

高等学校大专层次教学用书

# 化工原理

(第2版)

(上册)

姚玉英 陈常贵 柴诚敬 编著

 天津大学出版社  
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

高等学校大专层次教学用书

# 化 工 原 理

(第 2 版)

上 册

姚玉英 陈常贵 柴诚敬 编著



天津大学出版社

## 内 容 提 要

本书重点介绍化工单元操作的基本原理、典型设备及其计算。本书对基本概念的描述力求严谨,在内容的安排上注意理论联系实际以及知识的连贯性。全书采用循序渐进与深入浅出的编写方法,力求突出工程观点。

本书分上、下两册出版。上册包括流体流动、流体输送设备、非均相物系的分离、传热和蒸发等5章及绪论、附录。下册有蒸馏、吸收、蒸馏和吸收塔设备、液-液萃取及干燥等5章。每章均编入较多的例题,章末有习题,习题后附有参考答案。

本书可作为高等院校化工、生物、环保、制药等各专业的大专层次(包括高职、高自考、成人教育)的教材,也可供大本学生、设计及生产单位技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

化工原理.上册/姚玉英,陈常贵,柴诚敬编著.

2版.—天津:天津大学出版社,2004.3

ISBN 7-5618-1884-X

I.化… II.①姚… ②陈…,③柴… 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(2004)第 001873 号

出版发行 天津大学出版社  
出 版 人 杨风和  
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)  
网 址 www.tjup.com  
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742  
印 刷 天津市宝坻县第二印刷厂  
经 销 全国各地新华书店  
开 本 185mm × 260mm  
印 张 19.75  
字 数 510 千  
版 次 2004 年 3 月第 1 版  
印 次 2004 年 3 月第 1 次  
印 数 1 - 4 000  
定 价 26.00 元

## 再版说明

本书是1996年天津大学出版社出版的《化工原理》(上、下册)的第2版。第2版紧跟科技发展的步伐,反映了本学科领域的新理论、新技术和新设备,更新了离心泵、换热器及管子规格等新系列标准。为适应高等职业技术教育蓬勃发展的新形势,本书更注重学生工程能力的培养和创新意识的提高。同时,为了帮助学生加深对基础理论、基本概念的理解,提高解题技巧和自学能力,增强工程观点,同时出版了本套教材配套辅导书《化工原理学习指南——问题与习题解析》。

本书重点介绍化工单元操作的基本原理、典型设备及其计算。对基本概念的阐述力求严谨,注重理论联系实际。本书编写按照科学发展和认识规律,循序渐进,深入浅出,难点分散,例题丰富,启迪思维,便于自学。

全书按上、下两册出版。上册除绪论、附录外,包括流体流动、流体输送机械、非均相物系的分离、传热及蒸发等5章。下册有蒸馏、吸收、蒸馏和吸收塔设备、液-液萃取及干燥等5章。每章均编入较多的例题,章末附有习题。书末配有各章习题的参考答案。

本书可作为高等院校化工、生物、环保、制药等各专业的大专层次(包括高职、高自考、成人教育)的教材,也可供科研、设计及生产单位技术人员参考。

参加本书编写的人员有姚玉英(上册:绪论、第1章、第5章及附录;下册:第3章及第5章)、陈常贵(上册:第2章及第4章;下册:第1章)、柴诚敬(上册:第3章;下册:第2章及第4章)。

在本书编写过程中,得到贾绍义、夏青、王军的支持,在此表示感谢。

编者

2003年12月

# 目 录

绪论 .....	( 1 )
<b>第 1 章 流体流动</b> .....	( 5 )
本章符号说明 .....	( 5 )
第 1 节 流体静力学 .....	( 6 )
1.1.1 流体的密度 .....	( 6 )
1.1.2 流体的静压强 .....	( 8 )
1.1.3 流体平衡时的规律——流体静力学基本方程式 .....	( 9 )
1.1.4 流体静力学基本方程式的应用 .....	( 11 )
第 2 节 流体在管内的流动 .....	( 17 )
1.2.1 流量和流速 .....	( 17 )
1.2.2 定态流动和非定态流动 .....	( 19 )
1.2.3 流动系统中的物料衡算——连续性方程式 .....	( 19 )
1.2.4 流动系统中的能量衡算——柏努利方程式 .....	( 21 )
第 3 节 流体在管内流动时的摩擦阻力 .....	( 30 )
1.3.1 产生流动阻力的原因——内摩擦 .....	( 30 )
1.3.2 牛顿粘性定律与流体的粘度 .....	( 30 )
1.3.3 流动类型与雷诺准数 .....	( 34 )
1.3.4 层流和湍流的比较 .....	( 36 )
1.3.5 流体在圆形直管内流动时的摩擦阻力 .....	( 38 )
1.3.6 流体在非圆形直管内流动时的摩擦阻力 .....	( 45 )
1.3.7 管路上的局部阻力 .....	( 46 )
第 4 节 管路系统的计算 .....	( 50 )
1.4.1 管路系统中的总流动阻力(总能量损失) .....	( 50 )
1.4.2 管路系统的计算 .....	( 50 )
第 5 节 流量的测量 .....	( 57 )
习题 .....	( 65 )
<b>第 2 章 流体输送机械</b> .....	( 69 )
本章符号说明 .....	( 69 )
第 1 节 概述 .....	( 70 )
第 2 节 离心泵 .....	( 71 )
2.2.1 离心泵的工作原理及主要部件 .....	( 71 )
2.2.2 离心泵的基本方程式 .....	( 75 )
2.2.3 离心泵的主要性能参数 .....	( 78 )
2.2.4 离心泵的特性曲线 .....	( 80 )
2.2.5 离心泵的气蚀现象与安装高度 .....	( 85 )
2.2.6 离心泵的工作点与流量调节 .....	( 89 )
2.2.7 离心泵的类型与选用 .....	( 93 )

第3节 其他类型化工用泵 .....	(97)
2.3.1 往复泵 .....	(97)
2.3.2 旋转泵 .....	(99)
2.3.3 旋涡泵 .....	(100)
第4节 气体输送机械 .....	(101)
2.4.1 离心式通风机 .....	(101)
2.4.2 离心式鼓风机和压缩机 .....	(104)
2.4.3 旋转鼓风机和压缩机 .....	(104)
2.4.4 往复压缩机 .....	(105)
2.4.5 真空泵 .....	(110)
习题 .....	(111)
<b>第3章 非均相物系的分离</b> .....	(113)
本章符号说明 .....	(113)
第1节 重力沉降 .....	(115)
3.1.1 沉降速度 .....	(115)
3.1.2 重力沉降设备 .....	(119)
第2节 离心沉降 .....	(124)
3.2.1 离心沉降速度 .....	(124)
3.2.2 离心沉降分离设备 .....	(125)
第3节 过滤 .....	(133)
3.3.1 过滤操作的基本概念 .....	(133)
3.3.2 过滤基本方程式 .....	(135)
3.3.3 恒压过滤 .....	(138)
3.3.4 过滤设备 .....	(143)
3.3.5 滤饼的洗涤 .....	(147)
3.3.6 过滤机的生产能力 .....	(148)
第4节 离心机 .....	(150)
3.4.1 概述 .....	(150)
3.4.2 离心机的结构与操作 .....	(151)
习题 .....	(153)
<b>第4章 传热</b> .....	(156)
本章符号说明 .....	(156)
第1节 概述 .....	(157)
第2节 热传导 .....	(159)
4.2.1 热传导的基本概念和定律 .....	(159)
4.2.2 导热系数 .....	(161)
4.2.3 通过平壁的热传导 .....	(162)
4.2.4 通过圆筒壁的热传导 .....	(164)
第3节 对流传热概述 .....	(167)
4.3.1 对流传热分析 .....	(167)

4.3.2	对流传热速率方程和对流传热系数 .....	(168)
第4节	传热过程的计算 .....	(169)
4.4.1	热量衡算 .....	(169)
4.4.2	总传热速率微分方程 .....	(170)
4.4.3	总传热系数 .....	(171)
4.4.4	传热平均温度差 .....	(175)
4.4.5	总传热速率方程应用举例 .....	(178)
第5节	对流传热系数关联式 .....	(183)
4.5.1	对流传热系数的主要影响因素 .....	(183)
4.5.2	对流传热系数经验公式的建立 .....	(183)
4.5.3	流体无相变时的对流传热 .....	(184)
4.5.4	流体有相变时的对流传热 .....	(192)
第6节	辐射传热 .....	(196)
4.6.1	热辐射的基本概念 .....	(196)
4.6.2	物体的辐射能力 .....	(197)
4.6.3	两固体间的辐射传热 .....	(199)
4.6.4	对流和辐射的联合传热 .....	(201)
第7节	换热器 .....	(202)
4.7.1	换热器的分类 .....	(202)
4.7.2	间壁式换热器的类型 .....	(203)
4.7.3	换热器传热过程的强化 .....	(210)
4.7.4	管壳式换热器的设计和选型 .....	(211)
习题	.....	(220)
第5章	蒸发 .....	(224)
本章符号说明	.....	(224)
第1节	蒸发器的形式 .....	(226)
5.1.1	蒸发器的结构 .....	(226)
5.1.2	蒸发器的辅助设备 .....	(231)
5.1.3	蒸发器的选型 .....	(232)
第2节	单效蒸发及其计算 .....	(232)
5.2.1	溶液的温度差损失 .....	(232)
5.2.2	单效蒸发的计算 .....	(236)
第3节	多效蒸发 .....	(241)
5.3.1	多效蒸发的操作流程 .....	(242)
5.3.2	多效蒸发的计算 .....	(244)
5.3.3	对蒸发操作的进一步分析 .....	(253)
习题	.....	(255)
附录	.....	(256)
一、中华人民共和国法定计量单位制度	.....	(256)
二、常用单位的换算	.....	(257)

三、某些气体的重要物理性质 .....	(260)
四、某些液体的重要物理性质 .....	(261)
五、某些固体的重要物理性质 .....	(262)
六、干空气的物理性质( $101.33 \times 10^3$ Pa) .....	(263)
七、水的物理性质 .....	(264)
八、水在不同温度下的饱和蒸气压与粘度( $-20\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) .....	(265)
九、饱和水蒸气表(按温度顺序排) .....	(269)
十、饱和水蒸气表(按 kPa 顺序排) .....	(270)
十一、某些液体的导热系数 .....	(272)
十二、某些气体和蒸气的导热系数 .....	(275)
十三、某些固体材料的导热系数 .....	(276)
十四、液体的粘度和密度 .....	(278)
十五、101.33 kPa 压强下气体的粘度 .....	(282)
十六、液体的比热容 .....	(284)
十七、101.33 kPa 压强下气体的比热容 .....	(287)
十八、汽化热(蒸发潜热) .....	(289)
十九、液体的表面张力 .....	(291)
二十、壁面污垢热阻(污垢系数)( $\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ ) .....	(293)
二十一、101.33 kPa 压强下溶液的沸点升高与浓度的关系 .....	(294)
二十二、管壳式换热器总传热系数 $K_0$ 的推荐值 .....	(294)
二十三、管子规格 .....	(296)
二十四、泵规格(摘录) .....	(300)
二十五、4-72-11 型离心通风机规格(摘录) .....	(304)
二十六、管壳式换热器系列标准(摘自 TB/T 4714,4715—92) .....	(305)



# 绪 论

用化工手段将原料加工成产品的生产过程统称为化工生产过程。例如高压聚乙烯生产过程是将常温、常压下的乙烯气体加压并升温达到反应时所需的状态,然后在催化剂的作用下进行聚合反应,即将单体乙烯聚合成聚乙烯,从反应产物分离出其中未反应的乙烯及其他副产品后,余下的聚乙烯在粒化器中成型即为粒状产品聚乙烯。该过程是以化学反应,即聚合反应为核心,其他步骤只起到为化学反应准备必要的反应条件以及进一步将产品提纯的作用,而且这些步骤全是物理操作。化工产品有千千万万种,都是由不同的原料、使用不同的工艺方法和设备制成的,但归纳起来,各个产品的工艺生产过程都是由类似上述的化学反应和若干个物理操作步骤组合而成。化工原理就是研究除化学反应以外的诸物理操作步骤的原理和所用设备的课程。这些物理操作步骤称为化工单元操作,简称单元操作。单元操作可从不同角度分类,本教材按所遵循的基本原理将单元操作分为以下几类。

(1) 遵循流体动力规律的单元操作:包括流体输送、沉降、过滤、搅拌等单元操作。

(2) 遵循传热基本规律的单元操作:包括传热(加热、冷却、冷凝)、蒸发等单元操作。

(3) 遵循传质基本规律的单元操作:包括蒸馏、吸收、萃取等单元操作。因为这些操作的最终目的是将混合物中的组分分开,故又称为分离操作。

(4) 同时遵循传热、传质基本规律的单元操作:包括空气增湿与减湿、干燥、结晶等操作。

单元操作包括“过程”和“设备”两个内容,所以本课程曾被称为“化工单元操作和设备”。同一单元操作在不同的工艺生产中有共性也有各自的特性。例如前述的高压聚乙烯生产过程,要将  $15 \times 10^4$  kPa 的常温乙烯气体加热到  $200^\circ\text{C}$ ;用发酵法制造工业酒精时,要将低浓度的常温酒精加热到  $60^\circ\text{C}$  左右后送入精馏塔内提纯。两种操作都采用换热器这样的设备将流体温度升高,这就是传热单元操作在两种不同工业生产中的共性。但是在高压聚乙烯生产过程中是加热高压、常温的气体,而酒精生产过程中是加热常压、常温的液体,两者所用的换热器在类型和结构上均有差异,而且两者在工艺方面的要求也有所不同,这就是传热操作在两种不同生产过程中的特殊性。本课程只介绍单元操作的共性。

化工原理是实践性很强的工科课程,是化工类和相近专业学生必修的重要技术基础课。主要介绍单元操作的基本原理,所用典型设备的结构、计算和选用。计算包括设计型计算和操作型计算两种。设计型计算是指对给定的任务计算出设备的工艺尺寸;操作型计算是指对已有的设备进行查定计算。

学生学完本课程后应初步具有以下各种能力:

- (1) 能理论联系实际,用工程和经济观点处理遇到的各种化工单元操作的问题;
- (2) 会筛选恰当的单元操作去完成给定的生产任务;
- (3) 在设计设备计算工作中能寻求出所需的经验数据以及适宜的公式;
- (4) 能管理设备的正常运转,找出故障的原因并及时排除;
- (5) 应具有强化设备与初步创新的能力。

各单元操作原理及设备的计算都是以物料衡算、能量衡算、传递速率和平衡关系的概念为依据,有关内容在以后各章中陆续介绍。

以上四种概念都涉及各种物理量,而任何物理量的数量均要用数字和单位联合表达。故在绪论中介绍单位制度与单位换算。

### 一、单位制度

通过任意选择几个独立物理量,如长度、时间等作为基本量,并根据使用方便的原则定出这些基本量的单位,称为基本单位。其他的物理量,如速度、加速度等物理量的单位便可根据它们与基本量之间的关系来确定,这些物理量称为导出量,其单位称为导出单位。根据基本量及其单位的选择不同,产生了不同的单位制度,如重力单位制度和绝对单位制度。两种单位制度又分为英制和米制两种。重力单位制度以长度、时间及力为基本单位;绝对单位制度以长度、时间及质量为基本单位。重力单位制度与绝对单位制度的主要区别在于:前者以力为基本量,其单位为基本单位,质量为导出量,其单位为导出单位;后者以质量为基本量,其单位为基本单位,力为导出量,其单位为导出单位。根据牛顿第二力学定律,力与质量间的关系为:

$$F = ma \quad (0-1)$$

式中  $F$ ——作用于物体上的力;

$m$ ——物体的质量;

$a$ ——物体在作用力方向上的加速度。

应用式 0-1 时,各物理量单位可任选一种单位制度,算出的结果是一致的,但绝对不允许同时采用两种不同单位制度。因此式 0-1 称为单位一致性方程。

两种不同单位制度中基本量的米制单位列于表 0-1 中。

表 0-1 两种不同单位制度中基本量的米制单位

基本量		长度	时间	质量	力(或重力)
		长度	时间	质量	力(或重力)
绝对单位制	cgs 制 (物理单位制)	cm	s	g	-
	mks 制	m	s	kg	-
重力单位制 (工程单位制)		m	s	-	kgf

目前,国际上各科学领域所采用的单位制度已改为国际单位制度(简称 SI)。我国从 1990 年开始采用《中华人民共和国法定单位制度》(简称法定单位制度),它是在国际单位制度的基础上,加上若干个由我国指定的国际单位制度以外的单位。

法定单位制与 SI 一样,具有高度的统一性,包括了所有领域中的计量单位,其中任何物理量只有一个单位,使科学技术、工业生产、经济贸易甚至日常生活都统一用一种单位制度。本教材采用法定单位制,但在少数例题、习题中有意识地编入一些非法定制单位,有助读者熟悉新旧单位间的关系。

化工领域中常用法定单位制中的有关内容列于本教材的附录一中。

## 二、单位换算

目前国际上虽基本采用国际单位,但旧有文献资料中的数据是多种单位制度并存,使用这些数据时应将它们换算到所需的单位制度,所以读者应掌握物理量的单位换算方法。

### 1. 物理量的单位换算

同一种物理量用不同单位制度的单位表示时,其数值不同。例如:重力加速度在法定单位制中的单位为  $\text{m/s}^2$ , 数值为 9.81; 在 cgs 制中的单位为  $\text{cm/s}^2$ , 数值为 981。二者包括单位在内的数值比称为单位换算因子,例如重力加速度在法定单位制与 cgs 制中的单位换算因子为:

$$\frac{9.81 \text{ m/s}^2}{981 \text{ cm/s}^2} = \frac{1}{100} \text{ m/cm}$$

任何单位换算因子都是两个相等量之比,所以包括单位在内的任何换算因子在本质上都是纯数 1,故任何物理量乘以或除以单位换算因子,都不会改变原量的大小。化工中常用的单位换算因子列于附录二中。

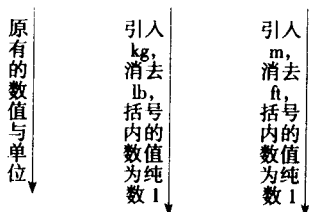
[例 0-1] 从旧有资料中查出常温下水的密度  $\rho = 62.43 \text{ [lb/ft}^3\text{]}^*$  (磅/呎<sup>3</sup>), 试将水的密度单位换算成法定单位制, 即  $\text{kg/m}^3$ 。

解: 单位换算时, 一般先从附录二查出原单位与要换算的新单位间的关系, 即单位换算因子, 由附录二查出:

$$1 \text{ [lb]} = 0.453 6 \text{ kg}$$

$$1 \text{ [ft]} = 0.304 8 \text{ m}$$

所以  $\text{kg}$  与  $[\text{lb}]$ 、 $[\text{ft}]$  与  $\text{m}$  间的换算因子分别为:  $0.453 6 \text{ kg}/[\text{lb}]$  及  $[\text{ft}]/(0.304 8 \text{ m})$ 。因此算出法定单位制中的密度为:



$$\rho = 62.43 \text{ lb/ft}^3 = \left[ 62.43 \frac{\text{lb}}{\text{ft}^3} \right] \left[ \frac{0.453 6 \text{ kg}}{\text{lb}} \right] \left[ \frac{\text{ft}}{0.304 8 \text{ m}} \right]^3 = 1 000 \text{ kg/m}^3$$

[例 0-2] cgs 制中粘度的单位为  $\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s})$ , 简称为  $[\text{P}]$  (泊),  $[\text{P}]$  的单位比较大, 用它来表示物质粘度时数值就很小, 所以通常用  $\text{cP}$  (厘泊) 作为粘度的单位, 而  $1[\text{P}] = 100[\text{cP}]$ 。SI 中粘度的单位为  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。试从基本量的单位换算开始, 找出 cgs 制与 SI 的粘度关系, 并与附录中单位换算关系比较。

解: 为了使初学者便于学习, 下面将过程写得比较仔细。

$$\begin{aligned} 1[\text{cP}] &= 1 \times 10^{-2} [\text{P}] = 1 \times 10^{-2} \frac{\text{g}}{\text{cm}\cdot\text{s}} = 1 \times 10^{-2} \frac{\text{g}}{\text{cm}\cdot\text{s}} \times \frac{\text{kg}}{1 \times 10^3 \text{ g}} \times \frac{1 \times 10^2 \text{ cm}}{\text{m}} \\ &= 1 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}} = 1 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}} \cdot \frac{\text{m}}{\text{m}} \cdot \frac{\text{s}}{\text{s}} = 1 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}\cdot\text{m}}{\text{m}^2\cdot\text{s}} \cdot \text{s} = 1 \times 10^{-3} \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \cdot \text{s} = 1 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s} \end{aligned}$$

与附录单位换算表中列的数值完全相同。

\* 绪论中非法定单位均加方括号。

以上两个例题是为了教会读者掌握物理量单位换算的原则而编入的,在以后计算中遇到类似例题中的简单换算,可以从附录中直接查出单位换算因子,对一些复杂的导出量若查不出换算因子,则可仿照例题方法换算,但不必在式中写出单位。

## 2. 经验公式(数字公式)的单位变换

前已述及式 0-1 是根据物理规律建立起来的物理方程,具有单位一致性,其中各符号单位必须采用同一单位制。

此外,在工程上还有根据大量实验数据整理成的经验公式,它只反映各有关物理量数字之间的关系,所以又称为数字公式。经验公式中每个符号只代表物理量中的数字部分,而数字又与特定单位相对应,因此在使用经验公式时各物理量必须采用指定的单位。

若已知物理量的单位与经验公式中指定的单位制度不相同时,则需换算成经验公式规定的单位,再分别代入经验公式进行运算。若经验公式要经常使用,可将整个公式加以变换,使其中各符号都采用所希望的单位,这就是经验公式的单位变换。下面通过例题说明。

【例 0-3】水分自静止的水面向空气中蒸发的速度可用下面经验公式计算:

$$G = 2.45 u^{0.8} \Delta p$$

式中  $G$ ——水分蒸发速度, [磅/(英尺<sup>2</sup>·时)];

$u$ ——水分上方空气的流速, [英尺/秒];

$\Delta p$ ——在空气温度下水的饱和蒸气压和空气中水气分压之差, [大气压]。

试将上式加以变换,使各物理量用法定单位制表示,即  $G$  为  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 、 $u$  为  $\text{m/s}$  及  $\Delta p$  为 Pa。

解:

(1) 流速  $u$  的变换,从附录查出:

$$1[\text{英尺}] = 0.3048 \text{ m}$$

或  $1[\text{英尺/秒}] = 0.3048 \text{ m/s}$

令  $u$  表示以 [英尺/秒] 为单位的流速、 $u'$  表示以  $\text{m/s}$  为单位的流速,则  $u$  与  $u'$  的关系为:

$$u = \frac{u'}{0.3048} \quad (1)$$

(2) 压强差  $\Delta p$  的变换,从附录查出:

$$1[\text{大气压}] = 1.0133 \times 10^5 \text{ Pa}$$

令  $\Delta p$  表示以 [大气压] 为单位的压强差、 $\Delta p'$  表示以 Pa 为单位的压强差,  $\Delta p$  与  $\Delta p'$  的关系为:

$$\Delta p = \frac{\Delta p'}{1.0133 \times 10^5} \quad (2)$$

(3) 蒸发速度  $G$  的变换,先算出 [磅/(英尺<sup>2</sup>·时)] 与  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  间的关系,即:

$$1 \left[ \frac{\text{磅}}{\text{英尺}^2 \cdot \text{时}} \right] = 1 \left( \frac{\text{磅}}{\text{英尺}^2 \cdot \text{时}} \right) \left[ \frac{0.4536 \text{ kg}}{1 \text{ 磅}} \right] \left[ \frac{1 \text{ 英尺}}{0.3048 \text{ m}} \right]^2 \left[ \frac{1 \text{ 时}}{3600 \text{ s}} \right] = 1.356 \times 10^{-3} \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$$

令  $G$  表示以 [磅/(英尺<sup>2</sup>·时)] 为单位的蒸发速度、 $G'$  表示以  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$  为单位的蒸发速度,  $G$  与  $G'$  的关系为:

$$G = \frac{G'}{1.356 \times 10^{-3}} \quad (3)$$

将式(1)、式(2)及式(3)代入题给的经验公式中,即:

$$\frac{G'}{1.356 \times 10^{-3}} = 2.45 \left( \frac{u'}{0.3048} \right)^{0.8} \left( \frac{\Delta p'}{1.0133 \times 10^5} \right)$$

略去各物理量的上标,并整理得:

$$G = 8.482 \times 10^{-8} u'^{0.8} \Delta p'$$

# 第 1 章 流体流动

## 本章符号说明

### 英文字母

$a$ ——加速度,  $\text{m/s}^2$ ; 质量分数;  
 $A$ ——截面积,  $\text{m}^2$ ;  
 $C_o$ 、 $C_v$ ——流量系数;  
 $d$ 、 $d_e$ ——分别为圆管直径及非圆管的当量直径,  $\text{m}$ ;  
 $e$ ——涡流粘度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  
 $E$ ——1 kg 流体具有的总机械能,  $\text{J/kg}$ ;  
 $Eu$ ——欧拉准数, 无因次;  
 $F$ ——流体的内摩擦力,  $\text{N}$ ;  
 $g$ ——重力加速度,  $\text{m/s}^2$ ;  
 $G$ ——质量速度,  $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ;  
 $h$ ——高度,  $\text{m}$ ;  
 $h_f$ ——1 kg 流体流动时因克服摩擦阻力而损失的能量, 简称能量损失,  $\text{J/kg}$ ;  
 $h'_f$ ——局部能量损失,  $\text{J/kg}$ ;  
 $l$ 、 $l_e$ ——分别为直管的长度及管件的当量长度,  $\text{m}$ ;  
 $m$ ——质量,  $\text{kg}$ ;  
 $M$ ——摩尔质量,  $\text{kg/kmol}$ ;  
 $N$ ——输送设备的轴功率,  $\text{kW}$ ;  
 $N_e$ ——输送设备的有效功率,  $\text{kW}$ ;  
 $p$ ——压强,  $\text{Pa}$ ;  
 $\Delta p_f$ ——因克服流动阻力而引起的压强降,  $\text{Pa}$ ;  
 $P$ ——压力,  $\text{N}$ ;  
 $r$ ——半径,  $\text{m}$ ;  
 $r_H$ ——水力半径,  $\text{m}$ ;  
 $R$ ——液柱压差计读数,  $\text{m}$ ; 气体常数,  $\text{J}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$ ;

$S$ ——两流体层间的接触面积,  $\text{m}^2$ ;  
 $T$ ——热力学温度,  $\text{K}$ ;  
 $u$ ——速度,  $\text{m/s}$ ;  
 $u_{\max}$ ——流动截面上的最大速度,  $\text{m/s}$ ;  
 $u_r$ ——流动截面上某点的局部速度,  $\text{m/s}$ ;  
 $U$ ——1 kg 流体的内能,  $\text{J/kg}$ ;  
 $v$ ——比容,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  
 $V$ ——体积,  $\text{m}^3$ ;  
 $V_s$ ——体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  
 $w_s$ ——质量流量,  $\text{kg/s}$ ;  
 $W_e$ ——1 kg 流体通过输送设备获得的能量, 或输送设备对 1 kg 流体作的有效功,  $\text{J/kg}$ ;  
 $y$ ——气体的摩尔分数, 即物质量分数;  
 $z$ ——相对高度,  $\text{m}$ 。

### 希腊字母

$\epsilon$ ——绝对粗糙度,  $\text{m}$  或  $\text{mm}$ ;  
 $\epsilon'$ ——体积膨胀系数;  
 $\zeta$ ——阻力系数;  
 $\eta$ ——效率;  
 $\mu$ ——粘度,  $\text{Pa}\cdot\text{s}$ ;  
 $\nu$ ——运动粘度,  $\text{m}^2/\text{s}$  或  $\text{cSt}$ ;  
 $\rho$ ——密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  
 $\tau$ ——内摩擦应力,  $\text{Pa}$ 。

### 下标

1、2——截面序号;  
 $f$ ——摩擦的;  
 $s$ ——秒的;  
 $m$ ——平均。

在化工厂内,不论是待加工的原料或是已制成的产品,常以液态或气态存在。各种工艺生产过程中,往往需要将液体或气体输送至设备内进行物理处理或化学反应,这就涉及选用什么类型、多大功率的输送机械,如何确定管道直径及如何控制物料的流量、压强、温度等参数,以保证操作或反应能正常进行,这些问题都属于流体输送操作,而流体流动的原理是输送操作的理论依据。

流体是液体和气体的统称。流体具有流动性,其形状随容器的形状而变化。液体有一定的液面,气体则无。液体几乎不具压缩性,受热时体积的膨胀不显著,所以一般将液体视为不可压缩的流体。与此相反,气体的压缩性很强,受热时体积膨胀很大,所以气体是可压缩的流体。如果在操作过程中气体的温度和压强改变很小,气体也可近似地按不可压缩流体来处理。

流体是由大量的不断作不规则运动的分子组成,各个分子之间以及分子内部的原子之间均保留着一定的空隙,所以流体内部空隙是不连续的,因此要从单个分子运动出发来研究整个流体平衡或运动的规律,既困难也不现实。所以在流体力学中,不研究个别分子的运动,只研究由大量分子组成的分子集团。设想整个流体由无数个分子集团组成,每个分子集团称为“质点”。质点的大小与它所处的空间相比是微不足道的,但比分子自由程要大得多。这样可以设想在流体的内部各个质点相互紧挨着,它们之间没有任何空隙而成为连续体。用这种处理方法就可以不研究分子间的相互作用以及复杂的分子运动,主要研究流体的宏观运动规律即可。把流体模化为连续介质,并不是所有情况都是如此的,高真空度下的气体就不能视为连续介质了。

由于连续介质的质点间无任何空隙而是连续的,故在研究流体流动各项内容时可以应用连续函数这一工具。

## 第 1 节 流体静力学

流体静力学是研究处于静止或相对静止状态下的流体在外力作用下的规律,即流体平衡规律。在实际生产中,流体平衡规律的应用面很广,如管道或设备内压强的测量、贮槽内液面的测量以及为了防止气体从设备内逸出时液封高度的计算,都是以流体平衡规律为依据的。

### 1.1.1 流体的密度

单位体积流体具有的质量称为密度,其表达式为:

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

式中  $\rho$ ——流体的密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$m$ ——流体的质量,  $\text{kg}$ ;

$V$ ——体积,  $\text{m}^3$ 。

当  $\Delta V$  趋近于零时,  $\Delta m/\Delta V$  的极限值为流体内部某点的密度,可以写成:

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

各种流体的密度可以从物理化学手册和有关资料中查得,本教材附录三、四及十四均列出某些流体在给定条件下的密度,供做习题时查用。

气体具有可压缩性及膨胀性,故其密度随温度及压强而变化,因此对气体密度必须标出其所处的状态。从手册中查出的气体密度是某指定状态下的数值,应用时一定要换算到操作条件的数值。当气体的压强不太高、温度不太低时,可按理想气体来处理,即热力学温度、压强和体积间具有如下关系:

$$\frac{p_0 V_0}{T_0} = \frac{pV}{T}$$

上式等号两侧除以一定质量  $m$  后,变为:

$$\frac{p_0}{\rho_0 T_0} = \frac{p}{\rho T}$$

或

$$\rho = \rho_0 \frac{p T_0}{p_0 T} \quad (1-2)$$

式中  $p$ ——气体的压强, Pa;

$T$ ——气体的热力学温度, K;

下标 0 表示由手册中查得的条件。

在某指定的温度和压强下,理想气体的密度也可以直接用气体状态方程来求算,即

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT$$

或

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (1-3)$$

式中  $R$ ——气体常数,  $R = 8.315 \times 10^3 \text{ J}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ ;

$M$ ——气体的摩尔质量,  $\text{kg}/\text{kmol}$ ;

$n$ ——气体的物质的量,  $\text{kmol}$ 。

若气体为混合气体,计算其密度的最简单方法是将式 1-3 中的气体摩尔质量  $M$  换以混合气体的平均摩尔质量  $M_m$ 。混合气体的平均摩尔质量可由加和规则求得,即:

$$M_m = M_1 y_1 + M_2 y_2 + \cdots + M_n y_n \quad (1-4)$$

式中  $y$ ——混合气体中组分的摩尔分数,即物质的量分数;

下标  $m$  表示平均,下标 1、2、……、 $n$  表示组分的序号。

液体的密度基本上不随压强而变(极高压强除外),随温度略有变化,在工程计算中,常将液体密度视为常数。

化工厂中所处理的液体经常是混合液体,是若干单纯液体的混合物。从手册中难于查到混合液体的密度,但可近似由计算求得。液体混合时体积略有变化,为了便于计算,一般忽略这种体积变化,认为各纯液体混合后总体积为各纯液体体积之和。以 1 kg 混合液为基准,混合液的平均密度可近似地用下式计算:

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

或

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

式中  $\rho_m$ ——混合液的平均密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$a$ ——混合液中各纯组分的质量分数。

应指出:同一物质在不同单位制中,密度的单位与数值均不同,应用时需密切注意。

还应指出:在化工计算中常采用密度的倒数,称为比容,其定义为单位质量物质具有的体积,以  $v$  表示,单位为  $\text{m}^3/\text{kg}$ 。

[例 1-1] 标准状况下某烟道气的密度为  $1.338 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,试求该烟道气在  $2 \times 10^5 \text{ Pa}$  及  $50^\circ\text{C}$  状况下的密度。

解:  $2 \times 10^5 \text{ Pa}$  及  $50^\circ\text{C}$  时烟道气的密度为:

$$\rho = \rho_0 \frac{pT_0}{p_0T} = 1.338 \times \frac{2 \times 10^5}{1.0133 \times 10^5} \times \frac{273}{273 + 50} = 2.232 \text{ kg}/\text{m}^3$$

[例 1-2] 求  $20^\circ\text{C}$  乙醇质量分数为 0.4 的乙醇水溶液的平均密度。

解:由附录四查得  $20^\circ\text{C}$  时乙醇和水的密度分别为  $789 \text{ kg}/\text{m}^3$  及  $998 \text{ kg}/\text{m}^3$ ,故乙醇水溶液的平均密度为:

$$\rho_m = \frac{1}{\frac{a_1}{\rho_1} + \frac{a_2}{\rho_2}} = \frac{1}{\frac{0.4}{789} + \frac{1-0.4}{998}} = 902.4 \text{ kg}/\text{m}^3$$

### 1.1.2 流体的静压强

在静止流体中,取通过某点的任意截面积为  $\Delta A$ ,垂直作用于该面上的压力为  $\Delta P$ ,单位截面上所受的压力为:

$$p = \frac{\Delta P}{\Delta A}$$

式中  $p$  称为静压力强度,简称压强,俗称压力。当  $\Delta A \rightarrow 0$  时,  $\Delta P/\Delta A$  的极限值即为该点的压强,即:

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta A} \quad (1-6)$$

式中  $p$ ——流体的静压强,  $\text{Pa}$ ;

$A$ ——作用面的面积,  $\text{m}^2$ ;

$P$ ——垂直作用于流体表面  $A$  上的压力,  $\text{N}$ 。

在化工生产中操作压强的高低相差悬殊。有的工艺过程的压强很高,如生产高压聚乙烯时反应器中的绝对压强为  $15 \times 10^7 \text{ Pa}$ ;有的工艺过程却在负压(真空)条件下操作,如蒸发  $\text{NaNO}_3$  水溶液时,冷凝器中的绝对压强约为  $15 \times 10^3 \text{ Pa}$ 。为了各行各业使用方便,除采用统一的法定计量单位制中规定的压强单位  $\text{Pa}$  外,还采用历史上沿用的  $\text{atm}$ (大气压)、 $\text{kgf}/\text{cm}^2$ (千克力/厘米<sup>2</sup>)、 $\text{mmHg}$ (毫米汞柱)、 $\text{mH}_2\text{O}$ (米水柱)、 $\text{bar}$ (巴)等压强单位,它们间的关系为:

$$1 \text{ atm} = 1.033 \text{ kgf}/\text{cm}^2 = 760 \text{ mmHg} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O} = 1.0133 \text{ bar} = 1.0133 \times 10^5 \text{ Pa}$$

工程上为了使用和换算方便,常将  $1 \text{ kgf}/\text{cm}^2$  近似地作为 1 个工程大气压,以  $\text{at}$  表示,于是:

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kgf}/\text{cm}^2 = 735.6 \text{ mmHg} = 10 \text{ mH}_2\text{O} = 0.9807 \text{ bar} = 0.9807 \times 10^5 \text{ Pa}$$



流体的压强用测压仪表测量,当被测流体的压强大于外界大气压强时,所用的仪表称为压强表,俗称压力表。压强表上的读数称为表压强,它不是流体的真正压强,因为校正压强表零点时,是以外界大气压强作为零点,所以被测流体的实际压强(又称绝对压强)等于外界大气压强与表压强之和,即:

$$\text{绝对压强(实际压强)} = \text{当地外界大气压强} + \text{表压强(表上读数)}$$

当被测流体的实际压强小于外界大气压强时,所用的测压仪表称为真空表,真空表上的读数称为真空度,它也不是流体的真正压强。同压强表一样,校正真空表时也是以外界大气压强作为零点,真空表测出的数值代表实际压强低于外界大气压强的数值,即:

$$\text{绝对压强(实际压强)} = \text{当地外界大气压强} - \text{真空度(表上读数)}$$

大气压强和绝对压强、表压强(或真空度)间的关系可以用图 1-1 表示。

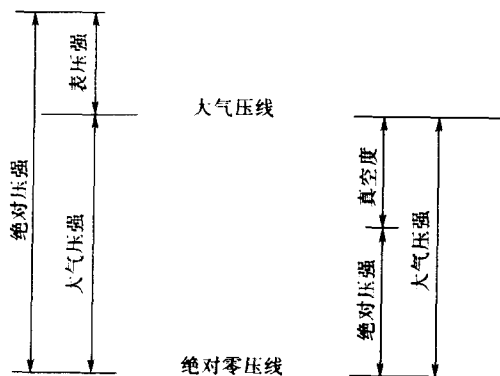


图 1-1 大气压强和绝对压强、表压强(或真空度)之间的关系

外界大气压强随温度、空气中的湿度和所在地区的海拔高度而改变。如北京地区大气压强为  $1.0133 \times 10^5$  Pa, 兰州地区约为  $0.853 \times 10^5$  Pa, 西藏地区海拔 4 500 m, 大气压强约为  $0.6 \times 10^5$  Pa。本书如不特别指明, 大气压强的数值都是指北京地区( $1.0133 \times 10^5$  Pa)而言的。

为了避免绝对压强、表压强、真空度三者间相互混淆, 规定在以后的讨论中对表压强和真空度均加以标注, 如  $2 \times 10^3$  Pa(表压)、 $4 \times 10^3$  Pa(真空度)等。

[例 1-3] 用多效蒸发设备蒸发  $\text{NaNO}_3$  水溶液, 规定未效的绝对压强为  $0.15 \times 10^5$  Pa, 问在北京地区和兰州地区操作时真空表上读数各为若干(Pa)?

解: 北京地区大气压强为  $1.0133 \times 10^5$  Pa, 故在该地区操作时, 真空表上读数即真空度为:

$$1.0133 \times 10^5 - 0.15 \times 10^5 = 0.8633 \times 10^5 \text{ Pa(真空度)}$$

兰州地区大气压强为  $0.853 \times 10^5$  Pa, 故在该地区操作时, 真空表上读数即真空度为:

$$0.853 \times 10^5 - 0.15 \times 10^5 = 0.703 \times 10^5 \text{ Pa(真空度)}$$

### 1.1.3 流体平衡时的规律——流体静力学基本方程式

本节只介绍流体在重力和压力作用下的平衡。重力就是地心吸力, 可以看做是不变的, 起变化的是压力, 故研究流体平衡规律的实质是研究处于相对静状态下流体内部压力变化的规律。为了便于讨论, 先介绍静止液体内部压力变化的规律, 然后推广到气体。