



闽西职业技术学院  
MINXI VOCATIONAL & TECHNICAL COLLEGE

国家骨干高职院校项目建设成果  
——应用化工技术专业

邱 飙 ○ 主编

# 化工单元操作

UAGONG DANYUAN CAOZUO



厦门大学出版社 国家一级出版社  
XIAMEN UNIVERSITY PRESS 全国百佳图书出版单位



闽西职业技术学院

MINXI VOCATIONAL & TECHNICAL COLLEGE

国家骨干高职院校项目建设成果

——应用化工技术专业

# 化工单元操作

主 编◎邱 飙



厦门大学出版社

XIAMEN UNIVERSITY PRESS

国家一级出版社

全国百佳图书出版单位

### 图书在版编目(CIP)数据

化工单元操作/邱飙主编. —厦门:厦门大学出版社,2016.5

(闽西职业技术学院国家骨干高职院校项目建设成果.应用化工技术专业)

ISBN 978-7-5615-5626-9

I. ①化… II. ①邱… III. ①化工单元操作-高等职业教育-教材 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 160629 号

---

**出版人** 蒋东明  
**责任编辑** 睦蔚  
**装帧设计** 李嘉彬  
**责任印制** 许克华

---

**出版发行** 厦门大学出版社  
**社址** 厦门市软件园二期望海路 39 号  
**邮政编码** 361008  
**总编办** 0592-2182177 0592-2181253(传真)  
**营销中心** 0592-2184458 0592-2181365  
**网址** <http://www.xmupress.com>  
**邮箱** [xmupress@126.com](mailto:xmupress@126.com)  
**印刷** 厦门市万美兴印刷设计有限公司

---

**开本** 787mm×1092mm 1/16  
**印张** 13.5  
**插页** 2  
**字数** 330 千字  
**版次** 2016 年 5 月第 1 版  
**印次** 2016 年 5 月第 1 次印刷  
**定价** 35.00 元

---

本书如有印装质量问题请直接寄承印厂调换



厦门大学出版社  
微信二维码



厦门大学出版社  
微博二维码

# 总 序

国务院《关于加快发展现代职业教育的决定》指出,现代职业教育的显著特征是深化产教融合、校企合作、工学结合,推动专业设置与产业需求对接、课程内容与职业标准对接、教学过程与生产过程对接、毕业证书与职业资格证书对接、职业教育与终身学习对接,提高人才培养质量。因此,校企合作是职业教育办学的基本思想。

产教融合、校企合作的关键是课程改革。课程改革要突出专业课程的职业定向性,以职业岗位能力作为配置课程的基础,使学生获得的知识、技能满足职业岗位(群)的需求。至2014年6月,我院各专业完成了“基于工作过程系统化”课程体系的重构,并完成了54门优质核心课程的设计开发与教材编写。学院以校企合作理事会为平台,充分发挥专业建设指导委员会的作用,主动邀请行业、企业的“能工巧匠”参与学院专业规划、专业教学、实践指导,并共同参与实训教材的编写。教材是实现产教融合、校企合作的纽带,是教和学的主要载体,是教师进行教学、搞好教书育人工作的具体依据,是学生获得系统知识、发展智力、提高思想品德、促进人生进步的重要工具。根据认知过程的普遍规律和教学过程中学生的认知特点,学生系统掌握知识一般是从对教材的感知开始的,感知越丰富,观念越清晰,形成概念和理解知识就越容易;而且教材使学生在学习过程中获得的知识更加系统化、规范化,有助于学生自身素质的提高。

专业建设离不开教材,一流的教材是专业建设的基础,它为课程教学提供与人才培养目标相一致的知识与实践能力平台,为教师依据教学实践要求,灵活运用教材内容,提高教学效果,完成人才培养要求提供便利。由于有了好的教材,专业建设水平也不断提高,因此在福建省教育评估研究中心汇总公布的福建省高等职业院校专业建设质量评价结果中,我院有26个专业全省排名进入前十名,其中有15个专业进入前五名。麦可思公司2013年度《社会需求与培养质量年度报告》显示,我院2012届毕业生愿意推荐母校的比例为68%,比全国骨干院校2012届平均水平65%高了3个百分点;毕业生对母校的满意度为94%,比全国骨干院校2012届平均水平90%高了4个百分点,人才培养质量大大提升。



闽西职业技术学院院长、教授

2015年5月

# 前 言

本书可作为化工类及相关专业(包括化工、环保、石油、生物工程、制药、材料、冶金等专业)的教材,也可供有关专业的技术人员参考。

本书重点介绍化工单元操作的基本原理、计算方法和典型设备。为了适应闽西革命老区经济发展,培养化工、材料工业高端技能型人才,闽西职业技术学院化工系专业教师与企业合作编写了本书,在编写的过程中力争做到系统完整,深入浅出,注重理论联系实际,突出工程观点和研究方法,同时反映新技术。

福建紫金铜业有限公司、福建龙麟水泥有限公司、福建春驰水泥集团有限公司、龙岩市华龙水泥有限公司以及龙岩卓越新能源发展有限公司参与编写并在编写中提出了宝贵意见。由于时间仓促和水平所限,错误和不当之处在所难免,望加批评指正,并向和提供资料的有关单位和参编的同志致以衷心感谢。

作 者

2016年5月

“闽西职业技术学院国家骨干高职院校项目建设成果”编委会

主任：来永宝

副主任：吴新业 吕建林

成员（按姓名拼音字母顺序排列）：

陈建才 董东明 郭 舜 李志文 林茂才

檀小舒 童晓滨 吴国章 谢 源 张源峰

## 目 录

绪 论	1
-----	---

## 第一部分 动量传递理论

第一章 流体流动及输送	7
第一节 流体静力学基本方程	7
第二节 流体流动的基本方程	14
第三节 流体在管内的流动现象及阻力的计算	21
第四节 管路计算	33
第五节 非牛顿型流体	38
第二章 气液输送机械	47
第一节 液体输送设备	47
第二节 气体输送、压缩设备和真空技术	67
第三节 固体流态化及气力输送	78

## 第二部分 热量传递理论

第三章 传 热	83
第一节 传热学基础	83
第二节 热传导	85
第三节 热对流	89
第四节 热辐射	105
第五节 传热设备	112
第四章 蒸 发	124
第一节 蒸发设备	125
第二节 单效蒸发	130
第三节 多效蒸发	136
第五章 干 燥	142
第一节 概 述	142
第二节 湿空气的性质	144
第三节 干燥器的物料与热量衡算	151
第四节 干燥时间与速度	155
第五节 干燥器	162

## 附 录

附录一	常用物理量的单位与量纲·····	176
附录二	某些气体的重要物理性质·····	176
附录三	某些液体的重要物理性质·····	177
附录四	干空气的物理性质(101.3 kPa) ·····	178
附录五	水及蒸气的物理性质·····	179
附录六	黏度·····	183
附录七	热导率·····	186
附录八	比热容·····	190
附录九	液体相变焓共线图·····	194
附录十	无机物水溶液的沸点(101.3 kPa) ·····	196
附录十一	管子规格·····	197
附录十二	离心泵规格(摘录)·····	197
附录十三	换热器系列(摘录)·····	201
参考文献	·····	208



# 绪 论

## 一、本课程的性质、地位和内容

本课程是化工类及相近专业的一门重要的专业基础课,在培养化学工程专业学生综合素质的过程中有其特殊的地位与作用。

在教学计划中,这门课程是承前启后、由理及工的桥梁。先行的“数学”“物理”“化学”等课程主要是了解自然界的普遍规律,属于自然科学的范畴,而“化工单元操作”则属于工程技术科学的范畴,是化工专业课程的基础。

本课程具有显著的工程性,它要解决的问题是多因素、多变量的综合性的工业实际问题,因此分析和处理问题的方法也就与理科课程有较大的不同,这可能会导致部分学生在学习初期有些不适应。

本课程的内容主要涉及化工单元操作的基本原理及其相关基础,它来自化工实践,又面向化工实践,是化工技术工作者的看家本领之所在,可以说“化工原理”四个字恰如其分地表达了这门课程的性质与重要性。

## 二、化工过程与单元操作

化工过程为化学工业的生产过程的简称,是在化学工业中,对原料进行大规模的加工处理,使其不仅在形态、物性上发生变化;而且在化学性质上也发生变化,成为合乎要求的过程,如高压聚乙烯的生产(图1)。显然,要完成一个化工过程并不是由单一步骤就可以实现,而是包括许多步骤,这些步骤可分为两大类。其中一类以进行化学反应为主,通常是在反应器中进行;另一类以发生形态、物性变化为主,如乙醇生产和石油加工中都要进行蒸馏操作,陶瓷、尿素、染料、塑料、纸张等的生产中都有干燥操作,而糖、食盐的生产过程中都包含流体输送、蒸发、结晶、离心分离、干燥等操作,像这一类以发生形态、物性变化为主的化工过程中的各种步骤,称为单元操作(unit operations)。

单元操作有下列特点:(1)它们都是物理性操作,即只改变物料的状态或其物理性质,并不改变其化学性质;(2)它们都是在化工生产过程中共有的操作,但不同的化工过程中所包含的单元操作数目、名称和排列顺序各异;(3)某单元操作作用于不同的化工过程,其基本原理并无不同,进行该操作的设备往往也是通用的。当然,具体运用时也要结合各化工过程的特点来考虑,例如原料与产品的物理、化学性质,生产规模的大小等。

单元操作按其内在的理论基础归并为如下几类:(1)以动量传递理论(Momentum Transfer Theory)(流体力学)为基础,包括流体流动与输送、沉降、过滤、离心分离、搅拌、固体流态化等;(2)以热量传递理论(Heat Transfer Theory)为基础,包括加热、冷却、冷凝、蒸发、结晶、冷冻浓缩等;(3)以质量传递理论(Mass Transfer Theory)为基础,包括蒸馏、吸

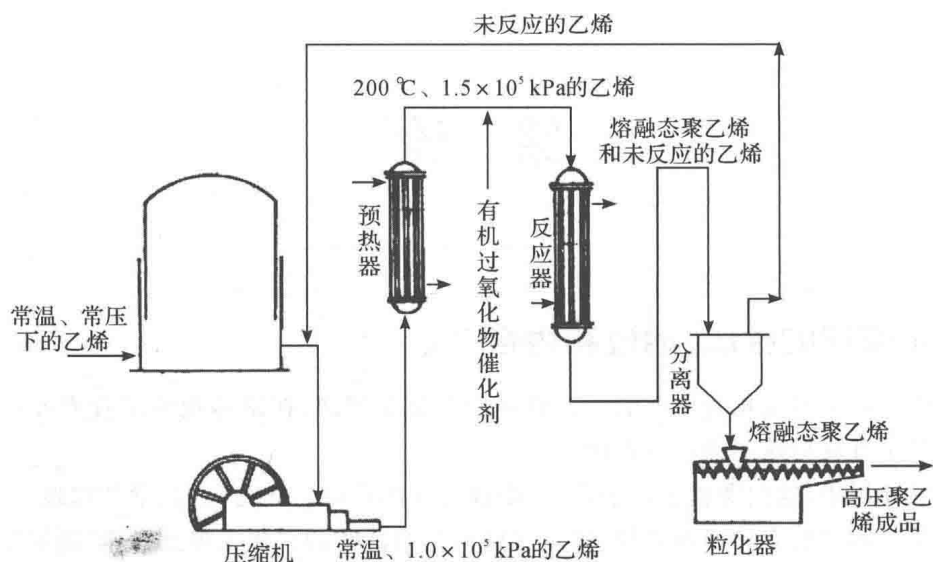


图 1 高压聚乙烯的生产

收、吸附、萃取、干燥、离子交换、膜分离等；(4)以热力过程为基础，包括压缩、冷冻等；(5)以机械过程为基础，包括固体物料的粉碎、分级等。

随着化学工业的发展，单元操作也不断发展。目前化工生产中常用的单元操作如表 1 所示。

表 1 化工生产中常用的单元操作

传递基础	单元操作名称	目的
流体流动 (动量传递)	流体输送	以一定流量将流体从一处送到另一处
	沉降	从气体或液体中分离悬浮的固体颗粒、液滴或气泡
	过滤	从气体或液体中分离悬浮的固体颗粒
	搅拌	使物料混合均匀或使过程加速
	流态化	用流体使固体颗粒悬浮并使其具有流体状态的特性
热量传递	换热	使物料升温、降温或改变相态
	蒸发	使溶液中的溶剂受热气化而与不挥发的溶质分离，从而达到溶液浓缩的目的
质量传递	吸收	用液体吸收剂分离气体混合物
	蒸馏	利用均相液体混合物中各组挥发度不同而使液体混合物分离
	萃取	用液体萃取剂分离均相液体混合物
	浸取	用液体浸渍固体物料，将其中的可溶组分分离出来
	吸附	用固体吸附剂分离气体或液体混合物
	离子交换 膜分离	用离子交换剂从溶液中提取或除去某些离子 用固体膜或液体膜分离气体、液体混合物
热、质传递	干燥	加热固体使其所含液体气化而除去
	增(减)湿	调节气体中的水汽含量
	结晶	使溶液中的溶质变成晶体析出

### 三、单位制及其换算

#### (一) 基本单位制

表 2 列出了目前通用的三种不同单位制。

表 2 三种基本单位制对照

单位制	物理量						
	长度	质量	时间	温度	物质的量	电流强度	发光强度
国际制(SI)	米(m)	千克(kg)	秒(s)	开[尔文] (K)	摩[尔] (mol)	安[培] (A)	坎[德拉] (cd)
工程制	米(m)	千克力·秒 <sup>2</sup> /米 kgf·s <sup>2</sup> /m	秒(s)或 [小]时(h)	度(°C)	—	—	—
物理制(cgs)	厘米(cm)	克(g)	秒(s)	度(°C)	—	—	—

注：两个辅助量：平面角(弧度, rad)、立体角(球面度, sr)。

#### (二) 单位换算

通过对质量、重量、力三者的分析,建立了工程制与国际制转换的桥梁:  $1 \text{ kgf} = 9.81 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 = 9.81 \text{ N}$ 。此外,对热、功、能量三者的分析,也可建立如下关系:

$$1 \text{ kcal} = 427 \text{ kgf} \cdot \text{m} = 4.187 \text{ kJ}$$

表 3 给出了化学工业中若干常用物理量的单位。

表 3 化学工业中若干常用物理量单位

物理量	cgs 单位	SI 单位	工程单位
长度	cm(厘米)	m(米)	m
质量	g(克)	kg(千克)	kgf·s <sup>2</sup> /m
力	$\text{g} \cdot \text{cm/s}^2 = \text{dyn}$ (达因)	$\text{kg} \cdot \text{m/s}^2 = \text{N}$ (牛)	kgf(千克力)
时间	s(秒)	s	s
速度	cm/s	m/s	m/s
加速度	cm/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>
能量、功	$\text{dyn} \cdot \text{cm} = \text{erg}$ (尔格)	$\text{N} \cdot \text{m} = \text{J}$ (焦)	kgf·m
功率	erg/s	$\text{J/s} = \text{W}$ (瓦)	kgf·m/s
压力	$\text{dyn/cm}^2 = 10^{-6} \text{ bar}$ (巴)	$\text{N/m}^2 = \text{Pa}$ (帕)	kgf/m <sup>2</sup>
密度	g/cm <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kgf·s <sup>2</sup> /m <sup>4</sup>
黏度	$\text{dyn} \cdot \text{s/cm}^2 = \text{P}$ (泊)	$\text{N} \cdot \text{s/m}^2 = \text{Pa} \cdot \text{s}$	kgf·s/m <sup>2</sup>
表面张力	dyn/cm	N/m	kgf/m
扩散系数	cm <sup>2</sup> /s	m <sup>2</sup> /s	m <sup>2</sup> /s

续表

物理量	cgs 单位	SI 单位	工程单位
温度	℃	K(开)	℃
热	cal(卡)	J	kcal(千卡)
热容、熵	cal/(g·℃)	J/(kg·K)	kcal/(kgf·℃)
焓、潜热	cal/g	J/kg	kcal/kgf
导热系数	cal/(cm·s·℃)	W/(m·K)	kcal/(m·s·℃)

## 四、化工原理的含义及其计算基础

### (一) 含义

化工原理是一门运用物料衡算、能量衡算、平衡关系、过程速率等概念来研究与化学工业生产有关的单元操作的规律及其所用设备的基本理论的学科。即化工原理是研究化工单元操作的基本原理、典型设备的结构和工艺尺寸的计算与选型、单元过程的操作因素分析及其调节原理,以及过程的强化途径与如何寻找故障的缘由等。

### (二) 计算基础

#### 1. 物料衡算

(1) 依据:质量守恒定律。

(2) 关系式:  $\sum F(\text{输入}) = \sum D(\text{输出}) + A(\text{积存})$ 。对稳定过程而言,  $A(\text{积存}) = 0$ , 即  $\sum F(\text{输入}) = \sum D(\text{输出})$ ; 对非稳定过程而言,  $A(\text{积存}) \neq 0$ , 若  $\sum F(\text{输入}) = 0$ , 则  $\sum D(\text{输出}) = -\text{积存}(A) = \text{消耗}$ , 此时考虑物料的变化应从微积分角度出发, 应用高等数学等方面的知识加以解决, 如例 1 所示。

**例 1** 一车间体积为  $30 \text{ m} \times 10 \text{ m} \times 8 \text{ m}$ , 车间内产一种有毒气体, 按安全标准规定它在空气中体积分数不得超过 0.002。一旦它的含量超过 0.002 时就自动通风, 通风量为  $120 \text{ m}^3/\text{min}$ 。问通风 20 min 后, 有害气体的含量为多少? 假定车间内的空气始终混合均匀, 在通风这段时间内新产生的有害气体可以忽略不计。

**解:** 设通风 20 min 后, 有害气体的含量为  $x$  (摩尔分率)。取整个车间为系统, 取时间微变量  $dt$  (min) 为衡算基准, 以有害气体为衡算对象, 列物料衡算, 其中:

$\sum F = 0, \sum D = 120 dt \cdot x, A = (30 \times 10 \times 8) \times dx$ , 即

$$120x \cdot dt + 2400dx = 0, dt = \frac{-2400}{120} \times \frac{dx}{x}$$

两边积分(选定积分区间:  $t = 0 \text{ min}$  时,  $x = 0.002$ ;  $t = 20 \text{ min}$  时,  $x = x$ ), 即有:

$$\int_0^{20} dt = \int_{0.002}^x \frac{-2400}{120} \times \frac{dx}{x}$$

最终可求得  $x = 0.00074$ , 即为有害气体的含量。

#### 2. 能量衡算

(1) 依据: 能量守恒定律。

(2)关系式:  $\sum H_F(\text{输入}) = \sum H_P(\text{输出}) + q(\text{积累})$ 。

**例 2** 一罐内盛有 20 t 的油, 温度为 20 °C。用外加热法进行加热, 如图 2 所示。油的循环量为 8 t/h, 循环的油在换热器中用水蒸气加热, 其在换热器出口温度  $T_3$  恒为 100 °C。罐内的油均匀混合。问罐内的油从  $T_1 = 20$  °C 加热到  $T_2 = 80$  °C 需要多少时间? 设罐与外界绝热。

**解:** 由于油罐内的油均匀混合, 从油罐内排出的油温与油罐内的油温相同, 设其在某一时间为  $T$  °C。以油罐为系统进行热量衡算, 以  $dt$  为时间基准, 以 0 °C 为温度基准, 如图 2 油的外循环加热过程, 则在  $dt$  时间内进出系统及系统内积累的热量分别为: 输入  $\sum H_F = WC_p T_3 dt$ , 输出  $\sum H_P = WC_p T dt$ , 积累  $q = GC_p dT$  (其中  $C_p$  为油的比热), 则  $WC_p T_3 dt = WC_p T dt + GC_p dT$ , 即

$$dt = \frac{G}{W} \cdot \frac{dT}{T_3 - T}$$

选取积分区间:  $t = 0$  时,  $T = T_1 = 20$  °C;  $t = t$  时,  $T = T_2 = 80$  °C, 则有:

$$\int_0^t dt = \frac{20 \times 10^3}{8 \times 10^3} \int_{20}^{80} \frac{dT}{100 - T}$$

最终可求出  $t = 3.47$  (h), 即为所需加热时间。

### 3. 平衡关系

任何传递过程都有一个极限。当传递过程达到极限时, 其过程进行的推动力为零, 此时净的传递速率为 0, 即为平衡。过程的平衡问题说明过程进行的方向和所能达到的极限。

### 4. 过程速率

指单位时间内所能传递的能量或物质质量, 如传热速率 J/s(W)、传质速率 (kmol/h) 等。过程的速率和过程所处的状态与平衡状态的距离及其他很多因素有关。过程所处的状态与平衡状态之间的距离通常称为过程的推动力。例如两物体间的传热过程, 其过程的推动力就是两物体的温度差。过程速率 = 过程推动力 / 过程阻力, 即过程的速率与推动力成正比, 与过程阻力成反比。显然过程的阻力是各种因素对过程速率影响的总的体现。

平衡与速率是分析单元操作过程的两个基本方面。化工过程的平衡是化工热力学研究的问题, 所以化工热力学是化工原理的一个重要基础。过程的速率是指过程进行的快慢。当过程不处于平衡态时, 则此过程必将以一定的速率进行。例如传热过程, 当两物体温度不同时, 即温度不平衡, 就会有净热量从高温物体向低温物体传递, 直到两物体的温度相等为止, 此时过程达到平衡, 两物体间也就没有净的热量传递。

物料衡算、能量衡算、平衡关系和过程速率将反复出现在本书中, 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。抓住这条主线, 会给学习本课程带来很大的帮助。

## 五、基本研究方法

在单元操作的发展过程中形成了两种基本研究方法, 即实验研究法和数学模型法。

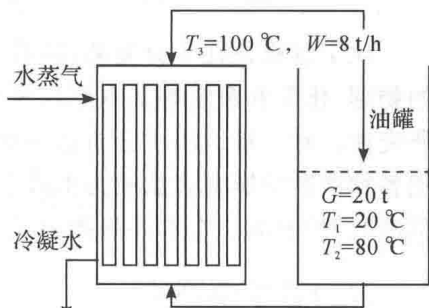


图 2 油的外循环加热过程

### (一) 实验研究法

化工过程往往十分复杂,涉及的影响因素很多,各种因素的影响有时不能用迄今已掌握的物理、化学和数学等基本原理定量地分析和预测,而必须通过实验来解决,即所谓的实验研究法。它一般以因次分析法为指导,依靠实验建立过程参数之间的相互关系,而且通常是把各种参数的影响表示成为由若干个有关参数组成的、具有一定物理意义的无因次数群(也称准数)的影响。在本课程的学习过程中,将经常见到以无因次数群表示的关系式。

### (二) 数学模型法

数学模型法首先要对化工实际问题的机理做深入分析,并在抓住过程本质的前提下做出某些合理的简化,得出能基本反映过程机理的物理模型,然后结合传递过程、物理化学的基本原理,得到描述此过程的数学模型,再用适当的数学方法求解。通常,数学模型法所得结果包括反映过程特性的模型参数,它必须通过实验才能确定,因而它是一种半经验、半理论的方法。

随着计算机及计算技术的飞速发展,复杂数学模型的求解已成为可能,所以数学模型方法将逐步成为单元操作中的主要研究方法。

在学习本课程时,应仔细体会不同单元操作中为什么有些采用实验研究法,有些采用数学模型法,有些则同时采用实验研究法和数学模型法。掌握这些方法论,将有助于提高分析问题与解决问题的能力。

# 第一部分 动量传递理论

## 第一章 流体流动及输送

在化学工业的生产过程中,许多原料、半成品、成品或辅助材料是以流体的状态存在的。所谓流体,是指由无数质点(并非指流体内部的分子,而是指大量流体分子所构成的微团,只是其大小与管路或容器相比“微不足道”)构成的、彼此之间无缝隙地能完全充满所占空间的连续介质,包括液体和气体。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。水和水蒸气就是常见的典型流体。如食品加工所遇到的液体有稀薄的,如牛奶、果汁、盐水等;也有稠厚的,如糖浆、蜂蜜、脂肪、果酱等。就气体而言,空气、氮气、二氧化碳、乙烯等气体也用于加工过程。所谓流体流动,是指流体内部无数质点运动的总和,产生流体流动的原因在于流体受到剪力作用而产生连续不断的变形。

流体流动基本原理及流动规律在化工生产中主要有以下几种应用:

(1) 流体输送。把流体从一个地方送到所需的另一个地方时,经常遇到流体通过管路系统的压力变化、输送所需功率、流量的测量、管路的直径和输送设备的选择等。

(2) 固体流态化。使颗粒具有流动特性,改善传热和传质过程。

(3) 气力输送。利用空气的动力作用,使物料在空气动力作用下被悬浮而输送。

### 第一节 流体静力学基本方程

流体静力学是研究流体在外力作用下达到静止平衡的规律,也就是指流体在重力作用下内部压力(点压力)变化的规律。在工程上,这些规律可用于流体在设备或管道内压强变化的测量、液体在贮罐内液位的测量及设备液封的设计等。

#### 一、与流体的流动有关的物理量

##### (一) 密度、相对密度、重度及比容

(1) 密度:单位体积流体具有的质量。 $\rho = \frac{dm}{dV}$ ,式中 $\rho$ 为流体的密度( $\text{kg}/\text{m}^3$ ), $m$ 为流体的质量( $\text{kg}$ ), $V$ 为流体的体积( $\text{m}^3$ )。对于气体,按理想气体状态方程处理,有 $\rho = \frac{pM}{RT}$ ,其中 $R = 8.3142 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

液体是不可压缩流体,其密度基本上不随压力而变,但随温度稍有改变;气体是可压缩

的流体,其密度随压力和温度而变化,因此必须标明气体的状态,如空气在标准状态下(1.01×10<sup>5</sup> Pa,0 °C)的密度为 1.293 kg/m<sup>3</sup>。流体的密度一般可在有关手册查得。

(2)相对密度:物质的密度与 4 °C 时水的密度之比,又称比重,无因次, $d = \frac{\rho}{\rho_w(4\text{ }^\circ\text{C})}$ 。

(3)重度  $\gamma$ :单位体积流体具有的重力。同一单位制下,密度与重度的关系为  $\gamma = \rho g$ 。

(4)比容  $v$ :流体密度的倒数,即单位质量流体所具有的体积(m<sup>3</sup>/kg)。

(5)混合物的平均密度  $\rho_m$

①对于液体混合物

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{wA}}{\rho_A} + \frac{x_{wB}}{\rho_B} + \dots + \frac{x_{wn}}{\rho_n}$$

②对于气体混合物

$$\rho_m = \rho_A x_{VA} + \rho_B x_{VB} + \dots + \rho_n x_{Vn} \text{ 或 } \rho_m = \frac{pM_m}{RT} \text{ (其中 } M_m = M_A y_A + M_B y_B + \dots + M_n y_n \text{)}$$

式中, $\rho_A, \rho_B, \dots, \rho_n$ ——液体混合物中各纯组分的密度;

$x_{wA}, x_{wB}, \dots, x_{wn}$ ——液体混合物中各纯组分的质量分率;

$x_{VA}, x_{VB}, \dots, x_{Vn}$ ——气体混合物中各组分的体积分率;

$M_A, M_B, \dots, M_n$ ——气体混合物中各组分的分子量;

$y_A, y_B, \dots, y_n$ ——气体混合物中各组分的摩尔分率。

## (二)压强

垂直作用在单位面积流体上的力为流体的压强,习惯上称为压力。压力的表示方法有绝对压力、相对压力及真空度等,是根据度量压力时基本起点不同而命名的。

绝对压强(力)以绝对零压作起点,是流体的真实压强(力);表压是测压表上所显示的读数,是表内压强(力)比表外大气压高出的值;真空度是真空表测出的比表外大气压低的数值。三者的关系为:

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

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

真空度是表压的负值,又称为负压。当压强为绝对压强时,可以不注明,但当压强用表压和真空度表示时,必须注明,以免混淆,如 140 kN/m<sup>2</sup> (表压)、360 mmHg(真空度)。其关系可用图 1-1 表示。压力的单位较多,注意单位间换算,如:

$$1 \text{ atm} = 760 \text{ mmHg} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O} = 10\,330 \text{ mmH}_2\text{O} = 10\,330 \text{ kgf/m}^2 = 101\,300 \text{ N/m}^2 = 1.033 \text{ kgf/cm}^2$$

$$1 \text{ atm(工程大气压)} = 1 \text{ kgf/cm}^2 = 735.6 \text{ mmHg} = 10 \text{ mH}_2\text{O} = 0.9807 \text{ bar} = 9.807 \times 10^4 \text{ Pa}$$

**[思考题]**在兰州操作的苯乙烯真空蒸馏塔顶的真空表读数为 80×10<sup>3</sup> Pa。在天津操作时,若要

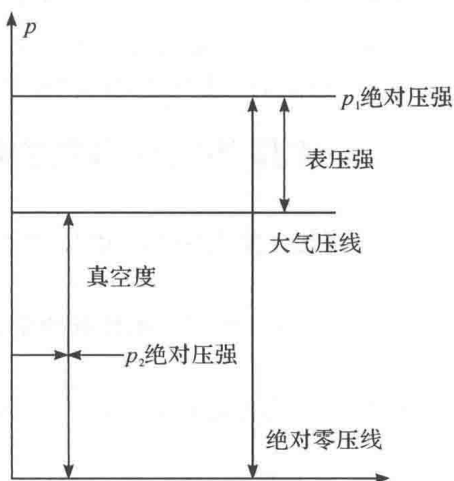


图 1-1 绝对压强、表压和真空度的关系



求塔内维持相同的绝对压强,真空表的读数应为多少?(兰州地区的平均大气压强为  $85.3 \times 10^3 \text{ Pa}$ ,天津地区的平均大气压强为  $101.33 \times 10^3 \text{ Pa}$ )

### (三)黏度

流体的黏性是流体的一个主要的物理性质。它是当流体受外力作用流动,其质点内部产生相对运动时,本身内部产生阻力的性质。流体在管内流动时,管内任一截面上各点的速度不同,中心处的速度最大,愈靠近管壁速度愈小,在管壁处流体质点总黏附于管壁上,其速度为零。因此,流体在圆管内流动时,可视为被分割成无数极薄的圆筒层,一层套一层,称为流体层。各层以不同的速度向前运动,如图 1-2 所示。由于各层速度不同,层与层之间发生了相对运动,速度较大的流体层对与之相邻的速度较小的流体层起着带动作用,而后者又对前者起着拖拽作用。流体层间这种相互作用阻止了流体向前运动。这种相互作用称为流体的内摩擦,是黏性的表现,又称黏性摩擦。流体要克服这种内摩擦力做功,必须损失能量以维持运动,这也是流体运动时产生能量损失的原因。

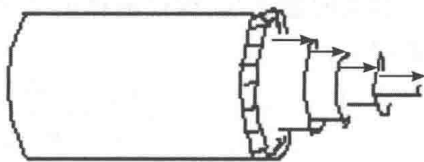


图 1-2 流体在圆管内分层流动示意图

影响内摩擦大小的因素较多,其中属于物理性质方面的是流体的黏性。衡量流体黏性大小的物理量称为黏度。牛顿(Newton)在 1686 年提出了确定流动运动时在内部产生摩擦力的内摩擦定律,又称为牛顿黏性定律,并为后继科学家证实。

如图 1-3,在相距  $h$  的两块很大的平板间充满黏稠液体。令下板保持不动,并以一定的力向右推动上板,此力即为通过平板而成为在界面处作用于液体的剪力。两板间的液体于是分成无数薄层而运动,附在上板底面的一薄层液体的速度等于板移动速度  $u$ ,以下各层速度逐渐减小,附在下板表面的一薄层液体的速度为零。实验证明,对于一般液体,剪应力  $\tau$  与上下两板速度随距离的变化率  $\frac{\Delta u}{\Delta y}$  成正比,可写成:

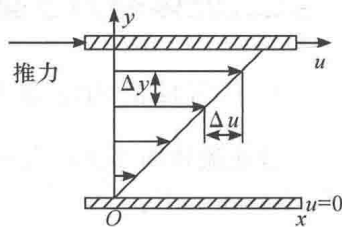


图 1-3 平板间液体速度变化

下两板速度随距离的变化率  $\frac{\Delta u}{\Delta y}$  成正比,可写成:

$$\tau = \mu \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (1-1a)$$

式(1-1a)中比例系数  $\mu$  的大小依流体而不同,流体的黏性愈强, $\mu$  值便愈大,故  $\mu$  称为黏度。流体在圆管内流动时, $u$  与  $y$  的关系不成直线,如图 1-4 所示。可对流动流体内的一点,将上述变化率改写成微分形式  $du/dy$ ,称为速度梯度,于是表示黏性的通用公式应写成:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

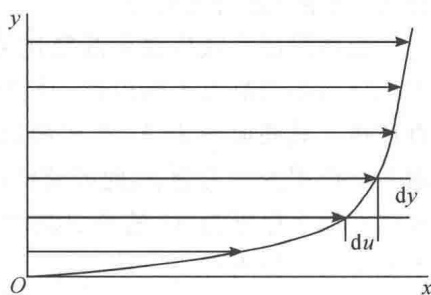


图 1-4 圆管内流体速度分布