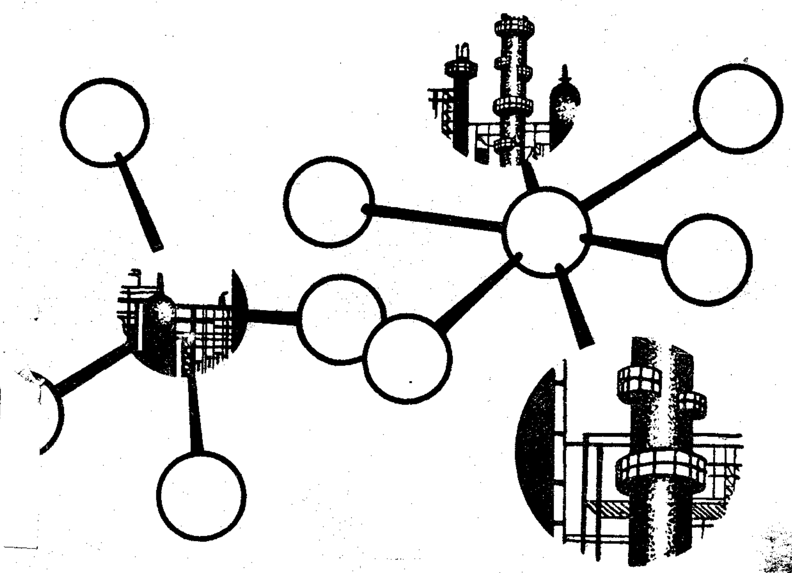
化学工程 卷Ⅳ

习题解答汇编(SI)

〔英〕J.R.巴克霍斯特 J.H.哈克 编

化学工业出版社



astle upon Tyne）同事们，在编写本书期间所给予的耐心帮助。

J. R. 巴克霍斯特

J. H. 哈克

1976年

于泰因斯堡大学

本书是〔英〕J. M. 柯尔森、J. F. 李嘉森著“化学工程”一书第一卷（第三版）中的习题解答汇编，作为“化学工程”第Ⅳ卷出版。

全书共分十一章，主要包括流体力学、传热、传质、边界层及热量质量和动量传递等有关习题汇编，本书反映了传热、传质的新进展及边界层理论等，并有一些较深的题目，且采用了现推广使用的国际单位制（SI）。

本书适用于大专院校化工系师生，亦可供化工设计单位、化工厂的工程技术人员参考。

全书由浙江大学化工系传递工程教研室的同志分工译出，经王高生、陈维杻、蒋斐、黄会芳、谭天恩校阅后定稿。

译者说明

本书按J. M. 柯尔森和J. F. 李嘉森所著“Chemical Engineering Volume Ⅳ：Solutions to the Problems in Volume Ⅰ(1977)”译出，与国内过去出版的几种化工过程及设备例题习题集相比，有不少新内容，例如反映了传热及传质理论新进展、边界层理论等，并有一些较深的题目。全书采用国际单位制(SI)。

原书中存在的一些缺点、错误，凡已发现的都作了修正。涉及概念性的问题，经过改写的，以符号“〈＊……＊〉”标明其起讫；对于一般性的数据、运算、有效数字、印刷错误及前后文的衔接等，则径直改正，未再注明。

书内公式、图表、节的编号均按柯尔森等“Chemical Engineering Volume Ⅰ(1977)”原著。为便利读者，译文中增添了以下内容：

1．有些公式按“化学工程”第一卷补充注明了编号，并加以说明（至少在第一次出现处）；所缺的少量公式也作了增补。

2．增加较常用的图、表，作为本书的附录。

3．常用的单位换算成SI单位的换算系数表（附录1）。

由于我们的水平有限，译文可能存在缺点错误，希望读者批评指正。

原　　序

在柯尔森、李嘉森合著《化学工程》卷Ⅰ第一版的序言中，有以下的一段话：

“我们在每一章中都引进了一些例题，我们认为，对于正确理解教本中所述的处理方法，这些例题是必要的。学生们在自己解决新的实际问题之前是十分希望先弄清例题的。化学工程问题要求得到数值的解答，故必需熟悉不同的技巧，以便能用系统的方法而不是凭直觉去得出答案。”

我们正是抱着上述目的而编纂此书的。本书实质上是《化学工程》卷Ⅰ第三版习题解答汇编。书的范围自然与上述教本相同，并按教本的分章将习题解答编排成章。本书是在编订卷Ⅰ新版的同时编写的，并大量引用了卷Ⅰ各部分的方程和原始数据。从这一意义上来说，本书是卷Ⅰ的补充。全书采用的是SI单位，其开本和格式与第三版相同。

和我们接触了无数学生一样，我们同这些题目已打了近20年的交道，虽然历年来我们对解题的方法不断作了改进，但我们仍不能声称已提供了最恰当的解答；的确，也未必都是最准确的。但是，我们希望，无论大学生或是工业部门的专业工程师，都能从我们这本书中学到许多东西。

显然，如果没有柯尔森、李嘉森两教授在工作上给予极其实际、长期的帮助，这本书是不能写成的。这里要特别感谢柯尔森教授，多年来他一直指导我们的思想，支持我们的工作。我们也要感谢泰因新堡大学（University of Newc-

目　录

第一章　单位和因次

题 1.1　用管道输送98%硫酸，酸粘度为$0.025N\cdot s/m^2$，密度为$1840kg/m^3$，流量为$685cm^3/s$，管径$\phi25mm$，试计算其雷诺数。

解

导管的截面积$=(\pi/4)0.025^2=0.000491m^2$

酸的平均流速　$u=685\times10^{-6}/0.000491=1.395m/s$

雷诺数：$Re=du\rho/\mu=0.025\times1.395\times1840/0.025$

$=\underline{2570}$

题 1.2　试比较$1P/kW\cdot h$电费和$15P/therm$❶煤气费的价格。

解

每项费用皆以P/MJ表示。

$1kW\cdot h=1kW\times h=(1000J/s)(3600s)=3600000J$

或3.6MJ

$1therm=105.5MJ$

故　电费$=1P/kW\cdot h$或$1/3.6=0.28P/MJ$

煤气费$=15P/105.5MJ$

$=0.14P/MJ$

题 1.3　某锅炉厂用热值为$27.2MJ/kg$的煤，产生压力$1825kN/m^2$的蒸汽$5.2kg/s$。如锅炉效率为75%，问每天的

❶　P表示英国货币一辨士；therm，克卡（热量单位，等于10^5Btu，或25190kcal，或$29.34kW\cdot h$）。——译者注

煤耗量是多少？若此蒸汽用于发电，可取透平机和发电机的总转换效率为20%，问可发生多少千瓦的电功率？

解

在$1825kN/m^2$下的蒸汽焓值＝2798kJ/kg（查蒸汽表）

∴　所产生蒸汽的总焓＝5.2×2798＝14550kW

忽略锅炉供水的焓（亦取自于煤）。

当效率为75%时，煤所供应热量＝14550×100/75

＝19400kW

由于煤的热值为27200kJ/kg，

耗煤率＝(19400/27200)＝0.713kg/s

或　(0.713×3600×24/1000)＝61.6Mg/day〔吨/日〕

蒸汽焓的20%可转换成电功率，其值为：

14550×20/100＝2910kW或2.91MW〔兆瓦〕

可近似作为3MW

题 1.4　某容器中搅拌器所需功率为以下四个变量的函数：

（a）搅拌桨的直径，

（b）搅拌桨在单位时间内的转数，

（c）液体的粘度，

（d）液体的密度。

从因次分析求出功率与这四个变量之间的关系。

由实验得到功率消耗与转数的平方成正比。若搅拌桨的直径加倍，试预计功率会增加多少倍？

解

令　$P=\phi(D、N、\rho、\mu)$，故函数的特征形式为：

$P=kD^aN^b\rho^c\mu^d$，式中k为常数。

将各参数的因次以**M**、**L**、**T**表示：

功率，$[P]=ML^2/T^3$　　密度，$[\rho]=M/L^3$

直径，$[D]=L$　　粘度，$[\mu]=M/LT$

转数，$[N]=T^{-1}$

使因次相等：

M：$1=c+d$

L：$2=a-3c-d$

T：$-3=-b-d$

以d表示其他待定指数，解得：

$$a=(5-2d)\quad b=(3-d)\quad c=(1-d)$$

$$P=k\left(\frac{D^5}{D^{2d}}\cdot\frac{N^3}{N^d}\cdot\frac{\rho}{\rho^d}\cdot\mu^d\right)$$

即　$$\frac{P}{D^5N^3\rho}=k(D^2N\rho/\mu)^{-d}$$

或　$$N_P=kRe^m \qquad (1)$$

故功率数群是雷诺数（m次方）的函数，事实上N_P也是弗鲁特数DN^2/g的函数。

式（1）可写成：

$$P/D^5N^3\rho=k(D^2N\rho/\mu)^B \qquad (2)$$

实验得出：　$P\propto N^2$

与式（2）$P\propto N^B\cdot N^3$对比，得$B+3=2$，故$B=-1$。

因对同一种流体，其粘度、密度皆相同，故

$$(P_2/P_1)(D_1^5N_1^3/D_2^5N_2^3)=(D_1^2N_1/D_2^2N_2)$$

或　$$(P_2/P_1)=(N_2^2D_2^3)/(N_1^2D_1^3)$$

在本题情况下，$N_1=N_2$，而$D_2=2D_1$

∴　$$(P_2/P_1)=8D_1^3/D_1^3=\underline{8}$$

用"循环待定法"可得到相同的解答如下：

$$P=\phi(D,N,\rho,\mu)$$

$$f(P, D, N, \rho, \mu) = 0$$

以M，L和T为基本因次，现共有五个变量和三个基本因次，故按白金汉（Buckingham）的π定理，将得到两个无因次群。

选择D，N和ρ为循环组合，就因次关系而言，有：

$$\left.\begin{array}{l} D \Leftrightarrow \mathbf{L} \\ N \Leftrightarrow \mathbf{T}^{-1} \\ \rho \Leftrightarrow \mathbf{ML}^{-3} \end{array}\right\} \text{于是} \left\{\begin{array}{l} \mathbf{L} \Leftrightarrow D \\ \mathbf{T} \Leftrightarrow N^{-1} \\ \mathbf{M} \Leftrightarrow \rho \mathbf{L}^3 \Leftrightarrow \rho D^3 \end{array}\right.$$

第一个无因次群，π_1，为

$$P(\mathbf{ML}^2\mathbf{T}^{-3})^{-1} \Leftrightarrow P(\rho D^3 \cdot D^2 \cdot N^3)^{-1} = \frac{P}{\rho D^5 N^3}$$

第二个无因次群，π_2，为

$$\mu(\mathbf{ML}^{-1}\mathbf{T}^{-1})^{-1} \Leftrightarrow \mu(\rho D^3 D^{-1} N)^{-1} = \frac{\mu}{\rho D^2 N}$$

因而

$$f\left(\frac{P}{\rho D^5 N^3}, \ \frac{\mu}{\rho D^2 N}\right) = 0$$

虽然对于简单的问题用此法收效并不显著，但是当包含很多个无因次数群时，此法较有效。

题 1.5 由实验得出单个球形粒子在流体中的最终沉降速度u_0为以下几个量的函数：

颗粒直径 d；

粒子的浮重W（即：颗粒重量减去它所排开的流体重量）；

流体密度，ρ；

流体粘度，μ。

用因次分析法导出u_0的关系式。

斯托克斯对很低沉降速度的细颗粒已从理论分析建立了关系式，流体的密度除有时会涉及颗粒的浮力外，不再对沉降速度有影响。还表明沉降速度必然与流体的粘度成正比。

解

$$u_0 = kd^aW^b\rho^c\mu^d$$

用因次M、L和T表示：

$$(L/T)=k(L)^a(ML/T^2)^b(M/L^3)^c(M/LT)^d$$

使等号两边因次相等：

M：$0=b+c+d$

L：$1=a+b-3c-d$

T：$-1=-2b-d$

以b表示其它系数：

$$a=-1,\ c=(b-1),\ 及d=(1-2b)$$

∴ $u_0=k\left(\frac{1}{d}\right)(W^b)(\rho^b/\rho)(\mu/\mu^{2b})$ 式中k为常数。

或 $\underline{u_0=k(\mu/d\rho)(W\rho/\mu^2)^b}$

整理后：

$$(du_0\rho/\mu)=k(W\rho/\mu^2)^b$$

此式说明$(W\rho/\mu^2)$是雷诺数的函数

因u_0与ρ无关，故b必须等于1，

得 $\underline{u_0=kW/d\mu}$

或说，对于一定的直径和浮重，沉降速度与流体的粘度成反比。

第二章 能量关系和动量关系

<* **题 2.1** 容量为$0.1m^3$的钢瓶中储有压力为$5MN/m^2$的空气，试计算绝热膨胀到大气压时，能作出的理论功。空气的初始温度为290K，其比热比γ为1.4。 *>

解

按式（2.1） $dU=\delta q-\delta W$

对于绝热过程，$\delta q=0$及$dU=-\delta W$

因式（2.25） $dU/dT=C_v$

故 $dU=C_vdT=-\delta W$

又 $\gamma=C_p/C_v$和式（2.27） $C_p=C_v+R$

有 $C_v=R/(\gamma-1)$

及 $W=-C_v\Delta T=-R\Delta T/(\gamma-1)=(RT_1-RT_2)/(\gamma-1)$

因 $RT_1=P_1v_1$ 及$RT_2=P_2v_2$

∴ $W=(P_1v_1-P_2v_2)/(\gamma-1)$

作最大功时 $P_1v_1^\gamma=P_2v_2^\gamma$

消去v_2得：

$$W=[(P_1v_1)/(\gamma-1)][1-(P_2/P_1)^{(\gamma-1)/\gamma}]$$

本题中

$P_1=5\ MN/m^2$，$P_2=0.1013MN/m^2$，

$T_1=290K$及$\gamma=1.4$。

比容 $v_1=(22.4/29)(290/273)(0.1013/5)$

$=0.0166m^3/kg$

∴ $W=[(5\times10^6\times0.0166)/0.4][1-(0.1013/5)^{0.4/1.4}]$

$=0.139\times10^6\,\mathrm{J/kg}$

气体的质量$=0.1/0.0166=6.02\mathrm{kg}$

∴ $W=0.139\times10^6\times6.02=0.84\times10^6\,\mathrm{J}$

或 $\underline{=840\mathrm{kJ}}$

题 2.2 当气体在等温条件下，其状态方程符合范德华定律，试推导以下的表达式：

（a）内能随体积的变化率，

（b）内能随压强的变化率，

（c）焓随压强的变化率。

解

范德华方程如式（2.32）所示，对于1kmol可写成：

$$[P+(a/V^2)](V-b)=RT \qquad (1)$$

或 $$PV=RT+bP-(a/V)+(ab/V^2) \qquad (2)$$

或 $$P=[RT/(V-b)]-(a/V^2) \qquad (3)$$

（a）由式（2.21）内能U、压强P和温度T的关系为：

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T=T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V-P$$

从式（3）

$$\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V=\frac{R}{(V-b)},\ \text{即}\quad T\left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V=\frac{RT}{(V-b)}$$

因而

$$\underline{\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T=\frac{RT}{(V-b)}-P=\frac{a}{V^2}}$$

原注：对于理想气体，$b=0$ 且 $\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T=\left(\frac{RT}{V}\right)-P=0$

（b）由式（2.23）偏导数间的关系：

$$\left(\frac{\partial U}{\partial P}\right)_T=\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T$$

$$\left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)=1\Big/\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)$$

由式（3）

$$\frac{\partial P}{\partial V}=\frac{-RT}{(V-b)^2}+\frac{2a}{V^3}=\frac{2a(V-b)^2-RTV^3}{V^3(V-b)^2}$$

已求得

$$\left(\frac{\partial U}{\partial V}\right)_T=\frac{RT}{(V-b)}-P$$

故

$$\left(\frac{\partial U}{\partial P}\right)_T=\left[\frac{RT}{(V-b)}-P\right]\left[\frac{V^3(V-b)^2}{2a(V-b)^2-RTV^3}\right]$$

$$=\frac{[RT-P(V-b)][V^3(V-b)]}{2a(V-b)^2-RTV^3}$$

原注：对于理想气体，$a=b=0$，故$(\partial U/\partial P)_T=0$

（c）将焓$H=U+PV$表达为P、T的函数，可得

$$dH=\left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P dT+\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T dP$$

$$=C_P dT+\left(\frac{\partial U}{\partial P}\right)_T dP+\left(\frac{\partial (PV)}{\partial P}\right)_T dP$$

对等温过程，$C_P dT=0$，故

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T=\left(\frac{\partial U}{\partial P}\right)_T+\left(\frac{\partial (PV)}{\partial P}\right)_T$$

从式（2）

$$\frac{\partial (PV)}{\partial P}=\frac{\partial}{\partial P}[RT+bP-(a/V)+ab/V^2]=b$$

故

$$\left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T=\frac{[RT-P(V-b)][V^3(V-b)]}{2a(V-b)^2-RTV^3}+b$$

〈* 题 2.3 试计算1000cm³气体，在压力为80MN/m²，温度290K条件下，通过管嘴排放于大气之前所储藏的能量。*〉

解

本题关键为涉及不可逆膨胀过程。取T_1、T_2之间的C_v为一常数。

$$\Delta U=-W=nC_v(T_2-T_1)$$

式中n为气体的kmol数，而T_2和T_1为最终及初始温度。

对于恒压过程，假定可应用理想气体定律，所作功由下式计算：

$$W=P_2(V_2-V_1)=P_2(nRT_2/P_2-nRT_1/P_1)$$

使以上两式中的W相等可得：

$$-C_v(T_2-T_1)=P_2(RT_2/P_2-RT_1/P_1)$$

在本题中，

$P_1=80000kN/m^2$，$P_2=101.3kN/m^2$，$V_1=10^{-3}m^3$，

$R=8.314kJ/kmol\cdot K$，$T_1=290K$

因此

$$-C_v(T_2-290)=101.3R[(T_2/101.3)-(290/80000)]$$

如 $C_v=1.5R$（即$\gamma=1.67$），则$T_2=174.15K$

现 $PV=nRT$ 且$n=80000\times10^{-3}/8.314\times290$

$$=0.033kmol$$

$$\Delta U=-W=C_vn(T_2-T_1)$$

$$=1.5\times8.314\times0.033\ (174.15-290)$$

$$=\underline{-47.7kJ}$$

〈* 故气体原储藏的能量为$\underline{U_1 - U_2 = -\Delta U = 47.7kJ}$。 *〉

题 2.4 将若干气瓶联通到一保持稳定压力P和温度T的大气罐，使瓶中气体压力升到P，如其最初的温度为T，压力为P_0，不计热损失且充气过程可作为可逆压缩，则气瓶中气体的最终温度是多少？假定可应用理想气体定律。

解

由式（2.1） $$dU = \delta q - \delta W$$

对于可逆绝热操作，$q=0$，及$\delta q=0$ 且$\delta W = Pd_v$

或 $$dU = -Pdv$$

任何过程中理想气体的内能变化由式（2.25）：

$$C_v dT = -Pdv = dU$$

现 $P = RT/v$，因而$dT/T = (-R/C_v)(dv/v)$

根据定义 $\gamma = C_P/C_v$，且$C_P = C_v + R$（由式2.27）

∴ $$R/C_v = \gamma - 1$$

且 $$dT/T = -(\gamma-1)(dv/v)$$

在条件1和2之间积分得：

$$\ln(T_2/T_1) = -(\gamma-1)\ln(v_2/v_1)$$

或 $$(T_2/T_1) = (v_1/v_2)^{\gamma-1}$$

现 $P_1 v_1/T_1 = P_2 v_2/T_2$，因而$v_1/v_2 = (P_2/P_1)(T_1/T_2)$

代入得 $$(T_2/T_1) = (P_2/P_1)^{\gamma-1}(T_2/T_1)^{1-\gamma}$$

故 $$(T_2/T_1) = (P_2/P_1)^{(\gamma-1)/\gamma}$$

按照本题的符号，最终温度$\underline{T_2 = T(P/P_0)^{(\gamma-1)/\gamma}}$

第三章　管道和明渠内的摩擦

题 3.1　水以$1250cm^3/s$的流量，通过一直径25mm、长30m的钢管，被泵送到一较水池高12m的贮罐中，试近似计算所需的功率。为此目的，应选择何种型号的泵和配置多大功率（以kW计）的电动机？

水的粘度$=1.30mN\cdot s/m^2$

水的密度$=1000kg/m^3$

解

直径25mm管的截面积$=(\pi/4)(0.025)^2=0.000491m^2$

流速　$u=(1250\times10^{-6}m^3/s)/0.000491m^2=2.54m/s$

$$Re=\rho\cdot u\cdot d/\mu=1000\times2.54\times0.025/1.3\times10^{-3}$$
$$=48900$$

由表3.1(附录 2)可取钢管的糙度 e 为 0.045mm，因而 $e/d=0.045/25=0.0018$

查图3.7（附录 3 ）当$e/d=0.0018$、$Re=4.89\times10^4$，得$R/\rho u^2=0.0032$

压降可由能量衡算方程及式3.16摩擦损失方程计算：

$$F=4(R/\rho u^2)\cdot(l/d)u^2$$

式中　F——单位质量流体的摩擦能损失，J/kg或m^2/s^2

对不可压缩流体的湍流运动：

$$\Delta u^2/2+g\Delta z+v(P_2-P_1)+4(R/\rho u^2)(l/d)u^2=0$$

而压降等于P_1-P_2，得

$$P_1-P_2=\rho[\Delta u^2/2+g\Delta z+4(R/\rho u^2)(l/d)u^2]$$