

高等院校规划教材

# LENGREYUAN GONGCHENG

## 冷热源工程

张维亚 魏 鋈 主编



煤炭工业出版社

高等院校规划教材

# 冷 热 源 工 程

主编 张维亚 魏 鋈

煤炭工业出版社

·北 京·

**图书在版编目 (CIP) 数据**

冷热源工程/张维亚, 魏盛主编. —北京: 煤炭工业出版社, 2009

高等院校规划教材

ISBN 978 - 7 - 5020 - 3468 - 9

I. 冷… II. ①张…②魏… III. ①制冷工程 - 高等学校 - 教材②热力工程 - 高等学校 - 教材 IV. TB6 TK1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 023490 号

煤炭工业出版社 出版

(北京市朝阳区芍药居 35 号 100029)

网址: [www.ceiph.com.cn](http://www.ceiph.com.cn)

煤炭工业出版社印刷厂 印刷

新华书店北京发行所 发行

\*

开本 787mm × 1092mm<sup>1</sup>/<sub>16</sub> 印张 14

字数 325 千字 印数 1—2,000

2009 年 4 月第 1 版 2009 年 4 月第 1 次印刷

社内编号 6273 定价 35.00 元

**版权所有 违者必究**

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 本社负责调换

# 前 言

冷热源是维持建筑环境舒适条件的能源供应中心，在建筑空调系统的投资和运行能耗中扮演主要角色，其应用和发展受到建筑、气候、能源及环境等诸多因素和国家能源政策的影响。

单就冷热源设备本身来说，用能源利用效率就可以评价其性能高低；但对冷热源工程来说，要选择适应特定地域的气候特征、能源状况及环境要求，同时满足特定建筑使用功能特点的冷热源方案，则是一个复杂的决策过程，其方案的优劣往往具有时间性、空间性和不确定性，呈现出动态和模糊特征。

本书是在国家大力提倡节能与合理利用能源、推行清洁能源、鼓励开发利用可再生能源和严格控制环境污染的背景下，将原专业平台课程中的“空调制冷技术”与“锅炉与锅炉房设备”的主要内容加以整合，并融入新的冷热源技术而编写的。

冷热源工程作为建筑环境与设备工程专业的专业平台课程，在本书的编排上力求突出应用性、先进性；既介绍了常规冷源及热源设备，又增加了冷热源一体化设备；在系统阐述空调冷热源方案的选择、冷热源设备、冷热源的辅助设施、冷热源机房与系统设计等内容的基础上，介绍了蓄冷技术、新能源利用技术、冷热电联供技术等空调冷热源工程新技术。

全书共九章，由张维亚、魏鋈担任主编。其由张维亚编写第一章、第二章、第三章、第四章和第九章第一节、第二节，魏鋈编写第五章、第六章、第七章第一节、第九章第三节和第五节，由刘光军编写第七章第二节，由吴金顺编写了第八章，由黄玲编写第九章第四节。

本书在编写过程中参考和引用了许多教材、专著和论文，在此编者向相关作者表示衷心的感谢。本书内容涉及范围广，且属于冷热源内容的整合尝试，虽然力求对读者的工程实践更具参考价值，但由于编者水平有限，时间仓促，本书存在缺点和错误在所难免，恳切希望广大读者指正，以利今后本书的充实和提高。

**编 者**

2009年1月

## 内 容 提 要

本书是高等院校规划教材，为“建筑环境与设备工程”专业的专业技术平台课程教材。旨在使学生了解能源与环境、能源与冷热源设备的关系，掌握冷热源及其设备、冷热源一体化设备等的基础理论、基本知识和新技术、新设备，并获得冷热源系统与机房设计的基本方法和技能。内容包括：绪论、制冷的基本原理、制冷剂及载冷剂、冷源设备、燃料及燃烧计算、热源设备、冷热源一体化设备、蓄冷（热）技术、冷热源系统及机房设计等。

本书作为建筑环境与设备工程专业的教学用书，也可供暖通空调设计、施工与运行管理、维修等人员的培训和自学参考。

# 目 次

第一章 绪论	1
第一节 能源、冷热源工程与建筑环境	1
第二节 建筑能耗与环境	2
第三节 空调冷热源工程的新进展	3
第二章 制冷的基本原理	4
第一节 概述	4
第二节 理想制冷循环——逆卡诺循环	7
第三节 蒸气压缩式制冷的理论循环	10
第四节 蒸气压缩式制冷的实际循环	13
第三章 制冷剂及载冷剂	19
第一节 制冷剂	19
第二节 CFCs 的使用与替代	24
第三节 载冷剂	26
第四章 冷源设备	30
第一节 压缩机	30
第二节 制冷系统设备	45
第三节 制冷机组	61
第五章 燃料及燃烧计算	75
第一节 燃料	75
第二节 燃料的燃烧计算	86
第三节 烟气分析及其结果的应用	92
第六章 热源设备	97
第一节 锅炉的基本知识	97
第二节 锅炉的热平衡	102
第三节 水管锅炉水循环及汽水分离	107
第四节 锅炉的燃烧方式与设备	110
第五节 锅炉的受热面的布置形式	123

第六节 其他热源设备·····	128
<b>第七章 冷热源一体化设备·····</b>	<b>133</b>
第一节 热泵·····	133
第二节 吸收式制冷及设备·····	142
<b>第八章 蓄冷(热)技术 ·····</b>	<b>161</b>
第一节 概述·····	161
第二节 冰蓄冷技术·····	162
第三节 水蓄冷(热)技术 ·····	168
第四节 共晶盐蓄冷技术简介·····	170
<b>第九章 冷热源系统及机房设计·····</b>	<b>172</b>
第一节 燃气供应系统设计·····	172
第二节 燃油供应系统设计·····	175
第三节 通风系统设计·····	182
第四节 冷热源水处理系统·····	184
第五节 冷热源机房设计·····	195
<b>附图·····</b>	<b>210</b>
附图 1 制冷剂 R22 压焓图 ·····	210
附图 2 制冷剂 R123 压焓图 ·····	211
附图 3 制冷剂 R134a 压焓图 ·····	212
附图 4 制冷剂 R717 压焓图 ·····	213
<b>参考文献·····</b>	<b>214</b>

# 第一章 绪 论

## 第一节 能源、冷热源工程与建筑环境

### 一、能源的概念及分类

能源是指自然界中能为人类提供某种形式能量的物质资源。能源是人类活动的物质基础，人类社会的发展离不开优质能源的发现和先进能源技术的使用。

能源种类繁多，按来源可分为来自地球外部天体的能量（主要是太阳能）、地球本身蕴藏的能量和地球与其他天体相互作用而产生的能量。按能源的基本形态分为一次能源和二次能源。按能源性质分为燃料型能源（煤炭、石油、天然气、泥炭、木材）和非燃料型能源（水能、风能、地热能、海洋能）。根据能源消耗后是否造成环境污染分为污染型能源和清洁型能源。根据能源使用的类型又可分为常规能源和新型能源。另外按能否不断得到补充或在较短周期内再产生还可分为再生能源和非再生能源。

为了满足特定的建筑环境要求，必须向其供给一定的冷量或热量，而冷量和热量的产生都是以消耗一定的能源为代价的。因此，“冷热源工程”课程介绍的是以高效合理用能为核心的冷热源系统与设备，这是建筑节能最重要的关键领域之一。

### 二、冷热源设备

冷量（或热量）供应一般是通过中间载体实现的，这种中间载体被称为冷媒或热媒。常见的冷媒有制冷剂、水和盐水；常见的热媒有水、蒸汽和空气。通常，我们把生产冷量的设备称为冷源设备（或制冷设备），把生产热量的设备称为热源设备（或供热设备）。冷（热）媒可以直接利用，也可以通过其他热质交换设备（或末端装置）进行能量交换。

冷热源设备是能源消耗与转化设备，能源形式的多样性使得冷热源设备的表现形式也多种多样。本书主要介绍工程中常见的冷热源设备；以消耗电能为主的蒸气压缩式制冷设备，以消耗矿物燃料为主的热源设备——锅炉，充分利用低位热源的热泵，消耗矿物燃料的冷热源一体化设备——直燃机组；同时对其他冷热源设备也有一定的介绍。

### 三、冷、热源设备与建筑环境

目前，越来越多的建筑要求夏季供冷、冬季供热，而冷源设备和热源设备是为人类居住环境提供能量的源头。它们的存在形式既有独立性，有时又形影相随。独立性表现在建筑所处的地域或功能不同时，一些建筑只需要供冷，而另一些建筑只需要供热，由单一的冷源或热源就可解决建筑的室内环境调控问题。但在我国大部分地区，大部分建筑都有不同程度的冷热调控要求；特别是随着国民经济水平的提高，这种趋势越来越显著，导致建筑中冷、热源能耗设备并存。因此，在进行采暖通风空调工程设计时，经常要求设备设计



师同时考虑冷、热源设备的设计和选型等工作。

## 第二节 建筑能耗与环境

### 一、能源结构与现状

我国原煤的生产消费在能源总量中所占的比例大约是 70%，石油约 20%，天然气约 2.3%，水电约 6.5%。我国煤炭的生产及消费约是世界平均水平的 2.6 倍，石油不足世界平均水平的 50%，天然气更是不足世界平均水平的 10%，一次电力略低于世界平均水平。

我国是世界第一人口大国，人口数量占世界总人口的 20%，就是资源最丰富的煤炭，人均资源量也只有世界平均值的 42.5%，而人均石油资源仅为世界平均值的 17.1%，人均天然气资源仅为世界平均值的 13.2%，人均能量资源占有量还不到世界平均水平的一半。目前，我国年人均能量消耗是 1000kg 标准煤，而世界年人均水平为 2000 ~ 3000kg 标准煤。

我国总的能源状况是优质能源比例很低（富煤、缺油、少气）、人均能源资源占有量低。能源生产和消费结构的不合理、能源资源的短缺，一定程度上制约了我国经济的总体发展。

### 二、能源的利用与环境污染

能源消耗是影响全球环境的最重要的方面之一。一次能源在利用过程中，会产生大量的  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$ 、烟尘、 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}$ 、微量元素及多种芳烃化合物等污染物，对环境产生严重影响。我国巨大的能源消费规模、以煤为主的能源消费结构引起的环境污染已不堪重负。

我国的环境污染为典型的能源消费性污染。我国是世界上继北美和欧洲后的第三大酸雨污染区，目前全国酸雨区面积约占国土总面积的 30%，每年因酸雨造成的直接经济损失约为当年 GNP 的 1% ~ 2%，其潜在的损失有可能在 3% 以上。大规模的能源消费所产生的  $\text{CO}_2$  等温室气体对全球气候变化的潜在威胁，已经成为国际社会关注的焦点。我国的能源环境问题，已经成为国际能源环境问题的一个重要部分。

### 三、建筑能耗

在国家能源消耗中，建筑能耗占有相当大的比例。据统计，我国建筑能耗占总能耗的比例为 20% 左右，平均值为 19.8%。其中，用于暖通空调的能耗（主要是冷热源的能耗）约占建筑能耗的 65%。建筑中最大的能耗系统是暖通空调系统、照明系统和建筑围护结构系统。控制建筑能耗的最有效方法是技术创新、选择适当的系统和高效设备等。

建筑能耗具有季节性。在暖通空调系统的耗能设备中，包含有冷热源设备、泵、风机、空气处理机、冷却塔等，它们有的季节性消耗电能，有的季节性消耗热能。

结合建筑、环境、能源三者的相互协调及可持续发展，未来建筑的发展趋势是节能与环保，强调环境、节能、资源和材料的有效利用。节能包括提高能效和资源的综合利用，其中能效的提高包括使用高效冷水机组、高效锅炉、高效设备电机、减少水系统的能耗、

采用新风冷却系统等各个方面，资源的综合利用包括各种排热的回收和蓄热系统的利用等，其中对自然资源的有效利用包括太阳能的利用、地热的应用等。

### 第三节 空调冷热源工程的新进展

随着社会经济发展水平的不断提高，空调的能耗需求越来越大，新能源在空调冷热源中的应用是冷热源研究的一个重要方面。目前空调冷热源的新能源应用研究主要集中在太阳能、地热能、天然气、燃料电池、核能和水电等方面。从目前的空调冷热源工程来看，新的进展主要体现以下的特点：

#### 1. 建筑能量集成系统 (Integrated System of Building Energy)

建筑能量集成系统体现在对空调冷热源系统能量利用的最大化方面，如建筑的冷热电三联供系统 (Combined Cooling Heating and Power)，该系统是建立在能量的阶梯利用概念基础上，把制冷、供热 (采暖和卫生热水) 和发电等设备构成一体化的联产能源转换系统。其目的是为了提高能源的利用率，减少需求侧能耗，减少碳、氮和硫氧化物等有害气体的排放。它是在分布式发电技术和热能动力工程技术发展的基础上产生的，具有能源利用率高和对环境影响小的特点。典型冷热电三联供系统一般包括动力系统和发电机 (供电)、余热回收装置 (供热)、制冷系统 (供冷) 等。目前，对于建筑能量集成系统的应用主要集中在冷热电三联供系统、区域供热供冷系统和冷热水三联供系统方面。

#### 2. 可再生能源的使用 (Using of Renewable Energy)

可再生能源泛指多种用之不竭的能源，主要包括太阳能、风能、地热能、海洋能、生物质能等可再生能源。

(1) 地源热泵技术的应用。地源热泵是一种利用地下浅层可再生地热资源实现供冷、供热、高效、节能环保的空调系统。地源热泵可以分为土壤源热泵、地下水热泵和地表水热泵。由于地下水、地表水非随处可得，且水质也不一定能满足要求，所以其使用范围受到一定限制。国内外对地源热泵的理论和实验研究均集中在土壤源热泵上。

(2) 太阳能技术的应用。用于被动式建筑物的供暖，利用太阳能加热水作为热泵的热源或直接用于辐射供暖。太阳能电池、太阳能吸收式制冷等对建筑物应用亦有广阔的前景。与建筑物结合起来的太阳能技术包括太阳能空调、太阳能采暖、太阳能热水、太阳能蓄能、地源热泵、太阳能光伏发电等。

#### 3. 蓄能技术的应用

蓄能空调系统包括蓄冷空调系统和蓄热空调系统。冰蓄冷空调系统就是利用夜间电网低谷时的电力来制冷，并以冰的形式把冷量储存起来，在白天用电高峰时将冰融化，释放出供空调系统使用的冷量。冰蓄冷空调技术是转移高峰电力、开发低谷用电、优化资源配置、保护生态环境的一项重要技术措施。

在蓄热系统中，目前我国主要使用电锅炉蓄热式系统且以水作为蓄热介质。所谓电力蓄热系统，就是以电锅炉为热源，利用低谷廉价电力对水加热，并将其储存在蓄热水箱中，在电网高峰时段关闭电锅炉，由储存在蓄热水箱中的热水供热。它的优点是不排出有害气体，无污染、无噪声，比煤锅炉、油锅炉的热效率高，又能充分利用低谷电，运行费用低。

## 第二章 制冷的基本原理

### 第一节 概 述

#### 一、制冷发展简史

人类最早的制冷方法是利用天然冷源，如冰、深井水等。我国早在三千年前的周朝就有了用冰的历史。现代制冷技术作为一门技术科学，是从19世纪中、后期发展起来的。1834年美国人波尔金斯（Perkins）制成第一台用乙醚为工质的制冷机，1844年美国医生高里（Gorrie）用封闭循环的空气制冷机为发烧病人建立了一座空调站，1860年法国人卡列（Carre）发明了氨水吸收式制冷系统，1874年林德（Linde）研制成功氨制冷机。

1913年美国工程师拉森（Lunsvsen）制造出世界上第一台手操纵家用电冰箱。1918年美国开尔文纳特（Kelvinator）公司首次在市场上推出自动电冰箱。1926年美国奇异（G. E.）公司研制成功了世界上第一台全封闭式制冷系统的自动电冰箱，1927年家用吸收式冰箱问世。

改革开放以来，我国制冷空调工业得到了迅速发展。据不完全统计，目前全国生产制冷设备的厂家有近100家，生产空调设备的厂家有近200家。自1989年来制冷空调业的工业产值平均年增长20%左右。目前我国制冷空调行业产值约占全球总量的12%以上，成为继美国、日本之后的第三大制冷空调生产国。我国电冰箱、家用空调器产量已居世界第一位，分别占到世界总产量的30%和16%；溴化锂吸收式制冷机产量居世界第二位。我国在产品质量、技术水平上均有很大提高，与国外先进水平的差距日益缩小，有的产品已达到世界同类产品的先进水平。

#### 二、制冷的的方法

制冷的的方法很多，可分为物理方法和化学方法。绝大多数的制冷方法是物理方法。目前广泛应用的制冷方法有相变制冷、气体绝热膨胀制冷和温差电制冷等。

##### 1. 相变制冷

液体转变为气体、固体转变为液体、固体转变为气体时都要吸收潜热，可以利用这个现象来实现制冷。它包括融化制冷、气化制冷和升华制冷。

(1) 融化制冷。利用固体融化的吸热效应实现制冷。如冰融化时要吸收 $334.9\text{kJ/kg}$ 的溶解热，并维持 $0^\circ\text{C}$ 温度，若在一小室内放一个盛冰的容器，则冰融化吸热而将小室冷却，并维持一定的温度。由于小室周围的环境温度较高，则环境的热量经小室的壁面传入室内，借小室内空气自然对流将热量传递到容器内融化着的冰，而维持小室一定的低温。冰融化的水携带着热量排出小室。目前，冷藏运输中的冷藏车有的就是直接用冰来冷却的。

(2) 气化制冷。利用液体气化的吸热效应实现制冷。例如氨在1标准大气压下要吸

收 1370kJ/kg 的气化潜热，这时的沸点为  $-33.4^{\circ}\text{C}$ 。如果将盛有氨液的容器放于小室内，则可将小室冷却到一定的低温。温度较高的环境的热量通过小室的围护结构传入小室内，借空气自然对流将热量经容器壁传递到沸腾着的氨液，从而将小室冷却到某一稳定的温度。蒸气压缩式制冷、吸收式制冷和蒸气喷射式制冷都是利用这种物理现象来实现制冷的。

(3) 升华制冷。利用固体升华的吸热效应来实现制冷。例如干冰（固体  $\text{CO}_2$ ）在 1 标准大气压下升华要吸收 573.6kJ/kg 的升华潜热，升华时的温度维持在  $-78.9^{\circ}\text{C}$ 。目前干冰制冷常被用在人工降雨和医疗中。

## 2. 气体绝热膨胀制冷

一定状态的气体通过节流阀或膨胀机绝热膨胀时，其温度会降低，从而达到制冷的目的。气体经过节流阀时，流速大、时间短，来不及与外界进行热交换，可以近似地看成绝热过程。根据稳定流动能量方程，气体绝热节流后焓值不变。对于实际气体，焓值是温度、压力的函数，节流后的温度将发生变化，这一现象称为焦耳-汤姆逊效应。空气、氧、氮、二氧化碳等气体在常温下经节流后温度会下降，可以用来制冷。

## 3. 温差电制冷

1934 年珀尔帕发现：两种不同金属组成的闭合电路中接上一个直流电源，一个接合点变冷（吸热），另一个接合点变热（放热），这种现象称为珀尔帖效应。但是纯金属的珀尔帖效应很弱，直到近代半导体的发现才使温差电制冷变为现实。半导体可分为电子型（N 型）和空穴型（P 型）两类。用这两类半导体组成的闭合电路，具有明显的珀尔帖效应。目前温差电制冷常用在小型制冷器中。

# 三、制冷的分类及应用

## 1. 分类

利用物理现象进行制冷的的方法很多，有绝热放气制冷、涡流管制冷、绝热退磁制冷、氮稀释制冷等。

按照不同的制冷温度要求，制冷技术可分为普通制冷、深度制冷、低温制冷和极低温制冷 4 类。

(1) 普通制冷（普冷）：稍低于环境温度至  $-100^{\circ}\text{C}$ （173K）。冷库制冷技术和空调用制冷技术属于这一类。

(2) 深度制冷（深冷）： $-100^{\circ}\text{C}$ （173K）~  $-200^{\circ}\text{C}$ （73K）。空气分离的工艺用制冷技术属于这一类。

(3) 低温制冷（低温）： $-200^{\circ}\text{C}$ （73K）~  $-268.95^{\circ}\text{C}$ （4.2K）。4.2K 是液氮的沸点。

(4) 极低温制冷（极低温）：低于 4.2K。

低温和极低温制冷技术一般只在高科技的研究工作中才需要如此低的制冷温度条件。

## 2. 制冷技术的应用

### 1) 空调工程

空调工程是制冷技术应用的一个广阔领域。任何一个空调系统必须有一个冷源——无论天然的还是人工的。天然冷源不是随处都有，而且使用范围和场合均受到限制，这就必

须采用人工制冷。空调中的制冷装置不仅可用于空气的冷却和干燥，而且还可以用来加热空气——供热，即热泵循环。随着社会经济的发展，空气调节将在更大范围内发挥它的作用，制冷技术的应用也将日益扩大和发展。

#### 2) 食品的冷加工、冷藏和冷藏运输

易腐食品（肉类、鱼类、蛋类、蔬菜和水果等）需要良好的保鲜设备，否则会腐烂变质。因此，易腐食品从采购（捕捞）、加工、贮存、运输到销售的全部流通过程中都必须保持稳定的低温环境，如某一环节处理不当就会发生腐烂变质。这种从食品生产到销售的各个环节中不断采用冷藏保存的系统称为冷藏链。这就需要各种制冷设备——冷加工设备、冷藏库、冷藏汽车、冷藏船、铁路机械冷藏车、冷藏销售柜台等。

#### 3) 机械、电子工业

精密机床油压系统利用制冷来控制油温，可稳定油膜刚度，保证机床的正常工作。应用冷处理方法，可以改善钢的性能，使产品硬度增加、寿命延长。电子工业中，许多电子元、器件需要在低温或恒温环境中工作，以提高其性能，减少元件发热对环境温度的影响。例如，计算机储能器、多路通讯、雷达、卫星地面站等电子设备需要在低温下工作。大规模集成电路、光敏器件、功率元件、高频晶体管、激光倍频发生器等电子元件的冷却都需要应用制冷技术。

#### 4) 医疗卫生事业

制冷技术在医疗卫生事业中的应用是多方面的。如血浆、疫苗及某些特殊药品的低温保存，尸体或器官组织的冷藏，低温麻醉，低温切片，低温手术和低温治疗，高烧患者的冷敷降温等。低温治疗或手术已用于肿瘤科、皮肤科、妇科、耳鼻喉科、神经外科、眼科等方面。在治疗皮肤癌、视网膜脱落等病例中有显著的疗效。

#### 5) 土木工程

在建造堤坝、码头、隧道、挖掘矿井时，如遇到含水的泥沙层，可以利用制冷方法在施工地段的周围造成冻土围墙，以防止水分渗入，增加护壁的力度，保障工程安全进行。混凝土固化时会释放反应热，为了避免发生热膨胀和产生应力，应把这些热量除去。在大型工程（如三峡大坝）中，可以用制冷的办法预先将砂、砾石、水和水泥等在混合前冷却，或在混凝土内埋入冷却水管使之冷却。

#### 6) 体育事业

现代冰上运动包括冰球、速滑、花样滑冰、冰上舞蹈等，它们对冰的质量、环境提出了更高的要求。因此，人工冰场在各国得到了迅速的发展。人工冰场的出现对普及冰上运动，延长冰上运动时间和扩大冰上运动的地域，以及提高冰上运动的水平都起着积极的作用。

#### 7) 日常生活方面

随着人民生活水平的提高，家用电冰箱已成为家庭中必备的电器产品。冰糕、清凉饮料已成为人们日常生活中普通的消费品。

综上所述，制冷技术的应用是多方面的，它的发展标志着科技水平、工业水平的发展，也标志着人民生活水平的提高。可以预料我国的制冷事业将会得到进一步的发展与提高。

#### 四、制冷技术未来研究方向

(1) 新型制冷工质的研究。由于氟利昂 (CFC) 对臭氧层的破坏作用日益被人们所认识和重视, 研制新的纯工质, 寻找共沸或非共沸混合工质来替代有害工质 R12, 已成为制冷剂的主要研究方向, 这必将为蒸气压缩式制冷机的发展开辟新的道路。

(2) 蓄冷技术和集中供冷。当空调负荷 (冷量) 与能源供应在时间上不一致时, 采用蓄冷技术是解决问题的一种有效方法。蓄冷空调系统能全部或部分地将制冷机的负荷由白天转移至夜间, 因此在能源消费逐年增加的情况下, 应用蓄冷空调技术具有较大的社会效益和经济效益。随着大型商用建筑 (办公楼、宾馆、商场等) 的增多, 在一些空调建筑集中的地区进行集中供冷, 可以提高制冷设备的效率。

(3) 制冷机的种类和形式。制冷设备规模不断扩大, 制冷机的种类和形式不断增多, 成套空调用冷水机组的制冷量可达 7000kW。

(4) 计算机在制冷技术上的应用。它包括计算机辅助设计、辅助测试、自动控制、生产管理 4 个方面。计算机技术的突飞猛进, 推动了制冷技术的蓬勃发展, 预示着制冷技术的发展有更广阔的前景。

### 第二节 理想制冷循环——逆卡诺循环

#### 一、无温差传热的逆卡诺循环

逆卡诺循环由两个可逆等温过程和两个可逆绝热过程组成, 循环沿逆时针方向进行, 如图 2-1 所示。它是一个工作在恒温热源和一个恒温冷源之间的理想制冷循环。制冷工质从恒温冷源吸收的热量  $q_0 = T_0(s_1 - s_4)$ , 用面积 41654 表示; 工质向恒温热源放出热量  $q_k = T_k(s_2 - s_3)$ , 用面积 23562 表示; 工质完成一个循环所消耗的净功  $w_0 = q_k - q_0 = (T_k - T_0)(s_1 - s_4)$ , 用面积 12341 表示。

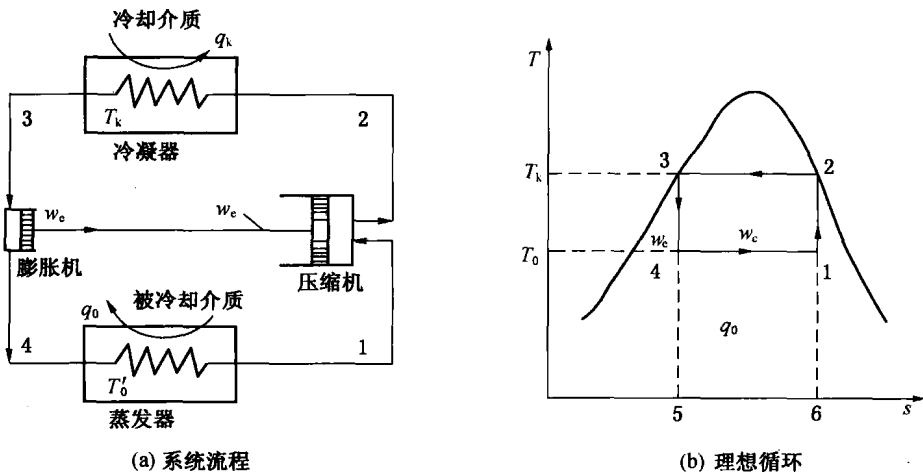


图 2-1 逆卡诺循环

在制冷循环中，制冷剂从被冷却物体中吸取的热量（制冷量） $q_0$  与所消耗的机械功  $w_0$  之比称为制冷系数，用  $\varepsilon$  表示。它是评价制冷循环经济性的指标之一。在逆卡诺循环中：

$$\varepsilon_c = \frac{q_0}{w_0} = \frac{q_0}{q_k - q_0} = \frac{T_0}{T_k - T_0} \quad (2-1)$$

由式 (2-1) 可知，逆卡诺循环的制冷系数仅取决于热源温度  $T_k$  和冷源温度  $T_0$ ， $\varepsilon$  随  $T_k$  的降低或  $T_0$  的升高而增大，与制冷剂本身的性质无关。由于高温热源和低温热源温度恒定、无传热温差存在，制冷工质流经各个设备中不考虑任何损失，因此逆卡诺循环是理想制冷循环，其制冷系数最高。

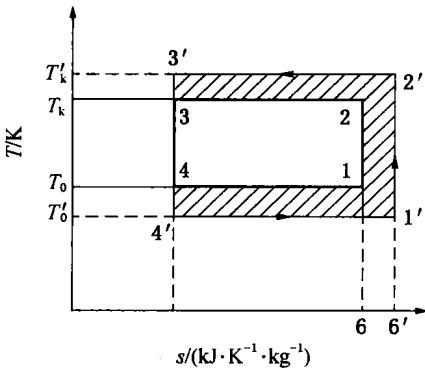
此外，逆卡诺循环也可用来获得供热效果，例如冬季将大气环境作为低温热源，将供热房间作为高温热源进行供热，这样工作的装置称为热泵。热泵的经济性用供热系数  $\mu$  表示。供热系数为单位耗功量所获取的热量：

$$\mu_c = \frac{q_k}{w_0} = \frac{q_0 + w_0}{w_0} = \varepsilon_c + 1 \quad (2-2)$$

由式 (2-2) 可知，热泵的供热量永远大于所消耗的功量，是综合利用能源的一种很有价值的措施。

## 二、有温差传热的逆卡诺循环

前面假定制冷剂与热源和冷源进行热交换时不存在温差，这就意味着换热器的面积要无限大，这显然是不切实际的。实际上，制冷剂在吸热过程中，它的温度  $T_0'$  总是低于被冷却物体的温度  $T_0$ ；在放热过程中，它的温度  $T_k'$  总是高于环境介质温度  $T_k$ 。具有恒定传热温差的逆卡诺循环的  $T-s$  图如图 2-2 所示，过程线用 1'2'3'4'1' 表示。假定循环的制冷量与无温差传热时的制冷量相等，即面积 41654 等于面积 4'1'6'54'。有温差传热时，循环所消耗的功  $w_0' =$  面积 1'2'3'4'1'，比无温差传热时多消耗  $\Delta w = w_0' - w_0$ （图中以阴影线面积表示）。因此有温差传热时的制冷系数小于无温差传热时的制冷系数，即



$\varepsilon_c' = \frac{q_0}{w_0'} < \frac{q_0}{w_0} = \varepsilon_c$

$$\varepsilon_c' = \frac{q_0}{w_0'} < \frac{q_0}{w_0} = \varepsilon_c$$

由此可知，无温差传热的逆卡诺循环是具有恒温热源时的理想循环，在给定的相同温度条件下，它具有最大的制冷系数。

图 2-2 具有温差传热的逆卡诺循环

实际的逆向循环具有外部和内部的不可逆损失，其不可逆程度用热力完善度来衡量。工作在相同温度区间的不可逆循环的实际制冷系数  $\varepsilon$  与可逆循环的制冷系数  $\varepsilon_c$  的比值称为该不可逆循环的热力完善度，用  $\eta$  表示，即

$$\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c} \quad (2-3)$$

$\eta$  值越接近于 1，说明实际循环越接近可逆循环，不可逆循环损失越小，经济性越好。

应当指出，制冷系数  $\varepsilon$  只是从热力学第一定律（即能量转换的角度）反映循环的经济性，在数值上它可以小于1、等于1或大于1；热力完善度  $\eta$  同时考虑了能量转换的数量关系和实际循环中的不可逆程度的影响，在数值上它始终小于1。当比较两个制冷循环的经济性时，如果两者的  $T_k$ 、 $T_0$  相同，则采用  $\varepsilon$  与  $\eta$  比较是等价的；如果两者的  $T_k$ 、 $T_0$  不相同，只有采用  $\eta$  加以比较才是有意义的。

### 三、具有变温热源的理想制冷循环——劳伦兹循环

在制冷循环实际工作时，有时会遇到热源的温度是变化的。例如，利用窗式空调器向房间供冷时，随着时间的延续，房间温度会降低。如图 2-3 所示的劳伦兹循环，冷源（被冷却物体）的温度由  $T_1$  逐渐下降到  $T_4$ ，热源（环境介质）的温度由  $T_3$  逐渐升高到  $T_2$ ，冷源放出的热量  $q_0$  可用面积 14651 表示。在上述给定条件下，如果进行逆卡诺循环，为保证从变温热源放热和从冷源吸热过程的连续进行，制冷循环的温度区间应为  $T_4$  和  $T_2$ ，为了制取相同的制冷量，面积 14651 应与面积 44'764 相等，即应采用 4'2'3'44' 所示逆卡诺循环。这样，制冷剂在吸、放热过程中，与变温的冷热源之间的热交换过程是一个有温差存在的换热过程，势必引起不可逆损失，由此引起的耗功的增加，可用图中阴影面积表示。换言之，在变温热源情况下，制冷剂实现逆卡诺循环所消耗的功并不是最小功。

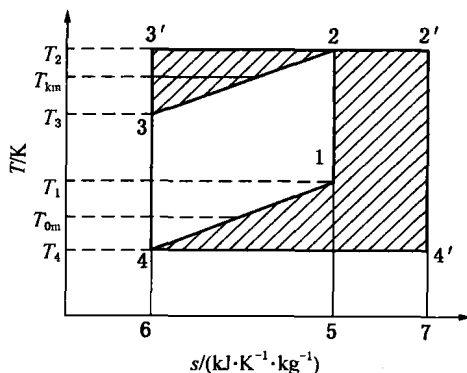


图 2-3 劳伦兹循环

为了达到变温条件下耗功最小的目的，制冷剂的循环过程应为 12341，让制冷剂在吸、放热过程中其温度也发生相应的变化，做到制冷剂与热源之间的热交换过程为无温差传热，不存在不可逆换热损失。1-2 过程和 3-4 过程仍分别为可逆绝热压缩过程和可逆绝热膨胀过程。这样，1-2-3-4 循环为一个变温条件下的可逆逆向循环——劳伦兹循环。实现这一循环所消耗的功为最小，制冷系数达到给定条件下的最大值。

为了表达变温条件下可逆循环的制冷系数，采用平均当量温度这一概念。若用  $T_{0m}$  表示制冷剂的平均吸热温度，用  $T_{km}$  表示制冷剂的平均放热温度，则

$$q_0 = T_{0m}(s_1 - s_4)$$

$$q_k = T_{km}(s_2 - s_3) = T_{km}(s_1 - s_4)$$

$q_0$  与  $q_k$  的大小分别可用面积 41564 和面积 23652 表示。平均吸热温度  $T_{0m}$  与平均放热温度  $T_{km}$  就是以熵差  $(s_1 - s_4)$  为底、分别等于面积 41564 和 23652 的矩形的高度。变温情况下可逆循环的制冷系数可表示为

$$\varepsilon_r = \frac{T_{0m}}{T_{km} - T_{0m}}$$

即相当于工作在  $T_{0m}$ 、 $T_{km}$  之间的逆卡诺循环的制冷系数。变温热源时计算热力完善度的公式为



$$\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_r}$$

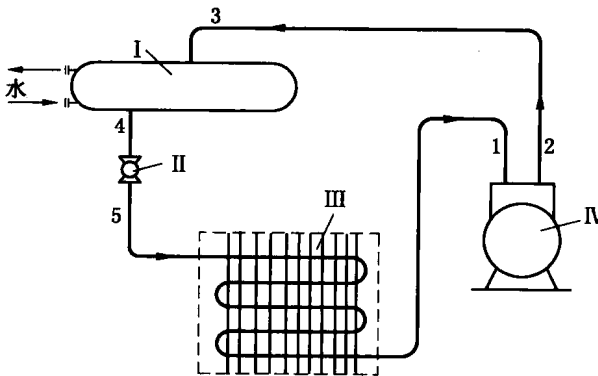
随着非共沸混合制冷剂的应用逐渐增多，可以找到某些非共沸混合制冷剂，使循环过程中制冷剂与热源之间的换热温差比单一制冷剂循环更小，因而可以提高循环的热力完善度。

### 第三节 蒸气压缩式制冷的理论循环

#### 一、蒸气压缩式制冷的理论循环

逆卡诺循环是理想制冷循环，虽然其制冷系数最高，但在工程上是无法实现的。工程上采用最多的是蒸气压缩式制冷循环。液态制冷剂由饱和液体气化成蒸气时要吸收热量（潜热）。气化时压力不同，其液体的饱和温度（沸点）不同，气化潜热的数值也不同，压力越低，饱和温度越低。例如，1kg 质量的水，在 827Pa 压力下，饱和温度为 5℃，气化潜热为 2489.05kJ；1kg 质量的氨液，在 101.3Pa 压力下，饱和温度为 -33℃，气化潜热为 1368.15kJ。可见，只要创造一定的低压条件，利用制冷剂气化时吸热就可以获得较低的温度环境。

由于液体在绝热膨胀前后体积变化很小，输出的膨胀功也极小，且高精度的膨胀机很难加工，因此蒸气压缩式制冷系统均用节流机构（节流阀、膨胀阀、毛细管等）代替膨胀机。另外，若压缩机吸入的是湿蒸气，在压缩过程中必然产生湿压缩。湿压缩会引起种种不良后果，严重时甚至毁坏压缩机，在实际运行中应严禁发生。因此，在蒸气压缩式制冷循环中，进入压缩机的制冷剂应是干饱和蒸气或过热蒸气，这种压缩过程称为干压缩。



I—冷凝器；II—节流阀；  
III—蒸发器；IV—压缩机

图 2-4 单级蒸气压缩式制冷系统图

图 2-4 是工程中常用的单级蒸气压缩式制冷系统。它由压缩机、冷凝器、节流阀和蒸发器组成。工作过程为：在蒸发压力  $p_0$ 、蒸发温度  $T_0$  下，液态制冷剂吸收被冷却物体的热量而沸腾，变成低温、低压的蒸气；而后被压缩机吸入，经压缩提高压力和温度后送入冷凝器；制冷剂在冷凝压力  $p_k$  下将热量传递给冷却介质（通常是水或空气），由高压过热蒸气冷凝成液体；高压液态制冷剂通过节流阀降压、降温后进入蒸发器重复上述过程。

#### 二、蒸气压缩式制冷循环在压焓图和温熵图上的表示

为了全面深入地分析蒸气压缩式制冷循环，不仅要研究循环中的每一个过程，还要了解各个过程之间的内在关系及其相互影响。用热力状态图来研究整个循环，可以直观地看