

## 声 明

本电子书由中国轻工业出版社出版,相关权利归中国轻工业出版社所有。读者、著作权人和(或)依法可以行使著作权的权利人如有疑问,请与中国轻工业出版社联系:

地址:北京市东长安街6号

邮编:100740

电话:85119838

Email: [xnxtm@yahoo.com.cn](mailto:xnxtm@yahoo.com.cn)

中国轻工业出版社

高等学校轻工专业试用教材

# 制冷器具原理与技术

徐传宙 时阳 湛清平 编

中国轻工业出版社

**图书在版编目(CIP)数据**

制冷器具原理与技术/徐传宙等编. -北京:中国轻工业出版社, 1996.5

高等学校轻工专业试用教材

ISBN 7-5019-1852-X

I. 制… II. 徐… III. ①制冷-设备-高等学校-教材②  
制冷装置-高等学校-教材 IV. TB657

中国版本图书馆CIP数据核字(96)第00599号

责任编辑 朱玲

中国轻工业出版社出版  
(北京市东长安街6号)  
北京市卫顺印刷厂印刷  
新华书店北京发行所发行  
各地新华书店经售

\*

787×1092毫米 1/16印张: 16.75 字数: 387千字

1996年5月 第1版第1次印刷

印数: 1—3400 定价: 21.30元

## 前 言

本书是为高等学校轻工专业自动控制工程系家用电器专业制冷器具课程所编写的教材。根据1991年家用电器教材工作会议精神及讨论的本教材大纲内容，编写了名为《制冷器具原理与技术》教学讲义。经过二年的使用，1993年教材工作会议决定将此讲义修改正式出版。

本教材以单级蒸气压缩式制冷为主，较系统、较全面地介绍制冷工作原理及制冷系统分析、制冷器具部件结构及基本计算、制冷器具的电气控制等内容，并适当介绍了吸收、吸附和热电式制冷原理及其应用。为了照顾各院校在要求上的差异，还编写了工程热力学和传热学基本知识。教材按60~64学时编写，讲授时可根据具体情况有所取舍。

参加本教材编写工作的有郑州轻工业学院机械工程系制冷教研室徐传宙（绪论、第一、三、四章）、时阳（第二、五、六章）、自动控制工程系家电教研室湛清平（第七章），由徐传宙统稿。西安建筑科技大学环境工程系杨磊教授对本书进行了审阅，并提出许多宝贵意见，给予了极大的支持和帮助，谨在此表示衷心感谢！

由于编者水平有限，书中缺点和不足之处，恳请读者批评指正。

编者

1995年7月于郑州轻工业学院

## 内 容 简 介

本书系高等学校自动控制系家用电器专业制冷器具课程试用教材。内容包括制冷技术中的工程热力学和传热学基本知识,单级蒸气压缩式制冷原理及制冷系统分析,制冷器具部件的结构及基本计算,制冷器具的电气控制,并对吸收、吸附式制冷和热电制冷及其应用也作了适当的介绍。

本书除作教材外,还可供制冷器具方面工程技术人员参考。

# 目 录

|                     |           |
|---------------------|-----------|
| 绪论                  | 1         |
| <b>第一章 制冷的热力学基础</b> | <b>3</b>  |
| 一、概述                | 3         |
| 二、工质的热力状态和热力过程      | 3         |
| (一)工质的热力状态和状态参数     | 3         |
| (二)气体状态方程           | 4         |
| (三)工质的比热容与热力学能      | 6         |
| (四)热量、功和压容图         | 7         |
| (五)气体的热力过程          | 8         |
| 三、热力学基本定律及其应用       | 11        |
| (一)热力学第一定律及其表达式     | 11        |
| (二)稳定流动能量方程和焓       | 12        |
| (三)熵和温焓图            | 14        |
| (四)热力循环             | 15        |
| (五)热力学第二定律          | 16        |
| 四、蒸气和相变工质           | 16        |
| (一)气化和凝结            | 16        |
| (二)蒸气的发生过程          | 17        |
| (三)相变工质状态参数         | 18        |
| 五、制冷循环              | 19        |
| (一)理想的制冷循环          | 19        |
| (二)理论的制冷循环          | 20        |
| (三)制冷工质的压焓图         | 21        |
| 六、湿空气               | 22        |
| (一)湿空气的状态参数         | 22        |
| (二)湿空气的焓湿图          | 24        |
| (三)湿球温度与露点温度        | 25        |
| 习题                  | 26        |
| <b>第二章 制冷原理</b>     | <b>28</b> |
| 一、蒸气压缩式制冷           | 28        |
| (一)单级蒸气压缩制冷的理论循环    | 28        |
| (二)液体过冷、蒸气过热及回热循环   | 32        |
| (三)单级蒸气压缩制冷实际循环     | 36        |
| (四)制冷剂与贮冷剂          | 40        |
| (五)带有中间冷却的制冷循环      | 48        |
| (六)应用非共沸混合工质的制冷循环   | 51        |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 二、吸收式与吸附式制冷 .....        | 54  |
| (一)吸收扩散式制冷 .....         | 54  |
| (二)闭式吸附式制冷 .....         | 56  |
| (三)开式吸附式和吸收式制冷 .....     | 61  |
| 三、热电制冷 .....             | 63  |
| (一)热电效应 .....            | 63  |
| (二)半导体制冷元件 .....         | 65  |
| (三)半导体制冷的基本原理与特性 .....   | 66  |
| (四)半导体制冷器的设计 .....       | 72  |
| (五)热电制冷的特点与应用 .....      | 77  |
| 四、气体制冷 .....             | 78  |
| (一)无回热气体制冷循环 .....       | 78  |
| (二)定压回热气体制冷循环 .....      | 79  |
| 习题 .....                 | 81  |
| <b>第三章 制冷压缩机</b> .....   | 82  |
| 一、概述 .....               | 82  |
| 二、往复式制冷压缩机 .....         | 83  |
| (一)工作原理与基本结构 .....       | 83  |
| (二)封闭式制冷压缩机的构造 .....     | 84  |
| (三)往复式制冷压缩机的热力性能 .....   | 89  |
| 三、回转式制冷压缩机 .....         | 103 |
| (一)滚动转子式制冷压缩机 .....      | 103 |
| (二)涡旋式制冷压缩机 .....        | 107 |
| 习题 .....                 | 110 |
| <b>第四章 冷凝器和蒸发器</b> ..... | 112 |
| 一、热量传递的三种基本方式 .....      | 112 |
| (一)导热 .....              | 112 |
| (二)对流传热 .....            | 115 |
| (三)辐射换热 .....            | 117 |
| 二、传热计算 .....             | 118 |
| (一)平壁传热 .....            | 119 |
| (二)圆筒壁传热 .....           | 120 |
| (三)带肋壁面传热 .....          | 121 |
| (四)肋效率 .....             | 122 |
| (五)传热温差 .....            | 124 |
| 三、冷凝器 .....              | 125 |
| (一)水冷式冷凝器 .....          | 125 |
| (二)空冷式冷凝器 .....          | 127 |
| (三)空冷式冷凝器的设计计算 .....     | 130 |
| 四、蒸发器 .....              | 139 |
| (一)冷却液体用的蒸发器 .....       | 140 |
| (二)冷却空气用的蒸发器 .....       | 140 |

|                      |     |
|----------------------|-----|
| (三)冷却空气用的蒸发器的设计计算    | 143 |
| 习题                   | 154 |
| <b>第五章 节流装置与辅助部件</b> | 155 |
| 一、节流装置               | 155 |
| (一)概述                | 155 |
| (二)热力膨胀阀             | 155 |
| (三)毛细管               | 158 |
| (四)电子膨胀阀简介           | 165 |
| 二、辅助部件               | 167 |
| (一)干燥过滤器             | 167 |
| (二)回热器               | 168 |
| 习题                   | 169 |
| <b>第六章 家用制冷器具</b>    | 170 |
| 一、电冰箱与冷柜             | 170 |
| (一)电冰箱的分类            | 170 |
| (二)电冰箱的结构            | 171 |
| (三)电冰箱的制冷系统          | 174 |
| (四)隔热与冷负荷计算          | 177 |
| (五)电冰箱的研究与发展         | 186 |
| 二、空调器                | 188 |
| (一)典型的空气热湿处理过程       | 188 |
| (二)空调器的类型、结构及系统布置    | 191 |
| (三)空调器的设计计算          | 200 |
| (四)空调器的新发展           | 203 |
| (五)空调器制冷量测试          | 204 |
| 三、家用制冷器具的附加装置        | 207 |
| (一)空气放电装置            | 207 |
| (二)空气加湿器             | 208 |
| <b>第七章 制冷器具电气控制</b>  | 210 |
| 一、制冷器具启动与保护          | 210 |
| (一)启动装置              | 210 |
| (二)保护装置              | 215 |
| 二、温度控制器与化霜器          | 218 |
| (一)温度控制器             | 218 |
| (二)化霜器               | 222 |
| 三、制冷器具控制电路           | 229 |
| (一)电冰箱典型控制电路         | 229 |
| (二)冷柜典型控制电路          | 232 |
| (三)空调器控制电路           | 232 |
| 四、制冷器具控制技术的发展        | 238 |
| (一)模糊控制在电冰箱上的应用      | 239 |

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| (二)变频调速技术在空调器上的应用.....         | 240 |
| (三)模糊控制在空调器上的应用.....           | 246 |
| <b>附录</b> .....                | 247 |
| 附表1 制冷剂R12的饱和液体及饱和蒸气的热力性质..... | 247 |
| 附表2 制冷剂R22的饱和液体及饱和蒸气的热力性质..... | 249 |
| 附表3 制冷剂R22的过热蒸气的热力性质.....      | 252 |
| 附图1 R12的压焓图.....               | 254 |
| 附图2 R22的压焓图.....               | 255 |
| 附图3 R134a的压焓图.....             | 256 |
| 附图4 湿空气的焓-湿图.....              | 257 |
| <b>参考文献</b> .....              | 258 |

## 绪 论

制冷就是使某物体或某空间的温度达到低于周围环境温度，并使之维持这个低温。为了使某物体或空间达到并维持所需的低温，就需不断地取出物体或空间内的热量，并把这一热量输送到外界环境介质(空气或水)中去。这样的热量转移过程就是制冷过程，简称“制冷”。

实现制冷的手段有两种：一种是利用天然冷源制冷；另一种是利用人造冷源制冷，即人工制冷。

天然冷源有深井水、冬季贮藏的天然冰。利用天然冰的融解热或比地面温度更低的深井水吸热，可使物体或空间降温，以实现天然冷源制冷。这种制冷不需要复杂的技术设备，具有价廉的优点，是古代我国和世界各国很早就采用的取冷方法。据史料记载，我们的祖先早在 3000 多年前就已懂得利用冰来冷藏食品和防暑降温。由于天然冷源受到地区、季节和贮冰条件的限制，且降温范围和制冷量有限，随着人工制冷技术的发展，天然冷源逐渐被人造冷源代替。

人工制冷可以实现比天然冷源更低的低温温度，有宽广的低温调节范围。按人工制冷不同制冷方法，所能实现的低温温度区域划分，制冷技术大体分为三类：

(1) 温度高于 120K( $-153^{\circ}\text{C}$ ) 的制冷温度区，称普通制冷，简称普冷。这一温度广泛用于食品冷冻冷藏、空气调节和某些生产工艺过程，主要制冷方法是利用制冷工质(制冷剂)相变制冷。

(2) 温度低于 120K 的制冷温度区，称深度制冷，简称深冷。这个温度多用于工业气体分离和气体液化，主要制冷方法是气体绝热膨胀制冷。

(3) 温度低于 0.3K 的制冷温度区，称超低温制冷，一般用于基础理论研究，主要制冷方法是绝热退磁制冷和氦稀释制冷。

制冷器具用制冷技术属于普通制冷范围，主要采用液体气化制冷，包括蒸气压缩式制冷、吸收和吸附式制冷等。

从 19 世纪中叶世界上出现第一台制冷机、人类开始采用人造冷源，到现在已有 100 多年的历史。1834 年美国 J. 珀金斯 (Jacob Perkins) 试制成功了人力转动的乙醚工质制冷机。1844 年 J. 高里 (John Gorrie) 在美国费城试制了采用压缩空气为工质的、可用来制冷和冷却空气的制冷机。1873 年英国人波义耳发明了氨压缩机，在此基础上德国人卡尔·林德于 1875 年研制成氨蒸气压缩式制冷机。19 世纪 50 年代出现了氨水溶液吸收式制冷机，90 年代有了蒸气喷射式制冷机。这两种制冷机的热效率较低，且一般用于制冷量较大场合，其应用不甚广泛。与此同时，制冷剂种类也在不断增加，1930 年氟里昂(卤代烃)工质的出现，用氟里昂为制冷工质促进了制冷技术的迅速发展，蒸气压缩式制冷机得到更加广泛的应用。1945 年又试制成第一台溴化锂吸收式制冷机，制冷机类型不断增多。

制冷最早是用来保存食品和调节一定空间范围内的空气温度。随着社会生产力的发展和人们物质生活水平的提高，制冷技术发展到今天，其应用范围已扩大到国民经济的各个部门和人们的日常生活中。

冷冻冷藏是目前长期食品保鲜的最主要的方式。人们生活中必需的鱼、肉、禽、蛋、蔬菜和水果等食品在冷冻或冷藏条件下，可减少其营养损失、防止腐败变质、保持新鲜。营养学家研究表明，食品的合理冷藏温度一般为 $0\sim 10^{\circ}\text{C}$ 之间，而大多数食品在 $5^{\circ}\text{C}$ 条件下冷藏，营养素损失较小，细菌繁殖及有害物质（亚硝酸盐等）的形成得到抑制。要长期保存鱼肉类食品，则需要更低温度，即进行冷冻。“快速冷冻”，即在 $0\sim -5^{\circ}\text{C}$ 温度区内快速降温，可大大减小营养成分和鲜味的损失。通过这段温度区间，时间不超过30min为宜。现代的食品加工、贮藏、运输和销售，直到用户之间需要形成一个一环扣一环的“冷藏链”。所采用的制冷技术和装置有各种冷库、冷藏汽车、冷藏船和冷藏列车；有商业和食堂、餐馆用的冷藏柜、带制冷机的冷饮和陈列柜；以及供家庭用的各种类型电冰箱等。

空气调节是制冷技术应用的一个广泛的领域。空气调节既有制冷，同时又包括对空气的处理过程，即调节空气的温度、湿度、洁净度和进行气流分配，以达到热舒适性要求和工业生产的工艺性要求。前者称热舒适性空气调节，例如宾馆、商店、剧场、公共建筑、办公室、汽车、住宅房间等处安装的空调设备。后者称生产工艺性空气调节，例如高温生产车间、纺织厂、印刷厂、造纸厂、仪器仪表车间、计量室、计算机房等处安装的空调设备。

在现代工业生产过程中，制冷技术直接应用于机械制造、化工过程和钢铁工业等方面，可以提高产品质量和改进工艺流程。制冷技术在农牧水产业、建筑业、医疗卫生事业、国防和科研等许多部门都得到广泛应用。

名目繁多的家用电器逐步进入居民家庭，满足和方便人们各方面的生活需求。制冷器具是其中的重要一员，如电冰箱、冷柜、冷饮机、房间空调器和空气去湿机等被列入家用电器产品之列。制冷器具的主要产品家用电冰箱，自1910年问世，1917年在美国开始作为商品投入市场以后，到60年代有不少国家的年产量已超过百万台。目前电冰箱生产发展迅速，世界电冰箱的年产量已超过5000万台。我国电冰箱生产在70年代还主要是供医疗卫生部门使用，产量很少。到80年代蓬勃发展起来，电冰箱进入居民家庭，需求量日增。这一时期引进的国外电冰箱生产线，使我国缩小了与国外电冰箱生产技术的差距，产品产量和质量大幅度提高。90年代以来，我国电冰箱的生产能力已达到年产千万台以上，居世界首位，不仅满足国内市场需要，而且有产品出口国外。在电冰箱快速发展的同时，家用单相空调器（房间空调器）和冷柜等制冷器具也获得了较大的发展。以家用单相空调器为例，80年代开始起步，90年代初产量已达到60万台，现今空调器年产量已突破200万台。

制冷器具的制冷系统以单级蒸气压缩式制冷为主，它在产品结构与设计、以及电气控制方式等方面，不同于其他类型制冷装置。专门讨论此方面的书籍多见于普及性读本，能成为一本适用于家用电器专业制冷器具方面使用的较系统、较全面的教材，是本教材编写的目的。

# 第一章 制冷的热力学基础

## 一、概 述

从热力学的观点来说，制冷就是将热量从低温热源转移到高温热源的过程。制冷机是完成这种热量转移过程的机器，但它必须消耗一定的能量（机械功、电能或热能）作为补偿。图 1-1 示出制冷机工作原理。

根据热源温度条件不同，这类机器可分为制冷机、热泵和热泵型制冷机三种。制冷机用于制冷，其低温热源是低于环境温度的被冷却对象（物体或空间），高温热源是环境介质（水或空气）；热泵用于供热，其低温热源是环境介质，高温热源是被加热对象（物体或空间）；热泵型制冷机则完成从被冷却对象吸热，同时向被加热对象供热的制冷和供热联合。

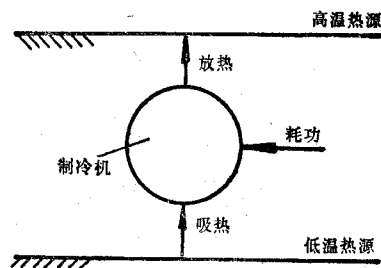


图 1-1 制冷机工作原理图

制冷机通过制冷机内的工作物质（制冷剂）从低温热源吸取热量，连同所消耗的热量，向高温热源排出，所采用的制冷技术涉及到工程热力学和传热学理论。工程热力学讨论热能和机械能相互转换规律，研究热能转换工作物质（工质）的性质，对热力过程和热力循环进行分析、计算等。传热学研究热量传递的规律，传热过程热流量计算等。

工程热力学和传热学是制冷技术的基础理论。本章仅讨论制冷的工程热力学基本理论，而传热学基本理论将在第四章进行讨论。

## 二、工质的热力状态和热力过程

### （一）工质的热力状态和状态参数

我们这里所说的工质是指气态工质，如空气、水蒸气和制冷剂蒸气等。

工质的热力状态是指某一瞬时，工质所呈现的某种宏观物理状况，简称工质的状态。通常将标志工质所处状态的宏观物理量称为热力状态参数，简称状态参数，也叫热力参数。工质的状态参数一经确定，工质实际所处的热力状态也就确定下来。

工质热力状态的基本参数是压力、温度和比容，它们可以直接或间接用仪器测量出来。其他的热力参数尚有热力学能、焓和熵等。

#### 1. 压力

这是工质在容器壁面的单位面积上所施加的垂直力，以  $p$  来表示，叫做绝对压力。国际单位制（SI）中压力的单位是  $\text{N}/\text{m}^2$ ，称帕斯卡，简称帕，符号为 Pa。Pa 的单位

很小，常用兆帕表示压力单位，符号为 MPa。

$$1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$$

压力通常用各种压力计来测定，压力计的读数叫做表压力，记作  $p_0$ 。表压力与绝对压力及当地的大气压力  $p_{\text{amb}}$  的关系为：

$$p = p_{\text{amb}} + p_0 \quad (1-1)$$

当容器内工质的绝对压力比大气压力低时，表压力是一个负数。取它的数值，称真空度，用  $p_v$  来表示，即：

$$p = p_{\text{amb}} - p_v \quad (1-2)$$

很明显，只有绝对压力才能真正说明工质的热力状态，是热力参数，因为表压力和真空度只是相对于当时当地的大气压力而言的。大气压力可以用专门的大气压力计来测定。

## 2. 温度

温度表示工质冷热的程度。按照分子运动理论，气体温度愈高，表明气体分子的平均动能愈大。

衡量温度的标尺叫做温标。在 SI 单位制中温度测量采用热力学温标，称绝对温度，以符号  $T$  表示，单位是开[尔文]，符号为  $K$ 。选取水的三相点（即水的固、液、汽三态共存时）的温度为基本定点，并定义其温度为  $273.16K$ 。热力学温标没有负值，每  $1K$  是水的三相点绝对温度的  $1/273.16$ 。

与热力学温标并用的还有摄氏温标，称摄氏温度，物理量符号为  $t$ ，单位符号为  $^{\circ}C$ 。摄氏温度每  $1^{\circ}C$  与绝对温度每  $1K$  的间隔大小是相等的，但两种温标的起始点不同。摄氏温标的  $0^{\circ}C$  是在一个标准大气压力下纯水的冰点，其热力学温标为  $273.15K$ ，比水的三相点的热力学温标低  $0.01K$ 。摄氏温度与绝对温度之间的关系为：

$$T = 273.15 + t \quad (1-3)$$

## 3. 比体积

单位质量工质所占的体积称比体积，以符号  $v$  表示，单位为  $m^3/kg$ 。若质量为  $m$  ( $kg$ ) 的工质占有总容积  $V$  ( $m^3$ )，则其比体积为：

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-4)$$

单位体积内所容纳的工质质量，叫做密度，用  $\rho$  表示，单位为  $kg/m^3$ 。即密度是比体积的倒数，关系式如下：

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V} \quad (1-5)$$

应该指出，比体积和密度都是热力参数，总体积  $V$  不是热力参数。这是因为工质数量上的变化，也将引起总体积的改变。

### (二) 气体状态方程

气态工质可分为两类，即气体和蒸气。任何气体都是液体的蒸气，而这里的气体是指远离液态、不易液化的气态；蒸气则指刚从液态过渡过来，或者比较容易液化的气态。空气的液化温度很低 ( $-183^{\circ}C$ )，在通常的热力状态下几乎是永久性气体；蒸气被加热

到远远超过液化温度，成为“过热”的蒸气，也可看成是一种气体，如制冷压缩机气缸中的制冷剂蒸气。实践结果发现，气体热力状态的三个基本参数（基本状态参数）：绝对压力  $p$ 、绝对温度  $T$  和比体积  $v$ ，在每一个热力状态下相互间有一定的内在联系，这种联系的关系式叫做状态方程。水蒸气和制冷剂蒸气的  $p$ 、 $T$ 、 $v$  之间的关系式则比较复杂。

在物理学中已经介绍过理想气体的概念，即它的分子是本身不占据体积的完全弹性体，分子之间也没有相互作用的内力，因而可以看成是一群彼此完全自由运动的质点的集合体。将实际气体进行这种理想化的假设处理，其状态方程则具有简单的公式表达，由此简化了气体热力过程计算。

通过实验先后发现，定量气体的温度维持不变时，其体积与压力成反比，这就是玻义耳-马略特定律；定量气体的体积保持不变时，其压力与绝对温度成正比，这就是查理定律；定量气体的压力维持不变时，其体积与绝对温度成正比，这就是盖-吕萨克定律。这三个定律是在保持一个参数不变，研究另外两个参数变化得出的规律。假如气体的这三个参数均发生变化时，它们之间的关系式可综合这三个定律表示成下式，即理想气体状态方程：

$$\frac{pv}{T} = R \quad \text{或} \quad pv = RT \quad (1-6)$$

对于质量为  $m$ ，体积为  $V$  的气体则为：

$$pV = mRT \quad (1-7)$$

对于每一种气体， $R$  是该气体的气体常数，单位为  $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

阿伏加德罗定律指出，在标准状态下 ( $p^\ominus = 101.325\text{kPa}$  和  $t^\ominus = 0^\circ\text{C}$ )  $1\text{kmol}$  或  $M$  (气体相对分子质量)  $\text{kg}$  质量的任何理想气体都将占据  $22.4\text{m}^3$ ，即  $Mv^\ominus = 22.4\text{m}^3$ 。由式 (1-7) 有：

$$p^\ominus(Mv^\ominus) = MRT^\ominus \quad (1-8)$$

对于标准状态，已知  $p^\ominus = 101.325\text{N}/\text{m}^2$ ， $T^\ominus = 273.15\text{K}$  和  $Mv^\ominus = 22.4\text{m}^3$ ，则：

$$MR = 8314.3 \quad \text{J}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$$

$$\text{或} \quad R = \frac{8314.3}{M} \quad [\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$$

$MR$  与气体的性质和状态无关，称通用气体常数。只要知道气体的相对分子质量  $M$ ，就能计算出该气体的气体常数  $R$ 。例如氧的相对分子质量是  $M = 32$ ，则其气体常数  $R = 259.8\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ；空气的平均相对分子质量  $M \approx 29$ ，其  $R = 286.7\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。

**例 1-1** 某种气体在表压力为  $0.2\text{MPa}$ ，温度为  $57^\circ\text{C}$  时，其比体积为  $0.2\text{m}^3/\text{kg}$ 。试问当表压力为  $1\text{MPa}$ ，温度为  $-5^\circ\text{C}$  时的比体积是多少？（大气压力为  $0.1\text{MPa}$ ）。

**解：** 已知  $p_1 = (0.2 + 0.1) = 0.3(\text{MPa})$

$$T_1 = 273 + 57 = 330(\text{K})$$

$$p_2 = (1 + 0.1) = 1.1(\text{MPa})$$

$$T_2 = 273 - 5 = 268(\text{K})$$

由式 (1-6) 可得：

$$v_2 = \frac{p_1 v_1}{T_1} \frac{T_2}{p_2} = \frac{0.3 \times 0.2 \times 268}{330 \times 1.1}$$

$$= 0.0443 (\text{m}^3/\text{kg})$$

例 1-2 求 27℃ 和 0.1MPa 条件下的空气的密度。

解: 
$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{p}{RT} = \frac{0.1 \times 10^6}{287 \times (273 + 27)} = 1.16 (\text{kg}/\text{m}^3)$$

### (三) 工质的比热容与热力学能

#### 1. 比热容

工质被加热或冷却时, 将使工质的状态发生变化。单位物量工质的温度每升高或降低 1℃, 其加热量或放热量, 就叫做该气体的比热容。按工质物量度量单位的不同, 比热容可分为三种: 质量热容、体积热容和摩尔热容。

质量热容表示 1kg 质量的工质, 温度变化 1K 所放出或吸进的热量, 用符号  $c$  表示, 单位是  $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

体积热容表示  $1\text{m}^3$  (指标准状况下) 的工质, 温度变化 1K 所放出或吸进的热量, 用符号  $c'$  表示, 单位是  $\text{kJ}/(\text{m}^3 \cdot \text{K})$ 。

摩尔热容表示  $1\text{kmol}$  的工质, 温度变化 1K 所放出或吸进的热量, 用符号  $c_m$  表示, 单位是  $\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

三种比热容之间的换算关系为:

$$c = c_m = 22.4c' \quad (1-9)$$

气体在压力不变条件下被加热时的热容, 叫做定压热容; 体积不变条件下被加热时的热容, 叫做定容热容, 分别用脚注  $p$  和  $v$  来识别。例如质量定压热容记作  $c_p$ ; 质量定容热容记作  $c_v$ 。

气体在定压条件下受热, 由于温度升高的同时, 还要克服外界抵抗力而膨胀作功, 所以定压热容要大于定容热容。越容易膨胀的工质, 其差别就越大。对水和其他液体而言, 实际上不需区别定压热容与定容热容。对于气体, 摩尔定压热容与摩尔定容热容之差等于通用气体常数  $MR$ , 即:

$$c_{p,m} - c_{v,m} = MR$$

或 
$$c_p - c_v = R \quad (1-10)$$

最常用的热容是  $c_p$ , 因为大多数加热和冷却过程是定压过程。几种重要介质常温下的定压热容可取为:

$$\begin{aligned} \text{干空气} \quad c_{p,0} &= 1.0 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \\ \text{水蒸气} \quad c_{p,0} &= 1.87 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \\ \text{液态水} \quad c_{p,0} &= 4.19 \text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K}) \end{aligned}$$

#### 2. 热力学能 (内能)

工质内部所具有的各种能量, 总称为工质的热力学能 (内能)。在热力学讨论的范围内, 热力学能包括分子运动的动能 (称热力学动能) 和分子间相互作用力的存在而具有的位能 (称热力学位能) 两部分, 或者说就是工质内部的热能。热力学动能与工质的温度有

关；热力学能 $U$ 与工质的热容有关。因此工质的热力学能是工质的一个状态参数。对于理想气体，因分子间不存在相互作用力，故其热力学能仅是温度的单值函数。

通常用 $U$ 表示 $m$ 质量工质的热力学能，单位为J或kJ。用 $u$ 表示1kg工质的热力学能，也称比能，单位为J/kg。热力学能采用热量的单位，但与热量有本质的区别。在给定状态下，可以说工质具有一定的热力学能，但不能说工质在该状态下具有多少热量。热力学能的绝对值无法测定，因为没有运动的热力学能绝对零值基点是不能找到的。在工程计算中，通常只涉及到热力学能的相对变化 $\Delta u$ ，所以可任意选取某一状态的热力学能为零，作为基准。例如，取1.013kPa和0℃时气体的热力学能为零。

#### (四) 热量、功和压容图

##### 1. 热量和功

热量是表示工质或物体吸收热能或放出热能多少的物理量。热量的单位是J或kJ；以前曾采用工程单位kcal（千卡）作为热量单位，1kcal是使1kg纯水在101.31kPa下以19.5℃升高到20.5℃时所吸收的热量。1kcal=4.1868kJ。

$m$ 质量的工质或物体，比热容为 $c$ ，温度从 $t_1$ ℃升高到 $t_2$ ℃时，其吸热量为：

$$Q = mc(t_2 - t_1) \quad (1-11)$$

如果物体温度从 $t_1$ 下降到 $t_2$ ，上式 $Q$ 为负值，说明物体放出热量。在热量计算中，通常把物体的吸热作为正值，放热作为负值。

功在力学中被定义为力与沿力的作用方向所产生位移的乘积。在热力学中的定义则是当热力系统（热力学研究对象）和外界（系统以外与系统发生作用的物体）之间存在压力差时，系统边界（系统与外界的分界面）和外界之间相互传递的能量。如图1-2所研究的热力系统（被封闭在气缸内的工质），当系统内工质的压力大于外界的压力，产生膨胀，推动活塞，使飞轮转动，我们就说系统（工质）对外界作了功。反之，当工质被压缩，工质从外界获得了功。热力学中通常规定热力系统对外界所作的功为正功；外界对热力系统作功为负功。膨胀功是正功，压缩功为负功。

功的单位是J，1J=1N·m。单位时间内完成的功称功率，单位为W或kW。1W=1J/s。单位时间流过的热量，称热流量，其单位也是W。1kcal/h=1.163W。

当热力系统与外界有能量（包括功和热）交换时，系统的状态就会发生变化。只有当系统状态发生变化时，才有功和热的传递。系统从初始状态变到终了状态所经历的全部状态，是一个状态参数变化的过程。因此功和热是一个过程量，它们不是热力状态参数。

##### 2. 膨胀功和压容图

通常热能转换为机械能是通过工质的膨胀来实现的。如图1-2所示，假定在气缸中有1kg工质，如果我们对气缸加热，工质压

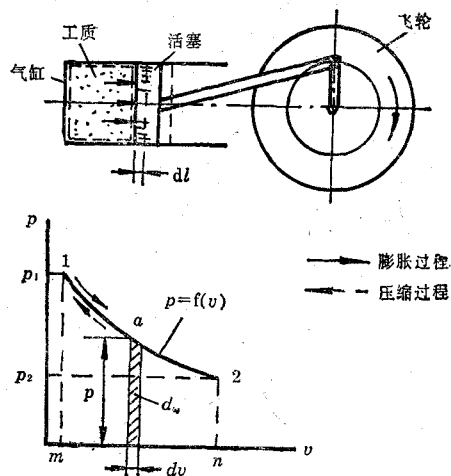


图 1-2 膨胀功与压容图

力升高到 $p_1$ ，同时允许飞轮转动，则工质逐渐膨胀，压力降低而比容增大，过程由初始状态1到终止状态2。在以比体积为横坐标，压力为纵坐标的压力-比体积图（称压容图或 $p-v$ 图）上画出膨胀过程的路线 $1 \rightarrow a \rightarrow 2$ 。如果活塞面积为 $F$ ，任一瞬间工质在压力 $p$ 的作用下推动活塞移动距离 $dl$ ，则工质所作的膨胀功为：

$$dw = pFdl = p dv \quad (1-12)$$

$dv = Fdl$  是工质膨胀时工质比体积的变化量。在过程 $1 \rightarrow a \rightarrow 2$ 中，系统所作的膨胀功为：

$$w_{12} = \int_1^2 dw = \int_1^2 p dv \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-13)$$

如果知道工质在状态变化过程中压力 $p$ 和比容 $v$ 之间的变化规律，即过程方程 $p = f(v)$ 已知，则膨胀功可以求得。在 $p-v$ 图上过程线 $1 \rightarrow a \rightarrow 2$ 下面的面积大小表示膨胀功，即：

$$w_{12} = \int_1^2 p dv = \text{面积 } 1a2nm1$$

对于 $m$ 质量工质所作的功则为：

$$W_{12} = m \int_1^2 p dv = \int_1^2 p dv \quad (\text{kJ}) \quad (1-14)$$

若以体积 $v$ 为横坐标，则 $p-v$ 图为功的指示图，称示功图。

当工质受压缩时，此过程即为压缩过程，过程沿反方向进行，从初始状态2到终止状态1。这时 $dv < 0$ ，所得功为负值，表明外界对工质作压缩功或压缩耗功。这时 $p-v$ 图上过程线下面的面积大小表示压缩耗功。

### (五) 气体的热力过程

气体工质热力状态发生变化的过程，称热力过程。研究热力过程的目的是：确定工质在热力过程中状态参数变化的规律；确定过程终止状态的状态参数；计算过程中工质与外界所交换的热量和功。

如果过程中传热无温差，作机械运动无摩擦，且工质与外界处于力平衡状态，这个过程称可逆过程。可逆过程就是当热力过程由初态到终态，然后沿着过程经历的反方向能回复到原状态（初态），同时外界不产生任何变化，好象过程未发生过一样，可逆过程才可以在 $p-v$ 图上用过程线表达出来。可逆过程实际上是不可能进行的，因为没有温差就不能传热，机械运动必伴有摩擦，故实际过程都是不可逆的。对不可逆过程进行研究相当困难，热力学主要研究可逆过程。我们把实际过程当作可逆过程研究，对实际过程与可逆过程之间的偏差，用经验或实验系数加以修正。

本节只讨论理想气体的可逆过程，并假定比热容不随温度变化，即 $c_p$ 和 $c_v$ 为常量。功和热量计算均取1kg工质。

工程上遇到的实际过程是多种多样，最有实际意义的典型过程是定容、定压、定温和绝热过程，以及较为普遍的多变过程。

#### 1. 定容过程

定量工质在状态变化过程中保持体积不变的热力过程，称为定容过程或等容过程。

过程方程： $v = \text{常数}$  或  $dv = 0$  (1-15)