



能源与环境出版工程

总主编 翁史烈

低品位热能转换过程及利用

——有机物工质发电及制冷

Conversion Process and Utilization of Low Grade Heat Energy
Power Generation and Refrigeration Using Organic Working Fluid

翁一武 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS



能源与环境出版工程

总主编 翁史烈

低品位热能转换过程及利用

——有机物工质发电及制冷

Conversion Process and Utilization of Low Grade Heat Energy
Power Generation and Refrigeration Using Organic Working Fluid

翁一武 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书以低品位热能利用为中心,介绍了低品位热能与能量转换原理,并对先进的应用技术进行了分析。主要内容包括有机工质的特性、有机朗肯循环发电技术、有机工质喷射制冷系统、有机工质低品位热能发电制冷复合系统、有机工质发电制冷系统热力计算与设计、低温余热发电典型设计和应用案例分析。

本书可作为高等学校能源动力类专业学生的选修课教材,也可作为能源利用部门有关技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

低品位热能转换过程及利用——有机物质发电及制冷/
翁一武著. —上海:上海交通大学出版社,2014
能源与环境出版工程

ISBN 978-7-313-12376-3

I. ①低… ②翁… ③低温余热—发电—热利

IV. ①TK11②X706

中国版本图书馆

数据核字(2014)第290003号



低品位热能转换过程及利用——有机物质发电及制冷

著 者:翁一武

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:韩建民

印 制:上海天地海设计印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:249千字

版 次:2014年12月第1版

书 号:ISBN 978-7-313-12376-3/TK

定 价:68.00元

地 址:上海市番禺路951号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:13.25

印 次:2014年12月第1次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:021-33872559

能源与环境出版工程 丛书学术指导委员会

主 任

杜祥琬(中国工程院原副院长、中国工程院院士)

委 员(以姓氏笔画为序)

苏万华(天津大学教授、中国工程院院士)

岑可法(浙江大学教授、中国工程院院士)

郑 平(上海交通大学教授、中国科学院院士)

饶芳权(上海交通大学教授、中国工程院院士)

闻雪友(中国船舶工业集团公司 703 研究所研究员、中国工程院院士)

秦裕琨(哈尔滨工业大学教授、中国工程院院士)

倪维斗(清华大学原副校长、教授、中国工程院院士)

徐建中(中国科学院工程热物理研究所研究员、中国科学院院士)

陶文铨(西安交通大学教授、中国科学院院士)

蔡睿贤(中国科学院工程热物理研究所研究员、中国科学院院士)

能源与环境出版工程 丛书编委会

总主编

翁史烈(上海交通大学原校长、教授、中国工程院院士)

执行总主编

黄 震(上海交通大学副校长、教授)

编 委(以姓氏笔画为序)

马重芳(北京工业大学环境与能源工程学院院长、教授)

马紫峰(上海交通大学电化与能源技术研究所教授)

王如竹(上海交通大学制冷与低温工程研究所所长、教授)

王辅臣(华东理工大学资源与环境工程学院教授)

何雅玲(西安交通大学热流科学与工程教育部重点实验室主任、教授)

沈文忠(上海交通大学凝聚态物理研究所副所长、教授)

张希良(清华大学能源环境经济研究所所长、教授)

骆仲泐(浙江大学能源工程学系系主任、教授)

顾 璠(东南大学能源与环境学院教授)

贾金平(上海交通大学环境科学与工程学院教授)

徐明厚(华中科技大学煤燃烧国家重点实验室主任、教授)

盛宏至(中国科学院力学研究所研究员)

章俊良(上海交通大学燃料电池研究所所长、教授)

程 旭(上海交通大学核科学与工程学院院长、教授)

总 序

能源是经济社会发展的基础,同时也是影响经济社会发展的主要因素。为了满足经济社会发展的需要,进入 21 世纪以来,短短十年间(2002—2012 年),全世界一次能源总消费从 96 亿吨油当量增加到 125 亿吨油当量,能源资源供需矛盾和生态环境恶化问题日益突显。

在此期间,改革开放政策的实施极大地解放了我国的社会生产力,我国国内生产总值从 10 万亿元人民币猛增到 52 万亿元人民币,一跃成为仅次于美国的世界第二大经济体,经济社会发展取得了举世瞩目的成绩!

为了支持经济社会的高速发展,我国能源生产和消费也有惊人的进步和变化,此期间全世界一次能源的消费增量 28.8 亿吨油当量竟有 57.7% 发生在中国! 经济发展面临着能源供应和环境保护的双重巨大压力。

目前,为了人类社会的可持续发展,世界能源发展已进入新一轮战略调整期,发达国家和新兴国家纷纷制定能源发展战略。战略重点在于:提高化石能源开采和利用率;大力开发可再生能源;最大限度地减少有害物质和温室气体排放,从而实现能源生产和消费的高效、低碳、清洁发展。对高速发展中的我国而言,能源问题的求解直接关系到现代化建设进程,能源已成为中国可持续发展的关键! 因此,我们更有必要以加快转变能源发展方式为主线,以增强自主创新能力为着力点,规划能源新技术的研发和应用。

在国家重视和政策激励之下,我国能源领域的新概念、新技术、新成果不断涌现;上海交通大学出版社出版的江泽民学长著作《中国能源问题研究》(2008 年)更是从战略的高度为我国指出了能源可持续发展的健康发展之路。为了“对接国家能源可持续发展战略,构建适应世界能源科学技术发展趋势的能源科研交流平台”,我们策划、组织编写了这套“能源与环境出版工程”丛书,其目的在于:

一是系统总结几十年来机械动力中能源利用和环境保护的新技术新成果；

二是引进、翻译一些关于“能源与环境”研究领域前沿的书籍，为我国能源与环境领域的技术攻关提供智力参考；

三是优化能源与环境专业教材，为高水平技术人员的培养提供一套系统、全面的教科书或教学参考书，满足人才培养对教材的迫切需求；

四是构建一个适应世界能源科学技术发展趋势的能源科研交流平台。

该学术丛书以能源和环境的关系为主线，重点围绕机械过程中的能源转换和利用过程以及这些过程中产生的环境污染治理问题，主要涵盖能源与动力、生物质能、燃料电池、太阳能、风能、智能电网、能源材料、大气污染与气候变化等专业方向，汇集能源与环境领域的关键性技术和成果，注重理论与实践的结合，注重经典性与前瞻性的结合。图书分为译著、专著、教材和工具书等几个模块，其内容包括能源与环境领域内专家们最先进的理论方法和技术成果，也包括能源与环境工程一线的理论 and 实践。如钟芳源等撰写的《燃气轮机设计》是经典性与前瞻性相统一的工程力作；黄震等撰写的《机动车可吸入颗粒物排放与城市大气污染》和王如竹等撰写的《绿色建筑能源系统》是依托国家重大科研项目的新成果新技术。

为确保这套“能源与环境”丛书具有高品质和重大的社会价值，出版社邀请了杜祥琬院士、黄震教授、王如竹教授等专家，组建了学术指导委员会和编委会，并召开了多次编撰研讨会，商谈丛书框架，精选书目，落实作者。

该学术丛书在策划之初，就受到了国际科技出版集团 Springer 和国际学术出版集团 John Wiley & Sons 的关注，与我们签订了合作出版框架协议。经过严格的同行评审，Springer 首批购买了《低铂燃料电池技术》(*Low Platinum Fuel Cell Technologies*)，《生物质水热氧化法生产高附加值化工产品》(*Hydrothermal Conversion of Biomass into Chemicals*)和《燃煤烟气汞排放控制》(*Coal Fired Flue Gas Mercury Emission Controls*)三本书的英文版权，John Wiley & Sons 购买了《除湿剂超声波再生技术》(*Ultrasonic Technology for Desiccant Regeneration*)的英文版权。这些著作的成功输出体现了图书较高的学术水平和良好的品质。

希望这套书的出版能够有益于能源与环境领域里人才的培养,有益于能源与环境领域的技术创新,为我国能源与环境的科研成果提供一个展示的平台,引领国内外前沿学术交流和创新并推动平台的国际化发展!

翁史烈

2013年8月

前 言

低于 200°C 的热能被称为低温热能,包括:太阳能、地热能、工业余热、发动机尾气等。这类热能总量巨大、种类繁多,具有分布广泛、能量密度低的特点。由于其利用难度大,目前大多没有利用,造成巨大的能源浪费和环境污染,因此对于这类低温热能的利用研究具有特别重要的意义。

人们对以太阳能、地热、生物质能以及工业余热等低温热能的利用已有很长的历史,早期的利用方式主要以直接供热为主。随着科学技术的快速发展,目前,已有诸多可利用此类低温热源的方法和技术,例如有机工质朗肯循环发电技术、吸收式/吸附式制冷技术、喷射式制冷技术等。

有机工质发电和制冷具有诸多优势,首先,其在热源温度较低条件下,可能具有更高的热回收效率;其次,多数有机工质在低温余热的温度范围内对应的蒸发压力较低,从而可以减小系统设备对耐压的需求,降低系统投资成本;再次,许多有机工质具备易于获取,工作压力适中且对环境无较大负面影响等优势。正是由于该技术具备以上诸多优势,使其逐渐受到人们广泛关注,并成为最近几年研究和应用的热点之一。

本书以低品位热能利用为中心,介绍了低品位热能与能量转换原理,并对先进的应用技术进行了分析。全书共 7 章:绪论;有机工质;有机工质朗肯循环发电;有机工质制冷过程;发电制冷复合循环过程;有机工质发电制冷系统热力计算与设计;低温热能发电系统应用案例。

本书是作者在总结团队近十年来在低温热能利用方面的研究成果基础上编写而成,在撰写初稿时得到了一些助手和学生的帮助,如王羽平、汤磊、吕小静、薄泽民、杨平等,也得到了陈汉平教授的指导。此书可作为高等学校能源动力类专业学生的选修课教材,也可作为能源利用部门有关技术人

员的参考书。

本书涉及面广,著者水平有限,疏漏谬误之处在所难免,谨请使用本书的专家、读者批评指正。

翁一武

目 录

第1章 绪论	001
1.1 能源资源	001
1.2 能量从资源到应用的转换	002
1.2.1 能量的转换	002
1.2.2 热力发电能量转换	003
1.3 低品位热能资源	004
1.3.1 太阳能	005
1.3.2 地热能	007
1.3.3 工业余热	009
1.3.4 海洋温差能	010
1.4 利用低品位热能发电和制冷	010
1.4.1 低品位热能发电制冷技术	010
1.4.2 有机工质发电制冷技术发展回顾	012
1.4.3 有机工质发电制冷技术应用现状	013
第2章 有机工质	019
2.1 有机工质的种类	019
2.2 有机工质的热物性	020
2.2.1 饱和性质	021
2.2.2 干湿性	022
2.2.3 有机工质与纯水的比较	024
2.2.4 有机工质近临界特性	025
2.2.5 有机工质超临界特性	026
2.3 有机工质的环保和安全性	027
2.3.1 有机工质的环保性	027
2.3.2 有机工质的安全性	028
2.4 混合有机工质	029

2.4.1 共沸及近共沸混合工质	029
2.4.2 非共沸混合工质	029
2.5 工质选择的基本要求	031
第3章 有机工质朗肯循环发电	033
3.1 有机工质朗肯循环基本原理	033
3.1.1 有机工质朗肯循环概述	033
3.1.2 有机工质朗肯循环主要部件	035
3.2 有机工质朗肯循环热力过程	037
3.2.1 基本热力过程	037
3.2.2 系统总体性能	039
3.2.3 影响因素分析	039
3.3 复杂型有机工质朗肯循环	044
3.3.1 复杂型朗肯循环概述	044
3.3.2 回热循环	045
3.3.3 再热循环	047
3.3.4 抽汽回热循环	049
3.3.5 不同复合循环的性能比较	052
3.4 近临界有机工质朗肯循环	053
3.4.1 热力学模型与计算方法	053
3.4.2 近临界 ORC 循环性能	057
3.5 超临界有机工质朗肯循环	061
3.5.1 超临界循环基本热力过程	061
3.5.2 超临界系统性能	062
3.6 系统主要设备的热力性能	068
3.6.1 蒸发器热力性能	068
3.6.2 膨胀机热力性能	072
第4章 有机工质制冷过程	079
4.1 喷射器	079
4.1.1 工作原理	079
4.1.2 定压混合	080
4.1.3 喷射器设计计算	081
4.1.4 喷射器性能	085
4.2 喷射式制冷	089

4.2.1 概述	089
4.2.2 工作原理	089
4.2.3 热力学模型	089
4.2.4 工质选择	094
4.2.5 喷射式制冷系统性能	094
4.3 吸收式及吸附式制冷	096
4.3.1 吸收式制冷工作原理	096
4.3.2 吸收式制冷工质	096
4.3.3 溴化锂吸收式制冷	097
4.3.4 氨水吸收式制冷	098
4.3.5 吸附式制冷	098
第5章 发电制冷复合循环过程	101
5.1 简介	101
5.1.1 喷射式发电制冷复合循环	102
5.1.2 氨水吸收式发电制冷复合循环	103
5.1.3 喷射式和吸收式发电制冷比较	104
5.2 喷射式复合循环热力学模型	105
5.2.1 喷射式复合系统状态点	105
5.2.2 状态点热力参数	106
5.2.3 循环系统热力模型	107
5.3 喷射式发电制冷复合循环性能	109
5.3.1 循环基本性能	109
5.3.2 工作参数对性能的影响	111
5.4 工质对复合循环性能影响	115
5.4.1 工质选择	115
5.4.2 工质对循环效率的影响	118
5.4.3 工质对循环压力的影响	118
5.4.4 工质对设备性能的影响	119
第6章 有机工质发电制冷系统热力计算与设计	121
6.1 化工过程余热发电系统热力计算与设计	121
6.1.1 芳烃热源概况	121
6.1.2 热源特性	122
6.1.3 工质选择	123

6.1.4 ORC 发电系统热力计算及设计	129
6.1.5 有机工质向心透平设计	139
6.2 太阳能喷射式电冷联供热力计算	143
6.2.1 太阳能热利用技术	143
6.2.2 工作原理	146
6.2.3 热力计算	150
6.2.4 影响因素分析	155
6.3 非能动式发电制冷系统热力计算和设计	162
6.3.1 简介	162
6.3.2 发电过程	162
6.3.3 非能动式喷射制冷	166
第 7 章 低温热能发电系统应用案例	169
7.1 我国低温热能发电应用	169
7.1.1 西藏那曲双循环地热电厂	169
7.1.2 广东省丰顺县地热电站	171
7.2 国外有机工质发电设备	171
7.3 国外有机工质热发电系统应用案例	173
7.3.1 德国有机工质发电案例	173
7.3.2 美国有机工质发电案例	176
7.3.3 日本有机工质发电案例	178
7.3.4 意大利 Asiago 生物质热电厂	181
7.3.5 奥地利有机工质发电案例	182
7.4 有机工质发电和制冷技术的发展趋势	187
参考文献	189
索引	191

第 1 章 绪 论

能源是社会经济发展的动力和保证。世界各国政府无不重视能源问题。作为一个发展中国家和能源消费大国,我国的能源问题更显突出,能源安全已成为国家亟待解决的问题。发展可再生清洁能源及节能,可以缓解国内能源紧张的局面,有利于环境的改善。

1.1 能源资源

能源资源是指可以直接或通过转换提供人类所需有用能的自然资源。在自然界有各种资源,其中有的资源禀赋某种内在形式的能量,通过人们已经掌握的科技知识,可以将它们转换成人们所需要的各种形式的能,如电能、热能、光能、机械能等。

能源资源可按其形态、特性或转换和利用的层次进行分类。世界能源委员会推荐的分类是:固体燃料、液体燃料、气体燃料、水能、核能、电能、太阳能、生物质能、风能、海洋能和地热能^[1]。

能源消费不仅是一个资源消耗问题,能源消费产生的污染排放也是一个需要认真对待的大问题^[2]。目前我国能源与排放状况主要存在四个方面的问题:能源资源短缺,人均占有量少;能源利用率低,浪费严重;经济高速发展,耗能大,能源结构不合理^[3]。

相关部门测算显示,我国能源利用效率仅为 33%,比世界先进水平低约 10 个百分点。与世界先进水平相比,我国在能源效率、单位产值能耗等方面仍然存在较大差距。目前我国产值能耗是世界平均水平 2 倍多,主要产品单位产值能耗比世界先进水平高 40%。我国的能耗高、能源利用效率低有多种原因,如技术水平与管理水平落后,经济结构不合理等^[4]。

可再生能源系统是一种清洁、安全、经济、可持续的能源系统,其主要包括太阳能、生物质能、水能、风能、潮汐能与地热能,据估计,到 2050 年可再生能源将占总用能的 20%~40%。设想若能有效地开发这部分资源且将其转变为电能,部分替代以化石能源为燃料的发电方式,对于促进可再生能源开发利用,减小化石能源消耗及 CO₂, SO₂, N₂O 等温室气体对环境污染物的排放,实现可持续发展,具有重

要意义^[5]。

1.2 能量从资源到应用的转换

1.2.1 能量的转换

能量转换是能量利用中最重要的一环。通常的能量转换是指能量形态上的转换,例如燃料的化学能通过燃烧转换成热能,热能通过燃烧转换成机械能等。广义的能量转换还包括以下两项内容:能量在空间上的转移,即能量的传输;能量在时间上的转移,即能量的储存。

任何能量转换过程都必须遵守自然界的普遍规律,即能量守恒定律:

输入能量 - 输出能量 = 储存能量的变化

当前用得最多最普遍的能量形式是热能、机械能和电能。它们都是由其他形态的能量转换而来,并且它们之间也可以互相转换。显然任何能量的转换过程都需要一定的转换条件,需在一定的设备或系统中实现。表 1-1 给出了能量转换过程及实现转换所需要的设备或系统。不同能源与热能的转换及热能的利用如图 1-1 所示。

表 1-1 能量转换过程与转换设备

能源	能量转换过程	转换设备
石油,煤炭,天然气等化石燃料 氢和酒精等二次能源	化学能→热能 化学能→热能→机械能 化学能→热能→机械能→电能 化学能→热能→电能 化学能→电能	燃烧炉,燃烧器 各种热力发动机 热机,发电机,磁流体发电,压电效应 热力发电,热电子发电 燃料电池
水能,风能,潮汐能,海流能,波浪能	机械能→机械能 机械能→机械能→电能	水车,水轮机,风力机 水轮发电机组,风力发电机组 潮汐发电装置,海流能发电装置 波浪能发电装置
太阳能	辐射能→热能 辐射能→热能→机械能 辐射能→热能→机械能→电能 辐射能→热能→电能 辐射能→电能 辐射能→化学能 辐射能→生物能 辐射能→电能	热水器,采暖,制冷,太阳灶 光化学反应,太阳能发电机 太阳能发电,热力发电,热电子发电 太阳电池,光化学电池 光化学反应(水分解),光合成
海洋温差能	热能→机械能→电能	海洋温差发电(热力发电机)

(续表)

能源	能量转换过程	转换设备
海洋盐分(能)	化学能→电能 化学能→机械能→电能 化学能→热能→机械能→电能	浓度发电 渗透压发电 浓度差发电
地热能	热能→机械能→电能 热能→电能	热力发电机,发电机 热电发电
核能	核分裂→热能→机械能→电能 核分裂→热能 核分裂→热能→电能 核分裂→电磁能→电能 核聚变→热能→机械能→电能	核发电,磁流体发电 核能炼钢 热力发电,热电子发电 光电池 核聚变发电

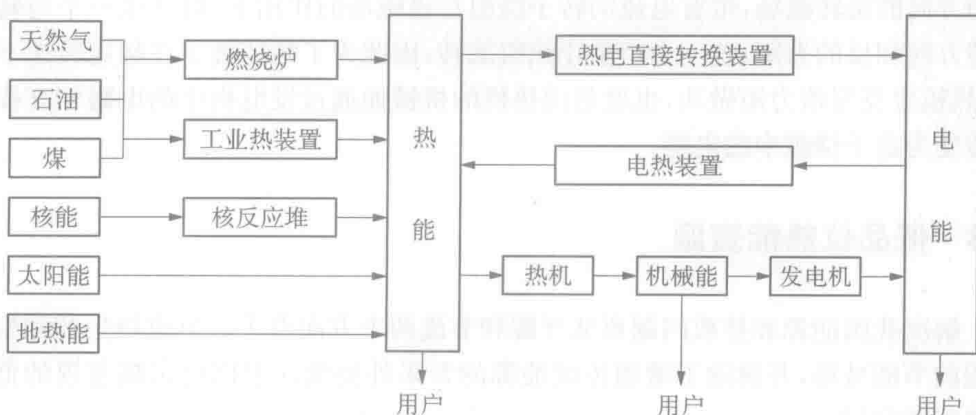


图 1-1 不同能源与热能的转换及利用

1.2.2 火力发电能量转换

火力发电的能量转换可以划分为 3 个过程,首先燃料化学能转换为热能,然后高温高压的热能通过热力机械转换为机械能,最后在发电机内机械能转换成可以方便使用的电能。

1) 化学能转换为热能

燃料燃烧是化学能转换为热能的最主要方式。所谓燃料就是在空气中容易燃烧并释放出大量热能的气体、液体或固体物质,是在经济上值得利用其热量的物质的总称。燃料的燃烧反应是一个氧化反应,燃料中的可燃元素碳、氢、硫和空气中的氧急剧化合时就会发出显著的光和热。同氢和硫相比,碳的氧化较为缓慢和困难,因此在任何燃烧过程中氢和硫都是在碳之前完全燃烧,其中氢燃烧最为激烈。

2) 热能转换为机械能

热能转换为机械能主要是在热机中完成的,主要的热机有蒸汽轮机、燃气轮机