

高等学校教学用书

化工原理

例题与习题



(第三版) 姚玉英 主编



化学工业出版社

高等学校教学用书

化工原理例题与习题

(第三版)

姚玉英 主编

化学工业出版社

·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

化工原理例题与习题/姚玉英主编.—3版—北京:化学工业出版社,1998.6

高等学校教学用书

ISBN 7-5025-2032-5

I. 化… II. 姚… III. 化工原理-高等学校-习题 IV. T
Q02-44

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 07694 号

高等学校教学用书
化工原理例题与习题
(第三版)

姚玉英 主编

责任编辑:骆文敏 徐世峰

责任校对:王安达 麻雪丽

封面设计:季玉芳

*

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

北京管庄永胜印刷厂印刷

三河市延风装订厂装订

*

开本 850 毫米×1168 毫米 1/32 印张 16 字数 454 千字

1998 年 5 月第 3 版 2003 年 5 月北京第 4 次印刷

ISBN 7-5025-2032-5/G·594

定 价: 25.00 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

97A049

再 版 说 明

本书是1983年出版的《化工原理例题与习题》的第三次修订版。第一版分上、下两册出版，上册为各单元操作的主要计算公式、例题与习题，下册为上册的习题解答。1990年的第二版对原有内容作了补充修改，增编了液体搅拌、蒸馏和吸收塔设备、结晶和冷冻等章，不出习题解答。本次修订（即第三版）除了仍然不出习题解答外，根据化工原理课程教学指导委员会1995年重新公布的高等学校工科本科《化工原理》课程教学基本要求，对原有内容进行了精选，保留绪论、流体流动、流体输送设备、非均相物系的分离、传热、蒸发、蒸馏、吸收、蒸馏和吸收塔设备、液-液萃取和干燥等章，删去原有的附录。

本版除了保持原有的由浅入深、巩固基本概念、紧密联系生产与科研实际的编写原则外，还具有以下特点：（1）在例题中编写了对题意的分析，理出解题思路与步骤；（2）大幅度地更新原有的例题与习题，例如流体流动及蒸馏等章约有90%的例题与习题是重新编写的；（3）例题与习题涉及面广，实用性强，且具有工程观点，其中有些例题与习题是在本科生参加各种化工原理课程竞赛试题及研究生入学试题的基础上改编的；（4）除了设计型的习题外，全部习题后均附有参考答案；（5）本书能与当前各种版本的《化工原理》教材配套使用。

本书可作为高等院校化工类及有关专业化工原理课程的教学用书，也可供报考研究生及从事化工工作的技术人员参考。

本书由姚玉英主编。各章执笔人分别为：绪论、第一章流体流动、第五章蒸发、第八章蒸馏和吸收塔设备姚玉英；第二章流体输送设备、第七章吸收曾敏静；第三章非均相物系的分离、第六章蒸馏刘国维；第四章传热、第九章液-液萃取柴诚敬；第十章干燥陈常贵。

编 者

1997年8月

内 容 提 要

本书为《化工原理例题与习题》的第三版。本次修订是根据化工原理课程教学指导委员会1995年重新公布的高等学校工科本科《化工原理》课程教学基本要求，对原有内容进行精选，大幅度地更新原有的例题和习题，以适应拓宽专业的要求。实用性强，具有工程观点。在例题中增加对题意和解题思路的分析。

全部内容除绪论外包括：流体流动；流体输送设备；非均相物系的分离；传热；蒸发；蒸馏；吸收；蒸馏和吸收塔设备；液-液萃取；干燥等十章。每章内容分为主要公式，例题，习题（附答案）三部分。

本书能与当前各种版本的《化工原理》教材配套使用。是高等院校化工类及相关专业化工原理课程的辅助教材。也可供报考研究生及从事化工科研、设计和生产的技术人员参考。

目 录

绪论	1
第一章 流体流动	18
第二章 流体输送设备	79
第三章 非均相物系的分离	110
第四章 传热	152
第五章 蒸发	228
第六章 蒸馏	262
第七章 吸收	340
第八章 蒸馏和吸收塔设备	395
第九章 液-液萃取	426
第十章 干燥	461

绪 论

主 要 公 式

化工计算以物料衡算、能量衡算、速率关系和平衡关系为计算基础。本绪论先介绍前两种衡算，余下的以后陆续介绍。

在进行两种衡算时，常涉及物料的数量、特性以及所处的状态参数，这些物理量的大小都是用数量及单位共同表明。目前国际上推行的单位制度为国际单位制（SI），我国以 SI 制为基础并规定某些与 SI 制并用的单位构成中华人民共和国法定单位制度，简称法定单位制。但在旧有资料中还是多种单位并存，使用时要加以换算，故首先介绍这方面的内容。

一、物理量的单位换算

同一物理量若单位不同其数值就不同，如重力加速度在法定单位制中的单位为 m/s^2 ，数值为 9.81；在 cgs 制中的单位为 cm/s^2 ，数值为 981。两者包括单位在内的数值比称为换算因子，故重力加速度在法定单位制与 cgs 制中的换算因子为：

$$\frac{9.81\text{m/s}^2}{981\text{cm/s}^2} = \frac{1}{100}\text{m/cm}$$

任何单位间的换算因子都是两个相等量之比，所以包括单位在内的各个换算因子都是纯数 1。任何物理量乘以或除以换算因子都不会改变原量的大小。物理量的单位换算就是利用这一原则而进行的。

化工中常用的物理量单位间的换算关系可以从各种版本的化工原理教材中查到，以后遇到这类问题不再指出其来源。

二、经验公式的换算

化工中常用的公式有物理方程与经验公式两大类。物理方程是根

据物理现象规律建立的，如反映物体运动规律的牛顿第二定律就是物理方程。物理方程中各物理量的单位可以采用任意单位制，算出的结果是一致的；但同一方程中不允许同时使用两种单位制度，所以物理方程又称单位一致方程。经验公式是单纯根据实验数据整理得来的，式中各物理量单位必须采用指定的（即整理数据时所采用的）单位，但不强调式中各物理量单位为同一单位制（见例 0-3）。若变动经验式中指定的物理量单位，则经验公式的形式有所改变。例如，计算填料塔中用水吸收二氧化硫时气相总体积吸收系数的经验公式最初形式为：

$$\frac{1}{K_{Va}} = \frac{0.00114}{u^{0.8}} + 0.00875 \quad (0-1)$$

式中 K_{Va} ——气相总体积吸收系数，lb/(ft²·h·atm)；
 u ——气相空塔速度，ft/s。

后因改用法定单位制，气相总体积吸收系数及空塔速度的单位分别改为 kg/(m²·h·kPa) 及 m/s，则经验公式变为：

$$\frac{1}{(K_{Va})'} = \frac{0.009146}{u'^{0.8}} + 0.1816 \quad (0-1a)$$

式中 $(K_{Va})'$ ——气相总体积吸收系数，kg/(m²·h·kPa)；
 u' ——气相空塔速度，m/s。

式 (0-1) 与式 (0-1a) 是两个等价的经验公式，使用时各符号的单位必须采用指定的单位。

若某经验公式需经常采用，则应将公式加以换算，使式中各符号的单位都改为使用者所希望的单位，这就是经验公式的换算，式 (0-1a) 就是由式 (0-1) 换算而来的，换算过程见例 0-2。

三、物料衡算

物料衡算是质量守恒定律的一种表达形式，即：

$$\sum G_I = \sum G_O + G_A \quad (0-2)$$

式中 $\sum G_I$ ——输入物料的总和；

$\sum G_O$ ——输出物料的总和；

G_A ——累积或损失的物料。

式 (0-2) 为总物料衡算式，当过程有化学反应时也适用于任一元

素的衡算。

式 (0-2) 用于定态操作时, 式中各项的单位为 kg/h, 用于非定态操作时则为 kg。

当定态操作时, 物料累积量为零, 则式 (0-2) 简化为:

$$\sum G_i = \sum G_o \quad (0-2a)$$

四、能量衡算

化工中涉及的能量经常是热能或热量, 故本书以介绍热能衡算为主。

热能衡算的依据是能量守恒定律, 即:

$$\sum Q_i = \sum Q_o + Q_L \quad (0-3)$$

式中 $\sum Q_i$ ——各流股带入的热量总和, kJ 或 kW;

$\sum Q_o$ ——各流股带出的热量总和, kJ 或 kW;

Q_L ——向周围环境散失的热量, kJ 或 kW。

式 (0-3) 也可以写成:

$$\sum (wH)_i = \sum (wH)_o + Q_L \quad (0-3a)$$

式中 w ——物料的质量, kg 或 kg/s;

H ——物料的焓, kJ/kg。

下标 I 表示带入、 O 表示带出。

式 (0-3) 及式 (0-3a) 用于定态操作时, 式中的 Q 及 w 的单位分别为 kW 及 kg/s; 用于非定态操作时则分别为 kJ 和 kg。

例 题

[例 0-1] 在英制单位中, 通用气体常数 $R = 1545.5 (\text{lbf}/\text{ft}^2) \cdot \text{ft}^3 / (\text{lbmol} \cdot ^\circ\text{R})$ 。其中 lbf/ft^2 为压强单位, 即磅力/英尺²; lbmol 为物质质量单位, 即磅摩尔; $^\circ\text{R}$ 为温度单位, 即英制绝对温度; ft^3 为体积单位, 即英尺³。试求 R 在法定制中的数值与单位。

解: R 是理想气体状态方程式中的常数, 即:

$$pV = nRT$$

式中 p 、 V 、 n 、 T 分别为压强、体积、物质质量及温度, 四者在法定单位制中的单位分别为 Pa、m³、kmol 及 K, 故 R 的单位应为 Pa · m³/(kmol ·

K)。先由单位换算表中查出各物理量在两种单位制中的对应关系：

$$1 \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2} = 47.88 \text{Pa}$$

$$1 \text{m} = 3.2808 \text{ft}$$

$$1 \text{lbmol} = 0.4536 \text{kmol}$$

$$1 \text{K} = \frac{9}{5} ^\circ\text{R}$$

$$R = 1545.5 \frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2} \cdot \text{ft}^3 / (\text{lbmol} \cdot ^\circ\text{R})$$

$$= 1545.5 \left[\frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2} \cdot \text{ft}^3 \right] \left[\frac{47.88 \text{Pa}}{\frac{\text{lbf}}{\text{ft}^2}} \right] \left[\frac{\text{m}^3}{3.2808^3 \text{ft}^3} \right] \left[\frac{\text{lbmol}}{0.4536 \text{kmol}} \right] \left[\frac{\frac{9}{5} ^\circ\text{R}}{\text{K}} \right]$$

\uparrow
原有的数值与单位

\uparrow
引入 Pa, 消去 lbf/ft²

\uparrow
引入 m³, 消去 ft³

\uparrow
引入 kmol, 消去 lbmol

\uparrow
引入 K, 消去 °R

$$= 8.315 \times 10^3 \text{Pa} \cdot \text{m}^3 / (\text{kmol} \cdot \text{K})$$

上式中后四个方括号内是换算因子，相当于纯数 1，故原有的数值与单位乘上后面四个括号内的数值相当于连乘四个 1，但引入需要的单位，消去不要的单位。

由状态方程式看出， p 与 V 的乘积为功，故常数 R 的单位常用下面方法表达：

$$R = \left[\frac{\text{Pa} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \right] = \left[\frac{\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{m}^3}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \right] = \left[\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \right] = \left[\frac{\text{J}}{\text{kmol} \cdot \text{K}} \right]$$

故在化工原理教材或有关资料中遇到的气体通用常数 R 常表示为：

$$R = 8.315 \times 10^3 \text{J} / (\text{kmol} \cdot \text{K})$$

【例 0-2】 试将式 (0-1) 转换为 (0-1a)。

解：要将式 (0-1) 转换成式 (0-1a)，应先查出两个式中各物理单位间的关系：

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

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

$$1 \text{atm} = 101.33 \text{kPa}$$

$$\therefore 1\text{ft/s} = 1 \frac{\text{ft}}{\text{s}} \times \frac{0.3048\text{m}}{\text{ft}} = 0.3048\text{m/s} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} 1\text{lb}/(\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{atm}) &= \left(1 \frac{\text{lb}}{\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot \text{atm}}\right) \left(\frac{0.4536\text{kg}}{\text{lb}}\right) \times \\ &\quad \left(\frac{\text{ft}}{0.3048\text{m}}\right)^2 \left(\frac{\text{atm}}{101.33\text{kPa}}\right) \\ &= 0.04818\text{kg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kPa}) \end{aligned} \quad (2)$$

由此可知

$$\frac{(K_Y a)'}{0.04818} = K_Y a \quad (3)$$

$$\text{及} \quad \frac{u'}{0.3048} = u \quad (4)$$

将式 (3) 及式 (4) 代入式 (0-1):

$$\frac{1}{\frac{(K_Y a)'}{0.04818}} = \frac{0.00114}{\left(\frac{u'}{0.3048}\right)^{0.8}} + 0.00875 \quad (5)$$

整理得

$$\frac{1}{(K_Y a)'} = \frac{0.009146}{u'^{0.8}} + 0.1816 \quad (6)$$

由此看出, 经验公式换算的关键在于利用式 (1) 及式 (2) 分别寻求气相空塔速度、总体积吸收系数在两种不同单位制中的关系式 (3) 及式 (4), 再将它们代入式 (0-1) 即获得式 (5), 故式 (6) (经整理后即成为式 (0-1a)) 与式 (0-1) 是等价的。

[例 0-3] 填料层的分离效果常用等板高度 H_T 来衡量。对 10mm 直径的陶瓷拉西环用于精馏操作时, 计算 H_T 的经验公式为:

$$H_T = 2.1G^{-0.37} D^{1.24} z^{1/3} a \mu / \rho$$

式中 H_T ——等板高度, in;

G ——气相质量流率, $\text{lb}/(\text{ft}^2 \cdot \text{h})$;

D ——塔径, in;

z ——填料层高度, ft;

a ——相对挥发度, 无因次;

μ ——液相粘度, cP;

ρ ——液相密度, g/cm^3 。

试将式中 H_T 、 G 、 D 、 z 、 μ 及 ρ 的单位分别改为 m 、 $kg/(m^2 \cdot h)$ 、 m 、 m 、 $Pa \cdot s$ 及 kg/m^3 ，换算上式。

解：本题经验公式中单位不一致，为英制与 cgs 制共存，但换算原则与上题相同。由单位换算表查出。

$$1 \text{ in} = 0.0254 \text{ m}$$

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

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

$$1 \text{ cP} = 1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$1 \text{ kg} = 1000 \text{ g}$$

将式中各符号加上标“'”代表采用新单位时的物理量，各物理量在原单位制及新单位制间的关系为：

$$\text{等板高度：} \quad H_T = \frac{H'_T}{0.0254} \quad (1)$$

质量流率：因查不到质量流率在两种单位制间的换算关系，故可自行导出：

$$\begin{aligned} 1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}} &= 1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}} \left(\frac{\text{ft}}{0.3048 \text{ m}} \right)^2 \left(\frac{0.4536 \text{ kg}}{\text{lb}} \right) \\ &= 4.883 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \end{aligned}$$

$$\therefore \quad G = \frac{G'}{4.883} \quad (2)$$

$$\text{塔径} \quad D = \frac{D'}{0.0254} \quad (3)$$

$$\text{填料层高度} \quad z = \frac{z'}{0.3048} \quad (4)$$

$$\text{粘度} \quad \mu = \frac{\mu'}{1 \times 10^{-3}} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \text{密度} \quad 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} &= 1 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \left(\frac{\text{kg}}{1000 \text{ g}} \right) \left(\frac{100 \text{ cm}}{\text{m}} \right)^3 \\ &= 1000 \text{ kg}/\text{m}^3 \\ \rho &= \frac{\rho'}{1000} \quad (6) \end{aligned}$$

将式 (1) 至式 (6) 代入原有式中：

$$\frac{H'_T}{0.0254} = 2.1 \left(\frac{G'}{4.883} \right)^{-0.37} \left(\frac{D'}{0.0254} \right)^{1.24} \left(\frac{z'}{0.3048} \right)^{1/3} \times$$

$$\alpha \left(\frac{\mu'}{1 \times 10^{-3}} \right) / \left(\frac{\rho'}{1000} \right)$$

整理上式，并略去上标：

$$H_T = 1.355 \times 10^7 G^{-0.37} D^{1.24} z^{1/3} \alpha \mu / \rho$$

由以上两例看出：经验公式中物理量指数是说明该物理量对过程的影响程度，与单位制无关，故经验公式经过单位换算后，各物理量的指数都没有变化。

[例 0-4] 每小时将 1000kg 含 20%（质量分数，下同）某种无机盐水溶液送至蒸发器内，用水蒸气加热使之沸腾气化，蒸出一部分水气，由蒸发器顶部排出。溶液被浓缩到 50% 后，连续送至结晶器使之冷却，析出含 4% 结晶水的无机盐晶体，由结晶器底部取出产品 P 。结晶器内含无机盐 37.5% 的母液 R 送回蒸发器与原料液合并进入蒸发器再蒸发。试求：

1. 每小时由蒸发器蒸出的水气量 W 及由结晶器排出的产品 P ，可以不考虑结晶产品表面附着的母液；

2. 每小时由结晶器排出的母液量 R 及由蒸发器排出的浓溶液量 B ；

3. 进入蒸发器的混合液（原料液和母液）中盐的浓度。

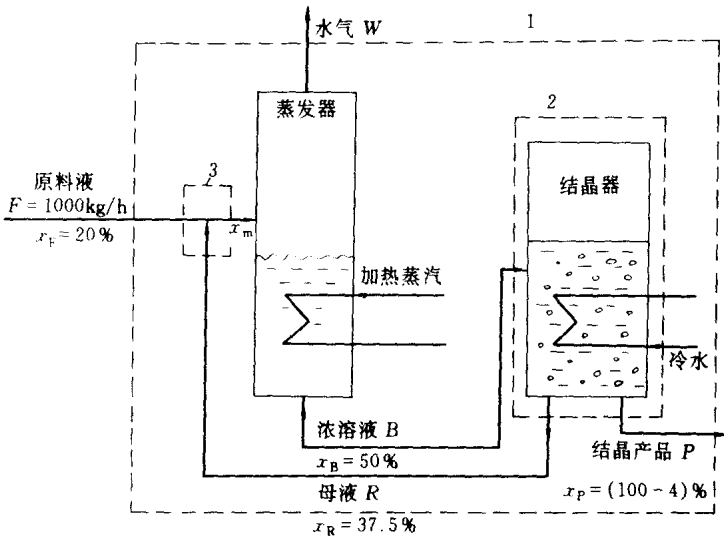
解：进行物料衡算时应首先做到以下各点：

(1) 根据题意画出如本例附图所示的流程图，并用箭头标出物料流向，注明流股名称、数量、单位、组成及状态参数。

(2) 圈出衡算范围，如附图中虚线 1、2 及 3 所示的封闭范围，衡算范围视具体情况而定，可以是一个生产过程、一个设备，也可以是局部设备。穿越范围的流股箭头向内的为输入物料，向外的为输出物料，没有穿越范围的流股不参与衡算。

附图中 x 为无机盐在流股中的质量浓度。

(3) 定出衡算基准，衡算基准是计算各流股物料量的依据，一般定态操作取 1h 或 1s 为基准，非定态操作（即分批操作）以一批物料为基准。基准选的不当，会使计算复杂。基准选定后，各流股均按基准进行计算。



例 0-4 附图

兹将题目中要求的各项计算如下。

基准：1h

1. 每小时由蒸发器中蒸出的水气量 W 及结晶产品量 P 以封闭虚线 1 为衡范围，在该范围内列总物料及无机盐的衡算，因可以不考虑晶体表面上附着的母液，故：

$$\text{总物料} \quad F = P + W$$

$$\text{无机盐} \quad Fx_F = Px_P + Wx_w$$

这里需要指出：进、出结晶器的冷却水虽为跨越虚线的流股，但因冷却水与溶液间只有热量交换而没有质量交换，故不参与衡算。另外，母液及浓溶液均未跨越虚线 1，故也不参与衡算。

将已知值代入上二式：

$$1000 = P + W$$

$$\text{及} \quad 1000 \times 0.2 = P(1 - 0.04) + W \times 0$$

$$\text{解得} \quad P = 208.3 \text{ kg 含 } 4\% \text{ 结晶水的晶体/h}$$

$$W = 791.7 \text{ kg 水气/h}$$

2. 每小时生成的母液量 R 及 50% 浓溶液量 B 在封闭虚线范围 2 内列总物料及无机盐的衡算:

$$\text{总物料} \quad B = R + P$$

$$\text{无机盐} \quad Bx_B = Rx_R + Px_P$$

将已知值代入上二式:

$$B = R + 208.3$$

$$\text{及} \quad 0.5B = 0.375R + (1 - 0.04) \times 208.3$$

$$\text{解得} \quad B = 974.8 \text{ kg } 50\% \text{ 浓溶液/h}$$

$$R = 766.5 \text{ kg 母液/h}$$

3. 进入蒸发器的混合液中无机盐浓度 x_m 在封闭虚线 3 范围内列无机盐的衡算:

$$Fx_F + Rx_R = (F + R)x_m$$

$$\text{或} \quad 1000 \times 0.2 + 766.5 \times 0.375 = (1000 + 766.5)x_m$$

$$\text{解得} \quad x_m = 0.276 = 27.6\%$$

[例 0-5] 某种不溶于水的固体粉末与水充分混合成为均匀的悬浮液, 测得悬浮液密度、粉末密度及水的密度分别为: $\rho_m = 1116 \text{ kg/m}^3$ 、 $\rho_s = 1500 \text{ kg/m}^3$ 及 $\rho_L = 1000 \text{ kg/m}^3$ 。试求悬浮液中固体粉末的质量分率。

解: 本题解题的关键在于取基准, 因要计算的是质量分率, 故以取 1kg 悬浮液为基准最为简单。令 a 表示悬浮液中固体分率, 即 1kg 悬浮液中含 $a \text{ kg}$ 固体、 $(1-a) \text{ kg}$ 水。固体不溶于水, 与水混和后, 悬浮液体积为固体与水的体积之和:

$$\text{悬浮液体积} = \text{固体体积} + \text{水的体积}$$

或可写成

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{a}{\rho_s} + \frac{1-a}{\rho_L}$$

$$\text{或} \quad \frac{1}{1116} = \frac{a}{1500} + \frac{1-a}{1000}$$

$$\text{解得} \quad a = 0.3118 = 31.18\%$$

若取 1 m^3 悬浮液为基准, 也可获得同样计算结果, 但计算步骤较以上的要繁琐, 读者可以试算。

[例 0-6] 在逆流填料洗涤塔中,用洗油作洗涤剂,洗涤焦炉气和芳烃混合气体中的芳烃,芳烃溶于洗油,而焦炉气可视为完全不溶于洗油,于是可将混合气中部分芳烃分出。每小时有 36kmol 含芳烃 2% (摩尔分率,下同)的混合气体送入洗涤塔底,在填料层中与由塔顶喷下的洗油逆流接触时芳烃溶于洗油,经洗涤后的混合气由塔顶取走,其中芳烃浓度降至 0.1% 。每小时用 6.1kmol 含芳烃 0.5% 已使用过的洗油作洗涤剂,洗涤完毕洗油由塔底取走。忽略洗油的挥发性。试求离开塔底洗油中芳烃的摩尔浓度。

解: 混合气入塔后,其中芳烃连续溶于洗油,故混合气的流量逐渐减小,而洗油的流量逐渐增大,非恒定流量的计算相当繁琐。但焦炉气不溶于洗油,而洗油可视为不挥发,故在整个洗涤过程中,不管两流股间有任何质量交换,而焦炉气与洗油的流量总是恒定的。故可采用焦炉气及洗油为计算基准,即混合气体流量 $V=\text{kmol}$ 焦炉气/h 及洗涤剂流量 $L=\text{kmol}$ 洗油/h。两相中芳烃浓度相应地改为:混合气中芳烃浓度 $Y=\text{kmol}$ 芳烃/ kmol 焦炉气、洗涤剂中芳烃浓度 $X=\text{kmol}$ 芳烃/ kmol 洗油, Y 及 X 称为比摩尔浓度。这种处理方法可使计算简化,在吸收、萃取、干燥等过程的计算中常采用这种手段。

按上述处理方法先换算各流股的流量及浓度,以下标 1 表示塔底、下标 2 表示塔顶。

混合气体进塔时芳烃浓度

$$Y_1 = \frac{2}{100-2} = 0.0204 \text{ kmol 芳烃/kmol 焦炉气}$$

混合气体出塔时芳烃浓度

$$Y_2 = \frac{0.1}{100-0.1} \approx 0.001 \text{ kmol 芳烃/kmol 焦炉气}$$

洗涤剂进塔时芳烃浓度

$$X_2 = \frac{0.5}{100-0.5} = 0.00503 \text{ kmol 芳烃/kmol 洗油}$$

洗涤剂出塔时芳烃浓度 $X_1 = \text{待求值}$

焦炉气的流量 $V = 36(1-0.02) = 35.28 \text{ kmol 焦炉气/h}$

洗涤剂的流量 $L = 6.1(1-0.005) = 60.7 \text{ kmol 洗油/h}$