

内部发行

制冷技术培训教材

(上册)

福建省水产厅
福建省农业标准化协会

1985

序

为使制冷技术服务于我国四化建设的需要，农牧渔业部水产局曾委托福建省水产厅举办过三次“全国渔船制冷技术培训班”。培训班根据农牧渔业部水产局规定的大纲要求，邀请有关部门的专业干部编写《制冷技术培训教材》。该教材在教学实践中获得良好效果，各地读者要求增订。

福建省水产厅根据继续举办制冷技术培训班的实际需要和广大读者的要求，委派翁文耀同志组织教材的重编工作。参加编写工作的同志是福州大学化工系郑启祥、黄飞和福州市制冷设备公司吴育金、林振湘同志。

这本教材共二十章，内容充实，文句通俗，可作为水产、食品系统制冷技术培训教材和从事制冷技术工作的工人、干部的自学材料，也可作为制冷专业技校和中等专业学校的参考材料。

教材各篇的编写分工如下：第一篇郑启祥，第二篇吴育金，第三篇黄飞，第四篇林振湘。全书由黄飞、郑启祥同志审编。参加审订工作的还有翁文耀，吴文炳同志。

由于编者水平有限，书中不妥之处恳望批评指正。

编 者 1985. 1.

上册目录

序

第一篇 制冷原理

第一章 人工制冷的物理基础

- 第一节 基本概念..... (2)
- 第二节 物质及其能量..... (5)

第二章 理想气体基本热力过程

- 第一节 物体的热胀和冷缩..... (10)
- 第二节 气体的压力、温度、体积间的关系..... (11)
- 第三节 理想气体基本热力过程..... (14)
- 第四节 热力系统与热力过程..... (18)

第三章 蒸 汽

- 第一节 液体沸点与压力的关系..... (19)
- 第二节 汽化与冷凝..... (21)
- 第三节 气体和蒸汽的主要热力学参数..... (23)

第四章 蒸汽压缩制冷基本过程

- 第一节 蒸汽压缩制冷原理..... (25)
- 第二节 制冷剂与载冷体..... (29)
- 第三节 单级循环及其图解..... (36)

第五章 单级蒸汽压缩制冷循环

- 第一节 单级蒸汽压缩式制冷的实际循环..... (40)
- 第二节 液体工质的过冷和蒸汽的过热..... (42)
- 第三节 单级压缩蒸汽制冷循环的热力计算..... (44)
- 第四节 制冷量、功率与工况的关系..... (46)

第六章 多级压缩及复叠式制冷循环

- 第一节 采用多级压缩的原因..... (54)
- 第二节 两级压缩制冷循环..... (55)
- 第三节 两级压缩制冷循环的热力计算..... (58)
- 第四节 复叠式制冷循环..... (64)

第二篇 制冷设备

第七章 制冷压缩机的工作原理

- 第一节 制冷压缩机的种类和工作原理..... (67)
- 第二节 单级活塞式压缩机的制冷量和功率的计算..... (68)

第三节	双级活塞式压缩机的制冷量和功率的计算	(84)
第四节	新系列活塞式制冷压缩机的特性	(89)
第五节	船用制冷压缩机	(91)
第八章	制冷压缩机组的结构	
第一节	制冷压缩机的主要零部件	(95)
第二节	压缩机的拆卸与检查	(103)
第三节	压缩机的装配工艺与技术要求	(108)
第四节	压缩机的操作方法, 事故分析及维修保养	(112)
第五节	其它类型的制冷压缩机	(120)
第九章	制冷系统其它设备	
第一节	冷凝器	(125)
第二节	蒸发器	(132)
第三节	膨胀阀	(237)
第四节	油分离器	(139)
第五节	贮液器	(142)
第六节	热交换器	(142)
第七节	气液分离器	(147)
第八节	放空气器	(148)
第九节	干燥器	(148)
第十节	过滤器	(149)
第十章	制冷装置的控制及调节元件	
第一节	压力继电器	(150)
第二节	油压继电器	(153)
第三节	温度继电器	(134)
第四节	电磁阀	(153)
第五节	安全阀和止回阀	(156)
第六节	ZK—4C型自动控制台	(157)
第十一章	制冷装置常见故障的分析和排除方法	
第一节	检查故障的基本方法	(161)
第二节	常见故障分析	(163)

第一篇 制冷原理

绪 论

所谓“制冷”，是指用人为的方法，把被冷却的物体或空间的热量不断地排除给周围环境介质如空气或水，直至被冷却对象的温度低于环境的温度，并维持此温度的热力过程。在工业生产和科学研究中，人们通常把人工制冷按冷却温度的高低分为“普冷”和“深冷”。凡制冷温度高于 -120°C 的称为普冷，低于 -120°C 的叫做深冷。食品保鲜用的人工制冷属于普冷范围。

食品的生产基地多数远离城市的边远地区，且都有明显的季节性，而消耗食品多集中在大城市，又需要天天连续供应。因此，食品的保鲜与贮藏乃是人类生死悠关的大事。干燥、盐渍、烟熏和高温杀菌装罐等是行之有效的食品保鲜与贮藏的方法，至今仍被人们广泛所采用。但如果要想保持食品的原有风味与色泽，最有效的方法尚有赖于冷冻保鲜。可想而知，随着人类社会的不断发展，人们的生活不断提高，冷藏保鲜的方法将更加普遍。

与冷藏保鲜一样，各行各业采用人工制冷也是与日俱增。石油炼制、化工生产是制冷的大用户，某些药品的生产和保藏更离不开制冷，纺织、冶金、电子工业以及特殊要求的实验室和检测室需要用制冷进行恒温恒湿空气调节。用人工制冷冻结土壤，使沼泽地或地下水位高的地带建筑施工或矿井挖掘将有很多方便。随着人们生活的不断提高，采用制冷进行夏季空调日益普遍。由于分马力电动机的制成和安全制冷剂的开发，小型电冰箱和空调器进入了人类社会最基础的单位——家庭。目前在一些国家和地区，家庭备有电冰箱和空调器是不足为奇的，种子的保藏与栽培也有赖于人工制冷。

要举出因采用制冷使得加工或制造有了可能或改善的例子是举不胜举的。上面的简要叙述仅是现代使用人工制冷的一小部分，毫不夸张地说，各行各业都需要应用人工制冷技术，而且每一年都可以发现许多新的应用。冷冻医疗就是近年开拓的应用制冷新领域。

但是，在解放前，我国是一个半殖民地半封建的国家。政治腐败、经济落后，根本谈不上有什么制冷工业。只有在解放后，在党的领导下，我国的制冷工业才有了从无到有、从小到大的飞跃发展。尤其在1978年党的十一届三中全会以后，制冷工业和其它社会主义建设一样，有了蓬勃的发展。目前全国各省都有了制冷机制造业，不但制成了往复式压缩机，还制成了螺杆压缩机以及溴化锂吸收式制冷机。可以预见，随着四化建设的日益发展，越来越需要发挥制冷工业的重要作用，可以说，当今妨碍制冷工业更快发展的仅是由于缺乏足够制冷工程技术人员和训练有素的技工，尽管目前我国有许多高等院校和中专学校都设有制冷专业，但仍远不能满足形势的需要，这本教材就是想为此做些微薄的工作。

第一章 人工制冷的物理基础

第一节 基本概念

一、物质的基本量

1、重量与重度：物体的重量是地球对其产生引力的结果；工程上通常以公斤作为其计量单位并用字母 G 表示，重度是物体单位体积的重量常用字母 γ 表示之；而体积乃是物体占据空间的尺寸，并用字母 V 表示以立方米（写作 米^3 ）作为计量单位。显然，重度的单位为（公斤/米³）

根据上述，我们不难写出重度的计算式：

$$\gamma = \frac{G}{V} \quad (1-1)$$

如以 v 表示物体单位重量的体积，即所谓比容，我们也可写出其计算式：

$$v = \frac{V}{G} \quad (1-2)$$

显然，比容与重度的关系是互为倒数关系。即：

$$\gamma = \frac{1}{v} \quad (1-3)$$

物质的比容和重度并不是常数，它是随着不同的物体和不同温度而变化，某些常用物质的重度列于表 1。重度工程上习惯也叫比重。

表 1—1 某些常见物体的重度

名 称	重度 (公斤/米 ³)	名 称	重度 (公斤/米 ³)	名 称	重度 (公斤/米 ³)
钢	7850	酚 醛	1250~1300	干 砂	1500~1700
不锈钢	7900	聚氯乙烯	1380~1400	耐火砖	1600~1900
铸 铁	7220	聚苯乙烯	1050~1070	松 木	500~600
铜	8800	低压聚乙烯	940	软 木	100~300
黄 铜	8600	高压聚乙烯	920	橡 胶	1200
铝	2670	有机玻璃	1180~1190	玻 璃	2500

2、重量流量和体积流量：流体在单位时间内流过管道或设备的某截面的重量，叫做重量流量，如单位时间内流过物质的量以体积计则为体积流量，它们的计算式分别为：

$$G' = \frac{G}{t} \quad (1-4)$$

$$V' = \frac{V}{t} \quad (1-5)$$

式中： G' ——重量流程（公斤/时）

V' ——体积流量 (米³/时)

t ——流体流动过重量 G 或体积 V 的时间 (小时)

物体运动的最简单形式是匀速直线运动, 在这种情况下, 物体在单位时间内所移动的距离都是一样的。这种运动也叫恒速运动。要注意“恒速”一词术语意味着运动的方向和速率都不变化, 而“恒速率”仅意味着速率大小不变, 不考虑运动的方向。所以, 速度是矢量, 它表示大小和方向, 速率只表示数量大小, 是标量。然而在制冷工程上运动的方向性并不重要, 所以两词可以不加以区别, 都表示标量, 只考虑其大小。

物体运动的速度或速率是表示单位时间内物体移动的距离, 即:

$$V = \frac{s}{t} \quad (1-6)$$

式中: V ——物体运动的速度 (米/秒)

s ——物体移动的距离 (米)

t ——物体移动距离 S 的时间 (秒) 或 (小时)

二、温度和压力

1 压力

这里所说的压力实是物理学上的压强, 是单位面积上的力。如果力是均布于给定面积上, 那在这面积上任意点的压力是相同的, 并以作用总力除以作用总面积而求之:

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-7)$$

式中: p ——压强, 即每单位面积上的力 (公斤/米²)

F ——作用总力 (公斤)

A ——力作用的面积 (米²)

工程上压力常用单位是 (公斤/厘米²), 1 公斤/厘米² 即是一个大气压。压力大小也可以流体柱的高度表示之。如图 1-1 所示, 流体在截面 I—I 处压力必相等:

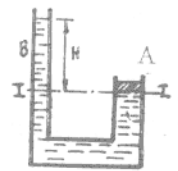
$$\text{而 } p_a = \frac{F}{A}, \quad p_b = \frac{H \gamma B}{B} = H \gamma, \quad \text{所以 } p_a = H \gamma \quad (1-8)$$

如以水银作为指示液, 已知水银的 $\gamma = 13.6$ (克/厘米³) 则可算出 1 公斤/厘米² 压力相当于 736 (mm 汞柱)。由于计量起点的不同, 压力分有绝对压力和表压力。绝对压力可以理解为流体“总的”或“真正”的压力, 而表压力是由压力计上读出的, 是容器内流体真正压力与大气压力的差值。如果流体压力要比大气压大, 则容器内流体的绝对压力为表压力与大气压之和, 如容器内压力比大气压小, 则真正压力为大气压与真空度之差 (见图 1-2) 所以。

$$P_{\text{绝}} = P_{\text{表}} + P_{\text{大气}} \quad (1-9) \quad P_{\text{绝}} = P_{\text{大气}} - P_{\text{空}} \quad (1-10)$$

表压力、绝对压力和真空度相互间关系还可以图 (1-2) 表示之。

必须指出, 作为物理参数的压力必须是系统内的绝对压力, 因此在以后进行有关制冷热力计算时, 必须将仪表读数按上述式子进行换算为绝对压力。换算时原则上 $P_{\text{大}}$ 应指当地的



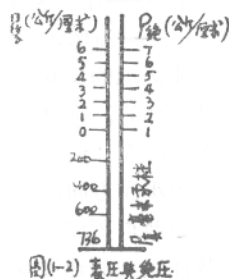
图(1-1) 压力计液柱

大气压，但如系统内压力较大时， P_0 取一个大气压已足够准确，但当系统压力很小时不能作出简化。

【例】1—1 某冷凝器压力表的读数为11.5（公斤/厘米²）当地当时气压计读数为770（毫米汞柱），试求该冷凝器此时绝对压力为多少（公斤/厘米²）？

【解】按式 (1—9)

$$\begin{aligned}\text{绝对压} &= \text{表压} + \text{大气压} = 11.5 + \frac{770}{735.6} = 11.5 + 1.05 \\ &= 12.55 \text{ (公斤/厘米}^2\text{)}\end{aligned}$$



【例】1—2 某蒸发器要求保持在0.5（公斤/厘米²）的绝压下操作，已知气压计的读数为760（mm汞柱），试求此蒸发器在操作时的真空度为多少（mm汞柱）？

解：按式 (1—10)

$$\text{真空度} = \text{大气压} - \text{绝对压} = 760 - 0.5 \times 735.6 = 760 - 367.8 = 392 \text{ (mm汞柱)}$$

2 温度

温度是物质分子运动强弱的象征，物质分子运动越强烈，则其温度就越高，反之亦然。

用作测量温度高低的最常用仪器是温度计。大多数温度计是用指示液随温度上升或下降而膨胀或收缩来工作的。由于酒精和水银的凝固点低以及热膨胀系数比较稳定，所以是最常用作温度计的指示液。水银的热膨胀系数在较大温度范围内要比酒精更稳定，所以用它作温度计指示液就更准确。然而，水银温度计比较昂贵且读数不易，酒精则易于染色使读数清晰且价廉。

温度计的刻度准则称作温标，目前通常有摄氏和华氏之分。以水在标准大气压下的凝固点为0，沸点为100的是摄氏温标。把这两点分成100个等分就叫做“度”，并记作“℃”。所以，摄氏温标水的凝固点为0℃，而沸点为100℃，虽然华氏温标的设计与摄氏温标有些不同，但原理是相同的。它以水的凝固点为32°，沸点为212°，这样水的凝固点与沸点之间分为180个等分。它的0点定在水凝固点以下32°。

这两种温标相互间怎样换算呢？我们注意到华氏温标的180个等分相当于摄氏温标的180个等分，即1°F相当于5/9℃，或1℃相当于9/5°F，又由于华氏温标的零点比水凝固点低32°，所以摄氏换算成华氏时还要加上32°F。这样，两者间的关系可以建立下列两个式子：

$$t_F = \frac{9}{5} t_C + 32 \quad (1-11) \quad t_C = \frac{5}{9} (t_F - 32) \quad (1-12)$$

式中： t_F ——华氏温度（°F）

t_C ——摄氏温度（℃）

由上述可以知道，华氏与摄氏两温标由于对零点选择的不同，因此对同一物体测出的温度值并不一样。如果我们只需要描述过程期间或物质相对于已知参照点的差值时，那这两种温标的任一种都是够用的。然而如果温度读数是涉及到某些基本规律的方程式时，就需要把参照点选在真正的或绝对的零点上。实际已经表明，这种叫做绝对0°的参照点大约为-273℃，所以绝对温度与摄氏温度间的换算关系为：

$$T = t_C + 273 \quad (1-13)$$

式中: T ——绝对温度 ($^{\circ}\text{K}$)

这三种温度间的换算关系可见图 1—3

3、功和功率

当一个力作用于物体并使物体移动了一定距离时,我们就说此力对物体做了功。假设力的方向与物体移动方向相一致,则所做功的大小就等于力与物体移动距离的乘积:

$$W = F \cdot S \quad (1-14)$$

式中: F ——力 (公斤)

S ——物体移动的距离 (米) W ——力所做的功 (公斤·米)

单位时间内作的功叫做功率,机械功率的常用单位是“马力”或“千瓦”。1 马力等于 75 公斤·米/秒,而 1 瓩等于 102 公斤·米/秒即:

$$P = \frac{W}{75t} \quad (1-15) \quad \text{或} \quad P = \frac{W}{102t} \quad (1-15')$$

式中: W ——功 (公斤·米)

t ——力作功 W 的时间 (秒)

P ——功率 (马力) 或 (千瓦)

【例】1—3 把重量为 320 公斤的鼓风机,从地面吊升到 50 米高空。如不计摩擦力和其它损失,求力对鼓风机作的功的大小? 如起吊鼓风机共耗时 2 分钟,求起重机所需输出功率为多少千瓦?

【解】: 应用式 (1—14)

$$W = F \cdot S = 320 \times 50 = 16000 \text{ 公斤} \cdot \text{米}$$

再应用式 (1—15')

$$P = \frac{W}{102t} = \frac{16000}{102 \times 2 \times 60} = 1.3 \text{ 千瓦}$$

第二节 物质及其能量

一、能量及其转换

我们周围的世界是物质的世界,而物质是具有一定能量而存在的。所谓能量,就是作功的本领,作功需要能量,当物体具有作功的能力时,我们就可以说此物体具有能量。

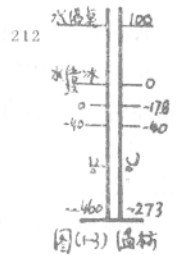
1 机械能

能量最简单的形式是机械能,而机械能又可分为动能与势能两种型式,所谓动能乃是物体具有速度的效能。如下落着的物体,流动的流体,运动着的机械零件都具有动能。物体所具有的动能是其质量和速度的函数,并遵循下面的关系式:

$$K_e = \frac{GV^2}{2g} \quad (1-16)$$

式中: G ——物体的重量 (千克)

V ——物体运动的速度 (米/秒)



g ——重力加速度 (9.81 米/秒^2)

K_e ——物体的动能 (公斤·米)

势能是物体的位置或状态所具有的能量。一个物体从一个位置到另一位置所作功的量,是物体势能大小的计量,例如打桩机的桩锤,当它被提升到距桩顶若干距离时,它就具有势能。如让其下落,它就会打桩做功。一个压缩着的弹簧或一条拉伸着的橡皮带,都有返回到自由状态而做功的本领,因而都具有势能。

物体所具有的位置重力势能可以下式计之:

$$P_e = G \cdot H \quad (1-17)$$

式中: P_{e1} ——物体的势能 (公斤·米)

H ——物体距基准面或参照点的座标距离 (米)

G ——物体的重量 (公斤)

物体如同时具有动能和势能,则其总能为两者之和:

$$U = P_e + K_e \quad (1-18)$$

【例】1—4 位距基准点高20米的输水管,管内水的平均流速为1.5 (米/秒) 试计算,每公斤水具有的总能量

【解】先应用式 (1-16) 求每公斤水的动能。

$$K_e = \frac{G v^2}{2 g} = \frac{1 \times 1.5^2}{2 \times 9.81} = 0.11 \text{ (公斤·米)}$$

再用式 (1-17) 求每公斤水的位能 $P_e = G \cdot H = 1 \times 20 = 20 \text{ 公斤·米}$

所以总位能为: $U = K_e + P_e = 0.11 + 20 = 20.11 \text{ 公斤·米}$

2 物质的内能

前面已经说过,物体由于具有速度和位置而对于参照点具有动能和势能。由于物质分子具有速度和相互间作用力,因而同样具有动能和势能。为区别起见,把分子的动能和势能叫做内动能和内势能。

上已述及,物质的温度是其分子运动的标志,所以,温度越高,分子动能就越大,如果一个物体连续散失能量直至内动能完全降低到零,则物体的温度将降到绝对零度 (-273.15°C) 其分子则完全停止运动。

内势能是分子间的距离或相对位置的能量是分子由一个位置相对另一位置的能量,分子间距离越大,它的内势能也越大,当一种能量加入物质使其膨胀或改变它的物理状态时,分子发生重新排列,并加大了相互间的距离。由于分子间相互引力作用总是企图拉在一起,所以要分开它们就必须作出内功将其拉开,即外功可提高物质的内能而储藏在物体中。

因此,我们要注意,能量传递给物质,并不一定会提高分子运动的速度 (提高温度) 有可能仅仅改变分子间的距离。

二、物质的聚集状态

1、物质的聚集状态

物质有三种不同的聚集状态,即固相、液相和气(汽)相。例如水是液体,但同样的物质

可以冰的固体形式而存在，也可以水蒸汽(气)而存在。许多物质在相应的温度和压力的条件下，可以三种不同形式的聚集状态而存在。

我们已经指出，物质分子的能量不仅取决于温度，而还取决于所处的物理状态的不同。换一句话说，能量的加进或移出，也就像改变温度一样，会引起它的物理状态的改变。例如金属，如果加进足够多的热量，它就会熔化。冰的融化和水的沸腾是大家所熟悉的，这些物理状态的变化都是靠能量传递而引起的。

物质处于固态时内势能比较小，物质分子间靠引力和重力相互甚为紧密。物质的分子结构较为坚硬，分子相互位置基本上被固定，分子运动仅限于机械振动的方式。由于坚硬的分子结构，固体力图保持自己的尺寸和形状，因此，固体尤其不可压缩，对任何企图改变它的形状的，都会有很大的抵抗力。

物质处于液相下的分子要比固相下具有更多的能量，且相互间并不那么紧密，在某种程度上说，它们有更多内能让其克服相互间的吸力，并有更多的空隙让分子左右运动。液体分子相互间向四周移动是自由的，这叫做流动。虽然液体也具有不可压缩性，而保留自己的体积，但它不能保持自己的形状，液体的形状总是与容器的形状相吻合。

物质处于气相下的分子所具有的能量要比液相下的能量大得多。它们有足够大的力来克服相互间的约束力。分子间相互引力既没有固定的界限，也没有由重力作用的界限。因此，气体分子是在高速下向四周飘荡，并不断地相互碰撞以及和容器壁的碰撞，气体既不保持其体积，也不保持形状，它们易于压缩并总是完全充满容器空间。此外，我们如果不把贮藏气体的容器加以封闭，则它就会从容器内逸出并扩散到环境去。

2 物质的相变及其热效应

上面已经述及，热量是能量的一种形式，热量的计量单位是“卡”或“千卡”。所谓1千卡热量工业上是表示水在标准大气压下温度为升高1℃所需的平均热量。反之，如果从1公斤水中取走1千卡热量，则水的温度就会降低1℃。

1公斤物体温度变化1℃所需要的热量叫做比热。比热常用符号为C，其单位为(千卡/公斤℃)同一种液体或固体由于所处的温度不同，其比热也不相同，但由于变化甚微，工程上取其平均值已足够准确了，气体就不然，它的比热在不同温度范围内变化很大。同一种物质在不同状态下的比热也相差甚大。如水的比热为1(千卡/公斤℃)而冰的比热仅为0.5(千卡/公斤℃)。

根据比热的定义，很明显，物质的温度变化所需加进或取出的热量可按下式计之：

$$Q = G \cdot C (t_2 - t_1) \quad (1-19)$$

式中：Q——物体温度变化所需加进或排出热量(千卡)

G——物体的重量(公斤)

C——物体的比热(千卡/公斤℃)

t_2, t_1 ——物体的终、始温度(℃)

要注意受热物体的量G也可以用重量流量来代替，这样热量就应该为热流量了，即单位时间内传递的热量。

【例】1—5，把20kg水从温度26℃加热到80℃，试计算所需输入热量为多少千卡？

【解】应用式(1—19)则

$$Q = G \cdot C(t_2 - t_1) = 20 \times 1 \times (80 - 26) = 1080(\text{千卡})$$

要注意热量传递给物体或从物体中排出,并不一定都会引起物体温度的变化。为此,我们把热量分成两种类型,凡热量会引起物体温度变化的叫做显热,而把热量仅引起物体状态变化(即相变)的叫做潜热。

大多数物质在温度逐步提高时,将受到两次聚集状态的变化,首先它们从固态变成液体,然后,液体的温度进一步提高到液体所不能存在的温度,于是液体就变成了蒸汽。这两次聚集状态的改变都需要热量的传递,而在过程中温度不会改变,所以把第一次相变的叫做融化潜热,而第二次的叫做汽化潜热。

为了更好地理解分子的内能,我们研究能量加入初始条件为绝对零度(0°K)的固体发生的影响,实际上在这样温度下物质分子绝对没有能量和完全静止的。当能量不论是以热或功的形式加入时,分子开始缓慢地振动,于是固体温度开始上升。当能量加入更多时,分子运动和物质的温度不断上升。直至固体达到融化的温度。把固体从绝对零度提高到融化温度前所需的热量叫做固体的显热。其值可按式(1—19)计之。当达到融化温度时,固体分子具有所能达到的最大速度,在这一温度时,任何加进一些热量就会引起固体一部分熔化变成液体。如加进热量足够多,则固体全部都变成液体。在固体变成液体期间,物体的温度保持不变。但这里要指出,上述的说法只对于真正晶体才是正确的,非晶体固体如玻璃等没有固定的融化温度,即在其从固体变成液体期间,它的温度是变化的,但对于进行热量计算时,通常仍假定在相变过程中,它的温度保持不变。

固体的融化或融化的温度随着材料和压力的不同而异,例如在标准大气压下,铅的融化温度大约 315.5°C ,而钨的融化温度为 1093°C ,冰则在 0°C 时融化。一般说来,大多数晶体材料融化温度随压力增大而下降,非晶体材料则相反,压力增大,融化温度则上升。在大多数情况下,压力对融化温度的影响是很小的,以致在相当大的压力范围内,固体的融化温度都可认为保持不变。

在固体变成液体的相变期间,能量的加进是用作克服那些相互绑在一起的所谓分子引力,使分子能够相互分离,使物质失去固体的坚固的结构而成为液体。在液相状态下,物体不能维持自己的独立形状。

固体分子间的引力是相当大的,要克服这种引力就需要相当大的能量,对于任何一种物质,融化潜热的数值可以从有关书籍中找到。

必须指出,在融化温度下,相变在两个方面都可以进行的,即在融化温度下,固体可以融化为液体,而液体同样可以凝固为固体。而且能量传递的数值也是相同的,所不同的是前者是输进能量,后者即放出热量。所传递的热量可按下式计之:

$$Q = Gh \quad (1-20)$$

式中: h ——物质的融化(或凝固)潜热(千卡/公斤)其它符号同前。

当物质从固体变成液体时,其液体的温度即是固体的融化温度。如果把液体进一步加热,则液体分子就会进一步提高动能,因而相应提高了液体的温度。如再继续加热,液体分子就会达到液相所允许的最大的运动速度。这样液体的温度将达到在给定压力下能保持液相的

最高温度。如再稍加进一些热量,都会使液体部分产生汽化变成成为蒸汽。如果假定蒸汽的压力是不变的话,则汽化的温度也保持不变。

把液体从熔化温度升高到汽化温度所加进热量叫做液体的显热,并可用式(1—19)计之。

液体变成蒸汽的温度,或相反的,从蒸汽变成液体的温度叫做饱和温度。饱和温度的液体叫做饱和液体,而饱和温度的蒸汽叫做饱和蒸汽。在给定压力下液体的饱和温度是液体的最高温度。饱和温度也是给定压力下蒸汽的最低温度。

不同液体的饱和温度是不一样的,液体饱和温度随压力变化特别大,例如铁的饱和温度大约可达 2454°C ,铜可达 2343°C ,而铅可达 1648°C 。在一个大气压下,水的沸点为 100°C ,乙醇为 77°C ,有些液体在极低的温度开始汽化,如氨、氧、氮等在标准大气压下其沸点分别为 -33.4°C , -182°C 和 -269°C 。

给饱和温度的液体加进某些能量,被用作提高分子的逸散能力(提高势能)使液体变成蒸汽,由于分子内动能没有增加,所以在相变期间,液体的温度保持恒定。

当物质从液体变成蒸汽时,物质分子需要足够的能量来克服包括重力等所有约束力。克服这些约束力所做的内功需要的能量是很大的,因此,物质从液相变为汽相时吸收能量的能力是很大的,常常要比固体变成液体需要吸收能量的能力大好几倍。

单位重量物质从液相变为蒸汽所吸收的能量,或相反的由蒸汽变成液态放出的能量叫做汽化潜热。不同种类液体的汽化潜热是有差别的,某些制冷工程常用的液体汽化潜热值可从附录中查到。像饱和温度一样,对于某一给定液体的汽化潜热随压力不同而稍有变动。当压力增大时,液体的饱和温度上升,而汽化潜热下降。

一定量的液体在饱和温度下汽化或冷凝的能量可按式(1—20)相似的式子计之:

$$Q = G R \quad (1-20')$$

式中: R ——单位重量物质的汽化潜热(千卡/公斤)其它符号同前。

【例】1—6, 试计算把20公斤在标准压力下饱和温度的水汽化为蒸汽所需要的能量,已知水在标准大气压下汽化潜热为539(千卡/公斤)

【解】按式(1—20')

$$Q = G R = 20 \times 539 = 10780 \text{ (千卡)}$$

【例】1—7, 某一开口容器内盛温度为 30°C 的水100公斤,现向其加进热量20000(千卡)试计算有多少水被汽化为蒸汽?

【解】水在此条件下的饱和温度为 100°C ,故要先按式(1—19)计算水升温所需显热。

$Q_1 = G C (t_2 - t_1) = 100 \times 1 (100 - 30) = 7000 \text{ (千卡)}$ 从供应总能中减去显热部分即为用于汽化的热量:

$$Q_2 = Q - Q_1 = 20000 - 7000 = 13000 \text{ (千卡)}$$

按式(1—20')稍加变动,即可计算出汽化量:

$$G = \frac{Q_2}{R} = \frac{13000}{539} = 24 \text{ (公斤)}$$

三、能量的转换和守恒

在上述的章节里，我们已经明确了物质的内动能(分子运动速度)和内势能(分子的间距)可以靠能量的传入或输出使其增加或减少。并且已经明确，并不是所有输入的能量都储存在物体中作为提高它的内能。常常有一些或全部输入物体的能量作为机械功形式传给外界。我们还明白了能量可以机械能的形式、也可以热能的形式转递给物体，例如锤子敲击钉子头，锤子下落的机械能部分转化为热提高了钉子的内能。当构成钉子的金属分子被锤子敲击而振动时，它的分子运动速度就加快而温度上升。又如一条金属丝被迅速反复地弯曲时，金属丝的弯曲部位将由于分子的扰动而变成热。还有大家都熟悉的物体表面相互摩擦也会引起温度的提高。反之亦然，常常有物体的外能转化成内能，例如飞行的子弹由于质量和速度而具有动能，当在打入靶物那一刹那，子弹的动能部分传给子弹和靶物的分子，以致两者的内能(温度)都提高了。

总之，能量的形式很多，如机械能、电能、化学能、热能等等、它们很容易从一个形式转化为另一个形式，例如电通过电热器或电炉即变成热能，电通过马达或电磁线圈就变成了机械能，机械能、化学能以及热能分别通过发电机、电池和热电偶就会转变成电能，等等。但我们要明确，在任何热力学系统中，能量总是恒定不变的，尽管它可以从一个形式转变成另一种形式，它的总能量是既不会减少也不会增加，这就是能量守恒定律，或所谓热力学第一定律。

既然功和热都是能量，所以尽管它们计量单位不一样，但总是可以换算的。实验指出，1千卡的热量相当于427(公斤—米)的机械功，即所谓热功当量，如用字母A表示功的热当量。则热与功的换算关系可列出下式：

$$Q = AW \quad (1-21)$$

$$\text{即 } A = \frac{1}{427} (\text{千卡/公斤—米}) \text{——功热当量}$$

第二章 理想气体基本热力过程

第一节 物体的热胀和冷缩

当物质分子的速度或分子间距由于能量的加入而加大时，就意味着物体体积的膨胀，以致单位重量物质所占居的体积增大了。因此，当能量加给一个不受容器限制的某一聚集状态的物质或由其放出能量时，此物质就相应地膨胀或收缩，也就是它的体积将相应随着能量的加进或放出而增大或缩小。对此规律有例外之一的是水，如果水被冷却，则它的体积一般会随之缩小，直到温度大约等于4℃时，水的密度最大。如进一步冷却，水的体积反而膨胀，直至温度降到0℃，水开始冻结固化时仍然伴随着体积的膨胀，1米³水冻结为冰体积变为1.085米³。因此水在固化期间发生有巨大的膨胀力，此力足以破坏钢管或约束容器的构件。

虽然水膨胀看来与物质分子运动说法有矛盾,然而这矛盾可由冰是晶体固体来加以解释。虽然物质分子在固态时甚为紧密,但由于固体的晶格空间实际变大,因而物质分子间的距离增加更大,所以固化时体积反而增大。

当固体或液体被加热使其温度升高时,它每升高 1°C 所膨胀的量是一定的。正像第一章所说的,许多温度测量仪器就是基于这一原理的。单位体积物质的温度上升 1°C 所膨胀的量叫做膨胀系数。不同物质的膨胀系数是不相同的,并随着不同的温度范围而发生变化。

由于固体或液体是完全不可压缩的,所以如果固体或液体的变形受到限制,以致它的体积不能随温度发生变化,则物体自身会产生巨大的压力作用于约束物上,以致引起约束物的破坏。由于温度变化引起的膨胀或收缩,所以公路、桥梁、管道等都应备有膨胀节。同理,容器也不能完全注满液体,必须留有空间让其膨胀,如不然由于温度升高引起膨胀力有时会招致容器的破坏。

第二节 气体的压力、温度、体积间的关系

由于气体分子间的结构松散,故加热或冷却所引起的体积变化将比固体或液体要大许多。下面将要说明气体可以不同方式改变它的状态以及在变化期间它的压力、温度和体积间的关系。在讨论这些参数间的关系时,为方便起见,我们假定气体从初始状态变化到终了状态的一系列独立变化过程中,它的三个参数仅允许有两个发生变化,第三个参数保持不变。

在推导这些气体基本定律时,我们必须记住气体总是会充满盛藏它的容器和气体的某些参数值必须由确定的零点来定值的。

1 等压过程

如果能量是在气体压力保持不变下加入的话,那么,气体体积的增加将与它的绝对温度成正比,这就是气体等压过程的查理定律,并可写成下列式子:

$$T_1 V_2 = T_2 V_1 \quad (2-1)$$

式中: T_1 ——气体初始的温度($^{\circ}\text{K}$)

T_2 ——气体终了状态的温度($^{\circ}\text{K}$)

V_1 ——气体初始体积(米^3)

V_2 ——气体终了体积(米^3)

为了更好地说明气体的等压过程,我们假定气体是封闭在活塞完全没有摩擦力的气缸装置中(图2-1a)。气体受到的压力是活塞的重量和活塞顶上的大气压。由于活塞在气缸中可以自由地上下移动,所以气体可以保持其恒定的压力而膨胀或收缩,当气体被加热时,它的温度上升,体积增大,活塞在气缸中就往上移动(如图2-1b)。当气体被冷却时,它的温度降低,体积缩小,活塞就往下移动(图2-1c)。不论在那种情况下,气体的压力总是保持恒定不变的。

【例】2-1气体的初始温度为 20°C ,其体积为 2米^3 在恒压下加热到体积变为 3米^3 ,试求气体终温为多少。

【解】应用式(2-1)则

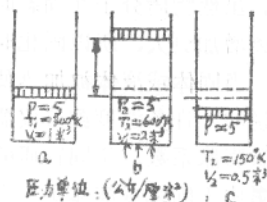
$$T_2 = \frac{T_1 V_1}{V_2} = \frac{(273 + 20) \times 3}{2} = 439.5^\circ \text{K}$$

$$\text{或 } t_2 = T_2 - 273 = 439.5 - 273 = 166.5^\circ \text{C}$$

【例】2—2，某气体的初温为 27°C ，在恒定下冷却到 0°C ，如初始体积为 8 米^3 ，求其终了体积 $V_2 = ?$

【解】同样应用式(2—1)

$$V_2 = \frac{T_2 V_1}{T_1} = \frac{(273) \times 8}{(273 + 27)} = 7.28 \text{ 米}^3$$



图(2-1)气体等压过程

2 气体的等温过程

气体在温度保持不变的条件下发生的热力过程叫做等温过程。

当气体在温度恒定不变的情况下增大或缩小体积时，其绝对压力与体积成反比。即当气体在温度保持不变下被压缩时，气体的绝对压力的升高与其体积的缩小成比例。同理，当气体在恒温下膨胀时，它的绝对压力的降低同其体积的增大成比例。这就是气体在恒温过程中下的波义尔定律的一种说法。

上面已经说过，气体分子是在高速、无规则地到处飞荡，它们常常相互碰撞并同容器壁碰撞。气体的压力即是这些分子碰撞的反映。无数的气体分子在高速下飞行，它在百分之几秒的时间内就碰撞容器壁一次，正是这些分子不断地轰击容器壁，而产生了气体施于壁面的压力。显然，压力的大小取决于气体分子在给定的面积上的冲击力和碰撞的频率。在给定空间内分子的数量和运动速度，可以计算出气体的冲击力和碰撞的频率。单位体积的气体分子数量越多，(气体的密度越大)，气体分子的运动速度越大，则其压力就越大。气体分子碰击容器壁的力仅取决于分子的速度。速度越大，冲击力也就越大，在给定空间内气体分子数越多，速度越大，分子碰撞容器壁的机会就越多。当气体在恒温下压缩时，气体分子速度保持不变，靠其体积的缩小，使贮藏在气缸中气体的密度增加，因而碰撞的机率加大而压力上升。当气体在等温下膨胀时，恰好与上述相反。

对于等温过程的波义尔定律，可用下列方程表示之：

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (2-2)$$

式中： P_1, P_2 ——气体的初始和终了压力(公斤/厘米²)；

V_1, V_2 ——气体的初始和终了体积(米³)；

【例】2—3，设有3公斤重的气体在等温下由初始体积 $V_1 = 2 \text{ 米}^3$ 膨胀到 $V_2 = 4 \text{ 米}^3$ ，如空气的初始压力为 3 公斤/厘米^2 (绝压)，试计算终了压力为多少？

【解】应用式(2—2)

$$P_2 = \frac{P_1 V_1}{V_2} = \frac{3 \times 2}{4} = 1.5 (\text{公斤/厘米}^2) (\text{绝压})$$

【例】2—4，某气体的初始压力 $P_1 = 8 (\text{公斤/厘米}^2) (\text{绝压})$ $V_1 = 4 \text{ 米}^3$ 在等温下膨胀到 $P_2 = 5 (\text{公斤/厘米}^2)$ 试求 $V_2 = ?$

【解】同样应用式(2—2)则

$$V_2 = \frac{P_1 V_1}{P_2} = \frac{8 \times 4}{5} = 6.4 (\text{米}^3)$$

3 气体的等容过程

假定气体贮藏在密闭的钢瓶中，所以当它受热或冷却时体积不受变化，这种过程即是气体的等容过程。氧气瓶在阳光下曝晒即是气体等容过程的实例，不管气体的温度怎样提高，而气体的体积始终不变，但气体分子运动加剧，使与器壁碰撞的机率增加。所以压力就上升了。同理，当气体在等容下冷却时，气体分子对器壁的冲击力和碰撞机率下降，因而压力降低。

实验发现，气体在等容过程下的温度与压力成正比。即：

$$T_1/T_2 = P_1/P_2 \quad (2-3)$$

4 理想气体状态方程

根据上述的理想气体的三个定律，我们对理想气体的任何一状态都可写出如下方程：

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} = \frac{PV}{T} = \text{常数} \quad (2-4)$$

这个常数与气体状态无关，仅取决于气体的性质，叫做气体常数，习惯上都用R表示，其单位为（公斤米/公斤⁰k）所以方程（2-4）可以写成：

$$Pv = RT \quad (2-5)$$

式中：（2-5）即为理想气体状态方程式：

今设有G公斤气体，方程（2-5）可以改写

$$PGv = GRT, \text{ 因为 } Gv = V \text{ 故}$$

$$PV = GRT \quad (2-6)$$

式中气体常数R可从有关手册中查到，某些重要气体的分子量、比重及R值例于表2-1。所以状态方程式中三个参数中，如其中两个为已知值时，则可计算出第三个参数。所以，当气体的两个状态参数已知时，气体的状态也就确定了。例如已知气体的压力和温度，因R是常数，则其比容 $v = \frac{RT}{P}$ 而可计出。所以气体状态方程式在求解气体有关过程时是很有用的。

表 2-1 某些重要气体的分子量、重度和R。

气 体	分 子 量	重度(公斤/米 ³)(标准状态)	气体常数(公斤·米/公斤k ⁰)
空 气	28.960	1.293	29.27
O ₂	32	1.429	26.50
N ₂	28.016	1.251	30.13
H ₂	2.016	0.090	420.60
CO ₂	44.010	1.963	19.25
CO	28.010	1.250	30.60
CH ₄	16.032	0.716	52.90
C ₃ H ₈	28.032	1.251	30.25
NH ₃	17.031	0.771	49.80