

有机朗肯循环在低温余热发电的应用进展

谷志卿¹, 宋海琛², 尹金城³, 鞠 朋¹, 吴维成¹, 张 静³

(1. 沈阳工程学院 碳达峰碳中和研究院, 辽宁 沈阳 110136; 2. 沈阳铝镁设计研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110001; 3. 南京理工大学 新能源学院, 江苏 南京 210000)

摘要: 低温余热发电是解决目前我国工业领域能源消耗高、余热利用率低的关键路径之一。有机朗肯循环(ORC)凭借在低温条件下显著提升膨胀机效率、改善汽轮机发电性能而备受关注。本文从系统构成和工质选择出发,阐述 ORC 工作原理、技术特征以及工质物化性质对性能的影响,进而梳理钢铁、化工、石化等行业已投运示范工程的系统构型、关键设备、工质方案与运行参数,并以净发电量、热效率和投资回收期为指标评价其节能环保与经济效益。分析结果表明,ORC 可依据余热规模和工质特性实现 kW 至 MW 级发电,引入回热、双工质或串级后效率可以再提升,投资回收期可控制在 2 a 以内;R245fa、R134a 等干流体为优选工质,非共沸工质需解决成分漂移问题;钢铁、化工、石化行业的低温余热发电示范项目证实 ORC 已具备规模化推广条件。通过案例剖析,为 ORC 技术在低温余热发电的规模化推广提供借鉴,并为更多工业场景的余热利用设计与应用提供参考。

关键词: 余热利用; 低温余热; 余热发电; 有机朗肯循环; 有机工质

中图分类号: TK11⁺5

文献标志码: A

文章编号: 1000-8764(2025)04-0032-08

doi: 10.13403/j.sjqt.2025.04.055

Application progress of organic Rankine cycle in low-temperature waste heat power generation

GU Zhiqing¹, SONG Haichen², YIN Jincheng³, JU Peng¹, WU Weicheng¹, ZHANG Jing³

(1. Carbon Peak and Carbon Neutralization Research Institute, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, Liaoning, China; 2. Shenyang Aluminum & Magnesium Engineering & Research Institute Co., Ltd., Shenyang 110001, Liaoning, China; 3. School of New Energy, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210000, Jiangsu, China)

Abstract: Low-temperature waste heat power generation is one of the key paths to solve the current high energy consumption and low waste heat utilization rate in our country's industrial field. The organic Rankine cycle (ORC) has attracted much attention for significantly improving expander efficiency and improving the power generation performance of steam turbines under low temperature conditions. Based on system constitution and refrigerant selection, the working principle, technical characteristics and the influence of working fluid physicochemical properties on performance are expounded, and then the system configuration, key equipment, working fluid scheme and operating parameters of the demonstration projects that have been put into operation in steel, chemical, petrochemical and other industries are sorted out, and their energy conservation, environmental protection and economic benefits are evaluated by using net power generation, thermal efficiency and payback period as indicators. The analysis results show that ORC can achieve kW to MW

收稿日期: 2024-09-28; **修回日期:** 2024-10-11

基金项目: 辽宁省科技厅应用基础研究计划资助项目(2022JH2/101300122); 辽宁省科技计划联合计划项目(2023JH2/101700251); 辽宁省“揭榜挂帅”科技计划项目(2023020439-JH1/104)

作者简介: 谷志卿(1998—),男,硕士研究生,从事余热回收利用方面的研究。

通信作者: 吴维成(1977—),男,博士,教授,从事工业领域减污降碳方面的研究。

power generation according to the scale of waste heat and working fluid characteristics, and the efficiency can be improved after the introduction of heat recovery, duplex or tandem stage, and the payback period can be controlled within 2 years. R245fa, R134a and other dry fluids are the preferred working fluids, and non-azeotropic working fluids need to solve the problem of composition drift. The low-temperature waste heat power generation demonstration project in the steel, chemical and petrochemical industries has confirmed that ORC has the conditions for large-scale promotion. Through the case analysis, it provides reference for the large-scale promotion of ORC technology in low-temperature waste heat power generation, and provides reference for the design and application of waste heat utilization in more industrial scenarios.

Key words: waste heat utilization; low-temperature waste heat; waste heat power generation; organic Rankine cycle; organic working medium

随着经济的发展,控制能源消耗和温室气体排放已成为各国关注的重点问题。2016年世界178个缔约方共同签署了《巴黎协定》,我国作为缔约方在2020年提出“碳达峰·碳中和”战略目标,并于2022年6月启动实施《减污降碳协同增效实施方案》。我国工业领域的能源消耗约占全国总能耗的70%左右^[1],而提高耗能单位能源利用效率是减少一次能源消耗的重要方式。据统计,我国约72%的一次能源在燃烧和转化过程中被浪费,其中大量热能通过各种形式的余热散发到环境中^[2]。因此,通过回收工业余热可以有效提高能源利用效率。在现有余热回收技术中,中高温余热通常采用热交换、热功转换等方式进行回收,而低温余热由于品质较低、利用难度大等缺点,仍有大部分未得到有效利用^[3]。近年来,国家持续推动电价改革,在工业用电领域不断完善阶梯电价机制,使得企业用电压力不断增大。企业持续寻求降低能源消耗、提高能源利用率的方法,而利用低温余热进行发电可以有效解决这一问题。

有机朗肯循环(organic Rankine cycle, ORC)是低温余热发电的主要研究方向。与传统朗肯循环不同的是,ORC系统采用制冷剂、碳氢化合物有机流体等低沸点有机工质^[4]。该工质在较低的热源温度下产生较高的压力,大大提高了膨胀机的运行效率,可以克服低温余热条件下传统蒸汽朗肯循环汽轮机的发电效率大幅降低的缺点,使得低温余热发电成为可能^[5]。1984年,ANGELINO等^[6]首次提出,ORC比蒸汽循环可以回收更多的能量;随后QUOILIN等^[7]指出,工作流体和膨胀机是ORC技术的两个关键方面;LIU等^[8]研究发现,相较于湿流体,干流体更适合作为ORC系统的工质;WEI等^[9]研究得出,系统效率和净功率随着

热源流量和温度的增加而升高;胡硕倬等^[10]研究得出,相较于亚临界-亚临界复叠式ORC,跨临界-亚临界复叠式ORC可有效增大系统净输出功,最大可提升23.9%,但当热源温度低于“等值热源温度”时,亚临界-亚临界复叠式ORC的净输出功反而大于跨临界-亚临界复叠式ORC。在系统优化方面,随着人工智能技术的不断发展,ORC神经网络模型广泛应用于系统分析和优化领域。平旭等^[11]提出基于肖维勒准则与主元分析的ORC神经网络建模方法;在实际应用中,TCHANCHE等^[12]调研了ORC的应用情况,得出ORC系统在生物质和二元地热的热电联产中已被成熟应用,且有机朗肯余热回收发电系统的应用增长最快,其在工业和联合循环电厂中具有巨大潜力;李骥飞等^[13]针对中低温热源驱动ORC分布式发电系统的多工况运行需求,研究了4kW级ORC试验机组在热源温度和流量变化条件下的多工况动态/稳态运行特性,得出热源温度变化对膨胀机进出口温压参数和机组输出功率的影响更显著。

随着“双碳”战略目标的深入推进和电价政策的持续收紧,低温余热的规模化和高效回收已成为我国工业领域节能降耗的刚性需求。ORC凭借工质灵活、结构紧凑、效率突出等优势,正快速走出实验室迈向工程化。现阶段关于ORC的研究多聚焦热力学优化与新型工质开发,而工厂则更关心落地实效。为此,本文从系统构成与工质选择切入,阐明ORC的工作原理、技术特征及工质物化特性对性能的影响,进一步梳理钢铁、化工、石化等行业已投运示范工程的系统构型、关键设备和运行参数,并以净发电量、热效率、投资回收期为指标评估其节能环保与经济效益。期望通

过实际案例的分析,为 ORC 在低温余热发电中的规模化应用提供借鉴,并为更多工业场景余热利用的设计与实施提供参考。

1 有机朗肯循环发电系统

1.1 系统简介

ORC 系统如图 1 所示。基本 ORC 由蒸发器、膨胀机、冷凝器和工质泵四个主要部件组成。其工作原理:从生产工序排放出的低温余热,在蒸发器内将有机工质加热成饱和蒸汽;这些高压蒸汽被送入膨胀机中驱动膨胀机做功,进而带动发电机发电;经膨胀后的乏汽进入冷凝器,外界冷却介质将其冷却至液态后送入工质泵,工质泵将液态工质加压后泵入蒸发器,以此循环。

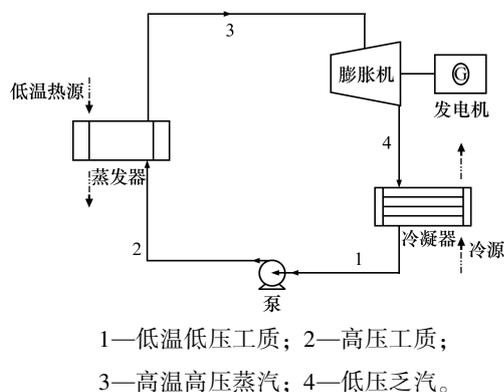


图 1 有机朗肯循环系统示意

Fig. 1 Schematic diagram of the organic Rankine cycle system

ORC 可以通过回收工业领域余热来提高能源利用效率。由于具有适应各种热源、技术成熟、系统结构简单且维护量较少等优点^[14],近年来 ORC 受到广泛关注。在发电功率方面,翟慧星等^[15]研究了装有回热循环的系统,得出热源的出口温度越高,系统蒸发的烟损越小,但当热源的出口温度较低时,采用回热流程反而会降低 ORC 系统的循环性能; TCHANKE 等^[16]研究得出,ORC 装置的输出功率取决于从热源提取的热量和有机朗肯循环的热效率,在热源温度受到限制的情况下,热效率最高的 ORC 系统将获得最高的输出功率。

1.2 有机工质的选择

工作流体的特性决定了 ORC 系统的设计和性

能^[17],因此,对工质的物理化学性质以及工质对系统性能影响的研究是建立 ORC 系统的基础。ORC 系统温熵图如图 2 所示。由图 2 可见:1~2 过程中,有机工质在工质泵内增压至蒸发压力,然后进入蒸发器中;2~3 过程中,有机工质在蒸发器中换热升温,经过蒸发—再加热至过热蒸汽状态后到达点 3;3~4 或 3~4S 的等熵膨胀过程中,过热蒸汽在膨胀机中作可逆、绝热(等熵)膨胀,推动膨胀机带动发电机发电。2~3 过程可使膨胀步骤的初始状态点 3 居于更高的温度,所以垂直线段可以向图 2 右方移动,使膨胀后的湿度不会太高。4~1 过程中,做功后的有机蒸汽在冷凝器中冷凝形成饱和液体后回流至工质泵。有机工质的蒸发温度较低,更易形成高压蒸汽^[18],在利用低温热源时的热回收效率也较高;此外,在系统运行效率、稳定性和经济性方面,ORC 系统比传统的蒸汽朗肯循环系统具有更多的优势。

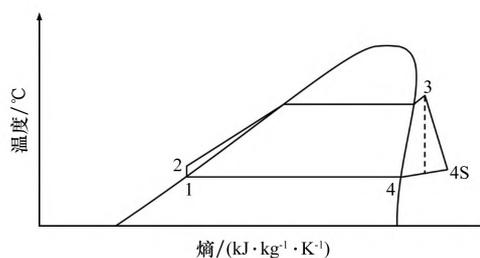


图 2 ORC 系统 T-S 关系

Fig. 2 The T-S relationship of ORC system

在给定 ORC 应用场景工作流体的选择过程中,一般考虑工作流体的热物理性质(压力、温度、比热容、潜热、闪点、热导率等)、安全性、成本、可用性、毒性、高温下的化学稳定性和环保问题等^[19]。含氯流体会消耗臭氧层物质已被《蒙特利尔议定书》禁止,因此,工质应在环保型 HFC(含碳、氟、氢的不完全卤代烃)、HCS(碳氢化合物)和新型工作液中选择^[20],且采用低臭氧消耗潜势(ozone depletion potential, ODP)和低全球增温潜势(global warming potential, GWP)特性的工作流体;工作流体可分为等熵流体、干流体和湿流体,蒸发器出口处的温度一般不超过工作流体的临界温度,以防止其分解和变质。根据上述筛选原则,WANG 等^[21]选择出 6 种工作流体:异丁烯、丁烷、R245fa(1,1,1,3,3-五氟丙烷)、

R245ca(1,1,2,2,3-五氟丙烷)、戊烷、己烷;通过试验得出6种工作流体的最大性能系数排序(按升序):异丁烯、丁烷、R245fa、R245ca、戊烷、己烷;容积膨胀比排序(按升序):异丁烯、丁烷、戊烷、R245fa、R245ca、己烷;净输出功率排序(按升序):R245fa、R245ca、异丁烯、丁烷、戊烷、己烷。解志勇等^[22]通过对比复叠式非共沸工质 ORC 系统和复叠式纯工质系统,得出前者的净输出功率比后者多 3.83%;RAYEGAN 等^[23]研究得出,过热 ORC 的能效比略高于饱和循环的能效比,而过热会降低 ORC 的烟效率,所以一般不选择饱和 ORC,除非以降低效率为代价获得更多的输出功率。

2 有机朗肯循环应用

19 世纪 80 年代人们已开展对 ORC 技术的研究,但关于 ORC 的早期应用较少。近年来,由于对化石燃料未来耗尽和全球环境破坏的担忧增多,且基于 ORC 余热利用的温度较低和可从各种热源来回收热量的特点,世界各地陆续安装了许多 ORC 装置用于低温热源发电。

2.1 锅炉烟气余热发电

工业生产中化石燃料的能量转换过程:锅炉内燃料燃烧产生大量烟气,烟气与炉内相应换热器换热进行能量转换,温度降低后的烟气经除尘器等设备后排入大气。这些低温烟气同样存在大量未被利用的热能,如果利用 ORC 系统将此部分烟气的热能发电后再排放,可一定程度提高能源利用效率,达到节能增效的目的。

钢铁行业能源消耗量约占全国工业总能耗的 15%,余热回收率仅为 20%~45%,其中中低温余热利用率更不足 5%^[24]。为此,邵颖聪等^[25]研究了某钢铁厂烧结系统环冷机第四段冷却废气 ORC 系统发电的可行性,得出项目投资回收期约为 4 a,存在较好的节能效益;冯军胜等^[26]对该烧结冷却烟气进行 ORC 余热发电系统建模,得出适宜的热源进口温度和系统热力参数下,ORC 发电系统可获得较大的净输出功和较小的单位温度传热量。曹春华等^[27]开发出钢铁行业加热炉低品位废烟气双工质 ORC 余热发电系统,此系统采用

双工质作为循环工质,具有循环效率高、适应工况变化能力强的优势,适用于钢厂加热炉废热的回收利用。该系统循环示意如图 3 所示。该系统的主要设备置于烟道内,利用双工质循环以提高发电效率。系统利用余热锅炉将蒸汽加热为饱和蒸汽,使饱和蒸汽在汽轮机中做功;此外,利用汽轮机排汽和一部分热水箱抽水在工质蒸发器内加热有机工质,使有机工质在 ORC 系统中循环做功。

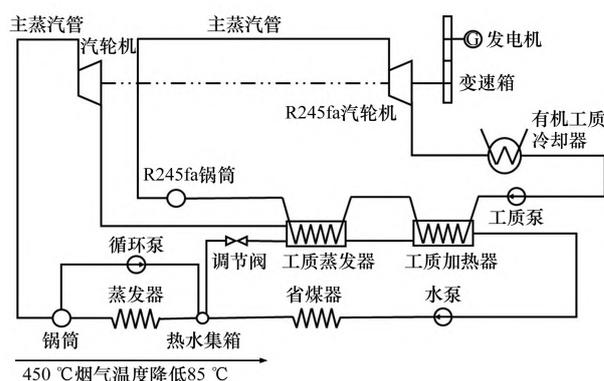


图3 双工质循环示意

Fig. 3 Schematic diagram of dual fluid cycle

以 2010 年广西某铝业公司加热炉余热发电项目为例,430~480℃进口烟气被空气预热器引出后,经过蒸发器、省煤器温度降低至 83~86℃后被排出。在蒸汽循环中,水工质由给水泵泵送,依次经过省煤器、热水集箱、水蒸发器、锅筒后进入汽轮机做功;汽轮机排出的 135~138℃蒸汽和热水集箱排出的 180℃热水进入工质蒸发器内与有机工质进行换热;有机工质在 R245fa 汽轮机中膨胀做功带动发电机发电,之后在有机工质冷却器中放热冷凝,经加压泵加压后继续循环。该项目烟气量为 4.1 万 m³/h,系统每小时发电量为 1 000 kW·h,年发电量可达 8×10⁶ kW·h,年发电收益约为 480 万元(人民币)。按工程建设费约 1 200 万元计算,投资回收期约为 2.5 a。

某石灰石矿回转窑^[28]现有烟气排放量约为 20 万 m³/h、温度约为 200℃,因用户供热需求量较小,选择通过建设 ORC 发电系统将此部分烟气余热回收利用。该“双工质双循环”回转窑低温余热利用工艺流程如图 4 所示。使用导流管道将烟气引出与烟气集热器相连,将集热器出口接入原

废气处理系统,使烟气集热器中生成的 140 ℃ 热水在蒸发器内与有机工质换热、有机工质在 ORC 系统中循环发电。在冬季采暖期,将部分热水抽出供热使用,在发电的同时还可实现供热。该余热发电系统设计中,集热器烟气参数:温度为 180 ℃/100 ℃,热水参数:流量为 40 t/h、温度为 140 ℃/70 ℃;板式换热器热水参数:流量为 15.5 t/h、温度为 140 ℃/71.5 ℃;供热水参数:流量为 70.8 t/h、温度为 75 ℃/60 ℃,可实现供热负荷 1.17 MW。2015 年运转后,该系统全年发电量达 1.5255×10^6 kW·h,且可供热 2.054×10^5 GJ,年节约标准煤约 1 200 t。

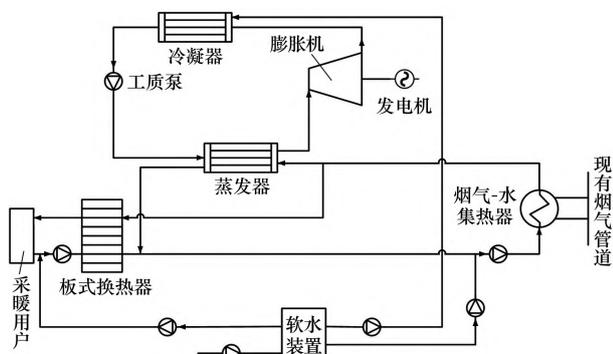


图 4 回转窑低温烟气余热回收工艺流程

Fig. 4 Flow chart of low temperature flue gas waste heat recovery process in rotary kiln

2.2 化工生产余热发电

化工作为国家重要的经济发展行业,随着我国工业部门的完善逐渐形成了较为完整的生产系统,但其生产过程中还存在许多低温余热未被有效利用。如企业生产过程中通常使用冷却水将放热化学反应产生的热量带走。这些热源由于温度及压力较低,不适用换热器制热等余热回收技术,但可采用 ORC 系统发电来回收。

河南某化肥厂合成氨/尿素生产系统的尿素调温水流量为 300 m³/h、上水温度为 120 ℃、回水温度为 145 ℃,龚普勤等^[29]采用 ORC 系统发电对其低温余热进行回收。工艺流程:尿素调温水进入 ORC 发电装置中的蒸发器后,其热量被有机工质(R245fa)吸收,驱动膨胀机带动发电机发电;做功后的低压蒸汽进入冷凝器,被循环水换热冷凝成低温工质并进入储液罐,之后通过工质泵循环加压重新回到蒸发器,如此循环。2017 年运行

数据显示,蒸发器调温水进口温度为 146.7 ℃,出口温度为 109.3 ℃,蒸发器有机工质进口温度为 35.40 ℃,出口温度为 128.11 ℃,发电机年净发电量约为 6.66×10^6 kW·h;通过经济性分析,ORC 系统每小时还能节约冷却塔以及循环水泵的电能消耗约 95 kW·h。以 ORC 余热发电机组年运行 8 000 h,按电价为 0.62 元/(kW·h)计算,年增效益可达约 460 万元,发电机组总投资为 800 万元,投资回收期约为 1.74 a。

孙雪强^[30]在安徽某 30 万 t/a 煤制二醇项目中,提出通过装备 ORC 系统来回收蒸汽余热。该项目在合成气制草酸乙二酯、草酸乙二酯加氢、产品精馏中都会产生大量低压蒸汽,可利用此蒸汽进行余热发电。其余热发电流程如图 5 所示。将闪蒸后的 ≥ 1.0 MPa 蒸汽冷凝水和 0.5 MPa 蒸汽冷凝水以及 ORC 系统中的回流冷液混合,形成流量为 436 t/h、温度为 132 ℃的低温热源。其中,将 87.2 t/h 的余热直接送入发电系统,将另一路 348.8 t/h 的余热送到余热制冷装置中用来制备约 -20 ℃的冷冻液。制备完成后,将温度约为 110 ℃的余热介质先送至发电装置进行发电,后送至空冷器冷却降温,将其除盐处理后返回工艺流程补水,以此循环。该系统发电端配备 3 台并列功率为 560 kW 的发电机组,发电机的净功率为 1 206 kW,年净发电量可达 9.648×10^6 kW·h。

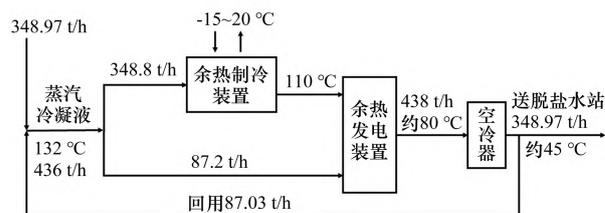


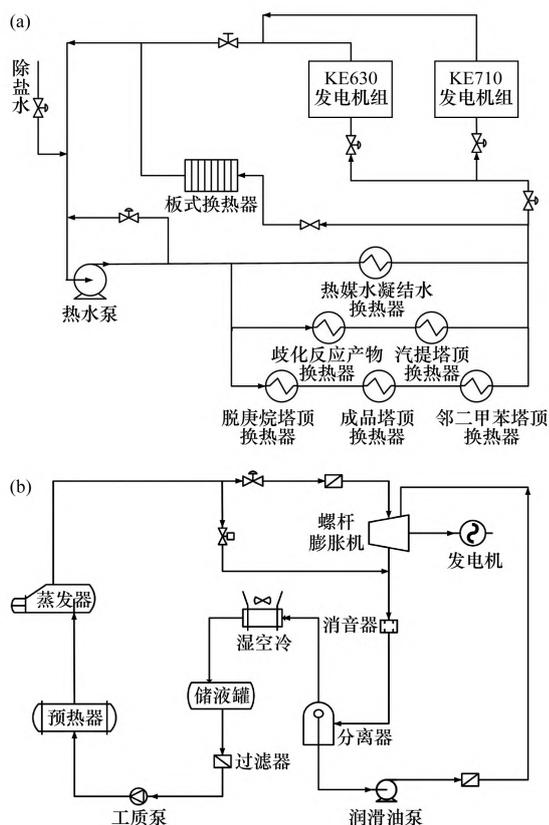
图 5 安徽某 30 万 t/a 煤制二醇项目余热发电流程
Fig. 5 The waste heat power generation process of a 300 000 tons/year coal-to-diol project in Anhui province

2.3 石化生产余热发电

石化工业也是我国能源资源消耗的主要行业,按照国家节能减排总体要求,亟需应用更环保的新技术,降低单位产品能耗。石油化工厂在催化重整、精馏单元等一系列反应、分离操作中,存在大量低品位热源,该热源在经过换热器后可以

被再次利用。如通过换热器与 ORC 系统的结合,可以有效提高炼化企业经济效益,实现工厂节能减排的目标。

某炼化企业芳烃联合装置^[31]利用 ORC 发电的方式回收低温余热,针对脱庚烷塔顶、成品塔顶、歧化汽提塔顶和歧化反应产物及凝结水余热等热源,在工艺管线相关位点设置热水换热器,可使除盐水升温至 90 ~ 120 °C。除盐热媒水在 ORC 蒸发器与 R245fa 换热,使 R245fa 蒸汽推动膨胀机从而带动发电机发电。热媒水循环工艺流程如图 6 (a)所示。该 ORC 发电系统由 KE710 发电机组和 KE630 发电机组组成,其工质单独密闭循环,热水串联利用。发电系统如图 6 (b)所示,由蒸发器、双螺杆膨胀机、异步发电机、冷凝器、工质泵等设备组成,通过工质 R245fa 在系统内循环推动膨胀机做功发电。2014 年 5 月 ORC 发电机组并入电网通电,ORC 系统校准后数据:系统收集热水



(a) 低温热媒水循环; (b) ORC 工质循环

图 6 低温热媒水和 ORC 工质循环工艺流程

Fig. 6 Circulation process flow of low-temperature heat transfer medium water and ORC working fluid

流量为 204 t/h, KE710 净发电功率为 426 kW, KE630 净发电功率为 326 kW, 总净发电功率为 752 kW, 净热效率为 7.2%, 每小时吨水净发电功率为 3.67 kW。

台湾某化工公司^[32]对苯乙烯生产工艺后端冷却塔的热源进行热能回收,以减少冷却塔负荷及热能损失。该公司设计、开发并安装了一套以化工厂废热水为热源条件的带螺杆膨胀机 200 kW ORC 发电机系统,作为化工工艺的余热回收发电平台。该系统工艺流程如图 7 所示,以蒸汽凝结水作为热源,选择 R134a(1,1,1,2-四氟乙烷)作为有机工质。ORC 发电机系统的蒸发器和过热器从 82 °C 废冷凝水中提取热能,蒸发和汽化 R134a 工质,通过冷却塔连接冷凝器向 ORC 发电机系统供应冷却水。冷却水入口温度范围设定为 25 ~ 35 °C。

该系统热力性能结果显示,冷凝汽提塔生成热源水的流速为 189 t/h。ORC 发电机系统现场 72 h 以上运行数据显示,冷凝水温度从 81.53 °C 降低到 62.77 °C,平均净发电量超过 193.75 kW·h,热效率为 4.7%,冷却塔的负荷较大减轻。项目按两年(2015、2016 年)运行时间计算,每年净发电量约为 1.65×10^6 kW·h。

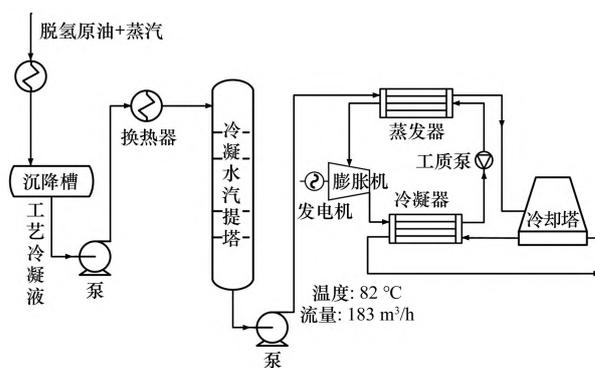


图 7 苯乙烯车间冷却塔余热回收发电系统流程

Fig. 7 Flow chart of waste heat recovery power generation system for cooling tower in styrene workshop

3 结论

目前,有机朗肯循环(ORC)已在低温余热发电领域实现工程化应用,但面向多场景以及大规模推广仍有待突破。本文通过对 ORC 的系统构

型、工质筛选及其在钢铁、化工、石化领域示范案例的梳理与比较,得出以下结论:①根据余热规模与工质特性,ORC 可实现 kW 至 MW 级净发电。引入回热、双工质或热水串级后,ORC 的净热电效率进一步提升,项目投资回收期显著缩短。维持换热端的合理温差是确保换热器高效运行和稳定输出的关键。② R245fa、R134a、戊烷等干流体因高安全性和经济性以及低 GWP,已成为工程应用的优选工质。非共沸混合工质可小幅提高净功率,但须克服成分漂移的问题。工质临界温度应高于蒸发器出口的温度,以防工质在蒸发器出口发生分解或处于高压状态。③ 钢铁行业的烧结环冷机和回转窑烟气、化肥厂合成氨/尿素生产系统以及煤制二醇项目的低压蒸汽、石化行业芳烃联合装置与苯乙烯生产工艺冷却塔的热水等低温余热回收项目应用表明,ORC 系统具备规模化推广条件,且投资回收期在 2 a 以内。

参考文献:

- [1] 何雅玲. 工业余热高效综合利用的重大共性基础问题研究[J]. 科学通报,2016,61(17):1856-1857.
HE Yaling. Research on important common basic problems of efficient and comprehensive utilization of industrial waste heat[J]. Chinese Science Bulletin, 2016,61(17):1856-1857.
- [2] 张进华,秦强,赵香龙,等. 低品位工业余热利用技术及研究进展[J]. 能源科技,2022,20(4):86-92.
ZHANG Jinhua, QIN Qiang, ZHAO Xianglong, et al. Technologies for low-grade industrial waste heat utilization and research progress[J]. Energy Science and Technology, 2022,20(4):86-92.
- [3] 郭少欣,张杰,罗昊敏. 低品位工业余热采集方法优化研究[J]. 节能,2020,39(3):95-99.
GUO Shaoxin, ZHANG Jie, LUO Haomin. Study on optimization of low-grade industrial waste heat collection methods[J]. Energy Conservation, 2020,39(3):95-99.
- [4] VÉLEZ F, SEGOVIA J J, MARTÍN 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 and Sustainable Energy Reviews, 2012,16(6):4175-4189.
- [5] PAPAPOPOULOS A I, STIJEPOVIC M, LINKE P. On the systematic design and selection of optimal working fluids for organic Rankine cycles[J]. Applied Thermal Engineering, 2010,30(6/7):760-769.
- [6] ANGELINO G, GAIA M, MACCHI E. A review of Italian activity in the field of organic Rankine cycles[J]. VDI-Berichte, 1984(539):465-482.
- [7] QUOILIN S, VAN DEN BROEK M, DECLAYE S, et al. Techno-economic survey of organic Rankine cycle(ORC) systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013,22:168-186.
- [8] LIU B T, CHIEN K H, WANG C C. Effect of working fluids on organic Rankine cycle for waste heat recovery[J]. Energy, 2004,29(8):1207-1217.
- [9] WEI D H, LU X S, LU Z, et al. Performance analysis and optimization of organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery[J]. Energy Conversion and Management, 2007,48(4):1113-1119.
- [10] 胡硕倬,李健,葛众,等. 跨临界-亚临界复叠式有机朗肯循环性能分析[J]. 热科学与技术,2021,20(1):65-71.
HU Shuoze, LI Jian, GE Zhong, et al. Performance analysis on the transcritical-subcritical cascade organic Rankine cycle system[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2021,20(1):65-71.
- [11] 平旭,杨富斌,张红光,等. 基于肖维勒准则与主元分析的有机朗肯循环神经网络建模方法[J]. 大电机技术,2023(6):70-76.
PING Xu, YANG Fubin, ZHANG Hongguang, et al. Modeling method of organic Rankine cycle neural network based on chauvenet criterion and principal components analysis[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2023(6):70-76.
- [12] TCHANKE B F, LAMBRINOS G, FRANGOUKAKIS A, et al. Low-grade heat conversion into power using organic Rankine cycles; A review of various applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2011,15(8):3963-3979.
- [13] 李骥飞,李瑞霞,苗政,等. 热源温度和流量对有机朗肯循环系统运行特性影响的实验研究[J]. 热力发电,2022,51(5):106-112.
LI Jifei, LI Ruixia, MIAO Zheng, et al. Experimental investigation on a 4 kW organic Rankine cycle system subjected to different heat source flow rates and

- temperatures[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(5):106-112.
- [14] NEMATOLLAHI O, KIM K C. Real-gas effects: The state of the art of organic Rankine cycles[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 277:124102.
- [15] 翟慧星,王随林,安青松,等. 有出口温度限制的热源亚临界有机朗肯循环最佳回热度定量准则的研究[J]. *可再生能源*, 2021, 39(4):472-480.
ZHAI Huixing, WANG Suilin, AN Qingsong, et al. Quantitative criterion of optimal regenerate efficiency for organic Rankine cycle with limited outlet temperature heat sources[J]. *Renewable Energy Resources*, 2021, 39(4):472-480.
- [16] TCHANCHE B F, PAPADAKIS G, LAMBRINOS G, et al. Fluid selection for a low-temperature solar organic Rankine cycle[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29(11/12):2468-2476.
- [17] BORSUKIEWICZ-GOZDUR A, NOWAK W. Comparative analysis of natural and synthetic refrigerants in application to low temperature Clausius-Rankine cycle[J]. *Energy*, 2007, 32(4):344-352.
- [18] GRZEBIELEC A. Termodynamiczne podstawy przenoszenia ciepła w termoakustycznych urządzeniach chłodniczych[J]. *Chłodnictwo: Organ Naczelnej Organizacji Technicznej*, 2009, 44(7):12-16.
- [19] MONDEJAR M E, ANDREASEN J G, PIEROBON L, et al. A review of the use of organic Rankine cycle power systems for maritime applications[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 91:126-151.
- [20] LI D X, ZHANG S S, WANG G H. Selection of organic Rankine cycle working fluids in the low-temperature waste heat utilization[J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser B*, 2015, 27(3):458-464.
- [21] WANG L B, BU X B, LI H S, et al. Working fluids selection for flashing organic Rankine regeneration cycle driven by low-medium heat source[J]. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2018, 37(3):1201-1209.
- [22] 解志勇,段远源,葛众,等. 烟气余热驱动复叠式非共沸工质有机朗肯循环系统热力学分析[J]. *可再生能源*, 2019, 37(5):776-783.
XIE Zhiyong, DUAN Yuanyuan, GE Zhong, et al. Thermodynamic analysis of cascade zeotropic working fluid organic Rankine cycle system driven by flue gas waste heat[J]. *Renewable Energy Resources*, 2019, 37(5):776-783.
- [23] RAYEGAN R, TAO Y X. A critical review on single component working fluids for organic Rankine cycles (ORCs)[J]. *ASME Early Career Technical Journal*, 2009, 8(1):1-8.
- [24] 王亚飞. 中国钢铁工业碳减排面临的问题、原因及对策:基于与国际先进钢铁企业的比较视角[J]. *对外经贸实务*, 2017(9):24-27.
WANG Yafei. Problems, causes and countermeasures of carbon emission reduction in China's iron and steel industry: Based on a comparative perspective with international advanced steel enterprises[J]. *Practice in Foreign Economic Relations and Trade*, 2017(9):24-27.
- [25] 邵颖聪,董辉,孙用军,等. 有机朗肯循环回收低温烧结余热发电的可行性分析[J]. *烧结球团*, 2014, 39(4):50-54.
SHAO Yingcong, DONG Hui, SUN Yongjun, et al. Feasibility analysis on recovering low temperature sintering waste heat for power generation by using organic Rankine cycle[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2014, 39(4):50-54.
- [26] 冯军胜,程新妮,王欢欢,等. 烧结冷却烟气低温余热 ORC 系统建模与热经济性能[J]. *烧结球团*, 2024, 49(1):93-98;105.
FENG Junsheng, CHENG Xinni, WANG Huanhuan, et al. Modeling and thermal economic performance of low-temperature waste heat ORC system for sintering cooling fume[J]. *Sintering and Pelletizing*, 2024, 49(1):93-98;105.
- [27] 曹春华,张卫东,陆俊杰,等. 有机工质朗肯循环发电技术在钢铁行业中的应用[J]. *节能*, 2012, 31(6):35-38;2.
CAO Chunhua, ZHANG Weidong, LU Junjie, et al. The development of organic Rankine cycle excess heat power generation in steel industry[J]. *Energy Conservation*, 2012, 31(6):35-38;2.
- [28] 武智永. 回转窑低温烟气余热回收工艺开发与应用[J]. *山西科技*, 2017, 32(3):137-138;152.
WU Zhiyong. Development and application of waste heat recovery of rotary kiln flue gas at low temperature rotary kiln process[J]. *Shanxi Science and Technology*, 2017, 32(3):137-138;152.

(下转第72页)

- LIANG Lianke. Metallurgical Thermodynamics and kinetics[M]. Shenyang:Northeast Institute of Technology Press,1990.
- [20] 孟黎明,赵庆杰. 铁矿石含碳球团中碳的气化反应速度对球团熔融的影响[J]. 钢铁研究学报,2007,19(12):5-9.
- MENG Fanming, ZHAO Qingjie. Effect of carbon gasification rate on melting behavior of iron ore/carbon composite pellet[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2007,19(12):5-9.
- [21] 储满生,王兆才,柳政根,等. 热压含碳球团自还原过程限制性环节的实验研究[J]. 过程工程学报,2010,10(1):121-126.
- CHU Mansheng, WANG Zhaocai, LIU Zhenggen, et al. Experimental study on controlling step of self reduction process of carbon composite iron ore hot briquette[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2010, 10(1):121-126.
- [22] 潘建,段真,朱德庆,等. 不锈钢尘泥球团煤基直接还原动力学[J]. 钢铁研究学报,2022,34(10):1067-1077.
- PAN Jian, DUAN Zhen, ZHU Deqing, et al. Kinetics of coal-based direct reduction of stainless steel dust pellets [J]. Journal of Iron and Steel Research,2022,34(10):1067-1077.
- [23] 田彦文,翟秀静,刘奎仁. 冶金物理化学简明教程[M]. 2版. 北京:化学工业出版社,2011.
- TIAN Yanwen, ZHAI Xiujing, LIU Kuiren. Physical Chemistry of Metallurgy[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press,2011.

(上接第 39 页)

- [29] 龚普勤,张文千,张宝珠等. 有机朗肯循环(ORC)发电在氮肥行业中的应用[J]. 中氮肥,2019(2):30-31.
- GONG Pule, ZHANG Wenqian, ZHANG Baozhu, et al. Application of organic Rankine cycle (ORC) power generation in nitrogen fertilizer industry[J]. M-Sized Nitrogenous Fertilizer Progress,2019(2):30-31.
- [30] 孙雪强. 有机朗肯循环在化工余热利用中的探讨[J]. 化工装备技术,2023,44(3):21-24.
- SUN Xueqiang. Exploration of organic Rankine cycle in the utilization of chemical waste heat[J]. Chemical Equipment Technology,2023,44(3):21-24.
- [31] 池胜刚. 石化行业首套 ORC 发电机组工业运行评价[J]. 炼油技术与工程,2017,47(2):60-64.
- CHI Shenggang. Assessment of commercial operation of first ORC power generation train in petrochemical industry [J]. Petroleum Refinery Engineering, 2017, 47(2):60-64.
- [32] LEE Y R, LIU L W, CHANG Y Y, et al. Development and application of a 200 kW ORC generator system for energy recovery in chemical processes[J]. Energy Procedia,2017,129:519-526.

(上接第 47 页)

- [21] SPREITZER D, SCHENK J. Reduction of iron oxides with hydrogen: A review [J]. Steel Research International, 2019,90(10):1900108.
- [22] WANG Z C, LIU Z G, TANG J, et al. Analysis of gas thermodynamic utilization and reaction kinetic mechanism in shaft furnace[J]. Journal of Iron and Steel Research (International),2014,21(1):16-23.
- [23] KOVTUN O, LEVCHENKO M, ILATOVSKAIA M O, et al. Results of hydrogen reduction of iron ore pellets at different temperatures[J]. Steel Research International, 2025,96(5):2300707.
- [24] 杨佳龙,胡正洪,李家新,等. 球团矿氨还原特性[J]. 钢铁,2025,60(1):29-39.
- YANG Jialong, HU Zhenghong, LI Jiixin, et al. Characteristics of ammonia reducing pellets[J]. Iron and Steel,2025,60(1):29-39.