

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.201704034



# 太阳能喷射-压缩复迭 制冷系统的性能分析

乔夏莹, 李风雷

(太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 以热力学第一定律和热力学第二定律为基础, 建立太阳能喷射-压缩复迭制冷系统的焓分析和能量分析模型, 分析发生温度、中间温度、冷凝温度和蒸发温度等运行参数对系统性能的影响, 选取对系统最佳的运行参数. 结果表明: 发生温度升高, 性能系数 (COP) 小幅度下降, 焓效率先增加后趋于平缓; 中间温度升高, COP 随之减小, 而焓效率随之增加; 冷凝温度上升, 导致 COP 和焓效率随之降低; 蒸发温度上升, 导致 COP 和焓效率随之增加; 当发生温度为 85 ℃, 中间温度为 24 ℃ 时, 系统的性能最优.

**关键词:** 喷射器; 太阳能; 压缩; 制冷; 焓分析; 性能系数

**中图分类号:** TK 519 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)01-0057-05

## Performance Analysis of Solar Ejector-Compression Refrigeration System

QIAO Xiaying, LI Fenglei

(College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** Based on the first law of thermodynamics and the second law of thermodynamics, the exergy analysis and energy analysis model of the solar ejector-compression refrigeration system was set up, and the influences of the operating parameters of generating temperature, medium temperature, condensing temperature and evaporating temperature on the system performance were analyzed. Through the analysis, the results show that the coefficient of performance (COP) decreases slightly, and the exergy efficiency rises in the beginning and then tends to be stable along with the generating temperature increasing. COP decreases and the exergy efficiency rises with the increment of the medium temperature. Besides, both COP and the exergy efficiency decrease when the condensing temperature increases, while rise when the evaporating temperature increases. Moreover, the optimum performance is obtained when the generating temperature is 85 ℃, and the medium temperature is 24 ℃.

**Keywords:** ejector; solar energy; compression; refrigeration; exergy analysis; coefficient of performance

我国太阳能资源丰富, 每年的辐射总量大于  $5\,020\text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2}$ , 大部分地区总日照时间超过 2 000 h, 为太阳能的利用提供了较好的条件<sup>[1]</sup>. 在当前化石能源储量有限, 环境污染严重, 尤其是雾霾严重威胁到人们生活质量的条件下, 开发利用太阳能的意义重大<sup>[2]</sup>. 利用这种低品位热源驱动空调系统降低建筑制冷的能耗是当前解决能源问题切实可行的方案. 太阳能喷射式制冷系统是利用低品位太阳能的有效

**收稿日期:** 2017-04-12

**通信作者:** 李风雷(1967-), 男, 副教授, 博士, 主要从事空调制冷新技术、热能利用与节能技术的研究. E-mail: fengleili@126.com.

**基金项目:** 国家国际科技合作项目(2013DFA61580); 山西省科技攻关项目(20140313006-6)

方法,日益受到国内外学者的关注. 供冷季太阳能辐射强度的变化与建筑空调冷负荷呈现了时间上的一致性. 气温越高,用户所需的制冷量越大,太阳能辐射越强. 利用太阳能驱动实现制冷,可减少空调制冷的电能消耗,显著节约常规能源. 喷射式制冷循环具有结构简单、运行稳定等优点. 然而,与其他制冷方式相比,其性能系数不高,且集热器面积过大. 为了提高系统总的性能系数,减少集热器面积,复合制冷方式成为新的研究方向. Sokolov 等<sup>[3]</sup>提出太阳能增压喷射制冷系统,在二次流体入口处设置了增压器,增加二次流体的入口压力,提高了喷射器效率. 张博等<sup>[4]</sup>提出太阳能双喷射器制冷系统,以提高单一喷射系统的喷射效率. Sun<sup>[5]</sup>提出喷射-压缩回热式制冷系统,回收余热提高系统性能. 田琦<sup>[6]</sup>提出太阳能喷射压缩一体化制冷系统,简化传统喷射系统,提高系统性能. 然而,上述系统受天气限制,难以实现连续制冷. 此外,蒋立本<sup>[7]</sup>提出太阳能喷射-吸收式制冷系统,该系统在吸收循环的基础上,增加气体和液体喷射器以提高系统的性能系数(COP). 李春华等<sup>[8]</sup>提出太阳能固体吸附-喷射制冷系统. 但是现阶段对于此类系统的研究不多,且系统运行维护相对复杂. 李风雷等<sup>[9]</sup>提出光热光电喷射-直接蒸发复合制冷系统,但是对环境湿度有要求,可利用区域有限. 本文针对 Sokolov 等<sup>[3]</sup>提出的太阳能喷射-压缩复迭制冷系统,从 COP 和 烟效率两个方面进行分析,研究不同运行参数对系统性能的影响.

1 太阳能喷射-压缩复迭制冷系统

太阳能喷射-压缩复迭制冷系统由太阳能集热子系统、喷射制冷子系统和压缩制冷子系统 3 部分组成. 系统结构如图 1 所示. 图 1 中:1~13 为状态点.

太阳能集热子系统主要由太阳能真空集热器、蓄热水箱、发生水泵、发生器等构成,集热器内的水经加热升温后进入发生器,将热量传递给发生器内的制冷剂,再经由发生水泵形成回路.

喷射制冷子系统主要由发生器、喷射器、冷凝器、蒸发器、膨胀阀和工质泵构成. 发生器产生的高温、高压制冷剂蒸汽入喷射器,经喷嘴高速喷出膨胀,在喷嘴附近压力降低,产生抽吸作用,将蒸发器中的低温蒸汽吸入喷射器. 低温蒸汽与发生器的高温蒸汽在喷射器中混合、升压,蒸汽压力能增大到适当的冷凝压力,进入冷凝器进行放热. 从冷凝器出来后,一部分流体被工质抽回发生器,剩余的通过膨胀阀进入蒸发冷凝器吸热完成制冷循环. 喷射制冷压焓图,如图 2 所示.

图 2 中: $p$  为压力,其值为绝对压力的对数值; $h$  为焓值; $o$  为喷嘴出口; $y$  为混合室入口;6 为冷凝器出口. 由图 2 可知:混合流体分为两股,7→4 为发生器换热,6→8→9 为节流和蒸发过程;4→ $o$  为一次流量从喷射器入口到喷嘴出口,之后,引射二次流体  $y$ →5 压力升高;混合流体从喷射器出来进入冷凝器.

压缩制冷子系统由风冷冷凝器、蒸发冷凝器、蒸发器和节流阀组成. 蒸发器流出的低压蒸汽通过压缩机加压之后,进入蒸发冷凝器冷凝,流经节流阀后进入蒸发器. 压缩制冷压焓图,如图 3 所示. 图 3 中:13→10 为等熵压缩过程;10→11 为等压冷凝;11→12 为绝热节流;12→13 为等压蒸发过程.

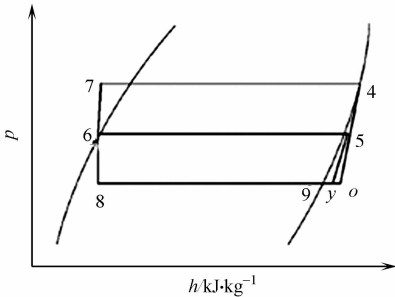


图 2 喷射制冷压焓图

Fig. 2 Ejector refrigeration  $p$ - $h$  figure

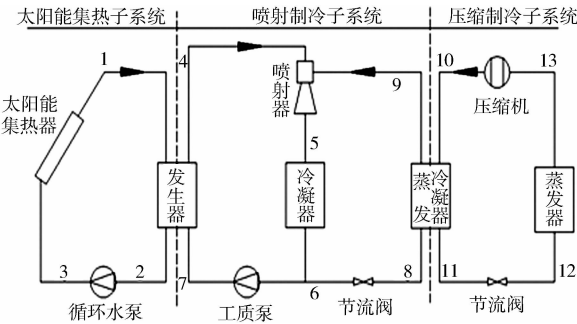


图 1 太阳能喷射-压缩复迭制冷系统

Fig. 1 Solar ejector-compression refrigeration system

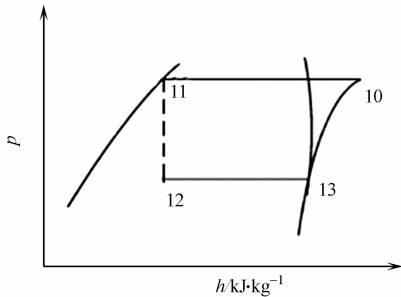


图 3 压缩制冷压焓图

Fig. 3 Compression refrigeration  $p$ - $h$  figure

## 2 能量分析

在太阳能喷射-压缩耦合制冷系统中,系统输入的电能为压缩机、工质泵等的消耗功率<sup>[10]</sup>. 系统的机械 COP 为

$$\text{COP} = Q_e / W. \quad (1)$$

式(1)中: $Q_e$  为蒸发器换热量,即系统制冷量,kW; $W$  为系统中工质泵、压缩机等的消耗功率,kW.

基于热力学第一和第二定律进行焓分析,分析不同能量的焓值,能够更全面更本质地揭示能的利用状况. 焓是以环境为基准状态时,某种能量的最大可用功. 对于流动的工质而言,焓是指从某一状态出发,经过一系列可逆过程达到与环境平衡时,工质所能完成的最大可用功. 如果取环境温度为基准温度,则单位质量的工质焓<sup>[11]</sup>为

$$\varepsilon = (h - h_0) - T_0(s - s_0). \quad (2)$$

式(2)中: $h$  为工质焓值,kJ · kg<sup>-1</sup>;  $s$  为工质熵值,kJ · (kg · K)<sup>-1</sup>; 下标 0 代表基准状态.

焓效率指系统的输出最大可用能与输入最大可用能的比值<sup>[12]</sup>,即

$$\eta = E_{\text{out}} / E_{\text{in}}. \quad (3)$$

式(3)中: $E_{\text{out}}$  为输出最大可用能; $E_{\text{in}}$  为输入最大可用能.

对于文中系统而言,系统的目的是制冷,最终制冷量为输出的有用能. 输入的有用能为集热器所获得的太阳能和工质泵、压缩机等的耗能.

太阳能集热器最终获得的有效热量  $E_u$  为

$$E_u = Q_u(1 - T_0 / T_{\text{sc}}). \quad (4)$$

式(4)中: $T_0$  为环境温度,K; $T_{\text{sc}}$  为太阳能集热器的平均温度,K; $Q_u$  为太阳能集热器收到的有效热量<sup>[13]</sup>,kW,即

$$Q_u = A_{\text{sc}} F_{\text{R}} [G(\tau\alpha)_e - U_L(T_i - T_a)]. \quad (5)$$

太阳能集热器的效率为

$$Y = \frac{Q_u}{A_{\text{sc}} G} = F_{\text{R}}(\tau\alpha)_e - \frac{F_{\text{R}} U_L (T_i - T_a)}{G}. \quad (6)$$

式(6)中: $U_L$  为集热器总热损系数; $T_i$  为传热流体进口温度,K; $T_a$  为大气温度的,K; $F_{\text{R}}(\tau\alpha)_e$  为集热器吸收系数; $F_{\text{R}} U_L$  为集热器散热系数.

整个系统的输入最大可用能为

$$E_{\text{in}} = E_u + W. \quad (7)$$

整个系统的输出最大可用能为

$$E_{\text{out}} = E_e = Q_e(T_a / T_r - 1). \quad (8)$$

式(8)中: $T_r$  为房间温度,K.

## 3 计算结果与分析

在太阳能喷射-压缩耦合制冷系统中,喷射制冷子系统制冷剂为 R141b;压缩子系统制冷剂为 R134a. 太阳能辐射强度取 800 W · m<sup>-2</sup>,周围空气温度取 31 °C. 为了研究发生温度、中间温度、冷凝温度和蒸发温度对系统性能的影响,固定 3 个运行温度的值,变化其中 1 个进行分析. 蒸发器为房间供冷,为保证供冷效果,分析时蒸发温度暂取 4 °C. 冷凝温度随环境湿球温度变化,为方便分析,取 1 个较大的定值,40 °C. 根据发生温度对单一喷射系统的效率分析情况<sup>[11]</sup>,取发生温度为 85 °C.

### 3.1 中间温度对系统性能的影响

在蒸发温度为 4 °C,冷凝温度为 40 °C,发生温度为 85 °C 的条件下,系统的 COP 和  $\eta$  随中间温度( $t_{\text{mid}}$ )的变化情况,如图 4 所示. 由图 4 可知:系统 COP 随着中间温度的增加而减小,而  $\eta$  随着中间温度的增加而增加. 中间温度的增加,即压缩制冷系统的冷凝温度升高,导致压缩机功率增加,使 COP 下降. 但喷射制冷子系统的蒸发温度增加,从而使喷射系数也随着增加,使  $\eta$  增加. 中间温度的选择需要综合 COP 与  $\eta$  的变化规律. 因此,选择 1 个位于曲线中间的温度,使 COP,  $\eta$  都比较适合. 此处选取 24 °C.

3.2 发生温度对系统性能的影响

在蒸发温度为 4℃,冷凝温度为 40℃,中间温度为 24℃的条件下,系统的 COP 和  $\eta$  随发生温度 ( $t_g$ ) 的变化情况,如图 5 所示. 由图 5 可知:COP 随着发生温度上升略有下降,而  $\eta$  随发生温度的上升而增大,且发生温度大于 85℃后,增加趋势减缓. COP 主要受压缩机功率和工质泵功率的影响,当蒸发温度和中间温度固定不变时,压缩机的功率是不变的,但是发生温度升高造成工质泵功率的增加,从而使 COP 呈现下降趋势,但因为工质泵功率与压缩机功率相比很小,所以下降趋势不明显. 发生温度的增加导致系统输入焓减小,但工质泵的功率增加,发生温度低时,输入焓占主导位置,所以  $\eta$  增加比较显著,发生温度增大速率变小.

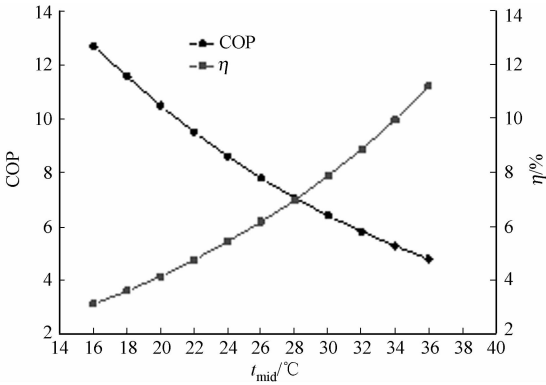


图 4 COP 和  $\eta$  随中间温度的变化

Fig. 4 COP and  $\eta$  with medium temperature

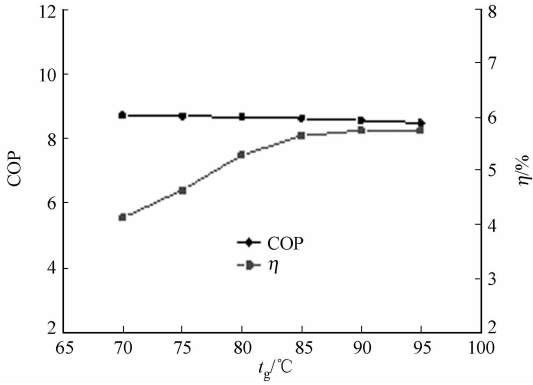


图 5 COP 和  $\eta$  随发生温度的变化

Fig. 5 COP and  $\eta$  with generating temperature

3.3 冷凝温度对系统性能的影响

在蒸发温度为 4℃,中间温度为 24℃,发生温度为 85℃的条件下,系统的 COP 和  $\eta$  随冷凝温度 ( $t_c$ ) 的变化情况,如图 6 所示. 由图 6 可知:COP 和  $\eta$  的值都随冷凝温度的升高而降低;随着冷凝温度的增加,喷射器的冷凝压力增加,喷射系数降低. 这表明更多的制冷剂需要抽到发生器,工质泵需消耗更多的能量,这导致 COP 和  $\eta$  变低.

3.4 蒸发温度对系统性能的影响

在冷凝温度为 40℃,中间温度为 24℃,发生温度为 85℃的条件下,系统的 COP 和  $\eta$  随蒸发温度 ( $t_e$ ) 的变化情况,如图 7 所示. 由图 7 可知:COP 和  $\eta$  随蒸发温度的增加,但  $\eta$  的上升趋势缓慢. 蒸发温度的升高导致压缩制冷子系统冷凝和蒸发的温差减小,压缩机的功率消耗也降低,COP 和  $\eta$  都增加.

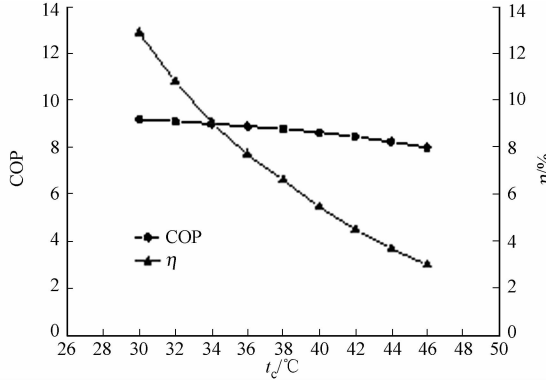


图 6 COP 和  $\eta$  随冷凝温度的变化

Fig. 6 COP and  $\eta$  with condensing temperature

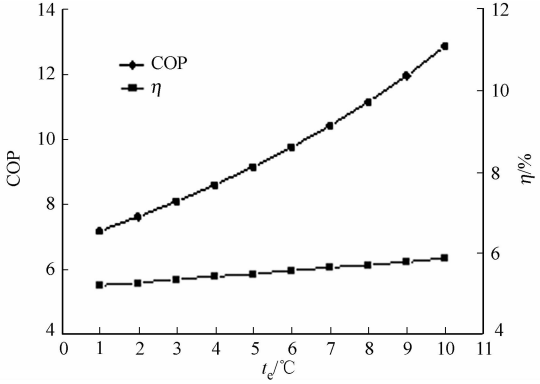


图 7 COP 和  $\eta$  随蒸发温度的变化

Fig. 7 COP and  $\eta$  with evaporating temperature

4 结论

通过对太阳能喷射-压缩复制冷系统的分析,可以得出运行参数对系统性能的影响.

1) 发生温度上升,引起 COP 缓缓下降,而  $\eta$  先增加后趋于平缓,在发生温度大于 85℃后,其值基

本不变.因此,发生温度为 85℃是较为合适的选择.

2) 中间温度上升,系统 COP 随之减小,而  $\eta$  随之增加,将中间温度选为 24℃.

3) 冷凝温度上升,导致 COP 和  $\eta$  随之降低.理论上,冷凝温度越低,系统性能越好.

4) 蒸发温度上升,导致 COP 和  $\eta$  随之增加,理论上,蒸发温度越高,系统性能越好.

总体而言,降低冷凝温度或增加蒸发温度可以提高系统的性能,但冷凝温度受环境湿球温度的影响而变化,而蒸发温度受末端用户需求的限制,不能随意改变.然而,对于发生温度和中间温度可以确定其最佳值分别为 85,24℃.

## 参考文献:

- [1] 李柯,何凡能.中国陆地太阳能资源开发潜力区域分析[J].地理科学进展,2010,29(9):1049-1054. DOI:10.11820/dlkxjz.2010.09.004.
- [2] 马丽梅,张晓.中国雾霾污染的空间效应及经济、能源结构影响[J].中国工业经济,2014(4):19-31.
- [3] SOKOLOV M,HERSHGAL D.Enhanced ejector refrigeration cycles powered by low grade heat (Part 2): Design procedures[J].International Journal of Refrigeration,1990,13(6):357-363. DOI:10.1016/0140-7007(90)90024-q.
- [4] 张博,沈胜强,邱庆刚.新型太阳能双喷射制冷系统的理论研究[J].太阳能学报,2006,27(8):782-787. DOI:10.3321/j.issn:0254-0096.2006.08.008.
- [5] SUN Dawen.Solar powered combined ejector-vapour compression cycle for air conditioning and refrigeration[J].Energy Conversion and Management,1997,38(5):479-491. DOI:https://doi.org/10.1016/s0196-8904(96)00063-5.
- [6] 田琦.太阳能喷射与压缩一体化制冷系统的研究[D].天津:天津大学,2005. DOI:10.7666/d.y1049016.
- [7] 蒋立本.吸收-喷射复合制冷循环的热力学与技术经济学分析与研究[D].西安:西安交通大学,2000. DOI:10.7666/d.Y34656.
- [8] 李春华,王如竹,卢永庄.太阳能固体吸附-喷射制冷联合循环系统研究[J].工程热物理学报,2001,22(4):414-416. DOI:10.3321/j.issn:0253-231X.2001.04.006.
- [9] 李风雷,韩瑞春,程志雯,等.光热光电喷射-直接蒸发复合制冷系统性能[J].华侨大学学报(自然科学版),2017,38(2):189-194. DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201702011.
- [10] 张博,沈胜强,阿布里提·阿不都拉.太阳能喷射式制冷系统性能分析[J].太阳能学报,2001,22(4):88-92. DOI:10.3321/j.issn:0254-0096.2001.04.019.
- [11] 谷宇海,陶乐仁,徐振立.太阳能喷射式制冷系统的焓分析[J].太阳能学报,2007,28(10):1073-1077. DOI:10.3321/j.issn:0254-0096.2007.10.005.
- [12] 白惠峰,田琦,王增长.基于焓分析的太阳能喷射制冷系统运行参数优化[J].建筑热能通风空调,2008,27(4):26-28. DOI:10.3969/j.issn.1003-0344.2008.04.007.
- [13] 别玉,胡明辅,郭丽.平板型太阳集热器瞬时效率曲线的统一性分析[J].可再生能源,2007,25(4):18-20. DOI:10.3969/j.issn.1671-5292.2007.04.006.

(责任编辑:钱筠 英文审校:刘源岗)