

有机朗肯循环研究综述

王 硕

铜山华润电力有限公司 江苏徐州 221000

摘 要: 针对余热利用率较低的现状, 将中低温余热转化为电能是目前节能研究领域的一个重要课题。目前提升中低温余热的回收利用率的方法, 在国际上一般采用的是通过有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle)回收中低温余热。ORC 与传统的朗肯循环非常相似, 但是其工质是有机流体, 与水相比具有低沸点的优势。这使得中低温余热可以作为热源, 因为大多数低沸点有机物即使在高压下仍具有非常低的饱和温度。此外, 有机流体比容比水小, 因此整个发电系统可以设计得小得多, 具有经济效益。蒸发器作为 ORC 系统焓损失最大的部件, 其设计的优化, 将直接有助于系统换热效率的提高。本文介绍了为解决能源短缺及其引起的环境问题, 国内外学者在中低温余热回收利用方面的努力; 熟知了目前国内外有机朗肯循环研究现状以及有机朗肯循环的运行特点, 并对未来中低温余热的回收利用进行展望。

关键词: 中低温余热; 有机朗肯循环; 工质; 蒸发器

A review of organic Rankine cycles

Shuo Wang

Tongshan China Resources Electric Power Co., LTD., Xuzhou, Jiangsu 221000

Abstract: In response to the low waste heat utilization rate, the conversion of medium and low-temperature waste heat into electrical energy is an important topic in the field of energy saving research. Currently, the most common method used internationally to improve the recovery and utilization rate of medium and low-temperature waste heat is through the Organic Rankine Cycle (ORC). ORC is very similar to the traditional Rankine cycle, but its working fluid is an organic fluid that has the advantage of a lower boiling point compared to water. This allows medium and low-temperature waste heat to be used as a heat source, as most low-boiling organic substances still have very low saturation temperatures even under high pressure. Additionally, organic fluids have a smaller specific volume compared to water, which allows the entire power generation system to be designed much smaller, thus offering economic benefits. The evaporator, as the component with the highest losses in the ORC system, plays a significant role in improving the system's heat transfer efficiency through optimization of its design. This paper introduces the efforts made by domestic and foreign scholars in the field of medium and low-temperature waste heat recovery and utilization to address energy shortages and the associated environmental issues. It provides an overview of the current research status of ORC both domestically and internationally, highlighting the operational characteristics of the ORC system. Furthermore, it offers prospects for the future recovery and utilization of medium and low-temperature waste heat.

Keywords: medium-low temperature waste heat; Organic Rankine cycle; Working medium; evaporator

引言

能源使用及其引起的环境问题是本世纪讨论最多的问题之一。针对余热利用率较低的现状^[1-2], 将中低温余热转化为电能是目前节能研究领域的一个重要课题。因为这个方法既减少了排入大气的废热量又降低了当地发电厂的运行负荷, 间接减少了化石燃料的消耗。这是一个保护环境、节约燃料的重要途径。目前提升中低温余热的回收利用率的方法, 在国际上一般采用的是通过机朗肯循环(Organic Rankine Cycle)^[3] 回收中低温余热。ORC 与传统的朗肯循环非常相似, 但是其工质是有机流体, 与水相比具有低沸点和低潜热的优势。这使得中低温余热可以作为热源, 因为大多数低沸点有机物即使在高压下仍具有非常低的饱和温度^[4]

此外, 有机流体比容比水小, 因此整个发电系统可以设计得小得多, 具有经济效益。蒸发器作为 ORC 系统焓损失最大的部件^[5], 其设计的优化, 将直接有助于系统换热效率的提高。

目前, 部分发达国家已经将该系统用于工程, 技术已经趋于成熟。我国学者在 ORC 系统各方面已经展开了系统的研究, 并取得了各方面的技术突破。相信通过技术的积累, 国内自主研发用于中低温余热回收利用的 ORC 系统将会在各个领域投入使用。

一、有机朗肯循环的介绍

有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle, 简称ORC) ORC 与传统的朗肯循环非常相似, 但是其工质是有机流体, 与水相比具有低沸点和低潜热的优势。这使得中低温余热可以作

为热源,因为大多数低沸点有机物即使在高压下仍具有非常低的饱和温度^[4]。此外,有机流体比容比水小,因此整个发电系统可以设计得小得多,具有经济效益。ORC发电厂的基本形式,如图1-1所示。

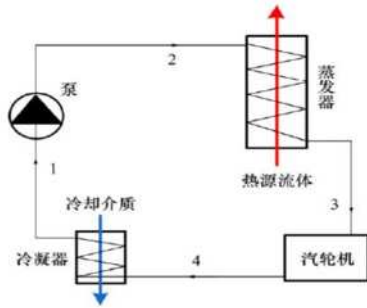


图1-1 有机朗肯循环示意图

ORC发电系统现在主要用于利用工业过程(化学品和水泥厂)的废热,并且通常用于转化可再生来源的低温和中温热能(地热,生物质,太阳)。许多学者对ORC发电系统的研究工作多致力于工质性质、换热器的设计、发电厂类型和参数如何影响ORC发电厂效率的问题。

二、有机朗肯循环研究现状

2.1 有机朗肯循环工质的现状

ORC发电系统正被应用于在扩大的热源参数范围内,太阳能^[7]、地热能^[8]、工业余热等越来越多的热源被利用。朗肯循环发电厂中的蒸发温度主要由热源温度决定。总温度降主要由冷凝器中冷却剂的温度确定。这意味着对于不同热源,存在一种最优工质,使循环效率和压力比的值可以达到最优。

刘超与徐进良^[9]在ORC中以低温地热为热源,分析比较了干、湿工质共12种,结果表明最优工质为R236fa。高建强等^[10]以太阳能为热源,取5种有机工质进行计算和分析,确定R123为最优工质。Khennich等^[11]以工业余热为热源,通过对5种工质分析研究,确定R141b为合适工质。

因为非共沸混合物在相变中发生温度滑移,所以近年来许多人对以非共沸混合物为工质ORC系统产生了浓厚的兴趣。Aghahosseini和Dincer^[12]分别对纯工质的ORC和以非共沸混合物为工质的ORC进行了热力学分析。Radulovic和Castaneda^[13]研究了超临界地热ORC。Abadi G B等^[14]提出并评价了小型有机朗肯循环中工质为R245fa/R134a非共沸混合物的性能实验,结果表明:即使在低压比下,与以纯R245fa为工质的ORC系统相比,该系统输出功率增加。

除此之外,筛选标准还有干湿性、环境影响和安全性等^[15]。目前市场使用较多的工质是R245fa^[16],其次是R134a^[17]。

2.2 有机朗肯循环换热器的研究现状

在有机朗肯循环系统主要通过换热设备实现系统与外界的热量传递。因此换热设备换热率的提高将有助于系统的优化。目前国内外对换热器的研究方法主要有:1.理论计算、2.实验研究、3.数值模拟^[18]。

魏莉莉等^[19]针对低温有机朗肯循环发电系统结合理论分析与实验测试证实“壳管式预热器+满液式蒸发器”的组合式蒸发器是ORC低温发电系统中蒸发器的最佳选择。魏新利等^[20]运用模拟软件对以R245fa为工质的ORC系统进行系统分析,证实“板式蒸发器”最适用于ORC系统。

蒸发器是有机朗肯中低温余热发电系统中的关键换热设备^[21],其换热效率对于整个系统的影响非常大。学者Mago等^[15]通过焓拓扑图和焓轮图(exergy wheel)方式,对基本有机朗肯循环和再热型有机朗肯循环的焓流程进行了研究,并且给出了各个主要设备的焓损失情况。结果指出蒸发器是整个循环焓损失最大的部件,对于基本循环可占整个系统焓损失的77%左右,而对再热型ORC蒸发器也要占到整个系统的40%多。废热发电系统的热力学分析表明,有两种方法可以提高系统性能:其一,提高热/能量输入;其二,提高系统的热做功转换能力^[22]。在给定热源情况下,蒸发器设计的优化将有助于工质吸收更多的热能转化为功。因此对蒸发器设计的进一步优化,可使系统更高效。当然,ORC系统的设计仅基于设计数据(热平衡图)是不经济的。因此,在实际应用ORC到工厂时,还需要考虑经济性^[23-24]的设计,以确定ORC的最佳尺寸。

三、总结与展望

文中对目前国内外有机朗肯循环研究现状以及有机朗肯循环的运行特点进行了综述,为基于有机工质的蒸发器设计,通过建立热力学模型,对有机朗肯循环系统进行稳态模拟以及对有机工质的研究,利用科学计算软件MATLAB^[25]进行蒸发器的热力计算,完成蒸发器的结构设计,为ORC电厂的设计及效率的提高提供有价值的参考。进一步加强我国在中低温余热方面的回收利用,达到节约资源与环境保护的目的。

参考文献:

- [1] 丁毅,史德明.钢铁企业余热资源高效利用[J].钢铁,2011,6(10):88.
- [2] 舒型武.简析钢铁工业节能减排的途径[J].冶金能源,2008,27(3):6.
- [3] 冯驯.有机朗肯循环中低温余热发电系统理论研

究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011: 6-7.

[4] Yamamoto T, Furuhashi T, Arai N, et al. Design and testing of the organic Rankine cycle [J]. *Energy*, 2001, 26(3): 239—251.

[5] Mago P J, Srinivasan K K, Chamra L M, et al. An examination of exergy destruction in organic Rankine cycles[J]. *International Journal of Energy Research*, 2010, 32(10):926-938.

[6] 冯驯, 徐建, 王墨南, 等. 有机朗肯循环系统回收低温余热的优势[J]. *节能技术*, 2010, 28(05): 387-391.

[7] Manolacos D, Kosmadakis G, Kyritsis S. On site experimental evaluation of a low temperature solar organic Rankine cycle system for RO desalination [J]. *Solar Energy*, 2009, 83(5): 646-656.

[8] Madhawa H H D, Golubovic M, Worek W M, et al. Optimum design criteria for an organic Rankine cycle using low-temperature geothermal heat sources[J]. *Energy*, 2007, 32(9): 1698-1706.

[9] 刘超, 徐进良. 中低温地热发电有机朗肯循环工质筛选[J]. *可再生能源*, 2014, 32(8): 1188-1194.

[10] 高建强, 孙鑫, 曲振肖, 等. 太阳能超临界有机朗肯循环的工质选择和性能分析[J]. *太阳能学报*. 2015, 36(8): 2002-2007.

[11] Khennich M, Galanis N. Thermodynamic analysis and optimization of power cycles using a finite low temperature heat source [J]. *International Journal of Energy Research*, 2012, 36(7): 871-885.

[12] Aghahosseini S, Dincer I. Comparative performance analysis of low temperature organic Rankine cycle (ORC) using pure and zeotropic working fluids. *Appl Therm Eng* 2013; 54:35-42.

[13] Radulovic J, Castaneda NIB. On the potential of

zeotropic mixtures in supercritical ORC powered by geothermal energy source. *Energy Convers Manag* 2014; 88:365-71.

[14] Abadi G B, Yun E, Kim K C. Experimental study of a 1kw organic Rankine cycle with a zeotropic mixture of R245fa/R134a[J]. *Energy*, 2015, 93:2363-2373.

[15] 于浩水, 冯霄, 王彧斐. 有机朗肯循环工质筛选准则分析[J]. *计算机与应用化学*, 2015, 32(11).

[16] 徐灏. 疲劳强度[M]. 北京: 高等教育出版社, 1988.

[17] 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* 2015.33(3):235-242.

[18] 贝晨. ORC 系统换热器性能分析及蒸发器对发动机性能影响研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2016

[19] 魏莉莉, 张于峰, 穆永超. 低温朗肯循环发电系统中的蒸发器设计研究[J]. *低温工程*. 2015.2(6):31-36.

[20] 魏新利, 闫艳伟, 马新灵, 等. 有机朗肯循环系统蒸发器的性能研究[J]. *郑州大学学报(工学版)*. 2015.36(4):45-53.

[21] 刘超, 徐进良, 陈奇成, 等. 低温跨临界有机朗肯循环工质筛选[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(23):37-43.

[22] 郭江峰. 换热器的热力学分析与优化设计[D]. 济南: 山东大学, 2011.

[23] 邓立生, 黄宏宇, 何兆红, 等. 有机朗肯循环的研究进展[J]. *新能源进展*, 2014(3):180-189.

[24] 李慧君, 王培毅. 有机工质余热发电系统的经济性分析[J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(4):77-82.

[25] 王沫然. MATLAB 与科学计算[M]. 北京: 电子工业出版社. 2012:08.

作者简介: 王硕(1992-), 男, 汉族, 助理工程师, 现任铜山华润电力有限公司集控巡检,