



高等学校理工类课程学习辅导丛书



化工原理学习指导

配套大连理工大学编《化工原理》(第三版 上、下册)

王瑶 主编



高等教育出版社



高等学校理工类课程学习辅导丛书

化工原理学习指导

Huagong Yuanli Xuexi Zhidao

王 瑶 主编



高等教育出版社·北京

内容提要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材《化工原理(第3版)》(大连理工大学编,高等教育出版社,2015年)的配套教学辅导用书,主要介绍了教材中各单元操作的教学基本内容、重点与难点、例题解析、习题详解和同步练习。通过这些环节,使读者深入理解和掌握化工原理的基本原理、规律,并利用这些知识解决工程实际问题。全书共11章,包括流体流动基础、流体输送设备、机械分离及流态化、传热过程及换热器、蒸发、蒸馏、气体吸收、气液传质设备、液-液萃取、干燥和膜分离过程。

本书强调基本理论的应用,突出工程观点。可作为高等学校化工及相关专业本科生学习化工原理课程的辅导书,也可作为研究生入学考试辅导用书。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理学习指导/王瑶主编.--北京:高等教育出版社,2016.10
(高等学校理工类课程学习辅导丛书)
ISBN 978-7-04-046396-5

I. ①化… II. ①王… III. ①化工原理-高等学校-教学参考资料 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 206053 号

策划编辑	刘 佳	责任编辑	刘 佳	封面设计	张 楠	版式设计	徐艳妮
插图绘制	杜晓丹	责任校对	陈 杨	责任印制	刘思涵		

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街 4 号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.hepmall.com.cn
印 刷	北京凌奇印刷有限责任公司		http://www.hepmall.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.hepmall.cn
印 张	32.5		
字 数	790 千字	版 次	2016 年 10 月第 1 版
购书热线	010-58581118	印 次	2016 年 10 月第 1 次印刷
咨询电话	400-810-0598	定 价	46.80 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 46396-00

前 言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材《化工原理(第3版)》(大连理工大学编,高等教育出版社,2015年)的教学辅导用书。本书的编写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。

本书是编者在多年的化工原理教学实践积累的基础上编写而成的,包括流体流动基础、流体输送设备、机械分离及流态化、传热过程及换热器、蒸发、蒸馏、气体吸收、气液传质设备、液-液萃取、干燥和膜分离过程共11章内容。各章分为教学基本内容、重点与难点、例题解析、习题详解和同步练习五部分。教学基本内容对教材要点进行简明阐述,对其中的难点和易混淆内容给予说明,并适当加深拓宽。重点和难点总结了各章需掌握的重点内容和学生在学习过程中的难点内容。例题解析选取各章典型内容以例题的形式加以分析,注重过程的分析和总结,是课堂教学的深入。习题详解是对大连理工大学编写的《化工原理(第3版)》(高等教育出版社)中各章习题的详细解答,供该书读者自学参考。同步练习供读者自我检查学习效果使用。

本书由大连理工大学化工原理教研室教师编写,参加编写的有潘艳秋、姜晓滨(第1、2、3章),刘琳琳、都健(第4、5章),王瑶(第6、10章),吴雪梅(第7、9章),肖武(第8章),李祥村(第11章)。大连理工大学化工原理教研室的全体同事在本书的编写过程中给予了无私的帮助和支持,同时,本书也吸取了兄弟院校的宝贵经验,在此一并表示衷心的感谢!

限于编者水平,书中难免不妥和错误之处,敬请读者指正。

编 者

2015. 10. 25

目 录

第1章 流体流动基础	1	2.4 习题详解	94
1.1 教学基本内容	1	2.5 同步练习	106
1.1.1 概述	1	第3章 流体相对颗粒(床层)的相对	
1.1.2 流体静力学	2	运动——机械分离及流态化	109
1.1.3 流体动力学	5	3.1 教学基本内容	109
1.1.4 流体流动阻力	6	3.1.1 颗粒与颗粒床层的特性	109
1.1.5 管路计算	9	3.1.2 流体与颗粒间的相对运动	111
1.1.6 流速与流量的测定	10	3.1.3 重力沉降	111
1.2 重点与难点	11	3.1.4 离心沉降	113
1.3 例题解析	11	3.1.5 流体通过颗粒床层的流动	114
1.3.1 关于流体静力学的计算	11	3.1.6 过滤	115
1.3.2 关于流体动力学的计算	13	3.2 重点与难点	118
1.3.3 关于流体流动阻力计算	17	3.3 例题解析	119
1.3.4 关于管路计算	23	3.3.1 关于重力沉降的计算	119
1.3.5 关于测速管和流量计的计算	30	3.3.2 关于离心沉降的计算	123
1.4 习题详解	32	3.3.3 关于流体通过颗粒床层流动	
1.5 同步练习	57	的计算	125
第2章 流体输送设备	60	3.3.4 关于过滤的计算	126
2.1 教学基本内容	60	3.4 习题详解	134
2.1.1 概述	60	3.5 同步练习	146
2.1.2 离心泵	60	第4章 传热过程及换热器	148
2.1.3 容积式泵	68	4.1 教学基本内容	148
2.1.4 通风机、鼓风机、压缩机和		4.1.1 传热基本方式及能量方程	148
真空泵	69	4.1.2 热传导	150
2.2 重点与难点	71	4.1.3 对流传热	152
2.3 例题解析	71	4.1.4 辐射传热	155
2.3.1 关于离心泵性能参数的计算	71	4.1.5 传热过程的计算	158
2.3.2 关于离心泵特性曲线、工作点和		4.1.6 换热器	160
流量调节的计算	72	4.2 重点与难点	161
2.3.3 关于离心泵组合操作的计算	89	4.3 例题解析	161
2.3.4 风机的选型	93	4.3.1 关于导热过程的计算	161

4.3.2 关于表面传热系数的计算	163	7.1.2 吸收过程的质量传递	340
4.3.3 关于热辐射的计算	167	7.1.3 分子扩散	341
4.3.4 关于保温层的计算	167	7.1.4 涡流扩散	342
4.3.5 传热过程综合计算	169	7.1.5 对流传质	342
4.4 习题详解	200	7.1.6 相际间的质量传递	344
4.5 同步练习	228	7.1.7 低浓度气体吸收	346
第5章 蒸发	233	7.1.8 高浓度气体吸收	349
5.1 教学基本内容	233	7.1.9 多组分吸收	350
5.1.1 概述	233	7.1.10 化学吸收	351
5.1.2 单效蒸发计算	234	7.1.11 解吸操作	351
5.1.3 多效蒸发的流程和加热蒸汽 经济性	235	7.2 重点与难点	352
5.1.4 蒸发器	235	7.3 例题解析	352
5.2 重点与难点	236	7.3.1 关于传质理论的计算	352
5.3 例题解析	237	7.3.2 关于吸收操作的计算	359
5.3.1 关于单效蒸发的计算	237	7.4 习题详解	382
5.3.2 关于多效蒸发的计算	242	7.5 同步练习	400
5.4 习题详解	248	第8章 气液传质设备	403
5.5 同步练习	253	8.1 教学基本内容	403
第6章 蒸馏	255	8.1.1 板式塔	403
6.1 教学基本内容	255	8.1.2 填料塔	412
6.1.1 概述	256	8.2 重点与难点	415
6.1.2 溶液的气液相平衡	256	8.3 例题解析	415
6.1.3 蒸馏过程	259	8.4 同步练习	418
6.1.4 双组分连续精馏的计算	261	第9章 液-液萃取	420
6.1.5 多组分精馏	269	9.1 教学基本内容	420
6.2 重点与难点	269	9.1.1 概述	421
6.3 例题解析	270	9.1.2 萃取过程的相平衡关系	421
6.3.1 关于气液相平衡的计算	270	9.1.3 溶剂的选择	425
6.3.2 关于简单蒸馏和平衡蒸馏 的计算	274	9.1.4 萃取流程的选择	426
6.3.3 关于双组分连续精馏的计算	275	9.1.5 萃取过程的计算	426
6.3.4 关于多组分精馏的计算	310	9.2 重点与难点	432
6.4 习题详解	315	9.3 例题解析	433
6.5 同步练习	332	9.3.1 关于三角形相图的计算	433
第7章 气体吸收	338	9.3.2 关于单级萃取的计算	435
7.1 教学基本内容	338	9.4 习题详解	440
7.1.1 概述	339	9.5 同步练习	451
		第10章 干燥	453
		10.1 教学基本内容	453

10.1.1 概述	454	计算	478
10.1.2 干燥介质	454	10.4 习题详解	485
10.1.3 物料干燥过程的相平衡	457	10.5 同步练习	496
10.1.4 干燥过程速率	459	第 11 章 膜分离过程	498
10.1.5 干燥过程计算	460	11.1 教学基本内容	498
10.1.6 干燥设备	464	11.1.1 概述	498
10.2 重点与难点	465	11.1.2 膜分离	499
10.3 例题解析	465	11.1.3 膜在过程强化中的应用	501
10.3.1 关于湿空气性质的计算	465	11.1.4 膜分离单元操作	502
10.3.2 关于干燥过程的物料和热量 衡算	472	11.2 重点与难点	505
10.3.3 关于干燥速率和干燥时间的		11.3 例题解析	506
		11.4 同步练习	510

第 1 章

流体流动基础

1.1 教学基本内容

- (1) 掌握流体的密度、黏度等物性参数的求取及不同单位之间的换算,掌握流体的作用力、压力的基准和单位、连续性假定;
- (2) 掌握流体的连续性、压缩性、黏性的概念,掌握牛顿黏性定律;
- (3) 掌握流体静力学基本方程的应用范围及其在压力(压差)、液位、液封高度测量中的应用;
- (4) 掌握理想流体的概念,掌握连续性方程、伯努利方程、机械能衡算式的内涵、应用条件及其应用;
- (5) 掌握边界层形成的原因和条件、平板上及圆管内边界层的发展、边界层的分离条件;
- (6) 掌握流体流动类型的判断依据及方法,掌握流体在管路中流动时流动阻力(包括直管阻力和局部阻力)的计算方法,学会流体适宜流速的选择及管路直径的确定;
- (7) 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;
- (8) 掌握管路中流体的流速、流量的测定原理及测量方法,以及毕托管、文氏管流量计和孔板流量计、转子流量计的测量原理、简单结构和特点、安装要点;
- (9) 了解量纲分析方法的相关概念和方法;
- (10) 了解流体流动与动量传递的关系。

本章主要内容之间的关系如图 1.1 所示:

1.1.1 概述

1. 流体的连续性假定

研究流体在静止和流动状态下的规律时,常将流体视为由大量质点组成、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),这就是流体的连续性假定。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。需要注意的是,当流体压力极低时,连续性假定不能应用。

2. 流体流动中的作用力

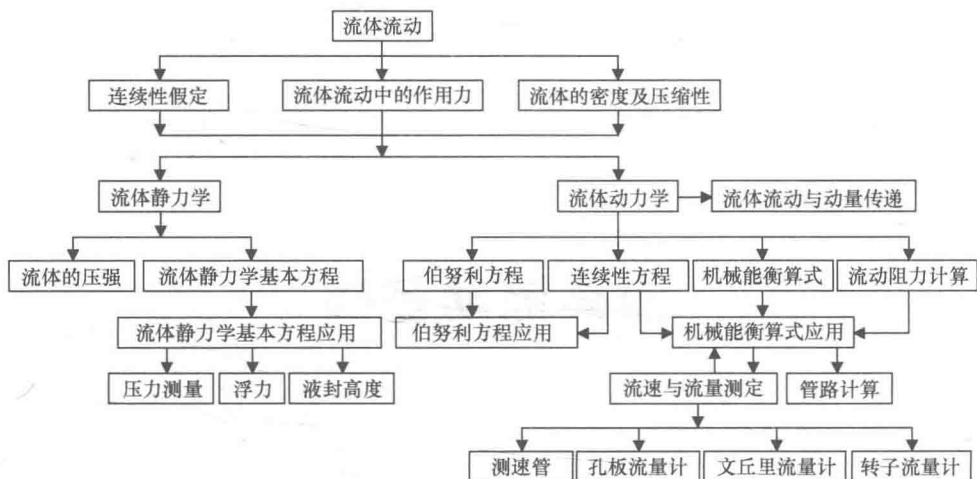


图 1.1 本章内容便览

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)。质量力与流体的质量成正比。

3. 流体的密度

单位体积内流体的质量称为流体的密度。一定种类的流体,影响其密度的因素有温度和压力。

液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. 流体的压缩性

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性。流体的压缩性用体积压缩系数 κ 表示,即当温度不变时,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

$$\kappa = -\frac{1}{v} \frac{dv}{dp} \quad (1.1)$$

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

1.1.2 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(主要为内部压力和重力)之间的关系。

1. 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,习惯上称为压力(本书后面所提压力,如

不特别指明,均指压强),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),工程大气压(at)。

要掌握以上各种压力单位的换算关系。

部分压力单位的换算关系如下:

$$1 \text{ mmHg} = 133.322 \text{ Pa} \quad 1 \text{ mmH}_2\text{O} = 9.80665 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ atm} = 101.325 \text{ kPa} = 760 \text{ mmHg} = 10.3 \text{ mH}_2\text{O}$$

$$1 \text{ at} = 98.07 \text{ kPa} = 735.6 \text{ mmHg} = 10.0 \text{ mH}_2\text{O}$$

(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,一般压力表所显示的数值即为表压。

真空度:如表压值为负值称为真空度,此时绝对压力低于大气压力,一般真空表所显示的数值即为真空度。

(3) 压力的特性

第一,流体压力处处与流体的作用面相垂直,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

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} \quad (1.2)$$

或

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \quad (1.3)$$

或

$$p_1 + \rho g z_1 = p_2 + \rho g z_2 \quad (1.4)$$

式(1.2)中各项单位均为 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。式(1.3)中各项的单位是 J/N 或 m,是指每牛顿流体所具有的能量,式(1.4)中各项的单位是 J/m³或 Pa,是指每立方米流体所具有的能量。

由以上各式可知,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的物理意义。

流体静力学基本方程适用于重力场中静止、连续的同一种不可压缩流体。对于不连续的流体,应分段使用静力学方程。

应用流体静力学基本方程时要注意等压面的选取。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也可用于压力变化幅度不大(如 $\frac{p_1 - p_2}{p_1} < 20\%$)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的应用——压力测量

流体静力学基本方程可用于压力测量、液位测量和液封高度计算等,这里仅讨论压力测量。

(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。压差计中的指示液必须与被测流体不互溶、不发生化学反应,其密度 ρ_0 必须大于被测流体的密度 ρ 。如图 1.2 所示(水平等径管),两测点 1、2 之间的压差为

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

若点 2 处连接大气,则测出的 Δp 值是 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、使用倾斜管压差计等外,还可用微差压差计,如图 1.3 所示。在 U 形管的两端上方各增设一个扩大室(其直径至少大于下面细管直径的 10 倍),其中各装有指示液 A 和 C,要求指示液 A 和 C 与下方 U 形管中指示液、与所测流体不相溶及发生化学反应,且密度大于下方 U 形管中指示液的密度。

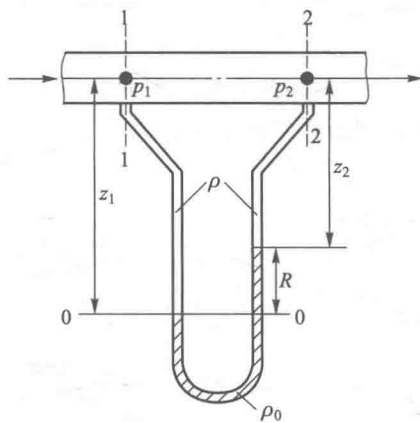


图 1.2 U 形管压差计

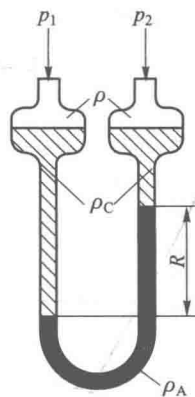


图 1.3 微差压差计

当微差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,压差计两端上方扩大室的截面积比下方 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

$$p_1 - p_2 = (\rho_A - \rho_C) gR \quad (1.5)$$

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

如果指示剂(如空气)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

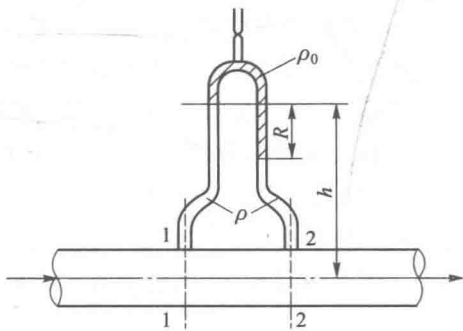


图 1.4 倒 U 形管压差计

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

注意:以上各压差计算式仅适用于水平等径管。

1.1.3 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 为管道流通截面积, m^2 ; ρ 为流体的密度, kg/m^3 。

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) 变化的质量流率 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。工业生产上的流动多属稳态流动。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

$$u_1 S_1 \rho_1 = u_2 S_2 \rho_2 = \cdots = uS\rho = q_m = \text{常数} \quad (1.6)$$

对不可压缩流体, ρ 为常数, 有

$$u_1 S_1 = u_2 S_2 = \cdots = uS = q_v = \text{常数} \quad (1.7)$$

不可压缩流体在圆管内流动时

$$u_1 d_1^2 = u_2 d_2^2 = \cdots = u d^2 = \text{常数} \quad (1.8)$$

式中, $d_1, d_2, \cdots, d$ 为管内径。

4. 伯努利方程

用于不可压缩理想流体 (假想的无黏性流体, 其在流动时无阻力) 的伯努利方程的三种形式为

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} \quad (\text{J/kg}) \quad (1.9)$$

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} \quad (\text{J/N}) \quad (1.10)$$

$$\rho g z_1 + p_1 + \frac{\rho u_1^2}{2} = \rho g z_2 + p_2 + \frac{\rho u_2^2}{2} \quad (\text{J/m}^3) \quad (1.11)$$

由以上三式可见:

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 伯努利方程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 $\sum R$ (J/kg)、压头损失 $\sum h_f$ (m)、压降 Δp_f (Pa) 等形式。由伯努力方程推导出的机械能衡算式相应也有三种形式:

$$\begin{aligned} gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + W_e &= gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \sum R \quad (\text{J/kg}) \\ z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} + H &= z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g} + \sum h_f \quad (\text{J/N 或 m}) \\ \rho gz_1 + p_1 + \frac{\rho u_1^2}{2} + \rho W_e &= \rho gz_2 + p_2 + \frac{\rho u_2^2}{2} + \Delta p_f \quad (\text{Pa 或 J/m}^3) \end{aligned}$$

以上各式中, 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。 $H = W_e / g$ 。

对于可压缩流体的流动系统,当压力变化不大(如 $\frac{p_1 - p_2}{p_1} < 0.2$) 时,仍可用机械能衡算式进行计算,以上各式中的 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、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 在选定的两流动截面间,系统与周围环境无质量交换,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 选定的两流动截面均须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 z 的基准面必须是水平面,其位置(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。

1.1.4 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存在黏性。

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 $\frac{du}{dy}$ 之间的关系为

$$\tau = \pm \eta \frac{du}{dy} \quad (1.12)$$

式(1.12)中,比例系数 η 称为黏度(或动力黏度),单位为 Pa·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,液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 (黏度 η 与密度 ρ 之比)的概念,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。

$$1 \text{ cP} = 1 \text{ mPa} \cdot \text{s} \quad 1 \text{ St} = 100 \text{ cSt} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$$

2. 牛顿流体与非牛顿流体

牛顿流体: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流体。

非牛顿流体:剪应力与法向速度梯度的关系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

流体的流动类型分为层流和湍流两种,可用雷诺数 Re ($Re = \rho u d / \eta$) 判断。在圆形管内,雷诺数 Re 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 1 的数群。

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。此时流型处于不稳定状态,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,所用的单位必须使用统一的单位制(即所有参数必须同用国际单位制或工程制单位等)。

4. 圆形直管内流体的流动

(1) 层流流动时管内流体的速度分布

由理论分析和实验证明,层流流动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

湍流时管内流体的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(缓冲层)、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) 大平板上流动边界层的形成和发展

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。边界层形成的条件是:实际流体(具有黏性的流体)流过固体壁面。

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,将可能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)。

(2) 圆形直管内边界层的形成和发展

流体在圆形直管内流动时与大平板一样,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。在进行参数测量时,应避开容易产生边界层分离的位置取点。

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两种。总阻力应为这两部分所有的阻力之和。

(1) 圆形直管内的流动阻力

阻力计算用范宁公式:

$$\Delta p_f = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho u^2}{2} \quad (\text{Pa}) \quad (1.13)$$

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。完全湍流区(阻力平方区)内,摩擦系数仅与管道的相对粗糙度有关。

(2) 非圆形直管内的流动阻力

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(式中流速的计算不能使用当量直径)。

$$d_e = 4 \times \frac{\text{流体流通截面积}}{\text{润湿周边长度}} \quad (1.14)$$

实验表明,用 d_e 计算摩擦系数在湍流时较可靠。对于层流,用 d_e 算出 Re 后,应该用下式计算 λ :

$$\lambda = C/Re$$

式中, C 为量纲为 1 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、管件、阀门、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:

$$\Delta p_f = \zeta \frac{\rho u^2}{2} \quad (1.15)$$

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:

$$\Delta p_f = \lambda \frac{l_e}{d} \frac{\rho u^2}{2} \quad (1.16)$$

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. 量纲分析法

量纲分析法的基础:物理方程的量纲一致性原则。

量纲分析法所得量纲为 1 数群数量的计算依据为白金汉 π 定理,即任何量纲一致的物理方程都可以表示为若干个量纲为 1 的数群的函数,量纲为 1 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:

$$N = n - m$$

1.1.5 管路计算

化工生产中涉及的管路分为简单管路和复杂管路两种。

1. 简单管路

(1) 简单管路是指管径相同且无分支的管路。计算公式为

$$q_v = \frac{\pi}{4} d^2 u \quad (1.17)$$

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{u^2}{2} \quad (1.18)$$

式中,摩擦系数

$$\lambda = f \left(\frac{du\rho}{\eta}, \frac{\varepsilon}{d} \right)$$

上述三个方程式中包括 13 个变量。当被输送流体种类确定,其物性数据 η, ρ 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 个变量。

对于设计型计算,一般已知流体的物性(ρ, η)和输送量(q_v),在确定了输送距离(l),选定了管材及管件(ε 及 $\sum \zeta$),明确了两截面的位能及静压能情况下,需要设计出经济管径及供液点应提供的能量(或静压能)。

对于操作型计算,已知管路情况(包括管长、管径、管件和阀门、输送设备情况等),需要核算管路的输送能力 q_v 。

两种类型计算所依据的公式相同。

(2) 串联管路

串联管路是由若干段管径不同的简单管路串联而成的管路。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(对于不可压缩流体,即体积流量不变)。

2. 复杂管路

(1) 并联管路

几条简单管路或串联管路的入口端与出口端分别汇合在一起的管路,称为并联管路。并联

管路的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。故在计算有并联支管存在的管路阻力时,对于并联段就只需考虑其中任一支管的阻力即可。

(2) 分支管路

若几条简单管路或串联管路仅于入口端汇合,则这样的管路称为分支管路。其特点为:总管流量等于分支管路流量之和,管路阻力应分段计算,分支点处的总机械能为定值。

(3) 汇合管路

几条简单管路或串联管路仅于出口端汇合,这样的管路称为汇合管路。其特点与分支管路类似。

1.1.6 流速与流量的测定

1. 测速管(毕托管)

毕托管测量的是点速度,其读数 R 与所在位置(距管中心距离 r) 上流体点速度 u_r 的关系为

$$u_r = C_p \sqrt{\frac{2gR(\rho_0 - \rho)}{\rho}} \quad (1.19)$$

式中,校正系数 $C_p = 0.98 \sim 1.0$ 。

利用测速管可以测得管道截面上任一点 r 处的速度,从而可得管截面上的速度分布。对于圆形管道,可以测取管中心的最大速度 $u_{\max}$,再根据 $u_{\max}$ 与平均速度 u 的关系(如关系图,参见教材),计算出管截面积上的平均速度,进而可求出流量。

注意测速管的安装要求和使用条件,测速管不适于在有固体杂质的流体中使用。

2. 孔板流量计

孔板流量计和文丘里流量计都属恒截面、变压差流量计。孔板流量计的取压方法有角接取压法(多用)和缩脉取压法。其压差计读数 R 与流体体积流量 q_v 的关系为

$$q_v = C_0 S_0 \sqrt{\frac{2gR(\rho_0 - \rho)}{\rho}} \quad (1.20)$$

式中, S_0 为孔口截面积, m^2 ; C_0 为孔流系数,与孔板的孔径 d_0 和管直径 d_1 之比 d_0/d_1 、 Re 有关,对于标准孔板,当 $d_0/d_1 < 0.5$, $Re > 6 \times 10^6$ 时, $C_0 = 0.6 \sim 0.65$ 。

流体流经孔板前后的阻力较大,要注意孔板流量计的安装要求。

3. 文丘里流量计(文氏管流量计)

文丘里流量计也属于恒截面、变压差流量计,其流量关系与孔板流量计类似,只需将该式中的 C_0 改为流量系数 C_v 即可,一般取 $C_v = 0.98$;同时, S_0 用喉管处的截面积 S_2 代替。

流体流经文丘里流量计前后的阻力较小,注意文丘里流量计的安装要求。

4. 转子流量计

转子流量计属恒压差、变截面流量计。其流量关系式为

$$q_v = C_R S_2 \sqrt{\frac{2g(\rho_f - \rho) V_f}{\rho S_f}} \quad (1.21)$$

式中, C_R 为流量系数,与转子形状及环隙雷诺数有关; S_f 、 V_f 、 ρ_f 分别为转子最大截面积、转子体积、转子材料密度; S_2 为环隙截面积。