

高等学校教材

化工原理

诸林 刘瑾 王兵 王治红 等编

石油工业出版社

高等学校教材

化工原理

诸林 刘瑾 王兵 王治红 等编

石油工业出版社

内 容 提 要

本书主要论述石油加工单元过程的基本原理和有关设备。包括流体流动及输送机械、热量传递及传热设备、质量传递和传质设备、非均相物系分离、蒸发、气体吸收、蒸馏、萃取、固体干燥，还介绍了一些其他传质分离过程。本书注重基本概念，密切联系石油加工过程的生产实际，着重培养分析和解决实际工程问题的能力。本书可作为化工类及相关专业的本科教材，也可供从事化工生产、设计和管理的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理/诸林等编.

北京:石油工业出版社,2007.8

高等学校教材

ISBN 978-7-5021-6189-7

I. 化…

II. 诸…

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 (2007) 第 112469 号

出版发行:石油工业出版社

(北京安定门外安华里 2 区 1 号 100011)

网 址: www.petropub.com.cn

发行部: (010) 64523620

经 销: 全国新华书店

印 刷: 北京晨旭印刷厂

2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

787×1092 毫米 开本: 1/16 印张: 36

字数: 918 千字 印数: 1—2000 册

定价: 50.00 元

(如出现印装质量问题, 我社发行部负责调换)

版权所有, 翻印必究

前 言

化工原理是化学工程与工艺专业及其相近专业的重要基础专业课，是在完成基础课程学习的情况下向专业课程学习过渡的一门承上启下、由理及工的课程。其主要任务是研究化工过程中单元操作的基本原理、典型设备，使读者通过本课程的学习能进行化工工艺计算和设备的选型计算。

本书以基本化工单元操作为主线，重点介绍化工单元操作的基本原理、计算方法和典型设备，力求理论联系实际，突出工程特点。本书可作为化工类及相关专业的教学用书，也可供从事化工生产、管理的技术人员参考。

本书由诸林、刘瑾、王兵、王治红等编。全书共 13 章。其中，西南石油大学诸林编写绪论、第一章及第十章第一节，刘瑾编写第七、第八、第九、第十三章，王兵编写第四、第五章及第十章第二节，王治红编写第三、第十一章和附录；四川理工学院刘兴勇编写第六、第十二章；中国石油吐哈油田分公司王洪建、邓雪琴编写第二章。

本书由四川大学叶世超教授审阅并提出了许多宝贵意见和建议。在编写过程中，得到了广大同仁的大力支持和帮助，同时还得到了石油工业出版社、西南石油大学教材建设委员会的大力支持，在此一并致谢。限于编者的学识和水平，书中难免有疏漏和不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2006 年 12 月

目 录

绪论	1
第一章 流体流动	4
1.1 流体的基本性质	4
1.2 流体静力学基本方程及其应用	9
1.3 流体动力学基本方程	14
1.4 流体流动现象	24
1.5 管内流动的阻力损失	31
1.6 管路计算	44
1.7 流速与流量的测量	53
习题	59
本章主要符号说明	61
第二章 流体输送机械	63
2.1 液体输送机械	63
2.2 气体输送机械	79
习题	88
本章主要符号说明	90
第三章 非均相物系分离	91
3.1 概述	91
3.2 颗粒及床层特性	92
3.3 沉降分离	95
3.4 过滤	111
习题	123
本章主要符号说明	125
第四章 热量传递	127
4.1 概述	127
4.2 热传导	130
4.3 稳态热传导	133
4.4 对流传热	141
4.5 传热过程计算	158
4.6 辐射传热	175
习题	183
本章主要符号说明	186

第五章 传热设备	189
5.1 换热器的分类	189
5.2 间壁式换热器	190
5.3 列管式换热器的选用和设计	197
习题.....	205
本章主要符号说明.....	205
第六章 蒸发	207
6.1 概述	207
6.2 单效蒸发	208
6.3 多效蒸发	214
6.4 蒸发设备	217
习题.....	220
本章主要符号说明.....	221
第七章 质量传递基础	223
7.1 分子扩散	223
7.2 对流传质	232
7.3 相间传质	237
习题.....	240
本章主要符号说明.....	241
第八章 气体吸收	242
8.1 概述	242
8.2 气液相平衡	246
8.3 吸收过程传质速率方程	251
8.4 吸收塔计算	256
8.5 解吸塔计算	272
8.6 化学吸收	275
8.7 塔板数	279
8.8 多组分吸收	282
习题.....	285
本章主要符号说明.....	288
第九章 蒸馏	291
9.1 概述	291
9.2 气液相平衡	293
9.3 简单蒸馏与平衡蒸馏	298
9.4 精馏	302
9.5 双组分连续精馏简单塔的计算	306
9.6 双组分连续精馏的其他流程和复杂塔的计算	322
9.7 多组分连续精馏过程的计算	327
9.8 间歇精馏过程	340
9.9 特殊精馏	345

习题	353
本章主要符号说明	356
第十章 气液传质设备	359
10.1 填料塔	359
10.2 板式塔	372
习题	392
本章主要符号说明	393
第十一章 萃取	395
11.1 概述	395
11.2 萃取相平衡	396
11.3 萃取分离效果与萃取剂的选择	402
11.4 萃取流程和计算	404
11.5 连续接触逆流萃取流程与计算	415
11.6 回流萃取和双溶质萃取	416
11.7 萃取设备	417
习题	424
本章主要符号说明	426
第十二章 固体干燥	428
12.1 概述	428
12.2 湿空气的性质与湿度图	429
12.3 固体物料的干燥过程	438
12.4 干燥速率和干燥时间	446
12.5 干燥器	451
习题	456
本章主要符号说明	458
第十三章 其他传质分离过程	460
13.1 吸附分离	460
13.2 结晶	480
13.3 膜分离	491
习题	511
本章主要符号说明	512
附录	515
1. 部分物理量的单位和量纲	515
2. 单位换算表	515
3. 某些气体的重要物理性质	520
4. 某些液体的重要物理性质	521
5. 某些固体材料的重要性质	523
6. 水的重要物理性质	525
7. 空气的重要物理性质 (101.3kPa 压力下)	527
8. 水的饱和蒸气压 (-20~100℃)	528

9. 饱和水蒸气表 (按温度排列)	529
10. 饱和水蒸气表 (按压力排列)	531
11. 水的粘度 (0~100℃)	534
12. 液体粘度共线图	535
13. 气体粘度共线图 (常压下用)	537
14. 液体比热容共线图	538
15. 气体比热容共线图 (常压下用)	540
16. 液体汽化潜热共线图	542
17. 无机物水溶液在大气压下的沸点	544
18. 管子规格 (无缝钢管规格简表)	545
19. 离心泵规格	547
20. 离心通风机规格	551
21. 列管式换热器规格	552
22. 气体的扩散系数	558
23. 某些二元物系的气液平衡组成	559
24. 某些三元物系的液液平衡数据	561
25. 填料的特性	561
26. $p-T-K$ 图	563
参考文献	566

绪 论

(1) 课程的特点与内容。

《化工原理》是化工类及其相近专业的一门重要的专业技术基础课，在专业培养过程中有其特殊的地位和作用：

①本课程是在高等数学、物理、物理化学等课程的学习基础上而开出的一门基础专业课程，属于工程技术科学的范畴，是化工专业课程的基础。

②本课程具有显著的工程性。它的目的不单单是认识一些自然现象，而是要解决化工过程中复杂的生产实际问题。因此分析和处理问题的方法也就有别于先修理科课程，要学会从复杂的工程问题中抓住主要因素，排除次要因素，抽出关键环节，以合理的简化方式建立过程或对象的物理和数学模型，从而解决实际工程问题。

《化工原理》是在 20 世纪化学工程学科的发展中逐步形成的，它的内容主要涉及化工过程中化工单元操作的基础原理及其相关基础。

化工过程是指化学工业的生产过程，它的从原料到产品的加工链由许多操作步骤组成，原料在各步骤中依次通过若干个或若干组设备，经历各种方式的处理之后最终成为产品。由于不同的化学工业所用的原料与所得的产品不同，所以不同的化工过程之间的差别很大。

一个化工过程的操作步骤可分为两大类。一类以进行化学反应为主，通常是在反应器中进行；另一类则为不进行化学反应的物理过程，包括原料预处理过程和反应产物后处理过程。尽管从生产某种产品的意义上讲，反应过程是生产核心，但它在工厂的设备投资和操作费用中通常并不占据主要比例，实际上起决定作用的往往是众多的物理过程，它们决定了整个生产的经济效益。习惯上把这些重要的物理过程称为化工单元操作，简称单元操作。

单元操作具有以下特点：

(1) 一般而言它们都是物理性操作，即只改变物料的状态或其物理性质，而不改变其化学性质。

(2) 它们都是化工过程中共有的操作，但不同的化工过程中所包含的单元操作数目、名称与排列顺序各异。

(3) 某单元操作用于不同的化工过程，其基本原理是一致的，完成该操作的设备一般也是通用的。

化工生产中常用的单元操作如表 1 所示。

表 1 常用单元操作

传递基础	单元操作名称	目 的
动量传递	流体输送	将一定流量的流体从一个地方输送到另一个地方
	沉降	从气体或液体中分离悬浮的固相颗粒、液滴或气泡
	过滤	从气体或液体中分离悬浮的固相颗粒
	搅拌	使物料混合均匀或使过程加速
	流态化	用流体使固体颗粒悬浮并使其具有流体状态的特性
热量传递	换热	使物料升温、降温或改变相态
	蒸发	使溶液中的溶剂汽化而非挥发性的溶质分离，达到溶液浓缩

传递基础	单元操作名称	目的
质量传递	吸收	用液体吸收剂分离气体混合物
	蒸馏	利用液体混合物中各组分挥发度不同使液体混合物分离
	萃取	用液体萃取剂分离均相液体混合物
	浸取	用液体浸渍固体物料, 将其中的可溶组分分离出来
	吸附	用固体吸附剂分离气体或液体混合物
	离子交换 膜分离	用离子交换剂从溶液中提取或除去某些离子 用固体膜或液体膜分离气体混合物或液体混合物
热量、质量传递	干燥	加热固体使其所含液体汽化而除去
	增(减)湿	调节气体中的水汽含量
	结晶	使溶液中的溶质变成晶体析出

把各种不同的化工过程总结成为由数量不多的单元操作所组成的观点, 是对化工过程认识的进步, 它使人们认识到化工生产中的共性。单元操作这一概念的形成是化学工程学科发展中具有标志性的成果, 在此基础上形成了化工原理这门课程。

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, 而且动量、热量和质量的传递速率控制着过程的进行。动量、热量和质量的传递简称三传, 三个传递过程有时单独起作用, 有时则两个或三个同时起作用。

单元操作所研究的内容包括单元操作过程的基本原理和实现单元操作目的的典型设备。

(2) 基本研究方法。

在单元操作的发展过程中形成了两种基本研究方法, 即实验研究法和数学模型法。

①实验研究法。

影响化工过程的因素很多, 它们有时不能用物理、化学和数学等基本原理定量地分析和预测, 而必须通过实验来解决, 这就是实验研究法。它一般以量纲分析法为指导, 依靠实验建立过程参数之间的相互关系, 而且通常把各种参数的影响表示成为由若干有关参数组成的、具有一定物理意义的量纲—数群(也称准数)的影响。

②数学模型法。

数学模型法首先要对化工实际问题的机理作深入分析, 并在抓住过程本质的前提下进行某些合理的简化, 得出能基本反映过程机理的物理模型, 然后结合传递过程、物理化学的基本原理, 得到描述该过程的数学模型, 再用适当的数学方法求解。通常, 数学模型法所得结果包括反映过程特性的模型参数, 它必须通过实验才能确定(定参), 因而它是一种半经验、半理论的方法。

(3) 过程衡算、平衡与速率。

在研究单元操作时经常用到物料衡算、热量衡算、平衡关系和过程速率的基本概念, 这些概念是分析和进行化工计算的基础。

①物料衡算与热量衡算。

物料衡算也称为质量衡算, 其依据是质量守恒定律, 热量衡算的依据是能量守恒和热力学第一定律。

用衡算的方法分析单元过程时, 首先要划定衡算的范围, 也称为控制体。根据范围的大小, 衡算分为微分衡算与总衡算两种。微分衡算取设备或管道中的一个微元体为衡算范围; 总衡算的范围是设备的一个大的部分或整个设备, 也可以是包括几个设备的一段生产流程或

整个车间，甚至整个工厂。

对于选定的衡算范围，质量衡算、热量衡算的方程为：

$$\text{进衡算范围的量} - \text{出衡算范围的量} = \text{衡算范围内的积累量}$$

若过程为稳态过程，则衡算范围内的有关变量均不随时间而变，其积累量为零，即：

$$\text{进衡算范围的量} = \text{出衡算范围的量}$$

物料衡算和热量衡算是化工过程中最基本的计算。通过物料衡算可以为正确选择生产过程的流程和计算原料消耗定额以及设备的生产能力和主要尺寸提供依据；通过热量衡算可以计算单位产品的能耗，确定过程中需要输入或移出的热量并设计换热设备。

②过程的平衡与速率。

过程的平衡问题说明过程进行的方向和所能达到的极限。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工原理学习的基础。过程的速率指过程进行的快慢。当过程不是处于平衡状态时，则此过程将以一定的速率进行。例如传热过程，当两物体温度不同时，即温度不平衡，就会有净热量从高温物体向低温物体传递，直到两物体的温度相等为止，此时过程达到平衡，两物体间也就没有净的热量传递。

过程的速率和过程所处的状态与平衡状态的距离及其他诸多因素有关。过程所处的状态与平衡状态之间的距离通常称为过程的推动力。例如两物体间的传热过程，其过程的推动力就是两物体的温度差。通常有：

$$\text{过程速率} = \text{过程推动力} / \text{过程阻力}$$

即过程的速率与推动力成正比，与阻力成反比。

第一章 流体流动

学习目标：

- 了解边界层的概念
- 熟悉层流、湍流的特点；复杂管路的计算；测速管、孔板流量计和转子流量计的工作原理、基本结构与有关计算
- 掌握流体粘度的概念及影响因素，压力的表示法及单位换算；流体静力学方程、连续性方程、柏努利方程及其应用；流动型态及雷诺判据；流体在管内流动时的阻力损失计算；简单管路的计算

重点内容：

流体静力学方程、连续性方程、柏努利方程及其应用；流动型态及雷诺判据；流体在管内流动时的阻力损失计算

流体指具有流动性的物质，气体和液体统称流体。化工过程所处理的物料大多是流体，且这些物料通过流动在设备间传送，而反应、传热、传质往往与流动状态息息相关，即参与化工过程的流体均涉及流动问题。这些流动既包括流体在管内的流动，也包括流体在各个单元操作过程及设备中的流动。同时，流体流动还涉及流体流量的测量、流体输送所需功率的计算等。因此，流体流动是重要的化工单元操作之一。

研究流体流动规律的学科称为流体力学，包括流体静力学和流体动力学。本章讨论流体流动过程的基本原理和流体在管内流动的规律。

1.1 流体的基本性质

1.1.1 连续介质假定

流体由运动着的分子构成，分子与分子之间都有一定间隙并且总是处于不断的随机运动之中。因而从微观的角度来看，流体是一种非连续性的介质。但在研究流体的平衡与运动规律中，人们考虑的是由大量分子所组成的流体质点的宏观运动，而不是单个分子的微观运动状况。因此工程上常常将流体视为充满所占空间的、由无数彼此间没有间隙的流体质点或微元组成的连续介质，这就是所谓的流体连续介质假定。流体质点是指由大量流体分子构成的微元团，其尺寸远远大于分子自由程而远小于流体所处空间的尺寸。在流体连续介质假定的基础上，流体的物理性质和运动参数就具有连续变化的特性，从而可以利用基于连续函数的数学工具从宏观角度考察和研究流体流动的规律。虽然连续性假设并不适宜于所有情况，例如对高真空稀薄气体、催化剂颗粒内的气体扩散等就不能成立，但是对大多数工程情况按连续性介质处理流体是合理的。

1.1.2 流体的压缩性

流体的压缩性是指流体的体积随压力变化而变化的关系。如果流体的体积不随压力而变化,该流体就是不可压缩流体,反之则为可压缩流体。实际流体都是可压缩的。液体的压缩性很小,在大多数场合下可视为不可压缩流体。气体压缩性比液体大得多,一般认为是可压缩的,称为可压缩流体。但如果压力变化很小,温度变化也很小,则可近似认为气体是不可压缩的。这需要具体问题具体分析。

1.1.3 作用在流体上的力

作用在流体上的所有外力可以分为体积力和表面力。

体积力又称质量力,是指作用在所考察流体的每个质点上的力,属于非接触性的力。例如流体在重力场中所受到的重力、在离心力场中所受到的离心力等,它与流体的质量成正比,也与流体的密度成正比,对于均一质量的流体则与其体积大小成正比。

表面力是指作用在所考察流体表面上的作用力。它的大小与流体的表面积成正比,通常可以将表面力分解为垂直于表面的法向分力(压力)和平行于表面的切向分力(剪切力),如图1-1所示。而单位面积上所受到的表面力称为应力,同样应力又可分为垂直于流体表面的法向应力(压力)和平行于表面的切向应力(剪切力)。静止流体只承受压力,不承受任何剪切力。

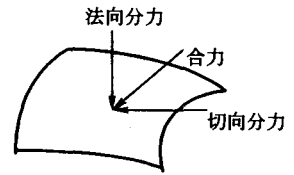


图1-1 作用于流体上的表面力

1.1.3.1 体积力与密度

流体在重力场中所受到的重力是典型的体积力,均质流体所受到的重力与流体的体积和密度成正比。

所谓密度即单位体积流体所具有的质量,通常用 ρ 来表示,单位为 kg/m^3 ,表达式为:

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

式中 m ——流体的质量, kg ;

V ——流体的体积, m^3 。

流体的密度是压力和温度的函数,即:

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

对于液体,压力的变化对其密度的影响很小,一般可以忽略不计,故通常可将其视为不可压缩流体。而温度的变化对液体的密度会有一定的影响,因此对液体的密度在查阅和使用时一定要附注温度条件。

同样地,对于气体,压力的变化对密度的影响相当显著,故通常视其为可压缩流体。本书附录3和附录4给出了一些常见气体和液体的密度值。

在压力不太高、温度不太低的情况下,可将气体视为理想气体,其密度可使用理想气体状态方程进行计算:

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1-3)$$

式中 p ——气体的绝对压力, Pa ;

M ——气体的摩尔质量, kg/mol;

R ——气体普适常数, 8.314J/(mol·K);

T ——气体的绝对温度, K。

由于压力、温度都会影响气体密度, 因此条件不同, 同一气体的密度值也不相同。此时可以使用理想气体状态方程进行换算, 使密度在两种不同的压力、温度条件下相比(式中1、2代表两种条件), 即:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{T_2 p_1}{T_1 p_2} \quad (1-4)$$

对于液体混合物, 因为其组成常用组分的质量分数来表达, 故混合液体的密度 ρ_m 用下式计算:

$$\frac{1}{\rho_m} = \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\rho_i} \quad (1-5)$$

式中 ρ_i ——液体混合物中组分 i 的密度, kg/m³;

w_i ——液体混合物中组分 i 的质量分数。

对于气体混合物有两种方法计算混合气体的密度。其一是将混合气体视为理想气体, 即采用式(1-3)计算密度, 此时式中的摩尔质量 M 使用混合气体的平均摩尔质量 M_m , 即:

$$\rho_m = \frac{\rho M_m}{RT}$$

气体混合物的平均摩尔质量可按下式计算, 即:

$$M_m = \sum_{i=1}^n M_i y_i \quad (1-6)$$

式中 y_i ——气体混合物中组分 i 的摩尔分数或体积分数;

M_i ——气体混合物中组分 i 的摩尔质量, kg/mol。

其二利用下式计算:

$$\rho_m = \sum_{i=1}^n \rho_i y_i \quad (1-7)$$

式中 ρ_i ——气体混合物中组分 i 的密度, kg/m³。

1.1.3.2 压力

压力是垂直作用于流体表面的力, 其大小与受力面积成正比。单位面积上的压力称为流体的静压强, 简称压强, 化工行业中习惯将其称为压力, 本书也遵从这一约定。

1) 压力的单位

在SI制中, 压力的单位为N/m², 称为帕斯卡, 以Pa表示。工程上还习惯使用其他压力单位, 如标准大气压(atm)、工程大气压(at, 1at=1kgf/m²)、毫米汞柱(mmHg)、米水柱(mH₂O)及巴(bar)等, 它们的换算关系为:

$$1\text{atm} = 1.033\text{kgf/cm}^2 = 760\text{mmHg} = 10.33\text{mH}_2\text{O} = 1.0133\text{bar} = 1.013 \times 10^5 \text{Pa}$$

2) 压力的表征

压力的大小常以两种不同的基准来表示。用绝对真空为基准计量的压力称为绝对压力, 简称绝压, 它是流体的真实压力。以当地大气压作为基准来计量的压力, 通常由压力表或真空表测出, 称为表压或真空度。表压或真空度与绝压的关系可用图1-2表示, 有:

表压 = 绝压 - 大气压

真空度 = 大气压 - 绝压

在同一地理位置，若表压越大，表明绝压也越大；若真空度越大，则说明绝压越小，真空程度越高。大气压即大气层压力的大小，与经纬度、海拔高度等因素有关，当地大气压可由气压计测量。化工计算中一般采用绝压进行计算，为了避免混淆，通常对表压、真空度加以标注说明，如 4000Pa（表压）、25mmHg（真空度）等，同时还应指明当地大气压。

1.1.3.3 剪切力与粘度

剪切力是平行作用于流体表面的力，液体与固体的主要差别就在于二者对剪切力抵抗能力的不同。固体在剪切力作用下会产生相应的形变以抵抗外力，而静止流体在剪切力的作用下发生连续不断的变形，即液体具有流动性。当流体流动时，流体内部存在着内摩擦力，这种内摩擦力会阻碍流体的流动，流体的这种特性称为粘性。

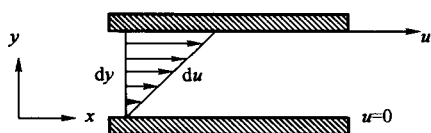


图 1-3 平板间粘性流体分层运动及速度分布

如图 1-3 所示，在上、下两块无限大且距离很近的平行平板之间充满了某种静止的流体。若将下板固定，对上板施加一恒定外力，使上板以速度 u 沿 x 方向做匀速运动。此时，紧靠上板的液体将粘附在其表面上而与之以相同的速度 u 向前运动。紧靠下板的液体，也因粘附作用而与下板一起保持不动。而两板之间的液体，则由于粘滞作用，从上到下速度逐渐由大变小，直至为零，两平板间流体速度呈线性变化。因此，两板间的流体可以看作分成了无数个平行于平板的流体层，层与层之间存在着速度差。速度较快的流体层中的流体，其在 x 方向的动量也大，该层流体分子中的一部分流体由于无规则热运动进入速度较慢的流体层，通过碰撞将动量传递给后者，使其产生一个加速力。同时，运动较慢的流体层亦有同样数量分子进入运动较快的流体层，而对后者产生一个大小相等、方向相反的减速力。这种传递一层一层进行，直至壁面。流体逐层向壁面传递动量的结果是产生了壁面处的摩擦力。这种运动着的流体内部相邻两流体层间的相互作用力就称为内摩擦力或粘滞力，内摩擦力实际上就是表面力。产生内摩擦力的内因是流体具有粘性。

实验证明，两相邻流体层之间的单位面积上的内摩擦力（即剪切力，用 τ 表示）与两流体层间的法向速度梯度 du/dy 成正比，即为牛顿粘性定律：

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-8)$$

式 (1-8) 中的比例系数 μ ，称为动力粘度，简称粘度。其物理意义表示速度梯度为 1 时，单位受力面积上流体层之间内摩擦力或剪切力的大小。显然，流体粘度是衡量流体粘性大小的一个物理量。

在 SI 单位制中，粘度的单位可由式 (1-8) 导出：

$$[\mu] = \left[\frac{\tau}{du/dy} \right] = \frac{N/m^2}{(m/s)/m} = Pa \cdot s$$

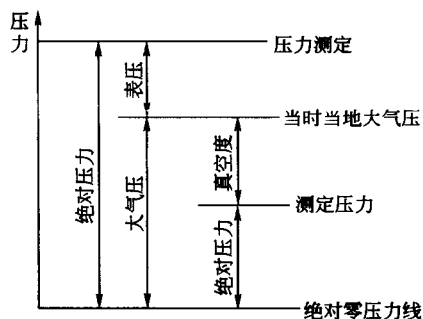


图 1-2 绝对压力、表压与真空度的关系

在 CGS 制中，粘度的常用单位为 $\text{dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ ，称为泊 (P)。也常用厘泊 (cP) 作为粘度的单位。粘度的 SI 制单位与 CGS 制单位之间的换算关系如下：

$$1\text{Pa} \cdot \text{s} = 10\text{P} = 1000\text{cP}$$

粘度作为流体的重要物理性质，可由实验测定。常用流体的粘度值，可以在有关手册或资料中查取，本书附录 3 和附录 4 列出了一些常见气体和液体的粘度。可以看出，大多数气体的粘度远远小于液体粘度。当缺乏实验数据时，也可以选用经验公式进行估算。

流体的粘度随温度而变，温度升高，液体粘度降低，而气体粘度增大。压力对液体粘度基本上无影响，而对气体粘度的影响只有在极高或极低压力下才比较明显。

流体混合物的粘度需选用适当的经验公式进行估算。如在不缔合混合液体的粘度可由下式计算：

$$\lg \mu_m = \sum x_i \lg \mu_i \quad (1-9)$$

式中 μ_m ——混合液粘度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；

x_i ——混合液中 i 组分的摩尔分数；

μ_i ——混合液中 i 组分的粘度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

对于低压下大多数混合气体的粘度，则可采用 Wilke 的半经验公式进行估算：

$$\mu_m = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \mu_i}{\sum_{j=1}^n y_j \Phi_{ij}} \quad (1-10)$$

$$\Phi_{ij} = \frac{1}{\sqrt{8}} \left(1 + \frac{M_i}{M_j}\right)^{-1/2} \left[1 + \left(\frac{\mu_i}{\mu_j}\right)^{1/2} \left(\frac{M_j}{M_i}\right)^{1/4}\right]^2$$

式中 μ_m ——混合气体的粘度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；

y_i, y_j ——混合气体中 i, j 组分的摩尔分数；

μ_i, μ_j ——混合气体中 i, j 组分的粘度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ；

M_i, M_j ——混合气体中 i, j 组分的摩尔质量， kg/mol 。

在研究流体运动方程时为求解的方便，流体的粘性还用运动粘度 ν 来表达，其单位为 m^2/s ，运动粘度与粘度的关系为：

$$\nu = \mu/\rho \quad (1-11)$$

1.1.4 牛顿型流体与非牛顿型流体

凡剪切力与速度梯度的关系服从牛顿粘性定律的流体称为牛顿型流体，包括所有的气体和大部分低分子量（非聚合的）液体或溶液；反之则属于非牛顿型流体，例如浓稠的悬浮液、淤浆、乳浊液、长链聚合物溶液、生物流体、液体食品、涂料、粘土悬浮液以及混凝土混合物等。非牛顿型流体的剪切力与速度梯度成曲线关系，或者成不过原点的直线关系，如图 1-4 所示。

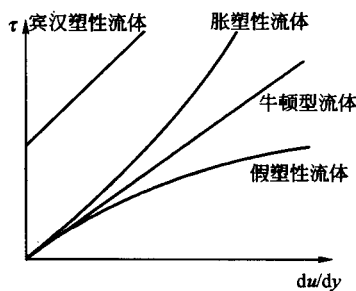


图 1-4 剪切力与速度梯度关系

非牛顿型流体可以分为三类：第一类是流体的剪切力与速度梯度间的关系不随时间而变，图 1-4 所示的流体均属于此类。第二类是流体的剪切力与速度梯度间的关系与时间有关，但为非弹性的，这类流体的现时性质与它最近受过的作用有关。例如番茄酱放着不动，会倒不出来，然而，一瓶刚

刚摇过的番茄酱就容易倒出来。第三类是粘弹性非牛顿流体，这类流体兼有固体的弹性与流体的流动特性，应力除去后其变形能够部分恢复。例如，面团受挤压通过小孔而成条状后，每条的截面积略大于小孔的面积。

目前在工程应用上对非牛顿型流体的研究，主要是集中在第一类，本书仅简单介绍这类非牛顿型流体。

1) 宾汉塑性流体

宾汉塑性流体 (Bingham plastic fluid) 的剪切力与速度梯度呈线性关系，但直线不过原点，见图 1-4，即：

$$\tau = \tau_0 + \mu \frac{du}{dy} \quad (1-12)$$

式 (1-12) 表示剪切力超过某临界值后流体才开始流动，属于此类的流体有油墨、纸浆、牙膏、泥浆等。

2) 假塑性流体和胀塑性流体

这两类流体的剪切力与速度梯度符合指数规律，即：

$$\tau = K \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (1-13)$$

式中 n ——流变指数 (flow behavior index)，量纲一；

K ——稠度指数 (consistency index)， $N \cdot s^n / m^2$ 。

n 、 K 均需实验确定。假塑性流体 $n < 1$ ，胀塑性流体 $n > 1$ ，牛顿型流体 $n = 1$ 。

与牛顿粘性定律相比，式 (1-13) 又可写成：

$$\tau = K \left(\frac{du}{dy} \right)^{n-1} \left(\frac{du}{dy} \right) = \mu_a \frac{du}{dy} \quad (1-14)$$

式 (1-14) 中 μ_a 称为表观粘度。表观粘度随速度梯度 du/dy 而变。假塑性流体的表观粘度随速度梯度的增大而减少，胀塑性流体的表观粘度随速度梯度的增大而增加。因此对非牛顿型流体的表观粘度，必须指明是在某一速度梯度下的数值，否则是没有意义的。

假塑性流体是非牛顿型流体中最重要的一类，大多数非牛顿型流体都属于这一类，如聚合物溶液、熔融体、油脂、油漆等。属于胀塑性流体的有淀粉、硅酸钾、阿拉伯树胶等的水溶液。

1.2 流体静力学基本方程及其应用

流体静力学主要研究流体在静止状态时的有关平衡规律，其实质是研究静止流体内部压力与位置高低的关系，它在流体压力测量、液位测量和设备液封等方面有广泛应用。

1.2.1 静止流体内静压力特性

静止流体单位面积所受到的压力习惯上称为静压力，通常用 p 表示。其特性有二，一是流体压力与作用面垂直且指向该作用面；二是静压力的大小与其作用面在空间的方位无关，而仅与其所处的位置有关，即静止流体中任一点不同方向的静压力在数值上均相等。

1.2.2 流体静力学基本方程

对静止流体做力的平衡，可得到静力学方程式。为此，在单一连续的静止流体中任意选