



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

制冷原理 与装置

第2版

郑贤德 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

制冷原理与装置

第2版

主编 郑贤德

参编 陈光明 丁国良 何国庚

主审 华泽钊 林秀诚



机械工业出版社

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是高等学校“制冷与低温技术”专业方向主干课教材之一,是在2001年出版的第1版基础上修订而成的。

本书以压缩式蒸气制冷机为主,着重阐述压缩式蒸气制冷机的工作原理、制冷剂的热物理性质、制冷循环的特性分析与计算机计算,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及特性分析、制冷装置的设计计算与优化、制冷空调装置的冷热源选择及制冷装置的节能等。

本书除作为热能与动力工程和建筑环境与设备工程专业教材外,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. —2版. —北京:机械工业出版社, 2008.3 (2011.6重印)

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-07925-5

I. 制… II. 郑… III. ①制冷—理论—高等学校—教材②制冷装置—高等学校—教材 IV. TB61 TB657

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第017982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:蔡开颖 责任校对:陈延翔

封面设计:张静 责任印制:乔宇

北京机工印刷厂印刷(三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2011年6月第2版第3次印刷

184mm×260mm·22印张·541千字

标准书号:ISBN 978-7-111-07925-5

定价:39.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010)88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010)68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010)88379649

读者购书热线:(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

制冷原理与装置 第2版

信息反馈表

尊敬的老师：

您好！感谢您多年来对机械工业出版社的支持和厚爱！为了进一步提高我社教材的出版质量，更好地为我国高等教育发展服务，欢迎您对我社的教材多提宝贵意见和建议。另外，如果您在教学中选用了本书，欢迎您对本书提出修改建议和意见。

本书配有电子课件，向本书授课教师免费提供，需要者可登录我社教材服务网（www.cmpedu.com）下载。

一、基本信息

姓名：_____ 性别：_____ 职称：_____ 职务：_____
邮编：_____ 地址：_____
任教课程：_____ 电话：_____—_____（H）_____（O）
电子邮件：_____ 手机：_____

二、您对本书的意见和建议

（欢迎您指出本书的疏误之处）

三、对我们的其他意见和建议

请与我们联系：

100037 北京百万庄大街22号·机械工业出版社·高等教育分社 蔡编辑 收

Tel: 010—8837 9713（O），6899 4030（Fax）

E-mail: cky@mail.machineinfo.gov.cn

第2版前言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，是在2001年出版的普通高等教育机电类规划教材《制冷原理与装置》基础上修订而成的。

本书根据第1版教材多年来的教学经验和读者意见以及近几年国内外制冷技术的发展，对原书有关章节内容作了相应的调整与增删。增加了近几年国内外制冷技术发展较快的内容，如替代制冷剂实用化以及相关制冷剂的热物性图表、二氧化碳跨临界循环、新型换热器以及吸收式制冷机溶液循环热力特性等。本书在制冷装置部分的第七章增加了为实现节能目的的冷冻冷藏用典型制冷自控系统，第八章的制冷装置的设计计算与优化更加实用化，第九章删去了老式干冰装置等内容，增加了燃气发动机热泵、水源热泵、多联热泵以及跨临界二氧化碳汽车空调系统。此外，从节能技术观点充实了第十章制冷空调装置的冷热源选择及制冷装置的节能内容，删去了第1版教材中的第十一章（制冷装置的安装与调试），并对附录中有关表面传热系数计算准则式的内容进行了增删。本书保持了第1版教材的体系，内容包括制冷原理、制冷设备与制冷装置三部分，形成了一套完整的制冷技术知识体系，有利于学生系统、全面而又循序渐进地学习、掌握，以启发学生的创新思维。

本书由郑贤德教授主编。全书共十章，参加各章节修订的成员为：华中科技大学郑贤德教授（绪论、部分第七章、部分第九章、第十章），浙江大学陈光明教授（第一、二、三章，附录A、B），华中科技大学何国庚教授（第四、五、六章及附录C、D），上海交通大学丁国良教授（部分第七章、第八章、部分第九章）。

本书由上海理工大学华泽钊教授、华中科技大学林秀诚教授主审，上海理工大学的张华教授、刘宝林教授对本书提出了许多宝贵意见，在此向他们表示诚挚的谢意。

由于水平和时间的限制，书中不足之处，恳望读者指正。

编者

第1版前言

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

目 录

第2版前言

第1版前言

绪论 1

第一章 制冷的热力学基础 5

第一节 相变制冷 5

第二节 绝热膨胀制冷 8

第三节 制冷热力学特性分析 10

第二章 制冷剂、载冷剂及润滑油 16

第一节 制冷剂概述 16

第二节 制冷剂的热物性参数及其计算方法 21

第三节 制冷剂的物理化学性质及其应用 26

第四节 常用制冷剂 30

第五节 载冷剂 36

第六节 润滑油 38

第三章 单级压缩蒸气制冷循环 42

第一节 单级压缩蒸气制冷机的理论循环 42

第二节 单级压缩蒸气制冷实际循环 54

第三节 单级压缩蒸气制冷循环性能的计算机计算 59

第四节 单级压缩蒸气制冷循环的特性分析 60

第五节 制冷循环的热力学第二定律分析 65

第四章 两级压缩和复叠制冷循环 72

第一节 概述 72

第二节 两级压缩制冷循环及热力计算 73

第三节 两级压缩制冷循环运行特性分析 82

第四节 复叠式制冷循环 86

第五章 吸收式制冷循环及其他制冷

方法 92

第一节 吸收式制冷机的基本原理与工质 92

第二节 吸收式制冷机溶液循环的热力特性 95

第三节 溴化锂吸收式制冷机的工作循环与热工计算 97

第四节 氨水吸收式制冷循环 106

第五节 压缩式气体制冷循环 111

第六节 气体涡流制冷 115

第七节 热电制冷 117

第八节 固体吸附制冷 122

第六章 制冷设备 126

第一节 概述 126

第二节 冷凝器 132

第三节 蒸发器 146

第四节 其他制冷换热器及辅助设备 162

第五节 新型制冷换热器及强化换热方法 169

第六节 制冷装置的节流机构 173

第七节 蒸气压缩式制冷装置的管路系统及隔热 182

第七章 制冷装置概述 194

第一节 制冷装置分类与应用 194

第二节 制冷装置的系统及冷却方式 195

第三节 典型制冷装置的自控系统 201

第八章 制冷装置的设计计算 209

第一节 制冷装置的设计原则 209

第二节 冷负荷的计算 210

第三节 制冷装置的特性分析 222

第四节 制冷空调装置仿真优化与计算机辅助设计 227

第九章 实用制冷装置	248	第二节 制冷装置的节能	304
第一节 食品冷冻、冷藏装置	248	附录	307
第二节 真空冷冻干燥装置	262	附录 A 常用制冷剂的饱和性质表	307
第三节 制冰装置	265	附录 B 常用制冷剂压—焓图	323
第四节 空调用制冷装置	268	附录 C 溴化锂水溶液的焓—含量图	333
第五节 试验用制冷装置	292	附录 D 制冷剂、载冷剂在不同条件下的表面 传热系数计算准则式	334
第十章 制冷空调装置的冷热源选择及 制冷装置的节能	297	参考文献	342
第一节 制冷空调装置的冷热源选择	297		

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。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在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，又能提高冷库容量，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降温、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也大，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达 -150°C 以下。

在核工业中，制冷技术用来控制核反应堆的反应速度，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试验室里进行试验。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，有些科学试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）从本质上解释了熔化和汽化现象，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珀金斯（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）。这是蒸气压缩式制冷机的雏形。

空气制冷机的发明比蒸气压缩式制冷机稍晚。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。

在各种形式的制冷机中，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。随着制冷机形式的不断发展，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。

由于CFC破坏大气臭氧层问题和全球温室效应的出现及其替代技术的发展，使制冷剂又进入了一个以HFC为主体和向天然制冷剂发展的新阶段。这是由于HFC对温室效应仍有较大的影响，欧洲一些科学家首先提出用自然物质作为替代物，例如 NH_3 、 CO_2 、碳氢化合物R290、R600a等。这些物质既不破坏大气臭氧层，又不产生温室效应。到目前为止还没有找到一种可用于替代的理想制冷剂，各种研究仍然在努力进行中。与此同时，以热能作为动力、以水作为制冷剂的吸收式制冷机得到了极大的发展，使燃气空调的用量日益增多，这既有利于环境保护，又有利于能源的综合利用。

20世纪制冷技术的发展还在于制冷范围的扩大，机器的种类和形式的增多，从小的家用电冰箱、空调器到大型冷库及大型建筑物空调，其设备规模扩大，国家颁布了制冷空调设

备的新的能效限定值和能源效率等级,加强了节能措施。计算机及自动控制技术的发展,亦推动了制冷技术的进步,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,随着家用电冰箱和空调器的绿色化、智能化、网络化、信息化等技术的应用,都预示着制冷技术更加美好的未来。

我国制冷机制造业是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60年代自行设计制造,并制定了比较系统的制冷空调产品系列和标准,以后又开发了各种形式的制冷空调产品。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及相关技术标准,并已经形成有一定基础的科研、教学、设计、生产制造和营销管理体系,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(WTO),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了世界先进水平,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,产品除电冰箱、空调器以外,还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有市场竞争能力,一般不会受很大冲击。但是与跨国知名公司及其产品相比,我国企业在许多方面仍存在较大差距。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。我国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,都将会给我国内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,使得谷物冷却机、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。

我国加入WTO后,“中国制造”已经成为国际分工体系的重要组成部分,受到世界瞩目。在经济全球化日益深化的背景下,“中国制造”不仅受到国内环境的影响,同时亦受到世界经济各种因素的影响,中国制冷空调制造业为中国工业进入国际竞争起了典范和启示作用,尤其是电冰箱和空调器等家电制造业,无论是总体产业规模还是技术水平和管理水平都有了很大的进步。我国的企业能开发不同技术性能要求的产品,能参与到国际标准化组织并能将一些标准引入我国的标准,目前,国家标准中有些指标甚至高于先进国家的标准。对于围绕环保问题欧盟提出的WEEE(Waste electrical and electronic equipment)废弃电子电器设备和ROHS(Restriction of the use of certain hazardous substances)限制有害物质的技术方案和检测手段,我国也能与国际进行同步研究。当然,欧盟,紧接着就是日本、美国的WEEE和ROHS指令对我国制冷空调尤其是家电商品出口会产生影响。这就要求我国的研究机构和企业,在产品设计时就考虑到不仅是性能、能耗等指标,还应从废旧制冷设备回收等环保角度考虑。然而要采用新材料、新技术就可能涉及新一轮的知识产权等非关税的贸易保护、技术壁垒。我国企业应该树立正确的环境保护意识和资源优化意识,提高制冷空调产品的整体水平,与世界先进的生产力、科学技术同步,以增强国际竞争力。可以预言,21世纪我国制冷空调事业将会更飞速地发展。

第一章 制冷的热力学基础

从热力学的角度考虑, 尽管各种制冷装置存在这样或那样的不同, 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, 通过一个消耗功(或热量)的补偿过程, 向较高温度的热源放出热量。

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熔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) 液体汽化

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

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

式中, h 为比焓 (J/kg); s 为比熵 [$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$]; 上标 “'” 表示液态; 上标 “''” 表示气态。

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

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

$$q_0 = r(1 - x) \quad (1-2)$$

式中, q_0 称为单位质量制冷量, 简称单位制冷量。

分析式 (1-2) 可知, 单位制冷量不仅与制冷剂的汽化热有关, 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) 固体的熔化与升华

在制冷技术中常应用纯水冰或溶液冰的熔化及干冰（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熔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。纯水冰的熔化温度为 0°C 。所以，利用纯水冰熔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 熔化成同温度的水时，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列出了冰的升华压力和对应的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熔化过程可以达到 0°C 以下的低温。冰盐冷却的物理过程如下：首先是冰吸热而熔化，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，冰在较低的温度下熔化，热交换是通过冰块表面上的盐水膜进行。当冰全部熔化、盐全部溶解后，便形成具有一定含量的盐水溶液。冰盐冷却所能达到的温度与盐的种类以及溶液的含量有关，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熔化，就可使冷却对象降温。在共晶固体未完全熔化成液体之前，它的温度是不变的，

称为共晶温度。共晶温度低于 0°C 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°C 的共晶冰,通常作为储能空调系统的储能介质。

表 1-3 列出了用于制冷目的的一些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 / $^{\circ}\text{C}$	密度 / (kg/m^3)	比热容 / $[\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})]$		熔化热 (kJ/kg)	共晶溶液在冻结时 的体积膨胀率(%)
				溶液	共晶冰		
ZnSO_4 和 H_2O	0.272	-6.5	1.249×10^3	3.127	1.574	213.1	6.8
BaCl_2 和 H_2O	0.225	-7.8	1.239×10^3	3.345	1.637	246.6	7.9
$\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3$ 和 H_2O	0.300	-11.0	1.312×10^3	3.182	1.536	186.3	5.2
NH_4Cl 和 H_2O	0.193	-11.1	1.148×10^3	3.307	1.729	301.0	8.1
NH_4NO_3 和 H_2O	0.412	-17.35	1.188×10^3	2.972	1.557	286.3	5.8
NaNO_3 和 H_2O	0.370	-18.5	1.29×10^3	3.059	1.565	215.6	5.6
NaCl 和 H_2O	0.224	-21.2	1.17×10^3	3.336	2.005	236.1	7.9
$\text{K}_2\text{SO}_4 + \text{KNO}_3$ 和 H_2O	0.045 + 0.08	-3.8	1.093×10^3	3.935	1.833	319.8	8.1
$\text{KCl} + \text{KNO}_3$ 和 H_2O	0.19 + 0.035	-11.8	1.15×10^3	3.182	1.666	265.8	7.7
$\text{NaNO}_3 + \text{KNO}_3$ 和 H_2O	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 $t_{\text{tr}} = -56.6^{\circ}\text{C}$, 压力 $p_{\text{tr}} = 5.2 \times 10^2 \text{ kPa}$ 。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学性质表。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刻度分格表示。附录 B 给出了一些常用制冷剂压—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

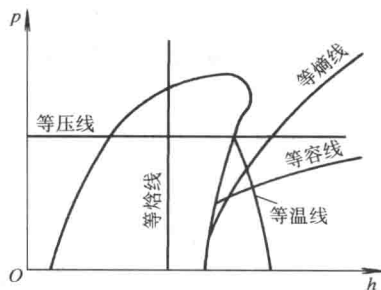


图 1-1 压—焓图

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, 等容线和等熵线都是向右上方延伸的下凹曲线, 但等熵线的斜率比等容线大。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 应用附录图 B-1 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

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

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

还可以利用压—焓图来表示液体汽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。第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。第三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为

$$a_s = \left(\frac{\partial T}{\partial P} \right)_s = \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p \quad (1-3)$$

a_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

$$a_{s, \text{id}} = \frac{k-1}{k} \frac{T}{p} \quad (1-4)$$

膨胀过程的全部温降称为积分等熵效应, 有

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

对于理想气体经过演算以后可得

$$\Delta T = T_1 - T_2 = T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (1-5)$$

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

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, 即

$$\Delta T = T_1 - T_2 = T_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{m-1}{m}} \right] \quad (1-7)$$

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。

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

实际气体的比热力学能不仅与温度有关, 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, 即

$$a_h = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h \quad (1-8)$$

式中, 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

$$\Delta T = T_2 - T_1 = \int_{p_1}^{p_2} \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h dp = \int_{p_1}^{p_2} a_h dp \quad (1-9)$$

微分节流效应也可表示成为

$$a_h = \frac{T \left(\frac{\partial v}{\partial T} \right)_p - v}{c_p} \quad (1-10)$$

由式 (1-10) 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 , 因此有

$$a_s = a_h = \frac{dT}{dp} \quad (1-11)$$

它可以按照克拉珀龙-克劳修斯方程式计算求得

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_s = \left(\frac{\partial T}{\partial p} \right)_h = \frac{T}{r} (v'' - v') \quad (1-12)$$