

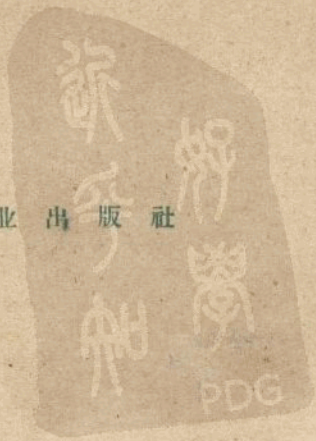
高等水产院校交流讲义

制冷技术

上海水产学院主编

水产加工专业用

农业出版社



前 言

本书是按照高等水产学校、水产品加工专业“制冷技术”课程的教学大纲编写的。编写时，主要以上海水产学院 1959 年编写的“制冷技术”讲义为蓝本，经过二年多的教学实践，并在原有基础上作了较大的修、补、增、删工作；原教材的第一章蒸汽压缩式制冷机的理论，现分为人工制冷的热力学原理和蒸汽制冷机二章。在冷藏库的设计一章中也作了较大的修改，并补充了我国在冷藏库设计方面的部分资料；书中还介绍了制冷机的原理及典型设备的结构、安装、操作维护等必要的技术和知识。对于吸收式和蒸汽喷射式制冷机只作简要介绍，本书也可适用于食品加工等专业作为教学参考书，也可供从事制冷技术的技术人员和科学研究人员参考。

本书的第一至第三章由徐世琼执笔，第四、五章由王锡珩整理，第六章由张偉民、李松寿整理，第七、八章由冯志哲执笔，第九、十章由翁斯鑑执笔。书中部分插图由杨天锡同志协助绘制。

本书虽经多次修改，但由于客观形势发展很快，又限于编者的业务水平和编写时间所限，错误与不妥之处想必较多，希望读者多加批评指正，俾供下次再版时修正。

編 者

一九六一年十一月

目 录

前言	1
緒論	1
第一章 人工制冷的热力学原理	3
第一节 逆向卡諾循环	3
第二节 不可逆的逆向卡諾循环, 格衣-斯托陀拉原理	6
第三节 热源温度是变数	8
第四节 空气制冷机的理論循环	10
第五节 吸收式制冷循环	13
第六节 蒸汽喷射式制冷循环	14
第二章 蒸汽制冷机	16
第一节 饱和区域内的制冷循环	16
第二节 干蒸汽的压缩、节流閥前液态制冷剂的过冷却	20
第三节 活塞式蒸汽制冷压缩机的工作过程	24
第四节 压缩机的制冷量与冷凝温度 t_K , 蒸发温度 t_0 的关系	37
第五节 制冷剂及冷媒	41
第六节 双級压缩制冷循环	49
第七节 双級压缩制冷循环的布置方案	58
第八节 串級式(复叠式)制冷循环	62
第九节 利用蒸汽喷射器产生双級压缩循环	63
第三章 活塞式制冷压缩机	66
第一节 活塞式制冷压缩机的分类	66
第二节 我国生产的氨压缩机	67
第三节 氟利昂压缩机	86
第四节 对活塞式制冷压缩机的要求和压缩机的系列化	88
第四章 冷凝器与再冷却器	91
第一节 冷凝器中的傳热	91
第二节 冷凝器的结构	95
第三节 再冷却器(过冷却器)	106

第四节 冷凝器的計算	109
第五章 蒸发器和空气冷却器	113
第一节 蒸发器中的傳热	113
第二节 盐水蒸发器的結構	114
第三节 盐水蒸发器的計算	121
第四节 空气冷却器	125
第五节 冷藏庫庫房冷却排管	139
第六章 制冷机的輔助设备与自动化裝置	148
第一节 制冷机的輔助设备	148
第二节 制冷机的自动化裝置	170
第七章 冷藏庫的設計	182
第一节 冷藏庫設計文件	182
第二节 冷藏庫庫址选择	187
第三节 冷藏庫初步設計資料和各室容量及面积的計算	188
第四节 冷藏庫的布置	192
第五节 冷藏庫耗冷量的計算	196
第六节 冷藏庫內制冷系統的选择	214
第八章 制冰	222
第一节 冰的使用和性质	222
第二节 机制冰	223
第三节 干冰——固体二氧化碳	236
第九章 制冷裝置的安裝和試驗	240
第一节 大型制冷工厂安裝工程和試驗	241
第二节 设备中心綫的划定及基础的砌筑	242
第三节 氨压缩机的安裝	243
第四节 氨制冷机的冷凝器及蒸发器的安裝	248
第五节 盐水制冰器及氨直接蒸发的制冰器的安裝	250
第六节 空气冷却器的安裝	251
第七节 室內冷却管組的安裝	252
第八节 輔助制冷設備的安裝	253
第九节 氨管道及盐水管道的安裝	254
第十节 全系統的一般試驗和加氨	256
第十一节 盐水系統的試驗及其加盐水工作	259
第十二节 制冷裝置的試运转	261

第十三节 氟利昂制冷机组的安装	261
第十四节 压缩式制冷机的试验及进行试验的一般条件	265
第十五节 试验中的测量工作	265
第十六节 制冷机功率和生产能力的测定	266
第十七节 制冷机各设备的试验	267
第十章 制冷装置的操作、维护和安全技术	271
第一节 制冷装置的操作任务	271
第二节 工作人员的責任	271
第三节 制冷机的开车和停车	272
第四节 制冷机的调节工作	278
第五节 氨制冷机工作中的故障	280
第六节 氨压缩机的维护工作	282
第七节 冷凝器和蒸发器的维护工作	287
第八节 室内冷却管组的维护工作	290
第九节 空气冷却器的维护工作	291
第十节 油分离器和集油器的维护工作	292
第十一节 系统内氨的添加	293
第十二节 制冷设备的定期检修	293
第十三节 使用氨制冷设备时的安全技术	297
第十四节 技术操作报表	298
第十五节 技术操作指标	299

附录

1. 饱和氨蒸汽的热力性质	303
2. 饱和氟利昂-12蒸汽的热力性质	305
3. 饱和 CO_2 蒸汽的热力性质	306
4. NaCl 盐水的物理性质	307
5. CaCl_2 盐水的物理性质	307
6. NaCl 及 CaCl_2 盐水的比热	308
7. NaCl 及 CaCl_2 盐水的比重	309
8. 直接建筑在土壤上的冷间由地坪传入的热量	310
一面有外墙的冷间	310
二面有外墙的冷间	312
9. 食物的焓	314
10. 生产间内空气调节的计算资料	315

11. 管子规格表	316
附 氨的 $\log P-i$ 图	
氟利昂-12 的 $\log P-i$ 图	
参考文献	317

緒 論

近二十年来，是人工制冷技术輝煌发展的年代。目前已很难指出在国民經济中那些部門是不需要采用某一种人工制冷的。

在食品工业中，人工制冷技术应用最为广泛，因用低温方法保藏鱼类、肉类、禽蛋、水果、蔬菜等易腐食品具有突出的优点：它較盐漬、干制、熏制、罐藏更能保持易腐食品原有的顏色、香味与营养。冷冻車間也是食品加工企业——鱼类联合加工厂、肉类联合加工厂、啤酒、酿造、乳品等工厂不可缺少的一个組成部分。

其次，要使捕捞的大量新鮮水产品运输至各消費地区，必須采用冷藏船、冷藏列車、冷藏汽車等具有制冷裝置的运输設備。

在商业网和日常生活中也广泛采用冷藏柜台和冰箱。

人工制冷技术也广泛应用于其他的經濟部門中，如化学工业中用以液化气体及混合溶液的分离等工艺过程；在冶金厂、紡織厂、剧院等部門，用人工制冷的方法来自动調节室內的温度和湿度。此外，农业、鋼铁工业、制药工业、建筑工业、科学研究等部門也广泛采用人工制冷技术。

人工制冷正式大規模地用于生产，还是在上世紀中叶活塞式制冷机发明以后。

在低温科学理論方面，苏联学者有很大貢獻，罗蒙諾索夫在 1745 年“論热与冷”一文中，对制冷混合物所发生的过程作了分析。1755 年在“液体冷冻实验”一文中提出的实验数据和結論特別值得注意。其次，洛維茨 (Т. Е. Ловиц) 院士用制冷混合物取得了 -50°C 的低温，随后其他学者又用洛維茨的方法液化了某些气体 (氨、二氧化硫等)。門捷列耶夫 (1860 年) 和后来的斯托列托夫 (А. Г. Столетов) (1882 年) 发现了物质由气态变为液态、液态变为气态这二种过程的物理本质，同时他对气体的压缩性与气体的节流过程也作了許多工作。这些卓越的成就在制冷技术中起着很大作用。

人工制冷最初开始于吸收式制冷。在 1777 年有人在实验室里发现吸收式制冷 (硫酸与水) 原理。1859 年德国工程师卡尔·林达发明濃氨水制冷机，并从此起开始用于生产，后来曾一度为美国人波依尔 (1872 年) 的活塞式氨蒸汽压缩制冷机所代替。直到 1930 年吸收式制冷机才再度发展起来与后起的活塞式蒸汽压缩制冷机 (不包括 1845 年美国人格林发明的空气膨胀制冷机)、喷射式制冷机并駕齐驅，发展至今。

在人类对冷的应用方面却有着悠久的历史。我国“詩經”里有冰窖的記載，三国时曹操曾以天然冰消暑。

我国人工制冷事业的发展过程可分为两个阶段。在解放前,无人重视,少数几个制冷工厂为帝国主义和资本家所控制,致事业发展甚慢。到1949年解放时全国冷藏库容量只有二万多吨。解放后,在党和政府的领导下,为了满足人民日益增长的生活水平的需要,大力发展人民的制冷事业。到1960年为止全国已有冷库库容量达40多万吨,而其中以1958年以来三年大跃进的成績最为显著,三年内建成的冷库占现有冷库总量的50%左右。在全国各地,几乎每个省、区、大中城市都有冷库建起。在制冷机制造方面也是如此,解放前仅上海、大连等地有几家制冷机器修配厂,而今天,在上海、杭州、大连、北京、沈阳、重庆等市都已建立起制冷机制造厂。这些工厂能自己设计与制造制冷机,产品质量在逐年提高(许多厂已对外出口)。为了适应制冷事业进一步发展的需要,全国各制造厂已以通用机械公司为中心組織起来,开始试图将空气压缩机、制氧压缩机、氨压缩机三机合一,使产品系列化,零、部件标准化,以更进一步提高产品的产量与质量。目前,在系列化方案的制定与部分产品的试制及鉴定方面已作出了很大成績。

在冷库设计方面,解放后也有极大发展,可以说是从无到有,现在已有商业部、上海船舶设计院等主要设计单位。商业部在1958年以前就设计出库容量从230吨到9,000吨供各地建设冷库参考的标准设计方案。在此基础上,近二年来在许多新的设计里,采用了不少新技术。如快速制冰、快速冻结及部分自动化设备。使冷库生产工艺更加合理,生产成本更加经济。

此外,在冷藏运输(包括汽车、火车与冷藏船)方面也有很大发展。在制冷技术人材的培养方面,国家也给予极大重视,先后设立了大、中专业学校,举办技术训练班。一些制冷学术組織各地正在形成,学术性活动正在逐步开展,为今后制冷事业的发展创造了良好的条件。可以预料在今后农副产品极大增长的情况下,制冷事业将会相应地有更大的发展。

国际上,苏联制冷事业的发展甚为突出。冷库的容量1955年比1945年增加4倍,在实现1959年到1965年的发展计划后,又将增长1.5~2倍。其次,苏联冻鱼生产占鱼品加工总量的百分比在逐年增长,1950年前冻鱼占21%,到1965年将占到47%。

近几年来国际上制冷事业发展很快,其锋芒大致指向这样几个方面:在活塞式制冷压缩机的制造方面,向着多汽缸、短行程、多轉数和最大限度降低单位制冷量所需的金属消耗量;制冷设备方面,集中在高效率快速冻结设备及其机械化与自动化的问题上;在冷库和工艺方面,趋向低温冻结,以期得到食品经冷保藏后的最大可逆性;在制冷方法上,如吸收式制冷、空气制冷机(近年来因透平压缩机的发展,又欲再起)及半导体制冷等方法也都在多方探讨。

目前人工制冷的方法有好多种,如压缩式、蒸汽喷射式、吸收式及用于特种工业部門的温差电和絕热去磁等制冷方法。

本课程是水产加工专业的一門专业課,它研究获得零下 100°C 以上低温的压缩式制冷方法、原理,典型的制冷设备以及冷藏库为中心的制冷装置的设计、维护、使用技术。

关于食品冷冻工艺包括食品在低温中的变化等,它将在另一門专业課——“水产品冷藏工艺学”中讲述。

第一章 人工制冷的热力学原理

第一节 逆向卡诺循环

人工制冷的任务是在于将被冷却物体中的热量移向周围介质（水或空气）；或者使该物体的温度降低，且低于周围介质的温度，并在所需要的时间内保持一定的温度。

尽管获取低温的方法有很多种，但是用机械方法来制冷是最广泛的。用以制冷的机器称为制冷机。现在广泛应用的制冷机可分为三类：即压缩式制冷机、蒸汽喷射式制冷机和吸收式制冷机，其中以压缩式制冷机应用最为普遍。

人工制冷是根据热力学的理论建立和发展起来的。根据热力学第二定律我们知道：热量经常是从温度较高的物体传向温度较低的物体，从来也没有过热量自发的从温度较低的物体传向温度较高的物体，正象石头或水不能自发的开始向上运动。但并不是说石头或水绝对不能向上运动的，只要作用一个力给石头或水，就能使它们向上运动。同样我们可知道热并非是不可能的由低温物体向高温物体传递，当有一个补偿过程后，热就能从低温物体传向高温物体，这个过程要消耗能量（功或是热）。

循环于制冷机的工作介质称为制冷剂，制冷剂周期地从被冷却物体中取得一定数量的热量，并将此热量传递给周围介质——水或空气，同时制冷剂完成了状态变化的循环。如上面所讲，实现这个循环必须消耗能量。

在一定的低温下，需要怎样来组织制冷机的工作，使获得单位冷量——一大卡的冷量，所消耗的能量为最小，这是制冷技术中一个很重要的问题。

为此，我们首先研究可逆的制冷循环。

设被冷却物体的温度为 T_0 ，而周围介质的温度为 T ，在这个温度范围内制冷机从被冷却物体中取出热量 Q_0 ，并将它传给周围介质，完成可逆的循环。为了完成这一循环所消耗的机械功等于 AL 。这部分功转变成热量后和取出的热量 Q_0 一起传给周围介质。因此可写出制冷机的热平衡式如下：

$$Q = Q_0 + AL \quad (1-1)$$

式中：

Q ——传递给周围介质的热量（见图 1-1）

L ——补偿过程所消耗的机械功

A ——功的热当量

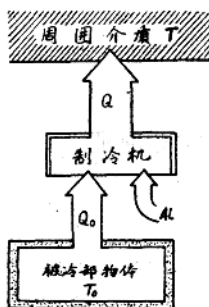


图 1-1 制冷机的工作原理图

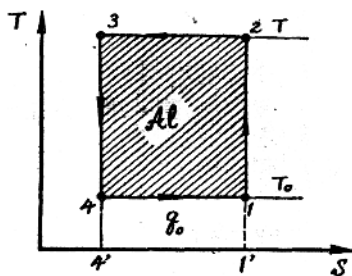


图 1-2 逆向卡诺循环

我們取被冷却物体的温度 T_0 和周围介质的温度 T 等于常数。故在制冷机内，其理论循环是逆向卡诺循环。它是由二个等温过程和二个绝热过程所组成的。循环的温—熵图如图 1-2 所示。

在 4~1 过程中制冷剂从温度为 T_0 的被冷却物体（例如从冷藏室内温度为 T_0 的空气）中等温吸热。

1~2 表示制冷剂在压缩机内绝热压缩过程，在压缩过程中消耗了功 AL ，而制冷剂的温度从 T_0 增高到 T 。

2~3 表示等温下制冷剂向周围介质放热过程。

3~4 表示制冷剂在膨胀机内绝热膨胀过程，产生膨胀功 AL 3~4，这时制冷剂的温度由 T 降低到 T_0 。在膨胀終了（点 4）制冷剂回复到开始状态，而循环就如此重复进行。

被冷却物体、制冷剂和周围介质共同组成了一个热力系统。

根据热力系统①可逆变化过程中熵的变量等于零这一事实，即

$$\Delta S_{\text{系统}} = \frac{Q}{T} - \frac{Q_0}{T_0} = \frac{AL + Q_0}{T} - \frac{Q_0}{T_0} = \frac{AL}{T} + Q_0 \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) = 0 \quad (1-2)$$

我們可以求得在逆向卡诺循环中所消耗的功是

$$AL_{\text{最小}} = Q_0 \left[\frac{T}{T_0} - 1 \right] \quad (1-3)$$

因为在制冷机内实现的是可逆的循环，故所消耗的功为最小功。

从上式可以看出：按照逆向卡诺循环制取一定的冷量时所消耗的机械功只与工作温度范围有关（而与制冷剂的性质无关），且周围介质的温度 T 愈高或被冷却物体的温度 T_0 愈低，则消耗的功愈多。这一结论在制冷技术中有着十分重要的意义。

实际上，要使制冷机在最小的温度范围 $(T - T_0)$ 内工作时，冷却水的温度尽可能低，并

① 这里所指的热力系统，是指孤立系统。以后用到热力系统都是指孤立系统而言的，不再加注解说明。

且不希望制冷剂达到无必要的过低温度 T_0 。

从被冷却物体中所取出的热量 (也就是制取的冷量), 与所消耗机械功 (所付出的代价) 的热当量之比值, 表示制冷机工作的有效程度, 这个比值称为制冷系数:

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{AL} \quad (1-4)$$

如果在制冷机内实现的是可逆的卡诺循环, 那么, 其制冷系数又可写成:

$$\varepsilon = \frac{Q_0}{AL} = \frac{T_0}{T - T_0} = \varepsilon_K \quad (1-4a)$$

制冷机每小时由被冷却物体中取得的热量 Q_0 称为制冷机的“制冷量”, Q_0 还可由下式表示:

$$Q_0 = G \cdot q_0 \text{ [大卡/小时]} \quad (1-5)$$

式中:

q_0 ——1 公斤制冷剂的制冷量 (或称单位重量制冷量) [大卡/公斤]

G ——每小时在制冷机中循环的制冷剂重量 [公斤/小时]

根据制冷量 Q_0 , 制冷系数 ε , 可计算出制冷机所需要的理论功率 N_a (绝热功率)。

$$N_a = \frac{Q_0}{860 \varepsilon} \text{ [kW]} \quad (1-6)$$

式中: $860 \varepsilon = K_T$ 叫“理论的单位制冷量”

即

$$K_T = \frac{Q_0}{N_a} \text{ [大卡/瓩·时]} \quad (1-7)$$

从式 (1-4) 中可以看出, 按照逆向卡诺循环工作的制冷机, 其制冷系数与制冷剂的性质无关, 而只是工作温度 T 和 T_0 的函数, 图 1-3 中示出 ε_K 与 T_0 及 T 的变化关系。

由图 1-3 中可以看出: T 的增高和 T_0 的减小均会使 ε_K 降低。

这里还应说明, T_0 变化 1 度对 ε 的影响比 T 变化 1 度的影响要大。

我们从 $\varepsilon = \phi(T, T_0)$ 的关系式中, 从偏微分的绝对值可以观察到:

$$\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial T} \right)_{T_0} = \frac{-T_0}{(T - T_0)^2}$$

$$\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial T_0} \right)_T = \frac{T}{(T - T_0)^2}$$

因为 $T > T_0$

所以 $\left[\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial T} \right)_{T_0} \right] < \left[\left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial T_0} \right)_T \right]$

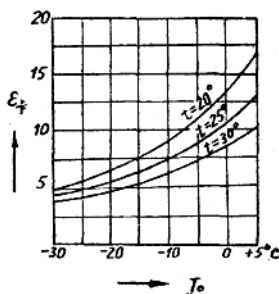


图 1-3 卡诺循环制冷系数 ε_K 与温度 T, T_0 的关系

第二节 不可逆的逆向卡诺循环, 格衣-斯托陀拉原理

在上面我們討論的逆向卡諾循环系假定制冷剂与热源(周围介质叫高温热源, 被冷却物

体叫低温热源总称为热源)之間的热交换是在无穷小的温差下进行的, 因此就需要无限大传热面积的热交换器, 这当然是不现实的; 在实际情况下, 制冷剂与周围介质和制冷剂与被冷却物体之間总是存在着一定的温差, 有温差的逆向卡諾循环如图 1-4 所示, 这种循环当然是不可逆的(外部不可逆)。

現在我們来討論有温差存在时对制冷循环能量消耗的影响:

在图 1-4 中引用下列符号:

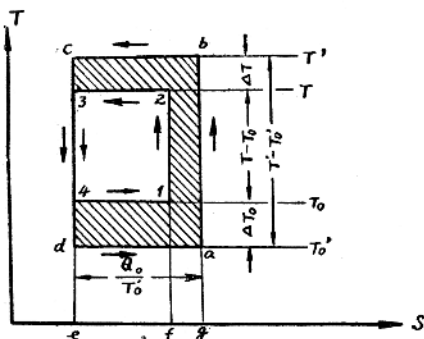


图 1-4 具有不可逆热交换的逆向卡諾循环

T ——周围介质的温度

T_0 ——被冷却物体的温度

T' ——循环中制冷剂的上限温度

T_0' ——循环中制冷剂的下限温度

$\Delta T = T' - T$

$\Delta T_0 = T_0 - T_0'$

很易看出, 由于温差 ΔT 与 ΔT_0 的存在, 循环的温度范围将比我們前面所讲的可逆循环的温度范围更大, 即 $(T' - T_0') > (T - T_0)$, 同时 $T_0 > T_0'$ 。从式(1-3)中可以看出, 和可逆循环比較在获得相同的冷量时, 不可避免地要多消耗功。

图 1-4 中, 1-2-3-4 为没有温差时制冷剂所经历的循环(可逆的逆向卡諾循环); $a-b-c-d$ 是有温差时所经历的循环(不可逆的逆向卡諾循环)。二者具有相同的制冷量 Q_0 (即面积 $4-1-f-e-4$ = 面积 $d-a-g-e-d$)。

根据热力学第一定律, 我們可写出二个循环的能量平衡式:

$$Q_0 + AL = Q$$

$$Q_0 + AL' = Q'$$

其中带有“'”符号的是指有温差情况而言的; 由此两能量平衡式可求得多消耗的机械功是:

$$\Delta AL = AL' - AL = Q' - Q \quad (1-8)$$

因此在有限温差存在时, 由于不可逆的热交换所多消耗的机械功等于在可逆循环内和不可逆循环内传递给周围介质的热量之差。这个附加功在图 1-4 中用斜线的面积来表示。

现在我们用熵的概念来分析和表示附加功 ΔAL :

在可逆情况下系统(制冷剂、周围介质、被冷却物体)熵的增量是:

$$\Delta S_{\text{制冷系统}} = \Delta S_1 + \Delta S_0 = \frac{Q}{T} - \frac{Q_0}{T_0} = 0 \quad (1-9)$$

式中: $\Delta S_1, \Delta S_0$ 是周围介质和被冷却物体熵的增量。

而在不可逆情况下, 系统熵的增量是:

$$\Delta S'_{\text{制冷系统}} = \Delta S'_1 - \Delta S_0 = \frac{Q'}{T} - \frac{Q_0}{T_0} > 0 \quad (1-10)$$

由式(1-9)可知: $\frac{Q}{T} = \frac{Q_0}{T_0}$, 代入式(1-10)可得

$$\Delta S'_{\text{制冷系统}} = \frac{Q'}{T} - \frac{Q}{T} = \frac{1}{T}(Q' - Q) \quad (1-11)$$

比较式(1-8)和式(1-11)可得:

$$\Delta AL = T \Delta S_{\text{制冷系统}} \quad (1-12)$$

式(1-12)在制冷技术中具有很重要的意义, 它可以这样叙述:

“在逆向循环中, 由于不可逆过程而多消耗的功, 等于周围介质的绝对温度和系统中熵的增量的乘积”(格衣-斯托陀拉原理)。

现在我们来比较可逆循环的制冷系数 ε_0 与不可逆循环的制冷系数 ε' , 根据制冷系数的定义可得:

$$\varepsilon_0 = \frac{Q_0}{AL} \text{ 和 } \varepsilon' = \frac{Q_0}{AL + \Delta AL}$$

因为 $\Delta AL > 0$, 所以 $\varepsilon_0 > \varepsilon'$, 在这二种情况下热量 Q_0 均是从温度为 T_0 的被冷却物体中取得的, 故可逆循环在能量上比不可逆循环更经济, 或是在获得相同的冷量时, 可逆循环所消耗的功比不可逆循环所消耗的功要小。这里附加指出, 在制冷机工作过程中保持机械过程的可逆性也起着同样的作用(虽然我们只讨论了传热的不可逆性问题)。

为了获取必须的冷量, 而使消耗的功为最少, 那末就需使制冷剂与热源之间的温差为最小; 在极限情况下, 当 $\Delta T_0 \rightarrow 0$ 和 $\Delta T \rightarrow 0$ 时, 则可得 $\Delta AL \rightarrow 0$, 即在给定的温度 T 和 T_0 的条件下, 获得冷量时所消耗的功为最少。但从另一方面来看, 随着温差的减少, 热交换器的传热面就增加, 这样热交换器由于制造时所消耗的材料和加工量的增加, 它的价格也就贵了。最后当能量消耗为最小时, 这个价格也就无限贵了, 减少能量损耗和节约金属材料这是制冷技术中的主要矛盾, 所以实际上解决这一问题是用折衷的方案来解决——选择所消耗的功 $AL \approx AL_{\text{最小}}$, 而循环中的温差 ΔT_0 和 ΔT 必须能使制冷机达到最经济的能量效果。

第三节 热源温度是变数

实际制冷机在工作时, 热源温度是经常变化的, 其变化的范围则与机器结构的特点和热源的容量有关。

首先我们假定有这样一任务, 要使某被冷却物体从温度 T_1 下降到 T_4 (图 1-5)。同时热源(周围介质)的温度等于某常数, 这个任务可以用下列方法来解决:

一、用可逆的方法来实现:

在机器内实现可逆循环 1-2-3-4-1, 这时制冷剂和热源之间进行平衡的热交换(也就是在无限小的温差下进行热交换), 并且循环过程 1-2 和 3-4 仍然是等熵过程, 制冷剂在完成可逆循环的同时从被冷却物体中取出热量 Q_0 , 并使其温度从 T_1 下降到 T_4 , 然后制冷剂将热量 Q_0 和所消耗的机械功 AL 所转化的热量一起传给温度为 T 的周围介质。

因为这个循环是可逆的, 所以 $\Delta S_{\text{总}} = 0$, $\Delta AL = 0$ 和 $AL = AL_{\text{最小}}$ ($AL_{\text{最小}}$ 在图 1-5 中是用斜线来表示的面积)。

二、将被冷却物体从温度 T_1 冷却到 T_4 的过程, 可按逆向卡诺循环工作的制冷机来实现。

这时, 在最好的条件下, 循环中最低的温度 T_0 等于 T_4 , 因为当 $T_0 > T_4$ 时, 就不可能将物体冷却到所需要的温度, 而当 $T_0 < T_4$ 时, 则实现这个循环所消耗的功将不等于最小功。

比较上述二种方法可以看出: 在逆向卡诺循环中当获取和循环 1-2-3-4-1 所获得同样数量的冷量 Q_0 时, 那末, 制冷剂的熵是随等温线 T_0 而变的, 它等于 $\frac{Q_0}{T_0}$, 所以逆向卡诺循环的外形是 4-5-6-3-4。不难看出, 完成逆向卡诺循环所消耗的功将大于前面所求得的最小功 $AL_{\text{最小}}$ (图 1-5), 或是 $\epsilon_{\text{卡诺}} < \epsilon_0$ 。

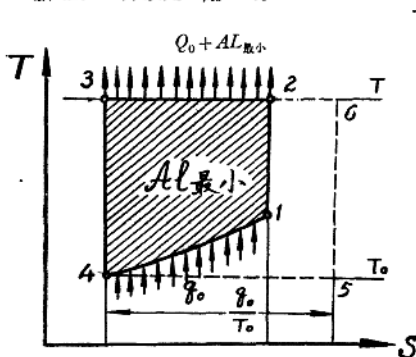


图 1-5 低温热源温度有变化的循环

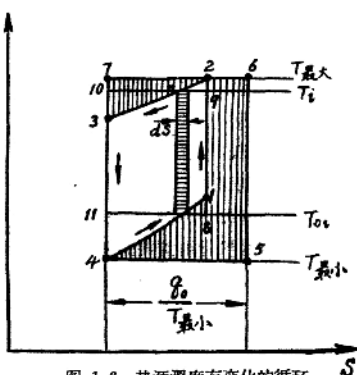


图 1-6 热源温度有变化的循环

进一步我們假定二个热源温度都是变化的 (图 1-6), 我們仍然假定 1-2-3-4-1 循环是可逆循环 (即要求保持热力平衡与机械平衡), 那末图 1-6 中 1-2-3-4-1 循环的封闭面积所表示之功亦是最小功。

后者表明, 在这一条件下 1-2-3-4-1 循环具有最高热力完善程度, 在与其他循环比較时可作为一个典型或是标准。

如果在 1-4 过程內, 制冷剂冷却时按卡諾循环 4-5-6-7-4 工作的机器来达到, 那末在循环中制冷剂的低温温度 T_4 就应当等于 $T_{\text{最小}}$, 而最高温度則根据热量从制冷剂傳到周围介质的条件来决定, 即 $T = T_{\text{最大}}$ 。

因为上面討論的循环 4-5-6-7-4 中, 制冷剂和热源之間的热交换是在有限温差下进行的, 故这样的循环是不可逆的; 而实现这个循环所消耗的功就大于可逆循环 1-2-3-4-1 所消耗的功, 或是 $\varepsilon_F < \varepsilon_0$ 。图 1-6 中垂直阴影綫表示不可逆卡諾循环 4-5-6-7-4 与可逆循环 1-2-3-4-1 相比較时所消耗的附加功。

但是可以适当的選擇温度范围, 并作这样一个卡諾循环, 使它的制冷系数 ε_F 与有温度变化的可逆循环的制冷系数 ε_0 相同, 亦即 $\varepsilon_F = \varepsilon_0$, 因此我們將 1-2-3-4-1 循环分成无限数目的基本循环, 而每一个基本循环乃是一个温度上下限为 T_i 和 T_{oi} 的卡諾循环, 在图 1-6 上基本循环用水平的阴影綫来表示。

对于任何一个基本循环来說, 它的制冷系数为:

$$\varepsilon_i = \frac{T_{oi}}{T_i - T_{oi}} \quad (1-13)$$

而对整个循环 1-2-3-4-1 来說

$$\varepsilon_{\text{可逆}} = \frac{Q_0}{Q - Q_0} = \frac{\int_4^1 T_{oi} ds}{\int_3^2 T_i ds - \int_4^1 T_{oi} ds} \quad (1-14)$$

式中: Q_0 是循环中制冷剂在低温 T_{oi} 下所获得的热量, 可用下式表示:

$$Q_0 = T_{m(1-4)} (S_1 - S_4) \quad (1-15)$$

$T_{m(1-4)}$ ——是循环中制冷剂在取得热量这一过程中的几何平均温度。

Q 是在高温 T_i 下从制冷剂中取出的热量, 可用下式表示:

$$Q = T_{m(2-3)} (S_2 - S_3) \quad (1-16)$$

$T_{m(2-3)}$ 是制冷剂在放热过程时的几何平均温度。

从式(1-14)(1-15)(1-16)中可得:

$$\varepsilon_F = \varepsilon_0 = \frac{T_{m(1-4)}}{T_{m(2-3)} - T_{m(1-4)}} \quad (1-17)$$

因此, 热源温度有变化的可逆循环的制冷系数 ε_0 , 在给定温度时, 可用吸热或放热时几何平均温度来表示, 建立在几何平均温度上的卡諾循环, 其制冷系数 ε_F 和热源温度有变化

的可逆循环一样。

在图 1-6 中, 8-9-10-11-8 所封闭的面积是建立在几何平均温度上的卡诺循环所需要的功, 它和可逆循环 1-2-3-4-1 所需要的功 $AL_{\text{最小}}$ 相等。因此当比较不同制冷机的循环有效程度时建立在几何平均温度上的卡诺循环也同样可以作为最小功的标准。

综合以上所讲, 可得以下几点结论:

1. 卡诺循环在热源温度不变的条件下是一个典型的热力循环。
2. 如果有一个或是两个热源的温度是变化的, 那末典型的热力循环有:
 - (1) 用可逆方法来实现的循环;
 - (2) 制冷剂与热源的热交换是可逆过程, 并且是建立在几何平均温度上的卡诺循环。

当热源温度相同时, 在一实际的制冷机中, 由于有不可逆性(外部不可逆和内部不可逆)故需要更多的功, 实际循环的制冷系数 ε_s 与典型循环的制冷系数 ε_0 的比值称为制冷机实际循环的热力完善程度 β 。

$$\beta = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_0} \quad (1-18)$$

为了正确的求得 β , 必须了解在比较时是采用那一个循环作为标准的, 上面已讲明当热源温度等于常数的情况下, 卡诺循环是一个典型循环(图 1-7 №1); 当温度 T 是常数而温度 T_0 是变数时则循环 №2(图 1-7)是典型循环, 当温度 T 和 T_0 均是变数时则循环 №3(图 1-7)是典型循环。

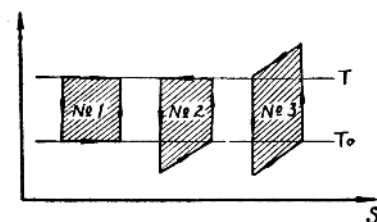


图 1-7 制冷机典型循环的选择图

图 1-7 中三种典型循环在已确定的热源条件下所需要消耗的功为最小功, 但这些最小功是不相等的即

$$AL_{\text{最小}}(\text{№1}) < AL_{\text{最小}}(\text{№2}) < AL_{\text{最小}}(\text{№3})。$$

因此, 对于同一实际制冷机来说, 当某一个实际制冷系数 ε_s 已经肯定, 那末采用不同的典型循环, 就有不同的热力完善度 β 即

$$\beta_1 = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{01}} \quad \beta_2 = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{02}} \quad \beta_3 = \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_{03}}$$

ε_{01} 、 ε_{02} 、 ε_{03} 各为典型循环 №1、№2 及 №3 的制冷系数。

第四节 空气制冷机的理论循环

在工业上应用空气为工质的制冷循环主要是利用气体膨胀涡流管效应和汤姆森效应; 由于空气是取之不尽、用之不竭、到处都有, 并且对人体和动植物都没有危害, 故人们很早就

应用空气制冷机来进行人工制冷,现在我们来讨论用膨胀机的空气制冷机的理论循环,这种制冷机的主要部件是:有传动装置的压缩机(A),膨胀机(B),热交换器(C)和装在冷藏室(E)内的冷却器(D),见图 1-8。

压缩机由吸入管道吸入循环的空气,然后将空气由压力 p_0 绝热压缩到 p ,这时空气的温度由 T_1 升高到 T_2 ,从压缩机中出来的压缩空气进入热交换器,在热交换器中,空气在被冷却水或大气冷却的管子内部流动,在理想情况下,热交换器出口处压缩空气的温度与冷却水或冷却空气的温度 T_0 相等,冷却后的压缩空气通入膨胀机内,在膨胀机内空气绝热膨胀到压力 p_0 并输出外功,同时它的温度也下降到 T_1 (低于冷藏室的温度),而在膨胀机内空气膨胀时所获得的膨胀功,则回送到压缩机的轴上,从膨胀机内出来的冷空气通入冷藏室的冷却器内,冷空气流经冷却器时从冷藏室的物品中获得热量,也就是等压加热到 T_1 的温度,然后再进入压缩机,这样,整个循环就重复进行。

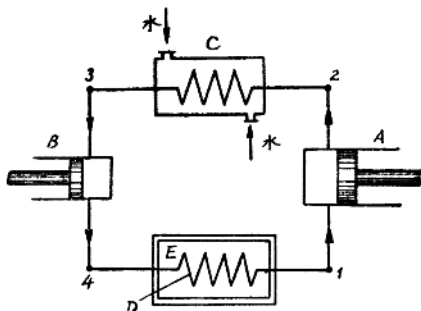


图 1-8 空气制冷机的系统图

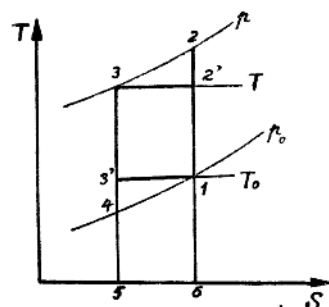


图 1-9 空气制冷机理论循环的 $T-S$ 图

这个系统图可以有一些改变,如布置成敞开式的,即空气从膨胀机中出来后直接通入冷藏室,然后自该处被压缩机吸入。在这种情况下冷却器就不需要了,有时空气从冷藏室内出来后就直接排至大气中,而不再循环,虽然有了这些变化但制冷原理还是一样的。

空气制冷机的理论循环在 $T-S$ 图上用图 1-9 来表示,这里 $T_0 = T_1$ 是被冷却地点需要保持的温度; $T = T_2$ 是热交换器中冷却水进口处的温度(我们假定热源温度 T 和 T_0 为常数)。

在图 1-9 中:

- 1-2——空气在压缩机内绝热压缩的过程
- 2-3——空气在用水冷却的热交换器中等压冷却过程
- 3-4——空气在膨胀机中绝热膨胀的过程
- 4-1——空气在冷却器内等压吸热的过程(吸取热量 Q_0)

消耗在压缩机上的功 AL_K 和膨胀机内所获得的功 $AL_{\text{膨}}$ 之差值等于实现空气制冷循环所必需的功 AL 。

由图 1-9 可看出:在 T 和 T_0 的温度范围内,逆卡诺循环的制冷量由面积 $1-3'-5-6-1$ 表