

文章编号:0253-4339(2021)02-0077-06
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2021.02.077

配置露点蒸发器的新型空气制冷循环的热力分析

王 鹏 王 闯 邢子文

(西安交通大学能源与动力工程学院 西安 710049)

摘 要 本文提出一种与露点间接蒸发冷却器相耦合的冷库用新型空气制冷循环。对该新型循环进行了相应的热力计算,与普通空气制冷循环及 NH₃ 蒸气压缩循环进行了对比分析,并对对比分析了工况参数变化对耦合露点间接蒸发冷却器前后的空气制冷循环性能及 NH₃ 蒸气压缩循环 COP 的影响。结果表明:配置露点间接蒸发冷却器的新型空气制冷循环的性能得到了提高,设定工况下最大 COP 可提高 37.8%,且相比 NH₃ 制冷循环,流程与设备更简单。
关键词 制冷循环;热力分析;露点间接蒸发冷却器;COP;天然制冷剂
中图分类号:TB61⁺1;TB657.5 **文献标识码**:A

Thermodynamic Analysis of a New Air Refrigeration Cycle Combined with a Dew-point Evaporator

Wang Peng Wang Chuang Xing Ziwen

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, 710049, China)

Abstract A new type of air refrigeration cycle combined with a dew-point indirect evaporative cooler (IEC) is proposed. Corresponding thermodynamic calculations on the new cycle were carried out. A comparative analysis was carried out with the ordinary air refrigeration cycle and NH₃ vapor compression cycle. The influences of operation conditions on the performances of the air refrigeration cycle before and after combining the dew-point IEC as well as the COP of the NH₃ vapor compression cycle were analyzed. The results showed that the performance of the new air refrigeration cycle combined with the dew-point IEC was greatly improved. The maximum COP can be increased by 37.8% under the design conditions. In addition, compared to the NH₃ refrigeration cycle, it can operate with simpler processes and equipment.
Keywords refrigeration cycle; thermodynamic analysis; dew-point indirect evaporative cooler; COP; natural refrigerant

随着我国经济科技水平的不断提高,冷链迅速发展,近年来冷库容量不断扩大。目前国内的冷库中,主要使用的制冷剂有 NH₃、CO₂ 及氟利昂,其中 NH₃ 与 CO₂ 是较为热门的制冷剂,而氟利昂制冷剂主要应用于中小型冷库^[1-2]。由于技术及经济发展导致的诸如臭氧层破坏、全球变暖效应等环境问题,人们环保意识不断增强,对于低碳型、低能耗的要求也越来越高,因此冷库节能、制冷流程优化以及制冷剂的研究及替代备受关注^[3-5]。

作为天然工质的空气是最符合环境要求的制冷剂。由于其可靠性高、制冷温度低、设备简单可靠、流程多样及使用方便等优点,自 1844 年布雷顿 (Brayton) 空气制冷机发明以来,在飞机空调、工业材料的冷却处理、低温环境实验模拟以及石化工业的存

储与加工等方面得到了广泛的应用^[6-8],但空气制冷机应用于冷库的研究较少。赵家强等^[9]针对用于 -35℃ 急冻的 NH₃/空气复叠循环和 NH₃ 完全中冷双级压缩循环进行了理论对比,指出两种循环 COP 相差较小,而且与空气的复叠循环能减少氨的充注量,但还没有脱离以 NH₃ 制冷循环为基础。因此需要进一步研究空气制冷机在冷藏方面的应用。

露点间接蒸发冷却技术是利用水的蒸发潜热,利用空气的干球温度和不断降低的湿球温度之差进行换热,将空气温度冷却至接近露点温度。在过去数十年中,大量不同的蒸发冷却技术已经被提出并应用于工业冷却、HVAC、小气候冷却及其他领域^[10-12]。露点间接冷却器占地面积小,安装形式灵活,且具有节能、环保等优势,但很容易受环境影响,使用场所有一

$$h = 1.006t + (1.86t + 2\,501)d \tag{4}$$

压缩机排气温度:

$$t_2 = (t_1 + 273.15) \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 273.15 \tag{5}$$

NH₃ 循环制冷量:

$$q_{\text{NH}_3} = h_{1'} - h_4 \tag{6}$$

空气制冷循环制冷量:

$$q_{\text{air}} = h_{4'} - h_4 \tag{7}$$

NH₃ 循环的性能系数:

$$\text{COP}_{\text{NH}_3} = \frac{q_{\text{NH}_3}}{w_{\text{NH}_3}} \tag{8}$$

空气制冷循环的性能系数:

$$\text{COP}_{\text{air}} = \frac{q_{\text{air}}}{w_{\text{air}} - w_{\text{air}}'} \tag{9}$$

其中多点工质状态参数可通过 Refprop 软件查询计算。

2 计算结果及分析

2.1 设定工况下的计算结果

由于文中提及的空气制冷循环为开式直接冷却流程,直接冷却流程可以消除由热交换器的传热温差所引起的不可逆损失。而 NH₃ 蒸气压缩循环的蒸发器、冷凝器存在一定的传热温差,因此对于流程计算的运行参数设定如表 1 所示。

表 1 工况参数设定

Tab.1 The setting of working condition parameters

工况参数	环境温度/℃	相对湿度/%	制冷温度/℃	冷凝温度/℃	蒸发温度/℃	压比
设计值	30	40	-20	40	-25	3

当忽略压缩机的等熵效率及膨胀机的等熵效率时,设定工况参数下的耦合 IEC 前后的空气制冷循环及 NH₃ 蒸气压缩循环计算结果如表 2 所示。

由表 2 可知,相比 NH₃ 蒸气压缩制冷循环,即使耦合了 IEC 的新型空气制冷循环也仍然存在容积制冷量少、制冷系数小等问题。但由于 NH₃ 蒸气压缩循环的压比过高,达到 10.27,一般需要采用复叠式制冷或双级压缩的形式,这会造成结构复杂、成本增加等问题。相比之下空气制冷循环的流程与设备更简单。低温气流在库内直接进行换热,省去了冷库排管或冷风机等设备,不仅消除传热温差,而且基本不需要考虑除霜问题,减少了很多因除霜造成的操作热。相比普通空气制冷循环,对于耦合了 IEC 的空气

制冷循环,由于 IEC 的预冷作用存在,吸气温度降低,从而排气温度降低,这有利于压缩机的运行,并使压缩机功耗减小。同时由于吸气状态变化,新型空气循环的容积制冷量得到提高,且 COP 提高了 15.69%,效率得到了提高。

表 2 计算结果

Tab.2 The calculation results

流程	耦合 IEC	未耦合 IEC	NH ₃ 制冷循环
吸气温度 t_1 /℃	15.02	30	-20
排气温度 t_2 /℃	119.72	136.87	156.28
压比	3	3	10.27
压缩机功耗 w /(kJ/kg)	107.48	113.13	367.14
膨胀功 w' /(kJ/kg)	70.24	70.24	
制冷量 q /(kJ/kg)	65.81	65.81	1 051.78
容积制冷量 q_v /(kJ/m ³)	77.98	74.12	1 331.75
COP	1.77	1.53	2.86

2.2 运行参数对性能系数的影响

当其他工况参数设定不变,容积制冷量及 COP 随环境温度的变化如图 4 所示。由图 4 可知,当环境温度从 20 ℃ 升至 40 ℃ 时,容积制冷量及 COP 均随环境温度的升高近似线性降低。耦合 IEC 后的空气制冷循环的容积制冷量及 COP 随着环境温度变化而减小的速率最小,但空气制冷循环随环境温度降低的速率均较小,而 NH₃ 蒸气压缩循环随环境温度的改变变化显著。

当其他工况参数设定不变,制冷循环的容积制冷量及 COP 随制冷温度的变化如图 5 所示。制冷温度改变对空气制冷循环及 NH₃ 制冷循环的影响与环境温度的影响恰好相反。综合图 4、图 5 可知,耦合了 IEC 的新型空气制冷循环性能随参数的改变而变化较小,具有更好的环境适应力。

当其他工况参数不变时,耦合 IEC 前后的空气制冷循环的容积制冷量及 COP 随工作压比的变化如图 6 所示。由于空气的容积制冷量小,设备体积一般较大,因此需要获得更大的容积制冷量。由图 6(a)可知,需要高压比。但由图 6(b)可知,在高压比时,空气制冷循环的 COP 很小,且压比过高对设备耐压会有更高的要求。因此,最高 COP 的工作压比并不是最好的工况点,压比的选取需要综合考虑这两个因素。对于耦合 IEC 前后的空气制冷循环,容积制冷量相对差值保持在 5.21% 不变,但 COP 相对差值随着工作压比的升高从 34.7% 降至 12.66%。随着压比

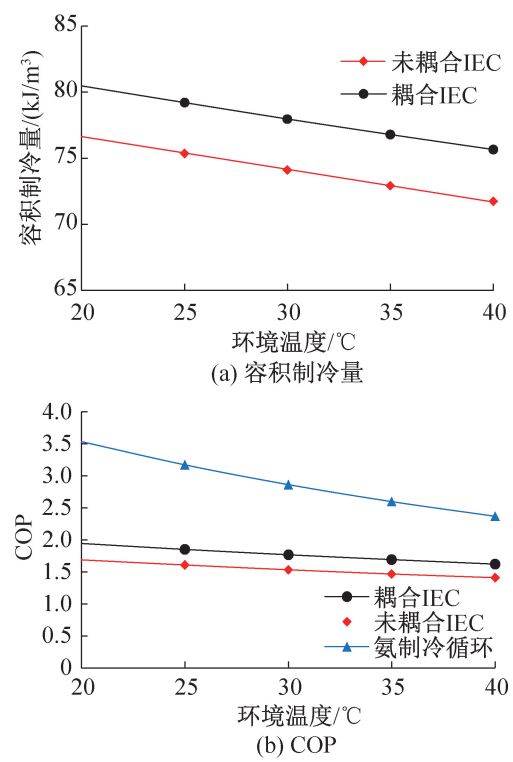


图 4 性能参数随环境温度的变化
Fig.4 The variaiton of performance parameters with ambient temperature

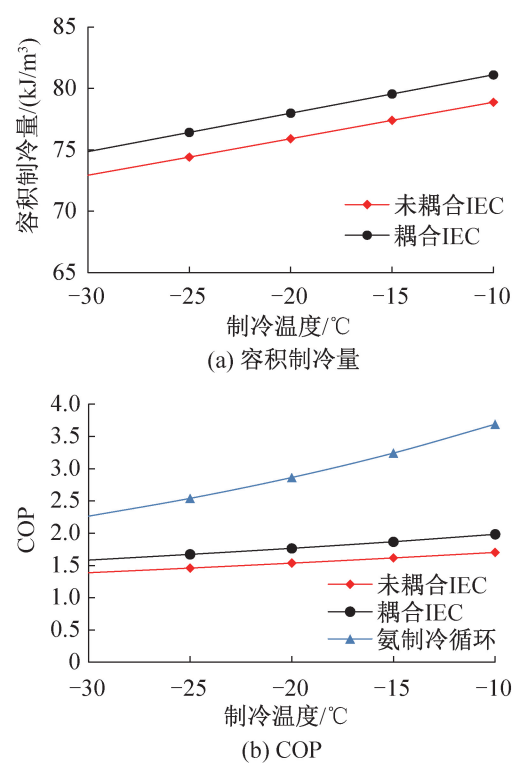


图 5 性能参数随制冷温度的变化
Fig.5 The variaiton of performance parameters with cooling temperature

COP 的影响逐渐变小。

图 7 所示为耦合了 IEC 的空气循环的制冷系数随压缩机、膨胀机的等熵效率的变化。由图 7 可知, 在一定的压力比和工作温度下, 耦合 IEC 后新型空气制冷循环 COP 随着压缩机效率和膨胀机效率的减小而迅速减小。其中压缩机效率影响更大, 因此要提高新型空气制冷循环的制冷系数, 提高压缩机的效率是最有效的途径。

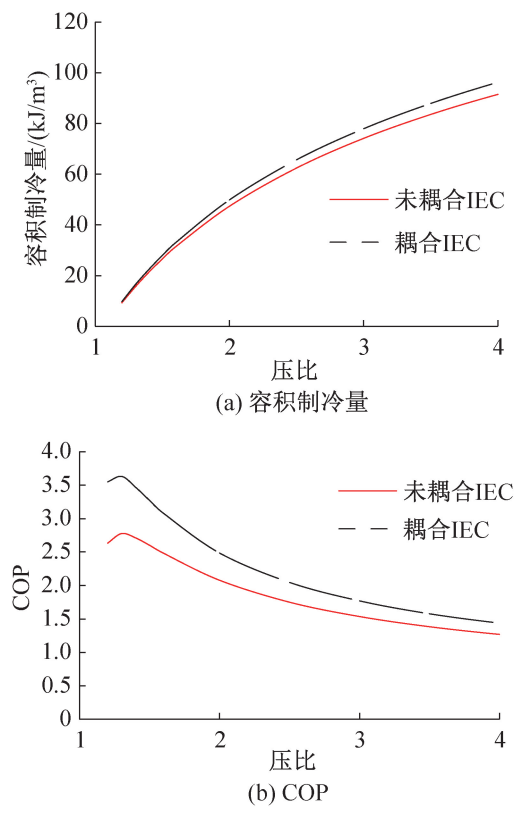


图 6 性能参数随工作压比的变化
Fig.6 The variaiton of performance parameters with the working pressure ratio

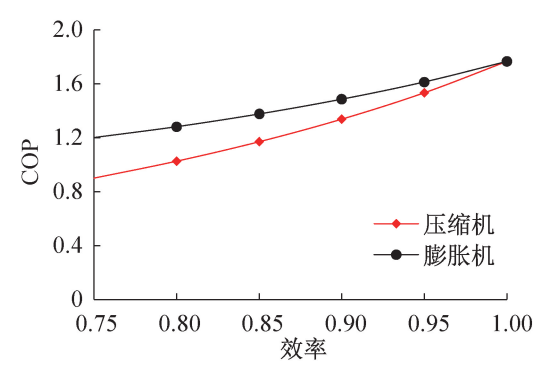


图 7 COP 随等熵效率的变化
Fig.7 The change of COP with isentropic efficiency

2.3 吸气参数对压缩机性能的影响

前文的计算分析均建立在压缩机等熵绝热运行的条件下, 而实际压缩过程都带有冷却装置且与外界

有热量交换,空压机的实际工作过程应为多变压缩过程,压缩机效率是不可忽视的参数。而吸气参数对空压机的运行状态的影响很大^[19-20]。因此,本节主要讨论由于吸气温度的不同而导致的配置 IEC 前后性能差异。

秦莉等^[19]通过实测数据表明:对于螺杆空压机,温度每增加 1 ℃,变频螺杆式空压机多变效率降低约 0.898%。因此,在一定范围内可近似认为空压机吸气温度变化与多变效率变化的关系为:

$$\Delta\eta = -0.898\%\Delta t$$

(10)

选取计算工况为文献实测数据^[19],未耦合 IEC 的空气制冷循环的空压机吸气温度为 31 ℃,含湿量 13.1 g/(kg 干空气),空压机效率为 81.2%,配置 IEC 前后的空压机含湿量不变。计算结果如表 3 所示。

表 3 空压机计算结果

Tab.3 The calculation results of air compressor

流程	耦合 IEC	未耦合 IEC
吸气温度 $t_1/^\circ\text{C}$	17.68	31
含湿量 $d/(\text{g}/(\text{kg 干空气}))$	119.72	136.87
多变效率 $\eta/\%$	93.1	81.2
压缩机功耗 $w/(\text{kJ}/\text{kg})$	116.52	139.78
COP	1.42	0.95

由表 3 可知,由于 IEC 的存在使得空压机吸气温度降低,含湿量保持不变,其多变效率更高,为 93.1%。即考虑压缩机效率造成的功耗增幅也就更小,表 2 中空压机功耗相对降幅由 5.0% 升至 16.6%。同时因为吸气温度与空压机多变效率的双重影响,配置 IEC 后空气制冷循环的 COP 提升达到了 37.8%。

3 结论

本文通过对提出的配置 IEC 的新型空气制冷循环的热力计算与分析,并将其与未耦合 IEC 的空气循环、NH₃ 蒸气压缩制冷循环进行了对比,得到如下结论:

1)耦合 IEC 前后的空气制冷循环相比蒸气压缩循环,均存在容积制冷量少,制冷系数小等问题。但空气制冷循环的流程与设备更简单,且可以基本解决传热温差及除霜问题。

2)相比普通空气制冷循环,耦合了 IEC 的新型空气制冷循环的吸排气温度更低,容积制冷量提高,设定工况下 COP 可提高 15.69%。

3)制冷循环性能系数均随制冷温度的升高而升高,随环境温度的升高而减小。NH₃ 制冷循环受参数变化的影响较大,而空气制冷循环具有更好的环境适应力。

4)最佳压比要综合考虑容积制冷量及 COP 等因素,随着压比升高,压比对性能参数的影响逐渐减小。

5)压缩机和膨胀机的等熵效率对空气制冷循环的性能影响较大,在本文中的新型制冷循环,压缩机的效率影响更大。

6)配置了 IEC 的空气制冷循环,由于吸气参数对空压机的影响,其效率得到了更大的提升,性能优势更显著,COP 提升达到 37.8%。

符号说明

- m ——一次空气质量,kg

m' ——二次空气质量,kg

h ——焓值,kJ/kg

d ——含湿量,g/(kg 干空气)

p ——压力,kPa

t ——温度,℃

t_1 ——吸气温度,℃

t_2 ——排气温度,℃

k ——绝热指数

q ——单位质量制冷量,kJ/kg

q_v ——单位容积制冷量,kJ/m³

w ——单位质量压缩机功耗,kJ/kg

w' ——单位质量膨胀功,kJ/kg

COP——性能系数

η ——多变效率,%
- 下标

$0'$ ——进口温度下饱和状态

v ——湿空气中的水蒸气

d ——露点

NH₃——NH₃ 循环

air——空气制冷循环

参考文献

[1] 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.)

[2] PATEL V, PANCHAL D, PRAJAPATI A, et al. An efficient optimization and comparative analysis of cascade refrigeration system using NH₃/CO₂ and C₃H₈/CO₂ refrigerant pairs[J]. International Journal of Refrigeration, 2019, 102:62-76.

- [3] HU Xinhao, ZHANG Zhongbin, YAO Yuchen, et al. Non-azeotropic refrigerant charge optimization for cold storage unit based on year-round performance evaluation [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 139:395-401.
- [4] 陈光明, 高能, 朴春成. 低碳制冷剂研究及应用最新进展[J]. 制冷学报, 2016, 37(1): 1-11, 31. (CHEN Guangming, GAO Neng, PIAO Chunheng. State of the art of research and applications of low-carbon refrigerants [J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(1): 1-11, 31.)
- [5] 田雅芬, 赵兆瑞, 邢子文, 等. CO₂ 复叠制冷系统与载冷剂制冷系统适用范围研究[J]. 制冷学报, 2016, 37(2): 22-29. (TIAN Yafen, ZHAO Zhaorui, XING Ziwen, et al. Study on application scope for CO₂ cascade refrigeration system and CO₂ secondary refrigerant system [J]. Journal of Refrigeration, 2016, 37(2): 22-29.)
- [6] 盛健, 张华, 吴兆林, 等. 飞机环境控制系统制冷空调技术现状[J]. 制冷学报, 2020, 41(2): 22-33. (SHENG Jian, ZHANG Hua, WU Zhaolin, et al. Technology of refrigeration and air-conditioning for aircraft environment control system [J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(2): 22-33.)
- [7] HOU Y, YANG S, CHEN X, et al. Study on the matching performance of a low temperature reverse Brayton air refrigerator [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89: 339-348.
- [8] ZHAO Hongli, HOU Yu, CHEN Liang. Experimental study on a small Brayton air refrigerator under -120 °C [J]. Applied Thermal Engineering, 2009, 29 (8/9): 1702-1706.
- [9] 赵家强, 余晓明. NH₃/空气复叠与 NH₃ 完全中冷双级压缩用于-35 °C 急冻的 COP 理论比较[J]. 建筑节能, 2016, 44(11): 15-17, 107. (ZHAO Jiaqiang, YU Xiaoming. Comparison of theoretical COP between R717/R729 cascade refrigeration system and fully intercooled R717 two-stage compression system for quick freezing at 35 °C [J]. Building Energy Efficiency, 2016, 44(11): 15-17, 107.)
- [10] YANG Y, CUI G, LAN C Q. Developments in evaporative cooling and enhanced evaporative cooling - a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 113: 109230.
- [11] SHAHZAD M W, BURHAN M, YBYRAIYMKUL D, et al. An improved indirect evaporative cooler experimental investigation [J]. Applied Energy, 2019, 256: 113934.
- [12] 周海东, 黄翔, 范坤. 露点间接蒸发冷却器结构对比分析[J]. 流体机械, 2013, 41(2): 71-77. (ZHOU Haidong, HUANG Xiang, FAN Kun. Comparative analysis of configuration on dew point evaporative cooler [J]. Fluid Machinery, 2013, 41(2): 71-77.)
- [13] JIA Lizhi, LIU Junjie, WANG Congcong, et al. Study of the thermal performance of a novel dew point evaporative cooler [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 160: 114069.
- [14] 褚俊杰, 黄翔, 孙铁柱. 国内外露点间接蒸发冷却技术研究最新进展[J]. 流体机械, 2017, 45(9): 71-76, 55. (CHU Junjie, HUANG Xiang, SUN Tiezhu. The latest development of dew point indirect evaporative cooling technology research at home and abroad [J]. Fluid Machinery, 2017, 45(9): 71-76, 55.)
- [15] RIANGVILA KUL B, KUMAR S. An experimental study of a novel dew point evaporative cooling system [J]. Energy and Buildings, 2010, 42(5): 637-644.
- [16] 杨立然, 黄翔, 贾曼, 等. 蒸发冷却与机械制冷协同耦合空调关键技术及节能性研究[J]. 流体机械, 2019, 47(8): 61-65. (YANG Liran, HUANG Xiang, JIA Man, et al. Research on key technology and energy saving of air conditioner combined with evaporative cooling and mechanical Refrigeration [J]. Fluid Machinery, 2019, 47(8): 61-65.)
- [17] 孙郁, 侯予, 赵红利, 等. 逆布雷顿循环空气制冷机的性能分析[J]. 低温工程, 2006(1): 27-30, 39. (SUN Yu, HOU Yu, ZHAO Hongli, et al. Performance analysis of reverse-Brayton air refrigerator [J]. Cryogenics, 2006(1): 27-30, 39.)
- [18] ASHRAE. 2013 ASHRAE handbook: fundamentals [M]. Atlanta: ASHRAE, 2013.
- [19] 秦莉, 颜苏芊, 刘宁, 等. 吸气参数对纺织企业不同类型空压机性能影响的研究分析[J]. 现代纺织技术, 2016, 24(3): 36-40. (QIN Li, YAN Suqian, LIU Ning, et al. Research and analysis of effects of suction parameters on the performances of different air compressors in textile mill [J]. Advanced Textile Technology, 2016, 24(3): 36-40.)
- [20] MA Fuqin, LI Bing, ZHANG Dingcai. Effect of dry and wet air on power consumption of air compressor [J]. Building energy efficiency, 2008, 9: 23-24.

通信作者简介

王闯,男,在读博士研究生,西安交通大学能源与动力工程学院,13289227655,E-mail: xjtu_chuangwang@outlook.com. 研究方向:螺杆压缩机设计与优化。

About the corresponding author

Wang Chuang, male, Ph. D. candidate, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, + 86 13289227655, E-mail: xjtu_chuangwang@outlook.com. Research fields: design and optimization of twin screw compressor.