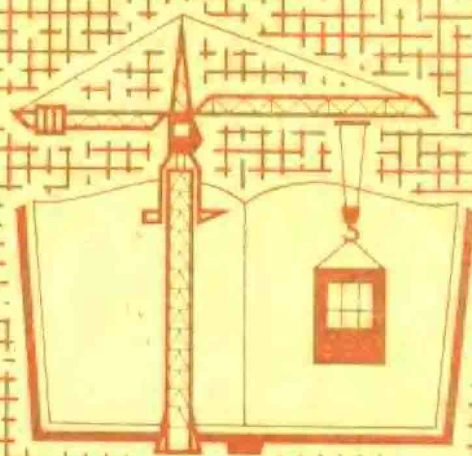


# 工程热力学

同 济 大 学  
哈尔滨建筑工程学院  
重庆建筑工程学院



高等学校试用教材

中国建筑工业出版社

高等学校试用教材

# 工 程 热 力 学

同 济 大 学  
哈尔滨建筑工程学院 编  
重庆建筑工程学院

中国建筑工业出版社

本书是高等院校供热通风专业、城市燃气热能供应工程专业及其它有关专业用的“工程热力学”课程试用教材。

内容包括：工质及气体状态方程、热力学第一定律、气体的主要热力过程及气体压缩、热力学第二定律、水蒸汽的性质、混合气体和湿空气、气体和蒸汽的流动、动力循环、制冷循环、化学热力学基础、溶液热力学基础、纯物质热力学微分方程式、新能源利用简介等十三章，各章均有例题和习题，书末附有九种主要热力学图表。图表中参数基本上采用国际单位制(SI)，例题和习题中有一部分题目采用目前通用的公制单位。

本书也可供从事供热通风、热能利用工程等方面的工作人员参考。

高等学校试用教材  
**工 程 热 力 学**  
同 济 大 学  
哈尔滨建筑工程学院 编  
重庆建筑工程学院

\*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)  
新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售  
中国建筑工业出版社印刷厂印刷

\*

开本：787×1092毫米1/16 印张：16 1/2 插页：3 字数：400千字  
1979年12月第一版 1979年12月第一次印刷  
印数：1— 8,140 册 定价：1.85元  
统一书号：15040·3740

## 前 言

本书是根据1978年在天津召开的供热通风专业“工程热力学”教材会议拟订的70学时的大纲进行编写的。初稿写出后，经有关兄弟院校讨论，提供意见，集中修改而成。此书也兼顾了城市燃气热能供应工程专业及其他有关专业对这一课程的要求。

全书内容以热力学宏观理论为基础，联系工程实际，反映供热通风工程的特点，同时，尽可能吸取了国内外本门学科的新内容和先进技术。因而对于基本概念、热力学第一定律和热力学第二定律都有较详细的论述。全书有关各章大都用能量方程式和熵方程式阐明热力学的基本理论，教材体系和内容比过去的有所更新和充实。有些章节的论述采用了新体系，如热力学第一定律在化学过程中的应用，就以能量方程式取代了盖斯定律和克希荷夫定律。在编写时注意由浅入深，难点分散，重点深入。为了加深理解和培养分析解决问题的能力，各章都编有一定数量的例题和习题。

为了不使学生负担过重，凡书中注有\*号的章节，由任课教师按实际情况决定取舍。

书中单位以国际单位制(SI)为主，但鉴于国内当前的规范、标准、技术资料等仍然使用公制单位的实际情况，也编入一部分公制单位的例题和习题，以利过渡。书中释意性的下角码采用了缩写英文字母，这是一个初步尝试，今后通过教学实践，根据效果再作调整。

本书由同济大学、哈尔滨建筑工程学院和重庆建筑工程学院三校的热工教研室合编，由同济大学和哈尔滨建筑工程学院担任主编。参加编写者有：同济大学蒋汉文、邱信立、章成骏，哈尔滨建筑工程学院廉乐明、孟宪吉、李力能，重庆建筑工程学院张惠迪、刘书林。

本书承太原工学院谢益棠同志细致审阅，提供了很多宝贵意见，谨致感谢。

# 基本符号表

| 英文符号        | 名 称                                        |              |                       |
|-------------|--------------------------------------------|--------------|-----------------------|
| $A$         | 反应物                                        | $p_0$        | 表压力或工作压力              |
| $a$         | 压力修正系数; 音速                                 | $p_c$        | 临界压力, 冷凝压力            |
| $B$         | 大气压力; 比例系数; 生成物                            | $p_r$        | 对比压力                  |
| $b$         | 容积修正系数                                     | $P$          | 非平衡状态时的压力             |
| $C$         | 非平衡浓度; 平衡系统中组分数目                           | $Q$          | 总热量; 传热量; 反应热         |
| $c$         | 流速; 质量比热; 余隙百分数; 平衡浓度                      | $Q_e$        | 流过负载的电量               |
| $c'$        | 容积比热                                       | $q$          | 单位质量热量                |
| $Mc$        | 摩尔比热                                       | $R$          | 气体常数                  |
| $d$         | 直径; 含湿量                                    | $R_0$        | 通用气体常数=8314J/(kmol·K) |
| $E$         | 总能量; 能量流量; 电动势                             | $r$          | 汽化潜热; 容积成分            |
| $e$         | 单位质量能量; 每个电子所带电量=1.602×10 <sup>-19</sup> C | $S$          | 位移; 总熵                |
| $F$         | 表面积; 散热面积; 作用力; 自由度数; 自由能                  | $s$          | 单位质量的熵                |
| $f$         | 截面积                                        | $T$          | 绝对温度                  |
| $g$         | 重力加速度; 质量成分                                | $T_r$        | 对比温度                  |
| $h$         | 单位质量的焓; 浦朗克常数                              | $T_a$        | 最大回转温度                |
| $h_{298}^0$ | 每千摩尔物质标准生成焓                                | $t$          | 摄氏温度                  |
| $H_{298}^0$ | 标准状态下总生成焓                                  | $t_c$        | 临界温度                  |
| $I$         | 太阳总辐射强度                                    | $U$          | 总内能; 物系内能             |
| $K$         | 热能利用率; 传热系数                                | $u$          | 单位质量的内能               |
| $K_c$       | 化学平衡常数(用浓度表示)                              | $V$          | 气体容积                  |
| $K_p$       | 化学平衡常数(用分压力表示)                             | $V_M$        | 摩尔容积                  |
| $k$         | 玻尔兹曼常数=1.3806×10 <sup>-23</sup> J/分子K      | $v$          | 比容; 反应速度              |
| $k_1$       | 正向反应速度常数                                   | $v_r$        | 对比比容                  |
| $k_2$       | 逆向反应速度常数                                   | $W$          | 总功; 总膨胀功              |
| $L$         | 产液率                                        | $w$          | 单位质量膨胀功               |
| $l$         | 长度; 高度                                     | $w_s$        | 轴功                    |
| $M$         | 分子量; 马赫数                                   | $x$          | 摩尔浓度; 干度; 摩尔成分        |
| $m$         | 质量; 质量流量; 一个分子的质量                          | $z$          | 压缩因子; 高程; 压缩机级数;      |
| $N$         | 分子数目                                       |              | 位能; 自由焓               |
| $N_M$       | 亚佛加得罗常数=6.023×10 <sup>26</sup>             | 希腊文符号        | 名 称                   |
| $n$         | 多变指数; 气体摩尔数; 溶液摩尔数; 分子浓度                   | $\alpha$     | 压力温度系数; 抽汽率           |
| $p$         | 压力; 平衡状态时工质的压力                             | $\beta$      | 容积膨胀系数; 绝热升压比; 压力比    |
|             |                                            | $\epsilon$   | 黑度; 绝热压缩比; 角系数        |
|             |                                            | $\epsilon_1$ | 制冷系数                  |
|             |                                            | $\epsilon_2$ | 供热系数                  |
|             |                                            | $\zeta$      | 能量损失系数                |
|             |                                            | $\eta$       | 集热器效率; 喷管效率           |

|             |                           |               |        |
|-------------|---------------------------|---------------|--------|
| $\eta_c$    | 循环热效率                     | <i>dry</i>    | 干的     |
| $\kappa$    | 比热比 (绝热指数)                | <i>f</i>      | 流动     |
| $\lambda$   | 定容升压比; 波长                 | <i>h</i>      | 供热; 高  |
| $\lambda_v$ | 容积效率                      | <i>irr</i>    | 不可逆    |
| $\mu$       | 等温压缩系数; 分子量               | <i>is</i>     | 孤立     |
| $\mu_J$     | 焦耳-汤姆逊系数                  | <i>l</i>      | 液体; 低  |
| $\nu$       | 振动频率                      | <i>lost</i>   | 损失     |
| $\xi$       | 热能利用系数; 质量浓度              | <i>M</i>      | 摩尔     |
| $\rho$      | 密度; 内汽化潜热; 定压预胀比;<br>绝对湿度 | <i>m</i>      | 平均     |
| $\tau$      | 时间; 透过率                   | <i>max</i>    | 最大     |
| $\varphi$   | 相对湿度; 平衡系统中相的数目;<br>速度系数  | <i>min</i>    | 最小     |
| $\psi$      | 外汽化潜热; 单位质量焓              | <i>n</i>      | 摩尔数    |
| $\omega$    | 分子运动速度                    | <i>P</i>      | 生成物    |
| 下角码         |                           | <i>ph</i>     | 物理     |
| <i>a</i>    | 有用                        | <i>R</i>      | 反应物    |
| <i>ab</i>   | 吸收                        | <i>rev</i>    | 可逆     |
| <i>act</i>  | 实际                        | <i>s, sat</i> | 饱和     |
| <i>c</i>    | 临界                        | <i>sur</i>    | 环境; 外界 |
| <i>ch</i>   | 化学                        | <i>sys</i>    | 系统     |
|             |                           | <i>vp</i>     | 蒸汽     |
|             |                           | <i>wet</i>    | 湿的     |

# 目 录

|                                |     |
|--------------------------------|-----|
| 绪 论 .....                      | 1   |
| 第一节 热能来源和热能利用 .....            | 1   |
| 第二节 供热通风工程中的主要热能利用设备 .....     | 1   |
| 第三节 工程热力学的研究方法、研究对象与主要内容 ..... | 3   |
| 第四节 国际单位制 (SI) 简介 .....        | 4   |
| 第一章 工质及气体状态方程式 .....           | 7   |
| 第一节 热力系统——闭口、开口和孤立系统 .....     | 7   |
| 第二节 工质的热力状态及其基本状态参数 .....      | 8   |
| 第三节 热力平衡状态及状态方程 .....          | 12  |
| 第四节 理想气体状态方程式 .....            | 13  |
| 第五节 范德瓦尔方程式 .....              | 17  |
| 第六节 对比态定律及压缩因子图 .....          | 20  |
| 第二章 热力学第一定律 .....              | 26  |
| 第一节 热力过程 .....                 | 26  |
| 第二节 热量和功量 .....                | 29  |
| 第三节 闭口系统热力学第一定律能量方程式 .....     | 34  |
| 第四节 开口系统热力学第一定律能量方程 .....      | 36  |
| 第五节 稳定流动能量方程的应用 .....          | 42  |
| 第六节 气体的比热 .....                | 44  |
| 第三章 气体的主要热力过程及气体压缩 .....       | 55  |
| 第一节 气体的基本热力过程 .....            | 55  |
| 第二节 气体的多变过程 .....              | 62  |
| 第三节 压气机的理论压缩功 .....            | 64  |
| 第四节 多级压缩及中间冷却 .....            | 69  |
| 第五节 活塞式压气机的余隙影响 .....          | 72  |
| 第四章 热力学第二定律 .....              | 77  |
| 第一节 热力循环 .....                 | 77  |
| 第二节 热力学第二定律的表述 .....           | 79  |
| 第三节 卡诺循环与卡诺定理 .....            | 80  |
| 第四节 热力学温标 .....                | 84  |
| 第五节 熵 .....                    | 86  |
| 第六节 孤立系统熵增原理 .....             | 93  |
| * 第七节 熵方程式 .....               | 96  |
| * 第八节 熵的概念 .....               | 101 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| 第五章 水蒸汽的性质 .....            | 106 |
| 第一节 液体的汽化 .....             | 106 |
| 第二节 水蒸汽的定压发生过程 .....        | 107 |
| 第三节 水的相图及三相点 .....          | 109 |
| 第四节 水蒸汽参数的计算及水蒸汽图表 .....    | 110 |
| 第五节 水蒸汽的基本热力过程 .....        | 115 |
| 第六节 克拉贝龙——克劳休斯方程 .....      | 118 |
| 第六章 混合气体和湿空气 .....          | 121 |
| 第一节 混合气体的基本概念 .....         | 121 |
| 第二节 混合气体的分子量及比热的计算 .....    | 124 |
| 第三节 混合气体的比热、焓和熵 .....       | 125 |
| 第四节 湿空气的状态参数 .....          | 127 |
| 第五节 湿空气的焓湿图及角系数 .....       | 132 |
| 第六节 湿空气的露点和湿球温度 .....       | 135 |
| 第七节 湿空气的基本热力过程 .....        | 137 |
| 第七章 气体和蒸汽的流动 .....          | 143 |
| 第一节 气体在稳定流动过程中的基本关系式 .....  | 143 |
| 第二节 喷管截面变化的规律 .....         | 145 |
| 第三节 流速及流量计算 .....           | 149 |
| 第四节 扩压管 .....               | 153 |
| 第五节 喷管主要尺寸的确定 .....         | 154 |
| 第六节 具有摩擦的流动 .....           | 155 |
| 第七节 气体和蒸汽的绝热节流 .....        | 157 |
| 第八章 动力循环 .....              | 161 |
| 第一节 简单蒸汽动力循环——朗肯循环 .....    | 161 |
| 第二节 热电循环 .....              | 167 |
| * 第三节 内燃机循环 .....           | 170 |
| * 第四节 燃气轮机循环 .....          | 174 |
| 第九章 制冷循环 .....              | 177 |
| 第一节 空气压缩式制冷循环 .....         | 177 |
| 第二节 蒸汽压缩式制冷循环 .....         | 180 |
| 第三节 蒸汽喷射式制冷 .....           | 184 |
| 第四节 吸收式制冷 .....             | 185 |
| 第五节 热泵 .....                | 186 |
| * 第六节 气体的液化 .....           | 187 |
| 第十章 化学热力学基础 .....           | 190 |
| 第一节 热力学第一定律在化学反应中的应用 .....  | 190 |
| 第二节 生成焓 .....               | 193 |
| 第三节 稳定流动系统中化学反应热效应的计算 ..... | 196 |
| 第四节 热力学第二定律在化学反应中的应用 .....  | 200 |
| 第五节 化学平衡和平衡常数 .....         | 203 |
| 第六节 自由焓与其他热力参数之间的关系 .....   | 206 |

|        |                            |     |
|--------|----------------------------|-----|
| 第七节    | 化学反应的定温方程式 .....           | 207 |
| 第十一章   | 溶液热力学基础 .....              | 211 |
| 第一节    | 溶液的一般概念 .....              | 211 |
| 第二节    | 二元溶液的温度-浓度图和焓-浓度图 .....    | 213 |
| 第三节    | 相律 .....                   | 217 |
| * 第十二章 | 纯物质热力学微分方程式 .....          | 220 |
| 第一节    | 热物性系数 .....                | 220 |
| 第二节    | 焓、内能及熵的微分方程式 .....         | 224 |
| 第三节    | $c_p$ 和 $c_v$ 的微分关系式 ..... | 229 |
| * 第十三章 | 新能源利用简介 .....              | 231 |
| 第一节    | 能源的分类 .....                | 231 |
| 第二节    | 地热的来历、分布和利用 .....          | 231 |
| 第三节    | 太阳能的利用 .....               | 234 |
| 第四节    | 氢燃料的利用 .....               | 239 |
| 参考书目   | .....                      | 242 |

## 附 录

|           |                                        |     |
|-----------|----------------------------------------|-----|
| 附表 1      | 饱和水与干饱和蒸汽表 (按温度排列) .....               | 243 |
| 附表 2      | 饱和水与干饱和蒸汽表 (按压力排列) .....               | 245 |
| 附表 3      | 未饱和水与过热蒸汽表 .....                       | 247 |
| 附表 4      | 在1000mbar时的饱和空气状态参数表 .....             | 252 |
| 附表 5      | 氨在饱和状态下的热力性质 .....                     | 254 |
| 单位换算表: a、 | 单位换算因数 .....                           | 255 |
|           | b、压力的换算 .....                          | 255 |
|           | c、能量的换算 .....                          | 255 |
| 附图 1      | 水蒸汽的 $h-s$ 图                           |     |
| 附图 2      | 在1bar时的湿空气 $H-d$ 图                     |     |
| 附图 3      | 氨( $\text{NH}_3$ )的 $\lg p-h$ 图 (公制单位) |     |
| 附图 4      | 氟里昂-22的 $\lg p-h$ 图 (公制单位)             |     |

# 绪 论

## 第一节 热能来源和热能利用

热能利用是与人类文明紧密相关的。恩格斯曾指出：“人们只是在学会了摩擦取火以后，才第一次迫使某种无生命的自然力替自己服务。”\* 在日常生活里如不利用热能，人们的生活势将倒退到茹毛饮血的状况。目前我国农业机械化的动力是以内燃机动力为基础；我国电力工业仍以热力发电占主要地位；工业企业热加工工艺的完成也依赖热能的利用。随着我国工农业日益发展，热能的利用也与日俱增，它在国民经济中占有重要地位，它关系到全国人民的日常生活和发展工农业生产的热源问题，因此我国把能源研究，作为八大带头学科之一。

热能的来源，近代主要依赖煤炭、石油、天然气、油页岩等矿产燃料和核燃料，地下热能的开发和太阳能的利用还处于刚刚开始阶段。矿产燃料和核燃料在地球上毕竟有限，如世界各国都能重视节省能源技术和热能管理工作，则对于减少能源的浪费，将发挥很大的作用。

热能的利用，不外乎两种方式：一种是直接利用，把热能用于直接加热物料；另一种是间接利用，把热能转换为机械能，或者再转换为电能。人们习惯于从燃料的燃烧过程中获取热能，从能源的最有效利用来考虑，用燃烧方法释放燃料的化学能，并不是最有效的利用方法（相对于燃料电池等利用化学能而言），但热力发电厂的生产电能正是采用这一方法利用热能，热能在热力发电厂的有效利用率并不充分，它排入江河湖海和大气中的废热，大约占所提供热能的60%。至于运输工具如汽车、火车、飞机、船舶等，都是把热能转换为机械能的方式利用热能，其有效利用率比发电厂更低，它们排放到大气中去的废热，约占提供热能的65%，在这些运输工具排放废热的同时，还随带着大量的有害物质，造成环境污染。热能用于热力发电和运输行业，从消耗热能的总量来看，所占比重极大。我国目前利用热能的技术水平还不够高，尚未达到物尽其用的地步。我国燃料资源丰富，对它如何更有效而无污染地加以利用，不仅是我国科技界的一个重大课题，也是一个世界性的学术问题。

## 第二节 供热通风工程中的主要热能利用设备

为把工程热力学的基本理论与供热通风工程中的热能利用设备结合起来，这里扼要介绍有关锅炉设备、制冷系统、空调系统和太阳能在建筑上的应用等初步知识。

### 2-1 锅炉设备

---

\* 恩格斯：《自然辩证法》，人民出版社1971年版第91页。

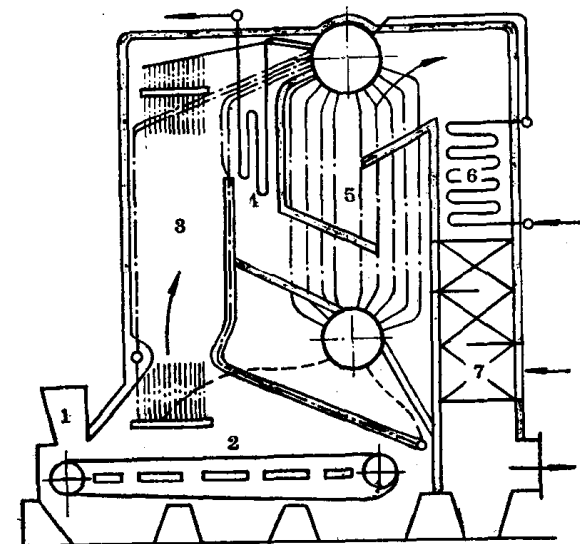


图 0-1 采用链条炉排的供热锅炉

1—煤斗；2—链条炉排；3—炉膛；4—过热器；  
5—汽锅管束；6—省煤器；7—空气预热器

图0-1是一台采用链条炉的供热锅炉。燃料自煤斗1自动落到链条炉排2上，进行燃烧产生烟气。携带大量热能的烟气在锅炉中依次从炉膛3经过热器4、汽锅管束5、省煤器6及空气预热器7，最后经除尘器及烟囱排入大气。汽锅中的水被高温烟气加热而汽化，产生所需规格的蒸汽作为供热用的工质。

## 2-2 压缩制冷系统

图0-2是一压缩制冷系统，氨气从蒸发器4被吸入压缩机1的气缸内，使氨气在气缸中压缩成为高温高压的氨气，然后送至冷凝器2冷凝为液氨，在这里用管道把液氨送往膨胀阀3，液氨经膨胀阀降压降温，在低温条件下进入蒸发器4，液氨

通过蒸发器的壁面从热风中吸热蒸发为氨气，把流经蒸发器的热风降温为冷风。

## 2-3 空调系统

图0-3是个一次回风空调系统，空气的处理流程如下：新风与来自空调房间7的回风先在混合室1按一定比例混合，接着经空气过滤器2流入淋水室3，在此受低温水喷淋降

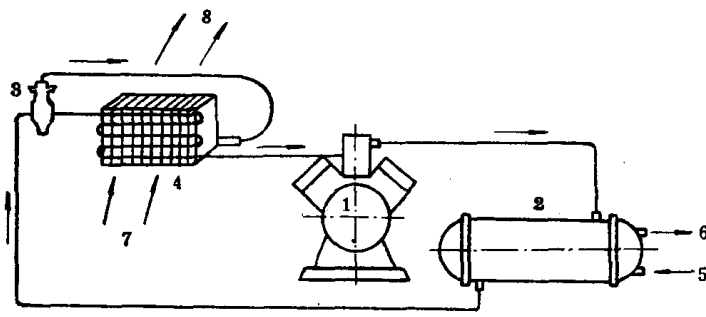


图 0-2 压缩制冷系统

1—压缩机；2—冷凝器；3—膨胀阀；4—蒸发器；5—冷却水入口；6—冷却水出口；7—热风；8—冷风

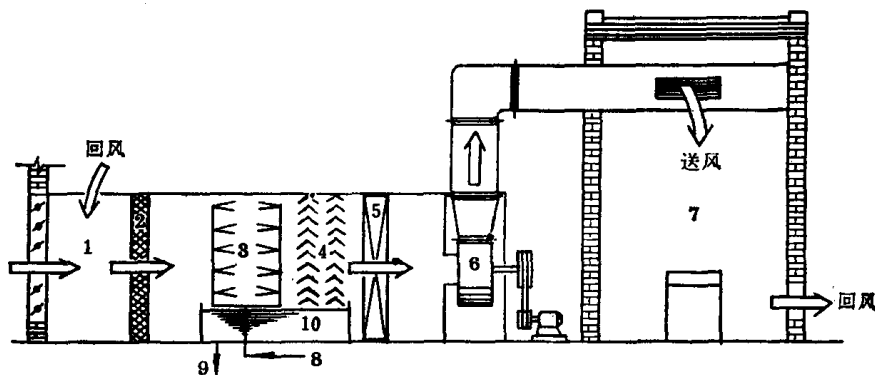


图 0-3 一次回风空调系统

1—混合室；2—空气过滤器；3—淋水室；4—后挡水板；5—加热器；6—送风机；7—空调房间；8—低温水送水管；9—回水排出管；10—盛水池

温降湿，然后再流经后挡水板 4 进入加热器 5，使空气加热到空调房间所需的温度，最后经送风机 6 送入空调房间 7，使这个房间在冬季获得热风，夏季得到冷风。

#### 2-4 太阳能在建筑上的应用

用

太阳能的热量是靠集热器 1 收集的，太阳能集热器可以和建筑屋面结合在一起。蓄能水箱存储集热器所生产的大量热水，如由于天气不正常，也可另加一个辅助热源生产热水。冬季可用蓄能水箱中的热水对室内进行热风采暖，如图 0-4 中的虚线所示。夏季可用蓄能水箱中的热水加热吸收式空调器 4 中的制冷溶液，以获得低温水，使流过冷却盘管 5 的空气降温后用风机 7 送入室内。

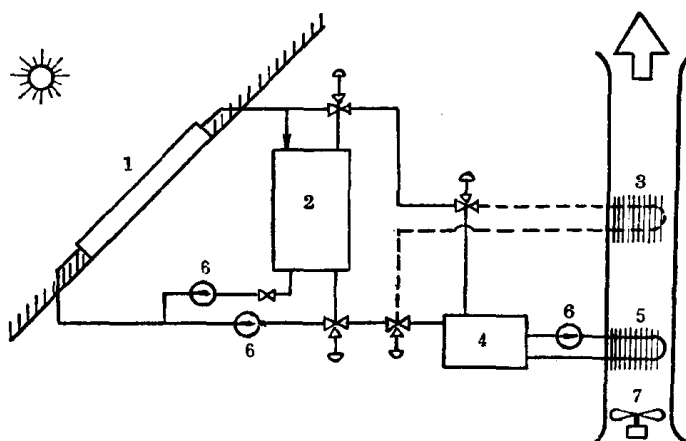


图 0-4 太阳能在建筑上的应用原理图

1—太阳能集热器；2—蓄能水箱；3—热风采暖盘管；4—吸收式空调器；5—空气冷却盘管；6—循环泵；7—轴流风机

### 第三节 工程热力学的研究方法、研究对象与主要内容

热力学是研究热现象规律的基础理论学科，它是人类对热现象进行直接观测和实验而总结出来的宏观理论，所谓宏观理论是相对于微观理论而言的。微观理论是从组成物质的分子原子等微粒的运动出发来阐明热现象的理论。宏观理论把组成物质的大量分子、原子等微粒作为一个整体，研究它所表现出来的各种性质和规律，而不去深究关于分子原子等微粒的结构及其运动的全部细节。工程热力学采用的研究方法也仍然是热力学的宏观方法，这一研究方法所获得的结果是精确的，符合客观实际的。

工程热力学属于应用科学的范畴，它从工程技术观点出发，把热力学基础理论——热力学第一定律和第二定律应用到工程技术领域里去。工程热力学的研究对象是热能转换为机械能的规律和方法，以及有效利用热能的途径，也包括将化学能或热能直接转换成电能的规律和方法。

工程热力学的主要内容有二个方面：一是基本理论部分；二是基本理论在工程技术领域里的应用部分。平衡状态，气体和蒸汽的性质，热力学第一定律和能量方程式，热力学第二定律和熵，以及热力学微分方程式等都是工程热力学的基本理论。至于混合气体和湿空气的性质，气体和蒸汽的流动，动力循环，制冷循环，化学热力学和溶液热力学等，都是基本理论在工程技术领域的应用。为了适应近代工程技术的发展，将热能有效而充分地利用，并防止污染环境，把化学热力学的部分内容也放在工程热力学的范围之内，是很有必要的。

## 第四节 国际单位制(SI)简介

国际单位制是1960年第十一届国际计量会议通过的, 其国际代号为SI\*, 我国简称为国际制。国际单位制已经得到会议参加国同意, 从1970年起, 在一些国家陆续采用。我国国务院于1977年5月颁发的《中华人民共和国计量管理条例(试行)》第三条规定: “我国的基本计量制度是米制(即‘公制’), 逐步采用国际单位制”。

一、在国际单位制中有三类单位, 即基本单位、导出单位和辅助单位。

1. 基本单位有七个。其名称和代号列于表0-1。

国际单位制基本单位

表 0-1

| 量       | 名 称    | 代 号    |     |
|---------|--------|--------|-----|
|         |        | 中 文    | 国 际 |
| 长 度     | 米      | 米      | m   |
| 质 量     | 千克(公斤) | 千克(公斤) | kg  |
| 时 间     | 秒      | 秒      | s   |
| 电 流     | 安 培    | 安      | A   |
| 热力学温度   | 开 尔 文  | 开      | K   |
| 物 质 的 量 | 摩 尔    | 摩      | mol |
| 光 强 度   | 坎 德 拉  | 坎      | cd  |

2. 导出单位是由基本单位通过代数式来表示的单位, 其内容较多, 现摘录供热通风专业常用的列于表0-2。

国际单位制导出单位示例

表 0-2

| 量        | 国 际 制 单 位 |                  |                                        |                                                                                            |
|----------|-----------|------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
|          | 名 称       | 代 号              |                                        | 用国际制基本单位表示的关系式                                                                             |
|          |           | 中 文              | 国 际                                    |                                                                                            |
| 力        | 牛 顿       | 牛                | N                                      | $\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$                                             |
| 压力(压强)   | 帕 斯 卡     | 帕                | $\text{Pa} (\text{N}/\text{m}^2)$      | $\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$                                        |
| 能、功、热量   | 焦 耳       | 焦                | $\text{J} (\text{N} \cdot \text{m})$   | $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$                                           |
| 功率、辐射通量  | 瓦 特       | 瓦                | $\text{W} (\text{J}/\text{s})$         | $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$                                           |
| 动力粘度     | 帕斯卡秒      | 帕秒               | $\text{Pa} \cdot \text{s}$             | $\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$                                        |
| 力 矩      | 牛 顿 米     | 牛米               | $\text{N} \cdot \text{m}$              | $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$                                           |
| 热流密度     | 瓦特每平方米    | 瓦/米 <sup>2</sup> | $\text{W}/\text{m}^2$                  | $\text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$                                                            |
| 热容、熵     | 焦耳每开尔文    | 焦/开              | $\text{J}/\text{K}$                    | $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$                       |
| 比热、比熵    | 焦耳每公斤开尔文  | 焦/公斤·开           | $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$  | $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$                                       |
| 比能、焓     | 焦耳每公斤     | 焦/公斤             | $\text{J}/\text{kg}$                   | $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$                                                           |
| 导热系数     | 瓦特每米开尔文   | 瓦/米·开            | $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$   | $\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$                         |
| 能(量)密度   | 焦耳每立方米    | 焦/米 <sup>3</sup> | $\text{J}/\text{m}^3$                  | $\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$                                        |
| 摩尔能量     | 焦耳每摩尔     | 焦/摩              | $\text{J}/\text{mol}$                  | $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{mol}^{-1}$                     |
| 摩尔焓、摩尔比热 | 焦耳每摩尔开尔文  | 焦/摩·开            | $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ | $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$ |

\* SI是法文Système International d' Unités的缩写。

3.辅助单位只有二个,而且纯系几何单位,见表0-3。

国际单位制辅助单位

表 0-3

| 量     | 国 际 制 单 位 |       |     |
|-------|-----------|-------|-----|
|       | 名 称       | 代 号   |     |
|       |           | 中 文   | 国 际 |
| 平 面 角 | 弧 度       | 弧 度   | rad |
| 立 体 角 | 球 面 度     | 球 面 度 | sr  |

二、用来构成国际制单位的十进倍数和分数单位的冠词,称为国际制冠词(SI词冠),常用的国际单位制词冠见表0-4。

常用国际单位制词冠

表 0-4

| 因 数       | 词 冠      | 代 号 |       |
|-----------|----------|-----|-------|
|           |          | 中 文 | 英 文   |
| $10^9$    | 吉咖(giga) | 吉   | G     |
| $10^6$    | 兆(mega)  | 兆   | M     |
| $10^3$    | 千(kilo)  | 千   | k     |
| $10^2$    | 百(hecto) | 百   | h     |
| $10^1$    | 十(deca)  | 十   | da    |
| $10^{-1}$ | 分(deci)  | 分   | d     |
| $10^{-2}$ | 厘(centi) | 厘   | c     |
| $10^{-3}$ | 毫(milli) | 毫   | m     |
| $10^{-6}$ | 微(micro) | 微   | $\mu$ |

三、国际单位制在供热通风专业中的应用。

1.力的单位用牛顿(N)

1牛顿力就是质量为1公斤的物体授以1米/秒<sup>2</sup>加速度的力,即  $1\text{N}=1\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ 。

必须指出,用重力加速度  $g$  来计算的力称为重力(过去称重量,今后取消这一名称),以  $G$  表示,则重力为  $G=mg$ ,其单位为  $\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ ,就等于N。质量  $m$  为1kg的物体所受的重力为

$$G=1\text{kg}\times 9.81\text{m}/\text{s}^2=9.81\text{N}$$

2.压力的单位用帕斯卡(Pa),也可用巴(bar)

$$1\text{Pa}=1\text{N}/\text{m}^2; 1\text{bar}=10^5\text{Pa}=10^5\text{N}/\text{m}^2$$

压力分为表压力和绝对压力,表压力也称工作压力,本书中不注明工作压力的都应理解为绝对压力。

3.国际单位制取消重度  $\gamma$ ,而用密度乘重力加速度  $\rho g$  代替,例如过去计算液柱压力用

$$p=H\gamma \quad \text{kgf}/\text{m}^2$$

式中  $H$ ——液柱高度, m;

$\gamma$ ——液柱重度,  $\text{kgf}/\text{m}^3$ 。

根据国际单位制,液柱压力应写成

$$p=H\rho g \quad \text{N}/\text{m}^2 \quad \left( \text{m} \cdot \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \text{即} \text{N}/\text{m}^2 \right)$$

式中  $\rho$  ——液体密度,  $\text{kg/m}^3$ ;

$g$  ——重力加速度,  $\text{m/s}^2$ 。

4. 温度单位用开尔文(K), 也可用摄氏温度( $^{\circ}\text{C}$ ), 两者度的大小相等, 而温度差则用K表示, 不用 $^{\circ}\text{K}$ 表示。

5. 能量、功量和热量都用同一单位焦耳(J), 其定义是  $1\text{J}=1\text{N}\cdot\text{m}$ , 在工程计算中还可使用瓦秒( $\text{W}\cdot\text{s}$ ), 它是焦耳的另一种表达形式, 即

$$1\text{J}=1\text{W}\cdot\text{s} \quad \text{或} \quad 1\text{W}=1\text{J/s}$$

千瓦小时( $\text{kW}\cdot\text{h}$ )暂时还可使用, 但以后将废除,  $\text{kW}\cdot\text{h}$ 与J的换算关系是  $1\text{kW}=3600\text{kJ}$ , 即  $1\text{kW}=1\text{kJ/s}$ 。

#### 6. 国际单位制的通用常数

1 标准大气压(760mmHg):  $101325\text{N/m}^2=1.01325\text{bar}$

标准重力加速度:  $9.80665\text{m/s}^2$

水的质量比热:  $4.1868\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

空气的定压质量比热:  $1.01\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

$0.01^{\circ}\text{C}$ 时水蒸汽的汽化潜热:  $2501\text{kJ/kg}$

通用气体常数:  $8314\text{J}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$

干空气的气体常数:  $287\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

水蒸汽的气体常数:  $461.5\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

#### 四、国际单位制与其他单位制的换算表

压 力 换 算 表

表 0-5

| 压力名称                | 帕 斯 卡<br>Pa           | 巴<br>bar                 | 公斤力/米 <sup>2</sup><br>mmH <sub>2</sub> O | 公斤力/厘米 <sup>2</sup><br>at | 毫 米 汞 柱<br>mmHg          | 标准大气压<br>atm             |
|---------------------|-----------------------|--------------------------|------------------------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 帕 斯 卡               | 1                     | $10^{-5}$                | 0.101972                                 | $0.101972 \times 10^{-4}$ | $7.50062 \times 10^{-3}$ | $9.86923 \times 10^{-6}$ |
| 巴                   | $10^5$                | 1                        | 10197.2                                  | 1.01972                   | 750.062                  | 0.986923                 |
| 公斤力/米 <sup>2</sup>  | 9.80665               | $9.80665 \times 10^{-5}$ | 1                                        | $1.000 \times 10^{-4}$    | $7.35559 \times 10^{-2}$ | $9.67841 \times 10^{-5}$ |
| 公斤力/厘米 <sup>2</sup> | $9.80665 \times 10^4$ | 0.980665                 | $10^4$                                   | 1                         | 735.559                  | 0.967841                 |
| 毫米汞柱                | 133.332               | $1.33332 \times 10^{-3}$ | 13.595                                   | $1.3595 \times 10^{-3}$   | 1                        | $1.31579 \times 10^{-3}$ |
| 标准大气压               | 101325                | 1.01325                  | 10332.3                                  | 1.03323                   | 760                      | 1                        |

注: 英制压力单位采用 磅力/英寸<sup>2</sup> ( $\text{lbf/in}^2$ )

1  $\text{lbf/in}^2=6894.7 \text{ Pa}$ 。

功、能 和 热 量 换 算 表

表 0-6

| 能量名称  | 千 焦<br>kJ              | 国际千卡<br>kcal           | 公斤力·米<br>kgf·m | 千瓦·时<br>kW·h            | 马力·时<br>ps·h            | 英 热 单 位<br>Btu         |
|-------|------------------------|------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|
| 千 焦   | 1                      | 0.2388                 | 101.972        | $2.772 \times 10^{-4}$  | $3.7777 \times 10^{-4}$ | 0.9478                 |
| 国际千卡  | 4.1868                 | 1                      | 426.94         | $1.163 \times 10^{-3}$  | $1.581 \times 10^{-3}$  | 3.9682                 |
| 公斤力·米 | $9.807 \times 10^{-3}$ | $2.342 \times 10^{-3}$ | 1              | $2.724 \times 10^{-6}$  | $3.703 \times 10^{-6}$  | $9.294 \times 10^{-3}$ |
| 千瓦·时  | 3600.65                | 860                    | 367168.4       | 1                       | 1.3596                  | 3412.14                |
| 马力·时  | 2648.278               | 632.53                 | 270052.36      | 0.7355                  | 1                       | 2509.63                |
| 英热单位  | 1.055056               | 0.2520                 | 107.5862       | $2.9307 \times 10^{-4}$ | $3.985 \times 10^{-4}$  | 1                      |

注: 1 国际大卡=1.0012 20 $^{\circ}$ 千卡

=1.0026 15 $^{\circ}$ 千卡

# 第一章 工质及气体状态方程式

在热力工程中，实现热能与机械能的转换，或热能的转移，通常都要借助于一种携带热能的工作物质，简称工质。各种气体、蒸气及其液体是工程上常用的工质。在工作过程中，一方面工质的热力状态不断地发生变化；一方面工质与外界之间有能量的输入或输出。因此，工质的热力性质及热能转换规律成了工程热力学的主要研究内容。本章介绍有关气态工质的热力状态特性，如状态、状态参数和状态方程式等内容。在研究方法上引入热力系统的概念，这对于明确研究对象，理解工质热力参数的物理概念，以及建立能量方程等都非常重要。

## 第一节 热力系统——闭口、开口和孤立系统

选取热力系统的方法是热力学重要的研究方法，它可以使我们明确研究对象，把注意力集中到所研究的物体上。如图 1-1，假如我们需要研究活塞式气缸中气体的热力状况，即可设想一个完全闭合的边界将气缸中的气体从周围的环境（缸体、活塞和外界空气等）中划分出来，那么，边界内部所包围的空间物体就称为热力系统，简称系统。边界外部的物体称为外界或环境。

分隔系统与外界边界可以是实际存在的或假想的，也可以是固定不变的或运动的、可变形的。如图 1-1 中的边界就是与气缸壁、气缸头及活塞表面等实物界面相一致的实际边界。又如图 1-2，一个真空的容器，当与外界连接的阀门打开时，外界空气在大气压力作用下将流入容器，直至它们的压力平衡为止。我们可以把大气中流入容器的那部分空气用一个假想的边界从大气中划分出来，那么，容器内壁以及假想的边界所包围的空气便是我们研究的热力系统。当阀门打开后，随着空气流入容器，假想的边界受外界空气压缩，这时边界及整个系统都发生收缩。

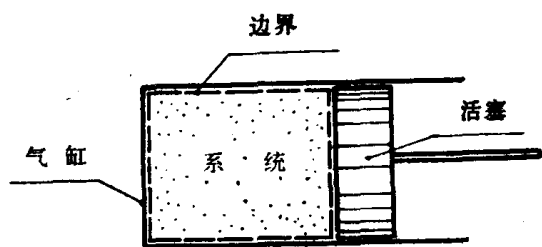


图 1-1 热力系统

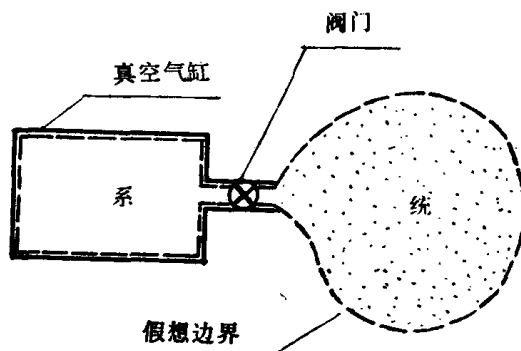


图 1-2 闭口系统

按照边界的性质及系统与外界的相互关系，可以把系统分为闭口系统和开口系统，绝热系统和孤立系统。没有物质穿过边界的系统称为闭口系统，系统的质量始终保持恒定，

如图1-1及图1-2都是闭口系统的实例。有物质穿过边界的系统称为开口系统，系统中物质的总量可以保持恒定或发生变化。工程上最常见的是工质连续而恒定地流过设备，系统中物质总量保持不变的情况，如水蒸汽连续而稳定地流过汽轮机而作功就是其实例。

无论是闭口系统或开口系统都可能有能量（热量或功量）穿过边界，使系统与外界发生能量传递（或称能量交换）；或者能量不能穿过其边界，系统与外界不发生能量交换。如果某系统的实际边界的围壁是由完全隔热的材料构成，热能不能穿过围壁，系统与外界之间没有热的相互作用，这样的系统称为绝热系统。如果一个热力系统既不与外界发生质量的交换，又不发生能量（包括热量和功量）的交换，则称为孤立系统。而孤立系统也可以是由几个有物质和能量交换的分系统所组成，如图1-3所示，系统边界以内的总体仍然是一个孤立系统。任何一个系统及其外界综合在一起考虑就构成一个孤立系统。

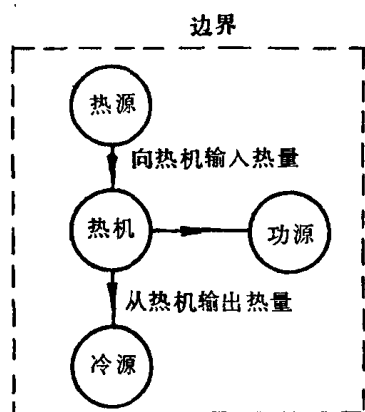


图 1-3 孤立系统

绝热系统与孤立系统都是抽象的概念，事实上，自然界不存在完全隔热的物质，也就不存在真正的绝热系统。同样，任何系统不论怎样使它和外界隔离开来，总不可能使它绝对不与外界发生能量的交换。然而，不能说这些抽象的概念没有现实意义，它们都是从客观事物中抽象出来的，抓住了事物的本质，能够表达事物基本的主要的一面，与实际事物有着很大程度的近似性。这种科学的抽象将给热力系统的研究带来很大的方便。在工程热力学中，我们还会遇到很多从客观事物中抽象出来的基本概念，如理想气体、理想溶液、平衡状态、可逆过程等等。这些抽象概念虽然都与客观事物不完全相同，却是客观事物在一定条件下的近似反映，有很大的现实意义。学习中不应该把这些抽象概念绝对化，而应该把它们看作一种可靠的科学研究方法。

应当指出：系统的选取，必须根据实际情况，以能给解决问题带来方便为原则。系统选取方法对研究问题的结果并无影响，仅与解决问题的繁复程度有关。

## 第二节 工质的热力状态及其基本状态参数

系统中的工质与外界物体之间能够进行能量交换（传热或作功）的根本原因，在于两者间的热力状态存在差异。例如，锅炉中的热量传递是由于燃料燃烧生成的高温烟气与汽锅内汽水之间存在着温度差；又如热力发动机中能量的转换是由于热力发动机中的高温高压工质与外界的温度、压力有很大的差别。可见，这种热力状态的差异，就是如压力、温度等这样一些标志工质物理特性的数值的不同。我们把系统中某瞬间工质表现在热力现象方面的总状况称为工质的热力状态，简称为状态。热力状态反映着系统工质大量分子热运动的平均特性。我们把描述工质状态特性的各种物理量称为工质的状态参数。状态参数值只取决于工质的状态，一定的状态，各状态参数有确定的数值。工质状态变化，状态参数值也变化，但两个不同状态参数之间的差值，与状态变化的途径无关。状态参数是点函数。

热力学中的状态参数有温度、压力、比容（或其倒数——密度）、内能、焓、熵、