



普通高等学校卓越工程师教育培养规划教材

制冷与热泵技术

主编 吴延鹏
主审 吴德绳 潘云钢



科学出版社

普通高等学校卓越工程师教育培养规划教材

制冷与热泵技术

主 编 吴延鹏
副主编 钟晓晖 勾昱君
主 审 吴德绳 潘云钢

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是高等学校建筑环境与能源应用工程专业“制冷与热泵技术”课程本科生教材,也是按照全国勘察设计注册公用设备工程师暖通空调专业考试大纲要求编写的考试辅导教材。本书共分为8章,主要针对建筑用制冷与热泵技术进行介绍,包括制冷与热泵工质、蒸气压缩式制冷(热泵)循环、蒸气压缩式制冷(热泵)机组、蒸气压缩式制冷(热泵)系统、吸收式制冷(热泵)、小型冷库设计的基础知识、蓄能技术及其应用、燃气冷热电三联供技术。

本书按48学时组织内容编写,各高校可以根据实际情况进行取舍。每章均配有本章小结、习题和研究型专题,便于不同需求的学生选用。

本书既可以作为建筑环境与能源应用工程专业本科生教材和全国勘察设计注册公用设备工程师暖通空调专业考试的辅导教材,也可以作为本专业研究生的参考教材,还可以作为能源与动力工程、土木工程、安全技术及工程等专业的工程技术人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

制冷与热泵技术 / 吴延鹏主编. —北京: 科学出版社, 2016.12

普通高等学校卓越工程师教育培养规划教材

ISBN 978-7-03-051010-5

I. ①制… II. ①吴… III. ①制冷技术-高等学校-教材②热泵-高等学校-教材 IV. ①TB66②TH3

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第301609号

责任编辑: 毛莹 张丽花 / 责任校对: 桂伟利

责任印制: 徐晓晨 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

http://www.sciencep.com

北京京华虎彩印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年12月第一版 开本: 787×1092 1/16

2016年12月第一次印刷 印张: 15

字数: 355 000

定价: 48.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

“制冷与热泵技术”是建筑环境与能源应用工程专业(简称建环专业)的必修课程,也是全国勘察设计注册公用设备工程师暖通空调专业考试的必考科目之一。制冷技术出现以后,人类才真正在自然环境的基础上创造了人工环境,因此本课程在建环专业具有举足轻重的地位。

目前国内建环专业相关教材大多是把制冷和热泵分开对待,事实上这两种技术的基本原理有很多是相同的。将两者合并在一本教材中,可以加强学生对制冷与热泵技术的理解,树立整体概念。本书编写大纲完全按照全国勘察设计注册公用设备工程师暖通空调专业考试大纲的要求制订,内容深度和广度满足注册公用设备工程师的需要,有利于学生今后的工作和事业发展。

编者自1995年本科毕业开始在中国矿业大学从事建环专业的教学工作,2006年到北京科技大学继续从事本专业的教学科研工作,在北京科技大学担任制冷课的主讲教师达10年之久。21年前选择在高校工作完全是出于对教育教学工作的热爱,本书也是编者多年教学工作的总结。北京科技大学已经将“制冷与热泵技术”课程列为研究型教学示范课进行建设。编者曾经担任全国勘察设计注册公用设备工程师暖通空调专业考试“制冷与热泵技术”的培训教师,出于课程建设和注册公用设备工程师培训的需要,组织兄弟院校有丰富教学经验的教师编写了此书。

本书的特色及创新之处如下:

(1) 本书坚持“少而精”的原则,脉络清晰、力求通俗易懂。例如,蒸气压缩式制冷是制冷与热泵技术最主要的内容,本书采用“工质、循环、机组、系统”四个部分的编写思路,有别于现有的制冷或热泵教材,思路更加清晰,更容易被学生理解和掌握。

(2) 将素质教育和专业教育融入教材中。设置“研究型专题”,这是历年笔者根据本专业最新的研究前沿凝练的题目,每一个题目都可以作为一个独立的研究课题进行科学研究,深度可深可浅,这就避免了学生死记硬背基本概念和教科书,强调知识的理解和实际应用。

“研究型专题”具有启发性和前瞻性,对于激发学生的学习兴趣、创新意识和综合能力培养具有重要意义,符合建筑环境与能源应用工程专业新时代人才培养的要求和未来发展的需要。每章后面还附有名师简介、行业名人名言等,对本科生进行素质教育和专业教育。

(3) 本书重点突出,对最基本、最常用的制冷与热泵循环进行深入系统的讲解,起到以点带面的作用,使学生能够很快抓住课程的重点,提高学习效率。

(4) 本书与时俱进,理论联系实际,反映本学科的新技术和国内外制冷与热泵领域最新的研究进展。

(5) 为了使本科生尽早了解建筑环境与能源应用工程专业相关的标准、规范,树立工程观念,在课后特别设置“课外自学”栏目,重点对相关的标准和规范进行自学,书中对重点的标准和规范条文也进行了介绍。

(6) 本书体现了安全生产的最新理念,在第6章专门设置“氨制冷冷库的安全运行”内容,增强学生的安全生产意识。

本书由北京科技大学吴延鹏担任主编,华北理工大学钟晓晖、勾昱君担任副主编。全书共计8章,北京科技大学吴延鹏编写绪论、第1章,第2章的2.1节、2.2节、2.3节,第3章,

第7章和第8章以及研究型专题、课外自学和名师简介、行业名家名言。华北理工大学钟晓晖编写第5章，华北理工大学勾显君编写第4章，天津商业大学刘清江编写第6章。中国矿业大学魏京胜编写第2章的2.4节。河南理工大学韩欣欣编写第2章的2.5节、第7章的7.6节。华北理工大学王昆编写第2章的2.6节。悉地国际设计顾问有限公司暖通总工王明友对第7章和第8章进行完善并提供了多幅插图。北京科技大学吴延鹏拟定本书编写提纲并统稿。

我国建环专业泰斗、德高望重的吴德绳教授担任主审，提出了不少指导性的意见，在此向敬爱的吴老师表示衷心的感谢！

衷心感谢中国建筑设计研究院(集团)有限公司副总工程师潘云钢教授级高工在百忙之中担任本书的主审，不但仔细审阅了全书，而且提出了很多宝贵的修改意见，使本书更加切合工程实际、更加具有可读性和学术性。潘总严谨求实的精神令人敬佩！

中国建筑科学研究院建筑环境与节能研究院院长徐伟研究员、天津大学马一太教授和哈尔滨工业大学马最良教授对本书的提纲和内容提出了修改意见，在此表示衷心的感谢！衷心感谢西安交通大学何雅玲院士、上海交通大学王如竹教授、清华大学李先庭教授、石文星教授、同济大学张旭教授、西安工程大学黄翔教授和华中科技大学陈焕新教授等多年来对我教学工作的指导！

北京科技大学研究生叶睿、谢先平、崔向红、陆禹名、王志华、郭占闯、孙冉参与了本书中的部分插图绘制以及部分文字录入、校对工作，在此表示感谢！还要感谢北京科技大学建环2012、2013级的所有本科生，他们最先接受了本书的讲课思路和讲课内容，克服了没有正式教材的困难，提出了不少好的建议，耐心听我讲课并取得了优良成绩。

感谢科学出版社总编助理、卫生职业教育分社王佳家社长对本书出版的关心和支持！感谢科学出版社毛莹编辑和张丽花编辑为本书出版做出的卓有成效的工作！

在本书编写过程中，参考了众多的国内外专家学者的教材、专著和学术论文，引用了许多相关的资料，同时也汇集了编者多年来的教学经验和科研成果，谨向这些文献的作者深表谢意！

本书的编写得到了高等学校本科教学质量与教学改革工程建设项目和北京科技大学教材建设经费资助，衷心感谢北京科技大学教务处的大力支持！

本书有配套的电子课件，有需要的老师可与出版社联系。

由于编者水平有限，不足之处在所难免，恳请读者批评指正，以便再版时修订。

联系方式：

地址：北京市海淀区学院路30号北京科技大学土木与资源工程学院建筑环境与能源工程系

邮编：100083

邮箱：wuyanpeng@126.com

吴延鹏

2016年9月于北京

目 录

前言	
第0章 绪论	1
0.1 制冷与热泵的定义	1
0.2 制冷技术的发展历程	1
0.3 热泵技术的发展历程	2
0.4 制冷方法	3
0.5 国内外制冷与热泵行业相关的学会(协会)简介	8
0.6 制冷与热泵技术的新进展以及面临的机遇和挑战	8
第1章 制冷与热泵工质	11
1.1 制冷剂的种类及性能	11
1.1.1 制冷剂的种类及编号方法	11
1.1.2 对制冷剂的要求及常用制冷剂的性能	13
1.2 CFCs 及 HCFCs 的淘汰与替代	16
1.3 载冷剂	18
1.3.1 对载冷剂物理化学性质的要求	18
1.3.2 载冷剂分类	18
1.4 蓄冷介质	20
1.5 润滑油	21
1.6 制冷剂-吸收剂工质对	22
第2章 蒸气压缩式制冷(热泵)循环	25
2.1 理想制冷(热泵)循环——逆卡诺循环	25
2.2 单级蒸气压缩式制冷(热泵)理论循环	27
2.2.1 单级蒸气压缩式制冷理论循环	27
2.2.2 蒸气压缩式制冷理论循环的性能指标及热力计算	30
2.2.3 液体过冷、蒸气过热及回热循环	31
2.3 双级蒸气压缩式制冷(热泵)循环	33
2.3.1 一次节流、完全中间冷却的双级压缩制冷循环	33
2.3.2 一次节流、不完全中间冷却的双级压缩制冷循环	34
2.3.3 二次节流、完全中间冷却的双级压缩制冷循环	35
2.3.4 二次节流、不完全中间冷却的双级压缩制冷循环	36
2.3.5 双级压缩制冷循环中间压力的确定	37

2.4	复叠式制冷循环	38
2.5	CO ₂ 跨临界制冷(热泵)循环	40
2.5.1	CO ₂ 制冷循环的分类及其特点	41
2.5.2	CO ₂ 跨临界循环的热力计算	42
2.5.3	CO ₂ 跨临界循环的应用	43
2.6	实际制冷(热泵)循环	44
2.6.1	实际循环在压焓图上的表示	44
2.6.2	实际循环的性能	46
第3章	蒸气压缩式制冷(热泵)机组	54
3.1	蒸气压缩式制冷(热泵)压缩机	54
3.1.1	制冷(热泵)压缩机的分类	54
3.1.2	活塞式压缩机	55
3.1.3	螺杆式压缩机	57
3.1.4	涡旋式压缩机	59
3.1.5	滚动转子式压缩机	61
3.1.6	离心式压缩机	62
3.2	蒸气压缩式制冷(热泵)换热设备	65
3.2.1	蒸发器	65
3.2.2	冷凝器	71
3.3	蒸气压缩式制冷(热泵)节流机构及辅助设备	73
3.3.1	节流机构	73
3.3.2	辅助设备	79
3.4	制冷(热泵)机组	81
3.4.1	制冷(热泵)机组的分类	82
3.4.2	空气源热泵	84
3.4.3	地源热泵	89
3.4.4	空气调节机组	94
3.5	制冷(热泵)机组的能效及性能评价指标	96
3.5.1	制冷(热泵)机组的能效限定值及能效等级	96
3.5.2	制冷(热泵)机组的工况和性能指标	98
3.6	制冷(热泵)机组的测试方法	101
第4章	蒸气压缩式制冷(热泵)系统	110
4.1	蒸气压缩式制冷(热泵)系统组成	110
4.2	蒸气压缩式制冷(热泵)系统设计	110
4.2.1	制冷剂管道系统的设计原则	110
4.2.2	制冷剂管道的材质	111

4.2.3	制冷剂管道系统的设计	111
4.2.4	R717 制冷剂管道系统的设计	112
4.2.5	制冷剂管道直径的选择	113
4.2.6	制冷剂管道的安装	114
4.3	蒸气压缩式制冷(热泵)系统自动控制	115
4.3.1	制冷(热泵)系统自动控制的主要环节	115
4.3.2	制冷(热泵)系统自动控制的实施	117
4.4	制冷(热泵)机组的经济运行	118
第5章	吸收式制冷(热泵)	122
5.1	溴化锂吸收式制冷机的工作原理及其理论循环	122
5.1.1	溴化锂吸收式制冷的工作原理	122
5.1.2	溴化锂吸收式制冷的理论循环	124
5.2	溴化锂吸收式制冷机的分类、特点及其主要性能参数	128
5.2.1	溴化锂吸收式制冷机的分类及其特点	128
5.2.2	溴化锂吸收式制冷机的主要性能参数	132
5.3	溴化锂吸收式热泵机组	135
5.3.1	吸收式热泵的能量、温度转换	135
5.3.2	第一类溴化锂吸收式热泵	136
5.3.3	第二类溴化锂吸收式热泵	138
5.3.4	溴化锂吸收式热泵的特点	139
5.4	溴化锂吸收式冷(温)水机组的结构特点及附属措施	140
5.4.1	溴化锂吸收式冷(温)水机组的结构特点	140
5.4.2	溴化锂吸收式冷(温)水机组的主要附加措施和制冷量衰减	141
5.5	溴化锂吸收式冷(温)水机组设计选型及机房布置	143
5.5.1	溴化锂吸收式冷(温)水机组设计选型	143
5.5.2	溴化锂吸收式冷(温)水机组机房布置	146
5.6	吸收式热泵在能量回收中的利用	154
5.6.1	工业企业的余热回收利用	154
5.6.2	热电厂的余热回收利用	155
5.6.3	在可再生能源系统中的应用	155
5.7	溴化锂吸收式冷(温)水机组的经济运行	156
第6章	小型冷库设计的基础知识	161
6.1	冷库围护结构的热工计算	162
6.1.1	冷库温、湿度要求	162
6.1.2	冷库建筑围护结构的设置	164
6.1.3	冷库围护结构的热工计算	165

6.2	冷库制冷系统设计及设备选择	167
6.2.1	冷库制冷系统的组成	167
6.2.2	冷库的冷负荷计算	167
6.2.3	制冷系统的选择	171
6.2.4	冷库制冷系统设备选型	171
6.2.5	装配式冷库的选型	176
6.3	气调储藏	177
6.4	氨制冷冷库的安全运行	178
6.4.1	近年的氨制冷系统安全事故及其原因分析	179
6.4.2	热氨融霜的原理及操作过程	179
6.4.3	系统的改进措施	181
第7章	蓄能技术及其应用	186
7.1	蓄冷技术的基本原理及分类	186
7.1.1	蓄冷技术的基本原理	186
7.1.2	蓄冷系统的基本运行方式	186
7.1.3	蓄冷技术的应用场合	187
7.1.4	蓄冷技术的分类	187
7.2	水蓄冷	188
7.2.1	水蓄冷系统的组成	188
7.2.2	水蓄冷空调的特点	190
7.3	冰蓄冷	191
7.3.1	冰蓄冷系统的形式	191
7.3.2	冰蓄冷系统的特点	193
7.4	蓄冷系统的设计步骤及内容	195
7.4.1	蓄冷空调系统的设计步骤	195
7.4.2	蓄冷负荷的确定	196
7.4.3	蓄冰装置容量的确定	196
7.4.4	蓄冷系统的控制	197
7.5	蓄热系统的类型、系统组成及设置要求	198
7.5.1	蓄热系统的分类	198
7.5.2	电锅炉蓄热系统	198
7.5.3	蓄热系统的设置要求和运行保养	199
7.5.4	电锅炉容量及蓄热设备的确定	199
7.6	蓄冷(蓄热)与制冷机(热泵)耦合技术	200
7.6.1	蓄冷-热泵耦合系统构成及工作流程	200
7.6.2	蓄冷-热泵耦合系统的特点	201

第 8 章 燃气冷热电三联供技术	207
8.1 燃气冷热电三联供的概念	207
8.2 采用燃气冷热电三联供的意义	208
8.3 冷热电三联供的使用条件	209
8.4 燃气冷热电三联供系统的组成和工作原理	209
8.5 燃气冷热电三联供系统的设计	211
8.5.1 燃气冷热电三联供系统的设计原则	211
8.5.2 燃气冷热电三联供系统的设计计算方法	212
参考文献	216
附录	218
附图	223

第0章 绪 论

随着我国社会和经济的快速发展，制冷技术已经渗入社会的各个领域和人们生活的方方面面，营造不同温度范围的环境以满足各种需要：制备接近 0K 热力学温度的环境以满足科学探索的需求；营造低于 120K 的极低温环境用于超导、气体分离液化及一些国防尖端技术中；为了生命科学的研究和医学需要而创造-40℃以下的深冷环境；为食品加工、储藏和保鲜而维持-40~10℃的储藏保鲜环境以及为了保证人的舒适健康营造常温舒适环境。近年来采用基于制冷技术的热泵手段高效地制备热量，也开始成为获取常温范围内的热量的重要途径，于是制冷与热泵技术又在各类 35~100℃热量的制备中获得广泛应用。由于我国近年来出现的大范围的雾霾天气，空气源热泵已经作为替代农村冬季散煤取暖的可选技术之一。制冷与热泵技术在空气调节、工农业生产、医疗卫生、建筑工程、空间技术、国防工业、食品加工及冷冻冷藏、科学实验等领域大展身手，关系到科技进步、国家强盛和人民生活水平的提高。美国工程院评出的 20 世纪对人类社会影响最大的 20 项工程技术成就中，空调和制冷技术排名第十。对于建筑环境与能源应用工程专业，制冷技术的出现才使真正意义上的人工环境得以营造，因此学习制冷与热泵技术的相关知识非常重要。

0.1 制冷与热泵的定义

制冷是指用人工的方法在一定时间和一定空间内将物体冷却，使其温度降低到环境温度以下，保持并利用这个温度。制冷的实质是将热量从被冷却对象转移到环境中。注意，“制冷”不等于“冷却”，“冷”是相对于环境而言的。灼热的铁放在空气中，通过辐射和对流向环境传热，逐渐冷却到环境温度。它是自发地传热降温，属于自然冷却，不是制冷。

热泵是指用人工的方法从低温热源吸收热量，通过消耗一定的能量(电能或热能)，向高温热源放出热量并利用这个热量。热泵的实质是热量提升装置，可以和“水泵”进行类比。

热泵和制冷机的工作原理相同，但也有明显的不同之处。首先两者的目的不同，制冷机的目的是制冷，热泵的目的是制热；其次两者的工作温度范围不同，热泵的工作温度下限是环境温度，上限需要根据用户的要求来定；制冷机的上限是环境温度，下限根据用户的制冷需求来定。另外，热泵和制冷机对设备部件的材料、结构、工作压力以及工质的特性要求也不同，如由于工作温度范围不同，热泵和制冷机对润滑油的要求也存在差异。

0.2 制冷技术的发展历程

国内历程：我国《诗经》一书最早记录古人夏季为建筑降温的方法“二之日凿冰冲冲，

三之日纳于凌阴”，讲的是人们冬季时藏冰于冰窖里储存，夏季温度升高时取出冰为室内降温，这种方法仅用于皇宫大臣，普通老百姓没有这个条件。《艺文志》中记载：“大秦国有五宫殿，以水晶为柱拱，称水晶宫，内实以冰，遇夏开放。”这是中国最早的空调房间。如今中国制冷行业得到了突飞猛进的发展，从业企业超过千家，部分技术也达到了世界先进水平，成为世界制冷行业第一大市场。

国际历程：1748年，威廉·库仑科学地发现了乙醚蒸发会引起温度下降的现象，1755年库仑发明了第一台采用减压水蒸发的制冷机，开创了人工制冷的新纪元。

1834年发明家波尔金斯造出了第一台以乙醚为工质的蒸气压缩式制冷机，这是后来所有蒸气压缩式制冷机的雏形。1875年卡利和林德用氨作为制冷剂，从此蒸气压缩式制冷机开始占有统治地位。1910年左右，马利斯·莱兰克发明了蒸气喷射式制冷系统。

到了20世纪，制冷技术有了更大发展。美国通用电器公司成功研制全封闭制冷压缩机、米里杰发现氟利昂制冷剂并用于蒸气压缩式制冷循环、伯宁顿发明回热式除湿器循环以及热泵的出现，均推动了制冷技术的发展。进入21世纪，制冷技术推广到人们生活、生产的各个领域。2014年我国家用电冰箱产量达到9529万台，国内保有量超过5.2亿台。现代生活离不开制冷技术，有了制冷技术的普及，人们的生活质量大大提高。

0.3 热泵技术的发展历程

热泵的工作原理虽然与制冷机相同，但发展远远不如制冷机顺利，因为人工制冷需要靠制冷机，但人工供热的途径有很多，而且往往比热泵更简单、造价更低。

国内历程如下：

20世纪50年代，天津大学热能研究所的吕灿仁在我国率先开展了热泵的研究，1965年成功研制第一台水冷式热泵空调机。20世纪60年代中期，哈尔滨建筑工程学院（现哈尔滨工业大学）的徐邦裕和吴元炜组成的研究小组也开展了热泵研究工作。1965年徐邦裕和吴元炜提出了应用辅助冷凝器作为空调机组二次加热器的新流程，1966年由哈尔滨空调机厂生产出第一台样机。1986年天津大学首次开展了燃气热泵的研究工作。1980年哈尔滨建筑工程学院成功研制国内首台标定型房间热平衡法实验装置，用于热泵实验和性能测试。改革开放以后，热泵技术的研究日趋活跃并逐步与国际接轨。哈尔滨工业大学的马最良作为学术带头人对水源热泵、土壤源热泵、空气源热泵和污水源热泵进行了数十年的持续研究，取得了大量创新性的成果。天津大学的马一太对二氧化碳热泵和空气源热泵进行了数十年的持续研究，也取得了大量创新性的成果。进入21世纪，随着我国城市建设的蓬勃发展，热泵技术得到推广应用，特别是地源热泵进入一个大发展时期，近年来空气源热泵在解决南方供暖和替代北方的燃煤供暖方面开始大展身手。

国际历程如下：

1852年，英国物理学家、发明家开尔文发表论文指出制冷机也可用于供热，从而成为提出热泵设想的第一人，当时称为热量倍增器（heat multiplier）。直到20世纪20年代初期，克劳斯和摩尔利在开尔文研究的基础上对热泵理论进行了重新论述和完善。1930年霍尔丹

报道了他在苏格兰安装的家用的热泵，工质为氨，用空气作为热源，用于室内的采暖和生活热水。1939年瑞士苏黎世议会大厦安装了大型热泵采暖装置，采用离心机，工质为R12，采用河水作为热源，可以输出175kW的热量，从此压缩式热泵在欧美得到发展。1859年开利发表了氨水吸收式制冷剂专利。1920年阿尔汤克奇提出了吸收式热泵的理论。1945年美国开利公司成功研制溴化锂-水吸收式制冷机，为第二类吸收式热泵的发展打下基础。与制冷机相比，热泵的发展受到能源价格和技术条件的制约，故其发展历史较为曲折，但发展的前景是光明的。

0.4 制冷方法

任何伴随有吸热的物理现象原则上都有可能用来制冷，所以人工制冷的方法很多。相变制冷利用物质由质密态到质稀态的相变时所产生的吸热效应达到制冷目的。利用液体相变的，是液体气化法制冷；利用固体相变的，是固体融化或升华冷却。固体相变冷却则是以一定数量的固体物质作为制冷剂，作用于被冷却对象，实现冷却降温。一旦固体全部相变，冷却过程即告终止。在建筑制冷与热泵技术中最常用的是液体气化法。

液体气化法以液体作为制冷剂，通过一定的机器设备构成制冷循环，利用液体汽化过程的吸热效应来制冷。由于组成了循环，所以可以对被冷却对象实现连续制冷，如图0-1所示。

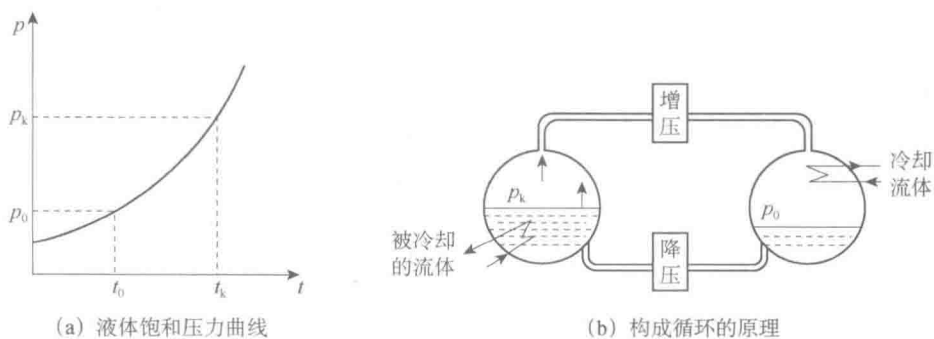


图0-1 液体气化法制冷原理图

当液体处在密闭的容器内时，若容器内除了液体和液体本身的蒸气不含任何其他气体，那么液体和蒸气在某一压力下将达到平衡，这种状态称为饱和状态。如果将一部分饱和蒸气从容器中抽出，液体中就必然要再汽化出一部分蒸气来维持平衡。以液体为制冷剂，它在汽化时要吸收汽化潜热，该热量来自被冷却对象，只要液体的蒸发温度比环境温度低，便可使被冷却对象变冷或者使它维持在环境温度以下的某一温度。

为使过程连续进行，必须不断地从容器中抽走制冷剂蒸气，再不断地将液体补充进去。为使制冷剂蒸气的冷凝过程可在常温下实现，需要将制冷剂蒸气的压力提高到常温下的饱和压力。这样，制冷剂将在低温低压下蒸发，产生制冷效应；然后在常温和高压下凝结，向环境温度的冷却介质排放热量；凝结后的制冷剂液体由于压力较高，返回容器之前需要先降低压力。

液体蒸发制冷循环必须具备以下四个基本过程：①制冷剂液体在低压下汽化产生低压

蒸气；②将低压蒸气抽出并提高压力变成高压蒸气；③将高压蒸气冷凝成高压液体；④使高压液体降低压力回到初始的低压状态。这一过程周而复始，形成循环。过程④实现了制冷剂自身的降温，是下一步制冷的前提，此过程通常经过节流装置实现；过程①是制冷剂从低温热源吸收热量的过程，实现制冷；过程②是循环的能量补偿过程；过程③是向高温热源排热的过程。在实际制冷装置中，实现能量补偿的方式也多种多样：消耗电能或机械能带动压缩机对低压气体做功——蒸气压缩式制冷；通过液体或固体吸收剂对制冷剂蒸气进行吸收或吸附，再利用驱动热源加热吸收或吸附工质对，产生较高压力和温度的制冷剂蒸气——吸收式制冷或吸附式制冷；以热能作为驱动热源、利用喷射器实现从蒸发器中抽取蒸气并压缩到高压——蒸气喷射式制冷。

1) 蒸气压缩式制冷

蒸气压缩式制冷属于液体汽化法制冷，是在普通制冷范围内用得最多的制冷方式。通过消耗一定的电能或机械能带动压缩机工作，从而实现从低温热源吸热、向高温热源放热。

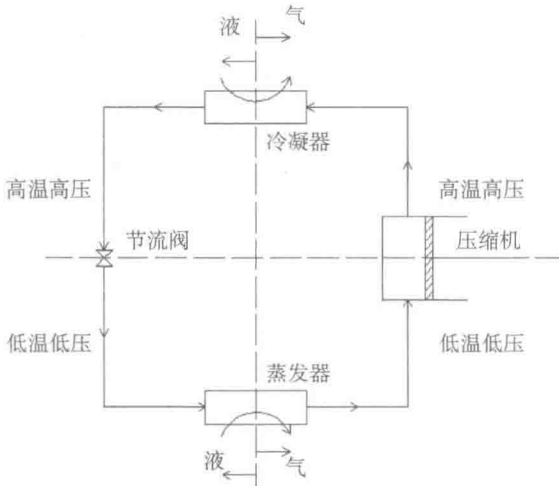


图 0-2 蒸气压缩式制冷循环流程图

蒸气压缩式制冷系统原理图如图 0-2 所示。系统由压缩机、冷凝器、节流阀、蒸发器 4 大件组成，用管道将它们连接成一个密封的系统。在蒸发器内处于低温低压的制冷剂液体与被冷却对象发生热交换，吸收被冷却对象的热量并汽化。产生的低压蒸气被压缩机吸入，经压缩后以高压排出。压缩机排出的高压气态制冷剂进入冷凝器，被常温的冷却水或空气冷却，凝结成高压液体。高压液体流经节流阀时节流，变成低温低压的气、液两相混合物，进入蒸发器，其中的液态制冷剂在蒸发器中蒸发制冷，产生的低压气再次被压缩机吸入。如此周而复始，不断循环。

需要注意的是，使用的制冷剂种类不同，制冷循环的热力状态图也相应有所不同。一般蒸气压缩式制冷循环采用的制冷剂远离临界点，而当采用二氧化碳作为制冷剂时，制冷循环为跨临界循环。

蒸气压缩式制冷循环发展至今，已经达到相当成熟的程度，目前广泛用于空气调节、食品冷冻冷藏、石油、化工等领域。

2) 蒸气吸收式制冷

与蒸气压缩式制冷类似，蒸气吸收式制冷同样利用制冷剂液体蒸发吸收潜热而制冷。区别于蒸气压缩式制冷以电能或机械能为驱动、带动压缩机做功使制冷剂蒸气实现高压状态；蒸气吸收式制冷则以热能为驱动，利用适当的溶液吸收低压蒸气，使其转变为液体，通过溶液吸收泵升压后再以加热的方式将沸点较低的组分从溶液中析出，成为高温高压的制冷剂蒸气，从而实现制冷循环。

蒸气吸收式制冷系统如图 0-3 所示。整个系统包括两个回路：制冷剂回路和吸收剂回路。制冷剂回路由冷凝器、节流阀和蒸发器组成；吸收剂回路由发生器、吸收器、溶液热交换器、溶液节流阀和溶液泵等组成。

系统中使用的工作流体通常称为二元溶液，其中低沸点组分为制冷剂，高沸点组分为吸收剂，而制冷剂和吸收剂共同组成系统中使用的工作流体，称为吸收式制冷的工质对。当前普遍应用的工质对有两种：溴化锂-水（制冷剂是水）、氨-水（制冷剂是氨）。溴化锂吸收式制冷机用于制取 $7\sim 10^{\circ}\text{C}$ 的冷水；氨水吸收式制冷机能够制冷的温度可达 -20°C 或更低。吸收剂对制冷剂气体有很强的吸收能力。吸收剂吸收了制冷剂气体后形成溶液，溶液再经加热后又能释放出制冷气体。因此用溶液回路取代压缩机的作用，构成蒸气吸收式制冷循环。

图 0-3 中，制冷剂回路由冷凝器、制冷剂节流阀和蒸发器组成。高压制冷剂气体在冷凝器中冷凝，产生的高压制冷剂液体经节流后到蒸发器蒸发制冷。溶液回路由发生器、吸收器、溶液节流阀、溶液热交换器和溶液泵组成。在吸收器中，吸收剂吸收来自蒸发器的低压制冷剂蒸气，形成富含制冷剂的溶液，将该溶液用泵送到发生器，经加热使溶液中的制冷剂重新以高压气态发生出来，送入冷凝器。另外，发生后的溶液重新恢复到原来的成分，经冷却、节流后成为具有吸收能力的吸收液，进入吸收器，吸收来自蒸发器的低压制冷剂蒸气。吸收过程中伴随释放吸收热，为了保证吸收的顺利进行，需要用冷却的方法带走吸收热，以免吸收液温度升高。

3) 蒸气喷射式制冷

蒸气喷射式制冷是以喷射器代替压缩机，以消耗热能作为补偿，利用工质在低压下汽化吸热来实现制冷。

蒸气喷射式制冷的工质可以是水，也可以是氨、R134a、R123、R600a 等。但目前在空调工程中多采用以水为工质的蒸气喷射式制冷装置，简称为蒸气喷射式制冷装置。

蒸气喷射式制冷装置的主要设备有蒸气加热器、喷射器、冷凝器、蒸发器、节流阀以及循环泵等，其工作原理如图 0-4 所示。在实际使用的系统中，冷凝后的水往往不再进入锅炉和蒸发器，而将它排入冷却水池作为循环冷却水的补充水使用。蒸发器和锅炉则另设水源供给补充水。

蒸气喷射式制冷机具有如下特点：补偿能的形式是热能，可以不用电能而利用余热、废热；结构简单、加工方便、没有运动部件、运行可靠、使用寿命长，因而具有一定的使用价值，如用于制取空调所需的冷水，但这种制冷机所需的工作蒸气压力高，喷射器的不可逆损失大，效率较低。因此，在空调冷水机组中采用溴化锂吸收式制冷机比用蒸气喷射

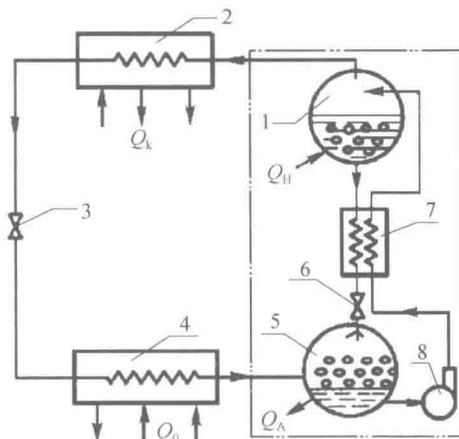


图 0-3 吸收式制冷循环流程图

- 1-发生器；2-冷凝器；3-节流阀；4-蒸发器；5-吸收器；
6-溶液节流阀；7-溶液热交换器；8-溶液泵

式制冷机具有明显的优势。

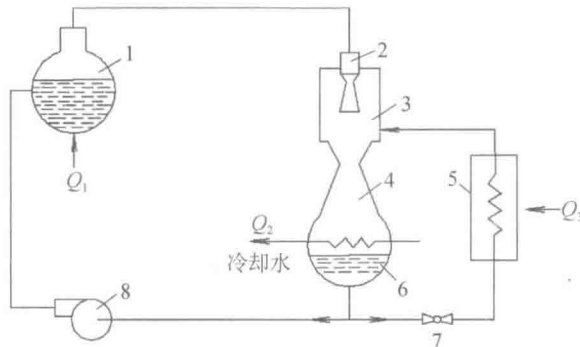


图 0-4 蒸气喷射式制冷系统循环流程图

1-蒸气加热器；2-喷射器；3-混合室；4-扩压器；5-蒸发器；6-冷凝器；7-节流阀；8-循环泵

4) 吸附式制冷

吸附式制冷系统是以热能为动力的能量转换系统。与吸收式制冷中采用液体吸收剂吸收和释放制冷剂不同，吸附式制冷采用固体吸附剂对制冷剂进行吸附和解析。吸附式制冷系统通常包括太阳能集热器、冷凝器、蒸发储液器和阀门四个部分。

吸附式制冷系统按所采用的工质可分为真空系统和压力系统两类。以甲醇和水作为制冷剂的系统为真空系统，以氨为制冷剂的系统为压力系统。

吸附式制冷系统的基本原理如图 0-5 所示。白天，集热器被太阳能加热而温度升高，使集热器内制冷剂蒸发，集热器内压力不断升高，当制冷剂达到冷凝温度下的饱和压力时打开阀 A，制冷剂进入冷凝器，被冷凝成液体进入蒸发储液器；傍晚关闭阀 A，随后集热器被冷却，内部压力下降至制冷剂蒸发温度下的饱和压力后，打开阀 B，蒸发储液器中制冷剂因压强骤减而沸腾，从而产生制冷效应，同时集热器吸附制冷剂，吸附过程中的吸附热被外界空气带走，如此反复完成制冷循环。

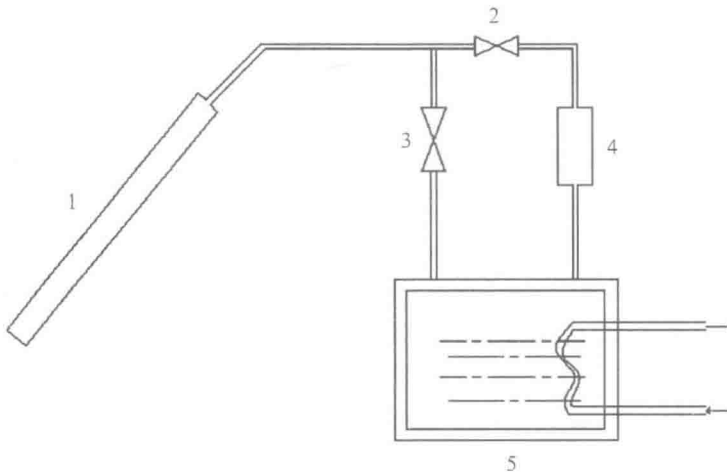


图 0-5 吸附式制冷系统原理示意图

1-集热器；2-阀 A；3-阀 B；4-冷凝器；5-蒸发储液器

吸附式制冷是一种间歇式制冷方式,为实现昼夜不间断制冷,整个系统分为日间工作系统和夜间工作系统两部分。日间采用两床交替式太阳能吸附连续循环系统,夜间采用太阳冷热联合循环系统。

吸附式制冷采用无氟利昂的制冷剂,直接由太阳能、工业废热等低品位能源驱动,具有结构简单、无运动部件、无噪声、抗振性好、使用寿命长等优点,但也存在制冷循环周期较长、制冷量相对较小、性能系数(Coefficient of Performance, COP)较低等缺点,在船舶制冷、汽车空调、宇航制冷中有广泛的应用前景。

5) 热电制冷

热电制冷的机理完全不同于蒸气压缩式制冷、吸收式制冷,它是以温差电现象为基础的制冷方法,它利用“泽贝克效应”的逆效应——佩尔捷效应的原理达到制冷的目的。

泽贝克效应(即热电效应)是在两种不同金属组成的闭合线路中,如果保持两接触点的温度不同,就会在两接触点间产生一个电势差——接触电动势。同时闭合线路中就有电流流过,称为温差电流。

反之,在两种不同金属组成的闭合线路中,若通以直流电,就会使一个接点变冷,一个变热。这种现象称为佩尔捷效应,也称为温差电现象。生产冷端就是我们需要的制冷。

热电效应的大小主要取决于两种材料的热电势。纯金属材料的导电性好,导热性也好。用两种金属材料组成电偶回路,其热电势小,热电效应很弱,制冷效果不明显(制冷效率不到1%)。半导体材料具有较高的热电势,可以成功地用来做成小型热电制冷器。按电流载体的不同,半导体分为N型半导体(电子型)和P型半导体(空穴型)。图0-6示出N型半导体和P型半导体构成的热电偶制冷元件。回路中接通电流时,一个接点变热,一个接点变冷。如果改变电流方向,则两个接点处的冷热作用互易,即原来的热接点变成冷接点,原来的冷接点变成热接点。

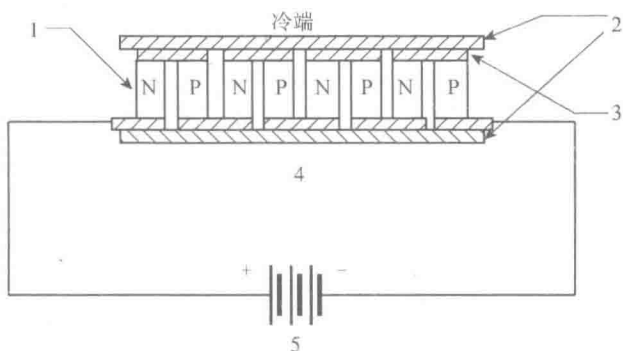


图 0-6 热电制冷原理示意图

1-N型和P型半导体; 2-绝缘陶瓷片; 3-金属导体; 4-热端; 5-直流电源

热电制冷器的结构和原理显然不同于液体汽化制冷。它不需要一定的工质循环来实现能量转换,没有任何运动部件。热电制冷的效率低,半导体材料的价格又很高,而且由于必须使用直流电源,变压和整流装置往往不可避免,从而增加了电堆以外的附加体积。由