

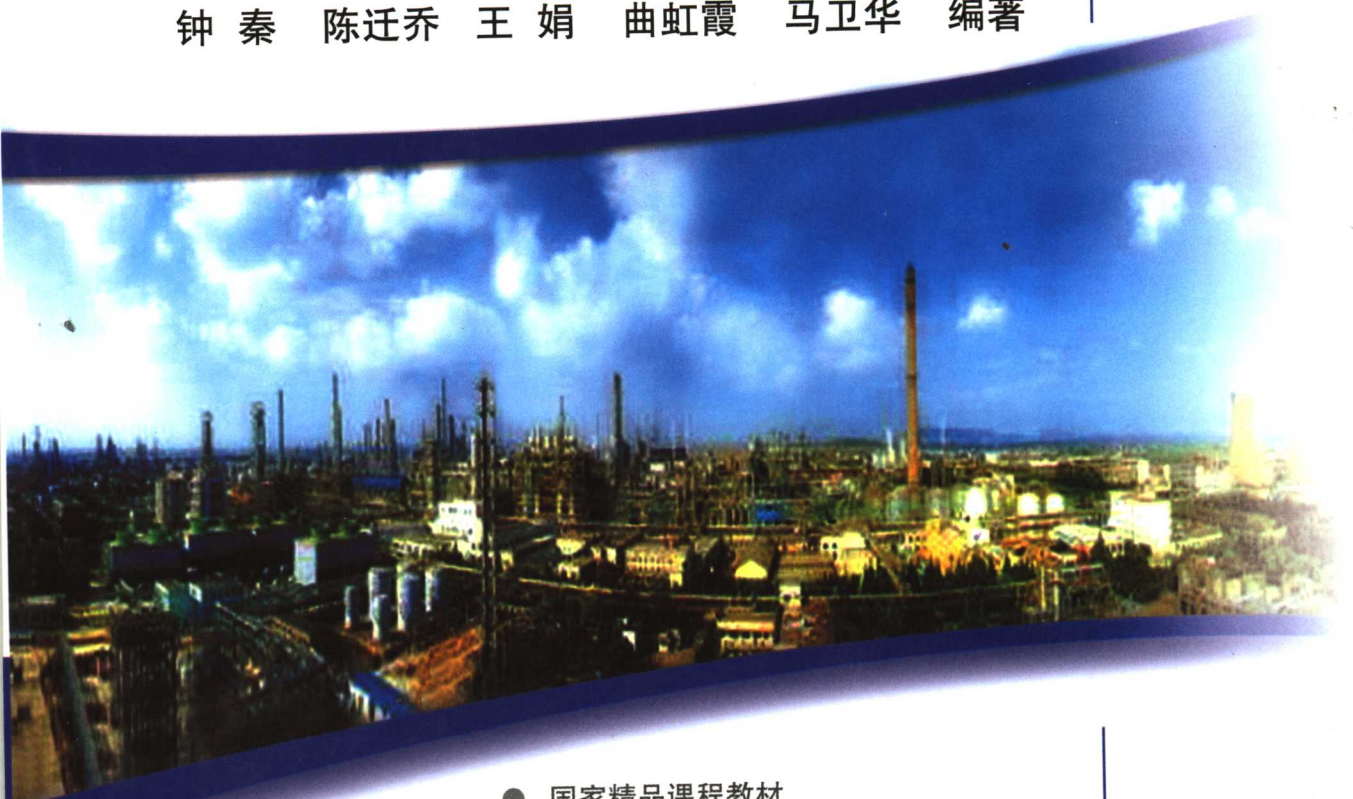


高等院校化学与化工学科“十一五”规划教材

化工原理

(第2版)

钟秦 陈迁乔 王娟 曲虹霞 马卫华 编著



- 国家精品课程教材
- 面向21世纪高等教育教学改革
- 厚基础，宽专业，重创新能力培养
- 简明精炼，适合少学时化工原理的教学



国防工业出版社
National Defense Industry Press



高等院校化学与化工学科“十一五”规划教材

化工原理

(第2版)

钟 秦 陈迁乔 王 娟 曲虹霞 马卫华 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书以过程原理的共性和处理工程问题的方法论作为贯穿化工单元操作的两条主线,注意从典型实例的剖析中提炼若干重要的工程观点,以期提高读者处理实际工程问题的能力。全书共八章,内容包括绪论、流体流动、流体输送机械、机械分离、传热、蒸馏、吸收、干燥和其它化工单元操作过程。每章均有例题和习题。

全书概念论述清楚,内容由浅入深,突出重点,主次分明,便于自学,可作为大专院校有关专业的教材使用,也可供化工部门从事科研、开发、设计和生产的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理/钟秦等编著.—2版.—北京:国防工业出版社,2007.8

高等院校化学与化工学科“十一五”规划教材

ISBN 978-7-118-05248-0

I.化... II.钟... 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(2007)第097273号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号 邮政编码100044)

新艺印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 27 $\frac{1}{4}$ 字数 643千字

2007年8月第2版第1次印刷 印数 1—3000册 定价 43.00元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

国家精品课程教材

前 言

本教材是在总结南京理工大学化工学院近六年使用《化工原理》(国防工业出版社, 2001)教学实践的基础上, 结合国家精品课程建设修订再版的。

本教材的编写旨在突出理论联系实际, 体现工科特色, 不求学科知识的全面性, 重在突出学科重点、基本观点和工程处理方法; 不求包揽学生各教学环节的详尽知识和材料, 意在培养学生从其它参考资料中获取知识和材料的能力; 并给教师在学科深度和广度上以及教学风格上留有发挥的余地, 努力满足 21 世纪人才培养的要求: 启迪智力、培养创新能力。

本教材将化工单元操作按过程共性归类, 以动量传递为基础, 叙述了流体输送、流体通过颗粒层的流动及其相关的单元操作; 以热量传递为基础, 阐述了换热操作; 以质量传递的原理论述了蒸馏、吸收等单元操作, 以及热量和质量同时传递的干燥操作。为了使教材既做到少而精, 又为学生进一步深造提供方便, 把蒸发、液液萃取、超临界萃取和液膜萃取、膜分离等单元操作放在最后一章, 作简明扼要的叙述。

此次再版补充了可压缩流体的管路计算和非牛顿流体基础、真空泵的选用; 补充了载热体的选择、精馏操作性问题的定性分析等, 删除了固体流态化部分。各章都更换或补充了部分例题和习题。

本教材由钟秦、陈迁乔、王娟、曲虹霞和马卫华编写, 其中绪论和第八章其它化工单元操作过程由钟秦编写, 第一章流体流动和第二章流体输送机械由陈迁乔编写, 第三章机械分离和第五章蒸馏由王娟编写, 第四章传热和第七章干燥由曲虹霞编写, 第六章吸收和附录由马卫华编写。全书由杜炳华教授主审。

本次修订再版, 是我校化工原理国家精品课程建设的重要内容之一, 获得了江苏省高等学校精品教材立项建设的资助。我校化工原理教学的全体教师对第一版教材进行了认真地总结和讨论, 提出了许多建设性的修改意见。本教材的编写还广泛参考了国内外多种版本的同类教材。编者在此一并致谢。

鉴于编者水平与经验有限, 第二版仍会存在不足之处, 恳望使用本教材的师生不吝赐教, 批评指正。

编 者

2007 年 5 月

目 录

绪论/1

第一章 流体流动/6

1.1 流体静力学基本方程式/6

- 1.1.1 流体的密度/6
- 1.1.2 流体的静压强/8
- 1.1.3 流体静力学基本方程式/9
- 1.1.4 流体静力学基本方程式的应用/11

1.2 流体流动的基本方程式/15

- 1.2.1 流量与流速/15
- 1.2.2 稳定流动与不稳定流动/17
- 1.2.3 连续性方程/17
- 1.2.4 伯努利方程/18
- 1.2.5 伯努利方程式的应用/21

1.3 管内流体流动现象/26

- 1.3.1 黏度/27
- 1.3.2 流动类型与雷诺准数/28
- 1.3.3 层流与湍流/29
- 1.3.4 边界层的概念/31

1.4 流体流动的阻力损失/33

- 1.4.1 层流时直管阻力损失计算/33
- 1.4.2 湍流时直管阻力损失计算/34
- 1.4.3 局部阻力损失/40
- 1.4.4 管路阻力对管内流动的影响/44

1.5 流体输送管路的计算/46

- 1.5.1 简单管路/46
- 1.5.2 复杂管路/49
- 1.5.3 可压缩流体的管路计算/52

1.6 流速和流量的测量/54

1.6.1 测速管/54

1.6.2 孔板流量计/55

1.6.3 文丘里流量计/58

1.6.4 转子流量计/59

1.7 非牛顿流体的流动/60

- 1.7.1 非牛顿流体的基本特性/60
- 1.7.2 幂律流体在管内的定态流动/62

习题/63

第二章 流体输送机械/70

2.1 离心泵/70

- 2.1.1 离心泵的工作原理/70
- 2.1.2 离心泵的理论压头/71
- 2.1.3 离心泵的功率与效率/74
- 2.1.4 离心泵的特性曲线/74
- 2.1.5 离心泵的工作点与流量调节/77
- 2.1.6 并联与串联操作/80
- 2.1.7 离心泵的安装高度/80
- 2.1.8 离心泵的类型与选用/83

2.2 往复泵/86

- 2.2.1 往复泵的构造及操作原理/86
- 2.2.2 往复泵的流量调节/87

2.3 其它化工用泵/88

- 2.3.1 正位移泵/88
- 2.3.2 非正位移泵/89

2.4 气体输送机械/91

- 2.4.1 通风机/91
- 2.4.2 鼓风机/93
- 2.4.3 压缩机/94

2.4.4	真空泵/97
	习题/99
第三章	机械分离/101
3.1	颗粒的沉降运动/101
3.1.1	流体绕过颗粒的流动/101
3.1.2	静止流体中颗粒的自由沉降/104
3.1.3	重力沉降设备/108
3.1.4	离心沉降/111
3.1.5	离心沉降设备/113
3.2	流体通过颗粒床层的流动/122
3.2.1	颗粒床层的特性/122
3.2.2	流体通过固定床的阻力/123
3.2.3	过滤/124
3.3	机械分离方法的选择/142
	习题/143
第四章	传热/145
4.1	概述/145
4.1.1	化工生产中的传热/145
4.1.2	传热过程/146
4.2	热传导/146
4.2.1	傅里叶定律/147
4.2.2	导热系数/147
4.2.3	平壁稳定热传导/149
4.2.4	圆筒壁稳定热传导/151
4.3	对流传热/153
4.3.1	对流传热分析/153
4.3.2	牛顿冷却定律和对流传热系数/154
4.3.3	对流传热的因次分析/155
4.3.4	无相变对流传热系数的经验关 联式/157
4.4	有相变的对流传热/164
4.4.1	蒸气冷凝传热/165
4.4.2	液体沸腾传热/168

4.5	传热过程的计算/170
4.5.1	热量衡算/170
4.5.2	总传热速率微分方程/170
4.5.3	总传热系数 K /171
4.5.4	传热推动力和总传热速率方程/174
4.5.5	稳定传热过程的计算/177
4.5.6	不稳定传热过程计算/183
4.6	辐射传热/184
4.6.1	基本概念和定律/184
4.6.2	两固体间的辐射传热/186
4.7	换热器/189
4.7.1	间壁式换热器的类型/189
4.7.2	列管式换热器的选用/195
	习题/202

第五章 蒸馏/206

5.1	概述/206
5.2	两组分理想物系的气液平衡/207
5.2.1	两组分理想物系的气液平衡关系/207
5.2.2	两组分理想溶液的气液平衡相图/209
5.3	平衡蒸馏和简单蒸馏/212
5.3.1	平衡蒸馏/212
5.3.2	简单蒸馏/213
5.4	精馏原理和流程/215
5.4.1	多次部分汽化与部分冷凝/215
5.4.2	塔板的作用/218
5.4.3	精馏操作流程图/218
5.5	两组分连续精馏的计算/219
5.5.1	理论板的概念及恒摩尔流假定/219
5.5.2	物料衡算和操作线方程/220
5.5.3	进料热状况的影响/222
5.5.4	理论板层数的求法/224
5.5.5	回流比的影响与选择/229
5.5.6	理论板数的简捷计算/234
5.5.7	塔高和塔径的计算/236

- 5.5.8 两组分精馏的其它类型/238
- 5.5.9 精馏塔的操作和调节/244
- 5.5.10 精馏装置的热量衡算/247
- 5.6 间歇精馏/249
 - 5.6.1 馏出液组成维持恒定的操作/249
 - 5.6.2 回流比维持恒定的操作/251
- 5.7 板式塔/251
 - 5.7.1 塔板结构/251
 - 5.7.2 塔板的流体力学状况/253
- 习题/255
- 第六章 吸收/259
 - 6.1 概述/259
 - 6.2 气液相平衡/261
 - 6.2.1 气体在液体中的溶解度/261
 - 6.2.2 亨利定律/262
 - 6.2.3 相平衡与吸收过程的关系/265
 - 6.3 传质机理与吸收过程的速率/267
 - 6.3.1 分子扩散与费克定律/267
 - 6.3.2 等摩尔逆向扩散/268
 - 6.3.3 单方向扩散/269
 - 6.3.4 分子扩散系数/271
 - 6.3.5 单相内的对流传质/273
 - 6.3.6 两相间传质的双膜理论/275
 - 6.3.7 总传质速率方程式/276
 - 6.3.8 传质速率方程式的各种表示形式/278
 - 6.4 吸收塔的计算/280
 - 6.4.1 物料衡算与操作线方程/281
 - 6.4.2 吸收剂的用量与最小液气比/282
 - 6.4.3 填料层高度的计算/285
 - 6.4.4 吸收塔的调整与操作计算/294
 - 6.5 解吸塔的计算/295
 - 6.6 填料塔/298
 - 6.6.1 填料塔的结构及填料特性/298
 - 6.6.2 填料塔内气液两相流动特性/300

- 6.6.3 塔径的计算/302
- 6.6.4 填料塔的附件/304
- 习题/309

第七章 干燥/312

- 7.1 概述/312
 - 7.1.1 固体物料的去湿方法/312
 - 7.1.2 对流干燥特点/312
- 7.2 湿空气的性质和湿度图/313
 - 7.2.1 湿空气的性质/313
 - 7.2.2 湿空气的 $I-H$ 图/319
- 7.3 干燥过程的物料衡算和热量衡算/322
 - 7.3.1 物料中含水量的表示方法/323
 - 7.3.2 干燥器的物料衡算/323
 - 7.3.3 干燥过程的热量衡算/325
 - 7.3.4 干燥器出口状态的确定及干燥过程的计算/326
 - 7.3.5 干燥系统的热效率/327
- 7.4 干燥速率与干燥时间/329
 - 7.4.1 物料中所含水分的性质/330
 - 7.4.2 恒定干燥条件下的干燥速率/331
 - 7.4.3 恒定干燥条件下干燥时间的计算/333
- 7.5 干燥器/335
 - 7.5.1 干燥器的主要型式/336
 - 7.5.2 干燥器的选型/345
 - 7.5.3 干燥器设计/346
- 习题/349

第八章 其它化工单元操作过程/352

- 8.1 蒸发/352
 - 8.1.1 基本概念/352
 - 8.1.2 单效蒸发/353
 - 8.1.3 多效蒸发/360
 - 8.1.4 蒸发器的选型/361

8.2 液液萃取/363	8.4.1 各种膜分离过程简介/382
8.2.1 基本概念/363	8.4.2 膜分离过程的主要传递机理/385
8.2.2 萃取过程的计算/368	8.4.3 分离膜/386
8.2.3 萃取设备的选择/375	8.4.4 膜组件/388
8.3 超临界萃取和液膜萃取/378	习题/393
8.3.1 超临界萃取/378	附录/395
8.3.2 液膜萃取/380	参考文献/434
8.4 膜分离/382	

绪 论

一、化工过程与单元操作

对原料进行化学加工以获得有用产品的生产过程称为化工生产过程。显然,其核心是化学反应过程及其设备——反应器。但是,为使化学反应过程得以经济有效地进行,反应器内必须保持某些优惠条件,如适宜的压力、温度和物料的组成等。为此,原料必须经过一系列的预处理以除去杂质,达到化学反应要求的纯度、温度和压力,这些过程统称为前处理。反应产物同样需要经过各种后处理过程加以精制,以获得最终产品或中间产品。

例如,乙炔法制取聚氯乙烯塑料的生产是以乙炔和氯化氢为原料进行加成反应以制取氯乙烯单体,然后在 0.8MPa、55℃ 左右进行聚合反应获得聚氯乙烯。在进行加成反应前,必须将乙炔和氯化氢中所含各种有害物质除去,以免反应器中的催化剂中毒失效。反应生成物(氯乙烯单体)中含有未反应完的氯化氢及其它副反应产物。未反应的氯化氢必须首先除去以免除其对设备、管道的腐蚀,然后将反应后的气体压缩、冷凝、精馏并除去其它杂质,达到聚合反应所需的纯度和聚集状态。聚合所得的聚氯乙烯和水的悬浮液须经分离脱水、干燥而后成为产品。生产过程可简要如图 0-1 所示。

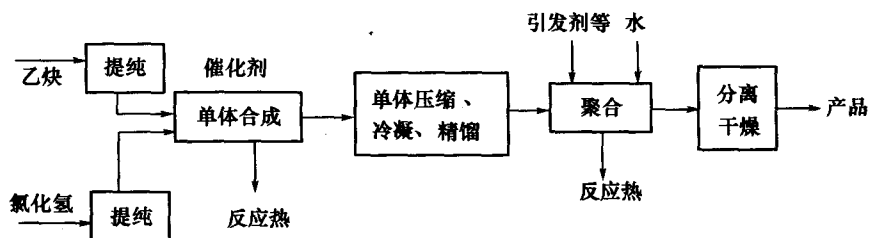


图 0-1 乙炔法制取聚氯乙烯塑料的生产过程示意图

此生产过程除单体合成和聚合属化学反应过程外,原料和反应物的提纯、精制等工序均属前后处理过程。前后处理工序多数属纯物理过程,但却是化工生产不可缺少的。

实际上,在一个现代化的、设备林立的大型工厂中,反应器为数并不多,绝大多数的设备中都进行着各种前后处理操作。也就是说,现代化学工业中的前后处理工序占有着企业的大部分设备投资和操作费用。因此,目前已不是单纯由反应过程的优惠条件来决定必要的前后处理过程,而必须总体地确定全系统的优惠条件。由此可见,前后处理过程在化工生产中的重要地位。

在化学工业的历史发展中,起初是按物理过程的目的,将各种前后处理归纳成一系列的单元操作,同时也兼顾过程的原理和相态,见表 0-1。

表 0-1 中只列出了常用的单元操作,此外尚有一些不常用的单元操作。而且,随着生产发展对前后处理过程提出的一些特殊要求,又不断地发展出若干新的单元操作。

表 0-1 化工常用单元操作

单元操作	目的	物态	原理	传递过程
流体输送	输送	液或气	输入机械能	动量传递
搅拌	混合或分散	气-液;液-液; 固-液	输入机械能	动量传递
过滤	非均相混合物分离	液-固;气-固	尺度不同的截留	动量传递
沉降	非均相混合物分离	液-固;气-固	密度差引起的沉降运动	动量传递
加热、冷却	升温、降温,改变相态	气或液	利用温度差而传入或移出热量	热量传递
蒸发	溶剂与不挥发性溶质的分离	液	供热以汽化溶剂	热量传递
气体吸收	均相混合物分离	气	各组分在溶剂中溶解度的不同	物质传递
液体精馏	均相混合物分离	液	各组分间挥发度的不同	物质传递
萃取	均相混合物分离	液	各组分在溶剂中溶解度的不同	物质传递
干燥	去湿	固体	供热汽化	热、质同时传递
吸附	均相混合物分离	液或气	各组分在吸附剂中的吸附能力不同	物质传递

单元操作按其理论基础可分为下列三类:

(1) 流体流动过程(Fluid Flow Process):包括流体输送、搅拌、沉降和过滤等,它们都遵循动量传递的原理。

(2) 传热过程(Heat Transfer Process):包括热交换和蒸发等,它们都遵循热量传递的原理。

(3) 传质过程(Mass Transfer Process):包括蒸馏、吸收、萃取、吸附、干燥、结晶和膜分离等,它们都遵循质量传递的原理。

流体流动时,流体内部由于流体质点(或分子)的速度不同,它们的动量也就不同,在流体质点随机运动和相互碰撞过程中,动量从速度大处向小处传递,这称为动量传递。所以流体流动过程也称为动量传递过程(Momentum Transfer Process)。

动量传递与热量传递和质量传递类似,热量传递是流体内部因温度不同,有热量从高温处向低温处传递,质量传递是因物质在流体内存在浓度差,物质从浓度高处向浓度低处传递。在流体中的这三种传递现象(Transport Phenomena),都是由于流体质点(或分子)的随机运动所产生的。若流体内部有温度差存在,当有动量传递的同时必有热量传递;同理,若流体内部有浓度差存在时,也会同时有质量传递。若没有动量传递,则热量传递和质量传递主要是因分子的随机运动产生的现象,其传递速率较缓慢。要想增大传递速率,需要对流体施加外力,使它流动起来。

由上述可知流体流动的基本原理,不仅是流体输送、搅拌、沉降及过滤的理论基础,也是传热与传质过程中各单元操作的理论基础,因为这些单元操作中的流体都处于流动状态。传热的基本原理,不仅是热交换和蒸发的理论基础,也是传质过程中某些单元操作(例如干燥)的理论基础。因为干燥操作中,不仅有质量传递而且有热量传递。因此,流体力学、传热及传质的基本原理是各单元操作的理论基础。

人们会注意到上述的单元操作,有许多是用来分离混合物。沉降与过滤用于非均相物系的分离,包括含尘或含雾的气体、含固体颗粒的悬浮液、由两种不互溶液体组成的乳

浊液等;蒸发用于分离由挥发性溶剂和不挥发的溶质组成的溶液;吸收是利用各组分在液体溶剂中的溶解度不同分离气体混合物;蒸馏是利用各组分的挥发度不同,分离均相液体混合物;萃取是利用各组分在液体萃取剂中的溶解度不同,分离液体混合物;吸附是利用气体或液体中各组分对固体吸附剂表面分子结合力的不同,使其中一种或几种组分进行吸附分离;干燥是对湿固体物料加热,使所含水分汽化而得到干固体产品的操作;结晶是利用冷却或溶剂汽化的方法,使溶液达到过饱和而析出晶体的操作;膜分离用于分离液体或气体混合物。

上述分离单元操作中,通常把沉降与过滤归属机械分离操作,而其余归属传质分离操作。

二、《化工原理》课程的性质与任务

为学习化工单元操作而编写的教材,在我国习惯上称之为《化工原理》(*Principles of Chemical Engineering*)。

《化工原理》是化工及其相关专业学生必修的一门基础技术课程,它在《数学》、《物理》、《化学》、《物理化学》等基础课与专业课之间,起着承先启后的作用,是自然科学领域的基础课向工程科学的专业课过渡的入门课程。其主要任务是介绍流体流动、传热和传质的基本原理及主要单元操作的典型设备构造、操作原理、过程计算、设备选型及实验研究方法等。这些都密切联系生产实际,以培养学生运用基础理论分析和解决化工单元操作中各种工程实际问题的能力,为专业课学习和今后的工作打下坚实的基础。

从上面介绍可知,单元操作种类很多,每种都有十分丰富的内容,在有限学时内,只有以三种传递现象的基本原理为主线,选择几种典型的单元操作来学习,以物料衡算、能量衡算、平衡关系、传递速率、经济核算等五种基本概念为理论依据,掌握单元操作通用的学习方法和分析问题的思路,培养理论联系实际的观点和方法,提高单元操作设备的设计计算、操作、选型、实验研究方法与技能,增强解决工程实际问题的能力。

三、单元操作中常用的基本概念

在研究化工单元操作时,经常用到下列五个基本概念,即物料衡算、能量衡算、物系的平衡关系、传递速率及经济核算。这五个基本概念贯穿于本课程的始终,在这里仅作简要说明,详细内容见相关章节。

物料衡算与能量衡算,在单元操作设备的设计、操作、研究中,都有重要作用。通过衡算,可以了解设备的生产能力、产品质量、能量消耗以及设备的性能和效率。在单元设备的理论研究中,也要通过衡算建立理论方程。

物料衡算和能量衡算时,要选定衡算系统,既可以是一个单元设备或几个单元设备的组合,也可以是设备的某一部分或设备的微元段。

1. 物料衡算

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

$$\text{输入量} - \text{输出量} = \text{累积量}$$

对于连续操作的过程,若各物理量不随时间改变,即处于稳定操作状态时,过程中不应有物料的累积。则物料衡算(Material Balance)关系为

$$\text{输入量} = \text{输出量}$$

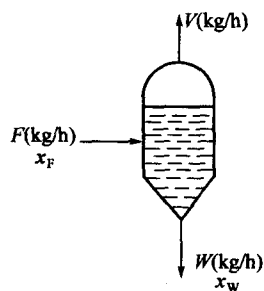
用物料衡算式可由过程的已知量求出未知量。物料衡算可按下列步骤进行：

(1) 首先根据题意画出各物流的流程示意图，物料的流向用箭头表示，并标上已知数据与待求量；

(2) 在写衡算式之前，要选定计算基准，一般选用单位进料量或排料量(质量、物质的量或体积等)、时间及设备的单位体积等作为计算的基准。在较复杂的流程示意图上应圈出衡算的范围，列出衡算式，求解未知量。

【例 0-1】 用连续操作的蒸发器把盐的组成质量分数为 x_F 的稀盐水溶液蒸发到组成质量分数为 x_W 的浓盐水溶液，每小时稀盐水溶液的进料量为 $F(\text{kg})$ 。试求每小时所得浓盐水溶液量 W 及水分蒸发量 V 各为多少千克。

解：各股物系的流程图如附图所示，计算基准取 1h，由于是连续稳定操作，总物料衡算式为



例 0-1 附图

$$F = V + W$$

溶质衡算式为

$$Fx_F = Wx_W$$

由此两式解得

$$W = (x_F/x_W)F, V = (1 - x_F/x_W)F$$

2. 能量衡算

本教材中所用到的能量主要有机械能和热能。能量衡算(Energy Balance)的依据是能量守恒定律。机械能衡算将在第一章流体流动中说明；热量衡算也将在传热、蒸馏和干燥等章节中结合具体单元操作有详细说明。热量衡算的步骤与物料衡算的基本相同。

3. 物系的平衡关系

平衡状态是自然界中广泛存在的现象。例如，在一定温度下，不饱和的食盐溶液与固体食盐接触时，食盐向溶液中溶解，直到溶液为食盐所饱和，食盐就停止溶解，此时固体食盐表面已与溶液形成动平衡状态。反之，若溶液中食盐浓度大于饱和浓度，则溶液中的食盐会析出，使溶液中的固体食盐结晶长大，最终达到平衡状态。一定温度下食盐的饱和浓度，就是这个物系的平衡浓度。当溶液中食盐的浓度低于饱和浓度，则固体食盐将向溶液中溶解。当溶液中食盐的浓度大于饱和浓度，则溶液中溶解的食盐会析出，最终都会达到平衡状态。从这个例子可以看出，平衡关系(Equilibrium Relation)可以用来判断过程能否进行，以及进行的方向和能达到的限度。

4. 传递速率

仍以食盐溶解为例说明。食盐溶液中食盐浓度低时，溶解速率(单位时间内溶解的食盐质量)大；食盐浓度高时，溶解速率小。当溶液达到饱和浓度(即平衡状态)时，不再溶解，即溶解速率为零。由此可知，溶液浓度越是远离平衡浓度，其溶解速率就越大；溶液浓度越是接近平衡浓度，其溶解速率就越小。溶液浓度与平衡浓度之差值，可以看作是溶解过程的推动力(Driving Force)。另外，由实验得知，把一个大食盐块破碎成许多小块，溶液由不搅拌改为搅拌，都能使溶解速率加快。这是因为由大块改为许多小块，能使固体食盐与溶液的接触面积增大；由不搅拌改为搅拌，能使溶液质点对流。其结果能减小溶解过

程的阻力(Resistance)。因此,过程的传递速率(Rate of Transfer Process)与推动力成正比,与阻力成反比,即

$$\text{传递速率} = \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}}$$

这个关系类似于电学中的欧姆定律。过程的传递速率是决定化工设备的重要因素,传递速率大时,设备尺寸可以小。

5. 经济核算

为生产定量的某种产品所需要的设备,根据设备的型式和材料的不同,可以有若干设计方案。对同一台设备,所选用的操作参数不同,会影响到设备费与操作费。因此,要用经济核算确定最经济的设计方案。

第一章 流体流动

气体和液体统称为流体。在化工生产中所处理的物料有很多是流体。根据生产要求,往往需要将这些流体按照生产程序从一个设备输送到另一个设备。化工厂中,管路纵横排列,与各种类型的设备连接,完成着流体输送的任务。除了流体输送外,化工生产中的传热、传质过程以及化学反应也大都是在流体流动下进行的。流体流动状态对这些单元操作有着很大影响。为了能深入理解这些单元操作的原理,就必须掌握流体流动的基本原理。因此,流体流动的基本原理是本课程的重要基础。

本章着重讨论流体流动过程的基本原理及流体在管内的流动规律,并运用这些原理与规律去分析和计算流体的输送问题。

在研究流体流动时,常将流体视为由无数分子集团所组成的连续介质。每个分子集团称为质点,其大小与容器或管路相比是微不足道的。质点在流体内部一个紧挨一个,它们之间没有任何空隙,即可认为流体充满其所占据的空间。把流体视为连续介质,其目的是为了摆脱复杂的分子运动,从宏观的角度来研究流体的流动规律。但是,并不是在任何情况下都可以把流体视为连续介质,如高度真空下的气体就不能再视为连续介质了。

1.1 流体静力学基本方程式

流体静力学是研究流体在外力作用下达到平衡的规律。在工程实际中,流体的平衡规律应用很广,如流体在设备或管道内压强的变化与测量、液体在贮罐内液位的测量、设备的液封等均以此一规律为依据。

1.1.1 流体的密度

一、密度

单位体积流体所具有的质量,称为流体的密度,其表达式为

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

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)。

不同的流体密度不同。对于一定的流体,密度是压力 p 和温度 T 的函数。液体的密度随压力和温度变化很小,在研究流体的流动时,若压力和温度变化不大,可以认为液体的密度为常数。密度为常数的流体称为不可压缩流体。

流体的密度一般可在物理化学手册或有关资料中查得,本教材附录中也列出了某些常见气体和液体的密度值,可供查用。

二、气体的密度

气体是可压缩的流体,其密度随压强和温度而变化。因此气体的密度必须标明其状

态,从有关手册中查得的气体密度往往是某一指定条件下的数值,这就涉及到如何将查得的密度换算为操作条件下的密度。但是在压强和温度变化很小的情况下,也可以将气体当作不可压缩流体来处理。

对于一定质量的理想气体,其体积、压强和温度之间的变化关系为

$$\frac{pV}{T} = \frac{p'V'}{T'}$$

将密度的定义式代入并整理得

$$\rho = \rho' \frac{T'p}{Tp'} \quad (1-2)$$

式中: p 为气体的压强(Pa); ρ 为气体的密度(kg/m^3); V 为气体的体积(m^3); T 为气体的绝对温度(K);上标“'”表示手册中指定的条件。

一般当压强不太高,温度不太低时,可近似按下式来计算密度。

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1-3a)$$

或

$$\rho = \frac{M}{22.4} \frac{T_0 p}{Tp_0} = \rho_0 \frac{T_0 p}{Tp_0} \quad (1-3b)$$

式中: p 为气体的绝对压强(kPa 或 kN/m^2); M 为气体的摩尔质量(kg/kmol); T 为气体的绝对温度(K); R 为气体常数, $8.314\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K})$;下标“0”表示标准状态($T_0 = 273\text{K}$, $p_0 = 101.3\text{kPa}$)。

三、混合物的密度

化工生产中所遇到的流体往往是含有几个组分的混合物。通常手册中所列的为纯物质的密度,所以混合物的平均密度 ρ_m 需通过计算求得。

(1) 液体混合物:各组分的浓度常用质量分率来表示。若混合前后各组分体积不变,则 1kg 混合液的体积等于各组分单独存在时的体积之和。混合液体的平均密度 ρ_m 为

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{wA}}{\rho_A} + \frac{x_{wB}}{\rho_B} + \dots + \frac{x_{wn}}{\rho_n} \quad (1-4)$$

式中: $\rho_A, \rho_B, \dots, \rho_n$ 为液体混合物中各纯组分的密度(kg/m^3); $x_{wA}, x_{wB}, \dots, x_{wn}$ 为液体混合物中各组分的质量分数。

(2) 气体混合物:各组分的浓度常用体积分率来表示。若混合前后各组分的质量不变,则 1m^3 混合气体的质量等于各组分质量之和,即

$$\rho_m = \rho_A x_{vA} + \rho_B x_{vB} + \dots + \rho_n x_{vn} \quad (1-5)$$

式中: $x_{vA}, x_{vB}, \dots, x_{vn}$ 为气体混合物中各组分的体积分数。

气体混合物的平均密度 ρ_m 也可按式(1-3a)计算,此时应以气体混合物的平均摩尔质量 M_m 代替式中的气体摩尔质量 M 。气体混合物的平均分子量 M_m 可按下式求算:

$$M_m = M_A y_A + M_B y_B + \dots + M_n y_n \quad (1-6)$$

式中: M_A, M_B, \dots, M_n 为气体混合物中各组分的摩尔质量(kg/kmol); y_A, y_B, \dots, y_n 为气体混合物中各组分的摩尔分数。

【例 1-1】 已知硫酸与水的密度分别为 $1830\text{kg}/\text{m}^3$ 与 $998\text{kg}/\text{m}^3$, 试求含硫酸为

60% (质量分数)的硫酸水溶液的密度为多少。

解:根据式(1-4)可得

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{0.6}{1830} + \frac{0.4}{998} = (3.28 + 4.01) \times 10^{-4} = 7.29 \times 10^{-4}$$

$$\rho_m = 1372 \text{kg/m}^3$$

【例 1-2】 已知干空气的组成为 O_2 21% (体积分数)、 N_2 78% (体积分数)和 Ar 1% (体积分数),试求干空气在压力为 $9.81 \times 10^4 \text{Pa}$ 及温度为 100°C 时的密度。

解:首先将摄氏度换算成开尔文

$$100^\circ\text{C} = 273 + 100 = 373\text{K}$$

再求干空气的平均摩尔质量

$$M_m = 32 \times 0.21 + 28 \times 0.78 + 39.9 \times 0.01 = 28.96 \text{kg/kmol}$$

根据式(1-3a)气体的平均密度为

$$\rho_m = \frac{9.81 \times 10 \times 28.96}{8.314 \times 373} = 0.916 \text{kg/m}^3$$

1.1.2 流体的静压强

一、静压强

流体垂直作用于单位面积上的力,称为压强,或称为静压强。其表达式为

$$p = \frac{F_v}{A} \quad (1-7)$$

式中: p 为流体的静压强(Pa); F_v 为垂直作用于流体表面上的力(N); A 为作用面的面积(m^2)。

二、静压强的单位

在国际单位制(SI制)中,压强的单位是帕斯卡(Pa)。但习惯上还采用其它单位,如标准大气压(atm)、某流体柱高度、巴(bar)或千克力每平方厘米(kgf/cm^2)等,它们之间的换算关系为

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

三、静压强的表示方法

压强的大小常以两种不同的基准来表示:一是绝对真空;另一是大气压强。以绝对真空为基准测得的压强称为绝对压强,以大气压强为基准测得的压强称为表压或真空度。表压是由压强表直接测得的读数,按其测量原理往往是绝对压强与大气压强之差,即

$$\text{表压} = \text{绝对压强} - \text{大气压强}$$

真空度是真空表直接测量的读数,其数值表示绝对压强比大气压低多少,即

$$\text{真空度} = \text{大气压强} - \text{绝对压强}$$

绝对压强、表压强与真空度之间的关系可用图 1-1 表示。

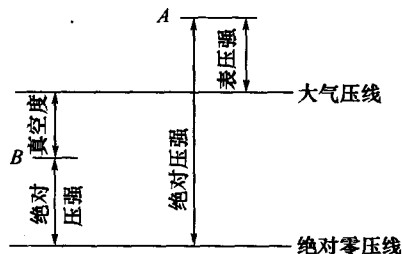


图 1-1 绝对压强、表压强和真空度的关系