

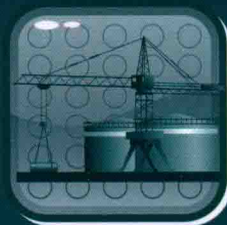
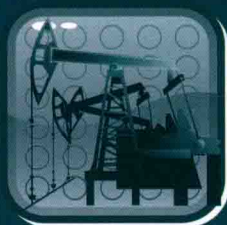
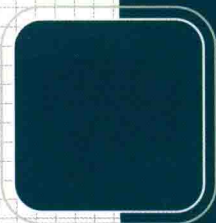
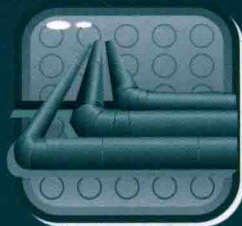
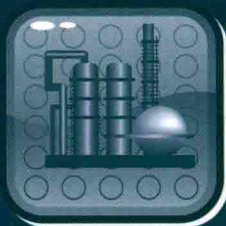
贾志谦 编著



化学工程

漫谈

HUAXUE
GONGCHENG
MANTAN



化学工业出版社

贾志谦 编著

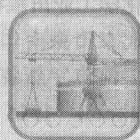
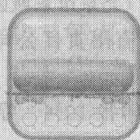
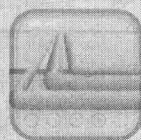
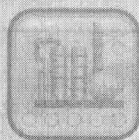
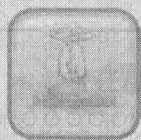


化学工程

漫谈



HUAXUE
GONGCHENG
MANTAN



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是一部化学工程科普图书。全书分为化学工程学发展简史、流体流动与输送机械、传热过程、传质过程、化学反应工程、化学工艺学六章,每章都从化学工程的发展历史、著名科学家简介、化工知识应用、化工新技术、化工知识的扩展和总结五方面对化学工程做了科普性的介绍。

本书将科学性、知识性和趣味性融为一体,可作为高等院校化学工程与技术、环境科学与工程、食品科学与工程、轻工技术与工程、化学等多个专业的化学工程课程教学参考书,也可供化学工程技术人员以及对化学工程感兴趣的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化学工程漫谈/贾志谦编著. —北京:化学工业出版社, 2015. 9
ISBN 978-7-122-24424-6

I. ①化… II. ①贾… III. ①化学工程-普及读物 IV. ①TQ02-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 140641 号

责任编辑:傅聪智

责任校对:蒋 宇

装帧设计:王晓宇

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印 刷:北京市振南印刷有限责任公司

装 订:三河市宇新装订厂

710mm×1000mm 1/16 印张10½ 字数205千字 2015年9月北京第1版第1次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:36.00 元

版权所有 违者必究

前言

FOREWORD

化学工程学主要研究化学工业和其他过程工业中化学过程和物理过程的共同规律,包括单元操作、化学反应工程、传递过程、化工热力学、化工系统工程等多个分支。在高等教育中,化学工程学是化学工程与技术、环境科学与工程、食品科学与工程、轻工技术与工程、化学等多个一级学科及其相关专业的重要基础课程。

本书分为化学工程学发展简史、流体流动与输送机械、传热过程、传质过程、化学反应工程、化学工艺学六章,每章主要由以下五方面内容组成:①化学工程的发展历史,介绍了流体力学、传热学、传质学、化学反应工程、石油化工等的发展历史,从中可以了解知识的形成过程和创新方法;②著名科学家简介,介绍了雷诺、伯努利、普朗特、傅里叶、努塞尔、刘易斯等数十位与化学工程有关的科学家的生平和主要贡献,读者可以从中获得人生启迪和激励;③化工知识的应用,介绍了风阻系数、风寒指数、潜水减压病等几十例化工知识的应用,可以提高读者运用化工理论知识分析和解决实际问题的能力,扩大知识面;④化工新技术,介绍了热管、热泵、膜吸收、膜蒸馏、分子精馏等化工新技术,可以使读者了解化工的最新进展,开拓思路;⑤化工知识的扩展,介绍了化工经济学、化学工程中的共性方法、化工中经济性原则的应用等内容。在附录中介绍了世界著名的化学品公司、化学工程学科和化学学科重要的国际学术期刊、世界大学化学工程专业和化学专业排名等内容。本书力求将科学性、知识性和趣味性融为一体,可以作为教师教学和学生学习的教学参考书,也可供化学工程技术人员参考。

在编写过程中,本书责任编辑对本书的选材和编写提出了很多宝贵意见,对本书的出版做了大量细致的编审工作,谨此表示诚挚谢意。本书在编写中参考了中国大百科全书等中外文献以及维基百科、百度百科、互动百科等网络资源,在此表示衷心感谢。由于化学工程内涵丰富,应用广泛,加之笔者水平有限,书中难免存在错误和不妥之处,敬请读者批评指正。

贾志谦

2015年5月于北京

目录

CONTENTS

1	Page
化学工程学发展简史	001
1.1 单元操作	001
1.2 化工热力学	002
1.3 化学反应工程	003
1.4 传递过程	003
1.5 化工系统工程	004
1.6 新兴交叉学科的形成	004
1.7 化工经济学	004
1.8 化学与化学工程的关系	005
参考文献	005

2	Page
流体流动与输送机械	006
2.1 流体力学发展简史	006
2.2 流体静力学	007
2.2.1 托里拆利与大气压计	007
2.2.2 帕斯卡与帕斯卡定律	008
2.2.3 烟囱的原理和烟囱效应	008
2.2.4 液封的应用	009
2.2.5 压力表	009
2.2.6 压力传感器	010
2.2.7 压强测量的要点	010
2.3 物料衡算和能量衡算	011
2.3.1 动量传递	011
2.3.2 纳维、斯托克斯与纳维-斯托克斯方程	012
2.3.3 欧拉及其对流体力学的贡献	013
2.3.4 拉格朗日与拉格朗日法	014

2.3.5 过堂风与连续性方程	015
2.3.6 流体动力学之父——丹尼尔·伯努利	015
2.3.7 伯努利方程的应用	016
2.4 流体内部结构	022
2.4.1 雷诺与雷诺准数	022
2.4.2 普朗特与边界层理论	023
2.4.3 边界层分离及其控制	024
2.4.4 冯·卡门与卡门涡街	025
2.5 流动阻力	027
2.5.1 泊肃叶和泊肃叶定律	027
2.5.2 空气阻力系数	028
2.5.3 游泳阻力与鲨鱼皮泳衣	028
2.6 流量和流速测定	029
2.6.1 流量测量仪表的发展	029
2.6.2 毕托和毕托管	029
2.6.3 速度式流量计	030
2.6.4 流场显示技术	031
2.7 流体输送机械	033
2.8 量纲与单位	036
2.9 公称直径	036
2.10 计算流体动力学	037
参考文献	037

3 Page

传热过程 038

3.1 传热学发展简史	038
3.2 热量传递	040
3.3 热传导	040
3.3.1 温度标准	040
3.3.2 傅里叶与傅里叶定律	040
3.3.3 热传导的应用	041
3.4 对流传热	044
3.4.1 牛顿与牛顿冷却定律	044
3.4.2 水壶壶底的温度	045
3.4.3 努塞尔与对流传热	045
3.4.4 格拉晓夫	046

3.4.5	风寒指数与对流传热速率	046
3.4.6	导热油	046
3.4.7	饱和水蒸气和过热水蒸气	046
3.4.8	自然对流与季风	047
3.4.9	供暖中的强化传热	047
3.4.10	冷却介质的出口温度	048
3.5	辐射传热	048
3.5.1	基尔霍夫与热辐射	048
3.5.2	斯蒂芬与辐射传热	049
3.5.3	城市热岛效应	049
3.5.4	热辐射与温室效应	049
3.5.5	青藏铁路与冻土保护	050
3.6	传热设备和技术	051
3.6.1	换热器的发展	051
3.6.2	螺旋扁管换热器	051
3.6.3	冷却塔	052
3.6.4	废热锅炉	052
3.6.5	省煤器	053
3.6.6	计算机显卡的散热	053
3.6.7	热管	053
3.6.8	热泵	054
3.6.9	林德与制冷机	055
3.6.10	空调	055
3.6.11	冰箱	056
3.6.12	红外干燥	056
3.6.13	微波加热	056
3.6.14	太阳能热水器	057
3.6.15	电热膜	057
3.7	能量的品质	058
	参考文献	058

4	Page
传质过程	059
4.1	质量传递
4.2	吸收
4.2.1	威廉·亨利与亨利定律
	059

4.2.2	亨利定律的应用	060
4.2.3	费克与费克定律	062
4.2.4	刘易斯与双膜理论	062
4.2.5	丹克沃茨与表面更新理论	063
4.2.6	肺泡与呼吸	063
4.2.7	吸收过程的强化措施	064
4.2.8	舍伍德与舍伍德数	064
4.2.9	洗油的成分	065
4.2.10	酸雨与二氧化硫减排	065
4.2.11	臭氧层破坏与 NO_x 减排	065
4.2.12	二氧化碳的化学吸收	065
4.2.13	吸附、吸收与吸着	066
4.2.14	膜吸收	066
4.2.15	气体膜分离	066
4.2.16	对数、自然对数与对数平均值	067
4.3	精馏	067
4.3.1	拉乌尔与拉乌尔定律	067
4.3.2	蒸馏酒	068
4.3.3	闪蒸	069
4.3.4	McCabe、席勒与 McCabe-Thiele 图解法	069
4.3.5	默弗里与默弗里效率	069
4.3.6	分子蒸馏	070
4.3.7	反应精馏	070
4.3.8	膜蒸馏	071
4.3.9	膜渗透汽化	072
4.4	萃取	073
4.4.1	萃取的发展历程	073
4.4.2	能斯特与分配定律	073
4.4.3	膜萃取	073
4.4.4	液膜分离	074
4.4.5	超临界流体萃取	075
4.5	奥斯特瓦尔德与结晶过程	075
4.6	膜过程	076
4.6.1	渗透现象的发现	076
4.6.2	水中花园实验与渗透	077
4.6.3	膜血液充氧器	077
4.6.4	铀浓缩中的膜分离	077

4.6.5 昂萨格与不可逆过程热力学	078
4.6.6 托马斯·杨与材料的杨氏模量	078
4.6.7 亲和膜分离	079
4.6.8 分子印迹膜分离	080
4.7 三传类比	081
参考文献	081

5 Page --- 化学反应工程 082

5.1 化学反应工程发展简史	082
5.2 阿伦尼乌斯与阿伦尼乌斯方程	083
5.3 多相反应	084
5.3.1 朗缪尔、欣谢尔伍德与吸附等温方程	084
5.3.2 催化剂载体——硅藻土	085
5.3.3 努森与努森扩散	085
5.3.4 郭慕孙与流态化	086
5.3.5 多相反应器	086
5.4 测定反应动力学的实验反应器	088
5.5 微反应器	091
5.6 膜化学反应器	091
5.7 过程强化	091
5.8 化工数据处理中坐标纸的选择	092
5.9 化学工程中的共性方法 ^[4]	092
5.10 化工中经济性原则的应用	096
参考文献	096

6 Page --- 化学工艺学 097

6.1 石油化工	097
6.2 煤化工	106
6.3 无机化工	108
6.3.1 硫酸和硝酸	108
6.3.2 合成氨	111
6.3.3 纯碱工业	113
6.4 高分子化工	115

6.5 生物化工	120
6.6 精细化工	124
6.6.1 染料与颜料	124
6.6.2 表面活性剂	131
6.6.3 涂料与胶黏剂	134
6.6.4 香料与化妆品	136
6.7 绿色化学化工	144
6.8 化工安全生产	146
6.9 化工设计与计算	148
参考文献	148

Page

附录	150
I 世界著名的化学品公司	150
II 化学工程学科重要的国际学术期刊	152
III 化学学科重要的国际学术期刊	154
IV 2014—2015 年 QS 世界大学化学工程专业排名	156
V 2014—2015 年 QS 世界大学化学专业排名	157

化学工程学发展简史

化学工程学主要研究化学工业和其他过程工业中化学过程和物理过程的共同规律,包括单元操作、化学反应工程、传递过程、化工热力学、化工系统工程等多个分支。本章简要介绍了化学工程学的发展历史。

1.1 单元操作

过滤、蒸发、蒸馏、结晶、干燥等操作具有悠久的历史。五千年前,中国人已利用日光蒸发海水制盐,埃及人已开始酿造葡萄酒,并用布袋过滤葡萄汁,但这些操作都是规模很小的手工作业。19世纪下半叶,法国大革命时期出现了路布兰法制碱,标志着化学工业的诞生。19世纪70年代,制碱、硫酸、化肥、煤化工等都有了相当规模。例如,索尔维法制碱中所用的碳化塔高达20余米,在其中同时进行化学吸收、结晶、沉降等过程。

英国曼彻斯特地区的制碱业污染检查员戴维斯(George E. Davis, 1850—1906,图1-1)指出:化学工业发展中面临的许多问题往往是工程问题;各种化工生产工艺,都是由蒸馏、蒸发、干燥、过滤、吸收和萃取等基本操作组成的,可以对其进行综合研究和分析;化学工程将成为继土木工程、机械工程、电气工程之后的第四门工程学科。也许是因为人微言轻,戴维斯的观点在英国并没有受到重视,1880年他发起成立英国化学工程师协会也未获成功。1887—1888年,戴维斯在曼彻斯特工学院作了12次演讲,系统阐述了化学工程的任务、作用和研究对象。这些演讲的内容陆续发表在曼彻斯特出版的《化工贸易杂志》上,戴维斯在此基础上写成了《化学工程手册》,于1901年出版,这是世界上第一部阐述各种化工生产过程共性规律的著作^[2]。



图1-1 George E. Davis^[1]

戴维斯的观点在美国却产生了较大影响。1888年,根据L. M. 诺顿教授的提议,麻省理工学院开设了世界上第一门化学工程课程。随后,宾夕法尼亚大学、戴

伦大学、密歇根大学也分别于 1892 年、1894 年、1898 年相继开设了类似的课程。但这些课程的主要内容是由机械工程和化学构成的，未能揭示化工生产的内在规律。

1908 年，利特尔 (Arthur D. Little, 1863—1935, 图 1-2) 参与发起成立美国化学工程师协会，并担任过该会的主席。1915 年，利特尔提出了单元操作的概念：任何化工生产过程，无论其规模大小都可以用一系列单元操作实现。只有将纷繁复杂的化工生产过程分解为若干单元操作进行研究，才能使化学工程专业具有广泛的适应能力。



图 1-2 Arthur D. Little^[2]

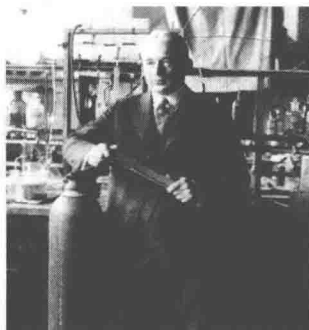


图 1-3 William H. Walker^[2]

1920 年，麻省理工学院成立了化学工程系，由 W. K. 刘易斯任系主任。同年，华克尔 (William H. Walker, 1869—1934, 图 1-3)、刘易斯 (Warren K. Lewis, 1882—1975) 和麦克亚当斯 (William H. McAdams) 撰写了《化工原理》一书的初稿，用于化工系的教学，后于 1923 年正式出版。该书阐述了各种单元操作的物理化学原理，提出了定量计算方法，并从物理学等基础学科中汲取了对化学工程有用的研究成果（如雷诺关于湍流和层流的研究）和研究方法（如因次分析和相似论），奠定了化学工程作为一门独立工程学科的基础。此后，各种单元操作的专著，如 C. S. 鲁宾逊的《精馏原理》(1922) 和《蒸发》(1926)、刘易斯的《化工计算》(1926)、麦克亚当斯的《热量传递》(1933)、舍伍德的《吸收和萃取》(1937) 相继出版。

20 世纪 50 年代初，美国化学工程师协会组织开展了蒸馏塔板效率的研究，浮阀塔板、舌形塔板、斜孔塔板等新型塔板相继问世，通过改进设计方法，筛板塔重新获得广泛应用。反渗透、电渗析、超滤等膜分离操作和区域熔炼等提纯技术进入了工业应用，液膜分离等新的分离技术开始进行实验室研究。

1.2 化工热力学

在化学工程中，经常需要计算高温高压下气体混合物的 p - V - T 关系，而经典热力学并没有提供现成的方法。20 世纪 30 年代初，麻省理工学院的 H. C. 韦伯教授等提出了利用气体临界性质的计算方法，这是化工热力学最早的研究成果。1939

年韦伯出版了第一本化工热力学教科书《化学工程师热力学》，1944年耶鲁大学的B. F. 道奇教授出版了《化工热力学》，标志着化学工程新的分支学科化工热力学的诞生。

高压过程的普遍采用和传质分离过程设计计算方法的改进，推动了化工热力学关于状态方程和多元汽液平衡、液液平衡及相平衡关联方法的研究，提出了一批获得广泛应用的状态方程（如RK方程、马丁-侯方程）和活度系数方程（如马格勒斯方程、威尔逊方程、NRTL方程）。20世纪70年代后，状态方程和相平衡关联仍然是研究热点，提出了PR方程（1976）、SRK方程（1972）等形式简单而又精确的新状态方程和基于基团贡献原则的UNIFAC方程（1977）等活度系数方程。

1.3 化学反应工程

20世纪40年代前期，在重大化工过程（如碳四馏分的分离、丁苯橡胶的乳液聚合、粗柴油的流态化催化裂化）的开发中，化学工程发挥了重要作用。例如，麻省理工学院的刘易斯教授和吉利兰教授提出了流态化催化裂化的设想，并通过实验证实了在催化裂化反应器和再生器之间连续输送大量固体催化剂的可行性。在化工过程开发中，反应器工程放大的重要性日益显著。利用单元操作的概念处理只包含物理变化的化工操作时比较成功，有人将反应过程按化学特征分为硝化、磺化、加氢、脱氢等单元过程，试图解决工业反应过程的开发问题，但实践证明该方法并没有抓住反应过程开发中工程问题的本质。

1913年哈伯-博施法合成氨投入生产，促进了催化剂和催化反应的研究。1928年钒催化剂成功用于二氧化硫的催化氧化。1936年发明了利用硅铝催化剂进行粗柴油催化裂化。对这些气固相催化反应和燃烧过程的研究，使化学工程师开始认识到工业反应过程中质量传递和热量传递对反应的影响。20世纪30年代后期，德国的G. 达姆科勒（1908—1944）和美国的E. 席勒分别对反应相外传质和传热以及反应相内传质和传热作了系统研究。20世纪50年代初，提出了一系列重要的概念，如返混、停留时间分布、宏观混合、微观混合、反应器参数敏感性、反应器的稳定性等。1957年在阿姆斯特丹举行的第一届欧洲化学反应工程讨论会上，宣布了化学反应工程学的诞生。20世纪70年代初，出现了处理大量连续组分参与的复杂反应体系的集总动力学方法和聚合反应工程、电化学反应工程等新分支。

1.4 传递过程

20世纪50年代，化学工程师认识到，所有单元操作都可视为动量传递、热量传递和质量传递三种传递过程或它们的结合。在工业反应器中，传递过程对化学反应具有重要影响，对单元操作和反应过程的深入研究，需要掌握传递过程的规律。1957年在普渡大学召开的美国工程学科的系主任会议上，传递过程和力学、热力

学、电磁学等被列为基础工程学科，并制定了该课程的详细计划。此后，威斯康星大学教授 R. B. 博德、W. E. 斯图尔德和 E. N. 莱特富特编写了《传递现象》，并于 1960 年正式出版，成为化学工程进入“三传一反”时期的标志。20 世纪 70 年代后，高分子化工和生物化工的发展推动了非牛顿型流体传递过程的研究，激光测量、流场显示等新技术开始应用于传递过程研究。

1.5 化工系统工程

20 世纪 50 年代中期，电子计算机开始进入化工领域，化工过程数学模拟迅速发展。由对一个过程或设备的模拟，很快发展到对整个工艺流程甚至企业的模拟，在 20 世纪 50 年代后期出现了第一代化工模拟系统，使化工系统的整体优化成为可能，形成了化学工程研究的一个新领域——化工系统工程。至此，化学工程形成了比较完整的学科体系。20 世纪 70 年代后，化工系统工程开始对系统综合进行探索，在换热器网络和分离流程的合成方面取得了具有实用价值的成果，20 世纪 80 年代初开发了以 ASPEN 为代表的第三代化工模拟系统。

1.6 新兴交叉学科的形成

近年来，化学工程在与其他学科的交叉渗透中形成了一些新领域。第二次世界大战期间发展起来的青霉素生产，开创了生物化学工程。战后各种抗生素和激素的生产迅速增长，微生物技术用于生产和污水净化。20 世纪 70 年代，分子生物学取得了重组 DNA 技术等重大成果，开拓了生物化学品和医药品制备的新领域。同时，生物医学工程正在形成，如传质原理用于潜水病的研究，传热原理用于体内热调节的研究，停留时间分布的概念用于分析药物疗效，非牛顿流体流动和渗析的原理用于人工心肺机、人工肾的研制。化学工程与固体物理、结晶化学、材料科学相结合，在化学气相沉积过程等研究中发挥了重要作用。目前，化学工程学的服务对象已由化学工业扩展到冶金、材料、能源、环境、生物等进行物质转化的过程工业^[3]。

1.7 化工经济学

1926 年，美国的 C. 泰勒出版了《化学工程经济学》，这是世界上第一本化工经济的专著，但当时并未引起应有的重视。20 年后，由于第二次世界大战期间和战后化学工业的迅速发展，人们逐渐认识到在开发新产品和新过程中，必须运用化工经济的原理评价和选择方案以及预测未来发展趋势。1948 年出版了《化学工程经济学》第三版，内容有了很大充实和更新。化工经济学主要研究化工及其生产过程的经济规律，旨在提高化工过程的设备、能源和资源的利用率以及整体的经济效益，属于一门边缘学科。其研究内容包括：化工的发展规律，与国民经济各部门的关系及其发展战略；根据资源和市场供需情况，研究化工企业的合理布局，企业的

厂址选择和经济规模；合理选择原料和工艺路线，进行化工过程的综合分析，寻求最适宜的生产过程方案；研究化工企业投资效果的衡量标准与计算方法，以及提高化工企业投资效果的途径；化工工程项目的投资估算，化工产品的成本组成和价格形成，联产品和副产品的成本计算，定价策略，以及工程投资和生产成本的控制；利用现代技术改造现有企业，提高技术水平和经济效益；化工过程和设备能量综合利用的热力学分析和经济效益分析；化工科研、开发、设计和生产操作控制中的技术问题、经济问题以及经济评价等。

1.8 化学与化学工程的关系

化学、化学工程与技术均为一级学科，研究内容和研究方法各不相同，但两者关系极为紧密。化学是在分子、原子层次上研究物质的组成、性质、结构与变化的规律，创造新物质的科学。而化学工程学是在化学产品工业化过程中逐渐形成和发展起来的，其任务是研究化工过程中的共性规律，为工程开发提供理论指导，通过将实验室成果转化为生产力，满足人类物质和精神生活的需要。可以说，化学为化学工程提供工业放大的素材，化学工程为化学的发展提供重要推动力，两者相互依存，相互促进，共同发展。因此，在我国普通高等学校本科化学专业规范中^[4]，化学工程学列入了化学教学的基本内容，而在化学工程专业规范中，化学也必然是基本教学内容。

参考文献

- [1] www.chemheritage.org/discover/online-resources/chemistry-in-history/themes/chemical-engineering.
- [2] 中国大百科全书编辑委员会. 中国大百科全书：化工卷. 北京：中国大百科全书出版社，2004.
- [3] 李洪钟. 聚焦结构、界面与多尺度问题，开辟化学工程的新里程碑. 过程工程学报，2006，6：991-996.
- [4] 化学类专业教学指导分委员会. 普通高等学校本科化学专业规范（草案）. 大学化学，2005，20（12）：30-42.

流体流动与输送机械

2.1 流体力学发展简史^[1]

古希腊的阿基米德建立了浮力定律等理论，奠定了流体静力学的基础。17世纪，帕斯卡阐明了静止流体中压力的概念，牛顿研究了流体中运动的物体所受到的阻力，提出阻力与流体密度、物体迎流截面积以及运动速度的平方成正比，同时针对黏性流体运动时的内摩擦力提出了牛顿黏性定律。之后，法国皮托发明了测量流速的皮托管；达朗贝尔对运河中船只的阻力进行了实验研究，证实了阻力同物体运动速度之间的平方关系；瑞士的欧拉采用了连续介质的概念，把静力学中压力的概念推广到运动流体中，建立了欧拉方程，利用微分方程组描述了无黏流体的运动；伯努利从经典力学的能量守恒出发，研究供水管道中水的流动，得到了流体定常运动下流速、压力、管道高程之间的关系，即伯努利方程。

欧拉方程和伯努利方程的建立，标志着流体动力学这一分支学科的建立，从此开始用微分方程和实验测量定量研究流体运动。18世纪，位势流理论有了很大发展，在水波、潮汐、涡旋运动、声学等方面阐明了很多规律。法国拉格朗日对无旋运动、德国赫尔姆霍兹对涡旋运动做了研究。在上述研究中，流体的黏性并不起重要作用，所考虑的是无黏流体。

1823年纳维 (M. Navier) 提出了流动方程用于不可压缩性流体，1845年斯托克斯 (G. G. Stokes) 改进了该方程，后称为纳维-斯托克斯 (N-S) 方程，是描述流体流动的基本方程。欧拉方程是 N-S 方程在黏度为零时的特例。然而，由于方程复杂，只有少数简单流动才能求解。这种局面直到 1883 年雷诺 (O. Reynolds) 提出对流动有决定性影响的无量纲数群 (雷诺数) 后才得以改观。1880—1883 年间雷诺进行了大量实验研究，发现管内流动由层流向湍流的转变发生在雷诺数为 1800—2000 之间，澄清了实验结果之间的混乱，对指导实验研究做出了重大贡献。

普朗特等从 1904 年到 1921 年逐步将 N-S 方程作了简化，从推理、数学论证和实验测量等角度建立了边界层理论，能计算简单情形下边界层内流动状态和流体同固体间的黏性力。该理论明确了理想流体的适用范围，又能计算物体运动时的摩擦

阻力。同时,普朗克提出了许多新概念,广泛用于飞机和汽轮机的设计中。20世纪初,飞机的出现极大促进了空气动力学的发展,以儒科夫斯基、恰普雷金、普朗克等为代表的科学家,开创了以无黏不可压缩流体位势流理论为基础的机翼理论,阐明了机翼受到举力,从而将比空气重的飞机托上天空的原理。边界层理论和机翼理论的建立和发展是流体力学的重大进展,使无黏流体理论同黏性流体的边界层理论有机结合起来。20世纪40年代以后,由于喷气推进和火箭技术的应用,飞行器速度超过声速,实现了航天飞行,使气体高速流动的研究进展迅速。

20世纪40年代,关于炸药或天然气等介质中发生的爆轰波^①形成了新的理论,为研究原子弹、炸药等起爆后激波在空气或水中的传播,发展了爆炸波^②理论。此后,流体力学出现了许多分支,如高超声速空气动力学、超声速空气动力学、稀薄空气动力学、电磁流体力学、计算流体力学等。20世纪60年代,由于结构力学和固体力学的需要,出现了计算弹性力学问题的有限元法,后开始在流体力学中应用,尤其是在低速流和流体边界形状甚为复杂的问题中,优越性更加显著。近年来又开始了用有限元方法研究高速流的问题,也出现了有限元方法和差分方法的互相渗透和融合。

在高等学校中,流体力学是化学工程、航空、船舶、汽车、水利、环境工程、给水排水等多个学科和专业的必修内容。

2.2 流体静力学

2.2.1 托里拆利与大气压计

托里拆利(Evangelista Torricelli, 1608—1647,图2-1),意大利物理学家、数学家。1608年10月15日出生于贵族家庭,幼年时表现出数学才能,20岁时在伽利略的得意门生数学家和水力学工程师B.卡斯特里指导下学习数学,毕业后成为他的秘书。1614年,托里拆利来到佛罗伦萨会见了伽利略,此时伽利略已双目失明,终日卧病在床,在他生命的最后三个月里,托里拆利和伽利略的学生维维安尼记录了伽利略的口述,成为伽利略最后一个学生。



图2-1 托里拆利

1641年托里拆利发表了第一篇论文《论自由坠落物体的运动》,发展了伽利略关于运动的思想。1644年,托里拆利和维维安尼将一端封闭的玻璃管内装满汞后

① 以超声速运动的激波称为冲击波,带有化学反应的冲击波称为爆轰波。

② 由于爆炸或大气压力、水压力的急剧变化所形成的压力脉冲及随之产生的介质运动。