

[环保·安全]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.06.018

双级压缩制冷系统替代制冷剂性能对比研究

朱伟明, 李征涛, 洪谢文, 周 翾, 张 婷, 陈永杰

(上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093)

摘 要:为研究可替代制冷剂,提高循环性能参数,利用 MATLAB 结合 NIST 对承载 R410A, R32, R404A 和 R507A 共 4 种制冷剂的一次节流中间不完全冷却的两级压缩制冷循环系统进行模拟,课题组对比分析高压级压缩机排气温度、系统能效比(coefficient of performance, COP)、单位制冷量和制冷剂流量对蒸发温度从 $-44\text{ }^{\circ}\text{C}$ 上升到 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时的动态响应,研究 4 种制冷剂在两级压缩中的具体性能差异,以期对制冷剂的选择做出相应的指导。结果表明:4 种制冷剂中 R32 的高压级压缩机排气温度偏高,但其单位制冷能力最大,制冷剂流量最小;R507A 对蒸发温度的动态响应最为强烈;制冷剂 R507A 和 R404A 各项性能指标接近;R32 的 C_{COP} 最高,比 R410A 高约 3.9%,比 R404A 和 R507A 分别高约 14.03% 和 12.40%。通过对数据研究对比发现,4 种制冷剂中 R32 的各项性能更为出色,作为一种新型的环保制冷剂,有很大的发展潜力。

关 键 词:制冷系统;双级压缩;制冷剂;蒸发温度;能效比;MATLAB

中图分类号:TB61+5

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2018)06-0085-05

Comparative Study on Performance of Alternative Refrigerant in Two-Stage Compression Refrigeration System

ZHU Weiming, LI Zhengtao, HONG Xiewen, ZHOU Xuan, ZHANG Ting, CHEN Yongjie

(School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In this paper, a two-stage compression refrigeration cycle system with incomplete cooling in the middle of one throttle carrying four refrigerants R410A, R32, R404A and R507A were simulated by MATLAB combined with NIST. When the evaporation temperature went up from $-44\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, the dynamic response of high-pressure compressor exhaust temperature, the COP (coefficient of performance) of system, unit refrigerating capacity and refrigerant flow rate were contrasted and analyzed. The specific performance differences of four refrigerants in two-stage compression were studied in order to provide guidance for the selection of refrigerants. The results show that the high-pressure compressor exhaust temperature of R32 is high in the four refrigerants, but it has the largest refrigeration capacity and lowest refrigerant flow. R507A has the strongest dynamic response to evaporation temperature; the performance indexes of refrigerant R507A and R404A are close; the COP of R32 is the highest of four refrigerants, which is about 3.9% higher than R410A and about 14.03% and 12.40% higher than R404A and R507A. Through the comparison of data, it is found that R32 has better performance among the four refrigerants. As a new environmental protection, R32 has great development potential.

Keywords: refrigeration system; two-stage compression; refrigerant; evaporation temperature; COP (coefficient of performance); MATLAB

随着人口的激增,人类对加热和冷却的能源消耗能力也快速提升。在商业冷冻方面,能源消耗的比重也逐渐增加。目前的商业冷冻行业中,为制取低温环

境,常常使用双级压缩制冷循环,以此避免单级压缩制冷循环产生的压比过大,导致排气温度过高的问题^[1]。如何减少能量消耗、提高能效比成为亟待解决

收稿日期:2018-06-17;修回日期:2018-08-27

第一作者简介:朱伟明(1994),男,江苏南通人,硕士研究生,主要研究方向为制冷测试和制冷系统模拟。E-mail:18818226782@163.com

的技术难题。目前解决问题主要有3种技术手段:①优化循环系统,寻找最佳循环效率;②优化设计循环各部件,减少各种热损失和机械损失;③研究可替代制冷剂,提高循环性能参数。课题组针对第3种技术手段,利用MATLAB和NIST REFPROP8.0软件作为辅助研究工具,在相同冷凝温度,不同蒸发温度下对R410A^[2],R32,R404A和R507A共4种制冷剂在双级压缩制冷系统中的循环性能进行研究分析。

1 制冷剂的物性分析

表1所示是双级压缩循环中4种制冷剂基本物理性质。由表1可知,R410A是二元准共沸混合制冷剂^[3],标准沸点 -51.6°C ,消耗臭氧潜能值(ozone depletion potential, ODP)为0,全球变暖潜能值(global

warming potential, GWP)为1 730,适用范围广泛,稳定、无毒,安全等级A1;R32是单工质制冷剂,标准沸点 -51.6°C , O_{ODP} 值为0, G_{GWP} 值为550,具有突出的环保特性,安全等级A2;R404A是三元近共沸混合制冷剂^[4],标准沸点 -46.1°C , O_{ODP} 值为0, G_{GWP} 值为3 850,适用于各种中低温制冷装置,不可燃,无毒,安全等级A1;R507A是二元共沸混合制冷剂^[5],标准沸点 -46.75°C , O_{ODP} 值为0, G_{GWP} 为3 985,具有优异的传热特性,适用于中低温商用制冷,安全等级A1。从表1易观察出,4种制冷剂拥有相近的标准沸点以及 O_{ODP} 为0的优异环保性能,在双级压缩系统中都具有良好的发展前景。

表1 4种制冷剂的基本物理性质
Table 1 Basic physical of four refrigerants

制冷剂	摩尔质量/($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	标准沸点/ $^{\circ}\text{C}$	临界温度/ $^{\circ}\text{C}$	临界压力/MPa	O_{ODP}	G_{GWP}	安全等级
R410A	72.58	-51.60	72.50	4.950	0	1 730	A1
R32	52.02	-51.60	75.40	5.808	0	550	A2
R404A	97.60	-46.10	72.40	3.690	0	3 850	A1
R507A	98.90	-46.75	70.62	3.800	0	3 985	A1

2 双级压缩系统理论模型

文中双级压缩系统采用一次节流中间不完全冷却的循环模式,系统如图1所示,主要由半封闭压缩机、冷凝器、蒸发器、节流阀及中间冷却器组成^[6]。高温高压制冷剂经过冷凝器冷却冷凝至状态5点,一部分制冷剂经过中间冷却器过冷至状态8点,经节流阀2节流至蒸发器进口状态9点,在蒸发器中实现吸热制冷效果后达到低压级压缩机的吸气状态1点,再经低压级压缩机压缩后达到过热状态2点,与来自中间冷却器的另一部分状态7点饱和制冷剂混合至状态3点进入高压级压缩机,再回到冷凝器,完成一个循环。

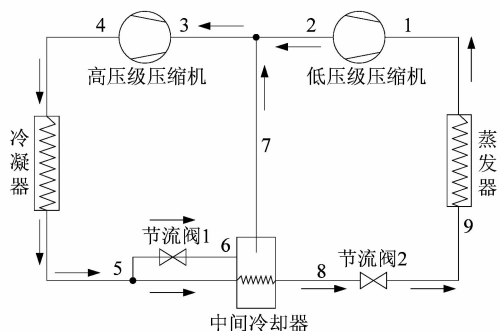


图1 一次节流中间不完全冷却双级压缩循环系统
Figure 1 Two-stage compression circulation system with incomplete cooling in middle of primary throttle

3 双级压缩系统热力学计算

双级压缩循环系统中,系统的总制冷量为低压级的蒸发吸热量,整个系统的功耗为低压级压缩机功耗和高压级压缩机功耗总和。双级压缩循环系统的压焓图如图2所示,根据质量守恒和能量守恒定律建立其热力学模型。

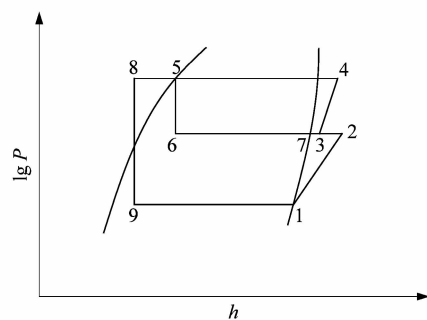


图2 一次节流中间不完全冷却双级压缩系统运行压焓图

Figure 2 Pressure-enthalpy diagram of two-stage compression system with incomplete cooling in middle of primary throttle

低压级单位制冷量

$$q_0 = h_1 - h_0 \quad (1)$$

式中: q_0 为低压级单位制冷量,kW; h_1 和 h_0 分别为蒸发器的进口焓值和出口焓值,kJ/kg。

低压级制冷剂质量流量

$$G_L = Q_0 / q_0 \quad (2)$$

式中: G_L 为低压级制冷剂质量流量, kg/s ; Q_0 为系统总制冷量, kW 。

根据能量守恒定律高压级的质量流量

$$G_H = G_L (h_7 - h_8) / (h_7 - h_5) \quad (3)$$

式中: G_H 为高压级制冷剂质量流量, kg/s ; h_7 为从中间冷却器出来的中间温度饱和蒸气的焓值, kJ/kg ; h_8 为经中间冷却器过冷的制冷剂液体的焓值, kJ/kg ; h_5 为经冷凝器出来的冷凝温度饱和制冷剂液体的焓值, kJ/kg 。

根据能量守恒和质量守恒定律高压级压缩机的进口状态:

$$G_H h_3 = (G_H - G_L) h_7 + G_L h_2 \quad (4)$$

式中: h_2 为从低压级压缩机出来的制冷剂蒸气的焓值, kJ/kg ; h_3 为从中间冷却器出来的中间温度饱和蒸气和从低压级压缩机出来的制冷蒸气混合后制冷蒸气的焓值, kJ/kg 。

中间压力

$$P_m = \sqrt{P_k P_0} \quad (5)$$

式中: P_m 为中间压力, MPa ; P_k , P_0 分别为冷凝压力和蒸发压力, MPa 。

低压级压缩机的指示效率

$$\eta_L = \frac{T_0}{T_m} + b t_0 \quad (6)$$

式中: η_L 为低压级压缩机指示效率; T_0 为蒸发温度, K ; T_m 为中间温度, K ; t_0 为蒸发温度, $^\circ\text{C}$; b 为修正系数。

高压级压缩机的指示效率

$$\eta_H = \frac{T_m}{T_k} + b t_m \quad (7)$$

式中: η_H 为高压级压缩机指示效率; T_m 为中间温度, K ; T_k 为冷凝温度, K ; t_m 为中间温度, $^\circ\text{C}$ 。

低压级压缩机的功耗

$$W_L = G_L (h_2 - h_1) / \eta_L \quad (8)$$

式中: W_L 为低压级压缩机的功耗, kW 。

高压级压缩机的功耗

$$W_H = G_H (h_4 - h_3) / \eta_H \quad (9)$$

式中: W_H 为高压级压缩机的功耗, kW 。

制冷性能系数

$$C_{\text{COP}} = Q_0 / (W_L + W_H) \quad (10)$$

双级压缩机循环系统的运行工况, 冷凝温度 40°C 保持稳定, 设定中间冷却器的传热温差为 5°C , 吸气过

热度为 10°C , 系统制冷负荷 5 kW , 蒸发温度区间取 $-44 \sim -30^\circ\text{C}$, 等间隔取值^[7]。

4 结果分析与比较

课题组通过 MATLAB 调用 NIST 的物性数据, 对一次节流中间不完全冷却的双级压缩系统^[8]进行理论循环计算, 对 R410A, R32, R404A 和 R507A^[9] 4 种制冷剂的循环性能进行理论分析和比较。图 3 所示为 4 种制冷剂单位制冷量随蒸发温度变化的情况。4 种制冷剂的单位制冷量都随蒸发温度的升高而呈现增长趋势。当蒸发温度从 -44°C 上升到 -30°C 时, R410A, R32, R404A 和 R507A 这 4 种制冷剂的单位制冷量增幅分别为 4.32% , 2.51% , 8.48% 和 8.74% , R404A 和 R507A 的增长幅度相近, 约为 R410A 的 2 倍, R32 的 3 倍。相同蒸发温度下, R32 的单位制冷量在 4 种制冷剂中最高, 比 R410A 高约 37% , 比 R404A 和 R507A 分别高约 60% 和 65% 。从图 3 中可以看出, R404A 比 R507A 的单位制冷量略高一点, 两者拥有相近的单位制冷能力。

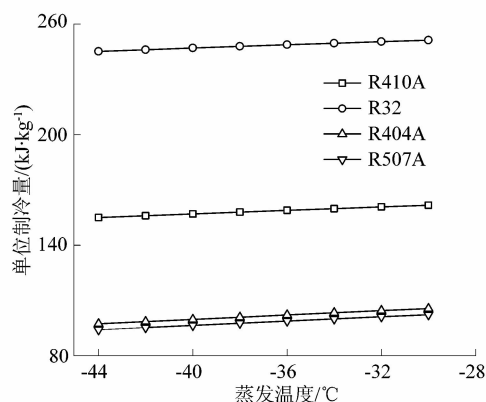


图 3 4 种制冷剂单位制冷量随蒸发温度变化的关系

Figure 3 Relationship between unit refrigerant volume of four refrigerants and evaporation temperature

图 4 所示为 4 种制冷剂总流量 (高压级压缩机的流量) 随蒸发温度变化的情况。4 种制冷剂的总流量随蒸发温度的升高呈现下降趋势。当蒸发温度从 -44°C 上升到 -30°C 时, R410A, R32, R404A 和 R507A 这 4 种制冷剂的总流量减幅分别为 4.16% , 2.70% , 8.38% 和 8.70% , R404A 和 R507A 减幅相近且最大, 为 R410A 的 2 倍, R32 的 3 倍。相同的蒸发温度下, R507A 的制冷剂总流量最大, 比 R404A, R410A 和 R32 分别高约 3.71% , 40.42% 和 63.10% 。

制冷系统循环中, 压缩机排气温度是制约达成更低蒸发温度的影响因素^[10], 也是衡量和检测制冷循环

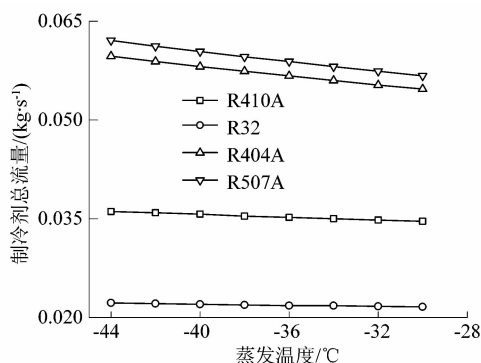


图4 4种制冷剂总流量随蒸发温度变化的关系

Figure 4 Relationship between total flow rate of four refrigerants and evaporation temperature

系统的重要指标。图5所示为4种制冷剂高压级压缩机排气温度随蒸发温度变化情况^[11]。随着蒸发温度从-44℃上升至-30℃时,高压级压缩机排气温度都呈现下降趋势,R32的下降幅度最大达到17.05%,R410A下降幅度为12.66%,R404A与R507A下降幅度相对来讲比较小分别为6.21%和5.77%。从整体的数据来分析,R32的高压级压缩机的排气温度偏高,R404A和R507A的排气温度相对小的多,只有R32的50%左右。而R410A对蒸发温度也有较好的动态响应。

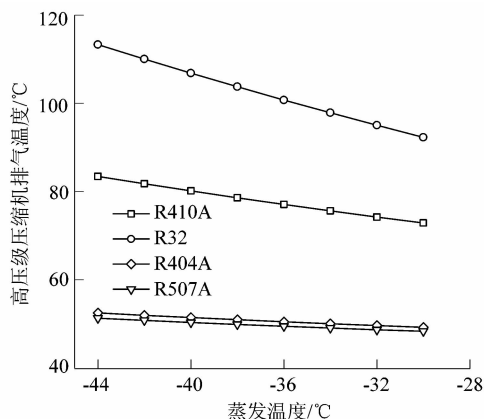
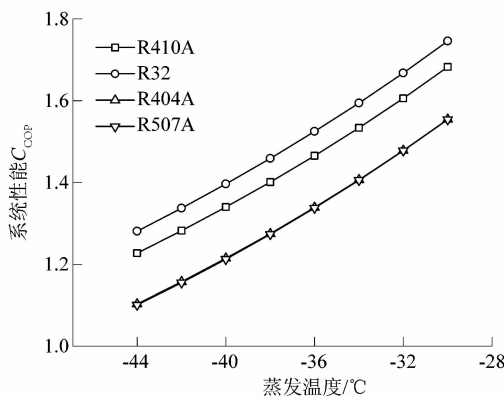


图5 4种制冷剂高压级压缩机排气温度随蒸发温度变化的关系

Figure 5 Relationship between exhaust temperature in high pressure compressor of four refrigerants and evaporation temperature

图6所示为制冷剂能效比随蒸发温度变化情况^[12]。能效比是评判制冷循环系统性能的重要指标,能效比对蒸发温度的动态响应是研究制冷循环系统性能的重要途径^[13]。各制冷剂的循环能效比随蒸发温度的升高而增加,R410A,R32,R404A和R507A的增

幅分别为37.08%,36.30%,40.91%和41.18%,4种制冷剂能效比随蒸发温度的动态响应都比较强烈,且极为相似。R32的能效比在4种制冷剂中最高,比R410A高约3.9%,比R404A和R507A分别高约14.03%和12.40%。

图6 4种制冷剂能效比 C_{OP} 随蒸发温度变化的关系Figure 6 Relationship between C_{OP} of four refrigerants and evaporation temperature

5 结论

笔者通过对4种制冷剂R410A,R32,R404A和R507A在双级压缩系统中性能指标对蒸发温度的动态响应研究分析,得出以下结论:

1) 文中制冷循环系统中4种制冷剂的能效比都随蒸发温度增大而增大,R32的能效比最大,R507A的能效比随蒸发温度的动态响应最为强烈。

2) 制冷剂R32的单位制冷性能最为出色,相同制冷量的情况下,R32流量最小,相对收益最高,但压缩机出口排气温度相对其他3种制冷剂偏高。

3) 文中循环系统中制冷剂R404A,R507A的单位制冷能力、排气温度和能效比都十分接近,随蒸发温度的动态响应也十分同步,对制冷剂的可替代性研究具有重要的意义。

4) 制冷剂R32各项性能指标突出,其作为一种新型的环保制冷剂,具有较为优越的性能。

参考文献:

- [1] 刘思照,陈鹏. 两级压缩空气源热泵系统的优化分析[C]//上海市制冷学会2013年学术年会论文集. 上海:东华大学,2013:327.
- [2] 张华,徐世林. R410A 双级压缩热泵空调器的特性分析[J]. 制冷学报,2008,29(6):21-24.
- [3] 张颖,何茂刚,刘洋. R410A 和 R407C 饱和液相运动黏度测量[J]. 工程热物理学报,2011,32(6):925.
- [4] 赵志刚,周彬彬,张超甫,等. R404A 制冷剂在商用制冷设备中的应用分析[J]. 制冷,2006,25(4):76-80.

(下转第95页)