

碳氢制冷剂在家用热泵中的运用

【摘要】 随着人们对环境问题的日益关注，各国政府正推动从化石燃料供暖转向电驱动热泵供暖转变。与此同时，由于合成制冷剂的负面影响，各国政府正在引入或扩大对含氟制冷剂的限制，而工业界则更关注相对环保的天然制冷剂的应用。尤其是碳氢制冷剂（HCs）正越来越多的得到应用，它具有优异的热物理性质，毒性较低，但易燃。与合成制冷剂不同，HCs 被许多人认为是长期的、对环境无害的选择，因为它们自然环境中的天然含量已经非常丰富。

本技术简报旨在综述目前家用热泵市场中 HCs 的使用普及率、在家用热泵中应用的优缺点、可应用程度以及未来潜力。

0 引言

社会和政府越来越重视全球变暖和相关的气候变化问题。应对的行动包括减缓温室气体排放与适应气候变化的后果。与建筑相关的二氧化碳排放当量占总排放量的三分之一以上(UNEP, 2022)，其中很大一部分与供暖（主要由天然气等化石燃料提供）有关。欧洲的 REPowerEU 计划(EU, 2022)推动了供暖电气化的趋势，该计划旨在 2030 年前将温室气体排放量至少减少 55%。

在该计划框架内，家用热泵被认为是满足住宅供暖需求的最有效替代产品，同时避免了对化石燃料的严重依赖。欧盟最初将重点放在与水系统相连的家用热泵，预计 2022 年至 2027 年的安装总量将增加 1000 万台，目标是到 2030 年安装总量达到 3000 万台(EU, 2022)。英国的目标是 2028 年前每年安装 60 万套家用热泵(UK Parliament Post, 2023)。据估计，如按照 REPowerEU 计划目标(EU, 2022)（IEA, 2022）安装家用热泵，2022 年至 2030 年欧盟住宅建筑的二氧化碳排放量可降低 46%。图 1 显示了这些目标的结果，其中一些欧盟国家在 2021 年和 2022 年售出的家用热泵显著增加。尽管全球热泵销量在连续 2 年 2 位数增长后于 2023 年下降了 3%，但这些数据仍可推断出世界其他主要市场地区的情况(Monschauer et al., 2023)。考虑到 2022 年家用热泵市场份额的持续上升，超过了燃气锅炉设备的销售额，创下了 20% 的增长记录，因此总体上将继续使用家用热泵来满足家用领域的供暖需求。事实上，许多主要的家用热泵制造商最近宣布了超过 70 亿欧元的投资计划，将其工厂的产能提高到 650 万台，以应对近年来空气-空气和空气-水家用热泵的销售增长。然而，2023 年销售量的降低可能

导致其中一些计划推迟。根据 IEA 的可持续情景预测 (IEA, 2023), 2040 年, 家用热泵将成为全球建筑物的主要供暖和制冷设备。这意味着在某些气候条件下, 仅用于制冷的空调预计将被可逆式 (供暖/制冷) 热泵所取代。

虽然市场上的家用热泵数量会明显大幅增加, 但哪些制冷剂将在地区和全球范围内使用尚不明确。不过, 为了遵守《〈蒙特利尔议定书〉基加利修正案》和新的欧洲含氟温室气体法规(EU Parliament and Council, 2024), 有必要使用 GWP 值低的制冷剂。在欧洲, 新的 2024 年含氟温室气体法规(EU Parliament and Council, 2024)正在加速过渡, 该法规将在 2035 年前禁止在 12kW 以下的新系统中使用所有含氟温室气体, 并在 2050 年之前停止在市场上销售 HFCs。制冷空调热泵行业提出了不同的替代制冷剂, 目前正在审议中 (Domansky and Motta, 2022, for a summary of the existing alternatives)。几乎所有可用的替代制冷剂都具有一定程度的可燃性 (McIndle 等人, 2017 年)。其中, 大多数合成制冷剂被归类为全氟和多氟烷基物质 (PFAS), 该类制冷剂被证明广泛使用会产生附带影响 (Forthun et al., 2023)。欧盟可能会考虑在 2025 年颁布禁令 (European Chemical Agency, 2023), 而世界其他地区正在讨论 PFAS 的危险性, 未来可能会决定限制其使用。在天然制冷剂中, HCs 通常因其易燃性而被弃用, 但在适当解决易燃性问题的前提下, HCs 是家用热泵的最佳选择。因此, 本技术简介重点介绍了在家用热泵中的 HCs。

本技术简报综述了家用热泵领域使用 HCs 的可能性。本技术简报框架如下, 首先介绍了 HCs 的特性, 以及使用 HCs 的家用热泵的主要特点, 包括其充注限制。其次, 概述了使用碳氢制冷的商用热泵及其在欧盟第 2024/573 号含氟温室气体法规框架内的可能性。最后, 考虑了可能的技术发展, 以扩大 HCs 在家用热泵中的应用范围。

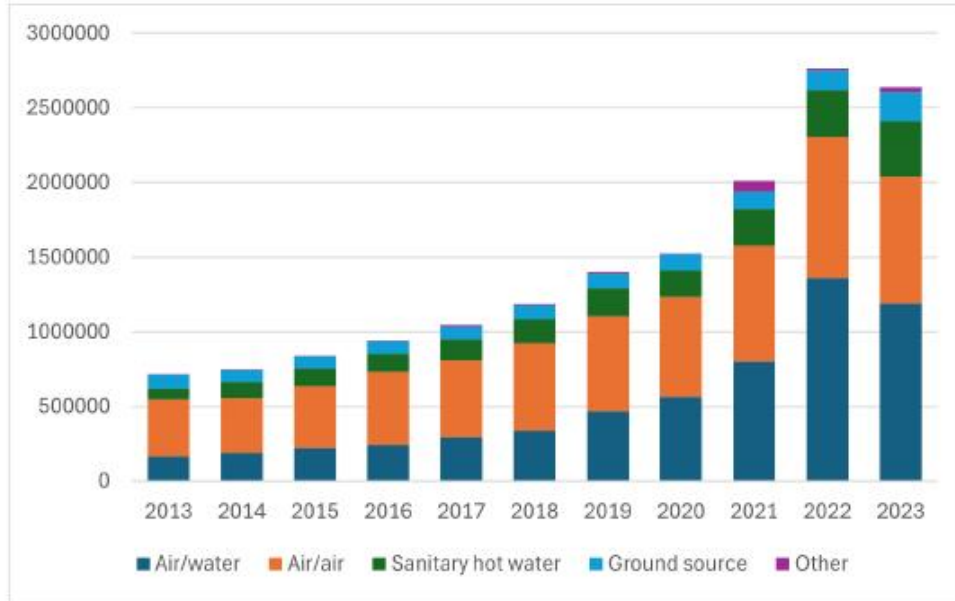


图 1: 欧盟 14 个国家不同类型热泵的销售情况 (欧洲热泵协会 (2024))

1 HCs 的优势和局限性

对于热泵, ISO 817 中列出了可能的替代制冷剂, 但 GWP 值低于 150 且 COP 合理的制冷剂有限, 而且大多数都是易燃的(McLinde et al., 2017)。考虑到 2022 年 UNEP RTOC 报告中列出的所有制冷剂, 只有 6 种制冷剂的 GWP 值低于 150 且不易燃, 属于 A1 级。这些制冷剂包括 R744、2 种不饱和含氟制冷剂 (HCFO-1224yd(Z) 和 HCFO-1233zd(E))、2 种混合制冷剂 (R471A 和 R476A) 以及 IFC-13I1, 其中两种 HCFO 不适合家用热泵的正常运行, IFC-13I1 存在兼容性问题。其余所有低 GWP 值替代品均为易燃品。在这些替代制冷剂中, HCs 没有任何专利限制, 在生物圈中含量丰富, 并且作为制冷剂具有非常好的特性 (McLinde et al., 2017, Colbourne, 2023)。在不同的 HCs 替代品 (R290、R600、R600a 和 R1270) 中, R290 被认为是最适用于家用热泵的候选制冷剂。表 1 列出了 HCs 与其他选定替代制冷剂的理论循环比较。表中显示了理想的 COP, 可以看出 R290 具有非常好的性能, 在实际系统中经常可以观察到。实际上, 在实际应用中, 由于压力比明显较低, COP 可以相对高于其他替代制冷剂, 从而提高压缩机的效率。与许多制冷剂一样, 使用内部热交换器 (IHX) 可以提高 HCs 循环的性能。

Parameter	R410A	R32	R1270	R290	R600	R600a	R1234yf	R152a
Cooling capacity [kW]	7.61	7.66	7.71	7.72	7.61	7.55	7.66	7.81
Heating capacity [kW]	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
Heating COP [-]	4.18	4.28	4.36	4.38	4.60	4.52	4.27	4.56
Swept volume [m ³ /h]	6.9	6.2	9.7	11.8	42.8	30.5	17.2	17.3
Compression ratio [-]	4.03	4.04	3.67	3.78	5.10	4.61	4.34	4.72
Condensing pressure [kPa]	2.7	2.8	1.8	1.5	434	604	1.2	1.0
Discharge temp [°C]	79.8	101.8	68.8	62.4	54.0	52.9	52.1	75.6

Conditions: Evaporating temperature: +5°C – 10 K = –5°C; superheat: 10 K; condensing temperature: 35°C + 10 K = 45°C; subcooling: 5 K; isentropic efficiency: 80%; no circuit pressure losses; no internal heat exchanger; interconnecting piping is adiabatic.

表 1：使用不同制冷剂的 10 kW 热泵系统特性比较

注：蒸发温度：+5°C - 10 K = -5°C；过热度：10 K；冷凝温度：35°C + 10 K = 45°C；过冷度：5 K；等熵效率：80%；无回路压力损失；无内部热交换器；相互连接的管道为绝热管道。

HCs 的另一个优点是其排气温度较低，这意味着在低蒸发（室外）温度下工作和生产生活热水的热泵中使用具有一些优势，并减少了对喷射等复杂系统的需求。由于油温较低，还可以提高组件的可靠性。

关于使用 R290 的系统部件尺寸，表 1 列出了压缩机扫气容积的一些代表性数值。如图所示，R290 要求的扫气容积明显大于大多数传统的高压型制冷剂（R410A、R32），但是实际应用中的压缩机材料和质量通常不受该参数的影响。为了确定其他系统部件（换热器、管道等）的特性，需要根据设计系统的 COP 确定相应的蒸发和冷凝温度。根据表 1 所应用的条件(Colbourne, 2022a)显示，对于空气-水型热泵，R1270 和 R290 可承受的进入温差（ETD）比 R410A 和 R32 的高 10-15%，对于液-水型热泵，R1270 和 R290 可承受的进入温差比 R410A 和 R32 的高 25%。这种“多余”的温差可与其他参数进行权衡，如使用较小的热交换器、较低的空气或水流速等。

关于系统成本，主要热交换器（蒸发器和冷凝器）的结构材料会受到制冷剂选择的显著影响。(Colbourne, 2022a)显示，在翅片管式换热器和板式换热器中，R410A、R32、R1270 和 R290 使用的金属量相似，而 R1234yf 和 R152a 则需要更多的材料，这表明就换热器的成本而言，R290 系统并不比目前使用的制冷剂更昂贵。

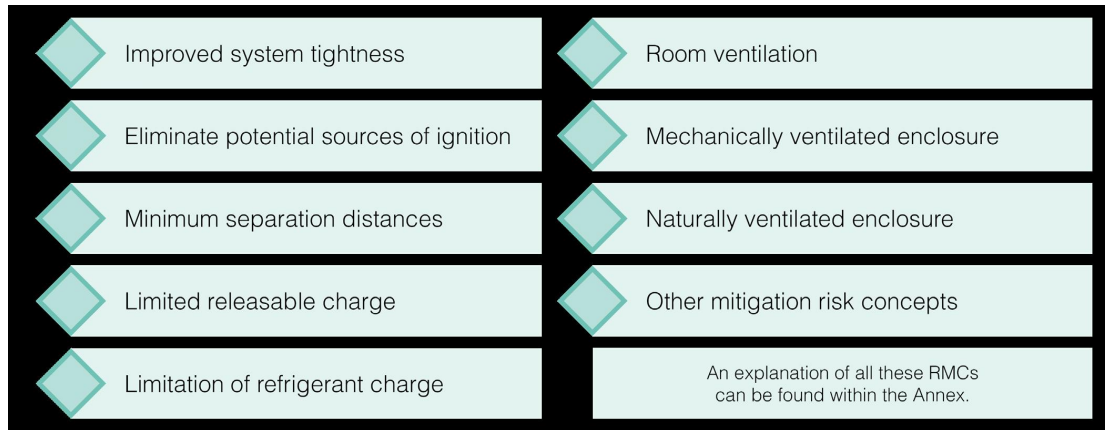
所有这些都表明 HCs 具有良好的热力学特性，将 R290 压缩机的等熵效率与使用其他制冷剂的压缩机进行比较也证明了这一点(Navarro et al., 2005) (Navarro et al. 2013)。然而，过去由于制冷剂的易燃性，室内使用 HCs 家用热泵大多仅限于充注量在 150 克以下的低容量系统。类似的设备包括使用 R600a 的家用冰箱和使用 R290 的家用滚筒烘干机。这可以追溯到 2008 年，当时有 50 多种不同型号的 R290 热泵安装在室内和室外(Palm, 2008)。

事实上，“众所周知”的 150g 充注限制源于家用冰箱标准 EN 60335-2-24，该标准使得无论房间大小都可以使用 R600a 设备。随后，在没有进行任何深入分析的情况下，这一限制被应用到其他安全标准中（见 Colbourne, 2021）。这一限制的后果可以说既有积极的一面，也有消极的一面。一方面，它增强了人们对广泛部署小型 HCs 系统的信心，减少了对易燃性危险的担忧。另一方面，它使人们对使用超过 150g 的 HCs 系统产生厌恶，从而极大地抑制了较大型、“安全” HCs 系统的普及(Colbourne et al., 2020)。随着欧洲即将对中、高 GWP 值的制冷剂实施限制，必然要克服使用所有易燃制冷剂的既定心态和禁忌。

2 HCs 热泵的易燃性风险缓解概念和充注限制

在许多地区，产品安全的法律框架规定了如何制定安全措施。例如，欧洲所有产品都必须符合适用的安全指令或法规，这些指令或法规涵盖了大多数危险，例如由电、压力、易燃性等引起的危险。这些法规规定了安全原则（如“必须避免爆炸”）；根据法律规定，这些要求必须在产品的设计、制造和运行中得到体现。在所谓的统一标准中，针对特定类型的设备和部件制定了对这些法律要求的实际解释。符合标准中的这些要求就意味着“推定”符合法规。因此，虽然法律很少强制要求遵守标准，但这是满足法律要求的一种更直接的方法。低于法规和标准的是行业准则和行为规范；这些准则和规范通常是自愿性的，不一定与立法相关，但可视为对上述规则的实际解释(Colbourne, 2023)。

实际上，大多数制造商的目标是遵守适用的产品和安装安全标准的相关要求，如 EN 60335-2-40 和 EN 378。这些标准根据系统类型、安装位置、制冷剂充注量等，提供了各种可适用于家用热泵的易燃性风险缓解概念。从本质上讲，这些风险缓解概念包括减少泄漏的方法、避免潜在火源、分散泄漏的气流以及给用户和操作员提供相关信息。具体来说，这些措施可能包括：



3 HCs 热泵的类型和特点

图 2 展示了一些不同类型的家用热泵。根据源介质和汇介质进行划分：空气-水（ATW）、液-水（LTW）和空气-空气（ATA）。根据安全标准（见第 3 节）中制冷剂充注量限制的预期值，标出了近似热容量上限。

空气-水系统可用于供暖和供生活热水。最常见的是室外单体设备，不过也有设计类似但室外空气通过管道进入室内，然后再排出室外的系统。也有一些分体式空气-水系统。如果遵守 EN 378 标准，室外整体式设备在制冷剂充注量和容量方面大致不受限制，而室内室外空气系统和分体式系统则可能受到限制，具体取决于设备的设计。

液-水系统采用与空气-水系统类似的安装方式，其中室内整体式机组应用最广泛。同样，根据设备设计，制冷剂充注量和容量可能会受到限制。

空气-空气系统通常是分体式系统（如可逆式分体空调），但也可能是穿墙式系统，包括可逆式窗式空调。在一些地区，排风系统也被广泛使用，从排出的暖空气中回收热量，辅助加热进入的空气或家用生活热水。

通过产品数据库（Eurovent、Keymark）的信息，可以观察到当前 R290 家用热泵的一般特征。2022 年，Eurovent 仅包含 R410A、R407C 和 R32 家用热泵，而 Keymark 则列出了使用这些制冷剂和和其他各种制冷剂的家用热泵。当时，所有列出的产品中约有 420 种是 R290 家用热泵。

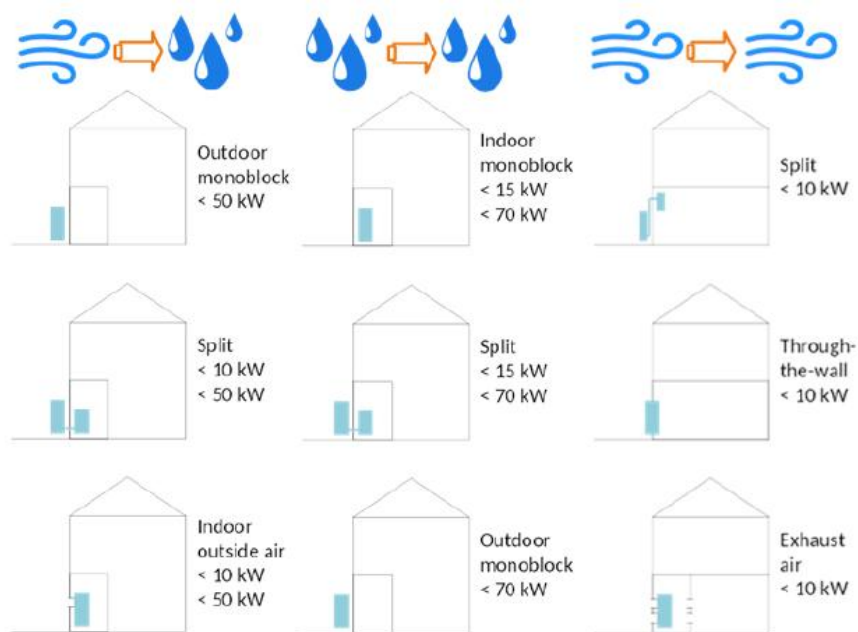


图 2：家用热泵类型。容量较小的系统位于房间内。容量较大的系统位于通风围栏内或室外。

3.1 空气-水家用热泵

该类型热泵是替代燃气锅炉的主要选择。由于其简便性，空气-水家用热泵近年来在市场上的销量大幅增加，目前已成为欧盟最畅销的类型之一。在 Keymark 数据库中，203 台 R290 家用热泵属于空气-水型家用热泵；相比之下，有 1095 台 HFC 空气-水家用热泵产品。

HFC 和 R290 空气-水家用热泵的性能数据见图 3。季节性能系数（SCOP）与名义加热能力（NHC）之间没有明显的关联。可以看出，R290 型号的 SCOP 明显高于 R410A 和 R32 型号。

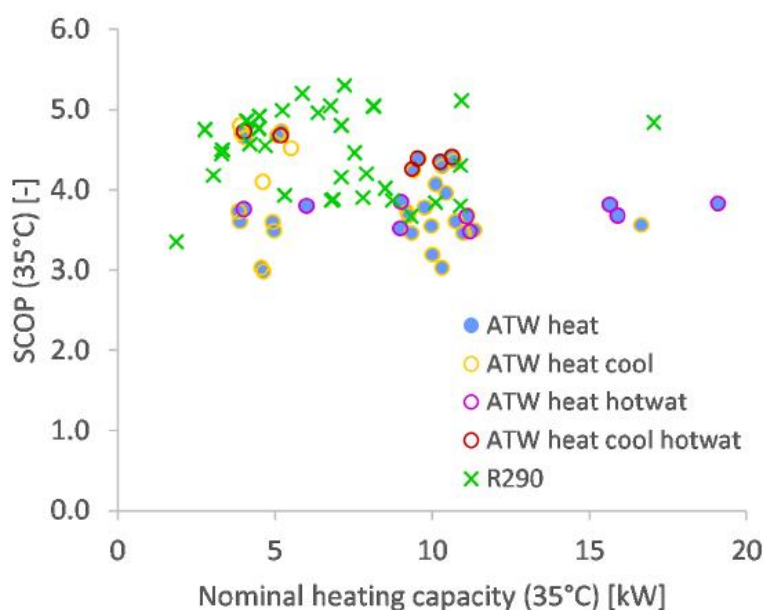
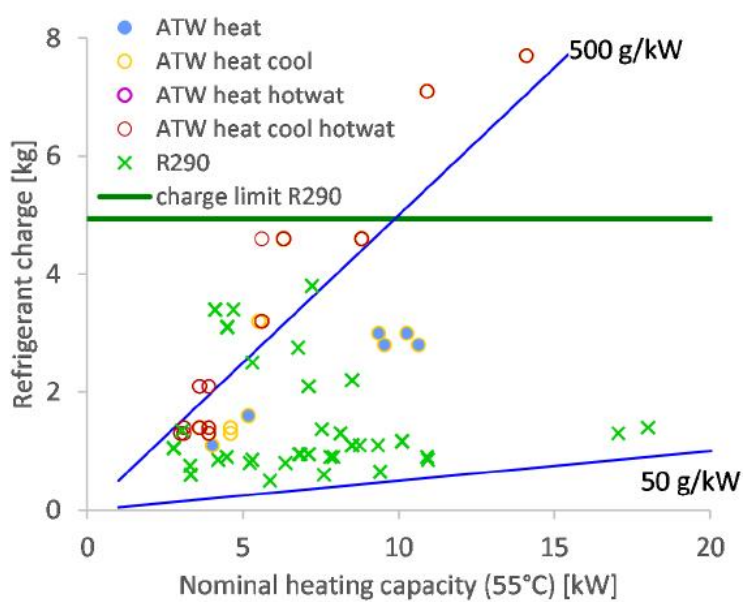


图 4 提供了空气-水家用热泵的制冷剂充注量，可以观察到充注量随 NHC 增加而增加的趋势。容量较大的 R290 设备的充注量不超过 1 千克，充注量最大的空气-水家用热泵系统约为 4 千克，低于 5 千克的充注上限。



3.2 液-水家用热泵

与空气-空气或空气-水家用热泵相比，液-水家用热泵的设备较少。在 Keymark 数据库中，127 种液-水家用热泵设备使用了 R290，408 种使用了 HFC。液-水家用热泵的性能数据见图 5。与空气-水家用热泵一样，季节性能系数与标

称加热容量之间没有特别的关系，SCOP 的范围在 3.5 到 5.5 之间，NHC 超过 40 千瓦。显而易见的是，现有的 R290 产品的效率接近所列型号的上限，其 NHC 的范围与 HFC 设备相似。

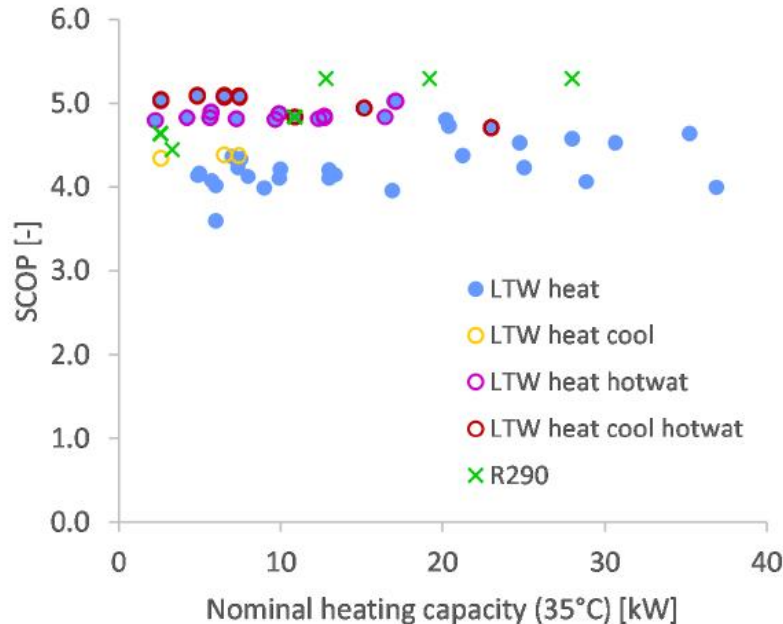
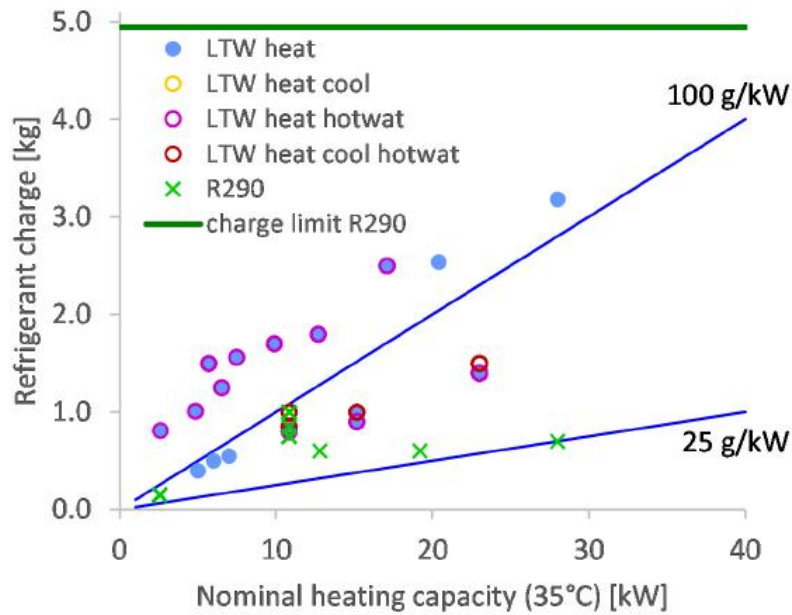


图 6 显示了各种类型的液-水家用热泵的制冷剂充注量。就空气-水家用热泵而言，随着 NHC 的升高，制冷剂充注量普遍增加，但液-水家用热泵的制冷剂充注量普遍较低。同样值得注意的是，在任何给定的 NHC 条件下，制冷剂充注量的差异仍然很大，可达 3 或 4 倍。大多数 R290 机组的充注量不足 1 千克。这两部分的图表清楚地表明，在使用 HFCs 时也可以设计“低充注量系统”，但 R290 所需的充注量一般要低得多。由于 R290 的密度要低得多，制造商可以进一步降低 R290 的充注量。

图 6 还显示充注量几乎与热泵容量无关。尽管可以预测更高的 SCOP 需要更高的充注量，但 Colbourne 的研究显示，在液-水家用热泵中，即使很低的充注量也可以获得很高的 SCOP，即使用 R290 时低至 25 g/kW。对于空气-水家用热泵，可以观察到类似的总体趋势，因为许多效率较高的设备只需要约 50 g/kW。



3.3 生活热水热泵

生活热水热泵通常与建筑供暖功能组合为一个热泵机组，通常做法是在热泵机组内增加水箱。但是，也有只生产生活热水的专用热泵。

对于既供暖又供生活热水的组合热泵机组，可以间接（通过水回路）或直接加热其水箱。在这两种情况下，都可以将减温器与冷凝器一起使用，以达到所需的温度。图 6、图 7 和图 8 的数据中包含了带减温器产品的数据，对于给定的 NHC，这些数据通常与较大的制冷剂充注量有关。

专用的生活热水热泵通常由内部装有冷凝器的水箱和位于水箱顶部的压缩机组成，蒸发器通常从周围空气中汲取热量。系统可以是集成式的，蒸发器安装在机组内，然后放置在室外；也可以是分体式的，有一个单独的蒸发器单元，通常也包含压缩机，放置在室外，带有冷凝器的水箱位于室内。

市场上可以找到使用 R290 的集成式和分体式生活热水热泵。

3.4 空气-空气热泵

标称制冷量低于 12 kW、同时具有热泵和空调功能的可逆式室内空调系统使用的制冷剂仍以 R410A 和 R32 为主。尽管如此，考虑到此类系统在当前欧盟和其他市场上的使用量最大，因此也应对该行业引入 HCs 的情况进行评估。事实上，空气-空气空调/热泵行业的全球 HFC 的当量二氧化碳排放量约占制冷空调

热泵行业的五分之一(Velders et al., 2015)。

在最近的一项研究 (Colbourne, 2022a) 中, 对 Eurovent 现有可逆空气-空气热泵数据库进行了调研, 结果表明该数据库中使用 R290 的产品不到 1%, 这项研究包括约 2500 种产品。根据这些信息, 考虑到 IEC 60335-2-40 规定的易燃制冷剂充注限制 (自 2022 年起), 对使用 HCs 系统的潜在充注量、效率或与现有系统相比的预计成本进行了评估。

这些系统中的制冷剂充注量大致随着容量的增加而增加, 而市场上不同类型系统在给定容量下所需的制冷剂充注量差别很大。这说明制冷剂充注量在目前的系统中并没有得到优化, 因此仍有机会大幅减少充注量。与 HFC 空气-空气家用热泵相比, 当前的 R290 产品显示出较低的单位容量充注量 (kg/kW), 并且随着系统容量的增加, 该值呈下降趋势 (见图 7)。

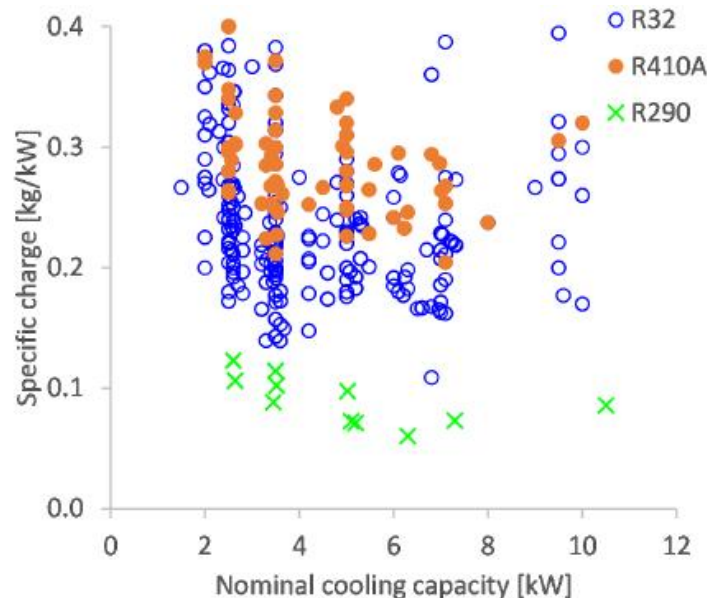


图 7 使用 R410A、R32 和 R290 的空气-空气热泵的单位容量充注量与额定制冷量的比较(Colbourne, 2022a)。

本技术简报根据 IEC 60335-2-40 规定的限制 (从 2022 年起), 以及假定供热需求为 200 W/m^2 , 对 R290 的充注限制进行了分析 (见图 8)。这种估计非常保守, 因为供热和制冷负荷远高于欧盟最极端的条件 (空间供热为 100 W/m^2 , 制冷为 150 W/m^2); 对于新建建筑而言, 这样的热负荷意味着设备超标三倍。根据上述分析, 随着新标准的实施, 在 12 kW 以下系统的中使用 HCs (尤其是 R290 和 R1270) 的高效可逆型号大体上是可行的。

图 8 列出了 IEC 60335-2-40 中 R290 的各种充注量限制（从 2022 年开始）。叠加数据涉及不同 SEER 范围内 R410A 和 R32 空气-空气空调/热泵的充注量和额定容量，但其充注量已降至“R290 等量”（基于额定条件下的液体密度比）。此外，还包括目前市场上的几种 R290 产品。从图中可以看出，大多数“潜在 R290”产品都允许使用各种充注限制，在许多情况下，无论其季节能效比如何，都可能需要使用额外的风险缓解概念，如增强密封性、整体循环气流和主动式有效释放等。

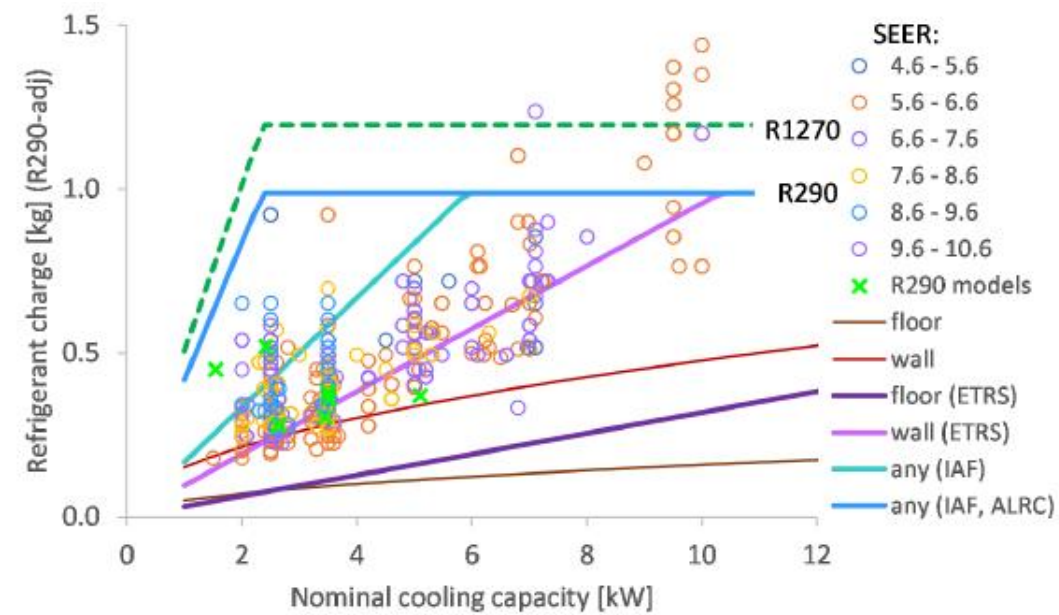


图 8： R290 的允许充注量与遵循不同的安全预防措施调整后充注量的叠加数据

关于 HCs 系统成本，特定容量的该类系统的零售价格差异较大，（Colbourne, 2022a）显示 R290 和 R1270 系统大体上是中等水平。此外，如与其他低 GWP 值替代制冷剂（如 R152a 或 R1234yf）相比，R1270 和 R290 最具吸引力，因为它们所需的 换热器材料质量较小、制造碳排放较低且充注量较少。

在欧洲以外的一些市场，空气-空气空调和热泵正在逐步使用 R290(United Nations Development program, 2019)。例如，中国的几家大型制造商已经开发出一系列 R290 空调和热泵。

4 热泵及其使用制冷剂的市场发展情况

对热泵制冷剂的演变和市场动态的观察得出了一个有趣的观点。可以从两个角度对其进行分析：一方面是根据所提供的产品，另一方面是根据消费者所需求

的产品。如图 9 所示，通过对 Keymark 热泵数据库的分析，我们在过去几年中收集了市场上现有热泵的相关信息。请注意，这些数据反映的是可用型号的比例，而不是实际销售的产品数量。它也不包含最畅销产品的加权信息。

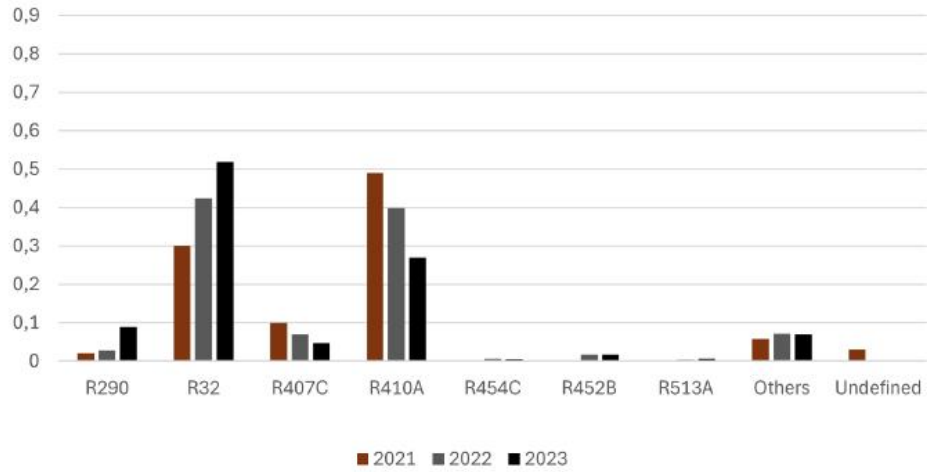


图 9: Keymark 热泵数据库中根据制冷剂列出的“提供”的热泵产品的演变情况。
“其他”包括 R134a、R404A、R449A、R452B 和 R417A。

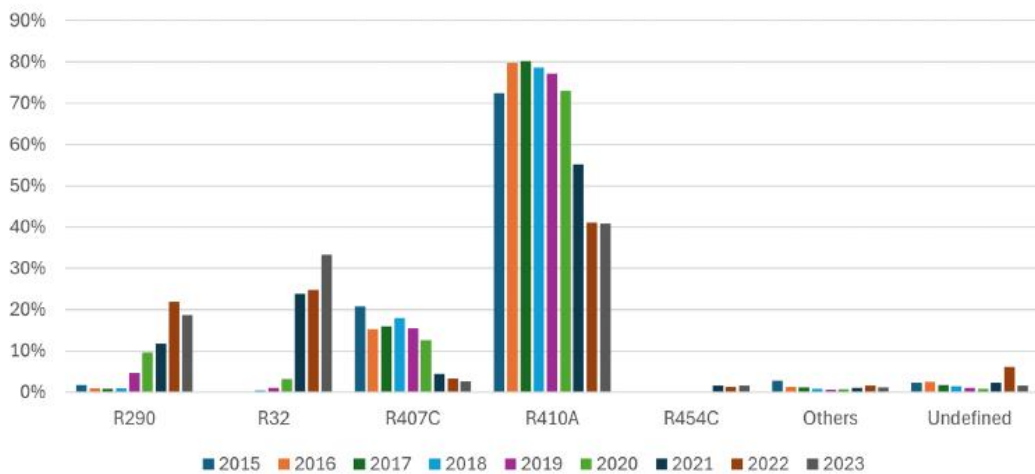


图 10: 德国房主希望使用的制冷剂份额的动态变化以及制冷剂之间的年度变化和变化原因

Annual change	R407C	R410A	R290	R32	Comment
2017-2018	+1.8%	-1.7%	+0.1%	+0.3%	
2018-2019	-2.3%	-1.4%	+3.6%	+0.8%	Intro of several new R290 DHPs on the (subsidized) market
2019-2020	-2.9%	-4.3%	+5.2%	+2.1%	Intro of several new R290 and R32 DHPs on the (subsidized) market
2020-2021	-8.3%	-17.7%	+2.1%	+20.6%	New funding scheme in 2021 (BEG) incl. ATA DHPs
2021-2022	-1.1%	-14.1%	+10.1%	+1.0%	Intro of new R290 HPs, new funding scheme in 2021 (BEG) incl. ATA DHPs
2022-2023	-0.5%	-0.3%	-3.1%	+8.6%	Simplified access of (multi-)split DHPs (mainly R32) to subsidization; supply issues for R290 DHPs

关于首选客户需求的信息非常有限。本研究仅获得了德国市场的数据（基于德国联邦高效建筑资助计划）。因此，可以对德国业主申请资助的热泵制冷剂份额进行分析。

图 10 显示了 2015 年至 2023 年补贴产品中热泵制冷剂的变化情况。从图中可以清楚地看出，R290 已经占据了重要地位，2022 年在所有热泵中的份额约为 20%。如果只考虑单体空气-水热泵，这一份额甚至会更高。2023 年 R290 热泵下降和 R32 热泵的持续增长是由不同原因造成的，请参见图中评论的年度变化。

5 欧盟含氟温室气体法规修订版视角下的 HCs

在 2024 年欧盟含氟温室气体法规中，有一系列针对各类制冷、空调、热泵设备的市场准入禁令。表 3 列出了与家用热泵有关的禁令。有些对 GWP 值高于 750 或高于 150 的含氟温室气体实施市场准入禁令，有些则完全禁止使用含氟温室气体。橙色阴影表示大容量空调和热泵系统难以达到充注限制，而绿色阴影表示使用 R290 大致可以达到充注需求。除第 8(e)项“其他独立式空调和热泵设备”和第 9(f)项“大于 12kW 的分体式空调和热泵系统”外，预计所有设备类别基本都可以使用 HCs。

Year	Annex IV Item ¹	Equipment category	Limitation ²	R290 permitted ³ [kg]	
				EN 60335-2-40	EN 378-1
2025	8(a)	Single split AC&HPs with > 3kg	No GWP > 750	1	1.5, 2.5
2027	8(b)	Plug-in room, monoblock AC and self-contained HPs ≤ 12 kW	No GWP > 150 (or GWP > 750)	1.0, 5.0	1.5, 5.0
2027	8(d)	Monoblock and self-contained AC&HPs, > 12 kW and ≤ 50 kW	No GWP > 150 (or GWP > 750)	1.0, 5.0	1.5, 5.0
2029	9(b)	AC&HP split ATW systems ≤ 12 kW	No GWP > 150	1	1.5, 2.5, 5.0
2029	9(c)	AC&HP split ATA systems ≤ 12 kW	No GWP > 150	1	1.5, 2.5
2029	9(e)	AC&HP split ATA systems ≥ 12 kW	No GWP > 750	1	1.5, 2.5
2030	8(e)	Other self-contained AC&HPs	No GWP > 150 (or GWP > 750)	1.0, 5.0	1.5, 5.0
2032	8(c)	Plug-in room, monoblock AC and self-contained HPs ≤ 12 kW	No F-gases (or GWP > 750)	1.0, 5.0	1.5, 5.0
2033	8(f)	AC&HP split systems > 12 kW	No GWP > 150	1	1.5, 2.5
2035	9(d)	AC&HP split systems ≤ 12 kW	No F-gases	1	1.5, 2.5

¹ The letter in parentheses refers to successive POM bans for each Annex IV item listed within Regulation 2024/573.

² Text in parentheses ("or GWP > 750") refers to the condition "...except when required to meet safety requirements."

³ Actual value depends upon system architecture (EN 60335-2-40) or access class/system location classification (EN 378-1).

表 3：HCs 充注量与标准允许值的比较

6 扩大 HCs 应用范围的可能演变

在热泵中更广泛地使用 HCs 的关键取决于安全问题，而这一问题与减少制冷剂充注量密切相关。除了以提高热泵效率和灵活性为重点的普通研发外，制冷剂充注量优化及其全生命周期管理也必须纳入到未来的发展中。

有几篇文献研究了制冷剂在热泵系统各部件上的分布情况。这些研究通常给出与图 11 类似的充注分布。一些文献侧重于优化这些组件中的制冷剂充注量 (Sanchez-Moreno et al. 2022; Corberan et al. 2008; Fernando et al., 2004)。在这些策略中，使用内部容积较小的冷凝器和蒸发器 (Fernando et al. 2008a, 2008b)、尽可能减少液体管路 (Ghoubali et al., 2017) 以及使用含油量最低或制冷剂溶解度较低的压缩机 (Andersson et al., 2018; Martinez-Galvan et al., 2011) 是迄今为止最常见的方法 (Corberan, 2014)。这些研究证明了减少现有系统中制冷剂充注量的潜力，也确实指明了一个很有前途的方向。但在某些情况下，这些研究中应用的技术必须先解决可行性/耐用性等问题，然后才能将这种低充注量系统推向市场。例如，LC150 项目 (ISE Franhoufer, 2022) 严格遵循了地源液-水热泵概念，而且也有一些

充注量优化的液-水和空气-水热泵投入市场。

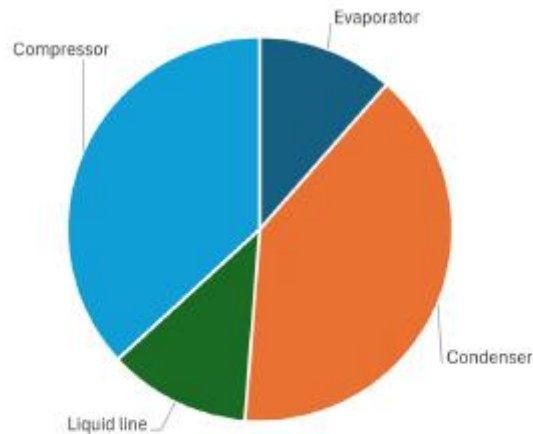


图 11：带板式热交换器的 5kW 液-水热泵中的各部件的制冷剂（单位：g）分布（基于文献(Palm, 2008)）

从这个意义上讲，目前已经出现了一些变化。例如，换热器制造商提出了一种更紧凑的翅片和管式换热器概念，管子的直径减小到 4 毫米(Filippini et al., 2023)。此外，还推出了钎焊板换热器，这种换热器的钎焊板之间的间隔更小，专门用于 HCs (Alfa-Laval, 2024)。最近，垂直铝扁管的使用也很有前景，不仅能提高性能，还能减少制冷剂充注量 (Mitsubishi Electric, 2024a)。据报道，使用风冷式 R290 冷凝器可使体积减少 70%，空气压降减少 40%，内部容积减少 50%，因此，采用特殊的管道几何形状和设计，可使冷凝器的体积最多减少 50% (O'Malley et al. 2024)。

关于压缩机，HCs 在常用润滑油中的溶解度差异很大，因此必须使用特定的润滑油。需要指出的是，这导致很难找到合适的压缩机。由于几家主要的压缩机制造商已经开发出了专门用于 HCs 的产品，因此可用性已变得不那么重要。然而，他们对充注量进行的优化仍然不能令人满意，这一点非常重要，因为在家用热泵中，压缩机通常是仅次于冷凝器的最大制冷剂储藏器（见图 11；Sanchez-Moreno et al.2022； Fernando et al.; 2004）。为解决这一问题，目前正在使用 PAG 等低溶解度油。此外，压缩机中的油量也可以更好地适应压缩机工作的特定系统环境，这需要进一步的研究。为汽车等行业开发的压缩机(Anderson et al., 2018)或无油离心式压缩机(Copeland)等其他方法可能是很有前景的替代方案，但要将这些概念商业化，相关行业还需要做出更多努力。

总之，在最大限度地减少内部容积方面仍有一些未解决的问题。从系统中移除储液器会给系统控制、运行和设计带来一些限制，需要进一步整体分析这些限制，尤其是运行期间制冷剂充注量可能会大幅变化的系统。这方面的研究可能包括：换热器的设计和选择标准、开发低充注条件下的专用部件（如膨胀阀）、压缩机在充注条件下工作的灵活性。

迄今为止，一些实验室已在原型机中实现了极低的充注量。在适合单户住宅的单体式机组中，R290 充注量通常约为每千瓦制冷量 10-15 克。分体式机组充注量较高，约为每千瓦制冷量 80 克(Mitsubishi Electric, 2024b)，但各种结果也表明充注量还可以进一步降低。

一般来说，在设计家用热泵系统时，减少制冷剂充注量从来都不是优先考虑的问题。相反，即使由于轻微甚至大量泄漏而损失了大量制冷剂，系统通常也能继续良好运行。在某些制冷剂排放对环境的有害影响尚不明确的时候，这是一种合理的设计策略。然而在使用易燃制冷剂的情况下，必须将最小充注量和零泄漏作为优先目标。考虑到这一点，有必要对所有家用热泵系统部件的设计进行审查，以便在不降低效率的情况下尽可能减少制冷剂充注量。此外，还需要从其他方面来合理确定此类系统的安全充注量。在这方面，应考虑系统对外部火灾的反应、住宅总体设计对室内制冷剂浓度的影响、确定释放充注量的方法等问题。

7 结语

由于合成制冷剂的使用和排放会对环境造成严重后果，HCs 作为家用热泵和其他制冷系统的制冷剂再次受到关注。由于 HCs 极易燃烧，需要考虑相关风险，并且必须对系统设计进行调整，以确保安全使用。直到最近，国际和欧洲标准对使用 HCs 仍有很大限制。这也是工业界迟迟不愿采用 HCs 的主要原因，除非是在制冷剂充注量可保持在 150 克以下的极低容量系统中。目前正在对标准进行修订，以使充注量较大系统的设计具有较低的易燃风险，从而支持从合成制冷剂向 HCs 过渡。在欧洲，新的含氟温室气体法规正在加速这一过渡，该法规将在 2035 年前禁止在 12 kW 以下的系统中使用所有含氟温室气体，并最迟在 2050 年逐步停止销售 HFCs。同样，国际上也将根据《蒙特利尔议定书》基加利修正案逐步减少 HFCs 的消使用。

HCs 作为制冷剂具有优异的性能，预计其在传热、压降和 COP 方面的性能与合成制冷剂相当，甚至更好。

许多热泵生产商都在关注减少制冷剂充注量的问题，原型机的制冷剂充注量为 150 克或更少，而市场上一些液-水热泵的每千瓦制冷剂充注量仅为 25 克。

使用 HCs（主要使用 R290）的家用热泵销量正在增加，该类型家用热泵在德国已经占据了 20% 的市场份额。许多热泵制造商目前正在开发使用 HCs 制冷剂的新的热泵机组。压缩机和热交换器制造商也在针对 HCs（特别是 R290）进行优化设计。

8 IIR 建议

- 近年来，人们对使用 HCs 和其他天然制冷剂越来越感兴趣。究其原因，是因为合成替代制冷剂在臭氧消耗、全球变暖和长寿命 PFAS 物质扩散等方面造成了不同程度的环境威胁。从这个角度来看，使用 HCs 被视为热泵和制冷设备的一种可靠和可持续的选择。
- 向天然制冷剂（以及低 GWP 合成制冷剂）转变是由国际协定《蒙特利尔议定书》基加利修正案和区域立法（例如 2024/573 欧洲 F-gas 法规和欧盟可能的 PFAS 禁令）推动的。有鉴于此，利益相关者应做好准备，以应对大多数合成制冷剂受到更严格控制的可能性。
- 从技术角度来看，HCs 具有良好的热力学和传输特性，能够提供与合成制冷剂同样高或更高的能效，同时还能实现较大的应用范围。
- HCs 的主要缺点是易燃，这引发了安全问题。修订后的安全标准最近已获批准（IEC 60335-2-40: 2022）或即将提出（prEN 378: 2024），这将为业界设计基于 HCs 的系统提供支持。应修订安全标准，使其更适合处理 HCs 易燃性的不同设计，并使新的缓解措施得以实施。
- 考虑到市场上现有的部件，可以说行业已准备好在中小型系统中使用 HCs。不过，制造商应重点开发用于 HCs 的部件，其特点是减少充注量，并具有双重系统操作或安全功能。例如，高可靠性的间接泄漏检测技术，可用作截止阀的、以减少可释放充注量的膨胀阀，或减小内部容积和充油量以最大限度减少充注量的压缩机。
- 设备制造商应鼓励开发新的化解风险概念，包括气流组织或通风、限制所需充注量或可释放充注量的方法、密封或通风等。
- 对于室内，低 HCs 充注量对于在狭小空间内实现系统最大容量至关重要，

这再次强调了进一步优化充注量的重要性。

致谢

本技术简报由 Emilio Navarro-Peris (E2 “热泵、能源回收”委员会副主席, 西班牙)、Daniel Colbourne (英国)、Thore Oltersdorf (德国) 和 Björn Palm (B1 “热力学和传递过程”委员会成员, 瑞典) 在 Alberto Coronas (E2 “热泵、能源回收”委员会名誉成员, 西班牙) 的协调下编写。

Lambert Kuijpers (B2 “制冷设备”委员会成员, 荷兰) 和 Xianting Li (E “空调、热泵和能源回收”分会主席, 中国) 与 Monique Baha (科学撰稿人, 国际制冷学会)、Souhir Hammami (科学和技术信息部主任, 国际制冷学会)、Maud Grasménil (翻译, 国际制冷学会)、Eric Devin (E1 “空调”委员会成员, 法国) 和 Aurélie Durand (信息专家, 国际制冷学会) 合作评审了该简报。

参考文献

1. Alfa-laval, 2024. “CB24.” [Online]. Available at:
<https://www.alfalaval.com/media/news/2020/cb24/>
2. Andersson K, Granryd E, Palm B, 2018. “Water-to-water heat pump with minimum charge of propane” in Proceedings of the 13 IIR Gustav Lorentzen conference. Available at:
<https://iifiir.org/en/fridoc/water-to-water-heat-pump-minimum-charge-of-propane-33586>
3. Cen Keymark. [Online]. Available at:
<https://keymark.eu/en/products/heatpumps/certified-products>
4. Colbourne D, 2023. Flammable Refrigerants. 54th IIR Informatory Note on Refrigeration Technologies. Available at:
<https://iifiir.org/en/fridoc/flammable-refrigerants-54-lt-sup-gt-st-lt-sup-gt-informatorynote-on-147292>
5. Colbourne D, 2022a. “Can refrigerants with a GWP below 150 be used for split air conditioners in Europe?”.
6. Colbourne D, 2021. “History of Flammable Refrigerants,” in Proc. Institute of Refrigeration, London.

7. Colbourne D, 2022b. “Can refrigerants with a GWP below 150 be used for Heat Pumps in Europe?”.
8. Colbourne D, Suen KO, Li TX, Vince I, and Vonsild A, 2020. “General framework for revising class A3 refrigerant charge limits–A discussion,” Elsevier Ltd. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2020.04.024.
9. Colbourne D, Arango A, and Dickson E, 2018. “Safe design of R290 ducted air-conditioning equipment,” in Proc. 13th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants. Available at:

<https://iifir.org/en/fridoc/safe-design-of-r290-ducted-air-conditioning-equipment-33514>
10. Copeland, 2024. “Copeland oil free centrifugal compressor.” [Online]. Available: <https://www.copeland.com/en-us/products/heating-and-air-conditioning/copeland-oil-free-centrifugal-compressor>
11. Corberán JM, Martínez IO, and González J, 2008. “Charge optimization study of a reversible water-to-water propane heat pump,” International Journal of Refrigeration, vol. 31, no. 4, pp. 716–726, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2007.12.011.
12. Corberan JM, 2014. Refrigerant Charge Reduction in Refrigerating Systems. 25th Informatory Note on Refrigeration Technologies. Available at: <https://iifir.org/en/fridoc/refrigerant-charge-reductionin-refrigerating-systems-25-lt-sup-gt-th-lt-sup-gt-137623>.
13. Domanski P and Motta SY, 2022. Low-GWP Refrigerants: Status and Outlook. 48th IIR Informatory Note. Available at: <https://iifir.org/en/fridoc/low-gwp-refrigerants-status-and-outlook-48-lt-supgt-th-lt-sup-gt-informatory-145388>.
14. European Chemical Agency, 2023. “<https://echa.europa.eu/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas>.”
15. EU, European Commission, COM(2022) 230: REPowerEU Plan, (2022).
16. European Heat Pump Association, 2023. “Market report 2023 Executive-Summary,”
17. Eurovent. [Online]. Available: <https://www.eurovent-certification.com/en/>
18. EU Parliament and Council, 2024. Regulation (EU) 2024/573 on fluorinated greenhouse gases.

19. Fernando P, Palm B, Lundqvist P, and Granryd E, 2004. “Propane heat pump with low refrigerant charge: Design and laboratory tests,” in *International Journal of Refrigeration*, Elsevier Ltd, 2004, pp. 761–773. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2004.06.012.
20. Fernando P, Palm B, Ameel T, Lundqvist P, and Granryd E, 2008a. “A minichannel aluminium tube heat exchanger – Part III: Condenser performance with propane,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 31, no. 4, pp. 696–708, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2008.02.013.
21. Fernando P, Palm B, Ameel T, Lundqvist P, and Granryd E, 2008b. “A minichannel aluminium tube heat exchanger-Part II: Evaporator performance with propane,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 31, no. 4, pp. 681–695, Jun. 2008, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2008.02.012.
22. Filippini S, Merlo U, Demurtas D, Volonte F, Molinaroli L, and Machi E, 2023. “Geometry miniaturization in fin-and-tube heat exchangers for refrigerant charge reduction,” in *Proceedings of the International Conference in Refrigeration*, pp. 918–926. Available at: <https://iifir.org/en/fridoc/geometry-miniaturization-in-fin-and-tube-heat-exchangers-for-147470>.
23. Forthun IH, Roelants M, Haug LS, Knutsen HK, Schell LM, Jugessur A, Bjerknes R, Sabaredzovic A, Bruserud IS, Juliusson PB, 2023. “Levels of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in Norwegian children stratified by age and sex - Data from the Bergen Growth Study 2,” *Int. J. Hyg. Environ Health*, vol. 252, doi: 10.1016/j.ijheh.2023.114199.
24. Ghouali R, Byrne P, and Bazantay F, 2017. “Refrigerant charge optimisation for propane heat pump water heaters,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 76, pp. 230–244, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.02.017.
25. International Energy Agency, 2022. “The future of Heat Pumps.” Available at: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps>.
26. International Energy Agency, 2023. “Energy Technology Perspective 2023.” Available at: <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>.
27. ISE Fraunhofer Institute, 2022. “LC150 project.” [Online]. Available at: <https://www.ise.fraunhofer.de/en/research-projects/lc-150.html>.
28. “Life Front project.” <https://lifefront.eu/> McLinden MO, Brown JS, Brignoli R,

- Kazakov AF, and. Domanski PA, 2017. “Limited options for low-global-warming-potential refrigerants,” *Nat Commun*, vol. 8, doi: 10.1038/ncomms14476.
29. Martínez-Galván I, González-Maciá J, Corberán JM, and Royo-Pastor R, 2011. “Oil type influence on the optimal charge and performance of a propane chiller,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 34, no. 4, pp. 1000–1007, doi: 10.1016/J.IJREFRIG.2011.01.012.
30. Meljac L, Forsen M, Colbourne D, 2021. “Increasing flammable refrigerant charge size without compromising safety,” in *Proc. 13th IEA Heat Pump Conf.*, Jeju, Korea.
31. Mitsubishi Electric, 2024a. [Online]. Available at: <https://es.mitsubishielectric.com/en/news/releases/global/2023/1101-a/index.html>
32. Mitsubishi Electrics, 2024b “100880496 - Using high-efficiency low GWP refrigerants – Development of small and medium-sized air conditioning technology.”
33. Monschauer Y, Delmastro C, and Martinez-Gordon R, 2023. “Global heat pump sales continue double-digit growth.” Available at: <https://www.iea.org/commentaries/global-heat-pump-sales-continue-double-digit-growth>.
34. Navarro E, Urchueguía JF, González J, and Corberán JM, 2005. “Test results of performance and oil circulation rate of commercial reciprocating compressors of different capacities working with propane (R290) as refrigerant,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 28, no. 6, pp. 881–888, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2005.01.010.
35. Navarro E, Martínez-Galvan IO, Nohales J, and González-Maciá J, 2013. “Comparative experimental study of an open piston compressor working with R-1234yf, R-134a and R-290,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 36, no. 3, pp. 768–775, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2012.11.017.
36. Ölen V, Granryd E, Palm B, Andersson K, and Nowacki JE, 2022. “Eco-Pack High temperature low charge Isobutane heat pump,” in *Proceedings of the 15th IIR Gustav Lorentzen Conference*. Available at: <https://iifiir.org/en/fridoc/ecopac-high-temperature-low-charge-isobutane-heat-pump-145338>.

37. O'Malley B, Tancabel J, Aute V, 2024 "Optimization of R290 Variable Geometry Heat Exchangers," Proceedings of the 16th-IIR-Gustav Lorentzen conference.
38. Palm B, 2008. "Hydrocarbons as refrigerants in small heat pump and refrigeration systems - A review", doi: 10.1016/j.ijrefrig.2007.11.016.
39. Sánchez-Moreno-Giner L, Methler T, Barceló-Ruescas F, and González-Maciá J, 2023. "Refrigerant charge distribution in brine-to-water heat pump using R290 as refrigerant," International Journal of Refrigeration, vol. 145, no. October 2022, pp. 158–167, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2022.10.013.
40. Sonner C, Schnabel L, and Fugmann H, 2022. "Safe Use of Flammable Refrigerants in Cooling/Heating Cycles," in 15th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants. Available at: <https://iifir.org/en/fridoc/safe-use-of-flammable-refrigerants-in-cooling-heating-cycles-145412>.
41. UNEP, 2022. "Report of the Refrigeration, Air Conditioning and Heat Pumps Technical Options Committee. 2022 Assessment. Ozone Secretariat, United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi, Kenya."
42. UK Parliament, 2023. "Heat Pumps." Postnote 699. Available at: <https://post.parliament.uk/research-briefings/post-pn-0699/>.
43. UNEP, 2023. "Building Materials and the Climate: Constructing a New Future".
44. United Nations Development Program, 2019, "HCFC Phase-Out Management Plan (HPMP Stage-II) For Compliance with the 2020 and 2025 Control Targets under the Montreal Protocol."

https://info.undp.org/docs/pdc/Documents/BGD/Detailed%20ProDoc_HPMP-II.pdf
45. Velders GJM, Fahey DW, Daniel JS, Andersen SO, and McFarland M, 2015. "Future atmospheric abundances and climate forcings from scenarios of global and regional hydrofluorocarbon (HFC) emissions," Atmos Environ, vol. 123, pp. 200–209, doi: 10.1016/j.atmosenv.2015.10.071.