



高职高专“十一五”规划教材

化工原理 学习指导

张浩勤 主编
陆美娟 主审



化学工业出版社

高职高专“十一五”规划教材

化工原理学习指导

张浩勤 主编

陆美娟 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是与陆美娟、张浩勤主编的高职高专“十一五”规划教材《化工原理》配套的学习指导用书。本书的符号体系、章节、公式编号与教材一致。每章均设有复习提要、概念辨析、典型题解和单元自测。复习提要突出重点内容,概念辨析讨论难点问题,典型例题重视工程特点,单元自测检查学习效果。

本书可以作为高职高专院校、各种函授大学、成人教育和高等教育自学考试化工类及相关专业学生学习化工原理课程和参加专升本的辅导教材,也可作为教师讲授本课程的参考书,另外本教材有些内容可作为参加研究生考试学生的参考资料。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理学习指导/张浩勤主编. —北京:化学工业出版社, 2007.7

高职高专“十一五”规划教材

ISBN 978-7-122-00512-0

I. 化… II. 张… III. 化工原理-高等学校-教学参考资料 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 084792 号

责任编辑:蔡洪伟

文字编辑:向东

责任校对:吴静

装帧设计:关飞

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印刷:北京市振南印刷有限责任公司

装订:三河市宇新装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张10 字数243千字 2007年7月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:17.00 元

版权所有 违者必究

前 言

化工原理是一门综合运用数学、物理学、物理化学等基础知识分析和解决化工生产过程中各单元操作问题的工程学科。首次接触工程学科，学生学习时普遍感到概念多、公式多、计算繁、易出错。因此，编写一本学习指导书，帮助学生进行系统有效的复习是必要的。

本书是与陆美娟、张浩勤主编的高职高专“十一五”规划教材《化工原理》配套的学习指导用书，秉承《化工原理》教材的编写原则，从便于自学和实际应用出发，加强运用基本概念和工程观点分析和解决化工实际问题的训练。旨在帮助学生掌握化工原理的学习方法，加强对基本概念、基本理论的理解，提高解题技能和解决工程问题的能力。

本书的符号体系、章节、公式编号与教材一致。本书每章内容包括：复习提要、概念辨析、典型题解和单元自测。复习提要从纵向对内容进行归纳总结，便于学生抓住重点；概念辨析通过横向比较和对难点内容进行分析，便于学生掌握相关概念之间的差异，提高辨识能力；典型题解紧密联系生产实际，突出课程的工程特点并兼顾可思考性和趣味性，注重分析与总结，培养学生综合运用知识解决问题的能力和解题技能。单元自测配有适量自测题，供学生检查学习效果和进一步巩固基本概念（答案放在每章后以便于核对）。

《化工原理学习指导》是与《化工原理》教材配套使用的，学生必须在认真学习教材的基础上，学习《化工原理学习指导》，并通过必要的做题和训练，掌握思考问题的方法，养成良好的解题习惯，建立起战胜困难的自信心，培养学习的兴趣。学习化工原理，并非做题越多越好，重要的是要善于思考，通过每一道例题或解一道习题都能从中悟出一定的道理，或者加深对某个基本概念的理解；或者验证某个重要观点；或者掌握某种工程处理方法。希望通过学习，掌握重点、突破难点、弄懂范例，总结规律，能收到举一反三的效果。

本书由郑州大学化工原理教研室编写。参加编写人员有：张浩勤（绪论、第八章、第十章、第十一章）、王训道（第一章、第二章、第三章）、谭翎燕（第四章、第五章、第九章）和张婕（第六章、第七章）。全书由张浩勤统稿，陆美娟审阅。

由于编者学识和水平有限，不当之处敬请指正。

编 者

2007年5月

目 录

绪论	1
一、《化工原理》课程的基本内容	1
二、物料衡算和热量衡算	1
三、学习注意事项	2
四、解题要求	3
第一章 流体流动	4
I 复习提要	4
一、概述	4
二、流体静力学	4
三、流体动力学	6
四、管内流动阻力	8
五、管路计算	10
六、流量测量	11
II 概念辨析	12
III 典型题解	14
IV 单元自测	23
单元自测答案	26
第二章 流体输送机械	27
I 复习提要	27
一、概述	27
二、离心泵	27
三、其他类型的化工用泵	30
四、气体输送机械	30
II 概念辨析	31
III 典型题解	33
IV 单元自测	37
单元自测答案	39
第三章 非均相混合物的分离	40
I 复习提要	40
一、沉降	40
二、过滤	42
II 概念辨析	44

III 典型题解	45
IV 单元自测	49
单元自测答案	50
第四章 传热	52
I 复习提要	52
一、概述	52
二、热传导	52
三、对流传热	53
四、传热计算	55
五、热辐射	57
六、传热设备	57
II 概念辨析	58
III 典型题解	60
IV 单元自测	68
单元自测答案	70
第五章 蒸发	71
I 复习提要	71
一、蒸发概述	71
二、单效蒸发过程	71
三、多效蒸发过程	73
四、蒸发装置	73
II 概念辨析	73
III 典型题解	74
IV 单元自测	77
单元自测答案	78
第六章 吸收	79
I 复习提要	79
一、概述	79
二、传质机理	79
三、吸收过程的气液相平衡关系	82
四、吸收速率	83
五、吸收塔的计算	84
II 概念辨析	87
III 典型题解	90
IV 单元自测	97
单元自测答案	99
第七章 蒸馏	100
I 复习提要	100

一、概述	100
二、双组分理想物系的气液相平衡	100
三、蒸馏方式及其原理	102
四、双组分连续精馏塔的工艺计算	102
II 概念辨析	105
III 典型题解	108
IV 单元自测	115
单元自测答案	116
第八章 气液传质设备	118
I 复习提要	118
一、气液传质设备类型与基本要求	118
二、板式塔	118
三、填料塔	120
四、板式塔与填料塔比较	121
II 概念辨析	121
III 典型题解	122
IV 单元自测	124
单元自测答案	125
第九章 干燥	127
I 复习提要	127
一、概述	127
二、湿空气的性质	127
三、连续过程的物料衡算与热量衡算	128
四、干燥过程的平衡关系和速率关系	129
五、干燥器	130
II 概念辨析	130
III 典型题解	132
IV 单元自测	136
单元自测答案	137
* 第十章 液-液萃取	138
I 复习提要	138
一、概述	138
二、液-液（三元体系）相平衡关系	138
三、部分互溶物系萃取过程计算	139
四、完全不互溶物系萃取过程计算	140
五、萃取设备	141
II 概念辨析	141
III 典型题解	142

IV 单元自测	144
单元自测答案	145
第十一章 膜分离技术	146
I 复习提要	146
一、膜分离过程的基础知识	146
二、典型膜过程	146
三、膜技术与其他技术耦合的过程	147
II 概念辨析	147
III 典型题解	148
IV 单元自测	150
单元自测答案	150
参考文献	152

绪 论

一、《化工原理》课程的基本内容

1. 课程的内容

《化工原理》主要研究化工生产过程中各单元操作的基本原理和过程计算、典型设备的结构及其工艺尺寸的设计、设备操作性能的分析以及组织工程性实验以取得必要的设计数据，找出强化过程、改进设备的途径。

2. 课程的特点

《化工原理》课程具有很强的工程特点，主要体现在以下几方面。

- (1) 过程的影响因素多 涉及物性因素、操作条件和设备结构等影响因素。
- (2) 过程制约条件多 涉及原料来源、气候条件、安全环保等制约条件。
- (3) 效益判据 工业过程的目的是最大限度地实现经济效益和社会效益。
- (4) 处理方法 理论分析、工业性实验与经验数据并重。

3. 培养目标

《化工原理》课程教学包括课堂教学、实验教学和课程设计，着重以下几个方面能力的培养。

(1) 单元操作和设备选择的能力 根据单元操作在技术和经济上的特点，进行“过程和设备”的选择，以适应指定物系的特性，并经济而有效地满足工艺要求。

(2) 操作和调节生产过程的能力 熟悉生产过程的操作和调节方法；在操作发生故障时，善于查找原因，采取相应的措施排除故障。

(3) 工程设计能力 学会利用《化学工程手册》、《化工设计手册》等参考书确定物性数据，掌握工艺过程计算方法，为设备设计和其他辅助设计奠定基础。缺乏数据时，还要会组织工程性实验以取得必要的设计数据。

二、物料衡算和热量衡算

1. 定常操作过程

定常操作过程中，设备内各种操作参数（统计的）都不随时间变化。否则，为不定常操作过程。

2. 单元操作计算的基本内容

物性计算、物料衡算、能量衡算、传递过程速率计算和过程的热力学极限与临界点计算。

3. 物料衡算

物料衡算的基础是质量守恒定律。对于定常过程，物料衡算方程为

$$\text{进入系统的各股物料量} = \text{离开系统的各股物料量} \quad (0-2)$$

物料衡算时可以采用不同的单位，但必须保持式中各项单位的一致。

对于多组分的混合物，可按照式(0-2)对各个组分分别列出组分衡算式。

不同的单元操作都有具体的物料衡算方程式，但其衡算原理是相同的。

4. 热量衡算

能量衡算的基础是能量守恒定律，即热力学第一定律。对于定常过程，若忽略物流的位能、动能和与外界交换的功量，能量衡算即为热量衡算（焓衡算），其方程为

进入系统的各股物料带入的焓+传入系统的热量=离开系统的各股物料带出的焓
+传出系统的热量 (0-3)

物料衡算和热量衡算的要点和步骤见教材的描述。

5. 量纲（因次）一致性和单位一致性

基本物理量见表 0-1。

表 0-1 基本物理量

基本物理量	长度	时间	质量	热力学温度	物质的量	电流	光强度
基本单位	米	秒	千克	开[尔文]	摩尔	安培	坎德拉
符号	m	s	kg	K	mol	A	cd

(1) * 热力学温度与摄氏温度的关系 热力学温度 273K 为摄氏温度 0℃。换算关系
 $A/^{\circ}\text{C} = B/\text{K} - 273$

例如，293K 为 20℃。

(2) 量纲 物理量通过几个基本物理量的幂次方的乘积来表达的关系称为物理量的量纲。

(3) 量纲一致性 在完整的物理方程中，各项的量纲必定相同。量纲一致性是量纲分析的基础。

(4) 单位 单位是表征物理量大小的要素。单位制不同，物理量的单位也随之变化，目前我国使用的是以国际单位制为基础的法定计量单位。

由于许多旧资料中还有多种单位并存，国外文献经常采用英制单位，使用时要加以换算。化工原理教材附录一给出了常用的换算公式。

(5) 单位一致性 在完整的物理方程中，各项的单位必须一致。它是检验计算正确性的一项判据。

三、学习注意事项

① 理解基本概念的内涵，弄懂物理意义。目标为能用自己的语言描述。

② 通过对比等方法，对各种相关概念进行比较，以加强理解记忆。注意公式的前提条件和应用范围。

③ 重视工程实际问题的简化处理方法。

量纲分析法：例如，湍流的阻力计算，对流传热系数计算。

数学模型法：例如，过滤速率方程，双膜理论等。

过程分解法：例如，实际塔板数=理论塔板数(过程)×板效率(设备)

④ 重视数量及概念。例如，水和低黏度液体的经济流速范围一般在 1~3m/s；常压气体的经济流速范围一般在 10~20m/s。饱和水蒸气冷凝的对流传热系数一般在 $10^4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 的数量级，而气体的强制对流传热系数一般在 $10^2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C})$ 的数量级。掌握类似的数量级概念对于解题和处理工程问题都有益处。

⑤ 注意过程-公式-图形之间的相互关系，掌握利用图示分析和帮助解决问题的方法。这种方法在吸收、精馏等传质过程的分析中尤为重要。

⑥ 采用归纳法将每个单元操作的主要内容理清，以便抓住主线，以线带面，使知识系

统化。

例如, 间壁式换热器的传热计算中, 热量衡算与传热速率方程联立求解是各类传热过程计算的基础。传热速率方程涉及传热系数、传热面积和传热推动力三个方程; 传热系数与冷、热流体的对流传热系数有关。间壁式换热器的传热计算中真正需要牢记的方程并不多。

⑦ 重视实验、设计以及下厂实习的实践机会, 同时考虑教材的基本知识在实践中是如何应用的, 真正做到理论与实践相结合。

四、解题要求

(1) 题意分析 认真阅题, 写明已知条件和待求量, 必要时做出简图以便于分析和解题。对于取定的控制体、控制截面等应在图中标明。

(2) 解题过程 解题思路要表达清楚。要列出由符号表示的计算公式, 各物理量的数值应与公式一一对应, 写出主要的计算过程。

(3) 符号单位 使用与教材一致的符号, 若自选其他符号, 请用文字注明符号意义。请使用国际单位制解题, 必要时首先做好单位换算。

(4) 有效数字 注意有效数字位数, 一般取 3~4 位。

第一章 流 体 流 动

I 复 习 提 要

本章重点掌握静力学方程、连续性方程、柏努利方程及其应用和阻力计算。

一、概述

(一) 流体的密度与比体积

(1) 密度 单位体积流体所具有的质量称为密度, kg/m^3 。其定义式为 $\rho = \frac{m}{V}$ (1-1)

(2) 液体密度 由于液体的体积随压强变化很小, 即液体可视为不可压缩性流体。液体的密度随温度的增加, 一般较小。

(3) 气体密度 气体的密度随温度、压强的变化而变化。当温度不太低、压强不太高时, 气体可看成理想气体, 则

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

(4) 比体积 $v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$ 为密度的倒数。

(二) 流体的黏性

1. 牛顿黏性定律

在定常层流条件下, 两流体层间的剪应力 (即单位面积上的内摩擦力) 与垂直于流动方向上的速度梯度成正比。即

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (\text{N/m}^2) \quad (1-8)$$

满足牛顿黏性定律的流体称为牛顿型流体, 否则称为非牛顿型流体。

2. 黏度

牛顿黏性定律中的比例系数称为黏度, 是单位速度梯度下的剪应力。它是流体的一种物性。流体的黏性是其分子微观运动的宏观表现, 只有在流体流动时才能表现出来。

黏度的 SI 单位为 $\text{N} \cdot \text{s/m}^2$, 即 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。CGS 制单位为泊 (P) 或厘泊 (cP), 其换算关系为 (该关系必须熟记)

$$1\text{cP} = 1 \times 10^{-2} \text{P} = 1 \times 10^{-3} \text{Pa} \cdot \text{s}$$

液体的黏度随温度的升高而降低; 气体的黏度随温度的升高而增大。压强对流体的黏度影响一般可忽略不计。

运动黏度

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-9)$$

二、流体静力学

(一) 流体的压强

1. 定义

垂直作用于单位面积上的压力称为压强。

$$p = \frac{P}{A} \quad (1-13)$$

压强的 SI 单位为 N/m^2 ，即帕斯卡 (Pa)。常用的单位还有：物理大气压 (atm)；工程大气压 (kgf/cm^2)；巴 (bar)；液体柱高 (如 mmHg, mH_2O 等)。牢记如下单位换算：

$$1\text{atm} = 1.013 \times 10^5 \text{Pa} = 1.0332 \text{kgf/cm}^2 = 1.0133 \text{bar} = 760 \text{mmHg} = 10.33 \text{mH}_2\text{O}$$

2. 压强基准

(1) 以绝对零压为基准 即以绝对真空为基准测得的压强，即流体的真实压强，称为绝对压强，简称绝压。

(2) 以大气压为基准

① 表压强 流体绝压高于大气压的部分，即：表压 = 绝压 - 大气压。

② 真空度 流体绝压低于大气压的部分，即：真空度 = 大气压 - 绝压 = -表压。

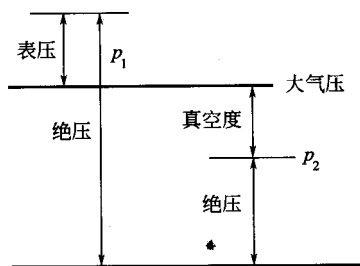


图 1-1 绝压、表压与真空度的关系

目前，工程上测量绝压低于大气压的仪表一般常用表压形式，即读数为负值。

(3) 讨论

① 绝压、表压及真空度关系如图 1-1 所示。

② 大气压与 1atm 不尽相同。大气压是温度和海拔的函数。

③ 为避免混淆，表压和真空度必须注明，否则为绝压。

(二) 流体静力学基本方程

1. 静力学基本方程

静止液体内部两截面压强之间关系 $p_1 + \rho g z_1 = p_2 + \rho g z_2$ (1-14)

静止液体内部某截面压强与液面上方外压强之间关系 $p = p_0 + \rho g h$ (1-14a)

式中， h 为由液面开始的液柱高度。

2. 静力学方程的讨论

(1) 适用条件 静力学方程适用于密度为常数的静止单相连续液体，严格来说对气体不适用，但若气体密度变化不大（变化率不超过 20%）时，密度取平均值，也可用上式近似计算。

(2) 由静力学方程可得到等压面的概念 即在静止、连续、同一种流体中，同一水平面上的各处压强相等。特别注意等压面应具有四个条件，缺一不可。

(3) 由方程(1-14a)知，液面上方压强变化时，液体内部压强将发生同样大小变化，即压强可传递。

(4) 将式(1-14) 各项除以 ρg 整理得

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho g} = z_1 - z_2 = h \quad (1-14b)$$

上式表明，压强大小可用流体柱高度表示，但必须注明何种流体。

(5) 将式(1-14) 变形可得 $gz_1 + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho}$ 或 $gz + \frac{p}{\rho} = \text{常数}$ (1-14c)

上式表明，在连续静止的同种流体中，单位质量流体的静压能和位能之和等于常数。

3. 静力学方程的应用

应用静力学方程解题的关键是在系统中选择合适的等压面,并列出等压面上静力学方程。在化工生产上的应用主要有:①表压及压强差的测定,如U形管压差计,双液柱微压差计,复式压强计等;②液位的测量;③液封高度的计算等。

三、流体动力学

(一) 流量与流速

(1) 体积流量 单位时间内流经通道某一截面的流体体积,用 V_s 表示,其单位为 m^3/s 。

(2) 质量流量 单位时间内流经通道某一截面的流体质量,用 W_s 表示,其单位为 kg/s 。

(3) 平均流速 (常简称流速) 单位时间内流体流经通道单位截面积的体积,以 u 表示,其单位为 m/s 。

$$u = \frac{V_s}{A} \quad (1-22)$$

(4) 质量流速 单位时间内流体流经通道单位截面积的质量,以 G 表示,其单位为 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

$$G = \frac{W_s}{A} \quad (1-24)$$

(5) 相互关系 $W_s = \rho V_s = \rho u A = G A$ (1-23)

(二) 连续性方程

对定常流动系统中任意两截面,有 $W_{s1} = W_{s2}$ 或 $\rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2$ (1-25)

对定常流动系统任一截面,有 $W_s = \rho u A = \text{常数}$ (1-26)

对不可压缩流体的定常流动,有 $V_s = u A = \text{常数}$ (1-27)

对不可压缩流体在圆管中作连续定常流动时,有 $\frac{u_1}{u_2} = \frac{A_2}{A_1} = \frac{d_2^2}{d_1^2}$ (1-28)

式(1-25)~式(1-28)为连续性方程的各种表现形式。

对连续性方程的讨论如下。

① 适用条件:在衡算范围内,充满管道的流体做连续定常流动。

② 连续性方程反映定常流动系统中各个截面上流体流速的变化规律,和管件、阀门等的配置及管路的安排无关。

③ 对定常流动系统中不可压缩流体,任意截面上的流速只与该截面积有关;在均匀管段上,流体流速将沿程不变。

(三) 机械能衡算方程

1. 理想流体的机械能衡算方程——柏努利方程

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} = \text{常数} \quad (\text{J}/\text{kg}) \quad (1-29)$$

2. 实际流体的机械能衡算方程——扩展柏努利方程

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + W_e = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \sum h_f \quad (\text{J}/\text{kg}) \quad (1-30)$$

3. 讨论

① 适用条件:不可压缩流体、等温、连续定常流动的机械能衡算。

② gz 、 $\frac{u^2}{2}$ 和 $\frac{p}{\rho}$ 分别表示单位质量流体所具有的位能、动能和压强能,它们是流体在某截面上所具有的;而 W_e 和 $\sum h_f$ 是指单位质量流体在两截面之间所获得和所消耗的机械能,

其中 W_e 是输送设备对单位质量流体所做的有效功，是输送机械的重要参数之一； $\sum h_f$ 则是单位质量流体在两截面间流动过程中的阻力损失。

在一定条件下，各种机械能形式之间是可以相互转换的，此减彼增，但总量保持不变。

③ 其他表示形式

a. 以单位重量（重力）流体为基准

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + H_e = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + H_f \quad (1-30b)$$

式中各项单位均为 m； z 、 $\frac{u^2}{2g}$ 、 $\frac{p}{\rho g}$ 、 H_e 、 H_f 分别称为位头、速度头（动压头）、静压头、输入压头和压头损失。

b. 以单位体积流体为基准

$$\rho g z_1 + p_1 + \frac{\rho u_1^2}{2} + \rho W_e = \rho g z_2 + p_2 + \frac{\rho u_2^2}{2} + \rho \sum h_f \quad (1-30a)$$

采用不同的形式仅是为了使用的方便，读者完全可根据自己的习惯择一用之。

④ 对于可压缩性流体，若两截面的压强变化率 $< 20\%$ ，可以使用柏努利方程，但密度应采用平均密度。

⑤ 若流体静止，即 $u=0$ ， $\sum h_f=0$ ，也不需要外加功，则式(1-30) 变为 $gz_1 + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho}$ （静力学方程），说明静止是运动的一种特殊形式。

4. 泵的轴功率 N

$$N = \frac{N_e}{\eta} = \frac{W_e W_s}{\eta}$$

5. 柏努利方程的应用

柏努利方程的应用是本章乃至下一章的重点，必须熟练掌握。应用柏努利方程解题时注意以下步骤和要点。

① 根据题意，绘出流动系统示意图，明确流体的流动方向。

② 确定衡算范围，正确选取截面。选取截面时需注意：a. 所选截面必须同流向垂直；b. 所选截面间流体必须连续；c. 其中一个截面必须包含所求未知量；d. 应选已知量最多的面作为另一个衡算面。

③ 压强基准：两截面所对应的压强基准可以是绝压，也可是表压，但必须一致。

高度基准：通常取一个已知面作为基准，但基准面必须平行于地面。

④ 沿着流向列出柏努利方程。注意方程中各项单位必须一致。

（四）实际流体的流动现象

1. 流型的判据——雷诺数

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} \quad (1-31)$$

对于圆管内的流动，当 $Re < 2000$ 时，为层流；当 $Re > 4000$ 时，一般为湍流；当 $Re = 2000 \sim 4000$ 时，可能为层流，也可能为湍流，依外界条件定，此区域称过渡区。但注意流动的类型只有层流和湍流两种。

2. 流体的流动类型

(1) 层流 流体质点沿管轴方向作直线运动, 即分层流动; 质点间不发生宏观混合; 流体的内摩擦力遵循牛顿黏性定律; 流体内的动量、热量、质量传递靠分子运动来进行。

$$\text{速度分布} \quad u_r = u_{\max} \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right) \quad (1-32)$$

在壁面处 $u_r = 0$, 在管中心处 $u_r = u_{\max}$, 平均速度 $u_m = \frac{1}{2} u_{\max}$ 。

(2) 湍流 流体质点总体上沿管轴方向流动, 同时还在各个方向上作剧烈的随机脉动; 流体的内摩擦力不服从牛顿黏性定律; 流体内的动量、热量、质量传递是通过质点和分子的随机运动共同完成的, 质点随机运动强化了传递过程。

$$\text{速度分布} \quad u_r = u_{\max} \left(1 - \frac{r}{R} \right)^{\frac{1}{7}}$$

质点的碰撞和混合使速度平均化, 平均速度 $u_m \approx 0.82 u_{\max}$ 。

四、管内流动阻力

(一) 流动阻力的分类及产生原因

化工管路一般由直管、管件和阀门等构成。流体流经直管的阻力损失就称为直管阻力; 流体流经管路中管件、阀门及管截面的突然扩大或缩小等局部地方所引起的阻力则称为局部阻力。流体流动的总阻力为直管阻力和局部阻力之和。

阻力产生的根源是流体具有黏性, 流动时产生内摩擦; 固体表面促使流体流动时其内部发生相对运动, 提供了流动阻力产生的外部条件。

(二) 阻力的直观表现——压强降

对定常流动, 在一水平等径直管段上任取两截面列柏努利方程有

$$\Delta p = p_1 - p_2 = \rho \sum h_f \quad (1-35)$$

上式表明, 直管阻力损失是由流体的压强能消耗提供的。

(三) 直管阻力计算通式——范宁公式

$$\sum h_f = \lambda \frac{l}{d} \times \frac{u_m^2}{2} \quad (\text{J/kg}) \quad (1-39)$$

$$\text{阻力压降:} \quad \rho \sum h_f = \lambda \frac{l}{d} \times \frac{\rho u_m^2}{2} \quad (\text{Pa}) \quad (1-39a)$$

$$\text{压头损失:} \quad H_f = \lambda \frac{l}{d} \times \frac{u_m^2}{2g} \quad (\text{m}) \quad (1-39b)$$

上面是范宁公式的三种表达式, 对层流和湍流均适用, 可视情况选择。应用上式的关键是求摩擦系数 λ 。

(四) 摩擦系数 λ 的计算

1. 层流时的摩擦系数

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (1-45)$$

$$\text{将上式代入范宁公式, 有} \quad \sum h_f = \lambda \frac{l}{d} \times \frac{u^2}{2} = \frac{32\mu l}{\rho d^2} u = \frac{32\mu l}{\rho d^4} \times \frac{V_s}{\pi/4}$$

由此式可得两点结论: ①一定流体在一定管路中层流流动时, 阻力损失与流速或流量的一次方成正比; ②层流时, 若流体物性、管长和体积流量不变, 阻力损失与管内径四次方成反比。

2. 湍流时的摩擦系数

由量纲（因次）分析法得到，湍流时摩擦系数 $\lambda = \phi(Re, \epsilon/d)$ 。通过实验找出 λ 与 Re 和相对粗糙度 ϵ/d 间的关系。较常用的是摩擦系数图（Moody 图），见教材图 1-34。Moody 图（双对数坐标图）可分为四个区：

（1）层流区 即 $Re < 2000$ ， $\lambda = 64/Re$ ， $\lg \lambda$ 与 $\lg Re$ 成线性关系，此时 λ 只与 Re 有关，与 ϵ/d 无关。

（2）过渡区 $Re = 2000 \sim 4000$ ， λ 一般按湍流查取。

（3）湍流区 $Re > 4000$ 且在图中虚线以下区域， λ 随 Re 增大而减小； Re 一定时， λ 随 ϵ/d 的增加而增大。

（4）完全湍流区 即图中虚线以上的区域， λ 与 Re 无关，当 ϵ/d 一定时，为常数。由范宁公式可得

$$\sum h_f = \lambda \frac{l}{d} \times \frac{u^2}{2} = \frac{\lambda l}{2(\pi/4)^2} \times \frac{V_s^2}{d^5}$$

由上式可知：①完全湍流时，对一定管路阻力损失与流速或流量的平方成正比，故此区又称为阻力平方区；②完全湍流时，若管长和体积流量一定，阻力损失与管径的五次方成反比。

（五）非圆形直管阻力的计算

计算非圆形直管阻力时，仍可用范宁公式，但应将公式和 Re 中的圆管直径以非圆管的当量直径 d_e 来代替。

$$d_e = 4 \times \text{水力学半径} = \frac{4 \times \text{流通截面积}}{\text{润湿周边长度}} \quad (1-50)$$

讨论：①湍流时，直管阻力的计算只需以 d_e 代替 d 即可；但层流时需用 $\lambda = c/Re$ 计算，其中 c 需查教材表 1-3。

②当量直径只能用于阻力计算，对于流量或流速中涉及的截面积绝不能用 $\frac{\pi}{4} d_e^2$ 计算，必须按实际截面积计算。

（六）局部阻力的计算

局部阻力计算方法有阻力系数法和当量长度法两种。

1. 阻力系数法

$$h_f = \zeta \frac{u^2}{2} \quad (\text{J/kg}) \quad (1-52)$$

式中 ζ 称为局部阻力系数，其值由实验定，常用的见教材表 1-4，其中 $\zeta_{\text{出口}} = 1$ 和 $\zeta_{\text{进口}} = 0.5$ 要记住。当部件发生界面变化时，式(1-52)中的 u 要采用较小截面处流速。

注意：当流体从管子直接排放到管外空间时，出口截面上的动能及出口阻力应与截面选取相匹配。若截面取管出口内侧，则表示流体并未离开管路，此时截面上仍有动能，系统的总阻力损失不包含出口阻力；若截面取管出口外侧，则表示流体已经离开管路，此时截面上动能为零，而系统的总阻力损失中应包含出口阻力。由于出口阻力系数 $\zeta_{\text{出口}} = 1$ ，两种选取截面方法计算的结果相同。

2. 当量长度法

将流体的局部阻力损失折合成相当于流体流过直径相同的长度为 l_e 的直管时所产生的阻力损失。