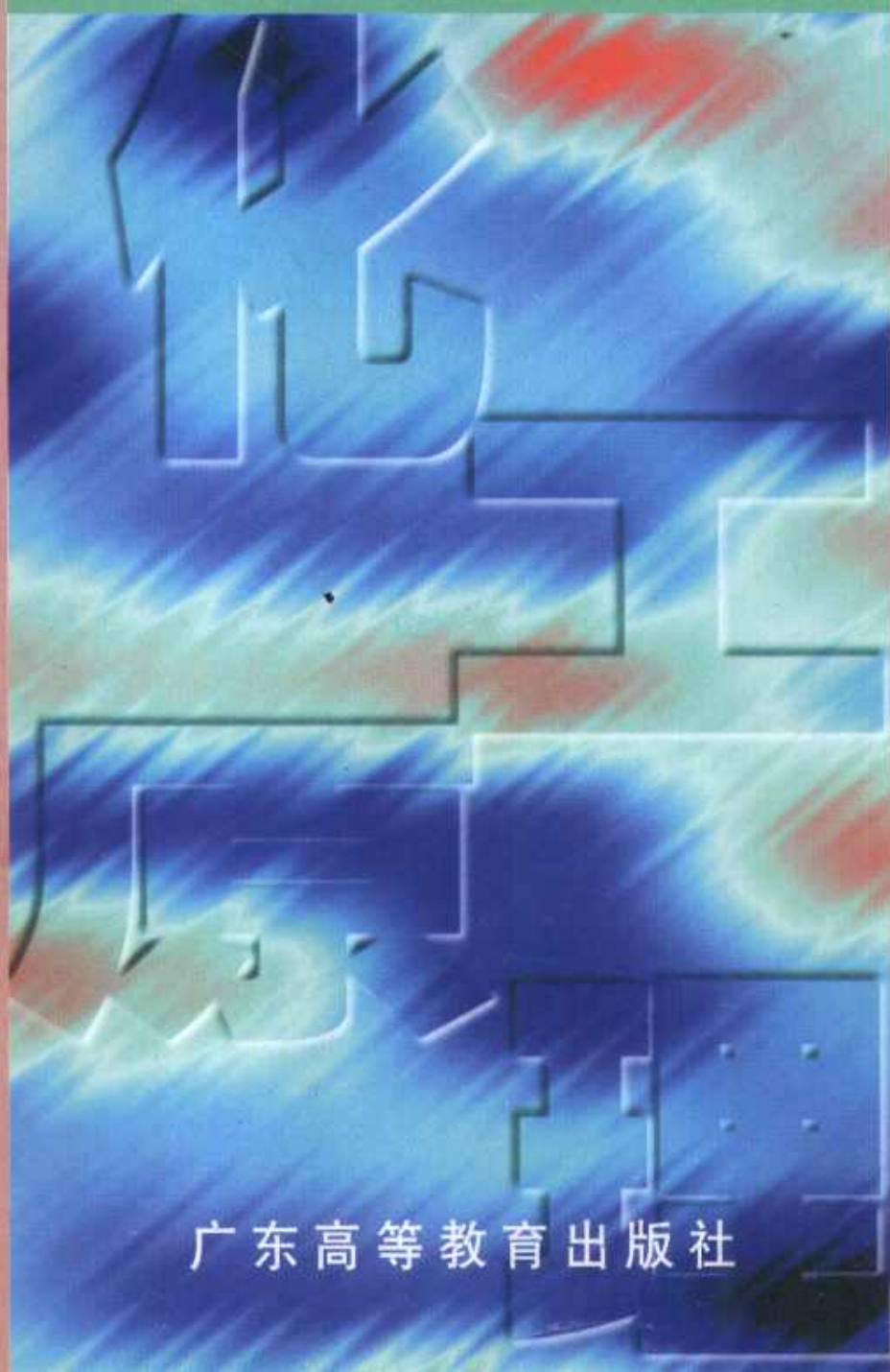


高 等 学 校 教 材

化 工 原 理

梁朝林 主编



广东高等教育出版社

7Q02-43

广东省高等学校“九五”规划重点教材²⁴⁷

化 工 原 理

主 编 梁朝林
副主编 樊芷芸 陈乃炽 赵果鲜
主 审 梅慈云

广东高等教育出版社

·广州·

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理/梁朝林主编. —2 版. —广州: 广东高等教育出版社, 2002.9

广东省高等学校“九五”规划重点教材

ISBN 7-5361-2539-9

I. 化…

II. 梁…

III. 化工原理-高等学校-教材

IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 40373 号

广东高等教育出版社出版发行

地址: 广州市天河区林和西横路

邮政编码: 510076 电话: 87551101 87553782

广东省茂名广发印刷有限公司印装

787 mm × 1 092 mm 16 开本 26 印张 633 千字

2000 年 9 月第 1 版

2002 年 9 月第 2 版 2002 年 9 月第 2 次印刷

印数: 3 501 ~ 6 000 册

定价: 36.80 元

前 言

本书是广东省高教厅组织编写的广东省高等学校“九五”规划重点教材之一，可供大专层次及一般本科层次化工（含应用化学等）类各专业学生使用，也可供化工方面的技术人员参考。考虑到化工、应用化学、精细化工、食品、环保、染整、生化、制药、化工机械等专业的教学要求不同，为便于教学和读者自学，拓宽读者的知识面，本书中适当多编入了一些内容，并以小号字编排，各校及读者可根据不同情况参考、选用。

本书包括绪论和流体流动等 12 章，重点介绍化工单元操作中的基本概念、基本原理、典型设备及有关计算方法。阐述简明严谨，深入浅出，主次分明，注重培养学生分析问题的能力；注意理论联系实际，并反映化学工程方面的新技术、新设备。

全书由梁朝林担任主编，樊芷芸、陈乃炽、赵果鲜担任副主编，由多所院校具有丰富教学经验的教师参编，最后由梁朝林负责修改定稿。参加编写的有：广东石油化工高等专科学校梁朝林（绪论、第 1 章、第 5 章、第 12 章及附录），中山学院瞿晓岳（第 2 章），惠州大学樊芷芸（第 3 章及第 4 章），韶关大学邹先强（第 6 章），佛山科技学院李艳莉（第 7 章），西江大学陈乃炽（第 8 章），嘉应大学温欣荣（第 9 章），广东石油化工高等专科学校赵果鲜（第 7 章及第 10 章），东莞理工学院周友明（第 11 章）。

全书由华南理工大学梅慈云教授主审。编写过程中，查阅参考了许多本科、专科类的化工原理（或化学工程）教材及专家编著的化学工程设计手册，得到了广东省高教厅教学处、广东高等教育出版社的大力支持，并得到了中山学院张玉鸿教授、五邑大学陈元鼎教授、广州市化学工业研究所曾庆焕高级工程师等的热情帮助，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限，书中难免有不足之处，欢迎批评指正。

编 者

2000 年 1 月

目 录

0 绪论	(1)
0.1 本课程的性质、内容与任务	(1)
0.2 单元操作中常用的四个基本概念	(1)
0.3 单位及单位换算	(3)
1 流体流动	(5)
重要符号说明	(5)
1.1 流体静力学	(6)
1.2 流体在管内流动的基本方程式	(12)
1.3 管内流体流动现象	(21)
1.4 流体流动阻力	(26)
1.5 管路的计算	(37)
1.6 流量的测量	(40)
习题	(44)
2 流体输送机械	(48)
重要符号说明	(48)
2.1 离心泵	(49)
2.2 其他类型的泵	(60)
2.3 气体输送与压缩机械	(64)
习题	(72)
3 沉降与过滤	(74)
重要符号说明	(74)
3.1 重力沉降	(75)
3.2 离心沉降	(82)
3.3 过滤	(89)
3.4 离心机	(103)
3.5 气体的其他净制方法	(104)
习题	(106)
4 流态化	(108)
重要符号说明	(108)

4.1	基本概念	(109)
4.2	流化床操作速度范围的计算	(112)
4.3	流化质量	(116)
4.4	气力输送	(118)
	习题	(122)
5	传热	(124)
	重要符号说明	(124)
5.1	概述	(125)
5.2	热传导	(128)
5.3	对流传热	(136)
5.4	热辐射	(146)
5.5	传热计算	(153)
5.6	热交换器	(160)
	习题	(171)
6	蒸发	(174)
	重要符号说明	(174)
6.1	概述	(174)
6.2	单效蒸发	(176)
6.3	多效蒸发	(185)
6.4	蒸发设备和辅助设备	(189)
6.5	蒸发器的操作和调节	(196)
	习题	(197)
7	吸收	(199)
	重要符号说明	(199)
7.1	概述	(200)
7.2	气液相平衡	(201)
7.3	吸收过程的速率	(205)
7.4	吸收塔的计算	(215)
7.5	其他类型的吸收与脱吸	(224)
	习题	(227)
8	蒸馏	(229)
	重要符号说明	(229)
8.1	概述	(230)
8.2	双组分理想溶液的气液相平衡	(231)

8.3	简单蒸馏	(236)
8.4	精馏	(236)
8.5	双组分连续精馏塔的计算	(239)
8.6	间歇精馏	(259)
8.7	恒沸精馏与萃取精馏	(261)
	习题	(266)
9	气液传质设备	(269)
	重要符号说明	(269)
9.1	概述	(270)
9.2	板式塔	(270)
9.3	填料塔	(292)
9.4	其他类型的气液传质设备	(302)
	习题	(304)
10	液-液萃取	(305)
	重要符号说明	(305)
10.1	概述	(305)
10.2	液-液相平衡	(306)
10.3	萃取剂的选择	(310)
10.4	萃取过程的计算	(312)
10.5	液-液萃取设备	(321)
	习题	(327)
11	干燥	(330)
	重要符号说明	(330)
11.1	概述	(331)
11.2	湿空气的性质和焓湿图	(332)
11.3	物料中所含水分的性质	(339)
11.4	干燥过程的物料衡算和热量衡算	(340)
11.5	干燥速率和干燥时间	(345)
11.6	干燥器	(350)
	习题	(354)
12	结晶	(356)
	重要符号说明	(356)
12.1	基本概念和操作原理	(357)
12.2	结晶操作的物料衡算和热量衡算	(363)

12.3	结晶方法与设备	(366)
	习题	(369)
13	附录	(371)
13.1	单位换算表	(371)
13.2	某些气体的重要物理性质	(374)
13.3	某些液体的重要物理性质	(375)
13.4	某些固体材料的重要物理性质	(377)
13.5	水的重要物理性质	(378)
13.6	空气的重要物理性质 (101 kPa 压强下)	(379)
13.7	水的饱和蒸气压 (-20 ~ 100 °C)	(379)
13.8	饱和水蒸气表 (按温度顺序排列)	(380)
13.9	饱和水蒸气表 (按压力顺序排列)	(381)
13.10	水的粘度 (0 ~ 100 °C)	(384)
13.11	液体粘度共线图	(385)
13.12	气体粘度共线图 (常压下用)	(387)
13.13	液体比热容共线图	(389)
13.14	气体比热容共线图 (常压下用)	(391)
13.15	液体气化潜热共线图	(393)
13.16	无机物水溶液在大气压下的沸点	(395)
13.17	管子规格 (摘录)	(396)
13.18	离心泵规格 (摘录)	(397)
13.19	离心通风机规格 (摘录)	(401)
13.20	列管式换热器规格 (摘录)	(402)
13.21	几种气体的平衡溶解度	(404)
13.22	一些气体在不同温度时的亨利系数值	(406)
13.23	气体在空气中的扩散系数 (101 kPa, 0 °C)	(407)
13.24	气体在水中的扩散系数	(407)
13.25	几种常用填料的特性数据	(408)

0 绪 论

0.1 本课程的性质、内容与任务

本课程主要讨论化工生产中的物理加工过程，是化工类各专业的一门重要的技术基础课。通过学习化工生产中内在的共同规律，掌握化学工业生产中共有的基本原理、设备结构及其计算方法。按其操作原理的共性，归纳成若干“单元操作”。

随着化工生产的发展，单元操作的研究和开发相当活跃，新的单元操作不断形成。目前化工生产中有几十种加工过程，但为数不多的单元操作是基本操作过程。按它们所依据的基本原理可分为如下内容：

(1) 流体动力过程。以动量传递规律为主要理论基础的单元操作，有流体输送、沉降、过滤、固体流态化等。

(2) 传热过程。以热量传递为主要理论基础的单元操作，有传热、蒸发、结晶等。

(3) 传质分离过程。以质量传递为主要理论基础的单元操作，用于各种均相混合物的分离，有精馏、吸收、萃取等。

(4) 热 - 质传递过程。由热量传递和质量传递两种规律共同决定的单元操作。这种过程与传热过程或传质分离过程均不相同，它的过程机理更为复杂。属热 - 质传递过程的单元操作有增湿、减湿、干燥等。

此外还有以热力学为主要理论基础的热力过程，如制冷；与固体颗粒加工、运动等有关的操作过程，如粉碎、流态化等。

本课程的基本任务是使学生掌握以下内容：

(1) 掌握化工过程的基本原理，典型设备的结构、性能及操作原理。

(2) 掌握化工过程的基本计算方法和设备的设计。

(3) 懂得寻求适宜的操作条件，探索强化过程的方向及改进设备的途径。

教学中应注意培养学生具有从工程技术观点出发，考虑和处理问题的能力；熟练地进行化工基本运算的能力以及一定的实际操作技能。

0.2 单元操作中常用的四个基本概念

学习本课程，必须注意下列基本概念，它们贯穿于各个单元操作的始终。

0.2.1 物料衡算

物料衡算是质量守恒定律在化工单元操作中的具体表达形式。对于任意一个人为划定的体系，其各股物料量之间的关系均符合下列物料衡算式：

$$\sum F_i - \sum F_o = M_a \quad (0.1)$$

式中： $\sum F_i$, $\sum F_o$ 分别为输入、输出体系的物料量总和； M_a 为体系内累积的物料量。

式 0.1 适用于任何指定的空间范围，并适用于过程所涉及的全部范围。无化学变化时，混合物中任一组分都符合式 0.1；有化学变化时，其中各元素仍符合式 0.1。式 0.1 既适用于连续过程，也适用于间歇过程。

进行物料衡算时，首先要圈出衡算的物料范围，并确定衡算对象及衡算基准，然后把进、出体系边界的各股物料逐项列出。对于连续过程，常以单位时间为基准，而单位时间流过的物料质量即为质量流量，即式 0.1 中各项分别为任一瞬间输入、输出物料的质量流量及体系内物料质量累积的速率；对于间歇过程，常以一次（批）操作为基准，即式 0.1 中各项分别为每次操作输入、输出及累积的质量。

0.2.2 能量衡算

能量衡算是能量守恒定律在化工单元操作中的具体表达形式。能量有各种不同的形式，如机械能、热能等，并且可以相互转换。把进出某一人为划定的体系的各种能量平衡关系建立起来，即称为能量衡算式。由于在不少化工设备中，没有外加功的输入和输出，故往往只考虑热量衡算。

进行热量衡算的基本方法与物料衡算的方法相同，即首先确定衡算范围和衡算基准，然后列出热量衡算式：

$$\sum H_i = \sum H_o + q \quad (0.2)$$

式中： $\sum H_i$, $\sum H_o$ 分别为单位时间内输入、输出体系的各股物料的总焓值； q 为单位时间内体系与环境交换的总热量。

应用上式时，应注意以下两点：

(1) 式中各项焓、热量的单位必须一致。焓与热量的单位虽相同，但两者的物理意义不同，应予以区分。

(2) 通常给出的某物质的焓值是指该状态下的焓与基准状态下的焓的差值。所谓基准状态即人为地规定某状态，此时其焓为 0。例如，常用的水和水蒸气热力学性质大都取 0℃, 1.0133×10^5 Pa 时水的焓为 0。虽然基准状态的选定不会影响能量衡算关系，但会影响焓值，因此基准状态的选定要一致。

0.2.3 平衡关系

任何传递过程都有一个极限。当传递过程到达极限时，其过程进行的推动力为 0，此时净的传递速率为 0，即称为平衡。例如，热量的传递过程中，当冷、热两种流体间的温差（传热的推动力）为 0 时，即达热平衡。物质在相间的转移也是有限度的，当达到此极限时，浓度差（气相或液相的实际浓度与相平衡浓度的差值）为 0，称为达到相平衡。此时表明该物系已达到理想的最大分离程度。

0.2.4 过程速率

过程速率是指单位时间内所传递的物质的量或能量。传热速率的单位为 J/s 或 W，

传质速率的单位为 kmol/h 等。任何过程的速率均与该过程的推动力成正比，而与其阻力成反比，即

$$\text{过程速率} \propto \frac{\text{过程推动力}}{\text{过程阻力}}$$

各过程的推动力的性质取决于过程的机理。例如，流体流动的推动力是能位差，传热过程的推动力是温度差，传质过程的推动力是浓度差等。

各过程的阻力之构成也与其过程的机理有关。例如，流体流动过程的摩擦阻力、传热过程的热阻、传质过程的扩散阻力等都有其各自的机理。

过程速率方程式的重要性在于用它可以确定为完成一定的生产任务所需设备的大小，以及从中分析过程的强化途径等。

物料衡算、能量衡算、平衡关系、过程速率这四个基本概念，将在本书中反复出现。它们所形成的各单元操作的相应计算式，就是各单元操作的主要计算依据。掌握好这四个基本概念，将大大有助于本课程的学习。

0.3 单位及单位换算

0.3.1 单位制

随着科学技术的飞速发展，为方便日益频繁的国际学术交流，国际计量会议制定了一种国际上统一的国际单位制，简称 SI 制。国际单位制中的单位是由基本单位、辅助单位和具有专门名称的导出单位构成的，本书常用的分别列于表 0.1 中。本书正文一律采用国际单位制。

表 0.1 国际单位制基本单位、辅助单位和具有专门名称的导出单位

类别	物 理 量	单位名称	单位符号
基 本 单 位	长度	米	m
	质量	千克	kg
	时间	秒	s
	电流	安 [培]	A
	热力学温度	开 [尔文]	K
	物质的量	摩 [尔]	mol
	发光强度	坎 [德拉]	cd
辅助 单位	平面角	弧度	rad
	立体角	球面度	sr
导 出 单 位	力；重力	牛顿	N
	压强；应力	帕斯卡	Pa
	能量；功	焦	J
	功率	瓦特	W
	摄氏温度	摄氏度	℃

注：① [] 内的字在不致混淆的情况下，可以省略。②摄氏温度是按式 $t/℃ = T/K - 273.15$ 定义的，式中：t 为摄氏温度；T 为热力学温度。

0.3.2 量纲

法定计量单位中，基本量长度、质量、时间的量纲可分别用符号 L , M , T 表示，则导出量的量纲可由这些基本量的量纲组合而成。例如，速度的量纲可用 $[LT^{-1}]$ 表示。若某物理量的量纲以 $[M^a L^b T^c]$ 表示，则 a , b , c 称为因次， $[M^a L^b T^c]$ 称为该物理量的因次式或量纲式。它表示该物理量的单位与基本量的单位之间的关系。当 $a = b = c = 0$ 时， $[M^0 L^0 T^0] = 1$ ，即量纲为 1。如液体的相对密度就是量纲为 1 的量。

0.3.3 单位制换算

同一物理量若用不同单位度量，其数值需要相应地改变，这称为单位换算。单位换算时，需要换算系数。常用单位的换算系数可从本书附录 13.1 中查得。

1 流体流动

重要符号说明

符号	意义	单位
A	截面积	m^2
A_r	转子流量计环隙截面积	m^2
C_0, C_r	流量系数	1
d, d_e, d_0	管道直径、管道当量直径、孔径	m
E	1 kg 流体所具有的机械能	J/kg
F	对流体施加的作用力或流体的内摩擦力	N
G	质量流速	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
h	高度	m
h_f, h'_f	直管阻力损失、局部阻力损失	J/kg
H_e	输送设备对流体所提供的有效压头	m
H_f	压头损失	m
l, l_e	管道长度、管道当量长度	m
M	摩尔质量	kg/kmol
m	质量	kg
N, N_e	输送设备的有效功率、轴功率	W
P	压力	N
p	压强	Pa
Q	热量	kJ
r, r_R	管道半径、管道水力半径	m
Re	雷诺准数	1
T	绝对温度	K
U	1 kg 流体的内能	J/kg
u	流速	m/s
$u_{\max}, u_r$	流动截面上的最大流速、某点的流速	m/s
V	体积	m^3
V_s	体积流量	m^3/s
v	比容	m^3/kg

W_s	质量流量	kg/m^3
W_e	设备对流体作有效功	J/kg
X_e	稳定段的长度	m
X_w, X_v, X_i	质量分数、体积分率、摩尔分数	1
Z	1 kg 流体所具有的位能	J/kg
Δp_f	1 m^3 流体流动时所引起的机械能损失	Pa
$\sum h_f$	1 kg 流体流动时所引起的机械能损失	J/kg
δ	流动边界层厚度	m
δ_b	滞流内层厚度	m
ϵ	绝对粗糙度	m
ζ	阻力系数	1
η	效率	1
θ	时间	s
λ	摩擦系数	1
μ	粘度	$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$
ν	运动粘度	m^2/s
ρ	密度	kg/m^3
τ	内摩擦应力	N/m^2
Π	润湿周边	m

无固定形状但可流动的物质被称为流体，如气体和液体。当温度或压强改变时，其体积和密度基本不变的流体称为不可压缩流体，如液体；体积发生显著变化的称为可压缩流体，如气体。气体在输送过程中，若压强变化较小，即体积和密度变化不大，也可按不可压缩流体处理。

化工生产中所用的原料或加工后所得的成品，绝大多数是流体；化工生产过程绝大多数的单元操作（如传热、传质等）也是在流体流动状态下完成的。流体的流动状态，直接影响着这些过程。因此，流体流动是化工生产中最基本的一个过程。

作为工程技术人员，应用流体流动规律主要解决两方面的问题：

(1) 在工艺方面，计算能量消耗、选泵，选择适宜流速、计算管径、设备的直径，选择合适的流量计等。

(2) 在标定核算方面，核算原有管径、设备的直径是否够用，原有泵能否满足新的要求，换热器等设备的压降是否在允许值内，流量计的量程范围能否满足处理量变化的要求等。

1.1 流体静力学

流体在重力和压力作用下达到平衡时呈现静止状态；若达不到平衡，则产生流动。

静止流体的规律，实际上是流体在重力作用下内部压力变化的规律。流体静力学就是研究静止流体的规律的科学。在工程实际中，流体静力学应用很广，如流体在设备或管道内压强的变化与测量、液体在贮罐内或塔底液位的测量等，均以这一规律为依据。在讨论此规律之前，首先学习流体的主要物理性质和有关的物理量。

1.1.1 流体的密度

流体单位体积所具有的质量称为密度，以 ρ 表示。如以 m 表示流体的质量， V 表示流体的体积，则

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

密度的单位和数值，在不同的单位制中是不同的。常用流体的密度数据可由有关手册查得。

对于任何一种流体，其密度是压力和温度的函数。压力对液体的密度影响很小，可忽略不计，故称液体为不可压缩流体。温度对液体的密度有一定的影响，故在说明液体密度时，应注明对应的温度条件。

气体具有可压缩性和膨胀性，其密度随压力和温度的不同，可有很大差别。当得不到气体的密度数据时，在气体的温度不太低、压力不太高的情况下，可近似地按理想气体状态方程式计算气体的密度：

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1.2)$$

式中： p 为气体的压强， N/m^2 ； M 为气体的摩尔质量， kg/kmol ； T 为气体的绝对温度， K ； R 为气体常数， $8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

如果气体应按照真实气体处理，则应用上式计算时要进行校正。

对于含有几个组分的液体混合物，其平均密度 ρ_m 可近似地按下式计算：

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{X_{w,A}}{\rho_A} + \frac{X_{w,B}}{\rho_B} + \cdots + \frac{X_{w,N}}{\rho_N} \quad (1.3)$$

式中： $\rho_A, \rho_B, \cdots, \rho_N$ 分别为液体混合物中各组分的密度， kg/m^3 ； $X_{w,A}, X_{w,B}, \cdots, X_{w,N}$ 分别为液体混合物中各组分的重量分数。

对于含有几个组分的气体混合物，其平均密度 ρ_m 可按下式计算：

$$\rho_m = \rho_A X_{v,A} + \rho_B X_{v,B} + \cdots + \rho_N X_{v,N} \quad (1.4)$$

式中： $\rho_A, \rho_B, \cdots, \rho_N$ 分别为在气体混合物的压力下各组分的密度， kg/m^3 ； $X_{v,A}, X_{v,B}, \cdots, X_{v,N}$ 分别为在气体混合物中各组分的体积分数。

气体混合物的平均密度 ρ_m 也可按式 1.2 计算。此时以气体混合物的平均相对分子质量 M_m 代替式中气体摩尔质量 M ，气体混合物的平均摩尔质量 M_m 可按下式求得：

$$M_m = M_A Y_A + M_B Y_B + \cdots + M_N Y_N \quad (1.5)$$

式中： $M_A, M_B, \cdots, M_N$ 分别为气体混合物中各组分的摩尔质量， kg/kmol ； $Y_A, Y_B, \cdots, Y_N$ 分别为气体混合物中各组分的摩尔分数。

1.1.2 流体的压强

流体垂直作用于单位面积上的力，称为流体的压强，俗称压力，其表达式为：

$$p = \frac{P}{A} \quad (1.6)$$

式中： A 为作用面的面积， m^2 ； p 为流体的压强， N/m^2 ； P 为垂直作用于器壁或流体表面上的力， N 。

压强的单位为 N/m^2 ，以 Pa 表示，称为帕斯卡。过去常采用的单位为 atm （标准大气压）、某流体柱高度、 bar （巴）或 kgf/cm^2 等。它们之间的换算关系为：

$$1 \text{ 标准大气压} = 101\,325 \text{ Pa} = 10\,330 \text{ kgf}/\text{m}^2 = 1.033 \text{ kgf}/\text{cm}^2 = 10.33 \text{ mH}_2\text{O} = 760 \text{ mmHg}$$

以绝对零压作起点计算的压强，称为绝对压强（ $p_{\text{绝}}$ ），是流体的真实压强，简称绝对压。

当被测流体的绝对压强大于外界大气压强（ $p_{\text{大}}$ ）时，所用的测压仪表称为压强表（俗称压力表）。压强表上的读数表示被测流体的绝对压强比大气压强高出的数值，称为表压强（ $p_{\text{表}}$ ），简称表压。

$$p_{\text{表}} = p_{\text{绝}} - p_{\text{大}} \quad (1.6 \text{ a})$$

当被测流体的绝对压强小于外界大气压强时，所用的测压仪表称为真空表。真空表上的读数表示被测流体的绝对压强低于大气压强的数值，称为真空度（ $p_{\text{真}}$ ）。

$$p_{\text{真}} = p_{\text{大}} - p_{\text{绝}} \quad (1.6 \text{ b})$$

真空度越高，则绝对压强越低。真空度又是表压强的负值。如真空度为 66.7 Pa 时，则表压强是 -66.7 Pa 。绝对压强、表压强、真空度之间的关系，可用图 1.1 表示。

当设备的绝对压强高于大气压时，则设备处于正压状态；当设备的绝对压强低于大气压时，则设备处于负压状态；当设备与大气相通时，则设备内液面上方的绝对压强等于大气压。

应当指出，外界大气压随大气的温度、湿度和所在地区的海拔高度而改变。如无特别指明条件，则认为大气压等于 $1.013\,3 \times 10^5 \text{ Pa}$ 。

为避免绝对压、表压、真空度三者相互混淆，通常应对表压和真空度加以标识。如 50 kPa （表压）， 0.05 MPa （真空度）等。

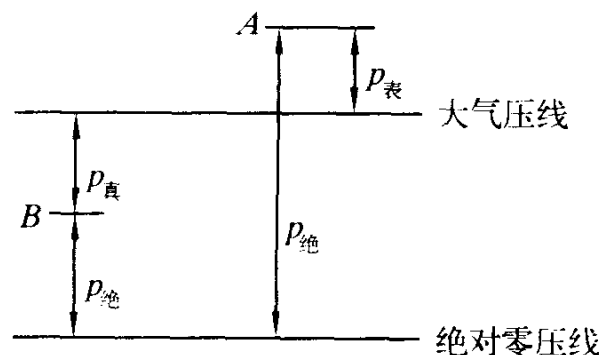


图 1.1 绝对压强、表压强、真空度的关系图

1.1.3 流体静力学基本方程式

由于流体本身的重力及外加压力的存在，在静止流体内部各点都受着这些力的作用。流体静力学即是研究流体在这些力的作用下达达到平衡或静止时的规律。

如在图 1.2 所示的容器中盛有静止的液体，设从中任意取一段垂直液柱，此液柱的底面积为 A ，液体的密度为 ρ ，任意选定一水平基准面，此处以器底为基准面。液柱的

上、下平面与基准面的垂直距离分别为 Z_1 与 Z_2 。现分析液柱受力的情况：

作用于液柱上面的压力： $p_1 A$ ；

作用于液柱下面的压力： $p_2 A$ ；

液柱自身的重力： $\rho g A (Z_1 - Z_2)$ 。

若液柱处于平衡状态，在垂直方向上各力的代数和应为 0，即

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

以 ρA 除上式的各项，并移项得

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} \quad (1.7)$$

此方程式称为流体静力学基本方程式。它也可写成以下形式：

$$p_2 = p_1 + \rho g (Z_1 - Z_2) \quad (1.8 a)$$

如果将液柱的上底面取在液面上，并设液面上方的压强为 p_0 ，液柱高度 $Z_1 - Z_2 = h$ ，则上式可改写为

$$p_2 = p_0 + \rho g h \quad (1.8 b)$$

由上式可见：①在静止液体内任一点压强的大小，与该点距液面的深度有关，越深则压强越大。②在静止液体内同一水平面上的各点，则因其深度相同，其压强亦相同。由于此水平面压强相等，称为等压面。等压面成立的条件是：流体必须连通、静止、均质、等高。③当液体上方的压强 p_0 有变化时，必将引起液体内部各点发生同样大小的变化。

1.1.4 流体静力学基本方程式的应用

1.1.4.1 连通器和液面计

底部用导管连接起来的容器叫做连通器，如图 1.3 所示。设器内盛有某种均质液体，即各处 ρ 相等，分两种情况讨论。

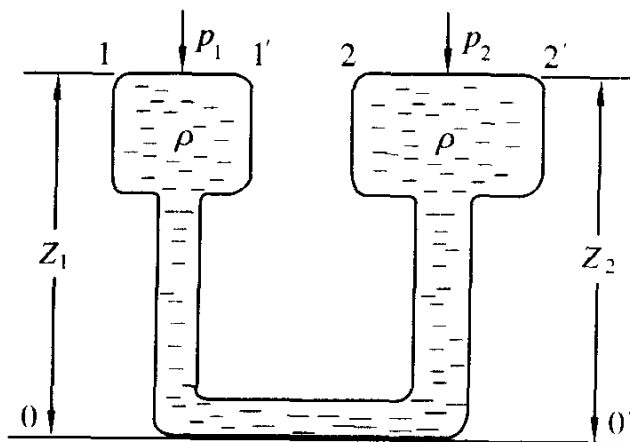


图 1.3 连通器

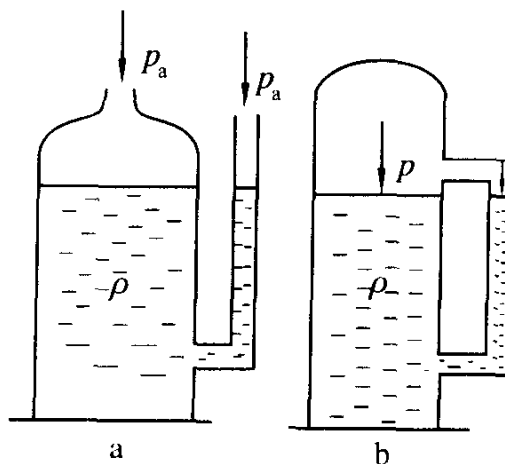


图 1.4 液面计示意图