



普通高等教育

制药类“十三五”规划教材

化工原理

(制药专业适用)

齐鸣斋 主编

丛梅 郭永学 孙浩 编写



HUAGONG YUANLI



化学工业出版社



普通高等教育

制药类“十三五”规划教材

化工原理

(制药专业适用)

齐鸣斋 主编

丛梅 郭永学 孙浩 编写

HUAGONG YUANLI



化学工业出版社

· 北京 ·

《化工原理》以传递过程作为贯穿制药过程（包括中药制药、生物制药、化学制药）单元操作的主线，注意从典型实例的分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。《化工原理》包括绪论、流体流动和流体输送机械、非均相物系的分离、传热、液体精馏、萃取和浸取、固体干燥、其他单元操作共八章。书中配有例题、习题和思考题。《化工原理》内容体系完整，概念论述清楚，突出工程特点，注重应用实践。

《化工原理》可作为医药大学、理工院校制药及相关专业的本科生教材，也可供制药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：制药专业适用/齐鸣斋主编；丛梅，郭永学，
孙浩编写. —北京：化学工业出版社，2018.11
ISBN 978-7-122-33008-6

I. ①化… II. ①齐…②丛…③郭…④孙… 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（2018）第 209982 号

责任编辑：徐雅妮 傅四周 任睿婷

责任校对：边 涛

装帧设计：王晓宇

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：三河市延风印装有限公司

装 订：三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 21½ 字数 556 千字 2019 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888 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：59.00 元

版权所有 违者必究

序

普通高等教育制药类“十三五”规划教材是为贯彻落实国家教育部有关普通高等教育教材建设与改革的文件精神，依据中药制药、制药工程和生物制药等制药类专业人才培养目标和需求，在化学工业出版社精心组织下，由全国 12 所高等院校 15 位著名教授主编，集合 20 余所高等院校百余位老师编写而成。

本系列教材适应中药制药、制药工程和生物制药等制药类专业需求，坚持育人为本，突出教材在人才培养中的基础和引导作用，充分展现制药行业的创新成果，力争体现科学性、先进性和实用性的特点，全面推进素质教育，可供全国高等中医药院校、药科大学及综合院校、西医院校医药学院的相关专业使用，也可供其他从事制药相关的教学、科研、医疗、生产、经营及管理工作者参考和使用。

本系列教材由下列分册组成：

《无机化学及实验》北京中医药大学铁步荣教授主编

《有机化学及实验》广东药科大学申东升教授主编

《分析化学及实验》广东药科大学王淑美教授主编

《物理化学及实验》天津中医药大学张师愚教授主编

《化工原理》华东理工大学齐鸣斋教授主编

《制药设备设计基础》沈阳药科大学韩静教授主编

《中药材概论》辽宁中医药大学孟宪生教授主编

《中药化学》河南中医药大学冯卫生教授主编

《中药药剂学》广东药科大学王岩教授主编

《中药制剂分析》南京中医药大学张丽教授主编

《中药炮制工程学》南京中医药大学陆兔林教授主编

《中药制药设备与车间工艺设计》中国药科大学柯学教授主编

《中药制药工程学》江中医药大学万海同教授主编

《中药制剂工程学》江西中医药大学杨明教授主编

本系列教材在编写过程中，得到了各参编院校和化学工业出版社的大力支持，在此一并表示感谢。由于编者水平有限，本系列教材不妥之处在所难免，敬请各教学单位、教学人员及广大学生在使用过程中，发现问题并提出宝贵意见，以便在重印或再版时予以修正，不断提升教材质量。

清华大学

罗国安

2018 年元月

前言

本书以制药生产过程中典型的单元操作为主要内容进行编写。制药生产包括中药制药、生物制药、化学制药。制药过程包含着众多的单元操作，且新的单元操作随着科学技术的发展还在不断涌现。但是，不同的单元操作有不同的工艺目的，基于不同的原理，采用了不同的研究方法、不同的数学表达方式。总体上，它们可分成流体输送和非均相分离过程、传热过程、传质分离过程三部分。因此，本书以“一条主线、三个面向”为框架，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”，将制药过程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、过滤、沉降、搅拌等操作；以热量传递为基础阐述换热、蒸发操作，以质量传递的原理说明精馏、萃取、浸取、吸附、结晶、膜分离、干燥等传质单元操作。本书还结合了多年来应用发展的新技术、新设备。

本书各章的编写按认识论原理叙述教学内容。由表及里、由浅入深是人们认识事物的基本原理。各章节的教学内容按照“定性-定量-应用”的程式展开，体现过程分析、数学表达、工程应用的不同层次，便于读者由浅入深、循序渐进地进行学习。各章末附有习题、思考题，书末附有习题答案以便读者自学。

将过程的数学表达用于实际时，本书从设计、操作两方面着手讨论，便于读者理论联系实际，也为读者解决综合性问题打好基础。

化工原理的工程实践性很强，很多知识和能力需通过应用实例分析、实验等环节才能使读者真正掌握。为此，我们还编写了化工原理实验内容，包括带泵管路、过滤、传热、精馏、萃取、干燥等典型单元操作实验，读者可通过扫描第300页的二维码下载附赠化工原理实验内容。

本书由华东理工大学齐鸣斋主编，其中非均相物系的分离、液体精馏、膜分离章节由丛梅编写，搅拌、溶液结晶、化工原理实验章节由郭永学编写，传热、固体干燥章节由孙浩编写，流体流动和流体输送机械、萃取和浸取、蒸发、吸附分离章节由齐鸣斋编写。本书是普通高等教育制药类“十三五”规划教材中的一本，编写中得到了系列教材编委会和编委会主任清华大学罗国安教授的指导，在此表示衷心感谢。

因作者水平有限，书中难免有疏漏之处，如蒙读者赐教，则预致谢忱，以便再版时更正。

编者

2019年1月

目 录

第 0 章 绪论 / 1

- 0.1 制药过程与单元操作 /1
- 0.2 化工原理课程的性质与任务 /1

0.3 单位换算 /2

第 1 章 流体流动和流体输送机械 / 3

1.1 概述 /3

- 1.1.1 流体流动中的作用力 /3
- 1.1.2 流体流动中的机械能 /4
- 1.1.3 流体输送机械的分类 /5

1.2 流体静力学 /5

- 1.2.1 流体静力学方程 /5
- 1.2.2 流体静力学方程的应用 /5

1.3 流体流动中的守恒原理 /8

- 1.3.1 质量守恒 /8
- 1.3.2 机械能守恒 /9

1.4 流体在管内的流动阻力 /11

- 1.4.1 流动的类型 /11
- 1.4.2 流体在圆管内的速度分布 /13
- 1.4.3 流体在管内流动的阻力损失 /15

1.5 流体输送管路的计算 /21

- 1.5.1 管路分析 /22
- 1.5.2 管路计算 /23

1.6 流速和流量的测定 /29

- 1.6.1 毕托管 /29
- 1.6.2 孔板流量计 /31
- 1.6.3 转子流量计 /33

1.7 离心泵 /34

- 1.7.1 离心泵工作原理 /34
- 1.7.2 离心泵特性曲线 /37
- 1.7.3 离心泵工作点与流量调节 /39
- 1.7.4 离心泵安装高度 /41
- 1.7.5 离心泵类型与选用 /43

1.8 其他流体输送机械 /45

- 1.8.1 往复泵 /45
- 1.8.2 其他液体用泵 /47
- 1.8.3 气体输送机械 /50

习题 /55

思考题 /60

本章符号说明 /62

第 2 章 非均相物系的分离 / 64

2.1 流固系统中的颗粒特性 /64

- 2.1.1 单颗粒特性 /64
- 2.1.2 颗粒群特性 /66

2.2 过滤 /67

- 2.2.1 流体通过固体颗粒床层的流动 /68
- 2.2.2 过滤过程基本概念 /70
- 2.2.3 过滤过程的数学描述 /71

2.2.4 过滤过程的计算 /74

2.2.5 过滤设备 /76

2.3 重力沉降 /83

2.3.1 颗粒的重力沉降速度 /83

2.3.2 重力沉降设备 /87

2.4 离心沉降 /90

2.4.1 颗粒的离心沉降速度 /90

2.4.2 离心沉降设备 /91

2.5 分离方法的选择 /95

习题 /96

思考题 /97

本章符号说明 /97

第3章 传热 /99

3.1 传热过程 /99

3.1.1 传热过程概述 /99

3.1.2 传热过程的基本概念 /101

3.2 热传导 /102

3.2.1 傅里叶定律 /102

3.2.2 通过平壁的定态导热过程 /103

3.2.3 通过圆筒壁的定态导热过程 /105

3.3 对流给热 /107

3.3.1 对流给热过程分析 /107

3.3.2 牛顿冷却定律 /108

3.3.3 无相变对流给热 /110

3.3.4 有相变对流给热 /114

3.4 传热过程的计算 /118

3.4.1 传热过程分析 /119

3.4.2 传热过程基本方程 /123

3.4.3 传热过程计算 /125

3.4.4 传热过程强化 /129

3.5 换热器 /130

3.5.1 间壁式换热器 /130

3.5.2 其他类型换热器 /133

习题 /137

思考题 /138

本章符号说明 /138

第4章 液体精馏 /140

4.1 蒸馏概述 /140

4.1.1 蒸馏分离的依据 /140

4.1.2 蒸馏过程及经济性 /141

4.2 双组分溶液的汽液相平衡 /141

4.2.1 理想物系的汽液相平衡 /142

4.2.2 非理想物系的汽液相平衡 /144

4.2.3 总压对相平衡的影响 /146

4.3 液体的蒸馏 /146

4.3.1 平衡蒸馏 /146

4.3.2 简单蒸馏 /147

4.4 精馏原理 /148

4.4.1 精馏过程分析 /148

4.4.2 精馏过程数学描述 /149

4.4.3 塔段的数学描述 /154

4.5 连续精馏过程计算 /158

4.5.1 理论板数的计算 /158

4.5.2 回流比的影响与选择 /161

4.5.3 加料热状态的影响与选择 /165

4.5.4 全塔效率与实际塔板数 /166

4.6 间歇精馏 /166

4.6.1 间歇精馏过程分析 /166

4.6.2 馏出液组成保持恒定的间歇精馏 /167

4.6.3 回流比保持恒定的间歇精馏 /168

4.7 特殊精馏 /169

4.7.1 恒沸精馏 /169

4.7.2 萃取精馏 /171

4.8 其他蒸馏技术 /172

4.8.1 水蒸气蒸馏 /172

4.8.2 分子蒸馏 /173

4.9 精馏设备 /175

4.9.1 板式塔 /176

4.9.2 填料塔 /183

4.9.3 填料塔与板式塔的比较 /187

习题 /188

思考题 /189

本章符号说明 /189

第5章 萃取和浸取 / 191

5.1 液液萃取过程 /191

5.1.1 液液萃取过程分析 /191

5.1.2 液液相平衡 /192

5.1.3 液液萃取过程计算 /193

5.1.4 液液萃取设备 /197

5.2 液固浸取过程 /201

5.2.1 液固浸取过程分析 /201

5.2.2 液固浸取过程计算 /202

5.2.3 液固浸取设备 /206

5.3 超临界流体萃取 /207

5.3.1 超临界流体 /207

5.3.2 超临界流体萃取的应用 /208

习题 /210

思考题 /210

本章符号说明 /211

第6章 固体干燥 / 212

6.1 概述 /212

6.1.1 固体去湿方法 /212

6.1.2 对流干燥流程及经济性 /213

6.2 干燥静力学 /213

6.2.1 湿空气的状态参数 /213

6.2.2 湿空气的焓湿图及其应用 /218

6.2.3 水分在气固两相间的平衡 /222

6.3 干燥速率与干燥过程计算 /224

6.3.1 恒定干燥条件下的干燥速率 /224

6.3.2 间歇干燥过程的干燥时间 /226

6.3.3 连续干燥过程一般特性 /229

6.3.4 干燥过程的物料衡算与热量衡算 /230

6.3.5 干燥过程的热效率 /233

6.4 干燥器 /236

6.4.1 常用干燥器 /236

6.4.2 干燥器的选型 /242

习题 /243

思考题 /244

本章符号说明 /244

第7章 其他单元操作 / 246

7.1 搅拌 /246

7.1.1 搅拌设备 /246

7.1.2 搅拌器的类型和性能特点 /247

7.1.3 搅拌功率 /253

7.1.4 搅拌器的放大 /256

7.2 蒸发 /259

7.2.1 蒸发过程分析 /259

7.2.2 单效蒸发 /260

7.2.3 蒸发操作的经济性和多效蒸发 /264

7.2.4 蒸发设备 /267

7.3 溶液结晶 /269

7.3.1 结晶基本原理 /270

7.3.2 饱和溶液和过饱和溶液 /270

7.3.3 结晶动力学 /271

7.3.4 结晶过程的物料衡算与热量衡算 /272

7.3.5 工业结晶方法与设备 /275

7.4 吸附分离 /277

7.4.1 吸附过程分析 /277

7.4.2 吸附相平衡 /279

7.4.3 传质及吸附速率 /282

7.4.4 固定床吸附过程 /283

7.4.5 吸附分离设备 /287

7.5 膜分离 /288

7.5.1 概述 /288

7.5.2 反渗透 /292

7.5.3 超滤 /294

7.5.4 电渗析 /295

习题 /296

思考题 /297

本章符号说明 /298

附赠 化工原理实验 / 300

附录 / 301

一、部分物理量的单位和量纲 /301

二、水与蒸汽的物理性质 /301

三、干空气的物理性质

($p=101.33\text{kPa}$) /304

四、液体及水溶液的物理性质 /305

五、气体的重要物理性质 /314

六、固体性质 /315

七、管子规格 /316

八、泵与风机 /318

九、换热器 /320

十、标准筛目 /324

十一、气体常数 R /325

十二、某些二元物系的汽-液平衡组成 /325

十三、填料的特性 /326

习题答案 / 328

参考文献 / 330

第 0 章

绪论



0.1 制药过程与单元操作

随着科学技术的进步和人类社会的发展，制药工业已成为越来越重要的产业，它包括了原料药的生产和药物制剂的生产。制药包含了中药制药、生物制药和化学制药。例如，中药制药中，原料药通过药材的浸取、反应、分离、干燥等步骤获得，它是药品的基础物质，但最终需制成适当的药物制剂，才能供医疗使用。如果加工不当，会使药用成分流失或变性，使之“虽有药名，终无药实”，在医疗中出现“脉准、方对、不治病”的现象。药品种类繁多，每一种药品的生产都有独特的工艺过程，但是，各种不同的工艺过程都是由若干个单元操作和单元反应组成的。这些单元操作在不同的药品生产中都会或多或少地出现，它们的实质是相同的。化工原理课程研究这些单元操作，主要有流体输送、搅拌、换热、蒸发、精馏、萃取、浸取、干燥、结晶、吸附、膜分离等。每一个单元操作都是基于一个物理的、物理化学的基本原理，实现一个过程。例如，精馏是基于各组分挥发度的差异而实现液体混合物分离，液液萃取是基于各组分在溶剂中的溶解度的差异而实现液体混合物分离，吸附是基于流体混合物中各组分与固体吸附剂表面分子结合力的不同而实现混合物分离，结晶是基于各组分在溶剂中的溶解度的差异而实现混合物分离，等等。

0.2 化工原理课程的性质与任务

化工原理课程的先修课程是数学、物理、物理化学，本课程的任务是利用先修课程的知识来解决制药生产中的单元操作问题，研究各单元操作的共性问题。各单元操作的共性问题就是传递过程：动量传递、热量传递、质量传递。流体输送、搅拌涉及的主要是动量传递，换热、蒸发涉及的主要是热量传递，精馏、萃取、浸取、干燥、结晶、吸附、膜分离涉及的主要是质量传递，各单元操作的目的、物态、原理、传递过程如表 0-1 所示。

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；过滤过程的实质是液体通过滤饼（颗粒层）的流动。又如，液体的萃取分离过程的实质是传质-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。从表 0-1 可见，贯穿化工原理课程的主线就是传递过程，它是本课程统一的研究对象，也是联系各单元操作的主线。

表 0-1 制药常用单元操作

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
液体精馏	均相混合物分离	液	各组分挥发度的不同	质量传递
萃取	均相混合物分离	液	各组分在溶剂中溶解度的不同	质量传递
浸取	均相混合物分离	固	各组分在溶剂中溶解度的不同	质量传递
干燥	去湿	固	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	质量传递
结晶	均相混合物分离	液	溶质在溶剂中的过饱和	质量传递
反渗透	均相混合物分离	液	各组分尺度不同的截留	质量传递
电渗析	均相混合物分离	液	电解质离子选择性的传递	质量传递

0.3 单位换算

物理量是通过描述自然规律的方程或定义新的物理量的方程而相互联系的。可把少数几个物理量作为相互独立的,其他的物理量可根据这几个量来定义。这少数几个相互独立的物理量为基本量,可由基本量导出的物理量为导出量,在国际单位制(SI制)中共有七个基本量:长度,质量,时间,电流,热力学温度,物质的量和发光强度。其他的量,都可以由这七个基本量导出。

一个物理量是由数值和单位组合表示的。与七个基本量对应,国际单位制共有七个基本单位:长度 m,质量 kg,时间 s,电流 A,温度 K,物质的量 mol,发光强度 cd(坎德拉)。与导出量对应的是导出单位,如密度 kg/m³,加速度 m/s²,力 N(=kg·m/s²)。

不同单位制所定义的基本量不同,其单位也不同。同一个物理量用不同的单位表示时,就涉及其数值的换算问题。化工原理课程采用 SI 制,但因历史原因,涉及的单位制还有:CGS 制、工程单位制。表 0-2 所示为常用单位制的基本单位。

表 0-2 常用单位制的基本单位

SI 制			CGS 制			工程单位制		
长度	质量	时间	长度	质量	时间	长度	力	时间
m	kg	s	cm	g	s	m	kgf	s

在工程单位制中,力是基本单位,将作用在 1kg 质量上的重力定义为 1kgf。换算关系为

$$1\text{kgf}=1\text{kg}\times9.81\text{ m/s}^2=9.81\text{N}=1000\text{g}\times981\text{cm/s}^2=9.81\times10^5\text{dyn}$$

在使用力、压强等物理量时,常需要进行工程单位制、CGS 制与 SI 制的换算。

第 1 章

流体流动和流体输送机械

气体、液体、超临界物质、悬浮液、气溶胶都是流体。制药生产涉及大量流体物料，涉及的过程大多在流动条件下进行。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：流动阻力及流量计量；流动对传热、传质及化学反应的影响；流体的混合。

当流体从低能位向高能位输送时，须使用流体输送机械。用以输送液体的机械通称为泵，用以输送气体的机械则按不同的情况分别称为通风机、鼓风机、压缩机和真空泵等。学习常用流体输送机械的工作原理和特性，可恰当选择和使用这些流体输送机械。

1.1 概述

1.1.1 流体流动中的作用力

连续性 流体由大量单个分子组成，彼此间有一定间隙。但是，工程上关心的是流体的宏观运动，可将流体看作是由无数质点组成的、彼此间没有间隙的连续介质，即流体是连续的。这样，可用连续函数描述流体的物理性质及运动参数。例如，对于速度，可作如下描述

$$u_x = f_x(x, y, z, t), \quad u_y = f_y(x, y, z, t), \quad u_z = f_z(x, y, z, t) \quad (1-1)$$

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坐标方向上的分量。

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。反之，为非定态流动。

流线 同一时刻不同流体质点在速度方向上的空间连线就是流线。流线上切线表示切点流体的速度方向，如图 1-1 所示。

控制体 制药生产中往往关心某些固定空间（如某一设备）中的流体运动。当划定一固定的空间体积来考察问题时，该空间体积称为控制体。

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，也称质量力，对于均质流体也与流体的体积成正比。重力与离心力都是典型的体积力。

表面力——压力与剪力 表面力与表面积成正比。表面力可分解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）。单位面积上所受的垂直力称为压强；单位面积上所受的剪力称为剪应力。

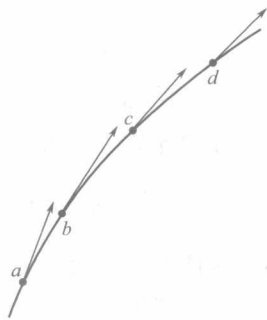


图 1-1 流线

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

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

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 。

剪应力 设有间距甚小的两平行平板, 其间充满流体 (见图 1-2)。下板固定, 上板施加一切向力 F 使平板以速度 u 作匀速运动。流体在固体表面不会滑脱, 保持与固体表面相同的速度, 板间各层流体的速度大小不同, 如图中箭头所示。对大多数流体, 单位面积的切向力 F/A , 即剪应力 τ 服从下列牛顿黏性定律

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

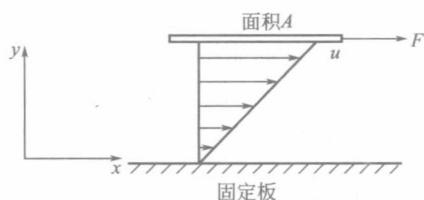


图 1-2 剪应力与速度梯度

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 。

黏度 黏度因流体而异, 是流体的物性。式(1-3)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。常用流体的黏度可从附录查取。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

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

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 单位中以 m^2/s 表示, CGS 单位为 沱 (厘米²/秒), 其百分之一为厘沱。为示区别, 黏度 μ 又称为动力黏度。

理想流体 当流体无黏性, 即 $\mu=0$ 时, 称为理想流体。实际流体都有黏性。

1.1.2 流体流动中的机械能

流体所含的能量包括内能和机械能。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。

1.1.3 流体输送机械的分类

制药生产涉及的流体可能是强腐蚀性的、易燃易爆的、温度很高或很低的、或含有固体悬浮物的，其性质千差万别。在不同场合下，对输送量和补加能量的要求也相差悬殊。依作用原理不同，可将流体输送机械作如下分类。

动力式（叶轮式）：包括离心式、轴流式等。

容积式（正位移式）：包括往复式、旋转式等。

其他类型：指不属于上述两类的其他型式，如喷射式等。

气体的密度及压缩性与液体有显著区别，从而导致气体与液体输送机械在结构和特性上有不同之处。

1.2 流体静力学

1.2.1 流体静力学方程

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

$$p = f(x, y, z) \quad (1-5)$$

静力学方程 在静止流体中，取一底面积为 A 的垂直柱形控制体，柱体上平面的坐标为 (x, y, z_1) ，下平面的坐标为 (x, y, z_2) ，如图 1-3 所示。因流体是静止的，不受任何剪应力，且处于力平衡状态，该柱体在垂直方向上所受的力为：①向下的表面力 $p_1 A$ ；②向上的表面力 $p_2 A$ ；③向下的体积力 $A(z_1 - z_2)\rho g$ 。由力平衡可得

$$p_2 A - p_1 A - A(z_1 - z_2)\rho g = 0$$

$$\text{即} \quad p_2 = p_1 + (z_1 - z_2)\rho g = p_1 + \rho gh \quad (1-6)$$

$$\text{或} \quad \frac{p_1}{\rho} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + gz_2 \quad (1-7)$$

式(1-6)中， $h = z_1 - z_2$ 。

式(1-7)被称为流体静力学方程。应当指出，式(1-6)、式(1-7)仅适用于在重力场中静止的不可压缩流体。上列各式表明静压强仅与垂直位置有关，而与水平位置无关，即等高等压，水平面就是等压面。这正是由于流体仅处于重力场中的缘故。若流体处于离心力场中，静压强分布将遵循不同的规律。对于气体，原则上须按式(1-6)的微分式 $dp = -\rho g dz$ 由密度与压强的关系进行积分。压强变化不大时，密度可近似地取其平均值而视为常数，式(1-7)仍可应用。

1.2.2 流体静力学方程的应用

虚拟压强 式(1-7)中， gz 项是单位质量流体的位能， $\frac{p}{\rho}$ 是单位质量流体的压强能。位能与压强能都是势能。式(1-7)表明，在同种静止流体中，不同位置的流体，其位能和压强能各不相同，但其和即总势能保持不变。若以符号 $\frac{\mathcal{P}}{\rho}$ 表示单位质量流体的总势能，则

$$\frac{\mathcal{P}}{\rho} = gz + \frac{p}{\rho} \quad (1-8)$$

式中， $\mathcal{P}$ 具有与压强相同的量纲，可理解为一种虚拟的压强。

$$\mathcal{P} = \rho gz + p \quad (1-9)$$

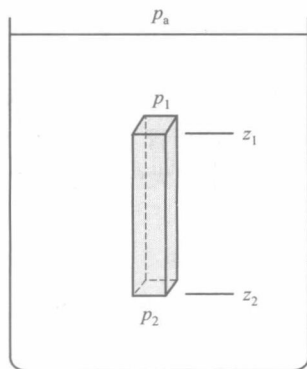


图 1-3 流体控制体的受力平衡

对不可压缩流体, 式(1-8)表示同种静止流体各点的虚拟压强处处相等。由于 $\mathcal{P}$ 的大小与密度 ρ 有关, 在使用虚拟压强时, 必须注意所指定的流体种类以及高度基准。

压强的其他表示方法 压强的大小除直接以 Pa 表示外, 在压强不太大的场合, 工程上常间接地以流体柱高度表示, 如用米水柱或毫米汞柱等。液柱高度 h 与压强的关系为

$$p = \rho gh \quad (1-10)$$

注意: 当以液柱高度 h 表示压强时, 必须同时指明为何种流体。例如, 1atm (标准大气压) = 1.013×10^5 Pa, 即 0.1013MPa, 相当于 760mmHg 或 10.33mH₂O。

压强的基准 压强的大小常用两种不同的基准来表示: 一是绝对真空; 二是大气压强。以绝对真空为基准测得的压强称为绝对压强, 以大气压强为基准测得的压强称为表压或真空度。表压是压强表直接测得的读数, 其数值就是绝对压强与大气压强之差, 即

$$\text{表压} = \text{绝对压} - \text{大气压}$$

真空度是真空表直接测量的读数, 其数值表示绝对压比大气压低多少, 即

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

图 1-4 表示绝对压、表压或真空度之间的关系。为免混

淆, 用表压或真空度表示压强数值时, 须加说明, 如 0.3MPa (表压), 0.05MPa (真空度)。

简单测压管 简单测压管如图 1-5 所示。储液罐的 A 点为测压口。测压口与一玻管连接, 玻管的另一端与大气相通。由玻管中的液面高度获得读数 R , 用静力学方程即式(1-6)得

$$p_A = p_a + R\rho g$$

A 点的表压为

$$p_A - p_a = R\rho g$$

(1-11)

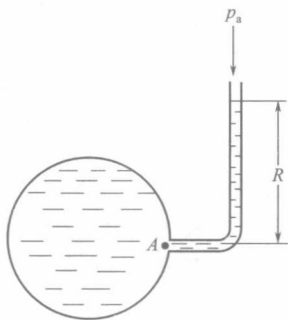


图 1-5 简单测压管

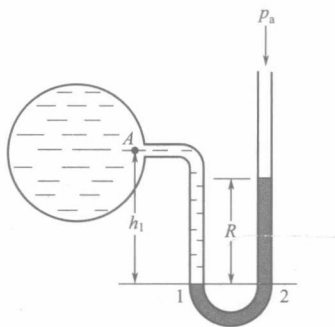


图 1-6 U 形测压管

U 形测压管 在图 1-6 中, 用 U 形测压管测量容器中的 A 点压强。U 形玻璃管内放有某种液体作为指示液。指示液必须与被测流体不发生化学反应且不互溶, 其密度 ρ_i 大于被测流体的密度 ρ 。由等高等压可知, 图中 1、2 两点的压强

$$p_1 = p_A + \rho gh_1$$

与

$$p_2 = p_a + \rho_i gR$$

相等, 由此可求得 A 点的压强为

$$p_A = p_a + \rho_i gR - \rho gh_1$$

A 点的表压为

$$p_A - p_a = \rho_i gR - \rho gh_1$$

(1-12)

如果容器内为气体, 则由气柱 h_1 造成的静压差可忽略, 得

$$p_A - p_a = \rho_i g R \quad (1-13)$$

此时 U 形测压管的指示液读数 R 表示 A 点压强与大气压之差, 读数 R 即为 A 点的表压。

U 形压差计 若 U 形测压管的两端分别与两个测压口相连, 则可以测得两测压点之间的压差, 故称为压差计。图 1-7 表示 U 形压差计测量直管内作定态流动时 A 、 B 两点的压差。因 U 形管内的指示液处于静止, 位于同一水平面 1、2 两点的压强

$$p_1 = p_A + \rho g h_1$$

与 $p_2 = p_B + \rho g (h_2 - R) + \rho_i g R$
相等, 故有

$$(p_A + \rho g z_A) - (p_B + \rho g z_B) = R g (\rho_i - \rho)$$

$$\text{或} \quad \mathcal{P}_A - \mathcal{P}_B = R g (\rho_i - \rho) \quad (1-14)$$

由式(1-14)可见, 当压差计两端的流体相同时, U 形压差计直接测得的读数 R 实际上并不是真正的压差, 而是 A 、 B 两点虚拟压强之差 $\Delta \mathcal{P}$ 。只有当两测压口处于等高面上时, $\mathcal{P}_A - \mathcal{P}_B = p_A - p_B$, U 形压差计才能直接测得两点的压差。

当压差一定时, 用 U 形压差计测量的读数 R 与密度差 $(\rho_i - \rho)$ 有关。有时, 也可以用密度较小的流体 (如空气) 作指示剂, 采用倒 U 形管测量压差。

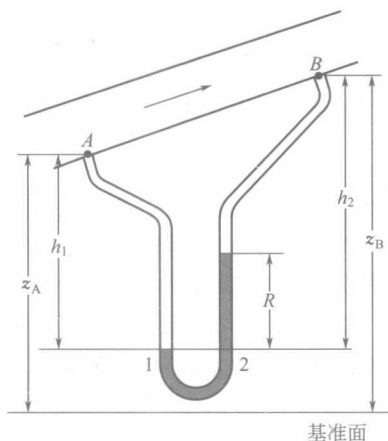


图 1-7 虚拟压强差

【例 1-1】静压强计算

某容器上装有一复式 U 形水银测压计, 如图 1-8 所示。截面 2、4 间充满水。已知对某基准面而言各点的标高为 $z_0 = 2.1\text{m}$, $z_2 = 0.9\text{m}$, $z_4 = 2.0\text{m}$, $z_6 = 0.7\text{m}$, $z_7 = 2.5\text{m}$ 。试求该容器内水面上的压强。

解: 按静力学方程, 同种静止流体的连通器内, 等高等压, 故有

$$p_1 = p_2, \quad p_3 = p_4, \quad p_5 = p_6$$

对水平面 1-2 而言, $p_2 = p_1$, 即

$$p_2 = p_a + \rho_i g (z_0 - z_1)$$

对水平面 3-4 而言

$$p_4 = p_3 = p_2 - \rho g (z_4 - z_2)$$

对水平面 5-6 而言

$$p_6 = p_5 + \rho_i g (z_4 - z_5)$$

容器内水面上的压强

$$p = p_6 - \rho g (z_7 - z_6)$$

$$p = p_a + \rho_i g (z_0 - z_1) + \rho_i g (z_4 - z_5) - \rho g (z_4 - z_2) - \rho g (z_7 - z_6)$$

则表压为

$$\begin{aligned} p - p_a &= \rho_i g (z_0 - z_1 + z_4 - z_5) - \rho g (z_4 - z_2 + z_7 - z_6) \\ &= 13600 \times 9.81 \times (2.1 - 0.9 + 2.0 - 0.7) - 1000 \times 9.81 \times (2.0 - 0.9 + 2.5 - 0.7) \\ &= 3.05 \times 10^5 \text{ Pa} = 305 \text{ kPa} \end{aligned}$$

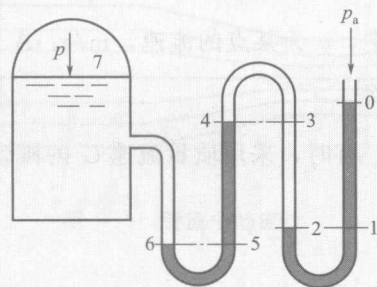


图 1-8 复式 U 形水银测压计

1.3 流体流动中的守恒原理

弄清流速、压强等运动参数在流体流动过程中的相互关系是研究其规律的基础。流体流动应当服从一般的守恒原理：质量守恒、机械能守恒。本节将导出这些守恒原理在流体流动中的具体表达形式。

1.3.1 质量守恒

流量 单位时间内流过管道某一截面的物质质量称为流量。流过的量若以体积表示，称为体积流量，以符号 q_V 表示，常用的单位有 m^3/s 或 m^3/h 。若以质量表示，则称为质量流量，以符号 q_m 表示，常用的单位有 kg/s 或 kg/h 。

体积流量 q_V 与质量流量 q_m 之间存在下列关系

$$q_m = q_V \rho \quad (1-15)$$

流量是一种瞬时的特性，不是某段时间内累计流过的量。它可因时而异。当流体作定态流动时，流量不随时间而变。

平均流速 流体质点在单位时间内流动方向上流经的距离称为流速，用符号 u 表示，单位为 m/s 。管内流体流动时，因黏性的存在，流速沿管截面形成某种分布。在工程计算中，常用一个平均速度来代替这一速度分布。定义物理量的平均值时应按其目的采用相应的平均方法。在流体流动中按体积流量相等的原则来定义平均流速。平均速度以符号 $\bar{u}$ 表示，即

$$\bar{u} = \frac{q_V}{A} = \frac{\int_A u \, dA}{A} \quad (1-16)$$

式中， u 为某点的流速， m/s ； A 为垂直于流动方向的管截面积， m^2 。

$$q_m = q_V \rho = \bar{u} A \rho \quad (1-17)$$

有时，采用质量流速 G 的概念，亦称为质量通量，其单位为 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

$$G = \frac{q_m}{A} = \bar{u} \rho \quad (1-18)$$

对于气体在直管中的流动，沿程的平均速度和密度都会发生变化，而质量流速 G 是沿程不变的。

质量守恒方程 考察图 1-9 中截面 1-1 至 2-2 之间的管段控制体，定态流动时，控制体内没有积累量，单位时间内流进和流出控制体的质量应相等，即

$$\rho_1 \bar{u}_1 A_1 = \rho_2 \bar{u}_2 A_2 \quad (1-19)$$

这就是流体在管道中作定态流动时的质量守恒方程，也称为连续性方程。式中， A_1 、 A_2 为管段两端的横截面积， m^2 ； $\bar{u}_1$ 、 $\bar{u}_2$ 为管段两端面的平均流速， m/s ； ρ_1 、 ρ_2 为管段两端面处的流体密度， kg/m^3 。对不可压缩流体， ρ 为常数，则有

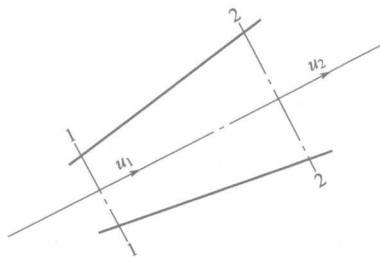


图 1-9 控制体中的质量守恒