

Methods and Application of
Condensing Heat Recovery and Optimization
of Cooling and Heating Sources

冷凝热回收与 冷热源优化的理论及方法

龚光彩 著



科学出版社

冷凝热回收与冷热源优化的 理论及方法

龚光彩 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

冷凝热回收等低品位能源利用及冷热源优化是重要的绿色能源技术,也是绿色建筑或可持续工程的关键技术。本书系统地介绍了冷凝热回收的发展及研究现状,介绍了烟及烟成本分析方法、有限时间热力学及动态仿真等方法,分析研究了典型单冷机组、典型多功能热泵机组冷凝热回收的相关技术、理论与方法。考虑冬季气候对热泵应用的影响,对与热泵热回收(多功能)相关的结霜问题及防霜开展了研究。在冷凝热回收(单冷、热泵装置)、热泵研究及烟成本方法研究等基础上,形成了建筑整体节能的优化设计方法;同时对可作为冷热源优化方法之一的各类低品位能源利用给出了新的评价方法。

本书可作为土建类专业、能源类专业及环境或规划类专业的相关教师、管理人员、高年级本科生、研究生等的参考书,也可供科研院所、设计院及企业研发中心等的研究与设计人员阅读使用。

图书在版编目(CIP)数据

冷凝热回收与冷热源优化的理论及方法/龚光彩著. —北京:科学出版社, 2013. 1

ISBN 978-7-03-035836-3

I. ①冷… II. ①龚… III. ①蒸发热-废热回收-研究 IV. ①X706

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 249121 号

责任编辑:牛宇锋 谷 宾 / 责任校对:朱光兰
责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 1 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2013 年 1 月第一次印刷 印张: 24

字数: 479 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

空调冷凝热回收是 20 世纪 90 年代中后期才在我国兴起的技术,起初在广东、广西及湖南等地发展,现在国内有很多地方也开始推广这项技术(包括多功能热泵技术)及相关产品。作者从 1997 年即与有关企业合作开展冷凝热回收方面的研究,其间经历了许多,也感受颇多。尽管我们 2000 年前在珠海等地有不少成功的冷凝热回收案例,2001 年在长沙完成迄今最大的单级离心制冷机组(500 冷吨左右)冷凝热回收的技术改造(目前长沙已有多例成功,包括至少两例离心制冷机组,且一台是 R134a 工质),但直到 2005 年,我们向有关酒店及企业推广时仍感到困难重重。幸运的是,1997 年以来,我们已经先后完成了螺杆式、活塞式及离心式制冷机组的热回收试验,特别是通过与朱金武先生长期合作,2003 年至 2004 年底又完成了一台多功能热泵空调热回收试验与一台一百千瓦左右制冷量的热泵装置热回收系统试验(当时的试验地点选择在湖南制药厂的一个废弃车间里)。

从 2005 年我国大力提倡的“循环经济”,发展到今天的“两型社会”、“低碳经济”、“绿色经济”等,市场已经越来越认同这样的节能环保技术。正是国家的这种变化,给我们的研究带来了巨大的机会。我们 1997 年开始研究单冷机组的冷凝热回收技术,2003 年开始研究多功能热泵的相关技术。本书是对我们前一阶段相关工作的总结。本书的面世,是我们课题组共同工作成果的结晶,研究生马扬、常世军、曾巍、何君、王立平、周建勇、吕东彦、王洪金、陈飞虎、吴蓉、王莹、王瑞、易勇兵、苏欢、李孔清、唐瑾晨、冯启辉、田彩霞等为本书的出版做出了许多贡献。苏欢、王立平参与了第 2、3、6 章的撰写;陈飞虎参与了第 3、4 章的撰写;唐瑾晨参与了第 5 章的撰写;绪论中插图则由田彩霞完成。

本书对冷凝热回收技术及其应用进行了相对系统的阐述。冷凝热回收(单冷或热泵装置)是重要的冷热源技术之一,故在推广应用时应作为冷热源组成的方式之一来考虑。考虑到冷凝热回收装置的特点及其应用情况,本书首先介绍了冷凝热回收技术研究与发展状况,以便让读者有一个宏观的了解。在第 2 章中,介绍了本书涉及的热力学与传热学的基础知识,除了介绍大家都较为熟悉的焓方法之外,还特别补充了有限时间热力学的基本理论及其应用工具,这一部分知识对于人们理解动态过程及系统整体优化是有帮助的。第 2 章的热力学部分与第 3~6 章均有关联,而数值传热部分则主要与第 5 章结霜过程关联。第 3 章着重介绍了单冷机组冷凝热回收的相关知识,本书的思路之一是坚持理论与实际相结合,本章除介绍冷凝热回收系统一般形式外,还针对典型的容积式或离心式单冷机组,分别介绍了实验(实测)、焓效率分析、动态仿真以及有限时间热力学分析研究,这实际上提供了不同的研究模型,读者可以相互比较,其中每一个方法都有其价值,可以相

互检验。紧接着第4章介绍了典型热泵装置热回收试验及相关研究,还特别地介绍了一个复合冷凝/蒸发四功能装置的试验及其仿真研究,包括工质替代时热回收的仿真研究等。鉴于南方高湿地区冬季风冷热泵装置易于结霜的情况,风冷热泵装置热回收时必须考虑如何有效防融霜。作为与热泵装置冷凝热回收相关的冷热源技术之一,将结霜与防霜的部分研究和想法放到第5章中,读者也可以比较更多的结霜与融霜方面的研究。有了前面几章的铺垫,第6章的安排就顺理成章了,本章的思想是希望冷凝热回收及热泵在内的各种冷热源技术或装置等元素能够形成一个整体的节能设计方法,冷热源优化应当与围护结构作为一个整体来考虑,这是绿色或可持续建筑的方向,本章所提供的焓成本设计方法或许有所裨益;同时本章还提供了几个典型案例。还有,低品位能源或余热是最有可能在建筑领域消化或获得应用的,从事建筑节能工作的科技工作者几乎每天都在与它打交道,所以本章提供了一个有效、简便评价这一类能量的新方法,即“余热回收/低品位能源利用的贡献指数”,相信读者对此一定有自己独到的见解。最后是结束语,表述了自己的一些看法。对于本书的全部内容,读者可以根据自己的需要选读。

感谢美国海军大学 C. Wu 教授、加拿大滑铁卢大学 X. Li 教授、瑞典皇家理工学院 J. Yan 教授、日本九州大学赤司泰义教授等,正是通过与国际知名学者的交流与合作,作者感受到很大的鼓舞。

感谢江亿院士、吴元炜教授、黄翔教授、周子民教授等在我们相关成果的鉴定会上给予的鼓励和支持。感谢中国科技大学陈则韶教授,与陈老师的交流获益良多。还要特别感谢我视为团队成员的朱金武先生、聂民先生、刘华武先生、王卫平先生、刘清银先生、袁博洪先生、杨启龙先生、唐壁奎先生、易治平先生、胡湘峰先生等,他们与我的其他朋友们一道,给予我长期的支持。感谢黄维高级工程师、张红彦高级工程师、丁力行教授、袁建新教授、尹建新教授、曹阳教授、袁东立教授、孙延勋教授、陈超教授、陈焕新教授、聂美清教授、龚延风教授、张春安教授、贾晶先生、王付立先生等的相关支持。

作者的研究工作先后得到国家 863 计划(2006AA05Z229)、国家国合专项(2010DFB63830)、湖南省科技重大专项(2010FJ1013)、湖南省高新技术重点计划(2008GK2016)、湖南省国合重点计划(2009WK2008)及住建部标准定额司计划、湖南省住建厅科技计划等大力支持,在此一并致谢。

最后,感谢妻子方燕红女士,她是我工作的最好见证。

希望本书的研究能够对读者有一定价值,囿于本人的见识和水平,全书文字及内容难免有不足之处,恳请广大读者批评指正。

龚光彩

2011年4月于长沙岳麓山

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
参考文献	7
第 2 章 热力学与数值传热基础	10
2.1 概述	10
2.2 冷热源设备与优化的热力学基础	14
2.2.1 系统、环境与焓	14
2.2.2 焓平衡与焓损失	23
2.2.3 焓方法与建筑冷热源设备焓分析	24
2.3 内可逆循环与有限时间热力学基础	30
2.3.1 有限时间热力学的理论特征	32
2.3.2 内可逆卡诺循环模型	33
2.3.3 内可逆卡诺循环的效率	34
2.3.4 CYCLEPAD 简介	36
2.3.5 内可逆循环在 CYCLEPAD 中的实现	39
2.4 数值传热基础	42
2.4.1 传热与流动基本控制方程	42
2.4.2 传热与流动模拟方法	45
2.4.3 翅片数值传热基础	47
2.5 本章小结	59
参考文献	59
符号表	61
第 3 章 单冷机组复合冷凝热回收与热力学仿真	62
3.1 单冷机组冷凝热回收技术研究进展	62
3.2 冷凝热回收系统形式简介	63
3.2.1 水冷式空调冷凝热回收系统	63
3.2.2 风冷机组冷凝热回收	65

3.3	单冷机组复合冷凝热回收技术	65
3.3.1	能流分析	67
3.3.2	焓流分析	68
3.4	容积式单冷冷水机组复合冷凝热回收技术性能比较	70
3.4.1	COP、焓效率的变化趋势	70
3.4.2	对制冷机组运行状况的影响	76
3.5	离心式单冷机组复合冷凝热回收技术性能比较	76
3.5.1	COP、焓效率的变化趋势	76
3.5.2	对冷热源机组运行参数的影响	80
3.5.3	对冷热源机组 EER、焓效率等性能参数的影响	81
3.6	基于 CYCLEPAD 的单冷机组复合冷凝过程热力学仿真	81
3.6.1	复合冷凝模式的时间序列模型	81
3.6.2	传统的单冷凝模式的 CYCLEPAD 模型	86
3.6.3	复合冷凝模式制冷循环的 CYCLEPAD 模型	93
3.6.4	复合冷凝模式制冷循环的分析	96
3.6.5	复合冷凝模式制冷循环仿真结果分析	100
3.7	单级离心式制冷机组复合冷凝过程动态仿真	102
3.7.1	复合冷凝过程的数学模型	102
3.7.2	单冷机组复合冷凝过程热力学仿真模型	104
3.7.3	计算结果及验证	106
3.8	不可逆卡诺制冷循环复合冷凝过程的有限时间热力学优化	111
3.8.1	物理模型	112
3.8.2	数学模型	113
3.8.3	优化模型求解	115
3.8.4	数值求解	118
3.8.5	数值算例	118
3.9	本章小结	127
	参考文献	128
	符号表	129
第 4 章	热泵装置复合冷凝热回收与热力学仿真	131
4.1	风冷热泵装置复合冷凝热回收概述	131

4.2 复合冷凝热回收的多功能热泵及热力学分析	135
4.2.1 多功能热泵热水空调机组实验装置	135
4.2.2 多功能热泵热水空调装置的热力学性能分析	138
4.2.3 多功能热泵热水空调机组实验装置性能试验	149
4.3 复合冷凝多功能热泵系统热力学仿真	158
4.3.1 四功能热泵热水空调机组实验装置	158
4.3.2 基于焓分析方法的复合冷凝多功能热泵系统热力学仿真	163
4.3.3 复合冷凝/蒸发四功能热泵热水空调机组热力学性能试验	183
4.3.4 替代工质复合冷凝过程仿真	190
4.4 本章小结	193
参考文献	193
符号表	195
第5章 风冷热泵装置的结霜与防霜	197
5.1 结霜与融霜研究概述	197
5.1.1 结霜问题研究进展	199
5.1.2 除霜方式的研究进展	202
5.1.3 除霜传热过程的研究进展	205
5.2 结霜工况的有限时间热力学与热泵循环性能研究	207
5.2.1 低温高湿环境下结霜研究的意义	207
5.2.2 内可逆模型在变工况热泵性能研究中的应用探讨	207
5.2.3 CYCLEPAD 仿真软件与变工况热泵性能研究	209
5.2.4 空气源热泵结霜工况性能理论基础	210
5.2.5 基于 CYCLEPAD 工具的结霜工况热泵性能分析	220
5.3 基于量纲理论的霜生长规律研究	225
5.3.1 量纲理论及其应用	226
5.3.2 结霜量关系式研究	227
5.3.3 空气源热泵结霜工况的实验研究	234
5.4 翅片结霜过程的数值模拟	243
5.4.1 翅片干工况显热计算模型与方法	243
5.4.2 翅片霜层分布模型及计算结果	264
5.4.3 分析与讨论	280

5.5 防霜与热源塔技术简介	282
5.6 本章结论	284
参考文献.....	284
符号表.....	289
第6章 整体节能与冷热源优化设计方法.....	293
6.1 建筑整体节能设计方法概述	293
6.1.1 概述	293
6.1.2 常用优化与评价方法	295
6.1.3 建筑冷热源优化分析模型分类	308
6.2 基于焓成本的冷热源优化方法与决策软件	310
6.2.1 建筑冷热源系统基本焓成本模型.....	310
6.2.2 基于焓成本分析方法的冷热源决策优化算法	312
6.3 典型冷热源优化模式	334
6.3.1 建筑冷热源模式及其现状	334
6.3.2 典型建筑冷热源基本应用模式	338
6.3.3 建筑冷热源模式示例	340
6.4 余热回收与低品位能源利用评价新方法	359
6.5 本章小结	364
参考文献.....	364
符号表.....	368
结束语.....	370
参考文献.....	374

第 1 章 绪 论

当前发达国家建筑能耗占其国内总能耗的 30%~40%，而我国目前建筑能耗也达到了全国总能耗的 27%左右，并且呈持续增长的趋势。按照发达国家建筑能耗增长的历程来看，我国目前正处在建筑能耗高速增长的时期。建筑能耗中的暖通空调能耗占 50%~60%，另外，建筑热水供应能耗(15%以上)也在建筑能源消耗中占有较大比例。随着经济的高速发展，可以预见我国建筑能耗，特别是暖通空调及卫生热水能耗所构成的建筑冷热源能耗占国内总能耗的比重会越来越大。

然而由于目前能源需求日益增大，能源不足这一矛盾日益尖锐。我国从 1993 年开始成为能源净进口国，能源的短缺严重影响了我国经济的发展。与此同时，我国目前能源利用率较低，还不到日本能源利用率的一半，因此研究新型的节能技术具有重要意义。若能够对全国总能耗中占有重要比重的建筑能耗，特别是暖通空调及卫生热水能耗构成的建筑冷热源能耗加以研究，提高其能源利用率，作用将是巨大的。

从建筑冷热源的发展角度来看，满足降温需求的冷源前些年(20 世纪 90 年代中期以前)大多采用冷水机，即采用单独的水冷(冷却塔)方式；后来又有了采用风冷方式的冷水或热泵机组；最近这些年又开始推广土壤源的热泵技术。对于冬季有采暖需求的热源来讲，早期的热源大多采用燃煤锅炉。在 20 世纪 90 年代初，由于环保的需求，城市里燃煤锅炉开始退出，发展了燃油、燃气或电锅炉等。另外，由于建筑物冬夏都存在卫生热水的需求，热源除满足采暖需求外还需满足卫生热水的需求。卫生热水的热源许多场合与空调采暖用热源结合在一起，有时又互相分开，其设备形式或种类与采暖热源是相同的，但容量不完全相同。

我国自进入 20 世纪 90 年代中后期，典型的冷热源应用有两种模式：模式一是制冷机组(可以满足夏季降温空调需要)+油、气、电锅炉(可以满足冬季采暖与全年卫生热水及少量蒸汽需要)；模式二是热泵/制冷机组(可以满足夏季降温空调及部分冬季采暖需要)+油、气、电锅炉(满足部分冬季采暖与全年卫生热水及少量蒸汽需要)。在以上两个模式当中，足够容量的传统油、气、电锅炉是必不可少的(即使模式二中采用了热泵技术，但若其未覆盖卫生热水的功能，锅炉仍为必需)。如若采用多功能的冷凝热回收与热泵综合利用技术(包括地热、热源塔等)，则将在很大程度上取代目前的各种生活热水锅炉，与制冷机组一起共同构筑出系列新型的建筑冷热源技术。这也将改变目前冷热源运用的基本模式，对未来建筑的冷热源发展方向具有很大的影响。预计将来建筑冷热源的典型应用模式也有两种：模式一是制冷(含地热)机组(可以满足夏季降温空调需要)+热泵装置(含地热)+冷凝

热回收即多功能热泵(热泵空调满足冬季采暖,热泵装置+冷凝热回收满足全年卫生热水需要,如需蒸汽锅炉,则容量大为降低);模式二是制冷/热泵(含地热或热源塔)空调机组(可以满足全年降温或采暖空调需要)+热泵装置(含地热)+冷凝热回收(多功能热泵)(热泵装置+冷凝热回收满足全年卫生热水需要,如需蒸汽锅炉,则容量大为降低)。这将是基于多功能热泵技术的新型冷热源(复合能源)基本应用模式。采用热泵装置及冷凝热回收(多功能)后,在无须蒸汽的场所,可以替代传统的煤、油、气及电锅炉;在需要蒸汽的场所,蒸汽容量也大为降低。同时,由于地热及太阳能与热泵技术的进一步发展,将形成更加合理的复合能源形式的建筑冷热源技术,也就是说,建筑物冷热源将会有新的优化组合模式,这将使运行成本大为降低且初投资控制在合理的范围内。

正因为如此,我国目前生产的各类热泵与制冷机组达到 7000 万台左右(2009 年),其冷凝热绝大部分没有有效利用。而我国绝大部分建筑物卫生热水能耗达到 15% 左右,冷凝热回收可以替代这一部分卫生热水所需要的能耗(制冷期间完全替代,在过渡季节及冬季,处于热泵热水工况运行时使用该部分能量生产卫生热水的效率也大大高于使用油、气、电热水装置)。当前我国能源不足与日益增大的能源需求之间的矛盾日益尖锐,建筑冷热源在能源总消耗所占的比重日益加大,因此,从能源利用即高效节能的角度来看,研究基于冷凝热回收利用的多功能热泵技术及其与太阳能、地热、空气能、热(能)源塔技术的各种复合能源技术有重要意义。这也正是本书的目的之一。

如前所述,冷凝热回收技术是将空调排放的废热予以回收利用,用来制取卫生热水或生产工艺热水,不仅变废为宝,减少大气环境热污染,而且可以降低热水供应系统运行费用,同时也提高了空调的运行效率。对于冷凝热回收技术的研究国外起步比较早,早在 1965 年就有 Healy 等首先提出将居住建筑空调冷凝热作为免费的热源进行热水供应的设想^[1],20 世纪 70 年代以后,Stuij、Douglas 等对热回收热泵的可行性进行了实验研究^[2,3],新加坡南洋理工大学的 Ying 指出通过回收冷凝热加热生活热水对空调器的性能影响并不大^[4],Goldschmidt^[5]和 Lee^[6]等研究了回收的冷凝热数量、机组的出水量及综合能源利用系数等。随着计算机技术的发展和普及,在实验研究的基础上人们开始用数值模拟的方法对冷凝热回收技术进行分析,以 Mason^[7]、Toh^[8]、Bong^[9]和 Baxter^[10]等为代表,对冷凝热回收系统的性能和运行特性进行了相关研究和分析,并在夏威夷进行了大规模推广,研究和推广结果显示其节能性非常显著。虽然 CARRIER 和 TRANE 公司都开发了双管束冷凝器热回收技术,但由于该技术原理上存在着根本缺陷,热回收效率有限,未能在市场上广泛推广。我国在 20 世纪 60 年代就有回收制冷机冷凝废热的设想,但发展较慢,90 年代后期我国开始了有关冷凝热回收技术应用方面的研究。近年来电力供应紧张和电力需求不断增加的矛盾,使节能成为焦点问题,冷凝热回

收技术引起了人们的广泛关注。

目前国内外关于冷凝热回收技术的成果及专利已有不少,典型示意图如图 1.1~图 1.4 所示,已获得的专利成果有 60 余项(截止到 2009 年),其中发明专利 17 项,实用新型 44 项。主要集中在两大方面:一方面是单冷机组的冷凝热回收技术,其中发明专利 7 项,实用新型 19 项;另一方面是关于热泵装置的冷凝热回收技术,此技术又分为两类,一类是能实现空-水冷灵活转换的复合冷凝热回收技术,其中发明专利 1 项,实用新型 6 项,另一类是涉及专有的换热技术或装置的冷凝热回收技术,其中发明专利 8 项,实用新型 13 项。除上述两个方面,另外还有利用相变材料回收冷凝热以及其他有关新型热回收冷凝器和研究冷凝热回收技术的新方法,包括发明专利 4 项,实用新型 6 项。

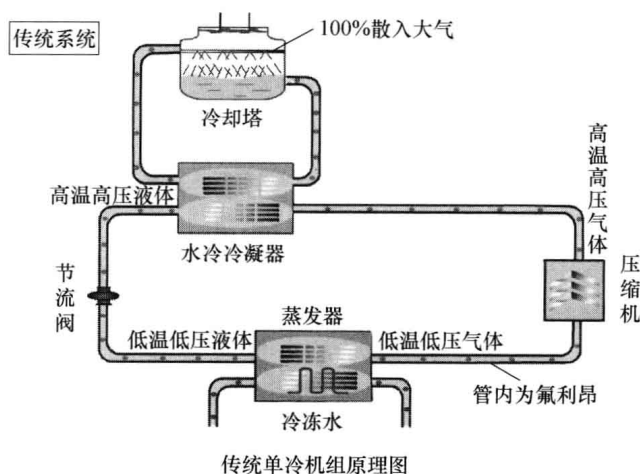


图 1.1 传统单冷机组示意图

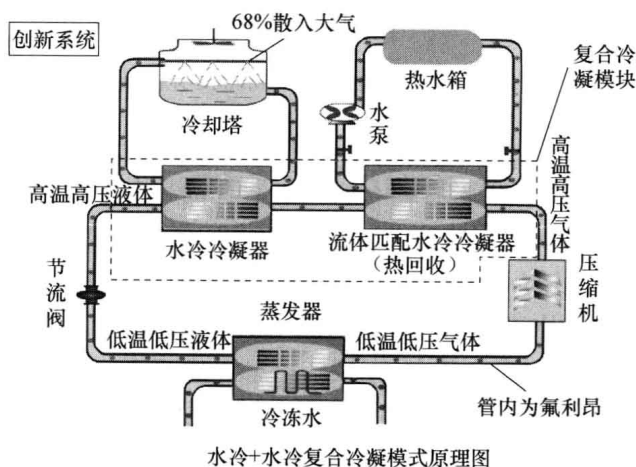


图 1.2 单冷机组冷凝热回收示意图

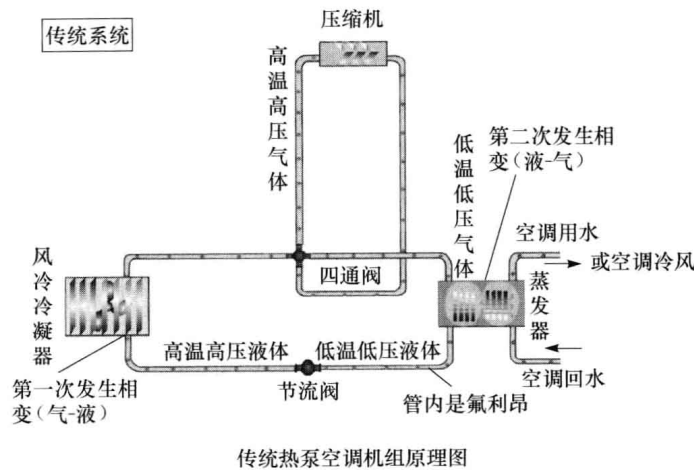


图 1.3 传统热泵空调机组示意图

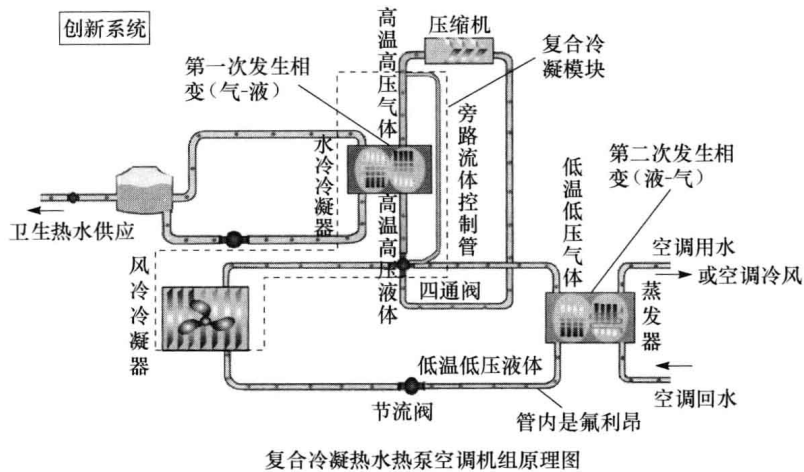


图 1.4 热泵空调冷凝热回收示意图

单冷机组的冷凝热回收根据冷凝热回收的形式主要分为直接式和间接式。直接式是指制冷剂从压缩机出来后进入热回收器直接与自来水换热制备生活热水，包括单冷凝器型^[11]和双冷凝器型^[12]。这种形式存在着明显的不足，冬天制备生活热水时供热要停止，目前一般不采用。间接式是指利用常规空调的冷凝器侧排出的高温空气或 37℃ 的水来加热制备生活热水。间接式由于要增加的设备比较多，换热效率比较低，不易推广。其中，直接式可又分为直流式和循环式，直流式是指自来水一次性经过热回收器之后就可获得较高温度的生活热水以供用户使用。由于直流式的水流量小，要求热回收器具有很高的换热效率，成本高，目前也有一些应用。循环式是指自来水经过热回收器之后进入蓄热水箱，然后通过热水泵循环

经过热回收器进行热交换后来获得较高的生活热水温度,最后由蓄热水箱提供生活热水到用户。循环式对热回收器的要求比直流式低,可根据用户需求提供生活热水,易于控制且可靠性强。

目前对单冷机组的冷凝热回收一般采用直接循环式,国内对此项技术的研究较多,国外也在20世纪90年代中期开始应用,典型的技术成果有:电脑自动控制利用余热制热水节能设备^[13]、离心式节能制冷装置^[14]、容积式节能热水机组^[15]、螺杆式冷水机组制热水节能设备^[16]、带热回收式水冷冷水机组^[17]等。此类技术成果在热回收工艺上基本是一致的,主要差别仍在换热回收即传热装置上。

热泵机组的冷凝热回收原理同单冷机组基本一致,目前也多采用直接循环回收冷凝热的方式,与单冷机组不同的是,热泵机组增加了四通换向阀,这就要求在加热回收器时考虑四通阀的正常工作,保障机组的稳定运行。

现有热泵机组的冷凝热回收技术大致可分为两类,一类是“并联”技术,主要是在压缩机与四通阀之后增加热回收器,通过增加多个控制阀以“并联”方式实现热回收,其典型技术成果有:多功能风冷冷热水机组^[18]、空气热能热泵式热水炉^[19]、四季节能冷暖空调热水三用机^[20]、多功能冷暖空调热水机^[21]等。另一类是“串联”技术,即直接在四通阀与压缩机之间增加热回收器的方式来实现部分或全部热回收。如采用基于流体旁路气动控制的复合冷凝技术,此项技术国外目前无相关专利,典型的技术成果有:热水热泵空调装置^[22]、联动屏蔽复合冷凝热水热泵空调装置^[23]等。此类技术的特点是增加的旁路控制管一端与压缩机出口直接联通,另一端与四通阀气动控制管入口或其高压侧入口联通,空冷和水冷能进行灵活转换,既可实现部分热回收也可实现全热回收,且不影响四通阀的正常工作,只需增加少量控制阀,就能保障机组的稳定运行。

以上成果都能实现冷凝热回收,但在冷热工况转换时影响换向阀的正常工作(只有在回收热量较少时才不至于影响换向阀),或者存在制冷流程改造复杂、元器件更换频繁、不利于生产和加工等缺点。这样易出现机组运行不稳定,冷凝力度不够或产生过冷现象,导致制冷循环偏离正常工况较多,影响空调效果,且经常出现回收冷凝余热量较少等情况。总的来说,我国在冷凝热回收领域取得了一些重要和关键性的成果,包括某些突破性的成果。

利用相变材料回收空调冷凝热指用蓄热器代替双冷凝器热回收技术中压缩机出口的冷凝器,并与常规风冷冷凝器(或冷却塔)采用串联连接,利用蓄热材料的相变过程将冷凝热回收并制取热水^[24]。典型的技术成果包括带相变蓄热水箱的热泵热水器^[25]及用于回收空调冷凝热的复合相变蓄热器^[26]等。目前利用的相变材料回收冷凝热的形式在国外已广泛采用,我国也取得了很大的进展,但对于如何利用高效、低成本的相变蓄热器来实现冷凝热回收有待进一步的探究。

随着对冷凝热回收技术研究的不断深入,其研究成果不仅体现在热回收形式

上,还体现在一些新型热回收冷凝器和研究冷凝热回收技术的新方法上,这些都为冷凝热回收技术的进一步研究及应用提供了条件。其典型技术成果有:可热回收的管式冷凝器^[27]、热回收式冷凝器装置^[28]、带冷凝热回收的蒸气压缩式制冷循环多功能教学实验台^[29]、基于产品焓成本冷热源优化设计软件^[30]等。

利用冷凝热回收技术不仅可以有效的节约能源,变废为宝,减少城市热污染,而且还可以带来巨大的经济效益,现以某宾馆集中式空调系统改造后回收冷凝热为例进行说明。该宾馆有 300 个床位,人均每日用水量 200L,卫生热水温度为 60℃,经计算可得每日总用水量 6×10^4 L。设定夏季水温平均温度为 18℃,经计算可得,每天制备卫生热水所需的总热量为 1.058×10^7 kJ。取电锅炉的热效率为 $\eta = 90\%$,电价为 1.00 元/(kW·h),经计算可得,电锅炉每日耗电量为 3265.00kW·h,电费为 3265.00 元。空调制冷工况运行时间为 135 天,经计算可得,制冷工况下使用电锅炉制备卫生热水的年运行费用为 4.41×10^5 元。宾馆总建筑面积约为 1.5×10^4 m²,采用的建筑冷源为水冷式冷水机组,由电热水锅炉供应热水。夏季,空调系统全天运行,制冷压缩机的平均制冷系数为 3.0,单位面积冷负荷指标为 80W/m²。经计算可得,总设计冷负荷为 1200kW,最大冷凝热排放量为 1600kW。经调查空调系统在制冷工况时建筑物平均冷负荷约为设计冷负荷的 1/2,则平均冷凝热排放量约为 800kW,每日总冷凝热排放量约 6.9×10^7 kJ。由以上分析计算可知,利用冷凝热回收装置可完全满足制备卫生热水的热量,每年可节约运行费用 4.41×10^5 元。

目前国内关于冷凝热回收技术研究开发及生产的企业和厂家有 100 多家,主要集中在北京、上海、山东、江苏、广东等地。一些国外著名品牌的制造商也在我国推广其相关技术与产品。

空调冷凝热回收技术是一项集节能、节费、环保等多项优点于一身的新型技术。尽管人们对于空调冷凝热回收技术的利用价值认识比较早,但在这方面的研究还不够深,不够全面,有许多问题有待更多的研究,典型的有:

(1) 单冷机组制备热水的冷凝热回收装置只能用于夏季,在漫长的过渡季节及冬季则处于闲置状态,卫生热水生产装置仍不可缺少,这需要有合适新型的设备及优化组合技术,如与热泵装置的联合使用(这实际上也是冷热源的匹配优化问题)等。

(2) 从总体上说,回收制冷机组冷凝热有较好的综合能源利用效率。但设计不合理时,对存在的丰富的冷凝热往往只能回收其中的较少部分,且热回收效率较低,不能满足建筑内卫生热水热负荷的需要;特别是针对大型离心制冷机组(300 冷吨^①以上)进行冷凝热回收技术改造时,如果热回收装置参数设计不合理,可能

① 1 冷吨=3.517 千瓦(kW),下同。

会使机组在运行时发生一种持续的尖锐噪声,严重时会导致机组损坏。因此单冷机组冷凝热回收时热回收装置优化设计十分重要。

(3) 各类热泵装置的冷凝热回收技术,包括空气源、地源热泵技术,特别是低温高湿条件下空气源热泵装置的结霜对热回收型热泵装置运行的影响等。

(4) 冷凝热回收方式与其他冷热源方式的优化匹配需进一步研究,单冷机组热回收与其他机组的优化匹配、热泵机组冷凝热回收与其他机组的匹配、冷凝热回收与太阳能热水的优化匹配、乃至太阳能光伏驱动带有热回收功能的各类机组的优化匹配等。

(5) 建筑整体节能目标条件下带冷凝热回收的单冷或热泵装置及其与其他机组的匹配组合与优化等。

由于冷凝热回收技术涉及面广,几乎涉及所有冷热源相关技术,包括冷热源优化等,20世纪70年代中期,柯曾(Curzon)、阿尔伯恩(Ahlborn)和吴治(Wu)首先论述了有限时间热力学概念,提出在有限时间内完成循环和优化循环这样一个具有实际工程意义的问题,为宏观热力学的近代发展开辟了一个新的领域^[31]。武汉海军工程大学的陈林根、孙丰瑞和厦门大学的陈金灿和美国海军大学的吴治教授进行了有限时间热力学优化方面的研究,他们的对象主要是理论热力系统的循环^[32]。在实际的热力系统分析方面,西安交通大学的傅秦生综述并应用了热力系统的一些分析方法,如夹点法^[33]。上海交通大学的丁国良、陈芝久和开利公司合作,主要开发了家用冰箱仿真分析的工具包^[34]。王如竹等对应用太阳能等能源为空调系统降低能耗开展了研究^[35]。

本书对冷凝热回收过程中所碰到的几个主要问题及相关的冷热源优化进行了讨论,本书的主要内容包括:

- (1) 冷凝热回收及低温环境下热泵的热力学基础;
- (2) 单冷机组热回收的有限时间热力学研究;
- (3) 热泵装置热回收的有限时间热力学研究;
- (4) 热泵装置的结霜与防霜;
- (5) 建筑整体节能与冷热源优化等。

目前,人们对冷凝热回收及基于冷凝热回收的多功能热泵新技术、热源塔模拟等方面的工作尚未系统开展。而冷凝热回收及冷热源优化技术是重要的绿色能源技术,本书主要在热力学仿真及系统优化方面开展了一些工作,这也是本书的特色之一,希望本书能够对冷凝热回收、热泵结/防霜及冷热源优化技术等方面的研究有所裨益。

参 考 文 献

[1] Healy C T, Wetherington T I Jr. Water heating by recovery of rejected heat from heat pump

- [J]. ASHRAE Journal, 1965, 4: 68~74.
- [2] Stuij B. Waste heat recovery heat pumps for buildings; an international overview[J]. IEA Heat Pump Central Newsletter, 1994, 12: 12~19.
- [3] Douglas R L, Cane S B C. Heat-recovery heat pump operating experience[J]. ASHRAE Transactions, 1994, 100(2): 165~172.
- [4] Ying W M. Performance of room conditioner used for cooling and hot water heating[J]. ASHRAE Transactions, 1989, 95(1): 441~444.
- [5] Goldschmidt V W. Desuperheater water-heater and air-to-air heat pump system; representative performance data[J]. ASHRAE Transactions, 1990, 96(2): 417~421.
- [6] Lee A H W, Jones J W. Performance data for a desuperheater integrated to a thermal energy storage system[J]. Energy Engineering, 1995, 92: 6~25.
- [7] Mason J r R S, Bierenbaum H S. Energy conservation through heatrecovery water heating [J]. ASHRAE Journal, 1977, 8: 36~40.
- [8] Toh K C, Chan S K. Thermosiphon heat recovery from an air-conditioner for a domestic hot water system[J]. ASHRAE Transactions, 1993, 99(1): 259~246.
- [9] Bong T Y, Hawlader M N A, Mahmood W. The prospect of incorporating desuperheaters to room air-conditioners for tropical application[J]. ASHRAE Transactions, 1988, 94(1): 340~349.
- [10] Baxter V D. Comparison of field performance of a high-efficiency heat pump with and without a desuperheater water heater[J]. ASHRAE Transactions, 1984, 90(2): 180~190.
- [11] 韩慧民. 利用水源热泵提供生活热水的新方法[J]. 节能与环保, 2005, 2: 46, 48.
- [12] 龚光彩, 常世钧, 马扬, 等. 蒸汽压缩式水冷制冷机的双冷凝器热回收技术[J]. 建筑节能通风空调, 2005, 24(1): 6~12.
- [13] 聂民. 电脑自动控制利用余热制热水节能设备: 中国, 98244986. 0[P]. 1999-12-15.
- [14] 聂民. 离心式节能制冷装置: 中国, 00235980. 4[P]. 2001-06-13.
- [15] 周创, 胡湘峰. 容积式节能热水机组: 中国, 02277383. 5[P]. 2003-09-10.
- [16] 聂民. 螺杆式冷水机组制热水节能设备: 中国, 200520062452. 9[P]. 2006-09-06.
- [17] 陈银林. 带热回收式水冷冷水机组: 中国, 200510038474. 6[P]. 2005-09-21.
- [18] 刘井龙, 胡泳波, 吴献忠. 多功能风冷冷热水机组: 中国, 101236027[P]. 2008-08-06.
- [19] 孙霆. 空气热能热泵式热水炉: 中国, 200310101604. 7[P]. 2005-04-27.
- [20] 陈则韶. 一种四季节能冷暖空调热水三用机: 中国, 2558908[P]. 2002-12-18.
- [21] 董永刚. 多功能冷暖空调热水机: 中国, 1796896[P]. 2006-07-05.
- [22] 龚光彩, 曾巍, 胡湘峰. 热水热泵空调装置: 中国, 200410045018. X[P]. 2006-10-18.
- [23] 龚光彩, 曾巍, 胡湘峰. 一种联动屏蔽复合冷凝热水热泵空调装置: 中国, 200420068101. 4 [P]. 2006-01-25.
- [24] 刘红娟, 顾兆林, 令彤彤. 冷凝排热-相变蓄热热回收空调系统的实验研究[J]. 制冷学报, 2005, (1): 1~4.
- [25] 叶远璋, 黄逊青, 张禄勤, 等. 带相变蓄热水箱的热泵热水器: 中国, 201081406[P]. 2008-