



教育部高等学校

化工类专业教学指导委员会推荐教材

化工原理

(上册)

王瑶 贺高红 主编



化学工业出版社

ABCT
MOE-CHINA

教育部高等学校化工类专业教学指导委员会推荐教材

化工原理

(上册)

王 瑶 贺高红 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

《化工原理》介绍化工过程中主要单元操作的基本原理、过程计算、过程强化及典型设备，全书共 10 章，分为上、下两册。本书为上册，详细介绍与流体流动和传热有关的单元操作，包括绪论、流体流动与输送设备、机械分离与流态化、传热过程与换热器、蒸发。

本书强调基本理论与工程实践相结合，突出工程观点和过程强化方法，可作为高等学校化工、石油、材料、生物、制药、轻工、食品、环境等专业本科生教材或参考书，也可供化工及相关专业工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

化工原理 (上册)/王瑶, 贺高红主编. —北京: 化学工业出版社, 2016. 8
教育部高等学校化工类专业教学指导委员会推荐教材
ISBN 978-7-122-27413-7

I. ①化… II. ①王… ②贺… 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 (2016) 第 141313 号

责任编辑: 徐雅妮 杜进祥
责任校对: 宋 夏

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: 三河市延风印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 23¼ 字数 590 千字 2016 年 10 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: 45.00 元

版权所有 违者必究

教育部高等学校化工类专业教学指导委员会 推荐教材编审委员会

主任委员 王静康 冯亚青

副主任委员 张凤宝 高占先 张泽廷 于建国 曲景平 陈建峰

李伯耿 山红红 梁斌 高维平 郝长江

委员 (按姓氏笔画排序)

马晓迅 王存文 王光辉 王延吉 王承学 王海彦

王源升 韦一良 乐清华 刘有智 汤吉彦 李小年

李文秀 李文翠 李清彪 李瑞丰 杨亚江 杨运泉

杨祖荣 杨朝合 吴元欣 余立新 沈一丁 宋永吉

张玉苍 张正国 张志炳 张青山 陈 砺 陈大胜

陈卫航 陈丰秋 陈明清 陈波水 武文良 武玉民

赵志平 赵劲松 胡永琪 胡迁林 胡仰栋 钟 宏

钟 秦 姜兆华 费德君 姚克俭 夏淑倩 徐春明

高金森 崔 鹏 梁 红 梁志武 程 原 傅忠君

童张法 谢在庠 管国锋 潘艳秋

序

化学工业是国民经济的基础和支柱性产业，主要包括无机化工、有机化工、精细化工、生物化工、能源化工、化工新材料等，遍及国民经济建设与发展的重点领域。化学工业在世界各国国民经济中占据重要位置，自 2010 年起，我国化学工业经济总量居全球第一。

高等教育是推动社会经济发展的重要力量。当前我国正处在加快转变经济发展方式、推动产业转型升级的关键时期。化学工业要以加快转变发展方式为主线，加快产业转型升级，增强科技创新能力，进一步加大节能减排、联合重组、技术改造、安全生产、两化融合力度，提高资源能源综合利用效率，大力发展循环经济，实现化学工业集约发展、清洁发展、低碳发展、安全发展和可持续发展。化学工业转型迫切需要大批高素质创新人才，培养适应经济社会发展需要的高层次人才正是大学最重要的历史使命和战略任务。

教育部高等学校化工类专业教学指导委员会（简称“化工教指委”）是教育部聘请并领导的专家组织，其主要职责是以人才培养为本，开展高等学校本科化工类专业教学的研究、咨询、指导、评估、服务等工作。高等学校本科化工类专业包括化学工程与工艺、资源循环科学与工程、能源化学工程、化学工程与工业生物工程等，培养化工、能源、信息、材料、环保、生物工程、轻工、制药、食品、冶金和军工等领域从事工程设计、技术开发、生产技术管理和科学研究等方面工作的工程技术人才，对国民经济的发展具有重要的支撑作用。

为了适应新形势下教育观念和教育模式的变革，2008 年“化工教指委”与化学工业出版社组织编写和出版了 10 种适合应用型本科教育、突出工程特色的“教育部高等学校化学工程与工艺专业教学指导分委员会推荐教材”（简称“教指委推荐教材”），部分品种为国家级精品课程、省级精品课程的配套教材。本套“教指委推荐教材”出版后被 100 多所高校选用，并获得中国石油和化学工业优秀教材等奖项，其中《化工工艺学》还被评选为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

党的十八大报告明确提出要着力提高教育质量，培养学生社会责任感、创新精神和实践能力。高等教育的改革要以更加适应经济社会发展需要为着力点，以培养多规格、多样化的应用型、复合型人才为重点，积极稳步推进卓越工程师教育培养计划实施。为提高化工类专业本科生的创新能力和工程实践能力，满足化工学科知识与技术不断更新以及人才培养多样化的需求，2014年6月“化工教指委”和化学工业出版社共同在太原召开了“教育部高等学校化工类专业教学指导委员会推荐教材编审会”，在组织修订第一批10种推荐教材的同时，增补专业必修课、专业选修课与实验实践课配套教材品种，以期为我国化工类专业人才培养提供更丰富的教学支持。

本套“教指委推荐教材”反映了化工类学科的新理论、新技术、新应用，强化安全环保意识；以“实例—原理—模型—应用”的方式进行教材内容的组织，便于学生学以致用；加强教育界与产业界的联系，联合行业专家参与教材内容的设计，增加培养学生实践能力的内容；讲述方式更多地采用实景式、案例式、讨论式，激发学生的学习兴趣，培养学生的创新能力；强调现代信息技术在化工中的应用，增加计算机辅助化工计算、模拟、设计与优化等内容；提供配套的数字化教学资源，如电子课件、课程知识要点、习题解答等，方便师生使用。

希望“教育部高等学校化工类专业教学指导委员会推荐教材”的出版能够为培养理论基础扎实、工程意识完备、综合素质高、创新能力强的化工类人才提供系统的、优质的、新颖的教学内容。

教育部高等学校化工类专业教学指导委员会

2015年1月

前言

化工原理课程内容包括化工过程典型单元操作的基本原理、典型过程及设备的设计与操作分析，是化学工程与工艺及相近、相关专业的重要专业技术基础课，具有基础理论和工程实践并重的特点。通过本门课程的学习，培养学生分析和解决工程实际问题的能力，这在创新型工程技术人才培养过程中具有重要意义。

本书借鉴了国内外同类教材的长处，并结合编者们多年的化工原理教学实践经验编写而成。教材介绍了化工过程中主要的单元操作，各章按照单元操作的基本原理、过程计算、过程强化和过程典型设备的主线编写，重点介绍过程的设计计算。在编写过程中，力争理论与实践相结合，突出工程观点和解决工程实际问题能力的培养及过程强化的方法。书中标*部分为拓展学习内容。

本教材包括10章，分为上、下两册。上册主要介绍与流体流动和传热有关的单元操作，包括绪论、流体流动与输送设备、机械分离与流态化、传热过程与换热器、蒸发。上册主编大连理工大学王瑶、贺高红，参加编写的有贺高红、焉晓明（第1章），潘艳秋、俞路（第2章），姜晓滨、阮雪华（第3章），吴雪梅、张宁、郑文姬（第4章），董宏光（第5章）。下册介绍与质量传递有关的单元操作，包括蒸馏、吸收、液液萃取、干燥和膜分离。下册主编大连理工大学潘艳秋、吴雪梅，参加编写的有王瑶（第6章），贺高红、肖武、张文君（第7章），肖武、张秀娟（第8章），韩志忠（第9章），李祥村、姜晓滨（第10章）。大连理工大学化工原理教研室的全体同事在本书的编写过程中给予了无私的帮助和支持，在此一并表示衷心的感谢！

限于编者水平，书中难免有不妥和疏漏之处，敬请读者指正。

编者

2016年7月

目录

第1章 绪论 / 1

1.1 化学工程与单元操作	1
1.2 化工原理课程的内容与地位	3
1.3 化工原理的研究方法	3
1.4 化工原理中常用的四个基本关系	3
1.5 单位制及单位换算	4

第2章 流体流动与输送设备 / 7

2.1 作用在流体上的力及流体的黏度	7
2.1.1 作用在流体上的力	7
2.1.2 压力和剪应力	8
2.1.3 牛顿黏性定律及流体的黏度	9
2.1.4 理想流体与实际流体	10
2.1.5 牛顿型流体与非牛顿型流体	10
2.2 流体流动计算基础	11
2.2.1 流体的特征	11
2.2.2 流场的描述	11
2.2.3 控制体	12
2.2.4 流体计算的两个假设	12
2.2.5 稳态流动与非稳态流动	13
2.2.6 流体的流量与流速	13
2.3 流体衡算方程	15
2.3.1 连续性方程	15
2.3.2 静力学方程	16
2.3.3 理想流体的伯努利方程	22
2.3.4 实际流体的机械能衡算	25
2.4 流体流动阻力及其计算	28
2.4.1 流体的流动类型	28
2.4.2 流体在圆管内的流动分析	31
2.4.3 量纲分析法	35
2.4.4 流体流动阻力的计算	37
2.5 流动边界层的概念	47
2.5.1 边界层的形成	47

2.5.2	边界层的发展	48
2.5.3	边界层的分离	49
2.6	管路计算	50
2.6.1	简单管路计算	51
2.6.2	复杂管路计算	53
2.7	流速和流量的测量	56
2.7.1	测速管	56
2.7.2	孔板流量计	58
2.7.3	文氏管流量计	61
2.7.4	转子流量计	62
2.8	流体输送设备	64
2.8.1	离心泵	65
2.8.2	容积式泵	85
2.8.3	旋涡泵	89
2.8.4	气体输送设备	90
2.9	流体输送过程的节能措施	100
	习题	101
	本章符号说明	108

第3章 机械分离及流态化 / 110

3.1	概述	110
3.2	颗粒及颗粒床层的几何特性	111
3.2.1	颗粒的几何特性	111
3.2.2	混合颗粒群的几何特性	112
3.2.3	颗粒床层的几何特性	113
3.3	沉降	114
3.3.1	流体绕过颗粒的流动	115
3.3.2	颗粒在流体中的运动	117
3.3.3	重力沉降	118
3.3.4	重力沉降设备	122
3.3.5	离心沉降	125
3.3.6	离心沉降设备	126
3.4	过滤	131
3.4.1	过滤操作的基本概念	132
3.4.2	过滤过程的物料衡算	133
3.4.3	过滤基本方程式	134
3.4.4	过滤过程的计算	135
3.4.5	滤饼的洗涤	138
3.4.6	过滤设备	139
3.4.7	离心过滤	146

3.4.8 过滤过程的节能与强化·····	149
3.5 流体通过固定床的流动及流态化·····	150
3.5.1 流体通过固定床的流动·····	150
3.5.2 固体流态化·····	152
习题·····	162
本章符号说明·····	164

第4章 传热过程与换热器 / 166

4.1 传热过程概述·····	166
4.1.1 热量传递的基本方式·····	166
4.1.2 间壁式传热过程的传热速率方程·····	167
4.1.3 热量衡算方程·····	169
4.2 导热·····	169
4.2.1 导热的基本概念·····	170
4.2.2 傅里叶定律和热导率·····	171
4.2.3 导热微分方程式·····	174
4.2.4 无内热源的一维稳态导热·····	177
4.2.5 具有内热源的一维稳态导热*·····	186
4.2.6 多维稳态导热和非稳态导热简介*·····	187
4.3 对流传热·····	188
4.3.1 热边界层·····	188
4.3.2 对流传热的传热速率·····	189
4.3.3 对流传热的研究方法·····	191
4.3.4 对流传热过程的量纲分析·····	191
4.3.5 无相变化的对流表面传热系数·····	196
4.3.6 有相变化的对流表面传热系数·····	213
4.4 辐射传热·····	226
4.4.1 辐射传热的基本概念·····	226
4.4.2 黑体辐射基本定律·····	228
4.4.3 实际固体和液体的辐射特性·····	231
4.4.4 两固体间的辐射传热·····	235
4.4.5 气体的辐射传热·····	237
4.4.6 复合传热和设备的热损失·····	240
4.5 换热器及其传热速率·····	244
4.5.1 间壁式换热器的结构形式·····	244
4.5.2 换热器的传热速率·····	253
4.5.3 传热效率和传热单元数*·····	262
4.5.4 换热器传热过程的强化·····	267
4.5.5 列管式换热器的设计和选型·····	274
习题·····	285

第 5 章 蒸发 / 290

5.1 概述	290
5.1.1 蒸发及其分类.....	290
5.1.2 蒸发操作的特点.....	291
5.2 单效蒸发	291
5.2.1 单效蒸发流程.....	291
5.2.2 单效蒸发的计算.....	292
5.3 多效蒸发	298
5.3.1 多效蒸发原理.....	298
5.3.2 多效蒸发流程.....	299
5.3.3 多效蒸发的计算.....	300
5.3.4 多效蒸发与单效蒸发的对比分析.....	306
5.4 蒸发设备	308
5.4.1 循环型蒸发器.....	308
5.4.2 单程型蒸发器.....	310
5.4.3 直接接触传热蒸发器.....	313
5.4.4 蒸发设备的附属装置.....	314
5.4.5 蒸发器的性能比较与选型.....	315
5.5 蒸发过程的节能措施	316
5.5.1 额外蒸汽的引出.....	316
5.5.2 热泵蒸发.....	316
5.5.3 冷凝水的闪蒸.....	316
5.5.4 多级多效闪蒸.....	317
5.6 蒸发过程的设计	318
5.7 蒸发过程和设备的强化与展望	318
习题.....	319
本章符号说明.....	320

附录 / 321

习题参考答案 / 356

参考文献 / 359

第1章

绪 论

1.1 化学工程与单元操作

化学工业 (Chemical Industry) 是将自然界的各种物质通过化学和物理方法加工成具有规定品质的物质的生产过程。化学工程是研究化学工业生产过程的共性规律, 解决工业放大和大规模生产中出现的各种工程技术问题的学科。它把化学工业生产提高到了一个新水平, 从经验或半经验状态提升到了理论指导和预测的新阶段, 使化学工业以更大规模的生产能力, 为人类生活提供更好的物质基础, 加快了人类社会发展的进程。美国化学工程师协会 (American Institute of Chemical Engineers, AIChE) 给出了一个化学工程很全面的定义: “Chemical engineering is that portion of engineering where materials are made to undergo a change in composition, energy or state of aggregation.” 对比定义, 我们环顾四周、想想衣食住行, 如牙膏、化妆品、衣物、涂料等, 几乎每一件物品都和化工有关, 可以说, 没有化学工程就没有现代的社会。所以, 掌握和利用好化工知识, 可以提高全社会的生活水平和生产水平, 为人类社会进步做出巨大的贡献。

法国大革命时期, 出现了吕布兰法制碱, 标志着化学工业的诞生。到 19 世纪 70 年代, 制碱、硫酸、煤化工、化肥等都已具备了很大的生产规模。例如, 索尔维法制碱中所用的纯碱碳化塔, 高达 20 余米, 在其中可以同时进行化学吸收、结晶、沉降等过程, 即使今天看来, 也是一项了不起的成就。

1888 年, 在 L. M. Norton 教授的提议下, 世界上第一个命名为化学工程的四年制本科课程, 即著名的第十号课程, 在美国麻省理工学院开设。随后, 宾夕法尼亚大学 (1892 年)、戴伦大学 (1894 年)、密歇根大学 (1898 年) 也相继开设了与之相似的课程。1901 年, 第一部化学工程专著《化学工程手册》在英国 G. E. Davis 出版。继冶金、机械、土建、电气四个工程学科以后, 又一个工程技术学科——化学工程就此诞生了。1902 年 W. H. Walker 负责完善麻省理工学院化学工程的实验教学, 开始了对化学工程教学的改革, 使化学工程的发展进入了一个新时期。

1915 年, A. D. Little 提出了单元操作 (Unit Operation) 的概念, 他指出: 任何化工生产过程, 无论其规模大小都可以分解为一系列的单元操作技术。化工生产过程纷杂繁多, 只有通过研究其基本构成要素——单元操作, 才能使化学工程专业具有广泛的适应性。化工

单元操作这一概念的形成，是化学工程学科发展的第一个重要里程碑。

任何一种化工产品的生产过程，都是由若干单元操作及化学反应过程组合而成的。化学反应是化工生产过程的核心，其投资约占整个化工生产过程投资的10%~20%，主要在反应器中进行。单元操作是指化工生产过程中除化学反应以外的物理过程，包括原料和反应物的前后处理过程。在这些物理过程中，只发生压力、温度、组成、相态等物理变化。例如被誉为人类科学技术上的一项重大突破的合成氨化工生产过程，其生产流程简图如图1.1所示。在该生产过程中，除氨合成塔中的氮气和氢气反应生成氨属于化学反应外，其余步骤均属于物理过程。合成氨的反应是核心，其他物理过程只起到为化学反应准备必要的反应条件以及后续将粗产品提纯的作用。虽然这样，这些物理过程在整个化工生产中仍占据极其重要的地位，对生产过程的经济效益以及节能环保具有重要的意义。

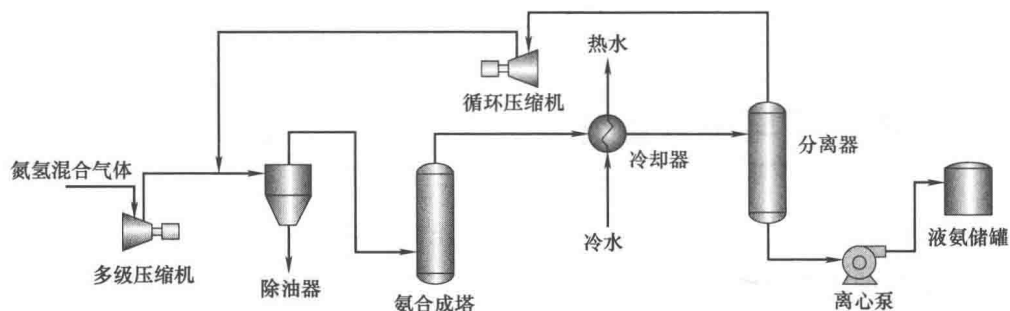


图 1.1 氮氢合成氨生产流程简图

不同的化工生产过程中，同一种单元操作遵循的基本规律是一样的。例如，硫酸厂和糖厂所用的加热器，虽然加热的物料不同，设备的材质和形状也不尽相同，但却遵循同一个热量平衡定律和热量传递定律。具体来说，忽略热损失的情况下，热载体的供热量等于冷载体的吸热量，热流量与两个载体的温度差有关，也与流体的流动状态有关。这些就是加热器遵循的基本规律，而且无论采用何种物料或操作条件，这些规律都可用统一的公式进行表达。当然，不同生产厂的加热器自有其依赖于工艺物料及工艺条件的特点，但传热单元操作的共同规律是一致的，而且往往占主导地位。

为数众多的单元操作，按其操作的功能可以分为：物料的增压、减压和输送；物料的混合和分散；物料的加热和冷却；均相混合物的分离（蒸发、蒸馏、结晶等）；多相混合物的分离（沉降、过滤、干燥等）。其中每一类还可以细分，例如按相态的不同，把多相混合物的分离再分为气液分离、气固分离、液固分离、液液分离、固固分离等。按功能分类虽然简单易行，但是不够科学。一方面不属于同一类的单元操作之间的共性被掩盖了，另一方面完成同一功能的不同单元操作并不一定遵循同一操作原理。单元操作按其理论基础可分为三类：

- ① 流体流动过程——遵循流体动力学基本规律，包括流体输送、搅拌、沉降、过滤、混合等；
- ② 传热过程——遵循传热基本规律，包括热交换、蒸发等；
- ③ 传质过程——遵循传质基本规律，包括吸收、蒸馏、萃取、吸附、干燥、膜分离等。

1.2 化工原理课程的内容与地位

化工原理是研究化工过程单元操作基本原理的一门技术基础课。“化工原理”的英文名

称为 Unit Operations of Chemical Engineering, 即“化工单元操作”。它是化学工程学科中形成最早、基础性最强、应用最广的学科分支。在学习化工原理之前, 需要具备高等数学、物理、物理化学、机械制图等课程的知识。

化工原理课程的主要内容是研究流体流动、流体输送机械、过滤、沉降、传热、蒸发、吸收、蒸馏、萃取、干燥、结晶、膜分离等单元操作的基本原理。通过化工原理课程的学习, 掌握各单元操作所用典型化工单元设备的原则结构、操作特性、设计计算方法, 培养学生综合应用所学专业知识和解决化工过程中各种问题、开发新的工艺流程、强化单元操作过程、实现操作优化的能力以及创新意识。单元操作的知识对于化工厂的设计、建设、生产和管理, 以及新产品、新工艺的开发都有着指导性的作用, 是化学工程师必须掌握的基础知识。

随着国民经济的发展和人民生活水平的不断提高, 对能源的需求越来越大。我国能源有限, 国内能源的供应将面临潜在的总量短缺, 尤其是石油、天然气供应将面临结构性短缺。石油供应的紧张, 对化学工业的影响程度远远高于其他工业。同时, 我国化学工业的粗放式发展, 导致了严重的环境污染问题。通过化工生产过程的合理设计, 可实现节约能源, 减少环境污染物的排放。而化工原理正是化工过程设计的基础。因此, 深入研究化工原理, 对化工生产过程中的各个单元操作进行强化, 对整个化工生产过程进行优化设计, 对化学工业乃至整个国民经济和人民生活来说具有特别重要的意义。

1.3 化工原理的研究方法

化工原理中所采用的研究方法有其自有的特点。在单元操作的发展进程中, 形成了两种基本研究方法, 即实验研究方法和数学模型方法。实验研究方法主要是以量纲分析和相似论为理论指导, 通过实验建立过程变量之间的关系, 通常用无量纲数(即无量纲参数, 或称无因次数、准数)群构成的关系式来表达, 主要用于解决内在规律尚不清楚的复杂化工问题。数学模型方法是在对过程实际问题的机理深入分析的基础上, 抓住过程本质, 进行合理简化, 建立物理模型, 进而结合物理化学、化工热力学和化工传递过程的基本原理, 建立描述此物理模型的数学模型。以数学方法求解后, 通过实验确定数学模型的常量参数。因而, 这是一种半经验、半理论的研究方法。由于对化工传递过程和化工热力学的研究不断深入, 积累了丰富的知识, 特别是电子计算机的普及和发展, 使数学模型方法的应用在单元操作的研究中日益广泛。

1.4 化工原理中常用的四个基本关系

(1) 物料衡算

物料衡算主要是为了衡量生产过程中原料、成品以及损失的物料数量。依据质量守恒定律, 进入与离开某一化工过程的物料质量之差, 等于该过程中累积的物料质量, 即

$$\sum G_1 - \sum G_0 = G_A \quad (1.1)$$

式中 $\sum G_1$ ——输入系统的物料量总和;

$\sum G_0$ ——输出系统的物料量总和;

G_A ——系统内累积的物料量。

当过程无化学反应时，式(1.1)适用于任一组分的物料衡算；当有化学反应时，式(1.1)只适用于任一元素的物料衡算。对于稳态过程，系统内无物料累积，各物料量不随时间改变，即处于稳态， $G_A=0$ ，则 $\sum G_I = \sum G_O$ 。

(2) 能量衡算

依据能量守恒定律，把进、出某特定系统的各种能量的收支平衡关系建立起来，即称为能量衡算式。能量有各种不同的形式，如机械能、热能、化学能、电能、磁能、原子能等，都可与热能之间互相转换，从而可将能量衡算式简化为热量衡算式。

热量衡算的基本式为

$$\sum Q_I = \sum Q_O + Q_L \quad (1.2)$$

式中 $\sum Q_I$ ——进入系统的各股物料的总热量，kJ 或 kW；

$\sum Q_O$ ——离开系统的各股物料的总热量，kJ 或 kW；

Q_L ——系统与环境交换的热量，kJ 或 kW。

(3) 物系的平衡关系

任何传递过程都有一个极限，当传递过程达到极限时，其过程进行的推动力为零，此时的传递速率为零，称为平衡。例如，热量传递过程中，当冷、热两物体的温差（即传热推动力）等于零时，即达到平衡状态。又如，一定温度下食盐的饱和浓度，就是这个物系的平衡浓度。

物系的平衡可用于判断传递过程是否可以发生，以及传递发生的方向和能达到的极限。

(4) 过程速率（亦称传递速率）

过程速率是指单位时间内所能传递的能量或物质的量。例如：传热速率为 J/s 或 W，传质速率为 kmol/h 等。

任何不处于平衡状态的物系，都必然存在一个向平衡方向进行的过程，而过程的快慢，即过程速率，受到多种因素的影响。过程速率决定设备的生产能力。

任何过程的速率均与该过程的推动力成正比，与其阻力成反比：

$$\text{传递速率} \propto \text{过程推动力} / \text{过程阻力} \quad (1.3)$$

各过程的推动力的性质决定于过程的机理，它可以是压力差、温度差或浓度差等。过程速率反映了过程进行的快慢。例如：传热过程的推动力是温度差，流体流动过程的推动力是机械能差，传质过程的推动力是浓度差（气相或液相的实际浓度与平衡浓度的差值）等。

各过程存在的阻力构成也决定于过程的机理，例如，传热过程存在的热阻、流体流动过程存在的摩擦阻力、传质过程存在的扩散阻力。

1.5 单位制及单位换算

(1) 单位制

任何物理量都是用数值与计量单位来表达的。因此，物理量的单位与数值应一起纳入运算。

物理量的单位分两类：基本单位和导出单位。

人为选定的几个独立的物理量称为基本量，并根据使用方便的原则制定出这些基本量的单位，称为基本单位，如长度 m、时间 s 等。而所有的导出单位都是由基本单位相互乘除构成。基本单位与导出单位总称为单位制，常见单位制的基本单位见表 1.1。

表 1.1 常见单位制的基本单位

基本量单位制	长度(符号)	质量(符号)	力(符号)	时间(符号)
国际单位制(SI制)	米(m)	千克(kg)	牛顿(N)	秒(s)
绝对单位制(CGS制)	厘米(cm)	克(g)		秒(s)
实用单位制(MKS制)	米(m)	千克(kg)		秒(s)
工程单位制	米(m)		千克力(kgf)	秒(s)

由于历史的原因，对基本量的选择不同，或对基本单位规定不同，产生了不同的单位制。长期以来，化工领域存在着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，给计算和交流带来不便。为改变这种局面，1960年10月第十一届国际计量大会通过了一种新的单位制，称为国际单位制，符号为 SI。

在 SI 制中规定了 7 个基本单位，化工领域常用的有 5 个，即长度为米 (m)，质量为千克 (kg)，时间为秒 (s)，热力学温度为开尔文 (K)，物质的量为摩尔 (mol)。

专门名称的导出单位有力、重力 N 或 $\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2$ ；压力 (压强)、应力 Pa 或 N/m^2 ；能量、功、热 J 或 $\text{N} \cdot \text{m}$ ；功率、辐射通量 W 或 J/s ；温度 $^{\circ}\text{C}$ 。

SI 制有两大优点：通用性，所有物理量的单位都可由基本单位导出，SI 制对所有科学领域都适用；一贯性，SI 制中任何一个导出单位都可由基本单位按物理规律直接导出，无需引入比例常数。

(2) 单位换算

单位换算是指同一性质的不同单位之间的数值换算。

物理量由一种单位换成另一种单位时，只是数值改变，量本身无变化。换算时要乘以两单位间的换算因数，即二者相等有不同单位的两个物理量之比。

例如：1N 的力和 100000dyn 的力是两个相等的物理量，但使用单位不同则数值不同。N 与 dyn 两种单位间的换算因数为：

$$100000\text{dyn}/1\text{N}=100000\text{dyn}/\text{N}$$

【例 1.1】 已知 $1\text{atm}=1.033\text{kgf}/\text{cm}^2$ ，试用单位 Pa 来表示压强。

解：先列出各量不同单位间的关系

$$\begin{aligned} 1\text{kgf} &= 9.81\text{N}, 1\text{cm}^2 = 10^{-4}\text{m}^2, 1\text{N}/\text{m}^2 = 1\text{Pa} \\ 1\text{atm} &= 1.033 \times 9.81 \times 10^4 \text{N}/\text{m}^2 = 1.0133 \times 10^5 \text{N}/\text{m}^2 \end{aligned}$$

所以

$$1.0133 \times 10^5 \text{N}/\text{m}^2 \times 1 \text{Pa} / \text{N}/\text{m}^2 = 1.0133 \times 10^5 \text{Pa}$$

【例 1.2】 将 $1\text{kgf}/\text{cm}^2$ 转换成 N/m^2 。

解：已知 $1\text{kgf}=9.81\text{N}$ ， $1\text{cm}^2=10^{-4}\text{m}^2$ ，所以

$$1\text{kgf}/\text{cm}^2 = 1 \times 9.81\text{N}/(10^{-4})\text{m}^2 = 9.81 \times 10^4 \text{N}/\text{m}^2$$

【例 1.3】 通用气体常数 $R=0.08206\text{L} \cdot \text{atm}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ ，试用单位 $\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 表示。

解：先列出有关各量不同单位间的关系。

$$1\text{L}=10^{-3}\text{m}^3, 1\text{atm}=1.0133 \times 10^5 \text{Pa}, 1\text{N} \cdot \text{m}=1\text{J}$$

所以

$$R = 0.08206 \times \text{L} \cdot \text{atm} / (\text{mol} \cdot \text{K}) \times 10^{-3} \text{m}^3 / \text{L} \times 1.0133 \times 10^5 \text{Pa} / \text{atm} \\ = 8.315 \text{m}^3 \cdot \text{Pa} / (\text{mol} \cdot \text{K})$$

又知

$$1 \text{Pa} = 1 \text{N} / \text{m}^2 = 1 \text{N} \cdot \text{m} / \text{m}^3 = 1 \text{J} / \text{m}^3$$

所以

$$R = (8.315 \text{m}^3 \times 1 \text{J} / \text{m}^3) / (\text{mol} \cdot \text{K}) = 8.315 \text{J} / (\text{mol} \cdot \text{K})$$