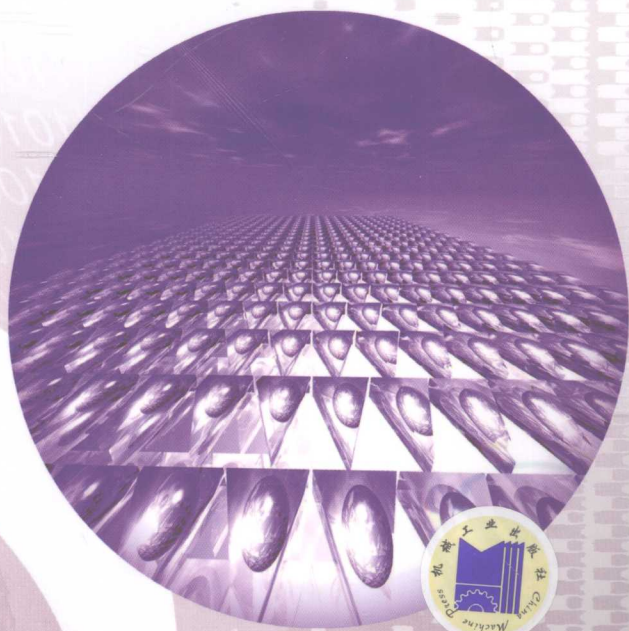


国家级精品课程建设配套规划教材

制冷技术

金文 逯红杰 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



配电子课件

国家级精品课程建设配套规划教材

制 冷 技 术

主 编 金 文 逯红杰

参 编 杜芳莉 刘 铭 杜 鹃



机 械 工 业 出 版 社

本书为“制冷技术”国家级精品课程建设配套教材,全书共12章,分别介绍了蒸气压缩式制冷热力学原理、制冷剂与载冷剂、蒸气压缩式制冷装置、蒸气压缩式制冷系统、制冷机组、水系统、空调制冷站设计、蒸气压缩式制冷系统运转前期工作、双级和复叠式蒸气压缩制冷、吸收式制冷、热泵技术、蓄冷技术等内容。

本书可作为高职高专供热通风与空调工程技术、制冷与空调技术、建筑设备工程技术等专业教材,也可作为从事制冷技术工程技术人员自学和培训教材。

图书在版编目(CIP)数据

制冷技术/金文,逯红杰主编. —北京:机械工业出版社,2009.8

国家级精品课程建设配套规划教材

ISBN 978-7-111-27871-9

I. 制… II. ①金…②逯… III. 制冷技术—高等学校—教材
IV. TB66

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第128823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:覃密道 责任编辑:王靖辉 版式设计:霍永明

责任校对:李秋荣 封面设计:张静 责任印制:邓博

北京机工印刷厂印刷(兴文装订厂装订)

2009年8月第1版第1次印刷

184mm×260mm·17.75印张·437千字

0 001—4 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-27871-9

定价:29.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 68354423

封面无防伪标均为盗版

前 言

本书是根据高职高专供热通风与空调工程技术专业的课程教学要求，结合多年的教学和工程实践，配合“制冷技术”国家级精品课程建设而编写的。

本书共12章，分别介绍了蒸气压缩式制冷热力学原理、制冷剂与载冷剂、蒸气压缩式制冷装置、蒸气压缩式制冷系统、制冷机组、水系统、空调制冷站设计、蒸气压缩式制冷系统运转前期工作、双级和复叠式蒸气压缩制冷、吸收式制冷、热泵技术、蓄冷技术等内容。

在编写过程中，编写人员多次对本书的大纲及内容进行研讨，参考了大量的相关专业书籍，并虚心听取了设计院、施工企业的技术专家和制冷系统运行管理一线技术人员的意见和建议，力求使教材更通俗、实用。教材编写以培养高技能应用型专门人才为目的，遵循理论与实践相结合的原则，突出对学生应用能力的培养。内容上深入浅出，符合认知规律。为了便于学生学习和掌握课程内容，本书各章前有学习目标，每节后都编写了小结，每章后列有思考与练习。

本书由金文和逯红杰担任主编。编写分工如下：绪论、第3章、第10章由逯红杰编写；第1章、第2章、第8章由金文编写；第4章、第9章由杜芳莉编写；第5章由刘铭编写；第6章、第7章、第11章、第12章由杜鹃编写。

由于编者水平有限，时间仓促，书中难免有错误或不当之处，恳请专家和使用本书的读者批评指正。

“制冷技术”国家级精品课程网址为：<http://www.xihangzh.com/zlkj>，网站提供了丰富的仿真课件、电子教案、思考练习题等网络资源，并有课程全程教学录像，供访问者学习和使用。

编者

目 录

前言	
绪论	1
思考与练习	4
第1章 蒸气压缩式制冷热力学原理	5
1.1 制冷原理	5
1.2 压焓图与温焓图	7
1.3 理想制冷循环	9
1.4 理论制冷循环	11
1.5 实际制冷循环	15
1.6 影响制冷循环效率的因素	30
思考与练习	36
第2章 制冷剂与载冷剂	38
2.1 制冷剂	38
2.2 载冷剂	56
思考与练习	59
第3章 蒸气压缩式制冷装置	61
3.1 制冷压缩机	61
3.2 冷凝器	83
3.3 蒸发器	91
3.4 节流机构	96
3.5 制冷系统的辅助设备	100
思考与练习	110
第4章 蒸气压缩式制冷系统	112
4.1 空调用制冷系统	112
4.2 冷藏用制冷系统	117
4.3 制冷管道	120
思考与练习	136
第5章 制冷机组	137
5.1 活塞式冷水机组	137
5.2 螺杆式冷水机组	143
5.3 离心式冷水机组	147
5.4 空调机组	151
思考与练习	158
第6章 水系统	159
6.1 冷却水系统	159
6.2 冷冻水系统	169

思考与练习	176
第 7 章 空调制冷站设计	177
7.1 空调制冷站设计的一般步骤	177
7.2 空调制冷站设计实例	184
思考与练习	192
第 8 章 蒸气压缩式制冷系统运转前期工作	193
8.1 单体试运转	193
8.2 制冷系统试验	194
8.3 制冷系统试运转	200
8.4 制冷系统运行及参数调试	202
思考与练习	205
第 9 章 双级和复叠式蒸气压缩制冷	206
9.1 双级蒸气压缩制冷	206
9.2 复叠式蒸气压缩制冷	219
思考与练习	222
第 10 章 吸收式制冷	224
10.1 吸收式制冷原理	224
10.2 工质对	225
10.3 溴化锂吸收式制冷	228
思考与练习	237
第 11 章 热泵技术	238
11.1 热泵工作原理	238
11.2 热泵技术的应用	241
思考与练习	249
第 12 章 蓄冷技术	250
12.1 蓄冷与蓄冷剂	250
12.2 蓄冷系统	253
思考与练习	261
附录	262
附录 1 R717 饱和液体及饱和蒸气热力性质表、压-焓图	262
附录 2 R134a 饱和液体及饱和蒸气热力性质表、压-焓图	265
附录 3 R12 饱和液体及饱和蒸气热力性质表、压-焓图	271
附录 4 R22 饱和液体及饱和蒸气热力性质表、压-焓图	274
参考文献	277

绪 论

制冷技术与我们的生活有着密切的关系，从家用电冰箱、空调器、冰柜、空调汽车、空调火车，到宾馆、商场的空调、冷库等，都离不开制冷。制冷技术是由于社会生产和人民生活的需要而产生和发展的，它的发展又促使了社会生产和科学技术的进步，满足了人们生活和生产需要。随着社会的不断进步，国民经济的快速发展，人们生活水平的不断提高，制冷技术将会被越来越多地应用到生产、生活等各个领域。通俗地讲，制冷技术就是研究如何获得低温的一门科学技术。

制冷可以通过两种途径来实现，一种是利用天然冷源，另一种是人工制冷。天然冷源主要是指夏季使用的深井水和冬天贮存下来的天然冰。在夏季，深井水的温度低于环境温度，可以用来防暑降温或作为空调冷源使用；天然冰可以用来食品冷藏和防暑降温。天然冷源虽具有价格低廉和不需要复杂技术设备等优点，但它受到时间和地区等条件的限制，最主要的是受到制冷温度的限制，它只能制取 0°C 以上的温度。要想获得 0°C 以下的制冷温度，必须采用人工制冷的方法来实现。本书中所称的制冷均是指人工制冷。

1. 制冷的概念

制冷是指用人工的方法将被冷却对象的热量转移到周围环境介质，使得被冷却对象达到比环境介质更低的温度，并在所需的时间内维持这个低温。

制冷与冷却不同。冷却是热量从高温对象传向低温对象的过程，是一个自发的过程，如一杯开水在空气中的自然冷却，开水的热量自发地传给了空气。而制冷是将低温对象的热量传给高温对象。如同将水从低处输送到高处需要使用水泵消耗电能一样，将热量从低温对象传给高温对象，是一个非自发的过程，需要使用一定的设备，消耗外界能量作为补偿。

实现制冷的机器和设备称为制冷机。制冷机在制取冷量的同时，必须消耗外界能量，这种能量可以是机械能、电能、热能、太阳能或其他形式的能量。

制冷的的方法很多，可以认为，凡是伴随着吸热的物理过程都可以用来制冷。按物理过程的不同，制冷的的方法有液体气化制冷、气体膨胀制冷、热电制冷、固体绝热去磁制冷等。在我们的专业范围内，应用最为广泛的是液体气化制冷，它是利用液体气化时吸收气化潜热而产生冷效应来实现制冷的。液体气化制冷的的方法又包括蒸汽压缩式制冷、吸收式制冷、吸附式制冷、蒸汽喷射式制冷等。本书主要介绍蒸汽压缩式制冷和吸收式制冷，其他制冷方法读者可根据兴趣和需要查阅相关书籍。

制冷剂是制冷过程中将热量从被冷却对象转移到环境的工作介质，也称制冷工质。

为了获得持续的低温，需要连续不断地制冷，制冷剂也就需要连续不断地从被冷却对象吸热和向环境介质放热，从而在制冷机器和设备内形成一个周而复始的循环流动，称为制冷循环。

按照制冷温度的不同，制冷技术可以分为不同的种类。不同的分类方法所划分的温度范围也有所不同，其中一种分类方法把制冷技术分为普通制冷 ($T > 120\text{K}$)、低温制冷 ($T = 4.2 \sim 120\text{K}$) 和超低温制冷 ($T < 4.2\text{K}$)。由于制冷温度不同，所采用的制冷剂、制冷方法、

制冷机器及设备都有较大的差别。食品冷藏冷冻、空气调节和一般的生产工艺用冷属于普通制冷的范畴，主要采用液体气化制冷。

2. 制冷技术的应用

随着制冷工业的发展，制冷技术的应用也日益广泛，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。美国机械工程师学会将空调制冷技术列为 20 世纪 20 项最重大工程技术成就之一（位列第十位）。

1) 日常生活中，家用冰箱、空调等均是制冷技术的应用，啤酒、冷饮、胶卷的生产，都离不开制冷技术。没有制冷技术，卫星地面站就不能正常传输信号，就不能正常收看电视节目了。

2) 空调工程是制冷技术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，需要安装工艺性空调系统；体育馆、大会堂、宾馆、超市、商场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性空调系统，满足人们的身心健康和提高工作效率。

3) 食品行业，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。

4) 精密机床油压系统利用制冷来控制油温，可稳定油膜黏度，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；机械装配时利用低温进行零部件间的过盈配合等。

5) 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；在生物技术的研究和开发中，制冷技术起着举足轻重的作用；冷冻医疗正在蓬勃发展。

6) 国防工业中，航空仪表、火箭、导航的控制仪器以及航空发动机都需要在模拟的高空低温条件下进行低温性能试验；可能在高寒地区使用的汽车、坦克、大炮、枪械等常规武器也需要作低温环境模拟试验。

7) 人工降雨也需要制冷技术。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，都离不开制冷技术。

8) 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，都离不开制冷技术。

9) 农业中的良种保存、种子处理、人工气候室，都需要低温。

10) 建筑业中，对于大型混凝土构件，凝固过程的放热将造成开裂，需要用冰替代水来抵消水泥的固化反应热。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，实现冻土法开采土方，以保持工作面。

3. 制冷技术的发展

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。早在三千多年前，我国人民已经懂得利用天然冷源，在严寒的冬季采集水面的厚冰贮藏在冰窖里，到夏季再取出来使用，在《诗经》、《左传》、《周礼》中均有记载。到了秦汉时期，冰的使用就更进了一步，到了唐朝已经生产冰镇饮料了。

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，19 世纪中叶开始发展起来。

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。

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，制得了冰，并正式申请了专利，这是蒸气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。这是世界第一台制冷和空调用的空气制冷机。

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。

1872 年，美国人波义耳发明了氨压缩机。

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，制冷技术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。

到 20 世纪 80 年代，随着部分氟利昂制冷剂对大气臭氧层的破坏得以公认，寻找新的、可替代的制冷剂成了新的研究方向。随着制冷空调的应用越来越广泛，其消耗的电能占用电量的比重越来越大，制冷空调的节能也显得越来越重要，对太阳能、地热能的开发和利用，系统能量的回收再利用尤为必要。随着自动控制技术的发展，制冷系统的运行管理已普遍采用微机控制，同时网络技术用于制冷系统的远程控制、故障诊断已经成为现实，从而使制冷系统能够更加可靠、节能、高效地运行

4. 本课程的主要内容及学习方法

本课程主要阐述单级蒸汽压缩式制冷的基本原理；制冷剂的性质及制冷剂的替代；制冷压缩机和设备的构造、性能；制冷系统的构成和设计方法；制冷机组的组成及选用；冷却水和冷冻水系统的组成与设计；双级和复叠式制冷的原理；蒸汽压缩式制冷系统的试运转；溴化锂吸收式制冷机组的工作原理；空调制冷站的设计；热泵、蓄冷技术的原理和应用等。

本课程以“流体力学”、“热工基础”等课程为理论基础，学习过程中应重视理论联系实际，注重课内实践、参观、实物展示、设备拆装、仿真电子课件等教学形式的利用。

思考与练习

- 0-1 什么是制冷？制冷和冷却有何不同？
- 0-2 制冷的的方法有哪些？
- 0-3 日常生活中，你接触到过哪些制冷系统或设备？制冷对你的生活产生了哪些影响？
- 0-4 结合个人情况，谈谈你将如何学好制冷技术这门课程。

第1章 蒸气压缩式制冷热力学原理

本章目标：

1. 理解蒸气压缩式制冷系统的基本原理以及系统组成。
2. 熟悉单级蒸气压缩式制冷循环在压焓图或温焓图上的表示。
3. 掌握单级蒸气压缩式制冷热力学基础：理想制冷循环、理论制冷循环、实际制冷循环特点。
4. 熟练应用压焓图对单级蒸气压缩式制冷循环进行热力学计算并了解计算目的。
5. 理解制冷循环经济评价指标：制冷系数与热力完善度、性能系数与能效比。
6. 掌握单级蒸气压缩式制冷系统的运行工况以及工况变化对制冷循环性能的影响。

在绪论中了解到，制冷是人为将热量从低温物体传向高温物体，在这个逆向传热过程中，必须要有一个能量补偿。蒸气压缩式制冷是以消耗机械能为补偿条件，借助制冷工质（常称为制冷剂）的状态变化将热量从温度较低的物体不断地传给温度较高的环境介质（通常是自然界的水或空气）中去。在本章，我们学习制冷工质在制冷循环中发生怎样的状态变化，这些变化带来多少热量和能量的转移。

1.1 制冷原理

1. 制冷系统组成

在炎热的夏天我们会有这样的体会，如果身上的汗能够不断地挥发出去，就会感到凉爽，这是因为汗水变为气体扩散到空气中时要吸收大量的汽化潜热，而这些潜热来自我们的身体，所以汗不断挥发，身体里的热量就不断地被带走。也就是说，液体汽化会从外界吸收热量，从而实现制冷的目的。那么在制冷系统中如何实现制冷呢？

首先要有一种像汗一样能够吸热而汽化的工质，这就是制冷工质，通常称为制冷剂。让制冷剂不断地经过被冷却物，从被冷却物中吸热汽化，使之达到并保持低温。但是制冷剂一旦汽化后就不能再制冷了，而在实际制冷过程中，我们总希望制冷剂能周而复始的被使用，连续地制冷，这就需要有一套机械装置把汽化后的制冷剂再变为液体，恢复其汽化制冷的功能，这套机械装置称为制冷装置。

制冷剂汽化吸热而实现制冷的设备叫蒸发器。蒸发器是一种热交换设备，制冷剂和被冷却物在其中进行热量传递，制冷剂进入蒸发器时是液体，离开时变为气体。将气态制冷剂变回液体的设备是冷凝器。冷凝器也是一种热交换设备，在其中制冷剂向环境（环境介质通常为空气或水）释放热量，由气态冷凝为液态，即制冷剂进入冷凝器时是气体，离开时变为液体，它又具备了汽化能力。但是制冷剂冷凝是向常温常压下的环境介质放热，而制冷后

离开蒸发器的气态制冷剂温度很低，低于环境温度（制冷是使被冷却物低于环境温度并保持），这个低温的制冷剂是无法向环境自发放热冷凝的，这就需要一种设备将低温低压蒸发器出口状态的制冷剂，变为高温高压冷凝器入口状态的制冷剂，这个设备就是压缩机。压缩机是耗能设备，它及时地从蒸发器抽取气态制冷剂，维持蒸发器低温低压状态，同时通过压缩作用提高制冷剂温度压力，并向冷凝器输送，实现向环境放热冷凝的目的。这样，制冷剂在蒸发器处于低温低压状态，在冷凝器处于高温高压状态，蒸发器与冷凝器不能直接连接，蒸发器出口与冷凝器入口通过压缩机提高压力实现连接，那么冷凝器出口与蒸发器入口也要有一个完成降压作用的连接设备，这就是节流机构。节流机构一方面将高温高压液态制冷剂节流降压，满足蒸发器工作条件，另一方面还可以调节蒸发器的供液量，满足被冷却物降温变化的要求。

因此，完成一个制冷过程所需最基本的组成设备包括压缩机、冷凝器、节流机构和蒸发器，它们通常称为制冷四大件。其中，压缩机是制冷系统的“心脏”，负责压缩和输送制冷剂蒸气；冷凝器输出热量，将制冷剂蒸气变回液体；节流阀是节流降压设备，供给蒸发器需要的制冷剂状态和流量；蒸发器吸收热量（输出冷量）从而实现制冷。

由压缩机、冷凝器、节流机构和蒸发器四个部件并依次用管道连接成封闭的系统，充注适当制冷工质，这就组成了制冷机，被称为最简单的制冷机。

2. 制冷循环过程

图 1-1 是最简单的制冷机结构组成示意图，也是工程中常见的蒸汽压缩式制冷系统图。它由压缩机、冷凝器、节流阀和蒸发器组成。其工作过程如下：

压缩机吸入来自蒸发器的低温低压制冷剂蒸气，经压缩，提高其压力达到冷凝压力 p_k 之后送入冷凝器，放出热量并传给冷却介质（通常是常温常压下的水或空气），由高温高压制冷剂蒸气冷凝成液体，液化后的高温高压制冷剂又进入节流机构，通过节流降温降压，达到蒸发压力 p_0 后进入蒸发器，在蒸发温度 t_0 下吸收被冷却介质的热量，低温低压制冷剂液体沸腾，变成低温低压的蒸气，随即再次被压缩机吸入，重复上述过程。制冷剂在单级蒸汽压缩式制冷系统中周而复始的工作过程就叫蒸汽压缩式制冷循环。通过制冷循环制冷剂不断吸收周围空气或物体的热量，从而使室温或物体温度降低，以达到制冷的目的。

在制冷过程中，蒸发器源源不断地从被冷却介质中吸收热量 Q_0 ，即对被冷却介质产生制冷量 Q_0 ，而这些热量通过制冷剂载送到冷凝器，再释放给冷却介质，同时制冷剂在传送热量过程中需要压缩机做功耗能 W ，在冷凝器也一并释放给冷却介质，因此冷凝器传出的热量包括制冷量 Q_0 和压缩功率 W 两个方面，这部分热量称为冷凝热负荷 Q_k 。

$$Q_k = Q_0 + W$$

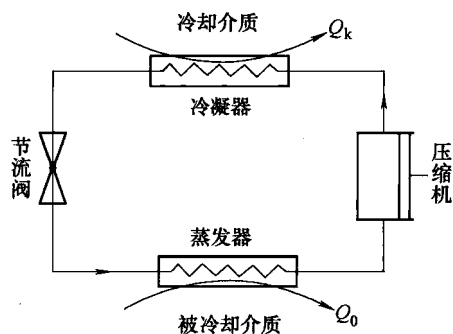


图 1-1 蒸汽压缩式制冷系统图

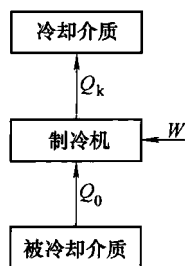


图 1-2 制冷过程热量传递示意

制冷过程热量传递情况如图 1-2 所示。

在蒸气压缩式制冷循环中，制冷剂不断发生状态变化，并有多种状态存在于系统当中，为了更好地了解制冷剂在不同位置所处的状态，我们可以将制冷系统横向分为两部分，如图 1-3a 所示，上部为高压部分，制冷剂在这部分处于高压——冷凝压力 p_k 状态下，下部为低压部分，制冷剂在这部分处于低压——蒸发压力 p_0 状态下；将制冷系统纵向也可分为两部分，如图 1-3b 所示，左部为液态部分，以液体制冷剂为主要存在形式；右部为气态部分，制冷剂在此为气体状态。

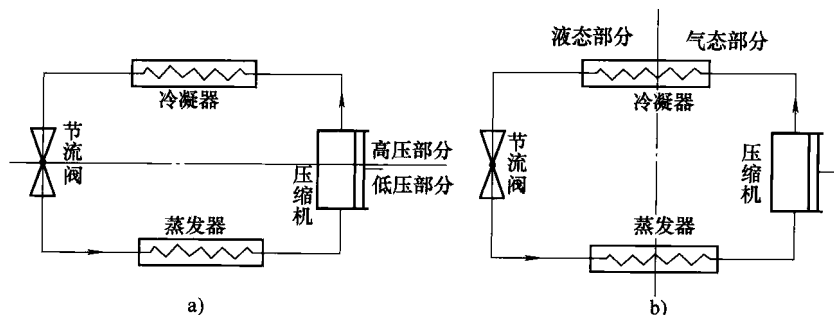


图 1-3 制冷系统中制冷剂的状态变化



制冷原理小结

1. 蒸气压缩式制冷系统基本组成有压缩机、冷凝器、节流机构和蒸发器。
2. 压缩机作用：从蒸发器吸入低温低压气态制冷剂，经压缩变为高温高压气态制冷剂。
3. 冷凝器作用：将压缩机排出的高温高压气态制冷剂与冷却介质进行热交换，放热冷凝为高温高压液态制冷剂。
4. 节流机构作用：对冷凝后的高温高压液态制冷剂节流降压，成为低温低压液态制冷剂。
5. 蒸发器作用：节流机构向蒸发器供液，低温低压液态制冷剂从被冷却介质吸热汽化，变为低温低压气态制冷剂，而被冷却介质在此实现制冷目的。

1.2 压焓图与温焓图

研究一个制冷循环过程，不单单知道其过程的组成，制冷剂发生的状态变化就可以了，而是要对制冷循环过程作定性定量分析计算，对制冷系统进行设计和优化。比如，根据用户对冷量的要求，什么样的制冷机能满足其需求？配置多大功率的制冷压缩机？怎样的冷凝器、节流机构和蒸发器才能与之匹配？制冷剂选用什么物质？制冷系统在什么条件下运行效率才高？

因此，为了深入全面分析蒸气压缩式制冷循环，不仅要研究循环中每一个过程，而且要了解各个过程之间的内在关系及其相互影响。这就需要借助一种分析工具，帮助我们研究整

个制冷循环,直观地表述制冷循环中各过程状态变化及其过程特点,这个工具就是制冷剂的温熵图和压焓图,这些制冷剂的热力状态图不仅可以对制冷循环进行分析和计算,而且还能使问题的解决得到简化。

在表示制冷剂状态参数的多种图线中,由于制冷剂的温熵图中,热力过程线下面的面积为该过程所收受的热量,很直观,便于分析比较,常常用于制冷循环的定性分析;而定压过程的吸热量、放热量以及绝热压缩过程压缩机的耗功量都可用过程初、终状态的制冷剂的焓值变化来计算,所以,进行制冷循环的热力计算时,常采用压焓图(也称莫里尔图),因此压焓图在制冷工程中应用更为广泛。

1. 压焓图

压焓图如图1-4所示。以绝对压力为纵坐标(为了缩小图面,使低压部分表示清楚,通常采用对数坐标,即 $\lg p$),以比焓值为横坐标,即 h 。图上有一点、二线、三区域、五种状态、六条等值参数线。

“一点”为临界点 K 。

“二线”是以 K 点为界, K 点左边为饱和液体线(称为下界线);右边为干饱和蒸气线(称为上界线)。

“三区”是利用临界点 K 和上、下界线将图分成三个区域,下界线以左为过冷液体区;上界线以右为过热蒸气区;二者之间为湿蒸气区(即两相区),在湿蒸气区内,等压线与等温线重合。

“五种状态”包括过冷液体区内制冷剂液体状态;上界线上的饱和制冷剂液体状态;两相区中制冷剂湿蒸气状态;下界线上的饱和制冷剂气体状态;过热蒸气区内制冷剂气体状态。

“六条等值参数线”簇分别为:

1) 等压线——水平线。其大小从下向上逐渐增大。

2) 等焓线——垂直线。其大小从左向右逐渐增大。

3) 等温线——液体区几乎为垂直线,湿蒸气区与等压线重合为水平线,过热区为向右下方弯曲的倾斜线。其大小从下向上逐渐增大。

4) 等熵线——向右上方倾斜,且倾角较大的实线。注意等熵线不是一组平行线,越向右走,等熵线越平坦,其值变化越大。其大小从上向下逐渐增大。

5) 等容线——向右上方倾斜,但比等熵线平坦的虚线。其大小从上向下逐渐增大。

6) 等干度线——只在湿蒸气区域内,下界线为干度 $x=0$ 的等值线;上界线为干度 $x=1$ 的等值线;湿蒸气区域内等干度线方向大致与饱和液体线或饱和蒸气线相近。其大小从左向右逐渐增大。

压焓图是进行制冷循环分析和计算的重要工具,应熟练掌握和应用。本书附录中列出了几种常用制冷剂的压焓图。

2. 温熵图

温熵图结构如图1-5所示。它以熵为横坐标,温度为纵坐标。一点、二线、三区域、六条等值参数线如图所示,与压焓图类同。

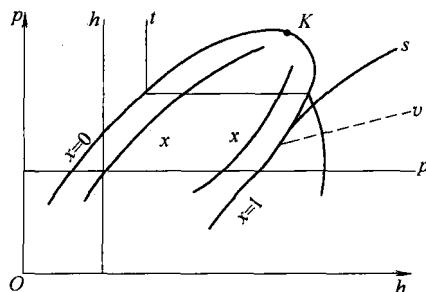


图1-4 压焓图

3. 应用

在温度、压力、比体积、焓、熵、干度等参数中,只要知道其中任意两个状态参数,就可在压焓图或温熵图上确定其状态点,其余参数便可直接从图中读出。

对于一个制冷系统,制冷剂在循环过程中各个状态点表示在压焓图或温熵图上,就形成一个封闭的循环回路,即制冷循环。因此,一个制冷过程只能在压焓图或温熵图上画出一个制冷循环。

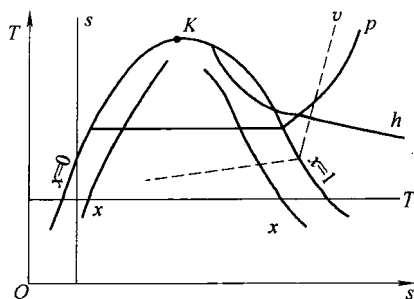


图 1-5 温熵图

1.3 理想制冷循环

1. 理想制冷循环

在热工理论课程的学习中,我们知道卡诺热机和逆卡诺循环,卡诺热机是效率为 100% 的理想热机,在实际中是不存在的。而逆卡诺循环则是卡诺热机的逆向循环,是一个理想的可逆制冷循环,在理论中可以实现制冷,但在工程上同样是不存在的。但是逆卡诺循环从理论上指出了制冷系统设计及提高制冷经济性的重要方向。逆卡诺循环将一个制冷过程通过几个热力学变化过程表达出来,使之可以利用热力状态图进行分析和计算,由此可以设计出一个适当的制冷系统,所以有了理想制冷循环理论基础,再通过一些过渡关系,就可以实现对实际制冷循环的分析计算。

理想制冷循环是逆卡诺循环,它是在两个恒温热源之间,由两个定温过程和两个绝热过程组成,由温熵图和压焓图结构可知,理想制冷循环是在制冷剂的湿蒸气区域内进行的。完成理想制冷循环的必要设备是压缩机、冷凝器、膨胀机和蒸发器,其循环的热力过程表示在温熵图上如图 1-6 所示。

1-2-3-4-1 是存在于高温热源 T'_k 和低温热源 T'_0 之间的理想制冷循环,它将热量从低温热源传送到高温热源,并消耗了功量。制冷循环过程为:单位质量制冷剂沿绝热线 1-2 等熵压缩,使制冷剂温度由低温 T'_0 提升到高温 T'_k ,消耗功量 w ;然后沿 $T = T'_k$ 等温线进行 2-3 定温冷凝,在高温热源 T'_k 条件下向冷却介质释放热量 q_k ;再沿绝热线 3-4 等熵膨胀,使制冷剂温度由高温 T'_k 恢复到低温 T'_0 ;最后沿 $T = T'_0$ 等温线进行 4-1 定温蒸发,在低温热源 T'_0 条件下向被冷却介质吸收热量 q_0 。这样,通过单位质量制冷剂在每一个制冷循环中可制取冷量 q_0 ,消耗功量 w ,两者之比即为该制冷循环的性能指标——制冷系数 ε 。制冷系数表示为单位耗功量所能制取的冷量,定义式为:

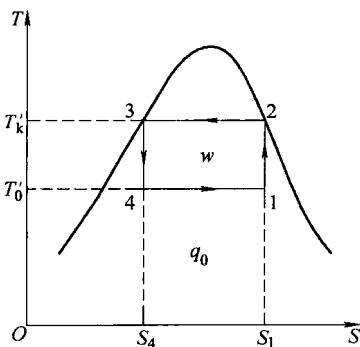


图 1-6 理想制冷循环 T-S 图

$$\varepsilon = \frac{q_0}{w}$$

对于理想制冷循环,即逆卡诺循环来说制冷系数为:

$$\varepsilon_c = \frac{T'_0}{T'_k - T'_0}$$

由此可见,理想制冷循环的制冷系数只与两个热源(冷却介质和被冷却介质)的温度有关,与制冷剂性质等其他因素无关,且冷却介质温度越低、被冷却介质温度越高,制冷系数就越大,制冷循环的经济性就越高。

2. 制约理想制冷循环因素

理想制冷循环实现的关键条件是:高、低温热源恒定,制冷剂在冷凝器和蒸发器中与两个热源间无传热温差,制冷工质流经各个设备中不考虑任何损失,因此,逆卡诺循环是理想制冷循环,它的制冷系数是最高的。

但是在实际工程中,要想满足理想制冷循环的几个关键条件是不现实的,也是无法实现的,主要表现在:

1) 压缩过程在湿蒸气区中进行的,危害性很大。若压缩机吸入的是湿蒸气,在压缩过程中必会产生湿压缩,而湿压缩将引起液击等种种不良的后果,严重时甚至毁坏压缩机,在实际运行时应严禁发生。因此,在实际蒸气压缩式的制冷循环中必须采用干压缩,即进入压缩机的制冷剂为干饱和蒸气或过热蒸气。

2) 膨胀机进行等熵膨胀不现实。因为蒸气压缩式制冷循环中,制冷剂液体在绝热膨胀前后体积变化很小,而节流损耗较大,以致使所能获得的膨胀功是不足以克服机器本身的工作损耗,且高精度的膨胀机很难加工。因此,在蒸气压缩式制冷循环中,均由节流机构(如节流阀、膨胀阀、毛细管等)代替膨胀机。

3) 在实际工程中,无温差传热是不可能实现的,否则理论上要求蒸发器和冷凝器应具有无限大传热面积,这当然是不可能的。所以实际循环只能使制冷剂的蒸发温度(T'_0)低于被冷却介质的温度(低温热源 T'_0),制冷剂的冷凝温度(T'_k)高于冷却介质的温度(高温热源 T'_k)。

综上可知,虽然逆卡诺循环制冷系数最大,但只是一个理想制冷循环,在实际工程中无法实现,但是通过该循环的分析所得出的结论对实际制冷循环具有重要的指导意义,对提高制冷系统经济性指出了重要的方向。因此,要使实际制冷系统节能运行,必须严格遵循上述原则,这就是引出蒸气压缩式制冷理想循环的主要目的。

3. 带传热温差的理想制冷循环

前面已讲过实现逆卡诺循环的一个重要条件是制冷剂与被冷却介质和冷却介质之间必须无温差情况下相互传热,而实际的热交换器总是在有温差的情况下进行传热的,因为蒸发器和冷凝器不可能具有无限大的传热面积。所以,实际有传热温差的制冷循环,制冷系数 ε 不仅与被冷却介质温度 T'_0 和冷却介质温度 T'_k 有关,还与热交换过程的传热温差($T'_0 - T_0$)和($T_k - T'_k$)有关。

例如被冷却介质在蒸发器中的平均温度为 T'_0 ,而冷却介质在冷凝器中的平均温度为 T'_k 时,逆卡诺循环可用图1-7中的1'-2'-3'-4'-1'表示。由于有传热温差存在,在蒸发器内制冷剂的蒸发温度 T_0 应低于被冷却介质温度 T'_0 ,即 $T_0 = T'_0 - \Delta T_0$;而冷凝器内制冷剂的冷凝温度 T_k 应高于冷却介质温度 T'_k ,即 $T_k = T'_k + \Delta T_k$ 。此时有传热温差的制冷循环可用图1-7中的1-2-3-4-1表示。从图中可以看出,有传热温差的制冷循环所消耗的功量增大了,多消耗的功量为图中两部分阴影面积2'233'2'与11'4'41之和,而制冷量却减少了,减少量为11'4'

41 面积。同理可得具有传热温差的两个绝热、定温过程组成的制冷循环的制冷系数为：

$$\begin{aligned}\varepsilon'_c &= \frac{T_0}{T_k - T_0} = \frac{T'_0 - \Delta T_0}{(T'_k + \Delta T_k) - (T'_0 - \Delta T_0)} = \frac{T'_0 - \Delta T_0}{(T'_k - T'_0) + (\Delta T_k + \Delta T_0)} \\ &< \frac{T'_0}{T'_k - T'_0} = \varepsilon_c.\end{aligned}$$

上式推导出 $\varepsilon'_c < \varepsilon_c$ ，这表明具有传热温差的制冷循环的制冷系数总要小于逆卡诺循环的制冷系数。

由于一切实际制冷循环均为不可逆循环，因此，实际循环的制冷系数 ε 总是小于工作在相同热源温度下的逆卡诺循环的制冷系数 ε_c 。实际制冷循环的制冷系数 ε 与逆卡诺循环的制冷系数 ε_c 之比称为热力完善度，定义式为：

$$\eta = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_c}$$

热力完善度 η 是小于 1 的数，它愈接近 1，表明实际循环的不可逆程度越小，循环的经济性越好，它的大小反映了实际制冷循环接近逆卡诺循环的程度。

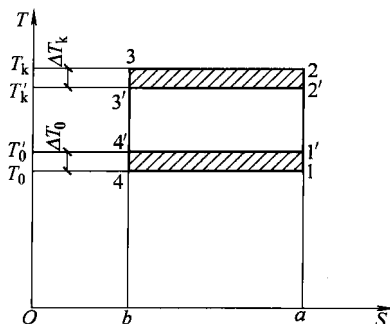


图 1-7 带传热温差制冷循环



理想制冷循环小结

1. 理想制冷循环是逆卡诺循环，在实际过程中是不存在的。
2. 理想制冷循环组成：等熵压缩、定温冷凝、等熵膨胀、定温蒸发制冷。
3. 制冷系数 ε 是衡量制冷循环经济性的指标。
4. 理想制冷循环制冷系数 ε_c 只与冷却介质和被冷却介质的温度有关，为最大制冷系数。
5. 热力完善度 η 是衡量实际制冷循环接近理想制冷循环程度的指标。

1.4 理论制冷循环

1. 理论制冷循环组成

由理想制冷循环的组成可知，湿压缩、膨胀机和无传热温差使理想制冷循环在实际工程中是不可实现的，因此，在理论制冷循环中作了如下调整：蒸气的压缩采用干压缩代替湿压缩；节流机构代替膨胀机；两个传热过程均为定压过程。

前两条的原因前面已经说明，这里不再重复，那么为什么要把两个传热过程设定为定压过程呢？

为了保证干压缩，压缩机吸入的是干饱和蒸气，则制冷剂吸气状态点位于饱和蒸气线上，那么制冷剂的绝热压缩过程就必定在过热蒸气区进行，压缩终了状态点成为了过热蒸气。因此，制冷剂在冷凝器中首先进行等压降温过程，当制冷剂由过热蒸气变为饱和蒸气后才能进行冷凝相变，而两相区等温线和等压线一致，则相变既是等温变化过程也是等压变化