

# 太阳能压缩式热泵 性能及数值模拟

TAIYANGNENG YASUOSHI REBENG  
XINGNENG JI SHUZHI MONI

◎ 王洪利 张振迎 田景瑞 等著



冶金工业出版社  
Metallurgical Industry Press

# 太阳能压缩式热泵 性能及数值模拟

王洪利 张振迎 田景瑞 等著



北 京  
冶 金 工 业 出 版 社  
2016

## 内 容 提 要

本书以太阳能压缩式热泵系统为研究对象,采用理论分析和数值模拟方法,分别对串联式太阳能热泵系统和并联式太阳能热泵系统进行了研究。热泵工质选用 R134a、R1234yf 和 R744 三种典型制冷剂,以逆卡诺循环为基准,研究了压力、温度和膨胀机代替节流阀等因素对热泵系统性能的影响;通过太阳能理论分析,对集热器和储热水箱进行了模拟计算;对热泵压缩机、冷凝器(CO<sub>2</sub>循环中气体冷却器)、回热器和储热水箱等进行了数值模拟;编制了串联式和并联式太阳能压缩式热泵性能分析程序,研究了辐射强度、集热器出口温度、蒸发温度、冷凝器出口温度、压缩机排气压力和压缩机效率等因素对系统性能的影响;建立了系统焓分析模型,对循环中各设备进行了焓损失分析。

本书可供从事制冷和热泵产品设计、生产及运行的工程技术人员使用,也可供高等工科院校制冷低温等专业本科生和研究生教学使用,同时还可供从事能源与节能工作的科技人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

太阳能压缩式热泵性能及数值模拟/王洪利等著. —北京:  
冶金工业出版社, 2016. 3

ISBN 978-7-5024-7171-2

I. ①太… II. ①王… III. ①太阳能—压缩式—水源  
热泵—研究 IV. ①TH3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 044683 号

出 版 人 谭学余

地 址 北京市东城区嵩祝院北巷 39 号 邮编 100009 电话 (010)64027926

网 址 www.cnmp. com. cn 电子信箱 yjcbbs@cnmp. com. cn

责任编辑 常国平 美术编辑 吕欣童 版式设计 孙跃红

责任校对 卿文春 责任印制 牛晓波

ISBN 978-7-5024-7171-2

冶金工业出版社出版发行;各地新华书店经销;三河市双峰印刷装订有限公司印刷  
2016 年 3 月第 1 版, 2016 年 3 月第 1 次印刷

169mm×239mm; 13. 25 印张; 259 千字; 202 页

39. 00 元

冶金工业出版社 投稿电话 (010)64027932 投稿信箱 tougao@cnmp. com. cn

冶金工业出版社营销中心 电话 (010)64044283 传真 (010)64027893

冶金书店 地址 北京市东四西大街 46 号(100010) 电话 (010)65289081(兼传真)

冶金工业出版社天猫旗舰店 yjgycbs. tmall. com

(本书如有印装质量问题,本社营销中心负责退换)

# 前 言

目前,能源和环境问题已经成为制约人类社会高速发展的主要问题,在社会各种关系中,人与自然的和谐发展日益显得重要与紧迫。酸雨、植被破坏、温室效应、臭氧层空洞、海洋污染等诸多生态环境问题已经成为全球关注的焦点。为推动经济、社会和环境的友好发展,节能和环保已经成为21世纪全球共同关注的首要问题。

随着人民生活水平的不断提高,过去满足人们温饱问题已经转变到对生活舒适度的追求。传统的北方冬季供暖,南方夏季制冷,到现在北方冬季不仅供暖、夏季还要制冷,南方夏季不仅制冷、冬季还要供暖。在社会总能耗中建筑能耗所占的比重正在逐年增大,建筑能耗主要包括家用电器、建筑的制冷与供暖等,所占比重已经达到社会总能耗的三分之一,所以对降低建筑能耗问题的研究潜力巨大。对于制冷空调和热泵行业,由于本身耗能加上传统制冷剂对环境的破坏,节能和制冷剂替代成为本领域的前沿课题。

太阳能属于一种可再生的清洁能源,分布广、储量大,同时具有很强的季节性和地域性。太阳能直接加热热水用于生活所用或冬季供暖,产生的热水波动很大,遇到极冷低温或阴雨天气甚至不能利用。热泵属于一种逆向循环,其效率较高,尤其在小温差下的效率更高。但极端天气对热泵影响很大。其中,空气源热泵在冬季极低温度时制热效果很差甚至不能工作。综合太阳能和热泵特点,可以将热泵和太阳能热水系统联合应用,将太阳能储热水箱中回收的热量经热泵加热用于冬季供暖,进而提高联合系统的效率。

本书以太阳能压缩式热泵系统为研究对象,采用理论分析和数值

模拟方法, 分别对串联式太阳能热泵系统和并联式太阳能热泵系统进行了研究, 旨在提高系统性能。热泵工质选用 R134a、R1234yf 和 R744 三种典型制冷剂, 以逆卡诺循环为基准, 研究了压力、温度和膨胀机代替节流阀等因素对热泵系统性能的影响; 通过太阳能理论分析, 对集热器和储热水箱进行了计算; 对热泵压缩机、冷凝器 ( $\text{CO}_2$  循环中气体冷却器)、回热器和储热水箱等进行了数值模拟; 编制了串联式和并联式太阳能压缩式热泵性能分析程序, 研究了辐射强度、集热器出口温度、蒸发温度、冷凝器出口温度、压缩机排气压力和压缩机效率等因素对系统性能的影响; 建立了系统焓分析模型, 对循环中各设备进行了焓损失分析。

本书由田景瑞撰写第 1 章, 张振迎撰写第 2 章, 唐琦龙撰写第 3、4 章, 侯秀娟撰写第 5、6 章压缩机模拟部分, 刘慧琴撰写第 5、6 章气体冷却器模拟部分, 张强撰写第 5、6 章冷凝器和回热器模拟部分, 贾宁撰写第 6 章太阳能储热水箱部分和第 7 章。路聪莎、杜远航、刘馨、张率华负责资料整理工作。王洪利负责全书的统稿工作。

本书的出版得到了华北理工大学现代冶金技术省重点实验室和河北省自然科学基金项目 (E2015209239) 的资助。感谢所有为本书研究提供参考文献的国内外作者。

由于作者水平所限, 书中不妥之处, 敬请广大读者批评指正。

作 者

2015 年秋于华北理工大学

# 目 录

|                                           |    |
|-------------------------------------------|----|
| 1 绪论 .....                                | 1  |
| 1.1 研究背景 .....                            | 1  |
| 1.1.1 环境保护和可持续发展 .....                    | 1  |
| 1.1.2 臭氧层破坏和温室效应 .....                    | 2  |
| 1.1.3 制冷剂替代及 $\text{CO}_2$ 自然工质重新启用 ..... | 2  |
| 1.1.4 太阳能热泵联合应用技术 .....                   | 3  |
| 1.2 太阳能的特点及利用技术 .....                     | 3  |
| 1.2.1 太阳能的特点 .....                        | 3  |
| 1.2.2 太阳能利用形式 .....                       | 4  |
| 1.2.3 我国太阳能的分布 .....                      | 5  |
| 1.2.4 世界太阳能的分布 .....                      | 7  |
| 1.3 $\text{CO}_2$ 跨临界热泵系统组成及研究现状 .....    | 7  |
| 1.3.1 压缩机 .....                           | 7  |
| 1.3.2 膨胀装置及膨胀机 .....                      | 11 |
| 1.3.3 换热器 .....                           | 12 |
| 1.3.4 $\text{CO}_2$ 跨临界循环 .....           | 14 |
| 1.4 R134a 和 R1234yf 热泵技术研究现状 .....        | 17 |
| 1.5 太阳能热泵系统组成及研究现状 .....                  | 19 |
| 1.5.1 国内研究现状 .....                        | 20 |
| 1.5.2 国外研究现状 .....                        | 33 |
| 1.6 小结 .....                              | 37 |
| 参考文献 .....                                | 38 |
| 2 热泵系统热力学分析 .....                         | 47 |
| 2.1 逆向卡诺循环和蒸汽压缩式循环 .....                  | 47 |
| 2.1.1 逆向卡诺循环 .....                        | 47 |
| 2.1.2 蒸汽压缩式循环 .....                       | 48 |
| 2.2 热泵系统组成及热力学分析 .....                    | 49 |
| 2.2.1 单级热泵循环分析 .....                      | 49 |

|                      |           |
|----------------------|-----------|
| 2.2.2 双级热泵循环分析       | 50        |
| 2.2.3 单、双级热泵循环热力学分析  | 52        |
| 2.3 热泵系统性能平台         | 53        |
| 2.3.1 性能平台界面         | 53        |
| 2.3.2 性能平台使用         | 54        |
| 2.4 热泵系统性能分析         | 57        |
| 2.4.1 单级热泵循环性能分析     | 57        |
| 2.4.2 双级热泵循环性能分析     | 65        |
| 2.5 小结               | 76        |
| 参考文献                 | 76        |
| <b>3 太阳能理论计算</b>     | <b>80</b> |
| 3.1 太阳能量的传输          | 80        |
| 3.2 太阳能相关参数          | 81        |
| 3.2.1 赤纬角            | 81        |
| 3.2.2 真太阳时           | 82        |
| 3.2.3 太阳角            | 83        |
| 3.2.4 太阳常数           | 83        |
| 3.2.5 太阳入射角          | 84        |
| 3.3 太阳能辐照量计算         | 84        |
| 3.3.1 大气层外太阳辐照量      | 84        |
| 3.3.2 月平均日太阳辐照量      | 84        |
| 3.3.3 水平面上辐照量        | 85        |
| 3.3.4 集热器辐照度         | 85        |
| 3.3.5 修正因子           | 86        |
| 3.4 计算结果             | 87        |
| 3.5 大气透明度和修正因子       | 88        |
| 3.5.1 大气透明度          | 88        |
| 3.5.2 晴空指数           | 88        |
| 3.6 小结               | 89        |
| 参考文献                 | 89        |
| <b>4 太阳能集热器和储热水箱</b> | <b>91</b> |
| 4.1 建筑采暖热负荷          | 91        |
| 4.1.1 设计依据           | 91        |

|                                      |     |
|--------------------------------------|-----|
| 4.1.2 热负荷计算                          | 92  |
| 4.2 计算选型                             | 92  |
| 4.2.1 集热器面积计算                        | 92  |
| 4.2.2 蓄热水箱设计                         | 93  |
| 4.2.3 集热系统流量确定                       | 94  |
| 4.3 小结                               | 95  |
| 参考文献                                 | 95  |
| 5 太阳能压缩式热泵数值模型                       | 97  |
| 5.1 模拟基础                             | 97  |
| 5.2 ANSYS 一般分析步骤                     | 98  |
| 5.3 CO <sub>2</sub> 跨临界循环压缩机数值模型     | 100 |
| 5.3.1 CO <sub>2</sub> 活塞压缩机连杆模型的建立   | 100 |
| 5.3.2 CO <sub>2</sub> 涡旋压缩机动涡盘模型的建立  | 107 |
| 5.4 CO <sub>2</sub> 热泵热水器气体冷却器数值模拟   | 113 |
| 5.4.1 CO <sub>2</sub> 工质的物性分析        | 113 |
| 5.4.2 CO <sub>2</sub> 气体冷却器模型的建立     | 114 |
| 5.5 R134a/R1234yf 热泵热水器冷凝器数值模拟       | 119 |
| 5.5.1 模拟基础                           | 119 |
| 5.5.2 冷凝器模型                          | 121 |
| 5.6 R134a/R1234yf 热泵热水器回热器的数值模拟      | 124 |
| 5.6.1 Gambit 模型                      | 124 |
| 5.6.2 边界条件的确定                        | 125 |
| 5.6.3 Fluent 中求解模型的参数设置              | 125 |
| 5.7 太阳能热泵储热水箱数值模拟                    | 127 |
| 5.7.1 物理模型                           | 127 |
| 5.7.2 控制方程                           | 127 |
| 5.7.3 模型的简化与假设                       | 128 |
| 5.7.4 网格划分和边界类型设定                    | 128 |
| 5.7.5 模拟工况                           | 128 |
| 5.8 小结                               | 129 |
| 参考文献                                 | 130 |
| 6 太阳能压缩式热泵模拟结果分析                     | 133 |
| 6.1 CO <sub>2</sub> 跨临界循环活塞压缩机连杆模拟结果 | 133 |



|                                             |            |
|---------------------------------------------|------------|
| 6.1.1 压缩过程连杆位移和应变模拟结果分析 .....               | 133        |
| 6.1.2 排气过程连杆位移和应变模拟结果分析 .....               | 135        |
| 6.2 CO <sub>2</sub> 跨临界循环涡旋压缩机动涡盘模拟结果 ..... | 137        |
| 6.2.1 动涡盘应力分布模拟结果分析 .....                   | 138        |
| 6.2.2 动涡盘位移变形模拟结果分析 .....                   | 139        |
| 6.3 CO <sub>2</sub> 热泵热水器气体冷却器模拟结果 .....    | 141        |
| 6.3.1 温度对换热性能的影响 .....                      | 141        |
| 6.3.2 质量流量对换热性能的影响 .....                    | 143        |
| 6.4 R134a/R1234yf 热泵热水器冷凝器模拟结果 .....        | 146        |
| 6.4.1 残差图分析 .....                           | 146        |
| 6.4.2 流速对换热性能的影响 .....                      | 147        |
| 6.5 R134a/R1234yf 热泵热水器回热器模拟结果 .....        | 155        |
| 6.5.1 残差图分析 .....                           | 155        |
| 6.5.2 长度对换热性能的影响 .....                      | 157        |
| 6.6 太阳能压缩式热泵储热水箱模拟结果 .....                  | 159        |
| 6.6.1 流速对温度场的影响 .....                       | 159        |
| 6.6.2 进口水温对温度场的影响 .....                     | 160        |
| 6.7 小结 .....                                | 160        |
| 参考文献 .....                                  | 161        |
| <b>7 太阳能压缩式热泵性能研究 .....</b>                 | <b>163</b> |
| 7.1 系统介绍 .....                              | 163        |
| 7.2 部件模型及系统效率 .....                         | 164        |
| 7.2.1 平板集热器 .....                           | 164        |
| 7.2.2 储热水箱 .....                            | 168        |
| 7.2.3 蒸发器 .....                             | 168        |
| 7.2.4 压缩机 .....                             | 169        |
| 7.2.5 冷凝器 .....                             | 169        |
| 7.2.6 节流阀 .....                             | 170        |
| 7.2.7 系统效率 .....                            | 170        |
| 7.3 程序设计及参数的确定 .....                        | 171        |
| 7.3.1 程序设计 .....                            | 171        |
| 7.3.2 程序运行界面 .....                          | 172        |
| 7.3.3 热泵参数的确定 .....                         | 174        |
| 7.4 太阳能热泵系统性能分析 .....                       | 175        |

---

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 7.4.1 串联式系统性能分析 .....        | 175 |
| 7.4.2 并联式系统性能分析 .....        | 183 |
| 7.5 太阳能热泵系统焓分析 .....         | 188 |
| 7.5.1 太阳能压缩式热泵焓分析模型 .....    | 189 |
| 7.5.2 串联式太阳能压缩式热泵焓损失分析 ..... | 191 |
| 7.5.3 并联式太阳能压缩式热泵焓损失分析 ..... | 194 |
| 7.5.4 太阳能压缩式热泵系统焓损失分析 .....  | 198 |
| 7.6 小结 .....                 | 199 |
| 参考文献 .....                   | 200 |

# 1 绪 论

## 1.1 研究背景

目前,能源和环境问题已经成为制约人类社会高速发展的主要问题,在社会各种关系中,人与自然的和谐发展日益显得重要与紧迫。酸雨、植被破坏、温室效应、臭氧层空洞、海洋污染等诸多生态环境问题已经成为全球关注的焦点。为推动经济、社会 and 环境的友好发展,节能和环保已经成为 21 世纪全球共同关注的首要问题<sup>[1]</sup>。

我国的经济发展近些年来增速平稳,GDP 每年都基本保持了 8% 的增长速度,有些年份增速超过了 10%。经济增长速度虽然是可喜的,但是我国经济增长的粗放型方式却依然没有改变,单位 GDP 的能耗比发达国家还是要高很多,日本的 GDP 单位能耗强度只是我国的六分之一。随着经济的飞速发展,我国消耗的能源数量已经跃居世界前列。

在社会总能耗中建筑能耗所占的比重正在逐年增大,建筑能耗主要包括家用电器、建筑的制冷与供暖等,所占比重已经达到社会总能耗的三分之一,所以对降低建筑能耗问题的研究潜力巨大。对于制冷空调行业,由于本身耗能加之传统制冷剂对环境的破坏,节能和制冷剂替代成为本领域的前沿课题,引起国内外专家学者和科技人员越来越多的关注;同时,越来越多的国内外资金项目也加大了对该领域的前沿性和创新性研究的资助力度。

虽然我国自然资源储量丰富,但是由于我国人口基数大,人均资源占有量较世界人均水平低 50%。预计到 2030 年我国能源短缺量将达到 2.5 亿吨标准煤,到 2050 年约为 4.6 亿吨标准煤,将占世界煤炭消费总量的一半以上<sup>[2]</sup>。我国目前石油对需求的保证有 40% 的缺口,按照目前的发展趋势,预计到 2020 年我国石油进口量将达到 2.5 亿吨,对进口石油的依赖程度达到 60%<sup>[3]</sup>。所以无污染的太阳能等清洁能源的开发与利用引起了广泛关注。

### 1.1.1 环境保护和可持续发展

在人类社会高速发展的今天,全球范围内的能源和环境问题越发显得重要和迫切。人类在享受丰富物质生活的同时,也对环境造成了很大破坏。正如恩格斯在《自然辩证法》<sup>[4]</sup>中所说的:“我们不要过分陶醉于我们对自然界的胜利。对

于每一次这样的胜利,自然界都报复了我们。”人类在享受生产力巨大发展所带来的丰厚回报的同时,也遭到自然界的无情报复。1962年,Rachel Carson的《寂静的春天》,揭开了人与自然共同生存问题的思考<sup>[5]</sup>;1972年3月,罗马俱乐部发表的《增长的极限》研究报告,深入分析了人与自然之间的关系,指出自然资源是有限的,人类必须自觉地抑制增长,否则将使人类社会陷入崩溃<sup>[6]</sup>。“我们不只是继承了父辈的地球,而是借用了子孙的地球”,这句话寓意深刻,《联合国环境方案》曾用这句话来告诫世人。1972年6月,在瑞典斯德哥尔摩召开的联合国人类环境会议(United Nations Conference on the Human Environment)是世界环境保护运动史上一个重要的里程碑。它是国际社会就环境问题召开的第一次世界性会议,标志着全人类对环境问题的觉醒。1972年出版的《只有一个地球》<sup>[7]</sup>一书为可持续发展观奠定了理论基础;1981年,美国学者布朗在《建设一个可持续发展的社会》的著作中首次使用并阐述了“可持续发展”的新观点<sup>[8]</sup>。1987年,联合国环境与发展大会(UNCED)的报告《我们共同的未来》对可持续发展进行了明确定义。

1992年,联合国环境与发展大会(UNCED)通过了《21世纪议程》报告,并最终促进了1997年《京都议定书》的签订<sup>[9]</sup>。中国政府于1994年3月通过了《中国21世纪议程》,其战略目标确定为“建立可持续发展的经济体系、社会体系和保持与之相适应的可持续利用资源 and 环境基础”。

### 1.1.2 臭氧层破坏和温室效应

常规制冷剂对环境的影响主要表现在对臭氧层的破坏和产生温室效应。臭氧层破坏和温室效应表现在臭氧含量不断减少和CO<sub>2</sub>浓度不断增加,将会对人类居住的环境产生巨大的影响,甚至是灾难性后果<sup>[10,11]</sup>。臭氧层破坏和温室效应已经成为全球共同关注的问题。

臭氧层破坏和温室效应已经成为国际间的共同问题,增强环境保护意识,走社会可持续发展的道路,已经成为必然选择的途径。在开展环保制冷剂的替代研究中,启用自然工质不失为一条最安全的途径。

### 1.1.3 制冷剂替代及CO<sub>2</sub>自然工质重新启用

随着CFCs、HCFCs禁用的提出,对制冷剂替代的研究方兴未艾。近十多年来科学家们通过不懈努力,研究出大量的过渡性或长期的CFCs和HCFCs替代物,并研究出相应的应用技术及设备,在制冷和空调行业得到广泛的应用。20世纪90年代,美国杜邦、联信、英国帝国化学公司、美国环保局(EPA)和美国ARI(制冷学会)提出了自己的替代物<sup>[12]</sup>。

目前,制冷剂替代主要有两条途径:以德国、瑞典等欧盟国家为代表的一派

主张采用碳氢化合物做制冷剂,认为采用生态系统中现有的天然物质作为制冷剂,可从根本上避免环境问题,替代物为 R717、R744、R290、R600a 四种;以美国和日本为代表的另一派主张采用 HFCs 等人工合成制冷剂。

在制冷剂历史上,人类最初使用的是  $\text{CO}_2$ 、 $\text{NH}_3$  和  $\text{SO}_2$  等自然工质。19 世纪后期,  $\text{CO}_2$  作为制冷剂曾被广泛应用在船用制冷机中。随后,性能优良的合成制冷剂逐渐替代了  $\text{CO}_2$  的作用。近 20 多年,臭氧层破坏和温室效应问题日益突出,合成制冷剂的使用开始受到人们的质疑,自然工质的研究开始复苏<sup>[13]</sup>。

作为自然工质,  $\text{CO}_2$  具有很多优点<sup>[14]</sup>: (1) 环境友好性 ( $\text{ODP}=0$ ,  $\text{GWP}=1$ ); (2) 容积制冷量大; (3) 无毒、不可燃; (4) 压比小,导热性好; (5) 与 PAG 和 POE 等合成润滑油互溶性好; (6) 价格便宜等。另外,  $\text{CO}_2$  也具有一些不足之处,如临界温度较低 ( $30.98^\circ\text{C}$ )、临界压力很高 ( $7.377\text{MPa}$ )、系统效率较低等。尽管  $\text{CO}_2$  作为制冷工质具有一些缺点,但已故前国际制冷学会主席 G. Lorentzen 仍认为  $\text{CO}_2$  是无可取代的制冷工质,并提出跨临界循环理论,指出作为制冷工质,  $\text{CO}_2$  制冷循环不宜采用普通工质的亚临界循环,而是采用跨临界循环形式,其可望在制冷空调和热泵领域发挥重要作用。

#### 1.1.4 太阳能热泵联合应用技术

太阳能属于一种可再生的清洁能源,分布广、储量大,同时具有很强的季节性和地域性。太阳能直接加热热水供生活所用或冬季供暖,产生的热水波动很大,遇到极冷低温或阴雨天气甚至不能利用。热泵属于一种逆向循环,其效率较高,尤其在小温差下的效率更高。但极端天气对热泵影响很大,其中,空气源热泵在冬季极低温度时制热效果很差甚至不能工作。综合太阳能和热泵特点,可以将热泵和太阳能热水系统联合应用,将太阳能储热水箱中回收的热量经热泵加热用于冬季供暖,进而提高联合系统的效率。

### 1.2 太阳能的特点及利用技术

#### 1.2.1 太阳能的特点

太阳向宇宙空间发射的辐射功率为  $3.8 \times 10^{23} \text{kW}$  的辐射值,其中二十亿分之一到达地球大气层。到达地球大气层的太阳能,30%被大气层反射,23%被大气层吸收,47%到达地球表面,其功率为  $8 \times 10^{13} \text{kW}$ ,也就是说太阳每秒钟照射到地球上的能量就相当于燃烧 500 万吨煤释放的热量。全球人类目前每年能源消费的总和只相当于太阳在 40min 内照射到地球表面的能量。

太阳能是储量巨大、可再生的清洁能源,在地球已经经历过的数十亿年中,太阳只向外界辐射了其自身能量的 2%。如果人类能够充分开发利用太阳能,完

全可以供给人类几十亿年使用,而且太阳能对环境的危害几乎为零,也不会排放任何温室气体,是人类在以后发展中需要充分利用和开发的清洁可再生能源。

太阳能在通过大气层时能量会被耗散,受到空气问题以及气候等多种因素的影响。由于上述所描述的特点,要求太阳能利用设备有较大的集热器面积;为了降低太阳能供给热量的间歇性,太阳能系统还应装备储热装置,这些让太阳能热利用系统的初期设备投资变得很大。由于需要供给普通建筑供暖用水及生活热水温度不要求很高,采用太阳能热利用设备可以做到热能能级的合理匹配和调控。

### 1.2.2 太阳能利用形式

太阳能常见利用形式主要分为如下几种:

(1) 被动式太阳房。区别于主动式太阳房,被动式太阳房不需要任何机械与动力设备。被动式太阳房的设计要考虑建筑物的朝向、当地太阳高度角的大小、外围护的结构及材料、建筑内部空间及蓄热材料的选择,使建筑物本身能够高效地收集、存储和分配太阳辐射能,无需辅助热源,并且达到冬季采暖、夏季遮阳降温的作用。按不同的采集太阳能的方式,被动式太阳房大致可分为直接收益式太阳房、集热-蓄热墙式太阳房、附加阳光间式太阳房、屋顶池式太阳房、直接收益窗和集热墙组合式太阳房。

(2) 太阳能集热器。太阳能集热器吸收太阳辐射,将有效热能传给传热工质,并且最大限度地保证吸收的热量不再散失,传热工质多选择液态物质或空气<sup>[15]</sup>。太阳能集热器的工作温度范围广,在生活、工业、娱乐业等场所采暖、供热水等诸多领域中已经广泛应用了太阳能集热器。从国内市场来看,一半以上的太阳能系统中应用的是真空管式集热器。平板型集热器在耐久性、适用工况、耐压上还不如真空管集热器。但是平板型太阳能集热器造价低廉、故障率低、热传递性、与传热介质的相容性较好<sup>[16]</sup>,应进一步提高平板型太阳能集热器的效率以及透明盖板、吸热板的加工工艺。

(3) 太阳能热水器。太阳能热水器是世界太阳能热利用产业中的骨干。太阳能热水器的使用,能大幅缓解由于热水消耗量的增加而引起的能源供应压力和环境压力<sup>[17]</sup>。太阳能热水器代替电热水器,每平方米采光面积节电  $300\text{kW}\cdot\text{h/a}$ ,削弱了城市的晚间用电高峰。但是,现有许多太阳能热水器的功能尚不完善,品种、规格、尺寸等都不满足建筑的要求,承载、防风、避雷等安全措施不够健全<sup>[18]</sup>。为了使太阳能热水系统成为民用建筑的配套设备,科研人员在最大限度地优化太阳能热水系统的产品结构功能、热水系统与建筑整合设计、太阳能与常规能源的匹配等方面进行了研究。

(4) 太阳能采暖系统。太阳能采暖系统就是一种主动式的太阳能热利用系统,由太阳能集热器、蓄热设备、辅助热源和循环水泵等设备组成,可以吸收、

存储太阳能，达到连续采暖的效果。但是，系统的运行温度较低，因为太阳能集热器的效率随着运行温度的升高而降低。我国大部分冬季需要采暖的地区，目前大多广泛使用的是短期蓄热的太阳能采暖系统，太阳能保证率在 20%~40%<sup>[19]</sup> 之间。预计到 2020 年，我国新建的节能建筑中，约 10% 的建筑中应用太阳能采暖系统，每年可节约 660 万吨标准煤。

1.2.3 我国太阳能的分布

我国太阳能光照资源丰富，全国 60% 以上的地区年辐射总量大于 5020MJ/(m<sup>2</sup>·a)，年平均日照小时数大于 2000h。我国太阳能资源分布见表 1-1。

表 1-1 我国太阳能资源分布

| 类型 | 日照<br>/h·a <sup>-1</sup> | 年辐射<br>/MJ·(m <sup>2</sup> ·a) <sup>-1</sup> | 等量热量所需标准燃煤<br>/kg | 主要地区                                           | 备注    |
|----|--------------------------|----------------------------------------------|-------------------|------------------------------------------------|-------|
| 一类 | 3200~3300                | 6680~8400                                    | 225~285           | 宁夏北部，甘肃北部，新疆南部，青海西部，西藏西部                       | 最丰富地区 |
| 二类 | 3000~3200                | 5852~6680                                    | 200~225           | 河北西北部，山西北部，内蒙古南部，宁夏南部，甘肃中部，青海东部，西藏东南部，新疆南部     | 较丰富地区 |
| 三类 | 2200~3000                | 5016~5852                                    | 170~200           | 山东，河南，河北东南部，山西南部，新疆北部，吉林，辽宁，云南，陕西北部，甘肃东南部，广东南部 | 中等地区  |
| 四类 | 1400~2000                | 4180~5016                                    | 140~170           | 湖南，广西，江西，浙江，湖北，福建北部，广东北部，陕西南部，安徽南部             | 较差地区  |
| 五类 | 1000~1400                | 3344~4180                                    | 115~140           | 四川大部分地区，贵州                                     | 最差地区  |

我国大部分省市太阳能资源都比较丰富，尤其是在我国西北部，如青海、新疆、西藏等地；而我国人口密度比较大的中东部，如河北、北京、山东、山西也是太阳能分布比较丰富的地区。如果太阳能利用技术能够在这些省市大规模发展利用，节约的一次能源耗费和减少的污染物排放将是十分巨大的。

图 1-1 为中国年平均太阳能总辐射量月变化，图 1-2 为中国年平均太阳能直接辐射总量月变化，图 1-3 为中国年平均太阳能直射比月变化，图 1-4 为中国年平均日照时数总量月变化。

我国属太阳能资源丰富的国家之一，全国总面积 2/3 以上地区年日照时数大于 2000h，年辐射量在 5000MJ/m<sup>2</sup> 以上。据统计资料分析，中国陆地面积每年接收的太阳辐射总量为 3.3×10<sup>3</sup>~8.4×10<sup>3</sup> MJ/m<sup>2</sup>，相当于 2.4×10<sup>4</sup> 亿吨标准煤的储量。

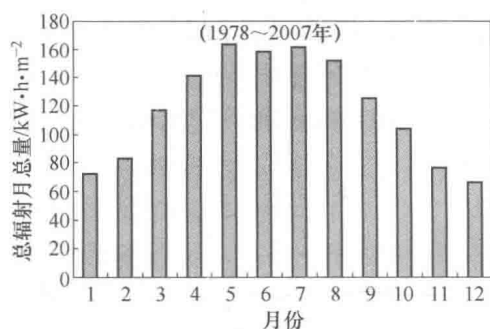


图 1-1 中国年平均太阳能总辐射量月变化

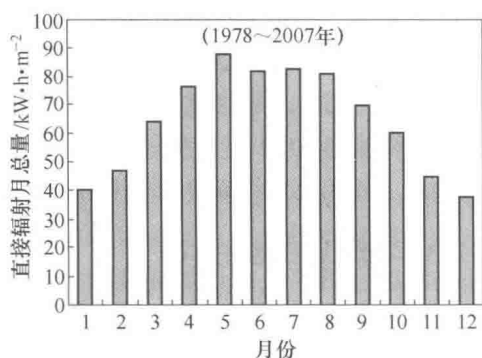


图 1-2 中国年平均太阳能直接辐射总量月变化

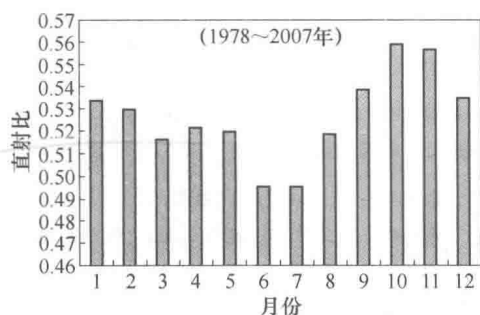


图 1-3 中国年平均太阳能直射比月变化

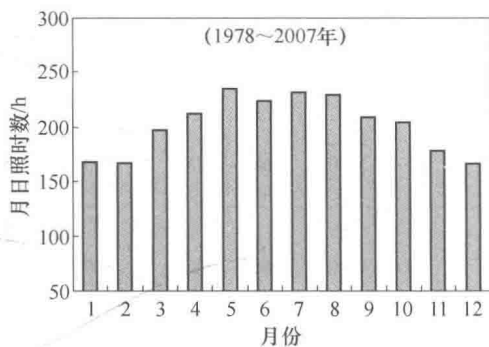


图 1-4 中国年平均日照时数总量月变化

根据国家气象局风能太阳能评估中心划分标准,我国太阳能资源地区分为以下四类<sup>[20]</sup>:

一类地区(资源丰富带):全年辐射量在  $6700 \sim 8370 \text{ MJ/m}^2$ , 相当于  $230 \text{ kg}$  标准煤燃烧所发出的热量。主要包括青藏高原、甘肃北部、宁夏北部、新疆南部、河北西北部、山西北部、内蒙古南部、宁夏南部、甘肃中部、青海东部、西藏东南部等地。

二类地区(资源较富带):全年辐射量在  $5400 \sim 6700 \text{ MJ/m}^2$ , 相当于  $180 \sim 230 \text{ kg}$  标准煤燃烧所发出的热量。主要包括山东、河南、河北东南部、山西南部、新疆北部、吉林、辽宁、云南、陕西北部、甘肃东南部、广东南部、福建南部、江苏中北部和安徽北部等地。

三类地区(资源一般带):全年辐射量在  $4200 \sim 5400 \text{ MJ/m}^2$ , 相当于  $140 \sim 180 \text{ kg}$  标准煤燃烧所发出的热量。主要是长江中下游、福建、浙江和广东的一部分地区,春夏多阴雨,秋冬季太阳能资源还可以。

四类地区:全年辐射量在  $4200 \text{ MJ/m}^2$  以下。主要包括四川、贵州两省。此区是我国太阳能资源最少的地区。



一、二类地区,年日照时数不小于2200h,是我国太阳能资源丰富或较丰富的地区,面积较大,占全国总面积的2/3以上,具有利用太阳能的良好资源条件。

#### 1.2.4 世界太阳能的分布

世界太阳能资源丰富的地区主要集中在非洲、南美洲、欧洲大部分地区和亚洲大部分区域。北非地区是全球太阳辐射最强的区域。中东几乎所有国家太阳能辐射能量都很高。

美国也是世界太阳能资源最丰富的地区之一<sup>[21]</sup>。全国一类地区太阳年辐照总量为9198~10512MJ/m<sup>2</sup>;二类地区太阳年辐照总量为7884~9198MJ/m<sup>2</sup>;三类地区太阳年辐照总量为6570~7884MJ/m<sup>2</sup>;四类地区太阳年辐照总量为5256~6570MJ/m<sup>2</sup>;五类地区太阳年辐照总量为3942~5256MJ/m<sup>2</sup>。澳大利亚的太阳能资源也很丰富。全国一类地区太阳年辐照总量为7621~8672MJ/m<sup>2</sup>;二类地区太阳年辐照总量为6570~7621MJ/m<sup>2</sup>;三类地区太阳年辐照总量为5389~6570MJ/m<sup>2</sup>;四类地区太阳年辐照总量也几乎都高于6570MJ/m<sup>2</sup>。

### 1.3 CO<sub>2</sub>跨临界热泵系统组成及研究现状

与大多数常规制冷剂相比,CO<sub>2</sub>的临界温度很低(30.98℃),因此CO<sub>2</sub>的放热过程是在接近或超过临界点的区域的气体冷却器中进行的,这也是“跨临界”一词的来源。

随着CO<sub>2</sub>跨临界循环技术在热泵热水器、汽车空调和工商业制冷等领域的不断深入研究和应用,随之配套的压缩机、节流阀、膨胀机、气体冷却器和蒸发器等也都得到了不同程度的发展。目前,欧洲(主要是挪威、德国、丹麦和荷兰等)、亚洲(主要是日本)和美国三个地域水平发展比较快,也在一定程度上代表了国际先进水平。

#### 1.3.1 压缩机

活塞压缩机适用压力范围广、材料要求低、加工较容易和技术上较为成熟,因此,在各种场合,特别是在中小制冷范围内,成为制冷压缩机中应用最早、生产批量最大的一种机型。

1989年,挪威科技大学(NTNU)的Fagerli等人首次进行了CO<sub>2</sub>跨临界循环试验<sup>[22]</sup>,其选用的压缩机为丹麦SABROE公司制造的CO<sub>2</sub>双缸活塞压缩机,如图1-5所示。该类型压缩机工作压力为4~12MPa,转速为500~5000r/min,壳体材料为钢和铝。压缩机容积30cm<sup>3</sup>,30℃时进、出口压力为4MPa和12MPa,转速为600~9500r/min,容积效率可达70%~80%。