

# 食品冷冻冷藏原理与技术

谢 晶 主编



化学工业出版社  
化学与应用化学出版中心

· 北 京 ·

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

食品冷冻冷藏原理与技术/ 谢晶主编. —北京: 化学工业出版社, 2005. 2  
ISBN 7-5025-6625-2

. 食... . 谢... . 食品贮藏: 冻结贮藏  
食品贮藏: 制冷贮藏 . TS205. 7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 007294 号

---

食品冷冻冷藏原理与技术

谢 晶 主 编

责任编辑: 孙绥中

文字编辑: 韩庆利 余纪军

责任校对: 顾淑云 战河红

封面设计: 郑小红

\*

化学工业出版社 出版发行  
化学与应用化学出版中心  
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)  
发行电话: (010) 64982530  
[http:// www .cip .com .cn](http://www.cip.com.cn)

\*

新华书店北京发行所经销  
北京市昌平振南印刷厂印刷  
三河市延风装订厂装订  
开本 787mm × 1092mm 1/16 印张 20 字数 518 千字  
2005 年 4 月第 1 版 2005 年 4 月北京第 1 次印刷  
ISBN 7-5025-6625-2/ TS · 249  
定 价: 39.00 元

---

版权所有 违者必究  
该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

# 前 言

随着社会经济的迅速发展、人民生活水平的不断提高，冷加工食品的产量和消费量日益扩大，如何建立完善的食品冷藏链是近年来各级政府多次强调要解决的问题。经申请此书列入上海市普通高等学校教材建设项目资助计划，在上海市教委领导和组织下编写了本书。

本书以讨论食品冷加工（冷却、冷冻、冷藏）所涉及的制冷技术为重点，论述的制冷原理、制冷设备、制冷技术和食品冷藏链密切相关，介绍的知识都是以实用为出发点。本书提及的制冷技术涵盖了食品冷藏链的各个环节，与食品科学学科、动力工程学科密切相关。希望通过本书的学习培养出一批既懂食品加工工艺又具有很强动力工程基础和操作技能的复合型工程技术人员。

本书的主要内容包括制冷技术的基本原理、制冷系统的主机、主要设备和辅助设备，同时介绍制冷在食品冷加工、冷藏库、冷藏运输、冷藏柜与工业制冰等领域的应用。这些应用已包括食品整个冷藏链和工业冷冻所需的制冷技术，同时在本书的编写中注重了有关冷冻冷藏新技术、新动向的论述。全书共九章，由谢晶担任主编。本书的绪论、第一、二、四、五、六章由谢晶编著，第三章由顾建中编著，第七章由陈邓曼、谢晶编著，第八章由瞿晓华、施骏业编著，第九章由谈向东、陈邓曼编著。书稿特邀上海水产大学食品学院徐世琼教授审稿。

由于本书涉及的领域较广，编者的水平有限，书中难免有缺点和错误，恳请广大读者批评指正。

谢 晶  
2004年12月

# 目 录

绪论.....	1
第一节 制冷的发展简史.....	1
第二节 制冷研究的范围和内容.....	3
第三节 制冷技术的应用.....	4

## 第一篇 制冷原理

第一章 蒸气压缩式制冷循环.....	9
第一节 逆向卡诺循环——制冷机的理想循环.....	9
第二节 单级蒸气压缩式制冷机的理论循环.....	17
第三节 蒸气制冷机的实际循环.....	27
第四节 两级压缩制冷循环.....	28
第五节 复叠式制冷循环.....	35
第二章 制冷剂、载冷剂和冷冻机油.....	42
第一节 制冷剂的种类和要求.....	42
第二节 常用和新型的制冷剂.....	51
第三节 载冷剂.....	59
第四节 冷冻机油.....	62
第三章 制冷压缩机.....	66
第一节 制冷压缩机的分类.....	66
第二节 压缩机的功率和效率.....	67
第三节 活塞式制冷压缩机.....	71
第四节 回转式制冷压缩机.....	78
第五节 离心式制冷压缩机.....	85
第六节 制冷压缩机的热力分析和节能措施.....	86
第四章 制冷热交换器.....	99
第一节 冷凝器.....	99
第二节 蒸发器.....	115
第三节 板式热交换器的应用.....	125
第四节 其他制冷热交换器.....	126
第五章 节流装置、阀门与辅助设备.....	131
第一节 节流装置.....	131
第二节 制冷系统常用阀门.....	143

第三节 蒸气压缩式制冷系统的辅助设备.....	151
-------------------------	-----

## 第二篇 制冷技术

第六章 食品的冷加工技术.....	167
第一节 食品冷加工基础.....	167
第二节 食品的冷却方法与装置.....	175
第三节 食品的冻结方法与装置.....	180
第四节 食品的解冻方法与装置.....	187
第五节 食品真空冷冻干燥与装置.....	194
第六节 果蔬的气调与设备.....	197
第七章 冷藏库.....	205
第一节 隔热与防潮.....	205
第二节 冷库热负荷计算.....	214
第三节 氟制冷系统.....	223
第四节 氨制冷系统.....	233
第五节 载冷剂制冷系统.....	237
第六节 装配式冷库.....	240
第七节 气调冷库.....	245
第八节 冷库配套设施.....	253
第九节 冷库的管理.....	265
第八章 冷藏运输与冷藏柜.....	270
第一节 食品冷藏链.....	270
第二节 陆上冷藏运输.....	271
第三节 船舶冷藏运输.....	279
第四节 航空冷藏运输.....	282
第五节 商用冷冻冷藏柜.....	283
第九章 工业制冰.....	286
第一节 人造冰的制取分类.....	286
第二节 盐水间接冷却制冰设备.....	289
第三节 直接冷却制冰设备.....	299
附录.....	306
附录 1 R717 饱和性质表.....	306
附录 2 R717 饱和性质图.....	308
附录 3 R22 饱和性质表.....	309
附录 4 R22 的 $\lg p-h$ 图.....	312
附录 5 R134a 饱和性质表.....	313
附录 6 R134a 的 $\lg p-h$ 图.....	315
主要参考文献.....	316

# 绪 论

制冷技术 (Refrigeration technology) 是一门研究人工制冷的原理、方法以及如何运用制冷装置获得低温的科学。低温是相对于环境温度而言的, 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就是制冷。它是为适应人们对低温的需要而产生和发展起来的。

## 第一节 制冷的发展简史

制冷技术作为一门科学, 是 19 世纪中期和后期发展起来的。在此之前, 人类很早就知道利用天然冷源, 如保存到夏季的冬季自然界的天然冰、雪或地下水资源, 进行防暑降温 and 保藏食物。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。我国古代的劳动人民早在三千多年前就已经懂得利用天然冷源, 即在冬季采集天然的冰贮藏在冰窖中, 到夏季再取出来使用。如《诗经》中就有“二之日凿冰冲冲, 三之日纳于凌阴”的诗句, 反映了当时人们每年二月到河里去凿冰; 三月将冰贮存到地窖的情况; 又《周礼》中有“凌人夏颁冰掌事”的记载。可见, 我国在先秦时代已将采冰、贮冰当作一项季节性的劳作。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”, 说明当时已懂得以天然冰作空调之用了。

西方最早来中国考察的意大利人马可·波罗, 在其所著的《马可·波罗游记》一书中, 对中国 18 世纪的用冰保藏鲜肉、制造冰酪冷食的技术及建冰窖的方法有详细记述。

古代的埃及和希腊很早也有利用冰的记载。从埃及人的约 2500 年前的壁画可以发现, 当时古埃及人就已想到, 将清水存于浅盘中, 天冷通风时, 由蒸发吸热, 使盘内剩余水结冰, 这可以说是较早的人工制冰。

以上列举的只是古代人民对天然冰的收藏、利用和简单的人工制冰, 但还称不上制冷技术。机械制冷技术的发展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, 提出了潜热的概念, 并发明了冰量热器, 标志着现代制冷技术的开始。

1809 年美国人发现了压缩式制冷的原理。1824 年德国人发现了吸收式制冷的原理。1834 年在伦敦工作的美国发明家波尔金斯 (Jacob Perkins) 造出了第一台用乙醚为制冷剂的蒸气压缩式制冷机, 并正式申请了乙醚在封闭循环中膨胀制冷的英国专利 (No. 6662)。这台机器可以看作是现代蒸气压缩式制冷机的雏形。1844 年美国医生约翰·高里 (John Gorrie) 制成了世界上第一台制冷和空调用的空气制冷机, 并于 1851 年获得美国专利。1858 年美国人尼斯 (Niles) 取得了冷库设计的第一个美工专利, 从此商业食品冷藏事业开始发展。1859 年法国卡列 (Ferdinand Carre) 设计制造了第一台氨水吸收式制冷机, 申请

了原理专利。1874年瑞士人皮特（Pitt）采用二氧化硫作为制冷剂。1875年德国人林德（Linde）设计成功氨制冷机，这被大家称为制冷机的始祖，对制冷技术的发展起了重大作用，从此，蒸气压缩式制冷机开始占了统治地位。20世纪以后，制冷技术有了更大的发展，1910年左右，马利斯·莱兰克（Maurice Lehlanck）在巴黎发明了蒸气喷射式制冷系统。1918年家用冰箱由美国的工程师科普兰（Copeland）发明，不久在美国开始作为商品投放市场。空调技术的应用始于1919年，美国芝加哥兴建了第一座空调电影院，次年开始在教堂配备空调，11年后出现了舒适性空调列车。

在各种形式的制冷机中，压缩式制冷机发展始终处于领先地位。随着制冷机形式的不断发展，制冷剂的种类也逐渐增多，从早期的乙醚、空气、二氧化硫到二氧化碳、氨、氯甲烷等。1929~1930年美国通用电器公司的米杰里（Thomas Midgley）首次用 $\text{CCl}_2\text{F}_2$ 作为制冷剂，取得很好的效果。而生产此工质的杜邦公司，将其命名为氟里昂12（Freon12），简称F12，后称为R12，此后R11、R13等在制冷上广泛应用，占据了很大的领域，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CFC具有消耗臭氧层的问题正式被公认以前，以各种卤代烃为主的制冷剂的发展已达到相当完善的程度。

CFC问题的出现及其替代技术的发展，对制冷工业来说，是一次历史性的冲击，它打乱了制冷工业已有的发展现状，但又提供了新的发展机遇，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。此外，其他制冷方式和制冷机种类的研究步伐将比以往加快，如半导体制冷、吸收式制冷的发展等。

20世纪制冷技术的发展还在于制冷范围的扩大，目前人类能达到的最低制冷温度是利用 $\text{He}^3$ - $\text{He}^4$ 稀释制冷与核绝热去磁的方法达到 $10^{-7}\text{K}$ 的温度；机器和机组的种类、形式不断增多，设备规模亦不断扩大；新材料在制冷产品上的应用，以提高其性能、寿命和成本效益；计算机技术的应用，亦推动了制冷技术的蓬勃发展，如计算机辅助设计（CAD）和计算机辅助制造（CAM）、计算机仿真优化、计算机神经网络技术的应用，以及计算机辅助测试、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，这一切都预示着制冷技术更加美好的未来。

由于制冷技术的发展和在工业生产中的应用，各发达国家率先建立本领域的学术组织。1888年英国建立了“英国冷库和冰协会”；1891年美国成立了“美国冷藏库协会”；1900年法国成立了“法国和殖民地冷藏工业理事会”；1903年和1904年，美国先后成立了“美国制冷设备制造协会”、“美国制冷工程师协会（ASHRAE）”。在此基础上，1908年在法国巴黎成立了“国际制冷学会（International Institute of Refrigeration，缩写为IIR）”，现在大约有60个国家会员，我国于1978年加入该学会。

我国人民开创的应用天然冰制冷的技术应逐步向人工制冷方面发展，但由于我国长期处于半殖民半封建社会，严重地制约了制冷技术的发展。直到20世纪50年代末期我国的制冷机制造业才发展起来。到第一个“五年计划”末期，全国的制冷机制造厂已发展到十几家，产品30多种。从刚开始时的仿制到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形式制冷机。20世纪90年代后，我国的制冷空调行业发展迅猛，制冷空调工业已成为国民经济中的重要支柱产业。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、技术水平比过去有很大的提

高，并已形成有一定基础的科研、教学、设计和生产体系，与国外先进水平的差距正在缩小。

目前，现代制冷工业正处于一个飞速发展的时期。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。对于家用电冰箱、家用空调器、溴化锂吸收式冷（热）水机组等在国内市场已形成一定的竞争力，但我国产品的优势主要在价格的竞争上，中国已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，提高制冷空调产品的整体水平、以增强国际竞争力是我们的当务之急。在国际竞争中我们有许多需要加倍努力的地方，如国内具有相当知名的品牌和企业与跨国知名公司及其产品相比，无论是在资本实力、生产规模、营销网络和方式、售后服务、产品研究开发能力上，还是在品牌知名度与信誉度上都有相当大的差距；制冷空调系统控制的智能化、网络化运行等方面亦存在较大差距。加入世界贸易组织、申办奥运及申办世界博览会的成功给我国的制冷工业带来了竞争和挑战，也带来了发展契机，特别是基础设施建设、农业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带来新的机遇。目前国家投入巨资对地铁、机场、铁路、高速公路的建设将会带动列车空调、大型空调机组、冷藏运输车辆等产品的生产，同时促进我国冷藏链的建设；工业产业结构的优化升级，基础产业支撑地位的加强，将进一步刺激作为有关产品生产工艺过程保障的工业制冷装置的更新、改造和配套发展；加大农业投入，加速农业产业结构调整，将促使谷物冷却机、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，这些都将会导致冷冻、冷藏、气调贮藏设备的需求旺盛；城镇化建设还将进一步促使家用制冷空调产业的发展。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。可以预言，21世纪我国制冷空调行业将会更飞速地发展，巨大的市场增长潜力和新技术的交叉渗透为它开辟了广阔发展的道路。

## 第二节 制冷研究的范围和内容

制冷几乎包括了从环境温度到 0K 附近的整个热力学温标。在科学研究和工业应用中，常把制冷分为普冷（简称为制冷）和低温两个体系。制（普）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。按照国际制冷学会第 13 届国际制冷大会（1971 年）的建议，将 120K 规定为普冷和低温的界线。通常，从环境温度到 120K 的范围属于制冷，而从 120K 以下，即从接近液化天然气的正常沸点至 2K 左右的温度范围属于低温，2K 以下的称为极低温，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，还体现在所使用的工质、机器设备以及获得低温的方法不同，但是亦有相同交叉之处。

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、绝热去磁以外，大多数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。

制冷的研究内容可以大致分为以下三个方面：研究获得低温的方法和有关的机理以及与此相应的制冷循环及其热力学分析和计算；研究制冷剂的性质，尤其是研究符合环保、节能要求的新型制冷工质；研究实现制冷循环所必需的各种制冷机械和设备，包括其工作原理、性能分析、机构设计，自动控制以及系统的设计。

本书分为制冷原理（基础篇）和制冷技术（应用篇）两部分。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基础知识，并介绍制冷剂、制冷系统主机、制冷换热器工作原理、结构和传热计算以及辅助设备的结构、工作原理；“制冷技术”部分主要介绍制冷在食品业（制冷应用最广泛、最早的行业）、商业、工业等方面的具体应用，如食品冷加工、冷藏库、冷藏运输、冷藏柜与工业制冰等领域，这些应用已包括食品整个冷藏链和工业冷冻所需的制冷技术。

### 第三节 制冷技术的应用

制冷技术最早是用来保存食物和降低房间温度。随着科学技术的发展和社会的进步，制冷的应用几乎渗透到国民经济各部门，并在提高人类生活的质量方面发挥着巨大的作用。

(1) 在商业中 主要是指制冷技术在易腐食品的保藏及食品冷藏链各环节的应用，这是制冷技术应用最早、最广的领域。由于肉类、水产品、禽、蛋、果蔬等易腐食品的生产有着较强的季节性和地区性，而利用冷加工方法来贮藏食品具有突出的优点，因此目前在食品商业流通中冻结设备、冷却设备、冷库设施、冷藏船、冷藏列车、冷藏汽车及冷藏集装箱被广泛采用。另外，供食品零售的商用冷藏柜、冷柜以及消费者的家用冰箱等的使用也逐渐普及。现代化的食品工业，对于易腐食品从生产到销售的冷藏链日趋完善，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。食品工业的发展与制冷技术有密切的关系。

(2) 在农业中 对农作物种子进行低温处理，培育耐寒品种；良种精液的低温保存，以及人工配种牲畜；人造雨雪；建造人工气候育苗室，模拟阳光的日光型植物生长箱育苗等均需要制冷技术。此外，化肥的生产过程中也需要制冷技术的应用，如一个年产 5000t 的合成氨厂，约需 232.6kW 标准制冷量。

(3) 在工业中 制冷技术的应用范围也很广泛。如石油化工、有机合成（橡胶、塑料、化纤等）、基本化工（酸、碱）等工业中如分离、精炼、结晶、浓缩、提纯、气体的液化，混合气分离、润滑油脱脂，及某些化学反应过程的冷却、吸收反应热和控制反应速度等单元操作都要用到制冷技术；又如机械制造中，对钢的低温处理，使金相组织内部的奥氏体转变为马氏体，以改善钢的性能；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。工业生产用制冷装置的特点是容量比较大，对温度的要求范围广，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 0℃ 以上，有的需要 -40℃ 以下，而天然气液化时蒸发温度低达 -150℃ 以下。

(4) 在建筑业中 用冻土法挖掘土方。在挖掘矿井、隧道、建筑桥梁、地下铁道，或在泥沼、砂水处掘井时，可采用冻土法施工，使工作面不坍塌，保证施工安全、提高施工效

率。制冷还应用于冷却巨型的混凝土块，混凝土加冰搅拌也已经普遍采用，因为混凝土固化时会释放出化学反应热，必须将其移去，以免发生热膨胀和混凝土应力，防止坝体混凝土出现危害性的温度裂缝。如一些工程大坝混凝土预冷系统就是采用综合措施，在胶带机上淋冷水冷却骨料，然后用冷风机风冷，再加片冰拌和混凝土，这些大坝工程需要大冷量的制冷机和片冰机。

(5) 大中型民用及公共建筑物中的空调 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。这些场所所用的是舒适性空调，它是用来满足人们舒适需要的空气调节，为人们创造适宜的生活和工作的环境。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。

(6) 在运输业中 车辆空调的应用也越来越广。如公共汽车、列车、卡车、旅游车、飞机、轮船、吊车中，也不同程度地安装有空气调节设备。这些交通工具中，制冷负荷主要是用来抵御来自太阳的辐射热和来自人体散发的热量。与建筑物空调相比，这些负荷的特点是变化迅速，单位体积的强度高。此外，磁悬浮超导列车所用的超导磁体也需要提供连续制冷才能保证，当然随着高温超导体研究的进展，则经济性会大大增加。

(7) 工业空调 空调技术不仅可以为在恶劣环境中工作的工人提供一定程度的舒适条件，而且也包括有利于产品加工和材料制造所需的特殊的温度、湿度、洁净度等要求，这种空调有别于舒适性空调，而称为工艺性空调。这不但意味着受控的空气环境对各种工业生产过程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、创造舒适的工作环境有重要意义。如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，在现代化的纺织厂中，需要空调来避免纺织品的柔软度和强度发生变化或产生静电。

(8) 在医疗卫生中 使用冷却干燥方法制成药物，低温保存血浆、疫苗、菌种和某些药品及生物制品，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、心瓣膜、主动脉等组织。医药卫生部门的冷冻手术，如心脏、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。

(9) 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。此外，随着人民生活水平的提高，对娱乐的需求也会增长，制冷技术也可以用于发展人造溜冰场、人造滑雪场等。

(10) 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。如核聚变反应堆托卡马克 (Tokamak) 装置就要依靠大型的超导磁体对聚变反应器中的高温等离子体进行磁约束。

(11) 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，都需要在模拟高温或低温条件下进行性能实验，高真空的空间环境都需要用液氮和液氦冷却的低温泵来产生；无论是载人还是不载人的航天器，低温总是空间计划的关键部分。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。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、低湿及高空或宇宙环境。又如宇宙空间特殊环境的创造和控制，也需要用到制冷技术。

此外，在其他尖端技术领域，如微电子技术、光纤通讯、能源、新型材料等，制冷技术也有重要的应用。

# 第一篇 制冷原理

# 第一章 蒸气压缩式制冷循环

本章介绍单级、双级蒸气制冷循环的特性及热力计算方法。着重分析理论循环，并讨论理论循环和实际循环的差别，此外还介绍了复叠式制冷循环的组成及其应用。

## 第一节 逆向卡诺循环——制冷机的理想循环

在热力学中，循环可以分为正向循环和逆向循环两种。动力循环，即将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照正向循环工作的。在温-熵图或压-焓图上，循环的各个过程都是依此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此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。在构成循环的各个过程中只要包含有不可逆因素，则这个循环就是不可逆循环。在制冷循环中不可逆因素分两类：内部不可逆和外部不可逆。内部不可逆因素包括制冷剂在流动或状态变化的过程中因摩擦、扰动及内部不平衡而引起的损失；外部不可逆是指在蒸发器、冷凝器等热交换器中有温差的传热损失。

### 一、逆向卡诺循环

人工制冷是根据热力学的原理建立和发展起来的。由热力学第二定律得：单热源的热机是不存在的，即利用一个热源是无法完成循环过程的；热量不可能自发地、不付代价地从一个低温物体传到另一个高温物体，如果要实现这样一个反向的过程，就必须要有有一个消耗能量的补偿过程。

实现制冷所必需的机器和设备，称为制冷机。在制冷机中，通常都是以周围环境介质作为它的高温热源，而以被冷却物体作为它的低温热源。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，如制冷剂周期地从被冷却物体中取得一定数量的热量，并将此热量传递给周围环境介质——水或空气，实现制冷循环。根据上面的结论，实现这个循环必须消耗能量。

在一定的热源温度下，需要怎样来组织制冷机的工作循环，使获得单位冷量所消耗的能量为最小，这是制冷技术中一个很重要的问题。为此，要研究逆向卡诺循环。研究它的目的是为了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的标准。

设被冷却物体的温度为  $T_0$ ，周围介质的温度为  $T$ ，在这个温度范围内，制冷机从被冷却物体中取出热量  $q_0$ ，并将它传递给周围介质，为了完成这一循环所消耗的机械功为  $w$ ，这部分功转变成热量后和取出的热量  $q_0$  一起传递给周围介质。因此，根据力学第一定律，可写出制冷机的热平衡式

$$q = q_0 + w \quad (1-1)$$

式中  $q$ 、 $\varphi$  和  $w$ ——传递给介质的单位热量、取出的单位热量和消耗的单位机械功，  
kJ/kg。

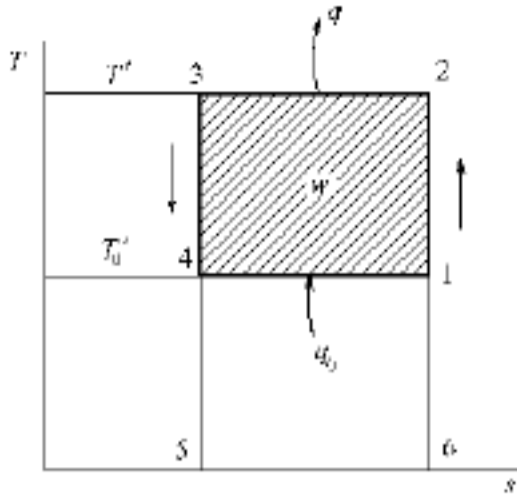


图 1-1 逆向卡诺循环

逆向卡诺循环是理想的制冷循环，现将逆向卡诺循环表示在  $T-s$  图上，如图 1-1 所示。它由两个等温过程和两个绝热过程所组成的。

在图 1-1 中：1—2 过程，是制冷剂在压缩机内等熵压缩过程，在压缩过程中消耗了功  $w_k$ ，而制冷剂的温度从  $T_0$  升高到  $T$ ；2—3 过程，是制冷剂向周围介质等温放热，放出的热量为  $q$ ；3—4 过程，是制冷剂由状态 3 等熵膨胀到状态 4，产生膨胀功  $w_p$ ，这时制冷剂的温度从  $T$ ，降低到  $T_0$ （膨胀终了状态点 4）；4—1 过程，是制冷剂从温度为  $T_0$  的被冷却物体中等温吸热，制取冷量为  $\varphi$ ，制冷剂又回复到开始状态，而循环就如此重复进行。

根据热力系统，可逆变化过程中熵的变量等于零这一热力学原理，可以写出逆向卡诺循环的熵变公式

$$s_{\text{系统}} = \frac{q}{T} - \frac{\varphi}{T_0} = \frac{w + \varphi}{T} - \frac{\varphi}{T_0} = \frac{w}{T} + \varphi \left[ \frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right] = 0 \quad (1-2)$$

式中  $w$ ——逆向卡诺循环所消耗的机械功，它等于压缩时所消耗的功减去膨胀时所做的功，即  $w = w_k - w_p$ 。

因为按逆向卡诺循环工作的制冷机，它所消耗的功为最小功，由式 (1-2) 可得

$$w_{\min} = \varphi \left[ \frac{T}{T_0} - 1 \right] \quad (1-3)$$

从式 (1-3) 中可以看出：按逆向卡诺循环工作的制冷机，在制取一定的冷量  $\varphi$  时，所消耗的机械功只与工作温度范围有关，与制冷剂的性质无关；且周围介质温度  $T$  愈高或被冷却物体的温度  $T_0$  愈低，则制冷循环所消耗的功愈多。这一结论，在制冷技术中有着重要的意义。

## 二、有温差的制冷循环

在上面所讨论的逆向卡诺循环，是假定制冷剂与热源之间的热交换在无限小的温差下进行的，因此就需要热交换器的传热面积无限大，这实际上是不现实的。而制冷剂与周围介质，制冷剂与被冷却物体之间总是存在着一定的温差，因此形成有温差的制冷循环，如图 1-2 所示。

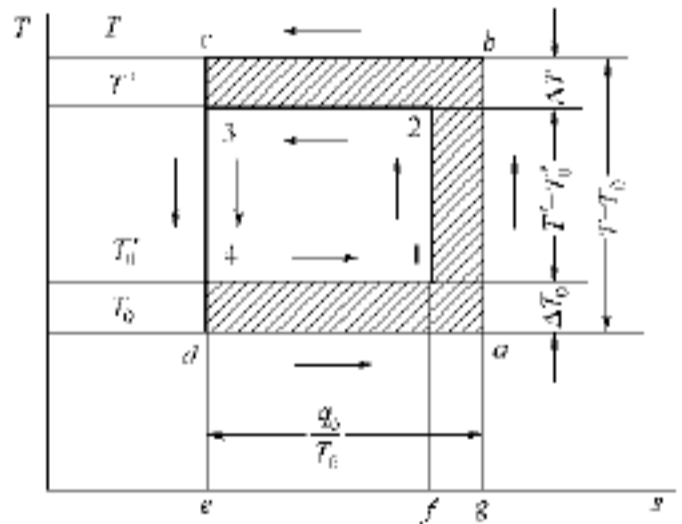


图 1-2 有温差的制冷循环

在图 1-2 中

$$T = T_1 - \Delta T_1$$

$$T_0 = T_2 + \Delta T_0$$

式中  $T$ ——循环中制冷剂的上限温度，K；

$T_1$ ——周围介质的温度，K；

$T_2$ ——被冷却物体的温度，K；

$T_0$ ——循环中制冷剂的下限温度，K。

很明显，由于温差  $T$  与  $T_0$  的存在，制冷循环的温度范围将比图 1—1 中的温度范围扩大，即  $(T - T_0) > (T - T_0)$ 。从式 (1-3) 中可看出，在获得相同的冷量  $q$  时，有温差的制冷循环将要多消耗功。

在图 1-2 中，1—2—3—4 为没有温差的逆向卡诺循环。a—b—c—d 为有温差的制冷循环，二者具有相同的制冷量  $q$ （即面积  $4-1-f-e-4 = \text{面积 } d-a-g-e-d$ ）。

根据热力学第一定律，可以写出两个循环的能量平衡式

$$q = q + w$$

$$q = q + w$$

其中带有“ ”符号的是指有温差情况而言的，由上面两个能量平衡式中，可求得多消耗的机械功为

$$w = w - w = q - q \quad (1-4)$$

因此在有温差存在时，由于不可逆的热交换所多消耗机械功等于不可逆循环时和可逆循环时传递给周围介质的热量之差。这个附加功在图 1-2 中为斜线所表示的面积。

同样可用熵的概念来分析和表示附加功  $w$ 。

在可逆情况下，制冷系统熵的变化为

$$S_{\text{制冷系统}} = S_1 + S_2 = \frac{q}{T} - \frac{q}{T_0} = 0 \quad (1-5)$$

式中  $S_1$ 、 $S_2$ ——周围介质和被冷却物体熵的变化。

在不可逆情况下，制冷系统熵的变化为

$$S_{\text{制冷系统}} = S_1 + S_2 = \frac{q}{T} - \frac{q}{T_0} > 0 \quad (1-6)$$

由式 (1-5) 可得  $\frac{q}{T_0} = \frac{q}{T}$ ，代入式 (1-6) 可得

$$S_{\text{制冷系统}} = \frac{q}{T} - \frac{q}{T} = \frac{1}{T} (q - q) \quad (1-7)$$

比较式 (1-4) 和式 (1-7) 可得

$$w = T S_{\text{制冷系统}} \quad (1-8)$$

式 (1-8) 在制冷技术中对分析不可逆制冷循环的能量损失时具有重要的意义，它可以这样来叙述：“在逆向循环中，由于不可逆过程而多消耗的功，等于周围介质的热力学温度和系统中熵的增量的乘积”。

### 三、制冷系数

在制冷循环中，制冷剂从被冷却物体中所制取的冷量  $q$  与所消耗的机械功  $w$  的比值称为制冷系数，用代号  $\epsilon$  表示，即

$$\epsilon = \frac{q}{w} \quad (1-9)$$

制冷系数是衡量制冷循环经济性的一个重要技术指标。国外习惯上将制冷系数称为制冷机的性能系数 COP (Coefficient of Performance)。在给定的温度条件下，制冷系数越大，则循环的经济性越高。

在图 1-2 中，可逆循环的制冷系数为  $\epsilon = \frac{q}{w}$ ，而不可逆循环的制冷系数为  $\epsilon = \frac{q}{w + w}$ ，因为  $w > 0$ ，所以  $\epsilon > \epsilon$ 。在这两个循环中， $q$  均是从温度为  $T_0$  的被冷却物体中取得的，故

可逆循环在能量上比不可逆循环更经济，或是在获得相同的冷量时，可逆循环所消耗的功比不可逆循环所消耗的功要小。这里还应指出，在制冷机工作过程中，减少保持机械过程的不可逆损失，也起着同样的作用（虽然在这里只讨论了传热的不可逆性问题）。

为了获得必需的冷量，而使消耗的功为最少，那么就需使制冷剂与热源之间的温差为最小。在极限情况下，当  $T_0 \rightarrow 0$  和  $T \rightarrow 0$  时，则  $w \rightarrow 0$ ，即在给定的温度为  $T$  和  $T_0$  的条件下，获得相同的冷量时所消耗的功为最少。但从另一方面来看，随着温差的减小，热交换器的传热面积就要增大。这样，热交换器的造价也就贵了。因此，减少能量损耗与节省金属材料的消耗，即降低运行费用与减少初投资是制冷技术中的一对矛盾。在具体解决这个问题时，要通过技术经济分析比较后才能确定。

如果在制冷机内实现的是可逆的循环，则制冷系数又可写成

$$\epsilon = \frac{q_0}{w} = \frac{T_0}{T - T_0} \quad (1-10)$$

从式 (1-10) 中可以看出：按照逆向卡诺循环工作的制冷机，其制冷系数与制冷剂的性质无关，而只是工作温度  $T$  和  $T_0$  的函数，即周围介质的温度  $T$  越高。被冷却物体的温度  $T_0$  越低，则循环的制冷系数越小。

这里还应说明， $T_0$  变化 1K 对  $\epsilon$  的影响比  $T$  变化 1K 的影响要大。

$$\left[ \frac{\partial \epsilon}{\partial T} \right]_{T_0} = \frac{-T_0}{(T - T_0)^2}$$

$$\left[ \frac{\partial \epsilon}{\partial T_0} \right]_T = \frac{T}{(T - T_0)^2}$$

因为

$$T > T_0$$

所以

$$\left| \left[ \frac{\partial \epsilon}{\partial T} \right]_{T_0} \right| < \left[ \frac{\partial \epsilon}{\partial T_0} \right]_T$$

在实际制冷过程中，不应使制冷剂的温度降得太低，以减少能量损失。

上面分析的无温差逆向卡诺循环是一个完全可逆的制冷循环，它没有任何不可逆损失，因此在一定的热源温度下，它的制冷系数具有最大的数值。但是这样的循环在实际制冷机中是无法实现的（因为制冷剂在吸热和放热时存在着温差，以及机械摩擦等内部不可逆损失），所以在理论上分析比较制冷循环经济性好坏时，仅将逆向卡诺循环作为比较的最高标准。通常是将工作于相同温度范围的制冷循环的制冷系数  $\epsilon$  与逆向卡诺循环的制冷系数  $\epsilon_c$  之比，称为这个制冷循环的热力完善度，亦称制冷效率，用代号  $\eta$  表示，其公式

$$\eta = \frac{\epsilon}{\epsilon_c} \quad (1-11)$$

式中  $\epsilon_c$ ——相同热源温度范围内的逆向卡诺循环的制冷系数。

热力完善度是用来表示制冷循环接近逆向卡诺循环的程度（在相同的温度范围内），它的数值愈大，说明制冷循环的不可逆损失愈小。所以，热力完善度也是制冷技术中的一个技术经济指标，但热力完善度与制冷系数的意义不同，制冷系数是与循环的工作温度、制冷剂的性质等因素有关，对于工作温度不同的制冷循环，就无法按照制冷系数的大小来判断循环经济性的好坏，在这种情况下，只能根据热力完善度的大小来判断。

例 1-1 已知周围介质（冷却水）的温度  $t = 25^\circ\text{C}$ ，制冷剂从室温为  $-20^\circ\text{C}$  的冷藏室内

吸取 11.63kJ 的热量，计算在这一温度范围内工作的逆向卡诺循环的制冷系数及消耗的理论功。

解

根据式 (1-10) 可求得逆向卡诺循环的制冷系数

$$= \frac{T_0}{T - T_0} = \frac{273 - 20}{(273 + 25) - (273 - 20)} = 5.62$$

根据式 (1-3) 可求得循环所消耗的理论功

$$w = \varphi \left[ \frac{T}{T_0} - 1 \right] = 11.630 \times \left[ \frac{273 + 25}{273 - 20} - 1 \right] = 2.07 \text{kJ}$$

例 1-2 在例 1-1 中，若传热温差  $T$  与  $T_0$  各为 10 时，计算循环多消耗的附加功  $w$  与制冷系数。

解

在  $T = 273 + 35 = 308 \text{K}$ ， $T_0 = 273 - 30 = 243 \text{K}$  时

$$w = 11.630 \times \left[ \frac{308}{243} - 1 \right] = 3.11 \text{kJ}$$

故

$$w = w - w = 3.11 - 2.07 = 1.04 \text{kJ}$$

$T$  与  $T_0$  各为 10 时，循环的制冷系数为

$$= \frac{\varphi}{w + w} = \frac{11.630}{2.07 + 1.04} = 3.74$$

#### 四、变温热源时的逆向可逆循环——劳伦兹循环

热源的热容量是有限的。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，即被冷却对象的温度将逐渐下降，环境介质的温度将逐渐上升。在这种热源温度变化的情况下，逆向可逆循环又是怎样进行的呢？

图 1-3 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采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。

为了达到在变温调节下耗电最小的目的，应使制冷剂在吸、排热过程中的温度也发生变化，而且变化趋势与冷、热源的变化趋势完全一致，使制冷剂与冷、热源之间进行热交换过程中的传热温差始终为无限小，无不可逆损失。即设法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  $b - c - d - a - b$  是耗电最小的循环，称为劳伦兹循环。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，为图 1-3 中的阴影面积。

由此，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，是耗电最小的循环，即制冷系数最大的循环。

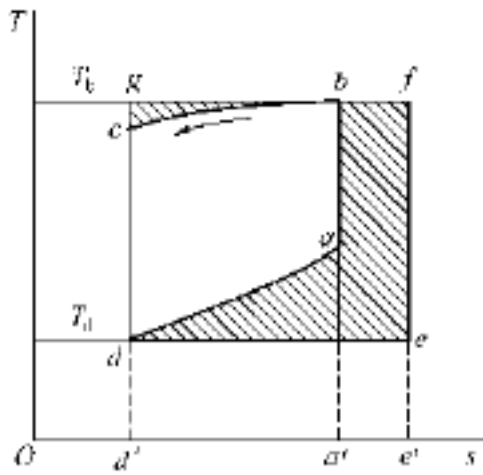


图 1-3 变温热源时逆向可逆循环

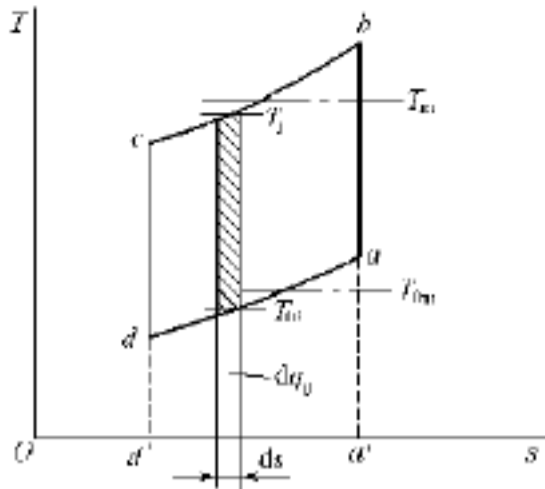


图 1-4 用微元循环分析劳伦兹循环

在热源温度变化时，制冷循环的热力完善度可以表示成

$$= \frac{\varphi}{L} \quad (1-12)$$

式中  $\varphi$  ——实际循环的制冷系数；

$L$  ——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的制冷系数，即劳伦兹循环的制冷系数。

劳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 1-4 所示，每个微元循环可以看作逆向卡诺循环，其制冷系数为

$$i = \frac{d\varphi}{dq_k - d\varphi} = \frac{T_{0i} ds}{T_i ds - T_{0i} ds} = \frac{T_{0i}}{T_i - T_{0i}} \quad (1-13)$$

而整个制冷循环 a—b—c—d—a 的制冷系数可表示为

$$i = \frac{\varphi}{q_k - \varphi} = \frac{\int_a^b T_{0i} ds}{\int_c^d T_i ds - \int_a^b T_{0i} ds} = \frac{T_{0m}}{T_m - T_{0m}} \quad (1-14)$$

式中  $T_{0m}$ 、 $T_m$  ——制冷剂吸热时低温热源的平均温度和放热时高温热源的平均温度，它们是热力学意义上的平均温度，不是算术平均温度。

由此可见，劳伦兹循环的制冷系数等于一个以放热平均温度  $T_m$  和吸热平均温度  $T_{0m}$  为高、低温热源温度的等效逆卡诺循环的制冷系数。

### 五、热能驱动的制冷循环

以热能直接驱动的制冷循环，例如吸收制冷循环，实际上为三热源循环，如图 1-5 所示。

热量  $q_0$  取自低温的温度为  $T_0$  的被冷却物体， $q_H$  来自高温蒸气、燃烧气体或其他热源， $q_k$  是系统在  $T_a$  温度下（通常是环境温度）放出的热量。

按热力学第一定律

$$q_k = q_H + \varphi \quad (1-15)$$

对于可逆制冷机，按热力学第二定律，在一个循环中熵增为零，即

$$\frac{q_k}{T_a} = \frac{q_H}{T_H} + \frac{\varphi}{T_0} \quad (1-16)$$

由上述两个公式可以得到

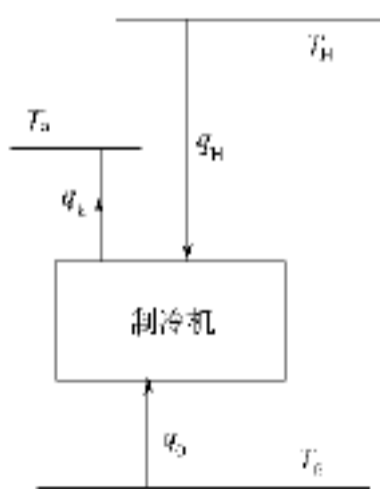


图 1-5 三热源制冷系统原理