

全国中等水产学校试用教材

制 冷 原 理

前 言

本书是三年制中专制冷专业用的教科书。第一篇结合制冷工程的特点，提供了必要的工程热力学基础知识，阐述了气体的基本概念、热能转换的规律、蒸汽的性质、湿空气、气体和蒸汽的流动等主要内容。第二篇介绍了普通冷冻的基本工作原理，而以蒸汽压缩式制冷原理作为重点，对吸收式、蒸汽喷射式和热电式制冷原理也作了概要的介绍。本书内容简明，文字通俗，说理比较清楚，对重要公式都列有例题，书末附有重要制冷工质的计算图表。

本书亦可供制冷行业的工人、技术人员和有关专业的师生参考。

参加本书审定工作的有：广东省食品公司麦嘉穗，上海机械学院顾景贤、余国和，上海海运学院吴甲斌，厦门水产学院李松寿，湖南省肉食水产公司刘治华，上海冰箱厂郁天强，武汉冷冻机厂吴荣泉等同志。西安交通大学张社祐、韩宝琦，上海机械学院蒋能照，华中工学院郑贤德、陈志远，国家水产总局设计院孙瑞璋等同志提了书面意见。经过以上同志严肃认真的审查，对于完善教材内容、提高书稿质量起了很大的作用。在此，我们谨向这些单位和同志表示深切的感谢。

本书由河北水产学校周志云主编，天津水产学校马灵芝编写了第二篇的第七至第九章。由于编者水平所限，编写时间又较为短促，书中不妥和错误之处，恳切希望读者给予批评指正。

编 者

1979. 1.

目 录

绪论	1
----------	---

第一篇 工程热力学基础

引言	5
第一章 理想气体的性质及其热量计算	6
第一节 理想气体的基本状态参数	6
第二节 理想气体状态方程式	9
第三节 混合气体	11
第四节 气体的热量计算	13
第二章 热力学第一定律及热力过程	18
第一节 热力学第一定律	18
第二节 内能	19
第三节 气体的外功	20
第四节 热力学第一定律的能量方程式	22
第五节 气体的基本热力过程	24
第三章 热力学第二定律及循环	33
第一节 循环及热效率	33
第二节 卡诺循环	34
第三节 制冷机理想循环	35
第四节 熵和温—熵图	36
第五节 热力学第二定律	40
第四章 蒸汽的性质	42
第一节 液汽两相的转变过程	43
第二节 蒸汽的产生	44
第三节 蒸汽的图表及其使用方法	46
第四节 蒸汽的基本热力过程	51
第五章 湿空气	53
第一节 湿空气的基本概念	63
第二节 湿空气的状态参数	54
第三节 湿空气的I—d图(焓湿图)	56
第四节 I—d图的应用	57
第五节 湿空气状态变化的过程	60
第六章 气体和蒸汽的流动	65
第一节 稳定流动的基本方程式	65

第二节	气体通过喷管的流速和流量	67
第三节	临界压力比、临界速度与最大流量	68
第四节	缩放喷管	70
第五节	实际流动过程	71
第六节	气体及蒸汽的节流	73
第二篇 制冷原理		
第七章	蒸汽压缩式制冷循环的热力学基础	77
第一节	单级蒸汽压缩式制冷的理论循环	77
第二节	制冷循环的热力完善度	80
第八章	制冷工质与载冷剂	81
第一节	制冷工质的种类	81
第二节	对制冷工质的要求	83
第三节	常用的制冷工质及其性质	87
第四节	新制冷工质R-502	90
第五节	制冷工质的选用	92
第六节	载冷剂(冷媒)	94
第九章	单级蒸汽压缩制冷循环	100
第一节	单级蒸汽压缩式制冷的实际循环	100
第二节	液体工质的过冷、蒸汽的过热及回热循环	103
第三节	单级压缩蒸汽制冷循环的热力计算	107
第四节	制冷量、功率与工况的关系	109
第十章	多级压缩及复叠式制冷循环	118
第一节	采用多级压缩的原因	118
第二节	两级压缩制冷循环	119
第三节	两级压缩制冷循环的热力计算	123
第四节	复叠式制冷循环	132
第五节	复叠式制冷循环的热力计算	134
第十一章	吸收式制冷机原理	137
第一节	概述	137
第二节	吸收式制冷机的工质	138
第三节	溴化锂吸收式制冷机原理	140
第四节	氨-水吸收式制冷机原理	143
第五节	吸收-扩散式制冷机原理	144
第十二章	蒸汽喷射式制冷机原理	145
第一节	概述	145
第二节	蒸汽喷射式制冷机的工作过程	148
第三节	蒸汽喷射式制冷机介绍	148
第十三章	热电式制冷原理	150
第一节	概述	150
第二节	热电制冷的基本原理	151

第三节 制冷系数及优值系数	152
第四节 半导体制冷器件的构造	154
附录一 国际单位制介绍	155
附录二 实验	160
蒸汽压缩式制冷装置制冷量的测定	160

绪 论

(一)

“制冷”是指用人为方法不断地从被冷却对象排热到周围环境介质中去，而使被冷却对象达到比环境介质更低的温度，并在必要长的时间内维持所规定的温度。要实现这个目的，可以有两种方法。一种是向自然界索取天然冷源：冰、雪或地下水。我国对冰的应用有着悠久的历史，直到目前，天然冰在食品保藏和降温等方面仍有大量应用。近年来，开发地下水资源用于工矿企业的空气调节工程中也较普遍。这种制冷方法的优点是简便、费用低，但它一般不能得到低于 0°C 的温度，又不易控制和调节，而且还受到季节和地区的限制。因此，当需要获得低于 0°C 的温度时，就必须采用另一种方法，这就是以消耗机械能或其它能量作为代价的“人工制冷”。

人工制冷或叫“致冷”。习惯上，我们把达到低于周围环境温度 $\sim 120\text{K}$ 以上的制冷技术叫普通冷冻，把 $120\text{K}\sim 73\text{K}$ 之间的制冷技术叫深度冷冻，把 $73\text{K}\sim 4.2\text{K}$ （氮在常压下的液化温度）之间的制冷技术叫低温制冷，而把 0.5K 以下的称为极低温技术。就本专业来说，我们讨论的范围仅限于普通冷冻。

近三十年来，人工制冷技术有了迅猛发展。在现代化的国民经济和国防领域中，几乎没有一个部门不应用制冷技术。

食品工业是最早应用制冷的部门。由于肉类、水产品、禽蛋、果蔬等易腐食品的生产有着较强的季节性和地区性，为了调剂旺淡季节、保障供给、支援出口、备战备荒，就需要将食品进行冻藏或冷藏，来延长食品的贮藏期限。目前，在商业流通网中，冷库设施、冷藏船、冷藏列车、冷藏汽车以及冷藏柜台、冰箱等装置的使用已逐渐普及，而冷藏库的服务范围，甚至还扩大到保存贵重皮毛、服装、药材、花卉、蚕种等方面。其它如冷饮品、饮料、酿酒等工业也离不开制冷技术。

在农业方面，使用化肥是粮棉增产的重要措施，施用1斤化肥可以增产3斤左右粮食，而在化肥生产中需要应用制冷。实现农业现代化要搞科学种田，如培育耐寒品种、微生物除虫、良种精卵的保存、人造雨雪等都与“冷”有关，可见制冷技术在农村的广阔天地也是大有可为的。

在工业方面，制冷技术的应用更为广泛。如近代炼钢工业，每炼一吨钢约需 50米^3 的氧气，那末年产6000万吨钢，就需要30亿 米^3 氧气，而氧气则是用深冷空气分离技术来获得的。在石油化工、有机合成（橡胶、塑料、化纤、药物、染料等）、基本化工（酸、碱）等工业中，如分离、精炼、结晶、浓缩、提纯、液化（如天然气的液化和贮运）、控制反应温度等单元操作都要用到制冷技术。

在冶金、纺织、印刷、精密仪表、电子工业等工厂，某些有特殊要求的实验室、试验中心、检量室，为了保证必要的恒温和恒湿的工作条件，需要进行空气调节，而制冷

则是空调装置中不可缺少的组成部分。此外，大会堂、影院、剧场、博物馆、医院、饭店等公用建筑，以至于旅客列车、汽车、救护车、客货轮、飞机等交通工具都日益广泛地应用空调装置。

在地下水位很高的地区或沼泽地带施工时，水就会给建筑施工带来很大困难，甚至使施工无法进行。如用人工制冷来冻结土壤，造成一道冰冻的围墙，就可防止水的侵入。由于冻土有相当大的抗压强度（ -9°C 时为130公斤/厘米²），故对挖掘矿井、隧道和建设地下工程是很适用的。另外，如修筑船坞、水闸、加固拱门桥梁时均可采用人工制冷来冻结土壤。对于一些地下工程，还往往要应用制冷的方法进行空调去湿，以便控制室内空气的湿度。

在医药卫生方面，血清、疫苗、组织器官（如皮肤、眼球等）和各种有机药物需要在较低温度下保存。在抗菌素的生产中，有的还要采用真空冷冻干燥。另外，如法医用“冷”保存尸体，以便确定致死原因，医学院校和研究部门冷藏尸体、器官组织，以供科研和学习之用。又如人工冬眠、低温麻醉和“冷手术刀”等医疗技术也无不都是制冷技术的应用。

在飞机制造和宇宙航行事业中，为了测试产品的低温性能，需要建立环境试验室，以便模拟某一气候条件进行试验。如航空发动机、航空仪表、飞机和火箭、航天器的材料零件等都要进行低温检验，必须合格后才被允许上天。对于坦克、装甲车、军械等同样有必要进行环境试验。另外，液氧和液氢可用作火箭的推进剂，而它们都是借助深冷或低温技术获得的。

用深冷方法还可从电解水的产物中分离出氢的同位素氘，氘是热核能的原料，如这一问题能得到进一步解决，则人类将有取之不尽、用之不竭的能源。科学研究发现了金属和合金在低温下的超导现象，使用超导电缆在传输大能量电力时极为经济。但形成金属的超导，就需要低温技术和设备。

在许多近代尖端科学技术部门中，如高速电子计算机、卫星通讯、激光、获得高真空、红外技术……等，都需要应用制冷技术。

现在，连文化、体育事业也离不开制冷，如摄影棚的空调、人工雪景的布置、室内冰球场等无不需“冷”。有些国家还采用低温粉碎方法来处理废塑料、废橡胶等工业废物，以减少城市公害。目前，甚至在文物的保存和保护方面也应用了制冷技术。

我们可以断言，随着科学技术的飞速发展，在制冷的应用方面将展示出无限广阔的灿烂远景。

（二）

我国古代劳动人民的许多发明创造，为人类社会的进步做出了光辉的贡献。早在三千多年以前，我国人民已经懂得利用天然冷源，在冬季采集天然冰贮藏在冰窖里，到夏季再取出来使用。如《诗经》上《豳风·七月》提到了“二日凿冰冲冲，三日纳于凌阴，四日共蚤”描述了当时的奴隶在寒冬腊月采集和贮存天然冰的辛勤劳动。到春秋战国时期，已出现了藏冰的冰房。在《左传》中经常提到冰房窖冰之事。《周礼》也有“凌人夏颁冰掌事”之说，这里的“凌人”就是总管藏冰和分配的小吏。当时还发明用

“冰鉴”盛冰以冷藏食物，并知道用冰来“寒尸”，以免尸体很快的腐臭。

到了封建社会，用冰制冷的技术又有发展。如《汉书·惠帝纪》中提到“秋七月乙亥，未央宫凌室灾”，记载了当时宫内冰库发生火灾的事。《邺中记》一书介绍了三国时代“曹操在临漳县西南设井，建石虎于其上藏冰。三伏之日以赐大臣”。书中还描述了一个大型冰库的规模：“有屋一百四十间，下有冰室，室有数井，井深十五丈，藏冰及石墨……”，这在1700多年之前实为世界上首屈一指。到了唐朝，冰的应用更为普遍，以至出现了“长安冰雪，至夏月则价等全璧”的情况。此外，在《齐民要术》中记载着农业上用雪水拌种，增强种子的抗寒性，以改良种子和提高产量。元朝时，意大利传教士马可勃罗（Marco Polo）曾来我国游历多年，在其所著《马可勃罗游记》中介绍了我国十八世纪用冰保藏鲜肉及制造冰酪冷食的技术。在建筑施工中我国也是应用冷冻最早的国家，在明代建造故宫和十三陵时，为了将几百吨的巨石完整地运到工地，采用沿路“百步一井”的方法。到了寒冬提水浇路，使路面结冰，利用巨石在光滑的冰道上滑动将它拉运到目的地，解决了当时没有大功率搬运设备的困难。

但是，在封建社会中，由于历代统治阶级的压迫奴役，社会生产力发展非常缓慢，我国的制冷技术也处于停滞的状态。解放前，在帝国主义、军阀、国民党反动派的血腥统治下，我国沦为一个半殖民地半封建的国家，政治腐败、经济上贫穷落后，工农业面貌破烂不堪，根本谈不上有什么制冷事业。全国仅上海、天津、汉口、南京等几个城市有少数冷库，总库容量不足三万吨，还大都掌握在外国资本家手中，成为掠夺我国农副产品的据点。上海仅有的几家很小的“冰箱厂”，也只能依靠进口设备、零件，搞些修修补补，为官僚买办和剥削阶级服务。至于制冷专业教育和科学研究则完全是空白。

解放以后，在中国共产党和毛主席的领导下，我国的制冷事业有了飞速发展。二十多年来，商业、外贸、水产系统的冷库都有了较大的发展，总库容量比解放前增长了三十多倍。制冷机制造业从无到有，从小到大，从仿制到自行设计，正在不断地茁壮成长。我国从1954年起造出了制冷机，到1958年已有了很大的发展。1964年制订了中小型活塞式制冷压缩机系列，共五种缸径二十二个品种。1976年制订了全封闭压缩机系列草案，1977年开始搞样机设计工作。我国在1967年制成蒸喷式制冷机，1968年制订了《蒸汽喷射制冷机系列》。1966年起，设计试制溴化锂吸收式制冷机，1974年制订发布了《溴化锂吸收式制冷机型式和基本参数》部标准，目前已生产20万~300万大卡/时不同制冷量的溴化锂吸收机。1966年，试制成300万大卡/时丙烯离心压缩机，1976年制订了空调用离心式制冷机系列草案。1971年我国成功地试制了螺杆压缩机，1974年一机部制冷行业组织了螺杆式制冷压缩机的联合设计，已有批量生产。半导体冰箱、空调器的研制也有了很大的进展，已开始形成生产能力。到目前为止，全国制冷机制造厂已有二十几个，布局比较合理，在产品品种和质量方面都达到了一个新的水平，并正在为实现四个现代化、迅速赶超世界先进水平而努力奋斗。

目前，我国一些工科高等院校动力系设有制冷和低温技术专业，在商业、水产、海运院校中也设有制冷专业、冷藏工艺专业，为我国培养了大批又红又专的制冷技术人才。此外，有些部门还设立了专业的科研设计单位，如合肥通用机械研究所、商业部设计院、一些省市的工业建筑设计院、轻工业设计院、纺织工业设计院、食品研究所、自

动化仪表研究所等。有关单位分别出版了几种专业刊物，如《冷藏技术》、《制冷机械》、《化工与通用机械》、《通用机械文摘》、《食品科技》、《渔港与渔船》等，多年来为发展我国制冷技术做了不少工作。1977年4月，我国成立了中国制冷学会，下设六个专业学组。1978年5月，又恢复了中国水产学会，下设渔业制冷专业委员会。它们正积极开展制冷科学技术的研究和学术交流，无疑将对我国制冷科学技术的发展起很大的促进作用。

以华主席为首的党中央，向全国人民提出了在本世纪内把我国建设成为伟大的社会主义现代化强国的战略任务。现代化的农业、工业、国防和科学技术都迫切需要制冷技术。但是，制冷技术在我国还是一门年青的学科，各方面的差距都不小，在林彪、“四人帮”的干扰破坏下，原来缩小的差距又拉大了，赶超世界先进水平的任务极为艰巨。作为制冷战线上的新兵，我们任重而道远，我们一定要为实现四个现代化的需要，努力学好制冷技术，为发展我国的制冷事业作出更大的贡献。

第一篇 工程热力学基础

引言

制冷专业为什么要学习工程热力学的基础知识呢？这个问题可从专业的任务加以阐明。

目前，在易腐食品的贮藏运输方面已广泛应用人工制冷；而在现代化工业生产的许多部门、国防工程以及大型公用建筑中，为了保证生产的正常进行或实施劳动保护、讲究公共卫生，也大多采用人工制冷来进行空气调节。这样，就需用适当的制冷装置，以实现上述各种目的。

图1是蒸汽压缩式制冷系统的原理图，该系统由压缩机、冷凝器、节流阀和蒸发器等四个主要部件组成；系统中充有制冷剂。液态制冷剂经节流阀减压进入蒸发器后，从被冷却物体中吸取热量而使之温度降低，同时它自身在低压下沸腾而转变为气态制冷剂，并被压缩机从蒸发器中抽出。气态制冷剂在压缩机内压缩到较高的压力而排出，其温度也相应升高（高于环境介质）。然后气态制冷剂流入冷凝器中放热，将热量传给冷却水，它自身则被冷却而凝结成液态制冷剂，这样周而复始地不断循环，完成了制冷（把低温条件下的热量转移到环境介质中去）的任务。

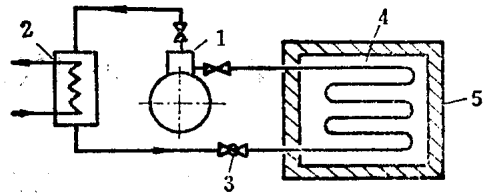


图1 制冷系统原理图

1. 压缩机 2. 冷凝器 3. 节流阀 4. 蒸发器
5. 冷库

为了使车间或公用建筑物内的空气保持一定的温度和湿度，可经过空调处理，然后用风机送到这些场所去。图2表示

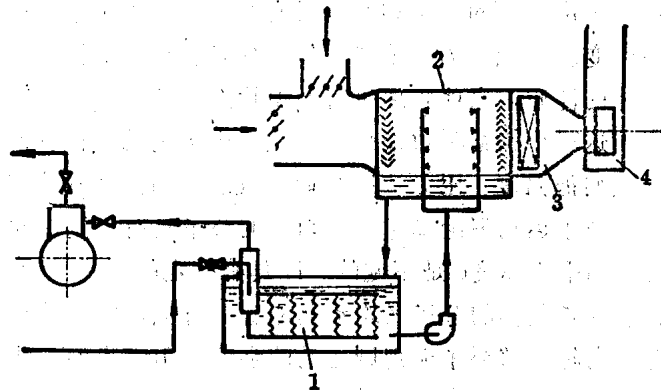


图2 空调系统原理图

1. 蒸发器 2. 空气洗涤室 3. 加热器 4. 风机

空调系统的原理图。在冬季，气温低、空气干燥，可经过喷水加湿和加热器加热后再送入。在夏季，室外气温高，有时空气湿度大，往往还进行降温除湿的处理（见图3）。

在上述这些系统中，压缩机、冷凝器、蒸发器、泵、风机等都是热工设备。我们要能正确的设计和使用这些制冷系统，就必须懂得在这些系统和设备里所发生的一系列热工现象的本质和规律，例如制冷剂的压力、温度、容积及其物态的变化，制冷系统中能量的转换等。工程热力学正是一门研究热能利用和功热转换领域中特有矛盾及其规律性的科学。在制冷工程中许多技术问题都离不开热工理论，生产上又处处遇到各种热工设备。所以，工程热力学是制冷专业工作者必须具备的基础理论知识，我们学习本课程的目的，就是要掌握和应用热工理论来指导我们的工作，更好地为发展制冷事业服务。

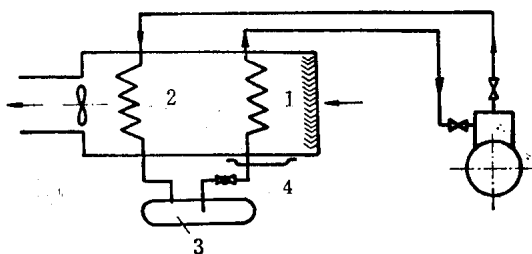


图3 除湿机原理图

1.蒸发器 2.冷凝器 3.贮液桶 4.集水盘

第一章 理想气体的性质及其热量计算

第一节 理想气体的基本状态参数

在热机内，要实现热能和机械能之间互相转换必须借助于某种工作物质；例如，内燃机的工作需要空气，蒸汽机和汽轮机的工作需要水蒸汽等。这种工作物质简称工质，由于气体和蒸汽具有良好的膨胀性和流动性，都是最常用的工质。制冷机中所用的工质又称为制冷剂。

气体或蒸汽都是由大量的分子和原子组成的，它们处于不断的无规则的运动中，其状态随时都可能改变。因此，为了描述气体在各种状态下的特征，必须采用某些物理量来确定和描写气体的性质，这些物理量就叫做状态参数。气态工质的热力状态，一般用温度、压力、比容这三个状态参数来描述，每一个确定的气体状态都有相对应的、完全确定的参数值。我们把温度、压力、比容叫做气态工质的基本状态参数。

一、温度 从分子运动理论知道，运动着的分子具有动能。在一定的温度下，某一气体分子直线运动的平均速度 \bar{v} 是不变的，即具有一定的分子平均动能。换句话说，当温度相同时，任意两种气体的分子平均动能相等。可见，物体的温度反映了分子无规则运动的平均动能，它标志着分子无规则运动的强度。由于人们无法直接测得分子动能的大小，故可用温度表示。当温度升高时，物质分子无规则运动的速度增大，分子的平均动能也随之增大。气体的绝对温度和气体分子的平均动能成正比，即

$$\frac{1}{2} m \bar{\omega}^2 = BT \quad (1-1)$$

式中： $\frac{1}{2} m \bar{\omega}^2$ —— 分子的平均动能；

B —— 比例常数；

T —— 绝对温度。

从上式可以看出，当 $T = 0$ 时， $\frac{1}{2} m \bar{\omega}^2 = 0$ ，即气体的分子热运动停止了，这是不可能的。辩证唯物主义告诉我们，物质与运动这两者是不可分割的，所以绝对零度也是不可能达到的。

从人们直接感觉来说，温度是物体冷热程度的一种度量。但是，人体的感觉并不可靠，一般可采用各种测温仪表来量测物体的温度。为了使温度的测量准确一致，就要有一个衡量温度的标尺，即要规定测温的基点和测量单位。目前，国际上通用的温标主要有：

1. 摄氏温标 t 又叫国际百度温标，它规定在一个物理大气压下，清洁冰的融点和清洁水的沸点各为 0° 和 100° ，在这两个定点之间等分一百个刻度，每个刻度就是摄氏1度。其测温单位用 $^\circ\text{C}$ 表示。

2. 绝对温标 T 它规定以水的三相点作为基点，其测温单位用 K 表示，并选定水的三相点为 273.16K (0.01°C)。这样就使绝对温标每一度的大小与摄氏温标相等， 0°C 就等于 273.15K ，故两者的换算关系为：

$$T(\text{K}) = t(^\circ\text{C}) + 273.15$$

工程上，近似地取为：

$$T = t + 273\text{K} \quad (1-2)$$

二、压力 由分子物理学可知，气体的压力是由于亿万个气体分子在无规则的运动中对容器壁频繁碰撞的结果。压力可用工质在每单位面积上的作用力来度量，其方向垂直于作用面。在工程热力学中，压力的单位是公斤力/米²，简写为公斤/米²，用符号 P 表示。但在实际应用中这个单位太小，故工程上测量压力常用公斤/厘米²，称为工程大气压，或简称气压。

压力的单位有时也用液柱的高度 H 来表示（见图1-1）。设 H 为垂直柱形液柱高度，底面积为 S ，液体的重度为 γ ，则在底面积上液柱的作用力为

$$P \cdot S = V \cdot \gamma$$

式中 V 是液柱体积，等于 HS ，代入上式得，

$$P = H \cdot \gamma \quad (1-3)$$

$$\text{或} \quad H = \frac{P}{\gamma}$$

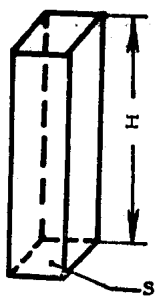


图 1-1 用液柱表示压力

当 γ 为定值时，一定的H值就相应于一定的压力P。

各种压力单位的换算关系可见下表。

表 1-1 压力单位换算表

单 位	公斤/厘米 ² (大气压) (at.)	公斤/米 ² (毫米水柱) (mm H ₂ O)	毫 米 汞 柱 (mmHg)	物 理 大 气 压 (atm.)
1公斤/厘米 ² (大气压)	1	10 ⁴	735.6	0.968
1公斤/米 ² (毫米水柱)	10 ⁻⁴	1	735.6 × 10 ⁻⁴	0.968 × 10 ⁻⁴
1 毫米汞柱	1.36 × 10 ⁻³	13.6	1	1.316 × 10 ⁻³
1 物理大气压	1.033	1.033 × 10 ⁴	760	1

国际单位制中规定力的单位为牛顿(N), 1N = 0.102Kgf, 故压力单位用帕斯卡(Pa)表示: 1帕斯卡(Pa) = 1牛顿/米² (N/m²)。而巴(bar)则作为Pa的特殊表达式:

$$1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$$

或

$$1\text{bar} = 1.02\text{Kgf/cm}^2$$

工程计算中，我们需要的是压力的实际数值。由于测量压力的仪表的结构原理建立在力的平衡上，故仪表测得的数值不是压力的真实数值而是相对于大气压力的差值。气体的压力P大于大气压力B时，如图1-2(a)所示，U形管压力计读数 h_1 就是超出大气压力的差值，称为表压力，以 $P_{\text{表}}$ 表示:

$$P_{\text{表}} = P - B$$

所以气体的真实压力(绝对压力)为

$$P = P_{\text{表}} + B \quad (1-4)$$

如果气体的压力小于大气压力，如图1-2(b)所示，压力计读数 h_2 就是低于大气压力的差值，称为真空度，以 $P_{\text{真空}}$ 表示:

$$P_{\text{真空}} = B - P$$

气体的绝对压力为:

$$P = B - P_{\text{真空}} \quad (1-5)$$

$P_{\text{表}}$ 和 $P_{\text{真空}}$ 都是相对于大气压力而言的压力，所以又称为相对压力。

必须指出，作为工质状态参数的压力应该是系统的绝对压力。因此，在进行热力计算时，必须将仪表读数按公式折算为绝对压力。折算时，式中的B应取当地大气压力，当系统压力较大时，取 $B \approx 1$ 工程气压已足够准确，而当系统压力很小时，不能作此简化。

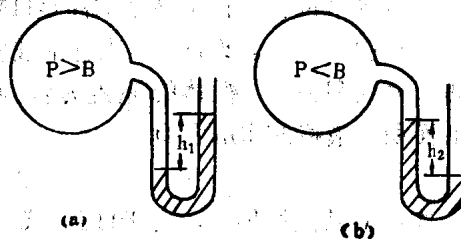


图 1-2 用U形管压力计测压

三、比容 如果G公斤气体工质占有容积V米³，则单位重量气体工质所占的容积叫做比容，用符号v表示，其单位是米³/公斤。

$$v = \frac{V}{G} \text{ 米}^3/\text{公斤} \quad (1-6)$$

例如，1公斤干空气在标准状态下的体积是0.776米³，则它的比容为0.776米³/公斤。

工程上有时也用比容的倒数——重度来计算。重度就是单位容积工质所具有的重量，以符号γ表示，其单位是公斤/米³。

$$\gamma = \frac{G}{V} \text{ 公斤/米}^3 \quad (1-7)$$

显然，在所有的状态下，工质的比容和重度互为倒数。

$$v = \frac{1}{\gamma} \quad \text{或} \quad \gamma \cdot v = 1$$

第二节 理想气体状态方程式

理想气体是指分子本身不占容积、分子之间没有作用力的气体，它是客观存在着的各种实际气体在一定条件下($v \rightarrow \infty$ 、 $P \rightarrow 0$)的抽象。在以后章节中我们提到的“气体”，若不加指明，其含义就是理想气体。

从日常现象中，我们发现一定量的气体在温度不变的条件下受压缩后体积变小，压力愈大则体积愈小，说明比容与压力成反比。当一定量的气体受热时，体积就膨胀，加热温度愈高则体积愈大，说明比容与温度成正比。

这些现象表明，气体的状态参数温度、压力、比容之间存在着某种关系，并按其固有的规律而变化，这种规律在某些情况下还是很复杂的。为了使问题简化，我们将工程上常用的一些气体当作理想气体来进行分析和计算。

根据理想气体的三个定律，我们对于理想气体的任何一状态都可以写出如下的关系式：

$$\frac{P_1 v_1}{T_1} = \frac{P_2 v_2}{T_2} = \frac{Pv}{T} = \text{常数}$$

这个常数与气体状态无关，仅决定于气体的性质，叫做气体常数，用R表示，它的单位为公斤·米/公斤·度。这样，就可得出理想气体状态方程式：

$$Pv = RT \quad (1-8)$$

对于G公斤气体，设其体积为V米³，则得

$$PV = GRT \quad (1-9)$$

这个方程式说明：①气体的P、v、T三个参数之间的关系，可用理想气体状态方程式表达，不论这三个参数如何变，它们的比例常数R保持不变。对于某一种气体，有其一定的R值。②气体的P、v、T三个状态参数中，只要已知两个状态参数，可以计算出第三个状态参数。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P和T，因R是常数，则 $v = \frac{RT}{P}$ ，可见任意一个状态参数决定于另两个状态参数。

化学中讲过克分子的概念，由此可引出一个在热力学中常用的气体单位，叫做公

斤分子——摩尔 (mol)。它就是用公斤做单位来表示某种气体的一定的量,而在数值上等于该气体的分子量 μ 。即

$$1 \text{ 摩尔气体} = \mu \text{ 公斤气体}$$

通过实验和理论证明发现,不管什么气体在标准状态下每 1 摩尔气体的体积都是 22.4 米³。例如, H₂ 的分子量为 2, 1 摩尔氢气就是 2 公斤氢, 在标准状态下体积为 22.4 米³; O₂ 的分子量为 32, 32 公斤氧就是 1 摩尔氧, 在标准状态下也是 22.4 米³。

对 1 摩尔的气体状态方程式可表示为:

$$P \cdot \mu v = \mu R \cdot T$$

在标准状态下, $P_0 = 1.033$ 大气压, $T_0 = 273\text{k}$, $\mu v_0 = 22.4 \text{米}^3$, 故

$$\mu R = \frac{P \mu v}{T} = \frac{P_0 \mu v_0}{T_0} = \frac{1.033 \times 10^4 \times 22.4}{273}$$

$$= 848 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{摩尔} \cdot \text{度}$$

$$P \mu v = 848 T \quad (1-10)$$

848 公斤·米/摩尔·度适用于任何理想气体, 所以称为通用气体常数。又 $\mu R = 848$

$$R = \frac{848}{\mu} \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{公斤} \cdot \text{度} \quad (1-11)$$

知道了气体的分子量 μ , 我们就可以很方便地用这个公式计算出任何理想气体的气体常数。表 1-2 列举了一些重要气体的分子量、重度和气体常数。

表 1-2 重要气体的分子量、重度和 R

气 体	μ	γ (公斤/米 ³) (标准状态)	R (公斤·米/公斤·度)
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	28.010	1.250	30.60
CO ₂	44.010	1.963	19.25
CH ₄	16.032	0.716	52.90
C ₂ H ₄	28.032	1.251	30.25
NH ₃	17.031	0.771	49.80

〔例 1〕 当压力表为 83 大气压、温度为 15°C 时, 氧气瓶内贮有 2.7 公斤氧, 试求氧气瓶的容积。

〔解〕 $R_{O_2} = \frac{848}{\mu} = 26.50 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{公斤} \cdot \text{度}$

$$V = \frac{GRT}{P} = \frac{2.7 \times 26.5 (273 + 15)}{(83 + 1) \times 10^4} = 0.025 \text{ 米}^3$$

〔例 2〕 贮气筒内装有 CO₂ 气体, 该筒的容积为 100 升, 当温度为 107°C 时压力表读数为 4 大气压, 试求 CO₂ 的重量。

〔解〕

$$R_{CO_2} = \frac{848}{\mu} = 19.3 \text{ 公斤} \cdot \text{米} / \text{公斤} \cdot \text{度}$$

$$G = \frac{PV}{RT} = \frac{5 \times 10^4 \times 0.1}{19.3 \times 380} = 0.68 \text{ 公斤}$$

〔例3〕 一个20升的氧气瓶内贮有氧气，在15°C时压力为100绝对大气压，用去一部分氧气后压力减为76绝对大气压而温度降至10°C，试求用去氧气的重量。

〔解〕

$$G_1 = \frac{P_1 V}{RT_1} = \frac{100 \times 10^4 \times 0.02}{26.5 \times 288} = 2.621 \text{ 公斤}$$

$$G_2 = \frac{P_2 V}{RT_2} = \frac{76 \times 10^4 \times 0.02}{26.5 \times 283} = 2.027 \text{ 公斤}$$

$$G = G_1 - G_2 = 0.594 \text{ 公斤}$$

第三节 混合气体

工程上所遇到的气体工质，往往不是单一成分的气体，而是由多种气体组成的混合物。例如，空气就是由N₂、O₂、CO₂、H₂O及一些稀有气体所组成的混合气体。在制冷装置系统中，冷凝器内的不凝缩气体也是混合气体。其它如烟道气、燃气等无不都是混合气体。因此，对于混合气体的性质应予了解。

对于空气、燃气等混合气体的分析，可以看出它们的特点是：各组成气体在通常情况下都远离液态，都具有理想气体的性质；各组成气体只是机械混合，彼此不起任何化学反应，保持着原有特性；由于分子热运动的结果，各组成气体形成了均匀一致的混合气体。这样，就可把混合气体当作是单一气体，它同样也遵循理想气体定律，这就是分析混合气体的出发点。

一、分压力和分容积 设有由1、2两种气体组成的混合气体，其状态为P、V、T， $G = G_1 + G_2$ 。如图1—3所示，如把1和2两种气体分别放在两个与混合气体容积相同的容器中，则1号气体对容器壁面产生一个压力P₁，2号气体对容器壁面产生压力P₂。而在混合气体的容器中，因为1、2两种气体没有分子力的相互作用，混合气体的总压力应是1、2两种气体分子对容器壁产生压力的总和。对于多种理想气体的混合物来说，第i种组成气体单独处在与混合气体相同的温度和压力下所具有的压力，叫做该组成气体的分压力P_i。至于混合气体的总压力则等于各组成气体分压力的总和，即

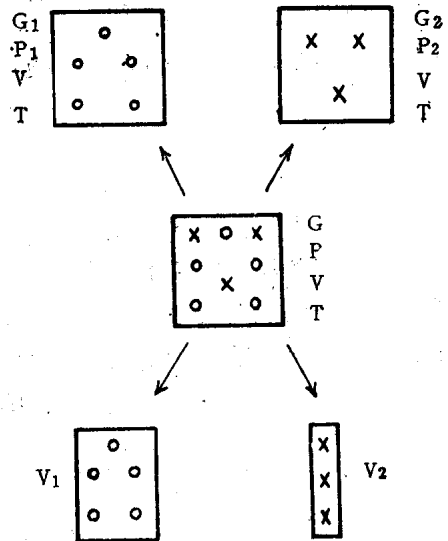


图1—3 分压力与分容积概念

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i \quad (1-12)$$

这叫做分压定律。

混合气体中某一组成气体在保持混合气体的压力和温度条件下单独存在时所占有的容积称为这种气体的分容积 V_i (如图 1-3)。而混合气体的总容积则为:

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n = \sum_{i=1}^n V_i \quad (1-13)$$

二、混合气体成分的分析

1. 重量成分 g 用组成气体的重量 G_i 和混合气体的重量 G 之比来表示,叫做组成气体的重量成分。

$$g_i = \frac{G_i}{G}$$

因为混合气体的重量等于组成气体的重量之和, $G = \sum G_i$, 所以重量成分的总和应等于 1。

2. 容积成分 r_i 用组成气体的分容积 V_i 和混合气体的容积 V 之比来表示,叫做组成气体的容积成分。

$$r_i = \frac{V_i}{V}$$

容积成分的总和也等于 1, $\sum r_i = 1$ 。

3. 莫尔成分 m 用组成气体的莫尔数 M_i 和混合气体总莫尔数 M 之比来表示,叫做组成气体的莫尔成分。

$$m_i = \frac{M_i}{M}$$

同样,混合气体各组成的莫尔成分的总和等于 1, 即 $\sum m_i = 1$ 。

各组成的莫尔成分和容积成分在数值上是相等的: $\frac{M_i}{M} = \frac{22.4M_i}{22.4M} = \frac{V_i}{V} = r_i$ 。

重量成分与容积成分可由下式换算:

$$g_i = \frac{G_i}{G} = \frac{\gamma_i V_i}{\gamma V} = \gamma_i \frac{r_i}{\gamma} \quad (1-14)$$

式中: γ_i ——某组成气体的重量;

γ ——混合气体的重量。

三、混合气体的平均分子量、气体常数 为了使混合气体可当作单一气体来处理,必须引入一个假想的概念——平均分子量 μ , 并认为混合气体分子都具有这样的平均分子量。而混合气体常数 R 仍可用公式(1-10)计算。

当已知混合气体的容积成分时, 则

$$\mu = \gamma_1 \mu_1 + \gamma_2 \mu_2 + \dots + \gamma_n \mu_n = \sum_{i=1}^n \gamma_i \mu_i \quad (1-15)$$

求得 μ 以后, 混合气体常数 $R = 848/\mu$ 即可求得。

当已知混合气体的重量成分时, 则

$$R = g_1 R_1 + g_2 R_2 + \dots + g_n R_n = \sum_{i=1}^n g_i R_i \quad (1-16)$$