



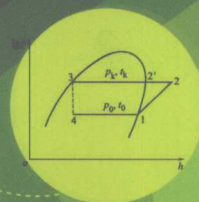
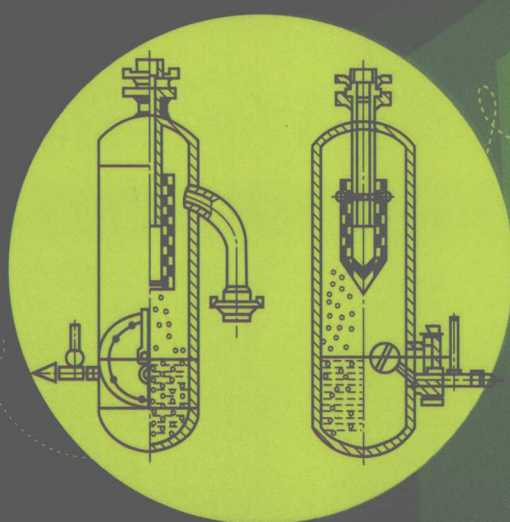
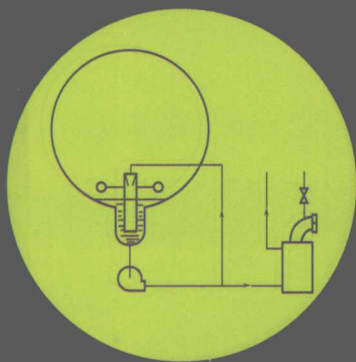
高等院校**建筑环境与设备工程专业**

规划教材 >>>>

ZHILENG JISHU YU ZHUANGZHI

制冷技术与装置

李永安 主编 马最良 主审



化学工业出版社



高等院校建筑环境与设备工程专业

规划教材 >>>>

ZHILENG JISHU YU ZHUANGZHI

制冷技术与装置

李永安 主编

杨吉民 苏顺玉 曹文胜 张云峰 编



化学工业出版社

·北京·

本书阐明了蒸气压缩式制冷的基本原理、系统组成、制冷设备的构造及工作原理,讲解了制冷设备选择的依据与方法,重点突出叙述了冷冻水系统、冷却水系统的设计计算方法,并列出了满足实际需要的水力计算表。对溴化锂吸收式制冷系统也作了必要的介绍。本书既有传统的制冷理论,又体现了制冷技术的新进展。书中列出了大量的习题,供教学使用。

本书可作为建筑环境与设备工程专业、热能与动力工程专业的教材,亦可供从事空调、制冷工程技术的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

制冷技术与装置/李永安主编. —北京:化学工业出版社, 2010.6
高等院校建筑环境与设备工程专业规划教材
ISBN 978-7-122-08205-3

I. 制… II. 李… III. ①制冷技术②制冷装置
IV. TB6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 063994 号

责任编辑:陶艳玲
责任校对:洪雅姝

装帧设计:尹琳琳

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)
印 装:三河市延风印装厂
787mm×1092mm 1/16 印张15 字数377千字 2010年7月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899
网 址: <http://www.cip.com.cn>
凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:28.00 元

版权所有 违者必究

前 言

本教材是在总结高等学校“空气调节用制冷技术”、“建筑环境与设备工程专业用制冷技术”等课程教学经验的基础上,结合工程实际,根据经济社会发展需要而编写的。

本教材在内容上既保留了传统制冷理论的精华,同时又充实吸收了制冷领域的新技术、新系统、新设备、新方法。

本教材力求做到体系完整,逻辑严密,概念叙述清楚,原理讲解明白,内容阐述深入浅出。重点突出了制冷技术的应用,强化了对学生工程实践能力的培养。本教材的突出特点是详细讲述了空调冷冻水系统、冷却水系统的水力计算方法以及冷冻水循环泵、冷却水循环泵、补水泵扬程的确定方法,分别列出了冷冻水、冷却水水力计算表,使理论与实际紧密联系,理论可直接为工程实际服务。

为便于巩固所学的知识,做到温故而知新,本教材选有典型例题,每章均列出了大量的习题,供读者复习使用。

本教材的绪论、第1章、第8章由山东建筑大学李永安教授编写;第3章、第4章由青岛农业大学杨吉民教授编写;第5章、第6章由武汉科技大学苏顺玉副教授编写;第2章由集美大学曹文胜副教授编写;第7章由长沙理工大学张云峰副教授编写。李永安教授负责全面统稿。

山东建筑大学刘学来教授对书稿进行了初审,承蒙哈尔滨工业大学博士研究生导师马最良教授对书稿进行了复审;顾皓、高亚南、栾卫涛、崔新阳诸同志对本书的编写提供了大力支持,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,再加上时间仓促,书中定有不当之处,恳请读者批评指正。

编者

2010年3月

目 录

绪论	1	3.2 螺杆式制冷压缩机	53
第1章 蒸气压缩式制冷循环	3	3.2.1 螺杆式制冷压缩机的结构与工作	
1.1 蒸气压缩式理论制冷循环	3	原理	53
1.1.1 蒸气压缩式制冷的工作原理	3	3.2.2 螺杆式制冷压缩机的运行调节	54
1.1.2 蒸气压缩式理论制冷循环在		3.2.3 螺杆式制冷压缩机的特点	54
压焓图上的表示	4	3.3 离心式制冷压缩机	55
1.1.3 制冷系数与热力完善度	6	3.3.1 离心式制冷压缩机的构造及工作	
1.2 改进的蒸气压缩式理论制冷循环	6	原理	55
1.2.1 液体过冷循环	6	3.3.2 离心式制冷压缩机的特性	55
1.2.2 蒸气过热循环	7	3.3.3 离心式制冷压缩机的能量调节	57
1.2.3 回热循环	9	3.3.4 离心式制冷压缩机的特点	58
1.2.4 多级压缩制冷循环	10	3.4 涡旋式制冷压缩机	58
1.2.5 复叠式制冷循环	14	3.4.1 涡旋式制冷压缩机的结构与工作	
1.3 蒸气压缩式制冷循环的热力计算	15	原理	58
1.4 蒸气压缩式制冷的实际循环	19	3.4.2 涡旋式制冷压缩机的运行调节	59
1.4.1 实际制冷循环	19	3.4.3 涡旋式制冷压缩机的特点	60
1.4.2 实际制冷循环的热力计算	20	3.5 滚动转子式制冷压缩机	61
小结	21	3.5.1 滚动转子式制冷压缩机的结构和	
习题	21	工作原理	61
第2章 制冷剂与载冷剂	22	3.5.2 滚动转子式制冷压缩机的特点	63
2.1 制冷剂的命名与选择	22	小结	63
2.1.1 制冷剂的命名	22	习题	64
2.1.2 制冷剂的选择原则	24	第4章 制冷装置的热交换设备	65
2.2 制冷剂的性质	25	4.1 冷凝器的种类、构造及工作原理	65
2.2.1 热力学性质	25	4.1.1 水冷式冷凝器	65
2.2.2 物理化学性质	28	4.1.2 空气冷却式冷凝器	68
2.3 CFCs 的限用与替代物的选择	32	4.1.3 蒸发式冷凝器	69
2.3.1 CFCs 的限用	32	4.2 蒸发器的种类、构造及工作原理	70
2.3.2 常用制冷剂和替代物的选择	33	4.2.1 冷却液体载冷剂的蒸发器	71
2.4 载冷剂	37	4.2.2 冷却空气的蒸发器	75
2.4.1 载冷剂的作用及选用原则	37	4.3 冷凝器和蒸发器的选择计算	77
2.4.2 常用载冷剂	38	4.3.1 冷凝器的选择计算	77
小结	39	4.3.2 蒸发器的选择计算	79
习题	39	4.4 强化冷凝器和蒸发器传热的方法	81
第3章 制冷压缩机	40	4.4.1 影响冷凝器传热的因素	81
3.1 活塞式制冷压缩机	40	4.4.2 影响蒸发器传热的因素	82
3.1.1 活塞式制冷压缩机的构造	40	4.4.3 强化传热的方法	83
3.1.2 活塞式制冷压缩机的性能	46	小结	85

习题	86	7.3.4 单效溴化锂吸收式制冷机的典型 结构与流程	134
第5章 制冷装置的其他辅助设备	87	7.3.5 影响单效溴化锂吸收式制冷机性 能的主要因素	138
5.1 节流装置	87	7.4 双效溴化锂吸收式制冷机	140
5.1.1 手动节流阀	87	7.4.1 双效溴化锂吸收式冷水机组的 工作原理	140
5.1.2 浮球节流阀	88	7.4.2 双效溴化锂吸收式冷水机组的 循环流程	141
5.1.3 热力膨胀阀	89	7.4.3 双效溴化锂吸收式制冷机的 理论循环	147
5.1.4 热电膨胀阀	95	小结	148
5.1.5 电子膨胀阀	96	习题	149
5.1.6 恒压膨胀阀	97	第8章 制冷站设计	150
5.1.7 毛细管	98	8.1 冷水机组的选择	150
5.2 辅助设备	100	8.1.1 冷水机组的分类	150
5.2.1 制冷剂的储存与分离设备	100	8.1.2 常用冷水机组	151
5.2.2 制冷剂的净化设备	102	8.1.3 各种冷水机组的优缺点	156
5.2.3 润滑油的分离与收集设备	104	8.1.4 各种冷水机组的容量范围	157
5.2.4 安全设备	106	8.1.5 冷水机组的选择原则	158
5.2.5 视液镜	107	8.2 冷冻水系统	159
小结	108	8.2.1 冷冻水系统分类	159
习题	108	8.2.2 冷水机组与循环水泵的连接方式	161
第6章 直接蒸发式空调系统	109	8.2.3 供回水总管上的旁通管与压差 旁通阀的选择	162
6.1 房间空调器	109	8.2.4 冷冻水系统的水力计算	162
6.1.1 窗式空调器	110	8.2.5 水泵所需扬程	167
6.1.2 分体式空调器	112	8.2.6 膨胀水箱	168
6.2 单元式空调系统	114	8.2.7 冷冻水系统的检测与控制	168
6.2.1 冷风机组	114	8.3 冷却水系统	170
6.2.2 恒温恒湿空调机组	114	8.3.1 冷却水系统的分类	171
6.2.3 特殊用途的空调机组和空气除 湿机	116	8.3.2 冷却水循环系统的组成及典型 流程	171
6.3 多联式空调系统	118	8.3.3 冷却塔	173
6.3.1 一拖多式空调器	119	8.3.4 冷却水系统的水力计算	179
6.3.2 变频控制多联式空调系统	119	8.3.5 冷却水系统的补水量	181
6.3.3 数码涡旋多联式空调系统	121	8.3.6 循环冷却水的水质处理	181
小结	121	8.3.7 冷却水循环系统设计中应注意 的几个问题	182
习题	122	8.4 制冷站设计原则与实例	182
第7章 溴化锂吸收式制冷	123	8.4.1 制冷站设计的基本内容	183
7.1 溴化锂吸收式制冷的基本原理	123	8.4.2 收集设计原始资料	183
7.1.1 基本原理	123	8.4.3 制冷站设备的选择	184
7.1.2 系统分类	124	8.4.4 制冷站的建筑设计	188
7.1.3 系统特点	124	8.4.5 制冷站设备安装设计	189
7.2 二元溶液的特性	124		
7.2.1 二元溶液的基本特性	125		
7.2.2 溴化锂水溶液的特性	128		
7.3 单效溴化锂吸收式制冷机	131		
7.3.1 单效溴化锂吸收式制冷循环	131		
7.3.2 工作原理与循环	132		
7.3.3 热力计算	134		

8.4.6 制冷站的供暖、空调、通风与防火设计	191	性表	209
8.4.7 制冷站的设计实例	191	附表 3 R22 饱和液体与饱和气体物性表	210
小结	196	附表 4 R134a 饱和液体与饱和气体物性表	213
习题	197	附表 5 R600a 饱和液体与饱和气体物性表	215
附录	198	附表 6 R290 饱和液体与饱和气体物性表	217
附图	198	附表 7 R507 饱和液体与饱和气体物性表	219
附图 1 制冷剂 R134a 压焓图	198	附表 8 R407C 饱和液体与饱和气体物性表	221
附图 2 制冷剂 R22 压焓图	199	附表 9 R410A 饱和液体与饱和气体物性表	224
附图 3 制冷剂 R290 压焓图	200	附表 10 氯化钠水溶液物性表	226
附图 4 制冷剂 R407C 压焓图	201	附表 11 氯化钙水溶液物性表	227
附图 5 制冷剂 R410A 压焓图	202	附表 12 乙二醇水溶液物性表	228
附图 6 制冷剂 R507 压焓图	203	参考文献	230
附图 7 制冷剂 R600a 压焓图	204		
附图 8 制冷剂 R717 压焓图	205		
附图 9 制冷剂 R744 压焓图	206		
附表	207		
附表 1 R717 饱和液体与饱和气体物性表	207		
附表 2 R744 饱和液体与饱和气体物性表			

绪 论

制冷技术是使某物体或空间达到低于周围环境温度，并维持这个温度的技术手段和方法。

制冷已是一门超越百年历史的老学科，却又是一门与国计民生密不可分的重要学科。因此，它总是显得生机勃勃，日新月异。

(1) 制冷技术的发展简史

1755 年，苏格兰人库仑（William Cullen）完成了第一台制冷设备，这台实验设备可以在真空罩下经过降压使水蒸发而制造少量的冰，同时发表了学术论文《液体蒸发制冷》；

1834 年，美国人波尔金斯（Jacob Perkins）试制成功了第一台以乙醚为制冷剂的蒸气压缩式制冷机；

1844 年，高里（John Gorrie）在美国费城用封闭循环的空气制冷机建立了第一座空调站；

1872 年，美国人波义耳（Boyle）发明了氨压缩机；

1895 年，法国人卡列（Ferdinand Carre）制成了氨水吸收式制冷机；

1875 年，卡列和林德（Linde）用氨作制冷剂，制成了氨蒸气压缩式制冷机；

1910 年左右，马里斯·莱兰克（Maurice Lehland）在巴黎发明了蒸气喷射式制冷机；

1929 年，氟里昂制冷机问世；

1945 年，美国开利公司研制出溴化锂吸收式制冷机；

1974 年，氟里昂族中的氯、氟碳化物（简称 CFC）问题的出现以及其对大气臭氧层的破坏得以公认，CFC 的替代技术和以 HFC 为主体向天然制冷剂发展的过程，使制冷行业步入新的历史阶段；

21 世纪制冷空调发展的方向是：节能、环保、健康；

脉冲管制冷、磁制冷、热声制冷、热电制冷、太阳能制冷、吸附制冷等新制冷技术正推动着制冷行业不断向前进步。

实现制冷可以通过两种途径：利用天然冷源和人工冷源。

人类对冰和雪等天然冷源的利用可以追溯到很早的年代。

曾经在人类历史上创造过辉煌古代文明、勤劳智慧的中华民族，远在 3600 年以前，就开始了冰、雪等天然冷源的应用。

夏朝历书的《夏小正》一文记载：“三月参则伏……颁冰者。分冰以授大夫也”。

《礼记·月令》亦有：“季冬之月，冰方盛，水泽腹坚，命取冰”的记载。

《艺文志》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。”这说明我们的先祖早已开创了冰雕艺术和利用冰降温消暑的先河。

东晋十六国时代，有后赵石虎三伏天赐大臣以冰食，及北朝时亦有乌梅浸汁作为饮料的记载。

意大利旅行家马可·波罗艰难跋涉 17 岁来到中国，元世祖隆重款待，封授宫廷名誉侍卫，又御赐冰酪消暑。公元 1295 年马可·波罗回国，元世祖特许传授冰酪制作法，他回到

家乡将这项技术贡献给意大利王室。意大利王室奇货可居，垄断为王室专利，对外秘而不宣。300年后，传至法国后又传入英国，英国人取名“冰激凌”。

建国60年来，特别是改革开放30年来，我国的制冷技术和设备取得了突飞猛进的发展。据统计，到2000年，我国制冷行业具有一定规模的企业发展到近600家，整个制冷空调设备制造业约占全球12%的份额，成为全球最具有活力的市场和仅次于美国和日本的第二制造大国。

(2) 制冷技术的应用

制冷技术是近几十年来发展最快的科学技术之一，从人们的日常生活到国民经济各部门，从传统产业到高新技术产业，从国防科技到航空航天，处处都离不开制冷技术和设备。

① 制冷技术在空气调节中的应用 制冷是空气调节的冷源，制冷可以用来降低空气的温度和含湿量，从而使空气的温度、湿度等得到调节。为了给人们的工作、生活创造舒适的环境，在宾馆、写字楼、医院、商场、火车站、码头、电影院、剧院、体育馆、学校、公寓、住宅及火车、飞机、轮船、汽车等场所均需设置空调。例如，美国芝加哥希尔斯大厦，110层，高443m，空调负荷 $1.72 \times 10^8 \text{ W}$ ；高度468.8m，居亚洲第一，世界第三的上海东方明珠广播电视塔，设计冷负荷11513kW；91层，420.5m的上海金茂大厦，空调设计冷负荷达到 $2.8 \times 10^7 \text{ W}$ 。为了生产工艺和检测等的需要，在纺织厂、电子元器件厂、仪器仪表厂、精密机床厂、感光材料厂、印刷厂、计量室等需要安装空调。一些工业产品如飞机发动机、航空仪表、机车车辆、无线电和电子产品等。一些武器如坦克、大炮及弹药，都需要在 $-40 \sim -70^\circ\text{C}$ 的低温下进行性能试验。在机械制造业中，对钢材进行 $-70 \sim -90^\circ\text{C}$ 的低温处理，可以改变其金相组织，使奥氏体变成马氏体，提高钢制机械零件的硬度及耐磨性。

② 制冷技术在食品工业中的应用 食品工业的发展与制冷技术有着密切的关系。一些易腐食品，如鱼、肉、蛋、果品、蔬菜等的加工、储藏和运输，都需要在低温条件下进行，以保证食品的质量和减少干缩损耗。现代化的食品工业，从食品的生产、储运到销售，都已经形成完整的冷链。所采用的制冷装置包括冷藏库、冷藏汽车、冷藏列车、冷藏船、冷藏柜、冰箱等。其他，如冷饮品、饮料等工业也需要制冷装置。

③ 制冷技术在其他方面的应用 一些医疗手术，如心脏、肿瘤、白内障的切除等，皮肤和眼球的移植手术及低温麻醉等，都需要制冷技术；医药工业中，利用真空冷冻干燥法冻干生物制品及药品，一些药物、疫苗及血浆等都需要在低温下储藏；宇宙飞船的推进需要使用液氧和液氢，而这两种物质的液化温度分别为90.17K和20.25K；进一步的研究发现，在0.79K的条件下，锌的电阻几乎为零，出现“超导现象”，这样，制造低温超导电缆对大功率输电很有经济价值；一些红外材料往往工作在120K以下的低温，使得热源遥感信号更加清晰，为了拍摄高灵敏度的信号往往需要更低的温度。这种技术已在研究外星体的远红外天文望远镜、气象卫星云图拍摄、导弹跟踪等方面得到了广泛的应用。

总之，制冷技术的应用是非常广泛的，随着科学技术的进步，社会经济的发展，人类生活水平的提高，制冷技术在国民经济中的应用将展示出更加广阔的美好前景。

第 1 章 蒸气压缩式制冷循环

在日常生活中，我们都有这样的常识，炎热的天气，室内温度很高，把水洒在地上，能使室温略微降低，因而会有凉爽的感觉。这是因为洒在地上的水蒸发时吸取室内热量的缘故。同样，把酒精滴在皮肤上，由于酒精蒸发吸热，也有凉爽的感觉。实际上不仅是水和酒精，任何一种物质，在由液态转化为汽态的过程中，都要吸取周围的热量。

水在常压下的蒸发温度为 100°C ；氨在常压下的蒸发温度却为 -33.4°C 。这说明不同的物质，由液态转变成汽态时的温度是不一样的。同样一种物质，当压力变化时，由液态转化为汽态时的蒸发温度也是不同的。例如：水在 0.00087MPa （绝对压力）时，它的蒸发温度就可降低为 5°C 。这就告诉我们，只要创造一个低压环境，就可以利用液体的气化获取所要求的低温。

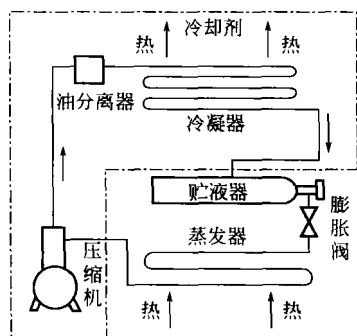


图 1-1 液体气化制冷原理图

就可降低为 5°C 。这就告诉我们，只要创造一个低压环境，就可以利用液体的气化获取所要求的低温。

液体气化制冷的工艺流程，如图 1-1 所示。图中点划线以外部分为制冷段，氨液（制冷过程称为制冷剂）从贮液器经膨胀阀，降低压力和温度；低温低压氨进入蒸发器，吸收周围空气或物体的热量而气化，从而降低室温或物体的温度，达到制冷的目的。而图中点划线以内部分为液化段，它的作用是一方面使蒸发器内保持一定的低压，另一方面使在蒸发器中气化了了的制冷剂液化，重新流回贮液器，再用于制冷。液化的方法是抽取蒸发器的低压气态制冷剂

并使之增压，以提高其饱和温度；然后再利用自然界大量存在的常温空气或水（统称冷却剂），使之在冷凝器内液化。图 1-1 所示的制冷系统采用压缩机使气态制冷剂增压，故称蒸气压缩式制冷。蒸气压缩式制冷是利用液态工质（如氨、氟里昂等）在汽化时从被冷却物体中吸收热量来实现制冷的。从 19 世纪 70 年代开始，到如今已有 100 多年的历史，是目前发展比较完善、应用最为广泛的制冷方法之一。这不仅因为蒸气压缩式制冷所需的机器设备紧凑，操作管理方便，制冷温度范围广，从稍低于环境温度至 -150°C 左右的温度均可实现，而且还因为在普冷温度范围内（ -120°C 以上）具有较高的循环效率。目前，我们所使用的制冷设备采用蒸气压缩式制冷循环的居多。

1.1 蒸气压缩式理论制冷循环

1.1.1 蒸气压缩式制冷的工作原理

蒸气压缩式制冷系统是由压缩机、冷凝器、节流装置、蒸发器（俗称“制冷四大件”）等四个主要部分组成，工质循环于其中。用管道依次将其连接，形成一个完全封闭的系统，如图 1-2 所示。制冷剂在这个封闭的制冷系统中以流体状态循环，通过相变，连续不断地从蒸发器中吸取热量，并在冷凝器中放出热量，从而实现制冷的目的。

蒸气压缩式制冷循环的工作过程如下：蒸发器内，制冷剂在一定的蒸发温度下气化，从被冷却对象中吸取热量 q_0 ，实现制冷。汽化后的低温低压的制冷剂蒸气被压缩机及时抽出，

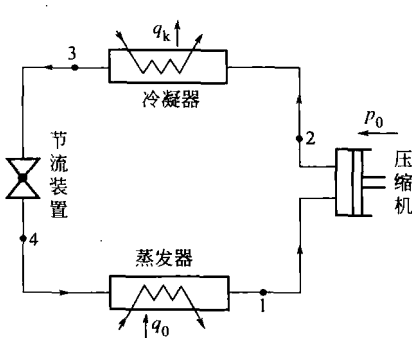


图 1-2 蒸汽压缩式制冷循环的原理图

并压缩至冷凝压力，送入冷凝器，压缩过程中压缩机消耗功率 P_0 。高温高压制冷剂蒸气在冷凝器内把热量 q_k 传递给环境冷却介质，首先被冷却然后被冷凝为高压常温的制冷剂液体。该液体通过节流降压装置，大部分成为低压液体，一小部分变成了低压蒸气，两者一并进入蒸发器，准备再次吸热气化，为压缩机所吸入，从而完成一个蒸汽压缩式制冷循环。整个循环过程主要由压缩、冷凝、节流以及蒸发四个过程组成，每个过程在不同的部件中完成，制冷剂在每个过程中的状态又各不相同，具体情况如下。

① 压缩过程 整个循环过程中，压缩机起着压缩和输送制冷剂蒸气并造成蒸发器中低压和冷凝器中高压的作用，是整个系统的“心脏”。制冷循环的压缩过程是在压缩机中完成的：压缩机不断抽吸从蒸发器中产生的压力为 p_0 、温度为 t_0 的制冷剂蒸气，将它压缩成压力为 p_k 的过热蒸气，并输送到冷凝器中。在这个过程中，压缩机需要做功。

② 冷凝过程 冷凝器是制冷系统中输出热量的设备，冷凝过程是在冷凝器中完成的。在压力 p_k 下，来自于压缩机的制冷剂过热蒸气在冷凝器中首先被冷却成饱和蒸气，然后再逐渐被冷凝成液体，制冷剂冷却和冷凝时放出的热量传给冷却介质（通常是水或空气）。在冷凝过程中，与冷凝压力 p_k 相对应的冷凝温度 t_k 一定要高于冷却介质的温度，冷凝后的液体通过节流装置进入蒸发器。

③ 节流过程 冷凝器冷凝得到的高压常温的制冷剂液体不能直接进入低温低压的蒸发器。利用饱和压力与饱和温度一一对应的原理，降低制冷剂液体的压力，可以降低制冷剂液体的温度。当制冷剂液体经过节流装置（膨胀阀、毛细管等）时，制冷剂压力由 p_k 降到 p_0 ，温度由 t_k 降至 t_0 ，部分液体气化。所以离开膨胀阀的制冷剂为温度为 t_0 的两相混合物，该两相混合物进入蒸发器。

④ 蒸发过程 蒸发器是制冷系统中冷量输出设备，蒸发过程是在蒸发器中完成的。在蒸发器中，来自膨胀阀的两相混合物在压力 p_0 和温度 t_0 下蒸发，从被冷却介质中吸取它所需要的汽化热，从而达到制取冷量的目的。在蒸发过程中，与蒸发压力 p_0 相对应的蒸发温度 t_0 一定要低于被冷却介质的温度。

1.1.2 蒸汽压缩式理论制冷循环在压焓图上的表示

用热力状态图来研究整个循环，不仅可以直观地看到循环中各过程的状态变化及其特点，而且还能使问题得到简化。

在“工程热力学”课程里，大家已经学习了制冷剂的热力性质图——压焓图（ $\lg p-h$ 图），如图 1-3 所示。利用压焓图不仅可以研究制冷循环的每个过程，而且可以了解各过程之间的关系，同时还可以利用 $\lg p-h$ 图进行制冷循环的热力计算。因为循环的各过程中功与热量的变化均可用焓值的变化来加以计算。 $\lg p-h$ 图以压力的对数值 $\lg p$ 为纵坐标，焓值 h 为横坐标。图中包含如下内容。

一点：临界点 C。

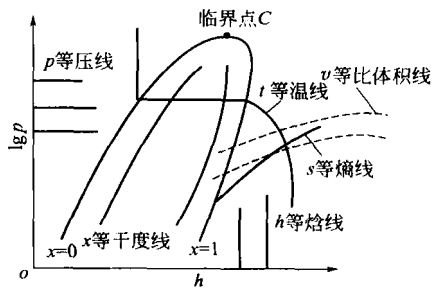


图 1-3 压焓图

三区：液相区、两相区（湿蒸气区）、气相区。

五态：过冷液体状态、饱和液体状态、饱和蒸气状态、过热蒸气状态、湿蒸气状态。

八线：等压线 p ，等焓线 h ，饱和液体线 $x=0$ ，饱和蒸气线 $x=1$ ，无数条等干度线 x ，等熵线 s ，等比体积线 v ，等温线 t 。

如图 1-3 所示，临界点 C 的左包络线为饱和液体线，线上任意一点代表一个饱和液体状态，对应的干度 $x=0$ ；临界点 C 的右包络线为饱和蒸气线，线上任意一点代表一个饱和蒸气状态，对应的干度 $x=1$ 。饱和液体线和饱和蒸气线将整个区域分为三个区：饱和液体线左边的是液相区，该区的液体称为过冷液体；饱和蒸气线右边的是气相区，该区的蒸气成为过热蒸气；由饱和液体线和饱和蒸气线包围的区域为两相区，制冷剂在该区域内处于湿蒸气状态。

等压线为水平线，等焓线为垂直线；等温线在液体区几乎为垂直线，两相区内是水平线，在气相区为向右下方弯曲的倾斜线；等熵线为向右上方弯曲的倾斜线；等比体积线为向右上方弯曲的倾斜线，比等熵线平坦；等干度线只存在于两相区，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。

为了缩小图面尺寸，纵坐标是用压力的对数值 $\lg p$ 来绘制的，有时还将湿蒸气区中间的，在实际计算中用不到的部分去掉，使图形更为紧凑。在温度 t 、压力 p 、比体积 v 、比焓 h 、比熵 s 、干度 x 等参数中，只要知道其中任何两个状态参数，就可以在 $\lg p-h$ 图上确定过热蒸气或过冷液体的状态点，从而在图中读出该状态下的其他参数。对于饱和状态的蒸气和液体，则只需知道一个状态参数，就可根据其干度 $x=1$ 或 $x=0$ 的特点，在图中确定其状态点。

利用 $\lg p-h$ 图时还应掌握各参数在 $\lg p-h$ 图上的变化趋势，尤其应该注意：等熵线是一组不平行线，越靠图右侧，等熵线走势越平坦，即数值变化越大；等温线在液相区、两相区和气相区三个区域里走势是变化的。

现将图 1-2 所示的蒸气压缩式制冷循环的各工作过程，表示在压焓图上，如图 1-4 所示。制冷理论循环中的各状态点及各个过程如下。

a. 过程线 1-2 表示等熵压缩过程，压力由蒸发压力 p_0 升高到冷凝压力 p_k 。点 1 表示制冷剂进入压缩机的状态，它对应于蒸发温度的饱和蒸气，根据压力与饱和温度的对应关系，该点位于蒸发压力 p_0 的等压线与饱和蒸气线的交点上；点 2 表示制冷剂出压缩机时的状态，也是进冷凝器时的状态，该点可通过 1 点的等熵线和冷凝压力 p_k 的等压线的交点来确定。由于压缩过程中外界对制冷剂做功，制冷剂温度升高，因此点 2 表示过热蒸气状态。

b. 过程线 2-3 表示制冷剂在冷凝器中的冷却（2-2'）过程和冷凝（2'-3）过程。点 3 表示制冷剂出冷凝器时的状态，它是与冷凝温度 t_k 所对应的饱和液体。整个过程是在冷凝压力不变的情况下进行的，进入冷凝器的过热蒸气首先将部分热量放给冷却介质，在等压下冷却成饱和蒸气（点 2'）。然后再在等压、等温条件下继续放出热量，直至最后冷凝成饱和液体（点 3）。因此，压力为 p_k 的等压线和饱和液体线的交点即为点 3。

c. 过程线 3-4 表示制冷剂在节流阀中的节流过程。点 4 表示制冷剂出节流阀时的状态，也是进入蒸发器时的状态。在该过程中，制冷剂的压力由冷凝压力 p_k 降至蒸发压力 p_0 ，温度由冷凝温度 t_k 降到蒸发温度 t_0 ，并进入两相区。由于节流前后制冷剂的焓值相等，因此

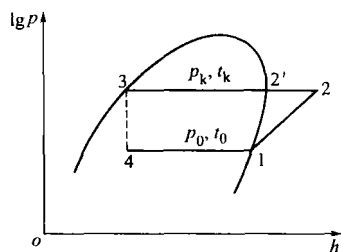


图 1-4 理论循环压焓图

由点3作等焓线与压力为 p_0 的等压线的交点即为点4。由于节流过程是一个不可逆过程,所以通常用虚线表示3-4过程。

d. 过程线4-1表示制冷剂在蒸发器中的汽化过程。该过程是在等温、等压下进行的,液体制冷剂吸取被冷却介质的热量而不断气化,制冷剂的状态沿等压线 p_0 向干度增大的方向变化,直到全部变为饱和蒸气为止。这样,制冷剂的状态又重新回到进入压缩机前的状态点1,从而完成一个完整的理论循环。

1.1.3 制冷系数与热力完善度

在理论制冷循环中,单位时间内制取的冷量与所消耗的功率之比称为制冷系数,用 ϵ_0 表示,即理论制冷循环的效果和代价之比。

$$\epsilon_0 = \frac{q_0}{\omega_0} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1} \quad (1-1)$$

制冷系数 ϵ_0 是分析理论制冷循环的一个重要性能指标。制冷系数越大,制冷循环经济性越好,投入少、产出多。反之则投入大、产出少。

制冷系数 ϵ 只适用于低温热源(被冷却对象)温度 t_c 和高温热源(环境冷却介质)温度 t_k 都相同,且制冷压缩设备是同一类型的制冷循环之间的经济性的比较。而涉及工作于不同的热源温度,消耗着不同能量品位、制冷压缩设备也不同的各类制冷循环之间效率的比较,则须采用热力完善度,用 β 表示。热力完善度 β 与制冷系数 ϵ 两者均为制冷循环的经济性指标。

所谓热力完善度,就是制冷循环接近它理想情况的程度。理论循环的热力完善度 β_0 ,即理论循环的制冷系数 ϵ_0 与理想循环制冷系数 ϵ_c 的比值。

$$\beta_0 = \frac{\epsilon_0}{\epsilon_c} \quad (1-2)$$

式中 ϵ_c ——理想循环的制冷系数。

1.2 改进的蒸气压缩式理论制冷循环

实际采用的蒸气压缩式制冷理论循环有节流损失和过热损失,因此,采取措施减少这两种损失对于提高制冷系数、节省能量消耗非常重要。减少节流损失有再冷却和回热两个措施;而采用具有中间冷却的多级压缩可以减少过热损失。下面将分别予以分析和讨论。

1.2.1 液体过冷循环

理论制冷循环中,我们认为冷凝完毕的制冷剂液体正好是饱和液状态,忽略制冷剂流动时的热交换,制冷剂达到节流阀前仍为饱和液状态,而在实际循环中,节流阀前液体过冷。液体过冷是指液体制冷剂的温度低于同一压力下饱和液体的温度,两者温度之差称为过冷度,具有液体过冷度的循环称为液体过冷循环。

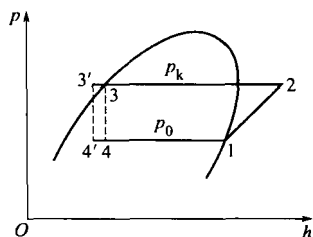


图 1-5 液体过冷循环压焓图

液体过冷循环压焓图如图 1-5 所示。其中 1-2-3-4-1 表示理论循环,1-2-3'-4'-1 表示过冷循环,其中 3-3'表示液态制冷剂的过冷过程。由图中可以看出,液体过冷循环的单位质量制冷量有所增加,增加量为 $h_4 - h_{4'}$ 。由于两个循环的耗功相同,所以过冷循环的制冷系数必然大于理论循环的制冷系数。对于给定的制冷量 q_0 ,液体过冷循环所需要的制冷剂质量流量将小于理论循环的质量流量。在两个循环的压缩机吸入状态相同的情况下,液体过冷循环所需要的体积流量 q_v 同样小于理论

循环的体积流量，即给定量的制冷剂需要较小容积的压缩机。

从上面的分析可知道，采用液体过冷循环是有利的，而且过冷度越大，对循环越有利。在实际制冷循环中，制冷剂液体离开冷凝器进入节流阀之前往往具有一定的过冷度，过冷度的大小取决于冷凝系统的设计和制冷剂与冷却介质之间的温差。然而仅仅依靠冷凝器本身使液体过冷，获得的过冷度是有一定限度的。如果要求获得更大的过冷度，通常需要在冷凝器后增加额外的热交换设备（再冷却器）。

图 1-6(a) 为具有再冷却器的蒸气压缩式制冷的工作流程。从图中可以看出，冷却水先经过在冷凝器下游设置的再冷却器，然后进入冷凝器，就可以实现液态制冷剂的再冷却。图 1-6(b) 的 3-3' 就是高压液态制冷剂再冷却过程线，其所达到的温度 $T_{s,c}$ 称为过冷温度。

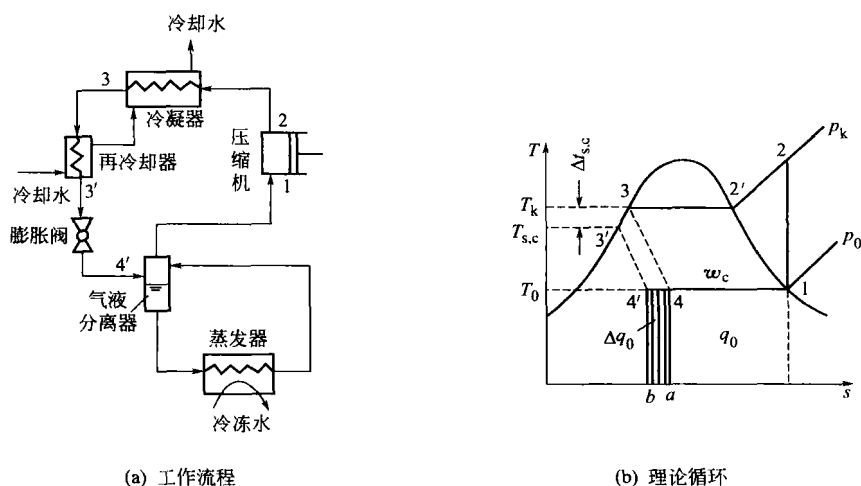


图 1-6 具有再冷却器的蒸气压缩式制冷循环

从图中还可以明显看出，由于高压液态制冷剂的再冷却，在压缩机耗功量不变的情况下，单位质量制冷能力增加 Δq_0 （面积 $a44'ba$ ），所以，节流损失减少，制冷系数有所提高。

因此，应用液体过冷对改善循环的性能总是有利的。但采用液体过冷必然增加工程初投资和设备运行费用，应进行全面技术经济分析比较。通常，对于大型的氨制冷装置且蒸发温度 t_0 在 -5°C 以下多采用液体过冷，过冷度一般取 $2\sim 3^\circ\text{C}$ ，对于空气调节用的制冷装置并不单独设置再冷却器，而是适当增大冷凝器面积，使冷却剂与制冷剂呈逆流，以达到此目的。

1.2.2 蒸气过热循环

理论制冷循环中，可以认为制冷剂在蒸发器中蒸发完毕时恰好是饱和蒸气状态，忽略制冷剂蒸气流动时与外界的热交换，因此，制冷压缩机吸入的制冷剂蒸气亦为饱和蒸气，如图 1-4 所示的 1 点。但实际制冷循环中，制冷压缩机吸入的制冷剂蒸气往往是过热的蒸气。蒸气过热是指制冷剂蒸气的温度高于同一压力下饱和蒸气的温度，两者温度之差称为过热度，有蒸气过热的循环称为蒸气过热循环。

蒸气过热循环压焓图如图 1-7 所示。其中 1-2-3-4-1 表示理论循环，1'-2'-3-4-1' 表示蒸气过热循环，其中 1-1' 过程为蒸气过热过程。由蒸发器出来的低压饱和蒸气，在通过吸入管道进入压缩机前从周围环境中吸取热量而过热，但它没有对被冷却介质产生制冷效应，这种过热常称为“无效”过热；如果蒸气的过热发生在蒸发器本身，或者发生在安装于被冷却室内的吸气管道上，从被冷却介质吸取热量而过热，对被冷却介质产生了制冷效应，这种过热常称为“有效”过热。

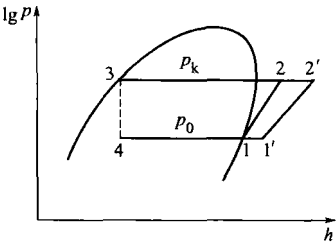


图 1-7 蒸气过热循环压焓图

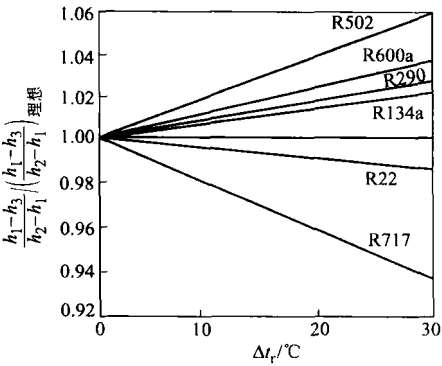


图 1-8 制冷剂制冷系数随过热度变化而变化的规律

(1) “无效”过热

对于“无效”过热循环，由图 1-7 中可以看出以下几点。

- a. 蒸气过热循环的单位质量制冷量没有变化，压缩机的比功却有增加，即 $h_{2'} - h_{1'} > h_2 - h_1$ （因为在蒸气过热区，等熵线越向右越平缓），所以过热循环的制冷系数降低。
- b. 在给定制冷量 q_0 下，蒸气过热循环所需的质量流量不变，然而压缩机吸气口的蒸气比体积增大（ $v_{1'} > v_1$ ）了，所以过热循环需要的体积流量增大，即给定量的制冷剂需要更大容积的压缩机。
- c. 压缩机的排气温度升高，冷凝器的单位热负荷增大。

由此可见，“无效”过热对循环是不利的，所以又称为“有害”过热。而且蒸发温度越低，与环境温度的差值越大，“有害”过热度越大，循环经济性越差。因此，通常采用在吸气管路上敷设保温材料来尽量避免“有害”过热。

(2) “有效”过热

对于“有效”过热循环，由图 1-7 中可以看出以下几点。

- a. 蒸气过热循环的单位质量制冷量增加（ $h_{1'} - h_4 > h_1 - h_4$ ）了，压缩机的比功也增加了，即 $h_{2'} - h_{1'} > h_2 - h_1$ ，循环制冷系数的变化取决于制冷剂本身的性质。图 1-8 所示为几种制冷剂制冷系数随过热度变化而变化的规律。从图中可以看出，蒸气“有效”过热对制冷剂 R134a、R290、R600a、R502 有益，制冷系数增大，且增大值随过热度的增加而增大；蒸气“有效”过热对制冷剂 R22、R717 不利，制冷系数减小，且减小值随过热度的增加而增大。

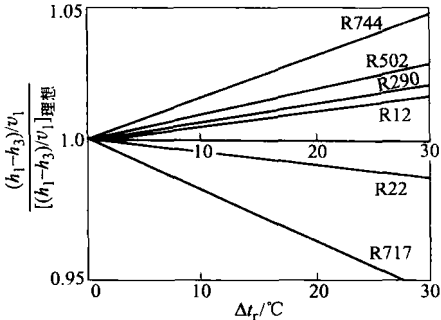


图 1-9 制冷剂单位容积制冷量随过热度变化而变化的规律

- b. 在给定制冷量 q_0 下，蒸气过热循环所需的质量流量减小，然而压缩机吸气口的蒸气比体积增大（ $v_{1'} > v_1$ ）了，所以蒸气过热循环需要的体积流量及其单位容积制冷量的变化也取决于制冷剂本身的性质。图 1-9 所示为几种制冷剂单位容积制冷量随过热度变化而变化的规律。从图中可以看出，蒸气“有效”过热对制冷剂 R744、R502、R290 的容积制冷量是有利的，单位容积制冷量增大，且增大值随过热度的增加而增大；蒸气“有效”过热对制冷剂 R22、R717 是不利

的, 单位容积制冷量减小, 且减小值随过热度的增加而增大。

总体来说, 虽然蒸气过热对循环有不利的影响, 但在实际循环中, 为了防止压缩机吸入在蒸发器中未完全汽化的制冷剂液滴, 对运行带来危害, 并使压缩机的输气量下降, 通常希望压缩机吸入的蒸气具有一定的过热度。对于 R717, 通常希望有 $5\sim 10^{\circ}\text{C}$ 的过热度; 对于 R22, 由于等熵指数小, 允许有较大过热度, 但是仍然要受最高排气温度这一条件的限制。

1.2.3 回热循环

为了使制冷剂液体过冷和制冷剂蒸气有一定程度的过热, 通常在制冷系统中增加一个回热器。回热器又称为气-液热交换器, 其作用是使节流前的制冷剂液体与制冷压缩机吸入前的制冷剂蒸气进行热交换, 同时实现制冷剂液体过冷和制冷剂蒸气过热的热交换设备。带有回热器的循环称为回热循环。回热循环系统如图 1-10 所示。

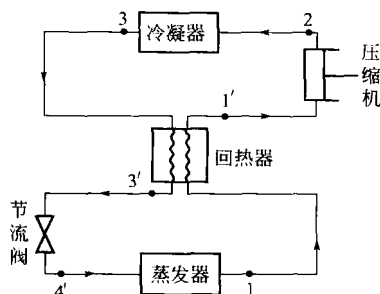


图 1-10 回热循环系统原理图

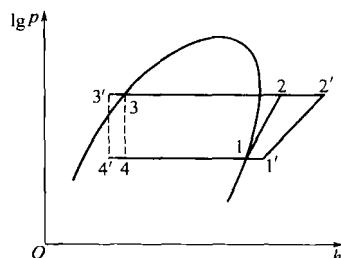


图 1-11 回热循环压焓图

由图 1-10 可以看出, 来自蒸发器的低压气态制冷剂 1 在进入压缩机前先经过一个热交换器——回热器, 在回热器中与来自冷凝器的高压饱和液 3 (也可以是再冷液) 进行换热, 低温蒸气 1 等压过热至状态 $1'$, 而高压液体 3 被等压再冷却至状态 $3'$, 从而实现蒸气回热循环。

回热循环在压焓图上的表示如图 1-11 所示。其中 1-2-3-4-1 为理论循环, $1'-2'-3'-4'-1'$ 为回热循环, 其中 3-3' 和 1-1' 表示在回热器中的回热过程。从图中可以看出, 回热循环的单位质量制冷量增加了, 但是压缩机的比功也增加了, 所以回热循环的制冷系数是增加还是减小与制冷剂的种类有关, 这点与蒸气过热循环的情况一致。即对于制冷剂 R502、R290 来说, 回热循环的制冷系数及单位容积制冷量均增加; 对于制冷剂 R717 和 R22 来说, 回热循环的制冷系数及单位容积制冷量均降低。如图 1-12 所示, 其纵坐标为回热与非回热循环性能系数之比, 则 R717、R22 等工质的制冷系数比值小于 1; R744、R502、R290 等工质的比值大于 1, 亦即经济性也是好的。

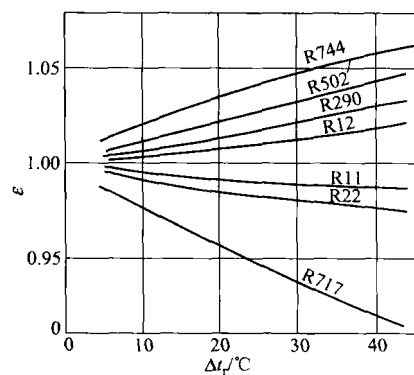


图 1-12 不同工质、不同回热温度 Δt_r 时回热与非回热循环制冷系数比 ϵ

如果不考虑回热器与外界的热量交换, 那么回热器内液体过冷放出的热量应等于蒸气过热吸收的热量, 其热平衡关系可表示为

$$h_4 - h_4' = h_1' - h_1 \quad (1-3)$$

也可以写成 $c_{pl}(t_3 - t_3') = c_{pg}(t_1' - t_1)$

式中， c_{pl} 为制冷剂液体的比定压热容； c_{pg} 为制冷剂蒸气的比定压热容。

由于制冷剂液体的比定压热容比制冷剂蒸气的比定压热容大，所以回热过程中制冷剂蒸气的温升要大于制冷剂液体的温升，制冷剂液体也不可能被冷却到蒸发温度。

氟里昂制冷系统比较适合采用回热器。因为该系统一般采用直接膨胀供液方式供液，一般不设置气液分离装置。回热循环的过冷可使节流降压后的闪发气体减少，从而使节流阀工作稳定，蒸发器供液均匀。同时回热循环的过热又可使制冷压缩机避免吸入制冷剂液滴，保护制冷压缩机。在低温制冷装置中通常也采用回热器，这是为了避免吸气温度过低使制冷压缩机气缸外壁结霜、润滑调节恶化，同时也是为了减少节流后的闪发气体。

1.2.4 多级压缩制冷循环

在单级循环中，随着两热源的温差增加，也即循环冷凝、蒸发温度差与压力比增加，制冷系数总是减少的。一般当两热源温差大于 60°C 时，单级循环性能系数很低。因此，当制冷与热泵的温差更大时，可采用具有中间冷却的多级压缩制冷循环，如图 1-13 中的制冷循环 $1 \rightarrow 2' \rightarrow 2'' \rightarrow 2''' \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 1$ 。低压饱和蒸气 1 从压力 p_0 先被压缩至中间压力 p_1 ，经冷却后再被压缩至中间压力 p_2 ，再经冷却……最后被压缩至冷凝压力 p_k 。这种多级压缩制冷循环，不但降低了压缩机的排气温度，而且可以减少过热损失，减少压缩机的总耗功量；高低压差越大，或者说蒸发温度越低，节能效果越明显。

多级压缩制冷循环常采用闪发蒸气分离器和中间冷却器两种形式，虽然可以提高循环的制冷系数，却要增加压缩机等设备的投资，一般只有当压缩比 p_k/p_0 大于 8 时采用。不过对于离心式或螺杆式制冷压缩机来说，可以比较方便地进行中间抽气，故空调用冷水机组虽然压缩比不高，也有采用双级或三级压缩系统的。目前，双级压缩和中间抽气的“准双级压缩”系统形式已在双工况（制冷与制冰）冰蓄冷空调机组和寒冷地区用热泵系统中得到应用。

(1) 一级节流、中间完全冷却的两级压缩制冷循环

流程图和 $\lg p-h$ 图如图 1-14 所示。

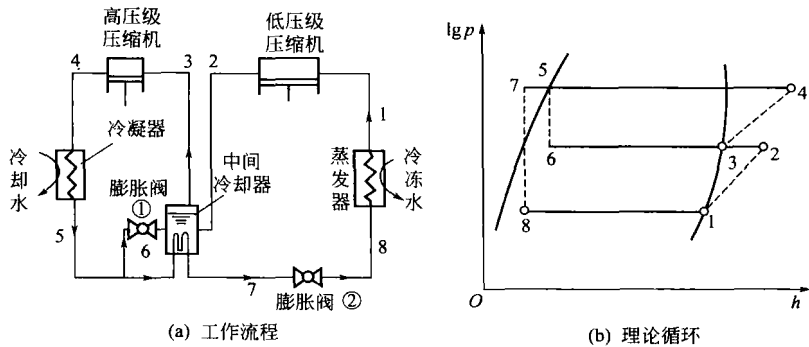


图 1-14 一级节流、中间完全冷却的两级压缩制冷循环

此流程中，自冷凝器中出来并经过中间冷却盘管过冷的高压液体，通过一个激流装置直接节流到蒸发压力。此外，由低压压缩机排出的气体，在中间冷却器中冷却到中间压力下的