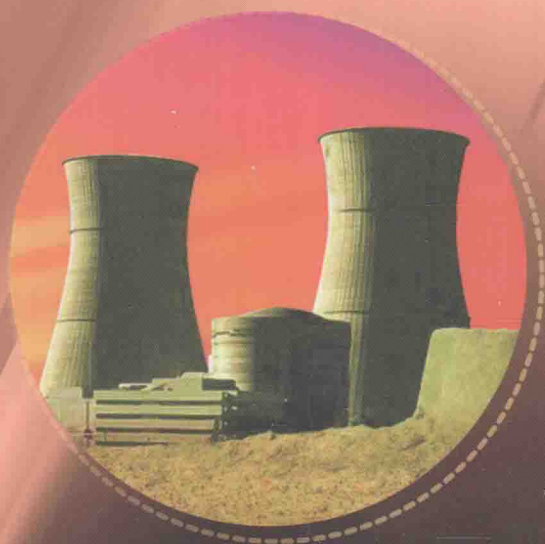




化工单元过程分析与

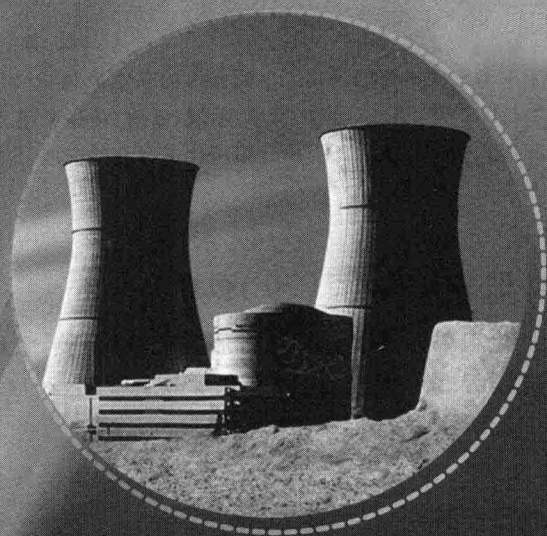
进展研究

HUAGONG DANYUAN GUOCHENG FENXI YU JINZHAN YANJIU

姚菊英 臧丽坤 冯志刚 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



化工单元过程分析与

进展研究

HUAGONG DANYUAN GUOCHENG FENXI YU JINZHAN YANJIU

姚菊英 臧丽坤 冯志刚 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要研究的是化工单元操作的基本原理、计算方法和典型设备。基本化工单元操作主要有流体输送、搅拌、换热、蒸发、吸收、精馏、萃取、吸附、结晶和膜分离等,本书围绕这些操作单元进行力学分析、热量衡算或质量衡算。最后还简要介绍了化工行业的进展。本书可供化工、化学、制药、食品、材料等相关专业的研究人员参考和学习。

图书在版编目(CIP)数据

化工单元过程分析与进展研究/姚菊英,臧丽坤,
冯志刚编著. --北京:中国水利水电出版社,2014.5
ISBN 978-7-5170-1909-1

I. ①化… II. ①姚… ②臧… ③冯… III. ①化工单
元操作—研究 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 075562 号

策划编辑:杨庆川 责任编辑:杨元泓 封面设计:马静静

书 名	化工单元过程分析与进展研究
作 者	姚菊英 臧丽坤 冯志刚 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:mchannel@263.net(万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话:(010)68367658(发行部)、82562819(万水) 北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京鑫海胜蓝数码科技有限公司
印 刷	三河市天润建兴印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 19 印张 462 千字
版 次	2014 年 6 月第 1 版 2014 年 6 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	66.00 元



凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

化工原理是化工类、环境类、食品及染整等相关专业的核心基础,一切与化学工程与工艺有关的技术都是需要深入学习、了解化工原理基本理论与方法。化工原理具有有很强的理论和工程实践性,是化学工程学科中的核心环节。随着现代科技的发展,出现化工学科与其他学科的交叉渗透,从而产生多种新型学科和边缘学科。化工单元操作越来越与其他学科如生物工程、食品工程、制药工程、环境能源工程、材料科学与工程、精细化工即应用化学等领域互相交叉,对这些学科的学习、探索都要以化工原理基本理论与方法为基础。

本书重点介绍化工单元操作的基本原理、计算方法和典型设备。在编撰过程中,力争保持系统完整,并尽量深入浅出,便于读者接受。在内容的取舍上注重化工单元操作基础理论和工程实际应用知识的介绍,注意吸收工业领域的新理论、新技术、新设备等新成果。

本书力图体现以下特点:

- (1)结构安排合理,语言精简易懂。
- (2)根据科学发展和认识规律,循序渐进,深入浅出地讲解。
- (3)理论与实践结合、突出重点、探索最新理论发展。

本书以化工原理基本理论和工程方法为两条主线,突出工程学科的特点,系统而简明地阐述了化工操作单元的基本理论、计算过程、典型设备的结构性能及过程。可以作为高校化工类及相关专业(化工、石油化工、生物、制药、食品、材料、冶金等)教材使用,也可供从事有关科研、设计、生成及管理工作的科技人员参考。

全书内容分为10章,第1章整体简介化工原理相关基础;第10章简述了化工的进展;余下各章为基础理论。本书将化工单元操作按过程共性归类,即以动量传递为基础,叙述了流体输送、搅拌、流体通过颗粒层的流动、绕流及其相关的单元操作;以热量传递为基础,阐述了换热及蒸发操作;以质量传递的原理说明了吸收、精馏、萃取、吸附、结晶和膜分离等传质单元操作,最后阐述了热量、质量同时传递过程的特点及增减湿和干燥操作。

本书编撰过程中,阅读和借鉴了大量的国内外相关专家学者的研究成果与著作,在此向有关作者表示由衷的敬意;编撰时也得到了许多同行的支持与帮助,在此表示深致谢意;书中部分图片来源与网络,仅供分析实用,版权归原作者所有。

鉴于作者学识所限,书中的错误和不妥之处,希望读者不吝指正。

作者

2013年10月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 化工内容与研究对象	1
1.2 单位制和单位换算	1
1.3 基本概念与研究方法	3
第 2 章 流体流动与输送机械	6
2.1 流体基本性质	6
2.2 流体静力学	12
2.3 流体动力学	20
2.4 流体流动阻力	26
2.5 管路计算	36
2.6 流速与流量的测量	39
2.7 流体输送机械	47
第 3 章 非均相机械分离单元过程	60
3.1 重力沉降	60
3.2 离心沉降	65
3.3 过滤	70
第 4 章 传热单元过程	87
4.1 概述	87
4.2 传热机理	90
4.3 热传导	96
4.4 对流传热	103
4.5 传热过程计算	110
4.6 换热器	113

第 5 章 吸收单元过程	120
5.1 概述	120
5.2 吸收和气液相平衡关系	123
5.3 吸收速率	132
5.4 相际传质	137
5.5 低含量气体吸收	140
5.6 填料塔	141
第 6 章 精馏单元过程	148
6.1 概述	148
6.2 双组分溶液的气液相平衡	148
6.3 精馏过程	154
6.4 双组分精馏理论塔板数的计算	158
6.5 板式塔	178
第 7 章 其他传质分离方法	190
7.1 液液萃取	190
7.2 结晶	206
7.3 吸附分离	217
7.4 膜分离	224
7.5 分离方法的选择	230
第 8 章 固体干燥单元过程	232
8.1 概述	232
8.2 干燥静力学	234
8.3 干燥速率与干燥过程计算	245
8.4 干燥器	258
第 9 章 动态化与气力输送	264
9.1 固体流态化	264
9.2 气力输送	268

第 10 章 现代化工进展	274
10.1 生物化工	274
10.2 精细化工	276
10.3 清洁生产化工	279
10.4 绿色化工	283
参考文献	295

第 1 章 绪 论

1.1 化工内容与研究对象

化工生产过程是将原材料大规模进行化学反应和物理加工处理,最终获得有价值产品的生产过程。这种以化学变化为主要标志的化学工业,由于其原料来源广泛,产品种类繁多,产品加工过程复杂多样、千差万别,形成了成千上万种不同的化工生产工艺。尽管不同化工产品的生产工艺过程与生产规模各不相同,但通常都是由化学反应过程及装置和若干物理操作过程有机组合而成。虽然化学反应过程及其反应器是化工生产的核心,但为了使化学反应过程得以经济有效地进行,反应器内必须保持适宜的工艺操作条件。为此,原料必须经过提纯、预热、加压等一系列前处理以达到反应所需要的原料组成、温度和压强等,反应后的产物也需要经过各种处理工序来进行分离、精制、输送等,以获得中间产品或最终产品。

在化工生产中具有共同物理变化特点和相同目的的基本操作过程称为化工单元操作,简称单元操作。实际上,在一个现代化的、设备林立的大型化工厂中,反应器的数量并不多,绝大多数的设备中都是进行着各种不同的单元操作。单元操作在化工生产过程中占据着重要的地位,对生产过程的经济效益产生着极大的影响。

按照物理过程的目的,可将各种前、后处理过程归纳成各类单元操作。

①单元操作都是化工生产过程中的共有操作,不同的化工生产过程中,所包含的单元操作数量、类型与顺序各异;

②单元操作都是物理性操作,整个操作过程中只有物料的状态或其物理性质发生改变,并没有新物质产生,并不改变物料的化学性质;

③具体的单元操作用于不同的化工产品生产时,其基本原理均相同,而且进行该操作的设备经常也是通用的;

④不同类型的单元操作均以三种传递理论为基础,有时会涵盖两种以上的传递理论。

根据各种单元操作的基本规律,可以发现单元操作从本质上可以分为动量传递、热量传递和质量传递三个大类。传递过程是联系各单元操作的一条主线,成为化工原理的统一的研究对象。

另外,还有热力过程(制冷)、粉体工程(粉碎、颗粒分级、流态化)等单元操作。

1.2 单位制和单位换算

任何物理量都是用数字和单位联合表达的。化工生产中使用的单位可分为基本单位和导出单位。基本单位是指基本量的单位。SI制共采用七个基本单位,即长度、质量、时间、温度、发光强度、电流、物质的量。常用的单位有长度、质量、时间、温度、物质的量五个基本单位。导

出单位是指由基本单位导出的单位。

(1)CGS 制(物理单位制)。基本物理量为长度、质量及时间,基本单位为厘米(cm)、克(g)、秒(s)。

(2)MKS 制(绝对单位制)。基本物理量为长度、质量及时间,基本单位为米(m)、千克(kg)、秒(s)。

(3)工程单位制(重力单位制)。基本物理量为长度、力(或重力)及时间,基本单位为米(m)、千克力(kgf)、秒(s)。

(4)SI 单位制(国际单位制)。在 MKS 制的基础上发展起来的。基本物理量为长度、质量、时间、温度、物质的量,基本单位为米(m)、千克(kg)、秒(s)。

目前国际上逐渐统一采取 SI 制,我国采用中华人民共和国法定计量单位(简称法定单位)。

由此可以看出,绝对单位制以长度、质量和时间为基本量,它们的单位为基本单位,力是导出量,其单位是导出单位;工程单位制是以长度、力和时间的单位为基本单位,质量的单位则属于导出单位;MKS 制和 SI 制虽都是以长度、质量和时间为基本量,其单位为基本单位,但长度和质量的基本单位与 cgs 制中的基本单位是不同的。

目前我国量和单位的使用遵循国家标准 GB3100~3102-1993,除个别领域外,不允许再使用非法定单位制。

SI 制还规定了一套词冠来表示倍数或分数。如 10^6 称为兆,代号为 M; 10^3 称为千,代号为 k; 10^{-3} 称为毫,代号为 m; 10^{-2} 称为厘,代号为 c。

SI 制还规定具有专门名称的导出单位的代号,可用它们的基本单位一起表示其他导出单位的常见的物理量,如表 1-1 所示。

表 1-1 用专门名称导出单位的 SI 制导出单位

物理量	中文代号	国际代号	基本单位表示
动力黏度	帕·秒	Pa·s	kg/(m·s)
表面张力	牛/米	N/m	kg/(m·s)
热流密度	瓦/米 ²	W/m ²	kg/s ³
比热容	焦/(千克·开)	J/(kg·K)	m ² /(s ² ·K)
导热系数	瓦/(米·开)	W/(m·K)	mkg/(s ³ ·K)
传热系数	瓦/(米 ² ·开)	W/(m ² ·K)	kg/(s ³ ·K)

除上述外,SI 制还规定了平面角和立体角两个辅助单位。平面角的单位称弧度,代号为 rad;立体角的单位称球面度,代号为 sr。

另外,还规定了如下的单位与 SI 制的单位并用;如时间采用日(d)、小时(h)、分(min);质量采用吨(t);容积采用升(L);平面角采用度(°)、分(')、秒(")。

在使用物理量方程进行计算时,本书采用的是 SI 制,但由于历史原因,有的物理量数据的单位不是 SI 制,因此在计算之前,如遇到别的单位制单位,应把它们换算成 SI 制单位。

当物理量的大小由一种单位换算成另一种单位时,其数值亦随之而变。此时,只要将原单

位表示的数值乘以换算因数便得到新的单位所表示的数值。所谓换算因数就是原单位与新单位大小的比值。如 1 m^3 等于 10^6 cm^3 , 把 m^3 换算成 cm^3 的换算因数就是 10^6 。

1.3 基本概念与研究方法

1.3.1 基本概念

1. 物料衡算

为了弄清生产过程中原料、成品以及损失的物料量,必须进行物料衡算。物料衡算为质量守恒定律的一种表现形式,即

$$\sum G_i = \sum G_o + G_a \quad (1-1)$$

式中, $\sum G_i$ ——输入物料的总和; $\sum G_o$ ——输出物料的总和; G_a ——累积的物料量。

式(1-1)为总物料衡算式。当过程没有化学反应时,它适用于物料中任一组分的衡算;当有化学反应时,它只适用于任一元素的衡算。若过程中累积的物料量为零,则式(1-1)可以简化为

$$\sum G_i = \sum G_o$$

上式所描述的过程属于稳态过程,一般连续不断的流水作业(即连续操作)为稳态过程,其特点是在设备的各个不同位置上,物料的流速、浓度、温度、压强等参数可各自不相同,但在同一位置上这些参数都不随时间而变。若过程中有物料累积,则属于非稳态过程,一般间歇操作(即分批操作)属于非稳态过程,在设备的同一位置上诸参数随时间而变。

以上各股物料量可用质量或物质的量衡量,对于液体及处于恒温、恒压下的理想气体还可用于体积衡量。常用质量分数表示溶液或固体混合物的组成,对理想混合气体还可用于体积分数(或摩尔分数)表示组成。

2. 能量衡算

能量一般包括机械能、热能、磁能、化学能、电能、原子能等,各种能量之间可以相互转化。化工计算时遇到的不是能量转化问题,而是总能量衡算,有时可以简化为热能或热量衡算。化工生产过程中一般只涉及机械能和热能。

能量衡算的依据是能量守恒定律,能量衡算的步骤与质量衡算的基本相同。能量衡算可写成如下等式:

$$\sum Q_{in} = \sum Q_{out} + Q_A \quad (1-2)$$

式中, $\sum Q_{in}$ 为随物料进入系统的总能量; $\sum Q_{out}$ 为随物料离开系统的总能量; Q_A 为系统累积的能量。

对于定态过程,系统内无能量累积,即 $Q_A = 0$, 所以能量衡算关系为:

$$\sum Q_{in} = \sum Q_{out}$$

式(1-2)也可以写成:

$$\sum (wH)_{\text{in}} = \sum (wH)_{\text{out}} + Q_A \quad (1-3)$$

式中, w 为物料的质量; H 为物料的焓。

能量衡算等式既适用于间歇过程,也适用于连续过程。作热量衡算时也和物料衡算一样,要规定出衡算基准和范围。此外,由于焓是相对值,与从哪一个温度算起有关,所以进行热量衡算时还要指明基准温度,简称基温。习惯上选 0°C 为基温,并规定 0°C 时液态的焓为零,这一点在计算中可以不指明。有时为了方便,要以其他温度作基准,这时应加以说明。

3. 过程的平衡与速率

任何一个物理或化学变化过程,在一定条件下必然沿着一定方向进行,直至达到动态平衡为止。这类平衡现象在化工生产中很多,如化学反应中的反应平衡,吸收、蒸馏操作中的气-液平衡,萃取操作中的液-液平衡等。

任何过程的平衡状态都是在一定条件下达到暂时、相对统一的状态,一旦条件变化,则原来的平衡就要被破坏,直至建立起新的平衡。因此我们只要适当地改变操作条件,过程进行就可按指定的方向进行,并尽可能使过程接近平衡,使设备能发挥最大的效能。平衡关系也为设备尺寸的设计提供了理论依据。

过程的平衡是指过程进行的方向和所能达到的极限。过程的速率则是指过程进行的快慢,也称为过程的传递速率。化工原理涉及传热速率和传质速率。过程速率的大小直接影响到设备的大小及经济效益等。过程速率等于过程推动力与过程阻力之比,即

$$\text{过程速率} = \frac{\text{推动力}}{\text{过程阻力}} \quad (1-4)$$

不同过程的传递速率不同,其推动力、阻力以及比例系数的表达方式都取决于过程的传递机理。

1.3.2 研究方法

1. 实验研究方法

化工过程十分复杂,除极少数简单的问题可以用理论分析的办法解决以外,都需要依靠实验研究加以解决。化工研究的任务和目的是通过小型实验、中间试验揭示过程的本质和规律,然后用于指导生产实际,进行实际生产过程与设备的设计与改进。实验研究方法直接用实验寻求各变量之间的联系,避免了方程的建立。

但如果实验工作必须遍历各种规格的设备和各种不同的物料,那么实验将反复进行而失去指导意义,因此必须建立实验研究的方法论。

实验研究方法一般以量纲分析和相似论为指导,依靠试验确定过程变量之间的关系,把各种因素的影响表示成为由若干个有关因素组成的、具有一定物理意义的无量纲数群的影响,以使实验结果在几何尺寸上能放大,在物料品种方面能“由此及彼”,具有指导意义。

2. 数学模型法

数学模型法需要对实际问题的机理做深入分析,并在抓住过程本质的前提下做出某些合理的简化,得出能基本反映过程机理的物理模型。通常,数学模型法所得结果包括反映过程特性的模型参数,其值须通过实验才能确定,并以实验检验模型的可靠性。因而它是一种半理论、半经验的方法。

随着计算机及计算技术的发展,复杂数学模型的求解已成为可能,所以数学模型法将逐步成为单元操作中的主要研究方法。

第2章 流体流动与输送机械

2.1 流体基本性质

2.1.1 流体概念

液体和气体统称为流体。流体抗剪和抗张的能力很小,在外力作用下,流体内部会发生相对运动,使流体变形,这种连续不断的变形就形成流动,即流体具有流动性。

流体由分子组成,分子间有一定的间距,并且分子都处于无规则的随机运动中,因此从分子角度而言,描述流体的物理量在空间和时间上的分布是不连续的。但在工程技术领域中人们感兴趣的是流体的宏观性质,即大量分子的统计平均特性,而不是单个分子的微观运动,因此提出了流体的连续介质模型,即将流体视为由无数分子集团所组成的连续介质。每个分子集团称为质点,其大小与容器或管路相比是微不足道的。质点在流体内部一个紧挨一个,它们之间没有任何空隙,即可认为流体充满其所占据的空间。把流体视为连续介质,目的是摆脱复杂的分子运动,从宏观的角度来研究流体的流动规律。但是,并不是在任何情况下都可以把流体视为连续介质,如高度真空下的气体就不能再视为连续介质了。

在化工生产过程中,处理的物料主要是流体,流体定义为不可能永久抵抗形变的物质,它包括液体与气体。化工生产过程通常需要将流体从一个装置输送到另一个装置,使之进行后续的加工处理,流体的流动和输送是最普遍的化工单元操作之一。流体输送设备及流体流量测量仪表的选择,以及其他化工单元操作如传热或传质过程,都与流体的流动有关。

化工过程中流体流动问题占有非常重要的地位,因为化工生产中的原料及产品大多数是流体,工艺生产过程的设计经常需要应用流体流动的基本原理,具体如下。

(1)流体的输送。通常设备之间是用管道连接的,欲把流体按规定的条件,从一个设备送到另一个设备,就需要选用适宜的流动速度,以确定输送管路的直径。在流体的输送过程中,常常要采用输送设备,因此需要计算流体在流动过程中应加入的外功,为选用输送设备提供依据。这些都要应用流体流动规律的数学表达式进行计算。

(2)压力、流速和流量的测量。为了了解和控制生产过程,需要对管路或设备内的压力、流速及流量等一系列参数进行测定,还需要合理地选用和安装测量仪表,而这些测量仪表的操作原理又多以流体的静止或流动规律为依据。

(3)为强化设备提供适宜的流动条件。化工生产的传热、传质等过程,都是在流体流动的情况下进行的,设备的操作效率与流体流动状况密切相关。因此,研究流体流动对寻找设备的强化途径具有重要意义。

2.1.2 流体的连续性

广义上讲,流体是指一切在应力作用下能够流动的、没有固定形状的物体,因此能流动是流体最基本的特性。气体和液体是最常见的两种流体形态,等离子体也是一种特殊的流体形态,此外膏体如牙膏、熔融的橡胶和塑料、悬浮液如水煤浆等都是流体的特殊形态,即便是生面团、凝胶等都可归为流体的范畴。

而固体在没有其他介质存在的情况下,固体内部任意位置都可产生宏观的孔洞。与固体不同,若无其他介质存在的前提下,流体内部不能形成宏观的孔洞,因此流体可以看作是连续性的整体,这就是流体的连续性。为了更好地理解流体的连续性,常引入流体质点的概念,将流体看成是由无数质点组成的一种连续性介质。流体质点是研究流体特性时所虚拟的能保持流体宏观特性的最小流体微元,流体内部的宏观特性都可通过某处质点的性质来描述。流体质点的尺寸远大于分子平均自由程,但又远小于设备的尺寸,因此可以认为流体是由无数彼此相连的流体质点组成的,是一种连续性介质。

需要注意的是,在分子密度稀薄的高真空中,流体的连续性将不成立,因此这时,气体分子的平均自由程可与设备的尺寸相比拟。但在大多数情况下,流体都可被看成连续性流体。

从微观上看,流体是不连续的,因为同大多数物质一样,组成流体的分子之间存在着间隙和范德华力,并不断地作无序的随机运动。但是工程应用上考虑的是流体的宏观特性,因此在研究流体特性时,一般情况下都认为流体是连续的。

2.1.3 流体的压缩性

从微观上讲,物质的存在状态与物质的分子间距有关。从固态到液态再到气态,物质的分子间距不断增大。一般情况下,在临界温度之下,随着压力的不断增大物质会经历三个状态的变化,首先从气态转变为液态,再转变为固态,物质的分子间距也经历从大到小的变化,因而物质的体积会随着压力的增大而减小。对固体而言,压力引起的体积变化在宏观研究领域完全可以忽略,但是对于流体,由于分子间距与固体相比较较大,因而相对容易压缩。这种流体的体积随着压力增大而减小的现象称为流体的可压缩性。

流体的可压缩性通常用体积压缩系数 β 表示。它表示在一定温度下,压力每增加一个单位时,流体体积的相对缩小量,即:

$$\beta = -\frac{1}{v} \times \frac{dv}{dp} \quad (2-1)$$

式中, v 为单位质量流体的体积即流体的比体积(比容), m^3/kg ; 负号表示压力增加时体积缩小。

由于 $\rho = 1/v$, 故有:

$$\rho dv + v d\rho = 1 \quad (2-2)$$

据此,式(2-1)又可写成:

$$\beta = \frac{1}{\rho} \times \frac{d\rho}{dp} \quad (2-3)$$

β 值越大,表明流体越容易被压缩。通常液体的压缩系数都很小,甚至某些液体的压缩系

数近似于 0, 其压缩性可以忽略。 $\beta \neq 0$ 的流体称为可压缩流体, 压缩性可忽略 ($\beta = 0$) 的流体称为不可压缩流体。

由式(2-3)可知, 对于不可压缩流体, $\frac{d\rho}{dp} = 0$ 。即流体的密度不随压力而改变。一般来说, 气体的密度随压力和温度变化较大, 因此气体一般情况下视为可压缩流体; 而大多数液体的密度随压力变化较小, 可视为不可压缩流体。但是, 实际上一切流体都是可压缩的。

2.1.4 流体的黏性

1. 牛顿黏性定律

静止流体不能承受任何切向应力, 当有切向应力作用时, 流体不再静止, 将发生连续不断的变形, 其内部质点间产生相对运动, 同时各质点间产生剪切力以抵抗其相对运动, 流体的这种性质称为黏性。所对应的切向应力称为黏滞力, 也称为内摩擦力。

牛顿黏性定律是个实验性定律。设有两块平行的平板, 其间充满流体, 如图 2-1 所示。假定 A 板固定, B 板以某速度 u_0 向右移动。由于流体与板间的附着力, 紧贴 B 板的流体层附着在板上, 以速度 u_0 随 B 板向右运动, 而紧贴 A 板的一层流体将如 A 板一样静止不动。介于两板之间的各层流体, 自上而下以逐层递减的速度向右移动。流动较快的流体层带动流动较慢的流体层; 反之流动较慢的流体层却又阻止流动较快的流体层向前运动, 从而两层流体之间产生了内摩擦力。

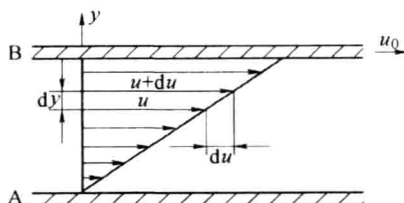


图 2-1 平板间流体速度的变化图

根据牛顿研究的结果, 发现流体运动时所产生的内摩擦力与流体的物理性质有关, 与流体层的接触面积和接触面法线方向的速度梯度成正比。其关系可用下式表示:

$$F = \mu S \frac{du}{dy} \quad (2-4)$$

式中, F 为流体层与流体层间的摩擦力, N; S 为流体层间的接触面积, m^2 ; $\frac{du}{dy}$ 为法向速度梯度, 即流体在垂直于运动方向上的速度变化率, $1/s$; μ 表示流体物理性质的比例系数, 称为动力黏度, 简称黏度, $Pa \cdot s$ 。

单位面积上的内摩擦力(称为剪应力)可表示为

$$\tau = \frac{F}{S} = \mu \frac{du}{dy} \quad (2-5)$$

式(2-4)和式(2-5)称为牛顿黏性定律, 流体内部所受的剪应力与速度梯度成正比。流

体静止时, $\frac{du}{dy} = 0$, 流体不受内摩擦力。对运动的流体, 凡遵循牛顿黏性定律的流体称为牛顿型流体, 如空气和水等低分子流体; 凡不遵循牛顿黏性定律的流体称为非牛顿型流体, 如油脂、牙膏、水泥浆和高分子化合物溶液等。

2. 流体的黏度

流体的黏度 μ 与流体的性质有关, 流体的黏性越大, 其值越大。

将式(2-5)改写成:

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} \quad (2-6)$$

由式(2-6)可知, 黏度的物理意义就是促使流体流动产生单位速度梯度的剪应力, 速度梯度最大处剪应力也最大, 速度梯度为零处剪应力也为零。因此黏度总是与速度梯度相联系, 只有在运动时才显现出来。分析静止流体的规律时就不用考虑黏度这个因素。

从分子角度考虑, 流体的黏性是由于动量传递的结果。因为当存在速度梯度时, 由于分子运动就会产生动量的传递。当流体的各层面之间发生相对运动时, 由于分子的无规则运动, 在相对运动层面之间就实现了动量交换。根据牛顿第二定律, 相对运动层面之间的剪切力应等于单位时间内通过单位面积传递的动量, 所以剪应力与速度梯度成正比。也就是说, 在一定条件下, 剪应力与速度梯度的比值是一常数, 这一常数就是式(2-6)所示的流体的黏度。因此黏度是流体的物理性质之一。

分子运动学研究表明, 气体的黏度随温度升高而增大, 随压强的变化较小, 只有在极高或极低的压强下, 才需考虑压强对气体黏度的影响。温度对气体黏度的影响可通过下列近似公式计算:

$$\frac{\mu}{\mu_0} = \left(\frac{T}{273} \right)^n \quad (2-7)$$

式中, μ 为热力学温度 T (K) 时的气体黏度; μ_0 为温度 273 K 时气体的黏度; n 为特定气体的常数。对空气 $n \approx 0.65$, 对二氧化碳、正丁烷和水蒸气, n 分别约等于 0.9、0.8 和 1.0。

液体的黏度随压强的变化基本不变, 但随温度升高而减小。例如, 水的黏度在 0°C 时为 $1.79 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$, 在 100°C 时为 $0.28 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 。

在 SI 单位制中, 黏度的单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。黏度值可通过试验测得, 某些常用流体的黏度可从本书的附录或有关手册中查得。在 CGS 单位制中, 黏度的单位为 $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s})$, 称为泊(P); 泊的单位较大, 常用泊的 1/100 来表示, 称为厘泊(cP)。三者之间的关系为:

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

此外, 流体的黏性还可用黏度 μ 与密度 ρ 的比值来表示。这个比值称为运动黏度, 以 ν 表示, 即:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-8)$$

运动黏度的 SI 单位为 $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; 在 CGS(米制)单位制中为 cm^2/s , 称为斯托(St)。

混合流体的黏度不能按简单的加和法计算, 在没有试验数据时, 可按经验公式进行估算。

常压混合气体的黏度可按如下公式估算：

$$\mu_m = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \mu_i M_i^{1/2}}{\sum_{i=1}^n y_i M_i^{1/2}} \quad (2-9)$$

式中， μ_m 为常压混合气体的黏度； y_i 为混合气体中 i 组分的摩尔分数； μ_i 为混合气体同温度下 i 组分的黏度， M_i 为 i 组分的摩尔质量。

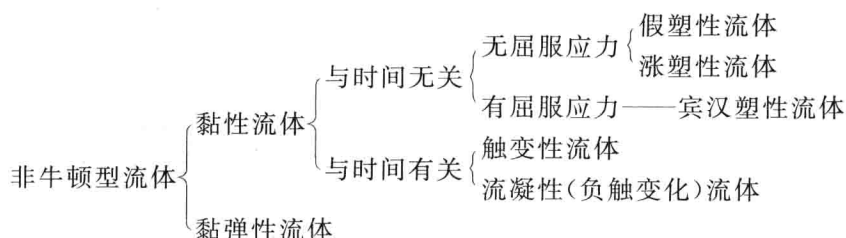
对分子不缔合的混合液体的黏度，可用如下公式估算：

$$\lg \mu_m = \sum_{i=1}^n x_i \lg \mu_i \quad (2-10)$$

式中， μ_m 为混合液体的黏度； x_i 为混合液体中 i 组分的摩尔分数； μ_i 为混合液体同温度下 i 组分的黏度。

3. 黏性流体

实际流体都具有黏性，具有黏性的流体统称为黏性流体或实际流体。在实际应用过程中，剪应力与剪切速率的关系服从牛顿黏性定律的流体称为牛顿型流体(Newtonian fluid)，反之则称为非牛顿型流体(non-Newtonian fluid)，一般可将非牛顿型流体分为以下几类。



非牛顿型流体的流变行为与流体的类型有关。在非牛顿型流体中，既具有黏性又具有弹性的流体称为黏弹性流体(viscoelastic fluid)，这类流体有生面团、凝固汽油等，这类流体通常能在消除剪应力后部分恢复由于剪应力引起的形变；只显示黏性而无弹性的流体称为非黏弹性流体。常见的非牛顿型流体大多属于非黏弹性流体。在非牛顿型流体中，在一定的剪切速率下，表观黏度会随剪应力作用时间变化的流体称为与时间有关的黏性流体，反之称为与时间无关的黏性流体。

与时间无关的非牛顿型流体，其剪应力与剪切速率的关系可见图 2-2 所示。这类流体主要有如下三类。

(1) 假塑性(pseudo plastic 或 shear-thinning)

流体这类流体的剪应力与剪切速率的关系如图 2-2 中的曲线 C 所示，可用如下关系式表示：

$$\tau = k \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (2-11)$$

式中， k 为稠度系数； n 为流性指数。显然，对假塑性流体而言， $n < 1$ 。为了与牛顿黏性定律比拟，将式(2-11)改写为：