

冷库制冷循环 的分析和计算

余根法 编著

78.583

8807415

渔业制冷保鲜丛书

冷库制冷循环的分析和计算

余根法 编著

农业出版社

渔业制冷保鲜丛书
冷库制冷循环的分析和计算

余根法 编著

责任编辑：陈力行

农业出版社出版（北京朝阳区惠惠路）

新华书店北京发行所发行 农业出版社印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 5.5印张 2插页 112千字
1988年2月第1版 1988年5月北京第1次印刷

印数 1—2,230册 定价 2.00元

ISBN 7-109-00158 X/S·109

出版说明

我国渔业生产发展迅速，为普及和提高从业者的水产品保鲜常识和技术水平，中国水产学会渔业制冷和水工专业委员会、科学普及工作委员会和农业出版社共同组织出版《渔业制冷保鲜丛书》。

本丛书的编者，根据从业者对保鲜基础知识和技术需求，结合编者的经验，进行收集和整理编写的。丛书从基础知识到具体操作，从冷库到渔船，从保鲜设施到具体管理，体现了丛书的系统性。为了使读者了解其他国家在渔业制冷保鲜工作上的规定，特意翻译了《国际鲜鱼保鲜实施准则》和编译了《冷冻水产品实用管理准则》两书，以供读者参考。

丛书包括：

《冷库制冷循环的分析和计算》

《制冰》

《冻结和冻结装置》

《水产冷库管理》

《渔船制冷装置》

《保温鱼箱和集装箱》

《国际鲜鱼保鲜实施准则》

《冷冻水产品实用管理准则》

本丛书由孙瑞璋同志担任主编。丛书可供高中以上文化程度从事渔业制冷保鲜工作有关人员参考使用。

中国水产学会

农业出版社

一九八六年八月

目 录

一、制冷技术的基础理论	1
(一) 人工制冷的原理	1
(二) 物质的聚态	1
(三) 液体的汽化和饱和状态	2
(四) 气体的液化和临界状态	4
(五) 热、功和热力学第一定律	5
(六) 热力学第二定律	7
(七) 状态参数	8
二、制冷压焓图中的状态参数和曲线	14
(一) 等压线和等焓线	15
(二) 饱和液体线和干饱和气体线	16
(三) 压焓图上的聚态区	17
(四) 等干度线	18
(五) 等熵线	19
(六) 等温线	20
(七) 等容线	21
(八) 状态参数的查法	22
三、蒸汽压缩式制冷循环的过程	24
(一) 蒸发过程	24
(二) 压缩过程	26
(三) 冷凝过程	27
(四) 节流过程	28

四、制冷循环中的功热计算	50
(一) 理论循环	30
(二) 直接膨胀供液制冷循环的功热计算	32
(三) 重力供液制冷循环的功热计算	38
(四) 回热制冷循环的功热计算	44
(五) 混流制冷循环	50
(六) 氨泵供液制冷循环	58
(七) 考虑压缩机效率的理论循环	70
五、双级压缩制冷循环	77
(一) 一次节流完全中间冷却的双级压缩制冷循环	78
(二) 二次节流完全中间冷却的双级制冷循环	89
(三) 不完全中间冷却的双级制冷循环	92
(四) 带中压蒸发器的双级制冷循环	100
(五) 氨泵供液双级制冷循环	103
六、压缩机运行工况的判断和分析	111
(一) 压缩机的吸入状态	111
(二) 压缩机的排出状态	117
(三) 压缩机的吸排状态与制冷循环经济指标的关系	118
(四) 双级压缩机的运行中压	127
(五) 压缩机的制冷能力	131
(六) 压缩机制冷量的标准和换算	138
(七) 用压焓图分析双级压缩机的运行工况	143

附 表

附图 1 氨 (NH_3) 的 $\lg P-i$ 图

附图 2 F-12 (CCl_2F_2) $\lg P-i$ 图

附图 3 F-22 (CHClF_2) $\lg P-i$ 图

一、制冷技术的基础理论

(一) 人工制冷的原理

在日常生活中，我们经常可以遇到因液体的蒸发而生凉的事例。例如：炎日下的庭院雨后可感到特别凉爽；皮肤上擦上酒精也会产生局部凉感，这些都是液体汽化吸热的缘故。

在制冷工程上，人们可利用低沸点液体汽化吸热的原理来实现人工制冷的目的。氨和氟利昂是目前人工制冷中应用最广的低沸点工质。为了节省和卫生等缘故，汽化后的制冷工质必须回收，并重新液化后供重复使用，这样就必须构成制冷循环。在制冷循环中，工质经历反复的物态变化，以消耗动能为代价，从低温介质中吸取热量，并将其能量的总和释放给高温介质，从而实现制冷效应。因此，要了解制冷循环，必须弄清物质的聚态和状态，以及与聚态和状态有关的热力学知识。

(二) 物质的聚态

根据物质构造学说，一切物质都由称作分子或原子的微粒组成，这种微粒在不断地作不规则的运动，这种运动形成物体的热能，称为热运动。

当分子运动时，或者互相接近，或者互相离开。分子之

间又有引力存在，其大小决定于分子间的距离。因为分子间的距离和引力不同，物体能以三种不同的状态存在，即固体、液体及气体。

在固体里，分子（或原子）间的距离最近，相互间的引力也最大。在这种物态中，分子没有直进运动，只是围绕其平衡位置作微小的振动。

固体加热时，可以转变为液体。此时，分子间的距离增加，分子间的引力减小，分子可以作有限的运动。但分子间仍有相当大的引力，因此不能作直进运动，只能围绕着一个可动的平衡位置振动，以及在分子之间进行相对的位移。

液体继续加热，可以转变成气体。这时体积显著增加，分子间的距离增大，分子间引力减小。当体积膨胀得很大时，分子间引力变得很小，以致不能约束分子的运动，此时分子就作直进运动，当分子互相碰撞时，要发生旋转，而组成分子的原子还存在不间断的振动。可见，气体具有最大的运动动能，液体次之，固体最小。可见，物质聚态的稳定和转化都与环境条件密切相关。物质聚态不同，分子热运动的性质和程度也不同。

（三）液体的汽化和饱和状态

液体分子汽化的必要条件是获得能量，以摆脱分子间的引力和克服液体界面的阻力。在通常情况下，是对液体加热。在制冷工程中，则是冷间向冷却排管内的液体工质加热。

在敞口的容器内，随着加热的进行，液体温度愈来愈高，汽化速度也随之加快，液体表面的蒸汽压也相应提高。

当液体表面的蒸汽压等于大气压力时，液体就开始沸腾。这时，液体的温度不再上升，稳定在一定数值上，加入热量全部供液体汽化所用。汽体和液体之间的温度和压力完全相同，我们称这个状态为饱和状态。饱和状态下的各参数都称为“饱和”。例如：饱和温度、饱和压力、饱和蒸汽、饱和液体等等。

显然，大气压力不变，沸点也不变；压力降低，沸点也降低；压力升高，沸点也必相应升高。因此，每种液体的饱和温度都随环境压力的变化而改变，一定的饱和温度必对应于一定的饱和压力。

饱和蒸汽继续加热，就成过热气体，过热气体和同压下饱和气体的温度差称为过热度。

液体在不加热的条件下也可汽化。例如：向一绝热的容器内注入液体后再予封闭，由于分子热运动的结果，某些液体分子在碰撞中获得能量，冲破液体界面的阻力而进入汽相，由于分子热运动的继续，气相分子将逐渐增多。另一方面，剩留液体因失去能量较大的分子，温度要相应降低。同时气体分子中也有一部分在热运动中失去能量而重新落入液体之中。在开始阶段，这种动态变化的总结果是使气体的密度增加，液体的温度降低。以后随着重新液化速度的加快，液体汽化速度降低，必将在某一状态达到液化速度和汽化速度的平衡。这时，气体密度不再增加，液体温度不再降低，这个状态也是饱和状态。此时参数之间的关系和加热时达到沸腾状态时的关系完全一样。

和饱和状态相比较，同压下温度低于饱和温度的液体，

在制冷工程上，常称作过冷液体。同样，蒸汽压力低于同压下饱和蒸汽压力的气体称不饱和气体。若温度高于饱和蒸汽的温度时，则称过热气体。

一个开口容器中的液体，在自然汽化的条件下，由于液体界面上气体分子的散逸和汽化速度较慢，无法达到饱和的程度。因此，这时产生的气体都是不饱和气体，液体为过冷液体。一种温度低于周围介质温度的饱和气体在管道中输送时，因受周围介质的加热，到达输送终点时，必成为过热气体。

（四）气体的液化和临界状态

已知气体和液体的根本区别在于分子间的距离不同，欲使气体液化，必须缩小气体分子间的距离。可供选择的办法是增加气体的压力和降低气体的温度。在制冷工程中，压缩机可用以增加气体的压力，冷凝器用以降低气体的温度和吸收液化时放出的潜热。这样，在压缩机和冷凝器的共同作用下，一些低沸点的制冷工质就可用常温的介质来达到液化目的。

由饱和状态的特点可知，当压力较高时，饱和温度也较高，这时，气体就可在较高的温度下冷凝成液体。因此，在一般情况下，如果希望用温度较高的介质来冷凝气体，就可采用相应提高压力的办法来实现。但是实验告诉我们：每种气体都存在一个特殊的温度界限，当温度高于某一定值时，无论如何增大压力，都无法使气体液化，这个温度界限就是气体可以被液化的最高温度，热力学上称临界温度。对应临界温度的有临界压力等参数。在临界状态下，气体和液体的

区别完全消失。因为只有在液体和气体共存条件下，才能通过加热或冷却来实现物质的汽化或冷凝，所以临界状态是汽液转化区域内的一个极限状态。几种物质的临界参数（表1—1）。

表 1—1 几种物质的临界参数

名 称	分 子 式	临界温度 (°C)	临界压力 (公斤/厘米 ²)
氨	NH ₃	+132.4	115.2
水	H ₂ O	+374.1	225.6
R-11	CFC1 ₃	+198	44.6
R-22	CHFC1	+98.6	50.3
空 气	—	-140.7	37.2
氮	N ₂	-147.13	33.49
氧	O ₂	-118.82	49.72

从表1—1数字可知，氨、R-11、R-12等物质，临界温度很高，它们可用常温介质液化，因此在制冷工程中应用很广。空气、氮、氧的临界温度很低，很难液化，在通常条件下都以气态存在，人们也习惯于把这类物质称为气体，如空气、氮气和氧气等等。

（五）热、功和热力学第一定律

热量是能量的一种，制冷工程上用千卡做单位。1千卡热量可使1公斤水的温度变化1°C。

在一般情况下，物体加热时温度升高，放热时，温度降低。温度的升降可用仪表或人的感官检查到，因此，我们称这种热量为显热。显热的变化必将引起物体温度的变化。

使物体温度变化1°C所需的热量称比热，常用的比热单

位是千卡/公斤·℃或千卡/米³·℃，前者称重量比热，后者称容积比热。不同物质在不同状态和不同温度条件下的比热有差别。

液体在加热时沸腾，气体在放热时冷凝，固体的融化，液体的凝结以及固体的升华等物态变化时，虽然有热量的加入或放出，但物体的温度并不变化。这种在温度不变时所加入或放出的热量称潜热。潜热的大小也因物质的种类和物态变化时的条件而不同。

功也是能量的一种，某一物体需在外力作用下才能改变存在状态或相对位置时，则实现这种改变需消耗能量，这种能量即为功。功的大小可用作用于物体运动方向的力与物体位移的乘积来表示，工程上功的单位用公斤·米。例如：将重 10 公斤的物体垂直上举 5 米，则功值为 $10 \times 5 = 50$ 公斤·米。

单位时间内做的功称功率，工程上用千瓦作为功率的单位。

功和热都是能量的一种，热可转变为功，功也可转变为热。根据能量守恒定律，一定能量消失时，必然有另一种形式的能量产生，并且在数值上遵循一定的比例关系。说明功和热转换关系的就是热力学第一定律。用数学式表示：

$$Q = AL$$

式中：Q——热量，千卡。

L——功，公斤·米。

A——比例系数。

比例系数A称为功的热当量，根据实验测定，A的平均

值为 $1/427$ ，千卡/公斤·米。

通过换算，可将功和热量采用同一的度量单位，这给计算和分析问题带来许多方便。表 1—2 和表 1—3 列出的是几种常用的功、热量和功率之间的换算关系。

表 1—2 功、热换算表

千 卡	公斤·米	马力·小时	千瓦·小时
1	427	0.00158	0.00116
0.00234	1	0.0000037	0.00000272
632	270000	1	0.735
860	367200	1.36	1

表 1—3 功率换算表

千卡 / 小时	公斤·米/秒	马 力	千 瓦
1	0.1186	0.00158	0.001163
8.34	1	0.0133	0.00981
632	75	1	0.735
860	102	1.36	1

(六) 热力学第二定律

热力学第二定律的一种说法是“热量不可能自发地由低温物体传递给高温物体”，正像水不可能自动地由低处向高处流动一样。但热能可以被动地由低温物体传递到高温物体，正像井中的水可用人力或机械力抽提到高处一样，条件是消耗外功。

在图 1—1 的制冷原理图中，制冷剂由低温介质吸收热量后变为气体，由于压缩机的作用，气体制冷剂将热量传递给高温介质，并重新液化成液体。在一个制冷循环结束后，制冷剂的状态没有变化，只是低温介质的热量被传递给高温介质，压缩机消耗了外功。

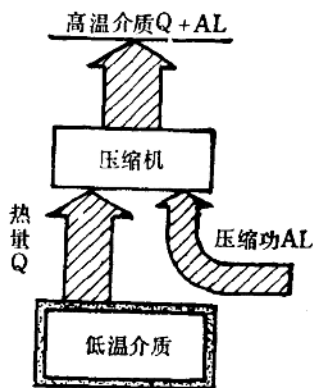


图 1—1 制冷原理图

设制冷剂吸收低温介质的热量为 Q ，压缩机消耗的功为 AL ，放给高温介质的热量则为 $Q + AL$ 。

由低温介质吸取的热量与压缩机消耗功量的比值称制冷系数 ε ，即：

$$\varepsilon = \frac{Q}{AL}$$

制冷系数是衡量制冷效率的参数。

(七) 状态参数

已知一切热力过程必须伴随工质的状态变化才能完成，例如在制冷工程中，制冷剂必须经过吸热、汽化、压缩、冷却、冷凝、节流等状态变化才能完成制冷循环。任何物体其状态变化的程度都可用状态参数来描述。状态参数是反映物体存在状态特性的数值，它与状态变化的中间过程无关，只与过程的起点和终点等某一定点有关。这样，我们可以撇开

复杂的中间过程，利用状态参数来计算物体的状态变化过程。

常用的状态参数有温度、压力、比容、内能、焓与熵几种。前二种可用仪表直接测量，后几种需用计算法导出。

1. 温度 温度是反映物体冷热、程度的量度。两物体接触时，热量由第一物体传递到第二物体，则表明第一物体的温度较第二物体为高，反之较低，若无热量传递，则为温度相等。

从分子运动学说看，构成物质的分子都处在不间断的热运动之中。例如气体分子不仅有直进运动，还有转动和振动。液体和固体的分子运动与气体虽有不同，但也存在多种形式的热运动。大量分子热运动的平均动能对外反映为物体的温度，因此，温度就是物质分子运动平均动能的量度。

在工程中，温度用国际百分温标 ($^{\circ}\text{C}$) 来量度，百分温标的 0° 是水的冰点，而 100° 是水的沸点，中间作 100 等分，每一等分为 1° 。国际百分温标的度数用 t 表示。

在热力学计算中，常采用绝对温标 ($^{\circ}\text{K}$)，它以分子停止热运动作为起点，称绝对零度。经过计算，推导出绝对零度比水的冰点低约 273 度。用绝对温标计算的温度称绝对温度，以 T 表示。则：

$$T = 273 + t$$

因为两种温标的每度量值相同，只是读数的起点不同，所以两种温标的量度差相同，有：

$$T_2 - T_1 = t_2 - t_1$$

2. 压力 压力是物质热运动受阻时对阻碍界面的作用

力。例如气体的压力就是大量气体分子撞击容器壁的结果。压力的大小用单位面积上的作用力表示，其方向垂直于作用面。

工程上，压力的单位用公斤/厘米²，称工程大气压。

物理学上，用纬度 45° 处海平面上的平均压力作为一个压力单位，称物理大气压。不同地点和不同高度位置上的实际大气压各不相同。

较小的压力一般用水银柱或水柱来表示。

以上几种压力单位之间有以下换算关系：

$$\begin{aligned} 1 \text{ 工程大气压} &= 1/1.033 \text{ 物理大气压} \\ &= 735.6 \text{ 毫米水银柱} \\ &= 10 \text{ 米水柱} = 9.80665 \times 10^4 \text{ 帕斯卡} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ 物理大气压} &= 1.033 \text{ 工程大气压} \\ &= 760 \text{ 毫米水银柱} \\ &= 10.33 \text{ 米水柱} = 10.13269 \times 10^4 \text{ 帕斯卡} \end{aligned}$$

$$1 \text{ 毫米水银柱} = 13.6 \text{ 毫米水柱。}$$

压力的数值可用压力表直接测量，用压力表测得的压力称表压力 $P_{\text{表}}$ 。因为测量是在大气压力作用下进行的，气体的实际压力只有在克服大气压力以后，才能指出正向的读数。所以，压力表指出的读数实为气体的实际压力与大气压力的差数，其测量原理如图

1—2。

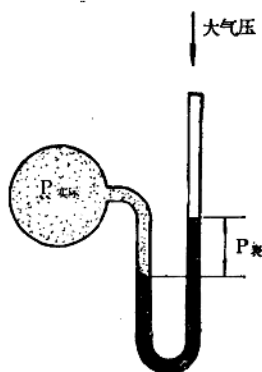


图 1—2 压力测量原理图

图 1—2 中，容器内气体的实际压力在克服大气压力的作用以后，使“U”形管内的水银柱升高的部分就是压力表测得的压力。因此，有：

$$P_{\text{表}} = p_{\text{实际}} - p_{\text{大气}}$$

$$P_{\text{实际}} = p_{\text{表}} + p_{\text{大气}}$$

已知 $P_{\text{大气}}$ 随地点和高度等变化，工程上为计算方便都假定 $P_{\text{大气}}$ 为 1 公斤/厘米²。因此，用工程大气压为计算单位时，

$$P_{\text{实际}} = P_{\text{表}} + 1, \text{公斤/厘米}^2$$

当气体的实际压力低于大气压力时，“U”形管内的水银柱就如图 1—3 所示。

图中，“U”形管左端水银柱的高度即为真空度，它表示气体的实际压力小于大气压力的程度。在制冷用的压力表中，真空度用水银柱高度表示。绝对真空时的读数为 760 毫米水银柱。

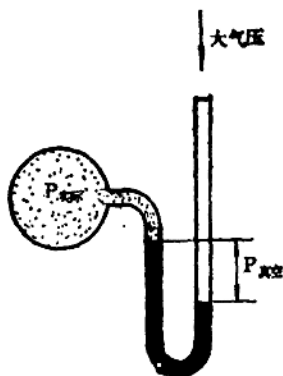


图 1—3 真空度测量原理图

3. 比容 单位重量的物质所占的体积称比容，用 v 表示，单位是米³/公斤。

显然，比容的倒数是重度 r 。则：

$$r = \frac{1}{v}, \text{公斤/米}^3$$

4. 内能 如果将物体分子运动的动能和分子的位能都考