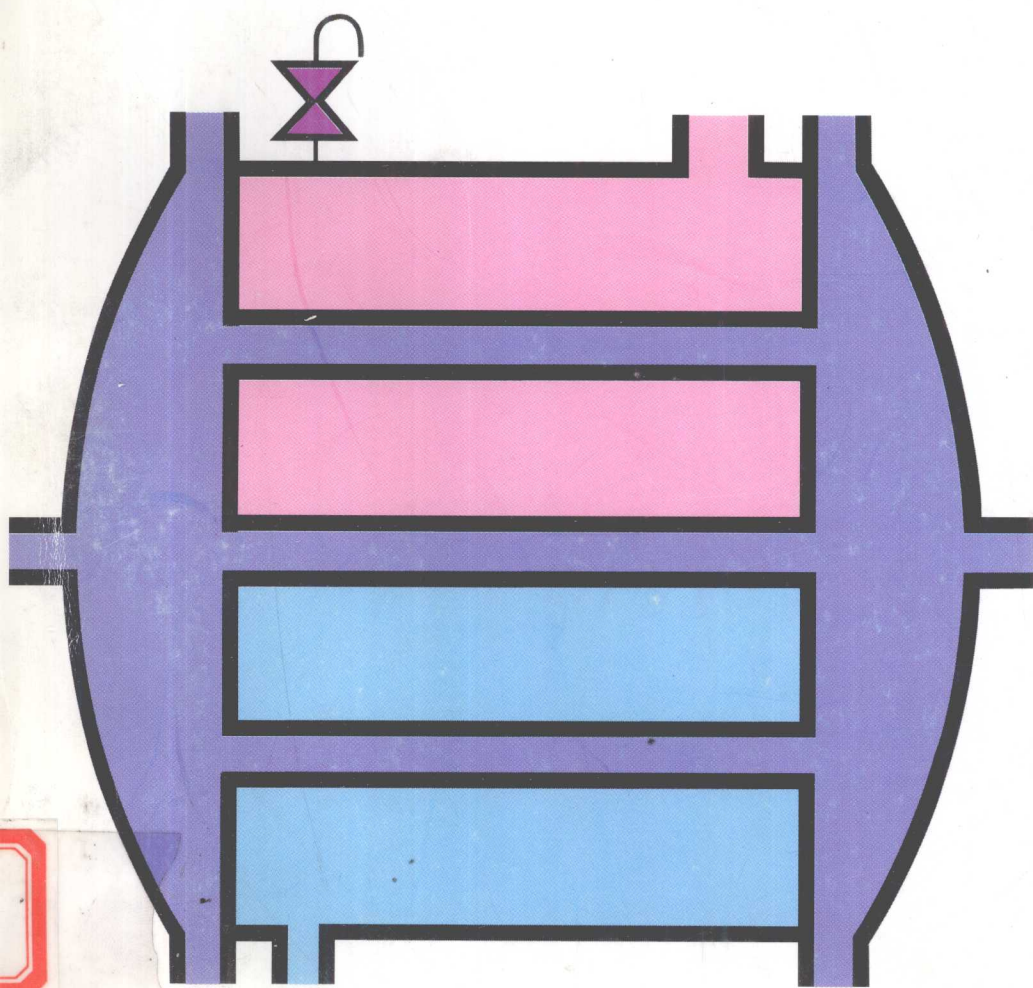


●高等学校教学用书

化工原理学习指导

天津大学化工原理教研室
柴诚敬 刘国维 陈常贵 编



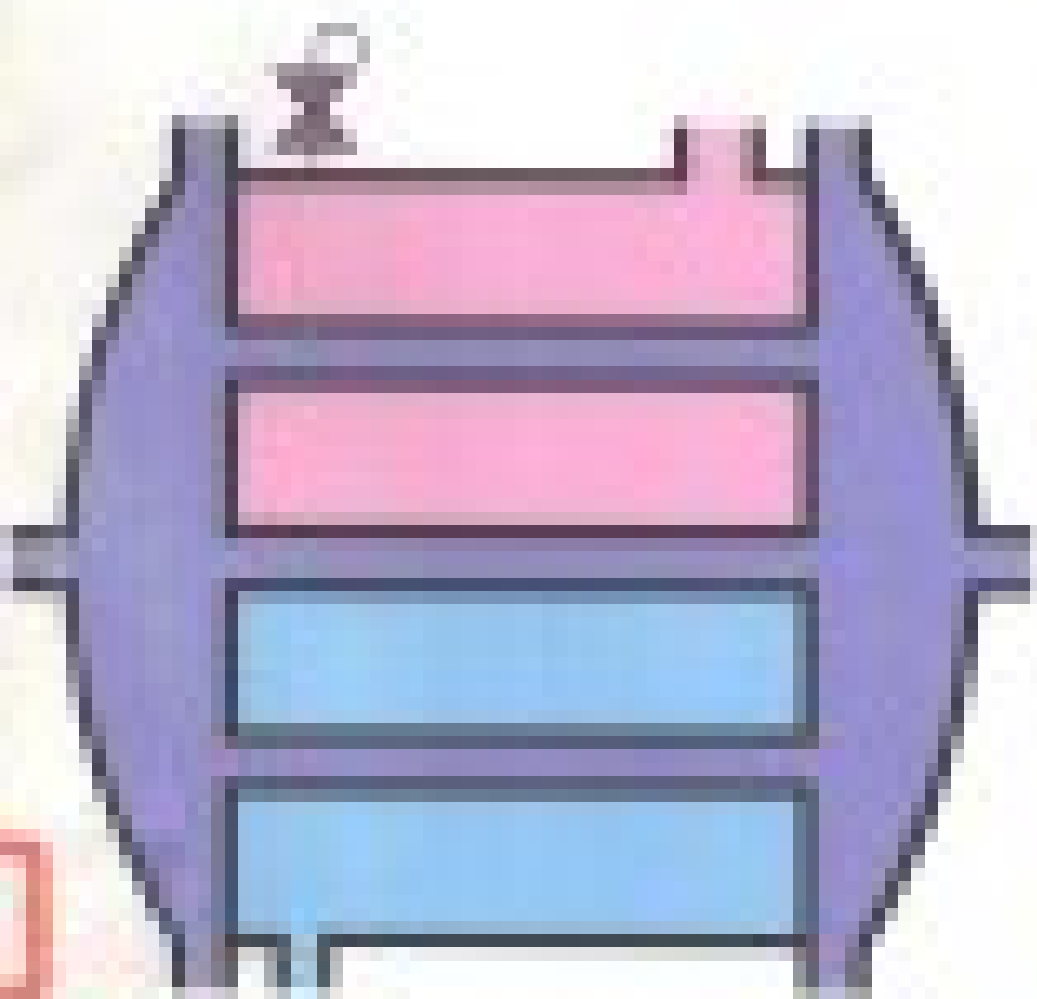
天津科学技术出版社

普通高等教育化学工程类

化工原理学习指导

天津大学化工原理教研室

董城刚 刘国瑞 陈雪燕 编



天津大学出版社 天津 300072

化工原理学习指导

柴诚敬 刘国维 陈常贵 编

天津科学技术出版社

责任编辑:宗洁

化工原理学习指导

柴诚敬 刘国维 陈常贵 编

*

天津科学技术出版社出版

天津市张自忠路189号 邮编 300020

天津市蓟县印刷厂印刷

新华书店天津发行所发行

*

开本 787×1092 1/16 印张 18.25 字数 446 000

1997年9月第1版

1997年9月第1次印刷

印数:1—4 000

ISBN 7-5308-2208-X

TQ·7 定价:19.50元

说 明

本书是在总结长期教学经验的基础上编写的。旨在帮助学生掌握学习《化工原理》的方法,深入理解基本概念与基本理论,提高运用基本理论分析与解决工程实际问题的技巧和能力。本书涉及的化工过程和单元操作有: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、蒸馏和吸收塔设备、液-液萃取及干燥等十章。每章都包括“基本内容和重要公式”及“应用举例”两部分,书末附有天津大学 1995 年至 1997 年招收硕士生“化工原理”入学试题,以供学生自我测试的参考。

本书力求内容丰富,概念清晰,阐述简洁,理论密切联系实际,着重增强工程观念,立足于工程能力的培养。本书可作为高等院校化工类及相关专业学生学习《化工原理》课程及考研复习的参考书,也可作为教师讲授本课程的参考读本,还可作为从事化工工作的技术人员的自学参考书。

本书由天津大学化工系柴诚敬、刘国维、陈常贵编写,姚玉英审定。概述、第一章、第二章、第三章、第八章、第九章由柴诚敬执笔;第四章、第五章、第十章由刘国维执笔;第六章、第七章由陈常贵执笔。本书在编写过程中,高寿山教授给予了帮助并提出宝贵意见,在此表示谢意。

目 录

概述	(1)
第一章 流体流动	(3)
第二章 流体输送机械	(39)
第三章 非均相物系的分离	(65)
第四章 传热	(89)
第五章 蒸发.....	(131)
第六章 蒸馏.....	(152)
第七章 吸收.....	(189)
第八章 蒸馏和吸收塔设备.....	(222)
第九章 液—液萃取.....	(229)
第十章 干燥.....	(246)
附 录 天津大学 1995 年至 1997 年招收硕士生入学试题(附答案).....	(275)

概 述

化工原理是一门综合运用数学、物理、化学等基础知识,分析和解决化工类型生产中各种物理过程或单元操作问题的工程学科,是化工类及相近专业的一门主干课。本课程担负着由理及工、由基础到专业的特殊使命。该课程强调工程观点、定量运算、实验技能及设计能力的培养,强调理论与实际的结合,以提高分析问题、解决问题的能力。具体说,学生应该在牢固掌握本课程基本知识、基础理论的前提下,着重以下几方面能力的培养:

(1)单元操作和设备选择的能力 根据各单元操作在技术上、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,经济而有效地满足生产工艺要求。

(2)操作和调节生产过程的能力 学习如何操作和调节生产过程,在操作发生故障时善于查寻故障原因,提出排除故障的措施,调用有利因素,克服不利因素,使生产顺利而高效地运行。

(3)工程设计能力 学习进行工艺过程计算和设备设计。当缺乏现成数据时,要能够从资料中查取、或从生产现场查定、或通过实验测取所需的设计数据。

(4)过程开发或科学研究能力 应该逐步掌握根据物理或物理化学原理而“开发”单元操作,进而组织成一个生产工艺过程。科技工作者的任务之一,就是善于调动某种工程手段,将可能变为现实,实现工程目的。这就要求学生具有创造性与开拓精神。

化工原理是一门重要技术基础课,实践性很强,要理论联系实际,掌握科学的学习方法,以获取最大的学习效益。

1. 提高学习自觉性,发挥主观能动性

在化工原理教学过程中,一般安排“讲课—课后作业—辅导答疑—实践(实验和设计)”等环节,同学要与老师密切配合,充分利用好上述环节,发挥主观能动性和学习自觉性,积极思维,并尽可能做到课前预习,对下次讲课的重点难点达到心中有数,以提高听课效果。

2. 着重学习处理工程问题的方法

所有化工生产过程都是十分复杂的,在研究各个单元操作或化工过程时,要学会抓关键问题,把握过程实质,暂时忽略一些次要因素,把复杂的工程问题进行恰当的简化处理,以便于对实际过程进行数学描述。对于重要方程的推导,要搞清楚为什么要简化、如何简化以及简化处理所引入的误差。

在建立的理论数学方程中,常常包括一些模型参数,往往需通过实验予以测定,这样使原先忽略的一些因素加以校正,使数学方程能够用于实际工程过程的计算。

3. 理论联系实际,提高知识记忆的永久性和学习的时效性

化工单元操作是化工生产实践的总结和升华,学习化工原理过程中,要注意联系生产、科研中遇到的成功或失败的案例,加深对基本理论的理解,学会用基本理论去解决工程问题,克服死背硬记的呆板学习方法。

另外,在我们日常生活中,存在着丰富、生动、直观的流体流动、传热及传质的实例,通过仔

细观察和研究这些实例,有利于提高学习时效、增强记忆,学活会用,变被动学习为主动学习。

4. 采用归纳、综合和对比的方法,学会逻辑简化

化工原理各章节之间具有密切的内在联系和很强的规律性,如能掌握归纳、综合、对比和逻辑简化的学习方法,则可使所学知识融汇贯通,强化知识的理解和消化。具体做法是:

(1)每学完一章(或一个单元操作)之后,要学习运用简练的文字、醒目的格式,把本章的基本理论、主要关系式及其工程应用清晰地表达出来,即从纵向上抓住主干线条,以线带面,把本章主要内容联系起来,使知识系统化。例如,流体流动可通过引申的柏努利方程把流体流动的基本规律及相关的计算公式有机地构成一个网络图表。同样地,传热这一章可通过总传热速率方程这条主线把相关内容有机地联系起来。

(2)通过综合对比掌握各单元操作之间的内在联系和共性。各单元操作之间,既有各自的特殊性,从而构成了自己特定的研究内容;同时,各单元操作之间又有密切的内在联系和统一性,从而构成了共同的规律。例如,流体流动(传动)、传热和传质三种传递过程中,都研究分子传递(牛顿粘性定律、傅立叶导热定律和菲克扩散定律)和对流传递,采用相同的工程研究方法(因次分析方法),而且传热与传质得到相应的准数和相似的关联式。

传质中各单元操作之间的共性更加明显。各章均以各单元操作的基本原理(或依据)为起点,依次讨论相平衡关系、物料衡算(包括总物料衡算及操作线方程)、设备主体尺寸计算、过程影响因素分析、操作参数的选择与调节、过程强化等内容,这就显示了相同的规律和相似的研究方法。但各章之间并不是简单的重复,而是各章重点各异、特点明显,而且难点分散,使同学们学完每一章都觉得有新收获,这些显示了各章的特殊性。

5. 在讨论课中,活学活用知识

在化工原理教学环节中,习题课或讨论课是训练学生计算技能和运用所学知识分析与解决实际问题能力的一种有效途径。在讨论课中,学生注意力高度集中、思维活跃、积极讨论,同学之间彼此磋商,互相启发,拓宽了思路,培养了综合运用知识、全面看问题的观点。

最后还应强调两点,即

(1)在化工原理教学中,有意安排某些内容让学生通过自学来掌握。老师不讲,不等于不重要或不作要求,同学要自觉培养自己获取和扩展知识的能力。

(2)要认真主动地在化工原理实践性教学环节(如实物教学、演示实验、实验、设计、看电视录像)中培养自己的实际能力,增强工程观点。

第一章 流 体 流 动

本章符号说明

英文字母

A —— 截面积, m^2 ;	r —— 半径, m ;
d —— 管道直径, m ;	R —— 管道半径, 或液柱压差计读数, m ;
d_e —— 当量直径, m ;	Re —— 雷诺准数;
d_0 —— 孔径, m ;	S —— 两流体层的接触面积, m^2 ;
E —— 1kg 流体所具有的总机械能, J/kg ;	T —— 热力学温度, K ;
g —— 重力加速度, m/s^2 ;	u —— 流速, m/s ;
G —— 质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;	$u_{\max}$ —— 流动截面上的最大速度, m/s ;
h —— 高度, m ;	u_r —— 流动截面上某点的局部速度, m/s ;
h_f —— 1kg 流体流动时为克服流动阻力而损失的能量, 简称能量损失, J/kg ;	V —— 体积, m^3 ;
h_f' —— 局部能量损失, J/kg ;	V_h —— 体积流量, m^3/h ;
H_e —— 输送机械对 1N 流体所提供的有效压头, m ;	V_s —— 体积流量, m^3/s ;
H_f —— 压头损失, m ;	w_s —— 质量流量, kg/s ;
l —— 长度, m ;	W_e —— 输送机械对 1kg 流体所作的有效功, J/kg ;
l_e —— 当量长度, m ;	Z —— 位压头, m ;
M —— 分子量;	希腊字母
N —— 输送机械的轴功率, kW ;	ϵ —— 绝对粗糙度, m ;
N_e —— 输送机械的有效功率, kW ;	ζ —— 阻力系数;
p —— 压强, Pa ;	η —— 效率;
Δp_f —— 1m^3 流体流动时所损失的机械能, 称为压强降, Pa ;	μ —— 粘度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;
P —— 压力, N ;	π —— 润湿周边, m ;
	ρ —— 密度, kg/m^3 ;
	τ —— 内摩擦应力, Pa 。

基本内容和重要公式

化工生产的原料及产品大多数是流体, 化工生产所涉及的过程大都是在流动条件下进行。研究流体流动的宏观规律(如连续性方程及柏努利方程)及流体在管内流动的內部结构(流型、速度分布及流动阻力), 并运用这些基本原理和规律去解决流体输送(管内适宜流速、管径及输送机械的选定), 操作参数(压强、流速或流量)的测量, 传热、传质过程适宜流体力学条件的确

定及强化等问题,便是本章的基本内容。

流体力学属于基础理论。学习这一章,要以柏努利方程为主线,深入了解该式的物理意义和应用条件;熟练掌握用柏努利方程解题的步骤与要点;清晰理解柏努利方程中各项的意义、测量或计算方法。要以流体力学为起点,逐渐掌握工程问题的处理方法,逐步增强工程观点。

一、表示流体宏观规律的基本关系式

(一)流体静力学基本方程式

1. 流体静力学基本方程式

当流体在重力和压力作用下达到平衡时,静止流体内部压强变化的规律遵循流体静力学基本方程式所描述的关系。

对于不可压缩流体, ρ 为常数,则有

$$\frac{p_1}{\rho} + gZ_1 = \frac{p_2}{\rho} + gZ_2 \quad (1-1)$$

或
$$p_2 = p_1 + \rho g(Z_1 - Z_2) \quad (1-1a)$$

当液面上方的压强为 p_0 ,距液面 h 处水平面的压强为 p ,式(1-1a)可改写为:

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

2. 流体静力学基本方程的应用条件及意义

流体静力学基本方程式只适用于静止的连通着的同一种连续的流体。该类式子说明在重力场作用下,静止液体内部压强的变化规律。由式(1-1b)可看出:

(1)当液面上方压强 p_0 一定时, p 的大小是液体密度 ρ 和深度 h 的函数。在静止的、连续的同一流体内,处于同一水平面上各点的压强都相等——等压面的概念;

(2)当 p_0 变化时,液体内部各点的压强 p 也发生同样大小的变化——传递定律;

(3)改写式 1-1b 可得

$$\frac{p - p_0}{\rho g} = h \quad (1-1c)$$

上式说明压强差(或压强)可用一定高度的液体柱表示,但一定注明是何种液体。

3. 流体静力学基本方程式的应用

以流体静力学基本方程式为依据可设计出各种液柱压差计、液位计,可进行液封高度计算,根据 $(gZ + \frac{p}{\rho})$ 的大小判断流向。但需特别注意,U形管压差计读数反映的是两测量点位能和静压能两项和的差值。

应用静力学基本方程式还应注意压强的表示方法(绝压、表压与真空度)及不同单位之间换算关系。

(二)定态流动系统的连续性方程式

在定态流动系统中,对直径不同的管段作物料衡算,以 1s 有基准,则得到:

$$w_s = u_1 A_1 \rho_1 = u_2 A_2 \rho_2 = \cdots = u A \rho = \text{常数} \quad (1-2)$$

当流体可视作不可压缩时, ρ 可取作常数,则有

$$V_s = u_1 A_1 = u_2 A_2 = \cdots = u A = \text{常数} \quad (1-2a)$$

式中 w_s ——流体的质量流量,kg/s;

u ——管截面上的平均流速,m/s;

A ——管道截面积,m²;

V_s ——流体的体积流量,m³/s;

ρ ——流体的密度, kg/m^3 。

下标 1、2 分别代表 1-1 与 2-2 截面。

对于可压缩流体,为使计算方便,引入质量流速的概念,即

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

式中 G ——质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

应用连续性方程式时,应注意如下两点:

(1)在衡算范围内,流体必须是连续的,即流体充满管道,并连续不断地从上游截面流入,从下游截面流出;

(2)连续性方程式反映了定态流动系统中,流量一定时,管路各截面上流速的变化规律。此规律与管路的安排和管路上是否装有管件、阀门与输送机械无关。这里流速是指单位管道横截面上的体积流量,即

$$u = V_s / A \quad (1-4)$$

当流量一定且选定适宜流速时,利用连续性方程可求算输送管路直径,即

$$d = \sqrt{\frac{4V_s}{\pi u}} \quad (1-5)$$

用上式算出管径后,要根据管子系列规格选用标准管径。

(三)柏努利方程式

1. 具有外功加入、不可压缩粘性流体定态流动的柏努利方程式

以 1kg 流体为基准,不可压缩粘性流体定态流经输送系统的柏努利方程式为

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + w_e = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \Sigma h_f \quad (1-6)$$

$$\text{或} \quad w_e = g\Delta Z + \frac{\Delta p}{\rho} + \frac{\Delta u^2}{2} + \Sigma h_f \quad (1-6a)$$

式中 w_e ——输送机械对 1kg 流体做的有效功, J/kg ;

$\frac{p}{\rho}$ ——静压能,或称流动功, J/kg ;

gZ ——位能, J/kg ;

Σh_f ——流动阻力, J/kg ;

p ——流体的静压强, Pa ;

Z ——截面的中心到基准水平面的垂直距离, m 。

当流体不流动时, $u=0$, $\Sigma h_f=0$,也不需要加入外功,于是式 1-6 变为:

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} \quad (1-1)$$

可见,流体静力学基本方程式为柏努利方程式的一个特例。

2. 理想流体的柏努利方程式

理想流体作定态流动时不产生流动阻力,即 $\Sigma h_f=0$,若又无外功加入,即 $w_e=0$,则式(1-6)变为:

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} \quad (1-7)$$

此式表明,理想流体作定态流动时,任一截面上 1kg 流体所具有的位能、静压能与动能之和为定值,但各种形式的机械能可以互相转换。

应注意,式(1-7)称为柏努利方程式,式(1-6)及式(1-6a)是柏努利方程的引申,习惯上也称为柏努利方程式。

3. 柏努利方程的讨论

应用柏努利方程式时,要注意搞清如下基本概念:

- (1)流体连续性假设的意义;
- (2)不可压缩流体与可压缩流体,理想流体与实际流体;
- (3)柏努利方程式的物理意义与应用条件;
- (4)应用柏努利方程式解题时的一般步骤、截面与基准面选取的原则;
- (5)流体密度的计算 对于理想气体:

$$\rho = \frac{PM}{RT} \quad (1-8)$$

或
$$\rho = \frac{M}{22.4} \frac{T_0 p}{T p_0} \quad (1-8a)$$

式中 M ——气体的分子量, kg/kmol;

T ——热力学温度, K;

R ——气体常数, 8.315 kJ/(kmol · K);

p ——气体的绝对压强, kPa。

对于混合气体,平均密度可按式计算:

$$\rho_m = \frac{p M_m}{RT} \quad (1-8b)$$

式中 M_m ——混合气体的平均分子量,其值按下式计算:

$$M_m = M_A y_A + M_B y_B + \cdots + M_n y_n \quad (1-9)$$

M_A, M_B, M_n ——气体混合物中各组分的分子量;

y_A, y_B, y_n ——气体混合物中各组分的摩尔分率。

对于液体混合物,若忽略混合前后体积的变化,则混合物的平均密度可按式估算:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{wA}}{\rho_A} + \frac{x_{wB}}{\rho_B} + \cdots + \frac{x_{wm}}{\rho_n} \quad (1-10)$$

式中 ρ_m ——混合物的平均密度, kg/m³;

ρ_A, ρ_B, ρ_n ——混合物中各组分的密度, kg/m³;

x_{wA}, x_{wB}, x_{wm} ——混合液中各组分的重量分率。

(6)注意柏努利方程式中 $gz, u^2/2, p/\rho, \Sigma h_f$ 与 w_e 各项的区别。前三项是指在某截面上流体本身具有的能量; Σh_f 是流经系统的能量消耗,它再也不能转变为其它形式的机械能; w_e 是流体在两截面间所获得的有效功,它是决定流体输送机械的重要参数之一,由它的值可计算输送机械的有效功率,即

$$N_e = W_e w_e \quad (1-11)$$

若知道输送机械的效率,则可求轴功率:

$$N = N_e / \eta \quad (1-12)$$

式中 N_e ——有效功率, J/s 或 W;

η ——效率;

N ——轴功率, J/s 或 W。

4. 其它条件下的柏努利方程式

(1)可压缩流体的流动 若所取系统中两截面间气体的压强变化小于原来绝对压强的20%时,则用两截面间流体的平均密度 ρ_m 代替式(1-6)与式(1-7)中的 ρ 。

(2)非定态流动 对于非定态流动的任一瞬间,柏努利方程式仍成立。

5. 不同衡量基准的柏努利方程式

(1)以单位重量(N)为基准 将式(1-6a)各项除以 g ,则得

$$H_e = \Delta Z + \frac{\Delta p}{\rho g} + \frac{\Delta u^2}{2g} + H_f \quad (1-6b)$$

上式各项的单位均为 J/N 或 m。

(2)以单位体积流体为基准的柏努利方程式

$$W_e \rho = g \rho \Delta Z + \Delta p + \frac{\Delta u^2}{2} \rho + \rho \Sigma h_f \quad (1-6c)$$

上式中各项单位均为 J/m³ 或 Pa。

二、管路阻力

本部分主要讨论流体流动的内部结构——宏观规律的微观分析,以了解流体在管内定态流动条件下两种流型的本质区别(流体质点的运动规律、管截面上速度分布、流体阻力产生根源)及工程处理方法,最终解决管路阻力计算问题。

(一)两种流型

1. 雷诺准数及两种流型

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} = \frac{dG}{\mu} = \frac{du}{\nu} \quad (1-13)$$

式中 Re ——雷诺准数,无因次数群,其数值反映流体流动的惯性力与粘性力的比值;

μ ——流体的粘度,或称动力粘度,Pa·s;

$\nu = \mu/\rho$ ——流体的运动粘度,m²/s。

根据 Re 的数值判断流型

$Re \leq 2000$ 滞流或称层流

$Re \geq 4000$ 湍流(工业上 $Re > 3000$ 即按湍流处理),也称紊流

$Re = 2000 \sim 4000$ 为不稳定过渡区

2. 牛顿粘性定律

当流体在管内滞流流动时,内摩擦应力可用牛顿粘性定律表示,即

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

$$\text{或} \quad \tau = -\mu \frac{du}{dr} \quad (1-14a)$$

式中 τ ——单位接触面积上的内摩擦力,称剪应力,Pa;

$\frac{du}{dy}$ ——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,1/s;

$\frac{du}{dr}$ ——沿圆管径向的速度梯度,1/s。

在流变图上标绘 $\tau - du/dy$ 关系为通过原点的直线,直线的斜率为流体的粘度 μ 。粘性只有在流体流动时才会表现出来。

遵循牛顿粘性定律的流体为牛顿型流体,所有气体和大多数液体属于这一类流体。不服从牛顿粘性定律的流体则为非牛顿型流体,如假塑性流体、胀塑性流体及宾汉塑性流体均属这一

类流体。

牛顿粘性定律适用于牛顿型流体层流流动时剪应力的计算。

改写式(1-14)可得：

$$\mu = \tau / \left(\frac{du}{dy} \right) \tag{1-14b}$$

促使流体流动产生单位速度梯度的剪应力即为流体的粘度，它是流体的物理性质之一。要进行不同单位制下粘度的单位换算，如：

$$1cP = 0.01P = 1 \times 10^{-3} Pa \cdot s$$

3. 滞流与湍流的比较

表 1-1 两种流型的比较

流型	滞(层)流	湍(紊)流
判据	$Re \leq 2000$	$Re > 4000$ (工业上取 3000)
质点运动情况	沿轴向作直线运动, 不存在横向混合和质点碰撞	不规则杂乱运动, 质点碰撞和剧烈混合。脉动是湍流的基本特点
管内速度分布	抛物线方程 $u = \frac{1}{2} u_{max}$ 壁面处 $u_w = 0$, 管中心 u_{max}	碰撞和混合使速度平均化 $u \approx 0.8 u_{max}$ 壁面处 $u_w = 0$, 管中心 u_{max}
边界层	滞流层厚度等于管子半径	层流底层—缓冲层—湍流层
直管阻力	粘性内摩擦力, 即 牛顿粘性定律 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$	粘性应力+湍流应力, 即 $\tau = (\mu + e) \frac{du}{dy}$ (e 为涡流粘度, 不是物性, 与流动状况有关)

注意搞清如下概念或事项：

(1) 边界层和层流内层(或层流底层)； Re 加大层流内层变薄，流动阻力加大；边界层分离引起形体阻力。

(2) 测量管内流动参数(流速、压强等)的仪表应安装在进口段以后的完全发展的流动平直管段上。

(二) 流体在管内的流动阻力

流体在管内的流动阻力由两部分构成，即。

$$\Sigma h_f = h_f + h_f' \tag{1-15}$$

式中 h_f ——直管阻力, J/kg；

h_f' ——局部阻力, J/kg。

流动阻力的表现形式为系统静压能的降低，即压强降 Δp_f 。

注意区别压强降 Δp_f 与两个截面间的压强差 Δp 的概念。

1. 流体在直管中的流动阻力

(1) 流体以速度 u 在管内径为 d 、管长为 l 的直管内作定态流动，则计算直管阻力的通式为

$$h_f = \frac{\Delta p_f}{\rho} = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2} \tag{1-16}$$

式中 Δp_f ——因摩擦阻力而引起的压强降, Pa；

l ——直管长度, m；

d ——管子内径, m；

λ ——摩擦系数, 无因次。

式(1-16)称范宁公式,此式对滞流与湍流均适用。湍流情况下,一般摩擦系数是 Re 和管壁相对粗糙度 ϵ/d 的函数(ϵ 为管壁绝对粗糙度, m)。

利用式(1-16)计算 h_f ,关键是要找出 λ 。

(2)滞流时的摩擦系数 λ ——解析法 滞流时 λ 仅是 Re 的函数而与 ϵ/d 无关,因而可用解析法找出 λ 与 Re 的关系,同时可对滞流流动的内部结构作一分析。

管截面上的速度分布方程式为:

$$u_r = \frac{\Delta p_f}{4\mu l}(R^2 - r^2) \quad (1-17)$$

式中 u_r ——距管中心 r 处的流体速度, m/s ;

r ——距管中心的径向距离, m ;

R ——管子的半径, m 。

由式(1-17)可知,流体在管内作滞流流动时,速度分布为抛物线方程,在管中心线上, $r=0$,速度为最大, $u_{\max} = \frac{\Delta p_f}{4\mu l}R^2$;在管壁处, $r=R$,速度为零;管截面上的平均速度为

$$u = \frac{\Delta p_f}{8\mu l}R^2 = \frac{1}{2}u_{\max} \quad (1-17a)$$

将 $d=2R$ 代入式(1-17a),并整理可得哈根—泊谟叶公式,即

$$\Delta p_f = \frac{32lu\mu}{d^2} \quad (1-18)$$

$$\text{或} \quad h_f = \frac{\Delta p_f}{\rho} = \frac{32l\mu u}{d^2\rho} \quad (1-18a)$$

比较式(1-16)与式(1-18a)可看出:

$$\lambda = 64/Re \quad (1-19)$$

(3)湍流时的摩擦系数 λ ——因次分析法 由于影响湍流流动阻力因素的复杂性,不能从理论上定量推导出过程本征方程,故需采用实验研究方法。指导实验研究的理论基础是因次分析。因次分析的基础是因次一致原则和 π 定理,其实质是用无因次数群代替物理变量,以减少实验工作量,关联数据的工作也会有所简化,并且有利于实验结果的相似推广。但需注意,经过因次分析得到无因次数群的函数式后,尚须通过实验确定具体的经验关联式或半理论公式,亦即因次分析不能代替实验。

对于水力光滑管,当 $Re=3000 \sim 1 \times 10^5$ 时,实验测得:

$$\lambda = 0.3164/Re^{0.25} \quad (1-20)$$

对于粗糙管,为使工程计算方便,在双对数坐标系中,以 ϵ/d 为参数,标绘 λ 与 Re 的关系,得到教材上所示的关系图。

从图上可看出四个不同区域:

滞流区 $Re \leq 2000$ $\lambda = 64/Re$, λ 与 ϵ/d 无关

过渡区 $Re = 2000 \sim 4000$ $\lambda = f(Re, \frac{\epsilon}{d})$

湍流区 $Re > 4000$ $\lambda = f(Re, \frac{\epsilon}{d})$

完全湍流区(阻力平方区,图中虚线以上区域) $\lambda = f(\frac{\epsilon}{d})$,与 Re 无关。

需强调指出,在过渡区和湍流区,当 ϵ/d 一定时, Re 加大, λ 变小。

教材上所示的关系,对牛顿型流体适用。

(4)圆形管内实验结果的推广——非圆形管的当量直径 流体在非圆形管内作定态流动时,其阻力损失仍可用式(1-16)计算,但应将式中及 Re 中的圆管直径 d 以当量直径 d_e 来代替。

$$d_e = 4r_H \quad (1-21)$$

式中 d_e ——当量直径, m;

$$r_H \text{——水力半径, m。 } r_H = \text{流通截面 } A / \text{润湿周边 } \pi \quad (1-22)$$

应用当量直径进行计算时需注意如下两点:

①对滞流摩擦系数 λ 的计算式(1-19)须进行修正,即

$$\lambda = c / Re \quad (1-19a)$$

式中 c 为无因次系数,其值随流道形状而变。

②不能用 d_e 来计算流体通过的截面积、流速和流量。

2. 局部阻力

为克服局部阻力所引起的能量损失有两种计算方法,即局部阻力系数法和当量长度法,其计算公式为:

$$h_f' = \zeta \frac{u^2}{2} \quad (1-23)$$

$$\text{及 } h_f' = \lambda \frac{l_e}{d} \frac{u^2}{2} \quad (1-24)$$

式中 h_f' ——局部阻力, J/kg;

ζ ——局部阻力系数, 无因次;

l_e ——局部阻力当量长度, m。

常用管件、阀门、突然扩大和缩小的局部阻力系数 ζ 值或当量长度 l_e 值可查有关教材。在工程计算中,一般取入口的局部阻力系数 ζ 为 0.5,而出口的局部阻力系数 ζ 值为 1.0。计算局部阻力时应注意两点:

(1)若流动系统的下游截面取在管道出口,则柏努利方程式中的动能项和出口阻力二者只能取一个,即截面选在出口内侧,取动能项;截面选在出口外侧,取出口阻力,出口阻力系数 ζ 值取为 1.0。

(2)用式(1-23)或式(1-24)计算突然扩大或突然缩小的局部阻力时,式中的 u 均应取细管中的流速值。

3. 管路系统的总能量损失

$$\Sigma h_f = \left(\lambda \frac{l + \Sigma l_e}{d} + \Sigma \zeta \right) \frac{u^2}{2} \quad (1-25)$$

由上式可分析欲减小管路系统总阻力损失可能采取的措施,诸如:

(1)合理布局,尽量减小管长,少装不必要的管件、阀门;

(2)适当加大管径及尽量选用光滑管;

(3)可能条件下,将气体压缩或液化后输送;

(4)高粘度液体(如原油)可采用加热伴管输送;

(5)允许的话,在液体中加入减阻剂;

(6)高强度磁力降粘减阻。

与此同时也应注意,有些情况下为了某种工程目的,特意造成边界层分离或有意增加能量损失,如节流流量计的设计、液体搅拌、传热及传质过程的强化等。

三、柏努利方程的工程应用

柏努利方程与连续性方程的结合,可解决流体流动中各种有关问题,诸如:

- (1)确定管道中流体的流速或流量;
- (2)确定容器间的相对位置;
- (3)确定输送机械的有效功或功率;
- (4)确定管路中流体的压强;
- (5)进行管路计算;
- (6)根据流体力学原理设计各种流量计。

本部分扼要讨论(5)、(6)两类问题的计算原则。

(一)管路计算

管路计算分为两种类型,它们是

- (1)设计型计算 即给定输送任务,设计合理的输送管路系统;
 - (2)操作型计算 对给定的管路系统求流量或对规定的输送流量计算压强降或有效功。
- 除求压强降外,一般需试差计算。

1. 简单管路计算

由等径或异径管段串联而成的管路。流体通过各管段的流量相等,总阻力损失等于各管段之和。

2. 并联管路计算

流体流经图 1-1 所示的并联管路系统时,遵循如下原则:

主管总流量等于各并联管段之和,即

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \quad (1-26)$$

各并联管段的压强降相等,即

$$\Sigma \Delta p_{f1} = \Sigma \Delta p_{f2} = \Sigma \Delta p_{f3} \quad (1-27)$$

各并联管路中流量分配按等压降原则计算,即

$$V_1 : V_2 : V_3 = \sqrt{\frac{d_1^5}{\lambda_1(l+l_e)_1}} : \sqrt{\frac{d_2^5}{\lambda_2(l+l_e)_2}} : \sqrt{\frac{d_3^5}{\lambda_3(l+l_e)_3}} \quad (1-28)$$

3. 分支管路计算

流体流经图 1-2 所示的分支管路系统时,遵循如下原则:

主管总流量等于各支管流量之和,即

$$V = V_1 + V_2 \quad (1-29)$$

单位质量流体在各支管流动终了时的总机械能与能量损失之和相等,即

$$gZ_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + \Sigma h_{f0-1} = gZ_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \Sigma h_{f0-2} \quad (1-30)$$

流体流经各支管的流量或流速必须服从式(1-29)及式(1-30)。

(二)流量(流速)测量

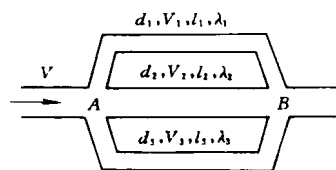


图 1-1

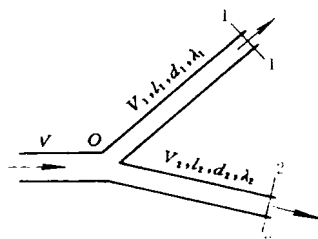


图 1-2