

人工湖水源热泵系统技术及应用

Technology and Application of Artificial Lake
Water Source Heat Pump System

吴荣华 孙源渊 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/邓志科

封面设计/陈 龙

终 审/韩玉堂

ISBN 978-7-5670-1179-3



9 787567 011793 >

定价:58.00元

人工湖水源热泵系统 技术及应用

吴荣华 孙源渊 著

中国海洋大学出版社
· 青岛 ·

为了满足设计及研究人员的技术需求,笔者将从事人工湖水源热泵研究所取得的关键技术成果及实践经验撰写成书。本书主要内容有:绪论,系统技术分析,系统形式,疏导式换热技术,压缩式热泵机组,防冻换热理论分析,系统输送能耗,引退水设计,系统经济及社会效益分析,工程案例等。全书着重介绍了寒冷地区人工湖水源热泵系统的关键技术及系统设计,为热泵系统的发展开辟了新领域。

本书适于领域内工程设计、研究及运行管理人员参阅与使用,亦可作为相关技术培训的教材和参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

人工湖水源热泵系统技术及应用/吴荣华,孙源渊

著. —青岛:中国海洋大学出版社,2016.6

ISBN 978-7-5670-1179-3

I. ①人… II. ①吴… ②孙… III. ①人工湖—水源
热泵—热泵系统—研究 IV. ①TB657

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 140841 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 dengzhike@sohu.com

订购电话 0532-82032573

责任编辑 邓志科

电 话 0532-88334466

印 制 日照日报印务中心

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 13.5

字 数 310 千

印 数 1—1000

定 价 58.00 元

前 言

人工湖水源热泵技术是从湖水等低品位能源中汲取冷热量为建筑物供热、供冷,具有显著的节能减排效益,是缓解建筑能源消耗与环境污染问题的重要途径。该系统在我国的研究及应用起步很晚、数量很少,尚未形成完整、完善的理论与技术体系及设计规范,技术水平滞后于实际应用的需求,尤其是我国的国情不同,需要更高端、更经济和更实用的理论与应用方法。本书作者长期致力于热泵技术的研究与实践,在地表水源热泵系统的基础上,开发了适用于湖水工况的疏导式低温换热工艺,并进行了一定的示范应用。为此,作者将研究成果和实践经验总结成文,以期推动该行业的高水平发展与应用。

本书体现了作者在人工湖水源热泵技术方面的研究成果。全书共 10 章:第 1 章和第 2 章介绍了湖水源热泵的国内外研究、应用状况,分析了湖水源热泵的关键技术问题等;第 3 章论述了人工湖水源热泵系统的系统形式;第 4 章介绍了笔者开发的疏导式换热方法的原理、疏导式换热设备的结构特点、运行压力等问题;第 5 章介绍了压缩式热泵的特点、主要部件的选型及污水地表水热泵的运行参数、故障分析等;第 6 章介绍了添加防冻溶液后低温工况下相关的换热理论分析;第 7 章论述了输送能耗比例及低温工况输送能耗的影响;第 8 章分析了系统能耗及节能减排效益;第 9 章论述了系统经济效益;第 10 章为典型的人工湖水源热泵系统工程实例介绍。本书可供能源、供热空调、热泵和建筑节能行业的科研,设计和工程技术人员参考使用,也可供大专院校相关专业的教师、研究生及高年级本科生参考使用。

本书的工作得到了国家十二五科技支撑计划项目“建筑用节能高效空调设备及系统开发”(2014BAJ02B00)、国家科技惠民计划项目“胶州市污水及地表水等热泵新能源惠民供热示范应用”(2013GS370204)、青岛市民生科技计划项目(1313122nsh)等的资助,在此表示衷心感谢。青岛科创蓝新能源股份有限公司为本项目的研究工作提供了良好的平台和支持,在此一并致谢。

由于作者水平有限,书中难免有不妥之处,敬请相关专家及同行批评指正。作者邮箱:wuronghua18@126.com。

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	世界能源形势	1
1.2	我国能源利用现状	2
1.3	国内外热泵技术应用研究现状	4
1.4	湖水源热泵发展现状	8
1.5	湖水源热泵系统的关键问题	9
第 2 章	湖水源热泵系统技术分析	14
2.1	地表水的水温、水质、水量	14
2.2	运行工况	15
2.3	冬夏工况匹配	16
2.4	地表水换热特点	20
2.5	换热技术分析	21
2.6	污垢及污垢系数	25
2.7	总传热系数	28
2.8	关键问题及难点分析	28
第 3 章	系统形式	31
3.1	传统湖水源热泵系统形式	31
3.2	低温湖水源热泵系统工艺	32
3.3	几种实用低温湖水源热泵系统	42
3.4	引退水系统	44
3.5	本章小结	45
第 4 章	疏导式换热技术	47
4.1	疏导式换热方法	47
4.2	疏导管式换热器结构	52
4.3	宽流道换热器结构	54
4.4	换热器的承压问题	55
4.5	工况适应性	59

第 5 章	压缩式热泵机组	61
5.1	流程及主要部件.....	61
5.2	工质循环.....	65
5.3	热泵常用工质.....	66
5.4	主要参数选择和设定.....	67
5.5	部件选型及管路设计.....	70
5.6	机组的自动保护.....	72
5.7	机组的故障分析.....	72
第 6 章	防冻换热理论分析	75
6.1	防冻介质.....	75
6.2	几种典型防冻溶液的传热特性研究.....	80
6.3	本章小结.....	90
第 7 章	输送能耗与系统设计	91
7.1	输送能耗比例问题.....	91
7.2	输送距离界限模型.....	92
7.3	资用输送能耗比例及其设计方法.....	98
7.4	系统运行调节方法	101
7.5	防冻溶液对管路输送能耗的影响	106
7.6	本章小结	108
第 8 章	系统能耗及节能减排指标.....	111
8.1	热泵机组制热效率分析	111
8.2	压缩机实际运行效率拟合性能曲线	113
8.3	供暖季系统运行能耗分析	115
8.4	本章小结	125
第 9 章	系统经济性评价.....	126
9.1	系统经济性评价方法	126
9.2	系统经济性评价分析	128
9.3	本章小结	130
第 10 章	寒冷地区湖水源热泵系统的工程应用	132
10.1	青岛科创蓝公司湖水源热泵系统.....	132
10.2	西安市白鹿原水厂水源热泵供热供冷系统.....	140
10.3	本章小结.....	144

附录	146
附录 1 疏导式污水换热器介绍及技术参数	146
附录 2 热泵压缩机的选型系列	152
附录 3 常用污垢热阻数据(单位面积)	166
附录 4-1 R22 饱和气与饱和液的热力性质	167
附录 4-2 R22 过热蒸气的热力性质	169
附录 4-3 R22 饱和气与饱和液的传递性质	174
附录 4-4 R22lg $p-h$ 图	175
附录 5-1 R134a 饱和气与饱和液的热力性质	176
附录 5-2 R134a 过热蒸汽的热力性质	177
附录 5-3 R134a 饱和气与饱和液的传递性质	183
附录 5-4 R134lg $p-h$ 图	184
附录 6 乙二醇、丙二醇、丙三醇防冻液物性参数(表 6-1~表 6-5,图 6-1)	185
附录 7 制冷量单位换算	188
附录 8 温度单位换算	189
附录 9 热泵驱动能源的折算系数和环境负荷	190
附录 10 水的热物性参数	191

第1章 绪 论

从 1840 年开始至今,西方发达国家先后完成了工业革命,社会发展对能源的依赖程度在逐年增加,尤其是化石能源。当今社会已经完全步入大工业时代,能源消费增加是经济社会发展的客观必然,开发清洁、可再生的新能源是贯彻可持续发展的重要环节。

1.1 世界能源形势

世界经济飞速发展,主要得益于利用化石能源,这导致了化石能源面临枯竭的危险。目前全世界能源年总消费量约为 134 亿吨标准煤,其中石油、天然气、煤等化石能源占 87%,大部分电力也是依赖化石能源,核能、太阳能、水力、风力、波浪能、潮汐能、地热等能源仅占 13%。

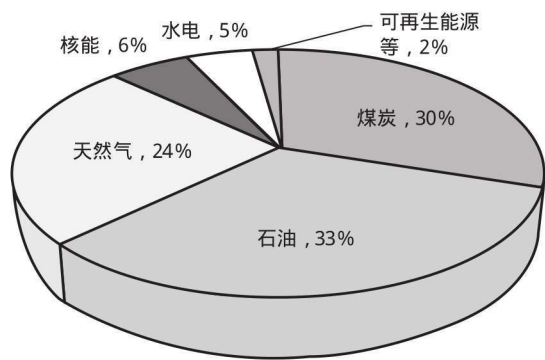


图 1-1 世界能源消费比例

化石能源价格比较低廉,开发利用的技术也比较成熟,并且已经系统化和标准化。虽然发达国家遭受 20 世纪 70 年代两次石油危机打击后,千方百计摆脱对石油的过度依赖,但在今后 20 多年里,石油仍然是最主要的能源之一,全球需求量将以年均 1.9% 的速度增长;煤仍然是电力生产的主要燃料,全球需求量将以每年 1.5% 的速度增长。由此可见化石能源仍然是我们在这个星球上赖以生存和发展的能源基础。目前,根据对石油储量的综合估算,可支配的石油能源极限为 1 180 亿~1 510 亿吨,石油储量在 2050 年前后面临枯竭;天然气储备估计在 131 800~152 900 兆立方米,年开采量维持在 2 300 兆立方米,将在 57~65 年后枯竭;煤炭的储量约为 5 600 亿吨,可以供应 169 年^[1]。

表 1-1 世界主要能源储量

能源名称	石油(亿吨)	煤炭(亿吨)	天然气(兆立方米)
储量	1 180~1 510	5 600	131 800~152 900

1.2 我国能源利用现状

1.2.1 传统能源利用现状

在世界能源开采及使用的严峻形势下,国内化石能源的开发和利用可谓是雪上加霜。我国是世界第二大能源生产国和第一大能源消费国,2014 年我国能源消费总量已达到 42.6 亿吨标准煤,增速为 2.2%。目前我国能源消费以煤炭为主,约占总消费的 70%,而且在未来相当长的时期内,我国仍将是煤为主,石油、天然气所占能源的消费比例逐渐上升。由此可见,我国的能源利用结构存在很大的弊端。

一是能源以煤炭为主,可再生资源开发利用程度很低。我国探明的煤炭资源占煤炭、石油、天然气、水能和核能等一次能源总量的 90%以上,煤炭在中国能源生产与消费中占支配地位。20 世纪 60 年代以前中国煤炭的生产与消费占能源总量的 90%以上,70 年代占 80%以上,80 年代以来煤炭在能源生产与消费中的比例占 75%左右,2012 年我国煤炭、石油、天然气、核能消耗量分别为总能源消耗量的 70.4%、17.7%、4.5%、0.7%^[2]。

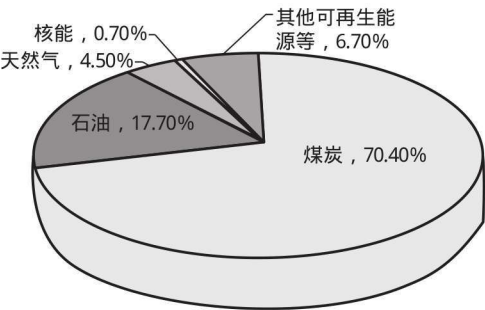


图 1-2 2012 年我国能源消耗比例

二是能源消费总量不断增长,能源利用效率较低。随着经济规模的不断扩大,我国的能源消费呈持续上升趋势。1957~1989 年中国能源消费总量从 9 644 万吨标准煤(SCE)增加到 96 934 万吨,增长了 9 倍。1989~1999 年,中国能源消费,从 96 394 万吨标准煤增加到 122 000 万吨,增长 26%。受资金、技术、能源价格等因素的影响,中国能源综合利用效率为 32%,能源系统总效率为 9.3%,只有发达国家的 50%左右^[3]。

三是能源消费以国内供应为主,环境污染状况加剧,优质能源供应不足。中国经济发展主要建立在国产能源生产与供应基础之上,能源技术装备也主要依靠国内供应。20 世纪 90 年代中期以前,我国能源供应的自给率达 98%以上。随着能源消费量的持续上升,以煤炭为主的能源结构造成城市大气污染,过度消耗生物质能引起生态破坏,生态环境压力越来越

大。世界银行认为,我国空气和水污染所造成的经济损失,大体占国内生产总值的 3%~8%,我国有的学者甚至认为中国环境破坏经济损失占到国民生产总值的 10%^[4~7]。

1.2.2 建筑能耗

建筑能耗、工业能耗、交通能耗并称我国三大用能大户。建筑能耗的总量逐年上升,在能源总消费量中所占的比例已从 20 世纪 70 年代末的 10% 上升到 27.45%,逐渐接近三成,而国际上发达国家的建筑能耗一般占全国总能耗的 33% 左右。以此推断,随着城市化进程的加快和人民生活质量的改善,我国建筑耗能比例最终还将上升至 35% 左右。若不采取有效的建筑节能措施,按照目前的建筑能耗状况,至 2020 年我国建筑能耗将比 2004 年增加 2.5 亿吨/年标准煤和耗电 5 800 亿~6 300 亿千瓦时/年,总计折合电力约 1.3 万亿千瓦时^[8~12]。我国能源供给压力巨大,已成为经济发展的重大瓶颈。

我国建筑用能浪费极其严重,而且建筑能耗增长的速度远远超过中国能源生产可能增长的速度,如果听任这种高耗能建筑持续发展下去,国家的能源生产势必难以长期支撑此种浪费型需求,从而不得被迫组织大规模的旧房节能改造,这将要耗费更多的人力和物力。在建筑中积极提高能源使用效率,就能够大大缓解国家能源紧缺状况,促进中国国民经济建设的发展。因此,建筑节能是贯彻可持续发展战略、实现国家节能规划目标、减排温室气体的重要措施,符合全球发展趋势。

由于建筑供暖空调所需的能源品位较低,采用传统的煤、电等高位能源进行建筑供暖空调,其能源消费结构极不合理,存在着巨大的浪费。采用可再生能源对建筑供暖空调日益得到国家及社会的关注,而自然界的水、空气、土壤中蕴含着大量的低品位可再生能源,这些低品位能源的温度与建筑供暖空调用能所需温度相当接近、彼此对口。若将这部分能源应用于居民供暖空调,将大大减少对常规化石能源的依赖^[13]。

1.2.3 我国可再生能源利用发展现状

可再生能源,是指传统能源之外的各种能源形式,包括太阳能、风能、生物质能、核能、地热能、氢能、海洋能等,其主要特点是可再生、循环利用。随着传统能源日益紧缺,可再生能源的开发与利用得到世界各国的广泛关注,越来越多的国家采取鼓励可再生能源发展的政策和措施,可再生能源的生产规模和使用范围正在不断扩大。2012 年《京都议定书》到期后新的温室气体减排机制将进一步促进绿色经济以及可持续发展模式的全面进行。

当前,中国的能源与环境问题严重,可再生能源开发利用受到越来越高的关注。可再生能源一方面作为传统能源的补充,另一方面可有效降低环境污染。我国可再生能源和新能源开发利用虽然起步较晚,但近年来也以年均超过 25% 的速度增长。

热泵技术作为一种新型的可再生能源利用技术,可以很好地解决建筑耗能危机。热泵系统是通过消耗小部分高位能源(电能),将原本无法直接利用的低品位可再生热源提升至中、高位能源,用于建筑供暖空调。采用热泵技术可大大提高能源利用效率,减少化石能源燃烧。然而,自然界的低品位热源存在热源空间分布不均匀,时间分布与热需求不匹配等问题,这就造成热泵系统无热可用、有热难用等难题^[14]。

1.3 国内外热泵技术应用研究现状

1.3.1 热泵基本原理

热泵是一种通过消耗小部分高品位能源,从低品位能源中取热的能源利用装置,即消耗少部分的驱动能源,吸收大量的低位能源,显然是一种高效的能源利用方式,利用热泵技术的逆向运行还可以达到制冷的目的^[15]。

根据能量守恒定理(热力学第一定律)^[16],热泵系统要从室内取走冷量或热量,则必然要有一个对应的无限大冷源或热源来提供一定的冷量或热量与之相平衡,一般来说,我们可以将外围环境(空气、水、土壤、太阳等)认为是无限大的冷/热源。也就是说,热泵系统事实上是一个热量传递装置。热泵系统运行方式为冬季供热、夏季供冷,能量传递方向与温度梯度方向相同,根据热力学第二定律,能量传递方向与温度梯度方向相同时,需要有一定功输入,即消耗一定量的电能^[17,18]。目前,工程应用中的热泵系统(以蒸气压缩式热泵系统为主)效率都很高,COP 可以达到 4 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,以保证节能性。

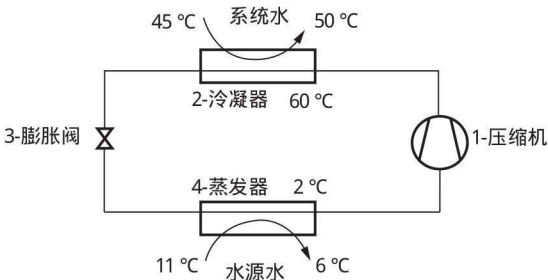


图 1-3 热泵技术的基本原理

1.3.2 热泵技术的应用意义

热泵技术成为当前我国新能源利用不可或缺的有力补充,已经获得了学术上以及工程上的广泛认可。在提供相同热量的情况下,热泵比燃煤和燃油锅炉节约 40%左右的一次能源,二氧化碳排放量可减少 68%,二氧化硫排放量可减少 93%,二氧化氮排放量可减少 73%^[19]。通过热泵系统,消耗一部分电能从自然界或者工业、生活污水的余热中提取低品位能源进行供热供冷,给我们提供了一条能源消耗少、环境污染小的绿色节能新途径。

1.3.3 热泵的分类及发展现状

按热泵的工作原理,可分为蒸汽压缩式(也称为机械压缩式热泵)、吸收式热泵、化学热泵、蒸汽喷射式热泵、热电热泵等。

蒸汽压缩式热泵由压缩机、冷凝器、节流膨胀部件、蒸发器等基本部件组成封闭回路,在

其中充注循环工质(如 R22 或 R134a 等),由压缩机推动工质在各部件中循环流动。工质在蒸发器中发生蒸发相变,吸收低温热源的热能;在压缩机中由低温低压变为高温高压,并吸收压缩机的驱动能;最后在冷凝器中发生冷凝相变放热,把蒸发、压缩过程中获得的能量供给用户。

蒸汽压缩式热泵系统以电能作为驱动力,运行效率很高^[20]($COP > 4$),即消耗 1 份电能能够给用户提供 4 份以上的热量,以燃煤锅炉发电效率 33%~42% 为准,蒸汽压缩式热泵系统的一次能源利用效率可以超过 100%,甚至接近 200%,其高效和环保性能显著。蒸汽压缩式热泵系统是当前应用技术最完善,应用范围最广的热泵系统,根据其驱动热源不同,还可以将热泵细化分类。

1. 空气源热泵

空气源热泵以室外空气为供能热源,系统简单,初期投资相对较低,运行可靠,热损耗很低,并节省机房面积,具有很好的环保性,没有特殊的环境或地理要求^[21]。空气源热泵的应用在我国已经存在很多实例,但我们也发现空气源热泵的应用存在一系列技术难题:① COP 低,特别是制热 COP 低;② 冬季温度过低时,换热器空气侧表面易结霜,对系统运行影响很大,且除霜的可靠性无法保证;③ 低温工况的运行效果差,主要表现为冬季温度很低的时候,系统制热量衰减迅速。由此,空气源热泵系统不适合冬季温度低于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[22] 的地区(例如东北,内蒙古等地区),而南方地区空气源热泵系统的发展具有很大潜力。

2. 地下埋管式土壤源热泵

地下埋管式土壤源热泵,通常我们只是简单地称其为土壤源热泵。在地下垂直地或水平地埋入塑料管,管内通入循环工质,使之成为循环工质与土壤间的换热器^[23]。在冬季,通过这一换热器从地下取热,成为热泵的热源;在夏季,从地下取冷,成为热泵的冷源。这就实现了冬存夏用或夏存冬用,这么看来,土壤更像一个储能装置^[24,25]。

目前土壤源热泵的主要问题是土壤传热能量密度很低,只有 25 W/m^2 左右^[26],导致换热面积过大,造成系统初期投资过高,因此仅适宜用于低密度建筑^[27,28];由于地质土壤结构比较复杂且难以勘测,热泵运行时对土壤造成的影响往往无法预估且难以勘测,当土壤内部的温度变化剧烈,导致热湿迁移发生断层时,系统的冷凝或蒸发温度将很容易发生波动,这时热泵将很有可能无法稳定运行,甚至无法运行。

要更好地利用土壤源热泵系统就需要首先从降低初期投资入手,充分与建筑基础相结合^[29],以当地的自然气候条件为重要设计基础,达到资源、资本利用最大化;通过与太阳能、空气源或其他种类的热泵耦合,组成复合热泵系统,形成一套综合性低值能源利用输送装置,夏季通过把吸收的太阳能和空气中的热量储存到土壤中,冬季加以利用,可明显提高热泵的效率^[30~32]。土壤源热泵系统具有很广阔的节能和环保潜力,上述有关方面的突破将使其有可能成为低密度建筑供暖空调冷热源的主要方式,还能不断推广到常规建筑供冷供热的行业中。

3. 地表水源热泵

地表水源热泵系统的供能热源是池塘、湖泊、河溪^[33]等地表水。在靠近江、河、湖、海等大量自然水体的地方,利用这些自然水体作为热泵的低温热源是一种很恰当的能源利用手段。芬兰学者在 2003 年通过建立一个模型对湖水温度分布进行模拟,证明寒冷气候地区用地表水源作热源的可能性。目前,北欧地区地表水源热泵已经实现规模化应用,美国制冷学

会 ARI320 标准规定^[34]:对湖水水源热泵系统来说,水体的面积及深度对系统供冷性能的影响比对供热性能的影响大,要求水体(深 4.5~9.0 m)的负荷不应超过 0.013 kW/m^2 或其水体不应产生温度分层现象。江、河、湖泊等地表水的分布与自然地理因素相关,地表水源热泵系统往往也会受到这些因素的限制。此外,与空气源热泵类似,地表水温也会受到自然环境因素的影响,但是相对于空气、水的比热容要高几个数量级,因此并不会导致整个热泵系统无法正常运行,只是热泵运行效率会有所下降。地表水的水质难以保证,这就需要在整套系统中加入水处理装置,例如过滤装置或中间换热器等防堵、防垢装置。当前改善和优化系统输送管路的设计方法^[35],开发低温差、大流量、小流速高效换热除污设备^[36],将成为地表水源热泵系统未来发展的关键突破点。同时,换热过程中对水体中生态环境的影响也需要在系统设计中预先加以考虑。

4. 污水源热泵

污水源热泵就是利用热泵直接从城市污水或二级水中提取热量,进行供热供冷,是污水综合利用的重要组成部分^[37]。据测算,城市污水全部充当热源可解决近 20%的城市建筑供暖,随着国民经济的发展,我国城市污水排放量和处理量也快速增加。据早年预计,2006~2010 年,全国污水排放总量年平均增长率将达到 55%,到 2015 年,全国污水年处理量将达到 360 亿 m^3 ^[38],假设利用率为 70%,综合平均负荷为 70 W/m^2 ,可供 3 亿 m^2 的建筑面积。污水源热泵利用的关键问题有以下两点:

(1) 阻塞污染问题。污水属于固、液两相流体,其中携带大量尺度较大的污物和尺度较小的悬浮物^[39,40],极易堵塞换热器,并在管壁上易形成大量的污垢,极大地影响换热器的效率,污水中携带的腐蚀性物质还会腐蚀输送管道。起初采用过滤装置将污水处理以后,再加以利用,但是效果并不理想,过滤格栅需要频繁的除垢和清洗,运行成本相对很高,而且格栅清洗难度较大。经过十余年的长足发展,目前采用的疏导式换热器已经基本解决了阻塞污染问题。

(2) 流动换热问题。当前污水处理厂对污水的处理程度不尽相同,污水实际是一种固、液两相,固相多组分流动的流体,其流动特性和换热特性与清洁水相比有一定的差别,因此无法精细地对污水的换热特性和流动特性进行研究,换热系数只能进行数量级上的估算,这样就对换热器的设计和制造提出了更高的要求。

实现对污水源热泵的安全可靠应用,必须要在以下方面进行突破^[41,42]:

(1) 开发研制新型城市原生污水热泵系统工艺。改进现有工艺的缺陷和不足,使系统更安全可靠地运行。

(2) 污水的流动特性与换热特性的深层次研究。污水自身理化性质与清水截然不同,黏度要高很多,组分相对复杂。通过实验手段认识污水的自身特性,是对污水综合性开发必备的理论科学基础。

(3) 污水换热器的结构设计。污水换热器作为当前最高效、最安全的污水余热利用手段,已经初步体现出其自身的发展潜力和经济效益,但是,结垢、阻塞等问题依然难以根除,关键是设备维护周期以及使用年限的长短问题。通过优化换热器的入口形状、流道形状、管道材料、尺寸参数等,使换热器具有更好的防堵、防垢、防腐蚀能力,并具有更好的传热特性。

5. 海水源热泵

海水源热泵是通过热泵把海水中的热能提取出来加以利用。据测算冷却水温度每降低

1℃,机组制冷系数可提高2%~3%^[43];冬季通过热泵的运行,提取海水中的热量用以建筑供暖。系统以海水为冷、热源,可以部分甚至全部取代传统空调和供热系统中的制冷机和锅炉,是一种环保节能且易实现的能源利用方式^[44],在瑞典、荷兰等欧洲国家应用较多,中国在2000年以后也开始重视海水源热泵的开发和试验,2008年青岛奥林匹克帆船中心媒体中心楼冬季首次采用海水源热泵供暖^[45],开创了我国公共建筑应用海水源热泵技术的先例。

目前海水源热泵也面临“三防”问题,由于海水的自然化程度过高,内部物质组成极为复杂,相比污水来说,其对管路装置的腐蚀性更强,而且海水中存在大量海洋生物或生物卵,附着在管路上会严重影响设备的换热性能^[46]。海水水温低、流量大,海水与清水的换热过程是一种特殊的传热过程^[47],具有温差小、流量大等特点,其复杂的流动传热特性,也是阻碍海水源热泵发展的关键问题。研制防腐材料,改进防腐工艺,开发海洋生物除垢技术,例如,电解海水制氯等技术,深入探索海水流动及传热特性,是解决海水源热泵推广缓慢和工程应用难以实现的关键。

6. 复合热泵

在实际应用中,单一热源热泵存在各自的突出问题,如空气源热泵室外换热器冬季存在结霜、除霜等问题,地源热泵采用土壤埋管系统时存在地下埋管面积较大、初期投资大的问题,污水源热泵“三防”问题等等,均制约了其进一步的发展。目前结合单一热源热泵系统优势的复合热源热泵技术^[48,49]已成为暖通空调行业研究发展趋势之一。

山东建筑工程学院的曲云霞、方肇洪等人对太阳能辅助供暖的地源热泵进行经济分析,结果表明:在我国北方采暖季节,采用地热换热器与太阳能集热器串联运行的方式比完全使用地源热泵更经济。上海理工大学的刘业风、伍德虎等对组合蒸发器型的太阳能和空气源双热源热泵及热水系统进行了控制方案设计,根据太阳能辐射强度及空调负荷的变化,采用不同的运行模式,可以减小运行成本,提高系统经济性。东南大学的张小松、徐国英设计了一种新型的太阳能——空气复合热源热泵热水器,该装置通过螺旋翅片蒸发管的平板型集热/蒸发器,可以实现对太阳能和空气源双热源的同步或切换利用。

但目前由于复合热源热泵系统较为复杂^[50,51],运行控制要求较高,并且初期投资较高,回收周期长,该技术推广应用的进展一直都很缓慢。除了从技术角度进行更深入广泛的研究,优化其系统构件匹配外,还需要国家制定相关的配套激励政策,从而推动这一节能环保技术的应用和科研进程。

1.3.4 热泵技术发展存在的问题

热泵技术的总体发展趋势是更高效、更节能、更环保,热泵系统的总体发展趋势是系统化、整体化、多元化。当前热泵技术的发展存在两大类问题:

一是热泵系统设计运行不合理,主要体现在:① 初期设计不合理,由于对热泵系统节能环保性能的盲目性,容易导致设计的冷热负荷不匹配,负荷过大则系统节能性能下降并且初期投资过高,负荷过低则系统无法正常运行;设计过程中管路计算不够精确,以及无法准确把握水泵的运行特性,易造成输送能耗过高,直接导致整个系统节能系数降低,当输送能耗比例大于25%以后,整个系统的节能性能就会明显下降。② 后期运行不合理,热泵系统作为一种新型的能源利用方式,机房管理对运行人员的专业要求相对较高,当运行人员的资质

达不到标准要求时,热泵在运行中就会盲目地依赖其节能性,运行控制无法做到有序化、合理化,导致运行成本偏高,削弱了其运行成本低的优势。

二是随着热泵技术的日趋成熟,源的探索与发展已经成为制约热泵技术二次革新的关键性因素。所谓的源是指维持热泵系统稳定持续运行的低品位热源,其主要特点是温度较低、总量极大、无法直接利用,主要包括空气源、污水源、地下水源、土壤源、地表水源等。虽然此类能源总量极大,但在空间上分布不均匀,在时间上与热需求不匹配,最终导致热泵系统无热可用、有热难用。在地域分布上,往往在热需求集中的区域,缺乏热源。在时间分布上,热需求与低位热源也无法达到完全同步。夏季,热用户需要空调制冷,但自然界中缺乏冷源,却存在着大量的热量;冬季,热用户需要供暖,但自然界中缺乏热源,却存在大量的冷量。对源的深入探索是逐步完善热泵系统应用体系的重要途径,同时又要突破科研思维定式,不拘泥于当前的热泵可用低品位能源形式,从载能介质形态、极限温度、流动传热特性等方面开发新型热源。

1.4 湖水源热泵发展现状

湖水源热泵根据其所利用的低品位热源的种类可归类于地表水源热泵系统。湖水与河水的差异较为明显,前者水体流动性差(部分无流动性,仅通过降雨、降雪等自然气象形态进行水体补充),水体总热容量小,热泵系统取放热对整个水体物化特性尤其是温度影响较大,由于流动性较差,水体冬季易结冰;后者水体流动性强,热承载能力强,热泵系统取热对整个水体流域的物化特性几乎无影响。湖水水体具有一般地表水体的通性,水质较差^[52],含有大量的泥沙及水生生物,属于多相流体,流体的流动传热特性比较复杂;水温方面,由于湖水与大气直接接触,水温状况与地下水及污水相比冬季低 $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,夏季高 $5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,但与当地空气温度相比冬季高 $3\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,夏季低 $5\sim 12\text{ }^{\circ}\text{C}$,具有一定的温度优势^[53]。

湖水源热泵系统在国内外的发展比较迅速,不仅在系统理论体系研究领域具有一定的突破,且拥有大量的工程应用实践案例。Jobson^[54,55]针对发电厂冷凝水来源的湖泊建立了湖水温度分布模型,全面考虑大气与湖水之间的热量传递过程,如蒸发、对流、水面长波辐射、天空长波辐射、太阳辐射、冷辐射等的影响,但没有考虑热分层的情况。Chiasson AD^[56]等建立了池塘用于计算土壤源热泵夏季多余冷凝热的模型,考虑了池水与盘管换热量的逐时变化,但该模型将池水视为均匀混合,没有考虑水体的垂向水温变化。陈晓等人^[57]建立了闭式湖水源热泵系统的数学模型,将垂向水温模型与热泵机组模型耦合求解,分析夏热冬冷地区闭式湖水源热泵系统的运行特性。陈金华等^[58]利用流体计算软件建立3D湖水水体模型,对某湖水源热泵系统的排放水管网采用复合散点排水以及采用集中排水方式进行了动态数值模拟,得到逐时排热工况下湖体温度场的分布情况。2004年,在湖南省湘潭市城市中心区建造了试验性的开式湖水源热泵系统,利用 $56\,000\text{ m}^2$ 的人工湖中水深 25 m 处的水作为低温冷热源,通过热泵机组为附近四幢大型建筑进行区域供冷供热^[59,60]。2007年,重庆开县人民医院湖水源热泵空调系统利用容量为 $16\text{万}\sim 22\text{万 m}^3$,水深为 $5\sim 7.5\text{ m}$ 的安康水库内的水源作为空调系统的冷热源,采用了直接取水、间接利用的方案^[61,62]。2000年在美国Iowa州的West Burlington建成世界上最大的闭式湖水源热泵系统,利用