

高 等 教 育 规 划 教 材

化工原理

第二版

祁存谦 丁楠 吕树申 编

HUAGONG YUANLI



化学工业出版社

高等教育规划教材

化工原理

(第二版)

祁存谦 丁楠 吕树申 编



化学工业出版社

·北京·

本书在第一版基础上修订而成,覆盖化工单元操作的主要内容,包括流体流动及输送、非均相分离、传热、蒸发、精馏、吸收、萃取、干燥、流态化与气力输送。对第一版中原理公式的数学推导做了删减,对概念定义及工业应用等做了相当篇幅的文字补充,使之更方便教学;增加了干燥章节习题内容。书中引入多种新的工艺计算及新的化工设备介绍,并列有主要章节的复习线索、例题及习题。书中内容精练,重点突出。第二版仍然采用文字教材与光盘配套发行的模式。以《虚拟化工原理课堂》命名的配套光盘与教材在内容上互补。所配光盘不仅具有趣味性,而且是课下复习的好助手。

本书可作为大学本科、大专 60~100 学时化工原理课程教材,尤其适用于化工、应用化学、制药、材料、生物工程、食品工程、环境工程、造纸、冶金等专业。也可供自考学生、高职学生等选用。

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理/祁存谦,丁楠,吕树申编.—2 版.—北京:
化学工业出版社,2009.3
高等教育规划教材
ISBN 978-7-122-04407-5

I. 化… II. ①祁…②丁…③吕… III. 化工原理-高等
学校-教材 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 201552 号

责任编辑:何 丽
责任校对:蒋 宇

文字编辑:丁建华
装帧设计:关 飞

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 装:化学工业出版社印刷厂
787mm×1092mm 1/16 印张 14 $\frac{1}{2}$ 字数 367 千字 2009 年 3 月北京第 2 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:29.8 元

版权所有 违者必究

第二版前言

本书出版两年多，就得到广大教师和读者的认同。特别是配套的《虚拟化工原理课堂》光盘，更受到读者的欢迎。但作为教材，在使用过程中，也发现若干不足之处。比如第一版原理公式的数学推导较多，但说明文字过于简洁，有些符号的意义讲得不透。此次对公式内容的来龙去脉、符号意义、工业应用做了相当篇幅的文字补充，使之更方便教学。对化工设备工作原理的叙述，做了重新改写。还增加了干燥习题课的内容。

2007年12月，我们在广州组织了一个“化工原理教材编审会”，邀请有关院校的老师参加。他们在肯定本书的同时，也提出了许多宝贵意见，并在第二版中得到体现。参加此次会议并提出意见的有：内蒙古农业大学、佳木斯大学、海南师范大学、湖北中医学院、福州大学、福建师范大学、上海工程技术大学、南昌大学、广东教育学院、佛山科技学院等大学的化工原理同行。银川大学、湛江师范学院的老师提出了书面意见。在此向他们表示感谢！

第二版仍然采用文字教材与光盘配套发行的模式。以《虚拟化工原理课堂》命名的配套光盘，与教材在内容上互补。凡选用本书为教材的学校，可向本书作者和化工出版社索取以下三种配套软件（作者及时更新）：化工原理习题解答、化工设备动画库（赠送版）、化工原理授课课件。

本书可作为大学、大专（60~100学时）化工原理课程教材，适用于化工、应用化学、制药、材料、生物、食品、环境、造纸、冶金等相关专业。也可供自考生、高职学生参考。

此次由三位作者分头修订，青年教师崔国峰参加了部分工作，祁存谦最终统稿。编者力求修订完美，但仍难免有不妥之处，望读者继续提出意见。

编者

2008年10月于广州中山大学

第一版前言

化工原理，有时也称为化工单元操作，它是化学工程与工艺及其相关专业的主干课程。通俗地说，化工原理是化工专业及相关专业学生的“看家课程”。无论是化工研究院、化工设计院，还是化工以及轻纺、食品、冶金等企业的工作，都离不开化工原理的基础知识。

时代在前进，知识在更新。生产实践要求化工原理课程内容要不断地更新。本书新增了一些工艺计算和老工艺的新算法，引入了若干新型化工设备及原理，也有若干更贴近生产实际的化工例题。

一个没有走进过化工企业的青年学生，初学化工原理有一种摸不着门路的感觉。针对这种情况，本书从生活事例入手，逐步展开科学原理的讲解。由打气筒充气、洒水车引出流体能量衡算方程；由坐在不同材质（木质或石质）凳子上的感受，引出热传导方程；由餐馆传出的诱人香味，引出扩散及传质概念等。趣味性是本书的亮点。

本书采用文字教材与光盘配套发行的模式，以《虚拟化工原理课堂》命名的配套光盘与教材在内容上互补。文字教材以教学大纲为本，满足教学基本要求。光盘则引入工艺原理的图形动画，化工设备原理动画，一些工厂设备的实物图片，部分扩充知识的工艺计算，例题计算等，还有教师对化工原理重点内容的讲解。光盘与教材的互补性，减少了教材字数，同时降低了教材的成本，这是本书的特点。

本书是中山大学多年教学实践的总结。绪论、流体流动、流体输送、非均相分离、流态化与气力输送由祁存谦编写；精馏、吸收、萃取由丁楠编写；传热、蒸发、干燥、附录由吕树申编写和整理；最后由祁存谦统编定稿。光盘的总体设计、资料收集、网页制作，由祁存谦主编完成。感谢众多的光盘制作人员的辛勤劳动。本书承蒙华南理工大学钟理教授主审，一并致谢。

本书可作为本科、大专 60~100 学时化工原理课程的教材，适用于化工、应用化学、制药、材料、生物工程、食品工程、环境工程、造纸、冶金等相关专业。对于学习化工原理课程的自考生、高职学生等也是一本有价值的参考书。

本书编写参考了国内出版的多个版本的《化工原理》教材，在此对作者表示感谢和敬意。由于作者水平有限，新增内容又比较多，一定有许多不足和有争议的地方，恳请同行批评指正。

编者

2005 年 10 月于广州中山大学

目 录

绪论	1	习题	38
0.1 化工原理在化学化工领域的地位	1	第2章 流体输送	41
0.2 化学工程发展四阶段	1	2.1 离心泵及其计算	41
0.3 相关教材的发展	2	2.1.1 离心泵构造及原理	41
0.4 单位制换算	3	2.1.2 离心泵参数与特性曲线	42
0.5 衡算方程和过程速率	3	2.1.3 离心泵选择与示例	44
第1章 流体流动	5	2.1.4 离心泵的安装高度及计算举例	45
1.1 流体流动现象	5	2.1.5 离心泵的工作点及调节举例	47
1.1.1 流体流动问题的引出	5	2.1.6 离心泵的并联与串联	49
1.1.2 流体的几个重要性质参数	5	2.2 流体输送设备和流体流动习题课	49
1.1.3 牛顿黏性定律	6	2.2.1 流体输送设备的种类及原理	49
1.1.4 流体流动类型	8	2.2.2 流体流动习题课	53
1.1.5 层流速度分布式的推导	9	习题	56
1.1.6 层流平均流速与最大流速	10	第3章 非均相分离	58
1.2 流体质量衡算——连续性方程	11	3.1 重力沉降	59
1.3 流体能量衡算——伯努利方程	11	3.1.1 重力沉降速度及计算举例	59
1.3.1 伯努利方程的导出	11	3.1.2 降尘室计算	61
1.3.2 流体静力学方程应用举例	13	3.2 离心沉降	63
1.3.3 真空规测压原理推导	14	3.2.1 离心沉降速度和分离因数	63
1.3.4 伯努利方程应用举例	15	3.2.2 旋风分离器及计算举例	64
1.3.5 伯努利方程在工厂中应用实例	16	3.3 过滤	65
1.4 流体流动阻力计算	20	3.3.1 过滤操作与过滤基本方程式	65
1.4.1 圆形直管阻力公式	20	3.3.2 恒压过滤方程及计算举例	67
1.4.2 层流时摩擦因数的计算	21	3.4 沉降过滤设备	69
1.4.3 乌氏黏度计的原理	22	习题	72
1.4.4 量纲分析法	23	第4章 传热	73
1.4.5 湍流时摩擦因数的计算	23	4.1 换热器类型及传热平衡方程	73
1.4.6 局部阻力的计算	25	4.1.1 换热器类型	73
1.4.7 流体阻力计算举例	25	4.1.2 传热平衡方程	73
1.5 管路计算	27	4.2 热传导	74
1.5.1 简单管路计算	27	4.2.1 傅里叶定律	74
1.5.2 适宜管径选择	28	4.2.2 平壁稳定热传导与热导率的测定	75
1.5.3 并联管路计算	28	4.2.3 圆筒壁稳定热传导计算	76
1.5.4 分支管路计算	29	4.3 对流传热	78
1.5.5 供水计算举例	30	4.3.1 牛顿冷却定律	78
1.6 流量测量	33	4.3.2 对流传热系数计算	79
1.6.1 孔板流量计原理及示例	33	4.4 综合传热计算	81
1.6.2 转子流量计原理及示例	35	4.4.1 导热与对流联合传热公式推导	81
1.6.3 测速管原理及示例	37		

4.4.2	导热与对流联合传热计算举例	84	6.5.4	提馏段操作线方程	119
4.4.3	强化传热的途径	85	6.5.5	进料状况参数及计算	120
4.4.4	热管设计原理与计算	86	6.5.6	进料线方程	121
4.4.5	绝热保温技术	88	6.5.7	进料方式对进料线方程的影响	122
4.5	辐射传热	88	6.5.8	精馏计算举例	122
4.5.1	辐射传热概述	88	6.5.9	理论塔板数的求法	123
4.5.2	辐射传热计算举例	89	6.6	回流比与吉利兰图	123
4.5.3	对流与辐射联合传热计算	90	6.6.1	回流比的影响因素	123
4.6	传热设备与习题课	92	6.6.2	全回流与最小回流比	124
4.6.1	传热设备的种类与原理	92	6.6.3	芬斯克公式推导	124
4.6.2	传热习题课	94	6.6.4	吉利兰图法求理论板数	125
习题		97	6.7	实际板数与板效率	126
第5章 蒸发		99	6.7.1	塔效率	126
5.1	单效蒸发	99	6.7.2	莫弗里板效率	127
5.1.1	单效蒸发衡算方程	99	6.8	精馏设备及习题课	128
5.1.2	蒸发器传热面积	101	6.8.1	精馏设备	128
5.1.3	蒸汽压下降引起沸点升高	101	6.8.2	精馏习题课	128
5.1.4	溶液静压力引起沸点升高	103	习题		133
5.2	多效蒸发	103	第7章 吸收		135
5.2.1	多效蒸发概述	103	7.1	吸收过程概述	135
5.2.2	多效蒸发流程	104	7.1.1	吸收定义与工业背景	135
5.3	蒸发设备	105	7.1.2	吸收的用途与分类	135
习题		106	7.2	吸收相平衡关系	136
第6章 精馏		108	7.2.1	气体的溶解度曲线	136
6.1	传质过程概述	108	7.2.2	亨利定律	137
6.1.1	传质过程的引出	108	7.2.3	亨利系数之间的关系	138
6.1.2	传质过程举例	108	7.3	传质系数与速率方程	139
6.2	理想溶液的汽-液平衡	110	7.3.1	分子扩散与费克定律	139
6.2.1	相平衡的引出	110	7.3.2	单相传质的层流“膜模型”	140
6.2.2	理想溶液及拉乌尔定律	110	7.3.3	两相间传质的“双膜模型”	141
6.2.3	t - x - y 图与 x - y 图	110	7.3.4	传质速率方程与传质系数之间的 换算	142
6.2.4	汽-液平衡解析表达式及计算 举例	111	7.4	吸收填料层高度计算	144
6.3	简单蒸馏及其计算	113	7.4.1	吸收塔物料衡算	144
6.3.1	简单蒸馏的装置及原理	113	7.4.2	最小液气比	145
6.3.2	简单蒸馏计算公式及举例	113	7.4.3	物料衡算计算举例	145
6.4	精馏原理	114	7.4.4	填料层高度基本计算式	145
6.4.1	多次简单精馏	114	7.4.5	传质单元高度与传质单元数	146
6.4.2	有回流的多次简单蒸馏	115	7.4.6	平均推动力法计算传质单元数	147
6.4.3	提馏塔与中间进料现代化精 馏塔	116	7.4.7	吸收因数法计算传质单元数	148
6.5	双组分连续精馏塔的计算	117	7.4.8	吸收塔设计计算举例	149
6.5.1	理论板与恒摩尔流假设	117	7.4.9	平衡线为曲线时填料层高度 计算	150
6.5.2	全塔物料衡算方程	118	7.4.10	曲线拟合法计算举例	152
6.5.3	精馏段操作线方程	118	7.5	吸收与解吸概要	152

7.5.1 吸收塔操作计算举例	152	9.3.1 干燥器物料衡算及计算举例	187
7.5.2 吸收与解吸的比较	153	9.3.2 干燥器热量衡算及计算举例	189
7.5.3 解吸操作线与最小气液比	153	9.3.3 干燥器的热效率与干燥效率	192
7.5.4 解吸塔填料层高度计算	155	9.4 干燥速率与干燥时间	193
7.6 吸收设备和习题课	155	9.4.1 物料所含湿分的性质	193
7.6.1 吸收设备	155	9.4.2 干燥速率与速率曲线	194
7.6.2 吸收习题课	156	9.4.3 恒速干燥速率计算	194
7.7 其他分离方法介绍	160	9.4.4 干燥时间及计算举例	196
7.7.1 吸附分离及计算简介	160	9.5 干燥器和习题课	197
7.7.2 膜分离应用简介	163	9.5.1 干燥器种类及原理	197
习题	164	9.5.2 干燥习题课	202
第8章 萃取	166	习题	205
8.1 萃取概念的引出	166	第10章 流态化与气力输送	207
8.2 萃取溶解度曲线	167	10.1 固体流态化	207
8.2.1 三角形相图表示法	167	10.1.1 流态化现象	207
8.2.2 直角坐标表示法	167	10.1.2 压降与流速的关系	207
8.3 错流萃取与逆流萃取计算	168	10.1.3 起始流化速度	208
8.3.1 错流萃取公式推导	168	10.1.4 流化床的带出速度	209
8.3.2 错流萃取举例	170	10.2 气力输送概述	210
8.3.3 逆流萃取公式推导	171	习题	210
8.3.4 萃取最小溶剂用量	171	附录	211
8.3.5 图解法确定逆流萃取理论级数	172	附录1 常用单位换算	211
8.3.6 解析法确定逆流萃取理论级数	172	附录2 水的物理性质	212
8.3.7 逆流萃取计算举例	173	附录3 饱和水蒸气的物理性质 (按温度排列)	213
8.4 萃取设备	174	附录4 饱和水蒸气的物理性质 (按压力排列)	214
习题	175	附录5 干空气的物理性质 ($p=1.01325\times 10^5\text{ Pa}$)	216
第9章 干燥	176	附录6 IS型单级单吸离心泵规格 (摘录)	217
9.1 干燥过程概述	176	附录7 金属材料的某些性能	219
9.2 湿空气性质与湿度图	176	附录8 某些液体的物理性质	221
9.2.1 湿空气的基本概念	176	附录9 某些气体的物理性质	223
9.2.2 湿空气性质	177	参考文献	224
9.2.3 湿空气 $T-H$ 图绘制	184		
9.2.4 $T-H$ 图的绝热冷却线	184		
9.2.5 $T-H$ 图应用举例	186		
9.2.6 三种类型湿度图比较	187		
9.3 物料衡算与热量衡算	187		

绪 论

0.1 化工原理在化学化工领域的地位

在此之前，同学们学习过了无机化学、分析化学、有机化学、物理化学等“四大化学”，“化工原理”是一门什么样的课程呢？它与“四大化学”有什么区别和联系呢？“四大化学”是化学化工类学生的基础理论课程，侧重化学理论和化学实验，它是培养化学家的。而“化工原理”是由化学理论到化学工业过渡的专业基础课程，是由化学实验过渡到化工生产的有关工程基础理论，是从事化工生产必需的工程知识。化工原理与化工传递过程、化学反应工程、分离工程、化工热力学、系统工程等，统称为化工专业基础课。图 0-1 给出了化工原理在化学化工领域的地位。

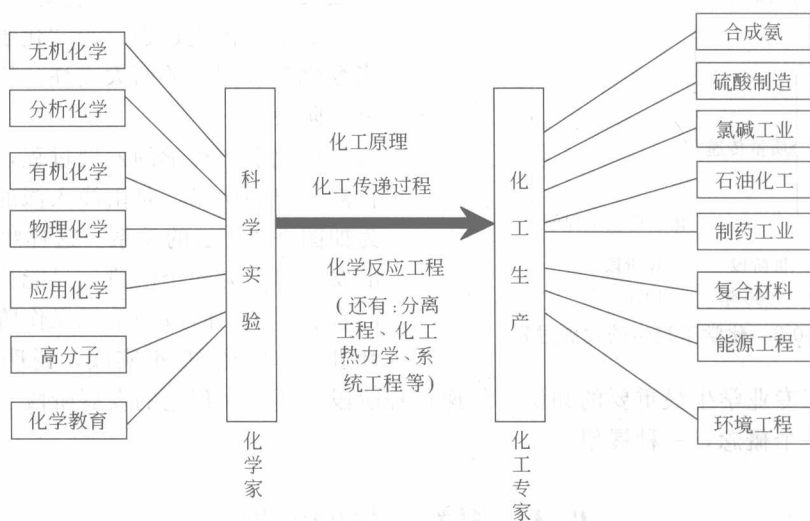


图 0-1 化工原理在化学化工领域的地位

0.2 化学工程发展四阶段

化工原理课程，不是教学生如何合成得到新物质、如何提取新物质、如何表征新物质，这是化学家的工作。化学工程研究的是，如何把化学家们的小试研究成果，开发放大为中试，再开发为生产规模。是在科学实验与化工生产之间架桥的工作。目前学术界比较公认的讲法是，化学工程的发展经历了四个阶段，即化学工艺学阶段、化工单元操作阶段、传递过程阶段和“三传一反”阶段。“三传一反”即动量传递、热量传递、质量传递和化学反应工程。化工原理讲的就是化工单元操作。

(1) 化学工艺学阶段 在 20 世纪以前的几百年时间里，出现了不少化学工业，如制糖

工业、制碱工业、造纸工业等。介绍每种工业从原料到成品的生产过程，作为一种特殊的知识讲解，这是最早的化学工艺。

(2) 化工单元操作阶段 到 20 世纪初，人们逐渐发现，许多化学工业中，存在共性的操作原理。例如，无论在制糖业还是制碱业，从溶液蒸发得到固体糖或固体碱所遵循的原理是相同的，于是，蒸发成为最早提出的单元操作之一。经不断总结，被称为单元操作的有流体流动与输送、沉降与过滤、固体流态化、传热、蒸发、蒸馏、吸收、吸附、萃取、干燥、结晶、膜分离等。

(3) 传递过程阶段 到 20 世纪 50 年代，人们又发现，各单元操作之间还存在着共性。例如，传热、蒸发都有热量传递的共性，蒸馏、吸附、吸收、萃取都存在质量传递的共性。

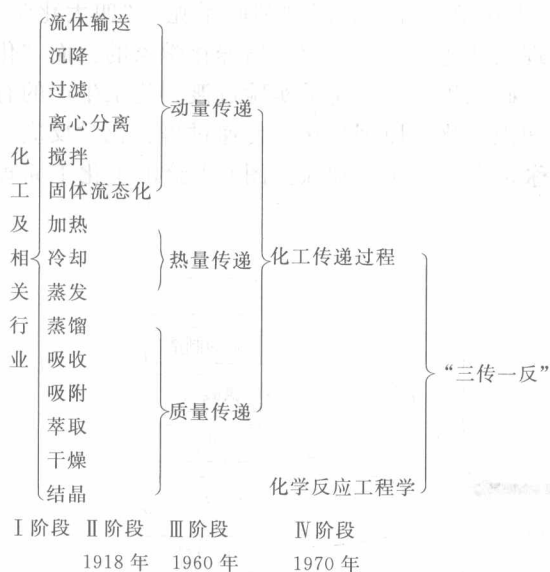


图 0-2 化学工程学的发展过程

于是将单元操作归纳为动量传递、热量传递、质量传递。此即化工传递过程阶段。

(4) “三传一反”阶段 20 世纪 50 年代中期，化学工程中出现了“化学反应工程学”这一新的分支。对化学反应器的研究，不仅要运用化学动力学与热力学原理，而且要运用动量传递、热量传递、质量传递原理。于是“传递过程”与“化学反应”成为当今化学工程学的两大支柱。简称“三传一反”阶段。

从化学工程学的发展过程，证明人们对自然规律的认识，是由浅入深的过程。归纳为如图 0-2 所示的关系。这样将化学工程学的发展归结为四个阶段，只能代表作者个人的看法。第二阶段的单元操作阶段，是实质性进步。历经 80 年实践，说明化工单元操

作仍然是化工专业学生最重要的知识。传递过程阶段，还处在理论的发展阶段。“三传一反”阶段，只是一个概念，一种展望。

0.3 相关教材的发展

在学习化工原理之前，应该掌握一些什么知识呢？也就是说，它的前期课程有哪些？如何定义化工原理课程，用一句话概括，就是利用数学手段，研究化学领域中的物理现象。它涉及数、理、化三大学科。但主要是研究物理定律，属于物理类课程。所以学好这门课程，首先要学好高等数学、普通物理，然后还要学好物理化学。

化学工程学类的教材，也有一个逐渐成熟的过程。20 世纪 20 年代初，出现了第一本《化工原理》教科书。我国于 20 世纪 20 年代在某些大学亦成立了化学工程系，讲授化工原理课程。1960 年第一本《动量、热量和质量传递》问世（C. O. Bennett, J. E. Myers, Momentum, Heat and Mass Transfer, 1960），开始了化工传递过程阶段。

我国 20 世纪 50 年代自编的《化工原理》及相关课程教科书有：

苏元复，《化工原理》，1952 年；

丁绪淮、张洪源、顾毓珍、张震旦，《化工操作原理及设备》上、下册，1956 年；

张洪源、丁绪淮、顾毓珍,《化工过程及设备》上、下册,1956年。

20世纪80年代后,工科和理科相关化工教科书有:

上海化工学院、天津大学等,《化学工程》(一)、(二),1980年;

天津大学,《化工原理》上、下册,1983年;

谭天恩、麦本熙、丁惠华,《化工原理》上册,1982年;下册,1986年;

陈敏恒、丛德滋、方图南,《化工原理》上、下册,1985年;

王志魁,《化工原理》,1985年;

王绍亭,《化工传递过程》,1980年;

清华大学、天津大学,《化工系统工程》,1981年;

北京大学,《化学工程基础》,1979年;

上海师范学院、福建师范大学,《化工基础》,1980年。

.....

0.4 单位制换算

教材中的物理量符号和计量单位,历来给学生学习带来一些不便。20世纪50年代,多使用绝对单位制和工程单位制,70年代开始采用国际单位制,即SI单位制。经过30多年的努力实践,国际单位制已经成为人们的共识。国外多采用英制单位,可以通过书末的换算表得到解决。

(1) CGS制(物理单位制) cm-g-s,厘米-克-秒制。

(2) MKS制(绝对单位制) m-kg-s,米-千克-秒制。

(3) 工程单位制 米-公斤(力)-秒。

(4) SI制(国际单位制) 是在MKS制的基础上发展起来的。

基本单位:长度——米(m);质量——千克(kg);时间——秒(s);温度——开尔文(K);物质的量——摩尔(mol)。

重要导出单位

力: $F=ma$, $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-2} \Rightarrow \text{N}$;

压强: $p=F/\text{面积}$, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2} \Rightarrow \text{N} \cdot \text{m}^{-2} \Rightarrow \text{Pa}$;

能量、功、热: $F \times \text{距离}$, $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \Rightarrow \text{N} \cdot \text{m} \Rightarrow \text{J}$;

功率: 功/时间, $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-3} \Rightarrow \text{J} \cdot \text{s}^{-1} \Rightarrow \text{W}$;

比热容: 热/(质量·温度), $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \Rightarrow \text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。

0.5 衡算方程和过程速率

物料衡算、能量衡算和过程传递速率是化工过程中最重要的几个概念。物料衡算依据是物质不灭定律。能量衡算依据是能量守恒定律。

将某个单元(某个设备、某个工艺、某个工厂)选定为衡算范围,输入衡算范围的量等于输出衡算范围的量加上累积量。这就得到了某个单元的衡算方程:

输入量 = 输出量 + 累积量

如果累积量为零,就称某个单元为稳定过程。在某个单元过程中,任一点物理量(如温度、压力、流量)都不随时间变化的过程,称为稳定过程。否则为非稳定过程。

一个稳定生产的化工车间，任何一点的温度、压力和流量都不会随时间而变化。否则是不稳定的生产过程。一般工艺车间，开车和停车时，都是非稳定过程。

假如选定某精馏塔为衡算范围，稳定生产过程中，进入塔的物质流量等于输出塔的物质流量，可得到该塔的物质衡算方程；进入塔的能量等于输出塔的能量，可得到该塔的能量衡算方程。

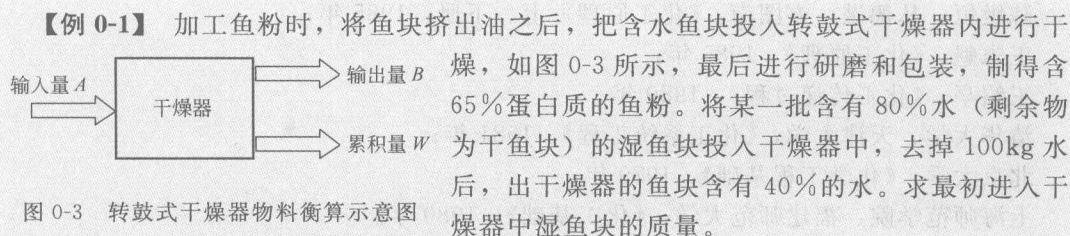


图 0-3 转鼓式干燥器物料衡算示意图

解 设湿鱼块为 $A\text{kg}$ ，干鱼块为 $B\text{kg}$ 。对干燥器作总物料衡算：

$$A = B + 100 \quad (1)$$

对干燥器中的水分作物料衡算：

$$A \times 0.8 = B \times 0.4 + 100 \quad (2)$$

联立式(1)和式(2)得

$$A = 150\text{kg}, B = 50\text{kg}$$

另外一种解法：对干燥器中的干鱼粉作物料衡算：

$$A \times 0.2 = B \times 0.6 \quad (3)$$

联立式(1)和式(3)得

$$A = 150\text{kg}, B = 50\text{kg}$$

化工原理中涉及传热速率和传质速率，称为过程速率。过程速率的大小，直接影响到设备的大小、工厂占地及经济效益等。过程速率等于过程推动力除以过程阻力：

$$\text{过程速率} = \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}}$$

比如糖溶解于水的溶解速率。50g 砂糖放入 500g 纯水中，其溶解速率大于将 50g 砂糖放入 500g 稀浓度糖水水中的速率，这是因为前者的浓度差更大，或者说是溶解推动力更大。

将 50g 砂糖放入 500g 纯水中，其溶解速率大于将 50g 颗粒状冰糖放入 500g 纯水水中的速率。这是因为前者糖与水的接触面积更大，溶解阻力更小的缘故。

第1章 流体流动

1.1 流体流动现象

1.1.1 流体流动问题的引出

首先讨论流体流动问题。每个家庭天天要用水，公园里随处可见流水，工厂更加离不开供水。某新建的居民小区，拟采用建水塔方案为居民楼供水，如图 1-1 所示^[20]。

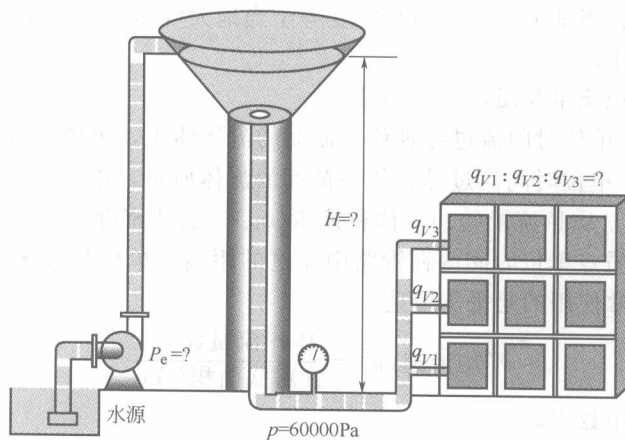


图 1-1 居民楼供水示意图

用泵将水送到高位水塔，水塔中的水源不断地送到一、二、三楼的用户，流量分别为 q_{V1} 、 q_{V2} 、 q_{V3} 。

这里引出三个问题：第一个问题是，为了保证一、二、三楼有水，就要维持楼底水管中有一定的水压（60kPa 表压），为了维持这个表压，水塔应建多高？即图中的 H 为多少？当然水塔高度的计算，有许多因素要考虑，水压仅是因素之一。第二个问题是，若水塔高度 H 确定了，需要选用什么类型的泵？即求算图 1-1 中泵的有效功率 P_e 为多少？然后选用泵。第三个问题是，若保持楼底水压为 60kPa 表压，那么一、二、三楼出水是均等的吗？即图 1-1 中 $q_{V1} : q_{V2} : q_{V3}$ 为多少？当然，图 1-1 的供水系统是实际供水系统作了简化处理。本章的知识将系统解决上述三个问题。

1.1.2 流体的几个重要性质参数

流体是液体和气体的总称，是没有固定形状、可以自由流动的物质。流体具有物质的一切属性，如密度、比热容、热焓及电学性质等。由于流体可以自由流动，它具有运动属性，如流动速度、流量、压强等。

(1) 密度 单位体积流体所具有的质量称为流体的密度。用 ρ 表示，单位是 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

比体积 单位质量流体所具有的体积，称为流体的比体积。它是密度的倒数。用 ν 表

示, $\nu = \frac{1}{\rho}$ 。

(2) 压强 单位面积上所受流体垂直方向的作用力, 称为流体的压强。习惯上称为压力。

用 p 表示, 单位是 Pa。1 atm = 101330 Pa = 760 mmHg。

绝压 以绝对真空为基准的压力数值, 称为绝压 (绝对压力)。

表压 某体系的绝对压力高出当地大气压的差值, 称为该体系的表压。

$$\text{表压} = \text{绝压} - \text{大气压}$$

真空度 某体系的绝对压力低于当地大气压的差值, 称为该体系的真空度。

$$\text{真空度} = \text{大气压} - \text{绝压}$$

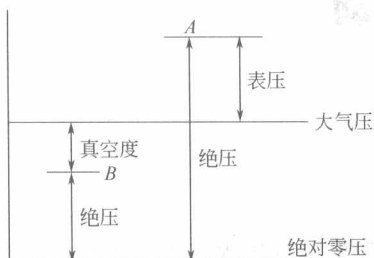


图 1-2 表压和真空度示意图

表压等于绝压减去当地大气压, 而真空度等于当地大气压减去绝压, 如图 1-2 所示。于是, 真空度亦为负压。

(3) 流量 有体积流量与质量流量两种。

体积流量 (q_V) 单位时间流过导管任一截面的流体体积, 单位是 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

质量流量 (q_m) 单位时间流过导管任一截面的流体质量, 单位是 $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

$$\text{质量流量}(q_m) = \text{体积流量}(q_V) \times \text{流体密度}(\rho)$$

流速 (u) 流体质点单位时间内在管路中流过的距离, 单位是 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。这是流体的点速度, 化工计算中经常使用的是平均流速。

$$\text{平均流速}(u) = \frac{\text{体积流量}(q_V)}{\text{管路截面积}(A)}$$

需要记住以下常用数据。

$$1 \text{ atm} = 101330 \text{ Pa} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O} = 1.033 \text{ at} = 760 \text{ mmHg}$$

$$\text{空气: } \rho = 1.293 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}, \mu = 0.0172 \text{ cP} = 0.0172 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s},$$

$$c_p = 1.01 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \text{管内流速取 } 8 \sim 15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$\text{水: } \rho = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}, \mu = 1 \text{ cP} = 1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s},$$

$$c_p = 4.187 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}, \text{管内流速取 } 1 \sim 3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

1.1.3 牛顿黏性定律

首先应指出, 牛顿黏性定律是个实验性定律, 是通过实验得出的。

站在长江大桥上, 人们可以看到, 江中心水急浪大, 江岸两边水流速度小, 证明流速存在一个流动分布, 如图 1-3 所示。横渡长江的人体会更深刻。

对于在圆管中流动的流体, 可以想像它们是由无数的速度不等的流体圆筒所组成, 如图

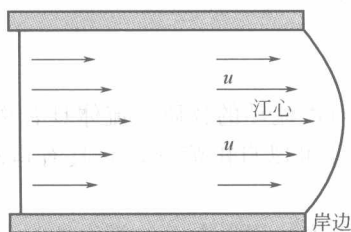


图 1-3 江面流速分布示意图

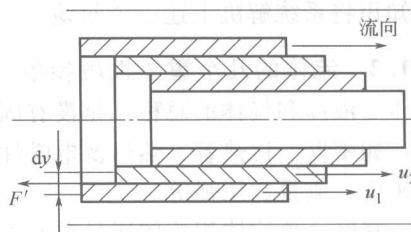


图 1-4 黏性定律推导示意图

1-4 所示。

这里选相邻两薄圆筒流体 (1,2) 进行分析。设两薄层之间垂直距离为 dy ，两薄层速度差为 du ，即 $(u_2 - u_1)$ ，两薄层之间接触的圆筒表面积为 A ，两薄层之间的内摩擦力为 F' 。实验证明，对于一定流体，内摩擦力 F' 与接触面积 A 成正比，与速度差 du 成正比，垂直距离 dy 成反比，此即牛顿黏性定律。

$$F' \propto A \frac{du}{dy} \Rightarrow F' = \mu A \frac{du}{dy}$$

$$\tau = \frac{F'}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-1)$$

式中， $\frac{F'}{A}$ 为摩擦剪应力（单位面积上所受的内摩擦力）， $\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ ； $\frac{du}{dy}$ 为流体的速度梯度（垂直于流体运动方向的速度变化率）， s^{-1} ； μ 为比例系数，称为黏度或动力黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

物理化学手册中常用到以厘泊 (cP) 表示的黏度。换算关系如下。

$$1 \text{ cP} = 0.01 \text{ P} = 0.01 \frac{\text{dyn} \cdot \text{s}}{\text{cm}^2} = 0.01 \times \frac{1 \times 10^{-5} \text{ N} \cdot \text{s}}{1 \times 10^{-4} \text{ m}^2} = 1 \times 10^{-3} \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = 1 \times 10^{-3} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

黏度 μ 的物理意义 由 $F' = \mu A \frac{du}{dy}$ 知，当取 $A = 1 \text{ m}^2$ ， $\frac{du}{dy} = 1 \text{ s}^{-1}$ 时，在单位接触面积上 $\mu = F'$ 。所以黏度 μ 的物理意义：在单位接触面积上，速度梯度为 1 时，由流体的黏度引起的内摩擦力的大小。在相同的流动条件下，流体的黏度越大，所产生的黏性力（或内摩擦力）也越大，即流体阻力越大。例如，用手指插入不同黏度的流体中，当流体黏度大时，手指感受阻力大，当黏度小时，手指感受阻力小。

式(1-1) 即为牛顿黏性定律。用一句话表述牛顿黏性定律，就是流体内部所受的剪应力与速度梯度成正比。再换一种表达形式，因

$$F = ma = m \frac{du}{dt} = \frac{d(mu)}{dt}$$

改写式(1-1) 得

$$\tau = \frac{F'}{A} = \frac{d(mu)}{A dt} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-1a)$$

式(1-1a) 中， $\frac{d(mu)}{A dt}$ 为单位面积的动量变化率，称为动量通量。所以，牛顿黏性定律的另一说法是，流体的动量通量与速度梯度成正比。

黏度或动力黏度，是流体的一种属性，是表征流体黏性大小的物理量。其值由实验测定。液体的黏度随温度升高而减少。气体的黏度随温度升高而增大。压强变化时，液体的黏度基本不变，气体的黏度随压强的变化也不大。只有在极高和极低的压强下，才考虑压强对气体黏度的影响。

工程计算中还会经常引用另一黏性系数，即运动黏度 γ 。流体的运动黏度，就是流体的黏度与流体密度之比值。即

$$\gamma = \frac{\mu}{\rho} \quad (1-2)$$

运动黏度的国际单位是 $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

人们将服从牛顿黏性定律的流体称为牛顿型流体；将不服从牛顿黏性定律的流体称为非牛顿型流体。

非牛顿型流体有三种，其剪应力与速度的关系如图1-5所示。

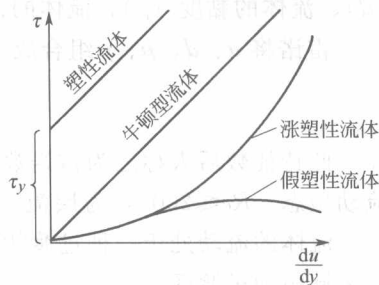


图 1-5 黏性定律示意图

$$(1) \text{ 塑性流体 } \tau = \tau_y + \mu \frac{du}{dy}$$

$$(2) \text{ 假塑性流体 } \tau = K \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (n < 1)$$

$$(3) \text{ 胀塑性流体 } \tau = K \left(\frac{du}{dy} \right)^n \quad (n > 1)$$

许多高分子溶液、涂料、泥浆等属于非牛顿型流体。

牛顿 (A. Newton)(1643—1727) 小传：牛顿被誉为科学巨人。他出生在英格兰的一个农民家庭里。牛顿研究了在流体中运动的物体所受到的阻力，得到阻力与流体密度、物体迎流截面积及运动速度的平方成正比的关系。他针对黏性流体运动时的内摩擦力提出了牛顿黏性定律。这是他在流体力学方面的贡献。

牛顿的三大成就是创立微积分、提出万有引力定律和光学分析的思想。对于一个运动物体，求微分相当于求时间和路程的关系中，求某点的切线斜率。这个斜率就是点速度。一个变速的运动物体，在一定时间范围里走过的路程，可以看作是在微小时间间隔里所走路程的和，这就是积分的概念。求积分相当于求时间和速度关系的曲线下面的面积。牛顿从这些基本概念出发，建立了微积分。微积分是牛顿和莱布尼茨在前人的基础上各自独立建立起来的。牛顿是经典力学理论的集大成者。他系统地总结了伽利略、开普勒和惠更斯等人的工作，得到了著名的万有引力定律和牛顿运动三定律。光学方面的三大贡献是：1666年，发现了白光是由各种不同颜色的光组成的；1668年，制成了第一架反射望远镜样机；他还提出了光的“微粒说”。

1.1.4 流体流动类型

当人们拧开水龙头时，若水压大，水的流量是大而急的，盆底激起水花飞溅；若水压小，水的流量小而慢，水呈细流状。在自然风景区，有的水流有“飞流直下三千尺”的架势，有的小溪则是涓涓细流。贵阳花溪公园的花溪流水是典型的涓涓细流，贵州安顺的黄果树瀑布则是典型的“飞流直下”。这都说明，日常生活中水的流动是有差别的。

如何将这些定性的感性认识提高到定量的理论高度呢？流动型态与哪些物理量有关呢？雷诺 (Reynolds) 利用如图 1-6 所示的实验装置，对流动型态进行了专门的研究。

1883年，雷诺通过大量实验观察到，流体流动分为层流（滞流）、过渡流、湍流，且流动型态除了与流速（ u ）有关外，还与管径（ d ）、流体的黏度（ μ ）、流体的密度（ ρ ）有关。

雷诺将 u 、 d 、 μ 、 ρ 组合成一个无量纲特征数。

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

此特征数后人称之为雷诺数 Re ，无数的观察与研究证明， Re 值的大小，可以用来判断流动型态。 $Re \leq 2000$ ，为层流。 $Re \geq 4000$ ，为湍流。 Re 在 2000~4000 之间为过渡区。此时，流体的流动处于一种过渡状况，可能是层流也可能是湍流，或者二者交替出现，所以，此区域称为过渡区。

雷诺数 Re 是个十分重要的无量纲数群。它不仅在流体流动过程中经常用到，而且在整

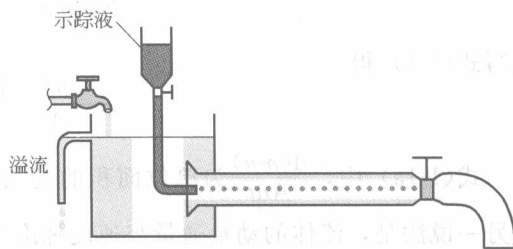


图 1-6 雷诺实验装置

个传热、传质过程中也常用到。

(1) 层流特征 流体质点无返混，整个流动区都存在速度梯度，速度分布呈抛物线形。

$$u_r = \frac{p_1 - p_2}{4\mu l} (R^2 - r^2)$$

平均流速是最大流速的一半， $\bar{u} = \frac{1}{2} u_{\max}$ ，如图 1-7 所示。

(2) 湍流特征 流体质点杂乱无章，仅在管壁处存在速度梯度，速度分布服从尼库拉则的 1/7 次方定律： $\frac{u_r}{u_{\max}} = \left(\frac{y}{R}\right)^{\frac{1}{7}}$ 应用范围是 Re 大于 1.1×10^5 ，平均流速是最大流速的 0.8 倍， $\bar{u} = 0.8 u_{\max}$ ，如图 1-8 所示。

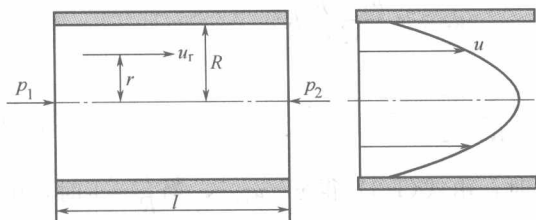


图 1-7 层流示意图

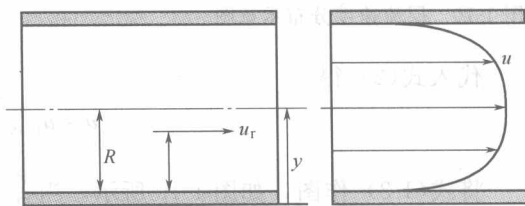


图 1-8 湍流示意图

雷诺 (O. Reynolds) (1842—1912) 小传：英国力学家、物理学家、工程师。1842 年生于北爱尔兰的贝尔法斯特。早年在工厂做技术工作。1867 年毕业于剑桥大学王后学院。1868 年起任曼彻斯特欧文学院工程学教授。1877 年当选为皇家学会会员。1888 年获皇家奖章。雷诺在流体力学方面最主要的贡献是发现流动的相似律，他引入表征流动中流体惯性力和黏性力之比的一个无量纲数，即雷诺数。对于几何条件相似的各种流动，即使它们的尺寸、速度、流体不同，只要雷诺数相同，则这些流动是动力相似的。1851 年 G. G. 斯托克斯已认识到这个比数的重要性。1883 年雷诺通过管路中平滑流线型流动（层流）向不规则带漩涡的流动（湍流）过渡的实验，阐明了这个比数的作用。此外，雷诺还给出平面渠道中的阻力；提出轴承的润滑理论（1886）；研究河流中的波动和潮汐，阐明波动中群速度概念；将许多单摆串联且均匀分布在一紧张水平弦线上，以演示群速度。

1.1.5 层流速度分布式的推导

如图 1-9 所示，在半径为 R 的管内，取半径为 r ，长为 l 的圆柱流体讨论。

作用于流体柱左端面的力为 $p_1 \pi r^2$ ；

作用于流体柱右端面的力为 $-p_2 \pi r^2$ ；

流体柱外表面受的内摩擦力为 $-F'$ 。

由牛顿黏性定律得

$$F' = \mu A \frac{du}{dy}$$

而
则

$$y = R - r$$

$$dy = -dr$$

$$F' = \mu(2\pi r l) \frac{du}{-dr}$$

在稳定流动条件下，上述合力为零，得

$$(p_1 - p_2) \pi r^2 + 2\pi r l \mu \frac{du}{dr} = 0 \Rightarrow 2l\mu \frac{du}{dr} = -(p_1 - p_2)r$$

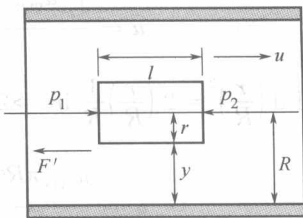


图 1-9 速度分布推导示意图