

Heat Pump Heating and Cooling Engineering

热泵供热供冷工程

吴荣华 刘志斌 马广兴 于磊 杨启容 于世山 张华北 编著



中国海洋大学出版社
CHINA OCEAN UNIVERSITY PRESS



作者简介

吴荣华 青岛大学机电工程学院教授（二级）。主要从事热泵系统、清洁能源供热、节能技术与设备的研究及应用。国家万人计划领军人才、山东省泰山学者，享受国务院政府特殊津贴，被评为山东省有突出贡献的中青年专家等。承担了国家“十二五”科技支撑计划项目、国家重大科技成果转化项目、国家科技惠民计划项目等，开展了几十项工程可行性研究、工程设计与调试等项目实施工作。负责的“基于疏导换热的污水及地表水热泵供热供冷”项目被鉴定为“国际领先水平”，与孙德兴教授共同完成的“城市原生污水热泵资源化工艺与技术”项目被鉴定为“世界首创”。发表学术论文100余篇，申请专利50余项，大部分已投产转化。获省部级技术发明一等奖1项、青岛市技术发明一等奖1项，建设示范工程100余项。

责任编辑/张跃飞
封面设计/陈 龙
终 审/冯广明

ISBN 978-7-5670-1178-6



9 787567 011786 >

定价：88.00元

热泵供热供冷工程

吴荣华 刘志斌 马广兴 于磊 编著
杨启容 于世山 张华北

中国海洋大学出版社

· 青岛 ·

为了满足工程技术人员、设计人员及研究工作者的需要,作者归纳分析了热泵的应用方式及相关基础理论,并阐述了作者多年从事热泵技术研究与应用所取得的相关成果和经验。本书主要内容包括:绪论,理论基础,热泵应用方式,热泵机组、换热器等机房设备,机房、取排水与末端系统设计,系统配电,施工安装,运行调试,运行维护,设计制图基础和工程案例等。本书全面介绍了热泵供热供冷工程的系统设计、施工和运行维护,着重介绍了污水及地表水热泵系统的共性关键问题。

本书可供该领域的工程设计、施工、研究及应用的技术人员参考,还可作为高等学校热能动力工程、建筑环境与能源应用工程等专业师生的参考书和教材。

图书在版编目(CIP)数据

热泵供热供冷工程/吴荣华等编著. —青岛:中国海洋大学出版社,2016.6
ISBN 978-7-5670-1178-6

I. ①热… II. ①吴… III. ①热泵—供热工程—研究
②热泵—供冷—工程—研究 IV. ①TU83

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 140843 号

出版发行 中国海洋大学出版社
社 址 青岛市香港东路 23 号 邮政编码 266071
出 版 人 杨立敏
网 址 <http://www.ouc-press.com>
电子信箱 flyleap@126.com
订购电话 0532-82032573
责任编辑 张跃飞 [DW]电 话 0532-88334466
印 制 日照报业印刷有限公司
版 次 2016 年 6 月第 1 版
印 次 2016 年 6 月第 1 次印刷
成品尺寸 185 mm×260 mm
印 张 27.5
字 数 620 千
定 价 88.00 元[HT]

前 言

热泵技术可以提取土壤、地表水、地下水和污水中的低品位热能为建筑物供热供冷,具有巨大的节能减排潜力,是缓解暖通空调能源消耗与环境污染问题的重要途径。本书作者长期致力于污水及地表水等热泵系统的研究与实践工作,为此将热泵供热供冷工程中相关理论和专业知识系统归纳,以及将所取得的相关研究成果总结成书,以期推动行业的发展。

目前国内也出现过多种有关热泵技术的参考书,但是大部分的重点在于热泵的介绍与设计。

为了全面反映热泵供热供冷工程技术,本书增加了相关内容。从各类热泵系统、理论基础、系统设计施工等方面入手,详细阐述了设备选择、系统设计、图纸绘制、施工、运行调试与维护,较全面地涵盖了实际工程中的各方面内容。

全书共 14 章,第 1 章介绍了热泵在国内外的应用状况;第 2 章从热力学、流体力学和传热学等方面阐述了热泵系统的理论基础;第 3 章论述了各种形式热源的热泵系统,包括系统形式、系统设计、运行工况、施工等,并分析了其设计与施工中的特殊性;第 4 章与第 5 章主要介绍热泵系统中主要设备的设计与应用,包括热泵机组、换热设备、水泵及机房辅助设备等;第 6、7、8 章介绍了热泵的机房系统、取排水系统和末端系统的设计方法;第 9 章介绍了系统的低压配电;第 10 章介绍了热泵系统工程的施工方法;第 11、12 章介绍了系统运行调试与维护保养;第 13 章介绍了施工图纸的绘制方法;第 14 章为典型的污水、地表水热泵工程实例介绍。

本书得到了国家“十二五”科技项目“建筑用节能高效空调设备及系统开发”(2014BAJ02B00)的资助,在此表示衷心感谢。

青岛科创蓝新能源股份有限公司为本书的研究和撰写工作提供了平台和支持,研究生郑记莘、孙源渊、李康和田时瑞同学承担了本书的文稿整理、录入和校核工作,在此一并致谢。本书在编写过程中,还参考借鉴了很多参考资料,在此向各位作者表示深深谢意。

限于作者水平,书中难免存在疏漏和不妥之处,敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 我国能源消耗与环境污染现状	1
1.2 热泵的原理、发展历程及分类.....	4
1.3 热泵研究应用状况	7
1.4 热泵的应用.....	12
1.5 我国热泵需求分析.....	14
第 2 章 热泵的理论基础	17
2.1 热力学.....	17
2.2 流体力学.....	30
2.3 传热学.....	40
第 3 章 热泵系统	55
3.1 地下水源热泵系统.....	55
3.2 土壤源热泵系统.....	64
3.3 地表水源热泵系统.....	71
3.4 海水源热泵系统.....	77
3.5 污水源热泵系统.....	80
第 4 章 热泵机组与机房设备	86
4.1 热泵机组设计与组装.....	86
4.2 水泵	109
4.3 换热设备	114
4.4 机房辅助设备	119
第 5 章 污水或地表水疏导式换热设备	123
5.1 污水及地表水换热的特点	123
5.2 一般换热工艺及问题	124

5.3	疏导式换热原理	124
5.4	污垢及传热系数	126
5.5	运行压力	129
第6章	机房系统设计	134
6.1	系统形式	134
6.2	运行工况	138
6.3	机房设备布置	144
6.4	其他事项	145
第7章	污水及地表水取排水设计	147
7.1	工艺流程	147
7.2	取水点设计	152
7.3	重力流设计	155
第8章	末端系统设计	163
8.1	地暖系统	163
8.2	风机盘管系统	169
8.3	新风系统	173
第9章	低压配电	180
9.1	低压配电方式	180
9.2	热泵系统低压配电主要电气设备	182
9.3	电线电缆的选择与计算	211
9.4	电机启动方式	217
9.5	机组与水泵的联动	223
第10章	安装与施工	225
10.1	常用管道附件介绍及安装	225
10.2	管道的加工及连接	231
10.3	室内管道的安装	236
10.4	室外热力管道安装	243
10.5	系统末端装置的安装	247
10.6	机房设备安装	265
10.7	管道及设备的防腐与保温	269
10.8	管道试压	276
10.9	管道吹扫与清洗	277
10.10	施工组织设计	278

第 11 章 调试及验收	292
11.1 热泵系统的运行调试	292
11.2 热网系统的初调节	305
11.3 竣工验收资料及要求	307
第 12 章 运行维护	308
12.1 机组常见故障及保养	308
12.2 水泵常见故障及保养	311
12.3 管路及设备清洗维护	313
第 13 章 设计绘图基础	322
13.1 绘图基础	322
13.2 图纸内容	336
13.3 设计细节	343
第 14 章 工程案例	347
14.1 青岛科创新能源厂区	347
14.2 西安东南郊水厂	348
14.3 西安金盾及周边区域(一期)	352
14.4 青岛团岛污水处理厂海湾花园小区	354
14.5 石家庄新界住宅小区	356
14.6 大连公共资源交易市场	359
14.7 青岛莱西凤凰印染厂热泵供热站	361
14.8 青岛前海馨苑小区	363
14.9 西安利君未来城一期	365
14.10 西宁青藏铁路调度大厦	367
附录 1 机组及水泵接管大样图	370
附录 2 制冷剂热工参数	371
附录 3 水力计算表	389
附录 4 单位换算	400
附录 5 不同能源热值	402
附录 6 压缩机参数	403
附录 7 常用局部阻力系数	417
附录 8 暖通工程施工与验收常用的表格	421

第 1 章 绪 论

当今世界经济飞速发展,能源消耗也在大幅度快速增长,不可再生的化石能源正面临枯竭。同时,化石能源的大量消耗已使环境和生态不堪重负,严重威胁着人类的生存。实施节能减排和开发清洁能源是全世界各个国家共同的主题。

作为能耗大户的建筑用能,占社会总能耗的 1/3 左右。而建筑用能的主要部分是采暖空调用能,这部分能源消耗是低品位能源消耗,常年介于 18~27 °C 之间,利用任何诸如煤、天然气等能源采暖空调都是能源的极大浪费,且会造成严重的环境污染。

热泵技术是利用少量高品位能源从环境中提取大量的低品位能源为建筑物供热供冷。所述的环境,包括大气、土壤、江河湖水、海水和污废水等。与燃煤集中供热相比,其一次能源利用率高达 133%,具有 50% 以上的节能减排潜力,是建筑物最理想的供热供冷方式。

1.1 我国能源消耗与环境污染现状

1.1.1 能源

2050 年,我国能源需求量预计将达 50 亿吨标煤,相当于 100 个三峡电站的全年发电总量。按目前水平可开采量为 30 亿吨标煤,水力、风力等发电开发量为 5 亿吨标煤,届时还有 15 亿吨标煤缺口量。这一缺口量只能靠进一步开发核能铀资源、太阳能及其他可再生性能源填补,能源问题将面临严峻挑战。^[1]

英国石油公司(BP)的《世界能源统计年鉴》数据中显示,2010 年我国成为世界上最大的能源消费大国,消费量占全球总量的 20.3%,超过了美国 19% 的比例。2014 年,我国一次能源总消耗折合 42.6 亿吨标煤,约占全球的 21.3%。到 2035 年,我国人均能源需求增长 40%,达到与欧洲相同水平,能源消耗总量将比当前水平还要增长 50%。预计到 2020 年,全国煤炭消费总量 48 亿~53 亿吨,中国短期煤炭供应宽松与长期总量不足的矛盾将会逐渐明显。^[2]

来自美国能源部的统计数字显示:中国的工业生产耗能占能源总消耗量的 70% 以上,但能源利用率仅为 33%;单位 GDP 能耗是国际平均值的 2 倍,是发达国家平均值的 4 倍。在我国消耗全球近一半的煤炭资源情况下,其综合能效不足 40%,比世界发达国家低 15% 到 20%。人均资源水平低、能源结构不合理以及综合利用效率低下是我国基本国情和软肋。

数据显示,能耗的问题体现在多种行业中,而建筑能耗占了整个社会总能耗的较大比例。在发达国家,建筑能耗占社会能源总消耗的40%以上。在西欧,这个比例甚至达到了52%。为此,欧盟在2002年欧洲议会和欧盟理事会上通过了关于建筑能耗的法律性文件,要求计算建筑物的整体能耗,为新建建筑和既有建筑颁发能效证书,并定期对建筑中的锅炉和空调系统进行检查和能耗评估,通过制定法律提高能源利用率,降低建筑能耗。

建筑相关能耗已成为我国三大能耗大户之一。随着我国经济的发展,建筑能耗占社会总能耗的比例在逐渐提高。目前,我国城镇建筑消耗(采暖、空调、照明、炊事、办公等伴随建筑运行使用的能耗)的能源占全国商品能源的23%~26%,这还不包括建筑材料制造用能及建筑施工过程耗能。

随着我国城市化进程的加速,建筑总量的不断攀升和居住舒适度的提升,建筑能耗呈急剧上扬趋势。由于建筑能耗主要集中在暖通空调能耗,据预测,2020年,我国暖通空调能耗量将达10亿吨标煤,预计最终会接近发达国家的水平,节能降耗的形势非常严峻。而在建筑能耗中则又以建筑采暖和空调能耗为主,因此,建筑节能的首要问题之一就是解决暖通空调领域的能耗问题。

我国建筑能耗历年平均为总能耗的19.8%。建筑能耗中,暖通空调能耗约占85%,能耗效率极低,同纬度气候条件接近地带,单位面积的平均制冷供暖耗能为发达国家的3倍。目前,住房建筑面积为347亿平方米,以每年13亿~14亿平方米速度增长。预计2020年,我国暖通空调的能耗量将达10亿吨标煤,占总能耗量的30%以上。暖通空调在能源消耗中将占有举足轻重的位置。

我国北方城镇建筑采暖能耗占全国总能耗的最大组成部分,单位面积采暖平均能耗折合标准煤为 $20 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,为北欧同纬度条件下建筑采暖能耗的2~4倍。目前,有5亿平方米左右的大型公共建筑,其耗电量为 $70 \sim 300 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,为住宅的10~20倍,是建筑能源消耗的高密度领域。调查表明,这类建筑能源浪费现象严重,具有很大的节能潜力。城镇的住宅总面积约100亿平方米,除采暖外的住宅能耗包括:照明、炊事、生活热水、家电、空调等,折合用电量为 $10 \sim 30 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,用电量约占我国全年供电量的10%。普通的公共建筑总面积约55亿平方米,用电量约占我国全年供电量的8%。^[3]农村建筑面积约占240亿平方米,总耗电约900亿千瓦时/年,生活用标准煤0.3亿吨/年。目前,我国农村的煤炭、电力等商品能源消耗量较低。^[3]根据调查,目前农村建筑使用初级生物质能源的能源利用效率很低,并陆续被燃煤等常规商品能源所替代。如果这类非商品能源完全被常规商品能源所替代,则我国建筑能耗将增加一倍。

能耗高的主要原因有3个:一是围护结构保温不良;二是供热系统效率不高,各输配环节热量损失严重;三是热源效率较低。由于大量小型燃煤锅炉效率低下,目前的热源平均还有15%~20%的节能潜力。

如果将来中国城镇建筑总量增加1倍,建筑能耗总量很可能增加不止1倍。在美国、欧洲国家和日本等发达国家,建筑运行能耗水平已经从其处于制造大国时期的20%~25%发展到目前金融与技术大国时的近40%。在建筑能耗中,暖通空调系统与热水系统所占的比例接近60%,而且随着人民生活水平提高还有继续上升趋势。

1.1.2 环境

在我国粗放式经济发展模式下,当人均GDP达到5000美金这一中等发达水平时,我

国同时也进入了环境污染严重的高压时期。以前的环境污染,仅仅是局部现象;现今的环境污染,已是全国性的普遍现象。2012年,入冬以来的全国性雾霾天气,清楚地反映了中国环境污染问题的严重性、紧迫性。蓝色的天空、清新的空气、洁净的水源已成为民众的期待。

我国城市大气环境中总悬浮颗粒物浓度普遍超标;二氧化硫污染保持在较高水平;机动车尾气污染物排放总量迅速增加;氮氧化物污染呈加重趋势;全国形成华中、西南、华东、华南多个酸雨区,以华中酸雨区为重。据亚洲开发银行和清华大学最新发布的《中华人民共和国国家环境分析》报告,中国500个大型城市中,只有不到1%达到世界卫生组织空气质量标准。博鳌亚洲论坛2014年年会中的数据显示,中国的煤炭消耗过去10年时间就增长了将近5倍的量,二氧化碳的排放量已经增加到了每年400亿吨。

据新华网报道,对118个城市连续监测数据显示,约64%的城市地下水遭受严重污染,33%的地下水受到轻度污染,基本清洁的地下水只有3%。在水资源总量2/3的地表水中,污染问题同样严重。^[4]根据全国水资源综合规划评价成果,84个湖泊中常年呈现富营养化状态的有48个,达到52.4%。根据2000年评估的633个水库中,62%为中营养水库,38%为富营养水库,贫营养水库不及1%。

全国耕种土地面积的10%以上已受重金属污染,共约1.5亿亩*。因污水灌溉而污染的耕地有3250万亩,因固体废弃物堆存而占地和毁田的约有200万亩,其中多数集中在经济较发达地区。每年因重金属污染的粮食高达1200万吨,造成的直接经济损失超过200亿元。

从环境污染的地域来看,已经从经济发达的东部地区和南部地区向中西部地区和北部地区迅速蔓延。最近几年,中西部地区加大了开发力度,低端产业向中西部转移,在经济快速增长的同时,环境污染问题也凸现出来。从环境污染的空间分布看,从天空到海洋,从陆地到河流,从地表到地下,无论是空气、水源还是土壤,都广泛地被严重污染。

我国大气污染主要表现为煤烟型污染。过去20年以来,中国67%的能源来源于煤炭。为了跟上需求,中国煤炭生产者所提供的煤炭质量在下降,污染性越来越大。中国目前生产的煤炭含硫量已经达到了1%,更多的硫被释放到空气中。二氧化碳是一种主要的污染物,是造成全球变暖的温室气体之一。以目前的趋势发展,到2025年,中国将超越美国而成为世界最大的温室气体排放国。其中,生活炉灶与采暖锅炉在居住区里,随着人口的集中,大量的民用生活炉灶和采暖锅炉也需要耗用大量的煤炭,特别是在冬季采暖时间,往往使受污染地区烟雾弥漫。这是一种不容忽视的大气污染源。

从目前情况看,煤炭在我国一次能源构成中仍然占70%以上,是我国主要的能源。我国工业燃料动力的80%依靠煤炭。全国每年用于直接燃烧的煤炭占总煤耗的84%,其中农村生产和生活耗煤1.2亿吨,占煤产量的20%;城市居民燃煤1.5亿吨,占全年煤产量的25%。同时还要指出,煤炭在我国城市能源构成中所占比例也相当大。据26个城市的统计资料,其中超过90%的有8个市,80%~90%的有7个市,70%~79%的有3个市,60%~69%的有5个市,50%~59%的有2个市,40%~49%有1个市。^[5]

以煤为主的能源构成以及多在陈旧的设备 and 炉灶中沿用落后的技术直接燃烧使用,而且这种使用方式竟占直接燃煤总量的62%,成为我国大气严重污染的主要根源。据历年的

* 亩为非法定计量单位,考虑到生产实际,本书继续保留,1亩≈666.7 m²。

资料估算,燃煤排放的主要大气污染物,如粉尘、二氧化硫、氮氧化物、一氧化碳等,总量约占整个燃料燃烧排放量的 96%。其中,燃煤排放的二氧化硫占各类污染源(燃料燃烧源、工业废气源、流动源)总排放量的 87%(占燃料燃烧排放量的 93%);排放的粉尘占总排放量的 60%(占燃料燃烧排放量的 99%);排放的氮氧化物占总排放量的 67%(占燃料燃烧排放量的 87%);排放的一氧化碳占总排放量的 71%(占燃料燃烧排放量的 87%)。[6]

在以煤为主的能源结构下,暖通空调用能是大气污染的主要因素之一。在全球空气污染最严重的 10 个城市中,中国占有 5 个,包括北京、上海、沈阳、西安和广州。北京冬季供暖期中 TSP(总悬浮颗粒物)、一氧化碳、二氧化硫、氮氧化物等严重超标。资料表明,70%的 TSP、90%的二氧化硫、60%的氮氧化物和 85%的矿物燃料生成的一氧化碳来自燃煤,暖通空调引起的污染物排放量占总排放量的 15%以上。燃煤排放二氧化硫引起的酸雨污染已扩展全国整个面积的 30%~40%,造成的经济损失接近国民生产总值的 2%。另外,全球二氧化碳等温室气体的排放给人类带来重大损失。全球温暖化的经济成本是全球经济总产值(GWP)的 10%~20%。暖通空调的能源消耗给环境带来了巨大压力。

1.2 热泵的原理、发展历程及分类

1.2.1 热泵的原理

热泵技术是近年来在全世界倍受关注的新能源技术。人们所熟悉的泵是一种可以提高位能的机械设备,比如水泵主要是将水从低位抽到高位。而热泵是一种能从自然界的空气、水或土壤中获取低品位热能,经过高位能源做功,提供可被人们所用的高品位热能的装置。热泵空调技术是根据逆卡诺循环原理,将低温热源或低位能源中的低品位热能进行回收,转换为高品位热能的一种节能与环保性技术。利用这项技术的逆过程,还可以达到制冷的目的,是以存在合适的低位能源为必要条件。

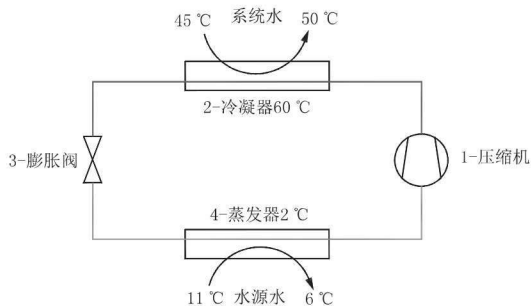


图 1-1 热泵工作原理示意图

图 1-1 示意了一种水源热泵向建筑物供热的工作原理。所谓水源热泵,就是指以环境中的水(污水、地表水、地下水等)作为热源,热泵工质(例如氟利昂)在压缩机 1 的驱动下,在压缩机 1、冷凝器 2、膨胀阀 3、蒸发器 4 几个主要部件中循环运动。工质的热力性质决定了蒸发器中的工质温度可以保持在 2℃(称为蒸发温度)左右,而冷凝器中则为 60℃(称为冷凝温度)。虽然这里的水源在冬季可能仅为 11℃,但可以作为热泵系统的热源。因为当它

被引入温度为 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的蒸发器时,它必然要把自身中的热能(称为内能)交给机组,变为 $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 排放出去。获取了水源热能的工质,被压缩机压缩到 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,在冷凝器中加热来自建筑物的系统循环水,由该水将热量带到建筑物的散热设备中。

总的来看,热泵能够从常温或低温($11\text{ }^{\circ}\text{C}$)的环境中提取热量,以较高的温度($50\text{ }^{\circ}\text{C}$)向建筑物供热。过程中机组每消耗 1 份高位能源(例如电能),能够从环境中提取 3 份以上的温差热量,建筑物实际可以得到的热量则为 4 份以上。

然而热泵技术应用的关键问题已不是热泵机组的效率有多高,而是需要有合适的低位能源或低温热源,以及整个系统的全面高效低能耗运行。

1.2.2 热泵的历程

19 世纪早期,法国科学家萨迪·卡诺(Sadi Carnot)在 1824 年首次在论文中提出“卡诺循环”理论,这成为热泵技术的起源。1852 年英国科学家开尔文(L. Kelvin)提出,冷冻装置可以用于加热,将逆卡诺循环用于加热的热泵设想。他第一个提出了一个正式的热泵系统,当时称为“热量倍增器”。之后,许多科学家和工程师对热泵进行了大量研究,研究持续 80 年之久。

1912 年,瑞士的苏黎世成功安装一套以河水作为低位热源的热泵设备用于供暖。这是早期的水源热泵系统,也是世界上第一套热泵系统。热泵工业在 20 世纪 40 年代到 50 年代早期得到迅速发展,家用热泵和工业建筑用的热泵开始进入市场,热泵进入了早期发展阶段。^[7]

20 世纪 70 年代以来,热泵工业进入了黄金时期,世界各国对热泵的研究工作都十分重视,诸如国际能源机构和欧洲共同体,都制订了大型热泵发展计划,热泵新技术层出不穷,热泵的用途也在不断开拓,广泛应用于空调和工业领域,在能源的节约和环境保护方面起着重大的作用。^[8]

21 世纪,随着能源危机的出现,燃油价格忽升,经过不断发展成熟的热泵技术以其高效、节能环保的特点重新登上历史舞台,成为当前最有价值和前景的新能源科技。前国际热能署专门成立国际热泵中心,并设立热泵推广工程部门(Heat Pump Programme),向世界各国推广协调热泵技术的发展应用。美国、加拿大、瑞典、德国、日本、韩国等政府均出台引导文件,以促进热泵技术的快速应用。

相对世界热泵的发展过程,中国热泵的研究工作起步晚了近 30 年。新中国成立后,随着工业建设新高潮的到来,热泵技术才开始引入中国。进入 21 世纪后,由于中国沿海地区的快速城市化、人均 GDP 的增长、政府节能减排工作的引导等因素拉动了中国空调市场的发展;尤其是 2006 年国务院下发了节能减排工作综合工作方案之后,显著促进了余热回收和热泵技术在中国的应用与发展。

从 1998 年热泵起步开始,经过 10 余年的培育,中国热泵行业开始从导入期转入成长期。热泵行业快速发展,一方面得益于能源紧张和环境污染严重的问题,使得热泵的节能和环保优势越来越明显;另一方面与政府的鼓励和扶持以及多方力量的投入有很大关系,尤其是 2006 年北京市政府首次下发了明确的扶持政策之后,各地方政府也相继出台了补助资金等配套方案,加大推广力度并引入众多企业参与。

1.2.3 热泵的分类

热泵的种类众多,可以根据热源、工作原理、压缩机、驱动能源形式等等进行分类^[9],如

表 1-1 所示。

表 1-1 热泵的分类

分类方式	热泵类型
按工作原理	蒸汽压缩式、气体压缩式、蒸汽喷射式、吸收式、热电式、化学式热泵
按利用热源	空气、地表水(江河、湖泊、海水等)、地下水、城市自来水、土壤、太阳能、废热(水、气)热泵
按用途	住宅用、商业及农业用、工业用热泵
按供热温度	低温热泵, 供热温度 $<100\text{ }^{\circ}\text{C}$; 高温热泵, 供热温度 $>100\text{ }^{\circ}\text{C}$
按驱动方式	电动机驱动、热驱动、发动机驱动热泵
按能源品位	第一类热泵、第二类热泵
按功能	单纯制热、交替制冷与制热、同时制冷与制热热泵
按压缩机	活塞式、涡旋式、滚动转子式、螺杆式、离心式热泵
按安装形式	单元式热泵机组、分体式热泵机组、现场安装式热泵机组

目前主要投入使用的有空气源热泵、水源热泵、土壤源热泵,其中水源热泵又分为地下水源热泵、湖水源热泵、海水源热泵和污水源热泵。

(1) 空气源热泵。

目前的空气源(或风冷)热泵产品主要是家用热泵空调器、商用单元式热泵空调机组和热泵冷热水机组。热泵空调器已占到家用空调器销量的 50%以上,年产量为 400 余万台。热泵冷热水机组自 20 世纪 90 年代初开始,在夏热冬冷地区得到了广泛应用。据不完全统计,在夏热冬冷地区部分城市的中央空调系统中,采用热泵冷热水机组的已占到 30%以上,而且应用范围持续扩大,并已向北方地区发展。空气源热泵机组冬季供热运行时,最大的问题是当室外气温较低时($<-5\text{ }^{\circ}\text{C}$),室外机的换热器翅片表面结霜,其除霜能耗约占热泵机组运行总能耗的 10%以上;而且由于除霜控制方法的问题,在翅片表面结霜不严重或不需要除霜时也进行了除霜,空气源热泵机组在低温环境下运行时能耗水平较低。另外,目前常用的一些除霜方法或多或少还存在一些问题,如发生多余的除霜动作,或需要除霜时不发出信号等弊病。

(2) 水源热泵。

水源热泵既具有中央空调能效高,成本低和安全、可靠等优点,又具有集中供热分散式调节灵活、方便和便于收费等优点,是一种适合民用建筑的采暖空调方式。尽管空气源热泵机组在我国的应用已相当广泛,但热泵机组存在供热量随着室外气温的降低而减少、结霜和运行综合能耗高等问题。而水源热泵则克服了空气源热泵的不足,运行可靠性高,其综合效率也显著提高,近几年来国内外的应用更为广泛,规模越来越大。尤其是污水源热泵,单项供热建筑已达 50 万平方米以上,装机容量达 30 MW。水源热泵与锅炉(电、燃料)和空气源热泵的供热系统相比,水源热泵具有明显的优势,其经济性、节能性非常显著。锅炉供热只能将 90%~98%的电能或 70%~90%的燃料内能转化为热量,供用户使用。水源热泵要比电锅炉加热节省 3/4 以上的电能,比燃料锅炉节省 1/2 以上的能量。由于水源热泵的热源温度全年较为稳定,一般为 10~25 $^{\circ}\text{C}$,其制冷、制热系数可达 4~5,与传统的空气源热泵相比,要高出 40%以上,其运行费用为普通中央空调的 50%~60%。^[10]近十几年来,水源热泵空调系统在北美及中、北欧等地区取得了较快的发展,而我国的水源热泵市场则更为活跃。

(3) 土壤源热泵。

土壤源热泵是以大地为冷热源对建筑物进行供热供冷:冬季通过热泵提取大地中的低位热能为建筑物供暖,同时相当于蓄存冷量,以备夏用;夏季通过热泵将建筑物内的热量转移到地下为建筑供冷,同时相当于蓄存热量,以备冬用。由于其同样具有节能、环保的显著特点,引起了世界各国的重视。欧、美发达国家土壤源热泵的利用已有几十年的历史,特别是供热方面已积累了大量的设计、施工和运行方面的资料和数据。我国是发展中国家,由于多种原因,主要是技术和经济原因,土壤源热泵的研究应用较水源热泵明显滞后,其应用范围和规模也较小。土壤源热泵是在大地中垂直埋管或水平埋管进行取热或取冷,以垂直埋管居多。由于需要解决冬夏冷热平衡问题,即夏季蓄存的热量正好为冬季提取,这样通常适用于冬夏两用的公共建筑。发达国家的土壤源热泵主要应用于小型别墅,应用规模较小。而我国喜欢大型化,这就造成了冷热平衡非常困难,大多数土壤源热泵系统的运行效果一般。另外,土壤源热泵系统的造价较水源热泵系统显著增加,而且需要较大的占地面积,因此其发展应用不如水源热泵。但土壤源热泵曾一段时间内风靡一时,最近两年的应用趋势才明显减慢。

(4) 复合热泵。

各种热泵均有其优缺点,例如:水源热泵,虽然效率高、安全可靠,但需要有水源;空气源热泵效率低,但空气随处都有。因此在较为特殊的地域或特殊的时间段内,为了弥补单一热源热泵存在的局限性或缺点,可将各种热泵系统同时耦合使用,构成了复合式热泵系统。复合热泵系统的目的:一是相互同时使用以达到满足供热供冷容量的目的;二是可以相互交替使用,例如空气温度高时使用空气源,空气温度低时使用土壤源或太阳能等。目前,可以研究或应用的复合热泵有空气+土壤源热泵、土壤+太阳能热泵、空气+太阳能热泵等。

1.3 热泵研究应用状况

1.3.1 国外现状

热泵技术其实并不是一项新技术,早在1852年 Lord Kelvin 就提出了这个概念。20世纪40年代, Rober Webber 将其修改成地热热泵。^[11]20世纪六七十年代开始商业推广。之后,许多国家都对热泵产生较高的兴趣。但热泵的快速发展主要还是发生在美国和欧洲国家。据相关文献测算,目前世界范围内的热泵装机容量可能接近10 100 MWt,年均利用的能量大约59 000 TJ(16 470 GWh),实际安装的机组数量大约900 000台。表1-2列举了地热热泵利用率最高的几个国家的应用情况^[11]。

表 1-2 利用地热热泵领先的国家

国家	装机容量(MWt)	年利用能量(GWh)	装机数量(台)
澳大利亚	275	370	23 000
加拿大	435	300	36 000
德国	560	840	40 000

续表

国家	装机容量(MWt)	年利用能量(GWh)	装机数量(台)
瑞典	2 000	80 00	200 000
瑞士	440	660	25 000
美国	6 300	6 300	600 000

1.3.1.1 美国

美国的大多数系统都是按制冷负荷进行设计,通常制冷负荷高于供暖热负荷,估计平均每年有 1 000 h 用热泵满负荷供暖。而在欧洲绝大多数热泵系统是按供暖负荷进行设计,通常是按供暖的基本负荷设计热泵系统,再加上其他热源进行调峰,因此欧洲的热泵系统每年可以满足运行 2 000~6 000 h,平均每年 2 300 h^[11]。即美国以供冷为主,不设计调峰系统;而欧洲则以供热为主,加上调峰系统。美国大多数热泵系统安装在中、西部地区 and 从北达科他州到佛罗里达州的东部地区。目前,每年接近安装 50 000 个热泵机组,有 600 个学校采用了热泵系统进行供暖和制冷,主要集中在得克萨斯州。另外,美国是按冷吨数来核算热泵机组的容量大小。1 冷吨相当于 12 000 Btu/h 或 3.51 kW^[11],一般 1 户需要的热泵机组在 3 冷吨或 10.5 kW 左右。

美国在肯塔基州路易斯维尔市的 1 个宾馆安装了容量最大的水源热泵系统,为 600 个宾馆房间、100 个公寓和 8.9 万平方米的办公区(整个宾馆 16 万平方米)供热供冷。系统设计了 4 口出水井,水量 640 t/h、出水温度 14℃,系统制冷负荷 15.8 MW、制热负荷 19.6 MW。消耗的能量较附近非热泵系统节省 47%,每月节省运行成本 25 000 美元。

1.3.1.2 欧洲

欧洲对热泵的持续研究超过了 20 年之久,对噪音问题、安装标准都做了深入系统的研究,其市场一直在慢慢扩大,从事热泵事业的公司也在不断增长。虽然其热泵产品早已进入了黄页,但除了瑞典和瑞士以外,热泵系统的市场总体还不算太大。瑞典在欧洲是安装热泵系统最多的国家之一(表 1-2),但大幅增加的热泵主要是空气源热泵。目前,在欧洲个人采用热泵系统供热的用户较多,统计热泵安装的数量较为困难。

在欧洲,热泵市场不大的原因与欧洲许多国家的气候条件有关,因为目前大多数的需求还是供暖,很少有制冷需要,所以热泵系统一般都处于单供暖状态,其用量相对较小。然而,随着大型商业建筑数量的增加,制冷的需要也将逐渐增加,另外还将进一步推广到南欧,将来的供热和供冷市场会显著快速增加。

(1) 瑞典。

瑞典是热泵应用较为发达的国家,早在 20 世纪 80 年代初期,地源热泵就已开始广泛应用,到 1985 年时已有 50 000 多台热泵机组被安装和运行。但随后由于其他能源价格较低以及热泵面临的技术质量问题造成热泵市场开始明显下滑,在 1985 年到 1995 年的 10 年间,平均每年安装 2 000 个左右的热泵机组。^[11]1995 年之后,瑞典政府开始大力鼓励和支持采用热泵系统,并出台了相关补贴政策,研究人员和相关企业、地产商对热泵又开始了强烈兴趣。根据瑞典热泵机构(SVEP)统计的销售数据,2001 年和 2002 年两年间就有 27 000 多个热泵机组被安装和运行。目前,正在运行的机组数量估计在 200 000 台左右。

瑞典在技术方面也走到了世界的前列。瑞典的热泵系统安装容量通常设计占总负荷的