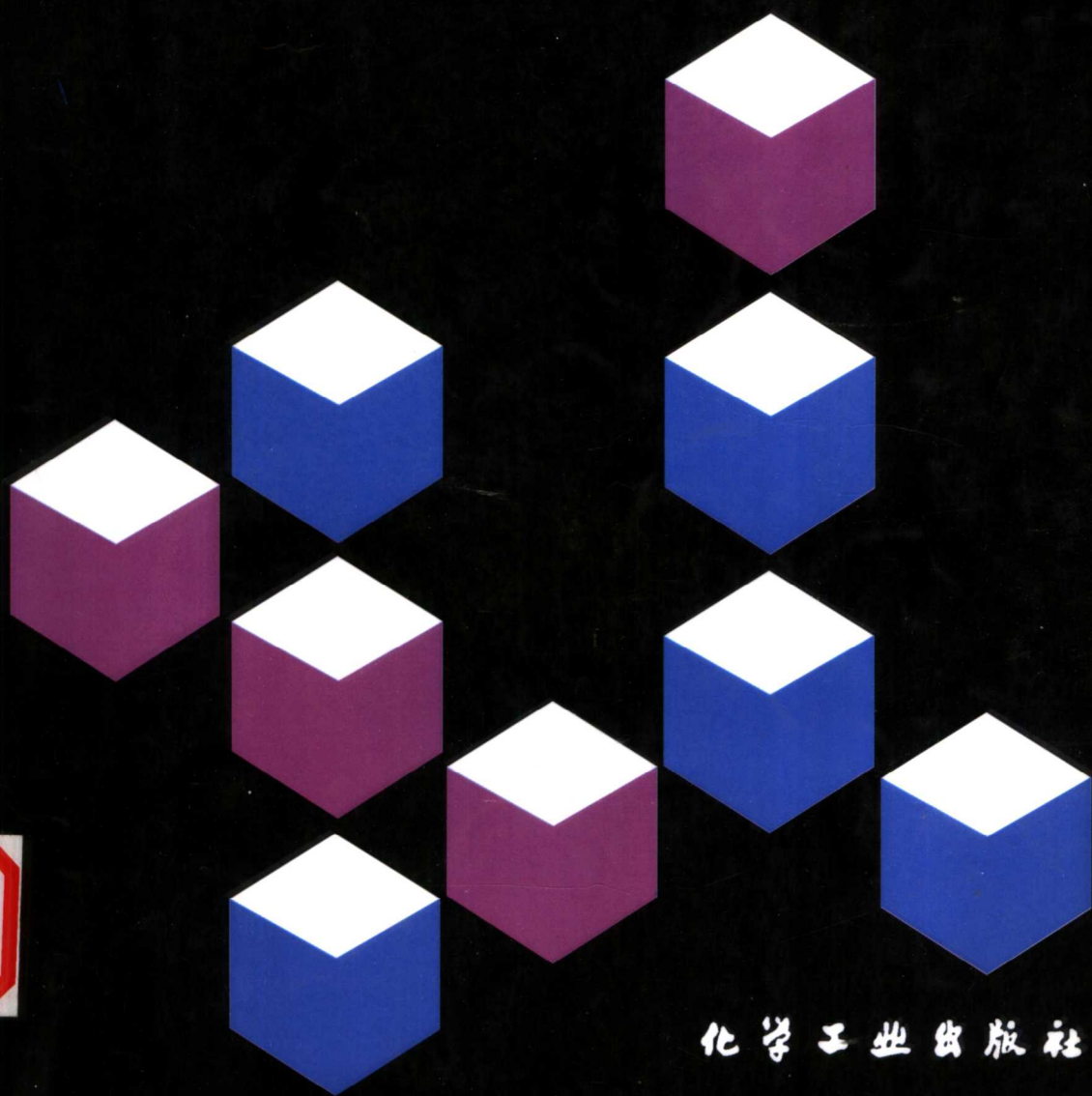


中等专业学校教学用书

化工原理例题分析与练习

陈守约 主编



化学工业出版社

职业技术教育教学用书

化工原理例题分析与练习

陈守约 主编

化学工业出版社

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理例题分析与练习/陈守约主编. —北京: 化学工业出版社, 1994.5

中等专业学校教学用书

ISBN 7-5025-1286-1

I. 化… II. 陈… III. 化工原理-习题-专业学校-教学参考资料 IV. TQ02-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (95) 第 03954 号

职业技术教育教学用书
化工原理例题分析与练习

陈守约 主编
责任编辑: 徐世峰

*

化学工业出版社出版发行
(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010)64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
北京市昌平振南印刷厂印刷
三河市宇新装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 12¼ 字数 304 千字

1994 年 5 月第 1 版 2003 年 1 月北京第 5 次印刷

ISBN 7-5025-1286-1/G·334

定 价: 20.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前 言

本书是根据 1990 年 7 月在厦门召开的化工中专化工原理教材编审委员会的决定与会议精神, 为了配合当前高中级职业技术学校化工原理课的教学而编写的。在例题与习题的教学方面, 会议要求编写一本适合职业技术教育特点的辅助教材, 与目前《化工原理》课本配套使用。

《化工原理例题分析与练习》是按上述要求进行选材、组织编写的。对应于现用教材, 本书内容包括: 流体流动、管路计算、流体输送、非均相物系的分离、传热原理与换热器、溶液蒸发、液体蒸馏、气体吸收、液液萃取、湿物料的干燥和冷冻原理等, 共计十一章。

本书在进行选编时, 除以上单元操作的基础知识、基本概念之外, 注意理论联系实际, 侧重于例题分析。书中选编了各种类型题目的解法。有些例题列出了几种解法, 进行比较说明, 分析解题思路、方法和技巧。希望有助于培养与提高学生分析和解决实际工程问题的能力。

为了正确理解教材中的基本理论和公式的应用, 书中选编了生产实际中遇到的一些实例, 进行分析说明。

例题内容与范围, 是在现用教材基础上的补充、加深与拓宽。有少量题目超出教学大纲的要求, 则用星号“*”标记, 并用小号字排出。

在叙述上, 力求简明扼要、通俗易懂、重点突出。

全书共编写例题 142 个。为了巩固所学的知识, 每章编有若干练习题, 供复习使用。全书共有练习题 107 个。书末附有参考答案。

本书使用国际单位制(SI)。有关国际制与工程单位制的换算, 例题分析所使用的图表、数据等, 主要参考金德仁编《化工原理》(化学工业出版社, 1987 年 6 月版)。

本书绪论和第一、二、三、四、十章由陕西化工学校陈守约编写, 第五、六、十一章由南京化工学校潘奉华编写, 第七、八、九章由四川泸州化工学校罗瑜先编写。全书由陈守约主编。

本书由河北化工学校金德仁主审。参加审稿的还有南京化工学校归宗燕, 湖南化工学校汤金石。

本书初稿写完后, 先后在西安和南京进行会稿和审稿。参加审稿的同志提出了宝贵意见。陕西化工学校化工原理教研组的同志提供了部分素材。汤晓云同志对书稿进行了校对。编者所在各校亦在工作中给予大力支持与协助。在此, 谨向在编写过程中给予我们热情支持和帮助的单位 and 同志们表示衷心感谢。

由于编者水平有限, 书中一定有不少缺点和错误, 恳请读者批评指正。

编者 1993 年 5 月

目 录

绪 论	1
第一章 流体流动	6
第一节 流体的基本物理性质	6
第二节 流体的压强与流体静力学基本方程	9
第三节 流体的连续性方程与柏努利方程	14
第四节 流体在管内流动时的阻力	20
练习一	28
第二章 管路计算	31
第一节 简单管路计算	31
第二节 复杂管路计算	39
第三节 可压缩流体的管路计算	44
第四节 流量的测量	46
练习二	48
第三章 流体输送	50
第一节 液体输送机械	50
第二节 气体压缩与输送机械	58
练习三	63
第四章 非均相物系的分离	64
第一节 重力沉降	64
第二节 离心分离	66
第三节 过滤分离	67
练习四	70
第五章 传热原理与换热器	71
第一节 热传导	71
第二节 对流传热	74
第三节 辐射传热	79
第四节 传热方程与换热器	81
练习五	92
第六章 溶液蒸发	95
第一节 单效蒸发	95
第二节 多效蒸发	101
练习六	110
第七章 液体蒸馏	111
第一节 气液相平衡	111
第二节 精馏塔的物料衡算	113

第三节 板式塔的理论塔板数与实际塔板数.....	117
练习七.....	120
第八章 气体吸收.....	122
第一节 吸收的气液相平衡关系.....	122
第二节 吸收过程的计算.....	124
第三节 吸收-解吸过程	131
练习八.....	133
第九章 液-液萃取	136
第一节 液-液相平衡	136
第二节 单级萃取.....	137
第三节 多级萃取.....	139
练习九.....	141
第十章 湿物料的干燥.....	143
第一节 湿空气的性质.....	143
第二节 干燥过程的物料衡算和热量衡算.....	145
练习十.....	147
第十一章 冷冻原理.....	148
第一节 理想冷冻循环.....	148
第二节 实际冷冻循环.....	149
练习十一.....	155
本书所用符号说明.....	156
练习题答案.....	158
附录.....	161

绪 论

在化工生产和化工原理计算中，经常涉及到关于物料衡算、能量衡算、平衡关系和过程速率等内容。现对以上几个基本概念，简要说明于下。

物料衡算 依据质量守恒定律，在一个稳定的生产过程中，投入设备的物料量必定等于所得产品量与过程中损失的物料量之和。即输入物料量必等于输出物料量。用数学式表示为：

$$G_{\text{入}} = G_{\text{出}} + G_{\text{损}}$$

利用物料衡算，可算得原料的消耗、产品产率、设备生产能力和主要工艺尺寸。

能量衡算 依据能量守恒定律，在一个稳定的生产过程中，输入能量应等于输出能量与损失能量之和，即

$$E_{\text{入}} = E_{\text{出}} + E_{\text{损}}$$

在进行能量衡算时，应将各种形式的能量（热能、电能、机械能、化学能、磁能等）考虑在内。但在化工生产中，最常用的是热能，例如，常向系统中输入热量（加热）或从系统中取出热量（冷却）。此时，能量衡算可简化为热量衡算

$$Q_{\text{入}} = Q_{\text{出}} + Q_{\text{损}}$$

通过热量衡算，可知单位产品耗热量，了解热量的利用和损失情况以及计算设备的主要尺寸。

平衡关系 在化工生产中，常遇到固体溶解、液体蒸馏、气体吸收等操作过程。这些操作都是在两相界面间进行的，过程能进行到什么程度，这要由平衡关系来确定。

任何一个化工过程，在一定条件下，必然沿着一定方向进行，直至达到平衡状态为止。例如，食盐在水中溶解时，要一直进行到成为饱和溶液为止。此时食盐的溶解速度与其结晶析出速度相等，达到动态平衡。这种动平衡，是在一定条件（温度）下建立的。当条件发生改变时，平衡关系也相应发生改变。在新的条件下，建立新的平衡。平衡关系表明过程的极限，可确定一个过程是否能进行，以及可能达到的程度。

过程速率 研究过程速率比物系的平衡关系更为重要。平衡关系只是表明一个过程变化的可能性与达到的极限，但不能确定过程变化的快慢，过程速率则说明变化和时间的关系。过程速率越大，说明设备生产能力越大，或设备尺寸越小。

任何一个物系，如果不是处于平衡状态，则必然会发生使该物系趋向平衡的过程。而过程进行的速率总是与过程的推动力成正比，而与过程的阻力成反比。

$$\text{过程速率} = \frac{\text{过程推动力}}{\text{过程阻力}}$$

由于具体过程不同，其推动力和阻力的内容也各不相同。例如，流体流动的推动力是压力差，传热过程的推动力是温度差，传质过程的推动力是浓度差或分压差，化学反应过程的

推动力是浓度差。上述压力差、温度差、浓度差等，都是强度因素，是推动过程进行的动力。与推动力相对应的阻力，则与操作条件、物料性质等因素有关。设法增加推动力或减少阻力，可以提高过程速率。

通过平衡关系和过程速率的计算，可确定设备的生产能力、工艺尺寸以及选择或改进生产操作条件。

关于物料衡算、热量衡算、平衡关系和过程速率的计算例题，本书将在有关章节中介绍。

在进行上述几项计算时，需用到物料的物性数据、过程的状态参数和其它物理量，它们的大小是用数字和单位共同表达的。因此，化工原理计算要涉及关于物理量的单位、单位制和单位换算问题。

单位制 物理量可人为地分为两类，即基本物理量和导出物理量。基本物理量是任意选定的几个彼此独立的物理量。如长度、质量、时间等。基本物理量的单位称为基本单位。基本量不多，只有几个。其余多数物理量称为导出量。如面积、体积、速度、压强、密度等。它可从基本量出发，通过定义或物理公式导出。导出量的单位称为导出单位。单位制是由基本单位与导出单位组成的。常见的几种单位制在力学中所用的基本量与基本单位如表 0-1 所示：

表 0-1 常用单位制的基本量与基本单位

基本单位 单位制	基本量	长 度	质 量	力 (重量)	时 间
绝对单位制：					
CGS 制		cm	g		s
MKS 制		m	kg		s
国际单位制 SI		m	kg		s
工程单位制		m		kgf	s

从上表可看出：CGS、MKS 制和 SI 中的长度、质量、时间为基本量，其单位为基本单位。而“力”是导出量，其单位通过公式 $F=ma$ 导出如下

$$\text{CGS 制 } [F] = [ma] = g \times \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} = g \cdot \text{cm/s}^2 = \text{dyn 达因}$$

$$\text{SI 制 } [F] = [ma] = \text{kg} \times \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = \text{kg} \cdot \text{m/s}^2 = \text{N 牛顿}$$

在工程单位制中，长度、力、时间为基本量，其单位为基本单位。而质量是导出量，其单位通过公式 $m=F/a$ 导出如下：

$$\text{工程制 } [m] = [F/a] = \frac{\text{kgf}}{\text{m/s}^2} = \text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m} (\text{工程质量单位})$$

在工程单位制中，力的单位为 kgf (千克力)。1kgf 等于质量为 1kg 的物体在重力加速度为 9.81m/s^2 的海平面上所受到的重力即重量。

单位换算 物理量由一种单位换算成另一种单位时，物理量本身并无变化，但数值要改变。换算时要将原单位的数目乘以两单位间的换算因数，才能得到新单位的数值。

所谓换算因数，就是两单位之间换算的倍数关系。

例如 $1\text{kgf} = 9.81\text{N}$ 即 $9.81 \frac{\text{N}}{\text{kgf}} = 1$

其中 9.81N/kgf 称为力的单位由 kgf 换算成 N 时的换算因数。将力的单位由 kgf 换算成 N 时，只需乘以 $9.81 \frac{\text{N}}{\text{kgf}}$ [相当于乘以 1]，即可将原单位换算成所需要的新单位。

例如 $1\text{kgf} = 1\text{kgf} \times 9.81 \frac{\text{N}}{\text{kgf}} = 9.81\text{N}$

例 题 分 析

例 0-1 在 26°C 和 1 大气压下， CO_2 在空气中的分子扩散系数 D 等于 $0.164\text{cm}^2/\text{s}$ ，试将此数据换算成 m^2/h 单位。

解法一：(1) 列出题中所给的物理量数据：

$$D = 0.164\text{cm}^2/\text{s} \quad (\text{a})$$

$$(2) \quad \because 1\text{m} = 100\text{cm} \text{ 得 } 1\text{m}^2 = 10^4\text{cm}^2$$

$$\text{改写成} \quad \frac{1\text{m}^2}{10^4\text{cm}^2} = 1 \quad (\text{b})$$

$$\text{又} \quad 1\text{h} = 3600\text{s}, \text{改写成} \quad \frac{1\text{h}}{3600\text{s}} = 1 \quad (\text{c})$$

(3) 将式 (a) 等号右侧乘以式 (b)，除以式 (c)，相当于乘以 1，除以 1，原式数值不变。经过分子分母中相同单位符号消去之后，即可将原单位换算成所需要的新单位如下：

$$\begin{aligned} D &= 0.164 \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \right] \left[\frac{1\text{m}^2}{10^4\text{cm}^2} \right] \left/ \left[\frac{1\text{h}}{3600\text{s}} \right] \right. \\ &= 0.164 \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \right] \left[\frac{1\text{m}^2}{10^4\text{cm}^2} \right] \left[\frac{3600\text{s}}{1\text{h}} \right] \\ &= 0.164 \cdot \frac{1 \times 3600}{10^4 \times 1} \left[\frac{\text{cm}^2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}}{\text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{h}} \right] \\ &= 0.05904\text{m}^2/\text{h} \approx 5.9 \times 10^{-2}\text{m}^2/\text{h} \end{aligned}$$

解法二：由题中所给物理量的单位，依其中基本单位需换算成什么新单位，查得相应的换算因数后，将单位与数字一起代入原式中进行运算，步骤如下：

(1) 写出原式 $D = 0.164\text{cm}^2/\text{s}$ 此单位要求换算成 m^2/h

(2) $\because 1\text{m}^2 = 10^4\text{cm}^2$ ，得由 cm^2 换算成 m^2 的换算因数为 $1 \times 10^{-4}\text{m}^2/\text{cm}^2$ ，又 s 换算成 h 的换算因数为 $\left[\frac{1}{3600} \right] \text{h/s}$

(3) 将换算因数代入原式中：

$$\begin{aligned}
 D &= 0.164 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \times \frac{1 \times 10^{-4} \text{m}^2 / \text{cm}^2}{(1/3600) \text{h} / \text{s}} \\
 &= 0.164 \times \frac{1 \times 3600 \text{cm}^2 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}}{1 \times 10^4 \text{s} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{h}} \\
 &= 0.05904 \text{m}^2 / \text{h} = 5.9 \times 10^{-2} \text{m}^2 / \text{h}
 \end{aligned}$$

解法三：对于比较熟练的化工计算者，为了节省时间，也可将原物理量中的数目写出后，只乘以或除以各相应的换算因数，并直接写出新单位如下：

$$\begin{aligned}
 D &= 0.164 \times \frac{1 \times 10^{-4} \text{m}^2}{(1/3600) \text{h}} \\
 &= 0.164 \times \frac{3600}{10^4} \text{m}^2 / \text{h} \\
 &= 0.05904 \text{m}^2 / \text{h} = 5.9 \times 10^{-2} \text{m}^2 / \text{h}
 \end{aligned}$$

例 0-2 试将热流强度（即热流密度或热通量） $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 换算成以 W/m^2 单位表示。

解法一：原单位 $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 要求换算成 W/m^2 即 $\text{J}/\text{s} \cdot \text{m}^2$ 。

查得 $1 \text{kcal} = 4186.8 \text{J}$ ，改写成 $\frac{4186.8 \text{J}}{1 \text{kcal}} = 1$ (a)

又 $1 \text{h} = 3600 \text{s}$ ，改写成 $\frac{3600 \text{s}}{1 \text{h}} = 1$ (b)

将原单位乘以式 (a)，除以式 (b)，相当于乘以 1，除以 1，原数值不变，即：

$$\begin{aligned}
 1 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} &= 1 \left[\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right] \left[\frac{4186.8 \text{J}}{1 \text{kcal}} \right] \left[\frac{3600 \text{s}}{1 \text{h}} \right] \\
 &= 1 \left[\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} \right] \left[\frac{4186.8 \text{J}}{1 \text{kcal}} \right] \left[\frac{1 \text{h}}{3600 \text{s}} \right] \\
 &= 1 \times \frac{4186.8 \times 1}{1 \times 3600} \left[\frac{\text{kcal} \cdot \text{J} \cdot \text{h}}{\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{kcal} \cdot \text{s}} \right] \\
 &= 1.1630 \text{J}/\text{s} \cdot \text{m}^2 = 1.1630 \text{W}/\text{m}^2
 \end{aligned}$$

解法二：原单位 $\text{kcal}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 要求换算成 W/m^2 ，即 $\text{J}/\text{s} \cdot \text{m}^2$ ，查得由 kcal 换算为 J 的换算因数为： $4186.8 \text{J}/\text{kcal}$ ，又 h 换算为 s 的换算因数为： $3600 \text{s}/\text{h}$ ，将换算因数代入原单位 $\frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$ 中，即：

$$\begin{aligned}
 1 \frac{\text{kcal}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}} &= 1 \times \frac{4186.8 \text{J}}{3600 \text{s} \cdot \text{m}^2} \\
 &= 1.1630 \text{J}/\text{s} \cdot \text{m}^2 \\
 &= 1.1630 \text{W}/\text{m}^2
 \end{aligned}$$

例 0-3 已知通用气体常数 $R = 82.06 \frac{\text{atm} \cdot \text{cm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ ，试将此数据换算成 SI 用 $\frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$ 所表示的量。

解法一：查得 $1 \text{atm} = 1.01325 \times 10^5 \text{N}/\text{m}^2$ ，

$$\text{即} \quad \frac{1.01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2}{1 \text{ atm}} = 1 \quad (\text{a})$$

$$1 \text{ m}^3 = 10^6 \text{ cm}^3, \text{ 即 } \frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \text{ cm}^3} = 1 \quad (\text{b})$$

$$1 \text{ kmol} = 1000 \text{ mol}, \text{ 即 } \frac{1000 \text{ mol}}{1 \text{ kmol}} = 1 \quad (\text{c})$$

将原单位乘以式 (a)、(b)、(c), 即:

$$\begin{aligned} R &= 82.06 \left[\frac{\text{atm} \cdot \text{cm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right] \left[\frac{1.01325 \times 10^5 \text{ N/m}^2}{1 \text{ atm}} \right] \left[\frac{1 \text{ m}^3}{10^6 \text{ cm}^3} \right] \left[\frac{1000 \text{ mol}}{1 \text{ kmol}} \right] \\ &= 82.06 \times \frac{1.01325 \times 10^5 \times 1 \times 1000}{1 \times 10^6 \times 1} \left[\frac{\text{atm} \cdot \text{cm}^3 \cdot (\text{N/m}^2) \cdot \text{m}^3 \cdot \text{mol}}{\text{mol} \cdot \text{k} \cdot \text{atm} \cdot \text{cm}^3 \cdot \text{kmol}} \right] \\ &= 82.06 \times 1.01325 \times 10^2 \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \right] \\ &= 8314.73 \left[\frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \right] = 8.31473 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \end{aligned}$$

解法二: 查得由 atm 换算为 N/m^2 的换算因数为 $1.01325 \times 10^5 (\text{N/m}^2) / \text{atm}$, 由 cm^3 换算为 m^3 的换算因数为 $1 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{cm}^3$, 由 mol 换算为 kmol 的换算因数为 $1 \times 10^{-3} \text{ kmol} / \text{mol}$, 将换算因数代入原单位 $\frac{\text{atm} \cdot \text{cm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}}$ 中, 即:

$$\begin{aligned} R &= 82.06 \cdot \frac{\text{atm} \cdot \text{cm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} = 82.06 \times \frac{1.01325 \times 10^5 (\text{N/m}^2) \times 1 \times 10^{-6} \text{ m}^3}{1 \times 10^{-3} \text{ kmol} \cdot \text{K}} \\ &= 82.06 \times 1.01325 \times 10^2 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \\ &= 8314.73 \text{ J/kmol} \cdot \text{K} \\ &= 8.31473 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K} \end{aligned}$$

练 习

- 0-1 在理想气体状态方程 $pV = nRT$ 中, $R = 0.08206 \frac{\text{atm} \cdot \text{l}}{\text{mol} \cdot ^\circ\text{C}}$, 试换算成以下列单位表示的 R 数值:
 $\frac{\text{kcal}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}, \frac{(\text{kgf/m}^2) \cdot \text{m}^3}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$.
- 0-2 试将功率 $\text{kgf} \cdot \text{m/s}$ [工程制], 换算成 SI 单位。
- 0-3 在 303K 时, 水的表面张力 $\sigma = 71.2 \text{ dyn/cm}$, 试将此 CGS 单位换算成 SI 单位, 再换算成工程单位。
- 0-4 试将传热速率 (或热负荷) kcal/h 换算成 SI 单位。
- 0-5 已知水的导热系数 $\lambda = 0.5 \frac{\text{kcal}}{\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C}}$, 试换算成 CGS 制及 SI 单位。

第一章 流体流动

第一节 流体的基本物理性质

基本公式

1. 密度的定义式:
$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

2. 相对密度 (比重) 与密度的关系:

$$d_4 = \rho / \rho_4 \quad (1-2)$$

水在 4℃ 时密度为 1000 kg/m³, $\therefore \rho = 1000 d_4$

3. 气体密度的计算式: 当温度不太低, 压强不太高时, 可按理想气体处理

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad \text{kg/m}^3 \quad (\text{SI 制}) \quad (1-3)$$

气体在操作条件下的密度 ρ 与在标准状态下的密度 ρ_0 之关系:

$$\rho = \rho_0 \frac{pT_0}{p_0T} = \frac{M}{22.4} \cdot \frac{pT_0}{p_0T} \quad \text{kg/m}^3$$

4. 比容的定义式:

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad \text{m}^3/\text{kg} \quad (1-4)$$

5. 液体混合物的平均密度: 若各组分在混合前后, 其体积不变, 则 1kg 混合液的体积等于各组分单独存在时体积之和:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{01}}{\rho_1} + \frac{x_{02}}{\rho_2} + \dots + \frac{x_{0n}}{\rho_n} \quad (1-5)$$

6. 气体混合物的平均密度: 若各组分在混合前后, 其质量不变, 则 1m³ 混合气体的质量等于各组分的质量之和:

$$\rho_m = \rho_1 x_{v1} + \rho_2 x_{v2} + \dots + \rho_n x_{vn} \quad (1-6)$$

7. 混合气体的平均分子量 $M_{\text{均}}$:

$$M_{\text{均}} = M_1 x_{v1} + M_2 x_{v2} + \dots + M_n x_{vn} \quad (1-7)$$

$$\rho_m = \frac{pM_{\text{均}}}{RT} \quad \text{kg/m}^3 \quad (1-8)$$

$$\rho_m = \rho_{0m} \frac{pT_0}{p_0T} = \frac{M_{H_2}}{22.4} \cdot \frac{pT_0}{p_0T} \quad (1-8a)$$

8. 粘度单位的换算关系:

$$1\text{Pa} \cdot \text{s} = 1 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = 1000 \frac{\text{m} \cdot \text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = 1000\text{cP} = 0.102 \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$$

9. 运动粘度与动力粘度 (绝对粘度) 的关系:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad \text{m}^2/\text{s} \quad (\text{SI 制})$$

例 题 分 析

例 1-1 在 20℃ 时, 四氯化碳 CCl_4 的相对密度 d 是 1.594。试求在 CGS 制、SI 制和工程制中 CCl_4 的密度 ρ 。

解: (1) 在 CGS 制中 $\rho = d = 1.594\text{g}/\text{cm}^3$

(2) 在 SI 中 $\rho = 1000d = 1594\text{kg}/\text{m}^3$

(3) 在工程制中 $1\text{kgf} = 1\text{kg} \times 9.81\text{m}/\text{s}^2$

$$1\text{kg} = \frac{1}{9.81} \text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}$$

代入 (2) 中, 则 $\rho = 1594 \times \frac{1}{9.81} \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}^2}{\text{m}} \times \frac{1}{\text{m}^3} = 162.48\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$

分析说明: 在工程制中, 有时用重度 (γ) 这个概念, 其单位是 kgf/m^3 。在地球上, 质量为 1kg 的物体, 称重时近似为 1kgf (因地理位置不同, 而略有差异)。因此, 同一物体在工程制中的重度 γ 与在 SI 中的密度 ρ , 在数值上近似相等。

例 1-2 已知某工厂炼焦煤气的组成为: CO_2 1.8%, C_2H_4 2%, O_2 0.7%, CO 6.5%, CH_4 24%, H_2 58%, N_2 7% (以上均为体积%)。试求该煤气在 780mmHg 及 25℃ 时的密度。

解法一: 查得在标准状态下, 各组分气体的密度分别为: $\rho_{\text{CO}_2} = 1.976\text{kg}/\text{m}^3$, $\rho_{\text{C}_2\text{H}_4} = 1.261\text{kg}/\text{m}^3$, $\rho_{\text{O}_2} = 1.429\text{kg}/\text{m}^3$, $\rho_{\text{CO}} = 1.250\text{kg}/\text{m}^3$, $\rho_{\text{CH}_4} = 0.717\text{kg}/\text{m}^3$, $\rho_{\text{H}_2} = 0.0899\text{kg}/\text{m}^3$, $\rho_{\text{N}_2} = 1.251\text{kg}/\text{m}^3$ 。

先用式 (1-6) 求得该煤气在标准状态下的平均密度 ρ_{0m} 为:

$$\begin{aligned} \rho_{0m} &= 1.976 \times 1.8\% + 1.261 \times 2\% + 1.429 \times 0.7\% + 1.250 \times 6.5\% + 0.717 \\ &\quad \times 24\% + 0.0899 \times 58\% + 1.251 \times 7\% = 0.464\text{kg}/\text{m}^3 \end{aligned}$$

再求得在所给条件下该煤气的平均密度 ρ_m 为:

$$\rho_m = \rho_{0m} \frac{p}{p_0} \cdot \frac{T_0}{T} = 0.464 \times \frac{780}{760} \times \frac{273}{273+25} = 0.436\text{kg}/\text{m}^3$$

解法二: 对于混合气体, 当压强不高时, 其摩尔分率即等于体积分率, 先用式 (1-7) 求出该混合气体的平均分子量 M_{H_2} :

$$M_{\text{均}} = 44 \times 1.8\% + 28 \times 2\% + 32 \times 0.7\% + 28 \times 6.5\% + 16 \times 24\% \\ + 2 \times 58\% + 28 \times 7\% = 10.356 \text{ kg/kmol}$$

再按式 (1-8) 求得在所给条件下该煤气的平均密度 ρ_m 为:

$$\rho_m = \frac{pM_{\text{均}}}{RT} = \frac{\frac{780}{760} \times 10132 \times 10.356}{8314 (273 + 25)} = 0.435 \text{ kg/m}^3$$

分析说明: 气体具有可压缩性及热膨胀性, 气体密度随压力、温度而有较大变化。在工程计算中, 当压强不太高、温度不太低时, 可按理想气体处理。在理想气体混合物中, 某组分的摩尔分率等于其压力分率, 亦等于其体积分率。即:

$$y\% = x_p\% = x_v\%$$

例 1-3 试计算在 20℃ 时 70% (质量) 的醋酸水溶液的密度。

解: 查得 20℃ 时, $\rho_{\text{醋酸}} = 1049 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{水}} = 998 \text{ kg/m}^3$ 利用式 (1-5) 计算在 20℃ 时, 醋酸水溶液的密度 ρ_m :

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{0.70}{1049} + \frac{0.30}{998} = 0.0009679$$

$$\rho_m = \frac{1}{0.0009679} = 1033 \text{ kg/m}^3$$

分析说明: 液体混合物密度的准确值, 应通过实验测定。当缺乏实测数据时, 可用式 (1-5) 估算 ρ_m 。利用式 (1-5) 求算液体混合物平均密度的条件是: 设备组分在混合前后其体积不变, 即各组分混合时具有体积相加性。实际上有些组分 (己烷-苯) 在混合时, 其体积略有增加。而有些组分 (密度相差很大的油品) 混合时, 其体积略有减少。不过, 一般在工程计算中, 因此种误差很小, 可以忽略不计。

例 1-4 某油品在常温下的粘度等于 2cP, 试将此粘度数据换算为 SI 及工程单位。

解: 查得 $1\text{P} = 1 \frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} = 100\text{cP}$; $1\text{N} = 10^5 \text{ dyn}$

$$1\text{m}^2 = 10^4 \text{ cm}^2; 1\text{kgf} = 981000 \text{ dyn}$$

$$\begin{aligned} (1) \text{ 粘度 } \mu &= 2\text{cP} = \frac{2 \text{ dyn} \cdot \text{s}}{100 \text{ cm}^2} \\ &= \frac{2}{100} \left[\frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} \right] \left[\frac{10^4 \text{ cm}^2}{1\text{m}^2} \right] \left[\frac{1\text{N}}{10^5 \text{ dyn}} \right] \\ &= \frac{2}{1000} \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = 0.002 \text{ N} \cdot \text{s/m}^2 = 0.002 \text{ Pa} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} (2) \quad \mu &= 2\text{cP} = \frac{2 \text{ dyn} \cdot \text{s}}{100 \text{ cm}^2} \\ &= \frac{2}{100} \left[\frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} \right] \left[\frac{1\text{kgf}}{981000 \text{ dyn}} \right] \left[\frac{10^4 \text{ cm}^2}{1\text{m}^2} \right] \\ &= \frac{2}{100 \times 98.10} \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = \frac{2}{9810} \text{ kgf} \cdot \text{s/m}^2 \\ &= 2.04 \times 10^{-4} \text{ kgf} \cdot \text{s/m}^2 \end{aligned}$$

分析说明：流体的粘度应通过实验测定或从有关手册中查得。

在 CGS 制中，粘度的单位用 P [$\text{dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$] 表示。在 20.2°C 时，水的粘度为 $0.01P$ 。由于 P 这个单位太大，使用起来不方便。所以常用 cP 来表示粘度。 $1cP = \frac{1}{100}P$ 。则 20.2°C 时，水的粘度即为 $1cP$ 。

在 SI 中，粘度的单位用 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ [$1\text{Pa} \cdot \text{s} = 1\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$] 表示。CGS 制与 SI 粘度单位的换算关系为：

$$1\text{Pa} \cdot \text{s} = 1 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = \frac{10^5 \text{dyn} \cdot \text{s}}{10^4 \text{cm}^2} = 10P = 1000cP$$

在工程单位制中，粘度的单位用 $\text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 表示。粘度的工程单位与 p (或 cP) 的换算关系为：

$$\begin{aligned} 1 \frac{\text{kgf} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} &= 1 \left[\frac{\text{kgf} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \right] \left[\frac{981000 \text{dyn}}{1 \text{kgf}} \right] \left[\frac{1 \text{m}^2}{10^4 \text{cm}^2} \right] \\ &= 98.1 \frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} = 98.1P = 9810cP \end{aligned}$$

第二节 流体的压强与流体静力学基本方程

基本公式

1. 流体压强的定义式： $p = \frac{F}{A} \quad \text{N}/\text{m}^2 \quad (\text{Pa})$ (1-9)

2. 常用压强单位的换算关系：

$$1 \text{atm} = 101.3 \text{kPa} = 1.033 \text{kgf}/\text{cm}^2 = 760 \text{mmHg} = 10.33 \text{mH}_2\text{O}$$

$$1 \text{at} = 1 \text{kgf}/\text{cm}^2 = 98.1 \text{kPa} = 735.6 \text{mmHg} = 10 \text{mH}_2\text{O}$$

3. 绝对压强、表压强与真空度之间的关系：

$$p_{\text{绝}} = p_{\text{大}} + p_{\text{表}}$$

$$p_{\text{绝}} = p_{\text{大}} - p_{\text{真}}$$

4. 流体静力学基本方程的几种表达式：

当液柱上底面在液体内时 $p_2 = p_1 + \rho g (z_1 - z_2)$ (1-10)

当液柱上底面在液面时 $p_2 = p_0 + \rho g h$ (1-10a)

5. U形管压差计的压强差： $\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho_{\text{示}} - \rho) g R$ (1-11)

6. 微差压差计的压强差： $\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho_A - \rho_B) g R$ (1-12)

7. 以液柱高度表示流体静压强： $p = \rho g h$

8. 流体静力学基本方程的应用

流体静力学基本方程，表明静止流体内部的压强变化规律。在连通着的同一种静止流体内部，处于同一水平面上（距基准面高度相等的平面）的各点压强相等，而与容器的形状无关。这个压强相等的水平面称为等压面。

例 题 分 析

例 1-5 某气柜内的表压强为 $200\text{mmH}_2\text{O}$ ，当地大气压强为 1.033at 。试求该气柜内的绝对压强，以 kPa 表示。

解： 气柜内的表压为 $200\text{mmH}_2\text{O}=0.2\text{mH}_2\text{O}$

$$p_{\text{表}} = \rho gh = 1000 \times 9.81 \times 0.2 \text{ N/m}^2 = 1962 \text{ N/m}^2$$

当地大气压强 $p_{\text{大}} = 1.033\text{at} = 101300 \text{ N/m}^2$

气柜内绝对压强，由式 $p_{\text{绝}} = p_{\text{大}} + p_{\text{表}}$

$$\begin{aligned} p_{\text{绝}} &= 101300 \text{ N/m}^2 + 1962 \text{ N/m}^2 = 103262 \text{ N/m}^2 \\ &= 103300 \text{ N/m}^2 = 103.3 \text{ kPa} \end{aligned}$$

例 1-6 某水泵进口管处真空表的读数为 650mmHg 。出口管处压力表的读数为 2.5at 。试求该水泵前后水的压差为多少 at ？合多少 kPa ？

解： 水泵进口管处 $p_{\text{进}} = \frac{650}{735.6} = 0.8625\text{at}$ （真空度）

出口管处 $p_{\text{出}} = 2.5\text{at}$ （表压强）

$$\begin{aligned} \text{压差 } \Delta p &= p_{\text{出}} - p_{\text{进}} = (p_{\text{大}} + p_{\text{表}}) - (p_{\text{大}} - p_{\text{真}}) = p_{\text{表}} + p_{\text{真}} \\ &= 2.5 + 0.8625 = 3.3625\text{at} \\ &= 329.86 \text{ kPa} \end{aligned}$$

例 1-7 水从水平管中流过，以 U 型管压差计测量两点间的压强差（如图 1-1）。U 型管下部为指示液。1—2，3—4，5—6，7—8，9—10 均为水平线。试判断：（1） p_1 与 p_2 是否相等？ p_3 与 p_4 是否相等？ p_5 与 p_6 是否相等？ p_7 与 p_8 是否相等？（2） p_1 与 p_2 之关系如何？

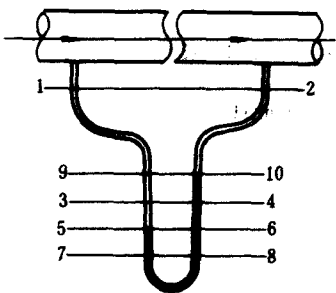


图 1-1 例 1-7 附图

解： 流体静力学基本方程的应用范围与条件是：流体静止（或平衡）且为连续均质。指的是流体内部各处密度相同，且为同一流体所连通。据此条件，对于深度相同的同一水平面上各点的静压强相等。

（1）今 1 与 2，虽是同一平面，同一种流体，但未直接连通，上游被流动的水隔开，下游被汞隔开。故 $p_1 \neq p_2$ 。3 与 4 虽在同一平面上，但却在不同流体之中，故 $p_3 \neq p_4$ 。因为 5 与 6，7 与 8 在同一水平面上，且处于同一流体中，所以， $p_5 = p_6$ ， $p_7 = p_8$ 。

（2）令指示液密度为 $\rho_{\text{示}}$ ，流体密度为 ρ ，U 型管内指示液读数为 R ，可得：

$$p_5 = p_6 + \rho g R, \quad p_6 = p_{10} + \rho_{\text{示}} g R$$

且

$$p_5 = p_6, \text{ 则 } p_6 - p_{10} = (\rho_{\text{示}} - \rho) g R$$

$\therefore$

$$p_1 = p_6 - \rho g (h_1 - h_9), \quad p_2 = p_{10} - \rho g (h_2 - h_{10}) = p_{10} - \rho g (h_1 - h_9)$$

∴

$$p_1 - p_2 = p_3 - p_{10} = (\rho_{\text{汞}} - \rho) gR$$

例 1-8 水平导管上的两点接一盛有水银的 U 型管压差计 (如图 1-2), 压差计读数为 26mmHg。如果导管内流经的是 (1) 水, (2) 20℃, 1atm 下的空气, 试计算在此种情况下压差计所指示的压强差各为多少 kPa?

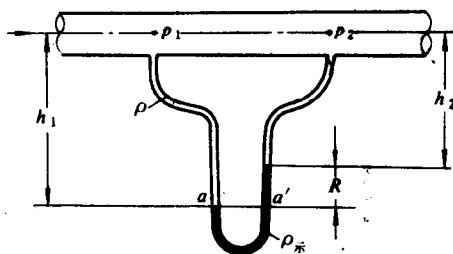


图 1-2 例 1-8 附图

解: 因为 $a-a'$ 在同一水平面上, 且为同一种流体, 故压强相等, 即 $p_a = p_{a'}$

$$\text{又 } p_a = p_1 + \rho g h_1, p_{a'} = p_2 + \rho g h_2 + \rho_{\text{汞}} g R$$

$$p_1 + \rho g h_1 = p_2 + \rho g h_2 + \rho_{\text{汞}} g R$$

$$\because h_2 = h_1 - R \quad \therefore p_1 - p_2 = (\rho_{\text{汞}} - \rho) g R$$

利用此式求两点间的压强差

(1) 管内流经水时:

$$\begin{aligned} \Delta p = p_1 - p_2 &= (\rho_{\text{汞}} - \rho) g R = (13600 - 1000) \times 9.81 \times 0.026 \\ &= 3.2 \times 10^3 \text{ N/m}^2 = 3.2 \text{ kPa} \end{aligned}$$

(2) 管内流经 20℃, 1atm 下的空气时, 先求出在所给条件下空气的密度

$$\rho_m = \frac{M_{\text{空}} p T_0}{22.4 p_0 T} = \frac{28.8}{22.4} \cdot \frac{1 \times 273}{1 \times (273 + 20)} = 1.2 \text{ kg/m}^3$$

再求压强差

$$\begin{aligned} \Delta p = p_1 - p_2 &= (13600 - 1.2) \times 9.81 \times 0.026 \\ &= 3.5 \times 10^3 \text{ N/m}^2 = 3.5 \text{ kPa} \end{aligned}$$

分析说明: 被测流体若为气体时 (此处是空气), 因气体的密度比液体的密度小的多, 则: $\rho_{\text{汞}} - \rho_{\text{气}} \approx \rho_{\text{汞}}$ 。上述计算式可简化为:

$\Delta p = p_1 - p_2 \approx \rho_{\text{汞}} g R$, 利用此简化式计算压强差如下:

$$\begin{aligned} \Delta p &= 13600 \times 9.81 \times 0.026 \\ &= 3.469 \times 10^3 \text{ N/m}^2 = 3.469 \text{ kPa} \end{aligned}$$

由此可知, 直接利用上述简化式计算气体管道两点间的压强差 Δp 也可得到较为准确的结果。

微差压差计 (杯管式双指示液 U 型管) 压强差的计算式为 $\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho_A - \rho_B) g R$ 由此式可知, 当 Δp 一定时, 如密度差 $(\rho_A - \rho_B)$ 越小, 则读数 R 便越大。微差压差计主要用于测量气体的微小压强差。

例 1-9 用 U 型管压差计测量气体管路上两点间的压强差, 指示液为水, 其密度 $\rho_{\text{水}}$ 为 1000 kg/m^3 , 读数为 12mm。为了放大读数, 改用微差压差计, 如图 1-3 所示。其中指示液 A 是含 40% 酒精的水溶液, 密度 ρ_A 为 920 kg/m^3 。指示液 B 是煤油, 密度 ρ_B 为 850 kg/m^3 。问读数可扩大到多少倍?

解: 用 U 型管测量气体的压强差时, 其简化式为: $\Delta p = \rho_{\text{水}} g R$ 。用微差压差计测量气体的