

高职高专系列教材

# 石油化工工艺基础

王焕梅 主编

中国石化出版社

[HTTP://WWW.SINOPEC.COM](http://www.sinopec.com)

高职高专系列教材

# 石油化工工艺基础

王焕梅 主编

中国石化出版社

## 内 容 提 要

本书主要介绍石油化工产品生产过程中原料的预处理及产品精制等物理过程的原理,以及化工单元操作的相关内容。本书共分为五章,包括:化工单元操作、石油化工原料、基础原料的生产、中间产品的生产、“最终”产品的生产。

本书适用于高职高专及中等职业技术学校相关专业的学生使用,也可供从事石油化工行业的管理人员、操作人员学习参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

石油化工工艺基础/王焕梅主编. —北京:中国石化出版社,2007

(高职高专系列教材)

ISBN 978 - 7 - 80229 - 390 - 8

I. 石… II. 王… III. 石油化工 - 工艺学 IV. TE65

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 109899 号

### 中国石化出版社出版发行

地址:北京市东城区安定门外大街 58 号

邮编:100011 电话:(010)84271850

读者服务部电话:(010)84289974

<http://www.sinopec-press.com>

E-mail:press@sinopec.com.cn

金圣才文化发展(北京)有限公司排版

北京宏伟双华印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经销

\*

787 × 1092 毫米 16 开本 10.5 印张 246 千字

2007 年 8 月第 1 版 2007 年 8 月第 1 次印刷

定价:20.00 元

# 前 言

为使非石化类专业的学生学习和了解石油化工工艺基础知识，或辅修专业的学生掌握较全面的石油化工生产方面知识以及从事石油化工行业管理的相关人员及辅助岗位的工人很快了解石化生产全貌，特别需要一本难度适中、内容丰富的石油化工工艺类教材，所以我们组织编写了《石油化工工艺基础》一书。

石油化学工业是化学工业的一个重要部门，它是以石油、天然气为原料，经过多次化学加工而生产各种有机化学品及合成材料的原材料工业。

石油化学工业大体上可分为原料加工、基础原料加工、中间产品加工、“最终”产品加工等几部分。同时为了让大家了解石油化工产品生产过程中原料的预处理及产品精制等物理过程的原理，还介绍化工单元操作的相关内容。本教材围绕这一思路，将全书分为五章。第一章单元操作，主要是介绍单元操作的相关原理和设备；第二章石油化工的原料加工，讲解天然气和石油的加工原理与方法；第三章基础原料加工，全面介绍七个基础原料的生产技术；第四章中间产品加工，选择五个典型中间产品讲解它们的生产过程；第五章“最终”产品加工，介绍高聚物的相关基础知识，主要介绍合成树脂、合成橡胶、合成纤维的生产原理及方法，并选择了四个产品分别具体讲解。每一个产品都要介绍性质与用途、生产原理、工艺条件选择、工艺流程、典型设备结构等相关内容。

本书绪论、第三章、第四章、第五章由王焕梅老师编写，第一章、第二章由张远欣老师执笔，全书由王焕梅老师统稿。在编写过程中还得到了高永利、袁科道、程惠明、王景芸等老师的大力支持和帮助，在此特表示谢意。

在编写过程中作者参考了大量的文献和资料，在此特向其作者表示感谢，所列参考文献若有遗漏之处，还请谅解。

由于时间仓促及编者水平有限，书中难免存在不少缺点和错误，希望使用本教材的师生及其他读者批评指正。

编 者  
2007年8月

# 目 录

绪 论 .....	( 1 )
一、石油化学工业 .....	( 1 )
二、石油化工产品 .....	( 1 )
三、全球石油化学工业的发展历程 .....	( 4 )
四、本门课程的内容及学习方法 .....	( 4 )
第一章 单元操作 .....	( 5 )
第一节 流体输送 .....	( 5 )
一、流体静力学 .....	( 5 )
二、流体在管内的流动 .....	( 6 )
三、流体输送机械 .....	( 13 )
第二节 传热 .....	( 19 )
一、概述 .....	( 19 )
二、热传导 .....	( 20 )
三、对流传热 .....	( 22 )
四、传热过程的计算 .....	( 23 )
第三节 传质及传质设备 .....	( 28 )
一、概述 .....	( 28 )
二、蒸馏 .....	( 29 )
三、气体吸收 .....	( 33 )
第二章 石油化工的原料加工 .....	( 38 )
第一节 天然气及其加工过程 .....	( 38 )
一、天然气脱酸性气体 .....	( 38 )
二、天然气脱水 .....	( 43 )
三、轻烃回收 .....	( 43 )
第二节 石油及其加工过程 .....	( 47 )
一、常减压蒸馏 .....	( 47 )
二、催化重整 .....	( 49 )
三、催化裂化(FCC) .....	( 51 )
四、加氢裂化 .....	( 54 )
五、延迟焦化 .....	( 57 )
第三章 基础原料的生产 .....	( 62 )
第一节 石油烃类的热裂解 .....	( 62 )
一、烃类裂解过程的化学反应 .....	( 63 )
二、裂解过程的影响因素 .....	( 65 )

三、烃类裂解的工艺流程 .....	( 68 )
第二节 裂解气的分离 .....	( 72 )
一、裂解气的组成及分离方法 .....	( 72 )
二、压缩与制冷 .....	( 74 )
三、气体净化 .....	( 77 )
四、裂解气深冷分离 .....	( 81 )
第三节 丁二烯的生产 .....	( 83 )
一、萃取精馏的基本原理 .....	( 83 )
二、萃取精馏操作时应注意的问题 .....	( 84 )
三、工艺流程 .....	( 85 )
第四节 石油芳烃的生产 .....	( 88 )
一、催化重整法 .....	( 88 )
二、裂解汽油加氢法 .....	( 95 )
第五节 合成气生产甲醇 .....	( 98 )
一、生产原料——合成气的制备 .....	( 98 )
二、合成气生产甲醇的原理 .....	( 98 )
三、生产甲醇的操作条件 .....	( 99 )
四、生产甲醇的工艺流程 .....	( 101 )
第四章 中间产品的生产 .....	( 104 )
第一节 乙烯氯化生产氯乙烯 .....	( 104 )
一、氯乙烯的性质和用途 .....	( 104 )
二、平衡氯化法生产氯乙烯 .....	( 105 )
第二节 丙烯氯化生产丙烯腈 .....	( 111 )
一、丙烯腈的性质和用途 .....	( 111 )
二、丙烯氨氧化法生产丙烯腈 .....	( 112 )
第三节 乙苯脱氢生产苯乙烯 .....	( 115 )
一、苯乙烯的性质和用途 .....	( 115 )
二、乙苯脱氢生产苯乙烯 .....	( 116 )
第四节 对二甲苯氯化生产对苯二甲酸 .....	( 119 )
一、对苯二甲酸的性质和用途 .....	( 119 )
二、对二甲苯高温氯化生产对苯二甲酸 .....	( 120 )
第五节 甲醇羰基合成生产乙酸 .....	( 124 )
一、乙酸的性质和用途 .....	( 124 )
二、甲醇羰基化法生产乙酸 .....	( 125 )
第五章 “最终”产品的生产 .....	( 128 )
第一节 概述 .....	( 128 )
一、基本概念 .....	( 128 )
二、高聚物的命名与分类 .....	( 129 )
三、聚合反应机理 .....	( 131 )

四、聚合方法 .....	(134)
五、工业生产过程 .....	(136)
第二节 合成树脂和塑料 .....	(137)
一、概述 .....	(137)
二、聚乙烯的生产 .....	(138)
三、聚氯乙烯的生产 .....	(143)
第三节 合成橡胶 .....	(146)
一、概述 .....	(146)
二、丁苯橡胶的生产 .....	(147)
第四节 合成纤维 .....	(150)
一、概述 .....	(150)
二、聚丙烯腈纤维的生产 .....	(152)
参考文献 .....	(157)

# 绪 论

## 一、石油化学工业

石油化学工业是化学工业的一个重要部门，它是以前石油、天然气为原料，经过多次化学加工而生产各种有机化学品及合成材料的原材料工业。

石油化学工业大体上可分为原料加工、基础原料加工、中间产品加工、“最终”产品加工等几部分，见图1。

原料加工包括天然气加工和原油加工。天然气加工包括天然气脱硫、脱二氧化碳及烷烃分离，分离所得  $C_2$  以上的烷烃可作为裂解制乙烯、丙烯的原料，其中  $C_4$  烷烃尚可作为脱氢制丁烯、丁二烯或异丁烯的原料，原油加工包括常减压蒸馏、催化重整、催化裂化、加氢裂化、焦化等加工手段。原料加工除生产燃料油和润滑油等炼油产品外，尚可提供大量石油化工原料，例如：石脑油、柴油、加氢裂化尾油等都是乙烯生产的良好原料，催化重整油则是芳烃生产的主要原料。

基础原料加工主要包括：合成气(进一步生产甲醇)、烯烃(乙烯、丙烯、丁二烯)、芳烃(苯、甲苯、二甲苯)等产品的加工过程，如由天然气可以生产合成气、石油炼制后的石油烃裂解可以得到烯烃和芳烃等，由这些基础原料出发可进一步加工生产各种石油化工产品。

中间产品加工由于产品不同，其加工过程各有千秋。由基础原料进一步加工生产的各种化学品，作为进一步加工的原料使用时，通常称为石油化学工业的中间产品。例如，醋酸乙烯、氯乙烯、丙烯腈、苯乙烯、对苯二甲酸等等。这些中间产品的生产技术基本不同，我们只能选择一些有代表性的产品向大家介绍加工过程。

“最终”产品加工主要涉及高聚物合成及成型等方面的知识，作为石油化学工业的“最终”产品是轻工、纺织、建材、机电等加工业的重要原料，主要包括合成树脂和塑料、合成橡胶、合成纤维、合成洗涤剂及其他化学品。

## 二、石油化工产品

石油化学工业的发展不仅从根本上改变了化学工业的原料结构，促进和推进了化学工业技术的以展，而且，所提供的大量新型合成材料在性能和生产成本上均越来越比天然材料显示出更大的优越性。石油化学工业的发展已使各种有机化学品及合成材料渗透到人民生活有关衣、食、住、行的各个方面，在各个领域越来越广泛地替代各种天然材料。

### 1. 人人喜爱的塑料制品

塑料是大家都很熟悉的东西，人们在日常生活中几乎离不开它。塑料杯子、塑料凉鞋、塑料水壶、塑料雨衣、塑料薄膜以及塑料灯头、开关、电话外壳等等，都是塑料制品。它具有价钱便宜、颜色漂亮、携带方便、轻巧耐用等优点。

塑料除了可用来做生活用品外，在工农业生产和国防工业方面还有极为广泛的用途。如果一辆汽车平均用 45kg 塑料，就可以代替 100kg 以上的金属材料；假如将塑料薄膜用于农业育秧，就可以保证苗床温度，促使早熟，达到增产效果。使用 1t 塑料薄膜育秧，可增产 10t 粮食。用于生产蔬菜时，可增加产量 1~3 倍。



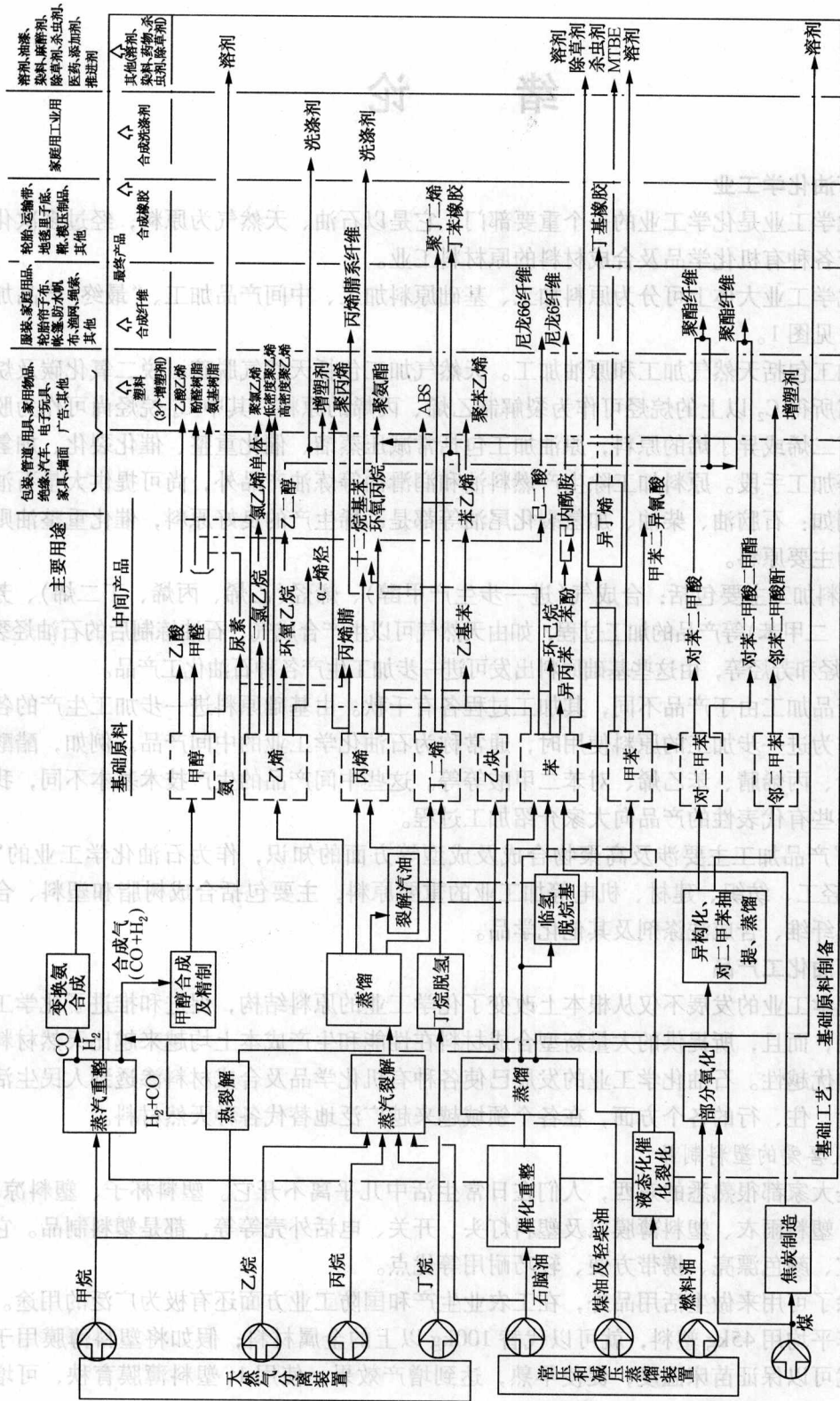


图1 石油化学工业的内部结构

## 2. 五彩缤纷的合成纤维

在日常生活中，人们常把许多长度要比其直径大很多倍，并且具有一定柔韧性的纤细物质，统统叫做纤维。在自然界中，诸如从植物生长出来的棉、麻；从动物身上产生出来的蚕丝、羊毛；从矿物中开采出来的石棉等，他们都是天然纤维。近年来，人们主要从石油化工中取得原料来合成这类高分子聚合物，然后再进行抽丝成纤维，这就叫合成纤维。

目前市场上合成纤维品种很多，从它们的性能、用途和工业水平等方面来看，主要有涤纶、锦纶、腈纶、丙纶、维纶、氯纶等六种。前三者产量几乎占合成纤维总产量的90%。

## 3. 工农业与国防工业的重要靠山——合成橡胶

人类为了制取合成橡胶，首先对橡胶树中流出的乳胶进行了研究，结果发现它的基本成分是异戊二烯，于是人们就开始合成这种成分。近几十年来，由于合成橡胶不受天时地理条件的限制，生产效率大大超过天然橡胶，而且合成橡胶的性能在耐油、耐磨、耐高温、耐低温、气密性等方面都较天然橡胶优越。所以，目前的产量已大大超过天然橡胶。

合成橡胶所需要的大量原料，如：乙烯、丙烯、丁烯和芳香烃，都可以来自石油化工。先从石油中获得生产合成橡胶的单体，然而通过聚合，也像塑料中的聚合物分子一样，连接成一条很长的“链条”。不过，它不是一条笔直的“链条”，而是弯弯曲曲的，既能屈能伸，又能作旋转运动的“链条”，这就使合成橡胶单体聚联成具有弹性的大分子固体。

合成橡胶品种繁多，习惯上根据合成橡胶的主要用途，大致分为通用合成橡胶和特种合成橡胶两大类。一般通用橡胶产量较大，主要用来生产各种轮胎、工业用品和生活用品及医疗卫生用品。特种橡胶专门用作在特殊条件下使用的橡胶制品。如：丁腈橡胶主要特点是耐油性好，广泛用于制造各种耐油胶管、油箱、密封垫片等。又如某些含氟橡胶不仅能耐高温，而且不受化学药剂的侵蚀，用这种橡胶制成的各种密封环在200℃腐蚀液中可以经受6万次反复变形，而能保持性能不变。

## 4. 农田、果园的营养品——化肥

土地需要不断补充营养，才能为人们不断地提供粮食、蔬菜、瓜果、棉花等农作物。土地的营养来自肥料。

由于自然界中各种天然的有机肥，已越来越满足不了实际农业生产的需求，所以，人们就逐步探索并发展了采取化学的办法来合成肥料，这种肥料就叫化学肥料，简称为化肥。

化肥中以氮肥在农业生产中用量最大，目前世界上各国的化肥生产中，氮肥的生产均占首位。氨是氮肥的基本原料。因为氨与硫酸作用，就生成硫酸铵；氨与硝酸作用，就可制得硝酸铵；氨与碳酸作用，就能生成碳酸氢铵；氨与盐酸作用，就能得到氯化铵；氨在一定条件下与二氧化碳作用，就能合成尿素。那么在工业上怎么制取氨呢？

制氨的原料是氮气和氢气。空气中五分之四都是氮气，所以，制氨工业中用的氮气，不言而喻，即可取之于空气。制氨工业中所需的氢气，可以有许多方法取得。其中，以天然气、炼厂气为原料来制取氢，则具有成本低、纯度高等优点。目前我国不少化肥厂就是用这种方法来制取氢气的。人们从“空中取氮”、“油中取氢”后，将它们按要求的比例混合，然后，在一定条件下进行化学反应，就可以得到合成氨了。有了氨就有了氮肥。有了氮肥也就有了农田增产的保证。

除了以上介绍的产品外，以石油和天然气为原料还可以制得染料、农药、医药、洗涤剂、炸药、合成蛋白质以及其他有机合成工业用的原料。

可以说石油化工产品已遍及到了工业、农业、国防、交通运输和人们日常生活的各个领域。

### 三、全球石油化学工业的发展历程

半个世纪来,世界石油化学工业经历了三次大的产业结构调整。这三次产业结构的调整一次比一次深入,规模一次比一次大。20世纪50~70年代初进行了以实现煤化工向石油化工转化为主要目标的世界第一次石油石化产业结构调整。20世纪70年代末80年代初进行了应对石油危机的世界第二次石油石化产业结构调整。此次结构调整的主要做法是:节能降耗;加大科技投入,开发石油化工新工艺、新技术、新产品;提高石油化工加工深度;增加技术密集度和附加值高的精细化学品和专用化学品的比重;发展终端销售,发展国际化、集团化经营等。这次调整标志着国际石油石化工业从量变到了质的提高阶段,推动世界石油石化工业从粗放向集约转化。进入20世纪90年代,世界石化工业虽有了长足的发展和进步,但仍未能彻底解决有效配置资源、保护生态环境可持续发展和效益最大化三大战略问题。客观现实要求世界石化工业迫切需要从资本集约向技术集约发展,需要技术创新,解决石化工艺技术存在的问题,实现传统石化技术的重大突破,使石化工业进入主要依靠技术进步求生存、求发展、求效益的新阶段。为此带来的世界石化产业结构的第三次调整,主要有以下特点:一是实行资产重组,突出核心业务,提高产业集中度,发展一体化经营,改善资产结构;二是以欧美大石油公司为主体,实施亚洲投资发展战略,调整石化工业全球化经营格局;三是精简机构,减人增效,优化企业组织结构;四是重视科技创新,调整产品结构,实行装置大型化和炼油化工一体化,推广应用现代信息技术,调整产业技术结构。

相关链接:通过信息检索了解我国石油化学工业的发展历程,你能做到吗?

### 四、本门课程的内容及学习方法

由图1我们已经对石油化学工业有了初步的了解,本门课程就是围绕这一思路向大家介绍石油化学工业的原料、基础原料加工、中间产品加工、“最终”产品加工等工艺过程。本门课程的重点是各种石油化工产品的生产原理、工艺条件选择、工艺流程安排等相关内容。同时为了让大家了解石油化工产品生产过程中原料的预处理及产品精制等物理过程,还增加了一章化工单元操作的相关内容。

《石油化工工艺基础》是一门专业技术课程,是基础理论、基础知识在工业生产上的应用学科。学习时要注意理论联系实际,将所学知识应用于实践,运用基础理论和知识解决实际问题;同时要关注实际生产技术的发展,将现场的新知识和新技术与所学理论相结合,这样才能达到很好的学习效果。另外,本门课程叙述内容较多,大家应学会总结与归纳,找出相同的原理或不同的规律等,理解后记忆。



#### 复习思考题

1. 什么是石油化学工业?
2. 石油化工的原料加工主要包括什么?
3. 石油化工的基础原料主要指哪些?
4. 你能列出一些石油化工中间产品的名称吗?
5. 举例说明石油化工在你生活中的应用。
6. 通过信息检索写出一篇关于我国石油化学工业发展历程的论文。
7. 本课程的主要内容有哪些?

# 第一章 单元操作

在种类繁多的石油化工生产中，除化学反应外，还必须对原料进行预处理和对产品进行后处理，这些处理过程可归纳为若干种基本的物理过程，称为单元操作。单元操作是对化学工业和其他过程工业中的物料进行粉碎、输送、加热、冷却、混合和分离等一系列使物料发生预期的物理变化的基本操作的总称。各种单元操作依据不同的原理，应用相应的设备，达到各自的工艺目的。如蒸馏根据液体混合物中各组分挥发能力的差异，可以实现液体混合物中各组分分离或某组分提纯的目的。

在石油化工生产中化学反应过程固然非常重要，但进行物理过程的设备在数量上远远超过反应设备，因此，单元操作在石油化工中也占据很重要的地位。所以，我们专门设置一章向大家介绍有关单元操作的基本原理及设备。

根据单元操作所遵循的基本规律，将单元操作分为三类：

- 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：包括加热、冷却、冷凝、蒸发等操作；
- ③ 遵循传质基本规律的单元操作：包括蒸馏、吸收、抽提、干燥等单元操作。

流体流动、传热及传质的基本原理是各单元操作的理论基础。

## 第一节 流体输送

石油化工生产中所处理的物料无论是原料、中间产物还是最终产品，大多都是流体。如合成氨工业中的氢、氮原料气，合成后的氨气及冷冻后的液氨等都是流体；催化裂化中的重质原料（减压馏分油、常压重油、减压渣油等）、产品（干气、液化气、汽油、柴油、渣油等）也都是流体。除此之外，在现代生产中，为了强化生产和实行连续操作，往往将固体采用流态化技术，使其在流动状态下操作，比如催化裂化装置中催化剂的输送过程。

石油化工生产中的流体，按工艺要求需输送到指定的设备内进行处理，反应制得的产品需送到储藏设备中储存，整个过程进行的好坏，动力的消耗及设备的投资都与流体的流动状态密切相关。

### 一、流体静力学

#### (一) 基本概念回顾

##### 1. 密度

单位体积流体的质量，称为流体的密度。用 $\rho$ 表示，SI单位为 $\text{kg}/\text{m}^3$ 。

##### 2. 压强

流体垂直作用于单位面积上的力，称为流体的静压强，简称压强。用 $P$ 表示，在SI单位中，压强的单位是 $\text{N}/\text{m}^2$ ，称为帕斯卡，以Pa表示。压强的大小常以两种不同的基准来表示：一是绝对真空；另一是大气压强。基准不同，表示方法也不同。以绝对真空为基准测得的压强称为绝对压强，是流体的真实压强；以大气压为基准测得的压强称为表压或真空度。

绝对压强与表压、真空度的关系如图 1-1 所示。

表压 = 绝对压强 - 当地外界大气压强

真空度 = 当地外界大气压强 - 绝对压强

【例 1-1】天津和兰州的大气压强分别为 101.33kPa 和 85.3kPa，苯乙烯真空精馏塔的塔顶要求维持 5.3kPa 的绝对压强，试计算两地真空表的读数(即真空度)。

解：真空度 = 大气压强 - 绝对压强

天津 真空度 = 101.33 - 5.3 = 96.03kPa

兰州 真空度 = 85.3 - 5.3 = 80kPa

## (二) 静力学基本方程

$$P_A = P_a + \rho gh \quad (1-1)$$

式中  $P_A$ ——测压点处的压强，Pa；

$P_a$ ——大气压强，Pa；

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

$g$ ——重力加速度， $\text{m}/\text{s}^2$ ；

$h$ ——测压仪器的液面高度，m。

式(1-1)称为流体静力学基本方程，说明在重力场作用下，静止流体内部压强的变化规律。流体静力学基本方程表明：

① 在静止的、连续的同种流体内，处于同一水平面上各点的压强处处相等。压强相等的面积称为等压面。

② 压强具有传递性：当作用于流体面上方压强变化时，流体内部各点的压强也将发生同样的变化。

③ 式(1-1)可改写为：

$$h = \frac{P_A - P_a}{\rho g}$$

说明压强差也可用液柱高度表示，但需注明液体的种类。如 1atm(标准大气压)相当于 760mmHg 或 10.33m  $\text{H}_2\text{O}$ 。

## 二、流体在管内的流动

流体静力学基本方程讨论了静止流体内部压强的变化规律，对于流动流体内部压强的变化规律、流体在流动过程中流速的变化关系、流体在输送过程中需要外界提供多大能量及为完成输送任务设备安装的相对高度等，都是在流体输送过程中常常会遇到的问题。要解决这些问题，必须找出流体流动的基本规律。反映流体流动的基本规律主要有连续性方程和柏努利方程式。

### (一) 定态流动与非定态流动

流体流动系统中，若各截面上的温度、压强、流速等参量仅随所在空间位置变化，而不随时间变化，这种流动称为定态流动；若系统的参变量不但随所在空间位置而变化而且随时间变化，则称为非定态流动。

如图 1-2(a)所示，进入的流量总是等于排出的，从而维持液位恒定，因而流速不随时

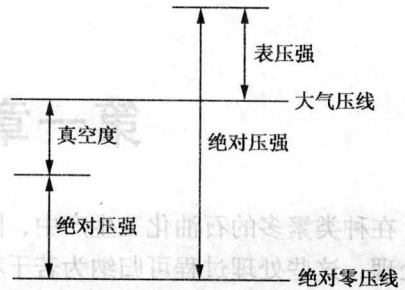


图 1-1 绝对压强与表压、真空度的关系

间变化，为定态流动；图 1-2(b) 装置流动过程中液位不断下降，流速随时间而递减，为非定态流动。在化工厂中，连续生产的开、停车阶段，属于非定态流动，而正常连续生产时，均属于定态流动。本章重点讨论定态流动问题。

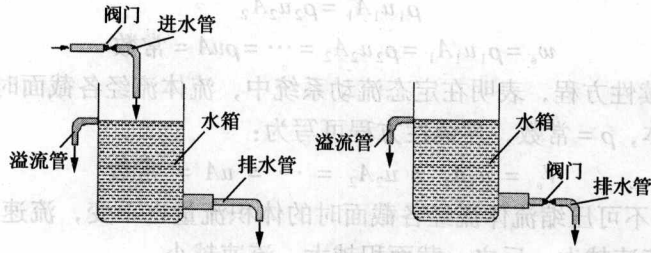


图 1-2(a) 定态流动      图 1-2(b) 非定态流动

## (二) 流体的流量与流速

### 1. 流量

#### (1) 体积流量

单位时间内流经管道任意截面的流体体积，称为体积流量，以  $V_s$  表示，单位为  $\text{m}^3/\text{s}$ 。

#### (2) 质量流量

单位时间内流经管道任意截面的流体质量，称为质量流量，以  $w_s$  表示，单位为  $\text{kg}/\text{s}$ 。

体积流量与质量流量的关系为：

$$w_s = V_s \rho \quad (1-2)$$

### 2. 流速

#### (1) 平均流速

流速是指单位时间内流体质点在流动方向上所流经的距离。实验发现，流体质点在管道截面的径向各点的流速并不一致，管中心处速度最大，越靠近管壁流速越小，管壁处为零。在工程计算中为简便起见，常常采用平均流速。定义平均流速  $u$  为流体的体积流量  $V_s$  与管道截面积  $A$  之比，即：

$$u = \frac{V_s}{A} \quad (1-3)$$

单位为  $\text{m}/\text{s}$ ，习惯上平均流速简称为流速。

#### (2) 质量流速

单位时间内流经管道单位截面积的流体质量，称为质量流速，以  $G$  表示，单位为  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。由于气体的体积流量随压强和温度而变化，故采用质量流速就较为方便。

质量流速与流速的关系为：

$$G = \frac{w_s}{A} = \frac{V_s}{A} \rho = u \rho \quad (1-4)$$

质量流量与质量流速的关系为：

$$w_s = V_s \rho = u A \rho = G A \quad (1-5)$$

### (三) 定态流动系统的物料衡算——连续性方程

如图 1-3 所示的定态流动系统，流体连续地从 1—1' 截面进入，2—2' 截面流出，且充满全部

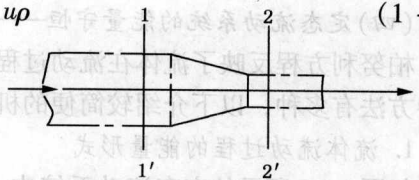


图 1-3 连续性方程的推导

管道。以 1—1'、2—2' 截面以及管内壁为衡算范围，在此范围内流体没有增加和漏失的情况下，根据物料衡算，单位时间进入截面 1—1' 的流体质量与单位时间流出截面 2—2' 的流体质量必然相等，即  $w_{s1} = w_{s2}$

$$\text{或} \quad \rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2 \quad (1-6)$$

$$\text{推广至任意截面} \quad w_s = \rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2 = \dots = \rho u A = \text{常数} \quad (1-7)$$

式(1-7)为连续性方程，表明在定态流动系统中，流体流经各截面时的质量流量恒定。

对不可压缩流体， $\rho = \text{常数}$ ，连续性方程可写为：

$$V_s = u_1 A_1 = u_2 A_2 = \dots = u A = \text{常数} \quad (1-7a)$$

式(1-7a)表明不可压缩流体流经各截面时的体积流量也不变，流速  $u$  与管截面积成反比，截面积越小，流速越大；反之，截面积越大，流速越小。

对于圆形管道，式(1-7a)可变形为：

$$\frac{u_1}{u_2} = \frac{A_2}{A_1} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \quad (1-7b)$$

式(1-7b)说明不可压缩流体在圆形管道中，任意截面的流速与管内径的平方成反比。

以上各式与管路安排及管路上的管件、输送机械等都无关。

**【例 1-2】**如图 1-4 所示，管路由一段  $\phi 89 \times 4 \text{mm}$  的管 1、一段  $\phi 108 \times 4 \text{mm}$  的管 2 和两段  $\phi 57 \times 3.5 \text{mm}$  的分支管 3a 及 3b 连接而成。若水以  $9 \times 10^{-3} \text{m}^3/\text{s}$  的体积流量流动，且在两段分支管内的流量相等，试求水在各段管内的速度。

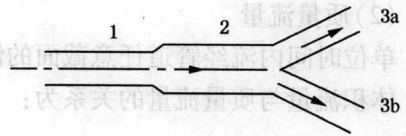


图 1-4 流体流动系统

解：管 1 的内径  $d_1 = 89 - 2 \times 4 = 81 \text{mm}$

则水在管 1 中的流速为：

$$u_1 = \frac{V_s}{\pi/4 d_1^2} = \frac{9 \times 10^{-3}}{0.785 \times 0.081^2} = 1.75 \text{m/s}$$

管 2 的内径  $d_2 = 108 - 2 \times 4 = 100 \text{mm}$

由式(1-7b)，则水在管 2 中的流速为：

$$u_2 = u_1 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 = 1.75 \times \left(\frac{81}{100}\right)^2 = 1.15 \text{m/s}$$

管 3a 及 3b 的内径  $d_3 = 57 - 2 \times 3.5 = 50 \text{mm}$

又水在分支管路 3a、3b 中的流量相等，则有： $u_2 A_2 = 2u_3 A_3$

即水在管 3a 和 3b 中的流速为：

$$u_3 = \frac{u_2 \left(\frac{d_2}{d_3}\right)^2}{2} = \frac{1.15 \left(\frac{100}{50}\right)^2}{2} = 2.30 \text{m/s}$$

#### (四) 定态流动系统的能量守恒——柏努利方程

柏努利方程反映了流体在流动过程中，各种形式机械能的相互转换关系。柏努利方程的推导方法有多种，以下介绍较简便的机械能衡算法。

##### 1. 流体流动过程的能量形式

如图 1-5 所示的定态流动系统中，流体从 1—1 截面流入，2—2 截面流出。衡算范围：1—1、2—2 截面以及管内壁所围成的空间；衡算基准：1kg 流体；基准水平面：0—0 水平面。

流体的机械能有以下几种形式：

(1) 内能

储存于流体内部的能量。设 1kg 流体具有的内能为  $U$ ，其单位为 J/kg。

(2) 位能

流体受重力作用在不同高度处所具有的能量称为位能。计算位能时应先规定一个基准水平面，如 0—0' 面。将质量为  $m$ kg 的流体自基准水平面 0—0' 升举到  $z$  处所做的功，即为位能。

位能 =  $mgz$ ，1kg 的流体所具有的位能为  $gz$ ，其单位为 J/kg。

(3) 动能

流体以一定速度流动，便具有动能。

$m$ kg 流体的动能 =  $\frac{1}{2}mu^2$ ，1kg 的流体所具有的动能为  $\frac{1}{2}u^2$ ，其单位为 J/kg。

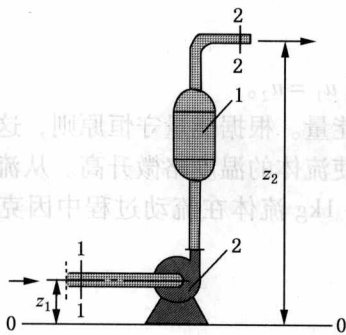


图 1-5 柏努利方程式的推导

1—换热设备；2—输送设备

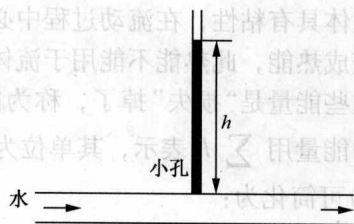


图 1-6 流体静压能的推导

(4) 静压能

在静止或流动的流体内部，任一处都有相应的静压强，如果在一内部有液体流动的管壁上开一小孔，并在小孔处装一根垂直的细玻璃管，液体便会在玻璃管内上升，上升的液柱高度即是管内该截面处液体静压强的表现，如图 1-6 所示。对于图 1-5 的流动系统，由于在 1—1 截面处流体具有一定的静压强，流体要通过该截面进入系统，就需要对流体做一定的功，以克服这个静压强。换句话说，进入截面后的流体，也就具有与此功相当的能量，流体所具有的这种能量称为静压能或流动功。

质量为  $m$ 、体积为  $V_1$  的流体，通过 1—1 截面所需的作用力  $F_1 = p_1 A_1$ ，流体通过此截面所走的距离  $V_1/A_1$ ，故与此功相当的静压能为：

$$\text{输入的静压能} = p_1 A_1 \frac{V_1}{A_1} = p_1 V_1$$

1kg 流体所具有的静压能为  $\frac{pV}{m} = \frac{p}{\rho}$ ，其单位为 J/kg。

位能、动能及静压能三种能量均为流体在截面处所具有的机械能，三者之和称为某截面上的总机械能。

此外，流体在流动过程中，还有通过其他外界条件与衡算系统交换的能量。

(5) 热

若管路中有加热器、冷却器等，流体通过时必与之换热。设换热器向 1kg 流体提供的热量为  $Q_e$ ，其单位为 J/kg。



### (6) 外功

在图 1-5 的流动系统中, 还有流体输送机械(泵或风机)向流体作功, 1kg 流体从流体输送机械所获得的能量称为外功或有效功, 用  $W_e$  表示, 其单位为 J/kg。

根据能量守恒原则, 对于衡算范围, 其输入的总能量必等于输出的总能量。在图 1-5 中, 在 1—1 截面与 2—2 截面之间的衡算范围内, 有:

$$U_1 + z_1 g + \frac{1}{2} u_1^2 + \frac{p_1}{\rho_1} + W_e + Q_e = U_2 + z_2 g + \frac{1}{2} u_2^2 + \frac{p_2}{\rho_2} \quad (1-8)$$

在以上能量形式中, 可分为两类:

- ① 机械能(即位能、动能、静压能)及外功, 可用于输送流体;
- ② 内能与热, 不能直接转变为输送流体的机械能。

### 2. 实际流体的能量衡算

#### (1) 以单位质量流体为基准

假设流体不可压缩, 则:  $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ 。

流动系统无热交换, 则:  $Q_e = 0$ ; 流体温度不变, 则  $u_1 = u_2$ 。

因实际流体具有粘性, 在流动过程中必消耗一定的能量。根据能量守恒原则, 这些消耗的机械能转变成热能, 此热能不能用于流体输送, 只能使流体的温度略微升高。从流体输送角度来看, 这些能量是“损失”掉了, 称为能量损失。将 1kg 流体在流动过程中因克服摩擦阻力而损失的能量用  $\sum h_f$  表示, 其单位为 J/kg。

式(1-8)可简化为:

$$z_1 g + \frac{1}{2} u_1^2 + \frac{p_1}{\rho} + W_e = z_2 g + \frac{1}{2} u_2^2 + \frac{p_2}{\rho} + \sum h_f \quad (1-9)$$

式(1-9)即为不可压缩实际流体的机械能衡算式, 其中每项的单位均为 J/kg。

#### (2) 以单位重量流体为基准

将式(1-9)各项同除以重力加速度  $g$ , 可得:

$$z_1 + \frac{1}{2g} u_1^2 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{W_e}{g} = z_2 + \frac{1}{2g} u_2^2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\sum h_f}{g}$$

$$\text{令} \quad H = \frac{W_e}{g}, H_f = \frac{\sum h_f}{g}$$

$$\text{则} \quad z_1 + \frac{1}{2g} u_1^2 + \frac{p_1}{\rho g} + H = z_2 + \frac{1}{2g} u_2^2 + \frac{p_2}{\rho g} + H_f \quad (1-9a)$$

上式中各项的单位均为  $\frac{W_e}{g} = \frac{\text{J/kg}}{\text{N/kg}} = \frac{\text{J}}{\text{N}} = \text{m}$ , 表示单位重量(1N)流体所具有的能量。虽然各项的单位为 m, 与长度的单位相同, 但在这里应理解为 m 液柱, 其物理意义是指单位重量流体所具有的机械能可以把它自身从基准水平面升举的高度。习惯上将  $z$ 、 $\frac{u^2}{2g}$ 、 $\frac{p}{\rho g}$  分别称为位压头、动压头和静压头, 三者之和称为总压头,  $H_f$  称为压头损失,  $H$  为单位重量的流体从流体输送机械所获得的能量, 称为外加压头或有效压头。

### 3. 理想流体的机械能衡算

理想流体是指没有黏性(即流动中没有摩擦阻力)的流体。这种流体实际上并不存在, 是一种假想的流体, 但这种假想对解决工程实际问题具有重要意义。对于不可压缩理想流体