

基于工质性质的理想制冷循环及其性能极值的探讨

许树学, 马国远, 房磊

(北京工业大学 环境与能源工程学院, 北京 100124)

摘 要: 建立了基于工质的理想制冷循环概念,提出了性能系数的计算方法,其特征是:换热过程等温,节流过程等熵,压缩过程由无穷多个等熵压缩过程组成,无限接近饱和压缩,并回收节流过程功和压缩过程工质过热产生的有用功. 基于几种常用的氟利昂工质和自然工质,分析循环过程功的比例分配及冷量损失状况,对性能系数进行比较研究.

关键词: 工质; 理想循环; 制冷 COP; 极限

中图分类号: TM 925. 1; TU 831. 7

文献标志码: A

文章编号: 0254 - 0037(2015)07 - 1093 - 05

doi: 10. 11936/bjutxb2014090030

Ideal Refrigeration Cycle Based on Refrigerant and Its Performance Limitation

XU Shu-xue, MA Guo-yuan, FANG Lei

(College of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

Abstract: The notion of an ideal refrigeration cycle based on refrigerant was established and its calculation method was developed in this paper. The ideal refrigeration cycle based on refrigerant was characterized as follows; the heat exchange process is isothermal, and the throttling process is isentropic, so the vapor compression process is composed of many isentropic processes and it is much closer to saturated process. The useful work of liquid throttling process and vapor compression process were also recovered. Based on some kinds of freon and nature working fluids, the power distribution condition, the loss of cooling capacity and cooling COP were researched in detail.

Key words: working fluid; ideal cycle; cooling COP; limitation performance

众所周知,逆卡诺制冷循环是工作于高温热源 T_H 和低温热源 T_L 之间性能最优的循环,亦即这种循环具有最大的制冷系数,与采用何种工质无关. 这是经典热力学的一个重要结论,但要使循环可逆,过程必须无限缓慢,否则会产生不可逆损失. 实际的制冷机在某种特定工质的循环中连续不断地吸收和排出热量,循环总是在有限时间内完成,因此,能达到的制冷系数比理论值小得多,且不同工质工况不同差别很大. 比如,一部优良的家用冰箱,实际制冷

系数大约只有它的 $1/3$,性能系数最好的空调也只有理论值的 $1/4$. 近几年,有研究者提出热力学完善度的概念,以与卡诺循环系数的接近程度来评价系统性能的优劣^[1-3]. 实际系统性能系数的降低,原因除了换热温差的影响外,主要在于压缩过程及节流过程的不可逆损失. 通过改善压缩过程提高效率有许多方法,常用的有多级压缩中间冷却、喷油冷却等,以及近几年发展起来的应用在空气源热泵上的 Ericsson 循环^[4]、双级压缩中间补气技术^[5-6]、单级

收稿日期: 2014-09-12

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(3154032)

作者简介: 许树学(1981—),男,讲师,主要从事制冷、热泵技术方面的研究,E-mail:xsx@bjut.edu.cn

压缩腔内补气/液技术^[7-9]等.

经典热力学所给出的制冷系数界限虽有重要理论意义,但对实际制冷机的指导意义并不大. 本文通过对压缩过程中热功转换的深入研究,考虑制冷循环过程所有可能的能量回收,提出了一种名为基于工质的理论制冷循环概念,为实际循环接近卡诺循环效率提供了一个方向.

1 思路的提出

基于工质的理想制冷循环特征如下:

- 1) 等温差传热. 具体指蒸发器、冷凝器与环境的换热过程无温差.
- 2) 压缩过程为回收有用能的饱和压缩过程. 在满足提升压力和饱和温度的前提下,考虑过程中所有可能的热功转化及热量传递.
- 3) 节流过程等熵,并全部回收膨胀功.
- 4) 制冷和制热的性能系数与采用工质的种类有密切关系.

图 1 所示为当压缩过程分为两级和三级时的制冷理论循环示意图. 吸、放过程与普通的制冷循环相同. 不同之处是压缩过程:1) 节流过程 3~4 为等熵过程;2) 压缩过程分为多级,每级间的压缩结束形成了一个介于高温热源和低温热源之间的温度,因此也就与低温热源产生了温差,在此温差下形成的卡诺热机输出有用功,同时,向低温热源排出一部分热量消耗部分冷量. 继续增加压缩级数,会产生更多个中间热源,也就会相应产生多个卡诺热机. 此时,回收的压缩过程功为卡诺热机输出的功之和,损失的冷量为热机向低温热源排放的热量之和,压缩过程变为饱和压缩过程.

2 参数的定义与计算

每一级压缩结束的热量

$$q_{i+1} = h_{is} - h_{i+1} \tag{1}$$

式中: h_s 可由 $i+1$ 级的压力值和 i 级的熵值得得; h_{i+1} 由压力为 p_{i+1} 的压力的饱和状态求得.

$$h_s = f(p_{i+1}, s_i) \tag{2}$$

$$h_{i+1} = f(p_{i+1}) \tag{3}$$

第 i 级压缩过程回收的压缩功

$$w_{p_i} = q_i \frac{T_i}{T_i - T_L} \tag{4}$$

压缩过程损失的冷量

$$q'_i = q_i - w_{p_i} \tag{5}$$

冷量损失比例

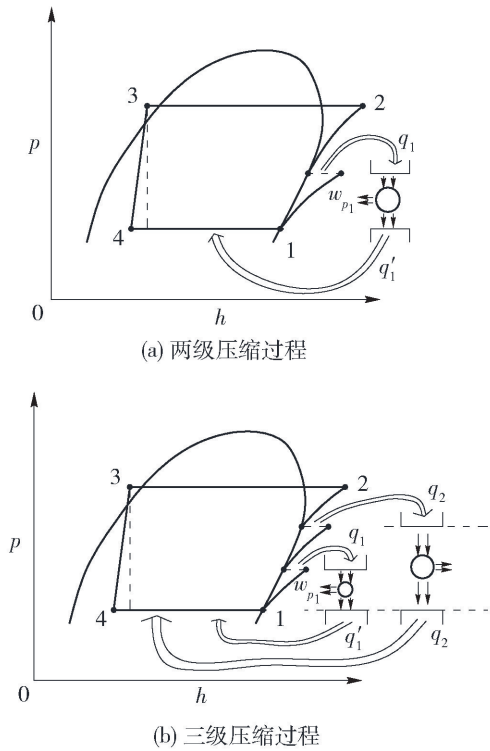


图 1 基于工质的理想制冷循环原理
Fig. 1 Ideal refrigeration cycle based on refrigerant

$$\varepsilon = \frac{q_i - w_{p_i}}{q_i} \tag{6}$$

等熵膨胀过程回收的功

$$w_s = h_3 - h_4 \tag{7}$$

假定过程分为 n 级,整个过程消耗的功

$$w = \sum_1^{n-1} (h_{is} - h_{i+1}) - \sum_1^{n-1} w_{p_i} - w_s \tag{8}$$

制冷量

$$q_0 = h_1 - h_4 - \sum_1^{n-1} q_i \tag{9}$$

制冷性能系数

$$\text{COP} = \frac{q_0}{w} \tag{10}$$

功回收率

$$\delta = \frac{\sum_1^{n-1} w_{p_i} + w_s}{\sum_1^{n-1} (h_{is} - h_{i+1}) - \sum_1^{n-1} w_{p_i} - w_s} \tag{11}$$

冷量损失比例

$$\varepsilon = \frac{\sum_1^{n-1} q_i}{h_1 - h_4} \tag{12}$$

3 计算结果与讨论

以空调工况为例进行计算,冷凝温度(高温热源温度)设定为 45 ℃,蒸发温度(低温热源温度) 2 ~ 10 ℃. 选择 R410A、R32、R22、R134a、R717、R718 几种常用工质,编制计算程序对循环的性能进行计算,物性通过软件 Refprop 7.0 进行计算^[10],结果见图 2 ~ 图 9.

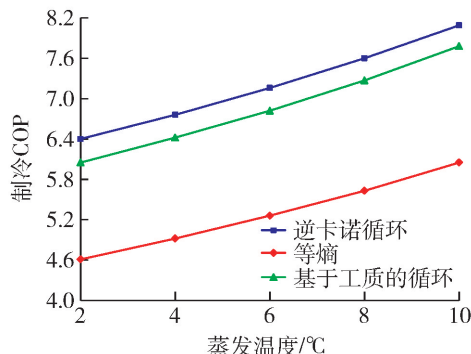


图2 3种不同的循环比较

Fig.2 Performance comparisons of three kinds of cycle

图2所示为逆卡诺循环、等熵压缩循环及基于工质的理想制冷循环3种循环制冷COP随蒸发温度的变化关系,工质为R32. 由图可知,3种方式制冷COP随蒸发温度的增大呈现近乎相同比例的增加,但同一蒸发温度下大小顺序为逆卡诺循环>基于工质的循环>等熵压缩循环. 基于工质的循环与逆卡诺循环的差距比较小,约为逆卡诺循环的94%~96%,基于工质的循环比等熵压缩可以提高约28%~31%.

3.1 功回收率

图3所示为功回收率随压缩级数的变化. 由图可知,随着压缩级数的增大,功回收率呈先急剧增大后趋于平稳的趋势. 6种工质中值最高的是R410A,其分为两级后,功回收率为25.72%,随着级数的逐渐增加达到最大值29%;功回收率最小的是R718,仅为8%. 对于所有的工质,在级数达到某个数值后,功回收率不再随压缩级数的增大而大幅度提高. 6种常用工质的功回收比的顺序为R410A>R32>R22>R134a>R717>R718.

图4所示为将所有功绘制在同一张饼状图上时,观察不同类别的功所占比例的状况. 由图可知,压缩过程回收的功所占的比例较小,维持在1%~6%;节流过程回收的功比例范围为2.9%~17.6%. 节流过程回收比例最大是R410A,达到

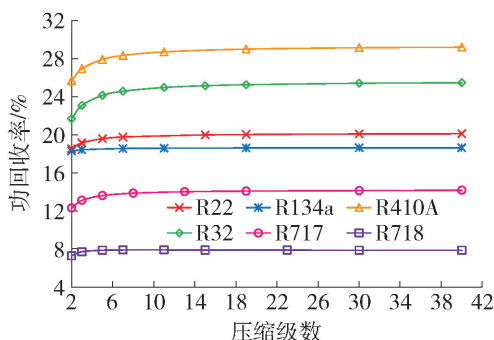


图3 回收比例随压缩级数的变化

Fig.3 Variation of power recovery ratio with number of compression stage

17.6%,最小的是R718,仅有2.9%;压缩过程回收功最大的是R32,为6.0%,最小的是R134a,仅为1.0%. 其原因可能是:温度相同时,不同工质的压力、压差及比容相差很大,比如R410A的压力(在几十个大气压的范围)远高于R718(工作压力为负压).

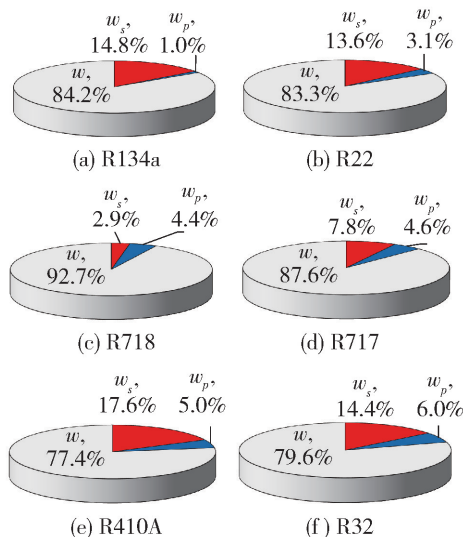


图4 不同工质的功耗分配状况

Fig.4 Power distribution of different kinds of refrigerant

3.2 冷量损失比例

图5所示为冷量损失比例随压缩级数的变化. 由图可知,与功回收率相同,冷量损失比例也呈现先急剧增大后趋于平稳的趋势. 在级数达到某个数值以后,冷量损失比例不再随压缩级数的增大而大幅度提高. 相同的压缩级数下,冷量损失比例最大是R32,达到约18%,最小的是R134a,约为3%. 6种常用工质的冷量损失比例的排序为R32>R410A>R717>R718>R22>R134a.

3.3 制冷/制热性能系数

图6、7所示为制冷/热COP随压缩级数的变化

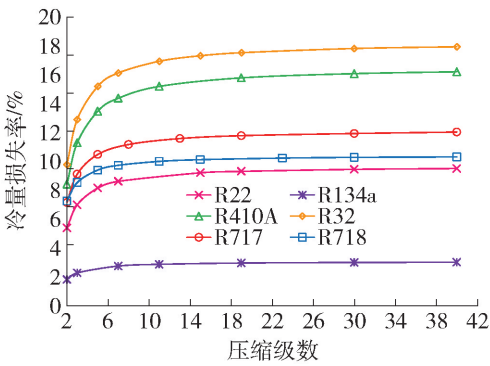


图 5 冷量损失比例随压缩级数的变化
Fig. 5 Variation of cooling capacity loss ratio with number of compression stage

关系. 由图可知,随着压缩级数的增大,制冷/热 COP 均呈现先急剧增大后趋于平稳的趋势. 级数高于一定值以后,制冷 COP 值趋于平稳,6 种常用工质的制冷 COP 排序为 $R718 > R717 > R134a > R32 > R22 > R410A$.

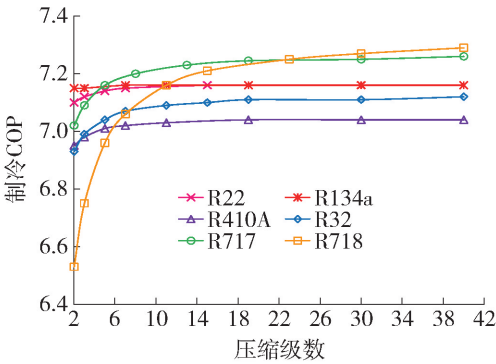


图 6 制冷 COP 随压缩级数的变化
Fig. 6 Variation of cooling COP with number of compression stage

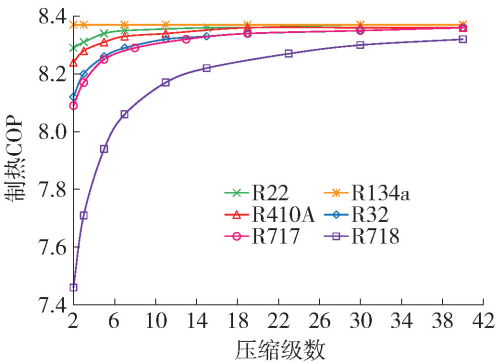


图 7 制热 COP 随压缩级数的变化
Fig. 7 Variation of heating COP with number of compression stage

与其他工质相比,R718 随压缩级数的增大变化有些特殊,在分级小时其制冷 COP 值最小,但在分级增大后其值增大速度较快,最终高于所有其他工质. 其原因可能是于:R718 属于小压差、高潜热的工质,相对于其他类工质,R718 的压缩过程功耗及节流过程回收功的大小对系统的制冷或制热 COP 的影响更加敏感,表现在图中的结果是制冷 COP 值随分级变化的斜率高于其他工质. 制热 COP 获得最大值的级数为 30 级,与制冷不同的是,所有工质包括 R718 的制热 COP 均趋向于同一个极值.

3.4 性能比较

图 8、9 所示为不同工质的制冷/热 COP 与逆卡诺循环比较的结果. 由图可知,6 种常用工质的制冷 COP 排序为 $R718 > R717 > R22 > R134a > R32 > R410A$,但最高的也没有超过逆卡诺循环. 对于制热 COP,排序为 $R134a > R22 > R32 > R410A > R717 > R718$,所有工质的极限制热 COP 都无限接近逆卡诺循环.

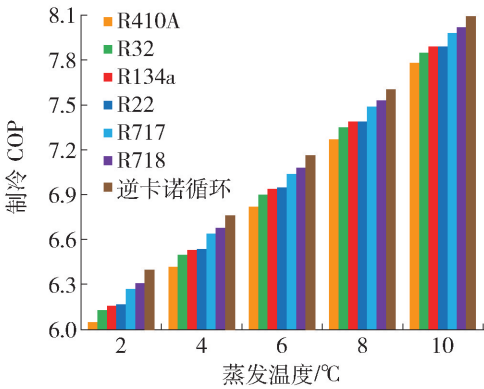


图 8 不同工质制冷 COP 随蒸发温度的变化

Fig. 8 Variation of cooling COP with evaporating temperature for different refrigerant

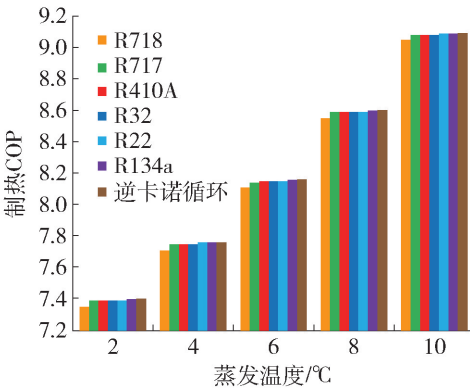


图 9 不同工质制热 COP 随蒸发温度的变化

Fig. 9 Variation of heating COP with evaporating temperature for different refrigerant

4 结论

1) 构造出基于工质的理想制冷循环,以此为基础分析制冷循环的性能极限值,结果表明,同一蒸发温度下大小顺序为逆卡诺循环 > 基于工质的循环 > 等熵压缩循环. 基于工质的循环与逆卡诺循环的差距比较小,约为逆卡诺循环的 94% ~ 96%,比等熵压缩可以提高约 28% ~ 31%.

2) 在空调工况范围内,制冷 COP 优劣顺序为 R718 > R717 > R134a > R32 > R22 > R410A,最大超过相同温区逆卡诺循环的 99%;制热 COP 大小顺序为 R134a > R22 > R32 > R410A > R717 > R718,并无限接近相同温区的逆卡诺循环制热 COP.

3) 6 种工质设计成基于工质的理想制冷循环后,制冷系数相对较高的是 R718;制热性能系数相对较高的是 R134a;最适宜回收节流过程功的是 R410A;最适宜回收压缩过程功的是 R32.

参考文献:

[1] 马一太,田华,刘春涛,等. 制冷与热泵产品的能效标准研究和循环热力学完善度的分析 [J]. 制冷学报, 2012, 33(6): 1-6.

MA Yi-tai, TIAN Hua, LIU Chun-tao, et al. Analysis on energy efficiency of water chiller and water source heat pump systems with thermodynamic perfectibility [J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33 (6): 1- 6. (in Chinese)

[2] 马一太,刘忠彦,李敏霞,等. 以自然度和完善度为基准的制冷和热泵系统环境性能评价探讨 [J]. 制冷学报, 2012, 33(5): 1-4.

MA Yi-tai, LIU Zhong-yan, LI Min-xia, et al. Analysis on energy efficiency of water chiller and water source heat pump systems with thermodynamic perfectibility [J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33 (5): 1- 4. (in Chinese)

[3] HUGENROTH J, BRAUN J, GROLL E, et al. Thermodynamic analysis of a liquid-flooded Ericsson cycle cooler [J]. International Journal of Refrigeration, 2007, 30: 1176-1186.

[4] BELL I H, GROLL E A, BRAUN J E. Performance of vapor compression systems with compressor oil flooding and regeneration [J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34: 224-233.

[5] 许树学,马国远,刘琦,等. 滚动活塞压缩机双级压缩中间补气制冷/热泵系统的实验研究 [J]. 北京工业大学学报, 2014, 40(3): 418-422.

XU Shu-xue, MA Guo-yuan, LIU Qi, et al. Experimental study on vapor injection refrigeration system with two-stage rolling piston compressor [J]. Journal of Beijing University of Technology, 2014, 40(3): 418-422. (in Chinese)

[6] 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): 24-27.

ZHANG Hua, XU Shi-lin. Analysis on characteristics of two-stage compression heat pump air-conditioner with R410A [J]. Journal of Refrigeration, 2008, 29(6): 24-27. (in Chinese)

[7] 马国远,彦启森. 涡旋压缩机经济器系统的性能分析 [J]. 制冷学报, 2003, 24(3): 20-24.

MA Guo-yuan, YAN Qi-sen. Thermodynamic behavior of scroll compressor with economizer for heat pump [J]. Journal of Refrigeration, 2003, 24 (3): 20-24. (in Chinese)

[8] 王宝龙,石文星,李先庭. 制冷空调用涡旋压缩机数学模型 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2005(6): 726-729.

WANG Bao-long, SHI Wen-xing, LI Xian-ting. Mathematical modeling of scroll refrigeration compressors [J]. Journal of Tsinghua University: Sci & Tech, 2005 (6): 726-729. (in Chinese)

[9] MATHISON M M, BRAUN J E, GROLL E A. Performance limit for economized cycles with continuous refrigerant injection [J]. International Journal of Refrigeration, 2011, 34: 234-242.

[10] LEMMON E, MCLINDEN M, HUBER M. Refprop 7.0. [2014-08-30]. <http://www.nist.gov/data/nist23.htm>2002.

(责任编辑 张 蕾)