

由河南省科技著作出版专项资金资助出版

有机朗肯循环 低温发电技术

YOUJI LANGKEN XUNHUAN
DIPINWEI RENENG FADIAN JISHU

孟祥睿 马新灵 编著

中原出版传媒集团
大地传媒

 河南科学技术出版社

有机朗肯循环 低品位热能发电技术

孟祥睿 马新灵 编著

河南科学技术出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书在全面介绍有机朗肯循环低品位热能发电技术的原理、应用范围的基础上,对其性能分析、系统的关键问题、模拟优化等问题做了研究和介绍,着重讲述了有机工质的选择和应用情况,有机朗肯循环系统中核心设备膨胀机、蒸发器的分类和选型,以及有机朗肯循环系统低品位热能发电系统的模拟、优化与改进等。

本书可作为高等院校能源动力类专业学生的选修课教材,也可作为能源部门有关技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

有机朗肯循环低品位热能发电技术/孟祥睿,马新灵编著. —郑州:
河南科学技术出版社, 2015. 1
ISBN 978 - 7 - 5349 - 7368 - 0

I. ①有… II. ①孟… ②马… III. ①热力发电 IV. ①TM611

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 237675 号

出版发行: 河南科学技术出版社

地址: 郑州市经五路 66 号 邮编: 450002

电话: (0371) 65737028

策划编辑: 李肖胜

责任编辑: 姚翔宇

责任校对: 马晓灿

封面设计: 张 伟

版式设计: 栾亚平

责任印制: 张艳芳

印 刷: 河南新华印刷集团有限公司

经 销: 全国新华书店

幅面尺寸: 170 mm × 240 mm 印张: 8.75 字数: 154 千字

版 次: 2015 年 1 月第 1 版 2015 年 1 月第 1 次印刷

定 价: 19.50 元

如发现印、装质量问题,影响阅读,请与出版社联系并调换。

前 言

中国特色的新型能源发展道路的主要含义是“坚持节约高效、多元发展、清洁环保、科技先行、国际合作，努力建设一个利用效率高、技术水平先进、污染排放低、生态环境影响小、供给稳定安全的能源生产流通消费体系”。在我国能源对外依存度逐年提高的情况下，提高能源利用率、加大对可再生能源的开发利用力度对保证我国能源安全具有重要意义。

国务院制定的《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》将“工业节能”作为优先主题，然而目前我国的能源利用率并不高，工业节能做得并不理想。统计指出，我国能源的实际利用率仅为 33% 左右。我国工业余热资源丰富，广泛存在于各工业生产过程中，数量惊人的工业余热主要包括电厂烟气余热，化工、钢铁行业锅炉、废水余热，工业炉窑余热，有色金属冶炼行业余热，采油厂、炼油厂余热等，但可回收利用率仅 60%。因而国家发展与改革委员会发布的《节能中长期专项规划》将“余热利用工程”作为节能的重点工程。

工业余热中的低品位热能（200℃ 以下的热能），尤其是 100℃ 以下的热能，由于其温度低，可用程度更低，过去大都被弃用。然而，将低品位热能所具有的热能转换成电能正成为一种有效提高能源利用效率的途径。低品位热能发电技术和途径很多，国外研究对比了有机朗肯循环（organic rankine cycle, oRC）、斯特林发动机和逆布雷顿循环三种技术，结果表明有机朗肯循环是利用低品位热能的有效途径。有机朗肯循环具有操作温度低、机动性好、安全性高、维修保养简单等特点，被认为是一种切实可行的热电转换技术。随着研究的扩展，有机朗肯循环可以回收各种类型的低品位热能并将其转换为电能。除工业余热之外，太阳热能、地热能、生物质能、内燃机废气、海洋温差能等包含的低品位热能也都可以通过有机朗肯循环转换为电能。利用有机朗肯循环，将低品位热能转换为高品位的电能，既有助于解决能源紧缺问题，提高了能源的综合利用率，同时又能减少常规能源利用过程中二氧化碳、氮氧化合物、二氧化硫、粉尘等污染物的排放。

本书在全面介绍有机朗肯循环低品位热能发电技术的原理、应用范围的基础上,对其性能分析、系统的关键问题、模拟优化等问题做了一些研究和介绍,着重讲述了有机工质的选择和应用情况,有机朗肯循环系统中核心设备膨胀机、蒸发器的分类和选型,以及有机朗肯循环低品位热能发电系统的模拟、优化与改进等。本书可作为高等院校能源动力类专业学生的选修课教材,也可作为能源部门有关技术人员的参考书。

本书编写和出版得到了河南省科技厅的河南省科技著作出版专项资金的支持。与本书相关的研究课题有河南省科技厅重点攻关项目“有机朗肯循环低温余热发电关键技术研究(122102210041)”“基于向心透平的 ORC 低温余热发电系统性能研究(142102210072)”“新型高效太阳能空气集热器研究(132102210052)”,以及河南省教育厅科学技术重点研究项目“用于低温余热发电系统的向心透平研究(13A480722)”“基于向心透平的 ORC 低温余热发电系统研究(14A480009)”。编写过程还得到了郑州大学河南省高校工业节能技术与装备工程技术研究中心全体同仁的支持,在此一并向他们表示感谢。

本书在河南省高校工业节能技术与装备工程技术研究中心魏新利教授的指导下,全文由孟祥睿和马新灵共同策划和编写。此外,河南省高校工业节能技术与装备工程技术研究中心的王慧、李伟杰、李文龙、姚志敏、赵俊霞等同学在编写过程中也帮助搜集、绘制、提供了一些素材、插图,在此向他们表示由衷的感谢。

本书编写内容涉及面广,加上作者水平有限,可能存在不当之处,敬请广大读者批评指正。

编 者

2014 年 6 月于郑州

目 录

1 绪论	(1)
1.1 低品位热能及其利用	(1)
1.1.1 低品位热能的种类	(1)
1.1.2 低品位热能利用技术	(4)
1.1.3 有机朗肯循环低品位热能发电技术的意义	(6)
1.2 有机朗肯循环低品位热能发电技术的研究现状	(7)
1.2.1 有机朗肯循环发电技术现状	(7)
1.2.2 有机朗肯循环系统的性能研究	(9)
1.2.3 有机工质的研究情况	(11)
2 有机朗肯循环低品位热能发电技术的应用范围	(15)
2.1 太阳能有机朗肯循环发电技术	(15)
2.1.1 太阳能有机朗肯循环发电技术概述	(15)
2.1.2 太阳能有机朗肯循环发电系统组成	(18)
2.1.3 太阳能集热系统	(19)
2.1.4 储热系统	(23)
2.1.5 应用前景	(24)
2.2 工业余热有机朗肯循环发电技术	(25)
2.2.1 烟气余热有机朗肯循环发电技术	(27)
2.2.2 电厂排汽有机朗肯循环发电	(31)
2.2.3 液体中的余热有机朗肯循环发电	(32)
2.2.4 LNG 冷能与工业余热有机朗肯循环发电	(33)
2.3 地热能有机朗肯循环发电技术	(34)
2.3.1 地热能有机朗肯循环发电系统应用举例	(35)
2.3.2 地热能有机朗肯循环发电系统的亚临界与超临界 循环系统	(37)
2.4 海洋温差能有机朗肯循环发电技术	(38)

2.4.1	开式循环发电系统	(38)
2.4.2	闭式循环发电系统	(39)
2.4.3	混合式循环发电系统	(40)
2.5	生物质能有机朗肯循环发电	(40)
2.5.1	生物质直燃有机朗肯循环发电系统	(41)
2.5.2	生物质有机朗肯循环发电的国内外发展现状	(43)
2.6	内燃机废气有机朗肯循环发电	(43)
2.6.1	内燃机废气能量回收利用的空间	(44)
2.6.2	有机朗肯循环发动机废气发电技术	(44)
2.7	展望	(47)
3	有机朗肯循环系统的原理和可行性分析	(52)
3.1	有机朗肯循环系统的原理及组成	(52)
3.2	有机朗肯循环的热力过程及能量分析	(53)
3.3	有机朗肯循环系统的焓分析	(54)
3.4	有机朗肯循环系统的经济可行性分析	(56)
3.4.1	我国电站锅炉烟气余热量的计算	(56)
3.4.2	余热机组发电容量、成本投资的确定	(57)
3.4.3	用 RETScreen 软件进行经济可行性分析	(58)
4	有机朗肯循环系统的关键技术问题	(62)
4.1	有机工质的选择	(62)
4.1.1	有机朗肯循环对工质性能的要求	(62)
4.1.2	有机工质性能综合对比	(65)
4.2	膨胀机的类型及选择	(73)
4.2.1	膨胀机的类型及研究现状	(73)
4.2.2	涡旋膨胀机	(74)
4.2.3	螺杆膨胀机	(76)
4.2.4	轴流式膨胀透平	(77)
4.2.5	向心透平	(80)
4.2.6	不同类型膨胀机的对比	(84)
4.3	蒸发器的类型及选择	(85)
4.3.1	蒸发器的主要影响参数	(86)
4.3.2	蒸发器的种类	(88)
4.3.3	蒸发器的选择	(96)
5	有机朗肯循环系统的模拟、优化与改进	(101)

5.1	有机朗肯循环系统的性能模拟	(101)
5.1.1	冷凝温度和蒸发温度的确定	(101)
5.1.2	用 Aspen Plus 软件对系统建模	(102)
5.1.3	模拟结果	(103)
5.2	基本有机朗肯循环系统的性能优化	(103)
5.2.1	蒸发器出口过热度对系统性能的影响	(103)
5.2.2	冷凝器出口过冷度对系统性能的影响	(104)
5.2.3	环境温度对系统性能的影响	(105)
5.3	有机朗肯循环系统的结构优化改进	(106)
5.3.1	乏气回热有机朗肯循环性能分析	(106)
5.3.2	抽气回热有机朗肯循环性能分析	(110)
5.3.3	再热有机朗肯循环系统性能分析	(113)
6	有机朗肯循环的应用案例	(118)
6.1	西藏那曲双循环地热电厂	(118)
6.2	德国 Lengfurt 水泥厂的有机朗肯循环纯低温余热发电站	(122)
6.3	美国莫来斯顿联合化学公司利用硫酸厂余热的有机朗肯循环系统	(123)
6.4	日本的低沸点工质透平发电实例	(125)
6.4.1	住友金属公司利用转炉排气冷却水余热的氟利昂汽轮机发电系统	(125)
6.4.2	利用柴油机排气余热的氟利昂汽轮机装置	(126)
6.4.3	以 F85 为工质的利用烟气余热的有机朗肯循环系统	(127)
6.5	广西北海某镍业有限公司 1 [#] 加热炉余热发电项目	(128)

1 绪 论

1.1 低品位热能及其利用

为人类的生产和生活提供各种能力和动力的物质资源称为能源，简单地说，能源就是提供能量的资源，它是人类赖以生存和发展的重要物质基础。随着煤、石油、天然气等不可再生能源的枯竭及环境问题的日益严峻，世界各国都非常重视能源的有效利用。一些发达国家的能源利用率在 50% 以上，而我国只有 30% 左右^[1]。大量的工业耗能以余热的形式被直接排放到大气中，尤其是 100℃ 左右的低温余热，基本不被回收利用，不仅浪费了能量，还使得热污染成为严重的环境问题。我国虽然是能源大国，但人均能源拥有量却很低，节能减排是我国重要的基本国策，低品位热能回收、利用技术已经成为节能研究领域的重要课题之一。

1.1.1 低品位热能的种类

能源按其利用时的品质分为低品位能源和高品位能源。热力学中，将理论上可以完全转换为功的能量称为高级能量，如电能、机械能、风能等；将理论上不能完全转换为功的能量称为低级能量，如内能、焓、热能等。热力学中常用熵来度量能量的可用程度，在环境条件下，能量中理论上能够转变为有用功的最高份额，称为该能量的熵^[2]。世界上经由热能这个环节被利用的能量占总能量的 85% 以上，同样是热能，温度不同，转换为功的程度也是不一样的。本书论述的低品位热能就是温度较低（200℃ 以下）的热能，由于其温度低，可用程度更低，所以在过去大都被弃用了，如低温工业余热。

1.1.1.1 工业余热

工业余热是在一定经济技术条件下，由热工艺过程产生的、未被利用而被排放到环境的热能。它是载于固体、液体和气体等介质的二次能源，包括废气废液（含可燃废气废液）余热、炉渣余热、冷却介质余热、化学反应余热和废料余热等。这些工业余热按行业来分，主要包括电厂烟气余热，化工、钢铁

行业锅炉、废水余热,有色金属冶炼行业余热,采油厂、炼油厂余热以及许多行业的炉窑余热,等等。我国工业生产中能源利用率低,也就意味着余热资源丰富,可回收利用率高。国务院制定的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006—2020年)》将“工业节能”作为优先主题,国家发展与改革委员会发布的《节能中长期专项规划》将“余热利用工程”作为节能的重点工程,因此工业余热的有效利用具有重大意义。

1.1.1.2 地热

地热是一种清洁无污染能源,目前全世界有120多个国家在开发利用地热能源,其中比较典型的有美国、日本、新西兰、菲律宾、印度尼西亚等。地热能源的主要用途是发电、务农和行医,以及温泉沐浴等。世界能源专家预计,到2100年地热能源的利用将占世界能源总量的30%~80%。因此,地热能源的开发与应用具有十分广阔的前景。

人类很早以前就开始利用地热,但真正认识地热能源并进行较大规模的开发利用却是始于20世纪中叶。地热的利用可分为地热发电和直接利用两大类,而对于不同温度的地热流体可利用的范围如下:200~400℃直接发电及综合利用;150~200℃用于双循环发电、制冷、工业干燥、工业热加工等;100~150℃用于双循环发电、供暖、制冷、工业干燥、脱水加工、回收盐类、生产罐头等;50~100℃,用于供暖、提供温室和家庭用热水、工业干燥等;20~50℃,用于沐浴、水产养殖、饲养牲畜、土壤加温、脱水加工等。

我国地热资源应用主要为高温地热发电与中低温地热直接应用形式,地热电站主要建于西藏。随着城市地热采暖的发展,地热资源综合应用效益明显提升。我国当前发现地热点5500处、地热田45个,整体来看应用率较低^[3]。

1.1.1.3 太阳热能

世界上最丰富的能源是太阳能,它是可再生的清洁能源。地球获取的太阳辐射能通量为 1.7×10^{14} kW,比核能、地热和引力能储量总和还要大5000多倍。地球每年接收的太阳能总量为 1×10^{18} kW·h,相当于 5×10^{14} 桶原油,是探明原油储量的近千倍,是世界年耗总能量的一万余倍。虽然太阳辐射能通量的密度较低,大气层外为 1353 W/m^2 ,而且通过大气层会进一步衰减,还会受到天气、昼夜以及空气污染等因素的影响,但如果配置储热装置,做到热能能级的合理匹配,就可以使太阳能发挥最佳效益。

人类对太阳能的利用有着悠久的历史,我国先民早在两千多年前就知道利用钢制四面镜聚焦太阳光来点火,利用太阳能来干燥农副产品。目前,太阳能产生的热能已广泛地应用于生产生产用水、生活热水,采暖,制冷,干燥,蒸馏,温室,烹饪等各个领域并可进行太阳能热发电,同时还可利用光生伏打效

应原理制成太阳能电池，将太阳的光能直接转化为电能加以利用^[4]。

1.1.1.4 生物质能

生物质是指任何可再生的或可循环的有机物质，包括所有的动物、植物、微生物，以及由这些生命体排泄和代谢的所有有机物质。生物质能是蕴藏在生物质中的能量，是直接或间接地通过绿色植物的光合作用，把太阳能转化为化学能后固定和储藏在生物体内的能量。它是一种可再生的无污染或低污染的清洁能源。生物质资源十分丰富，目前全球每年水陆生物质产量为全球总能耗量的6~10倍^[5]。

我国理论生物质能资源约有50亿t标准煤，是我国目前总能耗的4倍左右。长期以来，生物质能主要作为一次能源在农村利用，将秸秆等生物质直接燃烧以蒸煮食物、酒水等占农村总能耗的70%左右。但传统的炉灶直接燃烧秸秆等生物质，其转换效率仅为10%~20%，不仅浪费严重，还会污染环境。

近几十年开始对生物质进行能源化利用，生物质利用技术主要包括生物质气化技术、生物质液化技术、生物质固化技术。生物质气化技术是一种热化学处理技术，是以氧气、氢气或水蒸气等作为气化剂，在高温条件下通过热化学反应将生物质中的碳转化为可燃气体（主要为一氧化碳、氢气和甲烷等）。气化可将生物质转换为高品质的气态燃料，直接用于锅炉燃料或发电，产生所需的热量或电力，或作为合成气进行间接液化以生产甲醇、二甲醚等液体燃料或化工产品。生物质液化技术是对固体状态的生物质进行一系列化学加工，使低品位、能量密度低的生物质转化为优质液体燃料和化学品的技术，可分为直接液化、快速热解等方法。生物质固化技术是将生物质中的木质素在加热条件下液化或软化，使其具有相当的黏着强度，然后通过机械的方式向生物质施加一定的压力，使分散的生物质成为具有一定形状和密度的燃料。固化技术能提高能源密度，改善燃烧特性，实现优质能源转化^[6]。

1.1.1.5 内燃机废气热能

内燃机作为消耗石油资源最主要的设备，是交通运输、工程机械、农用机械等装置的主要动力来源，从石油中提炼的汽油、柴油是其主要燃料。研究表明，内燃机转变为有效功的热量占燃料燃烧发热量的30%~45%（柴油机）或20%~30%（汽油机），以废热形式排出车外的能量占燃烧总能量的55%~70%（柴油机）或70%~80%（汽油机）。如此多的热量被排放到大气中，不仅污染了环境，也造成了能源的浪费，所以应采用不同的方法将其回收利用。

目前，国内外内燃机废气余热利用技术从热源来看，可以分为发动机冷却水余热、排气余热和润滑油余热三种；而从用途上来看，有废气涡轮增压、制

冷空调、发电、采暖、改良燃料等方式。废气涡轮增压技术是把内燃机排出的废气输送到涡轮,然后输出功用来驱动增压器,借助废气中的部分能量来提高内燃机的进气压力进而增加充气量,以改善内燃机的动力性和经济性。目前绝大部分的大功率柴油机、半数以上的车用柴油机以及相当比例的高性能汽油机均采用了增压技术。废气余热制冷技术通过回收和利用发动机排气余热,驱动吸收式、吸附式或喷射式制冷系统,代替车内的压缩式空调系统,降低发动机油耗,是理想的节能方案。有机朗肯循环余热发电技术以内燃机废气为热源,驱动有机蒸气做功,从而将低品位的余热转换为高品质的电能^[7]。

1.1.1.6 潮汐能和海洋温差能

海水受太阳、月亮等天体和地球间相互作用的影响,会产生周期性的涨落和流动,海水涨落及潮水流动所产生的能量称为潮汐能。潮汐能有多种用途,其主要利用为潮汐发电。潮汐能发电是利用海湾、河口等有利地形,建筑堤坝,形成水库,以便大量蓄积海水,在坝中或坝旁建造水力发电厂房,通过水轮发电机组进行发电。潮汐能作为一种洁净的可再生资源,对其进行开发利用可有效缓解能源紧缺和环境污染问题。

世界上第一座潮汐发电站建于德国,即1912年在胡苏姆兴建的一座小型潮汐电站,它开创了潮汐发电的纪元。其后潮汐发电蓬勃发展,英国、美国、法国、加拿大、印度、韩国等都对其投入大量人力物力。现今世界上运行的著名潮汐电站主要有法国朗斯潮汐电站和美国阿拉斯加尼克湾、加拿大芬地湾、英国塞文河口、阿根廷圣约瑟湾、澳大利亚达尔文范迪门湾、印度坎贝河口、俄罗斯远东鄂霍茨克海品仁湾、韩国仁川湾等地的潮汐电站。我国自1958年开始研究利用潮汐能,从20世纪60年代至80年代中期先后建成白沙口、沙山、江夏等约40座潮汐电站。温岭江夏潮汐试验电站是我国已建成的最大的潮汐电站,它位于浙江省温岭市西南的江夏港上,总装机容量390 kW,2010年江夏电站全年发电量达731.74万kW·h^[8,9]。

除了潮汐能,海洋温差能也是目前海洋能开发利用的主要形式之一。海洋温差能是指以表层海水与深层海水的温度差的形式所储存的海洋热能,其能量的主要来源是蕴藏在海洋中的太阳辐射能。海洋温差能储量巨大,占地球表面积71%的海洋是地球上最大的太阳能存储装置,体积为 $6.0 \times 10^7 \text{ km}^3$ 的热带海洋海水每天吸收的能量相当于 2.14×10^{11} 桶原油的热量。按照现有技术水平,可以转化为电力的海洋温差能大约为 $10\,000 \text{ (TW} \cdot \text{h) / a}^{[10]}$ 。海洋温差能可用于发电、海水淡化、发展养殖业和热带农业,以及为海岛提供能量等^[11]。

1.1.2 低品位热能利用技术

低品位热能的利用途径很多,一般来说,综合梯级利用最好,其次是直接

利用,最后是间接利用。低温余热的利用有同级利用和升级利用两种方式。同级利用是根据低温余热的温位,选择适宜的用户,利用低温余热直接或间接代替高、中位热源,可以避免使用高、中位热源所造成的过大温差,节约了大量高品位能源,达到节能降耗的目的。升级利用是更高级的热能利用形式,通过对低温余热进行加工改造,提高温位或转变成机械功输出给高能级用户,以实现能量系统的最优匹配和合理回收,是最有效的低温余热回收利用技术,也即通过热泵、制冷或发电机组等能量转换设备,将低品位的低温余热提升为较高品位的电、冷水或其他形式能源后再进行利用^[12]。按不同的工作原理,低品位热能升级利用技术可分为以下几种^[13]。

1.1.2.1 热泵技术

热泵是高效热能转换装置,借助热力循环把热能由低温处移至高温处,期间要消耗少量高质能如机械能、电能等。作为最主要的低温余热升级利用技术,热泵广泛应用于蒸发、蒸馏、干燥和浓缩等工艺过程,热泵装置检修周期长,运行附加费用较少,使用高效、节能、经济。热泵主要有压缩式和吸收式两种,前者通过系统中工质的物态变化实现供热,用机械功驱动工质循环流动,连续地将热量从低温热源传送到高温位热阱;后者利用工质和吸收液的蒸发和吸收循环进行工作,消耗部分高位热能,从低温热源吸收热量并供给热用户。利用热泵可以将 30~40℃ 的低温废水升温 50~90℃,一般 400W 热泵即可产生 1500W 电炉所产生的热量。

1.1.2.2 吸收制冷技术

吸收制冷技术是以低温余热为热源将制冷剂汽化蒸发,用于生产工艺气体的进一步冷却和办公空调制冷。该技术尤其适用于夏季高温作业时遇到的余热回收情况,可以有效提高装置冷却效率,减少空调、电扇等使用,轻松实现热能、电能的双节约。

制冷所采用工质主要有两类:氨/水和溴化锂/水。前者以氨为制冷剂、水为吸收剂,利用液态氨汽化吸热使周围环境温度急剧降低的特性制冷,对热源温度要求不高,200℃ 以下即可使用(一般为 80~90℃)。后者以水为制冷剂、溴化锂为吸收剂,借助于溴化锂的强效吸水性,为水的蒸发创造低压(真空)环境,其性能系数较高,应用比较普遍。

1.1.2.3 热管技术

热管是 1963 年美国国家实验室发明的一种传热元件,由金属管内灌充导热介质并抽成真空后密封而成,其工作原理是利用密闭管内工质的蒸发与冷凝进行热量传导,工质在加热段汽化,吸收大量汽化潜热,并通过热管将热量快速传递到热源外。由于多数工质潜热巨大,很少的蒸发量便可转移大量热能,

传热效果显著,可在两端温差很小(10°C 左右)的情况下进行高效传热。

目前热管技术应用形式主要有热管换热器、热管蒸汽发生器、热管热风炉等。利用热管回收低温热能,在温差不大的情况下,无需任何辅助动力便可将低温余热及时“转移”而供继续生产之用。

1.1.2.4 变热器技术

变热器又称第二类吸收式热泵,可借助工质热力性能的变化从低品位热源中获取中品位热量,具有能耗低、安全可靠以及使用寿命长等优点。其工作过程可以看作正、逆两个卡诺循环的组合,一部分余热通过热交换升温,另一部分则被冷却至环境温度后排出。目前变热器实际应用最多的是以溴化锂/水为工质的系统,利用变热器技术进行低温余热回收,可将 $50\sim 100^{\circ}\text{C}$ 废热转变成较高温度的可用热源,最高输出温度可达 150°C 。

1.1.2.5 有机朗肯循环发电技术

有机朗肯循环低品位热能发电技术,用R123、R245fa、R600a等低沸点有机物代替常规朗肯循环的水蒸气,有机工质在蒸发器中从低品位热源中吸收热量,产生有机蒸气,进而推动膨胀机旋转,带动发电机发电,在膨胀机内做完功的乏气进入冷凝器中再被冷却为液态,由工质泵升压后打入余热回收器(蒸发器),完成整个动力循环。利用有机朗肯循环,将低品位热能转换为高品位的电能,既有助于解决能源紧缺问题,提高了能源的综合利用率,同时又能减少常规能源利用过程中二氧化碳、氮氧化物、二氧化硫、粉尘等污染物的排放。有机朗肯循环具有操作温度低、机动性好、安全性高、维修保养简单等特点,被认为是一种切实可行的热电转换技术。

除上述技术之外,利用低品位热能的技术还有热声技术、液态金属工业余热利用技术、Kalina循环发电技术、喷射制冷(热泵)技术等。

1.1.3 有机朗肯循环低品位热能发电技术的意义

为了满足人类的生产和生活的需要,世界各国都需要大量的电能。而电能主要从核能、可再生能源和化石燃料转化而来,从资源方面来考虑,在短时期内更好地利用化石燃料无疑是相当重要的。根据《京都议定书》,电能这种渐增的需求不能通过增加化石燃料得到满足,这就要求所有能源的余热要最大程度地被利用。有机朗肯循环技术就是一个将余热流转换成电能的切实可行的选择。

统计指出,至少50%的工业耗能以余热的形式直接排放到大气,尤其是 100°C 左右的低温余热,基本不被回收利用。有机朗肯循环采用的是低沸点有机物做工质,对于低品位的焓热,它与常规的水蒸气朗肯循环相比有很多优

点：①有机工质沸点很低，极易产生高压蒸气；②有机工质的汽化潜热比水小很多，因此低温情况下热回收率高；③有机工质的冷凝压力接近或稍大于大气压，工质泄漏的可能性小，无需复杂的真空系统；④有机工质凝固点很低，它们在较低温度下仍能释放出能量，寒冷天气可增加出力，冷凝器也不需要增加防冻设施；⑤由于有机工质本身的特性，系统的工作压力低（约 1.5 MPa），管道工艺要求低；⑥有机工质基本都是等熵工质或干流体，无需过热处理，不会在有水滴的高速情况下对透平机械的叶片造成冲击损害，也不会腐蚀透平机械^[14]；⑦有机工质在回收显热方面也有较高的效率，由于朗肯循环中显热和潜热二者的比例不相等，而有机朗肯循环系统中显热的比例较大，因此采用有机朗肯循环要比水蒸气的朗肯循环回收的热量多^[15]。此外，有机朗肯循环系统还具有设备简单、安全性高、机动性好以及对维护保养的要求较低等优点。因此，有机朗肯循环是利用低温余热的有效途径。

有机朗肯循环技术可以回收利用各种类型的低温热能，除工业余热外，太阳热能、地热能、生物质能、内燃机废气、海洋温差能等低品位热能也都可以通过有机朗肯循环转换为电能。由于有机朗肯循环低温热能发电技术不需要燃料，所以更符合节能环保的要求。它不仅实现了能源和环境的可持续发展，也缓解了企业电力不足的压力，满足了生产和生活的需求，实现了能源的综合利用。

1.2 有机朗肯循环低品位热能发电技术的研究现状

1.2.1 有机朗肯循环发电技术现状

国内外对于低温热能利用的研究开始于 20 世纪 70 年代的石油危机时期，其中有机朗肯循环的研究最为广泛。早在 1924 年，就有人开始研究利用二苯醚作为工质的有机朗肯循环。几十年来，低温热源有机朗肯循环发电系统已经在地热发电、太阳能发电、工业余热发电、机械设备余热发电等方面得到了广泛的应用。目前，全世界已有 2 000 多套有机朗肯循环发电装置在运行，有机朗肯循环发电系统的总装机容量已达 160 万 kW，从事有机朗肯循环系统设计安装的公司有十多个，如表 1.1 所示^[16,17]。据不完全统计，先后开展这项工作的有美国、中国、俄罗斯、日本、德国、以色列、法国、意大利、比利时、瑞典、新西兰、冰岛、印度、希腊等国家。

表 1.1 有机朗肯循环设备主要生产厂商

生产厂商	应用范围	功率范围 (kW)	热源温度 (℃)	发电效率	工质	膨胀机 类型
ORMAT, 以色列	地热、余热 回收, 太阳能	200 ~ 75 000	150 ~ 300	—	正戊烷	螺杆膨 胀机
Turboden, 意大利	热电联产、 地热	300 ~ 2 000	100 ~ 300	16% ~ 18%	硅油	两级向 心透平 膨胀机
Adoratec, 德国	热电联产	300 ~ 1 750	> 100	15% ~ 18%	OMTS	汽轮机
GMK, 德国	余热回收、地 热, 热电联产	50 ~ 2 000	> 120	9% ~ 21%	GL160	螺杆膨 胀机
Koehler - Ziegler, 德国	热电联产	70 ~ 200	150 ~ 270	11%	烃	螺杆膨 胀机
UTC, 美国	余热回收, 地热	280	> 93	—	—	—
Cryostar, 法国	余热回收、 地热	—	100 ~ 400	—	R245fa R134a	径流式 透平膨 胀机
Freepower, 英国	余热回收	6 ~ 120	180 ~ 225	—	—	涡旋膨 胀机
Triogen, 荷兰	余热回收	160	> 350	—	—	涡轮膨 胀机
Electrathern, 美国	余热回收	50	> 93	—	—	双螺杆 膨胀机
Infinity Tur- bine, 美国	余热回收	250	> 80	—	R134a	径流式 透平膨 胀机

以色列奥马特（ORMAT）公司开发出的有机朗肯循环废热地热发电技术居世界领先地位，并已在日本、荷兰、美国、德国、加拿大、菲律宾、冰岛等的水泥、炼油、造纸、石化、太阳能等众多领域得到了广泛应用。以有机碳氢化合物（如正戊烷、异戊烷等）为工质，利用 90℃ 左右的载热体来发电，生产的废热地热发电设备体积小，机动灵活性高，设备运行可靠，竞争力强，市场前景看好^[18]。截至 2009 年 3 月，ORMAT 公司有机朗肯循环电站已有几十年的成功运行经验，销售的有机朗肯循环电站超过 1 200MW，安装有机朗肯循

环电站的数量超过 2 600 座。

比较典型的还有美国联合技术公司 (UTC), 成功开发了低温有机朗肯循环发电系统, 在 74℃ 热源温度下, 能达到稳定的 8.2% 的发电效率, 并已在余热发电和煤层气发电系统废气余热发电等领域应用。美国 Electratherm 公司依托英国城市大学开发了基于双螺杆膨胀机的有机朗肯循环发电系统^[19]。表 1.2 为有机朗肯循环在部分国家的应用情况^[14]。

表 1.2 有机朗肯循环在部分国家和工业领域的应用

余热来源	精炼厂	燃气轮机	造纸厂	石化厂	焚烧炉
电厂位置	美国	加拿大	荷兰	美国	日本
余热类型	柴油	燃机尾气	低压蒸汽	冷凝碳氢化合物	蒸汽
流量 (m ³ /h)	50	295	13	85	6.7
进口温度 (℃)	184	275	105	104	167
出口温度 (℃)	80	92	80	85	80
冷凝器介质	水	空气	水	—	空气
输出功率 (kW)	300	5 850	930	780	550

我国在 20 世纪 70 年代引进国外的技术陆续建造了一批地热电站。西藏羊八井地热电站采用的热力系统有扩容 (闪蒸) 系统和双工质循环系统。双工质循环系统中, 地热源流经过热交换器, 把地热能传递给低沸点液体工质, 使之蒸发产生有机蒸气, 组成有机朗肯循环地热发电系统^[14]。那曲地热电站于 1993 年底建成, 装机容量 1MW, 采用以色列 ORMAT 公司的双工质循环系统, 地热热源温度为 110℃^[20]。

我国有机朗肯循环中低温余热发电技术的研究, 虽然经过几十年的努力, 仍未取得实质性的突破, 还处于基础研究阶段。上海交通大学对有机朗肯循环的性能、工质特性等进行了理论和实验研究; 天津大学对螺杆膨胀机的性能、调节方法、设计、加工及组装技术进行了系统的理论和实验研究; 北京工业大学研究了螺杆膨胀机、有机朗肯循环的系统性能优化; 昆明理工大学对低温余热发电有机朗肯循环的系统、工质、透平装置等进行了研究; 哈尔滨理工大学对低温余热发电的系统、电路进行了研究和模拟; 西安交通大学、清华大学、郑州大学、浙江大学等高校也在涡旋膨胀机、向心透平膨胀机、有机朗肯循环系统的循环特性等方面做了相应的工作。

1.2.2 有机朗肯循环系统的性能研究

有机朗肯循环作为动力循环系统, 其性能评价与分析是基于热力学第一定