

GAODENGXUEXIAOJIAOCAI

高等学校教材



化 工 原 理

(第二版) 上册

谭天恩 麦本熙 丁惠华 编著

化学工业出版社

高 等 学 校 教 材

化 工 原 理

(第二版)

上 册

谭天恩 麦本熙 丁惠华 编著

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 上册/谭天恩等编著. —2 版. —北京: 化学工业出版社, 1990.6
高等学校教材
ISBN 7-5025-0717-5

I. 化… II. 谭… 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 (95) 第 03103 号

高等学校教材

化 工 原 理

(第二版)

上 册

谭天恩 麦本熙 丁惠东 编著

责任编辑: 徐世峰

封面设计: 许 立

*

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

化学工业出版社印刷厂印刷

三河市延风装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 23 字数 573 千字

1990 年 6 月第 2 版 2004 年 1 月北京第 12 次印刷

ISBN 7-5025-0717-5/G·196

定 价: 30.00 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

原 序

本书是根据化学工业部教育司与化学工业出版社关于增编化工原理教材的要求而编写的。

新编一本书，除了表达作者的见解而外，亦必借鉴前人的成果。本书很重视吸取以前的化工原理教材的优点，特别是张洪沅、丁绪淮、顾毓珍三教授编著的“化学工业过程及设备”一书，历来为使用过的师生所称道，本书开编前征集意见时，亦常有人提出应以该书为楷模。编者曾认真研究该书特点，深觉其内容精炼、阐述严谨、概念清楚、文字流畅。对于由浅入深、联系实际等教学法上的基本要求，亦很重视。本书编写时极力以此为目标，但限于编者水平，甚虑达到之不易，在此提出，亦是作为策励之意。

本书力求重视概念与原理，同时注意引导学生从工程角度考虑问题。对于设备，着重典型分析，以操作原理为主，构造细节为次。至于设计计算，则侧重原则与方法，而具体步骤从简。有少数节、段的内容，与最基本者相比属于稍偏或稍难，用特殊标记▽表示。每章之末所推荐的参考读物，限于合乎学生程度而易见到的书刊；至于国内已出版的同类教材，自是重要的参考书，但若每章之末都列举一次，未免繁冗，故在此提出后，一般不再列。

本书有个别段落，采自编者参加编写的学校讲义，现已公开出版的其他教材中，偶亦有引用这些内容的。由于本书出版在后，故顺带指出。

成书过程中，除得到化工部教育司与化工出版社的有力支持外，编者所属各院校亦在工作上给予各种协助与方便，而许多院校从事化工原理教学的同志，或提供意见，或介绍资料，或校阅稿件，均不遗余力。本书得以编成，深赖上述赞助，对此编者深致谢意。编者学识有限，用力虽勤而成绩不彰，书中欠妥之处一定不少，甚望读者本着扶持一本合用教材的精神，尽量指出其不足，以助日后之修订。

编者 1982年8月

第 二 版 序

本书在 1984 年出版后经过几年的使用,广大读者在给予肯定的同时,也提出了不少的意见和建议,主要是上册中还存在某些概念不够清晰、阐述不够严密、内容不够精炼之处,印刷错误也较多等。经编者提出申请,化工原理课程教学指导委员会 1988 年两次工作会议上讨论,最后由化工部教育司核准,决定先对上册修订再版。

再版中对发现的错误作了更正,不够确切或严密的提法作了修改,力求加强前后的联系和论述的逻辑性,注意到习题和讲课进度能较好配合,对某些内容、尤其是第五、六章作了较大调整;根据法定单位制在我国的进展,基本上全采用 SI 制;重新改写的内容占到 10%以上,其中包括插图、例题、习题和参考文献。

我们虽尽了很大努力,但仍难免不妥之处,甚望广大读者继续提出意见。并对过去指出本书不足的同志们,在此表示深切谢意。

内 容 提 要

本书论述化学工程中单元操作的基本原理，上册包括绪论、流体流动、流体输送、机械分离、搅拌、传热、传热设备、蒸发等章，下册包括传质过程导论、吸收、蒸馏、气液传质设备、萃取、干燥（附空气调节）、固体流态化等章。本书重视基本概念，阐述力求严谨，同时亦注意实际应用与工程观点的培养，可作高等学校或同类学校化工原理课程的教材，亦可供化工部门从事研究、设计与生产的工程技术人员参考。

本书初版由谭天恩、麦本熙、丁惠华三人合编，由张洪沅、丁绪淮两教授审定。上册绪论、第一、二、三、四章由麦本熙执笔，第五、六、七章由丁惠华执笔。下册第八、九、十、十二章由谭天恩执笔，第十一、十四章由麦本熙执笔，第十三章由丁惠华执笔。此次修订原编写人不变，确定谭天恩为主编，黄有慧、吴庆邦为审稿人。

上册 目 录

原 序

第二版序

绪 论	1
(一) 化工过程与单元操作	1
(二) 单位及单位换算	2
(三) 物料衡算	4
(四) 热量衡算	5

第一章 流 体 流 动

第一节 流体静止的基本方程	8
1-1 密度	8
1-2 压力	9
1-3 流体的静力平衡	10
1-4 液柱压差计	11
第二节 流体流动的基本方程	13
1-5 概述	13
1-6 物料衡算——连续性方程	15
1-7 总能量衡算	16
1-8 机械能衡算——柏努利方程	18
第三节 流体流动现象	23
1-9 粘度	23
1-10 流动型态	26
1-11 管内流动的分析	28
1-12 湍流的特性	32
1-13 边界层概念	34
第四节 管内流动的阻力损失	36
1-14 计算直管摩擦损失的通式	36
1-15 层流时的摩擦损失	38
1-16 因次分析方法	38
1-17 湍流时的摩擦损失	41
1-18 非圆形管内的摩擦损失	45
1-19 局部阻力损失	46
第五节 管路计算	50
1-20 简单管路	51
1-21 复杂管路	55
1-22 可压缩流体的管路计算	58
第六节 流量测量	60
1-23 变压头的流量计	60
1-24 变截面的流量计	65

第七节 非牛顿型流体的流动与两相流动	67
1-25 非牛顿型流体的流动	67
1-26 气液两相混合物的流动	71
重要符号表	73
主要参考读物	75
参考文献	75
习 题	75

第二章 流 体 输 送 机 械

(甲) 液体输送机械	80
第一节 离心泵	80
2-1 离心泵的操作原理、构造与类型	80
2-2 离心泵的理论压头与实际压头	84
2-3 离心泵的主要性能参数	87
2-4 离心泵的特性曲线及其应用	89
2-5 离心泵的工作点与流量调节	91
2-6 离心泵的安装高度	93
2-7 离心泵的选用、安装与操作	96
第二节 其他类型泵	97
2-8 往复泵	97
2-9 旋转泵	100
2-10 旋涡泵	101
2-11 各类泵在化工生产中的应用	102
(乙) 气体输送与压缩机械	102
第三节 通风机、鼓风机、压缩机和真空泵	103
2-12 离心式风机	103
2-13 旋转鼓风机和压缩机	107
2-14 往复压缩机	108
2-15 真空泵	116
重要符号表	118
主要参考读物	119
参考文献	119
习 题	119

第三章 机 械 分 离

3-1 引 言	122
第一节 筛 分	122
3-2 固体颗粒	122
3-3 筛	126
第二节 沉 降	128
3-4 重力沉降速度	128
3-5 降尘室	133
3-6 悬浮液的凝聚过程	135
3-7 沉降槽	136

3-8 离心沉降速度	137
3-9 旋风分离器	138
3-10 旋液分离器	143
第三节 过 滤	143
3-11 概 述	143
3-12 过滤设备	145
3-13 过滤的基本理论	149
3-14 过滤计算	158
第四节 离心分离	164
3-15 离心机	164
3-16 离心分离原理简述	167
重要符号表	170
主要参考读物	172
参考文献	172
习 题	172

第四章 搅 拌

4-1 搅拌设备	175
4-2 搅拌功率	179
4-3 搅拌器放大的概念	184
重要符号表	187
主要参考读物	187
参考文献	187
习 题	187

第五章 传 热

第一节 概 述	189
5-1 传热在化工生产中的应用	189
5-2 传热的三种基本方式	189
第二节 热传导	190
5-3 傅立叶定律	190
5-4 导热系数	191
5-5 平壁的稳定热传导	193
5-6 圆筒壁的稳定热传导	196
第三节 两流体间的热量传递	199
5-7 间壁两侧流体热交换过程的分析	199
5-8 总传热系数	201
5-9 热量衡算式与传热速率方程间的关系	204
5-10 平均温度差的计算	205
5-11 传热效率-传热单元数法	213
5-12 壁温的计算	218
第四节 对流与对流传热系数	219
5-13 影响对流传热系数的因素	219
5-14 因次分析在对流传热中的应用	220

5-15	流体作强制对流时的对流传热系数	224
5-16	流体作自然对流时的对流传热系数	233
5-17	蒸气冷凝时的对流传热系数	235
5-18	液体沸腾时的对流传热系数	242
5-19	对流传热系数关联式的小结	246
5-20	非牛顿型流体的传热	248
第五节	辐射传热	250
5-21	基本概念	250
5-22	物体的发射能力——斯蒂芬-波尔茨曼定律	251
5-23	克希霍夫定律	252
5-24	两固体间的相互辐射	253
5-25	气体热辐射的特点	257
5-26	辐射、对流的联合传热	258
	重要符号表	259
	主要参考读物	261
	参考文献	261
	习 题	261

第六章 传 热 设 备

6-1	换热器的类型	266
6-2	夹套式换热器	266
6-3	蛇管式换热器	267
6-4	套管式换热器	268
6-5	列管式换热器	268
6-6	换热器的强化途径	276
6-7	板式换热器	276
6-8	螺旋板式换热器	278
6-9	板翅式换热器	279
6-10	翅片管换热器及空气冷却器	280
	重要符号表	282
	主要参考读物	283
	参考文献	283
	习 题	283

第七章 蒸 发

第一节	概 述	284
7-1	基本概念	284
第二节	单效蒸发和真空蒸发	285
7-2	单效蒸发的计算	285
7-3	蒸发设备中的温度差损失	290
7-4	溶液的沸点升高与杜林规则	291
7-5	液柱静压头和加热管内摩擦损失对溶液沸点的影响	293
7-6	真空蒸发	294
第三节	多效蒸发	295

7-7 多效蒸发设备的流程	295
7-8 蒸发器的生产能力、生产强度和多效蒸发器效数的限制	297
7-9 多效蒸发的计算	299
7-10 提高加热蒸气经济程度的其他措施	306
第四节 蒸发设备	308
7-11 蒸发器的结构及特点	308
7-12 除沫器、冷凝器和真空装置	314
第五节 蒸发器生产强度	316
7-13 影响蒸发器生产强度的因素	316
重要符号表	320
主要参考读物	320
参考文献	320
习 题	321

附 录

1. 单位换算表	322
2. 某些气体的重要物理性质	325
3. 某些液体的重要物理性质	326
4. 某些固体材料的重要物理性质	328
5. 水的重要物理性质	329
6. 空气的重要物理性质	330
7. 水的饱和蒸汽压	330
8. 饱和水蒸汽表（按温度排列）	331
9. 饱和水蒸汽表（按压力排列）	332
10. 水的粘度	335
11. 液体粘度共线图	336
12. 气体粘度共线图（常压下用）	338
13. 液体比热共线图	340
14. 气体比热共线图（常压下用）	342
15. 液体汽化潜热共线图	344
16. 无机物水溶液在大气压下的沸点	346
17. 管子规格	347
18. 离心泵规格	348
19. 离心通风机规格	352
20. 列管式换热器规格	353

绪 论

(一) 化工过程与单元操作

化学工程以化学工业的生产过程为研究对象。在化学工业中，对原料进行大规模的加工处理，使其不仅在状态与物理性质上发生变化，而且在化学性质上也发生变化，成为合乎要求的产品。此一过程即为化学工业的生产过程，简称为化工过程。化工过程包括许多步骤，原料在各步骤中依次通过若干个或若干组设备，经历各种方式的处理之后才能成为产品。化工过程的特点之一是步骤多，而且因为不同的化学工业所用的原料与所得的产品不同，所以各种化工过程的差别很大。

一个化工过程中所包含的步骤可分为两大类。一类以进行化学反应为主，通常是在反应器中进行。用于不同化学工业中的反应器有很大差别，主要是因为所进行的化学反应不同，反应的机理相差很大。例如，石油裂解用的裂解炉、氨合成用的合成塔，高分子聚合用的反应釜，在各方面都很不相同。

化工过程中还有另一类很重要的并不进行化学反应的步骤。例如，乙醇生产和石油加工中都要进行蒸馏操作；陶瓷、尿素、染料、塑料、纸张等的生产中都有干燥操作；而糖、食盐这两种迥然异味的食品的生产过程中都包含有流体输送、蒸发、结晶、离心分离、干燥等操作。这类操作称为单元操作。单元操作有下列特点：(1) 它们都是物理性操作，即只改变物料的状态或其物理性质，并不改变其化学性质。(2) 它们都是化工生产过程中共有的操作，但不同的化工过程中所包含的单元操作数目、名称与排列顺序各异。(3) 某单元操作用于不同的化工过程，其基本原理并无不同，进行该操作的设备往往也是通用的。当然，具体运用时也需要结合各化工过程的特点来考虑，例如原料与产品的物理、化学性质，生产规模的大小等。

本书的内容就是讨论比较重要而较常用的一些单元操作。单元操作按其所根据的内在的理论基础，又可进一步归并为三类：

(1) 以流体力学为基础，包括流体输送、沉降、过滤、离心分离、搅拌、固体流态化等；

(2) 以热量传递理论为基础，包括加热、冷却、蒸发等；

(3) 以质量传递理论为基础，包括蒸馏、吸收、吸附、萃取、干燥、结晶、膜分离等。进行这些操作的目的一般是将混合物分离，故它们又称为分离过程。

以流体力学为基础的单元操作都涉及流体流动，流体流动时其内部发生动量传递，故这些操作也可以按动量传递理论来研究。于是，各种单元操作的基础都可以归入动量、热量与质量三种传递理论中去。这三种传递又有彼此相类似的规律可以合起来研究，这就形成了传递过程这门学科。它是单元操作在理论方面深入一步的发展。

化学工业中工程技术人员的主要任务是开发、设计与操作。某化工过程所包括的步骤研究出来之后，将这些步骤连结起来使得生产大规模进行时经济上合理有利，称为“开发”此

一过程,其主要工作是探索最佳的流程与设备,定出最佳的操作条件。设计工作通常是规定出设备应具有的性能,选出合适的型式并确定其主要尺寸。操作则除了对日常生产过程进行管理并使设备能正常运转以外,更重要的是对现行的生产过程与设备作各种改进以提高其效率。所有这些工作都要求对各单元操作有充分的了解。此外,单元操作是工程技术的一个分支,理论与实践应紧密结合,既需要熟悉其原理,又须掌握设备的有关知识,二者不能有所偏废。

为学习单元操作而开设的课程,在我国习惯上称为化工原理。

(二) 单位及单位换算

在我国,国际制(SI)单位虽已公布推行,但工程制单位在生产、设计中使用仍较普遍,而且化学工程中常用的物理、化学数据有些仍以物理制(cgs)单位表示。因此,本书虽然基本上采用SI制,但也兼顾其它单位制,并在此专门讨论一下单位换算。

单位制度

单位制度的不同,在于所采用的基本单位的不同以及对基本单位大小的规定不一。物理制的基本单位是:长度单位厘米(cm),质量单位克(g),时间单位秒(s)。国际制的基本单位共有7个,但化工中常用的只有下面5个:长度单位米(m),质量单位千克(kg),时间单位秒(s),温度单位开尔文(K),物质质量单位摩尔(mol)。这两种单位都以质量为基本单位,属于绝对单位制系统。工程制的基本单位是:长度单位米,力或重量单位千克(力),时间单位秒。这种单位制的特点是,以力而不以质量作基本单位,属于重力单位制系统。千克(公斤)在SI制里指质量,在工程制里指力,容易混淆,本书在工程制的千克之后加注力字(用符号表示则写成kgf),以资区别。文中SI单位都采用国际计量会议所颁布的单位符号表示,而工程单位则用我国规定的中文代号或用拉丁字母表示。

在上述三种单位制下,化学工程中常见的若干物理量单位,列于绪论末的附表1。

质量、重量、力

要在化工计算中正确地运用单位,并弄清楚SI单位与工程单位的关系,首先应了解质量、重量、力三者的意义及其单位。

质量和重量(或力)是两个截然不同的概念。一个物体的质量是它所包含物质的多少;它的重量则是它所受地球吸引力(重力)的大小。一件物体的质量是固定的,它的重量却随着距离地球的远近而变化。通常所谓重量是指在地球表面附近的重量而言。

质量和力的关系可以用牛顿力学第二定律表示:

$$f = kma \quad (1)$$

式中, f 是作用于物体上的力, m 是物体的质量, a 是物体在力所作用的方向上的加速度。式中比例常数 k 的数值取决于各物理量所用的单位,若各物理量所用的单位都属于同一单位制度,则 $k=1$ 。

绝对单位制以质量单位g或kg作基本单位,令 $k=1$,便可从式(1)导出力的单位。若对式(1)中的物理量只考虑其单位而不考虑其数值大小,可导出力的单位(以 $[f]$ 表示)如下:

$$\text{cgs制: } [f] = [ma] = \text{g} \cdot \text{cm/s}^2 = \text{dyn(达因)}$$

$$\text{SI制: } [f] = [ma] = \text{kg} \cdot \text{m/s}^2 = \text{N(牛顿)}$$

工程制以力的单位千克(力)作基本单位,令式(1)中的 $k=1$,可导出质量的单位如

下:

$$\text{工程制:} [\dot{m}] = \left[\frac{f}{a} \right] = \frac{\text{千克(力)}}{\text{米/秒}^2} = \text{千克(力)} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}$$

由此可见, 1N 是作用于质量为 1kg 的物体上能够产生 1m/s^2 的加速度所需的力。1 “工程单位质量” 是在 1 千克 (力) 的作用之下其加速度为 1米/秒^2 的那个物体的质量。

至于 kg 和 kgf 即千克 (力) 的关系, 可用下法导得: 物体在地面附近受重力作用所产生的加速度 $a=9.81\text{m/s}^2$, 故作用于质量 $m=1\text{kg}$ 的物体上的重力为

$$f=ma=1\text{kg} \times 9.81\text{m/s}^2=9.81\text{kg} \cdot \text{m/s}^2 \text{ (即 N)} \quad (2)$$

物体所受的重力即为其重量, 而质量为 1kg 的物体在地面附近的重量为 1 千克 (力) 即 1kgf, 故得:

$$1\text{kgf}=9.81\text{kg} \cdot \text{m/s}^2=9.81\text{N} \quad (3)$$

式 (3) 表示了 kg 与 kgf 的关系, 它也是工程制与 SI 制之间换算的桥梁。

工程制中很少采用质量, 在可能的场合都改用重量, 例如不用密度而用重度, 后者的单位是千克(力)/米³, 其意义为单位体积物体的重量。

单位的正确运用

化工计算中所用的公式可分为两类。

一类公式是根据物理规律建立的, 称为理论公式, 例如前面的式 (1)。式中的符号除比例系数 k 以外, 各代表一个物理量, 因此又称物理量方程。一个物理量的大小必须由数目与单位二者相结合才能表示出来, 所以物理量实际上是数目与单位的乘积。将物理量数据代入这一类公式时, 严格的作法是将数目与单位一起代进去, 式 (2) 中的运算就是这样做的。将某一单位制的数据代入理论公式中, 解出的结果总是属于同一单位制。这就是说, 理论公式在单位上总是一致的, 任何同属一个制度的一致单位都可以用, 但中途不能更改。初学者遇到复杂公式时, 比较稳妥的办法是将数据预先换算成符合于所选用的单位制, 然后将数目与单位一起代入, 对数目和单位分别进行运算和整理。若求得的结果不能保持单位的一致或得出不合理的单位, 便表明计算中混进了不一致的单位, 否则就是公式本身单位不一致, 有必要检查它是否正确。

另一类公式是根据实验结果整理出来的, 称为经验公式。这类公式的每一个符号都要用指定单位的数值代入, 所得结果属于什么单位也是指定了的。对于此类公式, 代入以前要逐一核实数据的单位是否合乎规定, 只须将数字代入, 算出结果, 然后加上规定的单位。

单位换算

从各种来源得到的数据, 其单位不一定符合要求, 必须进行单位换算, 此项工作若在运算当中临时进行易于发生错漏, 以预先作好为宜。

化学工程中常用单位的换算因数可从本书 (上册) 附录表 1 中查得。复杂单位的换算因数没有必要记住, 无表可查时, 可以将其分解成简单的单位逐个换算。现举例说明单位换算的方法。

例 1 一标准大气压 (1atm) 的压力等于 1.033kgf/cm^2 , 将其换算成 SI 单位。

解 要用 SI 单位表示大气压, 则工程单位 kgf/cm^2 中的 kgf 须转化为 N, cm^2 须转换为 m^2 , 其转换关系为:

$$1\text{kgf} = 9.81\text{N}$$

$$1\text{cm} = (1/100)\text{m}$$

要令 $1.033\text{kgf}/\text{cm}^2$ 中之 kgf 从分子中消去而维持原值不变, 可将此量乘以一个分母中含有 kgf 而且等于 1 之值。根据上述换算关系, 可知应乘以 $9.81\text{N}/1\text{kgf}$ 。同理, 将此量乘以一个分子中含有 cm^2 而且等于 1 之值, 即 $(100\text{cm}/1\text{m})^2$, 则其分母中之 cm^2 亦可消去而转换为 m^2 。

故得:

$$\begin{aligned} 1\text{atm} &= 1.033 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \left(\frac{9.81\text{N}}{1\text{kgf}} \right) \left(\frac{100\text{cm}}{1\text{m}} \right)^2 \\ &= (1.033 \times 9.81 \times 100^2) \left(\frac{\text{kgf} \times \text{N} \times \text{cm}^2}{\text{cm}^2 \times \text{kgf} \times \text{m}^2} \right) \\ &= 1.013 \times 10^5 \text{N}/\text{m}^2 \end{aligned}$$

上法的特点是将单位也和数目一样纳入计算, 分子分母中的单位相消以后, 剩下的必须与所要求者相符, 有错立刻可以发现。对单位换算未熟练者采用此法比较稳妥。

例 2 通用气体常数 $R = 82.06\text{atm} \cdot \text{cm}^3/\text{mol} \cdot \text{K}$, 将其换算成以下列单位表示: (a) 工程单位: 千克(力)·米/千克分子·开; (b) 国际单位: $\text{kJ}/\text{kmol} \cdot \text{K}$ 。

解 (a) 工程单位:

$$\begin{aligned} R &= 82.06 \frac{\text{atm} \cdot \text{cm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} = 82.06 \left(\frac{10330\text{kgf}}{\text{m}^2} \right) (0.01\text{m})^3 \left(\frac{1}{0.001\text{kmol}} \right) \left(\frac{1}{\text{K}} \right) \\ &= 848\text{kgf} \cdot \text{m}/\text{kmol} \cdot \text{K} \end{aligned}$$

(b) 国际单位:

$$\begin{aligned} R &= 82.06 \frac{\text{atm} \cdot \text{cm}^3}{\text{mol} \cdot \text{K}} = 82.06 \left(\frac{1.013 \times 10^5 \text{N}}{\text{m}^2} \right) (0.01\text{m})^3 \left(\frac{1}{0.001\text{kmol}} \right) \left(\frac{1}{\text{K}} \right) \\ &= 8314\text{N} \cdot \text{m}/\text{kmol} \cdot \text{K} = 8.314\text{kJ}/\text{kmol} \cdot \text{K} \end{aligned}$$

上法将复合单位所包含的简单单位逐个按要求替换, 最后亦能化成所要求的形式。

(三) 物料衡算

设计设备决定其尺寸之前, 要定出所处理的物料量。整个过程或其某一步骤中, 原料、产物、副产物等量之间的关系, 可通过物料衡算确定。物料衡算的根据是质量守恒定律。由此可得, 进入任何过程的物料质量, 必须等于从该过程离开的物料质量与积存于该过程中的物料质量之和:

$$\text{输入} = \text{输出} + \text{积存}$$

很多情况下, 过程进行中无物料积存, 此种过程称为稳定过程 (关于稳定过程的其它特点, 以后再作进一步讨论)。此种情况下的物料衡算关系便简化为:

$$\text{输入} = \text{输出}$$

上述关系, 可在整个过程的范围内使用, 亦可在一个或几个设备的范围内使用。它既可针对全部物料运用, 在没有化学反应发生时还可针对混合物的任一组分来运用。

进行物料衡算的方法, 通过例题说明如下。

例 3 采用两个连续操作的串联的蒸发器浓缩 NaOH 溶液。每小时有 5 吨 12% (质量%) NaOH 溶液进入第一个蒸发器, 浓缩到 20% 后输送到第二个蒸发器, 进一步浓缩成 50% 的溶液而排出。试分别求出两个蒸发器每小时蒸发的水量及从第二个蒸发器送出的浓溶液量。

解 绘出流程图 (如图 1)

先求出第一个蒸发器的蒸发量。第一步划定衡算的范围, 用一圈封闭的虚线 (a) 表示。

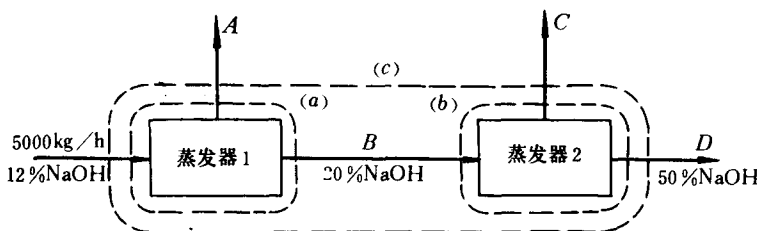


图1 例3流程图

衡算范围一经划定，便可设想圈内部分与四邻分隔开，以虚线为界。又以箭头表示物流方向，凡是穿越边界指向内的，都属输入项；凡是穿越边界指向外的，都属输出项。

对于第一个蒸发器，有两个未知数待定，即蒸发出的水量 A 与送出的 20% 溶液量 B 。现在考虑 1 小时内所涉及的物料量，可以写出：

基准——1 小时（进料 5000kg）

总物料衡算：5000 = $A + B$

NaOH 衡算 $5000(0.12) = A(0) + B(0.2)$

解出： $A = 2000\text{kg/h}$ ； $B = 3000\text{kg/h}$ 。

既然进入第二个蒸发器的 20% NaOH 溶液量 B 已经算出，用与前面一样的方法，在虚线 (b) 所圈定的范围内列物料衡算式，便可解出第二个蒸发器的蒸发量 C 与送出的 50% 溶液量 D 。这一步由读者完成。若对整个流程进行衡算，即取虚线 (c) 所圈定的范围作衡算范围，也可求得相同的结果，基准同前。

总物料衡算：5000 = 2000 + $C + D$

NaOH 衡算 $5000(0.12) = D(0.5)$

解得： $C = 1800\text{kg/h}$ ； $D = 1200\text{kg/h}$ 。

从上面的求解过程可以总结出作物料衡算的步骤如下：（1）绘一流程图表示所进行的过程，即以一方框表示一设备，以箭头表示输入设备或从设备输出的物流方向。已知的物料流量、组成及温度、压力等都注在箭头旁边；（2）划定衡算范围，其边界要与待计算的物流相交，这样所列出的衡算式才能包含需要算出的未知数；（3）规定衡算基准，并将其明确列出。衡算基准是在衡算式中规定已知量数值的依据，算出的未知量也应符合此基准，故必须十分明确；（4）列出衡算式并求解。

（四）热 量 衡 算

化工生产中所需的能量以热能为主，用于改变物料的温度与聚集状态，以及提供反应所需热量等。若操作中有几种能量相互转化，则其间的关系可通过能量衡算确定；若只涉及到热能，能量衡算便简化为热量衡算。能量衡算的根据是能量守恒定律。对于稳定过程，有“输入 = 输出”，这个关系若针对焓来运用，所作的衡算即为热量衡算。

热量衡算中需要考虑的项目是进出设备的物料本身的焓与从外界加入或向外界送出的热，有化学反应时则还包括反应所吸收或放出的热（反应热）。

SI 制中能量和热量的单位都是 J（焦耳）或 kJ（千焦耳）。1J = 1N · m。工程制的能量单位是千克(力) · 米，热量单位是千卡。它们之间的换算关系如下：

$$1 \text{ 千卡} = 427 \text{ 千克(力) · 米} = 4.187 \text{ kJ}$$

作热量衡算时也和作物料衡算时一样,要表示清楚衡算范围和衡算基准。此外,由于焓值的大小与从哪一温度算起有关,因而热量衡算还要指明基准温度。物料的焓值常从 0°C 算起,若以 0°C 为基准,亦可不再指明。有时为方便计,以进料温度或环境温度作为基准温度,或采用数据资料的基温(例如反应热的基温是 25°C),这时就一定要指明。

例 4 若例 3 中蒸发器 1 用 0.18MPa 的水蒸气加热,冷凝水在饱和温度下排出;原料液入口温度为 20°C ,在器内的沸点为 70°C ,溶液比热为 $3.8\text{kJ/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$,热损失为 $3\times 10^5\text{kJ/h}$,溶液的浓缩热可忽略。求所需要的水蒸气量。

解 分别求出每小时输入和输出蒸发器的热量,皆以 0°C 的液态为基准。为求加热蒸汽和所蒸发出蒸汽的焓 H_1 、 H_2 ,可查附录表 9 和表 8,得 $H_1=2704\text{kJ/kg}$, $H_2=2624\text{kJ/kg}$ 。

输出: (1) 浓液的焓 $Q_1=3000\times 3.8(70-0)=7.98\times 10^5\text{kJ/h}$

(2) 蒸发蒸汽的焓 $Q_2=2000\times 2624=52.48\times 10^5\text{kJ/h}$

(3) 冷凝水的焓 $Q_3=D\times 489\text{kJ/h}$

式中 D 为加热蒸汽量, kJ/h ; 489 为 0.18MPa 下饱和水的焓。

(4) 热损失 $Q_4=3\times 10^5\text{kJ/h}$

输入: (1) 原料液的焓 $Q_5=5000\times 3.8(20-0)=3.8\times 10^5\text{kJ/h}$

(2) 加热蒸汽的焓 $Q_6=D\times 2704\text{kJ/h}$

热量衡算: $Q_5+Q_6=Q_1+Q_2+Q_3+Q_4$

$$3.8\times 10^5+2704D=(7.98+52.48+3)\times 10^5+489D$$

$$D=59.66\times 10^5/2215=2693\text{kg/h}。$$

另解 也可以用以下分物流及其焓差的方法求解,比较简便。

输入: (1) 加热蒸汽的焓差,即为其汽化潜热 $r=2214\text{kJ/kg}$,于是 $Q'_1=2214D$ 。

输出: (1) 蒸发蒸汽的焓差

$$Q_2=2000(2624-3.8\times 20)=50.96\times 10^5\text{kJ/h}$$

(2) 浓液的焓差

$$Q'_3=3000\times 3.8(70-20)=5.7\times 10^5\text{kJ/h}$$

(3) 热损失

$$Q'_4=3\times 10^5\text{kJ/h}$$

热量衡算: $Q'_1=Q_2+Q'_3+Q'_4$

$$2214D=(50.96+5.7+3)\times 10^5$$

$$D=59.66\times 10^5/2214=2694\text{kg/h}。$$

附表 1 化学工程中若干常用物理量的单位

物 理 量	cgs 单位	SI 单位	工程单位
长度	cm(厘米)	m(米)	米 m
质量	g(克)	kg(千克)	千克(力)·秒 ² /米 kgf·s ² /m
力	$\text{g}\cdot\text{cm/s}^2=\text{dyn}$ (达因)	$\text{kg}\cdot\text{m/s}^2=\text{N}$ (牛顿)	千克(力) kgf
时间	s(秒)	s	秒 s
速度	cm/s	m/s	米/秒 m/s
加速度	cm/s^2	m/s^2	米/秒 ² m/s ²
能量、功	$\text{dyn}\cdot\text{cm}=\text{erg}$ (尔格)	$\text{N}\cdot\text{m}=\text{J}$ (焦耳)	千克(力)·米 kgf·m
功率	erg/s	$\text{J/s}=\text{W}$ (瓦)	千克(力)·米/秒 kgf·m/s
压力	$\text{dyn/cm}^2=10^{-6}\text{bar}$ (巴)	$\text{N/m}^2=\text{Pa}$ (帕斯卡)	千克(力)/米 ² kgf/m ²