

空调用制冷技术

李树林 主编

机械工业出版社

空调用制冷技术

李树林 主编



机械工业出版社

本书着重阐明了蒸气压缩式制冷的热力学原理,比较全面地介绍了各种空调用制冷系统的组成,各制冷设备的构造、工作原理、主要性能、使用范围,阐述了空调用制冷设备的选择依据及一般选择计算方法。对溴化锂吸收式和蒸汽喷射式制冷装置的工作原理、系统组成及使用范围等方面也作了简明的介绍。

本书可作为高等院校供热通风与空调工程专业的教材,也可供从事空调制冷的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

空调用制冷技术/李树林主编. —北京:机械工业出版社,
1995.10
ISBN 7-111-04800-8

I. 空… II. 李… III. 空气调节—制冷—技术 N. TB6
57.2

中国版本图书馆CIP数据核字(95)第10397号

出 版 人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)
责任编辑:蒋有彩 版式设计:张世琴 责任校对:韩 晶
封面设计:郭景云 责任印制:卢子祥
三河市宏达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
1995年12月第1版第1次印刷
787mm×1092mm^{1/16}·16.25印张·395千字
0 001—6 000册
定价:17.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

前 言

随着国民经济的发展和人民生活水平的不断提高，制冷技术得到了广泛的应用。为了适应空调用制冷技术发展的要求和满足建筑热能工程专业的需要，西安建筑科技大学、青岛建筑工程学院、太原工业大学、西北建筑工程学院、包头钢铁学院等院校联合编写了这本“空调用制冷技术”，供从事空调制冷技术的有关人员和有关院校师生参考。

本书由西安建筑科技大学李树林主编，并编写绪论、第一、三、七章；太原工业大学李临平编写第二、九章；西安建筑科技大学南晓红编写第四、五章；青岛建筑工程学院史自强编写第六、十章；西北建筑工程学院郑爱平编写第八、十二章；包头钢铁学院吴昨非编写第十一章。

本书由杨磊教授主审。由于编写人员水平所限，书中缺点和不足之处，请读者批评指正。

编者

1994年11月

目 录

前言		工作原理	91
绪论	1	第三节 冷凝器和蒸发器的传热分析	99
第一章 蒸气压缩式制冷的热力学		习题与复习思考题	103
原理	7	第六章 节流机构和辅助设备	105
第一节 热力学第二定律与理想制冷循环	7	第一节 节流机构	105
第二节 蒸气压缩式制冷的理论循环	11	第二节 辅助设备	113
第三节 蒸气压缩式制冷理论循环的热力计算	13	习题与复习思考题	122
第四节 液体制冷剂的过冷和回气过热	16	第七章 蒸气压缩式制冷系统及其自动控制	124
第五节 蒸气压缩式制冷的实际循环	20	第一节 蒸气压缩式制冷系统及其组成	124
习题与复习思考题	22	第二节 制冷系统的自动控制与控制器件	125
第二章 制冷剂与载冷剂	24	习题与复习思考题	139
第一节 制冷剂	24	第八章 空调冷冻站设计基础	141
第二节 载冷剂	33	第一节 制冷设备的选择计算	141
习题与复习思考题	36	第二节 冷冻站的设计要求和设备布置原则	153
第三章 活塞式制冷压缩机	37	第三节 制冷剂管路的设计	156
第一节 活塞式制冷压缩机的种类及型式	37	第四节 制冷设备和管道的隔热措施	164
第二节 活塞式制冷压缩机的总体及主要零部件结构	42	习题与复习思考题	167
第三节 活塞式制冷压缩机的性能及计算	56	第九章 整体式空调用制冷机组	168
第四节 影响活塞式制冷压缩机性能的主要因素	64	第一节 空调用冷水机组	168
第五节 活塞式制冷压缩机的运转特性及工况	66	第二节 空气调节机组	174
习题与复习思考题	70	习题与复习思考题	183
第四章 其它型式的制冷压缩机	71	第十章 两级压缩和复叠式制冷	184
第一节 离心式制冷压缩机	71	第一节 两级压缩制冷循环	184
第二节 螺杆式制冷压缩机	75	第二节 两级压缩制冷循环的热力计算	187
第三节 滚动转子式、涡旋式及斜盘式制冷压缩机	81	第三节 复叠式制冷	191
习题与复习思考题	85	习题与复习思考题	193
第五章 冷凝器和蒸发器	86	第十一章 蒸汽喷射式制冷装置	194
第一节 冷凝器的种类、基本构造及工作原理	86	第一节 蒸汽喷射式制冷原理及其装置	194
第二节 蒸发器的种类、基本构造及		第二节 蒸汽喷射式制冷的主要设备	200
		第三节 蒸汽喷射式制冷装置的运行特性及制冷量调节	203
		第四节 蒸汽喷射式制冷装置的安装和运行	205
		习题与复习思考题	207

第十二章 溴化锂吸收式制冷装置	208	附表 4 氯化钙水溶液的热物理性质	234
第一节 溴化锂吸收式制冷装置的工作原理 及其循环	208	附表 5 R717 饱和液体及饱和蒸气的 热力性质	236
第二节 溴化锂吸收式制冷装置的结构型式 及热力计算	213	附表 6 R11 饱和液体及饱和蒸气的 热力性质	238
第三节 溴化锂吸收式制冷装置的辅助设备 和附加措施	219	附表 7 R12 饱和液体及饱和蒸气的 热力性质	242
第四节 溴化锂吸收式制冷装置的性能及 制冷量调节	223	附表 8 R22 饱和液体及饱和蒸气 热力性质	244
第五节 溴化锂吸收式制冷装置的 几种型式	226	附表 9 R134a 饱和液体及饱和蒸气的 热力性质	246
习题与复习思考题	229	附图 1 R717 的 p - h 图	247
参考文献	230	附图 2 R11 的 p - h 图	248
附录	231	附图 3 R12 的 p - h 图	249
附表 1 制冷及空调工程中常用计量单位 及其换算	231	附图 4 R22 的 p - h 图	250
附表 2 饱和水及饱和水蒸气的热力性质 ...	231	附图 5 R134a 的 p - h 图	251
附表 3 氯化钠水溶液的热物理性质	233	附图 6 LiBr-H ₂ O 溶液的 h - ξ 图 (1)	252
		附图 7 LiBr-H ₂ O 溶液的 h - ξ 图 (2)	253

绪 论

一、人工制冷的的方法

“制冷”就是采用人工的方法，使某一物体或空间达到比环境介质更低的温度，并使之维持这个温度。这里所说的环境介质，就是指自然界的空气和水。为了使某一物体或空间达到并维持所需要的低温，就得不断地从它们中间取出热量并转移到环境介质中去。这个不断地从被冷却对象取出并转移热量的过程就是制冷过程，简称制冷。

实现制冷可以通过两种途径：利用天然冷源和利用人工冷源。

天然冷源是自然界存在的冷源，例如冰、雪和地下水等，都可以作为冷源，用作食品的冷藏和防暑降温。我国对天然冰、雪的应用有着悠久的历史，而且在采集、贮存和使用天然冷源方面积累了丰富的经验，直到现在，天然冷源在一些地区仍然得到应用。天然冷源具有价廉、贮量大等优点，而且利用天然冷源不需要复杂的技术和设备。所以在满足使用要求的前提下，应优先考虑利用天然冷源。但是利用天然冷源受时间、地区及运输等条件的限制，一般不能得到 0℃ 以下的温度，而且不易控制和调节。所以天然冷源只用在防暑降温 and 少量食品的短期贮藏方面。工业生产及科学试验等对低温的要求，大都是通过人工冷源（或称人工制冷）来实现。

人工冷源是利用各种类型的制冷机械进行冷量的生产，即利用人工的方法实现制冷。人工制冷需要比较复杂的技术和设备，而且生产的冷量成本较高，但是它却完全避免了天然冷源的局限性，特别是可以根据不同的要求获得不同的低温。

人工制冷可以获得的温度称为制冷温度。人工制冷能达到的制冷温度范围很广泛，从稍低于环境温度直到接近于绝对零度。制冷的温度与制冷的操作方法及所采用的制冷设备有关。根据制冷温度的不同，人为地把制冷分成普通制冷和低温技术二类。一般将 120K 以上的制冷称为普通制冷，更低的制冷温度则属于低温技术范围。

人工制冷的的方法很多，常见的有以下几种。

1. 利用液体汽化的吸热效应实现制冷（蒸气制冷）

任何液体汽化时都产生吸热效应，在恒温下单位质量的液体汽化时所吸收的热量叫汽化潜热。不同物质的液体在同一压力下，它们的饱和温度（沸点）及汽化潜热各不相同；即使是同一种液体，其饱和温度或汽化潜热也各不相同，压力降低时液体的沸点下降，汽化潜热增大。例如，在 1 个物理大气压 (101325Pa) 下，水的饱和温度为 100℃，汽化潜热为 2256.9kJ/kg；氨的饱和温度为 -33.4℃，汽化潜热为 1369.1kJ/kg。而同样是水，在 874Pa 压力下汽化时，可达到 5℃ 的饱和温度，汽化潜热为 2489.8kJ/kg。因此，只要选择适当的工作物质、创造一定的压力条件，就可以利用液体的汽化获得所要求的温度。

液体的汽化潜热可按式计算

$$r = h'' - h' = T(s'' - s') \quad (0-1)$$

式中 r ——液体的汽化潜热 (kJ/kg)；

T ——液体的饱和温度 (K)；

h' 、 h'' ——分别为饱和气体、饱和液体的比焓 (kJ/kg);

s' 、 s'' ——分别为饱和气体、饱和液体的比熵 [kJ/(kg·K)]。

每公斤液体汽化时的吸热量,即单位制冷量 q_0 , 不仅与液体的汽化潜热有关, 还与开始汽化前的含气量(干度)有关。压力较高的饱和液体经节流减压后进入两相区, 并含有一定的气量。若用 χ 表示开始汽化的干度, 则单位制冷量可表示为

$$q_0 = r(1 - \chi) \quad (0-2)$$

式中 q_0 ——单位制冷量 (kJ/kg);

χ ——湿蒸气的干度。

利用液体汽化吸收热量的特征实现制冷, 即为蒸气制冷。蒸气制冷可分为蒸气压缩式、蒸汽喷射式和吸收式三种类型。目前在人工制冷中使用最为广泛的是蒸气压缩式制冷。

2. 利用气体膨胀产生的冷效应实现制冷 (气体膨胀制冷)

高压气体绝热膨胀时, 对膨胀机做功, 同时气体的温度降低, 用这种方法可以实现制冷。与蒸气制冷相比, 气体膨胀制冷是一种没有相变的制冷方式, 通常多以空气作为工质, 所以也称为空气膨胀制冷。构成这种制冷方式的循环系统称为理想气体的逆向循环系统。最早出现的空气制冷机采用定压循环。

图 0-1 示出了采用定压循环的空气制冷机流程及其循环的 $T-s$ 图。循环由两个等压过程和两个等熵过程组成。从压缩机 A 排出的高温高压 (T_2 、 p_2) 气体进入空气冷却器 B, 并在压力 p_2 下被定压冷却到状态 3 (p_3 、 T_3), 然后进入膨胀机 C 中等熵膨胀到状态 4 (p_4 、 T_4), 温度和压力同时降低, 成为低温低压的冷气流, 冷气进入冷室 D, 在定压下吸收被冷却对象的热量而实现制冷, 空气温度回升到 T_1 。压缩机再由冷室中吸入状态 1 (p_1 、 T_1) 的气体, 等熵压缩到状态 2 (T_2 、 p_2), 这样便完成了一个循环。

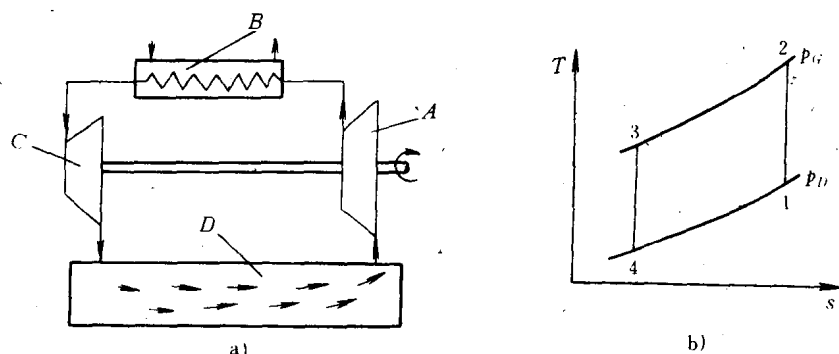


图 0-1 采用定压循环的空气制冷机

a) 系统流程图 b) 循环的 $T-s$ 图

A—压缩机 B—空气冷却器 C—膨胀机 D—冷室

循环中各有关状态参数的关系如下

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{K-1}{K}} \quad \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_3}{p_4}\right)^{\frac{K-1}{K}}$$

式中 K ——空气的绝热指数。

而且因为

$$p_2 = p_3 = p_G \quad p_1 = p_4 = p_D$$

所以

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_G}{p_D}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_G}{p_D}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

即

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_G}{p_D}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} \quad T_3 = T_4 \left(\frac{p_G}{p_D}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}}$$

式中 $\frac{p_G}{p_D}$ —— 压力比。

每公斤空气在冷室中的吸热量 (单位制冷量):

$$q_0 = h_1 - h_4 = c_p(T_1 - T_4) \quad (\text{kJ/kg})$$

式中 c_p —— 空气的定压平均比热容 $[\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})]$ 。

循环所消耗的净功:

$$\begin{aligned} w_i &= (h_2 - h_1) - (h_3 - h_4) \\ &= c_p[(T_2 - T_1) - (T_3 - T_4)] \end{aligned}$$

式中 w_i —— 循环中单位质量空气所消耗的净功 (kJ/kg)

循环的制冷系数:

$$\epsilon_0 = \frac{q_0}{w_i} = \frac{1}{\left(\frac{p_G}{p_D}\right)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1} = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

气体逆向循环是利用气体吸收显热实现制冷的, 因为气体的比热容很小, 单位制冷量很小, 一般情况下要求气体的流量大, 循环的经济性较低, 所以后来气体膨胀制冷逐渐被蒸气压缩式制冷所取代。现在它主要用于飞机机舱的冷却降温, 而且在循环型式上也有较大改进。

3. 利用半导体的热电效应实现制冷 (热电制冷)

一百多年以前, 人们就发现了温差电现象。它是由两种不同导体组成的一个闭合回路, 如图 0-2 所示。A、B 分别表示两种不同的导体, 当其中一个联接点被加热 (称为热端), 另一个联接点被冷却 (称为冷端) 时, 也就是两个联接点有温差存在时, 便在回路中产生了电动势, 称为温差电动势。温差电动势的大小与导体的性质及两个联接点的温差有关。对于两种导体, 当冷端温度一定时, 电动势的大小只与热端的温度有关。根据这个电动势大小, 就可确定热端周围介质的温度。

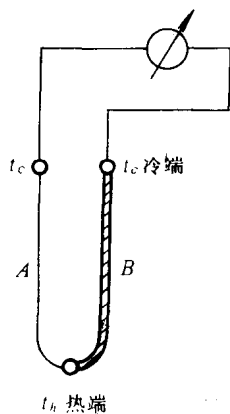


图 0-2 热电偶原理

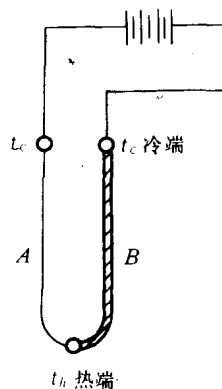


图 0-3 热电制冷原理

这种热电效应又叫温差电效应, 也就是通常用来测量温度的热电偶原理。相反, 如图 0-3 所示, 用两种不同导体联接成闭合回路, 并在此回路中接入直流电源, 当有电流通过回路时, 则一个联接点的温度就会降低成为吸热端 (冷端), 而另一个联接点的温度会升高成为放热端 (热

端), 这种现象称为帕尔帖效应, 或称热电制冷和制热。

由于一般金属的帕尔帖效应很弱, 即各联接点的吸热或放热作用十分微弱, 因而在制冷和制热方面没有实用价值。但是若采用两种不同类型半导体材料时, 帕尔帖效应就比较显著。所谓热电制冷, 就是利用半导体材料的这一效应进行制冷。图 0-4 示出半导体制冷原理。它采用一种称为“空穴型”(P 型)的半导体材料, 和另一种称为“电子型”(N 型)的半导体材料, 组成半导体制冷电偶, 电偶之间利用铜或铝联接片焊接而成。当直流电从 N 型半导体流向 P 型半导体时, 则在联接片 (2、3) 上产生吸热现象, 这端称为冷端。而在联接片 (1、4) 上便产生放热现象, 该端称为热端, 这样冷端便实现了制冷。如果电流方向相反, 则冷、热端就会互相变换, 原来的冷端变为热端、热端变为冷端。一个电偶所产生的制冷效应较小, 所以实用上是将数十个这样的电偶串联而成, 将不同电偶的冷端和热端分别排列在一起组成电堆, 如图 0-5 所示。

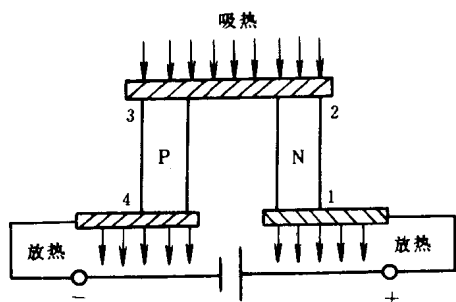


图 0-4 半导体制冷电偶

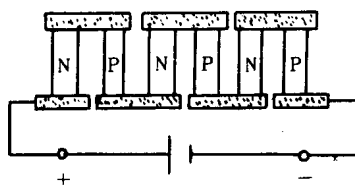


图 0-5 电堆

热电制冷的系统和过程, 不同于另外两种制冷方式。它不需要凭借某种工质实现能量的转移; 整个装置没有任何机械运动部件, 运行中无噪声; 设备体积小, 便于实现自动控制。但是热电制冷耗电量大, 制冷量较小, 能够获得的温差也不大。目前热电制冷在国防、医疗、畜牧等方面都已得到应用, 但多应用在冷量需求量较小的场合。

二、制冷技术在国民经济中的应用

最初制冷主要用于防暑降温和食品的贮藏。但是随着科学技术的发展, 制冷技术在各个领域中都得到广泛的应用, 它直接关系到很多工业部门的生产发展和人民生活水平的提高。由于制冷技术和设备的广泛使用, 用于各种型式制冷机的能耗与日俱增。一些经济发达国家, 制冷的电耗量约占电能总消耗量的 20%~30%。我国 1988 年用于制冷的耗电量达 300 亿 kW·h, 占全国总发电量的 5.5%。据统计, 从 1982~1988 年的 7 年中, 我国制冷耗电量平均以每年 17% 的速度递增。

1. 用于空气调节的冷源

空气调节广泛地用于工业生产及生活服务设施中。随着科学技术的发展, 许多仪器仪表厂、精密机床厂、感光材料厂、电子元件厂等的一些生产工艺过程, 都需要在一定的温度和湿度条件下进行。为了保证人们的工作和生活环境的舒适, 一些旅馆、饭店、大型公共建筑、交通运输设施等, 都需要应用空气调节装置。各种类型的制冷机是冷源工程的主要组成部分。例如美国“世界贸易中心”大楼总建筑面积为 220 万 m², 安装有 7 台单机容量达 24420kW (2100×10⁴kcal/h) 的 R22 离心式制冷机, 每台采用功率为 5080kW 的电动机驱动。我国首都

机场一期工程中,建有总制冷量为 9300kW 的集中式制冷站。

2. 用于食品工业

制冷技术广泛地用于食品工业。一些易腐食品(如鱼、肉、蛋、果品、蔬菜等)的加工,贮藏和运输,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、贮运到销售,都已经形成完整的冷链。所采用的制冷装置有冷藏库、冷藏汽车、冷藏船、冷藏列车等。此外,还有供食品销售商店、食堂、餐厅等使用的食品冷藏柜、各种带有制冷设备的食品陈列柜等。

3. 用于石油化学工业

石油化学工业中许多工艺过程都需要在低温下进行,例如盐类的结晶、溶液的分离、石油的脱脂、天然气的液化、石油的裂解等过程。化学工业中的合成橡胶、合成纤维、合成塑料、合成氨的生产都需要制冷。

4. 用于产品的性能试验及科学研究

一些工业产品如飞机发动机、航空仪表、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。

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。

5. 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。一些药物、疫苗及血液等都需要在低温下进行贮藏。

此外,人工制冷用于农牧业中的种子低温处理。建筑工程及矿井、隧道的施工中,如遇到流砂,可以用人工制冷的方法将流砂冻结,然后就可方便地进行施工(冻土施工法)。在许多近代尖端科学技术部门中,航天技术、卫星通讯、高速电子计算机、红外技术等领域都需要制冷技术。

总之,制冷技术的应用是非常广泛的,随着科学技术的进步,国民经济的发展,人民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。

三、制冷技术的发展简况

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 年约翰·高里在美国费城用封闭循环的制冷机建立了一座空调站。1852 年凯尔文作出了用逆卡诺循环可以制冷的理论证明。1862 年法国人卡列制成了氨水吸收式制冷机。1873 年波义耳发明了氨压缩机。在此基础上,卡列·林德于 1875 年用氨作制冷剂,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。蒸汽喷射式制冷机是 1890 年以后发展的,由于它能达到的温度限于 0°C 以上,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,氟利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,特别是空调制冷和中小型低温制冷领域中,几乎全部采用了这类制冷剂。由于氟利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。但是应该指出,近

十几年的研究证明,氟利昂簇中的含氯而无氢的碳化物(简称CFC),能严重地破坏大气中的臭氧以及地球高空的臭氧层,危害人类的健康和破坏地球上的生态环境,是公害物质,属于限制和禁止使用的物质。因此减少和禁止CFC的使用和生产,已成为当今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,也成为急需解决的问题。近十多年来,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。

现在制冷机的发展已经达到了比较完善的程度。人们利用逆向循环实现热量的转换,热泵也列入了制冷技术的范畴。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,成套建筑空调用的离心式制冷机组制冷量接近25000kW。制冷机的种类和型式不断增加,制冷系统的流程、主机、辅机、制冷剂及自动控制都有了新的发展。在制冷机的设计、制造、测试、控制及生产管理等方面,都使用电子计算机,更好地实现了设计的优化及制冷系统调节控制的自动化,取得了最佳技术经济效果。

我们的祖先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贮藏冰的房屋。1986年在陕西省姚家岗秦雍城遗址发掘出可以贮藏190m³冰块的地下冰室,这说明了早在春秋时期,秦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、贮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t。

我国现在的制冷机制造业是50年代末期,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、吸收式、热电式及蒸汽喷射式六大类制冷装置,许多产品的质量已接近和达到世界先进水平。以往我国的制冷装置主要用于工业生产和大型建筑的空调中。近年来由于人民生活水平的不断提高,制冷装置用于生活中的比例迅速提高,产品的数量也急骤增加。据统计,各类制冷装置的年产量从1978年的4万台套,猛增到1988年的790万台套。到1988年底,我国制冷装置的社会拥有量约为2000万台套,是1981年社会拥有量的40倍。1991年,我国已拥有年生产1200万台电冰箱的生产能力,电冰箱的产量居世界第一。可以预计,随着国民经济的发展和人民生活水平的提高,制冷机的生产和应用将会达到更高的水平。

第一章 蒸汽压缩式制冷的热力学原理

第一节 热力学第二定律与理想制冷循环

在人工制冷中，不仅有热量的转移，也包括热功转换的过程。热力学第一定律仅指出了热功转换在数量上的关系。热力学第二定律揭示了热功转换和热量传递的条件、深度和方向。克劳休斯（Clausius）指出：“不可能把热从低温物体传至高温物体而不发生变化”，这就是说，热量能自发地从高温物体传向低温物体，不能自发地从低温物体传向高温物体。这一叙述进一步说明了热量传递的方向性。热量由低温物体传向高温物体，必须有一个补偿过程。人工制冷的过程就是在外界的补偿下，将低温物体的热量向高温物体传送的过程。目前使用的补偿过程的方法有两种：一种是消耗功（机械能或电能）来提高制冷剂的压力和温度，使制冷剂将自低温物体（低温热源）吸取的热量，连同机械功转换成的热量，一同排至环境介质（高温热源）中，从而完成了热量从低温传向高温的过程；另一种是消耗高温的热能，用热量由高温传向低温的自发过程作为补偿，来实现将低温物体的热量传送到高温物体的过程。总之，在人工制冷中，需要消耗一定的能量（机械能或热能）作为补偿。

为了连续地实现热量的转移和热功转换，就必须使工质经过一系列的状态变化完成循环。随着效果的不同，循环可分为正向与逆向两种。利用工质的状态变化，将热能转化为机械能的循环叫做正向循环。正向循环在热力图上依顺时针方向进行。通过工质进行的状态变化，使热量从低温物体（冷源）传给高温物体（热源）的循环叫做逆向循环。它在热力图上是依逆时针方向进行的。

可利用逆向循环实现制冷。在这种循环中，利用工质膨胀到较低的温度来从低温物体吸取热量。为了实现连续的制冷过程，工质必须进行排热过程，以便回复到原来状态，重新对冷源吸热。和正向循环一样，逆向循环也必须遵循热力学第二定律。工质在完成逆向循环过程中，除了冷源（低温物体）外，还需要一个向其排热的热源（高温热源）。这同利用单一热源是无法实现循环过程的结论是一致的。在制冷的逆向循环中，通常以环境介质（水、空气等）作为高温热源。

一、逆卡诺循环

在热力学中，把由互相交替的两个等温过程和两个绝热过程组成的正向循环，称为卡诺循环。它是工作在一个恒温热源和一个恒温冷源之间的理想热机循环。按与卡诺循环相同路线而循相反方向进行的循环，叫做逆卡诺循环。图 1-1 所示的是一个逆卡诺循环，也是一个理想制冷循环。制冷工质在恒温冷源（被冷却物体）的温度 T' 和恒温热源（环境介质）的温度 T'' 间，按可逆循环进行工作。制冷工质在吸热过程中，其温度与被冷却物体的温度 T' 相等，在放热过程中，与环境介质温度 T'' 相等。也就是说在吸热和放热过程中，工质与被冷却物体及环境介质之间没有温差，传热是在等温下进行的，压缩过程和膨胀过程都是在没有任何损失的情况下进行的。循环中制冷工质沿绝热线 3—4 膨胀，温度从 T'' 降低至 T' ，然后沿等温

线 4—1 膨胀。在等温膨胀过程中, 工质在 T'_0 温度下从被冷却物体吸收热量 q_0 ; 工质再从状态 1 被绝热压缩至状态 2, 温度从 T'_0 升高至 T'_k ; 最后沿等温线 2—3 压缩。在等温过程中, 工质在 T'_k 温度下向高温热源 (环境介质) 放出热量 q_k 。

这样, 每一循环过程中 1kg 工质从低温热源吸取 q_0 的热量, 然后与所消耗的循环净功 Σw 所转换的热量一起, 排给高温热源 (环境介质) 的热量 q_k , 即

$$q_k = q_0 + \Sigma w \quad (1-1)$$

式中 Σw ——循环净功, 它为压缩功 w_c 与膨胀功 w_e 之差, 即 $\Sigma w = w_c - w_e$ 。

制冷循环的性能指标为制冷系数, 它表示消耗单位功量所能获得的制冷量, 用 ϵ 表示, 即

$$\epsilon = \frac{q_0}{\Sigma w} \quad (1-2)$$

逆卡诺循环的制冷系数可从图 1-2 推得:

$$q_0 = T'_0(s_1 - s_4) = T'_0(s_a - s_b) \quad (1-3)$$

$$q_k = T'_k(s_2 - s_3) = T'_k(s_a - s_b) \quad (1-4)$$

$$\Sigma w = q_k - q_0 = (T'_k - T'_0)(s_a - s_b) \quad (1-5)$$

所以逆卡诺循环的制冷系数为:

$$\epsilon_c = \frac{q_0}{\Sigma w} = \frac{T'_0(s_a - s_b)}{(T'_k - T'_0)(s_a - s_b)} = \frac{T'_0}{T'_k - T'_0} = \frac{1}{\frac{T'_k}{T'_0} - 1} \quad (1-6)$$

由上式可见, 逆卡诺循环的制冷系数与制冷工质的性质无关, 仅取决于低温热源 (被冷却物体) 的温度 T'_0 和高温热源 (环境介质) 的温度 T'_k 。 T'_k 越低, T'_0 越高, 制冷系数越大, 制冷循环的经济性越好。而且 T'_0 的变化比 T'_k 的变化对循环的制冷系数影响更大, 这点可以从下述两个偏导数的绝对值看出。

$$\left| \left(\frac{\partial \epsilon_c}{\partial T'_k} \right) \right| = \frac{T'_0}{(T'_k - T'_0)^2}$$

$$\left| \left(\frac{\partial \epsilon_c}{\partial T'_0} \right) \right| = \frac{T'_k}{(T'_k - T'_0)^2}$$

因此

$$\left| \left(\frac{\partial \epsilon_c}{\partial T'_0} \right) \right| > \left| \left(\frac{\partial \epsilon_c}{\partial T'_k} \right) \right|$$

逆卡诺循环的一个重要条件, 就是制冷剂与被冷却物体和冷却介质之间, 必须在无温差情况下相互传热。可是实际的热交换过程总是在有温差的情况下进行的, 否则理论上将要求热交换设备 (蒸发器或冷凝器) 具有无限大的传热面积, 这当然是不可能的。对于实际循环的制冷系数小于逆卡诺循环的制冷系数可予以推证。比如热交换时存在温差, 因而在吸热过程中, 工质的温度 T_0 应低于低温热源的温度 T'_0 , 即 $T_0 < T'_0$ 。在放热过程中, 工质的温度 T_k 应高于高温热源的温度 T'_k , 即 $T_k > T'_k$ 。将具有传热温差的制冷循环画在 $T-s$ 图上, 如图 1-2 所示。由于存在着传热温差, 即 $T_0 = T'_0 - \Delta T_0$ 、 $T_k = T'_k + \Delta T_k$, 为了使 1kg 制冷剂所获得的制冷量与逆卡诺循环的相同, 图中面积 $b4'1'a'b$ 应等于面积 $b41ab$ 。因此有传热温差的制冷循环所消耗的功量为面积 12341, 它比逆卡诺循环多消耗的功量, 在图中为斜线所示出的面积。这种由两个等温过程和两个绝热过程组成的有传热温差制冷循环的制冷系数为:

$$\epsilon = \frac{T_0}{T_k - T_0} = \frac{1}{\frac{T_k}{T_0} - 1}$$

将它与逆卡诺循环的制冷系数

$$\epsilon_c = \frac{T'_0}{T'_k - T'_0} = \frac{1}{\frac{T'_k}{T'_0} - 1}$$

相比, 由于 $T_k > T'_k$, $T_0 < T'_0$, 所以 $\epsilon < \epsilon_c$ 。

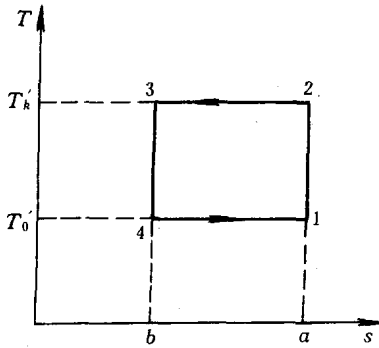


图 1-1 逆卡诺循环的温-熵图

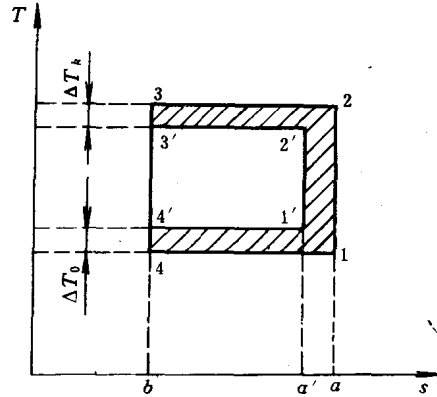


图 1-2 有传热温差的制冷循环

由此可见, 有传热温差的制冷系数总是小于逆卡诺循环的制冷系数。这点在热力学第二定律中已经证明: 由两个等温过程与两个绝热过程所组成的逆卡诺循环最经济, 其制冷系数也最大, 任何实际制冷循环的制冷系数都小于逆卡诺循环的制冷系数。因为逆卡诺循环是在没有传热温差和没有任何损失的可逆情况下进行的, 任何实际过程都不可能是无传热温差和无任何损失的机械运动, 所以逆卡诺循环实际上是无法实现的。逆卡诺循环是一理想制冷循环。它不仅从理论上指出了提高制冷装置经济性的重要方向, 例如应使蒸发温度 T_0 不要过低, 使冷凝温度 T_k 不要过高, 同时它还可用作评价实际制冷循环完善程度的指标。通常是将工作于相同温度间的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, 称为这个制冷机循环的热力完善度, 用 η 表示, 即

$$\eta = \frac{\epsilon}{\epsilon_c} \quad (1-7)$$

热力完善度是用来表示制冷机实际循环接近逆卡诺循环的程度。它的数值越大, 就说明循环的不可逆损失越小。在循环中, 减少传热温差、减少摩擦, 均会减少循环的不可逆程度, 并导致热力完善度的提高。热力完善度也是制冷循环的一个技术经济指标, 但它与制冷系数的意义不同。 ϵ 只是从热力学第一定律 (能量转换) 的数量角度反映循环的经济性, 而 η 是同时考虑了能量转换的数量关系和实际循环中不可逆程度的影响。从数值上看, ϵ 可以小于 1, 等于 1 或大于 1; η 则始终小于 1, 因为理想的可逆循环在实际上是不可能达到的。当比较两个制冷装置循环的经济性时, 如果两者的工作温度 T_k 、 T_0 相同, 采用 ϵ 与采用 η 进行比较是等价的; 如果两者的 T_k 、 T_0 不相同, 只有对它们的 η 加以比较才是有意义的, 因为这时只比较 ϵ 不能看出哪个制冷装置循环的经济性更好。

二、变温热源间的逆向循环——劳伦兹循环

逆卡诺循环必须具备的条件之一是高、低温热源温度恒定。实际制冷循环中，高温和低温热源温度大多数都是变化的而不是恒定的，例如，冷凝器中的冷却介质的温度是逐步升高，蒸发器中被冷却介质的温度是逐步降低。如图 1-3 所示。由于制冷剂在冷凝器和蒸发器中保持等温冷凝 (T_k) 和蒸发 (T_0)，这样就增大了制冷剂与介质之间的传热温差，使循环的不可逆损失增加，制冷系数和热力完善度下降。因此需要找到一种变温热源的理想循环。变温热源间的可逆循环，可依据冷源和热源的性质而以不同的方式来实现。只要满足工质与变温冷源、热源之间热交换时的温差各处均为无限小，以及工质与对其作用的物体之间保持机械平衡的条件，则工质进行的循环即为理想制冷循环。劳伦兹循环就是这种循环的形式。

劳伦兹循环是 1894 年由苏黎世工程师 H·Lorenz 提出的，当时是针对一侧为冷盐水，另一侧为冷却水的制冷机提出的变温理想制冷循环。这种循环是由两个绝热过程和两个变温的多变过程组成的，如图 1-4 所示。图中 $a-b$, $c-d$ 为绝热过程， $b-c$, $d-a$ 为变温多变过程。这样，对于外部为变温热源时，可以降低工质在吸热或放热过程中的传热温差，使循环的制冷系数提高。所以，劳伦兹循环是外部具有变温热源的理想制冷循环。

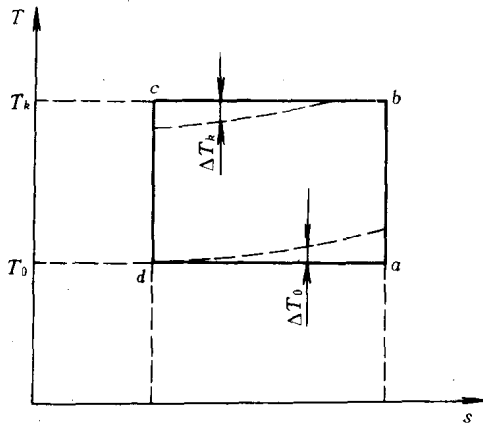


图 1-3 变温热源与逆向卡诺循环

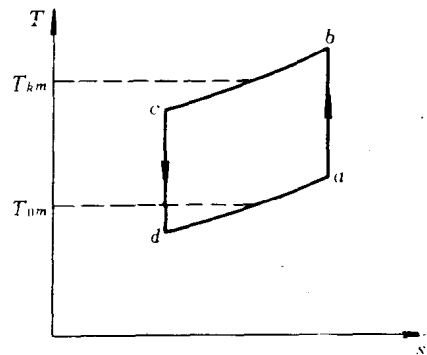


图 1-4 用平均温度表示的劳伦兹循环

对于变温条件下的可逆循环，可采用建立在平均当量温度概念上的逆卡诺循环来表示其经济指标。

$$\epsilon_t = \frac{T_{0m}}{T_{km} - T_{0m}} \quad (1-8)$$

式中 T_{0m} 、 T_{km} ——分别为两个变温热源的平均温度 (K)。

变温可逆循环 $abcd$ 的制冷系数，相当于在平均吸热温度 T_{0m} 和平均放热温度 T_{km} 间工作的逆卡诺循环的制冷系数。

三、热泵循环

逆向循环是以耗功作补偿，通过制冷工质的循环，从低温热源中吸收热量（即制冷量）并向高温热源放出热量，因此逆向循环可以用来制冷，也可用来供热，或者制冷、供热同时使用。用来制冷的逆向循环称为制冷循环，而用来供热的逆向循环称为热泵循环。由逆卡诺循环的分析可知，高温热源所获得的热量，等于冷源放出的热量与循环所耗的机械功转化成的热量之和。可见，采用逆向循环，以耗费少量机械功为代价，取得向高温热源供热的效果，根

据公式 (1-1), 1kg 工质在逆向循环中向高温热源放出的热量为

$$q_k = q_0 + \Sigma w$$

热泵循环的经济指标用供热系数 ϵ_h 表示, 它表示单位耗功量所获得的供热量, 即

$$\epsilon_h = \frac{q_k}{\Sigma w} = \frac{q_0 + \Sigma w}{\Sigma w} = 1 + \epsilon_c \quad (1-9)$$

可以看出, 热泵循环的供热系数永远大于 1。在以环境介质为低温热源向建筑物采暖系统供热的情况下, 从节约能源来考虑是有重要意义的。

第二节 蒸气压缩式制冷的理论循环

逆卡诺循环是理想制冷循环, 它的制冷系数 ϵ_c 被认为是理论的极限值。实现逆卡诺循环, 关键是两个等温过程和两个绝热过程。人们在实践中发现: 在一定的压力下, 液体的汽化和蒸气的冷凝都是在等压下进行的等温过程, 而且可以由压缩机和膨胀机来进行绝热压缩和绝热膨胀。所以在湿蒸气区域内, 有可能实现理想制冷循环。图 1-5 示出在湿蒸气区域内进行的蒸气压缩式制冷的理想循环。

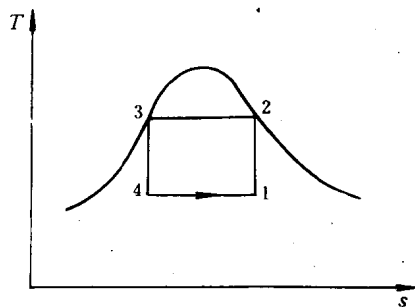


图 1-5 在湿蒸气区域内蒸气压缩式制冷的理想循环

但是, 逆卡诺循环只是人们从实践经验上升到理性认识的一种设想, 实际上在湿蒸气区域内, 蒸气压缩式制冷的理想循环仍然是很难实现的。其困难在于:

(1) 无温差的传热过程很难实现, 因为理论上要求蒸发器和冷凝器具有无限大的传热面积。实际上在冷凝器和蒸发器中, 都存在传热温差, 即在冷凝器中制冷剂凝结时的温度高于高温热源的温度, 在蒸发器中, 制冷剂汽化时的温度低于低温热源的温度。

(2) 图 1-5 中进入膨胀机的是液体制冷剂, 其比容比蒸气的小得多, 所能获得的膨胀功很小, 有时尚不足以克服机器本身的摩擦阻力, 而且液体膨胀机尺寸很小, 设计制造都很困难。

(3) 压缩机吸入的是湿蒸气, 在压缩机中有一部分液体要被压缩, 这种压缩过程称为湿压缩。湿蒸气被吸入气缸后, 气缸壁与制冷剂之间进行强烈的热交换, 湿蒸气中的液滴迅速汽化, 占据气缸容积, 使压缩机吸入的制冷剂量减少, 制冷量降低, 而且液滴进入气缸后很难全部汽化, 容易发生压缩液体的“液击”现象, 使气缸遭到损坏。

由于以上原因, 所以蒸气压缩制冷机都不是按上述逆卡诺循环工作的。图 1-6 示出了蒸气压缩式制冷的理论循环。它由两个等压过程、一个绝热压缩过程及一个绝热节流过程所组成。与在两相区内的理想制冷循环相比, 除了两个传热过程为等压过程和有传热温差外, 尚有下列两个区别。

1) 用节流阀代替膨胀机 在理想制冷循环中, 采用膨胀机是为了充分利用制冷剂由高压液体变成低压状态的膨胀功。以此减少循环所消耗的净功。这样循环所消耗的单位净功为

$$\Sigma w = w_c - w_e$$

在蒸气压缩式制冷的理论循环中, 用节流阀代替膨胀机, 这样首先会损失膨胀机的膨胀功。因此 1kg 制冷剂在制冷循环中所消耗的净功量, 就是压缩机的耗功量, 即 $\Sigma w = w_c$, 比理