

基于正逆循环的节能技术*

邵振华¹, 郑子辉¹, 于文远^{2†}, 胡永攀², 徐安波², 王远³

(1. 中国科学院广州能源研究所, 中国科学院可再生能源重点实验室, 广州 510640;

2. 上海理工大学制冷与低温研究所, 上海 200093; 3. 西安交通大学, 人居环境与建筑工程学院, 西安 710049)

摘要: 能源是当今社会发展的三大支柱之一, 是经济发展和社会进步的重要基础。近年来, 由于人类对能源的需求越来越大, 能源供应成为社会经济发展的瓶颈。在能源消耗不断攀升从而带来诸多社会和环境问题的现实背景下, 节能减排已成为当今人类的共识。本文依次介绍了机械蒸汽再压缩热泵技术、空气能热泵技术、喷气增焓技术三种节能技术。充分利用低品位能在一定程度上具有节能的效果, 由此, 基于有机朗肯循环及卡琳娜循环两种动力循环, 介绍了低品位能两种利用技术: 低品位能借助正循环(有机朗肯循环或卡琳娜循环)热功转换实现发电及低品位能借助正循环热功转换实现制冷。

关键词: 节能技术; 机械蒸汽再压缩; 空气能热泵; 喷气增焓; 有机朗肯循环; 卡琳娜循环

中图分类号: TK5

文献标志码: A

doi: 10.3969/j.issn.2095-560X.2015.04.007

Energy-saving Technologies Based on Positive and Inverse Cycle

SHAO Zhen-hua¹, ZHENG Zi-hui¹, YU Wen-yuan², HU Yong-pan²,
XU An-bo², WANG Yuan³

(1. CAS Key Laboratory of Renewable Energy, Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences,

Guangzhou 510640, China; 2. University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

3. Xi'an Jiaotong University, School of Human Settlement and Civil Engineering, Xi'an 710049, China)

Abstract: Energy is one of the pillars of the social development, and it is an important factor in the economic development and social progress of human society. In recent years, for the energy demand is more and more huge, the energy supply has become a bottleneck problem. In the real background of social and environmental problems induced by increasing energy consumption, saving energy has become a consensus. This paper introduces three kinds of energy-saving technologies, which are Mechanical Vapor Recompression Heat Pump, Air-source Heat Pump, and Enhanced Vapor Injection technology respectively. Making full use of low grade energy can save energy to a certain extent. Therefore, two technologies of low grade energy utilization were introduced based on Organic Rankine cycle and Kalina cycle: one is that low grade energy is changed into mechanical work to generate power by using the positive cycle (Organic Rankine cycle or Kalina cycle), and the other is that low grade energy is changed into mechanical work to realize refrigeration by using the positive cycle.

Key words: energy-saving technologies; Mechanical Vapor Recompression Heat Pump; Air-source Heat Pump; Enhanced Vapor Injection; Organic Rankine cycle; Kalina cycle

0 前言

自改革开放以来, 我国的国民经济保持以 8% 的高增长率迅猛增长^[1], 以致能源的供给成为了经济增长的瓶颈, 面对如此情况, 节能成为目前摆脱能源短缺束缚的重要途径之一。最近几年, 人们通过努力, 在节能技术的研究和产品开发上都取得了巨大的成果。本文介绍了几种比较成熟的节能技术, 包

括机械蒸汽再压缩热泵技术、空气能热泵技术、喷气增焓技术。充分利用低品位能在一定程度上具有节能的效果, 有机朗肯循环^[2-13]及卡琳娜循环^[14-17]是回收低品位热能的有效技术手段之一, 在低温条件下可以获得较高的蒸汽压力, 推动膨胀机做功, 由此介绍了低品位能借助正循环(有机朗肯循环或卡琳娜循环)热功转换实现发电及低品位能借助正循环热功转换实现制冷两种节能技术。

* 收稿日期: 2015-03-05 修订日期: 2015-3-31

† 通信作者: 于文远, E-mail: yuwyn0212@163.com

1 基于逆循环的机械蒸汽再压缩热泵技术^[18]

机械蒸汽再压缩 (MVR) 热泵利用蒸发器自身产生的二次蒸汽及其能量, 经压缩机压缩做功, 提升二次蒸汽的温度和压力, 如此循环向蒸发器供热, 从而减少对外界能源的需求。机械蒸汽再压缩热泵系统如图 1 所示, 新的料液借助进料泵进入蒸发器, 被压缩机压缩提升的二次蒸汽加热, 形成气液混合物进入分离器, 气液混合物在分离器进行分离, 分离器上部的二次蒸汽进入压缩机被压缩以实现其热力品质的提升, 压力和温度提高的二次蒸汽再重新进入蒸发器作为加热蒸汽来加热新的料液, 分离器下部将得到浓缩料液。料液吸收了压缩过的二次蒸汽的潜热而产生的新蒸汽则继续下一个循环过程, 经过压缩机压缩的二次蒸汽释放冷凝潜热之后冷凝成冷凝水。由于在蒸发器中, 获得的加热量为输入压缩机的指示功与二次蒸汽的潜热之和, 经压缩机压缩后, 二次蒸汽的潜热品位得以提高, 便于回收利用。而在传统的蒸发器中, 由于二次蒸汽的温度、压力较低, 其潜热无法回收用于加热料液, 从一定的程度上来讲, 机械蒸汽再压缩降低了一次能源的消耗, 具有一定的节能效果。

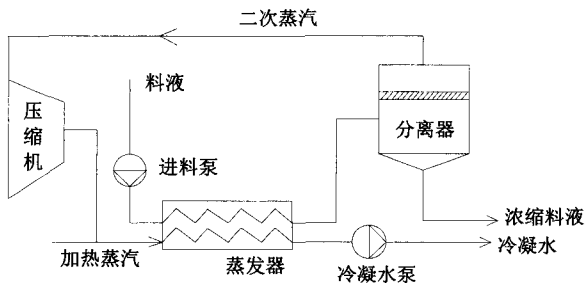


图1 机械蒸汽再压缩热泵系统图^[18]

Fig. 1 System diagram of Mechanical Vapor Recompression Heat Pump

2 基于逆循环的空气能热泵技术

我们周围的空气是有热量的。夏天温度高, 空气的热量也高; 冬天温度低, 空气所含的能量也相对较低。空气能是一种广泛存在、可随意利用的低品位能源。热泵是一种可以从低温热源吸取热量, 使其在较高温度下转换为可以利用能源的装置, 或者说是一种可以利用低品位热能的系统。

空气能热泵系统由压缩机、冷凝器、节流阀、蒸发器四个部件组成, 并通过管道将各部件连接形成

一个封闭的系统。系统构成如图 2 所示, 压缩机将低压制冷剂压缩成高温高压的气体排出, 排出的制冷剂气体在冷凝器中等压冷凝成液体, 同时将制冷剂冷凝时放出的热量传给高温环境, 冷凝后的制冷剂液体通过节流阀后温度降低, 低温低压的制冷剂进入蒸发器中吸收低温环境中的热量汽化后回到压缩机中完成一个循环。在整个循环过程中, 制冷剂在蒸发器中吸收低温环境的低品位热量 (即空气能), 经过压缩机的少量电能补偿后, 在冷凝器中将热量转移到高温环境中去。

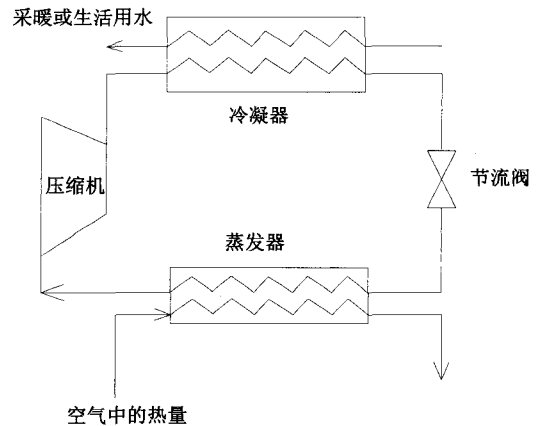


图2 空气能热泵系统图

Fig. 2 System diagram of Air-source Heat Pump

空气能热泵遵循能量守恒定律和热力学第二定律, 其能效比一般可达年均 4.0, 即空气能热泵以 1 份电能从环境空气中吸收 3 份热能, 向用户供应 4 份热能, 相比直接用电供热方式, 空气能热泵更加节能^[19]。空气能热泵只用了少量电能, 而热量主要来自无法被利用的空气中的低品位热能, 因此, 其节能效果显著。

3 基于逆循环的喷气增焐技术

北方的冬季由于环境温度很低, 普通蒸汽压缩式热泵系统面临低温环境的制约, 其制热系数受循环特性的限制, 有文献认为, 采用喷气增焐技术的热泵系统具有很强的低温适应性, 且环境温度越低, 节能效果越明显^[20,21]。喷气增焐系统是由喷气增焐压缩机 (本文指涡旋压缩机)、喷气增焐技术、高效过冷却器 (也称经济器或者节能器) 组成的新型系统, 高效过冷却器有过冷器和闪发器两种基本型式。按照高效过冷却器的型式, 喷气增焐系统有带过冷器的喷气增焐系统及带闪蒸器的喷气增焐系统^[22,23]。

带有过冷器的喷气增焓系统为一级两次节流经济器系统,图 3a 是带有过冷器的喷气增焓系统图,涡旋压缩机由电能驱动产生机械动力,把低温低压有机工质蒸汽压缩成高温高压的蒸汽,在冷凝器中高温高压的蒸汽被冷凝成高压液体,从冷凝器中出来的高压制冷剂液体通过主循环回路和辅助回路以气态的形式回到涡旋压缩机。主循环回路流程如下:冷凝器中出来的高压制冷剂液体直接进入过冷器进一步过冷后经过第二节流阀节流进入蒸发器,蒸发器的制冷剂吸收低温环境中的热量而变为低压气体通过吸气口被涡旋压缩机吸入。辅助回路流程如下:由冷凝器中出来的制冷剂液体经过第一节流阀节流到某一中间压力进入过冷器,过冷器当中产生的闪蒸气进入压缩机。主循环回路中制冷剂气体压缩到一定压力,与辅助回路吸入的制冷剂气体进入压缩机接触线密封后的吸气腔中进一步被压缩。过冷器在整个系统中起到了关键性的两方面作用:一方面对主循环回路冷媒进行节流前过冷,降低节流损失;另一方面,由于过冷器的增设,既减少了一级压缩的工质的流量,又降低了二级压缩进口的蒸汽温度和比容,从而降低了压缩机功耗^[2]。

带有闪蒸器的喷气增焓系统是两级节流经济器系统,如图 3b 所示。涡旋压缩机由电能驱动产生机械动力,把低温低压有机工质蒸汽压缩成高温高压的蒸汽,在冷凝器中高温高压的蒸汽被冷凝成高压液体,从冷凝器出来的高压制冷剂液体经第一节流阀后进入闪发器形成中间压力的气液混合物,气液混合物将通过主循环回路和辅助回路以气态的形式回到涡旋压缩机。经过闪发闪蒸器上部的气体温度升高,同时不断闪发致使闪发器下部的液体过冷。主循环回路流程如下:过冷后的制冷剂液体经过第二节流阀节流到蒸发压力后进入蒸发器,蒸发器的制冷剂吸收低温环境中的热量而变为低压气体通过吸气口被涡旋压缩机吸入。辅助回路流程如下:处于闪蒸器上部的闪发蒸汽通过辅助进气口被压缩机吸入。主循环回路当中制冷剂气体压缩到一定压力后与辅助回路吸入的制冷剂气体进入压缩机接触线密封后的吸气腔中进一步被压缩^[22]。

从图 4 中看出,由于采用了喷气增焓技术,涡旋压缩机排气口(即经过冷凝器)的流量为蒸发器流量 m 和辅助进口流量 i 之和,增强了冷凝器的换热效率^[24]。

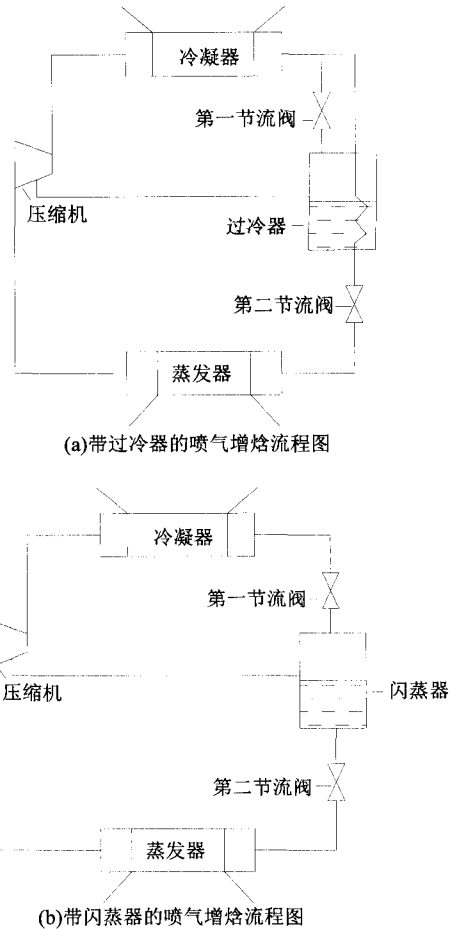


图 3 喷气增焓流程图
Fig. 3 Flow diagram of Enhanced Vapor Injection

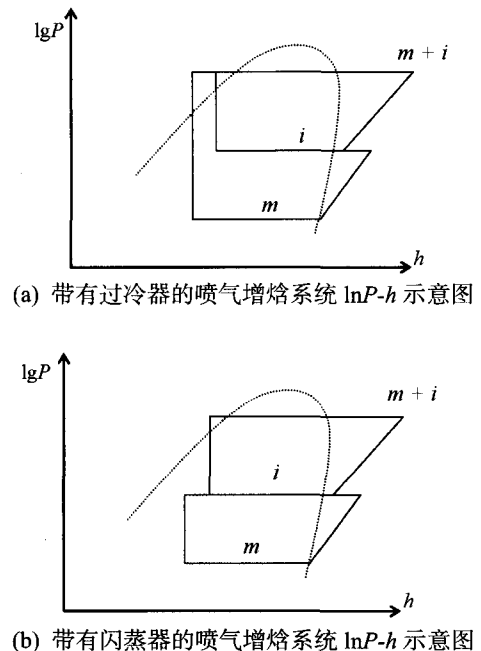


图 4 喷气增焓系统 $\ln P-h$ 图^[24]
Fig. 4 $\ln P-h$ of Enhanced Vapor Injection

4 基于正逆循环（耦合）的低品位能利用技术

低品位热能在自然界以及人类生活中大量存在，如太阳能、地热能、工业余热、市政污水余热等。余热都伴随着废水、废气排放到环境当中，造成了非常严重的能源浪费和环境污染，大量能源的浪费反过来又加剧了化石能源的消耗。太阳辐射能是地球上最主要的能量来源，太阳能分布广泛，被认为是最具有前景的能源^[25,26]。地热能是可再生的清洁能源，按埋藏深度可以分为高温地热 ($T > 150^{\circ}\text{C}$)、中温地热 ($90^{\circ}\text{C} < T < 150^{\circ}\text{C}$) 和低温地热 ($T < 90^{\circ}\text{C}$)^[27]。目前地热资源主要用于发电、采暖、制冷、农业生产和医疗保健等。我国地域辽阔，地热能可利用量巨大，但目前缺少对中低温地热资源开发利用。

近年来，有机朗肯循环及卡琳娜循环的研究为低品位热能（工业余热、太阳能、地热能等）的开发利用提供了发展机遇，在低温条件下可以获得较高的蒸汽压力，推动膨胀机做功，有机朗肯循环及卡琳娜循环是回收低品位热能的有效技术手段^[2-17]。有机朗肯循环系统如图 5 所示，整个循环由定压冷却、绝热加压、定压加热及绝热膨胀 4 个热力学过程组成，4 个过程分别发生于凝汽器、工质泵、发生器及膨胀机当中。经过膨胀机膨胀后的较低温度、较低压力的有机工质蒸汽，在凝汽器中与冷却水循环当中的冷却水进行换热冷却成过冷液体，换热之后的过冷有机工质液体，在工质泵中被加压至高压液体，进入蒸汽发生器进行加热，蒸汽发生器中的高压有机工质液体被加热，产生蒸汽，过热蒸汽进入膨胀机，推动膨胀机，输出机械功，经过膨胀机之后的较低温度、较低压力的有机工质蒸汽又回到凝汽器当中与冷却水循环当中的冷却水进行换热冷却，如此完成有机朗肯循环获得机械功^[28]。

图 6 为有机朗肯循环典型工况的温熵图 ($T-s$ 图)，理论循环包括以下基本过程： $1 \rightarrow 2s \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 5s \rightarrow 6 \rightarrow 1$ 。其中： $1 \rightarrow 2s$ 代表工质在膨胀机中的等熵膨胀过程； $4 \rightarrow 5s$ 代表工质在工质泵中等熵压缩过程； $1 \rightarrow 2$ 代表工质在膨胀机中的实际膨胀过程； $2 \rightarrow 4$ 代表有机朗肯循环工质定压放热过程； $4 \rightarrow 5$ 代表工质在工质泵中实际压缩过程； $5 \rightarrow 1$ 代表工质在发生器中定压加热过程。

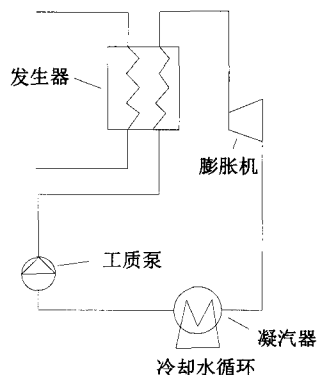


图 5 有机朗肯循环系统图
Fig. 5 System diagram of Organic Rankine cycle

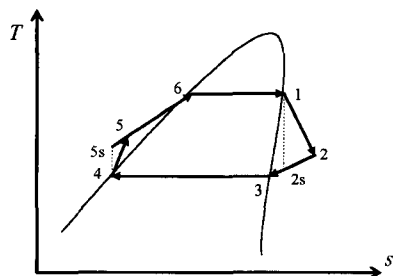


图 6 有机朗肯循环 $T-s$ 图
Fig. 6 $T-s$ of Organic Rankine cycle

卡琳娜循环^[29,30]是以氨水混合物为工质的循环系统，如图 7 所示，低品位热能进入发生器，加热发生器内的氨水溶液，形成过热氨水蒸汽进入膨胀机膨胀做功，做功后的低压、低温氨气进入吸收器被发生器出来的稀溶液吸收，放出的热量被冷却水带走，吸收器里面的氨水溶液经过工质泵加压、预热器升温之后，进入发生器蒸发，完成一个循环。

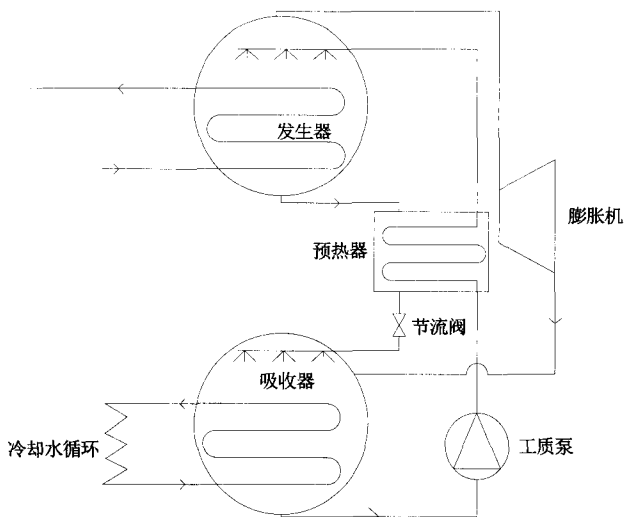


图 7 卡琳娜循环系统图
Fig. 7 System diagram of Kalina cycle

如图 8 所示, 基于正逆循环(耦合)的低品位能利用系统由三个子系统组成, 分别是低品位能收集子系统、动力(正)循环子系统及发电子系统或制冷(逆)循环子系统。低品位能收集子系统收集的热能通过发生器传递给动力(正)循环子系统,

通过有机朗肯循环或者卡琳娜循环获得较高的蒸汽压力, 推动膨胀机做功, 获得机械功, 进而实现发电子系统的发电功能或者通过联轴器连接制冷(逆)循环子系统当中的压缩机, 实现制冷循环子系统的制冷功能。

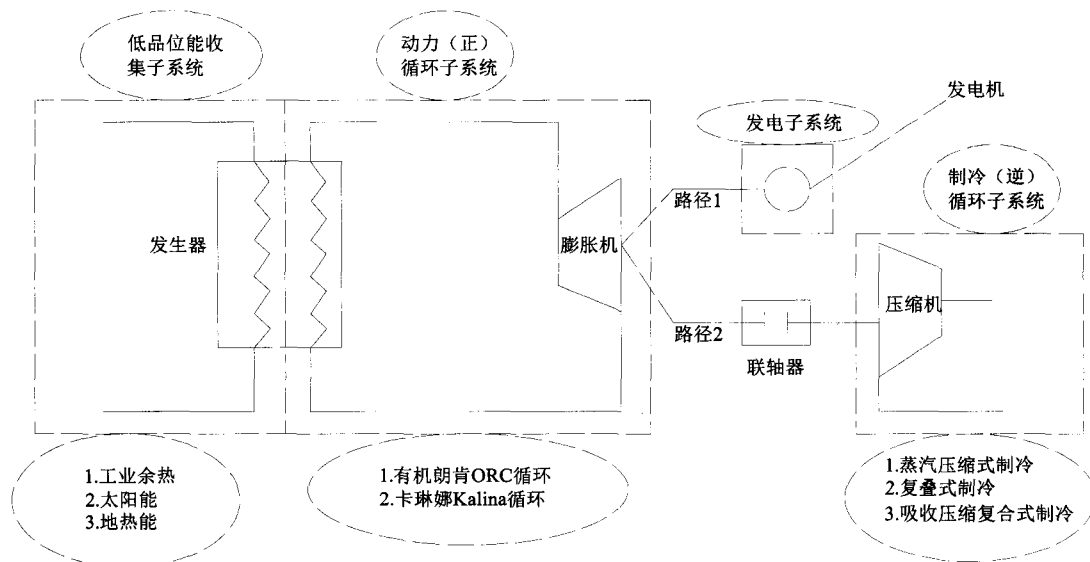


图 8 基于正逆循环(耦合)的低品位能利用示意图

Fig. 8 Sketch diagram of low grade energy utilization based on the coupling with positive Cycle (Organic Rankine cycle and Kalina cycle) and inverse cycle

4.1 低品位能借助正循环热功转换实现发电

如图 8 中的路径 1 所示, 低品位能发电技术有有机朗肯循环发电技术和卡琳娜循环发电技术。有机朗肯循环发电技术可以利用太阳能、地热能、工业余热等一切低品位能。常规动力循环以水蒸汽作为循环工质, 对热源温度要求非常高, 且设备体积庞大, 而采用低沸点有机工质的有机朗肯循环, 非常适宜于低品位能的利用, 系统结构也更加简单紧凑, 如果选择合适的有机工质, 甚至可以不设置过热设备, 就可以获得较好系统性能, 同时还降低了系统结构的复杂性, 实现热功转换进行发电, 且不消耗化石燃料, 对环境污染很小, 效率更高, 因而日益得到重视。相比其他利用方式, 卡琳娜循环是一种混合工质的有机朗肯循环, 适合变温热源, 但其结构复杂、换热设备较多、制造成本较高, 不利于推广^[3-17]。

4.2 低品位能借助正循环热功转换实现制冷

如图 8 中的路径 2 所示, 利用低品位能(太阳能、地热能、工业余热等)驱动有机朗肯循环、卡

琳娜循环产生的机械功来驱动制冷系统的研究日益受到关注, 而不是直接发电。国内外针一些学者对有机朗肯-蒸汽压缩式制冷系统进行了理论及试验研究^[6,11,13], 取得了一些成果。在北方地区, 常规的单级蒸汽压缩式制冷系统会因压缩比过高而使运行经济性显著降低, 喷气增焓技术可以很好地解决这一问题, 基于此提出了太阳能驱动的有机朗肯-喷气增焓(带二次吸气的增效)蒸汽压缩制冷系统^[2]的概念, 系统的流程图如图 9 所示。制冷系统由三个子系统组成, 分别是太阳能收集子系统、有机朗肯循环子系统及制冷循环子系统。太阳能驱动的有机朗肯-喷气增焓(带二次吸气的增效)蒸汽压缩制冷系统运行时, 太阳能集热器将热量传递至蓄热器, 再传递至发生器, 有机工质在发生器中吸收热量蒸发变为气态; 之后高温高压的气态有机工质进入膨胀机中进行膨胀, 输出机械功; 从膨胀机中出来的有机工质温度已大大降低, 进入凝汽器中被环境冷源凝结为液态工质, 之后经过工质泵加压, 最后进入发生器, 如此往复循环, 完成有机朗肯循环。

膨胀机和喷气增焓蒸汽压缩制冷循环子系统的压缩机为同轴结构，通过联轴器将机械功传递至压缩机，把低温低压有机工质蒸汽压缩成高温高压的蒸汽，在冷凝器中高温高压的蒸汽被冷凝成高压液体，从冷凝器中出来的制冷剂液体分两部分，辅助回路部分制冷剂液体通过第一节流阀节流到某一中间压力进入经济器，之后在经济器中借助热交换形成闪蒸

气体，主回路部分制冷剂直接进入经济器进一步过冷后通过第二节流阀节流进入蒸发器，制冷剂在蒸发器中吸收环境的热量汽化后形成气体回到压缩机中进行压缩。主回路中制冷剂气体压缩到一定压力后与辅助回路吸入的闪蒸制冷剂气体进入压缩机接触线密封后的吸气腔中进一步被压缩，如此往复循环完成喷气增焓蒸汽压缩式制冷循环。

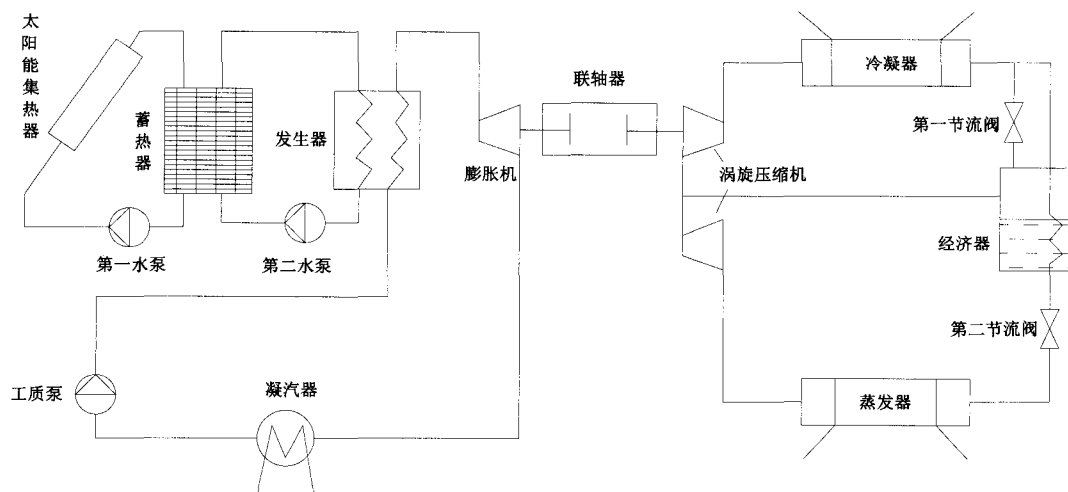


图 9 太阳能驱动的有机朗肯-喷气增焓（带二次吸气的增效）蒸汽压缩制冷系统结构示意图

Fig. 9 Structure diagram of organic Rankine-Enhanced Vapor Injection (with efficiency by secondary suction) Vapor Compression Refrigeration system powered by solar energy

图 10 是太阳能驱动的有机朗肯-喷气增焓（带二次吸气的增效）蒸汽压缩制冷系统的喷气增焓蒸汽压缩式制冷的热力学循环压焓图（ $\lg P-h$ 图）。其中：8→9s 代表主回路的制冷剂在涡旋压缩机中的等熵压缩过程；8→9 代表主回路的制冷剂在涡旋压缩机中的实际压缩过程；16→10s 代表闪蒸气体在涡旋压缩机中的等熵压缩过程；16→10 代表闪蒸气体在涡旋压缩机中的实际压缩过程；10→11 代表制冷剂

在冷凝器中的定压放热过程；11→14 代表辅助回路制冷剂的节流过程；14→16 代表制冷剂喷汽前自身的预热过程；11→12 代表主回路制冷剂阀前过冷过程；12→13 代表主回路制冷剂的节流过程；13→8 代表主回路制冷剂在蒸发器中的蒸发过程。

一些特殊行业，特别是食品冷冻冷藏或医疗等行业所需要的温度通常很低，常规的单级蒸汽压缩式制冷系统同样会因压缩比过高而使运行经济性显著降低，而复叠式制冷系统可以解决这一问题，基于此提出了中温地热能驱动的有机朗肯-复叠式制冷系统的概念^[31]。中温地热能驱动的有机朗肯-复叠式制冷系统流程图如图 11 所示，该系统由地热能收集子系统、有机朗肯循环子系统和复叠式制冷循环子系统组成。系统的有机朗肯循环子系统主要由发生器、膨胀机、凝汽器和工质泵组成。系统的复叠式制冷循环子系统由高温级和低温级两个制冷子单元组成。高温级制冷子单元由高温级压缩机、高温级冷凝器、高温级节流阀和蒸发冷凝器组成；低温级制冷子单元由低温级压缩机、蒸发冷凝器、低温级节流阀和低温级蒸发器组成。蒸发冷凝器既是高

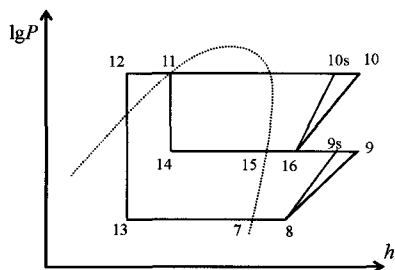


图 10 喷气增焓（带二次吸气的增效）蒸汽压缩制冷循环 $\ln P-h$ 图^[21]

Fig. 10 $\ln P-h$ of Enhanced Vapor Injection (with efficiency by secondary suction) Vapor Compression Refrigeration cycle

温级制冷子单元的蒸发器，又是低温级制冷子单元的冷凝器，蒸发冷凝器把两个制冷子单元联系在一

起，高温级制冷子单元采用中温制冷剂，低温级制冷子单元采用低温制冷剂。

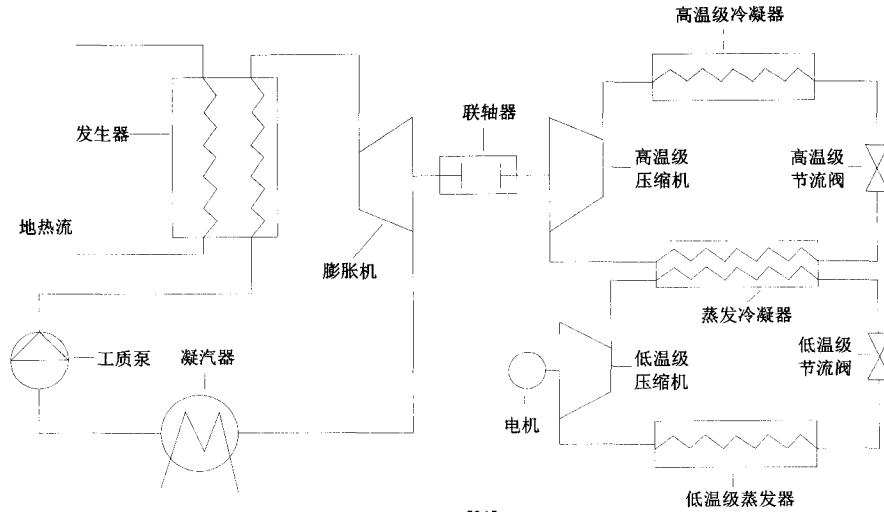


图 11 中温地热驱动的有机朗肯-复叠式制冷系统结构示意图^[31]

Fig. 11 Structure diagram of Organic Rankine-Cascade Refrigeration system Powered by Medium-grade Geothermal Energy

系统的有机朗肯循环子系统为复叠式制冷循环子系统的高温级压缩机提供动力，低温级压缩机则由电能驱动。图 12 为复叠式制冷循环子系统的压焓图 ($\lg P-h$ 图)。其中：8→9s 代表低温制冷剂在低温级压缩机中的等熵压缩过程；8→9 代表低温制冷剂在低温级压缩机中的实际压缩过程；9→11 代表低温制冷剂在蒸发冷凝器中的定压放热过程；11→12 代表低温制冷剂在低温级节流阀中的等焓节流过程；12→8 代表低温制冷剂在低温级蒸发器中的蒸发过程；14→15s 代表中温制冷剂在高温级压缩机中的等熵压缩过程；14→15 代表中温制冷剂在高温级压缩机中的实际压缩过程；15→17 代表中温制冷剂在高温级冷凝器中的定压放热过程；17→18 代表中温制冷剂在高温级节流阀中的等焓节流过程；18→14 代表中温制冷剂在蒸发冷凝器中的蒸发过程。

如图 8 所示，基于正逆循环（耦合）的低品位能利用技术只需增加低品位能收集子系统和动力（正）循环子系统，即可获得循环产生的机械功用发电或者驱动压缩机实现制冷功能。

4.3 低品位能借助正循环热功转换实现制冷与传统制冷的对比

目前制冷系统主要以消耗电能来驱动制冷系统当中的压缩机进而实现制冷，能效比较低，经济性不高，而使用的电能基本上来自火力发电，简单地说就是燃烧燃料（煤等）放出的热量加热水，形成高温高压过热蒸汽，推动汽轮机旋转输出机械功，带动发电机旋转，发出电能。燃料（煤等）燃烧时除了排放 CO₂ 和热量外，还会排放 SO₂、H₂S 等多种有害气体，其中 CO₂ 是温室气体，CO₂ 的排放增加了地球的温室效应。对于图 8 当中的路径 2，低品位能（太阳能、地热能、工业余热等）驱动动力循环有机朗肯循环或者卡琳娜循环带动膨胀机输出机械功，制冷子系统中的压缩机只需要通过联轴器与膨胀机同轴连接就可以实现系统的制冷功能。路径 2 充分利用了低品位能，一定程度上节约了大量的化石能源，起到保护环境的作用，另外，压缩机与膨胀机转速一致，减少了机械能转化为电能及电能远距离输送到用户所带来的损失两个环节，一方面提高了能源利用效率，另一方面使得系统结构更加紧凑。

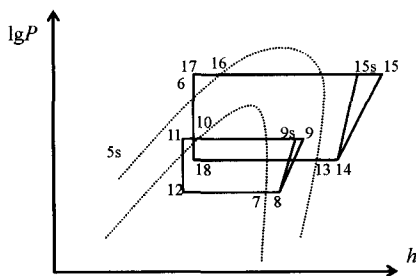


图 12 复叠式制冷循环 $\ln P-h$ 图^[31]

Fig. 12 $\ln P-h$ of Cascade Refrigeration cycle

5 总 结

(1) 介绍了机械蒸汽再压缩(MVR)热泵技术, 该技术可以回收利用物料蒸发所产生的二次蒸汽的潜热。

(2) 介绍了空气能热泵技术, 该技术只用了少量电能, 而热量主要来自于无法被利用的空气中的低品位热能。

(3) 介绍了带有过冷器的喷气增焓技术及带有闪蒸器的喷气增焓技术, 采用喷气增焓技术的热泵系统具有很强的低温适应性, 适用于北方冬季, 且环境温度越低, 节能效果越明显。

(4) 有机朗肯循环及卡琳娜循环是回收低品位热能的有效技术手段, 在低温条件下可以获得较高的蒸汽压力, 推动膨胀机做功, 由此介绍了低品位能两种利用技术: 低品位能借助正循环(有机朗肯循环或卡琳娜循环)热功转换实现发电及低品位能借助正循环热功转换实现制冷。

参考文献:

- [1] 朱祝林. 以能源节约为目标的轧辊热处理过程中若干调度优化方法研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2011.
- [2] 邵振华, 于文远, 陈小娇, 等. 太阳能驱动的有机朗肯-喷气增焓(带二次吸气的增效)蒸汽压缩制冷系统性能分析[J]. 新能源进展, 2014, 2(5): 373-379.
- [3] 韩中合, 叶依林, 刘赞. 不同工质对太阳能有机朗肯循环系统性能的影响[J]. 动力工程学报, 2012, 32(3): 229-234.
- [4] 王辉涛, 王华, 龙恩深, 等. 低温废弃余热驱动有机朗肯循环的优化[J]. 太阳能学报, 2013, 34(7): 1183-1188.
- [5] 刘怀亮, 何雅玲, 程泽东, 等. 槽式太阳能有机朗肯热发电系统模拟[J]. 工程热物理学报, 2010, 31(10): 1631-1634.
- [6] 卜宪标, 李华山, 王令宝. 船舶余热驱动的有机朗肯-蒸汽压缩空调性能分析与工质选择[J]. 大连海事大学学报, 2013, 39(4): 99-106.
- [7] 邵应娟, 金保昇, 钟文琪, 等. 微型有机朗肯循环热电系统建模与性能分析[J]. 东南大学学报, 2013, 43(4): 798-802.
- [8] 刘广林, 陈奇成, 张兵. 烟气热源有机朗肯循环系统工质选择[J]. 热能与动力工程, 2013, 28(3): 241-245.
- [9] 朱启的, 孙志强, 周子民. 工质类型对回收中低温余热有机朗肯循环性能的影响[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2013, 44(3): 1215-1220.
- [10] 韩中合, 叶依林, 刘赞. 不同工质对太阳能有机朗肯循环系统性能的影响[J]. 动力工程学报, 2012, 32(3): 229-234.
- [11] 曹园树, 胡冰, 梁立鹏, 等. 中温地热能驱动的跨临界有机朗肯-蒸汽压缩制冷系统的性能分析[J]. 新能源进展, 2014, 2(3): 204-210.
- [12] 梁立鹏, 曹园树, 胡冰, 等. R1234yf 有机朗肯循环系统热力学性能研究[J]. 新能源进展, 2014, 2(3): 197-203.
- [13] 曹园树, 孙雪萌, 马志同, 等. 中温地热能驱动的跨临界有机朗肯-蒸汽压缩制冷系统的焓分析[J]. 新能源进展, 2014, 2(6): 441-448.
- [14] 王春莉, 戴军, 郭佳, 等. 卡琳娜循环在火电厂节能降耗中的应用研究[J]. 自动化仪表, 2012, 33(7): 56-58, 62.
- [15] 方鹏. 卡琳娜循环在燃煤电厂烟气余热回收利用中的应用分析[J]. 中国科技投资, 2013(Z2): 102-103.
- [16] 周然, 韩吉田, 于泽庭. 基于太阳能卡琳娜循环的冷热电联供系统热力学分析[J]. 制冷技术, 2013, 33(3): 13-15, 20.
- [17] 陈效孺. 介绍一种新型的热力循环(Kalina)循环[J]. 上海电力, 1995, 8(3): 8-10.
- [18] 庞卫科, 林文野, 戴群特, 等. 机械蒸汽再压缩热泵技术研究进展[J]. 节能技术, 2012, 30(4): 312-315.
- [19] 王如竹, 吴静怡, 许煜雄. 高效节电的空气能热泵热水器[J]. 上海电力, 2004(6): 500-502.
- [20] 王文毅, 毛晓倩, 胡斌, 等. 中间补气量对经济器热泵系统性能的影响[J]. 制冷学报, 2013, 34(4): 40-46.
- [21] 杨丽, 王文, 白云飞. 经济器对压缩制冷循环影响分析[J]. 制冷学报, 2010, 31(4): 35-38.
- [22] 赵会霞, 刘思光, 马国远, 等. 涡旋压缩机闪发器热泵系统的试验研究[J]. 太阳能学报, 2006, 27(4): 377-381.
- [23] 陈镇凯, 胡文举, 江辉民, 等. 带有闪发器的空气源热泵系统数学模型的研究[J]. 流体机械, 2011, 39(11): 81-87.
- [24] 刘强, 樊水冲, 何珊. 喷气增焓涡旋压缩机在空气源热泵热水器中的应用[J]. 流体机械, 2008, 36(9): 68-72.
- [25] Quoilin S, Orosz M, Hemond H, et al. Performance and design optimization of a low-cost solar organic Rankine cycle for remote power generation, 2011, 85(5): 955-966.
- [26] Wang M, Wang J F, Zhao Y Z, et al. Thermodynamic analysis and optimization of a solar-driven regenerative organic Rankine cycle (ORC) based on flat-plate solar collectors[J]. Applied Thermal Engineering, 2013, 50(1): 816-825.
- [27] 王小毅, 李汉明. 地热能的利用与发展前景[J]. 节能科技, 2013(3): 43-48.
- [28] 王汝金, 张秀平, 贾磊, 等. 有机朗肯循环技术在低品位余热发电系统中的应用[J]. 电力需求侧管理, 2011(5): 25-28.

- [29] 连红奎, 李艳, 束光阳子, 等. 我国工业余热回收利用技术综述[J]. 节能技术, 2011(2): 123-128, 133.
- [30] 冯惠生, 徐菲菲, 刘叶凤, 等. 工业过程余热回收利用技术研究进展[J]. 化学工业与工程, 2012, 29(1): 57-64.
- [31] 邵振华, 于文远. 中温地热能驱动的有机朗肯-复叠式制冷系统性能分析[J]. 可再生能源, 2015, 33(4): 579-585.

作者简介:

邵振华 (1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事新能源技术方面的研究。

郑子辉 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事微尺度燃烧方面的研究。

于文远 (1988-), 男, 硕士研究生, 主要从事制冷装置测试技术与自动化方面的研究。