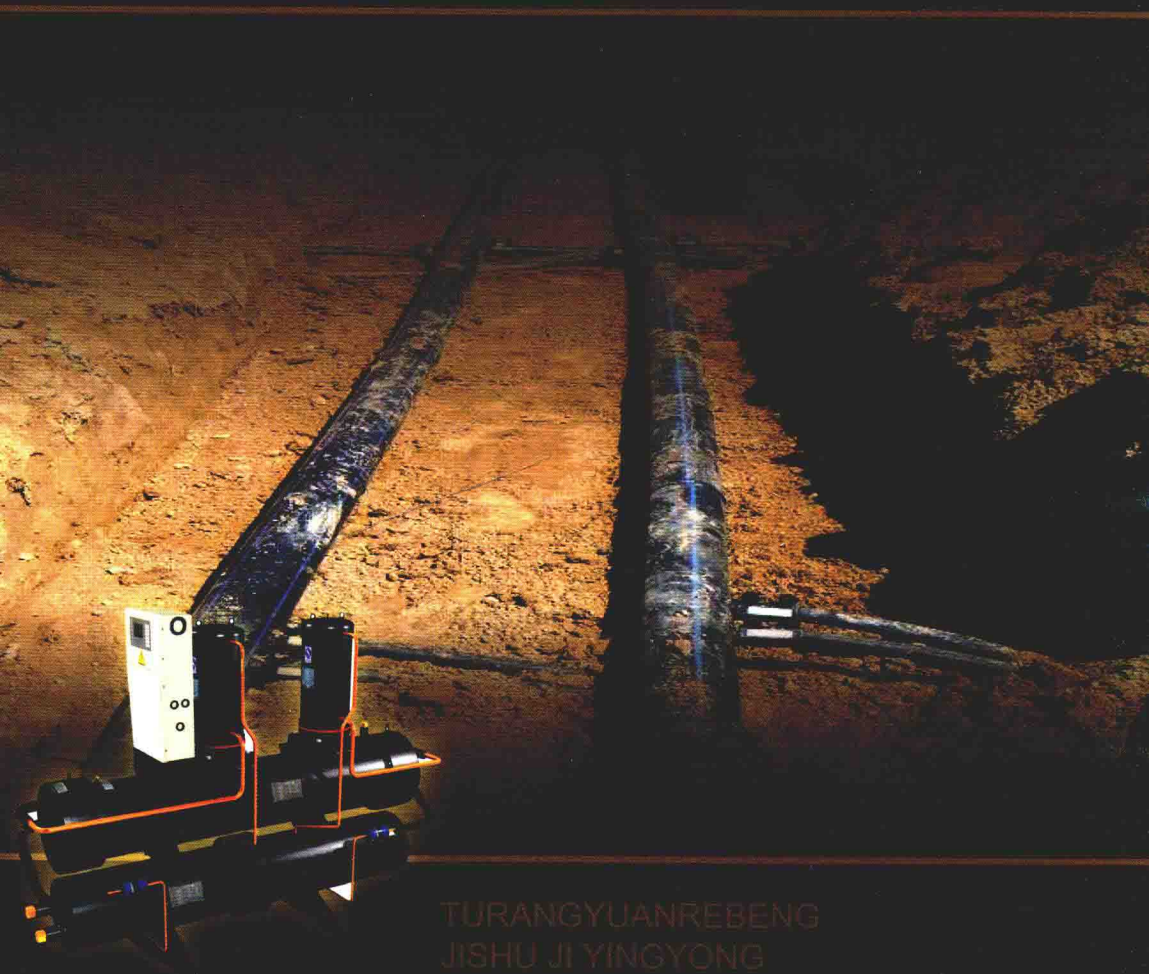


土壤源热泵 技术及应用

杨卫波 编著



TURANGYUANREBENG
JISHU JI YINGYONG



化学工业出版社

土壤源热泵 技术及应用

杨卫波 编著

TURANGYUANREBENG
JISHU JI YINGYONG



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要阐述了土壤源热泵的基本原理、相关理论、设计方法以及应用技术,内容包括土壤源热泵的概念、土壤源特性分析、岩土热响应测试、地埋管换热器传热理论与模型、地埋管换热系统设计、土壤热平衡问题及其控制、地埋管换热系统施工、系统运行能效测评及运行维护管理,并介绍了部分土壤源热泵工程实例。本书系统性与实用性相结合,反映了土壤源热泵领域最新的科学研究成果和工程应用进展。

本书可供从事土壤源热泵的研究、设计、施工及运行管理人员使用,也可供建筑、环境与能源应用工程等相关专业院校师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

土壤源热泵技术及应用/杨卫波编著. —北京:
化学工业出版社, 2015. 12
ISBN 978-7-122-25476-4

I. ①土… II. ①杨… III. ①热泵 IV. ①TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 253291 号

责任编辑: 张 艳 刘 军
责任校对: 王 静

装帧设计: 王晓宇

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 19¼ 字数 373 千字 2015 年 12 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: 68.00 元

版权所有 违者必究

I 前言 I FOREWORD I

随着经济的快速发展和人们生活水平的逐步提高,能源与环境问题日益突出,并成为各国在发展经济的同时急需解决的全球性问题,因此,寻求一种节能、环保、可持续性能源利用模式是世界各国能源建设与发展战略的重点。土壤源热泵作为一种既可供暖又可制冷,还可提供生活热水的新型空调技术,因其具有绿色、高效及适应性好等优点而备受各国青睐,且成为国际上公认的最具发展潜力的采暖空调技术之一。近期在我国也得到了快速发展,并被相关政府机构列为可再生能源利用专项技术支持与资助的重点领域之一。

土壤源热泵技术作为一种可再生能源建筑应用技术,在建筑节能领域得到了较为广泛的应用。至今,该技术在国外已有 50 多年的历史,积累了丰富的应用设计经验,已逐步趋向于成熟。然而,国内约在 10 年前才开始对其展开大规模的研究与开发。近年来,受国家及地方政府的大力推动,尤其是可再生能源建筑应用示范城市与示范项目的实施,土壤源热泵技术在我国得到迅速发展。但是,由于认识与技术上还不成熟,设计经验欠缺,导致部分土壤源热泵工程能效较低,甚至出现系统运行失败的情况。尤其在埋管传热理论与模型、系统动态仿真及其优化设计、土壤热平衡设计及其控制、运行调试与管理等方面需要进一步认识。本书结合作者多年来的研究与工程应用经验,对土壤源热泵技术进行全面的阐述,以期为该项技术在国内的健康发展提供参考。

本书内容力求理论联系实际,从土壤源热泵概念、土壤源特性分析、地下热响应测试、埋管换热器传热理论与模型、埋管换热系统设计、土壤热平衡问题及其控制、系统运行能效测评、系统运行维护管理及工程实例等方面来全面介绍土壤源热泵技术,并汇集了作者 10 多年来的研究与应用成果。因此,本书不仅可供从事土壤源热泵的研究、设计、施工及运行管理人员使用,也可供建筑、环境与能源应用工程等相关专业院校师生参考。

本书由扬州大学杨卫波副教授编著,并负责全书的统稿工作。本书在编著过程中,研究生杨晶晶、孙露露协助进行了部分文字和图形处理工作,并协助进行文字、公式、插图与表格的校对,在此一并表示衷心的感谢。

本书的出版得到了化学工业出版社的大力帮助和热情支持,在此表示衷心的感谢。

本书的工作得到江苏省自然科学基金项目(BK20141278)、扬州市自然科学基金项目(2015 年度)扬州市科技计划项目(2014-6)、中国科学院可再生能源重点实验室开放基金(y507k51001)、广西建筑新能源与节能重点实验室开放基金(桂林能 15-J-22-3)、热流科学与工程教育部重点实验室(西安交通大学)开放基金(KLTFSE2014KF05)

等的资助，在此一并致谢。

本书引用了许多参考文献和部分工程案例，谨向有关文献的作者和工程案例的设计者表示衷心感谢。限于编著者的水平，书中不妥之处在所难免，敬请前辈与同行批评指正，以便在以后的教学科研中改进。电子邮箱：yangwb2004@163.com。

杨卫波

2015年10月于扬州大学

I 目录 I CONTENTS I

第1章 绪论	1
1.1 能源、环境与可持续发展	1
1.1.1 能源消费现状	1
1.1.2 可持续发展对能源利用的要求	3
1.2 热泵与节能减排	3
1.2.1 热泵的定义	3
1.2.2 热泵空调系统	4
1.2.3 热泵的驱动能源与驱动装置	5
1.2.4 热泵的节能与环境效益	7
1.3 热泵的理论基础	8
1.3.1 理想的热泵循环	8
1.3.2 热泵的性能评价指标	10
1.4 热泵的低位热源	11
1.4.1 空气	11
1.4.2 水	12
1.4.3 太阳能	14
1.4.4 土壤	15
1.5 热泵的分类	17
1.5.1 热泵的分类方法	17
1.5.2 按热源种类分类	18
1.5.3 按热泵驱动方式分类	23
1.5.4 按热泵制热温度范围分类	24
1.5.5 按载热介质分类	24
1.6 热泵的发展历程与现状	24
第2章 土壤源热泵	27
2.1 土壤源热泵概述	27
2.1.1 土壤源热泵的定义	27
2.1.2 土壤源热泵系统的构成及工作原理	28
2.1.3 土壤源热泵的技术特点	29
2.2 土壤源热泵系统的热力学分析	31

2.2.1	热泵机组	31
2.2.2	用户末端	33
2.2.3	循环水泵	34
2.2.4	地埋管换热器	35
2.2.5	土壤源热泵系统	35
2.3	土壤源热泵的类型	36
2.3.1	土壤源热泵的分类	36
2.3.2	垂直埋管式土壤源热泵	36
2.3.3	水平埋管式土壤源热泵	38
2.3.4	螺旋形埋管式土壤源热泵	38
2.3.5	桩基埋管式土壤源热泵	38
2.3.6	直膨式土壤源热泵	40
2.3.7	复合式土壤源热泵	40
2.4	土壤源热泵适应性评价	42
2.4.1	适应性评价的必要性	42
2.4.2	适应性评价体系	43
2.5	土壤源热泵推广应用中的关键问题	46
2.5.1	认识方面	46
2.5.2	岩土热物性的确定	47
2.5.3	设计方面	47
2.5.4	施工方面	47
2.5.5	运行管理方面	48
2.5.6	能效测评	48
2.6	土壤源热泵技术的发展历史与现状	48
2.6.1	国外	48
2.6.2	国内	49
第3章	土壤源特性分析	53
3.1	土壤能量的来源与平衡	53
3.1.1	土壤能量的来源	53
3.1.2	土壤能量的平衡	54
3.2	土壤源的特点	54
3.2.1	土壤源的优点	54
3.2.2	土壤源的缺点	55
3.3	土壤的孔性	55
3.3.1	土壤密度	55

3.3.2	土壤容重	56
3.3.3	土壤孔隙	56
3.4	土壤的热特性	57
3.4.1	土壤的热容量	58
3.4.2	土壤的热导率	59
3.4.3	土壤的导温性	60
3.5	土壤的温度状况	61
3.5.1	土壤温度状况的影响因素	62
3.5.2	土壤温度的变化规律	62
3.5.3	土壤原始温度场的计算	63
3.5.4	土壤温度的变化特性	63
第4章 地下岩土热响应测试		67
4.1	概述	67
4.1.1	测试目的	67
4.1.2	测试依据	68
4.2	地下岩土热响应测试要求	68
4.2.1	一般规定	68
4.2.2	仪表要求	69
4.2.3	测试要求	69
4.3	常用测试方法	70
4.3.1	土壤地质手册	70
4.3.2	取样测值法	70
4.3.3	探针法	71
4.3.4	现场探测法	72
4.4	现场热响应测试原理	74
4.4.1	恒热流法	74
4.4.2	恒温法	74
4.4.3	两种测试原理比较	75
4.5	现场热响应测试装置及步骤	75
4.5.1	测试装置	75
4.5.2	测试步骤	76
4.5.3	测试结果的影响因素	77
4.6	数据处理方法	79
4.6.1	基于线热源的数据拟合法	79
4.6.2	基于解析解模型的参数估计法	81

4.6.3	三种方法的比较	82
4.6.4	测试实例及分析	85
第5章 地埋管换热器传热理论与模型		88
5.1	概述	88
5.1.1	地埋管传热模拟的意义	88
5.1.2	传热模型的理论基础	88
5.1.3	地埋管换热器的可利用传热温差	89
5.2	常用的地埋管换热器传热模型	89
5.2.1	导热型模型	90
5.2.2	热湿耦合型	99
5.2.3	考虑冻融相变	101
5.2.4	地埋管传热模型的关键	105
5.3	地埋管传热特性影响因素及强化措施	105
5.3.1	地埋管传热特性影响因素	105
5.3.2	地埋管传热强化措施	107
5.4	变热流线源模型	108
5.4.1	变热流线热源模型的提出	108
5.4.2	变热流情况下钻孔壁温的计算	108
5.4.3	变热流情况下埋管流体温度的计算	109
5.4.4	模型的验证	110
5.5	二区域 U 形埋管传热模型	112
5.5.1	二区域 U 形埋管传热模型的提出	112
5.5.2	钻孔外土壤区域的传热模型	112
5.5.3	钻孔内的传热模型	114
5.5.4	二区域 U 形埋管传热模型的应用	119
5.5.5	二区域 U 形埋管传热模型的实验验证	122
5.6	土壤冻结对地埋管换热特性的影响	123
5.6.1	土壤冻结对土壤温度分布的影响	123
5.6.2	含水率对土壤冻结特性的影响	125
5.6.3	土壤原始温度对土壤温度分布及冻结半径的影响	125
5.6.4	导温系数与 Stefan 数对土壤冻结半径的影响	126
5.7	地下水渗流对地埋管换热特性的影响	128
第6章 地埋管换热系统设计		130
6.1	设计的基础资料	130
6.1.1	设计原始资料	130

6.1.2	空调负荷的计算	135
6.1.3	现场资源条件勘探	141
6.2	地埋管换热器的管材及传热介质	142
6.2.1	地埋管换热器的管材	142
6.2.2	管材规格与压力级别	143
6.2.3	传热介质	144
6.3	地埋管换热器的形式与连接	146
6.3.1	地埋管换热器的形式	146
6.3.2	地埋管换热器的连接方式	149
6.4	地埋管换热器长度的设计	151
6.4.1	工程概算法	153
6.4.2	半经验公式法	154
6.4.3	计算机动态模拟法	154
6.5	地埋管换热系统的水力计算	155
6.5.1	地埋管换热系统流量的确定	155
6.5.2	地埋管换热系统的阻力计算	156
6.6	地埋管换热系统设计实例	161
6.6.1	工程概况	161
6.6.2	系统分区与机房冷热源配置	161
6.6.3	地埋管换热系统的设计	162
6.6.4	辅助冷却塔容量的确定	164
6.6.5	地埋管系统流量的确定	164
6.6.6	管内流速校核	166
6.6.7	管路系统阻力损失计算与承压能力校核	166
6.6.8	地下热平衡计算	167
6.7	地埋管换热系统专用设计软件	167
第7章	土壤热平衡问题及其控制	170
7.1	土壤热平衡	170
7.1.1	土壤热平衡的概念	170
7.1.2	土壤热失衡的原因	171
7.1.3	土壤热失衡的危害	172
7.2	土壤热平衡的设计与控制	173
7.2.1	土壤热平衡的设计	173
7.2.2	土壤热平衡控制的技术措施	175
7.3	土壤热平衡控制中关键影响因素的分析	176

7.3.1	取放热不平衡率	176
7.3.2	地下释能运行控制模式	178
7.3.3	埋管布置方式	182
7.3.4	岩土类型	183
7.3.5	地下水渗流	184
7.3.6	土壤冻结相变	185
7.4	复合式土壤源热泵系统	187
7.4.1	复合式系统的必要性	187
7.4.2	冷却塔-土壤源热泵复合式系统	187
7.4.3	太阳能-土壤源热泵复合式系统	193
第8章 地埋管换热系统施工		203
8.1	施工工艺流程	203
8.2	施工前的准备	203
8.2.1	现场勘探	203
8.2.2	场地规划	204
8.2.3	水文地质调查	205
8.2.4	测试孔与监测孔	205
8.3	施工设备	206
8.3.1	钻孔与挖掘机械	206
8.3.2	焊接与回填设备	211
8.4	地埋管管道的连接	214
8.4.1	管道的热熔连接	214
8.4.2	管道的电熔连接	218
8.4.3	钢塑管道的转换连接	220
8.4.4	聚乙烯管道连接与施工时应注意事项	221
8.5	地埋管换热器的安装	222
8.5.1	水平式地埋管换热器	222
8.5.2	竖直式U形地埋管换热器	224
8.6	地埋管换热系统的检验与水压试验	230
8.6.1	地埋管换热系统的检验	230
8.6.2	地埋管水压试验	230
第9章 土壤源热泵系统运行能效测评		232
9.1	能效测评的必要性	232
9.1.1	土壤源热泵健康发展的需要	232
9.1.2	土壤源热泵系统的复杂性	233

9.1.3	系统优化运行管理的需要	233
9.1.4	土壤源热泵生态环保的需要	233
9.2	能效测评的依据	234
9.3	能效测评的内容	234
9.3.1	测试条件	234
9.3.2	测试内容	235
9.3.3	评价内容	235
9.4	能效测评的方法	235
9.4.1	测试方法	235
9.4.2	评价方法	240
9.5	能效测评报告	244
9.5.1	基本要求	244
9.5.2	能效测评报告的组成	246
第10章	土壤源热泵系统运行维护管理	249
10.1	土壤源热泵系统的运行管理	249
10.1.1	技术资料	249
10.1.2	运行的规章制度	250
10.1.3	运行人员管理	251
10.1.4	运行技术要求	251
10.1.5	运行节能要求	254
10.1.6	运行安全要求	254
10.2	土壤源热泵系统的运行维护	255
10.2.1	维护保养制度	255
10.2.2	维护保养内容	255
第11章	土壤源热泵系统工程实例	257
11.1	浙江某宾馆复合式土壤源热泵系统	257
11.1.1	工程概况	257
11.1.2	地质勘探与岩土热响应测试	257
11.1.3	总体设计方案	258
11.1.4	热泵机组选型	258
11.1.5	地埋管换热系统设计	259
11.1.6	冷却塔容量确定	262
11.2	扬州大学复合式土壤源热泵实验示范系统	262
11.2.1	实验示范系统概况	262
11.2.2	冷却塔-土壤源热泵复合式系统	263

11.2.3	太阳能-土壤源热泵复合式系统	268
11.3	扬州帝景蓝湾土壤源热泵系统	273
11.3.1	工程概况	273
11.3.2	设计依据	274
11.3.3	空调负荷计算与热泵机组选型	274
11.3.4	地埋管换热器系统设计	275
11.3.5	地埋管换热器的施工	278
11.4	扬州阳光美第土壤源热泵系统	280
11.4.1	工程概况	280
11.4.2	设计依据	280
11.4.3	地下岩土热响应测试	280
11.4.4	空调负荷计算	282
11.4.5	冷热源配置	282
11.4.6	地埋管换热器设计与施工	284
11.4.7	地表水源热泵	286
	参考文献	288

第 1 章

绪论

1.1 能源、环境与可持续发展

1.1.1 能源消费现状

能源、环境及可持续发展问题作为全球关注的焦点，一直困扰着世界各国，是各国在发展经济的同时急需共同来解决的全球性问题。能源与环境问题作为当前人类面临的最大挑战，直接导致了可持续发展思想的提出，且成为 21 世纪人类社会发展的共识和指导人们生产与生活的重要理论。然而，能源消费所造成的能源短缺与环境问题是制约可持续发展的关键性因素。要实现社会的可持续发展就必须首先解决社会发展最重要动力——能源的可持续性开发与利用问题。

能源作为现代社会发展最重要的物质基础，与国民经济发展有着密切的关系。随着世界经济的快速发展和技术进步以及人口的迅速增长，整个世界对能源的需求量越来越大，并呈现出逐年递增趋势（图 1-1）。石油、天然气、煤炭等常规能源已满足不了日益增长的能源需求量，世界各国都感到传统矿物燃料的蕴藏量正

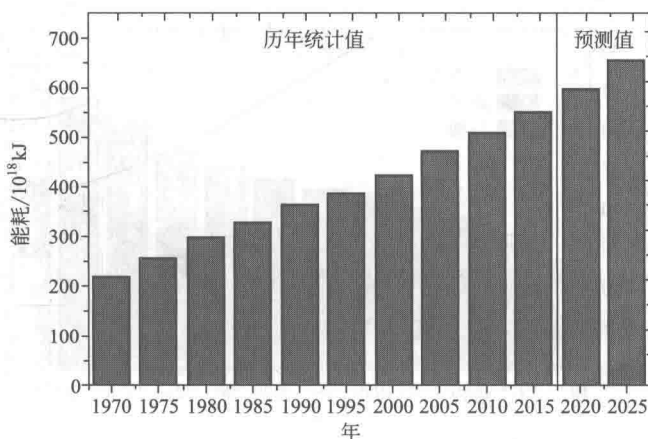


图 1-1 全球能源消耗统计与预测图

在减少，甚至有耗竭的可能。据估计，如按石油储量的综合估算，当前可支配与开采的化石能源大约为 1180 亿~1510 亿吨，以 1995 年 33.2 亿吨/年的世界石油年开采量计算，则石油储量约在 2050 年左右用完；天然气储备量约为 131800~152900Mm³，年开采量维持在 2300Mm³，将在五六十年内用完；煤的储量约为 5600 亿吨，按 1995 年 33 亿吨/年的消费量，可供应 170 年。另据统计：现在全世界每年消耗的矿物燃料相当于地球史前 200 万年的储藏量，如照此消费增长率持续下去，估计在今后三四十年内矿物燃料将有用竭的可能。能源需求量的增长与相对减少的能源供应之间的矛盾日趋加剧，当今世界的能源问题已变得十分尖锐，如不寻找新的替代能源，整个世界不久将会面临一次新的能源危机。

环境污染已成为世界各国普遍关注的重大问题。传统的能源资源（如煤、石油及天然气等）的大量消耗在带动工业经济快速发展的同时，也造成了环境的恶化。目前，世界上开发利用的能源主要是煤、石油、天然气等传统矿物燃料和水力资源，原子能也有一定程度的开发利用，其他的如太阳能、地热能及风能等可再生能源只有小规模的开发利用。煤、石油、天然气等矿物燃料的燃烧所生成的 CO₂、烟尘和硫化物等有害物质排放到大气中造成大气污染，严重地影响了生态环境和人们的正常生活。图 1-2 中示出了全球 CO₂ 排放量的统计及预测图，可以看出，因使用传统能源资源而造成的 CO₂ 排放量是逐年增加的，且上升幅度很快。据统计，1992 年燃烧排放到大气中的 CO₂ 就有 6.4 × 10⁹t，目前大气中 CO₂ 的年增长率为 1.5μg/g，而大气中 CO₂ 含量每增长一倍就会使低层大气年均温度升高 1.5~3.0℃，造成温室效应，破坏自然界正常生态平衡。现在我国能源构成中煤占 70%以上，石油及天然气占 25%，能源利用率均只有 30%左右，再加上燃烧率低、采暖锅炉吨位小、燃烧点分散等问题，进一步加重了污染程度。因此，必须进一步改进能源消费结构，大力开发使用清洁可再生能源，并提高其利用率。

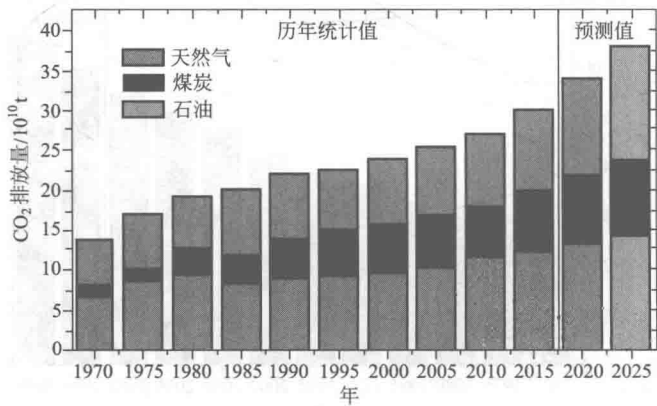


图 1-2 全球 CO₂ 排放量统计与预测图

1.1.2 可持续发展对能源利用的要求

20 世纪末期,没有任何一个概念能够像“可持续发展”那样引起全人类的共鸣,人类在深刻反思过去发展历程的基础上,严肃地提出了未来的发展模式——必须走可持续发展的道路。可持续发展理论已经被世界各国所接受,也必然成为指导当前能源利用技术发展的理论。

能源工业作为国民经济的基础产业,对于促进社会经济发展和提高人民生活水平极为重要。在经济快速增长的环境下,能源工业面临着经济增长和环境保护的双重压力,世界上越来越多的国家在经济发展中日趋认识到:一个可持续发展的社会应该是一个既能满足当今社会的需求而又不危及后代前途的社会。适应可持续发展的要求,面对现有能源资源的日趋枯竭及能源消耗所造成的臭氧层破坏和全球变暖进程加剧等全球性问题,在满足人类健康、舒适要求的前提下,合理配置资源、优化能源结构、可持续开发利用可再生能源、减少常规能源消耗,对于缓解日益紧迫的资源与环境压力,显得尤为迫切和重要。

生态建筑作为新世纪住宅建设的重要发展趋势,是近代可持续发展思想与理论在建筑业上的体现,也是人类解决能源危机、土地危机、环境污染等一系列严重社会问题的重要措施之一。21 世纪,人类面临能源和环境两大重要课题,寻求和利用清洁可再生能源在生态建筑中的应用,以解决作为国民经济支柱产业之一及耗能大户的建筑的可持续发展也是能源发展的必然趋势。热泵作为一种节能环保型能源采掘与利用装置,对于清洁可再生能源的开发利用具有重要意义,并成为生态建筑能源利用系统的一个必备元素。因此,节约能源,提高能源利用效率,大力开发使用新能源和可再生能源,并研制、开发其相应的利用装置与利用模式已成为世界各国能源建设与发展战略的重点,是走可持续发展的必由之路。

1.2 热泵与节能减排

1.2.1 热泵的定义

热泵是一种通过消耗一定的高位能,把不能直接使用的低位热能(空气、水、土壤、太阳能及废热等)经过提升后转换成可以利用的高位热能,从而可达到节约一部分高位能(煤、石油、天然气及电能等)的节能装置。按照新国际制冷辞典的定义,热泵(heat pump)就是以冷凝器释放出的热量来供热的制冷系统,从热力学或工作原理上来说,热泵就是制冷机。

从能量守恒的角度,热泵是遵循热力学第一定律的,即在热量传递与转换过程中遵循着守恒的数量关系。同时,热泵还遵循着热力学第二定律,即热量不可能自发地从低温区转移至高温区,必须消耗一定的高位能。热泵虽然是以消耗一

定的高位能作为代价而实现热量从低温区向高温区传递，但所得到的有用热能却是消耗的高位能与吸取的低位热能的总和。由此看来，用户应用热泵技术所获得的热量必定大于所消耗的高位能，因此，热泵是一种典型的节能装置。

理想的热泵可看作是图 1-3 所示的节能装置，由动力机和工作机组成热泵机组。利用高位能来推动动力机（如电机、汽轮机、燃气机、燃油机等），然后再由动力机来驱动工作机（如制冷机、喷射器）运转，从而实现把低位的热能转变为高位能，以向用户供热。

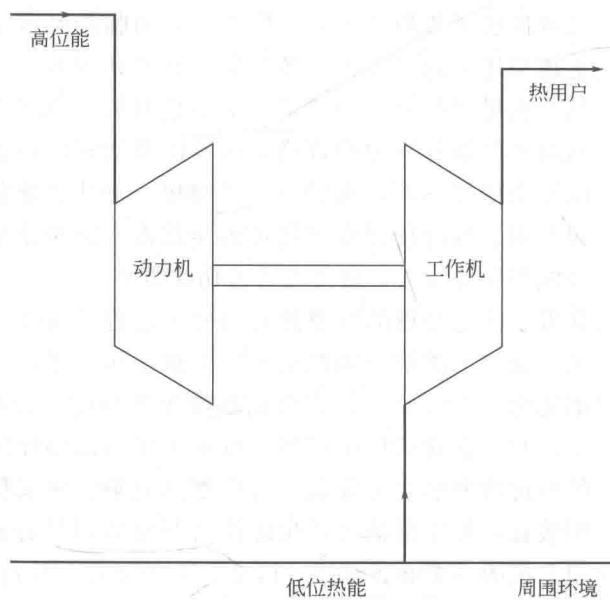


图 1-3 理想的热泵机组

1.2.2 热泵空调系统

热泵空调系统是热泵系统中应用最为广泛的一种系统。在空调工程实践中，常在空调系统的部分设备或全部设备中选用热泵装置。空调系统中选用热泵时，称其系统为热泵空调系统，或简称热泵空调，如图 1-4 所示。它与常规的空调系统相比，具有如下特点：

（1）热泵空调系统用能遵循了能级提升的用能原则，避免了常规空调系统用能的单向性。所谓的用能单向性是指“热源消耗高位能（电、燃气、油和煤等）→向建筑物内提供低温的热量→向环境排放废物（废热、废气、废渣等）”的单向用能模式。热泵空调系统用能是一种仿效自然生态过程物质循环模式的部分热量循环使用的用能模式。

（2）热泵空调系统用大量的低温再生能替代常规空调系统中的高位能。通过