

文章编号:1671-6833(2015)05-0044-05

R744 混合自然工质热泵系统特性研究

张仙平^{1,2}, 杨磊³, 魏新利², 王方³, 陈爱东¹

(1. 河南工程学院 土木工程学院, 河南 郑州 451191; 2. 郑州大学 化工与能源学院, 河南 郑州 450001; 3. 中原工学院 环境与能源学院, 河南 郑州 450007)

摘要:采用 EES(Engineering Equation Solver) 软件建立了跨临界循环混合工质热力学模型, 以中原地区典型城市—郑州的气象和水文条件模拟 R744/R290 自然混合工质热泵系统的性能, 基于计算数据, 对总当量变暖影响 (TEWI) 进行了估算. 结果表明: 在设计工况下, 不带回热器跨临界 R744/R290 热泵热水装置的最优制热 COP 可达 4.104. 经计算, 用于郑州地区的年平均制热 COP 为 4.202. 与其他常规能源热水器相比, R744/R290 热泵热水装置 CO₂ 排放量平均可减少 36.39%. 论文还计算并探讨了回热器和压缩机等熵效率对热泵系统性能的影响. 综合分析, R744/R290 热泵热水装置具有能效高且环保的优点.

关键词: R744; 混合自然工质; 热泵; TEWI; 雾霾

中图分类号: TB61⁺5; TU833⁺.1 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-6833.2015.05.010

0 引言

近几年, 华北华中地区冬季雾霾日趋严重, 直接影响人民的生活质量甚至健康^[1]. 形成雾霾的因素多种多样, 其中工业、生活供热及采暖燃用化石燃料排出的污染物是主要原因之一^[2]. 若用 R744/R290 热泵热水器代替传统热水器, 对减缓雾霾污染, 改善空气质量将大有裨益.

热泵作为一种高效节能设备在暖通空调制冷领域的应用越来越广泛. 然而, 中国现役热泵系统使用的工质主要是氟利昂类工质 HCFC22, 还有部分过渡氟利昂类 HFC 工质如 HFC134a、R410A 和 R407C 等. 这些工质的温室效应指数 GWP 仍较高, 终将被替代. 从可持续发展角度考虑, 自然工质将是最佳选择^[3]. 自然工质中的 R744 具有环保 (臭氧消耗潜能指数 ODP = 0, 100 年 GWP = 1), 不可燃无毒无嗅, 物化稳定性好, 易获取, 价格低廉, 无需回收, 流动传热特性优良等诸多优点, 但跨临界循环 R744 系统放热侧压力较高, 约是氟利昂类工质的 3~6 倍. 高压带来设备需重新

设计, 运行需考虑安全性等问题^[4]. 理论和实验研究均证明, 采用合适的第二组分工质与 R744 混合可达到降低压力的目的^[5-6]. 韩国学者 Kim 等人实验研究了跨临界循环 R744/R290 (质量配比, 85/15, 75/25, 60/40) 制冷用空调系统性能, 表明系统压力下降, 效率提高, 制冷量下降^[7]. 该课题组还实验研究了 R744/R290 流经光管和微肋铜管时的沸腾换热和压降特性^[8-9]. 意大利学者 Grauso 等人对 R744/R290 (质量配比, 83.2/16.8, 70.0/30.0) 流经内径为 6.0 mm 水平光管的流动沸腾换热特性进行了实验研究^[10]. 总结已有研究成果, 在 R744 中加入 R290 后, 沸腾传热系数总体呈下降趋势. 韩国学者 Kim 课题组还对 R744/R290 (质量配比, 75/25, 60/40) 亚临界循环空调系统进行了实验研究^[11]. 笔者课题组前期研究表明, 在给定条件下, R744/R290 (质量配比, 95/5) 将是最佳选择^[12]. 自然工质丙烷 R290 具有环保 (ODP = 0, 100 年 GWP ≈ 20), 充灌量少, 效率高等优点, 但最大缺点是易燃易爆. R290 与 R744 混合后恰好能抑制其可燃可爆性, 且当 R744 质量

收稿日期: 2015-03-15; **修订日期:** 2015-06-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51176207); 河南省高等学校青年骨干教师资助项目 (2012GGJS-185)

作者简介: 张仙平 (1973—), 女, 河南陕县人, 河南工程学院副教授, 博士, 主要从事环保工质热泵技术的研究, E-mail: zh2000ao@sohu.com.

通讯作者: 魏新利 (1953—), 男, 河南辉县人, 郑州大学教授, 博导, 主要从事高效热泵技术、多能源建筑空调系统等研究与开发工作, E-mail: xlwei@zzu.edu.cn.

配比大于 89% 时,R744/R290 混合物不可燃,安全等级为 A1 级.从环保和可持续发展角度考虑,R744/R290 混合自然工质对环境非常友善,这也是笔者选择其作为热泵用工质的根本出发点.

根据文献调研,R744/R290 热泵系统用于中原地区的性能分析尚无公开报道.笔者以中原地区典型城市—郑州为对象,通过所建混合工质跨临界循环热力学模型,模拟计算 R744/R290 热泵系统性能,得到制热性能系数 COP,最优放热侧压力等主要技术参数的运行规律;基于计算数据,估算 R744/R290 热泵热水装置的总当量变暖影响 TEWIs(Total Equivalent Warming Impact),并与 HCFC22 热泵热水装置、电热水器、燃气热水器进行对比^[13-15].

1 热力学模型

1.1 模型构建

R744/R290 混合工质热泵由压缩机、气冷器、回热器、一级节流阀、储液器、二级节流阀和蒸发器组成,如图 1 所示.利用回热器的进出口阀门,回热器设计为可选运行模式,如图中虚线框所示.

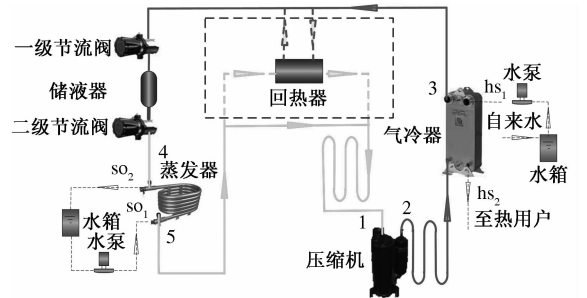


图 1 R744/R290 混合工质热泵系统
Fig.1 Schematic diagram of R744/R290 heat pump system

图 2 为温-熵图,可以看出,热泵循环由 1—2 压缩过程、2—3 等压冷凝过程、3—4 等焓节流过程、4—5—1 等压蒸发过程组成,6 为蒸发压力下的泡点,蒸发过程 4—5—1 和冷凝过程 2—3 均为变温过程,虚线 si_1-si_2 和 so_1-so_2 分别为热汇水和热源水变化线.

为简化热力计算,作出以下主要假设:压缩过程绝热但不等熵,考虑到热力计算中作出了若干假设,是具有一定理想化程度的计算,计算结果往往比试验值大,等熵效率取 0.70;忽略系统和周围环境间的散热损失;各组分工质为纯工质,忽略润滑油对工质或混合工质热物性的影响;忽略制

冷工质在各换热设备、连接管路中的压降;考虑到实际循环中由于部件匹配问题可能导致换热器传热效果变差,蒸发器和冷凝器中的最小传热温差取 7 ℃;压缩机吸气过热度取 10 ℃,以免产生液击.

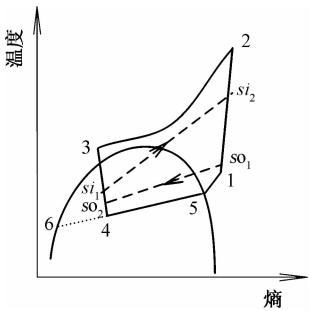


图 2 温-熵($T-s$)图
Fig.2 Temperature-entropy diagram

所建预测 R744/R290 混合工质热泵系统性能的模型已经得到实验验证,实验研究及跨临界循环算法流程框图参见本课题组前期研究文献^[10].

1.2 参数设定

根据相关国家标准^[16],设计工况下热汇水进、出口温度分别取 17 和 65 ℃,热源进出口温度分别取 20 和 15 ℃.

选取郑州为代表,分别在不同季节条件下研究热泵系统的性能,温、湿度如表 1 所示.郑州地区饮用水源主要有两种,地表水和深井水,地表水取自南水北调丹江水库水或黄河水,其使用区域更广,因此选地表水作为第二换热流体,水温随着室外空气温度的变化而变化,自来水的压力大约为 0.30 MPa.根据我国相关国家标准及热用户对用水温度的需求特点,设定热汇水出水温度分别为 55,65,75 和 85 ℃.气象参数取自文献^[13].

表 1 郑州地区不同季节第二换热流体的温度、湿度
Tab.1 Temperature and humidity of second heat transfer fluids at different seasons in Zhengzhou

季节	代号	干球温度/ ℃	相对湿度/ %	供水温度/ ℃
冬季	W	1	54	5
过渡季	T	15	64	15
夏季	S	26	73	22

2 结果与讨论

2.1 设计工况系统特性

图 3 表示了回热器对系统制热性能系数 COP

的影响.两种循环的制热 COP 均随着放热侧压力的升高而先增加后降低,存在最优值,对应的压力为最优放热侧压力.设置回热器可使系统最优性能系数由 4.104 升高为 4.245,提高了 3.4%.最优放热侧压力由 9.6 MPa 降为 9.1 MPa,利于安全运行.当高压压力比最优压力高 0.5 MPa,不带回热器系统的 COP 比最优 COP 降低 3.75%,带回热器的 COP 降低 4.50%;高压压力比最优压力低 0.5 MPa 时,两个循环的 COP 均有约 7% 的降低量.

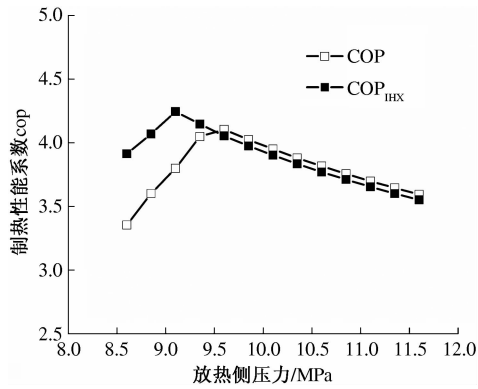


图 3 回热器对系统性能的影响
Fig.3 The effect of internal heat exchanger on the system performance

图 4 为 3 种不同压缩机等熵效率对应的系统性能.可以看出,等熵效率对制热 COP 影响较大,对最优压力影响较小.等熵效率为 0.70 时,COP 为 4.104,最优压力为 9.60 MPa.以等熵效率 0.70 作为比较基准,等熵效率为 0.80 时,COP 提高了 10.79%,最优压力基本维持不变;等熵效率为 0.60 时,COP 降低了 9.02%,最优压力降低了 2.63%.等熵效率与压缩机类型有关,因此,开发高效压缩机对提高系统性能十分重要.

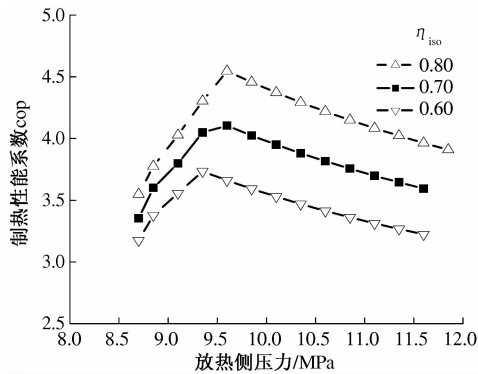


图 4 压缩机等熵效率对系统性能的影响
Fig.4 The effect of compressor isentropic efficiency on the system performance

2.2 变工况系统特性

图 5 为热汇水出水温度改变时系统性能的变化

化曲线.3 种工况下,最优制热 COP 均随着热汇水出水温度的增加而降低,最优压力随着出水温度的增加而增加.过渡季节 T 和夏季 S 的最优 COP 比冬季大,但 T 和 S 的最优压力也较高.从图中还可看出,该热泵装置可生产出 85℃ 的热水,即使在冬季,制热 COP 也可达到 3.084.

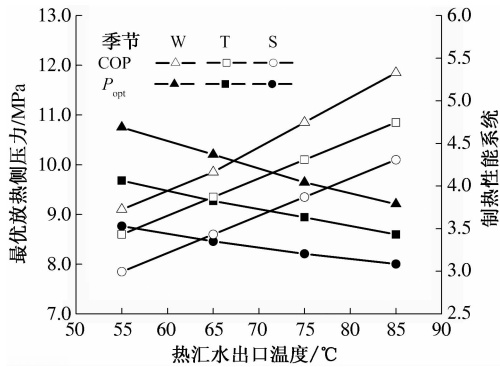


图 5 改变出水温度时制热 COP, P_{opt} 的变化
Fig.5 Variation of heating COP, P_{opt} and heat sink outlet temperature

笔者取蒸发压力下泡点温度和露点温度的算术平均值作为蒸发温度.图 6 为 3 种工况下,最优 COP 及最优放热侧压力和蒸发温度的关系.在其他条件不变的情况下,最优 COP 与蒸发温度成正比,冬季 W 工况最优制热 COP 最低,夏季 S 工况 COP 最高.从图中可以看出,在其他条件不变的情况下,最优压力随着热汇出水温度增加而增加,特别在夏季,出水温度为 85℃ 时最优放热侧压力较高,达到 11.85 MPa.

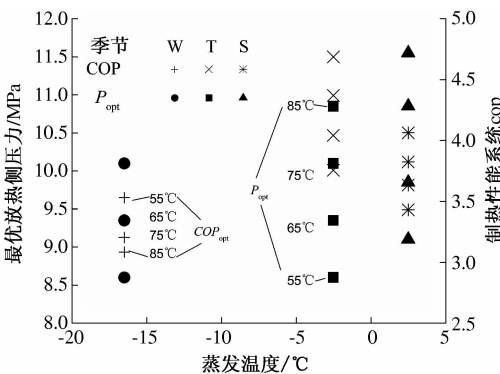


图 6 改变蒸发温度时制热 COP, P_{opt} 的变化
Fig.6 Variation of heating COP, P_{opt} and evaporation temperature

2.3 应用于郑州地区的 TEWIs 评价

根据气象资料,可得到郑州市典型年室外空气干球温度的频率.蒸发温度取决于空气的干球温度,一般比空气干球温度低 10℃ 左右.根据室外空气干球温度频率,拟合出不同出水温度下制

热 COP 和蒸发温度的关联式,再根据室外空气干球温度频率估算全年不同蒸发温度出现的频率,得到 R744/R290 热泵系统应用于郑州地区不同热汇出水温度下的全年平均制热性能系数 COP. 计算结果如图 7 所示,可以看出,随着热汇水出水温度的增加,系统 COP 呈下降趋势,全年平均制热性能系数 COP 为 4.202.

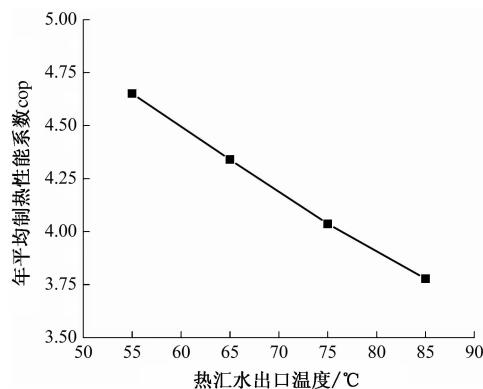


图 7 应用于郑州地区的年平均制热 COP

Fig. 7 Annual heating COP in Zhengzhou

假设 R744/R290 混合工质热泵热水器安装在郑州市的三口之家,制热负荷为 3.0 kW,初始制冷剂充注量为 0.90 kg,每年运行小时数为 3 000 h,使用寿命为 10 a,制冷剂的年泄漏量约为充灌量的 2%。天然气和燃煤发电的 CO₂ 排放量分别为 0.051 36 kg/MJ 和 0.264 2 kg/MJ,燃煤发电仍然是中国目前获取电力的主要方式,因此燃煤每产 1 kW/h 电能的 CO₂ 排放量为 0.95 kg^[17]。天然气折算成标准煤,确定其碳排放系数,再计算出每立方米天然气排放的 CO₂ 量。电热水器的效率取 0.90。天然气的电能消耗忽略不计,假设燃烧效率为 0.95。当前国内空气源热泵系统常用制冷工质是 HCFC22,因此 HCFC22 也被选择以计算比较 TEWI,其初始制冷剂充注量为 1.07 kg。

计算结果如图 8 所示,可以看出,煤电的 TEWI 最大,R744/R290 的 TEWI 最小;与 HCFC22 相比,R744/R290 减少了 18.76% 的 CO₂ 排放量。平均可减少 36.39% 的 CO₂ 排放量。计算结果还表明,在总 TEWI 中,直接温室效应所占的比例相当小,可以忽略不计。

3 结论

利用 EES 软件建立了 R744/R290 混合工质热泵系统分布参数模型,研究家用热泵热水器的系统性能,分别计算并讨论了设计工况下及应用

于中国中原地区典型城市—郑州市的系统综合性能变化规律。基于模拟数据,估算了 TEWI 值。结果表明,在设计工况下,最优制热 COP 为 4.104,最优放热侧压力为 9.70 MPa;由于最优压力高,对部件及连接管件的安全性要求较高。基于郑州典型年的气象参数和当地用水条件,年平均制热 COP 为 4.202。分析 TEWI 可以看出,与其他常用能源相比,R744/R290 热泵装置 CO₂ 排放量平均减少 36.39%。家用热泵热水器采用 R744/R290 作为替代工质可以达到高效环保的目的。

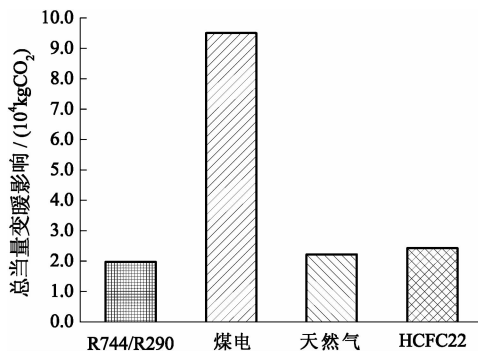


图 8 不同能源或工质的总 TEWI 比较

Fig. 8 Comparison of TEWIs for different energy

参考文献:

- [1] 中华人民共和国环境保护部数据中心. 全国城市空气质量日报. [DB/OL]. [2015-03-01]. <http://datacenter.mep.gov.cn/>.
- [2] 张小曳,孙俊英,王亚强,等. 我国雾霾成因及其治理的思考[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1178-1187.
- [3] LORENTZEN G. The use of natural refrigerants: a complete solution to the CFC/HCFC predicament [J]. Int J Refrig, 1995, 18(3): 190-197.
- [4] KIM M H, PETERSEN J, BULLARD C W. Fundamental process and system design issues in CO₂ vapor compression systems [J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2004, 30(2): 119-174.
- [5] SARKAR J, BHATTACHARYA S. Assessment of blends of CO₂ with butane and isobutane as working fluids for heat pump applications [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2009, 48(7): 1460-1465.
- [6] KOYAMA S, JIN Dong-xu, XUE Jun, et al. Experimental study on the performance of a CO₂/DME system [C]//Proceedings of the 22nd International Congress of Refrigeration, E2. Beijing, China, 2007: 986.
- [7] KIM J H, CHO J M, KIM M S. Cooling performance

- of several CO₂/propane mixtures and glide matching with secondary heat transfer fluid [J]. *Int J Refrig*, 2008, 31 (5): 800 – 806.
- [8] CHO J M, KIM Y J, KIM M S. Experimental studies on the characteristics of evaporative heat transfer and pressure drop of CO₂/propane mixtures in horizontal and vertical smooth and micro-fin tubes [J]. *Int J Refrig*, 2010, 33 (1): 170 – 179.
- [9] CHO J M, KIM Y J, KIM M S. Experimental studies on the evaporative heat transfer and pressure drop of CO₂ and CO₂/propane mixtures flowing upward in smooth and micro-fin tubes with outer diameter of 5mm for an inclination angle of 45° [J]. *Int J Refrig*, 2010, 33 (5): 922 – 931.
- [10] KIM J H, CHO J M, LEE I H, et al. Circulation concentration of CO₂/propane mixtures and the effect of their charge on the cooling performance in an air-conditioning system [J]. *Int J Refrig*, 2007, 30 (1): 43 – 49.
- [11] GRAUSO S, MASTRULLO R, MAURO A W, et al. CO₂ and propane blends: Experiments and assessment of predictive methods for flow boiling in horizontal tubes [J]. *Int J Refrig*, 2011, 34 (4): 1028 – 1039.
- [12] 张仙平. 热泵系统用 R744 混合工质特性的研究 [D]. 上海: 东华大学环境科学与工程学院, 2011.
- [13] 中国气象局气象信息中心气象资料室, 清华大学建筑技术科学系. 中国建筑热环境分析专用气象数据集 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2005.
- [14] KLEIN S A. Engineering Equation Solver [CP]. Academic Commercial Ver 9.699, #2313, 2015.
- [15] LEMMON E W, HUBER M L, MCLINDEN M O. Reference fluid thermodynamic and transport properties (REFPROP) [DB]. NIST Standard Reference Database 23, Version 9.0, 2013.
- [16] 中国家用电器研究院, 美的集团有限公司, 等. GB/T23137—2008 家用和类似用途热泵热水器标准 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [17] 李方运. 天然气燃烧及应用技术 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2002.

Study on the Performance of a Heat Pump System Using R744-based Natural Binary Mixture

ZHANG Xian-ping^{1,2}, YANG Lei³, WEI Xin-li², WANG Fang³, CHEN Ai-dong¹

(1. Department of Civil Engineering, Henan Institute of Engineering, Zhengzhou 451191, China; 2. School of Chemical Engineering and Energy, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 3. School of Energy and Environment, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: The thermal model using EES (Engineering Equation Solver) is developed, and then the system performance of transcritical R744/R290 heat pump water heater is simulated with the meteorological and hydrological conditions in Zhengzhou, the typical city in central China. The total Equivalent Warming Impacts (TEWIs) are calculated with the simulation datum. The results show that the maximum heating system COP is 4.104 under the design condition without consideration of internal heat exchanger. When R744/R290 heat pump water heater is on operation in central China, the mean annual heating COP of 4.202 can be achieved. Compared with the hot water heater using other energy, the R744/R290 heat pump water heater is averagely decreased by 36.39% in the CO₂ emissions. It is also calculated and discussed how the internal heat exchanger and compressor isentropic efficiency influence the system performances respectively. Therefore, the R744/R290 based heat pump water heater is characterized by a higher energy efficiency and a very effective way for remarkably reducing CO₂ emissions.

Key words: R744; mixture natural refrigerant; heat pump; TEWI; smog