

高等学校应用化学专业系列教材

化学工程基础

罗运柏 主编

Chemical Industry Press



化学工业出版社

高等学校应用化学专业系列教材

化学工程基础

罗运柏 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书主要阐述化学工程的基本原理,重点介绍了流体的流动与输送、传热过程、传质过程和反应工程基础。对于近年来研究进展迅速、应用领域广泛的膜分离技术和生化反应器,也分章加以论述。每章配有若干例题和习题,并附有参考答案。

本书为应用化学专业用系列教材之一,也可作为相近专业的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

化学工程基础/罗运柏主编. —北京:化学工业出版社, 2006.7
(高等学校应用化学专业系列教材)
ISBN 978-7-5025-8755-0

I. 化… II. 罗… III. 化学工程-高等学校-教材
IV. TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第087529号

责任编辑:宋林青 何曙霓
责任校对:蒋宇

封面设计:潘峰

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:大厂聚鑫印刷有限责任公司
装订:三河市万龙印装有限公司
787mm×1092mm 1/16 印张24 $\frac{3}{4}$ 字数660千字 2007年1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: 39.00 元

版权所有 违者必究

序

为了提高化学学科应用化学专业毕业生对从事化学、化工以及相关研究和工业领域工作的适应能力和创造能力，为了获取更好的教学效果和更高的教学质量，我们组织编写了应用化学专业系列教材，作为应用化学专业、与化学学科相关的各专业，以及化学专业本身的主要教学用书或教学参考书。

应用化学专业系列教材是在教育部高等学校化学及化工学科教学指导委员会化学专业教学指导分委员会的支持和指导下，在化学分委员会应用化学协作组的组织下，由全国七十多所高校的应用化学专业同仁主持、参与和帮助编写的。因此，系列教材具有知识点来源丰富、适用面广的特点，写作组连续十多年稳定的教学交流年会更有利于教材的推广和交流，有利于缩短教材的再版周期，体现出与现代科学和技术知识更新、拓展的同步节拍。

化学学科是一门传统的基础学科，是许多相邻学科、专业和新兴学科、专业，如材料、生物、电子、制药、纺织、能源、医学和组织工程等 的支撑或支持学科，应用化学系列教材将成为本专业知识拓展和相关专业知识引进的知识集成，成为新兴人才培养的知识源泉。化学学科对相关学科、专业的知识输出，显著地促进了这些学科、专业的发展。近年，迅速发展 的相关学科、专业的知识也开始对化学学科知识体系反馈，同样有效地促进了化学学科的发展，化学对生物输出产生了生物化学专业，而生物学对化学的反馈产生了化学生物学专业，这就是一对很好的例证。化学家编辑的适应多学科知识传授的应用化学系列教材，运用化学的基本原理深入探索相关学科、专业的规律和知识体系，能更好地体现出化学知识体系在有关学科、专业中基础和支撑、支持作用，有利于应用化学专业培养的人才在这些学科、专业中充分发挥其作用，有利于提高化学专业学生接受新学科领域知识的能力。

我们欢迎应用化学专业的同仁们选择本系列教材作为他们的教学用书，也欢迎化学专业、相关专业的教师们选择本系列教材作为他们的教学用书或教学参考书，并衷心希望得到他们的宝贵意见，以在再版时进行增补、修正。

感谢化学教学指导委员会领导、各学校应用化学专业同仁和化学工业出版社编辑们为本系列教材的出版做出的贡献。

俞庆森 唐小真
2005 年 4 月

前 言

根据高等学校化学教学指导委员会应用化学专业协作组第四次会议安排，本书由武汉大学组织相关院校编写，是高等学校应用化学专业系列教材之一。

应用化学的概念源于19世纪中叶，1919年国际纯粹与应用化学联合会（IUPAC）的成立确立了其基本含义。应用化学是根据化学的基本理论和方法对工业生产中与化学有关的问题进行应用基础理论和方法的研究以及实验开发研究的一门学科，其研究范围涵盖了整个化学领域，融化学理论和实践于一体，并与多门学科相互渗透，在推动科学技术的进步中显示出生机勃勃的活力。应用化学研究的方向按研究的对象来分可包括无机化学品化学、冶金化学、石油化学、煤化学、天然气化学、精细化学品化学、材料化学、应用有机化学、食品化学、能源化学、光源化学、海洋化学、环境化学、地球化学、生物化学、药物化学、助剂化学、放射化学、应用电化学、应用光化学、应用胶体及界面化学、应用动力学及热力学、萃取化学、分离过程化学、工业分析化学、农业化学等。因此，应用化学应当是理论化学与化学工程学之间的桥梁，是将化学理论变成大规模化工过程之间的过渡研究过程，是新型产品开发的基础，应用化学专业主要是培养应用型人才。目前，全国开办应用化学专业的各类高等学校已经超过了200所。

显然，化学工程基础是应用化学专业一门重要的专业基础课。本书根据“普通高等学校本科应用化学专业规范（草案）”编写，重点介绍了流体的流动与输送、传热过程、传质过程和反应工程基础。对近年来研究进展迅速、应用领域广泛的膜分离技术和生化反应器，也分章加以论述。

参加本书编写的有武汉大学罗运柏（第1章、第5章、第6章），于萍（第9章、第13章）；华东交通大学罗惠文（第2章、第3章）；湖南大学那艳清（第4章、第10章）；华中科技大学朱康玲（第7章、第8章）；兰州大学严世强（第11章、第12章）。全书最后由罗运柏整理定稿。

武汉大学马玉龙教授对本书的编写给予了极大的支持和关心，亲自参加了本书大纲的编写和讨论。化学工业出版社的编辑对本书的出版付出了辛勤劳动。在此一并致谢！

限于作者的水平和时间，书中难免有不足之处，恳请读者批评指正。

罗运柏
2006年5月于武昌珞珈山

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	化学工程学科的形成与发展	1
1.2	化学工程学科的研究特点、内容和对象	2
1.3	化学工程领域战略目标	3
1.4	物料衡算与能量衡算	4
1.5	单位制与单位换算	5
第 2 章	流体流动	7
2.1	流体静力学	7
2.2	流体在管内的流动	13
2.3	管路计算和流体流量测量	30
2.4	流体输送机械	38
	习题	47
第 3 章	沉降与过滤	53
3.1	概述	53
3.2	重力沉降	55
3.3	离心沉降	60
3.4	过滤	65
	习题	74
第 4 章	传热	75
4.1	概述	75
4.2	热传导	77
4.3	对流传热	84
4.4	传热计算	94
4.5	热交换器	103
	习题	109
第 5 章	传质基础	111
5.1	传质基础	111
5.2	传质过程机理	112
	习题	118
第 6 章	吸收	119
6.1	概述	119
6.2	气液相平衡关系	123
6.3	吸收速率方程	127
6.4	吸收塔的设计与计算	131
6.5	多组分吸收	141

习题	142
第 7 章 精馏	146
7.1 双组分溶液的汽液相平衡	146
7.2 精馏原理和精馏系统	149
7.3 双组分连续精馏过程	150
7.4 间歇精馏	166
7.5 恒沸精馏及萃取精馏	167
7.6 分子蒸馏	169
7.7 气液传质设备	172
习题	184
第 8 章 萃取	188
8.1 液液萃取过程	188
8.2 三元体系的液液相平衡	189
8.3 萃取过程计算	192
8.4 萃取设备	201
8.5 超临界流体萃取	204
习题	209
第 9 章 膜分离技术	212
9.1 膜材料与膜组件	214
9.2 微孔过滤与超滤	225
9.3 纳滤	229
9.4 反渗透	231
9.5 电渗析	239
9.6 渗透蒸发	245
9.7 气体分离	247
习题	252
第 10 章 干燥	253
10.1 干燥简介	253
10.2 湿空气的性质与湿度图	254
10.3 干燥过程中的平衡关系和速率关系	262
10.4 干燥过程计算	266
10.5 干燥设备的类别	273
习题	280
第 11 章 均相反应器	282
11.1 工业反应器的类型与操作方式	282
11.2 化学反应动力学基础	286
11.3 均相反应器	291
11.4 物料在反应器内的停留时间分布	314
习题	328
第 12 章 气-固相催化反应器	331
12.1 固体催化剂的特性	331
12.2 气-固相催化反应过程	332

12.3	外扩散过程	332
12.4	内扩散过程	337
12.5	固定床催化反应器	342
12.6	流化床催化反应器	345
	习题	346
第 13 章	生化反应器	348
13.1	概述	348
13.2	酶和微生物反应动力学	349
13.3	生化反应器	360
	习题	376
附录	377
参考文献	384

第 1 章 绪 论

1.1 化学工程学科的形成与发展

18 世纪, 在纺织、印染、制皂工业的推动下, 路布兰 (Leblanc) 纯碱制造工艺首先成为近代化学工业的里程碑, 由它带动了硫酸、盐酸、漂白粉等化工产品的生产。19 世纪中叶以后, 由于煤焦油的综合利用, 又出现了染料、医药、香料等有机化学工业。

19 世纪初, 英国的 G. E. 戴维斯出版了第一本化学工程专著《化学工程手册》, 首次将化工生产过程的各步骤加以分类, 系统阐述了物料输送、吸收与吸附、加热与冷却、蒸发与蒸馏、结晶与电解等, 从化工产品的生产工艺中归纳出共性规律。这样, 诞生了冶金、机械、土建和电气四个工程学科后的第五个工程学科——化学工程学科。

1888 年, 麻省理工学院 (MIT) 首先推出了化学工程课程体系并于 1920 年建立了化学工程系。1915 年, 利特尔 (A. D. Little) 明确提出“单元操作”这一基本概念, 将复杂的化工生产过程归纳为有限的单元操作, 如粉碎、过滤、萃取、精馏等。随后, 出现了一批论述单元操作的代表著作。如鲁宾逊 (C. S. Robinson) 的《精馏原理》(1922 年) 和《蒸发》(1926 年), 路易斯 (W. K. Lewis) 的《化工计算》(1926 年), 麦克亚当斯 (W. H. McAdams) 的《热量传递》(1923 年), 谢伍德 (T. K. Sherwood) 的《吸收和萃取》(1937 年) 等。特别是华尔克 (W. H. Walker)、路易斯和麦克亚当斯于 1923 年正式出版的《化学工程原理》一书, 首次提出了量纲分析、相似论等概念, 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, 奠定了化学工程作为一门独立学科的基础。1950 年, 布朗 (G. G. Brown) 等人的《单元操作》一书则展示了近 40 年来化学工程在这方面的发展历程。

20 世纪前叶, 一些重大的化学工艺开发使化学工程作为一个学科在工程界的学术地位飙升, 而工程学科的深入研究又促进了工艺的不断改进和不断进步。1913 年, 哈伯-博施法高压合成氨装置成功建成, 对高压化学工程、催化剂开发有着重要意义。1920 年, 从炼厂气中分离的丙烯合成出异丙醇, 被誉为石油化工的开端。1923 年, 费-托合成的成功是有机催化的典型范例。1926 年, 大型温克炉投产, 是流态化技术的最初应用。1925 年和 1928 年, 世界上第一个热塑性树脂与热固性树脂先后投产。1931 年, 前苏联的丁钠橡胶与美国杜邦的氯丁橡胶几乎同时投产。这些化学工艺的发现与发明, 从多个领域孕育着化学工程各二级学科的问世。

过去的 20 世纪是化学工程学科诞生与迅速发展并对人类文明进程产生重大影响的一百年。20 世纪 40 年代, 流态化技术应用于石油催化裂化过程使石油化学工业产生了划时代的变化; 溶剂萃取法用于核燃料后处理中分离铀及精密精馏用于重水的提取, 为核工业的发展奠定了基础; 深层培养法用于大规模生产青霉素标志着现代制药工业的产生。60 年代末, 化工系统优化的出现并与计算机控制技术相结合, 为超大型现代化工企业的发展奠定了基础。在 80 年代之后, 化学工程在理论上又有了一些新的突破, 如超临界技术、纳米技术以及化工过程综合化、集成化、大型化等; 计算机技术和分形学理论在化工理论研究和化工实践中也得到了应用。这些不仅充实、完善了化学工程学的理论体系, 而且进一步拓宽了化工

实践的视野和思路，为提高化工企业生产效益在理论和技术上提供了坚实的保障。

当今的化学工程学是支撑国民经济生产行业的重要理论支柱之一，也是当代四大工程技术科学（建筑工程、机械工程、电子工程和化学工程）之一，它的发展、完善、创新，极大地带动了国民经济的发展，推动了社会进步。

1.2 化学工程学科的研究特点、内容和对象

化学工程学科是在化学加工工业（CPI）的基础上发展起来的。它是以化学、物理、数学为基础，并结合其它技术以研究生产过程中共同规律的工程学科。化学工程的主要任务是：通过反应、原料的混合与分离、能量和质量的传递，最有效地实现化学加工工业的生产过程，获得品种繁多的产品，最优地利用资（能）源及保持良好的生态环境。

美国化学工程师学会在其《化学工程前沿》一书中对化学工程的定义如下：化学工程是深深地植根于原子、分子和分子转化的工程学科（Chemical engineering is an engineering discipline with deep roots in the world of atoms, molecules and molecular transformations）。这个定义更强调了基础学科如物理、化学、生物化学等在化学工程研究中的作用，淡化了具体的行业界限。

化学工程有七个分支：热力学与基础数据（相平衡、化学平衡、能量利用与转换规律）；单元操作（过程工业中共性物理过程及设备）；传递过程（动量、热量、质量传递规律及“三传”统一性）；分离工程（气液、液液、气固、液固、固固分离原理及装备）；反应工程（反应器内返混、相相传递、相内传递与化学反应的耦合等）；系统工程（从整体目标出发，对系统分析、分解、综合、优化）；控制工程（结合“动态”、“反馈”等特点，研究控制理论在化工中的应用）。

化学工程的研究对象则是在液滴-反应器的尺度范围内，其研究重点并不是化学现象本身，而主要是物理现象，或是在化学反应影响下的物理现象。此外，化学过程若要放大到生产规模时一般也离不开化学工程学。

对于不同时空尺度的化工过程内在联系的认识，是化学工程师将产品设计与过程、设备设计高效率地结合起来的一个重要基础。对不同尺度下过程的物理模型的建立、数学模型的抽提及在此基础上的设备设计、过程控制和优化，要求化学工程师具有更雄厚的物理学基础和力学知识，掌握现代数学工具，如计算流体力学等。

作为一门工程学科，化学工程学科的发展是与工业和社会经济发展密切相关的。经济发展的需求是学科发展的火车头，而基础科学则是化学工程基础研究和工业进步的知识源泉，化学工程作为物质和能源生产的基础工程技术的属性决定了它在未来社会中不可动摇的基础产业重要地位。然而，化学工程师的成功与否则取决于他对社会需求的敏感度，对网络时代经济全球化背景下的经济—产业—技术—社会的内在联系的认识及其创新能力，而创新能力是建立在其自然科学功底和对现代高新技术的把握之上的。

我国化学工程学科的建设应突出“生态化学工业”的发展方向，以资源—能源—环境综合开发为目标，将“产品工程”和“过程工程”相结合，将生物技术和信息技术与化学工程和工艺有机结合，形成以工业生物催化为核心的“生物化学工程”、以“过程和系统模拟优化”为基础的“数字化化学工程”及以“纳米加工技术及应用”为基础的“纳米化学工程”，紧密结合我国国民经济发展的需要，主动拓宽学科服务的行

业领域，在全球化竞争的背景下，建立中国强有力的化学工程知识创新及产业发展能力。

20 世纪的化学工程学科的发展过程表明，不断根据科学和工业的发展进一步完善和更新学科体系框架和内容是学科持续发展的保证和生命力所在。在迅速发展的 21 世纪，我们更应积极注重学科框架体系的更新和完善。

1.3 化学工程领域战略目标

进入 21 世纪，生命科学、信息技术、材料科学及环境科学迅速发展并由此产生以微软为代表的高新技术产业，化学工程为这些学科科技成果产业化提供了基础技术平台，高新技术产业的发展为化学工程科学工作者将高新技术引入化学工业提供了机遇，同时促使他们重新认识已经被认为是成熟学科的化学工程学科体系与内容。

现代化工最重要的特征之一是时空尺度的迅速扩展，从原子尺度下的原子、分子自组装过程，到考虑到全球环境变化的生态过程，其时空跨度达十余个数量级。科学研究实践表明，对化工过程更机理、更深层次的理解要求不断缩小研究空间尺度，从设备的宏观尺度到多相流液滴、气泡、颗粒（团簇）的介观尺度，再深入到胶束、纳米聚团、相界面的亚微观尺度和分子组装、超分子化学合成的分子尺度。在时间特性上，除了研究各类参数的时均值的分布规律，还要研究其在时域内的混沌行为。此外，为使不同的化工过程实现集成和优化，则需不断扩大研究的时空尺度。

当前的一些研究前沿主要集中在生物技术与生物医学工程相关的化学工程；信息材料与器件的化学工程；新型结构与功能材料的化学工程；资源与能源高效、清洁和集约化利用，即绿色化学技术的化学工程；环境保护、安全工程与危险化学品管理的化学工程；微尺度化学物理加工过程的科学问题；多相流传递过程；表面与界面工程；计算机辅助的过程工程、过程控制与复杂系统分析。

(1) 大力发展与绿色过程技术相关的化学工程研究

根据化学加工工业的发展需求，重点推动相关绿色单元技术开发与系统集成，力争达到国际先进水平，部分领域的研究要实现跨越式发展，自主地开创新领域，为建立示范性生态工业园区提供系统的、完整的科学技术支持。

(2) 积极发展利用劣质原料、替代原料和可再生原料的过程技术及相关的化学工程研究

重点开展劣质矿物资源、煤的转化、动植物资源和废弃物资源化方面的研究，力争在我国丰产、劣质资源利用的重大突破中，独立解决化学工程学问题。在能源领域，重点发展煤燃料电池、太阳能利用和生物质能等。

(3) 大力发展精细加工化学工程学研究

如信息材料与器件生产、低维材料（纳米材料、纤维材料与薄膜）、结构化材料与复合材料、保健与生物医学工程等高新技术，促进传统产业的升级换代，提高产品附加值。

此外，为了支撑相关过程工业跨越式的技术进步，提高原创力与国际竞争力，还必须为化学工程研究构筑强大的现代科学基础，主要领域包括：多相流传递与反应原理，表面和界面科学与工程，计算化学与计算化学工程，计算机辅助过程工程与控制原理，现代测试科学与技术等。

目前，化学工程技术面临的重大问题是如何开发节能工艺、设备和节能产品。人类社会文明的高速发展将伴随着巨大的能源消耗，能源短缺是 21 世纪社会经济发展的主要障碍，节能和寻找新能源已成为当务之急。

1.4 物料衡算与能量衡算

运用质量守恒定律,对生产过程或设备进行研究,计算输入或输出的物流量及组分等,称为物料衡算,物料衡算是化工计算的基础。

1.4.1 物料衡算

根据质量守恒定律,在一个化工过程中,进入的物料量必等于排出物料量和过程中的累积量,即:

$$\sum m_i - \sum m_o = m_A \quad (1-1)$$

式中, $\sum m_i$ 为进入物料量的总和; $\sum m_o$ 为排出物料量的总和; m_A 为积累的物料量。

由此可对这一过程中的总物料或其中某一组分列出方程求解,这种运算被称为物料衡算。没有化学变化时,混合物的任一组分都符合这个通式;有化学变化时,其中各元素仍然符合这个通式。如果过程中的累积量是零,它就是稳定操作。反之,就是不稳定操作。

进行物料衡算时,首先要确定衡算的范围(系统)、衡算对象及衡算基准,然后列出穿越系统边界的各股物料。间歇过程一般以批、次操作为基准;连续过程常以单位时间为基准,而单位时间流过的物料质量即为质量流量。所以,连续过程的物料衡算式可以表示为:

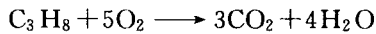
$$\sum \omega_i - \sum \omega_o = \frac{dm_A}{d\theta} \quad (1-2)$$

式中, ω_i 、 ω_o 为每股输入、输出物料的质量流量, kg/s; $\frac{dm_A}{d\theta}$ 为物料质量积累速率, kg/s。

连续稳定过程中,设备内不应有任何物料积累,即 $\frac{dm_A}{d\theta} = 0$, 故

$$\sum \omega_i = \sum \omega_o \quad (1-3)$$

【例 1-1】 丙烷充分燃烧时要使空气过量 25%, 燃烧反应方程式为:



试计算得到 100mol 燃烧产物(又称烟道气)需要加入空气的物质的量。

解 以 1mol 丙烷为计算基准,根据反应方程式,1mol 丙烷需要 5mol 的氧气与之反应,因氧气过量 25%,故需空气量为: $\frac{1.25 \times 5\text{mol}}{0.21} = 29.76\text{mol}$, 其中, O_2 为 6.25mol, N_2 为 23.51mol。烟道气中各组分的量为:

C_3H_8	0mol
CO_2	$3 \times 1\text{mol} = 3\text{mol}$
H_2O	$4 \times 1\text{mol} = 4\text{mol}$
N_2	23.51mol
O_2	$6.25 - 5 = 1.25\text{mol}$

从计算结果可以看出,当空气加入量为 29.76mol 时,可产生烟道气 31.76mol。

要产生 100mol 烟道气,需要加入的空气量为: $\frac{100\text{mol} \times 29.76\text{mol}}{31.76\text{mol}} = 93.7\text{mol}$ 。

1.4.2 能量衡算

根据能量守恒定律,对于连续稳定过程而言,任何时间内通过各种途径进入系统的总能量必等于同一时间内系统放出的总能量。

各种形式的能量（机械能、化学能、电能等）与热之间可以互相转变，但在许多化工设备（如换热器、蒸馏塔等）中，往往没有或者不需要考虑这种能量转变，因而化工系统中的能量衡算常常简化为热量衡算。

进行热量衡算的基本方法与物料衡算的方法相同，也必须首先确定衡算范围与衡算基准，但应该注意两个问题。

- 进、出系统的各股物料所携带的热量包括物料的显热与潜热，即物料的焓。而物料的焓值与其状态有关，而且是相对值。所以，进行热量衡算时，必须首先确定基准温度；如果有相变发生时，还需规定基准状态。通常，以 0℃、液态为基准，并规定 0℃ 时液态的焓为零。有关手册中饱和水蒸气性质表中所列水蒸气的焓值，就是以 0℃ 和液态为基准的。

- 进、出系统的热量不仅包括进出物料携带的热量，而且包括通过设备、管道的壁面由外界传入或由系统传出的热量。

因此，连续稳定过程的热量衡算的基本关系式可表示为：

$$\sum Q_i = \sum Q_o + Q_L \quad (1-4)$$

式中， $\sum Q_i$ 为进入系统各股物料所携带的热流量，kJ 或 kW； $\sum Q_o$ 为离开系统各股物料所携带的热流量，kJ 或 kW； Q_L 为系统向环境散失的热流量，即“热损失”，kJ 或 kW。

而 $Q_i = \sum(\omega H)_i$ ；和 $Q_o = \sum(\omega H)_o$ ，所以式(1-4) 还可表示为：

$$\sum(\omega H)_i = \sum(\omega H)_o + Q_L \quad (1-5)$$

式中， ω 为物料的质量，kg 或 kg/s； H 为物料的焓，kJ/kg。

1.5 单位制与单位换算

1.5.1 单位与单位制

任何物理量的大小都是用数字与单位的乘积表示的，运算中通常任意选定几个独立的物理量（如长度、时间等），称为基本量，根据使用方便的原则定出这些量的单位，称为基本单位。然后，其它诸量（如速度等）的单位便可根据它们与基本量之间的关系确定，这些物理量称为导出量，其单位称为导出单位。所有导出单位都是由基本单位相互乘、除而构成的。

基本单位与导出单位的总和称为单位制。

长期以来，整个科技领域存在多种单位制并用的局面，同一个物理量在不同的单位制中具有不同的单位与数值，如 CGS 制（物理单位制）和 MKS 制等。

1960 年，第 11 届国际计量大会通过了一种新的单位值，称为国际单位制（SI）。SI 单位制规定了 7 个基本单位：长度单位 m（米）、时间 s（秒）、质量单位 kg（千克）、热力学单位 K（开尔文）、电流单位 A（安培）、光强度单位 cd（坎德拉）和物质的量单位 mol（摩尔）。采用国际单位制后，每种物理量只有一个单位，所有物理量的单位都可以由这 7 个基本单位导出。而且，任何一个 SI 导出单位在由这 7 个基本单位相乘或相除导出时，都不需要引入比例系数。中国 1984 年公布了《中华人民共和国法定计量单位》，从 1991 年 1 月起，除个别领域外，不允许再使用非法定计量单位。

1.5.2 单位换算

各种单位制度目前尚未完全统一，不少文献资料中的数据仍是多种单位制并存，使用时需要进行单位换算。

(1) 物理量的单位换算

物理量单位换算时，是物理量由一种单位换算成另一种单位，量本身无变化，但数值要改变。一般是先查出原单位与要换算单位之间的关系，再采用单位之间的换算因素与各基本单位相乘或相除。

(2) 经验公式的单位变换

工程中经常会需要使用一些根据实验数据整理而成的经验公式，而这些经验公式中的各符号都要采用指定的单位。因此，在使用这些经验公式时，已知数据与公式所指定的单位不同时，就需要将整个经验公式加以变换，使经验公式中的各符号都采用计算者所希望的单位。

第 2 章 流体流动

流体是气体和液体的总称。化工生产中所涉及的物料大多是流体，因为反应物料在流动状态下易于混合和输送。用于同反应物进行传热、传质的介质等同样也是流体。因此，研究流体流动的规律是本课程的重要基础。

化工过程中所涉及的流体概念是由无数流体质点所组成的连续介质，但不包括高真空下的气体。流体质点比分子尺度要大得多。这样在研究流体运动规律时，可以摆脱分子间的相互作用和复杂的分子运动，只从宏观角度考虑流体在设备中的整体机械运动规律，主要有以下几个方面。

① 流量计量和流动阻力 利用流体力学的基本原理来计量化工管道中流动状态下的流体，研究流体在流动中的能量转换和过程中阻力的产生，用以设计管路和选择输送机械及其所需的功率。

② 流动状况对化工过程的影响 化工设备中的传热、传质和化学反应等化工过程都是在流动状态下进行的。而流动状态则控制着设备中不同物料的混合，温度、浓度的分布，流速的分布，从而影响化工过程的速率。

2.1 流体静力学

流体静力学研究流体在外力作用下处于静止或相对静止的规律，其基本原理广泛应用于工程实践。

2.1.1 流体的密度

单位体积流体的质量，称为流体的密度。在传递过程中也称为质量浓度。其表达式为

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2-1)$$

式中， ρ 为流体的密度， kg/m^3 ； m 为流体的质量， kg ； V 为流体的体积， m^3 。

液体的密度随温度的不同只稍有变化，随压力的不同变化更小（极高压力下例外），故可认为液体为不可压缩流体。工程计算中，液体密度可视为常数。气体密度随压力和温度的不同变化较大。当压力不太高、温度不太低时，可按理想气体状态方程换算。由

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT \quad (2-2)$$

得
$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (2-3)$$

式中， p 为气体的压力， kPa ； M 为气体的摩尔质量， kg/kmol ； T 为热力学温度， K ； R 为摩尔气体常数， $8.314\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

在化工计算中，常用到相对密度。相对密度为物质密度与 4°C 时纯水的密度之比，无量纲。

密度的倒数称为比体积，又称比容。即单位质量流体的体积，用符号 v 表示，单位为 m^3/kg 。

化工过程中所处理的流体物料往往是混合物。液体混合时，若忽略偏摩尔体积的影响，可近似按下式计算液体混合物的平均密度 ρ_m 。

$$\frac{1}{\rho_m} = \sum_{i=1}^n \frac{w_i}{\rho_i} \quad (2-4)$$

式中， w_i 为液体混合物中 i 组分的质量分数； ρ_i 为液体混合物中 i 组分的密度。气体混合物的平均密度用下式计算：

$$\rho_m = \sum_{i=1}^n \rho_i \varphi_i \quad (2-5)$$

式中， φ_i 为气体混合物中 i 组分的体积分数。

【例 2-1】 合成氨原料气体中的 H_2 和 N_2 的体积比为 3 : 1，试求氨氮混合气体在标准状态时的密度。

解 取标准状态时的 $p = 101\text{kPa}$, $T = (273 + 20)\text{K} = 293\text{K}$

氢气、氮气的摩尔质量 $M_{\text{H}_2} = 2.016\text{kg/kmol}$, $M_{\text{N}_2} = 28.02\text{kg/kmol}$ 。

氢气、氮气的摩尔分数 $x_{\text{H}_2} = 0.75$, $x_{\text{N}_2} = 0.25$ 。

混合气的平均摩尔质量为：

$$M_m = 28.02 \times 0.25 + 2.016 \times 0.75 = 8.52\text{kg/kmol}$$

根据式(2-3)，氨氮混合气体的密度为：

$$\rho = \frac{pM_m}{RT} = \frac{101 \times 8.52}{8.314 \times 293} = 0.353\text{kg/m}^3$$

2.1.2 流体的压力

流体垂直作用于单位面积上的力称为流体的压强，习惯上称为压力。

按压力的定义，其单位为 N/m^2 或 $\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s}^2)$ ，即帕斯卡，以 Pa 表示。其它单位制中，压力的单位还有如绝对大气压 (atm)、毫米汞柱 (mmHg)、米水柱 (mH_2O)、工程大气压 (kgf/cm^2)、巴 (bar) 等。它们之间的换算关系如下：

$$1\text{atm} = 760\text{mmHg} = 10.33\text{mH}_2\text{O} = 1.0133\text{bar} = 1.033\text{kgf}/\text{cm}^2 = 1.0133 \times 10^5\text{Pa}$$

为计算方便，工程上将 1atm 近似地等于 $1\text{kgf}/\text{cm}^2$ ，称为工程大气压。

$$1\text{工程大气压} = 1\text{kgf}/\text{cm}^2 = 100\text{kPa} = 10\text{mH}_2\text{O} = 9.807 \times 10^4\text{N/m}^2 = 735.6\text{mmHg}$$

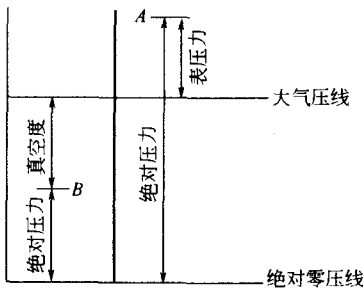
工程中测压仪表的压力是指在当时当地大气压基础上的读数，称表压力。其真实压力，即绝对压力还应加上大气压力，即

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

当使用真空表时，读数为真空度，其表压应为负值。

【例 2-2】 测得一台正在工作的离心泵进、出口压力表的读数分别为 35kPa (真空度) 和 145kPa (表压)。如果当时当地的大气压为 1 工程大气压，试求泵的进、出口的绝对压力各为多少 kPa？并在一绝对压、表压和真空度关系图上表示之。

解 1 工程大气压 = 100kPa



例 2-2 附图 绝对压力、表压力
与真空度的关系

泵进口绝对压力

$$p_1 = 100 - 35 = 65 \text{ kPa}$$

泵出口绝对压力

$$p_2 = 100 + 145 = 245 \text{ kPa}$$

2.1.3 流体静力学基本方程式

流体静力学方程式是描述处于静止状态的流体所受的压力和重力的平衡规律。

从静止液体中任意画出一底面积为 A 的垂直液柱，如图 2-1 所示，在液柱上距底面高度为 z 处取一微元高度 dz 薄层流体，其上、下底垂直坐标分别为 z 和 $z+dz$ ，且作用于上、下底的压力分别为 p 和 $p+dp$ 。流体密度为 ρ ，薄层流体在垂直方向上所受到的作用力有：

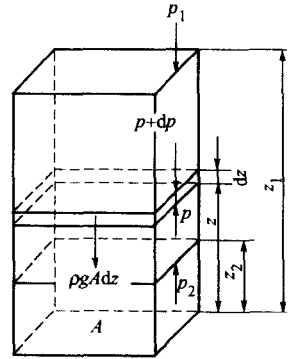


图 2-1 流体静力平衡

- ① 向上的总压力 pA
- ② 向下的总压力 $-(p+dp)A$
- ③ 向下的重力 $-\rho gAdz$

当流体处于静止状态时，该三力之和应为零，即

$$pA - (p+dp)A - \rho gAdz = 0$$

化简得

$$dp + \rho g dz = 0$$

当 ρ 为常数，积分上式得

$$\frac{p}{\rho} + gz = \text{常数} \quad (2-6)$$

若取 z_1 、 z_2 为积分上下限，则得

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho} = gz_1 - gz_2 \quad (2-7)$$

或

$$p_2 = p_1 + \rho g(z_1 - z_2) \quad (2-8)$$

当 $z_1 - z_2 = h$ (h 为任取流体柱高) 时，则式(2-8) 为

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho g} = h \quad (2-9)$$

如果高度为 z_1 的面为界面，其上方的压力为 p_0 ，则式(2-9) 为

$$p_2 = p_0 + \rho gh \quad (2-10)$$

以上表示式均为流体静力学基本方程式，现做如下讨论：

- ① 式(2-6) 表明，在连续均一的流体内，各点的机械能总和相等（这一点以后讨论）；
- ② 静压力仅与垂直位置有关，而与同一水平面上的不同位置无关；
- ③ 压力 p 与流体密度 ρ 有关；

④ 式(2-10) 表明，液面上所受到的压力 p_0 ，能以同样大小传递至流体内部各点，这就是帕斯卡定律。

2.1.4 流体静力学方程式的应用

(1) 压力的测量

测量流体压力的仪表很多，有弹簧管压力计，U 形管压差计，还有利用以上原理又转