

TRANSPORT PROCESSES
AND UNIT OPERATIONS

传递过程 与单元操作

(上册)

陈维柟 主 编

浙江大学出版社

TRANSPORT
PROCESSES
AND UNIT
OPERATIONS

传递过程与单元操作

(上 册)

陈维柵 主编

内容提要

本书是在浙江大学化工系近年来使用的“传递过程与单元操作”讲义基础上修改补充写成的。全书分上、下两册,上册包括绪论、流体流动、流体输送机械、流体通过颗粒层的流动、颗粒与流体之间的相对运动、热量传递、蒸发等章;下册包括质量传递、吸收、蒸馏、气液传质设备、萃取、干燥等章。本书可作为化工类有关专业的教学用书,也可供其它专业师生和化学工程技术人员参考。

传递过程与单元操作

(上册)

陈维桓 主编

责任编辑 徐宝澍

* * *

浙江大学出版社出版

(杭州玉古路 20 号 邮政编码 310027)

浙江大学出版社计算机中心电脑排版

杭州富阳何云印刷厂印刷

浙江省新华书店发行

* * *

787×1092 16 开 26.75 印张 685 千字

1993 年 8 月第 1 版 1997 年 1 月第 2 次印刷

印数 1501—2500

ISBN 7-308-01183-6/O·138 定价: 27.00 元

如发现书中有缺页、倒页和破页,请持此证到杭州富阳何云印刷厂调换

地址:富阳何云 邮编:311404 电话:0571—3201054

前 言

化工单元操作和动量、热量、质量传递过程属于化学工程中的两个分支学科,在大学的化工系里,多作为两门独立的技术基础课设置,考虑到这两门学科的发展历史和相互依赖关系,为了加深对单元操作中传递机理的了解,也为使传递理论能更好地联系实际,多年来,我们把原来的“化工原理”和“传递过程”两门课程合并开设,并定名为“传递过程与单元操作”。本书便是该课程教学用讲义基础上编写的。在编写中力求阐述清楚基本概念、基本理论和方法,以期获得举一反三的功效;力求不削弱单元操作的设计计算和操作分析能力的培养。在传递原理部分尽可能引用单元操作实例,以增强应用原理解决实际问题的能力。

本教材所需学时数(不包括课程设计和实验)约为 150 学时,经适当删减传递内容,也可用于学时较少的专业。

本书第 2、9、10 章由黄有慧执笔,第 3、4 章由曾跃先执笔,第 7、8 章由叶可粮执笔,第 11、12 章由蒋斐执笔,其余由陈维枢执笔,并为全书定稿。曾跃先编写了原讲义的第 1 章,周金汉编写了原讲义的第 5、6 章,谭式人、吴嘉等浙江大学传递工程教研室的同志对本书原稿提出不少宝贵意见,南碎飞对本书部分习题作了校订工作,在此对他们表示谢意。

由于我们学识有限,难免有错误和不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者
1993 年 5 月

绪 言

化工生产是人们利用矿物、植物甚至动物,以及我们周围的大气和水等资源,经过化学的(或物理的)加工,以生产人们所需的各种产品的一门产业。化工生产总是在一些塔、管、器等与周围相分隔的小环境里来完成的,因为在这些设备里,容易造就生产过程所要求的温度、压力、物态等的加工条件,并可避免与其周围的物质混杂起来。在化工设备内所进行的过程可分为化学反应过程和物理化学加工过程两大类,按照学科的划分,前者属于“单元操作”(Unit operation)。单元操作就是本课程要讨论的内容。

单元操作课程习惯上称为“化工原理”或全称“化学工程原理”(Principles of chemical engineering),在前苏联,称为“化学工艺过程和设备”。而本课程还在单元操作的基础上,加上“传递过程”,称为“传递过程与单元操作”。要说清楚这些名称的来由和涵义,最好先简短地回顾一下本学科的发展历史。

最早形成的工程学科首推与人们的住、行联系在一起的土木和建筑,18世纪中叶就有土木工程师的称号。以瓦特(1736—1819)发明蒸汽机为标志的工业革命,开创了机械工程学科。伏打(1745—1827)、法拉第(1791—1867)、爱迪生(1847—1931)等在电学上的成就,以及电作为新的能源加以利用,使电力工程从物理中独立了出来。在以上这些工程学科形成的同时,尽管化学工业已经作为一个老牌工业出现,但它被承认为也是一门工程学科的时间却要晚得多。20世纪以前的化学品生产是作坊式的,技术掌握在富有操作经验的作坊主手里。他们对基本原理不感兴趣,不能把实践知识提高到理性上来,他们局限于认识自己的一行一业,也不能从自己的认识总结出化工生产中共性的东西。在学术界,虽然化学作为一门科学早为人们所承认,但化工生产却长期地被认为只是化学、机械、电机、土木等,再加上工艺知识的简单混合。反映在化工教育上,也只是从典型的机械、电工、土木等课程中,抽出一些经验的东西,并把数学、物理和化学叠加上去,再加上一些化学工艺性的内容来组织教育。20世纪初,里特尔(A. D. Little)第一次作了用“工业化学”的课程名称把化学和工程知识有机地加以结合的化工教育的尝试。

1908年,美国化工学会诞生。在这前后,有一批像哥伦比亚大学的怀泰克(wittaker)、麻省理工学院的华尔克(walker)、密西根大学的怀特(white)等的化学家,在把一些新开发的化学过程推向生产时,亲身实践了生产过程,使理论和工程实践相结合。他们的研究、生产和教学活动加深了对化学工程的认识,酝酿了化学工程学科的诞生。现代的化学工程是在1922年奠基的,在那一年的美国化工学会年会上,以里特尔为首的化学工程教育委员会提出建立“单元操作”的概念,同时提出建成“化学工程”的“独立宣言”(Declaration of independence)的报告。在会议上,这两项建议得到了确认。

里特尔在报告中写道:“任何一个化学过程,不管它的规模如何,都可分解成为排列好的被称作为‘单元作用’(unit action)的系列,如粉碎、混合、加热、焙烧、吸收、沉淀、结晶、过滤、溶解等。这些单元操作为数不多。一个给定的化学过程中,只包括其中的少数几个……化学工程师

们为适应职业上的需要,所应具有的一种得心应手的能力,只能通过把在工业规模上进行着的过程,分解成为各种单元操作来获得……”里特尔在报告中继续写道:“化学工程不是化学、机械和土木工程的组合,本身就是工程学科的一个分支,它的基础就是单元操作,工业规模的化学过程正是由这些单元操作按一定的次序排列起来所组成的。”

把各种不同的化工产品的生产过程,总结成为为数不多的单元操作所组成的观点,是人们对化工过程认识的进步。它使人们看到了化工生产中的共性,把这种共性的东西抽象出来进行研究,可以对过程的本质了解得更为透彻。例如化工过程常常在流体状态下进行。许多化工厂都有流体问题,人们就把流体流动现象抽象出来,深刻地研究流体流动中的质量、能量和动量变化关系,使流动过程被了解得更为深透;又如化工过程中常常要把流体加热或冷却,这涉及到热量的传递问题,人们就把传热问题抽象出来,深刻地研究热的传导、对流和辐射现象,把传热过程了解得更为深透;再如化工过程中常常需要把产品或中间体提纯,这就要采用精馏、吸收、萃取、干燥等单元操作,人们就专门对这些过程作深入研究,了解这些过程中的物流关系、热量关系和物质在相际的传递现象,使得人们对这些单元操作的认识更为完整。一旦人们对各个单元操作有了较深刻的理解之后,就会对由这些单元操作所组成的具体的化工生产过程有更好的掌握,这种认识的循环前进,推动了学科的发展。

化学工程学科创建的初期,对化学工程的认识是肤浅的。按照当时的观点,认为单元操作概念的建立就奠定了化学工程的基础,难怪在1923年由麻省理工学院的华尔克、路易斯、麦克阿达姆斯合著的第一本单元操作教科书就取名为“化学工程原理”或简称“化工原理”(W H Walker, W K Lewis 和 W H McAdams; Principles of Chemical Engineering)^[1]。从当前人们对化学工程的知识结构的认识,可知单元操作仅仅是化学工程的一个组成部分,把单元操作理解为化学工程的原理,只是出于以上的历史原因而已。

随着单元操作概念的建立,许多学者把单元操作从具体的化学工艺中脱离出来,深入地探究它们的基本原理、设计方法和操作应用,推进了单元操作的发展,随即就出现了一批以具体的单元操作内容为题的学术专著,如麦克阿达姆斯的传热学(W H McAdams; Heat Transmission)^[2],鲁宾逊和吉利兰的分馏原理(C S Robinson, E R Gilliland; Elements of Fractional Distillation)^[3],谢伍德和匹格福特的吸收和萃取(T K Sherwood, R L Pigford; Absorption and Extraction)^[4]等等。经过对单元操作的深入研究,人们发现所有单元操作都属于速率过程。动量、热量和质量的传递速率控制着过程的进行。例如流体输送,颗粒在流体中的沉降、过滤、固体流态化技术等都属于流体力学范畴的问题,流体的动量传递控制着过程的进行;物系的加热和冷却,溶液的蒸发、浓缩等都属于传热范畴,热量传递控制着过程的进行,热量以对流方式传递时,流体流动对它有影响,所以热量和动量传递同时影响对流传热;混合物的分离操作,如蒸馏、吸收、萃取、干燥、吸附、离子交换、膜分离技术等,都受质量传递速率的控制,如果质量传递过程在流体间进行,流体流动会影响传质,当质量传递发生在一个相到另一个相之间时,还往往伴随着热量传递。所以各种单元操作中最基本的过程是动量、热量和质量的传递,三个传递过程有时单独地起作用,有时两个或三个同时起作用。如读者掌握了三个传递过程,这将会对他理解和运用单元操作带来好处。

在动量、热量和质量三个传递之间有什么联系呢?

在层流情况下的“三传”和静止介质中的传热和传质是最简单的过程。图0-1(a)、(b)和(c)中的曲线分别代表流体中的速度分布、物体中的温度和浓度分布。在图(a)中,单位体积流体在 x 方向的动量可以 ρv_x 表示,其中 ρ 是流体密度, v_x 是 x 方向流体速度。当沿 y 方向速度 v_y 发

生变化时,或有动量梯度存在时,就会发生 x 方向的动量在 y 方向的传递。传递过程的基本方程称为本构方程(constitutive equation),动量传递中的本构方程就是牛顿粘性定律:

$$\tau_{yx} = -\nu \frac{d(\rho v_x)}{dy} \quad (0-1)$$

式中: $d(\rho v_x)/dy$ 是单位体积流体的 x 方向的动量在 y 方向的梯度; τ_{yx} 是在垂直于 y 方向的单位面积上, x 方向动量的传递速率,称为动量通量。角标中第一个指标 y 代表动量传递的方向,第二个指标 x 表示动量的方向, ν 是流体的运动粘度。

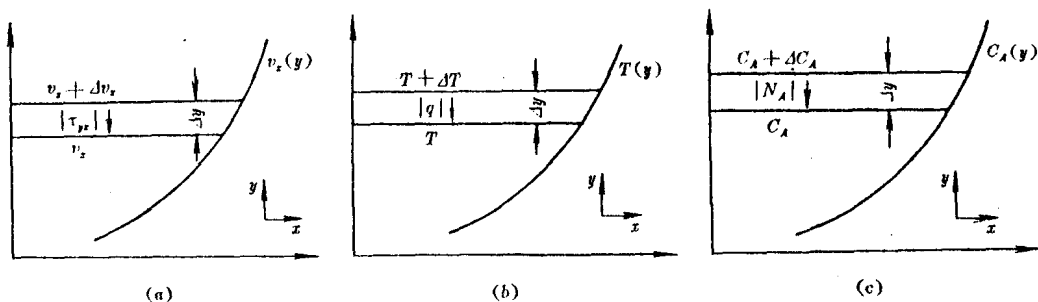


图 0-1 动量、热量和质量传递

在图(b)中,单位体积物体的热含量可以 $\rho c_p T$ 表示,其中 c_p 是物体的热容, T 是物体的温度。当物体在 y 方向存在温度梯度时,就会发生热量在 y 方向的传导。导热的本构方程是傅里叶定律:

$$q_y = -\alpha \frac{d(\rho c_p T)}{dy} \quad (0-2)$$

式中: $d(\rho c_p T)/dy$ 是热含量梯度; q_y 是垂直于 y 方向的单位面积上的传热量,称为 y 方向的热通量,比例系数 α 称为热扩散系数。

在图(c)中,单位体积中组分 A 的含量以 A 的浓度 c_A 表示。当物体在 y 方向存在浓度梯度时,就会发生组分 A 沿 y 方向的扩散传质。扩散的本构方程是费克定律:

$$N_{Ay} = -D_{AB} \frac{dc_A}{dy} \quad (0-3)$$

式中: dc_A/dy 是浓度梯度, N_{Ay} 是垂直于 y 方向的单位面积上的传质量,称为质量通量,比例系数 D_{AB} 代表组分 A 在组分 B 中的扩散系数。

式(0-1)~(0-3)中的系数 ν , α 和 D_{AB} 都是由组成物系的分子或基本粒子的运动行为所决定的,因此把由式(0-1)~(0-3)所描述的传递过程称为分子传递过程(molecular transport processes)。许多实际发生的传递过程中,因为流体是湍流的,还要附加由于湍流的传递贡献,其过程要比分子传递复杂。

动量传递是研究流体的动量的变化速率,按牛顿第二定律得知,动量的时间变率等于作用于流体上的力,所以动量传递和流体力学是两个同义词。动量、热量和质量是三种不同的物理量,但它们的传递方式(见式(0-1)~(0-3))却十分相似。这三种物理量的传递甚至是可以相比拟的,即在动量、热量和质量传递之间,存在类比关系(analogy),这为研究三种传递过程带来了方便。

通过界面的传递有重要的实用意义。例如管内流体流动时把动量传递给管壁,形成摩擦阻力;在换热器中,热流体把热量传递给管壁,再由管壁传递给冷流体;又如在两相流体间的传质中,某组分 A 从一个相的主体传递到相际界面,穿过界面后再传递到另一个相的主体中。界面

及其附近的流动状况,往往对传递过程产生重要影响。早在1923年单元操作概念建立的初期,路易士和惠特曼(Lewis和Whiteman)就注意到相际传质的界面。他提出了传质的双膜理论(two film theory)。此后,随着学科的发展,不断有其他学者提出新的相际传递理论。早在1901年,普兰特(Prandtl)就提出了流体的边界层理论,他认为流体沿固体边界流动时,流体的速度变化局限在靠近边界的一个薄的边界层内,研究的注意力可集中到边界层内,而把边界层以外的区域加以理想化。由于三种物理量的传递之间存在类比性,人们自然就想到了把流体力学边界层概念引用到传热和传质上,形成了热边界层和传质边界层概念,来简化对热量、质量传递过程的分析。以上所提到的分子传递过程,湍流传递过程,三种传递过程的类比,界面传递理论,传递的边界层概念,以及每个单元操作本身的规律等,组成了一门完整的工程科学。早在本世纪40年代,人们就提出建成化学工程科学(chemical engineering science),创办了以化学工程科学为名的英文杂志。从化学工程科学的进展来看,组成本课程的单元操作、传递过程和分离科学(separation science)三个学科分支,是为学术界所公认的化学工程的二级学科。

本教材与习惯上把单元操作和传递过程分别写成两个教材有所不同,是按照单元操作和传递过程之间的内在紧密联系,把两者有机地结合起来编写的,教材作这样的结合处理还可节省教学时数。这门课无疑地要把单元操作放在重要地位,不应对单元操作设备的分析和设计能力的培养有所削弱,传递过程的内容是为了加深各单元操作的基础,使学生对过程的机理有较深的了解,并使学生在生产和科学研究活动中,具有分析各种化工传递现象的能力。结合单元操作来学习传递过程,也可使传递过程的内容不致公式堆积,枯燥乏味。

本课程中所涉及的基本原理和方法有:

(一) 物质守恒定律(law of conservation of mass)

(二) 动量衡算(momentum balance)

(三) 能量衡算——能量守恒定律(热力学第一定律)(energy balance——first law of thermodynamics)

(四) 过程的速率方程(rate equation of processes)

任何速率过程,只有在存在推动力或物系偏离平衡时才能进行。力、温度和浓度都是表示传递的推动力大小的强度因素,研究物系中这些物理量的场,对本门学科是重要的。物系是否处于平衡,或偏离平衡有多远,传递的推动力有多大,可用热力学第二定律来判别,特别在质量传递中,需要关于溶液热力学的知识。

在本教材中无意采用过多过深的数学,但不断运用学生学过的高等数学知识,应该在本课程中有所体现。本教材采用SI单位制,过去习惯了使用其它单位制的学生,应熟悉与SI单位制间的换算。

参 考 文 献

1. Walker W H, Lewis W K, McAdams W H, Gilliland E R. Principles of Chemical Engineering. 1923
2. McAdams W H. Heat Transmission.
3. Robinson C S, Gilliland E R. Elements of Fractional Distillation.
4. Sherwood T K, Pigford R L. Absorption and Extraction.
5. Bird R B, Stewart W E, Lightfoot E N. Transport Phenomena. New York: John Wiley & Sons, 1960

目 录

绪 言	1
-----------	---

第一篇 流体动力过程

1 流体流动	3
1.1 概 述	3
1.1.1 连续介质的假定	3
1.1.2 作用在流体上的力	5
1.1.3 流体的密度	5
1.1.4 静止流体上的压力	6
1.2 流体静力学	7
1.2.1 流体静力学微分方程	7
1.2.2 重力场下的流体静力学方程	8
1.2.3 流体静力学方程在压力和压力差测量上的应用	9
1.3 流体的粘性	11
1.3.1 牛顿粘性定律	11
1.3.2 气体的粘度	13
1.3.3 液体的粘度	14
1.3.4 流体的流动形态和雷诺数	15
1.4 流体动力学的宏观衡算方法	17
1.4.1 研究流体运动的拉格朗日(Lagrange)方法和欧拉(Euler)方法	17
1.4.2 物理量的时间导数	17
1.4.3 控制体和控制面	18
1.4.4 系统和环境	18
1.4.5 广延量和强度量	18
1.4.6 流体系统的研究方法和控制体研究方法间的关系	19
1.4.7 流体的连续性方程	21
1.4.8 流体流动的宏观能量衡算	24
1.4.9 流体流动的机械能衡算方程	28
1.5 流体在圆管内流动时的摩擦阻力	29
1.5.1 量纲分析方法	30
1.5.2 流体在管内流动时的摩擦系数	31
1.5.3 流体在非圆形直管内流动时的摩擦阻力	33
1.5.4 局部阻力和局部阻力系数	34

1.6 管路计算.....	38
1.6.1 液体输送管路	38
1.6.2 可压缩流体在等径管内的流动	40
1.7 流体流动的宏观动量衡算.....	50
1.7.1 动量衡算的控制体法	51
1.8 流体动力学的薄层流体平衡方法.....	55
1.8.1 薄层流体上的动量衡算和流道上的边界条件	55
1.8.2 平板上的降膜流动	56
1.8.3 圆管内的流体层流	58
1.8.4 流体层流流经圆管时的摩擦阻力	60
1.8.5 环隙内的流体层流	60
1.9 流体动力学的微分衡算.....	62
1.9.1 连续性方程的微分形式	63
1.9.2 理想流体的欧拉运动方程	64
1.9.3 作用于流体上的表面力	66
1.9.4 作用于流体上的力平衡方程	67
1.9.5 运动流体的速度分解和变形率	69
1.9.6 牛顿流体的本构方程	72
1.9.7 奈维-斯托克斯方程	73
1.10 奈维—斯托克斯方程的应用示例	74
1.10.1 平板上的稳定层流降膜流动	74
1.10.2 圆管内的液体层流运动	75
1.10.3 环隙内液体的周向运动	76
1.11 不可压缩流体的平面运动	78
1.11.1 流函数	78
1.11.2 用涡量和流函数表示的运动方程	79
1.11.3 流体非常缓慢地流经球体的运动	79
1.12 不可压缩流体的层流边界层	81
1.12.1 平板上不可压缩流体作稳定层流时的边界层分析	82
1.12.2 边界层的动量积分方程	86
1.12.3 边界层的分离	88
1.13 流体的湍流运动简介	90
1.13.1 湍流脉动和时均概念	90
1.13.2 湍流附加应力	91
1.13.3 湍流运动的基本方程	91
1.13.4 普兰特混合长度假说	93
1.13.5 普兰特速度分布定律	94
1.13.6 圆管内的湍流	96
1.13.7 光滑平板上的湍流边界层	100
1.14 流体流量的测量.....	102
1.14.1 测速管	102
1.14.2 孔板流量计	103
1.14.3 文丘利流量计	105

1.14.4 转子流量计	106
习 题	107
主要符号说明	117
主要参考读物	118
2 流体输送机械	119
2.1 液体输送机械	119
2.1.1 离心泵	119
2.1.2 其它类型化工用泵	142
2.2 气体压送机械	118
2.2.1 通风机	148
2.2.2 鼓风机	153
2.2.3 压缩机	154
2.2.4 真空泵	158
习 题	162
主要符号说明	164
主要参考读物	165
3 流体通过颗粒层的流动	166
3.1 颗粒床层的特性	166
3.1.1 颗粒的特性	166
3.1.2 颗粒群的当量直径	168
3.1.3 颗粒床层特性	169
3.2 流体通过固定床层的压降	170
3.2.1 流体在固定床层中的流动特性	170
3.2.2 流体流经颗粒床层的压力降	170
3.3 过 滤	173
3.3.1 过滤操作的基本原理	173
3.3.2 过滤设备	174
3.3.3 过滤基本方程	180
3.3.4 恒压过滤方程	183
3.3.5 恒速过滤方程	184
3.3.6 过滤常数的测定	184
3.3.7 滤饼的洗涤速率与洗涤时间	187
3.3.8 过滤机的生产能力	188
习 题	192
主要符号说明	193
主要参考读物	194
4 颗粒与流体间的相对运动	195
4.1 曳力和曳力系数	195
4.2 沉 降	197

4.2.1 重力沉降	197
4.2.2 离心沉降	202
4.3 固体流态化技术	210
4.3.1 固体流态化的基本概念	210
4.3.2 流化床的压降	211
4.3.3 流化床的返混、沟流和节涌现象	212
4.3.4 流化床的操作范围	214
4.3.5 流化床的膨胀高度与分离高度	216
4.4 气力输送	217
4.4.1 气力输送装置	218
4.4.2 稀相气力输送中气流速度的选定	219
习 题	220
主要符号说明	222
主要参考读物	222

第二篇 热量传递过程

5 热量传递过程	225
5.1 概 述	225
5.2 热传导的基本概念	227
5.2.1 傅里叶定律	228
5.2.2 导热系数	228
5.2.3 热传导的微分方程	230
5.2.4 边界条件	232
5.3 一维稳态导热	233
5.3.1 平壁上的一维稳态导热	233
5.3.2 圆柱上的一维径向导热	239
5.3.3 球壁上的一维径向导热	245
5.3.4 接触热阻	245
5.3.5 带有肋片的换热面上的传热	246
5.4 非稳态导热	252
5.4.1 物体内部热阻可以略去的不稳态传热	252
5.4.2 半无限厚平壁的非稳态导热	253
5.4.3 平板两侧流体作对流时的非稳态导热	256
5.4.4 无限长圆柱和球体的一维非稳态导热	260
5.4.5 二维及三维非稳态导热问题的求解	263
5.5 导热问题中的有限差分方法	267
5.5.1 一维稳态导热的差分方法	267
5.5.2 二维稳态导热的差分方法	271
5.5.3 非稳态导热的差分方法	273
5.6 换热器的传热速率方程	276
5.6.1 传热速率方程	277

5.6.2	平均传热温度差	279
5.6.3	多程换热器和错流式换热器的平均传热温度差的校正	282
5.6.4	换热器计算的传热单元数法	284
5.7	对流传热的基本概念	289
5.7.1	热边界层概念	289
5.7.2	对流传热系数	290
5.7.3	能量衡算微分方程	291
5.7.4	湍流传热概念	295
5.7.5	对流传热的分类	296
5.8	相似方法	297
5.8.1	相似常数和相似准数	296
5.8.2	流体动力相似和传热相似	298
5.9	管内强制对流传热	301
5.9.1	管内强制层流传热	301
5.9.2	管内强制湍流传热	307
5.10	动量传递和热量传递之间的类比	309
5.10.1	雷诺类比	309
5.10.2	柯尔本类比	310
5.10.3	普兰特类比	310
5.10.4	冯·卡门类比	311
5.11	流体沿外壁作强制对流时的传热	313
5.11.1	平板上的强制层流热边界层	313
5.11.2	平板上的强制湍流传热	317
5.11.3	流体横向绕流单圆柱的传热	318
5.11.4	流体绕流圆球的传热	319
5.11.5	流体横向流经管簇的传热	319
5.11.6	流体在列管式换热器管间流动时的传热	322
5.12	自然对流传热	323
5.12.1	竖直平板上自然对流传热的微分方程及其典型解	324
5.12.2	自然对流传热的各种关联式	328
5.13	冷凝传热	334
5.13.1	竖直平板上的层流膜状冷凝	335
5.13.2	竖直平板上的湍流膜状冷凝	336
5.13.3	水平圆管外壁的膜状冷凝	337
5.13.4	水平圆管内的膜状冷凝	337
5.14	沸腾传热	339
5.14.1	大空间饱和液体的沸腾传热	340
5.14.2	大空间核状沸腾传热关联	341
5.14.3	大空间膜状沸腾传热关联	343
5.14.4	管内强制对流沸腾传热	344
5.15	辐射传热	345
5.15.1	黑体辐射强度和黑体辐射能力	346
5.15.2	物体表面的辐射性质	348

5.15.3	太阳辐射	349
5.15.4	角系数	350
5.15.5	灰体间的辐射传热	352
5.15.6	辐射热屏	357
5.15.7	由三个面所组成的闭合空间的辐射	359
5.15.8	气体辐射	360
5.15.9	暴露在大气中设备热损失的估计	366
5.16	换热器	367
5.16.1	管壳式换热器	367
5.16.2	蛇管式换热器	377
5.16.3	套管式换热器	378
5.16.4	用空气为冷却剂的换热器	378
5.16.5	板式换热器	379
5.16.6	螺旋板换热器	380
5.16.7	板翅式换热器	382
5.16.8	热 管	383
	习 题	384
	主要符号说明	391
	主要参考读物	393
6	蒸 发	394
6.1	概述	394
6.2	单效蒸发器的计算	395
6.2.1	物料衡算	395
6.2.2	热量衡算	396
6.2.3	单效蒸发器传热面积的计算	396
6.3	溶液的焓—浓图和杜林规则	397
6.4	蒸发器中的传热温度差损失	399
6.5	多效蒸发	399
6.5.1	多效蒸发的流程	400
6.5.2	蒸发器的生产能力和生产强度	401
6.5.3	多效蒸发的计算	402
6.6	蒸发器热能利用的其它方案	406
6.6.1	额外蒸汽的抽出	406
6.6.2	热泵蒸发流程	406
6.7	蒸发设备	407
6.7.1	循环型蒸发器	408
6.7.2	单程型蒸发器	409
6.7.3	用于蒸发器的除沫器和冷凝器	410
	习 题	412
	主要符号说明	413
	主要参考读物	414

第一篇

流体动力过程

流 体 流 动

物质在化学加工中常呈流体状态,流体的运动遂成为最普遍的化工单元操作之一。本章研究流体运动的基本规律,应用这些规律来实现流体的流动、输送,合理选用和操纵各种流体输送机械。物质在化学加工中还常伴随着传热、传质和化学反应,而这些过程也常常是在流体流动中来实现的,过程进行的速率与流体的运动状况密切相关。

流体的流动总是与发生流动的力相联系的。作用在流体上的力除了像重力之类无需使力与流体作直接的物理接触外,使流体产生压力、切应力等力的因素都是由微观的流体分子或流体团块作动量传递的结果,按照牛顿运动定律:运动物体的动量随时间的变率等于作用于该物体上的力。所以,研究运动流体的力学关系,实质上,就是研究流体的动量传递。

1.1 概 述

物质以气态、液态和固态存在,气态和液态的物体统称为流体。固体和流体间的力学区分在于它们受切应力后的不同变形情况。固体在切应力作用下产生弹性变形,一旦应力除去,恢复为原状,当应力超过屈服极限,就发生永久变形,即使除去应力,也不再复原。对于通常的流体,即使施加任何微小的切向应力,它就发生连续变形,这就使流体具有流动性。流体在压力作用下体现出弹性,说明流体能承受压应力。流体所能承受的拉应力是不会大于流体分子间的内聚力的,因为这个力很小,工程上认为流体是不能承受拉应力的。

1.1.1 连续介质的假定

流体是流体分子的一种聚集状态,即使是容器内的静止流体,它的内部始终存在着流体分子的热运动。流体在外力作用下,还发生流体的整体运动,如流体在管道中的流动那样。前者称为流体的微观运动,后者为流体的宏观运动。流体力学研究流体的宏观运动。

考虑一个微元体积内流体平均密度的变化情况:取流体中包含点 $p(x, y, z)$ 在内的一个微元体积 ΔV ,其中所含流体的质量为 Δm ,则流体的平均密度为 $\Delta m / \Delta V$ 。此流体的平均密度 $\Delta m / \Delta V$ 随微元体积 ΔV 的变化情况表示在图 1.1-1b 上,当微元体积 ΔV 从非常小逐渐增大,趋向一个特