

“十二五”
国家重点图书



21 世纪可持续能源丛书

地热能、余热能与热泵技术

张 军 编著



化学工业出版社

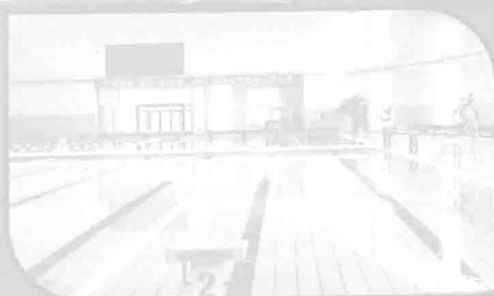
“十二五”
国家重点图书



21 世纪可持续能源丛书

地热能、余热能与热泵技术

张 军 编著



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书对热泵技术所利用的主要能源、热泵技术原理与设计以及应用进行了介绍,并特别针对热泵技术在应用中容易出现的问题进行了分析和阐述。

本书较全面地介绍各种热泵技术的应用方式及各种低品位能源的利用方法。主要包括三部分:第一部分是能源,主要介绍能源的品位以及地热能与余热能及其他低品位能源;第二部分是热泵技术,主要介绍压缩式热泵、吸收式热泵、吸附式热泵以及引射式热泵等相关知识;第三部分是技术应用,主要介绍地源热泵技术与浅层地热能的利用(包括地下水源热泵、土壤源热泵及地表水源热泵)、污水源热泵技术与生活余热的利用、吸收式热泵与中低温工业余热的利用以及电厂凝汽余热回收与热电联产综合技术等。

本书适合相关专业的技术人员阅读,也可作为高校相关专业师生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

地热能、余热能与热泵技术/张军编著. —北京:化学工业出版社, 2014. 4
(21 世纪可持续能源丛书)
ISBN 978-7-122-19435-0

I. ①地… II. ①张… III. ①地热能-热泵 ②余热利用-热泵 IV. ①TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 002471 号

责任编辑:戴燕红

文字编辑:丁建华

责任校对:边涛

装帧设计:韩飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京永鑫印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张26 $\frac{3}{4}$ 字数465千字 2014年6月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 88.00 元

版权所有 违者必究

序

20 世纪末，随着人类社会对能源可持续发展的迫切需要，出现了“可持续能源”的理念，并受到全世界人们的关注。

21 世纪以来，能源更是渗透到了人们生活的每个角落，成为影响全球社会和经济发展的第一要素。目前中国已经成为全球能源生产与消费的第一大国，能源与经济的关系、能源与环境的矛盾、能源与国家安全等问题日显突出。因此，寻找新型的、清洁的、安全可靠并可可持续发展的能源系统是广大能源工作者的历史使命。

2005 年，化学工业出版社出版了“21 世纪可持续能源丛书”，受到我国能源工作者的广泛好评；时隔 8 年，考虑到能源形势的变化和新技术的出现，又准备出版“21 世纪可持续能源丛书”（第二版），的确是令人高兴的事情。

“21 世纪可持续能源丛书”（第二版）共 12 册，仍然以每一个能源品种为一个分册，除对原有的内容做了更新，补充了最新的政策、技术和数据等外，增加了《储能技术》、《节能与能效》、《能源与气候变化》3 个分册。丛书第二版包括了未来能源与可持续发展的概念、政策和机制，各能源品种的资源评价、新工艺技术及特性以及开发和利用等；新增加的 3 个分册介绍了最新的储能技术，能源对环境与气候的影响以及提高能源效率等，使得丛书内容更加广泛、丰富和充实。

由于内容的广泛性和丰富性，以及参加编写的专家的权威性，本套丛书在深度和广度上依然保持了较高的学术水平和实用价值，是能源工作者了解能源

政策及信息，学习先进的能源技术和广大读者普及能源科技知识的不可多得的好书。

让我们期待这套丛书的出版发行，能为我国 21 世纪可持续能源的发展作出贡献。

A handwritten signature in black ink, consisting of three characters: '王', '大', and '中'.

中国科学院院士
2013 年 11 月 6 日

前 言

能量不仅有数量多少的不同，还有品位高低的差别。因此，节约能源不仅要从数量上节约，也要从品位上节约。在能够满足使用要求的前提下，应该尽可能利用低品位能源。浅层地热能、生活余热能和大多数的工业余热能都是低品位的能源，这些能源不仅价格便宜、数量巨大，而且不会增加向环境的排放。但也正是由于品位太低，这些能源一般不能被直接利用，必须借助热泵加以提升后才能利用。

热泵技术作为一项为数不多的真正能够实现市场化的可再生能源技术，不仅得到了广大用户的认可，而且得到了各级政府的大力支持。自 1994 年清华大学徐秉业教授研制出我国第一台地源热泵机组以来，地源热泵技术在全国的应用面积已经超过 2.4 亿平方米，为数万个项目提供了供暖、制冷和卫生热水，绝大多数项目都取得了很好的效果，为各个地区的节能减排和环境保护工作做出了重要的贡献。吸收式热泵等其他热泵技术在工业余热回收领域也开始扮演越来越重要的角色。但是，也有一些热泵项目在运行过程中出现了问题，这主要是由设计、生产、施工和运行管理中存在的一些问题造成的，因此，合理的设计、合格的产品、规范的施工和正确的运行管理是热泵技术成功应用的必要条件。本书作者通过搜集各方面的资料、参阅大量相关的文献，并结合作者多年从事热泵技术实践的经验，对热泵技术所利用的主要能源、热泵技术的原理与设计以及热泵技术的应用进行了粗浅的介绍，并特别针对热泵技术及应用中容易出现的问题进行了分析和阐述。本书试图用比较浅显的语言较全面地介绍各种热泵技术的应用方式及各种低品位能源的利用方法，希望不仅能为相关专业的技术人员提供参考，而且能为非专业人员提供一些借鉴和帮助。但由于水平有限，本书离上述目标还有很大的距离。

本书主要分三部分，第一部分介绍能源，主要包括能源的品位以及地热能、余热能及其他低品位能源的介绍；第二部分介绍热泵技术，主要包括压缩式热泵、吸收式热泵、吸附式热泵以及引射式热泵等相关知识；第三部分介绍技术应用，主要有地源热泵技术与浅层地热能的利用（包括地下水源热泵、土壤源热泵及地表水源热泵）、污水源热泵技术与生活余热的利用、吸收式热泵与中低温工业余热的利用以及电厂凝汽余热回收与热电联产综合技术等。

本书的编写工作主要由北京中科华誉能源技术有限公司的技术人员完成，其中唐道轲完成了第1章的部分工作和第4章的大部分工作，张振兴完成了第3章和第4章的部分工作，卓俊生完成了第5章的大部分工作，梁忠完成了第5章的部分工作，张茂勇完成了第7章、第8章的部分工作，刘军完成了第9章的大部分工作，另外，陈永平、黄智强、杨石县、张皓彬、朱龙华、周璐、韩松、倪文岗、胡永逵、刘文会、孙卿等也都参与了本书的部分工作，其余工作及统稿由张军完成。本书还得到了清华大学付林老师、张世钢老师和李岩博士的大力支持，在此表示衷心感谢。

本书在编写过程中，参考借鉴了很多相关文献，在此向各位作者表示深深的谢意。

由于编著者水平所限，难免存在疏漏和不足之处，欢迎读者批评指正。

编著者

2013年11月

目 录

第 1 章 能源和能源的品位	1
1.1 能量和能源的分类	1
1.1.1 能量的类型	1
1.1.2 能源的种类	2
1.2 能源的利用	3
1.2.1 加热的设备	3
1.2.2 利用热能做功的设备	5
1.2.3 设备效率和能量平衡分析	9
1.3 能源的品位	10
1.3.1 热能做功的能力	11
1.3.2 焓、熵及可逆与不可逆过程	13
1.3.3 能量贬值原理	14
1.4 评价能源利用合理性的方法	15
1.4.1 焓和焓效率	16
1.4.2 能级和能级分析	17
1.4.3 能质系数及计算方法	17
1.4.4 能源综合利用系数	20
1.5 能源的梯级利用	21
1.5.1 热电联产	21
1.5.2 余热余压发电	22
1.5.3 天然气热电冷三联供（分布式能源）	23

1.5.4 能源互联网.....	23
------------------	----

第2章 地热能	24
----------------------	-----------

2.1 地热能的来源.....	24
2.1.1 深部地热能的来源.....	24
2.1.2 浅层地热能的来源.....	26
2.2 浅层地热能的特点与意义.....	28
2.2.1 浅层地热能的优势.....	28
2.2.2 浅层地热能的不足.....	29
2.2.3 开发利用浅层地热能的意义.....	29
2.3 浅层地热能的存在形式.....	30
2.3.1 地下水.....	30
2.3.2 地下土壤.....	35
2.3.3 地表水.....	40
2.4 深部地热能的特点与应用.....	42
2.4.1 深部地热能的特点与意义.....	42
2.4.2 深部地热能的存在形式.....	42
2.4.3 世界地热资源分布.....	43
2.4.4 我国地热资源概况.....	44
2.4.5 深部地热能的利用.....	45
2.4.6 应用中需解决的问题.....	48

第3章 余热能	50
----------------------	-----------

3.1 工业余热介绍.....	50
3.1.1 我国工业能源消耗的状况.....	50
3.1.2 工业余热资源的重要性.....	51
3.1.3 工业余热资源的分类.....	52
3.1.4 工业余热资源的特点.....	53
3.1.5 工业余热资源的用途.....	54
3.2 工业余热利用技术.....	55
3.2.1 热交换技术.....	55
3.2.2 热功转换技术.....	59
3.2.3 热泵技术.....	63
3.2.4 工业余热利用技术小结.....	64
3.3 生活余热的资源及应用.....	65
3.3.1 城市污水的温度.....	65

3.3.2	城市污水的资源量	66
3.3.3	城市污水的特点	66
3.3.4	城市污水的类型	66
第4章	热泵技术	68
4.1	热泵技术介绍	68
4.1.1	热泵的概念	68
4.1.2	热泵的分类	69
4.1.3	热泵技术的应用	72
4.1.4	热泵技术的发展	72
4.2	压缩式热泵技术	73
4.2.1	压缩式热泵技术的原理	73
4.2.2	压缩机的选择与节能	86
4.2.3	热交换器的选择	101
4.2.4	节流装置的选择与节能	106
4.2.5	热泵工质(制冷剂)	111
4.2.6	实用热泵装置介绍	122
4.3	第一类吸收式热泵	124
4.3.1	吸收式热泵的原理	124
4.3.2	吸收式热泵的热量交换	127
4.3.3	吸收式热泵的工质对	128
4.3.4	吸收式热泵的特点	128
4.3.5	溴化锂双效吸收式热泵	129
4.3.6	吸收式热泵强化传热传质的方法	132
4.3.7	运行中提高溴化锂吸收式热泵性能的途径	135
4.3.8	溴化锂吸收式热泵的结晶分析及控制对策	138
4.4	第二类吸收式热泵	141
4.4.1	第二类吸收式热泵的基本原理	141
4.4.2	第二类吸收式热泵热力分析	142
4.4.3	两级第二类吸收式热泵	142
4.4.4	带喷射器的第二类吸收式热泵	143
4.4.5	一类热泵与二类热泵串联的联合循环	145
4.5	吸附式热泵技术	147
4.5.1	吸附式热泵的原理	147
4.5.2	吸附式热泵的特点	149
4.5.3	吸附式热泵的循环系统	150

4.5.4	吸附式热泵的工质对	151
4.6	引射式热泵技术	152
4.6.1	引射式热泵的流程和原理	152
4.6.2	引射式热泵的用途及特点	153
4.6.3	引射式热泵的性能分析	154
4.6.4	引射式热泵变工况性能分析	156
4.6.5	新型引射式热泵	159
4.6.6	引射式热泵的应用	162

第5章 地源热泵技术与浅层地热能的利用 167

5.1	地源热泵技术介绍	167
5.1.1	地源热泵技术的主要优势	167
5.1.2	地源热泵技术的系统组成	169
5.1.3	地源热泵的类型	169
5.1.4	地源热泵节能性分析	172
5.2	地下水源热泵	176
5.2.1	地下水源热泵系统的组成	176
5.2.2	地下水换热系统设计的步骤	177
5.2.3	地下水总需求量的确定	179
5.2.4	地下水资源勘察	180
5.2.5	地下水井的设计与施工	181
5.2.6	地下水回灌技术	188
5.2.7	热泵系统的设计要点	193
5.2.8	需要注意的主要问题	195
5.2.9	地下水源热泵的典型工程案例	197
5.3	土壤源热泵	211
5.3.1	土壤源热泵系统组成	211
5.3.2	换热管的埋设方式	213
5.3.3	影响垂直埋管换热性能的主要因素	220
5.3.4	垂直埋管换热器设计步骤与要点	230
5.3.5	资源勘察及热物性测试	232
5.3.6	换热管长度计算	233
5.3.7	地埋管换热系统的管网设计及应注意的问题	234
5.3.8	地下热平衡问题	236
5.3.9	钻孔与回填技术	238
5.3.10	需要注意的主要问题	239

5.3.11 土壤源热泵的工程实例分析·····	240
5.4 地表水源热泵系统·····	244
5.4.1 地表水换热系统的形式·····	244
5.4.2 地表水换热系统设计的步骤和要点·····	247
5.4.3 地表水资源勘察·····	247
5.4.4 闭式系统盘管换热器的设计·····	248
5.4.5 江河水的取水·····	249
5.4.6 海水的取水·····	253
5.4.7 地表水水质的影响·····	254
5.4.8 地表水源热泵的工程案例·····	259

第6章 污水源热泵技术与生活余热的利用····· 271

6.1 污水源热泵技术介绍·····	271
6.1.1 污水源热泵的优越性·····	271
6.1.2 污水源热泵的局限性·····	272
6.2 污水源热泵应用的关键问题与技术·····	272
6.2.1 污杂物问题·····	273
6.2.2 污垢问题·····	274
6.2.3 腐蚀问题·····	277
6.3 污水源热泵系统设计·····	277
6.3.1 污水源热泵系统形式的确定·····	277
6.3.2 污水源热泵系统应注意的问题·····	279
6.4 影响污水源热泵性能的因素·····	280
6.4.1 污水温度对系统性能的影响·····	280
6.4.2 污垢热阻对系统性能的影响·····	281
6.5 工程实例分析·····	281
6.5.1 污水直接利用工程案例——成远大厦污水源热泵工程·····	281
6.5.2 污水间接利用工程案例——沈阳阳光100国际新城污水源 热泵工程·····	282

第7章 吸收式热泵与中低温工业余热的利用····· 287

7.1 第一类吸收式热泵与低温余热的利用·····	288
7.1.1 影响余热回收效率的几个因素·····	288
7.1.2 经济性评价·····	293
7.1.3 应用实例·····	293
7.2 第二类吸收式热泵与中温余热的利用·····	298

7.2.1	在石化领域中的应用	298
7.2.2	在冶金行业中的应用	300
7.2.3	在酒精蒸馏中的应用	300

第8章 电厂凝汽余热回收与热电联产综合技术介绍

302

8.1	电厂余热资源状况	302
8.1.1	全国火力发电能力及其能耗现状	302
8.1.2	电厂余热量分析	303
8.2	热电联产	304
8.2.1	热电联产的发展概况	304
8.2.2	常规热电联产系统的介绍	305
8.2.3	大型供热机组的抽汽原理	306
8.2.4	抽汽安全性分析	308
8.2.5	最小凝汽量和最大抽凝比	310
8.2.6	传统热电联产在发展中遇到的问题	314
8.2.7	解决热电联产发展中遇到问题的途径	315
8.3	回收利用凝汽余热的方法	316
8.3.1	低真空运行技术	316
8.3.2	压缩式热泵技术	319
8.3.3	吸收式热泵技术	320
8.4	降低热网回水温度的方法	321
8.4.1	混水换热的方式	321
8.4.2	利用压缩式热泵降低热网回水温度	324
8.4.3	吸收式换热大温差供热技术	324
8.5	基于吸收式换热的热电联产集中供热系统	326
8.5.1	基于吸收式换热系统的介绍	327
8.5.2	Co-ah 系统利用凝汽余热的不同目标	329
8.5.3	Co-ah 系统凝汽余热对机组发电的影响	331
8.6	零能源损耗率的燃气-蒸汽联合循环热电冷三联供技术	332
8.6.1	技术背景	332
8.6.2	新技术介绍	332
8.7	电厂余热回收供热技术应用实例简介	334
8.7.1	赤峰示范项目	334
8.7.2	北京石景山热电厂（湿冷机组）	338
8.7.3	大同第一热电厂（空冷机组）	339

第 9 章 燃气冷热电三联供系统..... 341

9.1 采用冷热电三联供的意义 342

9.2 燃气冷热电三联供的使用条件 343

9.3 燃气冷热电三联供的系统组成及系统形式 344

9.4 燃气冷热电联供系统的基本原则与设备选型 350

9.4.1 燃气冷热电联供系统的基本原则 350

9.4.2 燃气冷热电联供系统的设备选型 351

9.5 燃气冷热电联供系统的评价 354

9.5.1 燃气冷热电联供系统的节能率 354

9.5.2 年平均能源综合利用效率及年平均余热利用率 356

9.6 工程的施工与验收 357

9.7 工程案例 357

9.7.1 北京中关村国际商城 357

9.7.2 长沙黄花国际机场 359

9.7.3 广州珠江啤酒厂 360

附录 地源热泵行业发展的政策背景..... 362

参考文献 364

第 1 章

能源和能源的品位



人类最初利用的能源本来很少，而且都是“可再生能源”：利用太阳能晒太阳，利用柴火等生物质能取暖做饭。但是近百年来，从吃穿住行到工业生产，人们对能源的消耗简直是大得惊人，如果不加节制，将会在未来两三百年的时间里把地球上亿万年形成的化石能源挥霍一空，而且由此产生的排放会给我们生存的地球带来无可挽回的环境灾难。

1.1 能量和能源的分类

人类不仅消耗能源的数量惊人，而且在种类上也越来越多。

1.1.1 能量的类型

能量是指物体做功的能力。如果一个力作用在物体上，物体沿这个力的方向移动了一段距离，这个力与这个距离的乘积就称为机械功，简称为功。做功可以使物体所具有的能量发生变化，而且物体能量变化的大小可以用做功的多少来度量。

能量也是物质运动能力的一种反映。相应于不同形式的运动，能量分为机械能、热能、电能、光能、化学能、核能等。

机械能是衡量物体宏观运动能力的一种能量，它是动能和势能之和，势能包括重力势能和弹性势能。决定动能大小的是质量和速度，决定重力势能大小的是质量和高度，决定弹性势能大小的是劲度系数与形变量。

反映分子运动状态的能量是热能。热能是大量分子所做的无规则运动的动能总和，又称热量。这也是人类直接利用最多的一种能量。所有分子的动能和势能的总和则称为内能。

反映电子运动的能量是电能。电能的利用是第二次工业革命的主要标志，从此人类社会进入电气时代。电能也是表示电流做功能力的物理量。

与光子运动对应的能量是光能，太阳、蜡烛等通过发光所释放出来的能量就是光能。

化学能是物体发生化学反应时所释放的能量，它不能直接用来做功，只有在发生化学变化的时候才释放出来，变成热能或者其他形式的能量。像石油和煤的燃烧，炸药爆炸以及人吃的食物在体内发生化学变化时所放出的能量，都属于化学能。

核能是从原子核释放出来的能量，也称原子能。释放核能的核反应有三种：①核裂变，打开原子核的结合力，让大原子分裂成小原子时释放出来的能量，核电站、原子弹利用的就是这种能量；②核聚变，将小原子熔合在一起，把小原子聚合成大原子时释放出来的能量，核聚变所释放出来的能量要比核裂变大得多，氢弹利用的就是这种能量，能够发电的可控核聚变正在研制过程中；③核衰变，自然的慢得多的裂变形式。

1.1.2 能源的种类

能源就是能量的来源，是指能够提供能量的物质。能源的种类有很多，分类方法也很多。

(1) 按形成和来源分类

① 来自太阳辐射的能量，如：太阳能、煤、石油、天然气、水能、风能、生物质能等。煤、石油、天然气等都是由古代生物沉积到地下以后形成的化石，所以称为化石能源，也叫化石燃料。这些古代生物最初是由光合作用形成的，所以化石能源也来自太阳能。化石能源是目前人类消耗的最主要的能源。

水能也是一种由于太阳辐射形成的能源。在水循环过程中，海水吸收太阳能，受热蒸发为水蒸气，上升到高空，具有了势能，水蒸气被输送到陆地上空，形成降水，水往低处流，流动过程中，势能逐渐转化为动能，可以用于发电。所以，归根到底，水能来自太阳辐射能。

② 来自地球内部的能量，如：核能、地热能等。

③ 天体引力能，如：潮汐能。

在上述各种能源中，化石能源和生物质能所储存的是化学能，要通过燃烧等方式转化成热能后才能被人类所利用；水能、潮汐能都属于机械能；太阳能是一种光能。

(2) 按属性分类

① 可再生能源，如：太阳能、地热能、水能、风能、生物质能、海洋能。

可再生能源有两大特点：一是可以再生，接近于取之不尽，用之不竭；二是不会产生 CO_2 和各种有害物质的净排放。

② 不可再生能源，如：煤、石油、天然气、核能等。

(3) 按开发利用状况分类

① 常规能源，如：煤、石油、天然气、水能、传统的生物质能等。

传统的生物质能就是指柴火等未经现代加工的生物质。除了水能和传统的生物质能外，常规能源基本上都是化石能源。常规能源从根本上来讲，都来自于

太阳能。

② 新能源，可再生能源与核能通常都称为新能源。

新型生物质能指经过加工后的生物质，例如颗粒化、液化或气化的生物质，也属于新能源的范畴。

(4) 按转换传递过程分类

① 一次能源 (Primary Energy)，直接来自自然界的能源，如：煤、石油、天然气、水能、风能、核能、海洋能、生物质能等。

② 二次能源 (Secondary Energy)，由一次能源经过加工转换以后得到的能源，如：电力、蒸汽、热水、煤气、汽油、柴油、重油、液化石油气、酒精、沼气、氢气和焦炭等。

1.2 能源的利用

人类利用能源的方式主要有两种，一种是利用能源做功，将能源转化成机械能或电能供人们使用；另一种是利用能源加热。

就目前国际国内技术水平而言，在今后相当长的时间内，主要能源仍将以煤炭、石油以及天然气等化石燃料为主。通过燃烧将这些化石燃料的化学能转化为燃烧产物的热能，用于做功或加热，是人类利用能源最主要的方式。

利用燃料热能做功，就是通过各种类型的发动机以及发电机，将燃料热能转化为机械能或电能。例如蒸汽动力装置、燃气动力装置、火箭发动机、内燃机等都能实现热能的转化并获得机械能或电能。这些间接利用热能的方式对于人类的文明进步以及生产发展极为重要。人类自从发明了蒸汽机之后，就引发了第一次工业革命，使手工作坊式生产走向大规模的工业生产，对人类改造自然、发展生产起到了重大作用。

利用热能的另一种方式是直接利用热能加热。如工业生产中的冶炼、加热、蒸煮、干燥以及分馏等，又如日常生活中的热水供应及采暖等。

对其他各种能源的利用也基本上是做功和加热这两种方式。例如，利用太阳能可以通过光热作用加热，也可以通过光电作用发电；利用风能和潮汐能可以发电；利用地热能和生物能可以加热或发电；利用核能也可以加热或发电。

1.2.1 加热的设备

生活中和工业中用于加热的设备很多，如各种锅炉、工业窑炉以及各种加热器等。为有助于理解本书后面章节的内容，下面对电厂锅炉和工业炉做一简要介绍。

1.2.1.1 电厂锅炉

锅炉一般由“锅”和“炉”两部分组成。所谓“炉”是指锅炉的燃烧系统，它通常包括炉膛、燃烧器、烟道、炉墙架等，其作用是完成燃料的燃烧过