

化工原理

上册

蒋维钧 戴猷元 顾惠君 编

清华大学出版社



TQ02

26-1

化 工 原 理

上 册

蒋维钧 戴猷元 顾惠君 编

（北京清华大学）

清 华 大 学 出 版 社

内 容 摘 要

本书为清华大学一类课“化工原理”的教材,在清华大学化工系和环境系等使用多年。

全书分上、下两册。上册包括流体流动、流体输送机械、流体流过颗粒和颗粒层的流动、非均相混合物的分离、传热和蒸发等6章。书末有26个附录;下册包括传质分离过程概论、吸收、蒸馏、气液传热设备、液液萃取、干燥和吸附分离等7章。

本教材与“化工原理”课的实验教材《化工原理实验》一起出版,可以配套使用,也可以单独选用。

读者对象:高等院校化工、生物化工、环境和材料等专业的师生,以及上述专业从事设计、开发和运行的科技人员。

(京)新登字 158 号

化 工 原 理

(上册)

蒋维钧 戴猷元 顾惠君 编

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本: 850×1168 1/32 印张: 22.25 字数: 579 千字

1992年12月第1版 1992年12月第1次印刷

印数: 0001—4000

ISBN 7-302-01048-X/O · 128

定价: 7.00 元

目 录

绪论	1
第一章 流体流动.....	17
第一节 流体流动中的作用力.....	17
1-1-1 体积力和密度	18
1-1-2 压力和静压强	20
1-1-3 剪力、剪应力和粘度	21
第二节 流体静力学基本方程.....	26
1-2-1 流体静力学基本方程	26
1-2-2 流体静力学基本方程的应用	30
1-2-3 流体在离心力场内的静力学平衡	36
第三节 流体流动的基本方程.....	37
1-3-1 概述	37
1-3-2 连续性方程式	41
1-3-3 柏努利方程式	42
1-3-4 柏努利方程式的另一种推导方法	48
1-3-5 柏努利方程式的应用	54
第四节 流体流动现象.....	63
1-4-1 两种流动型态和雷诺准数	63
1-4-2 管内层流与湍流的比较	67
1-4-3 边界层概念	75
第五节 管内流动的阻力损失.....	80
1-5-1 阻力损失及计算通式	80
1-5-2 圆形直管内层流流动的阻力损失	83
1-5-3 因次分析法	84
1-5-4 圆型直管内湍流流动的阻力损失	87

1-5-5	流体在非圆形管道内流动的阻力损失	93
1-5-6	局部阻力损失	94
1-5-7	伴有传热过程的流动阻力损失计算	105
1-5-8	可压缩流体流动的阻力损失计算	106
第六节	管路计算	112
1-6-1	管路计算的类型和基本方法	112
1-6-2	简单管路的计算	113
1-6-3	复杂管路的计算	116
1-6-4	阻力对管内流动的影响	124
第七节	流速和流量的测量	127
1-7-1	测速管	127
1-7-2	孔板流量计和文丘里流量计	129
1-7-3	转子流量计	134
第八节	非牛顿型流体的流动	137
1-8-1	乘方规律流体	137
1-8-2	乘方规律流体管内流动的阻力损失	137
习题	139
思考题	160
第一章符号说明	163
参考文献	165
第二章	流体输送机械	167
第一节	离心泵	168
2-1-1	离心泵的工作原理及主要构件	168
2-1-2	离心泵的基本方程式	173
2-1-3	离心泵的主要性能参数	180
2-1-4	离心泵的特性曲线	182
2-1-5	离心泵的安装高度	189
2-1-6	离心泵的工作点与流量调节	195
2-1-7	离心泵的组合操作	198
2-1-8	离心泵的类型和选用	201
第二节	往复泵	206

2-2-1 往复泵的工作原理	206
2-2-2 往复泵的输液量和流量调节	207
第三节 其它类型的化工用泵	210
第四节 气体输送机械	213
2-4-1 离心式通风机	214
2-4-2 离心鼓风机和压缩机	217
2-4-3 旋转鼓风机和压缩机	219
2-4-4 往复压缩机	220
2-4-5 真空泵	231
习题	233
思考题	238
第二章符号说明	241
参考文献	243
第三章 流体流过颗粒和颗粒层的流动	244
第一节 流体流过颗粒的流动	245
3-1-1 单颗粒的几何特性参数	245
3-1-2 曳力与曳力系数	247
3-1-3 流体流过球形颗粒	248
3-1-4 流体流过其它形状规则的颗粒(圆柱与圆片)	251
3-1-5 流体流过形状不规则的颗粒	253
第二节 颗粒在流体中的流动	253
3-2-1 重力沉降	254
3-2-2 离心沉降	261
第三节 流体流过颗粒床层的流动	264
3-3-1 混合颗粒的几何特性	264
3-3-2 颗粒床层的几何特性	268
3-3-3 流体通过颗粒固定床的压强降	271
第四节 固体流态化	274
3-4-1 流态化过程	275
3-4-2 流化床的流化类型与不正常现象	277
3-4-3 流化床的主要特性	280

3-4-4 流化床的操作范围	281
3-4-5 流化床的直径与高度	287
3-4-6 流化质量及改善流化质量的措施	290
3-4-7 气流输送	292
习题	299
思考题	301
第三章符号说明	302
参考文献	304
第四章 非均相混合物的分离	306
概述	306
第一节 沉降	307
4-1-1 沉降分离的一般原理	307
4-1-2 重力沉降分离	308
4-1-3 离心沉降分离	320
4-1-4 电沉降——电除尘器	337
第二节 过滤	338
4-2-1 概述	338
4-2-2 过滤设备	343
4-2-3 过滤过程计算的理论基础	356
4-2-4 过滤机生产能力的计算	372
第三节 其它分离方法	379
4-3-1 惯性分离器	379
4-3-2 湿法除尘器	380
4-3-3 分离方法的选择	382
习题	383
思考题	389
第四章符号说明	390
参考文献	393
第五章 传热	394
第一节 概述	394
5-1-1 传热在化工生产中的地位	394

5-1-2	热源和冷源	395
5-1-3	传热的三种基本方式	396
5-1-4	两种流体热交换的基本方式	397
5-1-5	典型的间壁式换热器及其传热过程	399
5-1-6	传热速率与热通量	401
5-1-7	稳定与不稳定传热	402
第二节	热传导	402
5-2-1	有关热传导的基本概念	402
5-2-2	热传导速率——傅立叶定律	403
5-2-3	导热系数	404
5-2-4	通过平壁的稳定热传导	407
5-2-5	通过圆筒壁的稳定热传导	414
5-2-6	导热微分方程式	418
第三节	对流传热概说	423
5-3-1	对流传热速率和对流传热系数	424
5-3-2	对流传热机理	425
第四节	传热过程计算	429
5-4-1	总传热速率方程	430
5-4-2	热量衡算	432
5-4-3	总传热系数	433
5-4-4	传热的平均温差	438
5-4-5	传热面积的计算	447
5-4-6	传热单元数法	448
5-4-7	保温层的临界直径	456
5-4-8	不稳定传热	457
第五节	无相变的对流传热	458
5-5-1	影响对流传热的因素	459
5-5-2	对流传热系数经验公式的建立方法	460
5-5-3	管内强制对流传热	465
5-5-4	管外强制对流传热	475
5-5-5	大空间自然对流传热	481

5-5-6 非牛顿型流体的传热	484
第六节 有相变的对流传热	488
5-6-1 冷凝传热过程简介	488
5-6-2 纯蒸汽膜状冷凝时的对流传热系数	490
5-6-3 影响冷凝传热的因素和冷凝过程的强化	497
5-6-4 沸腾传热过程简介	502
5-6-5 沸腾传热机理	503
5-6-6 影响沸腾传热的因素及强化沸腾传热的途径	508
5-6-7 沸腾传热系数的计算	510
第七节 辐射传热	512
5-7-1 热辐射的基本概念	513
5-7-2 物体的辐射能力	515
5-7-3 物体间的辐射传热	520
5-7-4 气体的热辐射	526
5-7-5 对流和辐射的联合传热	530
第八节 换热器	532
5-8-1 间壁式换热器的类型及选用	533
5-8-2 换热器传热过程的强化	546
5-8-3 列管式换热器的设计和选用	548
习题	561
思考题	575
第五章符号说明	577
参考文献	579
第六章 蒸发	580
第一节 概述	580
6-1-1 蒸发过程	580
6-1-2 蒸发的基本流程	581
6-1-3 蒸发的操作方法	582
6-1-4 蒸发过程的主要经济指标	585
第二节 蒸发设备	587
6-2-1 循环型蒸发器	587

6-2-2	非循环型(单程型)蒸发器	592
6-2-3	各类蒸发器的性能比较	595
6-2-4	蒸发的辅助设备	595
第三节	单效蒸发的计算	598
6-3-1	物料衡算	599
6-3-2	热量衡算	599
6-3-3	传热面计算	605
6-3-4	单效蒸发计算小结	615
第四节	多效蒸发器及其计算	616
6-4-1	多效蒸发流程	616
6-4-2	多效蒸发的温度差损失和有效温度差	619
6-4-3	多效蒸发最佳效数的确定	621
6-4-4	多效蒸发的计算	623
第五节	蒸发过程的设计	633
	习题	634
	思考题	637
	第六章符号说明	637
	参考文献	639
附录一	化工常用法定计量单位	641
附录二	常用单位的换算	642
附录三	某些气体的重要物理性质	646
附录四	某些液体的重要物理性质	648
附录五	干空气的物理性质(101.33kPa)	652
附录六	水的物理性质	653
附录七	饱和水蒸汽表(按温度排列)	654
附录八	饱和水蒸汽表(按压强排列)	656
附录九	某些有机液体的相对密度(液体密度与4℃水的密度之比)共线图(常压下).....	659
附录十	液体的粘度共线图(常压下)	661
附录十一	气体及蒸汽的粘度共线图	664
附录十二	液体的比热容共线图	666

附录十三	气体及蒸汽的比热容共线图	669
附录十四	常用固体材料的密度和比热容	671
附录十五	某些固体材料的导热系数	672
附录十六	某些液体的导热系数	673
附录十七	气体的导热系数共线图	674
附录十八	蒸发潜热(气化热)共线图	676
附录十九	液体的表面张力共线图	678
附录二十	壁面污垢的热阻	681
附录二十一	无机盐溶液在 101.33kPa 下的沸点	682
附录二十二	101.33kPa 下溶液的沸点升高与浓度的关系	684
附录二十三	管子规格(摘录)	685
附录二十四	泵规格(摘录)	688
附录二十五	4-72-11 型离心通风机规格(摘录)	696
附录二十六	管壳式热交换器系列标准(摘录)	698

绪 论

一、本课程的内容

化工原理是化工及其它化学加工过程类专业的一门重要的技术基础课,它的内容是讲述化工单元操作的基本原理、典型设备的结构原理、操作性能和设计计算。化工单元操作是组成各种化工生产过程、完成一定加工目的的基本过程。

“化工原理”这个名称是沿用世界上第一本系统阐述单元操作原理和计算方法的著作,即 W. H. Walker, W. K. Lewis 和 W. H. McAdams 合著的 Principles of Chemical Engineering (1923 年) 的名称,也直接称为化工单元操作或单元操作。我国在解放以前一直称“化工原理”,50 年代曾改为用苏联习用的名称“化工过程及设备”。鉴于这门学科是化学工程学科的重要基础部分,也是化学工艺学的重要基础,“化工原理”四字能简单明确地表达这门课程的性质与重要性,所以目前仍采用“化工原理”这个名称。

化工产品成千上万,每种产品均有它自己特定的生产过程。但是,分析众多的生产过程可以发现所有化工生产过程,除了每种产品特有的化学反应过程外,均由为数不多的基本过程(单元操作)所组成。从生产某种产品的意义上说,化学反应过程是生产过程的核心,但实际上为化学反应过程创造适宜条件和将反应产物分离制得纯净产品的单元操作在生产过程中占极重要的地位。通常,它们在工厂的设备投资和操作费用中占主要的比例,决定了整个生产的经济效益。

随着化工生产的发展,化工单元操作不断发展,目前化工生产

中常用的单元操作已达 20 余种(表 1),可以从不同的角度加以分类。

表 1 常用单元操作

类别	名称	目的
流体动力过程	流体输送	以一定流量将流体从一个设备送到另一个设备
	沉降	从气体或液体中分离悬浮的固体颗粒、液滴或气泡
	过滤	从气体或液体中分离悬浮的固体颗粒
	混合	使液体与其它物质均匀混合
	流态化	用流体使固体颗粒悬浮并使其具有流体状态的特性
传热过程	换热	使物料升温、降温或改变相态
	蒸发	使非挥发性物质稀溶液的溶剂蒸发,溶液浓缩
传质过程	蒸馏	利用组分挥发性不同通过汽化、冷凝,分离液体混合物
	吸收	用液体吸收剂分离气体混合物
	萃取	用液体萃取剂分离液体混合物
	浸取	用液体溶液浸渍固体物料,使可溶组分分离出来
	吸附	用固体吸附剂分离气体或液体混合物
	离子交换	用离子交换剂从溶液中提取或除去某些离子
	膜分离	用固体或液体膜分离气体或液体混合物
热质传递过程	干燥	加热固体使其所含液体(如水)汽化而除去
	增温与减温	调节与控制空气或其它气体中的水汽含量
	结晶	使溶液中的溶质变成晶体析出
热力过程	压缩	使气体提高压力
	冷冻	将物料冷却到环境温度以下
	粉碎	用外力使固体物料变成尺寸更小的颗粒
	颗粒分级	将固体颗粒分成大小不同的部分

按照操作的目的,单元操作可以分为以下三类:

(1) 改变物料的状态,其目的是使物料满足实现化学反应或

其它单元操作所需要的粒度、温度等条件和达到对产品要求的物理状态。如固体物料的粉碎、分级与造粒；物料的升温与降温；空气的增湿与减湿等。

(2) 混合物的分离，其目的是实现原料、中间产品与产品的分离和纯化。如用沉降或过滤的方法分离非均相混合物，用蒸馏、吸收、萃取等方法分离气体或液体均相混合物。混合物的分离在化工单元操作中占有特别重要的地位，是单元操作研究发展最活跃的领域。

(3) 物料的输送，包括流体的输送与固体的输送。

按照操作的主要物理特征和基本原理，单元操作大致可分为以下6类：

(1) 流体动力过程。以流体力学，即动量传递为主要理论基础的单元操作，如流体输送、沉降、过滤等。

(2) 传热过程。以热量传递为主要理论基础的单元操作，如换热、蒸发等。

(3) 传质过程。以质量传递为主要理论基础的单元操作，如蒸馏、吸收、萃取等。

(4) 热质传递过程。质量传递与热量传递同时进行的过程，如干燥、结晶、增湿与减湿等。有时把这类单元操作划入传质或传热过程。

(5) 热力过程。以热力学为主要理论基础的过程，如压缩、冷冻等。

(6) 机械过程。以机械力学为主要理论基础的过程。如固体物料的粉碎、分级等。

本课程采用后一种分类，讲述其中(1)到(4)类中最常用的单元操作。讨论各类单元操作的共同理论基础，各个单元操作的原理，典型设备的结构与操作特性，过程和设备的设计计算，设备的改进与强化以及分析研究问题的方法。

二、基本概念与方法

1. 过程的平衡与速率

平衡与速率是分析单元操作过程的两个基本方面。

过程的平衡问题说明过程进行的方向和所能达到的极限。例如传热过程,当两物质温度不同时,即温度不平衡,热量就会从高温物质向低温物质传递,直到两物质的温度相等为止,此时过程达到平衡,两物质间再也没有热量的净传递。又如吸收过程,含氨的空气与清水接触,氨在两相间不呈平衡,空气中的氨将溶解进入水中,当水中的氨含量增加到一定值时,氨在气液两相间达到平衡,氨就不再溶入水中。化工过程的平衡是化工热力学研究的问题,所以化工热力学是化工原理的一个重要基础。

过程的速率是指过程进行的快慢。当过程不是处于平衡状态时,则此过程就将进行。过程的速率和过程所处的状态与平衡状态的距离以及其它很多因素有关。过程所处的状态与平衡状态之间的距离通常称为过程的推动力,例如两物质间的传热过程,两物质的温度差就是过程的推动力,通常过程的速率表示成以下关系式:

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

即过程的速率与推动力成正比,与阻力成反比。显然,过程的阻力是各种因素对过程速度影响的总的体现。具体分析各种化工单元操作过程的机理可知,过程的速率取决于过程的机理。多数重要单元操作过程的进行与动量传递、热量传递或质量传递有关,所以这3种传递,即传递过程原理是化工原理的另一个重要基础。

2. 3种衡算

质量衡算、能量衡算与动量衡算是化工原理课程中分析问题的基本方法。质量衡算的依据是质量守恒定律,能量衡算的依据是

能量守恒和热力学第一定律,动量衡算的依据则是动量守恒定律即牛顿第二运动定律。

用衡算的方法来分析各种与动量传递,热量传递和质量传递有关的过程时,首先要划定衡算的范围,即衡算的系统。根据范围(或系统)的大小,衡算分为微分衡算与总衡算两种。微分衡算取设备或管道中一个微元体为衡算范围,在直角坐标系中微元体为 $dx dy dz$ (见图1)。如果在设备或管道的横截面上各种参数无变化时,也可以取其一微元段 dz 作为微分衡算的范围。总衡算的范围不是微元体或微元段,而是设备的一个大的部分,或整个设备,也可以是包括几个设备的一段生产流程或整个车间,甚至整个工厂。

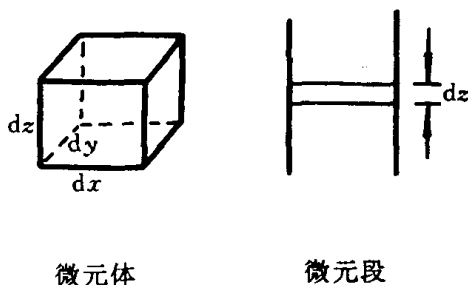


图1 微分衡算系统

这里只就总质量衡算与总能量衡算中的热量衡算加以说明,其它的衡算将在后面的有关章节中介绍。

(1) 质量衡算

质量衡算常称物料衡算,它反映生产过程中各种物料,如原料、产物、副产物等之间的量的关系,是分析生产过程与每个设备的操作情况和进行过程与设备设计的基础。进行物料衡算时首先要划定衡算的系统,其次要确定衡算的对象与衡算的基准。对于划定的衡算系统(例如一个设备或若干个设备组成的系统),根据质量守恒定律,一定时间 t 内输入系统的物料质量等于从系统输出

的物料质量和系统中积累的物料质量,即

$$\sum F = \sum D + A \quad (1)$$

式中: $\sum F$ —— t 时间内输入物料质量的总和;

$\sum D$ —— t 时间内输出物料质量的总和;

A —— t 时间内系统中积累的物料质量的总和。

上面所说的一定时间 t 就是衡算的基准,通常取单位时间,如 1 h, 1 min 等。根据过程的具体情况,为便于分析问题和计算,也可以取其它的基准,例如对于间歇操作,可取每处理一批物料为基准。

式(1)是以总物料为衡算对象的衡算式。物料衡算也可以某种元素为衡算对象,对于没有发生化学反应的系统,也可以某种物质为衡算对象进行衡算,得出与式(1)相同的衡算式。

对于稳态操作过程,系统中各处的所有操作参数,如温度、压强、密度等不随时间而变,系统中无物料的积累,即 A 等于零,故

$$\sum F = \sum D, \quad (2)$$

即输入的材料质量等于输出的材料质量。

例 1 在生产 KNO_3 的过程中,质量分数为 0.2 的纯 KNO_3 水溶液以 1 000 kg/h 的流量送入蒸发器,在 422 K 下蒸发出部分水而得 50% 的浓 KNO_3 溶液,然后送入冷却结晶器,在 311 K 下结晶,得到含水 0.04 的 KNO_3 结晶和含 KNO_3 0.375 的饱和溶液。前者作为产品取出,后者循环回到蒸发器。过程为稳态操作,试计算 KNO_3 结晶产品量、水蒸发量和循环的饱和溶液量。

解: 首先根据题意画出过程的物料流程图(图 2)。

1) 求 KNO_3 结晶产品量 P

取包括蒸发器和冷却结晶器的整个过程为系统(虚线框 I),取 1 h 为衡算基准,以 KNO_3 为衡算对象,因系稳态操作,输入系统的 KNO_3 量等于从系统输出的量,即