



21世纪高职高专规划教材

(机械类)

制冷原理与设备

李晓东 主编

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



配多媒体课件



21世纪高职高专规划教材
(机械类)

制冷原理与设备

主 编 李晓东
副主编 魏 龙
参 编 常新中 孙月秋 王荣梅
多媒体课件制作 齐向阳
主 审 刘春泽



机械工业出版社

本书是针对制冷与冷藏技术专业高等职业技术教育的特点,根据编者多年的教学和实践经验编写的。全书共分3篇12章,第1篇制冷原理,包括单级蒸气压缩式制冷循环、制冷剂与载冷剂、双级蒸气压缩式和复叠式制冷循环、其他制冷方法。第2篇制冷压缩机,包括活塞式制冷压缩机、螺杆式制冷压缩机、其他类型的制冷压缩机。第3篇制冷设备,包括蒸发器与冷凝器、节流装置、制冷系统辅助设备、冷媒水和冷却水系统设备、输送设备等。

本书在内容编写上突破了原来的教学体系,将传统的制冷原理、制冷压缩机、制冷设备3门课程整合成1门课程,一是适应2年制高职教学改革的需要;二是建立制冷系统的概念,而不是单一制冷原理、制冷压缩机或制冷设备,以提高学生工程素质。

本书可作为高等职业院校制冷与冷藏专业教材,也可以作为相关行业岗位培训教材或自学用书。

本书配有多媒体课件,凡一次性购书30本以上者免费赠送一份多媒体课件。请与本书责任编辑余茂祚联系(联系电话010—88379759)。

图书在版编目(CIP)数据

制冷原理与设备/李晓东主编. —北京:机械工业出版社, 2006.5

21世纪高职高专规划教材(机械类)
ISBN 7-111-18988-4

I. 制… II. 李… III. ①制冷-理论-高等学校: 技术学校-教材②制冷-设备-高等学校: 技术学校-教材 IV. TB6

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第036214号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:余茂祚

责任编辑:余茂祚 版式设计:冉晓华 责任校对:程俊巧

封面设计:马精明 责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2006年7月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·18印张·441千字

0 001—3 000册

定价:28.00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)68326294

编辑热线电话(010)68354423

封面无防伪标均为盗版

21 世纪高职高专规划教材

编委会名单

编委会主任 王文斌

编委会副主任 (按姓氏笔画为序)

王建明	王明耀	王胜利	王寅仓	王锡铭
刘义	刘晶磷	刘锡奇	杜建根	李向东
李兴旺	李居参	李麟书	杨国祥	余党军
张建华	茆有柏	秦建华	唐汝元	谈向群
符宁平	蒋国良	薛世山	储克森	

编委会委员 (按姓氏笔画为序, 黑体字为常务编委)

王若明	田建敏	成运花	曲昭仲	朱强
刘莹	刘学应	许展	严安云	李连邨
李学锋	李选芒	李超群	杨飒	杨群祥
杨翠明	吴锐	何志祥	何宝文	余元冠
沈国良	张波	张锋	张福臣	陈月波
陈向平	陈江伟	武友德	林钢	周国良
宗序炎	赵建武	恽达明	俞庆生	晏初宏
倪依纯	徐炳亭	徐铮颖	韩学军	崔平
崔景茂	焦斌			

总策划 余茂祚

前 言

本书是针对制冷与冷藏技术专业高等职业技术教育的特点,由几所高职院校合作,根据编者多年的教学和实践经验编写的。全书共分3篇12章,第1篇制冷原理,包括单级蒸气压缩式制冷循环、制冷剂与载冷剂、双级蒸气压缩式和复叠式制冷循环、其他制冷方法。第2篇制冷压缩机,包括活塞式制冷压缩机、螺杆式制冷压缩机、其他类型的制冷压缩机。第3篇制冷设备包括蒸发器与冷凝器、节流装置、制冷系统辅助设备、冷媒水和冷却水系统设备、输送设备等。

为了达到培养生产一线高技能人才的目的,本书在内容编写上突破了原来的教学体系,将传统的制冷原理、制冷压缩机、制冷设备3门课程整合成1门课程,一是适应2年制高职教学改革的需要;二是建立制冷系统的概念,而不是单一的制冷原理、制冷压缩机或制冷设备,以提高学生的工程素质。在内容取舍上注重能力的培养,突出实际、实用、实践的原则,教学内容符合高职学生的认知规律,贯彻重概念、重结论、重技术应用的指导思想,注重内容的典型性、针对性,加强理论联系实际。本书注意运用制冷原理基本概念,综合分析制冷压缩机和制冷设备结构,使学生理解制冷装置的总体设计中的能量平衡原理。

制冷原理与设备是一门实践性应用性较强的课程,在当代社会,随着制冷工业的发展,制冷原理与设备的应用已渗透到人们生活、生产、科学研究活动的各个领域,并在改善人类的生活质量方面发挥着巨大的作用。在使用过程中应密切结合生产、生活中的实际和实例。本书的教学内容按110学时编写,在使用过程中若借助实物、多媒体课件等现代教学手段,可以按90学时安排。

本书由辽宁石化职业技术学院李晓东担任主编和统稿并编写绪论、第8章、第9章、第10章、第11章;南京化工职业技术学院魏龙担任副主编并编写第1章、第5章、第6章、附录;河南工业大学化学工业职业技术学院常新中编写第3章、第7章;渤海船舶职业学院孙月秋编写第2章、第4章;辽宁石化职业技术学院王荣梅编写第12章。全书由沈阳建筑大学职业技术学院院长刘春泽教授主审。

本书多媒体课件由辽宁石化职业技术学院齐向阳制作。

由于编者经验不足,水平有限,书中难免有不当或错误之处,恳请使用者批评指正。

编 者

目 录

前言

绪论 1

第1篇 制冷原理

第1章 单级蒸气压缩式制冷循环	7	3.1 采用多级蒸气压缩式制冷循环的原因	41
1.1 单级蒸气压缩式制冷循环的基本工作原理	7	3.2 双级蒸气压缩式制冷循环	42
1.2 单级蒸气压缩式制冷理论循环	9	3.3 双级蒸气压缩式制冷循环的热力计算及运行特性分析	47
1.3 单级蒸气压缩式制冷实际循环	13	3.4 复叠式制冷循环	52
1.4 单级蒸气压缩式制冷机的性能及工况	20	复习思考题	54
复习思考题	23	第4章 其他制冷方法	55
第2章 制冷剂与载冷剂	24	4.1 吸收式制冷	55
2.1 制冷剂	24	4.2 蒸气喷射式制冷	65
2.2 载冷剂	36	4.3 吸附式制冷	67
复习思考题	39	4.4 热电制冷	69
第3章 双级蒸气压缩式和复叠式制冷循环	41	4.5 空气膨胀制冷	71
		4.6 涡流管制冷	72
		复习思考题	73

第2篇 制冷压缩机

第5章 活塞式制冷压缩机	76	工作过程	145
5.1 概述	76	6.2 螺杆式制冷压缩机的型式和特点	148
5.2 活塞式制冷压缩机的主要零部件	84	6.3 螺杆式制冷压缩机的主要零部件	149
5.3 活塞式制冷压缩机的总体结构与机组	97	6.4 螺杆式制冷压缩机的总体结构	161
5.4 活塞式制冷压缩机的热力性能	114	6.5 螺杆式制冷压缩机的热力性能	167
5.5 活塞式制冷压缩机的运行	124	6.6 螺杆式制冷压缩机组	171
复习思考题	143	复习思考题	174
第6章 螺杆式制冷压缩机	145	第7章 其他类型的制冷压缩机	175
6.1 螺杆式制冷压缩机的工作过程	145		

7.1 离心式制冷压缩机	175	7.3 涡旋式制冷压缩机	193
7.2 滚动活塞式制冷压缩机	189	复习思考题	201

第3篇 制冷设备

第8章 蒸发器与冷凝器	204	11.3 冷却水塔	243
8.1 传热基础知识	204	11.4 阀门	246
8.2 蒸发器	207	复习思考题	252
8.3 冷凝器	212	第12章 输送设备	253
8.4 传热过程的强化	216	12.1 水泵	253
复习思考题	216	12.2 氨泵	261
第9章 节流装置	217	12.3 风机	264
9.1 节流装置的作用和工作原理	217	复习思考题	266
9.2 热力膨胀阀	217	附录 常用制冷剂的热力	
9.3 毛细管	220	性质表和图	267
9.4 电子膨胀阀	221	附表 A R717 饱和液体及饱和蒸气	
复习思考题	221	热力性质表	267
第10章 制冷系统辅助设备	223	附表 B R12 饱和液体及饱和蒸气	
10.1 制冷系统流程	223	热力性质表	269
10.2 中间冷却器	224	附表 C R22 饱和液体及饱和蒸气	
10.3 分离与贮存设备	226	热力性质表	270
10.4 制冷剂净化与安全设备	231	附表 D R134a 饱和状态下的	
10.5 制冷装置用压力容器	235	热力性质表	272
复习思考题	238	附图 A R717 (NH ₃) 压—焓图	273
第11章 冷媒水和冷却水系统		附图 B R12 (CCl ₂ F ₂) 压—焓图	274
设备	240	附图 C R22 (CHClF ₂) 压—焓图	275
11.1 冷媒水和冷却水系统	240	附图 D R134a 压—焓图	276
11.2 水过滤器	242	参考文献	277

绪 论

制冷原理与设备是为了适应人们希望能人工改变局部环境温度的需要而产生和发展的。日常生活中常说的“热”或“冷”是人体对温度高低感觉的反应，制冷中所说的冷和热，是指用人工的方法在一定时间和一定空间内对某物体或对象进行冷却或加热，使其温度升或降到环境温度以下或以上。这是相对于环境温度而言的，如在炎热的夏季，气温高达 35℃，要使人感到舒适，通过人工制冷进行空气调节，使室温保持在 25℃左右；为了冷冻贮存食品，电冰箱冷冻室内应保持在 -18℃等。

1. 实现制冷的途径 自然界的客观规律是热量传递总是从高温物体传向低温物体，直至二者温度相等，如一杯开水放置冷却到凉白开，是一个自发的传热过程，属于自然冷却，不是制冷。

虽然热量不可能自发地从低温物体传向高温物体，但消耗功可使热量从低温传递到高温，就像借助水泵对水做功，就能使水从低处流向高处。人工制冷就是使热量从低温传递到高温的技术。工程上实现制冷有许多方法，常用的有压缩式制冷、吸收式制冷、半导体制冷等。每一种方法都有其特点，可以根据使用的条件进行选择。压缩式制冷在各种制冷方法中是最广泛应用的制冷方法与原理，大约占 90% 以上。压缩式制冷的原理是利用制冷剂在低温下沸腾吸热。由于沸腾吸热时的温度低于制冷对象的温度，制冷对象的热量就传递给了制冷剂，制冷对象的温度就降低。通过压缩机做功，使吸热后的制冷剂温度和压力升高（高于环境温度），这时，制冷剂就可以把热量传递给环境。然后，通过节流降压，制冷剂重新在低温下沸腾吸热，不断循环制冷。

制冷一定要借助专门的装置来完成，实现制冷的实际工艺、装置包括：获得低温的方法、原理、制冷剂，即制冷原理；使制冷剂压力升高的做功机械，即制冷压缩机；完成制冷剂吸热或放热、节流、安全运行、经济运行的辅助设备，即制冷设备等。

2. 制冷体系的划分 制冷服务对象不同，要求的制冷温度也不同。在工业生产和科学研究上，人们通常根据制冷温度的不同把人工制冷分为普通制冷（ $T > 120\text{K}$ ）、低温制冷（ $T = 4.2 \sim 120\text{K}$ ）、超低温制冷（ $T < 4.2\text{K}$ ）。由于制冷温度不同，所用的制冷剂、制冷原理、制冷压缩机、制冷设备都有较大的差别，制冷系统的组成也不同。

3. 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如冰、深井水等。我国早在周朝就有了用冰的历史，到了秦汉，冰的使用就更进了一步，到了唐朝已生产冰镇饮料并已有了冰商。

利用天然冷源严格说还不是人工制冷，现代人工制冷始于 18 世纪中叶。

1748 年，英国人柯伦证明了乙醚在真空下蒸发时会产生制冷效应。

1755 年，爱丁堡的化学教授库仑利用乙醚蒸发使水结冰，他的学生布拉克从本质上解释了融化和汽化现象，提出了潜热的概念，发明了冰量热器，标志着现代制冷技术的开始。同年，苏格兰人 W. Callen 发明了第一台蒸发式制冷机。

1781 年，意大利人凯弗罗进行了乙醚制冰实验。

1834年，在伦敦工作的美国人波尔金斯制成了用乙醚为制冷剂的手摇式压缩制冷机，并正式申请了专利，这是后来所有蒸汽压缩式制冷机的雏形。其重要进步是实现了闭合循环。

1844年，美国人戈里介绍了他发明的第一台空气制冷机，并于1851年获得美国专利。

1858年，美国人尼斯取得了冷库设计的第一个美国专利，从此商用食品冷藏事业开始发展。

1859年，法国人卡列制成了第一台氨吸收式制冷机，并申请了原理专利。

1873年，美国人D.Byok制造了第一台氨压缩机。

1874年，德国人林德建成了第一台氨压缩式制冷系统，使氨压缩式制冷机在工业上得到了普遍应用。

1910年左右，马利斯·莱兰克在巴黎发明了蒸汽喷射式制冷系统。

1918年，美国工程师考布兰发明了第一台家用电冰箱。

1919年，美国在芝加哥建起了第一座空调电影院，空调技术开始应用。

1929年，美国通用电气公司米杰里发现氟利昂制冷剂R12，从而使氟利昂压缩式制冷机迅速发展起来，并在应用中超过了氨压缩机。

进入20世纪后，制冷进入实际应用的广阔天地，人工制冷不受季节、区域等的限制，可以根据需要制取不同的低温。随后，人们又发现了半导体制冷、声能制冷、热电制冷、磁制冷、吸附式制冷、地温制冷等制冷方法。

我国制冷行业的发展始于20世纪50年代末期，1956年开始在大学中设立制冷学科，制冷压缩机制造业从仿制开始起步到20世纪60年代能自行设计制造。改革开放以来，制冷工业得到飞速发展，特别是80年代通过引进国外先进技术，使我国已发展成制冷空调产品的生产大国，许多产品已打入了国际市场。

4. 制冷的应用 在当代社会，随着制冷工业的发展，制冷的应用也日益广泛，现已渗透到人们生活、生产、科学研究活动的各个领域，并在改善人类的生活质量方面发挥着巨大的作用，从日常的衣、食、住、行，到尖端科学技术都离不开制冷。制冷工业的水平是一个国家现代化的标志。

(1) 空调工程：空调工程是制冷应用的一个广阔领域。光学仪器仪表、精密计量量具、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；体育馆、大会堂、宾馆等公共建筑和小汽车、飞机、大型客车等交通工具也都需有舒适的空调系统；应用于体育运动中，制造人工冰场；在工业生产中，为生产环境提供必要的恒温恒湿环境等。

(2) 食品工程：易腐食品从采购或捕捞、加工、贮藏、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，才能延长和提高食品的质量、经济寿命与价值。这就需有各种制冷设施，如冷加工设备、冷冻冷藏库、冷藏运输车或船、冷藏售货柜台等。大多数食品是容易腐败的，并且食品的生产有较强的季节性和地区性，到目前为止，制冷被认为是加工、贮存食品最好的方法，食品工业是利用制冷最早最多的部门。

(3) 机械及冶金工业：精密机床液压系统利用制冷来控制油温，可稳定油膜粘度，使机床能正常工作；对钢进行低温处理可改善钢的性能，提高钢的硬度和强度，延长工件的使用寿命；炼钢需要氧气，氧气要通过深冷分离方法从空气中得到；机器装配时，利用低温进行零部件间的过盈配合等。

(4) 医疗卫生事业：血浆、疫苗及某些特殊药品需要低温保存，低温冷冻骨髓和外周血干细胞；低温麻醉、低温手术及高烧患者的冷敷降温等也需制冷技术；生物技术的研究和开发中制冷起着举足轻重的作用；冷冻医疗正在蓬勃发展。

(5) 国防工业和现代科学：许多产品需要进行低温性能试验，例如，各种可能在高寒地区使用的发动机、汽车、坦克、大炮、枪械等常规武器的性能需要作低温环境模拟试验；火箭、航天器也需要在模拟高空低温条件下进行试验，这些都需要人工制冷技术。人工降雨也需要制冷。在高科技领域，如激光、红外、超导、遥感、核工业、微电子技术、宇宙开发、新材料等，都离不开制冷。

(6) 石油化工、有机合成：在石油化工、有机合成、基本化工中的分离、结晶、浓缩、液化、控制反应温度等，都离不开制冷。

(7) 轻工业、精密仪表电子工业：纺织、印刷、精密仪表、电子工业都需要控制温度和湿度，进行空气调节。多路通信、雷达、卫星地面站等电子设备也都需要在低温下工作。

(8) 农业、水产业：农业中的良种保存、种子处理、人工气候室，都需要低温。没有制冷，海洋渔业将无法生产。

(9) 建筑及水利：对于大型混凝土构件，凝固过程的放热将造成开裂。例如，葛洲坝的建筑过程就离不开制冷。在矿山、隧道建设中，遇到流沙等恶劣地质条件，可以用制冷将土壤冻结，利用制冷实现冻土开采土方。

(10) 日常生活：日常生活中家用冰箱及空调等是制冷技术的应用，啤酒、胶卷的生产，都离不开制冷。没有制冷技术，卫星地面站就不能正常传输信号，电视节目就看不成了。

综上所述，可见没有制冷工业，就没有现代社会。美国工程院 2000 年评出 20 世纪 20 项对人类社会和生活影响最大的工程技术成就，制冷技术就是其中的一项。

5. 制冷行业国内外关注的热点

(1) 制冷剂破坏臭氧层问题：制冷剂是压缩式制冷中的工作介质，在系统中循环流动。它在低温下吸热汽化，再在高温下凝结放热。从历史上来看，制冷技术发展的第一阶段，是从 1830 年到 1930 年，主要采用 NH_3 、 HCS 、 CO_2 、空气等作为制冷剂，这些制冷剂有的有毒，有的可燃，有的效率很低，使用了 100 年之久。1929 年，美国开发出氟利昂，它是饱和碳氢化合物的氟、氯、溴衍生物的总称。氟利昂是一大类，有几十种。它们的热力性质有很大的区别，但它们的物理和化学性质又有许多共同的优点，因此，从 1930 年到 1990 年，氟利昂得到了广泛的应用。

1975 年，美国学者提出，含氯的氟利昂中的氯原子会破坏臭氧层。臭氧层在离地面 25 ~ 40km 的平流层，它能够屏蔽对地球上生物有害的紫外线。太阳辐射的紫外线有各种波长，其中的波长为 0.28 ~ 0.32 μm 以下的紫外线会危害生命。臭氧层能够阻挡这些有害的紫外线，保护地球上的人类和生物。氟利昂中的氯原子会破坏臭氧层的理论到 20 世纪 90 年代被广泛接受，该理论于 1995 年得到了诺贝尔化学奖。根据该理论，含氯的氟利昂中的氯原子在平流层会分离出来，与臭氧分子作用生成氧化氯和氧分子。氧化氯能与臭氧作用，重新生成氯原子和氧分子，这样不断重复，使臭氧大量被破坏。

研究表明，臭氧层的臭氧每减少 1%，则有害辐射增加 2%。其后果是使皮肤癌和眼病增加，人体的免疫系统性能下降、海洋生物的食物链被破坏、一些植物生长受影响（包括农作物减产）。有人提出，当臭氧层余下 1/5 时，是地球生命的临界点。

应该说明，并不是所有的氟利昂都会破坏臭氧层。为了便于区分，现在经常把氟利昂分为氯氟烃（CFC）、含氢氯氟烃（HCFC）、含氢氟烃（HFC）三类。其中 CFC 类（如 R11 和 R12）对臭氧有明显破坏作用，是当前淘汰的重点。HCFC 的破坏作用比 CFC 类小的多，作为过渡物质目前还可以使用。第三类氢氟烃（HFC）不含氯，对臭氧层没有破坏作用。由此可见，破坏臭氧层的只是含氯的氟利昂。破坏臭氧层的实际上是氯原子，并不是氟原子。

CFC 与 HCFC 排入大气后即无国界，因此，保护臭氧层需要世界各国协调行动。我国于 1992 年加入《蒙特利尔》议定书，对消耗臭氧层的物质进行控制。1993 年，我国批准了《中国消耗大气臭氧层物质逐步淘汰国家方案》。应该说明的是，CFC 并不是只用于制冷空调，从世界平均水平来看，用作制冷剂的 CFC 大约占 30%，其余用于塑料发泡、各种行业的喷雾剂、清洗剂、溶剂。因此，淘汰 CFC 保护臭氧层涉及许多行业，是一个系统工程，是一个逐步进行的过程。

根据“国家方案”，对于我国的制冷空调行业，最终淘汰消耗臭氧层物质（ODS）的时间表如下：

家电行业。1999 年实现 40% 新生产冰箱、冷柜的替代；2003 年完成 70% 新生产冰箱、冷柜的替代。

汽车空调行业。自 2001 年 12 月 31 日起禁止所有新空调车中使用 CFC-12，并逐步削减在用车的 CFC 消费量。2009 年后只允许使用回收的 CFC。

工商制冷行业。在透平式制冷机生产中于 2003 年停止 CFC-11 和 CFC-12 的新灌装；2010 年停止 CFC-11 和 CFC-12 维修补充的再灌装。

泡沫塑料行业。2005 年前完成挤出泡沫塑料和聚氨酯垂直/水平泡沫塑料工艺中使用的 ODS 替代；2007 年前完成聚氨酯板材、管材泡沫塑料工艺中使用 ODS 替代；2010 年前实现聚氨酯喷涂和箱式工艺中使用的 ODS 替代。

从目前情况分，CFC 与 HCFC 的替代工质有许多种。潜在的绿色环保替代物有合成的和天然的两大类。合成的替代物有 HFCS；天然的有氨、二氧化碳、水、碳氢化合物等。

臭氧层的破坏和全球气候变化，是当前全球所面临的主要环境问题。由于制冷、空调、热泵行业广泛采取的 CFC 与 HCFC 类物质对臭氧层有破坏作用以及产生温室效应，使全世界的制冷、空调与热泵行业面临严重的挑战。CFC 与 HCFC 的替代已成为当前国际性的热门话题，该领域的研究和发展还在热烈进行中。

(2) 制冷空调的节能：我国的人均能源资源占有量相对不足，仅为世界平均水平的 40% ~ 50%。能源问题是制约我国现代化建设的关键之一。随着国民经济的发展和人民生活水平的提高，制冷空调的应用越来越广泛。目前广泛采用的压缩式制冷消耗大量的电能，其消耗电能所占的比重越来越大。据报道，北京、深圳的夏季集中空调用电量，已占全市总用电量的三成。因此，制冷空调的节能也就越来越显得重要。

目前人们熟知的“节能”（Energy Saving）已经逐渐为“能量效率”（Energy Efficiency）所取代。这一字之差，实际上反映了对节能的认识从单纯地抑制需求、减少耗能量，发展成为用同样的耗能量，或用少许增加的耗能量，来满足需求，进而提高工作效率和生活质量。

制冷空调的节能应以提高能量效率，用有限的资源和最小的能源消费代价来取得最大的经济和社会效益，满足日益增长的需求为目标。节能并不意味着限制发展，并不意味着降低生产和生活标准。

制冷空调的节能实际上是一个最优化的问题。它包括制冷空调每一个部件和整个系统设计的优化、操作调节的优化、维护管理的优化。通过每一个环节的优化，达到运行的优化，即整个系统的高效率运行，用最小的能源消费代价来满足制冷空调的需求。

6. 制冷原理与设备课程的学习内容 本课程只介绍普通制冷，以普通制冷温度范围内的蒸气压缩制冷原理、制冷压缩机、制冷设备为主。制冷原理与设备课程学习的内容是：

1) 学习获得低温的方法和有关的机理、制冷循环过程、制冷循环的热力学分析和计算，学习制冷剂的热力学性质和物理化学性质。

2) 学习实现制冷循环的主要设备制冷压缩机的原理、结构、应用。

3) 学习实现制冷循环辅助设备即制冷设备的原理、结构、应用。

制冷与空调设备在生活中应用的越来越多，与生活实际密切相关。这有利于使用课内实践、参观、实物展示、拆装、实际设备调查、仿真素材库电子课件等教学形式，以便深入浅出的讲解基本内容，训练学生举一反三的能力。制冷原理与设备的内容有机融合，可强化学生的工程观点。

制冷原理与设备一书是把专业课程中的制冷原理、制冷压缩机、制冷设备整合成一门课程，目的是使大家建立制冷系统的概念。学习中应注意运用制冷原理，综合分析制冷压缩机和制冷设备结构，理解制冷装置的总体设计中的能量平衡思想。

由于电冰箱、空调的普及，以及很多原理和设备实例存在于我们的日常生活中，制冷原理与设备一书的知识不是想象的那么深奥；当然，制冷原理与设备的知识也不是想象的那么简单，如果从系统的整体考虑，会遇到能量平衡、节能运行问题，系统的非均衡性、动态性问题，局部和全局的问题等，这些课题都需要研究、揣摩、实践。

由于新工艺、新技术、新材料的研究与应用，高效、节能、环保、新功能的制冷与空调设备不断出现，如：静音、省电、数字温控、自动除臭、模糊控制、神经系统除霜冰箱等；清新空气、变频、CFCs、神经系统和模糊控制、双转子压缩机、急冷/急热空调等；新型螺杆式、涡旋式、余摆线式压缩机等。在教学中，应及时将制冷原理与设备行业中的新工艺、新技术、新设备、新知识引入课堂。

第1篇 制冷原理

从低于环境温度的空间或物体中吸取热量并将其转移给周围环境的过程，称为制冷。“制冷”中的“冷”是相对于环境温度而言的。灼热的铁块放在空气中，通过辐射和对流向环境传热，逐渐冷却到环境温度；一杯热水置于空气中，逐渐冷却成常温水，类似这样的过程，都是自发的传热降温，属于自然冷却，不是制冷。只有通过一定的方式将铁块或水冷却到环境温度以下，才能称为制冷。热量从低温对象传给高温对象，是一个非自发的传热过程，需要消耗能量作为代价，这就好像水泵消耗电能，才能将低处的水输送到高处一样。

在两个热源之间工作的用于制冷目的的系统称为制冷系统。在制冷系统中传递热量的流体称为制冷剂，制冷系统即通过制冷剂在低温低压时从低温热源中吸取热量并在高温高压时将热量排到高温热源中，在制冷系统中制冷剂所经历的一系列热力过程的总和称为制冷循环。包括原动机在内的按照制冷循环依次连接起来的机械和设备的整体称为制冷装置。这些机械和设备都是与制冷剂相接触的。为实现制冷循环，必须消耗能量，该能量可以是机械能、电能、热能、太阳能及其他形式能量。

制冷原理是以热力学定律为理论基础来分析、研究制冷循环的理论和应用。本篇的主要内容包括：

- 1) 蒸气压缩式制冷循环工作原理、热力性能；单级、双级蒸气压缩式及复叠式制冷循环的组成、工作过程及工作特点。
- 2) 制冷剂的种类、编号，制冷剂的限制与替代；常用制冷剂、载冷剂的性质、特点。
- 3) 吸收式制冷循环的组成、工作原理及工作特点。
- 4) 蒸气喷射式制冷、吸附式制冷、热电制冷、空气膨胀制冷及涡流管制冷的基本原理。

第 1 章 单级蒸气压缩式制冷循环

蒸气压缩式制冷机（简称蒸气制冷机）是目前应用最广泛的一种制冷机。这类制冷机设备比较紧凑，可以制成大、中、小型，以适应不同场合的需要，能达到的制冷温度范围比较宽广，从稍低于环境温度至 -150°C ，在普通制冷温度范围内具有较高的循环效率，被广泛地应用于国民经济的各个领域。

根据实际应用，蒸气压缩式制冷循环，有单级、多级、复叠式等循环之分，本章将依次进行介绍。在各种蒸气压缩式制冷机中，单级压缩制冷机应用最广，是构成其他蒸气压缩式制冷机的基础，据不完全统计，全世界单级蒸气压缩式制冷机的数量占制冷机总数的 75% 以上，将重点予以介绍。

1.1 单级蒸气压缩式制冷循环的基本工作原理

在日常生活中我们都有这样的体会，如果给皮肤上涂抹酒精液体时，就会发现皮肤上的酒精很快干掉，并给皮肤带来凉快的感觉，这是什么原因呢？这是因为酒精由液体变为气体时吸收了皮肤上热量的缘故。由此可见，液体汽化时要从周围物体吸收热量。单级蒸气压缩式制冷，就是利用制冷剂由液体状态汽化为蒸气状态过程中吸收热量，被冷却介质因失去热量而降低温度，达到制冷的目的。制冷剂在变为蒸气之后，需要对它进行压缩、冷凝，继而进行再次汽化吸热。对制冷剂蒸气只进行一次压缩，称为蒸气单级压缩。

1.1.1 制冷循环系统的基本组成

根据蒸气压缩式制冷原理构成的单级蒸气压缩式制冷循环系统，是由不同直径的管道和在其中制冷剂会发生不同状态变化的部件组成，串接成一个封闭的循环回路，在系统回路中装入制冷剂，制冷剂在这个循环回路中能够不停地循环流动，即称为制冷循环系统。

制冷剂在流经制冷循环系统的各相关部位，将发生由液态变为气态，再由气态变为液态的重复性的不断变化。利用制冷剂汽化时吸收其他物质的热量，冷凝时向其他介质放出热量的性质，当制冷剂汽化吸热时，某物质必然放出热量而使其温度下降，这样就达到了制冷的目的。依照上述要求，蒸气压缩式制冷循环系统如图 1-1 所示。

蒸气压缩式制冷循环系统主要由四大部件组成，即压缩机、冷凝器、节流元件和蒸发器，用不同直径的管道把它们串接起来，就形成了一个能使制冷剂循环流动的封闭系统。

1.1.2 制冷循环过程

制冷压缩机由原动机如电动机拖动而工作，不断地抽吸蒸发器中的制冷剂蒸气，压缩成高压（ p_k ）、过热蒸气而排出并送入冷凝器，正是由于这一高压存在，使制冷剂蒸气在冷凝

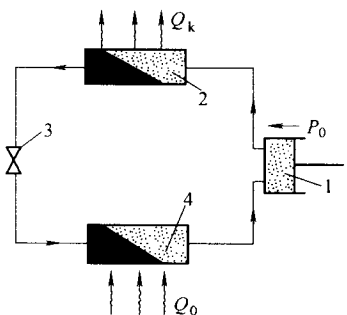


图 1-1 单级蒸气压缩式制冷循环系统

- 1—制冷压缩机 2—冷凝器
- 3—节流元件 4—蒸发器

器中放出热量，把热量传递给周围的环境介质——水或空气，从而使制冷剂蒸气冷凝成液体，当然，制冷剂蒸气冷凝时的温度一定要高于周围介质的温度。

冷凝后的液体仍处于高压状态，流经节流元件进入蒸发器。制冷剂在节流元件中，从入口端的高压 p_k 降低到低压 p_0 ，从高温 t_k 降低到 t_0 ，并出现少量液体汽化变为蒸气。

制冷剂液体流入蒸发器后，在蒸发器中吸收热量而沸腾汽化，逐渐变为蒸气，在汽化过程中，制冷剂从被冷却介质中吸收所需要的汽化热，被冷却介质由于失去热量而温度降低，实现了制冷的目的。当然，制冷剂液体汽化时的温度（按习惯称为蒸发温度） t_0 一定要低于被冷却介质的温度。由于压缩机不断地抽吸制冷剂蒸气，蒸发器中的低温、低压制冷剂蒸气能够不断地向前流动，不断地供给压缩机进行抽吸、压缩并排出，制冷剂在流动和变化中完成了一个循环后，进入下一次循环。只要压缩机不停止运转，制冷剂的循环就不会休止。

1.1.3 制冷系统各部件的主要用途

1. 制冷压缩机 制冷压缩机是制冷循环的动力，它由原动机，如电动机拖动而工作，它除了及时抽出蒸发器内蒸气，维持低温低压外，并且通过压缩作用提高制冷剂蒸气的压力和温度，创造将制冷剂蒸气的热量向外界环境介质转移的条件，即将低温低压制冷剂蒸气压缩至高温高压状态，以便能用常温的空气或水作冷却介质来冷凝制冷剂蒸气。

2. 冷凝器 冷凝器是一个热交换设备，作用是利用环境冷却介质空气或水，将来自制冷压缩机的高温高压制冷蒸气的热量带走，使高温高压制冷剂蒸气冷却、冷凝成高压常温的制冷剂液体。冷凝器向冷却介质散发热量的多少，与冷凝器的面积大小成正比，与制冷剂蒸气温度和冷却介质温度之间的温度差成正比。所以，要散发一定的热量，就需要足够大的冷凝器面积，也需要一定的换热温度差。

3. 节流元件 高压常温的制冷剂液体不能直接送入低温低压的蒸发器。根据饱和压力与饱和温度——对应原理，降低制冷剂液体的压力，从而降低制冷剂液体的温度。将高压常温的制冷剂液体通过降压装置——节流元件，得到低温低压制冷剂，再送入蒸发器吸热汽化。目前，蒸气压缩式制冷系统中常用的节流元件有膨胀阀和毛细管。

4. 蒸发器 蒸发器也是一个热交换设备。节流后的低温、低压制冷剂液体在其内蒸发（沸腾）变为蒸气，吸收被冷却介质的热量，使被冷却介质温度下降，达到制冷的目的。蒸发器吸收热量的多少与蒸发器的面积大小成正比，与制冷剂的蒸发温度和被冷却介质温度之间的温度差成正比，当然，也与蒸发器内液体制冷剂的多少有关。所以，蒸发器要吸收一定的热量，就需要与之相匹配的蒸发器面积，也需要一定的换热温度差，还需要供给蒸发器适量的液体制冷剂。

1.1.4 制冷剂的变化过程

制冷剂在循环系统中不停地流动，其状态也不断地变化，它在循环系统的每一部位的状态都是各不相同的。

1. 制冷剂在制冷压缩机中的变化 按压缩机工作原理的要求，制冷剂蒸气由蒸发器的末端进入压缩机吸气口时，应该处于饱和蒸气状态，但这是很难实现的。制冷剂的饱和压力和饱和温度存在着——对应关系，即压力越高温度越高，压力越低温度越低。其饱和压力值和饱和温度值的对应关系，可从附录中各种制冷剂的热力性质表中查阅。

制冷剂蒸气在压缩机中被压缩成过热蒸气，压力由蒸发压力 p_0 升高到冷凝压力 p_k 。由

于压缩过程是在瞬间完成的，制冷剂蒸气与外界几乎来不及发生热量交换压缩就已完成，所以称为绝热压缩过程。蒸气的被压缩是由于外界施给能量而实现的，即外界的能量对制冷剂做功，这就使得制冷剂蒸气的温度再进一步升高，使蒸气进一步过热，即压缩机排出的蒸气温度高于冷凝温度。

2. 制冷剂在冷凝器中的变化 过热蒸气进入冷凝器后，在压力不变的条件下，先是散发出一部分热量，使制冷剂过热蒸气冷却成饱和蒸气，然后饱和蒸气在等温条件下，继续放出热量而冷凝产生了饱和液体。继续不断地冷凝，饱和液体会越来越多，饱和蒸气越来越少，最终会把制冷剂蒸气全部冷凝为饱和液体，这时饱和液体仍维持冷凝压力 p_k 和冷凝温度 t_k 。冷凝温度 t_k 由设备的工况条件确定，对应的冷凝压力可从该制冷剂的热力性质表中查阅。

3. 制冷剂在节流元件中的变化 饱和液体制冷剂经过节流元件，由冷凝压力 p_k 降至蒸发压力 p_0 ，温度由 t_k 降至 t_0 。由节流元件出口流出的制冷剂变为液体约占 80%、气体约占 20%（体积分数）的两相混合状态，这其中少量蒸气的产生，是由于压力下降液体膨胀而出现的闪发气体。汽化时吸收的热量来源于制冷剂本身，与外界几乎不存在热量的交换，故称为绝热膨胀过程。

4. 制冷剂在蒸发器中的变化 以液体为主的两相混合状态的制冷剂，流入蒸发器内吸收被冷却介质的热量而不断汽化，制冷剂在等压等温条件下的不断汽化，使得液体越来越少，蒸气越来越多，直到制冷剂液体全部汽化变为饱和蒸气时，又重新流回到压缩机的吸气口，再次被压缩机吸入、压缩、排出，进入下一次循环。

以上是制冷剂的一个完整的状态变化过程，也称为一个完整的制冷循环过程。正是由于制冷循环的存在和制冷剂的合理状态变化，通过制冷剂的流动，实现了在蒸发器周围吸收热量，在冷凝器周围又放出热量，起到了把热量搬运、转移的作用，达到蒸发器周围温度下降，即制冷的目的。

1.2 单级蒸气压缩式制冷理论循环

单级蒸气压缩式制冷循环，是指制冷剂在一次循环中只经过一次压缩，最低蒸发温度可达 $-40 \sim -30^\circ\text{C}$ 。单级蒸气压缩式制冷广泛用于制冷、冷藏、工业生产过程的冷却，以及空气调节等各种低温要求不太高的制冷工程。

1.2.1 理论制冷循环的假设条件和压焓图

实际的制冷循环极为复杂，难以获得完全真实的全部状态参数。因此，在分析和计算单级蒸气压缩式制冷循环时，通常采用理论制冷循环。

1. 理论制冷循环的假设条件 理论制冷循环是建立在以下假设基础上：

- 1) 压缩过程为等熵过程，即在压缩过程中不存在任何不可逆损失。
- 2) 在冷凝器和蒸发器中，制冷剂的冷凝温度等于冷却介质的温度，蒸发温度等于被冷却介质的温度，且冷凝温度和蒸发温度都是定值。
- 3) 离开蒸发器和进入制冷压缩机的制冷剂蒸气为蒸发压力下的饱和蒸气；离开冷凝器和进入节流元件的液体为冷凝压力下的饱和液体。
- 4) 除节流元件产生节流降压外，制冷剂在设备、管道内的流动没有阻力损失（压力降），与外界环境没有热交换。

5) 节流过程为绝热过程, 即与外界不发生热交换。

2. 制冷剂的压焓图 为了对蒸气压缩式制冷循环有一个全面的认识, 不仅要知道循环中每一个过程, 而且要了解各个过程之间的关系以及某一过程发生变化时对其他过程的影响。在制冷循环的分析和计算中, 通常借助于压焓图, 可使整个循环问题简化, 并可以看到循环中各状态的变化以及这些变化对循环的影响。

压焓图的结构如图 1-2 所示。以绝对压力为纵坐标 (为了缩小图的尺寸, 提高低压区域的精度, 通常纵坐标取对数坐标), 以焓值为横坐标。其中有:

一点。临界点 C。

三区。液相区、两相区、气相区。

五态。过冷液状态、饱和液状态、湿蒸气状态、饱和蒸气状态、过热蒸气状态。

八线。等压线 p (水平线), 等焓线 h (垂直线), 饱和液线 $x=0$, 饱和蒸气线 $x=1$, 无数条等干度线 x (只存在于湿蒸气区域内, 其方向大致与饱和液体线或饱和蒸气线相近, 视干度大小而定), 等熵线 s (向右上方倾斜的实线), 等比体积线 v (向右上方倾斜的虚线, 比等熵线平坦), 等温线 t (液体区几乎为垂直线。两相区内, 因制冷剂状态的变化是在等压、等温下进行, 故等温线与等压线重合, 是水平线。过热蒸气区为向右下方弯曲的倾斜线)。

在温度、压力、比体积、比焓、比熵、干度等参数中, 只要知道其中任意两个状态参数, 就可以在压焓图中确定过热蒸气及过冷液体的状态点, 其他状态参数便可直接从图中读出。对于饱和蒸气及饱和液体, 只需知道一个状态参数就能确定其状态。

3. 理论制冷循环过程在压焓图上的表示 根据理论制冷循环的假设条件, 单级蒸气压缩式制冷理论循环工作过程, 在压焓图上的表示如图 1-3 所示。

1) 制冷压缩机从蒸发器吸取蒸发压力为 p_0 的饱和制冷剂蒸气 (状态点 1), 沿等熵线压缩至冷凝压力 p_k (状态点 2), 压缩过程完成。

2) 状态点 2 的高温高压制冷剂蒸气进入冷凝器, 经冷凝器与环境介质空气或水进行热交换, 放出热量 q_k 后, 沿等压线 p_k 冷却至饱和蒸气状态点 2', 然后冷凝至饱和液状态点 3, 冷凝过程完成。在冷却过程 (2-2') 中制冷剂与环境介质有温差, 在冷凝过程 (2'-3) 中制冷剂与环境介质无温差。

3) 状态点 3 的饱和制冷剂液体经节流元件节流降压, 沿等焓线 (节流过程中焓值保持不变) 由冷凝压力 p_k 降至蒸发压力 p_0 , 到达湿蒸气状态点 4, 膨胀过程完成。

4) 状态点 4 的制冷剂湿蒸气进入蒸发器, 在蒸发器内吸收被冷却介质的热量沿等压线 p_0 汽化, 到达饱和蒸气状态点 1, 蒸发过程完成。制冷剂的蒸发温度与被冷却介质间无温差。

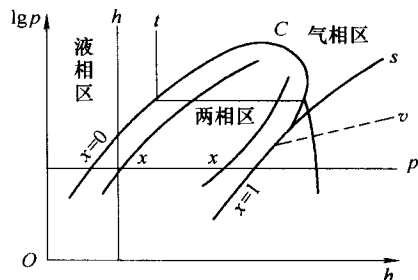


图 1-2 压焓图 ($\lg p-h$ 图)

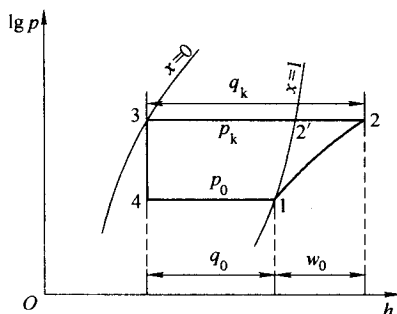


图 1-3 单级蒸气压缩式制冷理论循环在 $\lg p-h$ 图上的表示