



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



高等学校理工类课程学习辅导丛书

化工原理课程系列教材

化工原理学习指南

(第三版)

■ 天津大学化工学院 柴诚敬 夏清 主编

张国亮 刘明言 贾绍义 王军 等编

配套天津大学化工学院柴诚敬主编《化工原理》(第三版)

高等教育出版社



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



高等学校理工类课程学习辅导丛书

化工原理课程系列教材

化工原理学习指南

(第三版)

■ 天津大学化工学院 柴诚敬 夏清 主编

张国亮 刘明言 贾绍义 王军 等编

配套天津大学化工学院柴诚敬主编《化工原理》(第三版)

高等教育出版社·北京

内容提要

本书是与《化工原理》(第三版)教材配套的课程学习指导书。全书分12章,内容包括:流体流动、流体输送机械、非均相混合物分离及固体流态化、液体搅拌、传热、蒸发、传质与分离过程概论、气体吸收、蒸馏、液-液萃取和液-固浸取、固体物料的干燥(含增湿减湿)及其他分离方法。每章设有学习指导、学习要点、示范题解析、思考题简答及自测题(填空题、选择题及计算题)。书末附有化工原理及实验(或化工传递)考试大纲、三年天津大学研究生院招收硕士研究生“化工原理(含实验或化工传递)”入学试题、自测题及研究生入学试题答案。

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,也可供教师讲授本课程参考使用,同时,还可作为从事化工设计、科研、管理及生产等工作的科技人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理学习指南 / 柴诚敬,夏清主编; 张国亮等编. -- 3版. -- 北京: 高等教育出版社, 2019.3
ISBN 978-7-04-051246-5

I. ①化… II. ①柴… ②夏… ③张… 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(2019)第 011330 号

策划编辑 刘 佳 责任编辑 刘 佳 封面设计 张 志 版式设计 马 云
插图绘制 于 博 责任校对 高 歌 责任印制 耿 轩

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	北京鑫海金澳胶印有限公司		http://www.hepmall.com
开 本	787mm×1092mm 1/16		http://www.hepmall.cn
印 张	26	版 次	2007年5月第1版
字 数	630千字		2019年3月第3版
购书热线	010-58581118	印 次	2019年3月第1次印刷
咨询电话	400-810-0598	定 价	48.00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 51246-00

第三版前言

天津大学化工学院编写的“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材《化工原理》(第三版)以其双色印刷、双栏排版的新颖版本与读者见面。《化工原理学习指南》(第三版)作为课程资源的组成部分,随着新版教材问世也进行了相应的修订。

本版主要修订的内容如下。

1. 内容、结构框架与《化工原理》(第三版)教材紧密呼应,对部分章节内容做了删减(如非牛顿流体对流传热、多组分精馏等)、更新(如流体在圆管内层流或湍流的速度分布等)。同时,对传热这一章还进行了结构顺序调整。

2. 每章都更换或调整了部分例题。目的在于强化基础理论的工程应用,提升解题技巧,启迪创新思维。

置换下来的例题以数字资源的形式,通过扫描二维码供读者查阅。

3. 部分章节更换、补充或删减部分自测题。

4. 各章中的物理量符号与《化工原理》(第三版)教材中相应章节保持一致。

本版修订工作仍由原各章执笔者合作完成,即:柴诚敬(绪论、流体输送机械、液体搅拌、蒸发、蒸馏及附录)、张国亮(流体流动、其他分离方法)、夏清(非均相混合物分离及固体流态化、固体物料的干燥)、刘明言(传热)、贾绍义(传质与分离过程概论、气体吸收)、王军(液-液萃取和液-固浸取)。柴诚敬、夏清担任主编。

本书在修订过程中,得到天津大学化工学院及天津大学仁爱学院有关老师的热情支持和帮助,特此表示衷心的感谢。

编者

2018年6月

第二版前言

作为化工原理课程立体化教学体系组成部分的《化工原理学习指南》随着普通高等教育“十一五”国家级规划教材《化工原理》(第二版)的出版,也进行了相应的修订。

本次修订仍本着加强基础、突出能力培养、启迪创新的教学指导思想,引导学生从掌握基础知识和基本原理出发,注重创新能力培养。在保持本书第一版总体框架和特色前提下,修订内容如下:

1. 在内容与层次结构上同《化工原理》(第二版)教材相呼应,对部分内容做了删减、调整和更新。
2. 调整了部分例题和自测题。
3. 附录中除自测题答案外,其他内容都进行了更新,并且增加了2009—2011年天津大学考研题示范题解。

本次修订工作仍由本书第一版执笔者合作完成,即:柴诚敬(绪论、流体输送机械、液体搅拌、蒸发、蒸馏及附录),张国亮(流体流动、其他分离方法),夏清(非均相混合物分离及固体流态化、固体物料的干燥),刘明言(传热),贾绍义(传质与分离过程概论、气体吸收),王军(液-液萃取和液-固浸取)。主编为柴诚敬、夏清。

在本书修订过程中,得到天津大学化工学院及天津大学仁爱学院化工系有关老师的热情支持和帮助,特此表示衷心的感谢。

编者

2011年11月

第一版前言

本书是与天津大学化工学院柴诚敬教授等编写的《化工原理》(上、下册)教材(普通高等教育“十五”国家级规划教材,高等教育出版社“高等教育百门精品课程教材建设计划”一类精品项目)相配套的课程学习指导书。旨在帮助读者掌握化工原理课程的学习方法,加深对基本概念、基础理论的理解,提高分析和解决工程实际问题的能力和解题技巧。同时,为本课程的任课教师提供教学思路和大量有工程背景的教学案例。本书涉及的化工过程与单元操作和《化工原理》教材相对应,即:流体流动、流体输送机械、非均相混合物的分离及固体流态化、液体搅拌、传热、蒸发、传质与分离过程概论、气体吸收、蒸馏、液-液萃取和液-固浸取、固体物料的干燥(含增湿减湿)及其他分离方法。为了给考研的读者提供方便,书末附有化工原理及实验考试大纲、最近三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、模拟练习题及研究生入学试题答案。

本书是长期从事化工原理课程教学的老师们教学经验的总结和升华,内容精练,思路清晰,重点突出,案例充实,着重学生创新意识和工程能力的培养。每章的编写顺序为:学习指导、学习要点、示范题解析、思考题简答、模拟练习题(包括填空、选择及计算题),书末有模拟练习题答案。

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,也可作为教师讲授化工原理课程的参考教案,还可作为从事化工工作科技人员的参考书。

本书主编为柴诚敬、夏清。参加本书编写工作的有:柴诚敬(绪论、流体输送机械、液体搅拌、蒸发、蒸馏及附录),张国亮(流体流动、其他分离方法),夏清(非均相混合物分离及固体流态化、固体物料的干燥),刘明言(传热),贾绍义(传质与分离过程概论、气体吸收),王军(液-液萃取和液-固浸取)。在本书编写过程中,得到化工学院张凤宝、陈常贵、刘国维、马红钦、郭翠梨等有关老师的支持和帮助,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平所限和时间紧迫,书中不妥之处甚至错误在所难免,热忱欢迎读者批评指正。

编者

2006年11月

目 录

绪论	1	学习指导	145
第一章 流体流动	3	学习要点	145
学习指导	3	示范题解析	160
学习要点	4	思考题简答	171
示范题解析	18	自测题	174
思考题简答	49	本章符号说明	176
自测题	52	第六章 蒸发	177
本章符号说明	57	学习指导	177
第二章 流体输送机械	58	学习要点	177
学习指导	58	示范题解析	183
学习要点	58	思考题简答	189
示范题解析	68	自测题	190
思考题简答	88	本章符号说明	192
自测题	91	第七章 传质与分离过程概论	194
本章符号说明	96	学习指导	194
第三章 非均相混合物分离及固体 流态化	98	学习要点	194
学习指导	98	示范题解析	205
学习要点	98	思考题简答	208
示范题解析	114	自测题	210
思考题简答	125	本章符号说明	212
自测题	127	第八章 气体吸收	213
本章符号说明	130	学习指导	213
第四章 液体搅拌	132	学习要点	214
学习指导	132	示范题解析	228
学习要点	132	思考题简答	255
示范题解析	138	自测题	258
思考题简答	141	本章符号说明	261
自测题	142	第九章 蒸馏	263
本章符号说明	143	学习指导	263
第五章 传热	145	学习要点	264
		示范题解析	282

思考题简答	307	思考题简答	360
自测题	310	自测题	362
本章符号说明	314	本章符号说明	364
第十章 液-液萃取和液-固		第十二章 其他分离方法	366
浸取	316	学习指导	366
学习指导	316	学习要点	366
学习要点	316	思考题简答	371
示范题解析	327	附录	373
思考题简答	333	一、化工原理及实验(或化工传递)	
自测题	335	考试大纲	373
本章符号说明	337	二、天津大学研究生院招收硕士研究生	
第十一章 固体物料的干燥	339	《化工原理(含实验或化工传递)》	
学习指导	339	入学试题	374
学习要点	339	三、自测题及研究生入学试题答案	387
示范题解析	351	参考书目	404

绪 论

化工原理是研究化学工业及其他过程工业生产中物理过程共同规律的一门工程学科,承载着工程科学与工程技术的双重教育功能,在学生综合素质、工程能力和创新意识培养中具有举足轻重的作用。知识是能力的基础,而能力只有通过实践才能提高。本课程在教学体系中设置理论教学、实验教学和课程设计三个板块。第一板块要求学生牢固掌握本课程的基本知识、基础理论和基本方法,夯实“三基”,而后两个板块则更强调实验技能和设计能力的提高。

要学好理论教学这个板块,首先应该明确学什么、怎么学两个问题。

概括地说,学习化工原理这门课程要紧紧抓住如下三个方面的内容:

1. “三传”的基础理论

深刻理解“三传”的机理(包括分子传递和涡流传递)、重要定律(如牛顿黏性定律、傅里叶导热定律和菲克扩散定律)、数学模型及求解模型的方法。

2. 单元操作

掌握单元操作的原理、过程计算、设备工艺设计(选型)和操作调节。

3. 处理复杂工程问题的方法

学习处理复杂工程问题的方法和技术,如研究范围的选定、简化模型的建立、复杂问题的分解—综合法、研究工程问题的方法(解析法、数学模型法及实验方法)、技术经济分析(优化、化工节能及安全环保)、过程强化、当量的概念、非定态过程的拟定态处理等。

传递过程理论与工程方法论是联系诸单元操作的两条主线。

同学们在学习本课程过程中,要根据自身的特点,探索科学的学习方法,以取得事半功倍、融会贯通的学习效果。从基本方法来说,要紧紧抓好如下要点:

1. 着重学习处理工程问题的方法,增强工程观点

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。

2. 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,并灵活运用所学知识,分析和处理工程问题,避免死记硬背的学习方法。

单元操作包括“过程”和“设备”两个方面的内容,在“设备”的设计和操作中,贯穿着基本原理的应用。例如,列管式换热器的管方分程、壳程加折流挡板,以及若干个换热器串联操作可提高

换热器的传热速率,达到强化传热的目的。

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、加深理解。只有理解了知识,才会记得牢、用得上,并提高能力。

3. 逐步学会归纳、综合、对比及逻辑简化的学习方法

本教材各章节之间具有密切的内在联系和很强的规律性,通过“传递过程理论”和“工程方法论”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。具体做法是:

(1) 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)和涡流传递,采用相同的工程研究方法。对于分子传递,大都采用解析方法;而涡流传递则采用实验方法(量纲分析),而且传热与传质得到相应的量纲为 1 数群和相似的关联式。

传质分离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)、设备主体工艺尺寸计算、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,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。

(2) 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、实验技术、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,流体流动可通过连续性方程、机械能衡算方程和阻力方程三个主要关系式把流体流动的基本原理及相关的计算公式有机地构成一个知识网络。同样的,第五章传热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。

4. 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,学生要注意力高度集中、思维活跃、积极和老师互动,同学之间彼此磋商、互相启发,可拓宽思路,培养综合运用知识和全面看问题的能力。

5. 要注意本学科的最新科技成果和发展趋势,启迪创新思维

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。由此,可得到创新的启迪,激发创新意识。

第一章

流 体 流 动

学 习 指 导

一、学习要求

本章论述流体流动的基本原理,特别是流体在管内流动的规律,这一内容是本课程的重要基础。本课程的后续内容如流体输送机械、流体-固体非均相物系的分离、流体的分散与混合、固体流态化等都遵循流体流动的基本原理;此外,流体流动与传热、传质之间存在着非常密切的联系和类似性。因此,掌握流体流动的基本规律对于传热和传质的学习也极为重要。

通过本章学习,要求读者熟练掌握流体和流体流动有关的定义、概念,流体在管内流动的基本原理和规律,并运用这些原理和规律分析和计算流体流动过程中的有关问题。

二、应重点掌握的内容

1. 流体静力学方程及其应用。
2. 管内流动的连续性方程、机械能衡算方程及其应用。
3. 管路阻力(摩擦阻力、局部阻力和总阻力)的计算方法。
4. 简单、复杂管路的计算。
5. 流速与流量的测量。

三、学习方法

1. 鉴于本章是本课程的重要基础,而且是读者在学习本课程时首先遇到的内容,因此从一开始就注意学习方法,培养学习兴趣,打好基础,对于学好本课程具有重要作用。

2. 本章的核心内容是管内流动的连续性方程、机械能衡算方程以及阻力系数方程的工程运用,包括管路设计计算、输送机械功率的选择和能量消耗的计算等。只有通过练习大量习题,才能熟练掌握和运用有关的概念、原理和计算方法。

3. 本章内容既涉及流体力学的基本理论,又强调密切结合工程实际。因此在学习本章时,应注意掌握处理复杂工程问题的方法,增强工程观念。

学习要点

一、流体的重要性质

(一) 连续介质假定

连续介质假定是将流体视为由无数流体微团或质点组成的连续介质。根据该假定,流体是由连续分布的流体质点所组成,表征流体物理性质和运动参数的物理量在空间和时间上是连续分布的函数。

(二) 流体的密度与比体积

1. 定义

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度,以符号 ρ 表示, kg/m^3 ; 流体的比体积是指单位质量流体的体积,以符号 v 表示, m^3/kg ; 二者互为倒数 $v=1/\rho$ 。

2. 气体密度

(1) 气体密度的特性 随压力和温度而变,即 $\rho=f(p, T)$ 。

(2) 低压气体的密度 按理想气体状态方程计算

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

式中 ρ —— 气体的密度, kg/m^3 ;

m —— 气体的质量, kg ;

V —— 气体的体积, m^3 ;

M —— 气体的摩尔质量, kg/mol ;

p —— 气体的压力, Pa ;

T —— 热力学温度, K ;

R —— 摩尔气体常数,其值为 $8.314 \text{ J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 。

如果已知某气体在 T_0 、 p_0 下的密度值为 ρ_0 , 则该气体在 T 、 p 条件下的密度 ρ 可按下列式计算:

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0 p}{T p_0} \quad (1-2)$$

(3) 气体混合物的密度

$$\rho_m = \sum_{i=1}^n \rho_i x_{Vi} \quad (1-3)$$

式中 x_{Vi} —— 气体混合物中 i 组分的体积分数;

ρ_i —— 气体混合物中 i 组分的密度, kg/m^3 。

3. 液体密度

(1) 液体密度的特性 基本上不随压力变化,随温度略有改变。

(2) 纯液体的密度值可查教材附录或各种物性数据手册。

(3) 液体混合物的密度

$$\frac{1}{\rho_m} = \sum_{i=1}^n \frac{x_{wi}}{\rho_i} \quad (1-4)$$

式中 ρ_i —— 液体混合物中 i 组分的密度, kg/m^3 ;

x_{wi} —— 液体混合物中 i 组分的质量分数。

(三) 牛顿黏性定律与流体的黏性

1. 牛顿黏性定律

$$\tau = \mu \frac{du_x}{dy} \quad (1-5)$$

式中 τ —— 剪应力或内摩擦力, N/m^2 ;

μ —— 流体的动力黏度, 简称黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

牛顿黏性定律适用于牛顿流体的一维层流流动。

2. 牛顿流体与非牛顿流体

遵循式(1-5)的流体称为牛顿流体, 所有气体和大多数低相对分子质量的液体属于牛顿流体, 如水、空气等; 不遵循式(1-5)的流体为非牛顿流体。

3. 流体的黏度

流体黏度是流体状态(压力、温度、组成)的函数, 气体的黏度随温度的升高而增大, 液体的黏度随温度升高而减小。压力对黏度的影响较小。

黏度的单位换算: $1 \text{ cP} = 0.01 \text{ P} = 1 \times 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$

4. 运动黏度的定义

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-6)$$

ν 的单位为 m^2/s 。

具有黏性的流体称为黏性流体或实际流体。完全没有黏性($\mu=0$)的流体为理想流体。

二、流体静力学

流体静力学描述在重力场作用下, 静止流体内部的压力变化规律。

(一) 静压力的定义及特性

1. 静压力的定义

作用于静止流体上的法向应力称为流体的静压强, 习惯上称为压力, 以 p 表示。压力的方向与法向应力的方向相反。

2. p 的重要性质

流体的静压力处处与其作用面垂直, 且总是指向流体的作用面; 流体中任一点静压力的大小与所选择的作用面在空间的方位无关, 即压力为一标量。

3. 压力的单位

N/m^2 或 Pa 、 atm (标准大气压), 流体柱高度如 mH_2O 、 mmHg 等(注意须注明流体种类),

bar(巴)或 kgf/cm^2 等。压力单位之间的换算关系如下(一般取 4 位有效数字):

$$1 \text{ atm} = 101\,300 \text{ N}/\text{m}^2 = 101.3 \text{ kPa} = 1.033 \text{ kgf}/\text{cm}^2 = 10.33 \text{ mH}_2\text{O} = 760 \text{ mmHg}$$

4. 压力表示的基准

(1) 以绝对真空为基准测量的压力称为绝对压力(简称绝压);(2) 以大气压为基准测量的压力为表压力(简称表压);(3) 如测量的表压为负值称为真空度。其关系为

$$\text{表压力} = \text{绝对压力} - \text{大气压力}$$

$$\text{真空度} = \text{大气压力} - \text{绝对压力}$$

$$\text{真空度} = -\text{表压力}$$

(二) 流体静力学方程

1. 重力作用下的不可压缩流体的静力学方程式(积分形式)

$$\frac{p}{\rho} + gz = \text{常数} \quad (1-7)$$

$$\frac{p_1}{\rho} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + gz_2 \quad (1-8)$$

当液面上方的压力为 p_0 , 距液面 $h = z_1 - z_2$ 处的压力为 p , 则式(1-8)可写成

$$p = p_0 + \rho gh \quad (1-9)$$

2. 流体静力学方程的适用条件及意义

适用条件: 连通着的同种不可压缩静止流体。对于压力变化幅度不大的气体可近似适用。

方程的物理意义:

(1) 位能和压力能守恒: 式(1-7)表明, 在静止的连续流体中, 流体内任一点的位能或压力能可能不等, 但二者可以相互转换, 其总量为常数。

(2) 式(1-9)表明, 当液面上方的压力 p_0 改变时, 液体内部各点的压力 p 也随之发生同样大小的改变。这一性质称为静止液体内部压力变化的传递定律。

(3) 等压面的概念: 等压面是指流体内部压力相等的表面。在静止的、连续的同一流体内, 处于同一水平面上各点的压力相等, 即该水平面为等压面。

(4) 由式(1-9)得

$$\frac{p - p_0}{\rho g} = h \quad (1-10)$$

上式表明, 压力或压力差可用一定的液柱高度表示, 但采用液柱高度来表示压力或压力差时, 必须指明是何种液体。

(三) 流体静力学方程的应用

流体静力学方程可应用于压力和压力差的测量、液位测量、液封高度计算等。

1. U 管压差计

U 管压差计用于测量管路或设备中两点间的压力差, 所用指示液的密度应大于被测流体的密度, 并与被测流体不互溶。两被测点 1、2 之间的压差为

$$p_1 - p_2 = (\rho_A - \rho_B)gR \quad (1-11)$$

如点 2 处与大气相通,则测出的是点 1 的表压。

2. 双液 U 管微压差计

当所测量的压差较小,为提高测量精度,可采用双液 U 管微压差计。

当 U 管微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时,U 管两端上方扩大室的截面积比 U 管截面积大得多(100 倍以上),U 管中指示液读数变化对两扩大室中液面影响不大,于是

$$p_1 - p_2 = (\rho_A - \rho_C)gR \quad (1-12)$$

由于指示液 A 与 C 的密度差 $\rho_A - \rho_C$ 足够小,读数 R 可以达到较大值。

三、流体流动概述

(一) 流动体系的分类

1. 定态与非定态流动

若流体流速等物理量仅随位置变化而不随时间改变,则为定态流动,否则为非定态流动。

2. 一维与多维流动

若流速等物理量只依赖于一个曲线坐标,则为一维流动;依赖于两个曲线坐标为二维流动;依赖于三个曲线坐标则为三维流动。

3. 绕流与封闭管道内的流动

绕流指流体绕过一个浸没物体的流动,故也称为外部流动。另一类流动是流体在封闭管道内的流动。

(二) 流量与平均流速

1. 体积流量与质量流量

单位时间内流过任一流通截面的流体体积称为体积流量或体积流率,以 V_s 表示, m^3/s 。单位时间内流过任一截面的流体质量称为质量流量或质量流率,以 w_s 表示, kg/s 。二者关系为

$$V_s = \rho w_s \quad (1-13)$$

2. 平均流速与质量平均流速

平均速度指体积流量 V_s 与流通截面积 A 之比

$$u = \frac{V_s}{A} \quad (1-14)$$

或写成一般形式

$$u = \frac{1}{A} \iint_A u_z dA \quad (1-15)$$

质量平均流速亦称质量通量,指质量流量与流通截面积之比,以 G 表示, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。 G 与 u 的关系为

$$G = \frac{w_s}{A} = \frac{\rho V_s}{A} = \rho u \quad (1-16)$$

当输送管道为圆管时,平均流速为

$$u = \frac{4V_s}{\pi d^2} \quad (1-17)$$

若输送任务 V_s 给定,则管内径可按下式计算:

$$d = \sqrt{\frac{4V_s}{\pi u}} \quad (1-18)$$

注意:由于气体的体积随温度 T 和压力 p 改变,故气体的平均流速 u 随 T 和 p 变化。因此气体在管道内流动时,采用不随气体状态(T 、 p)变化的质量平均流速计算更为方便。

(三) 流动型态与雷诺数

1. 流动型态与雷诺数

流体的流动型态分为层流和湍流,可用雷诺数 Re 来判别。 Re 是由流体的性质(ρ 、 μ)、表征流动的特征流速 u 与特征尺寸 L 组成的量纲为 1 的数群。

流体在管内流动的雷诺数定义为 $Re = d\rho u/\mu$,根据实验有

(1) $Re < 2000$ 为层流;

(2) $Re > 4000$ 为湍流;

(3) Re 在 $2000 \sim 4000$ 范围内,可能是层流,亦可能是湍流。外界条件变化,如管道直径或方向的改变、外来的轻微振动,易促使过渡状态下的层流变为湍流。

雷诺数的物理意义:流体流动的惯性力与黏性力之比。

2. 当量直径

非圆形管道的当量直径的定义

$$d_e = 4r_H \quad (1-19)$$

$$r_H = \frac{A}{L_p} \quad (1-20)$$

式中 r_H ——水力半径, m;

L_p ——流道的润湿周边长度, m;

A ——流道的截面积, m^2 。

四、流体流动的基本方程

(一) 管路系统定态流动的连续性方程

$$w_s = \rho_1 u_1 A_1 = \rho_2 u_2 A_2 = \cdots = \rho u A = \text{常数} \quad (1-21)$$

对于不可压缩流体, $\rho = \text{常数}$, 则

$$V_s = u_1 A_1 = u_2 A_2 = \cdots = u A = \text{常数} \quad (1-22)$$

下标 1 和 2 分别表示截面 1 和 2。

对于圆形管道,则

$$\frac{u_1}{u_2} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2 \quad (1-23)$$

式中 d_1 与 d_2 分别为截面 1 和截面 2 处的管内径。

在应用连续性方程时,应注意如下两点:

(1) 流体在控制体内的流动必须是连续的,即流体连续不断地从上游截面 1 流入,从下游截面 2 流出。

(2) 对于定态流动系统,当流量一定,管路任一截面上流体的平均流速仅与该截面的面积及该处流体的密度有关,而与管路上是否装有管件、阀门及输送机械无关。

(二) 管路系统定态流动的机械能衡算方程

1. 定态、不可压缩黏性流体的机械能衡算方程

$$gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + W_e = gz_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \sum h_f \quad (1-24)$$

式中 u_1, u_2 ——分别为截面 1 与截面 2 处流体的平均流速, m/s;

p_1, p_2 ——分别为截面 1 与截面 2 处流体的压力, Pa;

z_1, z_2 ——分别为截面 1 与截面 2 的中心至基准水平面的垂直距离, m;

W_e ——控制体内的输送机械对单位质量(1 kg)流体所做的有效功,或 1 kg 流体从输送机械获得的机械能, J/kg;

$\sum h_f$ ——单位质量(1 kg)流体由截面 1 流入至截面 2 流出过程中沿程产生的机械能损失, J/kg。

式(1-24)也称工程伯努利方程。当流体静止时式(1-24)简化为流体静力学方程

$$\frac{p_1}{\rho} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + gz_2 \quad (1-8)$$

2. 对机械能衡算方程的分析

(1) 方程的适用条件 机械能衡算方程式(1-24)适用于不可压缩流体在任意控制体内的定态、连续的流动。

(2) 理想流体的机械能守恒方程——伯努利方程 理想流体流动时不产生内摩擦阻力, $\sum h_f = 0$; 若又无外功加入, $W_e = 0$, 则

$$gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} = gz_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} \quad (1-25)$$

式(1-25)表明,理想流体作定态流动而又无外功加入时,各种机械能之间可以相互转化,但总机械能 $E = gz + u^2/2 + p/\rho = \text{常数}$ 。

(3) 机械能衡算方程中各项的物理意义 式(1-24)中的 $gz, u^2/2, p/\rho$ 均指 1 kg 流体在流入或流出截面处之值;而 $\sum h_f$ 表示 1 kg 流体由截面 1 流至截面 2 过程中沿程产生的机械能损失,该能量转化成了流体的内能; W_e 为控制体内的输送机械对 1 kg 流体所做的有效功。