

热能的合理利用

RE NENG DE HE LI LI YONG

朱玉琢 主编

吉林科学技术出版社

热能的合理利用

朱玉琢 主编

李谦六 审校

吉林科学技术出版社

热能的合理利用

朱玉琢 主编

李谦六 审核

◆

吉林科学技术出版社出版发行

吉林省林业设计院印刷厂印刷

◆

787×1092毫米32开本 10.125印张 223,000字

1987年10月第1版 1987年10月第1次印刷

印数: 1—2350册

统一书号: 15376·74 定价: 3.00元

ISBN 7-5384-0111-3/TK·2

前 言

能源是实现社会主义现代化和提高人民生活水平的重要物质基础，是整个国民经济发展的强大动力。因此，有关能源的开发、利用为各国所重视。

能源在很大程度上是以热能形态或经过这一形态转变成其它形式的可用能量而被利用。因此，热能的合理利用在能源的开发和利用过程中占有极其重要的地位。本书以热能的合理利用和节约热能为重点，从理论和实践的结合上系统地阐述了热能合理利用的基本理论及其应用技术。全书共分十章，包括工程热力学原理；传热学原理；供热系统节能潜力与节能决策分析；焓分析；热能转换过程的经济分析；热能工程投资经济效益评价；集中供热；工业蒸气的蓄聚与凝结水回收；热力管道与热工设备保温；余热和余热利用技术。可供从事热能动力、暖通空调、能源与节能以及环境保护工作的工程技术人员、管理人员使用。对院校有关专业的师生也有参考价值。

本书由朱玉琢主编并定稿，吉林工业大学副教授、热能工程教研室主任李谦六审校。其中第一章由郝玉福编写；第二章由金文桂编写；第三、五、六章由李炬编写；第四章由苏俊林编写；第七、八、九、十章由朱玉琢编写。

由于编者水平所限，书中不足之处，请读者批评指正。

目 录

第一篇 热工基础理论

第一章 工程热力学原理	1
1-1-1 基本概念	1
1-1-2 热力学第一定律	15
1-1-3 热力学第二定律	21
1-1-4 简单可压缩物质	44
第二章 传热学原理	63
1-2-1 概述	63
1-2-2 稳定导热	64
1-2-3 对流换热	70
1-2-4 辐射换热	80
1-2-5 传热的增强与削弱	89

第二篇 热力系统技术理论分析

第三章 供热系统节能潜力与节能决策分析	94
1-3-1 供热系统节能潜力分析	94
1-3-2 供热系统节能决策分析	102
第四章 烟分析	109
1-4-1 有关烟的基本概念	109
1-4-2 烟分析法	118
1-4-3 合理用烟	147
第五章 热能转换过程的热经济分析	154
第六章 能源工程投资的经济效果评价	162

第三篇 热能的综合利用

第七章 集中供热	177
Ⅶ-7-1 概述	177
Ⅶ-7-2 热电联产与区域锅炉房供热系统	179
Ⅶ-7-3 集中供热系统的热负荷及其特性	196
Ⅶ-7-4 供热系统的调节	201
第八章 工业蒸气的蓄聚与凝结水回收	206
Ⅷ-8-1 蒸气的蓄聚及设备	206
Ⅷ-8-2 蒸气蓄热器热力系统 及其适用条件与范围	214
Ⅷ-8-3 凝结水的回收与利用	217
Ⅷ-8-4 凝结水的回收设备	224
第九章 热力管道与热工设备保温	237
Ⅸ-9-1 概述	237
Ⅸ-9-2 保温热力计算	241
Ⅸ-9-3 保温材料	264
Ⅸ-9-4 常用热力管道与设备 的保温结构	287
第十章 余热和余热利用技术	295
Ⅹ-10-1 余热源及其特性	295
Ⅹ-10-2 余热量的简化计算	300
Ⅹ-10-3 余热利用的原则和常用设备	304
Ⅹ-10-4 余热利用举例	314
参考文献	318

第一篇 热工基础理论

第一章 工程热力学原理

I - 1 - 1 基本概念

工程热力学的主要研究对象是工程技术中有关热能与机械能相互转换的规律。目前热能的主要来源是靠矿物燃料的化学能。燃料在某种设备中燃烧,由化学能转变为热能,再由热能转变为机械能。这种设备称之为“热能动力装置”,或简称热机。工程热力学不深入研究各种热机的具体构造,而是着重分析各种热机的共性问题,即研究热能转变为机械能的规律。

一、工质、热力系统、热源

1. 工质

我们常见的热机如汽车、拖拉机发动机和蒸气机车的蒸气机等,都属热机的一类。前者用燃油与空气混合燃烧产生的高温高压燃气;燃气膨胀推动活塞做功;后者用在锅炉里产生的高温高压蒸气,蒸气膨胀推动活塞做功。无论何种热机运转总要有工作媒介物质,即简称“工质”。工质应具有良好的流动性与膨胀性,体积最易发生变化。因而,热机的

工质不是气体就是蒸气。

2. 热力系统

热力系统就是一个特定的区域，用一个完善定义的表面将它与其他一切物体区分开的区域。与热力系统相关的周围物体称为外界。热力系统同外界的分界面（即完善定义的表面），称为控制表面。它可以是真实的，也可以是假想的。如图1-1和图1-2所示。图1-2进出口截面处为假想的控制表面，其余的为真实的控制表面。控制表面可以是固定不动的，也可以是移动的。如图1-1中气缸壁与工质间的控制表面是固定的，但活塞与工质之间的控制表面是移动的。

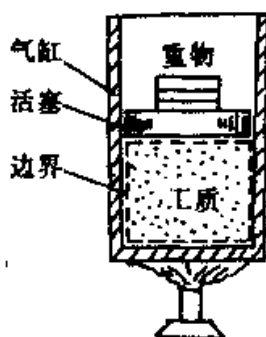


图1-1

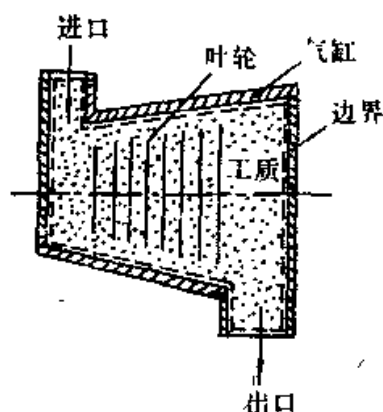


图1-2

按照热力系统与外界之间所进行的能量和物质交换情况，热力系统可分为闭口系统、开口系统、孤立系统和绝热系统。

闭口系统——和外界无物质交换，仅有能量交换；

开口系统——和外界既有质量交换又有能量交换；

孤立系统——和外界既无质量交换又无能量交换；

绝热系统——和外界只是无热量交换。

3. 热源

热源是一个特殊的闭口系统,其贮存能量相当大,它只与外界进行热量交换。交换的结果对其温度毫无影响,始终保持为定值。供给热机热量的热源称为高温热源(简称热源),吸收热机放出热量的热源称为低温热源(又称热汇)。

二、状态参数

热力系统在某一瞬间工质所处的宏观物理情况称为状态。而描写工质呈现宏观状态的物理量称为状态参数。

工程热力学中常用的状态参数有六个,即温度、压力、比容、内能、焓和熵。在这些状态参数中温度、压力和比容可以直接测量,有直观感,一般又称之为基本状态参数。下面分别介绍这六个状态参数。

1. 温度

温度是物体冷热程度的标志。表示冷热程度的数值或度数叫做温度;测量温度的物质叫做测温物质;量测温度的仪器叫做温度计。

由物理学的分子运动论可知,温度是分子热运动程度的标志。对气体而言,可用大量分子平移动能平均值来衡量,其关系式为:

$$\frac{m \cdot \bar{c}^2}{2} = BT \quad (1-1)$$

式中 T ——热力学温度;

$\bar{c}$ ——分子移动的均方根速度;

m ——分子的平均质量;

B ——比例常数,或称波耳茨曼常数。

按照分子运动论的观点,解释两个温度不同的物体直接接触时,在接触面上分子发生相互碰撞,进行动能交换,能

量由平均动能较大方面朝平均动能较小方面传递。也就是能量由温度较高物体向温度较低物体传递。

目前在工程上常见两种温标，热力学温标，又称开尔文温标或绝对温标，用K表示；热力学摄氏温标，用℃表示。两者之间的关系式：

$$T = t + 273.15 \text{ (K)} \quad (1-2)$$

作为工程计算，可取

$$T = t + 273 \text{ (K)} \quad (1-3)$$

式中 T ——热力学温度值，单位为 K；

t ——摄氏温度值，单位为 ℃。

摄氏温度每一度间隔与热力学温度完全一样，但摄氏温度与热力学温度所取零点不同。

2. 压力

压力是工质作用在单位面积的容器壁上的垂直作用力。按照分子运动论的观点，解释气体的压力是组成气体的大量分子频繁撞击容器壁的结果。

压力单位，在国际单位中为〔牛顿/米²〕，可记作〔N/m²〕，称为〔帕斯卡〕，简写成〔帕〕，国际代号为Pa，在工程计算中以〔帕〕为单位太小，常见〔兆帕〕表示，代号为MPa。

$$1\text{MPa} = 10^3\text{kPa} = 10^6\text{Pa}$$

目前与国际单位制同时使用的压力单位有 bar〔巴〕略见表 1-1。

表1—1 暂时与国际单位制并用的压力单位

单位名称	单位符号	与帕的换算关系
巴	bar	$1\text{bar}=10^5\text{Pa}=0.1\text{MPa}$
毫米汞柱	mmHg	$1\text{mmHg}=133.3224\text{Pa}$
毫米水柱	mmH ₂ O	$1\text{mmH}_2\text{O}=9.80665\text{Pa}$

在热力工程计算时,要用真实压力(又称绝对压力),用 p 表示;而在测量压力时,所用的压力表本身就置于大气压力作用下,因此所测得的数值是绝对压力与大气压力的差值,称为表压力,用 p_z 表示。参看图1-3(a),表压力是绝对压力高于当时当地的大气压力 p_b 的数值。即

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

如果工质的绝对压力比大气压力低时,真空计所测得的数值是绝对压力低于大气压力的差值,称为真空度,用 P_v 表示。参看图1-3(b),真空度是绝对压力低于当时当地的大气压力 p_b 的数值。即

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

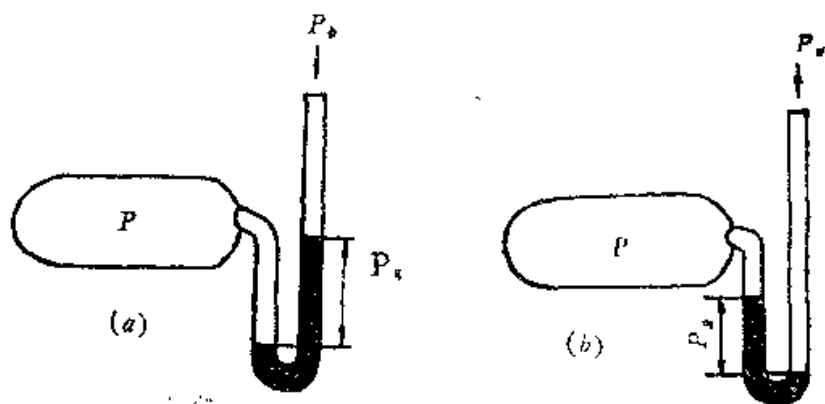


图1-3

由式 (1-4) 和式 (1-5) 可以看出, 当绝对压力 $p = \text{常数}$ 时, 如果 p_b 发生变化, 其 p_s 或 p_v 均随 p_b 的变化而变化, p_b 随时间地点不同而异, 故称 p_b 为当时当地大气压。为了便于理解和掌握压力之间的关系, 见图 1-4。

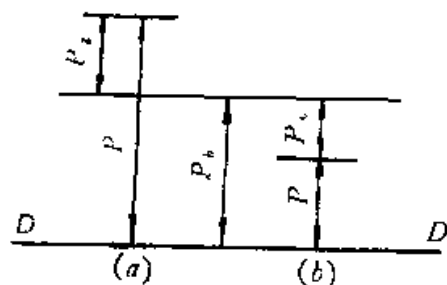


图1-4

3. 比容

比容是单位质量的工质所占有的容积, 即

$$v = \frac{V}{m}, \quad V = m \cdot v \quad (1-6)$$

式中 v ——比容;

V ——容积;

m ——质量。

比容的倒数, 即单位容积中所容纳的工质质量, 称为密度, 即

$$\rho = \frac{1}{v} \quad (1-7)$$

显然, $v \times \rho = 1$ 。要注意它们不是互相独立的状态参数, 可以任选其一, 然而热力学中通常使用 v 作为独立状态参数。有时给出重度这一状态参数, 重度是指单位容积中所容纳的工质重量, 即

$$\gamma = s \cdot g \quad (1-8)$$

式中 g ——重力加速度, $g = 9.80665 \text{ m/s}^2$ 。在工程计算中常取略值 9.81 m/s^2 。

4. 内能

内能是构成热力系统里的大量工质本身所具有的能量。

内能又可以分为内动能（分子的移动动能、转动动能和分子内部的振动动能）和内位能（分子之间的作用力所引起的位能）。

在工程计算中常用比内能，即单位质量工质所具有的内能。按照习惯简称比内能为内能，用 u 表示，即

$$u = \frac{U}{m} \quad U = m \cdot u \quad (1-9)$$

式中 u ——比内能；

U ——内能；

m ——质量。

在国际单位制中，内能的单位为J（焦耳），比内能的单位为J/kg。在工程单位制中，内能的单位为kcal（千卡或大卡），比内能的单位为kcal/kg。两者之间的换算关系为：

$$1\text{kcal} = 4186.8\text{J} = 4.1868\text{kJ}$$

各种能量的换算关系，查阅附表1。

5. 焓

焓是一个综合状态参数，即

$$H = U + pV \quad (1-10)$$

式中 H ——焓；

U ——内能；

P ——压力；

V ——容积。

在工程计算中，常用比焓，即单位质量工质所具有的焓，按照习惯简称比焓为焓，用 h 表示，即

$$h = \frac{H}{m} = u + pv \quad H = mh \quad (1-11)$$

式中 h ——比焓；

m ——质量。

在国际单位制中，焓的单位为J，比焓的单位为J/kg。在工程单位制中，焓的单位为kcal，比焓的单位为kcal/kg。考虑到当前工程技术人员对工程单位较熟悉，而对国际单位制不习惯，不妨对两种单位制的换算关系再介绍一下。因为在工程单位制中 pV 的乘积的单位是机械功kgf·m（公斤力·米），它和热量单位kcal之间的换算关系为，

$$1\text{kgf}\cdot\text{m} = \frac{1}{426.936}\text{kcal}$$

式中常数 $\frac{1}{426.936}$ 为热量和功量的换算常数，用 A 表示，则

A 称为功的热当量。

因此，如果应用工程单位制，式（1-11）改写为，

$$H=U+ApV \quad h=u+Apv \quad (1-11')$$

6. 熵

熵是一个导出的状态参数。它是由热力学第二定律推导出来的，熵的中文意思是按 Q/T 的比值——商而命名的，外文的原意是“转变”。按照熵的定义，即

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \quad (1-12)$$

式中 ΔS ——熵的变化量；

Q ——系统与外界交换的热量；

T ——系统的温度。

在工程计算中，常用比熵，即单位质量工质所具有的熵，按照习惯简称比熵为熵，用 ΔS 表示，即

$$\Delta S' = \frac{q}{T}, \quad \Delta S = m \cdot \Delta S' \quad (1-13)$$

式中 q —— 单位质量时，系统与外界交换的热量。

在国际单位制中，熵的单位为 J/K ，比熵的单位为 $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ，在工程单位制中，熵的单位为 kcal/K ，比熵的单位为 $\text{kcal}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ 。

三、平衡状态、状态方程

平衡状态是指热力系统在没有外界作用的条件下，工质宏观性质不随时间而变化的状态。所谓没有外界作用，是指热力系统与外界没有功量和热量交换的两种相互作用。

只有在平衡状态时，系统内工质的全部状态参数才有确定的数值。实践证明，对于我们经常遇到的热力系统，只要确定两个独立状态参数，其它的状态参数均可由这两个独立状态参数按一定的函数关系通过计算确定，从而工质的状态就可确定。对状态参数的性质可以概括为：状态参数在数学上表现为状态参数的变化与路径无关；状态参数的微分为全微分，而全微分的封闭积分等于零。用式子可以表示为：

$$\int_1^2 dz = z_2 - z_1$$

$$\oint dz = 0$$

其中 z 为任意状态参数。

状态方程是指状态参数之间的关系式。对于由气态工质所组成的热力系统，如果处于平衡状态时，就有确定的压力、温度和比容的数值。实验表明，这些参数之间存在某种相互关系。对于定量工质，当容积不变进行加热时，随温度的升

高压力增大；当压力不变进行加热时，随温度的升高容积增大，如果容积和压力确定之后，则温度便被确定，且仅有唯一确定的数值，从而状态被确定了。用数学表示可写成显函数或隐函数的形式，即

$$T=f_1(p, v), p=f_2(v, T), v=f_3(p, T)$$

$$\text{或 } F(p, v, T) = 0$$

这样的关系式称为气体的状态方程式。

从物理学得知，许多科学家作了大量的实验，得到理想气体状态方程式，或称克拉贝隆方程式。对1kg工质，理想气体状态方程式为

$$pv = RT \quad (1-14)$$

对mkg工质，状态方程式为

$$pV = mRT \quad (1-15)$$

式中 R ——气体常数，它与状态无关，但与气体性质有关。在国际单位制中，其单位为 $J/(kg \cdot K)$ ，在工程单位制中，其单位为 $(kgf \cdot m/kg \cdot K)$ 。

在工程热力学的计算中，经常用到摩尔这个物质的量的单位。所谓1摩尔是指气体中所包含的分子数与0.012kg碳-12的原子数目相等。摩尔的中文代号是摩，国际代号为mol。

1kmol气体所具有的容积称为1千摩尔容积，用 V_m 表示。即 $1V_m = M \cdot v$ ，按照阿佛加德罗定律：在同温同压下，相同容积的任何气体都具有相同数目的分子。所以，是同温同压下任何气体的千摩尔容积都相等。在物理标准状态下，即 $p = 0.101MPa$ （或 $p_0 = 1atm$ ）， $T = 273.15K$ （或 $t_0 = 0^\circ C$ ）。千摩尔容积的数值为

$$V_m = 22.4m^3/kmol$$

对于1kmol气体（相当于M公斤），状态方程式为

$$PMv = MRT$$

$$\text{或 } PV_m = R_m T \quad (1-16)$$

式中 R_m ——通用气体常数，它不仅与气体的性质无关，而且与气体的状态也无关。其值为

$$R_m = 8314.3 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K}) = 848 \text{ kgf} \cdot \text{m}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$$

对于任何一种理想气体常数 R ，可按式计算：

$$R = \frac{MR}{M} = \frac{8314.3}{M} \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$$

对于 n 个 kmol 的气体，其状态方程式为

$$pV = n(8314.3T) \quad (1-17)$$

上述诸方程，反映出各参数之间的基本关系，当气体温度较高，压力较低条件下，用它们计算所得到的结果，误差较小。

四、热力坐标图

因为两个独立状态参数可以确定一个状态，所以为了描述工质所处的状态、状态变化、热力系统与外界交换的功量与热量。采用由两个独立状态参数组成的二维坐标图，可作为直观地定性分析的辅助工具。在工程热力学中用的较多的是压容图（ $p-v$ 图）及温熵图（ $T-S$ 图）。见图1-5（a）、（b）。

在（a）、（b）图上任意一点都表示一个平衡状态，均有对应的 p 、 v 及 T 、 S 值。除此之外，每一点还有相应的其他状态参数值。如在 $p-v$ 图上，任意点除有与之对应的 p 、 v 值外，还有 T 、 S 、 u 、 h 值等与之对应。但是，如果不是平衡状态，则在图上无法表示。至于热力系统各部份之间差别不