



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

GONGCHENG RELI XUE

# 工程热力学

严家骏 王永青 编著



中国电力出版社  
<http://jc.cepp.com.cn>

*Thermal Energy & Power*



普通高等教育“十一五”国家级规划教材  
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

前言  
主要内容

GONGCHENG RELI XUE

# 工程热力学

编著 严家驊 王永青  
主审 吴存真 童均耕

林群以... 本书... 第一章... 第二章... 第三章... 第四章... 第五章... 第六章... 第七章... 第八章... 第九章... 第十章... 第十一章... 第十二章... 第十三章... 第十四章... 第十五章... 第十六章... 第十七章... 第十八章... 第十九章... 第二十章... 第二十一章... 第二十二章... 第二十三章... 第二十四章... 第二十五章... 第二十六章... 第二十七章... 第二十八章... 第二十九章... 第三十章... 第三十一章... 第三十二章... 第三十三章... 第三十四章... 第三十五章... 第三十六章... 第三十七章... 第三十八章... 第三十九章... 第四十章... 第四十一章... 第四十二章... 第四十三章... 第四十四章... 第四十五章... 第四十六章... 第四十七章... 第四十八章... 第四十九章... 第五十章... 第五十一章... 第五十二章... 第五十三章... 第五十四章... 第五十五章... 第五十六章... 第五十七章... 第五十八章... 第五十九章... 第六十章... 第六十一章... 第六十二章... 第六十三章... 第六十四章... 第六十五章... 第六十六章... 第六十七章... 第六十八章... 第六十九章... 第七十章... 第七十一章... 第七十二章... 第七十三章... 第七十四章... 第七十五章... 第七十六章... 第七十七章... 第七十八章... 第七十九章... 第八十章... 第八十一章... 第八十二章... 第八十三章... 第八十四章... 第八十五章... 第八十六章... 第八十七章... 第八十八章... 第八十九章... 第九十章... 第九十一章... 第九十二章... 第九十三章... 第九十四章... 第九十五章... 第九十六章... 第九十七章... 第九十八章... 第九十九章... 第一百章...

Thermal Energy & Power

中国电力出版社  
http://jc.cepp.com.cn



## 内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书主要讲述热力学基本概念、基本定律、气体和蒸气的热力性质以及各种热力过程和热力循环，对化学热力学和新能源也作了扼要的介绍。书中附有例题、思考题和习题以及必要的热工图表。全书采用我国法定计量单位，但考虑到当前工程实际，对某些工程单位也作了必要的说明。

本书由浙江大学吴存真教授和上海交通大学童钧耕教授主审通过，可作为电力及热能类各专业的工程热力学教材，亦可供有关工程技术人员参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

工程热力学/严家骝, 王永青编著. —北京: 中国电力出版社, 2007

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978 - 7 - 5083 - 5855 - 0

I. 工... II. ①严... ②王... III. 工程热力学—高等学校—教材 IV. TK123

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 100964 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2007 年 9 月第二版 2007 年 9 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21.75 印张 521 千字 2 插页 1 彩页

印数 0001—3000 册 定价 32.00 元

## 敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 前 言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材，本书的编写参考了国家教育委员会制定的多学时“工程热力学教学基本要求”（1995年修订版），结合作者编著和主审多本工程热力学教材的体会，同时也适当反映科学技术的新进展。

本书除包括工程热力学的传统内容（如热力学基本定律、工质的热力性质、热力过程及热力循环等）外，增加了工程实用过程、新型动力循环、新能源等方面的内容。基本理论部分有一定的深度和广度，力图使学生能较好地掌握热力学基本概念和基本定律的实质，并能运用它们来分析各种热力过程和循环，以便在能源科学方面打下良好的基础。应用部分旨在帮助学生更好地掌握理论知识，同时也是进一步联系工程实际的桥梁。教材内容注意反映热工科技的现状和发展趋势，也考虑到了电力和热能工程专业特点。在例题、习题、思考题的选择及其与教材内容的配合方面注重实用性和启发性。

作者结合本人的长期教学经验和研究成果，在理论体系上作了新的安排。如对状态参数熵采用了新的论证方法，以避免克劳修斯论证方法中的逻辑缺陷。又如，对能量方程、熵方程和焓方程均采用演绎法，在讲清热力学第一、第二定律实质的基础上，直接对代表普遍情况的虚拟热力系（包括开口系和闭口系）导出方程的一般形式，然后再演绎出针对各种情况的具体形式，以便凸显出不同方程形式的来龙去脉和它们之间的本质联系。

本书第一章~第十二章由严家骏教授编写，第十三章（化学热力学基础）和第十四章（能源的合理利用及新能源简介）由王永青副教授编写，全书由严家骏统稿。对书中打\*号的章节，使用者可根据学时数和教学具体情况部分或全部予以删减。由于这部分内容相对独立，无论取或舍，都不会影响全课程的完整性和系统性。

全书采用我国法定计量单位。考虑到当前工程实际，对某些工程单位也作了必要的说明。

本书配套有多媒体电子课件，详情请登录 <http://jc.cepp.com.cn>。

书稿承浙江大学吴存真教授和上海交通大学童钧耕教授主审。作者感谢主审人的仔细审阅和提出的宝贵意见，并希望本书出版后得到读者的批评和指正。

哈尔滨工业大学 严家骏

2007年6月

## 符 号 说 明

### 拉丁字母

$A$  面积; 功的热当量

$C$  常数

$C_m$  摩尔热容

$c$  比热容; 流速

$c_s$  音速

$D$  过热度

$DA$  干空气

$d$  含湿量

$d$  微增量

$E$  总能量

$E_L$  不可逆损失; 焓损

$E_x$  焓

$E_{x,Q}$  热量焓

$E_{x,U}$  工质焓

$e$  比总能量

$e_L$  比焓损

$e_x$  比焓

$F$  力; 自由能

$f$  比自由能

$G$  自由焓

$g$  重力加速度; 比自由焓

$H$  焓

$h$  比焓

$K$  平衡常数

$k$  玻尔兹曼常数

$M$  摩尔质量

$Ma$  马赫数

$m$  质量; (压气机) 级数

$N$  分子数

$n$  物质的量 (摩尔数); 分子浓度; 多变指数

$P$  功率

$p$  压力

$p_b$  大气压力

$Q$  热量; 反应热

$q$  每千克物质的热量

$q_m$  质量流量

$q_v$  体积流量

$R$  摩尔气体常数 (通用气体常数)

$R_g$  气体常数

$r$  汽化潜热

$S$  熵

$s$  比熵

$T$  热力学温度

$t$  摄氏温度

$U$  热力学能

$u$  比热力学能

$V$  体积

$v$  比体积

$W$  功; 膨胀功

$w$  每千克物质的功; 每千克物质的膨胀功; 质量分数

$x$  干度; 摩尔分数

$y$  湿度

$Z$  压缩因子

$z$  高度

### 希腊字母

$\alpha$  抽汽率; 过量空气系数

$\alpha_p$  热膨胀系数

$\beta$  膨胀压力比; 离解度

$\beta_s$  定熵压缩系数

$\beta_T$  定温压缩系数

$\gamma$  热容比; 化学计量系数

$\gamma_v$  弹性系数

$\Delta$  增量

$\delta$  微小量  
 $\epsilon$  压缩比; 制冷系数  
 $\zeta$  供热系数  
 $\eta$  效率  
 $\kappa$  定熵指数  
 $\lambda$  压升比  
 $\mu$  化学势

• 单位时间的

\* 滞止

' 饱和液体

顶标

上角标

下角标

A 三相点  
 a 空气  
 B 锅炉  
 C 卡诺循环; 逆向卡诺循环; 压气机;  
 冷凝器  
 c 临界  
 DA 干空气  
 d 露点  
 f 摩擦; (熵) 流; 生成; 燃料  
 g 表 (压力); (热、熵) 产  
 H 供热  
 i 第  $i$  个;  
 i 内部  
 in 进口 (参数)  
 j 第  $j$  个  
 k 动能  
 L (功) 损  
 m 每摩尔的; 平均  
 max 最大  
 min 最小  
 mix 混合  
 n 多变过程  
 o 循环的 (功、热量)  
 opt 最佳

$\mu_J$  焦耳—汤姆逊系数  
 $\xi$  能量利用率; 热利用系数  
 $\pi$  增压比  
 $\rho$  密度; 预胀比  
 $\tau$  时间; 升温比  
 $\varphi$  相对湿度; 体积分数  
 $\psi$  比相对湿度

— 平均

" 饱和蒸气

0 化学标准状况

out 出口 (参数)

P 泵

Pr 生成物

p 位能

$p$  定压

R 冷库

Re 反应物

r 相对; 回热; 对比; 余 (函数)

s 定熵

s 饱和

sh 轴 (功)

std 标准状况

T 定温

T 透平 (燃气轮机; 蒸汽轮机; 膨胀机)

t 热 (效率); 技术 (功)

th 喉部

tot 总的

V 定容

v 真空 (度); 水蒸气

w 水; 湿球 (温度)

x 湿蒸汽

0 理想气体状态

1 初态; 进口

2 终态; 出口

# 目 录

前言	1
符号说明	
绪论	1
1. 热能的利用	1
2. 热力学发展简史	1
3. 工程热力学的研究对象和研究方法	2
4. 工程热力学常用的计量单位	3
第一章 基本概念	4
1-1 热力系	4
1-2 状态和状态参数	5
1-3 平衡状态	10
1-4 状态方程和状态参数坐标图	11
1-5 过程和循环	12
1-6 功和热量	13
思考题	13
习题	14
第二章 热力学第一定律	15
2-1 热力学第一定律的实质及表达式	15
2-2 功和热量的计算及其在压容图和温熵图中的表示	19
思考题	23
习题	24
第三章 气体的热力性质和热力过程	26
3-1 实际气体和理想气体	26
3-2 理想气体状态方程和摩尔气体常数	26
3-3 理想混合气体	28
3-4 气体的热力性质	30
3-5 定容过程、定压过程、定温过程和定熵过程	37
3-6 多变过程	47
3-7 无功过程和绝热过程	52
3-8 绝热自由膨胀过程和绝热节流过程	57
3-9 定容混合过程和流动混合过程	59
3-10 充气过程和放气过程	65
思考题	68
习题	68

<b>第四章 热力学第二定律</b> .....	72
4-1 热力学第二定律的任务 .....	72
4-2 可逆过程和不可逆过程 .....	73
4-3 状态参数熵 .....	74
4-4 热力学第二定律的表达式——熵方程 .....	76
4-5 热力学第二定律各种表述的等效性 .....	81
4-6 卡诺定理和卡诺循环 .....	82
4-7 克劳修斯积分式 .....	84
4-8 热量的可用能及其不可逆损失 .....	86
4-9 流动工质的焓和焓损 .....	88
4-10 工质的焓和焓损 .....	90
4-11 关于焓损的讨论及焓方程 .....	92
4-12 热力学第二定律对工程实践的指导意义 .....	96
思考题 .....	97
习题 .....	97
<b>第五章 气体的流动和压缩</b> .....	100
5-1 一元稳定流动的基本方程 .....	100
5-2 喷管中气流参数变化和喷管截面变化的关系 .....	102
5-3 气体流经喷管的流速和流量 .....	104
5-4 喷管背压变化时的流动状况 .....	110
*5-5 喷管中有摩擦的绝热流动过程 .....	111
5-6 活塞式压气机的压气过程 .....	116
5-7 叶轮式压气机的压气过程 .....	121
5-8 引射器的工作过程 .....	123
思考题 .....	125
习题 .....	126
<b>第六章 气体动力循环</b> .....	128
6-1 概说 .....	128
6-2 活塞式内燃机的混合加热循环 .....	128
6-3 活塞式内燃机的定容加热循环和定压加热循环 .....	132
6-4 活塞式内燃机各种循环的比较 .....	133
6-5 燃气轮机装置的循环 .....	135
6-6 喷气发动机循环 .....	140
6-7 活塞式热气发动机循环 .....	141
思考题 .....	142
习题 .....	142
<b>第七章 热力学一般关系式</b> .....	144
7-1 二元连续函数的数学特性 .....	144
7-2 热系数 .....	145



7-3	自由能、自由焓、麦克斯韦关系式	148
7-4	熵、热力学能和焓的一般关系式	149
7-5	比热容和焦耳—汤姆逊系数的一般关系式	153
	思考题	155
	习题	155
<b>第八章 实际气体的热力性质</b>		157
8-1	纯物质的热力学面	157
8-2	纯物质的气—液相变和克劳修斯—克拉贝隆方程	159
8-3	实际气体的状态方程	160
8-4	实际气体的比热容、焦—汤系数、焓和熵	165
8-5	对比状态方程和对应态原理	169
8-6	通用的压缩因子图、对比余焓图和对比余熵图	171
	思考题	177
	习题	178
<b>第九章 水蒸气性质和蒸汽动力循环</b>		179
9-1	水蒸气的饱和状态	179
9-2	水蒸气的产生过程	181
9-3	水蒸气图表	184
9-4	水蒸气的热力过程	186
9-5	基本的蒸汽动力循环——朗肯循环	188
9-6	蒸汽参数对朗肯循环热效率的影响	190
9-7	蒸汽再热循环	191
9-8	抽汽回热循环	192
9-9	热电联产循环	194
9-10	实际蒸汽动力循环的能量分析与焓分析	195
	思考题	200
	习题	200
<b>第十章 湿空气性质和湿空气过程</b>		202
10-1	湿空气和干空气	202
10-2	绝对湿度和相对湿度	203
10-3	露点温度和湿球温度	204
10-4	含湿量、焓和焓湿图	205
*10-5	比相对湿度和通用焓湿图	207
10-6	绝热饱和温度	211
10-7	湿空气过程——焓湿图的应用	211
	思考题	217
	习题	218
<b>第十一章 双工质动力循环</b>		219
11-1	概说	219

11-2	工质性质对循环热效率的影响	220
11-3	双蒸气循环	221
11-4	燃气—蒸汽联合循环	222
* 11-5	注蒸汽燃气轮机装置循环	225
* 11-6	压气机喷水燃气轮机装置循环	229
* 11-7	湿空气透平装置循环	234
	思考题	239
	习题	239
<b>第十二章</b>	<b>制冷循环</b>	<b>240</b>
12-1	逆向卡诺循环	240
12-2	空气压缩制冷循环	241
12-3	蒸气压缩制冷循环	245
12-4	制冷剂的热力性质	247
12-5	蒸汽引射制冷循环和吸收式制冷循环	248
	思考题	250
	习题	251
<b>第十三章</b>	<b>化学热力学基础</b>	<b>252</b>
13-1	概说	252
13-2	热力学第一定律在化学反应系统中的应用	253
13-3	化学反应过程的最大有用功	257
13-4	化学反应方向及化学平衡	260
13-5	热力学第一定律和第二定律在燃烧过程中的应用	267
13-6	热力学第三定律	273
	思考题	273
	习题	274
<b>* 第十四章</b>	<b>能源的合理利用及新能源简介</b>	<b>275</b>
14-1	概说	275
14-2	能源的合理利用	276
14-3	新能源	279
	习题答案	288
	索引	294
	主要参考文献	300
	附录	301
附表 1	常用气体的某些基本热力性质	301
附表 2	某些常用气体在理想气体状态下的比定压热容与温度的关系式	301
附表 3	某些常用气体在理想气体状态下的平均比定压热容	302
附表 4	某些常用气体在理想气体状态下的平均比定容热容	302
附表 5	空气在理想气体状态下的热力性质表	303
附表 6	饱和水与饱和水蒸气的热力性质表 (按温度排列)	306

附表 7	饱和水与饱和水蒸气的热力性质表 (按压力排列)	308
附表 8	未饱和水与过热水蒸气热力性质表	310
附表 9	一些物质的标准生成焓 $H_f^\circ$ 、标准生成自由焓 $G_f^\circ$ 和标准状况下的绝对熵 $S_m^\circ$	328
附表 10	一些理想气体的焓 $H_m$ 及 1atm 下的绝对熵 $S_m(T, p^\circ)$	329
附表 11	化学平衡常数的自然对数值 ( $\ln K_p$ )	331
附表 12	各种压力单位的换算关系	331
附表 13	各种能量 (功、热量、能量) 单位的换算关系	332
附表 14	各种功率单位的换算关系	332
附图 1	水蒸气焓熵图	
附图 2	氨 ( $\text{NH}_3$ ) 的压焓图	
附图 3	R134a 的压焓图	
附图 4	湿空气的焓湿图	
附图 5	湿空气通用焓湿图	

注：有 \* 号的各节，可视具体的教学情况酌予删减。

## 绪 论

### 1. 热能的利用

现代化的国民经济，要求充足而经济的动力供应。自然界中可供大量产生动力的主要能源有风能、水能、太阳能、地热能、燃料化学能、原子能等。目前利用得最多的仍然是矿物燃料（石油、煤、天然气等）的化学能。但是，日益减少的地下燃料资源势必不能满足飞速发展的生产力对动力的需求。因此，目前世界各国对原子能、太阳能、地热能，乃至海洋能、生物质能等各种新能源正大力开展多方面的研究工作，以期找到新的能源出路。

在上述各种能源中，除风能（空气的动能）和水能（水的位能）可以向人们直接提供机械能以外，其他各种能源往往只能直接或间接地（通过燃烧、核反应）提供热能。人们可以直接利用热能为生产和生活服务，例如用于冶炼、分馏、加热、蒸煮、烘干、采暖等方面，但更大量的还是通过热机（如蒸汽轮机、内燃机、燃气轮机、喷气发动机等）使这些热能部分地（只能是部分地）转变为机械能，或进一步转变为电能，以供生产和生活中的大量需求。因此，对热能性质及其转换规律的研究，显然有着十分重要的意义。

### 2. 热力学发展简史

热现象是人们最常接触到的自然现象之一。人类最早利用热现象为自己服务，虽可追溯到钻木取火，但研究热现象并使之成为一门科学，则直到19世纪中叶才得以完成。

18世纪中叶瓦特发明蒸汽机，实现了大规模的热能到机械能的转换，推动了欧洲的工业革命，也激发了人们研究热现象的兴趣。但是，直到18世纪末，一种错误的热素说仍广为流传。热素说认为：热是一种没有质量的、不生不灭的物质，称作“热素”，它可以透入一切物体，物体的热和冷取决于所含热素的多少。由于热素说无法解释诸如摩擦生热等现象，人们开始认为热应该是和物质运动相关联的。伦福德于1798年首先指出，制造大炮时炮筒和切屑都产生高温，但并没有热素流入，因此热必定与切削时的运动有关。

1842年迈耶首先提出热是一种能量形式，它可以和机械能相互转换，但总的能量保持不变。到1850年，焦耳以多种实验方法测定了热和功的当量关系。至此，关于能量守恒与转换的原理，即热力学第一定律，终于取代热素说而得以确认。

关于热力学第二定律，卡诺于1824年在研究提高蒸汽机效率的基础上最先指出，热机必须在不同温度的热源之间工作（凡有温差之处，就能产生动力），而热机的工作效率取决于高温热源和低温热源的温度，就象水轮机的工作效率取决于高、低水位的落差一样。卡诺的研究涉及热能转变为机械能的条件和效率（即热力学第二定律的内容），但卡诺所处的时代，热素说还占统治地位，卡诺也不例外，他的结论虽然是正确的，但他对热能本质的理解却是错误的，他只是猜到了热力学第二定律。

热力学第二定律的确立应归功于克劳修斯。他于1850年提出了热力学第二定律的如下表述：“不可能将热量由低温物体传送到高温物体而不引起其他变化”，并以这一表述为前提正确论证了卡诺定理。

热力学两个基本定律的建立构成了热力学理论的框架，指导了热机的发展和不断完善，并被推广应用于其他科技领域。

此后，能斯特于 1912 年在研究低温现象的基础上提出了绝对零度不可能达到的原理，也被称作热力学第三定律。基南于 1942 年提出可用能的概念，并在热能工程中得到广泛应用和发展。

如上所述，热力学理论在生产实践和科学实验中建立并充实，反过来，它又推动了生产和科学技术的发展。这正是一切科学理论和科技、生产互动发展的普遍规律。

### 3. 工程热力学的研究对象和研究方法

热力学是研究能量（特别是热能）性质及其转换规律的科学。

热力学是在研究热机效率的基础上，于 19 世纪中叶由于建立了热力学第一定律和第二定律而形成的。在初期，它所涉及的主要是热能和机械能的转换。以后，由于热力学在化工、冶金、制冷、空调以及低温、超导、反应堆以至气象、生物等各个方面获得了越来越广泛的应用，因而它的研究范围已扩大到了化学、物理化学、电、磁、辐射等现象。

工程热力学着重研究热能和机械能的转换规律。从理论上阐明提高热机效率（使热能以更大的百分率转变为机械能）的途径仍然是工程热力学的一项主要任务。

热能转变为机械能必需借助一套设备和某种载能物质。这种设备就是通常所说的热机，而载能物质便是工质。热机对外做功时，要求工质有良好的膨胀性，这样才能方便地做功；而要热机不断地做功，则必须不断地将新鲜工质引入气缸，并将工作完了的工质排出，这就要求工质有良好的流动性，同时具备良好膨胀性和流动性的，不是固体，也不是液体，而是气体（如空气、水蒸气等）。因此，热机中的工质一般都是气态物质。但在应用蒸气作为工质时也会涉及到液体。

因此，工程热力学的主要内容包括下列三部分：

(1) 介绍构成工程热力学理论基础的两个基本定律——热力学第一定律和热力学第二定律。

(2) 介绍常用工质的热力学性质。

(3) 根据热力学基本定律，结合工质的热力学性质，分析计算实现热能和机械能相互转换的各种热力过程和热力循环，阐明提高转换效率的正确途径。

工程热力学的研究方法也就是热力学的宏观研究方法。这种宏观研究方法的特点是：根据热力学的两个基本定律，运用严密的逻辑推理，对物体的宏观性质和宏观现象进行分析研究，而不涉及物质的微观结构和微观粒子的运动情况。所以，热力学是热学的宏观理论。与此对照，热学的微观理论是统计物理学。统计物理学从物质的微观结构出发，依据微观粒子的力学规律，应用概率理论和统计平均的方法，研究大量微观粒子（它们构成宏观物体）的运动表现出来的宏观性质。

热力学和统计物理学在对热现象的研究上相辅相成，热力学经常利用从微观理论得到的知识（例如对工质热物理性质的研究成果，以及对一些热现象和经验定律的微观实质的解释）。由于热力学研究方法所依据的两个基本定律不需要任何假设，因而能给出普遍而可靠的结果，可以用来检验微观理论的正确性。但是，由于热力学不涉及物质的微观结构，因而用热力学方法无法获得物质的具体性质。统计物理学则由于深入热现象的本质，可使热力学理论获得微观机理上的说明，并可揭示宏观性质的微观决定因素，从而在理论上起到指导作用。统计物理学还能通过计算求得物质的性质，但推导比较复杂，而且由于不可避免地要对物质结构模型作一些简化或假设，因此所得结果和实际情况往往有差异。

像其他学科一样,在工程热力学中也普遍采用抽象、概括、理想化和简化的方法。这种略去细节、抽出共性、抓主要矛盾的处理问题的方法,在进行理论分析时特别有用。这种科学的抽象,不但不脱离实际,而且总是更深刻地反映了事物的本质。

#### 4. 工程热力学常用的计量单位

在工程热力学中涉及到比较多的物理量,这就有一个对这些物理量采用什么单位的问题。近年来,世界各国逐步采用统一的国际单位制(简称SI),以避免由于单位制不同而引起的混乱现象和烦琐的换算。我国也以国际单位制为基础制定了“中华人民共和国法定计量单位”,于1984年颁布执行。因此,本教材采用我国法定计量单位。考虑到目前的实际情况,对工程单位制也作了适当的介绍。

国家法定计量单位中给出了长度、质量、时间、电流、热力学温度、物质的量和光强度共七个基本单位。工程热力学中各常用物理量牵涉到的基本单位有五个,即长度、质量、时间、热力学温度和物质的量。

国家法定计量单位比较科学合理,各导出单位和基本单位的关系式中的系数都等于1,因此换算简单。表1和表2分别给出了工程热力学中常用的国家法定计量单位的基本单位和导出单位。

表1 国家法定计量单位的基本单位(部分)

量	单位名称	单位符号	量	单位名称	单位符号
长度	米	m	热力学温度	开[尔文]**	K
质量	千克(公斤)*	kg	物质的量	摩[尔]	mol
时间	秒	s			

\* 圆括号中的名称与它前面的名称是同义词。

\*\* 去掉方括号时为单位名称的全称;去掉方括号中的字时,即成为单位名称的简称,下同。

表2 国家法定计量单位的导出单位(部分)

量	单位名称	单位符号	其他SI单位的表示式
力	牛[顿]	N	$\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$
功、热量、能[量]	焦[耳]	J	$\text{N} \cdot \text{m}$
压力	帕[斯卡]	Pa	$\text{N}/\text{m}^2$
功率	瓦[特]	W	$\text{J}/\text{s}$
比热力学能、比焓	焦[耳]每千克		$\text{J}/\text{kg}$
比热容、比熵	焦[耳]每千克开[尔文]		$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$

在工程单位制的基本单位中,长度用米(m);时间用秒或小时(s或h);力用公斤力(kgf);质量则是导出单位。根据牛顿第二定律( $m = F/a$ ),质量单位为 $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$ 。

工程单位制中的公斤力(kgf)和国际单位制中的牛顿(N)之间的关系如下( $F = ma$ ):

$$1\text{kgf} = 1\text{kg} \times 9.80665\text{m}/\text{s}^2 = 9.80665\text{N}$$

9.80665 $\text{m}/\text{s}^2$ 是标准重力加速度。所以,在标准重力场中,重量为1kgf的物质,其质量正好是1kg。

关于压力、能量和功率的各种单位之间的换算关系可查阅本书附表12、附表13和附表14。

## 第一章 基本概念

本章介绍的热力学、状态参数、状态方程、过程、功和热量等都是分析能量传递和转换过程时必定会涉及的最基本的概念，务求掌握这些概念的实质，并在以后各章的学习中进一步加深理解并灵活运用。

### 1-1 热力学系

作任何分析研究，首先必需明确研究对象。热力学系就是具体指定的热力学研究对象。与热力学系有相互作用的周围物体统称为外界。为了避免把热力学系和外界混淆起来，设想有界面将它们分开。这界面可以是真实的（如图 1-1 和图 1-2 中取气体工质为热力学系时，气缸内壁和活塞内壁可以认为是真实存在的界面），也可以是假想的（如图 1-2 中进口截面和出口截面便是假想的界面）；可以是固定的，也可以是变动的（如图 1-1 中当活塞移动时界面发生变化）。不管界面是真实的还是假想的，是固定的还是变动的，它一旦被确定了，对界面内的热力学系和界面外的外界就要做到泾渭分明、内外有别，而不能随意混淆，以免在分析问题造成混乱和错误。

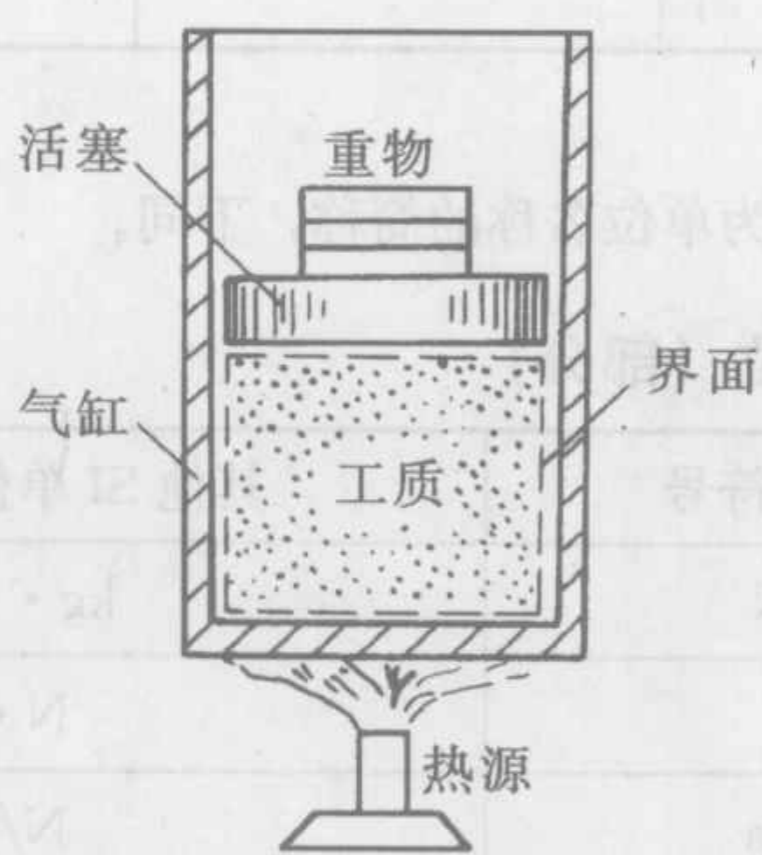


图 1-1

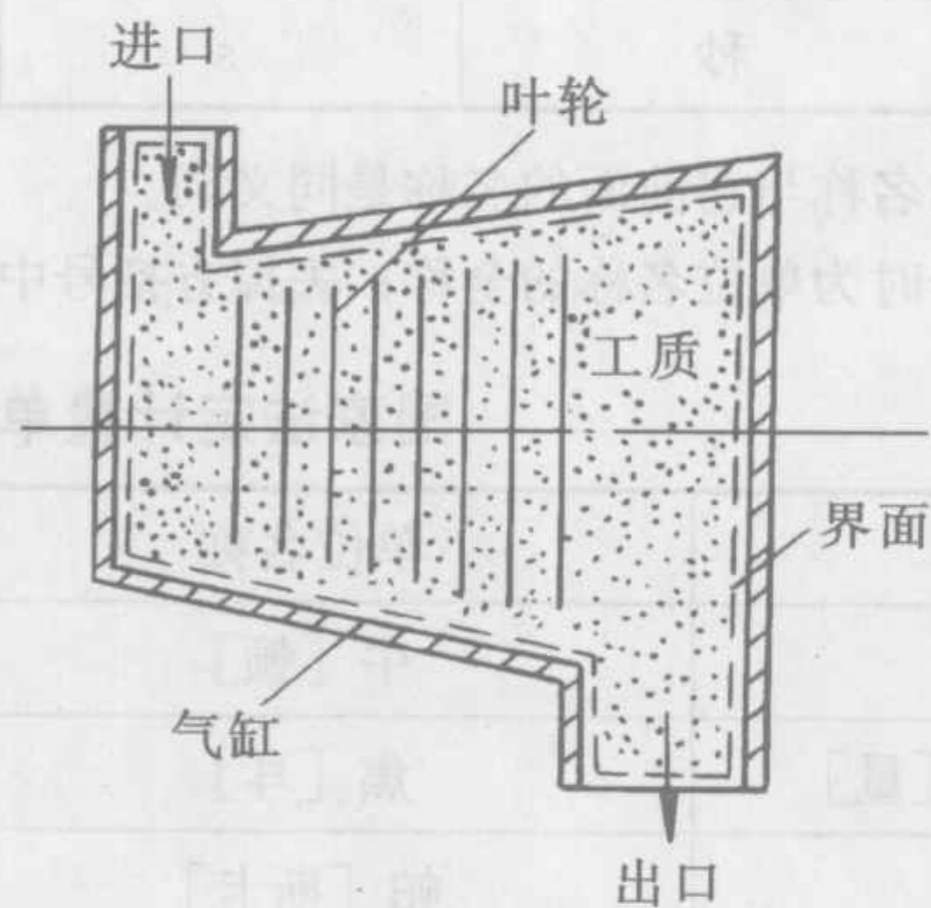


图 1-2

热力学系的选取主要决定于所提出的研究任务（即所要解决的问题），也和所采用的分析方法有关。例如，如果要计算某蒸汽轮机的功率，那么将蒸汽轮机或流过蒸汽轮机的蒸汽作为热力学系就可以了；如果要研究如何提高火力发电厂的热效率，那就应该将与之相关的蒸汽锅炉、蒸汽轮机、水泵、凝汽器、回热加热器等都包括进热力学系才能进行分析；如果要研究该电厂对环境的污染，那么整个电厂，包括它的煤场、水源以及周围的大气都应该包括在热力学系中。所以说热力学系的选取主要决定于所需解决的问题。但是有时，对同一个问题，由于采用的分析方法不同，热力学系的选取也会有所不同，例如，若要分析图 1-1 中气缸内气体工质吸热膨胀后的状态变化，既可以取封闭在气缸内的全部气体为热力学系，这时气缸和活塞内壁构成的真实界面是变动的；也可以取该图中虚线所示的固定空间内的气体（即包围在气缸内壁和上方那个假想界面内的气体）为热力学系，那么这个界面是固定的，但热力学系的质量

随着气体的膨胀而减少，因膨胀而“溢出”界面的那部分气体应视为这固定空间热力系的外界。

如上所述，热力系可以是一群物体、一个物体或物体的某一部分。它可以很大，也可以很小，但是不能小到只包含少量的分子，以致不能遵守统计平均规律，因为热力学理论的正确性有赖于分子运动的统计平均规律，而这一规律只存在于大量现象。

用界面将热力系和外界分开，并不是要断绝热力系和外界的联系，而是要控制好这个界面，对热力系和外界进行的任何形式的联系都做到心中有数。在作热力学分析时，既要考虑热力系内部的变化，也要考虑热力系通过界面和外界发生的能量交换和物质交换。对外界的变化，一般不予考虑。

根据热力系内部情况的不同，热力系可以分为：

单元系——由单一的化学成分组成；

多元系——由多种化学成分组成；

单相系——由单一的相（如气相或液相）组成；

复相系——由多种相（如气—液两相或气—液—固三相等）组成；

均匀系——各部分性质均匀一致；

非均匀系——各部分性质不均匀。

根据热力系和外界相互作用情况的不同，热力系又可以分为：

闭口系——和外界无物质交换；

开口系——和外界有物质交换；

绝热系——和外界无热量交换；

孤立系——和外界无任何相互作用。

例如，取图 1-1 所示界面内的气体工质（比如说氮气）为热力系，那么它是单元、单相、均匀的闭口系；如果取该图虚线所示的固定空间中的气体为热力系，那它就是单元、单相、均匀的开口系。如果取图 1-2 中所示界面内的气体为热力系并忽略它和外界的热量交换，那么它是单元、单相、非均匀的绝热开口系。

## 1-2 状态和状态参数

要研究热力系，必须知道热力系所处状况及其变化，并通过一些物理参数来表达，因此有必要对状态参数作一简单介绍。

状态是热力系在指定瞬间所呈现的全部宏观性质的总称。从各个不同方面描写这种宏观状态的物理量便是各个状态参数。

在工程热力学中常用的状态参数有 6 个，即压力、比体积、温度、热力学能、焓和熵。其中压力、比体积和温度可以直接测量，也比较直观，称为基本状态参数。下面逐一介绍这 6 个状态参数。

### 1. 压力

压力是指单位面积上承受的垂直作用力：

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-1)$$



式中  $p$ ——压力；

$F$ ——垂直作用力；

$A$ ——面积。

气体的压力是组成气体的大量分子在紊乱的热运动中对容器壁频繁碰撞的结果。根据式(1-1)计算的压力是气体的真正压力，称为绝对压力。由于测量压力的仪表通常总是处于大气环境中，因此不能直接测得绝对压力，而只能测出绝对压力和当时当地的大气压力的差值（参看图1-3，该图表示了风机进风和排风的压力状况）。当气体的绝对压力高于大气压力时（图中出口处），压力计所指示的是绝对压力超出大气压力的部分，称为表压力或表压（ $p_g$ ）。

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

式中  $p_b$ ——大气压力，可用气压计测定。

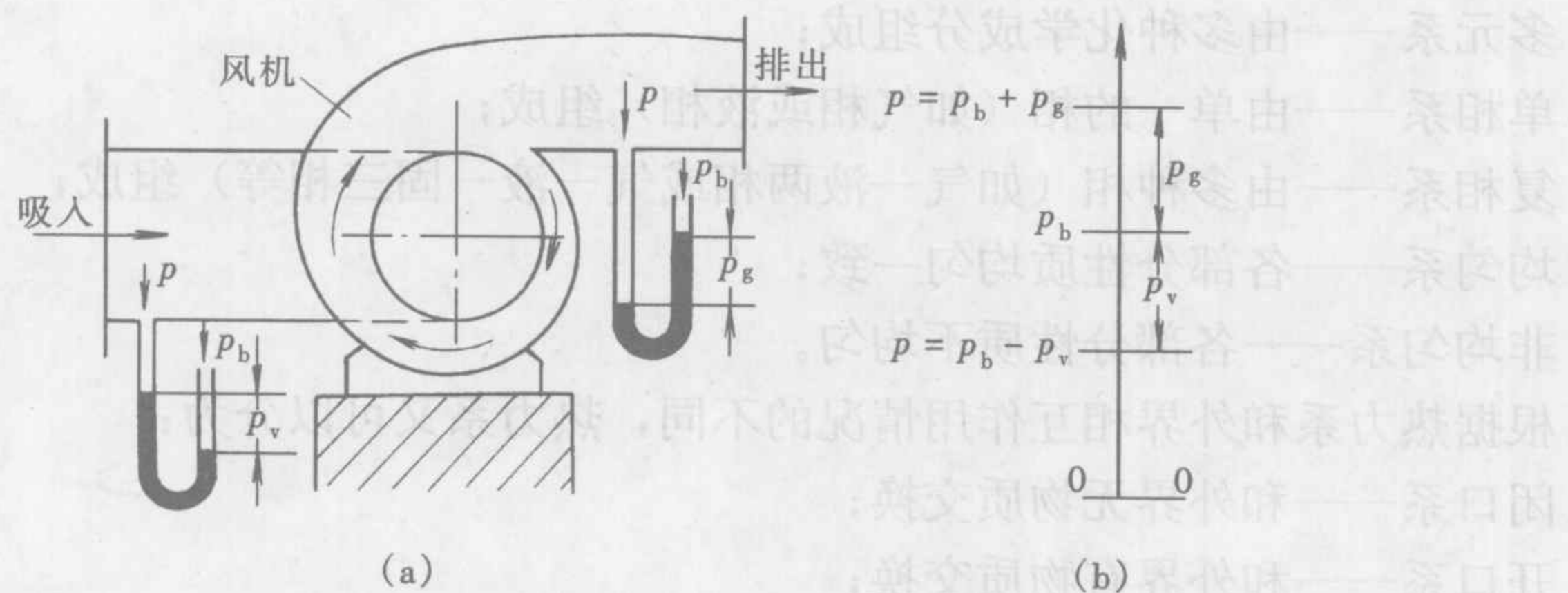


图 1-3

当气体的绝对压力低于大气压力时（图中入口处），真空计所指示的是绝对压力低于大气压力的部分，称为真空度（ $p_v$ ）。

$$p_v = p_b - p \quad (1-3)$$

因此，如果需要知道气体的绝对压力，仅仅知道压力计或真空计的读数是不够的，还必须知道当时当地气压计的读数，然后通过下列关系式将绝对压力计算出来：

$$p = p_b + p_g \quad (1-4)$$

$$p = p_b - p_v \quad (1-5)$$

显然，如果大气压力发生变化，即使气体的绝对压力保持不变，压力计和真空计的读数也是会发生变化的。

用U形管压力计（或真空计）通过液柱高度差测定表压力（或真空度）时，其换算关系如下：

$$p_g(\text{或 } p_v) = \rho g \Delta z \quad (1-6)$$

式中  $\rho$ ——液体的密度；

$g$ ——重力加速度；

$\Delta z$ ——液柱高度差。

国际单位制中压力的单位是 Pa（帕），并有

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

由于“Pa（帕）”这个单位过小，工程中也常用 MPa 作为压力单位。

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