

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.01.018



空调用蒸发式冷凝器能耗实验研究

傅俊萍, 刘哲宇, 何叶从, 石沛

(长沙理工大学 能源与动力工程学院, 长沙 410114)

摘要:当室外气温较高时,风冷热泵系统冷凝器存在换热效果下降的问题,而蒸发式冷凝器可以改善此问题,蒸发式冷凝器因此逐步得到广泛重视。为研究采用蒸发式冷凝器制冷系统的能耗情况,通过正交实验的方法,对比研究了蒸发式冷凝器与风冷式冷凝器在相同工况下压缩机能耗情况,并对影响其性能的因素进行了分析。研究表明,各因素对压缩机耗功量的影响能力依次为:冷凝器进口空气温度、速度及冷凝器喷水量。压缩机耗功量随进口空气温度的升高、进风空气速度降低而增大,随喷水量增加存在先减小后保持不变的现象。

关键词:冷凝器;能耗分析;节能;传热传质

中图分类号:TU831.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)01-0129-05

Experimental analysis on energy consumption of air-conditioning evaporative condenser

Fu Junping, Liu Zheyu, He Yecong, Shi Pei

(College of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, P. R. China)

Abstract: The heat transfer efficiency of air-cooled heat pump system would decrease in high outdoor temperature. Evaporative condenser gradually get wide attention due to its contribution to solve the problem. In order to study the energy consumption of heat pump with evaporative condenser, it was made a comparative study about compressor power consumption of evaporative condenser and air cooling condenser under the same conditions by orthogonal experiment and analyzed factors of efficiency. The results show that the influence of factors on power consumption and energy efficiency of compressor are as follows: inlet air temperature of condenser water volume, air velocity. Compressor power consumption increases with the increase of inlet air temperature and the decrease of air velocity. The compressor energy consumption decreases at first and then is constant with the increase of water volume.

Keywords: condenser; energy consumption analysis; energy saving; heat and mass transfer

收稿日期:2017-04-16

基金项目:国家自然科学基金(51406015);湖南省教育厅科研项目(16B012);湖南省科技厅项目(2013NK3003);长沙市科技局科研项目(K1403040-11)

作者简介:刘哲宇(1994-),男,主要从事暖通空调设备及建筑节能研究,E-mail:bullzheyu666@163.com.
傅俊萍(通信作者),女,教授,E-mail:fujunping000@163.com.

Received:2017-04-16

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51406015); Hunan Provincial Department of Education Research Projects (No. 16B012); Scientific Research Fund of Hunan Provincial Science and Technology Department (No. 2013NK3003); Scientific Research Fund Changsha Science and Technology Department (No. K1403040-11)

Author brief: Liu Zheyu (1994-), main research interests: heating ventilation and conditioning and building energy efficiency, E-mail: bullzheyu666@163.com.

Fu Junping (corresponding author), professor, E-mail: fujunping000@163.com.

风冷式冷凝器热泵系统组成简单,性能稳定可靠^[1],是空调系统中广泛使用的一种设备。但当室外气温升高时,风冷式冷凝器的散热环境变差,导致压缩机耗能增大。蒸发式冷凝器因换热效率高,并具有节能、节水、结构紧凑等优势,在暖通空调行业越来越受到关注。

Ala 等^[2]通过实验研究发现,在蒸发式冷凝器中翅片管束比光管管束传递热量多 92%~140%。Hosoz 等^[3]、庄友明^[4]、王少为等^[5]、张建一等^[6]、王军等^[7]通过实验发现,蒸发式冷凝器系统能耗比风冷式、水冷式少 31%和 14.3%。Ertunc 等^[8-9]利用神经网络系统建立了蒸发式冷凝器系统性能的预测模型。Vrachopoulos 等^[10]、Wang 等^[11]、Liu 等^[12]分别通过整合蒸发式冷凝系统发现,降低压缩机的操作温差,系统性能系数最大可提高 211%,利用蒸发冷却式冷凝器预冷空气,系统 COP 从 6.1%增加至 18%,压缩机的能耗降低了 14.3%。朱冬升等^[13]、李元希等^[14]研究了喷淋水蒸发式冷凝器传热传质性能,发现喷淋密度满足最小值时,改变喷淋密度对其传热传质性能影响不大。高焯等^[15]、叶军等^[16]通过实验研究得出了蒸发式冷凝器传热系数的拟合经验关系式。李元希等^[17-18]对板式蒸发式冷凝器进行了传热性能的实验研究,发现板式蒸发式冷凝器存在最佳入口风速和喷淋密度。

在对蒸发式冷凝器的已有研究中,由于侧重点不同以及实验条件各异,研究结果通用性不强。而且,蒸发式冷凝器性能受多种因素的影响,空气参数及喷淋水参数是其中的两个重要因素。参数值选取不当或者风量与水量间的配比关系不合理,都会对蒸发式冷凝器的换热效果产生很大影响。为深入研究喷水量、进风温度、进风速度等参数的耦合情况对蒸发式冷凝器压缩机能耗的影响,笔者设计并搭建了风冷蒸发式冷凝器换热实验平台,并在风冷式翅片管冷凝器设计的基础上,增加了喷淋装置,构成风冷式与蒸发式两用型冷凝器换热性能实验系统。

1 实验系统

实验系统主要由空气处理系统、空调制冷系统、喷淋水系统以及相关测试设备组成,如图 1 所示。空气处理系统主要由变频风机、表冷器、电加热器、加湿装置和测量仪器组成,通过对各设备进行综合调节控制,提供实验段入口所需的空气参数。空调制冷系统主要由蒸发器、冷凝器、压缩机组成,压缩机最大输入功率 1 900 W,吸排气侧最高压力 4.2

MPa,冷凝器的换热面积为 15.19 m²。蒸发器置于保温密闭性能很好的人工环境室中,并在环境室内放置恒定功率的热源,用以模拟房间热负荷。喷淋水系统则是为蒸发式冷凝器提供水源,主要由膨胀水箱、变频加压水泵、喷嘴、布水管道以及相关测试仪器等设备组成,其中,由膨胀水箱出来的自来水经变频水泵加压后,经管道至喷嘴均匀喷洒到冷凝器上表面,喷嘴之间间距为 102.5 mm,喷嘴与冷凝器的距离为 80 mm 时,冷凝器水膜分布较均匀。蒸发式冷凝器喷淋水系统如图 2 所示。

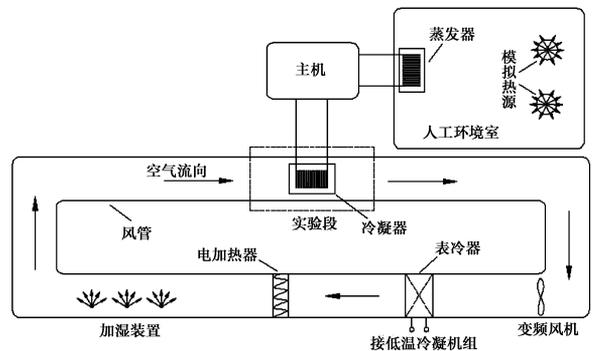


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental system

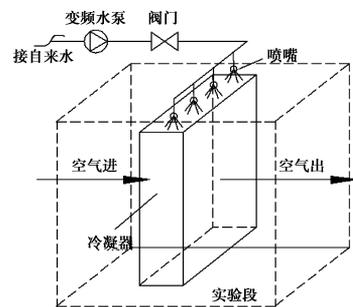


图 2 实验段蒸发式冷凝器喷淋水系统示意图

Fig. 2 The system diagram of experimental section of evaporative condenser spray water

2 实验结果与分析

2.1 空调用蒸发式冷凝器能耗正交实验研究

影响蒸发式冷凝器性能的因素主要有:喷水量、喷水温度、进风温度、空气进口相对湿度、进风速度、制冷剂流量、制冷剂温度、蒸发器的主体结构 and 表面状况等。实验中,由于喷淋水的作用,使得空气流到蒸发式冷凝器进口附近时湿度增加很大,而空气湿度的变化对蒸发式冷凝器的换热影响不大。蒸发式冷凝器的制冷剂流量和温度,蒸发器的主体结构和表面状况对冷凝器的换热系数均有一定的影响,但上述因素在风冷式空调系统设计时均已考虑,因此,

不做为本次实验研究的重点。综上原因,在影响蒸发式冷凝器性能的因素中,主要考虑:进风温度、进风速度、喷水量 3 个因素。喷淋水直接采用长沙地区夏季自来水,水温为 23 ℃,实验中取相对湿度 60%。运用正交实验法确定冷凝器进口空气温度、速度、喷水量 3 个因素的最佳水平以及对换热性能的影响。正交实验因素水平如表 1 所示,选用正交实验表 $L_9(3^4)$ 安排实验,压缩机节能效率 φ 可由式 (1) 计算得出。

$$\varphi = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: φ 为节能效率,%; W_1 为不喷水时压缩机耗功量, W ; W_2 为喷水时压缩机耗功量, W 。

表 1 正交实验因素水平表

Table 1 The level table of orthogonal factors

因素水平	进风温度 $t/^\circ\text{C}$	进风速度 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	喷水量 $Q_s/(\text{L} \cdot \text{h}^{-1})$	实验指标 W_2/W 或 $\varphi/\%$
1	28	2	14	
2	33	2.5	18	
3	38	3	22	

通过直接观察表 2 中的实验指标,可知实验序号 3 即进风温度为 1 水平、进风速度为 3 水平、喷水量为 3 水平时,蒸发式冷凝器耗功量最小,为 418 W。同时,发现实验序号 5 即进风温度为 2 水平、进风速度为 2 水平、喷水量为 3 水平时,蒸发式冷凝器节能效率最大,为 36.92%。

表 2 正交实验结果表

Table 2 The results table of orthogonal experiment

实验序号	进风温度 $t/^\circ\text{C}$	进风速度 $v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	喷水量 $Q_s/(\text{L} \cdot \text{h}^{-1})$	不喷水时耗功 W_1/W	喷水时耗功 W_2/W	节能效率 $\varphi/\%$
1	1 (28)	1 (2.0)	1 (14)	506	462	8.70
2	1 (28)	2 (2.5)	2 (18)	484	429	11.36
3	1 (28)	3 (3.0)	3 (22)	462	418	9.52
4	2 (33)	1 (2.0)	2 (18)	737	550	25.37
5	2 (33)	2 (2.5)	3 (22)	715	451	36.92
6	2 (33)	3 (3.0)	1 (14)	693	572	17.46
7	3 (38)	1 (2.0)	3 (22)	836	594	28.95
8	3 (38)	2 (2.5)	1 (14)	814	638	21.62
9	3 (38)	3 (3.0)	2 (18)	792	572	27.78

以各因子的水平为横坐标,压缩机耗功量为纵坐标,绘制直观分析趋势图,如图 4 所示。

从图 4 可以看出,压缩机耗功量随着进风温度

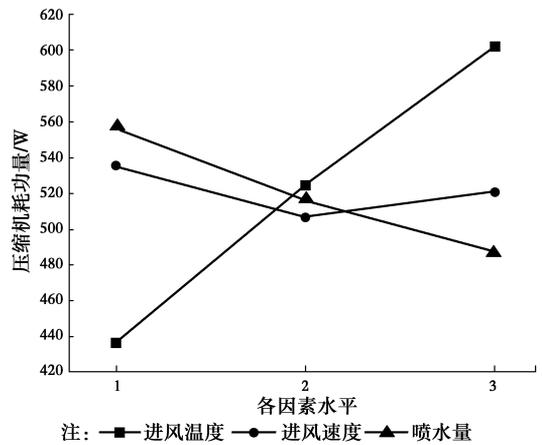


图 3 各因子与压缩机耗功量间的水平趋势图

Fig. 3 The trend graph of each factor and the compressor power consumption

的升高或者喷水量的减小而增大;而随着进风速度的增大,压缩机耗功量先减小后增大,可见,风速并不是越大越好,而是存在一最佳风速值。

为了进一步分析各因素对冷凝器换热性能的影响程度,运用方差分析法对正交实验结果进行了分析,如表 3 所示。

表 3 以压缩机耗功量为指标的正交实验的方差分析表

Table 3 Variance analysis table of the orthogonal experiment based on compressor consumption

方差来源	平方和	自由度	均方差	F 值
进风温度	40 898	2	20 449	9.57
进风速度	1290.7	2	645.35	
喷水量	7 340.7	2	3 670.35	1.72
误差 e (空列)	2 984.6	2	1 492.3	
误差 e'	4 275.3	4	2 137.65	
总偏差	5 2514	8		

$F_{0.05}(2,4) = 6.94; F_{0.1}(2,4) = 4.32$

由表 3 可知,进风速度的离差平方和小于误差的离差平方和,进风速度对实验指标影响较小,因而将进风速度项归入误差进行分析。通过计算得到的 F 值与 F 检验的临界值比较可知,影响压缩机耗功量的因素主次关系依次为:进风温度、喷水量、进风速度,这与直观分析得到的结论一致。

2.2 空调用蒸发式冷凝器能耗单因素实验研究

由 2.1 内容可知,启用喷淋装置比不启用喷淋装置更加节能,而且,各因素的最佳水平分别为:进风温度 33 ℃、进风速度 2.5 m/s、喷水量 22 L/h,各最佳水平组合时节能效率最大,达 36.92%。分别对喷水量、进风温度、进风速度 3 个因素进行了单因素

实验,即保持其他两个因素条件不变,只改变另外一个因素的值进行实验。实验结果如图6所示。

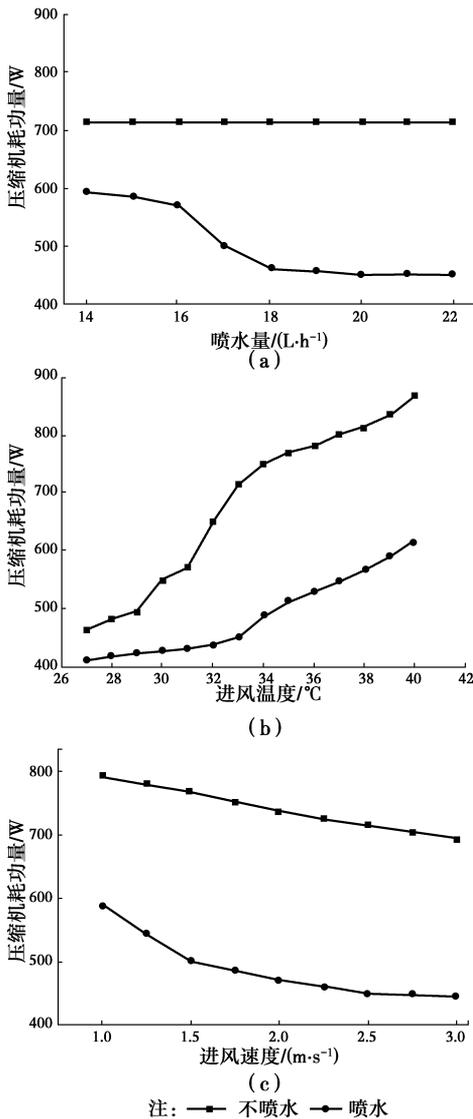


图4 喷水量、进风温度、进风速度对压缩机耗功量的影响

Fig. 4 The influence on compressor consumption of water volume, air temperature and air velocity

由图4(a)可知,同样条件下,启用喷水装置比不启用喷水装置时压缩机耗功量少,且随着喷水量的增加,压缩机耗功量从594 W减小到451 W后保持不变,这是因为,冷凝器上覆盖的水膜的汽化潜热降低了冷凝器内制冷剂的温度,因而,压缩机耗功量变小。当喷水量达到一定程度后,覆盖在冷凝器表面的水膜较均匀,此后再增加喷水量,冷凝器的传热传质能力不会增加,压缩机耗功量保持不变。由图4(b)可知,同等条件下,压缩机的耗功量随着进风温度的升高而增加,且喷水时的耗功量更小。这是因为,进风温度与冷凝器内制冷剂的传热温差是冷凝器传热的推动力,因此,进风温度的升高会使得压缩

机消耗更多的功。由图4(c)可知,保持进风温度33°C不变,压缩机的耗功量随着进风速度的升高而减小,且喷水时的耗功量小。不喷水时,进风速度的增加会强化空气与冷凝器的对流换热;喷水时,风速的增加使得空气与水膜间的对流换热以及传质过程增强,达到相同的制冷效果,压缩机耗功量减少。

3 结论

通过实验研究得出:冷凝器是否采用喷淋均存在同一进风速度下压缩机耗功量随进风温度的升高而增大;而在同一进风温度下,压缩机耗功量随进风速度的增加而降低,且采用喷淋后的压缩机能耗比不采用喷淋时有所下降。通过正交实验结果直观分析与方差分析得出,影响压缩机耗功量的主次关系均为:进风温度、喷水量、进风速度,且当进风温度为28°C、进风速度为2.5 m/s、喷水量为22 L/h时,压缩机耗功量最小,为418 W。

笔者只对选定的参数及其水平进行了研究,若要得出更为全面的研究结论,还需要另外选定参数及水平,在其他工况条件进行深入研究。

参考文献:

- [1] 郑贤德. 制冷原理与装置[M]. 2版. 北京:机械工业出版社,2008.
ZHENG X D. Refrigeration principle and device [M]. 2ed. Beijing: Machinery Industry Press, 2008. (in Chinese)
- [2] ALA H, KAI S R. Performance investigation of plain and finned tube evaporative cooled heat exchangers [J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(3):325-340.
- [3] HOSOZ M, KILICARSLAN A. Performance evaluations of refrigeration systems with air-cooled, water-cooled and evaporative condensers [J]. International Journal of Energy Research, 2004, 28: 683-696.
- [4] 庄友明. 蒸发式冷凝器和水冷式冷凝器的能耗比较及经济性分析[J]. 制冷, 2001, 20(1):48-51.
ZHUANG Y M. Energy consumption comparison and economical analysis of evaporative condenser and water-cooled condenser [J]. Refrigeration, 2001, 20(1):48-51. (in Chinese)
- [5] 王少为,于立强. 蒸发式冷凝器应用于户式空调的实验研究[J]. 节能, 2003(3):9-12.
WANG S W, YU L Q. Experimental study on the application of evaporative condenser in residential air conditioner [J]. Energy Saving, 2003 (3): 9-12. (in

- Chinese)
- [6] 张建一,秘文涛.工业用蒸发式和水冷式冷凝器的循环水量和能耗研究[J].制冷技术,2007,35(3):253-256.
ZHANG J Y, MI W T. Study on circulating water and energy consumption of industrial evaporative and water-cooled condensers [J]. Refrigeration Technology, 2007, 35(3):253-256. (in Chinese)
- [7] 王军,王海霞,毕文峰.氨用制冷系统蒸发式冷凝器的能耗研究[J].制冷技术,2011,39(10):74-77.
WANG J, WANG H X, BI W F. Study on energy consumption of evaporative condenser in ammonia refrigeration system [J]. Refrigeration Technology, 2011, 39(10):74-77. (in Chinese)
- [8] ERTUNC H M, HOSOZ M. Artificial neural network analysis of a refrigeration system with an evaporative condenser [J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26: 627-635.
- [9] ERTUNC H M, HOSOZ M. Comparative analysis of an evaporative condenser using artificial neural network and adaptive neuro-fuzzy inference system [J]. International Journal of Refrigeration, 2008, 31: 1426-1436.
- [10] VRACHOPOULOS M G, FILIOS A E, KOTSIOVELOU G T. Incorporated evaporative condenser [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27: 823-828.
- [11] WANG T W, SHENG C G, NNANNA A G A. Experimental investigation of air conditioning system using evaporative cooling condenser [J]. Energy and Buildings, 2014, 81:435-443.
- [12] LIU H W, ZHOU Q S, LIU Y L. Experimental study on cooling performance of air conditioning system with dual independent evaporative condenser [J]. International Journal of Refrigeration, 2015, 55:85-92.
- [13] 朱冬生,沈家龙,唐广栋,等.水分布对蒸发式冷凝器传热传质的影响[J].工程热物理学报,2007,28(1):83-85
ZHU D S, SHENG J L, TANG G D, et al. Effect of water distribution on heat and mass transfer in evaporative condenser [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2007, 28(1):83-85. (in Chinese)
- [14] 李元希,蒋翔,吴治将,等.板式蒸发式冷凝器水膜传热特性研究[J].武汉理工大学学报,2010,32(13):131-134.
LI Y X, JIANG X, WU Z J, et al. Study on water film heat transfer characteristics of plate evaporative condenser [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(13):131-134. (in Chinese)
- [15] 高煌,张欢,由世俊,等.利用蒸发式冷凝器再生除湿溶液时传质系数的实验研究[J].暖通空调,2012,42(1):65-68.
GAO H, ZHANG H, YOU S J, et al. Experimental study on mass transfer coefficient of regenerative desiccant solution by evaporative condenser [J]. Heating Ventilation & Air Conditioning, 2012, 42(1): 65-68. (in Chinese)
- [16] 叶军,章立新,沈艳,等.氨蒸发式冷凝器性能测试与计算[J].大众科技,2013,163(15):76-79.
YE J, ZHANG L X, SHENG Y, et al. Performance test and calculation of ammonia evaporative condenser [J]. Popular Science and Technology, 2013, 163(15): 76-79. (in Chinese)
- [17] 李元希,蒋翔,吴治将,等.板式蒸发式冷凝器水膜传热特性研究[J].武汉理工大学学报,2010,32(13):131-134.
LI Y X, JIANG X, WU Z J, et al. Study on water film heat transfer characteristics of plate evaporative condenser [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010, 32(13):131-134. (in Chinese)
- [18] 李元希,黄河,杨永峰,等.板式蒸发式冷凝器的性能实验[J].制冷与空调,2011,11(4):43-48.
LI Y X, HUANG H, YANG Y F, et al. Performance experiment of plate evaporative condenser [J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2011, 11(4):43-48. (in Chinese)