

制 冷 机

结 构 与 维 修

郑贤德 陈治春 等 编

华中工学院出版社

内 容 简 介

本书着重阐述活塞式与螺杆式制冷机的工作原理，系统地介绍：制冷技术的基础理论、制冷原理及装置；活塞式与螺杆式制冷压缩机的构造与维修；制冷设备及自控元件的构造与维修；制冷机的安装、调试及运行故障分析等方面的基本知识。

本书可作为制冷与空调机组的操作、维修及安装调试工人的培训（或自学）教材，也可作为制冷机设计、制造和管理人员的参考书，以及中等专业学校的教学参考书。

制冷机结构与维修

郑贤德 陈诒春 等编

责任编辑 杨元庆

*

华中工学院出版社出版发行

(武昌喻家山)

新华书店湖北发行所经销

华中工学院出版社印刷厂印刷

*

开本：787×1092 1/16 印张：11.75 插页6 字数：192 000

1987年6月第1版 1987年6月第1次印刷

印数：1—18 000

ISBN 7-5609-0053-4/TH·9

统一书号：15255-096 定价：2.16元

前 言

制冷机主要应用在工业生产过程、产品性能试验、空气调节、食品的冷冻加工、冷藏和冷藏运输、制药以及日常生活等方面。随着国民经济的迅速发展以及城乡人民生活水平的提高，制冷机的应用将越来越广泛。为了适应形势发展，满足国内广大制冷机制造、安装、操作与维修工人以及有关技术人员的需要，我们在以前举办过的几期制冷培训班所用教材的基础上编写了本书。

全书包括：制冷技术的热工基础；制冷机原理；活塞式制冷压缩机；螺杆式制冷压缩机；冷凝器、蒸发器及辅助设备；制冷装置及其自动控制；制冷机的安装与试运行；制冷装置运行中的故障分析与排除；制冷设备的维修等九章。在叙述上力求理论联系实际、通俗易懂、便于自学。

编写本书的人员有郑贤德、孙利生、陈治春、陈祥林及武汉冷冻机厂技术科部分同志。郑贤德同志负责统稿。本书经林秀诚、朱鸿复同志审稿，并提出了许多宝贵意见。此外，在编写过程中，得到华中工学院制冷教研室、武汉冷冻机厂、北京冷冻机厂、天津冷气机厂、武汉商业机械厂、岳阳制冷设备总厂及武汉制冷自控仪表厂等单位的大力协助，在此一并致谢。

限于编者的水平，错误和缺点在所难免，恳切欢迎读者批评指正。

编者

一九八六年二月

目 录

第一章 制冷技术的热工基础.....	(1)
第一节 制冷装置的基本原理.....	(1)
第二节 制冷技术的常用术语.....	(1)
第三节 能量转换与热力学定律.....	(6)
第四节 焓与焓.....	(6)
第五节 压焓图.....	(7)
第六节 湿空气的性质及焓湿图.....	(9)
第七节 传热学基础.....	(12)
第八节 流体流动的基本知识.....	(16)
第二章 制冷机原理.....	(19)
第一节 单级蒸汽压缩制冷循环.....	(19)
第二节 两级压缩及复叠式制冷循环.....	(27)
第三节 吸收式及蒸汽喷射式制冷机.....	(31)
第四节 制冷剂、冷媒及冷冻油.....	(34)
第三章 活塞式制冷压缩机.....	(42)
第一节 活塞式制冷压缩机的工作原理.....	(42)
第二节 活塞式制冷压缩机总体结构.....	(44)
第三节 活塞式制冷压缩机的性能.....	(48)
第四节 活塞式制冷压缩机主要部件构造.....	(49)
第五节 活塞式制冷压缩机的装配.....	(62)
第四章 螺杆式制冷压缩机.....	(66)
第一节 螺杆式制冷压缩机总体结构及工作原理.....	(66)
第二节 螺杆式制冷压缩机主要零部件构造.....	(70)
第三节 螺杆式制冷压缩机的装配.....	(73)
第四节 螺杆制冷机组.....	(75)
第五章 冷凝器、蒸发器及辅助设备.....	(80)
第一节 制冷设备的压力试验.....	(80)
第二节 冷凝器的结构型式及维护.....	(81)
第三节 蒸发器的结构型式及维护.....	(84)
第四节 辅助设备及其维护.....	(90)
第五节 泵.....	(96)
第六节 风机.....	(98)
第七节 泵与风机的主要技术指标.....	(99)
第八节 冷却塔.....	(100)
第六章 制冷装置及其自动控制.....	(103)
第一节 典型制冷装置.....	(103)
第二节 制冷系统的自控元件.....	(113)
第三节 制冷自控系统.....	(123)
第四节 制冷自控系统的故障分析.....	(125)

第七章 制冷机的安装与试运行.....	(127)
第一节 制冷机出厂前的试验.....	(127)
第二节 制冷压缩机及其它设备的安装.....	(130)
第三节 制冷系统安装质量的检查.....	(142)
第四节 制冷系统的调试.....	(143)
第八章 制冷装置的故障与排除.....	(149)
第一节 制冷机正常运行的标志.....	(149)
第二节 压缩机常见故障分析.....	(150)
第三节 操作运行中故障分析与排除.....	(153)
第四节 全封闭活塞式制冷压缩机的故障检查.....	(160)
第九章 制冷设备的维修.....	(163)
第一节 活塞式压缩机的检修.....	(163)
第二节 螺杆式制冷压缩机的检修.....	(170)
第三节 辅助设备的维修.....	(174)
参考文献.....	(181)
附表 制冷工程常用单位换算表.....	(182)
附图 制冷工质热力性质图.....	(182)

第一章 制冷技术的热工基础

第一节 制冷装置的基本原理

制冷就是用人工的方法将某一物体或空间的热量带走，使该物体或空间的温度低于周围环境的温度。

制冷有许多种方法，目前应用最广泛的是蒸汽压缩式制冷。它的基本原理是利用工作物质（制冷剂）状态变化时吸热和放热的特性来实现制冷。图 1-1 是蒸汽压缩式制冷系统的原理图。该系统主要由制冷压缩机、冷凝器、节流阀（即膨胀阀）和蒸发器组成。它们之间依次用管道连接，并充灌适量的制冷剂。它们的工作过程可由图 1-1 中制冷剂的循环过程看出：常温高压液体制冷剂从冷凝器流出，经节流阀降温降压后进入蒸发器；在蒸发器内，低温低压液态制冷剂从被冷却物体中吸取热量而汽化，从而使被冷却物体降低温度；汽化后的低温低压制冷剂被压缩机吸入并进行压缩，压缩后的高温、高压汽态制冷剂被排入冷凝器，在冷凝器中受到冷却而放出热量，冷凝成常温高压液态制冷剂，从而完成了一个制冷循环。通常，制冷压缩机由电动机带动，因此，蒸汽压缩式制冷循环是靠消耗电能来实现制冷的。

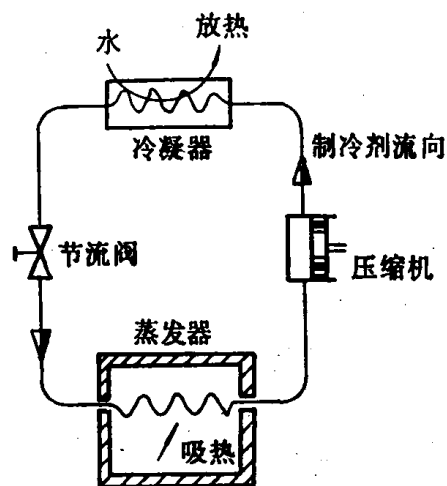


图 1-1 蒸汽压缩式制冷系统原理图

以上介绍的是最简单的制冷循环，即单级蒸汽压缩制冷循环，它是最基本并得到广泛应用的制冷循环。

从蒸汽压缩式制冷系统的工作过程可以看出：制冷系统中制冷剂有时变成汽态，有时又变成液态；状态变化过程中又伴随有吸热或放热，并且温度、压力也发生相应的变化。

为了弄清制冷装置中所发生的一系列变化，必须学习热工基础知识，以便了解制冷系统的内在联系及热工现象的本质，逐步掌握从理论上分析制冷装置能否正常运行的必要知识。

第二节 制冷技术的常用术语

制冷机中用来实现制冷的工作物质常称为制冷剂（或称工质）。氨和氟利昂是最常用的制冷剂。制冷装置工作时，制冷机与外界的能量交换往往是通过制冷剂的状态变化及温度升降、压力增减、吸热放热等热工现象表现出来。为了深入了解制冷原理，有必要先对制冷技术中一些常用术语作些说明。

一、温度

温度是物体冷热程度的量度。常用 T 或 t 表示。国际单位制 (SI) 中采用热力学温标, 也叫开尔文 (简称开氏) 温标 (或称绝对温标), 用 T 表示, 单位为开 [K]。同时并用的还有摄氏温标, 以 t 表示, 单位为度 [$^{\circ}\text{C}$]。绝对温标与摄氏温标的分度方法相同, 即摄氏温差 1 [$^{\circ}\text{C}$] 就是绝对温差 1 [K]。它们之间的换算关系如下:

$$T[\text{K}] = t[{}^{\circ}\text{C}] + 273.15 \quad (1-1)$$

换句话说, 摄氏温标的零点比开氏 (绝对) 温标的零点高出 273.15 度。

物体温度的高低用温度计测量。在制冷机中常用的温度计有水银式温度计、压力式温度计、电阻温度计和半导体温度计。

制冷设备中各部位温度的测量是检查制冷机运行正常与否的重要手段。

二、压力

通常用垂直作用于单位面积上的力来表示压力的大小 (即压强)。气体的绝对压力 (即气体的真实压力)

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-2)$$

式中, p —— 压力, [帕]; F —— 垂直作用力, [牛]; A —— 面积, [米²]。

国际单位制中压力的单位为帕斯卡 [Pa]。巴 [bar] 和物理大气压 (也称标准大气压 atm) 为暂时并用单位。在公制单位中压力单位常采用工程大气压 [at], 毫米水柱 [mm H₂O] 和毫米汞柱 [mm Hg] 等单位。各种压力单位换算见附表。

工程设计计算中, 需要的是压力的实际数值。由于测量压力的仪表通常处在大气环境中, 故仪表测得的数值不是压力的实际数值 (绝对压力), 而是和当时当地的大气压力的差值 (参见图 1-2)。

当容器内气体的绝对压力高于大气压时, 压力表所指示的是绝对压力超出大气压力的部分, 称为表压力 (或称相对压力), 用 p_g 表示, 即

$$p_g = p - B \quad (1-3)$$

式中, B —— 当时当地的大气压力, 可用气压计测定。

当容器内气体的绝对压力低于大气压力时, 真空计所指示的是绝对压力低于大气压力的部分, 表示表压力为负值, 负压有时用真空度表示, 即

$$h = B - p \quad (1-4)$$

式中, h —— 低于当地大气压力时的表压力, 常用真空度表示。

绝对压力 p 与表压力和当地大气压力之间的关系为:

$$\text{正压时,} \quad p = B + p_g \quad (1-5a)$$

$$\text{负压时,} \quad p = B - h \quad (1-5b)$$

必须指出: 作为制冷剂的状态参数的压力应是系统的绝对压力。一般制冷工质及热力过程图表上所注的压力都是指绝对压力, 而制冷机实际运行时压力表的读数均指表压力, 热工计算时必须按式 (1-5) 换算为绝对压力。

制冷机运行时, 正确控制制冷系统各部分的压力是系统安全正常运行的重要保证。

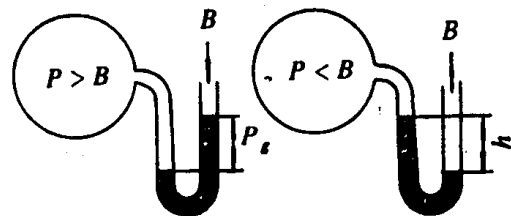


图 1-2 用 U 形管压力计测压

三、比容和密度

单位质量的物质所占有的容积称为比容,用 v 表示。如果 m 千克气体占有 V 米³ 容积,则比容

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-6)$$

比容的单位为[米³/千克]。制冷机中,比容常指制冷剂蒸汽的比容,液体的比容值比气体的比容值小得多。

比容的倒数称为密度,即单位容积内物质所具有的质量,用 ρ 表示,即

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{m}{V} \quad [\text{千克/米}^3] \quad (1-7)$$

汽态制冷剂的热力状态,一般可用 p 、 t 、 v 这三个基本状态参数来描述,且只要知道这三个基本参数中的任意两个,就可确定制冷剂所处的热力状态。因此,每一个状态必有相应的 p 、 t 、 v 数值。

四、热量

当两物体存在温差时,它们之间必传递热量。表示物体吸热和放热多少的物理量称为热量,用 Q 表示。热力学规定:系统从外界吸热时, Q 为正 ($Q > 0$);系统向外界放热时, Q 为负 ($Q < 0$)。

在国际单位制中,热量的单位和功、能量的单位相同,都为焦耳[J],有时也用瓦·秒[W·s]表示。在工程单位制中热量的单位为[千卡](又称大卡),各种单位换算见附表。

五、比热

单位质量的某种物质的热容量叫这种物质的比热,即:单位质量(1千克)的物质温度升高(或降低)1开(或1度)所吸收(或放出)的热量称为比热或称质量比热,用 c 表示,单位为[千焦/千克·开]。比热是物质的物性参数。

容积比热是指1标准米³的气体当温度升高(或降低)1开时所吸收(或放出)的热量,用 c' 表示,单位为[千焦/标准米³·开]。

必须指出:当工质被加热(或冷却)时,除温度变化外,其比容和压力也可能变化,故温度变化1度时所吸收(或放出)热量的多少就与加热(或冷却)的条件有关,也就是说,工质的比热在不同的热力过程中各不相同。制冷工程中常用到定压比热和定容比热,分别用 c_p 和 c_v 表示。定压比热是指1千克气体在其压力保持不变的条件下温度升高(或降低)1度时所吸收(或放出)的热量;定容比热则是指气体在加热过程中容积保持不变时的比热。对于同一工质而言,如果使 m 千克气体在定压过程和定容过程中都由同一温度 t_1 升高至同一温度 t_2 ,定压加热时所需的热量 Q_p 大于定容加热时所需的热量 Q_v ,即 $c_p > c_v$ 。各种气体的定压比热与定容比热可从有关资料中查取。

对固体或液体来说,温度变化时容积变化很小,故不分定压比热与定容比热。

六、汽化与凝结

物质由液态吸热后变成汽态的过程叫汽化。汽化的形式有两种:蒸发与沸腾。

蒸发是指液体表面的汽化过程。

沸腾是指液体内部和表面同时发生的剧烈汽化过程。

如把一壶水放在火炉上烧煮,水吸热后温度逐渐升高,水的表面不断有水变成水蒸汽逸出,这就是蒸发过程;当水温升到100℃(在一个标准大气压下)继续加热时,水的内

部产生大量气泡，使水不断翻滚，这时不仅水面蒸发加剧，而且大量水蒸汽从水面逸出，这就是沸腾过程。在沸腾过程中，尽管水在继续吸收热量，但壶中水温始终维持在 100°C 不变。

蒸发与沸腾都是液态吸热变成气态的汽化过程，两者本质是相同的，但两者的差异仅在于形成过程的条件不同。一般来说，对同一物质，在一定压力下，蒸发可在任意温度下进行，而沸腾只能在一定的温度下进行。液体在某一压力下沸腾时的温度就是该压力所对应的饱和温度（或称沸点）。

制冷剂和水一样，也具有这种性质。例如，制冷机中蒸发器内的制冷剂不断吸收被冷却物质的热量，制冷剂由液体变成气体，这就是制冷剂在蒸发器中的沸腾过程。必须指出：制冷剂在蒸发器中进行的汽化过程是沸腾过程，而不是蒸发过程。即当蒸发器压力维持一定时，制冷剂液体在与该压力（或称蒸发压力）相对应的饱和温度下才进行沸腾。

凝结过程则与汽化过程相反，即蒸汽在一定压力下冷却放出热量变成液体的过程。例如，揭开烧热水的锅盖，盖子内面附着有许多水珠，这就是水蒸汽遇冷后凝结成液体的凝结现象。

制冷机中，制冷剂在冷凝器中的变化过程就是凝结过程。即从压缩机排出的制冷剂蒸汽进入冷凝器后被冷却水（或空气）冷却，放出热量由蒸汽变成液体。当冷凝器压力维持一定时，凝结时蒸汽的凝结温度就是该压力所对应的饱和温度。

七、饱和温度和饱和压力

汽化与凝结是汽液相变的两种相反过程。密闭容器中，液体始终处于一定的温度时，容器内蒸发压力就会自行保持在一定的数值上，这时容器内汽液转化达到动态平衡。此时，称容器中的液体、气体处于饱和状态。例如，水在一个标准大气压力下加热至 100°C 即达到了饱和状态，此时水温维持在 100°C 。

在饱和状态下的液体称为饱和液体，其蒸汽称为饱和蒸汽；饱和液体的温度称为饱和温度，饱和蒸汽的压力称为饱和压力。

实验指出：对某一物质而言，饱和压力和饱和温度之间存在着——对应的关系。饱和压力随着饱和温度的升高而升高，随着饱和温度降低而降低。

不同的液体，在同一压力下，它们的饱和温度各不相同。几种常用制冷剂的饱和温度与饱和压力的对应关系见表 1-1。

在一个标准大气压力下，水的饱和温度是 100°C ，氨是 -33.4°C ，氟利昂 12 为 -29.8°C 。氨和氟利昂这种低沸点的性质正是人们选用为制冷剂的重要依据之一。

必须指出：加热并不是使液体沸腾的唯一方法。在温度一定的情况下，在密闭的容器内，降低容器内的压力同样能使液体沸腾。降低压力即降低了对应的饱和温度，当液体的温度高于饱和温度时，液体就会沸腾。

八、汽化潜热

液体汽化时要吸收热量，蒸汽冷凝时要放出热量。当液体处于饱和状态时，即使继续对它加热，但温度并不升高，蒸汽和液体一直保持着在相应压力下的饱和温度。如果停止加热，液体也就中止沸腾。可见要保持液体继续沸腾，必须不断地供给热量，这些热量并不是用来升高液体温度，而是用来使液体吸热而汽化的。

在饱和状态下，将 1 千克液体全部汽化转变为同温度的蒸汽所吸收的热量称为该液体在该状态下的汽化潜热，用 r 表示，单位为 [千焦/千克]。同一种液体的汽化潜热随

表 1-1 常用制冷剂的饱和温度与饱和压力 (工程单位制)

饱和温度 $t(^{\circ}\text{C})$	饱和压力 $p[\text{公斤力/厘米}^2]$		
	$\text{R}_{717}(\text{NH}_3)$	R_{12}	R_{22}
-50	0.4168	0.3999	0.660
-40	0.7318	0.6551	1.077
-30	1.219	1.025	1.679
-20	1.940	1.540	2.51
-15	2.410	1.863	3.03
-10	2.966	2.234	3.63
-5	3.619	2.660	4.32
0	4.379	3.147	5.10
5	5.259	3.696	5.99
10	6.271	4.314	6.99
15	7.427	5.008	8.11
20	8.741	5.779	9.35
30	11.895	7.581	12.26
35	13.765	8.626	13.95
40	15.850	9.771	15.79
45	18.165	11.023	17.81
50	20.727	12.386	20.03

饱和压力的升高而减小；不同的液体在同一压力下汽化潜热值也不同。

由于汽化与凝结是两个相反的过程，因此把 1 千克干蒸汽全部凝结成同温度的液体所放出的热量称为凝结热（或称冷凝热）。同一物质在某一饱和压力下冷凝热与汽化潜热在数值上完全相等。

八、蒸汽过热与液体过冷

蒸汽的温度高于对应饱和压力下的饱和温度时称为过热蒸汽。干蒸汽继续在定压下加热，其温度就会超过相应压力下的饱和温度，这时的蒸汽就叫过热蒸汽。在过热蒸汽的温度与饱和温度之差称为过热度。在制冷机中，压缩机的吸气管、汽缸、排气管里所流过的制冷剂蒸汽都处在过热状态。

相反，液体的温度低于饱和压力所对应的饱和温度时称为过冷液体。如制冷剂在冷凝器中凝结成饱和液体后，继续在定压下放热冷却就处在过冷状态。过冷液体的温度与饱和温度之差称为过冷度。

第三节 能量转换与热力学定律

制冷工程中所碰到的问题是电能、机械能和热能之间的相互转换的问题。

热力学第一定律就是能量守恒与转换定律在热工现象上的应用。即在一个封闭的热力体系内，热能和机械能可以在一定条件下相互转换，转换前后整个热力体系中所含能量总和不变。用通俗语言，则热力学第一定律可表述为，消耗一定的热能，必产生相应数量的机械能；反之，消耗一定的机械能，也必然产生相应数量的热能。热力学第一定律只说明热能与机械能之间的数量关系，即

$$Q = L \quad (1-8)$$

式中， Q ——热量(转换成机械能的热量，或由机械能转变而来的热量)[焦耳]； L ——机械能(由热能转换成的机械能，或转变为热能的机械能)[焦耳]。

式(1-8)只表示功与热之间的数量关系，并不意味着热量可以无条件地全部转换为机械能。

热力学第二定律则指明热能与机械能之间相互转换时在方向、条件等方面的客观规律，指导人们如何科学地实现热能与机械能之间的转换过程。

有许多自然现象是不可逆的，是有方向性的。例如，高处的水可以自动地向低处流动；热量总是自发地从高温物体传向低温物体；机械能可以通过摩擦自发地转变成热能等等。这些过程的进行不需要任何条件和限制，这种过程称为自发过程。反之，低处的水不会自发地向高处流；热量不会自发地从低温物体传向高温物体，这些不能自动进行的过程称为非自发过程。

应当指出，上述这些非自发过程，并非绝对无法实现，只要外界提供某些必要条件就可以实现。例如，从宏观上看，利用水泵就可将水从低处送到高处，利用制冷机就可以实现热量从低温物体向高温物体的传递。因此，要实现这些非自发过程，必须由外界提供某种条件作为补偿(大多以消耗外界能量作为补偿，水泵和制冷机都要消耗外界的能量)。

热力学第二定律有几种说法，其中之一是：热量不可能自发地从低温物体传向高温物体，除非有另外的补偿过程存在。

热力学第一、二定律是人们长期在生产斗争和科学实践中总结出来的自然规律。它们反映了客观实在的真理，并且构成了热力学的基础。

第四节 熵 与 焓

前面提到的压力(p)，温度(t)，比容(v)是工质的三个基本状态参数，此外还有其它几个状态参数。这里只介绍其中两个状态参数：熵与焓。

一、熵的定义

熵比较抽象，不能象压力、温度那样可用仪表去测量，而是由数学演算过程导出的状态参数。假如有1千克气体在压缩机中进行等温压缩，气体就会向外界传出一定的热量，如果把这部分热量 q 除以气体在传热过程中的绝对温度 T ，所得的商就称为气体在这一等温过程中熵的变化，即

$$\Delta s = q/T \quad (1-9)$$

“熵”字的含义是热量除以温度所得的商，当具有相同热量时，温度高的则熵小，温度低的则熵大。它的实质则是反映了单位质量分子的紊乱程度。

根据上述定义，工质从状态 1 变化至状态 2 的热力过程中，每一微段的温度可视为常数 T ，将加进去（或放出来）的微小热量 dq 除以加热（或放热）时的绝对温度 T ，就得到熵的微小增量 ds ，即

$$ds = \frac{dq}{T}$$

或
$$dq = Tds \quad (1-10)$$

式中，绝对温度 T 是发生传热过程的“推动力”，而 ds 则相当于传热的“位移量”。

熵用 s 表示，在国际单位制中，其单位为 [千焦/千克·开]，工程单位制中为 [大卡/公斤·开]。

二、焓的定义

焓的物理意义是指工质在流动时传递的总热量中取决于工质热力状态的那部分能量，即内能与推动功之和。若用 h 表示焓， u 表示内能，则焓的数学表达式为

$$h = u + pv \quad (1-11)$$

焓的单位是 [焦耳/千克]。因为内能 u 、压力 p ，比容 v 均是工质的状态参数，所以焓 h 也是工质的状态参数。焓与熵一样不可能用仪表来测量，也是从数学演算中定义的物理量。

由于引入焓的概念，大大简化了热工设备的热力计算。如制冷机工作过程中，工质在蒸发器、冷凝器、压缩机、节流阀工作过程中的能量变化均可用相应热力过程的焓差来计算。因此，焓在制冷技术中得到极为广泛的应用。

第五节 压 焓 图

制冷技术中最常用的热力图是制冷剂的压焓图。压焓图是以绝对压力为纵坐标（为了缩小图面尺寸并使线条的交点清楚，提高低压区域的精确度，通常以绝对压力的对数值 $\lg p$ 作为纵坐标），以焓值 h 为横坐标构成的平面坐标系。压焓图也称 $\lg p-h$ 图。图上任意一点表示工质某一确定的热力状态。

图 1-3 表示制冷剂的压焓图，说明如下。

一、一个临界点。

图上曲线的最高点 K 为临界点。在此点上工质液态与汽态的差别就消失了。这点的压力、温度、比容分别叫临界压力，临界温度和临界比容。不同的工质其临界参数值不同。工质的临界参数是选用为制冷剂的依据之一。

二、两条饱和线

图中，从 K 点出发向左右两下方引出两条线，左边的粗实线 Ka 为饱和液体线，右边的粗实线 Kb 为饱和蒸汽线。处在饱和液体线 Ka 上任意点的状态均是相应压力的饱和液体；同样，处在饱和蒸汽线 Kb 上的任意点均是饱和蒸汽状态，或称干蒸汽。

三、三个区域

饱和液体线 Ka 和饱和蒸汽线 Kb 将图面分成三个不同的区域：饱和液体线 Ka 左侧的区域为未饱和液体区（即过冷液体区），该区域内制冷剂均处在过冷状态；饱和蒸汽线 Kb 右侧的区域为过热蒸汽区；饱和液体线 Ka 和饱和蒸汽线 Kb 之间的区域为汽、液共存的

湿蒸汽区，该区域内制冷剂处在饱和状态，其压力和温度之间存在着一一对应的关系。

由于湿蒸汽是饱和液体与饱和蒸汽的混合物，因此用湿蒸汽中饱和蒸汽（即干蒸汽）的重量百分数——干度这个概念来描述湿蒸汽的汽、液成分，通常用 x 表示，显然 $(1-x)$ 则表示湿蒸汽中饱和液体的重量百分数。这样，三个区域就可以用干度值来表示，即：

$x = 0$	饱和液体；
$x = 1$	饱和蒸汽；
$0 < x < 1$	湿蒸汽；
$x = 0$ 以左	未饱和液体（过冷液体）；
$x = 1$ 以右	过热蒸汽。

制冷机中，蒸发和冷凝过程主要在湿蒸汽区域内进行，而压缩过程则在过热蒸汽区域内进行。

四、六组等参数线

1. 等压线

图上与横坐标轴相平行的水平细实线均是等压线。查取制冷剂的 $\lg p-h$ 图时应注意：图中纵坐标轴上所标注的压力值是绝对压力 P 值，而不是压力的对数值。

2. 等焓线

图上与横坐标轴垂直的细实线均是等焓线。毋庸讳言，凡处在同一条等焓线上的工质，不论其状态如何焓值均相同。

3. 等温线

图上用点划线表示的为等温线。等温线在不同区域其变化情况不同，要特别注意等温线的形状。在过冷液体区等温线几乎与横坐标轴垂直；在湿蒸汽区却是与横坐标轴平行的水平线；在过热蒸汽区为向右下方急剧弯曲的倾斜线。

在湿蒸汽区中，等温线与等压线重合，温度和压力不再是独立的状态参数，存在着对应关系，这一点应引起注意。

4. 等熵线

图上从左向右向上弯曲的细实线为等熵线。等熵线在过热蒸汽区用得较多（原因是制冷压缩机的压缩过程即沿着等熵线进行），因此，制冷剂的 $\lg p-h$ 图上等熵线均从饱和蒸汽线作为起始点。

5. 等容线

图上从左向右稍向上弯曲的虚线为等比容线，与等熵线相比较，等比容线比等熵线平坦些。制冷机中常利用等比容线查取制冷压缩机吸入点的比容值。

6. 等干度线

等干度线只存在于湿蒸汽区域内，且以临界点 K 出发把湿蒸汽区域各状态下干度相同的点连接起来，就成为等干度线。从饱和液体线 ($x=0$) 至饱和蒸汽线 ($x=1$) 其干度 (x) 值逐渐增大。

上述六个状态参数 (p, t, v, h, s, x) 中只要知道其中任意两个状态参数值就可以完全确定制冷剂所处的热力状态，然后

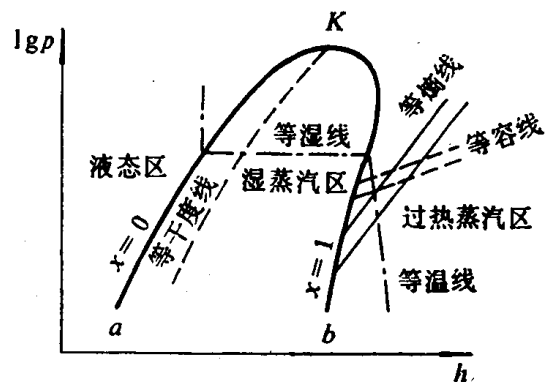


图 1-3 制冷剂的压焓图

根据压焓图就可以确定状态点的位置，查取其余四个状态参数。

由于制冷装置中，制冷剂的 actual 压力并不太高， $\lg p-h$ 图靠近临界点的高压部分和湿蒸汽区域的中间部分在热力计算中也很少用到，因此，为了缩小图面，突出实用部分，往往将高压部分和湿蒸汽区域的中间部分截去，使图面更加清楚，便于查用。

第六节 湿空气的性质及焓湿图

一、湿空气的性质

自然界中的空气都是干空气和水蒸汽的混合物，故常称为湿空气。在空调设备的设计及使用过程中，往往要计算湿空气的某些状态参数以及分析湿空气在空调设备中的状态变化过程。此外，在利用空气为载冷剂的其它制冷设备中，也会碰到有关湿空气的问题。有鉴于此，首先了解有关湿空气的性质。

1. 干球温度 t

干球温度即是环境温度，可用一般的温度计测得，在工程上一般采用摄氏温标，以 t 表示，单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。

2. 水蒸汽分压力

所谓气体分压力，就是指混合气体中各组成气体在具有与混合气体相同的温度时单独占有混合气体容积时所产生的压力。道尔顿定律指出：混合气体总压力等于各组成气体分压力之和。大气既然是由于干空气和水蒸汽组成，那么大气压力也就必然是水蒸汽分压力和干空气分压力之和。

3. 含湿量 d

湿空气中每千克干空气所混合的水蒸汽量称为含湿量 d ，湿空气的表示除含湿量外，还可用绝对湿度即每立方米湿空气中所含有的水蒸汽量（千克）来表示，但绝对湿度使用起来并不方便，因为在水分蒸发和凝结时，湿空气中的水蒸汽质量是变化的，而且湿空气的容积还随温度而变。

4. 相对湿度 φ

相对湿度 φ 是表征空气接近饱和的程度，即空气中水蒸汽分压力和同温度下饱和水蒸汽分压力之比，通常以百分比来表示。 φ 值小，说明空气饱和程度小，吸收水汽的能力强； φ 值大，则说明空气饱和程度大，吸收水汽的能力弱。当 φ 为 100% 时，说明该湿空气中所含水蒸汽已饱和；反之， φ 为零，指的是干空气。相对湿度 φ 和前面所讲的含湿量 d 都是表示空气湿度的参数，但意义却不同。 φ 能表示空气中水蒸汽的饱和程度，但不能表示水蒸汽的含量；而 d 恰与之相反。

5. 湿空气的焓

一千克干空气的焓和 d 千克水蒸汽的焓两者的总和称为 $(1+d)$ 千克湿空气的焓，常用 h 或 i 表示。

6. 湿球温度 t_s 和露点温度 t_l

由于空气中所含的水蒸汽很少达到饱和程度，因此将水银温度计的感温包用润湿的纱布包扎后，由于水的蒸发，温度计上指示的温度将低于干球温度，这一温度称为湿球温度。空气越干燥，则湿球温度与干球温度的差值越大。露点温度是指湿空气在冷却降温时，开始结露的温度，它在数值上等于湿空气中水蒸汽分压力所对应的饱和温度。

二、湿空气的焓湿图及其应用

在确定湿空气状态参数及其在空调过程中参数变化时，如果利用公式来计算是相当复杂的，因此人们都利用湿空气的焓湿图来确定湿空气的状态参数及变化过程。图 1-4 为湿空气焓湿图的示意图。

它的纵坐标是湿空气的焓值 i (或 h)，横坐标是含湿量 d ，为了使线图不挤在一起，便于查阅，两者夹角取 135° 。 $i-d$ 图是按某一大气压力值绘制的，不同的大气压力有相应的 $i-d$ 图，但在一般地区均可用大气压力为 1013.25 毫巴 (mbar)，即 760 毫米汞柱 (mm Hg) 的 $i-d$ 图来进行计算。附图 6 为湿空气的 $i-d$ 图。在 $i-d$ 图上都绘有一系列等 i 线、等 d 线、等 φ 线和等 t 线。可以证明，等湿球温度过程近似于等焓过程，因而等湿球温度线可用等 i 线来近似表示。以 $\varphi = 100\%$ 的相对湿度线为界，以下为过饱和区，由于过饱和状态是不稳定的，通常有凝结现象，所以又称为有雾区； $\varphi = 100\%$ 的曲线以上为湿空气区，又称为未饱和空气区。在湿空气区，水蒸汽处于过热状态。下面是 $i-d$ 图的应用举例。

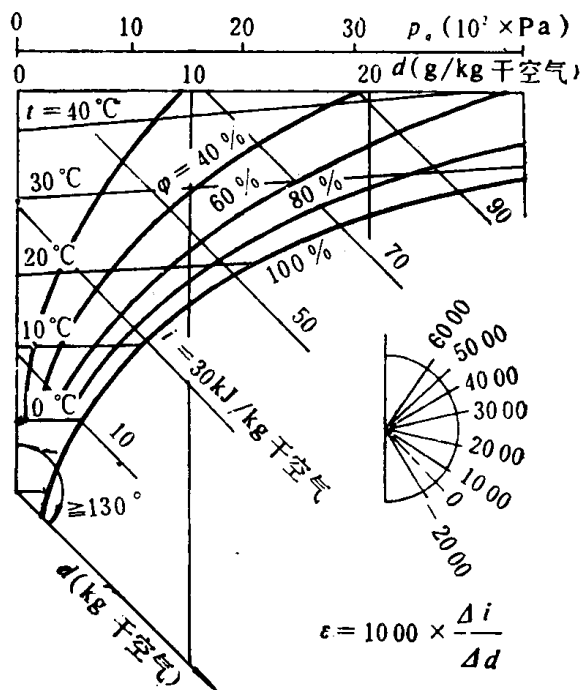


图 1-4 $i-d$ 图

[例 1-1] 已知某地大气压力 $B = 1013.25$ [毫巴]，温度 $t = 20^\circ\text{C}$ ，相对湿度 $\varphi = 60\%$ ，求空气的湿球温度和露点温度。

[解] 在 $B = 1013.25$ 毫巴的 $i-d$ 上，按 $t = 20^\circ\text{C}$ ， $\varphi = 60\%$ 确定空气状态点 A (图 1-5)，过 A 点引等焓线 ($i = 42.54$ 千焦/千克干空气) 与 $\varphi = 100\%$ 线相交得 B 点，它的温度即为空气状态点 A 的湿球温度， $t_s = 15.2^\circ\text{C}$ 。

过 A 点引等 d 线 ($d = 0.0088$ 千克/千克干空气)，与 $\varphi = 100\%$ 线相交得露点 C ，露点温度 $t_l = 12.0^\circ\text{C}$ 。

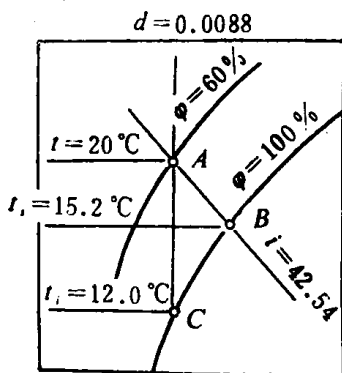


图 1-5 由空气状态确定湿球温度和露点温度

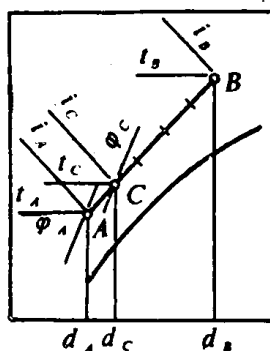


图 1-6

[例 1-2] 某空调系统采用新风与室内循环风进行混合处理，然后送至室内。已知大气压力为 1013.25 毫巴，回风量 $G_A = 2000$ 千克/小时，状态为 $t_A = 20^\circ\text{C}$ ， $\varphi_A = 60\%$ ；新风量 $G_B = 500$ 千克/小时，状态为 $t_B = 35^\circ\text{C}$ ， $\varphi_B = 80\%$ ，求混合空气状态。

[解] (1) 在大气压力为 1013.25 毫巴的 $i-d$ 图上找到状态点 A 、 B ，并以直线相连 (图 1-6)。

(2) 设混合点为 C ，将线段 \overline{AB} 分成两段，两段长度之比和参与混合的两种空气质量成反比，混合点靠近质量大的空气状态一端，即

$$\frac{\overline{BC}}{\overline{CA}} = \frac{G_A}{G_B} = \frac{2000}{500} = \frac{4}{1}$$

(3) 将线段 \overline{AB} 分为五等分，则 C 点位于靠近 A 点的一等分处。查图得 $t_c = 23.1^\circ\text{C}$ ， $\varphi_c = 73\%$ ， $i_c = 56$ 千焦/千克干空气， $d_c = 12.8$ 克/千克干空气。

利用 $i-d$ 图不仅能确定空气的状态及状态参数，而更重要的是，还能显示空气状态的变化过程。其变化过程的方向和特征可用热湿比 ε 表示，即

$$\varepsilon = \frac{i_B - i_A}{d_B - d_A} = \frac{\Delta i}{\Delta d}$$

亦可以表示为

$$\varepsilon = \frac{\Delta i}{\Delta d} = \frac{G \Delta i}{G \Delta d} = \frac{Q}{W}$$

式中， G ——空气量； Q ——吸放热量； W ——含湿量。

在 $i-d$ 图上热湿比线为辅助线。空气在处理过程中如果热、湿变化是同时进行，那么，在 $i-d$ 图上由状态 A 到状态 B 的连线，就应代表空气的状态变化过程，如图 1-7 所示。

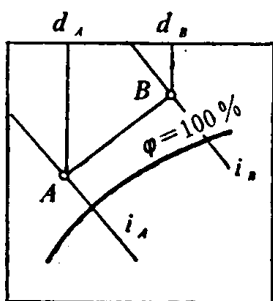


图 1-7 空气状态变化在 $i-d$ 图上表示

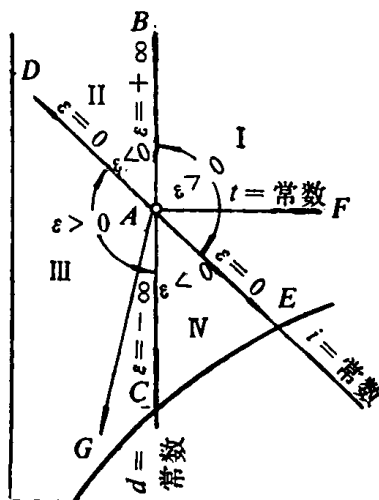


图 1-8 几种典型的空气状态变化过程

由图 1-7 和上式可知， ε 就是直线 AB 的斜率，它反映了过程线的倾斜角度，故又名“角系数”。斜率与起始位置无关，因此，起始状态不同的空气只要斜率相同，其变化过程线必定互相平行。图 1-8 绘制了空气状态变化的几种典型过程，现分述如下：

1. 干式加热过程

空气调节中常用电加热器来处理空气。当空气通过加热器时获得了热量，提高了温度，但含湿量并没有变化，因此空气状态呈等湿增焓升温变化，过程线为 $A-B$ 。由于在状态变化过程中 $d_A = d_B$ 、 $i_B > i_A$ ，故热湿比 ε 为

$$\varepsilon = \frac{\Delta i}{\Delta d} = \frac{i_B - i_A}{d_B - d_A} = \frac{i_B - i_A}{0} = +\infty$$

2. 干式冷却过程

与上述过程相反，空气在含湿量不变的情况下冷却，其焓值必相应减少，过程变化为等湿减焓降温，如图中 $A-C$ 。由于 $d_A = d_C$ 、 $i_C < i_A$ ，故

$$\varepsilon = \frac{i_C - i_A}{d_C - d_A} = \frac{i_C - i_A}{0} = -\infty$$

当空气通过表面式冷却器时，如冷却器的表面温度低于空气温度但高于空气的露点温度，则空气中的水蒸汽不会凝结，此时空气被等湿冷却。

3. 等焓减湿过程

图中 A—D 表示这一处理过程，其热湿比 $e=0$ ，如用固体硅胶除湿，使空气温度升高，含湿量减少，但焓值基本不变。

4. 等焓加湿过程

过程线为图中 A—E。由于状态变化前后焓值相等，因而热湿比 $e=0$ 。

等 i 线及等 d 线将 $t-d$ 图划分为四个区间，空气状态变化过程线在第 I 区间为增焓增湿过程；在第 II 区间为增焓减湿过程；在第 III 区间为减焓减湿过程；在第 IV 区间为减焓增湿过程。

第七节 传热学基础

物体之间存在温差，就发生热量的传递，简称为传热。传热是一个很复杂的物理现象。制冷过程与热量传递密切相关。

一、传热的基本方式

热量传递的基本方式有三种，即导热、对流和辐射。

1. 导热

导热是在物体本身各部分之间，也可以是在直接接触的物体之间发生热量传递的现象。固体、液体或气体之间都可进行导热。

实验证明，通过一个单层平壁的导热，如图 1-9 所示，传递的热量 Q 与该平壁的导热面积 F ，平壁两侧表面温度差 Δt 成正比，与平壁的厚度 δ 成反比。如果引入一个系数 λ ，则通过单层平壁所传导的热量

$$Q = \lambda F \frac{t_{w1} - t_{w2}}{\delta} = \lambda F \frac{\Delta t}{\delta} \quad [\text{瓦}] \quad (1-12)$$

式(1-12)还可改写成其它形式。如果单位面积的热流量（或称单位面积热负荷）为 q ，则

$$q = \frac{Q}{F} = \frac{\lambda}{\delta} \Delta t \quad [\text{瓦/米}^2] \quad (1-13)$$

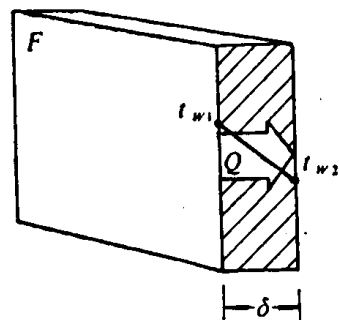


图 1-9 通过平壁的导热

式中， F ——平壁表面积， $[\text{米}^2]$ ； δ ——壁厚， $[\text{米}]$ ； Δt ——平壁两侧表面温度差， $\Delta t = t_{w1} - t_{w2}$ ， $[\text{°C}]$ ； λ ——系数，称为材料的导热系数， $[\text{瓦/米} \cdot \text{度}]$ 。

导热系数 λ 反映了材料导热能力的大小。各种物质的导热系数一般由实验测定。导热系数的物理意义是指当壁厚 1 米、两侧表面温度差 1°C 时，每平方米面积上每秒钟所能传导的热量。 λ 值大，表示该材料导热性能好。金属的 λ 值都很大，液体的 λ 值次之、气体的 λ 值最小。

2. 对流

对流是依靠流体的运动来交换热量的过程。而事实上，在工程应用中，往往涉及到流体和与其相接触的固体壁之间的热量交换，在这种情况下，热量的传递过程不仅有对流，