

空气制冷机

秦钢 李敏 程尔玺 蒋丽敏 编著

国防工业出版社

116181

空气制冷机

秦 钢 李 敏 编著
程尔玺 蒋丽敏



国防工业出版社

内 容 简 介

本书较全面地介绍了空气制冷机及其设备的原理和有关设计问题，包括以空气为工质制取冷量的机理，空气制冷机的各种实际流程，空气的净化与干燥，涡轮冷却器及其噪声控制，热交换器，控制仪表以及空气制冷机总体设计和热力计算等内容。

本书可用作高等院校有关专业的教材，也可供从事各种低温环境试验设备和要求使用温度低于 -80°C 的工业性低温装置设计人员、操作工人和工程技术人员参考使用。

DV83/07

空 气 制 冷 机

秦钢 李敏 程尔玺 蒋丽敏 编著

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092¹/₁₆ 印张18 415千字

1980年4月第一版 1980年4月第一次印刷 印数：0,001—8,200册

统一书号：15034·1993 定价：1.85元

前 言

空气制冷机是以空气为工质实现人工制冷的机器。近十几年来，随着科学技术的发展和进步，在某些工业性和科研性用冷领域内，例如在要求使用温度低于 -80°C 的工业性低温装置中，以及在各种生产性和科研性低温环境试验设备中，采用空气制冷机的条件逐渐成熟。1974年以来，国内在这方面作了不少工作，实践和分析表明，在这些用冷领域内，采用空气制冷机往往比采用目前广泛使用的蒸气制冷机有明显的优越性，因而引起了普遍的兴趣和重视。空气制冷技术已成为现代制冷技术的一个重要分支。

然而至今还未见到一本专门介绍空气制冷机的书。为了满足各方面的迫切要求，作者在总结北京航空学院制冷小组科研和工程设计实践以及教学工作经验的基础上，参阅各方面资料，编写了这本书。

本书在内容和深浅程度方面，力求照顾到一般制冷工作人员的需要，写得尽量通俗些，不仅给出了例题，对一些基础知识也作了适当复习，以便于自学。这是一本有工程适用价值的参考书。

全书共分九章。其中：传热学基础知识，涡轮冷却器，热交换器三部分由李敏同志执笔；噪声的消除及控制仪表两章由程尔玺同志执笔；空气的净化与干燥部分由蒋丽敏同志执笔；绪论，热工基础知识，空气制冷原理，实际流程原理，总体设计以及空气电加热炉设计基础等部分由秦钢同志执笔，并负责组织编写工作和统编全书。

王浚同志参加了本书大纲的制订和讨论，并认真审阅了全稿。

由于空气制冷机在普冷温度范围内的使用，在我国还仅仅是开始，经验和资料都很缺少，我们从事这方面工作的时间较短，理论水平很低，书中一定会有错误或不妥之处，请读者批评指正。

编 者

目 录

绪论	1	第四章 涡轮冷却器	71
第一章 空气制冷机的热力学和 传热学基础知识	5	§ 4-1 涡轮冷却器原理	71
§ 1-1 工程热力学基础知识	5	一 涡轮冷却器概述	71
一 气体的性质	5	二 气体在涡轮中的流动过程	75
二 热力学第一定律	10	三 离心式风扇简介	87
三 流动气体的基本热力过程	16	§ 4-2 涡轮冷却器的损失及效率	89
§ 1-2 传热学基础知识	20	一 气流在涡轮冷却器中的损失	89
一 热传导	20	二 涡轮冷却器的效率	91
二 对流换热	24	§ 4-3 涡轮冷却器的性能估算和调节	94
三 热辐射	31	一 涡轮冷却器性能估算	94
四 传热	36	二 涡轮冷却器制冷量调节	97
第二章 空气制冷机原理	39	§ 4-4 涡轮冷却器结构中的几个问题	98
§ 2-1 空气制冷原理	39	一 转子的平衡	98
一 利用节流效应产冷	39	二 转子的临界转速	100
二 压缩空气绝热膨胀并对外作功制冷	40	三 轴承的润滑和冷却	101
三 制冷膨胀机概述	43	四 涡轮冷却器的密封结构	103
§ 2-2 无回冷空气制冷机原理	44	五 空气轴承	103
一 空气制冷机的理论基本循环	44	第五章 热交换器	107
二 空气制冷机的实际基本循环	48	§ 5-1 热交换器概述	107
§ 2-3 回冷空气制冷机原理	52	一 间壁式热交换器的分类	107
一 回冷空气制冷机的理论循环	53	二 热交换器的效率及影响因素	109
二 回冷空气制冷机的实际循环	55	三 板翅式热交换器构造简介	110
第三章 空气制冷机实际流程原理	59	§ 5-2 带肋壁面传热系数计算	112
§ 3-1 实际流程设计中的几个问题 和分类	59	一 带肋壁面的传热特点	112
一 实际流程设计中的几个问题	59	二 肋片(翅片)效率与表面效率	113
二 空气制冷机实际流程分类	60	三 传热系数计算	117
§ 3-2 无回冷空气制冷机实际 流程原理	61	§ 5-3 板翅式热交换器主要性能估算	118
一 在飞机座舱和设备舱空调系统中的应用	61	一 热力计算	118
二 在供给低温气流的试验设备中的应用	63	二 流动阻力计算	126
§ 3-3 回冷空气制冷机实际流程原理	66	三 板翅式热交换器计算举例	127
一 闭式间接吸热循环	66	第六章 空气的干燥与净化	132
二 开式回冷低压直接吸热循环	68	§ 6-1 概述	132
三 闭式回冷常压直接吸热循环	69	一 基本概念	132
四 开式回冷常压直接吸热循环	70	二 压缩空气的干燥	135
		§ 6-2 压缩空气的净化	136
		一 多次撞击折转分离法	136
		二 离心分离法	137
		三 破沫网除雾	137

四 填料过滤器	138	三 常见气路中的压力、流量调节	208
§ 6-3 吸附干燥	138	四 恒温控制原理	211
一 吸附机理	138	五 空气制冷机的制冷量调节	213
二 干燥塔内的吸附过程	142	§ 8-2 空气制冷机的热力计算	217
三 影响干燥塔吸附能力的因素	143	一 低温室保温结构的设计	217
四 干燥塔的加热再生	146	二 低温室内气流组织	220
五 干燥塔的非加热再生装置简介	148	三 稳定工况下的热力计算	223
六 常用吸附剂简介	150	四 降温过程的热力计算	224
§ 6-4 热再生干燥装置设计	154	五 低温室降温时间估算	226
一 设计计算	155	§ 8-3 设计举例	230
二 干燥塔的结构设计	159	一 开式无回冷空气制冷机总体设计举例	230
三 例题	160	二 回冷空气制冷机总体设计举例	237
§ 6-5 空气电加热炉设计基础	163	第九章 空气制冷机控制仪表	246
一 空气电加热炉内传热过程分析和设计原则	164	§ 9-1 概述	246
二 辐射对流型空气电加热炉典型结构简介	169	一 工业自动化的一般概念	246
三 对流型空气电加热炉设计中的几个问题	171	二 自动化在空气制冷机中的应用	246
第七章 噪声的消除	176	§ 9-2 自动调节系统的基本概念	247
§ 7-1 声音和噪声的基本知识	176	一 自动调节系统及其组成	247
一 声波	176	二 自动调节系统分类	249
二 声波的特性	177	三 气动单元组合仪表简介	250
三 噪声及其量度	178	§ 9-3 空气制冷机常用测量、控制仪表	252
四 人耳的听觉特性	182	一 检测仪表	252
五 噪声的测量	182	二 调节仪表	256
六 噪声的危害及噪声标准	184	三 显示仪表	260
§ 7-2 噪声控制途径及控制方法	185	四 执行机构	263
一 噪声控制途径	185	§ 9-4 空气制冷机实际控制系统	271
二 在传播途径中对噪声进行控制的具体方法	186	一 涡轮冷却器入口压力 p_8 的控制	271
三 消声器设计	194	二 低温室与大气压差 Δp_s	272
§ 7-3 涡轮冷却器噪声的消除	195	三 低温室温度 t_0 控制系统	272
一 涡轮噪声分析	195	四 空气压缩机排气压力 p_K 的控制	273
二 涡轮冷却器噪声频谱	196	附录 1 在大气压力 $B=760$ 毫米	
三 涡轮冷却器噪声频谱分析	196	汞柱下干空气的物理参数	274
四 涡轮冷却器的噪声控制	197	附录 2 常用绝热材料	275
第八章 空气制冷机总体设计	204	附录 3 压缩和膨胀计算用表	
§ 8-1 空气制冷机实际流程设计中的		($K=1.4$)	276
几个问题	204	附录 4 部分城市气象资料	279
一 开式系统的除水方案选择	204	参考文献	280
二 闭式系统中的补气 and 除水方案选择	206		

绪 论

从日常生活经验中可知，在自然过程中热量只能从高温物体传给低温物体，而不可能自发地反方向传递。这是热力学第二定律的表达方法之一。但是这并不是说不可能把热量从低温物体转移给高温物。相反的过程也是可能的，但必须在另一个消耗能量的补偿过程帮助下才能实现。补偿过程所消耗的能量形式，可以是电能，也可以是热能或机械能。

制冷就是制取冷量的意思。制冷机就是能把热量不断地从低温物体转移给高温物体的机器。有时也可称之为“热泵”。

很早以前人们就已经知道利用深井水和冰等天然冷源来防暑降温或保存食品，此法直到现在还在使用。利用天然冷源的好处是价廉和不需要复杂的设备。但天然冷源受时间、地区的限制，远不能满足人民生活、工业生产和科学技术对低温条件提出的要求。因此人工制冷技术便随着科学技术和工业生产的发展而发展起来。

目前人工制冷在人民生活、工业生产和科学研究等各个方面都有着极为广泛的应用，已很难找出哪个国民经济部门不需要采用某种人工制冷技术。国民经济和科学技术越发展，人工制冷技术的应用领域就越广泛，应用规模也越大，它们对制冷技术提出的要求也越高。人工制冷成为现代科学技术的一个重要分支，它和国民经济及科学技术的发展有密切的关系。

自从1875年开始应用制冷机以来，已有一百多年的历史。根据所要获得的低温温度，习惯上把制冷技术分为普通冷冻（普通制冷）和深度冷冻两大部分。一般把 -120°C 以上温度范围划归普冷区，而把 -120°C 以下直至接近绝对零度的温度范围称为深冷区。由于应用领域和历来采用的制冷方法完全不同，所以普通制冷和深度冷冻几乎成了两个行业。除了各种气体分离设备外，深度冷冻在工业中很少应用，所以一般在用到“制冷”和“制冷机”这些词时，往往指的仅是普冷温度范围内的制冷问题和所采用的制冷机，而把深度冷冻区内的制冷问题和制冷机称为深冷技术，简称深冷（也有人叫超低温工程）和深冷装置。本书所要讨论的仅是空气制冷机在普冷温度范围内的设计和使用问题，不涉及深冷技术中有关气体的液化，分离等课题。

现代采用的制冷机，按其工作原理可分为蒸气制冷机，空气制冷机和热电制冷装置三种。目前真正得到广泛应用的只有前两种，热电制冷装置仅处于研究和少量应用阶段。

蒸气制冷机就是利用液态制冷工质（制冷剂）在不同压力下的气化和冷凝实现人工制冷的机器。蒸气制冷机的应用领域极为广阔。除了少数特殊的部门外，在 -120°C 以上的普冷温度范围内，历来都是用各种类型的蒸气制冷机制取冷量。所以往往把蒸气制冷机及与它有关的工程技术问题统称为普冷技术或普冷工程。

根据将工质的低压蒸气变为高压蒸气的不同补偿方法，现代蒸气制冷机可分为三类：即压缩式制冷机，吸收式制冷机和喷射式制冷机。它们对能源的要求，所采用的工质，应用领域和设备结构等都有很大差别。

压缩式蒸气制冷机是较早发展的一类制冷机，也是现代应用最广泛的制冷机。其补偿环节是压缩机，它在制冷机中起着心脏的作用。就压缩机的型式而言，首先发展起来的是活塞式，随后有离心式、回转式以及螺杆式。现在这几种型式的压缩机都普遍的使用着，其中以往复活塞式使用最广。压缩式制冷机可以使用多种工质，因而它的型式也较多。其最主要的优点就是在温度不很低时，单位制冷量（或单位轴功率产冷量）大。

制冷工质（或称制冷剂）就是在制冷机系统中循环变化携带热量的物质。其物理化学特性对制冷机的性能、设计和使用有着决定性影响。目前在压缩式蒸气制冷机中应用的制冷剂已有几十种。根据它们的应用工作温度范围，可分为高温工质、中温工质和低温工质三大类。最常用的中温工质是氨，氟里昂 12（F-12）和氟里昂 22（F-22），低温工质是氟里昂 13（F-13）等。

单级压缩机的压缩比是有限的。例如单级活塞式压缩机所能合理获得的压缩比不超过 8~10，而压缩机的排气压力（冷凝压力）由冷却介质的温度所规定，不能任意降低。因此，用单级压缩机在蒸发器内所能建立并保持的最低压力就不可能很低。相应，工质的蒸发温度 t_0 也就被确定，不能任意降低。例如，当单级压缩机的压缩比为 10 时，在不同的冷凝温度下，常用制冷剂所能达到的最低蒸发温度如表 0-1 所示。

表 0-1

制 冷 工 质	冷 凝 温 度 t_K (°C)		
	30	35	40
NH ₃	-30.5	-27.3	-24.4
F-22	-37.2	-34.2	-31.5
F-12	-36.8	-33.8	-31.1

在实际运行中，因为必须有传热温差，所能获得的最低使用温度，还要比表中所列数高 5~10°C。为了得到更低的温度，就必须使用多级压缩制冷机了。

当使用离心式压缩机时，每一级所能达到的压力比还要小些，一般不超过 4。因此为了得到 0°C 以下的低温就得采用多级压缩机了。

在采用活塞式压缩机的现代蒸气制冷机中，只用到两级压缩，除制取干冰的高压系统外，三级压缩制冷机已不再使用。

两级压缩蒸气制冷机所能获得的最低蒸发温度也是有限的。因为要使中温工质在很低的温度下沸腾气化，就必须在蒸发器内建立并保持很低的蒸发压力，当蒸发压力很低时，不仅增加了空气漏入系统的可能性，并且对压缩机的工作极为不利：吸气比容的增大和输气系数的降低，不仅要增大机组尺寸；并且使压缩机的效率大大降低；对于活塞式压缩机，则由于吸气阀的特性，当吸气压力降到 0.15~0.1 公斤/厘米² 时，压缩机就难以工作（对于氨，当 $t_0 = -65^\circ\text{C}$ 时，对于 F-22，当 $t_0 = -75^\circ\text{C}$ 时，对于 F-12，当 $t_0 = -68^\circ\text{C}$ 时，蒸发压力已在 0.15 公斤/厘米² 以下）。这时，即使增加压缩机级数，也不能使情况得到改善。因此，采用中温工质所能获得的蒸发温度就不可能再低。为获得更低的温度，就必须采用复叠式制冷机了，即在一套压缩式蒸气制冷机内采用多种工质的制冷机。

一般在由两个单级压缩系统组成的复叠式制冷机中，采用 F-22 和 F-13 为工质，最低蒸发温度可达 -85~-90°C。这时的实际使用温度为 -80°C 左右。为要获得再低一些的温度

度就必须采用单级-双级复叠式制冷机（即有一个部分是两级压缩系统）或由两个双级系统组成的复叠机了。如仍用F-22及F-13为工质，蒸发温度可达 -110°C （蒸发温度的进一步降低，则受蒸发压力过小的限制）。为了得到 -110°C 以下的蒸发温度，就要采用三元复叠机，即在一套制冷机内采用三种工质的复叠式制冷机。如在两个单级或单级-双级复叠循环的基础上，再加上一个以F-14为工质的单级系统，可获得 $-110\sim-140^{\circ}\text{C}$ 的蒸发温度。

采用复叠式蒸气制冷机虽然可以获得低达 -140°C 的蒸发温度，但在要求使用温度低于 -80°C 时（相应蒸发温度应在 $-85\sim-90^{\circ}\text{C}$ 以下），系统的总压缩级数要有3~4级，总压缩比极大，使机组制冷系数大大降低。系统内要增设低温工质膨胀容器及各种热交换器，实际流程变得十分复杂，运行的可靠性和经济性随之降低，而机组成本大大提高。此外，由于实际上是多级“热泵”串联工作，各级间匹配、协调问题十分突出，给设备的设计、操作和维护工作造成较大困难。

综上所述，由于现有制冷工质的物理性质所限，当要求的使用温度低于 -80°C 时，采用蒸气制冷机虽也可以作到，但已经是比较困难的了。探讨新的制冷方式，使之更合理、更经济地为科研生产提供使用温度低于 -80°C 的低温条件，已成为一个急待解决的问题。

当制冷工质在整个制冷循环中仅以气体状态存在时，这种制冷机叫作气体制冷机。由于在多数情况下气体制冷机是以空气为工质的，所以习惯上称为空气制冷机。

在历史上，人们首先是用空气制冷机实现人工制冷的。但因当时科学技术水平所限，制冷系数较低，无法与相继出现的蒸气制冷机竞争，因此在普冷温度范围内很快就被完全淘汰，而仅用于空气分离设备和其他需要极低温度的场所。近几十年来，由于透平膨胀机（涡轮冷却器）、高效率紧凑热交换器、空气静压轴承等的出现和发展，在普冷温度范围内重新采用空气制冷机的条件逐渐成熟。除飞机空调系统等特殊部门外，国外从六十年代末起，对空气制冷机在普冷领域内的应用问题进行了大量研究，并被认为是在 -80°C 以下使用温度时制取冷量的一个很有发展前途的方法。据报导，在苏联不仅设有专门的研究机构，并有定型的系列产品。国内从七十年代初起，在这方面也进行了不少研究工作。虽然还没有专门的研究机构和定型产品，但投入使用和正在建造的采用空气制冷机降温的低温装置已有几十台。发展也较快，应用日趋广泛。

据目前了解，其应用范围有：机械制造和仪表工业中零件的冰冷处理和产品的低温环境试验（ $-50\sim-120^{\circ}\text{C}$ ）；钢的快速淬火；磨损了的卡车和飞机轮胎翻新的低温硫化工艺（ $-90\sim-100^{\circ}\text{C}$ ）；橡胶制品毛边的切割加工（ $-90\sim-95^{\circ}\text{C}$ ）；废铜废钢铁轧碎（ $-95\sim-120^{\circ}\text{C}$ ）；水果、蔬菜、鱼、肉等高级食品的快速冷冻（ $-50\sim-110^{\circ}\text{C}$ ）；石油天然气回收；提供低温气流（ $0\sim-80^{\circ}\text{C}$ ）以进行各种发动机的低温环境试验；机场停机时飞机座舱的空调；汽车的空调；高温车间的局部冷却以及试验产品中发热部分的局部冷却等等。

空气制冷机中产冷的机理，与蒸气制冷机中利用液态工质在不同压力下的集态变化实现制冷完全不同。它是基于压缩空气的节流效应和压缩空气在膨胀机中进行绝热膨胀并对外做功，从而获得低温气流来制取冷量的。因此与蒸气制冷机相比，它有着完全不同的特点。这些特点是：

(1) 在使用温度高于 -80°C 时，空气制冷机的单位轴功率产冷量小于蒸气制冷机，且

温度越高，相差越大。所以在此温度范围内空气制冷机只能用于那些耗电量不是主要指标的场所。这是其主要缺点。

(2) 易于获得极低的温度，降温性能可靠，并且在 -80°C 以下使用温度时其实际单位耗电量的产冷量已与蒸气制冷机接近或比它更高，而流程和设备却简单得多。所以是获得 $-80\sim-140^{\circ}\text{C}$ 使用温度的一种很有前途的制冷手段。

(3) 制冷工质是空气，取之不尽而又无害。因此不存在制冷剂的购买、运输、保存等工作及由此所引起的一系列问题，也不存在污染环境的问题。大大降低了运行费用和对制冷机系统的气密性要求，简化了维护，增加了运行可靠性。

(4) 空气制冷机的实际使用流程比较灵活，对不同的使用目的和要求适应性较强。

(5) 制冷压缩机可以采用普通低压空气压缩机，既有利于综合利用，又易于组成特殊容量的制冷机组。

(6) 制冷量容易调节，维护操作简单。

总之，除在使用温度高于 -80°C 时单位轴功率产冷量明显小于蒸气制冷机外，在其他方面空气制冷机都比蒸气制冷机优越。

没有先进的现代化科研设备，就不能进行先进科学技术的研究工作。各种类型的低温环境试验设备，几乎是每个科研单位和航空工厂都要使用的基本科研生产设备之一。随着我国科学技术的发展，低温环境试验的内容不断增加，要求越来越高，规模也越来越大，已成为人工制冷技术的一个重要应用领域。与其他用冷领域相比，各类低温环境试验设备的制冷技术要求较高。其特点：通常这些设备的使用率不高，因此耗电量往往不是主要指标；起停频繁，主要在变温工况下运行，并且往往要求制冷量能在很大范围内调节；用冷方式多样，如要求连续供给低温气流，进行环境温度快速变化的冷热冲击试验和模拟高空低温环境条件等。虽然使用率不高，可是一旦要用，往往很急，而使用单位却往往缺乏真正懂得制冷技术的人员，因此不熟悉设备运行的可靠性要求等等。这些特殊要求和使用条件在其他用冷领域中是很少遇到的。这就给制冷工作者提出了一系列新的课题。

近些年来，国内在这些方面作了不少工作。目前投入使用和正在建设的几十台采用空气制冷机降温的低温设备多数是低温环境试验设备，普遍认为优点突出，很有推广价值。从目前国内发展趋势看来，空气制冷机将首先在低温环境试验设备中推广使用。由于这类试验设备的设计工作比工业生产性低温装置复杂，需要考虑更多的因素，所以本书在介绍空气制冷机一般原理的基础上，主要结合它在典型低温环境试验设备中的应用，来讨论空气制冷机流程设计和热力计算等问题。

第一章 空气制冷机的热力学和传热学基础知识

空气制冷机是以空气为工质，利用空气状态在制冷机内循环变化而实现人工制冷的机器。为了深入理解其工作原理和进行热力计算，本章对有关的热力学和传热学基础知识作适当介绍。我们将着重于阐述物理概念，而不追求数学表达式推导的完整性。

§ 1-1 工程热力学基础知识

一、气体的性质

从微观上看，气体是由极大数量的具有一定质量的微小弹性小粒——分子所组成。例如：一个氮分子的质量是 4.7×10^{-23} 克，而在标准条件下（一个物理大气压和 0°C ），一立方厘米空气中含有 2.683×10^{19} 个分子。这些分子本身所占据的实际体积之和大约为 1 立方毫米，仅占实际气体所占体积的千分之一左右。换句话说，气体分子间的空隙很大，分子间的平均距离为其本身尺寸的十倍左右，因而分子间的相互作用力（内聚力）很小。另外，这些分子总是处在无规则的热运动中，分子的热运动虽然不能用肉眼直接看到，但可从科学试验中得到证明，在日常生活中也能感到这种现象。如在不通风的房间里打开香水瓶盖子，全房间很快都能闻到香味；把气体充入容器内，气体将很快的均匀分布、占据整个容器空间，这些现象都是由于分子热运动的结果。分子的热运动速度是很高的，例如氮分子在标准状态下的平均热运动速度是 400 米/秒。分子既有一定的质量，又有相当的运动速度，所以每个分子都具有一定的动能。无数分子以很高的速度运动时，必然要发生碰撞。在碰撞的瞬间分子间进行了无损失的能量交换，使单个分子的运动速度和方向瞬息万变。无数分子在两次碰撞间所走过路程的平均值，叫作分子的平均自由行程。

正是由于气体分子间空隙很大，其分子又在进行永不停息的热运动，所以气体既容易压缩，又自发的趋向于膨胀——占据尽可能大的空间。这是气体区别于液体和固体的最大特点，也是实现热-功转换的物理基础。

在工程上通常把气体看作是连续不断的介质，而不关心个别分子的运动情况，这就是从“宏观”上看气体。下面我们从宏观上研究气体的性质。至于微观上的讨论，只是为了有助于理解现象的物理本质。

（一）气体的基本状态参数

物质总是处在不断的变化和运动中。为了说明物质在每一聚集状态下的特性所采用的物理量，称为物质的状态参数。物质的每一状态都有确定数值的状态参数与其对应，其数值与达到该状态的过程无关，只要有一个状态参数值发生变化就表示物质的状态在改变。这是状态参数的基本特征。描写气体状态的基本参数是温度、压力和比容。

1. 温度 温度表示物体的冷热程度。对于气体，温度反映着气体分子热运动的激烈程度。从分子运动理论可以导出：气体的温度与气体分子热运动的平均动能成正比。

测量温度高低的标尺叫温标。工程上常用的温标有摄氏温标和绝对温标（在英美国家多用华氏温标代替摄氏温标）。

摄氏温标用 t ($^{\circ}\text{C}$) 表示。绝对温标用 T (K) 表示。两种温标的关系是：

$$\begin{aligned} T &= 273.16 + t \approx 273 + t \quad (\text{K}) \\ t &= T - 273.16 \approx T - 273 \quad (^{\circ}\text{C}) \end{aligned} \quad (1-1)$$

2. 压力 气体的压力是气体无数分子热运动对容器壁面撞击的平均结果，用单位面积所承受的力来表示。力的方向总是垂直于容器的内表面。

$$p = \frac{F}{S} \quad (1-2)$$

p —— 气体的压力 (公斤/厘米²)；

F —— 作用力 (公斤)；

S —— 作用面积 (厘米²) 或 (米²)。

在工程上一般采用 (公斤/厘米²) 或 (公斤/米²) 作为压力的单位，并将 1 (公斤/厘米²) 的压力称为一个工程大气压，即

$$1 (\text{工程大气压}) = 1 (\text{公斤/厘米}^2) = 10000 (\text{公斤/米}^2)$$

地球大气的压力是由地面上大气空气柱的重量产生的。各地区的实际大气压力，叫作当地大气压，用符号 B 表示。当地大气压力 B 随海拔高度的增加而降低，对于同一地点和高度，还随季节、昼夜和气象条件而变化。在物理学中把北半球中纬度地区海平面上大气压力的年平均值定为标准大气压力，或叫一个物理大气压。

$$1 (\text{标准大气压}) = 1.0333 (\text{公斤/厘米}^2) = 10333 (\text{公斤/米}^2)。$$

气体的压力有时也用液柱的高度来表示，常用的单位有毫米汞柱和毫米水柱。

$$1 (\text{公斤/厘米}^2) = 10000 (\text{毫米水柱}) = 735.6 (\text{毫米汞柱})。$$

$$1 (\text{物理大气压}) = 10333 (\text{毫米水柱}) = 760 (\text{毫米汞柱})。$$

应特别指出的是：用一般压力表或 U 形管所测出的压力，如图 1-1 a 所示，并不反映气体压力的绝对值。由于压力表或 U 形管本身都处于当地大气压力的作用下，所以表上的读数是 被测气体的实际压力 p 与当地大气压力 B 之间的差值，叫作表压力，并用 p_b 表示。因此气体的实际压力或绝对压力值 p 为：

$$p = p_b + B \quad (1-3)$$

如果被测气体的实际压力 p 小于当地大气压力 B 时，则表上的读数叫作真空度 p_v (图 1-1 b)，即

$$p_v = B - p_b$$

当气体的实际 (绝对) 压力一定时，如果当地大气压力 B 发生变化，表压 p_b 或真空度 p_v 的值均会随之变化，所以只有绝对压力值才是真正说明气体状态的参数。本书中，不作特殊说明时，气体的压力都指绝对压力。

3. 比容 每 1 公斤气体所占有的容积叫作比容，用符号 v 表示，其单位是 (米³/公斤)。如果 G 公斤气体所占容积为 V 米³，则该气体的比容为：

$$v = V/G (\text{米}^3/\text{公斤}) \quad (1-4)$$

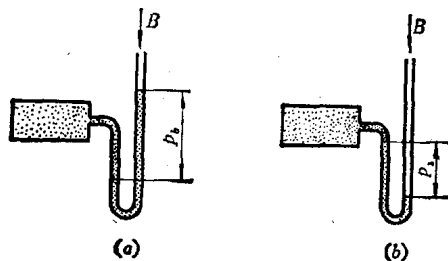


图 1-1

单位容积中气体的重量称为气体的重度，用 γ 表示

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

显然比容和重度间的关系是：

$$v = \frac{1}{\gamma} \text{ 或 } \gamma = \frac{1}{v} \quad (1-5)$$

除温度、压力、比容三个基本状态参数外，还有一些其他的表示气体状态的参数，如焓、熵等，它们的意义将在以后介绍。

(二) 理想气体的状态方程

上面介绍了描述气体状态的三个基本参数：压力、温度和比容。显然，单独用任何一个都不能完全确定气体的状态。那么最少要几个参数才能确定气体的状态？在气体状态发生变化时，这三个参数间有没有一定的关系？

人们通过长期的生产实践和科学实验发现，对于远离液态区的气体，这三个参数间有如下的近似关系：

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} \approx \frac{p_2 v_2}{T_2} \approx \dots \approx \frac{pv}{T} \approx \text{常数}$$

这就是说，某种气体原来处于状态 1，经过变化后处于状态 2，后又变化到状态 3 … 等，它的压力和比容的乘积被其绝对温度除，所得的商值始终近似等于一个常数。这个常数叫气体常数，用 R 表示。

可以设想一种在任何条件下都符合下述关系式的气体，

$$\frac{pv}{T} = R$$

或
$$pv = RT \quad (1-6)$$

式中 p —— 气体的绝对压力 (公斤/米²)；

v —— 气体的比容 (米³/公斤)；

T —— 气体的绝对温度 (K)；

R —— 气体常数 (公斤·米/公斤·K)。

这种气体就叫理想气体，(1-6) 式称为理想气体的状态方程式。根据分子运动理论，所谓理想气体，就是指其分子是没有体积，但有质量的弹性质点，且分子间没有作用力的这样一种假想气体。当然，自然界里不存在理想气体。但是当实际气体的压力不太高（与大气压力相比），而温度又相当高（与该气体的液化温度相比）时，则可以作为理想气体处理。这种处理方法可以使分析和计算大大简化，而引起的误差很小。

气体常数 R 的数值随气体的种类而不同。如空气的 $R = 29.27$ 公斤·米/公斤·K，水蒸气的 $R = 47.1$ 公斤·米/公斤·K。

在工程中有时不用比容而用重度，这时状态方程可写成：

$$\frac{p}{\gamma} = RT \quad (1-6a)$$

由状态方程式 (1-6) 可见，气体的状态参数 p 、 v 、 T 中只有两个参数是独立的。当任意两个状态参数确定后，第三个就可由状态方程求出。因此，只要任意两个状态参数确定后，气体的状态就确定了。

对于G公斤重的气体, 因为

$$v = \frac{V}{G}$$

所以

$$pV = GRT \quad (1-6b)$$

实验测定证明, 任何气体在 $p = 1.033 \text{ 公斤/厘米}^2$, $t = 0^\circ\text{C}$ ($T = 273\text{K}$) 的标准条件下, 只要气体重量的公斤数与其分子量 μ 相同, 各种气体所占的容积 V_μ 都是 22.4 米^3 。根据这个重要现象, 由

$$pV_\mu = \mu RT$$

可以求出对任意气体都适用的通用气体常数 μR 值:

$$\mu R = \frac{pV_\mu}{T} = \frac{1.033 \times 10^4 \times 22.4}{273} = 848 \text{ 公斤} \cdot \text{米/莫尔} \cdot \text{K}$$

这就是说, 任意气体的公斤分子量 (莫尔) 数与它的气体常数 R 的乘积都相等, 并等于 $848 \text{ 公斤} \cdot \text{米/莫尔} \cdot \text{K}$ 。

因此, 只要知道分子量, 就可以求出任意气体的气体常数:

$$R = \frac{848}{\mu} (\text{公斤} \cdot \text{米/公斤} \cdot \text{K}) \quad (1-7)$$

例如, 空气的 $\mu = 28.9$, 所以

$$R = \frac{848}{28.9} = 29.27 (\text{公斤} \cdot \text{米/公斤} \cdot \text{K})。$$

(三) 理想混合气体

理想混合气体是指进行混合的各组成气体都是理想气体, 并且各组成气体在混合时不发生任何化学变化, 混合后的气体仍符合理想气体有关定律。

1. 分压力和分容积 如果把混合气体中各组成气体分开, 并保持混合气体原来的容积和温度, 这时各组成气体所具有的压力称为该组成气体的分压力。

根据理想气体的假定, 各组成气体的分子热运动是互不干扰的, 所以混合气体对容器壁面的压力等于各组成气体分压力之和。设 p 为混合气体的压力, p_1, p_2, \dots, p_n 分别为各组成气体的分压力, 则

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n$$

这就是混合气体的分压力定律, 或称道尔顿定律。

如果把混合气体中各组成气体单独分开, 并使压力和温度都保持原来混合气体的压力和温度, 这时各组成气体所占有的容积称为该组成气体的分容积。

设 V 为混合气体的容积, V_1, V_2, \dots, V_n 分别为各组成气体的分容积, 则

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n,$$

即混合气体的容积, 等于各组成气体的分容积之和。

2. 混合气体成份的表示 混合气体的组成一般用重量百分数或容积百分数来表示。

所谓重量百分数就是混合气体中某一组成气体的重量与混合气体总重量的百分比。设各组成气体的重量分别为 G_1, G_2, \dots, G_n , 则混合气体的总重量应为

$$G = G_1 + G_2 + \dots + G_n$$

因而

$$1 = \frac{G_1}{G} + \frac{G_2}{G} + \cdots + \frac{G_n}{G}.$$

G_1/G 、 G_2/G 、 \cdots 、 G_n/G 就是各组成气体的重量百分数。

所谓容积百分数是各组成气体分容积与混合气体总容积的百分比。设各组成气体的分容积分别为 V_1 、 V_2 、 \cdots 、 V_n ，则混合气体的总容积为

$$V = V_1 + V_2 + \cdots + V_n,$$

因而

$$1 = \frac{V_1}{V} + \frac{V_2}{V} + \cdots + \frac{V_n}{V}.$$

设 $y_1 = V_1/V$ ， $y_2 = V_2/V$ ， \cdots ， $y_n = V_n/V$ ，则 y_1 ， y_2 ， \cdots ， y_n 就是各组成气体的容积百分数或相对容积。

对于微量组分气体的含量，由于所占百分数太小，往往用 ppm 表示。1 ppm 为百万分之一的意思。显然，它既用来表示相对重量，又用来表示相对容积。

3. 混合气体的平均分子量和平均气体常数 理想混合气体各组成气体的分子量是不相同的，它们的气体常数 R 的数值也不一样。为了能利用理想气体状态方程来表示理想混合气体状态参数间的关系，可以使用假想平均分子量的概念。这样就可以把混合气体作为单一成份的气体来处理。它的通用气体常数仍然是 848 公斤·米/莫尔·K。

混合气体的平均分子量 μ 可按下式计算：

$$\mu = y_1\mu_1 + y_2\mu_2 + \cdots + y_n\mu_n$$

或

$$\mu = (p_1\mu_1 + p_2\mu_2 + \cdots + p_n\mu_n) / p. \quad (1-8)$$

式中 y_1 、 y_2 、 \cdots 、 y_n ——分别为组成气体的容积百分数；

μ_1 、 μ_2 、 \cdots 、 μ_n ——分别为组成气体的公斤分子量；

p ——混合气体的总压力；

p_1 、 p_2 、 \cdots 、 p_n ——分别为组成气体的分压力。

混合气体的平均气体常数为

$$R = \frac{848}{\mu} = \frac{848}{\sum y_i \mu_i}. \quad (1-9)$$

(四) 气体的比热

单位数量的物质，温度升高 1°C 所需要的热量称为该物质的比热。热量用大卡为单位（1 大卡等于 1 公斤水在标准大气压下，从 19.5°C 加热到 20.5°C 所需要的热量）。

由于衡量气体数量的单位不同，气体的比热单位也不同。单位重量的气体温度升高 1°C 所需的热量称为重量比热 C ，一般用大卡/公斤· $^\circ\text{C}$ 作单位。单位容积的气体温度升高 1°C 所需的热量称为容积比热 C' ，很少用到。气体的数量用莫尔表示时的比热称为莫尔比热 μC ，单位是大卡/莫尔· $^\circ\text{C}$ 。

莫尔比热 μC 与重量比热 C 间有以下关系

$$\text{莫尔比热} = \text{公斤分子量} \times \text{重量比热}$$

或

$$\mu C = \mu \times C$$

气体的重量比热和莫尔比热，不仅与气体种类有关，而且与气体的加热条件有关。在压力不变的条件下，气体的重量比热称为等压比热 C_p ；在容积不变的条件下气体的重量比热称为等容比热 C_v 。由于在压力不变的条件下加热时，气体能够自由膨胀，一部分热量要

消耗于气体膨胀做功，因此等压比热 C_p 大于等容比热 C_v 。它们的单位都是大卡/公斤·°C。

任何一种理想气体的等压比热和等容比热间均存在下述关系：

$$C_p - C_v = AR \quad (1-10)$$

式中 R —— 气体常数；

A —— 热功当量。

气体的等压比热与等容比热的比值，叫做比热比或绝热指数

$$K = \frac{C_p}{C_v} \quad (1-11)$$

从式(1-10)和式(1-11)可以导出

$$C_p = \frac{K}{K-1} AR \quad (1-12)$$

实际测量表明，比热的数值随气体温度的变化而略有变化，并与压力有关，但压力对比热的影响很小，通常可略去不计。在实际计算中使用一定温度范围内的平均比热，即以定值比热的假想过程来代替变值比热的实际过程。

有了比热的概念，就可以进行换热量的计算。当几种温度不同的物体间进行热量交换时，所有高温物体的放热量之和与所有低温物体的吸热量之和必然相等。根据这一规律所列出的方程式称为热平衡方程式。

二、热力学第一定律

(一) 能量守恒和转换定律

能量守恒和转换定律是人类在长期实践中的经验总结。它可以表达为：“能量不能被创造，也不能被消灭，只能从一种形式转化为另一种形式，并且在转化前后能量总数保持不变。”

能量守恒和转换定律应用于热能和功之间的转换，称为热力学第一定律。可表达为：“热和功可以相互转换，一定量的热消失时必定产生一定量的功；反之，消耗一定量的功时，必出现与之对应的一定量的热。”

如果消耗的热量为 Q ，得到的功为 L ， Q 和 L 应该是相等的。但是，因为习惯上所采用的计量单位不同，热量 Q 的单位为大卡，在计算中功的单位常用公斤·米，因此存在一个当量关系式

$$Q = AL \quad (1-13)$$

式中 A —— 热功当量 (大卡/公斤·米)。试验测定

$$A = \frac{1}{426.45} \approx \frac{1}{427} \text{ (大卡/公斤·米)}$$

即 1 公斤·米的功相当于 1/427 大卡的热量。

因为

$$1 \text{ (马力)} = 75 \text{ (公斤·米/秒)},$$

$$1 \text{ (千瓦)} = 102 \text{ (公斤·米/秒)} = 1.36 \text{ (马力)},$$

故

$$1 \text{ (马力·时)} = 75 \times 3600 = 270000 \text{ (公斤·米)},$$

$$1 \text{ (千瓦·时)} = 102 \times 3600 = 367200 \text{ (公斤·米)},$$

$$1 \text{ (马力·时)} = \frac{75 \times 3600}{427} = 632 \text{ (大卡)},$$

$$1 \text{ (千瓦·时)} \frac{102 \times 3600}{427} = 860 \text{ (大卡)}。$$

(二) 不流动气体的热力学第一定律分析式

热力学第一定律虽然确定了热和功之间的转换关系，但热和功的具体转换还要通过工质气体的状态变化才能实现。由于气体的情况不同，用数学式表达热和功之间转换的分析式也就不同。或者说，对于不同的条件，热力学第一定律的表达式不同。

1. 热力学第一定律分析式 设气缸内装有 1 公斤气体，活塞开始时处在位置 1，气体的状态参数为 p_1 、 v_1 、 T_1 ，如图 1-2 所示。加入热量 q 后，气体的温度从 T_1 上升到 T_2 ，所吸的热量使气体的内部热能 u (简称内能) 增加 Δu 。另外，气体温度升高使分子热运动速度增大，气体分子撞击器壁的次数和撞击力都增加，因而使活塞向上移动到位置 2，对外作功 l (提起重物)。根据能量守恒定律可写出

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

对于微过程可写成

$$dq = du + Adl \quad (1-14a)$$

这就是不流动气体的热力学第一定律分析式。

2. 气体的内能 u 对于理想气体，内能是分子热运动的动能总和，单位是大卡/公斤。气体分子热运动的动能只是气体温度的函数，所以理想气体的内能与气体的压力和比容无关。对于实际气体，由于分子间作用力的存在，因此分子还具有位能，它取决于分子间的平均距离，即工质的比容。所以实际气体的内能是气体内部动能和位能之和。由于气体的基本状态参数确定后，内能的数值也就单值确定，所以内能也是一个状态参数。

气体内能的绝对值很难确定。实际上我们关心的仅仅是内能的变化，因而可以任意规定某一状态的内能为零。为了统一，一般都规定 0 K 或 0 °C 时的气体内能为零。

利用定容加热过程可以很容易地导出

$$\Delta u = C_v(T_2 - T_1) \quad (1-15)$$

对于微过程可写成

$$du = C_v dT \quad (1-15a)$$

由于内能的变化与过程无关，所以在一切热力过程中理想气体内能的变化都等于定容比热与温差的乘积。这样，式(1-14)可写成

$$q = C_v(T_2 - T_1) + Al \quad (1-16)$$

$$dq = C_v dT + Adl \quad (1-16a)$$

3. 气体对外所作功 l 的计算 设在图 1-3(a) 所示的汽缸中充有 1 公斤的气体工质，汽缸的活塞带动负载。在工质状态由 1 变到 2 的过程中，推动活塞使它从 A 移到 B，并对外作功 l 。在这个过程中没有工质加入汽缸，也没有工质排出汽缸，因此是一个封闭系统。现在来讨论功和工质状态变化的关系，如图 1-3(b) 所示。设活塞在移动过程中处在位置 x ，这时工质的压力为 p 公斤/米²，活塞的面积为 f 米²。由于工质膨胀，将活塞推动了一个微小的距离 dx 。因 dx 很小，可以把工质的微小压力变化忽略不计。这时，工质对活塞所作的功为：

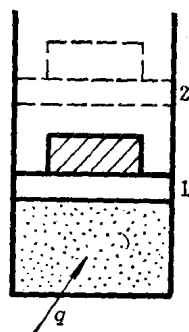


图 1-2