

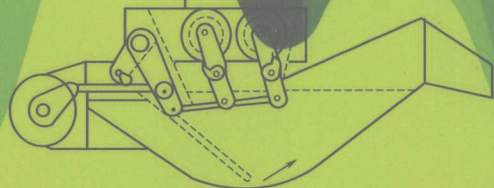
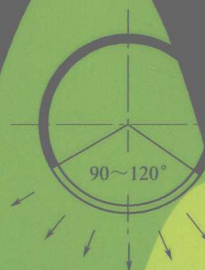
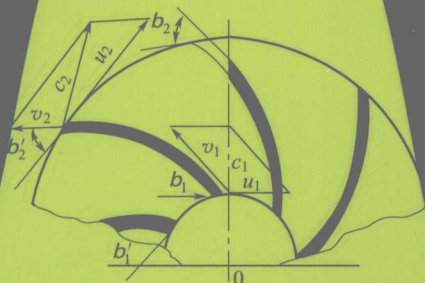


高等院校建筑环境与设备工程专业

规划教材 >>>>

LENGREYUAN GONGCHENG  
**冷热源工程**

丁云飞 主编 陈晓 吴佐莲 副主编 周孝清 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 >>>>

LENGREYUAN GONGCHENG

# 冷热源工程



化学工业出版社

·北京·

本书系统地阐述了蒸气压缩式制冷、吸收式制冷的基本原理,以及锅炉的工作过程及锅炉房设备的组成,介绍了空调冷热源设备的选择及冷热源系统的设计方法。全书分上下两篇,上篇为冷热源装置,主要内容包括蒸气压缩式制冷循环的基本原理、蒸气压缩式制冷系统的组成、吸收式循环的基本原理、供热锅炉的工作过程及其结构;下篇为冷热源系统设计,内容包括冷热源设备选择与机房设计、空调水系统设计及设备选择、地源热泵系统及设计方法、蓄冷系统及设计方法。

本书内容系统性强、深入浅出,既可作建筑环境与设备工程专业学生的教材使用,也可供从事该专业设计、安装、管理工作的工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

冷热源工程/丁云飞主编. —北京:化学工业出版社,  
2009.9  
高等院校建筑环境与设备工程专业规划教材  
ISBN 978-7-122-06365-6

I. 冷… II. 丁… III. ①制冷工程-高等学校-教材  
②热力工程-高等学校-教材 IV. TB6 TK1

中国版本图书馆CIP数据核字(2009)第125787号

---

责任编辑:陶艳玲  
责任校对:陈静

文字编辑:颜克俭  
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:化学工业出版社印刷厂

787mm×1092mm 1/16 印张19½ 字数498千字 2009年9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: 35.00 元

版权所有 违者必究

# 前 言

空气调节必须有冷热源设备及系统提供冷热量，而制冷装置及锅炉设备是空调系统中必备的人工冷热源。本书阐述了冷热源系统的基本原理，介绍了空调冷热源设备的选择、冷热源系统的设计方法。本书分上下两篇，上篇为冷热源装置，内容包括蒸气压缩式制冷循环的基本原理及蒸气压缩式制冷装置、吸收式循环的基本原理及溴化锂吸收式机组、供热锅炉的工作过程及其结构；下篇为冷热源系统设计，内容包括冷热源设备选择与机房设计、空调水系统设计及设备选择、地源热泵系统及设计方法、空调蓄冷系统及设计方法。通过本课程的学习，使学生具有设计、施工、管理空调中冷热源系统的基础知识和初步能力，为学生走向工作岗位打下良好的基础。

本书由广州大学丁云飞任主编，湖南工程学院陈晓、山东农业大学吴佐莲任副主编，广州大学朱赤晖以及山东农业大学王萌、刘小春参加了编写工作。具体分工如下：绪论、第1~3、6章（6.2.3除外）、第10章由丁云飞编写，第4、9章由陈晓编写，第5、6章（6.2.3）由吴佐莲编写，第7章由朱赤晖编写，第8章由王萌、刘小春编写。全书由丁云飞拟定编写大纲并进行统稿。本书承周孝清教授主审。

在本书的编写过程中，参考了许多同行专家学者的教材、专著和论文，并列于书末，以便读者在使用本书过程中进一步查阅相关资料，同时对各参考文献的作者表示衷心的感谢。

由于作者水平有限，难免有不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

2009年6月

# 目 录

<b>0 绪论</b> .....	1	0.2 空调冷热源的发展与应用现状 .....	3
0.1 空气调节与冷热源 .....	1	0.2.1 制冷技术的应用及发展 .....	3
0.1.1 空气调节 .....	1	0.2.2 热泵系统 .....	5
0.1.2 人工制冷的的方法 .....	1	0.2.3 冷热电三联供系统 .....	6
0.1.3 锅炉的工作过程 .....	3		

## 上篇 冷热源装置

<b>1 蒸汽压缩式制冷循环</b> .....	8	2.1.3 离心式制冷压缩机 .....	58
1.1 理想制冷循环 .....	8	2.1.4 滚动转子式制冷压缩机 .....	62
1.1.1 逆卡诺循环 .....	8	2.1.5 涡旋式制冷压缩机 .....	65
1.1.2 湿蒸气区的逆卡诺循环 .....	9	2.2 冷凝器 .....	66
1.2 蒸汽压缩式制冷的理论循环 .....	10	2.2.1 冷凝器的种类及特点 .....	66
1.2.1 蒸汽压缩式制冷的饱和循环 .....	10	2.2.2 冷凝器的选择计算 .....	70
1.2.2 蒸汽压缩式制冷的的基本系统 .....	11	2.3 蒸发器 .....	74
1.2.3 饱和循环与逆卡诺循环比较 .....	11	2.3.1 蒸发器的种类 .....	74
1.3 蒸汽压缩式制冷饱和循环的热力计算 .....	13	2.3.2 蒸发器的选择计算 .....	78
1.3.1 $p-h$ 图的构成及应用 .....	13	2.3.3 载冷剂 .....	81
1.3.2 蒸汽压缩式制冷的热力计算 .....	15	2.4 节流机构 .....	83
1.3.3 制冷量与制冷系数 .....	17	2.4.1 手动膨胀阀 .....	83
1.3.4 节流前过冷对制冷循环的影响 .....	17	2.4.2 浮球膨胀阀 .....	83
1.3.5 吸气过热对制冷循环的影响 .....	18	2.4.3 热力膨胀阀 .....	84
1.3.6 回热循环 .....	20	2.4.4 热电膨胀阀和电子脉冲式膨胀阀 .....	86
1.4 蒸汽压缩式制冷的实际循环 .....	21	2.4.5 毛细管 .....	88
1.5 双级压缩制冷循环和复叠式制冷循环 .....	23	复习思考题 .....	90
1.5.1 双级压缩制冷循环 .....	23	<b>3 制冷系统及辅助设备</b> .....	92
1.5.2 复叠式制冷循环 .....	26	3.1 制冷系统的典型流程 .....	92
1.6 制冷剂 .....	26	3.2 制冷剂系统中的辅助设备 .....	94
1.6.1 制冷剂的种类与命名 .....	26	3.3 制冷剂管路的管径的确定 .....	102
1.6.2 制冷剂的性质 .....	28	3.4 制冷系统的自动控制与运行调节 .....	106
1.6.3 制冷剂的替代 .....	34	3.4.1 制冷系统的自动阀门 .....	106
1.7 热泵 .....	37	3.4.2 制冷系统的控制器 .....	109
复习思考题 .....	38	3.4.3 蒸发器的自动调节 .....	111
<b>2 蒸汽压缩式制冷系统</b> .....	41	3.4.4 压缩机的自动调节 .....	114
2.1 制冷压缩机 .....	41	3.4.5 制冷系统的自动安全保护 .....	116
2.1.1 往复式压缩机 .....	42	3.5 蒸汽压缩式冷水机组 .....	116
2.1.2 螺杆式压缩机 .....	51	3.5.1 活塞式冷水机组 .....	116

3.5.2 螺杆式冷水机组 .....	117	5.1.1 锅炉房设备组成 .....	136
3.5.3 离心式冷水机组 .....	118	5.1.2 锅炉的工作过程 .....	137
3.5.4 风冷式冷水机组 .....	118	5.1.3 锅炉的分类 .....	138
复习思考题 .....	118	5.1.4 锅炉基本特性的表示方法 .....	139
<b>4 溴化锂吸收式机组 .....</b>	<b>119</b>	5.2 锅炉燃料与燃烧计算 .....	143
4.1 吸收式制冷机的工作原理 .....	119	5.2.1 燃料的成分及分析基准 .....	143
4.1.1 吸收式制冷的工作过程 .....	119	5.2.2 燃料的种类及特性 .....	145
4.1.2 溴化锂溶液特性及热力状态图 .....	120	5.3 锅炉热平衡与燃烧计算 .....	149
4.1.3 溴化锂吸收式制冷机的工作原理 .....	122	5.3.1 锅炉热平衡 .....	149
4.2 溴化锂吸收式制冷机的热力计算 .....	124	5.3.2 锅炉热效率 .....	151
4.2.1 热力计算过程 .....	124	5.3.3 燃烧计算 .....	153
4.2.2 制冷循环工作参数的确定 .....	126	5.4 常用燃烧设备 .....	156
4.3 双效溴化锂吸收式制冷机 .....	127	5.4.1 链条炉 .....	157
4.3.1 蒸气型双效溴化锂吸收式制冷机 .....	127	5.4.2 循环流化床炉 .....	157
4.3.2 直燃型双效溴化锂吸收式冷热 水机组 .....	128	5.4.3 燃油、燃气锅炉 .....	158
4.4 溴化锂吸收式制冷机的形式与结构 .....	130	5.4.4 水煤浆锅炉 .....	159
4.4.1 溴化锂吸收式制冷机的主要 形式 .....	130	5.4.5 辅助受热面 .....	161
4.4.2 溴化锂吸收式制冷机的主要部件 与附属设备 .....	131	5.5 烟风系统 .....	162
4.5 溴化锂吸收式制冷机的性能调节 .....	133	5.5.1 锅炉通风 .....	163
4.5.1 外界条件变化对机组性能的影响 .....	133	5.5.2 烟气净化 .....	166
4.5.2 部分负荷时的能量调节 .....	134	5.6 汽水系统 .....	168
复习思考题 .....	135	5.6.1 水循环的原理 .....	168
<b>5 供热锅炉 .....</b>	<b>136</b>	5.6.2 汽水分离 .....	169
5.1 概述 .....	136	5.6.3 锅炉水处理 .....	169
		5.7 燃烧系统的辅助设备 .....	173
		5.7.1 运煤系统 .....	173
		5.7.2 除渣系统 .....	174
		5.8 锅炉常用附件 .....	175
		5.9 供热锅炉节能 .....	178
		复习思考题 .....	179

## 下篇 冷热源系统设计

<b>6 冷热源设备选择与机房设计 .....</b>	<b>182</b>	7.1.1 冷冻水系统的形式 .....	200
6.1 冷热源设备的选择 .....	182	7.1.2 冷冻水系统设计 .....	204
6.1.1 制冷设备容量及台数的选择 .....	182	7.1.3 循环水泵的选择 .....	206
6.1.2 锅炉型号及台数的选择 .....	185	7.1.4 其他辅助设备的选择 .....	208
6.2 冷热源机房设计 .....	187	7.2 冷却水系统及设备选择 .....	209
6.2.1 冷热源机房的位置 .....	187	7.2.1 冷却水系统布置形式 .....	210
6.2.2 冷热源机房布置 .....	187	7.2.2 冷却塔的选择及布置 .....	210
6.2.3 燃煤锅炉房设计 .....	188	7.2.3 冷却水泵的选择 .....	212
6.2.4 燃油燃气锅炉房设计 .....	190	7.3 凝结水系统 .....	212
复习思考题 .....	199	7.3.1 凝结水管设置原则 .....	212
<b>7 空调水系统设计 .....</b>	<b>200</b>	7.3.2 凝结水管管径 .....	212
7.1 冷冻水系统及循环水泵的选择 .....	200	7.4 管路系统的隔热措施 .....	213

7.4.1	绝热材料及性能	213	9.2.2	水蓄冷空调系统的形式	253
7.4.2	绝热层厚度的确定	213	9.2.3	水蓄冷槽的类型及其特点	254
	复习思考题	216	9.2.4	水蓄冷空调系统设计	256
<b>8</b>	<b>地源热泵系统及设计方法</b>	217	<b>9.3</b>	<b>冰蓄冷空调系统</b>	258
8.1	地源热泵系统的基本概念	217	9.3.1	蓄冰技术	259
8.1.1	地源热泵系统的分类	217	9.3.2	冰蓄冷空调系统的循环流程	262
8.1.2	地源热泵系统组成及工作原理	217	9.3.3	冰蓄冷空调系统设计	263
8.1.3	地源热泵系统的特点	218		复习思考题	266
8.1.4	土壤源地源热泵系统	219	<b>10</b>	<b>冷热电三联供系统</b>	267
8.1.5	地下水地源热泵系统	220	10.1	概述	267
8.1.6	地表水源热泵系统	221	10.2	集中式冷热电联供技术	268
8.2	地源热泵系统设计前期的准备工作	223	10.2.1	集中式冷热电联供系统的形式	269
8.2.1	地源热泵系统的设计特点	223	10.2.2	集中式冷热电联供系统的冷热媒及冷热量调节	271
8.2.2	系统负荷计算	224	10.2.3	集中式冷热电联供的输配系统	273
8.2.3	现场勘测	225	10.3	建筑分布式冷热电联供技术	274
8.3	土壤源热泵系统设计方法	229	10.3.1	分布式发电技术	275
8.3.1	土壤换热器的设计步骤	229	10.3.2	热回收技术	276
8.3.2	地埋管换热器的布置形式	230		复习思考题	278
8.3.3	地埋管管材与传热介质	232	<b>附录</b>		279
8.3.4	地埋管管长的确定	233	附录 1	制冷剂编号及一般特性	279
8.3.5	竖井、管沟数目及间距	234	附录 2	R22 饱和状态下的热力性质	280
8.3.6	管道压力损失计算与循环泵的选择	234	附录 3	R717 饱和状态下的热力性质	282
8.3.7	校核管材承压能力	234	附录 4	R134a 饱和状态下的热力性质	285
8.3.8	土壤换热器传热计算方法	234	附录 5	R22 过热蒸气的热力性质	287
8.4	地下水源热泵系统设计	236	附录 6	R717 过热蒸气的热力性质	290
8.4.1	闭式环路地下水系统设计	237	附录 7	R134a 过热蒸气的热力性质	293
8.4.2	开式地下水系统设计	242	附录 8	氯化钙水溶液的物性值	296
8.5	地表水地源热泵系统设计	243	附录 9	乙二醇水溶液的热物性值	297
8.6	地源热泵系统优化	248	附录 10	R717 (NH <sub>3</sub> ) 的 $p-h$ 图	299
	复习思考题	249	附录 11	R134a 的 $p-h$ 图	300
<b>9</b>	<b>蓄冷空调系统及设计方法</b>	250	附录 12	R22 的 $p-h$ 图	301
9.1	概述	250	附录 13	LiBr-H <sub>2</sub> O 溶液的 $h-\xi$ 图之一	302
9.1.1	蓄冷空调技术的原理	250	附录 14	LiBr-H <sub>2</sub> O 溶液的 $h-\xi$ 图之二	303
9.1.2	蓄冷设计模式与控制策略	250	<b>参考文献</b>		304
9.1.3	蓄冷空调技术的发展与应用	252			
9.2	水蓄冷空调系统	252			
9.2.1	水蓄冷空调系统的特点	252			

# 0 绪 论

## 0.1 空气调节与冷热源

### 0.1.1 空气调节

空气调节指实现对某一房间或空间内的温度、湿度、空气流动速度、洁净度进行调节与控制，并提供足够的新鲜空气，空气调节简称为空调。

在夏季，一个房间可能获得以下几项热量和湿量：

- ① 透过玻璃窗进入的太阳辐射热量；
- ② 由于室内外温差通过建筑围护结构传入的热量；
- ③ 人员的散热量与散湿量；
- ④ 灯光散热量；
- ⑤ 设备散热量和散湿量。

空调的任务就是从房间内移出这些多余的热量和湿量（通常称为冷负荷和湿负荷），从而维持室内一定的温度和湿度，以满足人们工作生活及工业生产的需求。

具体地说，可以利用一种温度较低的介质来吸收这些多余的热量和除去空气中的湿量。例如，将温度较低的地下水（深井水）或由冰融化得到的低温水供入空调设备的空气冷却器中以带走房间内的热量和湿量。这种自然界中存在的低温物质（深井水或天然冰）称为“天然冷源”。但天然冷源的使用受地理、气候、环境等条件的限制，因此，必须采用人工制冷的的方法得到一种低温介质。“人工制冷”就是借助一种专门装置，消耗一定量的外界能量，以使热量从温度较低的被冷却物体或空间转移到温度较高的周围环境中去，这种专门装置称为制冷装置或制冷机。

在冬季，一个房间会失去热量，包括：围护结构传热耗热量、冷风渗透耗热量及冷风侵入耗热量，有时会有太阳辐射进入室内，使室内得到一定的热量。房间的失热量与得热量之差即为房间的热负荷。要维持房间在一个合适的温度（如 20℃），创造适宜的生活条件或工作条件，必须给房间供暖，就是用人工方法向室内供给热量，保持一定的室内温度。所有供暖系统都由热媒制备、热媒输送和热媒利用 3 个主要部分组成。

把给房间提供热量的装置称为热源，根据热源热量转换的来源不同，常见的热源有锅炉、电加热器、热泵、太阳能利用装置等。

### 0.1.2 人工制冷的的方法

制冷的的方法很多，可分为物理方法和化学方法。而绝大多数的的方法是物理方法。目前广泛应用的制冷方法有以下几种。

#### (1) 相变制冷

物质有固态、液态和气态 3 种状态。物质状态的改变称为相变。相变过程中，由于物质分子重新排列和分子运动速度的改变，就要吸热或放热，这种热量称为相变潜热。利用物质相变过程要吸热这一现象可以实现制冷的目的。



① 熔解 固体物质在一定温度下转变为液体称为熔解。1kg 固体物质在一定温度下熔解所吸收的热量称为熔解热。冰融化时的熔解热为 334.9kJ/kg。冰的熔解温度为 0℃，低于环境温度，可被利用来制冷。如图 0-1 所示，在一小室内放一盛冰的容器，如外界温度为 20℃，则冰融化吸热而把小室冷却，并维持小室一定低的温度，如 10℃。

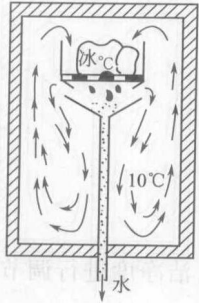


图 0-1 利用冰的熔解制冷

② 汽化 液体转变为蒸气称为汽化。汽化过程有蒸发和沸腾两种。蒸发是液体表面的汽化过程，任何一种液体裸露在空气中时，液体表面分子中动能较大的分子克服表面张力的作用而飞逸到自由空间中去，这种汽化过程称为蒸发，蒸发可以在任何温度下发生，即使在温度低于该压力的饱和温度下也可以发生蒸发现象。当液体温度等于饱和温度时，不仅在液体表面，而且在液体内部都发生汽化，这种汽化过程称为沸腾。这时的温度称为该压力下的沸点。沸腾是液体强烈的汽化过程。液体汽化要吸热，1kg 液体汽化所吸收的热量称为汽化潜热。例如，氨在 1atm (1atm = 101325Pa) 下的汽化潜热为 1370kJ/kg，这时的沸点为 -33.4℃。这种在低温下汽化吸热效应可被用来制冷。图 0-2 是利用液体汽化实现制冷的简单装置。在小室内放一通大气的容器，内盛沸点较低的液体（如氨液）。由于容器是通大气的，氨液在大气压下的饱和温度（即沸点）约为 -33℃，则温度较高的室内空气的热量传入容器内温度较低的氨液，使氨液汽化成蒸气，氨蒸气通过排气管排出小室外，而同时把小室冷却下来。汽化过程中压力保持不变，温度也保持不变，是一个等压等温的过程。

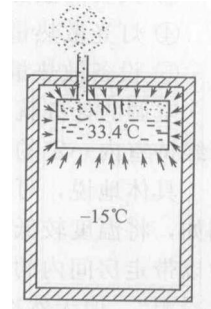


图 0-2 利用液体汽化制冷

③ 升华 当压力低于三相点压力时，固体物质直接转化为气态的现象称为升华。升华要吸热，1kg 固体物质在一定压力下升华所吸收的热量称为升华潜热。如干冰（固体  $\text{CO}_2$ ）在 1atm 下的升华潜热为 573.6kJ/kg。升华吸热效应也可被用来制冷。

### (2) 气体绝热膨胀制冷

一定状态的气体通过节流阀或膨胀机绝热膨胀，温度降低，从而达到制冷目的。气体绝热节流可以通过节流阀来实现。当气体经过节流阀时，流速大、时间短，来不及与外界进行热交换，可以近似地看作绝热过程。气体在绝热节流前后焓值不变。对于理想气体，焓值只是温度的函数，所以理想气体节流前后的温度是不变的。而实际气体的焓值是压力和温度的

函数，所以实际气体绝热节流后的温度将发生变化，这一现象称为焦耳-汤姆逊效应。气体节流后温度降低还是升高与气体初始状态有关。大多数气体（如空气、氧、氮、二氧化碳等）在常温下节流后的温度都降低，可以用来制冷。飞机机舱中的空气调节常用空气压缩式制冷，这实质上是利用空气通过膨胀机绝热膨胀达到制冷目的，其工作原理如图 0-3 所示。

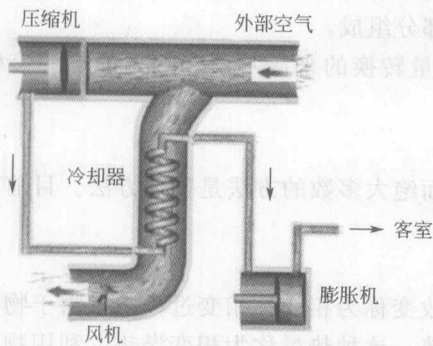


图 0-3 飞机客舱空调系统

### (3) 温差电制冷（热电制冷）

1834 年珀尔帖发现了如下现象：在两种不同金属组成的闭合电路中接上一个直流电源，则在一

一个接合点变冷(吸热),另一个接合点变热(放热),这种现象称为珀尔帖效应。这个效应是温差电制冷方法的基础。但是纯金属的珀尔帖效应很弱,而且还有热量从热接点导到冷接点的干扰,因而当时一直未被应用。直到近代半导体的发现才使温差电制冷成为现实,因此目前温差电制冷称为半导体制冷。半导体分两类——电子型(N型)和空穴型(P型)。用这两种半导体组成闭合电路(图 0-4),并接直流电源,这时就有明显的珀尔帖效应。系统中的铜起导电作用。系统中只需很小的直流电压,每一对半导体只需零点几伏,而所获得的制冷量也很小。因此,实际的制冷器都是由若干半导体组合件串联而成,所有的热接点在一侧,所有的冷接点在另一侧,即一侧放热、另一侧吸热制冷。目前半导体制冷用在小型制冷器中。

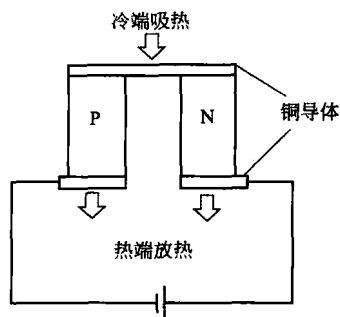


图 0-4 半导体制冷

### 0.1.3 锅炉的工作过程

锅炉是利用燃料或其他能源的热能,把工质加热到一定参数的换热设备。

锅炉是供热之源。锅炉及锅炉房设备的任务,在于安全、可靠、经济有效地将燃料的化学能转化为热能,进而将热能传递给水,以产生热水或蒸汽。人们把用于动力、发电方面的锅炉,叫做动力锅炉;把用于工业及采暖方面的锅炉,称为供热锅炉,通常称为工业锅炉。

锅炉的工作包括 3 个过程,燃料的燃烧、烟气向水的传热过程和水的汽化过程。其中任何一个过程进行得正常与否,都会影响锅炉运行的安全性和经济性。

#### (1) 燃料的燃烧过程

燃料燃烧所需的空气由鼓风机通过风道送入炉膛,与燃料混合燃烧,燃烧后形成的灰渣通过除渣装置排出,产生的高温烟气进入炉内传热过程。

#### (2) 烟气向工质的传热过程

炉膛的四周墙面上布置有水冷壁。高温烟气与水冷壁进行强烈的辐射换热,将热量传递给管内工质。烟气经炉膛出口冲刷蒸汽过热器、省煤器及空气预热器,与管内工质进行对流换热。

#### (3) 水的吸热、汽化、过热过程

锅炉工作时,经过水处理的锅炉给水由给水泵加压,先经过省煤器而得到预热,然后进入汽包。一部分锅水经下降管、下联箱进入水冷壁中吸热,形成汽水混合物,进入汽包。另一部分锅水经对流管束吸热后形成汽水混合物进入汽包。

借助上锅筒内装设的汽水分离装置,分离出的饱和蒸汽进入蒸汽过热器,成为过热蒸汽,提供给用热单位使用。

## 0.2 空调冷热源的发展与应用现状

### 0.2.1 制冷技术的应用及发展

#### (1) 制冷技术的应用

最初制冷主要用于防暑降温和食品的储藏。但是,随着社会的进步和科学技术的发展,制冷技术在各个领域中都得到广泛的应用,主要应用在下面几个方面。

① 用于空气调节的冷源 空气调节广泛地应用于工业生产及生活服务设施中。在工业

领域，如光学仪器、仪表、精密计量、量具、精密机床、半导体、纺织、合成纤维、印刷、电影胶片洗印等生产车间，大型生产过程的控制室，各种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；大会堂、影剧院、体育馆、图书馆、宾馆和饭店、展览馆等公共建筑和汽车、飞机、火车等交通工具都需要有舒适性空调系统；住宅需要舒适性空调（常采用家用空调器）；又如一些高温车间、炎热地区的生产车间需要防暑降温；地下铁路、地下商业街和仓库等的地下建筑物和构筑物也都需要空调。因此，随着人们生活水平的提高和社会经济的不断发展，空气调节将在更大范围内发挥它的作用，随之，制冷技术的应用也将日益扩大和发展。

② 用于食品工业 食品工业的发展与制冷技术有着密切的关系。目前，制冷技术广泛地用于食品工业中一些易腐食品，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、冷藏船、冷藏列车、冷藏柜、冰箱等。其他如冷饮品、饮料等工业也都需要制冷装置。

③ 用于机械、电子工业 机械工业中，应用冷处理方法可以改善钢的性能，使产品硬度增加、寿命延长。例如，合金钢经淬火后有残余的奥氏体，如果在 $-90\sim-70^{\circ}\text{C}$ 的低温下对它处理，奥氏体就变成马氏体，从而提高了钢的硬度及强度。经冷处理的刀具，其使用寿命可延长 $30\%\sim 50\%$ 。

电子工业中，许多电子元器件需要在低温或恒温环境中工作，以提高其性能，减少元件发热和环境温度的影响。例如，电子计算机储能器、多路通信、雷达、卫星地面站等电子设备需要在低温下工作。

④ 用于医疗卫生方面 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。

⑤ 用于科学研究方面 一些科学研究机构，如材料研究所、物理研究所、化学研究所等都需要人工制冷，以满足科学研究和试验的需要。

⑥ 土木工程方面 在建造堤坝、码头、隧道、挖掘矿井时，如遇到含水的泥沙，可以在施工地段的周围造成冻土围墙，以防止水分渗入，增加护壁的力度，保障工程安全施工。混凝土固化时会释放反应热，为了避免发生热膨胀和产生应力，应把这些热量除去：在大型工程（如水坝）中，可以用制冷的办法预先将沙、砾石、水和水泥等在混合前冷却，或在混凝土内埋入冷却水管使之冷却。

⑦ 现代农业方面 现代农业中，浸种、育苗、微生物除虫、良种的低温储存、冻干法保存种子、低温储粮等都要求运用制冷技术。

⑧ 体育运动方面 现代的冰上运动包括冰球、速滑、花样滑冰、冰上舞蹈等，这些冰上运动对冰场的质量、环境提出了更高的要求。因此，人工冰场在各国得到了迅速的发展。人工冰场的出现对普及冰上运动、延长冰上运动时间、扩大冰上运动的地域以及提高冰上运动的水平都起着积极作用。

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、人类生活水平的不断提高，制冷技术在国民经济中的应用将展示出更加宽广的前景。

## (2) 制冷技术的发展

现代制冷技术作为一门科学，是19世纪中期和后期发展起来的。1834年，美国人波尔金斯（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

(Gorrie) 在美国费城用封闭循环的空气制冷机建立了一座空调站。1859 年法国人卡列 (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, 从此蒸气压缩式制冷机一直占据统治地位。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机, 由于它的热力系数较小且容量一般较大, 所以应用不甚广泛。

进入 20 世纪以后, 制冷技术有了更大的发展。随着制冷机械的发展, 制冷剂的种类也不断增多。1930 年以后, 氟里昂制冷剂的出现和大量应用, 曾使压缩式制冷技术及其应用范围得到极大的发展。由于氟里昂具有良好的热力性质, 使制冷技术的发展进入了一个新的阶段。1974 年以后, 人类发现氟里昂中的氯氟碳化物 (简称 CFC), 能严重地破坏臭氧层, 危害人类的健康和破坏地球上的生态环境, 是公害物质。因此减少和禁止 CFC 的生产和使用, 已成为国际社会共同面临的紧迫任务, 研究和寻求 CFC 制冷剂的替代物, 以及面对由于更换制冷剂所涉及的一系列工作, 也成为亟待解决的问题。十多年来, 世界各国都投入了大量的人力和财力, 对一些有可能作为 CFC 的替代物及其配套技术进行了大量的试验研究, 并开始使用混合溶液作为制冷剂, 使蒸气压缩式制冷的发展有了重大的技术突破。与此同时, 其他制冷方式和制冷机的研究工作进一步加快, 特别是吸收式制冷机已经有了更大的发展。而且面对世界性的能源危机和环境污染, 对制冷机的发展提出更高的节能和环保要求。

受微电子、计算机、新型原材料和其他相关工业领域技术进步的渗透和促进, 制冷技术取得了突破性的发展。从制冷的温度范围来说, 可以获得从稍低于环境温度直到接近于绝对零度的低温。单机组的制冷量从几十瓦到几万千瓦。制冷机的种类和形式也在不断增加, 制冷系统的流程、主机、辅机、制冷剂及自动控制都在不断地发展。计算机在制冷机的设计、制造、测试、控制及生产管理等方面的广泛应用, 为更好地实现设计的优化及制冷系统调节控制的自动化, 为取得最佳的技术经济效益和环境效益, 提供有利的条件和可靠的保障。

中国人很早就知道利用天然冰进行食品的冷藏和防暑降温, 在《诗经》和《周礼》中就有了“凌人”和“凌阴”的记载。“凌”就是冰, 这说明在奴隶社会的周朝, 已有专门管理冰的人员和储藏冰的房屋。1986 年在陕西省姚家岗秦雍城遗址, 发掘出可以储藏  $190\text{m}^3$  冰块的地下冰室。这说明早在春秋时期, 秦国就很重视食物冷藏和防暑降温方面的设施建设, 我国劳动人民在采集、储运和使用天然冰方面积累了丰富的经验。然而, 由于中国长期处于封建社会, 束缚了生产力的发展和技术的进步, 现代的制冷技术一直没有得到发展。直到 1949 年, 我国还没有能制造制冷设备的工厂, 只在沿海几个大城市有几家进行配套安装空调工程的洋行和修理冰箱的小作坊, 制冷设备均为国外引进。全国仅有少数冷藏库, 总库容量不到 3 万吨。

我国的制冷机制造工业起源于 20 世纪 50 年代末期, 是在几个安装、修理厂的基础上发展起来的。从开始仿制生产活塞式制冷机, 到自行设计和制造, 并制定了有关的系列标准, 以后又陆续发展了其他类型的制冷机。目前已有活塞式、螺杆式、离心式、涡旋式、吸收式、热电式及蒸气喷射式等类型的制冷装置, 许多产品的质量和性能已接近和达到世界先进水平。

### 0.2.2 热泵系统

热泵是一种节能设备, 它能消耗较少的能源为空调建筑提供热量。它是利用逆卡诺循环原理, 从低温环境吸热并向高温环境放热达到为空调房间供热的目的。根据热泵吸热的低温环境不同, 可分为空气源热泵、水源热泵、土壤源热泵等。

图 0-5 为采用水/空气热泵机组的土壤源热泵系统简图。土壤源热泵系统主要由 3 部分组成:

室外地热能交换器、水/空气热泵机组或水/水热泵机组、建筑物内空调末端设备。一般情况下室外地热能交换器采用土壤-水地埋管换热器，所以土壤源热泵系统也称为地耦合地源热泵系统。在冬季，水/空气热泵机组制热运行，水或防冻水溶液通过地埋管换热器 1 从土壤吸收热量后，在循环水泵 2 的作用下流经水/空气热泵机组的蒸发器（冷热源侧换热器 3），将热能传递给热泵机组的工质。在冷凝器（负荷侧换热器 7）中，从土壤源吸收的热量连同压缩机 4 消耗的功所转化的热量一起供给室内空气。在夏季，换向阀 5 换向，水/空气热泵机组制冷运行，水源热泵机组中的工质在蒸发器（负荷侧换热器 7）中，吸收来自空调房间的热量，在冷凝器（冷热源侧换热器 3）中，从蒸发器中吸收的热量连同压缩机 4 消耗的功所转化的热量一起排给地埋管换热器中的水或防冻水溶液。水或防冻水溶液再通过地埋管换热器 1 向土壤排放热量。

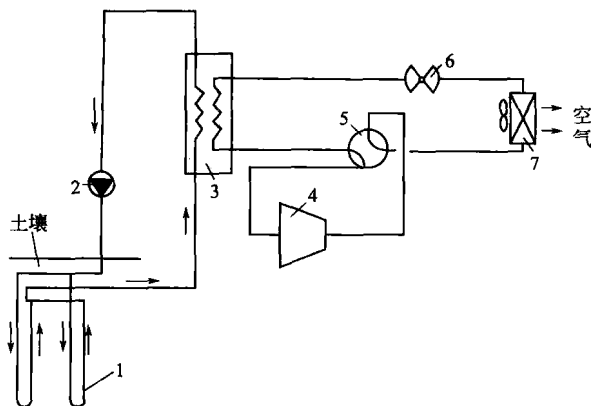


图 0-5 土壤源热泵系统简图

1—地埋管换热器；2—循环水泵；3—冷热源侧换热器；  
4—压缩机；5—换向阀；6—节流阀；7—负荷侧换热器

### 0.2.3 冷热电三联供系统

冷热电三联供系统是热能利用的一种有效形式，可以提高能源的利用效率，图 0-6 是冷热电三联供系统的示意。燃料首先通过发电装置发电，发电所产生的废热（废气或尾气）通过热交换装置产生生活热水或采暖、空调用热水，以满足建筑对热水的需求，也可生产出低压蒸汽或高温热水，供工业生产需要。通过换热器所生产的低压蒸汽或热水还可用于驱动制冷装置，来生产出空调冷冻水，以满足建筑物夏季空调的需要。

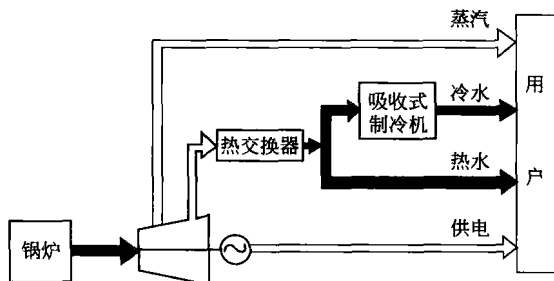


图 0-6 冷热电三联供系统的示意

由此可见，冷热电三联供系统符合能源的梯级利用，一般三联供系统的热能利用效率可达到 80% 以上。冷热电联供系统按照规模大小可分为集中式冷热电三联供系统和建筑冷热电三联供系统（也称建筑分布式能源供应系统）。



# 1 蒸气压缩式制冷循环

## 1.1 理想制冷循环

### 1.1.1 逆卡诺循环

由工程热力学原理可知，逆卡诺循环是由两个等温过程和两个绝热过程交替进行的逆向循环。逆卡诺循环在  $T-s$  图上的表示如图 1-1 所示。

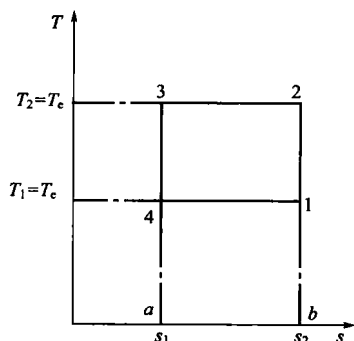


图 1-1 逆卡诺循环在  $T-s$  图上的表示

逆卡诺循环实际上是一个理想制冷系统的工作循环，图 1-2 是逆卡诺循环制冷机的原理图。制冷机由绝热压缩机、等温压缩机、绝热膨胀机、等温膨胀机所组成。4 个设备用管道连接，制冷剂在这 4 个设备中依次循环，完成 4 个工作过程，以图 1-1 为例进行说明。

绝热压缩过程 1-2：在绝热压缩机中完成，制冷剂的温度由  $T_1$  升高到  $T_2$ ，与外界无热量交换，但外界对制冷剂做功。

等温压缩过程 2-3：在等温压缩机中完成，制冷剂向高温热源放出热量  $Q_2$ ，外界对制冷剂做功。

绝热膨胀过程 3-4：在绝热膨胀机中完成，制冷剂温度由  $T_3$  降到  $T_4$ ，膨胀时对外做功，但与外界无热量交换。

等温膨胀过程 4-1：在等温膨胀机中完成，膨胀时对外做功，同时从低温热源中吸取热量  $Q_1$ 。

制冷剂经历 1-2-3-4-1 过程后恢复到初始状态，完成一个工作循环，系统从低温热源吸收了热量  $Q_1$ （系统的制冷量），向高温热源放出了热量  $Q_2$ ，同时外界对系统做功  $W$ （循环过程消耗的功为 4 个过程功量的代数和）。在  $T-s$  图（示热图）上，过程线下的投影面积即为该过程所放出或吸收的热量，则面积 41ba4 为过程 4-1 每千克制冷剂所吸收的热量，面积 23ab2 为过程 2-3 每千克制冷剂所放出的热量，因此有：

$$Q_1 = T_1 (s_2 - s_1) m \quad (1-1)$$

$$Q_2 = T_2 (s_2 - s_1) m \quad (1-2)$$

式中  $m$ ——制冷剂质量，kg；

$s_1$ 、 $s_2$ ——状态点 3（或 4）和 1（或 2）的比熵， $J/(kg \cdot K)$ 。

根据热力学第一定律，每千克制冷剂循环消耗的净功为：

$$\begin{aligned} W &= Q_2 - Q_1 = T_2 (s_2 - s_1) m - T_1 (s_2 - s_1) m \\ &= (T_2 - T_1) (s_2 - s_1) m \end{aligned} \quad (1-3)$$

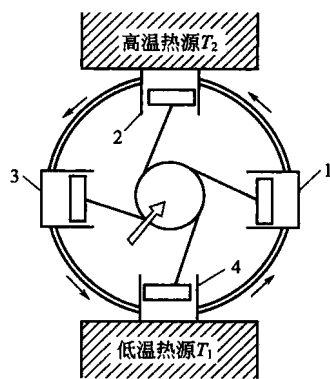


图 1-2 逆卡诺循环制冷机的原理图

1—绝热压缩机；2—等温压缩机；  
3—绝热膨胀机；4—等温膨胀机



即每千克制冷剂循环消耗的净功为面积 12341。

$$\text{因此，逆卡诺循环的制冷系数为：} \epsilon_c = \frac{Q_1}{W} = \frac{T_1(s_2 - s_1)m}{(T_2 - T_1)(s_2 - s_1)m} = \frac{T_1}{T_2 - T_1} \quad (1-4)$$

上述 4 个热力过程均是可逆过程，式(1-4)即是在低温热源  $T_1$  和高温热源  $T_2$  之间工作的制冷机所能达到的最大制冷系数。而对于实际循环，由于热力过程不可逆，其制冷系数都小于  $\epsilon_c$ 。

上述的逆卡诺循环制冷机有下列特点。

① 所有过程都是在可逆条件下进行的。即两个热源（高温热源  $T_2$ 、低温热源  $T_1$ ）与制冷剂之间的传热都是在无温差条件下进行的；所有的压缩、膨胀及制冷剂的流动等过程无摩擦，内部无涡流或扰动。

② 逆卡诺循环的制冷系数只与  $T_1$  和  $T_2$  有关，而与制冷剂无关。

③ 在  $T_1$  和  $T_2$  之间的制冷循环中，逆卡诺循环的制冷系数最大。

④ 逆卡诺循环的制冷系数随着  $T_1$  的升高或  $T_2$  的降低而增加，并可证明， $T_1$  对制冷系数的影响比  $T_2$  大。

### 1.1.2 湿蒸气区的逆卡诺循环

图 1-2 所示的逆卡诺循环制冷机的制冷剂无相变发生，所有过程都在气相区中进行。对于蒸气压缩式制冷系统，其中蒸发器中沸腾汽化过程是一个等压等温过程，冷凝器中的凝结过程也是等压等温过程。因此，也可以设想使蒸气压缩式制冷按逆卡诺循环工作。图 1-3 表示了按逆卡诺循环工作的蒸气压缩式制冷机。系统由绝热压缩机、绝热膨胀机、蒸发器和冷凝器组成。假设被冷却介质的温度  $T_1$  等于制冷剂的蒸发温度  $T_e$ ，冷却介质的温度  $T_2$  等于制冷剂的冷凝温度  $T_c$ ，以使传热过程无温差。其工作过程  $T-s$  图如图 1-4 所示。

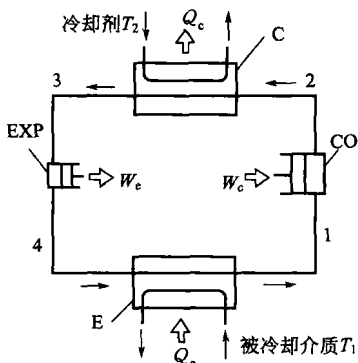


图 1-3 按逆卡诺循环工作的蒸气压缩式制冷机

E—蒸发器；CO—压缩机；  
C—冷凝器；EXP—膨胀机

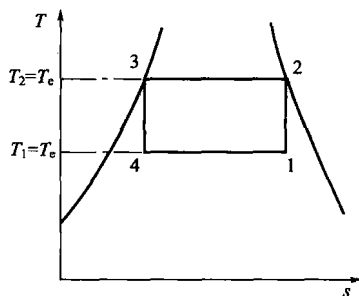


图 1-4 在湿蒸气区的逆卡诺循环在  $T-s$  图上的表示

从图 1-4 中可见以下过程。

绝热压缩过程 1-2：在绝热压缩机中完成，制冷剂温度由  $T_e(T_1)$  升高到  $T_c(T_2)$ ，压缩机消耗功  $W_c$ ，系统与外界无热量交换。

等压等温的凝结过程 2-3：在冷凝器中完成，制冷剂向冷却介质放出冷凝热量  $Q_c$ ，系统与外界无功量交换。

绝热膨胀过程 3-4：在绝热膨胀机中完成，制冷温度由  $T_c(T_2)$  下降到  $T_e(T_1)$ ，膨胀



获得功  $W_e$ ，系统与外界无热量交换。

等压等温的汽化过程 4-1：在蒸发器中完成，制冷剂从被冷却介质中吸取热量  $Q_c$ （制冷量）。

从  $T-s$  图上可以看到，这个循环仍然是由两个等温过程和两个绝热过程所组成的逆向循环，但所有过程都是在湿蒸气区域中进行的，因此称为湿蒸气区的逆卡诺循环。

实际上，湿蒸气区的逆卡诺循环实现起来困难很多，主要有以下一些。

① 无温差传热实际上是不可能实现的，实际循环只能使蒸发温度低于被冷却介质的温度 ( $T_e < T_1$ )，冷凝温度高于冷却剂的温度 ( $T_c > T_2$ )。

② 压缩过程在湿蒸气区中进行的危害性很大。在湿蒸气区的压缩称为湿压缩，由于液体的不可压缩性，湿压缩可能会引起液击现象而损坏压缩机。

③ 状态点 1 难以控制。状态点需由两个独立的状态参数确定，而在湿蒸气区等压线即是等温线，而干度的变化很难检测，因此点 1 就难以控制。

④ 膨胀机比压缩机的尺寸小很多，制造不易。状态 3 是液体，其比体积是蒸气的比体积的几十分之一，而系统中制冷剂循环的质量流量各处都是一样的，则要求膨胀机的汽缸做得很小。这种小膨胀机的机械损失可能占了膨胀获得的功的大部分，甚至得不偿失。

综上所述，实际上逆卡诺循环无实用价值，但是它是实际制冷循环的改进方向。

## 1.2 蒸汽压缩式制冷的理论循环

### 1.2.1 蒸汽压缩式制冷的饱和循环

由于湿蒸气区的逆卡诺循环实现起来有许多困难，需要进行一系列改进。如果使制冷剂在蒸发器中全部汽化成饱和蒸气，状态点 1 就可方便地确定，同时压缩机吸入饱和蒸气，压缩过程在过热蒸气区中进行，并且从蒸发压力  $p_e$  一直压缩到冷凝压力  $p_c$ 。另外，用结构简单的膨胀阀（节流机构）代替膨胀机。这样的制冷系统就是图 1-5 所示的系统。这个系统所进行的循环在  $T-s$  图上的表示如图 1-6 所示。

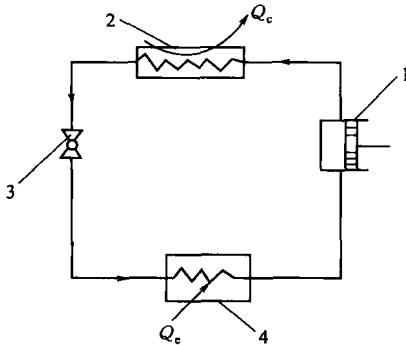


图 1-5 蒸汽压缩式饱和循环

1—压缩机；2—冷凝器；3—膨胀阀；4—蒸发器

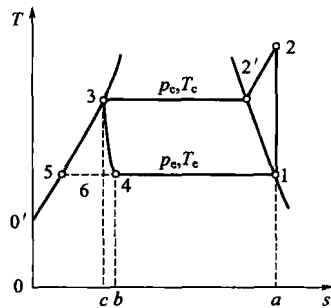


图 1-6 蒸汽压缩式饱和循环在  $T-s$  图上的表示

1-2 是在过热蒸气区中的绝热压缩过程，压力由蒸发压力  $p_e$  提高到冷凝压力  $p_c$ ，压缩后的排气温度  $T_2 > T_c$ 。

2-3 是在冷凝器中的等压冷却和凝结过程，其中 2-2' 是由过热蒸气等压冷却到饱和蒸气的过程，温度由  $T_2$  降到  $T_c$ ，与外界进行显热交换，2'-3 是等压下的凝结过程，温度保持不