

● 高等学校教学用书

化工原理

天津大学化工原理教研室

姚玉英 黄凤廉 陈常贵 柴诚敬 编

姚玉英 主编

上册



天津科学技术出版社

化 工 原 理

上 册

天津大学化工原理教研室

姚玉英 黄凤廉 陈常贵 柴诚敬 编

姚玉英 主编

天津科学技术出版社

内 容 提 要

本书重点介绍化工单元操作中的基本原理、典型设备及其计算。本书对基本概念的理解力求严谨,注意理论联系实际,并突出工程观点。全书分上下两册出版。上册除绪论和附录外,还有流体流动、流体输送设备、非均相物系的分离、传热和蒸发等五章。下册包括蒸馏、吸收、蒸馏和吸收塔设备、液-液萃取、干燥及流态化等六章。上下册的每章均编入较多的例题,章末有习题及思考题。

本书可作为高等院校化工及有关专业的教材,也可供有关部门的科研、设计及生产单位的技术人员参考。

本书由姚玉英任主编,陈常贵任副主编。参加上册编写工作的有:姚玉英(绪论、第五章及附录)、黄凤康(第一章)、陈常贵(第二章及第四章)、柴诚敬(第三章)。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理 (上)/姚玉英编著. —天津:天津科学技术出版社,1992.12(1999.8重印)
高等学校化工系教材
ISBN 7-5308-1060-X

I. 化… II. 姚… III. 化工原理-高等学校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 20208 号

天津科学技术出版社出版

出版人:王树泽

天津市张自忠路 189 号 邮编 300020 电话(022)27306314

天津市蓟县印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本 787×1092 1/16 印张 26 字数 618 000

1999 年 8 月第 1 版第 13 次印刷

定价:18.50 元

绪 论

用化工手段将原料加工成产品的生产过程统称为化工生产过程，如高压聚乙烯生产过程的主要步骤如图 0-1 所示。

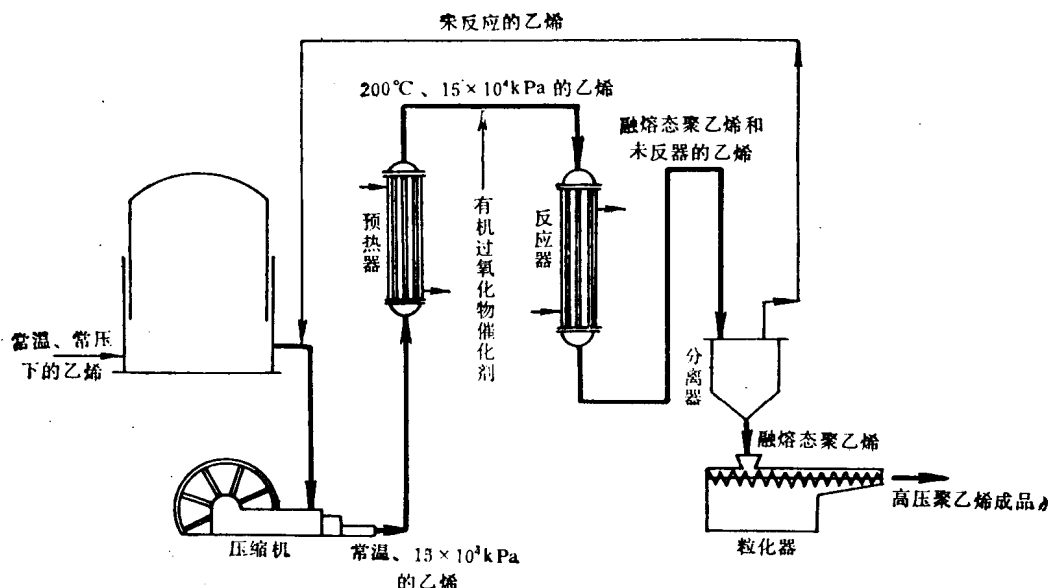


图 0-1 高压聚乙烯的生产流程示意图

图 0-1 的操作中除反应器内有化学反应外，其余步骤均属物理操作，实际上该生产过程是以化学反应为核心，而物理步骤只起到为化学反应准备必要的反应条件以及进一步将粗产品提纯的作用。

虽然有千千万万个不同的化工生产过程，但归纳起来，各种生产过程都是由类似上述的化学反应和若干个物理操作串联而成，所以不必将每一个化工生产过程都当作一种特殊的或独有的知识去研究，只研究组成生产过程的每一个单独操作即可。诸物理操作统称为化工单元操作，简称单元操作。化工原理课程就是研究这些物理操作的，至于化学反应则不属于本课程范畴。单元操作不仅在化工生产中占有重要地位，也广泛应用于石油化工、冶金、食品、制药及原子能等工业中。

根据单元操作所遵循的基本规律，可将单元操作划分为三大类，即：

- (1) 遵循流体动力基本规律的单元操作包括流体输送、沉降、过滤、固体流态化等。
- (2) 遵循传热基本规律的单元操作 包括加热、冷却、冷凝、蒸发等。
- (3) 遵循传质基本规律的单元操作 包括蒸馏、吸收、萃取、结晶、干燥、膜分离等。

因这些操作的最终目的是将混合物分离，故又称之为分离操作。

随着对单元操作不断地深入研究，人们认识到流体流动是一种动量传递现象，所以凡是

遵循流体流动基本规律的诸单元操作，都可以用动量传递理论去研究，其余两大类的单元操作则可分别用热量传递理论和质量传递理论进行研究。三种传递现象中存在类似的规律和内在的联系，且可用数学公式表达，逐渐形成了“三传理论”或“传递理论”，它是化工单元操作在理论上的进一步发展与深化。这部分内容已成为化工系的独立课程。

同一单元操作在不同的化工生产中有共性也有各自的特性。例如制碱和制糖生产中都有蒸发这个单元操作，它们共同遵循传热基本规律、都采用蒸发器，这就是蒸发操作在两种不同工业生产中的共性。但制碱工业的蒸发条件有别于制糖的，且两者所选的蒸发器也各异，这就是特殊性。化工原理主要是研究诸单元操作共性的课程。

化工原理课程是高等数学、物理、物理化学等课程的后继课程，属于技术基础课，在高等学校化工系的教学计划中起到为自然学科与应用学科的搭桥作用。它主要研究各单元操作的基本原理、所用典型设备的结构和设备工艺尺寸的计算或设备选型。通过本课程的学习，培养学生有分析和解决单元操作中各种问题的能力，即在科学研究和生产实践中对设备应具有操作管理、设计、强化与过程开发的本领。

研究单元操作必须熟悉物料衡算、能量衡算、速率关系和平衡关系的内容。下面扼要介绍前两种衡算，后两种关系将在以后陆续介绍。在介绍两种衡算之前，先介绍有关物理量单位的知识。

一、单位制度和单位换算

(一) 单位制度

任何物理量都是用数字和单位联合表达的。一般先选几个独立的物理量，如长度、时间等，并以使用方便为原则规定出它们的单位。这些物理量称为基本量，其单位称为基本单位。其它的物理量，如速度、加速度等的单位则根据其本身的物理意义，由有关基本单位组合构成，这种单位称为导出单位。

目前我国采用法定单位制度。由于历史、地区及不同学科领域的不同要求，对基本量及其单位的选择有所不同，因而产生了不同的单位制度，如绝对单位制度与重力单位制度，每种制度中又有米制与英制之分。绝对单位制度以长度、质量及时间为基本量；重力单位制度以长度、力（或重量）及时间为基本量。两者的主要区别在于绝对单位制度以质量为基本量，其单位为基本单位，力（或重量）的单位为导出单位；重力单位制以力（或重量）为基本量，其单位为基本单位，质量的单位为导出单位。力和质量之间的关系为：

$$F = ma$$

(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。

两种不同单位制度中基本量的米制单位列于表0-1中。

长期以来，工程计算中存在多种单位制度并用的局面，而同一物理量在不同单位制度中又具有不同的单位与数值，致使计算与交流极不方便，而且易引起错误。鉴于此，1960年10

月第十一届国际计量大会通过了一种优越性较大的新单位制度，称为国际单位制度，代号为

表0-1 两种不同单位制度中的米制单位

	基本量			
	长度	时间	质量	力(或重力)
绝对单位制度				
CGS制 (物理单位制)	cm	s	g	—
MKS制	m	s	kg	—
重力单位制 (工程单位制)	m	s	—	kgf

SI。该单位制度提出后即在国际上得到迅速推广，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，确定我国统一实行以国际单位为基础，包括由我国指定的若干非国际单位在内的《中华人民共和国法定计量单位制度》（简称法定单位制），规定从1991年起，除个别领域外，不允许再使用非法定单位制。

SI是mks制的引伸，除了mks制中原有的长度、时间和质量三个基本量外，还加上另外四个基本量和两个辅助量。四个基本量为：电磁强度（单位为安培，代号为A）、热力学温度（单位为开尔文，代号为K）、发光强度（单位为烛光，代号为cd）及物质量（单位为摩尔，代号为mol）。两个辅助量为：平面角（单位为弧度，代号为rad）及立体角（单位为球面度，代号为sr）。这些基本量都有严格的定义。

SI有高度的统一性，包括了所有领域中的计量单位，从而使科学技术、工业生产、经济贸易甚至日常生活只使用SI一种单位制度。SI中任何一个物理量只有一个单位，但重力单位制就有所不同，例如在重力单位制中，热量单位为kcal（千卡），功的单位为kgf·m，而热量和功是本质相同的物理量，计算时必须采用“热当量”（即1 kcal = 427 kgf·m）来换算使之统一，但在SI中热量与功都采用同一单位，即J（焦耳）。

本书采用法定单位制，在少数例、习题中有意识地编入一些非法定单位，有助读者练习新旧单位之间的换算。

中华人民共和国法定计量单位内容见附录一。

（二）单位换算

目前国际上各科学领域采用的单位制度虽向SI过渡，但要全面实施尚需经历一定时间，而且旧文献资料中的数据又是多种单位制度并存，使用时要进行换算，所以读者应掌握物理量在不同单位制中的换算方法。

1. 物理量的单位换算

同一物理量，若单位不同其数值就不同，例如重力加速度在SI中的单位为 m/s^2 ，其值为9.81；在cgs制中的单位为 cm/s^2 ，其值为981，即：

$$\text{重力加速度 } g = 9.81 \text{ m/s}^2 = 981 \text{ cm/s}^2$$

上式为重力加速度在SI与cgs制中的换算关系。常见物理量单位间的换算关系见附录二。

【例0-1】从已有资料中查出常温下苯的导热系数 λ 为0.0919 BTU/(ft·h·°F)（BTU为英制单位中热量单位的代号），试从基本单位换算开始，将苯的导热系数单位换算为 $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 。

解：单位换算时，一般首先从附录二查出原单位与要换算的新单位之间的关系，其次采用单位间的换算因数与各基本单位相乘或相除的方法，以消去原单位而引入新单位。

新单位 $\text{W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$ 也可写为 $\text{J}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C})$ 。

从附录二查出：

长度 $1 \text{ m} = 3.2808 \text{ ft}$

热量 $1 \text{ J} = 9.486 \times 10^{-4} \text{ BTU}$

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

时间 $1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$

苯的导热系数为：

$$\lambda = 0.0919 \text{ BTU}/(\text{ft}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{F})$$

$$= \left(\frac{0.0919 \text{ BTU}}{\text{ft} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}} \right) \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \right) \left(\frac{1 \text{ J}}{9.486 \times 10^{-4} \text{ BTU}} \right) \left(\frac{3.2808 \text{ ft}}{\text{m}} \right) \left(\frac{1.8 ^\circ\text{F}}{1 ^\circ\text{C}} \right)$$

$\uparrow$ 原有的数值与单位
 $\uparrow$ 引入s, 消去h, 括号内的数值等于1
 $\uparrow$ 引入J, 消去BTU, 括号内的数值等于1
 $\uparrow$ 引入m, 消去ft, 括号内的数值等于1
 $\uparrow$ 引入°C, 消去°F, 括号内的数值等于1

$$= 0.159 \text{ J} / (\text{m} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}) = 0.159 \text{ W} / (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

为了使读者练习单位换算方法, 故本题要求从基本单位开始进行换算。实际上可以从附录二直接查出:

$$1 \text{ W} / (\text{m} \cdot ^\circ\text{C}) = 0.578 \text{ BTU} / (\text{ft} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F})$$

$$\therefore 0.0919 \text{ BTU} / (\text{ft} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F}) = \frac{0.0919}{0.578}$$

$$= 0.159 \text{ W} / (\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$$

熟练单位换算方法后, 不必在式子中间写出单位。

2. 经验公式(或数字公式)的换算

工程中遇到的公式有两大类, 一是反映物理量之间关系的物理方程, 它是根据物理规律建立起来的, 如前述的式0-1, 式中各物理量的单位可以任选一种单位制度的, 但同一式中绝不允许同时采用两种单位制度, 因此物理方程又称单位一致性或因次一致性方程(因次将在第一章中介绍)。另一类是根据实验数据整理而成的经验公式, 式中各符号只代表物理量数字部分, 而它们的单位必须采用指定的单位, 故经验公式又称数字公式。若已知物理量的单位与公式中规定的不相符, 则应先将已知数据换算成经验公式中指定的单位后才能进行运算。若经验公式要经常使用, 则应将公式加以变换, 使式中各符号都采用计算者所希望的单位, 这就是经验公式的换算, 换算方法见例0-2。

【例0-2】管壁对周围空气的对流传热系数经验公式为:

$$\alpha = 0.026 G^{0.6} D^{-0.4}$$

式中 α ——管壁对周围空气的对流传热系数, $\text{BTU} / (\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F})$;

G ——空气的质量速度, $\text{lb} / (\text{ft}^2 \cdot \text{h})$ (lb 为英制中质量单位磅的代号);

D ——管子外径, ft 。

试对上式进行换算, 将 α 的单位改为 $\text{W} / (\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 、 G 的单位改为 $\text{kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 D 的单位改为 m 。

解: 从附录二查出或算出以下有关物理量单位之间的关系为:

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

$$1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}} = 1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}} \times \frac{1 \text{ kg}}{2.20462 \text{ lb}} \times \frac{(1 \text{ ft})^2}{(0.3048 \text{ m})^2} \times \frac{\text{h}}{3600 \text{ s}}$$

$$= 0.001356 \text{ kg} / (\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

$$1 \frac{\text{BTU}}{\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}} = 5.678 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$$

将原符号加上标“'”，以代表新单位的符号。下面以外径 D 为例，说明单位换算过程。前已述及，经验公式中的符号只代表数字部分，故：

$$D \text{ ft} = D' \text{ m}$$

$$\text{或 } D = D' \frac{\text{m}}{\text{ft}} = D' \frac{\text{m}}{\text{ft}} \times \frac{\text{ft}}{0.3048 \text{ m}} = \frac{D'}{0.3048}$$

$$\text{同理 } G = \frac{G'}{0.001356} \text{ 及 } \alpha = \frac{\alpha'}{5.678}$$

将以上关系代入原式，得：

$$\frac{\alpha'}{5.678} = 0.026 \left(\frac{G'}{0.001356} \right)^{0.6} \left(\frac{D'}{0.3048} \right)^{-0.4}$$

整理上式并略去符号的上标，得到换算后的经验公式为：

$$\alpha = 4.824 G^{0.6} D^{-0.4}$$

二、物料衡算

为了弄清生产过程中原料、成品以及损失的物料数量，必须要进行物料衡算。

物料衡算为质量守恒定律的一种表现形式，即：

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

式中 ΣG_I —— 输入物料的总和；

ΣG_O —— 输出物料的总和；

G_A —— 累积的物料量。

式 0-2 为总物料衡算式。当过程没有化学反应时，它也适用于物料中任一组分的衡算；当有化学反应时，它只适用于任一元素的衡算。若过程中累积的物料量为零，则式 0-2 可以简化为：

$$\Sigma G_I = \Sigma G_O \quad (0-3)$$

上式所描述的过程属于定态过程，一般连续不断的流水作业（即连续操作）为定态过程，其特点是在设备的各个不同位置上，物料的流速、浓度、温度、压强等参数可各自不相同，但在同一位置上这些参数都不随时间而变。若过程中有物料累积，则属于非定态过程，一般间歇操作（即分批操作）属于非定态过程，在设备的同一位置上诸参数随时间而变。

进行物料衡算时，首先，应按题意画出简单流程图，并画出衡算范围。在工程计算中，可以根据具体情况以一个生产过程、或一组设备、或一个设备、甚至设备某一局部作为衡算范围。其次，定出衡算基准，对连续操作，常以单位时间为基准；对间歇操作，常以一批操作（即一个操作循环）为基准。若基准选的不当，会使计算变为繁杂。式 0-2 或式 0-3 中各股物料量均按所选的基准进行计算。

式 0-2 或式 0-3 中各股物料数量可用质量或物质量衡量。对于液体及处于恒温、恒压下的理想气体还可用体积衡量。常用质量分率表示溶液或固体混合物的浓度（即组成），对

理想混合气体还可用体积分率（或摩尔分率）表示浓度。

【例 0-3】 如本例附图所示，在两个蒸发器中，每小时将 5000kg 的无机盐水溶液从 12%（质量，下同）浓缩到 30%。第二蒸发器比第一蒸发器多蒸出 5 % 的水分。试求：（1）各蒸发器每小时蒸出水分的量；（2）第一蒸发器送出的溶液浓度。

图中 F ——溶液的质量流量，kg/h；

x ——溶液中无机盐的质量分率；

W ——每小时蒸出的水分，kg/h；

下标 0 表示原料、1 表示第一蒸发器、2 表示第二蒸发器。

解：各流股物料的代号如本例附图所示。

基准：1h

（1）各蒸发器每小时蒸出的水分量 在。

图中点划线范围内列盐的衡算，得：

$$F_0 x_0 = F_2 x_2 \text{ 或 } 5000 \times 0.12 = 0.3 F_2$$

解得 $F_2 = 2000 \text{ kg 浓溶液/h}$

再在点划线范围内列总物料衡算，得：

$$5000 = 2000 + W_1 + W_2$$

或 每小时蒸发水分总量 $\Sigma W = W_1 + W_2$

$$= 5000 - 2000 = 3000 \text{ kg/h}$$

由题意知 $W_2 = 1.05 W_1$

而 $\Sigma W = W_1 + W_2 = 2.05 W_1 = 3000 \text{ kg/h}$

由此解得 $W_1 = 1463.4 \text{ kg/h}$ 及 $W_2 = 1536.6 \text{ kg/h}$

（2）第一蒸发器送出的溶液浓度 在图中虚线范围内列盐及总物料衡算，得：

盐： $F_0 x_0 = F_1 x_1$

或 $5000 \times 0.12 = F_1 x_1$

（a）

总物料： $F_0 = W_1 + F_1$

或 $5000 = 1463.4 + F_1$

（b）

联立式 a 及式 b，解得：

$$F_1 = 3536.6 \text{ kg/h 及 } x_1 = 0.1697 = 16.97\%$$

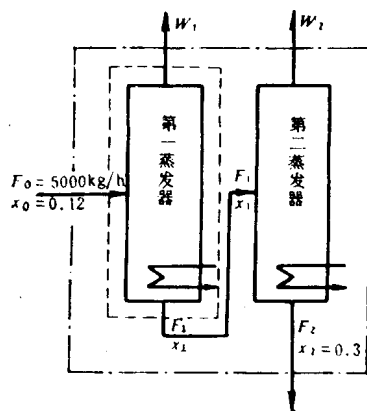
【例 0-4】 需将含有有机气体的贮槽进行内部清扫，罐的内径为 4m、高度为 10m。拟用通风机以 $1.5 \text{ m}^3/\text{s}$ 的送风量送入不含有有机气体的空气，同时以相等的流量将气体排出。试计算罐内有机气体浓度由 6 %（体积下同）降到 0.1 % 时所需的时间。

设通风过程中罐内气体完全混合，且罐内温度恒定。

解：通风过程中罐内气体能完全混合，因此任何时间排出气体的浓度与残留在罐内气体的浓度相同。

罐内的气体可视为恒温理想气体，故可对气体作体积衡算。

基准：dr s



例 0-3 附图

每秒向罐内送入 1.5m^3 空气, 每秒又有等体积气体从罐内排出, 故罐内气体的总体积恒定, 但有机气体的浓度随时间增长而下降。设罐内有机气体的瞬间体积浓度为 v 。

在 $d\tau$ 时间内, 围绕全罐作有机气体的体积衡算, 根据式 0-2 得:

$$\Sigma G_I = \Sigma G_O + G_A$$

通风机送入有机气体的体积 $\Sigma G_I = 0$

排出有机气体的体积 $\Sigma G_O = 1.5v d\tau$

罐内有机气体的积累量 $G_A = \frac{\pi}{4} (4)^2 \times 10 dv = 125.6 dv \text{ m}^3$

$$\therefore 0 = 1.5v d\tau + 125.6 dv$$

$$\text{或} \quad d\tau = -83.73 \frac{dv}{v}$$

在下述边界条件下积分上式, 即:

开始 $\tau = \tau_1 = 0 \quad v = v_1 = 0.06$

終了 $\tau = \tau_2 \quad v = v_2 = 0.001$

$$\begin{aligned} \therefore \tau &= \int_0^{\tau_2} d\tau = -83.73 \int_{0.06}^{0.001} \frac{dv}{v} \\ &= -83.73 \left[\ln v \right]_{0.06}^{0.001} \\ &= 83.73 \ln \frac{0.06}{0.001} \\ &= 342.8 \text{ s} \end{aligned}$$

三、能量衡算

机械能、热量、电能、磁能、化学能、原子能等统称为能量, 各种能量间可以相互转换, 化工计算中遇到的往往不是能量间转换问题, 而是总能量衡算, 有时甚至简化为热能或热量衡算。本教材以热量衡算作为讨论能量衡算的重点。

能量衡算的依据是能量守恒定律, 对热量衡算可以写成:

$$\Sigma Q_I = \Sigma Q_O + Q_L \quad (0-4)$$

式中 ΣQ_I ——随物料进入系统的总热量, kJ 或 kW;

ΣQ_O ——随物料离开系统的总热量, kJ 或 kW;

Q_L ——向系统周围散失的热量, kJ 或 kW。

式 0-4 也可写成:

$$\Sigma (wH)_I = \Sigma (wH)_O + Q_L \quad (0-5)$$

式中 w ——物料的质量, kg 或 kg/s;

H ——物料的焓, kJ/kg。

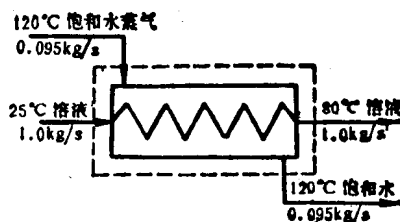
式 0-3 及式 0-4 既适用于间歇过程 (此时 Q 的单位为 kJ、 w 的单位为 kg) 也适用于连续过程 (此时 Q 的单位为 kW、 w 的单位为 kg/s)。

作热量衡算时也和物料衡算一样, 要规定出衡算基准和范围。此外, 由于焓是相对值,

与从哪一个温度算起有关, 所以进行热量衡算时还要指明基准温度(简称基温)。习惯上选 0°C 为基温, 并规定 0°C 时液态的焓为零, 这一点在计算中可以不指明。有时为了方便, 要以其它温度作基温, 这时应加以说明。

【例 0-5】 在换热器里将平均比热为 $3.56\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$ 的某种溶液自 25°C 加热到 80°C , 溶液流量为 1.0kg/s 。加热介质为 120°C 的饱和水蒸气, 其消耗量为 0.095kg/s , 蒸汽冷凝成同温度的饱和水排出。试计算此换热器的热损失占水蒸气所提供热量的百分数。

解: 先根据题意画出如本题附图所示的流程图。



例 0-5 附图

基准: s

从附录九查出 120°C 饱和水蒸气的焓值为 2708.9kJ/kg , 120°C 饱和水的焓值为 503.67kJ/kg 。

在图中虚线范围内作热量衡算。

式 0-4 中各项为:

$$\text{随流股带入换热器的总热量 } \Sigma Q_i = Q_1 + Q_2$$

其中:

$$\text{蒸汽带入的热量 } Q_1 = 0.095 \times 2708.9 = 257.3\text{ kW}$$

$$\text{溶液带入的热量 } Q_2 = 1 \times 3.56 (25 - 0) = 89\text{ kW}$$

$$\therefore \Sigma Q_i = 257.3 + 89 = 346.3\text{ kW}$$

$$\text{随流股带出换热器的热量 } \Sigma Q_o = Q_3 + Q_4$$

其中:

$$\text{冷凝水带出的热量 } Q_3 = 0.095 \times 503.67 = 47.8\text{ kW}$$

$$\text{溶液带出的热量 } Q_4 = 1 \times 3.56 (80 - 0) = 284.8\text{ kW}$$

$$\therefore \Sigma Q_o = 47.8 + 284.8 = 332.6\text{ kW}$$

将以上各值代入式 0-4, 得: $346.3 = 332.6 + Q_L$

$$\therefore \text{热损失 } Q_L = 13.7\text{ kW}$$

$$\text{热量损失百分数} = \frac{13.7}{257.3 - 47.8} \times 100\% = 6.54\%$$

习 题

1. 热空气与冷水间的总传热系数 K 值约为 $42.99\text{kcal}/(\text{m}^2\cdot\text{h}\cdot^{\circ}\text{C})$, 试从基本单位换算开始, 将 K 值的单位改为 $\text{W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

2. 密度 ρ 是单位体积物质具有的质量。在以下两种单位制中, 物质密度的单位分别为:

SI kg/m^3

米制重力单位 $\text{kgf}\cdot\text{s}^2/\text{m}^4$

常温下水的密度为 $1000\text{kg}/\text{m}^3$, 试从基本单位换算开始, 将该值换算为米制重力单位的数值。

3. 甲烷的饱和蒸气压与温度的关系符合下面经验公式:

$$\lg p = 6.421 - \frac{302}{t + 261}$$

式中 p ——饱和蒸气压, mmHg;

t ——温度, °C。

今需将式中 p 的单位改为 Pa, 温度单位改为 K, 试对该式加以变换。

4. 含 A、B、C、D 四种组分各 0.25 (摩尔分率, 下同) 的某混合溶液, 以 1000 kmol/h 的流量送入精馏塔内分离, 得到塔顶与塔釜两股产品, 进料中全部 A 组分、96% B 组分及 4% C 组分存于塔顶产品中, 全部 D 组分存于塔釜产品中。试计算塔顶和塔釜产品的流量及其组成。

5. 每小时将 200 kg 过热氨气 (压强为 1200 kPa) 从 95°C 冷却、冷凝为饱和液氨。已知冷凝温度为 30°C。采用冷冻盐水为冷凝、冷却剂, 盐水于 2°C 下进入冷凝、冷却器, 离开时为 10°C。求每小时盐水的用量。

热损失可以忽略不计。

数据:

95°C 过热氨气的焓, kJ/kg 1647

30°C 饱和液氨的焓, kJ/kg 323

2°C 盐水的焓, kJ/kg 6.8

10°C 盐水的焓, kJ/kg 34

目 录

结 论	(1)
第一章 流体流动	(1)
本章 符号说明	(1)
第一节 流体静力学基本方程式	(2)
1-1-1 流体的密度	(2)
1-1-2 流体的静压强	(4)
1-1-3 流体静力学基本方程式	(5)
1-1-4 流体静力学基本方程式的应用	(7)
第二节 流体在管内的流动	(12)
1-2-1 流量与流速	(12)
1-2-2 定态流动与非定态流动	(14)
1-2-3 连续性方程式	(15)
1-2-4 能量衡算方程式	(16)
1-2-5 柏努利方程式的应用	(21)
第三节 流体的流动现象	(27)
1-3-1 牛顿粘性定律与流体的粘度	(27)
1-3-2 非牛顿型流体	(31)
1-3-3 流动类型与雷诺准数	(33)
1-3-4 滞流与湍流	(35)
1-3-5 边界层的概念	(37)
第四节 流体在管内的流动阻力	(42)
1-4-1 流体在直管中的流动阻力	(43)
1-4-2 管路中的局部阻力	(54)
1-4-3 管路系统中的总能量损失	(56)
第五节 管路计算	(59)
第六节 流量测量	(66)
柏努利方程式的另一种推导方法	(75)
习题	(82)
思考题	(88)
第二章 流体输送设备	(89)
本章符号说明	(89)
第一节 液体输送设备	(90)
2-1-1 离心泵	(90)
2-1-2 其它类型泵	(121)

第二节 气体输送和压缩设备	(126)
2-2-1 离心通风机、鼓风机与压缩机	(127)
2-2-2 旋转鼓风机、压缩机与真空泵	(130)
2-2-3 往复压缩机	(132)
习题	(141)
思考题	(142)
第三章 非均相物系的分离	(143)
本章符号说明	(143)
第一节 重力沉降	(145)
3-1-1 沉降速度	(145)
3-1-2 降尘室	(153)
3-1-3 浓悬浮液的沉聚过程	(156)
3-1-4 沉降槽的构造与操作	(157)
3-1-5 连续沉降槽的计算	(158)
第二节 离心沉降	(161)
3-2-1 惯性离心力作用下的沉降速度	(161)
3-2-2 旋风分离器的操作原理	(162)
3-2-3 旋风分离器的性能	(163)
3-2-4 旋风分离器的结构型式与选用	(169)
3-2-5 旋液分离器	(172)
第三节 过滤	(173)
3-3-1 过滤操作的基本概念	(173)
3-3-2 过滤基本方程式	(175)
3-3-3 恒压过滤	(180)
3-3-4 恒速过滤与先恒速后恒压的过滤	(182)
3-3-5 过滤常数的测定	(185)
3-3-6 过滤设备	(187)
3-3-7 滤饼的洗涤	(192)
3-3-8 过滤机的生产能力	(193)
第四节 离心机	(197)
3-4-1 一般概念	(197)
3-4-2 离心机的结构与操作	(197)
第五节 气体的其它净制方法	(200)
3-5-1 惯性分离器	(200)
3-5-2 袋滤器	(201)
3-5-3 静电除尘器	(202)
3-5-4 文丘里除尘器	(202)
习题	(203)
思考题	(205)
第四章 传热	(206)
本章符号说明	(206)

第一节 概述	(207)
4-1-1 传热的基本方式	(208)
4-1-2 典型的传热设备	(209)
第二节 热传导	(211)
4-2-1 基本概念和傅立叶定律	(211)
4-2-2 导热系数	(213)
4-2-3 平壁的热传导	(214)
4-2-4 圆筒壁的热传导	(218)
第三节 对流传热	(222)
4-3-1 对流传热的分析	(222)
4-3-2 壁面和流体间的对流传热速率	(223)
4-3-3 热边界层	(224)
第四节 传热计算	(225)
4-4-1 能量衡算	(226)
4-4-2 总传热速率微分方程和总传热系数	(226)
4-4-3 平均温度差法	(230)
4-4-4 传热单元数法	(239)
第五节 对流传热系数关联式	(246)
4-5-1 对流传热系数的影响因素	(246)
4-5-2 对流传热过程的因次分析	(247)
4-5-3 流体无相变时的对流传热系数	(250)
4-5-4 流体有相变时的对流传热系数	(260)
4-5-5 壁温的估算	(269)
第六节 辐射传热	(270)
4-6-1 基本概念和定律	(270)
4-6-2 两固体间的辐射传热	(274)
4-6-3 对流和辐射的联合传热	(278)
第七节 换热器	(279)
4-7-1 换热器的类型	(279)
4-7-2 列管式换热器的基本型式和设计计算	(283)
4-7-3 新型的换热器	(295)
4-7-4 各种间壁式换热器的比较和传热的强化途径	(299)
习题	(300)
思考题	(302)
第五章 蒸发	(304)
本章符号说明	(304)
第一节 蒸发设备	(306)
5-1-1 蒸发器的结构	(306)
5-1-2 蒸发器的选型	(311)
第二节 单效蒸发	(312)
5-2-1 溶液的沸点和温度差损失	(312)

5-2-2 单效蒸发的计算.....	(317)
5-2-3 蒸发器的生产能力和生产强度.....	(325)
第三节 多效蒸发	(326)
5-3-1 多效蒸发的操作流程.....	(327)
5-3-2 多效蒸发的计算.....	(329)
5-3-3 多效蒸发和单效蒸发的比较.....	(338)
5-3-4 多效蒸发中效数的限制及最佳效数.....	(339)
第四节 蒸发器的工艺设计	(340)
5-4-1 蒸发器的工艺设计举例.....	(340)
5-4-2 蒸发器的辅助装置.....	(343)
习题	(344)
思考题	(345)

附录

一、中华人民共和国法定计量单位	(346)
二、常用单位的换算	(347)
三、某些气体的重要物理性质	(350)
四、某些液体的重要物理性质	(351)
五、干空气的物理性质 (101.33kPa)	(353)
六、水的物理性质	(354)
七、水在不同温度下的粘度.....	(355)
八、水的饱和蒸汽压 (-20℃至100℃)	(356)
九、饱和水蒸气压 (按温度顺序排列)	(357)
十、饱和水蒸气压 (按kPa顺序排列)	(358)
十一、某些液体的导热系数	(360)
十二、某些气体和蒸气的导热系数.....	(361)
十三、某些固体材料的导热系数	(362)
十四、常用固体材料的密度和比热	(364)
十五、液体的粘度和密度.....	(365)
十六、101.33kPa压强下气体的粘度.....	(369)
十七、液体的比热	(373)
十八、101.33kPa压强下气体的比热.....	(374)
十九、气化热 (蒸发潜热)	(376)
二十、液体的表面张力.....	(378)
二十一、某些有机液体的相对密度 (液体密度与 4℃水的密度之比)	(382)
二十二、壁面污垢热阻 (污垢系数), $\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C} / \text{W}$	(384)
二十三、无机盐溶液在101.33kPa压强下的沸点	(386)
二十四、管子规格 (摘录)	(387)
二十五、泵规格 (摘录)	(389)

二十六、4-72-11型离心通风机规格(摘录)	(392)
二十七、管板式热交换器系列标准(摘录)	(393)