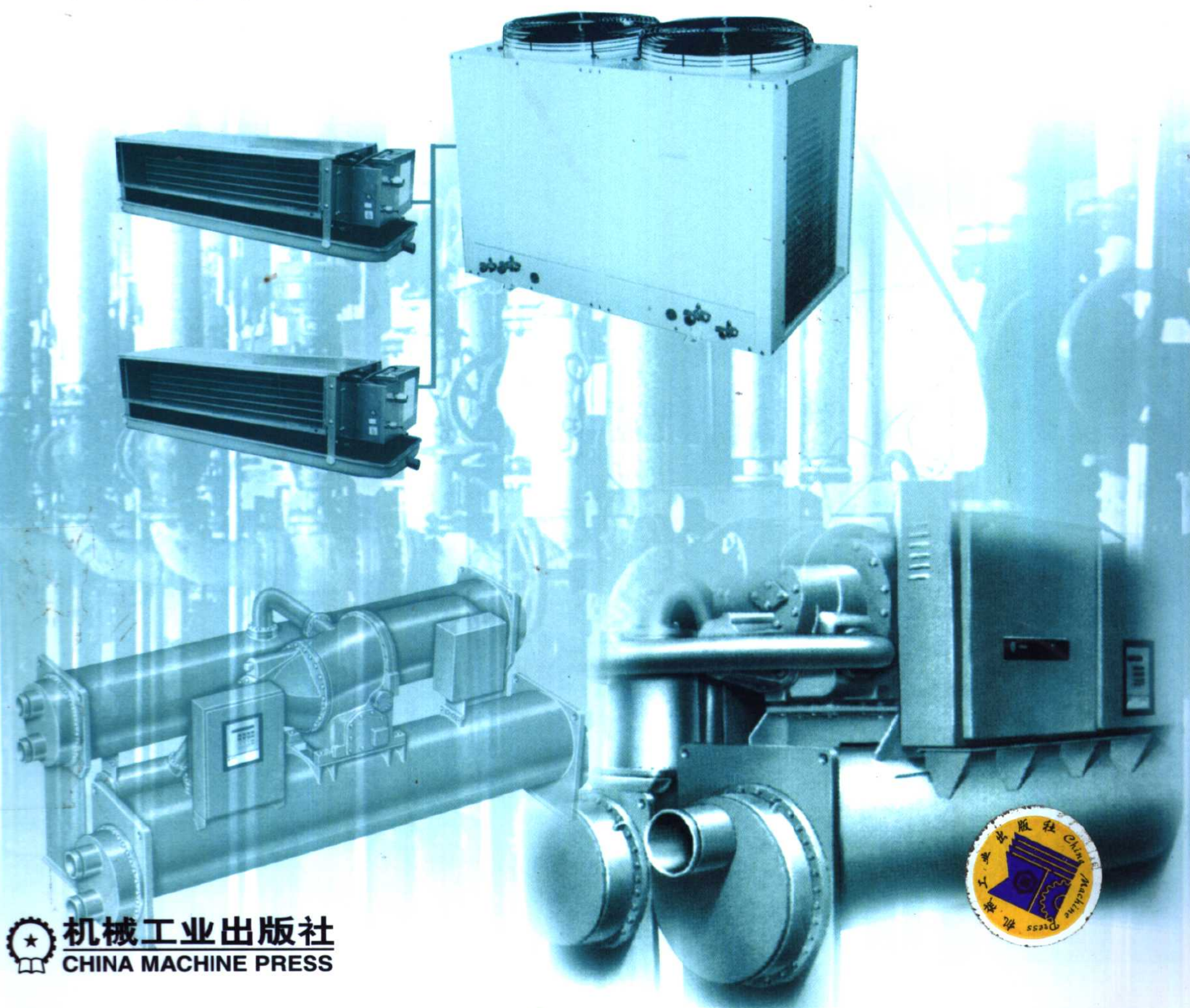


21 世纪供热通风与空调工程系列规划教材

# 制冷技术

主编 贺俊杰  
主审 贾永康



 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS





21 世纪供热通风与空调工程系列规划教材

# 制 冷 技 术

主 编 贺俊杰

参 编 徐向荣 马志彪 董晓明

主 审 贾永康



机 械 工 业 出 版 社

本书是高职高专和应用型本科供热通风与空调、制冷空调等专业“制冷技术”课程的教材。

本教材着重阐述了蒸气压缩式制冷的基本原理、设备构造、系统组成、制冷剂和载冷剂的热力性质、制冷循环的热力计算、制冷设备的选择计算、冷藏库制冷工艺设计、制冷机房与管道设计、制冷设备的安装和试运转等。本书的编写以注重培养学生能力为目的，在书中附有大量习题与思考题，便于学生学习及灵活地掌握、运用知识要点。

本书也可作为供热通风与空调专业函授教学教材和自学参考书，以及供从事制冷技术的工程技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

制冷技术/贺俊杰主编. —北京: 机械工业出版社, 2003.8

(21 世纪供热通风与空调工程系列规划教材)

ISBN 7-111-12462-6

I. 制... II. 贺... III. 制冷技术-高等学校-教材  
IV. TB66

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 050380 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 季顺利 版式设计: 霍永明 责任校对: 刘秀芝

封面设计: 姚 毅 责任印制: 路 琳

北京蓝海印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

1000mm×1400mm B5·7.25 印张·2 插页·284 千字

定价: 18.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

本书是根据“建设部高等学校土建学科教学指导委员会高职教育专业委员会”供热通风与空调专业的教学大纲编写的。

本书主要介绍了蒸气压缩式制冷的基本原理、设备构造、系统组成、制冷剂和载冷剂的热力性质、制冷循环的热力计算、制冷设备的选择、冷藏库制冷的工艺设计、制冷机房与管道设计、制冷设备的安装和试运转等。

制冷技术是供热通风与空调专业的一门主要专业课，实践性较强，所以在编写过程中，遵循理论与实践，教学与应用相结合的原则，力求深入浅出，通俗易懂，突出了高职高专重视实践性、实用性的特点，注重学生职业能力的培养，尽可能地取消复杂的理论计算、公式推导，并将一些计算简化；加强了制冷装置系统性、应用性以及实践环节等的基本知识和内容。为了便于学生掌握课程内容，本教材每章均列出了习题与思考题。

本书由内蒙古建筑职业技术学院贺俊杰副教授主编。各章编写分工如下：

绪论、第一章、第二章、第三章及第四章中的第二节、第五章中的第一、二节由内蒙古建筑职业技术学院贺俊杰副教授编写；第五章中的第三节、第六章由内蒙古工业大学徐向荣副教授编写；第七章、第八章、第十章由内蒙古建筑职业技术学院马志彪副教授编写；第四章中的第一及第三至五节、第九章由新疆建设职业技术学院董晓明讲师编写。

本书由山西建筑职业技术学院贾永康副教授主审。

由于编者水平有限，有不妥之处，敬请读者给予批评指正。

编 者

# 目 录

## 前言

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 绪论 .....                     | 1   |
| 习题与思考题 .....                 | 4   |
| 第一章 蒸气压缩式制冷的热力学原理 .....      | 5   |
| 第一节 蒸气压缩式制冷的基本原理 .....       | 5   |
| 第二节 蒸气压缩式制冷的理论循环 .....       | 9   |
| 第三节 单级蒸气压缩式制冷理论循环的热力计算 ..... | 14  |
| 第四节 蒸气压缩式制冷的实际循环 .....       | 19  |
| 习题与思考题 .....                 | 20  |
| 第二章 制冷剂 and 载冷剂 .....        | 22  |
| 第一节 制冷剂 .....                | 22  |
| 第二节 载冷剂 .....                | 30  |
| 习题与思考题 .....                 | 32  |
| 第三章 蒸气压缩式制冷系统的组成和图式 .....    | 34  |
| 第一节 蒸气压缩式氨制冷系统 .....         | 34  |
| 第二节 蒸气压缩式氟利昂制冷系统 .....       | 41  |
| 习题与思考题 .....                 | 43  |
| 第四章 制冷压缩机 .....              | 44  |
| 第一节 活塞式制冷压缩机的分类及其构造 .....    | 44  |
| 第二节 活塞式制冷压缩机的选择计算 .....      | 52  |
| 第三节 螺杆式制冷压缩机 .....           | 61  |
| 第四节 离心式制冷压缩机 .....           | 63  |
| 第五节 回转式制冷压缩机 .....           | 67  |
| 习题与思考题 .....                 | 70  |
| 第五章 压缩式制冷系统的设备和自控装置 .....    | 72  |
| 第一节 冷凝器和蒸发器 .....            | 72  |
| 第二节 节流机构和辅助设备 .....          | 93  |
| 第三节 制冷系统的自控装置与自动调节 .....     | 111 |
| 习题与思考题 .....                 | 117 |
| 第六章 双级和复叠式蒸气压缩制冷 .....       | 119 |
| 第一节 双级蒸气压缩制冷循环 .....         | 119 |
| 第二节 复叠式蒸气压缩制冷循环 .....        | 126 |

|                              |            |
|------------------------------|------------|
| 习题与思考题 .....                 | 127        |
| <b>第七章 小型冷库制冷工艺设计 .....</b>  | <b>128</b> |
| 第一节 冷藏库概述 .....              | 128        |
| 第二节 冷藏库耗冷量计算 .....           | 130        |
| 第三节 小型冷藏库制冷工艺设计 .....        | 143        |
| 习题与思考题 .....                 | 154        |
| <b>第八章 制冷机房与管道的设计 .....</b>  | <b>155</b> |
| 第一节 制冷机房的设计步骤 .....          | 155        |
| 第二节 制冷设备的选择和制冷机房的布置 .....    | 156        |
| 第三节 制冷剂管道的设计 .....           | 161        |
| 第四节 制冷机组 .....               | 173        |
| 习题与思考题 .....                 | 177        |
| <b>第九章 制冷装置的安装和试运转 .....</b> | <b>178</b> |
| 第一节 制冷设备的安装 .....            | 178        |
| 第二节 制冷管路和附件的安装 .....         | 183        |
| 第三节 制冷系统的试运转 .....           | 186        |
| 第四节 制冷系统的验收 .....            | 194        |
| 第五节 制冷系统常见的故障及排除方法 .....     | 196        |
| 习题与思考题 .....                 | 199        |
| <b>第十章 其他制冷技术 .....</b>      | <b>200</b> |
| 第一节 吸收式制冷 .....              | 200        |
| 第二节 蒸气喷射式制冷 .....            | 204        |
| 习题与思考题 .....                 | 208        |
| <b>附录 .....</b>              | <b>209</b> |
| 附录 A 制冷用物理参数表 .....          | 209        |
| 附表 A-1 饱和 R717 蒸气表 .....     | 209        |
| 附表 A-2 饱和 R12 蒸气表 .....      | 211        |
| 附表 A-3 饱和 R22 蒸气表 .....      | 213        |
| 附表 A-4 低压饱和水蒸气表 .....        | 215        |
| 附表 A-5 R717 饱和液的物性值 .....    | 216        |
| 附表 A-6 R12 饱和液的物性值 .....     | 217        |
| 附表 A-7 R22 饱和液的物性值 .....     | 217        |
| 附表 A-8 某些气体的物性值 .....        | 218        |
| 附表 A-9 氯化钠水溶液的物性值 .....      | 219        |
| 附表 A-10 氯化钙水溶液的物性值 .....     | 220        |
| 附录 B 制冷剂压焓图 (详见插页)           |            |
| <b>参考文献 .....</b>            | <b>223</b> |



# 绪 论

## 一、制冷的概念

制冷技术通俗地说就是研究如何获得低温的一门科学技术，它是随着人们对低温条件的要求和社会生产力的提高而不断发展的。

冷和热是同一范畴的物理概念，是人体对温度高低感觉的反应，就其本质来说它所反映的是物质分子运动的动能，把物体变冷实际上就是使它的温度降低。温度降低表明物体内部分子热运动减弱，热能减少；温度升高表明物体内部分子热运动加剧，热能增加。要把空间或物体温度降低，就必须从该空间或物体中取出热量，使它们内部的分子热运动减弱，从而使其变冷。

冷和热是相比较而存在的。在制冷技术中所说的冷是相对于环境温度而言的。因此，制冷就是使某一空间或某物体达到低于周围环境介质的温度，并维持这个低温的过程。所谓环境介质就是指自然界的空气和水。如前所述，要使某一空间或某物体达到并维持所需的低温，就得不断地从该空间或该物体中取出热量，并转移到环境介质中去，这个不断地从被冷却空间或物体中取出热量并转移到环境介质中去的过程就是制冷过程。

制冷可以通过两种途径来实现，一种是利用天然冷源，另一种是人工制冷。

天然冷源主要是指夏季使用的深井水和冬天贮存下来的天然冰。在夏季，深井水低于环境温度，可以用来防暑降温或作为空调冷源使用；天然冰可以用来食品冷藏和防暑降温。天然冷源虽具有价格低廉和不需要复杂技术设备等优点，但是，它受到时间和地区等条件的限制，最主要的是受到制冷温度的限制，它只能制取  $0^{\circ}\text{C}$  以上的温度。因此，天然冷源只能用于防暑降温、温度要求不是很低的空调和少量食品的短期贮存。要想获得  $0^{\circ}\text{C}$  以下的制冷温度，必须采用人工制冷的方法来实现。

## 二、人工制冷的的方法

在制冷技术中，人工制冷方法很多，目前广泛应用的制冷方法有以下三种

### 1. 液体气化制冷

它是利用液体气化时要吸收热量的特性来实现制冷。

物质由液态变为气态时要吸收气化热，这个热量随着物质的种类、压力、温度不同而有所不同。例如：1kg 质量的水，在  $101.325\text{kPa}$  压力下，气化时要吸收热量  $2255.68\text{kJ}$ ，这时沸点温度为  $100^{\circ}\text{C}$ ；在  $1.0721\text{kPa}$  压力下，气化时要吸收热量  $2481.35\text{kJ}$ ，这时水的沸点温度为  $8^{\circ}\text{C}$ 。又如 1kg 质量的氨液，在

101.325kPa 压力下气化时，要吸收 1370kJ 的热量，这时的沸点温度可达  $-33.4^{\circ}\text{C}$ ；压力在 190.11kPa 下气化时，要吸收 1327.52kJ 的热量，这时沸点温度可达  $-20^{\circ}\text{C}$ 。从上述例子中可以看出，对于同一种物质，压力越低，沸点温度越低，吸热就越大。因此，只要创造一定的低压，就可以利用液体的气化吸热特性获得所要求的低温。

## 2. 气体膨胀制冷

它是利用气体绝热膨胀来实现制冷的。

气体被压缩时，压力升高温度也随之升高，反之，如果高压高温的气体进行绝热膨胀时，压力降低而温度也随之降低，从而产生冷效应，达到制冷的目的。空气压缩制冷就是采用这个原理。图 0-1 为空气压缩制冷原理图。空气经压缩机绝热压缩后，压力温度升高，然后在冷却器中定压冷却到常温后，再进入膨胀机进行绝热膨胀，压力降低，体积膨胀，并对外做功，使空气本身的内能减少，温度降低，然后利用低温低压的空气进入低温室来吸收被冷却物体的热量，被冷却物体放出热量而温度降低，空气吸热后温度升高又被压缩机吸入，如此循环便可达到制冷的目的。空气压缩制冷常用于飞机的机舱空调。

## 3. 热电制冷

它是利用半导体的温差电特性实现制冷的。

热电制冷是将 N 型半导体（电子型）元件和 P 型半导体（空穴型）元件组成的半导体制冷电偶（见图 0-2）。在电偶的一端用铜片焊接起来，另一端焊上铜片并接上导线将它们连成一个回路。当直流电从 N 型流向 P 型半导体时，则在联接片（2-3）端产生吸热现象，这端称为冷端，而在联接片（1-4）端产生放热现象，该端称为热端，这样冷端便可以达达到制冷的目的。由于一对电偶的制冷量很小，所以在实际使用中是将若干对这样电偶串联起来，组成电堆。连接时，冷端排在一起，热端排在一起，当半导体制冷器输入一定数量的直流电时，冷端逐渐冷却，并可以达到一定的低温。由于热电制冷的效率较低，促使不能大

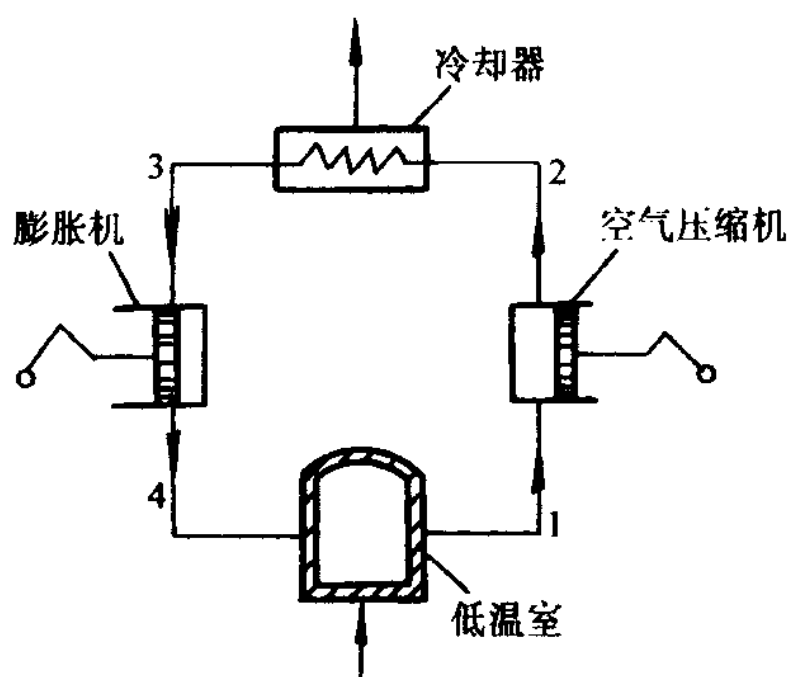


图 0-1 空气压缩制冷循环工作原理图

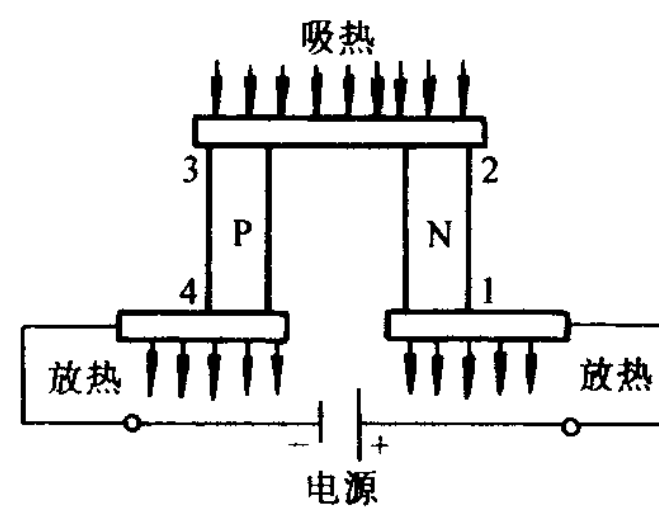


图 0-2 半导体制冷电偶



规模的应用，目前主要用在冷量需求量较小的小型制冷器中。

在上述三种制冷方法中，目前应用最广泛的是液体气化制冷，这种制冷称为蒸气制冷。蒸气制冷装置有三种：即蒸气压缩式制冷、吸收式制冷、蒸气喷射式制冷。

除了上述制冷方法外，获得低温的方法还有绝热去磁制冷、涡流管制冷、吸附式制冷等。这些方法在我们专业范围内基本上不用，本书不作介绍。

不同的制冷范围应选用不同的制冷方法。目前，根据制冷温度的不同，制冷技术可分为三类，即

普通制冷——高于  $-120^{\circ}\text{C}$  ( $153\text{K}$ )。

深度制冷—— $-120 \sim -253^{\circ}\text{C}$  ( $153\text{K} \sim 20\text{K}$ )。

超低温制冷—— $-253^{\circ}\text{C}$  以下 ( $20\text{K}$  以下)。

空调和食品冷藏属于普通制冷范围，主要采用液体气化制冷。

### 三、人工制冷在国民经济中的应用

随着工业、农业、国防和科学技术的发展，人民生活水平的不断提高，人工制冷在国民经济中得到了越来越广泛的应用。

#### 1. 空气调节工程

制冷技术在空调工程中的应用很广，所有的空调系统均需要冷源，冷源有天然冷源和人工冷源。由于天然冷源受到时间和地区等条件的限制，同时受到制冷温度的限制，所以空调冷源多采用人工制冷，利用制冷装置来控制空气的温度、湿度，从而使空气的温、湿度得到调节。空气调节根据其使用场合不同，分为两种形式：

(1) 工艺性空调 这种空调系统主要满足生产工艺等对室内环境温度、湿度、洁净度的要求。例如纺织、仪表仪器、电子元件、精密计量、精密机床、半导体、各种计算机房等都要求对环境的温度、湿度、洁净度进行不同程度的控制，以保证产品的质量。

(2) 舒适性空调 这种空调系统主要满足人们工作和生活对室内温度、湿度的要求。例如宾馆饭店、大会堂、影剧院、体育馆、医院、住宅、展览馆以及地下铁道、汽车、火车、轮船、飞机内的空气调节等。

#### 2. 食品的冷藏

在食品工业中应用人工制冷的场合很多，例如容易腐坏的食品如肉类、鱼类、禽类、蛋类、蔬菜和水果等都需要在低温条件下加工、冷藏、及冷藏运输，以保证食品的原有质量和减少干缩损耗。此外，各种型式的冷库还可以平衡食品生产上的季节性与销售之间的矛盾。

除此之外，冷食品与饮料的生产和贮存也需要制冷装置。目前国内的制冷技术已发展到每个家庭，家用水箱、冰柜已成为家庭中必备的电器产品。

### 3. 工业生产工艺

工业的许多生产过程需要在低温下进行，例如石油脱蜡、天然气液化、石油裂解、合成橡胶、合成纤维、以及合成氨和化肥的生产等。

### 4. 国防工业和科学研究

高寒地区的汽车、坦克发动机等需要做环境模拟试验，火箭、航天器也需在模拟高空的低温条件下进行试验，宇宙空间的模拟、超导体的应用、半导体激光、红外线探测等都需要人工制冷技术。

### 5. 其他方面

除了上述应用外，制冷技术还用于制冰、药物保存、医疗手术过程、现代农业育苗、良种的低温贮存、人工滑冰场等方面。

综上所述，制冷技术的应用是多方面的，它的发展标志着我国国民经济的发展和人民生活水平的提高。可以预料，随着我国市场经济的建立和完善，制冷事业将进入一个新的发展阶段。

## 四、本课程的研究内容和理论基础

制冷技术的研究内容可概括为以下三个方面：

1) 研究人工制冷的方法和有关制冷原理以及与此相应的制冷循环。

2) 研究制冷剂和载冷剂的性质，从而为制冷系统提供性能满意的工质。蒸气压缩式制冷要通过制冷剂热力状态变化才能实现，所以学生必须掌握制冷剂的物理化学性质。

3) 研究蒸气压缩式制冷的基本概念、基本理论、工作原理、理论循环的热力计算、系统组成、设备构造及选型计算、机房与管道设计、制冷系统安装和试运转等。

制冷的主要理论基础是工程热力学、传热学和流体力学。因此，学习和从事制冷工作的同志应注意在工程热力学、传热学和流体力学方面打下坚实的理论基础。

## 习题与思考题

- 0-1 什么叫制冷和制冷过程？
- 0-2 实现制冷有哪两种途径？
- 0-3 人工制冷有哪几种方法？最常用的是哪一种方法？
- 0-4 蒸气制冷有哪几种方法？最常用的是哪一种？
- 0-5 根据制冷温度的不同，制冷技术可分为哪几类？

# 第一章 蒸气压缩式制冷的热力学原理

## 第一节 蒸气压缩式制冷的基本原理

在讨论蒸气压缩式制冷的基本原理时，首先要清楚蒸气制冷的本质。在日常生活中我们都有这样的体会，如果给皮肤上涂抹酒精液体时，你就会发现皮肤上的酒精很快干掉，并给皮肤带来凉快的感觉，这是什么原因呢？这是因为酒精由液体变为气体时吸收了皮肤上热量的缘故。由此可见，凡是液体气化时都要从周围物体吸收热量。蒸气压缩式制冷原理就是利用液体气化时要吸收热量的这一物理特性来达到制冷的目的。

在制冷装置中用来实现制冷循环的工作物质称为制冷剂或工质。在冷藏库中对食品的冷冻或冷藏，就是利用某一种液体（氨或氟利昂）气化时吸收库内空气和食品的热量来实现的。

根据热力学第二定律我们知道，热量总是自发地从高温物体传向低温物体，就象水总是由高处自动流向低处一样，如水塔向用户供水。但是热量不能自发地从一个低温物体传向另一个高温物体，正象水一样，水不能自发地由低处流向高处，这并不是说水在任何条件下都不能由低处往高处运动，只要外界给水一个提升力还是可以实现，例如用水泵将水池中的水送往水塔。这就是说，要想让水由低处流向高处，需要消耗一定的能量（如电能、热能）作为补偿，否则这个过程难以实现。同样道理，要想低温物体的热量传向高温物体也应当有一个能量补偿过程，显然这个过程要消耗外界的能量（电能或热能）。有了这个补偿过程，热量就可以从低温物体传向高温物体。蒸气压缩制冷循环就是用压缩机等设备，以消耗机械能作为补偿，借助制冷剂的状态变化将低温物体的热量传向高温物体。那么制冷剂在制冷系统中经过什么样的热力循环实现人工制冷呢？经过哪种热力过程所组成的制冷循环在理论上最为经济？可通过逆卡诺循环加以说明。

### 一、理想制冷循环——逆卡诺循环

卡诺循环分为正卡诺循环和逆卡诺循环。正卡诺循环是正向循环，它是使高温热源的工质通过动力装置对外做功，然后再流向低温热源，使热能转化为机械能，也称动力循环；逆卡诺循环是逆向循环，它是使制冷剂在吸收低温热源的热量后通过制冷装置，并以消耗机械功作为补偿，然后流向高温热源。制冷循环就是按逆向循环进行的。



逆卡诺循环是可逆的理想制冷循环，实现逆卡诺循环的重要条件是：高、低温热源温度恒定；工质在冷凝器和蒸发器中与外界热源之间的换热无传热温差；制冷工质流经各个设备时无摩擦损失及其它内部不可逆损失。

逆卡诺循环是由两个定温和两个绝热过程组成。在湿蒸气区区域内进行的逆卡诺循环的必要设备是压缩机、冷凝器、膨胀机和蒸发器，其制冷循环以及循环过程在  $T-S$  图上的表示如图 1-1 所示。

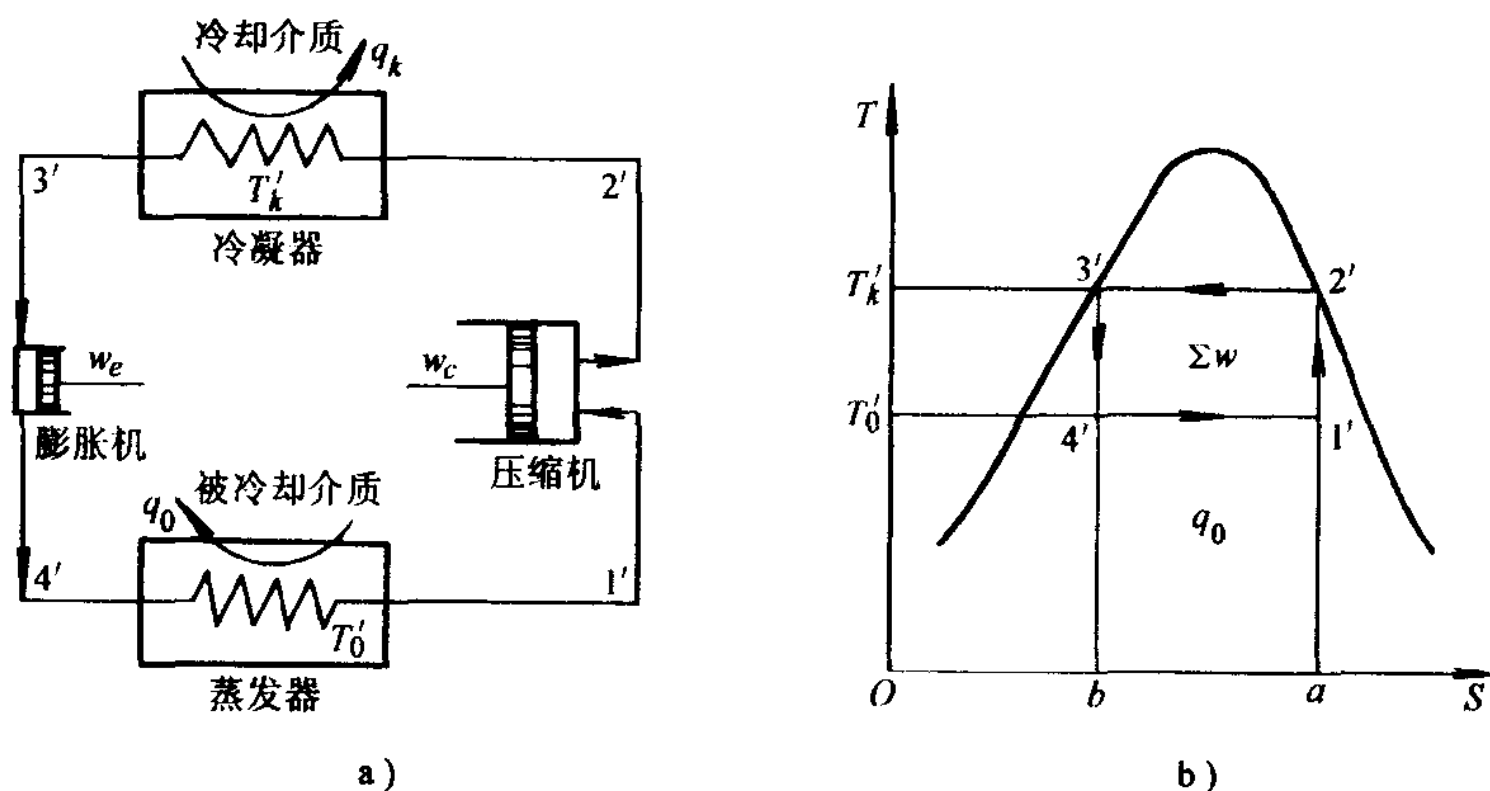


图 1-1 逆卡诺循环过程

由图 1-1 可知，制冷剂在逆卡诺制冷循环中包括四个热力过程。1'—2' 为绝热压缩过程，制冷剂由状态 1' 经过绝热压缩（等熵压缩）到状态 2'，消耗机械功  $w_c$ ，制冷剂的温度由  $T_0'$  升至  $T_k'$ ；2'—3' 为等温冷凝过程，制冷剂在  $T_k'$  下向冷却剂放出冷凝热量  $q_k$ ，然后被冷却到状态 3'；3'—4' 为绝热膨胀过程，制冷剂由状态 3' 绝热膨胀（等熵膨胀）到状态 4'，膨胀机输出功  $w_e$ ，制冷剂的温度由  $T_k'$  降到  $T_0'$ ；4'—1' 为等温吸热过程，制冷剂由状态 4' 等温  $T_0'$  下从被冷却物体中吸取热量  $q_0$ （即制取单位制冷量  $q_0$ ），这时制冷剂又恢复到初始状态 1'，这样便完成了一个制冷循环。如果循环继续重复进行，则要不断地消耗机械功，才能不断地进行制冷。由此可见，在制冷循环中，制冷剂之所以能从低温物体（被冷却物体）中吸取热量  $q_0$  送至高温物体（冷却剂），是由于消耗了能量（压缩功）的缘故。

在逆卡诺循环中，1kg 制冷剂从被冷却物体（低温热源）吸取的热量  $q_0$ ，连同循环所消耗的功  $\Sigma w$ （即压缩机的耗功量  $w_c$  减去膨胀机膨胀时所做的功  $w_e$ ）一起转移至温度较高的冷却剂（高温热源），根据能量守恒，则

$$q_k = q_0 + \Sigma w \quad (1-1)$$

$$\Sigma w = w_c - w_e$$

制冷循环常用制冷系数  $\epsilon$  表示它的循环经济性能，制冷剂从被冷却物体中吸

取的热量  $q_0$  与循环中所消耗功  $\Sigma w$  的比值称为制冷系数, 即

$$\epsilon = \frac{q_0}{\Sigma w}$$

对于逆卡诺循环, 1kg 制冷剂从被冷却物体 (低温热源) 吸取的热量为

$$q_0 = T_0' (S_a - S_b)$$

向冷却剂 (高温热源) 放出的热量为

$$q_k = T_k' (S_a - S_b)$$

制冷循环中所消耗的净功为

$$\Sigma w = q_k - q_0 = (T_k' - T_0') (S_a - S_b)$$

则逆卡诺循环制冷系数为

$$\epsilon_c = \frac{q_0}{\Sigma w} = \frac{T_0' (S_a - S_b)}{(T_k' - T_0') (S_a - S_b)} = \frac{T_0'}{T_k' - T_0'} \quad (1-2)$$

从式 (1-2) 可知, 逆卡诺循环的制冷系数只与被冷却物体的温度  $T_0'$  和冷却剂的温度  $T_k'$  有关, 与制冷剂性质无关。当  $T_0'$  升高,  $T_k'$  降低时,  $\epsilon_c$  增大, 制冷循环的经济性越好。而且,  $T_0'$  对  $\epsilon_c$  的影响要比  $T_k'$  大, 这点通过式 (1-2) 求两个偏导数的绝对值可以看出。

$$\left| \frac{\partial \epsilon_c}{\partial T_k'} \right| = \frac{T_0'}{(T_k' - T_0')^2}$$

$$\left| \frac{\partial \epsilon_c}{\partial T_0'} \right| = \frac{T_k'}{(T_k' - T_0')^2}$$

由于  $T_k' > T_0'$

$$\text{所以} \quad \left| \frac{\partial \epsilon_c}{\partial T_0'} \right| > \left| \frac{\partial \epsilon_c}{\partial T_k'} \right| \quad (1-3)$$

由式 (1-3) 可知,  $T_0'$  与  $T_k'$  对制冷系数  $\epsilon$  的影响不是相等的,  $T_0'$  的影响大于  $T_k'$ 。

## 二、有传热温差的制冷循环

前面讲过实现逆卡诺循环的一个重要条件是制冷剂与被冷却物和冷却剂之间必须在无温差情况下相互传热, 而实际的热交换器总是在有温差的情况下进行传热的, 因为蒸发器和冷凝器不可能具有无限大的传热面积。所以, 实际有传热温差的制冷循环, 制冷系数  $\epsilon_c'$  不仅与被冷却物体温度  $T_0'$  和冷却剂温度  $T_k'$  有关, 还与热交换过程的传热温差有关。例如被冷却物体 (如冷冻水) 在蒸发器中的平均温度为  $T_0'$ , 而冷却水在冷凝器中的平均温度为  $T_k'$  时, 逆卡诺循环可用图 1-2 中的 1'-2'-3'-4'-1' 表示。由于有传热温差存在, 在蒸发器内制冷剂的蒸发温度应低于  $T_0'$ , 即  $T_0 = T_0' - \Delta T_0$ ; 而冷凝器内制冷剂的冷凝温度  $T_k$  应高于  $T_k'$ , 即  $T_k = T_k' + \Delta T_k$ 。此时有传热温差的制冷循环可用图 1-2 中的 1-2-

3—4—1 表示, 所消耗的功量为面积 12341, 比逆卡诺循环多消耗的功可用 2'233'2' 和 11'4'41 表示, 减少的制冷量为面积 11'4'41。同理可得具有传热温差的制冷循环的制冷系数为

$$\begin{aligned}\epsilon_c' &= \frac{T_0}{T_k - T_0} = \frac{T_0' - \Delta T_0}{(T_k' + \Delta T_k) - (T_0' - \Delta T_0)} \\ &= \frac{T_0' - \Delta T_0}{(T_k' - T_0') + (\Delta T_k + \Delta T_0)} \quad (1-4)\end{aligned}$$

显然  $\epsilon_c' < \epsilon_c$ , 这表明具有传热温差的

制冷循环的制冷系数总要小于逆卡诺循环的制冷系数, 一切实际制冷循环均为不可逆循环, 因此, 实际循环的制冷系数总是小于工作在相同热源温度时的逆卡诺循环的制冷系数。实际制冷循环的制冷系数  $\epsilon$  与逆卡诺循环的制冷系数  $\epsilon_c$  之比称为热力完善度  $\eta$ , 即

$$\eta = \frac{\epsilon}{\epsilon_c} \quad (1-5)$$

热力完善度愈接近 1, 表明实际循环的不可逆程度愈小, 循环的经济性愈好, 它的大小反映了实际制冷循环接近逆卡诺循环的程度。

实际上, 蒸气压缩式制冷采用逆卡诺循环有许多困难, 主要有以下几点:

1) 压缩过程在湿蒸气区中进行的, 危害性很大。因为压缩机吸入的是湿蒸气, 在压缩过程中必然产生湿压缩, 而湿压缩会引起液击现象, 使压缩机遭受破坏, 因此, 在实际蒸气压缩式的制冷循环中采用干压缩, 即进入压缩机的制冷剂为干饱和蒸气 (或过热蒸气)。

2) 膨胀机等熵膨胀不经济。这是因为进入膨胀机的是液态制冷剂, 一则它的体积变化不大, 再则机件特别小, 摩擦阻力大, 以致使所能获得的膨胀功常常不足以克服机器本身的摩擦阻力。因此, 在实际蒸气压缩式制冷循环中采用膨胀阀 (也称节流阀) 代替膨胀机。

3) 无温差的传热实际上是不可能的。因为冷凝器和蒸发器不可能有无限大的传热面积, 所以实际循环只能使蒸发温度低于被冷却物体的温度, 冷凝温度高于冷却剂的温度。

综上所述, 虽然逆卡诺循环制冷系数最大, 但只是一个理想制冷循环, 在实际工程中无法实现, 但是通过该循环的分析所得出的结论对实际制冷循环具有重要的指导意义, 对提高制冷装置经济性指出了重要的方向。因此, 要使实际制冷装置节能运行, 必须严格遵循上述原则, 这就是详细分析讨论蒸气压缩式制冷基本原理的主要目的。

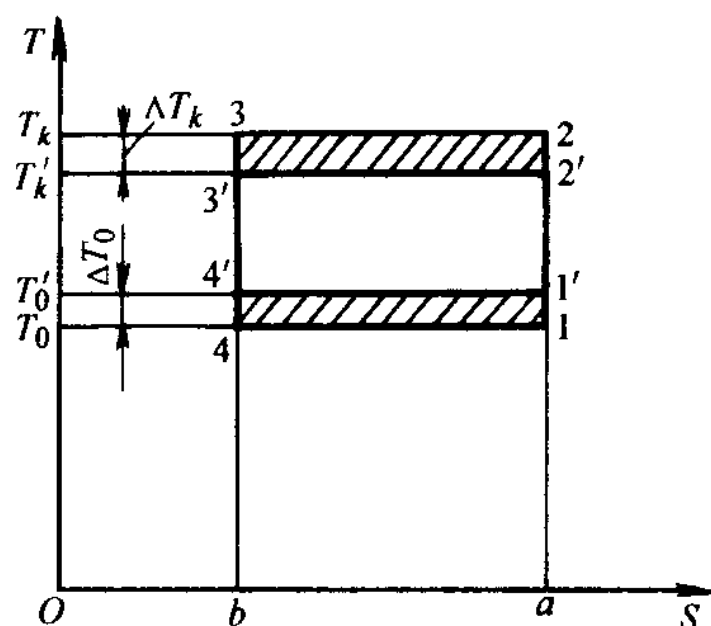


图 1-2 有传热温差的制冷循环

## 第二节 蒸气压缩式制冷的理论循环

### 一、单级蒸气压缩式制冷的理论循环

蒸气压缩式制冷的理论循环是由两个定压过程，一个绝热压缩过程和一个绝热节流过程组成。它与逆卡循环（理想制冷循环）所不同的是：

- 1) 蒸气的压缩采用干压缩代替湿压缩。压缩机吸入的是饱和蒸气而不是湿蒸气。
- 2) 用膨胀阀代替膨胀机。制冷剂用膨胀阀绝热节流。
- 3) 制冷剂在冷凝器和蒸发器中的传热过程均为定压过程，并且具有传热温差。

图 1-3 为蒸气压缩制冷理论循环图。它是由压缩机、冷凝器、膨胀阀、蒸发器等四大设备组成，这些设备之间用管道依次连接形成一个封闭的系统。它的工作过程是：压缩机将蒸发器内所产生的的低压低温制冷剂蒸气吸入气缸内，经过压缩机压缩后使制冷剂蒸气的压力温度升高，然后将高压高温的制冷剂蒸气排入冷凝器；在冷凝器内，高压、高温的制冷剂蒸气与温度比较低的冷却水

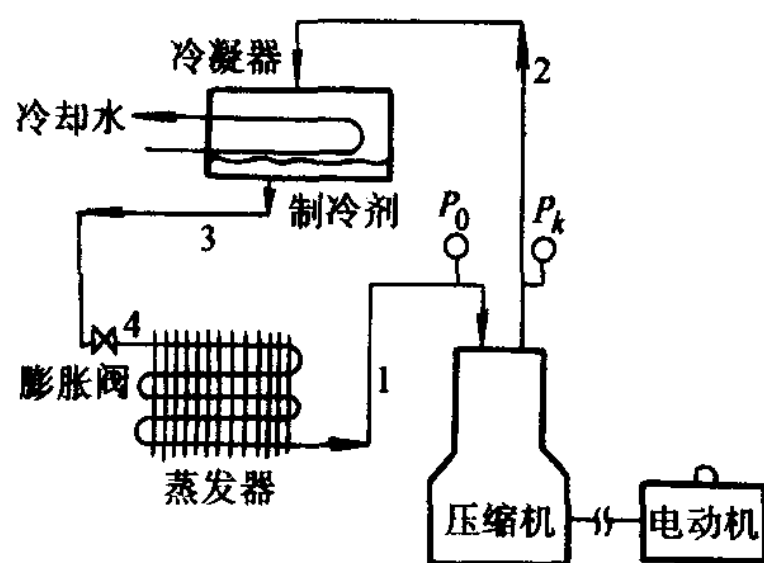


图 1-3 蒸气压缩制冷理论循环

（或空气）进行热量交换，把热量传给冷却水（或空气），而制冷剂本身放出热量后由气体冷凝为液体，这种高压的制冷剂液体经过膨胀阀节流降压、降温后进入蒸发器；在蒸发器内，低压低温的制冷剂液体吸收被冷却物体（食品或空调冷冻水）的热量而气化，而被冷却物体（如食品或冷冻水）便得到冷却，蒸发器中所产生的制冷剂蒸气又被压缩机吸走。这样制冷剂在系统中要经过压缩、冷凝、节流、气化（蒸发）四个过程，也就完成了一个制冷循环。

综合上述，蒸气压缩式制冷的理论循环可归纳为以下四点：

- 1) 低压低温制冷剂液体（含有少量蒸气）在蒸发器内的定压气化吸热过程，即从低温物体中夺取热量。该过程是在压力不变的条件下，制冷剂由液体气化为气体。
- 2) 低压低温制冷剂蒸气在压缩机中的绝热压缩过程。这个压缩过程是消耗外界能量（电能）的补偿过程，以实现制冷循环。
- 3) 高压高温的制冷剂气体在冷凝器中的定压冷却冷凝过程。就是将从被冷却物体（低温物体）中夺取的热量连同压缩机所消耗的功转化成的热量一起，全部由冷却水（高温物体）带走，而制冷剂本身在定压下由气体冷却冷凝为液体。



4) 高压制冷剂液体经膨胀阀节流降压降温后, 为液体在蒸发器内的气化创造了条件。

因此, 蒸气压缩式制冷循环就是制冷剂在蒸发器内夺取低温物体(空调冷冻水或食品)的热量并通过冷凝器把这些热量传给高温物体(冷却水或空气)的过程。

## 二、压焓图( $\lg p-h$ 图)的结构

在制冷装置中, 制冷剂的热力状态变化可以用其热力性质表来说明, 也可用热力性质图来表示。用图来研究整个制冷循环, 不仅可以简便地确定制冷剂的状态参数, 而且能直观地看到循环各状态的变化过程及其特点。

制冷剂的热力性质图主要有温熵图( $T-S$ )和压焓图( $\lg p-h$ 图)两种。由于制冷剂在蒸发器内吸热气化, 在冷凝器中放热冷凝都是在定压下进行的, 而定压过程中所交换的热量和压缩机在绝热压缩过程中所消耗的功, 都可用焓差来计算, 而且制冷剂经膨胀阀绝热节流后, 焓值不变。所以在工程上利用制冷剂的 $\lg p-h$ 图来进行制冷循环的热力计算更为方便。

压焓图( $\lg p-h$ 图)的结构如图1-4所示。图中以压力为纵坐标(为了缩小图面, 通常取对数坐标, 但是从图面查得的数值仍然是绝对压力, 而不是压力的对数值), 以焓为横坐标, 图中反映了一点、两线、三区、五态。 $k$ 点为临界点,  $k$ 点右边为干饱和蒸气线(称上界线), 干度 $x=1$ ,  $k$ 点左边为饱和液体线(称下界线), 干度 $x=0$ ; 两条饱和线将图分成三个区域: 下界线以左为过冷液体区, 上界线以右为过热蒸气区, 两者之间为湿蒸气区。图中包括一系列等参数线, 如等压线 $p=c$ , 等焓线 $h=c$ , 等温线 $t=c$ , 等熵线 $S=c$ , 等容线 $v=c$ , 等干度线 $x=c$ 。

在湿蒸气区内等压线与等温线重合。压焓图中的各等参数线形状见图1-4。

对于制冷剂的任一状态的有关参数, 一般只要知道任何两个参数, 即可在 $\lg p-h$ 图中找出代表这个状态的一个点, 在这个点上可以读出其他参数值。

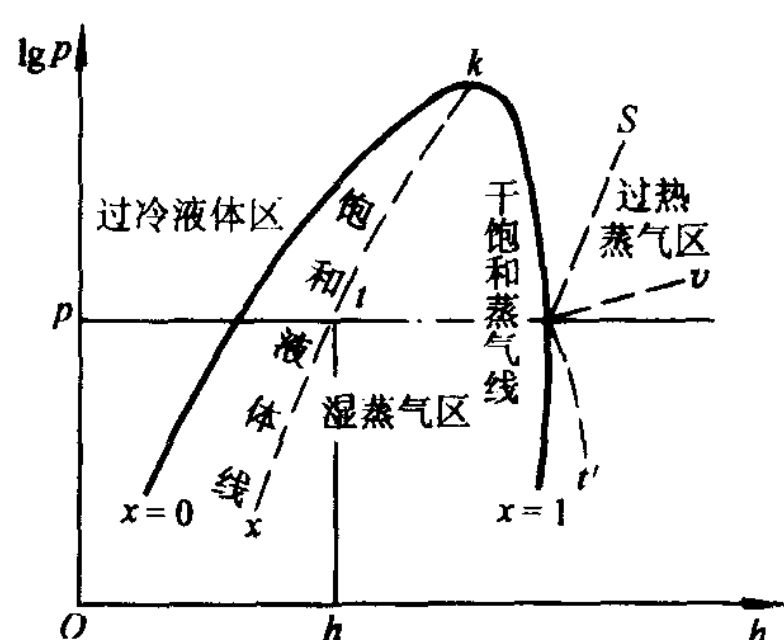
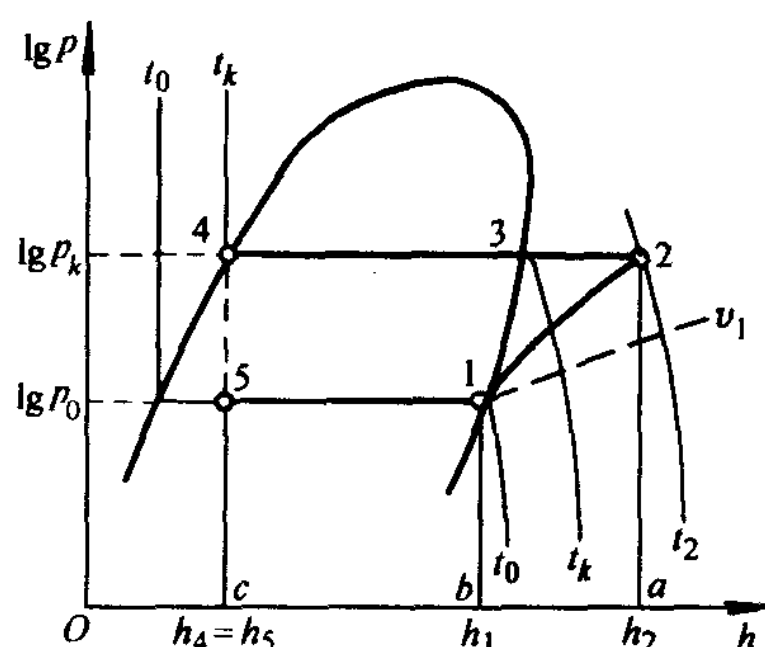
压焓图是进行制冷循环分析和计算的重要工具, 应熟练掌握。本书附录中列出了一些常用制冷剂的压焓图。

## 三、单级蒸气压缩式制冷理论循环在压焓图上的表示

为了进一步了解单级蒸气压缩式制冷装置中制冷剂状态的变化过程, 现将制冷理论循环过程表示在压焓图上, 如图1-5所示。并说明如下:

点1: 为制冷剂进入压缩机的状态。如果不考虑过热, 进入压缩机的制冷剂为干饱和蒸气。它是根据已知的 $t_0$ 找到对应的 $p_0$ , 然后根据 $p_0$ 的等压线与 $x=1$ 的饱和蒸气线相交来确定的。

点2: 高压制冷剂气体从压缩机排出进入冷凝器的状态。绝热压缩过程熵不变, 即 $S_1=S_2$ , 因此, 由点1沿等熵线( $S=c$ )向上与 $p_k$ 的等压线相交便可

图 1-4  $\lg p-h$  的结构图 1-5 制冷理论循环在  $\lg p-h$  图上的表示

求得点 2。

1—2 过程为制冷剂在压缩机中的绝热压缩过程。该过程要消耗机械功。

点 4：为制冷剂在冷凝器内凝结成饱和液体的状态，也就是离开冷凝器时的状态。它是由  $p_k$  的等压线与饱和液体线 ( $x=0$ ) 相交求得。

2—3—4 过程为制冷剂蒸气在冷凝器内进行定压冷却 (2—3) 和定压冷凝 (3—4) 过程。该过程制冷剂向冷却水 (或空气) 放出热量。

点 5：为制冷剂出膨胀阀进入蒸发器的状态。

4—5 为制冷剂在膨胀阀中的节流过程。节流前后焓值不变 ( $h_4 = h_5$ )，压力由  $p_k$  降到  $p_0$ ，温度由  $t_k$  降到  $t_0$ ，由饱和液体进入湿蒸气区，这说明制冷剂液体经节流后产生少量的闪发气体。由于节流过程是不可逆过程，因此在图上用一虚线表示。点 5 由点 4 沿等焓线与  $p_0$  等压线相交求得。

5—1 过程为制冷剂在蒸发器内定压蒸发吸热过程。在这一过程中  $p_0$  和  $t_0$  保持不变，低压低温的制冷剂液体吸收被冷却物体的热量使其温度降低而达到制冷的目的。

制冷剂经过 1—2—3—4—5—1 过程后，就完成了—个制冷理论基本循环。

#### 四、液体过冷的制冷循环

制冷理论基本循环 (即饱和循环) 没有考虑制冷剂的液体过冷，而液体过冷直接影响到制冷装置的循环性能，因此必须加以分析和讨论。

实现液体过冷的办法有：①增设专门的过冷设备 (即过冷器)；②适当增加冷凝器的传热面积，使一部分传热面积用于过冷；③采用回热循环 (增加过冷度)。

图 1-6 所示为设有过冷器液体过冷的制冷循环。图 1-7 所示为液体过冷循环在压焓图 ( $\lg p-h$  图) 上的表示。其工作过程是：将冷凝器排出的饱和液体制冷剂送入过冷器中进行过冷，利用深井水使饱和液体在定压下冷却到低于冷凝温度的过冷液体状态，我们把这个再冷却的过程称为液体过冷。如图 1-7 中的