

# 二氧化碳热泵发展白皮书



中国节能协会热泵专业委员会  
Heat Pump Committee of China Energy Conservation Association

2022年7月

## 主编单位

中国节能协会热泵专业委员会  
天津大学热能研究所  
上海交通大学制冷与低温工程研究所

## 副主编单位

中国科学院理化技术研究所  
中国电力科学研究院有限公司  
中国建筑科学研究院有限公司  
上海交通大学溧阳研究院  
珠海格力电器股份有限公司  
浙江盾安人工环境股份有限公司  
松下压缩机（大连）有限公司  
甘肃一德新能源设备有限公司  
上海海立电器有限公司  
浙江正理生能科技有限公司  
广东美芝制冷设备有限公司

## 参编单位

黑龙江爱科德科技有限公司  
浙江盾安机电科技有限公司  
青岛海信日立空调系统有限公司  
苏州苏净安发环境科技有限公司  
昆明东启科技股份有限公司  
西安庆安制冷设备股份有限公司  
浙江三花制冷集团有限公司  
迈特诺（马鞍山）管路技术有限公司  
浙江德富新能源技术有限公司  
安徽正刚新能源科技有限公司

## 编委人员

宋忠奎、马一太、高屹峰、陈江平、李敏霞、  
张振涛、成岭、李效禹、胡余生、冯忠波、刘玉环、  
何铭、徐志海、黄道德、郑立宇、韩兴旺、赵建峰、  
张文强、熊丹、杜培俭、孙民、孟鑫洋、李芑、王建、戴正刚

## 参编人员

赵恒谊、王派、王丹东、李晓琼、任丽萍、康志军、  
胡继伟、苟顺国、仇春伟、高斌、李丽娜、杨圣、  
赵东方、汤晓亮、杨晓川、熊爱娟、龚雪强、  
吴雪冬、陈军、许海生、董丽玮、刘雪涛

## 序 言

2020年习近平总书记对全世界宣布，中国将在2030年实现碳达峰2060年实现碳中和的目标，热泵作为高效的能源转换技术，在低碳发展战略下将发挥非常重要的作用。同时热泵产品也受《蒙特利尔议定书基加利修订案》的影响，2024年我国和一些发展中国家就要开始减少和使用氢氟烃类制冷剂，制冷剂的替代是一个迫在眉睫，同时又是非常具有挑战性的问题。掌握未来制冷和热泵的核心科技对中国制冷行业未来是至关重要的。

为落实双碳目标和《蒙特利尔基加利修正案》，需要发展自然工质热泵（制冷）循环，以应对不用化石燃料来生产各种热量和冷量。自然工质不是人工合成，或是工业产品但不破坏臭氧层，也基本没有温室效应。它包括CO<sub>2</sub>、水、空气、氨、碳氢化合物等。

CO<sub>2</sub>作为一种自然工质，有着非常优良的性质，是一种具有潜力的可替代环保工质。而热泵作为一种可再生能源技术，市场前景广阔，CO<sub>2</sub>工质与热泵技术两者的结合则更符合环保的理念。CO<sub>2</sub>跨临界循环热泵在双碳战略的大背景下，在推动能源的利用和转换中大有可为。

CO<sub>2</sub>跨临界循环的研究在我国已经发展了30多年，但是CO<sub>2</sub>临界循环系统仍存在一些不足，阻碍其广泛应用。可喜的是已经有一部分企业已经开始了CO<sub>2</sub>制冷和热泵的商业化，在一些领域进行了应用，特别是2022年北京冬奥会中CO<sub>2</sub>跨临界循环制冷的冰场以及热泵热能利用的示范，极好地宣传了CO<sub>2</sub>工质。根据目前存在的不足，我国的制冷企业需要开发具有自主知识产权的CO<sub>2</sub>跨临界循环热泵产品，形成有一定规模的产业链，逐步实现CO<sub>2</sub>制冷热泵的产品的国产化。

另外，我国在化工、食品、纺织、造纸、制糖和民用采暖采用溴化锂吸收式热泵，回收电厂冷凝器的余热，用汽轮机的低温水加热到可用温度，当然溴化锂吸收式热泵的工质对溴化锂是吸收剂，水是制冷剂。也有压缩式水蒸汽热泵，在工业蒸汽系统中直接用透平式或轴流式压缩机将乏汽压缩为高压蒸汽，它用电网的可再生能源，是未来碳中和时代工业蒸汽系统中唯一方向。氨和碳氢化合物都可因地制宜作为热泵的工质。

中国节能协会热泵专业委员会这些年为推动热泵技术的应用做了很多工作，向社会各界展示热泵技术碳中和的贡献做了很好的推广。协会对CO<sub>2</sub>热泵技术应用也特别地关注，本白皮书详细介绍了CO<sub>2</sub>热泵技术发展与潜力，以及企业目前生产的相关产品的现状、开发情况以及应用的案例，起到一个很好的宣传和推介作用。参编单位也尽量收集水、氨、和阶段性R32的热泵信息。希望更多的企业和研发关注并加入到这个领域来，促进CO<sub>2</sub>热泵行业的壮大。

## 摘要

环保问题日益成为国际关注的焦点，也关系我国的经济发展，特别是我国提出了2030碳达峰2060年碳中和的低碳发展战略，环保高效的能源转换设备必然是未来开发的趋势。热泵作为一种能源技术越来越受到关注，而且发展潜力巨大。本文从我国实施的双碳目标出发，讨论了在《蒙特利尔议定书基加利修订案》的国际法规情况下，热泵的发展会受到极大的影响，提出自然工质CO<sub>2</sub>与热泵相结合，开发CO<sub>2</sub>热泵是一条可行的发展途径。

本文对CO<sub>2</sub>工质的发展和CO<sub>2</sub>跨临界循环的提出进行了介绍，并对CO<sub>2</sub>跨临界循环工作原理和四种工作形式进行了讲解。同时对我国CO<sub>2</sub>的热泵系统的关键部件如压缩机、换热器、节流阀以及各种阀件等的开发现状进行了详细的介绍，包含十几家企业的相关产品情况。介绍了CO<sub>2</sub>热泵在各领域的应用情况，包括CO<sub>2</sub>热泵热水器、CO<sub>2</sub>热泵采暖、CO<sub>2</sub>热泵干燥和CO<sub>2</sub>汽车空调等，介绍了多家企业具体的应用案例，给出了CO<sub>2</sub>热泵在碳中和中的作用以及发展潜力。同时对CO<sub>2</sub>安全性进行分析，并对我国CO<sub>2</sub>热泵相关的法规进行了总结。

通过以上这些内容，可以了解CO<sub>2</sub>热泵的工作原理以及特点，了解当前CO<sub>2</sub>热泵的发展现状和各企业的开发状况。同时本书也给出了一些其他自然工质热泵的发展情况，为CO<sub>2</sub>等自然工质热泵进一步发展提供参考。

# 目 录

序言	1
摘要	2
1 背景	5
1.1 全球气候变暖	5
1.1.1 全球变暖问题	5
1.1.2 温室气体限控	6
1.2 碳达峰与碳中和	7
1.2.1 碳达峰碳中和的含义	7
1.2.2 热泵在未来碳中和的作用	9
1.2.3 CO <sub>2</sub> 与基加利修正案	10
2 CO <sub>2</sub> 热泵技术原理	12
2.1 CO <sub>2</sub> 的性质	12
2.2 CO <sub>2</sub> 工质的历史和发展	13
2.2.1 CO <sub>2</sub> 制冷技术的历史回顾	13
2.2.2 CO <sub>2</sub> 工质的发展	14
2.3 CO <sub>2</sub> 热泵循环	15
参考文献	16
3 CO <sub>2</sub> 热泵安全性	17
3.1 CO <sub>2</sub> 毒性概述	17
3.1.1 CO <sub>2</sub> 的毒性	17
3.1.2 CO <sub>2</sub> 的毒性和浓度管理	17
3.1.3 CO <sub>2</sub> 泄漏应急处理	18
3.1.4 操作处置与储存	18
3.2 CO <sub>2</sub> 的高压特性	18
参考文献	18
4 CO <sub>2</sub> 热泵关键部件进展	20
4.1 压缩机	20
4.1.1 CO <sub>2</sub> 压缩机分类	20
4.1.2 CO <sub>2</sub> 活塞式压缩机的回归	20

4.1.3 汽车空调用电动CO <sub>2</sub> 压缩机	22
4.1.4 采暖热泵用CO <sub>2</sub> 压缩机	23
4.1.5 热泵热水机用CO <sub>2</sub> 压缩机	24
4.2 CO <sub>2</sub> 其它部件	29
4.2.1 电子膨胀阀和电磁阀	29
4.2.2 四通换向阀和球阀	29
4.2.3 蒸发器	32
4.2.4 气体冷却器	34
4.2.5 CO <sub>2</sub> 膨胀机	35
4.2.6 管路	35
<b>5 CO<sub>2</sub>热泵的应用发展</b>	<b>37</b>
5.1 CO <sub>2</sub> 热泵热水器	37
5.2 CO <sub>2</sub> 热泵采暖	42
5.3 CO <sub>2</sub> 汽车空调	43
5.4 CO <sub>2</sub> 热泵干燥	46
参考文献	46
<b>6 CO<sub>2</sub>热泵的标准及法规</b>	<b>47</b>
<b>7 其它自然工质和近自然工质应用简介</b>	<b>49</b>
7.1 其它自然工质和近自然工质发展简介	49
7.1.1 水 (H <sub>2</sub> O) 工质的历史和发展	49
7.1.2 氨 (NH <sub>3</sub> ) 工质的历史和发展	49
7.1.3 R32工质的历史和发展	49
7.2 其它自然工质的热泵系统	50
7.2.1 水蒸汽的压缩式热泵	50
7.2.2 氨-水吸收式空气源热泵产品及应用	51
参考文献	52
<b>8 自然工质热泵发展展望</b>	<b>53</b>
<b>9 结论</b>	<b>55</b>

## 1 背景

### 1.1 全球气候变暖

#### 1.1.1 全球变暖问题

根据观测，近一二百年来全球气温在升高。20世纪末的平均气温比18世纪50年代的平均气温上升了0.85℃，海平面上升了14厘米。温度变化不排除天文和地理的因素，但人类活动所造成的温室效应气体浓度不断上升是主要原因。全球气温变化如图1-1。

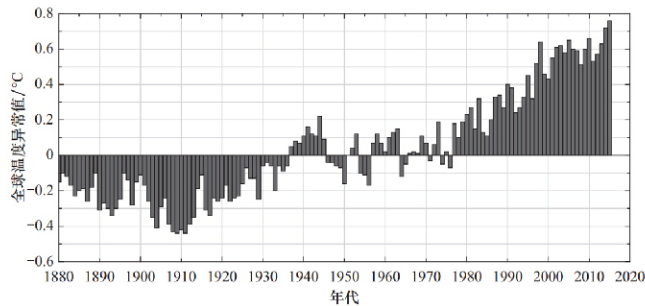


图1-1 全球气温变化<sup>[1]</sup>

科学界很早注意到了全球变暖问题，为此在1997年各国达成减缓地球温升的《京都议定书》，2007巴厘岛国际环境大会就后京都议定书时代的环境问题进行了磋商，2007年第19届蒙特利尔议定书缔约方大会通过了加速HCFCs淘汰步骤的议案，2006年欧盟通过旨在限制HFCs的EC842-2006法规和EC40-2006指令等一系列应对措施和共识的决议。随着高GWP的人工合成制冷剂带来的环境问题已经成为全球关注的焦点，人们的目光又开始聚集到了自然工质上来，CO<sub>2</sub>作为最为典型的自然工质，理所当然受到业内广泛的关注。白皮书将从历史出发，对CO<sub>2</sub>热泵技术的发展与应用现状进行总结，让更多的人对CO<sub>2</sub>热泵技术有充分认识。

CO<sub>2</sub>是化石燃料燃烧后的主要产物，其在大气中的浓度从1880年的290ppmv增加到2020年5月年的415ppmv，增加了125ppmv。大气中CO<sub>2</sub>增加了43%，同时地球表面的大气平均温度提高0.85℃。冰川中气泡分析可得出历史年代大气中CO<sub>2</sub>增加的记录。图1-1是用冰川中气泡研究的CO<sub>2</sub>浓度，图1-2给出了从18世纪中叶以来保存在冰川中的气泡分析结果。数据表明：在18世纪末到19世纪初，空气中二氧化碳的浓度开始增加，之后增加的速率越来越高。

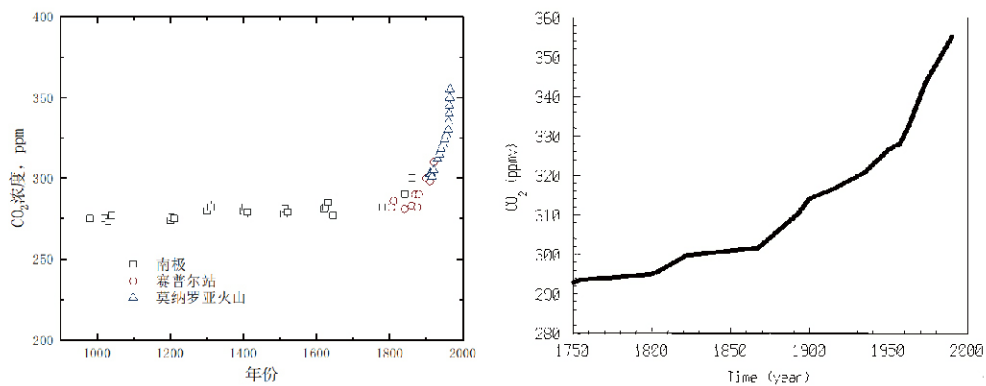


图1-2 用冰川中的气泡研究 CO<sub>2</sub>浓度变化      图1-3 近代大气CO<sub>2</sub>的浓度变化

大气中CO<sub>2</sub>含量的快速增加是与全球化石燃料消耗增长分不开的。图1-3 说明，自工业革命以来，全球燃料消耗迅速增加，目前每年约有百亿吨化石燃料烧掉，向大气排放几十亿吨的碳。

由于海洋对CO<sub>2</sub>有较强的吸收能力，大气中的碳以3.4Gt/年的速率增加，略低于燃料燃烧的排放速率。但此数据已说明，大气承受CO<sub>2</sub>的能力已超过了极限。2019年大气之中增加的CO<sub>2</sub>超过了410亿吨，每小时约500万吨。

20世纪50至60年代是环境污染和生态破坏日益严重的时候，许多环境问题如酸雨、海洋污染、生物多样性等越来越呈现全球化、国际化的趋势。

除CO<sub>2</sub>之外，N<sub>2</sub>O、甲烷、氯氟烃、氢氯氟烃等其它气体也具有温室效应特性。其中CO<sub>2</sub>对温室效应的贡献占50%，甲烷占20%，氯氟烃等占15%，N<sub>2</sub>O占10%，O<sub>3</sub>占5%。科学家们对温室气体用环境参数GWP（Global Warming Potential）进行评估，采用CO<sub>2</sub>（R744）为GWP是基本单位，规定1kg的CO<sub>2</sub>的GWP为1，常见温室气体的GWP值如下表1-1。

表1-1 各种温室气体的特征数据

温室气体	空气中含量 (ppmv)	对温室效应作用(%)	GWP (kgCO <sub>2</sub> )	大气中寿命(年)
CO <sub>2</sub>	415	50	1	150
CH <sub>4</sub>	1.7	由于整体数量的变化，大体在10%左右	70	7~10
N <sub>2</sub> O	0.31		200	150
O <sub>3</sub>	0.01~0.05		1800	0.01
R11	0.00028		3400	45
R12	0.00048		7100	100
R22		由于整体数量增加，可能达到40%	1700	12
R134a			1430	13.8
R125			3500	29
R32			675	5

表注1: 数据来源综合了多个参考资料

### 1.1.2 温室气体限控

在20世纪后三四十年，人们已经认识到，在能量利用时，一方面要提高用能效率，另一方面要减小对环境的有害排放，推动保护臭氧层和减缓温室效应。推动制定国际关于环境和生态保护的条约或协议，包括划时代的《蒙特利尔议定书》（1987年）、《京都议定书》（1997年），本世纪的《巴黎协定》（2015年）和《蒙特利尔议定书基加利修正案》（2016年）等；另一方面世界各国都在制定用能设备的能源效率的标准，建筑节能标准等。

随着科学技术的进步，人工合成制冷剂给环境带来的巨大负担和破坏逐渐引起国际社会的关注。针对臭氧层破坏和温室效应，国际社会给出了回应：1987年通过的《蒙特利尔议定书》及之后的各条修订案给出了CFCs和HCFCs的淘汰期限；1997年的《京都议定书》又提出对HFCs等温室



气体进行淘汰方案；2006年欧盟颁布了EC842-2006法规和EC40-2006指令，加速了淘汰F-Gases等温室气体的步伐；2007年第19届蒙特利尔议定书缔约方大会通过了加速HCFCs 淘汰步骤的议案；2016年国际197个《蒙特利尔议定书》参加国在非洲卢旺达国家首都基加利联合制定并通过了《蒙特利尔议定书基加利修正案》，开启了正式淘汰高GWP的HFCs的时间表。表1-2是该修正案规定发展中国家HFCs限控时间表。

表1-2 发展中国家HFCs限控时间表

	主要发展中国家 (中国等)	少部分发展中国家 (印度、沙特、巴基斯坦等)
基线	100%HFCs三年均值 (2020-2022) +65%HCFCs基线	100%HFCs三年均值 (2024-2026) +65%HCFCs基线
	2024: 冻结	2028: 冻结
	2029: 10%	2032: 10%
	2035: 30%	2037: 20%
削减 进度	2040: 50%	2042: 30%
	2045: 80%	2047: 85%

## 1.2 碳达峰与碳中和

### 1.2.1 碳达峰碳中和的含义

面对日益严峻的气候危机挑战，早在2014年11月12日，中美双方共同发表《中美气候变化联合声明》，其中提出了中国2030年左右二氧化碳排放达到峰值且争取尽早达峰的计划；2015年11月30日，中国政府向联合国提交《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》报告，正式确定2030年左右二氧化碳排放达到峰值并争取尽早达峰的目标。2020年9月22日第七十五届联合国大会一般性辩论中，中国国家主席习近平做出中国在2030年前碳达峰（二氧化碳排放达到峰值）、2060年碳中和（温室气体净零排放）的庄严承诺，并在气候雄心会议上进一步宣布，到2030年，中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比2005年下降65%以上，非化石能源占一次能源消费比重将达到25%左右，森林蓄积量将比2005年增加60亿立方米，风电、太阳能发电总装机容量将达到12亿千瓦以上。实现碳中和、重构人与自然和谐关系的重任需要全世界各国精诚合作，在构建人类命运共同体的过程中，中国在全球气候治理中承担重大责任，展现非凡勇气，为世界共同迎战全球气候环境改变注入信心。

根据联合国政府间气候变化专门委员会（Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC）的定义，碳达峰（peak CO<sub>2</sub> emissions）是指某个地区或行业年度CO<sub>2</sub>排放量达到历史最高值，然后进入持续下降的过程，是CO<sub>2</sub>排放量由增转降的历史拐点。碳达峰包括达峰年份和峰值。碳中和（carbon neutral）是指由人类活动造成的CO<sub>2</sub>排放量，与CO<sub>2</sub>去除技术（如植树造林）应用实现的吸收量达到平衡。

这里有两点注意事项：

一要把能源生产和能源利用两大行业严格分开。凡用化石燃料进行能源生产，属于碳排放行业，碳指标、碳源、碳汇、碳税、碳交易是对这个行业而言。这里还有其它温室气体排放，比如热泵用HFC制冷剂，本身有当量碳排放，R410A的GWP是2100，它泄漏1公斤，相当2.1吨CO<sub>2</sub>排放。生产厂和使用R410A设备的单位，一年有多少指标，到哪年封顶，如何减排，是碳排放行业。很多能源利用行业不排放CO<sub>2</sub>，主要任务是提高用能（主要是用电）效率。所以对一般能源利用行业不提碳排放和碳交易。热泵是未来碳中和时代的主要热源，如果热泵大量用高GWP的HFC作为循环工质，每公斤当量CO<sub>2</sub>排放为一至数吨，必然与基加利修正案相抵触，与碳中和目的有矛盾。采用低GWP的自然制冷剂，如CO<sub>2</sub>、氨、水、碳氢化合物是唯一的选择。

二要把碳达峰和碳中和严格分开。从碳排放来说，这两者是对立的，不能笼统而言。碳达峰要多烧化石燃料，碳中和要停止燃烧，两者泾渭分明，不能混淆，碳达峰为碳中和的基础。未来七八年左右碳达峰，中国CO<sub>2</sub>排放量大约每年100~120亿吨。很多行业是暂时不可迅速替代的，例如建筑用水泥、钢材、有色金属、单晶硅、化工原料等在这一阶段进行达峰储存，为将来技术转换期打基础。到了碳中和时代，炼钢以电炉为主，还原所需焦炭可以使用生物木炭。氢气炼钢也许成功，铁路、高速公路、机场、码头、桥梁、隧道需要大量水泥钢材，碳达峰前尽量填平补齐，未来对大规模重工业基本建设的需求减弱。因必要和维修基本建设还需要水泥，电炉和生物质能可以解决部分需求，本文不作展开，给出图1-4碳达峰和碳中和的示意图。

碳达峰有个前提，单位GDP碳排放要比2005年消减65%。这主要靠GDP的迅速增加，包括产业详细分工和新增产业。

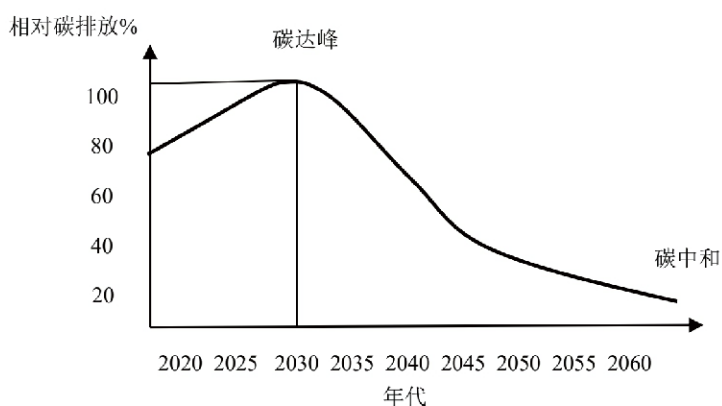


图1-4 碳达峰和碳中和的示意图

据分析，预计未来10年中国GDP年均增长4.7%以上，届时单位GDP碳排放强度年下降率要达到5%左右，才能抵消能源消费增长带来的碳排放增量，从而实现“2030年单位GDP碳排放将比2005年下降65%以上”的目标。

如果要在2060年实现碳中和目标的话，未来40年中国单位GDP碳排放年均下降9%左右，比2005-2019年年均下降4.6%的降幅要高出约1倍。

我国将应对气候变化融入社会发展全局规划。“十二五”期间首次将“低碳”纳入国民经济和社会发展五年规划，勾画了未来五年中国低碳发展的蓝图，促进了低碳发展；2015年提出了碳排放2030年左右达峰并尽早达峰等自主贡献目标，采取了调整产业结构、节约能源和资源、提高能源资源利用效率、优化能源结构、发展非化石能源、发展循环经济、增加森林碳汇、建立运行碳市场，推动全社会加速向绿色低碳转型。而最近的“十四五”期间则被认为是碳达峰的关键期、窗口期。十九届五中全会设定的社会主义现代化远景目标，要求2035年广泛形成绿色生产生活方式，碳排放达峰后稳中有降，生态环境根本好转，美丽中国建设目标基本实现。2020年12月16日中央经济工作会议确定，为做好碳达峰、碳中和的工作，抓紧制定2030年前碳排放达峰行动方案，支持有条件的地方率先达峰；加快调整优化产业结构、能源结构，推动煤炭消费尽早达峰；大力发展新能源，加快建设全国用能权、碳排放权交易市场；完善能源消费双控制度；继续打好污染防治攻坚战，实现减污降碳协同效应；开展大规模国土绿化行动，提升生态系统碳汇能力。

### 1.2.2 热泵在未来碳中和中的作用

现实生产和生活离不开供热或供暖，供热的定义是：用人工方法通过消耗一定能源向室内供给热量，使室内保持生活或工作所需要的适宜温度的技术、装备、服务的总称。供暖系统由热媒制备（热源）、热媒输送和热媒利用（散热设备或称末端设备）三个主要部分组成。自从人类会用火，热源基本都是来自燃烧炉灶或锅炉，从古代柴草到现代燃煤、燃油、燃气，或直接电加热。较大规模用热泵供热或采暖，是近一二十年的事。

根据中国节能协会热泵专业委员会2021年度发布的《热泵助力碳中和白皮书》中的内容，热泵在能量转换中的减碳贡献是巨大的，未来市场对热泵的需求也是巨大的。只要有电能，热泵即可供热，这个电能可以不是来自燃煤或燃气热电厂，而是来自水电、光电或风电等绿电，没有燃料的燃烧发电，属于零碳。可以预测，在碳中和时代，可能生产或生活需要的100℃以下的供热，除太阳能集热器直接供热，就得依靠各种热泵。随着碳达峰到碳中和，热泵产品的生产如何发展，现在很难作出准确的预测，只能笼统地说，热泵的增长率，一定超过GDP增长率。未来热泵产量，或是每年总容量的增长，不会是一个不变的增长率，它有可能增长快些，也可能增长慢些。

热泵是未来碳中和时代的主要热源，虽然热泵具有碳中和的作用，但如果热泵大量用高GWP的HFC作为循环工质，每公斤当量CO<sub>2</sub>排放为一至数吨，与碳中和目的有矛盾。

先做一个简单的模型，今后热泵产品容量按每10%速率增长，这也许是很保守的估计。从2024年到2045年热泵的总容量将增长7.4倍。考虑热泵大约报废时间为15年，2030年以后生产的热泵会保持运行，到2045年前假设有三分之一的热泵报废，大约还有2024年保有量的5倍。另一种算法，就是未来北方供热总共200亿m<sup>2</sup>，大约有10亿m<sup>2</sup>需要热泵，目前仅有约2亿m<sup>2</sup>，也是5倍。这5倍数量增加的热泵，充灌的制冷工质也将是2024年的5倍。粗算一下这么多的热泵需要充灌多少工质。就以北方冬季采暖如果按10亿m<sup>2</sup>建筑面积配套热泵，以很节能的15W/m<sup>2</sup>设计热泵，需要0.15亿kW总容量。也按最小工质充灌量0.1kg/kW，需要0.015亿kg，或0.000015亿吨，即150万吨。这里还没有说南方冬季采暖，工业商业供热，大约500~600万吨。尽管有回收再利用技术，泄漏量也会相当可观，如果仍采用的高GWP工质，造成的直接温室效应是非常严重的。因此工质的选择是热泵发展不得不面对的一个问题，也将影响其在碳中和中的作用。

### 1.2.3 CO<sub>2</sub>与基加利修正案

2021年6月17日，中国向联合国正式提交了基加利修正案的批约文件。按照规定，在联合国接受这一文件起90日后，该文件将正式生效，限制及削减HFC消费的基加利修正案，将于今年9月15日在中国生效。

基加利修正案于2016年10月达成。按照要求，大部分发达国家将从2019年1月1日基加利修正案生效之日起，削减HFCs的生产和消费，当年在基线水平上削减10%，到2036年削减85%；大部分发展中国家将在2024年冻结HFCs的生产和消费，并从2029年开始削减，当年削减10%，到2045年削减80%。

按照基加利修正案的规划，中国从2024年将把HFC消费量冻结在基线以下，而基线年则是2020-2022年，即以CO<sub>2</sub>为单位的100%的HFC三年均值（2020-2022）+65%HCFC基线值。

另一方面，基加利修正案，要求中国从2024年冻结。从今年9月15日开始，伴随着基加利修正案在中国生效，相关的管理政策也将逐步落实，这些产品的HFC物质使用将会受到影响。

热泵产品使用的工质都受限于《蒙特利尔议定书基加利修订案》，而且各国都有自己的关于制冷剂使用的规范，比如2015年1月欧盟开始实施的《欧盟含氟气体法规》，该法规通过控制高GWP制冷剂的配额和实施行业禁令，逐渐削减HFC类制冷剂在产品中的使用，这些政策必然影响我国对外出口的热泵产品。采用低GWP的工质是制冷热泵的发展趋势，但现有的可替代合成工质是美国霍尼韦尔公司以及杜邦公司等开发的HFO烯烃类物质，此类合成制冷剂GWP低但价格昂贵，具有低可燃性，其分解产物对环境的影响仍需要评估。因此选择使用低GWP的自然工质必然

成为一条可行的发展路径，也关系到我国制冷剂生产和使用的自主化。图1-5是HCFC和HFC的消减趋势。作为自然工质的CO<sub>2</sub>，ODP=0，GWP=1，具有良好的环保特性，受到了越来越多的关注，而CO<sub>2</sub>与热泵相结合，对热泵的发展也是一种促进。

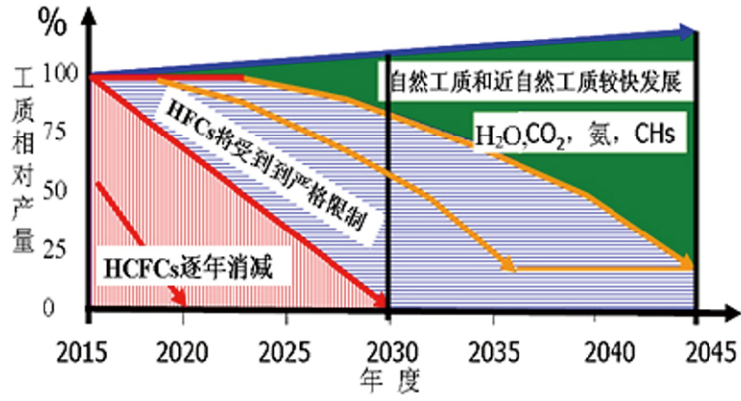


图1-5 HCFC和HFC的消减趋势

## 2 CO<sub>2</sub>热泵技术原理

### 2.1 CO<sub>2</sub>的性质

CO<sub>2</sub>作为最为典型的自然工质具有其独特的一些性质，这些性质也是它能够成为制冷剂的优势，主要包括：

(1) 廉价性。CO<sub>2</sub>在自然环境中数量巨大，大约占大气的0.04%多，而且来源广泛，容易取得。CO<sub>2</sub>又是很多工业工程的废气，价格十分低廉，也就不需要过多考虑制冷设备CO<sub>2</sub>的泄漏。

(2) 环境友好性。CO<sub>2</sub>的ODP为0，对臭氧层的破坏没有影响；它的GWP为1，虽然属于温室气体，但是它的使用正好回收了工业过程排放的废气，从生命周期GWP来说，CO<sub>2</sub>作为制冷剂是对温室效应有利的。同时CO<sub>2</sub>是真正的绿色制冷剂，它不会像人工合成制冷剂那样在未来产生对环境的不利影响，是最终级的没有任何限制的解决方案。

(3) 安全性和惰性。CO<sub>2</sub>无毒、不可燃、不爆炸、无刺激性，相对比较安全，因此将CO<sub>2</sub>直接通入室内或者作为第二制冷剂成为一种新型的应用模式。同时，CO<sub>2</sub>是一种惰性气体，对于制冷循环的常见材料具有相当好的兼容性，比如金属、塑料和橡胶。

(4) 优良的热力学性质。CO<sub>2</sub>具有一些优良的热力学性质。对通过对CO<sub>2</sub>的热力学参数主要来自于Span等人<sup>[1]</sup>和Vesovic等人<sup>[2]</sup>的研究。Christoph Bratschi<sup>[3]</sup>利用分子动力学的模拟方法对CO<sub>2</sub>的相平衡及临界物性进行了计算，结果表明临界点附近的物性计算值与实验值吻合的较好。图2-1至图2-4为几种常见的制冷剂的压力、比容、粘度和表面张力的比较关系图。从图中可以看出，高的工作压力使得压缩机吸气比容较小，使得容积制冷量较大（0℃时单位容积制冷量是NH<sub>3</sub>的1.58倍，是R22的5.12倍和R134a的8.25倍），这使得压缩机尺寸减小。压缩机排气量相比其他制冷剂要小很多，这样就减少了制冷剂的使用量；较低的粘度和表面张力使得CO<sub>2</sub>有优良的输运性。图2-1至图2-4给出CO<sub>2</sub>的温度、压力、比容、粘性和表面张力，与常规制冷有很大不同。

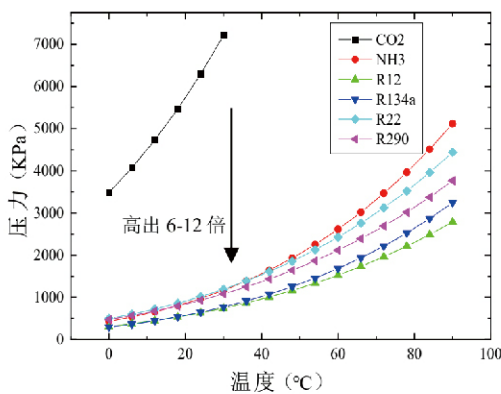


图2-1 几种制冷剂压力-温度曲线

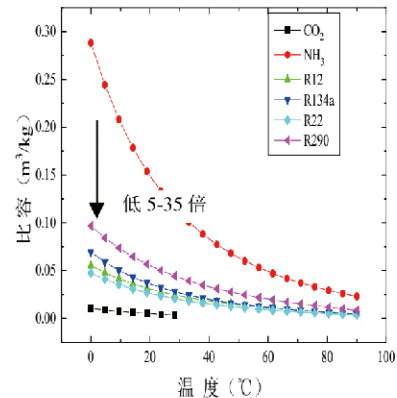


图2-2 几种制冷剂比容-温度曲线

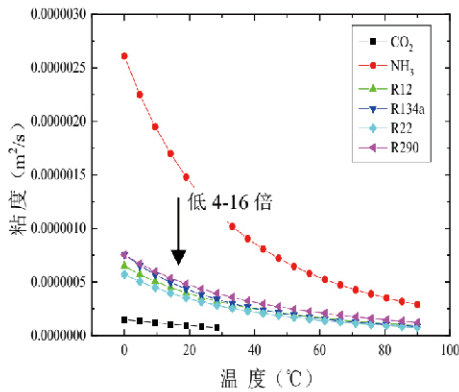


图2-3 几种制冷剂粘度-温度曲线

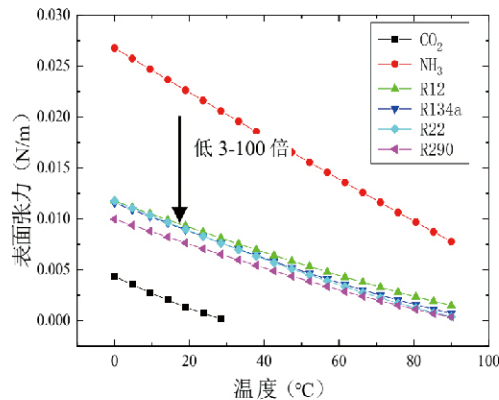


图2-4 几种制冷剂表面张力-温度曲线

CO<sub>2</sub>冷却换热的温度滑移大等优点可以通过逆流换热设计，从而使系统产生较高温度的热水，使得CO<sub>2</sub>跨临界热泵循环技术得以推广应用。对CO<sub>2</sub>压缩机来说，绝热指数较高(K=1.30)，压比 $\pi$ 约为2.5~3.0，比其它制冷系统低，容积效率相对较大，接近于最佳经济水平。

然而CO<sub>2</sub>也存在一些不完美的地方，CO<sub>2</sub>虽然没有毒，但是过多的CO<sub>2</sub>会导致CO<sub>2</sub>中毒，使人窒息而死。这个最高浓度为5%，相对而言，氨的泄漏危险浓度是0.02%，说明CO<sub>2</sub>可以有较长的逃离时间。CO<sub>2</sub>的高临界压力和低临界温度给系统带来了许多难题，CO<sub>2</sub>循环系统的压力比传统的制冷系统都要高，这就为系统的设计和零部件的承压强度提出了很多新的要求。同时，现阶段CO<sub>2</sub>系统的效率相对较低。随着科学技术的发展，适用于CO<sub>2</sub>系统的特定循环和设备逐渐出现，如1993年G. Lorentzen提出了CO<sub>2</sub>跨临界循环、很多公司和研究单位开发出了高效的CO<sub>2</sub>压缩机、采用喷射器或未来膨胀机取代节流阀减少节流损失等措施，目前CO<sub>2</sub>制冷循环的系统效率已经逐渐可以和传统系统媲美了。

## 2.2 CO<sub>2</sub>工质的历史和发展

随着高GWP的合成制冷剂带来的环境问题已经成为全球关注的焦点，人们的目光又开始聚集到了自然工质上来，CO<sub>2</sub>作为最为典型的自然工质理所当然受到业内广泛的关注。白皮书将从历史出发，对CO<sub>2</sub>热泵技术的发展与应用现状进行总结，让更多的人对CO<sub>2</sub>热泵技术有充分认识。

### 2.2.1 CO<sub>2</sub>制冷技术的历史回顾

在机械制冷的历史中，CO<sub>2</sub>是在19世纪末便被用作制冷剂的早期物质之一。1850年，美国人 Alexander Twining提出在蒸汽压缩系统中采用CO<sub>2</sub>作为制冷剂，并获英国专利<sup>[2]</sup>。在随后的几十年里，CO<sub>2</sub>被广泛应用于制冷设备中，尤其是在民用和船用制冷等方面有其不可替代的优势。据统计，1900年全世界范围内的356艘船只中，只有25%使用CO<sub>2</sub>蒸气压缩式制冷机；发展到1930年，这一数字上升到80%。在空调系统方面，1919年前后，CO<sub>2</sub>压缩机开始被广泛应用。图2-5为早期的CO<sub>2</sub>压缩机<sup>[3]</sup>。CO<sub>2</sub>制冷技术从19世纪末起步，到20世纪20~30年代达到了顶峰。在英国的船上

基本都采用了CO<sub>2</sub>压缩机；在住宅的空调系统、各种商业建筑和公共设施的空调制冷系统以及教堂、剧院和商店的制冷系统也都广泛采用了CO<sub>2</sub>制冷技术。

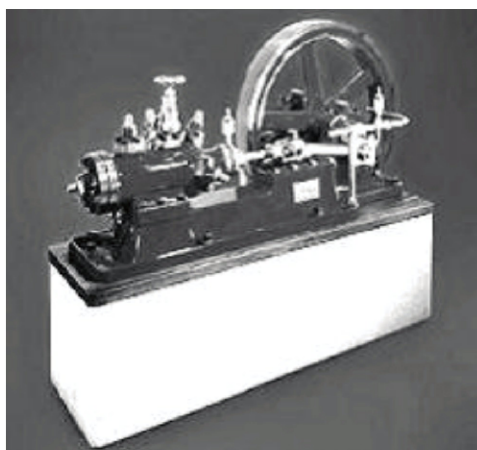


图2-5 早期的CO<sub>2</sub>压缩机

由于CO<sub>2</sub>临界温度（31.1℃）比较低，而临界压力（7.37MPa）又相对较高，在当时的技术条件下很难实现较高的系统效率。加上其冷凝器的冷却介质多采用温度较低的地下水或海水，基本属于亚临界循环，因当时的材料强度较差，导致了设备庞大笨重。这都限制了CO<sub>2</sub>进一步的应用。恰在这一时期，R12等CFCs合成制冷剂研发成功。无毒、不可燃、不爆炸、无刺激性，适中的压力和较高的制冷效率使得合成制冷剂，作为安全和理想的替代物迅速占据了市场，CO<sub>2</sub>也在二战之后逐渐销声匿迹。

### 2.2.2 CO<sub>2</sub>工质的发展

随着人工合成制冷剂给环境带来的巨大负担和破坏逐渐引起国际社会的关注，CO<sub>2</sub>等自然物质用作制冷剂再次受到广泛关注。前国际制冷学会主席，挪威的G. Lorentzen等人在1989~1994年发表多篇论文，大力提倡使用自然制冷工质，包括氨，碳氢化合物和CO<sub>2</sub>。他认为CO<sub>2</sub>是“无可取代的制冷剂”，可望在汽车空调和热泵等领域得到使用，从此在全球范围内开始了CO<sub>2</sub>再开发的应用与研究。图2-6为CO<sub>2</sub>用作制冷剂的发展史<sup>[4]</sup>。

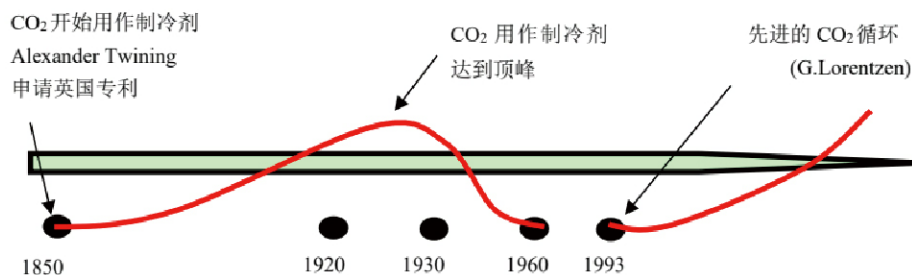


图2-6 CO<sub>2</sub>用作制冷剂发展史



### 2.3 CO<sub>2</sub>热泵循环

热泵（Heat Pump）是一种在高位能（一般为电能、热能）的驱动下，将低位热源（通常是空气、水或土壤）的热能转移到高位热源的节能装置，从而为住宅、商业和工农业供暖及提供热水等供热服务。二氧化碳热泵的循环方式主要包括以下四种：

（1）用跨临界循环可以直接生产65°C至90°C热水，在代替燃煤（油、气）锅炉、治理雾霾、节能减排中有重要作用。

（2）双级压缩跨临界循环，可在更低环境温度下生产65°C至90°C热水，或是产生较低温度的冷量，这是许多其它工质不具备的优势。

（3）用亚临界循环与氨、R290、R134a等组成复叠循环，用于超市、冷库或其它冷链，生产-25°C以下的冷量；也可在-25°C以下的环境温度下制热，提供较高温度的热水。复叠循环在减少氨的充灌量，减少HCFC或HFC用量方面作用显著。

（4）用跨临界循环与R290、R134a等组成部分复叠循环用于供热、制冰或其它冷链。部分复叠循环的供热回水温度可以提到较大的提升。

由于跨临界循环的特点，各种循环都需要用电子膨胀阀作为节流装置，有些循环需要两个膨胀阀。表2-1是CO<sub>2</sub>循环方式和节流装置的说明。

表2-1 CO<sub>2</sub>循环方式和说明

循环方式	主要循环特征	循环说明
跨临界循环		<p>一次性加热自来水提供65℃~90℃热水。 从家庭到迎宾馆饭店洗浴用水，或工艺用热水，以及车用热泵等。</p>
双级压缩跨临界循环		<p>一次性加热自来水提供65℃~90℃热水。 从家庭到迎宾馆饭店洗浴用水，或工艺用热水。</p>
复叠循环		<p>高温循环是其它工质 1、用于-25℃~-50℃的冷库、冷链或超市。 2、用于较低环境温度的供暖。</p>
部分复叠循环		<p>跨临界CO<sub>2</sub>热泵循环的气体冷却器出口温度越低，系统的COP越高。但气体冷却器出口温度受到环境的限制。 可以用一个较小冷量的R134a或R32亚临界循环，蒸发器与CO<sub>2</sub>气体冷却器换热，冷凝器产生较高温度的热水，与气体冷却器的出水串联，以提高整体循环的回水温度。 这一循环可称为“部分复叠循环”。</p>

参考文献

[1] Bratschi C, Huber H, Searles D J. Non-Hamiltonian molecular dynamics implementation of the Gibbs ensemble method. II. Molecular liquid-vapor results for carbon dioxide[J]. Journal of Chemical Physics, 2007, 126(16):164104.

[2] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). Climate change: global temperature. <http://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-global-temperature>.

[3] Bodinus W S. The rise and fall of carbon dioxide systems[J]. Ashrae Journal, 1999, 41(4):37-42.

[4] 丁国良.CO<sub>2</sub>制冷技术新发展[J].制冷空调与电力机械,2002(02):1-6+48.

### 3 CO<sub>2</sub>热泵安全性

#### 3.1 CO<sub>2</sub>毒性概述

##### 3.1.1 CO<sub>2</sub>的毒性

二氧化碳在空气中含量约为0.04%，人类生活在这个空间，不会受到危害。如果室内聚集着很多人，而且空气不流通；或者室内有煤气、液化石油气及煤火炉燃烧，使空气中氧气含量相对减少，产生大量二氧化碳，室内人员就会出现不同程度的中毒症状。当然，应用大量CO<sub>2</sub>作为制冷工质，一旦发生严重泄漏，瞬间局部的CO<sub>2</sub>浓度增加，需要认真对待。

当CO<sub>2</sub>的浓度达1%会使人感到气闷、头昏、心悸，达到4%~5%时人会感到气喘、头痛、眩晕，而达到10%的时候，会使人体机能严重混乱，使人丧失知觉、神志不清、呼吸停止而死亡。

因为CO<sub>2</sub>的比重较空气大，所以在低洼处CO<sub>2</sub>的浓度较高，以人工凿井或挖孔桩时，若通风不良则会造成井底的人员窒息。

关于CO<sub>2</sub>在室内空气最大允许含量，国标GB9237-2017规定，如下表3-1所示。日本规定室内空气CO<sub>2</sub>含量为0.15%时为换气标准。

表3-1 允许的制冷剂体积浓度

制冷剂	分子量	允许浓度RCL		实用限量	
		ppm (10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	% (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	ppm (10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )	% (m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup> )
R22	86.5	54381	5.44	77688	7.77
R134a	102.03	46104	4.61	54886	5.49
R407C	86.2	70162	7.02	80557	8.06
R410A	72.58	120363	12.04	135795	13.58
R744	44	36655	3.67	50909	5.01
R717	17	320	0.032	461	0.046
R32	52.02	26267	2.63	26267	2.63
R1234yf	114	11789	1.18	11396	1.14

##### 3.1.2 CO<sub>2</sub>的毒性和浓度管理

一般认为CO<sub>2</sub>是无毒的物质，大气中正常的体积含量是0.04%即400ppm，这一值在地球工业化之前是290ppm。如果空气中CO<sub>2</sub>体积分数是0.03%，质量分数约是0.046%，常温常压下的含量是5358mg/m<sup>3</sup>。研究表明，空气中CO<sub>2</sub>浓度低于2%时，对人没有明显的危害，超过这个浓度的CO<sub>2</sub>则会让人头痛、呼吸不畅，严重会窒息。高浓度CO<sub>2</sub>本身具有刺激和麻醉作用且能使肌体发生缺氧窒息<sup>[1]</sup>。长期慢性接触浓度小于5%的CO<sub>2</sub>，对机体几乎不会产生明显损害。CO<sub>2</sub>急性暴露浓度大于5%时会对机体产生不利的影晌，致死浓度大于10%~17%。急性CO<sub>2</sub>中毒的临床特征取决于接触的浓度和时间，会引起心血管、呼吸、神经系统损害。有关中毒包括急性中毒和慢性中毒<sup>[2]</sup>。

急性中毒是指突然进入高浓度CO<sub>2</sub>环境中，大多数人可在几秒钟内，因呼吸中枢麻痹，突然倒地死亡<sup>[1]</sup>。部分人可先感头晕、心悸，迅速出现谵妄、惊厥、昏迷。如不及时脱离现场、抢救，容易发生危险，必须迅速脱离险境，病人可立刻清醒。若拖延一段时间，病情继续加重，可因高热、休克、呼吸循环衰竭死亡，也可死于肝肾衰竭。幸免者甚至数月才逐渐恢复，部分病人可留有后遗症（神经衰弱、症状性癫痫、震颤性麻痹及去大脑皮质状态等）。慢性中毒是指长时间处于低浓度CO<sub>2</sub>环境中，可引起头痛、头晕、注意力不集中、记忆力减退等。

CO<sub>2</sub>的密度比空气大，并且会在因地下的通风不良的地窖、密闭仓库、长期不开放的油井、船舱底部、存放发酵桶和密闭隔离车间及下水道等处产生积累。近年来国内外都有急性CO<sub>2</sub>中毒事件的报道。

### 3.1.3 CO<sub>2</sub> 泄漏应急处理

CO<sub>2</sub>属于单位容积制冷量高的工质，因为循环系统的容积、系统及换热器的管道内径也比较细，它的单位容量的充灌量也比较小，这样工质一旦泄漏，空气中的浓度也比较低。但还是要做好防范于未然，比如在机房和设备附近安装工质泄漏报警器，一旦机房或房间中的CO<sub>2</sub>浓度超标，立即报警并自动打开通风设备。对于小的房间永远保留通风窗口。而机房应该有良好的逃生通道，配置氧气面罩，并有不停电电源照明。

对于参与CO<sub>2</sub>热泵设备生产和运行管理的所有职工，定期进行应对意外事故的安全演习。

### 3.1.4 操作处置与储存

CO<sub>2</sub>通常储存在气瓶中，当环境温度低于临界点（31.1℃），瓶内是气液两相，压力也会低于临界压力7.39MPa。温度高于临界温度时，瓶内就是超临界高压气体，温度越高压力也越高。所以首先气瓶和设备不能曝晒，要放在或安装在阴凉之处。当设备长期不用，或进行检修，要把系统中的CO<sub>2</sub>储存在专门承压容器中。通常还要有值班制冷设备，维持一个较低的环境温度。如果储存期超过一个月，很可能进行排放是合理的方案。因为低廉的价格，长期储存并不合算。

## 3.2 CO<sub>2</sub>的高压特性

高压和低压是相对而言，不按标准设计加工，低压容器也有爆炸的。符合标准的高压系统，必能安全运行。这只是不同的压力范围，有不同的强度标准，不同的焊接要求。对于CO<sub>2</sub>热泵系统，压缩机要设有高压安全保护，设高压安全阀，尽量减小高压端的管道直径和容器尺寸，比如采用在细长管内流动的气体冷却器，尽量不设高压工质罐。必要时设立低压储液罐，设立安全阀，在夏季维修或意外停机时可以对空放气。或是把CO<sub>2</sub>制冷剂转移至可移动钢瓶之中。

## 参考文献

[1] 冯忠海,黄日生,吴木生,郭润民,马天仲,荆霞.一起货轮船舱急性二氧化碳中毒事故调查分析[J].职

业卫生与应急救援,2019,37(01):84-85.

[2] Langford N J. Carbon dioxide poisoning[J]. Toxicological Reviews, 2005, 24(4): 229-235.

[3] 杜旭芹, 郝凤桐. 二氧化碳中毒研究进展[J]. 中国工业医学杂志, 2010, 23(04): 273-276.

## 4 CO<sub>2</sub>热泵关键部件进展

### 4.1 压缩机

#### 4.1.1 CO<sub>2</sub>压缩机分类

CO<sub>2</sub>压缩机分类如下图4-1所示。



图4-1 压缩机分类

热泵涉及应用广泛，按用途通常分为民用、商用、工农业、车用等。从小到大设备的压缩机的容量，可见表4-1。

表4-1 各种压缩机的应用（功率kW）

	运行方式	房间空调热泵	汽车空调热泵	商用制冷和热泵	工农业制冷和热泵
转子式	跨临界单级 或双级	3~10	0~10	3~7.5	
涡旋式		5	0~10	100	100
活塞式	亚临界复叠		10~40	10~100	200
螺杆式				300	300

#### 4.1.2 CO<sub>2</sub>活塞式压缩机的回归

为了开发跨临界CO<sub>2</sub>制冷与热泵循环的压缩机，人们经过多年探索，发现中小容量多缸活塞式压缩机是一条重要路线。跨临界CO<sub>2</sub>制冷与热泵循环的高压可达10MPa以上，从结构设计上，可以开发活塞式、转子式、涡旋式甚至离心式压缩机，目前尚不能开发出半封闭跨临界螺杆式压缩机。

人们总以为，活塞式压缩机因往复运动，效率较低，振动噪音大，大多被回转式压缩机所取代。这个规律，对于跨临界CO<sub>2</sub>制冷与热泵循环也一样存在。但活塞式压缩机有进气阀和排气阀，它适合跨临界循环较高压力，也可自然地调节为亚临界较低压力。如下是意大利都凌CO<sub>2</sub>跨临界压缩机和德国比泽尔CO<sub>2</sub>跨临界压缩机。都凌CO<sub>2</sub>跨临界压缩机是应用范围最宽广的压缩机系

列，在50Hz时，排量从1.12m<sup>3</sup>/h到26.57m<sup>3</sup>/h。该系列压缩机广泛应用于热泵、商业制冷、冷藏运输和暖通空调系统中，拓宽了CO<sub>2</sub>压缩机系列的应用范围。德国比泽尔CO<sub>2</sub>压缩机被广泛应用于制冷和空调领域几十年，具有很强的通用性。在低温冷冻，空调和热泵应用中被大量使用。该系列的产品具有耐用的阀组设计，高质量耐磨轴承组件和便于维修维护、使用与调速控制，运行平稳等特点。



图4-2 意大利都凌CO<sub>2</sub>跨临界压缩机

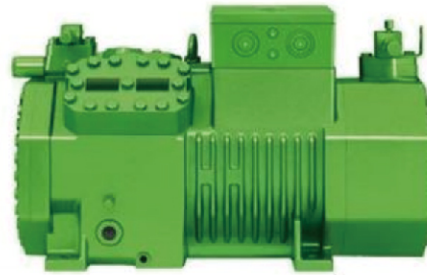


图4-3 德国比泽尔CO<sub>2</sub>跨临界压缩机

单个压缩机可组合为多机头系统，比如达到5~10台机头，这样容量可以迅速变化，工况也可以迅速变化。通常跨临界CO<sub>2</sub>制冷与热泵系统要冷热兼收，效率很高。图4-4是多台活塞式压缩机组成的较大容量的CO<sub>2</sub>制冷与热泵系统，通常用于大型冷库，或CO<sub>2</sub>制冷的人造冰场，在北京冬奥会的国家速滑馆和运动员训练基地积累了有设计、施工和工程应用的经验。

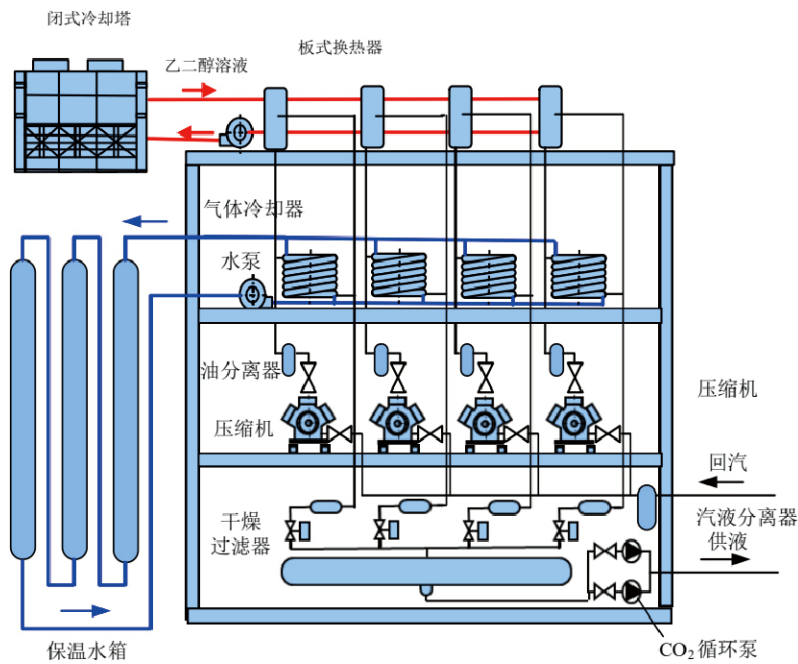


图4-4 多台活塞式压缩机组成的较大容量的CO<sub>2</sub>制冷与热泵系统

CO<sub>2</sub>压缩机的关键部件，例如压缩机的壳体、气缸盖、曲轴等，需要高强度球墨铸铁，国内铸造业已经能达到要求。因气缸、活塞的尺寸小，对活塞环、活塞销、连杆小头的轴套提出了很高的技术要求，还得在材料耐磨性上下工夫。

#### 4.1.3 汽车空调用电动CO<sub>2</sub>压缩机

近年来，作为新能源汽车的关键构成，空调系统在绿色制造方面积极寻求新的突破，在依赖于其部件新结构、新工艺和新技术发展的同时，对制冷剂绿色低碳的要求也在不断提升，采用CO<sub>2</sub>作为制冷剂已成为我国新能源汽车空调系统的发展方向。奔驰、上汽、东风集团、北汽新能源、大众等都已积极开展研究，有些已经实现量产。

汽车空调系统是由压缩机、阀件、换热器、控制系统等关键核心部件和制冷剂集成的有机整体。使用CO<sub>2</sub>作为制冷剂的汽车空调用电动压缩机按结构分为全封闭式与半封闭式，按功能分为单冷型、热泵型、低温热泵型。其中低温热泵型能在-25℃蒸发温度下正常运行。



图4-5 汽车空调用电动CO<sub>2</sub>压缩机

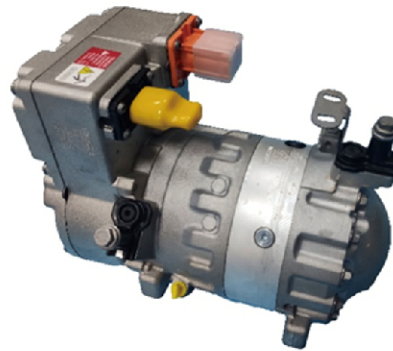


图4-6 松下（大连）新能源巴士空调及轨交空调用电动CO<sub>2</sub>压缩机

松下压缩机有限公司开发生产的CO<sub>2</sub>压缩机适用于轨交车辆、电动大巴等领域。2021年年初，由中车等三公司联合研制的搭载了全新CO<sub>2</sub>冷媒空调机组的时速 160 公里新一代全自动市域 A 型智慧列车，该空调机组使用松下33F卧式车用CO<sub>2</sub>压缩机。该款压缩机使用永磁体直流变频电机，拥有更宽的转速范围；双级压缩技术提高压缩机容积效率，可提升系统能效；内部中间压的结构设计能适应市域车及地铁车辆的重量要求；装备CO<sub>2</sub>冷媒双转子压缩机的列车空调环保先进，成功搭载在新一代全自动驾驶智慧型列车上，具有重要的里程碑意义。





图4-7自动驾驶智慧型列车



图4-8 中车氢燃料混合动力机车

#### 4.1.4 采暖热泵用CO<sub>2</sub>压缩机

采暖热泵用CO<sub>2</sub>压缩机多为多缸活塞式压缩机或螺杆式压缩机，也有部分转子式压缩机应用于采暖热泵。其中，活塞式压缩机在超临界工况和亚临界工况中都可以使用，螺杆式压缩机仅在亚临界状态使用。

CO<sub>2</sub>超临界活塞式压缩机无论大小和形式，目前中国都不能批量生产。产品主要来自意大利都凌压缩机公司、德国比泽尔公司、GEA等国外企业生产的半封闭活塞式CO<sub>2</sub>压缩机。CO<sub>2</sub>活塞式压缩机单机功率从数匹到60匹，较大容量用多缸方式分散了高压应力。通过多压缩机的办法减小了进排气管道和相应辅助部件的尺寸，已经可以做到MW级的制热量。松下（大连）的CO<sub>2</sub>压缩机自2013年起就在华批量生产，单机功率从约0.5匹到10匹，机型包含20余款，最高运行压力可达14MPa。

CO<sub>2</sub>螺杆式压缩机，因为容量要求适合在100匹以上，为避免外壳尺寸大而超重，目前只能做到亚临界。目前我国烟台冰轮、烟台奥威、上海汉钟、福建雪人等公司，都有多种型号的亚临界CO<sub>2</sub>螺杆式压缩机生产，基本可满足国内需求。

从2004年起，上海日立电器有限公司(SHEC)开始开展热泵热水器用全封闭CO<sub>2</sub>压缩机的研究与开发。其研究产品主要是1HP和双级压缩CO<sub>2</sub>压缩机。图4-9所示为该类型压缩机工作原理示意图。2006年，SHEC与上海交大、上海佐竹合作，开发出国内首台CO<sub>2</sub>压缩机性能试验台。其示意图如图4-10所示。

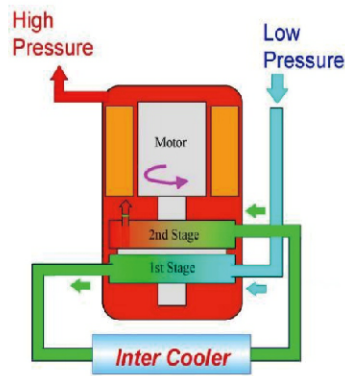


图4-9 全封闭CO<sub>2</sub>双级压缩机



图4-10 CO<sub>2</sub>压缩机性能试验台

2008年，SHEC全程参与了国标《家用和类似用途CO<sub>2</sub>制冷剂热泵热水器用全封闭型电动机—压缩机》的制定。2010年，完成两级定速CO<sub>2</sub>压缩机的开发。2011年，开始进行单级CO<sub>2</sub>压缩机研究探讨。2013年，开发了单级1HP(YSD033CV)和3HP(YSH098SV)的定速CO<sub>2</sub>压缩机。2016年，开发了单级1.5HP变频CO<sub>2</sub>压缩机(YSD033UKQ)。2020年，根据日本客户的需求，开始进行单级3HP变频CO<sub>2</sub>压缩机(YSH065SD)的开发，2022年实现了小批量的销售。其主要机型及相关参数如图4-11所示。

机型 Model	YSD033CV	YSH098SV	YSD033UKQ
应用领域 Application	主要应用于热泵热水器 Mainly used for heat pump water heater		
定速 (Fixed speed) / 变频 (Variable speed)	定速 (Fixed speed)	定速 (Fixed speed)	变频 (Variable speed)
排量 (cc/rev) Displacement	3.26	9.78	3.26
电源 Power Source	220V ~ 240V / 1 φ / 50Hz	220V ~ 240V / 1 φ / 50Hz	220V / 1 φ / 50Hz (Invert Input Power)
转速范围 (rpm) Allowable rpm range	-	-	1200~6600
额定制冷量 (W) Rated cooling capacity	2940	9750	4250 (at 4000rpm)
运行压力范围 Operating pressure limit	吸气压力 (Suction pres.) : 1.97~5.73MPa 排气压力 (Discharge pres.) : 7.5~12.0MPa		
额定工况测试条件 Testing condition	吸气压力 (Suction pres.)=4.5MPa    排气压力 (Discharge pres.)=10.0MPa 液体温度 (Liquid temp.)=22.0℃    周围温度 (Ambient temp.)=35.0℃ 吸气温度 (Suction temp.)=20.0℃    通风 (Wind speed)=2m/s		

图4-11 SHEC主要机型及其相关参数

#### 4.1.5 热泵热水机用CO<sub>2</sub>压缩机

热泵热水机用CO<sub>2</sub>压缩机多为全封闭转子或涡旋压缩机。以下是松下（大连）双转子双级压缩式CO<sub>2</sub>跨临界压缩机，它的特点是容量较小，噪音低，在特定工况下效率高，可用于不同容量的热泵热水机。松下公司于2001年全球首创的CO<sub>2</sub>双级压缩结构以及宽广的型谱，可为其它具有

广阔前景的领域提供有力的技术支撑。双级压缩机首先把在一级压缩腔内压缩成的中压高温气体通过中间冷却器进行冷却，然后再把该中温中压气体输送到二级压缩腔进行压缩，由此可减轻每一个压缩腔的工作负荷，形成既能降低排气温度又能把压力提升的双重功效。此外，把压缩过程分解成低压和高压两个阶段，并且把壳体内部设计成中间压结构，可以实现压缩机的高容积效率和小型化。相比于单级压缩方式，可以减少一半的压缩负荷，实现了出色的耐压设计和可靠性。同时还通过180°对称方式来布置滚动转子，保证了压缩转矩的平滑性，从而达到了降低振动和噪声的目的。

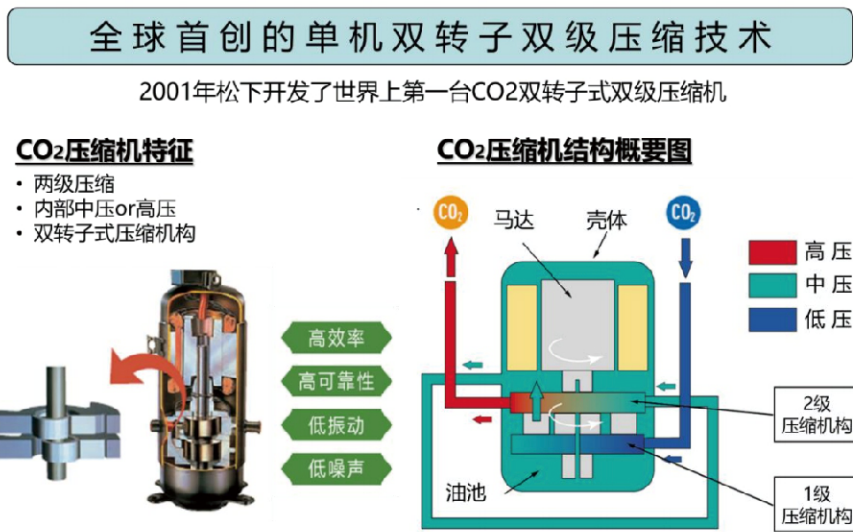


图4-12 松下双转子双级CO<sub>2</sub>跨临界压缩机的产品特点及工作原理


额定输出	300W	500W	750W	900W	1100W	1300W	2HP	3HP	4HP	8HP	10HP	
直流变频 型号	15F系列						20F系列			33F系列		
												
应用领域	300W	500W	750W	900W	1100W	1300W	2HP	3HP	4HP	8HP	10HP	
制热	热泵式干衣机		家用热泵式热水机					商用热泵				
制冷 (冷藏柜/ 冷冻机)	自动售货机		轻型商用冷藏柜/冷冻机						大型商用			
	车载空调											

图4-13 松下（大连）双转子双级CO<sub>2</sub>跨临界压缩机型号

下图4-14是圣三松公司的CO<sub>2</sub>跨临界涡旋压缩机，CO<sub>2</sub>跨临界涡旋压缩机的涡旋盘厚度相近，保证了涡旋的强度，可承受CO<sub>2</sub>跨临界涡旋压缩机较大的压差。



图4-14 圣三松公司CO<sub>2</sub>跨临界涡旋压缩机涡旋盘

西安庆安制冷设备股份有限公司开发了CO<sub>2</sub>转子式制冷压缩机，采用直流变频控制等重大新技术，拥有核心专利（3项发明专利），性能优异。产品已经系列化，如图4-15所示；可满足1~3HP CO<sub>2</sub>热泵热水器热水和采暖的使用要求。CO<sub>2</sub>压缩机产品型号和技术参数如表4-2。

冷媒	电源	排量cm <sup>3</sup>	制热能力
CO <sub>2</sub>	50Hz 220-240V	3.3	2000W - 4000W
		3.3	4000W - 8000W
	DC INV	4.2	4000W - 10000W
		6.0	6000W - 18000W

图4-15 庆安制冷CO<sub>2</sub>转子式制冷压缩机系列产品

表4-2 庆安制冷CO<sub>2</sub>压缩机产品型号和技术参数表

冷媒	制热量		工作容积	能效比	电源	筒体内径 Φ(mm)	用途
	W	Btu/h	cm <sup>3</sup> /rev	W/W			
CO <sub>2</sub>	4000	13650	3.3	4.45	1PH 220-240V 50Hz	112	热泵 热水器
	4950	16890	3.3	4.80			
	6330	21600	4.2	4.75	DC 3600rpm		
	9200	31390	6.0	4.85			

备注：测试条件：排气压力:10MPa，吸气压力:4.5MPa，过冷温度:22℃，吸气温度:20℃，环境温度:35℃。

GMCC美芝从2006年开始CO<sub>2</sub>滚动转子压缩机研发工作，投入了专项研发费用，建设了完善的CO<sub>2</sub>压缩机和系统实验装置，包括CO<sub>2</sub>压缩机性能和噪音测试台、压缩机单体耐久实验台、CO<sub>2</sub>专用焓差室和CO<sub>2</sub>压缩机耐压级压力脉冲实验测试等设备，可满足CO<sub>2</sub>压缩机各种测试工作的需要。

GMCC美芝先后进行了CO<sub>2</sub>单级高压腔结构、两级压缩中间压力结构、单级低压腔结构等的研发工作，并基于此开发了CO<sub>2</sub>跨临界单转子机双转子变频压缩机。利用CAE和CFD等辅助设计和仿真工具，进一步优化了压缩机的结构和内部流场设计，所开发的CO<sub>2</sub>压缩机具有高效、可靠、紧凑、低振噪的特点，设计寿命高达60000小时，运行频率范围30~120Hz，并可同时满足热泵热水器和冷藏柜等不同应用要求，产品出口欧洲，通过了市场的应用考验。



图4-16 GMCC美芝的CO<sub>2</sub>压缩机专用测试设备及产品

GMCC美芝研发的CO<sub>2</sub>压缩机蒸发温度可低至-40℃，高至25℃。解决了冷媒压力及压差大，耐压要求高、摩擦及泄露损失大，可靠性难度大的问题。采用DLC滑片，解决大压差下滑片磨损问题；全新设计滑片槽柔性结构，解决大压差下滑片及滑片槽磨损问题；泵体结构拓扑优化设计，抑制高压差下的泵体变形；部品选配、调芯间隙优化设计，柔性曲轴偏心部应用，解决大压差下的泄漏问题，同时兼顾摩擦副可靠性；耐压45MPa壳体开发，建立高厚度、高强度壳体加工技术、装配技术及耐压评价技术体系。耐压45MPa接线端子全新开发，可成功规避日本厂家的技

术壁垒，实现核心零件国产化，降低成本同时保证供应安全；定子热套结合定子三点焊的创新应用，解决高厚度壳体时定子热套内径变形大的问题，解决噪音及能效问题。该产品体积紧凑，成本低，较目前CO<sub>2</sub>冷媒冷冻冷藏领域主流的活塞式压缩机和涡旋式压缩机，体积和成本均大幅降低。

珠海格力电器股份有限公司从2008年就开始了CO<sub>2</sub>压缩机及相关技术的研究，重点开展了耐高压外壳，耐高温高效电机，高性能泵体，新型滑片结构、低吐油率等研究，建立了CO<sub>2</sub>压缩机高效设计方法，成功掌握了热泵热水器用单级和双级热泵热水器用CO<sub>2</sub>压缩机技术，标况下能效超国标45%，达3.78，并进一步研究开发了10HP冷冻冷藏用双级增焓高效CO<sub>2</sub>压缩机。格力热泵热水器用CO<sub>2</sub>压缩机如图4-17所示，冷冻冷藏用双级增焓CO<sub>2</sub>压缩机如图4-18所示。



图4-17 格力热泵热水器用单双级CO<sub>2</sub>压缩机



图4-18 格力冷冻冷藏用CO<sub>2</sub>双级增焓压缩机

## 4.2 CO<sub>2</sub>其它部件

### 4.2.1 电子膨胀阀和电磁阀

CO<sub>2</sub>循环控制用阀门生产厂家主要为丹佛斯、日本鹭宫、盾安、三花、卡乐等。CO<sub>2</sub>循环系统用电子膨胀阀的主要功能为流体的节流与流量控制。电子膨胀阀通过控制步进电机的运转，从而改变阀口的流通面积，实现制冷系统流量调节。CO<sub>2</sub>循环系统用电磁阀的主要功能为流体的通断控制。电磁阀按开启型式分为常闭和常开式。CO<sub>2</sub>工质系统压力远高于普通循环，跨临界系统最高可达15MPa，因此对相关阀门提出了新的要求。工质对于电子膨胀阀和电磁阀（图4-19）的技术要求如下表4-3。

表4-3 CO<sub>2</sub>系统用电子膨胀阀和电磁阀的技术要求

技术要求	传统冷媒系统	CO <sub>2</sub> 系统 <sup>1)</sup>	
		亚临界	超临界
最大动作压差	3.5MPa	4.5MPa	10MPa
最高工作压力	4.5MPa	7.5MPa	15MPa



(a)电磁阀



(b)电子膨胀阀



(c) 车用电子膨胀阀阀组

图4-19 电磁阀和电子膨胀阀

浙江盾安机电科技有限公司生产的CO<sub>2</sub>电子膨胀阀和电磁阀阀体采用高壁厚套管，爆破强度可达45MPa以上，高压安全余量充足。转子采用钨铁硼材料，高驱动力，最大开阀压差可达10MPa。

### 4.2.2 四通换向阀和球阀

CO<sub>2</sub>热泵系统过去多以电磁阀热气旁通化霜，化霜效率远不如四通阀。使用四通阀后可以简化系统管路，降低因复杂管路设计及多个焊点带来的泄漏风险，提升了系统可靠性。

四通阀从常规冷媒到CO<sub>2</sub>并不是简单的承压能力的提升，最大的挑战在于CO<sub>2</sub>系统要求在“更高的压差”下能够换向，MOPD从3.1MPa提升至6MPa。

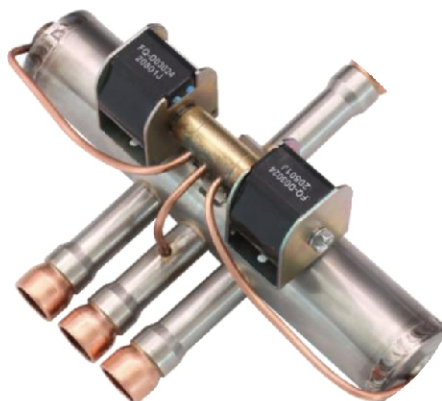


图4-20 四通阀

常规冷媒用的四通阀的MOPD的瓶颈在于其导阀设计。常规冷媒四通阀导阀采用滑碗面密封，压缩机排气通过D管上的毛细管压在滑碗面上，线圈通电时芯铁吸合，克服滑碗与阀座的滑动摩擦力切换，四通阀的最高动作压差无法超过31bar。如果采用同样的设计用于CO<sub>2</sub>系统，由于系统运行压力可达10MPa以上，将导致滑碗的滑动摩擦力大幅增加，线圈通电的芯铁吸力不足以克服滑碗滑动摩擦力，导致导阀无法切换。

为解决CO<sub>2</sub>系统高切换压差的难题，四通阀阀口采用钢球密封，阀口与阀座没有滑动摩擦力，阀口一旦打开，不再需要克服压差力，从而提升切换能力。

如三花的SHF-T四通阀采用创新的双线圈驱动双导阀的结构设计，因此工作时总是一侧导阀线圈通电，另一侧导阀线圈断电。和常规冷媒四通阀相比，取消了高压D管上的毛细管，同时在主阀体内的两边活塞上开了平衡孔，工作原理和常规冷媒四通阀不同。

四通阀的工作模式包括制热模式、切换过程、制冷或化霜模式。

图4-21(a)为制热模式。当右侧线圈通电，左侧线圈断电时，左导阀关闭，左侧毛细管和低压毛细管断开；右导阀打开，右侧毛细管和低压毛细管连通。高压气体从D管进入主阀体，并通过左侧活塞的平衡孔充满活塞左侧腔体，右侧活塞到达右端盖限位后，由活塞锥塞将右侧毛细管密封，右侧毛细管充满低压流体。此时滑块停在右侧，并保持在该位置。



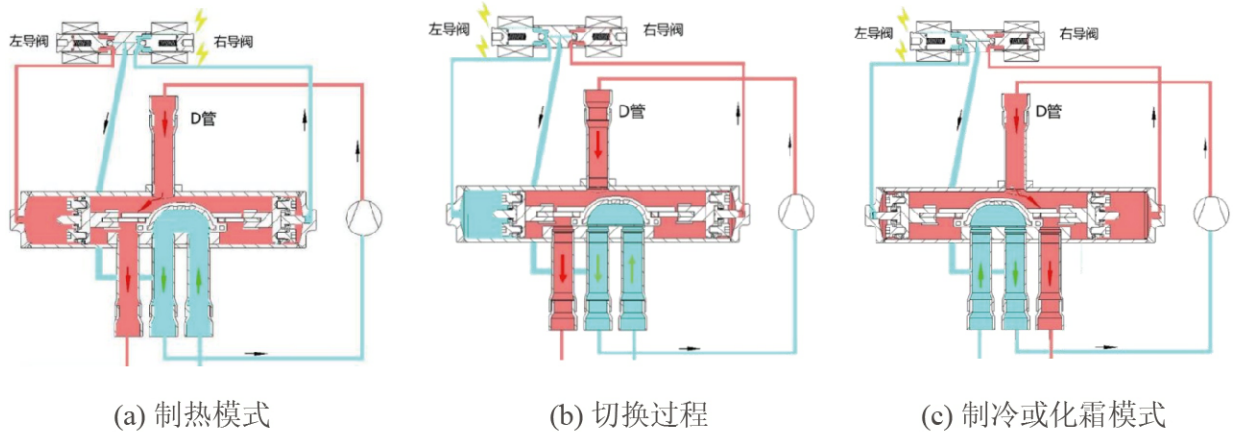


图4-21 四通阀的工作模式

图4-21(b)为切换过程。当左导阀通电，右导阀断电时，左边导阀打开，左侧毛细管与低压侧毛细管连通。由于左侧活塞上开有平衡孔，活塞右侧高压流体通过平衡孔泄压的速度没有左侧毛细管到低压毛细管的泄压速度快，从而形成压力差推动活塞向左移动。此时右侧的活塞因为开有平衡孔，开始向左移动，高压流体逐渐充满活塞右侧及毛细管；但右侧导阀关闭，右侧毛细管和低压毛细管断开。

图4-21(c)为制冷或化霜模式。当左侧活塞移动到左端盖限时，左侧毛细管与左侧腔体被锥塞密封，左侧毛细管与低压毛细管连通，保持低压。右侧活塞因为开有平衡孔，高压流体通过平衡孔充满活塞右侧腔体。右侧毛细管充满高压流体，但右侧导阀关闭，右侧毛细管与低压毛细管断开。此时滑块停在左侧，并保持在该位置。

SHF-T系列能够满足5HP排量的系统需求；当需要更大制冷量时，可以采用双阀并联的形式。当切换系统高低压差超过6MPa时，建议在高低压侧安装GDF电磁阀进行旁通，降低高低压压差至6MPa以下后再切换。下表4-4列举SHF-20D-55T01四通阀的性能参数。

表4-4 SHF-20D-55T01四通阀性能参数

型号	Cv	最高动作压差	最低动作压差	动作寿命	线圈	线圈电压
SHF-20D-55T01	5	6MPa	0.3MPa	≥10万次	双线圈	AC 220-240V

球阀主要用于自控阀件、过滤器以及换热器前后以备检修之需。以三花的CBV系列球阀为例，如图4-22。其可以应用到6MPa以下的亚临界系统中，而CBVT则可以应用于14MPa的跨临界系统中。为了提升强度，CBVT采用不锈钢接管，并分为钎焊接口和对焊接口两种选择，钎焊接口可以与系统铜管直接焊接。



图4-22 三花球阀

对于CO<sub>2</sub>球阀而言，难度最大的是阀杆处的密封。CO<sub>2</sub>的化学稳定性非常好但是具有极强的渗透性，在高压环境中会浸入密封材料内部，并且在压力突然下降时从材料内部释放出来，破坏密封材料。针对CO<sub>2</sub>的这一特性，所选用的密封材料必须通过爆炸性减压测试（ED试验）。从实践来看，传统的CR和HNBR都没有办法满足要求，EPDM是最接近要求的弹性橡胶材料。

CBV球阀采用EPDM密封材料确保CO<sub>2</sub>的兼容性，CBVT球阀由于需要承受更高的压力，采用了三花专利的石墨填料技术。通过改性后的石墨填料技术可以很好地兼容CO<sub>2</sub>以及满足长久耐磨性的要求。

在制冷系统设计中，低压侧部分如蒸发器的承压能力一般在6MPa以下（目前少数达到8MPa）。当蒸发器前后需要关闭检修时，内部积存的液态制冷剂在环境温度影响下可能快速膨胀汽化，压力急剧升高超出蒸发器的设计压力，建议在球阀位置并联单向阀作为安全泄压阀。GZJA维修组件直接将CBVT和BCV制作成组件形式，方便连接。



图4-23 三花GZJA 维修组件(球阀+单向阀)

### 4.2.3 蒸发器

CO<sub>2</sub>蒸发器按热源可分为风冷式和水冷式；按结构类型可分为管翅式、平行流式、管壳式、套管式、板式等，如图4-24；其中管壳式也分为满液式和降膜式。管壳式蒸发器根据工质流动方式的不同可分为管内沸腾和管外沸腾；管外沸腾常见的形式为满液式蒸发器，降膜式也是管外沸腾。管翅式、平行流式蒸发器通常以空气为热源；管壳式、套管式、板式通常用水或其他液体为热源。在汽车空调领域，通常采用铝制与百叶窗翅片组合而成的蒸发器。

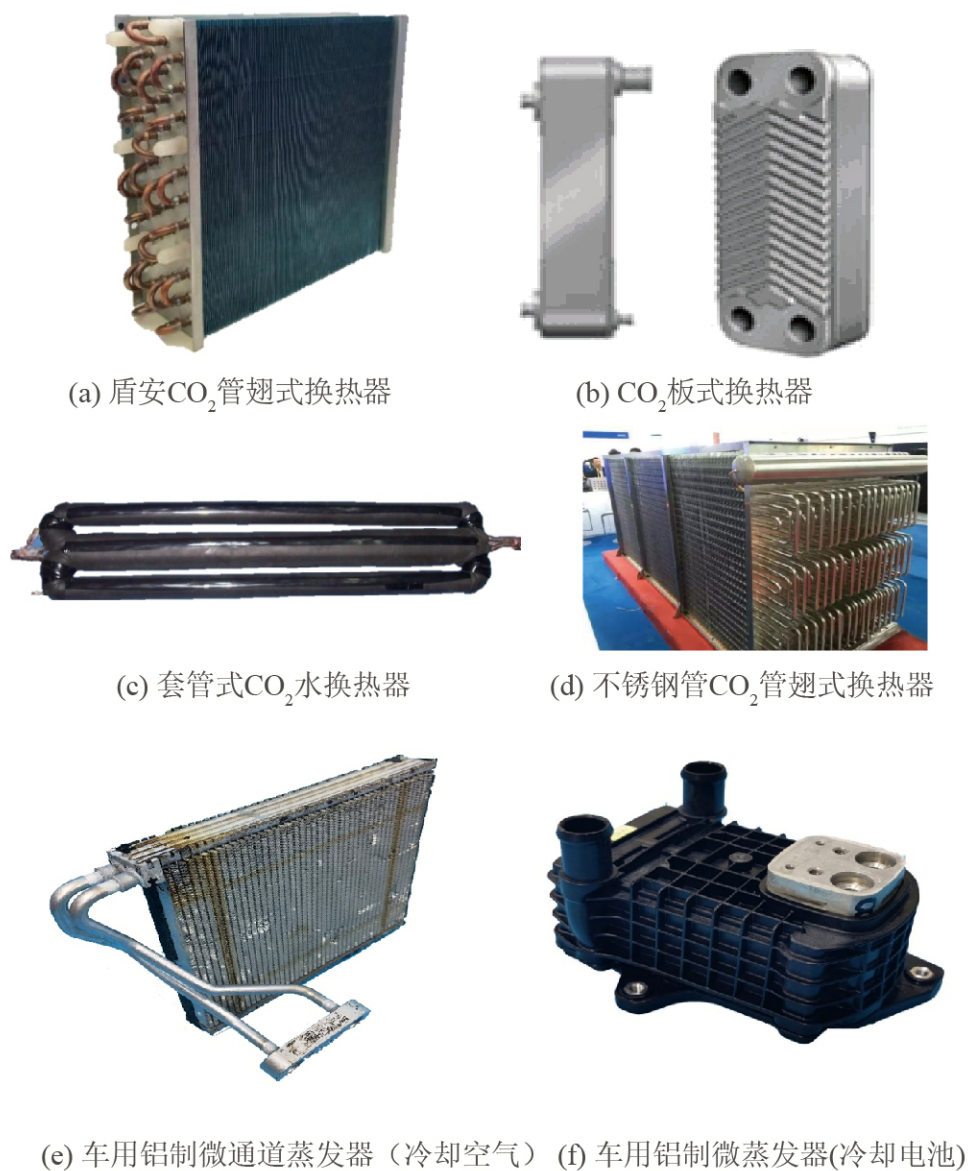


图4-24 各种形式的CO<sub>2</sub>蒸发器

在CO<sub>2</sub>满液式蒸发器中，CO<sub>2</sub>在管外流动，属于沸腾换热。对于普通工质来说，满液式蒸发器已广泛应用于大型制冷设备中；对于CO<sub>2</sub>系统来说，将发展到较大容量，用满液式蒸发器比较合适。降膜式蒸发是一种大空间蒸发沸腾换热模式，在常规工质的大中型制冷、热泵系统中得到应用。降膜式蒸发技术将液态制冷剂喷淋到换热管上，使得换热管外形成制冷剂液膜，与管内冷冻水完成蒸发换热过程。相比满液式蒸发换热，降膜蒸发具有以下优势：(1)高传热系数，可减小蒸发器的体积，降低最初成本和空间需要；(2)因传热好允许蒸发温度适当升高，改善循环效率；(3)起到油分的效果，更好地进行回油；(4)降低制冷剂充灌量，可减少30%的制冷剂充灌量。随着CO<sub>2</sub>应用范围的扩大和制冷热泵系统容量的增加，CO<sub>2</sub>降膜式蒸发器在CO<sub>2</sub>制冷热泵系统中将有广泛的应用。

#### 4.2.4 气体冷却器

CO<sub>2</sub>气体冷却器按冷却介质可分为：风冷和水冷；按结构形式分为：管壳式、套管式、板式、管翅式、平行流微通道式等；其中管翅式、平行流微通道式、通常用空气作为冷却介质；管壳式、套管式、板式常用水作为冷却介质。

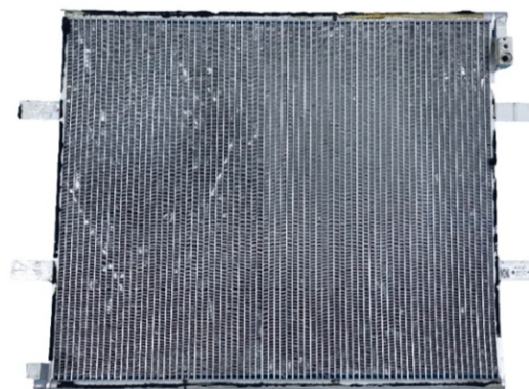
上世纪90年代，Lorentzen和Pettersen首次推出了CO<sub>2</sub>汽车空调用气体冷却器，其中冷却管为铝制机械胀管，肋片是铝制平肋片。这种铝制管翅式换热器的管外径和管内径分别为4.9mm、3.4mm。从发展趋势看，铜管铝翅片的结构还会延续，铜管的管径适当减小，壁厚有所增加，其在CO<sub>2</sub>热泵干燥机和CO<sub>2</sub>制冷设备中都可以应用。

对于生产热水的小型CO<sub>2</sub>跨临界循环热泵，由于套管式换热器使系统更加紧凑耐压，结构简单，易于加工，所以小型CO<sub>2</sub>水-水热泵系统的气体冷却器通常做成套管式。

用于生产热水的气体冷却器也可以选用板式换热器。常规工质应用于高温高压场合的板式换热器因耐压设计而显得非常厚重，由于CO<sub>2</sub>单位容积制冷量大，流动和传热性能好，相对减小了CO<sub>2</sub>板式换热器的承压面积。如图4-25(a)为CO<sub>2</sub>紧凑型钎焊板式换热器的示意图，其高效节能，制冷剂加注量小，排放少，体积紧凑，能够抵抗高温和高压，质量轻，能显著缩减系统外型尺寸而节省空间。但其存在除垢困难的问题，不适合应用在水质较差的CO<sub>2</sub>热泵热水机上。图4-25(b)为车用铝制微通道气体冷却器。



(a) CO<sub>2</sub>紧凑型钎焊板式气体冷却器



(b) 车用铝制微通道气体冷却器

图4-25 CO<sub>2</sub>紧凑型钎焊板式气体冷却器

#### 4.2.5 CO<sub>2</sub>膨胀机

由于CO<sub>2</sub>跨临界循环节流损失大，因而造成CO<sub>2</sub>跨临界循环效率低。理论上已经证明利用膨胀机代替节流阀回收膨胀功可以有效提高系统效率。珠海格力电器股份有限公司联合天津大学对CO<sub>2</sub>膨胀机技术进行了深入研究，通过对吸气损失、膨胀比、变工况、过膨胀和欠膨胀等关键因素研究，设计了CO<sub>2</sub>单膨胀机，搭建了膨胀功测试台，实现了单膨胀机回收效率达到40%以上，积累了高效膨胀机设计方法和回收功测试方法。格力CO<sub>2</sub>膨胀机外形如图4-26所示。



图4-26 格力CO<sub>2</sub>膨胀机

#### 4.2.6 管路

CO<sub>2</sub> 管路主要采用不锈钢管、铜管、铝管和软管。管路系统运行工作压力是传统空调系统的10倍以上，最高压力为17 MPa，介质工作温度在150℃以上，最高温度可达180℃。

在车用领域，要求采用质量较轻的铝管以及减震软管，当前国内CO<sub>2</sub>热泵空调管路产品大多处于研究开发阶段。迈特诺（马鞍山）管路技术公司在综合了类似工况下同类产品设计的成功经验和国外产品成功案例以及其它工况下的成功应用，提出了内层采用高弹性不锈钢波纹软管以提高产品的抗疲劳性能和高密封性、中编高强度不锈钢丝网套以承受高压介质、外包特殊配方的耐高温AEM橡胶的复合柔性管路方案。高弹性不锈钢波纹软管用于承受高压脉冲试验，高强度不锈钢丝网套用于承受高压测试，耐高温AEM橡胶用于承受耐老化试验；软硬结合部采用焊接结构，避免泄漏；与其它功能件连接采用球面密封或卡套密封形式，避免温度变化导致的密封可靠性下降。内层全金属结构保证了高温高压状态下的密封性长期可靠，外包橡胶层起到保温隔热、吸音降噪和吸收振动的作用。迈特诺公司已生产出合格的车载CO<sub>2</sub>热泵空调管路产品，如图4-27所示，并已交付小批量产品至相关厂家。



图4-27 CO<sub>2</sub> 车用高压软管

## 5 CO<sub>2</sub>热泵的应用发展

### 5.1 CO<sub>2</sub>热泵热水器

由于CO<sub>2</sub>的临界温度很低，因此CO<sub>2</sub>的放热过程不是在两相区冷凝，而是在接近或超过临界点的区域的气体冷却器中放热。其放热过程为一变温过程，有较大的温度滑移。这种温度滑移正好与所需的变温热源相匹配，是一种特殊的劳伦兹循环，当用于热泵循环时，有较高的放热系数，非常适合应用于热泵热水器。

CO<sub>2</sub>热泵热水器在日本发展最为迅速，日本电研院（CRIEPI）与东京电力公司（TEPCO）及DENSO公司的M.Saikawa，K.Hashimoto等人<sup>[1]</sup>合作于1998年9月开始进行CO<sub>2</sub>热泵热水器的基础理论研究。在TEPCO对改进型CO<sub>2</sub>热泵热水器的全年平均性能系数进行了测算，结果表明包括风扇和水泵耗电在内的全年系统平均COP值仍可高达3.0，而且改进型系统在外界空气为-20℃时，仍可提供高达90℃的热水。日本Sanyo电器公司Hiroshi Mukaiyama等人<sup>[2]</sup>研制的家用CO<sub>2</sub>热泵热水器，采用20~120Hz的变频电动机驱动。他们在恒温室中对该系统在不同温度、湿度的性能进行了测试。计算结果表明其总有效温室效应指数（TWEI）比其它方式的热水器降低了近一半。

而且，Sanyo还开发了双级滚动转子式压缩机用于热泵热水器，大大提高了整体的系统效率。



图5-1 Denso公司的CO<sub>2</sub>热泵热水器

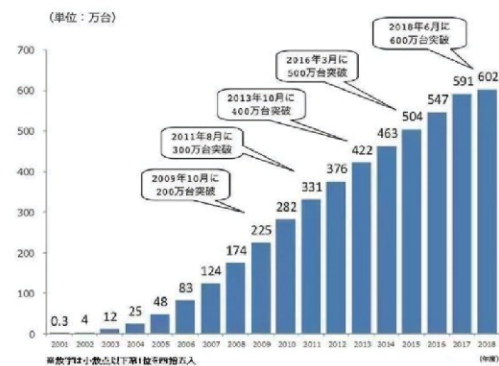


图5-2 日本CO<sub>2</sub>热泵热水器产量

2002年，日本大金公司推出了采用单级摆动转子式压缩机的CO<sub>2</sub>热泵热水器。系统额定耗功1.21kW，蒸发器置于室外，可提供65~90℃的热水，储水箱容量为300升/370升，其额定制热量4.5kW，标准状况下（室外空气温度16℃/12℃，进水温度17℃，出水65℃）COP可达3.72，噪声45分贝。同期，松下也推出了自己的水箱容量为370升的CO<sub>2</sub>热泵热水器。日本的CO<sub>2</sub>热泵热水器称为“生态精灵”（ECO CUTE），年产达20万台，到2010年达到近50万台，市场发展迅速。三菱公司开发了40kW的“SunnypackQEco”产品，首批产品于2007年10月上市。该型号CO<sub>2</sub>热泵热水器采用了新开发的变频涡旋CO<sub>2</sub>压缩机，性能系数达到4.1，与传统电热的热水器相比CO<sub>2</sub>的排放量减少了40%。

国内热泵热水器的研究，起步较晚。国内从上世纪末开始研究CO<sub>2</sub>循环制冷与热泵，到2010年之后，出现以CO<sub>2</sub>跨临界循环热泵热水机，并开始迅速发展，涌现出很多专业企业，列举部分企业如表5-1。

表5-1 国内CO<sub>2</sub>热泵热水机概况

企业名称	地点	相关参数
浙江盾安机电科技有限公司	浙江	可在-25℃~43℃环境下顺利运行，可生产最高90℃热水，实现高温供水和中温供水。
浙江正理生能科技有限公司	浙江	可保证65℃出水温度，并能实现80℃出水温度。-20℃环境温度运行，65℃出水温度时，机组即时COP可达1.6以上。
苏州苏净安发环境科技有限公司	苏州	产品单机制热量范围涵盖5~1500kW。
昆明东启科技股份有限公司	昆明	可在-25℃~43℃环境下顺利运行，可生产最高90℃热水，供暖标准工况-12℃，COP为2.63；-20℃，COP为2.34；热水标准工况，COP可达5.07。系统比燃油锅炉能耗费用降低50%左右，比天然气锅炉能耗费用降低72%。
青岛海信日立空调系统有限公司	青岛	机组运行中蒸发温度最低可达-45℃，标准工况COP可达4.6。在-35℃工况下其制热，效率依然可达到1.5左右。
浙江德富新能源技术有限公司	北京	采用带板式换热器的双循环系统，解决场地限制问题。
甘肃一德新能源设备有限公司	甘肃	最高供暖面积可达7500m <sup>2</sup> ，设计总负荷可达650kW。可在环境温度-25℃下正常运行，回水温度55℃。
安徽正刚新能源科技有限公司	安徽	冷冻水出水温度3~5℃，热水出水83~90℃。单机名义制冷量2100kW，名义制热量2900kW，机组综合COP为5.17~6.24。

浙江盾安机电科技有限公司的开发CO<sub>2</sub>热泵热水器机组，采用变频和回热器方案，可在-25℃~43℃环境下顺利运行，以一次加热的方式，可生产最高90℃热水。同时，机组可以实现高温供水和中温供水，有效发挥CO<sub>2</sub>热泵低温进水下高效的特点，也可以实现蓄热水箱蓄热节能。该机组已成功应用于四星级海亮商务酒店，按10年有效运行估算，可节电74.1万kW·h，减少二氧化碳排放738.7吨，二氧化硫排放22.2吨，氮氧化物11.1吨。此外，通过结合峰谷电蓄热，该项目每天平均生产35吨热水，每年可节电7.4万kW·h，节省费用约13.1万元/年。





图5-3 盾安二氧化碳热泵热水机组

浙江正理生能科技有限公司设计研发了新型跨临界CO<sub>2</sub>热泵热水器，如图5-4。相比传统技术，其开发的CO<sub>2</sub>热泵热水器能减少所充注工质的温室效应（GWP）90%以上；可保证65℃出水温度，并能实现80℃出水温度，优于传统热泵。在-20℃环境温度运行，65℃出水温度时，机组即时COP可达1.6以上，达到国内领先水平。此外，其独有的化霜系统可保证机组在冬季平稳运行。



图5-4 正理生能二氧化碳热泵热水机组

苏州苏净安发环境科技有限公司自2010年启动CO<sub>2</sub>热泵研发项目。作为国内最早研发并产业化CO<sub>2</sub>热泵的企业之一，应用涉及采暖医疗、食品和化工等行业领域。形成CO<sub>2</sub>热泵热水机，CO<sub>2</sub>热泵供暖机一体机和分体机，CO<sub>2</sub>冷热联供机组，CO<sub>2</sub>热泵家用系列等四大系列产品，如图5-5所示。产品单机制热量范围涵盖5~1500kW。



图5-5 苏州苏净安发环境科技有限公司热泵机组

昆明东启科技股份有限公司提供的浦江饭店CO<sub>2</sub>热泵热水系统于2012年5月启用，提供生活用水。系统比燃油锅炉能耗费用降50%左右，比天然气锅炉能耗费用降低72%，有明显的节能效果。此外，该公司CO<sub>2</sub>热水器产品已在哈尔滨铁路局机务段以及雄安高铁站多功能综合楼使用；上海体育学院太阳能与热泵结合、玉溪文体中心恒温泳池加热系统。

东启研制的蒸发器为微通道(多支路冷媒小流量)，换热效率高，在寒冷地区还能降低翅片的结霜效果，延长热泵有效运行周期，并通过变频技术平衡热泵系统的年平均效率；

如东启研制的套管式换热器为并、串联螺旋式套管式换热器（分为换热级和冷却级），换热级CO<sub>2</sub>流速较慢便于换热（抑制水垢产生），在冷却级水流速度较快便于冷却，实现一次性加热热水，极大提高热泵系统效率。



(a)东启空气源 CO<sub>2</sub>热泵机组



(b)东启水源 CO<sub>2</sub>热泵机组



(c)哈铁机务段

图 5-6 东启热泵机组

青岛海信日立空调系统有限公司开发了采用单机双级压缩的跨临界CO<sub>2</sub>热泵热水机，机组运行中蒸发温度最低可达-45℃，采用最优高压实时控制技术，标准工况COP可达4.6，在-35℃工况下其制热效率依然可达到1.5左右。



图5-7 海信日立双级压缩跨临界CO<sub>2</sub>热泵热水机

浙江德富新能源技术有限公司开发了板式换热器双循环CO<sub>2</sub>系统，适用于场地受限制的区域。



图5-8 德富公司二氧化碳热泵热水机组

在工业应用领域，安徽正刚新能源科技有限公司研发生产了兆瓦级跨临界二氧化碳冷热联供装置，如图5-9。其中Y-Y（液-液）系列产品应用于某制药企业，冷冻水出水温度3~5℃，热水出水83~90℃。单机名义制冷量2100kW，名义制热量2900kW。合肥通用机械研究院现场检测，机组综合COP为5.17~6.24。该产品2021年7月通过了中国机械工业联合会组织的专家鉴定，达到国际先进水平，年节能费用约2000万元。



图5-9 安徽正刚新能源科技有限公司兆瓦级跨临界二氧化碳冷热联供装置

## 5.2 CO<sub>2</sub>热泵采暖

空气源CO<sub>2</sub>热泵用于采暖，在我国铁路沿线的供暖中，已经得到实际应用。2018年，中国铁路总公司印发了关于《中国铁路总公司节约能源和环境保护发展规划（2018-2020年）》的通知，明确提出用空气源热泵技术替代锅炉改造。进一步加大空气源热泵技术示范推广力度，加快替代既有燃油锅炉和燃煤锅炉。通过结合站段供暖面积、热水需求量，合理选择热泵机组容量，实现以电代油和以电代煤，降低供暖成本和能耗，优化能源消费结构。2018-2020年，完成燃油锅炉150台、燃煤锅炉1300余台替代改造<sup>[3]</sup>。

根据铁路沿线的气候条件，包括哈局部分地区、呼局大部分地区、沈阳局、兰州局、乌局大部分地区、西安局、北京局、太原局等，运行环境在-30℃~40℃，站段分布散，城区少，偏远地区多，建筑面积小，大小不一，原有管网老旧，末端为铸铁暖气片且更换困难。CO<sub>2</sub>热泵具备出水温度高的特点，适用配套原铸铁暖气片使用。其气体冷却器内温度和压力相互独立，温度变化取决于外部介质流量和进口温度，决定了出水温度不受限于冷凝温度。改造后，空气源跨临界CO<sub>2</sub>热泵机组提供了70/50℃进回水供暖热水，95℃的生活热水，年平均能效比达到1.9~2.1，满足了各站点的节能改造要求。

黑龙江爱科德科技有限公司与天津铁路建筑设计研究院联合完成超低环温CO<sub>2</sub>空气源热泵机组，实现了为北方新高铁火车站的热风（采暖）、热水两联供，创新设计R134a部分复叠CO<sub>2</sub>跨临界循环，提高了热泵系统的各项性能，其产品在售热量和COP上均达到国际领先水平。

空气源CO<sub>2</sub>热泵用于采暖，也用于我国北方农村居民住宅示范项目。黑龙江爱科德科技有限公司的示范项目，在河北省围场县，最冷月平均温度-13.2℃，极端最低温-42℃。在某村所辖共计7500m<sup>2</sup>分散布局的楼房区、平房区、村委会、幼儿园、医院等，利用空气源CO<sub>2</sub>热泵用于采暖。设计供水温度45℃，回水35℃，100W/m<sup>2</sup>，选用了两台分体式复叠CO<sub>2</sub>热泵，满足整个区域房屋的冬季采暖负荷。

甘肃一德新能源设备有限公司对高速管理处供暖系统进行改造，用CO<sub>2</sub>分体空气源热泵供暖取代原有燃煤锅炉系统，如图5-9。最高供暖面积可达7500m<sup>2</sup>，设计总负荷可达650kW。其设计的CO<sub>2</sub>复叠空气源热泵供暖系统，可在环境温度-25℃下正常运行，回水温度55℃，采暖期室内温度18℃以上。月平均耗电量低于4元/度·平方米。



图5-10 一德公司CO<sub>2</sub>热泵热水机组

### 5.3 CO<sub>2</sub>汽车空调

根据2006年欧盟已通过的含氟温室气体(F-gas)法规的要求：自2011年1月1日起，欧盟禁止新生产的汽车空调使用GWP值大于150的制冷剂(因R134a的GWP值为1300，将被禁用)；在2011年1月1日至2017年1月1日的6年间，所用的汽车空调将按比例逐步淘汰GWP值大于150的制冷剂；自2017年1月1日起，禁止所有汽车空调使用GWP值大于150的制冷剂。R1234yf（GWP=4）和CO<sub>2</sub>是主要的汽车空调制冷剂替代选择。R1234yf物性与R134a接近，几乎可以直接替代R134a，但是由于专利等原因，制冷剂本身价格昂贵。相比而言，CO<sub>2</sub>制冷剂本身具有环保、价格低廉、来源广等优势。

1994年，欧洲宝马、戴姆勒、沃尔沃、大众等汽车公司与法雷奥等汽车零部件公司发起了“RACE”项目，联合欧美高校开发、推广应用CO<sub>2</sub>汽车空调。1995-1998年，欧洲主流车企又启动了针对CO<sub>2</sub>汽车空调的B-Cool Project。2001-2003年，美国SAE CRP对比评估了CO<sub>2</sub>与R134a的系统性能。由于替代制冷剂R1234yf的推广应用、以及CO<sub>2</sub>汽车空调零部件技术不成熟等原因，之后10余年CO<sub>2</sub>汽车空调进展缓慢。直至2015年，欧洲出台了CO<sub>2</sub>汽车空调VDA标准，推动了技术的推广。2017年，奔驰在面向欧洲市场的S级和E级车型中，量产了CO<sub>2</sub>汽车空调。2018年，奥迪在欧洲版的A8 4N车型中也量产了CO<sub>2</sub>汽车空调。图5-11所示为该汽车空调系统的原理示意图。

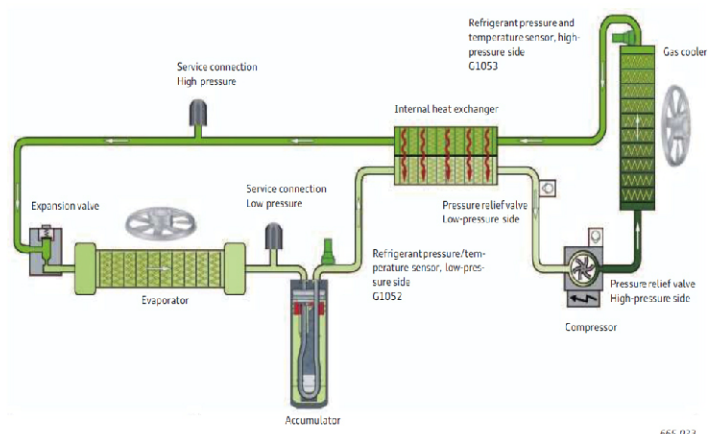


图5-11 奥迪A8 4N CO<sub>2</sub>汽车空调系统原理示意图

随着汽车从燃油动力转变为电动汽车，电动汽车在冬季几乎没有可用的余热用于乘客舱加热。为提高冬季续航里程，采用热泵技术大幅度降低制热能耗是非常有利的技术方案。目前包括特斯拉汽车、比亚迪汽车、蔚来汽车等新能源汽车厂家先后量产了热泵系统。由于采用R134a或者直接替代的低GWP值R1234yf存在制热量不足、制热能效低等问题，目前无法在-10℃及以下环境产生较好的制热效果。为提高热泵系统能力及效率，加上CO<sub>2</sub>的环保特性，CO<sub>2</sub>热泵系统是目前备受关注的技术手段。2020年，大众在MEB平台的ID.4车型等率先批量应用了CO<sub>2</sub>热泵空调。图5-12所示为大众汽车ID4 CO<sub>2</sub>热泵系统示意图。

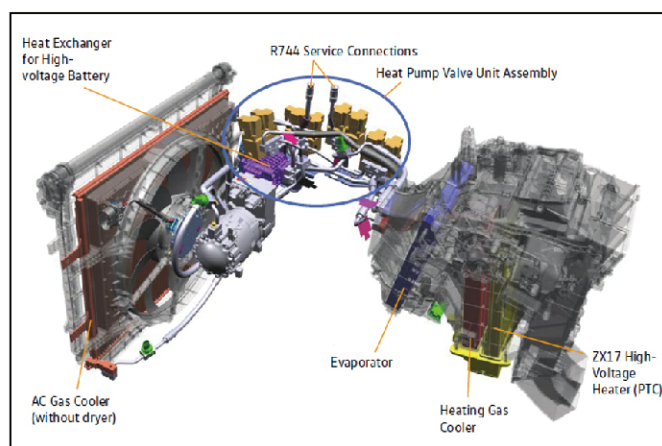


图5-12 大众汽车ID4 CO<sub>2</sub>热泵系统示意图

上海交通大学在2001与上汽集团合作开发了国内首台CO<sub>2</sub>汽车空调系统，并在桑塔纳汽车实现了样车开发与测试，之后与长安汽车、上汽大众、一汽等制造商开发了针对整车的CO<sub>2</sub>空调系统、以及CO<sub>2</sub>热泵空调系统。除了在乘用车领域外，CO<sub>2</sub>热泵空调系统在客车空调领域、列车空调领域也备受关注。上海交通大学与宇通客车成功开发了国内首台CO<sub>2</sub>热泵空调系统、与鼎汉技术开发了CO<sub>2</sub>列车空调热泵系统，并成功出口德国。

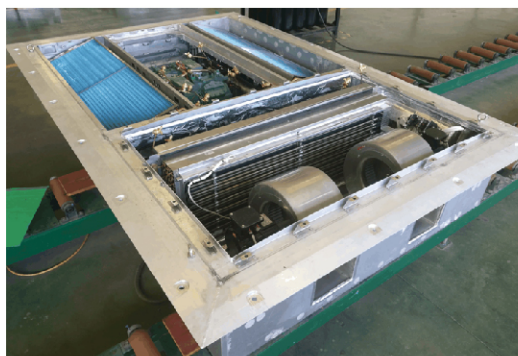
另外东风汽车集团、北汽新能源、蔚来汽车等在近几年投入开发CO<sub>2</sub>热泵空调系统，先后CO<sub>2</sub>台架搭建和测试、整车搭载和测试工作。部分产品如图5-13和5-14所示。



图5-13 搭载CO<sub>2</sub>空调系统的一汽奔腾新能源汽车



(a) 搭载CO<sub>2</sub>热泵系统的客车空调系统



(b) 搭载CO<sub>2</sub>热泵系统的列车空调系统

图5-14 搭载CO<sub>2</sub>热泵系统的车用空调系统

#### 5.4 CO<sub>2</sub> 热泵干燥

CO<sub>2</sub>的放热温度高，也可应用在热泵干燥技术上。德国Essen大学的E. L. Schmidt和K. Klocker等早在90年代末从理论上分析和讨论了CO<sub>2</sub>在热泵干燥方面应用的可行性<sup>[4]</sup>，并与R134a热泵干燥进行理论分析比较，同时对其应用于洗衣房干燥衣物进行了节能方面比较，得到了很好的应用效果，通过实验，COP达到5.5，比起传统的电干燥技术，其节能率达55%。

安徽正刚新能源科技有限公司研发生产的跨临界二氧化碳冷热联供F-F（风-风）系列产品应用于某食品企业，冷风出风温度12℃，热风出风85~100℃，综合节能率38%。

#### 参考文献

- [1] Michiyuki, SAIKAWA, Katsumi, et al. Development of CO<sub>2</sub> Heat Pump Water for Residential Use Development and Performance Evaluation of The Prototype System[J]. Transactions of the Japan Society of Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 2001, 18(3):225-232.
- [2] Hiroshi Mukaiyama, etc. Development of CO<sub>2</sub> compressor and its application system. In:7th International Energy Agency Heat Pump Conference. Beijing, China, May, 2022:137-1146.
- [3] 中国铁路总公司节约能源和环境保护发展规划（2018-2020年）.
- [4] Klocker K, Schmidt E L, Steimle F. Carbon dioxide as a working fluid in drying heat pump[J]. International Journal of Refrigeration. 2001, (24): 100-107.



## 6 CO<sub>2</sub>热泵的标准及法规

CO<sub>2</sub>热泵经过近几年各方的努力，技术标准体系在逐步制修订和完善中。随着CO<sub>2</sub>热泵产品越来越多，产品的标准制定工作也在逐步开展，对CO<sub>2</sub>热泵部件、产品、能效、安全性、可靠性和安装使用维修等提出了明确的要求，对于行业的整体发展起到了很好的规范和促进作用。具体见下表6-1。

表6-1 CO<sub>2</sub>热泵产品相关标准

名称	标准号	主要内容
以CO <sub>2</sub> 为制冷剂的热泵热水器技术要求和试验方法	GB/T 38734-2020	规定了以CO <sub>2</sub> 为制冷剂的热泵热水器的术语和定义、产品分类、技术要求及试验方法。适用于电动机驱动，使用CO <sub>2</sub> 作制冷剂，采用跨临界压缩循环，以空气作为热源，额定制热量不超过16kW，以提供热水为目的的家用和类似用途的热泵热水器。不适用于工业用热泵热水器。
商用或工业用及类似用途空气源二氧化碳热泵热水机	NB/T 10778-2021	规定了商用或工业用及类似用途的空气源二氧化碳热泵热水机的分类和编码、技术要求、试验方法、安全要求、检验规则、标志、包装、运输和贮存等。适用于采用电动机驱动，采用跨临界二氧化碳蒸气压缩式制冷循环，名义制热量16kW以上，以空气为热源，以提供热水为目的，并能在不低于-30℃的环境温度里制取热水的一次加热式热泵热水机。
二氧化碳空气源热泵通用技术规范	DB21T 2970-2018	规定了二氧化碳热泵机组的通用技术要求、试验方法、检验规则、标志、包装、运输和贮存等。适用于采用电动机驱动，采用二氧化碳蒸气压缩式制冷循环，空气为热源、提供热水和供热为目的的热泵机组。
商用或工业用及类似用途空气源二氧化碳热泵供暖机组	NB/T XXXX-202X	正在制定中

CO<sub>2</sub>热泵部件相关标准也在逐步制修订和完善中。其中有关压缩机的标准，已经出台了容积式CO<sub>2</sub>制冷压缩机、家用和类似用途CO<sub>2</sub>制冷剂热泵热水器用全封闭型电动机-压缩机、汽车空调用电动CO<sub>2</sub>制冷剂压缩机，相对比较完备。其它部件包括电磁膨胀阀、电磁阀和换热器等，都在逐步制修订和完善，具体如下表6-2。

表6-2 CO<sub>2</sub>热泵部件相关标准

名称	标准号	主要内容
采暖领域		
容积式CO <sub>2</sub> 制冷压缩机(组)	GB/T 29030-2012	规定了容积式CO <sub>2</sub> 制冷压缩机(组)的名义工况、性能允差、试验规定和试验方法,本标准还规定了输入功率、制冷系数、容积效率、等熵效率的计算等。所叙述的名义工况和试验方法,用于测量压缩机的制冷量、功率、容积效率、等熵效率和制冷系数。适用于容积式CO <sub>2</sub> 制冷压缩机及容积式CO <sub>2</sub> 制冷压缩机组。
家用和类似用途CO <sub>2</sub> 制冷剂热泵热水器用全封闭型电动机-压缩机	GB/T 26181-2010	规定了家用和类似用途CO <sub>2</sub> 热泵热水器用全封闭型电动机-压缩机的术语和定义、产品分类、要求、试验方法及标志、包装、运输、贮存的要求。适用于CO <sub>2</sub> 家用和类似用途热泵热水器使用的全封闭型电动机-压缩机。
汽车空调用电动CO <sub>2</sub> 制冷剂压缩机	JB/T XXXX-202X(制定中)	规定了汽车空调用电动CO <sub>2</sub> 制冷剂压缩机的技术要求、试验方法、检验规则、包装、运输和贮存。适用于以CO <sub>2</sub> 为制冷剂的汽车空调用电动压缩机。
CO <sub>2</sub> 制冷系统用电磁阀	JB/T XXXX-202X(制定中)	规定了CO <sub>2</sub> 系统用电磁阀的术语和定义、型号与基本参数、技术要求、试验方法、检验规则及标志、包装、运输和贮存。适用于制冷工质CO <sub>2</sub> ,公称通径不大于10mm的电磁阀。电磁阀主要用于热泵热水系统、冷冻冷藏系统,其它系统如汽车用电驱动空调系统等可参考使用。
CO <sub>2</sub> 制冷系统用电子膨胀阀	JB/T XXXX-202X(制定中)	规定了CO <sub>2</sub> 系统用电子膨胀阀的术语和定义、型号与基本参数、要求、试验方法、检验规则及标志、包装、运输和贮存。适用于制冷工质CO <sub>2</sub> ,额定电压不大于DC36V,阀门口径不大于8mm的制冷系统电子膨胀阀。电子膨胀阀主要用于热泵热水系统、冷冻冷藏系统,其它系统如汽车用电驱动空调系统等可参考使用。
CO <sub>2</sub> 制冷系统用换热器	JB/T 12326-2015	规定了CO <sub>2</sub> 制冷系统用换热器的术语和定义、型式和基本参数、要求和试验。适用于以CO <sub>2</sub> 为制冷剂的制冷系统用换热器。

根据淘汰HCFCs、HFCs的计划,中国作为制冷空调热泵生产大国,特别是在节能减排中,减少直接燃煤,改善大气环境和治理雾霾中,热泵供热是重要技术。我国的热泵工质今后可选品种为自然工质CO<sub>2</sub>、氨、碳氢等,CO<sub>2</sub>将会受到足够的重视。

## 7 其它自然工质和近自然工质应用简介

### 7.1 其它自然工质和近自然工质发展简介

除CO<sub>2</sub>外，其它自然工质也在制冷领域中扮演了重要的角色，此处主要介绍水(H<sub>2</sub>O)、氨(NH<sub>3</sub>)和R32的历史演变和发展过程。

#### 7.1.1 水(H<sub>2</sub>O)工质的历史和发展

自从1689年英国人托马斯·塞维利发明水蒸汽抽水，后来改进为作为矿井或工厂的活塞式蒸汽机循环工质，至今已经500多年。水是最自然的工质，水蒸汽作为制冷剂也有一百多年的历史。

#### 7.1.2 氨(NH<sub>3</sub>)工质的历史和发展

氨属于第一代制冷剂，有150年的历史，并从来没有被淘汰。不仅可以应用于压缩式制冷热泵与系统，还可以应用于吸收式和吸附式制冷与热泵系统。氨的标准沸点为-33.4℃，凝固温度为-77.7℃，工作压力适中，单位容积制冷量大，在传热性能、汽化潜热和导热方面均有优势，流动阻力小，价格也较为低廉，对大气臭氧层无破坏作用，目前仍被广泛采用。氨的主要缺点是有毒和可燃，属于B2L类物质，有强烈的刺激性臭味。

氨制冷系统中应设有空气分离器，以及时排除系统内的空气及其它不凝性气体，以免因系统中含有较多空气时，遇火引起爆炸。

氨与水可以以任意比例互溶，形成氨水溶液，在低温时水也不会从溶液中析出而造成冰堵的危险，所以氨系统中不必设置干燥器。但水分的存在会加剧对金属的腐蚀，所以氨中的含水量仍限制在≤0.2%的范围内。

氨在润滑油中的溶解度很小，油进入系统后，会在换热器的传热表面上形成油膜，影响传热效果，因此在氨制冷系统中往往设有油分离器。氨液的密度比润滑油小，运行中油会逐渐积存在贮液器、蒸发器等容器的底部，可以较方便地从容器底部定期放出。

氨对钢铁不起腐蚀作用，但对锌、铜及其铜合金（磷青铜除外）有腐蚀作用，因此在氨制冷系统中，不允许使用铜及其铜合金材料，只有连杆衬套、密封环等零件允许使用高锡磷青铜。目前氨用于蒸发温度在-65℃以上的大、中型单、双级制冷机中，也用在复叠式循环高温端，生产中高温热水。

#### 7.1.3 R32工质的历史和发展

R32无色、无味，是一种毒性和R22相当的、弱可燃性的制冷剂，但在R22的几种替代物R32、R290、R161、R1234YF中，R32的燃烧下限LFL(着火下限)最高为14.4%，最不易燃烧，相对安全。与R410A相比，R32的充注量仅为R410A的71%。R32系统工作压力较R410A高，但最大升高不超过2.6%，与R410A系统的承压要求相当，同时R32系统排气温度比R410A最大升高达

35.3℃。在理论循环性能方面，R32系统制冷量比R410A要高12.6%，功耗增加8.1%，综合节能4.3%，实验结果也表明采用了R32的制冷系统比R410A能效比略有增高。R32的ODP值为0，GWP值适中为675，与R22相比CO<sub>2</sub>减排比例可达77.6%。

虽然制冷剂的编号很多，但大多数都有较高的GWP，或是价格较高，或分解产物尚不确定，今后主要应用低GWP工质、自然工质或近自然工质。

## 7.2 其它自然工质的热泵系统

### 7.2.1 水蒸汽的压缩式热泵

水蒸汽的压缩式热泵早在20世纪中叶就广泛在轻工业、果汁浓缩、工业废水、有放射性废水和有毒废水中很早就采用了，机械蒸汽再压缩通过蒸汽压缩机做功，重新利用自身产生的二次蒸汽能量，进行蒸发冷凝。其能源主要来自电力，设备可小型化，运行平稳，自动化程度高。蒸汽机械再压缩技术由于可达到更低的运行温度，常用于成分复杂，含有挥发成分的高盐废水处理中。热泵蒸发技术广泛应用于各个行业的浓缩，结晶及干燥，热泵蒸发器采用热泵压缩的原理，在两端输出热媒和冷媒，同时对物料进行蒸发和对蒸汽进行冷凝。与此同时，高真空保证物料能在极低的温度下进行蒸发。这就解释了为什么热泵蒸发技术在小型蒸发应用上最为高效节能及环保。低温蒸发器常见单效处理，目前已应用于染料、石油化工、精细化工、制药等多个领域。将低温蒸发器应用于工业废水、污水处理中，可降低综合成本、提高资源化程度。



图 7-1 水蒸汽压缩热泵外观图

在蒸发浓缩工艺的场合，如处理高盐工业废水，采用蒸汽机械再压缩技术水处理技术在高盐工业废水浓缩处理方面有突出优势。其次，基于蒸汽机械再压缩技术热力过程相应的热力计算和所研制样机的空载试验过程中实际喷水量大小，设定样机处理高盐废水的最佳喷水量；有试验表明蒸汽机械再压缩技术系统样机处理硫酸锌废水时运行参数比较稳定，沸点温升约为2.5℃，喷水流



其中吸收剂循环为：在发生器中，氨水浓溶液被燃气或其它热源加热，氨气从溶液中不断蒸发出来，溶液浓度降低，成为高温稀溶液，换热降温后经节流阀进入吸收器，在吸收器中稀溶液溶解吸收来自过冷器的氨气并放出大量的热量成为氨水浓溶液。从吸收器出来的浓溶液经过水冷换热器降温（冷水进、热水出，热量被循环水取出，用于采暖、加热热水形成热泵功能）后，再经溶液泵加压后送入精馏器，浓溶液被加热后一部分直接进入发生器提馏段，一部分进入降膜式吸收器的高效换热器进行热交换。两部分浓溶液在换热后都回到发生器，进入下一个吸收剂的循环。

制冷剂循环：在发生器中，氨水浓溶液被加热，高温高压的氨气被不断蒸发出来。高温高压氨气经精馏器精馏后进入冷凝器，在冷凝器中经水冷换热器降温（热量被循环水取出，用于采暖、加热热水）后，冷凝为液氨进入过冷器，与来自翅片换热器的氨气进行热量交换成为过冷的液氨，经膨胀阀节流后进入翅片换热器，吸收空气中的热量转化为氨气，经过冷器变为过热的氨气，然后进入吸收器被稀溶液吸收，变为浓溶液被泵输入发生器，进入下一制冷剂的循环。

目前已有图7-4(a)所示天然气燃烧驱动的氨—水吸收式空气源热泵产品，单机供热量可达65kW，其可在-30℃环境温度下制热，随环境温度升高，其COP<sub>h</sub>有较大提高，天然气的平均一次能量利用率可达1.6~1.8。由于整个系统不用电动压缩机，各换热器不用铜材料，用钢制的换热器实现氨工质的压缩。此外，升压用溶液泵的功率很小，因此整体造价低于常规工质的电动空气源热泵。如图7-4(b)所示，这种氨—水吸收式空气源热泵已经批量生产并走向了应用。

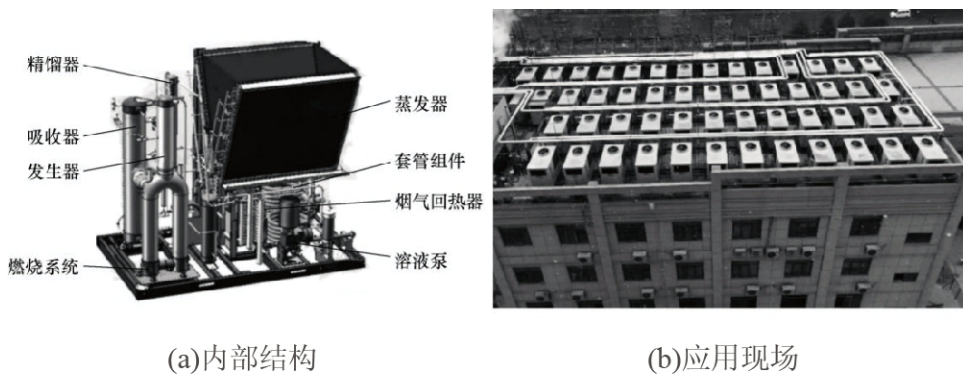


图7-4 天然气驱动氨—水吸收式空气源热泵的结构和应用现场

参考文献

[1] 庞卫科,罗宏,吴静,等. 机械蒸汽再压缩热泵MVR技术处理高盐工业废水的研究[C]//. 2020中国环境科学学会科学技术年会论文集(第二卷), 2020: 868-874.

## 8 自然工质热泵发展展望

在热泵需求高涨的趋势下，CO<sub>2</sub>热泵很有潜力。中国对热能有着巨大的需求，以建筑运行为例，据《供热行业2020年度发展状况报告》，截止2018年底，燃煤锅炉集中供热和燃气供暖的供暖总面积达到47%，而热泵的应用量不超过7%，CO<sub>2</sub>热泵的占比则更小。2019年建筑运行中化石能源消耗碳排放约22亿吨，建筑热需求所排放的二氧化碳占建筑运行碳排放量的38%左右。从建筑运行中的供暖、供热水，到工业生产中的热工艺过程和农业环境调控需要大量的热能，但目前这些热能大部分仍由传统的化石能源提供。这些需要热能的领域都是热泵可以推广的应用场合，热泵的使用可降低碳排放量，热泵使用的潜力非常大。全球对热泵的需求也非常旺盛，特别是欧盟已经把热泵列为可再生能源技术，以促进热泵的使用。根据国际能源署（IEA）的预测，到2030年，热泵市场的份额将达到22.1%。其中CO<sub>2</sub>等自然工质热泵以环保为基点更具竞争潜力。

从环保角度，CO<sub>2</sub>工质自身具有非常好的环保优势。根据《蒙特利尔议定书》基加利修订案工质，欧洲已经在2019年开始冻结并消减高GWP工质，出口欧盟的产品不能再使用如R134a、R410A等目前常用的工质。我国也将从2024年开始冻结高GWP工质，原有的HFC类的物质面临消减，而CO<sub>2</sub>具有环保特性，并且价格低廉，几乎是丙烯类的HFO类制冷剂价格的1/100，且这些HFOs类的人工制冷剂具有潜在环保问题和可燃性。CO<sub>2</sub>热泵系统具有非常独特的特点，CO<sub>2</sub>跨临界循环可获取高温水；在冷源温度低的情况下，效率反而很高；适合在低温地区运行，运行压力仍可保持正压，且出水温度满足要求；非常适合热能的梯级利用。因此CO<sub>2</sub>热泵是具有系统运行的优势。

CO<sub>2</sub>热泵的主要劣势是零部件价格，主要原因是系统各关键部件和一些零配件的供应链还不是完善，使得CO<sub>2</sub>热泵的零配件的价格高于普通氢氟烃类工质系统的零部件的10倍甚至20倍。因此供应链的完善是CO<sub>2</sub>热泵发展推广的重要因素。首先CO<sub>2</sub>热泵压缩机的制造业要跟上，目前的市场供应压缩机主要是活塞压缩机，缺少多样化的选择和广泛的供应，特别是适合车用空调热泵、房间空调热泵等CO<sub>2</sub>压缩机还没有量产。其次，一些用于气体冷却器的换热器由于有高压限制，能生产的厂家不多，而且一些新型的换热器如CO<sub>2</sub>微通道换热器以及CO<sub>2</sub>板壳式换热器价格昂贵。耐高压的阀件开发厂家不足，而且适用的容量范围有限，这些造成CO<sub>2</sub>热泵系统的阀件可选用的品牌少且贵。

但我国一些龙头企业已经有了CO<sub>2</sub>压缩机设计生产的能力，比如格力、海立等，风冷换热器和水冷换热器也具有加工能力。虽然CO<sub>2</sub>热泵系统的换热器需要大量钢材、铜材、铝材或合金新材料，由于我国有全面的金属冶炼和各种管材、板材制造业，换热器的材料有充足保证，具备各种换热器的制造加工设备，换热器的供应还是可以满足。现在一些下游产品的公司已经注意到产

业链对CO<sub>2</sub>产品的重要性，联合上游企业形成联盟，对整体产业链进行集体开发形成上游开发下游保证销售渠道，组成流畅的通道，非常有助于CO<sub>2</sub>产品的市场化。政府可以借鉴这种模式来推动产业的升级，以产品为目标，联合产品上下游的厂家形成合力，促进产品产业链的发展。随着更多国内厂家加入CO<sub>2</sub>关键部件的研发队伍，CO<sub>2</sub>热泵的成本会逐步降低，

CO<sub>2</sub>系统目前也已经从单一的水热水器逐渐向更多领域进行应用，CO<sub>2</sub>热泵作为其中的一个领域，也会在这个应用过程中吸取其他领域的经验，系统不断被优化，效率逐步提高，比如通过减小换热温差、优化运行压力等手段以达到整个系统的最优效率。还可以采用联合手段，提高系统能效，比如采用蓄冷、蓄热，充分利用可再生电能的波动性，开发大容量CO<sub>2</sub>热泵系统的冷热综合利用等。

至于水蒸汽压缩式热泵、氨工质压缩式热泵，早已在工厂蒸汽回收、冷库热量用于动物屠宰、滑冰场热量用于游泳池加热等领域应用，有广泛的应用前景。

欧盟为鼓励热泵的适用，已经出台了各项鼓励政策。我国相关领域的专家也开始制定了热泵利用可再生能源的计算方法国家标准，也应针对CO<sub>2</sub>等自然工质热泵制定相应的热泵开采可再生能源的计算方法标准，由于CO<sub>2</sub>等自然工质系统所具有的环保性能，其计算方法应该有别于其他工质的热泵，应有一套科学的CO<sub>2</sub>等自然工质热泵技术可再生能源贡献率计算方法，表明其可再生能源开采能力和环保能力，并将其纳入到对产品的评价中，鼓励企业生产的产品进行标示，并给予政策的支持。



### 9 结论

CO<sub>2</sub>是一种极具发展潜力的绿色环保工质，无论在研究上还是市场应用都已取得了很大进步。然而，CO<sub>2</sub>要全面应用还存在一些难题，因此，加大CO<sub>2</sub>制冷系统各部件的研究，加强国际交流与合作，深入开展CO<sub>2</sub>制冷剂跨临界循环系统研究，加快CO<sub>2</sub>制冷剂跨临界循环系统推广应用的步伐，具有重要的经济、环境和社会意义。

CO<sub>2</sub>等自然工质热泵是更具环保性的可再生能源的开采技术。在我国应把优先发展环保工质的热泵技术作为国策和地方经济发展的基础，在国家层面的指导下，把环保工质的热泵技术的基础研究、应用研究、关键零部件的生产研发、热泵工质的研发、热泵技术相关标准的制定都进行顶层设计。CO<sub>2</sub>等自然工质热泵的广泛应用对促进我国2060碳减排碳中和具有非常重要的意义。