



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



普通高等教育“十五”国家级规划教材



普通高等教育“九五”国家级重点教材

化工原理

(上册)

第四版

陈敏恒 丛德滋 方图南 齐鸣斋 潘鹤林 编



化学工业出版社



“十二五”普通高等教育本科国家级



普通高等教育“十五”国家级规划教材



普通高等教育“九五”国家级重点教材

化工原理

(上册)

第四版

陈敏恒 丛德滋 方图南 齐鸣斋 潘鹤林 编



化学工业出版社

·北京·

本书以传递过程作为贯穿化工单元操作的主线，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。上册共7章，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。每章均有例题、习题、思考题。

本书内容体系完整，概念论述清楚，突出工程特点，注重应用实践。

本书可作为理工院校相关专业的本科生教材，也可供化工及相关专业部门从事科研、设计和生产的技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理. 上册/陈敏恒, 从德滋, 方图南, 齐鸣斋, 潘鹤林编. —4版. —北京: 化学工业出版社, 2015.5

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材 普通高等教育“十五”国家级规划教材

ISBN 978-7-122-23194-9

I. ①化… II. ①陈…②从…③方…④齐…⑤潘… III. ①化工原理-高等学校-教材 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 043645 号

责任编辑: 何丽 徐雅妮

文字编辑: 丁建华

责任校对: 边涛

装帧设计: 关飞

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印刷: 北京永鑫印刷有限责任公司

装订: 三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 19 1/4 字数 501 千字 2015 年 7 月北京第 4 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 39.00 元

版权所有 违者必究

前 言

随着社会和经济的发展，社会对化工类专业毕业生的需求发生了变化，毕业生就业面扩大，就业大致可分为“研究型”“应用型”“经济管理型”三类。从化工原理课程教学内容的改革而言，如何适应这种变化，是作者需要考虑的问题。在前三版教材中，比较注重学生研究能力的培养和经济上参数优化的问题。本版化工原理教材力求在内容编写上加强学生应用能力方面的培养，适当增强实际工程应用方面知识，如常用的经验数据、常见的工程问题和解决措施，培养学生综合应用能力。本教材的编写以“一条主线、三个面向”作框架，即“以传递过程为主线，面向科学研究，面向工业应用，面向技术经济”，结合多年来发展的新技术、新设备，组织化工原理课程的教学内容。

本书将化工单元操作按传递过程共性归类，以动量传递为基础叙述流体输送、流体通过颗粒层的流动、绕流及相关的单元操作；以热量传递为基础阐述换热及蒸发操作；以质量传递的原理说明吸收、精馏、萃取、吸附、结晶、膜分离等传质单元操作；最后阐述了具有热质同时传递特点的干燥操作。

本书还结合典型单元操作的定量分析和数学描述对现代化工技术常用的方法作了较详细的说明，如数学模型方法、参数归并方法和过程分解方法等。单元操作的发展在过程和设备方面积累了丰富的材料，本书在取舍和组织这些材料时，注意培养读者的工程观点。例如，机械能衡算的观点、控制步骤与过程强化的观点等。以使读者在获取知识的同时对重要的工程观点有较深的印象，便于日后分析较复杂的工程问题。在数学描述结果应用中，本书从设计、操作和综合三方面着手讨论，便于读者理论联系实际。

各章都带有习题及答案、思考题，以便于自学。

作者十分感谢华东理工大学化工原理教研组的同事在编写工作中给予的帮助和支持。

作 者

2015年2月

第二版前言

第三版前言

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。

现代化工技术包含了数学模型、参数归并和过程分解等重要的工程问题处理方法，本书结合典型单元操作的定量分析和数学描述对这些方法作了较详细的说明。

单元操作的发展在过程和设备方面积累了丰富的材料，本书将以工程观点来取舍和组织这些材料。例如，以建立循环流动说明蒸发设备的沿革，以机械能平衡和动量平衡的观点观察管内流动和均布现象，结合吸收和传质设备分析引入返混的观点等，以期读者在获取知识的同时对重要的工程观点有较深的印象，便于日后更敏捷地分析较复杂的工程问题。

在过程定量分析之后，本书从设计和操作两方面将数学描述的结果付诸应用，便于读者联系实际思考问题。

自本书一版问世以来，受到了许多读者和同行的支持和鼓励。由于近十多年来化工技术的发展，此次再版时删去了工程上已少用的内容和计算方法，上册中补充了非牛顿流体基础，加快过滤速率的方法，用两相流解释蒸发管内的给热系数等；下册中补充了多元精馏、吸附、结晶和膜分离等单元操作的基本知识，各章都补充了思考题和习题以便于自学。

作者十分感谢袁渭康院士和谭天恩教授为本书再版审稿并提出了许多宝贵意见，感谢华东理工大学化工原理教研组的同事在修订工作中所给予的帮助。

作者

1998年8月

第三版前言

高 精 准 二 版

随着科学的进步和化工技术的发展，人们已在化工计算机模拟计算方面取得了长足的进步，流程模拟软件也取得了较大成功。然而，在化工过程的技术开发中，人们仍然离不开基本原理的指导，而且，在过程计算变得方便的条件下，更需要人们对过程和方法进行正确的选择。

本书将化工单元操作按传递过程共性归类：以动量传递为基础叙述流体输送、搅拌、流体通过颗粒层的流动、绕流及相关的单元操作；以热量传递为基础阐述换热及蒸发操作；以质量传递的原理说明吸收、精馏、萃取、吸附、结晶、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湿、减湿和干燥操作。在相关的单元操作之后，阐述了常规分离方法的选择，为读者日后的工业实践打下一定的基础。

本书还结合典型单元操作的定量分析和数学描述对现代化工技术常用的方法作了较详细的说明，如数学模型、参数归并和过程分解等。单元操作的发展在过程和设备方面积累了丰富的材料，本书将以工程观点来取舍和组织这些材料。例如，以机械能平衡和动量平衡的观点观察管内流动和均布现象，结合吸收和传质设备分析引入返混的观点等，以期读者在获取知识的同时对重要的工程观点有较深的印象，便于日后分析较复杂的工程问题。在数学描述结果应用中，本书从设计和操作两方面着手讨论，便于读者理论联系实际。

自本书第二版出版以来，得到了许多读者和同行的支持和建设性意见。此次第三版删去了部分较专业的内容和计算方法，上册中补充了力学分离过程的选择等内容；下册中补充了传质分离过程的选择等内容，各章都补充了习题答案，以便于自学。

与教材配套的“化工原理多媒体课件”的新版（第二版）预计在2007年10月出版。

作者十分感谢华东理工大学化工原理教研组的同事在本书修订工作中给予的帮助和支持。

作 者

2005年12月

目 录

绪论 / 1

第 1 章 流体流动 / 4

1.1 概述	4	1.5.2 湍流直管阻力损失的实验研究方法	25
1.1.1 流体流动的考察方法	4	1.5.3 直管阻力损失的计算式	27
1.1.2 流体流动中的作用力	5	1.5.4 局部阻力损失	28
1.1.3 流体流动中的机械能	7	1.6 流体输送管路的计算	32
1.2 流体静力学	7	1.6.1 管路分析	33
1.2.1 静压强在空间的分布	7	1.6.2 管路计算	34
1.2.2 静力学方程的物理意义	8	1.6.3 可压缩流体的管路计算	41
1.2.3 压强的表示方法	9	1.7 流速和流量的测定	44
1.2.4 压强的静力学测量方法	9	1.7.1 毕托管	44
1.3 流体流动中的守恒原理	11	1.7.2 孔板流量计	45
1.3.1 质量守恒	11	1.7.3 转子流量计	48
1.3.2 机械能守恒	12	1.8 非牛顿流体与流动	50
1.3.3 动量守恒	17	1.8.1 非牛顿流体的基本特性	50
1.4 流体流动的内部结构	18	1.8.2 非牛顿流体流动与减阻现象	51
1.4.1 流动的类型	19	习题	53
1.4.2 湍流的基本特征	20	思考题	62
1.4.3 边界层及边界层脱体	21	符号说明	63
1.4.4 圆管内流体运动的数学描述	23	参考文献	64
1.5 阻力损失	25		
1.5.1 两种阻力损失	25		

第 2 章 流体输送机械 / 65

2.1 概述	65	2.2.5 离心泵的类型与选用	76
2.2 离心泵	66	2.3 往复泵	79
2.2.1 离心泵的工作原理	66	2.3.1 往复泵的作用原理和类型	79
2.2.2 离心泵的特性曲线	70	2.3.2 往复泵的流量调节	79
2.2.3 离心泵的流量调节和组合操作	72	2.4 其他化工用泵	80
2.2.4 离心泵的安装高度	74	2.4.1 非正位移泵	80

2.4.2 正位移泵	82	2.5.4 真空泵	88
2.4.3 各类化工用泵的比较与选择	83	习题	90
2.5 气体输送机械	84	思考题	92
2.5.1 通风机	84	符号说明	93
2.5.2 鼓风机	86	参考文献	93
2.5.3 压缩机	86		

第3章 液体的搅拌 / 94

3.1 概述	94	3.4 搅拌功率	102
3.1.1 搅拌器的类型	94	3.4.1 搅拌器的混合效果与功率消耗	102
3.1.2 混合效果的度量	97	3.4.2 功率曲线	103
3.2 混合机理	98	3.4.3 搅拌功率的分配	105
3.2.1 搅拌器的两个功能	98	3.5 搅拌器的放大	106
3.2.2 均相液体的混合机理	98	3.6 其他混合设备	107
3.2.3 非均相物系的混合机理	99	习题	109
3.3 搅拌器的性能	100	思考题	109
3.3.1 几种常用搅拌器的性能	100	符号说明	109
3.3.2 改善搅拌效果的措施	101	参考文献	110

第4章 流体通过颗粒层的流动 / 111

4.1 概述	111	4.4.3 间歇过滤的滤液量与过滤时间的 关系	125
4.2 颗粒床层的特性	111	4.4.4 洗涤速率与洗涤时间	128
4.2.1 单颗粒的特性	111	4.4.5 过滤过程的计算	129
4.2.2 颗粒群的特性	112	4.5 过滤设备和操作强化	130
4.2.3 床层特性	115	4.5.1 过滤设备	130
4.3 流体通过固定床的压降	116	4.5.2 加快过滤速率的途径	136
4.3.1 颗粒床层的简化模型	116	习题	137
4.3.2 量纲分析法和数学模型法的 比较	119	思考题	139
4.4 过滤过程	119	符号说明	139
4.4.1 过滤原理	119	参考文献	139
4.4.2 过滤过程的数学描述	122		

第5章 颗粒的沉降和流态化 / 140

5.1 概述	140	5.3.2 离心沉降设备	148
5.2 颗粒的沉降运动	140	5.3.3 力学分离方法的选择	153
5.2.1 流体对固体颗粒的曳力	140	5.4 固体流态化技术	154
5.2.2 静止流体中颗粒的自由沉降	142	5.4.1 流化床的基本概念	155
5.3 沉降分离设备	146	5.4.2 实际的流化现象	155
5.3.1 重力沉降设备	146	5.4.3 流化床的主要特性	156

5.4.4 流化床的操作范围	158	5.5.3 稀相输送的流动特性	163
5.4.5 改善流化质量的措施	159	习题	164
5.5 气力输送	160	思考题	165
5.5.1 概述	160	符号说明	166
5.5.2 气力输送装置	161	参考文献	166

第 6 章 传热 / 167

6.1 概述	167	化措施	190
6.1.1 简介	167	6.5 热辐射	191
6.1.2 传热过程	169	6.5.1 固体辐射	191
6.2 热传导	170	6.5.2 气体辐射	199
6.2.1 傅里叶定律和热导率	170	6.6 传热过程的计算	200
6.2.2 通过平壁的定态导热过程	171	6.6.1 传热过程的数学描述	201
6.2.3 通过圆筒壁的定态导热过程	172	6.6.2 传热过程基本方程式	204
6.2.4 通过多层壁的定态导热过程	173	6.6.3 换热器的设计型计算	207
6.3 对流给热	175	6.6.4 换热器的操作型计算	209
6.3.1 对流给热过程分析	175	6.6.5 非定态传热过程的拟定态 处理	216
6.3.2 对流给热过程的数学描述	177	6.7 换热器	217
6.3.3 无相变的对流给热系数的经验 关联式	179	6.7.1 间壁式换热器的类型	217
6.4 沸腾给热与冷凝给热	184	6.7.2 管壳式换热器的设计和选用	220
6.4.1 沸腾给热	184	6.7.3 换热器的其他类型	229
6.4.2 沸腾给热过程的强化	186	习题	234
6.4.3 蒸汽冷凝给热	187	思考题	239
6.4.4 冷凝给热系数	187	符号说明	239
6.4.5 其他影响冷凝给热的因素及强 化措施	190	参考文献	240

第 7 章 蒸发 / 241

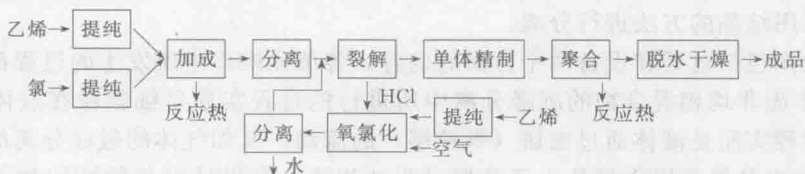
7.1 概述	241	7.3.3 蒸发速率与传热温度差	249
7.1.1 蒸发操作的目的和方法	241	7.3.4 单效蒸发过程的计算	250
7.1.2 蒸发操作的特点	241	7.4 蒸发操作的经济性和多效蒸发	251
7.2 蒸发设备	242	7.4.1 衡量蒸发操作经济性的方法	251
7.2.1 各种蒸发器	242	7.4.2 蒸发操作的节能方法	252
7.2.2 蒸发器的传热系数	245	7.4.3 多效蒸发过程分析	254
7.2.3 蒸发辅助设备	246	习题	256
7.3 单效蒸发计算	247	思考题	256
7.3.1 物料衡算	247	符号说明	257
7.3.2 热量衡算	248	参考文献	257

绪 论

化学工业生产过程

人类社会的发展离不开化学工业生产，现代人类的生活更离不开化工产品。化工生产是对煤、石油、天然气等原料进行化学加工，以获得所需的产品。化工生产的核心是化学反应过程和反应器。为了保证化学反应过程能够在技术上可行、经济上合理、环境可接受的条件下进行，反应器内必须保持某些特定条件，如合适的压强、温度和物料的组成等。通常，原料须先经过预处理以除去杂质，达到一定的纯度，再经换热和加压达到预定的温度和压强。这些过程统称为前处理。反应器出口物需要回收压强能、热能，进行分离精制，以获得所需产品。这些过程统称为后处理。

例如，乙烯氧氯化法制取聚氯乙烯塑料的生产是以乙烯和氯为原料进行加成反应，经分离获得二氯乙烷，再经 550°C 、 3MPa 的高温裂解生成氯乙烯，裂解所得氯化氢与空气、乙烯在 220°C 、 0.5MPa 下进行氧氯化反应生成二氯乙烷和水，经分离后二氯乙烷再裂解；精制后的氯乙烯单体在 55°C 、 0.8MPa 左右进行聚合反应获得聚氯乙烯。在进行加成反应前，必须将乙烯和氯中所含各种杂质除去，以免反应器中的催化剂中毒失效。反应产物又需进行分离，除去副产物四氯化碳、苯、三氯乙烷以及未反应的原料等。分离精制后的氯乙烯单体经压缩、换热，达到聚合反应所需的纯度和状态。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。生产过程可简要地图示如下。



上述生产过程除加成、裂解、氧氯化 and 聚合属反应过程外，原料和反应出口物的提纯、精制、分离等工序均属前、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，又是化工生产所不可缺少的。

其他化工生产过程与上述过程类似，均由前处理、反应过程、后处理所组成。在现代大型化工厂中，反应过程的设备数量并不多，绝大多数设备中进行的都是各种前、后处理。对于设备投资和操作费用来讲，也是前、后处理工序占大部分。因此，前、后处理过程在化工生产中占有重要地位。这些过程就是化工单元操作。

化工单元操作

化工单元操作可按不同的方法进行分类，按操作的目的将其分为：

- ① 物料的增压、减压和输送；
- ② 物料的混合或分散；
- 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。

按物理过程的目的, 兼顾过程的原理、相态, 可将各种前、后处理归纳成一系列的单元操作, 如表 0-1 所示。

表 0-1 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	混合或分散	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
吸附	均相混合物分离	液或气	各组分在吸附剂中的吸附能力不同	物质传递
反渗透	均相混合物分离	液	各组分尺度不同的截留	物质传递
电渗析	均相混合物分离	液	电解质离子选择性的传递	物质传递

表 0-1 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和单元操作的耦合。

为达到同样的目的, 可依据不同的原理、采用不同的方法、选取不同的单元操作。例如, 液-固非均相混合物可依据密度的差异用沉降的方法实现分离, 也可利用尺度的不同采用过滤的方法分离。又如液态均相混合物可依据各组分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的溶解度不同, 采用溶剂萃取法进行分离, 或利用各组分熔点和溶解度的不同, 采用结晶的方法进行分离。

各单元操作包括过程和设备两个方面的内容。各单元操作中所发生的过程都有内在的规律。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的过程实质是传质-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, 使过程在有利的条件下进行。

“化工原理”课程的主线

从化学工业的各个行业中抽提出单元操作加以研究, 是个重要的发展。各单元操作依据不同的原理, 达到各自的目的, 统一于同一个学科之中必定有统一的研究对象和研究方法。

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:

- ① 动量传递过程(单相或多相流动);
- ② 热量传递过程(传热);
- ③ 物质传递过程(传质)。

表 0-1 所列各单元操作均归属传递过程。传递过程是本课程统一的研究对象, 也是联系各单元操作的一条主线。

化工原理是一门工程学科, 它要解决的不仅是过程的基本规律, 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

于过程的本身，而首先在于化工设备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，采用合适的研究方法也是本课程内容的重要方面。

在这门学科的历史发展中已形成了一些基本的研究方法。主要有数学分析法；实验研究方法，即经验的方法；数学模型方法，即半理论半经验的方法。数学分析法已在物理课程中为学生所熟悉。实验研究方法直接实验测取各变量之间的联系，将结果整理成经验表达式。如果实验工作必须遍历各种尺寸的设备和各种不同物料，实验工作量甚大，难以实现。因此，须建立合理的实验研究方法，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”。数学模型方法立足于对复杂的实际问题作出合理简化，先建立数学方程，再进行实验工作量较小的验证性试验。从而使本门学科已在相当程度上解决了上述问题。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。数学模型方法抓住了过程的主要影响因素，大体反映了过程的真实面貌，已广泛地被采用。

这样，以单元操作为内容，以传递过程为主线，以研究方法为手段，组成了“化工原理”这一门课。

“化工原理”课程的应用

化工原理是一门应用性课程，它应通过对过程的研究解决工业应用中出现的问题。

① 根据各单元操作在技术上和经济上的特点，如何进行“过程和设备”的选择，以适应指定物系的特征，经济而有效地满足工艺要求。

② 如何进行过程计算和设备设计。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 如何进行优化操作和调节以适应生产的不同要求。在操作发生故障时，如何进行合理判断。

当实际工业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依据一个物理或物理化学的原理发展一个有效的过程、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1章

流体流动

液体和气体都是流体，流体还包括超临界物质、悬浮液、气溶胶。化工生产涉及的物料大部分是流体，涉及的过程绝大部分是在流动条件下进行的。流体流动的规律是本课程的重要基础。涉及流体流动规律的主要有以下几方面。

(1) 流动阻力及流量计量 对各种流体的输送，需设计管路、选用输送机械以及计算所需功率。化工管道中流量的常用计量方法也都涉及流体力学的基本原理。

(2) 流动对传热、传质及化学反应的影响 化工设备中流体的传热、传质以及反应过程在很大程度上受流体在设备内流动状况的影响。例如，在各种换热器、塔器、流化床和反应器中，人们十分关注流体沿流动截面速度分布的均匀性，流动的不均匀性会严重地影响反应器的转化率、塔器和流化床的操作性能，最终影响产品质量和产量。各种化工设备中还常伴有颗粒、液滴、气泡和液膜、气膜的运动，掌握粒、泡、滴、膜的运动状况，对理解化工设备中发生的过程非常重要。

(3) 流体的混合 流体与流体、流体与固体颗粒在各类化工设备中的混合效果都受流体流动的基本规律的支配。

1.1 概述 >>>

1.1.1 流体流动的考察方法

连续性假定 流体是由大量的彼此之间有一定间隙的单个分子所组成。如果以单个分子作为考察对象，流体将是一种不连续的介质，问题将非常复杂。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，而是流体的宏观运动。因此，可取流体质点（或微团）作为最小的考察对象。质点是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却要大得多。这样，可以假定流体是由大量质点组成的、彼此间没有间隙、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。

运动的描述方法——拉格朗日法和欧拉法 有两种不同的流体流动考察方法。拉格朗日考察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。欧拉考察方法是在固定空间位置上观察流体质点的运动情况，如空间各点的速度、压强、密度等。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 为坐标点的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。由于上述连续性假定, 此处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 若流体运动空间各点的状态不随时间变化, 则该流动被称为定态流动。显然, 定态流动各指定点的速度 u_x 、 u_y 、 u_z 以及压强 p 等均与时间无关。反之, 为非定态流动。

流线与轨线 为进一步说明两种考察方法的不同, 有必要区别流线与轨线。轨线是某一流体质点的运动轨迹, 它是拉格朗日法考察流体运动所得的结果。流线是流体在速度方向上的连线, 流线上各点的切线表示同一时刻各点的速度方向, 它是采用欧拉法考察的结果。

显然, 轨线与流线是完全不同的。只在定态流动时, 流线与轨线重合。

图 1-1 所示的曲线为一流线。图中四个箭头分别表示在同一时刻 a 、 b 、 c 和 d 四点的速度方向。由于同一点在指定某一时刻只有一个速度, 所以流线不会相交。

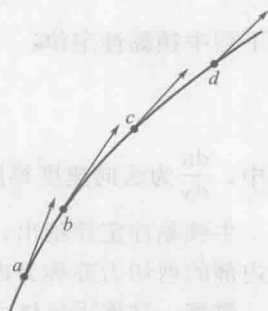


图 1-1 流线

控制体 化工生产中往往关心某些固定空间 (如某一化工设备) 中的流体运动。当划定一固定的空间体积来考察问题, 该空间体积称为控制体。

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, 所以也称质量力, 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^①都是典型的体积力。重力与离心力都是一种场力。

表面力——压力与剪力 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 (或切力)。单位面积上所受的力称为压强; 单位面积上所受的剪力称为剪应力。

压强的单位 压强用 p 表示, 其单位是 N/m^2 , 也称为帕斯卡 (Pa), 其 10^6 倍称为兆帕 (MPa), 即

$$1\text{MPa}(\text{兆帕}) = 10^6\text{Pa}$$

现工程上常用兆帕作压强的计量单位。

密度 体积力与密度密切相关。单位物质体积具有的质量称为密度, 用 ρ 表示, 其单位是 kg/m^3 。液体的密度随压强变化很小, 当压强不是很大时, 它可视为与压强无关, 称为不可压缩流体。

气体的密度随压强和温度变化, 称为可压缩流体。压强不是很大时, 可按理想气体状态

① 本书言及离心力均指非惯性参照系中的惯性离心力。

方程计算气体密度

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{Mp}{RT} \quad (1-2)$$

式中, m 为质量, kg ; V 为体积, m^3 ; M 为摩尔质量; R 为气体常数, $R=8.314\text{kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$; T 为热力学温度, K 。

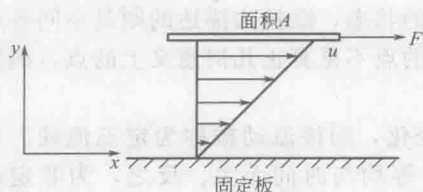


图 1-2 剪应力与速度梯度

剪应力 设有间距甚小的两平行平板, 其间充满流体 (图 1-2)。下板固定, 上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。紧贴于运动板下方的流体层以同一速度 u 流动, 而紧贴于固定板上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 τ 。对大多数流体, 剪应力 τ 服

从下列牛顿黏性定律:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-3)$$

式中, $\frac{du}{dy}$ 为法向速度梯度, $1/\text{s}$; μ 为流体的黏度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$, 即 $\text{Pa} \cdot \text{s}$; τ 为剪应力, Pa 。

牛顿黏性定律指出, 剪应力与法向速度梯度成正比, 与法向压力无关。运动着的黏性流体内部的剪切力亦称为内摩擦力。静止流体是不承受剪应力的。

黏度 黏度因流体而异, 是流体的物性。剪应力及流体的黏度只是有限值, 故速度梯度也只能是有限值。由此表明, 相邻流体层的速度只能连续变化。

黏性的物理本质是分子间的引力和分子的运动与碰撞。黏性是分子微观运动的一种宏观表现。流体的黏度是影响流体流动的一个重要的物理性质。许多流体的黏度可以从有关手册中查取。本书附录中列有常用气体和液体黏度的表格和共线图。通常液体的黏度随温度增加而减小。气体的黏度通常比液体的黏度小两个数量级, 其值随温度上升而增大。

黏度的单位是 $\text{Pa} \cdot \text{s}$, 较早的手册也常用泊 (达因·秒/厘米²) 或厘泊 (0.01 泊) 表示。其间的关系为:

$$1\text{cP}(\text{厘泊}) = \frac{1}{100}\text{P}(\text{泊}) = \frac{1}{100}\text{dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2 (\text{达因} \cdot \text{秒}/\text{厘米}^2) = 10^{-3}\text{Pa} \cdot \text{s}$$

黏度 μ 和密度 ρ 常以比值的形式出现, 为简便起见, 定义:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-4)$$

ν 称为运动黏度, 在 SI (国际单位制) 单位中以 m^2/s 表示, CGS (绝对单位制) 单位为池 (cm^2/s), 其百分之一为厘池。为示区别, 黏度 μ 又称为动力黏度。

对于不服从牛顿黏性定律的非牛顿型流体, 其剪应力与速度梯度的关系参见 1.8 节。

理想流体 当流体无黏性, 即 $\mu=0$ 时, 称为理想流体。

液体的表面张力 当液体面对气体时, 界面上液体分子所处状态与液体内部不同。液体内部分子受到邻近四周分子的作用力是对称的。而界面上液体分子受力不对称, 受到指向内部的力, 如图 1-3 所示, 所以液体表面都有自动缩成表面积最小的趋势。这就是水滴、肥皂泡呈现球形的原因。若用白金丝做成如图 1-4 所示的装置, 在液面上用 F 力向上拉, 形成液膜, 界面上单位长度所受的力就是表面张力。因液膜有前后两个表面, 表面受力总长度为

$2L$ ，所以表面张力 σ 为：

$$\sigma = \frac{F}{2L} \quad (1-5)$$

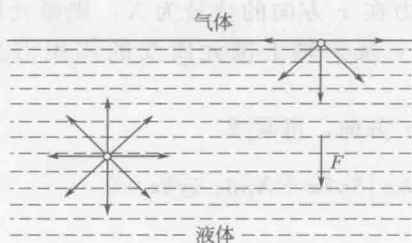


图 1-3 界面上力的各向异性

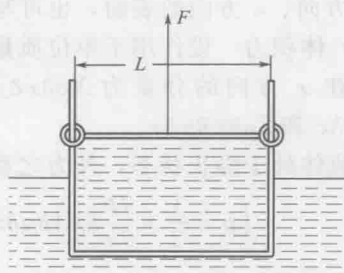


图 1-4 界面张力的测量装置

表面张力是物质的特性，并与温度、压强、组成以及共存的另一相性质有关。在液液界面、液固界面、气固界面都有类似的情况，称为界面张力。表面张力是形成毛细管压、表面浸润、吸附、沸腾过热、结晶熟化、干燥降速等重要现象的原因。

1.1.3 流体流动中的机械能

流体所含的能量包括内能和机械能。

众所熟知，固体质点运动时的机械能有两种形式：位能和动能。而流动流体中除位能、动能外还存在另一种机械能——压强能。流体在重力场中运动时，如自低位向高位对抗重力运动，流体将获得位能。与之相仿，流体自低压向高压对抗压力流动时，流体也将由此而获得能量，这种能量称为压强能。流体的压强能也称为流动功。流体流动时将存在着三种机械能的相互转换。

气体在流动过程中因压强变化而发生密度变化，从而在内能与机械能之间也存在相互转换。

1.2 流体静力学 >>>

1.2.1 静压强在空间的分布

静压强 在静止流体中，作用于某一点不同方向上的压强在数值上是相等的，即一点的压强只要说明它的数值即可。静压强的数值与位置有关，即

$$p = f(x, y, z) \quad (1-6)$$

流体微元的力平衡 在静止流体中取一立方体微元（微分控制体），其中心点 A 的坐标为 (x, y, z) 。立方体各边分别与坐标轴 ox 、 oy 、 oz 平行，边长分别为 δx 、 δy 、 δz ，如图 1-5 所示。

作用于此流体微元上的力有两种：

(1) 表面力 设六面体中心点 A 处的静压强为 p ，沿 x 方向作用于 $abcd$ 面上的压力为

$$\left(p - \frac{1}{2} \times \frac{\partial p}{\partial x} \delta x \right) \delta y \delta z$$

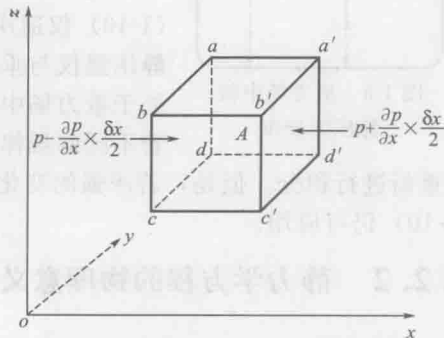


图 1-5 流体微元的受力平衡