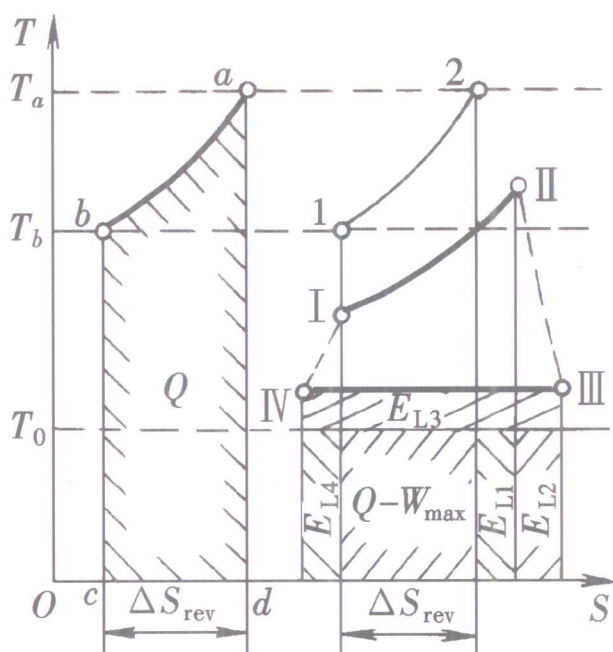


普通高等教育能源动力类规划教材

# 工程热力学

杨玉顺 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



普通高等教育能源动力类规划教材

# 工 程 热 力 学

主 编 杨玉顺  
参 编 张昊春 贺志宏  
主 审 何雅玲



机 械 工 业 出 版 社

全书分为四个部分：热力学基本概念和基本定律、工质的热力性质、热力过程及热力循环、化学热力学基础和能量直接转换及可再生能源。本书注重基本理论的阐述，注重理论与工程实践的联系，注重结合课程内容对学生进行热力学分析方法和思维能力的训练。本书各章附有例题、思考题和习题。附录有较详细的热工图表。此外，各章附有知识结构框图，便于学生掌握各章知识要点及其相互联系。多数章后还附有热力学史方面的选读材料，旨在使学生了解重要热力学概念、定律的来龙去脉及创立过程，从中受到科学家创新精神的启迪和科学素养的熏陶。

本书可作为热能动力、热力发动机、飞行器动力、制冷与低温技术、工程热物理、核工程及能源工程等专业的工程热力学教材，也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/杨玉顺主编. —北京：机械工业出版社，2009.4

普通高等教育能源动力类规划教材

ISBN 978-7-111-26582-5

I. 工… II. 杨… 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（2009）第 037294 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：蔡开颖 版式设计：霍永明 责任校对：陈延翔

封面设计：赵颖喆 责任印制：乔 宇

北京四季青印刷厂印刷（三河市杨庄镇环伟装订厂装订）

2009 年 6 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·23.5 印张·1 插页·579 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-26582-5

定价：41.00 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) 88379713

封面无防伪标均为盗版

## 《工程热力学》信息反馈表

尊敬的老师：

您好！感谢您多年来对机械工业出版社的支持和厚爱！为了进一步提高我社教材的出版质量，更好地为我国高等教育发展服务，欢迎您对我社的教材多提宝贵意见和建议。如果您在教学中选用了本书，欢迎您对本书提出修改建议和意见。

### 一、基本信息

姓名：\_\_\_\_\_ 性别：\_\_\_\_\_ 职称：\_\_\_\_\_ 职务：\_\_\_\_\_

邮编：\_\_\_\_\_ 地址：\_\_\_\_\_

任教课程：\_\_\_\_\_ 电话：\_\_\_\_\_—\_\_\_\_\_ (H) \_\_\_\_\_ (O)

电子邮件：\_\_\_\_\_ 手机：\_\_\_\_\_

### 二、您对本书的意见和建议

(欢迎您指出本书的疏误之处)

### 三、对我们的其他意见和建议

请与我们联系：

100037 北京百万庄大街 22 号·机械工业出版社·高等教育分社 蔡编辑 收

Tel: 010—8837 9713 (O), 6899 7455 (Fax)

E-mail: cky@mail.machineinfo.gov.cn

# 前 言

本书是根据教育部制定的多学时《工程热力学课程教学基本要求》(2004年修订版),吸收了国内外同类教材的优点,结合编者多年教学经验和校内试用多年的《工程热力学》讲义的基础上编写而成的。

全书15章既包括了工程热力学的传统内容,也适当反映科学技术的新进展。为了适应工程、能源、环保等需要,增加了工程实用过程、新型动力循环、可再生能源、能量直接转换等方面的内容。本书编排不同于国内同类书的体系,全书分为四个部分:热力学基本概念和基本定律、工质的热力性质、热力过程及热力循环、化学热力学基础和能量直接转换及可再生能源。每部分内容既相对独立自成体系,又相互衔接形成统一的整体。

本书结合了作者的长期教学经验和心得,在某些热力学基本概念和定律的阐述上作了大胆尝试:如在对外界的定义中强调了外界是指热力系之外的环境中与热力系有直接作用的那些物体,而并非热力系之外的环境都是外界;如对界面真假之分、动静之别、能质可传三个特性的概括;如在比热容的定义中强调了没有化学变化和相变的前提;如在对自发过程定义中强调了是系统内部的不平衡势差推动了自发过程的进行,而绝非没有任何驱动力自发过程就可以自动进行;如对热力学第二定律实质是熵产以及熵产与实际过程的不可逆性、单向性、方向性关系的论述;如对耗散效应本质的探究;等等。相信以上内容对于学生加深热力学基础知识的理解无不裨益。

各章都附有知识结构框图,对每章重要的知识点加以梳理,帮助学生将零散孤立的内容编织成科学合理的知识网络,便于学生掌握每章知识要点及其相互联系,有利于学生学以致用。

多数章后还附有热力学史方面的选读材料,这些背景知识既可供教师教学参考,又便于学生学习时阅读。编选的宗旨在于使学生了解重要的热力学概念、基本定律、定理的产生背景、创立过程及来龙去脉,使学生从中受到科学家创新精神的启迪和科学素养的熏陶。

本书绪论、第1~6章、第8章、第11~13章由杨玉顺教授编写,第9章、第10章、第15章由张昊春编写,第7章、第14章由贺志宏副教授编写,全书由杨玉顺统稿。

全书采用我国法定计量单位。本书配套有多媒体电子课件,包括PPT电子教案和习题参考答案,免费提供给使用本教材授课的教师,联系方式见书末的信息反馈表。

本书由西安交通大学何雅玲教授担任主审,何教授对本书进行了仔细审阅并提出了宝贵意见,在此表示衷心感谢。由于水平所限,书中难免有不妥之处,敬请读者批评和指正。

哈尔滨工业大学 杨玉顺

## 常用符号表

### 拉丁字母

|           |                |
|-----------|----------------|
| $A$       | 面积             |
| $C$       | 常数             |
| $C_B$     | 分子浓度           |
| $C_m$     | 摩尔热容           |
| $c$       | 比热容; 流速        |
| $c_s$     | 声速             |
| $D$       | 过热度            |
| $DA$      | 干空气            |
| $d$       | 含湿量            |
| $E$       | 总能量; 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; 亥姆霍兹自由能     |
| $f$       | 比亥姆霍兹自由能       |
| $G$       | 吉布斯自由能         |
| $g$       | 重力加速度; 比吉布斯自由能 |
| $H$       | 焓              |
| $h$       | 比焓             |
| $K$       | 平衡常数           |
| $k$       | 玻耳兹曼常数         |
| $M$       | 摩尔质量           |
| $Ma$      | 马赫数            |
| $m$       | 质量; 分子数        |
| $N$       | (压气机) 级数       |
| $n$       | 物质的量; 多变指数     |
| $P$       | 功率             |
| $p$       | 压力             |
| $p_b$     | 大气压力           |

|       |                          |
|-------|--------------------------|
| $Q$   | 热量; 反应热                  |
| $q$   | 每千克工质的热量                 |
| $q_m$ | 质量流量                     |
| $q_v$ | 体积流量                     |
| $R$   | 摩尔气体常数                   |
| $R_g$ | 气体常数                     |
| $r$   | 汽化热                      |
| $S$   | 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       |
| $\alpha_p$    | 相对压力系数            |
| $\alpha_v$    | 体膨胀系数             |
| $\beta_c$     | 临界压力比; 离解度        |
| $\gamma$      | 比热比; 化学计量系数; 表面张力 |
| $\Delta$      | 增量                |
| $\delta$      | 微小量               |
| $\varepsilon$ | 压缩比; 制冷系数         |
| $\zeta$       | 供热系数              |
| $\eta$        | 效率                |
| $\kappa$      | 等熵指数              |

|                          |                       |
|--------------------------|-----------------------|
| $\kappa_S$ 等熵压缩率         | k 动能                  |
| $\kappa_T$ 等温压缩率         | L (功) 损               |
| $\lambda$ 压升比            | m 每摩尔的; 平均            |
| $\mu$ 化学势                | max 最大                |
| $\mu_J$ 焦耳-汤姆逊效应系数       | min 最小                |
| $\xi$ 能量利用率; 热利用系数       | mix 混合                |
| $\pi$ 增压比                | n 多变过程                |
| $\rho$ 密度; 预胀比           | o 循环的 (功、热量)          |
| $\tau$ 时间; 升温比           | opt 最佳                |
| $\varphi$ 相对湿度; 体积分数     | out 出口 (参数)           |
| 顶标                       | P 泵                   |
| · 单位时间的                  | Pr 生成物                |
| — 平均                     | p 位能                  |
| 上标                       | p 等压                  |
| * 滞止                     | R 冷库                  |
| tot 总的                   | Re 反应物                |
| ' 饱和液体                   | r 相对; 回热; 对比; 余 (函数)  |
| " 饱和蒸汽                   | rev 可逆                |
| 0 化学标准状况                 | rj 热机                 |
| 下标                       | ry 热源                 |
| A 三相点                    | s 等熵                  |
| a 空气                     | s 饱和                  |
| act 实际                   | sh 轴 (功)              |
| atm 大气                   | std 标准状况              |
| B 锅炉                     | T 等温                  |
| C 卡诺循环; 逆向卡诺循环; 压气机; 冷凝器 | T 透平 (燃气轮机; 汽轮机; 膨胀机) |
| c 临界                     | t 热 (效率); 技术 (功)      |
| DA 干空气                   | th 喉部                 |
| d 露点                     | the 理论                |
| e 环境                     | v 体积                  |
| f 摩擦; (熵) 流; 生成; 燃料      | v 真空 (度); 水蒸气         |
| g 表 (压力); (热、熵) 产        | w 水; 湿球 (温度)          |
| H 供热                     | ws 工质                 |
| i 内部                     | x 湿蒸汽                 |
| id 孤立系                   | 0 理想气体状态              |
| in 进口 (参数)               | 1 初态; 进口              |
| irr 不可逆                  | 2 终态; 出口              |

# 目 录

前言

常用符号表

|                        |   |
|------------------------|---|
| 绪论                     | 1 |
| 0.1 能源及我国能源面临的主要问题     | 1 |
| 0.2 热能及其利用             | 2 |
| 0.3 能量转换装置的工作过程        | 3 |
| 0.4 工程热力学的研究对象及其主要研究内容 | 5 |
| 0.5 热力工程及热力学发展简史       | 6 |
| 0.6 热力学的研究方法           | 8 |
| 思考题                    | 9 |

## 第1部分 热力学基本概念和基本定律

|                           |    |
|---------------------------|----|
| 第1章 基本概念                  | 10 |
| 1.1 热力系                   | 10 |
| 1.2 状态和状态参数               | 12 |
| 1.3 平衡状态                  | 18 |
| 1.4 状态方程和状态坐标图            | 19 |
| 1.5 过程和循环                 | 20 |
| 1.6 功和热量                  | 22 |
| 本章要求重点与讨论                 | 22 |
| 思考题                       | 24 |
| 习题                        | 24 |
| 选读之一 帕斯卡与大气压              | 26 |
| 第2章 热力学第一定律               | 27 |
| 2.1 能量守恒原理及热力学第一定律的实质     | 27 |
| 2.2 热力学第一定律表达式            | 27 |
| 2.3 稳定流动能量方程的应用           | 32 |
| 2.4 功和热量的计算及其在压容图和温熵图中的表示 | 34 |
| 本章要求重点与讨论                 | 38 |

|                        |    |
|------------------------|----|
| 思考题                    | 39 |
| 习题                     | 40 |
| 选读之二 能量守恒定律和热力学第一定律的建立 | 41 |
| 第3章 热力学第二定律            | 47 |
| 3.1 热力学第二定律的任务         | 47 |
| 3.2 可逆过程和不可逆过程         | 49 |
| 3.3 状态参数熵              | 51 |
| 3.4 热力学第二定律的表达式——熵方程   | 51 |
| 3.5 热力学第二定律各种表述的等效性    | 56 |
| 3.6 卡诺定理和卡诺循环          | 59 |
| 3.7 克劳修斯积分式            | 62 |
| 3.8 热量的可用能及其不可逆损失      | 63 |
| 3.9 流动工质的焓和焓损          | 66 |
| 3.10 工质的焓和焓损           | 69 |
| 3.11 关于焓损的讨论及焓方程       | 71 |
| 3.12 热力学第二定律对工程实践的指导意见 | 75 |
| 本章要求重点与讨论              | 76 |
| 思考题                    | 79 |
| 习题                     | 80 |
| 选读之三 卡诺的热机理论           | 82 |
| 选读之四 热力学第二定律的建立        | 83 |
| 选读之五 熵概念渊源初探           | 85 |
| 选读之六 统计力学的奠基人——玻耳兹曼    | 92 |

## 第2部分 工质的热力性质

|               |    |
|---------------|----|
| 第4章 气体的热力性质   | 94 |
| 4.1 实际气体和理想气体 | 94 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 4.2 理想气体状态方程和摩尔气体常数 .....          | 95  |
| 4.3 气体的热力性质 .....                  | 96  |
| 4.4 实际气体对理想气体性质的偏离 .....           | 101 |
| 4.5 实际气体状态方程 .....                 | 103 |
| 4.6 对比状态方程和对应态原理 .....             | 107 |
| 4.7 通用的压缩因子图、对比余焓图和<br>对比余熵图 ..... | 109 |
| 本章要求重点与讨论 .....                    | 113 |
| 思考题 .....                          | 114 |
| 习题 .....                           | 115 |
| 选读之七 克拉贝隆及理想气体状态<br>方程 .....       | 116 |
| 选读之八 比热容、潜热与布莱克 .....              | 116 |
| 选读之九 气体的液化与低温的获得<br>安德鲁斯与临界点 ..... | 118 |
| 选读之十 范德瓦耳斯方程的建立 .....              | 119 |
| <b>第5章 热力学微分关系式</b> .....          | 122 |
| 5.1 特征函数 .....                     | 122 |
| 5.2 二元连续函数的数学特性 .....              | 123 |
| 5.3 热系数 .....                      | 124 |
| 5.4 麦克斯韦关系式 .....                  | 127 |
| 5.5 比熵、比热力学能和比焓的一般<br>关系式 .....    | 128 |
| 5.6 比热容的一般关系式 .....                | 131 |
| 本章要求重点与讨论 .....                    | 134 |
| 思考题 .....                          | 134 |
| 习题 .....                           | 134 |
| 选读之十一 电磁理论集大成者——<br>麦克斯韦 .....     | 136 |
| <b>第6章 水蒸气的热力性质</b> .....          | 138 |
| 6.1 水蒸气的饱和状态 .....                 | 138 |
| 6.2 水蒸气的产生过程 .....                 | 140 |
| 6.3 水蒸气的热力性质图表 .....               | 143 |
| 6.4 水蒸气的热力过程 .....                 | 145 |
| 本章要求重点与讨论 .....                    | 147 |
| 思考题 .....                          | 147 |
| 习题 .....                           | 148 |
| 选读之十二 黄子卿和水三相点的<br>测定 .....        | 149 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| <b>第7章 理想混合气体与湿空气</b> ..... | 150 |
| 7.1 混合气体的成分 .....           | 150 |
| 7.2 混合气体的参数计算 .....         | 152 |
| 7.3 湿空气及其湿度 .....           | 153 |
| 7.4 露点温度和湿球温度 .....         | 156 |
| 7.5 焓和焓湿图 .....             | 157 |
| 7.6 湿空气过程——焓湿图的应用 .....     | 159 |
| 本章要求重点与讨论 .....             | 163 |
| 思考题 .....                   | 163 |
| 习题 .....                    | 164 |
| 选读之十三 道尔顿及分压定律 .....        | 164 |

### 第3部分 热力过程及热力循环

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| <b>第8章 理想气体的热力过程</b> .....        | 166 |
| 8.1 概述 .....                      | 166 |
| 8.2 典型定值热力过程分析 .....              | 166 |
| 8.3 不做功过程和绝热过程 .....              | 180 |
| 8.4 混合过程 .....                    | 186 |
| 8.5 充气、放气过程 .....                 | 191 |
| 本章要求重点与讨论 .....                   | 194 |
| 思考题 .....                         | 195 |
| 习题 .....                          | 195 |
| <b>第9章 气体与蒸汽的流动</b> .....         | 197 |
| 9.1 一元稳定流动的基本方程 .....             | 197 |
| 9.2 喷管中气流参数变化和喷管截面<br>变化的关系 ..... | 199 |
| 9.3 气体流经喷管的流速和流量 .....            | 202 |
| 9.4 喷管背压变化时的流动状况 .....            | 207 |
| 9.5 喷管中有摩擦的绝热流动过程 .....           | 209 |
| 本章要求重点与讨论 .....                   | 214 |
| 思考题 .....                         | 215 |
| 习题 .....                          | 216 |
| <b>第10章 气体的压缩</b> .....           | 217 |
| 10.1 活塞式气压机的压气过程 .....            | 217 |
| 10.2 叶轮式气压机的压气过程 .....            | 223 |
| 10.3 引射器的工作过程 .....               | 225 |
| 本章要求重点与讨论 .....                   | 227 |
| 思考题 .....                         | 228 |
| 习题 .....                          | 228 |

|                                     |     |                                                 |     |
|-------------------------------------|-----|-------------------------------------------------|-----|
| <b>第 11 章 气体动力循环</b> .....          | 230 | <b>第 4 部分 化学热力学基础和能量<br/>直接转换及可再生能源</b>         |     |
| 11.1 概述 .....                       | 230 | <b>第 14 章 化学热力学基础</b> .....                     | 291 |
| 11.2 活塞式内燃机的混合加热循环 .....            | 230 | 14.1 概述 .....                                   | 291 |
| 11.3 活塞式内燃机的等容加热循环和<br>等压加热循环 ..... | 234 | 14.2 热力学第一定律在化学反应系统中<br>的应用 .....               | 292 |
| 11.4 活塞式内燃机各种循环的比较 .....            | 235 | 14.3 化学反应过程的最大有用功 .....                         | 296 |
| 11.5 燃气轮机装置的循环 .....                | 238 | 14.4 化学反应方向及化学平衡 .....                          | 299 |
| 11.6 喷气发动机循环简介 .....                | 243 | 14.5 热力学第三定律 .....                              | 305 |
| 11.7 活塞式热气发动机循环 .....               | 244 | 本章要求重点与讨论 .....                                 | 305 |
| 本章要求重点与讨论 .....                     | 245 | 思考题 .....                                       | 306 |
| 思考题 .....                           | 245 | 习题 .....                                        | 307 |
| 习题 .....                            | 246 | 选读之十八 吉布斯 .....                                 | 307 |
| 选读之十四 内燃机的发明 .....                  | 247 | 选读之十九 热力学第三定律的建立 .....                          | 308 |
| 选读之十五 燃气轮机和涡轮喷气<br>发动机的发明 .....     | 248 | <b>第 15 章 能量直接转换及可再生<br/>能源</b> .....           | 309 |
| <b>第 12 章 蒸汽动力循环</b> .....          | 250 | 15.1 能源分类 .....                                 | 309 |
| 12.1 基本蒸汽动力循环——朗肯循环 .....           | 250 | 15.2 能源的科学合理高效利用 .....                          | 311 |
| 12.2 蒸汽再热循环和抽汽回热循环 .....            | 254 | 15.3 能量直接转换 .....                               | 312 |
| 12.3 热电联产循环 .....                   | 257 | 15.4 可再生能源 .....                                | 317 |
| 12.4 实际蒸汽动力循环的能量分析与焓<br>分析 .....    | 258 | 本章要求重点与讨论 .....                                 | 327 |
| 12.5 双工质动力循环 .....                  | 263 | 思考题 .....                                       | 328 |
| 本章要求重点与讨论 .....                     | 272 | <b>附录</b> .....                                 | 329 |
| 思考题 .....                           | 273 | 附录 A 常用热力性质表 .....                              | 329 |
| 习题 .....                            | 273 | 表 A-1 常用气体的某些基本热力<br>性质 .....                   | 329 |
| 选读之十六 蒸汽机的发明者——<br>瓦特 .....         | 274 | 表 A-2 某些常用气体在理想气体状态<br>下的比定压热容与温度的关<br>系式 ..... | 329 |
| 选读之十七 蒸汽轮机的发明 .....                 | 275 | 表 A-3 某些常用气体在理想气体状态下的<br>平均比定压热容 .....          | 330 |
| <b>第 13 章 制冷循环</b> .....            | 277 | 表 A-4 某些常用气体在理想气体状态下的<br>平均比定容热容 .....          | 331 |
| 13.1 逆向卡诺循环 .....                   | 277 | 表 A-5 空气在理想气体状态下的热力<br>性质表 .....                | 332 |
| 13.2 空气压缩制冷循环 .....                 | 278 | 表 A-6 饱和水与饱和水蒸气的热力<br>性质表 (按温度排列) .....         | 335 |
| 13.3 蒸气压缩制冷循环 .....                 | 282 | 表 A-7 饱和水与饱和水蒸气的热力<br>性质表 (按压力排列) .....         | 337 |
| 13.4 制冷剂的热力性质与新型制冷剂 .....           | 284 |                                                 |     |
| 13.5 蒸汽喷射制冷循环和吸收式制冷<br>循环 .....     | 287 |                                                 |     |
| 本章要求重点与讨论 .....                     | 289 |                                                 |     |
| 思考题 .....                           | 290 |                                                 |     |
| 习题 .....                            | 290 |                                                 |     |

|                                                                               |     |                                            |      |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|--------------------------------------------|------|
| 表 A-8 未饱和水与过热水蒸气的热力<br>性质表 .....                                              | 339 | 表 A-11 化学平衡常数的自然对数值<br>( $\ln K_p$ ) ..... | 360  |
| 表 A-9 一些物质的标准生成焓 $H_f^0$ 、<br>标准生成吉布斯自由能 $G_f^0$ 和<br>标准状况下的绝对熵 $S_m^0$ ..... | 357 | 附录 B 常用热力性质图 .....                         | 361  |
| 表 A-10 一些理想气体的摩尔焓 $H_m$<br>及 101.325kPa 下的绝对熵 $S_m$<br>( $T, p^0$ ) .....     | 358 | 图 B-1 氨 ( $\text{NH}_3$ ) 的压焓图 .....       | 361  |
|                                                                               |     | 图 B-2 R134a 的压焓图 .....                     | 362  |
|                                                                               |     | 图 B-3 湿空气的焓湿图 .....                        | 363  |
|                                                                               |     | 图 B-4 水蒸气的焓熵图 .....                        | 书后插页 |
|                                                                               |     | 参考文献 .....                                 | 364  |

# 绪 论

## 0.1 能源及我国能源面临的主要问题

能源、材料、信息是构造人类社会的三大支柱。在这三者中，能源既是材料生产、机械制造及其功能实现的动力，又为信息采集、加工、储存、传递提供所需的能量，它更居于核心地位和发挥着关键作用。而且生产力愈发达，社会愈进步，人类物质生活及精神生活水平愈提高，则对能源的依赖性愈大。曾记否，1973 年第一次能源（石油）危机，不仅使美、日等资本主义国家蒙受数以百亿美元的巨大的经济损失，而且给整个社会生活造成极大的混乱。当时，在最发达、最文明的美国甚至出现了马拉汽车、燃木取暖和蜡烛照明的景象。西方报刊惊呼 1973 年的美国过了一个寒冷、暗淡的冬天。可以这样说，现代社会的物质生活和精神生活时刻都离不开能源的供应，没有足够的能源，人类社会将要停滞，现代文明的大厦将要坍塌。不仅如此，当今世界能源不仅是人类社会赖以生存和发展的物质基础，而且是一种重要战略物资。能源已经成为全球军事、政治、经济斗争的争夺目标和斗争手段。中东战火为什么连年不断，说到底，某些大国和政治集团垂涎和争夺那里丰富而廉价的石油资源是其动荡不安的根源。

新中国成立后的近 60 年以来，我国的能源工业取得了举世瞩目的成就，有力地保证和促进了整个国民经济发展和社会进步。但是，由于我国是一个人口众多的发展中国家，我国能源工业面临着许多问题，概括起来是“三低、污染重、不均衡”。

(1) 人均能源拥有量和储备量低 我国能源资源虽然较为丰富，但人均能源资源拥有量远低于世界平均水平，不但与美国相距甚远，在油、气资源方面与世界的平均水平也相差悬殊。我国人均原煤资源不到美国的  $1/10$ ，也低于世界的  $1/2$ ；人均原油资源只有美国的  $1/5$ ，也远低于世界的  $1/9$ ；天然气资源低于美国的  $1/8$  和世界的  $1/20$ 。地大而人均物不博才是中国真正的国情。

(2) 能源利用率低 受到我国科技水平和生产力水平的限制，我国能源终端利用率仅为 33%，比发达国家低 10 个百分点。单位产值平均能耗比发达国家高 30% ~ 80%，加权平均高 40%，单位产值能耗为发达国家的两倍。百万美元 GDP 中国能耗是美国的 2.5 倍，是欧盟的 5 倍，几乎是日本的 9 倍。例如，我国工业锅炉效率仅为西方发达国家的 80%，燃煤电厂平均煤耗我国是  $414\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，而国际平均为  $350\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ，鼓风机及水泵的能源利用率也仅为国际水平的 85%，国产电动机在产生相同动力的情况下，其电力消耗比国际水平高 5% ~ 10%。

(3) 人均能耗水平低 我国人均能耗水平特别是生活用能水平很低。例如，目前我国电力装机容量和总发电量已均居世界第二位，但人均占有量分别为  $0.21\text{kW}$  和  $900\text{kW} \cdot \text{h}$ ，均只有世界水平的  $1/3$ 。中国 1998 年的人均能源消费为 1.165t 标准煤，居世界第 89 位，不足世界人均消费水平的 2.4t 标准煤的一半，只是发达国家的  $1/10 \sim 1/5$ 。专家预计到 2040

年将达到 2.3t 标准煤左右,相当于目前世界平均水平,远低于发达国家的目前水平。可见人均常规能源相对不足,是中国经济、社会可持续发展的一个制约因素,尤其是石油和天然气。所以我们要能源忧患意识。

(4) 环境污染严重 我国能源构成的特点是富煤、贫油、少气。由于以煤为主,而且人口众多,生产和生活用能源给环境造成的污染已十分严重。有资料表明,生活及取暖用煤和生物质燃烧造成的室内空气污染每年约造成 11.1 万人早亡,城市内一些空气污染严重地带,呼吸道癌发病率上升 50%,肺癌死亡率上升近 20%。我国南部和西南部高硫煤地区的酸雨影响已危及全国 40% 的陆地面积和 19% 的耕地面积,使受影响地区农作物及林业生产率平均下降 3%。据世界银行报道,我国城市空气污染对人体健康和生产力造成的损失估计每年超过 200 亿美元;酸雨造成的每年农作物收成减产及其他损失高达上千亿美元。造成温室效应的二氧化碳排量更是居高不下,目前中国排放量居世界第二位,占世界总排放量的 13.6% (约 1/7),能源给环境造成的影响是十分严峻的。

(5) 能源分布极不均衡 经济发达的沿海和东部地区缺油少气,天然气丰富的西部经济又欠发达,不得不进行晋煤外运和西气东输等工程。

我国要实现四个现代化,在 21 世纪实现中华民族的伟大复兴,必须要解决好我国能源问题。解决我国面临的能源问题,除了要靠国家的宏观政策调控(有效地控制人口,改善我国能源构成和加大投入),更要靠科技进步和自主创新。推动能源科技进步和自主创新的重担历史地落在能源科技工作者的肩上。在能源问题上,目前面临确保能源供应和保护环境两大挑战,这是大有作为的天地。国家兴亡,匹夫有责,前辈们(例如哈尔滨工业大学的王仲奇院士和秦裕琨院士)已为我们做出了榜样。在校学习的青年学生是未来中国建设的骨干和中坚力量,现在应该学习掌握好科学技术,将来为国家富强和人民幸福作出自己的贡献。

## 0.2 热能及其利用

人类在日常生活和生产中,需要多种形式的能源。人类最早从自然能源中寻找所需能源,自然能源的开发和利用是人类社会进步的起点,而能源开发和利用的程度又是社会生产力发展水平和人类富裕文明生活水平的一个重要标志。蒸汽机的发明,开创了人类利用自然力的先河,解放了人的体力和畜力,人类由农业社会过渡到工业社会;电力的发现特别是微电子技术计算机的出现,又解放了人的体力和部分脑力劳动(重复性脑力劳动),人类社会开始由工业社会向信息社会过渡。

所谓能源,是指为人类生活和生产提供能量和动力的物质资源。自然界中以自然形态存在的、可直接利用的能源称为一次能源,主要有风能、水力能、太阳能、地热能、燃料化学能和核能等,其中有些可直接加以利用,但通常需要经过适当加工转换才能利用。由一次能源加工转换后的能源称为二次能源,其中主要是热能、机械能和电能。因此,能量的利用过程,实质上是能量的传递和转换过程,其大致如图 0-1 所示。

由图 0-1 可见,在能量转换过程中,热能不仅是最常见的形式,而且具有特殊重要的作用。一次能源中除太阳能通过光电反应,化学能通过燃料电池直接提供电能以及风能、水力能可直接提供机械能外,其余各种一次能源都往往要转换成热能的形式。据统计,经过热能

形式而被利用的能量,在我国占 90% 以上,世界其他国家平均超过 85%。因此,热能的开发利用对人类社会的发展有着重要的意义。

热能的利用有热利用和动力利用两种基本形式。热能的热利用或称为热能的直接利用,即将热能直接用于加热物体,以满足烘干、采暖、熔炼等生产工艺和人们生活需要。这种利用的方式已有几千年,它有两个特点:一是能量形式无变化,即产热体提供的是热能,受热体利用的也是热能;二是理论上无损失,即如不考虑实际上的热损失的话,理论上可以百分之百地利用。在这种热利用方式中,由于提供

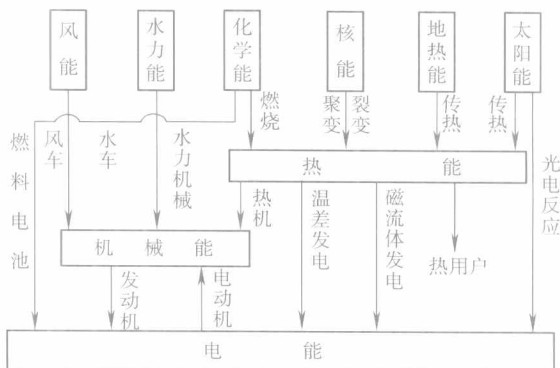


图 0-1 能量的传递和转换过程

热能利用的往往不是同一个物体或物体的同一部分,所以要提高其利用效率就必须研究热能传递的规律与特征,这就需要学习好传热学知识。热能的动力利用或称为热能的间接利用,通常是指通过各种热能动力装置将热能转换成机械能或者再转换成电能加以利用,为人类的日常生活和工农业生产及交通运输提供动力。自从发明蒸汽机以来,这种利用方式虽然至今仅有 200 多年的历史,但却开创了热能动力利用的新纪元,使人类社会生产力和科学技术突飞猛进。由此可见热能动力利用的重要性。这种利用形式具有与前种利用方式相反的两种特点:一是能量形式有变化,即供热体提供的是热能,而受热体(热机)输出的可能是机械能或电能;二是理论上必有损失,即在完全理想化的条件下,由于受到热力学第二定律的限制,热能也不能百分之百地转化为机械能或电能。事实也正是这个原因,当今世界,热能通过各种热能动力装置转换为机械能的有效利用程度较低。早期蒸汽机的热效率只有 1%~2%。目前燃气轮机装置的热效率大约只有 20%~30%,内燃机的热效率为 25%~35%,蒸汽电站的热效率也只有 40% 左右。如何更有效地实现热功转换,是一个十分迫切而又重要的课题。正如前所述,尽管新中国成立以来,能源生产发展迅速,已成为世界第三能源大国,而且燃料资源比较丰富,但人均占有量相对不足,特别是我国目前热能利用的技术水平与世界发达国家相比,还有很大差距,这个差距需要大家共同努力来缩小。由于这种利用方式的能量形式有变化、要转换,就需要学习和掌握热能与机械能转换的规律。这就是工程热力学所要研究的内容。对于每一位有志于报国的热能工作者来说,不仅要有报国之志,更要有报国之才,这就必须学习好、掌握好工程热力学这一门十分重要的专业基础课。

### 0.3 能量转换装置的工作过程

热能的转换和利用,离不开各种热能转换装置,如蒸汽动力装置、内燃机、燃气轮机装置以及压缩制冷装置等。为了从这些装置中总结出能量转换的基本规律以及共同特性,本节简要介绍几种常用的热能转换装置。

#### 1. 蒸汽动力装置

简单的蒸汽动力装置由锅炉、汽轮机、水泵和冷凝器等设备组成。图 0-2a 为其系统简

图。煤粉、油、天然气等化石燃料在锅炉内燃烧，其化学能转变为热能，产生高温的烟气。锅炉内的水吸收烟气的热量，变成水蒸气，当它流经过热器时，继续吸热，温度进一步升高，变为过热水蒸气。此时水蒸气的温度、压力比外界介质（空气）的高，具有做功能力。当它被导入汽轮机后，先通过喷管并在其中膨胀，压力、温度都降低，而速度增大，热能转换成了气流的动能。这种高速气流冲击推动叶片，带动叶轮旋转。气流的速度降低，动能转化为叶轮的机械能，通过轴转动做功，如图 0-2b 所示。膨胀后的乏汽，压力与温度都较低，进入冷凝器后向冷却水放热而凝结成水，并由泵升压后打入锅炉加热。如此周而复始循环，重复上述吸热、膨胀、放热和升压等一系列过程，把燃料燃烧放出的热能源源不断地转换成机械能。这种装置可简化为如图 0-2c 所示的热力系统图。

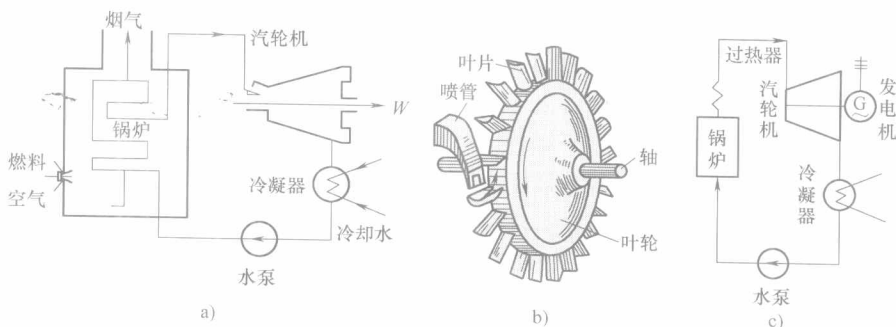


图 0-2 蒸汽动力装置

## 2. 燃气轮机装置

燃气轮机装置是 20 世纪 40 年代发展起来的一种比较新型的动力装置。最简单的燃气轮机装置包括三个主要部件：压气机、燃气轮机和燃烧室，图 0-3 所示为其流程示意图。空气和燃料分别经压气机与泵增压后送入燃烧室，在燃烧室中燃料与空气混合并燃烧，释放出热能。燃烧所产生的燃气吸热后温度升高，然后流入燃气轮机机边膨胀边做功。做功后的气体排向大气并向大气放热。重复上述升压、吸热、膨胀与放热的过程，连续不断地将燃料的化学能转变成热能，进而转换成机械能。

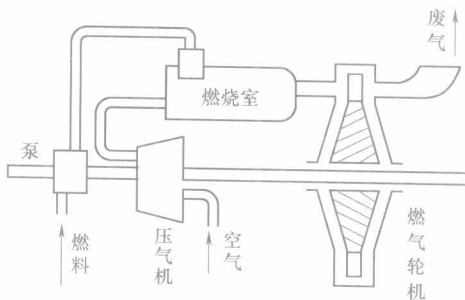


图 0-3 燃气轮机装置

## 3. 内燃机

内燃机的工作特点是，燃料在气缸内燃烧，所产生的燃气直接推动活塞做功。下面，以图 0-4 所示的汽油机为例加以说明。开始，活塞向下移动，进气阀开启，排气阀关闭，汽油与空气的混合气进入气缸。当活塞到达最低位置后，改变运动方向而向上移动，这时进、排气阀关闭，缸内气体受到压缩。压缩终了，火花塞将燃料气点燃。燃料燃烧所产生的燃气在缸内膨胀，向下推动活塞而做功。当活塞再次上行时，进气阀关闭，排气阀打开，做功后的燃气排向大气。重复上述压缩、燃烧、膨胀、排气等过程，周而复始，不断地将燃烧的化学能转变成热能，进而转换成机械能。

#### 4. 压缩制冷装置

以上介绍了热能动力装置，其目的是将热能转换成机械能。工程实际中还存在着另一种装置，它们消耗机械功来实现热能从低温物体向高温物体的转移，这类装置通常称为制冷装置或热泵。现以氟利昂蒸气压缩制冷装置为例说明其工作原理。

图 0-5 所示的系统中，一般采用氟利昂作为制冷剂。当低温低压的氟利昂蒸气从冷藏室出来被吸入压缩机后，经压缩变为温度和压力较高的氟利昂过热蒸气，此过热蒸气被送至冷凝器冷凝为液态氟利昂，同时放出热量，液态氟利昂再经膨胀机绝热膨胀，降温降压后送至冷藏室，吸收热量而汽化，这是在冷藏室内形成低温制冷的条件。

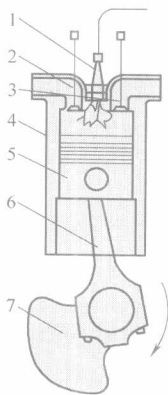


图 0-4 汽油机

1—火花塞 2—进气阀 3—排气阀  
4—气缸 5—活塞 6—连杆 7—曲轴

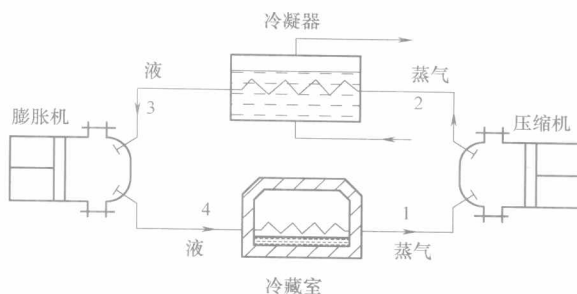


图 0-5 制冷装置

尽管上述几种能量转换装置的结构与工作方式各不相同，分析后有如下的共性。

首先，在热能装置中实现能量转换时，均需要某种物质作为工作物质，称为工质。例如水蒸气、空气、燃气以及氟利昂等。简言之，工质是在能量转换中必不可少的。

其次，能量转换是在工质状态连续变化的情况下实现的。工质在热能动力装置中都要经历升压、吸热、膨胀和放热等过程才能实现能量转换。简言之，热力过程是能量转换必须经历的途径。

再其次，供给热能动力装置的热能，只有一部分转变成机械能，其余的部分传给大气或冷却水。简言之，热能不能百分之百转换为机械能。

以上是通过初步的观察和分析得到的寓于各装置个性中的共性。所有这些，正是工程热力学这门课程中所要讨论的问题。

### 0.4 工程热力学的研究对象及其主要内容

工程热力学是研究热能和机械能转换规律及应用的科学。从理论上阐明提高热机效率和热能利用率的途径是工程热力学的一项主要任务。

工程热力学的主要研究内容，包括以下几个部分：

1) 能量转换的客观规律，即热力学第一、第二定律。这是工程热力学的理论基础，其

中,热力学第一定律从数量上描述了热能与机械能相互转换时的关系;热力学第二定律从质量上说明热能与机械能之间的差别,指出能量转换时的条件和方向性。

2) 工质的基本热力性质。包括空气、燃气、水蒸气、湿空气等的热力性质。

3) 各种热工设备中的工作过程。即应用热力学基本定律,分析计算工质在各种热工设备中所经历的状态变化过程和循环,探讨、分析影响能量转换效果的因素以及提高能量转换效果的途径。

4) 与热工设备工作过程直接有关的一些化学与物理问题。目前,热能的主要来源是依靠燃料的燃烧,而燃烧是剧烈的化学反应过程,因此需要讨论化学热力学的基本知识。

随着科技进步与生产发展,工程热力学的研究与应用范围已不限于只是作为建立热机(或制冷装置)理论的基础,现已扩展到许多工程技术领域,如航空航天、高能激光、热泵、空气分离、空气调节、海水淡化、化学精炼、生物工程、低温超导、物理化学等,都需要应用工程热力学的基本理论和基本知识。因此,工程热力学已成为许多有关专业所必修的一门技术基础课。

## 0.5 热力工程及热力学发展简史

热现象是人类最早接触的自然现象之一。相传远古时代的燧人氏钻木取火,这就是机械能转换成热能,使木头温度升高而发生燃烧的热现象。但是人类对热的利用和认识,经历了漫长的岁月,直到近 300 年,人类对热的认识逐步形成了一门科学。

在 18 世纪初期,由于煤矿开采工业上对动力抽水机的需要,最初在英国出现了带动往复水泵的原始蒸汽机。到了 18 世纪的下半期,由于资本主义工厂手工业的发展和自动纺纱机、织布机等工作机的不断发明,就迫切地需要一种实用的动力机来带动这些工作机,所以只有到了工场手工业的晚期阶段热力动力机的发明与应用才有了可能与需要。因此,可以说,蒸汽机的发明与应用是社会生产力发展的必然结果,而且蒸汽机的发明和改进也是经过当时许多国家的很多人共同努力所完成的。

1763~1784 年间英国人瓦特 (James Watt, 1736—1819) 对当时的原始蒸汽机作了重大改进,发明了应用于高于大气压的蒸汽作为工质、有回转运动、有独立冷凝器的单缸蒸汽机,现在估计其热效率约为 2%,这在当时已是很大的进步。

此后蒸汽机被纺织、冶金等工业所普遍采用,生产力得到很大提高。以后蒸汽机被不断改进。到了 19 世纪初,发明了以蒸汽机作为动力的铁路机车和船舶。

随着蒸汽机的广泛应用,如何进一步提高蒸汽机效率的问题变得日益重要。这样就促使人们对提高蒸汽机热效率、热功转换的规律以及水蒸气的热力性质问题进行了深入研究,从而推动热力学的发展。

在热功转换规律的研究上,最早、最卓越的年轻工程师卡诺 (Sadi Carnot, 1796—1832) 在 1824 年发表了卡诺定理。他首先在理论上指出热机必须工作于温度各不相同的热源之间,才能将从高温热源吸入的热量转变为有用的机械功,并提出了热机最高效率的概念。这些实质上已揭示了热力学第二定律最基本的内容,但是由于卡诺受到了当时流行的热质说的束缚,使他不能从中发现热力学第二定律。尽管如此,卡诺对热力学的贡献是功不可没的,他指出冷热源之间温差愈大,工作于其间的热机的热效率就愈高,这成为以后各种实