

化学工程基础

林爱光 编

清华大学出版社

化学工程基础

林爱光 编

清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

化 学 工 程 基 础

林 爱 光 编

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书是清华大学一类课“化工原理”的教材之一,在清华大学化学系、生物系、材料系、自动化系等使用多年。

全书分 6 章,内容包括流体流动、流体输送机械、流体流过颗粒和颗粒层的流动、传热、精馏、吸收、气液传质设备和化学反应工程。为了便于学生理解和掌握课程内容,书中列举了不少典型的例题和习题。书末附有做化工习题时常要用的物性参数图表及管子、泵、通风机的部分规格。

本书可作为高等院校工科有关专业及理科化学和应用化学专业的“化工基础”课程的教材,亦可供上述专业从事设计、开发和运行的科技人员参考。

本书由雷良恒教授审阅。

图书在版编目(CIP)数据

化学工程基础/林爱光编. —北京:清华大学出版社,1999

ISBN 7-302-03268-8

I. 化… II. 林… III. 化学工程-基础理论 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1998)第 33084 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者:北京清华园胶印厂

发行者:新华书店总店北京发行所

开 本:781×1092 1/16 印张:24.75 字数:584 千字

版 次:1999 年 2 月第 1 版 1999 年 2 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-03268-8/O·207

印 数:0001~4000

定 价:24.00 元

绪 论

1. 本课程的内容和教学目的

化学工程是研究改变物料的化学组成和物理性质的工程技术学科。它研究的内容不但包括具有化学变化的过程,而且还包括分离混合物为较纯净的不同组分的过程,以及改变物料的物理状态和性质的各种过程。因此,它需要高等数学、物理学、物理化学等课程为基础,研究化学、石油、冶金、轻工、生物、食品、环保等工业中具有共同特点的单元操作和化学反应工程等,以及有关的流体力学,热量传递和物质传递的原理,热力学和化学动力学等,以求得工业生产上的优质、高效、低能耗,并防止环境污染。

作为一门独立的学科,化学工程始于 20 世纪初。第一本系统阐述单元操作原理和计算方法的著作是 1923 年 W. H. Walker, W. K. Lewis 和 W. H. McAdams 合著的《Principles of Chemical Engineering》。

许多化工生产需要进行 1 个或几个化学反应,而化学反应必须在一定的条件下才能进行,并取得较高的产率,这些条件包括压强、温度、反应物料的配比等。另外,化学反应前后的原料和产品的提纯,副产物的利用以及反应热的排除(吸热反应则要供热)等等,都需要诸如流体输送和压缩、蒸馏、吸收、热交换等一系列单元操作来完成。

从生产某种产品的意义上说,化学反应过程是生产过程的核心,但实际上,为化学反应过程创造适宜条件和将反应物分离制成纯净产品的单元操作,在生产过程中占据重要的地位,它们在工厂的设备投资和操作费用中常常占主要的比例,决定了整个生产的经济效益。

随着化工生产的发展,化工单元操作不断发展,目前化工生产中常用的单元操作已达 20 余种。若按照操作的主要物理特征和基本原理,单元操作大致可分为以下 6 大类:

(1) 流体动力过程

研究流体流动及流体和与之接触的固体间发生相对运动时的基本规律,以及主要受这些基本规律支配的若干单元操作,如流体输送、沉降、流态化等。

(2) 传热过程

研究传热的基本规律,以及主要受这些基本规律支配的若干单元操作,如热交换、蒸发等。

(3) 传质过程

研究物质通过相界面的迁移过程的基本规律,以及主要受这些基本规律支配的若干

单元操作,如气体的吸收、液体的蒸馏等。

(4) 热质传递过程

质量传递和热量传递同时进行的过程,如干燥、结晶、增湿与减湿等。有时把这类单元操作划入传质与传热过程。

(5) 热力过程

以热力学为主要理论基础的过程,如压缩、冷冻等。

(6) 机械过程

以机械力学为主要理论基础的过程,如固体物料的粉碎、分级等。

本课程主要讨论前3类中最常用的单元操作:流体输送、传热、吸收、精馏;讨论各类单元操作的共同理论基础,各个单元操作的原理,典型设备的结构与操作特性,过程和设备的设计计算,设备的改进与强化以及分析研究问题的方法。

本课程还讨论化学反应工程,通过基本反应器、气固相催化反应器、反应器内物料停留时间分布和流动模型来阐明化学反应工程学的基本原理。

当今技术创新的一个重要特征是交叉领域、边缘学科的发展,带动了传统技术的发展。为适应当今科技飞速发展和国民经济发展的需要,学生应具有综合性、跨学科的广博基础。化学工程是一门涉及广泛的知识领域,既有系统的理论,又有很强的工程特点的课程,化学系和生物科学与技术系的学生,他们中的不少人将从事与国民经济有关的技术开发工作,他们要能与这些领域的工程技术人员合作或互相渗透,只有这样才能把科研成果尽快地转化为生产力;而自动化系的学生要搞好化工自动化、过程优化,也必须掌握化学工程的基本理论。

本课程的教学目的是对学生进行化学工程的教育,进一步提高学生在今后工作中分析问题和解决问题的能力。

2. 基本概念与方法

(1) 过程的平衡与速率

平衡与速率是分析单元操作过程的两个基本方面。

过程的平衡问题说明过程进行的方向和所能达到的极限。例如传热过程,只要空间两处温度不同,即温度不平衡,热量就会从高温处向低温处传递,直到两处温度相同为止,此时过程达到平衡,两处便没有热量传递。化工过程的平衡是化工热力学研究的问题,所以化工热力学是化学工程的一个重要基础。

过程的速率是指过程进行的快慢,可以近似地用推动力除以阻力表示。在实际工作中,一个过程以多快的速率由不平衡向平衡移动,是极为重要的问题。如果一个过程以极慢的速率进行,那么生产过程所需的设备将极为庞大。

一个过程的速率与推动力成正比,而与过程的阻力成反比,可表示为:

$$\text{过程的速率} = \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}}$$

推动力的性质决定于过程的内容。如传热过程的推动力是温度差。过程阻力是各种因素

• VII •

对过程速率影响的总的体现。具体分析各种化工单元操作过程的机理可知,过程的速率取决于过程的机理。多数重要单元操作过程与动量传递、热量传递或质量传递有关,所以传递过程原理是化学工程的另一个重要基础。

(2) 3 种衡算

质量衡算、能量衡算与动量衡算是化学工程课程中分析问题的基本方法。质量衡算的依据是质量守恒定律,能量衡算的依据是能量守恒和热力学第一定律,动量衡算的依据则是动量守恒定律即牛顿第二运动定律。下面只就总质量衡算与总能量衡算中的热量衡算加以说明。

1) 质量衡算

质量衡算常称物料衡算,它反映生产过程中各种物料,如原料、产物、副产物等之间的量的关系,是分析生产过程与每个设备的操作情况和进行过程与设计的基础。进行物料衡算时首先要划定衡算的系统,其次要确定衡算的对象与衡算的基准。对于划定的衡算系统(例如 1 个设备或若干个设备组成的系统),根据质量守恒定律,一定时间 t 内输入系统的物料质量等于从系统输出的物料质量和系统中积累的物料质量:

$$\sum F = \sum D + A \quad (0-1)$$

式中: $\sum F$ —— t 时间内输入物料质量的总和;

$\sum D$ —— t 时间内输出物料质量的总和;

A —— t 时间内系统中积累的物料质量的总和。

式(0-1)是以总物料为衡算对象的衡算式。物料衡算也可以某种元素为衡算对象。对于没有发生化学反应的系统,也可以某种物质为衡算对象,得出与式(0-1)相同的衡算式。

对于稳态操作过程,系统中各处的所有操作参数,如温度、压强、密度等不随时间而变,系统中无物料的积累,即 A 等于零,故式(0-1)变为:

$$\sum F = \sum D \quad (0-2)$$

即输入的物料质量等于输出的物料质量。

例 1 在生产 KNO_3 的过程中,质量分数为 0.2 的纯 KNO_3 水溶液以 1000 kg/h 的流量送入蒸发器,在 422 K 下蒸发出部分水,得到 50% 的浓 KNO_3 溶液,然后送入冷却结晶器,在 311 K 下结晶,得到含水 0.04 的 KNO_3 结晶和含 KNO_3 0.375 的饱和溶液。前者作为产品取出,后者循环回到蒸发器。过程为稳态操作,试计算 KNO_3 结晶产品量、水蒸发量和循环的饱和溶液量。

解: 首先根据题意画出过程的物料流程图如图 0-1 所示。

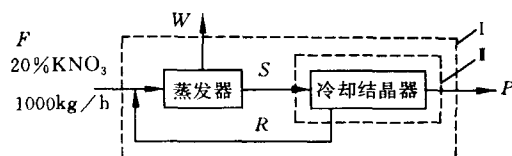


图 0-1 例 1 附图

① 求 KNO_3 结晶产品量 P 和蒸发水量 W

取包括蒸发器和冷却结晶器的整个过程为系统(虚线框 I), 取 1h 为时间衡算基准, 分别以总物料和 KNO_3 为衡算对象, 因系稳态操作, 故可得

$$F = W + P \quad (a)$$

$$F \times 0.2 = W \times 0 + P \times 0.96 \quad (b)$$

联立解(a), (b)两式可得

$$P = 208.3 \text{ kg/h}$$

$$W = 791.7 \text{ kg/h}$$

② 求循环的饱和溶液量 R

设进入冷却结晶器的质量分数为 0.50 的 KNO_3 溶液量为 $S \text{ kg/h}$ 。取冷却结晶器为系统(系统 II), 衡算基准为 1h, 以总物料为衡算对象, 做总物料的衡算, 得:

$$S = P + R \quad (c)$$

以 KNO_3 为衡算对象, 作 KNO_3 的衡算, 可得:

$$S \times 0.50 = 208.3 \times 0.96 + R \times 0.375 \quad (d)$$

联立解(c), (d)两式可得:

$$R = 766.5 \text{ kg/h}$$

2) 热量衡算

热量衡算是能量衡算的一种形式, 在很多化工过程中主要涉及物料温度和热量的变化, 所以热量衡算是化工计算中最常用的能量衡算。热量衡算的基础是能量守恒定律。

热量衡算不仅要划定衡算系统和选取基准, 而且除选取时间基准外, 还必须考虑物态与温度基准, 因为反映物料所含热量的焓值是温度和物态的函数。通常以 273 K 下物质的液态为基准。热量除了通过物料输入和输出外, 还可以通过热量传递从系统输入或输出。

根据能量守恒定律, 热量衡算式一般为:

$$\sum H_F + Q = \sum H_P + Q_A \quad (0-3)$$

式中: $\sum H_F$ ——单位时间内输入系统的焓值的总和, 即物料带入的热量总和;

$\sum H_P$ ——单位时间内从系统输出的物料焓值的总和, 即物料带出的热量总和;

Q ——单位时间内从环境传入(或传给环境)的热量;

Q_A ——单位时间内系统中热量的积累。

对于稳态过程, 系统内无热量积累, Q_A 等于零, 则

$$\sum H_F + Q = \sum H_P \quad (0-4)$$

例 2 一罐内盛有 20 t 重油, 温度为 20℃。用外循环加热法进行加热(见图 0-2), 重油循环量 W 为 8 t/h。循环的重油在换热器中用水蒸气加热, 其在换热器出口温度恒为 $t_3 = 100^\circ\text{C}$, 罐内油均匀混合。问罐内油从 20℃加热到 $t_2 = 80^\circ\text{C}$ 需要多少时间。假设罐与外界绝热。

解: 罐内油的温度随时间变化, 所以是一非稳态的加热过程, 由于罐内油均匀混合, 从罐内排出的油温与罐内油的温度相同, 设在某一时刻为 $t^\circ\text{C}$ 。

以罐为系统进行热量衡算, 以 $d\tau$ 为时间基准, 以 0℃的油为温度物态基准, 则在 $d\tau$ 时

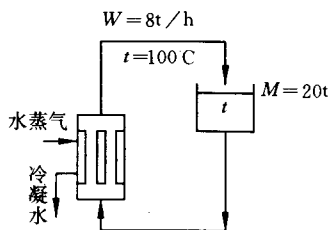


图 0-2 例 2 附图

间内进出系统及系统内积累的热量分别为

$$\text{输入系统的重油的焓} = Wc_p \times 100 \times d\tau$$

$$\text{从系统输出的重油的焓} = Wc_p t d\tau$$

$$\text{系统内积累的焓} = Mc_p dt$$

式中 c_p 为重油的平均质量定压热容。

根据式(0-1)可得:

$$Wc_p \times 100 \times d\tau = Wc_p t d\tau + Mc_p dt$$

整理上式可得:

$$d\tau = \frac{M}{W} \frac{dt}{100 - t}$$

按照下列条件进行积分:

开始时, $\tau = 0, t_1 = 20^\circ\text{C}$

终了时, $\tau = \tau, t_2 = 80^\circ\text{C}$

$$\int_0^\tau d\tau = \frac{20 \times 10^3}{80 \times 10^3} \int_{20}^{80} \frac{dt}{100 - t}$$

所以

$$\tau = \frac{20}{8} \ln \frac{100 - 20}{100 - 80} = 3.47(\text{h})$$

3. 单位制与单位换算

化学工程面向大规模生产,又和小型科学实验密切相连,要用到各种物理量如长度、面积、密度、粘度、导热系数、温度、压强等。尽管这些物理量种类繁多,但都可用几个彼此独立的基本量来表示,其大小则用各种单位来表示。常用的基本量有长度、质量、时间和温度等。基本量以外的其他物理量,可通过物理量之间的规律(定义或定律)从基本量导出,称为导出量,它们的单位称为导出单位。

在科学技术与生产发展的过程中,由于历史和地区等原因形成了不同的单位制,主要有两类:绝对单位制和重力单位制(工程单位制),这两类单位制又有英制与公制之分。

由于各国使用的单位制不同给国际间的科学技术交流与贸易往来带来不便,1960年10月第11届国际计量大会制订了一种新的单位制,称为国际单位制(The International System of Units),符号为SI。目前国际单位制已为世界各国广泛采用。以国际单位制为基础,国务院制订的中华人民共和国法定计量单位现已正式实施,所以本课程采用法定计

量单位。

国际单位制采用了 7 个基本单位,如表 0.1 所示。

在这 7 个基本单位中,化学工程中经常用到的是 m,kg,s,K,mol 这 5 个基本单位。

表 0.1 SI 基本单位

量的名称	量的符号	单位名称	单位符号
长度	$l(L)$	米	m
质量	m	千克(公斤)	kg
时间	t	秒	s
电流	I	安[培]	A
热力学温度	T	开[尔文]	K
发光强度	$I(Iv)$	坎[德拉]	cd
物质的量	n	摩[尔]	mol

此外,化学工程中还常用到一些国际制导出单位,如表 0.2 所示。表 0.2 中有几个导出单位具有专有名称,如力的单位称为牛[顿],符号为 N,它是使 1kg 质量的物体产生 1m/s^2 加速度的力。压强的单位称为帕[斯卡],符号为 Pa,就是 1m^2 面积上受力 1N,即 N/m^2 ,用国际制基本单位表示为 $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$ 。

表 0.2 化学工程学中常用的一些国际单位制导出单位

量的名称	单位符号	单位名称	单位符号	用其他符号表示
面积	m^2			
体积	m^3			
速度	m/s			
加速度	m/s^2			
比容	m^3/kg			
密度	kg/m^3			
浓度	mol/m^3			
力	$\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$	牛[顿]	N	
压强,应力	$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$	帕[斯卡]	Pa	N/m^2
动量	$\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}$			
能量,功,热	$\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$	焦[耳]	J	$\text{N} \cdot \text{m}$
功率	$\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^3$	瓦[特]	W	J/s
表面张力	kg/s^2			N/m
扩散系数	m^2/s			
动力粘度	$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$			$\text{Pa} \cdot \text{s}$ 或 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$
比热	$\text{m}^2/(\text{s}^2 \cdot \text{K})$			$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
导热系数	$\text{kgm}/\text{s}^3 \cdot \text{K}$			$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
传热系数	$\text{kg}/(\text{s}^3 \cdot \text{K})$			$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
传质系数 (浓度推动力)	m/s 或 $\text{kmol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})(\text{kmol}/\text{m}^3)$			

虽然目前全世界已普遍采用国际单位制,但是,由于长期使用习惯和生产设备与科学

仪器的延续使用,特别是以前出版的科技书籍、期刊与手册中均使用旧的单位制,因此,我们必须了解各种单位制,并能正确掌握不同单位制的对应单位之间的换算。同一物理量用不同单位制度量时的数值比称为换算因子,例如 1N 的力用工程单位制度量时为 0.102 kgf,所以 N 与 kgf 的换算因子为 0.102。化学工程中各种单位制的单位间的换算因子可以在本书附录 2 中查得。但是,我们还应当学会如何根据几个基本关系和定义自行得出换算因子。

例 3 求 1atm 等于多少 Pa? (1) 直接查表; (2) 若无表可查,可由 $1\text{atm} = 1.033 \text{ kgf/cm}^2$ 计算。

解: (1) 查附录 2 的表,得:

$$1\text{atm} = 101.3 \text{ kPa}$$

(2) 由于 $1\text{kgf} = 9.81 \text{ N}$, $1\text{cm} = 0.01 \text{ m}$, 所以

$$\begin{aligned} 1\text{kgf/cm}^2 &= 9.81 \text{ N} / (0.01)^2 \text{ m}^2 \\ &= 98100 \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

因 Pa 就是物理量的 SI 制基本单位 N/m^2 的又一写法, 所以

$$1 \text{ kgf/cm}^2 = 98100 \text{ Pa}$$

于是

$$\begin{aligned} 1\text{atm} &= 1.033 \text{ kgf/cm}^2 \\ &= 1.033 \times 98100 \\ &= 101300 \text{ Pa} \quad (\text{或 } 101.3 \text{ kPa}) \end{aligned}$$

目 录

绪 论	VII
1 流体的流动与输送	1
1.1 概述	1
1.2 流体静力学方程	1
1.2.1 流体的性质	1
1.2.2 流体的压强	3
1.2.3 流体静力学基本方程	4
1.2.4 流体静力学方程的应用	6
1.3 流体流动的基本方程	7
1.3.1 流量与流速	8
1.3.2 粘度	10
1.3.3 流体流动的类型及其判断	11
1.3.4 流动边界层	13
1.3.5 流体稳定流动时的连续性方程	15
1.3.6 流体流动过程的能量守恒和转化(柏努利方程式)	16
1.4 流速与流量的测量	22
1.4.1 测速管	22
1.4.2 孔板流量计	23
1.4.3 转子流量计	24
1.5 流体流动时的阻力	27
1.5.1 管路的沿程阻力	27
1.5.2 非圆形管内的流体阻力	35
1.5.3 局部阻力	36
1.5.4 乌氏粘度计测粘度的原理	40
1.6 管路计算	42
1.6.1 管路计算的类型和基本方法	42
1.6.2 简单管路的计算	43
1.6.3 复杂管路的计算	45
1.7 两相流动	46

1.7.1	球形颗粒在流体中运动时的阻力	46
1.7.2	曳力系数与雷诺数的关系	47
1.7.3	重力沉降	48
1.7.4	固体流态化	50
1.8	流体输送设备	58
1.8.1	离心泵	59
1.8.2	离心压缩机	68
1.8.3	往复压缩机和往复泵	69
1.8.4	其它常用流体输送设备	76
	习题	78
	本章符号说明	84
2	传热过程和传热设备	87
2.1	概述	87
2.1.1	化工生产中的传热	87
2.1.2	热传递的基本方式	88
2.1.3	热量衡算	88
2.2	热传导	89
2.2.1	基本概念与傅里叶定律	89
2.2.2	热导率	90
2.2.3	通过平壁的稳态热传导	93
2.2.4	通过圆筒壁的稳态热传导	96
2.3	对流传热	99
2.3.1	基本概念与牛顿冷却定律	99
2.3.2	用因次分析法求无相变时流体的给热系数 α	102
2.3.3	管内强制对流时的给热系数	103
2.3.4	大空间自然对流传热	106
2.3.5	保温层的临界直径	107
2.4	辐射传热	108
2.4.1	基本概念与定律	108
2.4.2	物体间的辐射传热	110
2.5	热交换过程的传热计算	113
2.5.1	热交换器的传热机理和传热基本方程式	113
2.5.2	总传热系数	115
2.5.3	传热的平均温度差	117
2.5.4	传热面积的计算	120
2.5.5	热交换设备	122
2.5.6	热交换过程的强化途径	127
	习题	129

本章符号说明.....	133
3 精馏	135
3.1 概述	135
3.2 双组分溶液的气液相平衡	135
3.2.1 气液平衡时的自由度.....	136
3.2.2 气相为理想气体、液相为理想溶液时的气液平衡	136
3.2.3 液相为非理想溶液时的气液相平衡简介.....	142
3.3 平衡蒸馏和简单蒸馏	143
3.3.1 平衡蒸馏(闪蒸).....	143
3.3.2 简单蒸馏.....	146
3.4 双组分连续精馏的分析和计算	149
3.4.1 精馏原理.....	149
3.4.2 精馏过程的物料衡算.....	152
3.4.3 精馏操作线方程.....	154
3.4.4 理论塔板和理论塔板数.....	160
3.4.5 回流比的影响和选择.....	165
3.4.6 理论塔板数的简捷算法.....	169
3.4.7 实际塔板数与塔板效率.....	171
3.4.8 连续精馏装置的热量衡算.....	173
3.5 间歇精馏	175
3.5.1 回流比恒定的间歇精馏.....	176
3.5.2 馏出液组成恒定的间歇精馏.....	179
3.6 两组分精馏的操作型计算与操作	180
3.6.1 两组分精馏的操作型计算.....	180
3.6.2 连续精馏操作条件的优化.....	183
3.7 特殊精馏	187
3.7.1 恒沸精馏.....	187
3.7.2 萃取精馏.....	188
习题.....	189
本章符号说明.....	195
4 吸收	198
4.1 概述	198
4.2 气液相平衡	199
4.2.1 气液平衡关系(溶解度曲线).....	199
4.2.2 亨利定律.....	201
4.2.3 相平衡与吸收过程的关系.....	203
4.3 传质机理和传质速率	204
4.3.1 分子扩散.....	205

4.3.2	对流扩散	210
4.4	两相间的传质	212
4.4.1	双膜理论	212
4.4.2	吸收传质速率方程	213
4.4.3	其它传质理论简介	219
4.5	吸收塔的设计及计算	220
4.5.1	吸收塔的物料衡算及操作线方程	221
4.5.2	吸收剂的选择和用量	222
4.5.3	塔径的确定	225
4.5.4	吸收塔填料层高度的计算	226
4.5.5	理论级数与塔高的计算	234
4.5.6	吸收过程的操作型计算	236
4.5.7	解吸	238
4.6	多组分吸收与化学吸收	241
4.6.1	多组分吸收	241
4.6.2	化学吸收	242
	习题	243
	本章符号说明	247
5	气液传质设备	250
5.1	填料塔	250
5.1.1	填料塔结构	251
5.1.2	填料	251
5.1.3	填料塔的附件	255
5.1.4	填料塔的流体力学特性	257
5.1.5	填料塔的传质与塔高的计算	261
5.2	板式塔	261
5.2.1	板式塔结构	261
5.2.2	常用塔板类型	261
5.2.3	板式塔主要工艺尺寸的计算	265
	习题	274
	本章符号说明	275
6	化学反应工程学	277
6.1	概述	277
6.1.1	化学反应器的作用	277
6.1.2	化学反应工程学的研究对象与方法	277
6.2	基本反应器	278
6.2.1	化学反应器的类型	278
6.2.2	几种典型的基本反应器	279

6.3	物料在反应器内的流动模型	282
6.3.1	全混流模型	282
6.3.2	平推流模型	282
6.3.3	轴向返混模型	282
6.3.4	多釜串联流动模型	283
6.4	均相反应器的计算	283
6.4.1	间歇釜式反应器	284
6.4.2	连续操作的管式反应器	287
6.4.3	连续操作的搅拌釜	290
6.4.4	多釜串联反应器	291
6.5	理想均相反应器的优化选择	295
6.5.1	以生产强度为优化目标选择反应器	296
6.5.2	以产率和选择性为优化目标选择反应器	298
6.6	物料停留时间分布和流动模型	302
6.6.1	物料返混和停留时间分布	302
6.6.2	停留时间分布的测定方法	308
6.6.3	理想反应器的停留时间分布	312
6.6.4	停留时间分布在非理想流动均相反应器中的应用和计算	317
6.7	非理想流动反应器内的流动模型——扩散模型	321
6.7.1	扩散模型	321
6.7.2	扩散模型参数的确定	323
6.8	气固相催化反应器	325
6.8.1	固定床催化反应器	326
6.8.2	流化床催化反应器	339
	习题	344
	本章符号说明	347
	参考文献	349
	附录	350
	附录1 化工常用法定计量单位	350
	附录2 常用单位的换算	350
	附录3 某些气体的重要物理性质	353
	附录4 某些液体的重要物理性质	354
	附录5 干空气的物理性质	357
	附录6 水的物理性质	358
	附录7 饱和水蒸气表(按温度排列)	359
	附录8 饱和水蒸气表(按压强排列)	360
	附录9 一些有机物的蒸气压	362
	附录10 常用固体材料的密度和比热容	363

附录 11	某些固体材料的导热系数	364
附录 12	某些液体的导热系数	365
附录 13	某些气体和蒸气的导热系数	366
附录 14	管内流体常用流速范围	367
附录 15	列管换热器的传热系数的参考值	368
附录 16	壁面污垢的热阻	369
附录 17	管子规格	370
附录 18	泵规格	372
附录 19	4-72-11 型离心通风机规格	378
附录 20	管壁的绝对粗糙度	378
附录 21	泰勒标准筛的规格	379

1 流体的流动与输送

1.1 概 述

化工生产中所处理的原料、半成品及产品大多数是流体。按照生产工艺要求,往往要把原料和半成品输送到各种设备中去进行化学反应或物理变化,制成的半成品或产品又常常要输送到下一工序或储罐内。各种传热和传质过程都是在流体流动的情形下进行的,强化设备的传热和传质过程往往要首先研究流体流动的条件及规律。因此,动力的消耗,过程进行的好坏及设备的投资都与流体的流动状态有关。

气态或液态下的物料称为流体。流体的特性之一是无固定形状,其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。流体的另一特性是易流动性,即其抗剪和扩张能力很小。

气体和液体的主要区别是可压缩性和密度,气体可压缩,液体可看成不可压缩;随着压强或温度的变化,气体的密度随之变化,而液体的密度变化不明显。

从工程实际出发研究流体流动,主要是研究流体的宏观运动规律。因此,我们一般把流体视为无数微团(或质点)组成的、彼此无间隙的、完全充满所占空间的连续介质。

本章主要讨论流体流动过程的基本原理和流体在管内流动的规律以及利用这些原理和规律解决实际问题。本章还结合化工生产的具体特点,分别就液体输送机械和气体输送机械进行讨论,介绍各类流体输送机械的工作原理、基本结构、性能及操作,各类机械的选择、功率消耗的计算、在管路中位置的确定等。

1.2 流体静力学方程

1.2.1 流体的性质

流动中的流体所受的作用力分为体积力和表面力两种。所谓体积力是作用于流体的每个质点上的力,它与流体的质量成正比。表面力则是作用于流体质点表面的力,它的大小是与流体质点表面积成正比。垂直于表面的力称为压力,平行于表面的力称为剪力。

流体静力学是研究流体在静止状况下所受各种力之间的关系,这些力的大小与流体的密度等性质有关。

密度——单位体积流体所具有的质量称为流体的密度,通常用 ρ 来表示: