

有机朗肯循环方法回收液压系统余热试验研究

谷正钊^{1,2}, 夏连鹏¹, 权龙¹, 李运华³

(1. 太原理工大学新型传感器与智能控制教育部与山西省重点实验室, 030024, 太原; 2. 太原工业学院
机械工程系, 030008, 太原; 3. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 100191, 北京)

摘要: 针对液压系统传统油冷器冷却时能耗大、热能浪费严重的问题,提出基于有机朗肯循环的液压系统余热回收利用方案,改善系统综合能效。建立了液压系统余热回收试验平台,研究电负载、油液流量和工质流量等参数对系统运行和能量特性的影响规律。试验结果表明:在相同工况下,与同等规格油冷器相比,所提有机朗肯循环余热回收系统最大热效率提高到了 2.56%;膨胀机压力比和系统热效率随电负载和油液流量增加而增加;随着工质流量增大,膨胀机入口工质过热度显著降低,而蒸发器换热量和膨胀机输出功率增大。在试验工况下,蒸发器最大换热量为 4.18 kW,膨胀机最大输出功率为 356 W。试验结果验证了液压系统余热回收系统的节能效果,得到了运行参数对系统性能的影响规律。

关键词: 液压系统;余热回收;有机朗肯循环;试验研究;运行特性

中图分类号: TK11 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202112002 **文章编号:** 0253-987X(2021)12-0009-07



OSID 码

An Experimental Study on Waste Heat Recovery of Hydraulic System by Organic Rankine Cycle Method

GU Zhengzhao^{1,2}, XIA Lianpeng¹, QUAN Long¹, LI Yunhua³

(1. Key Lab of Advanced Transducers and Intelligent Control System of Ministry of Education and Shanxi Province, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China; 2. Department of Mechanical Engineering, Taiyuan Institute of Technology, Taiyuan 030008, China; 3. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: A scheme of waste heat recovery and utilization of hydraulic system based on organic Rankine cycle is proposed to solve the problems of high energy consumption and serious waste of heat energy during cooling of traditional oil coolers in hydraulic system and to improve the comprehensive energy efficiency of the system. A test platform for waste heat recovery of the hydraulic system is built to study the influences of electric load, oil flow rate, and flow rate of the working fluid on the system operation and energy characteristics. Experimental results show that, compared with the oil cooler of the same specification, the system' maximum thermal efficiency of the proposed scheme increases to 2.56% under the same working conditions. The pressure ratio of the expander and the thermal efficiency of the system increase with the increase of electric load and oil flow rate. With the increase of the flow rate of the working fluid, the superheat of the working fluid at the inlet of the expander decreases significantly, while the heat flow rate in the evaporator and the output power of the expander increase. Under the testing

condition, the maximum heat flow rate in the evaporator is 4.18 kW, and the maximum output power of the expander is 356 W. The test results verify the energy saving effect of the waste heat recovery system of the hydraulic system, and reveal the influence laws of operating parameters on the system performance.

Keywords: hydraulic system; waste heat recovery; organic Rankine cycle (ORC); experimental study; operating characteristic

液压传动系统因其较大的功率质量比而广泛应用于大功率移动设备和工业设备。液压挖掘机作为典型的移动液压设备,根据中国工程机械工业协会的统计数据,其保有量在2017年底已达149.5万~162.0万台。由于液压能在转换和传递过程中存在节流损失和溢流损失,使系统平均效率仅为22%^[1],其损失的能量几乎都转化为热能而使油温升高。油温过高将产生一系列不良影响,如增大泄漏、加速油液氧化变质、加速密封元件老化等^[2]。为防止液压系统中油温过高,一般在系统中增加油冷器,由风扇引入环境空气与液压油进行强制对流换热。其中,冷却系统消耗功率可占整机装机功率的5%~10%^[3]。

目前,对液压系统冷却方式的研究主要集中于两方面:一方面通过优化机械结构和运行参数,使冷却系统与液压系统相匹配,提高冷却效果和运行的可靠性^[4-7];另一方面采用新型的冷却方式,如热管技术^[8]和半导体制冷技术^[9],增大传热系数,实现高效冷却。这些研究对冷却系统的优化提供了很好的指导,然而,仍需通过耗能来实现油液热能的耗散,降低了系统整体能量效率。为满足节能减排的发展理念,本文提出采用有机朗肯循环实现液压系统再生冷却,即在冷却热油液的同时,回收油液热并将其转化为可用能,以期实现无耗能冷却的目标。

由于有机朗肯循环(ORC)在中低温余热回收方面具有较高的效率,因此其在太阳能、地热水源、发动机废气、工业余热和生物质能等领域的研究较多^[10-14]。工质优选、参数优化、系统性能分析和试验测试等方面的研究,为有机朗肯循环的应用提供了技术支持^[15-19]。文献[20]对太阳能驱动的ORC系统进行了实验测试,当热源温度为110℃时,回热循环效率可达10.8%。文献[21]研究了热源为90℃热水的ORC实验系统,系统的最大比净功可达4.31 kJ/kg。文献[22]采用ORC回收重型车用柴油机排气余热,搭建了试验平台并进行了试验研究,在柴油机排气温度为447.63℃时,膨胀机最大输出功率为490 W。文献[23]通过试验研究了冷热源工况对ORC系统性能的影响,并建议在热源温度较

低时用基本ORC,在热源温度较高时用再热ORC。文献[24]研究了微型ORC系统的稳态和动态特性,发现负载对系统性能有显著影响,试验工况下最大发电功率为120 W。

尽管近年来对ORC试验研究逐渐增多,但仍有ORC回收液压系统余热方面的试验研究。常用液压系统中油液最高热平衡温度一般不超过95℃,作为余热热源时温度较低。尽管作者已对ORC回收液压系统余热进行了理论研究^[25],但其实际运行特性仍需通过试验进一步探究。因此,本文搭建有机朗肯循环回收液压系统余热试验平台,以研究系统在低温热源作用下的运行效果和特性,获得液压系统和ORC参数对系统性能的影响规律,为ORC在液压系统冷却中的应用提供参考。

1 试验系统

在前期理论研究的基础上,搭建基于ORC的液压系统余热回收试验平台,通过试验研究其可行性和运行特性。同时,试验结果可为仿真模型的校准和验证提供依据。

1.1 系统介绍

搭建的液压系统余热回收试验平台,主要包括作为热源的液压回路、ORC工质回路、机械传动部分和测控信号,并配有润滑回路,其原理如图1所示。试验平台以液压泵站模拟液压系统工作过程,由三相异步电机驱动液压泵作为动力源,采用溢流阀作为液压系统的负载,经溢流损失后液压能转化为热能,油液温度升高。油液流量由变量泵控制,通过调节负载阀工作压力控制油液温度。当液压油达到一定温度后,逐步启动ORC系统。升温后的液压油进入蒸发器,将热量传递给工质。此时,热油液被冷却,而工质吸热蒸发为有一定压力的气体。气态工质驱动膨胀机转动,然后通过皮带传动带动发电机旋转,发电机发电并供给电负载。之后,工质在冷凝器中冷凝为液体,并进入储液罐,再次由工质泵输入蒸发器,继续下一次循环。润滑回路主要由油泵、油分离器和储油罐组成,为膨胀机工作提供润滑

冷凝器中的换热量为

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = \dot{m}_{\text{wf}}(h_4 - h_1) = \rho_{\text{air}} q_{\text{air}} c_{p,\text{air}}(T_8 - T_7) \quad (4)$$

式中: $\dot{m}_{\text{wf}}$ 为工质的质量流量, kg/s; ρ_{air} 为空气密度, 取 1.29 kg/m^3 ; $c_{p,\text{air}}$ 为空气比定压热容, 取 $1005 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$; q_{air} 为空气流量, 由风速和面积计算得到, m^3/s ; h 为工质比焓, kJ/kg ; T 为温度, $^{\circ}\text{C}$; 下角标 1~8 分别对应图 1 中对应数字所在位置。

工质泵消耗功率为

$$W_{\text{rp}} = \frac{\dot{m}_{\text{wf}}(h_2 - h_1)}{\eta_{\text{rp}}} \quad (5)$$

式中: η_{rp} 为工质泵效率。

冷凝器和油冷器的冷却风扇消耗功率为

$$W_{\text{fan}} = \frac{p_{\text{air}} q_{\text{air}}}{\eta_{\text{fan}}} \quad (6)$$

式中: p_{air} 为风扇压降, Pa; η_{fan} 为风扇效率。

膨胀机输出功率为

$$W_{\text{exp}} = \dot{m}_{\text{wf}}(h_3 - h_4) \eta_{\text{exp}} \quad (7)$$

式中: η_{exp} 为膨胀机效率。

膨胀机的压缩比为

$$r_{\text{exp}} = p_3 / p_2 \quad (8)$$

系统热效率为

$$\eta_{\text{th, ORC}} = \frac{W_{\text{exp}} - W_{\text{rp}} - W_{\text{fan}}}{Q_{\text{evap}}} \quad (9)$$

由于油冷器冷却时只消耗功率, 故将其热效率定义为风扇消耗功率与散热功率的比值, 表示为

$$\eta_{\text{th, cooler}} = -\frac{W_{\text{fan}}}{Q_{\text{cooler}}} \quad (10)$$

3 结果与分析

在试验过程中, 测得室内环境温度为 $(18 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ 。保持蒸发器入口油温为 80°C , 油液流量以 10 L/min 的梯度, 从 50 L/min 递增至 80 L/min , 其变化如图 3 所示。电负载功率变化规律为 $60, 120, 220, 320 \text{ W}$ 。

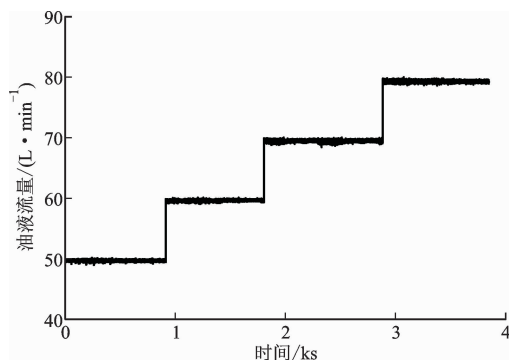


图 3 液压泵流量变化过程

Fig. 3 Changing process of hydraulic pump flow rate

3.1 油冷器和余热回收系统比较

采用 ORC 回收液压系统余热, 在回油路中将油冷器替换为蒸发器, 液压系统回流油液经过蒸发器后回油箱。油液经过换热器存在压降, 从而影响液压系统的背压, 而回油背压又将影响液压系统的运动平稳性和能效。若系统背压过小, 则对突变载荷的缓冲能力较弱, 会使执行元件运动平稳性降低; 若背压过大, 则系统功率损失增大, 使效率降低。因此, 需要比较油液在蒸发器和油冷器中的压降。

图 4 为入口油温 80°C 时, ORC 系统与相近规格的油冷器中油液压降和热效率的比较。由图可知, 油液在蒸发器中的压降稍小于油冷器中的压降, 两者处于同一数量级。因此, 在液压系统回油路中将油冷器替换为蒸发器, 会轻微降低系统背压。可通过调整背压阀参数, 维持系统所需背压。图中 ORC 系统的运行工况为: 负载 320 W , 工质质量流量 16 g/s 。由图可知, ORC 冷却系统的热效率为正值, 并随流量的增大而增大, 最大值为 2.56% ; 而油冷器冷却系统的热效率为负值, 随流量的增大而缓慢增大, 最大值为 -1.63% 。说明用 ORC 回收液压系统余热具有明显的节能效果。随着油液流量的增大, 油冷器冷却系统的热效率缓慢升高, 而 ORC 冷却系统的热效率显著升高。可见, 油液流量对 ORC 系统的热效率影响更显著。

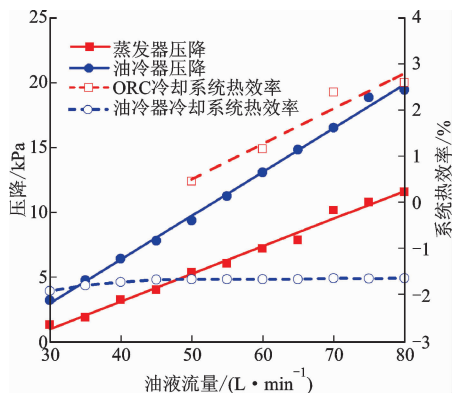


图 4 油冷器和余热回收系统的压降和系统热效率比较

Fig. 4 A comparison of pressure drop and thermal efficiency between oil cooler and waste heat recovery system

3.2 油液流量对余热回收系统性能的影响

液压系统作为 ORC 系统的热源, 油液流量的变化将影响蒸发器的换热量, 从而影响有机朗肯循环系统的性能。在试验中, 保持工质泵排量不变, 改变油液流量和电负载功率, 观测系统性能变化。

图 5 和图 6 分别为油液流量和电负载对膨胀机转速和压力比的影响。膨胀机转速和压力比随着油

液流量的增大缓慢增大,而膨胀机转速则随着负载的降低显著增大。这是由于随着油液流量增大,工质在蒸发器中吸热更充分,进入膨胀机时焓升高,从而使膨胀机转速缓慢升高。而电负载增大,膨胀机的输出转矩增大,从而降低膨胀机转速,并提高压力比。试验中,膨胀机的转速变化范围为 866~1 128 r/min,压力比变化范围为 3.49~3.87。

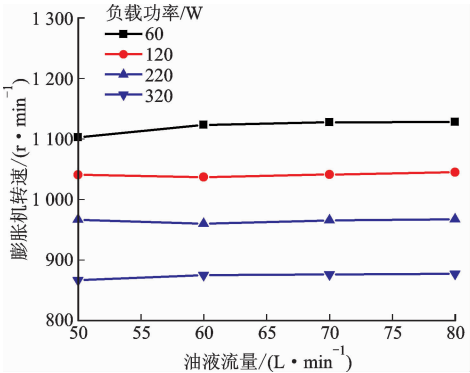


图 5 油液流量和电负载对膨胀机转速的影响
Fig. 5 Influences of oil flow rate and electrical load on the expander speed

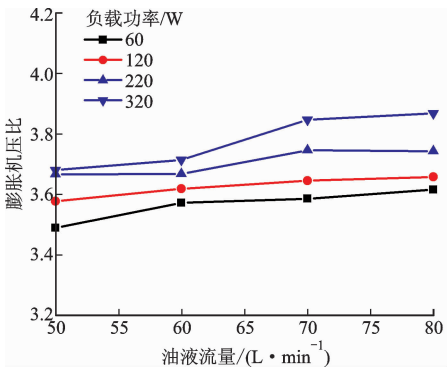


图 6 油液流量和电负载对膨胀机压力比的影响
Fig. 6 Influences of oil flow rate and electric load on pressure ratio of the expander

图 7 为油液流量和电负载对系统热效率的影响。由图可知,随着油液流量和电负载的增大,系统热效率逐渐增大。当电负载功率为 320 W,油液流量为 80 L/min 时,系统热效率达到最大值 2.56%。负载对 ORC 系统的影响可通过图 8 所示温熵图来分析,图中红色线条表示负载增大后温熵图的变化。当负载增大时,膨胀机转速降低,从而使工质蒸发压力和蒸发温度升高。因此,工质在蒸发器中的预热区换热量增加,而蒸发区和过热区换热量相对减少,整体换热功率轻微增大。膨胀机输出功率增大较多,所以系统热效率增加。而油液流量增大,使工质在蒸发器出口的压力和温度升高,蒸发器吸热量和

膨胀机输出功率都增大,由于后者增加幅度大,因此系统热效率也增大。

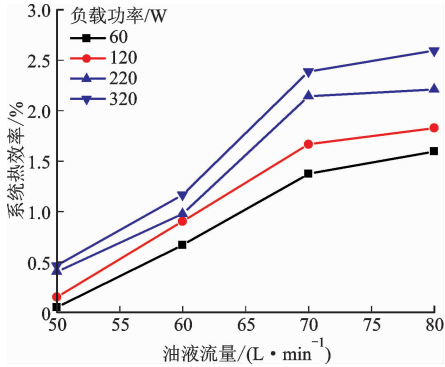


图 7 油液流量和电负载对系统热效率的影响
Fig. 7 Influences of oil flow rate and electrical load on the system thermal efficiency

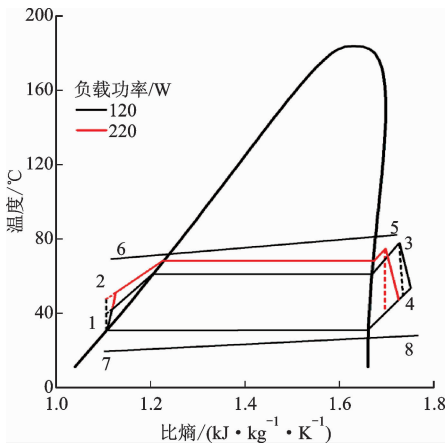


图 8 负载对 ORC 系统的影响
Fig. 8 Influences of load on ORC system

3.3 工质流量对系统性能的影响

工质泵对 ORC 系统的工质进行加压和输送,而工质流量直接影响系统运行特性。在试验中,保持负载功率为 320 W,分别在工质质量流量为 16、21 g/s 时进行测量,观察系统性能变化,其结果如图 9 和图 10 所示。

由图 9 可知,随着工质流量增大,蒸发器换热功率和膨胀机功率都增大,相当于将液压系统更多的热量转化为可用功,对液压系统和 ORC 系统都是有益的。当工质质量流量为 21 g/s,油液流量为 80 L/min 时,蒸发器的换热功率为 4.18 kW,膨胀机输出功率为 356 W。从图 10 可知,工质流量增大,会使蒸发压力增大,过热度下降。工质流量如果过大,可能使工质在膨胀机中进入两相区,产生液滴损伤膨胀机。因此,在实际运行中,应该根据液压系统的流量和温度,在保持工质过热的情况下,尽量增大工质流量。

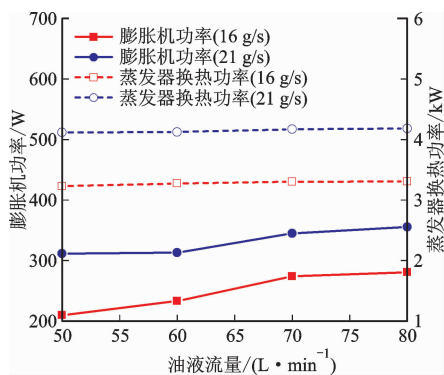


图9 工质流量对膨胀机功率和蒸发器换热功率的影响

Fig. 9 Influences of working fluid flow rate on output power of expander and heat exchange power of evaporator

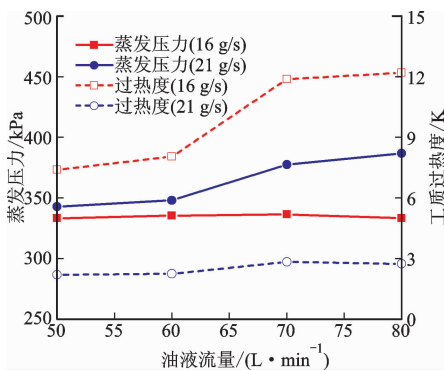


图10 工质流量对工质蒸发压力和过热度的影响

Fig. 10 Influences of working fluid flow rate on evaporating pressure and superheat degree

4 结论

本文对 ORC 回收液压系统余热系统进行了试验研究,比较了油冷器和 ORC 系统的压降和热效率,并研究了油液流量、电负载和工质流量对 ORC 系统性能的影响,主要结论如下。

(1)液压油在蒸发器中的压降稍小于相同规格油冷器中的压降。油冷器的热效率为 -1.63% ,而 ORC 系统的热效率可为正值,且随油液流量的增大而增大。

(2)油液流量和负载对系统性能有显著影响,两者的增大将提高膨胀机压力比和系统热效率。当电负载功率为 320 W,油液流量为 80 L/min 时,系统热效率可达 2.56%。

(3)工质流量增大,可增大蒸发器换热量和膨胀机输出功率,但会降低工质过热度。当工质质量流量为 21 g/s,油液流量为 80 L/min 时,蒸发器的换热功率为 4.18 kW,膨胀机输出功率为 356 W。由于搭建的测试平台规模较小,因此蒸发器中的换热

功率和膨胀机输出功率相对较小,但也能够验证液压系统余热回收系统的节能效果,并可为后续的系统优化、仿真建模和控制策略奠定基础。

参考文献:

- [1] LOVE L J, LANKE E, ALLES P. Estimating the impact (energy, emissions and economics) of the US fluid power industry [EB/OL]. (2012-12-01)[2021-02-01]. <https://www.osti.gov/biblio/1061537>.
- [2] DARKO K, VLADIMIR S. Mathematical modeling of changing of dynamic viscosity, as a function of temperature and pressure, of mineral oils for hydraulic systems [J]. Facta Universitatis Series: Mechanical Engineering, 2006, 4(1): 27-34.
- [3] AN K, KANG H, AN Y, et al. Methodology of excavator system energy flow-down [J]. Energies, 2020, 13(4): 951.
- [4] 姜友山, 金轲, 韦海云. 基于推土机风扇驱动系统的匹配研究 [J]. 液压与气动, 2014(1): 7-9.
JIANG Youshan, JIN Ke, WEI Haiyun. Matching study of hydraulic component on bulldozer temperature control fan system [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2014(1): 7-9.
- [5] 孙新年, 郭新民, 杨文霞, 等. 装载机冷却系统控制装置设计与试验研究 [J]. 内燃机学报, 2008, 26(2): 188-191.
SUN Xinnian, GUO Xinmin, YANG Wenxia, et al. Design and experimental study on control devices of cooling system in loader [J]. Transactions of CSICE, 2008, 26(2): 188-191.
- [6] 张钦国, 秦四成, 马润达, 等. 轮式装载机液压系统的散热器匹配及仿真 [J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(4): 1124-1129.
ZHANG Qinguo, QIN Sicheng, MA Runda, et al. Match and simulation analysis of hydraulic system radiator of wheel loader [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(4): 1124-1129.
- [7] WU Yang, QIN Sicheng, ZHANG Xuelin, et al. Research on speed control model with temperature in hydraulically-driven cooling fan [J]. Advanced Materials Research, 2014, 850-851: 350-354.
- [8] WANKHEDE A A, KOLHE P K. Design and analysis of hydraulic oil cooler by application of heat pipe [J]. International Engineering Research Journal, 2015 (S2): 1677-1681.
- [9] GUO Rui, ZHANG Zhenmiao, ZHAO Jingyi, et al. Performance analysis of a constant temperature hy-

- draulic tank cooling system based on semiconductor refrigeration technology [C]//2015 International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2015: 163-170.
- [10] BACCIOLI A, ANTONELLI M, DESIDERI U. Dynamic modeling of a solar ORC with compound parabolic collectors: annual production and comparison with steady-state simulation [J]. *Energy Conversion and Management*, 2017, 148: 708-723.
- [11] ANTONELLI M, BACCIOLI A, FRANCESCONI M, et al. Dynamic modelling of a low-concentration solar power plant: a control strategy to improve flexibility [J]. *Renewable Energy*, 2016, 95: 574-585.
- [12] 叶文祥, 柳长听, 刘健豪, 等. 采用温差发电-有机朗肯循环联合系统的船舶余热利用实验研究 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(8): 50-57.
- YE Wenxiang, LIU Changxin, LIU Jianhao, et al. Experimental research of ship waste heat utilization by TEG-ORC combined cycle [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(8): 50-57.
- [13] 杨新乐, 卜淑娟, 李惟慷, 等. 一种乏气压缩再循环有机朗肯循环系统热力特性分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(3): 886-896.
- YANG Xinle, BU Shujuan, LI Weikang, et al. Thermodynamic characteristics analysis for an ORC system with exhaust gas compression recycling [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(3): 886-896.
- [14] DE MENA B, VERA D, JURADO F, et al. Updraft gasifier and ORC system for high ash content biomass: a modelling and simulation study [J]. *Fuel Processing Technology*, 2017, 156: 394-406.
- [15] LAKEW A A, BOLLAND O. Working fluids for low-temperature heat source [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30(10): 1262-1268.
- [16] WANG Dongxiang, LING Xiang, PENG Hao, et al. Efficiency and optimal performance evaluation of organic Rankine cycle for low grade waste heat power generation [J]. *Energy*, 2013, 50: 343-352.
- [17] 冯军胜, 裴刚, 董辉, 等. 烧结冷却废气余热有机朗肯循环发电系统性能分析 [J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2019, 50(2): 466-473.
- FENG Junsheng, PEI Gang, DONG Hui, et al. Performance analysis of organic Rankine cycle power generation system with sinter cooling gas waste heat [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2019, 50(2): 466-473.
- [18] YANG Fubin, ZHANG Hongguang, BEI Chen, et al. Parametric optimization and performance analysis of ORC (organic Rankine cycle) for diesel engine waste heat recovery with a fin-and-tube evaporator [J]. *Energy*, 2015, 91: 128-141.
- [19] 王崇尧, 张红光, 赵蕊, 等. 道路工况下有机朗肯循环系统节能潜力分析 [J]. *西安交通大学学报*, 2020, 54(3): 150-160.
- WANG Chongyao, ZHANG Hongguang, ZHAO Rui, et al. Energy saving potential analysis for organic Rankine cycle system under real road conditions [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2020, 54(3): 150-160.
- [20] 宋建忠, 张小松, 李舒宏, 等. 太阳能有机朗肯循环系统的实验特性 [J]. *化工学报*, 2014, 65(12): 4958-4964.
- SONG Jianzhong, ZHANG Xiaosong, LI Shuhong, et al. Experimental characteristics of solar organic Rankine cycle system [J]. *CIESC Journal*, 2014, 65(12): 4958-4964.
- [21] 王怀信, 王大彪, 张圣君. 低温有机朗肯循环系统参数的理论与实验优化 [J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2014, 47(5): 408-413.
- WANG Huaixin, WANG Dabiao, ZHANG Shengjun. Theoretical and experimental optimization of low-temperature organic Rankine cycle system parameters [J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2014, 47(5): 408-413.
- [22] 魏名山, 史磊, 宋盼盼, 等. 以 R245fa 为工质的余热回收系统试验研究 [J]. *农业机械学报*, 2014, 45(3): 26-31.
- WEI Mingshan, SHI Lei, SONG Panpan, et al. Experiment of waste heat recovery system with R245fa as working fluid [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2014, 45(3): 26-31.
- [23] ZHANG Honghu, XI Huan, HE Yaling, et al. Experimental study of the organic Rankine cycle under different heat and cooling conditions [J]. *Energy*, 2019, 180: 678-688.
- [24] LIU Chao, WANG Shukun, ZHANG Cheng, et al. Experimental study of micro-scale organic Rankine cycle system based on scroll expander [J]. *Energy*, 2019, 188: 115930.
- [25] GU Zhengzhao, ZHANG Xiaogang, DONG Zhixin, et al. A solution to the cooling and preheating of hydraulic system by organic Rankine cycle with heat pump [J]. *Energy Conversion and Management*, 2019, 180: 94-105.

(编辑 亢列梅)