

R449A/CO₂ 复叠式制冷系统性能模拟研究

申江 边煜竣

(天津商业大学,天津市制冷技术重点实验室,天津 300134)

摘要: 根据 2014 年欧盟 517 号决议,由于其高达 3943 的 GWP 值,现阶段广泛使用的 R404A 将在大部分制冷领域被禁用。因此,寻找合适的低 GWP 替代冷媒变得愈加迫切。本文将 GWP 仅为 1282 的无毒制冷剂 R449A (XP40) 在以 CO₂ 为低温级冷媒的复叠系统中的性能表现进行了模拟计算并将结果与 R404A 的值进行了分析对比。结果表明:R449A 在复叠系统中的性能表现要优于 R404A,可作为其低 GWP 替代冷媒推广应用。

关键词: 替代冷媒;复叠系统;性能模拟

DOI: 10.16711/j.1001-7100.2017.06.011

R449A/CO₂ cascade refrigeration system performance simulation

Shen Jiang, Bian Yujun

(Refrigeration Key Laboratory of Tianjin, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: R404A with wide applications and high GWP value of 3943, will be banned to apply in most refrigeration industry according to EU Regulation No. 517 in 2014. Therefore, looking for the right alternative refrigerant with low GWP becomes more urgent. This article simulated the performance of R449A (XP40) in the cascade system with CO₂ as the low temperature refrigerant, and compared the results with R404A. The results show that R449A in cascade system performance is superior to R404A and can be as the alternative low GWP refrigerant.

Keywords: Alternative refrigerant, Cascade system, Performance simulation

1 前言

随着社会对全球气候问题关注越来越多,制冷空调领域高 GWP 的淘汰及寻找环境友好的替代冷媒的进程也愈加急迫。为了进一步减少含氟温室气体的排放,有效遏制全球气候变暖给人类带来的不利影响,欧盟议会于 2014 年 5 月 20 日公布了最新修订的《欧盟(EU) No. 517/2014 法规》^[1]。该法规被视作目前世界上有关限制氢氟烃使用的最具前瞻性法规。

法规不仅对削减 HFCs 的时间表进行了缩减,还针对 HFCs 类制冷剂设置了诸多的使用限制,包括在新产品和设备上的适用禁令、制冷剂副产品销毁义务等多项措施。如现存系统中使用的高 GWP 值 HFCs,将受到限制。2020 年开始, R404A、R507 等 GWP 值大于 2500 的制冷剂,在 40 吨 CO₂ 当量以上新的制冷设备中(军用设备及

-50℃ 冷冻设备除外)将被禁止使用,仅保养和维修过程中回收的这部分制冷剂可使用到 2030 年 1 月。另外,生产商和进口商如没有采用最佳的可行技术,将生产和制造过程中产生的 R23 副产品进行销毁和回收利用,则其生产的 HFCs 或使用 HFCs 的产品将被拒绝进入欧洲市场^[2]。

受限于法规的有关规定,目前中低温系统中广泛应用的冷媒 R404A,由于其高达 3943 的 GWP 值而将被逐步限制直至淘汰(见表 1),因此寻找其合适的替代冷媒成为影响替代进程能否顺利进行的关键因素。

目前,已经发布了三种改进的 HFCs 混合物作为 R404A 的替代物,即 R407A、R407F、R22A。尽管这三种制冷剂的 GWP 仅有 R404A 的一半左右,有相似或是更高的效率,但其 GWP 值依然很高,这样由于一些发达国家的 GWP 税,会导致购置成本比较昂贵^[4]。

收稿日期:2017-01-05

作者简介:申江(1960-),男,教授,博士,研究方向:制冷系统优化及节能关键技术研究。

通讯作者:边煜竣(1990-),男,硕士研究生,研究方向:低温与制冷。邮箱:424381844@qq.com。

HFOs 是 GWP 值很低(其值在 1 左右),ODP 为 0 安全、不可燃(ASHRAE A1)或微燃的液体制冷剂,可用作制冷空调领域 HFCs 的替代物^[5]。尽管如此,大多数 HFOs 制冷剂如 R1234yf, R1234ze 作为 HFCs 直接替代物使用时仍有诸多限制^[6]。

表 1 欧盟 F-Gas 法规对制冷剂 GWP 值的相关限制^[3]
Tab.1 Restrictions on GWP value of refrigerants in EU F-gas regulations^[3]

产品和设备	截止使用年限	GWP 值上限
家用冷冻/冷藏设备	2015	150
全封闭型商用冷冻/冷藏设备	2020	2500
全封闭型商用冷冻/冷藏设备	2022	150
固定式制冷设备(除 -50℃ 以下设备)	2020	2500
冷量大于 40kW 的商用集中式制冷系统(一次循环用 GWP > 1500 制冷剂的复叠系统除外)	2022	150

目前,全球各制冷剂生产企业都在开发 HFOs/HFCs 混合制冷剂来替代 R404A。Chemours 公司研发了 XP40 作为 R404A 的替代制冷剂。XP40(R449A)是一款 HFOs 制冷剂,具有零臭氧破坏潜值,能够实现性能的最优平衡,适用于新设备安装及现有系统改造,能够改善能效和环境特性,GWP 值为 1282,相比 R404A 降幅达 65%^[7]。

本文将对 R449A/CO₂ 复叠制冷循环系统进行热力学分析,并与 R404A/CO₂ 复叠系统进行性能对比,着重关注制冷量、吸气压力、排气压力、排气温度、压缩比、体积流量和系统 COP 的性能表现。

2 制冷剂物性分析

R449A 是由 R32(24.3%)、R125(24.7%)、R134a(25.7%)和 R1234yf(25.3%)混合组成的非共沸混合物。因为与 R404A 相似的物性对现有设备有很好的适用性,所以 R449A 被选作 R404A 的替代物之一,其物性见表 2。

由于 R449A 的临界温度更高,所以压缩蒸汽所需的能量降低^[8]。R449A 的标准沸点与 R404A 相当,但 R449A 的温度滑移较高,因此不

能当作近共沸混合物。考虑到该特性,针对 R449A 这类非共沸混合物,对系统进行重新设计将会提高效率,又 R449A 的蒸气密度较低,蒸汽和液体的密度差异较大,所以蒸汽管需要重新设计;而其液体和气体的导热性能相差不大,对换热器设计影响较小^[9]。

表 2 制冷剂物性对比(T=273K)^[1]
Tab.2 Comparison of refrigerant properties(T=273K)^[1]

	R404A	R449A	相对变化率
ODP/GWP	0/3943	0/1282	-
ASHRAE 安全等级	A1	A1	-
温度滑移/K	0.75	~4	433%
临界温度/K	345.2	354.63	2.7%
临界压力/kPa	3728.85	4454.3	19.45%
标准沸点/K	227.41	227	-
液体密度/(kg/m ³)	1150.59	1197.4	4.1%
气体密度/(kg/m ³)	30.32	22.337	26.3%

综上所述,R449A 满足固定式制冷设备制冷剂的 GWP 限制,也能够用于复叠系统。

3 系统数学模型及热力分析

R449A/CO₂ 复叠循环系统是由 R449A 作高温级制冷剂,CO₂ 作低温级制冷剂,经冷凝蒸发换热器进行热交换而组成的两级复叠制冷系统。该复叠系统理论循环的压焓图如图 1 所示。

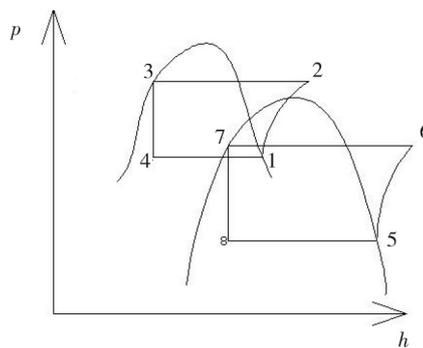


图 1 R449A/CO₂ 复叠系统理论循环 p-h 图
Fig.1 p-h diagram of R449A/CO₂ cascade refrigeration system

考虑商用冷冻冷藏的实际情况,复叠系统工况参数设定如下:系统制冷量 $Q_0 = 7\text{kW}$;低温级 CO₂ 蒸发温度 $t_0 = -35^\circ\text{C}$;中间温度(低温级冷凝温度) $t_m = -5^\circ\text{C}$;冷凝蒸发器换热温差 $\Delta t = 5^\circ\text{C}$;

高温级冷凝温度 $t_k = 45^\circ\text{C}$ 。

根据已建立的数学模型,在理性循环下,借助 MATLAB 软件对复叠系统进行热力计算和性能分析。得到复叠系统 COP、高低温级质量流量比 ε 同蒸发温度 t_0 、冷凝温度 t_k 、中间温度 t_m 及换热温差 Δt 之间的变化关系。

低温级 CO₂ 质量流量为:

$$q_{ml} = Q_0 / (h_5 - h_8) \tag{1}$$

低温级 CO₂ 压缩机耗功为:

$$W_1 = (h_2 - h_1) \times q_{ml} / \eta_l \tag{2}$$

低温级冷凝热负荷(高温级负荷)为:

$$Q_h = (h_2 - h_1) \times q_{ml} \tag{3}$$

高温级质量流量为:

$$q_{mh} = Q_h / (h_1 - h_4) \tag{4}$$

高温级压缩机耗功为:

$$W_2 = (h_2 - h_1) \times q_{mh} / \eta_h \tag{5}$$

复叠系统总耗功为:

$$W = W_1 + W_2 \tag{6}$$

复叠系统 COP 为:

$$COP = Q_0 / W \tag{7}$$

高、低温质量流量比为:

$$e = q_{mh} / q_{ml} \tag{8}$$

其中 Q_0 为复叠系统制冷量, η_l 、 η_h 分别为低温级和高温级压缩机等熵效率,理想循环取 $\eta_l = \eta_h = 1$, h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 分别为高温级循环状态点焓值, h_5 、 h_6 、 h_7 、 h_8 分别为低温级循环状态点焓值。另外,高温级制冷剂排气压力为 p_k , 排气温度为 t_2 。

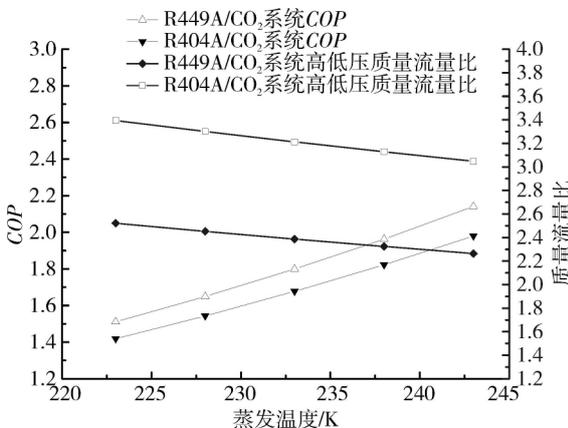


图 2 复叠系统 COP、质量流量比随蒸发温度的变化
Fig. 2 COP、mass flow ratio vs the evaporation temperature

4 结果与分析

图 2 给出了复叠系统 COP 和质量流量比随

系统蒸发温度 t_0 的变化情况。如图所示,在设定工况范围内,高温级冷凝温度及换热温差一定时,复叠系统 COP 随蒸发温度升高而增大; R449A/CO₂ 复叠系统的 COP 均高于 R404A/CO₂ 复叠系统的值。高低温级质量流量比随蒸发温度升高而降低, R449A/CO₂ 复叠系统的质量流量比均小于 R404A/CO₂ 复叠系统的值。

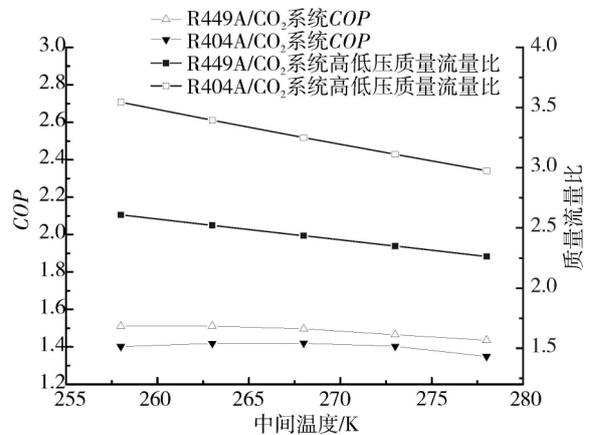


图 3 复叠系统 COP、质量流量比随中间温度的变化
Fig. 3 COP、mass flow ratio vs the intermediate temperature

图 3 给出了复叠系统 COP 和质量流量比随系统中间温度 t_m 的变化情况。如图所示,在设定工况范围内,高温级冷凝温度及换热温差一定时,复叠系统 COP 随中间温度升高先增大后减小,存在最优中间温度使复叠系统 COP 最大,设定工况下, R449A/CO₂ 系统对应最佳中间温度为 -10°C , 对应 COP 为 1.5113, R404A/CO₂ 系统对应最佳中间温度为 -5°C , 对应 COP 为 1.4197; R449A/CO₂ 复叠系统的 COP 均高于 R404A/CO₂ 复叠系统的值。高低温级质量流量比随中间温度升高而降低, R449A/CO₂ 复叠系统的质量流量比均小于 R404A/CO₂ 复叠系统的值。

图 4 给出了复叠系统 COP 和质量流量比随系统低温级过热度 dt 的变化情况。如图所示,在设定工况范围内,高温级冷凝温度及换热温差一定时,复叠系统 COP 随低温级过热度升高而降低,但降低幅度较小,最大时仅相差 2%; R449A/CO₂ 复叠系统的 COP 均高于 R404A/CO₂ 复叠系统的值。高低温级质量流量比随低温级过热度升高而降低, R449A/CO₂ 复叠系统的质量流量比均小于 R404A/CO₂ 复叠系统的值。

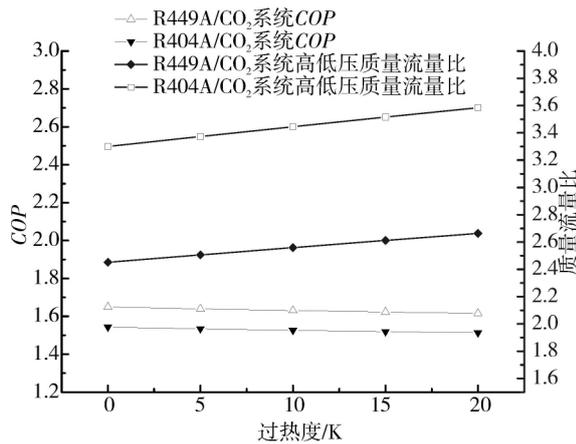


图 4 复叠系统 COP、质量流量比随低温级过热度的变化

Fig. 4 COP, mass flow ratio vs the degree of superheat

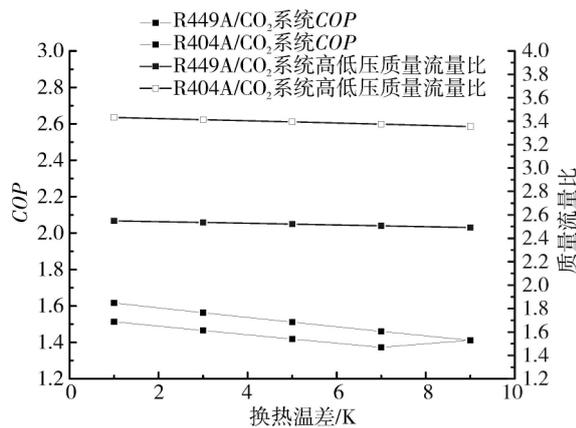


图 5 复叠系统 COP、质量流量比随冷凝蒸发器换热温差的变化

Fig. 5 COP, mass flow ratio vs the heat transfer temperature difference of condenser evaporator

图 5 给出了复叠系统 COP 和质量流量比随冷凝蒸发器换热温差 Δt 的变化情况。如图所示，在设定工况范围内，高温级冷凝温度及蒸发温度一定时，复叠系统 COP 随冷凝蒸发器换热温差 Δt 升高而减小；在换热温差为 1℃、3℃、5℃、7℃ 时，R449A/CO₂ 复叠系统的 COP 均高于 R404A/CO₂ 复叠系统的值，在换热温差为 9℃ 时，两系统 COP 值相等。高低温级质量流量比随冷凝蒸发器换热温差升高而略微降低，R449A/CO₂ 复叠系统的质量流量比均小于 R404A/CO₂ 复叠系统的值，两者相差 35% 左右。

5 结论

(1) 模拟工况范围内，R449A/CO₂ 复叠系统的 COP 均高于 R404A/CO₂ 复叠系统的值，相比

R404A/CO₂ 复叠系统 COP 提高 7% 左右。R449A/CO₂ 复叠系统的质量流量比均低于 R404A/CO₂ 复叠系统的值，相比 R404A/CO₂ 复叠系统质量流量比降低 26% 左右。

(2) 模拟工况范围内，高温级冷凝温度及换热温差一定时，复叠系统 COP 随中间温度升高先增大后减小，存在最优中间温度使复叠系统 COP 最大。设定工况下，R449A/CO₂ 系统对应最佳中间温度为 -10℃，对应 COP 为 1.5113，R404A/CO₂ 系统对应最佳中间温度为 -5℃，对应 COP 为 1.4197。

参考文献

- [1] Regulation (EU) No 517/2014 of the European parliament and of the council of 16 April 2014 [R/OL]. <http://publications.europa.eu/official/index.cn.htm>.
- [2] 李嵩. F-Gas 新法规: 不可小觑的影响力[J]. 制冷与空调, 2014, 14(5): 12-14.
- [3] Lemmon E W, Huber M L, McLinden M O. REFPROP, NIST Standard Reference Database 23, v. 9.1 [S]. National Institute of Standards, Gaithersburg, MD, USA 2014.
- [4] Maratou A. EU policy update F-Gas regulation, HFC taxes & fiscal incentives for natural refrigerants [C]// ATMOsphere Asia 2014 - Technology & Innovation. Tokio, Japan, 3-5 February 2015.
- [5] Yang Z, Wu X. Retrofits and options for the alternatives to HCFC-22 [J]. Energy, 2013, 59: 1-21.
- [6] Mota Babiloni A, Navarro Esbrí J, Barragán, et al. Drop in energy performance evaluation of R1234yf and R1234ze(E) in a vapor compression system as R134a replacements [J]. Appl Therm Eng, 2014, 71: 259-265.
- [7] https://www.chemours.com/Refrigerants/zh_CN/index.html.
- [8] Motta S Y F, Domanski P A. Impact of elevated ambient temperature on capacity and energy input to a vapor compression system: literature review [J]. Letter Report for ARTI 21-CR; Research Project, 2000, 605(9): 50010-50015.
- [9] Adrián Mota-Babiloni, Joaquín Navarro-Esbrí, Bernardo Peris et al. Experimental evaluation of R448A as R404A lower GWP alternative in refrigeration systems [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 105: 756-762.