

制冷技术培训系列教材

制冷原理 与制冷设备

张祉祐 主编

机械工业出版社

制冷技术培训系列教材

制冷原理与制冷设备

张祉祐 主编

张祉祐 常鸿寿 张华俊
吴进发 李树林 曹琦 编 著



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书是“制冷技术培训系列教材”之一。内容包括工程热力学基础知识,压缩式及吸收式制冷机的工作原理和基本计算,活塞式、离心式及回转式制冷压缩机的工作过程、结构及性能,制冷机的换热设备及辅助设备的种类、结构及工作特点,以及压缩式及吸收式制冷机组的种类、结构、性能和自动控制等。这些都是制冷技工和管理人员必须学习和掌握的基础理论和基本知识。本书可作为制冷技工和管理人员的培训教材,还可供在职职工及大专院校学生自学参考。

图书在版编目(CIP)数据

制冷原理与制冷设备/张祉祐主编. —北京:机械工业出版社, 1995.8
制冷技术培训系列教材
ISBN 7-111-04628-5

I.制…

II.①张…②常…

III.①制冷-理论②制冷-设备

IV.TB6

中国版本图书馆CIP数据核字(94)第15930号

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)
责任编辑:蒋有彩 版式设计:张世琴 责任校对:肖新民
封面设计:姚毅 责任印制:卢子祥
三河市宏达印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
1995年8月第1版·1995年8月第1次印刷
787mm×1092mm^{1/16}·19印张·460千字
9 001—6 000册
定价:19.80元

前 言

建国以来，随着国民经济的迅速发展和人民生活水平的不断提高，制冷设备的应用日益普遍。特别是近十多年来，随着党的改革开放政策的深入贯彻，我国制冷事业的发展更是一日千里，迅猛异常。现在，不但制冷设备的生产在机电产品中占相当大的比重，而且制冷设备的应用已深入到工业生产、人民生活、科学研究和国防设施的各个方面和部门。

制冷设备的大量应用，需要培养一大批管理人员和操作人员，他们必须具有制冷原理和制冷设备的基础知识、制冷设备管理和操作的技能。近几年来，许多单位和组织都在开办这类培训班，但苦于缺乏合适的教材，使培训工作难以收到预期的效果。为了改变这一状况，充分适应制冷技术培训工作的要求，我们组织编写了这一套“制冷技术培训系列教材”，既可用于制冷技工和管理人员的在职培训和上岗培训，也可供有一定实践经验的制冷技工和管理人员自学和参考。

本系列教材的使用对象，主要是具有高中或中等专业学校文化水平的在职工人、干部和社会青年，以及具有初中或技工学校文化水平，并在制冷设备的操作或维修方面有数年实践经验的青年工人。系列教材共三种：《制冷原理与制冷设备》、《制冷设备的安装与管理》和《冷藏与空气调节》；全部学习约需220课时（不包括实习时间），但在教学中可根据培训工种的不同，对教材内容进行取舍。

本系列教材是由陕西省瑞科制冷空调工程公司发起并支持编写的，在编写过程中还得到了山东省莱芜市钢城瑞科制冷工程公司的赞助，在此一并致谢。

本书的编写分工是：西安交通大学张祉祐教授撰写第1、2、3、4章，陕西省瑞科制冷空调工程公司吴进发高级工程师撰写第5、11章，西安建筑科技大学李树林副教授撰写第6、9、10章，西安交通大学常鸿寿教授撰写第7章，张华俊副教授撰写第8章，曹琦副教授撰写第12章；全书由主编张祉祐审阅并修改定稿。

由于作者的业务水平和实践经验所限，教材可能存在这样或那样的差错，恳请同行专家和广大读者予以批评指正。

作 者

1994年6月于西安

AK 2/06

目 录

第一篇 制 冷 原 理

第 1 章 工程热力学基础知识

1.1 工质及其基本状态参数	1
1.1.1 工质	1
1.1.2 工质的基本状态参数	2
1.2 能量及其转移形式	4
1.2.1 物质的能量	4
1.2.2 能量的转移形式——热量和功	4
1.2.3 功的类型	5
1.3 热力学基本定律	7
1.3.1 热力学第一定律及其应用	7
1.3.2 热力学第二定律和比熵	9
1.4 理想气体的性质	10
1.4.1 关于理想气体的概念	10
1.4.2 理想气体的基本定律	10
1.4.3 理想气体状态方程式	10
1.4.4 理想气体的比热容	11
1.5 理想气体的热力过程及循环	13
1.5.1 基本热力过程	13
1.5.2 多变过程	15
1.5.3 循环过程和卡诺循环	16
1.6 蒸气的热力性质	18
1.6.1 蒸气的定压发生过程	18
1.6.2 蒸气的热力性质表和图	20
1.6.3 蒸气的热力过程	23
1.7 气体及蒸气的压缩	24
1.7.1 活塞式压缩机的理论工作过程	24
1.7.2 活塞式压缩机的实际工作过程	26
1.7.3 离心式压缩机的工作过程	27

第 2 章 制冷方法、制冷剂和载冷剂

2.1 人工制冷方法及其应用	28
2.1.1 机械制冷	28

2.1.2 热电制冷	29
2.1.3 磁制冷	29
2.2 制冷剂的种类和编号	29
2.2.1 氟利昂及烷烃	30
2.2.2 烯烃及其卤族元素衍生物	30
2.2.3 混合制冷剂	30
2.2.4 其它有机化合物	31
2.2.5 无机化合物	31
2.3 制冷剂的热力学性质	31
2.3.1 标准沸点	32
2.3.2 凝固点	32
2.3.3 饱和蒸气压力	34
2.3.4 临界温度和压力	34
2.3.5 绝热指数	34
2.4 制冷剂的实用性质	34
2.4.1 制冷剂的相对安全性	34
2.4.2 制冷剂的热稳定性	35
2.4.3 制冷剂对材料的作用	35
2.4.4 制冷剂同水的溶解性	35
2.4.5 制冷剂同润滑油的溶解性	36
2.4.6 制冷剂的泄漏判断	37
2.5 常用制冷剂的特性及应用	37
2.5.1 无机化合物	37
2.5.2 氟利昂	37
2.5.3 混合制冷剂	38
2.5.4 CFC的代用问题	39
2.6 载冷剂	39
2.6.1 载冷剂的种类及选用	39
2.6.2 盐水	39
2.6.3 有机物载冷剂	40

第 3 章 单级压缩蒸气制冷循环

3.1 单级压缩制冷机的理论循环	41
------------------	----

3.1.1	单级压缩制冷机的组成和工作过程	41
3.1.2	单级压缩制冷机的理论循环及其性能指标	43
3.2	液体过冷、吸气过热及回热循环	44
3.2.1	液体过冷	44
3.2.2	吸气过热	45
3.2.3	回热循环	46
3.3	单级压缩制冷机的实际循环与热力计算	47
3.3.1	单级压缩活塞式制冷机的实际循环	48
3.3.2	单级压缩活塞式制冷机的热力计算	48
3.3.3	单级压缩离心式制冷机的实际循环	51
3.4	冷凝温度和蒸发温度对制冷机性能的影响及制冷机的工况	51
3.4.1	冷凝温度变化的影响	52
3.4.2	蒸发温度变化的影响	52
3.4.3	容积式制冷压缩机的性能曲线	53
3.4.4	单级压缩制冷机的工况	54

第4章 多级压缩与复叠式制冷循环

4.1	采用多级压缩与复叠式制冷机的必要性	56
4.2	两级压缩制冷循环	56
4.2.1	两级压缩制冷机的组成和工作过程	56
4.2.2	两级压缩制冷循环的型式	58

4.2.3	两级压缩制冷机的工作特性	60
4.3	三级压缩制冷循环	62
4.3.1	用离心式压缩机的三级压缩制冷循环	62
4.3.2	生产干冰的三级压缩制冷循环	63
4.4	复叠式制冷循环	64
4.4.1	复叠式制冷循环的型式	65
4.4.2	复叠式制冷机使用中的有关问题	67

第5章 吸收式制冷循环

5.1	吸收式制冷机的工质	68
5.1.1	溴化锂溶液的性质	68
5.1.2	溴化锂溶液的热力状态图	71
5.1.3	溴化锂溶液的腐蚀性与防腐措施	73
5.2	吸收式制冷机的工作原理	75
5.2.1	吸收制冷原理	75
5.2.2	溴化锂吸收式制冷机的工作原理	75
5.2.3	压缩式制冷机与吸收式制冷机原理的异同	77
5.3	溴化锂吸收式制冷机理论循环及其计算	78
5.3.1	理论循环及其 $h-\xi$ 图	78
5.3.2	设备的热负荷	80
5.3.3	循环的热平衡及热力系数	82
5.4	溴化锂吸收式制冷机的实际循环	82
5.4.1	实际过程同理论过程的区别	82
5.4.2	单效溴化锂吸收式制冷机循环	83
5.4.3	两效溴化锂吸收式制冷机循环	84
5.5	单级氨吸收式制冷机循环	87
5.5.1	单级氨吸收式制冷机的工作过程	87
5.5.2	循环过程在 $h-\xi$ 图上的表示	88

第二篇 制冷压缩机

第6章 活塞式制冷压缩机

6.1	活塞式制冷压缩机的工作过程及种类	90
6.1.1	活塞式制冷压缩机的工作过程	90
6.1.2	活塞式制冷压缩机的种类	91

6.1.3	我国活塞式制冷压缩机的型式及基本参数	92
6.2	活塞式制冷压缩机的总体及主要零部件结构	94
6.2.1	812.5G (8S12.5) 型制冷压缩机	95

6.2.2	47F (4FS7B) 型制冷压缩机	102
6.2.3	Q1.5S (2FM4) 型制冷压缩机	106
6.3	活塞式制冷压缩机的性能及计算	108
6.3.1	活塞式制冷压缩机的理论输气量及理论功率	108
6.3.2	活塞式制冷压缩机的制冷量	109
6.3.3	活塞式制冷压缩机的轴功率	111
6.3.4	影响活塞式制冷压缩机性能的主要因素	114
6.4	单级活塞式制冷压缩机的工况	116
6.5	应用不同制冷剂时活塞式制冷压缩机的特性	118

第7章 离心式制冷压缩机和机组

7.1	概述	120
7.1.1	离心式制冷压缩机的特点及应用范围	120
7.1.2	离心式制冷压缩机的分类	120
7.1.3	离心式制冷机的工作循环及制冷剂的选择	120
7.1.4	离心式制冷机的发展概况	124
7.2	离心式压缩机的工作原理	125
7.2.1	离心式压缩机各部件的作用	125
7.2.2	离心式压缩机级的基本方程式	125
7.2.3	损失、效率、功率	128
7.3	离心式制冷机组	130
7.4	离心式压缩机及其零部件的结构	132
7.4.1	压缩机转子	133
7.4.2	压缩机的固定元件	136
7.4.3	进口制冷量调节机构	137
7.4.4	轴承	138
7.4.5	密封	138

7.4.6	增速装置	138
7.4.7	联轴器	143
7.4.8	压缩机的平衡管	143
7.5	离心式制冷机的辅助设备	144
7.5.1	蒸发器和冷凝器	144
7.5.2	润滑油系统	146
7.5.3	抽气回收装置	148
7.6	离心式制冷机组的特性和调节	150
7.6.1	离心式制冷机组的特性	150
7.6.2	离心式制冷机组的调节	151

第8章 回转式制冷压缩机

8.1	概述	155
8.2	螺杆式制冷压缩机工作原理及特点	155
8.2.1	工作过程	155
8.2.2	工作特点	157
8.2.3	带经济器的螺杆式制冷压缩机	158
8.3	螺杆式制冷压缩机的构造及工作参数	160
8.3.1	总体结构	160
8.3.2	型式和基本参数	162
8.3.3	转子及其端面齿形	165
8.3.4	输气量调节装置	167
8.4	螺杆式制冷压缩机的性能	169
8.4.1	输气系数	169
8.4.2	内压缩与功率	169
8.5	滚动转子式制冷压缩机	171
8.5.1	工作原理及特点	171
8.5.2	结构及主要产品	173
8.6	涡旋式制冷压缩机简介	174
8.6.1	工作原理	174
8.6.2	结构	174
8.6.3	特点	176

第三篇 制冷设备和机组

第9章 制冷机的换热设备及辅助设备

9.1	制冷换热设备的传热学基础知识	177
9.1.1	传热的三种基本方式	177
9.1.2	传热的基本方程式	178
9.1.3	平均温度差	179
9.2	冷凝器的种类、结构及工作特点	181
9.2.1	水冷式冷凝器	181

9.2.2	空气冷却式冷凝器	184
9.2.3	蒸发式冷凝器	186
9.3	蒸发器的种类、结构及工作特点	187
9.3.1	冷却液体载冷剂的蒸发器	187
9.3.2	冷却空气的蒸发器	190
9.4	其它换热器	194
9.4.1	冷凝蒸发器	194
9.4.2	中间冷却器	194
9.4.3	回热器	195
9.5	辅助设备	196
9.5.1	润滑油的分离及收集设备	196
9.5.2	制冷剂的贮存及分离设备	198
9.5.3	制冷剂的净化设备	200
9.5.4	安全及其它辅助设备	203

第10章 压缩式制冷机组

10.1	制冷机组的种类	206
10.2	冷水机组	207
10.3	家用电冰箱和冷藏柜	209
10.3.1	家用电冰箱	209
10.3.2	冷藏柜	213
10.4	试验用制冷装置	214
10.4.1	试验装置的用途和种类	214
10.4.2	试验装置的特点和结构	214
10.4.3	试验装置的冷却、加热及真空系统	216

第11章 溴化锂吸收式制冷机组

11.1	溴化锂吸收式制冷机组的型式与总体结构	218
11.1.1	型式与基本参数	218
11.1.2	蒸汽型单效机组的总体结构	219
11.1.3	蒸汽两效型机组的总体结构	223
11.2	溴化锂吸收式制冷机组主要部件的结构	224
11.2.1	高压发生器	224
11.2.2	低压发生器与冷凝器	225
11.2.3	蒸发器与吸收器	226
11.2.4	热交换器	227
11.2.5	节流装置	228

11.2.6	抽气装置	228
11.3	溴化锂吸收式制冷机组的主要辅助设备	230
11.3.1	屏蔽泵	230
11.3.2	真空泵	230
11.3.3	真空隔膜阀	230
11.3.4	真空蝶阀	234
11.4	溴化锂吸收式制冷机组的运转特性及制冷量调节	235
11.4.1	外界条件变化对性能的影响	236
11.4.2	机内因素对性能的影响	237
11.4.3	容量控制	239

第12章 制冷机组的自动控制

12.1	自动控制的基本概念	240
12.1.1	自动控制与自动控制系统	240
12.1.2	自动控制系统的过渡过程及控制品质指标	241
12.1.3	调节对象特性	242
12.1.4	调节器	243
12.1.5	计算机在调节系统中的应用	244
12.1.6	制冷机组自动控制综述	244
12.2	蒸发器液量的自动调节	245
12.2.1	热力膨胀阀	245
12.2.2	热电膨胀阀和电子膨胀阀	247
12.2.3	毛细管	249
12.2.4	液位的检测和控制	250
12.2.5	电磁阀	251
12.3	制冷机组运转参数的自动调节	252
12.3.1	蒸发压力的自动调节	252
12.3.2	冷凝压力的自动调节	255
12.3.3	温度的自动调节	257
12.4	压缩机的能量调节	259
12.4.1	压力控制器-电磁滑阀式能量调节	259
12.4.2	油压比例调节器式能量调节	260
12.4.3	压缩机进排气侧流量旁通能量调节	262
12.4.4	变频式能量调节	263
12.5	压缩机组的常用电器和控制线路	265

12.5.1	电工常用基本图形和文字符号	265		
12.5.2	压缩机组常用电器	268	附表 2	R11饱和液体及饱和蒸气 热力学性质表
12.5.3	压缩机组的起动装置	270		
12.5.4	压缩机的常用控制电路	271	附表 3	R12饱和液体及饱和蒸气 热力学性质表
12.6	压缩机的自动保护	274		
12.6.1	吸气压力和排气压力保护	274	附表 4	R22饱和液体及饱和蒸气 热力学性质表
12.6.2	压缩机的压差保护	275		
12.6.3	压缩机的温度保护	277	附表 5	R13饱和液体及饱和蒸气 热力学性质表
12.6.4	离心式制冷机组不凝性气体过 量保护	278	附图 1	R717 (NH ₃) 压-焓图
12.7	小型制冷装置控制系统	279	附图 2	R11 (CCl ₃ F) 压-焓图
12.7.1	双门间冷式电冰箱控制系统	279	附图 3	R12 (CCl ₂ F ₂) 压-焓图
12.7.2	KW-31R型分体式空调器控 制系统	281	附图 4	R22 (CHClF ₂) 压-焓图
			附图 5	R13 (CClF ₃) 压-焓图
			参考文献	

附录 制冷剂的热力学性质表和图

附表 1 R717饱和液体及饱和蒸

第一篇 制 冷 原 理

第 1 章 工程热力学基础知识

在学习制冷原理之前，需先掌握工程热力学的基础知识，因为制冷是根据热力学的基本理论发展起来的。

热力学是研究热能同其它能量（如电能、机械能、化学能等）互相转换的一门科学。它能说明的问题比较多，适用的范围比较广，是一种具有普遍意义的物理学理论。工程热力学是热力学的一个重要分支。它主要研究热能同机械能互相转换的方法和规律，并探讨如何有效地利用能量资源。热能同机械能的互相转换，不仅存在于以生产电能和热能为目的的热力装置中，也存在于以制冷为目的的制冷装置中。

1.1 工质及其基本状态参数

1.1.1 工质

在热力装置及制冷装置中，不断循环流动以实现能量转换的物质称为工质。工质可分为热力工质和制冷工质（亦称制冷剂）两类。这是按其所起作用区分的，不是按物质的种类来区分的。例如水是应用最广泛的热力工质，同时也是应用较广的制冷工质；氨是良好的制冷工质，它也可以用作热力工质（目前使用较少）；而最普遍使用的氟利昂制冷工质，在低温位热能利用装置中同样可用作热力工质。

任何物质均可有固、液、气三种集态。从体积和形状来看，三种集态的特征是各不相同的。在给定的条件下，固态时物质具有固定的体积和形状，液态时物质具有固定的体积但形状随容器而变；气态时无固定体积和形状，物质可以充满容器。液体和气体都具有可以流动的特性，合称为流体。在热力装置及制冷装置中，工质应以液态或气态（或气液混合物）的形式出现，要能够循环流动。

物质均由分子构成，而且分子在不停地运动。但三种集态的物质分子运动形式是不同的。固态时物质分子位置固定，只能以其平衡位置为中心进行多方向的振动；液态时分子位置不定，可以在小范围内活动，分子的运动形式除振动外，还有移动；气态时分子的运动（包括移动和转动）杂乱无章，活动范围很大，速度也不时发生变化。

在热力装置及制冷装置的工作过程中，工质常会由液态变为气态，或者由气态变为液态。在一定条件下，物质由一种集态变为另一种集态的过程，称为相变（或集态变化）。常见的相变有六种：液态变为气态称汽化，气态变为液态称凝结；液态变为固态称凝固，固态变为液态称熔化；固态变为气态称升华，气态变为固态称凝华。在这些相变过程中，当保持压力不变时，温度也恒定不变，而且所保持的温度同压力之间存在一定的关系，这一关系随

工质的种类而变。

1.1.2 工质的基本状态参数

工质在某一瞬间的宏观物理状况称为状态。热力学中所说的状态是指热力状态。它仅涉及工质的热力学性质，并且是用工质的热力学参数来表示状态特性。状态和集态是两个截然不同的概念。同一集态可以有不同的状态。例如，热水和冷水属同一集态，但因温度不相同，它们就具有不同的状态。高压空气和低压空气，因为压力不同，状态也不相同。另一方面，工质的某一个状态也可以包函两个甚至三个集态，例如汽水混合物就包函两个集态，而汽、水、冰共存时的状态，就有三个集态。

描述工质状态特性的物理量称为状态参数（或称热力学参数）。工质的基本状态参数有三个：压力、温度和比容。

(1) 压力 流体单位面积所受垂直作用的力称为压力，物理学中习惯上称压强。例如力 F 垂直作用于面积 A 上时，所产生的压力为

$$p = F / A \quad (1-1)$$

压力的单位用帕斯卡，简称帕 (Pa)，它定义为每平方米面积上垂直作用1N的力。

$$1\text{Pa} = 1\text{N}/\text{m}^2$$

通常使用的压力单位还有千帕 (kPa) 和兆帕 (MPa)，它们同帕的换算关系是

$$1\text{kPa} = 10^3\text{Pa}, 1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$$

对于气体，压力是气体分子不断运动时碰击容器壁的结果。对于液体，自身重力也能产生压力。例如，设一容器底面积为 A ，内藏液体的高度为 H ，液体的密度为 ρ ，则容器底面受力为

$$F = mg = \rho AHg$$

式中 m 是液体的质量， g 是重力加速度。

由此产生的压力为

$$p = F / A = \rho gH \quad (1-2)$$

由此可见，还可以用液柱高度 H 来表示压力，在这种表示法中使用的单位有

$$1\text{mmH}_2\text{O} = 9.806\text{Pa}, 1\text{mmHg} = 133.32\text{Pa}$$

以前在工程上采用工程大气压 (at) 作为压力的单位，它同帕之间的关系是

$$1\text{at} = 1\text{kgf}/\text{cm}^2 = 98066\text{Pa}$$

此外，在物理学中将 0°C 时 760mmHg 所表示的压力定为标准大气压（亦称物理大气压），用 atm 表示，其值为

$$1\text{atm} = 760\text{mmHg} = 1.0332\text{at} = 101325\text{Pa}$$

在我国法定计量单位中，工程大气压已被废除。标准大气压作为一个概念仍然保留，但不作为压力的度量单位。

要区分开表压力和绝对压力。测定流体的压力，通常是用弹簧管式压力表或U形管液体测压计，其结构如图1-1所示。用压力表或U形管测得的压力称为表压力，用 p_s 表示，它实际上是工质的压力同大气压力 p_0 之差。工质的真正压力应为表压力与大气压力之和，称绝对压力。

$$p = p_s + p_0 \quad (1-3)$$

大气压力 p_0 可用气压计测量。

当工质处于真空状态时,其压力小于大气压力,用真空计测得的数值称真空度,用 p_v 表示,此时工质的绝对压力为

$$p = p_b - p_v \quad (1-4)$$

测得的表压力或真空度,只有按式(1-3)或式(1-4)计算的绝对压力才是工质的状态参数。在计算中, p_b 可由气压计测得,如无气压计可近似地取 $p_b = 1 \text{at}$,或 $p_b = 0.1 \text{MPa}$ 。

例题1-1 用压力表测得制冷压缩机的排气压为 12.5at ,试求其绝对压力(用 MPa 表示)。

解 已知 $1 \text{at} = 98066 \text{Pa} = 0.098 \text{MPa}$,则制冷压缩机排气的表压力为

$$p_g = 12.5 \times 0.098 = 1.225 \text{MPa}$$

题中未给 p_b 的数值,可近似取 $p_b = 0.1 \text{MPa}$,故排气的绝对压力为

$$p = p_g + p_b = 1.225 + 0.1 = 1.325 \text{MPa}$$

例题1-2 用U形管测压计测得溴化锂吸收式制冷机蒸发器内的真空度 $p_v = 736 \text{mmHg}$,用气压计读得当时的大气压力为 $p_b = 744 \text{mmHg}$,试求蒸发器内的蒸发压力(用 Pa 表示)。

解 按题给条件,蒸发压力为

$$p = p_b - p_v = 744 - 736 = 8 \text{mmHg}$$

而 $1 \text{mmHg} = 133.32 \text{Pa}$,故可求得

$$p = 133.32 \times 8 = 1066.6 \text{Pa}$$

(2) 温度 温度是工质冷、热程度的标志。一个物体较热时,就说它具有较高的温度;较冷时,说它具有较低的温度。从物质分子运动的角度考虑,温度是分子运动平均动能的度量。一物体的分子运动速度大时,平均动能大,因之该物体的温度高,反之则温度低。

工质的温度用温度计来测量,常用两种温标:摄氏温标和华氏温标。摄氏温标用 $^{\circ}\text{C}$ 表示。它是将标准大气压下纯水的冰点(即凝固温度)定为 0°C ,沸点(即汽化温度)定为 100°C ,两点之间均分为100格,每格称为摄氏一度(1°C)。华氏温标用 $^{\circ}\text{F}$ 表示,它是将标准大气压下纯水的冰点定为 32°F ,沸点定为 212°F ,两点之间均分为180格,每格称为华氏一度(1°F)。两种温度的换算式为

$$\left. \begin{aligned} t^{\circ}\text{C} &= \frac{5}{9}(t^{\circ}\text{F} - 32) \\ t^{\circ}\text{F} &= \frac{9}{5}t^{\circ}\text{C} + 32 \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

用温度计测得的温度习惯上称为普通温度。在热工计算中通常是用绝对温度作为状态参数,物理量符号用 T 表示,单位为开尔文,简称开(K)。绝对温度是根据理想气体的性质,用热力学方法推导出的,故也称热力学温度。它与摄氏温度的换算式为

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

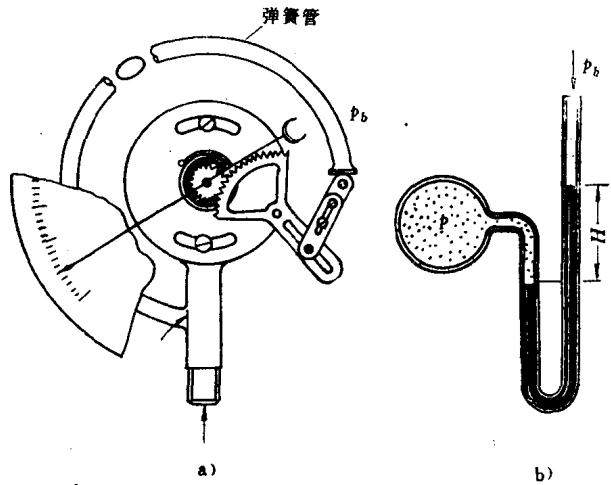


图1-1 压力表和U形管测压计
a) 弹簧管式压力表 b) U形管测压计

(3) 比容和密度 定量工质所占据的空间称为容积, 常用 V 表示。对于液体, 这就是它的体积; 对于气体, 主要是分子运动的空间。

单位质量工质的容积称为比容, 用 v 表示, 单位是 m^3/kg 。以 m 表示质量, 则

$$v = V/m \quad (1-6)$$

单位容积中所含工质的质量称为密度, 用 ρ 表示, 单位为 kg/m^3 。

$$\rho = m/V = 1/v \quad (1-7)$$

即 ρ 与 v 成倒数关系。

以上三个基本状态参数, 都是可以直接测量的。经验和实验都指明, 对于任一种工质, 其比容 (或密度) 是随其温度和压力而变的, 当温度和压力改变时, 比容也随之而变。这种变化关系对于气体工质表现得最为明显。因此, 对于任一种工质, 三个基本状态参数之间存在着固定的数学关系, 即

$$F(p, T, v) = 0$$

称为状态方程式, 其形式随工质的种类而变, 具体形式以后将要讲到。

1.2 能量及其转移形式

1.2.1 物质的能量

能量是物质运动和相互作用的度量。它同速度、动量、引力等具有相似的性质。运动和相互作用是物质存在的形式, 因此, 一切物质均具有能量。

一个物体具有的能量, 按其表现形式可分为宏观能量和微观能量两类。

宏观能量是由物体的宏观运动和物体之间的相互作用而引起的。它一般包括宏观动能及宏观位能。宏观动能 E_k 取决于物体的质量 m 和速度 w 。

$$E_k = \frac{1}{2} mw^2 \quad (1-8)$$

宏观位能取决于物体的质量 m 、重力加速度 g 和物体所处位置距离地面的高度 H 。

$$E_p = mgH \quad (1-9)$$

宏观动能和宏观位能按其性质, 均属机械能, 因为它们是由于物体的机械运动和引力作用而引起的。

物质的微观能量有三种形式: ①由物质的分子运动 (包括移动、转动和振动) 引起的内动能和由分子之间的吸引作用引起的内位能, 合称为内热能; ②因物质的分子结构而具有的微观能量, 称为化学能; ③因物质的原子结构而具有的微观能量, 称为原子能。这三项微观能量之和称为内能。不过物质的化学能和原子能, 只有当发生化学反应 (如燃烧) 和核反应 (裂变或聚变) 时才能释放出来, 而在工程热力学研究范围内, 一般不涉及化学反应和核反应, 故所提内能实际是指内热能。

无论是宏观能量或微观能量, 都是物质所具有的能量, 故也称储存能。一个物体的储存能的多少, 是随其运动状态和热力状态而变的, 只要物体的运动状态和热力状态一定, 则该物体的能量也就一定。相应的, 物体的运动状态和热力状态变化时, 它所具有的能量也要随之发生变化, 这就出现了能量转移或传递的问题。

1.2.2 能量的转移形式——热量和功

能量从一个物体转移 (传递) 到另一个物体时, 将以一定的形式表现出来。其表现形式

有两种：热量和功。热量和功是能量的迁移形式，称为迁移能，同时它们只存在于迁移过程之中，是过程量而不是状态量。一旦能量转移过程完成，传热或做功也就结束，热量和功就转化为工质的能量。所以只能说一个物体在某种状态时具有多少能量，而不能说它具有多少热量或功。

(1) 热量和比热容 当两个物体之间有温度差存在时，能量转移的形式称为热量。热量的单位为焦[耳]，用 J 表示，或用 kJ 表示。

物质在不发生相变的情况下吸热或放热时，温度要升高或者降低，因而人们提出了比热容的概念。比热容定义为 1 kg 工质温度每变化 1°C 所吸收或放出的热量，单位是 kJ/(kg·K)。根据比热容及温度的变化值，可以很方便地计算工质所吸收或放出的热量。例如，设有 m (kg) 的工质，比热容为 c [kJ/(kg·K)]，温度由 T_1 变至 T_2 ，则所吸收的热量可用下式计算。

$$Q = mc\Delta T = mc(T_2 - T_1) \quad (\text{kJ}) \quad (1-10)$$

在热量计算中，若 $T_2 < T_1$ ，则 Q 为负，它表示工质放出热量。

(2) 功和功率 功是在力的作用下能量的转移形式。在物理学中，功定义为力 F 同沿力的方向所移动的距离 Δx 的乘积，即

$$W = F\Delta x = F(x_2 - x_1) \quad (1-11)$$

式 (1-11) 所表示的功，可以象形地用 $F-x$ 图上的面积表示，如图 1-2 a 所示。如果在做功过程中力 F 不断变化 (图 1-2 b)，则所做的功需用积分法计算，即

$$W = \int_{x_1}^{x_2} F dx \quad (1-12)$$

式中 dx 为在某一瞬间移动的微小距离； F 为该瞬间力的瞬时值。

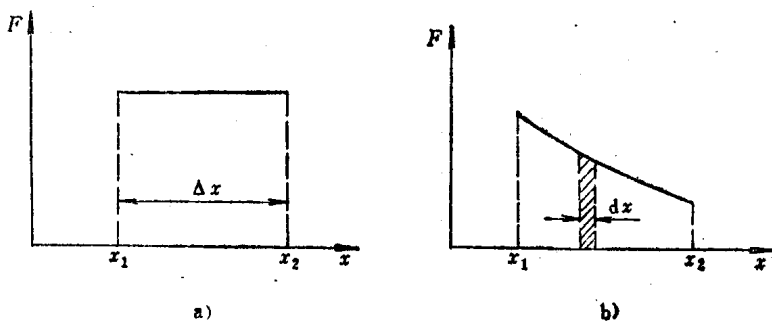


图1-2 功在 $F-x$ 图上的表示

a) F 为定值 b) F 为变值

功的单位与热量的单位相同，用焦或千焦，而且根据定义，1 牛(N)的力移动 1 米(m) 距离所做的功为 1 焦[耳](J)，即

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N} \cdot \text{m}$$

单位时间内所做的功称为功率。功率的单位为瓦[特]，用 W 表示。根据定义，每秒钟做 1 焦[尔]的功，则功率为 1 瓦[特]。故

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}, \quad 1 \text{ kW} = 1000 \text{ W} = 1 \text{ kJ/s}$$

1.2.3 功的类型

在自然界和工程技术中，力是多样性的，因而由力产生的功也有多种类型。在工程热力学研究的范围内，常涉及三种类型的功：容积变化功、流动功和轴功。

(1) 容积变化功 具有一定压力的气体膨胀时 (即容积增大时) 对外做的功，称为膨胀功。最常见的例子是气体在具有可移动活塞的气缸内的膨胀，如图 1-3 所示。设有 m (kg) 的气体，在气缸中由 $V_1 = mv_1$ 膨胀到 $V_2 = mv_2$ ，气体便对活塞做了膨胀功 W 。气体在膨胀过程中，压力由 p_1 降低到 p_2 ，活塞受力为一变化值，故应按式 (1-12) 计算膨胀功。用 A 表示

活塞面积，在膨胀过程的某一瞬间，活塞受力为

$$F = pA$$

在此力作用下活塞移动 dx 距离时，气体所做的微量功为

$$dW = Fdx = pAdx = pdV = mpdv$$

式中 dV 为活塞移动 dx 距离时气体容积的增长量。在整个膨胀过程中，气体所作的膨胀功为无数个 dW 之和，这要用积分法来计算。

$$W = \int_{V_1}^{V_2} pdV = m \int_{v_1}^{v_2} pdv \quad (1-13)$$

上式中的 $\int_{v_1}^{v_2} pdv$ 为 1kg 气体所做的膨胀功，它可用工质的 $p-v$ 图（压-容图）上的面积表示，如图1-3所示。

按式 (1-13) 计算出的功为正值，则气体对外做功。当压缩气体时，气体的压力升高 ($p_2 > p_1$)，容积减小 ($V_2 < V_1$)，则按上式计算出的功为负值，表示消耗的功，称为压缩功。膨胀功和压缩功都是由于工质容积的变化而引起的，称容积变化功(或简称容积功)。

(2) 流动功 工质在不发生状态变化的情况下，流进或流出热力装置或制冷装置所做的功称为流动功。如图1-4所示，工质在状态 p_1, v_1 下流进装置，在状态 p_2, v_2 下流出装置；设装置是在稳定情况下工作，则单位时间内流进和流出装置的工质质量应是相等的。为使质量为 m 的工质团 B 流入装置，上源工质（用一个假想的活塞代替）需作推挤功

$$-p_1 A_1 \Delta x_1 = -p_1 V_1 = -m p_1 v_1$$

式中， A_1 为进口管的截面积， V_1 为工质团 B 的容积。同样，在装置的出口处，为使同样质量的工质团 B' 流出，需对下源工质（用另一假想的活塞代替）做推挤功

$$p_2 A_2 \Delta x_2 = p_2 V_2 = m p_2 v_2$$

式中， A_2 为出口管的截面积， V_2 为工质团 B' 的容积。进出口推挤功的代数和即为流动功

$$W_f = p_2 V_2 - p_1 V_1 = m(p_2 v_2 - p_1 v_1) \quad (1-14)$$

式中 $(p_2 v_2 - p_1 v_1)$ 为每千克工质的流动功。

按式 (1-14) 算出的 W_f ，当为正值时，表示是装置需做的功；当为负值时，表示是装置可得到的功。在进出口推挤功的绝对值相同的情况下，流动功等于零。

(3) 轴功 对于图1-4所示的装置，通过叶轮机或搅拌器，可进行工质与外界的功的交换。这样的功称为轴功。当工质对外做功时，轴功为正；当工质消耗功时，轴功为负。

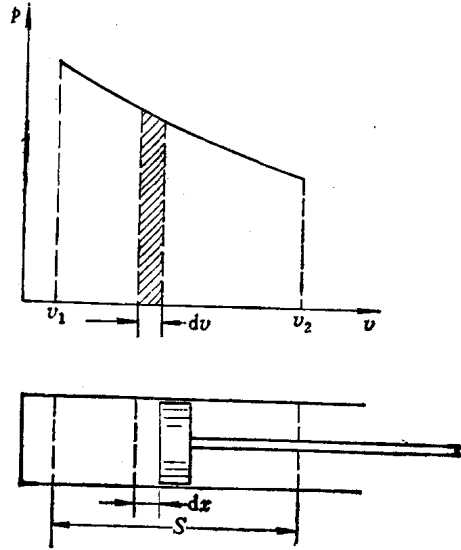


图1-3 气体的膨胀过程及膨胀功

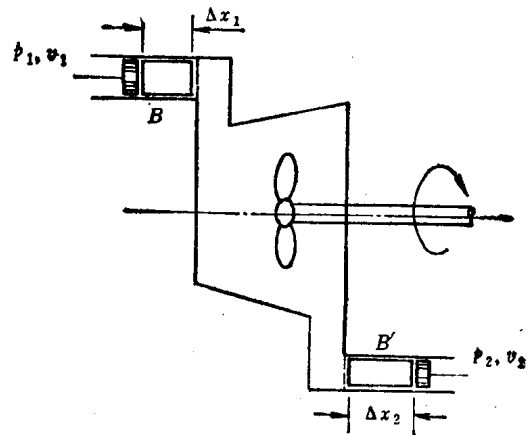


图1-4 流动功及轴功

例题1-3 一水冷式冷凝器，每小时通过的水量为50 t，水的温度由32℃升至36.5℃。试计算水每小时带走的热量。

解 水的比热容为 $c = 4.1868 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，根据式 (1-10)

$$\begin{aligned} Q &= mc(t_2 - t_1) = 50 \times 1000 \times 4.1868 \times (36.5 - 32) \\ &= 942000 \text{ kJ} \end{aligned}$$

即每小时可带走942000kJ的热量。

例题1-4 一氨压缩机，吸入参数为 $p_1 = 236 \text{ kPa}$ ， $v_1 = 0.507 \text{ m}^3/\text{kg}$ ，排气参数为 $p_2 = 1169 \text{ kPa}$ ， $v_2 = 0.165 \text{ m}^3/\text{kg}$ ，试计算每千克氨的流动功。

解 由式 (1-14) 可知

$$\begin{aligned} W_f &= m(p_2 v_2 - p_1 v_1) = 1 \times (1169 \times 0.165 - 236 \times 0.507) \\ &= 73.233 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

它系压缩机需做的功。

1.3 热力学基本定律

热力学是基于两个基本定律发展起来的，这就是热力学第一定律和热力学第二定律。

1.3.1 热力学第一定律及其应用

(1) 热力学第一定律 这是能量守恒和转换定律在热力学中的应用。它可以这样来表述：能量可以从一种形式转换为另一种形式，但在转换中能量的数量保持不变。工程热力学主要研究热量同功的转换关系。故在工程热力学范围内，热力学第一定律还可以这样来表述：“热可变为功，功也可变为热；一定量的热消失时，必产生一定量的功；消耗一定量的功时，必出现与之对应的一定量的热”[⊖]。

热力学第一定律是一个经验定律，是人们长时期生活经验、生产实践和科学实验的总结。它能说明与之有关的自然现象和技术现象，而且在自然界和工程技术中未曾发现与之相背的事实，但不能从学理上给以证明。

热力学第一定律说明，能量是不能创生也不能消灭的，这同物质不能创生也不能消灭一样；同时也说明，不消耗任何能量而可以对外做功的第一类永动机是不能制造出来的。

(2) 闭口系的能量方程式 一定量的工质处于一个封闭的空间时，称为闭口热力学系统，简称闭口系。这个空间可以是具有固定容积的容器，也可以是带有可移动活塞的气缸（其容积是可以改变的）。对于闭口系，工质可以同外界发生热量和功的交换，但没有工质的流进和流出；工质可以发生状态变化，但其质量始终恒定不变。

现用热力学第一定律对闭口系中发生的能量转换过程进行分析。设对质量为 m (kg) 的工质加入热量 Q (kJ)，工质对外做功 W (kJ)，同时工质由状态1变至状态2，内能增加了

$$\Delta U = U_2 - U_1 = m(u_2 - u_1) \quad (\text{kJ})$$

则由热力学第一定律，下式必然成立

$$Q = \Delta U + W \quad (1-15)$$

即加给系统的热量 Q ，一部分转换为外功 W ，一部分转换为工质的内能 ΔU 。式 (1-15) 是对 m kg 的工质而言的，对于1kg工质，则该式可写成

$$q = \Delta u + w \quad (\text{kJ/kg}) \quad (1-15a)$$

⊖ 引自沈维道，郑佩芝，蒋淡安合编的《工程热力学》(第二版)，高等教育出版社，1984年。

式 (1-15) 及式 (1-15 a) 称为闭口系的能量方程式。因为闭口系没有工质的流动, 故上两式也称为非流动过程的能量方程式。

(3) 开口系稳定流动过程的能量方程式 有工质流进、流出的热力装置及制冷装置, 称为开口热力学系统, 简称开口系。实际的热力装置和制冷装置大都属开口系, 而且在正常运转时, 均在稳定流动的条件下工作。所谓稳定流动过程, 是指在开口系的任一个截面上, 工质的状态参数 (p 、 v 、 T 等) 不随时间而变 (但不同截面上工质的状态参数一般互不相同)。这就要求在开口系的进出口处, 工质的状态参数和流量不随时间而变, 且进出口流量相等; 要求系统在单位时间内, 同外界交换的热量和功始终保持恒定。

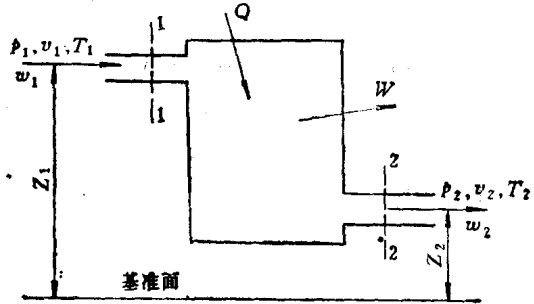


图1-5 开口系的稳定流动过程

现用热力学第一定律对开口系的稳定流动过程进行分析。如图 1-5 所示, 设单位时间流进、流出系统的质量为 m , 在进口处状态参数为 p_1 、 v_1 、 T_1 , 流速为 w_1 , 所处高度为 Z_1 , 在出口处相应的参数为 p_2 、 v_2 、 T_2 以及 w_2 和 Z_2 ; 同时在单位时间内工质向外吸热 Q , 对外做功 W 。由这些条件可知, 单位时间内工质带入系统的能量有内能 mu_1 、动能 $\frac{1}{2}mw_1^2$ 、位能 mgZ_1 以及上源工质对它所作的推挤功 mp_1v_1 ; 带出系统的能量相应地有 mu_2 、 $\frac{1}{2}mw_2^2$ 、 mgZ_2 以及对下源工质需作的推挤功 mp_2v_2 。根据热力学第一定律, 单位时间内进出系统的能量应该相等, 故下式必然成立

$$Q + m \left(u_1 + p_1 v_1 + \frac{1}{2} w_1^2 + g Z_1 \right) = m \left(u_2 + p_2 v_2 + \frac{1}{2} w_2^2 + g Z_2 \right) + W$$

$$\text{或} \quad Q = m(u_2 - u_1) + m(p_2 v_2 - p_1 v_1) + \frac{1}{2} m(w_2^2 - w_1^2) + mg(Z_2 - Z_1) + W$$

(1-16)

这就是开口系稳定流动过程的能量方程式。它说明在稳定流动过程中, 加给工质的热量 Q , 一部分转化为外功 W , 一部分用于增加工质的内能、动能、位能并填补推挤功之差。

在一般的热力装置及制冷装置中, 工质的动能和位能的变化量较小, 可以略去不计, 于是式 (1-16) 可以简化为

$$Q = m(u_2 - u_1) + m(p_2 v_2 - p_1 v_1) + W \quad (1-17)$$

$$\text{或} \quad Q = m(h_2 - h_1) + W \quad (1-18)$$

其中, $h_2 = u_2 + p_2 v_2$, $h_1 = u_1 + p_1 v_1$ 称为工质的比焓。

对于 1 kg 工质, 式 (1-18) 变为

$$q = (h_2 - h_1) + w \quad (1-18 a)$$

式中, q 是对 1 kg 工质的加热量; w 是 1 kg 工质所做的外功。

(4) 比焓 在开口系稳定流动过程能量方程式的推导中, 引入了一个新的物理量比