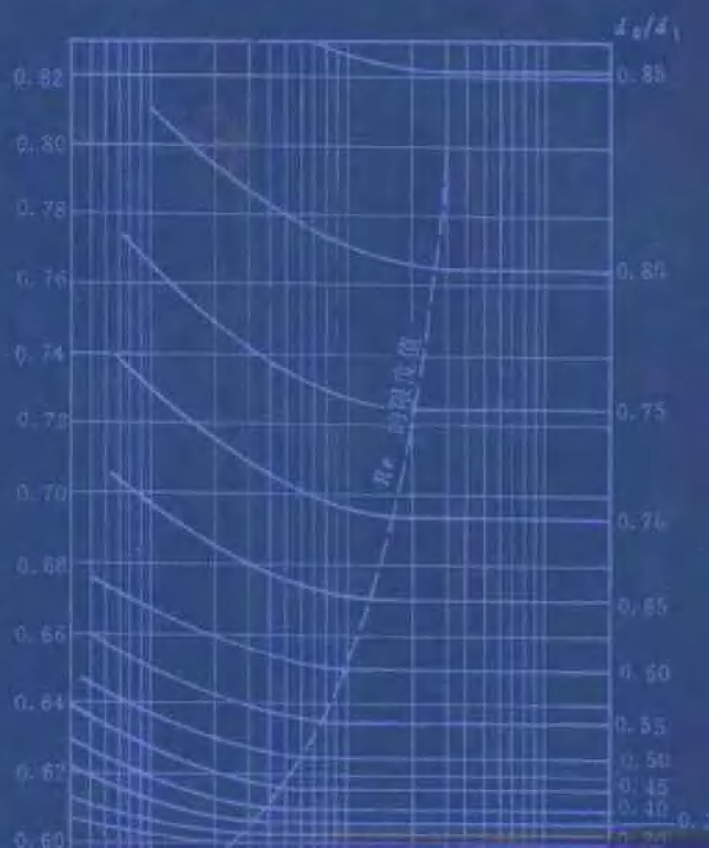


高等学校教材

化工原理

(上册)

大连理工大学 编



高等教育出版社

高等学校教材

化工原理

(上册)

大连理工大学 编



A0965920

高等教育出版社

内容简介

本书是根据大连理工大学化工原理教研室多年的教学及科研实践,并参考国内外的教材组织编写的。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、流体输送设备、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、干燥和膜分离等章。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。

本书可作为化工类专业本科生教材,也可供轻工、食品、石油等专业及有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理.上册/大连理工大学编.—北京:高等教育出版社,2002.7

ISBN 7-04-010617-5

I.化… II.大… 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(2001)第 098671 号

责任编辑 耿承延 封面设计 王凌波 责任绘图 尹莉
版式设计 马静如 责任校对 康晓燕 责任印制 宋克学

化工原理(上册)
大连理工大学 编

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市东城区沙滩后街 55 号
邮政编码 100009
传 真 010-64014048

购书热线 010-64054588
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>

经 销 新华书店北京发行所
印 刷 北京人卫印刷厂

开 本 787×1092 1/16
印 张 27.5
字 数 670 000

版 次 2002 年 7 月第 1 版
印 次 2002 年 7 月第 1 次印刷
定 价 31.40 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前 言

化工原理课程是化学工程与化工工艺类及相关专业的重要基础技术课。其主要任务是研究化工过程的单元操作基本原理、典型过程设备结构,进行过程工艺设计计算和设备选型及单元过程的操作分析。本课程在培养从事化工科学研究和工程技术人才过程中发挥着重要的作用。为此,不断改进和建设本课程、结合人才培养和社会生产发展及时充实、调整教学内容,提高教材理论和技术水平,适时编写新教材是十分必要的。

大连理工大学从早期的翻译、编著化工原理到20世纪70年代的自编教材,从80年代参编全国统编教材,到80年代中期再度在校内试用自编教材、90年代正式出版教材至今,长期坚持不懈地进行化工原理课程的教材建设。现又在多年教材建设和教学积累的经验基础上,结合近十年的教学和科研成果编写了《化工原理》(上册、下册)。

该教材在编写中努力遵循认识规律,从学科的特点出发进行编写。注意汲取国内外本学科发展的新成果和现代技术。坚持继承发扬的原则,合理地提升理论基础,强化理论与工程实际的联系,努力创新。

本教材适当地介绍了单元操作的发展和运用,较多地采用工程实例,以计算机为工具,采用现代技术和方法完成本课程的工程设计和过程的模拟与分析。以满足现代技术人才培养的需要。

全套教材共十章。上册含流体流动、流体输送设备、液体流过颗粒床层和流态化、传热、蒸发共五章;下册含蒸馏、吸收、萃取、干燥、膜分离与吸附共五章。上册由王世广主编。参加各章编写的有:袁一、王世广(绪论),王世广(第1章),贺高红(第2章),潘艳秋(第3章),都健(第4章),赵毅(第5章)。下册由樊希山主编。参加各章编写的有:樊希山(第6章),匡国柱(第7章),孙力(第8章),王瑶(第9章),贺高红(第10章)。在本书的编写中,得到了教研室的全体同行们及多年来历次参加教材编写的教师们关心和支持。清华大学蒋维钧教授在教材审阅中提出许多宝贵意见,于此,表示衷心的感谢。限于编者的水平,书中难免有错和不妥之处,恳请读者批评指正。

编者

2001年12月

目 录

绪论	(1)	1.6.3 文丘里流量计	(79)
第1章 流体流动	(4)	1.6.4 转子流量计	(80)
1.1 概述	(4)	1.6.5 堰	(82)
1.1.1 流体流动是各单元操作的基础	(4)	1.7 流体流动与动量传递	(83)
1.1.2 连续介质假定	(4)	习题	(85)
1.1.3 流体流动中的作用力	(5)	本章符号说明	(92)
1.1.4 流体的特征和密度及其压缩性	(6)	第2章 流体输送设备	(94)
1.2 流体静力学	(8)	2.1 概述	(94)
1.2.1 流体的压强及其特性	(8)	2.2 离心泵	(95)
1.2.2 流体静力学基本方程式	(9)	2.2.1 离心泵的基本结构、工作原理与 性能参数	(95)
1.2.3 流体静力学基本方程式的应用	(12)	2.2.2 离心泵的基本方程	(97)
1.3 流体动力学	(15)	2.2.3 离心泵的效率 and 实际压头	(102)
1.3.1 流量与流速	(15)	2.2.4 离心泵的特性曲线	(104)
1.3.2 稳态流动与非稳态流动	(17)	2.2.5 离心泵的汽蚀现象和安装 高度	(109)
1.3.3 连续性方程式	(18)	2.2.6 离心泵在管路中的工况	(115)
1.3.4 柏努利方程式	(19)	2.2.7 离心泵的组合运转工况分析	(117)
1.3.5 实际流体流动的机械能衡算式	(22)	2.2.8 离心泵的类型与选用	(119)
1.3.6 实际流体流动的机械能衡算式 的应用	(26)	2.3 容积式泵	(127)
1.4 流体流动阻力	(29)	2.3.1 往复泵	(127)
1.4.1 流体的粘性与牛顿粘性定律	(29)	2.3.2 隔膜泵和计量泵	(129)
1.4.2 流体的流动类型——层流和 湍流	(33)	2.3.3 转子泵	(130)
1.4.3 直圆管内流体的流动	(34)	2.4 其他类型的叶片式泵	(131)
1.4.4 边界层的概念	(40)	2.4.1 旋涡泵	(131)
1.4.5 流体流动阻力的计算	(43)	2.4.2 轴流泵和混流泵	(132)
1.4.6 量纲分析	(57)	2.5 各类泵的比较与选择	(133)
1.5 管路计算	(62)	2.6 通风机、鼓风机、压缩机和真 空泵	(136)
1.5.1 简单管路	(63)	2.6.1 离心式通风机	(137)
1.5.2 复杂管路	(66)	2.6.2 鼓风机	(140)
1.5.3 可压缩流体的流动	(69)	2.6.3 压缩机	(141)
1.6 流速和流量的测定	(73)	2.6.4 真空泵	(153)
1.6.1 测速管	(73)	习题	(156)
1.6.2 孔板流量计	(76)		

本章符号说明	(160)	3.8.3 静电除尘器	(228)
第3章 流体相对颗粒(床层)的流动及机械分离	(161)	3.8.4 湿式除尘器	(229)
3.1 概述	(161)	习题	(231)
3.2 颗粒及颗粒床层的特性	(161)	本章符号说明	(234)
3.2.1 单颗粒的特性参数	(161)	第4章 传热	(236)
3.2.2 混合颗粒的特性参数	(162)	4.1 概述	(236)
3.2.3 颗粒床层的特性	(164)	4.1.1 传热在化工生产中的应用	(236)
3.3 流体与颗粒间的相对运动	(166)	4.1.2 传热的基本方式	(236)
3.3.1 流体绕过颗粒的流动分析	(166)	4.1.3 稳态传热和非稳态传热	(237)
3.3.2 颗粒在流体中的流动	(169)	4.2 热传导	(237)
3.4 沉降	(170)	4.2.1 基本概念和傅里叶定律	(237)
3.4.1 重力沉降速度的计算	(170)	4.2.2 热导率	(239)
3.4.2 重力沉降设备	(175)	4.2.3 平壁的稳态热传导	(241)
3.4.3 离心沉降速度的计算	(180)	4.2.4 长圆筒壁的稳态热传导	(244)
3.4.4 离心沉降设备	(181)	4.2.5 圆球壁的稳态热传导	(246)
3.5 流体通过固定床的流动	(189)	4.3 对流传热	(248)
3.5.1 固定床的床层简化模型	(189)	4.3.1 热边界层的概念	(248)
3.5.2 流体通过固定床层的阻力	(191)	4.3.2 对流传热速率方程和表面传热系数	(249)
3.5.3 欧根方程的其他形式	(192)	4.4 表面传热系数的经验关联	(250)
3.6 过滤	(194)	4.4.1 表面传热系数的影响因素	(250)
3.6.1 过滤操作的基本概念	(194)	4.4.2 无相变化时对流传热过程的量纲分析	(251)
3.6.2 过滤过程的物料衡算	(195)	4.4.3 无相变化的对流传热	(255)
3.6.3 过滤基本方程式	(196)	4.4.4 有相变化的对流传热	(268)
3.6.4 过滤过程的计算	(198)	4.5 辐射传热	(280)
3.6.5 滤饼的洗涤	(202)	4.5.1 辐射传热的基本概念	(280)
3.6.6 过滤机及其生产能力	(203)	4.5.2 发射能力和辐射基本定律	(281)
3.6.7 离心过滤	(214)	4.5.3 两固体间的辐射传热	(284)
3.7 固体流态化及气力输送	(217)	4.5.4 气体的热辐射	(287)
3.7.1 床层的流态化过程	(217)	4.5.5 复合传热及设备的热损失	(289)
3.7.2 流化床的类似液体的特性	(218)	4.6 传热过程的计算	(292)
3.7.3 流体通过流化床的阻力	(219)	4.6.1 总传热速率方程	(292)
3.7.4 流化床的流化类型与不正常现象	(220)	4.6.2 热流量衡算	(293)
3.7.5 流化床的操作范围	(221)	4.6.3 传热系数和传热面积	(294)
3.7.6 流化床的高度与直径	(224)	4.6.4 平均温度差	(297)
3.7.7 气力输送的一般概念	(225)	4.6.5 传热效率和传热单元数法	(302)
3.7.8 气力输送的类型	(226)	4.7 换热器	(307)
3.8 气体的其他净化方法	(227)	4.7.1 间壁式换热器的类型	(307)
3.8.1 惯性分离器	(227)	4.7.2 列管式换热器的设计和选用	(311)
3.8.2 袋滤器	(227)	4.7.3 换热器的传热强化途径	(323)

4.7.4 其他类型换热器	(328)	附录 C 水在不同温度下的粘度	
4.7.5 换热器网络的综合	(337)	(0~100°C)	(383)
习 题	(337)	附录 D 饱和水蒸气表(以温度	
本章符号说明	(342)	为准)	(384)
第 5 章 蒸发	(344)	附录 E 饱和水蒸气表(以 kPa 为	
5.1 概述	(344)	单位的压力为准)	(385)
5.1.1 蒸发及应用	(344)	附录 F 某些液体的热导率	(387)
5.1.2 分类	(344)	附录 G 某些气体和蒸气的热导率 ..	(389)
5.1.3 蒸发操作的特点	(345)	附录 H 某些固体材料的热导率	(390)
5.2 蒸发设备	(345)	附录 I 液体的粘度和密度	(392)
5.2.1 蒸发器的结构及特点	(345)	附录 J 101.3kPa 压力下气体的	
5.2.2 除沫器、冷凝器和真空装置	(351)	粘度共线图	(396)
5.3 单效蒸发计算	(352)	附录 K 液体的比定压热容	(399)
5.3.1 物料衡算	(352)	附录 L 101.3kPa 压力下气体的	
5.3.2 热量衡算	(353)	比定压热容	(402)
5.3.3 蒸发器的传热面积	(356)	附录 M 气化热	(404)
5.3.4 溶液的沸点和传热温差损失	(360)	附录 N 液体的表面张力	(406)
5.4 多效蒸发和提高加热蒸汽		附录 O 某些有机液体的相对密度	
经济性的其他措施	(363)	(液体密度与 4°C 水的密度	
5.4.1 多效蒸发的流程	(363)	之比)	(409)
5.4.2 多效蒸发问题分析	(364)	附录 P 壁面污垢的热阻(污垢系	
5.4.3 多效蒸发的设计型计算	(367)	数)	(410)
5.4.4 提高加热蒸汽经济性的措施	(374)	附录 Q 无机物水溶液在大气压下	
习 题	(377)	的沸点	(412)
本章符号说明	(378)	附录 R 101.3kPa 溶液的沸点升高	
参考文献	(380)	与溶质质量分数的关系	(413)
附录	(381)	附录 S 管子规格(摘录)	(413)
附录 A 干空气的物理性质		附录 T 泵及风机规格(摘录)	(416)
(101.33kPa)	(381)	附录 U 换热器	(427)
附录 B 水的重要物理性质	(382)		

绪 论

化学工业和化学工程

化学工业是将自然界中的各种物质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。化工产品在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 20 世纪逐渐发展起来的,到了今天已经发展成为具有完整的体系,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。

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技术基础课。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,就可发现它们的共同之处是很明显的。在 20 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,如用泵输送液体、风机输送气体、压缩机对气体加压等操作。

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,虽然加热的物料不同,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量传递定律,具体来说,热载体的供热量等于冷载体的吸热量,热流量与二载体的温度差有关,也与流体的流动状况有关。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,如从海水中提取食盐和其他无机盐,将原油加工为汽油、柴油和润滑油(炼油工业是“大化工”的一个分支),从头到尾主要是物理过程。

为数众多的单元操作,按其操作的功能可以分为:物料的增压、减压和输送;物料的混合和分散;物料的加热和冷却;均相混合物的分离(蒸发、蒸馏、结晶等等);多相混合物的分离(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合物的分离再分为气-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、颗粒状物料的流态化等。
- ② 热量传递过程:包括加热、冷却、蒸气的冷凝、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 20 世纪 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 世纪 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,前者则侧重于实际工程应用。

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与典型化工单元设备的原则结构以及选型与工艺尺寸的计算。

化工原理课程的性质和它在整个教学计划中的地位,要求学习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,而是要解决真实的、复杂的生产问题。通过本课程,要学习怎样从复杂的工程问题中排除非主要因素,抽出关键环节,以合理的简化方式建立物理和数学模型,从而解决工程问题。

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,是学习本课程和用来解决工程问题时需要注意的。

物理量的单位及换算

化工原理课程采用国际单位制(SI),其基本单位有 7 个,而化工中常用的有 5 个:长度的单位为 m(米),质量的单位为 kg(千克),时间的单位为 s(秒),温度的单位为 K(开尔文),物质的量的单位为 mol(摩尔)。

在化工生产中,还使用一些非 SI 的法定计量单位,如时间的单位为 min(分)、h(小时)、d(日)、a(年);温度的单位还常用 $^{\circ}\text{C}$ (摄氏温度),旋转速度用 r/min(转每分)等。

由于历史上的原因,有些化工文献、手册、资料还可能遇到一些非法定计量单位和其他单位制。如压力单位还有物理大气压(atm)、工程大气压[at,也即公斤(力)/厘米²,kg(f)/cm²],bar(巴)、mmHg(毫米水银柱),mmH₂O(毫米水柱)等等。工程单位制(重力单位制)其基本单位长度为 m,时间为 s,力为 kg(f);厘米克秒制(CGS)的单位均是国际单位制的倍数和分数单位,其中一些有专门的名称。

单位和量纲

综上所述,同一个基本单位,可以用不同单位制中的单位来表示,但同一个基本单位,只能用一个基本量纲来表示,如长度用 L、质量用 M、时间用 T、温度用 Θ 来表示。可用基本量纲来表示一个物理量的量纲组成,如

$$[u] = L/T = LT^{-1}$$

上式即为量纲式,在求取流体流动阻力和表面传热系数计算式时均需要量纲式的概念。

第1章 流体流动

1.1 概 述

1.1.1 流体流动是各单元操作的基础

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 1.1.1 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)、流量计以及在管道中流动等,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,就要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型号,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的流体流动和输送问题。

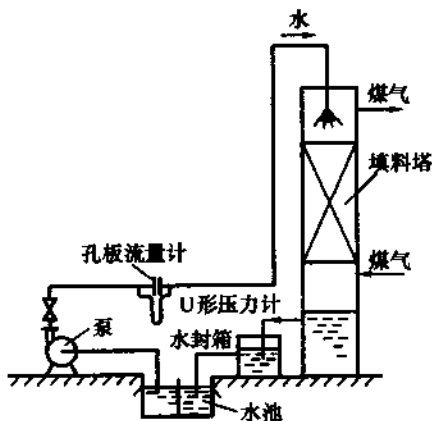


图 1.1.1 煤气洗涤塔

此外,在化工生产的传热和传质过程中,也大多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。

1.1.2 连续介质假定

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、地而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。但这些情况将不在本章讨论之列。

1.1.3 流体流动中的作用力

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他流体)施加于该流体微元之力。表面力与作用的表面积呈正比,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 1.1.2 所示。单位面积上的法向力称之为流体的法向应力 σ (N/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 τ (N/m^2)。静止流体没有承受任何剪切力,所以只有法向力。

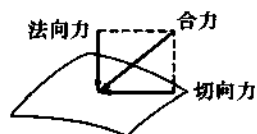


图 1.1.2 作用于流体的表面力

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上的表面力之外,还有一种不与流体接触,而施加于流体所有质点上,且与质量呈正比的力,称之为质量力,对于均质流体也与流体的体积呈正比,故也称之为体积力。流体在重力场中所受到的重力和在离心力场中所受到的离心力^①,都是质量力或体积力。重力和离心力均是场力。若设作用在质量为 m 的流体上的重力为 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自由落体加速度。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 $X = F_x/m, Y = F_y/m, Z = F_z/m$,在数值上也就分别等于自由落体加速度在 x, y, z 轴上的分量。若取 z 轴垂直向上, xy 平面为水平面,则单位质量力在 x, y, z 轴上的分量分别为

$$X = Y = 0 \quad Z = -mg/m = -g \quad (1.1.1)$$

式中 负号表示自由落体加速度 g 与坐标轴 z 的方向相反。

① 本书所谓的离心力都是指离心惯性力。

1.1.4 流体的特征和密度及其压缩性

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。

单位体积的流体所具有的质量称为流体的密度,用符号 ρ 表示,其表达式为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1.2)$$

式中 ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

m ——流体的质量, kg ;

V ——流体的体积, 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,可表示为

$$\rho = f(p, T) \quad (1.1.3)$$

式中 p ——流体的压强, Pa ;

T ——流体的热力学温度, K 。

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。

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

$$\rho_2 = \rho_1 / (1 + \beta_1 \Delta T) \quad (1.1.4)$$

式中 β_1 ——液体的体积膨胀系数,绝大多数物质为正值,单位为 $1/\text{K}$;

$\Delta T = (T_2 - T_1)$ ——温度差, K 。

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

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT \quad (1.1.5)$$

$$\text{或} \quad \rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (1.1.6)$$

式中 p ——气体的绝对压强, kPa ;

n ——气体的物质的量, mol ;

M ——气体的摩尔质量, g/mol ;

R ——摩尔气体常数,其值为 $8.315 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

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

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0 p}{T p_0} \quad (1.1.7)$$

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。

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若无实测值,则可应用相应的公式来计算。

对于液体混合物,各组分的含量常用质量分数来表示。现以 1 kg 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:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{w_A}{\rho_A} + \frac{w_B}{\rho_B} + \dots + \frac{w_n}{\rho_n} \quad (1.1.8)$$

式中 ρ_m ——液体混合物的平均密度, kg/m^3 ;

w_A, w_B, \dots, w_n ——混合物中各组分的质量分数;

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

对于气体混合物,各组分的含量常用体积分数(也是摩尔分数)来表示。现以 1 m^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

$$\rho_m = \rho_A x_A + \rho_B x_B + \dots + \rho_n x_n \quad (1.1.9)$$

式中 x_A, x_B, \dots, x_n ——气体混合物中各组分的摩尔分数(等于体积分数 φ)。

气体混合物的平均密度 ρ_m 也可按式(1.1.6)或式(1.1.7)计算,此时应以气体混合物的平均摩尔质量 M_m 替代式中气体的摩尔质量 M , 气体混合物的平均摩尔质量 M_m 可用下式计算

$$M_m = M_A x_A + M_B x_B + \dots + M_n x_n \quad (1.1.10)$$

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

在外部压力的作用下,流体分子间的距离会发生一定的改变,表现为其体积大小的变化。当作用在流体上的外力增大时,其体积要减小,这种特征称为流体的压缩性。

流体的压缩性可用体积压缩性系数 ϵ_v 来表示。压缩性系数 ϵ_v 是指当温度维持不变,压强每增加一个单位时,流体体积的相对变化量,现以单位质量流体的体积 v 为基准,将压缩性系数 ϵ_v 表示为

$$\epsilon_v = - \frac{1}{v} \frac{dv}{dp} \quad (1.1.11)$$

式中 ϵ_v ——压缩性系数, Pa^{-1} ;

负号——压强增加时,体积缩小;

v ——比体积, m^3/kg ;

p ——压强, Pa 。

由于 $\rho = \frac{1}{v}$, 即 $\rho v = 1$, 故有

$$\rho dv + v d\rho = 0 \quad (1.1.12)$$

据此,可将式(1.1.11)变成

$$\epsilon_v = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1.1.13)$$

式(1.1.13)表明压缩性系数 ϵ_V 值越大, 流体越容易压缩, 通常将 $\epsilon_V \neq 0$ 的流体称为可压缩流体。由于液体分子间的距离均很小, 故其压缩性系数 ϵ_V 也很小, 除了外压很大的情况外, 通常, 可忽略在外压作用下的液体密度的变化, 即压缩性系数 $\epsilon_V = 0$, 通常将 $\epsilon_V = 0$ 的流体称为不可压缩流体。

1.2 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。

1.2.1 流体的压强及其特性

在 1.1.3 中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。压强具有应力的量纲或单位, 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 上的总压力为 F , 则平均压力可表示为

$$p_m = \frac{F}{S} \quad (1.2.1)$$

对于流体中任意一点的压力则可表示为

$$p = \lim_{S \rightarrow 0} \left(\frac{F}{S} \right) \quad (1.2.2)$$

压力的大小除了直接以 Pa(帕斯卡)表示外, 在压力不高的场合, 工程上常间接地以流体柱高度表示, 如用 mH_2O 或 mmHg 等。液柱高度 h 与压力的关系为 $p = \rho gh$, 需要注意的是当以流体柱高度 h 表示压力时, 必须标明为何种流体。例如 1 atm (标准大气压) $= 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$, 即 101.3 kPa 或 0.1013 MPa , 相当于 760 mmHg 或 $10.33 \text{ mH}_2\text{O}$ 。

流体的压力除了用不同的单位来计量外, 还可以用如图 1.2.1 所示的不同的计量基准来表示: 以绝对零压(即完全真空)线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(即大气压力与绝对压力的差值)。

真空度表示绝对压力低于大气压力的数值, 即

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

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、大气压力以及真空度之间的关系如图 1.2.1 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。例如当测定流体内某点的压力时,不论将测压管按水平、垂直还是其他任何方向插入,只要管的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

$$p = f(x, y, z) \quad (1.2.3)$$

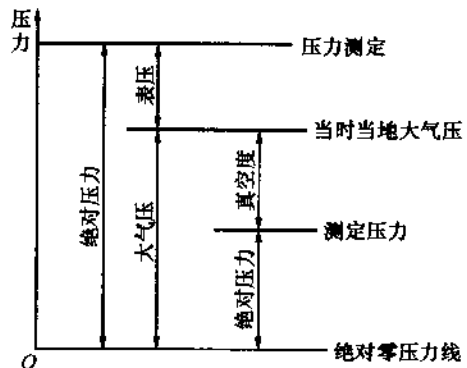


图 1.2.1 绝对压力、表压和真空度的关系

如前所述,式(1.2.3)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如何,压力也总是垂直于器壁的表面。

1.2.2 流体静力学基本方程式

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 1.2.2),其各边边

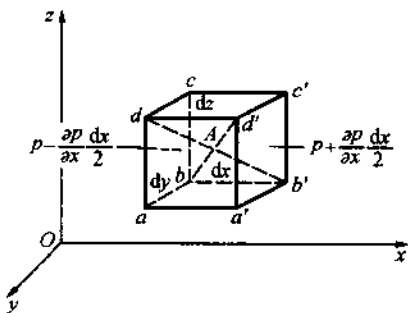


图 1.2.2 静止液体的立方微元

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 各表面上的表面力。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 轴变化时的压力变化率, 称之为压力梯度。因此, 作用于两侧面上的表面力分别为 $(p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{2}) dy dz$ 和 $(p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{2}) dy dz$ 。对于立方体其他四个侧面上的表面力, 也可以写出其相

应的表达式, 分别为 $(p - \frac{\partial p}{\partial y} \frac{dy}{2}) dx dz$ 和 $(p + \frac{\partial p}{\partial y} \frac{dy}{2}) dx dz$; 及 $(p - \frac{\partial p}{\partial z} \frac{dz}{2}) dx dy$ 和 $(p + \frac{\partial p}{\partial z} \frac{dz}{2}) dx dy$ 。

② 作用于流体微元上的质量力。设作用于单位质量流体上的质量力在 x 方向的分力为 X , 则 x 方向上的质量力分力为 $X \rho dx dy dz$ 。对于 y, z 方向的分力分别为 $Y \rho dx dy dz$ 和 $Z \rho dx dy dz$ 。

该流体微元处于静止状态,所以作用其上的表面力与质量力之和必等于零。对于 x 轴, $\sum F=0$,即

$$\left(p - \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{2}\right)dydz - \left(p + \frac{\partial p}{\partial x} \frac{dx}{2}\right)dydz + X\rho dx dy dz = 0 \quad (1.2.4)$$

若以流体微元的质量 $\rho dx dy dz$ 除以上式,则单位质量流体在 x 方向上的力平衡式为

$$X - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \quad (1.2.5)$$

同理
$$Y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (1.2.6)$$

$$Z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} = 0 \quad (1.2.7)$$

这就是所谓的流体平衡微分方程,又称之为欧拉平衡方程。

若流体所受的质量力仅为重力,又设重力的方向与负的 z 轴重合,则

$$X = Y = 0 \quad (1.2.8)$$

$$Z = -g \quad (1.2.9)$$

将式(1.2.8)代入式(1.2.5)和式(1.2.6),得

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = 0 \quad (1.2.10)$$

将式(1.2.9)代入式(1.2.7),得

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g \quad (1.2.11)$$

由于 $\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial p}{\partial y} = 0$,与 x, y 无关,故可将式(1.2.11)改为全微分,即

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \quad (1.2.12)$$

式(1.2.12)表明,静止流体中任一点的压力为流体密度和垂直位置的函数。

设图 1.2.3 的容器中盛有静止的液体,其密度为 ρ 。任意选定一水平面,作为基准面,例如以器底为基准面。液体中任意两点 1 和 2 与基准面的垂直距离分别为 z_1 和 z_2 ,相应的压力分别为 p_1 和 p_2 。在 1 和 2 两点之间积分式(1.2.12),因液体是不可压缩液体, ρ 是常数, g 也是常数,故

$$\int_{p_1}^{p_2} dp = -\rho g \int_{z_1}^{z_2} dz \quad (1.2.13)$$

$$p_2 = p_1 + \rho g(z_1 - z_2) \quad (1.2.14)$$

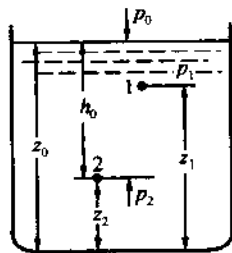


图 1.2.3 重力场中的压力分布

将式(1.2.14)称为流体静力学的基本方程式,适用于重力场中处于静止状态下的不可压缩