



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

化工原理 (第二版)

华南理工大学 编 邹华生 黄少烈 主编



高等教育出版社



面向 21 世纪 课 程 教 材
Textbook Series for 21st Century

化工原理 (第二版)

华南理工大学 编 邹华生 黄少烈 主编



高等教育出版社

内容简介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是面向 21 世纪课程教材。

本书以单元操作为主线,以工程应用为背景,系统讨论了常见单元操作的基本原理、过程、典型设备的主要特征和设计与计算方法。为了进一步提高学生理论分析能力和创新意识,本教材不仅加强了理论基础,拓宽了课程内容,同时还注意吸收、消化化工及相关领域的新理论和技术,介绍了新的化工单元操作原理、过程和设备。全书共八章,内容包括:流体力学与应用,流体输送机械、非均相机械分离、热量传递及设备、蒸馏、吸收、干燥和新型分离技术等。

为了便于学生理解和掌握单元操作基本原理和计算方法,培养其分析和解决问题的能力,本书列举了较多典型例题,同时每章配备有适量的习题和思考题。

本书注重理论联系实际,结合实例剖析,培养学生用工程经济观点分析和解决实际工程问题的能力。

本书可作为高等院校化工工艺类及相关专业“化工原理”或“化工基础”课程教材;也可作为从事石油、化工、制药、食品、环境、材料等部门的科研、设计和生产的工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理/华南理工大学,邹华生,黄少烈主编.—2 版.

—北京:高等教育出版社,2009.12

ISBN 978-7-04-027984-9

I. 化… II. ① 华… ② 邹… ③ 黄… 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(2009)第 182006 号

策划编辑	翟 怡	责任编辑	李 颖	封面设计	于文燕
版式设计	张 岚	责任校对	金 辉	责任印制	尤 静

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-58581118
社 址	北京市西城区德外大街 4 号	咨询电话	400-810-0598
邮政编码	100120	网 址	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-58581000		http://www.hep.com.cn
经 销	蓝色畅想图书发行有限公司	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	北京市南方印刷厂		http://www.landaco.com.cn
		畅想教育	http://www.widedu.com
开 本	787×960 1/16	版 次	2002 年 8 月第 1 版
印 张	32.25		2009 年 12 月第 2 版
字 数	600 000	印 次	2009 年 12 月第 1 次印刷
		定 价	37.60 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 27984-00

第二版前言

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是在第一版的基础上修订再版的。

培养厚基础、宽口径、强能力,具有创新意识和实践能力的高级专门人才是高等院校的基本任务,本书以实现该任务为宗旨,根据普通高等教育“十一五”国家级规划教材的质量要求编写的。

“化工原理”课程是一门实践性很强的技术基础课,但理论性与系统性较为薄弱。本书为加强理论基础,将传统的“化工原理”和“化工传递过程原理”有机地糅合,从而具有理论与实践并重的特点。

本书不仅加强了理论基础,拓宽了课程内容,同时还注意吸收、消化化工及相关领域的新理论、新方法、新技术和新设备,介绍学科前沿的发展动态和相关最新成果,力求达到教材的科学性、先进性、时代性和实用性的统一,使之在培养学生创新能力和工程实践能力中发挥更大的作用。

本书以动量传递、热量传递和质量传递基本理论为主线,以工程应用为背景,论述了流体流动、流体输送、颗粒与流体之间的相对运动(包括颗粒的沉降分离、离心分离和过滤分离)、传热过程与设备、蒸馏、吸收、干燥和新型分离技术。结合具体实例,对不同层次的理论和工程问题采取多样化处理方法,简繁相结合;借助主次分明的数学分析手段对不同的单元操作问题进行了讨论,以求开阔眼界,拓宽知识面,培养学生处理问题的灵活性。同时,本书注重工程实际问题处理方法的讨论与介绍,以增强学生工程观念。

本书第一版出版以来,得到许多读者和同仁的支持与鼓励。本次修订力求在论述的科学性、逻辑性和示例的工程实用性等方面更加完善。为了便于引导学生自学,每章开头增加了本章的内容概要,包括学习目的,重点掌握的内容,一般掌握的内容,一般了解的内容和应注意的问题。改正了原书中笔误或印刷错误,同时对第四、七章的内容进行了重新编写,附录中增加了实用的设计资料。

本书第一、二、三、四、六章和第七章由邹华生编写,绪论、第五、八章和英文索引由黄少烈编写。

在编写过程中,高等教育出版社十分关心书稿的进度和质量,给予了热情的指导和帮助。同时,得到了华南理工大学有关部门的大力支持,华南理工大学化学与化工学院有关老师给予了热情关心、支持和帮助,为本书提出了不少宝贵意见和建议。在此我们致以诚挚的谢意。

由于水平有限,在编著教材方面经验不足,难免存在缺点和错误,敬请同仁和读者提出宝贵意见和建议,以便在本书修订时改进。

编者

2009年4月

第一版前言

本书根据教育部“高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划”中的《化工类专业人才培养方案及教学内容体系改革的研究与实践》工科 03-31 项目组审定的教学基本要求编写,是面向 21 世纪课程教材。

培养基础扎实以及具有创新意识和实践能力的高级专门人才是高等院校的基本任务。“化工原理”课程作为一门实践性很强的技术基础课,具有理论与实践并重的特点,反映科技进步对化工技术发展的影响,在培养学生创新能力和实践能力中起着重要作用。国际化工界知名学者、美国普林斯顿大学 James Wei 教授在回顾化工高等教育一百多年历史、展望未来发展时指出:“化学工程学科与材料、环境、生物等领域交叉融合,其工程基础学科的重要性必将有进一步的加强”。在大学化工类专业要相应加强知识核心课程如流体力学、传递过程、化工热力学、化工原理等课程的教学,同时要注重在其他相关课程中的应用。为了适应 21 世纪高级化工专门人才的要求,力求在课程体系和教学内容等方面进行改革。在教学及编写过程中,注重基础理论的阐述。

本书以工程应用为背景,以基本化工单元操作为主线,将传递过程的理论融合到基本原理的阐述之中,注重工程实际问题处理方法的介绍,有利于激发学生的创新思维。除了基本单元操作,还增加了反映化工过程近代发展的新单元操作和新技术的内容,力求拓宽知识和应用领域。

本书由华南理工大学编,黄少烈、邹华生主编。参加编写的有钟理、伍钦。其中黄少烈(绪论、第五、八章、英文索引)、邹华生(第一、二、三、六章)、钟理(第四章)、伍钦(第七章)。本书由北京化工大学杨祖荣教授、天津大学刘邦孚教授担任主审。

在编写过程中,得到“化工类专业人才培养方案及教学内容体系改革的研究与实践”项目主持人余国琮院士的热情关怀和支持。高等教育出版社十分关心稿件的质量和进度,并出资帮助编者顺利地完稿件的撰写工作。华南理工大学化工学院有关老师给予热情关心、支持和帮助。学校有关专家和教授为本教材提出了不少宝贵意见和建议。在此我们致以诚挚的谢意。

由于水平有限,在编写教材方面缺乏经验,缺点和错误一定不少,敬请同仁和读者提出宝贵意见和建议,以便在本书修订时改进。

编者

2001 年 5 月

目 录

绪论	1
第一章 流体力学与应用	6
本章概要	6
第一节 概述	8
1-1-1 流体的连续性与特征	8
1-1-2 作用在流体上的力	8
1-1-3 非牛顿型流体	11
第二节 流体静力学	12
1-2-1 流体的密度	12
1-2-2 压强及其表示方法	13
1-2-3 流体静力学基本方程	14
1-2-4 流体静力学基本方程在工程中的应用	16
第三节 流体流动现象	20
1-3-1 流动过程与基本概念	20
1-3-2 流动型态	22
1-3-3 圆管内稳定流动过程数学分析	26
1-3-4 边界层简介	29
第四节 质量、能量和动量衡算	30
1-4-1 连续性方程	31
1-4-2* 纳维尔-斯托克斯方程(Navier-Stokes)	32
1-4-3 机械能衡算	35
第五节 管内流动阻力与能量损失	42
1-5-1 流体阻力与范宁公式	43
1-5-2 层流时阻力损失的计算	44
1-5-3 量纲分析方法	45
1-5-4 湍流时摩擦损失的计算	47
1-5-5 局部阻力损失	51
第六节 流体流动和静力学方程的应用	56
1-6-1 简单管路计算	56
1-6-2 复杂管路	58

1-6-3 可压缩流体管路计算	64
1-6-4 流量的测量	66
习题	75
思考题	80
第二章 流体输送机械	82
本章概要	82
第一节 离心泵	84
2-1-1 离心泵的工作原理及基本结构	84
2-1-2 离心泵的基本方程	86
2-1-3 离心泵的主要性能参数	91
2-1-4 离心泵的特性曲线	92
2-1-5 离心泵的工作点和流量调节	98
2-1-6 离心泵的安装高度	103
2-1-7 离心泵的型号与选用	107
第二节 其他类型的泵	110
2-2-1 往复泵	110
2-2-2 其他类型的泵	112
第三节 气体输送机械	115
2-3-1 离心式风机	115
2-3-2 旋转鼓风机	118
2-3-3 往复式压缩机	119
2-3-4 真空泵	122
习题	124
思考题	126
第三章 非均相机械分离	128
本章概要	128
第一节 概述	129
第二节 颗粒与颗粒群的特性	129
第三节 颗粒的沉降	134
3-3-1 颗粒在流体中的沉降过程	134
3-3-2 重力沉降设备	138
3-3-3 离心沉降与离心沉降设备	141
第四节 过滤	145
3-4-1 概述	145
3-4-2 过滤设备	147

3-4-3 过滤基本方程	150
3-4-4 过滤生产能力及滤饼洗涤	157
习题	160
思考题	162
第四章 热量传递及设备	163
本章概要	163
第一节 概述	165
4-1-1 传热过程及其应用	165
4-1-2 冷、热流体接触传热方式	165
4-1-3 传热的基本方式	167
第二节 热传导(导热)	168
4-2-1 温度场和温度梯度	168
4-2-2 导热速率——傅里叶(Fourier)定律	169
4-2-3 导热系数	169
4-2-4 平壁的导热	172
4-2-5 圆筒壁的稳定导热	175
4-2-6 球壳的稳定导热	178
4-2-7 保温层的临界厚度	178
4-2-8 具有内热源的稳定热传导	179
第三节 对流传热	180
4-3-1 对流传热分析	180
4-3-2 对流传热系数	181
4-3-3 对流传热过程量纲分析	184
4-3-4 流体无相变时的对流传热系数	187
4-3-5 蒸气冷凝对流传热系数	196
4-3-6 沸腾传热对流传热系数	202
第四节 辐射传热	206
4-4-1 基本概念	206
4-4-2 物体的辐射能力	208
4-4-3 两固体间的相互辐射传热	211
4-4-4 对流与辐射联合传热	215
第五节 传热过程计算	217
4-5-1 总传热速率方程	217
4-5-2 热量衡算	219
4-5-3 总传热系数 K	220

4-5-4 平均温差	225
4-5-5 壁温的估算	232
4-5-6 传热效率——传热单元数(NTU)法	234
第六节 换热器	241
4-6-1 夹套式换热器	241
4-6-2 套管式换热器	242
4-6-3 蛇管式换热器	242
4-6-4 列管式(管壳式)换热器	244
4-6-5 换热器的强化途径	253
4-6-6 新型高效换热器	255
习题	259
思考题	263
第五章 蒸馏	264
本章概要	264
第一节 概述	266
5-1-1 蒸馏及其在工业中的应用	266
5-1-2 双组分连续精馏的流程及精馏塔	266
第二节 双组分溶液的气液相平衡	268
5-2-1 双组分溶液气液平衡的自由度	269
5-2-2 双组分理想溶液的气液平衡	269
5-2-3 非理想溶液的气液平衡	275
5-2-4 总压对气液平衡的影响	278
第三节 平衡蒸馏和简单蒸馏	278
5-3-1 平衡蒸馏(闪蒸)	278
5-3-2 简单蒸馏	280
第四节 精馏的流程和原理	283
5-4-1 精馏原理	283
5-4-2 工业精馏装置	285
第五节 双组分混合液连续精馏的计算和操作分析	287
5-5-1 精馏塔操作压力的确定	287
5-5-2 全塔物料衡算	288
5-5-3 精馏段物料衡算和操作线方程	289
5-5-4 提馏段物料衡算和操作线方程	291
5-5-5 进料板物料衡算、热量衡算和进料方程	291
5-5-6 理论塔板数的计算	294

5-5-7 回流比对精馏操作的影响及选择	296
5-5-8 理论塔板数的简捷计算	301
5-5-9 实际塔板数与塔板效率	302
5-5-10 其他类型的双组分连续精馏	306
5-5-11 连续精馏装置的热量衡算	310
5-5-12 双组分连续精馏的操作分析和操作型计算	312
第六节 间歇精馏	318
5-6-1 间歇精馏的装置及特点	318
5-6-2 塔顶馏出液组成恒定的间歇精馏计算	319
5-6-3 回流比不变的间歇精馏计算	321
第七节 特殊精馏	322
5-7-1 恒沸精馏	323
5-7-2 萃取精馏	323
5-7-3 加盐萃取精馏	324
5-7-4 分子蒸馏	326
第八节 板式塔	329
5-8-1 工业生产对塔设备的要求	329
5-8-2 常用板式塔类型	330
5-8-3 板式塔的流体力学性能	335
5-8-4 板式塔的设计计算	338
习题	338
思考题	341
第六章 吸收	343
本章概要	343
第一节 概述	345
第二节 吸收中的气液相平衡	348
第三节 吸收速度	353
6-3-1 分子扩散	353
6-3-2 分子扩散系数	358
6-3-3 涡流扩散与对流传质	362
6-3-4 吸收速率方程式	365
第四节 吸收(或解吸)塔的计算	371
6-4-1 物料衡算——操作线方程	371
6-4-2 填料高度的计算	373
6-4-3 解吸	381

6-4-4 高浓度气体吸收	382
第五节 填料塔	385
6-5-1 填料塔的结构及填料特性	385
6-5-2 填料塔的流体力学特性	387
习题	393
思考题	396
第七章 干燥	398
本章概要	398
第一节 概述	400
7-1-1 干燥过程及对设备的基本要求	400
7-1-2 干燥的方法	400
第二节 湿空气的性质	402
7-2-1 湿空气的性质	402
7-2-2 空气的湿度图及其应用	409
第三节 干燥器的物料衡算和热量衡算	413
7-3-1 物料衡算	413
7-3-2 干燥过程的热量衡算	415
7-3-3 提高干燥过程经济性的措施	420
第四节 物料的干燥速率与干燥时间	421
7-4-1 物料中水分的性质	421
7-4-2 恒定干燥条件下的干燥速度	424
7-4-3 干燥时间的计算	429
第五节 干燥设备	431
7-5-1 概述	431
7-5-2 常用干燥器简介	432
习题	440
思考题	443
第八章 新型分离技术	444
本章概要	444
第一节 超临界流体萃取	445
8-1-1 超临界萃取原理	445
8-1-2 超临界流体萃取基本流程	448
8-1-3 超临界流体萃取的应用	450
第二节 膜分离技术	451
8-2-1 概述	451

8-2-2 膜分离的过程及基本原理	452
8-2-3 膜分离过程的特点	453
8-2-4 各种膜过程简介	455
8-2-5 膜分离设备-膜组件	459
思考题	461
本书主要参考书刊	462
附录	464
一、化工中常用法定计量单位	464
二、单位换算	465
三、水的物理性质	466
四、饱和水蒸气表	467
五、某些液体的物理性质	469
六、某些气体的物理性质	470
七、一些固体材料的热传导系数	472
八、扩散系数	472
九、气体在液体中的溶解度	473
十、某些有机化合物的蒸气压	475
十一、某些二元物系的气液平衡数据	477
十二、泵 IS 型单级单吸离心泵性能表	478
十三、换热器系列标准	480
专业名词索引	486
本书主要符号表	498

绪 论

一、化工生产与单元操作

1. 化工生产

化工生产是指有目的的使原料经过一系列的化学或物理变化,以获得产品的工业过程,有时也称为化学工业。在化工生产中有的产品可直接将原料通过物理加工的方法来获得,例如,天然植物油用物理加工方法(如蒸馏)获得香料产品。但是,由于简单物理加工方法较难使产品达到高纯度或因经济原因,这种加工方法应用得比较少;而绝大多数化工产品的获得都采用化学与物理加工相结合的方法。因此,化工生产的核心还是化学反应过程。然而,为使化学反应能在适宜条件下顺利地进行,需要对反应前的原料进行必要的预处理,使之达到规定的纯度;另外,化学反应过程不可避免地有副反应发生,反应产物除了目标产物外还有副产物和未反应的原料等组分,因此,要获得符合质量要求的产品,必须对产物进行精制与纯化,以获得最终的产品(或中间产品)。同时,化学反应要维持在一定的温度、压力条件下进行,需要在反应过程中进行加热或冷却。所以,化工生产过程不但包括化学变化过程,也包括混合物的分离、精制以及加热、冷却和物料的输送等物理过程,这些过程一般称之为“单元操作”。

例如,乙烯是石油化工的主要产品或原料,在石油化工中居主导地位,而生产乙烯的主要原料是石油炼制过程中的炼厂气和石脑油或轻质油经高温裂解的裂解气,无论是炼厂气还是裂解气,要获得聚合级的乙烯或丙烯,都需要进行一系列的分离操作。如图 0-1 为乙烯生产过程示意图。图 0-2 为典型的裂解气深冷分离流程示意图。

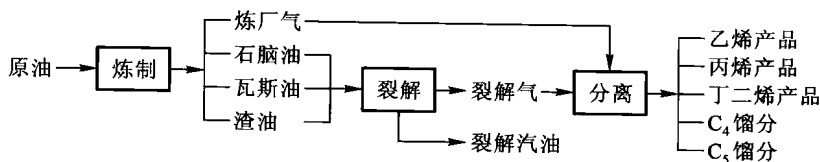


图 0-1 乙烯生产过程示意图

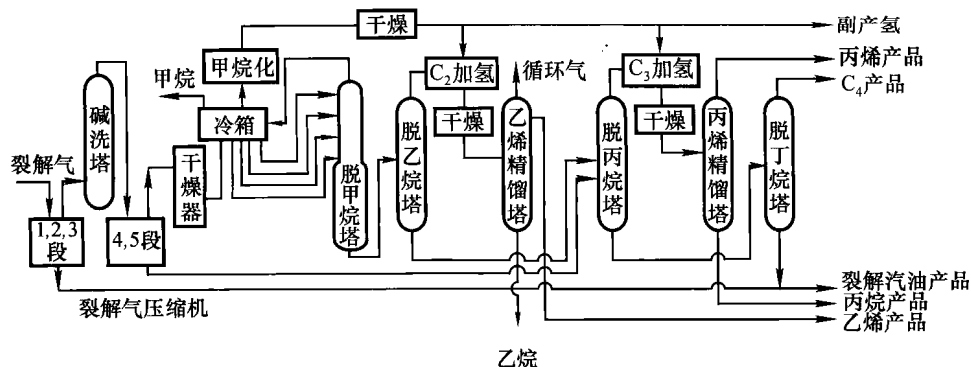


图 0-2 典型的裂解气深冷分离流程示意图

上述生产过程除裂解属化学反应过程外，原油炼制和裂解气分离都是物理加工过程。

一个现代化的化工生产工厂，化学反应设备并不多。绝大多数的设备都是进行原料、中间产物及产物的提纯与精制过程，而且占工厂的大部分投资和操作费用。据统计，化学和石油化学工业中反应设备投资约占总设备投资的 11%，而其他单元操作的设备投资约占 89%；药物和制药工业中反应设备投资约占总设备投资的 10%，而其他单元操作的设备投资约占 90%，这说明单元操作在化工及其相近工业中起着重要的作用。

2. 单元操作

尽管化学工业门类繁多，产品的生产过程多种多样，但都要用许多类型相同，且具有共同特点的基本工艺过程和设备。例如，流体输送、沉降、过滤、加热或冷却、结晶、吸收、蒸馏、萃取及化学反应等典型的单元操作及设备。由于这些具有共性的过程，于是提出了化工“单元操作”的概念。单元操作是指化工及其相近工业生产中常见且遵循共同规律和具有共同作用的基本操作。如石油炼制、乙烯和合成氨生产过程都需要输送各种流体，而输送流体的操作过程都遵循流体流动的规律；生产过程还要对混合物进行精制过程（如吸收、蒸馏等），而吸收、蒸馏过程都遵循传热传质的规律。所以，流体输送、吸收和蒸馏都属于单元操作。

化工及其相近工业生产中应用的单元操作类型较多，按其操作目的分，单元操作可分为：

- (1) 流体输送；
- (2) 物料的混合；
- (3) 物料的加热或冷却；
- (4) 均相混合物的分离；

(5) 非均相混合物的分离。

在对许多单元操作进行研究后,人们逐渐认识到它们物理作用的共同原则,遵循类似的基本规律。所以,单元操作可分为:

(1) 动量传递过程

包括遵循流体力学基本规律的单元操作,如流体输送、沉降、过滤和离心分离等。

(2) 热量传递过程

包括遵循热交换基本规律的单元操作,如传热、蒸发等。

(3) 质量传递过程

包括遵循通过扩散,从一相转移到另一相的过程,如吸收、蒸馏、萃取、吸附、离子交换和膜分离等单元操作。

单元操作所研究的内容包括:单元操作的基本原理和实现该单元操作的典型设备,并根据工艺特点、物料性质确定设备的结构和尺寸。

随着高新技术产业的发展,特别是新材料、生物工程和中药现代化生产的发展,出现了许多新产品、新工艺,对物理加工过程提出了特殊要求,产生了新的单元操作和新化工技术,如膜分离、超临界流体技术、超重力场分离技术、电磁分离等。另外,为了提高效率、降低能耗和绿色化工生产,将各单元操作互相耦合,产生了许多新技术,如反应精馏、萃取精馏、加盐萃取、反应膜分离、超临界结晶、超临界反应、超临界吸附等。这些新技术的发展和应用,将大大促进新材料、生物工程等的发展。

二、四个基本概念

在分析单元操作或化工过程中,经常要用到物料衡算、能量衡算、平衡关系和过程速率这四个基本概念,这些概念是分析和进行化工计算的出发点。

1. 物料衡算

物料衡算也称为质量衡算,其依据是质量守恒定律。它反映一个过程中原料、产物、副产物等之间的关系,即进入的物料量必等于排出的物料量和过程中积累量之和:

$$\text{输入物料的总量} = \text{排出物料的总量} + \text{过程积累的总量}$$

在进行物料衡算时,必须明确下列几点。首先要确定衡算的系统,即衡算对象包括的范围。在工艺计算时,通常以一个生产过程为衡算系统;在设备计算时,以单一个设备或其中一部分,也可以一组设备作为衡算的系统。其次,要确定衡算的基准。一般来说,选择过程中不起变化的量作为衡算的基准。在连续操作中则以单位时间作为基准。另外,还要确定衡算对象。对有化学变化的过

程,衡算对象选择为不发生变化的物质(如具有惰性的物质)或某一个化学元素;在蒸馏操作中,可以选择某一组分作为衡算的对象。最后,还要确定衡算对象的物理量及单位。在计算物料量时可以用质量或物质的量表示,但一般不宜用体积表示,特别是气体的体积随温度和压强的变化而变化。同时还应注意在整个衡算过程中采用的单位应该统一。

物料衡算是化工过程的最基本的计算,通过物料衡算可以为正确地选生产过程的流程和计算原料消耗定额以及设备的生产能力和主要尺寸提供依据。

2. 能量衡算

能量衡算的依据是能量守恒定律。在稳定的过程中,输入的能量必等于输出的能量(包括累计能量和损失能量)。在单元操作和化工过程中主要涉及物料的温度和热量的变化,所以化工计算中最常见的是热量衡算。热量衡算与物料衡算一样,既适用于物理变化过程,也适用于化学变化过程;既适用于化工生产过程整个系统,也适用于单个设备或一个过程。在热量衡算中要特别注意基准温度的选定。

通过热量衡算,可以计算单位产品的能耗,了解能量的利用和损失情况,确定生产过程中需要输入或向外界移走的热量,从而设计换热设备。

3. 平衡关系

任何一个物理或化学变化过程,在一定条件下沿着一定方向进行,最后达到动态平衡为止。例如,传热过程,如果空间两处流体的温度不同,即温度不平衡,热量就会从高温流体处向低温流体处传递,直到两处流体温度相等为止,此时传热过程达到平衡。从宏观来说,两处便没有热量传递。因此,过程的平衡关系可以判断物理或化学变化过程进行的方向以及可能达到的极限。上述传热过程进行的方向是由高温处向低温处,以两处温度相同作为传热过程极限。

4. 过程速率

过程速率是指物理或化学变化过程进行的快慢。一般用单位时间过程进行的变化量表示过程的速率。如传热过程速率用单位时间传递的热量,或用单位时间单位面积传递的热量表示;传质过程速率用单位时间单位面积传递的质量表示。过程进行的速率决定设备的生产能力,过程速率越大,设备生产能力也越大,或在同样产量时所需要的设备尺寸越小。在工程上,过程的速率问题往往比物系平衡问题显得更重要。过程的速率可用如下基本关系表示:

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

过程速率与过程推动力成正比,与过程阻力成反比,所以这三者的关系,类似于电学中的欧姆定律。过程进行的推动力是过程在该瞬间偏离平衡的差额。