

846

TQ02
Y35b

天津市普通高等学校“九五”重点教材

化 工 原 理

上 册

姚玉英 主编

姚玉英 黄凤廉 陈常贵 柴诚敬 编

天津大学出版社

内容提要

本书重点介绍化工单元操作的基本原理、典型设备及其计算。本书对基本概念의阐述力求严谨,注意理论联系实际,并突出工程观点。全书分上下两册。上册包括绪论、流体流动、流体输送机械、机械分离和固体流态化、传热、蒸发及附录。每章均编入较多的例题,章末有习题及思考题,并附有参考答案。

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

图书在版编目(CIP)数据

化工原理 (上)/姚玉英主编;黄凤廉等编. —天津:天津大学出版社,1999.8(2001.8重印)

ISBN 7-5618-1217-5

I.化… II.①姚… ②黄… III.化工原理 IV.TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 35937 号

出版发行 天津大学出版社
出版人 杨风和
地址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
印刷 天津宝坻第二印刷厂
经销 全国各地新华书店
开本 787mm×1092mm 1/16
印张 23.5
字数 584 千
版次 1999 年 8 月第 1 版
印次 2001 年 8 月第 4 次
印数 18 001—28 000
定价 28.00 元

再 版 说 明

本书是1992年由天津科学技术出版社出版的《化工原理》(上、下册)的修订版。修订版在初版的基础上作了一些修改与变动。原来下册第六章流态化的部分内容与上册第三章“非均相物系分离”合并,改称为“机械分离与固体流态化”。下册除流态化部分有变动外,还增加了“其它分离过程”一章,其中包括结晶、膜分离和超临界萃取三个分离过程。

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。对基本概念的阐述力求严谨,注重理论联系实际并突出工程观点。书中除了设计型的习题外,全部习题后均附有参考答案。

本书上册包括流体流动、流体输送机械、机械分离和固体流态化、传热、蒸发五章及绪论和附录;下册包括蒸馏、吸收、蒸馏和吸收塔设备、液-液萃取、干燥及其它分离过程六章。

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、设计及生产单位的科技人员参考。

本书主编姚玉英、副主编陈常贵。参加上册编写工作的有姚玉英(绪论、蒸发及附录)、黄凤廉(流体流动)、陈常贵(流体输送机械及传热)、柴诚敬(机械分离和固体流态化);参加下册编写工作的有陈常贵(蒸馏)、曾敏静(吸收)、刘国维(蒸馏和吸收塔设备)、柴诚敬(液-液萃取)、姚玉英(干燥)、尹秋响(第六章中的结晶)、姜忠义(第六章中的膜分离)和李淑芬(第六章中的超临界萃取)。

目 录

绪论	(1)
第一章 流体流动	(9)
本章符号说明	(9)
第一节 流体静力学基本方程式	(10)
1-1-1 流体的密度	(11)
1-1-2 流体的静压强	(12)
1-1-3 流体静力学基本方程式	(13)
1-1-4 流体静力学基本方程式的应用	(15)
第二节 流体在管内的流动	(19)
1-2-1 流量与流速	(19)
1-2-2 定态流动与非定态流动	(21)
1-2-3 连续性方程式	(21)
1-2-4 能量衡算方程式	(22)
1-2-5 柏努利方程式的应用	(27)
第三节 流体的流动现象	(32)
1-3-1 牛顿粘性定律与流体的粘度	(32)
1-3-2 非牛顿型流体	(35)
1-3-3 流动类型与雷诺准数	(37)
1-3-4 滞流与湍流	(39)
1-3-5 边界层的概念	(41)
第四节 流体在管内的流动阻力	(45)
1-4-1 流体在直管中的流动阻力	(46)
1-4-2 管路上的局部阻力	(56)
1-4-3 管路系统中的总能量损失	(57)
第五节 管路计算	(60)
第六节 流量测量	(67)
习题	(75)
思考题	(80)
第二章 流体输送机械	(82)
本章符号说明	(82)
第一节 液体输送机械	(83)
2-1-1 离心泵	(84)
2-1-2 往复泵	(112)
2-1-3 其它类型泵	(115)

第二节 气体输送和压缩机械	(117)
2-2-1 离心通风机、鼓风机与压缩机	(117)
2-2-2 旋转鼓风机与压缩机	(121)
2-2-3 往复压缩机	(121)
2-2-4 真空泵	(129)
习题	(130)
思考题	(132)
第三章 机械分离和固体流态化	(133)
本章符号说明	(133)
第一节 颗粒及颗粒床层的特性	(135)
3-1-1 颗粒的特性	(135)
3-1-2 颗粒床层的特性	(138)
第二节 沉降过程	(138)
3-2-1 重力沉降	(138)
3-2-2 离心沉降	(150)
第三节 过滤	(161)
3-3-1 过滤操作的基本概念	(161)
3-3-2 过滤基本方程式	(163)
3-3-3 恒压过滤	(167)
3-3-4 恒速过滤与先恒速后恒压过滤	(169)
3-3-5 过滤常数的测定	(171)
3-3-6 过滤设备	(173)
3-3-7 滤饼的洗涤	(178)
3-3-8 过滤机的生产能力	(179)
第四节 离心机	(182)
3-4-1 一般概念	(182)
3-4-2 离心机的结构与操作	(182)
第五节 固体流态化	(184)
3-5-1 流态化的基本概念	(185)
3-5-2 流动阻力	(186)
3-5-3 流化设备简介	(192)
3-5-4 气力输送简介	(195)
习题	(197)
思考题	(199)
第四章 传热	(200)
本章符号说明	(200)
第一节 概述	(201)
4-1-1 传热的基本方式	(201)
4-1-2 传热过程中热、冷流体(接触)热交换的方式	(202)
4-1-3 典型的间壁式换热器	(204)

4-1-4	载热体及其选择	(205)
第二节	热传导	(206)
4-2-1	基本概念和傅立叶定律	(206)
4-2-2	导热系数	(207)
4-2-3	平壁的热传导	(209)
4-2-4	圆筒壁的热传导	(213)
第三节	对流传热概述	(215)
4-3-1	对流传热速率方程和对流传热系数	(215)
4-3-2	对流传热机理	(217)
4-3-3	保温层的临界直径	(219)
第四节	传热过程计算	(220)
4-4-1	能量衡算	(220)
4-4-2	总传热速率微分方程和总传热系数	(221)
4-4-3	平均温度差法	(224)
4-4-4	传热单元数法	(232)
第五节	对流传热系数关联式	(238)
4-5-1	影响对流传热系数的因素	(238)
4-5-2	对流传热过程的因次分析	(239)
4-5-3	流体无相变时的对流传热系数	(242)
4-5-4	流体有相变时的对流传热系数	(250)
4-5-5	壁温的估算	(257)
第六节	辐射传热	(258)
4-6-1	基本概念	(258)
4-6-2	物体的辐射能力和有关的定律	(259)
4-6-3	两固体间的辐射传热	(261)
4-6-4	对流和辐射的联合传热	(265)
第七节	换热器	(266)
4-7-1	间壁式换热器的类型	(266)
4-7-2	列管式换热器的设计和选用	(274)
4-7-3	各种间壁式换热器的比较和传热的强化途径	(282)
	习题	(283)
	思考题	(286)
第五章	蒸发	(287)
	本章符号说明	(287)
第一节	蒸发设备	(289)
5-1-1	蒸发器的结构	(289)
5-1-2	蒸发器的选型	(294)
第二节	单效蒸发	(295)
5-2-1	溶液的沸点和温度差损失	(295)
5-2-2	单效蒸发的计算	(299)

5-2-3 蒸发器的生产能力和生产强度	(306)
第三节 多效蒸发	(307)
5-3-1 多效蒸发的操作流程	(308)
5-3-2 多效蒸发的计算	(309)
5-3-3 多效蒸发和单效蒸发的比较	(319)
5-3-4 多效蒸发中效数的限制及最佳效数	(320)
第四节 蒸发器的工艺设计	(320)
5-4-1 蒸发器的工艺设计举例	(321)
5-4-2 蒸发器的辅助装置	(324)
习题	(325)
思考题	(326)
附录	(327)
一、中华人民共和国法定计量单位	(327)
二、常用单位的换算	(328)
三、某些气体的重要物理性质	(330)
四、某些液体的重要物理性质	(331)
五、某些固体材料的重要物理性质	(332)
六、干空气的物理性质(101.33kPa)	(334)
七、水的物理性质	(335)
八、水在不同温度下的粘度	(336)
九、饱和水蒸气表(以温度为准)	(337)
十、饱和水蒸气表(以用 kPa 为单位的压强为准)	(338)
十一、某些液体的导热系数	(340)
十二、某些气体和蒸气的导热系数	(341)
十三、某些固体材料的导热系数	(342)
十四、液体的粘度和密度	(344)
十五、101.33kPa 压强下气体的粘度	(347)
十六、液体的比热容	(349)
十七、101.33kPa 压强下气体的比热容	(351)
十八、汽化热(蒸发潜热)	(353)
十九、液体的表面张力	(355)
二十、壁面污垢的热阻(污垢系数)	(357)
二十一、101.33kPa 压强下溶液的沸点升高与浓度的关系	(358)
二十二、管子规格(摘录)	(358)
二十三、泵规格(摘录)	(360)
二十四、4-72-11 型离心通风机规格(摘录)	(363)
二十五、管板式热交换器系列标准(摘录)	(364)
参考书目	(366)

绪 论

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

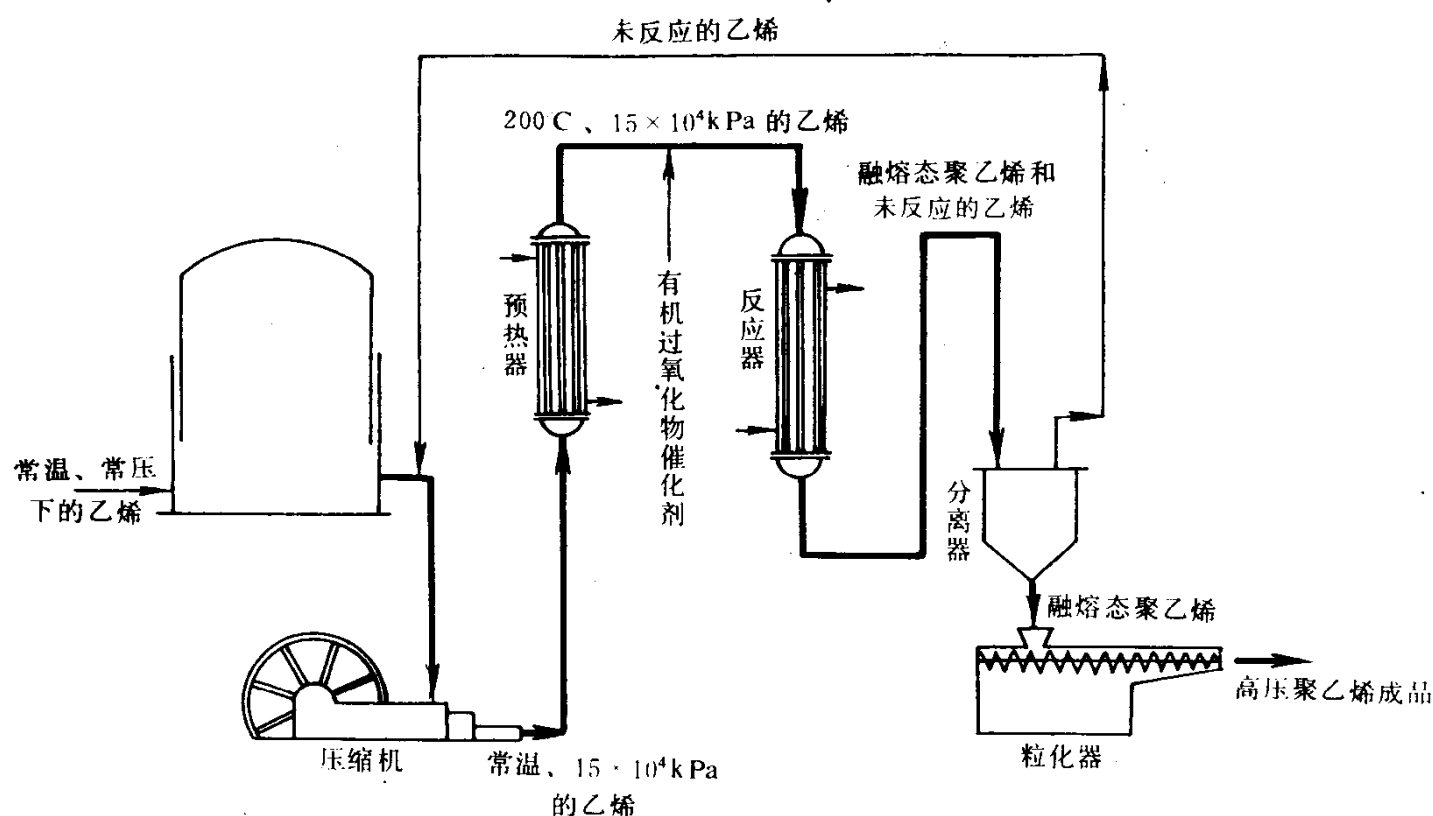


图 0-1 高压聚乙烯的生产流程示意图

在图 0-1 的生产过程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。虽然这样,这些物理步骤在整个化工生产中占极重要的地位,对生产过程的经济效益影响很大。

目前世界上有千千万万种用化工手段制成的产品,因此也就有千千万万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物理操作串联而成的,所以不必将每一化工生产过程都当作一种特殊的或独有的技术去研究,只研究组成生产过程的每一个单独操作即可。这些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。

过去,化工单元操作的应用主要局限于少数工业,诸如化学工业、石油化工、炼油、冶金、农产品加工、医药制造等工业中。今天,它已扩展应用于更多的新型生产技术领域,例如核工业、材料与空间技术、生物化工、油田气生产、环保等行业中。而且,随着新科学技术不断地涌出,化工单元操作与其它新兴学科之间的交叉联系也会越来越广泛。

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。

随着对单元操作的不断深入研究,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,且可用类似的数学公式表达,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,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。

研究单元操作必然要熟悉物料衡算、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各章中陆续介绍。在介绍两种衡算之前,先介绍有关物理量单位的知识。

一、物理量的单位

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。

由于历史、地区及各个学科的不同要求,对基本量及其单位的选择有所不同,因而产生了多种不同的单位制度。目前,国际上逐渐统一采用国际单位(SI);我国采用中华人民共和国法定计量单位(简称法定单位),它的内容详见本书末附录一。

由于旧文献和过期期刊中是多种单位制度并存,使用时要换算成目前采用的单位制度,所以读者应掌握物理量在不同单位制度间的换算。

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,例如重力加速度在法定单位制中的单位为 m/s^2 ,数值约为 9.81;在物理单位制(cgs制)中的单位为 cm/s^2 ,数值约为 981。二者包括单位在内的比值称为换算因子。例如重力加速度在 cgs 制与法定单位制间的换算因子为

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

任何单位换算因子都是两个相等量之比,所以包括单位在内的任何换算因子在本质上

都是纯数 1,任何物理量乘以或除以单位换算因子,都不会改变原量的大小。化工中常用的单位换算关系列于附录二中。

【例 0-1】 从已有资料中查出常温下苯的导热系数 λ 为 $0.0919\text{BTU}/(\text{ft}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{F})$ (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,即定出换算因子,用换算因子与各基本量相除或相乘,以消去原单位而引入新单位,即可得到要换算的数值。

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 $1\text{ }^\circ\text{C}=1.8\text{ }^\circ\text{F}$
 时间 $1\text{ h}=3600\text{ s}$

以上四个物理量在不同单位制中的换算因子分别为 $3.2808\text{ft}/\text{m}$ 、 $\text{J}/(9.486\times 10^{-4}\text{ BTU})$ 、 $1.8^\circ\text{F}/^\circ\text{C}$ 及 $\text{h}/(3600\text{s})$ 。

苯的导热系数为

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

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

\uparrow \uparrow \uparrow \uparrow \uparrow
 原有的数值 引入 m, 引入 J, 引入 $^\circ\text{C}$, 引入 s,
 与单位 消去 ft 消去 BTU 消去 $^\circ\text{F}$ 消去 h

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

为了使读者练习单位换算方法,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:

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

所以 $0.0919\text{BTU}/(\text{ft}\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{F}) = \frac{0.0919}{0.578} = 0.159\text{ W}/(\text{m}\cdot^\circ\text{C})$

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,例如牛顿第二运动定律式为

$$F = ma \tag{0-1}$$

式中 F ——作用在物体上的力;

m ——物体的质量;

a ——物体在作用力方向上的加速度。

式 0-1 中各物理量的单位可以任选一种单位制度,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,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。若计算过程中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所需的单位,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, BTU/(h·ft²·°F);

G ——空气的质量速度, lb/(ft²·h)(lb 为英制中质量单位磅的符号);

D ——管子外径, ft。

试对上式进行换算,将 α 的单位改为 W/(m²·°C)、 G 的单位改为 kg/(m²·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

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

$$1 \text{ kg} = 2.20462 \text{ lb}$$

$$1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$$

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

所以
$$1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}} = 1 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^2 \cdot \text{h}} \times \frac{1 \text{ kg}}{2.20462 \text{ lb}} \times \frac{(1 \text{ ft})^2}{(0.3048)^2} \times \frac{\text{h}}{3600 \text{ s}} = 0.001 356 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

令式中各物理量加上标“'”,以代表采用新单位时的物理量,新、旧单位的物理量间的关系为

对流传热系数
$$\alpha = \frac{\alpha'}{5.678} \quad (1)$$

质量速度
$$G = \frac{G'}{0.001 356} \quad (2)$$

直径
$$D = \frac{D'}{0.3048} \quad (3)$$

将以上关系代入原式,得

$$\frac{\alpha'}{5.678} = 0.026 \left(\frac{G'}{0.001 356} \right)^{0.6} \left(\frac{D'}{0.3048} \right)^{-0.4}$$

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

$$\Sigma G_1 = \Sigma G_0 \quad (0-3)$$

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。

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。

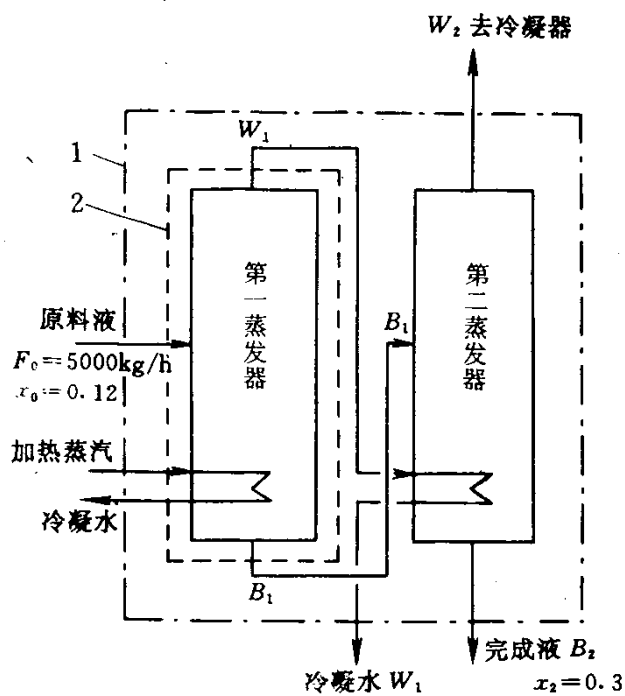
【例 0-3】 双效并流蒸发器是将待浓缩的原料液加入第一效中浓缩到某浓度后由底部排出送至第二效,再继续浓缩到指定的浓度,完成液由第二效底部排出。加热蒸汽也送入第一效,在其中放出热量后冷凝水排至器外。由第一效溶液中蒸出的蒸汽送至第二效作为加热蒸汽,冷凝水也排至器外。由第二效溶液中蒸出的蒸汽送至冷凝器中。

每小时将 5000kg 无机盐水溶液在双效并流蒸发器中从 12% (质量百分浓度,下同)浓缩到 30%。已知第二效比第一效多蒸出 5% 的水分。试求:

- (1) 每小时从第二效中取出完成液的量及各效蒸出的水分量;
- (2) 第一效排出溶液的浓度。

解:初学者进行物料衡算时应首先注意以下各点:

① 根据题意画出如本题附图所示的流程示意图,在图上用箭头标出物料的流向,并用数字和符号说明物料的数量和单位。



例 0-3 附图

图中 F_0 ——原料液的质量流量, kg/h;

B_1 ——第一效排出液流量, kg/h;

B_2 ——完成液流量, kg/h;

x ——溶液中无机盐的质量分率;

下标 0 表示原料液,下标 1、2 为蒸发器序号。

② 圈出衡算范围,如图中虚线 1 及虚线 2 所示。在工程计算中,可以根据具体情况以一个生产过程或一个设备,甚至设备某一局部作衡算范围。凡穿越所划范围的流股,其箭头向内的为输入物料,向外的为输出物料。没有穿越所划范围的流股不参与物料衡算。

③ 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,常以一批物料(即一个操作循环)为基准。基准选得不当,会使计算过程变得复杂。

基准选定后,参与衡算的各流股都按所选的基准进行计算。本题选 h 为基准。

(1) 每小时从第二效中取出完成液的量及各效蒸出的水分量 在图中虚线 1 范围内列盐及总物料衡算。这里要说明两点:一是第一效蒸发器的加热蒸汽与冷凝水都是穿越虚线 1 的两个流股,它们进、出虚线 1 各一次,只与系统有热量交换而没有质量交换,故不参与衡算;二是第一效蒸出的 W_1 kg/h 的蒸汽送至第二效蒸发器放出热量后排至外界,故 W_1 应参

与衡算。

盐的衡算 $F_0 x_0 = B_2 x_2$

总物料衡算 $F_0 = W_1 + W_2 + B_2$

将已知值代入以上二式

$$5000 \times 0.12 = 0.3 B_2 \quad (1)$$

$$5000 = W_1 + W_2 + B_2 \quad (2)$$

由题知 $W_2 = 1.05 W_1$ (3)

联立以上三式,得

完成液流量 $B_2 = 2000 \text{kg/h}$

第一效蒸出的水分 $W_1 = 1463 \text{kg/h}$

第二效蒸出的水分 $W_2 = 1537 \text{kg/h}$

(2)第一效排出溶液的浓度 在图中虚线 2 范围内列盐及总物料衡算:

盐 $F_0 x_0 = B_1 x_1$

总物料 $F_0 = W_1 + B_1$

将已知值代入上二式

$$5000 \times 0.12 = B_1 x_1$$

$$5000 = 1463 + B_1$$

联立以上二式解得

第一效排出溶液浓度 $x_1 = 0.1696 = 16.96\%$

【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% (体积分数,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,故可对气体做体积衡算。

选 s 为基准。

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 $d\theta$ 时间内,围绕全罐做有机气体的体积衡算,根据式 0-2 得

$$\Sigma G_1 = \Sigma G_0 + G_A$$

通风机送入有机气体的体积 $\Sigma G_1 = 0$

排出有机气体的体积 $\Sigma G_0 = 1.5 v d\theta$

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

所以 $0 = 1.5 v d\theta + 125.6 dv$

或 $d\theta = -83.73 \frac{dv}{v}$

在下述边界条件下积分上式,即

开始 $\theta = \theta_1 = 0$ $v = v_1 = 0.06$

終了 $\theta = \theta_2$ $v = v_2 = 0.001$

所以 $\theta = \int_0^{\theta_2} d\theta = -83.73 \int_{0.06}^{0.001} \frac{dv}{v} = -83.73 [\ln v]_{0.06}^{0.001} = 83.73 \ln \frac{0.06}{0.001} = 342.8 \text{ s}$

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的转换问题,而是总能量衡算,有时甚至可以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

$$\Sigma Q_1 = \Sigma Q_0 + Q_L \quad (0-4)$$

式中 ΣQ_1 ——随物料进入系统的总热量, kJ 或 kW;

ΣQ_0 ——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

$$\Sigma(wH)_1 = \Sigma(wH)_0 + Q_L \quad (0-5)$$

式中 w ——物料的质量, kg 或 kg/s;

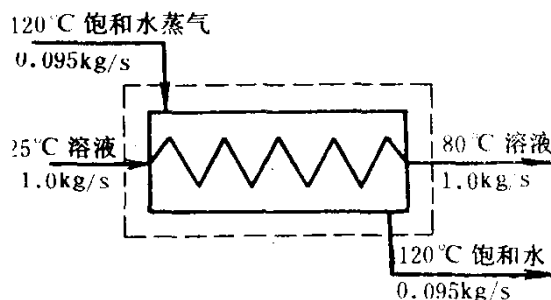
H ——物料的焓, kJ/kg。

式 0-4 及式 0-5 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,要以其它温度作基准,这时应加以说明。

【例 0-5】 在换热器里将平均比热容为 $3.56\text{kJ}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$ 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后排出。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:首先根据题意画出过程示意图(见本例附图)。



例 0-5 附图

选 s 作为基准。

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

随流股带入换热器的总热量 $\Sigma Q_1 = Q_1 + Q_2$, 其

中:

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

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

所以 $\Sigma Q_1 = 257.3 + 89 = 346.3 \text{ kW}$

随流股带出换热器的总热量 $\Sigma Q_0 = Q_3 + Q_4$, 其中:

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

溶液带出的热量 $Q_1 = 1 \times 3.58(80 - 0) = 284.8 \text{ kW}$

所以 $\Sigma Q_0 = 47.8 + 284.8 = 332.6 \text{ kW}$

将以上诸值代入式 0-4 中:

$$346.3 = 332.6 + Q_L$$

热损失 $Q_L = 13.7 \text{ kW}$

$$\text{热损失百分数} = \frac{Q_L}{Q_1 - Q_3} = \frac{13.7}{257.3 - 47.8} = 0.0654 = 6.54\%$$

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 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ 。[答: $K = 50 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$]

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。[答: $\rho = 101.9 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$]

3. 甲烷的饱和蒸气压与温度的关系符合下面经验公式:

$$\lg p = 6.421 - \frac{352}{t + 261}$$

式中 p ——饱和蒸气压, mmHg;

t ——温度, $^\circ\text{C}$ 。

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。[答: $\lg p = 8.546 + \frac{352}{T - 12}$]

4. 将 A, B, C, D 四种组分各为 0.25 (摩尔分率, 下同) 的某混合溶液, 以 $1000 \text{ kmol}/\text{h}$ 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。[答: 塔顶产品流量及其组成分别为: $D = 500 \text{ kg}/\text{h}$, $x_{DA} = 0.5$, $x_{DB} = 0.48$, $x_{DC} = 0.02$ 。塔底产品流量及其组成分别为: $W = 500 \text{ kg}/\text{h}$, $x_{WB} = 0.02$, $x_{WC} = 0.48$ 及 $x_{WD} = 0.5$]

5. 将密度为 $810 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的油与密度为 $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ 的水充分混合成为均匀的乳浊液, 测得乳浊液的密度为 $950 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。试求乳浊液中油的质量分率。水和油混合后体积无变化。(答: 油的质量分率 = 0.2244)

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

热损失可以忽略不计。

数据:

$95 \text{ }^\circ\text{C}$ 过热氨气的焓, kJ/kg 1647

$30 \text{ }^\circ\text{C}$ 饱和液氨的焓, kJ/kg 323

$2 \text{ }^\circ\text{C}$ 盐水的焓, kJ/kg 6.8

$10 \text{ }^\circ\text{C}$ 盐水的焓, kJ/kg 34

[答: $9735 \text{ kg}/\text{h}$]

(习题答案仅供参考。因设计题无唯一答案, 故设计题答案从略。)

第一章 流体流动

本章符号说明

英文字母

a ——加速度, m/s^2 ;
 A ——截面积, m^2 ;
 C ——系数;
 C_o, C_v ——流量系数;
 d ——管道直径, m ;
 d_e ——当量直径, m ;
 d_o ——孔径, m ;
 e ——涡流粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$;
 E ——1kg 流体所具有的总机械能, J/kg ;
 Eu ——欧拉准数;
 f ——范宁摩擦系数;
 F ——流体的内摩擦力, N ;
 g ——重力加速度, m/s^2 ;
 G ——质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$;
 h ——高度, m ;
 h_f ——1kg 流体流动时为克服流动阻力而损失的能量, 简称能量损失, J/kg ;
 h_f' ——局部能量损失, J/kg ;
 H_e ——输送设备对 1N 流体提供的有效压头, m ;
 H_f ——压头损失, m ;
 K ——系数;
 l ——长度, m ;
 l_e ——当量长度, m ;
 m ——质量, kg ;
 M ——分子量;
 N ——输送设备的轴功率, kW ;
 N_e ——输送设备的有效功率, kW ;

p ——压强, Pa ;
 Δp_f —— 1m^3 流体流动时损失的机械能, 或因克服流动阻力而引起的压强降, Pa ;
 P ——压力, N ;
 r ——半径, m ;
 $\dot{\gamma}$ ——剪切速率, s^{-1} ;
 r_H ——水力半径, m ;
 R ——气体常数, $\text{J}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$;
 R ——液柱压差计读数, 或管道半径, m ;
 Re ——雷诺准数;
 S ——两流体层间的接触面积, m^2 ;
 T ——热力学温度, K ;
 u ——流速, m/s ;
 u' ——脉动速度, m/s ;
 \bar{u} ——时均速度, m/s ;
 u_{\max} ——流动截面上的最大速度, m/s ;
 u_r ——流动截面上某点的局部速度, m/s ;
 U ——1kg 流体的内能, J/kg ;
 v ——比容, m^3/kg ;
 V ——体积, m^3 ;
 V_h ——体积流量, m^3/h ;
 V_s ——体积流量, m^3/s ;
 w_s ——质量流量, kg/s ;
 W_e ——1kg 流体通过输送设备获得的能量, 或输送设备对 1kg 流体所作的有效功, J/kg ;
 x_o ——稳定段长度, m ;
 x_o ——体积分率;

x_{cc} ——质量分率;
 y ——气相摩尔分率;
 Z ——1N 流体具有的位能, m

希腊字母

δ ——流动边界层厚度, m;
 δ_b ——滞流内层厚度, m;
 ϵ ——绝对粗糙度, mm;
 ϵ_k ——体积膨胀系数;
 ζ ——阻力系数;
 η ——效率;

η_0 ——刚性系数; Pa·s;
 κ ——绝热指数;
 μ ——粘度, Pa·s 或 cP;
 μ_a ——表观粘度, Pa·s;
 ν ——运动粘度, m²/s 或 cSt;
 Π ——润湿周边, m;
 ρ ——密度, kg/m³;
 τ ——内摩擦应力, Pa;
 τ_0 ——屈服应力, Pa。

液体和气体统称为流体。流体的特征是具有流动性, 即其抗剪和抗张的能力很小; 无固定形状, 随容器的形状而变化; 在外力作用下其内部发生相对运动。

化工生产中所处理的原料及产品, 大多都是流体。制造产品时, 往往按照生产工艺的要求把原料依次输送到各种设备内, 进行化学反应或物理变化; 制成的产品又常需要输送到贮罐内贮存。过程进行得好坏, 例如动力的消耗及设备的投资, 与流体的流动状态密切相关。

在化工生产中, 有以下几个主要方面经常要应用流体流动的基本原理及其流动规律。

1) 流体的输送 通常设备之间是用管道连接的, 欲想把流体按规定的条件, 从一个设备送到另一个设备, 就需要选用适宜的流动速度, 以确定输送管路的直径。在流体的输送过程中, 常常要采用输送设备, 因此就需要计算流体在流动过程中应加入的外功, 为选用输送设备提供依据。这些都要应用流体流动规律的数学表达式进行计算。

2) 压强、流速和流量的测量 为了了解和控制生产过程, 需要对管路或设备内的压强、流速及流量等一系列参数进行测定, 以便合理地选用和安装测量仪表, 而这些测量仪表的操作原理又多以流体的静止或流动规律为依据。

3) 为强化设备提供适宜的流动条件 化工生产的传热、传质等过程, 都是在流体流动的情况下进行的, 设备的操作效率与流体流动状况有密切关系。因此, 研究流体流动对寻找设备的强化途径具有重要意义。

本章着重讨论流体流动过程的基本原理及流体在管内的流动规律, 并运用这些原理与规律去分析和计算流体的输送问题。

在研究流体流动时, 常将流体视为由无数分子集团所组成的连续介质。每个分子集团称为质点, 其大小与容器或管路相比是微不足道的。质点在流体内部一个紧挨一个, 它们之间没有任何空隙, 即可认为流体充满其所占据的空间。把流体视为连续介质, 其目的是为了摆脱复杂的分子运动, 从宏观的角度来研究流体的流动规律。但是, 并不是在任何情况下都可以把流体视为连续介质, 如高度真空下的气体就不能再视为连续介质了。

第一节 流体静力学基本方程式

流体静力学是研究流体在外力作用下达到平衡的规律。在工程实际中, 流体的平衡规律应用很广, 如流体在设备或管道内压强的变化与测量、液体在贮罐内液位的测量、设备的液封等均以此一规律为依据。