

溴化锂制冷机 的操作与维修

XIU HUA LI

ZHILENG JI DE CAO ZUO

YU WEIXIU

王永发 编著

上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书是在溴化锂吸收式制冷机培训班教材基础上,经充实资料,修改编写而成的。

本书介绍的是溴化锂吸收式制冷机的工作原理、热工计算、型式结构、运行特性以及安装、运转、调节、控制等方面的知识。特点是制冷原理、基本术语及管理运行经验叙述详细,采用循序方式讲述,便于学习掌握。

本书可供溴化锂吸收式制冷机的管理、制造人员使用,亦可供有关专业的工程技术人员及大、中专院校师生参考。

溴化锂制冷机的操作与维修

王永发 编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路450号)

新华书店上海发行所发行 常熟第七印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 6.25 字数 143,000

1991年6月第1版 1991年6月第1次印刷

ISBN7-5323-2546-6/TB·18

印数 1—10,100 定价: 2.20 元

前 言

近几年来溴化锂吸收式制冷机在我国获得较快的发展和广泛的应用,对国民经济的发展起着一定的作用。但由于溴化锂吸收式制冷机的技术还在日益完善,就目前来说,如能合理使用溴化锂吸收式制冷机,就可使其使用寿命延长很多年,反之也足以使其很快腐蚀。这不仅影响机组的使用寿命,而且直接地影响机组的性能和正常运行。因此,对这种机型的书刊、资料的需要也日趋迫切。

本书是按照从事溴化锂吸收式制冷机的管理和维护人员的要求,并针对一般由氟利昂制冷机管理转向溴化锂吸收式制冷机管理的需要而编写的。

本书在编写过程中,何华斌参加了部分工作,还得到了参加原溴化锂吸收式制冷机培训班千多名学员的帮助,在此一并表示感谢。

限于编者的业务水平,书中错误和不足之处在所难免,恳切希望读者批评指正。

编 者

1990年10月

目 录

第一章 绪论	1
第二章 吸收式制冷的原理	3
第一节 怎样实现制冷	3
第二节 基本术语	5
第三节 溴化锂溶液的焓浓度图及状态点在图上的确定	11
第四节 传热原理和制冷换热器	14
第五节 传质过程	19
第六节 溴化锂吸收式制冷机的工作原理及其循环	20
第七节 二级发生溴化锂吸收式制冷机	22
第三章 溴化锂水溶液	24
第一节 溴化锂水溶液的特性	24
第二节 溴化锂-水工质对	25
第三节 溴化锂溶液的特性图表	29
第四节 溴化锂溶液的腐蚀问题	30
第四章 溴化锂吸收式制冷机的热工计算	32
第五章 溴化锂吸收式制冷机的型式与结构	39
第一节 溴化锂吸收式制冷机的型式	39
第二节 溴化锂吸收式制冷机的主要部件	40
第三节 溴化锂吸收式制冷机的主要辅助设备	46
第六章 溴化锂吸收式制冷机的运转性能	50
第一节 溴化锂吸收式制冷机的运行特性	50
第二节 提高制冷机运转性能的措施	52
第七章 溴化锂吸收式制冷机的安装、运转与维护	56
第一节 制冷系统的安装	56
第二节 制冷机的操作运转	60
第三节 制冷机的维护	68
第八章 溴化锂吸收式制冷机的调节、安全保护与程序运转	71
第一节 制冷机的冷量调节	71
第二节 制冷机的安全保护	74

第三节 制冷机的程序运转	77
常用符号	79
附表	81
附表 1 饱和水与饱和水蒸气表(按温度排列)	81
附表 2 饱和水与饱和水蒸气表(按压力排列)	83
附表 3 单位换算表	86
附图	90
附图 1 单效溴化锂制冷机流程图	90
附图 2 双效溴化锂制冷机流程图	90
附图 3 溴化锂溶液的密度(等浓度线)曲线	91
附图 4 溴化锂溶液的结晶曲线	91
附图 5 溴化锂溶液的焓-浓度图	92
附图 6 溴化锂溶液的焓-浓度图	93

第一章 绪 论

在现代的人工制冷中,除压缩式制冷外,吸收式制冷也是应用较广泛的一种。

从热力学第二定律可知,凡人工制冷必须消耗一定的能量来作为补偿过程。压缩式制冷机是依靠消耗电能来作为补偿的,耗电量大(尤其对大型制冷机而言)是它的缺点之一。而吸收式制冷机则是依靠消耗热能作为补偿过程,所需热能可来自低压蒸气、工矿企业的废汽及热水、太阳能等,因而经济性较好。

吸收式制冷机的原理早在 1777 年就为人们所发现,到 1925 年才把理论实用化,直到五十年代试制成第一台氨水吸收式制冷机,并在工业生产中得到应用。但由于设备比较复杂、热效率低,加以当时正值机械制造业蓬勃发展,1875 年出现了氨蒸气压缩式制冷机,致使吸收式制冷机在发展中受到一定的限制。1940 年发现了新的工质——溴化锂水溶液,吸收式制冷机又重新受到注意,并于 1945 年由美国凯利亚公司试制成功第一台溴化锂吸收式制冷机。

近 20 年来,随着科学技术的进一步发展,吸收式制冷机在各个方面日臻完善,而且正逢世界各国对能源利用问题十分重视,致使这种制冷机的发展更为迅猛。目前在大型空调装置中它所占的比重日渐增大,而且型式多种,广泛应用于各个领域。以结构型式分:有单筒型、双筒型、适宜于舰船使用的三筒型;以系统分:有单效型、双效型、冷温水两用型以及三泵、二泵和无泵系统;以热源种类分:则除了蒸气外,还有热水、燃气、燃油等。目前最大容量已达 5800kW ($5 \times 10^6 \text{kcal/h}$) 左右。

溴化锂吸收式制冷机对热源的要求很低, 0.12MPa 以上的低压蒸气和 80°C 以上的热水均可作为它的热源。它的工质具有无毒、不燃烧、不爆炸的特性,因而对人没有危害性。溴化锂水溶液在蒸发时蒸气中没有溴化锂存在,不需要有进一步分离溴化锂与水的精馏设备。同时也不用压缩机,设备结构比较简单,除屏蔽泵、真空泵、阀门等配套设备之外,几乎都是一般的热交换器设备,加工制造容易。由于没有大的运动部件,因而噪声、振动都很小,另外还具有操作简单、调节性能好以及可以使用温度较高的冷却水等优点。

溴化锂吸收式制冷机由于具有上述这些优点,使它今天在大型空调装置中和工厂工艺用水的生产中得到广泛的应用,尤其在有废汽、废热的地方使用更为有利。目前在美国大型空调装置中采用溴化锂吸收式制冷机的占 40%。日本近年来发展亦很快,1975 年的溴化锂吸收式制冷机销售量已超过离心式制冷机。并在此过程中,从一般的单效型式逐渐发展成双效型、直燃型、冷-热水两用型等。产量方面也有增长,由 1965 年以前的 60 台发展到 1973 年上半年为止已有 350kW 以上的机组 2000 台,其中 1972 年全年就生产了 670 台,八十年代还有新机型不断产生,溴化锂吸收式制冷机的生产有了大幅度的增长。

我国溴化锂吸收式制冷机的研制工作从 1963 年开始,到试制成功第一台船用溴化锂吸收式制冷机,从对溴化锂水溶液的物性、腐蚀和传热等基础性试验研究,到样机的研制、系统产品的设计制造都进行了大量的工作,到目前为止,溴化锂吸收式制冷机已在全

国纺织、宾馆、制药、电子、化工、冶金以及轻工部门得到广泛应用。

20年来,我国在发展溴化锂吸收式制冷机方面做了大量工作,取得了很大成绩,但与国外先进水平相比尚存在一定的差距。试验研究工作还做得不够,产品的更新换代慢,产品的品种还不能满足祖国四个现代化建设的需要,吸收式制冷机的性能还有待于进一步改进和提高,品种也有待于进一步更新。

随着我国四个现代化的飞速发展以及国民经济各部门日益增长的需要,溴化锂吸收式制冷机将得到广泛的应用,它的性能也将必定随着我国工业和科学技术的不断发展而日益完善,我们必须加倍努力,尽快使我国吸收式制冷机迈入世界先进的行列。

第二章 吸收式制冷的原理

第一节 怎样实现制冷

从日常生活可知,水总是由高处向低处流动,直至两连通容器中的水位相等为止。如果要把水从低水位送向高水位,就必须用水泵把水压至高处,这就要消耗功。若水从高水位自发流下的流量与水泵向上压送的流量相等,就能维持高、低水位差不变。

同理可知,两种温度不同的物体相接触,就会自发传热,热量总是会自发地由高温物体传给低温物体,直至两物体的温度相等,其传热才会停止。自然界中绝不会出现低温体自发地向高温体传热的情况。如果有一个低温体,放在周围温度较高的环境介质中,那么不论低温体保温得怎样完善,热量还是会通过各种途径向低温体“渗漏”。此时为了维持低温体的温度不上升,或甚至还要使它的温度继续下降,就必需使用制冷机,把热量从低温体“抽送”到环境介质(高温体)中去。当然,制冷机是要消耗能量的(如机械功、电能或热能等)。

我们可以把水泵的工作情况与制冷机作一类比(见图 2-1)。这里,水位差相当于温度差,水量相当于热量,水泵相当于制冷机(有一种特殊用途的制冷机称为“热泵”),高位水通过管道自发地流向低水位,相当于高温体的热量通过各种途径自发地流向低温体。上述只是一种直观性比喻,严格地说来,热量和水量在本质上是不同的。必须指出的是:水泵从低位水源吸取的水量等于压送到高水位的水量;而制冷机向高温体排送的热量 Q_k 却等于它从低温体吸取的热量 Q_0 加上输入机械功所相当的热量 AL , 即 $Q_k = Q_0 + AL$ 。详情见后。

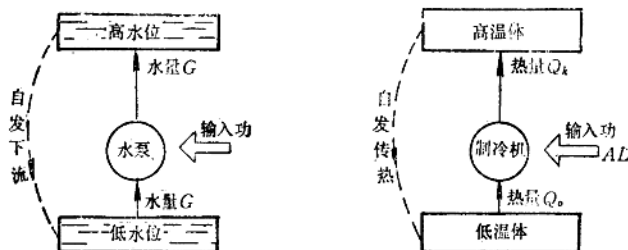


图 2-1 水泵与制冷机的类比

因此,制冷就是人工制取低温,也就是利用人类的技术来制取低于周围环境的温度,以满足人们生活或生产上的各种需要。

那末,怎样实现制冷呢?最常见的是蒸汽压缩式制冷。它的基本原理是利用某些低沸点的液体在汽化时能维持温度不变而吸收热量的性质来实现的。

溴化锂吸收式制冷机与蒸汽压缩式制冷机一样,也是一种借助制冷工质在低温、低压下蒸发、吸收热量,从而制取冷量的制冷机,水就是这种制冷机的制冷工质。为了能使制冷机连续制取冷量,也就是要使水在蒸发器中的蒸发过程连续进行,需要不断地补充蒸发掉

的水和不断地取走蒸发出来的水蒸气。在溴化锂吸收式制冷机中是利用一种溴化锂溶液(固态溴化锂溶解于水形成的一种液体),这种溶液在一定的浓度和温度下具有极易吸收水蒸气的特性,能将蒸发器中蒸发出来的水蒸气吸收掉,因吸收了水蒸气而变稀的溴化锂溶液在发生器中受到温度较高的工作蒸气(或其他形式的热能)加热,使溶液中的水分重新蒸发出来,并在冷凝器中通过冷却水冷却,放出汽化潜热而凝结为水,送入蒸发器中再蒸发,如此循环达到连续制冷的目的。

我们都有这样的体会:在炎热的夏天,屋子里非常热,这时只要在地上洒上一些水,由于水的蒸发,屋内就可以凉爽一些。又如在皮肤上擦一些酒精,酒精很快干了,这时皮肤上就产生凉快的感觉。这些现象说明,物质在蒸发时要吸收周围物体的热量,而周围物体由于失去热量,本身温度下降于是收到制冷的效果。

为了能经济而有效地连续制冷,人们经过长期的实践摸索,创造了多种行之有效的制冷方法。这里仅就广泛应用于氟利昂制冷机中的蒸气压缩式制冷与溴化锂吸收式制冷方法作进一步说明。

溴化锂吸收式制冷机从得到冷效应来说与蒸气压缩式是相同的。从图 2-2 氟利昂压缩式制冷机的循环与溴化锂吸收式制冷机的循环的比较中也可以看到,低压的制冷剂水在蒸发压力下进入蒸发器,制冷剂液体吸收了冷媒水的热量不断沸腾汽化,使冷媒水温度下降,达到制冷的目的。汽化后,低压蒸气必须设法回复到液体状态,以便进行连续制冷,这就需要通过相当于压缩机作用的吸收器和发生器以及冷凝器来完成。吸收器是吸收从蒸发器来的制冷剂蒸气,发生器将溴化锂稀溶液加热,使溴化锂溶液中的水重新蒸发出来,使它的压力得到提高,以致制冷剂蒸气能在常温下冷凝成液体状态。其冷凝过程如下:制冷剂蒸气被发生器蒸发后,其温度亦随之升高到高于环境介质(冷却水)温度。为此,还必须设法使制冷剂液体的温度进一步下降到低于冷媒水的温度才行。节流阀就能起到这一作用。高压液体经过节流阀进入蒸发器时因受到阻力而降压,在压力降低的同时,制冷剂液体因沸腾吸热而使本身的温度也相应下降。因而只要足够降压就可以使其温度降低到相应的低温,把这种低压低温的制冷剂汽液混合物引入蒸发器就能在冷媒水得到相应有的制冷效果。

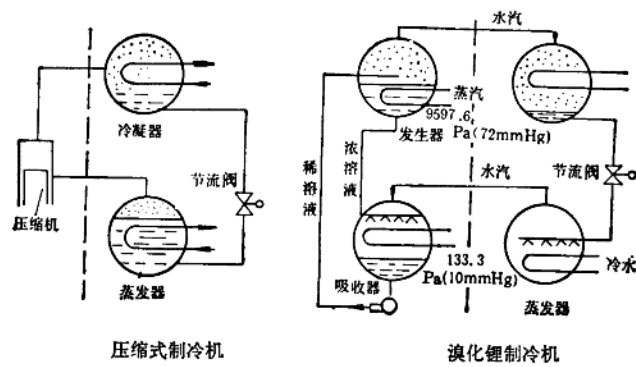


图 2-2 压缩式制冷机与溴化锂制冷机循环比较

综上所述,要有氟利昂制冷剂实现连续制冷,一台制冷机必须具备这四个基本部件来促使氟里昂循环变化:蒸发器使氟里昂液体吸热汽化;压缩机压缩氟里昂蒸气,使它的压力和

温度由低增高;冷凝器使高压蒸气放热冷凝为高压液体;膨胀阀使高压液体膨胀为低压低湿蒸汽混合物,不断供向蒸发器从而达到循环制冷的目的。在这过程中,所付出的代价主要表现在驱动压缩机运转所耗费的电力或其他动力上。溴化锂吸收式制冷机主要是由四只热交换器来完成溴化锂溶液的循环变化,由图可知只是用吸收器和发生器代替压缩机,(虚线左侧)吸收器起着压缩机的吸气行程作用,蒸发器、冷凝器、节流阀则具有同样的作用。虚线右侧与压缩式制冷机相同,付出的主要代价是用热量来加热发生器内的溴化锂稀溶液。

第二节 基本术语

从上述可知,溴化锂吸收式制冷机是一种以蒸气为动力,以水为工质,以溴化锂溶液为吸收剂,用来制取低温冷媒水的空调制冷设备。工质在制冷系统中一会儿由蒸气变成液体,一会儿又由液体变成蒸气,工质的这种状态变化以及浓度的增减、温度的升降、压力的增减、吸热和放热等现象是有一定的热力学内在关系的。为了更好地了解和掌握这种制冷设备,深入理解制冷原理,必须介绍一些热力学的基本知识和有关的基本概念。这里先对常见的一些术语作些说明。

一、温度

温度就是物体冷热程度的量度,常用 T 或 t 表示。温度的标定方法有多种,最常见的是摄氏温标,以符号 t 表示,单位为 $^{\circ}\text{C}$ 。摄氏温标是取在标准大气压力 0.1013MPa (760mmHg)下,冰的熔点为 0°C ,水的沸点为 100°C ,把这两点之间分成 100 等分,每一等分间隔为 1°C 。

在制冷工程计算中,通常使用绝对温标,也称热力学温标或开氏温标,以符号 T 表示,单位为 K 。绝对温度零度(0K)等于 -273.15°C 。绝对温标的分度间隔与摄氏温标相同,即摄氏温差 1°C 就是绝对温差 1K 。绝对温度与摄氏温度之间的关系为:

$$\text{绝对温度 } K = \text{摄氏温度 } ^{\circ}\text{C} + 273.15$$

若绝对温度以 T 表示,摄氏温度以 t 表示,实用上常取两者之差为 273 已够精确,即:

$$T \approx t + 273$$

当物体的温度发生变化时,它的某些性质也跟着发生变化,例如:液体的体积、气体的体积或压力、金属或半导体的电阻、热电偶的电动势等,都随着温度的变化而发生变化。人们利用这些物性随温度变化的规律制成各种不同的温度计来测量温度。

在制冷机中常用的温度计有玻璃棒温度计、压力式温度计,此外尚有电阻温度计、半导体温度计及热电偶温度计等。

二、压力

作用于单位面积上的力称为压力,常用 p 表示。我国法定计量单位中压力的单位为帕[斯卡],符号为 Pa 。力的单位为牛[顿](N),面积的单位为 $[\text{米}^2](\text{m}^2)$,故压力的单位 $\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$ 。由于[帕]的单位太小,实用上也可取它的 10^6 倍作为压力的计量单位,即 MPa (兆帕)。上述这些压力单位之间的换算关系为:

$$1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2 = 10^{-5}\text{bar} = 1.02 \times 10^{-5}\text{kgf}/\text{cm}^2$$

当我们把贮气筒里的气体全部放掉,压力表指针立即回复到零,这时筒壁是否受到压力呢?我们说,这时的贮气筒内壁仍然有压力作用着,这个压力就是周围环境的大气压力(不过贮气筒外壁亦受到大气压力,气筒内、外壁压力相平衡)。大气压是随地理气候条件的变化而变化的,在溴化锂吸收式制冷机中要考虑到这个变化。因此,这时筒内壁实际上受到的是当时当地的大气压力,而压力表指示值近似为零。为区别这两种情况,我们将上述压力表指示的压力称为表压力;将筒内壁实际受到的压力称为绝对压力。绝对压力与表压力的关系(见图 2-3 压力与真空关系示意图)可表示为:

$$\text{绝对压力} = \text{表压力} + \text{当地大气压力} \approx \text{表压力} + 1.013 \times 10^5 [\text{Pa}]$$

在以后的叙述中,除非特别加以说明,所有压力值均指绝对压力值。

当我们对贮气筒抽真空时,发现压力表的指针低于零,这反映了筒内的压力低于大气压力。低于大气压力的差值称之为真空度,它的单位和压力单位一样,由图 2-3 压力与真空关系示意图可知,这时筒内壁受到的绝对压力应为

$$\text{绝对压力} = \text{当地大气压} - \text{真空度} \approx 1.013 \times 10^5 - \text{真空度} [\text{Pa}]$$

在查阅图表时必须注意:一般图表上所注的压力都是绝对压力值。因此,对于用压力表测得的读数必须进行上述换算。

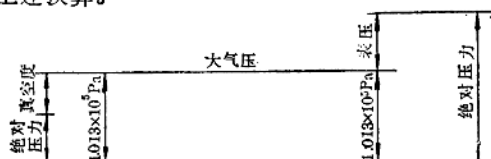


图 2-3 压力与真空关系示意图

溴化锂吸收式制冷机由于在高真空度下工作,通常制冷系统内的真空测量可使用 U 形真空计或旋转式真空计,其均能直接读出机组内的绝对压力。测量时不受大气压力的影响,更为直观方便。旋转式真空计能读出 0.133Pa (0.001mmHg) 的绝对压力,测量值更为准确。图 2-4 与图 2-5 分别为 U 形真空计与旋转式真空计的外形示意图。

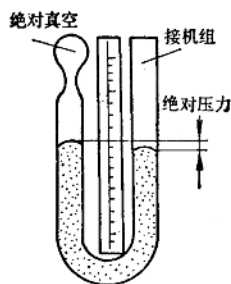


图 2-4 U 形真空计

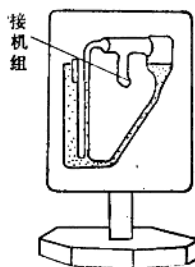


图 2-5 旋转式真空计

制冷系统外的高于大气压的测量可使用弹簧管压力表来测定,在压力不大时也可用 U 形管压力计来测定,管中介质可以是水银或水。图 2-6 与图 2-7 分别为弹簧管压力表与 U

注: bar, kgf/cm² 以及 mmH₂O (毫米水柱), mmHg (毫米汞柱), atm (标准大气压), at (工程大气压) 等都为非法计量单位,现已不用。

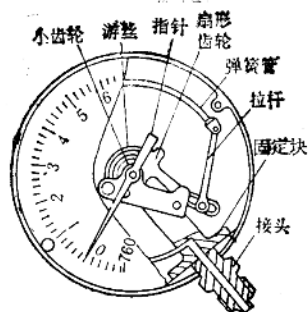


图 2-6 弹簧管压力表

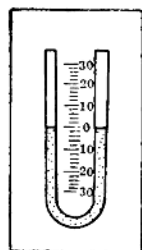


图 2-7 U 形管压力计

形管压力计的外形示意图。

三、比容与密度

单位质量物质所占有的容积称比容,用符号 v 表示。我国法定计量单位为 m^3/kg ,即每千克气体所占有的立方米数。

单位容积物质所具有的质量称密度,用符号 ρ 表示。气体的密度单位常取 $[\text{kg}/\text{m}^3]$ 。显然,比容与密度互为倒数,即:

$$\rho = \frac{1}{v}; \quad \text{而} \quad v = \frac{1}{\rho}$$

对于液体,由于其比容数值比气体小得多,故其单位常取 $[\text{L}/\text{kg}]$ 。同理,液体的密度单位常用 $[\text{kg}/\text{L}]$ 。在有关资料中查取液体的比容或密度时应注意其单位。

以上所述的温度 T 、压力 p 、比容 v 三者均可设法用仪表测量。 p 、 v 、 T 的数值说明工质所处的状态,它们是工质的基本状态参数。

四、溶液

由两种或两种以上纯物质所组成的均匀稳定体系叫做溶液。

溶液可以由两液体合成(例如把乙醇加入水中),也可由固体溶解于液体(如溴化锂溶解于水,形成吸收式制冷机中最常用的溴化锂水溶液),也可由气体溶解于液体(如氨蒸气溶解于水,形成吸收式制冷机中另一种常用的氨水溶液)。

构成溶液的有溶质、溶剂之分。当气体或固体溶解于液体中时,通常把液体当作溶剂,而把气体或固体当作溶质。例如氨水溶液和溴化锂水溶液中,水即为溶剂,氨和溴化锂为溶质。

溴化锂溶液就是把固体溶质溴化锂溶解在水中而成的。当把固体溴化锂放到水中时,溴化锂表面的粒子(分子或粒子)会由于本身的振动及受水分子的吸引,不断地、均匀地扩散到水的各个部分而形成溶液,这个过程叫做溶解。

固体溴化锂在水中的溶解性很好,但并不是可以无限地溶解的。在一定温度下,如果把固体溴化锂不断地加入到一定量的水中,那就会随着溶解过程的进行,溶液中的溴化锂含量不断地增加,当增加到某一定量时,就会发现如果继续加入溴化锂就不再溶解了,此时的溶

液称为饱和溶液。

饱和溶液中所含的溶质的量叫做溶解度。

一定温度下的饱和溶液(如溴化锂溶液),当温度下降时,由于溶解度减小,溶液中就有固体溶质(溴化锂)的晶体析出,这种现象称为结晶。在溴化锂吸收式制冷机的运行中,溴化锂溶液结晶是一种常见的故障,应十分注意避免。

五、浓度

为了确切地说明溶液中所含的溶质量,常用到浓度的概念。浓度是指溶质在溶液中所占的比例。与温度、压力、比容等表示物质状态参数一样,浓度是表示溶液特性的一个状态参数。

浓度的表示方法很多,有重量百分浓度、克分子百分浓度、当量浓度等等。在溴化锂吸收式制冷机计算中,一般采用重量百分浓度。

重量百分浓度的意义是在一定重量的溶液中,溶质所占的百分比,用符号 ξ 表示。

对于溴化锂溶液,若固体溴化锂的重量为 g_A kg,水的重量为 g_B kg,则由此组成的溴化锂溶液的重量百分浓度为

$$\xi = \frac{g_A}{g_A + g_B} = \frac{g_A}{G} \times 100\%$$

式中 G ——溴化锂溶液的重量。

例如:100g 溴化锂水溶液中含有 55g 溴化锂和 45g 水重量,百分浓度可由下式求得:

$$\xi = \frac{55}{55 + 45} = \frac{55}{100} \times 100\% = 55\%$$

根据重量百分浓度的含意,我们可以通过计算来配制一定浓度的溶液,例如对溴化锂吸收式制冷机而言,第一次充入机器内部的溶液的重量百分浓度一般为 58%,如果需配置 1^t (吨)浓度为 58% 的溴化锂水溶液,它所需要的溴化锂可根据上式求出:

$$58\% = \frac{x}{1} \times 100\% \quad x = 0.58t$$

因为市上出售的溴化锂一般都含有 2 份结晶水,因此 $\text{LiBr} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 的用量可按它们的分子量 μ 的比值来折算:

$$\frac{\mu_{\text{LiBr} \cdot 2\text{H}_2\text{O}}}{\mu_{\text{LiBr}}} \times 0.58 = \frac{123}{87} \times 0.58 = 0.82t$$

而所需水的重量则为 $1 - 0.82 = 0.18t$ 。也就是说,将 0.82t 的 $\text{LiBr} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 溶解到 0.18t 的水中,就得到 1t 浓度为 58% 的溴化锂水溶液。

六、汽化与凝结

我们在日常生活中可以看到,把水泼在地面上,不久,地面就会慢慢恢复干燥。这是因为水变成水蒸气跑到空气里去了的缘故。通常,我们把这种过程称为蒸发。另外,我们还可以看到烧开水的情况:把一盆水放在炉子上烧,加热后水温不断升高,与此同时,从水的表面上不断有水蒸气逸出,这也是蒸发过程;但当水被加热到 100°C 时,如图 2-8 中左面所示,情况就发生了显著的变化,这时,水面在不停地翻滚,并且从水里面大量地产生蒸汽泡,这种现象称为沸腾。在沸腾过程中,尽管炉子还是继续不断地加热容器中的水,但水的温

度始终维持在 100°C 不变。蒸发和沸腾都是由水变成水蒸气的过程，或称为汽化过程。但是，两者之间还是有明显的区别。一般说，蒸发在任何压力和温度情况下都随时在进行着，而且只是局限在表面的液体转变为蒸气，而沸腾在一定压力下只有达到与此压力相对应的一定温度才能进行，而且从液体内部大量地产生蒸气。例如：一个大气压下，水温达 100°C 时就沸腾；在 $4.7 \times 10^4 \text{Pa}$ 绝对压力下，水温 80°C 就沸腾；而在 934.6Pa 的绝对压力下，水温 6°C 就沸腾。我们把液体沸腾时所维持不变的温度称为沸点或称在某一压力下的饱和温度；而与饱和温度相对应的某一压力称为该温度下的饱和压力。这样，在上述烧水的例子中，我们可以说，水在一个大气压下的饱和温度为 100°C ，与此相对应的饱和压力为一个大气压。

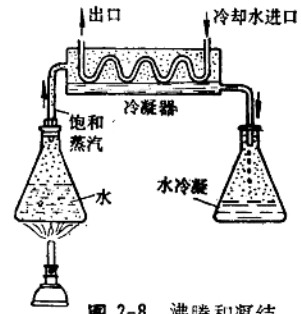


图 2-8 沸腾和凝结

在溴化锂吸收式制冷机中，水在蒸发器中不断吸收冷媒水的热量而由液体变成蒸气，这时水在蒸发器中所进行的是沸腾过程而不是蒸发过程，即当蒸发压力一定时，其中制冷剂水将在与该蒸发压力相对应的饱和温度下进行吸热、沸腾。其中发生器中工作的情况也是因受到蒸气的加热，而稀溶液中的水不断地沸腾出来。

凝结与汽化过程恰恰相反，即当蒸气在一定压力下冷却到一定温度时，它就会由蒸气状态转变为液体状态，这种冷却过程称为凝结过程（见图 2-8 右面）。在日常生活中，凝结的例子是很多的，例如：把盛有热水的锅盖揭开，盖上就有很多水珠滴下来，这就是汽化了的水蒸气遇到较冷的锅盖又复凝结的表现；又如冬天室外温度很低时，房间的玻璃窗上就有凝结的水珠，这是因为室内空气中的水蒸气遇到较冷的玻璃窗后凝结成水的缘故。

在溴化锂吸收式制冷机中，水在冷凝器中的变化过程是一个凝结过程。从发生器出来的制冷剂水蒸气进入冷凝器后被冷却水所冷却，并凝结成制冷剂水液体。必须指出，凝结时蒸气的凝结温度即是所处的压力下的饱和温度，在整个凝结过程中，尽管蒸气还是继续受到不断冷却。但其温度始终维持不变（因冷凝器内压力不变）。

七、饱和温度和饱和压力

上面已经初步提到了饱和温度与饱和压力之间存在着一定的对应关系，这一事实可以在不同海拔高度烧开水的生活实践中得到感性的认识。在气压为一大气压的沿海平原地带烧水，水到 100°C 方才煮开；而在气压低于一大气压的内地高原上烧水，水不到 100°C 就沸腾起来了，这充分说明，环境压力不同，水的沸点（即饱和温度）也就不同。

饱和温度与饱和压力之间一一对应的关系可以通过对不同物质进行大量科学实验来求得。附录饱和水蒸气表列出了水的饱和温度与饱和压力的对应关系。

对于不同的液体，在同一压力下，它的饱和温度也是不同的。例如：在一个大气压下，水的饱和温度是 100°C ，酒精为 78°C ，但氨则是 -33.4°C ，通常所说的沸点都是指液体在一个大气压下的饱和温度。

作为制冷剂的主要特征之一就是其沸点要低，这样才能利用制冷剂液体在低温下汽化吸热来得到低温。

八、过冷与过热

让我们仍以水蒸气的形成来说明这两个概念。在图 2-9(a) 所示的开口容器中盛放着水温为 20°C 的水,水面上有一个能上下自由移动又起密封作用的活塞,假使活塞的重量略而不计,也就是说,水面上受到一个大气压力的作用。如加水进行加热,水温开始升高,水的体积有所增大。当水温升高到饱和温度 100°C 时,这水就称为饱和水(图 2-9(b))。 20°C 的水显然比 100°C 的饱和水温度低,这种比饱和水温度低的水就称为过冷水。图 2-10 水在流动过程中进行冷却获得过冷水的示意图。饱和温度与过冷水温度之差称为过冷度,在上例中即为 $100 - 20 = 80^{\circ}\text{C}$ 。

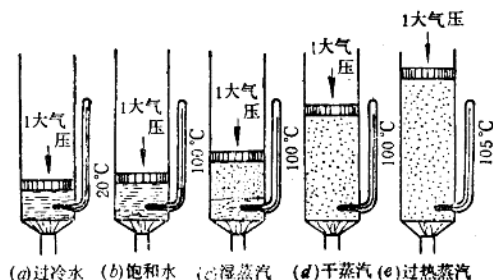


图 2-9 过冷和过热过程

若将饱和状态的水继续加热(如图 2-9(c)),水温将保持在 100°C 不变,容器中的水不断汽化为蒸气,比容很快增大,这时容器中是饱和水和饱和蒸气的混合物,称为湿蒸气。再继续加热(如图 2-9(d)),水继续汽化,比容继续增大而温度 100°C 保持不变,直到水全部变为蒸气,这时的蒸气称为干蒸气。若对干蒸气再继续加热,其温度就开始升高,超过饱和温度 100°C (图 2-9(e)),这时的蒸气称为过热蒸气。过热蒸气的温度与饱和温度之差称为过热度。如过热蒸气的温度为 110°C ,则其过热度即等于 $110 - 100 = 10^{\circ}\text{C}$ 。图 2-11 是在流动中加热获得过热蒸气的示意图。

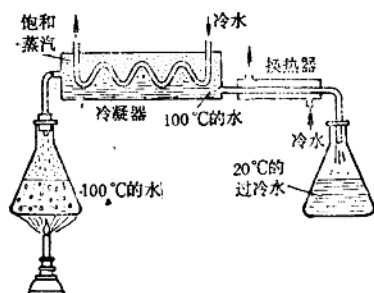


图 2-10 流动中的过冷过程

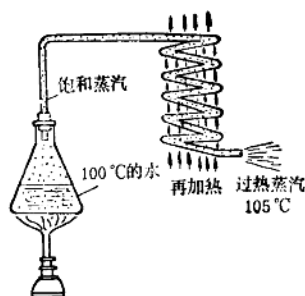


图 2-11 流动中的过热过程

溴化锂吸收式制冷系统中,发生器出来的制冷剂蒸气都处于过热蒸气状态,从冷凝器水盘出液管流出的往往是有过冷度的过冷水。

九、显热和潜热

水加热后温度就升高,放热后温度就降低;另外,水在汽化时要吸热,蒸气在冷凝时要

放热。

从上面实验可看出,由过冷水加热到饱和水,水的温度逐渐升高,所加热量的多少可以从温度的变化反映出来,这个热量就叫做显热。

在水沸腾时,我们继续加热,水不断地由液体变成蒸气,但水温保持不变。那么所加的热量到哪里去了呢?原来是消耗在水由液体变为蒸气的转化上了。这就是说,液体汽化时需要吸收热量。在汽化过程中,每公斤饱和液体完全转变为干蒸气所吸收的热量称为该液体的汽化潜热。例如:1kg100°C的水完全汽化为干蒸气所吸收的热量为2260kJ(1大气压下)。这热量就是水在一大气压下的汽化潜热,它的单位是kJ/kg。汽化潜热在不同的压力下,即饱和温度不同时,其数值是有所变化的。例如:水在1MPa下汽化时,它的饱和温度是179°C,汽化潜热为2018.5kJ/kg。另外,不同液体的汽化潜热也有不同的数值。例如一大气压下F12的汽化潜热为167.3kJ/kg。

十、比热容

1kg质量的物质温度升高(或降低)K(开尔文)时所吸收(或放出)的热量称比热容,用符号 c 表示,单位是kJ/(kg·K)。

自然界中各种物质的比热容是不同的,即使同一物质来说,当它所处的温度条件不同时,其比热容也有些变化。例如水的比热容约为4.1868kJ/(kg·K),但严格说明,当水温变化时,其比热容也略有变化。

质量比热容最为常用,可用于固体、液体或气体。但对气体来说,还常采用容积比热容这一概念。单位容积(1标准 m^3)的物质温度升高(或降低)1°C时所吸收(或放出)的热量称容积比热容,用符号 c' 表示,单位是kJ/(m^3 ·K)。所谓1标准 m^3 是指处于0°C及0.1013MPa(760mmHg)压力下的 $1m^3$ 的气体容积。

由于气体在吸热或放热过程中其容积、压力可以是变化的,因此当它的温度变化1°C时,吸热或放热量也有很大的变化。为此,在工程中引进了定压比热容与定容比热容,分别用符号 c_p 与 c_v 表示。例如,定压质量比热容是指1kg气体在压力保持不变情况下温度升高(或降低)1°C所吸收(或放出)的热量;而定容质量比热容则是指1kg气体在容积保持不变的情况下温度升高(或降低)1°C时所吸收(或放出)的热量。值得注意的是,定压比热容总是大于定容比热容,这是由于定压下加热气体使其温度升高1°C时气体还要克服外力膨胀作功,故此时要比定容下吸收更多的热量的缘故。各种气体的定压比热容与定容比热容可从有关资料中查用。空气在常温下的定压比热容为1.005kJ/(kg·K)。

对固体或液体来说,因其温度变化时容积变化很小,故往往不区分定压比热容与定容比热容。

第三节 溴化锂溶液的焓浓度图及状态点在图上的确定

溴化锂溶液的*i*- ξ 图其用途与蒸汽压缩式制冷机中使用的*tgP*-*i*图相似,是进行溴化锂吸收式制冷机的热工计算和制冷循环分析的主要线图,如图2-12所示。它以溶液的焓值为纵坐标,以溶液的重量百分浓度为横坐标,图分上、下两个部分:下部为液相区,斜实线为等温线,斜虚线簇为等压线,最右边的实线为溶液结晶线;上部为汽相区,有一组为了求

得过热蒸气焓值的辅助等压线。它描述了溴化锂溶液的焓 i 、浓度 ξ 、温度 t 和溶液表面水蒸气饱和压力 p 之间的相互关系,只要知道 i 、 ξ 、 t 、 p 四个量中的任意两个量,就可以从 i - ξ 图中确定其他的两个量,同时也可确定位于溶液面上处于过热状态的水蒸气的焓值。

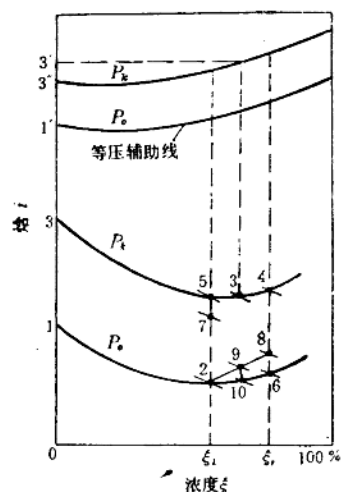


图 2-12 制冷循环在 i - ξ 图上的表示

水分不断逸出,溶液的浓度不断提高,直至 4 点发生终了时浓溶液的状态,此时浓度为 ξ_c 。

4-8 为浓溶液在溶液热交换器中的冷却过程。冷却过程是沿 ξ_c 等浓度线进行的。点 8 为溶液出热交换器的状态,此时压力较前有所下降,但温度相应降低更多,故为过冷液体。

8-6-2 本应为溶液在吸收器中的冷却、吸收过程,但因需要满足吸收器中吸收溶液具有一定喷淋量的要求,在进入吸收器的浓溶液中混入一部分稀溶液,因而该溶液状态实为点 9,它是以点 2 状态的稀溶液和点 8 状态的浓溶液按一定比例混合而成,点 9 的位置应在点 2 与点 8 的连线上。这种中间溶液是通过吸收器泵送入吸收器进行喷淋的,因泵的功率很小,溶液通过泵后的焓值可看成不变,但压力有所增加,进入吸收器后,闪发成点 10 状态。在蒸发压力 p_0 下吸收来自蒸发器的制冷剂水蒸气,最终到达 2 状态。10-2 即为溶液在吸收器中的吸收过程。

2-7 为稀溶液在热交换器的加热过程。来自吸收器的稀溶液经发生器泵输送到溶液热交换器,被发生器来浓溶液加热,这主溶液通过泵后的焓值也看成不变,但压力增高了,故不再是饱和状态,而为过冷液体。

3'-3 和 3-1' 分别表示制冷剂水蒸气的冷凝与蒸发过程,它们均在纵坐标轴上。在整个发生过程中,蒸发析出的制冷剂水蒸气状态是不断变化的,我们可按发生开始温度 t_0 和发生终了温度 t_k 的平均温度 t_s 作为制冷剂水蒸气进冷凝器时的温度,由该等温线与 p_k 等压线的交点向上引垂线,与汽相内 p_k 等压辅助线相交于一点,自该点作横轴平行线与纵坐标轴相交得点 3'。应当指出的是,汽相等压线只是辅助线,并不说明蒸气的浓度,只用来说明蒸气的焓值。因此,点 3' 只表示进冷凝器水蒸气的焓值,它的温度是 t_s ,压力是 p_k 。点 3' 的制冷剂水蒸气进入冷凝器后,首先冷却至饱和,到达 p_k 等压辅助线与纵坐标轴的交点 3'', 然后冷凝至液相 p_k 等压线与纵坐标轴的交点 3。出冷凝器的制冷剂水经节流后进入蒸发器蒸发。由于节流后压力下降,制冷剂水已不是饱和状态,但其焓值不变,故仍为点 3 的位置。制冷剂水在蒸发