

陆亚俊 马最良
庞志庆 编 著

制冷技术与应用

● 中国建筑工业出版社

制冷技术与应用

陆亚俊 马最良 庞志庆 编著

中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

本书着重阐述了蒸气压缩式制冷技术的基本原理与概念,以及它在空调、食品冷藏、制冰、人工冰场等方面的应用,此外还较详细地叙述了制冷系统的节能与制冷设备的实验,并介绍了制冷系统的调试与运行。

本书还给出了不少制冷应用的设计实例和制冷设备试验装置的设计原则及实用图式,以便读者能借助本书的实例和有关的参考资料,正确设计、使用有关的制冷装置和各种制冷设备试验装置。

本书既可供制冷设备制造厂和从事制冷应用的工程技术人员自学或参考,也可供空调工程专业或其他制冷应用方面专业的本科生、函授生参考之用。

责任编辑 姚荣华
技术设计 马江燕
责任校对 赵明霞

制 冷 技 术 与 应 用

陆亚俊 马最良 庞志庆 编著

中国建筑工业出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 22 插页: 1 字数: 532千字

1992年4月第一版 1992年4月第一次印刷

印数: 1—6,500册 定价: 14.55元

ISBN 7-112-01444-1/TU·1069

(6480)

前 言

人工制冷技术目前已广泛应用于国民经济许多部门，并与人民生活有着密切的联系。改革开放促使制冷事业迅猛发展，现在许多普通人也已经与制冷设备（如冰箱、冷藏柜、窗式空调机、柜式空调机、冷饮机等）发生了关系。《制冷技术与应用》一书正在制冷事业蓬勃发展的形势下问世，对人们了解制冷、应用制冷将会有所裨益，这正是作者写这本书的愿望。

本书以蒸气压缩式制冷为主线，阐述了这种制冷技术的基本原理与概念，以及在 -40°C 以上范围内的应用技术。作者多年从事制冷应用方面的教学与实践。本书的制冷技术的基本原理与概念是综合了近几年来空调专业本科生、函授生、专科生及专科生层次的空调制冷培训班的制冷讲授的经验，与最新的国内外制冷书籍及教材的优点。在章节的编排上、内容的取舍上作了新的尝试，以使从事制冷应用的读者便于自学，容易了解、掌握和应用本书的内容。本书制冷应用部分主要涉及空调、冷藏、制冰、人工冰场等方面的内容。其中部分内容是作者多年从事科研、设计、安装方面的经验总结。制冷应用部分除了阐述基本原则外，还给出了不少设计实例，以便读者能借助本书的实例和有关参考资料，正确设计、使用有关制冷装置、系统和设备。

本书既可供从事制冷应用的工程技术人员自学或参考，也可供空调工程专业或其他制冷应用方面专业的本科生、函授生参考之用。

参与编著本书的有哈尔滨建筑工程学院陆亚俊（第一、二、三、四、七、八、十二章）马最良（第五、六、九、十、十一、十三章）和哈尔滨市北方空调机厂庞志庆（第十四章）。全书由陆亚俊同志统稿。

由于作者水平有限，不妥之处，恳请读者批评指正。

目 录

第一章 绪论	1
1.1 制冷概述	1
1.2 制冷的发展简史	1
1.3 制冷技术的应用	3
第二章 热工基础知识	5
2.1 物态与热力状态	5
2.2 热力学定律	6
2.3 主要热力过程	9
2.4 传热的基本方式	10
2.5 传热系数和平均温差	12
2.6 实现制冷的途径	13
第三章 蒸气压缩式制冷的热力学原理	16
3.1 蒸气压缩式制冷的基本系统	16
3.2 制冷剂种类	17
3.3 制冷剂的热力参数图表	19
3.4 制冷量与制冷系数	21
3.5 理想制冷循环——逆卡诺循环	22
3.6 蒸气压缩式制冷的饱和循环	26
3.7 饱和循环与逆卡诺循环的比较	29
3.8 节流前过冷对制冷循环的影响	31
3.9 吸气过热对制冷循环的影响	33
3.10 实际循环	36
3.11 多级压缩和多级节流	39
3.12 双级压缩制冷循环	42
3.13 双级压缩制冷循环的热力计算	43
3.14 双级循环的中间压力	44
3.15 热泵循环	45
第四章 制冷压缩机	48
4.1 往复式压缩机的工作原理	48
4.2 往复式压缩机的容积效率与制冷量	51
4.3 往复式压缩机的功率	56
4.4 往复式压缩机的特性	59
4.5 往复式压缩机的构造	62
4.6 往复式压缩机的种类及简介	69
4.7 螺杆式压缩机的构造与工作过程	74
4.8 螺杆式压缩机的制冷量与功率	77

4.9	螺杆式压缩机的能量调节	79
4.10	滚动转子式压缩机	81
4.11	离心式压缩机的构造与特点	83
4.12	离心式压缩机的压缩过程	84
4.13	离心式压缩机的特性与调节	89
第五章	冷凝器、蒸发器和节流机构	92
5.1	冷凝器的种类及特点	92
5.2	冷凝器的选择计算	97
5.3	蒸发器的种类及特点	101
5.4	蒸发器的选择计算	106
5.5	节流机构	110
第六章	制冷剂与载冷剂	118
6.1	制冷剂的热力学性质	118
6.2	制冷剂的其他性质	122
6.3	常用制冷剂的主要性质及应用范围	125
6.4	载冷剂	127
第七章	制冷系统及辅助设备	130
7.1	制冷剂系统的典型流程	130
7.2	制冷剂系统中的辅助设备	134
7.3	润滑油分离设备和系统	137
7.4	不凝性气体分离器与系统	140
7.5	安全设备	143
7.6	除霜系统	144
7.7	制冷剂管路的管径的确定	146
7.8	制冷剂管路的设计原则	150
7.9	冷却水系统	155
7.10	制冷量输送系统	157
第八章	制冷系统的自动控制与调节	158
8.1	制冷系统的自动阀门	158
8.2	制冷系统的控制器	163
8.3	蒸发器的自动调节	166
8.4	压缩机的自动调节	168
8.5	冷凝器的自动调节	170
8.6	制冷系统的自动安全保护	171
第九章	制冷在空气调节工程中的应用	173
9.1	空调中冷冻水的制备系统	173
9.2	高层建筑空调冷冻水系统	176
9.3	空调中冷冻水制备系统的设计要点	180
9.4	空调冷冻站设计实例	183
9.5	空气调节机组	188
9.6	空调机组的选择	192
9.7	冷冻除湿	196
9.8	低温空调设计要点与实例	199

第十章 制冷在食品冷藏中的应用	205
10.1 食品冷冻保鲜的基本概念	205
10.2 小型冷库设计要点	206
10.3 小型冷库的负荷计算	211
10.4 小型冷库氨制冷系统设计计算实例	219
10.5 氟利昂小冷库实例	236
10.6 冷藏柜与装配式冷库	240
第十一章 制冰与人工冰场	245
11.1 冰块的生产	245
11.2 人工冰场	251
11.3 人工冰场负荷的计算	254
11.4 冰场实例	257
第十二章 制冷系统的节能	267
12.1 制冷系统设计中的节能问题	267
12.2 制冷系统运行中的节能	269
12.3 冷凝热量的利用	271
第十三章 制冷机与设备性能的实验	273
13.1 制冷压缩机制冷量的试验方法	273
13.2 房间量热计试验方法的原理	280
13.3 房间量热计试验装置实例	283
13.4 焓差法试验装置	289
13.5 冷风机性能试验方法	292
第十四章 制冷系统的调试与运行	296
14.1 制冷压缩机的试运转	296
14.2 制冷系统的气密性和真空试验	297
14.3 制冷系统充注制冷剂	299
14.4 制冷系统的启动和停车	301
14.5 制冷系统常见故障分析	303
14.6 制冷系统的安全技术	304
附录	306
附表1 制冷剂编号	306
附表2 R12饱和状态下的热力性质	306
附表3 R22饱和状态下的热力性质	309
附表4 R717饱和状态下的热力性质	311
附表5 R502饱和状态下的热力性质	314
附表6 R12过热蒸气的热力性质	317
附表7 R22过热蒸气的热力性质	322
附表8 R717过热蒸气的热力性质	327
附表9 R502过热蒸气的热力性质	330
附表10 氯化钙水溶液的物性值	335
附表11 氯化钠水溶液的物性值	337
附表12 乙二醇水溶液的物性值	338

附图1	R12过热区压—焓图.....	插页
附图2	R22过热区压—焓图.....	•339
附图3	R717过热区压—焓图.....	•340
附图4	R502过热区压—焓图.....	插页
参考文献		•341

第一章

绪 论

1.1 制冷概述

制冷，通俗一点说，就是把一空间或物体变冷。日常生活中常说的物体“热”或“冷”是指温度高低的相对概念。把物体变冷实际上是使它的温度降低。工程热力学中指出，温度是标志物体内部分子热运动强烈程度的一个物理参数。温度高就表明物体内部分子热运动强烈；反之，温度低就表明物体内部分子热运动弱。要把物体或空间的温度降低，就必须从物体或空间中取出能量——热量，使它们内部的分子热运动减弱。如何从物体或空间中取出热量呢？最简单的办法是利用温度较低的介质与被冷却物体或空间进行热交换，使热量由被冷却的物体或空间转移到温度较低的介质中去。例如，利用冰来冷却物体或空间，即是把热量由被冷却的物体或空间中转移到温度较低的冰。又例如，利用温度较低的地下水来冷却房间，这在空调工程中现在还时有应用。这些自然界存在的温度较低的物质，我们称为“天然冷源”。利用天然冷源制冷是一种最古老、最简单的制冷方法。但天然冷源不可多得，受地理、气候条件等的限制，如冰只有寒冷地区的冬季才有。然而自然界中大量存在着的是空气、河水，但它们只可以用来冷却温度较高的物体，例如用来冷却电机，以避免电机温度太高而损坏。若用它们来冷却温度低于环境温度的物体或空间，就无能为力了。现代人类的生活、生产经常需要某个物体或空间的温度低于环境温度，甚至低得很多。例如，储藏食品，需要把食品冷却到 0°C 左右或 -15°C 左右，以不使其变质；合金钢在 $-70\sim-90^{\circ}\text{C}$ 低温下冷处理后可以提高硬度和强度。这就要求有人工制冷，即人造低温技术。热力学告诉我们，热量不可能自发地从低温物体传递到高温物体。也就是说，这些物体（例如食品或合金钢）的热量决不能自发地传递到温度比它高的周围环境（空气或水）中去。要实现这种传递过程，必须有另外的补偿过程，如消耗一定的功作为补偿过程。这种利用一种专门装置，消耗一定量的外界能量，使热量从温度较低的被冷却物体或空间转移到温度较高的周围环境中去，称为人工制冷，这种装置称为制冷装置或制冷机。

制冷服务对象不同，要求的温度也不同。空气调节中一般只需把房间冷却到 $20\sim 27^{\circ}\text{C}$ ；果蔬储藏一般需要在 $0\sim 5^{\circ}\text{C}$ 之间；肉类储藏要求在 -18°C 左右；在1标准大气压下氧的液化温度为 90.18K 。由此可见，制冷温度范围很广，实现制冷所采用的方法必然相差悬殊。本书主要介绍温度较高范围内的制冷原理与应用技术。

1.2 制冷的发展简史

人类最早的制冷方法是利用自然界存在的冷物质——冰、深井水等。我国早在三千年

前的周朝就有了用冰的历史。《诗经》中“凿冰冲冲”、“纳于凌阴”就是记载了当时人们采集冰块，并储藏于冰窖里的情景。春秋战国时期，已经有专门管理冰的“凌人”和盛冰的器具——“冰鉴”。这种“鉴如缶，大口以盛冰，置食物于中，以御温气”。到了秦汉，冰的使用更进了一步，据《艺文志》记载：“大秦国有五宫殿，以水晶为柱拱，称水晶宫，内实以冰，遇夏开放。”这是我国最早的空调房间。三国时代曹操设井藏冰，“三伏之日以赐大臣”。到了唐朝已生产冰镇饮料“槐叶冷陶”，并已经有了冰商。冰酪、奶冰发源于中国，是冰淇淋的雏形，在元朝时由意大利著名旅行家马可·波罗将这种生产技术带到欧洲。希腊人和罗马人也早已知道建造地下雪窖，储藏压实的雪。印度人、埃及人把水放在浅的多孔陶器内，在夜间放于地下洞穴中，使水蒸发冷却。很早以前，东印度人

用某些盐类（如硝酸钠）溶于水中获得较低的温度。

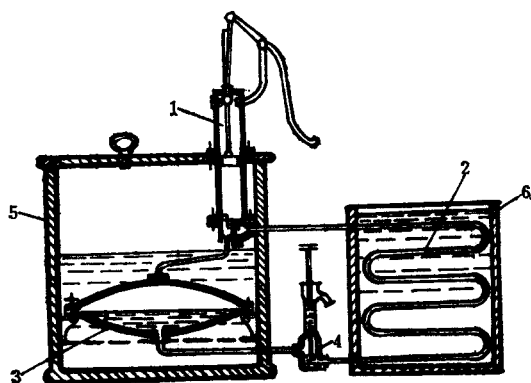


图 1-1 最早的制冷机

1—手动压缩机；2—冷凝器；3—蒸发器；4—重力阀；5—被冷却液体的容器；6—水箱

人工制冷到现在才有100多年的历史。1790年T·哈里斯（Thomas Harris）和J·郎（John Long）在英国取得最早一个关于制冷机的专利^[1]。1834年美国入J·潘肯斯（Jacob Perkins）在英国取得了如图1-1的制冷机专利。这台制冷机用乙醚做工质。手动压缩机1从蒸发器3中吸出气化的乙醚蒸气，加压后送入冷凝器2中冷凝成乙醚液体，再经重力阀4进入蒸发器3中。由于乙醚液体在蒸发器中气化吸热而冷却了容器5中的液体。

1851年J·高里（John Gorrie）在美国取得第一个制冷机专利，他采用压缩空气进行制冰。在澳大利亚，J·哈里逊（James Harrison）发明了乙醚机器，并在1860年制造出世界第一套制冰装置，用于啤酒厂内。1873年英国波义耳发明了氨制冷机。在此基础上，1875年德国人发明了氨压缩式制冷机。1881年在伦敦和波士顿建成了第一座冷库。1904年在纽约的斯托克交易所建成了制冷量为1582kW（ $136 \times 10^4 \text{ kcal/h}$ ）的空调系统。进入二十世纪后，蒸汽压缩式制冷机的发展很快。压缩机的种类、型式增多了，机器的转速增加了，设备日趋紧凑、体轻，自动化程度不断提高，新的更完善的制冷剂不断出现，……等等。

19世纪50年代试制出第一台氨水吸收式制冷机。1862年F·开利（Ferdinand Carre）从法国把吸收式制冷机引入美国南部联邦州。蒸气喷射式制冷机是在1890年以后才发展起来的。这两种制冷机的热效率低，敌不过当时正在蓬勃发展的蒸汽压缩式制冷机。因此，它们的发展受到一定限制。到了20世纪30年代到40年代，吸收式制冷机再一次获得发展。当时小型吸收式冰箱盛行；氨水吸收式制冷机由小容量向大容量发展。1945年试制成第一台溴化锂吸收式制冷机。20世纪20年代以后，蒸气喷射式制冷机得到广泛应用。以后又出现了其他工质（R12）的蒸气喷射式制冷机。

旧中国制冷工业基本上是空白，在解放前只有少数几座冷库，上海有几家很小的“冰箱厂”，只搞维修业务。解放后，制冷工业得到飞速发展，据不完全统计目前全国生产制

冷设备和制冷应用设备的厂家有130余家。50年代主要仿制苏、美老式的活塞式压缩机。60年代开始自行设计制造高速多缸的活塞式压缩机。1964年第一机械工业部制订了5种缸径的中小型活塞式压缩机系列的基本参数、技术条件、试验方法的标准。1958年试制成功 $100 \times 10^4 \text{ kcal/h}$ 的离心式压缩机。1971年试制成功螺杆式压缩机。目前已有活塞式、螺杆式、离心式、吸收式、蒸气喷射式、热电式六大类制冷机。80年代许多厂家引进了国外先进的制冷空调技术（包括软硬件），这使我国制冷空调部分产品得到更新换代，技术质量上更上了一个新的台阶。近几年制冷产品的产量大幅度增长，1988年全国家用电冰箱产量已达757万台，其他制冷设备总产量达225.7万台（套）。

1.3 制冷技术的应用

制冷——这门古老而又年轻的技术，现在已渗透到人们生活和生产活动的各个领域。从日常的衣、食、住、行到尖端的科学技术都离不开制冷技术。

一、空气调节工程

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需有一个冷源——天然的或人工的。天然冷源的资源不是随处都有，而且其使用范围、场合受到限制，这就必须采用人工制冷。空调工程应用的范围很广，如光学仪器、仪表、精密计量、量具、精密机床、半导体、纺织、合成纤维、印刷、电影胶片洗印等生产车间，大型生产过程的控制室，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；大会堂、影剧院、体育馆、图书馆、宾馆和饭店、展览馆等公共建筑和汽车、飞机、火车等交通工具都需要有舒适性的空调系统；又如一些高温车间、炎热地区的生产车间需要防暑降温；地下铁路、隧道、地下商业街和仓库等的地下建筑和构筑物也都需要空调。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，即所谓的热泵。热泵是近年来得到人们重视的一项节能技术。目前在国外的空调系统中已有很多开始采用热泵供热。因此，可以断言，在我国实现四个现代化的进程中，空气调节将在更大范围内发挥它的作用，随之，制冷技术的应用也将日益扩大和发展。

二、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，否则要腐烂变质。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冷藏链。这就需要各种制冷措施——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。食品冷藏链可以保证食品的质量，减少在生产及分配过程中食品的损耗，还可以平衡食品生产上的季节性和销售之间的矛盾。

三、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，使机床能正常工作。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。例如，合金成分较高的钢经淬火后有残余的奥氏体，如果把它在 $-70 \sim -90^\circ\text{C}$ 的低温下处理，奥氏体就变成马氏体，从而提高了钢的硬度及强度。经冷处理的刀具，其使用寿命可延长30~50%。

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，减少元件发热和环境温度的影响。例如，电子计算机储能器、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广泛应用制冷技术。

四、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；高烧患者的冷却降温等。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。

五、现代农业

现代农业中，浸种、育苗、微生物除虫、良种的低温贮存、冻干法长期保存种子、低温贮粮等都要求运用制冷技术。

六、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，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，以保障工程安全进行。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（如水坝）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。

七、国防工业和现代科学

在高寒地区应用的汽车、坦克、发动机、大炮等常规武器的性能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，这些都需要人工制冷技术。

超导体的应用、红外线探测、红外线夜间或高空摄影、宇宙空间的模拟、半导体激光等都需要低温制冷技术。

八、体育事业

现代的冰上活动包括冰球、速滑、花样滑冰、冰上舞蹈等，这些冰上运动对冰的质量、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。

九、日常生活方面

随着人民生活水平的提高，家用电冰箱已逐渐成为家庭中必备的电器产品。冰糕、冰棍、清凉饮料也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进一步的发展与提高。

第二章

热 工 基 础 知 识

工程热力学和传热学是制冷技术的主要的基础理论。为便于读者在理解制冷原理和解决实际工程问题时查阅这方面的概念，本章摘录了在制冷中经常应用的工程热力学和传热学的基本概念。有关这方面更系统和深入的内容，请阅读这些课程的教材。

2.1 物态与热力状态

一、物态

根据物质分子间距离、分子间作用力和热运动方式不同，物质有三态——固体、液体和气体。固体——分子间距离很小，在一定温度、压力条件下，一定质量的固体物质具有一定的形状和体积。气体——分子间距离很大，气体物质没有确定的形状，气体分子可以自由运动，可以充满任一形状和容积的密闭容器。液体——分子间的距离介于固体和气体之间，在一定温度和压力条件下，一定质量的液体物质具有一定的体积，但无确定的形状；放入容器内时，占有一定的体积，在重力作用下，形成一自由表面。

二、物态的变化

当物质的分子间距离、分子间作用力和热运动状态改变时，会引起物态的改变，固体和液体、液体和气体、固体和气体之间可以互相转换，这种物质状态的改变称为相变。

固体转变为液体称为溶解，或称融化，如冰融化成水。其逆过程称凝固。溶解或凝固时，温度保持不变，这个温度称为熔点或凝固点。

液体转变的气体称为气化，如水变成汽，汽化有两种不同方式——蒸发和沸腾。在液体表面上进行气化的现象称蒸发；而在液体内部和表面同时气化的现象称沸腾。在一定压力下，各种液体的沸腾只能在一定温度下进行，这个温度称为沸点，或称为某一压力下的饱和温度。而蒸发在任何温度下都可能发生。由气体转变为液体称为液化，或称凝结。

固体转变为气体称为升华，如固体二氧化碳（ CO_2 ）转变为气体。升华只能在低于三相点压力下发生。

三、饱和与未饱和

在某一压力下，当温度达到饱和温度（沸点）时的液体或气体称为饱和液体或饱和蒸气。饱和温度是液体可以存在的最高温度，或是气体可以存在的最低温度。同一物质不同压力下的饱和温度是不一样的；不同物质相同压力下的饱和温度一般也是不一样的。饱和温度下对应的压力称饱和压力。在某一压力下，温度低于该压力下饱和温度的液体是未饱和液体，常称为过冷液体；温度高于饱和温度的蒸气称为过热蒸气。

四、理想气体与蒸气

分子间互相没有作用力的气体称为理想气体。这种气体的分子是完全自由的。因此，理想气体内部无位能，它的状态改变不需克服内部分子力。降低温度和增加压力也不可能使这种气体变为液体或固体。实际上理想气体并不存在，理想气体实质上只是实际气体在压力 $p \rightarrow 0$ 或比容 $v \rightarrow \infty$ 时的极限状态的气体。然而，许多气体，如空气、氮气、氢气、氦气等，在常温下非常接近理想气体，工程计算中常把它们看作理想气体。蒸气是接近饱和状态的气体，有人定义蒸气是临界温度下的气体。通常把水蒸气写成汽。蒸气是实际气体，温度很高或比容很大时就接近理想气体。

五、状态方程

气体和蒸气的热状态常用一些物理参数（状态参数）来表征，最基本的状态参数为压力、温度、比容或密度。这些状态参数之间存在着规律性的联系。对于理想气体，遵循如下的状态方程：

$$pv = RT \quad (2-1)$$

式中 p —— 气体的压力，Pa；

v —— 气体的比容， m^3/kg ；

T —— 气体的温度，K；

R —— 气体常数， $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，应为 $8314/\mu$ ；

μ —— 气体的分子量。

从公式 (2-1) 可以看到，只要已知两个参数，热状态就确定下来了，第三个参数就可以利用状态方程计算得到。对于接近理想气体的气体，在工程上应用 (2-1) 式计算不会引起明显的误差。对于蒸气，尤其是接近液体的蒸气，用 (2-1) 式计算就会有很大误差。许多学者通过大量的理论探讨和实验，先后提出了上百种的实际气体状态方程式，它们一般只适用于某一物质在特定的压力温度范围内。利用这些公式计算相当复杂，目前工程上通常只应用由这些公式制成的各状态参数之间关系的热力性质图或表。

2.2 热力学定律

一、热量、功和内能

热量是一种能量，也称热能。热力学上定义热能是由于两个物体存在温差，而由高温物体传递到低温物体的能量。热量可以与其他形式的能量互相转换，如电能可以完全转换为热能，热能可以转换为机械能（但只能一部分）等。热能的单位：国际单位——焦耳（J）、千焦耳（kJ）；公制工程单位——卡（cal）、千卡（kcal）千瓦小时（kWh）；英制工程单位——英热单位（Btu）。换算关系是

$$1 \text{ kJ} = 0.2388 \text{ kcal} = 2.772 \times 10^{-4} \text{ kWh} = 0.9478 \text{ Btu}$$

功的定义是作用于物体上的力在位移方向的分量乘以物体移动的距离。气体容积变化要作功。设压力为 p 的气体在气缸内膨胀，推动活塞移动距离 ΔS （如图 2-1 所示），则气体对外作的功（膨胀功）为

$$\Delta W = p A \Delta S = p \Delta V \quad (2-2)$$

式中 A 为活塞面积，活塞向右移动了 ΔS ，气缸中气体的容积增加了 $\Delta V = A \Delta S$ 。如果气

缸内气体开始膨胀时的容积为 V_1 ，最后膨胀到 V_2 ，压力的变化如图2-1上方的 p - V 图上所示，问共作了多少功？从图上看到，当活塞移动微小距离 ΔS ，所作的功应为图中的阴影面积，则气体从 V_1 膨胀到 V_2 作的膨胀功应为曲线1-2下的面积，或是说由若干个类似的小阴影面积之和，可写成

$$W = \sum p \Delta V \quad (2-3)$$

在高等数学中， p - V 图上曲线1-2下的面积可以用定积分来计算，即

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad (2-4)$$

若上式除以气缸内气体的质量 m ，则得到单位质量气体的膨胀功，即

$$w = \frac{W}{m} = \int_{v_1}^{v_2} p dv \quad (2-5)$$

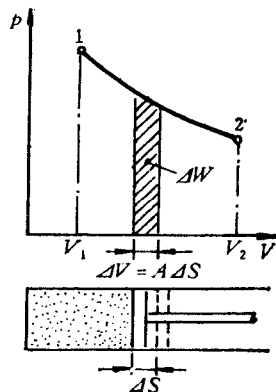


图 2-1 气体在汽缸内膨胀

式中 v_1 、 v_2 ——气体膨胀前后的比容， m^3/kg ；

w ——比功， J/kg 或 kJ/kg ($\text{kg f} \cdot \text{m/kg}$)；

W ——气缸内 $m \text{ kg}$ 气体所作的功， J 或 kJ ($\text{kg f} \cdot \text{m}$)。

工程单位制中功的单位是千克力·米 ($\text{kg f} \cdot \text{m}$) 与其他单位的关系为

$$1 \text{ kg f} \cdot \text{m} = \frac{1}{427} \text{ kcal} = 9.81 \times 10^{-3} \text{ kJ}$$

内能是物质内部分子动能（内动能）和分子位能（内位能）之和，用 U 表示，单位与功的单位一样。内动能通常表现为显热，它随着温度的升高而升高。内位能通常表现为潜热，只有当物态变化时，内位能才有明显的改变，而温度并不伴随改变。 1 kg 物质的内能称比内能，用 u 表示，单位为 J/kg 或 kJ/kg (kcal/kg)。

二、热量对物态的影响

当对物质加入或移出热量时，则改变了物质的内能。若热量只使物质的内能发生改变，则物质只发生温度变化，而不发生相变。单位质量的物质温度升高（或降低） 1 K 所需的热量称为比热，单位为 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ [$\text{kcal}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$]。比热与温度有关，在某一温度范围内，可用平均比热。若热量使物质的内位能发生改变，则物质发生相变，而温度不发生变化。固体与液体之间的相变所加入或移出的热量称为溶解潜热（简称溶解热）；液体和气体之间的相变所加入或移出的热量称为汽化潜热。 1 kg 液体的汽化潜热用符号 r 表示，单位为 kJ/kg (kcal/kg)。

三、焓和熵

焓是一个热力状态参数。不太严格地说，焓是“总热量”；确切一点说，焓是一定质量的流体，从某一初始状态（任意取的焓值起点）变为任一热力状态所加入的总热量，定义为

$$H = U + pV \quad (2-6)$$

式中 V 为一定质量流体的容积， m^3 ；焓的单位同热量单位。在工程单位制中，式（2-6）

中 pV 应乘以单位换算系数1/427。流体的焓除以质量 m 称为比焓,用 h 表示,单位为J/kg或kJ/kg(kcal/kg)。比焓的定义为

$$h = u + pv \quad (2-7)$$

习惯上比焓也简称焓。

熵也是一个热力状态参数,熵表示了一定质量的流体从某一初始状态(任意取的熵值起点)变为任一热力状态所加入的热量除以该流体的绝对温度。熵用 S 表示,单位为J/K或kJ/K(kcal/K)。1kg流体的熵称比熵,用 s 表示,单位为J/(kg·K)或kJ/(kg·K)[kcal/(kg·K)]。习惯上比熵也简称熵。比熵的数学表达式为

$$\Delta s = \frac{\Delta q}{T} \quad (2-8)$$

式中 Δs 为比熵的增量; Δq 为传递给1kg流体的热量,单位同比焓; T 为流体的绝对温度,K。

比熵也可以微分形式表示,即

$$ds = \frac{dq}{T} \quad (2-9)$$

四、可逆与不可逆

可逆过程是这样—个过程,当这个过程完成后,按原路线逆向进行,则热力系统和外界都回复到原来的状态。如果不满足上述条件,则是不可逆过程。流体的节流过程、有温差的传热过程、流动的摩擦及涡流的功量损失过程等都是不可逆过程。实际上没有一个过程是可逆的。但为了弄清热力过程的基本规律,通常将实际过程抽象为可逆过程来进行分析。

五、热力学第一定律

热力学第一定律指出,热能和机械能可以转换,而不能被创造,也不能被消灭。这个定律是更为普遍的能量守恒定律的一种特定形式。对闭口系统内的工作流体(称工质)加的热量,一部分用于增加工质的内能,另一部分用于工质作的膨胀功,如写成微分形式,则为

$$dq = du + p dv \quad (2-10)$$

将(2-7)式代入上式,则有

$$dh = dq + v dp \quad (2-11)$$

上述这两个公式即是闭口系统热力学第一定律能量方程式。

六、热力学第二定律

热力学第一定律说明了能量转换过程是守恒的,但没有说明能量转换过程的方向存在着差异。热力学第二定律对此作了阐明和论证。热力学第二定律有多种说法。其中一种说法是,机械功总能全部转换为热能,而热能只能有一部分转换为机械功,总有一部分热能受环境条件的限制而被带走,因此可写成

$$\text{输入的热量} = \text{转换成的机械功} + \text{输出热量}$$

热力学第二定律的克劳休斯说法是“不可能有这样不靠外界作用的自动机器,使热量由低温物体传递到高温物体。

对于一个孤立系统(与外界隔绝一切联系的系统),所有进行的热力过程总是使系统

的熵增加（当进行不可逆过程时）或保持不变（当进行可逆过程时），可以写成

$$\Delta S_{is} \geq 0 \quad (2-12)$$

这也是热力学第二定律的表达式。

七、稳定流动能量方程

工程中的热力设备一般不是闭口系统，而是开口系统，即工质总是不断地流进或流出这个热力设备的界面。实际设备中，工质流进或流出界面的质量流量以及该设备与外界的热量、功量传递并非恒定的，而是随着时间发生变化。但是常见的热工设备，质量流量以及与外界的热量、功量传递随时间变化很小，或是恒定的，我们都假定这个系统是稳定流动的。图2-2象征性地表示了稳定流动系统能量平衡图。这里假定系统任何断面上的质量流量 $\dot{m}$ （kg/s）、状态参数都不随时间改变，系统与外界的热量、功量传递也不随时间改变。根据能量守恒定律，进入系统的能量等于系统输出的能量，即

$$\dot{m} \left(h_1 + \frac{c_1^2}{2} + gZ_1 \right) + \dot{Q} = \dot{m} \left(h_2 + \frac{c_2^2}{2} + gZ_2 \right) + \dot{W} \quad (2-13)$$

式中 $\dot{Q}$ ——传入系统的热流量，J/s；

$\dot{W}$ ——系统对外作的功率，J/s；

c_1 、 c_2 ——系统进、出口工质的流动速度，m/s；

Z_1 、 Z_2 ——系统进、出口工质的高度，m；

h_1 、 h_2 ——系统进、出口工质的比焓，J/kg；

g ——重力加速度，9.81m/s²。

一般情况下，系统进、出口工质的动能 $c^2/2$ 和位能 gZ 的变化相对于焓、热量、功量的变化来说很小，可以忽略不计，因此上式可以简化为

$$\dot{m}h_1 + \dot{Q} = \dot{m}h_2 + \dot{W} \quad (2-14)$$

2.3 主要热力过程

工质在热力系统中状态发生连续的变化，并与外界进行着热量和功量传递的过程称热力过程。典型的过程有等压、等温、绝热等过程，这些过程的状态变化、与外界的热量和功量传递都有特定的规律。

一、等压过程

等压过程是在状态变化过程中工质压力保持不变的热力过程。热交换设备中工质的加热和冷却过程都是等压过程。等压过程在 p - v 图和 T - s 图上的表示如图2-3中线段1-2。等压加热为1→2，等压冷却为2→1。根据热力学第一定律公式（2-11），等压过程 $dp=0$ ，则有

$$dq = dh$$

等压过程1-2与外界的热量交换为

$$q = h_2 - h_1 \quad (2-15)$$