

文章编号:0253-4339(2018)02-0068-06
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2018.02.068

有机朗肯循环发电系统设计与实验研究

黄理浩 陶乐仁 郑志皋 梁浩 王刚 申玲

(1 上海理工大学制冷及低温工程研究所 上海 200093; 2 住房和城乡建设部科技与产业化发展中心 北京 100044)

摘 要 本文以 90~150 ℃ 低温余热热源的回收利用为前提,搭建了有机朗肯循环(ORC)发电系统实验平台。通过调节透平膨胀机入口压力,改变蒸发温度,实验研究蒸发温度对膨胀机性能和系统性能的影响。结果表明:当蒸发温度从 76 ℃ 升高到 84 ℃ 时,膨胀机入口温度逐渐升高,使膨胀机转速增大 9.11%,膨胀机输出功率增大 1.26 kW,最高等熵效率为 80.6%;系统循环净功、热效率、不可逆损失及烟效率均随蒸发温度的升高呈增大趋势,分别增大了 33.9%、26.7%、15.4%、27%。

关键词 有机朗肯循环;透平膨胀机;热效率;烟效率

中图分类号:TK115;TK123 文献标识码:A

Design and Experiment Research on Organic Rankine Cycle (ORC) Power Generation System

Huang Lihao Tao Lenren Zheng Zhigao Liang Hao Wang Gang Shen Ling

(1. Institute of Refrigeration & Cryogenics, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China; 2. Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Beijing, 100044, China)

Abstract Based on the premise of recycling the low-temperature waste heat from a 90-150 ℃ source, a test bench was designed for an organic Rankine cycle power generation system, and experimental research was performed. The effects of the evaporating temperature on the expander performance and system performance were investigated by adjusting the inlet pressure of the turbo expander and the evaporation temperature. The experimental results showed that when the evaporation temperature increased from 76 ℃ to 84 ℃, the expander inlet temperature gradually increased. Thus, the expander speed increased by approximately 9.11%, the output power increased by 1.26 kW, and the highest isentropic efficiency was 80.6%. At the same time, the cycle net power, thermal efficiency, irreversible loss, and exergy efficiency increased with the evaporation temperature by 33.9%, 26.7%, 15.4%, and 27%, respectively.

Keywords ORC; turbo expander; thermal efficiency; exergy efficiency

近年来,随着人们对全球生态环境及能源问题的关注,各国政府和相关能源研究部门开始重视新能源的开发与利用,尤其高度重视有机朗肯循环(ORC)发电技术的研究与应用,并取得了一定的成果。美国、日本、德国及法国等发达国家已经有众多低温余热发电机组,机组容量最大已达几十兆瓦^[1]。与国外相比,国内对 ORC 发电系统的研究起步较晚,技术相对不成熟,仍处于研究探索阶段。目前,主要从以下几个方面对 ORC 技术进行研究:技术经济的市场调查^[2-3]、工质的选择^[4-6]、最优控制策略模型^[7]、准动力模型^[8]及样机测试^[9-10]等。

ORC 在中低温热源上具有广泛的应用,如太阳能、地热能、潮汐能、生物质能、电厂废热、以及工业余热等,极大地激发了研究者的兴趣。B. R. Fu 等^[11]以 R245fa 为工质,向心透平为膨胀机,建立了一套 250 kW 变热源温度的有机朗肯循环发电系统,系统分析热源温度对传热性能和系统特性的影响。研究发现:蒸发温度的上升速率几乎与热源的进口温度一致;热源进口温度越高预热器的传热性能越好,可减小蒸发器面积;伴随着热源进口温度的上升,系统的净输出功与热效率也线性上升,但该装置的净输出功为 243 kW,略低于设计工况(热效率为 9.5%)。Miao Zheng 等^[12]以 R123 为工质,利用涡旋式膨胀机,建立低温有机朗肯循环发电系统,研究不同热源温度(140 ℃ 和 160 ℃)的系统运行特性。研究发现:ORC 系统的运行特性由工质质量流量和外部负载决定;热源温度越高,净输出功越大,但系统热效率降低(热源温度为 140 ℃ 和 160 ℃,净输出功分别为 2.35 kW 和 3.25 kW,热效率为 6.39% 和 5.12%)。B. Peris 等^[13]以 R245fa 为工质,利用涡旋式膨胀机,以天然

气锅炉模拟热源,建立有机朗肯循环发电系统,获得最大的总电效率为 12.32% (热源温度为 155 ℃)。魏莉莉^[14]以 R142b 为工质,设计了螺杆膨胀 ORC 实验系统,并通过实验验证了该系统的可行性,只是系统效率需进一步提高。魏新利等^[15]对自主设计的 ORC 发电系统进行了实验研究,结果表明蒸发器的不可逆损失最大。江龙等^[16]以低温热蒸气来模拟废热作为有机朗肯循环(ORC)的热源,利用涡旋膨胀机建立了以 R134a 为制冷剂的有机朗肯循环发电系统。通过 EES (engineering equation solver) 软件对 ORC 系统进行了数学建模,并将实验与模拟结果进行了比较。结果显示:当系统压力较低时,系统的不可逆程度较大,系统效率会有较大损失。

相关学者从不同角度对 ORC 系统进行了分析研究,但研究与实际应用的脱节,使 ORC 发电技术并没有很大突破。当前的 ORC 系统主要是以螺杆、涡旋及大功率的透平作为膨胀机,在小功率的向心透平如 50 kW 以下的研究较少,且设计、制造方面主要是以空压机为原型来设计向心透平,达不到应用的要求。今后,需在理论、实验研究和实际应用之间建立好桥梁,使更多的研究对生产应用起到真正意义上的指导作用。

1 实验装置及设计

目前,对中高温余热热源(150 ℃ 以上)的 ORC 发电系统研究已较为成熟。由于中高温余热热源温度较高,实现热量的高效回收较为容易。相比于中高温热源,低温热源的温度较低,高效回收有一定的难度。目前对于低温热源 ORC 发电系统效率的提高仍未有较好的解决方案,实验研究也相对较少。为了更加深入的研究影响低温热源 ORC 发电系统性能的因素,搭建以 90 ~ 150 ℃ 的低温工业余热为热源的 ORC 发电系统实验平台,以实现 20 kW 发电功率的输出为目标,并可实现蒸发温度在 85 ~ 145 ℃、冷凝温度在 35 ~ 45 ℃ 的变工况实验。

根据 ORC 的理论建模及热力分析,选取有机工质 R245fa 为系统循环工质,并在原有简单的理论循环系统基础上加入了预热装置和过热装置,并以锅炉蒸气模拟工业余热给系统提供热量。

实验系统设计与实验装置分别如图 1 和图 2 所示,主要部件有:蒸发器、过热器、膨胀机、冷凝器、储液罐、工质泵和预热器、干燥过滤器、电加热负载以及参数测量等辅助设备。根据系统中流体的种类可将循环分成三部分:工质侧循环、热源侧(锅炉蒸汽)循环和冷源侧(冷却水)循环。表 1 所示为实验仪器测

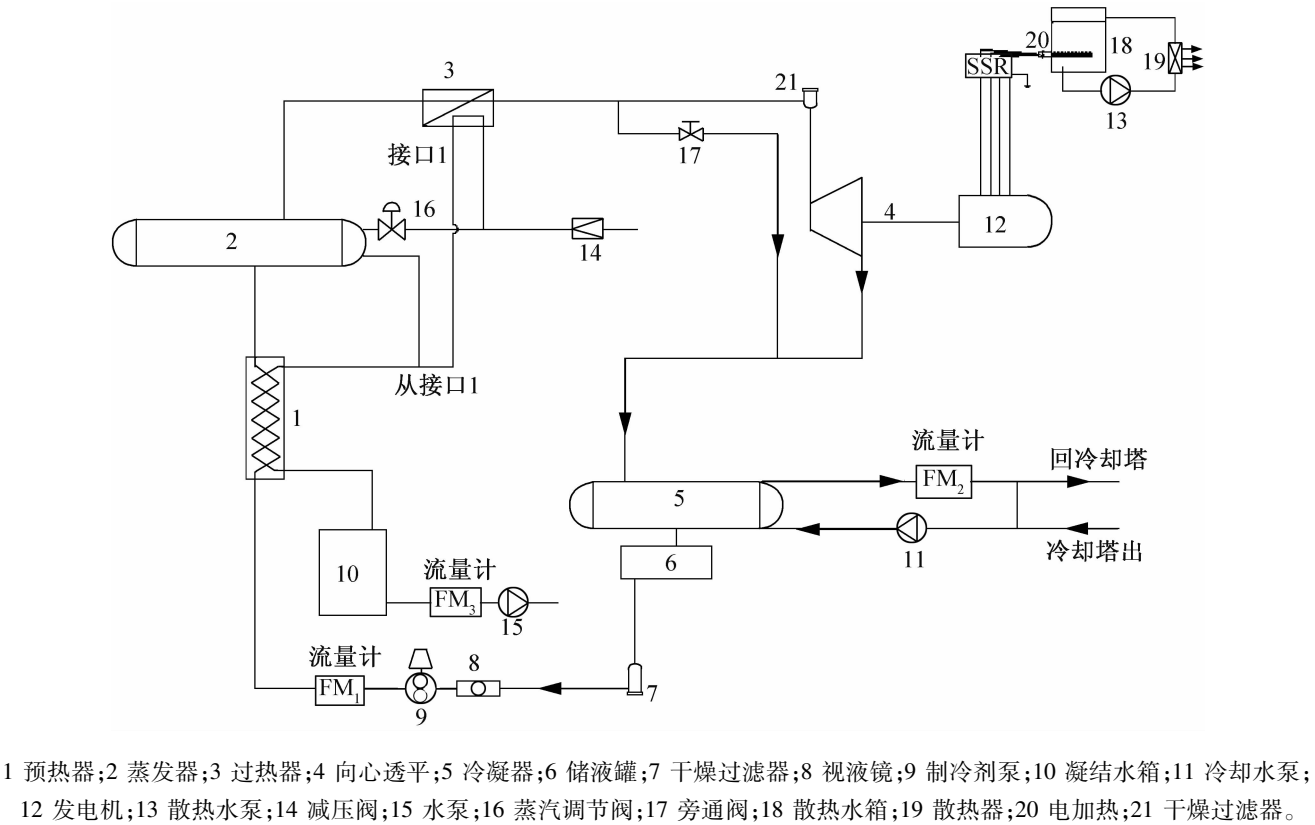


图 1 低温余热 ORC 发电实验系统设计

Fig. 1 Design of low temperature waste heat ORC power generation system



图 2 低温余热 ORC 发电系统实验装置
Fig.2 Experimental device of low temperature waste heat ORC power generation system

表 1 实验参数范围
Tab.1 Experiment parameters

类别	参数范围	测量误差
压力变送器/MPa	-0.1 ~ 100	±0.25% FS
质量流量计/(kg/h)	300 ~ 8 000	0.2 级
电磁流量计/(m³/h)	0 ~ 1	±0.3%
温度/℃ (Pt100)	0 ~ 200	± 0.06%
功率计/kW	0 ~ 24	± (0.2% 读数 + 0.2% 量程)

量范围及误差。

1) 工质侧循环。工质在蒸发器中吸收蒸气的热量蒸发为高压有机工质蒸气,经过过热器过热后进入膨胀机;高温高压的有机工质蒸气推动膨胀机叶轮做功,进而驱动发电机输出电功率;完成做功后的乏气直接进入冷凝器与冷却水换热,低温低压的液态有机工质从冷凝器中流出进入储液罐,多余的工质将储存在储液罐中,以供循环系统流量调节时备用;从储液罐出来的液体有机工质首先经过干燥过滤器,滤掉液体中杂质后再由工质泵加压送入预热器;经过预热后的工质再次进入蒸发器从而完成整个循环,并开始下一个循环。

2) 热源侧(锅炉蒸汽)循环。系统热源采用锅炉提供的水蒸气,为充分利用热源的热量,高温水蒸气先分成两部分,一部分进入过热器,另一部分直接进入蒸发器,在过热器与蒸发器中放热后,两部分水蒸气再次混合,一起进入预热器继续与温度较低的工质进行换热;水蒸气经过预热器进入凝结水箱,凝结为液态水,通过回水管道再回到锅炉完成蒸汽循环。

3) 冷源侧(冷却水)循环。本实验台冷却水由实验台屋顶冷却塔提供。通过冷却水泵将冷却水加压

送入冷凝器与工质进行换热,吸收工质热量后,冷却水温度升高,回到冷却塔放热后再次进入冷凝器,如此不断进行循环。

2 膨胀机性能测试

在整个 ORC 系统中,膨胀机是实现电能输出的关键设备,其性能直接影响输出功率的多少。评价膨胀机性能的主要参数:膨胀机转速、膨胀功、发电量、发电效率等。影响膨胀机性能的主要因素是膨胀机进出口温度及压力。一般情况下,膨胀机出口压力和温度随进口压力和温度的升高而升高,且进口温度和压力越大,透平膨胀机转速越高,进出口温差、焓差越大,即做功越多。由于膨胀机入口温度由蒸发温度决定,蒸发温度加 5℃ 过热度即为膨胀机入口温度,因此,蒸发温度是影响膨胀机性能的主要因素。

实验过程中,保持冷凝温度为 35℃,通过调节膨胀机进口压力来设置不同的蒸发温度值,膨胀机进口压力在 0.697 ~ 0.789 MPa 变化时,对应的蒸发温度变化为 76 ~ 84℃。随着蒸发温度的升高,膨胀机转速变化趋势如图 3 所示。

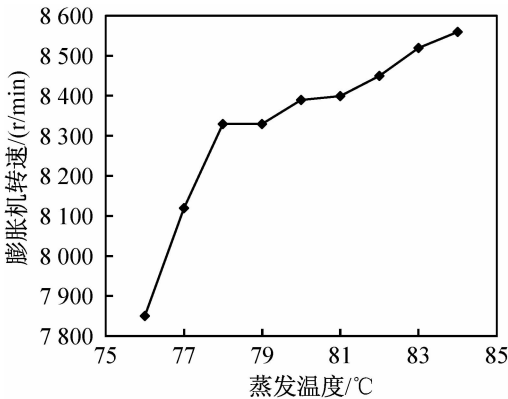


图 3 膨胀机转速随蒸发温度变化趋势
Fig.3 Variation of expander revolving speed with evaporation temperature

由图 3 可知,随着蒸发温度的升高,膨胀机转速逐渐增大,原因是蒸发温度的升高使膨胀机入口温度也逐渐升高。当蒸发温度从 76℃ 升高到 84℃ 时,膨胀机转速从 7 850 r/min 增至 8 565 r/min,约增大了 9.11%。

此外,膨胀机输出电功率是膨胀机最主要的性能参数,通过测出的膨胀机进出口焓值及工质流量即可算出膨胀机的膨胀功,发电量可直接测量。发电量与膨胀机膨胀功的比值即为膨胀机的发电效率:

$$\eta_{elec} = \frac{W}{W_s} \times 100\%$$

(1)

式中: W 为膨胀机的发电量, kW; η_{elec} 为膨胀机发电效率; W_s 为膨胀机的膨胀功, kW。

膨胀机的膨胀功、发电量及膨胀机发电效率随蒸发温度的变化如图 4 所示。

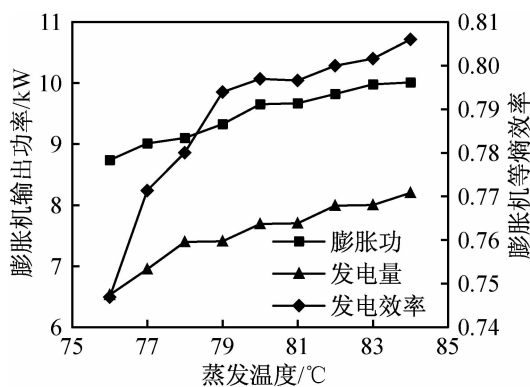


图 4 膨胀机性能曲线

Fig. 4 Expander performance curve

由图 4 可知,膨胀机的膨胀功与发电量均随蒸发温度的升高而逐渐增大。其中,膨胀机膨胀功最小值为 8.74 kW,最大值为 10 kW;发电量最小为 6.53 kW,最大为 8.2 kW。由于透平膨胀机内部存在摩擦、进气和漏气损失等不可逆损失,因此发电量均小于膨胀功。膨胀机发电效率曲线随蒸发温度的升高也呈逐渐增大的趋势,最高发电效率为 80.6%。主要是因为随蒸发温度的升高,膨胀机入口温度升高,膨胀机转速增大,使工质的热能转化为机械能的部分增多,提高了发电效率。因此,蒸发温度是影响膨胀机性能的主要因素,可适当增加膨胀机入口压力,进而提高蒸发温度,增大膨胀机转速,实现输出更大的发电功率。

3 ORC 系统性能测试

对整个 ORC 发电系统而言,主要的性能评价指标有:循环净功、热效率、不可逆损失以及炯效率等。主要影响因素包括:蒸发温度、冷凝温度、过热度 and 过冷度。本文通过实验来讨论蒸发温度对循环净功、热效率、不可逆损失以及炯效率的影响。

$$Q_e = m_f(h_1 - h_6) \quad (2)$$

式中: Q_e 为工质从热源侧吸收的热量, kW; m_f 为工质的质量流量, kg/s; h_1 、 h_6 分别为工质在蒸发器进、出口的焓值, kJ/kg。

$$\eta = \frac{W_{\text{net}}}{Q_e} \times 100\% \quad (3)$$

式中: η 为热效率; W_{net} 为循环净功, kW。

蒸发器中的炯损失:

$$I_e = m_f T_0 \left[(s_1 - s_6) - \frac{h_1 - h_6}{T_H} \right] \quad (4)$$

式中: T_0 为环境温度, K; s_6 、 s_1 分别为蒸发器进、出口工质的熵, kJ/(kg·K); T_H 为热源的平均温度, K。

冷凝器的炯损失:

$$I_c = m_f T_0 \left[(s_5 - s_2) - \frac{h_5 - h_2}{T_L} \right] \quad (5)$$

式中: s_2 、 s_5 分别为冷凝器进口和出口工质的熵, kJ/(kg·K); h_2 、 h_5 分别为膨胀机出口焓值以及冷凝器出口焓值, kJ/kg; T_L 为冷源的平均温度, K。

膨胀机的炯损失:

$$I_{\text{exp}} = m_f T_0 (s_2 - s_1) \quad (6)$$

式中: s_1 、 s_2 分别为膨胀机进口和出口工质的熵, kJ/(kg·K)。

工质泵的炯损失:

$$I_p = m_f T_0 (s_6 - s_5) \quad (7)$$

式中: s_6 为蒸发器进口工质的熵, kJ/(kg·K)。

根据式(4)~式(7)可得, ORC 系统总的炯损失:

$$I = I_e + I_c + I_{\text{exp}} + I_p = m_f T_0 \left[\frac{h_6 - h_1}{T_H} - \frac{h_5 - h_2}{T_L} \right] \quad (8)$$

炯效率:

$$\eta_e = \frac{W_{\text{net}}}{Q_e \left(1 - \frac{T_L}{T_H} \right)} \times 100\% \quad (9)$$

式中: η_e 为炯效率; W_{net} 为系统循环净功, kW。

3.1 蒸发温度对循环净功和热效率的影响

实验系统中除发电系统透平膨胀机以外,还有消耗功的设备,主要是工质泵和冷却水泵,循环净功需减去泵的功耗,可得循环净功和热效率。循环净功和吸热量及热效率随蒸发温度的变化趋势分别如图 5、图 6 所示。

由图 5 可知,当 R245fa 蒸发温度低于 85 °C 时,随着蒸发温度的升高,循环净功逐渐增大。当蒸发温度为 84 °C 时,循环净功增加了 31.05 kW,增加幅度为 33.9%。此外,由于实验工况的蒸发温度较低,热源温度较高,窄点温差的限制不予考虑,因此吸热量随蒸发温度的升高也呈增大趋势。

由图 6 可知,当蒸发温度由 76 °C 升高到 84 °C 时,热效率也逐渐升高。通过蒸发温度为 84 °C 和 76 °C 时的热效率,可计算得出热效率增加了 26.7%。热效率是由循环净功和热源放热量共同决定的。虽然循环净功随蒸发温度的变化趋势较为复杂,但热效率随蒸发温度是逐渐上升的。这主要因为随着蒸发

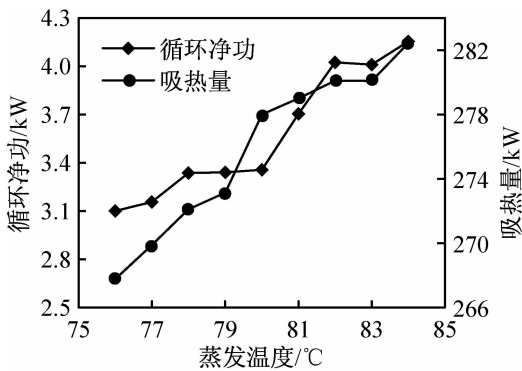


图 5 循环净功与吸热量随蒸发温度的变化
Fig. 5 Variations of the cycle net power and heat with evaporation temperature

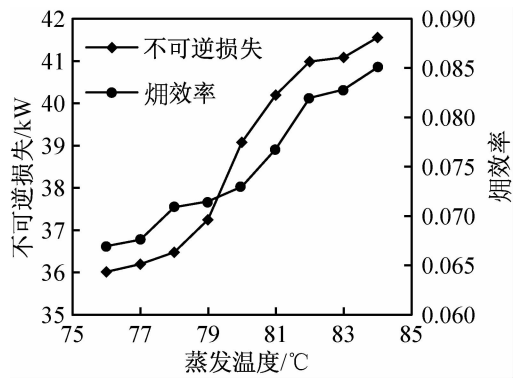


图 7 不可逆损失和炯效率随蒸发温度的变化
Fig. 7 Variations of the irreversible loss and the exergy efficiency with evaporation temperature

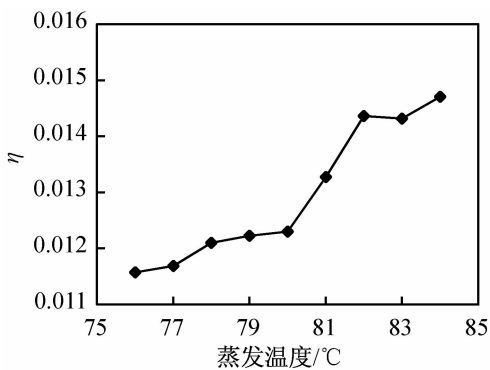


图 6 热效率随蒸发温度的变化
Fig. 6 Variation of thermal efficiency with evaporation temperature

温度升高,热源放热量的减小幅度比循环净功更大,以 R245fa 为例,当蒸发温度从 90 °C 上升到 120 °C 时,热源放热量减小了 45%,而循环净功仅减少了 26%,因此热效率仍呈增大趋势。从能量品位角度考虑,提高蒸发温度相当于提高了输入系统能量的品位,热效率也相应提高。由于当前测试工况的蒸发温度偏低,与设计值相差较大,因此热效率较低,最大值约为 1.5%。如果提高蒸发温度,热效率将继续增大。

3.2 蒸发温度对不可逆损失和炯效率的影响

当保持热源入口温度为 143 °C,冷源入口温度为 22 °C 时,不可逆损失与炯效率随蒸发温度的升高均呈增大趋势,如图 7 所示。当蒸发温度升高 8 °C (蒸发压力也升高),制冷剂流量增加,蒸发器换热量增大,不可逆损失增加了 5.54 kW,增加了 15.4%;炯效率增加了 27%。说明随蒸发温度的升高,炯效率增加的更多,因此,升高蒸发温度可有效提高炯效率。

4 结论

本文建立有机朗肯循环发电系统实验装置,当热

源温度不变,蒸发温度上升时,实验研究了蒸发温度对膨胀机性能和系统性能的影响,得出以下结论:

1) 在膨胀机中,膨胀机入口温度对其性能有较大影响,而膨胀机入口温度又由蒸发温度决定。当膨胀机进口压力在 0.697 ~ 0.789 MPa 变化时,对应的蒸发温度从 76 °C 升高到 84 °C,此时膨胀机转速从 7 850 r/min 增大到 8 565 r/min,增大约 9.11%;膨胀机的理想输出功率和实际输出功率分别增大 1.26 kW、1.67 kW,且由于膨胀机内部存在不可逆损失,在整个温度区间内实际输出功率均小于理想输出功率;此外,随蒸发温度的升高,膨胀机入口温度升高,膨胀机转速增大,使工质的热能转化为机械能的部分增多,膨胀机等熵效率也逐渐增大,最高等熵效率为 80.6%。

2) 当蒸发温度在 76 ~ 84 °C 变化时,蒸发温度升高 8 °C (蒸发压力也升高),制冷剂流量增加,蒸发器换热量增大,故系统的循环净功、吸热量、热效率、不可逆损失及炯效率均呈增大趋势(分别增大了 33.9%、26.7%、15.4% 及 27%)。在该温区,提高蒸发温度,可有效的提高系统的热效率与炯效率。

本文受上海市动力工程多相流动与传热重点实验室项目(13DZ2260900)、博士启动经费项目(1D-16-301-007)及高校教师培训培养项目(10-17-301-803)资助。(The project was supported by Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer of Power Engineering (No. 13DZ2260900), Doctor Start Funding (No. 1D-16-301-007) and University Teacher Training (No. 10-17-301-803).)

参考文献

- [1] 王大彪,段捷,胡哺松,等. 有机朗肯循环发电技术发展现状[J]. 节能技术, 2015, 33(3): 235-242. (WANG Dabiao, DUAN Jie, HU Busong, et al. Status of organic

- Rankine cycle power generation technology [J]. Energy Conservation Technology, 2015, 33(3):235-242.)
- [2] QUOILIN S, BROEK M V D, DECLAYE S, et al. Techno-economic survey of organic Rankine cycle (ORC) systems [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013, 22:168-186.
- [3] VELEZ F, SEGOVIA J J, MARTIN M C, et al. A technical, economical and market review of organic Rankine cycles for the conversion of low-grade heat for power generation[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(6):4175-4189.
- [4] BAO Junjiang, ZHAO Li. A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2013, 24:325-342.
- [5] MICHELI D, PINAMONTI P, RRINI M, et al. Performance analysis and working fluid optimization of a cogenerative organic rankine cycle plant[J]. Journal of Energy Resource Technology, 2013, 135(2): 021601.
- [6] RAYEGAN Y, TAO Y X. A procedure to select working fluids for solar organic Rankine cycles (ORCs) [J]. Renewable Energy, 2011, 36(2):659-670.
- [7] MANENTE G, TOFFOLO A, LAZZARETTO A, et al. An organic Rankine cycle off design model for the search of the optimal control strategy[J]. Energy, 2013, 58: 97-106.
- [8] BAMGBOPA M O, UZGOREN E. Quasi-dynamic model for an organic Rankine cycle [J]. Energy Conversion & Management, 2013, 72: 117-124.
- [9] LEE Y R, KUO C R, LIU C H, et al. Dynamic response of a 50 kW organic Rankine cycle system in association with evaporators[J]. Energies, 2014, 7(4): 2436-2448.
- [10] LEE Y R, KUO C R, WANG C C. Transient response of a 50 kW organic Rankine cycle system[J]. Energy, 2012, 48(1): 532-538.
- [11] FU B R, HSU S W, LEE Y R, et al. Effect of off-design heat source temperature on heat transfer characteristics and system performance of a 250-kW organic Rankine cycle system[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 70(1): 7-12.
- [12] MIAO Zheng, XU Jinliang, YANG Xufei, et al. Operation and performance of a low temperature organic Rankine cycle [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 75:1065-1075.
- [13] PERIS B, NAVARRO-ESBRI J, MOLES F, et al. Performance evaluation of an organic Rankine cycle (ORC) for power applications from low grade heat sources[J]. Applied Thermal Engineering, 2014, 75:763-769.
- [14] 魏莉莉. 以 R142b 为工质的有机朗肯循环低温发电系统研究[J]. 低温工程, 2016(4):61-68. (WEI Lili. Experimental study of R142b in low-temperature energy conversion system based on organic Rankine cycle [J]. Cryogenics, 2016(4):61-68.)
- [15] 魏新利, 李明辉, 马新灵, 等. 有机朗肯循环系统的实验研究和性能分析 [J]. 郑州大学学报 (工学版), 2016, 37(2): 73-76. (WEI Xinli, LI Minghui, MA Xinling, et al. Experimental investigation and performance analysis of organic Rankine cycle system [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2016, 37(2): 73-76.)
- [16] 江龙, GROLL E A. 有机朗肯循环的发电系统的实验研究[J]. 制冷学报, 2012, 33(1): 18-21. (JIANG Long, GROLL E A. Study on organic Rankine cycle and experiment of geothermal power generation [J]. Journal of Refrigeration, 2012, 33(1): 18-21.

通信作者简介

黄理浩,男,讲师,博士,上海理工大学制冷及低温工程研究所,15021119832, E-mail: huanglihao1208@163.com。研究方向:MVR 废液回收、窄通道换热、余热回收。

About the corresponding author

Huang Lihao, male, lecturer, Ph. D., Institute of Refrigeration & Cryogenics, University of Shanghai for Science and Technology, + 86 15021119832, E-mail: huanglihao 1208@163.com. Research fields: waste recovery of MVR, narrow channel heat transfer, waste heat recovery.