普通高等教育“十一五”国家级规划教材

化工原理

第四版

上册

谭天恩　窦　梅　等编著

HUAGONG YUANLI

化学工业出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

化工原理

第四版

上 册

谭天恩 窦梅 等编著

化学工业出版社

·北京·

本书在第三版的基础上进行修订。本书论述化工过程单元操作的基本原理、典型设备等。本版注重、更新基本概念的阐述，调整了部分章节结构，删减已少用的内容；核实、更新了某些数据，以更符合实用。全书分上、下册。上册包括：绪论、流体流动、流体输送机械、机械分离与固体流态化、搅拌、传热、传热设备、蒸发及附录等。本书为工科高等院校化工（多学时）及相关专业的化工原理课程的教材，亦可供化工行业从事研究、设计与生产的工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

化工原理．上册/谭天恩，窦梅等编著．—4版．—北京：化学工业出版社，2013.5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-122-16361-5

Ⅰ.①化… Ⅱ.①谭…②窦… 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（2013）第011879号

责任编辑：何　丽

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：北京振南印刷有限责任公司

装　　订：三河市宇新装订厂

787mm×1092mm　1/16　印张18¼　字数475千字　2013年6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：34.00元

版权所有　违者必究

前　言

本书第三版使用近七年后，即将新出版第四版。新版在保持第三版的框架下，主要作了以下修订更新：

1. 对某些内容的介绍、解释作了改进、补充（如湍流的形成、传热单元的意义），并对较多细节处的阐述进行完善，以期更易于接受，更利于内容的前后联系；订正了遗留的不妥之处，删减了已少用的部份内容。

2. 校准、更新了一些常用的数据，如附录八、附录九的“饱和水蒸气表”、附录十六的“管子规格”。

本书绪论、第一、二、三、十、十三章由窦梅编写；第十二章及第十四章的“超临界流体萃取”由黄文瀛编写；第十四章的“膜分离”由陈欢林编写；第四、五、六、七、八、九、十一章由谭天恩编写，并负责全书统稿。

为便于教学，本书配备有习题参考答案和电子教学课件，有需要者可向化学工业出版社或作者咨询。

本书第三版承蒙天津科技大学、太原理工大学、福建农林大学等院校的同行们提出诸多宝贵意见，对本次修订助益甚大，特表深切谢意；并渴望读者对本版不足之处继续提出。

作者

2013 年 3 月于杭州

第一版前言

本书是根据化学工业部教育司与化学工业出版社关于增编化工原理教材的要求而编写的。

新编一本书，除了表达作者的见解而外，亦必借鉴前人的成果。本书很重视汲取以前的化工原理教材的优点，特别是张洪沅、丁绪淮、顾毓珍三教授编著的“化学工业过程及设备”一书，历来为使用过的师生所称道，本书开编前征集意见时，亦常有人提出应以该书为楷模。编者曾认真研究该书特点，深觉其内容精练、阐述严谨、概念清楚、文字流畅。对于由浅入深、联系实际等教学法上的基本要求，亦很重视。本书编写时极力以此为目标，但限于编者水平，甚虑达到之不易，在此提出，亦是作为策励之意。

本书力求重视概念与原理，同时注意引导学生从工程角度考虑问题。对于设备，着重典型分析，以操作原理为主，构造细节为次。至于设计计算，则侧重原则与方法，而具体步骤从简。有少数节、段的内容，与最基本者相比属于稍偏或稍难，用特殊标记▽表示。每章之末所推荐的参考读物，限于合乎学生程度而易见到的书刊；至于国内已出版的同类教材，自是重要的参考书，但若每章之末都列举一次，未免繁冗，故在此提出后，一般不再列。

本书有个别段落，采自编者参加编写的学校讲义，现已公开出版的其他教材中，偶亦有引用这些内容的。由于本书出版在后，故顺带指出。

成书过程中，除得到化工部教育司与化学工业出版社的有力支持外，编者所属各院校亦在工作上给予各种协助与方便，而许多院校从事化工原理教学的同志，或提供意见，或介绍资料，或校阅稿件，均不遗余力。本书得以编成，深赖上述赞助，对此编者深致谢意。编者学识有限，用力虽勤而成绩不彰，书中欠妥之处一定不少，甚望读者本着扶持一本合用教材的精神，尽量指出其不足，以助日后之修订。

编者

1982 年 8 月

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

第二版前言

本书在1984年出版后经过几年的使用，广大读者在给予肯定的同时，也提出了不少的意见和建议，主要是上册中还存在某些概念不够清晰、阐述不够严密、内容不够精练之处，印刷错误也较多等。经编者提出申请，化工原理课程教学指导委员会1988年两次工作会议上讨论，最后由化工部教育司核准，决定先对上册修订再版。

再版中对发现的错误做了更正，不够确切或严密的提法作了修改，力求加强前后的联系和论述的逻辑性，注意到习题和讲课进度能较好配合，对某些内容，尤其是第五、六章做了较大调整；根据法定单位制在我国实施的进展，基本上全部采用SI制；重新改写的内容占到10%以上，其中包括插图、例题、习题和参考文献。

本书绪论、第一、二、三、四、十一、十四章由麦本熙执笔，第五、六、七、十三章由丁惠华执笔；其余由谭天恩执笔，并为全书统稿；黄有慧、吴庆邦为审稿人（黄有慧参加第九、十章执笔）。

我们虽尽了很大努力，但仍难免有不妥之处，甚望广大读者继续提出意见。并对过去指出本书不足的同志们，在此表示深切谢意。

作者

1990年元月

第三版前言

本书上册、下册第二版问世以来，分别过去了近16年和8年，对本书的再版修订工作化学工业出版社早有计划要求。之后，书稿的编写先后经过了几次反复修改，即将定稿。至此，本书又申报并被批准列为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，希望本书的再版能为教学改革添砖加瓦。第三版进一步贯彻以下的初衷：重视基本概念，阐述力求严谨，同时注意实际应用与培养工程观点，对发现的不妥之处予以订正；为较好地符合循序渐进、体现教改需要和科技进步，改写了一些内容；有的设备去旧换新，也对部分例题、习题进行了更新。具体做了如下改动。

1. 原第十四章“固体流态化”并入现第三章；

2. 简介某些新的内容，如反应精馏，并增加“其他分离过程”作为第三版的第十四章；

3. 删减已少用的内容，以使总的篇幅有所减少；

4. 各章的习题参考答案、参考读物汇总后分别列于上册和下册的书末。

本书是在第二版基础上修订完成的。原作者麦本熙、丁惠华由于健康原因未能参与本版修订工作。在此向麦本熙、丁惠华两位先生及第二版的其他编审者为本书所做的贡献深表谢意。

本书绪论、第一、二、三章由窦梅执笔；第十、十三章由周明华执笔；第十二章及第十四章的超临界流体萃取由黄文瀛执笔；第十四章的膜分离由陈欢林执笔；其余由谭天恩执笔，并为全书统稿。

为便于教学，本版书将配备电子教学课件和习题参考解答，有需要者可向出版社及作者咨询。

感谢读者们为本书提出的宝贵意见，切望对本版不足之处续予提出。

作者

2006年6月于杭州

目　录

绪论 …… 1
一、本课程的历史背景和内容 …… 1
二、贯穿本课程的三大守恒定律 …… 1
三、单元操作的研究方法 …… 2
四、贯穿本课程的主线——工程观点 …… 2

第一章　流体流动 …… 3
第一节　流体静止的基本方程 …… 3
一、密度 …… 3
二、压力的表示方法 …… 4
三、流体静力学方程 …… 4
四、流体静力学方程的应用 …… 5
第二节　流体流动的基本方程 …… 6
一、基本概念 …… 6
二、质量衡算——连续性方程 …… 9
三、机械能衡算方程 …… 10
第三节　流体流动现象 …… 15
一、流动型态 …… 15
二、湍流的基本概念 …… 17
三、管内流动的分析 …… 19
四、边界层与边界层分离 …… 21
第四节　管内流动的阻力损失 …… 22
一、沿程损失的计算通式及其用于层流 …… 22
二、量纲分析法 …… 24
三、湍流的摩擦系数 …… 26
四、非圆形管的沿程损失 …… 29
五、局部损失 …… 30
六、管内流动总阻力损失的计算 …… 31
第五节　管路计算 …… 33
一、简单管路 …… 34
二、复杂管路 …… 37
三、可压缩流体的管路计算 …… 41
第六节　流量测量 …… 43
一、变压头流量计 …… 43
二、变截面流量计 …… 47
习题 …… 49
符号说明 …… 53
参考文献 …… 53

第二章　流体输送机械 …… 54
第一节　离心泵 …… 54
一、离心泵的操作原理与构造 …… 54
二、离心泵的理论压头与实际压头 …… 56
三、离心泵的主要性能参数 …… 59
四、离心泵的特性曲线及其应用 …… 60
五、离心泵的工作点与流量调节 …… 62
六、离心泵的安装高度 …… 65
七、离心泵的类型、选用、安装与操作 …… 67
第二节　其他类型泵 …… 70
一、其他叶片式泵 …… 70
二、容积式泵 …… 70
三、其他形式泵 …… 73
四、各类泵在化工生产中的应用 …… 74
第三节　通风机、鼓风机、压缩机和真空泵 …… 75
一、离心式风机 …… 75
二、旋转鼓风机和压缩机 …… 78
三、往复压缩机 …… 79
四、真空泵 …… 82
习题 …… 83
符号说明 …… 86
参考文献 …… 86

第三章　机械分离与固体流态化 …… 87
第一节　筛分 …… 87
一、颗粒的特性 …… 87
二、颗粒群的特性 …… 88
三、筛分 …… 89

第二节　沉降分离 …… 91
一、重力沉降原理 …… 91
二、重力沉降分离设备 …… 94
三、离心沉降原理 …… 96
四、离心沉降分离设备 …… 97
第三节　过滤 …… 100
一、概述 …… 100
二、过滤设备 …… 102
三、过滤的基本理论 …… 105
四、滤饼洗涤 …… 109
五、生产能力 …… 110
第四节　离心分离 …… 114
第五节　固体流态化 …… 117
一、基本概念 …… 117
二、流化床的两种状态 …… 117
三、流化床的主要特性 …… 118
四、流化床的操作流速范围 …… 119
习题 …… 121
符号说明 …… 122
参考文献 …… 122

第四章　搅拌 …… 123
第一节　搅拌设备 …… 123
一、主要部件 …… 123
二、叶轮形式 …… 123
三、叶轮的操作 …… 124
四、搅拌槽与挡板 …… 125
五、典型搅拌器构型 …… 125
六、搅拌器的液体循环量与压头 …… 126
第二节　搅拌功率 …… 127
一、功率关联式 …… 127
二、功率曲线 …… 128
第三节　搅拌器放大 …… 131
一、搅拌器放大的基础 …… 131
二、搅拌器放大的实例 …… 132
习题 …… 132
符号说明 …… 133
参考文献 …… 133

第五章　传热 …… 134
第一节　概述 …… 134
一、传热在工业生产中的应用 …… 134
二、传热的三种基本方式 …… 134
三、传热速率与热阻 …… 135
第二节　热传导 …… 135
一、傅里叶定律 …… 135
二、热导率 …… 136
三、平壁的稳定热传导 …… 137
四、圆筒壁的稳定热传导 …… 141
第三节　两流体间的热量传递 …… 144
一、两流体通过间壁传热的分析 …… 144
二、传热速率和传热系数 …… 145
三、传热温差和热量衡算 …… 149
四、复杂流向时的平均温差 …… 152
五、传热效率-传热单元数法 …… 155
六、壁温的计算 …… 161
第四节　给热系数 …… 162
一、给热系数的影响因素和数值范围 …… 162
二、给热系数与量纲分析 …… 163
三、流体作强制对流时的给热系数 …… 166
四、流体作自然对流时的给热系数 …… 176
五、蒸气冷凝时的给热系数 …… 177
六、液体沸腾时的给热系数 …… 183
第五节　辐射传热 …… 187
一、基本概念 …… 187
二、物体的发射能力与斯蒂芬-波尔茨曼定律 …… 187
三、克希霍夫定律 …… 189
四、两固体间的相互辐射 …… 189
五、气体热辐射的特点 …… 193
六、辐射、对流的联合传热 …… 194
习题 …… 197
附录　饱和水蒸气参数的关联式 …… 199
符号说明 …… 200
参考文献 …… 200

第六章　传热设备 …… 201
一、换热器的分类 …… 201
二、夹套式换热器 …… 201
三、蛇管式换热器 …… 202
四、套管式换热器 …… 203
五、列管式换热器 …… 203
六、换热器的强化途径 …… 211
七、板式换热器 …… 212
八、螺旋板式换热器 …… 213

九、板翅式换热器 …… 214
十、翅片管换热器及空气冷却器 …… 215
十一、热管换热器 …… 216
习题 …… 217
符号说明 …… 217
参考文献 …… 217

第七章 蒸发 …… 218
第一节 概述 …… 218
第二节 单效蒸发 …… 219
一、单效蒸发的计算 …… 219
二、蒸发设备中的温差损失 …… 223
三、溶液的沸点升高与杜林规则 …… 224
四、液柱静压头和加热管内摩擦损失对溶液沸点的影响 …… 226
五、真空蒸发 …… 227
第三节 多效蒸发 …… 227
一、多效蒸发的流程 …… 227
二、蒸发器的生产能力、生产强度和多效蒸发器效数的限制 …… 228
三、多效蒸发的计算 …… 229
四、提高加热蒸汽利用程度的其他措施 …… 235
第四节 蒸发设备 …… 237
一、蒸发器的结构及特点 …… 238
二、蒸发辅助设备 …… 242
第五节 蒸发器的生产强度 …… 243
习题 …… 245
符号说明 …… 245
参考文献 …… 246

附 录 …… 247
附录一 常用物理量的单位与量纲 …… 247
附录二 某些气体的重要物理性质 …… 247
附录三 某些液体的重要物理性质 …… 248
附录四 某些固体材料的重要物理性质 …… 250
附录五 水的重要物理性质 …… 251
附录六 干空气的物理性质（101.3 kPa） … 252
附录七 水的饱和蒸汽压（−20～100 ℃） …… 253
附录八 饱和水蒸气表（按温度排列） …… 254
附录九 饱和水蒸气表（按压力排列） …… 255
附录十 水的黏度（0～100 ℃） …… 257
附录十一 液体黏度共线图 …… 258
附录十二 气体黏度共线图 …… 260
附录十三 液体比热容共线图 …… 262
附录十四 气体比热容共线图（常压下用） …… 264
附录十五 液体汽化潜热共线图 …… 266
附录十六 管子规格（摘自国家标准） …… 267
附录十七 IS型单级单吸离心泵性能表（摘录） …… 268
附录十八 8-18、9-27离心通风机综合特性曲线图 …… 272
附录十九 列管式换热器 …… 273
附录二十 常用筛子的规格 …… 278
附录二十一 无机物水溶液在101.3kPa（绝）下的沸点 …… 279

习题参考答案 …… 280

参考读物 …… 282

绪　论

一、本课程的历史背景和内容

在化学工业中，对原料进行大规模的加工处理，使其不仅在状态与物理性质上发生变化，而且在化学性质上也发生变化，成为合乎要求的产品，这一过程即为化学工业的生产过程，简称为化工过程。化工过程的特点是步骤多，而且由于所用的原料与所得的产品种类繁多，不同化工过程的差别很大。但分析各种化工过程可以发现，所包含的加工步骤均可分为两类。一类以进行化学反应为主，通常是在反应器中进行，它是化工过程的核心；另一类则主要是物理性加工步骤，即改变物料的状态或其物理性质，而不是改变其化学性质。例如，乙醇的生产和石油加工中都要进行蒸馏过程；陶瓷、尿素、染料、塑料、纸张等的生产中都有干燥过程；而糖、食盐这两种迥然不同的食品其生产过程中都包含有流体输送、蒸发、结晶、离心分离、干燥等过程。这类化工生产中共有的过程，用来为化学反应过程创造适宜的条件或将反应产物后处理制成纯净产品，称为**单元操作**。它们在化学工业生产中占有大部分的设备投资和操作费用，对生产的经济效益具有决定意义。

化工产品千千万万，但是所涉及的单元操作的种类却并不多，约 20 余种，按其所根据的内在的理论基础可分为：

以动量传递理论为基础，如流体输送、沉降、过滤、固体流态化、搅拌等；

以热量传递理论为基础，如加热、冷却、冷凝、蒸发等；

以质量传递理论为基础，如蒸馏、吸收、萃取等；

此外，还有以热、质同时传递为基础，如干燥、结晶、增湿、减湿等。

化工原理课程就是讲述比较重要且常用的单元操作的基本原理，工艺计算，典型设备的结构、操作性能和设计、选型等内容。“化工原理”这个名称源于世界上第一本系统阐述单元操作原理和计算方法的著作——W. H. Walker，W. K. Lewis 和 W. H. McAdams 合著的 Principles of Chemical Engineering（1923 年）。

二、贯穿本课程的三大守恒定律

本书中各单元操作的计算所涉及的定律主要有：质量守恒定律、能量守恒定律和动量守恒定律。

1. 质量守恒定律——物料衡算

每一单元操作中，均涉及原料、产物、副产物等之间量的关系，这可通过物料衡算确定。物料衡算的根据是质量守恒定律。即进入任何过程的物料质量等于从该过程离开的物料质量与积存于该过程中的物料质量之和

$$\text{输入}=\text{输出}+\text{积存}$$

很多情况下，过程进行中无物料积存，此种过程属于稳定过程（关于稳定过程的其他特点，第一章将作进一步讨论）。于是，上述物料衡算关系便简化为

$$\text{输入}=\text{输出}$$

上述关系可在微元体上使用，亦可在整个过程的范围内使用，或在一个或几个设备的范围内使用。它既可针对全部物料运用，也可在没有化学反应发生时针对混合物的任一组分来运用。

2. 能量守恒定律——能量衡算

许多单元操作需与外界进行能量交换，用于改变物料的温度或聚集状态，提供反应所需

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

的热量等，或者在过程中有几种能量相互转化。此时，其间的关系可通过能量衡算确定。能量衡算的根据是能量守恒定律。对于稳定过程，有

输入＝输出

3. 动量守恒定律——动量衡算

动量守恒定律即牛顿第二定律，研究动量随时间的变化率与力之间的关系。

三、单元操作的研究方法

化工原理属于工程学科，它的对象是现实的、复杂的生产过程。除少数简单问题可以列出方程直接求解以外，由于设备结构各异，影响因素繁多，单纯从理论上建立数学模型进行描述、求解，往往很困难，甚至根本行不通，因此，单元操作目前主要的研究方法是实验研究法和数学模型法（又称半理论半经验法），这两种方法在各单元操作中的具体应用，读者将会在各章中体会到。

1. 实验研究法

所谓实验研究法，一般是以量纲分析为指导，依靠实验建立过程参数之间的相互关系，把这种关系表示成由若干参数组成的特征数的关联。

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。

在学习本课程时，学生应仔细体会不同单元操作中哪些采用实验法，哪些采用数学模型法，其原因何在。掌握这些方法论，将有助于增强分析问题与解决问题的能力。

四、贯穿本课程的主线——工程观点

前已叙及，化工原理课程属于工程学科，它是基础理论课向工程专业课过渡的桥梁，是解决生产问题的基石。因此，培养工程思维和解决工程实际问题的能力是本门课程的最终目的。“工程观点”将一直贯穿于本课程中，以下举几个例子。

工程问题与以往理论上求解不同的是通常离不开从实验得出的经验、半经验公式，而这些公式都有各自的使用条件，这是工程性的一个典型特征，读者将逐步学会自己通过实验去得到或验证这类公式。计算方法上，由于参数间的关系复杂，往往难以用联立方程求解，而需要用“试差法”，即先设定某些初值，计算出结果后复核，再据此调整所设数据，重新计算，直到结果与设定值的偏差小于指定值为止。对于给定的问题，应当设定哪个（哪些）参数？设多大的初值？如何根据试算结果调整再次设定的值？这些都是需要逐步掌握的工程计算技巧。为避免因偶然的计算错误使结果离谱而不自知，以及如何恰当地选择试差中的初值等，需要记住一些经常遇到的工程数据范围，即需要有“数量概念”，如水及类似液体在管路中的流速范围一般为 $1\sim3\ \mathrm{m\cdot s^{-1}}$，做到心中有数。计算中也要注意“有效数字”，既要保证能够达到的准确性，又要避免出现虚假的“准确”。在工艺计算中会涉及大量的物性，而物性通常随温度、压力、浓度而变化，特别是受温度的影响较大，但考虑到在所涉及的范围内，物性的变化不是很显著，在工程计算中常近似取为常数，使问题简单化，以便于解决主要矛盾。此外，工程问题的解答或设计的方案通常不是唯一的，做决定时，除要考虑经济性以外，还要同时兼顾节能、环保及资源回收等因素。在本课程的学习中，读者将逐步认识、体会、树立这类工程观点，用来分析和解决实际问题。

第一章　流体流动

气体和液体统称为流体。流体流动现象在工业生产中很常见，本章内容就是流体流动的基本知识和规律。它在化工生产中极为重要，因为它不仅是研究流体在管内或设备内流动的基础，而且还与许多单元操作密切相关，例如沉降、过滤、搅拌、固体流态化、传热与传质等单元操作。因此，可以说，流体输送是化工过程中最普遍的单元操作之一。

流体流动不是指流体分子或原子的微观运动，而是指流体的宏观运动，其研究对象是由大量分子或原子构成的流体微团（或称质点）；另一方面，其大小与管路或容器的几何尺寸相比又是微不足道的。流体内部无数质点运动的总和，构成了流体的流动。

第一节　流体静止的基本方程

本节讨论重力场中静止流体的力学规律。在讨论前，先对有关的物理量作必要的说明。

一、密度

单位体积流体的质量，称为流体的**密度**，以符号 ρ 表示，单位是 $kg \cdot m^{-3}$。

流体的密度是物性之一，可从有关的物理化学手册中查得。一些常见流体的密度可参见本书附录二、附录三、附录五、附录六。

影响流体密度大小的因素主要有流体的种类、压力、温度等。其中，液体的密度基本上不随压力而变（除压力极高以外），但随温度稍有变化。通常温度升高，液体体积膨胀，密度变小。因此在手册上查取液体密度时，要注意所指的温度。

气体的密度一般随压力、温度有较明显的变化。在压力不是很高或极低时，其密度可按式(1-1) 理想气体状态方程计算

$$\rho=\frac{m}{V}=\frac{pM}{RT} \tag{1-1}$$

式中，ρ 为密度，$kg \cdot m^{-3}$；m 为质量，kg；V 为体积，m^3；M 为摩尔质量，$g \cdot mol^{-1}$ 或 $kg \cdot kmol^{-1}$；p 为压力，kPa；R 为气体常数，$R=8.314\ kJ \cdot kmol^{-1} \cdot K^{-1}$；$T$ 为热力学温度，K。

因为标准状态下（101.3 kPa、273 K），1 kmol 气体的体积为 22.4 m^3，故气体密度也可以采用式(1-2) 计算

$$\rho=\frac{M}{22.4}\times\frac{p}{101.3}\times\frac{273}{T}=0.1203\frac{Mp}{T} \tag{1-2}$$

化工过程中遇到的流体大多为混合物，而手册中一般仅提供纯物质的密度，混合物的密度可通过纯物质的密度计算如下。

对于液体均相混合物，假定混合前后总体积不变，则对 1 kg 液体的体积有

$$\frac{1}{\rho_m}=\frac{a_1}{\rho_1}+\frac{a_2}{\rho_2}+\cdots+\frac{a_n}{\rho_n}$$

式中，ρ_m 为液体混合物的密度，$kg \cdot m^{-3}$；a_1，a_2，…，a_n 为液体混合物中各组分的质量分数；无量纲；ρ_1，ρ_2，…，ρ_n 为液体混合物中各组分的密度，$kg \cdot m^{-3}$。

对于气体混合物，以 1 m^3 混合物为基准，根据混合前后总体积及总质量不变，可知

$$\rho_m = \varphi_1\rho_1 + \varphi_2\rho_2 + \cdots + \varphi_n\rho_n$$

式中，ρ_m 为气体混合物的密度，$kg \cdot m^{-3}$；φ_1，φ_2，…，φ_n 为气体混合物中各组分的体积分数。

压力或温度改变时，密度随之改变很小的流体称为**不可压缩流体**，若有较显著的改变则称为**可压缩流体**。通常认为液体是不可压缩的，气体是可压缩的。但是，若压力或温度改变不大时，气体也可按不可压缩流体处理。

二、压力的表示方法

流体垂直作用于单位面积上的力，称为压力强度，简称**压强**，但习惯上也多称为**压力**，单位为 Pa（帕），即 $N \cdot m^{-2}$。此外还有一些习惯使用的单位，现列出一些常见的压力单位及其换算关系。

$$1\ atm(标准大气压) = 101325\ Pa \approx 101.3\ kPa(千帕) = 0.1013\ MPa(兆帕)$$
$$= 760\ mmHg \approx 10.33\ mH_2O$$

压力有两种计量基准：以绝对真空为基准所计量的压力，称为绝对压力，简称绝压。绝压只能是正值。像式(1-1) 及式(1-2) 这样的热力学方程中必须采用绝压进行计算。以当地大气压（取对时间的平均值）为基准所计量的压力，称为相对压力。本书中，若没有注明，就认为基准压力为 1 个标准大气压，即 101.3 kPa。

相对压力可正可负，若为正值，则称此压力为表压（即压力表读数），若为负值，则称其绝对值为真空度（即真空表读数）。

如图 1-1 所示，表压、真空度与绝压的关系。

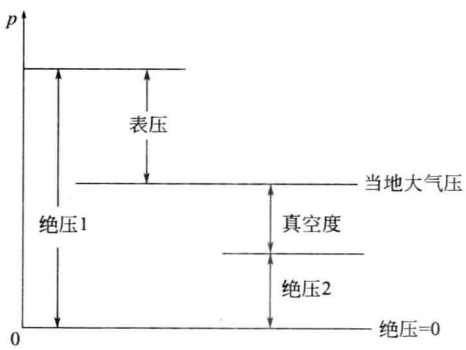

图 1-1　表压、真空度与绝压的关系

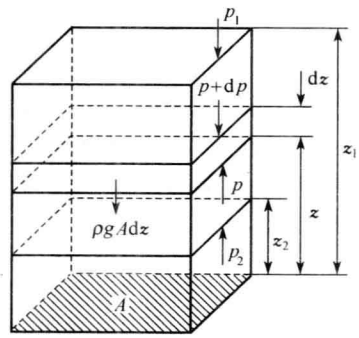

图 1-2　静止流体的力平衡

$$表压 = 绝压 - 当地大气压$$
$$真空度 = 当地大气压 - 绝压$$

本书中，若压力未注明，则默认代表表压。

三、流体静力学方程

静止流体内部任一点的压力称为该点的静压力，其特点如下：

(1) 从各方向作用于某一点上的静压力相等；

(2) 静压力的方向垂直于通过该点的作用平面；

(3) 在重力场中，同一水平面上各点的静压力相等；高度不同的水平面的静压力随位置的高低而变化。

静压力随位置高低变化关系的公式，可通过分析流体内部的静力平衡得到。

如图 1-2 所示，考虑重力场中内盛流体的垂直柱形容器，其底面积为 A。在底面以上高度为 z 的水平面上所作用的静压力为 p，此处流体的密度为 ρ。在此水平面上厚度为 dz 的薄层流体所受的力如下：

向上作用于薄层下底的总压力 pA；

向下作用于薄层上底的总压力 $(p+\mathrm{d}p)A$；

向下作用的重力 $\rho g A\mathrm{d}z$。

以向上作用的力为正，向下作用的力为负。流体静止时三力之和为零，故：

$$pA-(p+\mathrm{d}p)A-\rho g A\mathrm{d}z=0$$

简化得

$$\mathrm{d}p+\rho g\mathrm{d}z=0 \tag{1-3}$$

若 ρ=常数，积分上式得

$$\rho gz+p=\text{常数} \tag{1-4}$$

若积分上、下限分别取高度等于 z_1 和 z_2 的两个平面，又作用于这两平面上的压力分别为 p_1 与 p_2（如图 1-2），则得：

$$p_2=p_1+\rho g(z_1-z_2) \tag{1-5}$$

或

$$\frac{p_2}{\rho g}=\frac{p_1}{\rho g}+(z_1-z_2) \tag{1-6}$$

若容器内盛的是液体，上部与大气相通，则以表压计 $p_1=0$，容器底部的静压力 $p=p_2$；又以 z_p 代表 (z_1-z_2)，从式(1-6) 可知

$$\frac{p}{\rho g}=z_p \tag{1-7}$$

式(1-7) 就是液柱高 z_p 与其产生的静压力 p 之间的对应关系，$p/\rho g$ 通称为静压头；“头”用来代表液位高度，能形象地表示压力的大小；z_p 相应地称为位压头或位头。

式(1-4)～式(1-6) 是**流体静力学基本方程**，适用于重力场中静止的、连续的不可压缩流体。上述各式表明：静止流体内部某一水平面上的压力与其所处的高度和流体的密度有关，所在高度愈低则压力愈大。从式(1-6) 还可看出，压力 p_1 若有变化，压力 p_2 亦随之增减，即液面上所受的压力能以同样大小传递到液体内部的任一点（巴斯噶原理）。

四、流体静力学方程的应用

静力学原理在工程实际中应用相当广泛，在此仅介绍依据静力学原理制成的测压仪表，其主要形式如下。

（一）U 形管压差计

U 形管压差计结构如图 1-3 所示。在一根 U 形的玻璃管内装入液体，称为指示液。指示液要与被测流体不互溶，且其密度比被测流体的大。

将 U 形管两端与被测两点连通，若作用于 U 形管两端的压力不等，则指示液在 U 形管的两侧臂上便显示出高度差 R。

令指示液的密度为 ρ_0，被测流体的密度为 ρ，如图1-3所示，取水平面 3-3′。因 3-3′面以下的流体连续，根据静力学方程可知其为等压面，即 $p_3=p_3'$，考虑 U 形管左侧臂，根据静力学基本方程，可得

$$p_3=p_1+\rho g(z_1+R)$$

同样，考虑 U 形管右侧臂可得：

$$p_3'=p_2+\rho gz_2+\rho_0 gR$$

因 $p_3=p_3'$，故

$$(p_1+\rho gz_1)-(p_2+\rho gz_2)=(\rho_0-\rho)gR \tag{1-8}$$

化简得：

$$p_1-p_2=(\rho_0-\rho)gR+\rho g(z_2-z_1) \tag{1-9}$$

测量气体时，由于气体的密度比指示液的密度小得多，式(1-9) 中的 ρ 可以忽略，于是上式化简为：

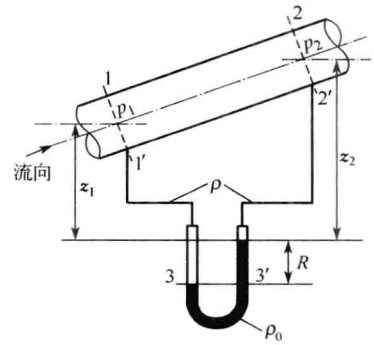

图 1-3　U 形管压差计

$$p_1 - p_2 = \rho_0 gR \tag{1-10}$$

若U形管的一端与被测流体连接，另一端与大气相通，则U形管压差计就成为了压力计，可测量流体的表压或真空度。

（二）双液体U形管压差计

若所测压力差很小，用普通压差计则读数R难以读准，可改用如图1-4所示的双液体U形管压差计。它是在U形管的两侧臂上增设两个小室，如图分别装入两种互不相溶而且密度相差不大的指示液。

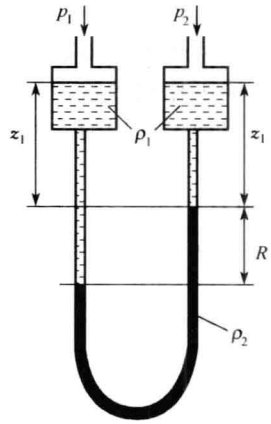

图1-4 双液体U形压差计

因为小室截面积足够大，故小室内液面高度变化常可忽略不计。由静力学原理可推知：

$$p_1 - p_2 = (\rho_2 - \rho_1)gR \tag{1-11}$$

选择两种适当的指示液，使（$\rho_2 - \rho_1$）很小，便可将R放大到普通U形管的好几倍或更大。

此外，将普通U形管压差计倾斜放置，也可以放大读数，此即倾斜U形管压差计。

【例1-1】 用普通U形管压差计测量气体管路上两点的压力差，指示液用水，读数R为12 mm。为了放大读数，改用双液体U形管压差计，指示液1为煤油，密度为850 kg·m^{-3}。指示液2仍用水。问读数可以放大到多少毫米？

解 将$R=0.012$ m、$\rho_0=1000$ kg·m^{-3}代入式(1-10)得

$$p_1 - p_2 = 1000 \times 0.012g$$

将$\rho_1=850$ kg·m^{-3}与$\rho_2=1000$ kg·m^{-3}与代入式(1-11)得

$$p_1 - p_2 = (1000-850)gR'$$

将以上两式相除得：

$$R' = \frac{1000 \times 0.012}{1000-850} = 0.08 \text{ m（或 80 mm）}$$

计算表明，新读数可提高为原来的80/12=6.7倍。

第二节 流体流动的基本方程

工业上流体大多沿密闭的管路系统（包括密闭的管道、容器和设备）流动，因此本节主要研究流体在管路系统内流动的基本方程。

一、基本概念

（一）流量与流速

1. 体积流量与质量流量

流体单位时间内流过管路任一流通截面（管道横截面，简称截面）的体积，称为**体积流量**，简称流量，用V_s表示，单位为m^3·s^{-1}；单位时间内流过任一截面的质量，称为**质量流量**，又称质量流率，用m_s表示，单位为kg·s^{-1}。

体积流量V_s与质量流量m_s之间存在下列关系：

$$m_s = \rho V_s \tag{1-12}$$

式中，ρ为流体密度，kg·m^{-3}。

2. 平均流速

流体质点在同一截面上各点的线速度并不相等，在管壁处为零，离管壁愈远则速度愈

大。工程上通常采用平均速度来表示流体在管道中的速度。

以流量除以截面积所得的平均速度，简称**流速**，用 u 表示，单位为 $m \cdot s^{-1}$。以质量流量除以截面积所得的平均速度称为**质量流速**，用 G 表示，单位为 $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$。即

$$u = V_s / A, \quad G = m_s / A \tag{1-13}$$

注意，A 与 u 在空间上是相互垂直的。显然，流速 u 与质量流速 G 之间存在下列关系：

$$G = \rho u \tag{1-14}$$

（二）稳定流动与不稳定流动

流体流动时，若任一点处的流速、压力、密度等与流动有关的物理参数都不随时间改变，就称之为稳定（稳态、定态）流动。反之，只要有一个物理参数随时间而变，就属于不稳定（非稳态、非定态）流动。

连续生产过程中的流体流动，多可视为稳定流动，在开工或停工阶段，则属于不稳定流动。本章以分析稳定流动为主。

（三）黏性与黏度

1. 牛顿黏性定律

众所周知，在水中或空气中运动的物体都会受到阻力，其产生的根本原因就是流体的黏性。

下面通过如图 1-5 所示的假想实验来详细阐述黏性及其产生的原因。

设想有两块面积很大而相距很近的平板，其间充满流体。令下板保持不动，用一恒定的力向右推动上板，使其以速度 $v = v_0$ 沿 x 方向作匀速运动。可以想象，附在上板底面的一薄层流体的速度等于板移动的速度 v_0，其下各层的速度逐渐减小，形成速度梯度 dv/dy；附在下板上表面的一薄层流体的速度为零，如图 1-5 所示。现各相邻流体层间的 dv/dy 都相等，也等于两板间的平均速度梯度 v_0/y_0，这里 y_0 为板间距。

为什么两板间的流体会作上述的运动呢？这是因为流体有黏性。

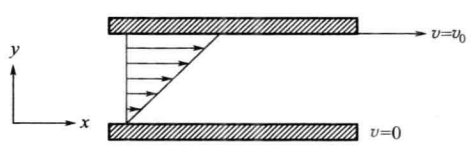

图 1-5　平板间黏性流体分层运动及速度分布

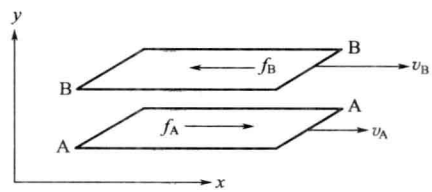

图 1-6　气体的内摩擦力

气体黏性产生的原因可以用分子运动论作如下解释。图 1-6 所示为相邻两薄层气体层 A-A 和 B-B 的示意图。其中，分子除了向右以速度 v_A、v_B 作定向运动外，还有无规则的热运动，后者使得分子在两薄层之间相互交换。速度较慢的薄层 A-A 的分子进入速度较快的薄层 B—B 后，会被加速而动量增大；同时产生一个与 v_B 方向相反的阻滞力 f_B。另一方面，速度较快的薄层 B-B 的分子进入速度较慢的薄层 A-A，会被减速而动量减小；同时产生一与 v_A 方向相同的推动力 f_A。以上由动量传递产生的一对力 f_A 与 f_B 大小相等，方向相反，这一对力就是黏性力或内摩擦力。这种传递一层一层进行，直至固体壁面。综上所述，气体的黏性力或内摩擦力产生的原因是速度不等的流体层之间动量传递的结果。

至于液体，由于液体分子间平均距离比气体要小得多，黏性力主要由分子间的吸引力所产生。

流体所具有的这种阻碍流体内部相对运动的性质称为**黏性**。

图 1-5 所示的一维分层流动中，两相邻流体层之间单位面积上的内摩擦力 τ，称为**内摩**

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com