



全国“星火计划”丛书

中国制冷学会科普工作委员会 编

宇航出版社

制冷系统

原理、运行、维修

内 容 简 介

本书较详尽地介绍了制冷系统的基本原理；主要制冷压缩机和辅助设备的结构性能和热力计算；实现制冷系统正常运行的要求；以及制冷系统进行维修的基本技能。全书理论阐述和操作实践经验并茂，并对冷库制冷系统的节能提出了实施意见。

全书共分四篇。第一篇为制冷系统的基本原理，第二篇为制冷压缩机和设备，第三篇为制冷系统的运行，第四篇为制冷系统的维护和检修，并附有常用制冷剂 R12、R22、R717 和 R502 的性能表和曲线图。

本书既是冷库、空调行业的工人业务培训教材，又可供制冷专科和技校的师生参考，对制冷与空调行业的技术人员、管理人员亦有参考价值。

制 冷 系 统

原理、运行、维修

中国制冷学会科普工作委员会 编

责任编辑：郑济民

☆

宇航出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

通县宏飞印刷厂印刷

☆

开本：787×1092 1/16

印张：22.5

字数：560 千字

1988年6月第1版第1次印刷 印数：1—15000册

ISBN 7-80034-073-2/FB·024 定价：45.40 元

前 言

近年来,冷藏库和空调制冷工程有了蓬勃的发展。为适应当前从事制冷机器设备运行、管理和维修工作的需要,各省、市制冷学会正在举办各种类型的制冷技工培训班,提高他们的理论水平和实际操作的技能,以达到制冷系统安全运行、提高制冷效率和节约能源的目的。但当前缺乏适用的教材。为此,中国制冷学会科普工作委员会组织了安徽、河南、山东和北京、上海三省二市制冷学会的有关工程师(讲师)和技师,编著了《制冷系统——原理、运行、维修》一书,来满足制冷技工培训班和从事制冷系统管理人员自学的需要。

参加本书编写工作的有:

第一篇: 张伟民和李功振同志,由张伟民同志负责校审;

第二篇: 刘元璋、杭乃放和张伟民同志,由张伟民同志负责校审;

第三篇: 霍廷祥、陈嘉庚和曹德胜同志,由曹德胜同志负责校审;

第四篇: 张伯福、刘成德和徐馥同志,由张伯福同志负责校审。

最后由曹德胜同志负责总纂和校审。

本书在编写过程中得到了饶辅民、彦启森、郭予信、吴亚平、胡大德和郑济民等同志的指导,以及安徽省、河南省、山东省和北京市、上海市制冷学会的大力协助,在此表示衷心感谢。

由于业务水平所限,书中缺点、错误在所难免,希望读者批评指正。

中国制冷学会科普工作委员会

1987年

目 录

第一篇 制冷原理.....	1
第一章 制冷基础知识.....	1
第一节 常用术语.....	1
第二节 热力学基本概念.....	11
第三节 传热学基本概念.....	13
第四节 流体流动基本概念.....	18
第五节 空调基本概念.....	21
第六节 食品冷冻基本概念.....	24
第二章 制冷剂、载冷剂和润滑油.....	28
第一节 制冷剂的种类.....	28
第二节 常用制冷剂及其性质.....	29
第三节 对制冷剂的要求.....	31
第四节 载冷剂.....	31
第五节 润滑油.....	34
第三章 制冷循环.....	36
第一节 单级蒸汽压缩式制冷循环.....	36
第二节 单级蒸汽压缩式制冷循环的热力计算.....	47
第三节 两级蒸汽压缩式制冷循环.....	53
第四节 复叠式制冷循环.....	61
第二篇 制冷机器设备和制冷系统.....	65
第一章 制冷压缩机.....	65
第一节 制冷压缩机的种类及工作原理.....	65
第二节 活塞式制冷压缩机的总体结构及主要零部件.....	77
第三节 活塞式制冷压缩机的制冷量和轴功率计算.....	92
第四节 螺杆式制冷压缩机的结构、工作原理及特点.....	99
第二章 制冷设备.....	110
第一节 冷凝器.....	110
第二节 蒸发器.....	119
第三节 中间冷却器.....	140
第四节 油分离器.....	144
第五节 集油器.....	147
第六节 氨液分离器.....	148
第七节 空气分离器.....	150
第八节 贮存容器.....	151
第九节 氨泵.....	159
第十节 水冷却装置和水泵.....	163
第十一节 回热式热交换器.....	163

第三章 阀和自控元件	168
第一节 节流设备和各类阀门	168
第二节 温度计、压力表	179
第三节 压力继电器	180
第四节 压差继电器	183
第五节 温度继电器	184
第六节 液位控制器	186
第四章 制冷系统	189
第一节 制冷系统原理图	189
第二节 供液方式	190
第三节 融霜方式	192
第四节 制冷系统自动化回路	193
第五节 氟利昂制冷系统的管路布置	199
第六节 管径选择	201
第七节 制冷系统实例	202
第三篇 制冷系统的运行	207
第一章 制冷系统的操作与调整	207
第一节 活塞式制冷压缩机的操作	207
第二节 螺杆式制冷压缩机的操作	212
第三节 制冷系统与设备的操作调整	214
第四节 制冷系统放油、放空气、融霜	216
第二章 制冷系统故障分析和排除	220
第一节 活塞式制冷压缩机常见故障分析和排除	220
第二节 螺杆式制冷压缩机常见故障分析和排除	223
第三节 制冷系统故障分析和排除	225
第三章 制冷系统的安全技术	228
第一节 安全技术对制冷系统中的意义	228
第二节 安全装置	228
第三节 安全操作	234
第四节 安全规定	237
第五节 制冷剂钢瓶的使用和管理	239
第六节 人身安全及紧急救护	241
第四章 冷库制冷系统的节能	246
第一节 节能的可能性	246
第二节 节能的措施	246
第四篇 制冷系统的维护与检修	247
第一章 零件损伤原因及磨损规律	249
第一节 零件损伤的形式	250
第二节 零件磨损的原因	251
第三节 零件磨损的规律	252
第二章 机器装卸基本工艺	255
第一节 机器装卸的重要性及方法	255
第二节 过盈配合的装配与拆卸	255

第三节 固定部件的装配与拆卸	257
第三章 制冷压缩机的检修	259
第一节 检修的目的和准备工作	259
第二节 氨活塞式制冷压缩机的拆卸和修理	260
第三节 螺杆式制冷压缩机的拆卸和修理	287
第四节 氟利昂制冷压缩机的拆卸与修理	293
第四章 制冷设备的维护与修理	297
第一节 制冷设备大修前制冷剂的排放	297
第二节 冷凝器的维护与修理	298
第三节 蒸发器的维护与修理	301
第四节 阀的维护与修理	303
第五节 泵的维护与修理	309
第六节 冷却水塔的维护与修理	310
第七节 风机的维护与修理	311
第五章 制冷设备检修后的检查	313
第一节 氨制冷设备的检查	313
第二节 氟利昂制冷设备的检查	315
附表一 国际单位制计量单位与换算表	320
附表二 常用制冷剂热力性质表	325
(一) R717 饱和蒸汽表	325
(二) R502 饱和蒸汽表	333
(三) R22 饱和蒸汽表	337
(四) R12 饱和蒸汽表	345
附图一 R717 $\lg p-h$ 图	
附图二 R12 $\lg p-h$ 图	
附图三 R22 $\lg p-h$ 图	
附图四 R502 $\lg p-h$ 图	

第一篇 制冷原理

第一章 制冷基础知识

制冷是指用机械方法，从一个有限的空间内取出热量，使该处的温度降低到所要求的程度。这个过程是靠热传递来完成的。在制冷原理学习开始之前，对制冷过程中的一些常用的名词术语介绍如下。

第一节 常用术语

一、物质

具有一定质量及占有空间的任何物体称为物质。物质有三种形态：固态、液态和气态。它能以其中任何一种形态存在。物质可分成最小的点，这些点仍保持物质原有的特性，这些点称为分子。

在固体中分子紧密地排列在一起，相互间不能自由分开，所以固体有一定的形状和体积。在液体中分子仍紧密地排列在一起，但相互可以自由移动，所以液体有一定体积，其形状由所盛的容器决定。气体中分子可以自由移动，分子间距离较大，它的体积和形状由所盛容器决定。

譬如水是一种物质，它的分子是由二个氢原子和一个氧原子组成。冰是水的固态，它有一定的形状和体积。水是它的液体，它有一定的体积，但形状随容器而定。水蒸气则是水的气态，它的体积和形状由所盛容器决定。水的这三种形态是随温度而变。温度降到冰点，水就变成冰，温度升到沸点，水就呈蒸汽。

二、温度

温度被用来表示物质冷与热的程度。物质的温度只是表示热的程度而不是热的量。如 1 千克水和 100 千克水，若两者温度相同，后者的热量是前者的 100 倍。

温度高低的程度可用温度计来度量。温度计是利用某些物质，在受热或冷却时，体积产生膨胀或收缩的特性制成的。如玻璃温度计，管内的液体受热后膨胀，液面升高，冷却收缩后，液面降低。液面的高低表示温度高低的程度。在管表面刻上标记就能量出温度值。表示这种温度值有几种标准。

（一）摄氏温标

在标准大气压下，把水的冰点作为 0 度，沸点作为 100 度，在 0 度与 100 度之间均衡的刻

成 100 格,每格作为 1 度,以符号 $^{\circ}\text{C}$ 表示。

(二) 华氏温标

在标准大气压下,把水的冰点定为 32 度,而沸点定为 212 度,二者之间均衡的分成 180 格,每格 1 度,以符号 $^{\circ}\text{F}$ 表示。

(三) 开氏温标又称绝对温标

它以摄氏温标为基础,把水的冰点定为 273.16 度,水的沸点定为 373.16 度,理论上把物质中分子全部停止运动之点作为 0 度,以符号 K 表示。

常用的温标是摄氏、华氏、开氏。它们之间可以换算。

华氏温标换算成摄氏温标

$$^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9} (^{\circ}\text{F} - 32)$$

摄氏换算成华氏

$$^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} ^{\circ}\text{C} + 32$$

开氏与摄氏的关系

$$T = t + 273.16$$

式中 T ——开氏温标, K;

t ——摄氏温标, $^{\circ}\text{C}$ 。

图 1-1-1 为上述温标的比较。

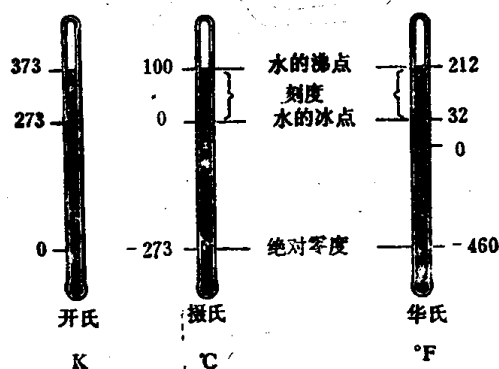


图 1-1-1 温标比较

三、热量

大家知道,物体温度的高低表示了组成物体的物质的分子热运动剧烈的程度。温度的高低也表示物体所具有能量的高低,这种能量称为热能。当温度不同的两个物体相接触时,两者的温度逐步趋于一致,发生了热能从温度较高的物体向温度较低的物体转移,此时物体所放出或吸收的能量称为热量。

常用的热量单位有:

(一) 卡

在标准大气压下,将 1g 水加热或冷却,其温度升高或降低 1°C 时,所加进或除去的热量称为 1 卡,以符号 cal 表示。因卡的单位太小,工程上往往采用其 1000 倍的千卡或大卡来表示,其符号为 kcal。

(二) 英热单位

在标准大气压下,将 1lb (磅) ($1\text{lb} = 0.454 \text{ kg}$) 水加热或冷却,其温度升高或降低华氏温度 1°F 时,所加进或除去的热量称为一个英热单位,其符号为 Btu。

(三) 焦耳

在国际单位制中,取热量单位与功的单位一致以焦耳表示。焦耳相当于用 1N (牛顿) 的力,其作用点在力的方向上移动 1m (米) 所做的功。因此,在国际单位制中,焦耳是功和能的单位。采用这种单位使计算简化。焦耳的符号为 J。

我国法定的热量单位是焦耳。
焦耳与卡之间的换算为

$$1\text{kJ (千焦耳)}=0.239\text{ kcal (千卡)}$$
$$1\text{kcal (千卡)}=4.19\text{kJ (千焦耳)}$$

其它的换算是

$$1\text{kcal (千卡)}=3.969\text{ Btu (英热单位)}$$
$$1\text{Btu (英热单位)}=252\text{ cal (卡)}$$
$$1\text{kcal (千卡)}=427\text{ kg}\cdot\text{m (千克}\cdot\text{米)}$$
$$1\text{kw (千瓦)}=860\text{ kcal/h (千卡/小时)}$$
$$1\text{ 美国冷吨}=3024\text{ kcal/h (千卡/小时)}$$
$$1\text{ 日本冷吨}=3320\text{ kcal/h (千卡/小时)}$$

四、比热

任何物质当加进热量,它的温度会升高.但相同质量的不同物质,升高同样温度时,其所加进的热量是不一样的.为相互比较,把 1kg 水温度升高 1℃ 所需的热量定为 4.19kJ. 以此作为标准,其他物质所需的热量与它的比值,称为比热. 如 1kg 水温度升高 1℃ 需 4.19kJ, 则比热值为 4.19kJ/(kg·℃),而 1kg 铜温度升高 1℃ 只需 0.39kJ, 则铜的比热为 0.39 kJ/(kg·℃). 不同的材料有各自的比热值,表 1-1-1 为几种材料的比热值.

表 1-1-1 几种材料的比热值 kJ/(kg·K)

物质名称	数 值	物质名称	数 值
水	4.190	牛肉	3.140
冰	2.095	氨(液体)	4.609
玻璃	0.754	氨(汽体)	2.179
铜	0.390	空气(干)	1.006
钢	0.461		

知道了材料的比热值,对它降温就能计算出需要除去的热量.例如要将 5kg70℃ 的水冷却到 15℃, 则需除去的热量为

$$Q = mc\Delta t = 5 \times 4.19 \times (70 - 15) = 1152.25\text{kJ}$$

式中 m ——水的质量, kg;
 c ——水的比热, kJ/(kg·K);
 Δt ——温度差值, K.

五、显热

对固态、液态或气态的物质加热,只要它的形态不变,则热量加进去后,物质的温度就升高. 加进热量的多少在温度上能显示出来,即不改变物质的形态而引起其温度变化的热量称为显热. 如对液态的水加热,只要它还保持液态,它的温度就升高. 因此,显热只影响温度的变化而不引起物质的形态的变化.

六、潜热

对液态的水加热,水的温度升高。当达到沸点后,虽然热量不断的加入,但水的温度不升高,一直停留在沸点,加进的热量仅使水变成水蒸气,即由液态变为气态。这种不改变物质的温度而引起物态变化(又称相变)的热量称为潜热。

③ 物态的变化可由固态变为液态,液态变为气态,或者反过来进行。物质由固态变为液态称为融化,由液态变为气态称为汽化,反之称为凝固和液化。物态的变化亦可由固态直接变为气态,而不经过程,物质这种状态的变化称为升华。

(一) 融解潜热

它是指 1kg 物质在不升高温度下,从固态变为液态所需的热量。如 1kg 0℃ 的冰转变成 0℃ 的水需 335.2kJ 的热量,因此,水的融解潜热为 335.2kJ/kg。其逆过程称凝固潜热,二者热量相同。

(二) 汽化潜热

它是指 1kg 物质在不升高温度的情况下,从液态变为气态所需的热量。上述融解潜热仅使物质的分子结构由固态变为液态,而汽化潜热是使分子间的距离拉得更大,因此需要的热量

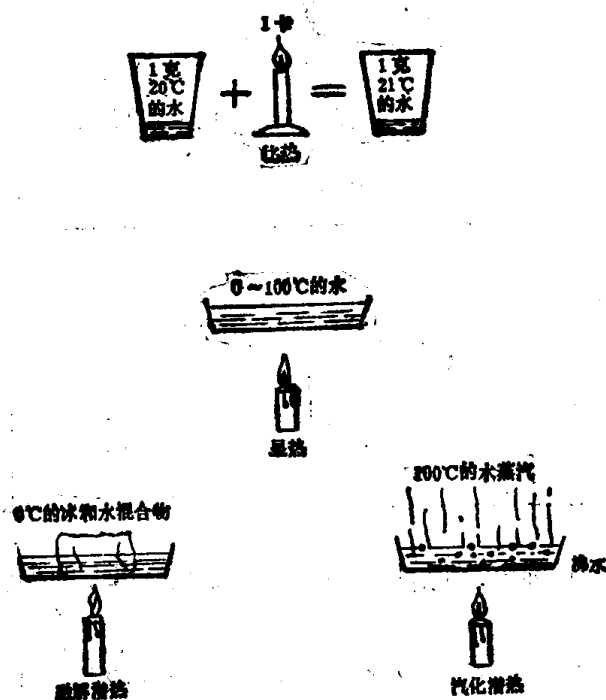


图 1-1-2 比热、显热、融解潜热和汽化潜热的概念

表 1-1-2 几种制冷剂的汽化潜热

制冷剂名称	沸点温度 [℃]	汽化潜热 [kJ/kg]
R12 (氟利昂 12)	-29.8	165.18
R22 (氟利昂 22)	-40.8	234.00
R502(氟利昂 502)	-45.6	177.80
R717 (氨)	-33.4	1366.70

就大得多。如冰的融解潜热为 335.2kJ/kg，而水的汽化潜热为 2257kJ/kg，二者相差 6 倍多。液化是汽化的逆过程，二者的热量是相等的。表 1-1-2 列举了常用几种制冷剂的汽化潜热。

从上述汽化潜热比较可看出，氨的汽化潜热最大，所以在同样制冷量下，它所需的流量就最小。

图 1-1-2 是比热、显热和潜热的示意图。

七、压力

气体由分子组成。亿万分子在无规则的运动中，频繁撞击容器内壁，在内壁单位面积上垂直产生的力称为压力。在工程中测量气体压力的常用单位是：kgf/cm²（公斤力/厘米²）或 mmHg（毫米汞柱），我国的法定单位是 Pa（帕斯卡）。

压力的计量标准是这样作出的，空气由分子组成，本身有压力，海拔越高，空气越稀薄，它的压力就越小，反之越大。在纬度 45° 的海面上，大气的常年平均压力就称作标准大气压，其值为 1.033kgf/cm²（公斤力/厘米²），用符号 atm 表示。

制冷系统中的压力可用压力表或真空表测得，此时压力表所表示的压力是指容器内气体压力与当时，当地的外界大气压力 B 之间的差值，称为表压力。而容器内气体实际压力，则称为绝对压力，也就是：绝对压力 = 表压力 + 大气压力。

用数学式表示，即

或
$$p_{绝} = p_{表} + B$$
$$p_{表} = p_{绝} - B$$

真空度的表示，即

或
$$p_{绝} = B - p_{真}$$
$$p_{真} = B - p_{绝}$$

从上式中看出， $p_{表}$ 和 $p_{真}$ 的大小都是相对值，它们都受外界大气压 B 变化的影响。只有绝对压力才能表明工质状态的热力性质，所以在制冷系统计算中需用绝对压力。在工程计算中为方便，把 1kgf/cm² 称为 1 个工程大气压，用符号表示为 1at。在计算时，当容器内工质的压力较高时，允许把大气压力 B 值定为 1at，由此而引起的计算误差是不大的。但在计算容器中的压力低于 1at 时，则会引起较大的误差。

国际单位制中压力单位与我国的法定压力单位一样是 Pa，简称帕。因 Pa 的值太小，故以 10⁵Pa 为 1bar（巴）作为 Pa 的特殊表达式。几种压力单位的换算见表 1-1-3。

表 1-1-3 压力比较表

bar	kgf/cm²	lbf/in²	atm	mmHg (0°C)	mH₂O(-15°C)
1	1.0197	14.50	0.9869	750	10.21
0.98	1	14.223	0.9678	735.5	10.01
1.0133	1.0333	14.70	1	760	10.34

压力和沸点关系极大，降低压力能使液体的沸点降低，增加压力则使沸点升高。因此，对

每一个作用于液体的压力就有一个对应的沸点。例如 $1.0133 \times 10^5 \text{Pa}$ 下，水在 100°C 时沸腾；若压力升高到 $2.41 \times 10^5 \text{Pa}$ ，水的沸点为 138°C ；若压力降低到 $0.43 \times 10^5 \text{Pa}$ ，水的沸点为 84.5°C 。在制冷系统中，用控制蒸发压力来达到控制蒸发温度。

沸腾和蒸发是有区别的，当汽化在液体表面发生称蒸发，汽化在液体内部及表面同时发生则称沸腾。制冷上习惯把沸腾称作蒸发，故蒸发温度实际是沸腾温度。图 1-1-3 为蒸发、沸腾、汽化、冷凝的示意图。

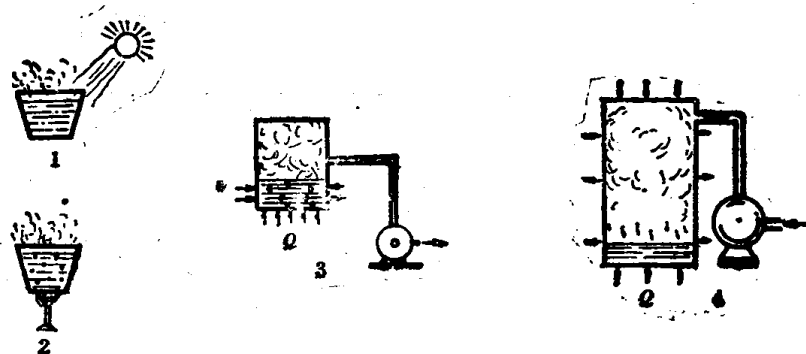


图 1-1-3 蒸发、沸腾、沸腾和冷凝与压力的关系

1—蒸发； 2—沸腾； 3—沸腾与压力的关系； 4—冷凝与压力的关系

八、比容和密度

每千克制冷剂所占有的容积称为比容。用符号 v 表示，常用单位是 m^3/kg 。

比容这个数值，在选用蒸发器和贮存器的大小以及计算压缩机的排汽量时，都要用到它，因此是个基本参数。

比容值与压力、温度有关。压力一定时，温度不同比容不同。温度一定时，压力不同比容亦不同。

比容的倒数即为单位容积中所容纳工质的质量称为密度，用符号 ρ 表示，单位为 kg/m^3 。

比容和密度互为倒数，所以对气体在任何状态下，比容和密度的乘积总是等于 1。即

$$v\rho = 1$$

九、导热系数，亦称热导率

导热系数是表示一种材料传导热量能力的一个物理量。如二块同样厚的材料，一块是铜块，一块是软木块，把它们放在比本身温度高的环境中，铜块立刻感觉到温度升高，而软木块则在短时间内感受不到。这说明二种材料对热量传导的能力不同，把这种材料对热量的不同传导能力以一个数字表示就称导热系数，其数值等于：当材料层的厚度为 1m ，二边温差为 1°C ，在 1h 内通过 1m^2 表面积所传导的热量，以符号 λ 表示，单位是 $\text{kcal}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$ ，国家法定单位是 $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，或用 $\text{J}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot\text{K})$ 。它们之间的换算关系是

$$1\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K}) = 0.860\text{kcal}/(\text{m}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$$

不同材料有不同的导热系数，它与材料的成分、密度、分子结构等因素有关。

同一种材料，影响其导热系数的主要因素是密度和湿度。密度大则导热系数大，湿度大则导热系数亦大。

十、放热系数

当冻结一块食品时,如在表面吹风则它的冻结速度比不吹风时快。表示这种不同物质(如食品是固体,空气是流体)之间在不同状态下换热能力的物理量称为放热系数。其数值等于每1h,每 1m^2 面积上,当流体和固体壁之间的温度差为 1°C 时所传递的热量。以符号 α 表示,其单位为 $\text{kcal}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$,国际单位制是 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 或 $\text{J}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$ 。二者之间的换算关系是

$$1\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}) = 0.860\text{kcal}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$$

十一、传热系数

热量从高温侧流体透过平壁转移到低温侧流体,这种热量传递的能力除与二侧温差、传热面积的大小有关外,还与平壁的导热系数、平壁的厚度及壁面两侧的放热系数有关。通过平壁的传热过程见图1-1-4。

把所有因素列成一个方程,即

$$Q = KF\Delta t \quad [\text{kJ}/\text{h}] \quad (1-1-1)$$

式中 Q ——传递的热量, kJ/h ;

F ——平壁的表面积, m^2 ;

Δt ——温差, $\Delta t = t_1 - t_2$, $^\circ\text{C}$;

K ——传热系数, $\text{kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \sum \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (1-1-2)$$

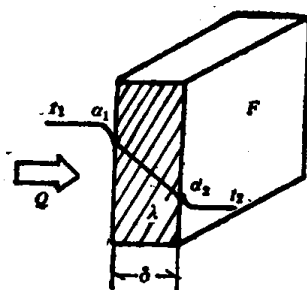


图 1-1-4 通过平壁的传热

式中 K 为传热系数,它数值上等于当两侧温差 1°C 时,1h通过 1m^2 传热面积,从一侧热流体传到另一侧冷流体所传递的热量。单位是 $\text{kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{C})$ 或 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 。

十二、水汽分压力

任何气体在分子运动时,都具有一定压力。湿空气由干空气和水汽组成,它们都具有各自的压力,称之为分压力,二者之和是空气的总压力。用下式表示

$$p = p_g + p_c \quad (1-1-3)$$

式中 p ——湿空气的压力;

p_g ——干空气的压力;

p_c ——水汽的分压力。

水汽压力的大小反映了空气中含水汽量的多少,它是空气湿度的一个指标。水汽的量大压力称为对应温度下水汽饱和分压力 p_{cB} 。空气的温度越高,则空气中水汽的饱和分压力越大,若空气中的水汽达到饱和分压力,则此时空气不能再吸收水分称为饱和空气。

十三、湿度

空气的潮湿程度以湿度表示。潮湿度的大小随空气中水汽含量而定。按用途不同,湿度有三种表示方法:

(一) 绝对湿度 (Z)

每立方米湿空气中含有水汽的质量称为空气的绝对湿度。设湿空气的体积为 $V\text{m}^3$ ，其中干空气的质量为 $G_g\text{kg}$ ，水汽的质量为 $G_c\text{kg}$ ，则

$$\text{绝对湿度 } Z = \frac{G_c}{V} [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (1-1-4)$$

因为水汽的容积等于干空气的容积，所以

$$Z = \frac{G_c}{V} = \frac{G_c}{V_c} [\text{kg}/\text{m}^3] \quad (1-1-5)$$

这实际上就是水汽的容量。常温下把湿空气看成理想气体*，则

$$\begin{aligned} p_c V_c &= G_c R_c T_c \\ Z &= \frac{G_c}{V_c} = \frac{p_c}{R_c T_c} \end{aligned} \quad (1-1-6)$$

式中 p_c ——水汽分压力；

V_c ——水汽的体积；

R_c ——水汽的气体常数；

T_c ——水汽的绝对温度。

上式表明，在温度一定时，水汽分压力 p_c 越大，则绝对湿度 Z 亦大，所以水汽分压力可反映湿空气中水汽的含量。不过从公式可看出，绝对湿度随水汽分压和绝对湿度两个参数而变，用它来反映空气中水汽含量不方便，故一般只用它来导出其他更有用的参数。

(二) 含湿量 (d)

湿空气在状态变化过程中，由于水分的蒸发和凝结，其体积和质量是变化的，即使湿空气中水汽含量不变，由于温度变化其体积亦随着改变。绝对湿度是以体积 V 作参数的，这样绝对湿度亦跟着变化，所以用它不能反映湿空气中水汽含量的多少。干空气在状态变化过程中其质量是不变的。以 1kg 干空气中带有的水汽量（由于数量不大，一般用 g 衡量）表示湿空气的湿度称为含湿量。用符号 d 表示

$$d = 1000 \frac{G_c}{G_g} [\text{g}/\text{kg}] \quad (1-1-7)$$

公式表明， 1kg 干空气中带有 dg 的水汽。

干空气和水汽在常温下都可作理想气体。

根据湿空气、干空气和水汽三者间的体积、温度、压力和质量关系， $V_c = V_g$ ， $T_c = T_g$ ， $R_c = 3.461$ ， $R_g = 2.153$ 代入式 (1-1-7) 得

$$\begin{aligned} d &= 1000 \frac{G_c}{G_g} = 1000 \frac{R_g p_c}{R_c p_g} \\ &= 622 \frac{p_c}{p_g} [\text{g}/\text{kg}] \end{aligned}$$

因为湿空气的压力即为大气压 B ，故 $p_g = B - p_c$ ，则

$$d = 622 \frac{p_c}{B - p_c} [\text{g}/\text{kg}] \quad (1-1-8)$$

* 理想气体：按照气体分子运动论的假设，“理想气体”的分子是本身不占有容积的弹性小球，分子之间不存在引力，可以看成是一群自由运动质点的集合体。

由此可见,含湿量 d 是与大气压力 B 及水汽分压 p_e 有关。一般在一个地区大气压力 B 可以看成是常数,这样,水汽分压力 p_e 越大,含湿量 d 亦越大。

在空调中含湿量是个重要参数,它反映了空气中水汽含量的多少。任何的空气状态变化过程都可用含湿量的增减来判断空气是加湿还是干燥处理,在计算中要经常用到它。由含湿量 d 和焓 h 制成的湿焓图是空调计算的基本线图。

(三) 相对湿度 (φ)

空气在容纳水汽方面具有这样一种物理性质:即在一定温度下,一定量的空气中只能容纳一定限度的水汽量,如果超过这一限度,多余的水汽就在空气中凝结成雾。这种一定限度的水汽量称为饱和湿度。在饱和湿度下相应的有饱和水汽分压 p_{eB} 、饱和绝对湿度 Z_B 与饱和含湿量 d_B ,它们随空气温度的高低而不同,这可从空气的物理性质表中查得。

一定温度下的空气所带有的水汽量,达到该温度下的最大值时称为饱和空气。能接受一定量水汽的空气称为未饱和空气。未饱和空气的绝对湿度 Z 小于同温度下的饱和绝对湿度 Z_B 。用 $Z_B - Z$ 虽然可以反映空气的吸湿能力,但用它来反映空气的湿度却不理想。因为 $Z_B - Z$ 值越大,空气越干燥,它的湿度越小。用它来表示空气的潮湿程度,在数字上恰好相反,因此用另一个参数即相对湿度 φ 来表示空气的潮湿程度

$$\varphi = \frac{Z}{Z_B} \times 100\% \quad (1-1-9)$$

由式可见, φ 反映了实际绝对湿度接近饱和绝对湿度的程度。所以,在一定温度下 Z 值越大,则 φ 就越大,空气就越潮湿。

若以饱和水汽分压 p_e 表示,则相对湿度可写成

$$\varphi = \frac{p_e}{p_{eB}} \times 100\% \quad (1-1-10)$$

或

$$\varphi = \frac{B - p_e}{B - p_{eB}} \frac{d}{d_B} \times 100\% \quad (1-1-11)$$

若令 $B - p_e = B - p_{eB}$, 则可将 $(B - p_e)/(B - p_{eB})$ 视为 1, 此时只有 2~3% 的误差,这在工程上是允许的,则

$$\varphi = \frac{d}{d_B} \times 100\% \quad (1-1-12)$$

空调中相对湿度 φ 是衡量空气潮湿程度对人和生产是否适宜的一个指标。

十四、湿球温度

由前所述,温度计的感温球与空气直接接触,测出的空气温度称为空气的干球温度。如果用带有水分的湿纱布包在温度计的感温球上,如图 1-1-5 和图 1-1-6 所示,这样的温度计称为湿球温度计。由它测出的温度称为湿球温度。

湿球温度是纱布中的水在与周围空气进行热、湿交换达到最终稳定状态时的温度。显然,在一定的空气温度下,空气的相对湿度 φ 越小,空气的吸湿能力越大,此时纱布中的水分蒸发越快,水分蒸发所需的汽化热越多,湿球温度降得越低,此时干球温度和湿球温度之间的温差越大,反之则二者的温差越小。当 $\varphi = 100\%$ 时,空气达到饱和,水分不能蒸发,干湿球温度就相等了。因此,用干湿球温度计算得的温差能确定空气相对湿度的大小。

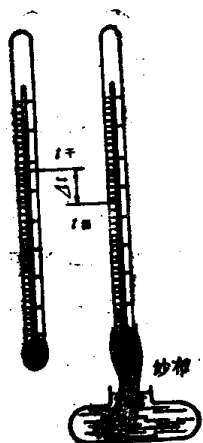


图 1-1-5 干、湿球温度计

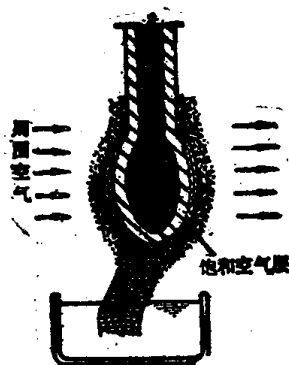


图 1-1-6 湿球周围薄的饱和空气层

十五、露点温度

某物体被降温时,在其表面会出现凝结水,这是由于临近这些表面的空气含湿量超过了饱和含湿量,空气中的水汽就凝结出来。对应于水汽凝结出来时饱和含湿量的温度称为露点温度。这样只要知道空气的含湿量 d , 根据空气性质表查出饱和含湿量 d_s 等于这个 d 值时所对应的温度,就是这种空气的露点温度。

结露取决于表面温度与空气的露点温度这二个参数的相互关系。仪器、设备等表面温度若低于空气环境的露点温度时,就会出现结露,损坏仪器。因此露点温度亦是衡量空气环境是否合适的一个主要指标。

十六、静压、动压、全压

在选择风机或从事空气调节工作时,常常会遇到静压、动压、全压这三个概念。根据流体力学知识,流体作用在单位面积上的垂直力称压力。当空气沿风管内壁流动时,其压力可分为静压、动压和全压,单位是 mmH_2O 或 kgf/m^2 或 Pa 。我国的法定单位是 Pa 。

(一) 静压 (p_i)

由于空气分子不规则热运动而撞击于管壁上产生的压力称为静压。计算时,以绝对真空为计算零点的静压称为绝对静压。以大气压力为零点的静压称为相对静压。空调中的空气静压均指相对静压。静压高于大气压时为正值,低于大气压时为负值。

(二) 动压 (p_b)

指空气流动时产生的压力。只要风管内空气流动就具有一定的动压,其值永远是正的。

(三) 全压 (p_q)

全压是静压和动压的代数和

$$p_q = p_i + p_b$$

(1-1-13)

全压代表 1m^3 气体所具有的总能量。若以大气压作为计算的起点,它可以是正值,亦可以是负值。

上述压力可用毕托管、微压差计等仪器测得。

第二节 热力学基本概念

一、热力学第一定律 焓

热力学是讨论热能及其转化的一门学科。物质运动的度量称为能量。物质总是在作各种不同形式的运动，对每种运动形式都有其相应的能量。如机械能、化学能、电能等。物质的各种形式的能量在一定条件下可以互相转化，但能量的总和保持不变。

(一) 内能 (u)

如图 1-1-7 所示，把 1 克分子水放在一个带有活塞的容器中，以热源加热，使水在 100°C ，下汽化成同温度同压力的水汽。在这个过程中水从环境吸收了热量 Q ，1at 水在汽化时体积膨胀推动活塞上升对环境作了功 L 。从实验测得汽体吸收的热量 Q 为 40.2kJ ，对外作的功 L 为 2.9kJ 。由此可见，水从环境中得到 40.2kJ 的热量，对环境做功消耗了 2.9kJ 的热量，因此，从环境得到的净能量为 37.3kJ 。这部分能量哪里去了呢？这部分能量使水由液体变成汽体，亦就是使水分子间距离拉大，分子运动速度加快等。这种变化的能量称为内能。

无数次的实验证明，热源加进去的热能等于系统内能(包括动能和位能)增加和对外做功的机械能之和。这一规律就称热力学第一定律。用数学式表示就是

$$q = \Delta u + Al \quad (1-1-14)$$

式中 q ——外界加给 1kg 工质的热量；

l —— 1kg 工质对外界作的单位功；

A ——功的热当量；

Δu —— 1kg 工质内能的增加量。

上述公式中的每项可以是正值，亦可以是负值。若 q 是负值，表示物质对环境放热， l 是负值，表示环境对工质做功。

关于能量的转换可以举出许多例子，如电动机带动压缩机的曲轴、连杆使活塞运动，这是电能变成机械能。活塞对氨汽进行压缩，使氨汽的温度及压力升高，这是机械能转变成热能。

(二) 焓 (h)

在稳定流动时，由外界传入的热量从热力学第一定律可知，这热量消耗在：

1. 增加内能 $\Delta u = u_2 - u_1$ ；

2. 增加压力位能 $A\Delta(pv) = A(p_2v_2 - p_1v_1)$ ；

3. 增加运动能 $\frac{A\Delta w^2}{2g} = \frac{A(w_2^2 - w_1^2)}{2g}$ ；

4. 增加重力位能 $A\Delta z = A(z_2 - z_1)$ ；

5. 作了机械功 Al 。

这样

$$q = (u_2 - u_1) + A(p_2v_2 - p_1v_1) + \frac{A(w_2^2 - w_1^2)}{2g} + A(z_2 - z_1) + Al \quad (1-1-1)$$

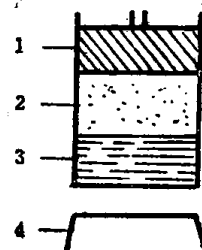


图 1-1-7 汽体受热膨胀做功
1—活塞；2—水汽 1at；
3—水 100°C ；4—热源