

顺应多变未来 引领低碳方向

环境友好型氢氟烯烃 (HFOs) 的前沿应用

WIN THE FUTURE OF LOW CARBON WITH FLEXIBILITY
FRONTIER APPLICATIONS OF HYDROFLUOROOLEFINS (HFOs)



序 言

把握低碳未来，HFO 势在必行

极端天气在全球范围内的增多给人类生产生活带来严峻挑战，作为应对臭氧层破坏、减缓全球变暖的重要手段之一，制冷剂替代是全行业性的长期挑战，也是我们必须面对和解决的课题。

我国是全球最大的制冷剂生产国和消费国，拥有全球最齐全的上下游产业链，行业节能和环保潜能巨大。自 20 世纪末，中国就积极地参与到全世界制冷工质替换这个重大行动中，为全球保护臭氧层和减缓气候变化作出了大量贡献。

当前，第一、二代制冷剂已基本退出历史舞台，我国正处于第二代制冷剂向第三代制冷剂过渡的阶段，而普遍采用的第三代替代制冷剂 HFC 是强效温室气体，其 GWP 值是二氧化碳的上千乃至上万倍，是《京都议定书》规定限排的温室气体之一，同时被《基加利修正案》列入消减列表。

显然，第三代 HFC 制冷剂已经不能满足当前中国向低碳社会快速转型的迫切愿望。特别是随着 2021 年 9 月 15 日《基加利修正案》在我国正式生效，第四代低全球变暖潜值制冷剂的推进变得尤为迫切。

2021 年，生态环境部已经牵头严格控制甚至关停了第一批 HFC 化工生产建设项目，这也为后续产能的减量管理奠定了基础。同时，在 HFC 的进出口管理方面，我国已经按照要求将其明确纳入进出口许可管理，现在国家正在修订消耗臭氧层物质管理条例和进出口管理办法，计划要把 HFC 的管控具体要求纳入行政法规中去。生态环境部也在牵头研究 HFC 配额管理的相关核发方案，未来将从源头管控和加强回收利用以及销毁等方面，加速 HFC 管理和消减。

这些动作都表明了中国坚定迈向低碳社会的决心，对我国制冷行业提出了更高要求，也为行业应用带来新的发展机遇。兼顾环保、性能、安全和成本的新型环保型制冷工质 HFO 具备规模化替代潜力，与国家提出的“双碳”战略目标高度契合，将助推制冷行业健康绿色发展。

张建君

浙江省化工研究院有限公司总经理

含氟温室气体替代及控制处理国家重点实验室主任

国家消耗臭氧层物质替代品工程技术研究中心主任

国标委含氟气体标准分技术委员会主任委员

国标委制冷剂标准分技术委员会副主任委员

生态环境部履约专家组专家

氟硅协会法规及产品监管委员会主任

联合国环境署蒙特利尔议定书技术经济评估组（TEAP）专家

兼药用气雾剂和化学品选择委员会（MCTOC）共同主席

目 录

序言	2
把握低碳未来，HFO 势在必行	2
前言	4
含氟气体技术进化路线	5
全球相关政策法规一览	7
中国的法规进程	10
HFO 在工业及民生行业的减碳应用	11
应用一：建筑家居.....	11
工商及民用制冷.....	11
家电及建筑保温.....	13
应用二：冷链冷藏.....	14
应用三：工业余热回收.....	16
有机朗肯循环余热发电	16
高温热泵.....	17
应用四：工业清洗.....	18
应用五：个人护理.....	19
应用六：电子冷却.....	20
移动通信.....	20
数据中心.....	21
高电压输配电.....	22
应用七：汽车	23
汽车空调制冷	23
新能源汽车轻量化材料	25
前瞻	26

前言

“今年全国气候年景总体偏差，极端天气气候事件呈现多发强发态势。”这是来自国家气候中心对 2023 年我国气候状况的研判。

根据中国气象局发布《2022 中国气候公报》，2022 年全国平均气温 10.51°C，为 1961 年以来仅次于 2021 年的历史次高，夏秋季高温创历史之最¹。世界气象组织 WMO 发布《2022 年全球气候状况》临时报告显示，2022 年全球平均气温比工业化前（1850 年至 1900 年）平均气温高出约 1.15°C²。2023 年 3 月，政府间气候变化专门委员会（IPCC）发布第六次评估报告综合报告《气候变化 2023》指出，倘若要将全球气温上升幅度控制在工业化前水平的 1.5°C 以内，所有部门都要在十年内全力、快速且持续地减少温室气体排放³。随着全球气候变暖趋势不断加剧，极端天气现象屡创新高，碳排放这个“幕后黑手”已经成为众矢之的。

含氟气体的使用是碳排放的重要来源之一。作为全球最大的含氟气体生产国和消费国，中国拥有完整的氟化工产业链⁴。这些含氟气体被作为制冷剂、发泡剂、溶剂及推进剂，广泛地应用于建筑保温、家电和商业及车用制冷、冷链物流、工业余热回收、医用及个人护理。通过创新技术或者法规对含氟气体加以改造或者做出限制，就可以对这一碳排放来源加以控制，从而获得更优的能效和更少的排放。仅以空调制冷剂为例，《2022-2028 年中国制冷剂行业现状调研分析与发展趋势预测报告》显示，全球制冷剂需求量的 38% 来自中国，65% 的制冷剂产能在中国⁵。根据联合国环境规划署（UNEP）和国际能源署（IEA）共同发布的《制冷系统排放和政策综合报告》，如果全球采取协调一致的行动，提高制冷行业的能源效率以及向气候友好型制冷剂转型，就可以在未来 40 年间减少 2100 亿~4600 亿吨二氧化碳当量排放⁶。



2022 年全国平均气温

10.51°C

比工业化前（1850 年至 1900 年）平均气温

高出约 **1.15°C**



全球制冷剂需求量

38%

来自中国

制冷剂产能

& 65%

在中国

当前，更受市场关注的减排主力军是电力、水泥、石化等高排放行业。然而，考虑到含氟气体的广泛应用和与个人生活的紧密相关程度，我们相信，对这一化学品的低碳探索将会给整个社会的可持续发展带来不可估量的影响，并且为中国提供更为广阔的减排路径。

1 《中国气候公报（2022 年）》，中国气象局国家气候中心

2 《2022 年全球气候状况》临时报告，世界气象组织

3 第六次评估报告综合报告《气候变化 2023》，政府间气候变化专门委员会（IPCC）

4 氟化工专家委员会副主任曾本忠，《氟化工：成为全球最大产销国》，《中国化工报》，2022 年 9 月 30 日

5 《2022-2028 年中国制冷剂行业现状调研分析与发展趋势预测报告》，中国产业调研网

6 《制冷系统排放和政策综合报告》，联合国环境规划署（UNEP）和国际能源署（IEA）

含氟气体技术进化路线

含氟气体以其卓越的热力学性能和安全特性被广泛地应用于各个领域，其中最广为人知的是作为制冷剂、发泡剂、溶剂及推进剂的应用。

从最初仅为了满足设备基本运行，到如今适应环境、能效、安全等方面的新要求，含氟气体截至目前共经历了四代技术的变革。

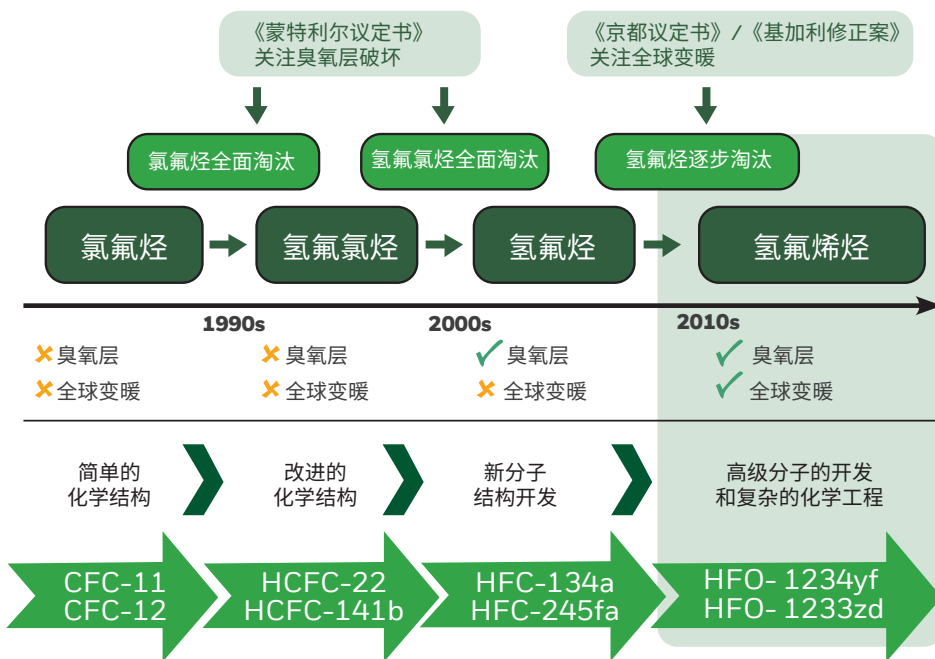


图1 法规驱动下的创新蓝图变革

第一代含氟气体：氯氟烃（CFC）

第一代氯氟烃含氟气体，简称 CFC（Chlorofluorocarbon）。CFC 性能强劲，但是环保性非常差。CFC 进入大气后，释放出的氯原子具有强氧化性，会分解臭氧层中的 O_3 ，直接导致臭氧层被破坏，主要代表产品有 CFC-11 和 CFC-12 等。

1977 年，英国科考队发现了南极上空的臭氧层空洞。为了解决 CFC 对臭氧层破坏的问题，1987 年，联合国 26 个成员国共同签署了《蒙特利尔议定书》，通过逐步淘汰 CFC 的使用来保护臭氧层和大气环境，并以臭氧消耗潜值（ODP，Ozone Depletion Potential）和全球变暖潜值（GWP，Global Warming Potential）作为衡量含氟气体环保性的重要指标。GWP 是以二氧化碳为基准，衡量含氟气体对气候变暖影响的指标值。设定二氧化碳的 GWP 为 1，其他物质的 GWP 参照二氧化碳进行计算。以 HFC-134a 为例，GWP 为 1300，这意味着每排放一千克的 HFC-134a 到大气中，等同于排放 1300 千克的二氧化碳。目前，全球范围内 CFC 的淘汰已告完成。

设定二氧化碳的

GWP=1

其他物质的 GWP 参照二氧化碳进行计算

以 **HFC-134a** 为例
GWP=1300

每排放

1 千克 HFC-134a

到大气中相当于排放

1300 千克 二氧化碳



第二代含氟气体：氢氟氯烃（HCFC）

第二代氢氟氯烃含氟气体，简称 HCFC（Hydrochlorofluorocarbon），它用氢原子替代了 CFC 中少部分氯原子，大幅降低了臭氧消耗潜值 ODP。主要代表产品有 HCFC-22 和 HCFC-141b 等。

虽然 HCFC 把 ODP 降低了一个数量级，但是仍然没有完全消除对臭氧层的破坏。HCFC 在 2007 年被《蒙特利尔议定书》列为加速淘汰的目标。

第三代含氟气体：氢氟烃（HFC）

第三代氢氟烃含氟气体，简称 HFC（Hydrofluorocarbon），将 HCFC 中的氯原子全都用氢原子替代，ODP 为零，彻底解决了臭氧破坏的问题，主要代表产品有 HFC-134a 和 HFC-245fa 等。

然而，HFC 的 GWP 非常高，对全球气候变暖的危害日益加剧。1997 年 12 月，《京都议定书》明确将 HFC 列为应实施减排的六大类温室气体之一。2016 年 10 月，《蒙特利尔议定书》第 28 次缔约方大会达成了《〈蒙特利尔议定书〉基加利修正案》，将 18 种 HFC 列入受控物质清单，并提出明确的削减目标。基于此，全球将有效降低强效温室气体的排放，从而预计在本世纪末减少全球升温 0.5°C⁷。

第四代含氟气体：氢氟烯烃（HFO）

为了减少 HFC 对气候变暖的影响，开发下一代环境友好型含氟气体迫在眉睫。霍尼韦尔作为全球领先的含氟气体供应商积极投入到第四代含氟气体的应用开发中，创造性地开发出氢氟烯烃含氟气体，简称为 HFO（Hydrofluoroolefin）。

HFO 的 ODP 为零，不会破坏臭氧层。同时，HFO 具有独特的双键结构，能够在释放到大气环境中后快速分解，大气寿命期仅为几个星期，因此 GWP 值超低，对气候变暖的影响极小。以 HFC-134a 为例，HFC-134a（GWP 1300）的大气寿命期在 14 年以上，而 HFO-1234yf（GWP < 1）的大气寿命期小于 28 天。

HFO 在环保性上的优异表现，使其成为 HCFC 和 HFC 的理想替代品，主要代表产品有 HFO-1234yf、HFO-1234ze 和 HFO-1233zd 等。

HFO 具有独特的

双键结构

释放到大气环境中后快速分解，大气寿命期仅为几个星期

GWP 超低

HFC-134a (GWP=1300)
大气寿命期在

14 年以上

HFO-1234yf (GWP < 1)
的大气寿命期

小于 28 天

7 《2018 年臭氧层消耗科学评估报告》，由世界气象组织、联合国环境规划署等机构于 2018 年 11 月 5 日发布

全球相关政策法规一览

可以看到，含氟气体的变革离不开环保政策法规的推动，其中《蒙特利尔议定书》尤其具跨时代意义，它驱动了含氟气体从第一代 CFC、第二代 HCFC 向第三代 HFC 的技术迭代。《基加利修正案》规定了第三代 HFC 的削减计划，进一步驱动含氟气体向第四代 HFO 的转换。主要的发达国家承诺从 2019 年开始削减 HFC 的使用量，并在 2036 年削减 HFC 的使用量至基线的 15%。而包括我国在内的绝大多数发展中国家将在 2024 年冻结 HFC 的生产和消费，从 2029 年开始削减 HFC 的使用量，并在 2045 年削减 HFC 的使用量至基线的 20%。

我国将在 2024 年冻结 HFC 的生产和消费，从 2029 年开始削减 HFC 的使用量，并在 2045 年削减 HFC 的使用量至基线的 **20%**

表 1 《基加利修正案》HFC 削减计划⁸

时间表	发达国家	发展中国家 第一集团	发展中国家 第二集团
HFC 基线	2011-2013 年 平均 HFC 消耗量	2020-2022 年 平均 HFC 消耗量	2024-2026 年 平均 HFC 消耗量
HCFC 基线	基线的 15%	基线的 65%	基线的 65%
冻结	N/A	2024	2028
第一步	2019-10%	2029-10%	2032-10%
第二步	2024-40%	2035-30%	2037-20%
第三步	2029-70%	2040-50%	2042-30%
第四步	2034-80%	2045-80%	2047-85%
第五步	2036-85%	N/A	N/A

为了完成《基加利修正案》规定的 HFC 削减目标，全球各国均出台了区域性的协议、法规、政策，来推进新技术以及环境友好型含氟气体的研发和应用，并在未来的含氟气体替代进程中应优先选择环保含氟气体和替代技术，以加速实现 HFC 的削减，确保国家履约削减目标的如期达成。

美国 SNAP 法规

SNAP (Significant New Alternatives Program, 显著性下一代替代政策) 是美国非常重要的全国性法规，专门针对臭氧层消耗物质替代品和替代技术进行评估、鉴定和公开发布。自 1994 年实施以来，该法规一直在不断更新。

过去几年，针对第三代 HFC，SNAP 颁布了两次重要的 HFC 淘汰计划。2015 年 7 月，

⁸ 根据《基加利修正案》整理，霍尼韦尔



SNAP

批准了一系列新型环境友好型含氟气体作为 HFC 的替代技术方案，其中就包括霍尼韦尔

Solstice® yf

HFO-1234yf

Solstice® N40

HFO-448A

美国环保署（EPA）最终决议，禁止在汽车空调、商业制冷、发泡以及气雾剂等多个应用中使用某些特定的高 GWP 值 HFC；2016 年 10 月，美国环保署发布追加决议，禁止在中央冷水机组、大型车辆的特殊空调中使用某些特定的高 GWP 值 HFC。这两项淘汰计划主要针对的是 HFC-404A、HFC-507A、HFC-134a、HFC-410A 等具有高 GWP 值的 HFC，从而减少 HFC 的使用。

2017 年 8 月 8 日，华盛顿特区巡回法院裁定 SNAP 20 法规无效，2019 年 4 月 5 日，美国哥伦比亚特区巡回上诉法院部分撤销了 SNAP 21 法规，但对于新的生产过程、新设备、新产品等而言，HFCs 仍被禁止使用。虽然在联邦政府层面，针对 HFCs 淘汰的 SNAP 20 和 SNAP 21 法规已失效，但美国许多州依然认为淘汰 HFCs 对环保而言意义重大，加利福尼亚州在 2018 年 8 月 31 日，投票通过了《加利福尼亚州清凉法案》，要求从 2019 年 1 月 1 日起继续执行 EPA 原制定的 SNAP 20 和 SNAP 21 法规。华盛顿州和佛蒙特州也在 2019 年通过了类似的法案，后继还有特拉华州、新泽西州、纽约州、康涅狄格州和马里兰州正在考虑实行类似法案，以继续削减 HFC。

2021 年 5 月，SNAP 批准了一系列新型环境友好型含氟气体作为 HFC 的替代技术方案，其中就包括霍尼韦尔 Solstice® yf（HFO-1234yf），Solstice® N40（HFO-448A）等环境友好型含氟气体。

可以看到，EPA 通过 SNAP 所释放出的信号是：限制高 GWP 的 HFC 在制冷设备、发泡和气雾剂等领域的应用，对有成熟替代技术的 HFC 给出明确的淘汰时间表。这与美国政府对温室气体管控的政策倾向完全一致。

欧盟含氟气体法案

与美国 SNAP 给出明确的淘汰目标和替代列表不同，欧盟在法规制定上持有更加开放的态度。首先，欧盟含氟气体法案（EU Fluorinated Greenhouse Gases Regulation, or F-Gas Regulation）规定，从 2015 到 2030 年逐步淘汰 HFC；到 2030 年会削减 2015 年基线的 79% 的 HFC，平均 GWP 将从 2000 降低至 400。其次，针对某些特定应用，欧盟含氟气体法案给出了含氟气体的 GWP 限制和禁止日期。例如，到 2020 年，全封闭商用冰箱和冷柜所使用的制冷剂的 GWP 必须低于 2500；到 2022 年，所使用的制冷剂的 GWP 必须低于 150。这就意味着原来广泛使用于该应用的 HFC-134a 和 HFC-404A 都不能再继续使用，设备商必须寻找更低 GWP 的替代制冷剂。

2022 年 4 月，欧盟委员会公布新的含氟气体法案修订草案，计划通过削减含氟温室气体排放，促使欧盟在 2030 年前额外减排 4000 万吨二氧化碳排放当量，至 2050 年额外减排 3.1 亿吨二氧化碳当量。为达到这一目标，该修订草案将收紧 HFC 的配额制度，在 2050 年前将新进入欧盟市场的 HFC 的潜在气候变暖影响降低 98%。

值得一提的是，欧盟引入碳市场交易制度，针对 HFC 制定了非常明确的碳配额制度，碳排放交易取得了一定成效。这对中国扩大交易主体范围、完善价格体系、调动市场主体交易的积极性，进一步发挥碳排放权交易的市场机制作用有一定的借鉴启示作用。

表 2 欧盟含氟气体法案 HFC 削减计划⁹

产品	GWP 限值	禁止日期
家用冰箱 (含有 HFC)	150	2015/01/01
商用冰箱和冰柜 (全封闭)	2500	2020/01/01
	150	2022/01/01
固定式制冷设备 (-50°C 以下的设备除外)	2500	2020/01/01
制冷量大于 40 千瓦的集中式的制冷系统	150	2022 /01/01
复叠系统的主循环除外	1500	2022 /01/01
移动式房间空调器	150	2020/01/01
充注量小于 3 千克的一拖一分体式空调系统	750	2025/01/01
充注大于 40 公吨的 CO ₂ 当量维修用制冷系统	2500	2020/01/01
使用再生制冷剂的充注大于 40 公吨 CO ₂ 当量的设备	2500	2030/01/01
XPS 泡沫	150	2020/01/01
聚氨酯泡沫	150	2023/01/01
市场销售的预充注设备必须持有欧盟配额	—	2017/01/01



欧盟含氟气体法案修订草案计划通过削减含氟温室气体排放，促使欧盟在 2030 年前额外减排

4000万吨

二氧化碳排放当量

至 2050 年额外减排

3.1亿吨

二氧化碳排放当量

日本氟制品排放修正法

2015 年 4 月，日本经济产业省正式颁布了日本氟制品排放修正法，对达到一定规模的 HFC 进行削减。针对包括家用和轻型商用空调、车用空调和冷冻冷藏机组在内的特定应用，该法规明确了所使用的含氟气体的 GWP 限制和禁止日期，主要目标是削减 HFC-410A、HFC-134a 和 HFC-404A 等具有较高 GWP 的 HFC 的使用。

表 3 日本氟制品排放修正法 HFC 削减计划¹⁰

特定产品分类	GWP 限值	目标年度
家用空调	750	2018
轻型商用空调 (小于 3 冷吨)	150	2020
车用空调	150	2023
冷藏机组和固定式冷冻冷藏机组 (标称功率大于 1.5 千瓦)	100	2019
中央式冷冻冷藏机组 (仅限于大于 5 万立方米的新建冷冻冷藏仓库)	100	2019
住宅用聚氨酯泡沫	150	2020

⁹ 根据《欧盟含氟气体法案》整理，霍尼韦尔

¹⁰ 根据《日本氟制品排放修正法》整理，霍尼韦尔

中国的法规进程

2021年9月15日，《基加利修正案》正式在中国生效。根据《基加利修正案》的履约要求，中国须自2024年起将HFC的生产和使用冻结在基线水平，2029年起HFC生产和使用不超过基线的90%，2035年起不超过基线的70%，2040年起不超过基线的50%，2045年起不超过基线的20%。

实际上，中国政府和相关行业一直致力于含氟气体的绿色替代工作，特别是在国际公约下开展了一系列面向不同行业应用的含氟气体替代行动，为全球环境治理作出了突出贡献。

早在2000年初，中国车用空调制冷剂的替代就走在了世界前列。当时汽车空调使用的制冷剂以CFC-12为主，对臭氧层破坏极大。中国汽车工业协会牵头完成了在汽车空调应用中从CFC-12到HFC-134a的迭代替换，实现了CFC的淘汰，以实际行动保护了臭氧层。

2011年开始实施的HCFC淘汰管理计划HPMP（HCFC Phase-out Management Plan）是又一里程碑法规。该计划得益于环保部和联合国多边基金的资助，通过设立基金帮助中国的核心企业实现HCFC-22制冷剂的淘汰。第一阶段HPMP专注于家用空调，当时全中国最大的九家制冷剂使用厂家加入了HPMP，将中国空调器行业的HCFC替代工作带入了实质性的淘汰阶段。第二阶段HPMP专注于热泵，根据履约目标，到2020年削减35%。可以说HCFC淘汰管理计划帮助中国企业在HCFC的淘汰进程和HFC的削减进程奠定了良好的基础。

另一个对碳减排起到关键作用的举动是碳配额交易平台的建立。2021年7月中国在上海建立全国性碳交易市场，首批覆盖范围明确八个高耗能行业，包括石化、化工、建材、钢铁、有色、造纸、电力和民航。随着法规的不断完善，中国的碳配额交易市场有望逐步涵盖各个细分领域，比如建筑空调、汽车等行业。

《基加利修正案》对我国正式生效之后，一系列针对HFC的管控政策开始逐步完善、落地。2021年9月30日，我国生态环境部发布《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（征求意见稿）》，其中要求各地不得新建、扩建用作制冷剂、发泡剂等受控用途的HFC-32、HFC-134a、HFC-125、HFC-143a和HFC-245fa化工生产设施。新一代高性能、低GWP的HFO将成为中国下一代的主要含氟气体。

HFC 削减

中国须自2024年起将HFC的生产和使用冻结在基线水平，2029年起HFC生产和使用不超过基线的

90%

2035年起不超过基线的

70%

2040年起不超过基线的

50%

2045年起不超过基线的

20%

HFO 在工业及 民生行业的减碳应用

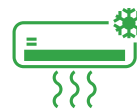
过去几十年里，霍尼韦尔一直将主要研发精力投入到能为客户改善环境的新产品上。通过替代全球变暖潜值更高的 HFC 产品，霍尼韦尔 Solstice® 系列产品可减少高达 99% 的温室气体排放。截至 2022 年底，Solstice® 产品的广泛使用已经帮助全球减排超过 3.26 亿公吨的二氧化碳当量，相当于每年减少近 7000 万辆汽车的碳排放¹¹。从目前的产品应用来看，主要消费行业包括：建筑家居、冰箱冷柜、工商制冷、汽车空调、消防器材生产、发泡剂生产、气雾剂生产等领域。

应用一：建筑家居

中国建筑行业能耗与碳排放在大盘中占比较高，在低碳发展中居重要地位。建筑家居行业实现清洁低碳转型的关键在于储能，这种储能不仅仅体现在电能的高效利用，还包括热能和冷能的储存。制冷剂 and 发泡剂对建筑冷热源的耦合至关重要，近年来，发达国家已逐步淘汰 HCFC 的使用，但在我国建筑空调制冷剂中，HCFC-22 等产品仍长期占据主导地位，发泡剂在建筑家居领域一般应用于冰箱保温和建筑保温。《蒙特利尔议定书》签订后的 30 多年以来，我国切实履行各项国际义务，正在进一步加快淘汰 HCFC 和 HFC。

工商及民用制冷

统计数据显示，2021 年，城市居民平均每百户空调拥有量为 161.7 台，乡镇居民平均每百户空调拥有量为 89.0 台，分别比 2012 年提高 27.5% 和 250.8%¹²。制冷空调设备中的制冷剂属于温室气体，可能造成臭氧层的破坏，导致气候变暖。在应对全球气候变化的背景下，我国制冷空调行业的减排潜力巨大，空调制冷剂也面临着低碳替代的考验。环保制冷剂的使用不仅可减少温室气体排放，也能通过降低能耗来达到节约经济成本的目的。



2021 年，城市居民平均每百户空调拥有量为

161.7 台

比 2012 年提高
27.5%



乡镇居民平均每百户空调拥有量为

89.0 台

比 2012 年提高
250.8%



11 该计算基于 2010 年 1 月到 2022 年 12 月之间 Solstice® 产品的实际销售量，并使用美国环保署温室气体当量计算器换算

12 国家统计局，居民收入水平较快增长 生活质量取得显著提高——党的十八大以来经济社会发展成就系列报告之十九。http://www.stats.gov.cn/xgk/jd/sjjd2020/202210/t20221011_1889192.html

由于制冷技术原理的差异，制冷空调终端分为商用冷水机组空调系统和民用空调系统，两者使用的制冷剂有所不同，因此替代方案各有差异。

工业生产和商业场所广泛使用商用冷水机组供冷。冷水机组主要以水作为载冷剂，水与蒸发器中的制冷剂进行热交换，再将水输送到需要冷却的空间中循环实现制冷。

目前，冷水机组中使用较多的制冷剂是 HFC-134a，虽然 HFC-134a 对臭氧层的破坏作用 (ODP) 为零，但具有较高的 GWP (1300)。霍尼韦尔 Solstice® 513A (HFO-513A, GWP 573) 和 Solstice® N15 (HFO-515B, GWP 299) 两款 HFO 制冷剂，可以在冷水机组中替代 HFC-134a，安全等级同为 A1，对臭氧层均无破坏作用。从长远解决方案来看，霍尼韦尔也有 Solstice® ZE (HFO-1234ze) 和 Solstice® ZD (HFO-1233zd) 两款 GWP 更低的制冷剂，较 HFC-134a 降低了 99.9%，其中 Solstice® ZE 的能效与 HFC-134a 相当，而 Solstice® ZD 是目前市场上尤为突出的低压替代制冷剂。目前，采用 Solstice® ZD 的离心式冷水机组已趋于成熟并开始稳步推向市场。

Solstice® 513A

更适合现有冷水机组的改造
GWP 较 HFC-134a

降低 **56%**

Solstice® N15

比较推荐用于新建机组
GWP 较 HFC-134a

降低 **77%**

在轻型商用和民用空调领域，目前仍有一部分产品使用 HCFC-22 作为制冷剂。按照《蒙特利尔议定书》的淘汰时间表，到 2030 年，我国房间空调器行业要完全淘汰 HCFC-22。很多产品都在使用 HFC-410A 和 HFC-32 替代 HCFC-22。虽然 HFC-410A 的 ODP 值为零，不破坏臭氧层，但其 GWP 值较高 (1924)，在环保法规步伐较快的发达国家，它正在被更环保的制冷剂逐步替代；HFC-32 的 ODP 值为零，而且也有较低的 GWP 值 (675)，但 HFC-32 属于弱可燃制冷剂，在一些充注量大的应用中其可燃性成为用户普遍的顾虑。

在这样的背景下，霍尼韦尔 Solstice® N41 (HFO-466A) 脱颖而出，借助环保、安全和节能三大核心竞争力成为 HFC-410A 的优选替代方案之一。



环保

Solstice® N41 的 GWP 值仅为 696，与 HFC-410A 相比降低约 64%，能够完全满足全球各国现行的环保法规。



安全

Solstice® N41 的制冷剂分类是 A1 类，无毒不可燃，与 HFC-410A 的制冷剂分类保持一致。



节能

Solstice® N41 具有与 HFC-410A 相匹配的性能表现和相似的排气温度，这让采用 Solstice® N41 的空调系统能够沿用与 HFC-410A 系统相同尺寸和设计的压缩机和热交换器。

此外，在分体式空调、单元式空调、屋顶式空调和涡漩冷水机组等多个空调细分领域，Solstice® 454B 都可以帮助客户更快捷方便地完成制冷剂的迭代更换。Solstice® N41 的不可燃特性能够帮助客户更好地保证在机房精密空调和多联机等多个空调细分领域进一步确保安全性。

家电及建筑保温

发泡剂应用于冰箱的聚氨酯泡沫保温中，虽然只是发泡材料中的一个组分，但在冰箱保温体系中发挥巨大的作用。30 多年来，发泡剂经历了数次技术转换，愈加节能环保。第一代的全氯氟烃（CFC）发泡剂和第二代含氢氯氟烃（HCFC）发泡剂都具有很高的 ODP 及 GWP，在冰箱中已经被完全淘汰。第三代发泡剂氢氟碳化物（HFC）不会对臭氧造成破坏，但仍然具有较高的 GWP 值，加剧温室效应。如今中国冰箱行业的主要发泡体系已经悄然向 HFO 发泡剂切换。

HCFC-141b 曾是发泡市场的宠儿，2011 年，我国开始执行聚氨酯泡沫行业 HCFC 淘汰计划，生态环境部在 2018 年发布了《关于禁止生产以一氟二氯乙烷（HCFC-141b）为发泡剂的冰箱冷柜产品、冷藏集装箱产品、电热水器产品的公告》，实现了这三个子行业 HCFC-141b 的完全淘汰。我国冰箱行业发泡剂体系从 HCFC-141b 切换到 HFC-245fa 技术。

联合国开发计划署于 2018 年 12 月开始在中国推行“海信 HFC-245fa 削减示范项目”，通过对家用冰箱生产线进行发泡技术改造，并在 2021 年如期完成项目目标，减少消耗 HFC-245fa 共 251.85 吨，相当于生产线每年减少 256570 吨二氧化碳排放¹³。中国也将从 2024 年开始，冻结 HFC 类产品的使用量。

在众多的替代方案中，HFO 发泡剂以其安全、环保、高效的特点，成为 HCFC 乃至未来 HFC 淘汰后发泡剂的更理想替代方案，并且由于 HFO 发泡剂可以改善泡沫的流动性和保温性能，HFO 和 HFO/HFC 共混发泡技术在家电行业的使用也越来越广泛。与第三代发泡剂相比，霍尼韦尔开发的第四代发泡剂产品 Solstice® LBA，GWP 降低了 99.9%，完全满足国际社会对气候协定的要求，同时还保留了不可燃、非 VOC（挥发性有机化合物）和高效的特点，在聚氨酯泡沫体系中有非常好的表现。使用霍尼韦尔第四代发泡剂制造的聚氨酯硬泡被广泛应用于建筑保温和家电等领域。

截止到 2023 年，中国三大知名家电品牌海信、海尔、美的分别在其旗下的家电产品商业化中采用了霍尼韦尔的 Solstice® LBA 解决方案。其中，海信容声冰箱搭载第四代发泡技术入选了来自于蒙特利尔议定书多边基金支持的“HFC-245fa 削减示范项目”，成为应对气候变化、减少冰箱发泡剂温室气体排放的国际案例。



2021 年“海信 HFC-245fa 削减示范项目”减少消耗 HFC-245fa

251.85 吨

相当于生产线每年减少

256570 吨

二氧化碳排放



¹³ 联合国开发计划署官方微信，《基加利修正案》对中国正式生效！
https://mp.weixin.qq.com/s/e4tkuqL_QFsiGGQFwqV9w

Solstice® LBA

对臭氧无破坏

GWP 值低

保温效果好
阻燃性能好

建筑保温是发泡剂应用的另一重要领域，主要应用于聚氨酯和 XPS 聚苯乙烯保温材料的生产制备过程中。聚氨酯喷涂泡沫和聚苯乙烯板材泡沫因其便利的施工方式，在建筑保温领域应用广泛。国内现在主要使用 HCFC-141b 作为聚氨酯喷涂体系的发泡剂，而在挤塑聚苯乙烯应用中更多采用的是 HCFC-142b 或者 HCFC-22。根据我国 HCFC-141b 淘汰第二阶段行业计划，聚氨酯喷涂行业和聚苯乙烯行业均将于 2026 年完全淘汰 HCFC。

由于喷涂应用是移动式现场发泡，无法使用戊烷类可燃性发泡剂作为替代方案，因此欧美国家在替代 HCFC-141b 时，普遍使用 HFC-245fa 或者 HFC-245fa 与 HFC-365mfc 的混合物。虽然这些 HFC 产品的泡沫保温效果和物理性能与 HCFC-141b 体系相当，但它们普遍 GWP 值较高。在挤塑聚苯乙烯行业，其涉及到的发泡剂沸点更低，可燃性发泡剂意味着更高的燃爆风险。由于 HFC-134a 必须配合其他类型的发泡剂共同使用，因此尚无不可燃的解决方案。鉴于中国将从 2024 年开始冻结 HFC 类产品的使用量，国内下游企业很快将面临二次淘汰的挑战。

霍尼韦尔 Solstice® LBA 可以很好地帮助企业实现过渡。中国客户晶雪已经使用 Solstice® LBA 发泡剂成功开发出芯材 B1 的高阻燃板材——黑晶板，为连续板材应用提供了新的解决方案。

• 能耗更低

将发泡剂替代为 Solstice® LBA 的过程中，设备不需要防爆升级，甚至还可以满足芯材 B1 的防火要求，K 值（传热系数）比正戊烷体系低约 8%，能耗更低。

• 平衡成本

如果像欧美地区一样，采用更科学的 R 值（热阻值，等于 K 值除以泡沫厚度）来反映板材的保温性能，Solstice® LBA 可以在降低发泡板材厚度的情况下达到与正戊烷发泡板材同样的保温性能，如此可以平衡发泡剂更换带来的成本上升。

应用二：冷链冷藏

冷链是指产品在产地采收或捕捞之后，经过加工、贮藏、运输、分销和零售再到消费者手中，始终使产品处于所必需的低温环境下，以保证产品质量安全、减少损耗、防止污染的特殊供应链系统，主要涉及生产型冷库、物流型冷库、运输过程的冷藏车和分销零售过程中的商超、便利店及前置仓等几个环节。

目前在冷链行业，HCFC-22 作为第二代制冷剂已经列入削减名单，而第三代制冷剂 HFC-404A 与 HFC-507A 虽然 ODP 为零，但 GWP 很高。大部分国家和地区对新型制冷剂的首要要求是 GWP 小于 1500。未来，随着《基加利修正案》关于分阶段减排 HFC 的要求在中国的逐步落实，冷链行业在新型制冷剂的选择上要综合衡量安全、环保、性能、经济等方面的因素。比如，安全方面要实现无毒性、低可燃性；环保方面要考虑零 ODP 和低 GWP；性能方面要考虑其热物理性能和能效；经济方面则要实现技术革新和技术替换的整体成本低廉。

当前，我国冷库产业的制冷系统普遍以“氨系统、氟系统”为主。氨制冷剂具有价格便宜、能效高、不会产生温室效应的优点，但也有易燃易爆、有毒性的缺点，对设计、维保、管理要求高，存在一定的安全事故隐患。目前，我国多个省份明令禁止使用氨制冷剂，即便是个别省份可使用，审批也非常严格，且对使用范围及地点有明确限制。目前我国五万吨容量以下的冷库一般采用的氟制冷剂，以 HFC-404A、HFC-507A、HCFC-22 为主。其中，HCFC-22 早已被国家列入 HCFC 淘汰名单，因此很多新建冷库都在规避使用 HCFC-22；而 HFC-404A 与 HFC-507A 虽然 ODP 为零，但仍然具有接近 4000 的高 GWP 值，随着《基加利修正案》对我国正式生效，第三代制冷剂 HFC-404A 与 HFC-507A 也将逐步进入加速淘汰期。

同样，作为“耗能和碳排放大户”，商超领域冷冻冷藏系统的制冷剂选择使用是企业节能减排管理的重点环节。目前中国商超冷冻冷藏系统使用的主流制冷剂 HCFC-22 已进入明令淘汰期，HFC-404A 也因高 GWP 逐步被纳入加快淘汰行列。

此外，随着生鲜电商平台的飞速发展，冷藏运输车、前置仓以及深入田间地头的可移动式冷库也发展迅猛，含氟制冷剂的使用规模也随之有很大增长。

霍尼韦尔针对冷链冷藏环节开发的 Solstice® N40 (HFO-448A) 已被广泛应用在欧盟、美国、日本以及亚太地区的超市、便利店、冷库等行业及领域，在全球已有数万家超市门店及冷库项目使用。2017 年霍尼韦尔把该制冷剂引进到中国，经商超和冷冻冷藏企业多年甄别、使用、研究及推广，目前已获得业内的广泛认可，包括大润发在内超过 100 多家大型超市门店，以及北京环球影城中央厨房冷库、上海国药疫苗冷库等项目均已成功使用 Solstice® N40。

2022 年，霍尼韦尔联合华商国际工程有限公司（原国内贸易工程设计研究院）开展了 Solstice® N40 替换 HFC-404A 和 HFC-507A 在冷库应用的可行性研究。结论显示，Solstice® N40 的节能减排效果均优于 HFC-404A（HFC-507A 因其性能与 HFC-404A 类似而结论相同），Solstice® N40 的综合节能效率在低温冷库超过 10%，在中温冷库约为 16%。根据此结论计算，对于 1.2 万平方米的冷库，预期每年电费节约 16 万元，直接带来的二氧化碳排放量可减少 68%，制冷系统全生命周期的二氧化碳排放量减少可达 30%，且可在 1 年内收回投资成本，给终端用户带来节能效益的同时也附加减碳效益。



Solstice® N40

不可燃

ODP=0

GWP=1273

对比 HFC-404A

GWP 降低 **68%**

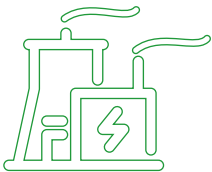
保证制冷性能的同时
系统能效提升

5%~16% ↑



应用三：工业余热回收

当前，我国能源利用存在利用效率低、经济效益差、生态环境压力大等主要问题，实现节能减排、提高能源利用率的目标主要依靠工业领域。我国工业领域能源消耗量约占全国能源消耗总量的 70%，主要工业产品单位能耗平均比国际先进水平高出 30% 左右¹⁴。除了生产工艺相对落后、产业结构不合理的因素外，工业余热利用率低、能源没有得到充分综合利用是造成能耗高的重要原因，我国能源利用率仅为 33% 左右，比发达国家低约 10%，至少 50% 的工业耗能以各种形式的余热被直接废弃¹⁵。这也从侧面反映了我国工业余热资源丰富。余热资源广泛存在于工业各行业生产过程中，约占其燃料消耗总量的 17% ~ 67%，其中可回收率达 60%¹⁶，余热利用率提升空间大，节能潜力巨大。



霍尼韦尔拥有综合性能卓越的 ORC 工业介质

HFC-245fa
GWP=858

Solstice® ZD
GWP=1

直接减排约 **99%**
在发电过程中可增加
3%~6% 电力

余热回收利用是将工业过程产生的余热再次回收重新利用，又被认为是一种“新能源”，近年来已成为推进我国节能减排工作的重要内容，下面重点讨论针对余热温度在 300° C 以下的低品位余热的回收利用技术，包括有机朗肯循环余热发电技术和热泵技术。

有机朗肯循环余热发电

有机朗肯循环 (Organic Rankine Cycle, 简称 ORC) 余热发电技术以低沸点有机物 (如 HCFC-123、HFC-245fa、HFC-152a、氯乙烷、丙烷、正丁烷、异丁烷等) 为工质，是一项将工业生产过程中产生的中低品位余热加以回收利用，转化为高品位电能的节能减排技术。在低温条件下有机工质被加热即发生蒸发，工质汽化后获得较高的蒸汽压力，推动膨胀机做功，从而将低品位热能转换为高品质的机械能和电能。有机工质的选取是有机朗肯循环余热发电技术的重要环节，通常应满足高环保性、高安全性、高可靠性、高经济性以及无毒性等多项指标。

由于不同有机工质热物性有所差异，会导致 ORC 热力循环特征有所不同，相应的热力发电系统也各具特点。霍尼韦尔拥有综合性能卓越的 ORC 工业介质，其中，Solstice® ZD 制冷剂具有初始原料减排以及过程增效双重优势。工业企业使用 ORC 技术，利用低品位热能发电可减少二氧化碳排放，同时又为企业节省电费，从经济角度和社会效益上均有一定的意义。

2018 年，中国宝武钢铁集团旗下的上海宝钢节能环保技术有限公司在其烧结工序中使用 ORC 技术进行余热回收发电，其中使用了 HFC-245fa 工业介质流体。

¹⁴ 我国工业余热回收利用技术综述, 中国知网

¹⁵ 我国工业余热回收利用技术综述, 中国知网

¹⁶ 我国工业余热回收利用技术综述, 中国知网

其年发电量约为 1099 万千瓦时，每年可节约标准煤 3517 吨，相当于每年减少碳排放约 9140 吨。如果在类似规模的项目中使用 Solstice® ZD 工业介质，可进一步减少约 12000 吨的初始碳排放，并且，由于发电效率的提高，每年可实现约 260 吨的可持续减排。

高温热泵

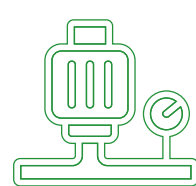
高效节能的热泵技术契合时代背景与政策导向，切合终端用能电气化的发展需求，是供热用能实现零碳排放的一条优选技术路径。热泵技术就是能量的搬运工，它从低温的热源（如空气、水、土壤、太阳能以及工业废水、废气等）中收集热能，通过热泵机组输送到高温热源，最终为客户提供需要的高温热水或蒸汽。

热泵技术在工业应用中的可行性取决于生产需要的温度水平。高温热泵和超高温热泵可将工业企业排放、浪费的中低温度的废水、废气中的热量通过高温热能热泵进行收集，转换成 $\leq 150^{\circ}\text{C}$ 的水或高温蒸汽，用于工业工艺或供暖使用，直接替代传统燃煤锅炉。一般而言，超高温热泵制热出水温度能够达到 100°C 以上，高温热泵的制热出水温度在 100°C 以下的热泵，而常规热泵的出水温度是在 $50^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 以下。

为保证高温热泵设备在稳定的可允许的工作压力下运用，采用特殊的制冷剂为工质可提高换热效率，目前高温热泵系统主要使用 HFC-134a 制冷剂，虽然这类制冷剂 ODP 为零，但 GWP 较高（1300）。霍尼韦尔推出的 Solstice® N15（HFO-515B）制冷剂帮助热泵系统突破现有制冷剂对冷凝温度的限制，助力热泵应用向工业领域的拓展。使用 Solstice® N15 的热泵系统，可实现 $80^{\circ}\text{C} \sim 100^{\circ}\text{C}$ 的制热温度，能够覆盖大部分的工业热水或热风的需求，运行费用成本更低。

而对于 100°C 以上的超高温制热需求，目前超高温热泵主要使用 HFC-245fa 制冷剂，虽然该制冷剂 ODP 为零，但 GWP 比较高（GWP 858），且毒性较高。霍尼韦尔 Solstice® ZD（HFO-1233zd）的临界温度比现有的 HFC-245fa 高 12.5°C ，且安全无毒；GWP 为 1，满足当前所有环保法规的要求；更重要的是，它比 HFC-245fa 具有更高的能效，能够帮助现有的 HFC-245fa 超高温热泵或蒸汽压缩超高温热泵系统设计，较为容易地切换为 Solstice® ZD 超高温热泵系统。

由于供应的温度高，高温热泵和超高温热泵在很多应用上变得具有竞争力，例如干燥、清洗、巴氏杀菌及其他食品加工应用，这些应用都需要用到 70°C 或以上的热水，高温热泵单位运行成本更低。



Solstice® N15

GWP=299

77% ↓ vs HFC-134a
不可燃

对防爆没有要求

Solstice® ZD

临界温度比现有的
HFC-245fa

高 **12.5°C**

安全无毒

GWP=1

满足当前环保法规的要求

更高的能效

应用四：工业清洗

工业清洗剂是化工产业中用于去除污垢的化学或生物制剂的统称，近年来，随着清洗技术迅速发展，工业清洗剂逐渐渗透到金属、机械、电子、印刷、交通、石油、仪器仪表等工业领域的方方面面。据国际投资咨询机构 Markets and Markets 数据显示，2019 年，全球工业清洗市场规模为 468 亿美元，到 2024 年，预计达到 582 亿美元左右，年复合增长率约为 4.5%¹⁷。可以看出工业清洗拥有巨大市场潜力且发展势头迅猛。

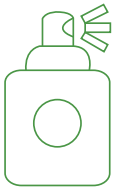
但在严格的法规压力下，市场对工业清洗剂的环保性、安全性、清洗效果等要求不断提升，许多清洗剂的使用都受到了限制或被彻底禁止使用。对挥发性有机化合物 (VOC)、易燃性和毒性的控制，以及将来相关法规对全球变暖潜值 (GWP) 的限制，催生了市场对新型工业清洗剂的需求。

此背景下，具备零 ODP 值、低 GWP 值的第四代含氟气体 HFO-1233zd 受到了广泛关注，并且在不同的工业清洗方式中得到应用。常见的工业清洗方式包括有管路冲洗、浸洗、蒸汽清洗、气雾清洗等。

管路冲洗的应用领域主要包括蒸发器、冷凝器和空调设备的管道，涉及移动设备（汽车、火车、飞机）、住宅和商业制冷系统等。霍尼韦尔第四代氟产品 HFO 中的 Solstice® PF-C 高性能溶剂在此应用场景下对油脂有较强的溶解能力，且能够实现快洗快干。

浸洗和蒸汽清洗主要应用于精密仪器比如医疗器械、工业零部件，甚至是一些结构比较复杂的零部件，搭配清洗的设备，进行超声波清洗。Solstice® PF-C 高性能溶剂具有稳定的去除脏污与溶解能力和快速干燥，对重脂、冷冻油、切削油、真空油、硅油、氟化油、硅脂等多种溶质有着优异的溶解力。作为低沸点溶剂，Solstice® PF-C 使用中的损耗可通过简单的闪蒸回收循环再利用，在经济安全方面呈现出显著优势。

气雾清洗主要采用持续性的纯净清洗剂进行喷雾清洗，用于去除待清洗物的助剂残留。例如电路板上的助焊剂、灰尘颗粒或长时间使用后残留的油脂。气雾清洁过程可有效避免引入其他污染物导致的二次污染问题。因此，气雾清洗的溶剂通常需要清洗能力强且不会破坏材料本身。在这方面，Solstice® PF-C 高性能溶剂有明显优势，其具备一定的热稳定性、非水解性和材料兼容性，与不锈钢、铝、冷轧钢、铜、镀锌钢和马口铁气雾剂罐兼容，对于常用的塑料和橡胶等亦有良好的兼容性，可在气雾清洁剂中作直接替代，也可应用于触点清洁剂，与其他的溶剂混配。



Solstice® PF-C

低沸点

沸点 **19°C**

可快干

缩短工艺时间

能耗低

清洗后无残留

不可燃

无需采取防爆措施

17 2020 年全球工业清洗行业市场规模与发展前景分析, Markets and Markets

值得注意的是，与 HCFC-141b、HFC-4310mee 和 HFC-365mfc 等相比，Solstice® PF-C 高性能溶剂大气寿命仅约为 26 天，其在中国和美国已经被列为非挥发性有机化合物，这意味着将不再需要用于控制地面臭氧和烟雾形成的焚化设备，从而节省大量资本。可以说，Solstice® PF-C 高性能溶剂是目前市场上现有溶剂的较理想替代品，在减少温室气体排放方面可以作出卓越贡献，是行之有效的长期解决方案。

应用五：个人护理

作为快消品的一个重要品类，个人护理行业近年来得到了快速发展。随着化妆品品类的升级与技术迭代，气雾剂形态的化妆品成为化妆品行业一个新的增长动力。据中商产业研究院《2017-2022 年护肤品行业发展前景及投资机会分析报告》数据显示，预计化妆品气雾剂在未来 5 年将会达到 6 亿罐，市场规模超过 300 亿元。

气雾剂化妆品在喷射使用时必须借助推进剂的压力，推进剂是气雾剂喷射的动力，也是溶剂和稀释剂。目前化妆品目录中可以作为气雾剂推进剂的液化气体原料主要包括丙烷、丁烷、异丁烷、二甲醚和 HFC-152a（二氟乙烷）等。这些气雾剂推进剂有一个共同的缺点，就是易燃性，在安全性上存在一定的隐患。

随着气雾剂化妆品市场需求的不断增长，消费者在追求产品带来的效果的同时，更加注重产品的安全性、便捷性、可回收性等需求，并对气雾剂化妆品的配方、原材料、外观创新等提出了更高的要求。

为了更好地助力中国气雾剂化妆品行业的发展，通过推动新原料运用到气雾剂化妆品的研发和使用中，提升其在日常储存过程中的安全性，霍尼韦尔推出了基于新一代氢氟烯烃（HFO）突破性技术的 Solstice® 推进剂和 Solstice® Enhance 高性能溶剂，可针对不同用途的个人护理气雾剂产品提供安全环保的解决方案，两者均属于不可燃材料（ASTM E-681），有助于减少对环境的影响，可更好地助力个人护理行业企业有效减少碳足迹。这两种产品目前已全部完成中国国家药品监督管理局化妆品新原料备案，并有望在监测期满后正式列入中国化妆品原料目录¹⁸，为配方设计师开发具有创新性的个人护理产品提供更多可能。全球护发品牌 FEKKAI 已经于 2022 年发布使用霍尼韦尔 Solstice® 推进剂用于洗发护理的产品。



Solstice® 推进剂
Solstice® Enhance
高性能溶剂

可提供无刺激性的
即时冷却
快速干燥
独特的发泡效果
全新质感

有效改善个人护理产品
表面润湿性

18 根据《化妆品注册备案管理办法》第十九条，安全监测的期限为 3 年，自首次使用化妆品新原料的化妆品取得注册或者完成备案之日起算

应用六：电子冷却

集成电路上可以容纳的晶体管数目在大约每经过 18 到 24 个月便会增加一倍。换言之，处理器的性能大约每两年翻一倍，同时价格下降为之前的一半¹⁹。近年来，众所周知的摩尔定律扩展速度有所放缓，其原因便在于晶元尺寸和散热瓶颈。随着电子元器件运行温度的上升，产品寿命会显著缩短；随着单位面积上容纳的电子元器件越来越多，散热的好坏将直接影响到电子设备工作的稳定性，在电子设备高性能、小型化发展趋势下，与之相伴的散热设计在电子设备中重要程度越来越高²⁰。

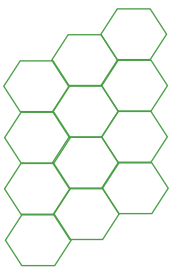
换言之，对电子设备而言，若散热不及时，电子设备发生故障的概率也将显著升高。美国空军航空电子完整计划曾对电子产品的故障和失效原因做过分析，结果发现由于温度过高而导致的失效占有故障原因的 55%²¹。在通信设备、数据中心、高电压输配电等应用领域，如何实现高效散热是近年来科学家和工程师们致力攻克的难题。除在界面材料和空气侧持续研究迭代，散热器本身也被大量研究，其中就包括如何使用环保冷媒实现高效散热。

移动通信

在移动通信网络中，大部分的能耗来自广泛分布的基站，日益密集的 5G 基站带来更高的能耗和散热挑战，以基站信号发射单元（天线、AAU）为例，4G 时代传统铝热沉配合基板镶嵌铜—水热管就能满足散热需求，而到了 5G 时代，发热量或有数倍的增加，先前的方案很难满足目标。吹胀板热管技术被研究应用于该领域并实现了产业化。

和其他热管工作原理类似，吹胀板内部工作介质在热源位置汽化吸收热量，在热源外区域释放热量液化，工作介质扮演“热量搬运工”的角色，从而实现整个吹胀板平面内的温度均匀。

吹胀板具有导热速度快、可靠性高等诸多优势，但在通信行业，特别是基站领域，传统散热方案难以满足 5G 基站的散热要求。5G 基站的功耗较 4G 基站提升了数倍；且 5G 基站天线等单元的体积、重量也有较大幅度的增加，因此市场亟待出现下一代散热方案，以进一步提升散热模组的性能、减轻产品重量。



霍尼韦尔
Solstice® 散热解决方案

Solstice® ZD
Solstice® ZE

提升数倍**冷却能力**

大幅**减轻重量**

提升**收益率**

19 百度百科，摩尔定律，<https://baike.baidu.com/item/%E6%91%A9%E7%88%BE%E5%AE%9A%E5%BE%8B/350634>

20 中国科学院，中国学科发展战略：电子设备热管理，科学出版社，2022

21 数据来源：美国空军航空电子完整性计划（US Air Force Avionics Integrity Program），AVIP

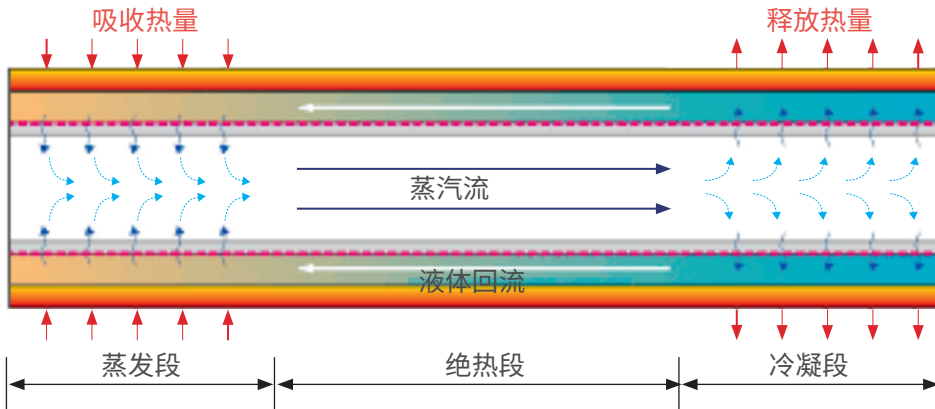


图 2 热管工作原理

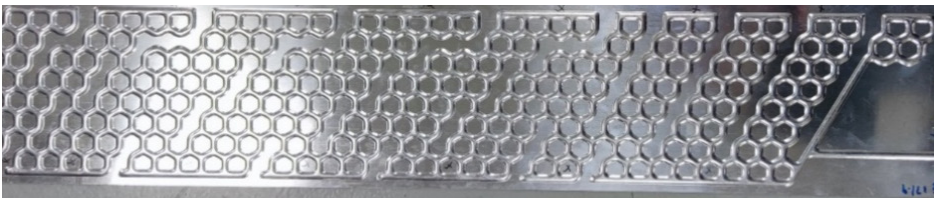


图 3 吹胀板

表 4 实验测试数据

类别	吹胀板		铝板
工作介质	Solstice®ZD	Solstice®ZE	/
加热功率 (W)	133.2	147.9	103
传热路径温度差值 (°C)	0.27	0.17	9.93
传热路径热阻 (°C/W)	0.0020	0.0011	0.094

数据中心

当前，现代化数据中心承担的数据计算和存储压力与日俱增，这给数据中心的系统稳定性提出了更高的要求，于是，服务器乃至机房的散热成为了关键。为应对大数据、超密度计算的“功耗墙”，使用其他诸如虹吸热管、单相或两相泵循环液冷甚至浸没冷却等散热新技术替代传统热沉来对计算机设备进行冷却，是未来数据中心的一场技术革命。这些新技术的共同特点是利用流体为媒介实现热量的转移。

对于高热流密度数据中心的散热问题，传统使用铜—水热管的技术并不能完全胜任——当热管吸收过量热量时，会出现“热管干涸”的现象，导致蒸汽无法冷凝为液体返回热源，使热管工作失效，进而造成设备宕机甚至损坏。因此，仍旧使用传统散热方案将提升设备运行的风险系数。在这样的背景下，两相虹吸散热技术越来越受到关注。采用霍尼韦尔 Solstice® 含氟气体为工作流体的虹吸热管散热器相对其他技术具有更高的性能，而更高的性能意味着 CPU 可以发挥更高的算力，或者散热风扇可以以更低转速运行进而实现节能。除了性能的优势，虹吸散热器还具有可靠性高、寿命长、免维护等诸多优点。

近年来，随着数据中心的功率密度不断增加，部分前沿的数据中心开始采用浸没式冷却。这种冷却方式直接将 IT 硬件浸没在冷媒中，电子元件产生的热量直接高效地传递到液体中，这种冷却方式减少了对导热界面材料、散热器和风扇等主动冷却组件的需求。初步研究表明，浸没冷却有助于企业在数据中心生命周期各阶段降低成本，包括从设计建造到运营、硬件的维护、维修和更换等阶段的成本节约。霍尼韦尔正着力研究和开发适用于浸没冷却、超低全球变暖潜值的碳氟化合物，争取对环境友好的同时兼顾商用需求、适宜的生产成本和稳定工艺。

高电压输配电

高压输电过程中需要借助换流阀、换流变压器等多种转换设备及装置，而这些设备主要由大功率半导体器件组成，具有体积小、功率大和热量集中等特点，过高温度会严重限制和影响电子产品的性能及可靠性，降低设备工作寿命。

针对高压输配电相关设备的散热特点，传统应用于高压输配电的热管散热技术出现了 2.0 版本“空腔散热”，也被称为真空腔均热板散热技术，真空腔底部的制冷液在吸收元器件热量蒸发后将热量传导至散热鳍片上，随后冷凝为液体回到底部。

与传统的单相液冷系统相比，霍尼韦尔 Solstice® E-Cooling 的两相液冷工艺更节能，冷却效果更均匀，性能更好，且所需泵功率更低。同时，Solstice® E-Cooling 也是一种绝缘流体解决方案，不会因接触液体而短路受损，特别适用于高电压输配电行业。

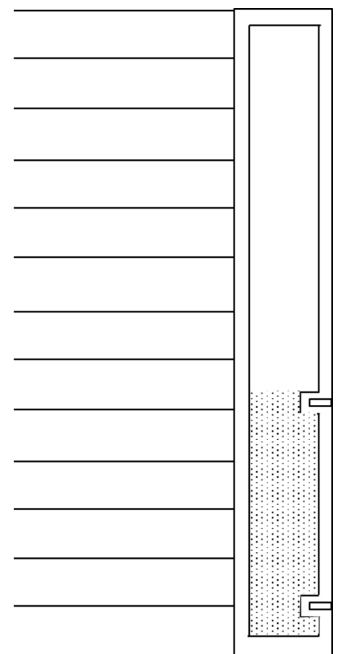


图 4 空腔散热器



Solstice® E-Cooling

两相液冷工艺

更节能

冷却效果

更均匀

性能更好

所需泵

功率更低

应用七：汽车

2021年9月15日，《基加利修正案》在中国正式生效，作为HFC的重要消费领域，汽车行业被认为是HFC削减的优先控制领域之一。

在汽车行业，HFC的应用主要包括车载空调中的制冷剂以及车内材料中的发泡剂，《基加利修正案》的生效意味着中国需要尽快开展新一代环境友好型HFO技术的商业化应用。

汽车空调制冷

欧、美、日等地区开展HFC汽车空调制冷剂削减工作已有十几年历史，汽车行业HFC替代率达50%以上²²，这为中国HFC削减提供了非常好的经验。从2011年起，欧盟通过含氟气体法案和针对车载空调的《车载空调指令（MAC Directive）》限制高GWP产品的使用。在美国，一方面，SNAP法规要求按照法规严格控制HFC-134a的使用限额；另一方面，采用气体减排的激励积分政策鼓励制造商提高车载空调的效能，减少制冷剂的需求。

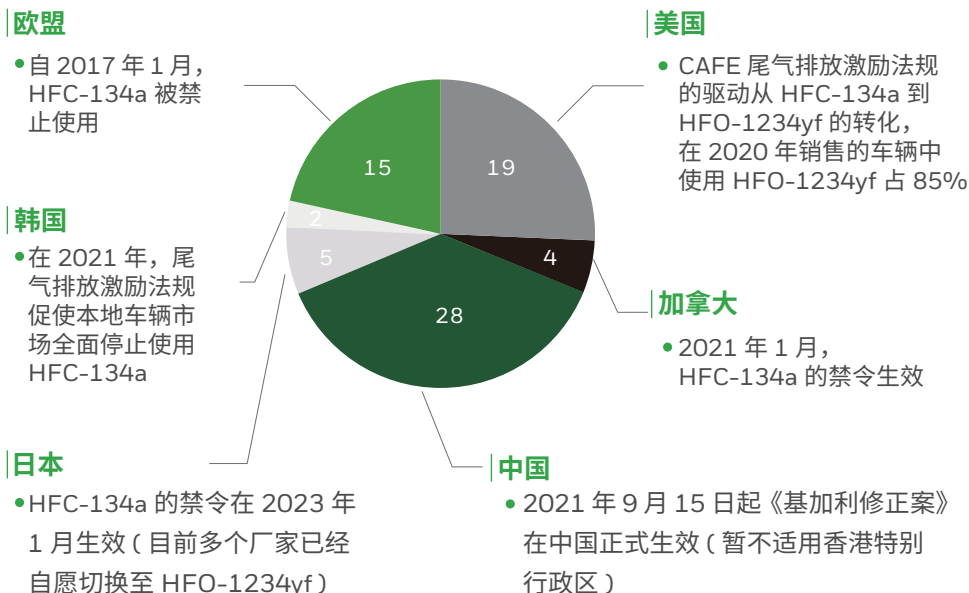


图5 全球法规现状

22 行业研究 | 汽车空调温室气体减排联合研究, <http://www.catarc.info/news/11457.cshtml>

在各国法规的驱动下，以霍尼韦尔 Solstice® yf (HFO-1234yf) 为代表的第四代氢氟烯烃 (HFO) 制冷剂异军突起，表现出明显的替代优势，可帮助汽车厂商满足针对汽车空调制冷剂日益严格的法规要求；且在汽车设计、工程制造和服务等方面得到成熟验证。截至 2022 年底，全球采用霍尼韦尔 HFO-1234yf 用于汽车空调系统的汽车约为 1.85 亿辆。

在新能源汽车尤其是纯电动汽车上，高效节能的热泵技术的应用有效地提升了新能源汽车的续航里程，促进了新能源汽车的应用与推广。相较于 HFC-134a，HFO-1234yf 热泵空调系统有着基本持平的制热性能，同时由于 HFO-1234yf 的标准沸点更低、相同工况下的压缩机排气温度更低，更有利于汽车热泵空调系统在更低的环境温度下可靠运行。有关研究表明，强化补气 (EVI) 技术可以显著提升汽车热泵空调系统的性能表现，并且 HFO-1234yf 热泵系统经过强化补气 (EVI) 后的性能提升效果优于 HFC-134a 热泵空调系统，可以满足超低环境温度下的制热需求²³。

目前，中国也在积极制定政策来明确汽车行业 HFC 削减进度，这就包括制定和实施汽车车载空调 HFC 淘汰时间表；制定机动车温室气体排放标准并囊括非二氧化碳温室气体排放限值；完善消费削减、排放控制、技术引导等相关措施，引导汽车行业开展技术研发、车型设计、产线改造、回收技术开发等应对工作，保障汽车行业 HFC 削减工作顺利推进。

目前来看，我国已经具备了替代和减少使用汽车空调制冷剂 HFC-134a 的能力。作为最早生产 HFO-1234yf 的国家之一，生产能力可以满足替代市场的需求。虽然减排初期 HFO-1234yf 相对成本较高，但相比其他行业减排单位温室气体的成本仍然具有优势²⁴。伴随着替代品的规模化生产和技术进步，减排成本将逐步降低。与此同时，世界上许多国家和地区已经禁用汽车空调采用高 GWP 制冷剂，加快使用低 GWP 制冷剂的车型将有利于中国本土企业生产满足其他国家进口标准的汽车，是中国迈入世界汽车强国行列的重要一步。

2022 年，霍尼韦尔宣布为蔚来汽车和沃尔沃汽车在中国市场提供超低全球变暖潜值的 Solstice® yf 制冷剂，这些合作标志着中国本土市场开始使用 Solstice® yf 制冷剂。



HFO-1234yf GWP<1

与目前国内市场使用的
HFC 制冷剂相比

99.9%



制冷能效高

安全性高

符合现有行业标准的要

23 采用 R1234yf 制冷剂的汽车超低温强化补气热泵空调系统性能，中国知网
24 《中国汽车空调 HFCs 制冷剂减排绿皮书》，北京大学



目前中国大部分车企已经具备了 HFO-1234yf 空调系统设计及应用能力，国内在运营的车辆在采用 HFO-1234yf 时，仅需轻微变更压缩机油、充注接口以及内部回热管（IHX），系统成本较低。

表 5 汽车空调系统的替代制冷剂性能、成本和市场状态比较²⁵

类型	GWP-100	相对能效比	成本 (元/kg)	使用寿命 期内保养 次数	安全性	市场状态
原有制冷剂 HFC-134a	1300	/	30	2	A1 不可燃	主流制冷剂
HFO-1234yf	<1	相当	300	2	A2 弱可燃	乘用车已广泛商业化
HFC-152a	138	制冷能效提高 10%，制热能效持平	18	2	A2 可燃	试验性
R-744	1	制冷能效下降 20%，制热能效提升 1~2 倍	6	2-4	A1 不可燃	在乘用车及大巴均有小批量应用
R-290	3	制冷能效提高约 10%，制热能效提升 1~2 倍	20	2	A3 极易燃	一款电动大巴已商业化，乘用车无商业化案例

新能源汽车轻量化材料

在全球碳中和的背景下，汽车行业的“弃油向电”已经势不可挡。新能源汽车对提升续航里程需求更为迫切，市场和政策也越来越关注新能源汽车的“里程焦虑”问题。而汽车轻量化是提升续航里程的有效途径，根据《中国商用汽车产业发展报告（2022）》，若新能源车减重 100 千克，续航里程将提升 10%~11%，同时降低 20% 的电池成本和日常损耗成本²⁶。除了在钢骨架结构上进行减重外，汽车内饰材料的减重也是汽车轻量化的重要辅助手段之一。

作为新型物理发泡剂，霍尼韦尔 Solstice® LBA 在环保、安全及轻量化替代方面有诸多看点。实验数据表明，在传统的聚氨酯泡沫内饰行业中，加入 3%~5% 的霍尼韦尔 Solstice® LBA 产品便可将产品密度进一步降低 10%~15%，可应用于在汽车的扶手、前保险杠、引擎罩盖、燃油盖、NVH 件，最终达到汽车内饰材料的减重，实现汽车轻量化，增强汽车未来的续航能力。



在传统的聚氨酯泡沫内饰行业中，加入 3%~5% 的

Solstice® LBA

可将产品密度进一步降低

10%~15%

²⁵ 《中国汽车空调温室气体减排措施及政策建议》，（ICCT）研究报告

²⁶ 《汽车工业蓝皮书：中国商用汽车产业发展报告（2022）》，社会科学文献出版社

前 瞻

气候变化是人类面临的共同挑战，要改变世界，唯有携手并进。《基加利修正案》在中国正式生效是一个里程碑式的节点，这意味着中国除了需要履行国际法规，也需要借此机会探索国内行业法规的制定，为减碳的长远目标做准备。

作为一项创新技术，HFO 在节能减排以及提高能效上的优势引起了中国产业界的广泛关注，国内制冷剂的相关应用厂商已经先行一步，比如家电、商超、冷库等行业已经开启 HFO 产品对 HFC 的替代使用；但是仍有一些应用领域需要跟进，如汽车、建筑板材、工业清洗等行业。一个好消息是，中国相应的行业协会已经开展对 HFO 在中国汽车空调制冷应用的调研，并已制定出初步计划。可以预见，未来三年 HFO 的全面应用将有望在各个行业遍地开花。

到 2022 年底为止，霍尼韦尔 Solstice® 系列 HFO 产品的广泛使用已帮助全球减排超过 **3.26 亿公吨** 的二氧化碳当量，这相当于

减少了
7.55 亿
桶石油潜在排放



每年减少近
7000 万
辆汽车的碳排放



减少
87 座
火电站一年的碳排放



如今，越来越多中国企业将可持续发展和践行 ESG 理念提升到企业战略和愿景的高度，积极通过节能减排践行企业社会责任、应对气候变化。面对 HFCs 的削减，HFO 不仅仅是当下履行国际法规的“答案”之一，也是未来五到十年中国很多企业转型和走向国际的一个重要解决方案。主要 HFO 生产厂家会以自身品牌、渠道、技术优势，联合上下游、协会、品牌方打造全方位生态圈，有序建立有助于 HFO 推广的市场、技术、交流的环境。相应的，下游企业也应提前做好准备，从生产、设备、供应链、市场销售端安排与之相应的调整，从而顺利实现整个行业的过渡。



关于我们

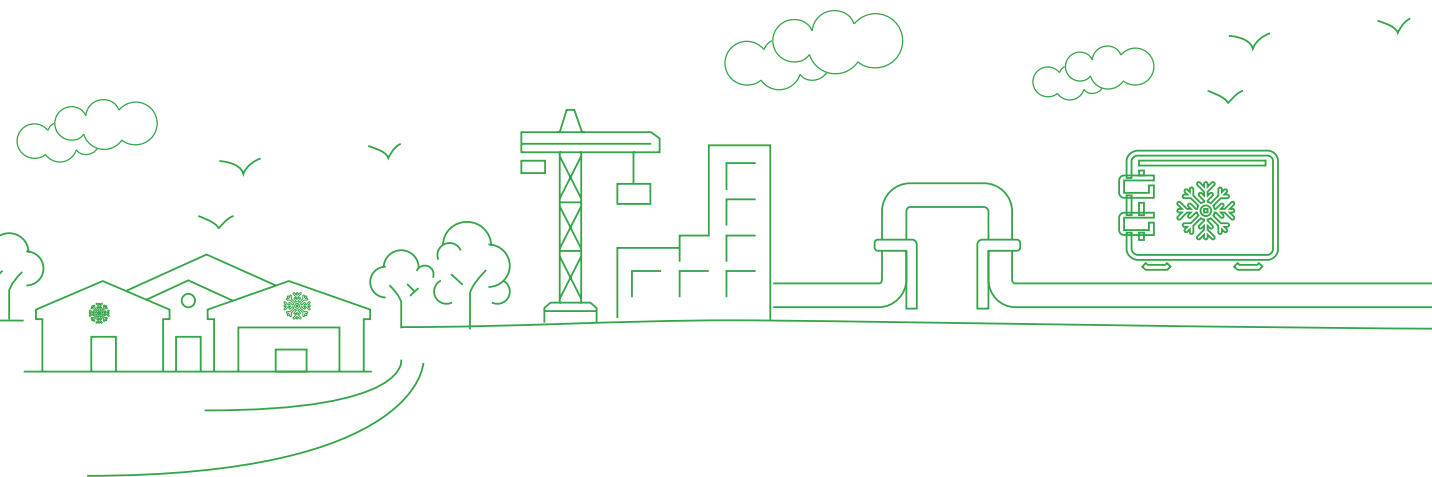
霍尼韦尔（中国）有限公司可持续发展研究院隶属于霍尼韦尔特性材料和技术集团，前身为 2018 年成立的霍尼韦尔（中国）有限公司环境保护研究院。升级后的研究院融合了该业务集团的创新力量和专家，涵盖了研发、技术、市场、产品等各个领域。可持续发展研究院低碳中心（以下简称“低碳中心”）成立于 2021 年 8 月，专注于研究低碳技术发展和市场需求，以霍尼韦尔创新的产品和技术为引擎，推动低碳解决方案在中国市场的开拓和实施，助力客户可持续发展以及中国“碳达峰”和“碳中和”目标的实现。低碳中心目前已经出版了《炼化行业低碳发展》、《以绿色技术促进可持续发展——霍尼韦尔 2022 低碳发展》以及《氢能工业与应用发展》三份研究报告。本次发布的《顺应多变未来，引领低碳方向——环境友好型氢氟烯烃（HFO）的前沿应用》白皮书首次聚焦于生活中被广泛应用，但又常常被忽视的氟产品。今年可持续发展研究院还将有更多的研究洞见与大众见面。

霍尼韦尔特性材料和技术业务集团是全球领先的特性材料、工艺技术和自动化方案供应商。该集团下属高性能材料部专业生产多样的高性能产品，包括环境友好型制冷剂、发泡剂和气雾剂。此外，集团下属霍尼韦尔 UOP 拥有超过 4900 个专利和应用，并且全球广泛使用的 36 种炼油工艺中的 31 种是霍尼韦尔 UOP 的发明。集团下属过程控制部则是分布式控制系统（DCS）的发明者，引领工业自动化行业长达半个世纪之久，其技术应用全球超过 15000 家生产基地，覆盖超过 125 个国家和地区。集团旗下智慧能源与热能解决方案部拥有面向多行业的综合燃烧控制方案，可满足全球客户对更加清洁、精准和高效的热量传输的需求。

编辑委员会

邹冠星 王金 刘焘 黄恒 宋艳燕 周永 赵欢欢 王斌 甘芸华 陶滔
吴翀 李宝刚 刘雪红 周青 陈漫野 王钰钰 卢彬 丁维维 罗瑞

感谢他们基于对行业发展和相关技术应用的洞察和提出的独到见解和前瞻。



Honeywell

霍尼韦尔(中国)有限公司
可持续发展研究院

地址:上海环科路555弄1号楼 邮编:201203
电话:400-842-8487
网址:www.honeywell.com.cn



联系我们