

Guidance on Learning
“Unit Operations of Chemical Engineering”

化工原理复习指导

柴诚敬 王 军 陈常贵 郭翠梨 编

Guidance on Learning
“Unit Operations of Chemical Engineering”

化工原理复习指导

柴诚敬 王 军 陈常贵 郭翠梨 编



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

内 容 提 要

本书是与《化工原理》配套的课程学习指导书。全书分11章,精练阐述10个化工过程与单元操作,即流体流动、流体输送机械、非均相物系的分离和固体流态化、传热、蒸发、蒸馏、吸收、蒸馏和吸收塔设备、液-液萃取、干燥。每章均设有学习指导、学习要点、本章小结、例题与解题指导、学生自测。书末附有化工原理及实验考试大纲、近四年天津大学研究生院招收硕士生《化工原理(含实验)》入学试题及答案。

本书可作为高等院校化工及相关专业学生学习《化工原理》课程及考研复习的指导书,也可作为教师讲授本课程的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理复习指导/柴诚敬编. —天津:天津大学出版社,2011.7

ISBN 978-7-5618-4048-1

I. ①化… II. ①柴… 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(2011)第 151408 号

出版发行 天津大学出版社
出 版 人 杨欢
地 址 天津市卫津路 92 号天津大学内(邮编:300072)
电 话 发行部:022-27403647 邮购部:022-27402742
网 址 www.tjup.com
印 刷 廊坊市长虹印刷有限公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm×260mm
印 张 20.75
字 数 518 千
版 次 2011 年 8 月第 1 版
印 次 2011 年 8 月第 1 次
定 价 35.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页等质量问题,烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究

再版说明

本书是与夏清、贾绍义主编的《化工原理》(上、下册,第2版)相配套的课程学习指导书。本书旨在帮助学生掌握化工原理课程的学习方法,加深对基本概念、基本理论的理解,提高分析工程实际问题的能力和解题技能。本书涉及的化工过程与单元操作有流体流动、流体输送机械、非均相物系的分离和固体流态化、传热、蒸发、蒸馏、吸收、蒸馏和吸收塔设备、液—液萃取、干燥等。为了给报考硕士研究生的学生提供方便,本教材编写组还特意编写了化工原理实验的内容。书末附有化工原理及实验考试大纲、近四年天津大学研究生院招收硕士研究生《化工原理(含实验)》入学试题及答案,供学生自我测试时参考。

本书是编者在总结长期教学经验的基础上编写的,内容精练、重点突出,注重创新意识和工程能力的培养。每章的结构组成为:学习指导、学习要点、本章小结、例题与解题指导、学生自测(包括基本概念和计算题)。书末给出自测题答案。

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良师益友,也可作为教师讲授本课程的参考书,还可作为从事化工工作的科技人员的自学指导书。

参加本书编写工作的有柴诚敬(绪论、流体流动、流体输送机械、非均相物系分离和固体流态化、蒸馏和吸收塔设备、液—液萃取、干燥、附录)、王军(传热、蒸发)、陈常贵(蒸馏、吸收)、郭翠梨(化工原理实验)。本书在编写过程中得到姚玉英、刘国维、贾绍义、夏清、马红钦等老师的支持和帮助,在此表示感谢。

由于编者水平有限,不当之处望广大读者指正,以便修改完善。

编者

2011.6

目录

绪论	(1)
第1章 流体流动	(3)
本章符号说明	(3)
本章学习指导	(3)
本章学习要点	(4)
本章小结	(14)
例题与解题指导	(15)
学生自测	(36)
第2章 流体输送机械	(41)
本章符号说明	(41)
本章学习指导	(42)
本章学习要点	(42)
本章小结	(51)
例题与解题指导	(52)
学生自测	(66)
第3章 非均相物系的分离和固体流态化	(70)
本章符号说明	(70)
本章学习指导	(71)
本章学习要点	(72)
本章小结	(85)
例题与解题指导	(86)
学生自测	(96)
第4章 传热	(100)
本章符号说明	(100)
本章学习指导	(101)
本章学习要点	(101)
本章小结	(116)
例题与解题指导	(116)
学生自测	(141)
第5章 蒸发	(144)
本章符号说明	(144)
本章学习指导	(144)

本章学习要点	(145)
本章小结	(150)
例题与解题指导	(151)
学生自测	(158)
第6章 蒸馏	(159)
本章符号说明	(159)
本章学习指导	(160)
本章学习要点	(160)
本章小结	(169)
例题与解题指导	(169)
学生自测	(190)
第7章 吸收	(194)
本章符号说明	(194)
本章学习指导	(195)
本章学习要点	(195)
本章小结	(204)
例题与解题指导	(204)
学生自测	(224)
第8章 蒸馏和吸收塔设备	(227)
本章符号说明	(227)
本章学习指导	(227)
本章学习要点	(228)
本章小结	(233)
例题与解题指导	(233)
学生自测	(233)
第9章 液—液萃取	(235)
本章符号说明	(235)
本章学习指导	(235)
本章学习要点	(236)
本章小结	(244)
例题与解题指导	(244)
学生自测	(250)
第10章 干燥	(253)
本章符号说明	(253)
本章学习指导	(253)
本章学习要点	(254)
本章小结	(262)
例题与解题指导	(263)
学生自测	(273)

第 11 章 化工原理实验	(277)
本章学习指导	(277)
本章学习要点	(277)
学生自测	(289)
附录	(292)
化工原理及实验考试大纲	(292)
天津大学研究生院招收硕士生《化工原理(含实验)》入学试题	(294)
学生自测题及考研试题答案	(311)
参考书目	(323)

结 论

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,是化工类及相关专业的一门主干课。本课程担负着由理及工、由基础到专业的特殊使命,即承担着工程科学与工程技术的双重教育任务。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的技术基础课,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,积极思考,并尽可能做到课前预习,对下次讲课的重点、难点做到心中有数,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,克服死记硬背式的呆板的学习方法。

另外,在日常生活中,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,通过“传递过程原理”和“处理工程问题的方法论”两条主线把它们有机地联系起来,掌握归纳、综合、对比和逻辑简化的学习方法,可使所学知识融会贯通,强化对知识的理解和消化。具体做法如下。

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,在流体流动一章中,可通过引申的伯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,在传热这一章中,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(牛顿黏性定律、傅里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(量纲分析方法),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、全面看问题的观念。

最后还应强调以下几点。

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。

③单元操作包括“过程”和“设备”两方面的内容,在“设备”的设计和操作中,贯穿着基本原理的应用。例如,列管换热器的管方分程、壳程加折流挡板以及若干个换热器串联操作,都可提高换热器的传热速率,达到强化传热的目的。

④要注意了解本学科的最新科技成果和发展趋势。随着新产品、新工艺的开发或为实现绿色化工生产过程和可持续发展战略,对物理过程提出了新的要求,又不断地发展出新的单元操作或化工技术,如膜分离、参数泵分离、超临界技术等。同时,以节约能耗、提高效率或洁净生产为特点的集成化工艺(如反应精馏、反应膜分离、多塔精馏系统的优化热集成等)将是未来的发展趋势。

第1章 流体流动

本章符号说明

英文字母

a ——组分的质量分数;
 A ——截面面积, m^2 ;
 d ——管道直径, m ;
 d_e ——当量直径, m ;
 d_0 ——孔径, m ;
 E ——1 kg 流体所具有的总机械能, J/kg ;
 g ——重力加速度, m/s^2 ;
 G ——质量流速, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$;
 h ——高度, m ;
 h_f ——1 kg 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 ;
 h'_f ——局部能量损失, J/kg ;
 H_e ——输送机械对 1 N 流体所提供的有效压头, m ;
 H_f ——压头损失, m ;
 l ——长度, m ;
 l_e ——当量长度, m ;
 M ——摩尔质量;
 N ——输送机械的轴功率, kW ;
 N_e ——输送机械的有效功率, kW ;
 p ——压强, Pa ;
 Δp_f ——1 m^3 流体流动时所损失的机械能, 称为压强降, Pa ;
 P ——压力, N ;
 r ——半径, m ;

R ——管道半径, 或液柱压差计读数, m ;
 Re ——雷诺数;
 S ——两流体层的接触面积, m^2 ;
 T ——热力学温度, K ;
 u ——流速, m/s ;
 $u_{\max}$ ——流动截面上的最大速度, m/s ;
 u_r ——流动截面上某点的局部速度, m/s ;
 v ——比容, m^3/kg ;
 V ——体积, m^3 ;
 V_h ——体积流量, m^3/h ;
 V_s ——体积流量, m^3/s ;
 y ——组分的物质的量分数;
 w_s ——质量流量, kg/s ;
 W_e ——输送机械对 1 kg 流体所作的有效功, J/kg ;
 Z ——位压头, m 。

希腊字母

ε ——绝对粗糙度, m ;
 ζ ——阻力系数;
 η ——效率;
 μ ——黏度, $\text{Pa} \cdot \text{s}$;
 π ——润湿周边, m ;
 ρ ——密度, kg/m^3 ;
 τ ——内摩擦应力, Pa 。

◆ 本章学习指导 ◆ ◆

1. 本章学习目的

通过本章学习, 掌握流体流动的基本原理、管内流动的规律, 并运用这些原理和规律分析和解决流体流动过程中的有关问题, 诸如:

(1) 流体输送 流速的选择、管径的计算、流体输送机械选型。

(2) 流动参数的测量 如压强、流速的测量等。

(3) 建立最佳条件 选择适宜的流体流动参数,以建立传热、传质及化学反应的最佳条件。

此外,非均相物系的分离、搅拌(或混合)都是流体力学原理的应用。

2. 本章应掌握的内容

① 流体静力学基本方程的应用。

② 连续性方程、伯努利方程的物理意义、适用条件、解题要点。

③ 两种流型的比较和工程处理方法。

④ 流动阻力的计算。

⑤ 管路计算和流量(流速)测量。

一般了解牛顿型和非牛顿型流体的流变特性以及边界层(边界层的形成、发展和边界层分离)的概念。

3. 本章学习中应注意的问题

① 流体力学属于基础理论,它和传热、传质之间存在着密切的联系和内在的相似性,要以流体力学为起点,认真学习,打好基础。

② 应用流体力学原理解题要绘图,正确选取衡算范围,解题要规范、完整。

③ 注意学习处理复杂工程问题的方法,增加工程观点。

本章学习要点

一、概述

(一) 流体的分类和特性

气体和液体统称流体。流体有多种分类方法:

① 按状态分为气体、液体、超临界流体等。

② 按可压缩性分为不可压缩流体和可压缩流体。

③ 按是否可忽略分子之间作用力分为理想流体与黏性流体(或实际流体)。

④ 按流变特性分为牛顿型流体和非牛顿型流体。

流体的特性为具有流动性、易变形(随容器形状)、流动时产生内摩擦,从而构成了流体力学原理研究的复杂内容之一。

(二) 作用在流体上的力

外界作用在流体上的力分为两种:

(1) 质量力(又称体积力) 流体受力大小与其质量成正比,如重力和离心力。

(2) 表面力 该力与流体表面积成正比。表面力又分为压力(垂直作用于表面上)和剪力(平行作用于表面)两类。静止流体只受到质量力和压力的作用,而流动流体则同时受到质量力、压力和剪力的作用。

(三) 流体流动的考察方法

1. 流体的连续介质模型

该模型假定,流体是由连续分布的流体质点所组成,流体的物理性质及运动参数在空间作连续分布,可用连续函数的数学工具加以描述。

2. 流体流动的描述方法

对于流体的流动,有两种描述方法:

(1)拉格朗日法 跟踪质点,描述其运动参数(位移、速度等)随时间的变化规律。研究流体质点的运动轨线即采用此法。

(2)欧拉法 在固定空间位置上观察流体质点的运动状况(如空间各点的速度、压强、密度等)。流体的流线即由此法考察而获得。

研究化工生产中某一设备内(控制体)流体的流动情况,大都采用欧拉法。

(四)定态流动与非定态流动

在流动系统中,各截面上流体的有关参数(物性、流速、压强等)仅随位置而变,不随时间而变的流动称为定态流动。流体流动的有关物理量随位置和时间均发生变化,则称为非定态流动。

本章重点讨论不可压缩牛顿型黏性流体在管内的连续定态流动。

二、流体静力学基本方程

本节讨论流体在重力及压力作用下的平衡规律及其工程应用。

(一)流体的密度与静压强

1. 流体的密度

单位体积流体所具有的流体质量称为密度,以 ρ 表示,单位为 kg/m^3 。

①液体的密度基本上不随压强而变化,随温度略有改变,可视为不可压缩流体。

纯液体密度值可查教材附录或手册。混合液的密度以 1 kg 为基准,可按下列式估算,即

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{a_1}{\rho_1} + \frac{a_2}{\rho_2} + \cdots + \frac{a_n}{\rho_n} \quad (1-1)$$

②气体的密度随压强和温度而变,为可压缩流体。当可作为理想气体处理时,密度用下列式估算,即

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1-2)$$

$$\text{或} \quad \rho = \rho_0 \frac{pT_0}{p_0T} \quad (1-2a)$$

对于混合气体,可用平均摩尔质量 M_m 代替式(1-2)中的 M , M_m 的计算方法为

$$M_m = M_1y_1 + M_2y_2 + \cdots + M_ny_n \quad (1-3)$$

2. 流体的静压强

垂直作用于流体单位面积上的表面力称为流体的静压强,简称压强,俗称压力,以 p 表示,单位为 Pa 。

在连续静止的流体内部,压强为位置的函数,任一点的压强与作用面垂直,且在各个方向都具有相同的数值。

压强可有不同的表示方法:

①根据压强基准选择的不同,可用绝对压强、表压强、真空度(负压压)表示。表压强和真空度分别用压强表和真空表度量。

表压强 = 绝对压强 - 大气压强

真空度 = 大气压强 - 绝对压强

②工程上常采用液柱高度 h 表示压强,其计算式及换算式为

$$p = h\rho g \quad (1-4)$$

$$10.33 \text{ mmHg} = 101.33 \text{ kPa}$$

(二) 流体静力学基本方程

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所描述的关系。

1. 基本方程的表达形式

对于不可压缩流体, ρ 为常数,则有

$$\frac{p_1}{\rho} + gZ_1 = \frac{p_2}{\rho} + gZ_2 \quad (1-5)$$

或
$$p_2 = p_1 + \rho g(Z_1 - Z_2) \quad (1-5a)$$

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(1-5a)可改写为

$$p = p_0 + \rho gh \quad (1-5b)$$

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只适用于静止的连通着的同一种连续的流体。此方程说明在重力场作用下,静止液体内部压强的变化规律。

静力学方程的物理意义为:

(1) 总势能守恒 式(1-5)表明,在同一种静止流体中不同高度的流体微元,其静压能和位能各不相同,但其两项和(称为总势能)却保持定值。

(2) 等压面的概念 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、连续的同一液体内部,处于同一水平面上各点的压强都相等。

(3) 传递定律 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。

(4) 液柱高度表示压强或压强差 改写式(1-5b)可得

$$\frac{p - p_0}{\rho g} = h \quad (1-5c)$$

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。

(三) 流体静力学基本方程的应用

以流体静力学基本方程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 $\left(gZ + \frac{p}{\rho}\right)$ 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还应注意压强的表示方法(绝对压强、表压强与真空度)及不同单位之间的换算关系。

应用静力学基本方程进行计算时,关键一环是等压面的准确选取。

三、流体流动的基本原理

本节主要讨论质量和能量守恒原理。

(一) 定态流动系统的连续性方程

在定态流动系统中,对直径不同的管段作物料衡算,以 1 s 为基准,则得到

$$w_s = u_1 A_1 \rho_1 = u_2 A_2 \rho_2 = \cdots = uA\rho = \text{常数} \quad (1-6)$$

当流体视为不可压缩时, ρ 可取作常数, 则有

$$V_s = u_1 A_1 = u_2 A_2 = \cdots = uA = \text{常数} \quad (1-6a)$$

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

$$G = \frac{w_s}{A} = \frac{V_s}{A} \rho = u\rho \quad (1-7)$$

连续性方程是定态流动系统中质量守恒原理的体现。

应用连续性方程时, 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、阀门及输送机械无关。这里流速是指单位管道横截面上的体积流量, 即

$$u = V_s / A \quad (1-8)$$

对于不可压缩流体, 流速和管径的关系为

$$\frac{u_2}{u_1} = \left(\frac{d_1}{d_2} \right)^2 \quad (1-9)$$

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的直径, 即

$$d = \sqrt{\frac{4V_s}{\pi u}} \quad (1-10)$$

用上式算出管径后, 要根据管子系列规格选用标准管径。

(二) 机械能衡算方程——伯努利方程

伯努利方程是流体流动中机械能守恒和转化原理的体现, 它描述了流入和流出一个系统的流体量和流动参数之间的定量关系。

推导伯努利方程的思路是: 从解决流体输送问题的实际需要出发, 采取逐渐简化的方法, 即进行流动系统的总能量衡算(包括热能和内能)、流动系统的机械能衡算(消去热能和内能)、不可压缩流体定态流动的机械能衡算。

1 kg 流动流体具有的各项能量(J/kg)示于表 1-1。

表 1-1 1 kg 流动流体具有的能量

	内能	位能	动能	静压能	加入热量	加入功
输入系统	U_1	gZ_1	$u_1^2/2$	$p_1 v_1$	Q_e	W_e
流出系统	U_2	gZ_2	$u_2^2/2$	$p_2 v_2$		

1. 具有外功加入、不可压缩黏性流体定态流动的伯努利方程

以 1 kg 流体为基准, 不可压缩黏性流体定态流经输送系统的伯努利方程为

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + W_e = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \Sigma h_f \quad (1-11)$$

或
$$W_e = g\Delta Z + \frac{\Delta p}{\rho} + \frac{\Delta u^2}{2} + \Sigma h_f \quad (1-11a)$$

8 式中的 W_e 为输送机械对 1 kg 流体所作的有效功, 或 1 kg 流体从输送机械获得的有效能量。式中各项单位均为 J/kg。

当流体不流动时, $u = 0$, $\Sigma h_f = 0$, 也不需要加入外功, 于是式(1-11)变为

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} \quad (1-11b)$$

可见, 流体静力学基本方程为伯努利方程的一个特例。

2. 理想流体的伯努利方程

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(1-11)变为

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} \quad (1-12)$$

此式表明, 理想流体作定态流动时, 任一截面上 1 kg 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。

3. 伯努利方程的讨论

(1) 伯努利方程的适用条件 由推导过程可知, 伯努利方程适用于不可压缩流体定态连续的流动。

(2) 理想流体的机械能守恒和转化 1 kg 理想流体流动时的总机械能 E (即 $gZ + \frac{u^2}{2} + \frac{p}{\rho}$) 是守恒的, 但不同形式的机械能可互相转化。

(3) 注意区别式(1-11)中各项能量所表示的意义 式中的 gZ 、 $u^2/2$ 、 p/ρ 指某截面上 1 kg 流体所具有的能量; Σh_f 为两截面间沿程的能量消耗, 它不可能再转化为其他机械能; W_e 是 1 kg 流体在两截面间获得的能量, 是输送机械重要的性能参数之一。由 W_e 可选择输送机械并计算其有效功率, 即

$$N_e = W_e w_s \quad (1-13)$$

若已知输送机械的效率 η , 则可计算轴功率, 即

$$N = \frac{N_e}{\eta} \quad (1-14)$$

(4) 伯努利方程的基准 前面各式都是以 1 kg 流体为基准, 若以 1 N 或 1 m³ 流体为基准, 则可分别得到

$$1 \text{ N 流体 } H_e = \Delta Z + \frac{\Delta u^2}{2g} + \frac{\Delta p}{\rho g} + H_f \quad (1-11c)$$

式中各项单位为 J/N 或 m。 H_e 为输送机械的有效压头, H_f 为压头损失, Z 、 $u^2/2g$ 、 $p/\rho g$ 分别称为位压头、动压头和静压头。

$$1 \text{ m}^3 \text{ 流体 } H_T = g\rho\Delta Z + \Delta p + \frac{\Delta u^2}{2}\rho + \rho\Sigma h_f \quad (1-11d)$$

式中各项单位均为 J/m³ 或 Pa。 H_T 称为风机的全风压, 是选择风机的重要参数之一。

(5) 伯努利方程的推广

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(1-11)与式(1-12)中的 ρ 。

②非定态流动: 对于非定态流动的任一瞬间, 伯努利方程仍成立。

四、流体在管内的流动规律及流动阻力

本节通过简要分析在微观尺度上流体流动的内部结构,最终解决管截面上的速度分布及流动阻力计算问题。

(一) 两种流型

1. 雷诺实验及雷诺数

为了研究流体流动时内部质点的运动情况及影响因素,雷诺于1883年设计了雷诺实验。通过实验观察到,随流体质点速度的变化,流体显示出两种基本流型——滞流和湍流。

实验中发现三种因素影响流型,即流体的性质(主要为 ρ, μ)、设备情况(主要为 d)及操作参数(主要为 u)。对一定的流体和设备,可调参数为 u 。

雷诺综合如上因素整理出一个量纲为1的数群——雷诺数,即

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} = \frac{dG}{\mu}$$

Re 是一个量纲为1的数群,无论采用何种单位制,只要各物理量单位一致,所得 Re 值必相同。其数值反映流体流动的惯性力与黏性力的比值,即流体质点的湍动程度,并作为流动类型的判据。根据经验,当 $Re \leq 2\,000$ 时为滞流或层流,当 $Re > 2\,000$ 时,按湍流或紊流处理。

2. 牛顿黏性定律及流体的黏性

当流体在管内滞流流动时,内摩擦应力可用牛顿黏性定律表示,即

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-15)$$

$$\text{或} \quad \tau = -\mu \frac{du}{dr} \quad (1-15a)$$

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

遵循牛顿黏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。不服从牛顿黏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。

由式(1-15)可得到流体动力黏度(简称黏度)的表达式,即

$$\mu = \tau / \left(\frac{du}{dy} \right) \quad (1-15b)$$

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

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

3. 滞流与湍流的比较

表 1-2 两种流型的比较

流型	滞(层)流	湍(紊)流
判据	$Re \leq 2\,000$	$Re > 2\,000$
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

流型	滞(层)流	湍(紊)流
管内速度分布	抛物线方程 $u = \frac{1}{2}u_{\max}$ 壁面处 $u_w = 0$, 管中心处 $u = u_{\max}$	碰撞和混合使速度平均化 $u \approx 0.8u_{\max}$ 壁面处 $u_w = 0$, 管中心处 $u = u_{\max}$
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	黏性内摩擦力, 即 牛顿黏性定律 $\tau = \mu \frac{du}{dy}$	黏性应力 + 湍流应力, 即 $\tau = (\mu + e) \frac{du}{dy}$ (e 为涡流黏度, 不是物性, 与流动状况有关)

应注意搞清楚如下概念:

①流体在圆管进口段内的流动完成了边界层的形成和发展过程。边界层在管中心汇合时, 边界层厚度等于半径, 以后进入完全发展的流动。

当边界层在管中心汇合时, 若边界层内为滞流, 则管内流动为滞流, 即整个边界层均为滞流层; 若边界层为湍流, 则管内流动为湍流。湍流时边界内存在滞流内层、缓冲层及湍流区。 Re 愈大, 湍流愈激烈, 滞流内层愈薄, 流动阻力也愈大。

②边界层的分离加大了流体流动的能量损失, 除黏性阻力外, 还增加了形体阻力, 二者总称局部阻力。

③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、流动完全发展的平直管段上。

(二) 流体在管内的流动阻力

流体在管内的流动阻力由直管阻力和局部阻力两部分构成, 即

$$\Sigma h_f = h_f + h'_f \quad (1-16)$$

阻力产生的根源是流体具有黏性, 流动时产生内摩擦; 固体表面促使流体流动时其内部发生相对运动, 提供了流动阻力产生的条件。流动阻力大小与流体性质(ρ 、 μ)、壁面情况(ε 或 ε/d) 及流动状况(u 或 Re) 有关。

流动阻力消耗了机械能, 表现为静压能的降低, 称为压强降, 用 Δp_f 表示。

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) 直管阻力通式 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, 则通过流动流体受力的平衡可推得计算直管阻力的通式为

$$h_f = \frac{\Delta p_f}{\rho} = \lambda \frac{l}{d} \frac{u^2}{2} \quad (1-17)$$

式(1-17)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(1-17)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。

滞流时管截面上的速度分布方程为