



普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套参考书

工程热力学 学习辅导与习题解答

第2版

童钧耕 主编
童钧耕 范云良 编



高等教育出版社
Higher Education Press

TK12/1=4A

2008

普通高等教育“十

套参考书

工程热力学 学习辅导与习题解答

第2版

童钧耕 主编

童钧耕 范云良 编

高等教育出版社

内容简介

本书是参照教育部新制定的“高等学校工科本科工程热力学(多学时)课程教学基本要求”,配套沈维道、童钧耕主编《工程热力学》(第四版)(以下简称主教材)的内容编写而成的。全书与主教材的编排基本一致,每章均包含有本章要点、本章学习导引、主要内容概述、典型例题、思考题提示、拓展题五部分。附录选编了近几年上海交通大学本科生考试和硕士生入学考试的试题(大部分附有题解),这些试卷可以作为学生自测的参考材料。

本书语言简练、自成体系,适用于能源动力、机械、核工程及化学工程等专业,可以与主教材配套使用,也可单独使用;可以配合学习过程使用,也可作为考研辅导书。

图书在版编目(CIP)数据

工程热力学学习辅导与习题解答/童钧耕主编.—2
版.北京:高等教育出版社,2008.5

ISBN 978-7-04-023618-7

I. 工… II. 童… III. 工程热力学-高等学校-教学参考资料 IV. TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 039429 号

策划编辑 宋 晓 责任编辑 宋 晓 封面设计 张志奇 责任绘图 黄建英
版式设计 范晓红 责任校对 刘 莉 责任印制 韩 刚

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京中科印刷有限公司

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787×960 1/16
印 张 21.25
字 数 390 000

版 次 2004 年 11 月第 1 版
2008 年 5 月第 2 版
印 次 2008 年 5 月第 1 次印刷
定 价 26.60 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 23618-00

第 2 版 前 言

本书第 1 版是参照国家教育委员会 1995 年制定的“工程热力学(多学时)课程教学基本要求”,针对沈维道、蒋志敏、童钧耕合编的面向 21 世纪课程教材——《工程热力学》(第三版)的内容编写而成的教学辅导书,出版后受到读者的欢迎。

随着时代的前进和教学实践的需要,童钧耕等对上述《工程热力学》进行了修订,编写出版了列入普通高等教育“十一五”国家级规划教材的《工程热力学》(第四版)(以下简称主教材)。主教材在保持原教材体系的框架下对教材作了一定的变动,如把第三版第七章水蒸气拆分成水蒸气的性质和水蒸气的热力过程两部分,分别与第三版第三章理想气体的性质及第四章理想气体的热力过程结合,组成主教材的第三章气体和蒸汽的性质及第四章气体和蒸汽的基本热力过程;把第三版第三章中混合气体的部分内容移至湿空气组成新的第十二章理想气体混合物及湿空气,等等。此外,主教材还增加了热力学在生物过程、核电二回路循环的应用等方面的介绍,增加了一定数量与工程实践紧密联系的例题和习题,并配置了光盘。

本书是配合主教材编写的,除了随其进行章节调整外,考虑到本书第 1 版的部分内容已选编入主教材及其配套光盘的参考电子讲稿内,故作了以下变动:

- (1) 增设思考题提示;
- (2) 典型例题增设部分选择题;
- (3) 更新考题,大部分试卷附有题解及试卷错误分析;
- (4) 将巩固和提高题更改为拓展题,数量减少。

许多读者(包括一些教师)曾来函索要沈维道、蒋智敏、童钧耕合编《工程热力学》(第三版)思考题的答案,也有部分读者通过电子邮件希望笔者解答选择题。为响应读者的要求,本书增设了配合主教材的思考题提示和选择题。主教材设置的选择题可分为两类:一部分是归纳性质的,通过思考帮助读者把分散在教材中的各个知识点串联起来,加强理解;另一部分是拓展性质的,通过思考读者可以把思维扩散到各个方向,因此思考题不应该有,甚至有的根本没有标准答案。希望本书提供的思考题提示不会妨害读者的思考。

本书更新了上海交通大学工程热力学的考题。从 2003 年开始,上海交通大学工程热力学的教学实行模块化:在机械与动力工程类所有学生必修工程热力学 I (36 学时)的基础上,动力方向的学生还必修工程热力学 II (27 学时),机械

设计及制造方向的学生可选修工程热力学 II (27 学时), 因此试卷就有工程热力学 I 和工程热力学 II 之分。本书对大部分试卷给出参考题解及试卷错误分析。这里的题解仅是从教学的角度出发为大多数读者提供解题的一个参考, 未必是最好的解题方法。试卷错误是从实际考卷中摘录的, 希望读者能想一想自己是否会犯类似的错误, 分析原因, 相信通过这个步骤会对工程热力学理论的理解有一个很大的提升。

本书紧密环绕主教材展开, 简练而自成体系, 可以与主教材配套使用, 也可单独使用; 可以配合课堂教学过程使用, 也可作为考研辅导书和自学工程热力学的教材。相信和第 1 版一样, 本书会成为帮助读者学好工程热力学的有力工具。

本书由童钧耕主编, 范云良参加了部分章节的编写工作。

上海海事大学吴孟余教授仔细审阅了书稿, 提出了许多宝贵的意见。我校机械与动力工程学院工程热物理研究所吴慧英教授、王经教授、刘振华教授、胡国新教授、王平阳副教授、洪方军老师、汪国山老师等各位同仁对本书的编写给予了很大的帮助, 在此一并致谢。

书中若有错误和不妥之处, 望能不吝指正。联系方式: 上海东川路 800 号上海交通大学机械与动力工程学院, 邮政编码: 200240。E-mail: jgtong@sjtu.edu.cn。

童钧耕

2007 年 10 月

主要符号

A	面积, m^2	p_e	表压力, Pa
c_f	流速, m/s	p_i	分压力, Pa
c	比热容(质量热容), $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; 浓度, mol/m^3	p_s	饱和压力, Pa
c_p	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	p_v	真空度, 湿空气中水蒸气分压力, Pa
c_v	比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	Q	热量, J
C_m	摩尔热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	q_m	质量流量, kg/s
$C_{p,m}$	摩尔定压热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	q_v	体积流量, m^3/s
$C_{v,m}$	摩尔定容热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	Q_p	定压热效应, J
d	耗汽率, kg/J ; 含湿量, $\text{kg}(\text{水蒸气})/\text{kg}$ (干空气)	Q_v	定容热效应, J
E	总(储存)能, J	R	摩尔气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
E_x	焔, J	R_g	气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$E_{x,Q}$	热量焔, J	$R_{g,eq}$	平均(折合)气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$E_{x,U}$	热力学能焔, J	S	熵, J/K
$E_{x,H}$	焓焔, J	S_g	熵产, J/K
F	力, N; 亥姆霍兹函数, J	S_f	(热)熵流, J/K
G	吉布斯函数, J	S_m	摩尔熵, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
H	焓, J	S_m^0	标准摩尔绝对熵, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
H_m	摩尔焓, J/mol	T	热力学温度, K
ΔH_c^0	标准燃烧焓, J/mol	T_i	转回温度, K
ΔH_f^0	标准生成焓, J/mol	t	摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$
I	作功能力损失(焔损失), J	t_s	饱和温度, $^{\circ}\text{C}$
K_c	以浓度表示的化学平衡常数	t_w	湿球温度, $^{\circ}\text{C}$
K_p	以分压力表示的化学平衡常数	U	热力学能, J
M	摩尔质量, kg/mol	U_m	摩尔热力学能, J/mol
Ma	马赫数	V	体积, m^3
M_r	相对分子质量	V_m	摩尔体积, m^3/mol
M_{eq}	平均摩尔质量(折合摩尔质量), kg/mol	W	膨胀功, J
n	多变指数; 物质的量, mol	W_{net}	循环净功, J
p	绝对压力, Pa	W_i	内部功, J
p_0	大气环境压力, Pa	W_s	轴功, J
p_b	大气环境压力, 背压力, Pa	W_t	技术功, J
		W_u	有用功, J
		w_i	质量分数

II 主要符号

x	干度	κ	等熵指数
x_i	摩尔分数	κ_T	等温压缩率
z	压缩因子	λ	升压比
α	抽汽量, kg	μ	化学势
α_v	体胀系数, K^{-1}	μ_j	焦耳 - 汤姆逊系数 (节流微分效应), K/Pa
γ	比热容比; 相变潜热 (汽化潜热), J/kg	π	压力比 (增压比)
ε	制冷系数; 压缩比	ν_{cr}	临界压力比
ε'	供暖系数	ρ	密度, kg/m^3 ; 预胀比
η_c	卡诺循环热效率	σ	回热度
$\eta_{c,s}$	压气机绝热效率	φ	相对湿度; 喷管速度系数
η_{ex}	炯效率	φ_i	体积分
η_T	蒸汽轮机、燃气轮机的相对内效率		
η_v	循环热效率		

下脚标

a	湿空气中干空气的参数	iso	孤立系统
c	卡诺循环; 冷库参数	m	每摩尔物质的物理量
C	压气机	s	饱和参数; 相平衡参数
cr	临界点参数; 临界流动状况参数	out	出口参数
CV	控制体积	v	湿空气中水蒸气的物理量
in	进口参数	0	环境的参数; 滞止参数

目 录

主要符号 / I

第一章 基本概念及定义 /1

■ 本章要点 1 ■ 本章学习导引 1 ■ 主要内容概述 2 ■ 典型例题 11
■ 思考题提示 16 ■ 拓展题 18

第二章 热力学第一定律 /21

■ 本章要点 21 ■ 本章学习导引 21 ■ 主要内容概述 21 ■ 典型例题 25
■ 思考题提示 31 ■ 拓展题 33

第三章 气体和蒸汽的性质 /36

■ 本章要点 36 ■ 本章学习导引 36 ■ 主要内容概述 37 ■ 典型例题 47
■ 思考题提示 52 ■ 拓展题 54

第四章 气体和蒸汽的基本热力过程 /58

■ 本章要点 58 ■ 本章学习导引 58 ■ 主要内容概述 59 ■ 典型例题 67
■ 思考题提示 77 ■ 拓展题 79

第五章 热力学第二定律 /89

■ 本章要点 89 ■ 本章学习导引 89 ■ 主要内容概述 90 ■ 典型例题 99
■ 思考题提示 110 ■ 拓展题 113

第六章 实际气体的性质及热力学一般关系式 /121

■ 本章要点 121 ■ 本章学习导引 121 ■ 主要内容概述 122 ■ 典型例题 130
■ 思考题提示 137 ■ 拓展题 138

第七章 气体与蒸汽的流动 /141

■ 本章要点 141 ■ 本章学习导引 141 ■ 主要内容概述 142 ■ 典型例题 148
■ 思考题提示 158 ■ 拓展题 159

第八章 压气机的热力过程 /165

■ 本章要点 165 ■ 本章学习导引 165 ■ 主要内容概述 166 ■ 典型例题 169

目 录

思考题提示 173 拓展题 174

第九章 气体动力循环 /178

本章要点 178 本章学习导引 178 主要内容概述 179 典型例题 187

思考题提示 194 拓展题 197

第十章 蒸汽动力装置循环 /202

本章要点 202 本章学习导引 202 主要内容概述 203 典型例题 208

思考题提示 219 拓展题 220

第十一章 制冷循环 /225

本章要点 225 本章学习导引 225 主要内容概述 226 典型例题 231

思考题提示 237 拓展题 238

第十二章 理想气体混合物及湿空气 /242

本章要点 242 本章学习导引 242 主要内容概述 243 典型例题 249

思考题提示 258 拓展题 259

第十三章 化学热力学基础 /263

本章要点 263 本章学习导引 263 主要内容概述 264 典型例题 271

思考题提示 278 拓展题 279

附录 上海交通大学近年工程热力学考题选 /284

2004 年工程热力学I试题及要点提示 284 2004 年工程热力学II试题及要点提示 289

2005 年工程热力学I试题及要点提示 294 2005 年工程热力学II试题及要点提示 299

2006 年工程热力学I试题及要点提示 304 2006 年工程热力学II试题及要点提示 308

2005 年工程热力学硕士研究生入学试卷及要点提示 313

2006 年工程热力学硕士研究生入学试卷及要点提示 318

2007 年工程热力学硕士研究生入学试卷及要点提示 324

主要参考文献 /330

第一章 基本概念及定义

本章要点

本章讨论工程热力学的基本概念及定义,有热能动力装置、工质、热力系统、边界、外界、系统平衡状态、状态参数、状态参数坐标图、温度、压力、比体积、准静态过程、可逆过程、过程的功和热量、循环、循环的经济性指标等。

本章学习导引

本章主要构筑工程热力学的基本概念,对这些概念的理解将在很大程度上影响本门课程的学习。工程热力学是主要研究能量,特别是热能与机械能相互转换的规律及其在工程中的应用的学科。热能与机械能的相互转换需借助一定的媒介物质,所以本章首先引进热能动力装置、热力系统;为描写系统,引进了平衡态、状态参数、状态参数坐标图、温度、压力、比体积等。能量转换是通过过程来实现的,所以又有准静态过程、可逆过程、循环以及过程的功和热量等;另外,围绕工程应用还引进表征能量利用经济性的概念,如热效率等。这些概念有些是建立热力学基本理论必不可少的,例如温度、平衡态、可逆过程等,称为基本概念。

需要强调的是,对概念的理解并不意味着死记硬背,而是正确地把握和应用,例如状态参数只是状态的函数,与如何达到指定状态的中间过程无关。因而,可以建立起不论过程是否可逆,只要初、终态相同,其变化量就相同,进行循环后状态参数必定恢复到原值,等等。还需指出的是,学习本章时既要避免死记硬背又不可马虎草率,工程热力学中的许多概念,如平衡态、可逆过程、功和热量等,在其他课程里接触过,有些还经常应用,但工程热力学中有扩展和深入,对这部分内容的疏忽和掉以轻心常常会造成后面学习的困难。

主要内容概述

一、热能动力装置

能源是人类赖以生存的重要物质基础之一,能源的开发和利用成为衡量社会物质文明的重要标志。自然界中蕴藏着各种不同形式的能,主要以热能的形式或者转换为热能的形式供人们利用。

把热能转换为机械能的整套设备称为热能动力装置(或称热机)。热能动力装置可分为两大类:蒸汽动力装置和燃气动力装置。工程热力学不深入研究各种装置的具体结构和各自的特性,而是抽取它们的共同本质进行探讨。各种热能动力装置从原理上可抽象为图 1-1a 所示的示意图。其中 T_1 表示提供热量的热源; T_2 表示吸收工质排出热量的低温热源(或称冷源); E 表示热机装置,工质在其中循环变化,吸热、膨胀、排热,把热能不断转换成机械能。无论哪种类型的热能动力装置,在目前的技术条件下,都要通过工质的吸热、膨胀、排热才能实现把热能源源不断地转换为机械能。还有一类能量转换设备是通过输入能量,实现把热量从低温物体传向高温物体,它们的抽象原理图如图 1-1b 所示。如同热能动力装置一样,工质在设备中周而复始地吸热、压缩、放热,实施把热能从低温物体传向高温物体。

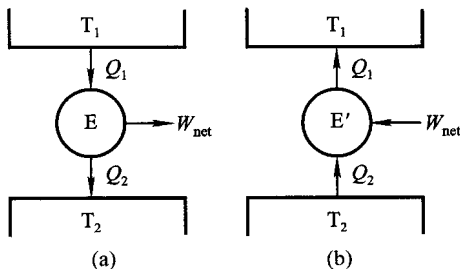


图 1-1 热能动力装置示意图

二、热源

热源是与热力学研究对象交换热量的物质系统的统称,有高温热源(简称热源)和低温热源(简称冷源)之分。热源也可以分为恒温热源和变温热源,如果构成热源的物质系统的质量非常大,在某特定的过程中放出(或吸收)一定量的热量后,温度几乎不变,这样的热源可以认为是恒温的。如一杯热水向大气放

热变成凉水,大气是低温热源,由于大气质量太大,不会因吸收热水放出的热量而使温度明显变化,所以这里大气是恒温热源。又如,在利用燃气轮机排气加热余热锅炉中水的过程中,随着锅炉中水从燃气吸热升温汽化,燃气温度下降,所以这里燃气是变温热源。

三、热力系统

在工程热力学中,为了方便起见,和力学中取分离体的方法一样,通常把热力学分析的对象从周围物体中分割出来,这种人为地从周围物系中分割出来作为热力学研究对象的有限物质系统称为“热力系统”,或简称为“系统”、“体系”。与系统发生质量、能量交换的周围物质系统称“外界”。系统与外界的分界面(线)称为边界(图1-2)。边界可以是假想的或实际的、固定的或移动的(图1-3)。系统通过边界与外界进行质量的交换,以及热能、机械能或其他形式能量的传递。

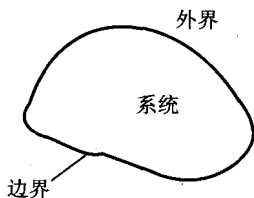


图 1-2 系统示意图

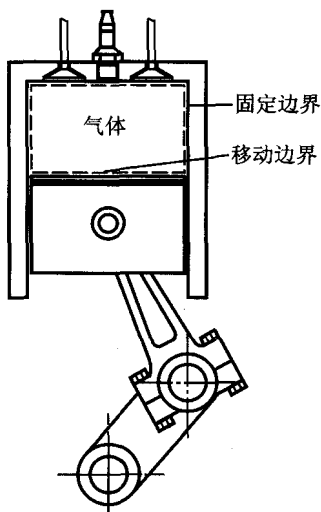


图 1-3 边界示意图

工程热力学中关心的热力系统可以分为以下几种：

闭口系——没有任何质量通过边界与外界发生交换的系统,常称为控制质量,如图1-3所示汽油机气缸中的气体。

开口系——通过边界与外界发生质量交换的系统,常称为控制体积,如以人体为系统,由于人需要呼吸、进食、出汗、排泄等,所以是开口系。

区分闭口系和开口系的关键是有没有质量越过了边界,并不是系统的质量是不是发生了变化。如果输入某系统的质量和输出该系统的质量相等,那么,虽

然系统内的质量没有改变,但系统是开口系。

绝热系——与外界没有热量交换的系统。

孤立系——与外界没有任何形式的质、能交换的系统。

绝热系是从系统与外界的热交换的角度考察系统,不论系统是开口系还是闭口系,只要没有热量越过边界,就是绝热系。取保温瓶和里面的水为系统,是绝热系;取集中供暖系统的一段保温材料性能良好的管子为系统,是开口绝热系(图 1-4)。

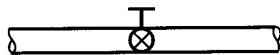


图 1-4 开口绝热系示意图

自然界没有孤立系,这是热力学研究抽象得出的概念,把研究对象(系统)及与之发生质、能交换的物系放在一起考虑,这个联合系统就是孤立系。例如,穿宇航服在空间行走的宇航员不是孤立系统,但如果把与他进行信息联系的设备包含在研究的系统内,则就可认为是孤立系统了。

孤立系必定是绝热的,但绝热系不一定是孤立系。

除上述各类系统外,还可以把系统分为均匀系、非均匀系、单相系、复相等。

四、平衡状态

热力学中把系统所处的某种宏观状况称为工质的热力状态,简称状态。平衡状态系指在没有外界作用的情况(与外界既没有能量交换也没有质量交换,但恒力场如重力场的影响除外)下工质宏观性质可长久保持不变的状态。一个系统,如果它的压力到处相同,并与外界平衡称为达到力平衡(或机械平衡);如果它的温度到处相同,并与外界平衡则称之为达到热平衡。在无化学反应及无相变的条件下,如一个系统同时处于力平衡和热平衡,该系统就处于热力平衡状态,简称平衡状态。平衡状态的热力系统,只要不受到外界的影响,它的状态就不会随时间而改变。如果受到外界作用,引起系统内压力不均匀或温度不均匀,破坏了系统的平衡状态,则当外界作用停止后,系统内压力不同及温度不同的各部分物质之间,将产生机械作用和热作用,并最终趋向新的平衡状态。

只要系统的参数不随时间而改变,即认为系统处在稳定状态,因此处在平衡状态的系统必定是稳定的,但若系统参数不随时间而改变是在外界作用下实现的,那么只是稳定状态而不是平衡状态。

五、状态参数

处于平衡状态的工质可用一组确定的宏观物理参数描述,这些宏观物理量称为状态参数。常用的状态参数有压力 p 、温度 T 、体积 V 、热力学能 U (以前习惯称内能)、焓 H 和熵 S 等。实践证明,要确定处于平衡状态的简单可压缩系统

(无化学反应的,与外界的功效交换仅为体积变化功的,由可压缩物质构成的系统)的状态,并不需要知道全部状态参数的值,只要知道其中任意两个独立状态参数的值,其他参数可以通过它们之间的关系式计算出来。即简单可压缩系只有两个独立的状态参数,其他状态参数都表示为这两个独立参数的函数。

状态参数只是状态的函数,与如何达到该状态的过程无关。在数学上表现为是点的函数,其微量是全微分,它沿闭合路径的积分为零,即

$$\int_1^2 dZ = Z_2 - Z_1, \quad \oint dZ = 0, \quad dZ = \left(\frac{\partial Z}{\partial x} \right)_y dx + \left(\frac{\partial Z}{\partial y} \right)_x dy$$

状态参数可分为两类,一类称强度量,如温度和压力,它们的值与物质的量无关;另一类称广延量,它们的值正比于物质的量,如物质的体积、热力学能、焓和熵等。

若系统两平衡状态的各状态参数均一一对应相等,称此两平衡状态相等;反之,相等的两状态则其状态参数必然一一对应相等。对于简单可压缩系,只要两个独立的状态参数一一对应相等,就可判定该系统两平衡状态相等。

由两个独立的状态参数为坐标轴可构成所谓的状态参数图。对于简单可压缩系,状态参数图上的一点可表示一个确定的状态,而系统的每一个确定的状态都可在状态参数图找到对应的点。由于没有处于平衡状态的系统不能用状态参数描述,所以非平衡态不能用状态参数图上的点表示。常用的状态参数图有压-容($p-v$)图、温-熵($T-s$)图和焓-熵($h-s$)图等。

六、温度

众所周知,当两个冷热不同的物体相互接触时,会有一股净能量——热量,从热物体传向冷物体,使热物体变冷,冷物体变热,最后当两物体的冷热程度相同时,净能流的交换停止,此时称该两物体达到热平衡。可见,物体具有某种宏观性质,当这种性质不同的两个物体接触时,会发生热量传递;当物体间达到热平衡时,它们的该项性质相同。这种驱动热量传递的宏观性质称为温度。正如压力差是功传递的推动力一样,温度差是驱使热量传递的推动力。温度是描述和判断系统是否与其他系统处于热平衡状态的状态参数,一切处于热平衡的系统都具有相同的温度,系统之间有热量传递,则必存在温差。物体温度的高低确定了热量传递的方向:温度高的物体自发地把热量传递给温度低的物体。

如果两个系统同时与第三个系统处于热平衡,它们彼此也处于热平衡,这称为热力学第零定律,它是温度测量的基础。

为了进行温度测量,需建立温度的标尺,即温标。国际单位制(SI)中,以热力学温标作为基本温标。它所定义的温度称为热力学温度,其符号为 T ,单位为开,单位符号为K。热力学温标以水的三相点,即水的固、液、气三态平衡共存时

的温度为基本定点,并定义其温度为 273.16 K。于是 1 K 就是水的三相点热力学温度的 $\frac{1}{273.16}$ 。热力学温度也常沿用“绝对温度”的名称。由于热力学温标实施困难,国际上定义了国际摄氏温标,与热力学温标并用,国际摄氏温标的符号为 t ,摄氏温度的单位是摄氏度,单位符号为 $^{\circ}\text{C}$ 。热力学温标 1 K 与国际摄氏温标 1°C 的间隔是完全相同的。热力学温度与摄氏温度存在着下述的关系:

$$\{t\}_{^{\circ}\text{C}} = \{T\}_{\text{K}} - 273.15 \text{ K} \tag{1-1}$$

所以水的三相点的摄氏温度是 0.01°C 。

七、压力

压力是单位面积上所承受的垂直作用力(物理上称为压强)。压力的单位是帕斯卡,简称帕,单位符号为 Pa, $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ 。工程上因 Pa(帕)作为单位太小,常用 kPa(千帕)、MPa(兆帕)作单位, $1 \text{ kPa} = 1\,000 \text{ Pa}$, $1 \text{ MPa} = 1 \times 10^6 \text{ Pa}$ 。以前在工程上使用的压力单位还有 bar(巴)和 atm(标准大气压)等。它们与帕的换算关系见表 1-1。

表 1-1 各种压力单位与帕的换算关系

单位名称	单位符号	与 Pa 的换算关系
巴	bar	$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$ 或 0.1 MPa
标准大气压	atm	$1 \text{ atm} = 101\,325 \text{ Pa} = 1.013\,25 \text{ bar}$
毫米水柱	mmH_2O	$1 \text{ mmH}_2\text{O} = 9.806\,65 \text{ Pa}$
毫米汞柱	mmHg	$1 \text{ mmHg} = 133.322\,4 \text{ Pa}$
工程大气压	at	$1 \text{ at} = 98\,066.5 \text{ Pa}$

工质的真实压力称为“绝对压力”,以 p 表示。当地大气压力以 p_b 表示,绝对压力大于当地大气压力时,压力表指示的压力值称为表压力,用 p_e 表示:

$$p = p_b + p_e \tag{1-2}$$

当绝对压力低于当地大气压力时,测压仪器称为真空表,用真空表测得的数值,即绝对压力低于当地大气压力的数值,称“真空度”,用 p_v 表示:

$$p = p_b - p_v \tag{1-3}$$

气体压力与表压力或真空度的关系如图 1-5 所示。

当地大气压力的值可用气压计测定,其数值随所在地的纬度、高度和气候等条件而有所不同。所以,即使绝对压力不

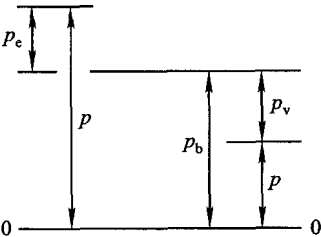


图 1-5 表压力和真空度

变,随着当地大气压力的改变,表压力和真空度也要发生变化。因此,表示工质状态参数的压力,只能用绝对压力。

八、比体积

反映定量工质体积大小的状态参数是体积 V 。比体积是指单位质量的工质所具有的体积,以符号 v 表示(工程热力学中约定用小写字母表示单位质量工质的参数),单位为 m^3/kg 。

$$v = V/m \quad (1-4)$$

式中, m 为工质的质量, kg ; V 为工质的体积, m^3 。

单位体积工质所具有的质量称为密度,以符号 ρ 表示,其单位为 kg/m^3 :

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

比体积与密度互为倒数。

气体的比体积随温度和压力而变化,因此用体积表示气体的量时需指定状态。国际上把压力为 $101\,325\text{ Pa}$ 、温度为 $0\text{ }^\circ\text{C}$ (即 273.15 K) 的状态规定为标准状态。习惯把标准状态的压力、温度、比体积分别记作 p_0 、 T_0 、 v_0 , 体积记作 V_0 。

九、状态方程

表示处于平衡状态系统的温度 T 、压力 p 和比体积 v 这三个基本状态参数之间关系的函数称为状态方程式,即

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

理想气体的状态方程是

$$pv = R_g T, pV = mR_g T, pV = nRT \quad (1-6)$$

式中: R_g 是气体常数, 仅与气体种类有关而与气体的状态无关; R 是摩尔气体常数(习惯上称为通用气体常数), 不仅与气体状态无关, 也与气体的种类无关, $R = 8.314\,5\text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。若气体的摩尔质量为 M , 则 $R = MR_g$ 。需指出的是, 状态方程式中各物理量的单位的匹配: 压力 p —— Pa ; 温度 T —— K ; 比体积 v —— m^3/kg , 体积 V —— m^3 ; 质量 m —— kg ; 物质的量 n —— mol 。

十、准静态过程和可逆过程

热能和机械能的相互转化必须通过工质的状态变化过程才能完成, 过程是指系统从一个平衡状态向另一个平衡状态变化时经历的全部状态的总合。在实际设备中进行的过程都是很复杂的, 一切过程都是平衡被破坏的结果, 故实际过程都是不平衡的。

若系统从一个平衡状态连续经过无数个中间状态过渡到另一个平衡状态,

过程中系统偏离平衡状态无限小并且随时恢复平衡状态,这样的过程称为准静态过程(或称准平衡过程)。准静态过程进行的条件是工质自身有恢复平衡的能力,并且驱使过程进行的不平衡势无限小。它是实际过程的理想化。

系统经历某一过程后,如能在过程逆向进行后使外界和系统同时回复到初始状态而不留下任何变化,则该过程称为可逆过程。可逆过程是无耗散效应(如摩擦、电阻、磁滞等)的准静态过程。

判别系统是否经历了一个可逆过程的关键并不在于其是否能恢复到原状态,而在于是否在回复到原状态的同时不在外界留下任何影响。系统进行了不平衡过程,必将产生一些不可回复的后遗效果,所以这样的不平衡过程必定是不可逆过程。经历了准静态过程,但过程中有摩擦等耗散效应,过程也不可逆。运动无摩擦、传热无温差的准平衡过程是可逆过程。

自然界中一切过程均是不可逆的,可逆过程只是一种抽象概念,但对可逆过程的分析 and 计算,无论在理论上或是在实用上都有重要意义。

可逆过程和准静态过程可由状态参数图上的实线表示。

十一、功和可逆过程功

工程热力学中把功定义为:通过边界传递的能量,其全部效果可表现为举起重物。所谓“举起重物”,并非指一定要举起重物,因为举起重物时使重物的位能增加,所以举起重物的真正含义是广义地指转变为机械能。由此,可以认为功是传递过程中的机械能。

我国法定单位制中,功的单位是 J(焦)或 kJ(千焦)。

工程热力学中约定系统向外界做功为正;外界对系统做功为负,即工质膨胀做功为正,工质被压缩做功为负。

系统在可逆过程中的功为

$$w = \int_A^B \delta w = \int_{v_1}^{v_2} p dv \quad (1-7)$$

如果气体质量是 m , 则

$$W = mw = m \int_{v_1}^{v_2} p dv = \int_{v_1}^{v_2} p dV \quad (1-8)$$

由数学知识:积分 $\int_{v_1}^{v_2} p dv$ 的值就是 $p-v$ 图中过程曲线与横轴所形成的曲边梯形 12mn1 的面积(图 1-6)。

若过程中气体膨胀, $dv > 0$, 由积分而得的功为正。反之,当气体压缩时,则 $dv < 0$, 功为负值。

闭口系工质在体积变化过程中需要排斥大气,反

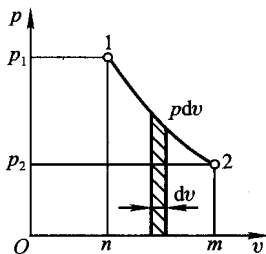


图 1-6 可逆过程的功