

3

化 学 工 程 基 础

叶炳林主编

华南师范学院化学系

1980年

化学工程基础

叶炳林主编

华南师范学院化学系

前 言

本教材是为了适应我院教学需要于1979年夏由叶炳林同志编成，主要供1976年入学的学员使用。

根据目前学生实际情况，并结合教育发展的要求，内容主要包括三大部分，即传递过程、化学反应工程和化学工艺。

本教材以传递过程列为第一篇，内容包括流体输送、传热、传质（吸收和蒸馏等），这是要求学生掌握的基本的内容。它取材于本院1974年编《化工基础》讲义，稍作修改补充。第二篇是化学反应工程，内容有概论、均相反应器、理想反应器性能比较、非理想流动、非均相反应器等五章，全部是1979年新编而成。

化学反应工程是最近二三十年逐渐形成和发展起来的一门新兴的学科分支，它与化学科学联系比较紧密而有广阔的发展前途，本教材中作了比较系统而概略地介绍，内容稍嫌过多，教学中可酌情处理。

第三篇典型化学工艺部分，内容主要是合成氨等典型工艺。编写这部分教材的目的在于使化学工程理论更好地联系实际，并且也为学生将来从事中学化学教学工作打下一定的基础。化学工艺生产的方法、流程和设备是随着科学技术的发展而不断地变革和发展的，本书这次重印时虽作了全面的修订，但由于时间匆忙，搜集资料不全面，可以想见，在反映工业新成就方面，必然是不够完善的。

这次重印，其大的体系作了某些调整，在本教研组同志们的协助下，亦对全书进行了校订和校对，特别是本组曾灼先同志具体负责修改了第十三章。但是，由于时间仓促，并限于编者的政治业务水平，遗漏和错误之处在所难免，热切地希望读者多提批评指正意见。

编 者

1980年3月于石牌

目 录

第一章 绪论	(1)
(一)、化学工程基础的内容及任务	(1)
(二)、物料衡算与能量衡算	(2)
(三)、物理量因次和单位	(3)
第一篇 传递过程	(6)
第二章 流体的流动与输送	(6)
(一) 第一节 概述	(6)
(二) 第二节 流体力学基础	(6)
(三) 第三节 泵的性能类型和选择	(26)
(四) 第四节 气体的压缩和输送	(35)
第三章 传热过程	(40)
(一) 第一节 化工生产中的传热过程	(40)
(二) 第二节 传热过程基本原理	(41)
(三) 第三节 传热设备	(57)
第四章 蒸发	(67)
(一) 第一节 蒸发操作与设备	(67)
(二) 第二节 单效蒸发的计算	(72)
(三) 第三节 多效蒸发	(74)
(四) 第四节 蒸发过程的附属设备——冷凝及真空设备	(80)
第五章 气体的吸收	(84)
(一) 第一节 化工生产中的吸收操作	(84)
(二) 第二节 吸收原理	(88)
(三) 第三节 设计吸收设备的途径	(97)
第六章 蒸馏	(102)
(一) 第一节 化工生产中的蒸馏操作	(102)
(二) 第二节 精馏原理及其主要设备	(105)
(三) 第三节 精馏塔操作分析	(110)
第二篇 化学反应工程	(127)
第七章 化学反应工程概论	(127)
一、化学反应工程的内容和任务	(127)
二、化学反应的分类和反应速度表示方法	(127)

三、化学反应器类型及其选择	(130)
第八章 均相反应器	(136)
第一节 反应器设计基础	(136)
第二节 间歇反应器	(138)
第三节 连续式反应器	(141)
第四节 多段槽式反应器	(145)
第九章 理想反应器性能比较	(148)
第一节 简单反应	(148)
第二节 复杂反应	(153)
第三节 变温过程	(161)
第十章 非理想流动	(169)
第一节 理想反应器的偏离	(169)
第二节 停留时间分布及其测定	(171)
第三节 典型反应器停留时间分布	(177)
第四节 非理想流动反应器的设计	(180)
第十一章 非均相反应器	(186)
第一节 非均相系的设计特点	(186)
第二节 气固催化反应动力学	(190)
第三节 气固催化反应器	(198)
第三篇 典型化学工艺	(218)
第十二章 硫酸生产工艺	(218)
第一节 概述	(218)
第二节 二氧化硫炉气的制造	(220)
第三节 接触法制造硫酸	(227)
第四节 三废治理和综合利用	(241)
第十三章 合成氨工艺	(244)
第一节 概述	(244)
第二节 合成氨原料气的制造	(246)
第三节 原料气的净化	(257)
第四节 氨的合成	(272)
第十四章 石油炼制	(284)
第一节 概述	(284)
第二节 原油的蒸馏	(287)
第三节 石油的二次加工	(291)
第四节 芳烃抽提和气态烃分离	(298)
第五节 石油产品的精制	(303)

第一章 绪论

一、化学工程基础的内容及任务

1. 化学工程基础的研究对象及内容

化学工程是一门技术基础课，它主要是研究化工生产中的一般性规律问题。

大家知道，化学工业是一个多行业多品种的经济部门，每一化工产品的生产，都有其不同的工艺过程及其特有的操作条件。例如硫酸工业，由固态的硫铁矿作为原料，经过矿石破碎、过筛焙烧、精制转化、吸收等许多工序，最后变成液态产品硫酸；又如合成氨工业，以空气、水和煤（也有以石油和空气）作原料，经过造气、精制、合成等等许多过程而得气态、液态或固态产品（氨、氨水或尿素），所用的原料不同，工艺流程不同，得到的产品也各异，每一化工生产都有其特点。但是“一切事物本来是互相联系的和具有内部规律的”。如果将许多化工生产过程加以分析整理，从中可以发现，有些过程（或程序）只是使物料发生物理变化。例如为了使原料适合化学反应的要求，需将其破碎、精选，为使反应产物合于需要而进行分离提纯等；另有一些过程则是使物料发生化学变化。例如焙烧、氧化、化合、分解等。故其一般化学生产原则流程可图示如下：



图1.1 典型化学生产过程

使物料发生物理变化的那些处理过程属于单元操作的范围，有关化学处理的过程，便是化学反应工程的范围。化学工程就是研究化工生产中的单元操作和化工反应工程的，因而是研究化工生产的普遍规律的。

化工生产中的单元操作，主要有流体输送，非均相体系分离，加热、冷却、蒸发、干燥、结晶、吸收、蒸馏等等，但按其原理不过是传动过程（流体流动），传热过程和传质过程。化学反应工程则是综合应用化学、热力学、动力学、流体力学、传热、传质以及经济方面的知识以设计进行各类反应所必须的最适宜化学反应器为目标。所以化学工程的基本内容，简单地说就是“三传一反”。另外，为了使理论联系实际，应用基础理论去分析问题和解决问题，最后我们增编了典型工艺分析一章，这正是认识从实践始，经过实践得到了理论的认识，还须再回到实践中去，所以本教材的内容就是按照这一马克思主义认识论的过程来安排的。

2. 化学工程基础的教学任务

从化学工程基础的研究对象和基本内容可以知道，它是一门理论与实际紧密联系的课

程，是综合应用物理、化学和工程经济方面的基本原理，研究和解决实际生产问题的科学。

“自然科学是人们争取自由的一种武装。”师范学院设置化学工程基础，其教学任务是：

(1) 扩大化学专业知识，学会运用所学化学专业理论解决实际生产问题的方法，使理论知识很好地联系实际；

(2) 了解和掌握化学工程的基本原理和典型化工设备，初步建立工艺生产观念，为今后工作中更有效地联系化工生产实际打下基础。

二、物料衡算与能量衡算

物料衡算与能量衡算是一切化工设计的基础，同时通过物料衡算与能量衡算来反映化工生产中物料和能量的变化情况。现分别讨论如下：

(1) 物料衡算

物料衡算就是根据物质不灭定律对过程中的物料从数量上进行清算。物料衡算一般分为两种情况，一种是在已有的装置上，对一个车间、一个工段、一个设备或几个设备，利用实际测定的数据（有时也要一些理论计算数据），算出另外一些不能直接测定的物料量，由此对这个装置的生产情况作出分析，找出问题，为改进生产提供意见。另一种是对新车间、新工段、新设备作出设计，即利用资料中已有的生产实际数据（往往也要一些理论计算数据），在已知生产任务（即产品数量）下算出需要原料量，付产品和三废生成量，或在已知原料量的情况下算出产品，付产品和三废的产量。另外，物料衡算还是能量衡算及设备计算的基准。一般都在物料衡算之后，才能计算所需要的热量（或冷量）及设备大小。

进行物料衡算的基本公式就是：

$$\text{进料量} = \text{出料量} + \text{积累量}$$

此式可用于全体物料，在没有化学反应时，也可用于任一组分。在没有化学反应时，可用重量单位，也可用摩尔或公斤分子单位，而在有化学反应时，一般要用重量单位来进行衡算。

在进行物料衡算时，必须注意两个问题，即计算的范围和计算基准。

计算范围就是指从哪里开始算起（进料点），又从哪里结束（作为出料）。例如根据需要可以确定计算范围为一个设备，或者几个设备等等，为了使计算范围明确，可以把几个有关设备画出示意图，并用方框注出计算范围，如果计算范围明确，当然不画图也可以。

其次是计算基准问题。其中之一就是时间单位，例如要计算产量或原料消耗量，必须指出是一年之内、一日之内或一小时之内的产量或消耗量，实际计算中往往用小时作单位。另外也可以原料的任何方便的数量单位作基准，例如，100公斤分子或100公斤原料作基准，进行产物或中间物的计算，此时就不存在时间因素了。

(2) 能量衡算

跟物料衡算相似，能量衡算（主要表现为热量衡算）是以能量守恒定律为基础对过程中的能量从数量上进行清算。同样能量衡算也可分为两种情况。一种是在已有的装置上，对某个设备，利用实际测定（有时也要作一些相应的计算）的数据，算出另外一些不能或很难直接测定的能量或热量，由此对这个设备作能量上的分析，找出该设备的热利用或热损失情况，

另一种是在设计中利用各进出口已知量及已知温度求一般物料的未知量和未知温度，例如求换热设备的水蒸汽用量或冷却水用量。

进行能量衡算的基本公式为：

进入系统的热 = 出系统的热 + 积累的热

物料衡算是热量衡算的基础，而这两种衡算又是设备计算的基础。

计算时也要先确定计算范围，即设备或系统能量的进出口，其次也要确定计算基准。在热量衡算中可按100公斤分子或100公斤原料计算，也可在物料衡算后，按设备每小时进料量来进行计算，还必须指出的是对物料进行热量衡算时，还跟物料的基准态（相态、温度）有关。基准态可任意选定，但对每一物料而言，其进口与出口的基准态必须相同。

三、物理量因次和单位制

参与生产过程的各种物料都具有各种性质，如密度、粘度、导热系数等；同时它们还处在一定的运动状态故要用不同的参变数如温度、压强、速度等来表示其过程特征。这些表示物料物理性质与运动状态的参数称为物理量。

任何一个物理量都由两部分组成：一是单位，说明是个什么量和用什么标准来测量；另一部分是数值，说明多少个单位构成这个量。例如两点之间的距离是8米，那就说明这两点间的距离这个物理量已测量过，测量时所用的长度标准是〔米〕，并以此作为单位长度，而这两点间的距离刚好是8个1〔米〕的长度。如果一个一定的距离用这个标准长度〔米〕去测量觉得太大或太小，还可以把这个标准减小或加大；使测量的结果达到所要求的准确度。一个物理量只有在数值和单位都给全了才算明确。

物理量可以分成两类，一类是将少数物理量作为基本量，另一类是用这些基本量来表示的物理量叫做导出量。选定那些量作为基本量，完全是根据方便人为地确定的，不同的单位制可有不同的基本量，更可用不同的单位。例如在工程上常以力、长度、温度和时间作为基本量，而质量是导出量。

任何一个基本量可用一特定的字母表示，这个特定的字母就是这个量的因次，如L是长度的因次， τ 是时间的因次，F是力的因次，T是温度的因次，因次并不表明数值和单位。

导出量的因次就是由基本量的因次构成的，例如速度根据物理定义，不管其大小和所用的单位总是用时间除长度，故速度的因次就是 L/τ 或 $L\tau^{-1}$ ，加速度的因次就是 L/τ^2 或 $L\tau^{-2}$ 。

一旦基本量确定后，任何一个导出量的因次都可根据相互物理关系或者定义而求得，正如上述速度和加速度的因次一样，任何一个量Q的因次可写成如下的通式：

$$Q = L^{\alpha} F^{\beta} T^{\gamma}$$

上式称为因次式，其中指数 α 、 β 、 γ 、可为正、负整数、分数或者零。

为了度量物理量的大小，人们创造了多种单位制度，我国目前通用的是米制（或称公制），其中又分为绝对单位制和工程单位制（重力单位制）。

在绝对单位制中又分为物理单位制与绝对实用单位制。

物理单位制的基本量是质量、长度、时间和温度等，各基本量的单位分别为克、厘米、秒和度(°C)，所以这种单位制又叫厘米·克·秒制(简称CGS制)。在物理单位制中力是导出量，其单位由牛顿第二定律： $F = ma$ 导出，故其单位为〔克·厘米/秒²〕，简称为达因。

绝对实用单位制的基本量和物理单位制是相同的，但单位不完全相同。其长度单位为〔米〕，质量单位为〔公斤〕，时间单位是〔秒〕。力的单位是基本量导出的为〔公斤·米/秒²〕称为〔牛顿〕。

在工程单位中，除了以米、秒分别作为长度和时间的单位外，力也作为基本量，其单位为〔公斤〕，而质量则作为导出量，其单位为〔公斤(力)·秒²/米〕。

由此可见，在两种不同的单位制中，〔公斤〕这个单位，在绝对实用单位制中表示质量的单位，在工程单位制中表示力的单位。为了区别起见，当〔公斤〕作为质量单位时，则用〔公斤(质)〕表示。

工程单位制中力的单位〔公斤〕，它相当于1〔公斤(质)〕质量的物体，在重力加速度为9.8066〔米/秒²〕处所受的重力，所以重量与质量间的联系可根据牛顿第二定律 $F = ma$ 导出：

$$\begin{aligned} 1 \text{ [公斤]} &= 1 \text{ [公斤(质)]} \times 9.81 \text{ [米/秒}^2\text{]} = 9.81 \text{ [公斤(质)·米/秒}^2\text{]} \\ &= 9.81 \text{ [牛顿]} = 1000 \text{ [克(质)]} \times 9.81 \times 100 \text{ [厘米/秒}^2\text{]} \\ &= 981000 \text{ [克(质)·厘米/秒}^2\text{]} = 981000 \text{ [达因]} \end{aligned}$$

将上式简化，就可更清楚地看出在两种单位制中质量和重量之间的关系：

$$1 \text{ [公斤(力)]} = 1 \text{ [公斤(质)]} \times 9.81 \text{ [米/秒}^2\text{]}$$

$$\text{或} \quad 1 \text{ [公斤(质)]} = \frac{1}{9.81} \text{ [公斤(力)·秒}^2\text{/米]}$$

从上述关系式可以说明两点：

1) 在绝对单位制中质量为一公斤的物体，其产生的重力，用工程单位制中的单位表示时亦为一公斤，但是若用绝对单位制中的单位表示就不是一公斤了，亦即在同种单位制中1〔公斤(力)〕并不等于1〔公斤(质)〕；

2) 绝对单位制中的1〔公斤(质)〕等于工程单位制中的质量单位〔公斤(力)·秒²/米〕的 $\frac{1}{9.81}$ 倍。

另外还有一种国际单位制(简称SI)是一种新的计量制度，是国际计量局为了统一计量制度吸收米制的优点制定出的国际单位制。目前这种单位制度正在我国及其他国家被推广采用。

[注] 关于国际单位制有关问题请参阅《石油化工》1978年第4期。

各种单位制的因次和单位总结如下表。

一些物理量的单位与因次

物理量名称	公制			英制			SI制单位		
	绝对			工程单位制			名称	代号	因次式
	CGS制单位	MKS制单位	因次式	单位	因次式				
长度	[厘米]	[米]	L	[米]	L	[米]	m	L	
质量	[克]	[公斤]	M	[公斤·秒 ² /米]	FT^2L^{-1}	[千克]	kg	M	
力	[克·厘米/秒 ²]或[达因]	[公斤·米/秒 ²]或[牛顿]	MLT^{-2}	[公斤]	F	[牛顿]	N	MLT^{-2}	
时间	[秒]	[秒]	T	[秒]	T	[秒]	s	T	
速度	[厘米/秒]	[米/秒]	LT^{-1}	[米/秒]	LT^{-1}	[米/秒]	m/s	LT^{-1}	
加速度	[厘米/秒 ²]	[米/秒 ²]	LT^{-2}	[米/秒 ²]	LT^{-2}	[米/秒 ²]	m/s^2	LT^{-2}	
功	[克·厘米 ² /秒 ²]或[尔格]	[公斤·米 ² /秒 ²]或[焦耳]	L^2MT^{-2}	[公斤·米]	LF	[焦耳]	J	L^2MT^{-2}	
功率	[克·厘米 ² /秒 ³]或[尔格/秒]	[公斤·米 ² /秒 ³]或[瓦特]	L^2MT^{-3}	[公斤·米/秒]	LET^{-1}	[瓦特]	W	L^2MT^{-3}	
压强	[克/厘米·秒 ²]或[巴]	[公斤·米·秒 ²]	$L^{-1}MT^{-2}$	[公斤/米]	$L^{-2}F$	[帕斯卡]	Pa	$L^{-1}MT^{-2}$	
密度	[克/厘米 ³]	[公斤/米 ³]	$L^{-3}M$	[公斤·秒 ² /米 ⁴]	FT^2L^{-4}	[千克/米 ³]	kg/m^3	$M L^{-3}$	
粘度	[克/厘米·秒]或[泊]	[公斤·米·秒]	$ML^{-1}T^{-1}$	[公斤·秒/米 ²]	FTL^{-2}	[帕斯卡·秒]	$Pa \cdot s$	$ML^{-1}T^{-1}$	
表面张力	[达因/厘米]	[牛顿/米]	MT^{-2}	[公斤/米]	FL^{-1}	[牛顿/米]	N/m	MT^{-2}	
扩散系数	[厘米 ² /秒]	[米 ² /秒]	L^2T^{-1}	[米 ² /秒]	L^2T^{-1}	[米 ² /秒]	m^2/s	L^2T^{-1}	
温度	[°C]	[°C]	θ	[°C]	θ	[开尔文]	K	θ	
热	[卡]	[千卡]	L^2MT^{-2}	[千卡]	LF	[焦耳]	J	L^2MT^{-2}	
比热	[卡/克·°C]	[千卡/公斤·°C]	$L^2T^{-2}\theta^{-1}$	[千卡/公斤·°C]	$L\theta^{-1}$	[焦耳/千克·开尔文]	J/kg·K	$L^2T^{-2}\theta^{-1}$	
导热系数	[卡/厘米·秒·°C]	[千卡/米·秒·°C]	$LMT^{-2}\theta^{-1}$	[千卡/米·秒·°C]	$FT^{-1}\theta^{-1}$	[瓦特/米·开尔文]	W/m·K	$MT^{-2}\theta^{-1}$	

第一篇 传递过程

在化工操作中的传递过程。包括动量传递、热量传递和质量传递等所谓三传过程。在这一篇主要讨论流体的流动与输送，传热、蒸发、吸收和蒸馏等有关操作及其基本原理。

第二章 流体的流动与输送

第一节 概述

化学工业是一个多行业多品种的经济部门。每一化工产品的生产，都有其不同的工艺过程及其特有的操作条件。但是，在第一章已经提到，各种化工过程都是由单元操作和化学处理过程（属化学反应工程）组合而成，所以，为了深刻地理解和设计各种化学工艺过程，需要对各种单元操作和化学反应工程的基本原理和主要设备，分别加以讨论。

但是，作为流体的流动和输送对于化工生产过程来讲，却是十分重要的，而且其基本原理也是研究其他一些单元操作的基础。因此，我们在研究化工生产的一般共同规律之前，必需首先对这个问题进行讨论。

所谓流体就是气态、液态之类物质的统称。流体的特征在于其质点几乎有无限的流动性，而且几乎可以毫无阻力地将其形状分裂或改变。例如合成氨生产中作为原料、半成品或成品的空气、水、半水煤气、氨等皆为流体。

在本章我们将要研究流体行为的有关基本原理，并且要进而学会解决以下问题：

- 1) 流体输送管路中管径的选择；
- 2) 估算输送流体所需的动力；
- 3) 流速、流量及压强的测量；
- 4) 输送设备的工作原理和性能。

以下将从流体的性质、流体在相对静止和运动时的基本规律开始讨论，然后再介绍一些典型的流体输送机械。

第二节 流体力学基础

一、流体的特性

流体包括液体和气体，它们在输送和流动时所表现的特性是有一些微小的区别的。例如液体的压缩性很小，实际上可以认为是不可压缩的；气体则极易压缩，同时放出相应的热量；气体可以充满任意大小的空间，而液体则不能。除此之外，气体和液体之间没有什么多

大的区别了。因此，流体在运动过程中只要运动速度不很大，压强变化也不很大时，气体体积的变化是可以忽略不计的。故所以气体和液体的运动有着共同的规律。下面着重说明一些与流体特性有关的基本概念。

1. 密度和重度

密度 单位体积流体的质量叫做密度，以符号 (ρ) 表示。若以 (m) 表示流体的质量，(V) 表示流体的体积，则

$$\rho = \frac{m}{V} \text{ [公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米}^4 \text{]} \quad (2.1)$$

式中 m 等于流体的重量 G 除以重力加速度 g 。

$$\text{即: } m = \frac{G}{g} \text{ [公斤} \cdot \text{秒}^2 / \text{米]} \quad (2.2)$$

重度 每单位体积所含物体的重量称为重度，以符号 (γ) 表示。

$$\gamma = \frac{G}{V} \text{ [公斤/米}^3 \text{]} \quad (2.3)$$

从物理学中知道，重量等于质量乘以重力加速度 g 。即 $G = mg$ ；故将此式代入 (2.1) 式并与 (2.3) 式相结合，可得重度与密度的关系式：

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{G}{gV} = \frac{\gamma}{g} \text{ 或 } \gamma = \rho g \quad (2.4)$$

重度 γ 在工程中应用较为广泛。

工业上有时以物质的重度与纯水在 4°C 的重度相比，以表示各物质的轻重，此比率称为比重，常用 d 表示。

2. 压强

流体每单位面积上所受之力称为压力强度，简称压强，以 p 表示。若用 P 表示作用于流体表面积 F 上的力，则压强为：

$$p = \frac{P}{F} \text{ [公斤/米}^2 \text{]}$$

压强单位除了用 [公斤/米²] 表示外，还可用大气压，液柱高度 (毫米汞柱和米水柱) 等表示。

在物理学中一大气压是按 760 mm 汞柱计算，在工业上为了计算方便，一大气压按 10 米水柱计算，前者称为物理大气压，后者称为工程大气压。

$$\begin{aligned} 1 \text{ [物理大气压]} &= 760 \text{ [毫米汞柱]} = 1.033 \text{ [公斤/厘米}^2 \text{]} \\ &= 1033 \text{ [毫米水柱]} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ [工程大气压]} &= 735.6 \text{ [毫米汞柱]} = 1 \text{ [公斤/厘米}^2 \text{]} \\ &= 10000 \text{ [毫米水柱]} \end{aligned}$$

工业上用以测量系统内流体压力强度的仪表，一般称为压强计 (压力计)，其读数是表示系统内绝对压强与当时大气压之差。在实际生产设备中，其压强可能大于或者小于大气压，在工程技术上，压强大于 1 个大气压则以“表压”表示，小于 1 个大气压，则以“真空

度”表示。其绝对压强、表压与真空度之间的关系如下：

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

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

例如我系化工厂蒸汽锅炉发生的蒸汽其表压为 5 [公斤/厘米²]，则此蒸汽实际的压强即绝对压强为

$$\text{表压} = \text{绝对压强} - 1 \text{ [公斤/厘米}^2\text{]}$$

$$5 \text{ [公斤/厘米}^2\text{]} = \text{绝对压强} - 1 \text{ [公斤/厘米}^2\text{]}$$

$$\text{即：绝对压强} = 6 \text{ [公斤/厘米}^2\text{]}$$

又如化工厂水流喷射泵用以抽真空时，其真空度可达 660 [毫米汞柱]，这表明系统中绝对压强为

$$735.6 - 660 = 75.6 \text{ [毫米汞柱]}$$

3. 粘度

流体流动时，其中会出现对运动产生阻力的内摩擦力。流体这种对运动产生阻力的性质称为粘度，常以符号 (μ) 表示，其单位为 [泊] 或 [厘泊]，工程上用 [公斤/秒·米²] 表示。

流体的粘度受温度的影响。当温度升高时，液体的粘度下降，而气体粘度则上升。粘度的变化与压强关系不大。

二、流体静力学的基本原理及其应用

无论什么事物的运动都采取两种状态，相对地静止的状态和显著地变动的状态。实际存在的流体，有时处在相对静止或平衡状态，有时处在流动状态。处在相对静止状态的规律称为流体静力学，处在流动状态所表现的规律便属于流体动力学。下面首先讨论流体静力学的基本内容。

静止的流体其间没有内部摩擦力，这种情况与理想的液体接近，以下就以液体为例来说明其规律。

静止的液体中任何一点，均受到周围液体质点对它的作用力，不过所受到的力的大小与方向无关，亦即不论从上下左右作用于该点的力，在数值上是相等的。

例如，在静止液体中任取一垂直液柱，如图 2.1 所示。其上下的面积为 F ，它们与基准水平面的距离分别为 h_0 和 h 。因为液体呈静止状态，因此液体内部各点的力都达到平衡（否则质点会因受力不均而运动）。

在该液柱所受向下的力有重力 (G) 和顶面的向下压力 (P_0)，即：

$$G = \gamma F (h_0 - h)$$

$$P_0 = p_0 F$$

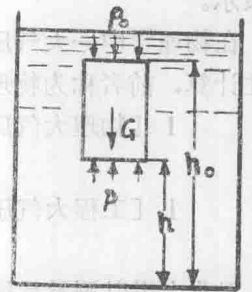


图 2.1 流体静力平衡图

液柱所受的向上的力，仅为作用于底面的压力（ P ），即

$$P = pF$$

达到平衡时，向下的作用力与向上的作用力相等（当然其前后左右的力亦分别相等），故得下列平衡式：

$$pF = p_0F + \gamma F (h_0 - h)$$

式中 γ 为液体重度，将上式整理后可写为：

$$h + \frac{p}{\gamma} = h_0 + \frac{p_0}{\gamma} \quad (2.5)$$

式（2.5）是流体静力学基本方程式，此式经过整理还可用下列诸式表示：

$$\frac{p - p_0}{\gamma} = h_0 - h \quad (2.6)$$

$$p = p_0 + \gamma (h_0 - h) \quad (2.7)$$

从流体静力学的基本方程式可以看出，液体内任何一点所受静压力的大小仅与液体位置的高低有关，即在同一水平上各点所受的压力相同，不同水平面上质点所受的力，则视质点距液面的距离而异。液体质点位置的高低，即表示该液体质点所具备的位能的大小，在流体力学中称之为位压头（见后）。同样液体的静压强便称为静压头，故从式（2.5）可以表明：静止液体中任一点的位压头与静压头之和为一常数。同时从式（2.7）还可看出，当液体内任一点 h_0 上的压力（单位面积上所受之压力称为压强，以后将以压强代替压力进行讨论）有任何数量上的改变时，则液体内其它各点上的压强 p 也有相同数量的改变。换句话说，如果向器内液体施以压力，则此压力能以同样的大小传递到液体内各质点（此处的“压力”意即重力）。

流体静力学的基本原理，就是用上述流体静力学基本方程式来表达，它是工业上液柱压强计、液压机、连通器的液面平衡等的工作原理的基础。

1. 液压计

图2.2所示为一种最简单的液压计。它是由一支两端开口的u形玻璃管制成，管内可以根据所测压强差的大小，选择适当的液体（如水、四氯化碳、水银等），u形管的两端可分别与两个需要测量压强差的测压点联接（亦可一端任其通大气），从u形管两边液面差（稳定时的读数），就可算出两端的压强差（或表压）。

设u形管中盛有重度为 γ 的液体，当两侧所受压强 p_1 与 p_2 不相等时，两侧液面将有不相同的高度。设 p_1 大于 p_2 ，而两边的液面差为 Δh ，以相同高度的两点为基准，根据静力学原理，则应为：

$$h_1 + \frac{p_1}{\gamma} = h_2 + \frac{p_2}{\gamma}$$

u形管两侧压强差应为

$$p_1 - p_2 = \gamma (h_2 - h_1) = \gamma \Delta h$$

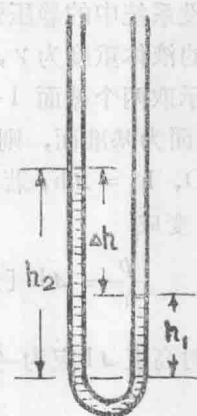


图2.2 液压计示意图

从上式可以看出，压强差仅与u形管两侧液面差有关，而与u形管大小及h无关。实验室所用的水银气压计，就是根据同样的道理设计出来的。

2. 烟囱

图2·3表示高度为h [米] 的烟囱，烟囱顶上的大气压以 p_c 表示，炉内压力用 p_f 表示，炉外的大气压用 p_a 表示，烟囱内烟道气的平均重度为 γ_c [公斤/米³] 烟囱外冷空气的重度为 γ_a [公斤/米³]，由于烟道气的温度高于大气温度，所以 $\gamma_a > \gamma_c$ 。若暂不考虑烟道气在烟囱里的流动，而把这个问题当作一个流体静力学的问题来处理，则：

$$p_f - p_c = h\gamma_c$$

$$p_a - p_c = h\gamma_a$$

$$p_a - p_f = h(\gamma_a - \gamma_c)$$

(由上二式相减而来)

因 $\gamma_a > \gamma_c$ ，所以 $p_a - p_f > 0$ ，即 $p_a > p_f$ ，故炉外的空气便会往炉内流， p_a 与 p_f 之差和烟囱的高度成正比，所以烟囱愈高，空气向炉里流动的推动力就愈大。有些锅炉就是根据这个道理进行自然通风燃烧的。

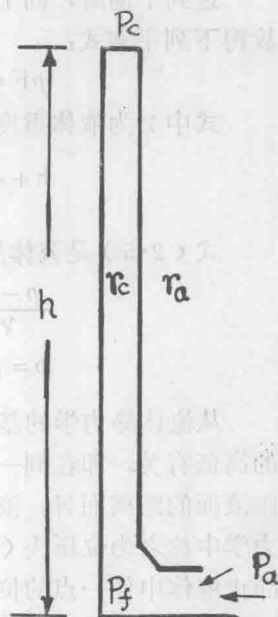


图2·3 烟囱

3. 气柜与液封

在氮肥厂应用的气柜以及气柜的液封，也是根据流体静力学原理设计的。

如图2·4所示，(a)表示气柜的液封，(b)表示从气流中排除出的液体经液封管排出。

液封的目的是为了防止系统中的气体外流，为此我们要计算确定液封管应插入液体中的深度。

如图设系统中的静压强为 p (表压)，液封所用的液体重度为 γ ，由式(2.5)并象图中所示取两个截面1-1和2-2，以1-1截面为基准面，则：

$h_1 = 0$ ， $h_2 = \Delta h$ ，若以表压为基准，式(2.5)变成

$$\frac{p}{\gamma} = \Delta h \text{ [米水柱]}$$

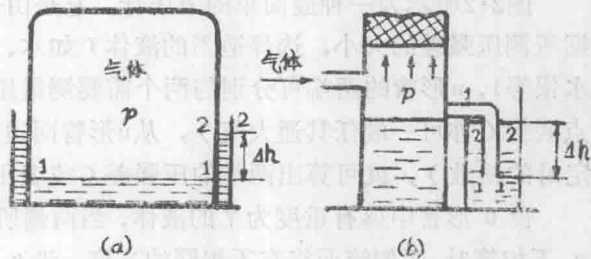


图2·4 液封示意

所以，液封高度 Δh 应为 $\frac{p}{\gamma}$ ，即液封管插入液体中的深度须大于 Δh 方能保证系统中的气体不致外流。

三、流体力学基本原理

我们所面对的整个自然界是各种物体相互联系的总体，它们是互相联系同时又互相作用着，并且正是这种相互作用构成了运动。在化工厂中所实际见到的流体不仅有呈静止状态的，而更多的是经过流体输送机械沿着密闭管道从一处送向另一处呈现运动状态的流体。因此，我们必须从各个方面去研究，才有可能了解其总体。前述是流体处于相对静止状态时的特性，下面就讨论流体在流动时的规律。

1. 流体流动速度与流动类型

流体流动的速度是流体质点单位时间内所流经的距离。然而在导管横截面的各点上，流体质点的速度是各不相同的。一般在导管中心处最大，愈靠近管壁则速度愈小，在紧靠管壁处，由于流体质点对管壁的粘附作用，其速度等于零（理由见后）。但在工程上所用的速度为平均速度。

单位时间内流过管路任一截面的流体体积，称为体积流量。简称为流量，若单位时间内流过管路任一截面的流体以重量来表示，则称为重量流量。它们彼此的关系可用下式来表示：

$$W = \frac{V}{F} \quad [\text{米/秒}] \quad (2.8)$$

$$V = W \cdot F \quad [\text{米}^3/\text{秒}] \quad (2.9)$$

$$G = F W \gamma \quad [\text{公斤/秒}] \quad (2.10)$$

式中 F ——导管的截面积 $[\text{米}^2]$ ；
 V ——每秒钟的体积流量， $[\text{米}^3/\text{秒}]$ ；
 W ——流速， $[\text{米/秒}]$ ；
 γ ——流体重度， $[\text{公斤/米}^3]$ ；
 G ——重量流量。

液体流量由于其重度在运动中没有什么变化，故采用体积流量表示，气体在流动时其重度经常发生变化，也就是总体积发生变化，此时采用重量流量较方便。

流体在导管中流动，根据其流速大小不同，有层流（或滞流）与湍流等类型。下面用雷诺实验来说明。

雷诺用图2.5的实验装置进行了实验。图中A为高位贮液桶，B为低位贮液桶，水经由与两桶相连的玻璃管从A流向B，其速度可用活门D控制之。在玻璃管进口处，置有一与墨水贮桶C相通的细管，以便注入墨水。当管内流速不大时，墨水在玻璃管中成一直线，墨水与液体不相混扰，彼此平行成直线流动。如若将管内流速增大，则当到达某一流速时，墨水与液体将混在一起，就不再保持直线状态了。



图2—5 雷诺实验

从以上的实验说明，当流速不大时，墨水流动呈直线，这是由于管内的各个质点相互沿管轴作平行而有规则的运动，我们将这种流动型态称为层流（或滞流）。当流速增大而墨水呈混乱状态，则是由于质点不按照同一方向移动，各质点的运动速度在大小和方向上都随时发生变化，因此使质点间彼此相互碰撞发生扰乱现象，这种流动型态称为湍流。

根据用不同的流体和不同的管径所获得的实验结果，证明支配流体流动型态的因素，除流体的流速外，还与管径 d ，流体的粘度 μ 和流体的密度 ρ 有关。

经研究结果，流体流动的类型为上述四因素所组成的复合数群 $\frac{dw\rho}{\mu}$ 所决定。此数群称为雷诺准数，以 Re 表示之。它们的因次互相抵销，故此数无因次。雷诺准数 Re 小于2100时流体流动呈滞流， Re 大于4000时是湍流， Re 在2100~4000之间是过渡阶段，可能是湍流也可能是滞流。

由于流动类型的不同，流体速度在导管中的分布情况也随之而异。滞流时，（如图2.6）管中心速度很大，渐近管壁其速度渐小以至于零。这是由于管壁对流体的摩擦阻力作用之故，总平均速度为管中心最大流速的 $\frac{1}{2}$ 。湍流时平均流速为管中心流速的0.8倍。

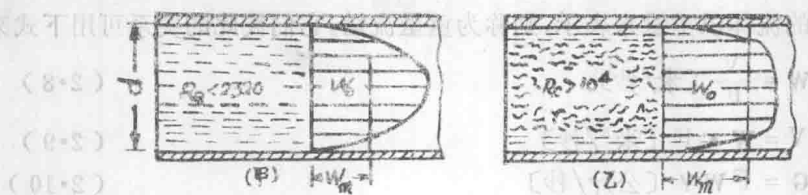


图2.6流体在导管中作滞流（甲）和湍流（乙）时的速度分布

w_0 = 最大速度 w_M = 平均速度

从图2.6可以看出，不论是滞流或湍流，近管壁的流速均较低，因此在管壁附近总是存在着一层呈滞流型态的边界层。只有增加流体平均流速，因而使湍流程度较大时，该层的厚度就薄一些，否则就厚一些。

滞流边界层的流体质点流速极慢且呈平行有规则的运动，因此它对传热和扩散过程有不利的影响。

上述速度分布情况，是流体流动已达稳定状态而言，即当流体在管中流动时，流体在任意点上的流速、压强等都不随时间而变化时的情况。

在化学工厂中，流体的流动情况，大多数为稳定流动。与此相反，有一种流动情况叫做不稳定流动，即通过任一断面处的流体流速、压强等物理性质随时发生变化。例如水从随时变动水位的贮槽中经小孔流出时，水的流速将随时根据槽内水位的变化而改变。

2. 流体流动连续性

“既然我们面前的物质是某种既有的东西，是某种既不能创造也不能消灭的东西”，那末当流体在密闭导管中作稳定流动且无流体的增减或漏失时，则每单位时间内，通过导管任一截面的流体重量均相同，此种现象称为流体流动的连续性。若导管有分支，其总流量必为