

■ 高等学校理工科化学化工类规划教材

省精品课程教材

化工原理

UNIT OPERATIONS OF CHEMICAL ENGINEERING

王国胜 主编



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

■ 高等学校理工科化学化工类规划教材

省精品课程教材

化 工 原 理

UNIT OPERATIONS OF CHEMICAL ENGINEERING

主编 王国胜

编著 王祝敏 孙怀宇 裴世红

高 枫 范俊刚 王国胜



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

化工原理 / 王国胜主编. —大连: 大连理工大学出版社, 2010. 8

ISBN 978-7-5611-5659-9

I. ①化… II. ①王… 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(2010)第 140367 号

大连理工大学出版社出版

地址: 大连市软件园路 80 号 邮政编码: 116023

发行: 0411-84703842 传真: 0411-84701466 邮购: 0411-84703636

E-mail: dutp@dutp.cn URL: <http://www.dutp.cn>

大连理工大学印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸: 185mm×260mm 印张: 25.75 字数: 591 千字
2010 年 8 月第 1 版 2010 年 8 月第 1 次印刷

责任编辑: 刘新彦 于建辉 责任校对: 刘华夏
封面设计: 宋 蕾

ISBN 978-7-5611-5659-9

定 价: 39.80 元

前 言

我国的高等教育已经迈入大众化门槛。在坚持精英教育办学层次的基础上,培养研究型、复合型、应用型人才是当前研究的重要课题。按照培养复合型与应用型人才的要求和特点,应着重加强培养复合型与应用型人才的工程素质与实践能力。化工原理是化工类专业的基础课之一,是一门应用性课程,它不但要阐明过程的基本规律,而且面临的是真实的、复杂的实际生产问题。将工程观点以及研究工程问题的方法论贯穿始终,加强实习、实验、设计等实践环节的培养,提高学生的实践能力,培养学生的工程素质是本书的根本出发点。

从宏观上,本书将认识实习、化工原理、化工原理实验、化工原理课程设计与生产实习五个环节紧密联系起来,充分体现实践与理论的辩证关系。加强学生对化工生产基本单元过程的理解,实现感性认识到理性认识的结合。

从微观上,本书将化工原理的内容按照一定的规律编排,每章基本按照以下内容编写:(1)概述;(2)基础理论;(3)基本单元过程;(4)典型单元过程装备;(5)单元过程原理;(6)装备设计型计算;(7)装备操作型计算;(8)单元过程其他类型装备及装备优化;(9)习题;(10)本章主要符号说明。学生可以了解和熟悉各章的知识点,掌握重点及难点,通过书后习题,重点掌握各章主要内容。书末附有4套模拟试题,以便学生自己检查学习效果。

全书内容除绪论和附录外共分8章,包括:流体流动、流体输送机械、流体通过颗粒床层的流动、传热、蒸馏、吸收、干燥和其他单元操作(萃取、吸附、膜分离、蒸发与结晶)。

本书可以作为普通高等学校化学化工类复合型与应用型人才培养的试点教材,也可供炼油、冶金、能源、轻工、制药、环保、材料及安全等有关行业的科研、设计及生产单位的科技人员参考。

本书由王国胜主编,参加编写工作的有:王国胜、王祝敏(第5章蒸馏、第6章吸收)、孙怀宇(第1章流体流动、第2章流体输送机械)、裴世红(第4章传热)、高枫(第3章流体通过颗粒床层的流动、第8章其他单元操作)、范俊刚(第7章干燥)。

限于编者的学识和水平,书中疏漏不妥之处在所难免,恳请读者指正。

如有任何意见或建议,请通过以下方式与大连理工大学出版社联系:

邮箱 jcjf@dutp.cn

电话 0411-84707962 84708947

编者
2010年6月

目 录

第1章 流体流动 /1

- 1.1 概 述 /1
- 1.2 流体的物理性质 /2
 - 1.2.1 流体的密度 /2
 - 1.2.2 流体的比容 /3
 - 1.2.3 流体的黏度 /3
- 1.3 流体静力学基本方程式及应用 /5
 - 1.3.1 流体的压力 /5
 - 1.3.2 流体静力学基本方程式 /6
 - 1.3.3 流体静力学基本方程式的应用 /8
- 1.4 流体动力学 /12
 - 1.4.1 流量与流速 /12
 - 1.4.2 管道的选用 /13
 - 1.4.3 稳定流动与非稳定流动 /14
 - 1.4.4 连续性方程 /14
 - 1.4.5 伯努利方程式 /15
 - 1.4.6 伯努利方程式的应用 /20
- 1.5 流体流动的阻力 /22
 - 1.5.1 流体流动类型与雷诺数 /22
 - 1.5.2 流体在圆管内流动时的速度分布 /24
 - 1.5.3 边界层的概念 /25
- 1.6 流动阻力计算 /26
 - 1.6.1 直管阻力计算式 /27
 - 1.6.2 摩擦系数计算方法 /28
 - 1.6.3 非圆形管内流动阻力 /34
 - 1.6.4 管路系统的组成 /34
 - 1.6.5 局部阻力的计算 /36
 - 1.6.6 流体在管内流动的总阻力损失计算 /38
- 1.7 管路计算 /40
 - 1.7.1 简单管路 /40

- 1.7.2 复杂管路 /41

1.8 流速和流量的测量 /42

- 1.8.1 测速管 /42
- 1.8.2 孔板流量计 /43
- 1.8.3 文氏流量计 /46
- 1.8.4 转子流量计 /47

习 题 /48

本章主要符号说明 /50

第2章 流体输送机械 /51

- 2.1 概 述 /51
 - 2.1.1 对流体输送机械的基本要求 /51
 - 2.1.2 流体输送机械的分类 /51
- 2.2 离心泵 /52
 - 2.2.1 离心泵的工作原理 /52
 - 2.2.2 离心泵的主要部件 /53
 - 2.2.3 离心泵的主要性能参数 /55
 - 2.2.4 离心泵的特性曲线及其影响因素 /57
 - 2.2.5 离心泵的工作点与流量调节 /59
 - 2.2.6 离心泵的气蚀现象与安装高度 /64
 - 2.2.7 离心泵的类型与选用 /68
- 2.3 其他类型化工用泵 /71
 - 2.3.1 往复泵 /71
 - 2.3.2 计量泵 /73
 - 2.3.3 齿轮泵 /74
 - 2.3.4 螺杆泵 /74
 - 2.3.5 旋涡泵 /75
- 2.4 气体输送机械 /75
 - 2.4.1 离心式通风机、鼓风机和压缩机 /76

2.4.2	往复式压缩机	/79
2.4.3	真空泵	/81
	习题	/82
	本章主要符号说明	/84
第3章 流体通过颗粒床层的流动 /85		
3.1	概述	/85
3.1.1	混合物的分类	/85
3.1.2	非均相物系分离在化工生产中的应用	/85
3.1.3	常见非均相物系的分离方法	/86
3.2	颗粒及颗粒床层的特性	/86
3.2.1	颗粒的特性	/86
3.2.2	颗粒床层的特性	/88
3.3	流体与颗粒间的相对运动	/89
3.3.1	流体绕过颗粒的流动分析	/89
3.3.2	颗粒在流体中流动	/90
3.3.3	流体通过颗粒床层	/91
3.4	沉降	/93
3.4.1	重力沉降	/94
3.4.2	离心沉降	/102
3.5	过滤	/107
3.5.1	基本概念	/107
3.5.2	影响过滤的因素	/108
3.5.3	过滤基本方程式	/109
3.5.4	过滤常数的测定	/116
3.5.5	过滤设备	/118
3.5.6	滤饼洗涤	/121
3.5.7	过滤机的生产能力	/122
3.6	流态化	/125
3.6.1	流态化过程	/125
3.6.2	流化床类似液体的性质	/126
3.6.3	流体通过流化床的阻力	/126
3.6.4	流态化技术的优缺点	/128
3.6.5	气-液-固三相淤浆床	/129
3.7	过程强化与展望	/130
3.7.1	沉降过程的强化	/130
3.7.2	过滤过程的强化	/130

3.7.3	过滤技术展望	/131
	习题	/132
	本章主要符号说明	/134

第4章 传热 /135

4.1	概述	/135
4.1.1	传热过程在化工生产中的应用	/135
4.1.2	传热的基本方式	/135
4.1.3	间壁换热过程的剖析	/136
4.2	热传导	/138
4.2.1	傅里叶定律	/138
4.2.2	导热系数	/140
4.2.3	平壁的稳态热传导	/142
4.2.4	圆筒壁的稳态热传导	/145
4.2.5	保温层的临界直径	/148
4.3	对流传热	/150
4.3.1	对流传热方程与对流传热系数	/150
4.3.2	对流传热系数的经验关联式	/151
4.3.3	流体无相变时对流传热系数的经验关联式	/153
4.3.4	流体有相变时的对流传热	/158
4.3.5	选用对流传热系数关联式的注意事项	/163
4.4	对流传热计算	/164
4.4.1	热量衡算	/164
4.4.2	传热平均温度差	/165
4.4.3	总传热系数	/170
4.4.4	壁温的计算	/174
4.4.5	换热器的操作型计算	/176
4.4.6	换热器的设计型计算	/179
4.4.7	传热单元数法	/180
4.5	热辐射	/183
4.5.1	基本概念	/183
4.5.2	物体的辐射能力与斯蒂芬-玻尔兹曼定律	/184
4.5.3	克希霍夫定律	/185

- 4.5.4 两固体间的辐射传热 /185
- 4.5.5 对流和辐射的联合传热 /188
- 4.6 换热器 /189
 - 4.6.1 换热器的分类 /189
 - 4.6.2 间壁式换热器 /190
 - 4.6.3 载热体及其选择 /197
 - 4.6.4 强化传热的途径 /198
 - 4.6.5 列管式换热器的设计与选用 /199

习 题 /206

本章主要符号说明 /209

第5章 蒸 馏 /210

- 5.1 概 述 /210
 - 5.1.1 蒸馏过程的分类 /210
 - 5.1.2 蒸馏操作的特点 /211
- 5.2 溶液的气液相平衡 /211
 - 5.2.1 相 律 /211
 - 5.2.2 双组分理想物系的气液相平衡 /212
 - 5.2.3 双组分非理想物系的气液相平衡 /215
- 5.3 蒸馏与精馏原理 /216
 - 5.3.1 简单蒸馏和平衡蒸馏 /216
 - 5.3.2 精馏原理 /217
 - 5.3.3 精馏流程 /218
- 5.4 双组分连续精馏塔的计算 /219
 - 5.4.1 理论板的概念及恒摩尔流假定 /220
 - 5.4.2 物料衡算和操作线方程 /221
 - 5.4.3 进料热状态的影响及 q 线方程 /224
 - 5.4.4 理论板数的计算 /226
 - 5.4.5 回流比的影响与选择 /231
 - 5.4.6 简捷法求理论板数 /235
 - 5.4.7 双组分精馏过程的几种特殊情况 /236
 - 5.4.8 精馏操作分析 /238
- 5.5 间歇精馏 /239
 - 5.5.1 恒定回流比的间歇精馏 /240

- 5.5.2 馏出液组成恒定的间歇精馏 /240

5.6 恒沸精馏和萃取精馏 /241

- 5.6.1 恒沸精馏 /241
- 5.6.2 萃取精馏 /242

5.7 板式塔简介 /243

- 5.7.1 塔板结构 /243
- 5.7.2 塔板的类型及性能评价 /245
- 5.7.3 板式塔的流体力学性能与操作特性 /247
- 5.7.4 塔板效率 /250
- 5.7.5 塔高及塔径的确定 /251

习 题 /254

本章主要符号说明 /255

第6章 气体吸收 /256

- 6.1 概 述 /256
 - 6.1.1 吸收操作的概念和目的 /256
 - 6.1.2 吸收操作必须解决的问题 /257
 - 6.1.3 吸收操作的分类 /258
- 6.2 气液相平衡 /259
 - 6.2.1 气体的溶解度 /259
 - 6.2.2 亨利定律 /261
 - 6.2.3 相平衡关系在吸收过程中的应用 /264
- 6.3 传质机理与吸收速率方程 /265
 - 6.3.1 分子扩散与费克定律 /266
 - 6.3.2 稳态分子扩散 /266
 - 6.3.3 单相内对流传质 /269
 - 6.3.4 两相间的传质 /271
- 6.4 填料吸收塔的计算 /274
 - 6.4.1 物料衡算与操作线方程 /275
 - 6.4.2 溶剂用量与最小液气比 /276
 - 6.4.3 填料层高度的计算 /278
- 6.5 填料塔简介 /285
 - 6.5.1 填料塔的结构与特点 /286
 - 6.5.2 填料的种类与特性 /286
 - 6.5.3 填料塔的流体力学性能 /289
 - 6.5.4 填料塔设计 /291

6.5.5	填料塔的内件	/292
6.6	解吸	/294
6.6.1	解吸方法	/294
6.6.2	气提解吸的计算	/295
	习题	/297
	本章主要符号说明	/299
第7章 干燥 /300		
7.1	概述	/300
7.1.1	固体去湿方法	/300
7.1.2	干燥过程的分类	/300
7.2	湿空气的性质及干燥机理	/302
7.2.1	湿空气的性质	/302
7.2.2	湿空气的焓-湿图	/309
7.2.3	湿空气状态的变化过程	/313
7.2.4	水分在气-固两相间的平衡	/314
7.2.5	固体物料的干燥机理	/315
7.3	对流干燥及典型设备	/316
7.3.1	对流干燥过程的传热与传质	/316
7.3.2	对流干燥流程与经济性	/316
7.3.3	厢式干燥器	/317
7.4	干燥过程的物料衡算与热量衡算	/318
7.4.1	湿物料的性质	/318
7.4.2	干燥系统的物料衡算	/319
7.4.3	干燥系统的热量衡算	/320
7.4.4	空气通过干燥器时的状态变化	/323
7.5	干燥速率及干燥时间	/326
7.5.1	恒定干燥条件下的干燥速率	/327
7.5.2	恒定干燥条件下的干燥时间	/329
7.5.3	连续干燥过程的一般特性	/331
7.6	干燥器	/332
7.6.1	干燥器的基本要求	/332
7.6.2	典型干燥器介绍	/333
7.6.3	干燥器的设计	/338

7.6.4	干燥器的选型	/345
	习题	/347
	本章主要符号说明	/349
第8章 其他分离过程 /350		
8.1	萃取	/350
8.1.1	概述	/350
8.1.2	液液萃取设备	/351
8.1.3	萃取设备的选择	/356
8.2	结晶	/356
8.2.1	概述	/356
8.2.2	溶液结晶过程	/357
8.2.3	溶液结晶过程设备	/358
8.3	蒸发	/360
8.3.1	概述	/360
8.3.2	蒸发设备的分类	/361
8.4	膜分离	/364
8.4.1	膜分离过程简介	/365
8.4.2	膜分离过程的主要传递机理	/367
8.4.3	分离膜	/368
	习题	/369
	习题参考答案	/370
	模拟试题	/374
附录 /380		
附录1	常用物理量SI单位和因次	/380
附录2	SI制与其他单位制的换算关系	/380
附录3	某些液体的重要物理性质	/381
附录4	某些气体的重要物理性质	/382
附录5	水的物理性质	/383
附录6	干空气的物理性质	/383
附录7	饱和水蒸气表	/384
附录8	有机液体相对密度共线图	/385
附录9	液体黏度共线图	/386
附录10	气体黏度共线图	/387

- | | | | | | |
|-------|------------------|------|-------------|---------------|------|
| 附录 11 | 气体比热容共线图 | /388 | 附录 18 | 管子规格 | /393 |
| 附录 12 | 液体比热容共线图 | /389 | 附录 19 | 泵规格 | /394 |
| 附录 13 | 液体汽化热共线图 | /390 | 附录 20 | 9-19 型离心通风机规格 | |
| 附录 14 | 某些液体的表面张力及常压下的沸点 | /391 | | /395 | |
| 附录 15 | 某些气体和蒸气的导热系数 | /391 | 附录 21 | 管壳式热交换器系列标准 | |
| 附录 16 | 某些液体的导热系数 | /392 | | /397 | |
| 附录 17 | 某些固体材料的导热系数 | /392 | 附录 22 | 某些二元物系气液平衡数据 | |
| | | | | /400 | |
| | | | 参考书目 | /401 | |

流体流动

1.1 概述

液体和气体统称为流体。流体的特征是具有流动性,即其抗剪和抗张的能力很小,无固定形状,随容器的形状而变化,在外力作用下其内部发生相对运动。

在研究流体流动时,常将流体视为由无数流体微团组成的连续介质。所谓流体微团或流体质点是指这样的小块流体:它的大小与容器或管道相比是微不足道的,但是比起分子自由程长度却要大得多,它包含足够多的分子,能够用统计平均的方法来求出宏观的参数(如压强、温度),从而可以观察这些宏观参数的变化情况。连续性的假设首先意味着流体介质是由连续的流体质点组成的,其次还意味着质点运动过程的连续性。在本书的研究范围内,可以将流体视为连续介质。但对于高真空下的气体等特殊情况,就不能将流体视为连续介质了。

在化工生产中所处理的物料有很多是流体,流体流动的基本原理及其流动规律主要应用于以下几个方面。

(1) 流体的输送:通常设备之间是用管道连接的,要想把流体按所要求的条件,从一个设备输送到另一个设备,需要选用适宜的流速,以确定输送管路的直径。在流体的输送过程中,常常要采用流体输送设备,因此需要计算流体在流动过程中应加入的外功,为选用流体输送设备提供依据。这些都要应用流体流动规律的数学表达式进行计算,即研究推动流体流动的原因及流体流动中的特性。

(2) 压强、流速和流量的测量:为了解和控制生产过程,需要对管路或设备内的压强、流速及流量等一系列参数进行测定,以便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) 除了流体输送外,化工生产中的传热、传质过程以及化学反应大都是在流体流动状态下进行的,流体流动状态对这些单元操作有着很大影响。为了能深入理解这些单元操作的原理及为强化设备提供适宜的流动条件,就必须掌握流体流动的基本原理。

因此,流体流动的基本原理是本课程的重要基础。本章着重讨论流体流动过程的基本原理及流体在管内的流动规律,并运用这些原理与规律去分析和计算流体的输送问题。

1.2 流体的物理性质

1.2.1 流体的密度

单位体积流体的质量,称为流体的密度,其表达式为

$$\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-1)$$

当 $\Delta V \rightarrow 0$ 时, $\Delta m/\Delta V$ 的极限值即为流体某点的密度,即

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-1a)$$

式中 ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;
 m ——流体的质量, kg ;
 V ——流体的体积, m^3 。

流体的密度随流体的种类、温度、压强的变化而变化,对一定流体,密度是压强 p 和温度 T 的函数,可用下式表示:

$$\rho = f(p, T) \quad (1-2)$$

式中 p ——流体的压强, Pa ;
 T ——流体的温度, K 。

液体的密度随压强的变化甚小(极高压强下除外),可忽略不计,故常称液体为不可压缩流体,但其随温度的变化稍有改变。气体的密度随压强和温度的变化较大,当压强不太高、温度不太低时,气体的密度可近似地按理想气体状态方程式计算,由

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT \quad (1-3)$$

得
$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (1-4)$$

式中 p ——气体的压强, Pa ;
 T ——气体的温度, K ;
 M ——气体的摩尔质量, kg/kmol ;
 R ——摩尔气体常数, $8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

对于一定质量的理想气体,其体积、压强和温度之间的变化关系为

$$\frac{pV}{T} = \frac{p'V'}{T'}$$

所以,气体密度也可按下式计算

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0 p}{T p_0} \quad (1-5)$$

式中, ρ_0 为标准状态下气体的密度; T_0 、 p_0 分别为标准状态下气体的温度和压强。

化工生产中遇到的流体常常不是单一组分,而是由若干组分所构成的混合物。对于气体混合物,可按理想气体计算密度。但式中气体的摩尔质量 M 应以混合气体的平均摩尔质量 M_m 代替,即

$$M_m = M_1 x_1 + M_2 x_2 + \cdots + M_n x_n \quad (1-6)$$

式中 M_1, M_2, \dots, M_n —— 气体混合物中各组分的摩尔质量;

x_1, x_2, \dots, x_n —— 气体混合物中各组分的摩尔分数。

气体混合物的组成通常以体积分数表示。对于理想气体,体积分数与摩尔分数相等。

对于液体混合物,各组分的组成常用质量分数表示。若混合前后体积不变,则 1 kg 混合液的体积等于各组分单独存在时的体积之和,则可由下式求出混合液体的密度 ρ_m 。

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{w1}}{\rho_1} + \frac{x_{w2}}{\rho_2} + \cdots + \frac{x_{wn}}{\rho_n} \quad (1-7)$$

式中 $x_{w1}, x_{w2}, \dots, x_{wn}$ —— 液体混合物中各组分的质量分数;

$\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ —— 液体混合物中各组分的密度, kg/m^3 ;

ρ_m —— 液体混合物的平均密度, kg/m^3 。

1.2.2 流体的比容

单位质量流体的体积,称为流体的比容,用符号 ν 表示,单位为 m^3/kg ,则

$$\nu = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1-8)$$

流体的比容是密度的倒数。

1.2.3 流体的黏度

1. 牛顿黏性定律

前已述及,流体具有流动性,即没有固定形状,在外力作用下其内部产生相对运动。流体流动时其内部产生摩擦力,即具有抗拒内在的向前运动的特性,称为黏性。黏性是流动性的反面。

以水在管内流动为例,管内任一截面上各点的速度并不相同,中心处的速度最大,愈靠近管壁速度愈小,在管壁处水的质点附于管壁上,其速度为零。其他流体在管内流动时也有类似的规律。所以,流体在管内流动时,实际上是被分割成无数极薄的圆筒层,一层套一层,各层以不同的速度向前运动,如图 1-1 所示。由于各层速度不同,层与层之间发生了相对运动;速度快的流体层对相邻的速度较慢的流体层产生了一个推动其向前方向的力;同时,速度慢的流体层对速度快的流体层也作用一个大小相等方向相反的力,从而阻碍较快流体层向前运动。这种运动着的流体内部相邻两流体层间的相互作用力,称为流体的内摩擦力或剪切力。流体的内摩擦力一方面与流体分子间力有关,另一方面与流体分子无规则热运动引起的动量传递有关。存在内摩擦力是流体黏性的表现,内摩擦力又称为黏滞力或黏性摩擦力。流体流动时的内摩擦,是流动阻力产生的依据,流体流动时必须克服内摩擦力而做功,从而使流体的一部分机械能转变为热而损失掉。下面通过一个实验来说明内摩擦力与哪些因素有关。

在两块面积很大而间距很小的大平板间充满某种静止流体,如图 1-2 所示,在某一时刻,使用力 F 以速度 u 水平移动上面一块大平板,紧贴在该板上的一层流体也必然以速度 u 随平板运动;而紧靠下层平板的流体,因附着于板面而静止不动,在两层平板之间流体

中则形成上大下小的流速分布。此两平板间的流体可看成许多平行于平板的流体层，层与层之间存在着速度差，即各流体层之间存在着相对运动，所以相邻两层之间存在着内摩擦力。

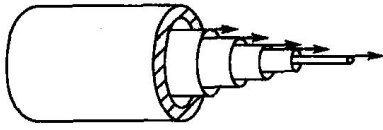


图 1-1 流体在圆管内分层流动示意图

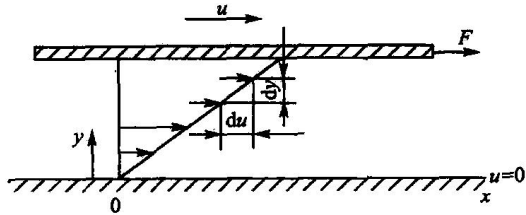


图 1-2 平板间液体速度变化图

根据实验测定，对于一定的流体，内摩擦力 F 、平板面积 A 以及速度梯度 $\frac{du}{dy}$ 有如下关系：

$$\frac{F}{A} \propto \frac{du}{dy}$$

设比例系数为 μ ，则 $\frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy}$ 。令 $\tau = \frac{F}{A}$ ，则

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-9)$$

式中 τ —— 内摩擦力，Pa；

$\frac{du}{dy}$ —— 法向速度梯度， s^{-1} ；

μ —— 比例系数，其值随流体的不同而不同，流体的黏性愈大，其值愈大，所以称为黏滞系数或动力黏度，简称黏度， $Pa \cdot s$ 。

式(1-9)所表示的关系称为牛顿黏性定律。它的物理意义是流体流动时产生的内摩擦力与法向速度梯度成正比。满足牛顿黏性定律的流体称为牛顿型流体，所有气体和大多数液体都属于这一类；反之称为非牛顿型流体，非牛顿型流体在化工过程中亦属常见。本章主要讨论牛顿型流体。

2. 流体的黏度

式(1-9)可改写成

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{du}{dy}} \quad (1-10)$$

所以黏度的物理意义是促使流体流动产生单位速度梯度的剪应力。由上式可知，速度梯度最大处剪应力也最大，速度梯度为零处的剪应力也为零。黏度总是与速度梯度相联系，只有在运动时才显现出来。所以分析静止流体的规律时就不需要考虑黏度因素。

国际单位制中黏度的单位为 $Pa \cdot s$ ，厘米克秒制中黏度的单位为 P(泊) 和 cP(厘泊)，它们的换算关系如下：

$$1 Pa \cdot s = 10 P = 1000 cP$$

黏度是流体的物理性质之一，其值由实验测定。液体的黏度一般远大于气体的黏度，例如在 $20^{\circ}C$ 时，水的黏度为 $1.005 \times 10^{-3} Pa \cdot s$ ，而空气的黏度为 $1.81 \times 10^{-5} Pa \cdot s$ 。液体

的黏度随温度升高而减小,气体的黏度则随温度升高而增大。压强变化时,液体的黏度基本不变;气体的黏度随压强增加而增加得很少,在一般工程计算中可忽略不计,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。

此外,黏度与密度之比称为运动黏度,以 ν 表示,即

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-11)$$

运动黏度的单位为 m^2/s ,厘米克秒制中运动黏度的单位为 cm^2/s ,称为斯托克斯,简称为斯,以 St 表示,斯的 1/100 称为厘斯(cSt)。单位换算关系为

$$1 \text{ St} = 100 \text{ cSt} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

黏度的数据来源有数据手册、实验测定和经验公式。本书附录中列出了常见液体和气体在常温下的黏度数值及不同温度下某些物质的黏度图表。

混合物的黏度可按经验公式进行计算,如对分子不缔合的混合液,可计算如下:

$$\lg \mu_m = \sum x_i \lg \mu_i \quad (1-12)$$

式中 μ_m —— 混合液的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

x_i —— 液体混合物中第 i 组分的摩尔分数;

μ_i —— 与液体混合物同温度下第 i 组分的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

常压下气体混合物的黏度,可用下式计算:

$$\mu_m = \frac{\sum y_i \mu_i M_i^{1/2}}{\sum y_i M_i^{1/2}} \quad (1-13)$$

式中 μ_m —— 气体混合物的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

y_i —— 气体混合物中第 i 组分的摩尔分数;

μ_i —— 与气体混合物同温度下第 i 组分的黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;

M_i —— 气体混合物中第 i 组分的摩尔质量, kg/kmol 。

黏度对于流体的流动方式有很大的影响,在本章后面将对其进行研究。

1.3 流体静力学基本方程式及应用

1.3.1 流体的压力

1. 定义

流体垂直作用于单位面积上的总压力,称为流体的压强,简称压强,俗称压力,但压力更为通用。在静止流体中,流体压力具有以下两个重要特性:

- (1) 流体压力处处与它的作用面垂直,并总是指向流体的作用面;
- (2) 流体中任一点压力的大小与所选定的作用面在空间的方位无关。

2. 压强的单位和单位换算

在国际单位制中,压强的单位是 N/m^2 ,称为帕斯卡,以 Pa 表示。但习惯上还采用其他单位。如 atm(标准大气压)、某流体柱高度或 kgf/cm^2 等。它们之间的换算关系为

$$1 \text{ 标准大气压(atm)} = 1.0133 \times 10^5 \text{ Pa} = 1.033 \text{ kgf}/\text{cm}^2 = 10.33 \text{ mH}_2\text{O} = 760 \text{ mmHg}$$

3. 压强的基准

压强可以有不同的计量基准,如果以绝对真空为基准,称为绝对压强。若以大气压强为基准,测量得到绝对压强高出大气压强的数值,称为表压强,俗称表压。

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

当被测流体的绝对压强小于大气压时,其低于大气压的数值称为真空度,即

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

绝对压强、表压和真空度的关系如图 1-3 所示。为避免混淆,在以后的讨论中对表压及真空度均加以标

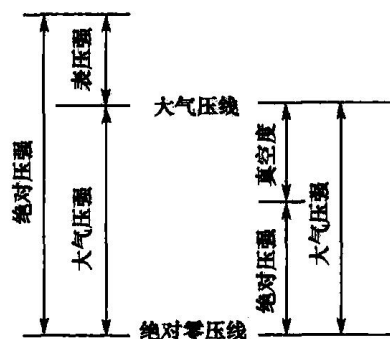


图 1-3 绝对压强、表压强和真空度的关系

注意 此处的大气压强均指当地大气压强,其值随大气的温度、湿度和海拔高度而变。

【例 1-1】 在兰州操作的苯乙烯真空蒸馏塔顶的真空表读数为 8×10^4 Pa。在沈阳操作时,若要求塔内维持相同的绝对压强,真空表的读数应为多少?已知兰州地区的平均大气压强为 8.53×10^4 Pa,沈阳地区的平均大气压强为 1.01×10^5 Pa。

解 根据兰州地区的大气压强条件,可求得操作时塔顶的绝对压强为

$$\text{绝对压强} = \text{大气压强} - \text{真空度} = 85\,300 - 80\,000 = 5\,300 \text{ Pa}$$

在沈阳操作时,要求塔内维持相同的绝对压强,由于大气压强不同,则塔顶的真空度也不相同,其值为

$$\text{真空度} = \text{大气压强} - \text{绝对压强} = 101\,000 - 5\,300 = 95\,700 \text{ Pa}$$

1.3.2 流体静力学基本方程式

流体静力学基本方程式是用于描述静止流体内部的压强沿高度变化的数学表达式。对于不可压缩流体,密度不随压强变化,其静力学基本方程可用下述方法推导。在静止液体中取一垂直液柱,如图 1-4 所示。液柱水平方向的横截面积为 A ,液体密度为 ρ ,以容器器底为基准水平面,则液柱的上、下底面与基准水平面的垂直距离分别为 Z_1 和 Z_2 ,以 p_1 与 p_2 分别表示高度为 Z_1 及 Z_2 处的压强。

对此液柱进行垂直方向上的受力分析,作用于液柱的力有:

- (1) 下底面所受的向上总压力为 $p_2 A$;
- (2) 上底面所受的向下总压力为 $p_1 A$;
- (3) 该液柱的重力 $mg = \rho g A (Z_1 - Z_2)$ 。

在静止液体中,上述三力的合力应为零,即

$$p_2 A - p_1 A - \rho g A (Z_1 - Z_2) = 0$$

化简并消去 A ,得

$$p_2 = p_1 + \rho g (Z_1 - Z_2) \quad (1-14)$$

如果将液柱的上底面取在液面上,设液面上方的压强

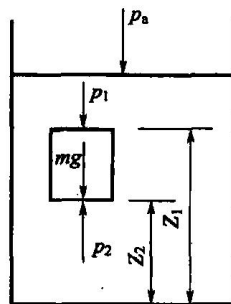


图 1-4 静力学基本方程式的推导

为 p_a , 液柱 $Z_1 - Z_2 = h$, 则上式可改写为

$$p_2 = p_a + \rho gh \quad (1-15)$$

式(1-14)及式(1-15)均称为静力学基本方程式。由式(1-14)、式(1-15)可知:

(1) 当液面上方的压强一定时,在静止液体内任一点压强的大小,与液体本身的密度和该点距液面的深度有关。因此,在静止的、连续的同一种液体中,处于同一水平面上的各点,其压强亦相等。这些压强相等点组成的水平面,称为等压面。

(2) 当液面上方的压强有变化时,必将引起液体内部所有点压强发生同样大小的变化。

(3) 式(1-15)可改写为

$$\frac{p_2 - p_a}{\rho g} = h \quad (1-16)$$

由上式可知,压强或压强差的大小可用液柱高度来表示,但必须注明是何种液体。

虽然静力学基本方程式是用液体进行推导的,液体的密度可视为常数,而气体密度则随压强而改变,但考虑到气体密度随容器高低变化甚微,一般也可视为常数,故静力学基本方程式也适用于气体。

注意 上述方程式只能用于静止的连通着的同一种连续的流体。

【例 1-2】 图 1-5 所示的开口容器内盛有油和水。油层高度 $h_1 = 0.7 \text{ m}$ 、密度 $\rho_1 = 800 \text{ kg/m}^3$, 水层高度 $h_2 = 0.6 \text{ m}$, 密度 $\rho_2 = 1000 \text{ kg/m}^3$, 大气压为 p_a 。

(1) 判断下列两关系式是否成立,即

$$p_A = p'_A, \quad p_B = p'_B$$

(2) 计算水在玻璃管内的高度 h 。

解 (1) $p_A = p'_A$ 成立。因 A 及 A' 两点在静止的连通着的同一种流体中,并在同一个水平面上。所以截面 A—A' 是等压面。

$p_B = p'_B$ 不能成立。因 B 及 B' 两点虽在静止流体的同一水平面上,但不是连通着的同一种流体,所以截面 B—B' 不是等压面。

(2) 由上面讨论知, $p_A = p'_A$, 而 p_A 与 p'_A 都可以用流体静力学基本方程式计算,即

$$p_A = p_a + \rho_1 gh_1 + \rho_2 gh_2$$

$$p'_A = p_a + \rho_2 gh$$

于是

$$p_a + \rho_1 gh_1 + \rho_2 gh_2 = p_a + \rho_2 gh$$

简化上式并将已知值代入,得

$$800 \times 0.7 + 1000 \times 0.6 = 1000 h$$

解得

$$h = 1.16 \text{ m}$$

下面进一步讨论静力学基本方程式中各项的意义。将式(1-14)两边除以 ρg 并加以整理可得

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \quad (1-17)$$

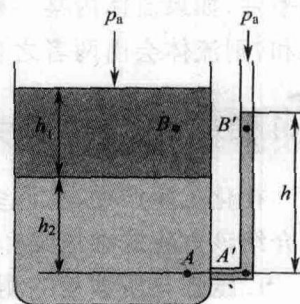


图 1-5