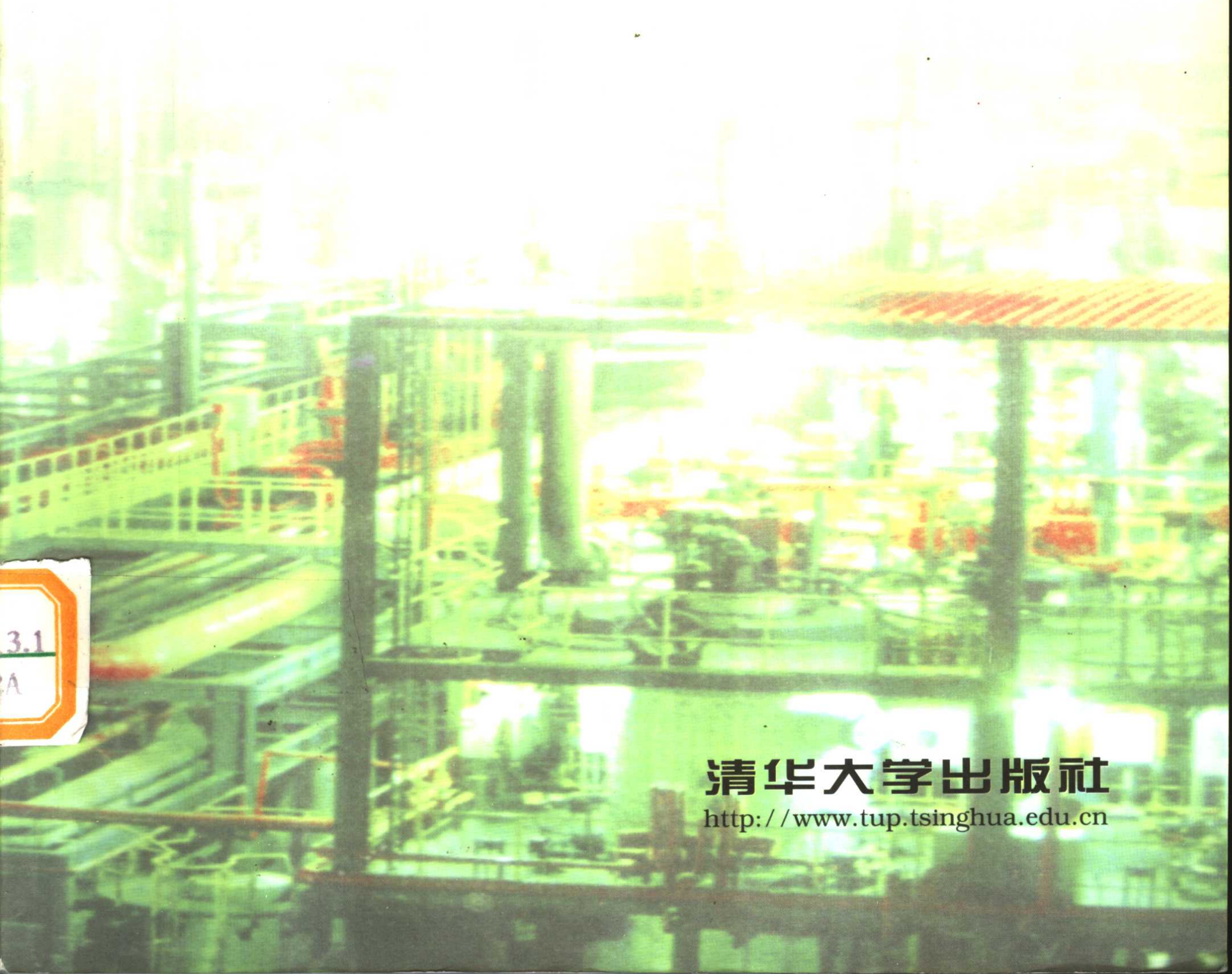
化工热力学

——基本内容、习题详解和计算程序

高光华 于养信 编著



清华大学出版社
http://www.tup.tsinghua.edu.cn

化 工 热 力 学

——基本内容、习题详解和计算程序

高光华　于养信　编著

清 华 大 学 出 版 社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书为童景山、高光华和刘裕品编著的《化工热力学》(清华大学出版社，1995)教科书的配套教材，包括热力学基本定律、流体的 p-V-T 关系、流体的热力学性质、气体的压缩和膨胀过程、热功转换过程、过程热力学分析、液体溶液、相平衡和化学平衡等 8 章。每一章中有基本理论、主要公式的介绍和习题详解。

书中收集的习题精选自作者多年教学中积累的典型试题，以及从国外教材、专著和文献中提炼出来的题目，其中，还有相当数量用计算机求解的习题，同时给出了用 FORTRAN 语言编写的计算程序。

读者对象：大专院校师生、低年级研究生。

书　名：化工热力学——基本内容、习题详解和计算程序
作　者：高光华　于养信　编著
出版者：清华大学出版社(北京清华大学学研楼，邮编 100084)
http://www.tup.tsinghua.edu.cn
印刷者：清华大学印刷厂
发行者：新华书店总店北京发行所
开　本：787×1092 1/16　**印张**：17.25　**字数**：398 千字
版　次：2000 年 5 月第 1 版　2000 年 5 月第 1 次印刷
书　号：ISBN 7-302-00765-9/O・242
印　数：0001～4000
定　价：18.50 元

前　　言

多年的教学经验使我们深有体会，学生若要透彻地掌握化工热力学的概念、理论和方法，必须演算一定数量的习题，非如此不能融会贯通所学的知识。但学生在初解化工热力学习题时常感困难，尤其面对复杂的理论推导和工程应用习题不知从何下手。

自从童景山、高光华和刘裕品所编著的《化工热力学》（清华大学出版社，1995）一书出版发行以来，读者希望能有一本与教科书配套的习题集出版以满足本科教学的需要。本书针对读者的要求，并在总结清华大学化工系多年化工热力学教学经验的基础上编写而成。如果本书能对大学本科生和低年级研究生的学习有所裨益，编者则倍感欣慰。

本书的章节编排与化工热力学教科书一致，每章开端为内容提要，力求简明扼要地介绍基本理论和主要公式，然后给出习题详解。鉴于溶液和相平衡理论在化工分离过程中的重要作用，本书在第 7 章的液体溶液和第 8 章的相平衡和化学平衡部分补充了自近年来国际上出版的专著、教材和最新的科学文献中提炼的习题。对溶液理论、气液平衡、液液平衡、气体的溶解度和超临界流体相平衡计算都给出了内容丰富、有一定深度的习题，其中有相当数量为用计算机求解的习题，如热力学模型参数的求取，泡点、露点的计算以及二元相互作用参数的回归等。本书对这部分习题给出了用 FORTRAN 语言编写的主程序和通用子程序，这对于学生掌握热力学理论的工业应用以及研究生阶段的科研工作都有一定的启发和借鉴。

限于编者水平，加上时间仓促，本书定有考虑不周甚至错误之处，恳请读者和专家批评指导，以便进一步修改和提高。

目　录

1章　热力学基本定律

1.1　内容提要

1.1.1　热力学第一定律

闭系(恒质量)的热力学第一定律在数学上由下式表示：

$$\Delta U = Q - W \tag{1-1}$$

式中 ΔU 为体系总的内能变化，内能的改变与体系变化的途径无关，是体系的状态函数。Q 及 W 分别为体系与环境间交换的热与功，热与功和体系变化所经历的途径有关，是过程量。

对于微小变化过程，式(1-1)可写为

$$dU = \delta Q - \delta W \tag{1-2}$$

稳定流动体系的热力学第一定律的数学表达式为

$$\Delta H + \Delta \frac{u^2}{2g} + \Delta Z = Q - W_F \tag{1-3}$$

上式是以流动的单位质量(如 1kg)流体作为体系。式中 ΔH 表示流体从截面 1 到截面 2 的焓变化，$\Delta \frac{u^2}{2g}$ 与 ΔZ 分别为体系的动能及位能变化，而 Q 与 W_F 分别为单位质量的流体与环境之间传递的热量与轴功。

式(1-3)也可以写成微分形式

$$dH + \frac{u\mathrm{d}u}{g} + dZ = \delta Q - \delta W_F \tag{1-4}$$

实际应用时，因动能和位能与其它能量相比常可忽略，故流动过程热力学第一定律可写为

$$\Delta H = Q - W_F \tag{1-5}$$

对于一个无摩擦存在的稳定流动过程，体系的轴功可由下式求出：

$$W_F = -\int_{p_1}^{p_2} V\mathrm{d}p \tag{1-6}$$

1.1.2　气体的基本热力过程

气体(理想气体和真实气体)的热力过程系指特定条件(如等温、等压和多方过程)下体系所经历的变化。按照热力学第一定律，过程变化的功量与热量与特定条件有关。

(1) 等温过程

对于 1mol 理想气体，因内能仅是温度的函数，则

$$\Delta U = 0 \tag{1-7}$$

$$Q = (W_m)_{最大} = RT\ln\frac{V_2}{V_1} = RT\ln\frac{p_1}{p_2} \tag{1-8}$$

对于经历等温可逆过程的真实气体，其最大膨胀功可由下式计算：

$$(W_m)_{最大} = \int_{V_1}^{V_2} p\mathrm{d}V \tag{1-9}$$

上式中，p 可应用真实气体状态方程代入，进而积分求得 $W_{最大}$值。亦可使用逸度计算，即

$$\begin{aligned}(W_m)_{最大} &= \int_{V_1}^{V_2} p\mathrm{d}V \\ &= (p_2V_2 - p_1V_1) - RT\ln\frac{f_2}{f_1}\end{aligned} \tag{1-10}$$

式(1-10)中，f 为气体的逸度(逸度的计算可参看教科书 3.3 节)。

对于真实气体的热量计算，需先计算出 ΔU_T(参看 3.2 节)，然后再依式(1-1)计算得到。

(2) 等压过程

等压过程中 1mol 气体所做的机械功为

$$(W_m)_p = p(V_2 - V_1) \tag{1-11}$$

其焓变可根据如下方程式计算：

$$\Delta H_p = \int_{T_1}^{T_2} C_p\mathrm{d}T \tag{1-12}$$

因为

$$\Delta U = \Delta H - \Delta(pV) \tag{1-13}$$

故等压过程中，体系内能的变化为

$$\Delta U_p = \int_{T_1}^{T_2} C_p\mathrm{d}T - p\Delta V \tag{1-14}$$

对于理想气体，因

$$C_p = C_V + R \tag{1-15}$$

式中，C_p，C_V 分别为理想气体的摩尔定压、定容热容。ΔU_p 又可写为

$$\Delta U_p = \int_{T_1}^{T_2} C_V\mathrm{d}T \tag{1-16}$$

根据热力学第一定律，得到气体在等压过程中的热量为

$$Q_p = \int_{T_1}^{T_2} C_p\mathrm{d}T \tag{1-17}$$

(3) 绝热过程

绝热过程中，体系与环境无热量交换，则

$$Q = 0 \tag{1-18}$$

对于 1mol 理想气体，绝热过程方程为

$$p_1V_1^k = p_2V_2^k = pV^k = 常数 \tag{1-19}$$

$$\frac{T_1}{T_2}=\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k-1} \tag{1-20}$$

$$\frac{p_1}{p_2}=\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k} \tag{1-21}$$

$$\frac{T_1}{T_2}=\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{(k-1)/k} \tag{1-22}$$

上列诸式中，

$$k=\frac{C_p}{C_V} \tag{1-23}$$

k 称为绝热指数，单原子气体 $k=1.667$；双原子气体 $k=1.40$；简单多原子气体 $k=1.33$。

1mol 理想气体在闭系中经历可逆绝热过程所做的机械功为

$$W_m=\int_{V_1}^{V_2}p\mathrm{d}V$$

$$=\frac{1}{k-1}p_1V_1\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]$$

$$=\frac{1}{k-1}R(T_1-T_2) \tag{1-24}$$

若气体处于流动状态，其轴功为

$$W_F=-\int_{p_1}^{p_2}V\mathrm{d}p$$

$$=\frac{k}{k-1}p_1V_1\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right] \tag{1-25}$$

(4) 多方过程

1mol 理想气体的多方过程方程为

$$p_1V_1^m=p_2V_2^m=pV^m=\text{常数} \tag{1-26}$$

$$\frac{p_1}{p_2}=\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{m} \tag{1-27}$$

$$\frac{T_1}{T_2}=\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{m-1} \tag{1-28}$$

$$\frac{T_1}{T_2}=\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{m-1}{m}} \tag{1-29}$$

上列诸式中，m 为经验常数，$1<m<k$。

1mol 理想气体在闭系可逆多方过程中所做的机械功为

$$W_m=\int_{V_1}^{V_2}p\mathrm{d}V$$

$$=\frac{1}{m-1}p_1V_1\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}}\right]$$

$$=\frac{1}{m-1}R(T_1-T_2) \tag{1-30}$$

热量按照热力学第一定律可由下式求得：

$$Q = \Delta U + W_m$$
$$= \left(C_V - \frac{R}{m-1}\right)(T_2 - T_1) \tag{1-31}$$

若体系经历可逆流动多方过程，其轴功为

$$W_F = \frac{m}{m-1}p_1V_1\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}}\right] \tag{1-32}$$

体系与环境之间交换的热量为

$$Q = \Delta H + W_F$$
$$= \int_{T_1}^{T_2} C_p \mathrm{d}T + \frac{m}{m-1}p_1V_1\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{m-1}{m}}\right] \tag{1-33}$$

1.1.3 热力学第二定律

(1) 卡诺循环与热效率

理想可逆热机的工质从温度为 T_1 的高温热源吸收热量 Q_1，进行可逆膨胀。工质又经过可逆压缩将热量 Q_2 传给温度为 T_2 的低温热源，从而构成一个卡诺循环。卡诺循环的功量等于循环热量，即

$$W = Q_1 - Q_2 \tag{1-34}$$

热效率定义为工质在整个热力循环中对外所做净功与从高温热源吸收的热量之比。卡诺机的热效率为

$$\eta_t = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \tag{1-35}$$

所有工作于同温热源和冷源之间的热机，以可逆卡诺机的热效率为最高。

(2) 热力学第二定律及其数学表达式

热力学第二定律指出：热不可能自发地、不付代价地从一个低温物体转到另一高温物体。

热力学第二定律提供了判断过程进行的方向和限度的依据，并以熵函数的变化作为判据。熵是体系的性质，与过程无关，仅取决于初、终状态。熵变定义为

$$\mathrm{d}S = \frac{\delta Q_{可逆}}{T} \tag{1-36}$$

或

$$\Delta S = \int \frac{\delta Q_{可逆}}{T} \tag{1-37}$$

式中 $\delta Q_{可逆}$ 系指可逆过程的热量。计算不可逆过程系统的熵变时，需在同样的初、终态间设计一个可逆过程以求其熵变。

热力学第二定律的数学表达式为

$$\mathrm{d}S \geqslant \frac{\delta Q}{T} \tag{1-38}$$

对于与环境无任何形式的物质和能量交换的孤立体系，$\delta Q = 0$，则上式变为

$$\mathrm{d}S \geqslant 0 \tag{1-39}$$

此即著名的熵增加原理。

根据熵增加原理，判断一个过程是否自发，需计算包括环境在内的总熵变 ΔS_T，即

$$\Delta S_T = \Delta S_{体系} + \Delta S_{环境}$$

当 $\Delta S_T > 0$ 时，过程可以自发进行；当 $\Delta S_T = 0$ 时，体系达到平衡。其中 $\Delta S_{体系}$ 的计算依照式(1-37)进行。若环境是大气或其它恒温恒压大热源时，$\Delta S_{环境}$ 可按下式计算：

$$\Delta S_{环境} = \frac{Q_{体系}}{T_{环境}} \tag{1-40}$$

式中 $Q_{体系}$ 系指体系与环境实际交换的热量，而不是假设的可逆过程的热量，$T_{环境}$ 是环境的恒定温度。

另外，体系与环境的总熵增也是体系做功能力损失的一个度量，即

$$W_L = T_0 \Delta S_T \tag{1-41}$$

式中，T_0 为环境的绝对温度。

1.2 习题与解答

1-1 在试验发动机时，功率的 95% 被制动器所消耗，其余 5% 传入外界介质。制冷器用 $t_1 = 12℃$ 的水来冷却。水从制动器流出时的温度为 $t_2 = 35℃$，如果发动机的功率 $N = 40kW$，试求在 1h 内为了冷却制动器需消耗的水量。

解：1h 内制冷器内产生的热量 Q 为

$$Q = 40 \times 3\ 600 \times 0.95 = 136\ 800 (kJ/h)$$

制冷器消耗的水量 G 为

$$G = \frac{Q}{C_p(t_2 - t_1)} = \frac{136\ 800}{4.184 \times (35 - 12)} = 1\ 421.56 (kg/h)$$

1-2 设有一台锅炉如图 1-1 所示，水流入锅炉时的焓为 62.55kJ/kg，蒸气流出时的焓为 2 710.5kJ/kg，锅炉效率为 70%，1kg 煤可产生 29 190kg 的热量，锅炉蒸发量为 4.5t/h，试计算 1h 消耗的煤量。

解：锅炉蒸发 1kg 水的实际耗热量为：

$$Q' = \frac{H_{汽} - H_{水}}{\eta} = \frac{2\ 710.5 - 62.55}{0.7} = 3\ 782.79 (kJ/kg)$$

每小时耗热量：

$$Q = 4.5 \times 10^3 \times 3\ 782.79 = 17.02 \times 10^6 (kJ/h)$$

每小时消耗的煤量：

$$G = \frac{17.02 \times 10^6}{29\ 190} = 583.16 (kg/h)$$

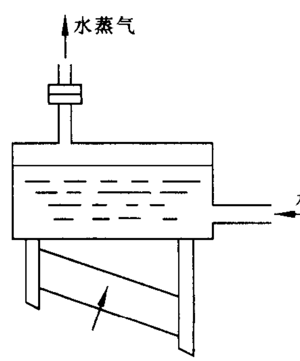


图 1-1 锅炉

1-3 一个储气瓶从压缩空气总管充气(图 1-2)。总管内压缩参数恒定，为 588.4kPa，25℃。充气开始时，瓶内空气参数为 147.1kPa，10℃，充气到 588.4kPa。求充气终了时瓶内空气的温度，设充气过程在绝热条件下进行。

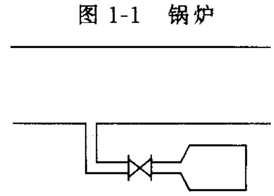


图 1-2 充气过程

解：假设在本题中气体服从理想气体定律。并设储

气瓶体积为 V；充气前压力为 p_1，温度为 T_1；充气后压力为 p_2，温度为 T_2；压缩空气总管压力为 p_0，温度为 T_0；则充气前原有气体量为

$$n_1 = \frac{p_1 V}{RT_1}$$

充气后气体总量为

$$n_2 = \frac{p_2 V}{RT_2}$$

充入空气的净值为

$$n_2 - n_1 = \frac{V}{R}\left(\frac{p_2}{T_2} - \frac{p_1}{T_1}\right)$$

据热力学第一定律

$$\Delta U = Q - W$$

因为充气过程是绝热的，则

$$Q = 0$$

此处 W 为压缩功

$$W = (n_2 - n_1)p_0 V = (n_2 - n_1)RT_0$$

储气瓶内气体内能的改变为

$$\Delta U = n_1 C_V(T_2 - T_1) + (n_2 - n_1)C_V(T_2 - T_0)$$

则有 $$n_1 C_V(T_2 - T_1) + (n_2 - n_1)C_V(T_2 - T_0) = (n_2 - n_1)RT_0$$

$$n_2 C_V T_2 = n_1 C_V T_1 + (n_2 - n_1)(C_V + R)T_0$$

即 $$\frac{p_2 V}{RT_2}T_2 C_V = \frac{p_1 V}{RT_1}C_V T_1 + \left(\frac{p_2 V}{RT_2} - \frac{p_1 V}{RT_1}\right)(C_V + R)T_0$$

因对理想气体，有

$$C_p - C_V = R$$

空气的绝热指数

$$k = \frac{C_p}{C_V} = 1.40$$

则上式经化简整理可得

$$T_2 = \frac{p_2 T_0}{\dfrac{p_2 - p_1}{k} + \dfrac{p_1 T_0}{T_1}} = \frac{588.4 \times 298.15}{\dfrac{588.4 - 147.1}{1.40} + \dfrac{147.1 \times 298.15}{298.15}} = 379.47(\mathrm{K})$$

1-4 汽轮机排出的乏汽凝结后得到高度纯洁的蒸馏水，可以用水泵送回锅炉继续使用。如果乏汽进入凝汽器(图 1-3)时的焓为 2 293.5kJ/kg，流速为 200m/s，被冷却凝结后以 2m/s 的流速流出，而冷凝水的焓则降低到 125.1kJ/kg，试求凝汽器中冷凝 1kg 乏汽由冷却水带走的热量。若冷却水流经凝汽器后温度上升不超过 10℃，试问冷凝 1kg 汽轮机乏汽至少需要多少千克冷却水？设冷却水的比热容为 4.17kJ/(kg・℃)。

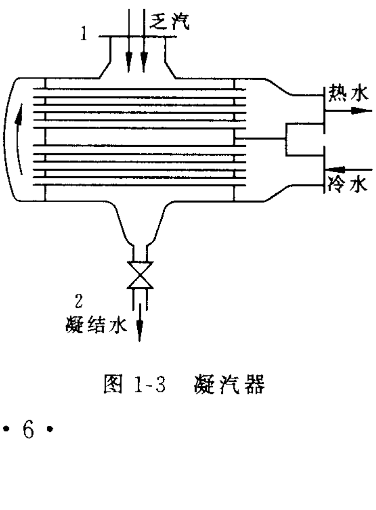


图 1-3 凝汽器

解：对图 1-3 的 1,2 截面列出流动能量方程：

$$H_2+\frac{u_2^2}{2g}=H_1+\frac{u_1^2}{2g}+Q$$

$$\begin{aligned}Q&=(H_2-H_1)+\frac{u_2^2-u_1^2}{2g}\\&=(125.1-2\ 293.5)+\left(\frac{2^2-200^2}{2\times 9.81}\right)\Big/102\\&=2\ 188.4(\mathrm{kJ})\end{aligned}$$

$$G=\frac{Q}{C_p\Delta t}=\frac{2\ 188.4}{4.17\times 10}=52.48(\mathrm{kg})$$

1-5 1kg空气从初态温度$t_1=17℃$开始绝热压缩到容积变为原来容积的1/5，然后经过定温过程膨胀到原来的容积，求空气在这两个过程中与外界共有多少功量交换？

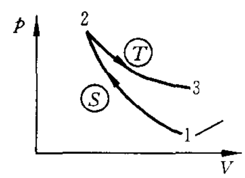


图 1-4 p-V 图

解：这两个过程在 p-V 图上可表示如下：

对绝热过程

$$\frac{T_1}{T_2}=\left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{k-1}$$

代入 $T_1=273.15+17=290.15(\mathrm{K})$，$\dfrac{V_2}{V_1}=\dfrac{1}{5}$，$k=1.40$

得到 $T_2=\dfrac{T_1}{\left(\dfrac{V_2}{V_1}\right)^{k-1}}=\dfrac{290.15}{(0.2)^{0.4}}=552.35(\mathrm{K})$

则

$$\begin{aligned}W_S&=\frac{1}{k-1}(p_1V_1-p_2V_2)=\frac{1}{k-1}R(T_1-T_2)\\&=\frac{1}{0.4}\times 8.314\times(290.15-552.35)\\&=-5\ 449.83(\mathrm{J/mol})\\&=-188.58(\mathrm{kJ/kg})\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}W_T&=RT\ln\frac{V_3}{V_2}=RT\ln\frac{V_1}{V_2}\\&=8.314\times 552.35\times\ln 5\\&=7\ 390.92(\mathrm{J/mol})=255.74(\mathrm{kJ/kg})\end{aligned}$$

故总功量交换为

$$\begin{aligned}W_t&=W_S+W_T\\&=-188.58+255.74=67.16(\mathrm{kJ/kg})\end{aligned}$$

1-6 测得气体在进行某一过程时压力和比容的变化规律如下表所示：

V/L/kg	50	100	150	200	250
p/kPa	3 932.4	1 412.1	755.1	480.5	343.2

试问此过程是否能按多方过程来考虑？为什么？试应用不同方法确定其多方指数。将此

过程按正确比例用小方格纸绘在 p-V 图上，连成光滑曲线。

设此气体为空气，试把 p-V 图上曲线下方的面积(用数方格数目的办法确定)所代表的功量交换的数据与按多方过程计算出的数据相比较。

解：(1) 由 $p_1V_1^m=p_2V_2^m$，得

$$m=\frac{\ln p_2-\ln p_1}{\ln V_1-\ln V_2}$$

则此过程各个阶段的多方指数如下：

过程	1—2	2—3	3—4	4—5	平均
m	1.477 5	1.543 9	1.571 1	1.507 9	1.525 1

由上表可知，m 是变化的，故严格而言，该过程不是一个多方过程。但由于 m 值变化不大，亦可近似认为该过程为一个多变指数 $\overline{m}=1.525\ 1$ 的多方过程。

该过程的 p-V 图如图 1-5 所示。采用数方格数目的办法得到 p-V 图上曲线下方的面积所代表的功量交换的数据为

$$W_m=205.2\text{kJ/kg}$$

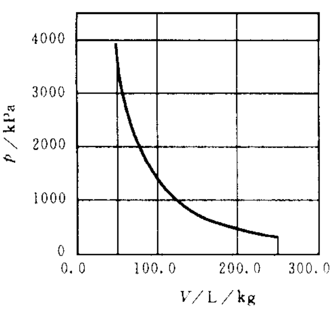


图 1-5 p-V 图

(2) 按多方过程计算其功量为

$$W_m=\frac{1}{k-1}(p_1V_1-p_2V_2)$$
$$=\frac{1}{1.522\ 1-1}\times(3\ 932.4\times0.05-343.2\times0.25)=212.2(\text{kJ/kg})$$

由以上结果知，两种方法所得功量值相近，但作图法有一定误差。

1-7 试将满足以下要求的多方过程在 p-V 图和 T-S 图上表示出来：

(1) 工质膨胀又放热；

(2) 工质膨胀又升压；

(3) 工质被压缩，升温又放热；

(4) 工质被压缩，升温又吸热；

(5) 工质被压缩，降温又降压；

(6) 工质放热，降温又降压。

解：多方过程方程 $pV^m=c$ 是一个普遍的过程方程式，当多方指数的数值不同时，其过程也就不同：

$m=0$ 时，$p=c$，为定压过程；

$m=1$ 时，$pV=c$，为等温过程；

$m=k$ 时，$pV^k=c$，为绝热过程；

$m=\pm\infty$时，$V=c$，为定容过程。

以上 4 个基本热力过程是多方过程的特例。多方指数 m 可在 $0\sim\pm\infty$范围内变化，它有多个变化过程。在 p-V 图和 T-S 图上分别画出 $m=0,1,K,\pm\infty$的等值线，从而将 p-V 图和 T-S 图划分成几个区域，其中阴影部分即为满足题意要求的区域，详见图 1-6。

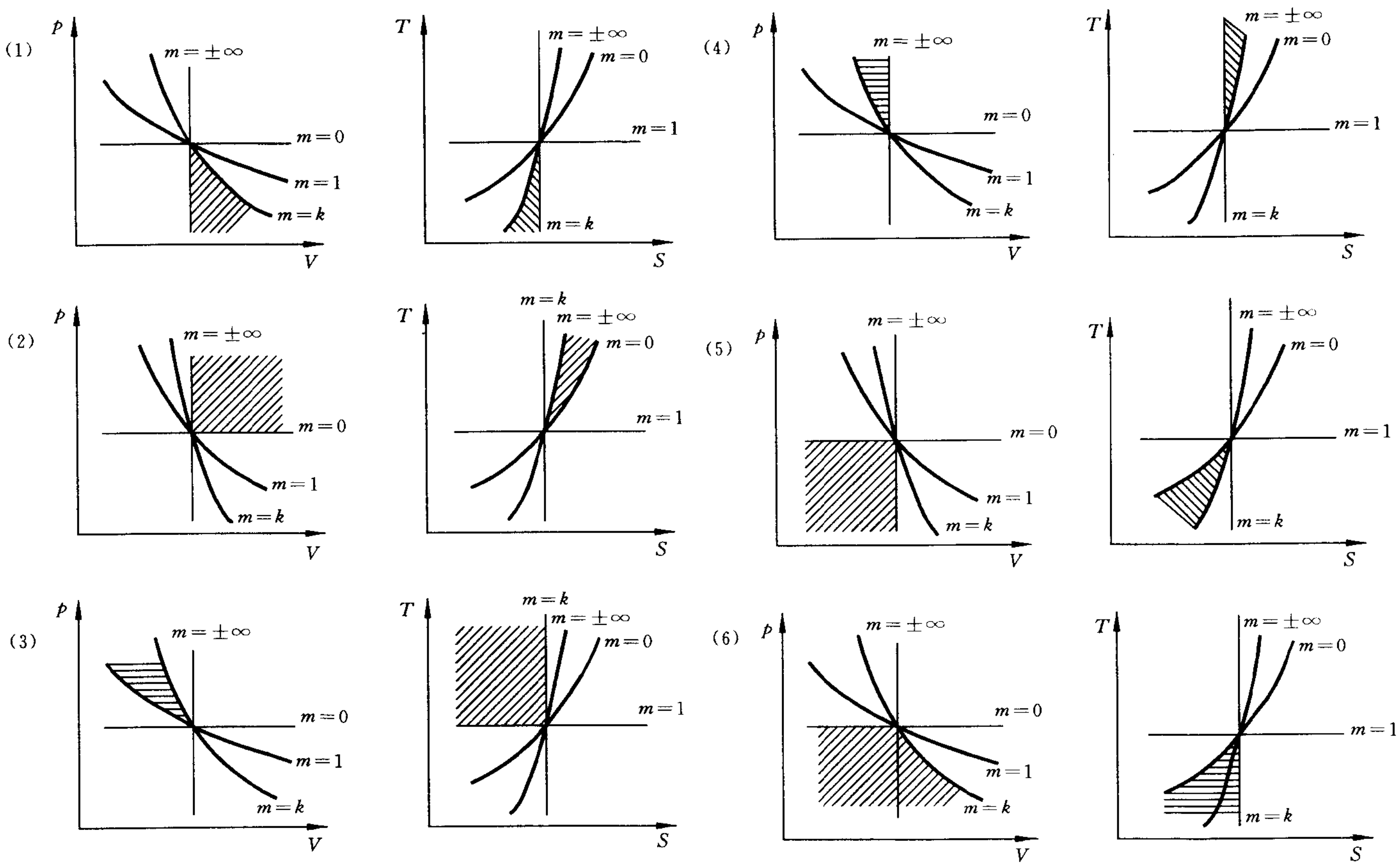


图1-6　p-V图 与 T-S 图

1-8 供暖用风机连同加热器(图1-7)把温度为$t_1=0$℃的冷空气加热到温度为$t_3=25$℃后送入建筑物的风道内，送风量为10 000kg/h，风机轴上的输入功率为50kW，设整个装置不向周围大气散热，

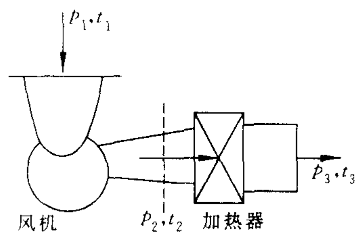


图 1-7 供暖用风机

(1) 求风机出口温度t_2；

(2) 求加热器对空气的加热量(kJ/h)；

(3) 以上计算结果与整个过程是否可逆有无关系？若加热器中有阻力，空气通过时产生不可逆摩擦扰动并带来压力降，以上计算结果是否仍然正确？为什么？

解：(1) 若风机进出口之间为绝热可逆过程，空气为理想气体，则风机的轴功为

$$W_F=\frac{k}{k-1}R(T_1-T_2)$$
$$=\frac{1.4}{1.4-1}\times 8.314\times(273.15-T_2)$$
$$=29.055\times(273.15-T_2)(\mathrm{J/mol})$$

由已知条件可知单位质量的空气实际消耗的功为

$$W_F=\frac{(-50)\times 3\,600}{10\,000}=-18(\mathrm{kJ/kg})=-502.2(\mathrm{J/mol})$$

则风机出口温度t_2可由下式求出：

$$29.055\times(273.15-T_2)=-502.2$$
$$T_2=290.43\mathrm{K},\quad t_2=17.28℃$$

(2) 加热器对空气的加热量为

$$Q=GC_p\Delta t$$
$$=10\,000\times 1.003\,2\times(25-17.28)$$
$$=7.74\times 10^4(\mathrm{kJ/h})$$

(3) 若过程不可逆，则上述结果需加以修正。若加热器中有阻力，空气通过它时，不可逆摩擦扰动产生压降，(2)中的加热量则不能使用等压公式计算。同时由于存在摩擦阻力，风机用于压送空气的功率减小。

1-9 工质按照下列4个热力学过程所组成的热力循环进行工作：

过程	对外热量交换 Q/kJ	对外功量交换 W_m/kJ
1	+10.42	−9.81
2	0	+14.71
3	−17.93	−6.87
4	+15.85	?

试求：(1) 全循环中工质吸取的净热量；

(2) 全循环中工质所做的净功；

(3) 第4个过程中工质对外的功量交换；

(4) 循环的热效率。

解：(1) 全循环中工质吸收的净热量为

$$Q_{净} = 10.42 + 0 - 17.93 + 15.85 = 8.34(\text{kJ})$$

(2) 因为工质完成全循环后，内能无变化，即 $\Delta U=0$，则 $W=Q$，故全循环中工质所做的净功为

$$W_{净} = 8.34\text{kJ}$$

(3) 因为$(-9.81)+14.71+(-6.87)+W_4=8.34$

所以
$$W_4=10.31\text{kJ}$$

(4) 循环的热效率为

$$\eta_t = \frac{W}{Q_1} = \frac{8.34}{10.42+15.85} = 0.3175$$

1-10 设空气作为理想气体(热容量也视为常量)进行由下列 3 个过程所组成的循环：

(1) 定温过程：初态为 392.3kPa，$1\text{m}^3/\text{kg}$，终态压力为 98.07kPa；

(2) 定压过程：终态比容为 $1\text{m}^3/\text{kg}$；

(3) 定容过程：回到初始状态。

试求：

(1) 循环热效率；

(2) 各个过程中空气的熵变 ΔS_{12}，ΔS_{23}，ΔS_{31}，并将循环在 p-V 图和 T-S 图上表示出来。

解：(1) 按题意空气符合理想气体状态方程：

$$pV = RT$$

则定温过程初态温度为

$$T_1 = \frac{p_1V_1}{R} = \frac{392.3\times10^3\times28.9\times1\times10^{-3}}{8.314} = 1\ 363.66(\text{K})$$

终态体积为

$$V_2 = \frac{RT}{p} = \frac{8.314\times1\ 363.66}{98.07\times10^3} = 0.115\ 6(\text{m}^3/\text{mol}) = 4(\text{m}^3/\text{kg})$$

若等温过程是可逆的，则可逆等温膨胀功为

$$\begin{aligned}W_{12} &= -RT\ln\frac{p_2}{p_1}\\ &=(-8.314)\times1\ 363.66\times\ln\frac{98.07}{392.3}\\ &=15.72(\text{kJ/mol}) = 543.86(\text{kJ/kg})\end{aligned}$$

因为理想气体的内能仅是温度的函数，故等温过程 $\Delta U_T=0$，那么等温膨胀过程中气体吸收的热量等于可逆膨胀功，即

$$Q_{12} = W_{12} = 543.86\text{kJ/kg}$$

等压过程的终温按理想气体定律计算得

$$T_3 = \frac{p_3V_3}{R} = \frac{98.07 \times 10^3 \times 28.9 \times 1 \times 10^{-3}}{8.314} = 340.90(\text{K})$$

等压过程的压缩功为

$$W_{23} = p(V_3 - V_2) = 98.07 \times (1 - 4) = -294.21(\text{kJ/kg})$$

按题意将空气的热容量视为常量，且 $C_p = 29.20\text{J/(mol} \cdot \text{K)}$，$C_V = 20.88\text{J/(mol} \cdot \text{K)}$，则等压过程的热效应为

$$\begin{aligned} Q_{23} &= C_p\Delta t \\ &= 29.20 \times (340.90 - 1\,363.66) \\ &= -29.86(\text{kJ/mol}) = -1\,033(\text{kJ/kg}) \end{aligned}$$

对于定容过程，因为没有体积变化，$\Delta V_{31} = 0$，故 $W_{31} = 0$，该过程的热效应为

$$\begin{aligned} Q_{31} &= C_V\Delta T = 20.88 \times (1\,363.66 - 340.90) \\ &= 21.36(\text{kJ/mol}) = 739.10(\text{kJ/kg}) \end{aligned}$$

全循环的净功

$$\begin{aligned} W_{\text{循环}} &= W_{12} + W_{23} + W_{31} \\ &= 543.86 - 294.21 + 0 = 249.65(\text{kJ/kg}) \end{aligned}$$

全循环吸入的热量

$$\begin{aligned} Q_{\text{吸入}} &= Q_{12} + Q_{31} \\ &= 543.86 + 739.10 = 1\,282.96(\text{kJ/kg}) \end{aligned}$$

则循环的热效率

$$\eta_t = \frac{W_{\text{循环}}}{Q_{\text{吸入}}} = \frac{249.65}{1\,282.96} = 0.19$$

（2）各个过程中空气的熵变分别为

$$\Delta S_{12} = \frac{Q_{12}}{T} = \frac{543.86}{1\,363.66} = 0.398\,8(\text{kJ/(kg} \cdot \text{K))}$$

$$\begin{aligned} \Delta S_{23} &= \int_2^3 \frac{C_p}{T}\text{d}T = C_p\ln T\Big|_2^3 = 29.20 \times \ln\frac{340.90}{1\,363.66} \\ &= -40.48(\text{J/(mol} \cdot \text{K))} = -1.401\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta S_{31} &= \int_3^1 \frac{C_V}{T}\text{d}T = C_V\ln T\Big|_3^1 = 20.88 \times \ln\frac{1\,363.66}{340.90} \\ &= 28.95(\text{J/(mol} \cdot \text{K))} = 1.002\text{kJ/(kg} \cdot \text{K)} \end{aligned}$$

该循环的 p-V 图和 T-S 图如图 1-8 所示。

1-11 将 35kg 温度为 427℃的铸钢放入 135kg 温度为 21℃的油中冷却。已知铸钢的定压比热容为 $C_p = 0.5\text{kJ/(kg} \cdot ℃)$，油的比热容为 $C_p = 2.5\text{kJ/(kg} \cdot ℃)$，如果无热损失，试计算：

（1）铸钢的熵变化是多少？

（2）油的熵变化是多少？