

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2017.01.003

太阳能喷射式制冷系统运行特性的研究

袁朝阳, 陶乐仁, 马国强

(上海理工大学 制冷与低温工程研究所, 上海 200093)

摘要:针对目前太阳能喷射式制冷系统在运行时,热源驱动受太阳能辐射波动的影响较大,系统在运行过程中存在工况不稳定的缺点,以电加热为辅助热源的太阳能喷射式制冷实验台为对象,研究了系统的运行特性。系统调试过程中,采用电加热调节热水进出口温度改变发生温度,调节节流阀开度改变蒸发温度。实验结果表明:由于喷射器固有结构的限制,随着发生温度的升高,喷射系数 E_{ER} 、系统性能系数 C_{COP} 与机械性能系数 C'_{COP} 并非一直增大,系统存在一个最佳的发生温度;控制发生温度在85℃时,随着蒸发温度的升高,喷射系数 E_{ER} 、系统性能系数 C_{COP} 与机械性能系数 C'_{COP} 也逐渐增大,但增大的幅度逐渐变小。通过实验得出了系统最佳工作工况,为维持系统高效可靠的运行提供了方法。

关键词:喷射式制冷,发生温度,蒸发温度,性能系数(COP)

中图分类号:TK124 文献标志码:A 文章编号:1005-2895(2017)01-0010-05

Operating Characteristic Study of Solar Ejector Refrigeration System

YUAN Zhaoyang, TAO Leren, MA Guoqiang

(Institute of Refrigeration and Cryogenics, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the weakness that solar ejector refrigeration system is greatly affected by solar fluctuation and has defect of unstable operating condition in operation, the solar ejector refrigeration experiment table with electric heating as auxiliary heat source was taken as the research object to study operating characteristics of the system. In the process of the system debugging, electric heating was used to control hot water inlet and outlet temperature to change the generating temperature, and to control opening of the throttle valve to change the evaporation temperature. Experimental results showed because of the ejector nature structure limit, the ejection coefficient E_{ER} , system coefficient of performance and mechanical C'_{COP} were not always increasing with the increase of the generating temperature, the system had an optimum generating temperature. When generating temperature was 85℃, the ejection coefficient E_{ER} , system coefficient of performance and mechanical C'_{COP} would increase with the evaporation temperature increase, but the increasing amplitude gradually became smaller. The best working condition presented in this paper provided an appropriate way to keep the system in efficient and reliable operation.

Keywords: ejector refrigeration; generating temperature; evaporation temperature; coefficient of performance(COP)

太阳能喷射式制冷系统以低品位热源—太阳能作为动力来实现制冷循环,是可持续发展的技术之一。其结构简单、运行可靠无振动,但存在驱动热源受天气与季节影响较大的缺点,制冷效率较低,故提高喷射式制冷系统的效率是现今需要解决的重要问题。早期的研究主要集中在一些基础实验和模拟系统的理论分析上。张博等^[1]研究了冷却水温度对系统性能系数

C_{COP} 的影响,得出了随着冷却水温度的下降,系统性能系数 C_{COP} 呈上升的趋势,在冷却水温达到28℃时系统趋于稳定。王永红等^[2]利用真实气体模型对喷射式制冷系统的喷射器进行CFD模拟计算,得出当喷射器结构固定,蒸发温度在6~20℃时,蒸发温度越高,喷射器性能越好。刘娜等^[3]对太阳能喷射式制冷系统进行热力学分析,结果发现系统性能系数 C_{COP} 随着蒸发温度的升高而增大,总熵产随着蒸发温度的升高而

收稿日期:2016-08-11;修回日期:2016-09-28

基金项目:上海市重点实验室资助项目(1N-15-301-101)。

第一作者简介:袁朝阳(1992),男,河南信阳人,硕士,主要从事制冷循环系统优化的研究。E-mail:1257761950@qq.com

减小,发生温度和蒸发温度的适当提高有利于改善系统的整体性能,但没有进行具体的实验验证。本文在早期研究的基础上,通过太阳能喷射式制冷实验台,研究了系统在不同发生温度和蒸发温度下的运行特性,对提高系统的稳定性和工作效率,最大限度发挥喷射式制冷系统的优点进行实验验证,为系统实际运行和之后的研究提供参考。

1 实验原理及方法

1.1 实验原理

实验选用 R141b 为制冷工质,驱动热源以太阳能为主,电加热作为辅助热源。系统与常用的压缩式制冷系统的区别在于采用喷射器代替压缩机,利用喷射器中的喷嘴产生高速流体所形成的真空度来引射蒸发器中的制冷剂进行工作^[4],可以节省压缩机耗功。图 1 为系统原理图,主要由太阳能集热器、水泵、水箱、发生器、工质泵、喷射器、蒸发器、节流阀、冷凝器和储液器组成。

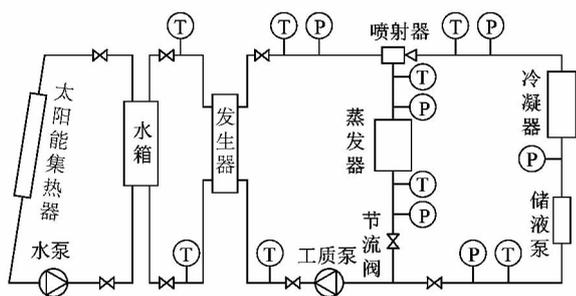


图 1 太阳能喷射式制冷系统原理图

Figure 1 Principle of solar ejector refrigeration system

实验系统由 2 个子循环组成,子循环之间通过发生器进行热交换。发生器左侧是太阳能集热子循环,其利用太阳能集热器吸收太阳能加热循环中的传热流体,传热流体再经过发生器将吸收的热量传递给发生器右侧的制冷剂,然后传热流体再返回水箱补充热量,完成太阳能集热子循环。发生器右侧是制冷子循环,制冷剂液体流经发生器与左侧的传热流体换热形成蒸气,蒸气流经喷射器喷嘴附近加速流动而产生低压区,形成的压差将下方蒸发器中的制冷剂蒸气吸入而形成引射流体,并在混合室中与喷嘴出来的蒸气混合,经缩放扩压室扩压后流入冷凝器中冷凝放热,直至形成饱和液体。冷凝后的制冷剂液体进入储液器,从储液器出来后分成 2 路:一路经过工质泵加压后回到发生器,在发生器中再次与传热流体进行热交换;另一路经节流阀降压至蒸发压力,在蒸发器内再次吸热汽化完成制冷子循环。

1.2 实验设备及工况

1) 发生器。制冷剂在发生器中吸热汽化,发生器是系统换热量最大的部件,其换热效率直接影响系统的效率。为提高换热效率强化换热,实验采用阿法拉伐的板式换热器作为发生器,型号为 AC-70X-12M-F,耐温 $-196.0 \sim 150.0 \text{ } ^\circ\text{C}$,耐压 3.2 MPa 。采用电加热调节热水进出口温度来改变发生温度。实验以室内环境温度 $31.2 \text{ } ^\circ\text{C}$,蒸发温度 $22 \text{ } ^\circ\text{C}$,冷凝温度 $35 \text{ } ^\circ\text{C}$ 为定量,控制发生器在发生温度分别为 $70, 75, 80, 85, 90,$ 和 $95 \text{ } ^\circ\text{C}$ 下运行,研究系统的特性。

2) 蒸发器。实验采用满液式蒸发器,使用电加热平衡法测量系统的制冷量。加热量由温控器 PID 调节控制,控制精度为 $0.1 \text{ } ^\circ\text{C}$,为了保证实验的可靠性,实验前需对蒸发器进行漏热标定,求出修正系数。蒸发温度通过调节节流阀的开度来改变。实验以室内环境温度 $31.2 \text{ } ^\circ\text{C}$,发生温度 $85 \text{ } ^\circ\text{C}$,冷凝温度 $35 \text{ } ^\circ\text{C}$ 为定量,控制蒸发器在蒸发温度分别为 $18, 19, 20, 21, 22$ 和 $23 \text{ } ^\circ\text{C}$ 下运行,研究系统的特性。

实验台的数据采集使用北京某公司的 Force Control V6.1 组态软件,实验开发了太阳能喷射式制冷系统的数据采集界面,可以实现数据的自动采集,数据报表以及实时/历史曲线显示等功能。采集系统共设置 14 个温度点,通过 ADAM-5510E 模块和 2 个 ADAM-5018 热电偶模块实现通信连接。模块把温度信号转换成数字信号,经过 RS232C 串行口传输到 PC 机上。组态软件灵活、可复制、通用性强,用户可通过改变硬件配置文件、软件图形文件及实时数据库等配置信息来构建新的系统监控平台以适应不同系统的要求。该构建方式既提高了系统的开发效率,又保证了系统软件的成熟性和可靠性,使用方便灵活且便于维护和修改^[5]。

1.3 计算方法

实验通过采集模块中的温度和压力数据,以理论压焓图进行热力学计算分析。太阳能喷射式制冷循环的 $L_{gp}-h$ 图如图 2 所示,其中 h 为焓, p 为压力。

系统有 2 个循环回路,6—7—1—3—4—5—6 为太阳能集热系统提供的高温高压动力循环回路,6—7—8—9—5—6 为制冷系统的循环回路。1—3 过程为制冷剂的发生过程,制冷剂液体与太阳能集热器中的热水在发生器中进行热交换,吸收热量汽化成高温高压蒸气;3—4 过程为高温高压的工作流体流经喷嘴时等熵膨胀,膨胀后压力降低,速度达到超音速流动;点 5 为状态点 4 的工作流体和状态点 9 的引射流体等压

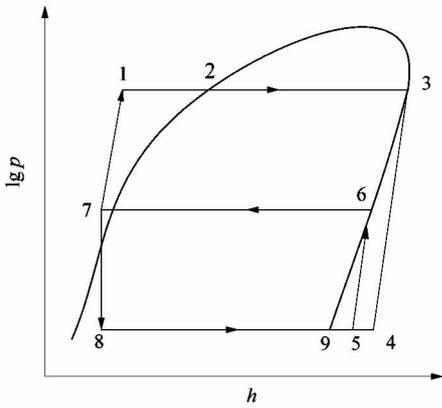


图2 太阳能喷射式制冷压焓图

Figure 2 Pressure-enthalpy diagram of solar ejector refrigeration system

混合后的状态,5—6为扩压过程;8—9过程为引射流体在蒸发器内的蒸发过程;6—7过程为制冷剂工质在冷凝器中的冷凝过程,冷凝后的工质分成2路;7—1过程为冷凝后的工质经过工质泵提高压力后回到发生器内;7—8过程为冷凝后的工质经过节流后回到蒸发器,完成整个系统循环。

喷射式制冷系统的输入能量为发生器提供的热量和循环中工质泵所消耗的机械功。实验中各点焓值由温度和压力测点的值经 refprop 物性软件得到。然后通过相应的公式计算系统的性能系数,分析系统的运行性能^[6-8]。

系统的制冷量 Q_e 为:

$$Q_e = m_e (h_9 - h_8) \quad (1)$$

式中: m_e 为蒸发器出口的制冷剂流量,即引射流体的质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; h_9 为蒸发器出口焓值, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; h_8 为蒸发器进口焓值, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

发生器所需热量 Q_g 为:

$$Q_g = m_g (h_3 - h_1) \quad (2)$$

式中: m_g 为发生器出口的制冷剂流量,即工作流体的质量流量, $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$; h_3 为发生器的出口焓值, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; h_1 为发生器的进口焓值, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

冷凝量 Q_c 为:

$$Q_c = (m_e + m_g) (h_6 - h_7) \quad (3)$$

式中: h_6 为冷凝器进口的焓值, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; h_7 为冷凝器出口焓值, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

泵的机械能 W_m 为:

$$W_m = m_g (h_1 - h_7) \quad (4)$$

根据喷射器中能量守恒得:

$$m_g h_3 + m_e h_9 = (m_e + m_g) h_6 \quad (5)$$

整理得系统的喷射系数 E_{ER} 为:

$$E_{ER} = \frac{m_e}{m_g} = \frac{h_3 - h_6}{h_6 - h_9} \quad (6)$$

制冷系统性能系数 C_{COP} 的数学表达式如下:

$$C_{COP} = \frac{Q_e}{Q_g + W_m} = \frac{m_e (h_9 - h_8)}{m_g (h_3 - h_1) + m_g (h_1 - h_7)} = E_{ER} \frac{h_9 - h_8}{h_3 - h_7} \quad (7)$$

从计算式(7)可以看出,系统性能系数 C_{COP} 的计算可以完全由在个工作状态下的焓值确定。但对于太阳能喷射式制冷系统来说,通常使用机械性能系数 C'_{COP} (系统制冷量与泵机械能的比值)来评价系统的性能,由于系统运行过程中使用的能量大部分是太阳能,因此机械性能系数 C'_{COP} 能更好地反映出太阳能喷射式制冷系统利用太阳能的经济性,其数学表达式如下:

$$C'_{COP} = \frac{Q_e}{W_m} = E_{ER} \frac{h_9 - h_8}{h_1 - h_7} \quad (8)$$

2 实验结果及分析

2.1 发生温度对系统的影响

由图3可以看出,喷射系数 E_{ER} 、系统性能系数 C_{COP} 及机械性能系数 C'_{COP} 随发生温度的增加呈现先上升后下降的趋势。发生温度在 85°C 左右时,3者均出现了最大值,分别为 0.307, 0.193 和 1.731。

由理论分析可知^{[9]53},随着发生温度的升高,发生器中产生蒸气所具有的能量增多,在喷射器中的引射流体增大。系统单位质量的工作流体可以引射更多的制冷剂蒸气,也即系统的喷射系数 E_{ER} 增大,所以系统性能系数 C_{COP} 及机械性能系数 C'_{COP} 也会随着发生温度的升高呈现增加的趋势,但是并没有一直随着发生温度的升高而增加,在发生温度为 85°C 时出现了最佳值。当发生温度超过 85°C 以后,3者随着发生温度的增加呈现下降的趋势。分析可知这是由喷射器的固定结构所决定的,因为喷射器设计时采用的工况为 85°C , 冷凝温度为 38°C , 蒸发温度为 8°C , 喷射器混合段截面积是根据发生流体与引射流体在此工况下的最大喷射系数的等压混合截面积设计的。因此当工况条件发生变化时,固定结构的喷射器的喷射系数会由于混合段截面积的限制而不再继续随着发生温度的升高一直增大,当蒸气流量达到一定数值时,喷射器喉部的速度也达到了壅塞速度,此时的壅塞现象影响了喷射器的性能,因此进一步提高发生器温度也不会引射更多的制冷剂蒸气,所以在发生温度超过 85°C 时,系统的

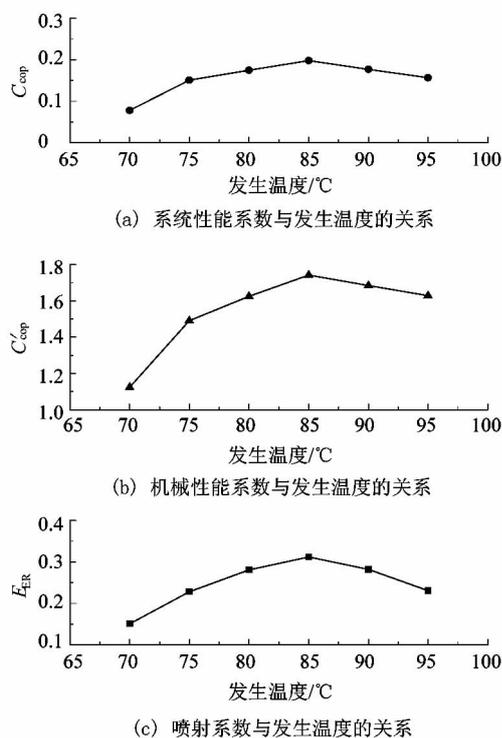


图3 系统的性能随发生温度的变化趋势

Figure 3 Generating temperature effect on system performance

喷射系数 E_{ER} 、系统性能系数 C_{COP} 及机械性能系数 C'_{COP} 均出现下降的趋势。喷射器的固定结构限制了发生温度的继续增长,因此实际运行中系统需设计多种规格的喷射器以优化其性能。

2.2 蒸发温度对系统的影响

由图4中的变化趋势可以看出,3者随蒸发温度的升高均呈现逐渐上升的趋势。喷射系数 E_{ER} 由0.239上升至0.314,系统性能系数 C_{COP} 由0.156上升至0.198,机械性能系数 C'_{COP} 由1.296上升至1.792。

由理论分析可知^{[9]54},引射流体经过蒸发、混合和扩压过程完成蒸发器的制冷效果,蒸发温度的升高可以提高系统性能系数 C_{COP} 。在喷射式制冷系统中,喷射器替代了蒸气压缩式制冷系统中的压缩机,蒸发温度的升高意味着引射相同流量的制冷剂蒸气所需要的工作流体的能量变少,所以提高蒸发温度有利于提高系统的喷射系数 E_{ER} ,进而提高系统性能系数 C_{COP} 及机械性能系数 C'_{COP} 。实验数据显示,随着蒸发温度的升高3者均呈现上升的趋势,符合理论分析。但是,从变化趋势可以看出,3者增加的斜率随着蒸发温度的升高在变小,即系统性能的改善幅度在变小。通过分析可知,这是由于固定结构的喷射器限制了喷射系数

的增加,进而影响了系统性能系数 C_{COP} 及机械性能系数 C'_{COP} 的增长。

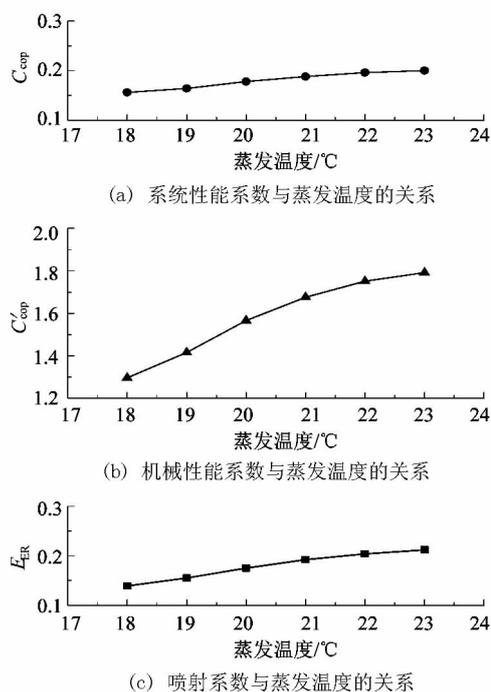


图4 系统的性能随蒸发温度的变化趋势

Figure 4 Evaporating temperature effect on system performance

3 结论

对于固定结构的喷射器,系统存在一个最佳的发生温度,此时喷射系数 E_{ER} 、系统性能系数 C_{COP} 及机械性能系数 C'_{COP} 均达到最大值;并且3者也都随着蒸发温度的上升而上升,但当蒸发温度过高时,3者增加的斜率在变小,这是由于喷射器固定结构限制了喷射系数的增加所造成的。系统以电加热为辅助热源,弥补了实验时太阳辐射的不稳定性对系统性能的影响,进一步实验可通过将电加热作为备用热源,研究太阳能与电加热能量的配比对系统效率的影响。实验结论符合早期研究关于发生温度和蒸发温度的适当提高有利于改善系统的整体性能的理论分析,但由于实验所用的喷射器在设计时采用的工况比较单一,实验结论具有一定的局限性,在后续的工作中可从不同规格的喷射器对系统运行性能的优化方面研究。

参考文献:

- [1] 张博,沈胜强. 太阳能喷射式制冷系统性能的实验研究[J]. 热科学与技术, 2006, 5(1): 59-63.
- [2] 王永红,陶乐仁,王金锋,等. 蒸发条件对喷射器性能的影响研究[J]. 工程热物理学报, 2011, 32(6): 1002-1004.

(下转第18页)