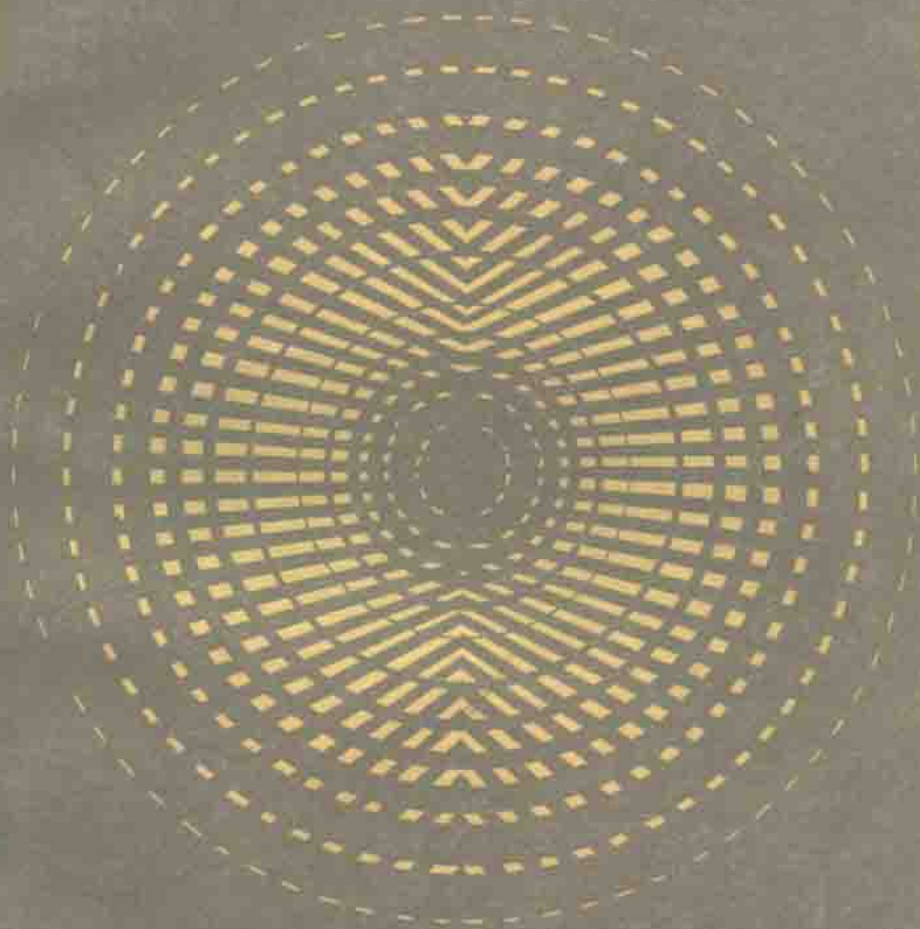


工程热力学



〔日〕小林清志 著
刘 吉 译
水利电力出版社

GONGCHENG

RELIXUE

内 容 提 要

本书论述了工程热力学的基本理论及其在近代科学技术中的应用并以叙述基本概念、基本定律和工质的热力学性质等基本理论为重点,同时考虑了学科的系统性、完整性和内容的一定深度。在论述方式上注意由浅入深,通俗易懂,概念清楚,简单明了。书中各章均有相应的例题和习题,书末附有习题答案。鉴于由公制单位向国际单位制过渡需要一段时间,本书所用的计量制度仍以公制单位为主,以国际单位制为辅。

本书可供高等院校和中等专业学校的动力机械、热能工程、以及供热通风等专业的师生参考,亦可供有关科技人员参考。

工業熱力学

小林清志著

理工学社・东京・1981

工程热力学

[日]小林清志著

刘吉萱译

*

水利电力出版社出版

(北京德胜门外六铺炕)

新华书店北京发行所发行・各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 9.75印张 250千字 1插页

1983年2月第一版 1983年2月北京第一次印刷

印数0001—8620册 定价1.30元

书号15143・5046

译 序

本书是根据日本静岡大学小林清志教授(工学博士)所著《工業熱力学》(1981年理工学社第一版第二次印刷本)一书译出。

小林先生这本书的突出特点是少而精,本书篇幅约为一般工程热力学教科书的一半,论述工程热力学的基本理论及其应用比较系统而简练。在内容方面,该书以叙述基本概念、基本定律及工质的热力学性质等基本理论为重点,同时考虑了学科的系统性、完整性和内容的一定的深度。论述方式上注意由浅入深,通俗易懂,概念清楚,简单明了。所以,本书可供大学和中等专业学校有关专业的师生参考,也可供有关的工程技术人员参考。

关于单位制问题,著者一方面强调了向国际单位制(SI)过渡的趋势,另一方面又充分认识到这种过渡需要时间,不主张在过渡问题上操之过急。所以,书中的计量制度采用了以公制单位为主,以国际单位制为辅的方式。译者认为,这种处理方法对于我国读者是方便的并有一定的参考价值。

本书的译出承太原工学院边铁城教授和汪辅仁副教授给予指导,谨致谢意。译者水平有限,译文中不妥或谬误之处,敬请读者批评指正。

译 者

1982.2

原 序

本书是作为在大学和工业专科学校机械工程系学科中，讲授基础课程工程热力学的教科书和参考书而编写的。因此，本书尽可能多采用一些基础内容，并力求写得简明，以便具有大学一年级水平的读者能充分理解。在叙述上尽量做到循序渐进，每一个结果，均交待清楚是利用了前业已提出过的哪些概念或公式而导出来的。

内容方面，在考虑了机械工程系学科基础课程的特点和授课时数等因素后，确定了各个章节以及内容的深浅。鉴于当前正在逐渐向国际单位制（SI）过渡，因此专设一节予以说明，在附录中给出了单位换算表，书中的主要公式都同时标明以往所用的工程单位与SI单位。

为了真正深入理解书中的内容，读者亲自动手解题是非常重要的。各节中给出适当的例题及其解法可作为自解习题的引导。为便于自学，书末还附有各章习题的答案。

因为本书是教科书，笔者本意力求做到准确无误。但疏漏之处在所难免，不妥之处，如蒙读者指正，则感幸甚。

本书在执笔当中，承蒙允许参阅许多国内外的著作和文献，谨向这些作者深表谢意。笔者承蒙东北大学名誉教授棚沢泰先生在本学科领域的学习道路和研究方法上予以指导，谨衷心感谢。另外，谨向给与本书执笔机会的理工学社的故关口傅氏、吉住久氏以及在出版方面给与种种协助的芹野喜雄氏致以深切的谢意。

著 者

1979年10月

主 要 符 号 表

符 号	名 称	工 程 单 位	SI单位
<i>A</i>	功的热当量	kcal/kgf·m	J/J
<i>B</i>	动 力	kgf·m/s	W
<i>C</i>	1kmol的比热容	kcal/kmol·°C	kJ/kmol·K
	相对速度	m/s	m/s
<i>D</i>	直 径	m	m
<i>E</i>	能 量	kcal, eV	J
<i>F</i>	面 积	m ²	m ²
	自由能	kcal	J
<i>G</i> ●	重量, 质量	kgf	kg
	自由焓	kcal	J
<i>H</i>	焓	kcal	J
	发热量	kcal/kgf	kJ/kg
<i>J</i>	热的功当量	kgf·m/kcal	J/J
<i>K</i>	力	kgf	N
	体积弹性系数	kgf/cm ²	Pa
<i>L</i>	比 功	kgf·m/kgf	kJ/kg
<i>M</i>	分子量		
	力 矩	kgf·m	N·m
<i>P</i>	绝对压力	kgf/cm ² , ata	Pa
<i>Q</i>	热 量	kcal	J
<i>R</i>	气体常数	kgf·m/kgf·K	m/K
<i>S</i>	熵	kcal/°C	kJ/K
<i>T</i>	绝对温度	K	K
<i>U</i>	内 能	kcal	J

● 本书中重量用kgf, 质量用kg——原注

符 号	名 称	工 程 单 位	SI单位
V	容 积	m^3	m^3
W	功	$kgf \cdot m$	J
α	换热系数	$kcal/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$	$W/m^2 \cdot K$
β	定压膨胀比		
	体积膨胀系数	1/K	1/K
γ	重 度	kgf/m^3	
ε	压缩比、黑度(或 辐射率)		
ζ	性能系数		
η	效 率		
θ	角 度		
κ	比热容比 c_p/c_v		
λ	导热系数	$kcal/m \cdot h \cdot ^\circ C$	$W/m \cdot K$
	过量空气系数		
a	音 速	m/s	m/s
	热扩散率	m^2/h	m^2/h
c_p	定压比热容	$kcal/kgf \cdot ^\circ C$	$kJ/kg \cdot K$
c_v	定容比热容	$kcal/kgf \cdot ^\circ C$	$kJ/kg \cdot K$
f	比自由能	$kcal/kgf$	kJ/kg
g	重力加速度	m/s^2	m/s^2
	比自由焓	$kcal/kgf$	kJ/kg
h	比 焓	$kcal/kgf$	kJ/kg
k	传热系数	$kcal/m^2 \cdot h \cdot ^\circ C$	$W/m^2 \cdot K$
l	长 度	m	m
m	原子量	a.m.u	a.m.u
n	多变指数		
q	热流密度	$kcal/m^2 \cdot h$	W/m^2
	每单位重量(质量) 的热量	$kcal/kgf$	kJ/kg
r	半 径	m	m
	气化潜热	$kcal/kgf$	kJ/kg

符 号	名 称	工 程 单 位	SI单位
s	比 焓	kcal/kgf·°C	kJ/kg·K
t	温 度	°C	K
u	比内能	kcal/kgf	kJ/kg
	圆周速度	m/s	m/s
v	比 容	m ³ /kgf	m ³ /kg
w	速 度	m/s	m/s
x	座 标	m	m
	干 度		
y	座 标	m	m
z	座 标	m	m
μ	粘性系数	kgf·s/m ²	Pa·s
ν	运动粘性系数	m ² /s	m ² /s
ρ	密 度	kgf·s ² /m ⁴	kg/m ³
σ	压力比		
	斯蒂芬—玻尔兹曼常数	kcal/m ² ·h·K ⁴	W/m ² ·K ⁴
	核断面积	cm ²	cm ²
τ	时 间	h	s
	剪切应力	kgf/cm ²	Pa
φ ①	相对湿度	%	%
ω	绝对湿度	kgf/kgf'	kg/kg'

① 原书这里用 ϕ 表示相对湿度，但正文中多用 φ 表示，故译文中统一改用 φ 表示相对湿度——译者注

目 录

译序

原序

主要符号表

1	绪论	1
1-1	热力学	1
1-2	热与能	2
1-3	温度与热平衡	4
1-4	温标	5
1-5	温度定点	6
1-6	温度计	7
1-7	绝对单位与工程单位	10
1-8	国际单位	12
1-9	密度、重度、比容单位	15
1-10	压力单位	16
1-11	功、能量、热量单位	18
	习题	18
2	热与功	20
2-1	系统、状态参数、状态变化	20
2-2	功	21
2-3	内能	26
2-4	比热容	27
2-5	焓、显热与潜热	29
2-6	热力学第一定律	30
2-6-1	闭口系统	30
2-6-2	开口系统	33
2-7	能量守恒定律与第一类永动机	36
	习题	36
3	理想气体	38

3-1	理想气体与非理想气体	38
3-2	玻义耳-查理定律	38
3-3	气体常数	40
3-4	理想气体的比热容、内能与焓	42
3-5	理想气体的状态变化过程	46
3-5-1	定容过程	46
3-5-2	定压过程	48
3-5-3	定温过程	50
3-5-4	绝热过程	52
3-5-5	多变过程	56
3-6	理想气体的混合	62
3-6-1	分压力与道尔顿定律	62
3-6-2	不同状态参数气体的混合	65
3-6-3	湿空气	67
	习题	70
4	热力学第二定律与熵	72
4-1	热力发动机与热泵	72
4-2	热力学第二定律	76
4-3	可逆过程与不可逆过程	78
4-4	卡诺循环	79
4-5	热力学温标	83
4-6	可逆循环与不可逆循环、克劳修斯积分	85
4-7	熵	87
4-8	熵增原理	90
4-9	温-熵图	93
4-9-1	定温过程	93
4-9-2	可逆绝热过程	94
4-9-3	卡诺循环	94
4-9-4	一般可逆过程	94
4-9-5	不可逆绝热过程	99
4-10	可用能与不可用能	100
4-11	最大功与烟	101
4-11-1	闭口系统	102

4-11-2	开口系统	105
4-12	化学反应中的自由能与自由焓	107
4-13	热力学第三定律	109
	习题	110
5	非理想气体、蒸气	112
5-1	蒸气的性质	112
5-2	实际气体的状态方程式	116
5-3	饱和液(水)	119
5-4	饱和蒸气	121
5-4-1	干度	121
5-4-2	比容、内能、焓与熵	122
5-4-3	气化潜热	122
5-4-4	克拉贝龙—克劳修斯方程	124
5-5	过热蒸气	125
5-6	水蒸汽的状态方程式与蒸汽线图	127
5-6-1	水蒸汽的状态方程式	127
5-6-2	蒸汽线图	128
	习题	131
6	气体的流动	133
6-1	基本方程式	133
6-1-1	状态方程式	133
6-1-2	连续方程式	133
6-1-3	动量方程式	134
6-1-4	能量方程式	136
6-2	绝热效率与多变效率	137
6-2-1	膨胀流动	137
6-2-2	压缩流动	139
6-3	通过渐缩喷管的流动	141
6-4	临界状态	143
6-5	渐缩-渐放喷管	146
6-6	涡轮机内的流动	150
6-6-1	冲动式涡轮机与反动式涡轮机	150
6-6-2	动叶内的流动	151

习题	155
7 外燃机与内燃机循环	157
7-1 往复式发动机与旋转式发动机	157
7-1-1 斯特林循环与埃里克森循环	159
7-1-2 奥托循环	161
7-1-3 狄塞尔循环	164
7-1-4 萨巴蒂循环	168
7-1-5 实际发动机循环	170
7-2 燃气轮机	172
7-2-1 焦耳-布雷顿循环	173
7-2-2 回热式燃气轮机循环	175
7-2-3 中间冷却、再热、回热式燃气轮机循环	178
7-2-4 实际的燃气轮机循环	179
7-2-5 喷气发动机循环	181
习题	183
8 蒸汽原动机与制冷机循环	185
8-1 蒸汽原动机循环	185
8-1-1 朗肯循环	187
8-1-2 回热循环	189
8-1-3 再热循环	191
8-2 制冷机循环	193
8-2-1 蒸汽压缩式制冷循环	193
8-2-2 制冷剂与盐水	195
8-2-3 吸收式制冷循环	197
8-3 冷气设备	199
8-3-1 湿空气图	201
8-3-2 空气调节	203
习题	206
9 热传递	208
9-1 热传递的方式	208
9-1-1 导热	208
9-1-2 对流换热	209

9-1-3	有相态变化时的换热	209
9-1-4	热辐射	209
9-2	导热	210
9-3	对流换热	212
9-4	无限大平板内的温度分布与热流密度	214
9-5	多层异质平板内的温度分布与热流密度	215
9-6	对流换热中的相似规律	218
9-6-1	强制对流换热	218
9-6-2	自然对流换热	221
9-7	简单形体的对流换热系数	222
9-7-1	竖平面	222
9-7-2	水平平面	223
9-7-3	管内流动	223
9-7-4	水平圆柱	223
9-7-5	球	224
9-8	沸腾换热	224
9-8-1	沸腾的状态	224
9-8-2	沸腾曲线	225
9-9	凝结换热	227
9-10	热辐射	229
9-11	绝对黑体的热辐射	230
9-11-1	浦朗克定律	231
9-11-2	雷莱公式	231
9-11-3	维恩公式	231
9-11-4	维恩位移定律	232
9-11-5	斯蒂芬-玻尔兹曼定律	232
9-12	灰体的热辐射	233
9-12-1	实际物体的热辐射与灰体	233
9-12-2	吸收率与辐射率的关系—基尔霍夫定律	234
	习题	234
10	燃烧	236
10-1	燃烧反应	236

10-2	反应热	238
10-3	发热量	240
10-4	燃烧所必要的理论空气量	243
10-5	绝热燃烧温度	248
10-6	燃烧效率	250
	习题	251
11	核能	253
11-1	原子核反应的能量	253
11-2	核裂变能	255
11-3	核断面积与中子通量	257
11-4	原子反应堆及其出力	259
11-4-1	原子反应堆的出力	259
11-4-2	原子反应堆	260
11-5	核聚变能	262
	习题	263
	习题答案	265
	附录	269
I	单位换算表	269
II	饱和蒸汽表	273
(1)	按压力排列	273
(2)	按温度排列	274
III	未饱和水与过热蒸汽表	276
IV	水蒸汽莫里尔图(书末附图)	
V	氟里昂R-12特性表	281
VI	氟里昂R-12(CCl_2F_2)莫里尔图	283
VII	氨的P-v图	284
	参考文献	285
	索引	286
	著者简历	295

1 绪 论

1-1 热 力 学

热力学 (thermodynamics) ① 是“研究与热能 和功 (即机械能) 相关的现象及与其有关的物质性质的科学”。因此, 热力学是物理学的一个分支。

涉及到**热** (heat) 和**功** (work) 的现象很多。例如, 自然界中常常刮风, 有时形成风暴, 下雨、下雪; 气温变冷变暖, 时而发生干旱, 冬季结冰等等。这些现象都是遵循热力学的规律而发生的。

人们积极利用热功现象而制造出来的机械很多。如汽车发动机、冰箱、喷气发动机、火箭以及火力发电厂设备等等, 可以说这都是应用热力学定律的产物。

热力学是19世纪后半叶完成的学科。这种热力学指出, 在给定热平衡的条件, 并存在两个热平衡状态时, 系统从一个平衡状态向另一个平衡状态转变前后的关系。这种情况下, 不涉及时间变化的描述。从这个意义来说, 热力学为静力学。反之, 系统论述热力状态随时间而变化的热力学称为**不可逆过程** (irreversible process) **热力学**。

另外, 从分子、原子的微观角度来阐述热力学而构成的理论称为**统计热力学** (statistical thermodynamics)。也就是说, 认为物质是由分子、原子构成的, 例如, 气体的各个分子在某一瞬间处于某个位置, 并具有一定的速度和能量。并且, 这些分子在反复碰撞的同时, 其位置、速度和能量也都在激烈的变化着。综合该气体各个分子的力学特性的结果, 可以表明该系统的气体性

① 术语的英文是原著者加的——译者注

质。以这样的研究方法为主来解释热力学问题的，就是统计热力学。

热力学是在三个基本原理的基础上建立起来的科学。即：热力学第一定律是能量守恒原理；热力学第二定律是规定热现象变化过程方向性的定律；热力学第三定律是表明绝对零度不可能达到的定律。

1-2 热 与 能

热是能 (energy) 的一种形式。众所周知，能具有多种形式。例如有：功 (力 $\times$ 距离)、电能、光能、声能、热能以及其它各种形式。而且，各种形式的能量都可以相互转换。一般可以说热能是最低级的能，若不采取特别的措施，其它形式的能最终都会转换成热能形式。

可是，过去人们曾经认为热是一种物质，是一种微妙的弹性流体，把它命名为热素 (caloric)。并根据“热素”的流进流出来解释各种各样的热现象。但是，在18世纪末 (1798年)，曾任慕尼黑兵工厂厂长的汤普森 (Benjamin Thopson, 1753—1814) 即后来的朗弗德 (Runford) 伯爵，一直对于大炮穿孔时产生大量热量的现象持怀疑态度，并为此进行了实验。他把钝刀具压进圆筒的孔中，在几乎只有摩擦作用的条件下旋转，测定了圆筒的温升。并对加热效应进行了定量的研究，结果证明摩擦是加热的原因，明确地否定了热素说。但是，他仍未提出热与功等价的原理。此后不久，即1847年，英国人焦耳 (James Prescott Joule, 1818—1889) 用图 1-1 所示的装置进行了实验。在水量热计 1 内，使叶轮 3 在固定叶片 2 之间旋转而将水搅动。焦耳断定了水温上升是由于内摩擦的结果，并据此确定了热与功的能量是等价的，首次测定了它们之间转换的定量关系。图 1-1 中，叶轮旋转所需要的功量 W ，应等于两个各重 G kgf 的重物下降 lm 所消耗的位能减去相应于重物最终速度 w 的动能，即

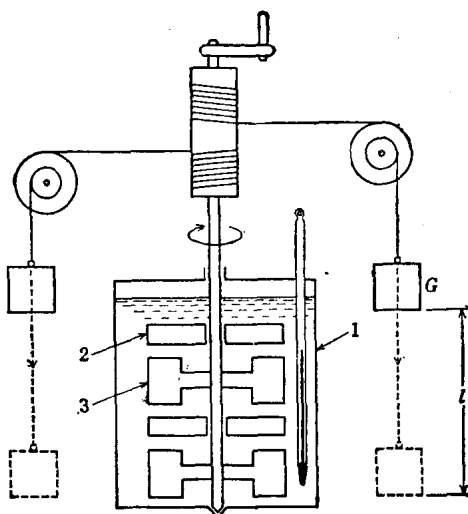


图 1-1 焦耳实验

$$W = 2 \left(Gl - \frac{1}{2} \frac{G}{g} w^2 \right) \quad \text{kgf} \cdot \text{m}, \text{J} \quad (1-1)$$

若假定重 G_w kgf 的水温上升了 Δt ，则摩擦发热量 Q kcal 为

$$Q = G_w c \Delta t \quad (1-2)$$

式中 c 为水的比热容。 W 与 Q 之间总是存在一定的关系，即

$$W = JQ \quad \text{kgf} \cdot \text{m}, \text{J} \text{ 或 } Q = AW \quad \text{kcal}, \text{J} \quad (1-3)$$

式中的比例常数 J 称为热功当量 (mechanical equivalent of heat)， A 称为功热当量 (thermal equivalent of work)。

当前，根据测量得出的 J 、 A 值为

$$\left. \begin{aligned} J &= 427 \text{ kgf} \cdot \text{m} / \text{kcal} = 1 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{J} \\ A &= 1 / 427 \text{ kcal} / \text{kgf} \cdot \text{m} = 1 \text{ J} / \text{N} \cdot \text{m} \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

焦耳的这项研究，为当时整个学术界所瞩目，对以后确立能量守恒定律 (law of energy conservation) 起了重要作用。

上述实验表明热的本质就是能量。如果从微观 (microscopic) 角度来看，热能就是分子动能。对于同一热容量的物体来说，如果分子运动变得激烈，则热能就增大，温度也就随之增高。

这可以说明温度是表示分子平均动能水平高低的物理量。

1-3 温度与热平衡

温度 (temperature) 这个概念, 作为表示物体冷暖程度的量, 在我们日常生活中是经常感受到的。但是, 仅以这种感觉难以做出准确的判断。譬如说, 长时间置于同一房间里的金属和棉花, 其温度应是相同的。此时试与它们接触, 却感到两者凉暖有别。若因此而断定两者的温度不同, 则是错误的。所以, 首先必须正确地定义温度。

热能 (热量) ① 总是从高温物体向低温物体传递。这种现象可以认为是高温物体的运动激烈的分子刺激低温物体运动缓慢的分子, 使后者的运动逐渐活跃起来。这是由于分子动能传递而导致的结果。因此如前所述, 温度是表明物体分子平均动能水平高低的物理量。如果热传递这样进行下去, 最终两者都会达到相等的能量水平, 即达到相同的温度。这时, 热传递停止了, 称这种状态为达到了热平衡 (thermal equilibrium)。现在, 设有如图1-2中所示的彼此热绝缘的两个物体1和2, 它们与物体3良好地

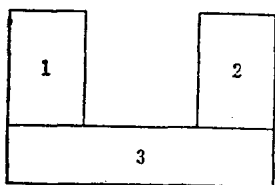


图 1-2 处于热平衡的三个物体

热接触②, 假定1与3、2与3相互之间都处于热平衡状态。根据经验知道, 若将1、2之间的热绝缘取掉, 既使令两者相接触, 也不会发生热传递, 即1与2也处于热平衡状态。即可以说, 分别与第三个系统处于热平衡状态的两个系统, 也必定互

相处于热平衡状态。这个原理称为热力学第零定律 (Zeroth law of thermodynamics)。

- ① 原文如此。但是, 严格地说热能与热量是两个不同的概念。热能是取决于物体状态的量, 而热量则是一个迁移量, 是与热力过程有关的量——译者注
- ② 意即物体1、2分别与物体3紧密接触, 使得它们之间不存在接触热阻——译者注