



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



第三版 上册 化工原理

大连理工大学 编



高等教育出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

化工原理

Huagong Yuanli

第三版
上册

大连理工大学 编

高等教育出版社·北京

内容简介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是在大连理工大学化工原理教研室编写、高等教育出版社 2009 年出版的《化工原理》(上、下册,第二版)基础上修订而成的。本书主要介绍化学工程中常见单元操作的基本原理、典型设备及其工艺设计计算。全书分上、下两册出版。上册包括绪论、流体流动基础、流体输送设备、流体与颗粒(床层)的相对运动、传热过程及换热器、蒸发各章;下册包括蒸馏、吸收、气液传质设备、液-液萃取、干燥、膜分离和吸附分离过程各章。本书加强了动量传递、热量传递和质量传递的理论基础,努力与工程实际结合,并介绍了与学科相关的发展前沿,注重培养工程观念及处理工程问题的能力和创新意识。

本书可作为化工类及相关专业本科生教材,也可供轻工、石油、食品、制药等专业选用及有关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理. 上册 / 大连理工大学编. --3 版. --北京:高等教育出版社,2015. 7
ISBN 978-7-04-042698-4

I. ①化… II. ①大… III. ①化工原理-高等学校-教材 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 117018 号

策划编辑	刘 佳	责任编辑	刘 佳	封面设计	张 楠	版式设计	童 丹
插图绘制	杜晓丹	责任校对	杨凤玲	责任印制	韩 刚		

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.landaco.com
印 刷	河北鹏盛贤印刷有限公司		http://www.landaco.com.cn
开 本	787mm×1092mm 1/16		
印 张	26.75	版 次	2002 年 7 月第 1 版
字 数	660 千字		2015 年 7 月第 3 版
购书热线	010-58581118	印 次	2015 年 7 月第 1 次印刷
咨询电话	400-810-0598	定 价	38.80 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 42698-00

第三版前言

本书是在大连理工大学编写、高等教育出版社出版的《化工原理》(上、下册)第二版(2009年)和第一版(2002年)基础上修订的,在此对第二版和第一版教材全体编者所付出的辛苦工作表示深深的谢意。同时本书在修订过程中还参考了国内外的许多优秀教材。

本书在修订过程中对第二版教材的部分内容和体系进行了调整,以使其更加适应教育教学改革的需要,满足现代技术人才培养的要求。

全套教材共11章,上册含绪论、流体流动基础、流体输送设备、流体与颗粒(床层)的相对运动、传热过程及换热器、蒸发共5章;下册含蒸馏、吸收、气液传质设备、液-液萃取、干燥、膜分离和吸附分离过程共6章。上册由都健、王瑶主编,其中绪论由都健、匡国柱编写,第1章由王瑶编写,第2章由王瑶、贺高红编写,第3章由董宏光、潘艳秋编写,第4章由都健编写,第5章由刘琳琳、赵毅编写。下册由潘艳秋、贺高红主编,其中第6章由潘艳秋、樊希山编写,第7章由吴雪梅、韩志忠、匡国柱编写,第8章由韩志忠、匡国柱、樊希山编写,第9章由肖武、孙力编写,第10章由姜晓滨、吴雪梅、王瑶编写,第11章由李祥村、贺高红、吴雪梅编写。

本书是大连理工大学化工原理教研室教师多年的教学和科研工作的积累,在编写过程中得到了教研室全体同事及多年来历次参加教材编写教师们的关心和支持,在此一并表示衷心的感谢!

限于作者的水平,书中难免有不妥与错误之处,敬请读者指正。

编 者

2015年1月

第二版前言

化工原理课程是化学工程与化工工艺类及相关专业的重要专业基础课。其主要任务是研究化工过程的单元操作基本原理、典型过程设备结构,进行过程工艺设计计算、设备设计或选型和单元过程的操作分析。第二版加强了动量传递、热量传递和质量传递的理论基础,并努力与工程实际结合,提高教材的理论和技术水平,以适应创新人才培养的要求。

大连理工大学从 20 世纪 70 年代开始,长期坚持不懈地进行化工原理课程的教材建设。本书是在大连理工大学编写、高等教育出版社 2002 年出版的《化工原理》(上、下册)基础上修订的,在此对第一版教材的全体作者付出的辛苦工作表示深深的谢意。同时在编写过程中参考了国内外的许多优秀教材。

本书在编写过程中努力遵循学科的发展和认识规律,由浅入深,循序渐进,注意基础理论和工程实际的结合,并适当介绍了与学科相关的发展前沿,以满足现代技术人才培养的需要。

全套教材共十二章。上册含绪论、流体力学基础、流体输送设备、流体与颗粒(床层)的相对运动、传热过程及换热器、蒸发共五章;下册含质量传递过程基础、蒸馏、吸收、液-液萃取、传质设备、干燥、膜分离和吸附分离过程共七章。上册由都健、王瑶主编,其中绪论由匡国柱编写,第 1 章由王瑶编写,第 2 章由贺高红编写,第 3 章由董宏光、潘艳秋编写,第 4 章由都健编写,第 5 章由赵毅编写。下册由潘艳秋、贺高红主编,其中第 6 章由匡国柱编写,第 7 章由潘艳秋、樊希山编写,第 8 章由韩志忠、匡国柱编写,第 9 章由孙力编写,第 10 章由匡国柱、孙力、樊希山编写,第 11 章由吴雪梅、王瑶编写,第 12 章由贺高红、吴雪梅编写。

该书是大连理工大学化工原理教研室教师多年的教学和科研工作的积累,在编写过程中得到了教研室的全体同事及多年来历次参加教材编写的教师们的关心和支持。北京化工大学杨祖荣教授在教材审阅中提出许多宝贵意见,在此一并表示衷心的感谢!

限于作者的水平,书中难免有不妥与错误之处,敬请读者指正。

编 者

2009 年 5 月

第一版前言

化工原理课程是化学工程与化工工艺类及相关专业的重要基础技术课。其主要任务是研究化工过程的单元操作基本原理、典型过程设备结构,进行过程工艺设计计算和设备选型及单元过程的操作分析,本课程在培养从事化工科学研究和工程技术人才过程中发挥着重要的作用。为此,不断改进和建设本课程、结合人才培养和社会生产发展及时充实、调整教学内容,提高教材理论和技术水平,适时编写新教材是十分必要的。

大连理工大学从早期的翻译、编著化工原理到 20 世纪 70 年代的自编教材,从 80 年代参编全国统编教材,到 80 年代中期再度在校内试用自编教材、90 年代正式出版教材至今,坚持不懈地进行化工原理课程的教材建设。现又在多年教材建设和教学积累的经验基础上,结合近十年的教学和科研成果编写了《化工原理》(上、下册)。

该教材在编写中努力遵循认识规律,从学科的特点出发进行编写。注意汲取国内外本学科发展的新成果和现代技术。坚持继承发扬的原则,合理地提升理论基础,强化理论与工程实际的联系,努力创新。

本教材适当地介绍了单元操作的发展和运用,较多地采用工程实例,以计算机为工具,采用现代技术和方法完成本课程的工程设计和过程的模拟与分析,以满足现代技术人才培养的需要。

全套教材共十章。上册含流体流动、流体输送设备、液体流过颗粒床层和流态化、传热、蒸发共五章;下册含蒸馏、吸收、萃取、干燥、膜分离与吸附共五章。上册由王世广主编。参加各章编写的有:袁一、王世广(绪论),王世广(第 1 章),贺高红(第 2 章),潘艳秋(第 3 章),都健(第 4 章),赵毅(第 5 章)。下册由樊希山主编。参加各章编写的有:樊希山(第 6 章),匡国柱(第 7 章),孙力(第 8 章),王瑶(第 9 章),贺高红(第 10 章)。在本书的编写中,得到了教研室的全体同行们及多年来历次参加教材编写的教师们的关心和支持。清华大学蒋维钧教授在教材审阅中提出许多宝贵意见,于此,表示衷心的感谢。限于编者的水平,书中难免有错误和不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2001 年 12 月

目 录

绪论	1	1.7.2 复杂管路计算	57
第 1 章 流体流动基础	3	1.7.3 阻力对管内流动的影响	61
1.1 流体流动的研究方法	3	1.7.4 可压缩流体的管路计算	62
1.1.1 流体的连续性假定	3	1.8 流速和流量的测量	65
1.1.2 流体质点运动的描述方法	3	1.8.1 测速管	66
1.1.3 流场的描述	4	1.8.2 节流式流量计	68
1.2 作用在流体上的力	4	1.8.3 转子流量计	73
1.3 流体的基本性质	6	习题	76
1.3.1 流体的流动性	6	本章符号说明	83
1.3.2 流体的密度	6	参考文献	84
1.3.3 流体的压缩性	8	第 2 章 流体输送设备	85
1.3.4 流体的黏性	8	2.1 概述	85
1.4 流体静力学基本方程	11	2.2 离心泵	86
1.4.1 流体静力学基本方程	11	2.2.1 离心泵的基本结构、工作原理 与性能参数	86
1.4.2 流体静力学基本方程的应用	14	2.2.2 离心泵的基本方程	89
1.5 流体流动的基本方程	16	2.2.3 离心泵的效率 and 实际压头	92
1.5.1 稳态流动与非稳态流动	16	2.2.4 离心泵的特性曲线	94
1.5.2 流体的流量与流速	17	2.2.5 离心泵的汽蚀现象和安装高度	99
1.5.3 连续性方程	18	2.2.6 离心泵的工作点与流量调节	104
1.5.4 伯努利方程	19	2.2.7 离心泵的組合运转	106
1.5.5 实际流体流动的机械能衡算 方程	23	2.2.8 离心泵的类型与选用	108
1.5.6 实际流体流动的机械能衡算方程 的应用	25	2.3 容积式泵	116
1.6 管内流体流动阻力	27	2.3.1 往复泵	116
1.6.1 流体的流动类型	27	2.3.2 隔膜泵和计量泵	118
1.6.2 流体在圆管内流动分析	30	2.3.3 转子泵	119
1.6.3 流体流动边界层	35	2.4 其他类型的叶片式泵	120
1.6.4 流体流动阻力计算	38	2.4.1 旋涡泵	120
1.7 流体流动管路计算	53	2.4.2 轴流泵和混流泵	121
1.7.1 简单管路计算	54	2.5 各类泵的比较与选择	122
		2.6 通风机、鼓风机、压缩机和真	

空 泵	126	3.7.3 流体通过流化床的阻力	203
2.6.1 离心通风机	126	3.7.4 流化床的流化类型与不正常现象	204
2.6.2 鼓风机	129	3.7.5 流化床的操作范围	205
2.6.3 压缩机	130	3.7.6 流化床的高度与直径	207
2.6.4 真空泵	141	3.7.7 气力输送的一般概念	209
习题	144	3.7.8 气力输送的类型	209
本章符号说明	148	3.8 非均相混合物分离的新进展	210
参考文献	149	3.8.1 分离方法的新进展	210
第 3 章 流体与颗粒(床层)的相对运动		3.8.2 分离方法的选择	212
——机械分离及流态化	150	习题	212
3.1 概述	150	本章符号说明	215
3.2 颗粒及颗粒床层的几何特性	150	参考文献	216
3.2.1 单颗粒的几何特性参数	150	第 4 章 传热过程及换热器	217
3.2.2 混合颗粒的几何特性参数	151	4.1 传热基本方式及能量方程	217
3.2.3 颗粒床层的几何特性	153	4.1.1 热量传递的基本方式	217
3.3 流体与颗粒间的相对运动	154	4.1.2 传热过程的能量方程	219
3.3.1 流体绕过颗粒的流动分析	155	4.2 热传导	223
3.3.2 颗粒在流体中的运动	157	4.2.1 无内热源的一维稳态热传导	223
3.4 沉降	158	4.2.2 有内热源的一维稳态热传导	230
3.4.1 重力沉降速度的计算	158	4.2.3 热导率	231
3.4.2 重力沉降设备	163	4.3 对流传热	233
3.4.3 离心沉降速度的计算	167	4.3.1 热边界层	233
3.4.4 离心沉降设备	169	4.3.2 对流传热速率方程和表面传热系数	234
3.5 流体通过固定床的流动	176	4.3.3 管内强制层流传热的理论分析	235
3.5.1 固定床的床层简化模型	176	4.3.4 对流传热过程的量纲分析	238
3.5.2 流体通过固定床层的阻力	177	4.3.5 无相变化的对流表面传热系数	242
3.5.3 欧根方程的其他形式	178	4.4 冷凝传热和沸腾传热	256
3.6 过滤	180	4.4.1 蒸气冷凝传热	256
3.6.1 过滤操作的基本概念	180	4.4.2 液体沸腾传热	263
3.6.2 过滤过程的物料衡算	182	4.5 辐射传热	266
3.6.3 过滤基本方程式	182	4.5.1 辐射传热的基本概念	266
3.6.4 过滤过程的计算	184	4.5.2 发射能力和辐射基本定律	267
3.6.5 滤饼的洗涤	187	4.5.3 两固体间的辐射传热	270
3.6.6 过滤机及其生产能力	188	4.5.4 气体的辐射传热	272
3.6.7 离心过滤	199	4.5.5 复合传热和设备的热损失	275
3.7 固体流态化及气力输送	201	4.6 传热过程的计算	277
3.7.1 床层的流态化过程	201		
3.7.2 流化床类似液体的特性	202		

4.6.1 总传热速率方程	277	参考文献	363
4.6.2 热流量的计算	278	附录	364
4.6.3 总传热系数和传热面积	279	附录 A 干空气的物理性质	
4.6.4 平均传热温度差	282	(101.33 kPa)	364
4.6.5 传热效率和传热单元数	287	附录 B 水的重要物理性质	365
4.7 换热器	292	附录 C 水在不同温度下的黏度	
4.7.1 管式换热器的结构型式	293	(0~100 °C)	366
4.7.2 板式换热器的结构型式	300	附录 D 饱和水蒸气表(以温度	
4.7.3 其他换热器的结构型式	304	为准)	367
4.7.4 换热器传热过程的强化	305	附录 E 饱和水蒸气表(以 kPa 为	
4.7.5 列管式换热器的设计和选型	310	单位的压力为准)	368
习题	324	附录 F 某些液体的热导率	370
本章符号说明	329	附录 G 某些气体和蒸气的热导率	372
参考文献	330	附录 H 某些固体材料的热导率	373
第 5 章 蒸发	331	附录 I 液体的黏度和密度	375
5.1 概述	331	附录 J 101.3 kPa 压力下气体的	
5.1.1 蒸发过程及应用	331	黏度共线图	379
5.1.2 蒸发过程的分类	332	附录 K 液体的比定压热容	382
5.1.3 蒸发过程的特点	332	附录 L 101.3 kPa 压力下气体的	
5.2 单效蒸发计算	332	比定压热容	385
5.2.1 物料衡算	332	附录 M 汽化热	387
5.2.2 热量衡算	333	附录 N 液体的表面张力	389
5.2.3 传热计算	336	附录 O 某些有机液体的相对密度	
5.2.4 溶液的沸点和传热温度差损失	337	(液体密度与 4 °C 水的密度	
5.3 多效蒸发和提高加热蒸汽经济		之比)	392
性的措施	341	附录 P 壁面污垢的热阻(污垢系	
5.3.1 多效蒸发的流程	341	数)	393
5.3.2 多效蒸发的分析	342	附录 Q 无机物水溶液在大气压下	
5.3.3 多效蒸发的设计型计算	344	的沸点	395
5.3.4 提高加热蒸汽经济性的措施	351	附录 R 101.3 kPa 溶液的沸点升高	
5.4 蒸发器	354	与溶质质量分数的关系	396
5.4.1 蒸发器的结构及特点	354	附录 S 管子规格(摘录)	396
5.4.2 除沫器和冷凝器及真空装置	360	附录 T 泵及风机规格(摘录)	399
习题	361	附录 U 换热器	410
本章符号说明	362		

绪 论

1. 化学工业与化学工程

化学工业是将自然界中的各种物质资源通过物理和化学方法加工成具有规定质量的化工产品的工业。在当代社会,化工产品遍及人们生活和工业生产的各个领域,人们越来越依赖化工产品,这使得化学工业在国民经济发展中占有极其重要的地位。

在化学工业中,从原料到产品的生产过程称为化工工艺,由于化工产品及生产这些产品所用的原料众多,使得化学工业中的生产过程种类繁多,形成了众多的化工工艺。化学工程学科是研究化工生产过程中所涉及的化学过程及物理过程的基本规律并应用这些规律解决生产过程实际问题的科学。现今的化学工程学科不仅涵盖整个化学与石化工业领域,而且也涵盖了许多与化工生产过程相同或相近的其他(如能源、生物、材料、制药、冶金、轻工等)工业生产过程。

2. 化学工程学的发展过程

(1) 萌芽时期 现代化工生产始于 18 世纪。其特点仅仅表现为专有技术,以研究某一产品的生产技术为对象,形成了各种工艺学。

(2) 奠基时期 化学工程作为一门新兴的学科始于 19 世纪,人们认识到种类繁多的化工生产过程虽然具有多样性,但其共同特征是都可以分解为若干相对独立的化学反应单元过程或物理加工单元过程。例如,将均相混合物分离成单组分的分离单元、将物料升温或降温的传热单元、产生新组分的化学反应单元等,于是形成了“化工单元操作”的概念。“化工单元操作”概念的形成,奠定了化学工程学的学科基础,但该时期的化学工程仍以实验和经验为主。1923 年,美国麻省理工学院的著名教授 W.H.华克尔等人编写了第一部系统阐述化工单元操作的著作,该书名为《化工原理》(Principles of Chemical Engineering),化工原理课程亦就此产生。

(3) 化学工程学时期 20 世纪 50 年代,人们开始在本质上揭示各类单元操作的基本规律,开始系统研究单元操作中的传递现象,形成了动量传递、热量传递和质量传递概念,建立了传递学基础。同时,化学反应工程学也得到了系统的发展,于是化学工程学领域形成了“三传一反”(三传是指动量传递、热量传递和质量传递,一反是指化学反应工程)的概念,标志着化学工程学科发展进入了新的发展时期,从技术走向科学。

(4) 现代化学工程学时期 20 世纪 60 年代末,计算机技术、系统工程学开始应用于化学工程领域,形成了现代化学工程学,包括化工原理、化工传递过程、化学反应工程、化工热力学、化工系统工程学、化工过程动态学及控制论等在内的完整的化学工程学科体系。同时化学工程学科与相邻学科相融合逐渐形成了若干新的学科分支,例如,生物化学工程、分子化学工程、环境化学工程、能源化学工程、计算化学工程、软化学工程、微电子化学工程等,使现代化学工程进入了一个全新的发展时期。现代化学工程学面临的三大挑战为资源、能源和环境保护。

3. 化工原理课程内容

化工原理课程是研究化工单元操作基本原理、典型的单元操作设备及其工艺设计的专业基础课,是化学工程学科体系中的基础课程之一,具有较强的工程特点。在学习本课程过程中,要注意学会综合运用高等数学、物理学、物理化学等课程的基础理论知识解决工程实际问题,要注意学习研究化学工程问题的基本方法和解决工程问题的典型方法,建立工程观念,提高解决问题的能力,即理论上的可行性、技术上的可行性、环境与安全的可行性及经济上的可行性。

4. 物理量的单位及换算

任何物理量的大小都是由数字和单位联合来表达的。过去,由于历史、地区的原因及学科的不同要求,出现多种单位制。国际单位制(SI)是一种完整的单位制,它包括了所有领域中的计量单位,其基本单位有7个,而化工中常用的有5个:长度的单位为m(米),质量的单位为kg(千克),时间的单位为s(秒),温度的单位为K(开尔文),物质的量的单位为mol(摩尔)。

在化工生产中还使用一些非SI的法定计量单位,如时间的单位为min(分)、h(小时)、d(日)、a(年);温度的单位还常用℃(摄氏度),旋转速度用r/min(转每分)等。

有些化工文献、手册、资料还可能遇到一些非法定计量单位和其他单位制。如压力单位还有atm(标准大气压)、at(工程大气压,也即千克力每平方厘米,kgf/cm²)、bar(巴)、mmHg(毫米汞柱)、mmH₂O(毫米水柱)等。工程单位制(重力单位制)其基本单位长度为m,时间为s,力为kgf;厘米克秒制(CGS)的单位均是国际单位制的倍数和分数单位,其中一些有专门名称。

5. 单位和量纲

同一基本单位可以用不同单位制中的单位来表示,但同一个基本单位,只能用一个基本量的量纲来表示,如长度用L、质量用M、时间用T、温度用Θ来表示。可用基本量的量纲来表示一个物理量的量纲组成,如速度的量纲:

$$[u] = L/T = LT^{-1}$$

上式即为量纲式,在求取流体流动阻力和表面传热系数计算式时均需要量纲式的概念。

第 1 章

流体流动基础

流体包括气体和液体,是具有流动性的物质。化工生产中所涉及的物料大多为流体,为满足化工生产工艺要求,常常需要将流体物料从一设备输送到另一设备,从上一工序输送到下一工序,逐步完成各种物理变化和化学变化,得到所需的化工产品。因此,流体流动与输送成为最普遍的化工单元操作之一。此外,化工生产中所涉及的传热、传质和化学反应过程,也大都是在流体流动的条件下进行的,流体的流动情况对这些过程的操作效果影响很大。不仅如此,由于流体有便于输送、处理、控制及连续操作的优点,所以,即使所处理的物料是固体,也往往把固体物料制成溶液,或把固体破碎成小颗粒悬浮在流体中呈“流态化”进行操作。因此,研究流体流动过程的基本原理和规律问题是研究其他化工单元操作的重要基础。

1.1 流体流动的研究方法

1.1.1 流体的连续性假定

从微观角度来看,流体是由大量的彼此之间有一定间隙的单个分子所组成,各单个分子做着无规则的热运动。如果以单个分子作为考察对象,那么流体将是一种不连续的介质,所需处理的运动是一种随机的运动,问题将是非常复杂的。但在研究流体流动规律时,人们更关注流体的宏观运动,而不是单个分子的微观运动。因此,工程上常将流体视为充满所占空间的、由无数彼此间没有间隙的流体质点(或微团)组成的连续介质,这就是流体的连续性假定。所谓流体质点是指含有大量分子的流体微团,其尺寸远小于流体所处空间尺寸,但远大于分子自由程。引入连续性假定后,流体的物理性质和运动参数就具有连续变化的特性,从而可以利用基于连续函数的数学工具,从宏观角度研究流体流动的规律。实践证明,连续性假定对绝大多数工程情况是适合的。但在有些情况下,分子的自由程大到可同设备的特征长度相比拟时(如在高真空稀薄气体中或催化剂颗粒内气体扩散等情况下),该假定不再成立,所以流体的连续性假定存在局限性。

1.1.2 流体质点运动的描述方法

对于流体流动,通常可以采取两种不同的描述方法。一种方法是选定一个流体质点,对其跟踪观察,描述其运动参数(如位移、速度等)与时间的关系,这种方法称作拉格朗日(Lagrange)法。另一种方法则是在固定位置上观察流体质点的运动情况,即描述各有关运动参数在指定空间和

时间上的变化,这种方法称为欧拉(Euler)法。如,欧拉法对于速度可作如下描述:

$$\begin{cases} u_x = f_x(x, y, z, t) \\ u_y = f_y(x, y, z, t) \\ u_z = f_z(x, y, z, t) \end{cases} \quad (1.1.1)$$

式中, x, y, z ——位置坐标;

t ——时间;

u_x, u_y, u_z ——指定点速度在三个垂直坐标轴上的分量。

可见,拉格朗日法描述的是同一质点在不同时刻的状态,而欧拉法描述的则是空间各点的状态及其与时间的关系。流体流动中,由于涉及无数个流体质点,采用拉格朗日法会使问题变得复杂。仅当所研究的是任一质点都遵循的一般规律时,才采用拉格朗日法。欧拉法不直接追究质点的运动过程,而是以充满运动流体质点的空间——流场为对象,研究各时刻质点在流场中的变化规律。通过观察在流动空间中的每一个空间点上运动要素随时间的变化,把足够多的空间点综合起来而得出整个流体的运动情况。因此,一般情况下采用欧拉法对流体流动加以描述较方便,尤其是在空间各点的状态不随时间而变化时采用欧拉法描述更为方便。

1.1.3 流场的描述

流体运动所占据的空间称为流场,对流场可采用“迹线”或“流线”进行描述。所谓迹线,是同一流体质点在不同时刻所占空间位置的连线,即某一流体质点的运动轨迹。显然,迹线是采用拉格朗日法考察流体运动所得的结果。而流线是表示某一时刻不同质点的速度方向的空间曲线,曲线上任一点的切线方向即为该点的速度方向。流线与电力线、磁力线相类似,由于任意时刻同一位置上只有一个速度方向,故流线不会相交。

可见,迹线和流线是完全不同的两个概念。迹线描述的是同一质点在连续瞬间的位置,而流线则表示的是同一瞬间不同质点的速度方向,是采用欧拉法考察的结果。当空间各点流体的速度不随时间而变化时,流线与迹线重合。

生产上一般采用管道输送流体,对于单相流体充满管内空间且在管内流动时,由于流体是沿着管轴线流动的,所以其流线为平行的直线。

1.2 作用在流体上的力

无论处于运动还是静止状态的流体,都承受着一定的作用力。流体受到的作用力可分为质量力(体积力)和表面力两种。质量力是指不与流体接触,而施加于流体所有质点上,并与流体的质量成正比的力。对于均质流体也与流体的体积成正比,故也称之为体积力。流体在重力场中所受到的重力和在离心力场中所受到的离心力都是质量力。表面力是指与流体质点接触的外界(器壁或该流体质点周围的其他流体)施加于流体质点表面的作用力。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。通常可将表面力分解为法向分力和切向分力,如图 1.2.1 所示。法向分力称



图 1.2.1 作用于流体上的表面力

为压力,切向分力称为剪切力(又称为内摩擦力)。

(1) 压力 通常单位面积上的压力称为流体的压强,习惯上也称为压力(本书后面所提压力,如不特别指明,均指压强),而把作用于流体全部表面积上的压力称为总压力。压力是垂直作用于流体表面的力,其方向指向流体的作用面。

设垂直作用于流体表面积 S 上总的力为 F ,则平均压力可表示为

$$p_m = \frac{F}{S} \quad (1.2.1)$$

对于流体中任一点的压力则可表示为

$$p = \lim_{S \rightarrow 0} \left(\frac{F}{S} \right) \quad (1.2.2)$$

需要说明的是,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,只与该点在空间的位置有关。即作用于任一点上所有不同方位的压力在数值上是相等的,压力各向同性。空间任一点的压力可表示成

$$p = f(x, y, z) \quad (1.2.3)$$

压力具有应力的单位,在 SI 单位制中,其单位是 N/m^2 ,称为帕斯卡,用 Pa 表示。在工程上常使用兆帕($1\text{MPa} = 10^6\text{Pa}$)作为压力计量单位。此外,工程上也间接地以液体柱的高度表示压力的大小,如 mH_2O 或 mmHg 等。若液体的密度为 ρ ,则液柱高度 h 与压力 p 的关系为

$$p = \rho gh \quad (1.2.4)$$

由式(1.2.4)可知,同一压力用不同物质液柱表示时,其高度不同。因此当以液柱高度表示压力时,必须注明液体的种类,如 $10\text{ mH}_2\text{O}$ 或 760mmHg 。此外,过去用过的压力单位还有工程大气压($\text{at}, \text{kgf/cm}^2$)、标准大气压(atm)、巴(bar)等。一些常见的压力单位和它们之间的换算关系为

$$1\text{ atm} = 1.013 \times 10^5\text{ Pa} = 1.033\text{ kgf/cm}^2 = 10.33\text{ mH}_2\text{O} = 760\text{ mmHg}$$

流体的压力大小常以两种不同的基准来表示,一种是以绝对零压力(即完全真空)为基准,另一种是以当时当地大气压力为基准。以绝对零压力为基准的压力称为绝对压力,它是流体的真实压力。以当时当地大气压力为基准的压力称为表压或真空度,若绝对压力高于大气压力,则高出部分称为表压,即

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

若绝对压力低于大气压力,则低出部分称为真空度,即

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

显然,真空度是表压的负值。表压值可由压力表直接测得,真空度亦可由真空表直接测量。绝对压力、表压、大气压力及真空度之间的关系如图 1.2.2 所示。

当压力数值用表压或真空度表示时,必须加以注明,如 2000 Pa (表压)或 600 mmHg (真空度),同时还应注明当时当地的大气压力。

(2) 剪应力 单位面积上的剪切力称为剪应力,用符号 τ 表示。根据牛顿第二定律,力等于质量与加

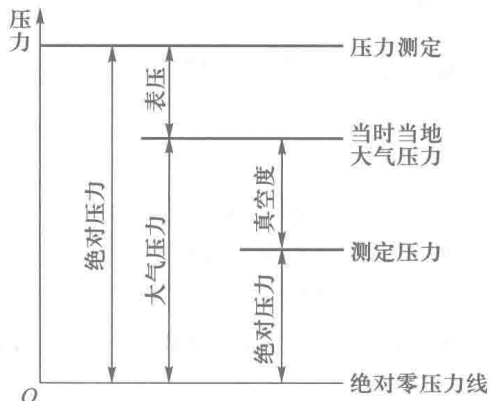


图 1.2.2 绝对压力、表压和真空度的关系

速度的乘积,即

$$F = ma \quad (1.2.5)$$

作用于相邻两流体层之间的剪应力可写成

$$\tau = \frac{F}{S} = \frac{ma}{S} = \frac{mdu}{Sdt} = \frac{d(mu)}{Sdt} \quad (1.2.6)$$

式中, S ——两流体层的作用面积;

t ——时间;

m ——流体质点的质量;

u ——流速。

式(1.2.6)表明,剪应力可以表示为单位时间通过单位面积的动量,即动量通量。流动流体中其内部的剪应力是速度不等的两相邻流体层彼此作用的力,这种相互作用就是两流体层之间的动量传递。剪应力的单位为

$$[\tau] = \frac{\text{N}}{\text{m}^2} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2}{\text{m}^2} = \text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$$

1.3 流体的基本性质

1.3.1 流体的流动性

物质在运动时内部分子间发生相对运动的特性称为流动性。固态物质的分子或离子是有固定晶格位置的,当固体(刚体)运动时,其内部分子或离子间的相对位置不变。而气体或液体运动时,内部分子间会发生相对运动。因此,流体区别于固体的主要特征是具有流动性。

静止的流体不能承受剪切力,只要有剪切力存在,流体就会变形(并且没有恢复原状的能力),流体连续不断的变形就形成了流动。流体的流动并非指其内部分子的运动,而是指流体作为一个整体运动的同时,内部还有流体质点的相对运动。流体内部无数质点运动的总和,就是流体流动。

因为流体的抗变形能力差,因此流体没有固定的形状,其形状随容器形状而变化。

1.3.2 流体的密度

单位体积的流体具有的质量称为流体的密度,用符号 ρ 表示,其表达式为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.3.1)$$

式中, ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

m ——流体的质量, kg ;

V ——流体的体积, m^3 。

密度是流体的物理性质,一般来说,其值随压强和温度的变化而改变,可表示成

$$\rho = f(p, T) \quad (1.3.2)$$

式中, p ——流体的压强, Pa ;

T ——流体的温度, K。

流体的密度一般可在物理化学手册或有关资料中查到, 本书附录中也列出了一些常见纯组分液体和气体的密度值。

(1) 液体的密度 液体的密度几乎不随压强而变化(极高压力除外), 常可忽略其影响, 但温度对液体的密度有一定的影响。液体密度随温度的变化关系可表示为

$$\rho_2 = \frac{\rho_1}{1 + \alpha_{v1} \Delta T} \quad (1.3.3)$$

式中, α_{v1} ——液体的体膨胀系数, K^{-1} ;

ΔT ——温度差, K。

通常情况下, 液体的密度由实验测定。对于液体混合物的平均密度, 若无实测数据, 可应用一些近似公式进行估算。液体混合物中, 各组分的含量常用质量分数来表示。现以 1 kg 混合液体为基准, 若各组分在混合前后其体积不变, 则 1 kg 混合物的体积等于各组分单独存在时的体积之和, 故有

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{w_A}{\rho_A} + \frac{w_B}{\rho_B} + \cdots + \frac{w_n}{\rho_n} \quad (1.3.4)$$

式中, ρ_m ——液体混合物的平均密度, kg/m^3 ;

$w_A, w_B, \cdots, w_n$ ——混合物中各组分的质量分数;

$\rho_A, \rho_B, \cdots, \rho_n$ ——同温同压下各组分单独存在时的密度, kg/m^3 。

(2) 气体的密度 气体的密度随温度和压强有较大的变化。当气体的压强不太高、温度不太低时, 气体密度可按理想气体状态方程来计算, 即

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT \quad (1.3.5)$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (1.3.6)$$

式中, p ——气体的绝对压强, kPa;

n ——气体的物质的量, mol;

M ——气体的摩尔质量, g/mol;

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

由此, 当已知某气体在已知条件(T_0, p_0)下的密度 ρ_0 , 可用式(1.3.7)换算为操作条件(T, p)下的密度 ρ :

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0}{T} \frac{p}{p_0} \quad (1.3.7)$$

当气体温度较低或压强较高时, 气体的密度应采用真实气体状态方程进行计算。

对于气体混合物, 各组分的组成常用摩尔分数来表示。现以 $1 m^3$ 混合气体为基准, 若组分在混合前后其压强与温度不变, 混合气体的质量等于各组分的质量之和。

$$\rho_m = \rho_A y_A + \rho_B y_B + \cdots + \rho_n y_n \quad (1.3.8)$$

式中, $y_A, y_B, \cdots, y_n$ ——气体混合物中各组分的摩尔分数。

理想气体混合物的平均密度也可直接按式(1.3.9)计算, 即

$$\rho_m = \frac{pM_m}{RT} \quad (1.3.9)$$

式中, M_m ——气体混合物的平均摩尔质量, 其值为

$$M_m = M_A y_A + M_B y_B + \cdots + M_n y_n \quad (1.3.10)$$

式中, $M_A, M_B, \cdots, M_n$ ——气体混合物中各组分的摩尔质量, g/mol。

1.3.3 流体的压缩性

在外部压力的作用下, 流体分子间的距离会发生一定的改变, 表现为其体积大小的变化。流体的体积随压强而变化的特性称为流体的压缩性, 可用体积压缩系数 κ 表示(简称为压缩率)。压缩系数定义为: 当温度维持不变, 压强每增加一个单位时, 流体体积的相对变化量。以单位质量流体的体积 v 为基准, 则压缩系数 κ 可表示为

$$\kappa = -\frac{1}{v} \frac{dv}{dp} \quad (1.3.11)$$

式中, κ ——压缩系数, Pa^{-1} ;

v ——比体积, m^3/kg ;

p ——压强, Pa ;

负号——表示压强增加时, 体积缩小。

由于密度 ρ 与比体积 v 的关系可表示为 $\rho = \frac{1}{v}$, 即 $\rho v = 1$, 则有

$$\rho dv + v d\rho = 0 \quad (1.3.12)$$

将式(1.3.12)代入式(1.3.11)中, 整理得

$$\kappa = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dp} \quad (1.3.13)$$

压缩系数 κ 的大小, 反映了流体被压缩的难易程度。通常将 $\kappa \neq 0$ 的流体称为可压缩流体, 将 $\kappa = 0$ 的流体称为不可压缩流体。一般液体的分子间距离小, 体积随压力的变化很小, 可视为不可压缩流体。而对于气体, 当压力变化时, 其体积会有较大变化, 为可压缩流体。

1.3.4 流体的黏性

(1) 牛顿黏性定律 设有上、下两块面积很大且相距很近的平行平板, 其间充满某种静止的流体, 如图 1.3.1 所示。若将下板固定不动, 对上板施加一恒定的平行于平板的外力 F 使上板以速度 u 作匀速运动。紧邻壁面的流体由于与壁面间的作用力, 将不作相对于该壁面的相对运动。因此, 紧贴于运动板下方的流体层也将以同一速度 u 流动, 而紧贴于固定板上方的流体层则静止不动。当流速不太大时, 两板间的流体将呈薄层流动, 各层流体速度变化是线性的(如图 1.3.1 所示)。对任意相邻两层流体来说, 运动速度快的流体层带动运动速度慢的流体层, 而运动速度慢的流体层则拖曳运动速度快的流体层。这种运动着的流体内部相邻流体层间的相互作用力称为流体的内摩擦力。流体在流动时产生内摩擦力的性质, 称为流体的黏性。

实验证明, 对于一定的流体, 单位面积上的内摩擦力(称为剪应力)与两流体层的速度差成正比, 与两流体层间的垂直距离成反比, 即