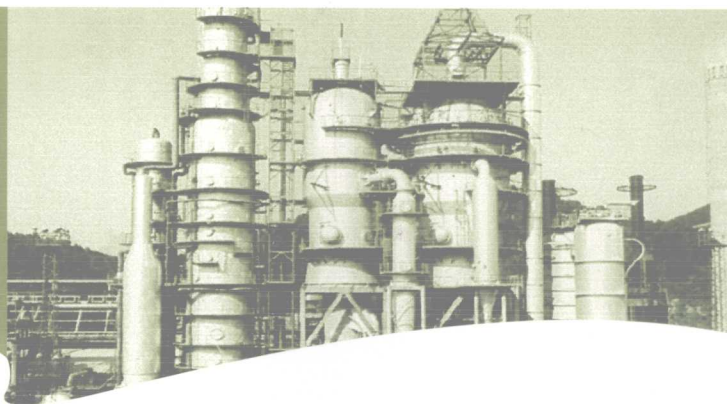


化工原理

李月红 主 编
原怀保 副主编



**PRINCIPLES OF
CHEMICAL ENGINEERING**

中国环境科学出版社

高等院校环境类系列教材

化工原理

主 编 李月红

副主编 原怀保

中国环境科学出版社·北京

图书在版编目(CIP)数据

化工原理/李月红主编. —北京: 中国环境科学出版社,
2009.1

(高等院校环境类系列教材)

ISBN 978-7-80209-870-1

I. 化 II. 李… 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 (2008) 第 178765 号

责任编辑 黄晓燕 李卫民

责任校对 刘凤霞

封面设计 龙文视觉·陈莹

出版发行 中国环境科学出版社
(100062 北京崇文区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.cn>
联系电话: 010-67112765 (总编室)
发行热线: 010-67125803

印 刷 北京市联华印刷厂
经 销 各地新华书店
版 次 2009 年 1 月第 1 版
印 次 2009 年 1 月第 1 次印刷
印 数 1—3 000
开 本 787×960 1/16
印 张 28
字 数 500 千字
定 价 36.00 元

【版权所有。未经许可请勿翻印、转载, 侵权必究】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

前 言

《化工原理》是为环境工程、化工、生物技术、制药等专业开设的一门重要的技术基础课，具有很强的工程性、实用性。是自然科学领域的基础课向工程科学的专业课过渡的入门课程。在培养人才的过程中，该课程起着承前启后、由理及工的纽带作用。其内容是“三传”即动量传递、质量传递、热量传递理论在单元操作中的应用。

本教材通过理论学习和实际操作技能的训练，能使学生理解流体流动、传热、传质的基本原理，掌握常用单元操作的基本理论、基本工艺计算以及典型设备构造、性能特点、操作原理及要点、选型等。培养学生建立基本的工程观点，提高运用基础理论分析和解决单元操作中各种工程实际问题的能力。

本书共分9章，全部内容讲课时数约为100学时。考虑到各种专业的需要以及学时安排的不同，其中加有*号的章节可作为不同专业的选讲内容。

本书由李月红担任主编，原怀保担任副主编。参加编写的人员有洛阳理工学院李月红（绪论、第五章、第六章）、原怀保（第四章、附录）、李娟（第一章）、周国强（第六章实训部分），中州大学岳福兴（第三章、第九章）、刘宇飞（第二章），焦作大学屈菊平（第七章），黄河水利职业技术学院李玉静（第八章）。

本书的编写得到了中国环境科学出版社和参编者所在单位领导的大力支持和帮助，书中引用和借鉴了一些已发表的文献资料，在此向有关作者和提供过帮助的同志表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中不妥之处在所难免，敬请使用本书的师生和其他读者批评指正。

编 者

2008年2月

目 录

绪 论	1
第一章 流体力学与应用	7
第一节 概 述	7
第二节 流体静力学	8
第三节 流体流动的基本方程	16
第四节 流体流动现象	23
第五节 流体流动阻力	31
第六节 管路计算	45
第七节 流速和流量的测定	48
实训 流体流动阻力测定操作技能训练	56
第二章 流体输送机械	65
第一节 概 述	65
第二节 离心泵	66
第三节 其他类型泵	86
第四节 气体输送机械	90
实训一 离心泵操作技能训练	97
实训二 离心泵特性曲线测定技能训练	98
*第三章 非均相机械分离	102
第一节 概 述	102
第二节 颗粒与颗粒群的特性	103
第三节 重力沉降	107
第四节 过滤	119
实训一 非均相物系分离操作技能训练	132
实训二 板框过滤操作技能训练	134

第四章 传 热	139
第一节 概 述	139
第二节 热传导	141
第三节 对流传热	150
第四节 传热计算	162
第五节 辐射传热	175
第六节 换热器	179
实训 对流传热系数测定操作技能训练	188
第五章 吸 收	194
第一节 概 述	194
第二节 气液相平衡	196
第三节 传质机理与气体吸收过程的速率	203
第四节 填料吸收塔的计算	219
第五节 填料塔的结构及特性	233
第六节 解吸操作	242
实训 填料吸收塔操作技能训练	244
第六章 蒸 馏	250
第一节 概 述	250
第二节 双组分溶液的气液相平衡	251
第三节 蒸馏与精馏原理	259
第四节 双组分连续精馏操作计算	265
第五节 蒸馏设备	289
第六节 连续精馏塔的操作和调节	295
实训 精馏操作技能训练	298
*第七章 萃 取	304
第一节 概 述	304
第二节 液—液萃取相平衡	307
第三节 影响萃取操作的主要因素	314
第四节 萃取过程的计算	318
第五节 超临界流体萃取	328
第六节 液—液萃取设备	332

*第八章 干 燥	340
第一节 概 述	340
第二节 湿空气的性质及湿度图	342
第三节 干燥过程的物料衡算和热量衡算	352
第四节 干燥速率和干燥时间	359
第五节 干燥设备	366
实训一 物料干燥操作技能训练	372
实训二 干燥曲线、干燥速率曲线测定操作技能训练	374
*第九章 膜分离技术	379
第一节 概 述	379
第二节 反渗透	386
第三节 超滤和微滤	391
第四节 电渗析	395
第五节 其他膜过程	401
附 录	410
附录一 单位换算表	410
附录二 物理常数及物理性质	413
附录三 管子规格、离心泵规格及性能、热交换器标准	435
参考文献	441

绪 论

一、《化工原理》课程的内容、性质及任务

《化工原理》是化工、环境工程、制药、食品等专业的一门重要的技术基础课，它主要研究化工单元操作的基本原理及典型设备的结构、设计、选型、操作调节等，故又称为化学工程基础或化工单元操作，具有很强的工程性、实用性。它在数学、物理、化学、物理化学等基础课与专业课之间，起着承前启后的作用，是自然科学领域的基础课向工程科学的专业课过渡的入门课程。其主要任务是介绍流体流动、传热、传质的基本原理和主要单元操作的典型设备构造、操作原理、计算、选型及实验研究方法；培养学生基本的工程观点，提高运用基础理论分析和解决单元操作中各种工程实际问题的能力。

二、化工过程与单元操作

化学工业是将自然界的各种物质，经过化学方法和物理方法处理，制造成生产资料和生活资料的工业。一种产品从原料到成品的生产过程，往往需要几个或几十个加工过程。其中除了化学反应过程外，还有大量的物理加工过程，这些统称为化工过程。

化学工业产品种类繁多。每种产品均有它自己特定的生产过程，但归纳起来，各种不同的生产过程都是由若干个化学反应和若干个基本的物理操作串联而成，每一个基本的物理操作过程都称为一个单元操作，如流体输送、搅拌、沉降、过滤、热交换、蒸发、结晶、吸收、蒸馏、萃取、吸附以及干燥等。例如，乙醇、乙烯及石油等在生产过程中，都采用蒸馏操作分离液体混合物，所以称为蒸馏单元操作。又如合成氨、硝酸及硫酸等在生产过程中，都用吸收操作分离气体混合物，所以称为吸收单元操作。再如尿素、聚氯乙烯及染料等在生产过程中，都采用干燥操作以除去固体中的水分，所以称为干燥单元操作。任何一种化工产品的生产过程，都是由若干单元操作及化学反应过程组合而成的。每个单元操作，都是在一定的设备中进行的。例如，吸收操作是在吸收塔内进行的；干燥操作是在干燥器内进行的。单元操作不仅用在化工生产中，而且在石油、轻工、冶金、制药及原子能等工业及环境保护工程、生物工程中也得到广泛应用。

单元操作的种类有几十种之多,但按其理论基础可分为下列三类:

(1) 流体流动过程,包括流体输送、搅拌、沉降、过滤等。

(2) 传热过程,包括热交换、蒸发等。

(3) 传质过程,包括吸收、蒸馏、萃取、吸附、干燥等。

流体流动时,其内部发生动量传递,故流体流动过程也称为动量传递过程。

流体流动的基本原理,不仅是流体输送、搅拌、沉降及过滤的理论基础,也是传热与传质过程中各单元操作的理论基础,因为这些单元操作中的流体都处于流动状态。传热的基本原理,不仅是热交换和蒸发的理论基础,也是传质过程中某些单元操作(例如干燥)的理论基础。因为在干燥操作中,不仅有质量传递而且有热量传递。因此,流体力学、传热及传质的基本原理是各单元操作的理论基础。

二、物理量的单位与量纲

1. 国际单位制与法定计量单位

由于科学技术的迅速发展和国际学术交流的日益频繁,以及理科与工科的关系的进一步密切,国际计量会议制定了一种国际上统一的国际单位制,其国际代号为 SI。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,分别列于表 0-1、表 0-2 及表 0-3 中;国际单位制中用于构成十进倍数和分数单位的词头,列于表 0-4 中。CGS 制与工程制的基本单位列于表 0-5 中。

表 0-1 国际单位制的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号	量纲符号
长度	米	m	L
质量	千克	kg	M
时间	秒	s	T
电流	安培	A	I
热力学温度	开尔文	K	Θ
物质的量	摩尔	mol	N
发光强度	坎德拉	cd	J

表 0-2 国际单位制的辅助单位

量的名称	单位名称	单位符号
平面角	弧度	rad
立体角	球面度	sr

表 0-3 国际单位制中具有专门名称的导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	其他表示示例
频率	赫兹	Hz	s^{-1}
力, 重力	牛顿	N	$kg \cdot m/s^2$
压力 (压强), 应力	帕斯卡	Pa	N/m^2
能量, 功, 热	焦耳	J	$N \cdot m$
功率	瓦特	W	J/s
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}C$	

表 0-4 用于构成十进倍数和分数单位的词头

所表示的因数	词头名称	词头符号	所表示的因数	词头名称	词头符号
10^6	兆	M	10^{-1}	分	d
10^3	千	k	10^{-2}	厘	c
10^2	百	h	10^{-3}	毫	m
10^1	十	da	10^{-4}	微	μ

表 0-5 CGS 制与工程制的基本单位

量的名称	CGS 制				工程制			
	长度	质量	时间	温度	长度	力	时间	温度
单位符号	cm	g	s	$^{\circ}C$	m	kgf	s	$^{\circ}C$

2. 量纲 (因次)

物理量的基本量纲 (dimension) 是其本身。SI 单位制中, 7 个基本量的量纲符号分别为 L、M、T、I、 Θ 、N、J, 例如长度的量纲为: $\dim l = L$ 。

导出量 Q 的量纲可由这些基本量的量纲符号组合而成。其一般表达式为:

$$\dim Q = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} I^{\delta} \Theta^{\epsilon} N^{\zeta} J^{\eta}$$

式中: $\dim$ 为量纲符号, 指数 α 、 β 、 γ ... 称为量纲指数。例如, 速度的量纲为 $[LT^{-1}]$ 、加速度的量纲为 $[LT^{-2}]$ 。若量纲表达式中所有量纲指数均为零, 称为量纲为 1 的量 (或称无因次), 表示为

$$\dim Q = L^0 M^0 T^0 \dots = 1$$

量纲为 1 的量, 其单位名称是一, 符号为 1。例如, 液体的相对密度为该液体的密度与 $4^{\circ}C$ 时纯水的密度之比值, 其量纲为 $[ML^{-3}/ML^{-3}] = [M^0 L^0] = 1$, 为量纲为 1 的量。过去把量纲指数均为零的量, 称为无量纲的量。

3. 量纲一致性方程

物理量方程是与某一客观现象有关的各物理量之间关系的表达式。任何一个物理量方程，只要理论上成立，则该方程等号两边不仅数值相等而且量纲必相等，称为量纲一致性方程。

例如：理想气体状态方程 $pV = nRT$ ，等号左边的量纲为：

$$\dim pV = \frac{\text{M} \cdot \text{L/T}^2}{\text{L}^2} \cdot \text{L}^3 = \text{ML}^2\text{T}^{-2}$$

等号右边：气体的物质的量 n $\dim n = \text{N}$ ；热力学温度 T $\dim T = \Theta$

为了保持量纲一致性方程，则气体常数 R 的量纲为： $\dim R = \text{ML}^2\text{T}^{-2}\text{N}^{-1}\Theta^{-1}$

工程生产中流体的流动、传热、传质等，由于影响因素较多，不能从理论上推导出物理量之间的关联式，通常用量纲分析法通过工程试验建立经验关联式。量纲一致性是量纲分析法的基础。具体内容将在第一章流体力学与应用和第四章传热中介绍。

4. 单位换算

同一物理量若用不同单位度量时，其数值需相应的改变。这种换算称为单位换算。法定计量单位刚实行不久，由过去的 CGS 和工程单位制过渡到全部使用法定单位，还需要一段时间。因此，必须掌握这些单位间的换算关系。单位换算时，需要换算因数。化工中常用单位的换算因数，可从本教材附录中查得。要特别注意工程单位制中的“力”的单位 kgf 与国际单位制中“力”的单位 N 之间的换算关系。

四、单元操作中常用的基本概念

在研究化工单元操作时，经常用到下列五个基本概念，即物料衡算、能量衡算、物系的平衡关系与传递速率及经济核算。这五个基本概念贯穿于本课程的始终，在这里仅作简要说明，详细内容见各章。

1. 物料衡算

依据质量守恒定律，进入与离开某一化工过程的物料质量之差，等于该过程中累积的物料质量，即输入量-输出量=累积量。

对于连续操作的过程，若各物理量不随时间改变，即为稳定操作状态时，过程中不应有物料的积累，则物料衡算关系为：输入量=输出量。

用物料衡算式可由过程的已知量求出未知量。物料衡算可按下列步骤进行：

(1) 首先根据题意画出各物流的流程示意图，物料的流向用箭头表示，并标上已知数据与待求量。(2) 在写衡算式之前，要确定计算基准，一般选用单位进料量或排料量、时间及设备的单位体积等作为计算的基准。在较复杂的流程示意图上

应圈出衡算的范围，列出衡算式，求解未知量。

例 0-1 用连续操作的蒸发器把含盐浓度为 w_F （质量分数）的稀盐水溶液蒸发至浓度为 w_W 的浓盐水溶液，每小时稀盐水溶液的进料量为 F (kg)。试求每小时所得浓盐水溶液量 W 及水分蒸发量 V 各为多少？

解：各股物系的流程图如图 0-1 所示，由于是连续稳定操作，计算基准取 1h，总物料衡算式为

$$F = V + W$$

溶质衡算式为

$$F \cdot w_F = W \cdot w_W$$

解以上两式得

$$W = (w_F / w_W) F$$

$$V = (1 - w_F / w_W) F$$

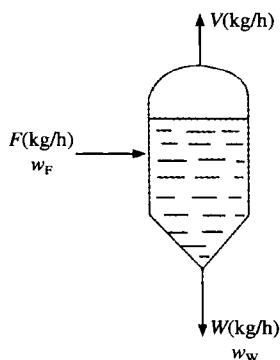


图 0-1 例 0-1 附图

2. 能量衡算

本教材中所用到的能主要有机械能和热能。能量衡算的依据是能量守恒定律。机械能衡算将在第一章流体力学与应用中说明；热量衡算也将在传热、蒸馏、干燥等章中结合具体单元操作进行详细说明。热量衡算的步骤与物料衡算基本相同。

3. 物系的平衡关系与传递速率

平衡关系与传递速率是分析单元操作过程的两个基本方面。

平衡状态是自然界中广泛存在的现象。过程的平衡可用来判断过程能否进行及进行的方向和能达到的限度。例如，在一定温度下，不饱和的食盐溶液与固体食盐接触时，食盐向溶液中溶解，直到溶液为食盐所饱和，食盐就停止溶解，此时固体食盐表面已与溶液成动态平衡。反之，若溶液中食盐浓度大于饱和浓度，则溶液中的食盐会析出，使溶液中的固体食盐结晶长大，最终达到平衡状态。一

定温度下食盐的饱和浓度，就是这个物系的平衡浓度。当溶液中食盐的浓度低于饱和浓度，则固体食盐将向溶液中溶解。当溶液中食盐的浓度大于饱和浓度，则溶液中溶解的食盐会析出，最终都会达到平衡状态。

过程的传递速率是指过程进行的快慢。仍以食盐溶解为例说明。食盐溶液中食盐浓度低时，溶解速率（单位时间内溶解的食盐质量）大；食盐浓度高时，溶解速率小。当溶液达到饱和浓度（平衡状态）时，则不再溶解，溶解速率为零。由此可知，溶液浓度越是远离平衡浓度，其溶解速率就越大；溶液浓度越是接近平衡浓度，其溶解速率就越小。溶液浓度与平衡浓度之差值，可以看做是溶解过程的推动力。另外，由实验得知，把一个大食盐块破碎成许多小块，溶液由不搅拌改为搅拌，都能使溶解速率加快。这是因为由大块改为许多小块，能使固体食盐与溶液的接触面积增大；由不搅拌改为搅拌，能使溶液对流。其结果能减小溶解过程的阻力。因此，过程的传递速率与推动力成正比，与阻力成反比，即：

$$\text{传递速率} = \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}}$$

这个关系类似于电学中的欧姆定律。过程的传递速率是决定化工设备的重要因素，传递速率大时，设备尺寸可以小。

4. 经济核算

为定量地生产某种产品所需要的设备，根据设备的形式和材料的不同，可以有若干设计方案。对同一台设备，所选用的操作参数，会影响到设备费与操作费。因此，要用经济核算确定最经济的设计方案。

第一章

流体力学与应用

知识目标

熟悉流体的主要物理性质及反映流体流动过程的特征的重要参数;

理解流体在圆管内流动时的速度分布及阻力分布情况;

掌握流体流动的连续性方程、伯努利方程及其应用, 流体在管内流动的阻力及其计算, 流体流量的测定方法;

了解常用的管道、管件、阀门, 简单管路和复杂管路的计算。

第一节 概 述

气体和液体统称为流体。化工生产过程中所处理的原料、半成品以及产品多数为流体。流体物料从一个设备输送到另一个设备, 从上一道工序转移到下一道工序, 逐步完成各种物理变化或化学变化, 得到所需要的化工产品。除了流体输送外, 化工生产中的许多单元操作也与流体流动有关。各种传热和传质过程大都是在流体流动的情况下进行的。流体的流动状态对这些单元操作有着很大影响。可以说, 流体流动的基本原理和规律是“化工原理”这一课程的重要基础。

流体是由大量分子组成的, 分子之间有一定的间隙, 它们随时都在作无规则的热运动。若把单个流体分子作为研究对象, 流体就是一种不连续的介质, 这将使研究非常困难。在化工生产过程中, 人们感兴趣的并不是某个分子的微观运动, 而是整个流体的宏观运动。因此我们的研究对象是由大量分子组成的微团——流体质点, 其比分子平均自由程大得多, 比设备尺寸小得多。流体可看成是由大量流体质点组成的, 质点间无空隙, 而且充满空间的连续介质。这样我们就可以使用连续函数的数学工具来描述流体的性质。

第二节 流体静力学

流体静力学主要是研究流体在静止状态下所受的各种力之间的关系，实质上是讨论流体静止时其内部压力变化的规律。由于它涉及流体的密度、压力等物理量，因此这里首先介绍流体的物理性质。

一、流体的物理性质

(一) 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

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

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 。

对于任何一种流体，其密度都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。温度对液体的密度则有一定的影响，通常在介绍液体密度时，应标明对应的温度。气体具有可压缩性及膨胀性，压力对气体的密度有一定的影响，故称气体为可压缩流体。在气体温度不太低、压力不太高的情况，气体密度可近似地按理想气体状态方程计算。

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1-2)$$

式中： p ——气体的压力， kPa ；

M ——气体的摩尔质量， kg/kmol ；

T ——气体的热力学温度， K ；

R ——摩尔气体常数， $8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

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。当气体混合物接近于理想气体时，其密度仍可用式(1-2)计算，但式中的气体摩尔质量 M 应以混合气体的平均摩尔质量 M_m 代替。其中

$$M_m = \sum_{i=1}^n (y_i M_i) \quad (1-3)$$

式中： y_i ——混合物中组分 i 的摩尔分数；

M_i ——混合物中组分 i 的摩尔质量, kg/kmol。

当气体混合物中各组分的密度已知时, 则可用下式计算混合气体的密度。

$$\rho_m = \sum_{i=1}^n (y_i \rho_i) \quad (1-4)$$

式中: ρ_i ——同温同压下组分 i 的密度, kg/m³。

例 1-1 已知干空气的组成为: O₂ 21%、N₂ 78% 和 Ar 1% (均为体积分数), 试求干空气在压力 98.1 kPa 及温度 100℃ 时的密度。

解: 根据式 (1-3) 计算干空气的平均摩尔质量

$$M_m = 32 \times 0.21 + 28 \times 0.78 + 39.9 \times 0.01 = 28.96 \text{ kg/kmol}$$

根据式 (1-2) 计算干空气的密度

$$\rho_m = \frac{98.1 \times 28.96}{8.314 \times (273 + 100)} = 0.916 \text{ kg/m}^3$$

液体混合时, 体积往往有所改变。假设混合液为理想溶液, 则其体积等于各组分单独存在时的体积之和, 若混合液中各组分密度为已知, 其平均密度可近似地按下式计算。

$$\frac{1}{\rho_m} = \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\rho_i} \quad (1-5)$$

式中: w_i ——混合液中组分 i 的质量分数。

例 1-2 已知硫酸与水的密度分别为 1 830 kg/m³ 与 998 kg/m³, 试求含硫酸 60% (质量分数) 的硫酸水溶液的密度。

解: 根据式 (1-5)

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{0.6}{1830} + \frac{0.4}{998} = 7.29 \times 10^{-4}$$

$$\rho_m = 1372 \text{ kg/m}^3$$

(二) 流体的压力

1. 压力的定义

垂直作用于流体单位面积上的力, 称为流体的压强, 习惯上称为流体的静压力或压力。其表达式为

$$p = \frac{F}{A} \quad (1-6)$$

式中: p ——流体的压力, Pa;

F ——垂直作用于流体上的力, N;

A ——力的作用面积, m^2 。

在 SI 单位制中, 压力的单位是 N/m^2 , 即 Pa。此外, 还常用大气压 (atm) 或液柱高度来表示压力。

2. 压力的表示方法

(1) 绝对压力: 以绝对真空为基准测得的压力。绝对压力是流体的真实压力。

(2) 表压: 以外界大气压为基准测得的压力, 工程上用压力表测得的流体压力就是流体的表压, 它是流体的真实压力与外界大气压的差值。即

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

(3) 真空度: 当被测流体绝对压力小于大气压时, 压力通常用真空度来表示, 真空表所测得的流体压力就是流体的真空度, 它表示流体的真实压力比外界大气压小了多少。即

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

例 1-3 已知甲地区的平均大气压力为 85.3 kPa, 乙地区的平均大气压力为 101.3 kPa, 在甲地区的某真空蒸馏塔操作时, 塔顶真空表读数为 20 kPa。问若改在乙地区操作, 真空表的读数为多少才能维持塔内的绝对压力与甲地区操作时相同?

解: 根据甲地区的大气压条件, 可求得操作时塔顶的绝对压力为

$$\text{绝对压力} = \text{大气压力} - \text{真空度} = 85.3 - 20 = 65.3 \text{ kPa}$$

在乙地区操作时, 要求塔内维持相同的绝对压力, 由于其大气压与甲地区不同, 则塔顶的真空度亦不相同, 其值为

$$\text{真空度} = \text{大气压力} - \text{绝对压力} = 101.3 - 65.3 = 36 \text{ kPa}$$

流体静力学基本方程式

由于流体本身的重力以及外加压力的存在, 静止流体内部的压力沿着高度会发生变化。流体静力学基本方程式就是用于描述静止流体内部的压力沿着高度变化的数学表达式。对于不可压缩流体, 其静力学基本方程的推导方法如下。

现取静止流体中任意一垂直液柱, 如图 1-1 所示。液柱的横截面积为 A , 液体的密度为 ρ , 若以容器底为基准面, 则液柱的上表面、下表面与基准面的垂直距离分别为 z_1 和 z_2 , 以 p_1 和 p_2 分别表示液柱上下表面所受到的压力。