

基本館藏

269809

高等学校教学用书

# 制 冷 机

[苏]B.И.阿历克塞耶夫 著



化学工业出版社

1957  
100000

# ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАШИНЫ

Доцент В. П. АЛЕКСЕЕВ

高等学校教学用书

# 制 冷 机

[苏] B. II. 阿历克塞耶夫 著

边绍雄 译

化学工业出版社

本书系苏联专家B. П. 阿历克塞耶夫副教授在我国交通大学向研究生与教师讲课的手稿。全书共分十二章，详细地阐述了各种制冷机的理论、构造和计算。第一章 制冷的热力学原理；第二章 制冷剂；第三章 复杂循环及其计算；第四章 各种制冷压缩机的构造和计算；第五章 制冷机蒸发器的构造与计算；第六章 制冷机冷凝器的构造与计算；第七章 空气冷却器的构造与计算；第八章 制冷机机组；第九章 活塞式压缩机的润滑油；第十章 喷射式制冷机的热力学原理；第十一章 吸收式制冷机装置；第十二章 喷射式制冷机。

本书可作为制冷机工业、食品冷藏工业、化学工业及有关工业部门中的工程技术人员的参考书，也可作为高等学校教师及学生的参考书。

本书由交通大学制冷压缩机教研室边绍雄同志译出，经边绍雄、陈纯正、钱鸿章、张祉祐、夏安世等同志校订。

В. П. Алексеев

## ХОЛОДИЛЬНЫЕ МАШИНЫ

### 制 冷 机

边绍雄 译

化学工业出版社 出版 北京安定门外和平北路

北京市书刊出版业营业许可出字第092号

化学工业出版社印刷厂印刷 新华书店发行

开本：787×1092公厘<sup>1/16</sup> 1960年2月第1版

印张：21<sup>1/2</sup> 插页：68 1960年2月第1版第1次印刷

字数：482千字 印数：1—2500

定价：(10) 精装3.40元 书号：15063-0596  
平装2.85

## 目 录

作者前言 .....	5
緒論 .....	6

## 第一章 人工制冷的热力学原理

1-1 卡諾循环 .....	7
1-2 不可逆卡諾循环。格衣-斯托陀拉原理 .....	9
1-3 热源温度是变数。冷势 .....	11
1-4 逆向气体循环。空气制冷机 .....	13
1-5 空气制冷机的实际循环 .....	16
1-6 气体回热制冷循环 .....	20
1-7 空气制冷机的实际回热循环。透平机应用的远景 .....	22
1-8 蒸汽制冷机循环。饱和区域内的蒸汽循环 .....	25
1-9 干蒸汽的压缩和液体制冷剂的过冷。制冷机的理論蒸汽循环 .....	29
1-10 压缩机的制冷量和所消耗的功率与蒸发温度及冷凝温度的关系 .....	33
1-11 正常制冷量、标准制冷量和工作制冷量 .....	35
1-12 蒸汽制冷压缩机汽缸内的实际过程 .....	36
1-13 供給系数 .....	40
1-14 制冷压缩机的标示效率。指示压力系数 .....	43
1-15 摩擦功 .....	45

## 第二章 制冷剂

2-1 概念 .....	47
2-2 制冷剂的热力完善度 .....	54

## 第三章 复杂循环及其计算。两级压缩和两级调节

3-1 概念 .....	57
3-2 两级压缩的实际系统 .....	64
1) 单级调节两级压缩系统 .....	64
2) 两级调节两级压缩系统 .....	65
3) 具有增压压缩机的两级压缩系统 .....	67
4) 制冷剂的两个蒸发温度均比 $t_0$ 低的两级压缩系统 .....	68
3-3 具有再次充汽的压缩循环(翻尔希沙循环) .....	69
3-4 三级压缩制冷循环 .....	71
3-5 复迭式循环 .....	73
3-6 采用各种不同制冷剂时压缩式制冷机合理使用的温度范围 .....	75
3-7 载冷剂——有机物和盐溶液 .....	79
3-8 压缩式制冷机的能量平衡 .....	82

## 第四章 活塞式制冷压缩机的构造和计算

4-1 制冷压缩机的分类 .....	88
4-2 压缩机主要尺寸的计算 .....	88
4-3 压缩机转速 $n$ 的选择及转速 $n$ 与比值 $\varphi \left( \frac{v_s}{D} \right)$ 之关系 .....	90
4-4 $\frac{S}{D}$ 和制冷剂种类的关系 .....	93
4-5 比值 $\frac{S}{D}$ 、供给系数和摩擦功 .....	95
4-6 对活塞式压缩机的要求 .....	95
4-7 制冷压缩机的构造(一般说明) .....	96
1) 单级压缩机 .....	96
2) 多级压缩机 .....	97
3) 氨压缩机 .....	99
4) 角度式氨压缩机 .....	107
5) 氟里昂压缩机 .....	110
6) 二氧化碳压缩机 .....	118
4-8 制冷压缩机的工作计算 .....	121
4-9 阀门的构造和计算 .....	127
4-10 压缩机的空负荷启动及制冷量的调节 .....	135
4-11 填料函(曲轴和活塞杆的密封) .....	139
4-12 制冷压缩机的安全装置 .....	144
4-13 压缩机系列化 .....	146

## 第五章 制冷机蒸发器的构造与计算

5-1 蒸发器内的传热(几点说明) .....	149
5-2 蒸汽能从传热面自由蒸发的蒸发器 .....	150
5-3 蒸汽从传热面上不能自由脱离的蒸发器 .....	160
5-4 低温蒸发器 .....	165
5-5 蒸发器的强度计算 .....	167
5-6 蒸发器内制冷剂最佳流速的选择 .....	168

## 第六章 制冷机冷凝器的构造和计算

6-1 冷凝器内的传热 .....	170
6-2 制冷剂冷凝时的放热系数 .....	172
6-3 冷凝器的构造 .....	179
6-4 壳管式冷凝器 .....	181
6-5 水冷式冷凝器的热力计算 .....	186
6-6 空气冷却的冷凝器 .....	180
6-7 淋激式冷凝器 .....	191
6-8 蒸发式冷凝器 .....	190
6-9 冷凝器之强度计算 .....	204

## 第七章 空气冷却器的构造与计算

7-1 空气冷却器的构造 .....	205
7-2 空气冷却器内的传热 .....	209
7-3 肋管式空气冷却器的热力计算 .....	211
7-4 湿式空气冷却器的热力计算 .....	215
7-5 喷射式空气冷却器的热力计算 .....	217

## 第八章 制冷机机组

8-1 活塞式压缩机机组 .....	219
8-2 制冷机机组的特性曲线 .....	225
8-3 制冷机的自动化 .....	227
8-4 制冷机自动化的主要设备 .....	229
(1) 低压浮子调节阀 (ПРВв.д) .....	229
(2) 高压浮子调节阀 (ПРВв.д) .....	233
(3) 热量调节阀 (ТРВ) .....	234
(4) 压力继电器 (低压压力控制器) .....	241
(5) 高压压力控制器 .....	242
(6) 温度继电器 .....	242
(7) 电磁阀 .....	243
(8) 水量调节阀 .....	243
(9) 远程液体制冷剂液位指示器 .....	244
8-5 自动化制冷装置的典型系统 .....	245

## 第九章 活塞式压缩机的润滑油

9-1 概念 .....	256
9-2 “制冷剂-润滑油”系统的性能 .....	256
9-3 润滑油的选择 .....	260
9-4 蒸发器内润滑油的回收 .....	261

## 第十章 吸收式制冷机热力学原理

10-1 概念 .....	266
10-2 最简单的吸收式制冷机 .....	266
10-3 吸收式制冷机的热力完善度 .....	269
10-4 “焓-浓度”图 .....	269
10-5 简单吸收式制冷机的工作循环 .....	272
10-6 回热 .....	275
10-7 发生器蒸汽的净化 (局部冷凝, 精馏) .....	280
10-8 精馏塔板上的过程 .....	287
10-9 双作用精馏塔 .....	289
10-10 精馏塔的理论塔板数和实际塔板数 .....	292

10—11 填充塔內的精餾过程 .....	294
10—12 精餾塔主要尺寸的計算 .....	295
10—13 精餾塔的热損耗 .....	295
10—14 外界条件对吸收式制冷机工作的影响 .....	297
10—15 溴化鋰制冷机的热力計算 .....	303

## 第十一章 吸收式制冷装置

11—1 现有的氨吸收式制冷机 .....	307
11—2 氨水吸收式制冷机的設備 .....	311
11—3 溴化鋰吸收式制冷机 .....	317
11—4 溴化鋰制冷装置技术經濟指标調节 .....	319
11—5 吸收-扩散式制冷机 .....	321
11—6 吸收式和壓縮式制冷机的技术經濟比較 .....	323

## 第十二章 噴射式制冷机

12—1 概念 .....	328
12—2 噴射式制冷机的理論循环 .....	330
12—3 噴射式制冷机的实际循环 .....	332
12—4 现代噴射式制冷机 .....	334
12—5 蒸汽噴射式制冷机制冷量的調节 .....	340
<b>参考文献</b> .....	<b>341</b>



## 作者前言

这本书是1958年我在交通大学向制冷及压缩机教研组教师讲授制冷机课的讲稿。

在这门课程内，讲解了人工制冷的热力学的原理、压缩式制冷机、吸收式和喷射式制冷机。

考虑到听课人在压缩机动力学方面都具有相当水平，在这本讲稿内我删除了活塞式压缩机动力学这一章。同时，也没有讲授压缩机零件的强度计算和吸收式、喷射式制冷机各设备的强度计算。这是较合理的，因为这些均是另外一门课程——气体压缩机的讲课内容，并且在设备制造的文獻内均有介绍。

由于讲稿内容过分庞大，故将讲稿内原定要讲的透平式制冷机一章删除。

讲稿是由教研组边绍雄同志翻译，由夏安世、张社祐、钱鸿章、陈纯正等同志校对，我衷心的向这些同志致谢。我不懂中文，不可能改正翻译中可能存在的生硬的词句和不确切的地方，也不能做一番润饰加工工作，这是非常遗憾的事。谨向批评和指正本书的读者致以谢忱。

B. П. 阿厉克塞耶夫

1958年于西安交通大学

## 緒 論

近几十年来制冷技术获得了辉煌的成就，现在已经很难指出在国民經济內有那些部門是不需采用某一种人工制冷的。

人工制冷已获得了广泛的应用，在化学工业中气体和蒸汽液化、复杂溶液分离、盐类結晶、溶液濃縮、吸热反应的調节和染料的生产中均需人工制冷；在石油煉制厂內当从石油餾中提炼石蜡时，用来精煉矿物油；在气体制造厂內用来制取灯用气体；此外，人工制冷还用于人造絲工厂、合成橡胶工厂、鉀矿、制葯工业、医院、农艺和建筑工程。在矿山工程內人工制冷用于在含水地区挖掘矿井和隧道。在机械制造工业中利用冷冻的方法进行鋼的“人工时化”和使残留的奧氏体轉变成馬氏体以便对鋼材进行加工。在飞机制造业內利用人工冷冻对航空发动机、飞行用仪表和飞机結構的零件进行低温試驗。此外人工制冷尚用于工业和民用的空气調节，汽車、火車和船舶的冷藏运输，食品工业，商业部門和家用冷藏。农业、科学研究和其他許多方面也都需要人工制冷。

如上所述，应用人工制冷的部門是各种各样的，但是制冷的方法却只有一种，这就大大縮减了研究制冷技术的任务，因为我們不必去仔細地研究需要冷冻的各种各样的生产和生产过程的操作。

在这門課內，将要講述人工制冷的热力学原理，压缩式、吸收式和喷射式制冷机以及这些制冷机的計算原理和設計。叙述性的材料将尽可能少講，这一部分和有关制冷机运轉的問題請參看其他参考書籍。

## 第一章

### 人工制冷的热力学原理

#### 1-1 卡諾循环

从日常經驗知道，热量經常是从較热的物体传到較冷的物体，从来也沒有过热的传递过程是反向进行的，也就是热量不会从冷的物体传到热的物体。热量自发的从冷的物体传到热的物体是不可能的。这一說法乃是热力学第二定律各种說法之一。

例如石头或水是不能自发的开始向上运动，同样，热量也就不能自动从低温的物体传到另一个高温的物体。但并不是說，石头和水是絕對不能向上运动的，也就是热量不能传至高温物体。这种运动是有可能的，但必須有另一被称为补偿过程的运动存在时方有可能实现。这个过程需要消费以功的形式或是热的形式来表示的能量。

制冷就是利用制冷机連續或是間断的从具有比四周介质温度还要低的物体中取出热量。这种机器的工作物质称为制冷剂或是简称工质。工质周期的从冷物体中取得一定数量的热量，并且將該热量传给四周介质——水或是空气，而同时工质完成了状态变化的循环。如前面所講，实现这个循环必需消耗能量。

在給定的低温下，需要怎样来組織制冷机的工作，以便获得单位冷量——一大卡热量——所需的能量为最小，这一个問題就成为很重要的問題。

为了解决这一問題，我們来研究的、进行可逆循环的制冷机(全部过程均是遵守热力学平衡和机械平衡)。設冷物体的温度等于  $T_0$ ，而四周介质的温度等于  $T$ 。在这个温度下工质从冷物体中取出热量  $Q_0$ ，并将其传给四周介质完成逆向的封閉过程(循环)。为了完成这一过程所消耗的机械功等于  $AL$ 。这部分功轉变成热量后和热量  $Q_0$  一起传给四周介质。因此可写出制冷机的热平衡方程式：

$$Q_1 = Q_0 + AL \dots \dots \dots (1-1)$$

$Q_1$ ——传给四周介质的热量图 1-1。

因为我們取冷却物体的温度  $T_0$  和四周介质的温度  $T$  等于常数，所以制冷剂在可逆的制冷机内工作时，唯一的可能的循环是卡諾循环。如大家所知道的，这个循环是由两个等温过程和两个絕热过程所組成。現在我們来看一看这个循环(1-2)。

在 4-1 过程中工质等温的从温度为  $T_0$  的冷物体(例如从冷藏室內温度为  $T_0$  的空气)中吸热。然后工质絕热压缩到較高的压力(2-1 过程)。在压缩过程中消耗了功  $AL_{1-2}$ ，而工质的温度也就增加到  $T$ ，以后在 2-3 过程中工质和温度为  $T$  的四周介质进行交换，将热量  $Q_1$  传给四周介质。在 3-4 过程中工质絕热膨胀，产生了膨胀功  $AL_{3-4}$ 。这时工质的温度也就从  $T$  下低到  $T_0$ 。膨胀終了(点 4)工质回复到原始状态，而循环就如此繼續进行。不断的将热量  $Q_0$  从温度为  $T_0$  的一面传递到比較高的温度为  $T$  的一面的过程也就是冷气的生产的过程。

$T$ - $S$  图给出了一个可能性，即利用很方便和明了的图解法来計算在  $T_0$  温度时传给工质

的热量  $Q_0$ ，和工质传给温度为  $T$  的四周介质的热量  $Q_1$ ，以及实现封闭过程所消耗的功  $AL = AL_{1-2} - AL_{3-4}$ 。热量  $Q_0$  可用等温线  $T_0$  下的面积（面积  $1'-1-4-4'$ ）来表示，热量  $Q_1$  则可用等温线  $T$  下的面积来表示（面积  $1'-2-3-4$ ），而循环消耗功  $AL$  相应于热量  $Q_1$  和  $Q_0$  的面积之差（图 2 上这个面积用阴影线来表示）。

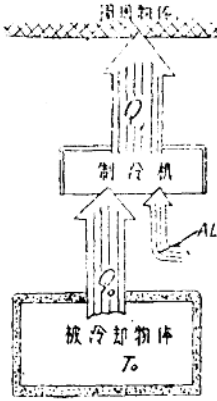


图 1-1 制冷机工作原理图

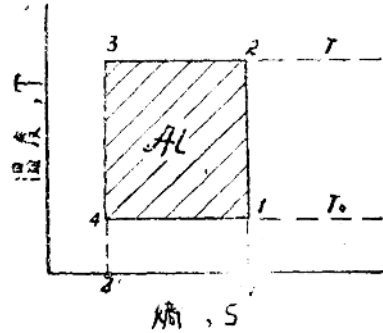


图 1-2 逆向卡诺循环

被冷却物体，完成逆向过程（或是循环）的工质和四周介质组成了热力系统。如果从温度为  $T_0$  的冷却物内取出热量  $Q_0$ ，并将其传给温度为  $T$  的物体，那末冷却物熵的减少等于：

$\Delta S_0 = -\frac{Q_0}{T_0}$  而四周介质熵的增加： $\Delta S_1 = \frac{Q_1}{T}$  因为在一个循环后工质熵的变化是等于零，所以在制冷过程中系统内的熵似乎应当减少，也就是  $\Delta S_{\text{系统}} = \frac{Q_1}{T} - \frac{Q_0}{T_0} < 0$ ，因为  $T > T_0$ 。

但是从热力学第二定律知道，在自然界中任何一类过程均不可能使系统中物体的熵减少，而只有使系统中物体的熵增加的过程。仅有在极限情况下和理想情况时熵等于常数。

因此为了使我們所观察的从冷却物内取出热量的过程能够实现，就必须满足一个条件：

$$\Delta S_{\text{系统}} \geq 0 \dots \dots \dots (1-2)$$

为此就必须有一个过程使四周介质熵增加的补偿过程。功的消耗过程就是这个补偿过程，功转变成热量，增加了四周介质的熵其的值等于  $\frac{AL}{T}$ 。

$$\Delta S_{\text{系统}} = \frac{AL}{T} + \frac{Q_1}{T} - \frac{Q_0}{T_0} \geq 0 \dots \dots \dots (1-3)$$

从式 (3) 可看出，为了实现制冷过程必须要消耗功，它的数值可用下列公式来求得。

$$AL \leq Q_0 \left[ -1 \right] = Q_0 \left[ \frac{T - T_0}{T_0} \right] \dots \dots \dots (1-4)$$

显然，最小的消耗功符合下列条件。

$$AL_{\text{最小}} = Q_0 \left[ \frac{T - T_0}{T_0} \right] \dots \dots \dots (1-5)$$

如果在制冷机内实现的是可逆卡诺循环，那末所消耗的功为最小。

从公式 (1-5) 可得，所消耗的功与循环的制冷量  $Q_0$  及温度差  $(T - T_0)$  成正比，而与

制冷温度  $T_0$  成反比。换一句话说，获得一大卡制冷量所消耗的功随着四周介质的温度增加和制冷温度  $T_0$  的降低而增加。这个结论在制冷技术上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内  $T - T_0$  下工作时，必须尽可能采用较冷的水来冷却循环中的制冷剂。并且不希望制冷剂达到无必要的过低的温度  $T_0$ 。

从冷的物体中取出的热量（也就是冷量）与外面所消耗而用热量单位来表示的机械功的比值，表示制冷机的有效性。这个比值称为制冷系数  $\epsilon$ 。

$$\epsilon = \frac{Q_0}{AL} = \frac{T_0}{T - T_0} \dots\dots\dots(1-6)$$

制冷系数与电功热当量的乘积乃是制冷机在给定的温度条件下消耗一千瓦电能所能达到的最大冷冻能力  $K$ 。

$$K = 860 \cdot \epsilon [\text{大卡/千瓦小时}] \dots\dots\dots(1-7)$$

从公式 (6) 可得，依照逆卡诺循环工作的制冷机的制冷系数与工作物体的性质无关，而是温度  $T$  和  $T_0$  的函数 (图 1-3)。这里为了避免误解起见必须着重指出，制冷系数的大小并不能作为详尽无遗的判断制冷过程好坏的准则。后者说明，二制冷机在不同的温度条件下依照卡诺循环工作时，可得到不同的制冷系数  $\epsilon_1 \neq \epsilon_2$ ，虽然它们所消耗的能量是完全相等。这个结论在后面将更详细的来讲清楚。

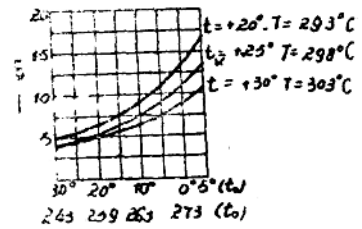


图 1-3 卡诺循环制冷系数  $\epsilon$  与温度  $T$ 、 $T_0$  的关系

### 1-2 不可逆卡诺循环，格衣-斯托拉原理

在前面我们讨论时假定工质与热源之间的热交换，也就是工质和四周介质以及和冷却物的热交换是在无穷小的温差下进行的，因此需要有无限大传热面积的热交换器，当然这不是现实的。实际上，无论是制冷机热交换器的传热面积或是工质与热源之间的温差均是一有限值，所以有必要研究当有温差存在时对制冷循环能量的质的影响。

我们引用下列符号： $T$  和  $T_0$ ——四周介质和冷物体的温度。 $T'$  和  $T'_0$ ——循环中制冷剂温度的上下界限。 $\Delta T' = T' - T$ ， $\Delta T'_0 = T_0 - T'_0$ 。(图 1-4)。

很易看出，由于温差  $\Delta T'$  和  $\Delta T'_0$  的存在，循环的温度范围将在比我们前面所看过的可逆循环的温度范围更大，也就是  $T' - T'_0 > T - T_0$ 。此外，在这个循环内制冷剂的温度下限也相应的比卡诺循环要低，也就是  $T'_0 < T_0$ 。

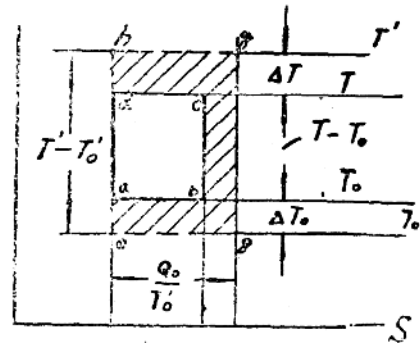


图 1-4 具有不可逆热交换的卡诺循环

这两个因素如公式 (5) 所得的结论一样，这个循环与没有温差  $\Delta T'$  和  $\Delta T'_0$  的可逆卡诺循环相比较，获得同样的冷量时，不可避免的要多消耗功。

现在我们来计算卡诺循环由于外部的不可逆，也就是热交换在有温差的情况下进行时所引起附加功的数值。

为此我们列出可逆卡诺循环以  $abcd$  来表示的热平衡式？

$$Q_0 + AL = Q_1 \dots\dots\dots(1-8)$$

图1-4上假定用  $c f g h$  来表示外部不可逆循环其热平衡式为:

$$Q_0 + AL' = Q'_1 \dots \dots \dots (1-9)$$

由此二式可求得制冷剂与热源之间的热交换为不可逆时所引起的附加功的数值。

$$\Delta AL = AL' - AL = Q'_1 - Q_1 \dots \dots \dots (1-10)$$

因此在有限温差时, 由于不可逆的热交换所引起的附加功等于在可逆循环内和不可逆循环内从制冷剂传到四周介质的热量之差。附加功  $AL$  的数值在图1-4上用阴影线来表示。

现在我们利用熵的概念来分析和表示附加功  $AL$ 。在可逆循环中由四周介质、制冷剂和冷却物所组成的系统的熵的增量是:

$$\Delta S_{\text{系统}} = \Delta S_0 + \Delta S_1 = -\frac{Q_0}{T_0} + \frac{Q_1}{T_1} = 0 \dots \dots \dots (1-11)$$

式中:  $\Delta S_0$  和  $\Delta S_1$  ——是冷却物和四周介质熵的增量。

在不可逆循环内系统的熵的增量:

$$\Delta S_{\text{系统}} = \Delta S_0 + \Delta S'_1 = -\frac{Q_0}{T_0} + \frac{Q'_1}{T_1} > 0 \dots \dots \dots (1-12)$$

式中:  $\Delta S'_1$  ——当传给四周介质热量  $Q'_1$  时, 其熵的增量。

因为  $\frac{Q_0}{T_0} = \frac{Q_1}{T_1}$ , 所以式 (12) 可表示成下列形式。

$$\Delta S'_{\text{系统}} = \frac{Q'_1}{T_1} - \frac{Q_1}{T_1} = \frac{1}{T_1} (Q'_1 - Q_1) \dots \dots \dots (1-13)$$

从式 (1-10) 或 (1-13) 得  $\Delta AL = T \cdot \Delta S_{\text{系统}} \dots \dots \dots (1-14)$

公式 (1-14) 在热力学中有极重要的意义。这一公式用于制冷技术中并可这样读: “在逆向循环中由于不可逆过程而多消耗的功等于四周介质的绝对温度和系统中熵的增量的乘积”(格尤衣—斯托陀拉原理)。

如所周知, 熵是状态的函数。制冷剂状态变化完成了封闭循环, 故其熵的变化总是等于零, 与循环是否可逆无关。因此式 (1-11) 和 (1-12) 仅是热源的熵的变化。这时比较两个循环——可逆循环和不可逆循环——在这两个循环内由制冷剂所传递的热量比(“制冷量”)  $Q_0$  假定相同)。

现在我们来比较可逆循环的制冷系数  $\epsilon$  与不可逆循环的制冷系数  $\epsilon'$ 。根据制冷系数的定义可得,

$$\epsilon = \frac{Q_0}{AL} \quad \text{和} \quad \epsilon' = \frac{Q_0}{AL + \Delta AL}$$

因为  $\Delta AL > 0$ , 所以  $\epsilon > \epsilon'$ 。在这两种情况时, 热量  $Q_0$  均是从温度为  $T_0$  热源传出。考虑到这一点后, 可得出结论, 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小。

这就很清楚, 当实现逆向封闭过程时保持热力可逆性是多么重要。在制冷机中机械过程的可逆也起着同样重要的作用。后者表明, 必须竭力使工质和作用于工质的系统的物体之间处于机械平衡。

因此为了获得必需的冷量, 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。在极限情况时, 当  $\Delta T_0 \rightarrow 0$  和  $\Delta T_1 \rightarrow 0$  时, 则可得  $\Delta AL \rightarrow 0$ 。即在给定的温度  $T_0$  和  $T_1$  的条件下, 获得冷量所消耗的功就最少, 也就是  $AL$  最小。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。最后能量消耗为最小时，这个价格也就无限制的增加。所以实际上是用折中方案来解决的——选择所消耗的功 $AL \neq AL_{\text{最小}}$ ，而循环中的温差 $\Delta T$ 和 $\Delta T'$ 必须能使制冷机达到最经济的能量效果。

### 1-3 热源温度是变数。冷势

实际的制冷机在工作时其热源温度是变化的，而变化的范围则与机器的构造特点和热源的容量有关。

首先我们假定有这样一个问题，要使某一冷却物从 $T_1$ 温度下降到 $T_2$ 。图1-5。同时热源（四周介质）的温度是等于某常数。这个任务可以这样来解决，在机器内实现可逆循环1-2-3-4，在工质和热源之间进行平衡的热交换（也就是无温差的热交换），并且循环中1-2和3-4部分是等熵过程。工质完成可逆循环同时在冷却物从 $T_1$ 冷却到 $T_2$ 的过程中从冷却物中取得了热量 $Q_0$ ，然后工质将热量 $Q_0$ 和所消耗掉的外功 $AL$ 所转化的热量一起传给温度为 $T$ 的四周介质。因为这个循环是可逆的所以 $\Delta S_{\text{系统}}=0$ ， $\Delta AL=0$ 和 $AL=AL_{\text{最小}}$ 。为了实现1-2-3-4循环，需要最小功 $AL_{\text{最小}}$ 这个功的数值可用热量单位来表示，它在图1-5上用阴影线来表明。

将冷却物从温度 $T_1$ 冷却到 $T_2$ ，这一过程可在按逆卡诺循环工作的制冷机内实现。在最好的情况时，循环中最低的温度 $T_0$ 等于 $T_2$ 。因为当 $T_0 > T_2$ 时，就不可能将物体冷却到所给定的温度，而当 $T_0 < T_2$ 时，则实现这个循环所消耗的功将不等于最小功。

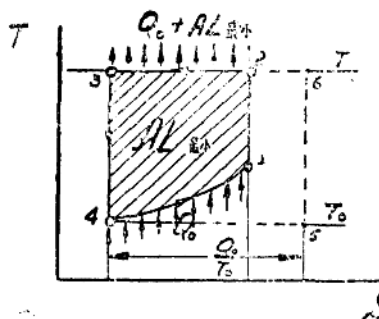


图 1-5 低温热源温度有变化的循环

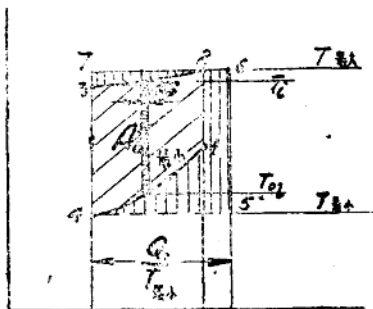


图 1-6 热源温度有变化的循环的最小功

因为在卡诺循环中应当制取如循环1-2-3-4中同样数量的冷量 $Q_0$ ，所以制冷剂熵的变化是依等温线 $T_0$ 而变的，它等于 $\frac{Q_0}{T_0}$ ，而卡诺循环外形是4-5-6-3-4不难看出，完成卡诺循环所消耗的功大于前面所求得的最小功 $AL_{\text{最小}}$ 图1-5或者是 $\epsilon_{\text{卡诺}} < \epsilon_0$ 。

进一步我们假定二个热源的温度是变化的图1-6。如果在热源与工质之间的温差各处均是无穷小，而制冷剂与对其起作用的物体之间存在着机械平衡，那末1-2-3-4循环将是可逆的。这一循环实现时所消耗的功也就是最小功。后者表明，在这一的条件下，循环1-2-3-4具有最高的热力完善程度，在与其他循环比较时可作为一个典型或是标准。

如果在1-4过程内物体冷却是利用按卡诺循环4-5-6-7工作的机器来达到，那末循环内制冷剂的低温温度 $T_0$ 就应当等于 $T_0_{\text{最小}}$ ，而高温温度则根据从制冷剂传给热源热量这

一条件而决定的  $T_2 = T_{\text{最大}}$ 。因为在这一循环内工质和热源之间的热交换是在有限温差下进行，所以循环是不可逆的。而实现这一循环所消耗的功就大于可逆循环 1-2-3-4 所消耗的功或是  $\epsilon_{\text{卡诺}} < \epsilon_0$ 。图 1-6 上垂直阴影线表示制冷剂在吸热和放热时温度是在变化的条件下，不可逆卡诺循环 4-5-6-7 与可逆循环 1-2-3-4 相比较所消耗的附加功。

但是可以适当的选取温度范围，并作这样一个卡诺循环，使它的制冷系数  $\epsilon_{\text{卡诺}}$  与有温度变化的可逆循环的制冷系数  $\epsilon_{\text{可逆}}$  相同，也就是  $\epsilon_{\text{卡诺}} = \epsilon_{\text{可逆}}$ 。为此我们将 1-2-3-4 循环图 1-6 分成为无穷多的基本循环，而每一个基本循环乃是一个温度上下限为  $T_i - T_{o_i}$  的卡诺循环。在图 1-6 上前面所說的基本循环用水平阴影线来表示。对于任何一个基本循环来说，它的制冷系数等于：

$$\epsilon_i = \frac{T_{o_i}}{T_i - T_{o_i}} \dots \dots \dots (1-15)$$

而对整个循环 1-2-3-4 来说，等于

$$\epsilon_{\text{可逆}} = \frac{Q_0}{Q_1 - Q_0} = \frac{\int T_{o_i} ds}{\int T_i ds - \int T_{o_i} ds} \dots \dots \dots (1-16)$$

式中：  $Q_0$ ——循环内工质在低温  $T_{o_i}$  下所获得的热量。我们可写成下式：

$$Q_0 = T_{m(1-2)} (S_1 - S_4) \dots \dots \dots (1-17)$$

$T_{m(1-2)}$  ——循环内热量传给工质时工质的几何平均温度。同样  $Q_1$  是在高温  $T_i$  时从工质中取出的热量。我们可写成下式：

$$Q_1 = T_{m(2-3)} (S_2 - S_3) \dots \dots \dots (1-18)$$

$T_{m(2-3)}$  ——自工质内取出热量时工质的几何平均温度。

从式 (1-16)(1-17)(1-18) 可得， $\epsilon_{\text{卡诺}} = \epsilon_{\text{可逆}} = \frac{T_{m(2-3)}}{T_{m(2-3)} - T_{m(1-2)}} \dots \dots \dots (1-19)$

因此热源温度有变化的可逆循环的制冷系数  $\epsilon_{\text{可逆}}$ ，在给定温度时可用吸热或放热时不变的温度也就是几何平均温度来表示。建立在几何平均温度上的卡诺循环，其制冷系数  $\epsilon_{\text{卡诺}}$  如热源温度有变化的可逆循环一样。在图 1-6 上间断的斜阴影线表示了基本卡诺循环。在这一循环内制取单位冷量所消耗的功将等于变动温度的可逆循环所需要的功。因此当比较不同制冷机的循环的有效性时，几何平均的卡诺循环也同样可以作为最小功的标准。归纳起上面的说明可得：

- 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：
  - (i) 用可逆方法来实现的循环。
  - (ii) 工质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。

现在我们再较详细的来讲逆向循环制冷系统的意义。根据定义， $\epsilon$  乃是从低温热源取出热量的  $Q_0$  和外部所消耗的机械功  $AL$  的比值，也就是  $\epsilon = \frac{Q_0}{AL}$ 。如前面所提到的，冷量与所提出的任务有关，在制冷机内它可以是在某一不变的溫度下，或是变动的溫度  $T$ 。下来制得。但是经常有这种情况，所需的冷量既需在变动溫度下又需在某一不变的溫度下制得。我们已知道应当如何实现逆向循环以使制取单位冷量所消耗的功为最小。为此希望循环是由可逆过程所组成，也就是如前面所提到的一样，使系统中的熵始终保持不变。后者只可能当制冷



剂内部是处于热力平衡和机械平衡状态(包括边界条件),制冷剂与热源之间是处于热力平衡、以及制冷剂和被制冷的物体是处于热力平衡等条件满足的情况下方可能产生。

我们假定可逆过程这一条件可以满足,这样如前面所着重指出的制取单位冷量所需的功为最小功。如果给定热源的溫度 $T$ 和 $T_0$ 是常数,那末根据卡诺循环我们得

$$AL_{\text{最小}} = \frac{T - T_0}{T_0} \quad [ \text{大卡/大卡} ] \quad \text{和} \quad \epsilon_{\text{卡诺}} = \frac{1}{AL_{\text{最小}}}$$

当热源溫度相同时,任一实际的制冷机由于其有不可逆性故需要更多的功。

后面我们假定需要在某一不变的溫度下或是更低的溫度 $T'$ 下制冷。这时和前面一样,为了制取单位冷量我们必须耗费的功等于。

$$AL'_{\text{最小}} = \frac{T - T_0'}{T_0'}, \quad \text{但是} \quad AL'_{\text{最小}} > AL_{\text{最小}} \quad \text{和} \quad \epsilon'_{\text{卡诺}} < \epsilon_{\text{卡诺}}$$

当冷源溫度为 $T''$ 时,相应的可得

$$AL''_{\text{最小}} > AL'_{\text{最小}} > AL_{\text{最小}} \\ \text{和} \quad \epsilon''_{\text{最小}} < \epsilon'_{\text{最小}} < \epsilon_{\text{卡诺}} \text{等等。}$$

因此冷量的动力价值与其溫度位有关,或是象平常所说的与冷势有关。循环的制冷系数可作为冷量价值的标准:当在冷源溫度变化的条件下制冷时很清楚的可得出正确的结论,制冷系数愈小,则制取冷量所需的动力将愈大。显然,当制冷溫度为变动的情况下,这一结论也是正确的。

同样制取冷量所需的动力大小与四周介质的溫度有关,随着四周介质溫度的增加而增高,这一点很清楚的可以看出。因此如已指出的,在实际上竭力希望制冷机的循环尽可能在较接近热源的溫度上下限内进行,也就是在四周介质(冷却水或是空气)是最低的溫度下和尽可能在较高的制冷溫度下进行。但是须注意到溫度 $T_0$ 的变化比溫度 $T$ 的变化对于循环的制冷系数 $\epsilon$ 具有更大的影响,因为对 $\epsilon = \varphi(T, T_0)$ 来说,偏微分的绝对值用下列不等式来表示。

$$\left| \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial T} \right) T \right| < \left| \left( \frac{\partial \epsilon}{\partial T_0} \right) \right|$$

#### 1-4 逆向气体循环。空气制冷机

在制冷机的工作过程内是借助于制冷剂来完成逆向循环的。在整个循环中,制冷剂仅以气体的状态存在(气体循环)或是改变自己的聚合状态,周期的以蒸汽状态和液体状态存在(蒸汽循环),这与具体的条件有关。

在工业上首先是用气体压缩式制冷机来获得冷量的。由于空气对人无害并且容易取得,故这种制冷机是用空气作为制冷剂的。

现在我们来讨论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(W)内的冷却器(D)见图1-7。

压缩机由吸入管吸入循环的空气,然后将空气由压力 $P$ ,绝热压缩到 $P_1$ 。这时空气的溫度也由 $T_1$ 升高到

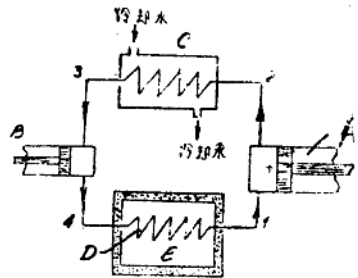


图 1-7 空气制冷机的系统