

职业教育院校课程改革规划新教材

制冷和空调设备运行与维修专业教学、培训与考级用书

赵金萍 主编

ZHILENG JISHU JICHU

制冷技术基础



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



配电子教案

职业教育院校课程改革规划新教材
制冷和空调设备运行与维修专业教学、培训与考级用书

制冷技术基础

主 编 赵金萍
副主编 杨 丽
参 编 朱智民 董慧敏
主 审 杨东红

机械工业出版社

本书分为三篇，共九章。第一篇为工程热力学基础，主要介绍热力学基本定律，热力过程，蒸汽、混合气体及湿空气的性质和概念；第二篇为流体力学与传热学基础，主要介绍流体的基本性质，流体静力学、流体动力学基础及能量损失，热量传递的基本方式，传热过程及常用换热器；第三篇为制冷基本原理，主要介绍常用制冷剂的性质和各种制冷方法等内容。

本书可以作为职业院校制冷和空调专业教材，也可作为社会相关专业岗位培训教材。

图书在版编目（CIP）数据

制冷技术基础/赵金萍主编. —北京：机械工业出版社，2012.2

职业教育院校课程改革规划新教材. 制冷和空调设备运行与维修专业教学、培训与考级用书

ISBN 978-7-111-34422-3

I. ①制… II. ①赵… III. ①制冷技术-高等职业教育-教材
IV. ①TB66

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2011）第 197637 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：汪光灿 责任编辑：张丹丹 版式设计：石 冉

责任校对：樊钟英 封面设计：路恩中 责任印制：杨 曦

北京中兴印刷有限公司印刷

2012 年 2 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm · 10.25 印张 · 1 插页 · 251 千字

0 001 — 3 000 册

标准书号：ISBN 978-7-111-34422-3

定价：22.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社 服 务 中 心：(010)88361066

门户网：<http://www.cmpbook.com>

销 售 一 部：(010)68326294

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销 售 二 部：(010)88379649

读者购书热线：(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

前言

本书分为三篇，共九章。第一篇为工程热力学基础，主要介绍热力学基本定律，热力过程，蒸气、混合气体及湿空气的性质和概念；第二篇为流体力学与传热学基础，主要介绍流体的基本性质，流体静力学、流体动力学基础及能量损失，热量传递的基本方式，传热过程及常用换热器；第三篇为制冷基本原理，主要介绍常用制冷剂的性质和各种制冷方法等。

本书在编写中遵循能力本位的主导思想，充分体现宽、浅、用、新的原则，避免过多的理论推导、计算，结合专业特点增加实用性内容。通过本课程的学习，学生应掌握从事制冷和空调设备运用与维修工作所必需的基础理论知识，为学习后续专业课程和职业技能打下基础。

本书可以作为职业院校制冷和空调专业教材，也可作为社会相关专业岗位培训教材。

本书由青岛海洋高级技工学校赵金萍任主编，杨丽任副主编。其中，第二章、第三章由河南鹤壁职业技术学院朱智民编写，第五章由青岛海洋高级技工学校杨丽编写，第八章、第九章由河南鹤壁职业技术学院董慧敏编写，其余章节由赵金萍编写。全书由北京市经贸高级技术学校杨东红主审。本书在编写过程中，有关学校教师提出了许多宝贵意见，在此谨向他们表示感谢。

由于编者水平有限，加上编写时间仓促，书中不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

目 录

前言

第一篇 工程热力学基础

第一章 基本概念..... 1	第二节 气体压缩基本原理 27
第一节 工质与热力系统..... 1	第三节 气体比热容及热量计算 方法 29
第二节 状态及基本状态参数..... 2	思考题与习题 32
第三节 理想气体及状态方程..... 6	第四章 蒸气的性质及基本热力过程 ... 33
第四节 热力过程..... 8	第一节 液体的汽化与饱和 33
第五节 功量与热量..... 9	第二节 蒸气等压产生过程 34
第六节 热力循环 11	第三节 蒸气的热力性质图表 36
思考题与习题 12	第四节 蒸气的基本热力过程 39
第二章 热力学定律 14	思考题与习题 43
第一节 热力学第一定律 14	第五章 混合气体和湿空气 44
第二节 稳定流动能量方程及其 应用 16	第一节 混合气体 44
第三节 热力学第二定律 18	第二节 湿空气的热力性质 47
第四节 卡诺循环与卡诺定理 19	第三节 湿空气的焓湿图及其应用 ... 49
思考题与习题 23	第四节 湿空气的基本热力过程 53
第三章 理想气体热力过程 24	思考题与习题 57
第一节 理想气体基本热力过程 24	

第二篇 流体力学与传热学基础

第六章 流体力学基础 58	第七章 传热学基础 76
第一节 流体及其基本性质 58	第一节 稳态导热 76
第二节 流体静力学基础 60	第二节 对流换热 79
第三节 流体动力学基础 64	第三节 辐射换热 83
第四节 能量损失 67	第四节 传热与换热器 86
思考题与习题 73	思考题与习题 92

第三篇 制冷基本原理

第八章 制冷剂、载冷剂与冷冻机油 ...	94	第四节 吸收式制冷循环	118
第一节 制冷剂	94	第五节 蒸气喷射式制冷循环	121
第二节 载冷剂与冷冻机油	101	第六节 空气压缩式制冷循环	123
思考题与习题	104	第七节 混合制冷剂制冷循环	126
第九章 制冷循环	106	第八节 其他制冷循环	128
第一节 单级蒸气压缩式制冷		思考题与习题	131
循环	106	附录	133
第二节 多级蒸气压缩式制冷		附录 A 专业英语词汇	133
循环	112	附录 B 常用热力性质表	140
第三节 复叠式制冷循环	115	附录 C 常用热力性质图	151

第一篇 工程热力学基础

工程热力学是热力学的一个重要分支，主要研究的是热能与机械能之间的相互转换规律。本篇研究的主要内容有：热力学基本概念；热力学定律；热力过程、热力循环；常用工质的性质等。

热力学的研究方法有两种：一种是宏观研究方法，另一种是微观研究方法。作为应用科学之一的工程热力学，以宏观研究方法为主，微观理论的某些结论用来帮助理解宏观现象的物理本质。

第一章 基本概念

【学习目标】

1. 掌握热力系统的概念，了解热力系统的分类；
2. 掌握状态参数的数学特征及基本状态参数；
3. 能够利用理想气体状态方程求解实际问题；
4. 区别了解热力过程及热力循环；
5. 了解功量和热量的定义。

第一节 工质与热力系统

一、工质

在工程热力学中，为实现热能与机械能之间的相互转换，必须借助于某种物质作为它的工作介质，称为工质。如制冷与空调系统中工作在各种热力设备中的液体和气体，它们在能量转换中起着媒介的作用。

工质是实现能量转换与传递的内部条件，合理地选用工质可提高热力设备的效率。在热机循环中，为获得较高的热效率，常选用水蒸气、空气或燃气等可压缩、易膨胀的气体作为工质。在制冷循环和热泵循环中，同样为了提高制冷系数和供热系数，常选用被称为制冷剂的氨、氟利昂等易汽化、易液化的物质作为工质。

二、系统与外界

热力学中，为了简化分析讨论问题，在相互作用的各物体中，人为地选取某一范围内的物体作为热力研究对象，这个范围内物质的总和称为热力系统或热力系，简称系统或体系。

将与系统相互作用的周围物质称为外界或环境。系统与外界之间的分界面称为界面或边界，所以说热力系统是由界面包围着的作为研究对象的物质的总和。系统与外界之间，通过边界进行能量的传递与物质的转移。这个界面可以是真实的，也可以是假想的；可以是固定的，也可以是变化的或者运动着的。作为系统的边界，可以是这几种边界面的组合。

三、闭口系统与开口系统

根据系统与外界之间是否进行物质交换，可将系统分为开口和闭口两种。

系统与外界之间有物质交换的系统称为开口系统（开口系或开系）。通常，开口系统总是取某一相对固定的空间，故又称为控制容积系统，如图 1-1a 所示。

系统与外界之间没有物质交换的系统称为闭口系统（闭口系或闭系）。由于系统内物质质量保持恒定，故又称为控制质量系统，如图 1-1b 所示。但应注意：闭口系统具有恒定的质量，但是质量恒定的系统不一定是闭口系统。

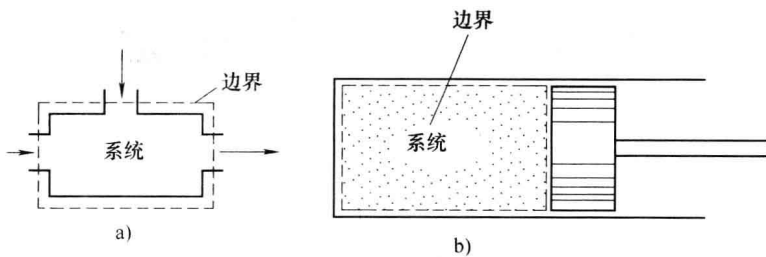


图 1-1 开口系统和闭口系统
a) 开口系统 b) 闭口系统

四、简单系统、绝热系统与孤立系统

根据系统与外界之间所进行的能量交换情况不同，可将系统分为简单系统、绝热系统与孤立系统三种。

系统与外界之间只存在热量及一种形式准静态功交换的系统称为简单系统。

系统与外界之间完全没有热量交换的系统称为绝热系统。

系统与外界之间既无物质交换又无能量交换的系统称为孤立系统。

自然界中绝对的绝热系统和孤立系统都是不存在的，但在某些系统中，如果界面上的热量、功量、质量的交换都很小或其作用的影响可忽略不计，这时可看做是某一特定条件下的简化系统，以利于热力学的分析。

工程热力学中讨论的系统大多属于简单可压缩系统，它是指与外界只有热量及准静态容积变化功交换的由可压缩流体组成的系统。

第二节 状态及基本状态参数

一、热力系统的状态

分析热力系统能量转换的前提是研究热力系统的热力状态变化。热力系统在某一瞬间所

体现的宏观物理状况称为热力状态或状态。

热力系统可以呈现出各种不同的状态，其中具有重要意义的是平衡状态。系统在不受外界影响（重力场除外）的条件下，宏观物理性质不随时间变化的状态称为平衡状态。实现平衡状态的充分必要条件是系统内部及系统内外之间的一切不平衡势差的消失。

系统的平衡状态可以用任意两个独立物理参数确定，也可以用二维平面坐标图来描述。显然，不平衡状态由于没有确定的状态参数，无法在状态坐标图中表示。在本教材讨论的范围内，常用的状态坐标图有压力比体积图、温熵图、焓熵图、压焓图等。

二、系统的状态参数

（一）状态参数及其数学特征

热力状态是系统各种宏观物理特性的表现，描述这种宏观特性的物理量称为系统的热力状态参数或状态参数。

系统的状态是通过状态参数来表征的，热力状态的单值性决定了热力状态参数有如下特征：

- 1) 任意热力过程中，系统从初态变化至末态时，任意状态参数的变化量（增量）仅是初、末状态下的状态参数的差值，与变化路径无关。
- 2) 热力系统进行一个封闭的状态变化过程而回复到初态时，其状态参数不改变，即变化量（增量）为零。

（二）状态参数的分类

1. 基本状态参数与导出状态参数

在热力学中主要的状态参数有：温度（ T ）、压力（ p ）、比体积（ v ）或密度（ ρ ）、内能（ U ）、焓（ H ）和熵（ S ）等。其中，温度（ T ）、压力（ p ）、比体积（ v ）或密度（ ρ ）是可以直接用仪器仪表测量的，被称为基本状态参数。而其余的状态参数都不能直接测量，必须由基本状态参数导出，所以称为导出状态参数。

2. 广延量与强度量

状态参数按其数值是否与系统内物质质量有关，可分为两类：

- 1) 凡与质量有关的状态参数称为广延量（或尺度量），如容积（ V ）、内能（ U ）和焓（ H ）等。这类参数具有可加性，在系统中它的总量等于系统内各部分同名参数值之和。
- 2) 凡与质量无关的状态参数称为强度量，如压力（ p ）、密度（ ρ ）和温度（ T ）等。这类参数不具可加性，如果将一个均匀系统划分为若干个子系统，则各子系统及整个系统的同名强度参数都具有相同的值。

单位质量的广延量，具有强度量的性质，称为比参数。通常广延量用大写字母表示，由广延量转化而来的比参数在其对应的广延量名称前冠以“比”字，并用相应的小写字母表示，例如，比体积 v 、比内能 u 、比焓 h 和比熵 s 等。但习惯上为了书写方便，除比体积外，常常省略“比”，仅以小写字母表示区分。

（三）基本状态参数

1. 压力

热力学中的压力是指垂直作用于单位作用面上的力，即物理学中的压强，用符号 p 表示。对于气体，压力的实质是系统中大量分子不断地作无规则热运动而撞击容器壁面，在单

位面积的容器壁面上所呈现的平均作用力。

(1) 绝对压力、大气压力和相对压力 工质的真实压力称为绝对压力，用 p 表示，它以毫无一点气体存在的绝对真空作为起点。

大气压力是大气层中的物体受大气层自身重力产生的作用于物体上的压力，用 p_b 表示，它随各地的纬度、高度和气候条件而变化，可用专门的气压计测定。工程中，如果被测工质的绝对压力很高，为简化计算，可将大气压力近似取值为 0.1MPa ；如果被测工质的绝对压力较小，就必须按当时当地大气压力的具体数值计算。

系统的压力常用弹簧管式压力计或 U 型管压力计来测量。弹簧管式压力计的基本原理如图 1-2 所示。弹性弯管的一端封闭，另一端与系统相连，在管内作用着被测的压力，而管外作用着大气压力。弹性弯管在管内外压差的作用下产生变形，从而带动指针转动，指示出被测工质与大气之间的压力差。U 型管压力计如图 1-3 所示。U 型管内盛有水或水银，一端接被测的工质，而另一端与大气环境相通。当被测的压力与大气压力不等时，U 型管两边液柱高度不等。此高度差即被测工质与大气之间的压力差。

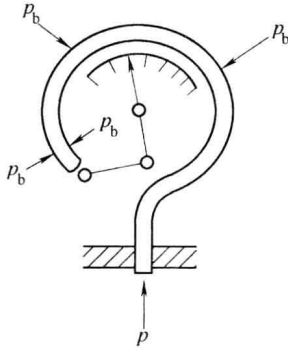


图 1-2 弹簧管式压力计

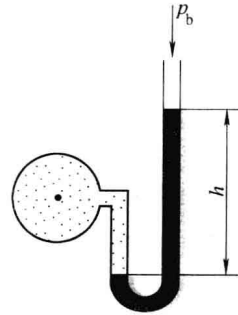


图 1-3 U 型管压力计

由此可见，无论使用什么压力计，测得的结果都是工质的绝对压力 p 和大气压力 p_b 之间的相对值，称为相对压力，它以当地大气压作为起点。当绝对压力高于大气压力时，压力计指示的数值称为表压力，用 p_g 表示，显然

$$p_g = p - p_b \quad (1-1)$$

当绝对压力低于大气压力时，压力计指示的读数称真空度，用 p_v 表示，显然

$$p_v = p_b - p \quad (1-2)$$

若以绝对压力为零时作为基线，则可将绝对压力、表压力、真空度和大气压力之间的关系用图 1-4 表示。

(2) 压力单位 在国际单位制 (SI) 中规定压力的单位为帕斯卡，简称“帕”，符号是 Pa，它的定义式为

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

即 1m^2 面积上作用 1N 的力称为 1 帕斯卡。工程上由于 Pa 这个单位太小，常用千帕 (kPa) 或兆帕 (MPa) 作为压力单位，它们之间的关系是

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

工程中还曾采用其他压力单位，如巴 (bar)、标准大

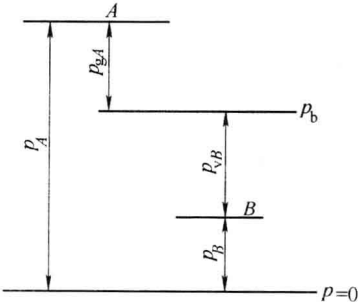


图 1-4 绝对压力、表压力、真空度和大气压力之间的关系

气压 (atm)、工程大气压 (at)、毫米汞柱 (mmHg)、米水柱 (mH₂O) 等, 并有 1bar = 10⁵Pa = 0.1MPa 及表 1-1 的换算关系。

表 1-1 压力单位换算表

单位名称	帕斯卡 (Pa)	工程大气压 (at)	标准大气压 (atm)	毫米汞柱 (mmHg)	米水柱 (mH ₂ O)
帕斯卡 (Pa)	1	1.01972×10^{-5}	0.98692×10^{-5}	7.5006×10^{-3}	1.01972×10^{-4}
工程大气压 (at)	0.980665×10^5	1	0.96748	735.56	10.000
标准大气压 (atm)	1.01325×10^5	1.03323	1	760.00	10.3323
毫米汞柱 (mmHg)	133.3224	1.3595×10^{-3}	1.3158×10^{-3}	1	1.3595×10^{-2}
米水柱 (mH ₂ O)	9806.65	0.1	0.096784	73.556	1

2. 温度

(1) 热力学第零定律与温度 若将冷热程度不同的两个系统相接触, 它们之间会发生热量传递。在不受外界影响下, 一段时间后, 它们将达到相同的冷热程度, 而不再进行热量传递, 这种情况称为热平衡。试验表明: 与第三个系统处于热平衡的两个系统, 彼此也处于热平衡。按照 1931 年福勒 (R. H. Fowler) 的提议, 这个结论称为热力学第零定律。

由此可知, 处于同一热平衡状态的各个系统, 无论其是否相互接触, 必定有某一宏观特性是相同的。将描述此宏观特性的物理量称为温度, 即将这种可以确定一个系统是否与其他系统处于热平衡的物理量定义为温度。这也是可以用温度计测量物体温度的依据。温度计的读数, 则是利用测温物质的某种物理特性 (V 、 R 、 p 等) 来表示的。

(2) 温标 为了进行温度测量, 需要有温度的数值表示方法, 即需要建立温度的标尺或温标。在现代 SI 单位制中采用热力学温标为基本温标, 由它所确定的温度称为热力学温度, 符号为 T , 单位为开尔文, 中文代号“开”, 国际代号“K”。热力学温标选取纯水的三相点 (固、液、气三相平衡共存状态) 为基本点, 定义纯水的三相点温度为 273.16K。因此, 每单位开尔文等于纯水三相点热力学温度的 $1/273.16$ 。

与热力学温标并用的还有热力学摄氏温标, 简称摄氏温标, 由它所确定的温度称为摄氏温度, 符号为 t , 单位为摄氏度, 代号“℃”。热力学摄氏温标不是以 SM (工程单位) 制中的 1atm 下的纯水沸点与凝固点为基本点, 而是直接由热力学温标导出, 热力学摄氏温标 t 的定义式为

$$\{t\}_{\text{℃}} = \{T\}_{\text{K}} - 273.15 \quad (1-3)$$

3. 比体积与密度

容积是指工质所占有的系统空间, 包括物质微粒本身占有的体积和微观粒子运动的空间。系统的比体积就是单位质量物质所占有的容积, 以符号 v 表示, 单位为 m³/kg, 即

$$v = \frac{V}{m} \quad (1-4)$$

式中 V ——物质的容积, 单位为 m³;

m ——物质的质量, 单位为 kg。

系统的密度是指单位体积物质的质量, 以符号 ρ 表示, 单位为 kg/m³, 即

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-5)$$

显然，比体积与密度互为倒数，即

$$\rho v = 1 \tag{1-6}$$

单位体积物质的重量称为重度（或容重），以符号 γ 表示，单位为 N/m^3 ，即

$$\gamma = \frac{G}{V} \tag{1-7}$$

在重力场中，物体的重量 G 等于质量 m 与重力加速度 g 的乘积，即

$$G = mg$$

等式两边同除以体积 V ，可得重度与密度的常用重要关系，即

$$\gamma = \rho g \tag{1-8}$$

式中 g ——重力加速度，一般取 $g = 9.81 \text{m/s}^2$ 。

密度和重度不仅与物体的种类有关，还取决于物体的温度和压强。常见物体的密度和重度值见表 1-2。

表 1-2 几种常见物体的密度、重度（1 个标准大气压下）

名称	温度/ ℃	密度/ (kg/m^3)	重度/ (N/m^3)	名称	温度/ ℃	密度/ (kg/m^3)	重度/ (N/m^3)
水	4	1000	9810	润滑油	15	900 ~ 930	8829 ~ 9123.3
海水	15	1020	10006.2	二氧化碳	0	1.976	19.385
水银	0	13590	133317.9	空气	0	1.293	12.684
酒精	20	789	7740.1				

第三节 理想气体及状态方程

凡遵循克拉珀龙状态方程的气体，称为理想气体。

对于不同物量的气体，克拉珀龙状态方程有下列几种形式，即

$$pv = RT \text{ (对于1kg 气体)} \tag{1-9}$$

$$pV_m = R_m T \text{ (对于1kmol 气体)} \tag{1-9a}$$

$$pV = mRT = nR_m T \text{ (对于 } m \text{ kg 或 } n \text{ kmol 气体)} \tag{1-9b}$$

式中 p ——绝对压力，单位为 Pa；

v ——比体积，单位为 m^3/kg ；

R ——气体常数，与气体所处的状态无关，只与气体种类有关，单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ；

T ——热力学温度，单位为 K；

V_m ——千摩尔容积，按阿伏加德罗假说，在相同压力和温度下，各种气体的摩尔容积相同。在标准状态（ $T_0 = 273.15 \text{K}$ ， $p_0 = 1.01325 \times 10^5 \text{Pa}$ ）下，各种理想气体的 V_m^0 均相同，都是 $22.414 \text{m}^3/\text{kmol}$ ；

V ——体积，单位为 m^3 ；

R_m ——摩尔气体常数，不仅与气体所处的状态无关，而且还与气体种类无关，因此又称为通用气体常数。 R_m 值的大小可以根据标准状态参数由式（1-9a）确定，即

$$R_m = \frac{1.01325 \times 10^5 \times 22.414}{273.15} \text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K}) = 8314 \text{J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$$

气体常数 R 与摩尔气体常数 R_m 的关系为

$$R_m = MR \tag{1-10}$$

式中 M ——相对分子质量。

不同气体的 M 值不同， R 也不同。几种常用气体的 R 值见表 1-3。

表 1-3 常用气体常数 R [单位: J/(kg·K)]

气体名称	化学式	相对分子质量	气体常数	气体名称	化学式	相对分子质量	气体常数
氢	H ₂	2.016	4124.0	氮气	N ₂	28.013	296.8
氦	He	4.003	2077.0	一氧化碳	CO	28.011	296.8
甲烷	CH ₄	16.043	518.2	二氧化碳	CO ₂	44.010	188.9
氨	NH ₃	17.031	488.2	氧气	O ₂	32.000	259.8
水蒸气	H ₂ O	18.015	461.5	空气		28.970	287.0

克拉珀龙状态方程描述了同一状态下理想气体 p 、 v 、 T 三个参数之间的关系。由于它只适用于理想气体，故又称理想气体状态方程。

实际气体分子本身具有体积，分子间存在相互作用力（引力和斥力），这两项因素对于分子的运动状况均产生一定的影响。描述实际气体特性时，必须以正确的方式修正这两项因素的影响，例如范德瓦尔斯方程等。但是，当气体的密度比较低，即分子间的平均距离比较大时，分子本身所占的体积与气体的总容积相比是微乎其微的，分子间的作用力也极其微弱，特别是当 $p \rightarrow 0$ 、 $v \rightarrow \infty$ 时，上述两项因素的影响可以忽略不计。因此，可以认为理想气体是一种假想的气体，它的分子是一些弹性的、不占体积的质点，分子之间没有相互作用力。理想气体和实际气体无明显的界限，只是根据工程计算所允许的精度范围而定。在本书后续章节中，除特殊说明外，“气体”一般指理想气体，实际气体则根据其接近液态的程度，以“蒸汽”或“汽体”来表述。

例 1-1 求下列情况下氧气的密度。

- (1) 在绝对压力为 15MPa，温度为 200℃ 时。
- (2) 在物理标准状况时。

解 氧气的气体常数为

$$R = \frac{R_m}{M} = \frac{8314}{32} \text{J/(kg·K)} = 259.8 \text{J/(kg·K)}$$

- (1) 求 15MPa 及 200℃ 时氧气密度

$$p = 15 \text{MPa} = 15 \times 10^6 \text{Pa}$$

$$T = (273 + 200) \text{K} = 473 \text{K}$$

由气态方程 $pv = RT$ 得到

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{p}{RT} = \frac{15 \times 10^6}{259.8 \times 473} \text{kg/m}^3 = 122.06 \text{kg/m}^3$$

- (2) 求物理标准状况下的氧气密度

物理标准状况: $p_0 = 101325 \text{Pa}$

$$T_0 = 273 \text{K}$$

同样由气态方程得到

$$\rho_0 = \frac{1}{v_0} = \frac{p_0}{RT_0} = \frac{101325}{259.8 \times 273} \text{kg/m}^3 = 1.43 \text{kg/m}^3$$

第四节 热力过程

一、热力过程定义

当一个热力系统不具有任何不平衡势差时，必将永远保持其平衡状态，这时系统具有确定的状态参数。若系统界面上发生能量传递或系统内新的不平衡的产生，会使系统偏离平衡状态而发生变化。在变化中随着系统内外不平衡势差的逐渐消失，最终达到新的平衡状态。这种由于系统与外界相互作用而引起的热力系统由一个平衡状态经过连续的中间状态变化到另一个新的平衡状态的全过程，称为热力过程，简称过程。

任何热力过程中的初态与末态都是平衡状态，如果中间状态也处处平衡，这就是平衡过程；如果中间状态中存在不平衡状态时，这就是不平衡过程。平衡过程中的每一热力状态都具有确定的状态参数，在热力状态图中可用一条确定的实线来描述其过程变化。在不平衡过程中，除了初态与末态可用确定的状态参数来表示外，中间状态无法用确定的状态参数来表示，那么在热力状态图中无法用确定的曲线来描述不平衡过程的中间状态。为了方便讨论不平衡过程的变化特性，则在初态与末态间用虚线连接来近似地描述。

严格地讲，系统经历的实际过程，由于不平衡势差的作用必将经历一系列非平衡状态。这些非平衡状态实际上已无法用少数几个状态参数描述，为此，研究热力过程时，需要对实际过程进行简化，建立某些理想化了的物理模型。准静态过程和可逆过程就是两种理想化的模型。

二、准静态过程

图 1-5 所示为气体在活塞气缸装置中的变化过程示意图。在初态下，气体的压力与外界力相平衡，系统具有确定的初态参数。若突然降低外界力，则气体压力大于外界力。在这个不平衡势差的作用下，气体突然膨胀推动活塞快速向上运动，直至系统压力与外界力间的不平衡势差消失，而达到新的平衡状态。显然这是一个不平衡过程，除了初态、末态可用状态参数确定外，中间状态就难以用状态参数准确地表达。如果将外界压力减小一个微量，系统压力与外界力间的不平衡势差为无限小，活塞仅向上膨胀微小的体积，几乎不影响系统内部的平衡性，所以在这微小的变化中，系统偏离平衡态的程度为无限小，一旦偏离平衡态就能极快地回复到新的平衡态。这样依次重复，使系统逐渐变化至末态。像这类系统在极小不平衡势差的作用下，极少偏离平衡态作连续变化的过程，称为准静态过程或准平衡过程，在热力状态图中仍用实线来描述。

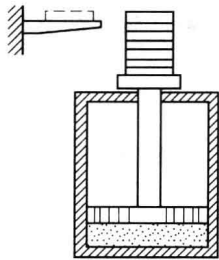


图 1-5 气体在活塞气缸装置中的变化过程

准静态过程是一种理想化的过程，要求一切不平衡势差无限小，使得系统在任意时刻皆无限接近于平衡态，这就必须要求过程进行得无限缓慢。实际过程都不可能进行得无限缓

慢，但为了方便分析，工程热力学中常将所研究的热力过程看做准静态过程，这是由于这些热力过程中系统平衡态从被破坏到回复新的平衡态所需时间——弛豫时间极短，系统平衡回复率大于变化率。

三、可逆过程

可逆过程是热力学的又一理想模式，它是指无任何不可逆损失的过程。不可逆损失包括与系统状态有关的非平衡损失和与系统、外界条件有关的耗散损失。非平衡损失是由系统内不平衡势差引起的损失。耗散损失是由机械摩擦阻力、流体粘性阻力等作用而产生的不可逆损失。

当热力系统在变化中不存在任何不可逆损失时，系统及外界都能按原来变化路线逆行至初态，并能完全恢复到各自的初态，这就是可逆过程。实现可逆过程的条件：一是准静态过程；二是无任何耗散效应。否则就是不可逆过程。可见平衡过程和可逆过程都假定变化时，系统内、外都不存在耗散，所以两者是等效的。而准静态过程仅考虑系统内部平衡性，是系统内部平衡过程，仍属于不可逆过程的范畴。由此可知：可逆过程必然是准静态过程；而准静态过程则未必是可逆过程，它只是可逆过程的必要条件之一。

第五节 功量与热量

系统与外界之间在不平衡势差的作用下会发生能量交换。能量交换的方式有两种——做功和传热。

一、功量

在工程热力学中，功定义为广义力与广义位移的乘积。并规定，系统对外界做功取为正值；而外界对系统做功为负值。

在 SI 单位制中，功的单位与热量、能量的单位相同，都用焦耳（J）表示，其定义为：1 焦耳 = 1 牛顿·米，即 $1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m}$ 。

在 SM 单位制中，功的单位是千克力·米（ $\text{kgf} \cdot \text{m}$ ）。单位换算见表 1-4。

表 1-4 功、热、能量单位换算表

名称	千焦 (kJ)	国际千卡 (kcal)	千克力·米 (kgf·m)	千瓦·时 (kW·h)	马力·时 (ps·h)	英热单位 (Btu)
千焦	1	0.2388	101.972	2.777×10^{-4}	3.7767×10^{-4}	0.9478
国际千卡	4.1868	1	426.94	1.163×10^{-3}	1.581×10^{-3}	3.9682
千克力·米	9.807×10^{-3}	2.342×10^{-3}	1	2.724×10^{-6}	3.703×10^{-6}	9.292×10^{-3}
千瓦·时	3600.65	860	367168.4	1	1.3596	3412.14
马力·时	2647.79	632.53	270052.36	0.7355	1	2509.63
英热单位	1.055056	0.2520	107.6157	2.9307×10^{-4}	3.985×10^{-4}	1

注：1 国际千卡 = 1.0012 千卡（20℃）= 1.0003 千卡（15℃）。

在工程中，也常分析讨论单位时间的做功能力——功率。功率的单位是瓦特（W）：1 瓦特 = 1 焦耳/秒，即 $1\text{W} = 1\text{J/s}$ 。

功率的换算关系有：1 马力 (ps) = 0.736 千瓦 (kW)

1 千瓦 (kW) = 1.36 马力 (ps)

(一) 准静态过程中的容积变化功——膨胀功和压缩功

系统容积变化所完成的膨胀功或压缩功统称容积变化功，是一种基本功量。如图 1-6 所示，其值大小相当于 $p-v$ 图中过程曲线与横坐标之间的阴影面积，即

$$w = \int_1^2 p(v) dv = \text{面积 } 1-2-n-m-1$$

所以也称 $p-v$ 图为示功图。

可见，当气体膨胀时，积分为正值，表示系统膨胀对外做功；当气体被压缩时，积分为负值，表示外界对系统做压缩功。

功量不是状态参数，是与过程有关的过程函数，所以

$$w = \int_1^2 \Delta w \neq w_2 - w_1$$

当气体质量为 $m \text{ kg}$ 时，系统体积为

$$V = mv$$

则功为

$$W = \int_1^2 p dV = m \int_1^2 p dv = mw \quad (1-11)$$

(二) 其他形式的准静态功

除容积变化功外，系统还可能还有其他形式的准静态功。

1. 拉伸机械功

物体在外力的作用下被拉伸时外界消耗的功，或者系统对外界所做的功。

2. 表面张力功

液体的表面张力有使表面收缩的趋势。若要扩大其表面积，外界需克服表面张力而做功。

二、热量

当系统与外界之间存在温差时，热量是通过界面由温度高的系统向温度低的外界所传递的热能。热力学认为温差是热量传递的动力，一旦系统与外界间达到热平衡时，相互间的热量传递随之停止。同时，热量与功量一样也是过程函数，即传热量的大小与热力过程有关，在相同的初态与末态之间，热力过程的路径不同，则传热量也不同。

在热力学中，以 q 表示质量为 1 kg 系统的换热量；以 Q 表示质量为 $m \text{ kg}$ 系统的换热量。并常规定系统吸热量为正值，放热量为负值。在 SI 单位制中，热量的单位同样是焦耳 (J)。

在热力分析时，常用温熵 ($T-s$) 图上过程曲线下的面积 $1-2-s_2-s_1-1$ 来描述系统与外界间换热关系 (见图 1-7)，所以也称 $T-s$ 图为示热图。

三、储存能

系统储存能包括内部储存能和外部储存能，也是能量的一种表现形式。系统内部储存能即内

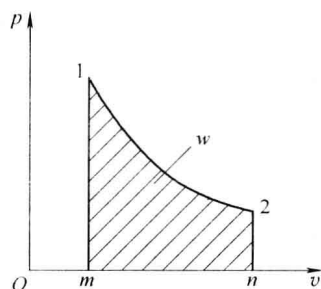


图 1-6 容积变化功的大小

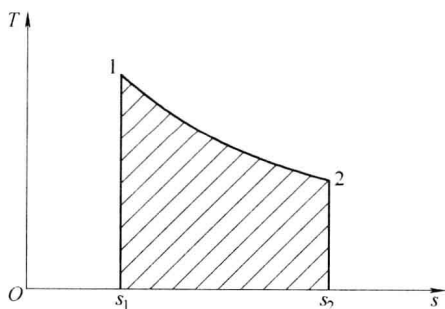


图 1-7 系统与外界间换热关系

能，它与系统内部粒子微观运动和粒子的空间位置有关；系统外部储存能包括宏观动能和重力位能，也就是系统本身所储存的机械能。显然，系统总的储存能是内能、动能和位能之和。那么对于没有宏观运动和相对位置高度为零的系统，其总的储存能就等于其内能。

第六节 热力循环

能量之间的转换，通常都是通过工质在相应的热力设备中进行循环来实现的。系统从某一初态开始，经过一系列的中间状态变化后重新回复到初态的全过程，称为热力循环，简称循环。

热力循环根据其方向可分为正向循环和逆向循环；根据可逆性可分为可逆循环和不可逆循环。

循环的经济指标用工作系数来表示，即

$$\text{工作系数} = \frac{\text{收益}}{\text{代价}}$$

一、正向循环

使热能转换为机械能的循环称为热机循环或热动力循环，如蒸气动力循环、气体动力循环等。由于热机循环在状态图中以顺时针方向描述，所以也称为正向循环，如图 1-8 所示。

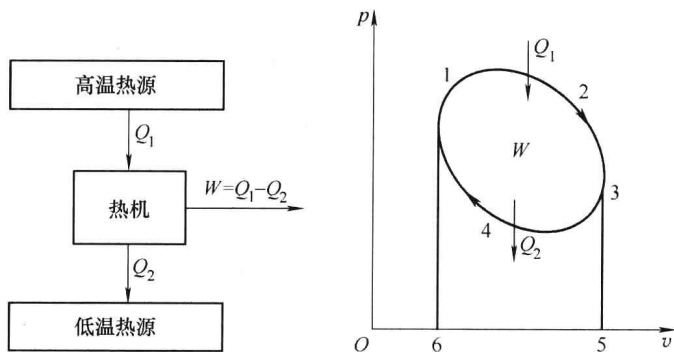


图 1-8 正向循环

在正向循环中，系统从高温热源 T_1 吸热 Q_1 ，对外做功 W 。同时为实现循环，系统还必须向低温热源 T_2 放热 Q_2 。根据能量守恒定律

$$Q_1 - Q_2 = W \quad \text{或} \quad Q_1 = Q_2 + W$$

在工程中，将循环净功 W 与高温热源供热 Q_1 之比称为热效率，以 η_1 表示，用以衡量热机循环的经济性，即

$$\eta_1 = \frac{\text{收益}}{\text{代价}} = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} \quad (1-12)$$

热效率 η_1 小于 1 说明高温热源向系统供热 Q_1 仅有部分转换为功 W 向外输出，而另一部分热 Q_2 不能转换为功，只是传向低温热源 T_2 。 η_1 数值越大，表示循环的经济程度越高。