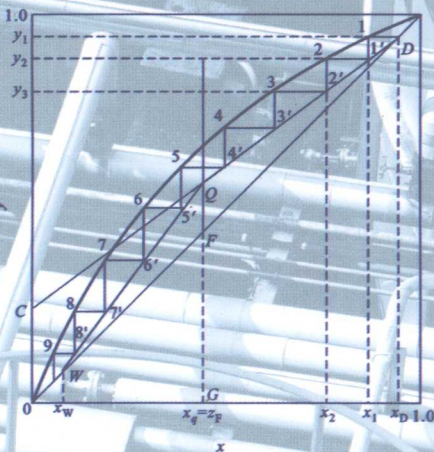


(第二版)

HUAGONG YUANLI XUEXI ZHIDAO

匡国柱 主编



大连理工大学出版社
DALIAN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY PRESS

TQ02
3615:2

化工原理学习指导

(第二版)

匡国柱 主编

潘艳秋 ~~都健~~ 王瑶 编著
~~贺高红~~ ~~吴雪梅~~

大连理工大学化工原理教研室 组编

大连理工大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

化工原理学习指导/匡国柱主编.—2版.—大连:大连理工大学出版社,2009.1

ISBN 978-7-5611-2090-3

I. 化… II. 匡… III. 化工原理—高等学校—自学参考资料 IV. 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:大连市软件园路 80 号 邮政编码:116023

发行:0411-84708842 邮购:0411-84703636 传真:0411-84701466

E-mail:dutp@dutp.cn URL:<http://www.dutp.cn>

大连理工印刷有限公司印刷 大连理工大学出版社发行

幅面尺寸:140mm×203mm 印张:17.375 字数:560 千字

2002 年 9 月第 1 版 2009 年 1 月第 2 版

2009 年 1 月第 3 次印刷

责任编辑:刘新彦 于建辉

责任校对:欣 宇

封面设计:宋 蕾

ISBN 978-7-5611-2090-3

定 价:32.00 元

前 言

本书是在《化工原理学习指导》(大连理工大学出版社2002年9月出版)一书基础上修订而成的,对原书内容进行了适当修改、删减,补充了部分习题,全部采用最新国家标准规定的量和单位。本书是广大教师和学生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,以及提高自修能力。

本书各章主要分以下六部分:

教学基本要求 列出各章的教学基本要求,即应掌握的知识点及重点、难点内容。

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重点,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 本部分选取本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。

考研真题精选 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 本部分依据大连理工大学化工原理教研

室编写的《化工原理》一书(高等教育出版社出版),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:潘艳秋(第1~3章),都健(第4、5章),王瑤(第6、9章),贺高红、吴雪梅(第7、8章),全书由匡国柱统稿并最后定稿。

本书是在大连理工大学化工原理教研室全体教师多年教学实践的基础上编写而成的,同时也吸取了众多兄弟院校的宝贵经验,在此一并表示诚肯谢意。

您有任何意见或建议,请通过以下方式与出版社联系:

邮箱 jcjf@dutp.cn

电话 0411-84707962 84708947

编 者

2009年1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/13

考研真题精选/28 习题详解/36 同步练习/65

第 2 章 流体输送设备/ 69

教学基本要求/69 重点内容概要/69 典型例题解析/81

考研真题精选/90 习题详解/107 同步练习/121

第 3 章 流体相对颗粒(床层)的流动及机械分离/ 123

教学基本要求/123 重点内容概要/123 典型例题解析/134

考研真题精选/149 习题详解/151 同步练习/168

第 4 章 传 热/ 170

教学基本要求/170 重点内容概要/170 典型例题解析/185

考研真题精选/207 习题详解/227 同步练习/259

第 5 章 蒸 发/ 266

教学基本要求/266 重点内容概要/266

典型例题解析/269 习题详解/281 同步练习/288

第 6 章 蒸 馏/ 290

教学基本要求/290 重点内容概要/290 典型例题解析/307

考研真题精选/339 习题详解/357 同步练习/374

第7章 气体吸收/ 381

教学基本要求/381 重点内容概要/382 典型例题解析/401

考研真题精选/421 习题详解/434 同步练习/458

第8章 萃 取/ 462

教学基本要求/462 重点内容概要/462 典型例题解析/477

考研真题精选/483 习题详解/484 同步练习/498

第9章 干 燥/ 500

教学基本要求/500 重点内容概要/500 典型例题解析/508

考研真题精选/526 习题详解/533 同步练习/543

参考文献/ 547

第1章 流体流动

● 教学基本要求 ●

要求熟练掌握流体静力学基本方程式、连续性方程式、机械能衡算式的内容和应用,在此基础上解决管路计算、输送设备功率计算等问题。

(1)掌握流体的密度、黏度等数据及不同单位间的换算;掌握流体流动中的作用力及连续介质假设。

(2)了解流体流动中的连续性、稳定性及不可压缩性概念,掌握流体的两种流动类型及判断依据和方法;

(3)掌握流体静力学基本方程式、连续性方程式、机械能衡算式的内容及其应用;

(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,掌握简单管路和复杂管路的特点及相关计算;

(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)了解量纲分析方法的相关概念和方法。

● 重点内容概要 ●

本章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。流体流动的计算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。本章内容如图 1-1 所示。

一、概述

1. 连续介质假设

研究流体在静止和流动状态下的规律性时,常将流体视为由大量质点组

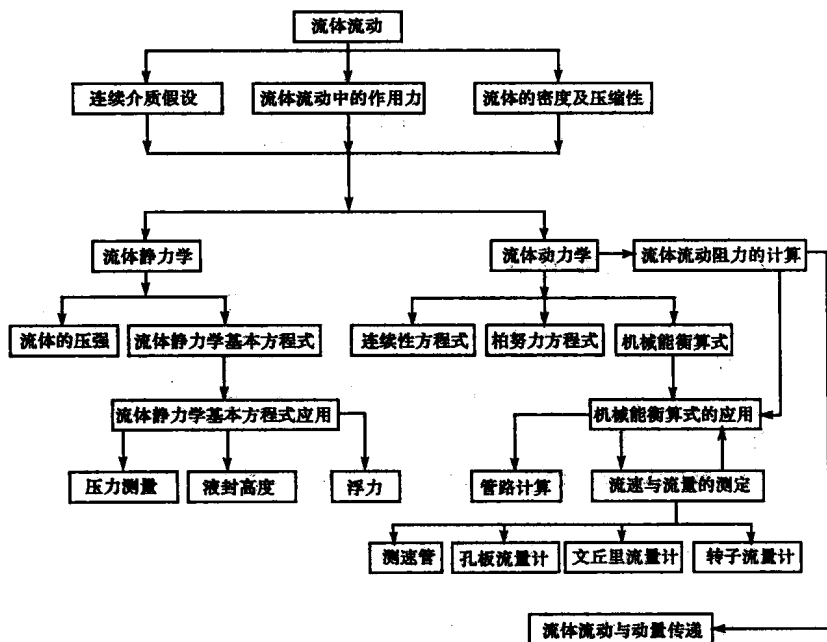


图 1-1 本章内容便览

成的,彼此间没有空隙的连续介质,利用连续函数方法求得流体的宏观特征值(如压强、密度等),此即为连续介质假设。只有当流体压力极低时,连续介质假设才不能应用。组成连续介质的质点由大量分子所组成,但其尺寸远小于流体所处空间的尺寸,却远大于分子自由程。

2. 流体流动中的作用力

流体受到的力有表面力和质量力两类。表面力是指与流体微元接触的外界(器壁或其周围的其他流体)施加于该流体微元上的力(如压力)。表面力与作用的表面积成正比。单位面积上的表面力称为应力。质量力(体积力)是指不与流体接触,而施加于流体所有质点上的力(如重力、离心力)。质量力与流体质量成正比。

3. 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。流体的密度几乎不随压力而变化,但温度对其有一定的影响,可由相关

的物性手册中查得。

气体的密度随压力和温度而变化。当压力不太高、温度不太低时,可按理想气体状态方程来计算。

液体混合物的密度有相应的计算公式。气体混合物的密度也可按理想气体状态方程计算(当压力不太高,温度不太低时)。

4. 流体的压缩

当作用于流体上的外力发生变化时,流体的体积也会发生变化,这种特征称为流体的压缩。流体的压缩用体积压缩系数 ϵ_v 表示,即温度不变,压强每增加一个单位时,流体体积(现以单位质量流体的体积 v 为基准)的相对变化量。即

$$\epsilon_v = -\frac{1}{v} \frac{dv}{dp}$$

通常将 $\epsilon_v \neq 0$ 的流体称为可压缩流体。一般情况下,液体的 $\epsilon_v = 0$,故可视为不可压缩流体。

二、流体静力学

流体静力学主要研究流体静止状态下所受的各种力(主要为内部压力)之间的关系。

1. 流体的压强

作用于流体单位表面积上的法向表面力称为压强,习惯上称为压力,而将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 (帕斯卡), kgf/cm^2 等。

以流体柱高度表示: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:物理大气压(atm)。

要掌握以上各种表示压力单位的换算关系。

(2) 压力的基准

绝对压力:以绝对真空(绝对零压)为基准测得的压力。

表压:以当时当地大气压为基准测得的压力,即绝对压力与大气压力之差,如表压值为负值称为真空度,此时绝对压力低于大气压力。

(3) 压力的特性

第一,流体压力处处与流体的作用面垂直,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。

2. 流体静力学基本方程式

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho}$$

或

$$gz + \frac{p}{\rho} = \text{常数}$$

或

$$p = p_0 + \rho gz$$

式中各项(如 gz 项和 p/ρ 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 p/ρ 项是单位质量流体所具有的静压能。

由上式可知,静止连续的均质流体中,流体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。这就是流体静力学基本方程式的物理意义。

流体静力学基本方程式适用于重力场中静止连续的同一种不可压缩流体。

应用流体静力学基本方程式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、连续的同一种流体并处于同一水平面这些条件,缺一不可。

流体静力学基本方程式也可用于压力变化幅度不大的气体,此时取流体的平均密度进行计算。

3. 流体静力学基本方程式的应用 —— 压力测量

(1) U形管压差计

U形管压差计用于测量管路或设备中两点间的压力差。U形管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 ,如图 1-2 所示两测点 1、2 之间的压差为

$$\Delta p = p_1 - p_2 = gR(\rho_0 - \rho) \quad (\text{注:该式仅适用于水平等径管})$$

若点 2 处所连的为大气,则测出的 Δp 是 1 点的表压值。

(2) 微差压差计(双液体 U 形管压差计)

若两截面 1—1 与 2—2 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 ρ 相近的流体作指示液的 U 形管压差计外,还可用微差压差计,如图 1-3 所示。

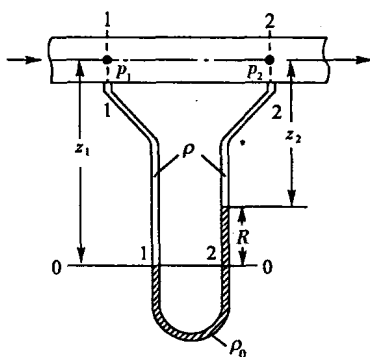


图 1-2 U形管压差计

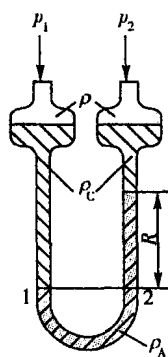


图 1-3 微差压差计

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积比U形管的截面积大得多(100倍以上)，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($\rho_A > \rho_c$)，可使读数 R 放大几倍甚至更大。

(3) 倒U形管压差计

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

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

注意：以上各压差计算式仅适用于水平等径管。

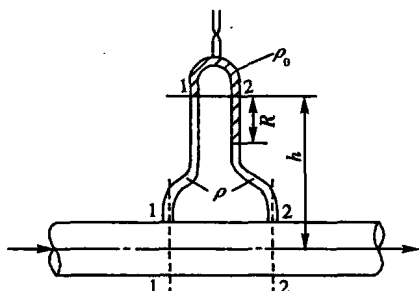


图 1-4 倒U形管压差计

三、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之间的转化规律。

1. 流量与流速

体积流量 q_v (m^3/s)、质量流量 q_m (kg/s) 与平均速度 u (m/s)、质量流率 G [$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$] 之间的关系为

$$q_v = uS, q_m = q_v \rho = uS\rho, G = \frac{q_m}{S} = \frac{q_v \rho}{S} = u\rho$$

式中, S 为管道截面积, m^2 。

由于气体的体积随温度 T 和压强 p 而变, 故气体的平均速度 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) 变化的质量流量 G 计算较为方便。

2. 稳态流动与非稳态流动

在流动系统中, 若流体的流速、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。工业生产多属稳态流动。反之, 若以上参数不仅随位置变化, 而且随时间而变, 则称该系统为非稳态流动系统。工业生产中的开车与停车阶段的流动属非稳态流动。

3. 稳态流动时的连续性方程式

$$u_1 S_1 \rho_1 = u_2 S_2 \rho_2 = \cdots = uS\rho = q_m = \text{常数}$$

对不可压缩流体, ρ 为常数, 有

$$u_1 S_1 = u_2 S_2 = \cdots = uS = q_v = \text{常数}$$

不可压缩流体在圆管内流动时

$$u_1 d_1^2 = u_2 d_2^2 = \cdots = u d^2 = \text{常数}$$

式中, $d_1, d_2, \cdots, d$ 为管内径。

4. 柏努利方程式

用于不可压缩理想流体 (假想的无黏性, 流动时无阻力的流体) 的柏努利方程式为

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

由上式可见:

(1) 不可压缩理想流体在与外界无能量交换的稳态恒温流动系统中, 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。(其他两种单位表示的柏努利方程式略)

5. 实际流体流动的机械能衡算式

实际流体在流动时为了克服流动阻力, 必须消耗一部分机械能。消耗的机械能可分别表示为阻力 $\sum R(\text{J/kg})$ 、压头损失 $\sum h_f(\text{m})$ 、压降 $\Delta p_f(\text{Pa})$ 等形式。导出的机械能衡算式相应也有多种形式:

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

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + H = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \sum h_f \quad (\text{m 相当于 J/N})$$

$$\rho g z_1 + p_1 + \frac{\rho u_1^2}{2} + \rho W_e = \rho g z_2 + p_2 + \frac{\rho u_2^2}{2} + \Delta p_f \quad (\text{Pa 相当于 J/m}^3)$$

式中, W_e 、 H 、 ρW_e 分别是流体输送机械对 1 kg 流体、1 N 流体、1 m³ 流体所做的功。

对于可压缩流体的流动系统, 当 $\frac{p_1 - p_2}{p_1} < 0.2$ 时, 仍可用机械能衡算式进行计算, 上式中的 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(有时与连续性方程式联用)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。

机械能衡算式的应用条件:(1) 稳定、连续、不可压缩流动系统;(2) 在选定的两截面间, 系统与周围环境无质量交换, 满足连续性方程式。

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) 截面应选在包含已知数据多、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, 除待求的未知量外, 都应是已知数据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, 即同为绝压值或表压值。

四、流体流动阻力

1. 流体的黏性与牛顿黏性定律

实际流体流动时产生阻力的内在原因是流体的黏性。

牛顿黏性定律表明, 在流体流动过程中, 流体层间产生的剪应力 τ (单位面积上的切向表面力) 与法向速度梯度之间的关系为

$$\tau = \pm \eta \frac{du}{dy}$$

式中,比例系数 η 称为黏度(动力黏度),单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

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

在一些工程应用中,可以用到运动黏度 ν 的概念,即黏度 η 与密度 ρ 之比,单位为 m^2/s 。

在工程应用中,黏度 η 和运动黏度 ν 的单位还有其他表示方法。如 cP (厘泊)、 St (斯)等,要掌握相关单位间的换算关系。

2. 牛顿型流体与非牛顿型流体

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

非牛顿型流体:凡不符合牛顿黏性定律的流体。如稠度较高的悬浮液、黏稠液、高分子聚合物液体等,包括假塑性流体、黏塑性流体、胀塑性流体等。

3. 流体的流动类型

流体的流动类型分层流和湍流两种,可用雷诺数 Re 判断。它是由管内径 d 、流体的平均速度 u 、流体的密度 ρ 和黏度 η 组成的量纲为一的数群($Re = \rho u d / \eta$)。

当流体在圆形直管内流动时,根据实验有:

(1) $Re \leq 2000$ 时为稳定的层流;

(2) $Re \geq 4000$ 时为稳定的湍流;

(3) $2000 < Re < 4000$ 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)

4. 圆形直管内流体的流动

(1) 层流时管内流体的速度分布

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 与管中心处最大速度 $u_{\max}$ 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,管中心处速度最大,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 与管中心处最大速度 $u_{\max}$ 的关系为

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

5. 边界层的概念

(1) 边界层的形成

流体在大平板上流动过程中,紧靠平板壁面处必存在一薄层流体,其速度小于流体的主体速度,称为流动边界层。边界层形成的原因,一是由于流体具有黏性,二是由于有固体壁面的约束作用。

(2) 边界层的发展

如果大平板壁面足够长,流体在流经一段长为 x_0 的距离后,将由稳定的层流边界层发展成为稳定的湍流边界层。湍流边界层内近壁处为层流内层。层流内层与湍流层之间还存在着过渡层或缓冲层(不稳定状态)。

如果流体在圆管内流动,也存在边界层的形成与发展过程。与大平板不同的是:

边界层的厚度最大为圆管半径,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,边界层就扩展至管中心。汇合时边界层的流动状态决定了流体的流动状态(层流或湍流),此时为完全发展的流动边界层。

(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黏性摩擦两个必要因素,可能产生边界层分离的现象。边界层的分离使流体质点碰撞激烈,而消耗能量。

6. 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:

$$\Delta p_f = \lambda \frac{L}{d} \frac{\rho u^2}{2} \quad (\text{Pa})$$

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系数图查取。

(2) 非圆形直管内的流动阻力

此时仍采用范宁公式计算流动阻力,但式中的 d 及 Re 中的 d 皆应用当量

直径 d_e 代替。

$$d_e = 4 \times \frac{\text{流体流通截面积}}{\text{润湿周边长度}}$$

实验表明, d_e 用于湍流时较可靠, 对于层流以 d_e 算出 Re 后, 应该用下式计算 λ :

$$\lambda = C/Re$$

式中, C 为量纲为一的系数, 可查阅相关资料获取。

(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、各种流量计及设备时, 会产生局部阻力。计算局部阻力的方法有两种。

① 阻力系数法

$$\Delta p_t = \zeta \frac{\rho u^2}{2}$$

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 $\rho \frac{u^2}{2}$ 的倍数, ζ 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。

② 当量长度法

$$\Delta p_t = \lambda \frac{l_e}{d} \frac{\rho u^2}{2}$$

这种计算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。

7. 量纲分析

量纲分析的基础: 物理方程的量纲一致性。白金汉 π 定理: 任何量纲一致的物理方程都可以表示为若干个量纲为一的数群的函数, 量纲为一的数群的数目 N 由物理量数 n 和用来表示这些物理量的基本次数 m 决定:

$$N = n - m$$

五、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为简单管路。计算公式为

$$q_v = \frac{\pi}{4} d^2 u$$