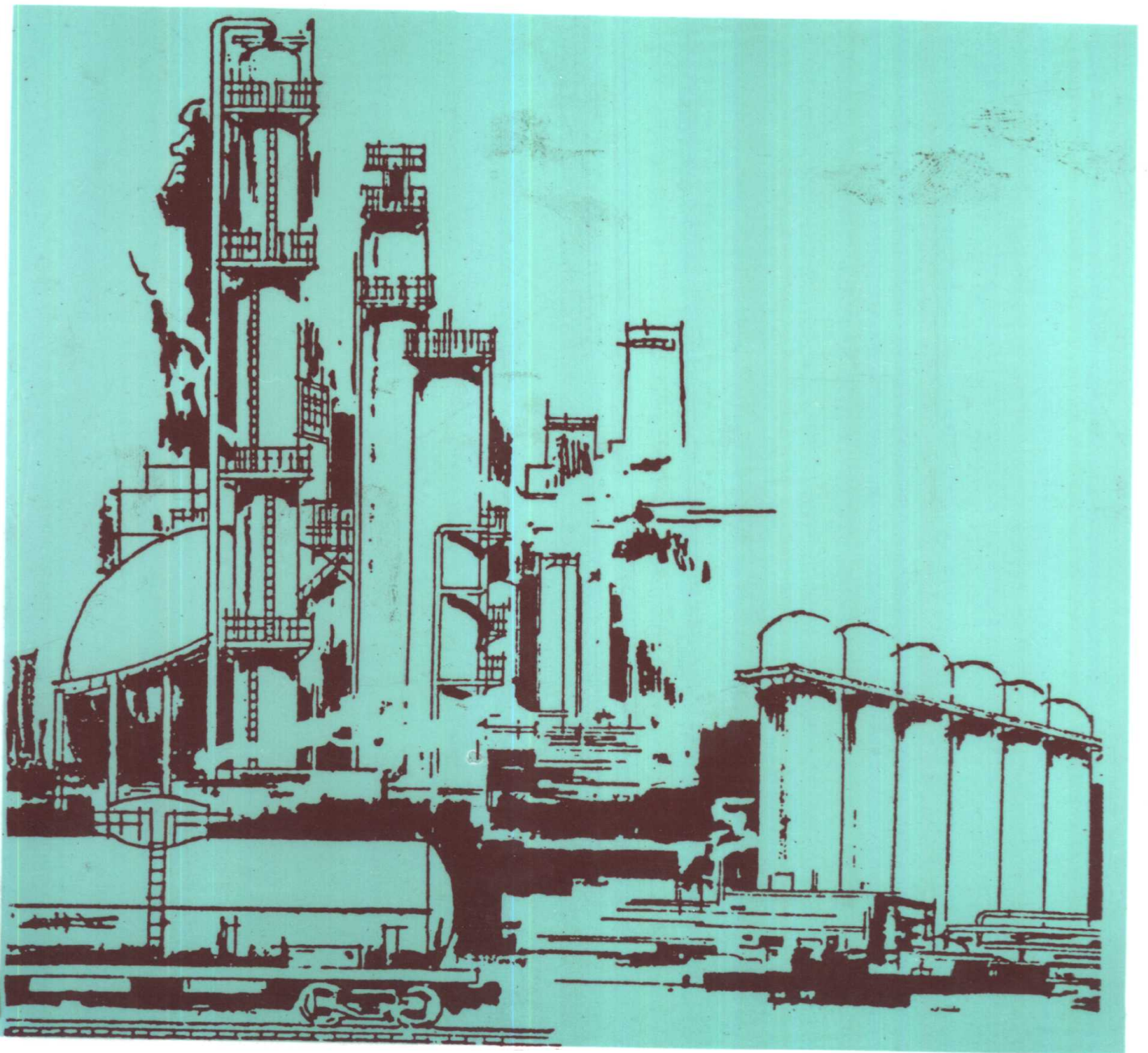


化 工 原 理

(上册)

大连理工大学化工原理教研室 编

大连理工大学出版社



化 工 原 理

(上 册)

大连理工大学化工原理教研室编

大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

化工原理(上册)/袁一等编—大连:大连理工大学出版社,1993.9
ISBN 7-5611-0792-7

- I 化工原理(上册)
- I 袁一等编
- II 流体—流动—传热
- IV TQ02

内 容 简 介

本书根据大连理工大学化工原理教研室多年的教学实践,并参考国内外的教材,由该室组织编写。主要介绍化学工程中常见单元操作的基本原理、典型设备及其工艺设计计算。全书分上、下两册出版。上册包括绪论、流体流动、流体输送机械、流体相对颗粒(床层)的流动与机械分离、传热和蒸发等章;下册包括蒸馏、吸收、萃取和干燥等章。本书注意理论与实际的结合,着重培养工程观点和处理工程问题的方法和能力,可供高等院校化工类及相近专业作为教材或参考书,亦可供化工、石油、轻工等部门从事科研、设计和生产的技术人员参考。

本书上册由袁一、郑轩荣主编。参加各章编写的有:绪论,袁一;第一章,王世广、袁一;第二章,王世广;第三章,匡国柱;第四章,樊希山;第五章,郑轩荣。

大连理工大学出版社出版发行
(大连市凌水河 邮政编码 116024)

大连业发印刷厂印刷

开本:787×1092毫米 1/16 字数:605千字 印张:25

印数:6501—9000册

1993年9月第1版

1998年8月第3次印刷

责任编辑:王君仁 刘新锋

责任校对:玉洁

封面设计:羊戈

定价:18.00元

前 言

大连理工大学化工学院(原大连工学院化学工程系)化工原理教研室开设“化工原理”课程已四十余年,曾翻译、编写过该课程教材。

1972年教研室编写出教材《化工过程及设备》上、中、下三册(校内发行);1980年参加了全国统编教材《化学工程》的传热、蒸发章的编写及上册的审阅工作(化学工业出版社出版)。

为适应教学工作不断发展的需要,1988年教研室组织编写出《化工原理》试用教材(校内发行)。上册由向惟汶主编,参加编写的有:向惟汶、沙庆云、徐敦顺、卢琐、王世广、樊希山,下册由郑轩荣主编,参加编写的有:郑轩荣、李景鹤、樊希山、卢琐。1992年在该试用教材的基础上,并结合多年教材编写与教学实践的经验,教研室又组织进行部分改编,正式出版了本教材。

在此,对试用教材编写者和对“化工原理”教材做出过贡献的林纪方、沈自求、郭宜祐、丁惠华、魏德孚、蒋斐、冯骅、程国远及其他各位老师致以诚挚的谢意。

由于水平有限,本书难免有错误等不妥之处,欢迎批评指正。

化工原理教研室

1996年4月

绪 论

一、化学工业和化学工程

化学工业是将自然界中的各种物资资源通过物理和化学的方法加工成具有规定质量的物质的工业。化工产品国民经济中占有重要地位。当代人们的衣食住行各个方面越来越仰赖于化学工业所提供的产品。农业生产使用的化肥、农药,是典型的化工产品。在人们的衣着中,合成纤维所占比重越来越大。塑料和橡胶制品已成为人们日常生活不可缺少的物质材料。基本无机化工产品和基本有机化工产品是一切工业部门和国防工业所不可缺少的原材料。能源、建材、冶炼、轻工等工业,不仅消耗大量的化工产品,而且这些工业部门的生产过程本身与化学工业也十分相近或相同,可视为“大化工”的组成部分。高新技术产业,如信息技术、生物工程、环境治理,需要各种特殊性能的化工原料,为化学工业开拓了新领域。

化学工程是一门工程技术学科,它研究化工产品生产过程的基本规律,并应用这些规律解决化工生产中的问题。

化学工程这一学科是在上一世纪逐渐发展起来的,到了今天已经发展成为完整的体系,其中形成最早,基础性最强、应用面最广的学科分支,就是本课程——化工原理。

二、《化工原理》课程的内容与性质

《化工原理》是在高等数学、物理学、物理化学等课程的基础上,研究化工单元操作基本原理的一门基础技术课。它的发展与化工单元操作概念的形成是密切相关的。

早在化学工程成为一门学科之前,已经建立了各种化学工厂,在当时来说已具有相当大的规模生产不同的化工产品。那时,每一种产品的制备方法,均视为一种专门的生产技术。以研究某一产品的生产技术为对象,形成了各种工艺学,如硫酸工艺学、纯碱工艺学等等。

随着生产技术的进展,人们认识到,化工产品虽然多种多样,生产工艺流程各异,但也有共同之处。任何一种化工生产,从原料到产品的加工链,可以很自然地分解为若干道工序,各自完成一项多少较为单一的任务。不同化工产品的原料、产品、加工路线各异,但如果分解为这些工序后,就可发现他们的共同之处是很明显的。在本世纪 20 年代,明确的“单元操作”概念在化学工程中建立起来了。

许多化工生产需要进行一个或几个化学反应,它们成为整个生产流程的中心环节。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。具体说来,这些条件包括压力、温度、反应物料的配比等。化工生产所处理的物料大多为流体(液体或气体)。因此,有关流体输送和加压操作在任何化工厂都是不可少的,加泵送(输送液体)、风机(输送气体)、压缩(气体加压)等。加热器和冷却器往往是化工厂最常见到的设备,因为大多数化学反应是吸热或放热的,而且要在一定的温度条件下进行,所以,传热是一重要的化工单元操作。不少原料是一种混合物,必须预先进行提纯才可以送去反应,而反应产物也是混合物,必须进行分离才得到合乎规格的产品。蒸馏、吸收、萃取、蒸发、干燥、结晶,这些都是典型的分离过程的单元操作。

不同的化工生产中,同一种单元操作所遵循的基本规律是一样的。例如,硫酸厂所用的加热器和糖厂所用的加热器,虽然加工的物料不同,设备材质和形状也未尽一致,但却遵循同一的热量平衡定律和热传递定律,具体来说,热载体的供热量等于冷载体的吸热量,传热速率与二载体的温度差有关,也与流体的流动情况有关。这些就是加热器运行的普遍规律,而且这些规律可用统一的公式表达,并不因物料品种或操作条件的区别而有所不同。当然,不同生产厂的加热器自有其依赖于工艺物料及工艺条件的特点,但传热单元操作的共同规律是统一的,而且往往是占主导地位。化工单元操作这一概念的形成,是化学工程学科发展的第一个重要里程碑。《化工原理》课程亦就此而产生。

《化工原理》课程的名称,由于历史上的原因,还曾称为《单元操作》、《化工过程及设备》、《化学工程》等。

迄今,化工原理所讲授的内容,一般都是属于物理过程。初看来,这似乎与化工一名相违,其实不然。虽然对大多数化工厂来说,化学反应是中心环节,但在反应环节之前和之后必须有足够多的非化学环节(加热、冷却、加压、减压、分离、混合等等)作为化学反应的预处理和后加工。这些物理过程的单元操作,构成了化工生产的绝大部分。即使是化学反应器本身,非化学过程,如流体流动、传热、传质等,也占有相当重要的地位。还有的化工厂,基本上不存在化学反应,如海水提取食盐和其它无机盐,原油加工为汽油、柴油和润滑油(炼油工业是“大化工”的一个分支),从头到尾全是物理过程。

为数众多的单元操作,按其操作的功能可以分为:①物料的增压、减压和输送;②物料的混合和分散;③物料的加热和冷却;④均相混和物的分离(蒸发、蒸馏、结晶等等);⑤多相混和物的分离(沉降、过滤、干燥等等)。其中每一类还可以细分,例如按相态的不同把多相混和物的分离再分为气—液分离、气—固分离、液—固分离、液—液分离(分层)、固—固分离(筛分)等。这样,具有实际意义的单元操作不下数十种。

这种分类虽然简单易行,但却不够科学。一方面,不属于同一类的单元操作之间的共性被掩盖了;另一方面,完成同一功能的各个单元操作并不一定遵循同一操作原理。单元操作按其理论基础来划分,将更便于学习和研究。化工生产中,主要的单元操作可以归纳为三类过程:

- (1) 流体流动过程:包括流体的输送、悬浮物的沉降和过滤、颗粒料物料的流态化等。
- (2) 热量传递过程:包括加热、冷却、蒸汽的冷凝、溶液的蒸发等。
- (3) 质量传递过程:包括液体溶液的蒸馏、气体混合物的吸收、固体物料的干燥等。

以上三类过程几乎覆盖了所有的主要单元操作。

热量传递过程的物理基础,是物系内不同地点的温度不同而导致能量的流动。质量传递的物理基础,是物系内不同地点的浓度不同而导致物质的流动。类似地,流体流动过程是流体质点的动量变化的结果,因此可以称为动量传递过程。按上述原则对单元操作进行分类和研究,有助于理解不同单元操作之间的内在联系和整个化工原理课程的系统性,也可提高理解深度。

在50年代形成的“三传一反”(三传是动量传递、热量传递、质量传递,一反是化学反应)学说,乃是化学工程学科继20年代化工原理(单元操作)之后的第二次重要发展,可视为第二个里程碑。化工原理和化工传递过程这两门课程之间有着密切的联系,后者是前者的理论基础,前者则偏重于实际工程运用。

《化工原理》课程的主要内容,是研究化工单元操作的基本原理,典型化工单元设备的原则结构、选型及工艺尺寸的计算。

《化工原理》课程的性质和它在整个教学计划中的地位,要求学者逐步学会和掌握本课程的特点。

第一,本课程的理论基础,是已学习过的一些基础课,特别是高等数学、物理学、物理化学。学习本课程时,要注意如何综合运用这些知识,有目的地解决工程实际问题。

第二,化工原理是一门工程学科,它的目的并不只是认识一些自然现象,而是解决真实的、复杂的生产问题。通过本课程,要学习怎样从复杂事物中排除非主要因素,抽出关键环节,以合理的简化方式建立物理和数学模型,解决工程问题。

第三,化工原理中所采用的研究方法有其自有的特点。它主要是一种实验研究方法,而不是公式或逻辑推理。但是,如果实验工作只是工程实际的“一对一”的翻版,那将不胜其烦,而且失去了指导意义。本门学科所建立的一整套实验研究策略及其适用范围和局限,是学习本课程和用来解决工程问题需要注意的。

三、物理量的单位及换算

本课程一律采用国际单位制(SI)。

在化工生产中,还使用一些非 SI 单位,如时间的单位分(min)、小时(h)、日(d)、年(yr)。温度单位常用摄氏温度(°C)。压力单位还有物理大气压(atm)、工程大气压[ata,也即公斤(力)/厘米²,kg(f)/cm²]、巴(bar)、毫米水银柱(mm Hg)、,毫米水柱(mm H₂O)等等。

由于历史上的原因,有些化工文献、手册、资料还可遇到其他单位。特别需要提及的,工程单位制(重力单位制)以力作为基本量,而 SI 以及 CGS 和 MKS 制都是以质量作为基本量,而把力作为导出量。尤为不利的是,工程单位制的力的单位是公斤(力),极易与作为质量单位的千克(公斤)混淆。SI 单位制的力的单位是牛顿(N)。其关系是 1kg(f)=9.81N,在换算时需注意。

另外一个常遇到的换算,是能量单位卡(cal),多年来一直以它作为热能的单位。另一方面,从力学的角度给出了功的单位,即用力 and 距离的乘积作为功的单位,如尔格(1 达因的力作用 1 厘米)、焦耳(1 牛顿的力作用 1 米),以及其他。后来人们发现,热和功是可以互相转换的,并精确测定了转换的数量关系,即所谓的热功当量,如 1 卡相当于 4.187 焦耳,等等。SI 把能量、热和功的单位统一表示为焦耳。在查阅较早的文献和手册时常常会遇到这一类换算。

化工计算中常用到的单位及换算因数见书末附录一。但是,应当学会如何根据几个基本关系和定义自行得出换算因数。

例 1 求 1 大气压等于多少 Pa? (1)直接查表;(2)无表可查,但知 1 大气压等 1.033kg(f)/cm²。

解: (1) 查附录一的表,得

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

(2) 由于 1kg(f)=9.81N, 1cm=0.01m, 所以

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

而 Pa 就是物理量的 SI 制基本单位即 N/m² 的又一写法,所以

$$1 \text{ kg(f)/cm}^2 = 98100 \text{ Pa},$$

于是

$$1 \text{ atm} = 1.033 \text{ kg(f)/cm}^2 = 1.033 \times 98100 \\ = 101300 \text{ Pa}, \text{ 或 } 101.3 \text{ kPa}$$

例 2 文献给出放热速率的单位是 kcal/h, 如何换算为 SI 单位 W?

查得能量、热量、功的 SI 单位单位是焦耳 J, 它与旧的热量单位卡 cal 的换算关系是 (见附录一)

$$1 \text{ cal} = 4.187 \text{ J}$$

所以

$$1 \text{ kcal/h} = 4.187 \times 1000 / 3600 = 1.163 \text{ J/s}, \text{ 即 } 1.163 \text{ W}.$$

例 3 旧制单位时间作功以 kg(f) · (m/s) 记, 请将 2500 kg(f) · m/s 换算为 kW.

$$1 \text{ kg(f) m/s} = 9.81 \text{ N} \cdot \text{m/s} = 9.81 \text{ W},$$

所以

$$2500 \text{ kg(f) m/s} = 2500 \times 9.81 = 24500 \text{ W}, \text{ 或 } 24.5 \text{ kW}.$$

目 录

绪 论	
第一章 流体流动	1
概述	1
第一节 流体静力学	2
§ 1-1-1 流体的密度	2
§ 1-1-2 流体的作用力	3
§ 1-1-3 流体的压强及其特性	4
§ 1-1-4 流体静力学基本方程	5
§ 1-1-5 静力学基本方程的应用	8
第二节 流体动力学	11
§ 1-2-1 流量与流速	12
§ 1-2-2 稳态流动与非稳态流动	13
§ 1-2-3 连续性方程	14
§ 1-2-4 柏努利方程	15
§ 1-2-5 实际流体流动的机械能衡算式	18
§ 1-2-6 实际流体流动的机械能衡算式的应用	22
第三节 流体流动阻力	25
§ 1-3-1 流体的粘性与牛顿粘性定律	25
§ 1-3-2 流体的流动类型——层流和湍流	28
§ 1-3-3 直圆管内流体的流动	30
§ 1-3-4 边界层的概念	35
§ 1-3-5 流体流动阻力的计算	38
§ 1-3-6 因次分析	52
第四节 管路计算	57
§ 1-4-1 简单管路	57
§ 1-4-2 复杂管路	60
§ 1-4-3 可压缩流体的流动	64
第五节 流速和流量的测定	67
§ 1-5-1 测速管	68
§ 1-5-2 孔板流量计	70
§ 1-5-3 文丘里流量计	73
§ 1-5-4 转子流量计	73
§ 1-5-5 堰	75
§ 1-5-6 流量计读数校正	76
第六节 流体流动与动量传递	78
习题	80
本章符号说明	86

第二章 流体输送设备	87
第一节 离心泵	87
§ 2-1-1 离心泵的基本结构、工作原理与性能参数	87
§ 2-1-2 离心泵的基本方程	90
§ 2-1-3 离心泵的效率 and 实际压头	93
§ 2-1-4 离心泵的特性曲线	95
§ 2-1-5 离心泵在管路中的工况	100
§ 2-1-6 离心泵的组合运转工况分析	103
§ 2-1-7 离心泵的气蚀现象和安装高度	105
§ 2-1-8 离心泵的类型与选用	108
第二节 其它类型泵	113
§ 2-2-1 往复泵	113
§ 2-2-2 隔膜泵和计量泵	115
§ 2-2-3 旋涡泵	116
§ 2-2-4 旋转泵	117
§ 2-2-5 各类泵的比较与选择	118
第三节 通风机、鼓风机、压缩机和真空泵	119
§ 2-3-1 离心式通风机	120
§ 2-3-2 鼓风机	123
§ 2-3-3 压缩机	123
§ 2-3-4 真空泵	134
习题	138
本章符号说明	141
第三章 流体相对颗粒(床层)的流动及机械分离	142
第一节 颗粒与颗粒床层的特性	142
§ 3-1-1 颗粒的特性	142
§ 3-1-2 颗粒床层的特性	145
第二节 流体与颗粒间的相对运动	147
§ 3-2-1 流体绕过颗粒的流动	147
§ 3-2-2 颗粒在流体中的运动	150
第三节 重力沉降	151
§ 3-3-1 重力沉降速度的计算	151
§ 3-3-2 重力沉降设备	156
第四节 离心沉降	158
§ 3-4-1 离心沉降速度	159
§ 3-4-2 离心沉降设备	160
第五节 流体通过颗粒床层的流动	168
§ 3-5-1 流体通过固定床的阻力	168

§ 3-5-2 流体通过流化床的流动	172
第六节 过滤	178
§ 3-6-1 概述	178
§ 3-6-2 过滤过程的物料衡算和过滤速率	179
§ 3-6-3 过滤计算	182
§ 3-6-4 滤饼的洗涤	185
§ 3-6-5 过滤机及其生产能力	185
§ 3-6-6 离心过滤	196
第七节 气体净化的其它方法和设备	198
习题	204
本章符号说明	207
第四章 传热	209
概述	209
第一节 热传导	210
§ 4-1-1 基本概念和定律	210
§ 4-1-2 导热系数	211
§ 4-1-3 平壁的稳态导热	214
§ 4-1-4 长圆筒壁的稳态导热	218
§ 4-1-5 圆球壁的稳态导热	220
第二节 对流传热	221
§ 4-2-1 对流传热速率方程	222
§ 4-2-2 传热膜系数的影响因素	224
§ 4-2-3 因次分析的应用	225
第三节 流体无相变化时对流传热膜系数的经验关联	228
§ 4-3-1 管内强制对流	229
§ 4-3-2 管外强制对流	233
§ 4-3-3 自然对流	237
第四节 蒸汽冷凝与液体沸腾	240
§ 4-4-1 蒸汽冷凝机理	240
§ 4-4-2 冷凝传热膜系数	241
§ 4-4-3 液体沸腾传热及其影响因素	246
§ 4-4-4 沸腾传热膜系数	249
第五节 辐射传热	252
§ 4-5-1 热辐射的基本概念	252
§ 4-5-2 发射能力与辐射基本定律	253
§ 4-5-3 固体表面间的辐射传热	255
§ 4-5-4 气体的热辐射	259
§ 4-5-5 复合传热与设备热损失计算	260

第六节 传热过程的计算.....	263
§ 4-6-1 热量衡算	263
§ 4-6-2 传热速率方程	264
§ 4-6-3 传热系数 K	265
§ 4-6-4 平均温度差	268
§ 4-6-5 强化传热过程的途径	272
§ 4-6-6 传热效率和传热单元数	277
第七节 换热器.....	281
§ 4-7-1 换热器的类型	282
§ 4-7-2 列管式换热器	283
§ 4-7-3 其它类型换热器	298
习题.....	305
本章符号说明.....	309
第五章 蒸发	311
概述.....	311
第一节 单效蒸发和真空蒸发.....	312
§ 5-1-1 单效蒸发	312
§ 5-1-2 溶液的沸点和传热温度差损失	316
§ 5-1-3 真空蒸发	319
第二节 多效蒸发和提高加热蒸汽经济性的其它措施.....	320
§ 5-2-1 多效蒸发的流程和加料方法	320
§ 5-2-2 多效蒸发的优缺点	321
§ 5-2-3 多效蒸发的设计型计算	323
§ 5-2-4 提高加热蒸汽经济性的其它措施	330
第三节 蒸发设备.....	333
§ 5-3-1 蒸发器的结构及特点	333
§ 5-3-2 除沫器、冷凝器和真空装置	339
第四节 影响蒸发器生产强度的因素.....	340
习题.....	343
本章符号说明.....	344
主要参考资料	346
附录	347

第一章 流 体 流 动

概 述

液体和气体统称为流体。流体区别于固体的主要特征是具有流动性,其形状随容器形状而变化;受外力作用时内部产生相对运动。

在化学工业生产中所处理的原料及产品,很多是流体。例如在酸、碱、合成氨、煤气的生产过程中,以及在石油化工、高分子化工等工业中,都会碰到流体在管道中输送的问题。

图 1-1 为用水洗涤煤气以除去其中焦油等杂质过程的示意图。洗涤水用泵输送到塔顶,从喷头淋下,在填料塔中与煤气接触后,由塔底排出。煤气用鼓风机从塔底送入,经洗涤后由塔顶排出。这里水和煤气的输送以及附属设备流量计、压差计、水封等都涉及流体力学问题。其中流体在泵(或鼓风机)、流量计以及管道中流动等,是流体动力学问题。而流体在压差计,水封箱中处于静止状态,则是流体静力学问题。为了确定流体输送管路的直径,计算流动过程产生的阻力和输送流体所需的动力,据此选择输送设备的类型和尺寸,以及测定流体的流量和压强等,必须研究流体在流动和静止状态下的规律,并运用这些规律去分析和解决化工生产过程中涉及到的流体流动和输送问题。

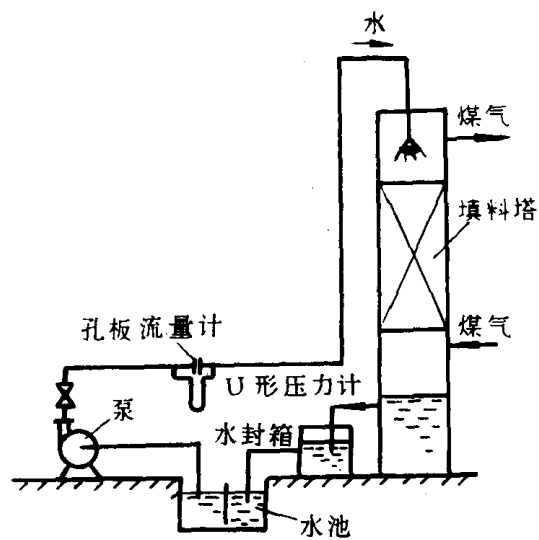


图 1-1 煤气洗涤塔

此外,在化工生产的传热过程和传质过程中,也大都是指流体之间的传热和传质,涉及运动着的流体。流体的流动情况对这些过程的操作效率影响很大,因此,流体流动过程的基本原理和规律性,对于传热、传质的研究也是非常重要的。

研究流体在静止和流动状态下的规律性时,常将流体视为由无数质点组成的连续介质。所谓流体质点是指含有大量分子的极小单元或微团。事实上,流体是由彼此间有一定间隙的分子所组成,而且分子总是处于随机的运动状态,所以从微观角度来看,流体是一种非连续介质。但在研究流体的平衡和运动规律中,考虑的是由大量分子所组成的流体质点的宏观运动规律,而不是着眼于单个分子的微观运动状况;考虑的是在容器或管路内的变化,而不是平均自由程那样微小距离上的差异。流体质点的尺寸远小于流体所处空间的尺寸,但远大于分子自由程。所以,可以将流体视为由大量质点组成的、彼此间没有空隙的连续介质,作为连续函数求得流体的宏观特征量(如压强、密度、速度等),这就能大大简化

对于流体静止状态或运动状态规律的研究。应用连续介质这一物理模型所导出的方程及其计算结果,与实验结果是一致的。这表明按连续介质处理流体是合理的。只有在个别情况下,不能将流体作为连续介质来处理,例如航天飞机进入超高空极稀薄大气中的飞行阶段、地面上高真空技术和催化剂颗粒内气体扩散等问题,气体分子的自由程大到可同设备的特征长度相比拟。这些情况将不在本章讨论之列。

第一节 流体静力学

流体静力学主要研究流体在静止状态下所受的各种力之间的关系,实质上是讨论流体静止时其内部压强变化的规律。由于它涉及流体的密度、压强等物理量,因此这里首先介绍一下有关的基本概念。

§ 1-1-1 流体的密度

单位体积的流体所具有的质量称为密度,用符号 ρ 表示之。其表达式为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1-1)$$

式中 m 为流体的质量,kg; V 是质量为 m 的流体的体积, m^3 。因此密度的单位为 kg/m^3 。

密度是流体的物理性质。一般来说,其值随压强和温度的变化而改变,在数学上表示为函数,即

$$\rho = f(p, T) \quad (1-2)$$

式中 p 为流体的压强; T 为流体的温度。

流体的密度一般可在物理化学手册或有关资料中查到,本书附录中也列有某些常见液体和气体的密度数值。

1. 液体的密度

液体的密度几乎不随压强而变化,但温度对液体密度有一定影响,故可只根据温度条件,查取液体的密度。如果需要把在温度 T_1 下查得的密度 ρ_1 ,换算为操作温度 T_2 下的密度 ρ_2 ,则可应用下式

$$\rho_2 = \rho_1 / (1 + \varepsilon_v \Delta T) \quad (1-3)$$

式中 ε_v —— 液体的体积膨胀系数,绝大多数物质为正值;

$\Delta T = (T_2 - T_1)$ —— 温度差。

2. 气体的密度

气体的密度随温度和压强而变化,而且比液体显著得多,因此要根据温度及压强条件来确定气体的密度。当气体的压强不太高、温度不太低时,气体密度可按理想气体状态方程来计算,即

$$pV = nRT = \frac{m}{M} RT \quad (1-4)$$

或

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (1-4a)$$

式中 p 为气体的绝对压强,kPa; M 为气体的摩尔量,kg/kmol; R 为通用气体常数,其值为

8. $315\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$; T 为气体的绝对温度, K 。

另外, 若已知 T_0, p_0 下的 ρ_0 , 则 T, p 下的 ρ 亦可按下式计算

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0}{T} \frac{p}{p_0} \quad (1-5)$$

当温度较低, 压强较高时, 气体的密度应采用真实气体状态方程进行计算。

3. 流体混合物的密度

化工计算中所遇到的流体, 往往是含有几个组分的混合物。通常手册中所能查到的只是纯物质的密度, 因此混合液体、混合气体的平均密度如无实测值, 则用相应的公式来计算。

对于液体混合物, 各组分的浓度常用质量分率来表示。现以 1kg 混合液体为基准, 若各组分在混合前后其体积不变, 则 1kg 混合物的体积等于各组分单独存在时的体积之和, 即

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{mA}}{\rho_A} + \frac{x_{mB}}{\rho_B} + \dots + \frac{x_{mn}}{\rho_n} \quad (1-6)$$

式中 ρ_m —— 流体混合物的平均密度, kg/m^3 ;

$x_{mA}, x_{mB}, \dots, x_{mn}$ —— 混合物中各组分的质量分率;

$\rho_A, \rho_B, \dots, \rho_n$ —— 各纯组分的密度, kg/m^3 。

对于气体混合物, 各组分的浓度常用体积分率(也是摩尔分率)来表示。现以 1m^3 混合气体为基准, 若各组分在混合前后其压强与温度不变, 混合气体的质量等于各组分的质量之和, 即

$$\rho_m = \rho_A x_{VA} + \rho_B x_{VB} + \dots + \rho_n x_{Vn} \quad (1-7)$$

式中 $x_{VA}, x_{VB}, \dots, x_{Vn}$ —— 气体混合物中各组分的体积分率。

气体混合物的平均密度 ρ_m 也可按式(1-4)或(1-4a)计算, 此时应以气体混合物的平均分子量 M_m 代替式中的气体分子量 M , 气体混合物的平均分子量 M_m 可用下式计算

$$M_m = M_A x_{VA} + M_B x_{VB} + \dots + M_n x_{Vn} \quad (1-8)$$

式中 M_A, M_B, \dots, M_n —— 气体混合物中各组分的摩尔量。

§ 1-1-2 流体的作用力

无论处于运动还是静止状态的流体, 都承受着一定的作用力。

在流体中任取一微元体积作为研究对象, 它受到的力有表面力和质量力两类。

表面力是指与该流体微元接触的外界(器壁、或所指定的流体微元周围的其它流体)施加于该流体微元之力。表面力与作用的表面积成正比, 单位面积上的表面力称之为应力。通常可以将表面力分解为法向分力与切向分力, 如图 1-2 所示。单位面积上的法向力称之为流体的法向应力 $\sigma(\text{N}/\text{m}^2)$, 由图可见, 法向应力总是垂直且指向流体微元之任一表面, 又称之为压强。单位面积上的切向力称之为剪切应力 $\tau(\text{N}/\text{m}^2)$ 。静止流体不能承受任何剪切力, 所以只有法向力。

这里需要指出, 根据牛顿第三定律: 作用力等于反作用力, 则与器壁接触的流体所受到的表面力, 也就是流体施加于器壁的力, 但大小相等而方向相反。

除了通过直接接触而作用于流体表面的的表面力之外, 还有一种不与流体接触, 而施

加于整个流体的力,称为质量力。质量力与质量成正比。如流体在重力场中所受的重力与质量成正比,因此重力是一种质量力。如作用在质量为 m 的流体上的质量力为 F ,则单位质量的质量力为 F/m ,从物理学上可知其数值就等于加速度。若用 F_x, F_y, F_z 分别表示质量力 F 在 x, y, z 三个坐标方向上的分力,并用 X, Y, Z 分别表示单位质量的质量力在 x, y, z 轴上的分量,则 $X = F_x/m, Y = F_y/m, Z = F_z/m$,在数值上也分别等于加速度在 x, y, z 轴上的分量。如果取 z 轴垂直向上, xy 平面为水平面,则单位质量力在 x, y, z 轴向上的分量为



图 1-2 作用于流体的表面力

$$X = Y = 0; \quad Z = \frac{mg}{m} = -g$$

式中负号表示重力加速度 g 与坐标轴 z 方向相反。

若流体在离心力场中运动,则此时流体所受的作用力,除了重力外还有离心力^①,离心力也是一种质量力,与质量成正比。

§ 1-1-3 流体的压强及其特性

上节已指出作用于流体单位面积上的法向表面力称之为压强。流体处于静止状态时的压强又称之为静压强。压强具有应力的因次或单位,以 N/m^2 或 Pa(帕斯卡)表示。压强是流体力学中重要而又常用的物理量。习惯上常常将压强称之为压力,以后除特殊说明外,均将压强称之为压力,而将作用于流体一定大小表面积上的表面力的总和称之为总压力。

设作用于流体表面积 $S(m^2)$ 上的总压力为 $P(N)$,则平均压力可表示为

$$p_m = \frac{P}{S} \quad (1-9)$$

对于流体中任意一点的压力则可表示为

$$p = \lim_{s \rightarrow 0} \left(\frac{P}{s} \right) \quad (1-10)$$

在 SI 中,压力 p 的单位是帕斯卡,写作 Pa,但在工程实际中还采用其它单位,如 atm(标准大气压)、at(工程大气压)、bar(巴)或 kgf/cm^2 等,其间的换算关系为

$$1atm = 1.033kgf/cm^2 = 760mmHg = 10.33mH_2O = 1.01325bar = 1.01325 \times 10^5 Pa$$

$$1at = 1kgf/cm^2 = 735.6mmHg = 10mH_2O = 0.981bar = 9.81 \times 10^4 Pa$$

流体的压力除了用不同的单位来计量外,还可以用不同的计量基准来表示:以绝对零压(即完全真空)为基准的压力称为绝对压力;以当时当地大气压力为基准的压力称为表压。

表压为绝对压力与大气压力之差,即

$$\text{表压} = \text{绝对压力} - \text{大气压力}$$

表压值可用压力表直接测得,而绝对压力则是表压与大气压力之和。

若表压值低于当地大气压时,则表压的负值称为真空度(即大气压与绝对压力的差

^① 本书所谓的离心力都是指离心惯性力。

值)。

真空度表示绝对压低于大气压的值,即

$$\text{真空度} = \text{大气压力} - \text{绝对压力}$$

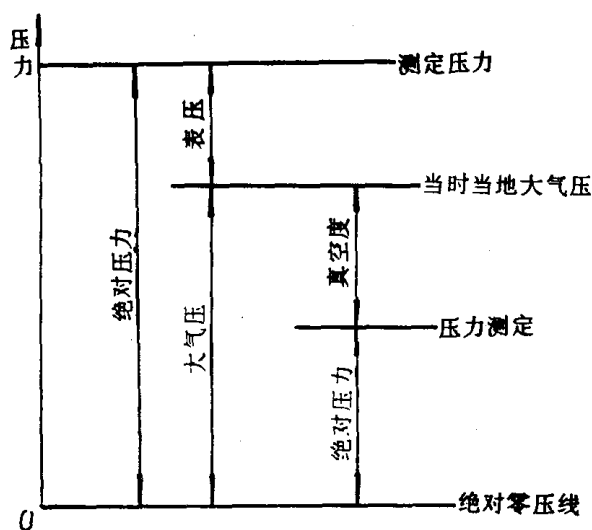


图 1-3 绝对压力、表压和真空度的关系

真空度亦可由真空表直接测量,而绝对压力则是大气压力与真空度之差。

绝对压力、表压、大气压以及真空度之间的关系如图 1-3 所示。

熟悉压力的各种计量单位与基准及换算关系,对于以后的学习和实际工程计算是十分重要的。

流体压力具有以下两个重要特性:

- (1) 流体压力处处与它的作用面垂直,并且总是指向流体的作用面;
- (2) 流体中任一点压力的大小与所选定的作用面在空间的方位无关。例如当测定流体中某点压力时,不论将测压管按水平、垂直还是其它任何方向插入,只要管端正好与该点接触,则压力表上所显示的读数是相同的。

在空间的不同点上,可以有不同的压力,因而它是空间坐标的单值函数,即

$$p = f(x, y, z) \quad (1-11)$$

如前所述,该式不仅适用于流体内部,也适用于与器壁接触的流体表面上的任一点。不管器壁的形状和方向怎样,压力也总是垂直于器壁的表面。

§ 1-1-4 流体静力学基本方程

为推导流体微元平衡微分方程,现从静止的流体中任取一微元立方体(图 1-4),其各边边长为 dx, dy, dz , 分别与 ox, oy, oz 轴平行。流体微元的中心点为 $A(x, y, z)$, 体积 $dV = dx dy dz$, 密度为 ρ 。该流体微元受到的作用力有两种,现在分析它在三个坐标轴上的受力平衡关系。

(1) 各面上的表面力。若设微元体中心点 A 处的压力为 p , 则沿 x 轴作用于左右两侧面上的压力分别为 $p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{2}$ 和 $p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{2}$, $\frac{\partial p}{\partial x}$ 是质点随 x 轴变化时压力的变化率,称之为压