

B

普通高等教育机电类规划教材

制冷原理与装置

郑贤德 主编

普通高等教育机电类规划教材

制 冷 原 理 与 装 置

主编 郑贤德

参编 陈光明 陈诒春 丁国良

主审 华泽钊



机械工业出版社

本书是高等工科大学“制冷与低温技术”专业方向的主干课教材之一。内容以压缩式蒸气制冷机为主,着重阐述蒸气制冷机的工作原理、循环特性和热力计算方法,以及制冷换热器的结构特点、传热机理和设计计算方法等。制冷装置部分着重介绍实用制冷装置、制冷装置的设计计算及优化,空调装置的冷热源选择及制冷装置的节能等。

本书除作为动力工程类各专业教材外,还可供有一定基础的工程技术人员自学或参考之用。

图书在版编目(CIP)数据

制冷原理与装置/郑贤德主编. —北京:机械工业出版社,2000.11
普通高等教育机电类规划教材
ISBN 7-111-07925-6

I. 制… II. 郑… III. ①制冷-理论-高等教育-教材②制冷装置-高等教育-教材 IV. TB6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 76503 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:钱飒飒 版式设计:冉晓华 责任校对:李汝庚
封面设计:李雨桥 责任印制:郭景龙
北京第二外国语学院印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
2001 年 1 月第 1 版·第 1 次印刷
787mm × 1092mm^{1/16} · 18.75 印张 · 465 千字
0 001—4 000 册
定价:24.00 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、68326677 - 2527

前 言

本书是根据第二届全国高等学校动力工程类专业教学指导委员会制冷与低温技术专业指导小组于 1996 年 11 月召开的西安会议决议编写的, 它包括制冷原理与制冷装置两部分内容。

本书内容以压缩式蒸气制冷机为主, 制冷原理部分主要是应用工程热力学的理论阐明压缩式蒸气制冷机的工作原理、制冷热力学特性分析、制冷剂热物性参数及其计算机计算方法、制冷循环热力计算, 应用传热学理论阐明制冷热交换设备的结构特点及计算。制冷装置部分主要介绍实用制冷装置、制冷装置的设计计算及优化、制冷循环的计算机模拟、制冷装置的计算机辅助设计。此外还介绍了空调装置的冷热源选择、制冷装置的节能以及安装调试等。

本书由华中理工大学郑贤德教授主编。全书共计十一章, 第一、二、三章由浙江大学陈光明教授编写, 第四章至第六章由华中理工大学陈诒春副教授编写, 第七、八章由上海交通大学丁国良教授编写, 第九章由丁国良教授和郑贤德教授合编, 绪论和第十、十一章由郑贤德教授编写。

本书由上海理工大学华泽钊教授主审。

本书在编写过程中, 动力工程类专业教学指导委员会制冷与低温技术专业指导小组在 1999 年 5 月武汉会议时, 曾听取过本书编写情况的汇报并进行了讨论, 对本书编写工作及内容提出过宝贵的意见和建议, 谨致以谢意。

本书内容涉及面广, 以及由于引入了较多的新内容, 如有不足之处, 恳切希望读者批评指正。

编者

2000 年 1 月

目 录

前言		第三节 制冷装置的节流机构	152
绪论	1	第四节 蒸气压缩式制冷装置的辅助设备	159
第一章 制冷的热力学基础	5	第七章 制冷装置概述	176
第一节 相变制冷	5	第一节 制冷装置分类与应用	176
第二节 绝热膨胀制冷	8	第二节 制冷装置的系统及冷却方式	177
第三节 制冷热力学特性分析	10	第八章 制冷装置的设计计算	183
第二章 制冷剂、载冷剂及润滑油	16	第一节 制冷装置的设计原则	183
第一节 制冷剂概述	16	第二节 冷负荷的计算	185
第二节 制冷剂的热物性参数及其计算方法	21	第三节 单级压缩蒸气制冷循环的计算机模拟	199
第三节 制冷剂的物理化学性质及其应用	26	第四节 制冷装置的特性分析	205
第四节 常用制冷剂	30	第五节 制冷装置优化与计算机辅助设计简介	210
第五节 载冷剂	36	第九章 实用制冷装置	217
第六节 润滑油	38	第一节 食品冷冻、冷藏装置	217
第三章 单级压缩蒸气制冷循环	42	第二节 真空冷冻干燥装置	231
第一节 单级压缩蒸气制冷机的理论循环	42	第三节 制冰及干冰装置	234
第二节 单级压缩蒸气制冷实际循环	53	第四节 空调用制冷装置	239
第三节 单级压缩蒸气制冷循环性能的计算机计算	58	第五节 试验用制冷装置	255
第四节 单级压缩蒸气制冷循环的特性分析	59	第十章 空调装置的冷热源选择及制冷装置的节能	260
第五节 制冷循环的热力学第二定律分析	64	第一节 空调装置的冷热源选择	260
第四章 两级压缩和复叠制冷循环	70	第二节 制冷装置的节能	263
第一节 概述	70	第十一章 制冷装置的安装与调试	266
第二节 两级压缩一级节流循环	71	第一节 制冷装置的安装	266
第三节 两级压缩制冷循环运行特性分析	78	第二节 制冷装置的调试	269
第四节 复叠式制冷循环	83	附录	275
第五章 其他制冷循环	89	附录 A 计算马丁-侯方程常数的程序	275
第一节 吸收式制冷循环	89	附录 B 用马丁-侯方程计算比焓和比熵的程序	276
第二节 压缩式气体制冷循环	104	附录 C 单级压缩蒸气制冷循环性能的计算机程序	277
第三节 气体涡流制冷	108	附录 D 常用制冷剂压—焓图	280
第四节 热电制冷	110	附录 E 制冷剂、载冷剂在不同条件下的表面传热系数计算准则式	289
第五节 固体吸附制冷	114	参考文献	296
第六章 制冷设备	117		
第一节 概述	117		
第二节 制冷装置的换热设备	118		

绪 论

从低于环境温度的空间或物体中吸取热量，并将其转移给环境介质的过程称为制冷。制冷技术是为适应人们对低于环境温度条件的需要而产生和发展起来的。

制冷和低温这两个概念是以制取低温的温度来区分的，但并没有严格的范围。通常，从环境温度到 120K 的范围属于制冷，而从 120K 以下到绝对零度（0K）的范围属于低温，也有将 120K 以下的制冷统称为低温制冷的。制冷与低温不仅体现在所获得的温度高低不同，还体现在所采用的工质以及获得低温的方法不同，但是亦有重叠交叉之处。

实现制冷所必需的机器和设备，称为制冷机。例如机械压缩式制冷机包括压缩机、蒸发器、冷凝器和节流机构；吸收式制冷机包括发生器、冷凝器、蒸发器、吸收器和节流机构等。在制冷机中，除压缩机、泵和风机等机器外，其余是换热器及各种辅助设备，统称为制冷设备。而将制冷机同消耗冷量的设备结合一起的装置称为制冷装置，如冰箱、冷库、空调机等。

除半导体制冷以外，制冷机都依靠内部循环流动的工作介质来实现制冷过程。它不断地与外界产生能量交换，即不断地从被冷却对象中吸取热量，向环境介质排放热量。制冷机使用的工作介质称为制冷剂。制冷剂在制冷系统中所经历的一系列热力过程总称为制冷循环。为了实现制冷循环，必须消耗能量，该能量可以是电能、热能、机械能、太阳能及其他形式的能量。

与制冷的定义相似，从环境介质中吸取热量，并将其转移给高于环境温度的加热对象的过程，称为热泵供热。热泵循环和制冷循环的形式相同，而循环的目的，所使用的制冷剂和循环工作区间的温度不同，当然亦有采用相同制冷剂的。对于从环境介质中吸取热量而向高温处排出热量的制冷系统，可交替或同时实现制冷与供热两种功能的机器称为制冷与供热热泵。从能量利用的观点来看，这是一种有效利用能量的方法，既利用了冷量，又利用了热量。

由于制冷循环和热泵循环的原理和计算方法是相似的，因此本书中只着重分析制冷循环。书中的“制冷原理”部分主要从热力学的观点来分析和研究制冷循环的理论和应用，并扼要介绍制冷剂、制冷换热器工作原理、结构和传热计算；“制冷装置”部分主要介绍制冷装置的设计计算及实用制冷装置。

制冷在国民经济各部门及人民生活中应用很广。

在人民生活中，家用冰箱、空调器的应用日益增多，有些发达国家的家用冰箱普及率已达到 99% 以上。在我国城镇，冰箱和空调器已广泛地进入家庭，近年来增长速度很快，发展前景很乐观。

制冷技术在商业上的应用主要是对易腐食品（如鱼、肉、蛋、蔬菜、水果等）进行冷加工、冷藏及冷藏运输，以减少生产和分配中的食品损耗，保证各个季节市场的合理销售。现代化的食品工业，对于易腐食品，从生产到销售已形成一条完整的冷链。所采用的制冷装置有冻结设备、冷库、冷藏列车、冷藏船、冷藏汽车及冷藏集装箱等。另外，还有供食品零售

的商用冷藏柜、冷柜以及消费者的家用冰箱等。而冷藏列车等运输式冷藏装置实际上就是可以高速移动的冷库，它是随着制冷技术和交通运输的发展而发展的，以满足食品冷链的需要。此外，与食品冷藏技术有关的是冷藏食品的包装化，即必须对肉类等采用分割加工工艺，然后进行冷却、冻结和包装冷藏，这样既能保证质量，提高冷库容量，并实现节能。

降温和空气调节在工矿企业、住宅和公共场所的应用也愈来愈广。空气调节分为舒适空调和工艺空调。舒适空调是用来满足人们舒适需要的空气调节，而工艺空调是为满足生产中工艺过程或设备的需要而进行的空气调节。空气调节对国民经济各部门的发展和对人民物质文化生活水平的提高有着重要的作用。这不仅意味着受控的空气环境对各种工业生产过程的稳定运行和保证产品的质量有重要作用，而且对提高劳动生产率、保护人体健康、创造舒适的工作和生活环境有重要意义。工业生产中的精密机械和仪器制造业及精密计量室要求高精度的恒温恒湿；电子工业要求高洁净度的空调；纺织业则要求保证湿度的空调。同时，在民用及公共建筑中，随着改革开放，旅游业的蓬勃发展，装有空调机的宾馆、酒店、商店、图书馆、会堂、医院、展览馆、游乐场所日益增多。此外，在运输工具如汽车、火车、飞机和轮船中，也不同程度地安装有空气调节设备。空气调节技术包括制冷、供暖、通风和除尘，其中制冷降温是空气调节的一项关键技术。

在工业生产过程中，制冷应用也很广。如机械制造中，对钢的低温处理，使金相组织内部的奥氏体转变为马氏体，改善钢的性能。在钢铁和铸造工业中，采用冷冻除湿送风技术，利用制冷机先将空气除湿，然后再送入高炉或冲天炉，保证冶炼及铸件质量。化学工业中，气体的液化，混合气分离，盐类结晶，润滑油脱脂，某些化学反应过程的冷却、吸收反应热和控制反应速度等过程中，都需要应用制冷技术。此外，石油裂解、合成橡胶、合成树脂、化肥、天然气液化、贮运也需要制冷。工业生产用制冷机的特点是容量比较大，蒸发温度范围广，一个工厂往往需要几千至几万千瓦的制冷量，所需的蒸发温度范围亦大，有的生产过程只需要零度以上，有的需要 -40°C 以下，而天然气液化时蒸发温度低至 -150°C 以下。

在核工业中，制冷技术用来控制原子能反应堆的反应速度，吸收核反应过程放出的热量。在航天和国防工业中，航空仪表、火箭、导弹中的控制仪器，以及航空发动机，都需要在模拟高温低温条件下进行性能实验。在高寒地区使用的汽车、拖拉机、坦克、常规武器、铁路车辆、建筑机械等，也都需要在模拟寒冷气候条件下的低温实验室里进行实验。为此就需要建造各种类型的低温试验室，其所要求的蒸发温度一般比较低，大约在 $-40\sim -80^{\circ}\text{C}$ 范围。此外，有些科学实验要求建立人工气候室以模拟高温、高湿、低温、低湿及高空环境。这类宇宙空间特殊环境的创造和控制，对军事和宇航事业的发展具有重要作用。

在建筑工业中，用冻土法挖掘土方。在挖掘矿井、隧道，或在泥沼、砂水处掘进时，可采用冻土法使工作面不坍塌，保证施工安全。混凝土加冰搅拌也已经普遍采用。三峡工程大坝混凝土预冷系统就是采用综合措施，在胶带上淋冷水冷却骨料，然后用冷风机风冷，再加片冰拌和混凝土。这是为防止坝体混凝土出现危害性的温度裂缝所必须采取的措施，这些大坝工程需要大冷量的制冷机和片冰机。

在农业方面，对农作物种子进行低温处理，人工配种时牲畜良种精液的低温保存，模拟阳光的日光型植物生长箱育秧等均需要制冷技术。

在医药卫生部门的冷冻手术，如心脏、外科、肿瘤、白内障、扁桃腺的切除手术，皮肤和眼球的移植手术及低温麻醉等，均需要制冷技术。医药工业中，还利用真空冷冻干燥技术

保存如疫苗、菌种、毒种、血液制品等热敏性物质，以及制作各种动植物标本，低温干燥保存用于动物异种移植或同种移植的皮层、角膜、骨骼、主动脉、心瓣膜等组织。

此外，在微电子技术、光纤通信、能源、新型原材料、宇宙开发、生物工程技术这些尖端科学领域中，制冷技术也有重要的应用。

下面简单地介绍制冷技术的发展历史。

人类最早是将冬季自然界的天然冰雪，保存到夏季使用。这在我国、埃及和希腊等文化发展较早的国家的历史上都有记载。如《诗经》中就有“凿冰冲冲、纳于凌阴”的诗句，反映了当时人们贮藏天然冰的情况。《周礼》中有“凌人夏颁冰掌事”的记载。可见我国的采冰、贮冰技术早已采用。魏国曹植所写的《大暑赋》中亦有这样的诗句：“积素冰于幽馆，气飞积而为霜”。说明当时已懂得用冰作空调之用了。

西方最早来中国考察的意大利人马可·波罗，在他的《马可·波罗游记》一书中，对中国的制冰和建冰窖的方法有详细记述。

古代的埃及和希腊很早就有利用冰的记载。埃及人将清水存于浅盘中，天冷通风时，由于蒸发吸热，使盘内剩余水结冰。这是较早的人工造冰。

以上列举的只是古代人对天然冰的收藏、利用和简单的人工制冰，还谈不上制冷技术。机械制冷技术是随着工业革命而开始的。1755年爱丁堡的化学教授库仑（William Cullen）利用乙醚蒸发使水结冰。他的学生布拉克（Black）从本质上解释了融化和汽化现象，导出了潜热的概念，并发明了冰量热器，标志了现代制冷技术的开始。

1834年在伦敦工作的美国发明家波尔金斯（Jacob Perkins）正式呈递了乙醚在封闭循环中膨胀制冷的英国专利申请（No. 6662）。这是蒸汽压缩式制冷机的雏型。

空气制冷机的发明比蒸汽压缩式制冷机稍晚。1844年美国人戈里（John Gorrie）介绍了他发明的空气制冷机，这是世界上第一台制冷和空调用的空气制冷机。

1859年法国卡列（Ferdinand Carré）设计制造了第一台氨吸收式制冷机。

在各种型式的制冷机中，压缩式制冷机发展较快。从1872年美国人波义耳（Boyle）发明了氨压缩机，1874年德国人林德（Linde）建造第一台氨制冷机后，氨压缩式制冷机在工业上获得了较普遍的使用。随着制冷机型式的不断发展，制冷剂的种类也逐渐增多，从早期的空气、二氧化碳、乙醚到氯甲烷、二氧化硫、氨等。1929年随着氟利昂制冷剂的出现，使得压缩式制冷机发展更快，并且在应用方面超过了氨制冷机。随后，于20世纪50年代开始使用了共沸混合制冷剂，20世纪60年代又开始应用非共沸混合制冷剂。直至20世纪80年代关于淘汰消耗臭氧层物质CFC问题正式被公认以前，以各种卤代烃为主的制冷剂的发展几乎已达到相当完善的地步。

CFC问题的出现及其替代技术的发展，使制冷剂又进入一个以HFC为主体和向天然制冷剂发展的新的历史阶段。

20世纪制冷技术的发展还在于制冷范围的扩大，机器的种类和型式的增多，设备规模亦不断扩大。计算机技术的发展，亦推动了制冷技术的蓬勃发展，尤其是动态仿真优化、辅助设计、辅助测试、自动控制、集成制造和生产工艺管理等方面计算机技术的应用。此外，家用电冰箱和空调器等家用电器的绿色化、智能化、网络化、信息化等等，这一切都预示着制冷技术更加美好的未来。

我国制冷机制造业是在20世纪50年代末期才发展起来的。从20世纪50年代的仿制开

始到 20 世纪 60 年代自行设计制造,并制订了有关产品系列和标准。以后又陆续发展了多种型式制冷机。目前制冷空调行业已具有品种比较齐全的大、中、小型制冷空调产品系列,产品质量、性能、技术水平较过去有很大的提高,并形成有一定基础的科研、教学、设计和生产体系,正在缩小与国外先进水平的差距。

随着我国加入世界贸易组织,国际国内市场的竞争日趋平等和激烈,从整体而言,这将会对我国经济发展起推动作用。对于电冰箱、家用空调器、溴化锂吸收式冷(热)水机组等在国内外市场已形成一定的竞争力。许多有自己特色的制冷空调产品的综合技术指标达到世界先进水平,并逐步进入国际市场,受到国外用户的青睐。另外行业内与国际知名企业或跨国公司进行合资、合作的企业近百家,产品包括部分制冷压缩机、冷水机组、冷冻冷藏设备等。其产品的先进性和价格均具市场竞争能力,一般不会受很大冲击。但是与跨国知名公司及其产品相比,我们在许多方面仍存在较大差距。例如,国内具有相当知名品牌和企业与国际跨国知名公司相比,无论是资本实力、生产规模、营销网络及方式,产品研究开发能力,还是品牌知名度与信誉度都有相当大的差距。制冷压缩机的研究开发和生产能力,制冷空调系统控制、智能化、网络化运行等亦存在较大差距,不具备竞争能力。我国虽已发展成为制冷空调产品的生产大国,但还不是制冷空调产品的强国。面对我国即将加入世贸组织的到来,国家大规模的现代化建设,特别是基础设施建设和农业的产品结构调整及推进城市化进程等改革措施都将会给我国制冷空调行业发展迎来新的机遇。目前国家投入巨资对机场、地铁、铁路、高速公路的建设将会带动大型空调机组、列车空调、冷藏运输车辆等产品的生产和促进我国冷藏链建设;加大农业投入,加速农业产业结构调整,将使谷物冷却机,粮食种子库的建设,蔬菜、水果、养殖加工业的发展和花卉业的兴起等,都将会导致冷冻,冷藏,气调储存设备产品的需求旺盛。国家这些政策的实施,亦为从事制冷空调业的设计、监理、咨询等服务业带来项目支持等。随着我国加入世贸组织,门户将进一步开放,国外企业和资本的进入肯定会加速,竞争和挑战将会加剧,我国制冷空调行业仍面临着降低关税、开放服务贸易、管理方式和企业发展战略转变的影响,因此我们应充分利用世贸组织协定允许的过渡期,进行结构调整形成规模经济,注重科技形成自己的开发能力,提高制冷空调产品的整体水平,以增强国际竞争力。可以预言,21 世纪我国制冷空调行业将会更飞速地发展。

第一章 制冷的热力学基础

在绪论中已经讨论了制冷机、热泵和制冷制热同时进行的联合机器。从热力学的角度考虑,尽管制冷机、热泵和联合机工作的温度区间不同,但它们的基本原理是一样的,即利用某种物质状态变化,从较低温度的热源吸取一定的热量 (Q_c 或 Q_a),通过一个消耗功 W (或热量) 的补偿过程,向较高温度的热源放出热量 (Q_k 或 Q_h)。根据热力学第一定律,向高温热源的放热量应等于从低温热源吸取的热量与所消耗的功之和,即对于:

$$\left. \begin{array}{l} \text{制冷机} \\ \text{热 泵} \\ \text{联合机} \end{array} \right\} \begin{array}{l} Q_c + W = Q_k \\ Q_a + W = Q_h \\ Q_c + W = Q_h \end{array} \quad (1-1)$$

为了实现上述能量转换,首先必须有使制冷机能达到比低温热源更低温度的过程,并连续不断地从被冷却物体吸取热量。在制冷技术范围内,实现这一过程有下述几种基本方法:

(1) 相变制冷:利用液体在低温下的蒸发过程或固体在低温下的融化或升华过程从被冷却物体吸取热量以制取冷量。

(2) 气体绝热膨胀制冷:高压气体经绝热膨胀即可达到较低的温度,令低压气体复热即可制取冷量。

(3) 气体涡流制冷:高压气体经涡流管膨胀后即可分离为热、冷两股气流,利用冷气流的复热过程即可制冷。

(4) 热电制冷:令直流电通过半导体热电堆,即可在一端产生冷效应,在另一端产生热效应。

在这一章中只阐述相变制冷及气体绝热膨胀制冷,其他制冷方法将在第五章中讲述。

第一节 相 变 制 冷

一、物质的相变特性

(一) 液体气化

物质从液态变为气态的过程称为气化。任何液体气化时都要吸收热量。在定压下,单位质量液体气化时所吸收的热量称为气化热 r (单位为 J/kg)。

$$r = h'' - h' = T(s'' - s') \quad (1-2)$$

式中, h 为比焓,单位为 J/kg ; s 为比熵,单位为 $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; 上角'表示液态;上角''表示气态。

对于任何一种液体,气化热是随其气化时的压力变化而变化的,气化热随着压力的升高而降低,在临界压力时,气化热为零;而在相同压力下,不同的液体其气化热是不相同的。

在制冷机的工作过程中,在低温下蒸发的制冷剂液体一般都是令高压液体经节流降压而得到的。较高压力的饱和液体节流降压后即进入两相区,并闪发出一定的饱和蒸气。对于

1kg 制冷剂, 若用 x 表示闪发后的干度, 则当其余液体全部转变为饱和蒸气时吸收的热量为

$$q_0 = r(1 - x) \quad (1-3)$$

q_0 称为单位质量制冷量, 简称单位制冷量。分析式 (1-3) 可知, 单位制冷量不仅与制冷剂的气化热有关, 还随节流后的干度而变。制冷剂液体在节流膨胀前后压力变化范围越大, 则节流过程中闪发的气体越多, 因而单位制冷量就越小。

(二) 固体的融化与升华

在制冷技术中常应用纯水冰或溶液冰的融化及干冰 (固体二氧化碳) 的升华过程来制冷。除干冰可以由高压液体二氧化碳用降压法得到外, 纯水冰和溶液冰都需用制冷机制备。无论纯水冰、干冰或溶液冰, 因不具备流动性, 所以都不能利用它们的融化或升华过程来组成制冷机的循环。

天然冰的来源是有限的, 现代制冷技术中大量应用的纯水冰都来源于人工制冰厂。纯水冰的融化温度为 0°C 。所以, 利用纯水冰融化只能使被冷却的物体保持 0°C 以上的温度。1kg 纯水冰在 0°C 融化成同温度的水时, 可以吸收 335kJ 的热量。

在水的三相点温度以下, 冰可以直接升华为水蒸气, 冰升华时的温度与相应的压力有关。表 1-1 列出了升华压力和升华温度之间的关系。

表 1-1 冰的升华压力和对应的升华温度

温度/ $^\circ\text{C}$	0	-25	-50	-75
升华压力/kPa	0.61	63×10^{-3}	3.87×10^{-3}	0.116×10^{-3}

应用冰和盐混合物的融化过程可以达到 0°C 以下的低温。冰盐冷却的物理过程如下: 首先是冰吸热而融化, 即在冰的表面上蒙了一层水膜, 此时的温度为 0°C 。接着盐便溶解于水膜中, 吸收一定的溶解热, 因而使温度降低。此后, 冰在较低的温度下融化, 热交换是通过冰块表面上的盐水膜进行。当冰全部融化、盐全部溶解后, 便形成具有一定浓度的盐水溶液。冰盐冷却所能达到的温度与盐的种类以及溶液的浓度有关, 见表 1-2。

表 1-2 冰盐混合时的温度

混合物的组成	盐或酸的质量分数	混合后的最低温度/ $^\circ\text{C}$	混合物的组成	盐或酸的质量分数	混合后的最低温度/ $^\circ\text{C}$
水和盐			NaNO_3	0.371	-18.5
NH_4Cl	0.231	-5.1	NaCl	0.248	-21.2
NaNO_3	0.429	-5.3	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.444	-21.5
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.524	-8.0	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.556	-40.3
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.714	-12.4	$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.588	-55
NH_4NO_3	0.375	-13.6	雪或碎冰与双盐混合物		
NH_4SCN	0.571	-18.0	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + \text{K}_2\text{SO}_4$	0.112 + 0.084	-3.1
KSCN	0.600	-23.7	$\text{KCl} + \text{KNO}_3$	0.190 + 0.035	-11.8
雪或碎冰和盐			$\text{KCl} + \text{NH}_4\text{Cl}$	0.091 + 0.148	-18.0
$\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.291	-9.0	$\text{Na}_2\text{NO}_3 + \text{KNO}_3$	0.359 + 0.062	-19.4
CaCl_2	0.231	-11.0	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O} + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0.054 + 0.386	-20.0
KCl	0.281	-11.0	$\text{NH}_4\text{Cl} + \text{NH}_4\text{NO}_3$	0.115 + 0.270	-22.5
NH_4Cl	0.200	-15.8	$\text{NH}_4\text{Cl} + (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	0.074 + 0.311	-22.5
NH_4NO_3	0.375	-17.3	$\text{KNO}_3 + \text{NH}_4\text{NO}_3$	0.049 + 0.404	-25.0

溶液冰是指由共晶溶液冻结成的冰，也称共晶冰。将共晶溶液充灌在密封容器里，并将它冻结成固体，即得到溶液冰。然后把这种容器移到需要冷却的地方，依靠吸收热量使共晶固体融化，就可使冷却对象降温。在共晶固体未完全融化成液体之前，它的温度是不变的，称为共晶温度。共晶温度低于0℃的共晶冰，通常应用于无机械制冷的冷藏汽车中。共晶温度高于0℃的共晶冰，通常作为储能空调系统的储能介质。

表 1-3 列出了一些用于制冷目的的共晶溶液的物理性质。

表 1-3 一些共晶溶液的物理性质

共晶溶液种类	盐在水溶液中的质量分数	冻结温度 /℃	密度 / (kg·m ⁻³)	比热容 / [kJ·(kg·K) ⁻¹]		融化热 /kJ·kg ⁻¹	共晶溶液在冻结时的体积膨胀率 (%)
				溶液	共晶冰		
ZnSO ₄ 和 H ₂ O	0.272	-6.5	1.249 × 10 ³	3.127	1.574	213.1	6.8
BaCl ₂ 和 H ₂ O	0.225	-7.8	1.239 × 10 ³	3.345	1.637	246.6	7.9
Na ₂ S ₂ O ₃ 和 H ₂ O	0.300	-11.0	1.312 × 10 ³	3.182	1.536	186.3	5.2
NH ₄ Cl 和 H ₂ O	0.193	-11.1	1.148 × 10 ³	3.307	1.729	301.0	8.1
NH ₄ NO ₃ 和 H ₂ O	0.412	-17.35	1.188 × 10 ³	2.972	1.557	286.3	5.8
NaNO ₃ 和 H ₂ O	0.370	-18.5	1.29 × 10 ³	3.059	1.565	215.6	5.6
NaCl 和 H ₂ O	0.224	-21.2	1.17 × 10 ³	3.336	2.005	236.1	7.9
K ₂ SO ₄ + KNO ₃ 和 H ₂ O	0.045 + 0.08	-3.8	1.093 × 10 ³	3.935	1.833	319.8	8.1
KCl + KNO ₃ 和 H ₂ O	0.19 + 0.035	-11.8	1.15 × 10 ³	3.182	1.666	265.8	7.7
NaNO ₃ + KNO ₃ 和 H ₂ O	0.359 + 0.062	-19.4	1.34 × 10 ³	3.014	—	217.9	6.1

干冰是固体二氧化碳的习惯叫法。干冰升华时需要吸收升华热，故可用来制冷。

干冰的三相点参数为：温度 $t_{tr} = -56.6^{\circ}\text{C}$ ，压力 $p_{tr} = 5.2 \times 10^2 \text{ kPa}$ 。在大气压下，干冰的升华热为 573.6 kJ/kg，升华温度为 -78.5°C 。

常压下干冰受热时直接升华为二氧化碳，它对食品无害，因此可用来冷却和保存食物，并且可直接与食物接触。

二、压—焓图

相变制冷是利用制冷剂的状态变化实现的。制冷剂在不同状态时具有不同的特性。制冷剂的特性可用表格、函数公式或曲线图来表示。一些制冷设计手册（例如：ASHRAE Handbook, Fundamentals）都会给出常用制冷剂的热力性质表。随着计算机技术的迅速发展，函数公式的用途越来越大，在本书第二章中将详细介绍利用计算机和函数公式来求得制冷剂特性数据的方法。

制冷剂性质曲线图有多种形式，但在制冷行业中用处最大、用得最多的一种叫做压—焓（ $p-h$ ）图。压—焓图的纵坐标表示压力，横坐标表示比焓值。通常纵坐标都以对数坐标表示，因此压—焓图也叫 $\lg p-h$ 图。附录 D 给出了一些常用制冷剂的压—焓图。压—焓图的基本构造线图如图 1-1 所示。

图中的拱状曲线代表制冷剂所有的饱和液体和饱和蒸气的状态，曲线上的最高点为临界点，它是饱和蒸气和饱和液体的分界点，在它左面的曲线为饱和液体线，在它右

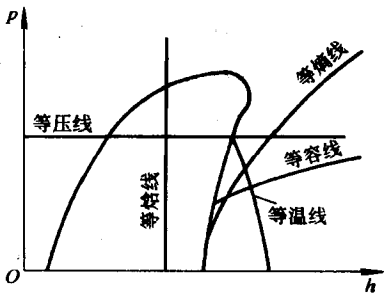


图 1-1 压—焓图

面的曲线为饱和蒸气线。拱状线内的区域为两相区，饱和液体线左边的区域为过冷液体区，饱和蒸气线右边为过热蒸气区，临界点以上为超临界区。

在压—焓图上，等压线和等比焓线是最简单的，分别为水平线和垂直线。纯物质的等温线在两相区为水平线，在过冷液体区为略向左上方延伸的上凹曲线，非常接近于垂直线。这是因为压力对过冷液体比焓值的影响很小的缘故。有些图在该区域没有标出等温线，这时就用垂直线代替，不会导致很大的误差。在过热蒸气区，等温线是向右下方延伸的下凹曲线。温度较高的等温线在压力较低时也接近于垂直线，这是因为此时的制冷剂气体已接近于理想气体，因而比焓值与压力无关。在过热蒸气区，等比体积线和等比熵线都是向右上方延伸的下凹曲线，但等比熵线的斜率比等比体积线大。各种等值特性线已经在图 1-1 中给出。

利用压—焓图查取热力学参数是很方便的。

例 1-1 制冷剂 R134a 在压力为 0.3MPa 和比体积为 $0.08\text{m}^3/\text{kg}$ 时，其温度和比焓值为多少？

解 应用附图 D-5 中 R134a 的压—焓图，状态点位于等压线和等容线的交点，由此可查出

$$t = 38^\circ\text{C}$$

$$h = 432\text{kJ/kg}$$

我们还可以利用压—焓图来表示液体气化制冷的全过程以及压缩蒸气制冷循环，有关这一内容将在第三章中作详细介绍。

第二节 绝热膨胀制冷

气体制冷机是利用高压气体的绝热膨胀以达到低温，并利用膨胀后的气体在低压下的复热过程来制冷。气体绝热膨胀的特性随所使用的设备而变，一般有三种方式。一种方式是令高压气体经膨胀机（活塞式或透平式）膨胀，此时有外功输出，因而气体的温降大，复热时制冷量也大；但要用膨胀机，系统结构比较复杂。在一般的气体制冷机中均采用这一膨胀方式。第二种方式是令气体经节流阀膨胀（通常称为节流），此时无外功输出，气体的温降小，制冷量也小，但系统结构比较简单，也便于进行气体流量的调节。值得指出的是，一些气体在某些状态时节流后并不一定降温，因此，在进入节流膨胀阀之前气体的温度一定要处在该气体节流后能降温的状态。还有一种方式是绝热放气制冷，这种制冷方式在低温制冷机中大量使用，在普通制冷中很少使用，这里不予讨论。

一、有外功输出的膨胀过程

当气体实现有外功输出的绝热膨胀时，最理想的情况是可逆的绝热膨胀，即等熵膨胀。等熵膨胀中温度随微小压力变化而变化的关系可用下式表示：

$$\alpha_s = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_s = \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad (1-4)$$

α_s 称为微分等熵效应。对于理想气体， $\left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p = \frac{R}{p}$ ，故：

$$\alpha_{s, \text{id}} = \frac{k-1}{k} \frac{T}{p} \quad (1-5)$$

膨胀过程的全部温降称为积分等熵效应:

$$\Delta T = \int_{p_1}^{p_2} a_s dp$$

对于理想气体经过演算以后可得:

$$\Delta T = T_1 - T_2 = T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (1-6)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \quad (1-7)$$

在实际膨胀过程中, 由于过程的不可逆, 因此总是按多变过程膨胀。这时, 理想气体的积分等熵效应由下式确定:

$$\Delta T = T_1 - T_2 = T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} \right] \quad (1-8)$$

式中, m 为多变指数。

二、节流膨胀过程

在节流膨胀过程中没有外功的输出。如果在节流过程中气体与环境之间没有热量交换, 则节流前后的比焓值保持不变。因此, 如果在进入节流膨胀阀之前气体的温度处在该气体节流后能降温的状态, 节流过程也只是一个降温而不制冷的过程; 而且节流时有摩擦损失, 是一个不可逆过程, 其结果将导致熵的增加。

理想气体的内能 u 和 pv 值仅是温度的函数。因此, 理想气体节流时, $\Delta u = 0$, $\Delta h = 0$, $\Delta T = 0$, 这说明理想气体的节流过程前后比焓和温度均不变。

实际气体的内能不仅与温度有关, 而且还与压力有关, 节流后的温度 T_2 可大于、等于或小于节流前的温度 T_1 。实际气体节流膨胀时, 温度随微小压力变化而变化的关系可用下式表示:

$$a_h = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \quad (1-9)$$

a_h 称为微分节流效应, 或称焦耳-汤姆逊效应, 简称焦-汤效应。由 a_h 可求出积分节流效应为:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \int_{p_1}^{p_2} \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h dp = \int_{p_1}^{p_2} a_h dp \quad (1-10)$$

微分节流效应也可表示成下式:

$$a_h = \frac{T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v}{c_p} \quad (1-11)$$

由式 (1-11) 可知, 微分节流效应的符号取决于 $T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p$ 与 v 的差值, 而此一差值与气体的种类及所处的状态有关。

纯物质在饱和区域内, 在相同的压降下具有相同的温差 ΔT , 因此:

$$a_s = a_h = \frac{dT}{dp} \quad (1-12)$$

它可以按照克拉贝隆-克劳修斯方程式计算求得:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_s = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h = \frac{T}{r} (v'' - v') \quad (1-13)$$

第三节 制冷热力学特性分析

在热力学里, 循环可分为正向循环和逆向循环两种。动力循环, 即把热量转化成机械功的循环, 是正循环。所有的热力发动机都是按正向循环工作的。在温—熵图或压—焓图上, 循环的各个过程都是依次按顺时针方向变化的。

逆向循环是一种消耗功的循环。所有的制冷机和热泵都是按逆向循环工作的。在温—熵图或压—焓图上, 循环的各个过程都是依次按逆时针方向变化的。

循环又可以分为可逆循环和不可逆循环两种。在构成循环的各个过程中, 只要包含有不可逆过程, 则这个循环就是不可逆循环。在制冷循环里, 各种形式的不可逆过程可分成两类: 内部不可逆和外部不可逆。制冷剂在其流动或状态变化过程中因摩擦、扰动及内部不平衡而引起的损失, 都属于内部不可逆; 蒸发器、冷凝器及其他换热器中有温差时的传热损失, 属于外部不可逆。

研究逆向可逆循环的目的, 是要寻找热力学上最完善的制冷循环, 作为评价实际循环效率高低的标准。

一、热源温度不变时的逆向可逆循环——逆卡诺循环

当高温热源和低温热源的温度不变时, 具有两个可逆的等温过程和两个等熵过程的逆向循环, 称为逆卡诺循环。在相同温度范围内, 它是消耗功最小的循环, 即效率最高的制冷循环, 因为它没有任何不可逆损失。

图 1-2 为一般逆卡诺循环的 T - s 图。1-2 为等熵压缩过程, 3-4 是等熵膨胀过程。2-3 是等温放热过程, 4-1 是等温吸热过程。高温热源 (例如环境介质) 的温度为 T , 低温热源 (即被冷却对象) 的温度为 T_0 , 它们分别等于制冷剂放热时的温度 T_k 和吸热时的温度 T_0 。

现在对图中的循环 1-2-3-4-1 进行分析。制冷剂向高温热源放出的热量为:

$$q = T (s_1 - s_4) \quad (1-14)$$

在 T - s 图上以面积 2-3-5-6-2 表示。在 1-4 过程中, 制冷剂从被冷却对象所吸取的热量 (称为制冷量) 为:

$$q_0 = T_0 (s_1 - s_4) \quad (1-15)$$

循环所消耗的功 w_0 等于压缩过程 (1-2 和 2-3) 所消耗的功与膨胀过程 (3-4 和 4-1) 所获得的功之差

$$w_0 = (T - T_0) (s_1 - s_4) \quad (1-16)$$

在 T - s 图上以面积 1-2-3-4-1 表示。

消耗单位功所获得的制冷量的值 (用相同的能量单位), 称为制冷系数, 即:

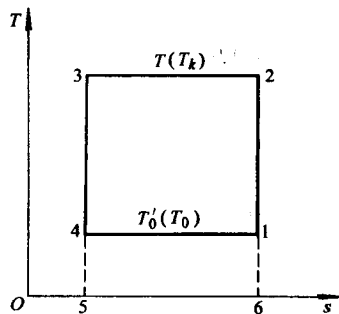


图 1-2 逆卡诺循环在 T - s 图上的表示

$$\epsilon_0 = \frac{q_0}{w_0} \quad (1-17)$$

将式 (1-15)、式 (1-16) 代入式 (1-17)，得逆卡诺循环的制冷系数为：

$$\epsilon_0 = \frac{T'_0}{T - T'_0} = \frac{1}{\frac{T}{T'_0} - 1} \quad (1-18)$$

从上式可以看出，逆卡诺循环的制冷系数与 T'_0 成正比，与 $T - T'_0$ 成反比，当 T 与 T'_0 越接近， ϵ_0 的值迅速上升，即只用少量的功就可以把较多的热量从低温热源转移到高温热源。在一定的高温热源和低温热源下它是一定值。也就是说，逆卡诺循环的制冷系数只与高温热源和低温热源的温度有关，而与制冷剂的性质无关。

由式 (1-18) 可得：

$$\frac{\partial \epsilon_0}{\partial T'_0} = \frac{T}{(T - T'_0)^2} \quad (1-19)$$

$$\frac{\partial \epsilon_0}{\partial T} = -\frac{T'_0}{(T - T'_0)^2}$$

故：

$$\left| \frac{\partial \epsilon_0}{\partial T'_0} \right| > \left| \frac{\partial \epsilon_0}{\partial T} \right| \quad (1-20)$$

由此可知， T 升高和 T'_0 降低都将导致逆卡诺循环制冷系数的降低，而 T'_0 降低影响的程度更为显著，这意味着要实现温度较低的制冷具有更高的难度。

现在，让我们再分析一下具有传热温差（外部不可逆）的循环，如图 1-3 所示。图中高温热源温度为 T ，制冷剂向高温热源放热时的温度为 T_k ；低温热源的温度为 T'_0 ，制冷剂向低温热源吸热时的温度为 T_0 。很显然，如果 $1'-2'$ 和 $3'-4'$ 是可逆过程的话，则 $1'-2'-3'-4'$ 的制冷系数为：

$$\epsilon = \frac{T_0}{T_k - T_0} \quad (1-21)$$

它将小于按式 (1-18) 计算的 ϵ_0 。

事实上，任何一个不可逆循环的制冷系数，总是小于相同热源温度时的逆卡诺循环的制冷系数。而一切实际的制冷循环都是不可逆循环，因此，一切实际循环的制冷系数 ϵ 总是小于相同热源时的逆卡诺循环的制冷系数 ϵ_0 。

热力完善度 η 的定义为：

$$\eta = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (1-22)$$

式中， ϵ 为实际制冷循环的制冷系数， ϵ_0 为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随高温热源和低温热源的温度不同以及过程的不可逆程度而变化，其值可以大于 1，或小于等于 1。而热力完善度是表示实际循环的完善性接近逆卡诺循环的程度。热力完善度的数值恒小于 1。

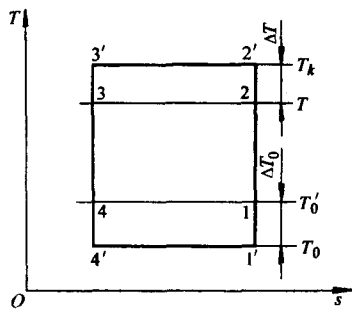


图 1-3 有温差传热的不可逆制冷循环

二、变温热源时的逆向可逆循环——洛伦兹循环

制冷机在实际工作中，被冷却对象的温度和环境介质的温度往往是随着热交换过程的进行而变化的。例如，水在逆流式换热器中被冷却，随着冷却过程的进行，水的温度是逐渐降低的。

在这种热源温度变化的情况下，逆向可逆循环将是怎样呢？这需要具体分析。

图 1-4 表示了高温热源和低温热源温度是变化的情况。在这种情况下如果要运用一个由两个等熵和两个等温过程组成的制冷循环，则制冷剂向高温热源的放热过程应是 $b-g$ ，它的温度等于热源温度 T_b 至 T_c 之间的最高温度 T_b ；制冷剂在蒸发过程中向被冷却物体吸热时的温度应该是 T_d ，它等于被冷却物体温度由 T_d 至 T_a 之间的最低温度 T_d 。点 e 的位置根据表示制冷量的面积 $e-d-d'-e'-e$ 等于 $a-d-d'-a'-a$ 而定。这个循环为了获得面积为 $e-d-d'-e'-e$ 的制冷量，需要消耗面积为 $f-g-d-e-f$ 的功。

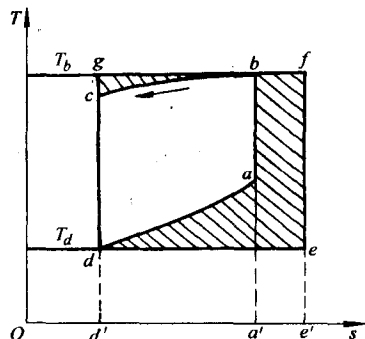


图 1-4 变温热源时的逆向可逆循环

如果我们使制冷机按可逆循环 $b-c-d-a-b$ 工作，则它在制取面积为 $a-d-d'-a'-a$ 的冷量时，只需要消耗面积为 $b-c-d-a-b$ 的功。显然，可逆的逆向循环 $b-c-d-a-b$ 是消耗功最小的循环，称为洛伦兹循环，它在制取相同的冷量时，比由两个等熵和两个等温过程组成的制冷循环 $f-g-d-e-f$ 少消耗的功，在图 1-4 中用阴影面积表示。

因此，我们可以得出这样的结论：在热源温度变化的条件下，由两个和热源之间无温差的热交换过程及两个等熵过程所组成的逆向可逆循环，是消耗功最小的循环，即制冷系数最高的循环。

在热源温度变化时，制冷循环的热力完善度可以表示成：

$$\eta = \frac{\epsilon}{\epsilon_L} \quad (1-23)$$

式中， ϵ 是实际循环的制冷系数， ϵ_L 是制冷剂与热源之间不存在温差的并有两个等熵过程所组成的逆向可逆循环，即洛伦兹循环的制冷系数。

洛伦兹循环可以被分解成许多个微元循环来计算其制冷系数。如图 1-5 所示，每个微元循环可以看作逆卡诺循环，其制冷系数为：

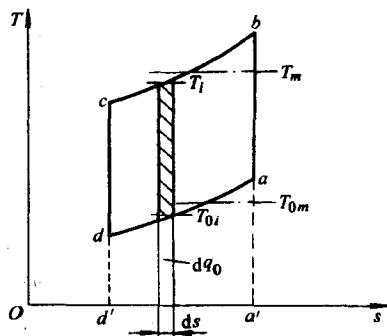


图 1-5 用微元循环来分析洛伦兹循环

$$\epsilon_i = \frac{dq_0}{dq_k - dq_0} = \frac{T_{0i} ds}{T_i ds - T_{0i} ds} = \frac{T_{0i}}{T_i - T_{0i}} \quad (1-24)$$

而整个制冷循环 $a-b-c-d-e$ 的制冷系数可表示为：

$$\epsilon_i = \frac{q_0}{q_k - q_0} = \frac{\int_d^a T_{0i} ds}{\int_c^b T_i ds - \int_d^a T_{0i} ds} = \frac{T_{0m}}{T_m - T_{0m}} \quad (1-25)$$