



绿色低碳制冷剂趋势 及二氧化碳制冷技术与应用白皮书

艾默生商住解决方案与天津商业大学联合发布

2022年8月

目录

摘要	2
第一章 制冷剂绿色替代,是应对全球气候危机的必然要求	3
HFCs 等氢氯氟烃类制冷剂是全球变暖的重要推手	3
一系列国际公约为 HFCs 削减制定顶层框架	4
中国对全球 HFCs 削减至关重要	5
第二章 向环保制冷转型,全球监管和决策机构在行动	6
欧盟:立法先行,削减步伐引领全球	6
美国:新 AIM 法案领导减排加速	6
日本:法规完善细致,实施成效显著	7
中国:构建全方位立体化政策网络	8
第三章 行业加速响应新型环保制冷解决方案研究及应用进展	9
选择绿色替代制冷剂应全面衡量综合考虑	9
CO ₂ 与常用制冷剂的比较及优劣势分析	10
高临界压力和低临界温度为压缩机设计带来技术挑战	12
CO ₂ 制冷系统在炎热气候条件下的能效问题	12
CO ₂ 制冷系统在众多场景具备广阔应用潜力	13
现有应用案例展示出 CO ₂ 制冷的巨大潜力	14
具有重大引领示范作用的国家级案例:冬奥会速滑馆	14
行业案例:艾默生跨临界 CO ₂ 制冷系统应用于餐厅冷库	15
行业案例:艾默生二氧化碳亚临界复叠制冷应用于商超行业	20
第四章 未来展望低 GWP 是发展趋势,但制冷剂替代是漫长的旅程	22
前路长远,前景广阔	22
艾默生为行业落实“双碳”目标贡献力量	23
持续投资,加快 CO ₂ 技术的本土开发及应用	23
校企合作,赋能本土人才培养和创新	24
多元行动,做行业发展的支持者和贡献者	24
结语	25
参考文献	26

摘要

制冷剂使用与环境保护息息相关。继氯氟碳化物（CFCs）的完全淘汰助全球臭氧层保护行动取得巨大成功之后，氢氯氟碳化物（HCFCs）、氢氟碳化物（HFCs）等高全球变暖潜值（GWP）制冷剂带来的巨大温室效应，成为制冷行业关注的焦点。在全球变暖加剧的形势下，向更加绿色低碳的低 GWP 工质转型尤为关键。本报告简要综述了推动绿色低碳制冷解决方案发展的顶层框架、监管政策和行业趋势，并选取具有重要示范价值的应用案例，展现了二氧化碳（CO₂）制冷解决方案在碳减排、环保及能效等方面的综合效益，以期为我国 CO₂ 制冷技术在我国的进一步推广落地提供参考。

第一章 制冷剂绿色替代，是应对全球气候危机的必然要求

2022 年夏，全球迎来罕见高温天气，多地刷新百年来最高温记录。世界气象组织 (WMO) 报告预测，未来五年间，至少有一年有 93% 的可能性成为有史以来最热的一年，而且全球升温幅度有近半机率暂时达到 1.5°C 阈值。席卷欧洲、北美和亚洲的酷烈热浪，正将气候变化及其后果的严峻性，前所未有地呈现在数十亿人口面前。

炎热只是气候变化导致的极端天气事件之一。气候变暖如果不受控制地持续下去，还会引发极地冰原融化，海平面上升，淹没沿海地带，冲击低地国家，加剧干旱及沙漠化扩大趋势……一系列地球地理环境的重大变迁，将对经济社会产生深远影响，严重威

胁人类的生产活动与生命安全。

正因为此，遏制全球气候变暖和臭氧层破坏的“元凶”，减少温室气体和消耗臭氧层物质排放，受到国际社会高度重视，成为全人类需共同承担的时代命题。

在此过程中，制冷及其对气候变化的重要影响，不可避免地推到台前，引发政府、行业及消费者的持续关注。随着人们对制冷行业碳排放担忧的加深，一系列强有力的国际公约先后将其纳入控制范围，向世界传递出明确信号：为了人类的明天，制冷剂绿色低碳替代势在必行。

HFCs 等氢氟烃类制冷剂是全球变暖的重要推手

政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 报告指出，近 50 年来的全球气候变暖，主要是由人类活动排放的大量温室气体的增温效应造成的。温室气体主要包括二氧化碳 (CO₂)、甲烷 (CH₄)、一氧化二氮 (N₂O)、全氟烃 (PFCs)、六氟化硫 (SF₆)、氯氟碳化物 (CFCs) 和氢氟碳化物 (HCFCs)、氢氟碳化物 (HFCs) 等。其中，HFCs、HCFCs、CFCs 等含氟温室气体的全球变暖潜值 (GWP) 可达 CO₂ 的成千上万倍，辐射强度贡献达全部温室气体的 13%，对气候变化有着深远影响。

在人类历史上，CFCs、HCFCs、HFCs 都曾是或者仍是广泛使用的制冷剂。在认识到这些氢氟烃类制冷剂对气候的危害后，全球自上世纪末起采取行动，逐步淘汰它们在制冷设备中的使用。具体淘汰进度各异：CFCs 作为消耗臭氧层物质，已在全球范围内完全淘汰；HCFCs 的全球淘汰正在推进中，在发达国家已基本完成，在中国也正加紧淘汰。然而，对 CFCs 和 HCFCs 的淘汰，很大程度上是通过使用 HFCs 作为替代来实现的，这就导致前两类气体在大气中浓度下降，最后一类气体浓度反升。

制冷碳排放数据快报

- **制冷导致巨额碳排放：**联合国环境规划署 (UNEP) 《2020 年排放差距报告》称，2019 年，全球温室气体排放量达 591 亿吨二氧化碳当量 (范围：±59) (包括土地利用变化产生的温室气体排放量)。另据研究显示，制冷行业目前占全球温室气体排放量的 10% 以上。
- **未来制冷排放量还将持续增长：**NGO 组织绿色创新发展中心 (IGDP) 预计，若按照现有趋势发展，到 2050 年，全球制冷排放将达 89 亿吨二氧化碳当量。
- **发展中国家空调使用是重要贡献因素：**落基山研究所表示，新兴经济体的民用空调需求将在 2050 年增长至当前的五倍，全球民用空调设备的使用量将达到 45 亿台，在此期间，仅民用空调的增长部分，就将带来 1320 亿-1670 亿吨当量的碳排放。
- **中国制冷碳排放约占全球三分之一：**中国作为制冷设备的最大消费、制造和出口国，其制冷行业的碳排放量约占全球制冷碳排放总量的 33%。

这一变化已直接体现在现有的观测数据中。WMO 和中国气象局近年发布的《温室气体公报》都表明，全球已完成淘汰的消耗臭氧层物质 CFCs 的大气本底浓度呈下降趋势，HCFCs 本底浓度停止上升或上升速度变慢，替代物 HFCs 浓度呈上升趋势。

HFCs 被选作 CFCs、HCFCs 等消耗臭氧层物质的替代品，是由其对臭氧的优良特性决定的：HFCs 消耗臭氧层潜值 (ODP) 为零，不对臭氧层损耗直接产生影响，相对稳定、无毒、无腐蚀性。然而，HFCs 虽不伤害臭氧层，却是全球变暖的杀手——尽管它们在大气中的浓度很小，它们的全球变暖潜值 (GWP) 却往往比 CO₂ 高出数千倍甚至上万倍，可以在大气中存留很长时间并吸收相当多的热能，是一类值得警惕的“超级温室气体”。

ASHRAE 编号	物质名称	分子式	大气寿命 (年)	100 年 GWP (AR4)
R-125	HFC-125	CHF ₂ CF ₃	29	3,500
R-134a	HFC-134a	CH ₂ FCF ₃	14	1,430
R-143a	HFC-143a	CF ₃ CH ₃	52	4,470
R-152a	HFC-152a	CH ₃ CHF ₂	1.4	124
R-227ea	HFC-227ea	CF ₃ CHF ₂ CF ₃	34.2	3,220
R-23	HFC-23	CHF ₃	270	14,800
R-236cb	HFC-236cb	CH ₂ FCF ₂ CF ₃	13.6	1,340
R-236ea	HFC-236ea	CHF ₂ CHF ₂ CF ₃	10.7	1,370
R-236fa	HFC-236fa	CF ₃ CH ₂ CF ₃	240	9,810
R-245ca	HFC-245ca	CH ₂ FCF ₂ CHF ₂	6.2	693
R-245fa	HFC-245fa	CHF ₂ CH ₂ CF ₃	7.6	1,030
R-32	HFC-32	CH ₂ F ₂	4.9	675
R-365mfc	HFC-365mfc	CF ₃ CH ₂ CF ₂ CH ₃	8.6	794
R-41	HFC-41	CH ₃ F	2.4	92
R-43-10mee	HFC-43-10mee	CF ₃ CHF ₂ CF ₂ CF ₃	15.9	1,640

主要 HFCs 的名称、分子式、大气寿命和 GWP

数据来自 IPCC 第四次评估报告 (AR4)

一系列国际公约为 HFCs 削减制定顶层框架

气候变化的后果由全人类共同承担，抗击气候变化的全球行动，也需由国际社会共同协调，精诚合作。上世纪末以来，一系列国际公约为氢氟氯烃类制冷剂的削减确立了顶层框架，成为制冷剂环保转型的最有力推动力量。

- 《京都议定书》：1997 年缔约，将 HFCs 列为规定控制的六种温室气体之一，并形成了关于限制温室气体排放的法案，拉开了 HFCs 限减的序幕。
- 《巴黎协定》：2015 年 12 月生效，明确提出通过全球范围的共同行动，在本世纪内把全球平均气温升幅控制在工业化前水平 2°C 之内，并努力将气温升幅限制在工业化前水平 1.5°C 之内。协定为 2020 年后全球合作应对气候变化确定了总的任务和方向。
- 《蒙特利尔议定书》：1987 年签署，旨在通过控制对臭氧层有破坏作用的物质的生产、消费，保护关系到全人类未来生存与发展的大气层。该议定书提出要严格限制臭氧层破坏系数较大的 CFCs 及 HCFCs 类制冷剂的使用和生产。从《蒙特利尔议定书》缔结至今，全球共削减了 95% 以上的消耗臭氧层物质。截至 2010 年 1 月 1 日，在全球范围内已实现了 CFCs 制冷剂的全面淘汰，成功遏止了臭氧层的进一步耗损，地表紫外线辐射基本保持恒定水平。
- 《蒙特利尔议定书》基加利修正案：《蒙特利尔议定书》在臭氧层保护上取得了巨大成功，为了避免在解决臭氧层破坏问题的同时产生温室效应问题，2016 年 10 月，基加利修正案在卢旺达基加利通过，2021 年 9 月 15 日对中方生效。规定在未来 30 年将 HFCs 和高 GWP 制冷剂的生产量和用量减少 80%。

联合国环境规划署 (UNEP) 和国际能源署 (IEA) 在 2020 年共同发布《制冷系统排放和政策综合报告》指出：绝大部分的 HFCs 消费量发生在制冷行业，全球制冷市场依赖的 HFCs 及其混合物的 GWP 加权平均值为 2200；在不受控情景下，预计到 2100 年，HFCs 排放将使全球气温上升 0.3-0.5°C，对《巴黎协定》的 1.5°C 温控目标构成严重威胁。

具体而言，基加利修正案所列的削减目标为：

- 18 种 HFCs 物质，包括；R-134a、R-134a、R-143a、R-245fa、R-365mfc、R-227ea、R-236cb、R-236ea、R-236fa、R-245ca、R-43-10mee、R-32、R-125、R-143a、R-41、R-152、R-152a 和 R-23。
- 一些由常用 HFCs 物质组成的 HFCs 混合物，如 R-404A 和 R-410A 等。

所规定的削减时间表为：

- 美国、加拿大等发达国家将于 2019 年开始逐步减少氢氟碳化物的生产和消费；
- 包括中国在内的超过 100 个发展中国家，将自 2024 年起冻结 HFCs 的消费和生产，2029 年实现削减 10%，2035 年削减 30%，直至 2045 年完成 80% 的削减量；
- 对于包括印度、巴基斯坦及一部分海湾国家在内的少数发展中国家，为了给予其经济增长提供更多的时间，准许其自 2028 年开始冻结 HFCs 的使用，并于 2032 年开始进行削减。
- 到 2047 年以后，所有国家预计 HFCs 消费将不超过各自基准的 15%-20%。

国家	基准年与基准值	削减目标
发达国家	2011、2012、2013 年 HFC 的平均消费量 +15% 基准年 HCFCs 的量，计算 CO ₂ 当量。	2019-2023：削减至 90% 2024-2028：削减至 60% 2029-2033：削减至 30% 2034-2035：削减至 20% 2036 之后：削减至 15%
发展中国家 - 第 1 组 (包括中国)	2020、2021、2022 年平均的 HFC 消费量 +65% HCFCs 基准年消费量，计算 CO ₂ 当量。	2024-2028：100% 2029-2034：削减至 90% 2035-2039：削减至 70% 2040-2044：削减至 50% 2045 之后：削减至 20%
发展中国家 - 第 2 组 (海湾合作委员会，印度，伊朗，伊拉克，巴基斯坦)	2024、2025、2026 年平均的 HFC 消费量 +65% HCFCs 基准年消费量，计算 CO ₂ 当量。	2028-2031：100% 2032-2036：削减至 90% 2037-2041：削减至 80% 2042-2046：削减至 70% 2047 之后：削减至 15%

数据来自《蒙特利尔议定书》基加利修正案

中国对全球 HFCs 削减至关重要

在新增 HFCs 使用中，发展中国家占重头。预计到 2050 年，发展中国家的 HFCs 的消费和排放水平将达到 50-90 亿吨 CO₂ 当量。而中国又是重中之重——届时，有超过 50% 的消费和排放可能来自中国。

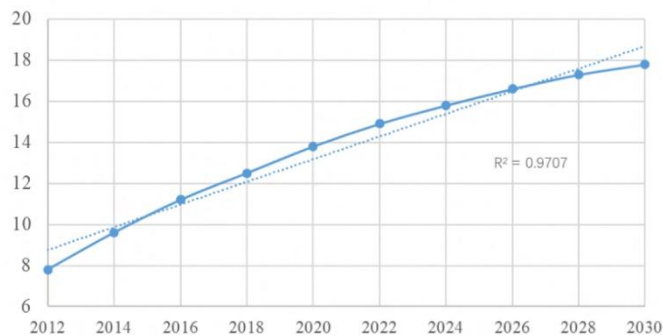
作为经济规模举世瞩目的发展中经济体，中国历经氟化工业的飞跃发展和全民生活水平的快速提高，已成为全球最大的 HFCs 生产与消费国。生态环境部数据表明，2020 年，我国 HFCs 总产能 168.3 万吨，实际产量 81.1 万吨。中国制冷空调工业协会

作为一个负责任的大国，中国积极履行减排义务，为全球大气保护事业做出了突出贡献。自 1991 年正式加入《蒙特利尔议定书》以来，中国经过多年行动与艰苦努力，于 2007 年 7 月 1 日正式完成了对 CFCs 的完全淘汰。按照《蒙特利尔议定书》的要求，中国到 2020 年将 HCFCs 物质较基线水平削减了 35%。HFCs 的削减也在快速推进中。相比不受控情景，到 2050 年，中国通过削减 HFCs 可降低 300-400 亿吨的碳排放量，为抑制全球升温 0.5°C 做出三分之一的贡献。

(CRAA) 数据显示，中国每年制冷剂消费量超过 35 万吨，其中家电生产和工商制冷是消费量最大的领域。另据 CRAA 报告估算，工商业制冷空调行业如果按照高增长模型发展，2030 年其消费的制冷剂总量将达到 17.8 万吨，如果按照低增长模型发展，2030 年制冷剂消费总量也将达到 15.4 万吨。CRAA 据此指出，如果我国工商业制冷空调行业在未来十几年持续保持高增长模式，未来削减压力将非常大，因此需要加快中长期替代制冷剂的产品转轨和使用投入。

2020 年 9 月，中国在第七十五届联合国大会一般性辩论上提出“30·60”目标：将提高国家自主贡献力度，力争碳排放于 2030 年前达到峰值，到 2060 年前实现“碳中和”。这一目标再次体现了中国对建设人类命运共同体的担当，彰显了中国积极应对气候变化、走低碳发展道路的决心，将在经济、能源和环境方面给中国乃至世界带来深远影响。在双碳政策的推动下，中国扩大采用零 ODP、低 GWP 的制冷剂，不断提升制冷领域的绿色清洁程度，翻开了制冷绿色升级的新篇章。

2012-2030年我国工商制冷行业制冷剂消费量（万吨）



2012-2030 年我国工商制冷行业制冷剂消费量

来自中国生态环境部《<蒙特利尔议定书>受控物质制冷剂回收再用管理模式研究报告》



第二章 向环保制冷转型，全球监管和决策机构在行动

在强有力国际公约和国际共识的推动下，世界监管和决策机构加速推进制冷剂环保转型在本国/地区的落地。以下对欧、美、日、中四大经济体的相关政策及动向做简要解读。

欧盟：立法先行，削减步伐引领全球

在控制含氟温室气体排放方面，欧盟向来走在全球最前列。欧洲大多数国家的淘汰进程往往早于《蒙特利尔议定书》规定的时间表。欧盟所采取的路径是以立法手段为先导，从上至下促使行业生产和消费者行为发生改变，从而推动制冷产品和设备大规模向环境友好转型。

- 2014 年，欧盟委员会公布 2030 年气候和能源政策目标，规定欧盟成员国在 2030 年之前将温室气体排放量削减至比 1990 年水平减少 40%。
- 2019 年，欧盟发布《欧洲绿色协议》，并于 2021 年通过《欧洲气候法案》，为欧盟各国在 2050 年实现碳中和目标铺平了道路。
- 为实现上述气候目标，欧盟将产品和系统能效提升、削减 HFCs 等作为工作的重点，制定和实施了生态设计指令（Ecodesign）、含氟气体法规及配套措施和标准，并不断更新。

欧盟生态设计指令涵盖广泛，包括 31 类产品，其中制冷空调类包括：家用空调、家用冰箱、热泵和工商业制冷空调产品。依据该指令，这些产品必须降低其在整个生命周期中对环境的影响，体现能效优先，同时兼顾产品可维护性和可回收性要求，落实循环经济。

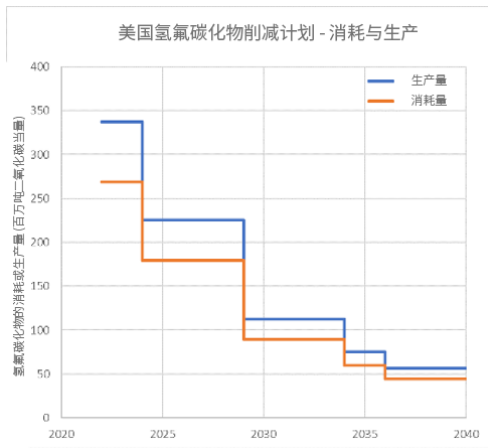
2015 年 1 月，《欧洲含氟气体法案》（简称“F-Gas 法案”）（第 517/2014 号）正式生效，该法案规定了欧洲的 HFCs 削减进程：到 2023 年削减 55%，到 2030 年削减 79%。对 HFCs 采取三个方面的管控措施：通过配额管理从源头上进行总量控制；以 GWP 为标准，分行业禁止相关产品和设备的使用；按照 HFCs 的生命周期进行管理，对生产、使用及报废回收等环节进行严格控制，减少排放。2022 年 4 月，欧盟公布了新的 F-Gas 法规提案，拟进一步收紧对氟化气体排放的监管。新提案如获通过，之前免费申请获得配额的模式将改成先付费后获得配额，按氟化气体产品每吨二氧化碳排放当量 3 欧元的价格支付，而且对违规行为的惩罚也将更加严格。自 F-Gas 法案实施以来，欧洲 HFCs 类制冷剂价格一直在高位徘徊，从经济角度促进了绿色制冷剂的替代进程。

美国：新 AIM 法案领导减排加速

长期以来，美国的温室气体减排及 HFCs 削减工作主要由美国环境保护署（EPA）联合地方政府及相关行业积极推动。2017 年美国宣布将退出《巴黎协定》，同年美国法院裁定 EPA 不得依照重要新替代品政策（SNAP）强制要求企业以低 GWP 物质替代 HFCs，使得 HFCs 的削减进程一度搁浅。

然而，2020 年 12 月，美国颁布《美国创新与制造（AIM）》法案。2021 年 1 月 27 日，美国总统拜登发出行政令，将《基加利修正案》提交美国参议院，以推动该修正案获得批准。2021 年 2 月 19 日，美国正式重返《巴黎协定》。2021 年 4 月，美国总统拜登在领导人气候峰会上宣布将扩大美国政府的减排承诺，到 2030 年将美国的温室气体排放量较 2005 年减少 50%~52%，到 2050 年实现碳中和目标。这几个里程碑性事件标志着美国的减排行动已提上联邦层面，并且未来还将不断加速。

根据 AIM 法案，EPA 将制定一项限额计划，从 2036 年起削减 HFCs 生产和消费量基线水平的 85%，预计 2022 年至 2050 年可减少 45 亿公吨的二氧化碳排放当量，预期至 2050 年经济效益可达 2,720 亿美元，包括降低产业法规执行成本及应对气候变化的公共支出；美国将实施限额计划，逐步削减 HFCs 的生产和消费，制定针对 HFCs 制冷剂的管理标准，建立基于行业的使用限制规则，促进下一代技术转型。AIM 法案包括一份旨在逐步削减纯 HFCs 的清单，其内容与《基加利修正案》中采用清单基本相同。



AIM 法案下的美国 HFCs 削减时间表

来自自然资源保护委员会 (NRDC)

美国重要新替代品政策 (SNAP) 简介

美国 EPA 于 1994 年建立重要新替代品政策 (SNAP)，对消耗

臭氧层物质的替代品进行评估，以减少对人类健康和环境的总体风险，促进向更安全的替代品平稳过渡。SNAP 通过这些评估，为众多制冷应用领域生成了一批可接受和不可接受的制冷剂替代品的清单。2015-2016 年间，EPA 先后发布 SNAP 第 20 号、21 号规定，禁止使用多种高 GWP 的 HFCs 作为替代品。2020 年第 23 号规定列出了适用于制冷和空调设备的 9 种替代品，包括将 R-448A、R-449A 和 R-449B 列为可接受的用于零售食品中温冷藏的制冷剂。2022 年 7 月 28 日，EPA 提出了 SNAP 第 26 号规定议案，拟将多种用于工商业建筑空调和住宅及非住宅除湿机的制冷剂列为一定使用条件下可接受的制冷剂。

在美国 HFCs 监管环境一度较为松散的情况下，SNAP 对于指导各州的 HFCs 削减行动具有重要意义。以加州为首的一些州积极采取 SNAP 政策以及其他措施。根据加州空气资源委员会 (CARB) 新规，从 2022 年 1 月 1 日开始，工商业制冷将不再使用目前的 HFCs 制冷剂；对于新设施和全面改造的设施，要求使用制冷剂 GWP 低于 150 的设备。这将有效地推动氨和 CO₂ 等制冷剂的使用。

日本：法规完善细致，实施成效显著

自《京都议定书》签订以来，日本先后颁布《全球变暖对策促进法》《指定家电的循环利用法》《氟碳化合物回收及销毁法》《碳氟化合物合理使用和妥善管理法》《臭氧层保护法》修订案等一系列法律法规，形成了一套完整成熟的节能减排促进体系，以期逐步削减 HFCs，并达到基加利修正案 2036 年削减至基准量的 15% 的目标。

尤为值得一提的是，日本的管控政策将重点集中于含 HFCs 产品生命周期过程中的排放控制，明确了制造商、进口商、零售商、消费者多方的责任和义务。其中，《碳氟化合物合理使用和妥善管理法》通过推动企业开发、生产和使用低 GWP 的非碳氟化合物替代制冷剂，来逐步实现 HFCs 削减目标。

该法规根据日本市场上指定产品所使用的制冷剂的最低 GWP，并综合考虑安全性、能效、可负担性等因素，设定了 GWP 目标值。要求制造商和进口商在目标年之前，必须使其出货的每种产品的 GWP 加权平均值达到目标值。具体详情如下表：

设备类型	主流制冷剂 (GWP 值)	GWP 目标值	目标年
家用空调	R410A(2090), R32(675)	750	2018 年
商用空调			
制冷量小于 3 冷吨	R410A(2090), R32(675)	750	2020 年
制冷量大于 3 冷吨	R410A(2090)	750	2020 年
中央空调 (离心式冷水机组)	R134a(1430), R245fa(1030)	100	2023 年
汽车空调	R134a(1430)	150	2023 年
冷凝机组及固定式制冷设备	R404A(39200), R410A(2090), R407C(1774), CO2(1)	1500	2025 年
集中式制冷设备(大型冷库)	R404A(39200), NH3(<1)	100	2019 年

数据来自日本经济产业省在 ATMOSphere Japan 2020 上所作的 Japan's Progress in Countering Fluorocarbons Emissions 报告

上述目标值的设定是为了让 GWP 更低的产品能够获得广泛使用。在此推动下，日本的制冷剂替代成效显著。居民家用空调和单元式空调已采用 R32 作为主要替代制冷剂。在日本对自然工质的大力推广下，目前的热泵热水器产品也已主要采用 CO₂ 作为制冷剂。

中国：构建全方位立体化政策网络

作为全球制冷设备制造和消费大国，中国多年来制定和实施了一系列政策、法规和标准，致力推动全球市场向更高效、更低 GWP 的制冷设备转型。

- “十四五”规划：2022 年 1 月，国务院印发《“十四五”节能减排综合工作方案》，对“十四五”时期节能减排工作作出了总体部署。方案提出：实施绿色高效制冷行动，以建筑中央空调、数据中心、商务产业园区、冷链物流等为重点，更新升级制冷技术、设备，优化负荷供需匹配，大幅提升制冷系统能效水平。到 2025 年，城镇新建建筑全面执行绿色建筑标准，城镇绿色高效制冷产品市场占有率大幅提升。
- 《绿色高效制冷行动方案》：2019 年发布，是中国第一个专门针对制冷的行动方案，也是中国制冷领域未来十年提升能效和制冷剂转型的中长期实施方案。方案明确指出，要加速淘汰 HCFCs 制冷剂（如 R-22 等），限控 HFCs 的使用（如 R-404A、R-410A 等），提升绿色高效制冷产品的供给，促进绿色高效制冷消费，推进制冷绿色改造，促进更新升级制冷技术、设备，大幅提升既有系统的绿色化水平，同时深化国际合作，积极参与和引领全球环境治理体系改革和建设，展示我国负责任大国形象。
- 近年来，中国政府还推出了一系列针对制冷细分行业的具体政策，对汽车、冰箱冷柜、冷藏集装箱等领域的制冷剂使用做出明确规定。2021 年 12 月，生态环境部办公厅发布《关于严格控制第一批氢氟碳化物化工生产建设项目的通知》，要求：自 2022 年 1 月 1 日起，各地不得新建、扩建用作制冷剂、发泡剂等受控用途的 R-32、R-134a、R-125、R-143a 和 R-245fa 化工生产设施（不含副产设施），环境影响报告书（表）已通过审批的除外。（注：这五种受控 HFCs 制冷剂，同时也是混配制冷剂 R-410A、R-404A、R-407C、

R-507 的主要成分。）

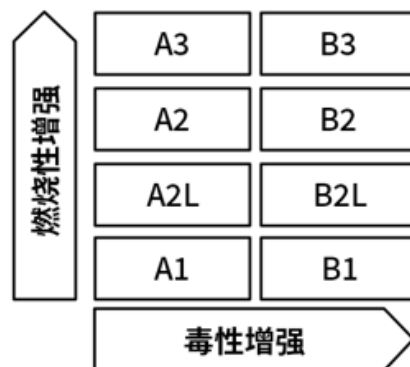
2021 年 9 月 15 日，《基加利修正案》对中国正式生效，中国的大气保护行动将再上一个台阶。中国政府高度重视履约工作，计划逐步采取一系列行动，逐步冻结并削减 HFCs 的生产使用：

- 一是将 HFCs 管控纳入国内法律法规体系。修订《消耗臭氧层物质管理条例》，启动调整《中国受控消耗臭氧层物质清单》和《中国进出口受控消耗臭氧层物质名录》，将 HFCs 纳入法律法规和《蒙特利尔议定书》履约工作管控范围。
- 二是将 HFCs 削减计划纳入《中国逐步淘汰消耗臭氧层物质国家方案》。开展 HFCs 数据收集分析和行业调研，研究提出 HFCs 未来实施削减的领域和路线图、政策管理措施。
- 三是建立和实施 HFCs 进出口许可证制度。联合有关部委启动 HFCs 进出口商品编码工作，开展国家消耗臭氧层物质进出口审批系统的扩容改造，将 HFCs 纳入审批系统。
- 四是研究出台三氟甲烷（R-23）管控政策。《基加利修正案》共管物质 18 种，其中 17 种作为商品生产和使用，R-23 是化工工艺过程中无意排放的副产物。中国将按照要求研究制定 R-23 管控政策，规范和指导相关企业的 R-23 控排工作。

至此，中国已构建起了一张全方位、立体化的政策网络，既包括国家层面的方案和规划，也包括对细分行业的具体指引，周密覆盖从 HFCs 使用管控、进出口管理到替代部署的各个环节。坚定不移推进制冷剂环保升级，走绿色低碳高质量发展道路的中国，将为全球应对气候变化做出新的贡献。

中国制冷空调行业常用制冷剂

标准 冷媒名	工质类型	工质类别	ODP	GWP (AR4 100 年)	安全等级
R-123	单一工质	HCFC	0.02	77	B1
R-134a	单一工质	HFC	0	1430	A1
R-22	单一工质	HCFC	0.05	1810	A1
R-32	单一工质	HFC	0	675	A2L
R-290 (丙烷)	自然工质	工业化学品	0	3	A3
R-404A	非共沸	HFC	0	3921	A1
R-407A	非共沸	HFC	0	2107	A1
R-407F	非共沸	HFC	0	1825	A1
R410A	非共沸	HFC	0	2088	A1
R-448A	非共沸	HFO	0	1387	A1
R-449A	非共沸	HFO	0	1397	A1
R-513A	共沸	HFO	0	631	A1
R-717 (氨)	自然工质	工业化学品	0	0	B2L
R-744 (CO2)	自然工质	工业化学品	0	1	A1
R-1234yf	单一工质	HFO	0	4	A2L
R-455A	非共沸	HFO	0	148	A2L
R-454C	非共沸	HFO	0	148	A2L
R-1233zd(E)	单一工质	HFO	0	5	A1
R-1234ze(E)	单一工质	HFO	0	<1	A2L



国家标准 GB/T7778-2017 中的安全等级说明

第三章 行业加速响应：新型环保制冷解决方案研究及应用进展

为响应国际组织和各国政府的顶层设计，同时也为了回应消费者对更加绿色环保产品的殷切期待，全球家用空调、工商业制冷和移动制冷行业积极推进新型环保制冷解决方案的研究和开发。人们逐渐认识到，在关键标准、环境、成本和能耗方面，没有“完美的”“一劳永逸的”最佳选择。在未来，采用不同工质和技术的解决方案可能会在不同的应用领域和地域成为主流，具体取决于地区形势、立法等的差异。

在新的解决方案不断涌现和向前发展的进程中，二氧化碳（CO₂）制冷解决方案在一些应用领域（如冷冻冷藏）的表现尤为引人注目——不仅仅是因为它直接消除了高 GWP 温室气体的排放，也因为随着组件技术、应用方法和设备性能的发展，它还正成为能

效的赢家，从而进一步减少了系统运行能耗导致的间接碳排放。投资成本高从前被认为是 CO₂ 制冷项目的早期挑战之一，现在人们发现，这些成本可通过长期运行所节省的能耗得到一定补偿。随着跨临界及亚临界 CO₂ 制冷解决方案的日趋完善，可以预见，它们将成为一些市场上的主流选择。

CO₂ 制冷解决方案在其适用范围内的优越性也在实践中得到了证明。近年来，随着国家鼓励绿色改造、相关标准出台以及一批示范项目的实施，被誉为当前“最环保制冷技术”的 CO₂ 制冷加速在我国冷库、商超等场景落地，显示出超越传统系统的节能减排效益。本章后半部分将结合实际应用案例对此做详细介绍。

选择绿色替代制冷剂应全面衡量综合考虑

绿色制冷剂替代是全球制冷行业面临的一项长期挑战。近年来，全球都在广泛组织开展替代制冷剂的研发、评价和应用推广工作。一般认为，理想的替代工质应该满足多方面的要求：

- 环境影响：消耗臭氧层潜值（ODP）为 0，全球变暖潜值（GWP）尽量小，对环境的综合影响小。
- 安全性：主要考虑毒性和可燃性。
- 经济性：除了工质本身的制造成本，还需考虑热工性能和配套设备的置换成本。

但很难有一种工质，同时满足上述所有要求。自然工质的 GWP 虽低，实际使用起来却面临高压、密封等技术挑战。一些碳氢化合物（HCs）工质的热工性能好，温室效应也较小，却有着极强的易燃易爆性。一些新开发的 HFO 类工质，在 GWP、安全性

方面都较为令人满意，单位容积制冷量却较小，价格也非常昂贵。

因此，并不存在一个恒定的“最优解”。一个项目应该选用什么样的制冷剂，应结合当地的具体政策、实施条件等，在全面衡量之后再决定。如何通过更先进的技术来为工质“扬长避短”，平衡环境效益、安全性和经济性之间的矛盾，也成为了未来替代制冷剂开发的主要任务之一。

在现实需求和技术挑战的驱动下，全球制冷行业都在不断进行下一代绿色替代工质的评估、论证和解决方案开发工作，并逐渐淘汰出了一些更为优越的选择。其中，自然工质里的佼佼者——CO₂，就凭借零 ODP、超低 GWP（GWP=1）以及更多优势走入业界的视野，成为新一代替代技术的主流方向之一。



CO₂ 与常用制冷剂的比较及优劣势分析

R744 (即 CO₂) 制冷剂属于纯自然物质, ODP 为 0, GWP 为 1, 安全等级为 A1, 无毒、不可燃, 大气中寿命极长, 是一种兼具良好环保性、安全性、稳定性的自然制冷剂。从热力学性能角度看, 其单位体积制冷量大、液体密度较大、黏度低, 这些都有利于减少系统管路和压缩机的尺寸, 提高换热器的效率。较好的市场可获得性进一步增强了其商用价值。因此, R744 在国内外制冷剂替代研究中一直被视为最具竞争力的工质之一, 也是未来行业发展的一个主流趋势。

制冷剂	R744	HFC	HFC	HFC	HFC	HCFC
	R744	R404A	R134a	R407A	R407F	R22
大气压力下的饱和温度	-78.5°C 干冰的温度	-46°C 饱和温度	-26°C 饱和温度	-41°C 中点饱和温度	-43°C 中点饱和温度	-41°C 饱和温度
临界温度	31°C	72°C	101°C	82°C	83°C	96°C
临界压力	73.8bar	35.7 bar	41.7 bar	45.2 bar	47.5 bar	49.8 bar
三相点压力	5.2bar	0.03 bar	0.005 bar	0.013 bar	TBC	< 0.005 bar
20°C饱和温度下的压力	57.2bar	10.9 bar	5.7 bar	10.2 bar	10.6 bar	9.1 bar
100 年 GWP (AR4)	1	3922	1430	2107	1825	1810
安全等级	A1	A1	A1	A1	A1	A1

R744 与常用高 GWP 制冷剂的基本特性比较

	R744	HFOs	HCs	R717
制冷能力	绿色	黄色	黄色	黄色
效率	绿色	黄色	黄色	黄色
压力	绿色	黄色	黄色	黄色
环境影响	绿色	黄色	黄色	黄色
可燃性	绿色	红色	红色	红色
毒性	绿色	黄色	黄色	黄色
制冷剂的可获得性	绿色	红色	红色	红色
零部件的可获得性	绿色	黄色	黄色	黄色
专业知识的可获得性	绿色	黄色	黄色	黄色
制冷剂的成本	绿色	红色	红色	红色
系统的成本	绿色	黄色	黄色	黄色

R744 与其他主流低 GWP 制冷剂的比较*

*黄色表示该制冷剂表现与 HFCs 相近

红色表示该制冷剂表现差于 HFCs

绿色表示该制冷剂表现优于 HFCs

来自艾默生报告 [CO₂ Product Guide 2021 for Refrigeration Applications](#)



从上表可以看出，R744 因其 GWP 仅为 1 的特性，在低碳环保方面远胜传统 HCFCs 和 HFCs，在安全可靠、制冷能力方面，也优于其他常用绿色替代制冷剂 HFOs、HCs 和 R717（氨）。当然，正如每一种制冷剂都有其优缺点，R744 同样也并不是完美的。全球领先的制冷解决方案提供商艾默生基于其多年在 CO₂ 领域积累的专业知识，提供对 R744 制冷剂的详细优劣势分析如下：

优势	劣势
<ul style="list-style-type: none"> • 单位体积制冷量大，制冷能力强（大约是 R404A 的 5 倍），这对压缩机排量以及热交换器和管道工程的尺寸有积极影响。 • 管道工程和热交换器的压降更低。 • 长吸气和液体管道的影响较小。 • 由于压力和密度高，蒸发器和冷凝器的传热很高，这将允许降低制冷剂和空气之间的温差以提高效率，或允许使用更小的蒸发器和冷凝器。管壁厚度可能需要增加以处理更高的压力，因此需要仔细设计以利用 R744 的特性。 • 膨胀阀上的压降比其他制冷剂大，所以压头控制的最小设置可以更低，这就提高了效率。 • 较低的压缩比导致了较高的压缩机等熵效率。 • 对大多数材料无腐蚀作用。与 HFC 系统中使用的材料几乎没有区别。 • 与压缩机润滑油有良好的混和性，可以回油。聚酯类润滑油可以继续使用，和 HFCs 一样。 • 毒性低且不可燃。 • GWP 可忽略不计，在发生泄漏的情况下，对气候变化的直接影响非常小。 • 生产成本低，可广泛获得，尽管 R744 的纯度应达到 99.99%，才能用于具有全封闭和半封闭压缩机的制冷系统。 • 由于压缩指数高，排气温度高，这为热量回收提供了良好的潜力。注意：在蒸发压力和排气压力相差较大的跨临界系统中，排气温度过高。 • 稳定的分子导致制冷系统内分解的可能性很低。 • 短期内未见有立法要求削减或淘汰 R744，可被视为一种可长期使用的制冷剂。 	<ul style="list-style-type: none"> • 高运行压力和静置压力带来更高危险性，增加了泄漏的可能性。部件需经过特殊设计。 • 由于更高的制冷量，需要特殊的压缩机（不同的马达/排量组合）。 • R744 系统更加复杂——要么是亚临界复叠系统，要么是跨临界增压系统。这导致了更高的部件成本和安装成本。 • 管道工程可能包括钢或不锈钢管道，需要专门的持证焊工；由于压力较高和材料不同，需采用不同的焊接技术。 • 更高的复杂性也增加了性能和可靠性差的概率，特别是在调试工作没有做好的情况下。 • 对于跨临界系统，由于 R744 的排气压力高，在低温冷冻应用时需要采用增压系统设计。 • R744 跨临界系统在温和气候条件下的能效表现优于在炎热气候条件下，因为在炎热地区这类系统主要是在临界点以上运行。采用并行压缩或引射器技术可以提高炎热气候下的能效水平，但也增加了系统的复杂性和总体成本。各厂家正不断投入研发，推出新技术以提高炎热气候条件下的能效表现。 • R744 不在现行法规（如欧洲 F-Gas 法案）的限控范围内，因此它的使用和泄漏检测都不像 HFCs 那样受到严格监管。然而，高压使系统容易发生泄漏，如果泄漏率高，性能就会受到影响。 • 对水污染非常敏感，当复叠式热交换器中出现泄漏时，会形成不寻常的化合物。

来自艾默生报告：[CO₂ Product Guide 2021 for Refrigeration Applications](#)

艾默生同时指出，尽管看起来 R744 制冷剂的缺点似乎比优点少，但这些缺点同样不容忽视，因为它们对 R744 系统的安全性和可靠性有着很大的影响。这其中，尤为值得注意的，有以下两个问题：

高临界压力和低临界温度为压缩机设计带来技术挑战

CO₂ 的临界压力较高 (73.8 bar)，临界温度较低 (31°C)，这就对压缩机和换热器等关键部件的设计提出了较高要求。开发高性能的 CO₂ 压缩机，提高 CO₂ 在气体冷却器及微通道换热器中的传热性能，因此成为决定其应用推广的关键。

CO₂ 制冷系统在炎热气候条件下的能效问题

与其他制冷剂相比，CO₂ 系统的效率与气候更为相关。在跨临界 CO₂ 制冷设备最为普及的北欧地区，由于当地的平均环境温度较低，CO₂ 系统的总体效率和能效比与 HFCs 系统相当。在炎热地区，系统能效比则迅速下降。为此，世界范围内都在不断研发新技术，以提升 CO₂ 系统在高环境温度下的能效水平，逐渐消除 CO₂ 能效“赤道线”，推动 CO₂ 系统应用从寒冷区域拓展至较为炎热的区域（例如我国南方地区）。

目前行业内已获应用的技术主要有并行压缩 (Parallel Compression) 技术、引射器 (Ejector) 技术、机械过冷 (Mechanical Sub-cooling) 技术、蒸发式冷却器 (Adiabatic Gas Cooler) 技术，热回收技术、满液式蒸发器以及艾默生创新研发的动态喷气增焓 (Dynamic Vapor Injection, DVI) 技术。

艾默生 DVI 技术简介

艾默生融合了 DVI 技术的全新系列跨临界 CO₂ 制冷解决方案，即使在炎热气候条件下也能高效连续运行，在环境温度高达 44°C 时仍能保证可靠制冷。与并行压缩或引射器技术（虽能提高炎热气候下的效率水平，但也增加了系统复杂性和总体成本）相比，艾默生 DVI 技术通过喷射阀将闪蒸气体从经济器或闪蒸气罐直接喷射到涡旋压缩机内部，从而消除了并行压缩的需要，降低了系统设计的复杂性，同时保持了高效能。此外，通过省去并行压缩系统，如并联压缩机及配套的变频驱动或者管路等，系统仅需要保留少量的部件，因此也就降低了全生命周期成本，包括投资和运维成本。

降低制冷系统的能耗，也是出于进一步节能减排的现实需要。UNEP/IEA 《制冷系统排放和政策综合报告》将提高系统能效置于与制冷剂绿色替代并重的地位，指出：在采用低 GWP 制冷剂的同时，如果提高制冷设备的能效，可使气候变暖缓解效果增加一倍以上；如果全球采取协调一致的行动，推动实现节能和气候友好型制冷转型，未来 40 年可避免 2100-4600 亿吨温室气体

排放——以 2018 年全球排放水平为参考值，相当于 4-8 年的全球排放量。

CO₂ 制冷系统分类及适用范围简介

CO₂ 制冷系统主要分为三大类：

- 跨临界增压系统：纯 CO₂ 系统，中温低温全部采用 CO₂ 制冷剂
- 亚临界复叠系统：混合系统，中温采用 HFC/HFO 等环保制冷剂，低温采用 CO₂ 制冷剂。
- 二次回路系统：载冷系统，主回路采用 HFC/HFO 等环保制冷剂，中温 / 低温采用 CO₂ 作为载冷剂。

三种系统各有其优劣势，适用于不同的应用范围：

	优势	劣势
跨临界增压系统	单一制冷剂，纯自然工质；换热效率高，系统压力高，零部件成本高；低温应用需要双级蒸发器小；在较冷气候区域应用时，其系统能效高	系统压力高，零部件成本高；低温应用需要双级系统；在温暖气候区域应用时，其系统能效较低；
亚临界复叠系统	复叠的两套系统较简单低温二氧化碳系统压力不是太高，与空调系统 R-410A 相当，很多部件可以与 HFC 系统通用，成本低；中温系统可以采用 HFC, HFO, HC 等环保制冷剂；在温暖气候区域应用，系统能效高；	两种制冷剂，非纯自然工质；复叠换热器的换热温差会导致低温系统的能效略微下降；中温/低温系统相互关联，如有故障会影响到整体运行；
二次回路系统	高效利用二氧化碳潜热；主回路可以是简单冷水机组系统，可采用 HFC, HFO, HC 等；系统运用压力基本无波动；	额外换热器及换热温差导致性能略微下降；需要专门二氧化碳液体泵，安装费用较高；技术人员对二氧化碳液体泵的知识了解程度低。

CO₂ 制冷系统在众多场景具备广阔应用潜力

低碳环保、安全稳定、良好可获得性，再加上关键部件和能效技术的进步，使 CO₂ 成为 21 世纪的理想工质之一，展现出广阔的应用前景。根据联合国环境规划署（UNEP）的推荐，CO₂ 作为零 ODP 值、低 GWP 的绿色替代制冷剂，适用于食品零售、自动售货、大型超市、冷库、冷链物流、工业制冷、空调等广泛的领域。

IPCC 报告也指出，在商业制冷领域（常用 R-22，R-404A 和 R-134a），使用包括 R744（CO₂）在内的低 GWP 制冷剂，并通过新的系统设计全面提升能效，是重要的减排机遇之一；在食品加工冷藏和工业制冷领域（常用 R-717 氨和 R-22），CO₂ 和氨/CO₂ 复叠系统会逐步用于蒸发温度低于或等于 -40°C 的应用；在车

用空调领域，R-744 是替代 R-134a 的两种主要选择之一。可持续采购领导委员会（SPLC）在 2021 年发布的《关于气候友好型制冷剂管理和采购的建议》中指出，目前，在美国的商业制冷系统应用中，CO₂ 正被用作主流制冷剂，跨临界 CO₂ 系统广泛用于大型超市，而且美国 EPA 已将包括 R744 在内的几种低 GWP 制冷剂列为可用于大型工商业空调冷水机组。

在制冷剂替代更早更快的欧洲，CO₂ 制冷由于具有优良的传热性能和流动特性，且对食品无污染，往往成为新建超市的首选。德国、丹麦、挪威、瑞典等北欧多国的新冷链设施几乎都采用 CO₂ 制冷剂，新开张的便利店和加油站也正在扩大 CO₂ 制冷剂的使用。



现有应用案例展示出 CO₂ 制冷的巨大潜力

在 2021 年 12 月起施行的中国国家标准《冷库设计标准》(编号 GB50072-2021) 和《冷库施工及验收标准》(编号 GB51440-2021) 中, 在很多应用场合, 如大中型冷库中, 均推荐使用 CO₂ 作为制冷剂 and 载冷剂。在政策对制冷绿色改造及制冷消费绿色升级的大力鼓励下, CO₂ 制冷剂的落地推广进展迅速。从亚临界到跨临界, 不同类型的 CO₂ 制冷系统, 都已在中国获得了成功应用。本节选取了一些具有重要示范价值的应用案例, 以展示 CO₂ 制冷的真实绩效和环境收益。

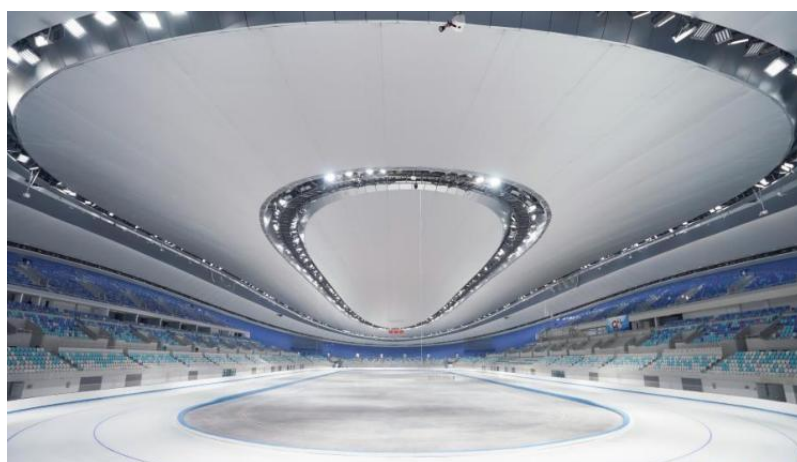
具有重大引领示范作用的国家级案例: 冬奥会速滑馆

北京 2022 冬奥会标志性场馆——国家速滑馆是全球首个采用 CO₂ 跨临界制冷的冬奥大道速滑场馆, 装有中国目前最大的 CO₂ 跨临界制冷系统, 艾默生为该系统提供了关键油路管理部件支持。

据报道, 国家速滑馆的冰面面积约 1.2 万平方米, 而国际上应用 CO₂ 跨临界技术的冰场一般在 1800 平米左右。面积如此巨大的“超级”冰场, 在全世界尚属首例。采用当前最先进、环保、高效的 CO₂ 直冷技术, 使系统的综合能效比 (COP) 相较传统系统显著提高。制冷过程中产生的大量高品质余热还可回收复用, 用

于场馆的热水、浇冰、除湿等场景, 每年节电高达 200 万度。项目前期建设增加的投资, 很快会从未来运行减少的能耗中得到补偿。

在冬奥会上的大放异彩, 使国家速滑馆成为了未来同类项目的标杆, 其 CO₂ 跨临界系统的突破性应用, 率先为全球做出了环保和可持续的示范。经过这一规模首屈一指的国家级项目的验证, 可以预计, 未来 CO₂ 制冷解决方案将会在中国乃至世界加速推广开来。



国家速滑馆

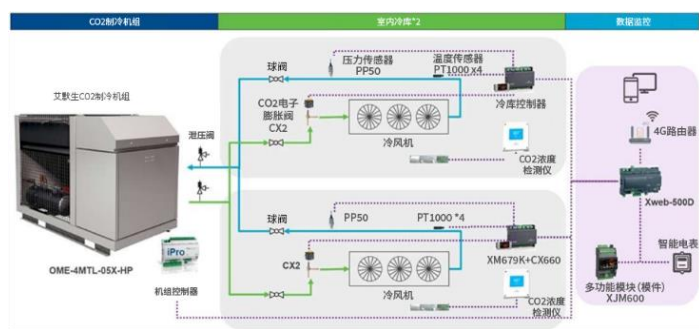
行业案例：艾默生跨临界 CO₂ 制冷系统应用于餐厅冷库

项目简介

2022 年 2 月，艾默生与某全球知名家居零售商成功合作，配合其中国餐厅冷链系统冷媒绿色环保提升计划，为其在中国某地门店的西餐冷库和冷菜冷库，完成了跨临界 CO₂ 系统的安装和调试。

项目运行期间，天津商业大学作为我国冷冻冷藏领域最具科研实力和行业影响力的学术机构之一，同时也是艾默生在 CO₂ 制冷领域的长期校企合作伙伴，对本项目中所采用的系统进行了运行监测和数据分析（[分析结果请见后文](#)），以对跨临界 CO₂ 中温制冷机组的落地应用进行测试，同时探索更适合中国乃至亚洲的 CO₂ 制冷技术发展路线。

在该项目中，由一台 5HP 跨临界 CO₂ 制冷机组为两个中温冷库提供冷量，两个冷库并联且独立控制。艾默生还为该店面安装了数据采集系统，可实现在线查看和获取数据，包括室外机组侧的运行参数、冷库侧的控制效果以及独立耗电量。



运行系统图

机组位置、主电源及管道走向

· 机组安装在商场楼顶原机组平台，利用管道井走管

· 电源需要百米左右接线，需要使用电缆



具体安装项目包括：

- 制冷机组：OME-4MTL-05X-HP 1 台
- 冷风机：BMT139H2C 2 台
- CO₂ 电子膨胀阀：CX2 2 套
- 库温控制器：XM679K+CX660：2 套
包括压力温度传感器：PP50、PT1000
- CO₂ 浓度探测及报警器：2 套
- 电柜及控制箱：1 套
- Xweb 500D 控制器
- 智能电表、4G 路由器
- 不锈钢管路及电气线缆

现场图示

系统采用远置式的形式，将压缩机、风冷气体冷却器、闪发罐、高压阀和旁通阀等部件集成到一个机组当中，安装于室外楼顶，通过制冷管道，与位于中温冷藏库的蒸发器连接起来，形成整个制冷系统。

室内设备及智能电箱



以上图片均来自艾默生与天津商业大学测试报告

主要部件介绍

压缩机

根据中温冷藏库需要的制冷量，选取了艾默生 Stream 系列 CO₂ 半封闭活塞压缩机，额定功率为 5.0HP，排气量为 4.9m³/h，设计最高压力为 13.5MPa，对制冷剂流量和换热都进行了优化设计。压缩机配有 CoreSense™ 诊断技术模块，可以更快地诊断系统相关问题，甚至可在问题出现前及时发现。该系列压缩机是中温跨临界应用,以及低温亚临界侧应用中高静置压力(吸气压力 90bar)系统的理想之选。

蒸发器

根据中温冷藏库的制冷负荷以及冷库需求温度，蒸发器选取了风冷翅片管式，选择了 CO₂ 专用蒸发器型号-BMT139H2C，设计压力高达 80bar。气体冷却器配有 EC 风机，风机输入功率为 280W。

数据采集箱

系统采用 XWEB 和 XJM60D 数据采集器进行实时运行数据的采集和记录，采集信息主要包括系统温度、压力以及功率等实时运行数据。

冷库库温控制箱

系统采用 XM679K 控制器对冷库的实时温度、蒸发温度、过热度以及化霜进行控制，保证系统安全可靠运行。

CO₂ 浓度检测仪

CO₂ 浓度过高的的话会导致人员窒息，为了保证人员安全，在冷藏库安装了 CO₂ 浓度监测仪，当冷库内 CO₂ 浓度高于 5000ppm 时，浓度检测仪会发生报警。

运行数据分析

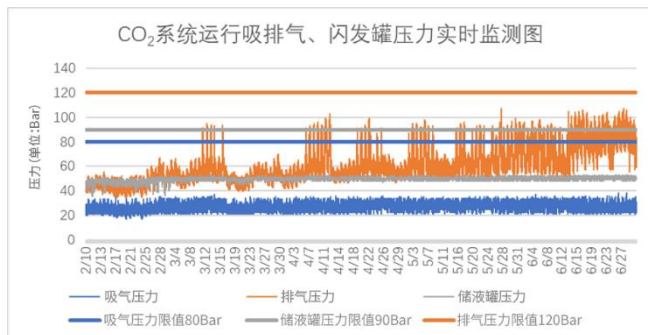
天津商业大学作为第三方机构，以该项目 2 月 10 日-6 月 30 日运行数据为基础，通过数据处理，对系统的运行压力、能耗以及系统性能进行了分析。本小节简录其分析结果如下。

安全运行压力管理

系统压力的控制对跨临界 CO₂ 制冷系统十分重要，因为系统配件、管路系统、备用工具等都与系统压力息息相关。为保障系统安全可靠运行，系统各个部件运行的压力不能超过部件可承受的最大工作压力，以防止造成损坏。本设备通过一个高压调节阀控制气体冷却器出口的压力，通过另一个闪发罐压力阀（也叫介质压力调节阀或闪气阀）来控制闪发罐内制冷剂和相关液体分配管道工作的压力。

本次运行时间从 2 月 10 日到 6 月 30 日，期间最高环境温度已经达到了 36°C，压缩机吸气、排气压力及闪发罐压力均未超过最大压力限制，泄压阀无动作，说明该系统压力是在安全控制范围内的。

从下图可以看出，在运行期间，压缩机平均吸气压力为 26bar，最高吸气侧压力为 38bar，未超过最大吸气压力 80bar。压缩机在炎热环境下的最高排气压力为 107bar，未超过最大排气压力 120bar。闪发罐平均压力为 49.6bar，最高压力为 53bar。随着环境温度的升高，气体冷却器出口温度高于 26°C 时，排气压力高于 74bar，系统进入跨临界模式运行。

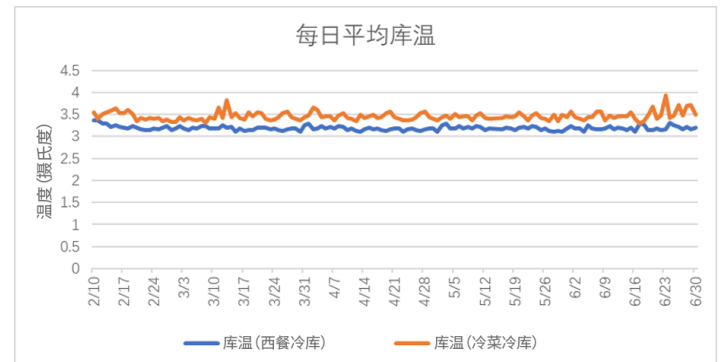


库温控制效果

两个冷库均安装了回风温度探头，回风探头所测得的温度是包含除霜升温后的温度，比实际库温略高。

从以下的每日平均库温图可以看出，库 1 在 2 月 10 日-6 月 30 日的平均库温为 3.19°C，最高库温为 3.36°C，最低库温为 3.1°C；库 2 在同期的平均库温为 3.46°C，最高库温为 3.93°C，

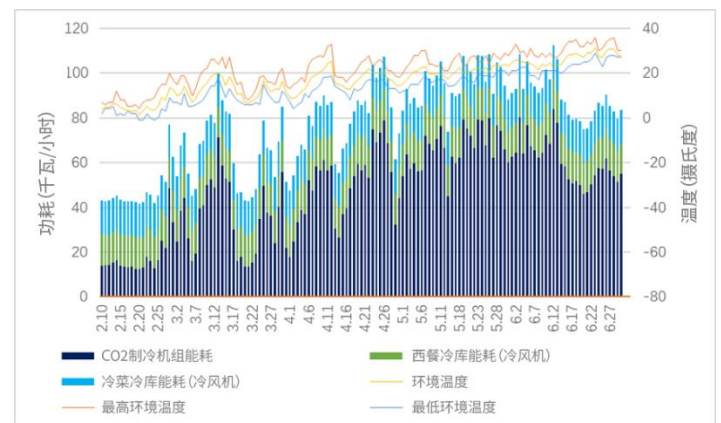
最低库温为 3.3°C。两个冷库的温度波动分别为 0.26°C 和 0.63°C，可以满足冷库的冷藏需求，且运行稳定。



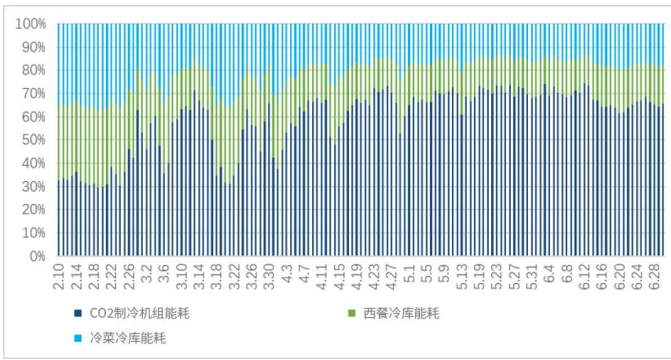
能耗分析

系统能耗可分为三部分，包括机组（压缩机和风机等部件）总能耗和两个末端冷风机能耗等，机组总能耗和两个末端冷风机能耗可由电表采集分别获得。

以下二图分别展示了系统各部分能耗和占比情况。从中可以看出，环境温度对机组能耗有显著影响，测试期间平均用电量为 48kW·h/天。西餐冷库和冷菜冷库的末端冷风机一天的能耗分别约为 14kW·h 和 15kW·h 左右。由于冷风机是一直连续运行的，耗电量基本稳定，平均占总能耗的 48%，最高能占到 70%。



系统各部分每日能耗



系统各部分每日能耗占比

以上图表及数据均来自天津商业大学《CO₂ 跨临界冷凝机组应用白皮书》

项目小结

天津商业大学通过现场测试，对跨临界 CO₂ 机组制冷系统实际运行情况进行监测，分析并研究了机组运行特性、制冷性能以及优化分析，得出主要结论如下：

1. 连续运行分析表明，该系统可以有效地把库温控制在 2~4℃以内，库温波动也很小。系统压力一直低于 120bar，可以安全正常地运行。系统的吸气压力比较稳定，为 26bar 左右，对应的饱和蒸发温度为 -10.6℃。系统进入跨临界后，压缩机排气温度迅速升高，最高可达 133℃，但低于 150℃，不会导致润滑油碳化，不会影响系统安全。当闪发罐压力高于 50bar 时，达到旁通阀开启压力，闪蒸气体被旁通到压缩机吸气口，与蒸发器出口的制冷剂混合，使得压缩机吸气温度低于机组回气温度，在一定程度上可以降低压缩机排气温度。

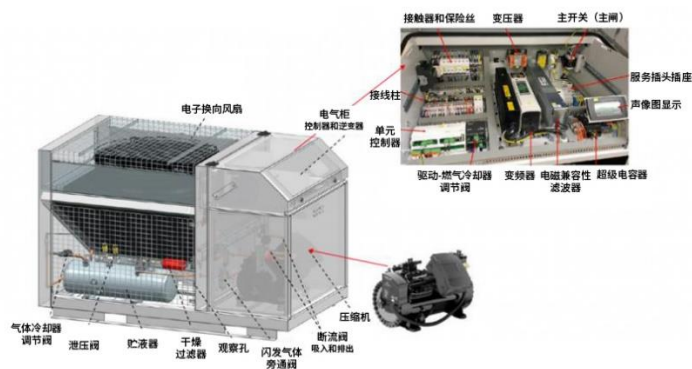
2. 当制冷负荷较小时，由于两个冷风机的风机全天运行（除霜时间除外），导致两个蒸发器末端能耗较大。随着制冷负荷的增加，制冷量逐渐增大，机组的能耗也逐渐增加，冷风机能耗基本不变。

艾默生认为，本项目成功呈现和验证了跨临界 CO₂ 制冷系统在餐厅冷库的可靠应用。所搜集的跨临界 CO₂ 制冷相关实际运行数据，为分析适合中国及亚洲地区的跨临界 CO₂ 制冷机组技术，以及艾默生在中国推广跨临界 CO₂ 制冷提供了有益借鉴。



附：艾默生 CO₂ 制冷解决方案简介

上述项目所采用的艾默生跨临界 CO₂ 制冷解决方案是一套面向未来的创新型绿色制冷方案，专为使用低 GWP 自然制冷工质 CO₂ 而设计。解决方案采用 Stream 系列压缩机，其特点是安静可靠运行；集成的变频器可根据实际冷量需求，精确控制压缩机的速度；EC 风扇可以安静高效的方式带走气体冷却器中的热量；先进的电子控制器允许精确调控所有相关参数，并包括许多电子保护功能，以实现高度可靠的运行。在国际范围内，该解决方案已在超市、农场、食品加工、冷库等领域积累了一批成功应用案例。



艾默生谷轮™ 跨临界 CO₂ 制冷机组

解决方案适用于多种应用场景：

- 便利店
- 冷库
- 前院场地
- 快餐店、酒吧和餐厅

更多优势包括：

绿色低碳
- 制冷剂 GWP=1

即插即用
- 工厂预设参数

结构紧凑 & 节省空间

极好的可维护性
- 顶部可翻开的舱盖便于控制和操作

可靠性好
- 高质量元器件，完善出厂测试
- 低的压缩机带油率
- 电子油位保护
- 先进自控保护

低噪音
- 压缩机仓消声措施
- 采用低噪音/少震动的 CO₂ Stream 压缩机
- 采用低噪音 EC 风机

先进的电子控制
- 先进的电子吸气和气体冷却器控制
- Modbus 通讯接口、可与上位机双向通讯、实现智能控制
- 报警历史&实时时钟

行业案例：艾默生二氧化碳亚临界复叠制冷应用于商超行业

项目简介

2017年，为配合环保部对自然工质制冷在超市行业的应用示范，安徽省徽商红府连锁超市携手艾默生商住解决方案公司及其合作伙伴，共同打造完成了其“绿色低碳二氧化碳制冷技术示范店”项目，成为CO₂制冷系统在内资超市的首次落地。该项目由联合国开发计划署和环保部联合牵头，并获得了蒙特利尔议定书多边基金的资助。

示范门店营业面积约5700平方米，其中生鲜面积约1500平方米。中温冷柜及冷库共21个，低温冷柜及冷库14个。整个项目于2017年9月投入运营，艾默生为其提供了CO₂制冷整体解决方案。上线五年来，系统运行平稳可靠，有效降低了全年碳排放和耗电量。

因项目在节能减排方面的出色表现，该门店被联合国开发计划署授予“二氧化碳制冷示范超市”荣誉；凭借在CO₂制冷方面的过硬技术和成功经验以及在此次示范店建设中的出色表现，艾默生亦被授予“二氧化碳制冷示范项目设备商”荣誉。

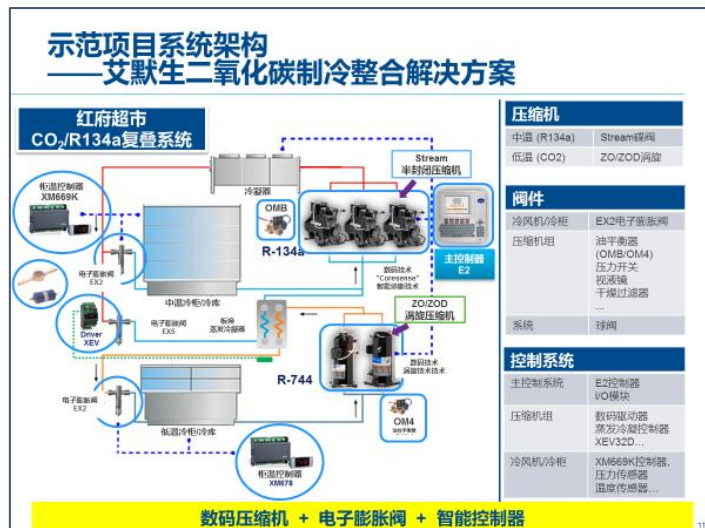


艾默生为本项目提供的设备一览



艾默生解决方案图示及红府超市实景图

红府超市及艾默生获联合国表彰殊荣

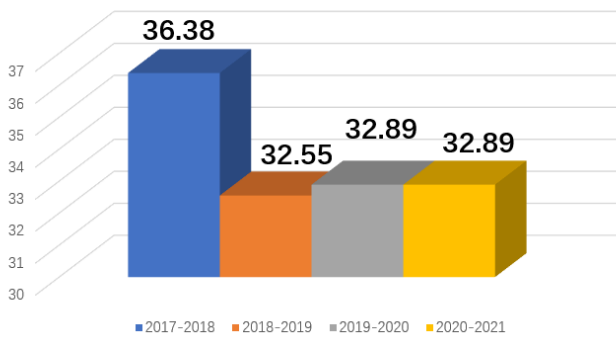


项目运行监测数据及成果分析

能效分析

自 2017 年 8 月份改造后至今，艾默生一直对其制冷系统的运行状态进行监测，并根据实际使用特点不断进行系统设定优化和调整。根据汇总年度报告来看，优化后系统每年节约能耗约 36,000 kWh，并且随时间推移无明显能效衰减。

根据第三方检测机构国家商用制冷设备质量监督检验中心 2018 年 8 月检测报告显示，红府 R134a/CO₂ 复叠制冷系统，综合能效 1.14，相对比同期检测的其他商超门店 R22 及 R404A 制冷系统，CO₂ 系统 COP 能效高约 12.9%。



根据目前中国碳排放交易所采用的电网排放因子 0.6101tCO₂/MWh 估算，仅红府超市中心广场店此次制冷系统改造带来的节能因素降低的碳排放为 21.96 吨/每年，若计入 CO₂ 绿色制冷剂本身的温室效应作用，节能减排效果将更加显著。

减排及环保效果分析

消耗臭氧物质彻底消除：CO₂ 的臭氧消耗潜值 (ODP) 为 0，对臭氧层损耗无影响，完全消除了改造前使用的 R22 制冷剂对大气臭氧层的破坏。

项目	改造前	改造后
使用制冷剂	中温	R22(GWP=1810)
	低温	R22(GWP=1810)
ODP	0.05	0
对臭氧层损坏影响	有	无

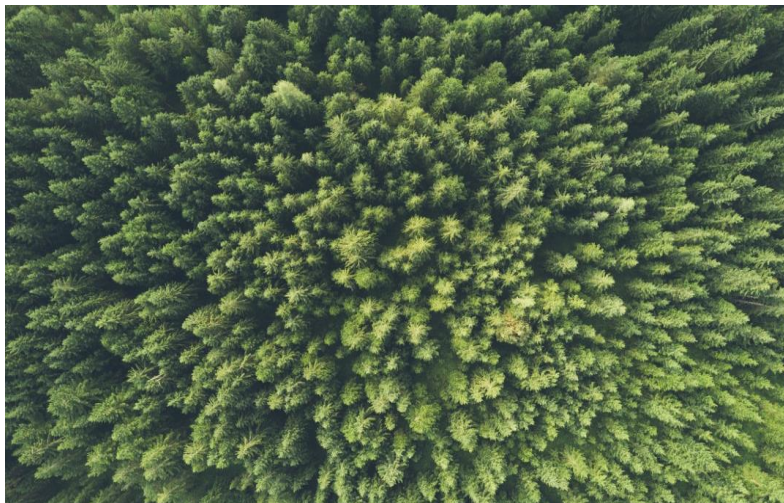
以上图表及数据均来自艾默生

稳定性分析

根据长期实时监测数据，冷柜柜温控制精确稳定，整套 R-134a/CO₂ 复叠制冷系统运行压力稳定，没有出现 CO₂ 压力超标导致机组安全阀动作的现象。据现场测定，采用数码无级调节技术后，压缩机启停次数大大减少，实现控温精确、运行节能、延长压缩机寿命等效果。

项目小结

本项目应用艾默生亚临界 CO₂ 复叠制冷解决方案，通过领先的 CO₂ 技术使能效提升 12.9%；通过额外的综合节能技术，每年为门店节能约 36,000kWh，每年二氧化碳减排约 22 吨；通过采用先进的数码无级调节技术和智能控制系统，实现了系统运行压力稳定，柜温控制精确，压缩机启停减少和蒸发温度优化。总体看来，本项目为超市业主提供了一套可靠、环保、节能的绿色解决方案，为行业内使用绿色制冷剂技术展现了杰出的示

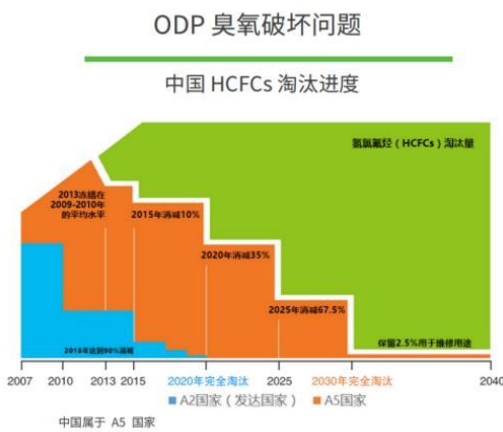


第四章 未来展望：低 GWP 是发展趋势，但制冷剂替代是漫长的旅程

前路长远，前景广阔

在基加利修正案履约要求，以及“双碳”政策的大力推动下，中国冷冻冷藏行业制迎来了新一轮制冷剂替代浪潮。目前，行业正大力淘汰广泛使用的 R22、R123 等 HCFCs 制冷剂（其生产和消费均受配额限制），向 2030 年完全淘汰的目标迈进。HFCs 制冷剂在中国已进入配额基准期（2020-2022 年），2024 年将正式冻结。

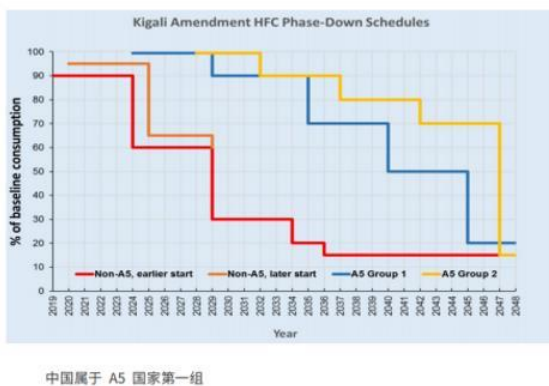
基加利修正案下的中国淘汰进程表



来自中国生态环境部《中国制冷空调行业制冷剂替代政策及进展》

GWP 全球变暖问题

中国 HFCs 削减进度



来自联合国环境规划署 HFC Baselines and Phase-down Timetable

对标欧美日等成熟市场来看，传统高 GWP 制冷剂正在加速淘汰，取而代之的有低 GWP 的 HFO 制冷剂，也有更加环境友好的 CO₂ (R-744)、丙烷 (R-290) 等自然工质制冷剂。简言之：发达国家走过的升级路线依次为：CFCs → HCFCs / HFCs → 新型 HFO 制冷剂或自然工质 (CO₂、碳氢化合物等) 制冷剂。其中，以 CO₂ 为代表的自然工质，越来越受到国际社会的关注和期待。

目前，CO₂ 制冷系统在欧美日等发达经济体已具有一定的规模。尤其是在欧洲市场，在 F-Gas 法案的严格限定下，各行业积极采用更加环境友好的 CO₂ 自然工质替代技术。

在中国等发展中国家，这一技术还有待普及，限制其推广应用的原因往往在于：

- CO₂ 制冷系统的技术条件要求高
- 初期投资较大
- 运行压力较高
- 系统对安装、操作和维护人员素质要求相对较高
- 企业缺少替代意识和制冷剂精细化管理手段
- 相关法规、政策、标准尚不健全

从历史经验来看，每一代制冷剂的升级换代，都是一个漫长的过程。生态环境部报告指出，一种制冷剂从开始淘汰到完全淘汰，一般需要 20 年的时间。在此期间，成本、技术、人员方面的挑战，都会使企业面临一定压力。因此，虽然转向低 GWP 制冷剂最终目标，但受制于种种现实因素，中国企业可能还需在使用 HFCs 的过渡期徘徊一段时间。

道路虽然长远，前景的广阔给予我们充分的信心。更令人欣喜的是，各方正不断发挥力量，推动愿景变为现实：近年来，中国制冷监管政策日臻完善，并逐步健全相关标准体系，就工商业制冷而言，先后完成了 GB9237 安全标准的修订，以及一些产品标准的修订，包括 CO₂、NH₃ 的产品标准和 CO₂ 冷库标准等；行业方面，管理体系、技术研发和人才培养也在不断进步。

种种动向表明，中国冷冻冷藏设备大规模转向新一代低 GWP 制冷剂只是时间问题。随着“30·60”目标和基加利修正案所规定的时间节点渐次到来，满怀期待的中国制冷产业、客户和终端消费者，都将迎来一个更加绿色低碳的美好明天。

艾默生为行业落实“双碳”目标贡献力量

作为协助开创环保制冷技术的全球性企业之一，艾默生长期致力于使其国际领先的技术、设备和专业知识在中国落地生根，同时凭借其在全球市场和前沿科技领域的深厚积淀，赋能中国本土人才培养和创新，携手客户、行业伙伴和研究机构，共同助力中国制冷产业的绿色升级。

持续投资，加快 CO₂ 技术的本土开发及应用

自 2002 年落户苏州以来，艾默生苏州研发中心已经走过了 20 年的历史。20 年来，中心在创新与开拓中不断成长，在亚太地区新型谷轮™涡旋压缩机的开发中发挥了重要作用。2019 年升级蜕变为“艾默生苏州研发与整体方案中心”后，更是进一步跃升为艾默生全球研发网络的中坚力量，不仅为中国和亚太、中东地区的空调、供暖及制冷领域的客户提供技术支持，也增强了艾默生在绿色制冷剂方面的研究、开发和测试能力。



艾默生研发及整体方案中心：
从概念到生产的全功能性研发中心

在 CO₂ 制冷方面，艾默生研发及整体方案中心配有 CO₂ 跨临界增压系统、CO₂ 亚临界复叠系统和 CO₂ 跨临界中温制冷机组，以支持研究团队的前沿探索。并设置客户体验和培训区，为客户提供交互式技术体验和培训支持。在中心开展的一系列活动，使艾默生能够以创新的方式联动客户和更多合作伙伴，共同推动 CO₂ 制冷技术的发展和推广。

CO₂ 亚临界复叠系统



CO₂ 跨临界增压系统



CO₂ 跨临界中温机组



校企合作，赋能本土人才培养和创新

艾默生积极与高校合作，通过校企携手、产教融合，落实行业人才培养和绿色制冷剂研发。2021年，艾默生与天津商业大学达成合作，结合艾默生作为制冷领军企业的技术实力和天津商业大学在冷冻冷藏领域的专业力量，开展CO₂制冷系统测试及技术调研研究，探索更适合在亚洲应用的CO₂冷凝机组技术发展路线。当前，双方还正共同探索建立绿色制冷剂（CO₂）应用技能提升实训基地及研究生校外实践基地，为制冷行业的未来发展培养优秀人才。

多元行动，做行业发展的支持者和贡献者

作为制冷空调行业“碳达峰、碳中和”工作领导小组副组长成员，艾默生积极发挥自身在行业的影响力，为制冷行业绿色转型升级发挥示范引领作用。同时，艾默生长期参与行业标准与规范的编制和修订，并积极分享全球经验和最佳实践，参与编写了《中国制冷空调产业发展白皮书》等深具影响力的行业报告。

在中国，为中国，是艾默生始终不变的坚定承诺。扎根中国40多年来，艾默生见证了中国制冷行业的飞跃发展。如今，随着行业向更加绿色低碳、节能高效的下一阶段进发，艾默生也将以此为契机，继续深化其投资、技术和人才本土化战略，使其领先的产品和解决方案更好地融入到行业发展中，为中国“双碳”目标的实现和全球应对气候变化，贡献更多来自中国的智慧和力量。



艾默生与天津商业大学达成多项合作项目签约及揭牌仪式

结语

从 1977 年人类首次发现臭氧层空洞，进而发现 CFCs 是破坏臭氧层的主因之一，到今天 CFCs 早已彻底淘汰，而南极上方的空洞也已明显修复，制冷剂替代一直位于气候行动的最前沿。

现在，随着全球变暖趋势加剧，制冷行业面临新的挑战：从零 ODP 但高 GWP 的 HFCs，转向低 GWP 的新一代绿色环保制冷剂。

正如我们在前文所提到的，这个过渡将会是漫长的旅程。然而，纵观全球几十年来不断向更环保的下一代制冷剂进发的历程，特别是中国在制冷剂升级之路上所取得的巨大成就，我们有理由相信：这一次的战役，人类也必将取得胜利，而且这胜利并不遥远。

在制冷领域，艾默生一直致力于寻找高性能、更环保的解决方案。旗下谷轮™ (Copeland™) 品牌创立百年来，已成为节能、可靠压缩机设计的代名词，它持续为空调和制冷系统提供强大动力，以改善人们的工作生活环境。

如今，艾默生将其引以为豪的压缩机技术与自然工质 CO₂ 相结

合，为全球客户提供可持续的替代方案，帮助他们完成向低 GWP 制冷剂的转型，以实现可持续发展目标，领先一步达到未来的合规要求。

这项努力体现了艾默生的公司宗旨：我们推动创新，使世界更健康、更安全、更智能和更具可持续性。

我们也深知，制冷剂绿色替代是一项跨越全球地域和众多行业的宏伟挑战，需要政府制定适宜的政策和战略，需要科研机构提供学术资源支撑，需要行业积极配合统筹行动，也需要来自终端消费者的热情响应。

在此过程中，艾默生愿凭借我们的谷轮™ 品牌和创新方法，凭借我们在行业的领导地位和深厚积淀，尽献来自一家企业的一臂之力。

为了让我们及后代能继续生活在今日所看到的美好世界，让我们携手努力。



参考文献

- [1] 世界气象组织 (WMO), WMO 最新通报: 未来五年全球气温暂时达到 1.5°C 阈值的几率为 50: 50
<https://public.wmo.int/zh-hans/media/%E6%96%B0%E9%97%BB%E9%80%9A%E7%A8%BF/wmo%E5%8F%91%E5%B8%83%E6%8B%89%E4%B8%81%E7%BE%8E%E6%B4%B2%E5%92%8C%E5%8A%A0%E5%8B%92%E6%AF%94%E5%9C%B0%E5%8C%BA%E6%B0%94%E5%80%99%E7%8A%B6%E5%86%B5%E6%8A%A5%E5%91%8A>
- [2] 界面新闻, 2050 年全球空调数量或增长 2.5 倍, 制冷行业成为气候变化领域的“大象”
<https://www.jiemian.com/article/2724857.html>
- [3] WMO, WMO 温室气体公报, 第 17 期, 2021
- [4] 中国气象局气候变化中心, 中国温室气体公报, 第 1 期, 2012
- [5] 政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 和技术与经济评估专家组 (TEAP), IPCC/TEAP 特别报告: 保护臭氧层和全球气候系统: 与氢氟化物和全氟化碳相关的问题, 2005
- [6] IPCC, 第四次评估报告 (AR4), 2007
- [7] 联合国环境规划署 (UNEP) 和国际能源署 (IEA), Cooling Emissions and Policy Synthesis Report: Benefits of cooling efficiency and the Kigali Amendment, 2020
- [8] IPCC, 第六次评估报告 (AR6) 第三工作组报告 Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change, 2022
- [9] UNEP, 保护臭氧层维也纳公约缔约方大会第十一次会议和关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书缔约方第二十九次会议联合会议报告, 2017
- [10] UNEP, 关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书缔约方第二十八次会议报告, 2016
- [11] 中国连锁经营协会, 超市绿色应用冷链技术实施手册, 2018
- [12] 北京大学环境科学与工程学院, 《基加利修正案》基线与控制情景和相关电力需求预测, 2018
- [13] 中国制冷空调工业协会, 中国工商制冷空调行业 HFCs 制冷剂使用趋势研究报告, 2014
- [14] 中国生态环境部固体废物与化学品管理技术中心, 《蒙特利尔议定书》受控物质制冷剂回收再用管理模式研究报告, 2022
- [15] Alex Hillbrand, EPA Kicks Off HFC Phasedown Under Brand New AIM Act
<https://www.nrdc.org/experts/alex-hillbrand/epa-kicks-hfc-phasedown-under-brand-new-aim-act>
- [16] 经贸透视, 拜登政府通过新方案落实逐步淘汰氢氟碳化物 (HFCs)
http://www.chinaiol.com/News/Content/202109/46_31934.html
- [17] 联合国官网, 【专题报道】领导人气候峰会: 40 多国领导人作出承诺 联合国再次呼吁“奔向零碳”
<https://news.un.org/zh/story/2021/04/1082682>
- [18] Ammonia, 美国颁布《新冠纾困法案》下的氢氟碳化物削减法案
http://www.ozone.org.cn/gidt/202102/t20210201_819752.html
- [19] 北京大学环境科学与工程学院, 管控 HFC 政策法规 (研究报告), 2018
- [20] 中国国务院, 关于印发“十四五”节能减排综合工作方案的通知, 2021
- [21] ASHRAE, ANSI/ASHRAE Standard 34-2010, 2010
- [22] 艾默生, CO₂ Product Guide 2021 for Refrigeration Applications, 2021
- [23] 可持续采购领导委员会 (SPLC), Recommendations for Climate Friendly Refrigerant Management and Procurement, 2021
- [24] 新华社, 跨越冬奥 织就梦想——国家速滑馆“冰丝带”诞生记
http://www.xinhuanet.com/politics/2021-02/07/c_1127076740.htm
- [25] 天津商业大学, CO₂ 跨临界冷机组应用白皮书, 2022
- [26] 中国生态环境部对外合作与交流中心, 中国制冷空调行业制冷剂替代政策及进展, 2018
- [27] UNEP, HFC Baselines and Phase-down Timetable
https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/26842/7880FS05Blines_EN.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [28] UNEP, HCFC - 如何准备逐步淘汰?
<https://wedocs.unep.org/bitstream/handle/20.500.11822/29824/7639FlyerHCFC-CN.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [29] UNEP, 缔约方所提交的关于执行第 XIX/6 号决定第 9 段的情况介绍, 即向不使用消耗臭氧层物质过渡、以期最大限度地减少对环境的影响的情况 (第 XXV/5 号决定, 第 3 段) 摘要, 2014

艾默生以净零排放目标，助力建设一个更可持续的世界

全球技术与工业软件领导者艾默生将其可持续发展策略与科学碳目标倡议 (SBTi) 的净零排放标准相结合，制定净零排放目标：预计到 2030 年，艾默生旗下所有公司将实现范围一和范围二的净零排放目标，并推动范围三价值链排放量较 2021 年基准值减少 25%。2030 年既定短期目标符合《巴黎协定》努力将气温升幅控制在 1.5°C 之内的目标，因而获得 SBTi 的认可。艾默生还承诺将根据 SBTi 净零排放标准，制定 2045 年长期净零目标。

除了意义深远的可持续发展规划，艾默生还通过产品、软件和服务，帮助客户、供应商及合作伙伴实现可持续发展目标。面对气候变化的挑战，艾默生相信，大规模推广和普及能源转型解决方案，将有助于打造一个净零排放的未来。

进一步了解艾默生净零排放目标详情，请参阅《2021 年环境、社会和公司治理 (ESG) 报告》。

关于艾默生

艾默生 (美国纽约证券交易所代码: EMR) 总部位于美国密苏里州圣路易斯，是一家全球性的技术与工程公司，为工业、商业及住宅市场客户提供创新性解决方案。自动化解决方案业务帮助过程、混合和离散行业制造商优化其能效和运营成本，促进生产，确保人员安全和保护环境。商住解决方案帮助确保人类舒适度和健康，保障食品质量和安全，提升能效，打造可持续发展的基础设施。如欲了解更多信息，欢迎访问：www.emerson.cn



www.emerson.cn