

# 化工原理 上册

GAODENG XUEXIAO JIAOXUE YONGSHU

高等学校  
教学用书

陈 敏 恒 编  
丛 德 滋  
方 图 南

化学工业出版社

高等学校教学用书

# 化 工 原 理

上 册

陈敏恒 丛德滋 方图南 编

化 学 工 业 出 版 社

## 内 容 提 要

本书以过程原理的共性和处理工程问题的方法论作为贯穿化工单元操作的两条主线,注意从典型实例的剖析中提炼若干重要的工程观点,以期提高读者处理实际工程问题的能力。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、液体的搅拌、流体通过颗粒层的流动、颗粒的沉降和流态化、传热、蒸发等七章。每章均有例题和习题。概念论述清楚,可作为大专院校有关专业的师生作教材使用,也可供化工部门从事科研、设计和生产的技术人员参考。

本书由陈敏恒、丛德滋、方图南编写,张庆霖对全书作技术整理。原试用本曾经施亚钧、施其瑛校阅并提出宝贵意见,倪福生提供了部分习题,吴俊生、叶金大参加了部分修改工作。在编写和修改过程中得到华东化工学院化工原理教研组及兄弟院校许多同志的热情支持和帮助。

高等学校教学用书

化 工 原 理

上 册

陈敏恒 丛德滋 方图南 编

责任编辑:施承薇

封面设计:任 辉

化学工业出版社出版

(北京和平里七区十六号楼)

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ 印张23字数576千字印数1—25,170

1985年9月北京第1版1985年9月北京第1次印刷

统一书号15063·3766定价4.00元

# 目 录

绪论	1
<b>第一章 流体流动</b>	
第一节 概述	4
1-1-1 流体流动的考察方法	4
1-1-2 流体流动中的作用力	6
1-1-3 流体流动中的机械能	9
第二节 流体静力学	9
1-2-1 静压强及其特性	9
1-2-2 静压强在空间的分布	10
1-2-3 压强能和位能	11
1-2-4 压强的表示方法	11
1-2-5 压强的测量	12
第三节 流体流动中的守恒原理	14
1-3-1 质量守恒	14
1-3-2 机械能守恒	16
1-3-3 动量守恒	23
第四节 流体流动的内部结构	27
1-4-1 流动型态	27
1-4-2 湍流时的层流内层和过渡层	29
1-4-3 圆管内流体运动的数学描述	29
1-4-4 圆管内流体运动的速度分布	30
1-4-5 边界层及边界层脱体	32
第五节 阻力损失	34
1-5-1 层流时的直管阻力损失计算	34
1-5-2 湍流时直管阻力损失的实验研究方法	34
1-5-3 因次分析方法和 $\pi$ 定理	36
1-5-4 湍流直管阻力损失的经验式	38
1-5-5 局部阻力损失	41
第六节 流体输送管路的计算	46
1-6-1 阻力对管内流动的影响	46
1-6-2 管路计算	48
1-6-3 可压缩流体的管路计算	56
第七节 流速和流量的测定	60
1-7-1 毕托管	60
1-7-2 孔板流量计	62

1-7-3 转子流量计.....	66
第一章习题.....	69
本章符号说明.....	76
参考文献.....	77
<b>第二章 流体输送机械</b>	
第一节 概述.....	78
2-1-1 概述.....	78
第二节 离心泵.....	80
2-2-1 离心泵的工作原理.....	80
2-2-2 离心泵的功率和效率.....	85
2-2-3 离心泵的特性曲线.....	87
2-2-4 流量调节.....	91
2-2-5 离心泵的组合操作.....	92
2-2-6 离心泵的安装高度.....	93
2-2-7 离心泵的类型与选用.....	96
第三节 往复泵.....	98
2-3-1 往复泵的作用原理和类型.....	98
2-3-2 往复泵的流量及其不均匀性.....	100
2-3-3 往复泵的流量调节.....	102
第四节 其它化工用泵.....	103
2-4-1 非正位移泵.....	103
2-4-2 正位移泵.....	105
2-4-3 各类化工用泵的比较.....	106
第五节 气体输送机械.....	107
2-5-1 通风机.....	108
2-5-2 鼓风机.....	110
2-5-3 压缩机.....	111
2-5-4 真空泵.....	114
第二章习题.....	118
本章符号说明.....	120
参考文献.....	121
<b>第三章 液体的搅拌</b>	
第一节 概述.....	122
3-1-1 搅拌器的类型.....	122
第二节 混和效果的度量.....	124
3-2-1 调匀度.....	125
3-2-2 混和的尺度.....	125
第三节 混和机理.....	126
3-3-1 大尺度的混和机理.....	126
3-3-2 小尺度的混和机理.....	126

第四节 搅拌器的性能.....	128
3-4-1 搅拌器的两个功能.....	128
3-4-2 几种常用搅拌器的性能.....	128
3-4-3 强化湍动的措施.....	129
第五节 搅拌功率.....	131
3-5-1 搅拌器的混和效果与功率消耗.....	131
3-5-2 功率曲线.....	131
3-5-3 搅拌功率的分配.....	134
第六节 搅拌器的放大.....	135
3-6-1 搅拌器的放大.....	135
第三章习题.....	137
本章符号说明.....	137
参考文献.....	138
<b>第四章 流体通过颗粒层的流动</b>	
第一节 概述.....	139
4-1-1 概述.....	139
第二节 颗粒床层的特性.....	139
4-2-1 单颗粒的特性.....	139
4-2-2 颗粒群的特性.....	141
4-2-3 床层特性.....	144
第三节 流体通过固定床的压降.....	145
4-3-1 颗粒床层的简化模型.....	145
第四节 过滤.....	150
4-4-1 过滤原理.....	150
4-4-2 过滤过程的数学描述.....	152
4-4-3 过滤时间与滤液量的关系.....	154
4-4-4 滤饼的洗涤.....	159
第五节 过滤设备和操作.....	160
4-5-1 压滤和吸滤设备.....	160
4-5-2 离心过滤设备.....	165
第四章习题.....	166
本章符号说明.....	168
参考文献.....	169
<b>第五章 颗粒的沉降和流态化</b>	
第一节 概述.....	170
5-1-1 概述.....	170
第二节 颗粒的沉降运动.....	170
5-2-1 流体对固体颗粒的绕流.....	170
5-2-2 静止流体中颗粒的自由沉降.....	173
第三节 沉降分离设备.....	177

5-3-1 重力沉降设备	177
5-3-2 离心沉降设备	180
第四节 固体流态化技术	185
5-4-1 流化床的基本概念	186
5-4-2 实际的流化现象	187
5-4-3 流化床的主要特性	187
5-4-4 流化床的操作范围	190
5-4-5 流化床的浓相区高度和分离高度 (TDH)	192
5-4-6 流化质量	193
第五节 气力输送	196
5-5-1 概述	196
5-5-2 气力输送装置	197
5-5-3 稀相输送的流动特性	199
第五章习题	201
本章符号说明	202
参考文献	203
<b>第六章 传热</b>	
第一节 概述	205
6-1-1 概述	205
6-1-2 传热过程	207
第二节 热传导	208
6-2-1 傅立叶定律和导热系数	208
6-2-2 通过平壁的定态导热过程	211
6-2-3 通过圆筒壁的定态导热过程	212
6-2-4 通过多层壁的定态导热过程	214
第三节 对流给热	216
6-3-1 对流给热过程分析	216
6-3-2 对流给热过程的数学描述	218
6-3-3 对流给热的因次分析	219
6-3-4 对流给热系数的经验关联式	221
第四节 沸腾给热与冷凝给热	227
6-4-1 沸腾给热	227
6-4-2 沸腾给热过程的强化	229
6-4-3 蒸汽冷凝给热	230
6-4-4 冷凝给热系数	230
6-4-5 影响冷凝给热的因素及强化措施	235
第五节 热辐射	236
6-5-1 固体辐射	236
6-5-2 气体辐射	245
第六节 传热过程的计算	247

6-6-1 传热过程的数学描述	248
6-6-2 传热过程基本方程式	252
6-6-3 换热器的设计型计算	255
6-6-4 换热器的操作型计算	257
6-6-5 传热单元法	261
6-6-6 非定态传热过程的拟定态处理	264
6-6-7 变系数的传热过程计算	266
第七节 换热器	266
6-7-1 间壁式换热器的类型	266
6-7-2 管壳式换热器的设计和选用	269
6-7-3 其它类型换热器	280
第六章习题	283
本章符号说明	288
参考文献	289
<b>第七章 蒸发</b>	
第一节 概述	290
7-1-1 概述	290
第二节 蒸发设备	291
7-2-1 蒸发器	291
7-2-2 蒸发器的传热系数	295
7-2-3 蒸发辅助设备	296
第三节 蒸发操作的经济性和操作方式	298
7-3-1 生蒸汽的利用率	298
7-3-2 蒸发设备的生产强度	300
第四节 单效蒸发计算	302
7-4-1 单效蒸发过程的数学描述	302
第五节 多效蒸发计算	307
7-5-1 多效蒸发的过程分析	307
7-5-2 多效蒸发过程的数学描述	309
7-5-3 多效蒸发的计算方法	310
第七章习题	316
本章符号说明	316
参考文献	317
附录	318
一、单位因次及其换算	318
二、水与蒸汽的物理性质	322
三、干空气的物理性质 ( $P=760$ 毫米汞柱)	328
四、液体及水溶液的物理性质	329
五、气体的重要物理性质	343
六、固体性质	349



七、管子规格.....	350
八、泵与风机.....	353
九、换热器.....	356
十、标准筛目.....	359
十一、气体常数R.....	360

# 绪 论

## 化工生产过程

化学工业是对原料进行化学加工以获得有用的产品。显然，其核心应当是化学反应过程及其设备——反应器。但是，为使化学反应过程得以经济有效地进行，反应器内必须保持某些优惠条件，如适宜的压强、温度和物料的组成等。因此，原料必须经过一系列的预处理以除去杂质，达到必要的纯度、温度和压强。这些过程统称为前处理。反应产物同样需要经过各种后处理过程加以精制，以获得最终成品（或中间产品）。

例如，聚氯乙烯塑料的生产是以乙炔和氯化氢为原料进行加成反应以制取氯乙烯单体，然后在8个大气压、55℃左右进行聚合反应获得聚氯乙烯。在进行加成反应前，必须将乙炔和氯化氢中所含各种有害物除去，以免反应器中的催化剂中毒失效。反应生成物（氯乙烯单体）中含有未反应掉的氯化氢及其它副反应产物。未反应的氯化氢必须首先除去以免其对设备、管道的腐蚀，然后将反应后的气体压缩、冷凝并除去其它杂质，达到聚合反应所需的纯度和聚集状态。聚合所得的塑料颗粒和水的悬浮液须经脱水、干燥而后成为产品。这一生产过程可简要地图示如下：



此生产过程除单体合成、聚合属反应过程外，原料和反应物的提纯、精制等工序均属前、后处理过程。前、后处理工序中所进行的过程多数是纯物理过程，但却是化工生产所不可缺少的。

实际上，在一个现代化的、设备林立的大型工厂中，反应器为数并不多，绝大多数的设备中都是进行着各种前、后处理操作。也就是说，现代化学工业中的前、后处理工序占有着企业的大部分设备投资和操作费用。因此，目前已不是单纯由反应过程的优惠条件来决定必要的前、后处理过程，而必须总体地确定全系统的优惠条件。由此足见前、后处理过程在化工生产中的重要地位。

## 单元操作

为数众多的前、后处理过程可从不同的角度加以分类。首先按操作的目的将其分为

1. 物料的增压、减压和输送；
2. 物料的混和或分散；
3. 物料的加热或冷却；
4. 非均相混合物的分离；
5. 均相混合物的分离。

由于被加工物料相态的不同，上述各项也可作进一步细分。例如：气体的输送和液体的输送；液-固混合物的分离与气-固混合物分离；气体均相混合物的分离与液体均相混合物的

分离等等。

为了达到同样的目的，可以依据不同的原理、采用不同的方法。例如，液-固非均相混合物可依据其密度的不同采用沉降的方法实现分离的目的，也可利用其尺度的不同而采用过滤的方法加以分离。又如液态均相混合物可依据组分间挥发度的不同用精馏的方法分离，也可利用各组分在溶剂中溶解度不同，采用溶剂萃取法进行分离。

在化学工业的历史发展中，起初是按物理过程的目的，同时也兼顾过程的原理、相态，将各种前、后处理归纳成一系列的单元操作，如表 1 所示。

表 1 化工常用单元操作

单元操作	目的	物态	原理	传递过程
流体输送	输送	液或气	输入机械能	动量传递
搅拌	混和或分散	气-液；液-液； 固-液	输入机械能	动量传递
过滤	非均相混合物分离	液-固；气-固	尺度不同的截留	动量传递
沉降	非均相混合物分离	液-固；气-固	密度差引起的沉降运动	动量传递
加热、冷却	升温、降温，改变相态	气或液	利用温度差而传入或移出热量	热量传递
蒸发	溶剂与不挥发性溶质的分离	液	供热以汽化溶剂	热量传递
气体吸收	均相混合物分离	气	各组分在溶剂中溶解度的不同	物质传递
液体精馏	均相混合物分离	液	各组分间挥发度的不同	物质传递
萃取	均相混合物分离	液	各组分在溶剂中溶解度的不同	物质传递
干燥	去湿	固体	供热汽化	热、质同时传递

表中只列出常用的单元操作，此外尚有一些不常用的单元操作。而且，随着生产发展对前、后处理过程所提出的一些特殊要求，又不断地发展出若干新的单元操作。

就其内容而言，各单元操作包括两个方面：过程和设备。各单元操作中所发生的过程都有其内在的规律。例如，液-固非均相混合物的沉降分离中所进行的过程实质是细颗粒在液体中的自由沉降；过滤的过程实质是液体通过滤饼（颗粒层）的流动。又如气体的吸收分离中所发生的过程是某个组分由气相主体传递至气液界面，继而溶解，然后由界面传递到液相主体中去，其过程实质是传质-溶解。研究各单元操作就是为了掌握过程的规律，并设计设备的结构和大小，以使过程在有利的条件下进行。

#### “化工原理”课程的两条主线

从化学工业的各个行业中抽出单元操作加以研究，这是生产发展的需要。各单元操作依据不同的原理，适应于不同的物态，达到各自的目的。然而又何以统一于同一个学科之中呢？任何一个学科（或学科分支）之所以能成为一门学科，必须有统一的研究对象、统一的研究方法。

首先，各单元操作中所发生的过程虽然多种多样，但从物理本质上说只是下列三种：

- 一、动量传递过程（单相或多相流动）；
- 二、热量传递过程（传热）；
- 三、物质传递过程（传质）。

表 1 所列各单元操作皆归属传递过程。于是，传递过程成为统一的研究对象，也是联系各单元操作的一条主线。

另一方面，各单元操作有着共同的研究方法。化工原理是一门工程学科，它要解决的不单是过程的基本规律，而且面临着真实的、复杂的生产问题——特定的物料在特定的设备中

进行特定的过程。实际问题的复杂性不完全在于过程本身，而首先在于化工设备的复杂的几何形状和千变万化的物性。例如，过滤中发生的过程是流体的流动，其本身并不复杂，但滤饼提供的是形状不规则的网状结构通道。对这样的流动边界作出如实的、逼真的数学描述几乎是不可能的。采用直接的数学描述和方程求解的方法将是十分困难的。因此，探求合理的研究方法是发展这门工程学科的重要方面。

在这门学科的历史发展中已形成了两种基本的研究方法。一种是实验研究方法，即经验的方法；另一种是数学模型方法，即半理论半经验的方法。实验研究方法避免了方程的建立，直接用实验测取各变量之间的联系。但是，如果实验工作必须遍历各种尺寸的设备和各种不同的物料，那末，这样的实验将不胜其烦，而且失去了指导意义。因此必须建立实验研究的方法论，以使实验结果在几何尺寸上能“由小见大”，在物料品种方面能“由此及彼”。至今，本门学科已在相当程度上解决了这一问题。数学模型方法立足于对复杂的实际问题作出合理简化，从而使方程得以建立。例如，将滤饼中的不规则网状通道简化成若干个平行的圆形细管，由此引入的一些修正系数则由实验测定，因而这种方法是半经验、半理论的。由于数学模型方法抓住了影响过程的主要因素，大体上反映了过程的真实面貌，现正日益广泛地被采用。

由此可知，研究工程问题的方法论是联系各单元操作的另一条主线。

这样，以单元操作作为内容，以传递过程和研究方法论为主线组成了“化工原理”这一门课。

#### “化工原理”课程所回答的问题

化工原理是一门应用性课程。它应通过各有关过程的研究回答工业应用上提出的问题：

1. 如何根据各单元操作在技术上和经济上的特点，进行“过程和设备”的选择，以适应指定物系的特性，经济而有效地满足工艺的要求。
2. 如何进行过程的计算和设备的设计。在缺乏数据的情况下，如何组织实验以取得必要的设计数据。
3. 如何进行操作和调节以适应生产的不同要求。在操作发生故障时如何寻找故障的缘由。

当然，当生产提出新的要求而需要工程技术人员发展新的单元操作时，已有的单元操作发展的历史将对如何根据一个物理或物理化学的原理发展一个有效过程，如何调动有利的并克服不利的工程因素发展一种设备提供有用的借鉴。

# 第一章 流体流动

流体流动规律是本门课程的重要基础，主要原因是：

一、化学工业中涉及各种流体的输送问题，需要研究流体的流动规律以便进行管路的设计、输送机械的选择以及所需功率的计算。

二、化工设备中的传热、传质以及反应过程大多是在流动条件下进行的，流体的流动对这些过程有着重要的影响。因此，有必要了解流动的内部结构作为其后传热、传质过程研究的基础。

## 第一节 概 述

### 1-1-1 流体流动的考察方法

**连续性假定** 流体包括液体和气体。流体是由大量的彼此之间有一定间隙的单个分子所组成，而且各单个分子作着随机的、混乱的运动。如果以单个分子作为考察对象，那末，流体将是一种不连续的介质，所需处理的运动是一种随机的运动，问题将是非常复杂的。

但是，在流动规律的研究中，人们感兴趣的不是单个分子的微观运动，而是流体宏观的机械运动。因此，可以取流体质点（或微团）而不是单个分子作为最小的考察对象。所谓质点指的是一个含有大量分子的流体微团，其尺寸远小于设备尺寸但比起分子自由程要大得多。这样，可以假定流体是由大量质点组成的、彼此间没有空隙、完全充满所占空间的连续介质。流体的物理性质及运动参数在空间作连续分布，从而可以使用连续函数的数学工具加以描述。

实践证明，这样的连续性假定在绝大多数情况下是适合的，然而，在高真空稀薄气体的情况下，这样的假定将不复成立。

流体在运动时，各质点间可改变其相对位置，这是它与固体运动的重要区别。由此造成对流体运动规律的描述上的种种不同。

**运动的描述方法——拉格朗日法和欧拉法** 对于流体的流动，通常有两种不同的考察方法。一种方法是：选定一个流体质点，对其跟踪观察，描述其运动参数（如位移、速度等）与时间的关系。这种考察方法称为拉格朗日法。

另一种方法称为欧拉法。此法并不跟踪流体质点进行观察，而是在固定位置上观察流体质点的运动情况，如速度、压强、密度等，即欧拉法系直接描述各有关运动参数在指定空间和时间上的变化。例如，对于速度，可作如下描述

$$\left. \begin{aligned} u_x &= f_x(x, y, z, t) \\ u_y &= f_y(x, y, z, t) \\ u_z &= f_z(x, y, z, t) \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中  $x$ 、 $y$ 、 $z$  为位置坐标， $t$  为时间， $u_x$ 、 $u_y$ 、 $u_z$  为指定点速度在三个垂直坐标轴上的投影。

简言之，拉格朗日法描述的是同一质点在不同时刻的状态；欧拉法描述的则是空间各点

的状态及其与时间的关系。必须指出，由于上述的连续性假定，此处所谓的点不是真正几何意义上的点，而是具有质点尺寸的点。以下均同。

**定态流动** 如果运动空间各点的状态不随时间而变化，则该流动称为定态流动。例如就速度而言，对于定态流动：

$$\frac{\partial u_x}{\partial t} = 0 \quad \frac{\partial u_y}{\partial t} = 0 \quad \frac{\partial u_z}{\partial t} = 0 \quad (1-2)$$

由此，式 (1-1) 成为

$$\begin{aligned} u_x &= f_x(x, y, z) \\ u_y &= f_y(x, y, z) \\ u_z &= f_z(x, y, z) \end{aligned} \quad (1-3)$$

此时流动的速度只随空间位置而变，而与时间无关，即速度是空间位置的函数。对于空间任一固定点而言，随着时间的流逝，流体质点不断更换，但该点的速度始终如一。

在定态流动下，其它各有关运动参数也服从类似的关系式。

**流线** 与 **轨线** 为了进一步说明两种考察方法的不同，有必要区别流线和轨线。

轨线是同一流体质点在不同时刻所占空间位置的连线，即轨线是某一流体质点的运动轨迹。显然，轨线是采用拉格朗日法考察流体运动所得的结果。

流线则不同，它是采用欧拉法考察的结果。流线上各点的切线表示该点的速度方向。

显而易见，轨线与流线是完全不同的。轨线描述的是同一质点在连续瞬间的位置，而流线表示的则是同一瞬时不同质点的速度方向。不难理解，只有在定态流动时流线和轨线才重合。

图1-1(a)中所示曲线为一流线。图上分别表示出a、b、c和d四点上的速度方向。

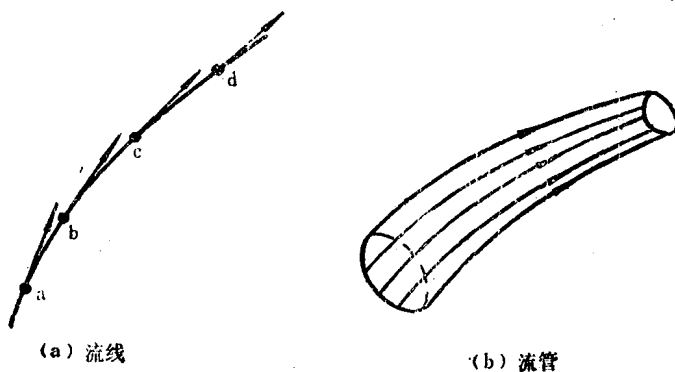


图 1-1 流线和流管

流线有两个重要属性：

1. 同一点只有一个速度，由此可知，流线互不相交。

2. 在流动区域内，通过任意封闭曲线各点引出的流线所围成的空间称为流管，如图1-1(b)所示。按流线的定义，不可能有宏观的横向流动穿越流管。

**考察方法的选择** 在物理学中考察单个固体质点的运动时，通常都采用拉格朗日法。在流体流动中则不然。由于流体流动中涉及到无数个质点，采用拉格朗日法就使问题变得异常复杂。仅当所研究的系任一质点均遵循的一般规律时，才采用拉格朗日法。一般情况下，若需对流动作出描述时，则往往采用欧拉法，尤其在流动是定态时，采用欧拉法来描述流动状

态就显得更为方便。

### 1-1-2 流体流动中的作用力

流动中的流体受到的作用力可分为体积力和表面力两种。

**体积力** 体积力作用于流体的每一个质点上，并与流体的质量成正比，对于均质流体也与流体的体积成正比。流体在重力场运动时受到的重力，在离心力场运动时受到的离心力\*都是典型的体积力。重力和离心力都是一种场力。

**表面力——压力和剪力** 表面力与表面积成正比。若取流体中任一微小平面，作用于其上的表面力可分为垂直于表面的力和平行于表面的力。前者称为压力，后者称为剪力（或剪力）。单位面积上所受的垂直力称为压强；单位面积上所受的剪力称为剪应力。

设有间距甚小的两平行平板，其间充满流体（图1-2）。上板固定，下板施加一平行于平板的切向力  $F$  使此平板以速度  $u$  作匀速运动。

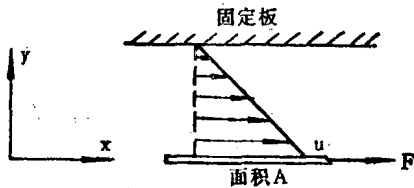


图 1-2 剪应力与速度梯度

紧贴于运动板上方的流体层以同一速度  $u$  流动，而紧贴于固定板下方的流体层则静止不动。两板间各层流体的速度不同，其大小如图中箭头所示。单位面积的切向力  $F/A$  即为流体的剪应力  $\tau$ 。对大多数流体，剪应力  $\tau$  服从下列牛顿粘性定律：

$$\tau = -\mu \frac{du}{dy} \quad (1-4)$$

式中  $\frac{du}{dy}$  为法向速度梯度， $1/s$ ；

$\mu$  为流体的粘性系数，简称粘度， $N \cdot s/m^2$ ；

剪应力  $\tau$  的单位是  $N/m^2$ 。

牛顿粘性定律指出，剪应力与法向速度梯度成正比，与法向压力无关。流体的这一规律与固体表面的摩擦力的变化规律截然不同。运动着的粘性流体内部的剪切力亦称为内摩擦力。

粘性系数因流体而异，是流体的一种物性。粘度愈大，同样的剪应力将造成较小的速度梯度。剪应力及流体的粘度只是有限值，故速度梯度也只能是有限值。由此可知，相邻流体层的速度只能连续变化。据此可对流体流经圆管时的速度沿半径方向的变化规律作出预示。紧贴圆管壁面的流体因受壁面固体分子力的作用而处于静止状态（即壁面无滑移），随着离壁距离的增加，流体的速度连续地增大，如图1-3所示。这种速度沿管截面各点的变化称为速度分布（或称速度侧形）。只有当流体无粘性（称为理想流体）， $\mu=0$ 时才会出现如图1-4所示的均匀的速度侧形。

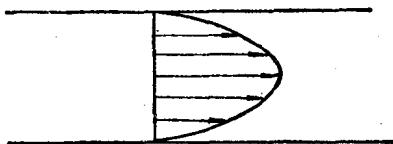


图 1-3 粘性流体在管内的速度分布

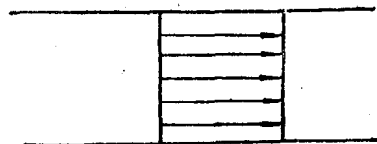


图 1-4 理想流体在管内的速度分布

\* 本书言及离心力均指非惯性参照系中的离心惯性力。

粘性的物理本质是分子间的引力和分子的运动与碰撞。以气体分子运动为例，若两相邻流体层在  $x$  方向具有不同的速度，那末，当低速流体层的分子藉分子运动进入高速层时将促使该层速度降低。反之，高速流体层分子藉分子运动进入低速层时将促使其速度增加。从宏观上看，上述事实相当于低速流体层施加一个剪应力于高速层，其方向与运动方向相反。高速层则施加一个剪应力于低速层，其方向与其运动方向相同。两者大小相同，方向相反，互

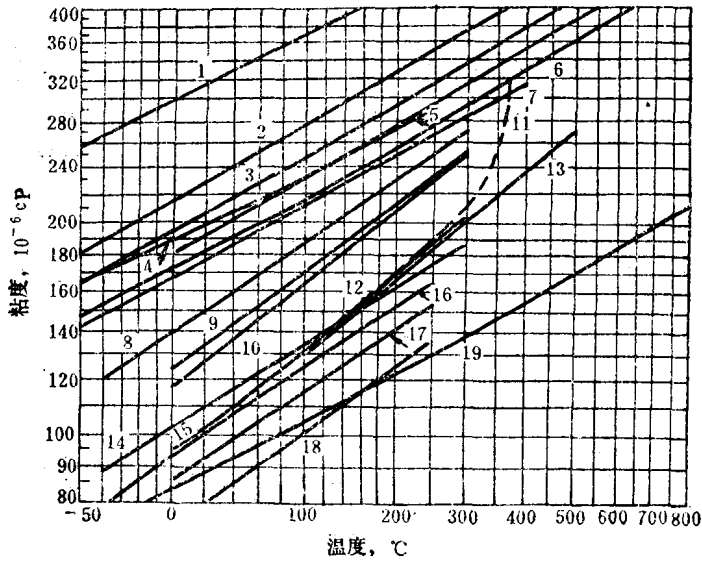


图 1-5 气体的粘度 (1atm)

1—Ne; 2—Ar; 3—O<sub>2</sub>; 4—He; 5—NO; 6—空气; 7—CO、N<sub>2</sub>; 8—CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O; 9—Cl<sub>2</sub>; 10—SO<sub>2</sub>; 11—饱和水蒸气; 12—NH<sub>3</sub>; 13—过热水蒸气 (1atm); 14—CH<sub>4</sub>; 15—C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>; 16—C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>; 17—C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>; 18—C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>; 19—H<sub>2</sub>

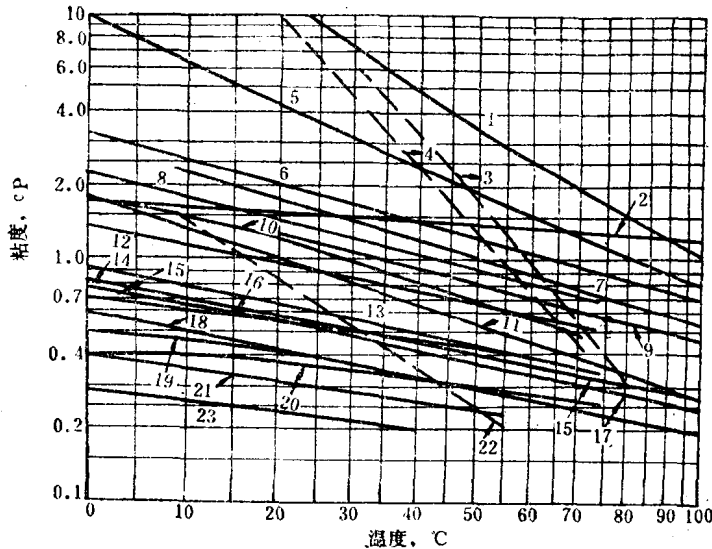


图 1-6 液体的粘度

1—石炭酸; 2—水银; 3—甘油; 4—蓖麻油; 5—苯胺; 6—硝基苯; 7—甲酸; 8—松节油; 9—醋酸; 10—乙醇; 11—水; 12—四氯化碳; 13—苯; 14—甲醇; 15—甲苯; 16—氯仿; 17—辛烷; 18—醋酸乙酯; 19—庚烷; 20—二硫化碳; 21—己烷; 22—橄榄油; 23—乙醚



为作用力与反作用力。由此可知，尽管所观察的只是流体宏观的机械运动，分子的微观运动仍然显示其影响，只是这里以宏观的形式加以处理而已。换句话说，粘性就是这种分子微观运动的一种宏观表现。

上述不同速度的流体层在流动方向上具有不同的动量，层间分子的交换也同时构成了动量的交换和传递。动量传递的方向与速度梯度方向相反，即由高速层向低速层传递。因此，无论是气体或液体，剪应力  $\tau$  的大小即代表此项动量传递的速率。

流体的粘度是影响流体流动的一个重要的物理性质。许多流体的粘度可以从有关手册中查取。图1-5和图1-6表示某些常用气体和液体的粘度及其随温度的变化规律。

通常手册中查到的粘度数据都是以物理制单位表示的。粘度的物理制单位为泊〔达因·秒/厘米<sup>2</sup>〕，或其百分之一，厘泊。进行工程计算时需将其换算成国际制单位（SI）或工程制单位。

$$\begin{aligned} 1 \text{ 厘泊 (cP)} &= \frac{1}{100} \text{ 泊 (P)} = \frac{1}{100} \left[ \frac{\text{达因} \cdot \text{秒}}{\text{厘米}^2} \right] \\ &= \frac{1}{100} \frac{\frac{1}{100000} \text{ N} \cdot \text{s}}{\left( \frac{1}{100} \right)^2 \text{ m}^2} = \frac{1}{1000} \frac{\text{Ns}}{\text{m}^2} \end{aligned}$$

以厘泊计的粘度，换算成SI单位表示，其数值应除以1000。以后将会发现粘度  $\mu$  和密度  $\rho$  常以比值出现，因此，为简便起见，定义

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-5)$$

称为运动粘度，在SI单位中以  $\text{m}^2/\text{s}$  表示，物理制单位为沱（厘米<sup>2</sup>/秒），其百分之一为厘沱。为示区别，粘度  $\mu$  又称作动力粘度。

从图1-5和图1-6两图的比较中可以看出，气体的粘度成百倍地小于液体的粘度，而且随温度呈现相反的变化。气体的粘度随温度上升而增大，液体则相反。

实验表明，气体及水、溶剂、甘油等液体服从牛顿粘性定律，此类流体统称牛顿型流体。但也有不少流体并不服从牛顿粘性定律，此类流体统称非牛顿型流体。

非牛顿型流体又有多种。某些流体如油墨、泥浆等，只有当施加的剪应力大于某一临界值之后才能流动，超过此值多余部分的剪应力与速度梯度成正比。此种流体称为塑性流体。

对非牛顿流体常取剪应力与速度梯度之比称为表观粘度  $\mu_0$ ，即

$$\mu_0 = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} \quad (1-6)$$

表观粘度不仅与流体性质有关，还与速度梯度有关。因此，一般不能从手册中查得非牛顿流体的粘度。

许多高分子熔体和溶液、油漆等，其表观粘度随速度梯度的增大而降低，此类流体称为假塑性流体。反之，某些塑料溶胶、高固体含量的悬浮系其表观粘度随速度梯度增大而增加，此称为胀塑性流体。

本书除特殊说明处外，均指牛顿流体，粘度是它的物性，通常只与温度有关，而与速度梯度无关。