

文章编号:0253-4339(2016)06-0097-07

doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2016.06.097

CO₂ 应用于我国工商制冷行业的适用性研究

史敏 贾磊 张秀平 吴俊峰 李灵 钟瑜

(合肥通用机械研究院 压缩机技术国家重点实验室 合肥 230031)

摘要 CO₂ 是我国工商制冷行业 HCFCs 淘汰管理计划中明确的替代品之一,本文从技术标准、性能测试、替代成本、市场前景等方面对天然制冷剂 CO₂ 应用于工商制冷行业的适用性进行分析,结果表明:国内外相关标准认为 CO₂ 理论上可以适用于所有类型的制冷系统应用,但在充注量方面需规避泄漏窒息的风险;CO₂ 热泵热水器在超低温工况和 GB/T 21362—2008 名义工况下的 COP 比 R410A 热泵热水器分别高 7.9% 和 10.7%,CO₂ 冷风机蒸发器比传统产品在性能上具有一定的优势;CO₂ 热泵系统替代 R22 系统的成本会增加 1~2 倍,CO₂ 冷冻冷藏系统替代 R22 系统的成本会增加 20%~30%;CO₂ 在工商制冷行业的热泵热水机和冷冻冷藏设备领域具有较好的应用潜力,但还需在制冷循环效率提升、高效部件开发、高压运行安全性保障等方面开展深入的工作。

关键词 天然制冷剂;热泵热水器;冷冻冷藏设备;性能系数;CO₂;适用性

中图分类号:TB64;TQ051.5

文献标识码:A

Applicability Research on CO₂ Application in Chinese Industrial and Commercial Refrigeration Industry

Shi Min Jia Lei Zhang Xiuping Wu Junfeng Li Jiong Zhong Yu

(State Key Laboratory for Compressor Technology, Hefei General Machinery Research Institute, Hefei, 230031, China)

Abstract CO₂ is a HCFCs substitution in HPMP of industrial and commercial refrigeration (ICR) sector in China. In this paper, the applicability of natural refrigerant CO₂ application in ICR is analyzed by standards, testing, replacement cost and market prospect. The conclusion indicates that: 1) based on the leaking and suffocation risk charging limit, CO₂ can be used in all refrigeration systems theoretically in relevant standards; 2) under ultra-low temperature condition and nominal condition in GB/T 21362—2008, the COP of CO₂ heat pump water heater is 7.9% and 10.7% higher than R410A unit, and the performance of CO₂ air-cooler evaporator is better than traditional unit; 3) the replacement cost from R22 heat pump and refrigeration system to CO₂ system will increase 100%~200% and 20%~30%, respectively; 4) CO₂ has well application potential in heat pump water heater and refrigeration equipment area of ICR, but the refrigeration cycle efficiency promotion, high efficiency components development and operation security protection under high pressure need further research.

Keywords natural refrigerant; heat pump water heater; refrigeration equipment; coefficient of performance; CO₂; applicability

天然制冷剂 CO₂ 在环保性、热物性和流动传热特性等方面具有一些独特的优势^[1]。国外商业建筑中,主要应用于大、中型超市制冷系统以及空气源热泵热水器,一般有三种基本应用方式^[2-3]:1) 作为相变载冷剂用于主制冷循环的二次回路输配制冷量;2) 作为制冷工质,应用于亚临界制冷循环系统;3) 作为制冷工质,应用于跨临界循环系统,如:CO₂ 热泵热水器等。

针对不同的应用需求和超市有中、低温两段温区制冷的需要,可在以上三种基本方式的基础上,组合

各种不同的混合系统。近年来,国外超市 CO₂ 制冷系统的应用数量不断增长,全球各大连锁超市集团,特别是本部在欧洲的超市集团,纷纷设立 CO₂ 制冷示范店,如英国最大的超市连锁商 Tesco,瑞士第二大的零售集团 Coop,加拿大领先的零售集团 Loblaw 和全球最大的连锁超市 Walmart 等^[4]。

目前在食品加工和冷冻冷藏工业中,随着对食品冷冻温度、快速冻结需求的不断提升,要求制冷工质的温度进一步降低。当蒸发温度很低时,传统低温制冷工质 NH₃ 不适合再作为制冷工质,而 CO₂ 仍能维

持较为合理的饱和压力。因此,CO₂ 在蒸发温度低于 -40 ℃ 的制冷系统中得到广泛重视^[5]。

另一方面,跨临界 CO₂ 热泵及其部件的开发研究也是目前国际制冷领域的热点之一。日本对 CO₂ 热泵热水器的研究开发起步较早,目前的相关技术较为成熟,自 2002 年家用 CO₂ 热泵热水器产品投放市场后,销售量稳步上升。目前,日本的 CO₂ 热泵热水器累计销售量已达到几百万台^[6]。

虽然 CO₂ 具有良好的热力学性质和较小的环境影响,被认为是有潜力的长期替代方案,但 CO₂ 系统存在运行压力较高、制冷循环能效较低等局限,制约其在行业的应用范围,且与国外相比,我国 CO₂ 制冷系统方面的研究仍处于初级阶段。为此,在环保部的

组织下,合肥通用机械研究院联合国内知名高校、企业和协会,共同开展了工商制冷行业应用 CO₂ 的适用性研究工作,通过对技术标准、实际运行特性、替代成本、市场前景等方面的深入分析,研究 CO₂ 工质在工商制冷行业的适用性问题,以促进自然工质在我国得到进一步推广,并为下一阶段 HCFCs 淘汰技术的选择提供技术支撑。

1 相关标准对工商制冷行业应用 CO₂ 的规定

目前,国内外相关技术标准对 CO₂ 的安全性分类如表 1 所示。

表 1 相关标准中 CO₂ 的安全分类

Tab. 1 CO₂ safety classification in relevant standards

国家/地区	ISO-IEC	欧洲	中国	美国	
标准	ISO 817:2014	EN378—1:2008	GB 9237—2001	ASHRAE 34—2013	
安全分类	A1	A1	第 1 组	A1	
安全性	无毒不可燃	无毒不可燃	无毒不可燃	无毒不可燃	
可燃性			实验条件下无火焰传播		
毒性	OEL $\geq 400 \times 10^{-6}$ (慢性毒性)、对于 GB/T 7778—2008, 满足致命浓度 $\geq 100 \times 10^{-6}$ (急性毒性)				

从表中可以看出,ISO 817:2014^[7]、EN378—1:2008^[8]、GB 9237—2001^[9]、GB /T 7778—2008^[10] 和 ASHRAE 34—2013^[11] 标准均将 CO₂ 划分为无毒不可燃工质。我国正在对制冷工质的分类方法标准进行修订,拟结合中国国情和标准体系,采用与 ISO 817:2014 相同的分类方法,以实现国际接轨,减少行业多次替代带来资源和能源的浪费。

表 2 汇总了相关标准对于 CO₂ 限制使用以及允许充注量的要求。

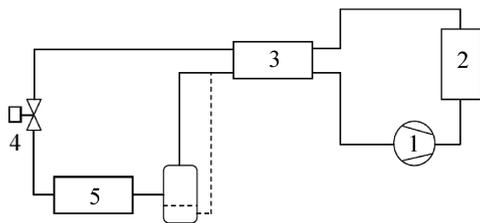
由表 2 可知,从安全角度分析,CO₂ 理论上可以适用于所有类型的制冷系统应用。但在应用时,需要考虑工质泄漏带来的窒息风险,在特定的机房和应用场所内,应该根据实际情况设置必要的浓度探测仪、排风以及报警等安全措施。

2 性能实验

前期对 CO₂ 压缩机、CO₂ 冷冻冷藏设备和 CO₂ 热泵热水机开展了实验研究,结果表明:CO₂ 工质在上述设备中具有良好的表现^[12-15]。为了探索 CO₂ 在更多种类产品中的性能,本文针对小型 CO₂ 热泵热水器、CO₂ 冷风机蒸发器进行了系列性能实验。

2.1 小型 CO₂ 热泵热水器性能实验

系统原理图见如图 1 所示,其中压缩机采用自主研发的 CO₂ 压缩机,气体冷却器采用缠绕型涡流管式气冷器,节流电子膨胀阀调节。



1 压缩机;2 气体冷却器;3 回热器;4 节流阀;5 蒸发器

图 1 小型 CO₂ 热泵热水器原理图

Fig. 1 Principle of small CO₂ heat pump water heater

按照自定义的超低温测试工况和 GB/T 21362—2008^[16] 的名义工况,CO₂ 热泵热水器与传统 R410A 热泵热水器的实验数据对比如表 3 所示。

通过上述数据对比可知,在名义工况下,CO₂ 热泵热水器比 R410A 热泵热水器的性能系数(COP)提高 7.9%;在超低温工况下,CO₂ 热泵热水器比 R410A 热泵热水器的 COP 高出 10.7%。

表 2 相关标准对于 CO₂ 的限制使用及充注量规定
Tab. 2 CO₂ application limit and charge requirement in relevant standards

序号	标准号	限制使用主要要求
1	GB 9237—2001	<p>1) CO₂ 应用在直接系统时,除了工业区域外,单位空间的充注量应不大于 0.1 kg/m³,工业区域需设置足够的应急出口,否则按照其它应用要求。</p> <p>2) CO₂ 应用在间接系统时,在工业区域时,无限制。在其它区域时,如果制冷系统安装在机房内时(机房要满足通风要求),无限制;否则单位空间的充注量应不大于 0.1 kg/m³。</p>
2	ISO 5149:2014	<p>1) 当制冷系统全部置于机房时,工质充注量无限制,机房设置浓度报警等。</p> <p>2) 当制冷系统的压缩机以及高压侧置于机房时,在通用区域,如医院、法院、公寓等,单位空间的充注量应不大于 0.072 kg/m³,其他区域无限制。</p> <p>3) 当制冷系统全部置于人员活动区域时,如果没有设置通风、浓度报警等安全措施,在通用区域,如医院、法院、公寓等,单位空间的充注量应不大于 0.072 kg/m³;在监管区域(如商场、办公室等)和授权区域(如制造工厂等),如果安装在建筑地下层或者建筑地上层没有安全出口的区域,房间的单位体积充注量不大于 0.072 kg/m³,其他情况无限制。</p> <p>4) 第 3 条为无安全措施的情况,当采取通风、浓度报警等安全措施时,可以放宽工质的充注量。在建筑地下层,如果单位空间的充注量大于 0.072 kg/m³ 且小于等于 0.074 kg/m³,则应该采取通风或者安全报警两个措施之一;如果单位空间的充注量大于 0.074 kg/m³ 且小于等于 0.18 kg/m³,则应该采取通风和安全报警两个措施,单位空间的充注量不能超过 0.18 kg/m³。在建筑地上层时,如果单位空间的充注量小于等于 0.074 kg/m³ 时,无需额外措施,当单位空间的充注量大于 0.074 kg/m³ 且小于等于 0.18 kg/m³,则应该采取通风或者安全报警两个措施之一;如果单位空间的充注量大于 0.18 kg/m³,则应该采取通风和安全报警两个措施。</p>
3	ASHRAE 15—2013	<p>1) 对于高概率的直接系统,除了工业区域和冷藏室以及机构性区域外,单位空间的充注量应不大于 0.072 kg/m³;机构性区域,如医院等限制人员活动的场所,单位空间的充注量应不大于 0.036 kg/m³;工业区域和冷藏室设置浓度探测器等安全措施时,无限制。</p> <p>2) 对于低概率的间接系统,工质的充注量无限制,机房需要浓度探测、通风等安全措施。</p>
4	EN 378:2008	<p>1) 当制冷系统全部置于机房时,工质充注量无限制,机房设置浓度报警等。</p> <p>2) 当制冷系统的压缩机以及高压侧置于机房时,在通用区域,如医院、法院、公寓等,单位空间的充注量应不大于 0.1 kg/m³,其他区域无限制。</p> <p>3) 当制冷系统全部置于人员活动区域时,在通用区域,如医院、法院、公寓等,单位空间的充注量应不大于 0.1 kg/m³;其他区域,如果安装于建筑地下层或者建筑地上层无紧急出口的区域,单位空间的充注量应不大于 0.1 kg/m³,其余场合无限制。</p>

表 3 CO₂ 热泵热水器与 R410A 热泵热水器的性能对比
Tab. 3 Performance comparison between CO₂ and R410A heat pump water heater

参数	CO ₂ 热泵热水器		R410A 热泵热水器	
	名义工况	超低温工况	名义工况	超低温工况
进口空气干球温度/ °C	20	-15	20	-15
进口空气湿球温度/ °C	15	-	15	-
进水温度/ °C	14.98	9.02	15.09	8.98
出水温度/ °C	54.94	55.08	55.01	54.96
制热量/ kW	4.62	3.62	4.08	2.29
消耗功率/ kW	0.96	1.69	0.92	1.19
COP	4.79	2.14	4.44	1.93

此外,项目组分别测试样机在过载工况(空气侧干球温度 43 °C,湿球温度 26 °C,进水温度 29 °C,出水温度 65 °C)、低温工况 1(空气侧干球温度 -7 °C,湿球温度 -8 °C,进水温度 9 °C,出水温度 55 °C)和

低温工况 2(空气侧干球温度 -7 °C,湿球温度 -8 °C,进水温度 9 °C,出水温度 65 °C)等工况下样机的制热量和 COP。

表 4 过载和低温工况下 CO₂ 热泵热水器的性能

Tab. 4 Performance of CO₂ heat pump water heater under overload and low temperature conditions

热源侧空气进口干/湿球温度/°C	制热量/kW	消耗功率/kW	COP	进水温度/°C	出水温度/°C
43/26	4.61	1.04	4.43	29.01	65.09
-7/-8	2.95	1.25	2.36	8.96	55.19
	3.19	1.40	2.28	8.89	64.88

同时,为了验证 CO₂ 热泵热水器用于风盘供暖,地板采暖等供暖设备的可行性,测试了该产品在进水温度为 30 °C 时,不同工况下产品的性能。

当进水温度为 30 °C,出水温度分别为 50 °C、55 °C、65 °C 的工况时,CO₂ 热泵热水器的实验数据见表 5。

表 5 不同出水温度时 CO₂ 热泵热水器的性能

Tab. 5 Performance of CO₂ heat pump water heater under different outlet temperature conditions

热源侧空气进口干/湿球温度/°C	制热量/kW	消耗功率/kW	COP	进水温度/°C	出水温度/°C
20/15	4.44	1.25	3.54	29.97	50.08
	4.55	1.31	3.47	30.07	55.35
	4.52	1.39	3.26	30.04	64.93

当进水温度为 30 °C,出水温度为 50 °C,空气侧干/湿球温度为 7/6 °C、-7/-8 °C 和干球温度为

-15 °C 的工况时,CO₂ 热泵热水器的实验数据见表 6。

表 6 不同干湿球温度时 CO₂ 热泵热水器的性能

Tab. 6 Performance of CO₂ heat pump water heater under different dry-bulb and wet-bulb temperature conditions

热源侧空气进口干/湿球温度/°C	制热量/kW	消耗功率/kW	COP	进水温度/°C	出水温度/°C
7/6	4.21	1.59	2.65	30.08	50.03
-7/-8	2.99	1.48	2.02	30.05	50.02
-15/-	2.55	1.65	1.55	29.97	49.98

通过以上实验数据可以看出,CO₂ 工质应用于热泵热水器上具有很好的能效优势。

2.2 CO₂ 蒸发器性能实验

在工商业冷冻冷藏领域,蒸发器是 CO₂ 冷风机直接产生制冷效果的部件,其性能优劣直接影响整个系统能耗的高低。针对 CO₂ 冷风机蒸发器开展性能测试,主要考察风速和过热度对 CO₂ 蒸发器性能的影响,实验工况见表 7。

理想情况下,零过热度能最大限度发挥蒸发器的作用,但考虑过热度为零时蒸发器出口工质可能会带液,导致压缩机发生液击事故,所以一般情况

下蒸发器有一定的过热度,技术标准中一般规定翅片蒸发器过热度为 5 °C 左右。在过热度分别为 5.5 °C 和 4.2 °C 的两工况下,对 CO₂ 低温蒸发器进行了实验研究,结果如图 2 所示。由图 2 可知,随着风速增大,换热量均显著增加,而过热度小的换热量增大速率更快,过热度由 5.5 °C 降到 4.2 °C 时,换热量增大约 10%。

根据换热量测试结果,由空气侧进出口温度及蒸发温度计算对数平均温差,结合已知的换热面积,可计算得出蒸发器的总传热系数平均值为 20 W/(m²·K),该数值与使用传统 R22 和 R404A 工质

的冷风机相当^[17], 高于冷风机制造商一般要求的 15 W/(m²·K)。由于 CO₂ 工质具有良好的环保和

安全特性, 因此, CO₂ 在冷风机蒸发器领域也具有较好的应用前景。

表 7 CO₂ 冷风机蒸发器性能实验工况
Tab.7 Performance test condition for CO₂ air-cooler evaporator

工况	空气侧			制冷剂侧		
	干球温度/ °C	相对湿度/ %	风速/ (m/s)	阀前温度/ °C	蒸发温度/ °C	过热度/ °C
1			1.0	-3.2	-29	
2			1.5	-3.2	-29	
3	-23	—	2.0	-3.2	-29	5.5
4			2.5	-3.2	-29	
5			3.0	-3.2	-29	
6			1.0	-3.2	-29	
7			1.5	-3.2	-29	
8	-23	—	2.0	-3.2	-29	4.2
9			2.5	-3.2	-29	
10			3.0	-3.2	-29	

注: 空气进口相对湿度应保证换热器基本无结霜或无凝结水。

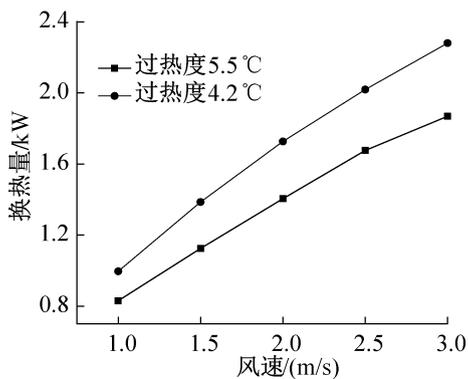


图 2 过热度和风速对 CO₂ 蒸发器换热量的影响

Fig.2 CO₂ evaporator heat exchange capacity versus superheat degree and air speed

3 替代成本分析

选用 CO₂ 作为替代工质时, 替代成本是制造企业必须考虑的重要因素。本文从生产线、产品制造、物流仓储、运行维护等角度分析目前 R22 热泵系统和冷冻冷藏系统转换为 CO₂ 系统的成本变化, 为制造企业的升级改造提供必要的参考。

3.1 生产线改造成本

1) 适应性设计与制造

由于 CO₂ 工质的固有特性, 针对传统 R22 系统的部件承压特性、最佳充注量、换热器的适应性、零部

件的优化选型、工质与润滑油的相容性以及机组安全运行等进行适应性分析, 针对原生产线进行重新设计和样机制造。

2) 生产线改造

(1) 换热器加工

由于 CO₂ 系统运行压力高, 且根据 CO₂ 的换热特性进行换热器的全新设计, 因此, 需要对换热器管径、换热器模具、胀管、试压等工艺设备等进行改造, 进一步增大了加工的难度。另外, 换热器尺寸的变化, 需要更换换热器钣金加工模具, 包括新增换热端板冲孔模具、翻边模具和折弯模具等。

(2) 产品装配

CO₂ 系统气密性要求提高, 现有真空泵不能满足要求, 需要更换真空泵设备; 现有卤素检漏仪无法满足使用要求, 需新购专用检漏仪; 同时, 需要更换工质充注设备和回收设备。

3) 生产线试运行

生产线设备改造完毕后, 需进行调试和试运行, 验证整条生产线是否具有连续稳定生产的能力, 故需要在改造后的产品线上试生产一定数量的新产品。

4) 其他

对性能实验中心进行改造, 包括新增高压传感器、工质流量计等。根据 CO₂ 产品的特点, 对生产、安全、管理、销售、安装和维修人员开展培训。

3.2 产品制造与仓储物流成本

将 R22 工质替换为 CO₂ 后,产品的主要成本变化如下:

1) 压缩机:需要专用 CO₂ 压缩机,其结构强度增加,导致成本增加较多。

2) 电气元件:基本无变化。

3) 蒸发器和冷凝器:管材强度和管壁厚度均有增加,导致成本增加较多。

4) 管路、阀门等附件:节流阀、控制阀等阀件的成本增加较多,管路成本略有增加,故成本增加较多。

5) 工质:由于 CO₂ 为天然工质,价格低廉,因此,工质成本降低。

6) 由于 CO₂ 对环境友好,无毒,不可燃,因此,物流仓储成本无变化。

3.3 运行维护成本

CO₂ 系统在安装过程中,由于压力较高,对系统管路的承压能力提出新要求。同时 CO₂ 对系统中水份含量的要求更高,国际上推荐 CO₂ 的纯度为 99.9% 以上干燥度,水含量小于 0.1%。这在实际运行中很有挑战性,若系统安装运转过程中抽空(除水)不彻底,或者润滑油中含水,CO₂ 与水反应产生碳酸,均会对系统可靠性带来威胁。

根据调研的 CO₂ 系统实际运行情况来看,CO₂ 系统与传统 R22 系统的运行成本相当,且均要求定期维护,由于 CO₂ 系统的运行压力较高,部件的通用性不强,对产品的维护要求更加严格,需要配备专用设备和人员。因此,产品的维护成本略有增加。

3.4 综合分析

从上述分析过程并结合日本、欧洲等地区的 CO₂ 热泵产品、CO₂ 冷冻冷藏系统生产和销售情况来看,R22 热泵系统替换为 CO₂ 热泵系统的成本会增加 1~2 倍(制热量越大,成本增加比例越小),R22 冷冻冷藏系统替换为 CO₂ 冷冻冷藏系统的成本会增加 20%~30%,其主要原因在于产品制造成本和生产线改造成本增加。

4 市场前景分析

4.1 CO₂ 热泵热水机

2013 年 9 月,国务院印发了《大气污染防治行动计划》,该计划设定了大气污染防治行动计划的目标,同时明确提出了鼓励热泵的应用,“新建建筑要严格执行强制性节能标准,推广使用太阳能热水系统、地源热泵、空气源热泵、光伏建筑一体化和热电冷三联供等技术和装备”。

近年来,南方采暖日益受到消费者追捧,市场上已出现很多空气源热泵热水机(器)通过地暖或者小温差末端的形式采暖的实际应用案例。另外,京津冀及周边地区 5 年内将着力推行削减“燃煤”的行动。这将形成一个特殊的供暖刚性需求市场,大多数燃煤供暖改造将转向电供暖。京津冀及周边地区的气候条件为空气源热泵的应用创造了良好的条件。

根据中国制冷空调工业协会的统计,2014 年热泵热水机的销售产值约为 24 亿元,且市场保持稳步增长的态势。由于具有良好的环保特性和较高的能效,CO₂ 热泵热水机有望逐步得到推广应用,在做好安全保障的基础上,该类产品具有较好的市场前景。

4.2 CO₂ 冷冻冷藏设备

《物流业发展中长期规划(2014—2020 年)》等文件提出重点建设农产品、医药、冷链物流园区,完善冷链物流网络,为冷链行业持续健康发展提供制度保障。另外,《全国药品流通行业发展规划纲要》、《药品冷链物流运作规范》等文件的陆续出台,加强了医药冷链的管理,将带动医药用冷冻冷藏设备的发展。

食品、药品工业生产过程中冷却、产品的保鲜、冷藏运输等环节均离不开冷冻冷藏设备。因此,未来随着冷链物流的不断发展壮大,冷冻冷藏设备将面临爆发式增长。由于 CO₂ 冷冻冷藏设备良好的性能和优异的环境友好性,必然也将迎来一个快速发展的时期。

5 结论

本文从技术标准、产品性能测试、产品制造与运维成本以及国家的节能减排政策等方面分析探讨了 CO₂ 在我国工商制冷行业的应用潜力。

1) 从技术标准规定来说,CO₂ 理论上可以适用于所有类型的制冷系统应用,只是应用时要考虑工质泄漏带来的窒息风险,在特定的机房和应用场所内,应该根据实际情况设置必要的浓度探测仪、排风以及报警等安全措施。

2) 从产品性能测试结果来看,CO₂ 热泵热水机具有较高的出水温度和 COP,可以完全替代传统热泵热水器,但要注意该类系统在除霜方式上与传统热泵系统的不同;CO₂ 低温蒸发器也具有较好的性能,但其换热量和压降受迎面风速、质量流量、过热度等参数的影响较大。

3) 在 CO₂ 制冷(热泵)技术应用方面,国内虽然已经逐渐开始掌握成套技术,水平与国外相比差距不大,技术水平趋于成熟,但推广之路明显滞后。目前 CO₂ 制冷(热泵)系统造价相对较高,令很多企业望而生畏。就安全、综合运行的经济性而言,CO₂ 制冷

(热泵)系统更具优势;单从工质方面来说,CO₂ 比氟利昂成本更低,更易获得,未来氟利昂的成本必将不断升高,CO₂ 将成为良好的中长期替代物。

4)随着国家对节能环保工作重视程度的不断增加,CO₂ 热泵热水机和冷冻冷藏设备在供暖、冷链物流等领域具有良好发展前景,将对工商制冷设备制造形成一定的吸引力。

综上所述:CO₂ 在工商制冷行业的热泵热水机和冷冻冷藏设备领域具有较好的应用潜力,但还需攻克循环效率提升、高效部件开发、高压运行安全性保障等技术瓶颈,以推动高效、低成本 CO₂ 制冷(热泵)系统在工商制冷行业中的可持续发展。

参考文献

[1] 史敏,贾磊,钟瑜,等. 二氧化碳制冷技术[J]. 制冷与空调(北京), 2007, 6(6): 1-5. (SHI Min, JIA Lei, ZHONG Yu, et al. CO₂ Refrigeration Technology[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2007, 6(6):1-5.)

[2] 葛长伟,姜韶明,于志强. NH₃/CO₂ 制冷系统的研究[J]. 制冷技术, 2014, 34(3): 22-28. (GE Changwei, JIANG Shaoming, YU Zhiqiang. Research on NH₃/CO₂ refrigeration system[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2014, 34(3):22-28.)

[3] 宋昱龙,唐学平,王守国,等. 空气源跨临界 CO₂ 热泵最优排气压力的理论和实验[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(9):81-87. (SONG Yulong, TANG Xueping, WANG Shouguo, et al. Theoretical and experimental investigation for optimal discharge pressure of air-source trans-critical CO₂ heat pump[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(9):81-87.)

[4] 何亚峰,贾磊,孔晓鸣,等. CO₂ 工质应用新进展[J]. 制冷与空调(北京), 2013, 13(5):40-45. (HE Yafeng, JIA Lei, KONG Xiaoming, et al. New application development of CO₂ refrigerant[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2013, 13(5):40-45.)

[5] 葛运江,王芳,朱永宏,等. NH₃/CO₂ 制冷系统应用分析[J]. 制冷技术, 2014, 34(3):34-38. (GE Yunjiang, WANG Fang, ZHU Yonghong, et al. Application analysis of NH₃/CO₂ refrigeration system[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2014, 34(3):34-38.)

[6] 张剑飞,秦妍. 日本 CO₂ 热泵热水机市场状况及技术进展[J]. 制冷与空调(北京), 2014, 14(4):6-10. (ZHANG Jianfei, QIN Yan. CO₂ heat pump water heater market situation and technology progress in Japan[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2014, 14(4):6-10.)

[7] ISO 817:2014. Refrigerants-designation and safety classification[S]. Switzerland: International Organization for Standardization,2014.

[8] EN378—1:2008. Refrigerating systems and heat pumps-safety and environmental requirements[S]. Brussels:European Committee for Standardization, 2008.

[9] 全国冷冻空调设备标准化技术委员会. GB 92372001 制冷和供热用机械制冷系统安全要求[S]. 北京:中国标准出版社,2001.

[10] 全国冷冻空调设备标准化技术委员会. GB/T 7778—2008 制冷剂编号方法和安全性分类[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.

[11] ASHRAE 34—2013. Designation and safety classification of refrigerants[S]. Atlanta: ASHRAE, 2013.

[12] 周俊海,贾磊,刘期聂,等. CO₂ 制冷压缩机性能检测装置与试验研究[J]. 制冷技术, 2014, 34(2):34-37. (ZHOU Junhai, JIA Lei, LIU Qinie, et al. Performance test equipment and experimental investigation of CO₂ refrigeration compressors[J]. Chinese Journal of Refrigeration Technology, 2014, 34(2): 34-37.)

[13] 陈红兵,钟瑜,戴琳,等. R22 与 R744 空气源热泵热水机组的对比[J]. 流体机械, 2010, 38(11):59-63. (CHEN Hongbing, ZHONG Yu, DAI Lin, et al. Comparison of R22 and R744 air-source heat pump water heater[J]. Fluid Machinery, 2010, 38(11):59-63.)

[14] 于志强,刘昌丰. NH₃/CO₂ 复叠制冷系统的控制方案及分析[J]. 制冷与空调(北京), 2012, 12(3):128-131. (YU Zhiqiang, LIU Changfeng. Controlsolutions and analysis for NH₃/CO₂ cascade refrigeration system[J]. Refrigeration and Air-conditioning, 2012, 12(3):128-131.)

[15] 王炳明,于志强,姜韶明,等. NH₃/CO₂ 复叠制冷系统实验研究[J]. 制冷学报, 2009, 30(3):21-24. (WANG Bingming, YU Zhiqiang, JIANG Shaoming, et al. Experimental study on NH₃/CO₂ cascade refrigeration system[J]. Journal of Refrigeration, 2009, 30(3): 21-24.)

[16] 全国冷冻空调设备标准化技术委员会. GB/T 21362—2008 商业或工业用及类似用途的热泵热水机[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.

[17] 刘亚哲,臧润清. 冷冻冷藏装置冷风机性能实验研究[J]. 制冷学报, 2014, 35(5):61-66. (LIU Yazhe, ZANG Runqing. Experimental study on performance of the air cooler in refrigeration device[J]. Journal of Refrigeration, 2014, 35(5):61-66.)

通信作者简介

史敏,女,教授级高级工程师,合肥通用机械研究院总质量师,(0551)65335506,E-mail: shimin@hgmri.com。研究方向:制冷技术和制冷空调检测技术等。

About the corresponding author

Shi Min, female, professor of senior engineer, general quality director of Hefei General Machinery Research Institute, +86 551-65335506, E-mail: shimin@hgmri.com. Research fields: refrigeration technology and testing technology of R & AC, et al.