

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
浙江大学化工系传递工程教研室 译

化 学 工 程 出 版 社

CHEMICAL ENGINEERING

Volume 4

J. M. Coulson and J. F. Richardson

Solutions to the Problems in Chemical Engineering Volume 1

J. R. Backhurst and J. H. Harker

PERGAMON PRESS 1977

OXFORD · NEW YORK · TORONTO · SYDNEY

PARIS FRANKFURT

化 学 工 程

卷 IV

习题解答汇编 (SI)

浙江大学化工系传递工程教研室 译

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本 $787 \times 1092^{1/32}$ 印张 $8^{3/4}$ 字数194千字印数1-20,000

1980年4月北京第1版1980年4月北京第1次印刷

书号15063·3159定价0.91元

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、陈维桢、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-

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

目 录

第一章	单位和因次	1
第二章	能量关系和动量关系	6
第三章	管道和明渠内的摩擦	11
第四章	可压缩流体的流动	43
第五章	流量测量	63
第六章	流体的输送	88
第七章	传热	103
第八章	传质	193
第九章	边界层	222
第十章	热量、质量和动量传递	234
第十一章	气体的增、减湿和水的冷却	239
附录		264

第一章 单位和因次

题 1.1 用管道输送98%硫酸,酸粘度为 $0.025\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$,密度为 $1840\text{kg}/\text{m}^3$,流量为 $685\text{cm}^3/\text{s}$,管径 $\phi 25\text{mm}$,试计算其雷诺数。

解

$$\text{导管的截面积} = (\pi/4)0.025^2 = 0.000491\text{m}^2$$

$$\text{酸的平均流速 } u = 685 \times 10^{-6} / 0.000491 = 1.395\text{m/s}$$

$$\text{雷诺数: } Re = du\rho/\mu = 0.025 \times 1.395 \times 1840 / 0.025 \\ = 2570$$

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

解

每项费用皆以 P/MJ 表示。

$$1\text{kW}\cdot\text{h} = 1\text{kW} \times \text{h} = (1000\text{J/s})(3600\text{s}) = 3600000\text{J} \\ \text{或 } 3.6\text{MJ}$$

$$1\text{therm} = 105.5\text{MJ}$$

故 电费 $= 1\text{P}/\text{kW}\cdot\text{h}$ 或 $1/3.6 = 0.28\text{P}/\text{MJ}$

$$\text{煤气费} = 15\text{P}/105.5\text{MJ} \\ = 0.14\text{P}/\text{MJ}$$

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

① P表示英国货币一辨士; therm, 克卡 (热量单位, 等于 10^5Btu , 或 25190kcal , 或 $29.34\text{kW}\cdot\text{h}$)。——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/m²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：

$P = kD^a N^b \rho^c \mu^d$ ，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:

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

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

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

$$\text{或} \quad N_r = k Re^m \quad (1)$$

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

式 (1) 可写成:

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

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

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

$$\text{或} \quad (P_2/P_1) = (N_2^2 D_2^3)/(N_1^2 D_1^3)$$

在本题情况下, $N_1 = N_2$, 而 $D_2 = 2D_1$

$$\therefore (P_2/P_1) = 8D_1^3/D_1^3 = 8$$

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:

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

第一个无因次群, π_1 , 为

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

第二个无因次群, π_2 , 为

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

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

$$u_0 = k d^a W^b \rho^c \mu^d$$

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：

$$a = -1, c = (b - 1), \text{ 及 } d = (1 - 2b)$$

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

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

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，

$$\text{得 } \underline{u_0 = kW / d \mu}$$

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

$$\text{按式 (2.1)} \quad dU = \delta q - \delta W$$

对于绝热过程, $\delta q = 0$ 及 $dU = -\delta W$

$$\text{因式 (2.25)} \quad dU/dT = C_v$$

$$\text{故} \quad dU = C_v dT = -\delta W$$

$$\text{又} \quad \gamma = C_p/C_v \text{ 和式 (2.27) } C_p = C_v + R$$

$$\text{有} \quad C_v = R/(\gamma - 1)$$

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

$$\text{因} \quad RT_1 = P_1 v_1 \quad \text{及} \quad RT_2 = P_2 v_2$$

$$\therefore \quad W = (P_1 v_1 - P_2 v_2)/(\gamma - 1)$$

$$\text{作最大功时} \quad P_1 v_1^\gamma = P_2 v_2^\gamma$$

消去 v_2 得:

$$W = [(P_1 v_1)/(\gamma - 1)] [1 - (P_2/P_1)^{(\gamma-1)/\gamma}]$$

本题中

$$P_1 = 5 \text{ MN/m}^2, \quad P_2 = 0.1013 \text{ MN/m}^2,$$

$$T_1 = 290\text{K} \text{ 及 } \gamma = 1.4。$$

$$\begin{aligned} \text{比容} \quad v_1 &= (22.4/29)(290/273)(0.1013/5) \\ &= 0.0166 \text{ m}^3/\text{kg} \end{aligned}$$

$$\therefore \quad W = [(5 \times 10^6 \times 0.0166)/0.4] [1 - (0.1013/5)^{0.4/1.4}]$$

$$=0.139 \times 10^6 \text{ J/kg}$$

$$\text{气体的质量} = 0.1/0.0166 = 6.02 \text{ kg}$$

$$\therefore W = 0.139 \times 10^6 \times 6.02 = 0.84 \times 10^6 \text{ J}$$

$$\text{或} \quad \underline{= 840 \text{ kJ}}$$

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 1 kmol 可写成：

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

$$\text{或} \quad PV = RT + bP - (a/V) + (ab/V^2) \quad (2)$$

$$\text{或} \quad P = [RT/(V - b)] - (a/V^2) \quad (3)$$

(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)

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

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：

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} dH &= \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P dT + \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T dP \\ &= C_P dT + \left(\frac{\partial U}{\partial P}\right)_T dP + \left(\frac{\partial(PV)}{\partial P}\right)_T dP \end{aligned}$$

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T₁、T₂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T₂和T₁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,

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

$$R = 8.314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}, T_1 = 290 \text{ K}$$

因此

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

如 C_v = 1.5R (即γ = 1.67), 则T₂ = 174.15K

现 PV = nRT 且 n = 80000 × 10⁻³ / 8.314 × 290

$$= 0.033 \text{ kmol}$$

$$\Delta U = -W = C_v n(T_2 - T_1)$$

$$= 1.5 \times 8.314 \times 0.033 (174.15 - 290)$$

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

<* 故气体原储藏的能量为 $U_1 - U_2 = -\Delta U = 47.7 \text{ kJ}$ 。 *>

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

$$\text{由式 (2.1)} \quad dU = \delta q - \delta W$$

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

$$\text{或} \quad dU = -Pd_v$$

任何过程中理想气体的内能变化由式 (2.25):

$$C_v dT = -Pd_v = dU$$

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)

$$\therefore \quad R/C_v = \gamma - 1$$

$$\text{且} \quad dT/T = -(\gamma - 1)(dv/v)$$

在条件 1 和 2 之间积分得:

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

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

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

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

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

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