


化工原理例题与习题

(第二版)

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU



高等学校
教学用书



姚玉英 主编
化学工业出版社

内 容 提 要

《化工原理例题与习题》(第二版)仍由天津大学姚玉英主编。在第一版的基础上,本书广泛采纳了读者提出的有益建议,充实全书内容。除第一版所述的绪论、流体流动、流体输送设备、非均相物系分离、传热、蒸发、蒸馏、吸收、萃取、干燥等内容外,修订版增编了搅拌、蒸馏和吸收塔设备、结晶和冷冻等四章,在有些章节中增编了一些新的内容,以适应生产和技术的发展。

在修订过程中,进一步强调了由浅入深、巩固基本概念,加强实际应用的编写原则,在有关章节中,对设备的工艺设计作了一些练习和训练;引入了一些实际问题和研究生入学考题,旨在提高读者的专业理论水平。

本书可供有关专业的师生在《化工原理》课程的教学过程中参考使用;也可供从事化工工作的技术人员作为自学和提高的学习材料;对于报考研究生的学习和工作人员,尤为一本很好的复习资料。

高等学校教学用书
化工原理例题与习题
(第二版)
姚玉英 主编

责任编辑:徐世峰
封面设计:任 辉

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787×1092¹/₁₆,印张31³/₄,字数804千字
1990年6月第1版 1990年6月北京第1次印刷
印 数 1—4,400
ISBN 7-5025-0539-3/G·136 (课)
定 价6.55元

说 明

本书是1983年出版的《化工原理例题与习题》的修订版。原书分上、下两册出版，上册为各单元操作的主要计算公式、例题和习题，下册为上册习题的解答。修订版不出习题的解答。修订版除原有的绪论、流体流动，流体输送设备、非均相物系分离、传热、蒸发、蒸馏、吸收、液-液萃取、干燥及附录外，还增编了液体搅拌、蒸馏和吸收塔设备、结晶和冷冻四章。对原有各章删去一些简单的例、习题，补充了一些实用性强的题，其中有些题是我校近年来本科生的试题与研究生入学试题。此外，个别章还增编一些内容，如非均相物系分离章增编了固体流态化，干燥章增编了凉水塔，蒸馏和吸收塔设备章不仅合并原有蒸馏及吸收章的有关内容，还增编了筛板塔的设计计算内容。

本书内容广泛，可与当前各种版本的《化工原理》教材配套使用。各章的例、习题是本着由浅入深，巩固基本概念，理论联系实际的基本原则编写的。

本书可作为高等院校化工类及有关专业师生的《化工原理》课程的教学参考书，也可供报考研究生人员及从事化工工作的技术人员参考。

本书由姚玉英主编。具体执笔人员：绪论和附录姚玉英；第一章刘国维、曾敏静、陈永惠；第二章黄凤廉；第三章刘邦孚、曾敏静；第四章柴诚敬；第五章柴诚敬、思勤；第六章陈常贵；第七章李阿娜；第八章胡莲芬；第九章柴诚敬、胡莲芬；第十章靳怀璿；第十一章李宗堂；第十二章陈常贵；第十三章刘国维。

一九八八年三月

目 录

绪论	1
第一章 流体流动	15
第二章 流体输送设备	63
第三章 过滤、沉降与固体流态化	92
第四章 液体搅拌	138
第五章 传热	146
第六章 蒸发	208
第七章 蒸馏	226
第八章 吸收	280
第九章 蒸馏和吸收塔设备	317
第十章 液-液萃取	350
第十一章 结晶	381
第十二章 干燥	388
第十三章 冷冻	438

附 录

一、中华人民共和国法定计量单位	453
二、常用单位的换算	454
三、某些气体的重要物理性质	458
四、某些液体的重要物理性质	459
五、干空气的物理性质	461
六、饱和湿空气的性质 (101.3kPa)	462
七、水的物理性质	462
八、水在不同温度下的粘度	463
九、水的饱和蒸汽压(-20℃至100℃)	464
十、饱和水蒸气表 (按温度排列)	465
十一、饱和水蒸气表 (按压强单位为kgf/cm ² 进行排列)	467
十二、饱和水蒸气表 (按压强单位为kPa进行排列)	469
十三、某些液体的导热系数	470
十四、某些气体和蒸气的导热系数	472
十五、某些固体材料的导热系数	473
十六、常用固体材料的密度和比热	474
十七、液体的粘度	475
十八、101.3kPa压强下气体的粘度	477
十九、液体的比热	479

二十、101.3kPa压强下气体的比热	481
二十一、液体汽化热(蒸发潜热)	483
二十二、液体表面张力	485
二十三、有机液体的密度	487
二十四、壁面污垢热阻(污垢系数) $m^2 \cdot ^\circ C/W$	489
二十五、无机盐水溶液在101.3kPa压强下的沸点	490
二十六、管子规格(摘录)	491
二十七、泵规格(摘录)	492
二十八、4-72-11型离心通风机规格(摘录)	496
二十九、管板式热交换器系列标准(摘录)	497
三十、氟里昂-12的压焓图	599
三十一、氟里昂-22的压焓图	500
三十二、氨的压焓图	501

绪 论

在化工原理的计算中，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的热量交换（简称热损失），所采用的计算手段是物料衡算和能量衡算，所依据的基本原理是速率关系和平衡关系。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能或电能；利用速率关系和平衡关系，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和重力单位两种制度，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物理量（简称基本量）；重力单位制度以长度、力（或重量）及时间作为基本量。由于每种单位制度选用三个基本量，故只能有三种相应的基本单位，遇到复杂问题时，常常单位不够使用，这时就得引进其它基本量及相应的单位。例如在热力学中引进 $^{\circ}\text{C}$ 或 $^{\circ}\text{F}$ 作温度的单位；引进 kcal （千卡）或 Btu （英热单位）作热量或能量的单位。这样才能将各种单位制度扩大应用于各种科学领域中。

绝对单位与重力单位这两种制度的区别在于：前者是以质量为基本量，其单位为基本单位，而力（或重量）的单位则为导出单位；后者是以力（或重量）为基本量，其单位为基本单位，而质量的单位则为导出单位。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中的单位来表示，这种表示方法称为单位一致性。因此，根据式0-1可以得出质量和力在不同单位制度中形式各异的导出单位。

在重力单位制中，力的大小不易测得准确，经国际度量衡委员会规定：

$$\begin{aligned} 1\text{kgf} &= 9.80665\text{N} \\ &= 9.80665\text{kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2* \end{aligned}$$

* kgf 代表千克（力）， kg 代表千克（质）。

应用时如不要求十分精确，可近似地取为：

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

自然科学领域中广泛采用绝对单位制中的米制，若长度以cm、质量以g、时间以s为单位，简称为cgs制；若长度以m、质量以kg、时间以s为单位，则简称为mks制。工程技术领域中经常涉及到物理量“力”，故采用以力为基本量的单位制度比较方便，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。

60年代初，国际度量衡委员会通过并颁行了一种国际单位制度，国际上的代号为SI，它是mks制的引伸与发展，所包含的基本量除了mks制中原规定的长度、质量和时间三个基本量外，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（单位为sr，即球面度）。

SI优于旧有的任何一种单位制度。例如，过去在重力单位制中功的单位为 $\text{kgf}\cdot\text{m}$ ，能和热量的单位为kcal，把这些本质相同的物理量用不同的单位表示，运用时很不方便，要采用换算系数（即热功当量）进行换算。在SI中，功、能量和热量三者只用一个单位J（焦）表示，这样不但易于理解，且运用时也很方便，不必加以换算。此外，在SI中，由于引入了发光强度、电流强度等基本单位后，致使这种制度可以直接应用于电学、光学等领域中。因此，SI具有高度的统一性，任何科学领域中的物理量单位都是由这七个基本量的单位组成，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种单位制度中。

自从国际度量衡委员会颁布了SI后，各国相继逐步改用这种单位制度，SI已成为国际上通用的单位制度。我国国务院于1977年确定逐步采用国际单位制，1984年又发布命令，确定我国统一实行《中华人民共和国法定计量单位》（见附录一），它是以国际单位为基础，外加由国家专门指定的非国际单位的若干个基本单位。要求在1990年年底前完成向法定计量单位的过渡，自1991年1月起，除个别领域外，不允许使用法定计量单位以外的单位。

本书以采用法定计量单位为主，但因旧有资料是各种制度的单位并存，且目前处于单位过渡时期，故在少数例、习题中引入一些法定计量单位以外的惯用单位，以便读者掌握不同单位间的换算。

例 0-1 在英制绝对单位制中，粘度的单位为 $\text{lb}/(\text{ft}\cdot\text{s})$ ，在法定计量单位中粘度的单位为 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。试求两者间的关系。

解 粘度的单位为导出单位，它的法定计量单位是由以下基本单位组成：

$$\text{Pa}\cdot\text{s} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{s} = \frac{\frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$$

由附录二查得粘度在两种不同单位制中的基本量之间的关系为：

$$1\text{lb}=0.4536\text{kg}$$

$$1\text{ft}=0.3048\text{m}$$

上面两个关系可以改写为：

$$\frac{0.4536\text{kg}}{\text{lb}} = 1 \quad (\text{a})$$

$$\frac{\text{ft}}{0.3048\text{m}} = 1 \quad (\text{b})$$

将式 a 及式 b 等号左侧值与英制的粘度单位联乘, 实际上等于联乘两个 1, 但乘了以后可以消去原单位中的 lb 及 ft, 而引入新单位 kg 及 m, 这样就可以获得粘度在不同单位间的数值关系。

$$\begin{aligned} 1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}\cdot\text{s}} &= 1 \left[\frac{\text{lb}}{\text{ft}\cdot\text{s}} \right] \left[\frac{0.4536\text{kg}}{\text{lb}} \right] \left[\frac{\text{ft}}{0.3048\text{m}} \right] \\ &= 1.4481 \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}} \quad (\text{c}) \end{aligned}$$

上面计算结果即为粘度数值在英制单位与法定计量单位之间的关系。

不管什么复杂导出单位间的换算只要遵循这种方法, 即可换算成所需的单位。

在通常的运算中, 不必写出象式 a 和式 b 那样的关系式, 只要确定原单位与要换的单位之间的数值关系, 直接写出式 c, 消去原单位而引入新单位, 如本题中 lb 是要消去的单位, kg 是要引入的单位, 故应乘以 $0.4536\text{kg}/\text{lb}$, 而不应乘以 $\text{lb}/(0.4536\text{kg})$ 。

应指出, 有些导出单位间的换算可以不必进行上述的运算, 可直接从相应的换算表中查得。本题可直接从附录二查得 $1\text{lb}/(\text{ft}\cdot\text{s}) = 1.4881\text{s}$, 与换算结果一致。

例 0-2 在气体状态方程 $pV = nRT$ 中, 气体通用常数 $R = 82.06\text{atm}\cdot\text{cm}^3/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 。试求在下列不同单位制中 R 的数值与单位。

1. 压强 p 的单位为 Pa、体积 V 的单位为 m^3 、物质质量 n 的单位为 kmol、绝对温度 T 的单位为 K。

2. 压强 p 的单位为 kgf/m^2 、体积 V 的单位为 m^3 、物质质量 n 的单位为 kmol、绝对温度 T 的单位为 K。

3. 压强 p 的单位为 lbf^*/ft^2 、体积 V 的单位为 m^3 、物质质量 n 的单位为 lbmol 、绝对温度单位为 R。

$$\begin{aligned} \text{解 1.} \quad R &= 82.06 \frac{\text{atm}\cdot\text{cm}^3}{\text{mol}\cdot\text{K}} \\ &= 82.06 \left[\frac{\text{atm}\cdot\text{cm}^3}{\text{mol}\cdot\text{K}} \right] \left[\frac{1.01325 \times 10^5 \text{Pa}}{\text{atm}} \right] \left[\frac{\text{m}}{100\text{cm}} \right]^3 \left[\frac{1000\text{mol}}{\text{kmol}} \right] \\ &= 8315 \frac{\text{Pa}\cdot\text{m}^3}{\text{kmol}\cdot\text{K}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{2.} \quad R &= 82.06 \frac{\text{atm}\cdot\text{cm}^3}{\text{mol}\cdot\text{K}} \\ &= 82.06 \left[\frac{\text{atm}\cdot\text{cm}^3}{\text{mol}\cdot\text{K}} \right] \left[\frac{10332\text{kgf}/\text{m}^2}{\text{atm}} \right] \left[\frac{\text{m}}{100\text{cm}} \right]^3 \left[\frac{1000\text{mol}}{\text{kmol}} \right] \\ &= 848 \frac{\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol}\cdot\text{K}} \end{aligned}$$

* lbf 代表磅 (力)。

$$\begin{aligned}
 3. \quad R &= 82.06 \frac{\text{atm} \cdot \text{cm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} \\
 &= 82.06 \left[\frac{\text{atm} \cdot \text{cm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} \right] \left[\frac{14.697 \frac{\text{lb}}{\text{in}^2} \left(\frac{12 \text{in}}{\text{ft}} \right)^2}{\text{atm}} \right] \\
 &\quad \left[\frac{453.6 \text{mol}}{\text{lbmol}} \right] \left[\frac{\text{ft}}{30.48 \text{cm}} \right]^3 \left[\frac{\text{K}}{1.8 \text{R}} \right] \\
 &= 1546 \frac{\frac{\text{lb}}{\text{ft}^2} \cdot \text{ft}^3}{\text{lbmol} \cdot \text{R}}
 \end{aligned}$$

例 0-3 用某矩鞍型填料塔蒸馏碳氢化合物时, 整理出分离能力相当于一层理论塔板的填料层高度 (简称等板高度) H_c 的经验计算式为:

$$H_c = 4.605 \times 10^4 G^{-0.45} D^{1.11} Z^{1/3} \frac{\alpha \mu_L}{\rho_L}$$

式中 H_c ——等板高度, ft;

G ——气相空塔质量速度, lb/(ft²·h);

D ——填料塔直径, ft;

Z ——填料层高度, ft;

α ——相对挥发度, 无因次;

μ_L ——液体粘度, g/(cm·s);

ρ_L ——液体密度, lb/ft³。

试将上面经验式加以换算, 使 H_c 以 m、 G 以 kg/(m²·h)、 D 以 m、 Z 以 m、 μ_L 以 mPa·s 及 ρ_L 以 kg/m³ 为单位。

解 题给的是经验公式, 所谓经验公式是指单纯根据试验数据整理出的公式, 它不是单位一致性公式, 各物理量有其专用的单位, 从表面上看经验公式, 似乎等号两侧的单位不一致, 实际上经验公式中的数字是有单位的, 它的单位起到使等号两侧的单位一致起来的作用。所以若改变经验公式中物理量的单位, 最终公式的形式不变, 而是式中数字值改变了。

从附录二直接或间接查出以下关系:

$$1 \text{ft} = 0.3048 \text{m}$$

$$1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}} = 1 \left[\frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}} \right] \left[\frac{0.4536 \text{kg}}{\text{lb}} \right] \left[\frac{\text{ft}}{0.3048 \text{m}} \right]^2 = 4.883 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{h}}$$

$$1 \frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}} = 1 \left[\frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}} \right] \left[\frac{1 \text{kg}}{1000 \text{g}} \right] \left[\frac{100 \text{cm}}{\text{m}} \right] = \frac{1}{10} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right]$$

$$= \frac{1}{10} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \right] \left[\frac{\text{m}}{\text{m}} \right] \left[\frac{\text{s}}{\text{s}} \right]$$

$$= \frac{1}{10} \left[\frac{\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \right] = \frac{1}{10} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{s} \right] = \frac{1}{10} \text{Pa} \cdot \text{s} = 100 \text{mPa} \cdot \text{s}$$

$$1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} = 1 \left[\frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \right] \left[\frac{0.4536 \text{kg}}{\text{lb}} \right] \left[\frac{\text{ft}}{0.3048 \text{m}} \right]^3 = 16.019 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

令 H'_c 、 G' 、 D' 、 Z' 、 μ'_L 及 ρ'_L 分别代表变单位后的相应物理量,两种不同单位制中各物理量相互间的关系为:

$$H_c = \frac{H'}{0.3048} \quad \text{ft} \quad (\text{a})$$

$$G = \frac{G'}{4.883} \quad \text{lb}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h}) \quad (\text{b})$$

$$D = \frac{D'}{0.3048} \quad \text{m} \quad (\text{c})$$

$$Z = \frac{Z'}{0.3048} \quad \text{m} \quad (\text{d})$$

$$\mu_L = \frac{\mu'_L}{100} \quad \frac{\text{g}}{\text{cm} \cdot \text{s}} \quad (\text{e})$$

$$\rho_L = \frac{\rho'_L}{16.019} \quad \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \quad (\text{f})$$

将式 a 至式 f 的关系代入经验式中,得:

$$\frac{H'_c}{0.3048} = 4.605 \times 10^4 \left[\frac{G'}{4.883} \right]^{-0.45} \left[\frac{D'}{0.3048} \right]^{1.11} \left[\frac{Z'}{0.3048} \right]^{1/3} \left[\frac{\alpha \left(\frac{\mu'_L}{100} \right)}{\frac{\rho'_L}{16.019}} \right]$$

略去式中物理量上标,并整理得:

$$H_c = 2.55 \times 10^4 G^{-0.45} D^{1.11} Z^{1/3} \frac{\alpha \mu_L}{\rho_L}$$

上式即为换算题指定单位后的经验公式。

二、物料衡算及能量衡算

进行物料及能量衡算时,应特别注意以下各点。

首先,要圈出衡算范围或系统。在化工工艺计算中,往往是以一个生产过程作为衡算系统,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用箭头表示,各股物料数量之间的关系遵循质量守恒定律,即:

$$\Sigma \text{输入物料量} = \Sigma \text{输出物料量} + \text{损失量} \quad (0-2)$$

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,只有当是理想气体及系统的温度、压强恒定时,才能用体积表示液体的数量。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(或体积分率或分压分率)表示。本书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：

$$\Sigma \text{输入的能量} = \Sigma \text{输出的能量} + \text{损失的能量} \quad (0-3)$$

应指出，“能量”应该是指各种形式的能量，包括热能、电能、机械能（位能、动能和静压能的总称）、磁能等等。但在化工生产中，常常遇到向系统输入热能或取出热能的问题，故本书以热能衡算作为重点。

例 0-4 100kg 木材从含 40%（质量，下同）的水分干燥到含 20% 的水分时，试计算水分的蒸出量。

解 方法一

基准：100kg 原始木材

原始木材中绝干木材质量 = $100(1 - 0.4) = 60\text{kg}$ 绝干木材

干燥后木材的质量 = $\frac{60}{1 - 0.2} = 75\text{kg}$ 干燥后的木材

水分蒸发量 = $100 - 75 = 25\text{kgH}_2\text{O}/100\text{kg}$ 原始木材

方法二 在干燥过程中，绝干木材不蒸发，故在原始木材及干燥后的木材中绝干木材没有变化，因此也可以 1kg 绝干木材为基准。

原始木材中每 kg 绝干木材中含水量（简称水分干基浓度）= $0.4/0.6 = 0.666\text{kgH}_2\text{O}/\text{kg}$ 绝干木材

干燥后木材中的水分干基浓度 = $\frac{0.2}{0.8} = 0.25\text{kgH}_2\text{O}/\text{kg}$ 绝干木材

对每 kg 绝干木材而言的水分蒸发量 = $0.666 - 0.25 = 0.416\text{kgH}_2\text{O}/\text{kg}$ 绝干木材

原始木材中绝干木材质量 = $100(1 - 0.4) = 60\text{kg}$ 绝干木材 / 100kg 原始木材

水分蒸发量 = $60 \times 0.416 = 25\text{kgH}_2\text{O}/100\text{kg}$ 原始木材

两个方法的计算结果完全一致。

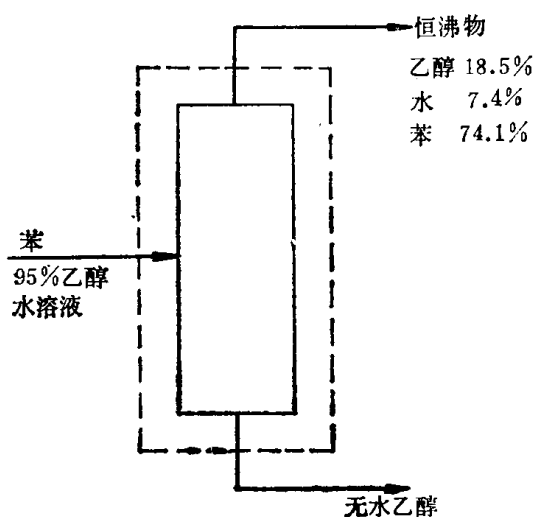


图 0-1 例 0-5 附图

例 0-5 本题附图表示制造无水乙醇的工艺示意图。含乙醇 95%（质量，下同）的水溶液与纯苯共同加入精馏塔中，在塔内苯和水溶液形成恒沸物，由塔顶取出，其组成为：乙醇 18.5%、水 7.4%、苯 74.1%。塔底得到无水乙醇。若每小时从塔底获得 0.25m^3 无水乙醇，试计算每小时加入苯的量及 95% 乙醇水溶液的量。无水乙醇的密度为 $785\text{kg}/\text{m}^3$ 。

解 欲计算每获得 0.25m^3 无水乙醇时苯的耗用量，应通过总物料及各组分的衡算求得。

基准：1 h

令 $F =$ 进塔物料总量， kg/h ；

$D =$ 塔顶产品（即恒沸物）的量， kg/h ；

$W =$ 塔底产品（即无水乙醇）的量， kg/h ；

$x =$ 组分的质量分率；

下标 B 示苯、 A 示乙醇、 W 示水。下标 F 示进料、下标 D 示塔顶产品。

塔底无水乙醇的量 $W = 0.25 \times 785 = 196.25\text{kg}$ 无水乙醇/h

在图中虚线范围内列出下列各物料的衡算，即：

$$\text{总物料} \quad F = D + W = D + 196.25 \quad (\text{a})$$

$$\text{乙醇} \quad F x_{FA} = 0.185D + 196.25 \quad (\text{b})$$

$$\text{苯} \quad F x_{FB} = 0.741D \quad (\text{c})$$

$$\text{水} \quad F x_{FW} = 0.074D \quad (\text{d})$$

上面四个方程式中有五个未知数，故再于进料中找出乙醇与水组成间的关系为：

$$\frac{x_{FA}}{x_{FW}} = \frac{0.95}{0.05} = 19 \quad (\text{e})$$

由式 b、式 d 及式 e 解得 $D = 160.73 \text{kg}$ 塔顶产品/h

由式 c 解得苯的耗用量 $= F x_{FB} = 0.741 \times 160.73 = 119.1 \text{kg}$ 苯/h

由式 a 解得总进料 $F = 160.73 + 196.25 = 356.98 \text{kg}$ 总进料/h

故 95% 乙醇水溶液的耗用量为：

$$356.98 - 119.1 = 237.88 \text{kg} \text{ 95\% 乙醇水溶液/h}$$

由以上两个例题看出，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。对简单的计算，可以不画出示意图，但一定要明确指出计算基准。

有时在计算过程中，常遇到题给数据不足的情况。若缺少的是物料的物理常数，如粘度、密度等，可以从本书末附录或有关手册中查得。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，结合具体情况加以选用，但所查出的数据，其单位不一定与所要求的一致，这时就应加以换算，然后再进行计算。

例 0-6 粗苯乙烯混合液体中含有 1.5% 苯、3.0% 甲苯、60.0% 乙苯、35.0% 苯乙烯及 0.5% 焦油。这种混合液要用精馏方法多次分离，才能获得高纯度的苯乙烯。

分离过程的部分流程如本题附图所示。

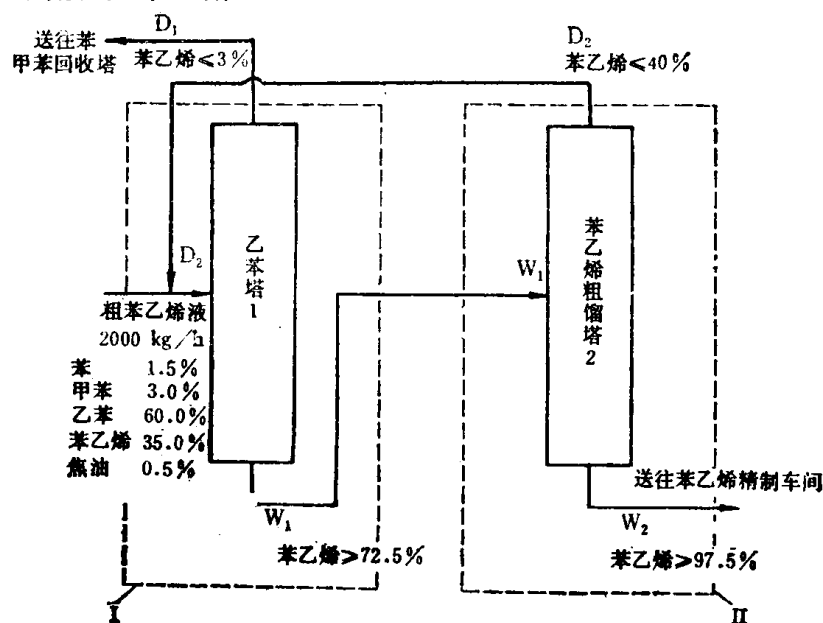


图 0-2 例 0-6 附图

粗苯乙烯原料液首先送入乙苯塔 1 内进行分离，从塔顶几乎蒸出原料中的全部苯和甲苯以及部分乙苯及苯乙烯，苯乙烯浓度不允许高于 3%，塔顶蒸出物经冷凝后送至另一塔以回收其中的苯和甲苯。塔 1 底部排出的为原料中全部焦油及部分乙苯和苯乙烯，苯乙烯浓度不允许低于 72.5%。

塔 1 底部排出物送至后面的苯乙烯粗馏塔 2 中进行粗分。塔 2 顶部几乎蒸出进入该塔原料中全部乙苯及部分苯乙烯，苯乙烯浓度不允许大于 40%，底部排出的为该塔进料中全部焦油及部分苯乙烯，苯乙烯浓度不允许低于 97.5%。

塔 2 顶部蒸出的气体经全部冷凝后与粗苯乙烯溶液（即原始的原料液）混合后送入塔 1 中作为该塔原料。塔 2 底部排出的液体送往另一车间进行精制提纯。

若粗苯乙烯的处理量为 2000kg/h（不包括由塔 2 顶部送回的那部分液体），试求每小时从两个塔顶部及底部送出的物料量及浓度。

解 令

D 、 W ——分别表示每小时从塔顶及塔底取出的物料量，kg/h；

下标 1 及 2 分别表示乙苯塔 1 及苯乙烯粗馏塔 2。

1. 塔顶及塔底各股物料流率

基准：1 h

各流股均取题给的极限浓度。并认为乙苯塔 1 顶部蒸出物中不含焦油，底部排出物中不含苯和甲苯；苯乙烯粗馏塔 2 顶部蒸出物中不含焦油，底部排出物中不含乙苯。

在本题附图中围绕塔 1 作虚线 I、围绕塔 2 作虚线 2。

在虚线 I 的范围内作总物料及苯乙烯的衡算，得：

$$W_1 + D_1 = 2000 + D_2 \quad (a)$$

及
$$0.725W_1 + 0.03D_1 = 2000 \times 0.35 + 0.4D_2 \quad (b)$$

再在虚线范围 II 内列总物料及苯乙烯的衡算，得：

$$W_1 = D_2 + W_2 \quad (c)$$

及
$$0.725W_1 = 0.4D_2 + 0.975W_2 \quad (d)$$

由上面四个方程式联解得出：

$$D_1 = 1322.7 \text{ kg/h}$$

$$D_2 = 520.7 \text{ kg/h}$$

$$W_1 = 1198.2 \text{ kg/h}$$

$$W_2 = 667.3 \text{ kg/h}$$

用手算法解上面四个方程式时，不论是用一般的代入法或是用行列式求解，在数字运算上总是繁杂的，工程上有时采用另一种处理方法。

方程式 a 和 b 中有三个变量（即 W_1 、 D_1 及 D_2 ），无法由此二式解出三个变量的数值，若人为地规定其中一个变量的数值，譬如说规定 D_2 为 520.7kg/h（参照前面计算结果而规定的），这样通过式 a 和式 b 便可解出另两个变量的数值为：

$$D_1 = 1322.6 \text{ kg/h}$$

$$W_1 = 1198.2 \text{ kg/h}$$

D_1 及 W_1 是在假设 $D_2 = 520.7 \text{ kg/h}$ 的基础上算出的。若 D_2 值假设的正确，则算得的 D_1 及 W_1 值也是正确的。 D_2 值是否假设的正确，可以利用式 c 及式 d 去核对，即将算出的 W_1 代入该二式中，由此解出 D_2 及 W_2 ，若算出的 D_2 也为 520.7kg/h，或者相接近，其误差在工程技

术允许范围之内，则表示所假设的 D_2 值是正确的，或是可以接受的。

将上面算出的 $W_1=1198.2\text{kg/h}$ 代入式c及式d，得：

$$1198.2 = D_2 + W_2$$

及

$$0.725 \times 1198.2 = 0.4D_2 + 0.975W_2$$

由此解得

$$W_2 = 677.2\text{kg/h}$$

$$D_2 = 521\text{kg/h}$$

故可认为前面假设是正确的。若算出的 D_2 与假设值相差甚远，则应重新假设 D_2 值，重复计算，直至两者相等或相差不大时为止。这种计算方法称为“试差计算法”，简称“试差法”。

与前面计算相比，试差法可以避免复杂的数字运算，但假设 D_2 值时似乎无法下手，本题由于已有第一次计算的正确结果作为参考，故一次试算就得到满意的结果，否则要经过多次试算才成。但当计算技巧熟练时，能够分析出要假设的数值大致范围，一般经过三、四次的重复计算就可以得到满意的结果。

试差法还经常用于变量之间的关系不能完全用式子表达时，例如 x 和 y 两个变量之间的关系是由一个方程和一条曲线描述的，这时若求算 x 和 y ，则试差法是图解法之外的切实可行的计算手段。此外，对高阶一元方程的求解，试差法也是可行的计算手段。

2. 物料浓度

(1) 乙苯塔1中各流股的浓度 混合进料中各组分的数量为：

苯：	$2000 \times 0.015 = 30\text{kg/h}$
甲苯：	$2000 \times 0.03 = 60\text{kg/h}$
乙苯：	$2000 \times 0.6 + 520.7 \times 0.6 = 1512\text{kg/h}$
苯乙烯：	$2000 \times 0.35 + 520.7 \times 0.4 = 908\text{kg/h}$
焦油：	$2000 \times 0.005 = 10\text{kg/h}$

顶部蒸出物料的数量及各组分的数量为：

总物料：	$D_1 = 1322.7\text{kg/h}$
苯：	30kg/h
甲苯：	60kg/h
苯乙烯：	$1322.7 \times 0.03 = 39.68\text{kg/h}$
乙苯：	$1322.7 - (30 + 60 + 39.68) = 1193\text{kg/h}$

塔顶蒸出物各组分的浓度为：

苯：	$\frac{30}{1322.7} \times 100\% = 2.27\%$
甲苯：	$\frac{60}{1322.7} \times 100\% = 4.54\%$
乙苯：	$\frac{1193}{1322.7} \times 100\% = 90.19\%$
苯乙烯：	$\frac{39.68}{1322.7} \times 100\% = 3.0\%$

$$\Sigma = 100\%$$

塔底排出物的数量及各组分的数量为：

$$\begin{aligned} \text{总物料} & W_1 = 1198.2 \text{ kg/h} \\ \text{苯乙烯} & 1198.2 \times 0.725 = 868.7 \text{ kg/h} \\ \text{焦油} & 10 \text{ kg/h} \\ \text{乙苯} & 1198.2 - (868.7 + 10) = 319.5 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

塔底物料中各组分的浓度为：

$$\begin{aligned} \text{乙苯} & \frac{319.5}{1198.2} \times 100\% = 26.67\% \\ \text{苯乙烯} & \frac{868.7}{1198.2} \times 100\% = 72.5\% \\ \text{焦油} & \frac{10}{1198.2} \times 100\% = 0.83\% \end{aligned}$$

$$\Sigma = 100\%$$

(2) 苯乙烯粗馏塔中各流股的浓度 塔顶物料中各组分浓度为已知，即：

$$\begin{aligned} \text{乙苯} & 40\% \\ \text{苯乙烯} & 60\% \end{aligned}$$

塔底排出物的数量及各组分的数量为：

$$\begin{aligned} \text{总物料} & W_2 = 677.3 \text{ kg/h} \\ \text{焦油} & 10 \text{ kg/h} \\ \text{苯乙烯} & 677.3 \times 0.975 = 660.37 \text{ kg/h} \\ \text{乙苯} & 677.3 - (10 + 660.37) = 6.93 \text{ kg/h} \end{aligned}$$

塔底物料中各组分的浓度为：

$$\begin{aligned} \text{乙苯} & \frac{6.93}{677.3} \times 100\% = 1.023\% \\ \text{苯乙烯} & \frac{660.37}{677.3} \times 100\% = 97.5\% \\ \text{焦油} & \frac{10}{677.3} \times 100\% = 1.476\% \end{aligned}$$

$$\Sigma = 99.999\% \approx 100\%$$

例 0-7 有一内径 D 为 7m 的贮槽，槽中液面距底的垂直距离为 H m。底部开有直径 d_0 为 0.1m 的排液孔。已知：

1. 将全部液体放完需 3 h；
2. 液体从排液孔的排出率计算式为：

$$V_0 = 0.5085 d_0^3 \sqrt{2gH}$$

式中 V_0 ——液体从小孔中的排出率， m^3/s ；

d_0 ——小孔的直径， m ；

g ——重力加速度， m/s^2 ；

H ——槽内液面高度， m 。

试计算:

1. 槽中液面的高度;
2. 将槽中液体放出一半所需的时间。

液体密度在排放过程中恒定。

解 液体经过小孔的自由排放过程中,液面不断下降,即 H 不断减小,从而通过小孔的排出率 V_0 也不断减小,所以题给公式中 V_0 及 H 均为排出时间 θ 的函数。

1. 槽中液面高度

由于排放过程中液体密度不变,故可对液体体积进行衡算。

设在 $d\theta$ 时间内,因有液体排放而使槽内液面改变 dH 高度。

在 $d\theta$ 时间内,于进口与排放口间列液体的体积衡算,得:

$$\begin{aligned} & \text{进入的液体体积} - \text{排出的液体体积} \\ & = \text{槽内液体体积的变化} \end{aligned}$$

其中:

进入的液体体积=0

$$\begin{aligned} \text{排出的液体体积} &= 0.5085d_0^2 \sqrt{2gH} d\theta \\ &= 0.5085(0.1)^2 \sqrt{2 \times 9.81H} d\theta \\ &= 0.02252 \sqrt{H} d\theta \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{槽内液体体积变化} &= \frac{\pi}{4} D^2 dH \\ &= \frac{\pi}{4} (7)^2 dH = 38.47 dH \end{aligned}$$

$$\therefore 0 - 0.02252 \sqrt{H} d\theta = 38.47 dH$$

$$\text{整理得} \quad d\theta = -1708 \frac{dH}{\sqrt{H}} \quad (\text{a})$$

已知将槽内液体全部放完的时间 $\theta_1 = 3\text{h}$,故在时间从0到 θ_1 及液面高度从 H 到0的边界条件下积分式a,得:

$$\theta_1 = \int_0^{\theta_1} d\theta = -1708 \int_H^0 \frac{dH}{\sqrt{H}}$$

$$\text{或} \quad 3 \times 3600 = 1708 \left[\frac{H^{1/2}}{1/2} \right]_0^H = 2 \times 1708 [H^{1/2} - 0]$$

$$\text{解得} \quad H = 10\text{m}$$

2. 将槽中液体放出一半所需的时间

设将槽内液体放出一半时所需的时间为 θ_2 。在时间0到 θ_2 及液面高度从10m到5m的边界条件下积分式a,得:

$$\begin{aligned} \theta_2 &= \int_0^{\theta_2} d\theta = -1708 \int_{10}^5 \frac{dH}{\sqrt{H}} \\ &= 1708 \left[\frac{H^{1/2}}{1/2} \right]_5^{10} \\ &= 2 \times 1708 (10^{1/2} - 5^{1/2}) = 3164 \text{ s} = 0.879 \text{ h} \end{aligned}$$

例 0-8 采用本题附图所示的蒸发器,每小时将2000kg水溶液,从含固体5%浓缩至30%。已知在操作条件下:溶液的沸点为78℃、水的汽化热为2319.5kJ/kg、水的焓为2633.5kJ/kg。原料液温度为20℃,比热为4kJ/(kg·℃)。浓缩液的比热为4.19kJ/(kg·℃)。加热蒸气的压强为200kPa,冷凝水于蒸汽饱和温度下排出。热损失为10000W,忽略溶液的稀释热。试求水分蒸发量及蒸汽消耗量。

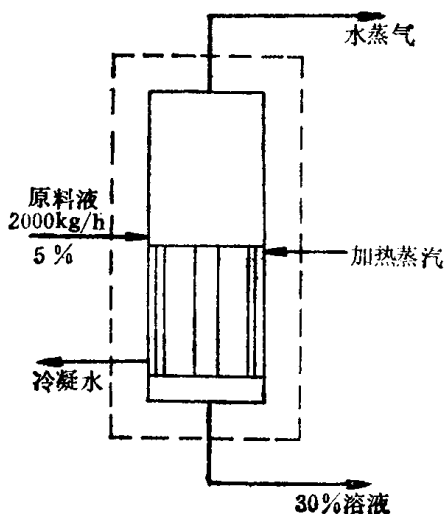


图 0-3 例0-8附图

联解式 a 及式 b, 得 $W = 1666.7 \text{ kg/h}$

2. 加热蒸汽消耗量

加热蒸汽消耗量可通过热衡算求得。进行热衡算时,除与物料衡算一样,首先要确定衡算基准,其次要圈出衡算范围,再用箭头表示进、出这个范围的热流方向外,还要规定出基准温度(简称基温)及基本状态。初学时为了避免弄错,最好以0℃作为基温、以液态作为基本状态。实际上,基温可以任意选择,但以方便计算为原则。

基温: 0℃

基本状态: 液体

基准: 1 h

- 令: D = 加热蒸汽消耗量, kg/h;
 Q_1 = 加热蒸汽带入的热量, kJ/h;
 Q_2 = 冷凝水带出的热量, kJ/h;
 Q_F = 原料液带入的热量, kJ/h;
 Q_w = 蒸汽带出的热量, kJ/h;
 Q_B = 浓缩液带出的热量, kJ/h;
 Q_n = 热损失, kJ/h。

在附图的虚线范围内列热量衡算, 得:

$$Q_1 + Q_F = Q_w + Q_B + Q_2 + Q_n \quad (c)$$

式中各项计算如下:

(1) Q_1 从附录十二查出压强为 200kPa 蒸汽的温度为120.2℃、焓为2709.2kJ/kg, 汽化热为2204.6kJ/kg。

解 基准: 1 h

令: F = 每小时进料量, kg/h;

W = 每小时蒸出的水分量, kg/h;

B = 每小时获得的浓缩液体量, kg/h。

在本题附图中围绕蒸发器画虚线作为衡算范围。

1. 水分蒸发量 W

在图中虚线范围内列总物料及水分的衡算, 得:

$$F = W + B = 2000 \quad (a)$$

及 $0.95 \times 2000 = W + 0.7 B \quad (b)$

应予指出,在图0-3中加热蒸汽与冷凝水两个流股虽然也穿越虚线范围,但两股物料进、出平衡,故列衡算式不予以考虑。