

# 化工原理例题与习题

(上册)

姚玉英 等编

化学工业出版社

本书分上、下两册出版。上册内容包括《化工原理》或《化学工程》课程中各个单元操作的计算公式、例题及习题,共有183个例题、259个习题。与本书配套使用的《化工原理例题与习题—习题解答》作为本书的下册出版。

本书涉及的化工过程和操作有:属于流体动力过程的流体流动、流体输送设备、非均相物系的分离;属于传热过程的传热、蒸发;属于传质过程的蒸馏、吸收、萃取、干燥。书末附有常用的物性常数及有关图表,以便查用。

各章例题与习题都是本着由浅入深,由简而繁,巩固基本概念,理论联系实际的基本原则编写的。某些章还编有计算设备工艺尺寸的大型题。

本书可供化工系各专业学生学习《化工原理》课程时参考,也可供教师讲授本课程时参考,还可供从事化工工作的技术人员作为自学参考书。

本书由姚玉英主编。具体执笔人员:绪论姚玉英;第一章陈永惠、刘国维、曾敏静;第二章黄凤廉;第三章刘邦孚;第四章思勤、柴诚敬;第五章陈常贵;第六章李婀娜、张松敏;第七章胡莲芬;第八章靳怀璿;第九章冯朝伍。全书由黄凤廉、陈常贵、刘国维校核。

## 化工原理例题与习题

(上册)

姚玉英 等编

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850×1168<sup>1/32</sup>印张18插页1 字数514千字印数1-257000

1983年12月北京第1版1983年12月北京第1次印刷

统一书号15063·3544定价2.25元

## 目 录

绪论.....	1
第一章 流体流动.....	30
第二章 流体输送设备.....	114
第三章 非均相物系的分离.....	155
第四章 传热.....	208
<del>第五章 蒸发.....</del>	<del>277</del>
第六章 蒸馏.....	297
第七章 吸收.....	371
第八章 液-液萃取.....	412
第九章 干燥.....	452

## 附 录

一、《化工原理》中常用的、有专门名称的、国际单位制的导出单位.....	517
二、常用单位的换算.....	517
三、干空气的物理性质.....	520
四、水的物理性质.....	521
五、 <del>某些气体在常压下的沸点及临界参数</del> .....	<del>523</del>
六、水的饱和蒸汽压 (-20℃至100℃).....	523
七、饱和水蒸汽压表 (以温度为准).....	525
八、饱和水蒸汽表 (以用[公斤/厘米 <sup>2</sup> ]为单位的压强为准).....	527
九、饱和水蒸汽表 (以用kN/m <sup>2</sup> 为单位的压强为准).....	529
十、某些液体的导热系数.....	532
十一、某些气体和蒸气的导热系数.....	534

十二、某些固体材料的导热系数.....	536
十三、常用固体材料的密度和比热.....	538
十四、某些液体的表面张力及常压下的沸点.....	539
十五、某些水溶液的表面张力, N/m.....	540
十六、水在不同温度下的粘度.....	540
十七、液体的粘度和密度.....	542
十八、气体的粘度.....	546
十九、液体的比热.....	548
二十、101.3kN/m <sup>2</sup> 压强下气体及蒸气的比热.....	551
二十一、蒸发潜热(气化热).....	553
二十二、某些有机液体的相对密度(液体密度与277K时水的 密度之比).....	<del>555</del>
二十三、壁面污垢的热阻(污垢系数) m <sup>2</sup> ·K/W.....	557
二十四、无机盐溶液在大气压下的沸点.....	558
二十五、1[大气压]下溶液的沸点升高与浓度的关系.....	559
二十六、管子规格(摘录).....	559
二十七、泵规格(摘录).....	562
二十八、4-72-11型离心通风机规格(摘录).....	567
二十九、管壳式热交换器系列标准(摘录).....	568

## 绪 论

在化工原理计算中，不论是计算已有设备的生产能力、或是计算完成一定生产任务所需设备的工艺尺寸、或是计算生产过程中能量的消耗、或是计算设备与周围环境间的热量交换（简称热损失），所需要的计算内容可以归纳成：物料衡算、能量衡算、速率关系及平衡关系。利用物料衡算，可以算出生产过程中消耗的原料量、获得的产品量以及过程中物料的损耗量，也可以算出过程中物料由一相转移到另一相的数量；利用能量衡算，可以算出操作过程中消耗的热量或电能；利用速率关系及平衡关系，可以算出设备的生产能力或工艺尺寸。

在计算上述各项内容时，经常要利用说明物料特性的各种物性常数（如比热、汽化热、粘度等）以及说明操作状态的状态参数（如温度、压强等），它们的大小都是用数字和单位共同表达的。因此，化工原理计算中又要涉及单位、单位制度及不同单位制度间的换算（简称单位换算）等问题。

下面扼要介绍单位制度、单位换算、物料衡算及能量衡算。速率关系及平衡关系则放在后面各章中陆续介绍。

### 一、单位制度与单位换算

单位制度分为绝对单位与重力单位两种制度，每种制度又有米制与英制之分。绝对单位制度以长度、质量及时间作为基本量；重力单位制度以长度、力（或重量）及时间作为基本量。由于每种单位制度只选用三种基本量，遇到复杂问题时，常常不够使用，这时就要引进其它基本量及相应的单位。例如，在讨论热力学内容时，引进摄氏温度（ $^{\circ}\text{C}$ ）或华氏温度（ $^{\circ}\text{F}$ ）作为温度的单位；引进千卡（kcal）或英热单位（BTU）作为热量或能量的单位。这样，就可以将各种单位制度扩大应用于热力学领域中。

绝对单位制度与重力单位制度的区别在于：前者是以质量为基本量，质量的单位为基本单位，力（或重量）的单位为导出单位；后者是以力（或重量）为基本量，力（或重量）的单位为基本单位，质量的单位为导出单位。质量和力的关系用牛顿力学第二定律关联，即

$$F = ma \quad (0-1)$$

式中  $F$  —— 作用于物体上的力

$m$  —— 物体的质量

$a$  —— 物体在作用力方向上的加速度。

在任何方程式中，各物理量必须采用同一种单位制度下的单位来表示，称为单位一致性。因此，根据式 0-1 可以得出不同单位制度下质量或力的导出单位。

在重力单位制中，力的大小不易量得准确，经国际度量衡委员会规定为

$$\begin{aligned} 1[\text{公斤(力)}] &= 9.80665[\text{牛顿}] \\ &= 9.80665[\text{公斤(质)} \cdot \text{米/秒}^2]^* \end{aligned}$$

应用时如不要求十分精确，可以近似地取为

$$1[\text{公斤(力)}] = 9.81[\text{公斤(质)} \cdot \text{米/秒}^2] \quad (0-2)$$

自然科学中广泛采用以〔厘米〕、〔克〕、〔秒〕为基本单位的单位制度。即 cgs 制。工程技术领域中，要经常考虑力的作用，以力作为基本量比较方便，因此工程技术中常采用重力单位制度，重力单位制度又称为工程单位制度的理由即在于此。

最近，国际度量衡委员会通过并颁行了一种称为国际单位制（简称 SI）的单位制度，它是以  $m$ （米）、 $kg$ （千克，质）以及  $s$ （秒）为基本单位的单位制度（即 mks 制）的引伸与发展，除了 mks 制中原规定的三个基本量外，还加上另外四个基本量和两个辅助量。四个基本量为：电流强度（单位为 A，即安培）、热力学温度（单位为 K，即开尔文）、发光强度（单位为 cd，即烛光）及物质量（单位为 mol，即摩尔）。两个辅助量为：平面角（单位为 rad，即弧度）及立体角

\* 本书规定 SI 单位制度的单位用英文符号表示，其它单位制度的单位一律用中文加方括号表示。

(单位为sr, 即球面度)。

SI单位制度优于旧有的任何一种单位制度。例如, 过去在不同的科学领域中, 用米制单位表示功、能和热量时, 使用的单位有: [尔格]、[公斤(力)·米]、[大气压·升]、[英热单位]、[磅(力)·英尺]等等; 在SI单位制度中, 功、能、热量三者只用一个单位J(焦)表示, 这样不但易于理解, 且换算起来也很方便。又如在工程制中, 力或重量的单位为[公斤(力)], 而 $1[公斤(力)] = 9.81[公斤(质)·米/秒^2]$ , 在使用时往往将公斤后面的“力”或“质”字省去,  $1[公斤(力)]$ 或 $1[公斤(质)]$ 都用[公斤]表示, 这样容易将力和质量混淆起来, 而 $1[公斤(力)]$ 与 $1[公斤(质)]$ 是两个不同的概念。在SI单位制度中, 质量为基本量, 其单位为kg; 力的单位是导出单位, 为N(即 $kg·m/s^2$ ), 两者不易混淆。此外, 在SI单位制度中, 由于加入了发光强度、电流强度等基本量后, 致使这种制度可以直接应用于电学和光学领域中。因此, SI单位制度具有高度的统一性, 包括了所有科学领域中的计量单位, 从而使科学技术、工业生产、经济贸易以及日常生活统一在一个单位制度中。

自从国际度量衡委员会颁布了SI单位制度后, 各国相继逐步改用这种单位制度, SI单位制度将成为国际上通用的单位制度。最近, 我国国务院已批准颁发了“计量单位名称与符号试行方案”。本例、习题集以国际单位制度为主, 但目前各工业生产部门还多采用原有的重力单位制度; 且旧资料中又是各种单位制度并存; 再者, 从事化学工程者的工作既与小型实验室数据有关(即与cgs制有关), 又与大规模生产数据有关(即与重力单位制有关)。所以从事化学工程者应熟悉各种单位制度, 并掌握不同单位制度间的换算。基本单位和简单的导出单位间的换算可以直接从本书后面的附录二中查出, 复杂的导出单位之间的换算则比较麻烦, 但只要遵循一定的原则, 不论多么复杂的换算, 也能迎刃而解。

### 例 题

0-1 在英制中,  $1[大气压] = 14.697[磅(力)/英寸^2]$ , 试求在SI

制中，1〔大气压〕相当于若干 $\text{N}/\text{m}^2$ 。

解 本题应先将不同单位制度下的基本单位之间的关系找出，由附录二查出：

$$1[\text{磅(力)}]=4.448\text{N}$$

$$1[\text{英寸}]=0.0254\text{m}$$

上二式可以改写为

$$\frac{4.448\text{N}}{1[\text{磅(力)}]}=1 \quad (\text{a})$$

$$\frac{(1\text{英寸})^2}{(0.0254\text{m})^2}=1 \quad (\text{b})$$

若将题给的关系式等号右侧乘以式 a 及式 b，实际上均相当于乘以 1，故乘以式 a 和式 b 以后，不影响式子恒等，而单位则换成所需的单位了，即

$$\begin{aligned} 1[\text{大气压}] &= 14.697[\text{磅(力)}/\text{英寸}^2] \\ &= 14.697 \left[ \frac{\text{磅(力)}}{\text{英寸}^2} \right] \left[ \frac{4.448\text{N}}{1\text{磅(力)}} \right] \left[ \frac{1\text{英寸}}{0.0254\text{m}} \right]^2 \\ &= \frac{14.697 \times 4.448}{0.0254^2} \text{N}/\text{m}^2 \\ &= 1.0133 \times 10^5 \text{N}/\text{m}^2 \end{aligned}$$

通常在换算中，不必写出像式 a 及式 b 那样的关系式，只要确定其基本单位需换算成什么新单位，如本题中要将〔磅(力)〕换成 N；然后再从附录的单位换算表中找出  $1[\text{磅(力)}]=4.448\text{N}$  的关系；最后将式子乘以  $[4.448\text{N}/1\text{磅(力)}]$ 。这样，可以消去单位〔磅(力)〕，而引入所需单位 N。因为  $[4.448\text{N}/1\text{磅(力)}]=1$ ，式子乘以  $[4.448\text{N}/1\text{磅(力)}]$  相当于乘以 1。应记住，原来单位中〔磅(力)〕是分子，故应乘以  $[4.448\text{N}/1\text{磅(力)}]$ ，而不应乘以  $[1\text{磅(力)}/4.448\text{N}]$ 。又如〔英寸<sup>2</sup>〕要换成  $\text{m}^2$ ，而  $1[\text{英寸}]^2=[0.0254\text{m}]^2$ ，〔英寸<sup>2</sup>〕在原单位中是分母，故式子乘以  $[1\text{英寸}/0.0254\text{m}]^2$ 。

应指出，对简单的导出单位换算可以不必进行上述的运算，而直接从相应的换算表中查得，例如本题可以直接从附录二查得



$$1[\text{大气压}] = 1.0133 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

以上只是作为单位换算的练习而已。

0-2 在各种单位制度中, 物质比热 $c_p$ 的单位分别为

SI单位制  $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$

米制重力单位  $[\text{千卡}/\text{公斤}\cdot^\circ\text{C}]$

英制重力单位  $[\text{英热单位}/\text{磅}\cdot^\circ\text{F}]$

$4^\circ\text{C}$ 时水的比热为 $4.1868\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。试从基本单位开始, 将 $4^\circ\text{C}$ 时水的比热换算成米制及英制中的重力单位。

解 从附录二查出比热单位中相应的各基本量在不同单位制度中的关系为:

$$1[\text{千卡}] = 4.1868 \text{ kJ}$$

$$\text{温度差}1\text{K} = \text{温度差}1^\circ\text{C} = \text{温度差}1.8^\circ\text{F}$$

$$1[\text{英热单位}] = 1.055\text{kJ}$$

$$1[\text{磅}] = 0.4536\text{kg}$$

米制重力单位:

$$\begin{aligned} 4.1868 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} &= 4.1868 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \right] \left[ \frac{1\text{千卡}}{4.1868\text{kJ}} \right] \left[ \frac{1\text{K}}{1^\circ\text{C}} \right] \\ &= \frac{4.1868}{4.1868} [\text{千卡}/\text{公斤}\cdot^\circ\text{C}] \\ &= 1[\text{千卡}/\text{公斤}\cdot^\circ\text{C}] \end{aligned}$$

英制重力单位:

$$\begin{aligned} 4.1868 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} &= 4.1868 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}} \right] \left[ \frac{1\text{英热单位}}{1.055\text{kJ}} \right] \left[ \frac{0.4536\text{kg}}{1\text{磅}} \right] \\ &\quad \left[ \frac{1\text{K}}{1.8^\circ\text{F}} \right] \\ &= \frac{4.1868 \times 0.4536}{1.055 \times 1.8} [\text{英热单位}/\text{磅}\cdot^\circ\text{F}] \\ &= 1[\text{英热单位}/\text{磅}\cdot^\circ\text{F}] \end{aligned}$$

故 $4^\circ\text{C}$ 时, 米制及英制中水的比热分别为 $1[\text{千卡}/\text{公斤}\cdot^\circ\text{C}]$ 及 $1[\text{英热单位}/\text{磅}\cdot^\circ\text{F}]$ 。

0-3 在气体状态方程  $pV = nRT$  中,  $R = 82.07$  [大气压·厘米<sup>3</sup>/克分子·°K], 试求下列各项中通用气体常数  $R$  的数值及单位:

1. 若压强  $P$  用  $N/m^2$ 、体积  $V$  用  $m^3$ 、摩尔数  $n$  用  $kmol$ 、绝对温度  $T$  用  $K$  表示;

2. 若压强  $P$  用 [公斤(力)/米<sup>2</sup>]、体积  $V$  用 [米<sup>3</sup>]、摩尔数  $n$  用 [公斤分子]、绝对温度  $T$  用 °K 表示;

3. 若压强  $P$  用 [磅(力)/英尺<sup>2</sup>]、体积  $V$  用 [英尺<sup>3</sup>]、摩尔数  $n$  用 [磅分子]、绝对温度  $T$  用 °R 表示。

**解** 从附录二中查出相应的各基本量在不同单位制中的关系为:

$$\begin{aligned} 1[\text{大气压}] &= 1.0133 \times 10^5 N/m^2 \\ &= 10330 [\text{公斤(力)/米}^2] \\ &= 14.697 [\text{磅(力)/英寸}^2] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{从而算出 } 1[\text{大气压}] &= 14.697 \left[ \frac{\text{磅(力)}}{\text{英寸}^2} \right] \\ &= 14.697 \left[ \frac{\text{磅(力)}}{\text{英寸}^2} \right] \left[ \frac{12 \text{英寸}}{\text{英尺}} \right]^2 \\ &= 2116.4 [\text{磅(力)/英尺}^2] \end{aligned}$$

又查出

$$\begin{aligned} 1m &= 100 [\text{厘米}] \\ 1kmol &= 1000 [\text{克分子}] \\ \text{温度差 } 1^\circ K &= \text{温度差 } 1.8^\circ R \\ 1[\text{英尺}] &= [30.48 \text{厘米}] \\ 1[\text{磅分子}] &= 453.6 [\text{克分子}] \end{aligned}$$

1.  $R = 82.07$  [大气压·厘米<sup>3</sup>/克分子·°K]

$$\begin{aligned} &= 82.07 \left[ \frac{\text{大气压} \cdot \text{厘米}^3}{\text{克分子} \cdot ^\circ K} \right] \left[ \frac{1.0133 \times 10^5 N/m^2}{1 \text{大气压}} \right] \\ &\quad \left[ \frac{1m}{100 \text{厘米}} \right]^3 \left[ \frac{1000 \text{克分子}}{1kmol} \right] \left[ \frac{1^\circ K}{1K} \right] \\ &= \frac{82.07 \times 1.0133 \times 10^5 \times 1000}{100^3} \frac{N/m^2 \cdot m^3}{kmol \cdot K} \end{aligned}$$

$$= 8316 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{m}^3 / (\text{kmol} \cdot \text{K})$$

$$2. R = 82.07 [\text{大气压} \cdot \text{厘米}^3 / \text{克分子} \cdot ^\circ\text{K}]$$

$$= 82.07 \left[ \frac{\text{大气压} \cdot \text{厘米}^3}{\text{克分子} \cdot ^\circ\text{K}} \right] \left[ \frac{10330 \text{公斤(力)/米}^2}{1 \text{大气压}} \right]$$

$$\left[ \frac{1 \text{米}}{100 \text{厘米}} \right]^3 \left[ \frac{1000 \text{克分子}}{1 \text{公斤分子}} \right]$$

$$= \frac{82.07 \times 10330 \times 1000}{100^3} \left[ \frac{\text{公斤(力)/米}^2 \cdot \text{米}^3}{\text{公斤分子} \cdot ^\circ\text{K}} \right]$$

$$= 848 [\text{公斤(力)/米}^2 \cdot \text{米}^3 / \text{公斤分子} \cdot ^\circ\text{K}]$$

$$3. R = 82.07 [\text{大气压} \cdot \text{厘米}^3 / \text{克分子} \cdot ^\circ\text{K}]$$

$$= 82.07 \left[ \frac{\text{大气压} \cdot \text{厘米}^3}{\text{克分子} \cdot ^\circ\text{K}} \right] \left[ \frac{2116.4 \text{磅(力)/英尺}^2}{1 \text{大气压}} \right]$$

$$\left[ \frac{1 \text{英尺}}{30.48 \text{厘米}} \right]^3 \left[ \frac{453.6 \text{克分子}}{1 \text{磅分子}} \right] \left[ \frac{^\circ\text{K}}{1.8 ^\circ\text{F}} \right]$$

$$= \frac{82.07 \times 2116.4 \times 453.6}{30.48^3 \times 1.8} \left[ \frac{\text{磅(力)/英尺}^2 \cdot \text{英尺}^3}{\text{磅分子} \cdot ^\circ\text{R}} \right]$$

$$= 1564 \left[ \frac{\text{磅(力)}}{\text{英尺}^2} \cdot \text{英尺}^3 / \text{磅分子} \cdot \text{R} \right]$$

0-4 水分自静止的水面向空气中蒸发的速率可用下式进行计算:

$$G = 2.45 u^{0.8} \Delta p$$

式中  $G$ ——水分蒸发速率, [磅/英尺<sup>2</sup>·时]

$u$ ——水分上方空气的流速, [英尺/秒]

$\Delta p$ ——在空气温度下水的饱和蒸汽压与空气中水汽分压之差, [大气压]。

试将上式加以换算,使 $G$ 以 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $u$ 以 $\text{m}/\text{s}$ 、 $\Delta p$ 以 $\text{N}/\text{m}^2$ 表示。

解 本题是要将式中各物理量的单位换算成SI。从表面上看,似乎原式等号两侧的单位不一致,但数值2.45是有单位的,它相当于 $G$ 与 $(u^{0.8} \cdot \Delta p)$ 之间的换算常数,实际上式子等号两侧的单位是一致的。故要将各物理量的单位换成SI的单位,只要改变常数2.45的

数值即可。

由附录二查出

$$1[\text{英尺}] = 0.3048\text{m}$$

或

$$1[\text{英尺/秒}] = 0.3048\text{m/s}$$

令  $u$  表示以 [英尺/秒] 为单位的流速,  $u'$  表示以  $\text{m/s}$  为单位的流速, 则  $u$  与  $u'$  的关系为

$$u = \frac{u'}{0.3048} \quad (\text{a})$$

又从附录二查出

$$1[\text{大气压}] = 1.0133 \times 10^5 \text{N/m}^2$$

令  $\Delta p$  表示以 [大气压] 为单位的压强差,  $\Delta p'$  表示以  $\text{N/m}^2$  为单位的压强差, 则  $\Delta p$  与  $\Delta p'$  的关系为

$$\Delta p = \frac{\Delta p'}{1.0133 \times 10^5} \quad (\text{b})$$

再算出

$$\begin{aligned} 1[\text{磅/英尺}^2 \cdot \text{时}] &= 1 \left[ \frac{\text{磅}}{\text{英尺}^2 \cdot \text{时}} \right] \left[ \frac{0.4536\text{kg}}{1\text{磅}} \right] \\ &\quad \left[ \frac{1\text{英尺}}{0.3048\text{m}} \right]^2 \left[ \frac{1\text{时}}{3600\text{s}} \right] \\ &= \frac{0.4536}{0.3048^2 \times 3600} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \\ &= 1.356 \times 10^{-3} \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}) \end{aligned}$$

令  $G$  表示以 [磅/英尺<sup>2</sup>·时] 为单位的蒸发速率,  $G'$  表示以  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  为单位的蒸发速率, 则  $G$  与  $G'$  的关系为

$$G = \frac{G'}{1.356 \times 10^{-3}} \quad (\text{c})$$

将式 a、式 b 及式 c 代入题给的关系式中, 得

$$\frac{G'}{1.356 \times 10^{-3}} = 2.45 \left[ \frac{u'}{0.3048} \right]^{0.8} \left[ \frac{\Delta p'}{1.0133 \times 10^5} \right]$$

略去各物理量的上标, 并整理得

$$G = 8.48 \times 10^{-8} u^{0.8} \Delta p \quad \text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

## 二、物料衡算及能量衡算

进行物料衡算及能量衡算时，应特别注意以下各点。

首先，要圈出衡算范围或系统。在工艺计算中，往往是以一个生产过程作为衡算的系统，而在化工原理计算中，应视具体情况可以以一组设备、一个设备甚或以设备的一个部分作为衡算的范围或系统。且认为所圈定的范围与外界没有关系，而是独立的。进入或离开这个系统的物料以箭头表示，各股物料数量之间的关系遵循质量守恒定律，即

$$\Sigma \text{输入的物料量} = \Sigma \text{输出的物料量} + \text{损失量} \quad (0-3)$$

上式适用于总物料及物料中任一组分的衡算。

其次，要规定出衡算的基准。在间歇操作中，一般以一个操作循环为基准；在连续操作中，以单位时间为基准。式0-3中一切物料的数量，均应按所选定的基准进行计算。

再者，物料的数量可以用质量表示，也可以用物质量表示，对液体还可以用体积表示。但对于气体，只有为理想气体以及系统的温度、压强恒定时，才能用体积表示气体的数量。溶液或固体混合物中各组分的浓度（又称组成）常用质量分率表示；理想混合气体的浓度常用摩尔分率或体积分率表示。本例题与习题集中如不特别指明都是采用这种方法表示物料浓度的。

至于能量衡算，其基本原则与物料衡算一样，进、出系统的能量关系遵循能量守恒定律，即

$$\Sigma \text{输入的能量} = \Sigma \text{输出的能量} + \text{损失的能量} \quad (0-4)$$

应指出，“能量”应该是指各种形式的能量，包括热量、电能、机械能（位能、动能和静压能的总称）、磁能等等。但在化工生产过程中，常常遇到向系统输入热量或从系统中取出热量的问题，故本书以热量衡算作为重点。

## 例 题

0-5 氧与氯的混合气体中含有2.4%氧。为了测量该混合气体的流率，使气体通入一陶磁管，每秒向管路中通入 $0.167\text{m}^3$ 的空气（计算时可以近似地认为空气中含有21%氧、79%氮），在管子下游气体已充分混合均匀的某处，对气体进行分析知其中含氧8.5%。气体在管中流动时因摩擦而产生的压强降很小可以略去不计；流动过程中的温度可认为是恒定的；各种气体可视为理想气体。试求：

1. 每秒输入氧和氯的混合气体的量；
2. 取样处混合气体的浓度。

**解** 流动过程中忽略了摩擦阻力，故压强没有变化；温度也是恒定的；且为理想气体。因此，气体的数量可以用体积表示。

依题意画出流程图，如本题附图所示。

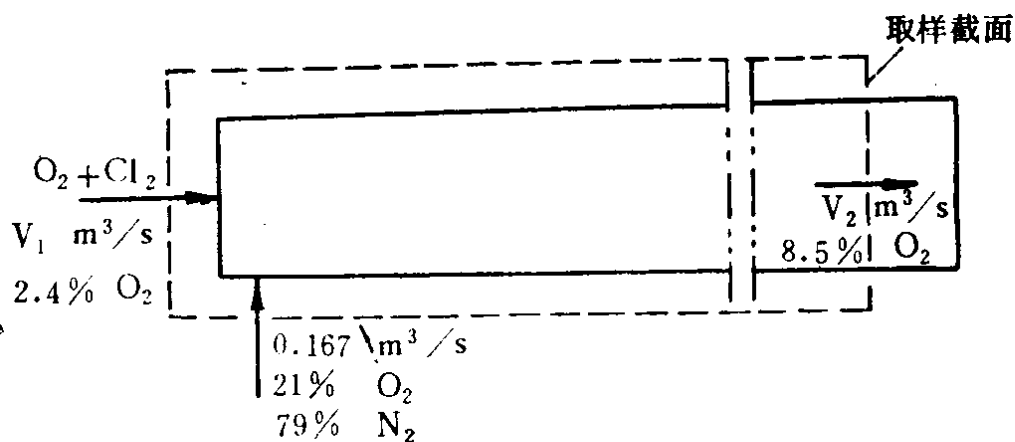


图 0-1 例0-5附图

基准 1s

范围 如本题附图中虚线所示

1. 输入的氧和氯混合气体的流率

设原混合气体流率为 $V_1 \text{ m}^3/\text{s}$ 、取样处混合气体流率为 $V_2 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

在虚线范围内分别列总物料及氧的衡算，得

$$V_1 + 0.167 = V_2$$

及 
$$0.024V_1 + 0.167 \times 0.21 = 0.085V_2$$

解上二式得

原混合气体流率  $V_1 = 0.342 \text{ m}^3/\text{s}$

## 2. 取样处混合气体的浓度

由上面的总物料衡算式知取样处混合气体流率为

$$V_2 = V_1 + 0.167 = 0.342 + 0.167 = 0.509 \text{ m}^3/\text{s}$$

取样处混合气体中各组分的体积为

$$\text{O}_2: (0.342 + 0.167) \times 0.085 = 0.043 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{Cl}_2: 0.342(1 - 0.024) = 0.334 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{N}_2: 0.167 \times 0.79 = 0.132 \text{ m}^3/\text{s}$$

取样处各组分的浓度为

$$\text{O}_2: \frac{0.043}{0.509} \times 100\% = 8.45\%$$

$$\text{Cl}_2: \frac{0.334}{0.509} \times 100\% = 65.62\%$$

$$\text{N}_2: \frac{0.132}{0.509} \times 100\% = 25.93\%$$

$$\Sigma = 100.0\%$$

由此看出，进行物料衡算的要点是：首先，根据题意画出简单的示意图，用虚线圈出衡算范围，并选出衡算基准。其次，用箭头标出物料进、出路线，注明各股物料的数量及状态，凡是跨越虚线的箭头都是参与衡算的流股。最后，列出若干有用的独立方程式，方程式的数目应与未知数数目相等。应予指出，对简单的计算，可以不画示意图，但一定要明确指出计算基准与范围。

有时在计算过程中，常遇到题给数据不足的情况。若缺少的是物料的性质常数，如粘度、密度等，可以从本书附录或化学手册中查得。若缺少的是设备结构参数，如浮阀塔阀孔直径、溢流堰高度等；或者缺少的是操作参数，如流体在管道中流过的速度、管道壁面的污垢热阻等，可以参考化工手册或化工单元操作专著，结合具体情况加

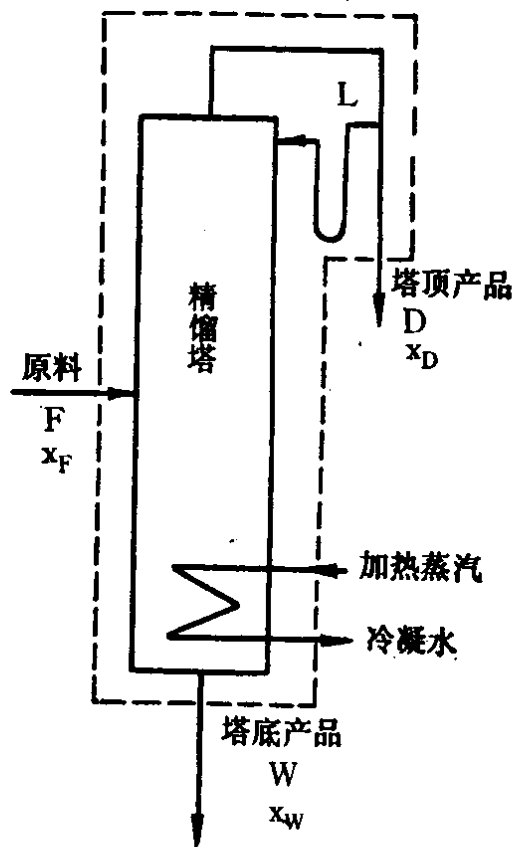


图 0-2 例0-6附图

以选用。但所查出的数据，其单位不一定是SI制的，这时就应将各物理量的单位都换算成SI制的，然后再进行计算。

0-6 在本题附图所示的常压连续精馏塔中，分离含苯40%的苯-甲苯混合溶液。要求塔顶产品中含苯97%，塔底产品中含苯2%。若每小时有15000kg原料液送入塔中，试求塔顶产品及塔底产品的千摩尔流率。

**解** 以 $F$ 、 $x_F$ ； $D$ 、 $x_D$ 及 $W$ 、 $x_W$ 分别代表原料液、塔顶产品及塔底产品的千摩尔流率及摩尔浓度。因要算的是各流股的摩尔流率，故先将原料液、塔顶产品及塔底产品的浓度换算成摩尔浓度。苯和甲苯的分子量分别为78及92kg/kmol，则

$$x_F = \frac{40/78}{40/78 + 60/92} = 0.44$$

$$x_D = \frac{97/78}{97/78 + 3/92} = 0.974$$

$$x_W = \frac{2/78}{2/78 + 98/92} = 0.0235$$

$$\begin{aligned} \text{原料液的平均分子量 } M_F &= 78 \times 0.44 + 92(1 - 0.44) \\ &= 85.8 \text{ kg/kmol} \end{aligned}$$

$$\text{原料液的千摩尔流率 } F = \frac{15000}{85.8} = 175 \text{ kmol/h}$$

**基准** 1h

**范围** 如本题附图虚线所示

在虚线范围内列总物料及苯的衡算，得

$$D + W = F = 175$$

$$\text{及 } 0.97D + 0.0235W = 0.44 \times 175$$

联立上二式解得

$$D = 77 \text{ kmol/h}$$

$$W = 98 \text{ kmol/h}$$

在精馏操作中，由于工艺的需要，有一部分塔顶产品返回塔内作为回流，余下的才是实际获得的塔顶产品 $D$ 。令每小时回流量为 $L$ 。



kg, 由图看出, 回流在所圈定的虚线范围内循环流动, 指示回流流动方向的箭头没有跨越虚线, 故在虚线范围内列物料衡算时, 应不考虑回流。

另外, 由本题附图看出, 操作过程中要不断地向系统送入加热蒸汽, 也不断地向系统中取出冷凝水, 但这股物料与被处理溶液为金属壁面所隔开, 不参与精馏操作, 进行物料衡算时也不应考虑这股物料。

0-7 采用蒸发方法将浓度为10% NaOH及10% NaCl的水溶液进行浓缩。蒸发时只有部分水分汽化成为水蒸汽而逸出; 部分NaCl结晶成晶粒而留在母液中。操作停止后, 分析母液的成分为: 50% NaOH、2% NaCl及48% H<sub>2</sub>O。若每批处理250kg原料液, 试求每批操作中:

1. 获得的母液量;
2. 蒸发出的水分量;
3. 结晶出的NaCl量。

**解** 依题意画出如本题附图所示的流程图。

**基准** 一个操作循环, 即250kg原料液

**范围** 图中虚线所示

令  $x$  = 获得的母液量, kg

$y$  = 蒸发出的水分量, kg

$z$  = 结晶出的NaCl量, kg

在图中虚线范围内对一个操作循环分别列NaOH、NaCl及H<sub>2</sub>O的衡算, 得

$$\text{NaOH: } 250 \times 0.1 = 0.5x$$

$$\text{NaCl: } 250 \times 0.1 = 0.02x + z$$

$$\text{H}_2\text{O: } 250(1 - 0.1 - 0.1) = y + 0.48x$$

联立上三式, 解得

$$\text{母液量 } x = 50\text{kg}$$

$$\text{蒸发出的水分量 } y = 176\text{kg}$$

$$\text{结晶出的NaCl量 } z = 24\text{kg}$$