



# 中国工商制冷空调行业 HFCs 制冷剂使用趋势研究报告

中国制冷空调工业协会

2014

本报告由能源基金会资助。

报告内容不代表能源基金会观点。

## 摘 要

中国目前是全球最大的制冷空调设备生产国和消费国，中国工商制冷空调行业是中国 HCFCs 的主要消费行业之一。目前中国工商制冷空调行业正在实施加速淘汰 HCFCs 的工作，HFCs 作为全球当前阶段 HCFCs 的主要替代品之一，HCFCs 的淘汰过程将驱动 HFCs 消费快速增长。伴随着全球范围内的消耗臭氧层物质的淘汰进程已完成大半，减少温室气体排放、减缓全球变暖已成为现阶段中全球环境保护的首要课题，当前国际社会逐步削减 HFCs 的呼声也日益高涨。在北京刚召开的 APEC 会议期间，中美两国就温室气体具体减排目标达成协议。在这种形式下，有必要开展中国工商制冷空调行业 HFCs 制冷剂使用趋势研究工作，为未来可能的 HFCs 逐步削减做好相关的准备工作。

本研究项目在对中国工商制冷空调行业制冷剂消费现状开展调研的基础上，测算出 2012 年制冷剂消费总量超过 7.8 万吨，折算成 CO<sub>2</sub> 当量为 125.6 百万吨。基于符合正态分布模型和 GDP 增速关联增长模型两种模型进行预测，2030 年中国工商制冷空调行业制冷剂消费总量按低增长模式将达到 15.4 万吨，按高增长模式将达到 17.8 万吨。本研究报告根据行业专家的建议，基于协会所掌握的行业背景数据，设定了基线情景（BAU）、削减情景 A、削减情景 B、削减情景 C 和削减情景 D 五种削减情景。在低增长模型下，按情景 C 制冷剂消费折算 CO<sub>2</sub> 当量基本能控制在设定的基线要求；在高增长模型下，只有选择情景 D，才能将制冷剂消费折算 CO<sub>2</sub> 当量控制在设定的基线要求，此时削减量将达到 172.1 百万吨 CO<sub>2</sub> 当量，削减率为 60%，经分析认为这也是当前技术水平及国际环境下的中国工商制冷空调行业最大削减潜力。

作为含氟制冷剂使用大户的中国工商制冷空调行业，未来 HFCs 削减压力将非常大。在未来中长期内如何切实有效地控制 HFCs 制冷剂的使用，加快转向更加低碳环保的替代制冷剂，需要制定适宜的政策和战略，并尽早采取行动，通过政府的统筹规划和组织管理、行业机构、高校科研院及企业届的积极协调参与，通过技术创新寻找合理的解决方案，共同为全球化的减排温室气体、保护生态环境做出贡献。



# 目 录

<b>1 背景</b> .....	<b>1</b>
1.1 HFCs 逐步削减面临的国际形势 .....	1
1.2 发达国家和地区 HFCs 逐步削减进展 .....	4
<b>2 工商制冷空调行业发展现状及预测</b> .....	<b>8</b>
2.1 工商制冷空调行业概况 .....	8
2.2 工商制冷空调行业制冷剂消费现状和发展预测 .....	12
<b>3 工商制冷空调行业的替代技术分析</b> .....	<b>15</b>
3.1 选择替代技术的基本原则 .....	15
3.2 潜在替代制冷剂分析 .....	17
3.3 国际组织制冷剂替代方案的调研 .....	22
3.4 其他相关替代技术分析 .....	28
3.5 替代制冷剂相关标准的发展 .....	31
3.6 国内替代技术选择参考方案 .....	36
<b>4 HFCs 制冷剂削减潜力测算</b> .....	<b>38</b>
4.1 制冷剂削减所产生环境效益的计算方法 .....	38
4.2 HFCs 制冷剂削减情景设定 .....	42
4.3 HFCs 制冷剂削减情景计算 .....	46
4.4 HFCs 制冷剂削减潜力分析 .....	49
4.5 小结 .....	51
<b>5 HFCs 制冷剂逐步削减的困难与期望</b> .....	<b>52</b>
5.1 开展 HFCs 制冷剂削减工作的紧迫性 .....	52
5.2 国际形势变化的不确定性 .....	52
5.3 核心技术影响削减进程 .....	52
5.4 中国国情下 HFCs 削减路线的复杂性 .....	53
5.5 小结 .....	53
<b>6 应对 HFCs 制冷剂控制的建议</b> .....	<b>55</b>

6.1 政府应做好统筹规划、组织管理工作 .....	55
6.2 行业协会应充分发挥桥梁与纽带作用 .....	56
6.3 企业应积极开展替代品的筛选、推广工作 .....	56
6.4 高校科研院应发挥替代技术创新的支撑作用 .....	56
<b>参考文献.....</b>	<b>59</b>

# 1 背景

## 1.1 HFCs 逐步削减面临的国际形势

能源和环境问题是当前世界各国关键的主要焦点，各国都把应对气候变化作为保护全球环境和履行国际职责的首要目标。在臭氧层破坏问题和温室效应问题给人类敲响了环境保护的警钟之后，人们开始逐步关注可提供舒适和调控的温湿度环境的制冷技术对环境的负面影响。当前应用最广泛的制冷技术（压缩式制冷空调和热泵技术）是利用制冷剂在系统各部件间循环流动，通过热力状态的变化，实现从低温热源吸热向高温热源放热，从而达到营造不同于自然环境的可控与舒适环境的要求的技术。然而，该技术虽然为人类提供了可控与舒适环境，但是，由于作为制冷系统“血液”的制冷剂使用了氯氟烃（CFCs）、氢氯氟烃（HCFCs）或氢氟烃（HFCs）等含氟或氯物质，也带来了破坏大气臭氧层、增加碳排放、增加温室效应等负面影响。

在科学研究证实了地球臭氧层变薄的事实后，1985年在联合国环境规划署（UNEP）的推动下，制定了保护臭氧层的《维也纳公约》，并在1987年9月签署了《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》<sup>[1]</sup>。截至2010年6月29日为止，已有196个政府批准了这项条约。CFCs和其它ODS（臭氧层破坏物质）的生产和消费量(折合到ODS吨)已经被奇迹般的减少了98%以上，而且已避免了相当于超过1350亿吨CO<sub>2</sub>的温室气体排放。2007年，美国国家航空航天局NASA的数据表明，自1998年以来，臭氧洞的最低水平已经趋于稳定，不再减少<sup>[2]</sup>。

在保护臭氧层行动中取得了巨大成功之后，国际社会将关注重点转移到温室气体排放削减方面。2013年9月27日，联合国政府间气候变化专门委员会IPCC在斯德哥尔摩发布了第五次气候变化评估报告第一次工作组报告《气候变化2013：自然科学基础（决策者摘要）》<sup>[3]</sup>。报告指出：从1950年代以来的变化是千年以来所未见的；从有详细气象记录以来的1850年代开始，刚刚过去的三个年代每一个都刷新了气温最高的纪录。从1983到2012年这三十年，至少在北半球是1400年以来最热的三十年。在1880年到2012年间，陆地与海洋表面的气温已经升高了0.85摄氏度，而2003到2012年十年的平均气温与1850到1900年五

十年的平均气温比较，也高出了 0.78 摄氏度。气候变化的驱动力主要来自 CO<sub>2</sub> 浓度的升高。总辐射强迫是增加的，已经导致气候系统的能量摄取。总辐射强迫的最大原因是由 1750 年以来大气中 CO<sub>2</sub> 浓度增加所造成的。所以，人类对气候系统的影响是显而易见的。这可以从不断增加的大气中温室气体浓度、正辐射强迫、观测到的变暖得以印证。因此，为了应对气候变化，1997 年 12 月，在日本京都召开的《联合国气候变化框架公约》第 5 次缔约国际会议上，许多国家和地区签订了《京都议定书》，明确了对 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O、SF<sub>6</sub>、PFC 和 HFCs 六种温室气体进行管控<sup>[4]</sup>。

在温室气体影响中，制冷剂产生的影响是不能忽略的，由于目前广泛使用的制冷剂（HCFCs 和 HFCs）大多是含氟气体（F-gas），这些物质一般有较高的直接辐射强迫和较长的大气寿命，因此有较高的全球变暖潜值（GWP）。尽管《蒙特利尔议定书》已经对 HCFCs 的使用进行了约束，然而作为 HCFCs 的替代品 HFCs 物质，由于高 GWP 问题也只是一个过渡方案，最终将逐步受到限制。例如：自 2009 年开始，在《蒙特利尔议定书》缔约方大会上，北美三国多次提出将 HFCs 从《京都议定书》转移纳入《蒙特利尔议定书》进行管理的提案，提出要逐步实现 HFCs 的削减控制。2011 年，108 个国家加入蒙特利尔议定书曼谷宣言（Montreal Protocol Bangkok Declaration），呼吁在 CFC 和 HCFC 的淘汰过程采用低 GWP 的替代品。2012 年，联合国大会通过决议，批准里约+20 宣言（Rio+20 Declaration），支持逐步削减 HFC 的消费与生产。2012 年 11 月，105 个国家加入巴厘宣言（Bali Declaration），呼吁向低 GWP 的 ODS 替代品转变。2013 年 5 月，北极理事会 Kiruna Declaration of the Arctic Council 敦促蒙特利尔议定书缔约国立即采取行动削减 HFC 的生产与消费。美国带动北美三国与小岛屿国家代表连续 5 年向蒙特利尔议定书缔约方会议提出了 5 次逐步削减 HFC 生产和消费的修正提案（见图 1-1）<sup>[5]</sup>。该提案规定 A5 国家以 2008-2010 年氟氯烃消费量和生产量平均值的 90% 作为基准；而非 A5 国家将 2008-2010 年所有氢氟碳化物消费量和生产量，与氟氯烃消费量和生产量的 85% 相加后取平均值，作为基准。计算基准以全球变暖潜能值，而不是《蒙特利尔议定书》通常采用的臭氧消耗潜能值来计算。迄今为止国际上已有超过 100 个国家表态支持 HFCs 逐步削减提案<sup>[6]</sup>。

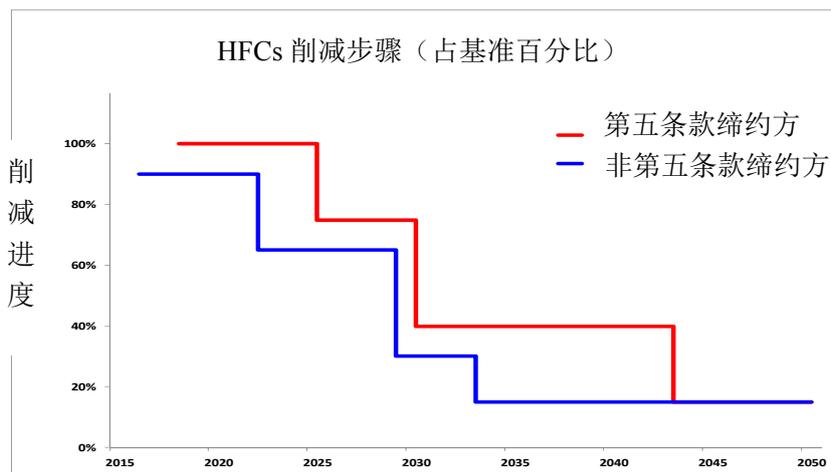


图 1-1 北美三国提出的 HFCs 削減提案<sup>[7]</sup>

在 2013 年 6 月初举行的中美元首庄园峰会上，两国领导人均表示同意将共同努力推动逐步削減 HFCs 的使用。美国和中国同意携手合作并与其他国家一道，通过多边途径，包括使用《蒙特利尔议定书》中的专业知识和机构，逐步减少 HFCs 的生产和消费，同时继续将 HFCs 包含在《联合国气候变化框架公约》以及《京都议定书》中关于排放报告规定的范围内。2013 年 9 月，G20 峰会期间中美双方元首见面又进一步就 HFCs 问题进行了交流，中国与美国这两个全球最大的温室气体排放国同意采取新的合作举措，逐步减少 HFCs 的使用。两国同意设立一个联络小组来探讨具体问题，比如成本效益、资金和技术支持、安全和环境效益等相关问题。2014 年 11 月，在北京召开的 APEC 会议期间，中美发布应对气候变化联合声明：两国将在开始削減具有高全球增温潜势的氢氟碳化物方面加强双边合作，并按照两国元首于 2013 年 9 月 6 日圣彼得堡会晤所达成共识在多边框架下携手合作；美国计划于 2025 年实现在 2005 年基础上减排 26%-28%。中国计划 2030 年左右二氧化碳排放达到峰值且将努力早日达峰，并计划到 2030 年非化石能源占一次能源消费比重提高到 20%左右，双方均计划继续努力并随时间而提高力度。就国际议定书的规定和长远的发展趋势而言，目前国际上普遍使用的高 GWP 的 HFCs 制冷剂在未来的消费淘汰将不可避免。

## 1.2 发达国家和地区 HFCs 逐步削减进展

为了加快 HFCs 削减和控制，世界各国为减轻温室效应方面采取了不同的措施。欧盟的思路是通过提前制定相应的削减法规，促使企业去寻找新的解决方案，并且解决方案偏重与 CO<sub>2</sub> 和碳氢等天然工质<sup>[8]</sup>。例如：2006 年欧盟出台 2006/40/EC 法案，法案规定自 2017 年 1 月 1 日起，在欧盟成员国新生产的汽车，所使用的汽车空调制冷工质 GWP 不能超过 150；2013 年 12 月，欧盟委员会、议会环境委员会、理事会于 2013 年 12 月对 2006 年 F-GAS 法案的修订协商形成了提交议案，并在 2014 年 3 月被欧洲议会全体会议正式采纳<sup>[9]</sup>，该修订案制定了 HFCs 削减时间表：2015 年冻结，2016 年削减政策干预启动，2030 年削减使用量的 79%（CO<sub>2</sub> 当量），见图 1-2。具体措施包括：对于大型工商业制冷系统（制冷量大于 40kW），使用 GWP 用包括：对（当前使用的 R404A 为 3922）制冷剂的限定时间为 2020 年；商用冰柜及冷库在 2020 年后不能使用 GWP 能使用及冷的制冷剂；在 2022 年后不能使用 GWP 能使用及的制冷剂；间接复叠式制冷系统的限定值为 1500；而单体分体空调（充注量小于 3kg 的），限定值为 750（2025）。同时，欧盟还对 F-gas 法规所能产生的影响进行了预测分析<sup>[10]</sup>，见图 1-3。

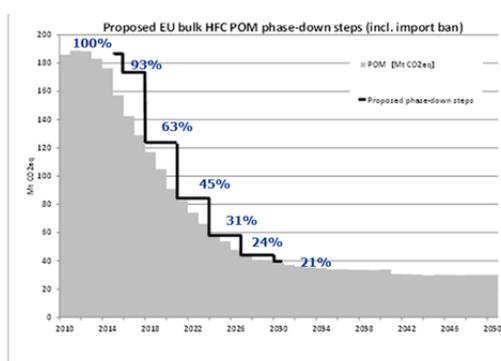


图 1-2 欧盟 HFCs 削减时间表

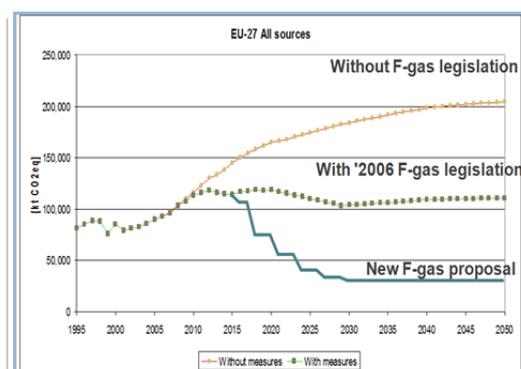


图 1-3 F-gas 法规下欧盟温室气体排放预测<sup>[9]</sup>

美国的思路是寻找到解决方案并制定相应的法规，因此从 2006 年开始开发一系列新的低 GWP 替代工质 HFOs 来探索制冷工质环保要求的应对策略，并进行相关的评估测试。2014 年 7 月美国环保署提出了新的 SNAP 修订提案，建议把 5 种具有（微）可燃性制冷剂加入可用制冷剂名单；2014 年 8 月建议禁止一

些制冷空调产品领域禁止使用高 GWP 的制冷剂；2014 年 10 月, SNAP 发布的新增的可使用的替代制冷剂, 详见下表。

表 1-1 2014 年 7 月 SNAP 提议新增的可使用的替代制冷剂<sup>[11]</sup>

制冷剂	GWP	适用领域					
		冰箱	零售业 食品冷藏	自动 售货机	低温 制冷	载冷剂	家用 空调
乙烷	6				√	√	
异丁烷	8		√	√			
丙烷	3	√		√			√
R441A	<5		√	√			√
HFC-32	675						√

表 1-2 2014 年 8 月 SNAP 提议在美国市场禁止使用的制冷剂<sup>[11]</sup>

禁止销售的制冷剂及时间	对应产品
机动车载空调（2021 年后生产的）	HFC-134a 不能使用
新生产的（或是由旧的 ODS 翻新的）超市使用的冷藏系统：远程压缩系统（2016 年 1 月）	HFC 不能使用，包括 HFC-227ea, R-404A, R-407B, R-421B, R-422A, R-422C, R-422D, R-428A, R-434A, R-507A
新生产的独立式商用食品冷藏设备和贩卖机（2016 年 1 月）	HFC 不能使用，包括 HFC-134a, R-404A, R-407A, R-407C, R-507A, 其他混合物
由旧的 ODS 翻新的独立式商用冷藏设备和贩卖机（2016 年 1 月）	HFC 不能使用，包括 R-404A 和 R-507A

表 1-3 2014 年 10 月 SNAP 发布的新增的可使用的替代制冷剂<sup>[11]</sup>

制冷剂	冷水 机组	工业 制冷	工业 空调	冷藏 库	冷冻 运输	零售食 品冷藏	自动 售货机	商用 制冰机	冷饮 机	家用冰箱 和冷柜	载冷 剂
R450A	√	√	√	√	√	√	√	√	√	√	
CO <sub>2</sub>					√						
HCFO- 1233zd(E)											√

日本经济产业省(METI)正在修订制冷剂相关的法规<sup>[12]</sup>, 2014 年 8 月底进行公示, 计划 2015 年 4 月正式实施 (详见下表 1-4)。该修订案对各类产品的规定采用加权平均目标值, 而不是非直接禁用某种高 GWP 的 HFCs 物质。从该修订案可以预计, 未来的几年内家用空调和单元式空调 PAC 将主要采用 R32 作为替代制冷剂。目前, 在日本热泵热水器产品中已主要采用了 CO<sub>2</sub> 作为制冷剂。

表 1-4 日本制冷剂法规规修订案的相关规定

产品类别	现有制冷剂 (GWP)	目标值	目标年
家用空调 (不含柜机)	R410A (2090) R32 (675)	750	2018
单元式空调 PAC (不含柜机)	R410A (2090)	750	2020
商业冷冻冷藏 (压缩机能力 : > 1.5kW)	R404A (3920) R410A (2090) R407C (1774) CO <sub>2</sub> (1)	1500	2025
中央式冷冻单元 (二次循环, 大于 50000m <sup>3</sup> 的新冷库)	R404A (3920) Ammonia (<1)	100	2019
汽车空调	R134a (1430)	150	2023

近年来, 一些国际非政府组织在 HFCs 削减方面也积极开展了相关的行动, 详见下表 1-5。

目前我国是世界上最大的 HCFC-22 生产国和使用国, 据统计, 2012 年, 我国仅工商业制冷空调领域消费的 HCFCs 超过 4 万吨 (不包括维修领域), HFCs 也超过两万吨, 并且在过去几年间制冷剂的消费总量还在快速增长, 这是因为我国制冷空调产业仍然处于高速发展期。然而, 根据《蒙特利尔议定书》第 19 次缔约方会议通过的加速淘汰 HCFCs 的调整案要求, 我国在 2013 年实现冻结、2015 年完成削减基线水平 10% 的任务, 2020 年要削减 35%, 2025 年要削减 67.5%, 2030-2040 年只允许 2.5% 的维修量; 这就必须尽快明确 HCFCs 替代路线, 研究合适的替代技术, 已经迫在眉睫<sup>[13]</sup>。HFCs 作为 HCFCs 的主要替代品, HCFCs 的淘汰过程将驱动 HFCs 的消费和排放的快速增长。然而, 近两年, 随着国际上对温室气体控制的压力加大, 生态经济, 低碳经济, 循环经济成为主流, 《京都议定书》已将 HFCs 列为温室气体而限制使用, HFCs 逐步削减的呼声越来越高, 各国 (主要发达国家) 对 HFC 生产和消费单独制定的限制性法规, 使中国 HFC 及相关产品出口面临巨大挑战, 预计会对制冷行业产生更大的冲击。基于国内外的现状, 中国是制冷空调产业的生产大国, 如何在这个转型期把握国际方向, 提出我国制冷行业自己的制冷剂发展战略, 参与国际谈判与合作, 将对中国乃至全

球制冷空调行业的发展起到重要的作用。为此，在当前的国际形式下，有必要开展制冷空调行业 HFCs 制冷剂使用趋势分析工作，为未来可能的 HFCs 逐步削减做好相关的准备工作。

表 1-5 非政府组织的对于 HFCs 削减开展的行动<sup>[13]</sup>

非政府机构	成员	态度/行动
Consumer Goods Forum	成立于 2009 年，拥有 400 多个会员，成员包括：可口可乐、家乐福、强生、沃尔玛等。	CGF 成员将从 2015 年起淘汰 HFC 制冷剂，在新设备中采用低 GWP 制冷剂。
Refrigerants, Naturally!	PepsiCo, Red Bull, The Coca-Cola Company, and Unilever, supported by Greenpeace and the United Nations Environment Program	支持将 HFC 纳入蒙特利尔议定书，逐步削减并最终淘汰 HFC
The Alliance for Responsible Atmospheric Policy	Carrier, Danfoss, Emerson, General Motors, Johnson Controls, Lennox, McQuay, Mitsubishi, Trane, Sub-Zero, Whirlpool, Sub-Zero, Mitsubishi	支持在蒙特利尔议定书框架下削减 HFC
The Air-Conditioning, Heating and Refrigeration Institute (AHRI)	A.O. Smith, Bradford White, Dunham-Bush, Carrier, Johnson Controls, Trane, Friedrich Air Conditioning, Fujitsu, Grundfoss, LG, Modine, Parker Hannifin, Rheem, Rinnai, Samsung, and Turborcor	支持在蒙特利尔议定书框架下削减 HFC

## 2 工商制冷空调行业发展现状及预测

### 2.1 工商制冷空调行业概况

工商用制冷设备产品种类繁多，应用广泛，生产厂家众多。从上个世纪九十年代初以来，伴随着中国经济的持续健康发展，中国工商制冷行业取得了巨大的进步，工商制冷空调行业一直保持着超过两位数的平均年增长率，中国已成为全球制冷空调设备的生产大国。据统计，工商制冷空调行业 2012 年的产值约 2500 亿元。根据不同的应用场合，使用不同种类制冷空调设备。工商制冷产品应用广泛，种类繁多，通常将终端产品按照以下大类进行分类统计：

#### 2.1.1 小型冷水（热泵）机组

冷水（热泵）机组是指使用水作为载冷剂，通过四通换向阀实现蒸发器与冷凝器功能转换，达到使载冷剂水被制冷剂冷却（加热），然后将载冷剂水输送到需要冷却（加热）空间中循环的制冷系统。小型冷水（热泵）机组应用于小型宾馆、小型写字楼、小型饭店和小型医院、别墅等场合，主要为涡旋式冷水（热泵）机组。根据协会调查统计，小型冷水（热泵）机组主要采用 HCFC-22 为制冷剂，部分采用 R410A 作为制冷剂。

#### 2.1.2 大中型冷水（热泵）机组

大中型冷水（热泵）机组主要包括螺杆式冷水（热泵）机组、离心式冷水机组，不包括溴化锂吸收式冷水（热泵）机组，因为溴化锂吸收式冷水（热泵）机组不涉及温室气体的直接排放，不在本报告的研究范围。大中型冷水（热泵）机组广泛应用在大型的写字楼、体育馆、商场、宾馆、工厂、饭店等大型工商用场合。根据协会调查统计，螺杆式冷水（热泵）机组主要采用 HCFC-22、HFC-134a 作为制冷剂；离心式冷水机组主要采用 HFC-134a 作为制冷剂，部分采用 HCFC-123 作为制冷剂。

#### 2.1.3 热泵热水机

采用制冷循环，将低品位热源（空气或水）的热量转移到被加热的水中制取热水的设备。与传统直接采用电、燃气、煤、油等能源制取热水方式相比，热泵热水机具有节能和环保的优势，近年来发展较快，广泛应用在宾馆、饭店、宿舍、

游泳馆、美容院等制取热水的场合。根据协会调查统计，热泵热水机主要采用 HCFC-22、HFC-134a 作为制冷剂，少部分采用 R410A、R407C 等作为制冷剂。

#### **2.1.4 单元式空调机**

一种向封闭空间、房间或区域直接提供处理空气的设备。它主要包括制冷系统以及空气循环装置，还可以包括加热、加湿和通风等装置。单元式空调机涵盖的机种比较多，包括柜式空调机、屋顶式风冷空调（热泵）机组、风管送风式空调（热泵）机组、机房空调、洁净空调、医用空调、恒温恒湿机和除湿机等，该机型制冷量小到几千瓦，大到数百千瓦。它安装方便，使用灵活，因此应用广泛。车用空调是一种特殊的单元机，车用空调包括铁路用的列车空调和汽车用的空调。本报告内容仅包括列车空调产品的情况，不包括汽车空调产品的相关情况。根据协会调查统计，单元式空调机主要采用 HCFC-22 作为制冷剂，部分采用 R410A 作为制冷剂，少部分采用 HCFC-142b、R407C 作为制冷剂。

#### **2.1.5 多联式空调（热泵）机组**

一台或数台风冷室外机可连接数台不同或相同型式、容量的直接蒸发式室内机构成单一制冷循环系统，它可以向一个或数个区域直接提供处理后的空气。多联式空调（热泵）机组可实现室内机独立控制，具有使用灵活、占用安装空间较小、可不设专用机房等特点，应用在一部分商场、别墅、写字楼等场合。根据协会调查统计，多联式空调（热泵）机组主要采用 R410A 作为制冷剂。

#### **2.1.6 工商用冷冻冷藏设备和压缩冷凝机组**

冷冻冷藏设备是用制冷方法冻结、贮藏易腐食品的设备。冷冻冷藏设备产品种类比较多，包括食品冷柜、运输冷藏设备、制冰设备、速冻装置、冻干设备、冷库、气调库、冷饮机等。压缩冷凝机组由压缩机、电动机、冷凝器及必要的辅助设备组成，大部分为制冷压缩机生产企业生产，部分由工程公司生产，购买压缩机做成压缩冷凝机组为工程配套使用。工商用冷冻冷藏设备和压缩冷凝机组主要采用 R22、NH<sub>3</sub> 作为制冷剂，部分采用 R134a、R404A 作为制冷剂，目前一些企业已经尝试使用 CO<sub>2</sub>/NH<sub>3</sub> 复叠式循环机组，并通过了验收<sup>[14]</sup>。

目前，关于工商业制冷行业的法律和法规主要集中在对 CFCs 和 HCFCs 控制方面。具体包括：截止到 2010 年 4 月，中国政府已颁布了 100 多项保护臭氧层的政策法规。2000 年 4 月批准修订的《中华人民共和国大气污染防治法》对

ODS 淘汰进行了相关规定。环境保护部（原国家环境保护总局）出台 28 项政策措施，实施 ODS 生产及进出口配额管理；与此同时，每个行业各自出台 HCFCs 产品的相关标准。经过 5 年的准备与审批，国务院于 2010 年 4 月颁布了《消耗臭氧层物质管理条例》，并将于 2010 年 6 月 1 日起生效实施。该条例将成为可持续淘汰 ODS 的坚实基础。如下表 6 简要介绍已颁布的有关 HCFCs 淘汰的政策法规<sup>[15]</sup>。表 2-1 是全球范围内针对 HFC 的政策法规的汇总。

表 2-1 全球范围内针对 HFC 的政策法规的汇总

政策法规类型	国家/地区
征税	Denmark, Denmark, Norway, Poland, Slovenia, Spain, Sweden, France
进出口	Australia
碳税	Australia, New Zealand
登记注册、报告、泄露检测、库存备案	Czech Republic, France, Germany, Hungary, Netherlands, Poland, Slovakia, Sweden, US (California)
企业和从业人员认证	France, Netherlands
废弃和处置要求	Germany, Japan, Sweden, US (California)
使用限制，如最大排放限值、年泄露率或最小充注量	Belgium, Denmark, France, Germany, Luxembourg, Netherlands
生产、使用	Australia, China, Japan, US (California),
建立国家级数据库	EU, US
禁止特定应用	Denmark, EU, France, Switzerland, US
HFC 替代品	Canada, US
用户培训项目	US (California)

表 2-2 已颁布的部分 ODS 淘汰的政策法规<sup>[15]</sup>

分类	内容	颁布时间	颁布机构及部门
法律	中华人民共和国大气污染防治法	2000	国家立法机关
国内规章	消耗臭氧层物质管理条例	2010	国务院
生产控制	CFC 生产的禁令	2007	环境保护部
	关于严格控制新建、改建、扩建含氢氯氟烃生产项目的通知	2008	环境保护部
	关于加强 HCFCs 生产、销售和使用管理的通知	2013	环境保护部
消费控制	关于严格控制新建使用含氢氯氟烃生产设施的通知	2009	环境保护部
进出口控制	消耗臭氧层物质管理办法	1999	环境保护部、商务部、海关总署
	中国进出口受控消耗臭氧层物质名录（第三批）	2004	环境保护部、商务部、海关总署
	消耗臭氧层物质进出口管理办法	2014	环保部、商务部、海关总署
信息管理	关于全面推行排污申报登记的通知-将 ODS 列入污染物排放申报范围	1997	环境保护部
	关于使用消耗臭氧层物质申报登记数据库管理系统的通知	1997	
监督管理	关于加强地方环保部门在保护臭氧层工作中监督管理职能的通知	1997	环境保护部
	关于印发及试行《保护臭氧层多边基金项目实施指南（试行）》的通知	1996	
	关于进一步加大查处非法生产销售消耗臭氧层物质的通知	2004	
	关于加强消耗臭氧层物质淘汰管理工作的通知	2007	
环境标识	环境标志产品认证技术要求：消耗臭氧层物质替代产品	2005	环境保护部
替代品管理	关于发布《消耗臭氧层物质（ODS）替代品推荐目录（修订）》的公告	2007	环境保护部

## 2.2 工商制冷空调行业制冷剂消费现状和发展预测

根据协会的初步测算,2012 年行业制冷剂消费总量约 78360 吨,其中 HCFCs 制冷剂约 47060 吨;消费的 HFCs 制冷剂约 23300 吨,包括 R410A、HFC-134a、R404A 等;消费的 NH<sub>3</sub> 制冷剂在 8000 吨左右。见表 2-3。

表 2-3 2012 年各类产品制冷剂消费量 单位:吨

产品类型	HCFCs	HFCs	NH <sub>3</sub>	小计
小型冷水(热泵)机组	8700	800		9500
大中冷水(热泵)机组	11510	6000		17510
热泵热水机	4600	700		5300
单元式空调机	16950	3400		20350
多联式空调(热泵)机组		11600		11600
工商用冷冻冷藏设备和压缩冷凝机组	5300	800	8000	14100
合计	47060	23300	8000	78360

基于制冷剂增长的历史数据以及能源消费情况与国家 GDP 相关性的调研,可以将未来增长速率用两种模型进行预测,一种是低增长模型,该模型是基于工商制冷空调制冷剂历史消费数据,参考国外制冷剂消费增长模式符合正态的 logistic 模型发展规律的客观事实<sup>[16][17]</sup>,考虑到未来制冷剂消费可能出现的饱和点进行预测,具体模型公式如下:

$$f(t) = \frac{K}{1 + \alpha \times \exp(-q \times (t - t_0))}$$

其中: t 为特定的目标年,

t<sub>0</sub> 为预测起始基准年(基准年为 2012 年,假定其市场的饱和度为 50%);

K 是根据历史的几个观测数据获得的最大可能消费量;

α 为参考基准年的数据回归值;

q 为增长关联系数。

另一种属于高增长模型,该模型是基于能源消费情况与国家 GDP 有一定关联性的实施,制冷剂消费增长可以分成两部分,一部分是与 GDP 增长率直接关联的,另一部分增长率符合高斯模型,因此可将预测的 GDP 增长速率应用到制

制冷剂消费的增长预期。根据世界银行的估计，中国 2015 年之后 GDP 的增长假设为 2016 年—2020 年按照 7% 增长，2021—2030 年按照 5.6% 增长。表 2-4 是文献给出的历史 GDP 平均增速及未来 17 年的增速预测。高增长模型的具体公式如下：

$$f(t) = f(t-1) \times \left\{ 1 + S_{GDP} \times g(t) \exp \left[ \frac{-((t-1) - t_0)}{A} \right] \right\}$$

其中：t 为特定的目标年；

$t_0$  为预测起始基准年（基准年为 2012 年）；

$S_{GDP}$  为第 t 年国内生产总值增速；

$g(t)$  为拟合与人口增长和国内生产总值相关的关联分段函数；

A 为基于已知数据回归的指数增长倍率。

两种模型预测结果如下图 2-1。到 2030 年，如按照高增长模式，预计制冷剂消费总量达到 17.8 万吨；如按低增长模式，也能达到 15.4 万吨。不管按照哪种模式发展，从制冷剂消费增长的整个发展历程可划分三个阶段：起始发展期，高速增长期，饱和平稳期。2000 年之前属于起始发展期，从 2000 年至今，制冷剂消费进入了高速增长期，通过预测分析可知，从现在到 2020 年之前中国工商制冷空调行业制冷剂消费仍将保持较高的增长速度，在高增长模式，从 2014-2030 一直保持着稳步较快的增长，预计到 2050 年基本能达到饱和；而对于低增长模式，预测中在 2030 年已达到基本地增长饱和。随后，我国制冷剂消费将逐步变缓，此时新增市场增长将放缓，原有消费产品的更新替代起到了比较重要的作用。

表 2-4 1981-2013 历史 GDP 平均增速和 2014-2030 预测 GDP 平均增速<sup>[18]</sup>

历史 增速	时间段	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
	增长	10.1	10.3%	12.7%	14.2%	9.6%	9.2%	10.4	9.3%	7.8%	7.7%
预测 增速	时间段	2014-2015		2016-2020		2021-2030					
	基准情景	7.5%		7%		5.6%					

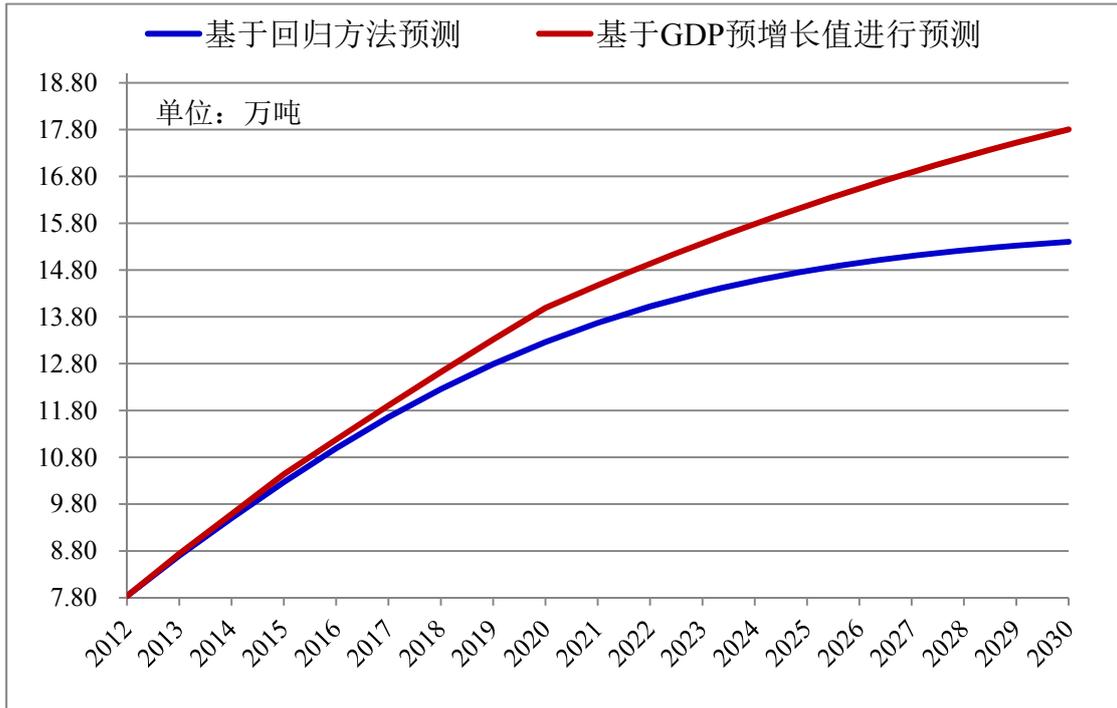


图 2-1 工商制冷空调行业制冷剂消费预测

### 3 工商制冷空调行业的替代技术分析

#### 3.1 选择替代技术的基本原则

制冷剂的替代原则应首先考虑对地球环境的影响，同时还要考虑安全性、经济性以及在遵守各种法规的前提下的可行性，如图 3-1 所示<sup>[19]</sup>。因此，理想的替代工质应该满足多方面要求。

- (1) 环境影响：臭氧层破坏潜能（ODP）值为 0，全球变暖潜能（GWP）值尽量小，而且还要考虑在实际应用条件下的能耗、能耗峰值，综合地评价对地球环境的影响。
- (2) 安全影响：毒性和可燃性是主要的两大安全性要素。由于对制冷工质环境影响指标的要求越来越高，使得选择新的制冷工质时不得不考虑具有毒性、微燃性甚至可燃性制冷工质，这需要在技术层面严格把关，建立安全使用评价机制，减小制冷工质的排放等。
- (3) 经济性影响：热工性能、配套设备置换成本、制冷工质本身的制造成本是三个主要的经济性影响因素。其中热工性能除了具有高的性能系数 COP 以外，制冷量、蒸发压力、冷凝压力、排气温度等参数与被替代物相近，滑移温度尽量小。

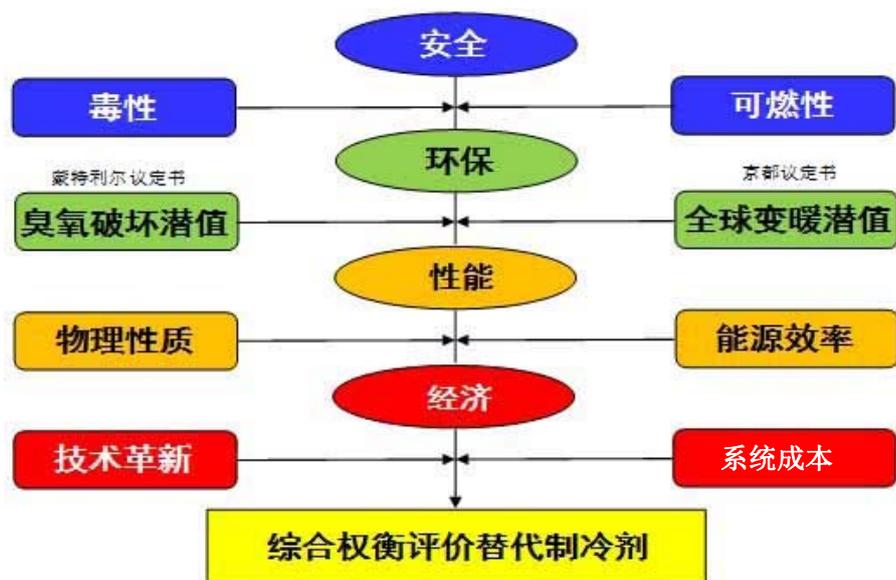


图 3-1 选择制冷剂时需要考虑的因素<sup>[19]</sup>

但上述要求往往是顾此失彼。首先，单从 GWP 考虑，天然工质很容易受到关注，但是空气和水由于能效低、实际使用起来较困难（高压、密封等），对环保的综合评价（比如 LCCP 评价）并不高，CO<sub>2</sub> 的临界温度较低、工作压力较高，只适合一些特定应用领域。其次，热工性能好、温室效应极小的碳氢化合物 HCs 也备受瞩目（如 R290），但该类物质有极强的可燃易爆性，所以允许使用容量极小，同时在安全上需要很大的投入；另外，一些新开发的 HFO 类工质，尽管有较低的温室效应，安全性相对较好，但其制冷系数和制冷量都较小且价格昂贵。因此如何理解制冷剂环保指标和安全指标，如何在技术上、安全法规上解决这些问题，如何平衡这些要求之间的矛盾，是未来制冷剂替代发展的主要问题之一。

由于建立的制冷剂替代要求的标准不一，各国最初的制冷剂替代方向也不尽相同。欧盟一直积极开发以天然工质为中心的应用技术，特别是对氨及二氧化碳的研发投入较多。在日本和美国，主要是对安全性和能效的考虑，即努力寻找环境影响低、相对安全的新合成制冷剂：如近期美国提出的 HFO-1234yf 和 HFO1234ze (E)，希望能够在汽车空调、冷水热泵机组及冷冻冷藏机组上得到应用，也在积极跟进碳氢和较低 GWP 的 HFC-32 制冷剂的使用推进，2014 年 7 月，美国环保署（EPA）发布了气候友好型制冷剂名单，拟将乙烷、丙烷、异丁烷、混合制冷剂 R441A 共四种碳氢制冷剂及 HFC-32 应用于 6 类制冷和空调领域。而日本各个主要厂家对中小型单元式空调机组和多联机主要看好 HFC-32，并且也制定了自己的替代发展路线。因此，掌握国内外制冷剂替代发展趋势，剖析替代的基本思路和路线，对我国制冷空调行业探索出一条有中国特色的制冷剂替代路线有着重要意义。

综合考虑以上几方面的影响，目前已经达成共识，尚没有一种物质完全满足要求。所以选择什么样的制冷剂作为替代工质应该根据具体的环境、政策、应用条件等情况综合考虑。现在已逐渐形成了下列四种基本思路<sup>[20]</sup>，即：

- (1) 较低 GWP 值 HFCs 制冷工质的中长期使用，如 HFC-32、HFC-134a 等。
- (2) 开发低 GWP 制冷剂，如氢氟烯烃类工质 HFO-1234ze(E)、HFO-1234yf 等。
- (3) 天然工质，以 C、H、N、O 等元素组成的天然工质为对象，重新回到了早期制冷工质中的 CO<sub>2</sub> 和 NH<sub>3</sub> 等；
- (4) 低 GWP 混合制冷工质。

### 3.2 潜在替代制冷剂分析

#### 1) HFC-32

HFC-32 ( $\text{CH}_2\text{F}_2$ , methylene fluoride) 的 GWP 为 675、ODP 值为 0，其热物理性质与 HCFC-22 及 R410A 较为接近，但相对于 HCFC-22 (GWP1800, ODP0.04) 与 R410A (GWP2100) 来说，对环境的影响已有大幅降低，满足欧盟最新制定的 F-Gas 法规 (GWP<750)。

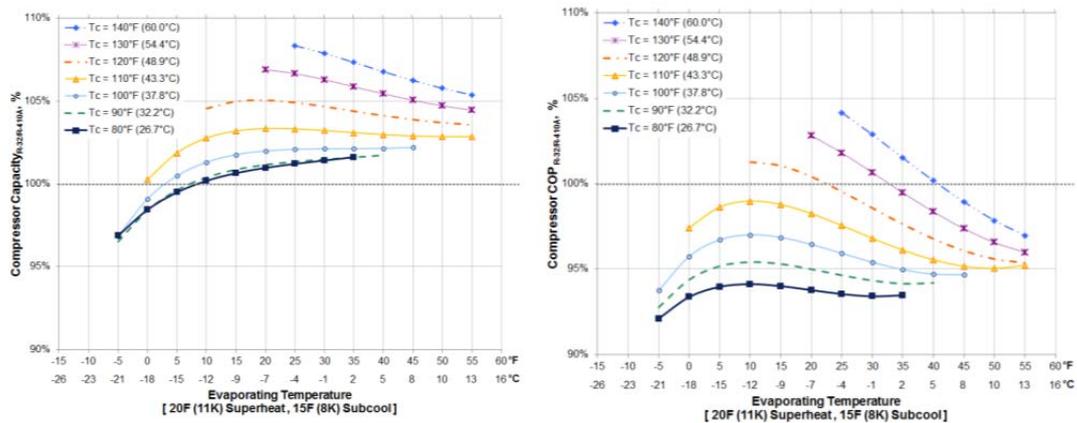


图 3-2 HFC-32/R410A 制冷量和 COP 与蒸发温度（露点）的变化关系<sup>[21]</sup>

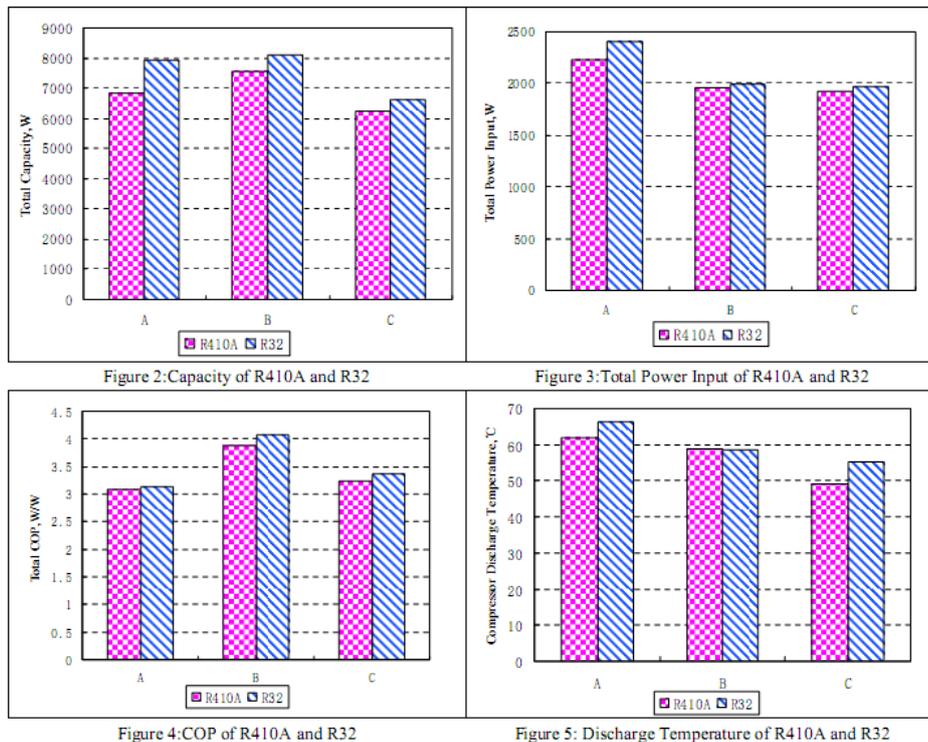


图 3-3 分体式空调系统 R410A/HFC-32 测试结果对比<sup>[22]</sup>

而且由于 HFC-32 的单位容积制冷量比较大，因此其充注量约为 HCFC-22 的 0.6 倍，CO<sub>2</sub> 减排比例可达 77.6%，比 R410A 优越，综合环境性能较好。同时 HFC-32 的热工性能（主要指能效 COP）与 R410A 相当。AHRI 的低 GWP 可选制冷剂评估项目中的 HFC-32 在 R410A 涡旋压缩机的压缩机热量计测试报告、以及制冷剂 HFC-32 在分体式空调系统替代测试报告显示，在没有任何优化的情况下，HFC-32 的制冷量约比 R410A 高 3-5%，而 COP 增量不是很明显（见图 3-2 和图 3-3）。然而，HFC-32 有较弱的可燃性，属于 A2L 类，但在相关的可燃性分析和风险评估中，如进行相应规范要求，其可燃风险概率事故非常小，如 HFC-32 在日本的高压气体保护法规中就属于“不可燃”的气体。此外，由于 HFC-32 的正常沸点较低，因此排气压力与 R410A 相当，而且 HFC-32 的比热容比较大，故排气温度高于 R410A，如何降低压缩机排气温度、选用高稳定性的润滑油、开发与之相容性的密封材料、应用微通道换热器来减少制冷剂充注量是应用技术开发的重点。因此，从环保性能、热物理性质、热工性能以及市场可获得性综合考虑，HFC-32 是一种和谐兼顾节能减排、安全稳定、市场转轨等多方面要求的，非常成熟的替代 HCFC22 的制冷剂，未来将在单元式空调、小型冷水（热泵）机组、多联式空调机组以及热泵热水机中有很好的应用前景。2013 年，同方公司受多边基金资助的“采用 R32 替代 R22 在小型商用空气源冷水/热泵中的应用示范项目”已通过验收。

## 2) 天然工质 CO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub> 和 HC

R744 (CO<sub>2</sub>, 二氧化碳) 和 R717 (NH<sub>3</sub>, 氨) 是两种有良好的环保性和热力学性能的天然制冷剂，符合当前对制冷剂环境性能的要求，因此在一些制冷应用领域承担了主要角色。R744 由于具有良好的环保性 (GWP 值为 1) 和安全性，且化学稳定性和市场可获得性较好，因此一直是国内外制冷剂替代研究的热点之一。并且 R744 的气相比容较小，运动粘度较低、单位容积制冷量较大，有利于减小装置体积。但 R744 的主要问题是其临界温度较低 (仅 31℃)，运行压力超高，适宜采用跨临界循环实现变温吸放热匹配来提高用能效率，因此，压缩机和换热器等关键部件都需要重新设计，其应用领域主要集中在热泵热水器和冷冻冷藏的复叠式循环机组中。其关键的技术包括：开发高性能的 CO<sub>2</sub> 压缩机，提高 CO<sub>2</sub> 在气体冷却器及微通道换热器中的传热性能。R717 由于其较优的热力学性

能,在整个制冷剂发展历程中始终是不可替代的角色,目前主要应用在大型冷冻冷藏系统中。R717 的缺点是有一定的弱可燃性、低毒性和腐蚀性,因此当前关键技术主要集中在开发高效氨压缩机和循环工质泵、解决润滑油及高效换热问题来减少充注量来进一步缩减整体体积、降低腐蚀性和系统泄漏。2013 年 7 月,烟台冰轮集团的获得了多边基金资助的“冷冻冷藏 NH<sub>3</sub>/CO<sub>2</sub> 复叠制冷系统替代 HCFC22 示范项目”通过了验收。

HC 的 GWP 很低,无毒,制冷理论效率高,具有很好的环保特性,但是具有强可燃性。由于工商空调设备中制冷剂充灌量大,如果使用 R290 等 HC 制冷剂,其安全性将不能得到充分保证,也不符合当前国际和国内标准的限制规定。工商空调领域将积极关注替代技术的进展,并适时组织开展针对碳氢等天然制冷剂的替代技术研究以及安全评估,探讨未来应用的可能性。

### 3) HFO-1234yf 和 HFO-1234ze(E)

HFO-1234yf (CF<sub>3</sub>CF=CH<sub>2</sub>, 2,3,3,3-tetrafluoropropene)、HFO-1234ze(E) (CHF=CHCF<sub>3</sub>, trans-1,3, 3,3-tetrafluoropropene) 是近期新开发且受到广泛关注的两种不饱和氢氟烯烃制冷剂。由于这类物质存在双键,在大气中容易断裂,因此该类物质有非常短的大气寿命,所以,这两种制冷剂有非常低的 GWP 值(均小于 6),具有较好的环境性能,被认为是下一代可应用的低 GWP 制冷剂。也正是由于双键的存在,C 原子对 H 原子的束缚力较弱,容易发生断裂,故有较弱的可燃性(在同样的 C 和 F 比例下,相对于 HFCs,如 HFC134a 不可燃,但 HFO-1234yf 可燃),所以,HFO-1234yf 和 HFO-1234ze(E)的均为 A2L 级。其中 HFO-1234yf 的热力性能与 HFC-134a 接近,且在材料相容性实验和压缩磨损实验测试中,与 HFC-134a 系统基本相通,因此可作为汽车空调的替代制冷剂;HFO-1234ze(E)的临界温度高于 HFC-134a,因此在热泵热水器(机)和大型冷水热泵机组有一定应用前景;与被替代 HCFC-22 和 HFC-134a 相比(见图 3-4),这两种物质的汽化潜热较小、蒸发压力较低,需要的流量较大,导致系统压降较大,若直接应用于原有制冷热泵系统,其系统性能系数 COP 和容积制冷量都有所降低,造成其间接温室气体排放提高。由于 HFO 类制冷剂属于复杂流体,且有较多同分异构体,化工合成和分离所需能耗较高,其成熟的工艺均由国外公司专利保护,因此价格比较昂贵。同时,这两种制冷剂具有低可燃性,安全分类属于

A2L。所以，对于这两种制冷剂来说，通过混入高潜热的工质来改善热力学性能和安全性能，及换热强化、部件优化等措施来提高系统性能是其技术开发的重点。

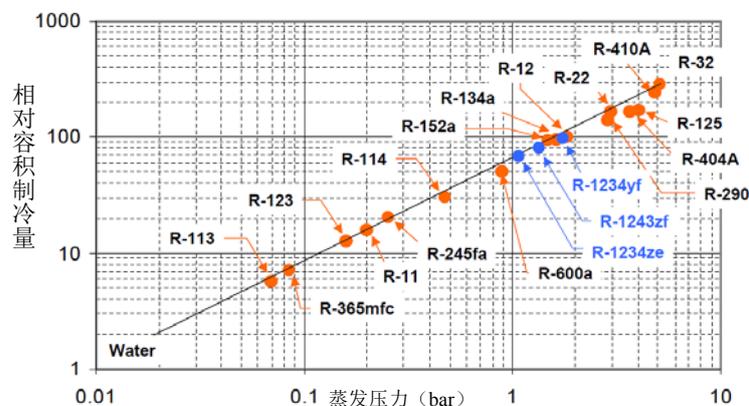


图 3-4 不同制冷剂的蒸发压力与容积制冷量对比关系<sup>[23]</sup>

#### 4) HFOs 混合物

为了弥补 HFOs 制冷剂的容积制冷量和性能系数上的缺陷，在保证 GWP 有限提升的基础上，混入容积制冷量较大的工质制备成 HFOs 混合制冷剂是较好的改进措施。在已存在的容积制冷量较大的制冷剂当中，由于  $\text{NH}_3$  等有一定毒性，因此需要排除；如果混入  $\text{CO}_2$ ，则混合物有较大的温度滑移，如果混入 HCs 工质，可能会增加混合物的可燃性，在空调系统中应用存在一定的风险；对于 HFC-125 工质，则将会导致高的 GWP 值；因此，最可能的选择是将 HFOs 制冷剂与 HFC-32、HFC-134a、HFC-152a 混合，这样既能提高其容积制冷量，提高 COP 性能，又不至于使 GWP 值提高太多，而且可燃性也是属于 A2L 的可接受级别。图 3-5 描述的是可能组成的混合制冷剂的潜在解决方案<sup>[24]</sup>；其中包括潜在的替代对象，形成的风险级别及几种新的混合制冷剂。从中可以看出：国际上正在为不同产品应用积极开发适用的低 GWP 值混合制冷剂，但这种混合策略只是热力性能和环保安全性能的折中优化，如直接充注替代，可能无法达到原有系统的 COP 和制冷量要求。表 9 列举的是 AHRI 评估的几种低 GWP 制冷剂替代物<sup>[25]</sup>。

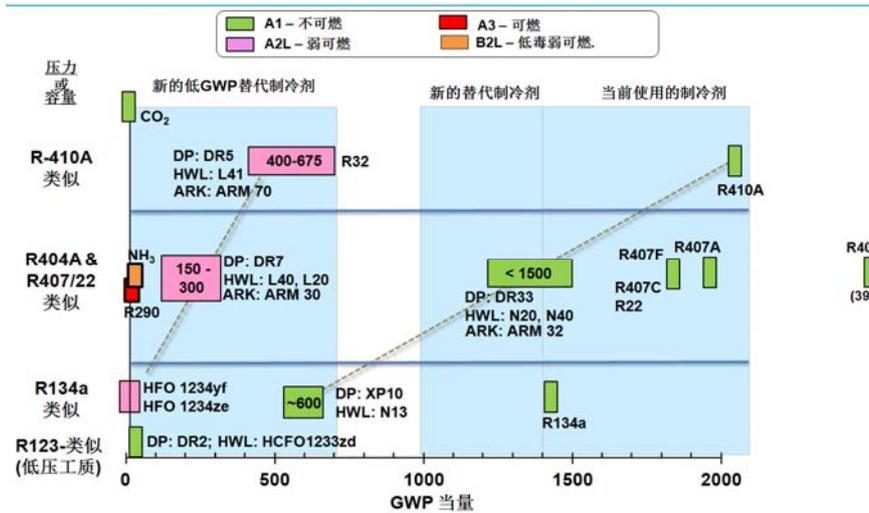


图 3-5 低 GWP 值混合 HFO 替代制冷剂的开发<sup>[24]</sup>

表 3-1 AHRI 评估的部分低 GWP 替代物<sup>[25]</sup>

制冷剂代号	替代对象	组分	GWP	分类	容积制冷量	效率
ARM-41a	R134a	R-32/R134a/R-1234yf	943	A1	15%	-2%
ARM-42a		R-134a/R-152a/R-1234yf	117	A2L	1%	0%
XP-10		R-134a/R1234yf	631	A1	1%	-4%
N-13a		R-134a/R1234yf/R-1234ze(E)	604	A1	-8%	-2%
N-13b		R-134a/R-1234ze(E)	604	A1	-13%	-1%
R-1234yf		R-1234yf	4	A2L	-7%	-6%
R-1234ze		R-1234ze(E)	6	A2L	-26%	-1%
R32	R410A	R32	675	A2L	57%	8%
ARM-70a		R-32/R-134a/R-1234yf	482	A2L	23%	10%
DR-5		R-32/R-1234yf	490	A2L	45%	8%
L-41a		R-32/R-1234yf/R-1234ze(E)	494	A2L	36%	9%
L-41b		R-32/R-1234ze(E)	494	A2L	32%	9%
L-20	R22	R-32/R-152a/R-1234ze(E)	331	A2L	4%	-1%
D52Y		R-32/R-125/R-1234yf	979	A2L	-5%	-1%
LTR6A		R-32/R744/R-1234ze(E)	206	A2L	16%	-2%

ARM-30a	R404A	R-32/R-1234yf	199	A2L	2%	8%
ARM-32a	R404A	R-32/R-125/R-134a/R-1234yf	1577	A1	8%	8%
D2Y-65		R-32/R-1234yf	239	A2L	11%	9%
DR-33		R-32/R-125/R-134a/R-1234yf	1410	A1	6%	8%
L-40		R-32/R-152a/R-1234yf/R-1234ze	285	A2L	5%	12%

### 3.3 国际组织制冷剂替代方案的调研

针对制冷剂替代物的评价，国际上成立了一些有影响的机构和联合项目组，以下分别介绍联合国环境规划署（UNEP）、美国环保署（EPA）重要的新替代物项目计划（SNAP）、美国空调、供暖和制冷工业协会（AHRI）最新的关于低 GWP 替代制冷剂的评价。

联合国环境规划署（UNEP）评估报告每年均会发布技术和经济评估小组报告（Technology & Economic Assessment Panel (TEAP) Reports），2010 年 5 月，最新报告的第一卷内容为 HCFCs 制冷工质替代物的评价（ASSESSMENT OF HCFCs AND ENVIRONMENTALLY SOUND ALTERNATIVES），如表 3-2 所示。

表 3-2 TEAP 关于 HCFCs 制冷工质替代物的评价(2010.5)<sup>[26]</sup>

商业制冷			
	被替代物	主流替代物	Low-GWP 替代物
单独设备（冷柜，自动售货机和饮料冷却器）	HCFC22 R502 (CFC115/HCFC22)	HFC134a	HC600a, 饮水机, 充灌量小于 150g
			HC290, 制冰机, 展示柜
			CO <sub>2</sub> , 自动售货机
冷库	HCFC22	HFC134a  R404A	NH <sub>3</sub>
			CO <sub>2</sub>
超市大型集中系统	HCFC22		HC290, HC1270
			CO <sub>2</sub> , 直膨式
			NH <sub>3</sub> (HC290、HC1270), 间接系统 CO <sub>2</sub> , 复叠系统
工业制冷			
工业制冷	HCFC22	HFC134a/R404A	NH <sub>3</sub>

			CO <sub>2</sub>
			HCs
工商用空调			
单元机	HCFC22	R410A	HFC32
			HFC1234yf、HFC1234yf/HFCs
		R407C	HC290
			CO <sub>2</sub>
冷水机组	HCFC123	HFC134a, 离心机	NH <sub>3</sub>
	HCFC22	HFC245fa, 离心机	CO <sub>2</sub>
		R407C	HCs
			HFC1234yf
			R718
	汽车空调	CFC12	HFC134a
CO <sub>2</sub>			
HFC152a			
HFC1234yf			

美国环保署 SNAP 计划: SNAP 计划 (Significant New Alternatives Policy) 是美国环保署根据美国清洁空气行动方案 612 节的要求, 于 1994 年 3 月 18 日设立。从 1994 年 5 月以来, 共发布了 32 次评审结果, 现介绍 2010 年 6 月 16 日发布的关于 HCFCs 替代物的最新报告, 如表 3-3 所示。

表 3-3 Acceptable Substitutes for Class II (HCFCs) Substances in Air Conditioning and Refrigeration<sup>[27]</sup>

名称	家用或小型商用空调	商用空调	工业过程制冷	工业过程空调	巴士或列车空调	冷库	溜冰室制冰	冷冻运输	零售业食品冷藏	制冰机	低温制冷	家用冰箱或冷柜	其他
R407A	R,N						R,N	R,N	R,N	R,N			
R410A	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	N	
R410B	N	N	N	N		N	N	N	N	N		N	
R404A	R,N	R,N	R,N	R,N		R,N	R,N	R,N	R,N	R,N	R,N	R,N	
R407C	R,N	R,N	R,N	R,N	R,N	R,N	R,N	R,N	R,N	R,N	R,N	R,N	
R421A	R, N	R, N	R, N	R, N		R, N	R, N	R, N	R, N	R, N		R, N	
R421B			R, N			R, N	R, N	R, N	R, N	R, N		R, N	
R422B	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	
R422C	R, N	R, N	R, N	R, N		R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	
R422D	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N		R, N	
R424A	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N		R, N	
R428A			N			R, N	R, N	R, N	R, N	R, N		R, N	
R134a	N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	N		R, N	
R245fa		R, N <sup>1</sup>									N(141b)		
R507A	R, N	R, N	R, N	R, N		R, N	-	R, N	R, N	R, N		R, N	
R417A	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N		R, N	

名称	家用或小型商用空调	商用空调	工业过程制冷	工业过程空调	巴士或列车空调	冷库	溜冰室制冰	冷冻运输	零售业食品冷藏	制冰机	低温制冷	家用冰箱或冷柜	其他
R427A	R	R		R	R				R			R	
R-125/134a/600a (28.1/70.0/1.9)	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N			R, N					
Hydrofluoroet Her-7000			R, N								R, N		
RS-44(2003 formulation)	R, N	R, N	R, N	R, N		R, N	R, N	R, N	R, N	R, N		R, N	
R423A		R, N <sup>7</sup>	R, N	R, N		R, N	R, N						
R426A				R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N		R, N	
R437A	R, N											R, N	
R290 (Propane)			R, N										
R407B			R, N			R, N	R, N	R, N	R, N	R, N			
R407D								R, N					
R600 (Butane)			R, N										
R1270 (Propane)			R, N										
Cryogenic System using								N					

Recaptured liquid CO <sub>2</sub> or liquid N <sub>2</sub>													
R434A	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N		R, N	
R125/290/ 134a/600a (55.0/1.0/42.5/ 1.5)	R, N	R, N	R, N	R, N		R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	
ISCEON 79, R422A			R, N			R, N	R, N	R, N	R, N	R, N		R, N	
R438A (KDD5)	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N	R, N		R, N	
Self-chilling Cans using Recycled CO <sub>2</sub>	-	-	-	-		R, N	-	R, N	R, N	-		R, N	
Ammonia	N <sup>2</sup>	N <sup>3</sup>	N <sup>4</sup>	N <sup>4</sup>		N <sup>4</sup>	N <sup>4</sup>	-	N <sup>5</sup>	N <sup>4</sup>		N <sup>2</sup>	
R744 (Carbon Dioxide, CO <sub>2</sub> )			R, N			N			N		N		
Water/Lithium bromide	-	N	-	-		-	-	-	-	-	-		
THR03	N <sup>6</sup>	N	R, N	N		N	N	R, N	N	N		N	
HFC227ea		N	N			N							

注： R = Retrofit Uses, N = New Uses

从计划方案可以看出，该计划已将制冷的应用领域分为了 12 个方向，而且替代对象的种类不断增多；替代分类更加细致科学。当前替代技术的发展方向是根据应用对象、充灌量等进行分类并进行选择性的替代。而且，在 2014 年 6 月，为支持奥巴马总统提出的“气候行动计划”，美国环保署提议在美国选择更加环保的、不会对臭氧层造成破坏的制冷剂。这是环保署在“气候行动计划”框架内采取的第一个与制冷剂有关的行动，呼吁“重要替代制冷剂政策（SNAP）”项目确认并通过气候友好型化学物。由《空气清洁法案》授权，美国环保署“SNAP”项目对不会对臭氧层造成破坏的化学替代物以及替代技术进行了评估。该提案将扩大经由 SNAP 通过的制冷剂名单，将低 GWP 制冷剂包含在内，这些制冷剂可用于替代臭氧层破坏物质以及高 GWP 的 HFCs。通过行业、环保机构以及其他人的反馈，EPA 建议针对以下 6 种制冷空调产品，列一份低 GWP 的碳氢制冷剂的名单：商用以及家用冰箱/冰柜的整体机、低温制冷设备、非机械传热器、售卖机以及房间空调器。这项提案也增加了 HFC-32，它的 GWP 值只有目前使用在房间空调器的传统制冷剂的 1/3。这些制冷剂在欧洲和亚洲应用在很多产品中。

美国空调、供暖和制冷工业协会（AHRI）在 2011 年 3 月也启动了低 GWP 替代制冷剂的评估研究项目，该项目主要为了评价当前制冷剂替代研究成果、加速行业界的制冷剂替代工作进程、减少重复性工作，联合多家制冷空调设备厂家及制冷剂生产厂家对现有的替代制冷剂进行评估。目前，至 2013 年底，已完成的第一批 38 种替代制冷剂的评估，评估报告可从以下的地址进行下载：

[http://ahrinet.org/ahri+low\\_gwp+alternative+refrigerants+evaluation+program.aspx](http://ahrinet.org/ahri+low_gwp+alternative+refrigerants+evaluation+program.aspx)

2014 年，该项目将对新提交的 23 种制冷剂进行第二轮评估，表 3-4 给出的是已完成评估的主要替代制冷剂和未完成的替代制冷剂汇总，其中所列非标准制冷剂名称的均是制冷剂生产厂家自己命名的制冷剂代号。

表 3-4 AHRI 评估的低 GWP 替代制冷剂<sup>[25]</sup>

已完成评估的低 GWP 替代制冷剂				
基准	A1 选择	A2L 选择	A3	其他
R134a	ARM41a, D4Y, N13a, N13b, XP10, AC5X	R1234yf, R1234ze, ARM42a, AC5		
R404A	ARM32a, N40a, N40b, DR-33	R32, ARM31a, ARM30a, D2Y-65, DR-7, L40,	R290	R744
R410A		R32, ARM70a, D2Y-60,		R744

		L41a,L41b, DR-5,HPR1D		
R22/R407 C	N20,ARM32a,LTR4X	L20, D52Y, LTR6A	R290	
第二轮评估的新替代制冷剂				
基准	A1 选择	A2L 选择	A2	其他
R-134a	BRB36			
R404A	ARM-32b,ARM-35,D42Yb,D42Yz,DR-34,N-40C <sup>2</sup>	ARM-20a,ARM-20b	ARM-25 a	
R410A		ARM-71a,DR-5A,HPR2A, L41-1 <sup>3</sup> ,L41-2 <sup>4</sup>		
R22/R407 C	ARM-32c,D542HT,DR-91	DR-3,L-20a <sup>5</sup>		
R-123	ARC-1,R1233zd	LPR1A		

通过对国际替代制冷剂方案的调研，我们不难得出以下结论：在未来制冷剂发展中，没有“完美的”、“包打天下”的制冷剂，当前替代制冷剂的选择只能是各种衡量指标的“折中”考虑，并根据应用领域分类进行选择性替代。不管是采用新制冷剂的直接替换（drop in）还是采用新制冷剂逐步淘汰 HCFCs（phase out），要想实现替代的顺利转轨和无缝切换，都需要解决替代制冷剂转换的核心技术（包括系统、部件以及制冷剂合成制造）。弱可燃制冷剂的应用已经不可避免，如何正确、安全地使用这些弱可燃制冷剂是关键。因此，应用标准的合理修订以及安全规范的制定，能够降低系统应用风险、扫清替代制冷剂应用障碍、拓展新型制冷剂适用领域。

### 3.4 其他相关替代技术分析

从前面的介绍可知，在追求低 GWP、大容积制冷量和高 COP 等综合性能要求的同时，会使得制冷剂替代对象的种类不断增多，替代分类更加细致科学，这需要根据应用对象、充注量等综合考虑进行选择替代。而且，由于制冷剂物性和理化性质的变化，也带来的可燃性、高压、高排气温度等问题，使得传统的制冷压缩机、换热器、节流阀等已不能完全适应替代制冷剂对其高效及可靠运行的要求，主要表现在对工作过程的影响、对安全充注量的约束、对材料和润滑油的选择以及结构设计的要求等，这都需要解决适用于替代制冷剂主要部件的新的设计方法及关键技术。具体包括：如何通过提高承压能力、减少变形、降低泄漏等

开发高效、高可靠性的高压压缩机；如何抑制与应对替代制冷剂的高排气温度，易产生渣浆等问题；如何利用替代制冷剂的热物性与输运特性，提高效率，减少充注量、缩小体积，提高其安全性。

替代制冷剂压缩机的关键技术：在高压压缩机的开发中，CO<sub>2</sub>压缩机的是最具挑战性的。与传统制冷剂相比，CO<sub>2</sub>跨临界循环压缩机具有工作压力高、压差大、压比小、体积小、重量轻、运动部件间隙难以控制、润滑较困难等特点。为了解决这些问题，一些新的替代技术的开发成为了研究热点。例如：为了减少压差变形和泄露，可以采用双级压缩，机壳内腔的压力为中间压力（约 5~6MPa），第一级的排气分为两路，一路进入第二级压缩腔，另一路进入壳体内保证壳体的压力为低压，然后再进入第二级压缩腔，这样保证了压缩机壳内的压力为中间压力，而且还有利于轴和其它部件的润滑；对于 CO<sub>2</sub> 涡旋压缩机，采用滚动止推轴承降低动涡盘端面的摩擦损失，利用精密的加工和装配减少动静涡盘之间的泄漏损失，从而保证压缩机高效运行。随着，一些关键技术被不断解决，CO<sub>2</sub> 跨临界循环技术逐渐走向了实际应用，未来将在小型热泵热水器中得到应用。

此外，对于具有高排气温度的 HFC-32 制冷剂，利用制冷剂在较低吸气干度下对压缩机运行仍保持一定可靠性的特点，可以使用电子膨胀阀控制压缩机吸气干度，或者在压缩过程中注入液体或者低温气体，均可以对压缩机有冷却效果，可以降低压缩机的排气温度。目前主要的应用技术有中间压力强制喷气增焓（EVI）、喷液（ELI）和吸气干度控制（SX）（此技术依赖压缩机本身的特性）。例如：EVI 系统循环（见图 3-6）中间有一个过冷型经济器，补汽回路采用系统过冷后节流。控制策略可以为：补汽回路在排气温度控制时，可能需要干度控制；不控制排气温度时，可以进行经济器的经济性控制。而 ELI 系统循环（见图 3-7）的压缩机喷液流量直接由高压液体管路节流而来，喷射到压缩机的中间腔，通过一个喷射口使得气液充分雾化混合，继续进行压缩。这种喷液方式避免了喷液对电动机绝缘的伤害及轴承润滑油的稀释。但是，如果喷液量过大，气液混合较差，也可能导致压缩机严重液压缩或破坏油膜而失效。ELI 系统较为简洁，其优点是控制目标单一，仅为了排气温度控制而开启喷液阀；在制热运行时，喷液带来的流量不占用吸气排量，能够提高制热量。SX 系统循环与一般热泵相同，或与 ELI 类似。该系统较为依赖压缩机本身的设计，需要在很小的一段压缩行程内完成带

液压缩。在吸气干度逐渐减小的过程中，压缩行程与饱和气体线有 1 个交点，在这个交点之前一直存在液压缩。液压缩对压缩机的可靠性是一个挑战，一种解决方案是在这个交点附近设计 1 个泄压阀，当液压缩达到这个物理位置时，则进行旁通泄压。SX 系统较简洁，可以采用蒸发器回液控制或喷液回路控制，投入也很少。其缺点是，吸气干度控制流量中用来降低排气温度的部分直接占用了吸气排量，对系统运行的经济性产生负面影响<sup>[28]</sup>。有研究表明<sup>[30]</sup>对于 HFC-32 压缩机，将吸气干度设置为 0.93 就能使排气温度降到 135℃ 以下，将干度设定为 0.9 就能使排气温度降到 120℃ 以下。通常，对于 HFC-32 干度应该控制在 0.75 以上。

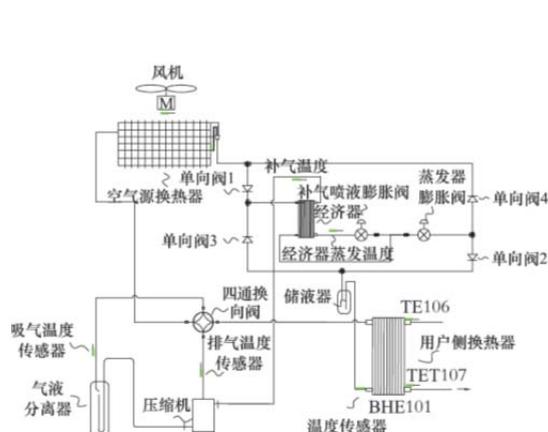


图 3-6 风冷冷水热泵系统 EVI 系统图<sup>[29]</sup>

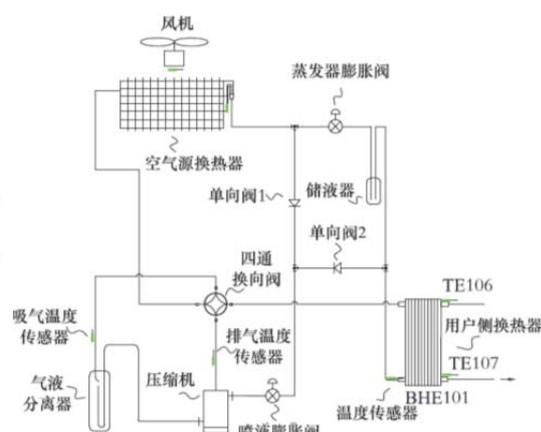


图 3-7 风冷冷水热泵系统 ELI 系统图<sup>[28]</sup>

对于研究直接灌注（drop-in）替代技术的制冷剂，其材料相容性是必须要考虑的，这是实现压缩机良好润滑、保证关键元件稳定工作、确保压缩机可靠运行的必要条件；而且对于替代制冷剂高排气温度的发展趋势，进行压缩机关键部件的材料相容性耐久实验也是非常必须的。为了保证材料在高排气温度下仍然保持良好的密封性和绝缘性，选用具有稳定水解性的、良好绝缘性并且与制冷剂和润滑油相容的材料是至关重要的。

对于中小型机组，在结构轻量化和小型化的前提下，小通道或微通道换热器是同时满足耐压性、高热效率和系统安全性的必然选择。微通道换热器的技术优势在于：通道直径减小，管内换热增强，耐压能力提高；空气侧流动阻力可大大降低，减小了风扇功率，换热面积相同时传热性能与传统肋片管式结构相比有所增强；采用整体焊接技术，接触热阻可忽略不计，现有肋片管式换热器通常采用

胀管工艺,接触热阻会随着时间的推移不断增大,甚至导致肋片与管道发生脱离,大大降低系统的性能;流道体积减小,制冷剂充注量可明显减少,对可燃制冷剂的应用范围有一定扩大,且有利于环境保护;换热器紧凑、高效,材料成本更低。

### 3.5 替代制冷剂相关标准的发展

在制冷剂替代的可选方案中, HFC-32 等弱可燃制冷剂是某些产品领域未来发展的必然的、折中的选择,因此,在安全法规上如何确保、标准制定上如何规范这些制冷剂的安全使用变得十分重要。然而,由于工业化程度、科学技术水平的差异以及受到自然条件、自然资源限制等影响,各国在维护国家安全,保护人类健康和环境安全等方面的法律法规不尽相同。为了减少并最终打破技术性贸易壁垒,应尽量优先采用国际标准或者行业协会、学会等标准,如: ISO817、ISO5149、ISO7010、ISO17584、ASHRAE34 等标准都是行业标准(相关标准汇总见表 3-5<sup>[30]</sup>),而且这些标准也正围绕制冷剂安全性标准的发展进行相应的修订。

表 3-5 国内外制冷剂安全相关标准情况<sup>[30]</sup>

标准类型	中国	美国	欧洲	国际
安全分类	GB/T7778-2008 GB20577-2006	ASHRAE 34-2013 UL2182		ISO817-2014
系统安全	GB9237-2001	ASHRAE 15-2013	EN378-2008	ISO5149-2014
设备安全	GB4706.32-2012 GB4706.13-2008 GB25130-2010 GB25131-2010 等	UL207 UL250 UL471 UL474 UL478 UL484 UL1995 UL60335-2-34 UL60335-2-40	EN60335-2-34 EN60335-2-40	IEC60335-2-34 IEC60335-2-40

对于国际标准,最近修订出台的 ISO817-2014<sup>[30]</sup>在之前 2005 版的基础上新增了 42 个制冷剂品种,其中单质包括: RE170、R1234yf、R1234ze (E)、R601、R601a,混合物包括: R407F、R415B...R442A 等 34 种非共沸混合物和 R510A、R511A 和 R512A 三种共沸混合物;并对制冷剂的可燃性进行了重新划分,将可

燃性等级为 2 类中的燃烧速率 $\leq 10\text{cm/s}$  的单独列为“2L”，即微可燃类，因此制冷剂可分为“1（不可燃类）”、“2L（微可燃类）”、“2（可燃类）”和“3（易燃类）”。综合考虑制冷剂的毒性和可燃性后，安全性可分为 8 类，详见表 5，ISO817-2014 还规定了 110 种制冷剂的安全性类别。虽然，新标准的毒性分类中没有涉及急性毒性，但给出了急性毒性评价指标，采用制冷剂浓度极限（RCL: Refrigerant Concentration Limit），其综合了急性毒性暴露极限（ATEL）、缺氧极限（ODL）、燃烧浓度极限（FCL）等，且数值为上述 3 个指标的最小值。

ISO 5149 关于设备安全的基本标准，规定了制冷剂的允许充注量（以 ISO 817 规定的制冷剂的安全等级和容许浓度为基础）及机械强度等项目，同时规定了对设备的设计以及安全的要求。空调机组及热泵的设备安全标准 IEC 60335-2-40、电冰箱的安全标准 IEC 60335-2-24、压缩机的安全标准 IEC 60335-2-34 中，均以 ISO 5149 为基础，制定了对相关特定机器的安全要求。IEC 针对特定机器的安全标准，对特定机器有更加细节化的规定，所以在这方面，IEC 标准一般优先于 ISO 5149 标准。在 IEC 标准没有规定时，一般需遵守 ISO 5149 标准。另外，ISO 标准与 IEC 标准并不是强制标准，而是推荐标准。但是，如果各国都制定和 ISO 标准以及 IEC 标准不吻合的国内标准，将有可能以违反 WTO(世界贸易组织)TBT(技术性贸易壁垒协议)遭到起诉。如果各国对制冷空调设备制定比国际标准更严格的标准，必须有相应的技术依据。2014 年 1 月，ISO（国际标准化组织）有关冷冻空调设备安全环境的基本标准 ISO 5149 的第 1~3 部分通过了其成员国的投票，加上此前（2012 年）已经通过的第 4 部分，ISO 5149(2014)标准内容全部通过发行。该标准将制冷和热泵安全和环境方面要求分为了 4 个部分：第一部分，基本要求、分类、定义和选择原则；第二部分，设计、建造、试验、标记与文件编制；第三部分，安装地点；第四部分，运行、维护、检修和回收。在第一部分中对制冷剂充注量进行了规定，并针对新制定的 2L 微燃等级规定了新的充注量上限，将充注量上限与强燃等级 3 和弱燃等级 2 相比放宽了 1.5 倍。充注量上限的制定的基本思路是，系统内的制冷剂在 4min 内全部泄漏到室内时，地板附近的浓度不会超过可燃下限 LFL 以确保室内的安全。在第二部分规定中，电子元件必须遵守 IEC 60335-2-40，IEC 60335-2-24 或者 IEC 60204-1 的规定。第三部分也相应地修改了微燃等级 2L 相关的部分。但第四部分对可燃制冷剂未特

定给出。具体修改内容见表 14。

表 3-6 新版 ISO 5149 修改内容列表<sup>[31]</sup>

项目	ISO 5149-1993	ISO 5149-2014															
建筑分类	A 公共设施：医院、监狱 B 公共场所：剧场、大厅 C 居住：住宅、旅店 D 公务：办公楼、小型、商店 E 工业：工厂	第 1 部分第 5.1 项： A 通用区域：医院、监狱、旅店、住宅、剧场、车站、饭店 B 监管区域：办公楼、实验楼、办公楼 C 授权区域：工厂、屠宰场															
等级分类	第 1 组：不燃、弱毒性 第 2 组：低可燃、强毒性 第 3 组：可燃、弱毒性	依据 ISO817 第 6 项： <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>弱毒性</th> <th>强毒性</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>不燃</td> <td>A1</td> <td>B1</td> </tr> <tr> <td>低可燃</td> <td>A2L</td> <td>B2L</td> </tr> <tr> <td>可燃</td> <td>A2</td> <td>B2</td> </tr> <tr> <td>易燃</td> <td>A3</td> <td>B3</td> </tr> </tbody> </table>		弱毒性	强毒性	不燃	A1	B1	低可燃	A2L	B2L	可燃	A2	B2	易燃	A3	B3
	弱毒性	强毒性															
不燃	A1	B1															
低可燃	A2L	B2L															
可燃	A2	B2															
易燃	A3	B3															
可燃性定义	以体积可燃下限 3.5% 定以可燃性。	依据 ISO817 第 6.1.3.3 项： 引入低可燃的等级 2L 以精确定义氨的可燃性。燃烧速度低于 10cm/s 时定义为 2L。体积可燃下限 3.5% 依然存在，但是又加进了燃烧热量 19MJ/kg 以区分强燃。															
毒性浓度	低于麻醉上限的一半。	依据 ISO817 第 8 项：根据 ISO817，毒性极限更加复杂。死亡率(30 分以内)以内限更加心脏致敏(NOAEL)复杂。了燃麻醉性(CNS)(EC50)燃烧热度对于几个有长期使用经验的制冷剂（如：HCFC-22），容许使用以前的数字。															
制冷剂使用上的限制	系统和安装位置分为直接和间接。 在建筑分类 A、B、C 以及 D 区分里不允许使用第 3 组的制冷剂用于空调。	第 1 部分第 5.3 项：在直接和间接的基础上，又增加了机罩通风，安置于室外的压缩机及压力容器。 第 1 部分附件 A： -如果房间足够大，可以满足充注量计算式，在没有通风要求的情况下，可以使用 1kg 碳氢用于空调。 -采用了 IEC SC61D 和 ISO TC86SC1 联合工作组提案的充注量计算公式。 -其他制冷剂的充注量与 LFL 成比例。															
多联机的要求		第 1 部分附件 A 第 A.2 项： 对 A2L 制冷剂因为其微弱的可燃性(燃烧时的压力上升极小或可以忽视)，对其充注量放宽了 1.5 倍。															
制冷剂种	表 4 列出了 CFCs、HCFCs 以及 CO <sub>2</sub> 。一共 26 个工质，包	第 1 部分附件 B 表 B.1-B.3： 第 1 部分表 B 列出了以下工质：															

类	括 2 个共沸混合物。	纯工质：41 种；非共沸：64 种；共沸：12 种
压力	铸铁耐压实验：设计压力×1.5 板材卷成或无缝管材：设计压力×1.3 安全阀起座：设计压力×1.1 压力上限设定装置：设计压力×1.0 泄漏实验压力：设计压力×1.0	第 2 部分第 5.2.2.3 项 铸铁耐压实验压力为设计压力×1.43 或对 10% 的接头进行设计压力×1.1 的非破坏试验。 安全阀起座压力：设计压力×1.2 压力上限设定装置：设计压力×1.0。 泄漏实验压力：设计压力×0.25 安全阀必须设置在爆破片的下游。
通风 机罩		第 2 部分第 5.2.17 项： 为了在没有防爆措施的室内使用强可燃制冷剂，引入了通风机罩的概念。对机罩进行通风换气，以防止泄漏制冷剂流出机外。
耐压 试验		第 2 部分附件 C 依据相关配管、接头以及部件具体要求。
电器 安装	依据 IEC60335-2-40 及 2-24。1993 年 ISO5149 发行时，IEC60335 系列还没有包括可燃制冷剂的内容。	第 3 部分第 5.4.1 项： 依据 IEC60335 系列或者 IEC60294-1。IEC60335-2-40 以及 IEC60335-2-24 已经包括了可燃制冷剂的内容。ISO5149-2 包括了有关电器部件的特定要求。
机房 电气 设备	电气设备等级在制冷剂超过 2.5 公斤时为危险区等级 3，在制冷剂超过 25 公斤时为危险区等级 2。但是氨不在此列。	第 3 部分第 7.3 项： 电气设备在机房的危险区等级分别设为 2 级或 3 级，但是 2L 制冷剂不受此限制。

对于美国标准，ANSI/ASHRAE Standard 34(2013)制冷剂名称和安全分类标准已修订完成，它综合了其 2010 年版和其后来批准与公布的 36 项补遗的内容<sup>[32]</sup>，并与 ISO 817(2013)基本保持一致，但在安全分类中评价指标 LFL 的量纲选择，可燃浓度极限 FCL (Flammability concentration limits) 取值和制冷剂浓度极限 RCL 取值方面与 ISO 817(2013)略有不同。其中修订内容包括：增补了 2 条名称术语，即增加了泡点与露点的定义；澄清了最低观测得到的有效水平 LOEL (lowest observed effect level) 与观测不到的有效水平 NOEL (no-observed effect level) 的定义；修改了工作场所环境暴露水平 (WEEL) 的定义。对制冷剂 R600 添加了缺少的 RCL 数据，并将制冷剂 R1270、R436B 与 R437 的 RCL 数据修改成可参考的数据；将 R402A、R415A、R415B、R418A 与 R419A 的 RCL 值作了修改，因为它们没有遵守标准中的可燃性测试方法；根据可选择的燃烧速度测量数据，将 4 种制冷剂 HFC-32、HFC-143a、R717、HFO-1234yf 的可燃性安全分

级由 2 级修改为 2L 子级；基于较新的可接受 GLP 方法，修改了 HFC-32 心脏致敏 NOEL 值，从  $200000 \times 10^{-6}$  修改为  $350000 \times 10^{-6}$ ，并取消了取值  $250000 \times 10^{-6}$  的 LOEL 数值。新增加了 R407F、R417B、R439A、R440A...R449 等 12 种非共沸制冷剂混合物和 R511A、R512A 两种共沸制冷剂混合物。修改了共沸混合物的内容，对于共沸混合物（R500 系列）的一些应用，应提供证据证明在混合物的名义组分下在所打算应用范围内，一般在  $T_{\text{NBP}} < T < 0.95T_{\text{crit}}$  的温度范围内，存在着共沸，其中  $T_{\text{NBP}}$  为 0.101MPa 压力下的泡点温度，K； $T_{\text{crit}}$  为该混合物的临界温度，K。ANSI/ASHRAE Standard 15-2013 详细说明了制冷系统的安全设计、建造、安装和运行，对可燃制冷剂的使用，在充灌量限制，电气安全、系统安装和产品设计等方面都作了严格限制，详细讨论可参考文献[9]。

对于日本标准，高压气体保安法则给出了可燃气体的定义：LFL 本标准，或者 UFL-LFL 高压气体的气体在法律上定为“可燃性气体”，因此 R32 不属于可燃性气体范围。而冷冻保安法则对于使用可燃性制冷剂的冷冻空调设备，在设备的构造、储液器设计、灭火设施的设置、电气设备防爆、泄漏报警措施的设置、设备维修特殊要求、设备变更后的气密试验要求、气体排放要求、设备制造安装的特殊要求、设备完成检查方法等方面给出了相关要求。

对于欧洲相关标准和法规，EN 378(2008)标准与 ISO 5149(2014)类似，只在制冷剂充灌量限制等方面略有不同，且标准还给出了使用可燃性制冷剂设备的检修指南。而 EN 60079 等同采用 IEC 60079 标准。目前相关的标准已修订完成。

我国与制冷剂相关的标准和法规有数十个，其中的主要几个现行标准，GB/T7778(2008)制冷剂编号方法和安全性分类标准的分类方法与其他国家和地区的分类方式略有不同，而 GB 9237(2001)等效采用 ISO 5149(1993)。GB 25131-2010 蒸汽压缩循环冷水（热泵）机组安全要求标准给出了产品设计安全标准，但标准未对可燃性制冷剂进行特殊要求。GB 4706 机械制冷系统和产品安全要求标准系列等同采用 IEC 60335 系列标准，GB 5226.1(2008)机械电气设备标准等同采用 IEC 60204-1(2005)，GB 3886 爆炸性环境电气安全标准系列等同或修改采用 IEC 60079 标准系列。GB 20577(2006)危险化学品及危险货物安全法规和标准，规定了易燃气体的术语和定义、分类、判定流程和指导、类别和警示标签、类别和标签要素的配置及警示性说明的一般规定。其中易燃气体分为 2 类：类别

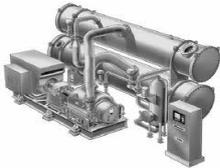
1, LFL 品及危险或者 UFL-LFL 险货物安的气体; 类别 2: 除类别 1 有可燃范围的气体。GB 50016(2006)建造设计防火规范中, 对于使用可燃性制冷剂的建筑而言, 应根据生产中使用或产生的物质性质及其数量等因素确定建筑的火灾危险性, 根据火灾危险性和空间大小确定空间内最多允许存放的可燃性制冷剂总量, 根据建筑的功能确定其建筑物耐火等级、防火间距、防爆措施、安全疏散、建筑结构、消防车道、消防给水和灭火设施、防烟和排烟措施、采暖、通风和空气调节、电气安全等防火措施。

采用可燃制冷剂安全解决措施, 提前对可燃制冷剂替代应用规范布局, 对应对制冷剂标准发展, 有着重要的现实意义。目前国际社会正加快新标准的制定工作, 2014 年, 新的 ISO 5149 和 ISO 817 已正式投票通过, 2015 年将启动 IEC 60335-2-40 的修订工作, 近期我国也启动了对弱可燃制冷剂 R32 可燃性风险的评估与标准的制定工作。但是, 应当注意到, 对于可燃制冷剂的应用, 有了安全标准和法规的等依据, 为了保证产品生产和使用的安全, 保护消费者的人身安全和利益, 还需要在产品的设计、安装、维护、回收等整个制冷产品生命周期中认真地理解安全法规的要点, 把握好每个环节, 并对相关人员进行教育培训, 降低关键环节维修和回收的风险几率, 以确保各个操作环节中的安全。

### 3.6 国内替代技术选择参考方案

根据近期我国制冷展中展示了最新的零 ODP、更低 GWP 的绿色环保的替代品、替代技术及相关研究成果路演情况, 以及对我国大型工商业制冷公司的调研所掌握的情况来看。国内企业已掌握了近期替代物 R410A 和 HFC-134a 应用的核心技术, 并且一些大型企业已突破 HFC-32 制冷剂在单元式空调和小型冷水(热泵)机组中应用的关键技术, 并已生产出部分样机, 但在多联机中的使用, 其最佳充注量、压缩机控制、系统回油设定等技术问题有待进一步解决。对于工商用冷冻冷藏设备和压缩冷凝机组, R134a 替代技术和 NH<sub>3</sub>/CO<sub>2</sub> 替代技术已基本掌握。未来 5 年有待突破的替代技术包括: 应用在 CO<sub>2</sub> 热泵热水机的高效 CO<sub>2</sub> 压缩机的开发, 在大型冷水(热泵)机组和压缩冷凝机组能够实现 drop-in 替代的 HFOs 工质替代技术还有待进一步探索。表 3-7 是根据调研情况给出的工商业制冷中不同产品可选择的替代方案<sup>[13]</sup>。

表 3-7 我国工商业制冷空调行业替代技术选择参考方案

产品类型	当前使用 制冷剂	可能的替代物
小型冷水（热泵）机组 	HCFC-22 R410A	R410A（近期） HFC-32（中长期）
大中冷水（热泵）机组 	HCFC-22 HCFC-123 HFC-134a	HFC-134a（近期） HFO-1234ze(E)（中长期） HFO 混合制冷剂（中长期）
热泵热水机 	HCFC-22 HFC-134a R410A R407C	HFC-134a（近期） R410A（近期） HFC-32（中长期） CO <sub>2</sub> （中长期） HFO 混合制冷剂（中长期）
单元式空调机 	HCFC-22 HCFC-142b R410A R407C	R410A（近期） HFC-32（中长期）
多联式空调（热泵）机组 	R410A	R410A（近期） HFC-32（中长期） HFO 混合制冷剂（中长期）
工商用冷冻冷藏设备和压缩 冷凝机组 	HCFC-22 HFC-134a R404A NH <sub>3</sub>	HFC-134a（近期） NH <sub>3</sub> /CO <sub>2</sub> （中长期） HFOs 混合制冷剂（中长期）

## 4 HFCs 制冷剂削减潜力测算

### 4.1 制冷剂削减所产生环境效益的计算方法

制冷剂所产生的环境问题是主要体现在对臭氧层的破坏作用和温室效应两个方面。目前国际上通用的关于制冷剂的环保性能评价指标主要是臭氧损耗潜能（ODP）和全球变暖潜能（GWP）。ODP 是用来评价制冷工质破坏臭氧层能力的指标。ODP 值是在相对的基础上计算得到的，即将 CFC-11 的 ODP 值定为 1，所有其他制冷剂的 ODP 都是相对于 R11 定出的。ODP 值越小，说明制冷工质的破坏臭氧层能力越小。我国已经制定了 HCFCs 制冷剂的淘汰方案，因此本报告中制冷剂削减所产生的环境效益不考虑 ODP 问题。GWP：来衡量制冷剂对全球变暖的影响。和 ODP 值一样，GWP 值也是在一个相对的基础上计算出来的。CO<sub>2</sub> 的 GWP 值被定为 1，所有其他温室气体都有一个相对 CO<sub>2</sub> 的 GWP 值。GWP 值评价了制冷剂自身对全球气候变暖的影响，它的大小取决于三方面的因素：①吸收红外辐射的能力；②在大气中的寿命；③与 CO<sub>2</sub> 相比较时使用的的时间区间框架（ITH：Integration Time Horizon）。值得注意的是，对于同一种制冷工质，根据所用的不同时间框架，其 GWP 值会发生变化，因此必须在相同的时间框架下比较才有意义，一般用的较多的是基于 100 年的时间框架。目前，国际上考虑的制冷剂的 GWP 值一般采用 IPCC2013 年第五次评估报告<sup>[3]</sup>（第 8 章 Table 8.A.1）或 ASHRAE 提供的基础数据，因此本报告也选择此数据作为计算基准。当前，对制冷剂的减排效应的评价方法主要有包括：1、直接用 GWP 进行评估；2、考虑系统的充注量的 CO<sub>2</sub> 减排率 ERR；3、如果考虑系统运行能耗的影响的总当量变暖影响 TEWI 评估方法，4、如何考虑制冷剂的整个生命周期的影响，可以选用全周期气候性能 LCCP 方法。

CO<sub>2</sub> 减排率 ERR：由于即使只从直接排放来看，对 CO<sub>2</sub> 减排的贡献，不能仅看制冷剂的 GWP 值，它还与制冷剂充注量有直接关联。因此，国内学者提出使用 CO<sub>2</sub> 减排率 ERR 作为其减排性能的指标<sup>[33]</sup>。如以 HCFC-22 的替代制冷剂为例，该指标的计算公式如下：

$$ERR = \frac{(GWP_{R22} \times G_{R22}) - (GWP_{\text{替代品}} \times G_{\text{替代品}})}{(GWP_{R22} \times G_{R22})}$$

式中：G 为系统充注量（g）。

通常可以认为充注量 G 近似与摩尔质量 M 成正比，而 GWP 和 M 均为制冷剂和 HCFC-22 本身的物化参数。因此，此指标完全可由替代工质及 HCFC-22 的本身参数确定，不受制冷机组的具体条件的约束。它简单明了，计算方便，操作性强，且与 CO<sub>2</sub> 减排目标直接挂钩。应当注意到，该 CO<sub>2</sub> 减排率 ERR 可正可负。正值表示有减排作用，正值越大则减排效果越明显；负值表示不但无减排作用，且有增排效益，负值越大则增排效果越明显。表 4-1 列出的是低 GWP 制冷剂相对于 HCFC-22 的 ERR 分析结果，从中可以看出，尽管 HFC-32 的 GWP 值相对于 HCFC-22 只削减了约 2/3 的量，但是由于 HFC-32 的充注量减少，使得其相对于其 CO<sub>2</sub> 减排率却达到了 77.6%。

表 4-1 不同替代制冷剂减排率（ERR）对比<sup>[33]</sup>

制冷剂	GWP	分子量	ERR	制冷剂	GWP	分子量	ERR
R407C	1824	86.2	0.009	ARM-70a	482	70.929	0.782
R410A	2088	72.58	0.026	L41a	494	60.977	0.808
R134a	1430	102.03	0.068	L-41b	494	60.977	0.808
LTR4X	1295	85.095	0.296	DR-5	490	61.172	0.808
D52Y	979	97.776	0.388	L-20	331	67.811	0.857
N-20	975	96.657	0.398	DZY-60	272	77.22	0.866
ARM-41a	943	99.54	0.400	LTR6A	206	77.631	0.898
XP-10	631	108.43	0.563	ARM-42a	117	104.8	0.922
N-13a	604	108.67	0.581	R1234ze	6	114.04	0.996
N-13b	604	108.67	0.581	R1234yf	4	114.04	0.997
AC5X	622	100.87	0.599	NH <sub>3</sub>	<1	17	0.999
D4Y	574	108.91	0.601	CO <sub>2</sub>	1	44	0.999
R32	675	52.02	0.776	R290	3	44	0.999

总当量变暖影响 TEWI：相对于制冷剂自身对全球气候变暖的影响，制冷和空调系统还会以间接的能量消耗对全球气候变化起作用。基于这种考虑，总当量变暖效应（TEWI: Total Environmental Warming Impact）综合考虑制冷剂排放的直接效应和能源消耗的间接效应，对制冷剂造成温室效应的总量值进行评估。其中，直接效应由泄漏损失效应和回收损失效应组成，取决于制冷工质的 GWP 值、

气体泄漏量及考虑的时间长度；间接效应取决于制冷和空调系统运行的效率。

TEWI 的计算公式如下：

$$TEWI = GWP \times m \times (1 - \alpha) + GWP \times L \times n + n \times E_{ann} \times \beta$$

式中：m：制冷剂充装量（kg）；

α：制冷剂回收系数，其值为 0~1；

L：制冷工质泄漏量（kg/a）；

n：有效使用期（a）；

E<sub>ann</sub>：年能消（kW·h/a）；

β：提供每千瓦·时能量引起的二氧化碳排放量[kg(CO<sub>2</sub>)/(kW·h)]。

TEWI 的计算需要明确制冷和空调系统的种类和应用场合，其最有效的用途是确定直接变暖效应和间接变暖效应的相对重要性。图 4-1 描述的是几种替代制冷剂的 TEWI 值比较。从图中可以看出，间接效应对 TEWI 的影响要比直接效应大得多，尽管 HFO-1234yf 和 CO<sub>2</sub> 有较小的 GWP 值，但是由于其较低的效率，导致其 TEWI 值要比 R410A 大；反而 HFC-32 尽管其 GWP 值（675）的优势不明显，但是其 TEWI 值却是最小的。这也为什么 R32 被认为是很有前景的长期替代 R22 的理想制冷剂。

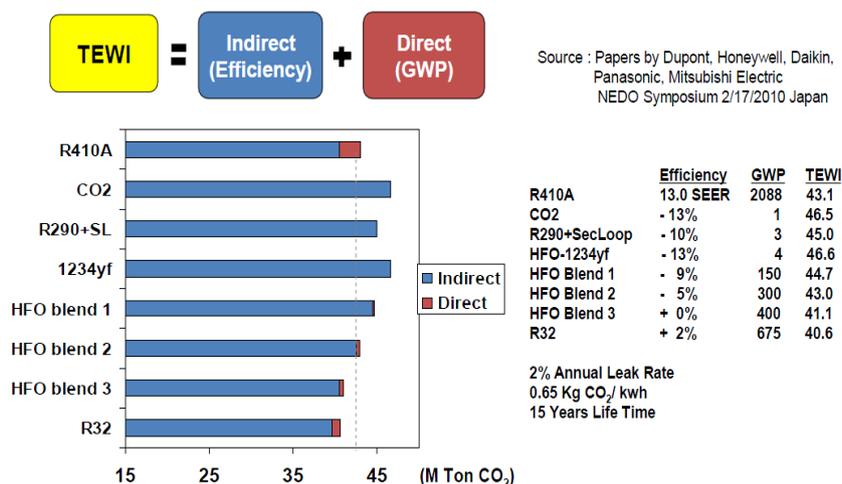


图 4-1 几种替代制冷剂的 TEWI 比较<sup>[34]</sup>

全寿命期气候性能 LCCP: (Life Cycle Climate Performance) 指标由美国 Arthur D Little 公司于 1999 年提出的,是在 TEWI 基础上补充了制冷工质生产过程中的能耗引起的温室效应影响,主要考虑以下两个因素: ①生产制冷剂及其原

材料时的耗能（如电能和各种燃料）所伴随的影响，这种影响称为蕴含能量 E。

②生产过程排放的作为温室气体的任何副产品所产生的影响，这种影响称为不易收集的排放值 F。

$$LCCP=(GWP+E+F)[m\times(1-\alpha)+L\times n]+n\times E_{ann}\times\beta$$

式中：E：生产制冷剂及其原料时的消耗（如电能和各种燃料）所伴随的影响，这种影响称为“蕴含能量”；

F：生产过程中排放的作为温室气体的任何副产品，这种影响称为“不易收集的排放”；

m：制冷剂充装量（kg）；

$\alpha$ ：制冷剂回收系数，其值为 0~1；

L：制冷工质泄漏量（kg/a）；

n：有效使用期（a）；

Eann：年能消（kW·h/a）；

$\beta$ ：提供每千瓦·时能量引起的二氧化碳排放量[kg(CO<sub>2</sub>)/(kW·h)]。

与 TEWI 类似，若用 LCCP 衡量和分析，制冷工质的直接温室效应均很小，间接温室效应占主要部分。因此联合国环境规划署、美国环保署、美国大气对策联盟以及美国空调制冷协会等认为，在制冷空调行业中，分析环境影响时，焦点不在于制冷剂本身，而是这些设备的 LCCP 指标。因此，按照 LCCP 概念和计算方法，单元式空调、冷水机组、商业制冷、汽车空调、热泵等设备使用不同制冷剂时有各自的不同的 LCCP 结果。图 4-2 是给出的是 R410A、HFC-32、HFO-1234yf 和几种 HFO 混合物的 LCCP 值的对比。计算基准是以 3 冷吨 R410A 机组，其制冷季节能效比 SEER 和制热季节性能系数 HSPF 分别为 13.0 和 7.7，间接效应计算中电力的温室气体释放率选取的是 0.65kgCO<sub>2</sub>/kwh（美国平均水平）。从图中可以看出，就 LCCP 值而言，HFC-32 在替代制冷剂中也有较大的优势。

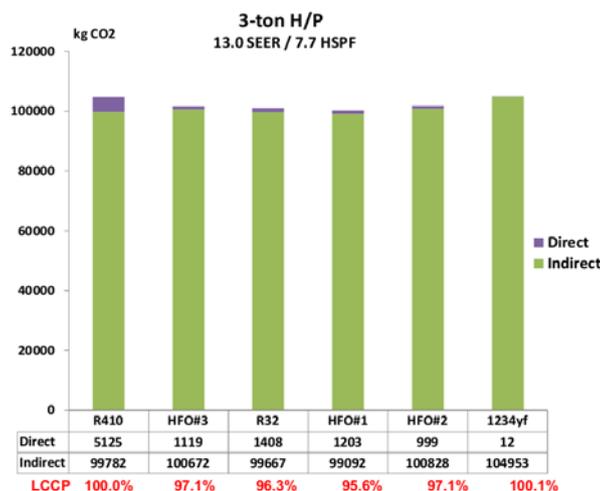


图 4-2 几种替代制冷剂的 LCCP 比较<sup>[24]</sup>

综上所述，制冷剂的每种环保指标都有各自的特点和优势，我们需要根据所要研究问题的目的和对象，选用不同的指标。由于 TEWI 和 LCCP 计算相对较复杂，而且计算需要考虑制冷设备外部条件因素，因此本报告中只是基于 CO<sub>2</sub> 减排率 ERR 的方法，考虑制冷剂充注量和 GWP 值进行分析计算。相关数据见表 4-2。由此，可以计算出 2012 年，我国工商业制冷制冷剂消费折算 CO<sub>2</sub> 当量为 125.55 百万吨，该数据也作为后续计算中的温室气体削减基线值。

表 4-2 不同制冷剂削减效果的计算基准<sup>[3]</sup>

	R22	R123	R142b	R410A	R134a	R404A	R407C	NH <sub>3</sub>	R32
GWP	1760	79	1980	2088	1300	3922	1824	1	675
相对于 R22 充注量	1			0.84	1.18	1.12	1	0.8	0.6

## 4.2 HFCs 制冷剂削减情景设定

由于目前 HCFCs 淘汰是强制性要求，设定在 2013 年将 HCFCs 的生产及消费冻结在 2009 及 2010 年平均值的水平上，分别于 2015、2020、2025 及 2030 年实现基线水平 10%、35%、67.5%、97.5% 的削减，2030—2040 年间允许保留 2.5% 的基准量供维修使用。工商制冷空调 HCFCs 的基线水平为 42900 吨。因此，本报告的预测分析时间跨度设定为 2014-2030 年，考虑国内外相关法规和制冷剂应用发展趋势，将 2015 年、2020 年、2025 年作为制冷剂切换的起始关键年，其余

各年均考虑线性替代,并将 2012 年的制冷剂消费折合的 CO<sub>2</sub> 当量作为 HFC 制冷剂削减测算基准,制冷剂增长考虑低增长和高增长两种模式。并且,不同产品类型考虑不同的替代制冷剂方案。

**基线情景 (BAU):** 基于市场自发行为,为假定没有 HCFCs 加速淘汰方案下的制冷剂消费折合的 CO<sub>2</sub> 当量;

**削减情景 A:** 假设未来没有出现突破性的替代技术创新和没有实施大规模的激励措施,按照 HCFCs 淘汰管理计划筛选的技术路线完成 HCFCs 加速淘汰的目标,主要替代品为 R410A, HFC-134a 等发达国家已用替代制冷剂,适当考虑逐渐成熟的低 GWP 替代品,如 HFC-32;

**削减情景 B:** 假定大型企业逐步掌握了中长期替代制冷剂产品转换的关键技术,中长期替代物的比例提高一倍,逐步开始选用一些 GWP 较低的混合制冷剂;

**削减情景 C:** 假定我国大中型企业逐步掌握了低 GWP 制冷剂的关键技术,中长期替代物的比例再提高一倍,一些 GWP 比较低的混合制冷剂开始得到较多的应用;

**削减情景 D:** 假设中长期替代物得到最大可能范围的应用。

表 4-3 削减情景 A 设定

	R410A	R32	R134a	CO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	GWP=700	GWP<150	备注
小型冷水（热泵）机组	80%	20%						R32 替代使用从 2016 年开始
大中型冷水（热泵）机组			100%					
热泵热水机	60%	10%	30%					R32 替代从 2021 年开始
单元式空调机	80%	20%						R32 替代使用从 2016 年开始
多联式空调（热泵）机组	90%	10%						R32 替代使用从 2020 年开始
工商用冷冻冷藏设备和压缩冷凝机组			40%	5%	55%			CO <sub>2</sub> 替代从 2016 年开始

表 4-4 削减情景 B 设定

	R410A	R32	R134a	CO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	GWP=700	GWP<150	备注
小型冷水（热泵）机组	60%	40%						R32 的替代使用从 2016 年开始
大中型冷水（热泵）机组			95%			5%		考虑在 2021 年采用 GWP=700 的新工质部分替代
热泵热水机	40%	20%	35%	5%				R32 替代从 2021 年开始，CO <sub>2</sub> 替代从 2021 年开始
单元式空调机	60%	40%						R32 替代使用从 2016 年开始
多联式空调（热泵）机组	70%	30%						R32 替代使用从 2021 年开始
工商用冷冻冷藏设备和压缩冷凝机组			30%	10%	55%	5%		CO <sub>2</sub> 替代从 2016 年开始 采用 GWP=700 替代从 2021 年开始

表 4-5 削减情景 C 设定

	R410A	R32	R134a	CO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	GWP=700	GWP<150	备注
小型冷水（热泵）机组	20%	80%						R32 的替代使用从 2016 开始
大中型冷水（热泵）机组			70%			20%	10%	GWP=700 从 2021 年开始，GWP<150 从 2025 年开始
热泵热水机	30%	40%	15%	15%				R32 替代从 2021 年开始，CO <sub>2</sub> 替代从 2021 年开始
单元式空调机	20%	80%						R32 的替代使用从 2016 开始
多联式空调（热泵）机组	50%	50%						R32 的使用从 2021 年开始
工商用冷冻冷藏设备和压缩冷凝机组			20%	15%	55%	10%		CO <sub>2</sub> 替代从 2016 年开始 采用 GWP=700 替代从 2021 年开始

表 4-6 削减情景 D 设定

	R410A	R32	R134a	CO <sub>2</sub>	NH <sub>3</sub>	GWP=700	GWP<150	备注
小型冷水（热泵）机组	10%	90%						R32 的替代使用从 2016 开始
大中型冷水（热泵）机组			40%			40%	20%	GWP=700 工质从 2021 年开始，GWP<150 从 2025 年开始
热泵热水机	10%	50%	10%	30%				R32 替代从 2021 年开始，CO <sub>2</sub> 替代从 2021 年开始
单元式空调机	10%	90%						R32 的替代使用从 2016 开始
多联式空调（热泵）机组	30%	70%						R32 的使用从 2021 年开始
工商用冷冻冷藏设备和压缩冷凝机组			10%	20%	55%	10%	5%	CO <sub>2</sub> 替代从 2016 年开始，采用 GWP=700 替代从 2021 年开始，GWP<150 从 2025 年开始

### 4.3 HFCs 制冷剂削减情景计算

基于测算结果可知(见表 4-7):在低增长模型增长预期下,基线情景(BAU)中制冷剂消费折算 CO<sub>2</sub> 当量将逐渐增加,从 2012 年 125.55 百万吨到 2030 年将达到 246.77 百万吨,几乎增长了一倍,且增长规律与制冷剂消费量一致。在削减情景 A 中,由于近期替代物 R410A 的 CO<sub>2</sub> 减排率与 HCFC-22 接近(考虑充注量),而 HFC-134a 的减排效果也甚微,增长规律与基线情景一致,制冷剂消费折算 CO<sub>2</sub> 当量依然是逐渐增加,到了 2020 年,已达到 202.58 百万吨;尽管一些低 GWP 制冷剂的引入,如 HFC-32 在 2016 年开始逐步替代,CO<sub>2</sub> 在 2021 年也开始尝试转换,且一些高 GWP 的制冷剂如 R404A 被逐步削减使用,使得整个增长趋势有所减缓(从 2025 到 2030 的 5 年间只增长了 0.98%),但是由于中长期替代物所占比例较小,在整个预测周期内仍然是保持消费增长趋势,2030 年制冷剂消费折算 CO<sub>2</sub> 当量仍然能达到 218.31 百万吨。对于削减情景 B,由于中长期替代物的比例提高了一倍,使得预测周期内的增长出现了拐点,在 2025 年制冷剂消费折算 CO<sub>2</sub> 当量出现了最高峰,达到了 200.74 百万吨,但是随后就出现了下降趋势,到 2030 年只有 187.30 百万吨(降低了 6.7%),对于削减情景 C,由于一些中长期替代制冷剂的替代比例已达到了 60%,且随着国际替代技术的不断成熟,一些 GWP 更低的替代物的引入,如 GWP<150 的制冷剂也 2020 后成为了选择方案,因此整个削减效果更趋明显,其中增长的最高点提前到了 2020 年,只有 187.46 百万吨,但到 2030 年,制冷剂消费折算 CO<sub>2</sub> 当量仍然有 131.30 百万吨,接近设定的基线要求(125.55 百万吨,2012 年)。对于削减情景 D,近期高 GWP 替代物只保留了 10%,而中长期替代物的比例已达到了 90%,而且一些新的低 GWP 的制冷剂在整个产品领域都得到了应用,比例也不断在增加,所得整个削减效果在 2025-2030 年间非常明显,最终 2030 年的制冷剂消费折算 CO<sub>2</sub> 当量只有 97.94 百万吨,达到了设定的削减基线值以下,甚至比基线值还减少了 22%。从累计效果来看,基线情景下,18 年内制冷剂消费折算 CO<sub>2</sub> 当量达到了 3910.78 百万吨;而在削减情景 A 下,累计消费了 3676.46 百万吨;对于削减情景 B,累计消费约为基线情景的 89%,对削减情景 C,能降低到 80%,而对于削减情景 D,仅只有基线情景的 71%。尽管削减效果非常明显,但以目前的调研情

况来看，由于中长期替代品所占的比例较大，近期替代物的产品线在没有发挥一定时效的作用需要被淘汰，且一些新的应用技术的仍然不够成熟，企业投入的研发成本将会大大增加，因此会导致替代成本变得非常大。低增长模型下 HFC 制冷剂的削减预测变化规律对比见图 4-3。

表 4-7 低增长模型下制冷剂消费折算 CO<sub>2</sub> 当量(单位：百万吨 CO<sub>2</sub>-eq)

年份	基线情景 BAU	情景 A	情景 B	情景 C	情景 D
2012	125.55	125.55	125.55	125.55	125.55
2015	164.75	162.76	162.76	162.76	162.76
2020	211.44	202.58	197.11	187.46	169.91
2025	235.64	216.18	200.74	170.36	140.9
2030	246.77	218.31	187.30	131.30	97.94
累计	3910.78	3676.46	3485.57	3127.45	2787.68

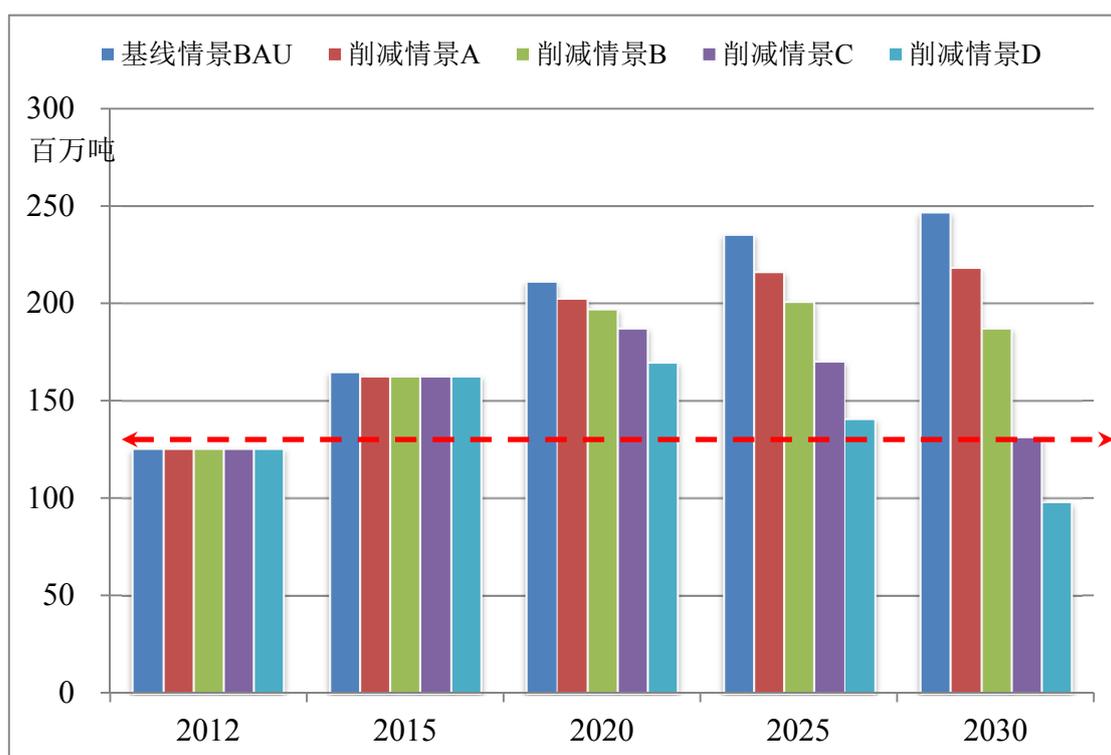


图 4-3 低增长模型下制冷剂消费折算 CO<sub>2</sub> 当量的比较

在高增长模型增长预期下，基线情景 BAU 中制冷剂消费折算 CO<sub>2</sub> 当量能达到 285.27 百万吨，相对于低增长模式，尽管在 2020 年之前保持相近的增速，但是后期高增长模式仍然保持较高的增速，导致其削减的压力将更大（需要的削减量增加了 38.5 百万吨 CO<sub>2</sub> 当量）。在基线情景和削减情景 A 中，高增长预期下的

制冷剂消费折算 CO<sub>2</sub> 当量的增长规律与低增长模型相同，均未出现增长拐点；拐点的出现都是出现在削减情景 B 中。只有按照削减情景 D 来规划，最大限度的增加 HFC-32、NH<sub>3</sub> 等中长期替代制冷剂在工商业制冷行业的应用比例，才能使 2030 年的制冷剂消费折算 CO<sub>2</sub> 当量控制在设定的基线要求(125.55 百万吨 CO<sub>2</sub> 当量，2012 年)，此时 2030 年的制冷剂消费折算 CO<sub>2</sub> 当量仍有 113.22 百万吨。可以设想，如果未来实际增长率比计算设定的高增长模式的还要高，将会使得即使选择削减情景 D 来规划，也仍然达不到将制冷剂消费折算 CO<sub>2</sub> 当量控制在设定的基线要求，这将给我们未来的削减规划及计划的制订提出了更艰巨的挑战。

表 4-8 高增长模型下制冷剂消费折算 CO<sub>2</sub> 当量 (单位: 百万吨 CO<sub>2</sub>-eq)

年份	基线情景 BAU	情景 A	情景 B	情景 C	情景 D
2012	125.55	125.55	125.55	125.55	125.55
2015	167.40	165.33	165.33	165.33	165.33
2020	223.09	211.43	207.71	197.26	178.47
2025	257.87	233.87	219.24	185.56	153.0
2030	285.27	252.37	216.53	151.78	113.22
累计	4200.68	3915.71	3727.36	3325.63	2949.3

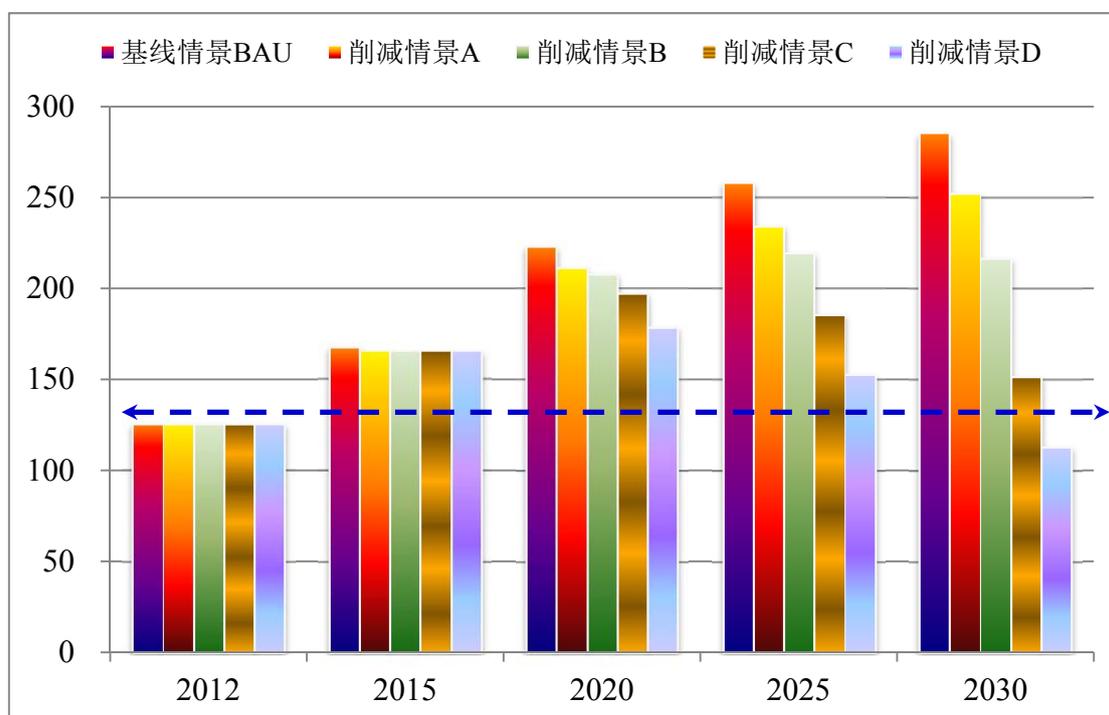


图 4-4 高增长模型下制冷剂消费折算 CO<sub>2</sub> 当量的比较

## 4.4 HFCs 制冷剂削减潜力分析

根据上述计算，相比基线情景 BAU 制冷剂消费情况，结合表 4-7 低增长模型下的相关数据，如果从温室气体排放来看，不同情景下替代工质逐年所实现的削减潜力对比见表 4-9。从表中可以看出，各削减情景下，所具备的削减潜力随着中长期低 GWP 制冷剂的逐步替代引入而逐年增加，即使实施削减情景 B 的规划，也能在 2030 年实现削减 59.47 百万吨 CO<sub>2</sub> 当量，削减率达到了 24.1%；如能实施削减情景 D 的规划，到 2030 年，能实现削减 148.83 百万吨 CO<sub>2</sub> 当量，削减率达到了 60.3%，大于 2012 年全年的制冷剂消费折算 CO<sub>2</sub> 当量，累计 HFCs 削减折算 CO<sub>2</sub> 当量达到 1123.1 百万吨。因此，提高中长期替代制冷剂应用比例，所产生的削减潜力将非常巨大。各情景相对于基线情景的对比分析结果见图 4-5。

表 4-9 低增长模型下 HFCs 削减的环境效益（单位：百万吨 CO<sub>2</sub>-eq）

年份	基线情景 制冷剂消费	HFCs 削减折算 CO <sub>2</sub> 当量							
		削减情景 A		削减情景 B		削减情景 C		削减情景 D	
		减少量	削减率	减少量	削减率	减少量	削减率	减少量	削减率
2015	164.75	1.99	1.2%	1.99	1.2%	1.99	1.2%	1.99	1.2%
2020	211.44	8.86	4.2%	14.33	6.7%	23.98	11.3%	41.53	19.6%
2025	235.64	19.46	8.3%	34.90	14.8%	65.28	27.7%	94.74	40.2%
2030	246.77	28.46	11.5%	59.47	24.1%	115.47	46.8%	148.83	60.3%
累计	3910.78	234.3	6.0%	425.2	10.9%	783.3	20.0%	1123.1	28.7%

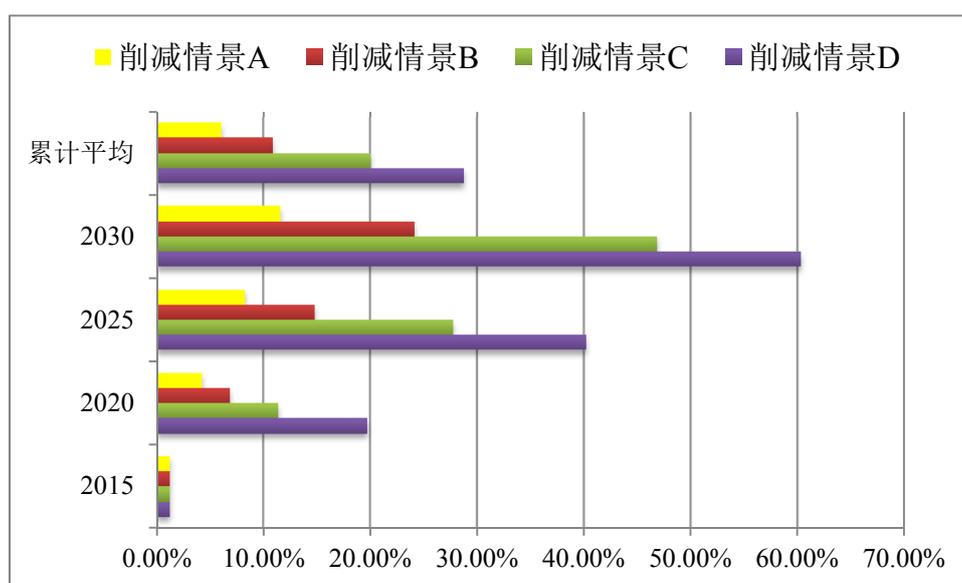


图 4-5 低增长模型下各情景与基线情景削减率的对比

高增长模型下，各削减情景具备的潜力所呈现的规律与低增长模型的类似，见表 4-10 和图 4-6。但是，从表中可以看出，削减情景 D 中，到 2030 年，能实现削减 172.05 百万吨 CO<sub>2</sub> 当量，削减率达到了 60.3%，累计 HFCs 削减折算 CO<sub>2</sub> 当量达到 1251.4 百万吨。高增长模型下制冷剂消费在 2030 年之后仍然保持较高的增长率，因此，如何进一步削减 HFCs，如何实现制冷剂的循环再利用，是需要考虑的重要问题。

表 4-10 高增长模型下 HFCs 削减的环境效益（单位：百万吨 CO<sub>2</sub>-eq）

年份	基线情景 制冷剂消费	HFCs 削减折算 CO <sub>2</sub> 当量							
		削减情景 A		削减情景 B		削减情景 C		削减情景 D	
		减少量	削减率	减少量	削减率	减少量	削减率	减少量	削减率
2015	167.40	2.07	1.2%	2.07	1.2%	2.07	1.2%	2.07	1.2%
2020	223.09	11.66	5.2%	15.38	6.9%	25.83	6.7%	44.62	20.0%
2025	257.87	24.00	9.3%	38.63	15.0%	72.31	28.0%	104.87	40.7%
2030	285.27	32.90	11.5%	68.74	24.0%	133.49	46.8%	172.05	60.3%
累计	4200.68	284.9	6.8%	473.3	11.3%	875.1	20.8%	1251.4	29.8%

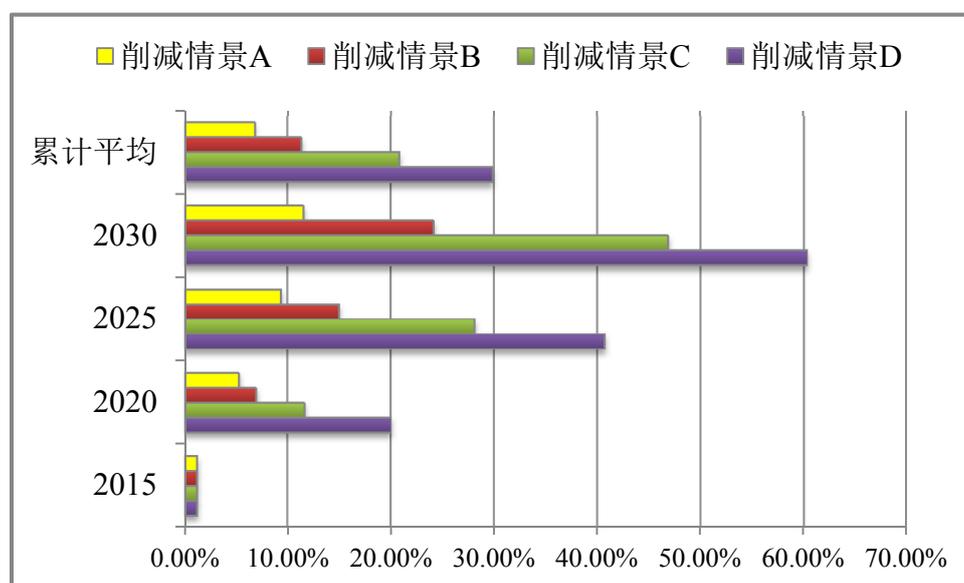


图 4-6 高增长模型下各情景与基线情景削减率的对比

## 4.5 小结

基于对各种制冷剂环境效益评估方法的分析，结合工商业制冷产品和系统的特点，本报告选取了制冷剂削减率 ERR 作为计算模型，并从国内外制冷剂发展趋势、可选的替代制冷剂现状、当前的替代技术水平等方面建立了 HFC 削减潜力的分析模型；同时，基于两种增长模式，对不同情景下、不同替代技术、不同应用比例等几个方面进行了分析。

从结果来看：

1) 我国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达到 15.4 万吨。

2) 在低增长模型下，情景 B 接近将 2030 年制冷剂消费折算 CO<sub>2</sub> 当量控制在设定的基线要求，情景 C 中 2030 年制冷剂消费折算 CO<sub>2</sub> 当量低于在设定的基线要求；在高增长模型下，只有选择情景 C，才能将制冷剂消费折算 CO<sub>2</sub> 当量控制在设定的基线要求，这也是当前技术水平及国际环境下的最大削减潜力。

所以，如果我国工商业制冷空调行业在未来十几年持续保持着高增长模式，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，集中力量攻克重点研究方向，有组织有计划的进行相关的标准法规的修订，为替代制冷剂的应用扫清障碍；同时推动行业开展制冷空调系统制冷剂充注量、产品可靠性和能效方面的研究，在有效降低系统的制冷剂充注量和泄漏率的同时，也最大限度地提升产品能效水平，实现臭氧层保护和温室气体减排的双重环境效益。

## 5 HFCs 制冷剂逐步削减的困难与期望

### 5.1 开展 HFCs 制冷剂削减工作的紧迫性

未来中国制冷空调行业还将保持较高的增长速度，制冷剂的消费总量也将保持较高的增长速度。根据前面的分析测算，在今后中长期的一段时间内要实现 HFC 的冻结和逐步削减，中国工商制冷空调行业面临巨大的困难和挑战。在当前的国际形式下，在今后一定时期内开展 HFC 逐步削减已经是一个不可避免的国际趋势。这就需要中国密切关注国际 HFC 削减的最新进展，加快开展 HFC 制冷剂逐步削减的研究工作，为将来 HFC 削减的国际合作与发展做好准备工作。

### 5.2 国际形势变化的不确定性

尽管气候变化是人类社会所面临的共同的、涉及人类未来生存发展的根本性问题，全球也达成了共识。但是，温室气体减排同时也是一个复杂的国际问题，全球各主要经济体均从其各自的政治和经济利益出发，在温室气体减排的谈判中采取了不同的立场，这在制冷空调热泵行业的制冷剂替代的推进过程中尤为明显。例如：由于各国的产业结构、市场、规模和国际地位各不相同，使得其对替代制冷剂的评价标准不一样，因此获得的推荐结果也不一样。尽管经过艰苦的两轮投票后，ISO5146（2014）修订稿最终得到了通过、国际上也在积极地推动低 GWP 制冷剂应用的评估，然而各国制定的替代路线仍然不是非常明确，且部分内容还存在很多争议，这都表明要使各方获得根本的认同还比较困难，国际上各方的“博弈”导致了发展的不确定性。

### 5.3 核心技术影响削减进程

回顾中国工商业制冷空调行业发展，中国由于起步相对较晚，其中新型制冷剂的合成、重要物性和性能参数的获取、关键部件的开发等各项核心技术与发达国家相比还有较大的差距。尽管中国工商业制冷行业通过产业结构整合以及核心技术的引进开发，并搭上了中国经济高速发展的快车道，其产量和规模逐渐跃居到了世界的首位，但是中国依然还不是制冷空调强国。例如：在 AHRI 评估的低

GWP 新制冷剂中，中国没有一项推荐产品入选；替代压缩机及相关配件、适用润滑油技术等方面，中国行业研发的技术和产品相对较少。这些核心技术的缺失限制了我国制冷空调行业应对 HFCs 削减能力，且国际上一些先进企业在 ODS 淘汰过程中往往采取了技术封锁的消极态度，这也进一步阻碍了我国制冷空调行业将来应对 HFCs 削减的能力。

## 5.4 中国国情下 HFCs 削减路线的复杂性

目前，制冷工质替代方向的不确定性、关键技术可获得性、转轨资金的保障性，这都给了 HFCs 削减路线的制定增加了复杂性。中国作为发展中国家，许多企业是否能够可靠、可持续的得到稳定的足够的替代资金、技术转让的可能性大小、新替代品的开发研究周期和制冷工质回收，再生和销毁体系的建立仍然不明朗。HFCs 削减问题过快推进，会对我国的制冷空调行业和企业产生明显影响，加重企业所承受的技术压力、经济压力，同时增加市场对新的替代技术和产品接受的不确定性；在满足国民经济发展需求的基础上，必须确保削减工作既履行国际义务、满足温室气体减排要求，又要尽量减少对行业发展的冲击，保证行业的持续、稳定、健康发展。

## 5.5 小结

温室气体的削减是当今国际社会关注的重点，对于经济高速发展中的中国，其承受的温室气体减排压力巨大。尽管根据《京都议定书》的规定，中国没有减排义务，但是为了保护我们的家园，顺应国际社会发展需求，彰显我国对全球环境问题的重视，体现中国负责任的大国形象，中国主动承担了一定的减排任务，2009 年 11 月，在哥本哈根气候大会前夕，中国政府正式宣布了 2020 年单位 GDP 的 CO<sub>2</sub> 排放水平比 2005 年下降 40%~45% 的约束性目标。同时，在未来的国际谈判框架下，从制冷空调行业实际发展的角度出发，我们认为以单纯的 GWP 为替代品优劣的评价指标，是片面的、不科学的，应该综合考虑制冷剂整个寿命期气候性能(LCCP)，选择对全球气候变化影响更低的替代物，这样才能实现温室气体的最大化减排。

对于工商制冷空调行业，作为温室气体 HFCs 制冷剂的使用和排放大户，必

须采取措施进行积极地控制。中国是制冷剂使用和消费的大国，随着经济发展需求，未来十年中国制冷空调行业将仍然保持较高的发展速度，如何切实有效地控制 HFC 制冷剂的使用，需要制定适宜的政策和战略，并尽早采取行动，争取主动，为减排温室气体，保护生态环境作出贡献。

## 6 应对 HFCs 制冷剂控制的建议

目前,我国工商制冷空调行业使用主要是 HCFCs 制冷剂, HFCs 制冷剂的消费处于起步和不断增加阶段,在淘汰 HCFCs 和 HFC 逐步削减的下一阶段工作中,应该采取积极、稳妥推进的策略;避免“盲目性”、“二次转轨”;在积极跟踪国际研发进展的基础上,构建适合中国国情的中长期替代路线;针对不同对象,采用不同的方案,先易后难,有层次不断推进。同时,抓住当前机遇,立足本国国情发展绿色替代制冷剂。

### 6.1 政府应做好统筹规划、组织管理工作

政府应当借鉴淘汰 ODS 和保护臭氧层的行动中所取的经验,从中国目前所处环境和所需要承担的国际任务目标出发,充分考虑中国制冷产业所处的国际地位和发展阶段、制冷剂对环境温室效应的贡献率以及国际 HFCs 逐步削减进程,开展中国制冷空调行业 HFC 制冷剂使用控制方面的深入研究,做好行业 HFC 制冷剂使用控制的统筹规划工作:

- 1、将协会、企业、高校和科研院所统一协调起来,统筹规划充分发挥各部门优势,并落实好管理体制、相关政策、各方责任和义务等工作。争取国际可能的项目资助和技术援助;完善监督和奖励体系和机制,推动政策、法规标准的制修订,通过国家产业政策,对投资方向进行引导,鼓励中长期替代技术和替代品的研发、应用和限制受控物质的生产和消费;有计划有组织地对新型自主替代品和关键替代技术的协调攻关,有策略有方向地构建行业制冷剂替代发展战略。

- 2、借鉴日本对 HFCs 使用跟踪管理办法,自上而下建立起 HFCs 制冷剂排放的管理监督机制,便于将 HFCs 的生产和消费淘汰工作纳入到政府主管和有关行业部门的日常监督管理运作中。因此,需要建立规范化的 HFCs 生产、消费、进出口的数据申报和报告制度,完善 HFCs 制冷剂使用和回收的管理制度,严控制冷剂排放关,逐步建立 HFCs 跟踪管理信息系统。

- 3、推动合理科学地评价 HFCs 气体对气候变化影响的研究工作,完善制冷剂全生命周期温室气体影响 LCCP 的评估工作,积极参与国外机构对制冷剂的评估和标准的修订工作,在国际社会发出中国的声音。

4、积极宣传 HFCs 制冷剂使用对环境的影响、国际 HFCs 削减的相关进展、国内 HFCs 削减面临的形势，使企业意识到使用高 GWP 制冷剂存在二次替代的风险，提高公众对环境保护的认识，推动公众对臭氧气候友好产品的接受度。

## 6.2 行业协会应充分发挥桥梁与纽带作用

行业协会全面了解企业的生产经营活动，掌握技术发展趋势，是衔接主管部门、企业、高校和科研院所的桥梁，因此在组织控制削减活动中能够发挥重要作用。

1、应尽快组织专家对企业的制冷剂使用和回收、替代技术选择掌握和储备、替代技术应用发展等情况的调查工作，充分掌握制冷剂生产和使用、回收处理各环节的排放和能源消耗情况，评估其中的面临的主要问题、可接受的程度、需要支持关键环节等内容，为合理地科学地评价制冷剂对气候变化的影响以及转轨成本提供依据，为国家相关政策法规、规划的制订提供基础信息。

2、在国家主管部门的监督和管理下，在国际执行机构的帮助和指导下，行业协会应当基于企业调查大数据，针对替代技术发展的地域（企业间）和领域（产品类别间）的不均匀性，提出各种可能的办法和解决方案，从而有效地促进替代品产业的应用推广和健康发展。

3、协会还应当组织国内外替代技术研讨会，加强企业、科研院所与发达国家之间的技术和信息交流，组织替代品的筛选、评价工作，逐步协调建立起政府主导、科研院所提供技术支撑、企业为主体，并能满足社会、国家和企业多赢局面的行业机制。针对国际标准（ISO5149、ISO817）的更新情况，加快弱可燃性 R32 制冷剂相应标准的出台，扫清替代制冷剂的使用障碍，抢占单元式和小型冷水机组替代技术应用推广的先机；组织科研院所、制冷剂生产企业、制冷系统制造企业联合攻关，发展具有自主知识产权、掌握低 GWP 替代技术，为制冷领域未来控制削减目标的制定提供选择路径和有力保障。

## 6.3 企业应积极开展替代品的筛选、推广工作

替代制冷剂和替代技术的推广和应用是 HFCs 削减控制工作取得成功的关键，而这都需要各个企业落实与实施，这是国家实现削减目标的根本保障点。

未来适应国家的规划和行业的发展，企业不仅要依托政策扶植、资金支持、技术援助解决替代品转轨和替代技术应用的 key 问题，还要积极参与国际机构对低 GWP 制冷剂评估工作，开展替代品趋势调研，充分了解各替代品和替代技术的实际效果，为进一步技术选择引进和消费吸收提供主动辨识能力；同时，企业联合高校和科研院所协同攻关，开发具有自主创新知识产权的新替代品、掌握提高产品能效的有效方法、提高相关产品密封性和回收循环利用的有效方法等，从而提升自身在替代品和替代技术的竞争力。

对未来有较好的削减效果并且应用前景明朗的替代品，如 R32 应用与单元式空调和小型冷水热泵机组、CO<sub>2</sub> 应用于冷冻冷藏和热泵热水机，应尽快解决产品应用的关键技术问题：如 R32 的排气温度控制、润滑油的使用、密封和绝缘材料的选择、电气安全控制等问题，CO<sub>2</sub> 压缩机开发、换热器优化等问题；基于自身实力和目标要求，参与替代品应用示范工作和技术标准更新，加快人员培训工作，加大环保替代产品的宣传力度，为将来 HFCs 削减工作做好准备工作。

## 6.4 高校科研院应发挥替代技术创新的支撑作用

在 HFCs 削减控制以及替代技术开发过程中，高等院校、科研院应发挥科技支撑作用，参与和支持国家规划和战略的制订、替代品筛选与开发等各项工作，具体应当从一些几个重点领域开展研究：

1、制冷剂评价指标与体系的研究：制冷剂筛选体系研究和制冷剂的环保性能评价指标研究；

2、制冷剂热物性研究：新型环保替代品和混合制冷剂的热物性研究，低 GWP 制冷剂/润滑油的热物性研究以及添加纳米材料的制冷剂热物性研究；

3、低 GWP 制冷剂的关键应用技术研究：适合于新型制冷剂的换热器(含小管径和微通道)及其配型匹配研究与开发，采用制冷剂的制冷系统性能优化研究，适合于新型制冷剂的自动控制技术研究，制冷剂减注技术研究，减少系统泄漏率研究，适合于新型制冷工质的专用压缩机的研发；

4、制冷剂安全性的研究：可燃制冷剂爆炸机理的研究，可燃制冷剂泄漏、燃烧、爆炸动态过程的研究，燃烧爆炸灾害及防护机理的研究，可燃制冷剂阻燃惰化技术的研究，新型制冷剂的毒性研究，针对可燃性制冷空调设备在制造、储

运和使用的整个生命周期的各个环节的安全风险进行评价,提出相应的解决措施和建议。

## 参考文献

- [1] Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer, 1987.
- [2] ASSESSMENT OF HCFCs AND ENVIRONMENTALLY SOUND ALTERNATIVES, Technology and Economic Assessment Panel, PROGRESS REPORT, 2010, 5.
- [3] 联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC), 气候变化 2013: 自然科学基础 (决策者摘要) (Climate Change 2013: The Physical Science Basis (Summary for Policymakers)), 2013,9.
- [4] Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change, 1997.
- [5] 汪训昌, ASHRAE 34-2013 标准的解读与述评, 暖通空调, 2014(44)6:14-18.
- [6] Decisions Adopted by the Nineteenth Meeting of the Parties to the Montreal Protocol on Substances the Deplete the Ozone Layer, <http://www.ozone.unep.org/>
- [7] North American 2014 HFC Submission to the Montreal Protocol. 2014. <http://o-zone.unep.org>.
- [8] 中国科学技术协会, 2010-2011 制冷及低温工程学科发展报告, 中国科学技术出版社. 北京. 2010.
- [9] European Commission DG Climate Action, The new EU Regulation on Fluorinated Greenhouse Gases-Impact on the Chinese equipment manufacturers, Ozone2Climate Industry Roundtable 2014 Beijing China, 2014.
- [10] 中国制冷学会, 低 GWP 值制冷剂时代即将到来, 中国制冷简报, 2014(4):24-28.
- [11] SNAP Regulations Rule 20-Proposal to prohibit certain high-GWP HFC alternative. 2014. [www.epa.gov](http://www.epa.gov).
- [12] <http://www.env.go.jp/earth/ozone/cfc/law>.
- [13] Stephen Yurek. Transitioning to Lower GWP Refrigerants: Reseach, Technology, and Training. Ozone2Climate Industry Roundtable 2014 Beijing China, 2014.
- [14] 中国制冷学会, 烟台冰轮二氧化碳制冷项目进入全国多地、多行业, 中国制冷简报, 2014(4):30-31.
- [15] 中国制冷协会, 中国工商制冷空调行业 HCFCs 淘汰计划 (摘要版), 2014.
- [16] Roger Hitchin, Christine Pout, Philippe Riviere, Assessing the market for air conditioning systems in European buildings, Energy and Buildings. 2013(58):355-362.
- [17] 杨虹, 张剑波, 冯金敏, 中国 HCFC-22 的消费与排放清单及预测, 北京大学学报 (自然科学版). 2010(46).2:251-256.
- [18] 北京大学环境科学与工程学院, 控制管理氢氟碳化物 (HFCs) 影响研究—机遇与挑战, 2013.
- [19] 史琳, 安青松, 制冷剂专题 1 制冷剂发展简史及现阶段主要问题, 地源热泵. 2013.
- [20] 中国科学技术协会, 中国制冷科学技术战略研究报告. 2011.
- [21] AHRI Low-GWP Alternative Refrigerants Evaluation Program, TEST REPORT 39: Compressor Calorimeter Test of Refrigerant R-32 in a R-410A Scroll Compressor. 2014. [www.ahrinet.org](http://www.ahrinet.org).
- [22] AHRI Low-GWP Alternative Refrigerants Evaluation Program, TEST REPORT 31: System Drop-in Test Refrigerant R-32 in Split Air-conditioning. 2014. [www.ahrinet.org](http://www.ahrinet.org).
- [23] Brett Van Horn. Hydrofluoro-olefins Low-GWP Refrigerants. 2011 ASHRAE Winter Conference. Las Vegas. 2011.
- [24] Hung Pham, Rajan Rajendran. R32 and HFOs AS Low-GWP Refrigerants for Air Conditioning. International Refrigeration and Air Conditioning.
- [25] Karim Amrane, Xudong Wang, Overview of AHRI Low Global Warming Potential Alternative Refrigerants Evaluation Program, The International Symposium on New Refrigerants and Environmental Technology 2012.
- [26] ASSESSMENT OF HCFCs AND ENVIRONMENTALLY SOUND ALTERNATIVES, Technology and Economic Assessment Panel, PROGRESS REPORT, 2010, 5.
- [27] Substitute Refrigerants Under SNAP as of June 16, 2010, SNAP Information.<http://www.epa.gov/ozone/snap>

- [28] 王林忠, 吴献忠. R32 在热泵系统中的排气温度控制途径及理论预测. 第二届中国制冷空调专业产学研论坛论文集. 2012:126-130.
- [29] 矢岛龙三郎, 吉见敦史, 朴春成. 降低 R32 压缩机排气温度的方法. 制冷与空调, 2011,11(2):60-64.
- [30] 史婉君, 张建君, 陈敬良, 高春利, 刘宏建, 黄煜. 浅析标准 ISO/FDIS 817-2013《制冷剂-命名和安全分类》. 制冷与空调. 2014,14(5):7-11.
- [31] 片冈修身. 新版 ISO5149 标准概要. 制冷与空调. 2014(14).5:1-6.
- [32] ASHRAE. ANSI/ASHRAE Standard 34 2013 Designation and safety classification of refrigerants. Atlanta:ASHRAE, 2013.
- [33] 朱明善, 王鑫, 史琳. CO<sub>2</sub> 减排率 Y—制冷工质的一种环保指标. 制冷与空调. 2011,11(1): 91-94.
- [34] Hunm Pham. Next Generation Refrigerants: Standards and Climate Policy Implications of Engineering Constraints[C]. 2010 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Building, 2010: 282-294.