑到了空调的负荷，并且通常可以适应加装热泵。相比之下，在意大利，典型家庭当前的容量仅为3kW，使用单相电表，最大容量为6kW。安装热泵可能很容易导致峰值负荷超过此级别，需要家庭支付升级电力接口的费用。决策者在决定为安装热泵提供财政支持时，需要考虑升级用户侧电力接口的成本。

配电系统升级的需求也有很大差异。在法国，电加热很普遍，因此用户侧电力接口和配电网也随之发展起来。然而，在德国等国家，传统的供暖设备主要是化石燃料锅炉，因此通常没有建立配电网来适应住宅建筑普遍使用的电加热。在目前电加热受限的地区，热泵的应用和电动汽车的迅速普及可能会大幅增加峰值负荷，提高对配电网升级的需求。

配电系统管理的其他方法，包括应用分布式可再生能源与电池，将改善对馈线升级的需求。在承诺目标情景（APS）中，全球分布式太阳能光伏容量在2021年至2030年期间增长了三倍以上。通过需求侧的负荷管理，也可以减少对电网进行物理加固的需要（框2.1）。低压配电线路的数字化也可以帮助解决用电挤兑，增加对电网的监控和远程控制，可以通过将其锚定在电网上的需求点来降低升级成本。特别是，采用电压调节技术的新变压器取代旧变压器可以降低成本。

专栏2.1 ▶ 利用热泵的需求侧灵活性来保证电网的稳定性

德国热泵制造商菲斯曼与德国输电系统运营商（TSOs），最近启动了一个试点项目，以证明在处理可再生发电的灵活性和确保电网稳定等方面，热泵可以提供需求侧灵活性的价值。菲斯曼通过Equigy人群平衡平台（一个数据交换平台，使小负荷聚集者能够参与电力平衡市场），将同意加入该计划客户的热泵灵活性潜力聚集起来，并将由此产生的能量提供给电网运营商，以减少峰值负荷。如果TSO接受某一电网节点的报价，则通过在特定时段关闭热泵机组群，从而降低其热量输出，减少其用电量。为了保持室内温度，热量被储存在蓄热水罐中。而关闭热泵通常需要几个小时，循环加热系统和建筑本身的热惯性（特别是在隔热良好的情况下）也弱化了关闭热泵对温度的影响。客户们根据他们对降低负荷所做的贡献获得报酬。

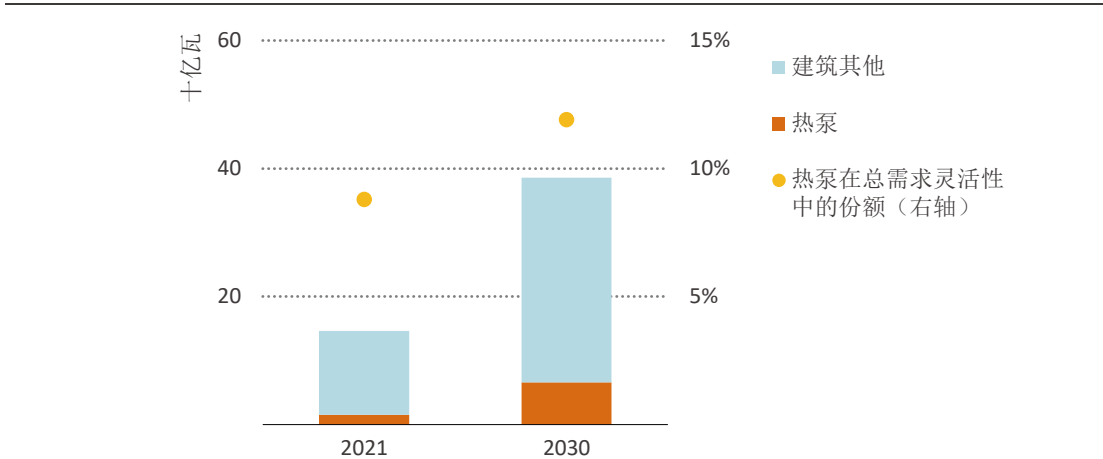
试点项目的目标是容纳100台热泵。在未来的项目中，为了使重要电网稳定运行，机组的数量需要大幅增加。还需要消除广泛使用带来的障碍，尤其是复杂的认证标准，以及在系统平衡和辅助服务市场上对居民消费者需求侧灵活性的贡献报酬不足。

供暖用电的增加会导致电力需求的逐时和季节变化更加明显，尤其是在寒冷时期，这可能会导致需求峰值显著增加。热泵有很大的灵活使用潜力，这可以减轻其在冬季高峰期对整体电力需求的影响。在承诺目标情景（APS）中，2030年冬季，热泵约占整个欧盟居民用电量的15%，且在使用热泵供暖的家庭的用电需求中高达70%。2021至2030年间，欧盟需求侧灵活性提高三倍多，热泵在其中发挥了重要作用，热泵在总灵活性资源中所占份额从2021的9%跃升至2030年的12%左右（图2.3）。装有太阳能光伏的建筑将有更大的潜力来实现负荷转移，并可以最大限度提高白天的电力自用率。

数字技术在体现热泵提供系统灵活性中不可或缺。热泵的灵活性要通过自动化技术体现，这种灵活性实现方式要求机组内置通信和控制功能。最低性能标准可以要求电器具备基本的可控性。目前市场上大多数热泵已将控制设备连接到机组，从而实现需求响应特性。然而，许多制造商使用专有的控制系统，这可能会限制设备间的互动。法规要求制造商确保热泵能够接收和发送数据，不仅能够对其运行状态进行监控，还能实现对设备的远程控制，这是智能控制推广应用的第一步。建筑物还需要更好的设备互通性和自动化，以从电网接收灵活性需求信号，并更好地控制其能源消耗状态（国际能源署，2021b）。

基于市场环境的激励措施可鼓励热泵用户向电网提供灵活性，这可以通过降低电价或电网自主交易实现。市场环境的变化可以确保热泵的灵活性得到电力供应商的充分重视，并降低用户的消费额（国际能源署，2021a）。政府可以推广具有较强可控性的能源供应模式，同时为消费者的隐私和选择建立保护机制。

图 2.3 ▶ 热泵和其他建筑电力使用在需求侧灵活性需求最高时段的需求响应潜力及欧盟在承诺目标情景（APS）中总需求侧灵活性中的份额，



IEA. CC BY 4.0.
热泵成为承诺目标情景（APS）中一种主要的需求侧灵活性资源，建筑和供暖系统的热惯性使电力使用峰值减小
注：建筑其他包括制冷和电器

为了最大限度地发挥以水为热媒的热泵潜力，在不影响终端用户热舒适性的情况下提升电力系统的灵活性，还需要对供暖系统进行一些调整，包括在热泵关闭期间储存热水或安装备用的非电力供暖设备，以及改善建筑物的隔热性能。在隔热良好的建筑中，关闭热泵几个小时对室内温度几乎没有影响。国际能源署建筑和社区能源计划（国际能源署，2019）的工作证明了更有效的建筑围护结构具有系统灵活性的好处。然而，即便是在发达经济体，大多数建筑的隔热性能都很差，限制了热泵在需求侧灵活性方面发挥作用的潜力。例如，在日本，2022年就可以购买用于住宅建筑的空气-水热泵，利用实时天气预报生成屋顶太阳能光伏发电可用性的概况，从而优化其使用。目前，尽管有许多试点项目（表2.1），但利用热泵的灵活性仍然是一个小众的解决方案。

混合热泵是增加灵活性的另一种选择，例如荷兰政府已提议将混合热泵作为新建筑的默认选项，可以帮助管理电网拥堵（荷兰企业署，2022年）。

表 2.1 ▶ 开发热泵灵活性潜力的试点项目

国家	项目名称	描述
瑞士	在配电网中集成可再生能源的通用操作灵活性	● 峰值需求减少0-5% ● 自我消纳增长5.5%
丹麦	欧盟生态电网	● 270户配备热泵的家庭提供高达167kW的调峰（5分钟时间跨度）
联合国	Crowdflex	● 对于没有电动汽车的家庭，时间电价的应用将每日晚高峰平均降低了12%
荷兰	可再生能源的电-热转换集成技术、模拟和灵活性潜力	● 在一小时的灵活性试验中，热泵可提供2.5kW的灵活性容量

2.4 能源可负担性

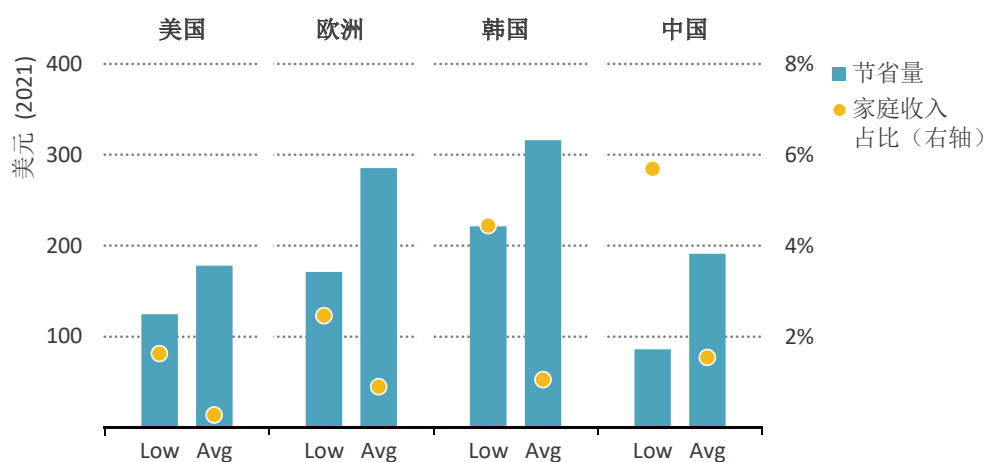
能源价格上涨是通货膨胀压力增加的主要原因，通货膨胀的压力正在降低世界许多地区的家庭消费能力和生活水平。在2021年，一个家庭用于能源的平均花费约占其收入的7%，其中约一半用于建筑室内用能。在供暖地区，家庭公共支出的大部分通常用于供暖。对贫困家庭而言，这一比例可能更高，他们在能源方面的支出占收入的比例通常要高得多，但获得的能源服务却更少。

世界各地的家庭能源费用急剧增加，在某些情况下翻了一番。世界各国政府通过采取补助措施来应对价格上涨，包括设置家庭能源费用上限（如法国和英国）、直接现金补贴（如德国）和保障天然气供应的长期合同（如中国和韩国）。总的来说，截止至2022年9月，世界各国政府已经支出了大约5500亿美元，为消费者和企业提供缓冲，以应对能源价格高涨的影响，至本报告发布时，这一金额还会更大。

改用热泵可以帮助家庭减少能源支出。2021年，从燃气锅炉换成热泵的家庭可以节省可观的能源费用，从美国的180美元到欧洲的近300美元不等。在现今能源价格飙升的背景下，节省的费用要多得多，从美国每年300美元到欧洲每年900美元不等。在净天然气进口国，节约的成本通常最多，特别是在中国等居民用电价格较低的国家。在贫困家庭中，节省费用的占比最大，从收入的2%到6%不等（图2.4）。

尽管改用热泵可能会节省成本，但由于前期安装成本高昂，许多消费者在经济上无法更换现有的供暖系统，尤其是在当前经济不景气的背景下。降低这一成本将是扩大热泵应用的关键（见第3章）。贫困家庭最难负担这一费用，当他们的供暖系统需要更换时，他们倾向于选择最便宜的更换方案，从而可能将目标锁定在昂贵的天然气供暖中。此外，随着清洁能源转型的推进，如果消费者逐渐减少对天然气管网系统的投资，天然气供暖成本可能会随着时间进一步上升。一些政府为不太富裕的家庭提供了针对性的能效改造和热泵补贴，以解决这些障碍。目前，共有12个国家制定了此类政策，其中大部分在欧洲，约占全球供暖需求的三分之一。

图 2.4 ▶ 2021年选定国家/地区从燃气锅炉转换为热泵节省的家庭能源费用



IEA. CC BY 4.0.

从燃气锅炉转向热泵的家庭在能源账单上节省了大量开支，其中贫困家庭节省的开支占他们总收入的比例最大

注：Low =低收入家庭；Avg=平均收入家庭。节省是基于运营成本，不包括前期成本。该分析基于不同地区/国家的平均电力和天然气价格，以及各自地区/国家代表性城市（底特律、斯德哥尔摩、首尔、北京）的平均家庭供暖和热水需求。

与富裕家庭相比，贫困家庭从改用热泵中节省的资金更少，回收期更长。这是因为贫穷家庭的住所通常较小，为了减少开支，使用供暖的频率较低。而且，贫困家庭住所内的设备能效也较低，通常低于建筑的平均能效，这增加了潜在成本并延长了回收期。在任何情况下，贫困家庭通常需要预先获得财政支持，才能从供热系统改造或改用热泵中受益。

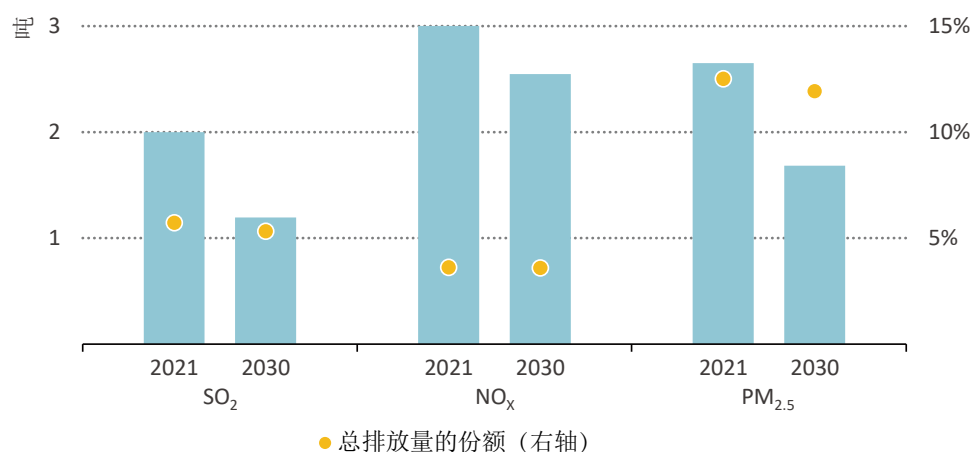
电价和燃油税需要仔细设计，以确保它们不会阻碍消费者安装热泵（见第3章）。目前的一些电价机制旨在提高能源效率，对用电水平高于平均水平的家庭收取更高的电价或增加总费用，但这可能会影响使用电热泵的用户。一些公用事业公司为使用电加热和电动汽车的消费者提供特殊的电表或特殊的电价，以鼓励人们购买。与统一电价相比，如果再加上智能控制来优化供暖，合理的运行时间也有助于降低热泵运行成本。同时，也有助于提高电网的可靠性和灵活性。在设计能源税和碳价方案时，必须避免用低排放电力替代化石燃料时的费用陡增。

2.5 公共卫生和环境

2.5.1 空气污染

广泛采用热泵技术有助于改善空气质量和公众健康。以煤、石油和生物质燃料为基础的建筑供暖和热水系统会造成家庭和环境的空气污染。2021年，每天有超过1.9万人因呼吸污染空气而过早死亡，其中大多数在新兴市场国家和发展中经济体（国际能源署，2022c）。

图 2.5 ▷ 承诺目标情景（APS）建筑供暖和热水燃料燃烧产生的主要空气污染物排放



IEA. CC BY 4.0.

承诺目标情景（APS）中建筑供暖和热水系统的电气化将在2021年至2030年期间大幅减少建筑的主要空气污染物的排放

资料来源: IIASA (2022) and IEA。

约八分之一的细颗粒物空气污染（PM_{2.5}）排放是由建筑供暖和热水系统中锅炉使用的木材和煤炭产生的。尽管建筑供暖排在总排放中的占比不大，但其会导致氮氧化物（NO_x）和二氧化硫（SO₂）的排放，氮氧化物主要来自燃气锅炉，二氧化硫主要来自锅炉中使用的煤炭和油。在承诺目标情景（APS）中，2021至2030年间，建筑供暖和热水系统产生的主要空气污染物排放量下降了15-40%，这主要得益于热泵的应用（图2.5）。

此外，大规模改用热泵可以防止与化石燃料燃烧相关的其他风险。例如，设备质量差的锅炉会排放一氧化碳，据估计，每年约有4万人因一氧化碳中毒死亡，此外，还会引起爆炸和火灾的相关风险（IHME, 2022）。

2.5.2 含氟气体

热泵在环境方面存在潜在问题。热泵相对于其他供暖技术的主要吸引力在于其减少温室气体排放的潜力，尤其是其输入电力是由低排放能源产生时。然而，热泵的广泛使用带来了在热泵机组中用作制冷剂的含氟气体排放的风险。这些排放气体是强力的温室气体，这可能抵消从化石燃料转向清洁供暖所带来的气候改善效益。

目前用于热泵、冰箱和其他制冷设备的主要含氟气体类型是含氟碳氢化合物，占全球含氟气体产量的85%以上（联合国环境规划署，2017年）。它们被广泛用作臭氧消耗物质的替代品，而臭氧消耗物质在1987年通过的《蒙特利尔议定书》（一项关于逐步淘汰破坏平流层臭氧层的化学物质的里程碑式多边环境协定）下已被逐步淘汰。含氟气体约占全球温室气体排放量的2.4%（IPCC, 2022年）。未来几年，随着热泵和空调使用量的增加，如果不采取进一步行动控制其使用量，其排放量可能迅速增长。为符合政府间气候变化专门委员会（IPCC）要求的全球气温上升不超过1.5°C，需在2021年2030年间将含氟气体排放量减少约75%。鉴于含氟气体的大气寿命短、全球变暖潜能高（GWP）¹，立即采取行动减少其排放量，可以快速抑制全球气温增长，并避免技术停滞。

2016年，《蒙特利尔议定书》基加利修正案要求发达国家到2036年、发展中国家和新兴国家到2047年将含氟气体的生产和消费逐步减少80-85%，以应对含氟气体排放对气候的影响。截至2022年10月，占全球温室气体排放量80%以上的缔约方签署了该修正案。欧盟主要使用含氟气体法规实施其逐步淘汰路径，欧盟委员会已于2022年4月提交了一份修订提案，建议禁止在所有自给式和小型分体式热泵和空调系统中使用GWP值超过150的制冷剂。

¹GWP注释：全球变暖潜能值使得比较不同温室气体的气候影响成为可能。它被定义为某一温室气体所吸收的热量，以相同质量的二氧化碳吸收热量的倍数表示。为了解释气体在大气中的不同寿命，最常用的指标是100年全球变暖潜能值，它对应于从排放时起100年内吸收的热量。除非另有说明，本报告均使用100年全球变暖潜能值。

表 2.2 ▶ 家用热泵的常用制冷剂和替代品

类别	制冷剂	全球变暖潜能值	可燃性	三氟乙酸产率
常规 HFC	R-410a R-134a	2 088 1 430	不易燃 (A1)	0% 7- 20%
碳氢化合物 (HC)	R-290 (丙烷) R-1270 (丙烯) R-600 (丁烷) R-691 (戊烷)	≤3	较高可燃性 (A3)	0%
较低全球升温潜能值的 HFC	R-32	675	低可燃性 (A2L)	0%
HFC/HFO 混合物	R-454B	490	低可燃性 (A2L)	30%
HFO	R-1234yf R-1234ze	4 <1	低可燃性 (A2L)	100% <10%
CO ₂	R-744 (二氧化碳)	1	不易燃 (A1)	0%

注:GWP来源于IPCC的第四次评估报告 (AP4)，不确定性为30%，GWP阈值在很大程度上基于该迭代。与此同时，IPCC第五次评估报告 (AP5) 和第六次评估报告 (AP6) 中更新了一些数值。TFA产率指排放的制冷剂在大气中分解为三氟乙酸 (TFA) 的百分比，而三氟乙酸是一种寿命很长且对环境和人类健康有害的物质，TFA产率百分比越高，危害越大。

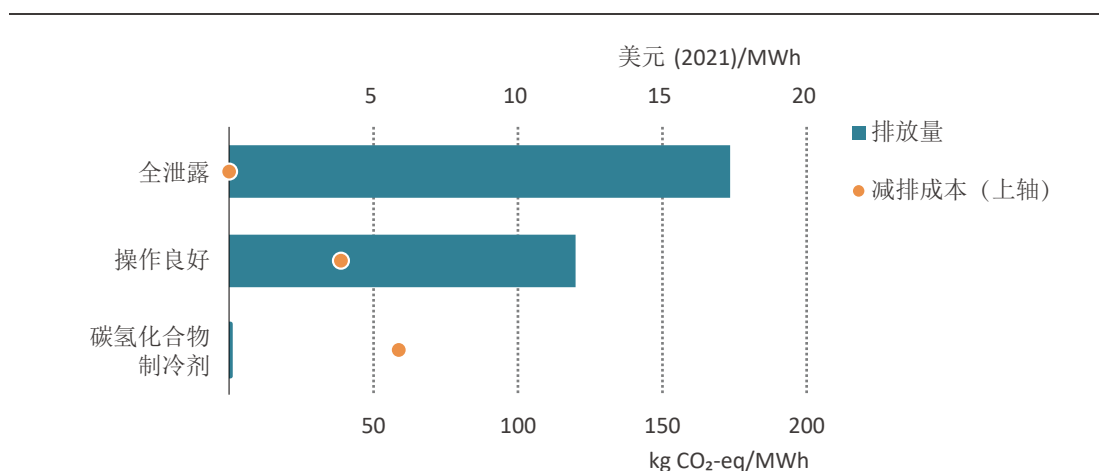
资料来源: UBA (2021)。

含氟气体的排放来源于气体生产、制冷循环(如热泵)和产品使用及退废过程中的泄漏。其中，热泵的排放可以通过定期维护以及合理的退废回收来减少 (大金, 2022)。然而，全球范围内可能没有有效的处理回收设备的系统。目前的技术实践在理论上最多可以将全球热泵的含氟气体排放量减少三分之一，但这一预测值会因地区和热泵类型而异。此外，还可以使用替代制冷剂，如全球变暖潜能值较低的含氟气体以及碳氢化合物、HFOs 或 CO₂，它们的全球变暖潜能值更低，但技术上可能更复杂或更昂贵 (表 2.2)。例如，丙烷作为制冷剂使用时，因其更高的可燃性而受到欧盟建筑法规的限制。虽然安装整体式循环机组 (制冷剂循环完全位于室外) 可以解决这个问题，但分体式系统因其适用范围更广而成为许多用户的选择，同样不可忽视。修订后的国际电工委员会 (IEC)² 标准于 2022 年 5 月发布，欧盟正在针对该标准进行正式协商，但根据欧盟立法，制造商已经可以采用。在具有室内机的小型分体式系统中，当系统满足额外的安全要求时，其允许被充入足够的易燃制冷剂。对于较大的系统，拟议的含氟气体法规仍然允许使用全球变暖能值低于 750 的 HFC 制冷剂。为了确保在安装和退废期间也能安全处理易燃制冷剂，并最大限度地减少事故，联合国环境规划署 (UNEP) 制定了制冷剂领航计划，促进发达经济体与新兴及发展中经济体之间关于制冷剂安全处理的实践成果交流和知识培训 (UNEP, 2018)。

²IEC-60335-2-40电热泵、空调和除湿机的特殊要求 (IEC, 2022)。

为了减少制冷剂用量及其相关的环境和安全风险，需要进行技术创新。例如，德国的一个研究项目成功地测试了一种热泵模型，其每千瓦容量仅使用 10 克丙烷制冷剂，COP 为 4.7，而目前系统通常的制冷剂用量是它的六倍（Fraunhofer ISE，2022）。一些制造商还开发了全球变暖潜能值水平较低的替代氢氟碳化合物，如氢氟碳化合物 R-32。R-1234yf 和 R-1234ze 等氢氟碳化合物的可燃性较低，不会消耗臭氧层，全球变暖潜能值显著降低，但会对环境和人类健康造成其他潜在危害³。CO₂ 制冷剂不易燃，毒性很低，全球变暖潜能值为 1（Patenaude，2015）。然而，使用它时需要更高的系统压力和具有更高输出功率的压缩机，这增加了在制造和使用热泵时对用能和材料的要求。由于其物理性质，CO₂ 在要求高温差供热的特定用途（如热水器或某些工业和商业应用）中提高了系统效率。

图 2.6 ▶ 热泵制冷剂每MWh有效热量输出时温室气体排放量和不同制冷剂选择下的减排成本



专业的维护、回收和使用替代制冷剂可以大大减少制冷剂泄漏造成的排放

IEA. CC BY 4.0.

注:kgCO₂-eq = 等效CO₂千克当量。制冷剂以全球变暖潜能值为2000的制冷剂混合物为基准。全寿命温室气体排放包括运行和报废期间制冷剂泄漏产生的温室气体排放。

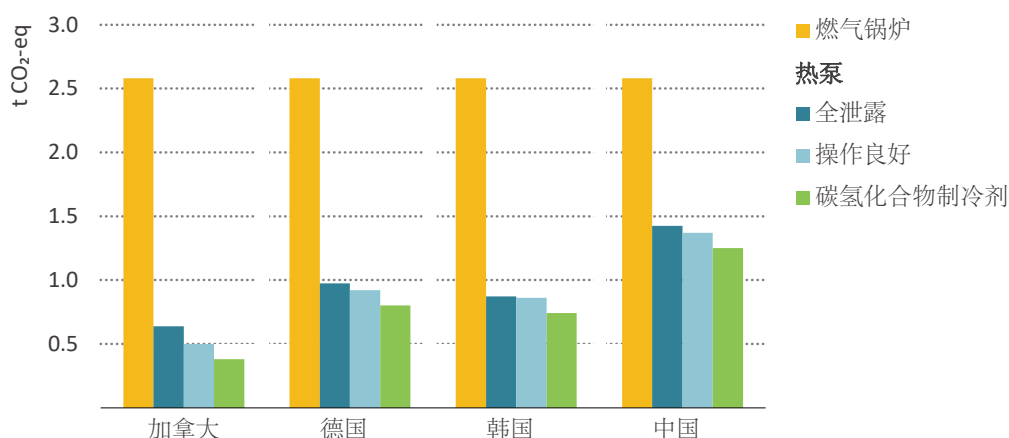
资料来源:IEA基于Purohit和Höglund-Isaksson(2017)的分析。

³ HFOs被认为是一种单氟和多氟烷基物质(PFAS)，因为它们在大中转化为三氟乙酸，对环境和人类健康构成长期危害。可能的未来法规可能禁止PFAS在欧盟的使用(欧洲化学品局，2022年)。

最经济的从热泵制冷剂中减少温室气体排放的方式是用碳氢化合物取代氢氟碳化物，但增加了可燃性的风险（图2.6）。使用HFC R-134a制冷剂的普通住宅热泵的6-40%的全生命周期CO₂排放与制冷剂泄漏有关，具体取决于功率组合、热泵性能以及制冷剂在设备报废时是否回收。随着电力生产越来越多地脱碳，这一比例将会上升。

如果使用含氟气体制冷剂并且完全泄漏，与高效燃气锅炉相比，热泵仍然可以减少至少20%的温室气体排放量，即使在使用非可再生电力的情况下也是如此。在占世界能源消耗70%的地区，减排率超过45%，在电力来源更清洁的国家，减排率达到80%。而使用替代制冷剂时，这些数值可以分别再提高10个百分点。这种巨大的变化主要来源于发电排放强度的差异，而不是制冷剂的选择。图2.7显示了四个国家根据其气候条件和电力生产的排放强度而节省的排放量。

图 2.7 ▶ 根据制冷剂选择，燃气锅炉和热泵每MWh有效热量输出时温室气体排放量



IEA. CC BY 4.0.

无论是何种气候条件和电力来源组合，改用热泵都能显著减少排放。
解决含氟气体排放问题可以进一步减少排放。

注：tCO₂-eq = 等效 CO₂ 吨数；HC= 碳氢化合物。将热泵与效率为 90% 的燃气锅炉和 GWP 为 2000 的制冷剂组合的含氟气体排放进行了比较。全生命周期温室气体排放包括电力使用和运行和报废期间制冷剂泄漏产生的温室气体排放。电力生产排放因素：加拿大（119 克 CO₂-eq/kWh）、德国（352 g/kWh）、韩国（424 g/kWh）、中国（549 g/kWh）。加拿大气候以安大略为主，中国以东北为主。

资料来源：IEA 基于 Purohit 和 Höglund-Isaksson（2017）、Purohit 等人（2022a）、Kowalski 和 Szałański（2019 年）的分析。

如果含氟制冷剂继续以同样的方式使用，到2030年，在2050年净零排放情景（NZE）中，全球热泵装机将减少相当于7.4亿吨CO₂的温室气体排放量，约为澳大利亚每年温室气体排放总量的两倍。但即使在全世界范围内应用设备维护和循环利用方面的最佳做法，也只能减少三分之一的排放量，这使得将限制全球气温上升1.5℃变得更加困难。

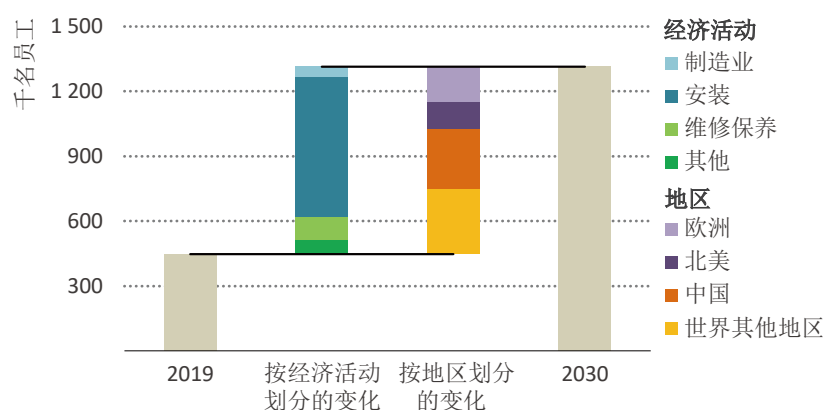
从理论上讲，改用非氢氟碳化合物制冷剂是可行的，但由于技术和成本方面的影响，有可能阻碍其在热泵中的应用。重点是，不能简单地在现有机组中替换制冷剂。虽然一些热泵制造商不再严重依赖氢氟碳化合物，但其他制造商将需要改变生产工艺，使用不同的组件和材料。生产和安装的工人可能需要接受额外的制冷剂易燃相关的安全培训。因此，一个稳定而长远的监管框架对于带动产业投资至关重要。在短期内，政策的重中之重应该是建立防泄漏和强制回收系统的标准，以避免传统的高全球变暖潜能值制冷剂从旧设备排放到空气中。由于含氟气体泄漏发生在设备使用期间和设备报废的时候，即使制冷剂在新设备上持续使用，含氟气体在2050年以后仍将被排放（Purohit等人，2022b）。决策者需要确保加速淘汰氢氟碳化合物的措施不会阻碍热泵的推广应用，后者在气候方面的好处远远超过氢氟碳化合物泄漏对气候的负面影响。这意味着在没有能效或其他技术质量重大损失的情况下，尽量让原先使用氢氟碳化合物的设备使用低全球变暖潜能值制冷剂。

2.6 创造就业机会

随着热泵应用的迅速推广，在制造和安装热泵方面，以及制造热泵所需的各种材料和零部件方面，需要相应地增加劳动力。这意味着要大力招聘和培训工人。

2019年，全球约有45万人直接从事热泵的制造、安装、销售、维护工作(图2.8)。安装是热泵产业链中劳动密集程度最高的部分，估计有21万名工人就业。因为具有庞大的建筑存量，中国拥有最多的安装商。尤其是在中国南方，在夏季制冷和冬季供暖都依赖热泵。空气-水热泵和地源热泵在安装时的时间消耗通常更大，这增加了对应的就业人数，也增加了随着市场扩张招聘新工人的需求。制造、维修和维护总共占到热泵工作内容的一半左右。与安装人员一样，中国拥有最多的热泵制造劳动力，约为5.5万人，与其在全球热泵制造中40%的份额相符，其次是美国，全球大约四分之一的热泵是在美国生产的。

图 2.8 ▷ 2019-2030年承诺目标情景APS情景中按工作模式和地区/国家划分的就业变化



IEA. CC BY 4.0.

到2030年，热泵将创造80万个新的工作岗位，主要是安装和维护，呼吁进行大规模的招聘和培训

注：其他包括批发和运输。

在承诺目标情景（APS）中，到2030年，全球热泵行业的就业人数将增加近两倍，达到130多万人。随着制造商和安装商响应REPowerEU倡议和其他国家热泵应用计划的远景目标，欧洲的劳动力数量增加近两倍。随着预计的全球热泵产业劳动力增长，将有大约70万名工人建造更节能的建筑，并进行建筑围护结构隔热改造。集成热泵系统还能促进在家用太阳能光伏板和电池方面创造就业机会。

承诺目标情景（APS）中，热泵产业就业增长集中在安装工作上。承诺目标情景（APS）需要的热泵安装人员数量攀升至85万，增加了近65万。需求增长最大的是中国和亚太其他地区。欧洲的安装劳动力数量增加三倍，这主要归功于欧盟和英国对热泵的快速应用。此外，到2030年，还需要大约17万名工人来维护和运行全球新增的热泵。招募和培训这些工人是一项相当大的任务。考虑到目前与供暖相关的劳动力市场十分紧缺，业内已经有人担心这些岗位是否都能得到填补（见第3章）。

由于新型和高效工厂落地，劳动生产率得到提高，热泵制造业的工作岗位数量增长变得缓慢，全球增幅约为40%。创新的传感器控制和计算机编程可以简化制造流程，提高装配线的效率。而通过对兼容于不同类型热泵的标准化组件进行模块化设计，可以减少制造时间和劳动力投入（RHC和EHPA, 2021年）。热泵制造业的就业主要集中在欧洲、北美和中国，这些地区目前拥有大量的生产能力，主要制造商在2030年之前将大部分投资用于扩大产能。欧洲和美国的新制造工厂纷纷投产，反映出近期政策正将供

应链的关键部分向内转移（见第3章）。由于劳动力成本较高，这些地方的制造成本明显高于亚太地区，但可以通过自动化生产降低成本。然而，许多制造工作，如焊接，仍将是劳动密集型的。

热泵行业需要产业链上不同类型的专业人员具备不同的技能。制造业工人需要能够操作机械设备并执行手工任务，类似于其他家用和工业电器的制造工作，而安装工作需要一名或多名技能较强的供暖专业人员，他们可以计算热损失，调整热泵的容量，并执行管路和接电工作（见第3章）。其中许多技能可以与制造业和供暖行业的类似工作互通，从而为化石燃料供暖行业的工人（如燃气锅炉安装工）提供了一条可替代的职业道路，并使招聘新工人变得更容易（需遵守当地法规和相关强制性资格）。

培训对于在世界范围内扩大热泵劳动力至关重要，特别是对于安装人员。安装培训方案，包括工业协会和制造商提议的方案，必须包含农村和城市地区。和空调行业一样，今天的热泵制造和安装行业由男性主导。改善性别平衡的努力可以与培训和招聘方案结合起来。热泵工人的工资通常也比建筑工人的平均工资高出四分之一左右，尽管这在不同国家差别很大，但培训费用高昂可能会挫伤新申请者的积极性。为学徒提供体面的报酬，为再培训计划提供公共财政资金，这些都是吸引工人进入该行业的重要手段。工会代表可以帮助创造更好的工作条件、安全标准和公平的工资。在美国，热泵作为能源效率产业的一部分，其工会化率高于平均水平（US DOE，2022年）。

障碍与解决方案
市场化

小 结

- 加速热泵应用的关键在于克服一系列障碍，其中最主要的是安装的前期成本、用户侧潜在的非成本因素、制造约束和安装工人短缺。政府和热泵行业需要共同努力，以解决这些问题并实现承诺目标情景（APS）设想的热泵推广速度。
- 相对于其他供暖选择，购买和安装热泵的高额前期成本可能会阻止许多消费者，尽管较低的运行成本意味着即使在某些地区没有补贴，热泵也可以在其生命周期内具有成本竞争力。由于政策的支持，在当今大多数主要的供暖市场上，安装空气-空气热泵的成本与燃气锅炉相当，尽管空气-水热泵的成本仍然是燃气锅炉的两到四倍。已经有30多个国家提供了资金支持，其中许多国家为低收入家庭（如波兰）或高能效设备（如加拿大）提供额外支持。能源税改革和将CO₂税平等应用于家庭供暖燃料和电力可以降低运行成本，使热泵具有成本优势。
- 许多非成本障碍，如复杂的审批流程，信息缺乏，以及对业主和租户的激励分配，是当今许多国家消费者采用热泵较少的主要原因。一些国家已经采取行动简化许可程序（如捷克共和国），为消费者创建一站式服务（如爱尔兰），并鼓励替代商业模式来解决激励分配问题，特别是在北美、英国和德国，但各地都仍然需要加强努力。
- 头部制造商最近宣布了投资超过40亿欧元用于扩大热泵产能和相关工作的计划，主要集中在欧洲。然而，供应链瓶颈，对芯片组和铜的影响尤为明显，正在增加制造成本，并阻碍热泵产能的增加。以美国为代表的几个国家正在采取激励措施来应对，以增大国内产能。为了进一步鼓励投资，需要长期政策的一致性和监管的确定性，以及加强供应链的有针对性的行动。
- 合格安装人员的短缺，已经是许多供暖市场的一个关键问题，阻碍热泵的推广。到2030年，承诺目标情景（APS）对全职安装人员的需求将增长四倍，超过85万。将热泵纳入具有类似技能的水管工和电气工程师的现有认证，将有助于降低培训要求。经济激励（比如欧洲各地采用的激励措施）也可以用来吸引新工人参加专业培训计划。

3.1 引言

加速推广热泵达到承诺目标情景（APS）所设想的程度需要克服一系列障碍，其中一些障碍是普遍存在的，而另一些则仅限于某些国家或地区。本章重点解决建筑热泵的主要障碍，包括需求侧——消费者采用热泵的成本和其他市场障碍，以及供给侧——扩大产能和培训安装工人方面的实际限制。解决这些障碍的关键政策总结在表3.1中，并在本章后续部分详细讨论。

于2023年1月发布的IEA报告《能源技术展望2023》中详细介绍了热泵组装和安装之前的供应链障碍，包括对制造热泵所需的原材料、设备和组件供应的潜在限制。

表3.1 ► 加速推广热泵的关键障碍概述及相应的政策解决方案

障碍	政策解决方案
需求方面	
成本壁垒	前期成本： • 补助金 • 低息贷款 • 税收抵免 • 绿色抵押贷款 • 替代商业模式 • 中大型项目的风险解决方案 运行成本： • 重新平衡电力和化石燃料税，碳税与补偿 • 电价改革 • 建筑隔热和热分配系统升级的支持 • 安装后的质量和设置控制 • 用户培训
消费者采用的非成本障碍	• 为消费者提供一站式平台和比较工具 • 促进和支持供暖替代商业模式以解决激励分配问题 • 光学、噪声和建筑许可的法规变更 • 多户建筑的决策规则修订 • 出租物业或交易点的最低能效要求 • 供暖技术的性能标签 • 针对消费者的信息宣传活动 • 独立且免费的审计以提供更换供暖系统的决策依据
供应方面	
产能约束和供应链脆弱性	• 政策支持和法规的长期确定性，以及即将到来的法规变化的可预见性，包括行业咨询 • 国家热泵推广目标和路线图 • 产业政策，包括对制造商的财政支持 • 确保热泵部件供应链的安全
合格安装工人短缺	• 将热泵集成到供暖、通风和空调（HVAC）、建筑和电气专业的现有认证中 • 吸引暖通空调专业人员获得额外认证的激励措施 • 加强制造商培训，简化安装过程 • 具有广泛课程的国际标准化认证计划 • 国家热泵推广目标和路线图，建立信心，为专业人员提供长期就业前景

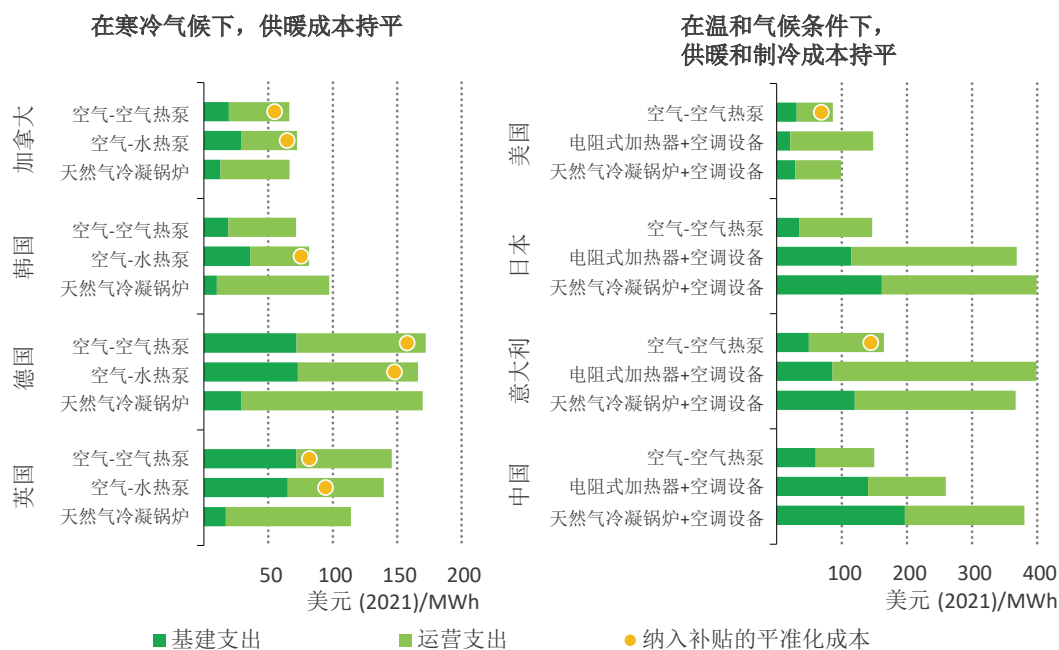
根据具体情况设计和调整这些政策需要可靠的数据，而实践中往往缺乏这些数据。特别是需要关于热量需求、工业过程需求和余热来源的数据，例如使用热力系统图，以及关于建筑和供暖系统热用户、市场发展、安装和维护成本以及已安装系统的实际性能的数据。世界各地的政府都需要进一步努力，改进数据收集工作，以便更好地为决策过程和投资决策提供信息。

3.2 成本壁垒

热泵相对于其他供暖技术的整体成本竞争力取决于多个因素，包括初始购买价格、运行和维护成本（包括运行所需的电力价格）、使用年限以及补助金或减税等财务激励措施。在大多数市场中，热泵即使考虑财政激励也通常比传统的化石燃料加热设备（如石油或天然气锅炉）的前期成本更高，但由于能源效率更高，热泵在其生命周期内运行成本更低。

如今，热泵在成本上的竞争力因各国在所有这些因素上的差异而有很大不同。基于2021年的平均设备价格和承诺目标情景（APS）预测的燃料价格，新型热泵在寒冷气候中为一栋普通住宅供暖，比天然气冷凝锅炉在大部分主要供暖市场中更具成本优势，甚至在无补贴的情况下亦是如此（图3.1）。然而，在某些国家，如英国，需要热泵补贴才能使其具备成本竞争力。即使热泵在使用寿命期已经是最便宜的供暖选择，为降低初始成本负担，仍可能需要财政激励措施，包括补贴和低息贷款，否则可能会阻止建筑物业主优先选择安装热泵。

图3.1 ▷ 2021年部分国家住宅热泵及替代品供暖与制冷的平准化成本



IEA, CC BY 4.0.

得益于较低的运行成本，热泵在一些主要供暖市场上即使在无补贴的情况下，也可与燃气锅炉竞争。

注：空气-空气 = 空气-空气热泵；空气-水 = 空气-水热泵；天然气 = 天然气冷凝锅炉；电热 = 电阻式加热器；AC = 空调设备。供暖和制冷的平准化成本估计了在设备使用寿命内，提供1兆瓦时（MWh）供暖或制冷的平均成本，包括设备和安装的基建成本；运营支出包括燃料成本和定期维护。分析假设各个代表国家中一个代表城市的供暖和制冷度日数，然后使用该国的平均能源价格。对于寒冷气候，我们选用多伦多、首尔、柏林、爱丁堡作为代表城市，对于温和气候，我们选用华盛顿特区、京都、罗马、上海作为代表城市。使用了承诺目标情景（APS）预测的设备和燃料成本的中等市场价格。天然气锅炉的使用寿命假设为17年，空气-空气热泵的使用寿命假设为15年，空气-水热泵的使用寿命假设为18年。电阻式加热器和空调设备的使用寿命假设为10年。

3.2.1 降低前期成本

降低购买和安装热泵的前期成本对于提高其对消费者（尤其是家庭）的吸引力至关重要。设备成本因技术类型（空气-空气、空气-水或地源）、额定容量、制造质量和功能，以及不同国家和地区（部分取决于市场的成熟度）而有很大差异。后一个因素也会影响安装和辅助成本，如电气和管道工作或储热水箱，其需求因每个安装的具体配置而有很大差异。劳动力成本的差异进一步解释了各国前期成本的差异。

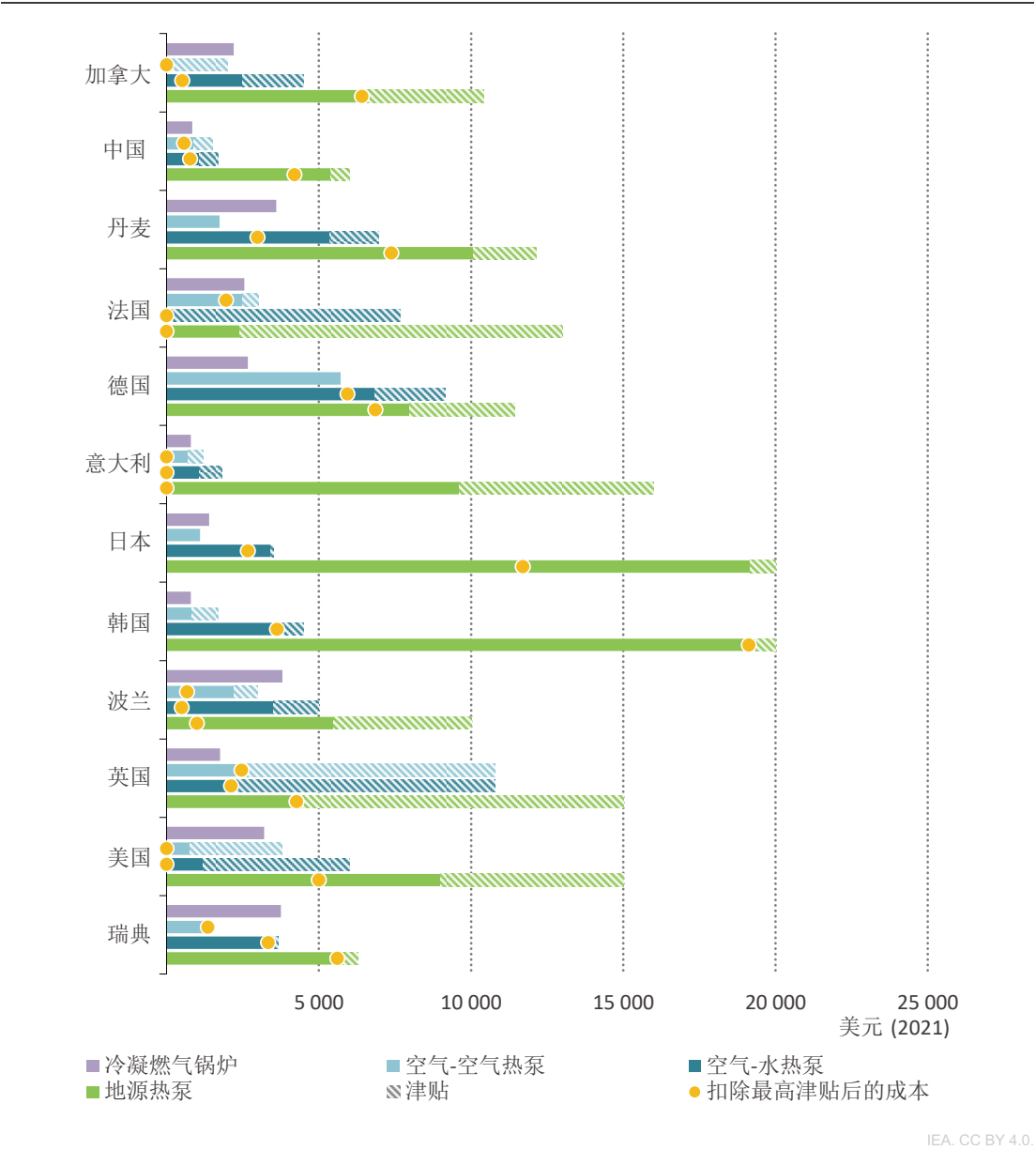
在大多数市场上，尽管同一技术在不同国家甚至国内的成本差距相差很大（见附录A中的图A.1），但住宅热泵的前期成本（包括安装）通常远高于化石燃料锅炉。然而，在一些成熟市场，如丹麦和日本，最便宜的无管道空气-空气热泵型号在小型住宅的新安装中已经比燃气锅炉更便宜，特别是由于减少了管道工程和安装成本（图3.2）。但对于无管道空气-空气系统，由于拥有多个供暖区域的大户型住宅需要多个设备，因此通常使其比燃气锅炉更昂贵。以水为热媒（空气-水）的热泵比空气-空气热泵更昂贵，即使是最便宜的型号，在除瑞典以外的所有主要市场上也比燃气锅炉更贵，这是因为瑞典早期政策使得热泵得以广泛采用，从而降低了安装成本。地源热泵在所有国家都是最昂贵的技术类型，因为安装地下换热器需要进行土方或钻探工程，这可能占到系统总价格的一半以上（尽管它们更高的耐用性和效率意味着它们在平准化成本上具有竞争力）。在需要部分时间制冷的气候中，安装可逆热泵可以有效降低供暖成本，因为它省去了单独安装空调设备的额外成本。

与燃气或石油锅炉相比，热泵更高的前期成本意味着一些家庭无法负担得起，尽管它们的运行成本可能会低得多。为了帮助克服这一障碍，许多国家推出了热泵补贴政策以推广热泵的应用。考虑到目前可获得的最低补贴，空气-空气和空气-水热泵的前期成本在一些国家（包括法国和美国）低于燃气锅炉。对于有资格获得更高补贴的低收入家庭，热泵的成本优势可能更大，比如在波兰。在一些国家（如加拿大），对于效率最高的型号（通常价格更高）补贴额度也更高。

在现有住宅中更换热泵可能会产生额外成本，这也可能成为选择该选项的障碍。根据热泵的容量，较旧的住宅可能需要升级其电气系统以适应更高的功率负荷。此外，现有的散热器可能需要更换为更大的散热器，或者使用地板辐射供暖或强制空气供暖系统，以便让热泵在较低温度下运行并具有更高的供暖效率。¹这些升级成本可能占到安装热泵总成本的三分之一。

¹化石燃料锅炉通常在60-80℃的输出温度下运行。虽然热泵可以产生超过55℃的热量，并有可能达到70℃，但其性能随着输出温度的升高而下降。

图3.2 ► 2022年部分国家最便宜型号的主要住宅供暖技术设备及安装成本



IEA. CC BY 4.0.

得益于较低的运行成本，热泵在一些主要供暖市场上即使在无补贴的情况下，也可与燃气锅炉竞争。

注：成本包括设备价格及其安装费用。补贴考虑了每个国家提供给符合条件的家庭的最低国家财政支持水平。中国和日本不在国家层面提供补贴。有一些国家例如意大利，在某些情况下提供的补贴可能超过购买价格。

表3.2 ► 2022年全球住宅热泵财政支持机制覆盖情况

财政支持类型及主要特点	国家数目	全球住宅供暖份额
资金补贴	30	70%
仅适用于热泵的支持...		
主要用于供暖	27	47%
安装在老旧住宅中	20	28%
完全依靠电力运行(混合系统除外)	16	11%
取代化石燃料供暖系统	12	34%
安装在主要住所中	12	15%
基础金额设定...		
作为费用份额，并以最高金额为上限	16	39%
根据不同的热泵技术类型	10	16%
取决于其他因素	6	3%
额外支持.....		
更高能效的技术	18	29%
低收入家庭	12	34%
安装在住宅而不是公寓的热泵	4	2%
安装在欠发达地区的热泵（例如没有集中供热）	4	2%
替代化石燃料供暖系统的热泵	3	7%
所得税减免	9	33%
仅适用于热泵的支持...		
安装在老旧住宅中	5	12%
安装在主要住所中	3	6%
设定基准金额...		
作为购买/安装价格的一部分，并受最高金额限制	7	30%
与购买价格相等	2	2%
根据效率/节能程度高于购买/安装价格	1	3%
额外支持.....		
替代化石燃料供暖系统的热泵	1	< 1%
增值税退税	5	12%
增值税率.....		
购买和/或安装热泵降低	5	12%
购买和/或安装热泵等于零	1	4%
低息贷款	24	29%
贷款.....		
低利率和对金额和期限的条件	20	18%
零利率和对金额和期限的条件	7	13%

注：分析基于国家级政策，但对于日本和中国，只存在地方级别的计划，但覆盖了国家供暖需求的相当大部分。

主要供暖国家提供了广泛多样的财政激励计划，反映了政治意愿、国家政策战略和地方因素的差异（见表3.2）。在许多国家，只有在废弃现有的化石燃料锅炉后，才能获得对热泵安装的财政支持。这些国家共占全球供暖需求的三分之一以上。

补助金是最常用的政策工具，目前在30个国家提供，共占全球供暖需求的70%。在一些国家，补助金可覆盖低收入家庭购买和安装热泵的大部分甚至全部成本。一些国家，包括法国和英国，已降低或完全取消了对替代燃气锅炉的增值税。一些国家使用所得税抵免。例如，意大利的超级奖励计划为大规模建筑翻新提供高达建筑成本110%的税收抵免，其中包括热泵。然而，与直接补助和津贴不同，税收抵免需要一定的延迟时间，通常为两年，最长可达五年。低息或无息贷款、绿色抵押贷款以及特定的贷款还款计划（例如按实际消费支付）在许多国家广泛可得。在中大型地源热泵项目中，一些国家开展了规避钻井的金融风险的计划，尤其是法国（Georisk, 2021）。对于消费者来说，了解各种类型财政支持的资格和申请方式可能是困难的，因此一些国家设立了“一站式”服务机构来简化流程；爱尔兰电力超级住宅就是一个例子。

其他政策方法也可以帮助降低购买和安装热泵的初始成本。适当的监管环境可以促进新的商业和融资模式的出现，通过减少或消除消费者的前期成本负担，并允许他们随着使用支付这些费用，例如通过租赁或热能服务模式（参见下一节）。在适用的情况下，监管机构应该消除其他阻碍采用的前期障碍，例如天然气网络断开费用。

预计到2030年之前，购买和安装热泵的成本将以实际价值逐渐下降，因为市场扩大并且供应商从规模经济中受益。制造热泵的最大成本组成部分是压缩机、换热器和电子元件，它们共占空气源热泵成本的三分之二左右（US DOE, 2016年）。通过大规模自动化，降低生产成本的潜力很大，但需要强有力、稳定的政策信号，使制造商承诺进行扩大产能所需的大量投资。工业化措施可以促进更快的成本下降，例如标准化零部件和质量控制测试，可以降低零部件、安装、维修和维护的成本。制造商还可以开发即插即用的设计，使安装更快、更简单、更便宜。针对相邻地区中类似建筑物的连续安装，可以借鉴荷兰起源的Energiesprong方法，实现建筑物的能源效率改造，从而帮助共享成本（Energiesprong, 2021年）。在成熟市场上，安装商之间竞争的增加也有望对成本产生下行压力。

总体而言，在近十年内，热泵的总前期成本在大多数市场可能会下降五分之一，并在一些国家（如德国）可能下降40%（Heptonstall 和 Winskel, 即将发布；Agora Energiwende, 2022）。然而，预期的成本仍然存在高度不确定性，因为还有其他因素可能逆转上述趋势，例如对热泵能源性能和允许使用的制冷剂类型的法规加强，以及在逐步在需要进行深度能源改造的现有建筑中部署热泵时的更高翻新成本。

专栏3.1 ► EBRD对热泵的融资

欧洲复兴开发银行（EBRD）支持快速部署热泵作为供热系统降碳的一种手段。通过绿色经济融资机制，EBRD与170多家地方金融机构和2300家技术供应商合作，为希望投资绿色技术的企业和业主提供支持。EBRD已经在东欧和东南欧一系列项目上投资了8000多万欧元，安装了3万个热泵。此外，贷款作为波兰和罗马尼亚以节能建筑改造计划的一部分为热泵的部署提供了资金支持。

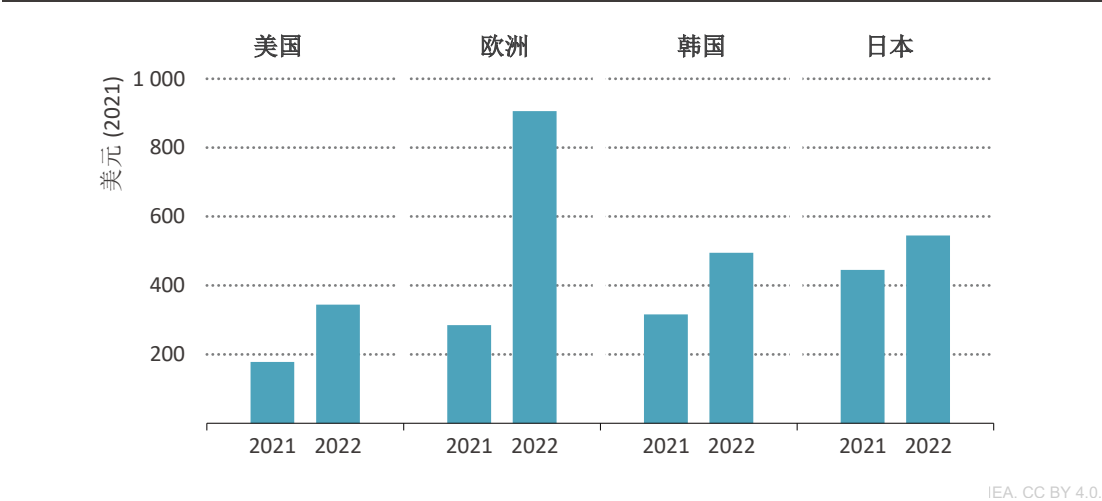
为了支持热泵应用部署，EBRD主要致力于以下四个方面：

- 为热泵在特定市场中的规模化推广提供优化技术支持。
- 与政府协同消除热泵技术推广的障碍，并协助制定最低性能标准。
- 特别是在巴尔干半岛西部地区，支持市政设施安装工业级和建筑级规模的热泵用于区域供热，作为深度能源改造和新建筑项目的一部分。
- 通过银行部门加强绿色经济融资。

3.2.2 降低运行成本

在现阶段能源危机之前，热泵运行成本就已经低于供暖市场的主流燃气锅炉设备（图3.3）。在欧洲，这一优势在近几个月有所增长，平均每年可为欧洲居民节省900多美元。这是因为居民电价的涨幅一般低于天然气，这一定程度上是由于政府干预以抑制价格上涨。

图3.3 ► 2021和2022部分地区/国家燃气锅炉改用热泵的居民能源费用节省情况



在大多数国家，不断飙升的天然气价格提高了运行热泵相对于燃气锅炉的成本优势

注:2022年能源费用的节省考虑了截至2022年9月的政策干预措施，包括减少增值税、直接补贴以及对设定

能源价格上涨上限等。该分析基于各地区/国家的平均电力和天然气价格，以及各地区/国家代表性城市（底特律、斯德哥尔摩、首尔、新潟）的平均用户热负荷与热水需求。

资料来源:IEA基于Energie-Control Austria, MEKH和VaasaETT（2022）的分析。

在一些国家，化石燃料税率仍有相当大的改革空间，天然气仍然比电力具有更优惠的税收政策。其他国家已采取相关措施重新平衡税收。例如，荷兰的一项税收改革降低电力税率并提高天然气税率，使得热泵的运行成本甚至低于燃气锅炉，并2018年出台了禁止燃气接入新建筑的禁令，这导致了对热泵的需求增加（RAP, 2022a）。在丹麦，电力税率占到2021年住宅电价的一半以上，如果家庭采用热泵供暖，用户只需支付0.1欧分/kWh的低税率（IEA, 2021）。

此外，碳价制订也有助于在化石燃料和低碳技术之间创造公平的竞争环境，并特别是在低排放发电的地区可以显著提高热泵的应用竞争力。如今，全球有20多个国家建筑行业CO₂排放进行定价（世界银行，2022年）。在瑞典，碳税在1991年被引入，随后税率稳步提高，并推动了燃油锅炉向热泵的大规模转变。瑞典的碳价在2022年达到了118欧元每吨CO₂，这是世界上最高的价格之一。因此，燃油锅炉在瑞典已经基本上被淘汰，热泵占供热系统销售额的90%以上。

在所有情况下，能源税收和碳价都需要考虑到分配方式影响。政府可能要采取保护最弱势群体的补偿性措施，比如通过提高燃料税和/或碳税产生的额外收入来提供资金。这些收入也可以用来补贴热泵和其他清洁能源技术。

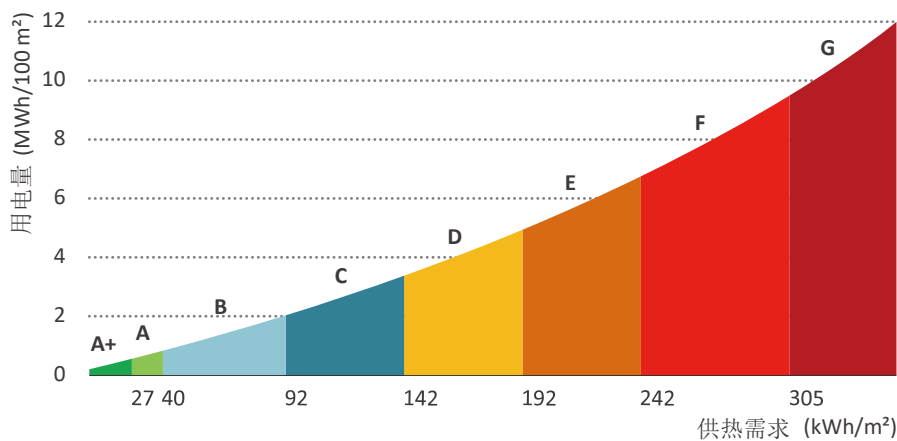
电价也可以以降低热泵运行成本为目标进行设计。建筑物和储热水箱的热惯性为热泵灵活运行提供了相当大的潜力，使其能够在一天中的非高峰时段消耗电力。这种灵活性需要通过使用时间动态电价以及自动化操作来强化。例如，爱尔兰电力公司提供的夜间电价大约是白天电价的一半，允许热泵业主定制其设备程序，特别是在夜间运行时（Electric Ireland, 2022年）。集成的计量、通信和主动控制功能可以增强热泵的需求响应潜力，并最大限度地降低运行成本。这也有助于平衡整个电力系统，减少热泵大规模应用对需求峰值的影响。也可以让热泵与屋顶太阳能光伏耦合灵活运行，这可以进一步降低运行成本，尽管这需要较高的前期成本。

提高能源效率也可以降低运行成本。低能耗建筑和高效的热泵（可以通过最低能源性能标准和标签来推广）对于降低热泵容量至关重要，从而降低运行和安装成本。还可以降低供水温度，使热泵能够更高效、更廉价地运行。在丹麦，研究发现，在效率等级最高的家庭中，热泵的用电量比效率等级最低的家庭节约30倍（图3.4）。将一个家庭的效率等级提高两个等级（例如从D到B），可以减少一半的供暖能源需求，为消费

者节省费用。国际能源署《2022年能源效率市场报告》更详细地讨论了低能耗建筑和热泵的关系（国际能源署，2022a）。

热泵的运行成本也受到其运行和维护状况的影响。至关重要的是，热泵业主应当了解正确的操作，并需要由合格的技术人员进行彻底的维护，以便热泵在整个生命周期内有效运行。随着时间推移，空气源热泵可能会被污垢堵塞，导致耗电量增加、机组过早磨损和运行噪音增大等问题。同时，制冷剂也容易泄漏，这会降低运行效率，也会影响气候变化（参见第2章）。适用于大型热泵的制冷剂泄漏预警系统目前已在市场上销售，将其推广到家用系统可以帮助用户了解性能下降的原因，并避免制冷剂气体的排放。

图3.4 ▶ 丹麦2022年按建筑能效等级划分的热泵年用电量



IEA, CC BY 4.0.

在丹麦，能效等级最高的热泵用电量比能效等级最低的热泵用电量低30倍

注:m²=平方米。绝对值根据丹麦建筑分类。各等级的阈值取决于当地的气候条件。A2015级为A级，A2015级别表示为A，A2020级别表示为A+。用电量是指每100平方米建筑面积的用电量。

数据来源: IEA根据Danish Energy Agency（2022年）的数据整理。

3.3 用户侧非成本因素障碍

除了成本之外，消费者选择热泵还面临诸多其他问题，主要包括与热泵安装有关的限制，关于热泵优势的信息不足，以及建筑业主和租户之间的激励分配机制不完善。虽然这些问题不如成本那么具体，但它们在很大程度上导致许多消费者选择其他供暖系统而不是热泵。如果不采取行动解决这些问题，可能不利于消费者选择热泵，限制热泵技术的推广。许多国家已经制定一些措施来解决一部分问题，但还需要进一步解决这些问题，从而更广泛地应用热泵。

3.3.1 新设备安装限制

在大多数国家，热泵的安装受到许多限制。热泵的安装通常要遵守建筑、消防安全、土地使用和电气的规范和规定。安装还可能需物业或建筑协会的批准，他们可能更关注美观和噪音，以及根据规划内容获得当地政府的批准。规模较小的家庭，特别是多户建筑，可能没有足够的外部空间安装热泵（尽管存在集中式热泵解决方案[国际能源署，2022b]），并且可能存在如何将外部压缩机单元固定到建筑立面的问题。获得批准和设计系统以避免实际限制可能会消耗大量时间和金钱，导致一些消费者在此过程中改变主意。对于在区域供热或商业应用中利用污水废热的水源热泵，法规可能禁止将废水从污水管道引向热交换器。

一些国家为了鼓励热泵的推广，已经简化了热泵的许可程序。例如，在捷克共和国，容量不超过20kW的室外住宅热泵现在无需申请建筑许可证。欧盟委员会最近提议缩短欧盟范围内热泵许可证授予过程的期限（欧盟委员会，2022）。许多国家也不要求小型热泵的规划许可。一些国家放宽了多户建筑的审批程序，只需要简单审批就可以安装热泵和其他清洁技术。对于地源热泵，根据钻井规定，可能会面临钻探深度的限制，一些政府已提高允许的深度，以便进行更多安装。根据地热可用性和监管要求来进行区域分类的地热地图有助于简化地源热泵项目的许可程序（BRGM, 2022）。

然而，在大多数司法管辖区，仍然存在许多其他限制。因此需要对关于热泵的所有法规、规范和审批流程进行全面审查，并且取消那些健康、安全、宜居性或其他结果没有实质性影响的多余繁琐的限制。这个过程可能很复杂，涉及大量的地方、国家和国际权威机构，因此需要由一个强大的中央集中机构来进行。各国在这一领域的经验分享对于进一步消除繁文缛节具有重要作用。

3.3.2 可靠信息匮乏

获取关于热泵的可靠信息对于消费者在诸多供暖方案中选择热泵技术至关重要。比较各种热泵、选择安装人员、获得批准和获得相关补贴资格的过程可能非常复杂和耗时。在调查中，许多曾考虑过购买热泵的消费者都将这些障碍列为他们最终决定不继续购买的原因（dena, 2022）。

能源标签是帮助消费者确定最节能供暖方案的关键措施。在大多数情况下，对于采用最低能效标准的供暖和制冷技术（110个国家已经采用或计划采用这些标准），能源标签是强制性的。除能源效率外，标签还应包括智能准备、可回收性和降噪功能，以

方便消费者选择。信息和宣传活动也可以用来纠正消费者对热泵性能的误解。许多消费者没有意识到近年来在热泵性能（包括效率和噪音）方面所取得的重大改进。促进社区层面的对话举措也可以增强消费者对该技术的信任，包括分享经验教训，并向考虑改用热泵的房主普及信息（RAP, 2022b）。一些国家大力推行一站式服务，帮助消费者比较不同类型的热泵、评估生命周期成本、选择经过审批的安装商、获得融资并申请补贴。在紧急购买的情况下，该服务能够帮助消费者做出明智的选择，当现有供暖系统突然故障，需要紧急更换时，大多数消费者会简单地选择更换现有供暖设备，而不考虑其他选择。在一些国家，紧急购买可占有供暖设备购买量的60%（Nesta, 2021）。除此之外，一站式服务还可以帮助安装人员接触到潜在客户。另一种替代方法是要求能源公用事业通过效率计划提供由第三方运营的比较工具，或要求能源公司、制造商或安装商网络为此类计划的成本作出贡献，提供免费的第三方能源审计，这可能比公用事业本身提供的建议更值得信赖，也可以帮助消费者在更换供暖系统时做出更明智的决策。

3.3.3 业主和租户之间激励分配机制不完善

业主和租户之间激励分配是建筑节能投资的一个常见障碍，包括采用热泵等更高效的供暖系统。如果业主不确定能否通过更高的租金或更高的房产转售价值收回更多的热泵投资，他们可能会对投资热泵持谨慎态度，尽管热泵可以让房产出售价格显著增加（Shen, 2021）。为了鼓励业主投资热泵和其他清洁能源技术，一些政府已经通过了立法，允许房主在房租中减少一部分节省的供暖成本，与租客分享利益。对出租物业或销售点交易设定最低能效要求，也可以激励对热泵的投资。例如，在法国，能源效率评级为最低等级（G级）的房产从2023年起将不再能够出租，而评级为F和G级的住宅将受到租金冻结，只有在进行改造至少达到E级时才会取消租金冻结。

融资模式例如能效性能和供热设备租赁，可以降低或消除前期投资成本，有助于克服激励分配的障碍。这涉及到房主和租户之间的一种协议，即将投资热泵的财务、绩效或技术风险转移到专业服务公司或公用事业，通过预定期限内的定期费用收回前期成本，在某些情况下，费用会基于实际节能效果（表3.3）。目前在主要供暖市场上可用的大多数方案旨在提供贷款的替代方案。在某些情况下，热泵仍然是服务公司的财产，降低了业主的财务风险。

表3.3 ► 促进热泵推广的主要商业模式

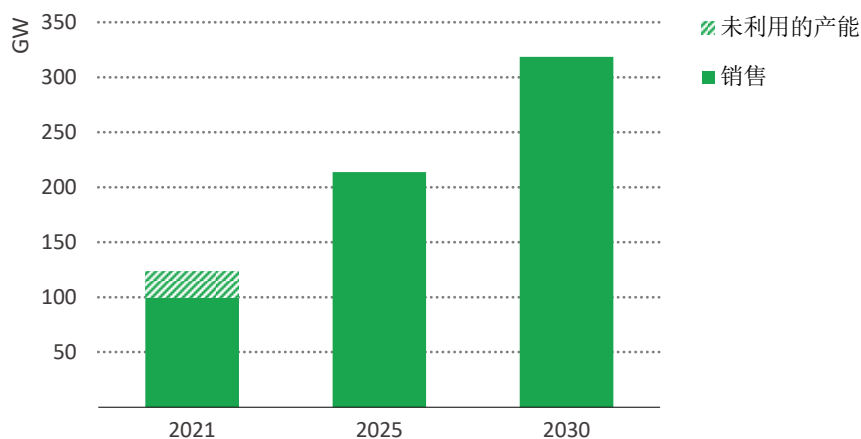
方案	描述	例子
能效性能合同 (EPCs)	节能服务公司 (ESCO) 在与商业客户的长期能源绩效合同 (EPC) 基础上, 安装、拥有并运营热泵, 采用共享节能模式或保证节能。	在英国可再生热能激励计划下使用
热量服务	由专业节能服务公司向住宅协会、业主或公用事业提供热泵及其维护和热量作为长期捆绑服务, 并根据保证节省的能源量支付固定的费用。	正在许多国家进行试验, 特别是在欧洲
性能绩效支付	客户根据节能情况为热泵设备支付固定的租金。	在美国加州、俄勒冈州和纽约州等州使用
票据融资	热泵安装和设备费用由长期贷款支付, 贷款通过附加在房产上的公用事业账单偿还, 可以转让给未来的租户。	在加拿大的几个省份都有使用
清洁能源资产评估	在住宅或商业物业中安装热泵的费用由贷款支付, 该贷款附加在房产上, 作为10-20年物业税的附加费用偿还, 便于向未来租户转让, 利率更优惠。	广泛应用于北美地区
常规设备租赁	热泵在预定的期限内租给业主, 期满后将热泵所有权转让给用户。	可在德国和其他一些国家使用
清洁能源中间贷款	大型银行向小型地方银行借款, 以便向投资热泵的建筑物所有者发放贷款。这种模式使大量融资能够投向许多小规模投资机会。	欧洲复兴开发银行 (EBRD) 等多边开发银行广泛采用了这一模式。EBRD利用绿色技术选择器 (一个无需额外批准就有资格获得支持的技术数据库), 来加快融资决策

资料来源: Catapult Energy Systems (2022); Urban (2021); EBRD (2022)。

3.4 制造限制

在承诺目标情景 (APS) 设想的规模上加速全球热泵的推广, 取决于制造能力的大规模扩张。制造商满足不断增长需求的能力可能受到各种因素的制约, 例如材料和零部件的可用性、商业和投资环境以及监管和法律限制等。尽管这不是本报告的主要关注点, 但政策制定者需要关注这些潜在的制约因素, 并找出协助私营部门解决这些问题的方法。目前, 世界各地销售的热泵主要是在中国、美国、欧洲、日本和韩国制造的。目前现有工厂尚未利用的产能约占2021年总产能的20%, 但这甚至不足以满足承诺目标情景 (APS) 预测的两年内销售增长量 (图3.5)。压缩机、换热器和制冷剂等基本材料和专用零部件的供应, 也需要迅速扩大。

图3.5 ▷ 承诺目标情景（APS）情景目前和预计的热泵销售情况以及目前未利用的制造能力



IEA, CC BY 4.0.

未利用的热泵产能，虽然相当于总产能的20%左右，但甚至不足以满足APS情景两年的销售增长量

资料来源：IEA根据《全球研究展望》提供的数据对2021年的分析。

供应链的限制已经影响到热泵和关键部件的制造，尤其是过去两年的半导体和芯片组。全球短缺已经增加了供暖、通风和空调(HVAC)行业的成本，并降低了生产速度。铜、钢、铝、用于焊接的银和某些塑料的价格上涨也增加了成本（First Citizens Bank，2022）。随着清洁能源转型的推进，其中一些材料，尤其是铜，将继续保持高需求。用于住宅应用的空气源热泵含有约 15-20kg 的铜，主要用于管道和阀门中，约占设备总成本的 10%（International Copper Alliance，2022；GOV.UK，2016）。该行业正在探索使用铝替代铜作为关键部件以降低成本（Bloomberg News，2021 年）。住宅以水为热媒的热泵的铝含量通常是冷凝燃气锅炉的两倍多，铜和黄铜含量通常是冷凝燃气锅炉的 15 倍。²

从中期和长期来看，通过报废管理法规，增加废弃热泵、空调和化石燃料锅炉材料的回收和循环利用，可能成为铜、铝和铁供应的次要来源，同时减少与它们的开采相关的影响。在欧盟，热泵和空调目前受《废弃电气和电子设备指令》（Waste Electrical and Electronic Equipment Directive）下的报废管理法规约束，该指令为废弃设备的收集、处理和回收制定了标准（European Union，2012）。

各国政府在刺激国内热泵制造投资、解决供应链瓶颈、培育创新等方面发挥着越来越大的作用。一些国家最近出台了政策，旨在将关键清洁能源技术的制造转移到本土。其中包括一些明确针对热泵的政策，如美国的《国防生产法案》。其他政策则针对半导体和关键矿物制造业，如欧盟的《欧洲芯片法》和《关键原矿物法》。一些国家在部署目标、

²基于产品环境概况（2022）与Assoclima协会的单独通信，2022年11月。

禁止使用化石燃料锅炉和消费者激励措施的基础上，还提供了热泵研发支持等制造业激励措施，这些措施都增强了制造商扩大产能时的市场确定性。英国政府正在计划实施另一项措施，即对锅炉制造商供暖系统销售中的热泵销售设定逐年提高的配额（GOV.UK，2022）。减少监管的不确定性是制造商扩大生产规模的关键。在欧盟，正在讨论的基于委员会提案的 F-gas 法规修订版预计将于 2024 年生效，为热泵和其他技术制造商关于 F-gas 使用限制提供明确指引（详见第 2 章）。

头部制造商最近宣布计划投资超过40亿欧元用于扩大热泵生产能力和相关工作。大多数声明涉及在欧洲的项目，尽管其他地区的生产能力也将增加，但新项目通常较少公开宣传（表3.4）。

表3.4 ▶ 欧洲部分制造商近期宣布的热泵生产投资情况

公司	地区/国家	投资分配	投资（欧元）	竣工日期
威能Vaillant	欧盟	热泵和能源效率	1.3亿	2022-2023
Hoval	列支敦士登、斯洛伐克	热泵	0.6亿	2023-2024
Clivet(美的集团)	意大利	热泵	0.6亿	2024
三菱 Mitsubishi	土耳其、英国	热泵和空调	1.28亿	2024
博世 Bosch	欧洲	热泵	3亿	2025
大金欧洲 Daikin	比利时、捷克、德国、波兰	热泵、数字化、研发和服务能力	12亿	2025
Stiebel Eltron	德国	热泵	6亿	2025
NIBE	瑞典	热泵	4.6亿	2025
菲斯曼 Viessmann	波兰	热泵和其他绿色解决方案	10亿	2025
松下 Panasonic	捷克共和国	热泵	1.45亿	2026

注：三菱（1.13亿美元+ 1500万英镑）和尼伯（50亿瑞典克朗）兑换成欧元。

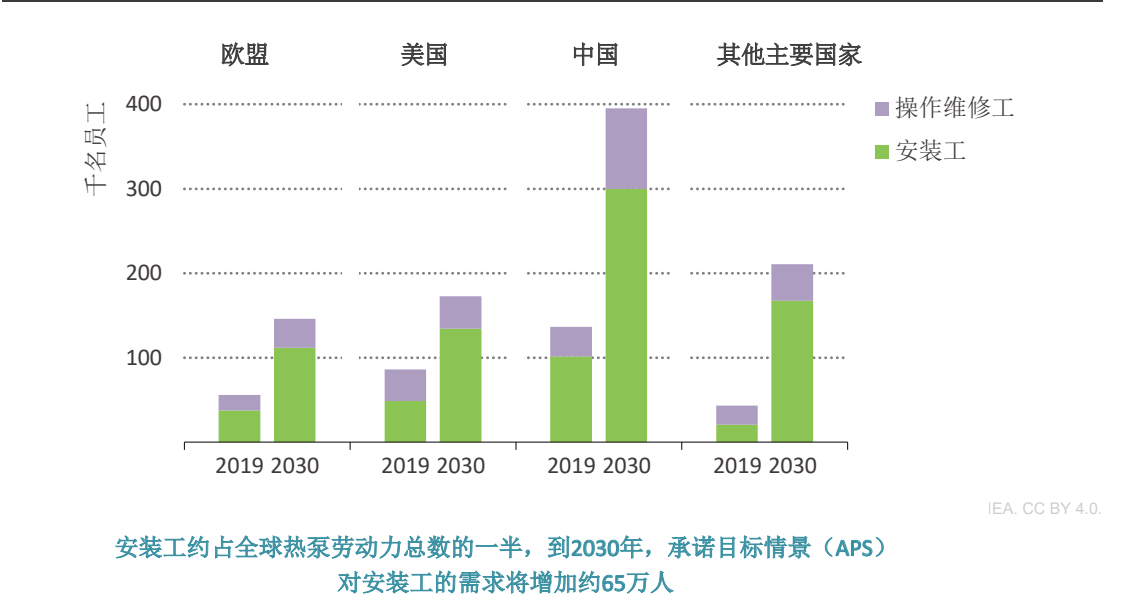
资料来源：威能集团（2022）；商业解决方案（2021年）；皓欧（2022）；泉林（2022）；三菱（2022）；沃克（2021）；博世（2022）；大金（2022）；克林高夫（2022）；尼贝（2022）；菲斯曼集团（2022）；松下（2022）

3.5 熟练安装人员短缺

在APS情景中，全球热泵的快速推广需要体现在供应链的每个环节，特别是安装环节需要大幅增加劳动力（参见第2章）。如今，全球约一半的热泵工人从事安装工作，另外四分之一从事热泵的维护和服务工作。到2030年，预计安装工的需求将在承诺目标情景（APS）中翻四倍，超过85万人（图3.6）。所有新的安装工都需要接受充分的培训并通过项目认证。

在一些国家，熟练安装人员的短缺已经开始成为热泵推广的瓶颈。安装热泵所需的技能与建筑行业的许多标准职业类似，但仍需要额外的专业知识。这些技能包括评估性能，为设计安装计算热损失，以及更新现有供暖系统和电线的部分（表3.5）。其中一些技能可以通过在职培训来获得，而其他技能，特别是热泵安装、钻孔、电气工作和制冷剂处理，则需要经过培训和认证的专业人员。安装和电气技能通常包括在相同的资格计划中，尽管在一些国家需要不同的专业人员，例如加拿大。地源热泵需要额外的资格，包括勘探和钻井，管道的传热和地质分析。在石油和天然气领域，技术熟练的钻井工程师很适合从事这样的工作。

图3.6 ▶ 承诺目标情景（APS）中按地区/国家划分的热泵就业情况



注:O&M=操作和维护。其他重点国家=澳大利亚、新西兰、加拿大、日本、韩国、欧亚大陆和欧洲其他地区。

表3.5 ▶ 按热泵安装的阶段划分的所需典型技能和职业示意图

技能	职业	热泵类型
选型及热泵系统设计		
对现有供暖基础设施和结构保温进行现场评估	一般建筑工人，热泵安装工	所有
热损失和热负荷计算	热泵安装工	所有
设计、材料选择和系统布局	热泵安装工	所有
压降计算，热导率评估	热泵安装工	所有
安装		
挖沟和钻孔	注册钻井专业工人	地源热泵
管道连接和管道	管道工，管道安装工，热泵安装工	所有
处理制冷剂	具有F-气体认证的热泵安装工 具有处理易燃材料资格的热泵安装工	具有现场F-气体制冷剂处理的系统 具有现场碳氢制冷剂处理的系统
电气工程		
电线	电工，热泵安装工	所有
系统配置		
最终系统设置，制冷剂气体稳定	热泵安装工	所有

安装人员的标准对于行业的发展仍然至关重要。不合格的安装人员可能导致系统性能不佳或维护问题，包括泄漏和电气问题，可能违反制造商提供的保修或家庭保险的条款和条件，以及给热泵行业带来声誉风险。此外，许多安装人员继续使用过时的热泵性能概念进行操作，并且在消费者咨询更换锅炉时劝阻他们不要采用热泵。由监管机构或行业机构设计的认证方案在所有主要市场上都可以获得。它们的范围和持续时间各不相同，在国际上也不协调。在中国，为工业和商业制冷和空调设备（包括热泵）提供服务的公司都有自愿的资格认证。在欧洲，安装人员需要获得相关认证或证明有一定年限的相关经验。

虽然安全正确地安装热泵需要培训，但繁琐的认证计划可能会阻碍工人获得这些资格。额外的培训要求、成本或当地对热泵的需求不足可能会阻碍工人申请培训和认证，传统供暖系统企业的所有者也不会将业务多元化到热泵领域。为了减轻这些障碍，可以将热泵认证建立在现有资格认证计划的基础上，并纳入电工、水管工和其他供暖和制冷技术人员的现有课程和火灾风险安全培训中。越来越多的制造商也在提供自己的安装培训计划，这些培训计划更有针对性，持续时间也更短，使公司能够更快

地建立一支经过认证的安装人员队伍。在制造商和司法管辖区之间设立标准化证书和培训，可以帮助扩大安装人员队伍，增加国家和地区之间的劳动力流动性。石油和天然气锅炉禁令和其他政策增加了热泵行业前景的长期确定性，也可以鼓励工人进入该行业。

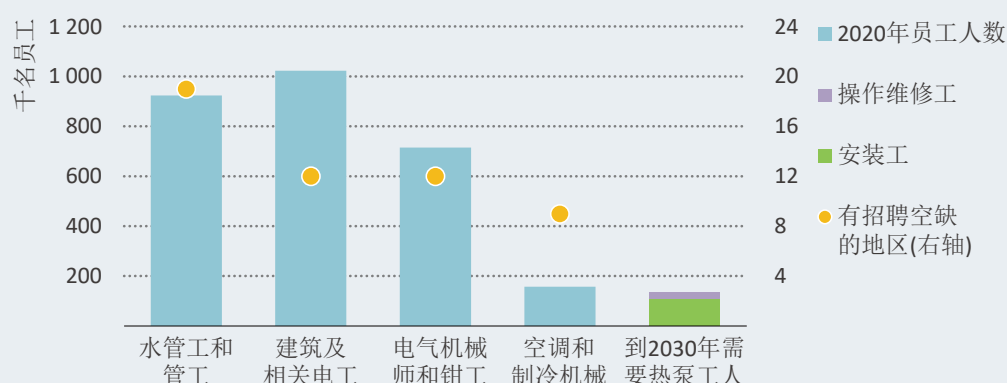
政府可以在促进热泵安装人员的培训和招聘方面发挥重要作用。他们需要与行业合作，更新认证，为工人提供追求职业教育的激励措施，并支持学徒制。英国就是这样通过向安装人员提供激励措施，此外包括荷兰、英国和欧盟成员国在内的几个国家已经推出了专注于培训热泵安装人员的政府计划，特别是自REPowerEU启动以来（方框3.2）。

制造商还可以通过设计更坚固、标准化和更易于安装的热泵，以及为安装公司配备正确的数字工具和应用程序来帮助他们正确安装机组，从而缓解安装人员短缺的问题。有关建筑特征的开放数据有利于商业模式创新，这些模式使用数字工具来评价热泵安装的难易程度，并将客户与安装人员联系起来。

专栏3.2 ► 满足欧盟对热泵安装人员日益增长的需求

承诺目标情景（APS）中反映的REPowerEU热泵目标要求将经过培训的热泵安装人员数量从2019年的4万左右增加到2030年的11万。在所有欧盟国家，除了像单体系统这样的独立系统外，大多数热泵系统是对需要处理制冷剂的热泵安装人员的安装认证都是强制性的。随着基加利修正案对F-gas制冷剂使用的限制越来越多，所需的认证可能从处理F-gas过渡到处理易燃材料。然而，尽管《可再生能源指令》要求相互支持的认证，但对于大多数设备而言，各国对安装人员的培训和认证要求各不相同。鉴于各国热泵市场成熟度的巨大差异，各国之间在热泵安装人员培训和优秀的实践知识分享方面的合作有助于确保高效和高质量的安装，并实现REPowerEU目标。

图3.7 ▷ 2020年和2030年欧盟劳动力短缺的热泵安装相关职业的员工数量



IEA. CC BY 4.0.

许多欧盟国家面临着热泵安装关键职业的劳动力短缺。到2030年，安装热泵所需的熟练工人数量将超过需求。

注：职业定义见《国际标准职业分类》。“有招聘空缺的地区”包括欧盟27国，比利时分为三个自治区，以及瑞士和挪威。

来源：IEA基于ELA（2021年）的分析。

额外的培训要求将给原本已经紧张的欧洲劳动力市场带来更大的压力。与热泵安装相关的一系列职业都存在工人短缺，如水管工和管道安装工、空调和制冷机械工、电气机械工和安装工以及电工（图 3.7）。在最近的一项调查，大多数国家报告了水管工和管道安装工的招聘缺口，该职业在所有经济部门中排名第二（ELA, 2021年）。然而，热泵安装工和热泵维修工的数量仍然远远小于当前相关职业的就业人数。将重点放在将热泵特定培训纳入现有的认证计划，并提供激励措施，来吸引已经在相关职业的工人进行热泵认证计划。

快速的技能提升和培训对于满足安装人员日益增长的需求至关重要。一些措施可以缓解劳动力短缺恶化带来的风险，包括修订现有的水管工、电工和暖通空调技工认证课程；将培训时长和重新认证减少到所需的最低限度；补贴培训费用；引入一个在欧盟范围内的全面认证计划，这将提高培训要求的可见性，并改善劳动力流动性。

附录资料



探索背后的数据

《2022年世界能源展望》



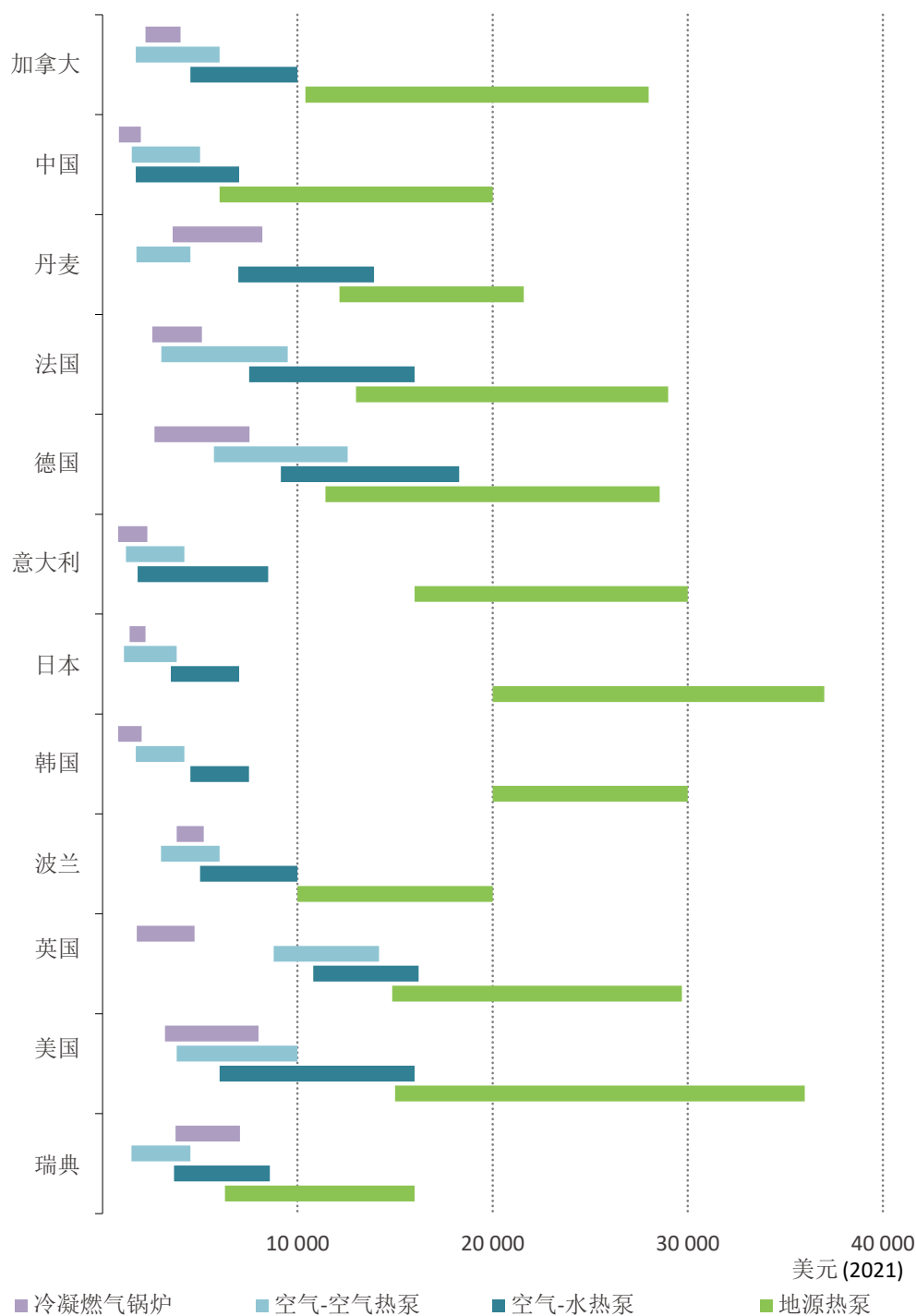
本报告使用的数据来自全球能源和气候模型。
更多数据可以在下方链接最新版本的世界能源展望报告中找到：

iea.li/weo22

技术成本和财政支持计划

技术成本

图A.1 ▷ 2022年选定国家按技术划分的前期成本范围



IEA. CC BY 4.0.

财政支持计划

表A.1 ► 选定国家2022年9月住宅热泵财政支持计划

	补助	税收折扣	贷款
澳大利亚			
小规模技术证书	●		
无息贷款计划			●
奥地利			
淘汰石油和天然气计划	●		
个人清洁供暖计划	●		
比利时			
布鲁塞尔：RENOLUTION奖金	●		
瓦隆区：住房奖金	●		
瓦隆区：Renopack			●
佛兰德：翻新奖金	●		
佛兰德：翻新贷款			●
全国：热泵降低增值税率		●	
保加利亚			
能效和可再生资源基金			●
税收管理机制		●	
加拿大			
绿色住宅计划：补贴	●		
绿色住宅计划：贷款			●
中国			
北方各省：冬季清洁取暖计划	●		
克罗地亚			
家庭房屋能源改造计划	●		
捷克共和国			
新绿色节能计划：换热系统	●		
新绿色节能计划：新热水器	●		
锅炉补贴	●		
私人银行贷款			●
丹麦			
建筑基金池	●		
低利率贷款			●

表A.1 ► 选定国家2022年9月住宅热泵金融支持计划（续）

	补助	税收折扣	贷款
芬兰			
替代石油和天然气供暖计划	●		
所得税抵扣：基本改造工程		●	
法国			
Ma Prime Renov'	●		
节能证书（CEE）	●		
ecoPTZ：零利率生态贷款			●
热泵减税		●	
德国			
高效建筑联邦资金（BEG）：BEG EM（个人措施）	●		
高效建筑联邦资金（BEG）：BEG WG（住宅建筑）			●
所得税法：第35c条（住宅建筑）		●	
希腊			
Save计划：εξοικονομώ	●		
Save计划贷款：εξοικονομώ			●
税务调节机制I：法律No. 2238/1994		●	
匈牙利			
家庭翻新补贴	●		
住宅绿色资本需求优惠计划			●
意大利			
Conto Termico 2.0（激励计划）	●		
超级奖金110%		●	
Ecobonus 65%		●	
热泵减税		●	
爱尔兰			
SEAI家庭能源补贴：热泵个人升级补贴	●		
SEAI家庭能源补贴：全额资助能源升级	●		
An Post家庭能源改进贷款			●
日本			
热泵补贴计划	●		
韩国			
KEPCO（韩国电力公司）：支持安装热泵	●		
私人银行贷款			●

表A.1 ► 选定国家2022年9月住宅热泵金融支持计划（续）

	补助	税收折扣	贷款
拉脱维亚			
教育与科学部：支持家庭使用可再生能源资源	●		
经济部：私人住宅翻新和能源效率	●		
国家支持的私人银行贷款			●
立陶宛			
环境部：使用可再生能源资源	●		
私人银行贷款			●
卢森堡			
PRIME House 2017	●		
热泵减税		●	
KlimaPrêt：零利率			●
KlimaPrêt：优惠利率			●
私人银行：能源改造贷款			●
荷兰			
ISDE：可持续能源和节能投资补助	●		
国家供暖基金：低利率贷款			●
新西兰			
能源效率与节约权威机构：温暖新西兰家庭计划	●		
健康住房标准		●	
私人银行：绿色贷款			●
挪威			
Enova补助金	●		
波兰			
清洁空气计划：清洁空气	●		
清洁空气计划：停止雾霾	●		
清洁空气计划：热力现代化减税		●	
Moje Ciepło（我的温暖）	●		
私人银行贷款			●
葡萄牙			
可再生能源贷款			●
罗马尼亚			
能源效率之家计划	●		

表A.1 ► 选定国家2022年9月住宅热泵金融支持计划（续）

	补助	税收折扣	贷款
斯洛伐克			
“为家庭提供绿色能源II计划”	●		
斯洛伐克复苏与韧性计划	●		
斯洛文尼亚			
“生态基金”：补贴	●		
“生态基金”：无息贷款			●
西班牙			
“人口挑战地区市政建筑物能源改造计划（PREE 5000）”	●		
2021年《法令477/2021》计划6：推广住宅区可再生热能系统	●		
2021年《法令853/2021》：改造住宅楼和社会住房	●		
瑞典			
“装修抵税”：减税		●	
英国			
“锅炉升级计划”	●		
“家居能源苏格兰”：无息贷款			●
苏格兰免费热泵补贴	●		
热泵减税率		●	
美国			
住宅可再生能源税收抵免：地热热泵		●	
通货膨胀减少法案：热泵税收抵免		●	
减少通货膨胀法案：高效家用电器返利计划	●		

定义

本附件提供了本报告中使用的术语的一般信息，包括：单位和一般换算系数；燃料、工艺和部门的定义；区域和国家集团；以及缩写和缩略词。

单位

Energy	EJ	百亿亿焦耳 (1 焦耳 $\times 10^{18}$)
	MWh	兆瓦时
	GWh	吉瓦时
	TWh	太瓦时
Gas	bcm	十亿立方米
Mass	kg	千克
	t	吨 (1 吨 = 1 000 千克)
	kt	千吨 (1 吨 $\times 10^3$)
	Mt	兆吨 (1 tonne $\times 10^6$)
	Gt	吉吨 (1 tonne $\times 10^9$)
Monetary	USD million	1 美元 $\times 10^6$
	USD billion	1 美元 $\times 10^9$
	USD/t CO ₂	美元/吨CO ₂
Power	W	瓦特 (1 J/S)
	kW	千瓦 (1 瓦特 $\times 10^3$)
	MW	兆瓦 (1 watt $\times 10^6$)
	GW	吉瓦 (1 watt $\times 10^9$)

能源的一般转换系数

		Multiplier to convert to:		
		EJ	bcme	GWh
转换自:	EJ	1	27.78	2.778×10^5
	bcme	0.036	1	9 999
	GWh	3.6×10^{-6}	1×10^{-4}	1

注：天然气的低热值为1 MJ每44.1 kg。十亿立方米天然气当量 (bcme) 的换算作为代表性乘数，但由于使用了特定国家的能源密度，可能与IEA平衡之间转换天然气量所获得的平均值不同。本报告始终使用较低的热值。

定义

建筑：建筑行业包括住宅、商业和公共机构建筑以及非特定的其他建筑所使用的能源。建筑能源使用包括空调供暖、热水供应、照明、电器和烹饪设备。

二氧化碳 (CO₂)：一种由一份碳和两份氧组成的气体。它是一种重要的温室气体（能够吸收热量）。

清洁能源：在电力方面，清洁能源包括：从可再生能源、配备碳捕集、利用和储存（CCUS）的核能和化石燃料；电池储能；电力网络。在效率方面，清洁能源包括建筑、工业和运输的能源效率，不包括航空燃料和国内航行。在终端应用中，清洁能源包括：可再生能源的直接使用；电动汽车；建筑、工业和国际海运的电气化；工业中的CCUS和直接空气捕集。在燃料供应中，清洁能源包括低排放燃料。

煤：包括原始煤炭，如褐煤、焦煤和蒸汽煤，以及派生燃料，如块状燃料、褐煤煤球、焦炉焦、煤气焦、煤气厂煤气、焦炉煤气、高炉煤气和氧化钢炉煤气。泥炭也被包括在内。

性能系数（COP）：COP是用于衡量有用能量（即供热或供冷输出）与能源输入的比率。COP越高，设备效率越高。

需求侧灵活性资源：描述可以影响负荷曲线的资源，例如在不影响总电力需求的情况下将负载曲线时间平移，或进行负荷削减，例如短暂中断需求或在一定时间内调整需求强度。

电力需求：定义为总发电净量减去自用发电，加上净贸易（进口减出口），再减去输电和配电损失。

发电量：定义为发电厂仅使用电力或联合发电（热电联产）发电的总量，包括自用发电所需的发电量。这也被称为毛发电量。

能源部门温室气体（GHG）排放：与能源有关和工业过程的二氧化碳排放加上能源和工业部门逃逸和排出的甲烷和二氧化氮排放。

能源服务：见可用能源。

F-气体：氟化气体，有多种应用，包括制冷、空调和热泵，它是制冷剂循环的重要组

成部分。

化石燃料：包括煤炭、天然气和石油。

地热能：地热能是来自地球表面以下的热能。水和/或蒸汽将地热能带到地表。根据其特性，地热能可以被用来发电或供热。

全球升温潜能值（GWP）：该度量标准用于比较不同温室气体对气候变化的影响，并用于二氧化碳当量计算。二氧化碳的GWP设为1，因此所有其他气体都是相对于二氧化碳的比值。为了考虑到气体在大气中存在时间的差异，最常用的度量标准是100年GWP；有时也会使用20年GWP。GWP₁₀₀为27的气体表示在100年时间范围内对全球变暖的影响比二氧化碳强27倍。

热量（终端用途）：可以通过化石或可再生燃料的燃烧、直接地热或太阳能热系统、放热化学过程以及通过电力（通过阻性加热或热泵从周围空气和液体中提取热量）来获得。该类别涉及广泛的终端用途，包括建筑物中的空间和水加热以及烹饪，以及工业中的海水淡化和加工应用。不包括冷却应用。

热量（供应）：通过燃料燃烧、核反应堆、地热资源或捕获太阳能获得。它可以用于供暖或冷却，或转化为机械能用于运输或发电。出售的商业热能随着发电燃料输入分配反映在总终端热能上。

热泵：热泵从低位热源中提取热量，例如周围空气、储存在地下的地热能源，或者工厂附近的水或废热，然后将热量提升温度和转移至需要的地方。

以水为热媒的热泵：在热泵供暖系统中使用水作为热媒，通过管道将热泵中的热量通过散热器或地板辐射送到每个房间。

投资：投资是指能源供应、基础设施、终端使用和效率方面的资本支出。燃料供应投资包括石油、天然气、煤炭和低排放燃料的生产、转化和运输。电力部门投资包括新建和翻新发电设施、电力网络（输电、配电和公共电动汽车充电设施）和电池储能。能源效率投资包括建筑、工业和交通方面的效率改进。其他终端使用投资包括购买用于直接使用可再生能源的设备、电动汽车、建筑、工业和国际海运方面的电气化、使用低排放燃料的设备，以及工业和直接空气捕集中的CCUS。数据和预测反映了项目寿命周期内的支出，并以2021年实际美元为基础，除非另有说明。报告的总投资金额反映了该年度的支出金额。

供暖和制冷的平准化成本：供热与供冷的平准化成本估算了设备寿命周期内提供1 MWh供热或供冷的平均成本，考虑设备和安装的基建成本；运营支出包括燃料成本和定期维护费用。

低排放电力：包括可再生能源技术、基于低排放的氢基发电、基于低排放的氢基燃料发电、核能以及装备有CCUS的化石燃料电站。

低排放燃料：包括现代生物能源、低排放氢和低排放氢基燃料。

天然气：包括矿床中的气体，无论是液化的还是气态的，主要由甲烷组成。它既包括来自仅以气态形式生产碳氢化合物的油田的非伴生气，也包括与原油生产有关的伴生气以及从煤矿回收的甲烷（煤矿气）。液化天然气、人造气体（来自城市或工业废物或污水）和排放或燃烧的数量不包括在内。气体数据以立方米表示，以总热值为基础，在15°C和760毫米汞柱的标准条件下测量。主要为了与其他燃料作比较，以吨油当量表示的天然气数据是按低位发热量计算的。低位发热量和高位发热量之间的差值是燃料燃烧过程中产生的水蒸气汽化潜热（对于气体，低位发热量比高位发热量低10%）。

石油：包括传统和非传统石油生产。石油产品包括炼厂气、乙烷、液化石油气、航空汽油、汽车汽油、喷气燃料、煤油、轻/重柴油、溶剂油、白色矿物油、润滑剂、沥青、石蜡、蜡和石油焦。

发电：指用于发电厂、热力发电厂和联合发电厂的燃料。包括主要活动生产厂和自用的小型厂（自主生产者）。

制冷剂：通过制冷设备（如热泵、空调、冰箱）的制冷循环传递热量的物质。
可再生能源：包括生物能源、地热、水电、太阳能光伏（PV）、聚光太阳能以及用于发电和供热的风能和海洋（潮汐能和波浪能）。

住宅：家庭使用的能源，包括供暖和制冷、热水加热、照明、电器、电子设备和烹饪。

服务：商业设施（如办公室、商店、酒店、餐馆）和机构建筑（如学校、医院、公共办公室）中使用的能源。服务业的能源使用包括建筑供暖和制冷、热水加热、照明、电器、烹饪和海水淡化。

太阳能光伏（PV）：由太阳能光伏电池产生的电力。

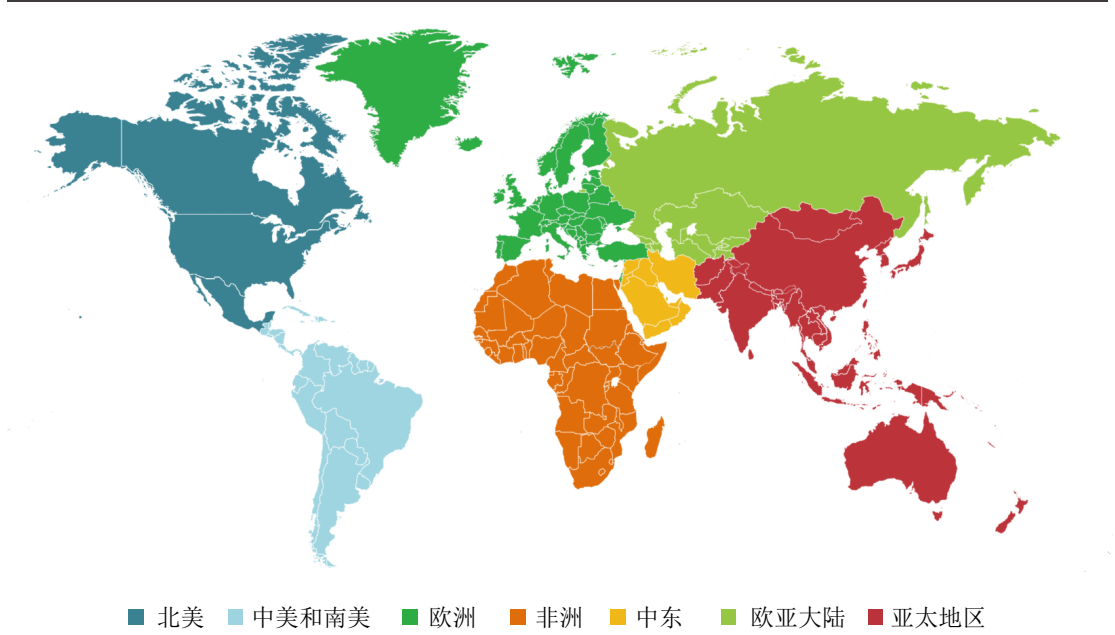
总终端耗能（TFC）：是各终端使用的耗能总和。TFC按以下部门的能源需求进行分解：工业（包括制造业、矿业、化学生产、高炉和焦炉）、交通运输、建筑（包括住宅和服务）和其他（包括农业和其他非能源用途）。但TFC不包括国际海运和航空燃料，除非这些燃料被包含在交通运输部分中。

有用能源：指终端用户可用于满足其需求的能源。这也被称为能源服务需求。由于使用的转化损失，大多数技术的可用能源量低于相应的最终能源需求。使用电力的设备通常比使用其他燃料的设备具有更高的转换效率，这意味着对于消耗的单位能源，电力可以提供更多的能源服务。

零碳建筑：零碳建筑具有高能效，零碳建筑能直接使用可再生能源或可以使用完全脱碳的相关能源供应，如电力或区域供暖。

区域和国家

图 B.1 ▷ 主要区域



注：本地图不影响任何领土的地位或主权，不影响国际边界和边界的划定，也不影响任何领土、城市或地区的名称

发达经济体：经合组织区域和保加利亚、克罗地亚、塞浦路斯^{1,2}、马耳他和罗马尼亚。

非洲：北非和撒哈拉以南非洲区域。

亚太地区：东南亚区域和澳大利亚、孟加拉国、朝鲜民主主义人民共和国、印度、日本、韩国、蒙古、尼泊尔、新西兰、巴基斯坦、中国、斯里兰卡、中国台湾和其他亚太国家和地区。³

里海：亚美尼亚、阿塞拜疆、格鲁吉亚、哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、土库曼斯坦和乌兹别克斯坦。

中美洲和南美洲：阿根廷、多民族玻利维亚国、巴西、智利、哥伦比亚、哥斯达黎加、古巴、库拉索、多米尼加共和国、厄瓜多尔、萨尔瓦多、危地马拉、海地、洪都拉斯、牙买加、尼加拉瓜、巴拿马、巴拉圭、秘鲁、苏里南、特立尼达和多巴哥、乌拉圭、委内瑞拉玻利瓦尔共和国以及其他中美洲和南美国家和地区。⁴

发展中亚洲：亚太地区，不包括澳大利亚、日本、韩国和新西兰。

新兴市场经济体和发展中经济体：未列入发达经济体区域的所有其他国家。

欧亚大陆：里海地区和俄罗斯联邦（俄罗斯）。

欧洲：欧盟区域和阿尔巴尼亚、白俄罗斯、波斯尼亚和黑塞哥维那、北马其顿、直布罗陀、冰岛、以色列⁵、科索沃、黑山、挪威、塞尔维亚、瑞士、摩尔多瓦共和国、土耳其、乌克兰和英国。

欧盟：奥地利、比利时、保加利亚、克罗地亚、塞浦路斯^{1,2}、捷克共和国、丹麦、爱沙尼亚、芬兰、法国、德国、希腊、匈牙利、爱尔兰、意大利、拉脱维亚、立陶宛、卢森堡、马耳他、荷兰、波兰、葡萄牙、罗马尼亚、斯洛伐克共和国、斯洛文尼亚、西班牙和瑞典。

IEA（国际能源署）：经合组织区域，不包括智利、哥伦比亚、哥斯达黎加、冰岛、以色列、拉脱维亚和斯洛文尼亚。

拉丁美洲：中美洲和南美洲区域集团以及墨西哥。

中东：巴林、伊朗伊斯兰共和国、伊拉克、约旦、科威特、黎巴嫩、阿曼、卡塔尔、沙特阿拉伯、阿拉伯叙利亚共和国、阿拉伯联合酋长国和也门。

非经合组织国家：未列入经合组织区域的所有其他国家。

非石油输出国组织国家：未列入石油输出国组织区域的所有其他国家。

北非：阿尔及利亚、埃及、利比亚、摩洛哥和突尼斯。

北美：加拿大、墨西哥和美国。

OECD（经合组织）：澳大利亚、奥地利、比利时、加拿大、智利、捷克共和国、哥伦比亚、哥斯达黎加、丹麦、爱沙尼亚、芬兰、法国、德国、希腊、匈牙利、冰岛、爱尔兰、以色列、意大利、日本、韩国、拉脱维亚、立陶宛、卢森堡、墨西哥、荷兰、新西兰、挪威、波兰、葡萄牙、斯洛伐克共和国、斯洛文尼亚、西班牙、瑞典、瑞士、土耳其、英国和美国。

OPEC（石油输出国组织）：阿尔及利亚、安哥拉、刚果共和国、赤道几内亚、加蓬、伊朗伊斯兰共和国、伊拉克、科威特、利比亚、尼日利亚、沙特阿拉伯、阿拉伯联合酋长国和委内瑞拉玻利瓦尔共和国。

东南亚：文莱达鲁萨兰国、柬埔寨、印度尼西亚、老挝人民民主共和国、马来西亚、缅甸、菲律宾、新加坡、泰国和越南。这些国家都是东南亚国家联盟（东盟）的成员。

撒哈拉以南非洲：安哥拉、贝宁、博茨瓦纳、喀麦隆、刚果共和国、科特迪瓦、刚果民主共和国、厄立特里亚、埃塞俄比亚、加蓬、加纳、肯尼亚、毛里求斯、莫桑比克、纳米比亚、尼日尔、尼日利亚、塞内加尔、南非、南苏丹、苏丹、坦桑尼亚联合共和国、多哥、赞比亚、津巴布韦和其他非洲国家和地区。⁶

国家说明

¹土耳其共和国说明：本文件中关于“塞浦路斯”的信息涉及该岛南部。岛上没有代表土族和希族塞人的单一权力机构。土耳其承认北塞浦路斯土耳其共和国（TRNC）。在联合国范围内找到持久和公平的解决方案之前，土耳其应保持其在“塞浦路斯问题”上的立场。

²经合组织和欧洲联盟所有欧洲联盟成员国的说明：塞浦路斯共和国得到联合国所有成员国的承认，土耳其除外。本文件中的资料涉及塞浦路斯共和国政府有效控制下的地区。

³个别数据不可用，估计总共有：阿富汗、不丹、库克群岛、斐济、法属波利尼西亚、基里巴斯、澳门（中国）、马尔代夫、新喀里多尼亚、帕劳、巴布亚新几内亚、萨摩亚、所罗门群岛、东帝汶、汤加和瓦努阿图。

⁴个别数据不可用，估计总共有：安圭拉、安提瓜和巴布达、阿鲁巴、巴哈马、巴巴多斯、伯利兹、百慕大、博内尔、英属维尔京群岛、开曼群岛、多米尼加、福克兰群岛（马尔维纳斯）、法属圭亚那、格林纳达、瓜德罗普、圭亚那、马提尼克、蒙特塞拉特、萨巴、圣尤斯提乌斯、圣基茨和尼维斯、圣卢西亚、圣皮埃尔和密克隆、圣文森特和格林纳丁斯、圣马丁，特克斯和凯科斯群岛。

⁵以色列的统计数据由以色列有关当局提供，并由其负责。经合组织和（或）国际能源署使用这些数据并不损害戈兰高地、东耶路撒冷和以色列在约旦河西岸定居点根据国际法的地位。

⁶个别数据不可用，估计总共有：布基纳法索、布隆迪、佛得角、中非共和国、乍得、科摩罗、吉布提、斯威士兰王国、冈比亚、几内亚、几内亚比绍、莱索托、利比里亚、马达加斯加、马拉维、马里、毛里塔尼亚、留尼旺、卢旺达、圣多美和普林西比、塞舌尔、塞拉利昂、索马里和乌干达。

缩略词

APS	承诺目标情景
CCUS	碳捕捉、利用和储存
CDD	空调度日数
CO ₂	二氧化碳
CO ₂ -eq	当量二氧化碳
COP	性能系数
EBRD	欧洲复兴开发银行
EPC	合同能源管理
ESCO	能源服务公司
EU	欧盟
EV	电动汽车
F-gas	氟化气体
G7	七国集团
GHG	温室气体
GWP	全球升温潜能
GX	绿色转型
HDD	供暖度日数
HC	碳氢化合物
HFC	氢氟烃
HFO	氢氟烯烃
HPT TCP	热泵技术 技术合作计划
HVAC	暖通空调

IEA	国际能源署
IEC	国际电工委员会
IPCC	政府间气候变化专门委员会
MVR	机械式蒸汽再压缩
NOX	氮氧化物
NZE	2050年净零排放情景
O&M	操作和维护
OECD	经济合作与发展组织
PFAS	全氟烷基和多氟烷基物质
PM _{2.5}	细颗粒物
PV	光伏
RD&D	研究、开发和示范
SO ₂	二氧化硫
STEPS	既定政策情景
TFA	三氟乙酸
TRL	技术成熟度
TSO	传输系统操作员
UNEP	联合国环境规划署
US	美国
WEO	世界能源展望

参考文献

第一章：热泵应用展望

Aalborg University (2013), Heat Roadmap Europe 2050: Second pre-study for the EU27, https://vbn.aau.dk/ws/portalfiles/portal/77342092/Heat_Roadmap_Europe_Pre_Study_II_May_2013.pdf

AHRI (Air-Conditioning, Heating, and Refrigeration Institute) (2022), Monthly Shipments, <https://www.ahrinet.org/analytics/statistics/monthly-shipments>

BASF (2022), BASF, SABIC and Linde start construction of the world's first demonstration plant for large-scale electrically heated steam cracker furnaces, <https://www.basf.com/global/en/media/news-releases/2022/09/p-22-326.html>

BMWK (Bundesminister für Wirtschaft und Klimaschutz) [Federal Ministry for Economic Affairs and Climate Action, Germany] (2022), Boost for green district heating: Federal funding for efficient heat networks (BEW) begins, <https://www.bmwk.de/Redaktion/EN/Pressemitteilungen/2022/09/20220915-boost-for-green-district-heating-federal-funding-for-efficient-heat-networks-bew-begins.html>

Chinabaogao (2022), Statistics on domestic sales, domestic sales and enterprise distribution of air source heat pump industry in my country, <https://www.chinabaogao.com/data/202208/606704.html>, [in Chinese].

Clean Energy Wire (2022), Stiebel Eltron to invest 600 million euros to expand heat pump production capacity, <https://www.cleanenergywire.org/news/stiebel-eltron-invest-600-million-euros-expand-heat-pump-production-capacity>

EHPA (European Heat Pump Association) (2021), <https://www.ehpa.org/market-data>

Energistyrelsen [Danish Energy Agency] (2022), Klimastatus og –fremskrivning 2022 (KF22): El og fjernvarme (ekskl. affaldsforbrænding) [Climate status and projection 2022 (KF22): Electricity and district heating (excluding waste incineration)], https://ens.dk/sites/ens.dk/files/Basisfremskrivning/kf22_sektornotat_8a_produktion_af_el_og_fjernvarme.pdf, [in Danish].

European Commission (2022a), Heat Pumps in the European Union, https://setis.ec.europa.eu/heat-pumps-european-union_en

European Commission (2022b), REPowerEU: Joint European action for more affordable, secure and sustainable energy, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=COM:2022:108:FIN>

European Commission (2020), ReUseHeat: Accessible urban waste heat (Revised version) WP1 Task 1.2 Deliverable 1.4.,
<https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5cfc2bcd3&appId=PPGMS>

European Commission (2016), Mapping and analyses of the current and future (2020 2030) heating/cooling fuel deployment (fossil/renewables),
https://energy.ec.europa.eu/mapping-and-analyses-current-and-future-2020-2030-heatingcooling-fuel-deployment-fossilrenewables-1_en

France, Ministry of Ecological Transition (2022), Pompes à chaleur [Heat pumps],
<https://www.ecologie.gouv.fr/pompes-chaleur>, [in French].

GOV.UK (2020), The ten point plan for a green industrial revolution – Point 7: Greener buildings,
<https://www.gov.uk/government/publications/the-ten-point-plan-for-a-green-industrial-revolution/title#point-7-greener-buildings>

Government of Italy [Ministry of Infrastructure and Transport; Ministry of Economic Development; Ministry of the Environment and Land and Sea Protection] (2019), Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima [Integrated National Plan for Energy and Climate], https://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/PNIEC_finale_17012020.pdf, [in Italian].

Government of Spain (2019), Draft of the Integrated National Energy and Climate Plan 2021-2030,
https://energy.ec.europa.eu/system/files/2019-06/ec_courtesy_translation_es_necp_0.pdf

HEATLEAP (2022), HEATLEAP Project, <https://heatleap-project.eu/heatleap-project/>

Helen Ltd (2020), Katri Vala Heating and Cooling Plant,
<https://www.helen.fi/en/company/energy/energy-production/power-plants/katri-vala-heating-and-cooling-plant>

HPT TCP (Technology Collaboration Programme on Heat Pumping Technologies) (2018), Heat pumps in combination with district heating increases energy efficiency at Hammarbyverket, <https://heatpumpingtechnologies.org/annex47/wp-content/uploads/sites/54/2018/12/annex-47hammarbyverket.pdf>

- IEA (International Energy Agency) (2022a), World Energy Outlook 2022, <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>
- IEA (2022b), Weather for Energy Tracker, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/weather-for-energy-tracker>
- IEA (2022c), Global Hydrogen Review 2022, <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>
- IEA (2020a), Is cooling the future of heating?, <https://www.iea.org/commentaries/is-cooling-the-future-of-heating>
- IEA (2020b), Energy Technology Perspectives 2020, <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>
- JRAIA (The Japan Refrigeration and Air Conditioning Industry Association) (2022), Voluntary statistics, <https://www.jraia.or.jp/statistic/>, [in Japanese].
- Madeddu, S. et al. (2020), The CO₂ reduction potential for the European industry via direct electrification of heat supply (power-to-heat), Environmental Research Letters, Vol. 15/12, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/abbd02>
- Marina, A. et al. (2021), An estimation of the European industrial heat pump market potential, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 139, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110545>
- Maruf, N. et al. (2022), Classification, potential role, and modeling of power-to-heat and thermal energy storage in energy systems: A review, Sustainable Energy Technologies and Assessments, Vol. 53(B), <https://doi.org/10.1016/j.seta.2022.102553>
- Mathiesen, K. et al. (2022), Putin's war accelerates the EU's fossil fuel detox, <https://www.politico.eu/article/vladimir-putin-war-ukraine-accelerates-eu-fossil-fuel-detox/>
- Morawiecka, M. and J. Rosenow (2022), From laggard to leader: How Poland became Europe's fastest-growing heat pump market, <https://foresightdk.com/from-laggard-to-leader-how-poland-became-europes-fastest-growing-heat-pump-market/>
- PORT PC (2022), Ponad dwukrotny wzrost sprzedaży powietrznych pomp ciepła w I poł. 2022 roku! [Sales of air-source heat pumps more than doubled in the first half of 2022!], <https://portpc.pl/ponad-dwukrotny-wzrost-sprzedazy-powietrznych-pomp-ciepła-w-i-poł-2022-roku/>, [in Polish].

Rosenow, J. et al. (2022), Heating up the global heat pump market, Nature Energy, Vol. 7, <https://www.nature.com/articles/s41560-022-01104-8>

Swiss Office of Energy (2020), Qualitätsüberwachung von Kleinwärmepumpen und statistische Auswertung der Prüfergebnisse 2019 [Quality monitoring of small heat pumps and statistical evaluation of the test results 2019], <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/10078>, [in German].

Toleikyte, A. and J. Carlsson (2021), Assessment of heating and cooling related chapters of the national energy and climate plans (NECPs), <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC124024>

US DOE (United States Department of Energy) (2022), Residential Cold Climate Heat Pump Challenge, <https://www.energy.gov/eere/buildings/residential-cold-climate-heat-pump-challenge>

Wastewater Heat Online (2022), Case studies, <https://wastewaterheat.online/case-studies>

第二章：加快热泵应用的影响

Daikin (2022), Recovery, Reclamation and Destruction of Fluorocarbons,
<https://www.daikin.com/csr/environment/climatechange/fluorocarbon>

European Chemicals Agency (2022), Registry of restriction intentions until outcome,
<https://echa.europa.eu/en/registry-of-restriction-intentions/-/dislist/details/0b0236e18663449b>

Fraunhofer ISE (2022), Propane-based Refrigeration Circuit for Heat Pumps Achieves New Efficiency Record,
<https://www.ise.fraunhofer.de/en/press-media/press-releases/2022/propane-based-refrigeration-circuit-for-heat-pumps-achieves-new-efficiency-record.html>

UBA (Umweltbundesamt) [German Environment Agency] (2021), Persistent degradation products of halogenated refrigerants and blowing agents in the environment: type, environmental concentrations, and fate with particular regard to new halogenated substitutes with low global warming potential,
<https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/persistent-degradation-products-of-halogenated>

IEA (International Energy Agency) (2022a), A 10-Point Plan to Reduce the European Union's Reliance on Russian Natural Gas, <https://www.iea.org/reports/a-10-point-plan-to-reduce-the-european-unions-reliance-on-russian-natural-gas>

IEA (2022b), Playing my part - How to save money, reduce reliance on Russian energy, support Ukraine and help the planet, <https://www.iea.org/reports/playing-my-part>

IEA (2022c), World Energy Outlook 2022,
<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>

IEA (2021a), Unlocking the Potential of Distributed Energy Resources,
<https://www.iea.org/reports/unlocking-the-potential-of-distributed-energy-resources>

IEA (2021b) Net Zero by 2050 - A roadmap for the Global Energy Sector,
<https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

IEA (2019), Examples of energy flexibility in buildings,
<https://www.annex67.org/media/1921/examples-of-energy-flexibility-in-buildings.pdf>

IEC (International Electrotechnical Commission) (2022), IEC 60335-2-40:2022,
<https://webstore.iec.ch/publication/62837>

IHME (Institute for Health Metrics and Evaluation) (2022), Poisoning by carbon monoxide — Level 4 cause, https://www.healthdata.org/results/gbd_summaries/2019/poisoning-by-carbon-monoxide-level-4-cause

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2022), Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-3/>

Kowalski, P., & Szałański, P. (2019). Seasonal coefficient of performance of air-to-air heat pump and energy performance of a building in Poland, E3S Web of Conferences 116, <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911600039>

Netherlands Enterprise Agency (2022), Hybrid Heat Pumps Mandatory, <https://business.gov.nl/amendment/hybrid-heat-pump-mandatory>

Patenaude, A. (2015), CO₂ as a Refrigerant - Basics & Considerations, RSES journal, pp. 26-30, https://www.rses.org/assets/rses_journal/0115_CO2.pdf

Purohit, P., et al. (2022a), The key role of propane in a sustainable cooling sector, Proceedings of the National Academy of Sciences, 119(34), <https://doi.org/10.1073/pnas.2206131119>

Purohit, P., et al. (2022b), Achieving Paris climate goals calls for increasing ambition of the Kigali Amendment, Nature Climate Change, 12, pp. 339-342, <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01310-y>

Purohit, P., & Höglund-Isaksson, L. (2017), Global emissions of fluorinated greenhouse gases 2005-2050 with abatement potentials and costs, <https://doi.org/10.5194/acp-17-2795-2017>

RHC and EHPA (Renewable Heating and Cooling and European Heat Pump Association) (2021), Strategic Research and Innovation Agenda for Heat Pumps: Making the technology ready for mass deployment, <https://www.rhc-platform.org/content/uploads/2021/06/RHC-ETIP-SRIA-HPs-2021v02-WEB.pdf>

RTE (Réseau de Transport d'Électricité) [Electricity Transmission Network] (2021), Energy Pathways to 2050, https://assets.rte-france.com/prod/public/2022-01/Energy%20pathways%202050_Key%20results.pdf

US DOE (United States Department of Energy) (2022), United States Energy and Employment Report, <https://www.energy.gov/policy/us-energy-employment-jobs-report-useer>

UNEP (United Nations Environmental Programme) (2018),
<https://www.unep.org/ozonaction/refrigerant-management-0>

UNEP (2017), Kigali Fact Sheet 2 - Current Use of HCFCs and HFCs,
<https://wedocs.unep.org/20.500.11822/2686>

第三章：障碍与解决方案

Agora Energiwende (2022), Durchbruch für die Wärmepumpe: Praxis Optionen für eine effiziente Wärmewende im Gebäudebestand [Breakthrough for the heat pump: Practical options for an efficient heating transition in the building stock], https://static.agora-energiwende.de/fileadmin/Projekte/2022/2022-04_DE_Scaling_up_heat_pumps/A-EW_273_Waermepumpen_WEB.pdf, [in German].

Bloomberg News (2021), Copper Is So Pricey Now That Aircons Are Switching to Aluminum, <https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-09-09/copper-is-so-pricey-now-that-aircons-are-switching-to-aluminum?leadSource=uverify%20wall>

Bosch (2022), Thermotechnology: 300 million euros for the heat pump business, <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/en/thermotechnology-300-million-euros-for-the-heat-pump-business-240185.html>

Catapult Energy Systems (2022), What we do, <https://es.catapult.org.uk/>

BRGM (Bureau de recherches géologiques et minières) [Bureau of Geological and Mining Research, France] (2022), Greater Paris: near-surface geothermal potential mapped, <https://www.brgm.fr/en/news/press-release/greater-paris-near-surface-geothermal-potential-mapped>

Daikin (2022), Daikin Europe invests 300 million euro in new Polish heat pump heating factory, https://www.daikin-ce.com/en_us/press-releases/2022/daikin-europe-invests-300-million-in-new-polish-heat-pump-heatin.html

Danish Energy Agency (2022), Energimærkning af huse [Energy labeling of houses], <https://sparenergi.dk/forbruger/boligen/energimaerkning-boliger/huse>, [in Danish].

dena (2022), Heat pumps in energy consulting, <https://www.dena.de/en/newsroom/publication-detail/pub/a-survey-of-experts-the-heat-pump-in-energy-consultations/>

EBRD (European Bank for Reconstruction and Development) (2022), Green Technology Selector, <https://techselector.com/ts-en/>

ELA (European Labour Authority) (2021), Report on Labour Shortages and Surpluses, <https://www.ela.europa.eu/en/media/725>

Electric Ireland (2022), Heat Pump Price Plan, <https://www.electricireland.ie/residential/electricity-and-gas/heat-pump-price-plan>

Energie-Control Austria, MEKH and VaasaETT (2022), Household Energy Price Index (HEPI) (database), <https://www.energypriceindex.com/price-data> (accessed October 2022).

Energiesprong (2021), Serial renovation: Germany's first pilot project completed, <https://energiesprong.org/serial-renovation-germanys-first-pilot-project-completed/>

European Commission (2022), Proposal for a council regulation laying down a framework to accelerate the deployment of renewable energy, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=COM:2022:591:FIN>

European Union (2012), Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the council on waste electrical and electronic equipment (WEEE - recast), <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2012:197:0038:0071:EN:PDF>

First Citizens Bank (2022), HVAC Equipment Shortage: How Will Ongoing Supply Chain Issues Affect Techs?, <https://www.firstcitizens.com/small-business/insights/skilled-trades/hvac-equipment-shortage>

Georisk (2021), Where are we with geothermal risk mitigation schemes?, <https://www.georisk-project.eu/where-are-we-with-geothermal-risk-mitigation-schemes/>

GOV.UK (2022), A market-based mechanism for low carbon heat – Consultation, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1026607/clean-heat-market-consultation.pdf

GOV.UK (2016), Potential Cost Reductions for Air Source Heat Pumps, https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/498962/150113_Delta-ee_Final_ASHP_report_DECC.pdf

Heptonstall, P., & Winskel, M. (forthcoming), Decarbonising home heating: An evidence review of domestic heat pump installation costs.

Hoval (2022), Hoval increases investment in heat pump production, <https://www.hoval.co.uk/press/uk/hoval-increases-investment-in-heat-pump-production?e=>

IEA (International Energy Agency) (2022a), Energy Efficiency 2022, <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2022>

IEA (2022b), Solution matrix, <https://heatpumpingtechnologies.org/annex50/solution-matrix/>

- IEA (2021), Denmark: Strategic Market Outlook, <https://heatpumpingtechnologies.org/publications/denmark-strategic-market-outlook/>
- International Copper Alliance (2022), Home and Office: Infrastructure Reimagined Factsheet, <https://copperalliance.org/wp-content/uploads/2022/02/ICA-IR-HomeOffice-202202-R4.pdf>
- Klingauf, J. (2022), Wärmepumpen-Boom: Deutscher Mittelständler Stiebel Eltron investiert 600 Millionen Euro [Heat pump boom: German medium-sized company Stiebel Eltron invests 600 million euros], <https://stiebel-eltron.pressroom-rbt.com/2022/08/30/waermepumpen-boom-deutscher-mittelstaendler-stiebel-eltron-investiert-600-millionen-euro/>, [in German].
- Mitsubishi (2022), Mitsubishi Electric to expand production capacity at A/C base in Turkey, <https://www.mitsubishielectric.com/news/2022/0527.html>
- Nesta (2021), Interim boilers for broken heating, <https://www.nesta.org.uk/interim-boilers-for-broken-heating/>
- NIBE (2022), Interim report 2, 2022 (Q2), <https://www.nibe.com/investors/pm-news-reports/2022---news-reports/2022-08-18-interim-report-2-2022-q2>
- Panasonic (2022), Panasonic Accelerates Investment in Air-to-water Heat Pump production its Czech factory, <https://news.panasonic.com/global/press/en220902-2>
- PEP (2022), PEP EcoPassport (database), <http://www.pep-ecopassport.org/> (accessed September 2022).
- Quanlin, Q. (2022), Midea starts work on new heat pump plant in Italy, <https://www.chinadaily.com.cn/a/202210/15/WS634a007ba310fd2b29e7c96a.html>
- RAP (Regulatory Assistance Project) (2022a), Levelling the playing field: Aligning heating energy taxes and levies in Europe with climate goals, <https://www.raponline.org/wp-content/uploads/2022/07/Taxes-and-levies-final-2022-july-18.pdf>
- RAP (2022b), A policy toolkit for global mass heat pump deployment, https://www.raponline.org/wp-content/uploads/2022/11/RAP_Heat_Pump_Toolkit.pdf
- Shen, X et al. (2021), Estimation of change in house sales prices in the United States after heat pump adoption, Nature Energy, Vol. 6, pp. 30-37, <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00706-4>
- Urban, R. (2021), Clean Energy Financing Programs Canada, <https://www.energyhub.org/financing/#canada-wide>

US DOE (United States Department of Energy) (2016), Heat Pump Supply Chains and Manufacturing Competitiveness Considerations,
https://www.energy.gov/sites/prod/files/2016/04/f30/30005_Mann_040716-1105.pdf

Vaillant Group (2022), EIB supports the Vaillant Group's research and development for climate friendly heating solutions, <https://www.vaillant-group.com/news-stories/eib-supports-the-vaillant-group%60s-research-and-development-for-climate-friendly-heating-systems.html>

Viessmann Group (2022), Viessmann Group to invest EUR 1 billion in heat pumps & green solutions, <https://www.viessmann.family/en/newsroom/company/viessmann-group-to-invest-eur-1-billion-in-heat-pumps-and-green-solutions>

Walker, P. (2021), Mitsubishi invests £15 million in Livingston heat pump factory, <https://www.insider.co.uk/news/mitsubishi-invests-15-million-livingston-25369217>

World Bank (2022), Carbon Pricing Dashboard,
<https://carbonpricingdashboard.worldbank.org/>

国际能源署 (IEA)

这项工作仅代表国际能源署秘书处的观点，但不一定代表国际能源署所有成员国或任何特定资助者或合作者的观点。这项工作不构成对任何具体问题或情况的专业建议。国际能源署对该作品的内容(包括其完整性或准确性)不作任何明示或暗示的陈述或保证，也不对使用或依赖本报告的行为负责。

《热泵的未来》中文译本。

《热泵的未来》报告的中译本是根据其英文原文翻译的，英文版是本出版物的正式版本。虽然国际能源署是本出版物英文原版的作者，但国际能源署对本译文的准确性和完整性不承担任何责任。本出版物由中国节能协会热泵专业委员会全权负责翻译。

本文应国际能源署要求与原文保持一致，不代表翻译单位的政治观点。



根据国际能源署的知识共享许可通告，本作品已由知识共享署名4.0国际许可协议授权。

本文件及其中所包含的任何地图均不影响任何领土的状态或主权，国际边界或界限的划定，以及任何领土、城市或地区的名称。

除非另有说明，图和表中的所有材料均来自国际能源署的数据和分析。

国际能源署出版物

国际能源署

网址：www.iea.org

联系方式：www.iea.org/contact

中国节能协会热泵专业委员会排版—2023年7月

封面设计：国际能源署

热泵的未来

World Energy Outlook Special Report

由低排放电力驱动的热泵是全球向安全且可持续供暖过渡的核心技术。《热泵的未来》是国际能源署《世界能源展望》系列中的一份特别报告，它对热泵的前景进行了展望，明确了加速其部署的关键机遇。它还强调了热泵发展的主要障碍和政策解决方案，并探讨了加速应用热泵对能源安全、消费者的能源账单、就业和应对气候变化的影响。

2021年，全球约有10%的空间供暖需求由热泵满足，且安装速度正在迅速增长，销售量达到创纪录水平。然而还需要政府的政策支持以帮助消费者克服热泵相对于其他替代品的较高前期成本。在占当今70%以上供暖需求的30多个国家中，已经有对热泵的财政激励措施。据国际能源署估计，2023年全球热泵有潜力减少全球二氧化碳(CO₂)排放至少5亿吨—相当于现在欧洲所有汽车的年二氧化碳排放量。

