

文章编号: 1671-6612 (2024) 02-237-05

R23 超临界热泵开水机的结构与性能研究

宋鑫宇 谢继红 郭子瑞 刘明权 文鑫

(天津科技大学机械工程学院 天津 300222)

【摘要】 针对电热开水机耗电多、R744 (二氧化碳) 超临界热泵开水机工作压力高等问题, 对 R23 超临界热泵开水机的结构和性能进行了研究; 以环境空气温度 0°C、冷水温度 15°C、开水温度 100°C、开水产率 130L/h (0.036kg/s) 为背景, R23 超临界热泵开水机采用单级压缩循环即可满足要求, 工作压力仅需 10.0MPa, 加热器内热泵工质与水的传热温差可在 5°C 以上, 制热系数可达 2.68, 耗电功率约为电热开水机的 37%; 上述条件下采用 R744 作为超临界热泵开水机工质时, 制热系数与 R23 超临界热泵开水机相近, 但需要采用带级间冷却的两级压缩循环, 且工作压力需 14.0MPa; 综上, R23 超临界热泵开水机比电热开水机可大幅度降低耗电量, 且工作压力和系统复杂性显著低于 R744 超临界热泵开水机, 具有较好的应用优势。

【关键词】 开水机; 热泵; 超临界; R23; 节能

中图分类号 TM925 文献标志码 A

Study on the Structure and Performance of R23 Supercritical Heat Pump Water Boiler

Song Xinyu Xie Jihong Guo Zirui Liu Mingquan Wen Xin

(College of Mechanical Engineering, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin, 300222)

【Abstract】 A study was conducted on the structure and performance of R23 supercritical heat pump water boiler to address the issues of high power consumption of electric water boiler and high working pressure of R744 (carbon dioxide) supercritical heat pump water boiler. Taking the ambient air temperature of 0°C, the cold water temperature of 15°C, the boiling water temperature of 100°C, and boiling water rate of 130L/h (0.036kg/s) as the background, the R23 supercritical heat pump water boiler can meet the requirements by using a single stage compression cycle, with a working pressure of only 10.0MPa. The minimum heat transfer temperature difference between the heat pump working medium and water in the heater can be above 5°C, the coefficient of performance can reach 2.68, and the power consumption is about 37% of that of the electric water boiler. Under the above conditions, when R744 is used as the working medium for the supercritical heat pump water boiler, the coefficient of performance is similar to that of R23 supercritical heat pump water boiler, but a two-stage compression cycle with interstage cooling is required, and the working pressure needs to be 14.0MPa. In summary, compared with the electric water boiler, R23 supercritical heat pump water boiler can significantly reduce power consumption, and the working pressure and system complexity are significantly lower than that of R744 supercritical heat pump water boiler, which has significant application advantages.

【Keywords】 water boiler; heat pump; supercritical; R23; energy conservation

0 引言

开水机在学校、医院、车站、办公楼等场所都

有广泛应用, 目前常用的开水机是电热开水机^[1,2], 即用电能直接转换为热能制备开水, 其主要不足是

作者简介: 宋鑫宇 (1999-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: sxyhh99@163.com

通讯作者: 谢继红 (1969-), 女, 硕士, 副教授, E-mail: xiejihong@tust.edu.cn

收稿日期: 2023-11-29

耗电量较高;热泵开水机利用热泵从环境空气中吸热来制备开水,其耗电量约为电热开水机的1/2~1/3,具有显著的节能优势^[3,4]。

热泵开水机按热泵工质循环方式通常有多级循环、复叠循环、超临界循环等型式^[5],其中超临界循环热泵开水机在能源效率(制热系数)、系统简洁性等方面均具有较好的优势。目前较常用的超临界热泵工质为R744(CO₂)^[6-8],但用于制备开水时,其工作压力(压缩机排气压力)较高,可达14MPa以上;R23也可用作超临界热泵开水机的工质,其临界压力约为R744的65%^[9-11],有利于减少系统中的各部件壁厚和费用;基于此,课题组针对R23为工质的超临界热泵开水机的结构和典型工况性能进行了研究分析,目标是降低超临界热泵开水机的工作压力、简化系统结构、降低系统成本,为超临界热泵开水机的开发提供有益的参考。

1 R23 工质的基本特性

R23的基本特性参数如表1所示(表中也列出了R744的基本特性参数作为对比)。

表1 R23的基本特性参数

Table 1 Basic characteristic parameters of R23

工质	R23	R744
分子式	CHF ₃	CO ₂
分子量	70	44
沸点/°C	-82.15	-78.40
临界温度/°C	25.97	31.10
临界压力/MPa	4.80	7.40

由表1可见,R23与R744的标准沸点和临界温度均相近,而R23的临界压力约为R744的65%,根据工作压力与临界压力基本成正比的规律,R23超临界热泵开水机的工作压力可显著低于R744,有利于超临界热泵开水机中压缩机、换热器、管路等的轻量化和降低超临界热泵开水机成本。

2 结构与循环

2.1 R23 超临界热泵开水机

确定超临界热泵开水机结构与循环时,压缩机排气温度通常应在105°C~120°C之间,加热器内工质与水的的核心传热温差应大于3°C^[12,13];基于上述考虑,R23超临界热泵开水机可采用图1所示结构,相应的工作循环如图2所示。

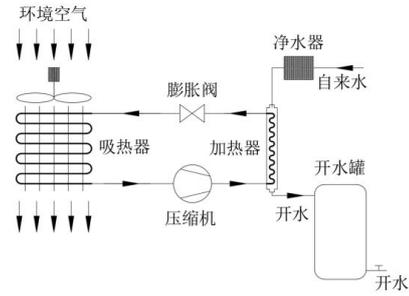


图1 R23超临界热泵开水机基本结构

Fig.1 Basic structure of R23 supercritical heat pump water boiler

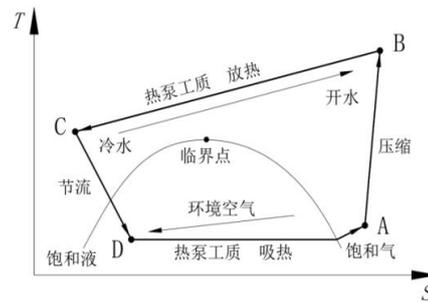


图2 R23超临界热泵开水机工作循环

Fig.2 Working cycle of R23 supercritical heat pump water boiler

图1和图2中R23超临界热泵开水机包括压缩机、加热器、膨胀阀、吸热器、净水器、开水罐等部件,低压低温R23工质通过吸热器从环境空气中吸热,经压缩机压缩后变为超临界高压高温状态进入加热器,把流过加热器的冷水加热为100°C的开水(进入开水罐),出加热器的高压R23经膨胀阀节流后变为低压低温状态再返回吸热器继续循环。

2.2 R744 超临界热泵开水机

在环境空气温度0°C、冷水温度15°C、开水温度100°C、开水产率130L/h(0.036kg/s)时,采用单级压缩R744超临界热泵开水机时,运行参数如表2所示。

表2 R744超临界热泵开水机运行参数

Table 2 Operating parameters of R744 supercritical heat pump water boiler

运行参数	数值
环境空气温度/°C	0.00
吸热器内R744蒸发温度/°C	-10.00
吸热器内R744蒸发压力/MPa	2.60
加热器冷水进口温度/°C	15.00
加热器开水出口温度/°C	100.00

续表 2 R744 超临界热泵开水机运行参数

Table 2 Operating parameters of R744 supercritical heat pump water boiler

运行参数	数值
开水制备流量/kg·s ⁻¹	0.036
加热器内 R744 工作压力/MPa	14.00
加热器内 R744 进口温度/°C	138.00
加热器内 R744 出口温度/°C	20.00
加热器内 R744 流量/kg·s ⁻¹	0.041
压缩机耗电功率/kW	4.90
制热系数	2.62

由表 2 可见, R744 超临界热泵开水机采用单级压缩循环时, 压缩机排气温度 138°C, 超过了常规润滑油的耐受温度, 需要采用带级间冷却器的双级压缩循环, 基本结构和工作循环如图 3 和图 4 所示。

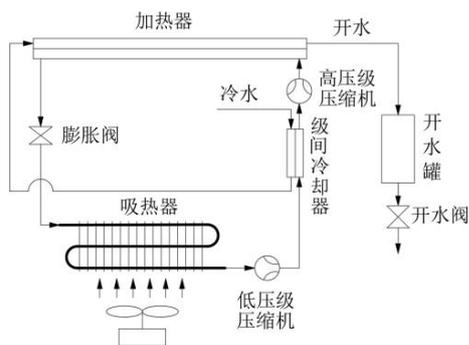


图 3 带级间冷却器的双级压缩 R744 超临界热泵开水机基本结构

Fig.3 Basic structure of two-stage compression R744 supercritical heat pump boiler with interstage cooler

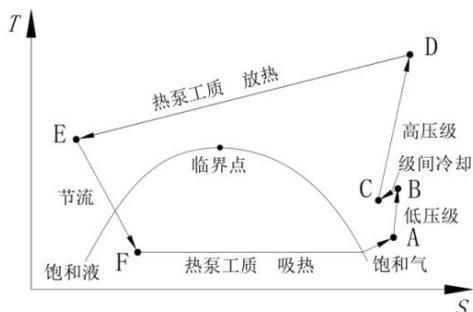


图 4 带级间冷却器的双级压缩 R744 超临界热泵开水机工作循环

Fig.4 Two-stage compression R744 supercritical heat pump boiler with interstage cooler working cycle

图 3 和图 4 中, 冷水先进级间冷却器, 吸收低

压级压缩机排出工质的热能, 被初步预热后再进入加热器, 被高压级压缩机排出的超临界工质加热到开水状态。

3 运行性能

3.1 R23 热物性方程

为了便于对 R23 超临界热泵开水机的循环性能进行计算, 利用 R23 热物性数据^[9]拟合得到其热物性方程如下。

(1) R23 的焓方程

R23 的焓方程为:

$$h = N_1 + N_2T + N_3p + N_4T^2 + N_5p^2 + N_6Tp + N_7T^3 + N_8p^3 + N_9T^2p + N_{10}Tp^2 + N_{11}T^4 + N_{12}p^4 + N_{13}T^3p + N_{14}T^2p^2 + N_{15}Tp^3 \quad (1)$$

式中: h 为焓, J/mol; T 为温度, °C; p 为压力, MPa; N_i 为常数系数, 取值如表 3 所示。

(2) R23 的熵方程

R23 的熵方程为:

$$s = n_1 + n_2T + n_3p + n_4T^2 + n_5p^2 + n_6Tp + n_7T^3 + n_8p^3 + n_9T^2p + n_{10}Tp^2 + n_{11}T^3p + n_{12}T^2p^2 + n_{13}Tp^3 \quad (2)$$

式中: s 为熵, J/(mol·K); T 为温度, °C; p 为压力, MPa; n_i 为常数系数, 取值如表 3 所示。

(3) R23 的饱和蒸气压方程

R23 的饱和蒸气压方程为:

$$p = 2.50945 + 0.068226T + 0.000714T^2 + 0.000003T^3 \quad (3)$$

式中: p 为饱和蒸气压, MPa; T 为温度, °C。

表 3 焓和熵的方程表达式的系数

Table 3 Coefficients of Equation Expressions for Enthalpy and Entropy

i	N_i	n_i	i	N_i	n_i
1	27957.00	113.1200	9	-0.041800	-0.000171
2	28.70000	0.223000	10	-9.440000	-0.032840
3	-6468.000	-27.35000	11	0.000034	-0.000004
4	-0.86000	-0.006590	12	-0.230000	0.000081
5	574.0000	2.722000	13	-0.001238	0.000743
6	84.00000	0.286100	14	0.024810	---
7	0.000710	0.000032	15	0.196800	---
8	-11.50000	-0.083500	---	---	---

3.2 R23 超临界热泵开水机运行参数

基于 3.1 中的方程 (1)~方程 (3)，以环境空气温度 0℃、冷水温度 15℃、开水温度 100℃、开水产率 130L/h (0.036kg/s) 为背景对 R23 超临界热泵开水机的运行参数进行了计算分析，得到一组最佳的运行参数如表 4 所示。

表 4 R23 超临界热泵开水机运行参数

Table 4 Operating parameters of R23 supercritical heat pump water boiler

运行参数	数值
环境空气温度/℃	0.00
吸热器内 R23 蒸发温度/℃	-10.00
吸热器内 R23 蒸发压力/MPa	1.90
加热器冷水进口温度/℃	15.00
加热器开水出口温度/℃	100.00
开水制备流量/kg·s ⁻¹	0.036
加热器内 R23 工作压力/MPa	10.00
加热器内 R23 进口温度/℃	113.00
加热器内 R23 出口温度/℃	20.00
加热器内 R23 流量/kg·s ⁻¹	0.07
压缩机耗电功率/kW	4.80
制热系数	2.68

上述运行参数下，电热开水机所需的耗电功率为 12.9kW，R23 超临界热泵开水机的耗电功率为 4.8kW，耗电量约为电热开水机的 37%。

3.3 带级间冷却器的双级压缩 R744 超临界热泵开水机运行参数

在环境空气温度 0℃、冷水温度 15℃、开水温度 100℃、开水产率 130L/h (0.036kg/s) 时，R744 采用带级间冷却器的双级压缩时，R744 超临界热泵开水机的运行参数如表 5 所示。

表 5 带级间冷却器的双级压缩 R744 超临界热泵开水机运行参数

Table 5 Operating parameters of two-stage compression R744 supercritical heat pump boiler with interstage cooler

运行参数	数值
环境空气温度/℃	0.00
吸热器内 R744 蒸发温度/℃	-10.00
吸热器内 R744 蒸发压力/MPa	2.60
低压级压缩机排气压力/MPa	5.50
低压级压缩机排气温度/℃	48.30
高压级压缩机吸气温度/℃	25.00

续表 5 带级间冷却器的双级压缩 R744 超临界热泵开水机运行参数

Table 5 Operating parameters of two-stage compression R744 supercritical heat pump boiler with interstage cooler

运行参数	数值
高压级压缩机排气压力/MPa	14.00
高压级压缩机排气温度/℃	108.00
加热器 R744 出口温度/℃	40.00
R744 质量流量/kg·s ⁻¹	0.053
开水制备流量/kg·s ⁻¹	0.036
冷水进级间冷却器温度/℃	15.00
冷水出级间冷却器温度/℃	30.00
开水出加热器温度/℃	100.00
低压级压缩机功率/kW	2.20
高压级压缩机功率/kW	2.80
压缩机总功率/kW	5.00
制热系数	2.57

由表 5 可见，R744 超临界热泵开水机采用带级间冷却器的双级压缩循环时，排气温度在合理范围内，制热系数与 R23 超临界热泵开水机相近。

如表 4 和表 5 可见，对于超临界热泵开水机采用 R23 作为工质，加热器中工作压力是 10.0MPa，采用 R744 需要 14.0MPa；采用 R23 可以显著降低超临界热泵开水机的工作压力和系统复杂性，有利于提高超临界热泵开水机的可靠性和降低成本。

3.4 加热器内温度分布

R23 超临界热泵开水机加热器内的热泵工质和水的温度分布如图 5 所示。

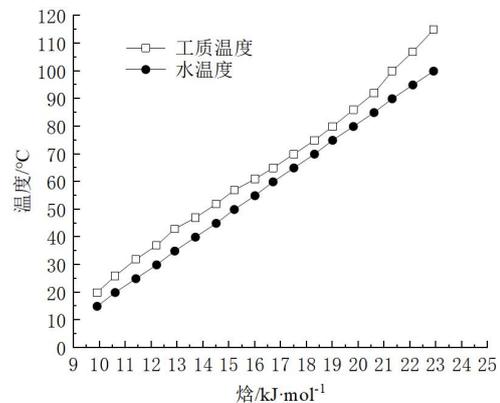


图 5 加热器内水和 R23 温度变化

Fig.5 Water in heater and R23 temperature variation

图 5 中水在被加热过程中比热容基本不变，因此其升温曲线近似为直线，但 R23 温度变化较复

杂,要从超临界状态变为液态,其当量比热容有较大变化,因此其降温线是不规则曲线,因而 R23 与水的传热温差也在沿程变化。在冷水进口处传热温差约为 5°C ,在开水出口处传热温差约为 15°C ,水温在 $60^{\circ}\text{C}\sim 75^{\circ}\text{C}$ 温度范围之间,有一个传热温差的窄段,在表 4 所列运行参数下,窄段传热温差 5°C ,可以满足制备开水时加热器内工质和水的传热速率的要求。

4 结论

以环境空气温度 0°C 、冷水温度 15°C 、开水温度 100°C 、开水产率 130L/h 为背景,对 R23 超临界热泵开水机的结构和性能进行了研究,主要结论如下:

(1) R23 超临界热泵开水机相对于电热开水机,可大幅度降低制备开水能耗。制备开水流量为 130L/h (0.036kg/s) 时, R23 超临界热泵开水机的耗电功率为 4.8kW ,电热开水机的耗电功率为 12.9kW , R23 超临界热泵开水机的耗电功率约为电热开水机的 37%。

(2) R23 超临界热泵开水机相对于 R744 超临界热泵开水机系统结构可显著简化。R23 超临界热泵开水机采用单级循环即可满足加热器内热泵工质与水的最小传热温差、压缩机排气温度等要求,而 R744 作为超临界热泵开水机工质时,需要采用带级间冷却器的双级压缩循环。

(3) R23 超临界热泵开水机的工作压力相对于 R744 超临界热泵开水机的工作压力可显著降低。当进热泵开水机冷水温度为 15°C ,出水温度 100°C 时, R23 超临界热泵开水机工作压力为 10.0MPa ,采用 R744 作为超临界热泵开水机工质的工作压力为 14.0MPa ,因此, R23 超临界热泵开水机可采用相对简单的部件,有利于降低系统成本。

参考文献:

- [1] 程民泽. 开水机检验标准及开水机改进过程中的问题探析[J]. 轻工标准与质量, 2018, (1): 72-74.
- [2] 赵天怡, 张城瑀, 吴一凡, 等. 基于电开水器能耗监测数据的高校教学楼用能规律模型研究[J]. 建筑节能, 2019, 47(3): 93-100.
- [3] 曲翔. 热泵式开水器的研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
- [4] 王林, 候召宁, 李修真, 等. 采用不同工质的高温复合热泵开水器特性研究[J]. 热科学与技术, 2022, 21(1): 83-90.
- [5] 董益秀, 王如竹. 高温热泵的循环、工质研究及应用展望[J]. 化工学报, 2023, 74(1): 133-144.
- [6] 刘业凤, 孟德忍, 贾世伟, 等. 跨临界 CO_2 热泵高压侧最优压力的实验研究[J]. 轻工机械, 2018, 36(4): 40-43.
- [7] Van Nieuwenhuysse J, Lecompte S, De Paepe M. Current status of the thermohydraulic behavior of supercritical refrigerants: A review[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 218: 119201.
- [8] Adamson K-M, Walmsley T G, Carson J K, et al. High-temperature and transcritical heat pump cycles and advancements: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 167: 112798.
- [9] 陈东, 谢继红. 热泵技术手册 (第 2 版) [M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.
- [10] 王凤坤, 郭瑞. R23 跨临界循环最优高压侧压力分析[J]. 低温与超导, 2009, 37(10): 62-64, 80.
- [11] 杨艳艳, 乔家辉, 李连生. 跨临界 CO_2 制冷技术发展现状及其改进途径综述[J]. 制冷与空调, 2023, 37(5): 679-686.
- [12] Rony R, Yang H, Krishnan S, et al. Recent Advances in Transcritical CO_2 (R744) Heat Pump System: A Review [J]. Energies, 2019, 12(3): 1-35.
- [13] 黄睿, 胡斌, 王如竹, 等. 基于套管换热器优化的 CO_2 跨临界热泵高温供热性能提升研究[J]. 制冷学报, 2023, 44(4): 93-101.