

石油化工工人技术培训教材

石油化工过程及设备

(中级本)

马道轩 潘绍祥 等 编



中国石化出版社



054408

200425575

石油化工工人技术培训教材

石油化工过程及设备

(中 级 本)

马道轩 潘绍祥 等编

TE624

014



中国石化出版社

(京)新登字048号

内 容 提 要

本书是中国石化总公司工人技术培训教材的一种,是根据总公司人事部培训处所制订的编写大纲编写的。本书从基础知识出发,介绍了化工原理基础理论,包括流体力学、流体输送机械、非均相分离、传热原理及换热设备、蒸发、蒸馏、吸收、萃取、冷冻、塔设备、反应工程基础及冷却水循环处理等内容。结合这些理论知识,书中给出了一些生产实践中的应用实例,也给出了大量的思考题与习题。

本书可供石油化工企业中各类中级工人使用,也可作为中专、中技教材。

石油化工工人技术培训教材

石油化工过程及设备

(中级本)

马道轩 潘绍祥 等编

中国石化出版社出版

(北京朝阳区太阳宫路甲1号 邮政编码: 100029)

海丰印刷厂排版

海丰印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 32开本 16印张 354千字 印1-2900

1991年12月北京第1版 1991年12月北京第1次印刷

ISBN 7-80043-184-3/TQ·093 定价: 7.40元

前 言

本书是根据1984年10月中国石化总公司人事部培训处在辽化公司召开的关于编写初、中级工人技术培训教材会议通过的《石油化工过程及设备》中级工人技术培训教材教学大纲编写的。全书除绪论外，还包括流体力学、流体输送机械、非均相分离、传热原理和换热设备、蒸发、流体的蒸馏、气体的吸收、液-液萃取，塔设备、冷冻原理及设备、反应工程基础、循环冷却水的处理技术简述等。全书内容的教学时数为165学时。

本书从中级工人的文化水平出发，在保证本学科的系统性、完整性的前提下，着重介绍石油化工单元操作的基础理论及设备，力求做到通俗易懂，深入浅出。

本书适合于有机、无机、化机、仪表、化纤、炼油等专业的中级工人使用，由于各专业的要求不同，任教老师可根据需要进行选用。

参加本书编写人员有：马道轩、潘绍祥、李汉芳、王印、宋国森、刘志洪、黄惠忠、黄基传。马道轩任主编，潘绍祥任副主编。

参加本书审定的有兰化公司化肥厂蒋兆京，燕山公司合成橡胶厂赵茹，辽化公司化工二厂周洪利，大连石化公司的崔永胜同志。在此，谨向这些同志表示衷心地感谢。

绪 论

一、本课程的性质、内容和任务

石油化工生产是以化学变化、物理变化或化学处理和物理加工为主要特征的工业生产过程。其原料广泛，产品种类繁多，加工过程复杂多样。但是，在各种加工过程中，除化学反应外，其余步骤可归纳为若干种基本的物理过程。如流体的输送与压缩、沉降、过滤、蒸发、结晶、蒸馏、吸收、萃取、冷冻等等。这些基本的物理过程称为单元操作，若干单元操作串联组合则构成一个工艺制造过程。

单元操作不仅在石油化工生产过程中占据重要位置，也广泛用于冶金、轻工、制药、原子能等工业中。

《石油化工过程与设备》是一门基础技术课程，其主要任务是研究石油化工单元操作的基本原理，典型设备的构造及工艺尺寸的计算。通过本课程的学习，可使中级技术工人掌握石油化工生产过程及典型设备的基本原理，获得强化过程的技能。

《石油化工过程与设备》课程的内容包括一些应用较广泛的石油化工单元操作，如液体输送、气体输送、非均相系分离、固体流态化、传热、蒸发、蒸馏、吸收、萃取、干燥和冷冻等。按照各单元操作遵循的基本规律，把它们归纳为以下几个过程。

1. 流体动力过程

包括遵循流体力学原理的单元操作，如流体输送，过滤、固体流态化等。

2. 热量传递过程

II

包括传热、蒸发等。

3. 传质过程

在这类过程中，某种物质从一个相（液相或气相）转到另一个相。这类过程包括传质理论的操作，如蒸馏、吸收和干燥等。

4. 热力过程

包括遵循热力学定律的操作，如冷冻。

二、单位制

表示一个物理量的大小，不能只列出数字，还要列出所计量的单位。例如，某设备的长度是一个物理量，它的大小可以用1米来表示，如果只用数字1就不能说明长度的大小。

物理量分为基本量和导出量。基本量的单位称为基本单位，导出量的单位称为导出单位。例如，长度为基本量，其单位米为基本单位。速度为路程与时间之比，由长度和时间导出，是一个导出量，其单位米/秒为导出单位。

过去，在自然科学里广泛采用绝对单位制（即MKS制），物理单位制（即cgs制）和工程单位制，计量单位不统一。国际单位制是国际度量衡会议于六十年代初提出的一种新的单位制度（即SI单位制）。本书采用的是中华人民共和国法定计量单位（以SI制为基础）。

SI制共采用七个基本单位，在化工科技领域中常用 m、kg、s、K和mol 这五个基本单位及有专门名称的导出单位，如 N、Pa、J、W等。

表0-1和表0-2分别为我国法定计量单位所包括的国际单位制的基本单位和部分具有专门名称的导出单位。

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
长度	米	m
质量	千克(公斤)	kg
热力学温度	开[尔文]	K
物质的量	摩[尔]	mol
时间	秒	s

表 0-2 具有专门名称的导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	其它表示方法
力, 重力	牛[顿]	N	$\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$
压力, 压强	帕[斯卡]	Pa	N/m^2
能量、热、功	焦[耳]	J	$\text{N} \cdot \text{m}$
功率、辐射通量	瓦[特]	W	J/s
摄氏温度	摄氏度	℃	
吸收剂量	戈[瑞]	CY	J/kg
剂量当量	希[沃特]	SY	J/kg

目 录

前 言

绪 论

第一章 流体力学

第一节 流体静力学	1
第二节 流体动力学及流体在流动中的物料和能量计算	16
第三节 流体阻力	26
第四节 流体流量的测定	45
本章小结	54
练习题	57

第二章 流体输送机械

第一节 离心泵	60
第二节 往复泵	80
第三节 其它类型泵	85
第四节 气体压缩和输送机械	93
本章小结	107
练习题	109

第三章 非均相分离

第一节 重力沉降	117
第二节 过滤	124
第三节 气体的净制	130
第四节 固体的干燥	139

本章小结.....	144
练习题.....	145
第四章 传热原理和换热设备	
第一节 传热的基本知识.....	148
第二节 传热计算.....	156
第三节 换热器种类和构造.....	182
第四节 强化传热过程的途径.....	186
第五节 管路和设备的保温.....	188
本章小结.....	192
练习题.....	200
第五章 蒸发	
第一节 概述.....	204
第二节 蒸发设备.....	207
第三节 单效蒸发的计算.....	222
第四节 高效蒸发.....	240
第五节 蒸发器的生产强度.....	246
本章小结.....	250
练习题.....	252
第六章 液体的蒸馏	
第一节 蒸馏过程的相平衡.....	254
第二节 简单蒸馏与精馏原理.....	275
第三节 物料衡算与操作线方程式.....	287
第四节 精馏设备的计算.....	300
第五节 回流比.....	308
第六节 连续精馏装置的热量衡算.....	312
第七节 特殊蒸馏.....	317
第八节 精馏塔的操作.....	323

本章小结.....	326
练习题.....	330
第七章 气体吸收	
第一节 吸收过程的理论基础.....	335
第二节 吸收过程的计算.....	358
第三节 吸收流程及解吸.....	378
本章小结.....	383
练习题.....	384
第八章 液-液萃取	
第一节 萃取操作基本原理.....	389
第二节 萃取流程及其计算.....	400
第三节 萃取设备简介.....	412
第四节 萃取剂的选择.....	417
第五节 液-液萃取与蒸馏比较.....	417
本章小结.....	419
练习题.....	419
第九章 塔设备	
第一节 板式塔.....	422
第二节 填料塔.....	433
本章小结.....	446
练习题.....	448
第十章 冷冻原理及设备	
第一节 冷冻过程的理论基础.....	450
第二节 压缩蒸汽冷冻机.....	457
第三节 其它冷冻机.....	461
本章小结.....	466
练习题.....	467

第十一章	化学反应设备简介	
第一节	固定床反应器.....	470
第二节	流化床反应器.....	473
第三节	管式炉.....	475
第四节	其它型式的化学反应器.....	486
	本章小结.....	490
第十二章	工业循环冷却水处理技术	
第一节	水处理的目的是.....	491
第二节	水处理方法.....	493
第三节	微生物的危害与防治.....	499

第一章 流体力学

气体和液体都具有流动性，统称为流体。石油化工生产中所处理的物料，大多数是流体。为了制得产品，常常将流体物料按照生产工艺的要求，依次输送到各种设备中进行化学反应或物理变化，而且这些过程进行的好坏与流体在设备内的流动状态也密切相关。通常在设备之间用管道连接。有时常借助于流体输送设备（如泵和风机等）使流体物料从一个设备流到另一个设备，或由上一道工序送往下一道工序，连接生产流程。

此外，石油化工生产的各个单元操作，无论是传热、传质、多相混合物的分离和化学反应等过程，大都是在流体流动状态下进行的。流体流动的状态，直接影响着这些操作过程。

流体力学基本知识，是解决流体输送的理论依据。

本章主要讲述流体静力学（即流体在静止时的平衡规律）和流体动力学（即流体流动时的基本规律）。

第一节 流体静力学

流体的静态是流体运动的一种特殊形式。流体静力学的任务是研究静止流体内部压力变化的规律。

1-1-1 基本概念

1. 密度

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度。如以 m 表

示流体的质量， V 表示流体的体积， ρ 表示流体的密度，则：

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

在SI制中，质量的单位为千克，kg；体积的单位为立方米， m^3 ；所以 ρ 的单位为 kg/m^3 。

压强对液体的密度影响很小，可忽略不计，因此，常称液体为不可压缩的流体；温度对液体的密度有一定的影响，如纯水的密度在277K时为 1000 kg/m^3 ；在293K时为 998.2 kg/m^3 ；在373K时则为 958.4 kg/m^3 。因此，在选用密度数据时，要注明测定该数值时的温度。

液体密度与277K时的水的密度之比称为液体的相对密度，用符号 d_{277} 表示，即：

$$d_{277} = \frac{\rho}{\rho_{\text{水}}} \quad (1-2)$$

式中 ρ ——液体在 T K时的密度；

$\rho_{\text{水}}$ ——水在277K时的密度。

已知液体的相对密度，可从式(1-2)求得液体的密度。

水在277K时的密度为 1000 kg/m^3 ，所以， $\rho = 1000 d_{277}$ ， kg/m^3 。

气体因具有可压缩性和膨胀性，其密度随着压强和温度的变化差别很大。因此，气体的密度必须标明其状态。从手册中查得的气体的密度往往是某一指定条件下的数值。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处理。

对于一定质量的理想气体，其体积、压力和温度之间的变化关系为：

$$\frac{PV}{T} = \frac{P'V'}{T'}$$

因为

$$V = \frac{m}{\rho} \quad V' = \frac{m}{\rho'}$$

所以

$$\frac{P \frac{m}{\rho}}{T} = \frac{P' \frac{m}{\rho'}}{T'}$$

即

$$\rho = \rho' \frac{PT'}{P'T} \quad (1-3)$$

式中 V 、 V' ——分别为操作条件和数据指定条件下的气体体积， m^3 ；

ρ ——操作条件下的气体密度， kg/m^3 ；

P 、 P' ——分别为操作压力和数据指定压力， Pa ；

T 、 T' ——分别为操作温度和数据指定温度， K 。

标准状态下的气体密度为：

$$P_0 = \frac{M}{22.4}$$

则某一状态（压力为 P 、温度为 T ）下的气体密度为：

$$\rho = \rho_0 \frac{PT_0}{P_0T} = \frac{M}{22.4} \cdot \frac{PT_0}{P_0T} \quad (1-4)$$

式中 ρ 、 ρ_0 ——分别为操作状态下和标准状态下的气体密度， kg/m^3 ；

M ——气体的分子量， kg/kmol ；

22.4——1 kmol 气体在标准状态下的体积， m^3/kmol ；

P 、 P_0 ——分别为操作压力和标准状态下的压力， Pa ；
($P_0 = 0.101 \text{MPa}$)；

T 、 T_0 ——分别为操作温度和标准状态下的温度， K ($T_0 = 273 \text{K}$)。

通常手册中所列出的流体密度为纯物质的密度，而在石油化工生产过程中遇到的多数是含有多个组分的混合物。

若设各组分混合时具有体积加和性，以1kg混合物为基准，即混合物体积等于各组分单独存在时的体积之和，因此有：

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{a_1}{\rho_1} + \frac{a_2}{\rho_2} + \frac{a_3}{\rho_3} + \cdots + \frac{a_n}{\rho_n} \quad (1-5)$$

式中 ρ_m ——混合液体的密度，kg/m³；

$a_1, a_2, a_3 \cdots a_n$ ——分别为各组分的质量分率；

$\rho_1, \rho_2, \rho_3 \cdots \rho_n$ ——分别为各组分的密度，kg/m³。

对于混合气体，各组分的浓度一般用体积分率（在同一温度，压力下，某一组分单独存在时的体积与混合气体体积之比） Y 来表示，以1m³混合气体为基准。因混合前后各组分的质量不变，因此1m³的混合气体的质量等于各组分质量之和，即：

$$\rho_m = \rho_1 y_1 + \rho_2 y_2 + \cdots + \rho_m y_m \quad (1-6)$$

式中 ρ_m ——混合气体的密度，kg/m³；

ρ_1, ρ_2 ——分别为各组分气体的密度，kg/m³；

y_1, y_2 ——分别为各组分气体的体积分率。

2. 流体的压强

垂直作用于流体单位面积上的力，称为流体的压力强度，亦称流体的静压强，简称压强，用符号 p 表示。若 f 为垂直作用于面积 A 上的力，则压强

$$p = \frac{f}{A} \quad (1-7)$$

在SI制中， f 的单位是牛顿(N)， A 的单位是平方米(m²)，所以，压强 p 的单位为N/m²。其专用名称为帕斯卡，简称

帕，代号为Pa。

压力的单位，过去曾用大气压(atm)，流体柱高度(米液柱)和工程大气压(at)，它们与帕斯卡的关系为：

$$1\text{atm}=0.101\text{MPa}$$

$$1\text{mmHg}=133.3224\text{Pa}$$

$$1\text{kgf/cm}^2=93.067\text{kPa}$$

3. 表压、真空度和绝对压强

设备压力表上的读数并不是设备内流体的真实压强，而是设备内流体的真实压强与设备外大气压强之差。设备压力表的读数为零，说明设备内流体的真实压强与设备外大气压强相等。一般真实压强称为绝对压强，简称绝压；而压力表指示的压强称为表压强，简称表压。绝对压强与大气压强、表压强有如下关系：

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

若所测的压强比大气压低，则采用真空表。真空表上的读数称为真空度。绝对压强、大气压强和真空度有如下关系：

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

上两式中，等号两端必须采用相同的单位。绝对压强、表压强、真空度它们之间的关系，可用图1-1表示。

这里要指出，外界大气压强随大气的温度、湿度和所在地区的海拔高度而改变。为了避免绝对压强、表压强、真空度三者相混淆，对表压强和真空度均加以标注，如：

$$2\text{kPa}(\text{表压}) ; 53.32\text{kPa}$$

(真空度)等。

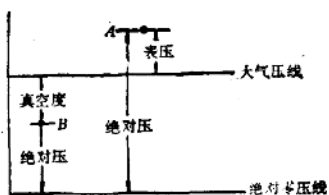


图 1-1 绝对压强、表压强和真空度的关系

例1-1 蒸汽加热器的蒸汽压强表上读数为 $1.67 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，当地气压计上的读数为 $1.03 \times 10^5 \text{ Pa}$ ，试求蒸汽的饱和温度。

解：加热蒸汽的绝对压强 = 大气压强 + 表压强 = $1.03 \times 10^5 + 1.67 \times 10^5 = 2.7 \times 10^5 (\text{Pa}) = 0.27 (\text{MPa})$

查表得对应的蒸汽饱和温度为 402.4 K 。

例1-2 某真空精馏塔，要求塔顶操作压强须保持 5332.9 Pa 绝对压强，如果大气压强读数为 100792 Pa ，试求塔顶真空计应控制在若干 Pa 。

解：真空度 = 大气压 - 绝压

当气压计读数为 100792 Pa 时

真空度 = $100792 - 5332.9 = 95459.1 (\text{Pa}) = 0.95 (\text{MPa})$

例1-3 某设备进出口测压表的读数分别为 $3 \times 10^5 \text{ Pa}$ （表压）和 $2 \times 10^5 \text{ Pa}$ （表压），求两处的绝对压强差。

解：由题意得：

$$\begin{aligned} P_{\text{进}} - P_{\text{出}} &= (P + P_{\text{进表}}) - (P + P_{\text{出表}}) = P_{\text{进表}} - P_{\text{出表}} \\ &= 3 \times 10^5 - 2 \times 10^5 = 1 \times 10^5 (\text{Pa}) = 0.1 (\text{MPa}) \end{aligned}$$

1-1-2 流体静力学基本方程式

如果一个物体在两个力的作用下能够保持静止不动，就说这两个力处于平衡。二力平衡时，一定是两个力的大小相等、方向相反、并且作用在同一条直线上。静止的流体是在重力和压力的作用下，达到静止的力平衡，并处于相对静止状态。由于重力就是地心引力，可以看作是不变的，起变化的是压力。研究静止流体内部压强变化的规律的数学表达式，就称为流体静力学基本方程式。

静止流体内部，从各个方向作用于某一点压强是相等的，否则，该点的流体便不能保持静止。同一水平面上各点