

工业过程余热回收利用技术研究进展

冯惠生, 徐菲菲*, 刘叶凤, 单纯

(天津大学化工学院, 天津 300072)

摘要: 概述了余热利用的热交换技术、余热制冷制热技术、低温有机朗肯循环及 Kalina 循环余热发电技术的应用, 并对其热力学原理以及研究方法进行了分析。认为研究推广低温有机朗肯循环及 Kalina 循环等低温余热发电技术对提高余热利用率更加有效, 余热制冷制热技术的应用必须与工艺过程相结合, 加强计算机模拟在制冷过程的设计中的应用。

关键词: 余热回收利用; 热交换技术; 余热制冷制热; 低温有机朗肯循环; Kalina 循环; 模拟

中图分类号: TK01⁺8 **文献标志码:** A

Review of Waste Heat Utilization Technologies for Industry Processes

FENG Hui-sheng, XU Fei-fei*, LIU Ye-feng, SHAN Chun

(School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: This paper reviewed the characteristics and applications of waste heat recovery technologies such as heat transfer utilization, refrigeration and heat pump, power generation by organic Rankine cycle (ORC) system and Kalina cycle. The thermodynamic principle and research method existing in the recovery of waste heats were carried out. The dissemination of ORC system and Kalina cycle system are necessary for increasing the effective of waste heat utilization. Meanwhile, refrigeration and heat pump technologies should be combined with specific industry process, application of simulation to the design also should be enhanced.

Key words: waste heat utilization; heat transfer technology; refrigeration and heat pump; low temperature organic Rankine cycle; Kalina cycle; simulation

能源短缺、环境污染已发展为世界范围的问题^[1-3], 节能减排、降低能耗、提高能源的综合利用率, 是解决能源问题的根本途径。我国工业领域的能源消耗量约占全国能源消耗总量的 70%^[4]。除了生产工艺相对落后、产业结构不合理的因素外, 工业余热利用率低, 能源没有得到充分综合利用是造成单位 GDP 能耗高的重要原因。随着能源危机

的压力不断加大和人们追求循环经济、可持续性发展的要求越来越高, 如何合理的利用工业余热, 成为节能减排工作的重要内容。

1 余热的特点

余热资源属于二次能源, 是一次能源或可燃物

收稿日期: 2011-08-10

作者简介: 冯惠生(1962-), 男, 副研究员, 主要从事传质与分离工程和化工设备研究。

联系人: 徐菲菲, 电话: (022) 27405583, E-mail: xflpld@126.com。

料转换后的产物,或是燃料燃烧过程中所发出的热量在完成某一工艺过程后所过剩的热量,但是这些看似低品位的能量仍有被利用的可能和价值。按照温度高低分类,工业余热一般分为 600 °C 以上的高温余热,230 °C ~ 600 °C 的中温余热和 230 °C 以下的低温余热 3 种;按照来源,工业余热又可被分为:烟气余热、冷却介质余热、废汽废水余热、化学反应热、高温产品和炉渣余热,以及可燃废气、废料余热^[5-6]。

余热资源来源广泛、温度范围广、存在形式多样,余热的回收量与工艺生产过程、环境条件的变化密切相关,余热的回收利用受施工环境的限制,对余热回收设备要求较高。工业余热资源的利用对设备有如下要求:具有较宽且稳定的运行范围;能适用多变的生产工艺的要求;设备部件可靠性高,布局合理;能够综合利用能量,以提高余热利用率。

2 余热利用技术

由于余热资源的多样性,产生余热资源的环境和工艺过程的不同以及场地固有条件的限制。目前应用的余热回收方式有热交换技术、热泵技术、余热制冷技术、低温有机朗肯循环发电技术和 Kalia 循环发电技术。

2.1 热交换技术

热交换技术设备对余热的利用不改变余热能量的形式,只是通过换热设备将余热能量直接传给自身工艺的耗能过程,是余热回收直接高效的方法之一。所用设备为各种换热器,包括传统结构的各种换热器、热管换热器和余热蒸汽发生器。各种换热器的特点如表 1 所示。

表 1 表 1 热交换设备比较

Table 1 Comparison of heat exchangers

换热器类型	换热器特征	优点	余热温度范围
间壁式换热器	管式换热器	2 种不同流体在管壳内进行换热,1 种在管内流动,1 种在管外流动。	结构坚固,适应弹性大,材料范围广泛。允许入口烟气温度达 1 000 °C 以上,出口烟温约 600 °C,平均温差约 300 °C。
	板式换热器	主体结构由换热板片以及板间的胶条组成,应用于液体-液体之间的换热。	传热系数约为管式的 2 倍,传热效率高,结构紧凑,节省材料。入口烟气温度约 700 °C,出口温度达 360 °C。
	同流换热器	气-气热交换器,主要有辐射式和对流式 2 类。	体积较小,便于安装。允许入口烟气温度达 1 100 °C 以上,出口烟温约 600 °C,将助燃空气加热至 400 °C。
	陶瓷换热器	1 种新型的列管式高温热能回收装置,主要成分为碳化硅。	导热性能好,强度高,抗氧化、抗热震性能好。寿命长,维修量小,性能可靠稳定,操作简便。允许 1 550 °C 废热进入换热器,可以将助燃空气预热至 815 °C。
蓄热式热交换器	冷热流体交替流过蓄热元件进行热量交换,属于间歇操作的换热设备,分为显热储能和相变潜热储能。	相变潜热储能设备热量输出稳定,换热介质温度基本恒定,换热系统运行状态稳定。	显热储能热交换设备,适合于 450 ~ 1 100 °C 及以上的高温余热回收。相变潜热储能设备适合于低温余热回收。
热管换热设备	热管是 1 种高效的导热元件,通过全封闭的真空管内工质的蒸发和凝结相变过程和 2 次间壁换热来传递热量,将热量储存和换热合二为一。	导热性优良,传热系数高,具有良好的等温性,可控温度、热量输送能力强。	热管的工作温度分布广泛,在实际应用中用于工业余热回收的热管使用温度在 50 ~ 400 °C。
余热锅炉	本质上讲是 1 个可产生水蒸气的换热器。可利用高温烟气余热、化学反应余热、可燃气体余热等,生产高压、中压或低压蒸汽或热水,用于工艺流程或并入管网供热。同时,余热锅炉是低温汽轮机发电系统中的重要设备,为汽轮机等动力机械提供做功蒸汽工质。	余热锅炉把换热部件分散安装在工艺流程各部位,节省空间。	多应用于 350 ~ 1 000 °C 高温烟气余热回收。
高凝固点物料蒸馏余热锅炉	利用气相物料冷凝释放的潜热,可以设计成立式与塔直接相连,也可以设计成卧式且通过管线与精馏塔分开放置。	用于蒸馏冷凝器既可以保证高凝固点物料的安全操作,保证设备和管道不宜堵塞,又可副产一定量的低压蒸汽。	凝固点在 100 ~ 200 °C 的有机物料蒸馏过程。

热交换技术中热交换器种类多,且都具有一定使用条件,在生产过程中应结合生产条件、工艺流程,选择合适的换热器。

2.2 制冷制热技术

2.2.1 余热制冷技术

传统的制冷方式是压缩式制冷,利用外功压缩制冷,能耗较大。近年来可利用廉价能源和低品位热能吸收式或吸附式制冷系统快速发展,采用天然制冷剂(氨-水、溴化锂-水等)不含对臭氧层有破坏的 CFC 类物质,具有显著的节电能力和环保效益,在 20 世纪末得到了广泛的推广应用。

吸附式制冷和吸收式制冷是循环特性十分相似的制冷方式:解吸(发生)——冷凝——蒸发——吸附(吸收)如此循环往复。但是吸收式制冷的工质应为流动性良好的液体,如氨-水、溴化锂水溶液等;吸附式制冷吸附剂一般为固体介质,常使用分子筛-水、氯化钙-氨等工质对。

以溴化锂水溶液为工质的吸收式制冷系统应用最为广泛,它可以利用蒸汽、热水、工业废热、余热、地热等低品位热能为驱动进行制冷,节省电力能源,在工业余热利用方面具有一定的优势^[7,9]。目前溴化锂制冷技术在国内已经得到大规模的利用^[10-11]。

吸附式制冷可利用低至 50℃ 的热源,且不需要溶液泵或精馏装置,也不存在制冷机污染、盐溶液结晶以及对金属腐蚀等问题,适用范围广,可用于振动、倾颠或旋转等场所,能有效地利用低品位的热源。但由于其研究尚未深入,其运行性能还很难与其他制冷方式竞争^[12]。

2.2.2 热泵技术

工业生产中常常需要消耗大量的热能,同时又有许多低温热能如 50℃ 左右的热水或 70~90℃ 的低温蒸汽以废热形式被排放到环境中,热泵技术常被用来回收利用此类余热资源。例如电厂、橡胶和印染等行业的余热回收^[13-14]。

热泵技术包括压缩式热泵和吸收式热泵。压缩式热泵以消耗一部分高品质能(电能、机械能或高温热能)作为补偿,通过制冷机热力循环,把低温余热“泵送”至高温热媒。吸收式热泵可以直接利用各种热能驱动,不需要高温驱动热源即达到“自行”升温的目的,是一项很有效的节能措施^[15]。

压缩式热泵在化工行业的应用已经取得了一定成效,例如通过热泵机组提升锅炉给水品位,使

原有的锅炉给水由 20~25℃ 提升到 50℃,50℃ 以上的水,可以满足工业的蒸馏浓缩、干燥或建筑物采暖等对热水的需求。虽然吸收式热泵起步较晚,但是也取得了很大的进展,如燕山石油化工有限公司研究院与大连理工大学化工学院共同开发了回收工厂废热的吸收式热泵中试装置^[13]。

2.3 低温有机朗肯循环

有机朗肯循环(Organic Rankine Cycle,简称 ORC)不是用水作工质,而是使用低沸点的有机物为工质来吸收废气余热,汽化,进入汽轮机膨胀做功,带动发电机发电,系统简单紧凑,如图 1 所示。

采用这种发电方式对低温范围余热利用有显著优点:余热物流与工质不直接接触,有机工质密度较大,比容小,管道尺寸小,透平通流面积小,对较低温度热源的利用有更高的效率。并且选择合适的有机工质,可以节省过热器的制造费用,流程简单,还可降低环境对其影响^[16-17]。例如若选择干流体和等熵流体,可不设置过热器,直接将饱和的有机工质蒸汽送入透平机内膨胀做功后,在透平出口仍是干蒸汽,也不会对透平产生液滴侵蚀^[18-19]。

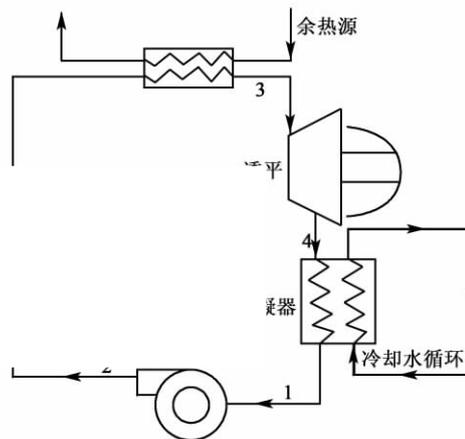


图 1 有机朗肯循环系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of organic Rankine cycle

通常有机工质的选择应满足如下条件:1)在相同蒸发温度和冷凝温度下,绝热焓降大;2)在相同条件下,换热系数大;3)工质临界参数、常压下沸点等热物理性质适宜;4)化学稳定性好、不分解、腐蚀性小、毒性小、环保、不易燃易爆;5)经济性好,即来源丰富,价格低。但是在实际应用中,工质很难同时满足上述全部条件,而且随着国际上对有机工质环保要求的日益提高,可用工质不断更新,因此需要根据热源类型及温度品位,综合考虑。采用不同

有机工质(或者有机工质的混合物),可回收不同温度范围的低温热能,系统简单,运行维护成本低^[20]。例如比较有代表性的是: Mago^[21]针对不同温度层次的热源,选用 R134a、R123a 和 R113 等烷基衍生物,苯,甲苯和水等干湿流体为工质,进行朗肯循环的热力分析和性能评价,得出对于温度小于 370 °C 的热源,低沸点有机工质的朗肯循环发电系

统比水蒸气发电效率更高,更经济。

ORC 系统由于其在低温余热回收上的突出优势,特别是用低温余热发电技术,在国外的一些发达国家,如日本、美国很早就有了应用,并且已经形成了比较成熟的技术,具体见表 2^[16,22]。而我国对 ORC 技术的研究起步较晚,对于 ORC 技术的利用目前尚处于研究开发阶段^[16-17]。

表 2 ORC 系统应用举例

Table 2 Applied examples of ORC system

ORC 应用	应用实例	有机工质	发电功率/kW
日本三菱重工	1977 年 11 月在大分县的九州电力公司建成大岳地热发电装置。	无数据	1 000
日本三井造船	在该公司的第二玉野发电厂建立了 ORC 发电装置。	无数据	500
美国机械技术公司	莫比尔石油公司托伦斯炼油厂的炼油生产装置中。	R113 烷基衍生物	总发电功率 2 140
以色列奥玛特(ORMAT)公司	建成了世界首座水泥厂以低温沸点有机物为工质的 ORC 纯低温余热发电站。	氯乙烷等低温沸点有机物	1 500

2.4 Kalina 循环

Kalina 循环是以氨水混合物为工质的循环系统,最简单的热力循环是一级蒸馏循环,即一定浓度的氨水溶液经过水泵加压、预热器升温之后,进入余热锅炉蒸发,形成过热氨水蒸汽进入透平膨胀做功,然后利用复杂的蒸馏冷却子系统解决氨水混合物冷凝问题,使透平乏汽重新形成一定浓度的工质溶液,再到达给水泵,完成一个循环,详见图 2^[23]。

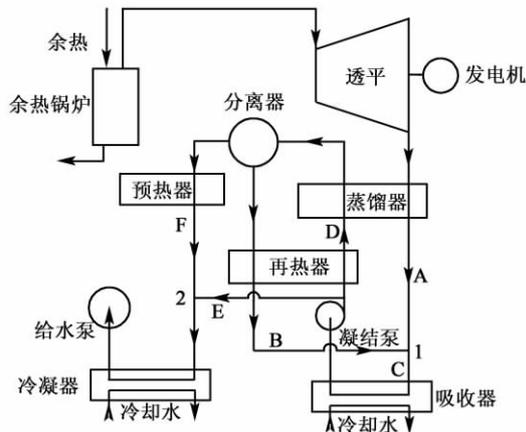


图 2 一级蒸馏 Kalina 循环原理图

Fig. 2 Principle of Kalina cycle

Kalina 循环以氨水混合物为工质具有很多优势:氨水的沸点比水低,能够利用水蒸气生产不能利用的废热,降低设备制造的花费。氨水来源广泛,价格较低。Kalina 循环在蒸发过程中工质等压变温蒸发,减少工质吸收过程中的不可逆性,而又

因为冷凝过程中的基本工质含氨低,克服混合工质有机朗肯循环冷凝损失大的弱点,能够更合理有效的回收利用低温余热^[24-26]。

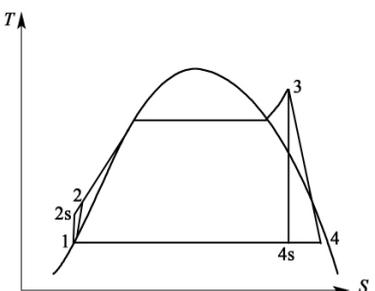
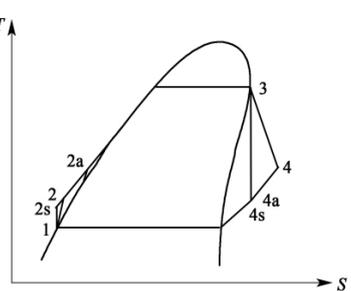
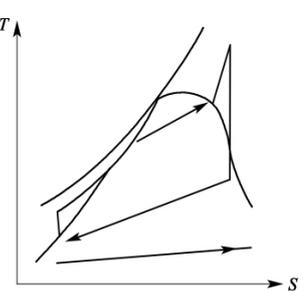
3 热力学原理分析

综上所述,热交换技术利用工业余热的方法只是通过换热设备将余热能量直接传给自身工艺的耗能过程,并没有改变余热的利用形式。制冷制热系统是利用逆向循环的能量转换系统,逆向循环以耗功作为补偿,通过制冷剂的循环把从低温热源吸收的热量(制冷量)和耗功量一起从高温热源放出。压缩式制冷机是以机械能或电能为补偿,吸收(吸附)式制冷机或热泵则是以热能为补偿。蒸汽余热发电,有机朗肯循环余热发电技术,Kalina 循环余热发电为代表的余热发电技术是典型的热功能转换技术,具体见表 3。

4 溴化锂制冷系统计算机模拟方法

计算机仿真模拟的研究方法正随着计算机技术的飞速发展而越来越显示出优越性^[28-30],在溴化锂制冷技术研究中的应用更证明这一研究方法的可行性。其它形式余热利用方式与溴化锂吸收式制冷基于相同热力学原理,所以在今后的研究也可以尝试采用计算机模拟方法,建立适宜的模型,克服现阶段研究过程中存在的试验周期长,设备制造投资大的缺点。

表 3 余热发电技术比较
Table 3 Comparison of waste heat power generation technologies

项目	余热蒸汽发电	有机朗肯循环	Kalina 循环
循环工质	干水蒸气	低沸点有机物	氨水混合物
<i>T-S</i> 图 ^[16, 27]			
优点	生产工艺成熟,水蒸气工质性质稳定,对设备无腐蚀性,增加设备运行周期。	循环工质的沸点比水的沸点要低。对热源的利用效率也有提高。ORC 在显热回收方面有更高的效率,可回收较多的热量。	在蒸发过程中工质等压变温蒸发,减少了工质吸热过程的不可逆性,实现了在较低压力下工质完全冷凝的问题。还可以将透平排气的部分余热用于分馏过程所需能量。
工作原理	蒸汽余热发电,有机朗肯循环余热发电技术,Kalina 循环余热发电技术的热力学原理相同,只是循环工质不同,系统越来越简单紧凑。		
效率	目前可达到 38~42 kWh/t 且由于水本身特性其效率提升可能性不大。	4~2 kW 不等,依赖热源的温度。	理论上循环系统的效率比朗肯循环高 15%。
缺点	不利于低温情况下做功。在余热温度不高的情况下就必须采取再加热或者减压闪蒸等技术手段来防止做功完毕过热蒸汽变成湿蒸汽。发电成本较高。	对于工质的研究还不成熟,如何选择合适的有机工质还具有一定的局限性。	氨-水混合工质在高温下的稳定性差,氨-水工质对材料的腐蚀性,循环排烟温度低于其露点温度,循环过程负荷突变特性使透平机效率降低。

采用计算机模拟系统首先应根据 MESH 方程建立数学模型,它将影响到仿真研究的稳定性、快速性和准确性。系统仿真模型有多种分类方法。总体上可分为动态模型和静态模型以及分布参数模型与集中参数模型 2 大类^[31-34]。在静态模型中又有集中参数和分布参数之区别。表 4 列出了这几种模型在溴化锂制冷系统应用的特点。

Khalid^[32] 基于物质和能量守恒定律建立了稳态仿真模型,即单效溴化锂制冷机过程模型。与一般的只考虑吸收器中的传热模型不同的是,该模型既考虑了吸收器中的传热过程也考虑了传质过程。Vliet^[35] 建立了双效溴化锂制冷机变工况性能的数学模型,讨论了不同的设计和操作参数对制冷机制冷量和热力系数的影响。Grossman^[36] 建立了低温

热源驱动的单级热泵变工况性能的计算机模型,研究了废热温度、冷却水温度和稀溶液循环量对机组的影响。我国姚寿广^[37] 也建立了单、双效溴化锂吸收式制冷机运行的数学模型,开发和设计了变工况性能的模拟优化程序。

溴化锂制冷机热力参数多,手工设计工作量异常复杂繁重,灵活性差,精度不高,针对这种情况,国内外已经开发出了多套用于溴化锂制冷机设计的软件。常见软件见表 5。

5 结语与展望

节能减排,提高能源的利用率,是解决当前面临的能源危机最有效的措施,也是世界能源发展战

表 4 溴化锂制冷系统数学模型

Table 4 Mathematical models of Li-Br refrigeration system

项目	静态集中参数模型	静态分布参数模型	动态模型
优点	最简单的静态模型,它只需要通过代数方程和少量一阶微分方程来描述制冷系统中的工作特性。	可计算出制冷剂与溶液在各部件中的分布量,由于考虑到系统的热容,以及工质的不同流动状态,大大提高了所描述系统的正确性。	分布参数模型能比较真实地描述系统中各部件的运行特性。特别是适应于开停机,变负荷等瞬时情况。
缺点	研究重点在于系统达到稳定工况时,各部件的相互匹配关系,具有一定局限性。	仅适应于相对稳定的工况,而忽略状态点的变化。	模型建立需要许多的微分方程,还要分析系统中各部件有关运行参数的相互耦合关系,进行解耦,大大增加了计算工作量。
研究对象	单效溴化锂系统	一些比较重要、而且在空间方向上参数变化量比较大的部件	开机、停机或变负荷等瞬态工况剧烈变化过程。
基本假设	1) 整个系统中只有冷凝压力和蒸发压力 2 种压力状态; 2) 发生器和吸收器中的工质都为平衡状态。	1) 每一区系统中只有冷凝压力和蒸发压力两种压力状态; 2) 发生器和吸收器中的每一区工质都为平衡状态。	1) 管内径与壁厚一致,忽略沿管长方向的热传导; 2) 忽略管内的流动损失,冷冻水和冷却水流量稳定; 3) 忽略容器壁、管壁的热容量,容器内的溶液被认为是均匀一致的; 4) 除热交换器外,不考虑管壁的传热。忽略散热损失; 5) 吸收器、发生器、低温发生器和冷凝器等容器中的压力是均匀一致的 ^[29] 。
输入参数	溶液泵的流量、外部热交换流体的质量流率、外部热交换流体的进口温度和热交换器的尺寸。	溶液泵的流量、外部热交换流体的质量流率、外部热交换流体的进口温度和热交换器的尺寸。	分区流量、外部热交换流体的质量流率、外部热交换流体的进口温度和热交换器的尺寸。
输出参数	制冷剂的质量流率、各状态点的热力学参数、热交换量和系统 COP 值。	制冷剂与溶液在各部件中的分布量。	开机、停机或变负荷等瞬态工况剧烈变化时制冷剂与溶液在各部件中的分布量。
控制方程	每个部件的质量方程和能量方程	每个部件的质量方程和能量方程	动态模型的控制方程包括质量方程、能量方程和动量方程,由于含有时间项,方程形式比较复杂。

略之重要内容。

首先,应该推广应用中高温余热回收利用技术,尤其是提高中小企业余热利用率,推进余热利用技术与工艺节能相结合,优化工艺系统及其相应的余热利用技术。例如,高凝固点物料的常压沸点都很高(如吩噻嗪)沸点达到 380 ℃ 以上,凝固点高达 187 ℃,因此精馏过程中常常需要减压。这就需要真空系统在真空缓冲罐与塔顶冷凝器之间设计物料捕集器,使从精馏塔冷凝器物料出口被真空泵抽出的物料凝固在捕集器内的冷却盘管上,以保护真空系统不被高凝固点物料堵塞和减少物料损失。这就需要用到比循环水温度更低的冷媒(10 ℃ 以下)。因此,可以采用溴化锂吸收式制冷机,将高凝固点物料在塔顶冷凝器上副产的低压蒸汽回收利

用。产生低温冷媒水(10 ℃ 以下)作为精馏真空系统物料捕集器的冷媒。这样既可实现能源回收再利用,还可以生产低温冷却水,供工艺流程需要的单元使用。

其次,目前我国应用较多的主要有余热锅炉-低温汽轮发电技术,适用于利用 350 ℃ 以上的中高温余热,但对于低温余热利用率不高。从技术发展角度看,低温有机朗肯循环是利用低温工业余热、太阳能和地热能的经济有效方案,但目前我国尚未普及应用,因此深入开展低温有机朗肯循环余热发电和 Kalina 循环余热发电技术的开发研究,并积极推广应用,提高低温工业余热、地热和太阳能利用率。

最后,计算机仿真模拟在溴化锂制冷机制造优化过程中的应用,有效地克服了溴化锂制冷机研究

表 5 溴化锂制冷机软件性能
Table 5 Introduction of Li-Br refrigeration system simulation software

分类	适应范围	优点	缺点
WLBAR 系统模块化设计软件 ^[30]	单效机组	该模型由 7 个模块(用户模块、设计选择模块、基础热物性参数转换模块、基础参数设计计算模块、热力系统计算模块、热力系统优化模块及结果输出模块。)组成,7 个模块自成体系,即可独立运行,又可搭接使用。	在基础设计上仍然存在诸如设计灵活性差、计算繁琐等问题。
热管废热单效溴化锂制冷机的计算机辅助设计计算程序 ^[38]	双效机组	过程中采用最小二乘法拟合溴化锂等物性参数,简化设计计算,提高设计精度。	由于双效制机的结构复杂,参数假设较多。
双效机辅助设计程序 ^[39]	双效机组	双效溴冷机热力计算任务与方法与单效溴冷机的计算基本相同。	只是由于增加了高压发生器,故在设计参数的确定上须考虑高压发生器中的压力、高低压发生器中的放气范围,以及高温区溴化锂溶液值的确定等问题。
ABSIM 软件 ^[40]	各种循环结构	可以用来研究各种循环结构,计算应用各种工质的循环运行参数和性能系数,并进行分析比较。	制造循环结构的成本较高,推广应用有较大难度。

制造过程中制造成本高,试验投资大,设计周期长的问题。在今后的研究过程中应该积极推广计算机仿真模拟研究方法在其它余热回收方式中的应用,降低设计制造费用,提高余热利用率。

参考文献:

[1] 蔡九菊,王建军,陈春霞,等. 钢铁企业余热资源的回收利用[J]. *Iron and Steel* 2007, 42(6): 1-7

[2] 崔民选. 中国能源发展报告[M]. 北京: 社会科学文献出版社 2010

[3] 王莉,王玲. 能源利用与环境保护[J]. *化工进展*, 1998, (2): 35-38

[4] 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, 29(166): 123-128

[5] Bureau of Energy Efficiency. Waste heat recovery[OL]. <http://www.em-ee.org/>

[6] Energy efficiency guide for industry in Asia. Thermal energy equipment: Waste heat recovery[OL]. <http://www.energyefficiencyasia.org>

[7] TALBI M,AGNEW B. Exergy analysis: An absorption refrigerator using lithium bromide and water as the working fluids[J]. *Applied Thermal Engineering* 2000, 20: 619-630

[8] MISRA R, SAHOO P, GUPTA A. Thermo-economic evaluation and optimization of a double-effect H₂O/LiBr vapour-absorption refrigeration system[J]. *International*

Journal of Refrigeration 2005, 28: 331-343

[9] ASSIL ZADEH F, KALOGIROU S A, ALI Y, et al. Simulation and optimization of a LiBr solar absorption cooling system with evacuated tube collectors[J]. *Renewable Energy* 2005, 30: 1143-1159

[10] 谭志明,罗运禄. 溴化锂吸收式制冷机及其在橡胶工业中的应用[J]. *橡胶技术与装备*, 1993, (5): 43-46

[11] 王士永. 应用溴化锂制冷技术回收炼油厂低品位热能[J]. *石油炼制与化工* 2007, 38(3): 57-61

[12] 王如竹,王丽伟,吴静怡. 吸附式制冷理论与应用[M]. 上海: 同济大学出版社 2007

[13] 李巍,梁爱民,周淑芬. 吸收式热泵技术在合成橡胶领域的应用[J]. *中外能源* 2006, 11(5): 77-80

[14] 李岩,付林,张世刚,等. 电厂循环水余热利用技术综述[J]. *建筑科学* 2010, 26(10): 10-14

[15] KIM B, PARK J. Dynamic simulation of a single-effect ammonia-water absorption chiller[J]. *International Journal of Refrigeration* 2007, 30: 535-545

[16] 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(163): 387-391

[17] 张红. 用低沸点工质的朗肯循环(ORC)方法回收低品位工业余热[J]. *节能技术* 2004, 11(268): 22-24

[18] HUNGT C. Waste heat recovery of organic Rankine cycle using dry fluids[J]. *Energy Conversion and Management* 2001, 42: 539-553

[19] YAMAMOTO T, FURUHATA T, ARAI N, et al. Design

- and testing of the organic Rankine cycle [J]. *Energy*, 2001, 26: 239 – 251
- [20] HUNG T, SHAI T, WANG S. A review of organic Rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat [J]. *Energy*, 1997, 22: 661 – 667
- [21] MAGOP J, CHAMRA L M, SRINIVASAN K, *et al.* An examination of regenerative organic Rankine cycles using dry fluids [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28: 998 – 1 007
- [22] HETTIARACHCHI H M, 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, 1: 698 – 1 706
- [23] NAG P, GUPTA A. Exergy analysis of the Kalina cycle [J]. *Applied Thermal Engineering*, 1998, 18: 427 – 439
- [24] BOMBARDA P, INVERNIZZI C M, PIETRA C. Heat recovery from Diesel engines: A thermodynamic comparison between Kalina and ORC cycles. [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2010, 30: 212 – 219
- [25] OGRISECK S. Integration of Kalina cycle in a combined heat and power plant, a case study [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2009, 29: 2 843 – 2 848
- [26] SHI X, CHE D. A combined power cycle utilizing low-temperature waste heat and LNG cold energy [J]. *Energy Conversion and Management*, 2009, 50: 567 – 575
- [27] 吕灿仁, 严晋跃, 马一太. Kalina 循环的研究和开发及提高效率的分析 [J]. *热动力工程*, 1991, 1(31): 1 – 6
- [28] 解国珍, 陈向东, 李德英, 等. 溴化锂吸收式制冷系统特性的仿真模拟研究 [J]. *流体机械*, 2005, 33 (增): 144 – 148
- [29] 陆震, 王磊. 吸收式制冷系统仿真模型的研究与发展 [J]. *流体机械*, 2001, 29 (2): 58 – 62
- [30] 周建, 陈海平, 辛玲. 溴化锂吸收式制冷机模块设计及优化 [J]. *华北电力大学学报*, 1997, 24 (2): 56 – 62
- [31] ARGIRIOU A, BALARAS C, KONTOYIANNIDIS S, *et al.* Numerical simulation and performance assessment of a low capacity solar assisted absorption heat pump coupled with a sub-floor system [J]. *Solar Energy*, 2005, 79: 290 – 301
- [32] JOUDI K A, LAFTA A H. Simulation of a simple absorption refrigeration system [J]. *Energy Conversion and Management*, 2001, 42: 1 575 – 1 605
- [33] LEVY A, JELINEK M, BORDE I. Numerical study on the design parameters of a jet ejector for absorption systems [J]. *Applied Energy*, 2002, 72: 467 – 478
- [34] WILLATZEN M, PETTIT N, PLOUG-SORENSEN L. A general dynamic simulation model for evaporators and condensers in refrigeration [J]. *International Journal of Refrigeration*, 1998, 21: 398 – 403
- [35] VLIET G C, LAWSON M B, LITHGOW R A. Water-lithium bromide double-effect absorption cooling analysis [R]. Texas Univ: Austin Center for Energy Studies, 1980
- [36] GROSSMAN G, CHILDS K. Computer simulation of a lithium bromide-water absorption heat pump for temperature boosting in Oak Ridge National Lab, TN (USA), 1983
- [37] 姚寿广. 溴冷机变工况性能模拟 [J]. *华东船舶工业学院学报*, 1995, 9 (2): 81 – 85
- [38] 张卫华, 贺小华, 陈伟. 热管废热溴化锂吸收式制冷机计算机辅助计算 [J]. *流体机械*, 1999, 27 (12): 43 – 45
- [39] 袁秀玲, 陈志明, 金苏敏. 双效溴化锂吸收式制冷机的计算机辅助设计及其参数选择分析 [J]. *低温工程*, 1991, 63 (5): 13 – 18
- [40] 陆震. 吸收式热泵国际最新动态 [J]. *制冷技术*, 1996, 4 (1996): 5 – 9