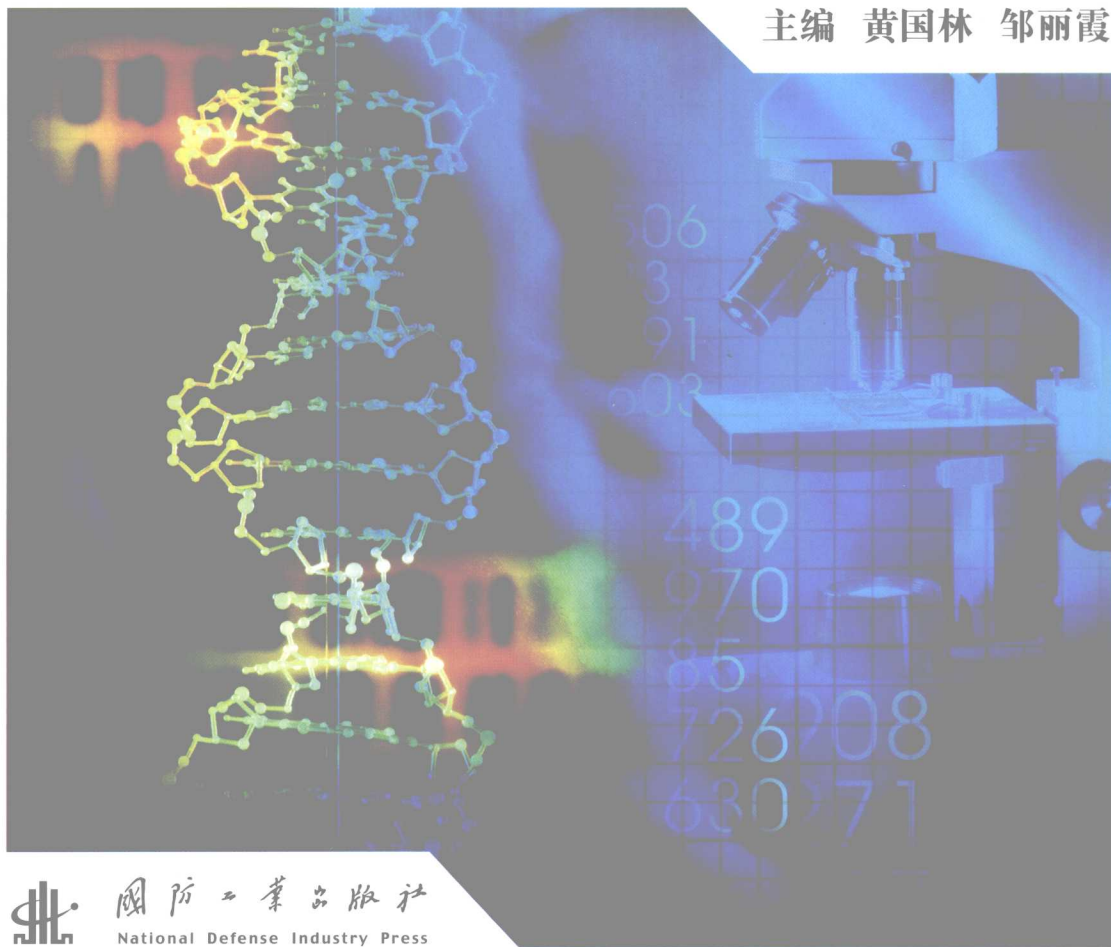


# 化工原理

## 学习指导

主编 黄国林 邹丽霞



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

# 化工原理学习指导

主编 黄国林 邹丽霞

国防工业出版社

·北京·

## 内 容 简 介

全书共有九个章节,内容包括:流体流动、流体输送机械、非均相物系的分离、传热、蒸发、蒸馏、吸收、萃取及干燥,每章包括基本理论和重要公式、例题解析及自测题三个部分。其中经典例题解析 149 题,自测题及习题 104 题,并附有参考答案。

本书可作为高等院校化工及相关专业教学参考书。对于从事化工生产、化工设计和科研人员,本书也有一定的参考价值。

### 图书在版编目(CIP)数据

化工原理学习指导/黄国林,邹丽霞主编. —北京:国防工业出版社,2009.4

ISBN 978-7-118-06148-2

I. 化... II. ①黄...②邹... 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(2009)第 006600 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

天利华印刷装订有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 787×960 1/16 印张 12 $\frac{3}{4}$  字数 257 千字

2009 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 22.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

# 前 言

《化工原理》是化工及相近专业的综合性技术专业基础主干课程,理论与实际紧密相连,在化学工程与工艺专业课程设置中占有重要的地位和作用。为使学生更好地掌握本课程的基本理论、基本思想及分析问题、解决问题的方法,明确学习该课程的重要意义,作者根据化工原理课程的教学基本要求,并结合多年来的教学实践经验,编写了《化工原理学习指导》。旨在通过一些典型的示范例题和练习题,将本课程的基本概念和重点内容系统地再现,使学生通过例题或习题悟出一定的道理,加深理解相关知识的基本概念,验证相关重要工程观点,掌握基本的处理工程问题的方法。

全书共有九个章节,内容包括:流体流动、流体输送机械、非均相物系的分离、传热、蒸发、蒸馏、吸收、萃取及干燥,每章包括基本理论和重要公式、例题解析及自测题三个部分。其中经典例题解析 149 题,自测题及习题 104 题,并附有参考答案。

该指导书涉及的内容是化工实际生产中常见的单元操作,因此本书也可和各种版本的《化工原理》教材配套使用,可作为高等院校化工及相关专业教学参考书。对于从事化工生产、化工设计的工程师和科研人员,本书也有一定的参考价值。

由于编者学识有限,书中在编写处可能存在不妥之处,恳请各位同仁及读者指教,编者将不甚感谢!

编者  
2008 年 8 月

# 目 录

<b>第一章 流体流动</b> .....	1
<b>第一节 教学基本要求</b> .....	1
<b>第二节 基本内容</b> .....	2
2.1 流体静力学基本方程式 .....	2
2.1.1 流体的压强 .....	2
2.1.2 流体静力学基本方程式 .....	2
2.2 管内流体的流动 .....	2
2.2.1 流量与流速 .....	2
2.2.2 连续性方程式 .....	3
2.2.3 机械能守恒式—伯努利方程的常用形式 .....	3
2.3 流体的流动现象 .....	3
2.3.1 牛顿黏性定律 .....	3
2.3.2 流体的黏度 .....	4
2.3.3 流体的流动类型 .....	4
2.4 流体在管内的流动阻力 .....	5
2.4.1 流体在直管中的流动阻力 .....	5
2.4.2 管路上的局部阻力 .....	5
2.4.3 管路总能量损失 .....	6
2.5 管路计算 .....	6
2.5.1 简单管路 .....	6
2.5.2 复杂管路 .....	7
<b>第三节 习题解答</b> .....	7
<b>第四节 自测题</b> .....	23
<b>第二章 流体输送机械</b> .....	26
<b>第一节 教学基本要求</b> .....	26
<b>第二节 基本内容</b> .....	26

2.1	离心泵 .....	26
2.1.1	工作原理 .....	26
2.1.2	离心泵的基本方程式 .....	27
2.1.3	离心泵的主要性能参数与特性曲线 .....	27
2.1.4	离心泵性能的改变和换算 .....	28
2.1.5	离心泵的气蚀现象与允许吸上高度 .....	28
2.1.6	离心泵的工作点与流量调节 .....	30
2.2	离心通风机 .....	31
2.2.1	离心通风机的性能参数 .....	31
2.2.2	离心通风机的特性曲线 .....	32
第三节	例题解析 .....	33
第四节	自测题 .....	42
<b>第三章</b>	<b>非均相物系的分离 .....</b>	<b>44</b>
第一节	教学基本要求 .....	44
第二节	基本内容 .....	44
2.1	沉降过程 .....	44
2.1.1	重力沉降 .....	44
2.1.2	离心沉降 .....	46
2.2	过滤 .....	48
2.2.1	过滤方式 .....	48
2.2.2	滤饼的压缩性 .....	48
2.2.3	过滤基本方程式 .....	49
2.2.4	滤饼的洗涤 .....	50
2.2.5	过滤机的生产能力 .....	51
2.3	离心机 .....	51
第三节	例题解析 .....	52
第四节	自测题 .....	65
<b>第四章</b>	<b>传热 .....</b>	<b>67</b>
第一节	教学基本要求 .....	67
第二节	基本内容 .....	67
2.1	传热的基本方式 .....	67
2.2	热传导 .....	68
2.2.1	傅里叶定律 .....	68

	2.2.2 平壁的热传导	68
	2.2.3 圆筒壁的热传导	68
2.3	对流传热速率方程	69
2.4	传热计算	69
	2.4.1 能量衡算	69
	2.4.2 总传热速率微分方程	69
	2.4.3 总传热系数	70
	2.4.4 平均温度差	70
	2.4.5 传热单元数法	70
	2.4.6 传热效率和传热单元数的关系	71
2.5	热辐射	71
	2.5.1 基本概念	71
	2.5.2 基本定律	72
第三节	例题解析	72
第四节	自测题	91
<b>第五章</b>	<b>蒸发</b>	<b>94</b>
第一节	教学基本要求	94
第二节	基本内容	94
	2.1 溶液的温度差损失和杜林规则	94
	2.1.1 溶液的温度差损失	94
	2.1.2 杜林规则	95
	2.2 单效蒸发的计算	95
	2.2.1 蒸发量( $W$ )	95
	2.2.2 加热蒸汽消耗量( $D$ )	96
	2.2.3 传热面积( $S_0$ )	97
	2.2.4 蒸发器的生产能力和蒸发强度	97
	2.3 多效蒸发	98
第三节	例题解析	98
第四节	自测题	111
<b>第六章</b>	<b>蒸馏</b>	<b>113</b>
第一节	教学基本要求	113
第二节	基本内容	113
	2.1 两组分溶液的气液相平衡	113

2.2	平衡蒸馏和简单蒸馏	114
2.2.1	平衡蒸馏	114
2.2.2	简单蒸馏	115
2.3	双组分连续精馏塔的计算	115
2.3.1	物料衡算	115
2.3.2	操作线方程	115
2.3.3	进料热状态的影响	116
2.3.4	回流比的影响和选择	116
2.3.5	理论板层数的求法	117
2.3.6	板效率与实际全塔效率	118
第三节	例题解析	118
第四节	自测题	134
<b>第七章</b>	<b>吸收</b>	<b>136</b>
第一节	教学基本要求	136
第二节	基本内容	137
2.1	气液相平衡	137
2.1.1	亨利定律	137
2.1.2	亨利定律各系数之间的关系	137
2.2	传质机理与吸收速率	138
2.2.1	费克定律	138
2.2.2	气相中的稳定分子扩散	138
2.2.3	吸收速率方程式	139
2.3	吸收塔的计算	140
2.3.1	吸收塔物料衡算与操作线方程	140
2.3.2	吸收剂用量的决定	142
2.3.3	填料层高度的计算	142
2.3.4	理论板层数的计算	143
第三节	例题解析	144
第四节	自测题	152
<b>第八章</b>	<b>萃取</b>	<b>155</b>
第一节	教学基本要求	155
第二节	基本内容	155
2.1	三元体系的液—液相平衡	155



2.1.1	组分在三角形相图上的表示 .....	155
2.1.2	溶解度曲线和联结线 .....	156
2.1.3	辅助曲线和临界混溶点 .....	157
2.1.4	分配系数和分配曲线 .....	157
2.1.5	杠杆定律 .....	158
2.1.6	选择性系数 .....	158
2.2	溶剂比和萃取剂的最小用量 .....	159
2.3	萃取过程的计算 .....	159
2.4	液—液萃取设备 .....	159
第三节	例题解析 .....	160
第四节	自测题 .....	172
<b>第九章</b>	<b>干燥</b> .....	<b>174</b>
第一节	教学基本要求 .....	174
第二节	基本内容 .....	174
2.1	干燥操作的分类 .....	174
2.2	湿空气的性质与湿焓图 .....	174
2.2.1	湿空气性质 .....	174
2.2.2	湿焓图 .....	176
2.3	物料衡算和热量衡算 .....	176
2.3.1	物料含水量的表示方法 .....	176
2.3.2	物料衡算方程 .....	176
2.3.3	干燥过程的热量衡算 .....	177
2.3.4	干燥器热效率 .....	178
2.4	干燥动力学 .....	178
第三节	例题解析 .....	179
第四节	自测题 .....	188
<b>参考文献</b>	.....	<b>193</b>

# 第一章 流体流动

## 第一节 教学基本要求

本章主要讨论流体流动过程中的基本原理和流体在管内的流动规律,研究流体宏观运动规律,将流体视为由无数微团(质点)组成的、彼此无间隙的、完全充满所占空间的连续介质。具体地说,就是质量守恒定律、能量守恒定律、动量定理等自然科学三大定律在流体流动现象上的应用。这一章是本课程的基础,这是因为:

(1)许多单元操作都是在流体流动条件下进行的,因此,流体流动的基本规律是研究这些单元操作的重要基础。

(2)流体流动规律,与传热、传质的规律类似,在化工中称为“三传”(动量传递、热量传递、质量传递)。因此,掌握流体流动规律的方法和手段,对传热、传质的学习非常重要。

本章学习的基本要求为:

### 重点掌握:

(1)流体的主要物性(如密度、黏度等)数据的求取,压力的定义及表压、真空度、绝对压力的定义;流量、流速的定义;不同单位间的换算。

(2)流体静力学基本方程、连续性方程式及应用。

(3)各种形式的伯努利方程式,并能熟练地运用伯努利方程解题。

(4)雷诺数的表达式,流体的两种流动类型的判断方法。

(5)流体在管路中流动时流动阻力的计算(包括直管阻力和局部阻力),流体适宜流速的选择及管路直径的确定。

### 主要了解:

(1)了解流体流动中的连续性、稳定性。

(2)牛顿黏性定律以及应用。

(3)流体在圆管内的速度分布。

(4)了解管路的构成,管件及阀门的作用,学会简单管路和复杂管路的相关计算。

(5)了解管路中流体的压力、流速和流量的测定原理及方法;毕托管、孔板流量计和转子流量计的测量原理、简单结构和特点,并能作简单的计算。

(6)了解因次分析方法的相关概念。

## 第二节 基本内容

流体流动规律是本门课程的重要基础,主要讨论流体流动过程的基本原理及流体在管内的流动规律,并运用这些原理与规律去分析和计算流体的输送问题。流体流动的计算即是物料衡算和能量衡算的综合运用。

### 2.1 流体静力学基本方程式

#### 2.1.1 流体的压强

压强不同单位之间的换算关系:

$$1 \text{ atm} = 1.033 \text{ kgf/cm}^2 = 760 \text{ mmHg} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O} = 1.0133 \text{ bar} = 1.0133 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 1.0133 \times 10^5 \text{ Pa}$$

不同基准压强的关系:

$$\text{表压} = \text{绝对压强} - \text{大气压强} \quad (1-1)$$

$$\text{真空度} = \text{大气压强} - \text{绝对压强} \quad (1-2)$$

#### 2.1.2 流体静力学基本方程式

$$p_2 = p_1 + \rho g(z_1 - z_2) \quad (1-3)$$

或

$$\frac{p_2}{\rho g} = \frac{p_1}{\rho g} + (z_1 - z_2) \quad (1-4)$$

式中  $p_1, p_2$ ——分别在静止流体内部高度  $z_1, z_2$  处的静压强 ( $\text{N/m}^2$ );

$z_1, z_2$ ——静止流体内部点 1、2 距某一基准面的高度 (m);

$\rho$ ——流体密度 ( $\text{kg/m}^3$ )。

流体静力学基本方程式,适用于重力场中静止的连续的不可压缩流体。

### 2.2 管内流体的流动

#### 2.2.1 流量与流速

(1) 体积流量  $V_s$  和质量流量  $W_s$  之间的关系:

$$W_s = V_s \cdot \rho \quad (1-5)$$

(2) 平均流速  $u$  和质量流速  $G$  之间的关系:

$$u = V_s / A \quad (1-6)$$

$$G = W_s/A = V_s \cdot \rho/A = u \cdot \rho \quad (1-7)$$

$$W_s = uA\rho \quad (1-8)$$

式中  $A$ ——与流动方向相垂直的管道横截面积( $\text{m}^2$ )。

## 2.2.2 连续性方程式

稳定流动系统:

$$W_s = \rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2 = \dots = \rho u A = \text{常数} \quad (1-9)$$

若流体可视为不可压缩的流体,

$$V_s = u_1 A_1 = u_2 A_2 = \dots = u A = \text{常数} \quad (1-10)$$

## 2.2.3 机械能守恒式—伯努利方程的常用形式

(1)以单位质量流体为基准( $\text{J/kg}$ )。

$$gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + W_e = gz_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \sum h_f \quad (1-11)$$

(2)以单位重量流体为基准( $\text{m}$ )。

$$z_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + H_e = z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + H_f \quad (1-12)$$

(3)以单位体积流体为衡算基准( $\text{Pa}$ )。

$$z_1 \rho g + \frac{u_1^2}{2} \rho + p_1 + W_e \rho = z_2 \rho g + \frac{u_2^2}{2} \rho + p_2 + \rho \sum h_f \quad (1-13)$$

## 2.3 流体的流动现象

### 2.3.1 牛顿黏性定律

$$\tau = \frac{F}{S} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-14)$$

式中  $\frac{du}{dy}$ ——速度梯度,即在与流动方向相垂直的  $y$  方向上流体速度的变化率;

$\mu$ ——比例系数,流体的黏性愈大,其值愈大,称为黏滞系数或动力黏度,简称为黏度。

服从牛顿黏性定律的流体称为牛顿型流体,所有气体和大多数液体都属于这一类,如气体及水、溶剂、甘油等液体;非牛顿型流体、不服从牛顿黏性定律,如胶体溶液、泥浆、油墨等。

### 2.3.2 流体的黏度

黏度的物理意义是促使流体流动产生单位速度梯度的剪应力,黏度和温度与压强有关。其中液体的黏度随温度的升高而减小,气体的黏度则随温度升高而增大。压强变化时,液体的黏度基本不变;气体的黏度随压强增大而增加得很少,在一般工程计算中可以忽略。

黏度的单位换算:

$$1\text{cP} = 0.01\text{P} = 0.01\text{dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2 = 0.01 \times \frac{10^{-5}\text{N} \cdot \text{s}}{\left(\frac{1}{10^2}\right)^2 \text{m}^2} = 0.001\text{Pa} \cdot \text{s}$$

对于常压气体混合物的黏度,可采用下式计算,即:

$$\mu_m = \frac{\sum y_i \mu_i M_i^{1/2}}{\sum y_i M_i^{1/2}} \quad (1-15)$$

式中  $\mu_m$ ——混合气体的黏度(Pa·s);

$\mu_i$ ——混合气体中某一组分的黏度(Pa·s);

$y_i$ ——混合气体中某一组分的摩尔分率;

$M_i$ ——混合气体中某一组分的摩尔质量。

### 2.3.3 流体的流动类型

流体流动的类型分为层流和湍流,可通过雷诺准数的大小来判断。雷诺准数表达式为

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} \quad (1-16)$$

实验证明,流体在直管内流动时:当  $Re \leq 2000$  时,流体的流动属于滞流,流体质点沿管轴作有规则的平行运动,各质点互不碰撞,互不混合;当  $Re \geq 4000$  时,流动属于湍流,流体质点作不规则的杂乱运动; $Re$  值在  $2000 \sim 4000$  的范围内,可能是滞流,也可能是湍流,在生产操作条件下,常将  $Re > 3000$  的情况按湍流考虑。

(1) 流体在圆管内层流时速度分布:

$$u_r = u_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (1-17)$$

平均速度:

$$\bar{u} = \frac{\bar{V}_s}{A} = \frac{\int_A u_r dA}{A} = \frac{u_{\max} \int_0^R \left( 1 - \left( \frac{r}{R} \right)^2 \right) 2\pi r dr}{\pi R^2} = \frac{1}{2} u_{\max} = \frac{p_1 - p_2}{8\mu l} R^2 \quad (1-18)$$

(2) 流体在圆管内滞流时速度分布。

湍流时管壁处的速度也等于零,则靠近管壁的流体仍作滞流流动,这一作滞流流动的流体薄层称为滞流内层或滞流底层。自滞流内层往管中心推移,速度逐渐增大,出现了缓冲层或过渡层,再往中心才是湍流主体。

$$\bar{u} = 0.8 - 0.82u_{\max} \quad (1-19)$$

## 2.4 流体在管内的流动阻力

流体在管路中流动时的阻力可分为直管阻力和局部阻力。

### 2.4.1 流体在直管中的流动阻力

(1) 范宁公式。

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2} \quad (1-20)$$

或

$$\Delta p_f = \rho h_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho u^2}{2} \quad (1-21)$$

式中  $\lambda$ ——摩擦系数,  $\lambda = \frac{8\tau}{\rho u^2}$ , 它是雷诺数的函数或者是雷诺数与管壁粗糙度的函数。

此式对于滞流与湍流均适用。

(2) 流体在圆管内作滞流流动时  $\lambda$  计算。

$$\lambda = \frac{64}{Re} \quad (1-22)$$

影响滞流摩擦系数的因素只是雷诺数  $Re$ , 而与管壁的粗糙度无关。

(3) 流体在圆管内作湍流流动时  $\lambda$  计算。

湍流时,在不同  $Re$  值范围内,对不同的管材, $\lambda$  的表达式亦不相同,用起来很不方便。在工程计算中,一般将实验数据进行综合整理,以  $\varepsilon/d$  为参数,标绘  $Re$  与  $\lambda$  关系,得到莫狄图。通过莫狄图便可根据  $Re$  与  $\varepsilon/d$  值查得  $\lambda$  值。

(4) 流体在非圆形直管内的流动阻力。

在湍流情况下,对非圆形截面的通道可以用当量直径  $d_e$  代替之。

$$d_e = 4r_H \quad (1-23)$$

式中  $r_H$ ——水力半径(m),  $r_H = \frac{\text{流通截面积}}{\text{润湿周边}}$ 。

### 2.4.2 管路上的局部阻力

流体在管路的进口、出口、弯头、阀门、扩大、缩小等局部位置流过时,容易变为湍流。

在湍流情况下,为克服局部阻力所引起的能量损失有两种计算方法。

(1)阻力系数法。

$$h'_f = \zeta \frac{u^2}{2} \quad (1-24)$$

或

$$\Delta p'_f = \zeta \frac{\rho u^2}{2} \quad (1-25)$$

式中  $\zeta$ ——局部阻力系数,一般由实验测定。

(2)当量长度法。

流体流经管件、阀门等局部地区所引起的能量损失可写成如下形式:

$$h'_f = \lambda \frac{l_e}{d} \frac{u^2}{2}$$

或

$$\Delta p'_f = \lambda \frac{l_e}{d} \frac{\rho u^2}{2} \quad (1-26)$$

式中  $l_e$ ——管件或阀门的当量长度,其单位为 m,表示流体流过某一管件或阀门的局部阻力,相当于流过一段与其具有相同直径、长度为  $l_e$  的直管阻力。

### 2.4.3 管路总能量损失

管路总能量损失是管路上全部直管阻力与局部阻力之和。则管路的总能量损失为:

$$\Sigma h_f = \lambda \frac{l + \Sigma l_e}{d} \frac{u^2}{2} \quad (1-27)$$

式中  $\Sigma h_f$ ——管路的总能量损失(J/kg);

$l$ ——管路上各段直管的总长度(m);

$\Sigma l_e$ ——管路上全部管件与阀门等的当量长度之和(m);

$u$ ——流体流经管路的流速(m/s)。

应注意,当管路由若干直径不同的管段组成时,由于各段的流速不同,此时管路的总能量损失应分段计算,然后再求其总和。

## 2.5 管路计算

### 2.5.1 简单管路

(1)设计型问题。给定输入任务和要求,寻求完成给定输送任务 and 要求的输送管程系统的间接设计类型。设计型问题需用试差法,这是因为流体流动状况处于湍流区时,摩擦系数  $\lambda$  与  $Re$  数呈非线性关系的缘故。

(2)操作型问题:已知输入和管径系统,求解或测试管路系统的输送能力的值。

## 2.5.2 复杂管路

(1) 串联管路。

① 全管路的总阻力等于各段简单管路阻力之和；

② 各段简单管路内的质量流量均等于总质量流量。

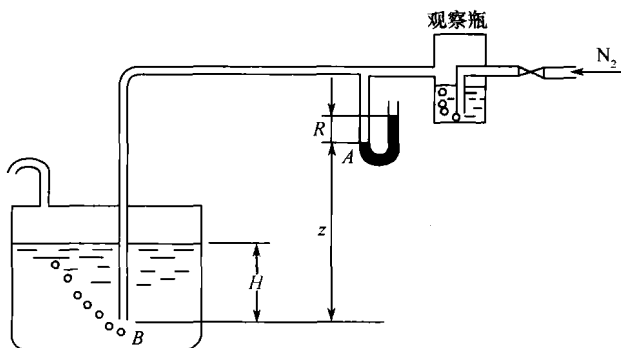
(2) 并联管路与分支管路。

① 各条分支管路中的阻力相等；

② 各分支管路中的质量流量之和等于总管路中的质量流量。

## 第三节 习题解答

**例题1** 欲知某地下油品储槽的液位  $H$ ，采用图示装置在地面上进行测量。测量时控制氮气的流量使观察瓶内产生少量气泡。已知油品的密度为  $850\text{kg/m}^3$ ，并测得水银压强计的读数  $R$  为  $150\text{mm}$ ，问储槽内的液位  $H$  为多少？



例题1附图

解：因观察瓶中只有少许气泡产生，这表明在管道内氮气的流速极小，可近似认为处于静止状态。

根据静力学方程，有：

$$\frac{p_A}{\rho_{N_2}} + gz_A = \frac{p_B}{\rho_{N_2}} + gz_B$$

因  $\rho_{N_2}$  很小，所以  $p_B - p_A = \rho_{N_2}g(z_A - z_B) = \rho_{N_2}gz \approx 0$

储槽内液位  $H$  为

$$H = \frac{p_A}{\rho g} = \frac{\rho_{\text{Hg}}gR}{\rho g} = \frac{13600 \times 9.81 \times 0.15}{850 \times 9.81} = 2.4\text{m}$$



**例题2** 把空气近似看成是由21%的氧气和79%的氮气组成的混合物(体积分数), 试估算温度为400℃时常压空气的黏度。

解:对于低压混合气体,其黏度可用下式计算

$$\mu_m = \frac{\sum y_i M_i^{\frac{1}{2}} \mu_i}{\sum y_i M_i^{\frac{1}{2}}}$$

查出在给定条件下氧气和氮气的黏度为:

$$\mu_1 = 0.0382 \text{ cP}, \mu_2 = 0.0322 \text{ cP}$$

$$y_1 M_1^{\frac{1}{2}} = 0.21 \sqrt{32} = 1.188, y_2 M_2^{\frac{1}{2}} = 0.79 \sqrt{28} = 4.18$$

空气的黏度为

$$\begin{aligned} \mu_m &= \frac{y_1 M_1^{\frac{1}{2}} \mu_1 + y_2 M_2^{\frac{1}{2}} \mu_2}{y_1 M_1^{\frac{1}{2}} + y_2 M_2^{\frac{1}{2}}} \\ &= \frac{1.188 \times 0.0382 + 4.18 \times 0.0322}{1.188 + 4.18} \\ &= 0.0335 \text{ cP} = 3.35 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s} \end{aligned}$$

和手册中查得的400℃空气的黏度数据一致。

**例题3** 求出下列流体在 $\phi 57 \times 3.5 \text{ mm}$ 管内流动时,若保持层流状态,允许的极限流速(指平均流速)。

(1) 20℃的水;

(2) 黏度为 $3.5 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ ,密度为 $963 \text{ kg/m}^3$ 的重油。

(3) 温度为20℃,黏度为 $1.825 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$ 及密度为 $1.2 \text{ kg/m}^3$ 的空气。

解:从手册中查得,20℃水的密度 $\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$ ,黏度 $\mu = 1.005 \text{ cP}$ ,

管内径  $d = (57 - 2 \times 3.5) \times 10^{-3} = 0.05 \text{ m}$ 。

要保持流动处于层流状态,  $Re \leq 2000$

由  $Re = d u \rho / \mu$

有(1)  $u = Re \mu / (d \rho) = 2000 \times 1.005 \times 10^{-3} / (0.05 \times 998.2) = 0.0403 \text{ m/s}$

同理(2)重油的极限速度  $u = 2000 \times 3.5 \times 10^{-5} / (0.05 \times 963) = 1.45 \text{ m/s}$

(3)空气的极限速度  $u = 2000 \times 1.825 \times 10^{-5} / (0.05 \times 1.2) = 0.608 \text{ m/s}$

**例题4** 列管换热器的管束由121根 $\phi 25 \times 2.5 \text{ mm}$ 的钢管组成。空气以 $9 \text{ m/s}$ 的速度在列管内流动。空气在管内的平均温度为 $50^\circ \text{C}$ ,压强为 $1.96 \times 10^3 \text{ Pa}$ (表压),当地大气压为 $98.7 \times 10^3 \text{ Pa}$ ,试求:

(1) 空气的质量流量;