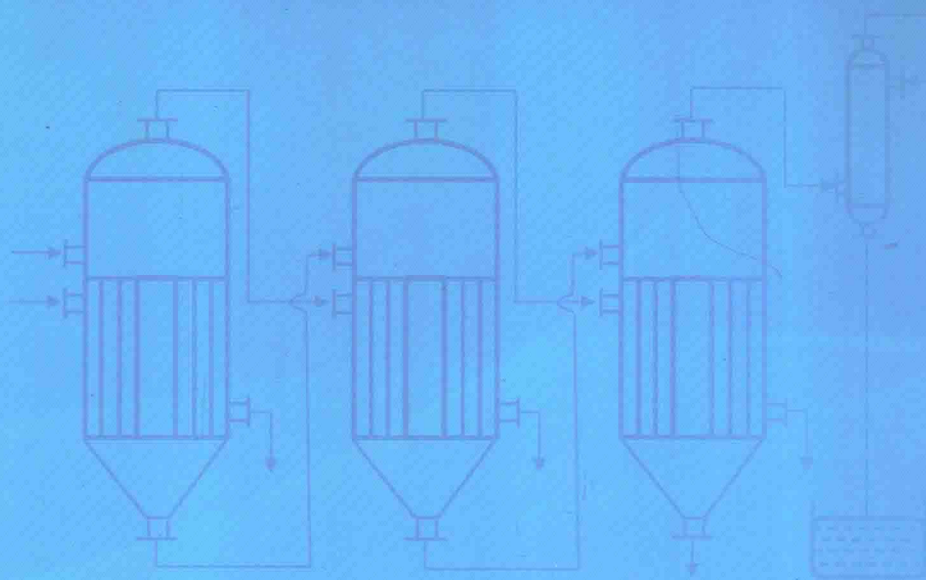




普通高等教育“十二五”规划教材

# 化工原理学习指导 及习题精解

陈礼辉 主编

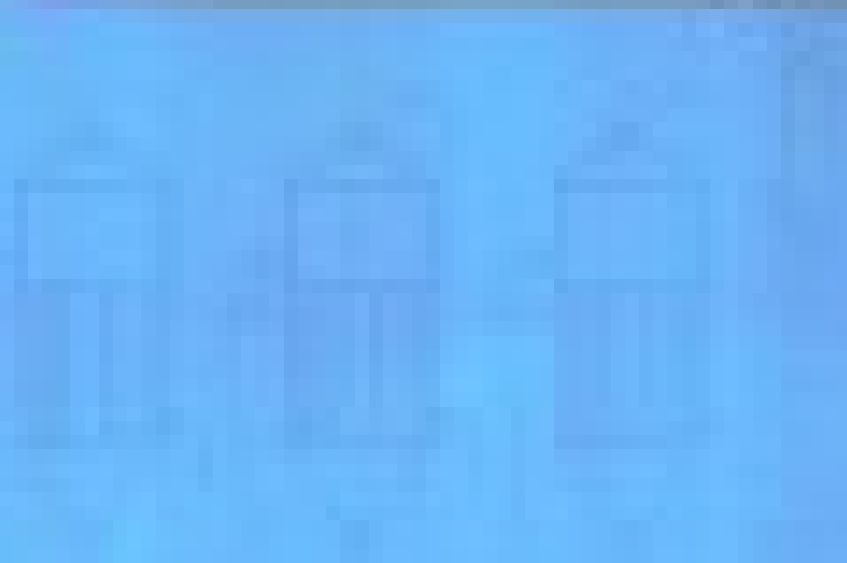


中国林业出版社

第2版 化工原理学习指导及习题精解

# 化工原理学习指导 及习题精解

第二版



• • • • •

普通高等教育“十二五”规划教材

# 化工原理学习指导 及习题精解

陈礼辉 主编

中国林业出版社

## 内 容 简 介

本书针对化工各种单元操作开展编写工作,在编写过程中,强调“化工原理”课程的工程特色,以培养读者解决工程实际问题的能力为目标。本书共分为10章,包括流体流动、流体输送机械、机械分离、传热、蒸发、吸收、精馏、气液传质设备、萃取、干燥。各章均包括教学基本要求、重点内容、知识点关联图、习题解答、思考题及符号表6部分内容。通过这些环节,使读者巩固基本概念,引导读者思考,分析并解决工程实际问题。

本书可作为化学工程与工艺及相关专业的“化工原理”课程学习的辅导用书,同时亦可作为“化工原理”课程硕士研究生入学考试的辅导用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

化工原理学习指导及习题精解/陈礼辉主编. —北京:中国林业出版社, 2015. 11

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5038-8241-8

I. ①化… II. ①陈… III. ①化工原理—高等学校—自学参考资料 IV. ①TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第260129号

## 中国林业出版社·教育出版分社

策划、责任编辑:高红岩

电话:83143554

传真:83143516

出版发行 中国林业出版社(100009 北京市西城区德内大街刘海胡同7号)

E-mail: jiaocaipublic@163.com 电话: (010) 83143500

http: //lycb. forestry. gov. cn

经 销 新华书店

印 刷 北京市昌平百善印刷厂

版 次 2015年11月第1版

印 次 2015年11月第1次印刷

开 本 850mm×1168mm 1/16

印 张 15.5

字 数 380千字

定 价 30.00元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有 侵权必究

## 《化工原理学习指导及习题精解》编写人员

主 编 陈礼辉

编写人员 (按拼音排序)

陈礼辉 (福建农林大学)

陈 彦 (福建农林大学)

廖益强 (福建农林大学)

林启模 (福建农林大学)

卢泽湘 (福建农林大学)

谭 非 (福建农林大学)

化工原理课程是化学工程领域科学和技术发展的必然产物，是一门关于化学加工过程技术基础课，主要研究化工生产过程中的物理加工，按其操作原理的共性归纳成若干个单元操作。课程工程性强，教学内容丰富。习题训练是学生掌握化工原理课程的基本理论、基本思想及基本方法的重要环节。为此，编者根据化工原理课程的教学要求，结合教学经验，编写了《化工原理学习指导及习题精解》。

本书以例题的形式，再现了《化工原理》教材的相关内容，强调对基本概念、基本原理和工程处理方法的理解决。每章包括教学基本要求、重点内容、知识点关联图、习题解答、思考题及符号表 6 个部分。内容覆盖流体流动、流体输送机械、机械分离、传热、蒸发、吸收、蒸馏、气液传质设备、萃取、干燥 10 个基本单元操作。问题由浅入深，对启发思维、培养分析与解决问题的能力不无裨益，可作为教学参考书，供大专院校化工类及相关专业的师生、从事化工工作的工程技术人员参考，同时亦可作为化工原理课程硕士研究生入学考试辅导用书。

本书由福建农林大学教师编写，第一章由陈礼辉、廖益强、林启模编写，第二章和第三章由卢泽湘、林启模编写，第四章由谭非、林启模编写，第五章、第六章和第七章由廖益强、林启模编写，第八章和第九章和第十章由陈彦、林启模编写。全书由陈礼辉统稿。

由于编者水平有限，书中难免有不妥之处，敬请读者批评指正。

编 者

2015 年 5 月于福建农林大学

# 目 录

## 前 言

|                                                 |      |
|-------------------------------------------------|------|
| 第一章 流体流动 .....                                  | (1)  |
| 一、教学基本要求 .....                                  | (1)  |
| 二、重点内容 .....                                    | (1)  |
| (一) 液体的密度 .....                                 | (1)  |
| (二) 流体静力学基本方程式 .....                            | (2)  |
| (三) 水平管路上液体压差计读数与两测压面间压强差的关系 .....              | (2)  |
| (四) 流体的平均速率 (简称速度)、体积流量、质量流量及质量<br>流速间的关系 ..... | (3)  |
| (五) 定态条件下流体的连续性方程 .....                         | (3)  |
| (六) 定态条件下的伯努利方程 .....                           | (3)  |
| (七) 输送机械的轴功率 .....                              | (4)  |
| (八) 牛顿黏性定律 .....                                | (4)  |
| (九) 流体在圆形管内流过时的摩擦阻力 .....                       | (5)  |
| (十) 流体在非圆开管内流过时的摩擦阻力 .....                      | (6)  |
| (十一) 分支管路 .....                                 | (7)  |
| (十二) 并联管路 .....                                 | (7)  |
| (十三) 流速、流量的测量 .....                             | (7)  |
| 三、知识点关联图 .....                                  | (9)  |
| 四、习题解答 .....                                    | (10) |
| 五、思考题 .....                                     | (25) |
| 六、符号表 .....                                     | (29) |
| 第二章 流体输送机械 .....                                | (31) |
| 一、教学基本要求 .....                                  | (31) |
| 二、重点内容 .....                                    | (31) |
| (一) 离心泵的理论压头与实际压头 .....                         | (31) |
| (二) 离心泵的主要性能参数 .....                            | (32) |

|                                    |      |
|------------------------------------|------|
| (三) 离心泵的特性曲线 .....                 | (32) |
| (四) 离心泵的安装高度 .....                 | (32) |
| (五) 离心通风机 .....                    | (33) |
| (六) 往复压缩机有关计算式 .....               | (33) |
| (七) 余隙及容积系数 .....                  | (34) |
| (八) 理论吸气量 $V'_{min}$ .....         | (34) |
| (九) 多级绝热压缩功 $\overline{W}_i$ ..... | (34) |
| 三、知识点关联图 .....                     | (35) |
| 四、习题解答 .....                       | (36) |
| 五、思考题 .....                        | (43) |
| 六、符号表 .....                        | (45) |
| 第三章 机械分离 .....                     | (47) |
| 一、教学基本要求 .....                     | (47) |
| 二、重点内容 .....                       | (47) |
| (一) 离心沉降 .....                     | (47) |
| (二) 颗粒的特性 .....                    | (48) |
| (三) 降尘室 .....                      | (48) |
| (四) 离心沉降 .....                     | (48) |
| (五) 旋风分离器性能 .....                  | (48) |
| (六) 过滤 .....                       | (49) |
| 三、知识点关联图 .....                     | (52) |
| 四、习题解答 .....                       | (53) |
| 五、思考题 .....                        | (64) |
| 六、符号表 .....                        | (66) |
| 第四章 传 热 .....                      | (68) |
| 一、教学基本要求 .....                     | (68) |
| 二、重点内容 .....                       | (68) |
| (一) 热传导 .....                      | (68) |
| (二) 对流传热 .....                     | (69) |
| (三) 对流传热系数经验式 .....                | (70) |
| (四) 两流体间的热量传递 .....                | (72) |
| 三、知识点关联图 .....                     | (74) |
| 四、习题解答 .....                       | (75) |
| 五、思考题 .....                        | (97) |
| 六、符号表 .....                        | (99) |



|                                |       |
|--------------------------------|-------|
| 第五章 蒸 发 .....                  | (101) |
| 一、教学基本要求 .....                 | (101) |
| 二、重点内容 .....                   | (101) |
| (一) 单效蒸发 .....                 | (101) |
| (二) 多效蒸发 .....                 | (103) |
| 三、知识点关联图 .....                 | (104) |
| 四、习题解答 .....                   | (105) |
| 五、思考题 .....                    | (110) |
| 六、符号表 .....                    | (112) |
| 第六章 吸 收 .....                  | (113) |
| 一、教学基本要求 .....                 | (113) |
| 二、重点内容 .....                   | (113) |
| (一) 气相组成 (即浓度) 的表示方法及其换算 ..... | (113) |
| (二) 液相组成的表示方法及其换算 .....        | (114) |
| (三) 吸收操作中的相平衡关系 .....          | (114) |
| (四) 分子扩散的传质速率方程式 .....         | (115) |
| (五) 吸收速率方程式 .....              | (116) |
| (六) 吸收塔的操作线方程 .....            | (117) |
| (七) 最小液气比和适宜液气比 .....          | (117) |
| (八) 填料吸收塔塔径 .....              | (117) |
| (九) 填料层高度 .....                | (117) |
| 三、知识点关联图 .....                 | (119) |
| 四、习题解答 .....                   | (120) |
| 五、思考题 .....                    | (134) |
| 六、符号表 .....                    | (139) |
| 第七章 精 馏 .....                  | (141) |
| 一、教学基本要求 .....                 | (141) |
| 二、重点内容 .....                   | (141) |
| (一) 双组分溶液的汽液平衡关系 .....         | (141) |
| (二) 平衡蒸馏和简单蒸馏 .....            | (142) |
| (三) 连续精馏塔的物料衡算 .....           | (143) |
| (四) 连续精馏塔的热量衡算 .....           | (144) |
| (五) 最小回流比与适宜回流比 .....          | (145) |
| (六) 连续精馏塔理论板层数的计算 .....        | (145) |
| (七) 板效率和实际塔板数 .....            | (146) |

|                         |              |
|-------------------------|--------------|
| 三、知识点关联图 .....          | (147)        |
| 四、习题解答 .....            | (148)        |
| 五、思考题 .....             | (161)        |
| 六、符号表 .....             | (164)        |
| <b>第八章 气液传质设备 .....</b> | <b>(165)</b> |
| 一、教学基本要求 .....          | (165)        |
| 二、重点内容 .....            | (165)        |
| (一) 板式塔基本概念 .....       | (165)        |
| (二) 塔板效率表示法 .....       | (166)        |
| (三) 浮阀塔工艺尺寸计算 .....     | (167)        |
| (四) 浮阀塔板的流体力学验算 .....   | (169)        |
| (五) 浮阀塔板的负荷性能图 .....    | (169)        |
| (六) 填料塔 .....           | (170)        |
| 三、知识点关联图 .....          | (171)        |
| 四、习题解答 .....            | (172)        |
| 五、思考题 .....             | (182)        |
| 六、符号表 .....             | (183)        |
| <b>第九章 萃 取 .....</b>    | <b>(185)</b> |
| 一、教学基本要求 .....          | (185)        |
| 二、重点内容 .....            | (185)        |
| (一) 萃取基本概念 .....        | (185)        |
| (二) 主要计算要点 .....        | (186)        |
| (三) 萃取设备 .....          | (187)        |
| 三、知识点关联图 .....          | (189)        |
| 四、习题解答 .....            | (190)        |
| 五、思考题 .....             | (201)        |
| 六、符号表 .....             | (203)        |
| <b>第十章 干 燥 .....</b>    | <b>(204)</b> |
| 一、教学基本要求 .....          | (204)        |
| 二、重点内容 .....            | (204)        |
| (一) 湿空气的性质 .....        | (204)        |
| (二) 湿空气温度 .....         | (206)        |
| (三) 空气的湿度图 .....        | (208)        |
| (四) 对流干燥的传热与传质过程 .....  | (208)        |
| (五) 空气干燥器的物料衡算 .....    | (208)        |

|                           |       |
|---------------------------|-------|
| (六) 空气干燥器的热量衡算 .....      | (209) |
| (七) 干燥过程的计算及图示 .....      | (211) |
| (八) 干燥器的热效率 .....         | (212) |
| (九) 水分在空气与物料间的平衡关系 .....  | (212) |
| (十) 恒定干燥条件下的干燥速率 .....    | (213) |
| (十一) 恒速干燥阶段的干燥时间的计算 ..... | (214) |
| (十二) 降速干燥阶段的干燥时间计算 .....  | (214) |
| 三、知识点关联图 .....            | (215) |
| 四、习题解答 .....              | (216) |
| 五、思考题 .....               | (232) |
| 六、符号表 .....               | (233) |
| 参考文献 .....                | (234) |

# 第一章 流体流动

## 一、教学基本要求

本章主要涉及质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律在流体流动现象上的应用。通过学习，能够熟练应用流动流体的基本规律解释流体在管道中流动的现象，并能够熟练地计算和设计简单管路，定性分析复杂管路。

本章应掌握静止流体的基本方程、流动流体的连续性方程、流动流体的能量守恒方程及其应用；掌握牛顿黏性定律、管路阻力计算方法和流体流动类型的判断。熟悉流体的黏度、体积流量、质量流量、流体在管路中形成的边界层及边界层分离等基本概念；了解量纲分析方法、试差法等工程方法，流量测量的基本原理、常用流量计的基本构造及使用方法。重点是流体流动的机械能守恒方程及其应用，难点是应用能量守恒定律计算复杂管路。主要内容包括以下几个方面：

- 流体静力学方程及其应用；
- 机械能守恒方程及其应用；
- 流体流动的基本现象；
- 管路阻力的计算及定性分析。

## 二、重点内容

### (一) 液体的密度

#### 1. 理想气体的密度

除从手册中可以查到理想气体的密度外，还可使用式(1-1)或式(1-2)计算所需状态下纯气体的密度。

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0}{T} \frac{p}{p_0} = \frac{M}{22.4} \frac{T_0}{T} \frac{p}{p_0} \quad (1-1)$$

及

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1-2)$$

式中： $\rho$ ——密度， $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ；

$M$ ——相对分子质量， $\text{kg} \cdot \text{kmol}^{-1}$ ；

$p$ ——绝对压强，Pa；

$T$ ——开尔文温度，K；

$R$ ——气体通用常， $R = 8.314 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ；

下标0——标准状态。

若以混合气体的平均相对分子质量  $M_m$  代替上二式中纯气体的相对分子质量

$M$ , 则可以算出混合气体的平均密度  $\rho_m$ 。混合气体的平均相对分子量计算式为:

$$M_m = M_1 y_1 + M_2 y_2 + \cdots + M_n y_n \quad (1-3)$$

式中:  $y$  ——组分在混合气体中的摩尔分数;

下标  $m$  ——表示平均, 下标 1, 2,  $\cdots$ ,  $n$  为组分序号。

气体具有可压缩性、膨胀性, 其密度随温度、压强而变化。因此, 对气体密度数值必须标明其所处状态。

## 2. 液体的密度

从手册中只能查到纯液体的密度。混合液体的密度可用近似方法求得。若各组分在混合前、后体积没有变化, 则混合液体密度可用式(1-4)求算:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{\alpha_1}{\rho_1} + \frac{\alpha_2}{\rho_2} + \cdots + \frac{\alpha_n}{\rho_n} \quad (1-4)$$

式中:  $\alpha$  ——组分在混合液体中的质量分数。

液体为不可压缩流体, 在工程计算中常将液体的密度视为常数。

## (二) 流体静力学基本方程式

$$p = p_0 + \rho gh \quad (1-5)$$

式中:  $h$  ——液柱高度, m;

$g$  ——重力加速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ;

$p_0$ 、 $p$  ——分别为  $h=0$  及  $h=h$  处的流体压强, Pa。

## (三) 水平管路上液体压差计读数与两测压面间压强差的关系

### 1. 普通 U 管压差计

$$p_1 - p_2 = gR(\rho_A - \rho) \quad (1-6)$$

式中:  $p_1$ 、 $p_2$  ——分别为两测压面上的压强, Pa;

$R$  ——压差计上指示剂读数, m;

$\rho_A$ 、 $\rho$  ——分别为指示剂及被测流体的密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

若被测量的流体是气体, 则因  $\rho_A \gg \rho$ , 式(1-6)简化为:

$$p_1 - p_2 = gR\rho_A \quad (1-6a)$$

### 2. 微压差计

$$p_1 - p_2 = (\rho_A - \rho_C)gR + (\rho_C - \rho)gR' \quad (1-7)$$

式中:  $\rho_C$  ——指示剂 C 的密度,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ;

$R$  ——指示剂 A 的读数, m;

$R'$  ——指示剂 C 的读数, m;

其他符号与前同。

一般微差压差计用于测量气体的压强差, 由于  $\rho_C \gg \rho$ , 故式(1-7)可以简化为:

$$p_1 - p_2 \approx (\rho_A - \rho_C)gR + \rho_C gR' \quad (1-7a)$$

指示剂 C 的读数  $R'$  往往很小, 式(1-7a)又可以简化为:

$$p_1 - p_2 \approx (\rho_A - \rho_C)gR \quad (1-7b)$$

在应用式(1-6)、式(1-7)时须特别注意以下几点:

- 使用条件是连续的、均质的绝对静止的流体;
- 水平面即为等压面。

牢记以上两点,可以找到适当的等压面,然后再应用静力学方程,就可以解决压力、压差的测量,液位的测量及液封高度等静力学计算问题。

(四)流体的平均速率(简称速度)、体积流量、质量流量及质量流速间的关系

$$V_s = Au \quad (1-8)$$

$$m_s = V_s \rho = Au\rho \quad (1-9)$$

$$G = \frac{m_s}{A} = u\rho \quad (1-10)$$

式中:  $V_s$ ——流体的体积流量,  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ;

$u$ ——流体的速度,  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ;

$A$ ——流道的截面积,  $\text{m}^2$ ;

$G$ ——流体的质量流速,  $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

式(1-8)可改写为:

$$d = \sqrt{\frac{4V_s}{\pi u}} \quad (1-11)$$

式中:  $d$ ——流道或塔设备的直径,  $\text{m}$ 。

式(1-11)为设计圆形管道或塔设备直径的基本公式。

某些流体在管道中的流速范围可查各种版本的化工原理教材。

(五)定态条件下流体的连续性方程

在定态条件下,单位时间内通过流道任一截面的质量流量相等,即:

$$m_{s1} = m_{s2} = \cdots = m_{sn} = m = \text{常数} \quad (1-12)$$

式(1-12)称为定态条件下流体的连续性方程,也可以改写成:

$$u_1 \rho_1 A_1 = u_2 \rho_2 A_2 = \cdots = u_n \rho_n A_n = u\rho A = \text{常数} \quad (1-12a)$$

对不可压缩流体,密度  $\rho$  为常数,即:

$$u_1 A_1 = u_2 A_2 = \cdots = u_n A_n = uA = \text{常数} \quad (1-12b)$$

若输送管道的截面积没有变化,  $A$  为常数,则:

$$u_1 = u_2 = \cdots = u_n = u = \text{常数} \quad (1-12c)$$

式(1-12a)、式(1-12b)及式(1-12c)是式(1-12)的引申,习惯上也称之为流体连续性方程。

(六)定态条件下的伯努利方程

以 1 kg 质量的理想液体为基准时的伯努利方程式为:

$$gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} \quad (1-13)$$

式中:  $z_1$ 、 $z_2$ ——分别为 1-1' 及 2-2' 截面与参考水平面间的垂直距离, m。

对实际流体式(1-13)应修正为:

$$gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \sum w_f \quad (1-13a)$$

式中:  $\sum w_f$ ——1 kg 液体由 1-1' 面流到 2-2' 面的过程中共消耗的能量, 称为摩擦阻力或流动阻力,  $J \cdot kg^{-1}$ 。

若流动过程中采用输送机械, 则式(1-13a)应修正为:

$$gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + w_e = gz_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \sum w_f \quad (1-13b)$$

$$w_e = g\Delta z + \frac{\Delta u^2}{2} + \frac{\Delta p}{\rho} + \sum w_f \quad (1-13c)$$

式中:  $w_e$ ——流动过程中, 1 kg 液体从输送机械获得的能量, 称为有效功或净功,  $J \cdot kg^{-1}$ 。

### (七) 输送机械的轴功率

$$N = \frac{N_e}{\eta} = \frac{w_e m_s}{\eta} \quad (1-14)$$

式中:  $N_e$ ——单位时间内流体从输送机械获得的能量, 称为有效功率,  $J \cdot s^{-1}$  或 W;

$N$ ——单位时间输送机械向流体提供的能量, 转轴消耗的能量, 称为轴功率,  $J \cdot s^{-1}$  或 W;

$\eta$ ——输送机械总效率。

### (八) 牛顿黏性定律

流体在圆管内流过时, 可视为被分割成无数极薄的圆筒向前运动, 中心速度最大, 近管壁处速度为零。圆筒间彼此相互的作用力称为内摩擦力, 单位接触面积上的内摩擦力称为剪应力, 它的表达式为:

$$\tau = \pm \mu \frac{du}{dy} \quad (1-15)$$

式中:  $\tau$ ——剪应力, Pa;

$\frac{du}{dy}$ ——在与流动方向相垂直的  $y$  方向上流过的速度变化率, 称为速度梯度,  $m \cdot s^{-2}$ ;

$\mu$ ——比例系数, 简称黏度,  $Pa \cdot s$ 。

式(1-15)称为牛顿黏性定律。

黏度是液体的物理性质之一, 其值由实验测定。工程计算中除了极高和极低的压强外, 可以不考虑压强对气体黏度的影响, 液体的黏度基本不随压强而变化。

## (九) 流体在圆形管内流过时的摩擦阻力

流体在圆管内的摩擦阻力

$$\sum w_f = w_{f,直} + w_{f,局} \quad (1-16)$$

式中:  $\sum w_f$ ——流动过程中的总摩擦阻力,  $J \cdot kg^{-1}$ ;

$w_{f,直}$ ——流经直管的摩擦阻力,  $J \cdot kg^{-1}$ ;

$w_{f,局}$ ——流经管件等局部位置的摩擦阻力,  $J \cdot kg^{-1}$ 。

习惯上常用压强降表示摩擦阻力:

$$\sum w_f = \frac{\Delta p_f}{\rho} \quad (1-17)$$

或

$$\Delta p_f = \rho \sum w_f \quad (1-17a)$$

式中:  $\Delta p_f$ ——因克服摩擦阻力而引起的压强降低的值, 简称压强降, Pa。

## 1. 直管摩擦阻力

从理论上可以推导出

$$w_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2} \quad (1-18)$$

或

$$\Delta p_f = \rho w_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho u^2}{2} \quad (1-18a)$$

式中:  $\lambda$ ——摩擦系数, 无因次;

$l$ ——直管长度, m。

上二式称为范宁 (Fanning) 公式, 是计算直管摩擦阻力的基本公式。

摩擦系数  $\lambda$  与流动类型有关。

(1) 层流 ( $Re \leq 2000$ ) 可以从理论上推导出:

$$\Delta p_f = \frac{32\mu l u}{d^2} \quad (1-19)$$

式(1-19)称为哈根 (Hagen) - 泊谟叶 (Poiseuille) 公式。与式(1-18a)相比知:

$$\lambda = \frac{64\mu}{d u \rho} = \frac{64}{Re} \quad (1-20)$$

式中:  $Re$ ——雷诺准数, 无因次。

(2) 湍流 ( $Re \geq 4000$ ) 湍流情况比较复杂, 目前只能用半经验半理论的方法来处理数据, 整理出摩擦系数的经验公式或绘出关系曲线。

## ①经验公式

光滑管: 柏拉修斯 (Blasius) 公式

$$\lambda = \frac{0.3164}{Re^{0.25}} \quad (1-21)$$

式(1-21)适用范围为  $Re = 5 \times 10^3 \sim 1 \times 10^5$ 。



顾毓珍公式

$$\lambda = 0.0056 + \frac{0.500}{Re^{0.32}} \quad (1-22)$$

式(1-22)适用范围为  $Re = 3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^6$ 。

粗糙管：顾毓珍公式

$$\lambda = 0.01227 + \frac{0.7543}{Re^{0.38}} \quad (1-23)$$

式(1-23)适用范围为  $Re = 3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^6$ 。

②关系曲线：已制成摩擦系数与雷诺准数、 $\varepsilon/d$  (相对粗糙度)间的关系曲线，可查化工原理教材。

## 2. 局部摩擦阻力

(1)阻力系数法 将局部阻力看作是动能的函数：

$$w_{f,局} = \zeta \frac{u^2}{2} \quad (1-24)$$

式中： $\zeta$ ——阻力系数，无因次。

阻力系数由实验测得，可从手册及化工原理教材查到。

(2)当量长度法 将流体流经管件的局部阻力折合相当于流过  $l_e$  长度的直管阻力，将式(1-18)及式(1-18a)中的  $l$  换成  $l_e$ ，即可算出局部阻力  $w_{f,局}$  或局部压强降  $\Delta p_{f,局}$ 。

$$w_{f,局} = \lambda \frac{l_e}{d} \frac{u^2}{2} \quad (1-25a)$$

或

$$\Delta p_{f,局} = \rho w_{f,局} = \lambda \frac{l_e}{d} \frac{\rho u^2}{2} \quad (1-25b)$$

式中： $l_e$ ——管件的当量长度，m。 $l_e$  可从手册或化工原理教材中查到。

## (十) 流体在非圆开管内流过时的摩擦阻力

前面求圆形管内摩擦阻力各式中的圆管直径  $d$  换以当量直径  $d_e$ ，即可用以求出非圆形管内的相应阻力，但不能用当量直径来计算流体通过的截面积、流量和流速。当量直径的计算式为：

$$d_e = 4 r_H \quad (1-26)$$

而

$$r_H = \frac{\text{流通截面积}}{\text{润湿周边}}$$

当量直径用于计算湍流时的阻力较可靠；用于矩形管时，长与宽之比不能超过 3:1；对环形截面积时其可靠性较差；层流时用当量直径计算阻力的误差更大。当必须采用式(1-24)时，除式(1-18)及式(1-18a)中的  $d$  换以  $d_e$  外，还需将式(1-20)修正为：

$$\lambda = \frac{C}{Re} \quad (1-27)$$