

化工原理学习指导

匡国柱 主编

潘艳秋 都 健
王 瑶 贺高红 编写

大连理工大学化工原理教研室 组编

大连理工大学出版社

匡国柱 2002

图书在版编目(CIP)数据

化工原理学习指导 / 匡国柱主编 .— 大连: 大连理工大学出版社, 2002.9

ISBN 7-5611-2090-7

.化... .匡... .化工原理—高等学校
—自学参考资料 .TP3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 040498 号

大连理工大学出版社出版

地址:大连市凌水河 邮政编码:116024

电话:0411-4708842 传真:0411-4701466 邮购:0411-4707955

E-mail:dutp@mail.dlptt.ln.cn URL:http://www.dutp.com.cn

大连业发印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:140mm×203mm 印张:18.75 字数:592千字
印数:0001

2002年9月第1版

2002年9月第1次印刷

责任编辑:刘新彦

责任校对:吴孝东

封面设计:王福刚

定 价:28.00元

前 言

《化工原理学习指导》是应广大教师和学生要求而编写的。本书是学习化工原理的教学参考书之一。

编写本书的宗旨是帮助读者深刻理解化工原理教材的重点内容,牢固掌握基础知识和基本原理,灵活运用化工原理反应的基本规律,培养正确的思维方法,以及提高自修的能力。

本书各章主要分六部分:教学基本要求、重点内容概要、典型例题解析、拓展迁移、习题详解、同步练习。其中:

重点内容概要。本部分依据“化工原理课程教学基本要求”,结合学生学习的实际状况,简明阐述各章内容的要点,对于其中的难点和易混淆、疏漏之处给以恰如其分的说明,某些地方适当地加深拓宽一些必要的内容,希望能起到穿针引线、画龙点睛的作用。

典型例题解析。本部分选各章典型内容以例题的形式加以分析,用以指导学生认真完成课外作业,是课堂教学的继续和深入。

拓展迁移。精选大连理工大学多年的研究生考题并借鉴其他院校相关试题编写而成。

习题详解。本部分依据我室编写的《化工原理》教

材,选取各章习题做出详细解答。

同步练习。学业上的成功取决于个人的努力和自我鞭策。本部分可供学生自我检查学习效果使用,以激发学习兴趣,提高学习质量。

参加本书编写工作的有:第1章、第2章、第3章潘艳秋;第4章、第5章都健;第6章、第9章王瑶;第7章、第8章贺高红;全书由匡国柱统稿。

本书是在我室全体教师多年教学实践的基础上编写而成的,编写时也吸取了众多兄弟院校的宝贵经验,对本书更有特色起了重要作用,在此一并表示诚恳谢意。

由于编者水平有限,成书时间仓促,错误之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2002年8月

目 录

第 1 章 流体流动.....	1
教学基本要求.....	1
重点内容概要.....	1
典型例题解析	12
拓展迁移	32
习题详解	40
同步练习	70
第 2 章 流体输送设备	74
教学基本要求	74
重点内容概要	74
典型例题解析	86
拓展迁移	96
习题详解.....	115
同步练习.....	130
第 3 章 流体相对颗粒(床层)的流动及机械分离.....	132
教学基本要求.....	132
重点内容概要.....	132
典型例题解析.....	142
习题详解.....	159
同步练习.....	176
第 4 章 传热.....	178
教学基本要求.....	178

重点内容概要.....	178
典型例题解析.....	195
拓展迁移.....	219
习题详解.....	245
同步练习.....	280
第 5 章 蒸发	287
教学基本要求.....	287
重点内容概要.....	287
典型例题解析.....	290
习题详解.....	303
同步练习.....	310
第 6 章 蒸馏	312
教学基本要求.....	312
重点内容概要.....	312
典型例题解析.....	330
拓展迁移.....	367
习题详解.....	387
同步练习.....	405
第 7 章 气体吸收	412
教学基本要求.....	412
重点内容概要.....	413
典型例题解析.....	432
拓展迁移.....	455
习题详解.....	469
同步练习.....	493
第 8 章 萃取	498
教学基本要求.....	498
重点内容概要.....	498

典型例题解析.....	513
拓展迁移.....	520
习题详解.....	522
同步练习.....	537
第9章 干燥	539
教学基本要求.....	539
重点内容概要.....	539
典型例题解析.....	548
拓展迁移.....	567
习题详解.....	574
同步练习.....	585
参考文献.....	589

第 1 章 流体流动

教学基本要求

在研究流体流动规律中,不是研究流体单个分子的微观运动,而是将流体视为由无数个分子团(或称质点)组成的连续介质,从而可避开复杂的分子运动,研究流体的宏观机械运动,并可利用连续函数的数学工具。

学习本章的基本要求为

了解流体平衡和运动的基本规律,要求熟练掌握静力学方程式、连续性方程式、机械能衡算方程式的内容和应用,在此基础上解决管路计算、输送设备功率计算等问题。

(1)掌握流体的主要物性(如密度、粘度等)数据的求取及不同单位间的换算;

(2)了解流体流动中的连续性、稳定性,掌握流体的两种流动类型的判断方法;

(3)掌握流体静力学方程式、连续性方程式、机械能衡算方程式的内容及其应用;

(4)掌握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;

(5)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;

(6)掌握管路中流体的压力、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;

(7)了解因次分析方法的相关概念。

重点内容概要

本章主要讨论有关流体流动过程的基本原理及流体在管内的流动规律。

流体流动的计算即是物料衡算和能量衡算的综合运用,其中又以能量衡算为主,物料衡算为辅。整章计算部分的内容见图 1-1。

图 1-1 流体流动内容便览

一、流体静力学

流体静力学主要研究流体在静止状态下所受的各种力之间的关系。

1 流体的密度

单位体积内流体的质量称为流体的密度,影响密度的因素有:温度和压力。

液体的密度 液体通常可视为不可压缩性流体,故液体密度一般认为只随温度而变化(极高压力下除外),可由相关的物性手册中查得。

气体的密度 气体是可压缩性流体,故密度与压力、温度有关。当压力不太高、温度不太低时,可按理想气体处理。

液体混合物密度的计算有相应的计算公式。

2 流体的作用力

作用在流体微元上的力有表面力和质量力两种。表面力是指与该流体微元接触的外界(器壁,或所指定的流体微元周围的其他流体)施加于该流体微元上的力,表面力与作用的表面积成正比;质量力是指不与流体接触,而施加于整个流体上的力,质量力与质量成正比。

3 流体的压强

作用于流体单位面积上的法向表面力称为压强,习惯上称压力。而整

个面积上所受到的作用力称为总压力。

(1) 压力的单位

按压力的定义表示： N/m^2 或 Pa , kgf/cm^2 等。

以流体柱高度表示，如米水柱 (mH_2O)，毫米汞柱 (mmHg) 等。

(注意：必须注明流体种类)

以大气压为计量单位，如物理大气压 (atm)

要掌握以上各种表示方法之间的换算关系。

(2) 压力的基准

绝对压强：以绝对真空为基准测得的压强。

表压：以当时当地大气压为基准测得的压强，如表压值为负值称为真空度。

(3) 压力的特性

第一，流体压力处处与它的作用面垂直，且总指向流体的作用面；

第二，流体中任一点压力的大小与所选定的作用面在空间的方位无关。

4. 流体静力学基本方程式

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} \quad \text{或} \quad gz + \frac{p}{\rho} = \text{常数}$$

或

$$p = p_0 + \rho gh$$

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。

由上式可知，各项 (gz 项和 $\frac{p}{\rho}$ 项) 单位均为 J/kg 。其中， gz 项是单位质量流体所具有的位能，而 $\frac{p}{\rho}$ 是单位质量流体所具有的静压能。可见，连续静止流体中，流体内各点位能或静压能可能不相等，但二者可以互相转换，其总和保持不变。这就是静力学基本方程的物理意义。

应用静力学方程时要注意选取等压面。等压面是流体中压力相等的水平面，等压面必须同时满足静止的、连续的同一种流体、处于同一水平面这三个条件，缺一不可。

静力学基本方程也可用于压力变化幅度不大的气体。

5. 压力测量

(1) U 形压差计

U 形压差计用于测量管路或设备中两点间的压力差，U 形压差计中指示液必须与被测流体不互溶，其密度 ρ_0 必须大于被测流体密度 ρ ，图 1-2 中两

测点1,2 之间的压差为

$$p = p_1 - p_2 = \rho gR(\rho_0 - \rho)$$

如点 2 处所连的为大气,则测出的是 1 点的表压值。

(2) 微差压差计(双液体 U 管压差计)

若两截面的压差很小,则为了提高读数精度,除了可选用 ρ_0 尽可能与相近的流体作指示液的 U 形压差计外,还可用微差压差计,如图 1-3 所示。

图 1-2 U 形管压差计

当压差计两端与压力分别为 p_1 和 p_2 的两个取压口相连接而测取压差时,U 形管两端上方扩大室的截面比 U 形管截面大得多(约 100 倍),U 形管中指示液读数变化对两扩大室中液面影响不大,则有

$$p_1 - p_2 = (\rho_A - \rho_c) gR$$

由于两种指示液的密度 ρ_A 和 ρ_c 非常接近,可使读数 R 放大几倍或更大。

(3) 倒 U 形压差计

如果指示液密度 ρ_0 小于被测流体密度 ρ ,则应使用倒 U 形压差计,如图 1-4 所示。所测两截面内的压差为

$$p = p_1 - p_2 = (\rho - \rho_0) gR$$

图 1-4 倒 U 形压差计

二、流体动力学

流体动力学研究流体在流动时的规律性及能量转化规律。

1. 流量与流速

体积流量 $V(\text{m}^3/\text{s})$ 、质量流量 $W(\text{kg}/\text{s})$ 与平均流速 $u(\text{m}/\text{s})$ 、质量流速 $G(\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$ 之间的关系为

$$V = uA, W = \rho V = \rho uA, G = \frac{W}{A} = \frac{\rho V}{A} = \rho u$$

式中: A 为管道截面积。

由于气体的体积随温度 T 和压强 p 而变,故气体流速 u 也随 T 、 p 变化,因此,气体在管内流动时,有时采用不随气体状态(T 、 p)变化的质量流速 G 计算较为方便。

2. 稳态流动与非稳态流动

在流动系统中,流体的流速、密度、压力等物理量仅是位置的函数,不随时间改变,则称此系统为稳态流动系统,化工生产多属连续稳态流动。反之,若以上参数不仅随位置变化、而且随时间而变,则称该流动为非稳态流动。

3. 稳态流动时的连续性方程

$$u_1 A_1 = u_2 A_2 = \dots = uA = W = \text{常数}$$

对不可压缩流体, ρ 为常数,有

$$u_1 A_1 = u_2 A_2 = \dots = uA = V = \text{常数}$$

4. 柏努利方程

用于不可压缩理想流体(假想的无粘性,故流动时无阻力的流体)的柏努利方程为

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

由上式可见:

(1) 不可压缩的理想流体在与外界无能量交换的稳态流动系统中,机械能守恒,且可以相互转换。

(2) 柏努利方程式中的各项皆为机械能,但用不同单位表示机械能时,其形式也不同。

5. 实际流体流动的机械能衡算式

实际流体在流动时存在流动阻力。为了克服流动阻力,系统必须消耗掉一部分机械能。消耗的机械能可分别表示为阻力 $R(\text{J/kg})$ 、压头损失 $h_f(\text{m})$ 、压力降 $p_f(\text{Pa})$ 等形式。导出的机械能衡算式相应也有多种形式:

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + We = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + R \quad (\text{J/kg})$$

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + He = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + h_f \quad (\text{m})$$

$$gz_1 + p_1 + \frac{\rho u_1^2}{2} + We = gz_2 + p_2 + \frac{\rho u_2^2}{2} + R \quad (\text{N/m}^2)$$

式中: We 、 He 、 We 分别是流体输送机械对 1kg 质量流体、每牛顿流体、每 m^3 流体所做的功。

对于可压缩性流体的流动系统,当 $\frac{p_1 - p_2}{p_1} < 0.2$ 时,仍可用机械能衡算式进行计算,式中的 ρ 用平均值 ρ_m 代替。

6. 机械能衡算式的应用

实际流体的机械能衡算式(有时与连续性方程联用)可用于计算输送设备的有效功率、管道中流体的流量、管道中流体的压力及设备间的相对位置等。

公式应用条件:第一,稳定、连续不可压缩的流动系统;第二,在选定的两截面间,系统与周围无质量交换,满足连续性方程。

在应用机械能衡算式时应注意以下几点:

- (1) 选定的两截面要垂直于流体流动方向。
- (2) 截面应选数据多、计算方便处,即待求的未知量应在截面上或在两截面之间,且截面上的有关数据 p 、 u 、 z 等,除待求量外,都应是已知数或通过计算可求出的数据。
- (3) 截面上的物理量均取该截面上的平均值。
- (4) 位头基准面必须是水平面,基准面的位置(指高度)对计算结果无影响。
- (5) 两截面压力的基准必须一致,即同为绝压或表压值。

三、流体流动阻力

1 流体的粘性与牛顿粘性定律

牛顿粘性定律表明流体在流动过程中产生的剪应力 与法向速度梯度之间的关系,其表达式为

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

式中:比例系数 μ 称为粘度,其单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

粘度是度量流体粘性大小的物理量,可由实验测定,其影响因素有温度和压力。一般来说,流体的粘度随温度升高而减小,压力对它的影响可忽略;气体的粘度随温度升高而增大,压力升高时粘度略有增加,一般工程计算中可不考虑压力的影响。

在一些工程应用中,可以用到运动粘度 的概念,即粘度 μ 与密度 ρ 之比,其单位为 m^2/s 。

牛顿型流体:剪应力与速度梯度的关系符合牛顿粘性定律的流体。全部气体与大部分液体皆属于牛顿型流体。

非牛顿型流体:凡不符合牛顿粘性定律的流体。如稠度较高的悬浮液、粘稠液、高分子聚合物液体等。

2 流体的流动类型

流体的流动分层流和湍流两种类型。流体的流动类型可用雷诺数 Re 判断。它是由管内径 d ,流体的流速 u ,流体的密度 ρ 和粘度 μ 组成的无因次数群($Re = \rho u d / \mu$)。

当流体在圆形直管内流动时,根据实验有:

- (1) $Re < 2000$ 时为稳定的层流;
- (2) $Re > 4000$ 时为稳定的湍流;
- (3) 当 $2000 < Re < 4000$ 时为过渡流。此时流型处于不定状态,有时呈层流,有时呈湍流,或两者均存在,依环境而定。

注意:计算 Re 时,所用的单位必须是统一的。(即所有量必须同用 SI 制或工程制单位等)

3 直圆管内流体的流动

- (1) 层流时管内流体速度分布

由理论分析和实验证明,层流时流体速度沿管径呈抛物线形状分布。管中心处速度最大,管壁处速度为零。截面上平均速度 u 与最大速度 u_{\max} 的关系为

$$u = 0.5 u_{\max}$$

(2) 湍流时管内流体的速度分布

湍流时速度分布规律由实验确定,管中心区速度最大,管壁处速度为零。从管壁到管中心可以将流体分成三个区域:层流内层、过渡层、湍流主体。管内平均速度 u 与管中心最大速度 u_{\max} 的关系为

$$u = 0.8 u_{\max} \sim 0.82 u_{\max}$$

4 边界层的概念

(1) 边界层的形成

流体流动过程中,紧靠固体壁面处必存在一薄层边界层(其速度小于流体的主体速度),其形成的原因一是由于流体具有粘性,二是由于有固体壁面的约束作用。

(2) 边界层的发展

如果壁面足够长,流体在流经一段长为 x_0 的距离后,将由稳定的层流发展成为稳定的湍流。

如果流体在圆管内流动,也存在边界层形成与发展的过程。与平板不同的是:

边界层充分发展后,边界层的厚度即为管之半径,仅在流体流入管口附近一段距离(进口段)内,才有边界层的内外之分;流经进口段之后,边界层随后就扩展至管中心。汇合时的边界层流动状态决定了流体的流动状态,此时为完全发展的流动。

(3) 边界层的分离

流体流经具有较大曲率的曲面时,由于存在逆压梯度和壁面附近的粘性摩擦,将可能产生边界层分离现象。边界层分离使流体质点碰撞激烈,而消耗能量。

5 流体流动阻力的计算

流体在管内流动时的流动阻力有直管阻力和局部阻力。总阻力应为这两部分阻力之和。

(1) 圆形直管内的流动阻力

阻力计算用范宁公式:

$$p_f = \frac{l}{d} \cdot \frac{u^2}{2}, \text{Pa}$$

式中: λ 为摩擦系数,层流时 $\lambda = 64/Re$,湍流时 λ 是 Re 和相对粗糙度 ϵ/d 的函数,可由经验公式或摩擦因子图查取。

(2) 非圆形直管内的流动阻力

此时仍采用范宁公式计算阻力,但式中的 d 及 Re 中的 d 皆应用当量直径 d_e 代替

$$d_e = 4 \frac{\text{流体流过截面积}}{\text{流体润湿周边}}$$

有实验表明, d_e 用于湍流下较可靠,对于层流以 d_e 算出 Re 后,应用下式计算:

$$\lambda = C Re$$

式中: C 为无因次系数。

(3) 局部阻力的计算

流体流经管路的进口、出口、各种管件、阀门、扩大、缩小及各种流量计时,会产生局部阻力。计算局部阻力的方法有两种。

$$\text{阻力系数法} \quad p_f = \zeta \cdot \frac{u^2}{2}$$

这种计算方法将克服局部阻力所消耗的能量表示成流体动能 $\frac{u^2}{2}$ 的倍数。称为局部阻力系数,其值通常由实验测定。注意计算用的 u 值取小管径中的速度值。

$$\text{当量长度法} \quad p_f = \lambda \cdot \frac{l_e}{d} \cdot \frac{u^2}{2}$$

这种方法将克服局部阻力所消耗的能量折合成同管径直管的长度 l_e ,称为当量长度。 l_e 的值可由实验测取。

6. 因次分析

因次分析的基础:物理方程的因次一致性。白金汉定理:任何因次一致的物理方程都可以表示为若干个无因次数群的函数,无因次数群的数目 N 由物理量数目 n 和用来表示这些物理量的基本次数目 m 决定:

$$N = n - m$$

四、管路计算

化工生产中涉及的管路分简单管路和复杂管路两种。

1. 简单管路

管径相同且无分支的管路称之为简单管路。

计算公式: $V = \frac{\pi}{4} d^2 u$

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \left(\frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{u^2}{2}$$

$$= f \left(\frac{du}{\mu}, \frac{l}{d} \right)$$

上述三个方程中包括 13 个变量, 当被输送流体已定, 其物性数据 ρ 、 μ 已知, 则方程组中尚有 11 个变量。需再确定 8 个参数, 即可求另 3 个。

对于设计型计算, 一般已知流体的物性 (ρ , μ) 和输送量 V , 在确定了输送距离 (l), 选定了管材及管件 (ζ 及 λ), 明确了需液点的位能及静压能情况下, 设计一经济管径及供液点应提供的位能 (或静压能)。

对于已知管路情况, 核算输送能力 V 的情况, 所依据的公式与设计型相同。

2. 复杂管路

(1) 串联管路

由若干段管径不同的简单管路串联而成的管路即为串联管路。故全管路的总阻力等于各段简单管路阻力之和, 而各段简单管路内的质量流量均等于总流量 (对不可压缩流体, 即体积流量不变)。

(2) 并联管路

几条简单管路或串联管路的入口端与出口端都是汇合在一起的, 称为并联管路。并联管路的一个重要特征是每条分支管路的阻力相等, 而各分支管路的质量流量之和等于总管路的流量。

(3) 分支管路

若几条简单管路或分支管路仅于入口端汇合, 则这样的管路为分支管路。