

普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套辅导教材
21世纪高等教育规划教材

工程热力学 习题详解

刘宝兴 编著



普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套辅导教材
21 世纪高等教育规划教材

工程热力学学习题详解

编著 刘宝兴
参编 王 瑾 童正明

附录 (CIP) 目次

普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套辅导教材

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

11-5

工. I

中国图书馆

机械工业出版社

刘宝兴

王瑾

童正明

2007年8月第1版

160mm×230mm

12.00元

ISBN 7-111-15207-1

机械工业出版社

010-88379711

北京机械工业出版社

本书是与作者主编的由机械工业出版社出版的“21 世纪高等教育规划教材”、并已被列入教育部“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”的《工程热力学》教科书相配套的教学辅导教材。本书的主要目的是帮助学生系统思考分析工程问题,并掌握有序的解题方法。

本书的每章开始是主要概念和计算公式,紧接着是习题详解。作者对《工程热力学》中每章后的习题进行分类选题,并作了全面、详尽的解题和注释,以利读者独立求解其他同类习题。

本书内容包括:基本概念和定义,纯物质的性质,经由功和热量及物质的能量传递、热力学第一定律、热力学第二定律、熵、焓、热力学关系式、流体的流动和喷管、压缩机、气体动力循环、蒸汽动力循环、制冷循环、理想气体混合物和湿空气、化学反应系统、化学平衡和相平衡,共 16 章。本书讲解简明,解题安排由易到难。全书共解题 365 道,计算数据摘自作者主编的《工程热力学》书中的附录,全部采用国际单位制。

本书可作为高等学校热能工程、热能动力工程、建筑环境与设备工程、环境工程和机械工程各专业的教学辅导用书,也可作为有关工程技术人员自学、进修的辅导教材或参考书,对准备考研的学生也是一本很好的解题复习参考书。

图书在版编目(CIP)数据

工程热力学习题详解/刘宝兴编著. —北京:机械工业出版社, 2007.4

普通高等教育“十一五”国家级规划教材配套辅导教材 21 世纪高等教育规划教材.

ISBN 978-7-111-21284-3

I. 工... II. 刘... III. 工程热力学—高等学校—解题 IV. TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 049620 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:刘涛 版式设计:张世琴 责任校对:樊钟英

封面设计:王伟光 责任印制:李妍

北京中兴印刷有限公司印刷

2007 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 10 印张 · 385 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-21284-3

定价:25.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379711

封面无防伪标均为盗版

前言

本书是与作者主编的由机械工业出版社出版的“21 世纪高等教育规划教材”、并已被列入教育部“普通高等教育‘十一五’国家级规划教材”的《工程热力学》教科书相配套的教学辅导教材。本书的主要目的是帮助学生系统思考、分析工程问题并掌握有序的解题方法。

全书共 16 章，全部内容有基本概念和定义、纯物质的性质、经由功和热量及物质的能量传递、热力学第一定律、热力学第二定律、熵、焓、热力学关系式、流体的流动和喷管、压缩机、气体动力循环、蒸汽动力循环、制冷循环、理想气体混合物和湿空气、化学反应系统、化学平衡和相平衡。本书的每章开始是主要概念和计算公式，扼要说明这一章的基本概念和常用计算公式。紧接着是习题详解，对作者主编的《工程热力学》中每章后的习题进行分类选题，并作了全面、详尽的解题和注释。细读理解这些题后，就可以自己独立求解《工程热力学》教材中余下的、作为作业布置的其他同类习题。所以，这本《工程热力学学习题详解》对于课后面对作业无从着手的同学确是一本十分有益、实用的辅导教材。当然，对于准备考研而练习解题的考生也是一本很有价值的参考书。

本书讲解简明，解题的安排由易到难。全书共解题 365 道，计算数据摘自作者主编的《工程热力学》书中的附录，全部采用国际单位制。

作者要特别感谢机械工业出版社对本书编写工作的支持和关心。对本书的编写给予过关心和帮助的各位同仁，在此也一并表示衷心感谢。最后，真诚地希望能得到读者的指正意见。

刘宝兴

常用符号

A	面积, m^2	n	物质的量 (摩尔数), 多变指数
a	声速, m/s	P	功率, W
B_T	容积弹性模数	Pe	势能, J
C	余隙比	pe	比势能, J/kg
c	比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	p	绝对压力, Pa
c_p	比定压热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	p_a	干空气压力, Pa
c_v	比定容热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$	p_b	背压力, Pa
C_m	摩尔热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	p_c	临界压力, Pa
$C_{p,m}$	摩尔定压热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	p_g	表压力, Pa
$C_{v,m}$	摩尔定容热容, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$	p_i	分压力, Pa
COP_R	制冷机性能系数	p_0	大气环境压力, Pa
COP_{HP}	热泵性能系数	p_r	对比压力; 相对压力
E	总能, J	p_s	饱和压力, Pa
e	比总能, J/kg	p_{sur}	外界绝对压力, Pa
Ex	烟, J	p_v	水蒸气分压力, Pa
ex	比烟, J/kg	Q	热量, J
F	力, N ; 自由度	q	比热量, J/kg
f	比亥姆霍兹函数, J/kg	q_m	质量流量, kg/s
g	比吉布斯函数, J/kg	qv	体积流量, m^3/s
$\bar{g}_f^0$	生成吉布斯函数, kJ/kmol	R	气体常数, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
HHV	高热值, kJ/kg	R_m	摩尔气体常数, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
H	焓, J	$r_{a/f}$	空气-燃料比
h	比焓, J/kg	S	熵, kJ/K
$\bar{h}$	摩尔焓, J/mol	s	比熵, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
$\bar{h}_f^0$	生成焓, kJ/kmol	s_f	比熵流, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
Ke	动能, J	s_g	比熵产, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
ke	比动能, J/kg	$\bar{s}$	摩尔熵, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
K_P	反应的平衡常数	$\bar{s}^0$	标准摩尔绝对熵, $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$
L	做功能力损失 (烟损失), J	T	热力学温度, K
LHV	低热值, kJ/kg	T_c	临界温度, K
M	摩尔质量, kg/kmol	T_{DP}	露点温度, K
Ma	马赫数	T_i	转回温度, K
MEP	平均有效压力, Pa	T_r	对比温度
m	质量, kg	t	摄氏温度, $^{\circ}\text{C}$

t_w	湿球温度, $^{\circ}\text{C}$
U	热力学能, kJ
u	比热力学能, kJ/kg
V	体积, m^3
v	比体积, m^3/kg
v_c	临界比体积, m^3/kg
v_r	对比比体积; 相对比体积
W	体积功, J
W_{net}	净功, J
W_s	轴功, J
W_t	技术功, J
W_u	有用功, J
w	比功, J/kg
x	干度; 质量分数
y	摩尔分数
z	压缩因子; 标高, m
Z_c	临界压缩因子

希腊字母

α	热膨胀系数
β	临界压比
γ	比热容比; 汽化热(汽化潜热), J/kg
ϵ	压缩比; 回热器效能
η	效率
θ	单位质量流动流体总能, J/kg
κ	等熵指数
κ_T	等温压缩率
λ	等容增压比
μ	焦汤系数; 化学势
ν	化学计量系数
π	增压比
ρ	密度, kg/m^3 ; 定压预胀比
τ	加热比; 时间, s
v	速度, m/s
Φ	传热速率, W
ϕ	相对湿度
ω	含湿量, kg(水蒸气)/kg(干空气)

下标

a	实际; 空气
-----	--------

abs	绝对; 吸收
adi	绝热
atm	标准大气状态
av	平均
b	边界
c	燃烧; 压缩; 临界
cri	临界点
cv	控制容积
e	出口状态
eva	蒸发
f	饱和液体; 燃料
fg	饱和蒸气与饱和液体参数差
g	饱和蒸气
gen	产生
H	高温状态
HE	热机; 换热器
i	进口状态; 理想状态
int	内部
iso	孤立状态
L	低温状态
m	摩尔量; 混合物
P	生成物
PW	搅拌轮
R	反应物; 制冷机
r	热源; 对比
reg	回热
rep	推动; 排斥
rev	可逆
s	等熵
sat	饱和
sur	外界
sys	系统
t	热的; 技术的
tot	总量
u	通用
v	水蒸气
w	水
0	滞止状态; 寂态

目 录

前言

常用符号

第1章 基本概念和定义

1.1 主要概念和计算公式

1.2 习题详解

1. 压力

2. 温度

第2章 纯物质的性质

2.1 主要概念和计算公式

2.2 习题详解

1. 热力性质

2. 理想气体

3. 压缩因子

4. 其他状态方程

5. 理想气体的比热容、 Δu 和 Δh

第3章 经由功和热量及物质的能量传递

3.1 主要概念和计算公式

3.2 习题详解

1. 经由功的能量传递

2. 质量守恒

3. 经由物质的能量传递

第4章 热力学第一定律

4.1 主要概念和计算公式

4.2 习题详解

1. 一般闭口系统的能量平衡

2. 理想气体闭口系统的能量平衡

3. 一般开口系统的能量平衡

4. 稳定流动过程的能量平衡

5. 非稳定流动过程的能量平衡 (充气过程和排气过程)

6. 三个过程组成的循环

第5章 热力学第二定律

5.1 主要概念和计算公式

5.2 习题详解	50
1. 热机和热效率	50
2. 能量转换效率	51
3. 制冷机和热泵	52
4. 卡诺热机	53
5. 卡诺制冷机和卡诺热泵	56
第6章 熵	59
6.1 主要概念和计算公式	59
6.2 习题详解	63
1. 熵和熵增原理	63
2. 纯物质的熵变	65
3. 不可压缩物质的熵变	68
4. 理想气体的熵变	69
5. 可逆稳定流动的功	72
6. 稳定流动装置的等熵效率	77
7. 熵平衡	82
第7章 焓	88
7.1 主要概念和计算公式	88
7.2 习题详解	91
1. 计算	91
2. 闭口系统的焓平衡	94
3. 控制容积的焓平衡	101
4. 焓效率	111
第8章 热力学关系式	114
8.1 主要概念和计算公式	114
8.2 习题详解	116
1. 麦克斯韦关系式	116
2. 克拉贝龙方程	117
3. 关于 du , dh , ds , c_p 和 c_v 的一般关系式	118
4. 热系数	119
5. 焦汤系数	120
第9章 流体的流动和喷管	121
9.1 主要概念和计算公式	121
9.2 习题详解	122
1. 滞止参数	122
2. 声速和马赫数	123
3. 一维等熵流动	123
4. 通过喷管的等熵流动	124

5. 喷管和扩压管的效率	127
第 10 章 压缩机	132
10.1 主要概念和计算公式	132
10.2 习题详解	133
第 11 章 气体动力循环	140
11.1 主要概念和计算公式	140
11.2 习题详解	143
1. 实际和理想循环、卡诺循环、空气标准假设、往复式发动机	143
2. 奥托循环	145
3. 狄塞尔循环	148
4. 混合加热循环	151
5. 实际和理想布雷顿循环	154
6. 回热型布雷顿循环	158
第 12 章 蒸汽动力循环	162
12.1 主要概念和计算公式	162
12.2 习题详解	164
1. 卡诺蒸汽动力循环	164
2. 简单朗肯循环	166
3. 再热朗肯循环	172
4. 回热朗肯循环、再热—回热朗肯循环	175
5. 蒸汽动力循环焓分析	196
第 13 章 制冷循环	198
13.1 主要概念和计算公式	198
13.2 习题详解	200
1. 逆向卡诺循环	200
2. 理想和实际蒸气压缩制冷循环	201
3. 气体制冷循环	207
4. 热泵系统	209
第 14 章 理想气体混合物和湿空气	212
14.1 主要概念和计算公式	212
14.2 习题详解	215
1. 理想气体混合物的组分	215
2. 理想气体混合物的 $p-v-T$ 性质	218
3. 理想气体混合物的参数	221
4. 湿空气	225
5. 焓湿图和湿空气过程	226
6. 空气调节	232
7. 冷却塔	245

第 15 章 化学反应系统	250
15.1 主要概念和计算公式	250
15.2 习题详解	253
1. 理论和实际的燃烧过程	253
2. 生成焓和燃烧焓	265
3. 反应系统的第一定律分析	268
4. 绝热火焰温度	279
5. 熵变和反应系统的第二定律分析	282
6. 燃料电池	287
第 16 章 化学平衡和相平衡	290
16.1 主要概念和计算公式	290
16.2 习题详解	293
1. 平衡常数 K_p 和理想气体的平衡组分	293
2. 平衡常数 K_p 随温度的变化 van't Hoff 方程	299
3. 化学平衡和能平衡	300
4. 同时发生的反应	303
5. 相平衡	305
参考文献	307

第1章

基本概念和定义

1.1 主要概念和计算公式

热力学涉及所有与能有关的问题,掌握热力学基本原理对开发利用能源是十分重要的,热力学一直是工程教育的重要部分。

1) 热力学系统(或称为系统)被定义为任何具有确定特性的物质或空间的整体。系统的选择由个人决定。在系统确定之后,不在系统中的其他一切事物叫外界。分开系统和外界的表面叫边界。

2) 当研究定量物质时,系统被称为闭口系统(也称为控制质量),这时没有物质跨越边界流动。与外界不以任何方式相互作用的闭口系统叫孤立系统。开口系统(也称为控制容积)是指适当选择的区域,这时物质和能量可跨越开口系统的边界。

3) 物质的状态描述物质如何存在。它具有温度、压力、密度以及其他宏观参数,知道这些参数之后,就能确定物质的状态。参数是整个系统的特征量,它不取决于系统状态如何变化,只取决于最终的系统状态。

4) 参数可以细分成两类,强度参数和广延参数。强度参数不依赖系统的大小,例如温度和压力。广延参数依赖于系统的大小,例如质量和体积。而单位质量的广延参数,如比体积,具有强度参数的性质。

5) 热力学处理的是平衡状态。在平衡状态,系统中没有不平衡的势(或驱动力)。除非满足所有有关的平衡条件,否则一个系统不会处于平衡状态。

6) 如果没有一个系统参数随时间而变,则该系统处于稳定状态。

7) 状态公理就是指简单可压缩系统的状态完全可由两个独立的强度参数来给定。

8) 一个系统在没有电、磁、重力、运动和表面张力的作用时称为简单可压缩系统。

9) 系统从一个平衡状态到另一个平衡状态所经历的任何变化称为过程，过程就是系统状态的变化。在一个过程中系统所经过的状态系列称为途径。为了完整地描述一个过程，就应说明过程的初态和终态、过程的途径以及与外界的相互作用。

10) 当过程进行中系统随时保持无限接近平衡状态，就称为准静态过程或准平衡过程。一个准静态过程可以被看作系统内不平衡势无限小、过程进行得足够慢的过程。人们对准静态过程感兴趣，一是因为它分析方便，二是可以用作与实际过程进行比较的标准。

11) 用参数坐标图来分析热力过程是很方便的。因为过程途径表示的是过程中系统经历的一系列平衡状态，对非准静态过程无法用一个状态来表征整个系统，所以也没有整个系统的过程途径。非准静态过程用初态和终态之间的虚线表示。

12) 过程中温度保持不变的过程叫等温过程；过程中压力保持不变的过程叫等压过程；过程中比体积保持不变的过程叫等容过程。

13) 热力学循环是两个或更多个过程的总体，并且终态等于初始状态。

14) 稳定就意味着参数不随时间变化，反之就是不稳定。而均匀就意味着参数在给定区域中不随地点变化。稳定流动过程被定义为在过程中流体稳定地流过控制容积，这时流体参数可从控制容积中的一点到另一点发生变化，但是，在任何固定点、在整个过程中都保持不变。因此，在稳定流动过程中控制容积的体积 V 、质量 m 和总能量 E 保持不变。

15) 能可以许多形式存在，诸如热能、机械能、动能、势能、电能、磁能、化学能和核能，它们的总和构成系统的总能 E 。单位质量的系统总能 $e = E/m$ 。系统总能的变化与选择的参考点无关。

16) 在热力学分析中，常常将构成总能的各种能的形式分为两种：宏观形式的能和微观形式的能。能的宏观形式是系统作为整体相对某外部参考系所具有的能的形式，如动能和势能。能的微观形式是与系统分子结构和分子活动程度有关的能的形式，它们独立于外部参考系。所有微观形式能的总和称为系统的热力学能，并用符号表示为 U 。在不计电、磁和表面张力的作用时，系统总能由热力学能、动能和势能构成，并表示为

$$E = U + KE + PE = U + mv^2/2 + mgz$$

$$e = u + ke + pe = u + v^2/2 + gz$$

静止系统的总能变化 ΔE 等于其热力学能的变化 ΔU 。

17) 与分子各种动能有关的系统热力学能称为显能。与系统的相有关的热力

学能称为潜能。另外热力学能还包括化学能和核能。在热力学中,通常指热力学能中的显能和潜能为热能,以与传递热相区分。

18) 可储存在系统中的各种形式的能,可看作能的静态形式。不储存在系统中的能是动态形式,或称为能的相互作用。动态形式能可在它跨越边界时被确认,也就代表系统在过程中得到或失去的能量。与闭口系统有关的能的相互作用仅有传递热和功两种。如果驱动力是温差,那么能的相互作用就是传热,否则就是功。对控制容积,还可通过质量传递来交换能量。

19) 物体的动能是与所有分子有规律运动有关的有序形式能量,相反,分子的动能完全是无规律的,是高度无序形式能量。有序形式能量远比无序形式能量有价值,热力学的一个主要方面就是讨论无序形式能量(热量)向有序形式能量(功)的转换;也可知道有序形式能量可被完全转换成无序形式能量,但只有一部分无序形式能量可通过热机被转换成有序形式能量。

20) 比体积是物质的体积除以质量。密度定义为单位体积中物质的质量,即比体积的倒数, $\rho = 1/v$ 。

21) 每单位面积上的法向力 $p = F/A$ 称为压力。压力单位定义为 Pa, $1\text{Pa} = 1\text{N/m}^2$ 。系统和外界压力之差称为表压力 p_g 。系统的绝对压力 p 是系统表压力 p_g 和外界绝对压力 p_{sur} 之和。

$$p = p_g + p_{\text{sur}}$$

大气压力 p_b 是空气受重力作用的结果,在海平面处是 $101\,325\text{Pa}$ 。

若表压力为零,那么系统绝对压力等于外界绝对压力。若表压力是负的,这时从外界绝对压力减去这个读数就得到系统的绝对压力。小于大气压的压力差值称为“真空压力”或“真空度”。主要转换关系是 $1\text{atm} = 101.325\text{kPa} = 760\text{mmHg}$ 。

22) 温度是物体冷、热程度的度量。

23) 热力学第零定律说:“当两个物体都与第三个物体处于热平衡时,这两个物体就相互处于热平衡,因而处于相同的温度。”这时,第三个物体就是温度计。

24) 温度的数值表示法就是温标。温标基准点有两种,一种是水的三相点(冰、水和水蒸气共存点),另一种是在一个大气压下水的沸点。

25) 常用的温标有 SI 制的摄氏温标、英制华氏温标和热力学温标。在摄氏温标中,指定水的冰点和沸点分别为 0°C 和 100°C ,相应在华氏温标中分别为 32°F 和 212°F 。

热力学温标(绝对温标)是一种与任何物质性质无关的温标。在 SI 制中是开尔文温标,其温度单位表示为 K,最低温度为 0K 。在英制中热力学温标是朗肯温标,其温度单位表示为 R。热力学温标规定水的三相点的温度为 273.16K ,

因此,热力学温度的1度就是水的三相点温度的 $1/273.16$ 。

摄氏温标与开尔文温标的关系是 $t^{\circ}\text{C} = \text{TK} - 273.15$

摄氏温度 $^{\circ}\text{C}$ 与华氏温度 $^{\circ}\text{F}$ 的关系为 $t^{\circ}\text{C} = (5/9)(t^{\circ}\text{F} - 32)$

朗肯温标 R 与华氏温度 $^{\circ}\text{F}$ 的关系为 $\text{TR} = t^{\circ}\text{F} + 459.67$

1.2 习题详解

1. 压力

【1-1】 风机进口管上的真空表读数为 15.24cm 水柱,环境大气压为 $99\,963\text{Pa}$,试确定管道内的绝对压力。水的密度为 $999.30\text{kg}/\text{m}^3$,重力加速度 $g = 9.753\,6\text{m}/\text{s}^2$ 。

【解】 $p = p_b - p_v = p_b - \rho g H = 99\,963\text{Pa} - 999.30\text{kg}/\text{m}^3 \times 9.753\,6\text{m}/\text{s}^2 \times 0.152\,4\text{m} = 98.48\text{kPa}$

注:绝对压力等于环境大气压减去真空度。液柱垂直高度为 H 的压差是 $\Delta p = \rho g H$ 。

【1-2】 容器内绝对压力为 0.2bar ($1\text{bar} = 100\text{kPa}$),环境大气压为 101kPa ,则安装在容器壁内的布尔登管式压力计的读数为多少?它是表压力还是真空读数?

【解】 $p = p_b + p_g = 0.2 \times 10^5\text{Pa} = 101\,000\text{Pa} + p_g$ $p_g = -81\,000\text{Pa}$ 是真空读数

注:绝对压力等于环境大气压加表压力。布尔登管式压力计的读数是工质绝对压力与环境大气压力之差,正的读数是表压力,负的读数的绝对值是真空度。

【1-3】 一位高山徒步旅行者的气压表开始时的读数是 930mbar ($1\text{bar} = 10^5\text{Pa}$),在终点是 780mbar 。忽略高度对当地重力加速度的影响,试确定爬高的垂直距离。假定空气的平均密度为 $1.20\text{kg}/\text{m}^3$ 。

【解】 $\Delta p = \rho g H$ $(930 - 780) \times 100\text{Pa} = 1.20\text{kg}/\text{m}^3 \times 9.81\text{m}/\text{s}^2 H$
 $H = 1\,274.21\text{m}$

注:垂直标高为 H 的压差是 $\Delta p = \rho g H$ 。 $1\text{mbar} = 10^{-3}\text{bar} = 100\text{Pa}$ 。

【1-4】 一个压力锅由盖中央的小型减压开关周期地自动放汽来维持锅内表压 100kPa ,放汽孔横断面积为 4mm^2 ,大气压是 101kPa ,试确定该小型减压开关的质量。

【解】 假设该小型减压开关的质量为 $m\text{kg}$ 。力平衡方程为 $mg/A = p_g$
 $(m\text{kg} \times 9.81\text{m}/\text{s}^2 / 4 \times 10^{-6}\text{m}^2 / 1\,000)\text{kPa} = 100\text{kPa}$ $m = 0.040\,77\text{kg} = 40.77\text{g}$

注:大气压力加上开关质量引起的压力等于锅内绝对压力。

【1-5】 已知球1和标高2之间是水;管道2~3之间是汞;标高3和球4之

间也是水。标高 1~2 之间是 2m; 标高 2~3 之间是 0.5m; 标高 3~4 之间是 0.4m。 $\rho_{\text{Hg}} = 13\,590\text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{water}} = 1000\text{ kg/m}^3$, $g = 9.81\text{ m/s}^2$, $p_1 = 500\text{ kPa}$ 。试确定 4 处的压力 p_4 。

【解】 汞柱低位液面处的压力

$$p_2 = p_1 + (\rho g H)_{\text{H}_2\text{O}} = 500\,000\text{ Pa} + 1\,000\text{ kg/m}^3 \times 9.81\text{ m/s}^2 \times 2\text{ m} = 519\,620\text{ Pa}$$

$$\text{汞柱高位液面处的压力 } p_3 = p_2 - (\rho g H)_{\text{Hg}} = 519\,620\text{ Pa} - 13\,590\text{ kg/m}^3 \times 9.81\text{ m/s}^2 \times 0.5\text{ m} = 452\,961\text{ Pa}$$

$$p_4 = p_3 + (\rho g H)_{\text{H}_2\text{O}} = 452\,961\text{ Pa} + 1\,000\text{ kg/m}^3 \times 9.81\text{ m/s}^2 \times 0.4\text{ m} = 456\,885\text{ Pa}$$

注: 液柱垂直高度为 H 的压差是 $\Delta p = \rho g H$ 。某一液柱的同标高液面处的压力是相同的。

【1-6】 活塞与流过管道的气体压力相平衡。活塞顶面 A_1 的直径是 10cm; 底面 A_3 的直径是 20cm; 质量 21kg。 $p_1 = 600\text{ kPa}$, $p_2 = 170\text{ kPa}$ 。求管道中气体的压力 p_3 。

【解】 力平衡方程为 $mg + p_1 A_1 + p_2 A_2 = p_3 A_3$

$$21\text{ kg} \times 9.81\text{ m/s}^2 / 1000 + 600\text{ kPa} \times \pi \times 0.05^2\text{ m}^2 + 170\text{ kPa} \times \pi \times (0.1^2 - 0.05^2)\text{ m}^2 = p_3 \pi \times 0.1^2\text{ m}^2$$

$$p_3 = 284.058\text{ kPa}$$

注: 本题的力平衡是空间 1 施加的力加上空间 2 施加的力加上活塞产生的重力等于管道中气体对活塞底面产生的力。

2. 温度

【1-7】 有人提出一个新的绝对温标, 它对应水的冰点是 150°S , 对应水的沸点是 300°S 。试确定: 1) 分别对应 100°S 和 400°S 的摄氏温度 $^\circ\text{C}$ 。2) 1°S 与 1 K 的大小之比。

【解】 1) 1°S 与 1°C 的大小之比: $(300^\circ\text{S} - 150^\circ\text{S}) / (100^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) = 1.5^\circ\text{S}/^\circ\text{C}$

$$100^\circ\text{S} - 150^\circ\text{S} = -50^\circ\text{S} = -50^\circ\text{S} / 1.5^\circ\text{S}/^\circ\text{C} = -33.33^\circ\text{C}$$

$$400^\circ\text{S} - 150^\circ\text{S} = 250^\circ\text{S} = 250^\circ\text{S} / 1.5^\circ\text{S}/^\circ\text{C} = 166.67^\circ\text{C}$$

2) 1°S 与 1 K 的大小之比: $1.5^\circ\text{S}/^\circ\text{C} = 1.5^\circ\text{S}/\text{K}$

注: 在摄氏温标中对应水的冰点是 0°C , 对应水的沸点是 100°C 。摄氏温标中的 1°C 与热力学温标中的 1 K 的大小是相同的。

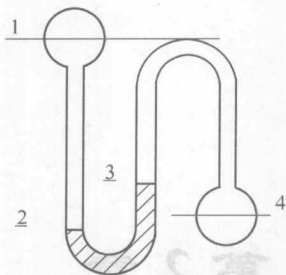


图 1-1 题 1-5 图

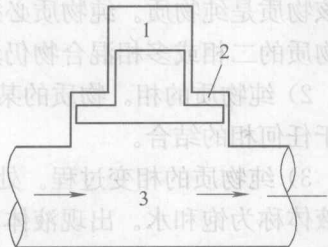
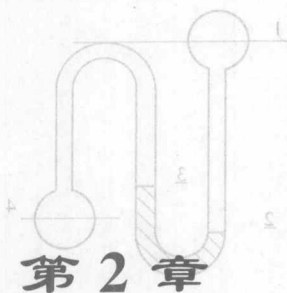


图 1-2 题 1-6 图



第2章

纯物质的性质

2.1 主要概念和计算公式

1) 用来进行能的转换的某物称作物质。整个物质处处具有固定的化学组成, 则该物质是纯物质。纯物质必须是均匀的, 在各处具有相同的化学和物理组成。纯物质的二相或多相混合物仍然是纯物质, 只要所有相的化学组成是相同的。

2) 纯物质的相。物质的某些状态集合可称为该物质的相。任何纯物质可存在于任何相的结合。

3) 纯物质的相变过程。处于没开始蒸发的未饱和水称为过冷水。正要蒸发的液体称为饱和水。出现液体和蒸汽的混合物就是湿蒸汽。所有的液体全部蒸发就成了饱和蒸汽。再使蒸汽温度上升成为过热蒸汽。

4) 在给定压力下纯物质发生相变的温度称为饱和温度 T_{sat} 。同样, 在给定温度下纯物质发生相变的压力称为饱和压力 p_{sat} 。相变过程中吸收或释放的能量称为潜热。

5) 相变过程参数图 T - v 图、 p - v 图和 p - T 图: 一点是临界点, 二线是饱和液体线和饱和蒸汽线, 三区是过冷液体区、湿蒸汽区和过热蒸汽区和五状态是过冷水、饱和水、湿蒸汽、饱和蒸汽和过热蒸汽。纯物质的 p - T 图, 通常称为相图。升华曲线、汽化曲线和熔解曲线将固态、液态和气态分开。这三条线交于三相平衡共存的三相点。汽化曲线的另一端是临界点。

6) 热力学参数表

① 在一些过程的分析中, 特别是动力或制冷系统中, 会经常遇到几个参数的结合, 如 $u + pv$ 。为了简单和方便, 就将这个复合参数定义为新参数焓, 用符号 h 表示。在一些参数表中往往不列出热力学能 u , 而用公式 $u = h - pv$ 来计算。

② 通常用下标 f 表示饱和液体参数, 用 g 表示饱和蒸汽参数, 用 h_{fg} 表示某参数的干饱和蒸汽参数值和饱和液体参数值之差。量 h_{fg} 就称为汽化潜热。当温度或压力上升时, h_{fg} 值减小, 直到临界点变成零。

③ 参数干度 x 定义为蒸汽质量占混合物总质量的比例, $x = m_{\text{vapor}}/m_{\text{total}}$ 。在湿蒸汽分析中, 干度是确定状态的两个独立强度参数之一。令湿蒸汽的比焓为 h , 其干度就为 $x = (h - h_f) / (h_g - h_f)$, 式中分子在参数坐标图上是湿蒸汽状态和饱和液体状态之间的距离, 而分母是饱和蒸汽状态和饱和液体状态之间的距离。

④ 过热蒸汽。在饱和蒸汽线右侧和温度高于临界温度的区域, 物质以过热蒸汽存在。这是单相区域, 通常取温度和压力作为两个独立参数。

⑤ 过冷液体。过冷液体数据较少的原因是过冷液体参数随压力变化很微小。在缺少过冷液体数据时, 作为近似, 可将过冷液体处理成给定温度下的饱和液体。即取 $v \approx v_f$, $u \approx u_f$ 和 $h \approx h_f$ 。在非常高的压力时, 用 $h \approx h_f + v_f(p - p_s)$ 来计算焓可较大地减小 h 的误差。

⑥ 参考状态和参考值。对水, 取 0.01°C 的饱和水为参考状态, 这时的热力学能和熵值被指定为零。对制冷剂 R134a, 取 -40°C 的饱和液体为参考状态, 这时的焓和熵值被指定为零。参考状态的选择会使有些参数出现负值。采用不同的参考状态会使不同的参数表在相同的状态列出不同的参数值。在热力学中所关心的是参数的变化量, 选择的参考状态在计算中不重要, 只要从同一张表或图中取值即可。

7) 任何将物质的压力、温度和比体积联系起来的关系式被称为状态方程。最普遍的是理想气体状态方程, 也称为理想气体定律, 表达为 $pV = mRT$, 对每 kg 工质有 $p\bar{v} = RT$, 对每摩尔工质有 $p\bar{v}_m = R_m T$ 。以上是最常用的理想气体状态方程式。满足这个关系的气体称为理想气体。在低压和高温时, 气体密度降低, 其表现就象理想气体一样。在实践应用范围, 许多熟悉的气体, 诸如空气、氮气、氧气、氢气、氦气、氖气、氦气甚至较重的气体, 诸如二氧化碳, 都能处理成理想气体而可忽略误差(常常小于 1%)。然而, 稠密的气体, 如蒸汽动力装置中的水蒸汽和制冷机中的制冷剂蒸汽, 不应处理成理想气体, 对这些物质应使用参数表。

8) 压缩因子——偏离理想气体性质的度量。对理想气体有 $p\bar{v}/RT = 1$ 。对实际气体取 $p\bar{v}/RT = Z$, 符号 Z 称为压缩因子。 Z 值偏离 1 越远, 则气体偏离理想气体性质越多。

9) 尽管各种气体在给定的温度和压力下性质是不同的, 但在用临界参数进行规范后的温度和压力下, 性质就非常一致。规范后的温度和压力称为对比温度 T_r 和对比压力 p_r , 分别定义为 $T_r = T/T_c$ 和 $p_r = p/p_c$ 。准对比比体积定义为 $\bar{v}_r = \bar{v}_{\text{actual}} / (RT_c/p_c)$ 。