



普通高等教育“十二五”规划教材

化工原理

主 编 郝晓刚 樊彩梅
副主编 卫静莉 史宝萍 李 裕



科学出版社

内 容 简 介

本书重点介绍各主要化工单元操作的基本原理、典型设备和相关计算,内容包括绪论、流体流动、流体输送机械、非均相物系分离、传热、蒸发、吸收、蒸馏、干燥以及附录。全书以流体流动(动量传递)为基础阐述流体输送、非均相物系分离相关单元操作;以热量传递为基础阐述换热器及蒸发单元操作;以质量传递为基础阐述吸收、精馏传质单元操作,并介绍具有热量、质量同时传递特点的干燥操作。本书以物料衡算、能量衡算为主线,强调应用基本概念和原理分析、解决工程实际问题。每章均包括学习内容提要 and 较多例题,章末附有思考题和习题,便于读者自学。

本书可作为高等院校化工类各专业的本科生教材,也可供化工部门研究、设计和生产单位技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理/郝晓刚,樊彩梅主编. —北京:科学出版社,2011.6

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-03-031118-4

I. ①化… II. ①郝…②樊… 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(2011)第 091460 号

责任编辑:丁 里 / 责任校对:朱光兰

责任印制:张克忠 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市安泰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2011 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2011 年 6 月第一次印刷 印张:23 1/4

印数:1—4 000 字数:589 000

定价:47.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

本书是配合落实教育部及中国工程院“卓越工程师教育培养计划”方案、以应用型人才培养为目标而编写的一本专业基础课程教材。本书可作为高等院校化工类各专业的本科生教材,也可供化工部门研究、设计和生产单位技术人员参考。

化工原理是一门工程性非常强的关于化学加工过程的技术基础课程,它为过程工业(包括化工、轻工、医药、食品、环境、材料、冶金等工业部门)提供科学基础,对化工及相近学科的发展起支撑作用。化工原理课程以单元操作为内容,以传递过程原理和研究方法为主线,研究各个物理加工过程的基本规律、典型设备的设计方法、过程的操作和调节原理。

本书介绍各主要化工单元操作的基本原理和典型设备的计算,注重理论联系实际,通过多种例题将理论与解决实际问题较好地关联,培养学生的工程实践能力,提升学生的工程素养。内容包括绪论、流体流动、流体输送机械、非均相物系分离、传热、蒸发、吸收、蒸馏、干燥。每章均包括学习内容提要 and 较多例题,章末附有思考题和习题。各院校可根据各专业实际需要选择教学内容。

本书从培养学生的应用能力角度组织教学内容,重点强调应用基本概念和原理分析、解决工程实际问题。全书以物料衡算、能量衡算为主线,以流体流动(动量传递)作为传热、传质(分离)的基础,由浅入深,层次分明,便于读者自学。

全书由郝晓刚、樊彩梅负责统稿审定。参加编写工作的有:太原理工大学樊彩梅、郝晓刚、王韵芳(绪论、第1章、第2章及附录),中北大学李裕(第3章)、焦纬洲(第8章),太原工业学院卫静莉、熊英莹(第4章、第5章),太原科技大学史宝萍、赵晓霞(第6章、第7章)。

在本书编写过程中得到太原理工大学化学化工学院领导的关心和支持,以及上述各校化工原理课程全体同仁的无私帮助,在此表示诚挚的感谢!同时感谢太原理工大学“卓越工程师教育培养计划”试点领导组提出的宝贵意见。

由于时间仓促,本书难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

编 者

2010年12月

目 录

前言

绪论	1
0.1 化工生产过程与单元操作	1
0.1.1 化工生产过程	1
0.1.2 单元操作	2
0.2 四个基本概念	3
0.2.1 物料衡算	3
0.2.2 能量衡算	4
0.2.3 平衡关系	4
0.2.4 过程速率	4
0.3 课程的研究方法和基本内容	5
0.3.1 课程的研究方法	5
0.3.2 课程的基本内容和目的	5
第1章 流体流动	6
1.1 概述	6
1.1.1 流体的分类和特性	6
1.1.2 流体流动的研究方法——连续性假设	7
1.1.3 流体流动中的作用力	7
1.2 流体静力学	12
1.2.1 流体静力学基本方程式	12
1.2.2 流体静力学基本方程式的应用	14
1.3 流体在管内的流动	18
1.3.1 基本概念	18
1.3.2 连续性方程	20
1.3.3 能量衡算方程	21
1.3.4 伯努利方程的应用	26
1.4 流体流动现象	30
1.4.1 流动类型与雷诺数	30
1.4.2 滞流与湍流	32
1.4.3 边界层的概念	36
1.5 流体在管内的流动阻力	36
1.5.1 流体在直管中的流动阻力	37
1.5.2 管路上的局部阻力损失	46
1.5.3 管路系统中的总能量损失	50
1.6 管路计算	51

1.6.1 简单管路的计算	51
1.6.2 复杂管路的计算	53
1.6.3 管路计算中常用的方法——试差法	56
1.7 流量的测量	57
1.7.1 变压差的流量计	57
1.7.2 变截面的流量计	62
思考题	64
习题	64
符号说明	67
第2章 流体输送机械	69
2.1 概述	69
2.2 离心泵	69
2.2.1 离心泵的主要构件及工作原理	70
2.2.2 离心泵基本方程式	73
2.2.3 离心泵的性能参数	76
2.2.4 离心泵的特性曲线及其影响因素	79
2.2.5 离心泵的安装高度	83
2.2.6 离心泵的工作点与流量调节	87
2.2.7 离心泵的组合操作	92
2.2.8 离心泵的类型与选择	94
2.3 其他类型泵	98
2.3.1 正位移泵	98
2.3.2 非正位移泵	100
2.3.3 各类化工用泵的比较	100
2.4 气体输送机械	101
2.4.1 通风机	102
2.4.2 鼓风机	102
2.4.3 压缩机	103
2.4.4 真空泵	109
2.4.5 常用气体输送机械的性能比较	110
思考题	110
习题	111
符号说明	112
第3章 非均相物系分离	113
3.1 概述	113
3.2 颗粒与颗粒群的特性	114
3.2.1 单颗粒的特性	114
3.2.2 颗粒群的特性	115
3.3 沉降分离	118
3.3.1 重力沉降及设备	118

3.3.2 离心沉降及设备	123
3.4 过滤	126
3.4.1 颗粒床层的特性	126
3.4.2 过滤原理	127
3.4.3 过滤设备	134
思考题	137
习题	137
符号说明	138
第4章 传热	140
4.1 概述	140
4.1.1 传热的三种基本方式	140
4.1.2 传热过程中冷、热流体的接触方式	141
4.1.3 传热过程	142
4.2 热传导	143
4.2.1 基本概念与傅里叶定律	143
4.2.2 导热系数	144
4.2.3 平壁的稳态热传导	145
4.2.4 圆筒壁的稳态热传导	148
4.3 对流传热	150
4.3.1 对流传热过程分析	150
4.3.2 牛顿冷却定律和对流传热系数	151
4.3.3 对流传热系数的实验研究方法	152
4.3.4 流体无相变时的对流传热系数	154
4.3.5 流体有相变时的对流传热系数	158
4.4 传热过程计算	161
4.4.1 热量衡算	161
4.4.2 总传热速率微分方程和总传热系数	162
4.4.3 平均温度差法和总传热速率方程	166
4.4.4 传热单元数法	173
4.5 辐射传热	177
4.5.1 辐射传热的基本概念	177
4.5.2 物体的辐射能力和有关的定律	178
4.5.3 两固体间的辐射传热	181
4.6 换热器	183
4.6.1 间壁式换热器的类型	183
4.6.2 换热器中传热过程的强化	188
思考题	190
习题	190
符号说明	192

第 5 章 蒸发	194
5.1 概述	194
5.1.1 蒸发操作及其在工业中的应用	194
5.1.2 蒸发操作的特点	194
5.1.3 蒸发的基本流程	195
5.1.4 蒸发操作的分类	195
5.2 单效蒸发	195
5.2.1 单效蒸发的计算	195
5.2.2 蒸发器的生产能力和生产强度	203
5.3 多效蒸发	204
5.3.1 多效蒸发操作流程	205
5.3.2 多效蒸发的计算	206
5.3.3 多效蒸发效数的限制	207
5.4 蒸发设备	207
5.4.1 蒸发器	207
5.4.2 蒸发器的辅助设备	211
5.4.3 蒸发器的选型	212
思考题	212
习题	213
符号说明	213
第 6 章 吸收	215
6.1 概述	215
6.1.1 吸收的基本概念	215
6.1.2 吸收操作的应用	215
6.1.3 吸收的分类	216
6.1.4 吸收剂的选择	216
6.1.5 相组成的表示方法	216
6.2 吸收过程的气液相平衡	219
6.2.1 相际动平衡与气体在液体中的溶解度	219
6.2.2 亨利定律	221
6.2.3 气液相平衡关系在吸收中的应用	224
6.3 吸收机理和速率关系	225
6.3.1 物质传递的方式	225
6.3.2 双膜理论及其假想模型	226
6.3.3 单相内的对流扩散速率方程	227
6.3.4 两相间总传质速率方程	227
6.3.5 吸收速率方程的各种表示形式及吸收系数的换算	230
6.4 物料衡算及吸收剂用量的确定	231
6.4.1 物料衡算与操作线方程	232
6.4.2 吸收剂用量的确定	233

6.5 填料塔及其计算	235
6.5.1 填料塔的构造	235
6.5.2 填料塔的流体力学性能及塔径的计算	239
6.5.3 填料吸收塔有效高度的计算	241
6.5.4 吸收塔的操作和调节	246
6.6 其他类型吸收简介	248
6.6.1 高浓度气体吸收	248
6.6.2 多组分吸收	248
6.6.3 化学吸收	249
6.7 解吸	249
思考题	250
习题	250
符号说明	252
第7章 蒸馏	254
7.1 概述	254
7.2 双组分理想溶液的气液相平衡	255
7.2.1 相律	255
7.2.2 用饱和蒸气压表示的气液平衡关系及 $t-x-y$ 图	255
7.2.3 用相对挥发度表示的气液平衡关系及 $y-x$ 图	257
7.3 两组分非理想溶液的气液相平衡	259
7.3.1 具有正偏差的非理想溶液	259
7.3.2 具有负偏差的非理想溶液	260
7.4 蒸馏方式及原理	260
7.4.1 平衡蒸馏	260
7.4.2 简单蒸馏	261
7.4.3 连续精馏	262
7.5 双组分连续精馏的计算	263
7.5.1 双组分连续精馏计算的两个基本假设	264
7.5.2 全塔物料衡算	264
7.5.3 操作线方程	266
7.5.4 进料热状况及进料线方程(q 线方程)	267
7.5.5 理论板数的计算	271
7.5.6 回流比的选择	274
7.5.7 简捷算法确定理论板数	277
7.5.8 实际板数和塔板效率	278
7.5.9 双组分连续精馏过程的热量衡算	280
7.5.10 几种特殊情况蒸馏简介	281
7.5.11 精馏过程的操作和调节	283
7.6 间歇精馏	285
7.6.1 回流比恒定的间歇精馏	285

7.6.2 馏出液组成恒定的间歇精馏	286
7.7 特殊精馏	286
7.7.1 恒沸精馏	286
7.7.2 萃取精馏	287
7.8 板式塔	288
7.8.1 塔板结构和板面布置	288
7.8.2 塔板类型	290
7.8.3 板式塔的流体力学性能	292
思考题	294
习题	294
符号说明	296
第8章 干燥	297
8.1 概述	297
8.2 湿空气的性质及湿度图	298
8.2.1 湿空气的性质	298
8.2.2 湿空气的 $H-I$ 图及其应用	304
8.3 干燥过程的物料衡算与热量衡算	307
8.3.1 湿物料中含水量的表示方法	308
8.3.2 干燥系统的物料衡算	308
8.3.3 干燥系统的热量衡算	309
8.3.4 空气通过干燥器时的状态变化	310
8.3.5 物料衡算与热量衡算的应用举例	312
8.4 固体物料在干燥过程中的平衡关系和速率关系	314
8.4.1 物料的平衡湿含量	314
8.4.2 干燥速率	316
8.4.3 恒定干燥条件下干燥时间的计算	318
8.5 干燥器	320
思考题	322
习题	322
符号说明	323
参考文献	325
附录	326
附录1 中华人民共和国法定计量单位制	326
附录2 常用物理量单位的换算	327
附录3 某些气体的重要物理性质	330
附录4 某些液体的重要物理性质	331
附录5 干空气的物理性质(101.33 kPa)	333
附录6 水的物理性质	334
附录7 水在不同温度下的黏度	335
附录8 水的饱和蒸气压($-20\sim 100\text{ }^{\circ}\text{C}$)	336

附录 9 饱和水蒸气压(按温度顺序排列)	337
附录 10 某些液体的导热系数	338
附录 11 某些气体和蒸气的导热系数	339
附录 12 某些固体材料的导热系数	340
附录 13 污垢系数/($\text{m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$)	341
附录 14 液体的黏度和密度	342
附录 15 气体的黏度(101.33 kPa)	346
附录 16 液体的比热容	348
附录 17 气体的比热容(101.33 kPa)	350
附录 18 气化热(蒸发潜热)	352
附录 19 无机盐溶液的沸点(101.33 kPa)	354
附录 20 管子规格	355
附录 21 IS 型单级单吸离心泵性能表(摘录)	358

绪 论

0.1 化工生产过程与单元操作

0.1.1 化工生产过程

化工生产过程是指采用化学或物理的手段将原料加工成产品的工业过程。在化工生产中可以直接将原料通过物理加工方法来获得产品。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难以实现经济型高纯度产品的生产,因此绝大多数化工产品的获得都需要采用化学与物理加工相结合的方法。显然,化工生产的核心是化学反应过程及其设备——反应器。然而,化学反应都是在一定条件下进行的,反应器内必须保持某些优化条件,如适宜的压力、温度和物料的组成等。因此,需要对反应原料进行必要的预处理以除去杂质,达到必要的纯度、温度和压力要求,这些过程统称为前处理。反应产物同样需要精制与纯化等后处理,以获得最终产品(或中间产品)。

例如,德士古(Texaco)煤气化制取粗煤气的生产是以煤和氧气为原料,在德士古炉中进行气化反应。该法要求原料煤粒度小于 0.1 mm,制成悬浮状的水煤浆,煤浓度为 70%,用泵加入气化炉,与入炉氧气在 1400 ℃和 4.0 MPa 下进行煤气化反应,生成的熔融灰渣以液态排出。热的粗煤气在废热锅炉中回收热量,产生蒸汽,粗煤气冷却到 200 ℃,然后在洗涤冷却器洗去灰尘并降温,冷却后的粗煤气则经净化处理进一步发电或制取合成氨。德士古煤气化流程图如图 0-1 所示。

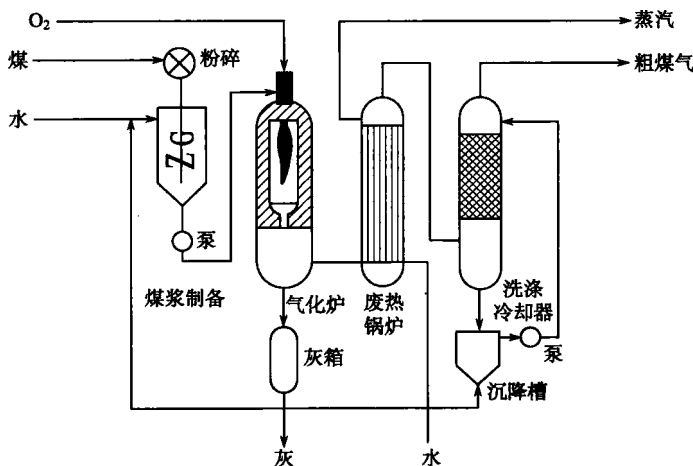


图 0-1 德士古煤气化流程

又如,氨水催化脱除粗煤气中硫化氢制备硫磺的工艺流程如图 0-2 所示。含有硫化氢的粗煤气(又称原料气)从脱硫塔底部进入,与塔顶喷淋而下的氨水溶液逆流接触,气体中的硫化氢被溶液吸收而脱除,从脱硫塔顶出来的净化气送往下道工序进一步净化加工。吸收硫化氢

后的溶液(富液)从脱硫塔底部引出,经循环槽用泵打入再生塔,与再生用的空气逆流接触,废气排空或去处理系统,再生溶液送往脱硫塔循环使用。再生塔中氧化生成的硫沫漂浮于液面,由塔顶的扩大部分上部溢流入硫泡沫槽,用真空过滤机分离出硫磺,然后送入熔硫釜,通蒸汽熔炼成工业硫磺。

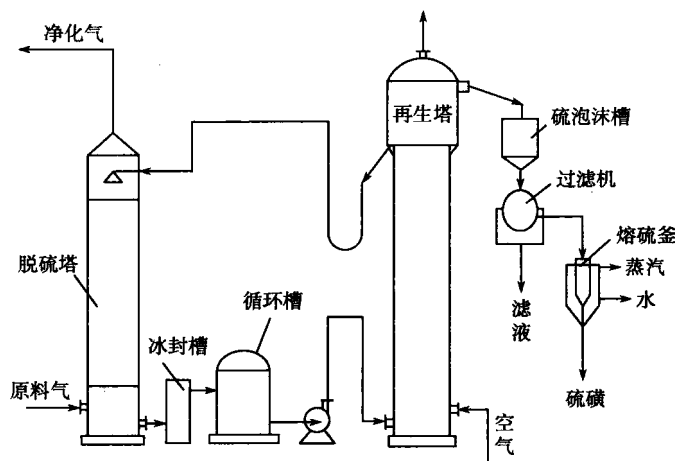


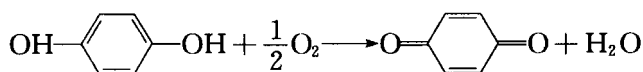
图 0-2 氨水催化脱硫流程

氨水催化法脱除原料气中硫化氢制备硫磺的原理如下:

首先,原料气中的硫化氢在脱硫塔中被氨水吸收,反应为



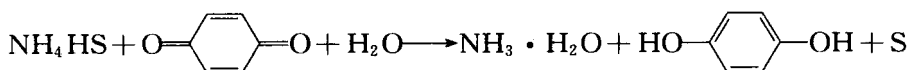
吸收液中添加对苯二酚作为载氧剂和催化剂。对苯二酚在碱性溶液中被空气中的氧气氧化为苯醌,反应为



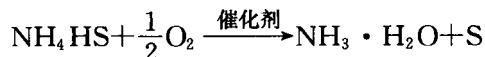
对苯二酚(还原态)

苯醌(氧化态)

其次,硫化铵在苯醌的作用下被氧化成单质硫,反应为



总的氧化反应为



上述生产过程除反应器内有化学反应外,其余步骤均属于物理操作。任何一个生产过程,化学反应是核心,而其他的物理操作则是为化学反应准备适宜的反应条件以及对粗产品进行分离和提纯,也是化工生产不可缺少的操作过程。

0.1.2 单元操作

尽管化工生产过程千差万别,但是归纳起来,各种生产过程都是由化学(生物)反应及若干物理单元操作组合而成的。这些基本的物理操作统称为化工单元操作,简称单元操作。这些单元操作为经化学反应制备所需产品承担着前处理和后处理的任务,因此任何一个化工生产

过程都可以用如图 0-3 所示的简单方框图表示。对这些物理操作的基本原理、过程计算及典型设备的研究构成了化工原理课程的基本内容。

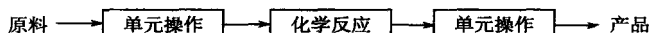


图 0-3 化工生产过程示意图

事实上,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围绕反应设备进行各种前处理、后处理操作,这些前处理、后处理的单元操作工序的投资费用占工厂总投资的绝大部分(约 90%)。因此,在优化反应过程的同时,必须考虑优化各单元操作。由此可见,单元操作在化工生产中发挥着重要作用。

对于单元操作,可以从不同角度加以分类。按操作目的,可将单元操作分为:①物料的增压、减压和输送;②物料的混合或分散;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。

按作用的共同原理,即遵循类似的基本规律,可将单元操作分为:

(1) 流体流动过程。研究流体流动及流体和与之接触的固体间发生相对运动时的基本规律,以及主要受这些基本规律支配的若干单元操作,如流体输送、沉降、过滤等。

(2) 热量传递过程。研究传热的基本规律以及主要受这些基本规律支配的若干单元操作,如传热、蒸发等。

(3) 质量传递过程。研究物质通过相界面迁移过程的基本规律,以及主要受这些基本规律支配的若干单元操作,如液体的蒸馏、气体的吸收、固体的干燥等。

也有热量、质量同时传递的单元操作,如结晶、增湿和减湿、固体的干燥等。

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,出现了新的单元操作和新的化工技术,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、降低能耗和实现绿色化工生产,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、化工及生物工程等的发展。

0.2 四个基本概念

在研究各种单元操作时,为了掌握过程始末和过程中各股物料的数量、组成之间的关系,并弄清过程中吸收或释放的能量,必须作物料衡算及能量衡算。此外,为了计算所需设备的工艺尺寸,必须依据平衡关系,了解过程进行的方向与极限,依赖速率关系分析过程进行的快慢。因此平衡关系和速率关系也是研究各种单元操作原理的基本内容。

0.2.1 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,即进入体系的物料量必等于从体系排出的物料量和过程中的积累量之和。

输入物料的总量 = 排出物料的总量 + 过程积累的总量

在进行物料衡算时,必须明确以下几点:首先,确定衡算范围。衡算范围可以针对一个设

备,也可以是一个生产过程。其次,确定衡算的基准。一般来说,选择过程中不发生变化的量作为衡算的基准,在间歇生产中多以一批物料作为衡算基准,而在连续操作中则以单位时间作为衡算基准。再次,确定衡算对象。对有化学变化的过程,衡算对象选择不发生变化的物质(如具有惰性的物质)或某一个化学元素为对象;在蒸馏操作中,可以选择某一组分作为衡算对象。最后,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,因为其会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最基本的计算,通过物料衡算可以为正确地选择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。

0.2.2 能量衡算

能量衡算的依据是能量守恒定律。在稳定的生产过程中,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体系,也适用于单个设备或单个过程。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,以便设计换热设备。

0.2.3 平衡关系

任何一个物理变化或化学变化过程都是在一定条件下沿着一定方向进行的,最后达到动态平衡。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。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及可能达到的极限。上述传热过程进行的方向是高温向低温传递,以两处温度相同作为传热过程的极限。

0.2.4 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来表示。例如,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,速率越大,设备的生产能力也越大或在相同产量时所需要的设备尺寸越小。在工程上,过程速率问题往往比物系平衡问题显得更重要。过程速率可用以下基本关系表示:

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

过程速率与过程推动力成正比,与过程阻力成反比,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瞬间偏离平衡的差额。例如,流体流动过程的推动力为势能差,传热过程的推动力为温度差,传质过程的推动力为实际浓度与平衡时的浓度差。过程的阻力是与过程推动力相对应的,它与过程的操作条件和物性有关。从以上基本关系可以看出,要提高过程速率,可以通过增大过程推动力的途径来实现。例如,流体输送过程可以加大压强差,传热过程可以提高温度差,传质过程可以提高浓度差。另外,也可以通过减少过程阻力的

办法来提高过程的速率。例如,流体输送时可加大输送管道的直径,两相流体传质时可以提高两相流体的湍动程度等。

0.3 课程的研究方法和基本内容

0.3.1 课程的研究方法

化工原理是一门实践性很强的工程课程,在其长期的发展过程中,形成了以下两种基本研究方法:

(1) 实验研究方法,即经验的方法。该方法一般用量纲分析和相似论为指导,依靠实验来确定过程变量之间的关系,通常用量纲为1的数群(或称准数)构成的关系来表达。实验研究方法避免了数学方法的建立,是一种工程上通用的基本方法。

(2) 数学模型法,即半理论、半经验的方法。该方法通过对实际复杂过程机理的深入分析,在抓住过程本质的前提下,作出某些合理简化,建立数学模型,然后通过实验确定模型参数。这是一种半经验半理论的方法,由于数学模型在影响过程的主要因素之间建立了联系,因此能较好地反映过程的真实情况,目前正日益获得广泛应用。

由此可见,传递过程是联系各个单元操作的一条主线,而工程问题的研究方法则是联系各个单元操作的另一条主线,两者结合起来便构成以单元操作作为研究内容的化工原理课程。

0.3.2 课程的基本内容和目的

化工原理是在高等数学、物理化学等课程的基础上开设的一门专业基础课程,也是一门实践性很强的课程,所讨论的每一单元操作都有其应用背景并与生产实践紧密相连,其主要任务是研究化工单元操作的基本原理、典型设备的构造及工艺尺寸的计算或设备选型。化工原理主要讨论化工及其相近工业中最常用的单元操作,包括流体流动、流体输送机械、非均相物系分离、传热、蒸馏、吸收和干燥等。通过学习本课程,主要培养学生分析和解决单元操作问题的能力,如设备选型能力、工程设计能力、生产调节能力、生产研发能力,以便能在工作实践中达到强化生产过程、提高设备能力及效率、降低设备投资成本及加快新技术开发等方面的目的。

为此,要求做到以下几点:

- (1) 熟悉和掌握单元操作基本概念、基本原理、基本计算方法和典型设备。
- (2) 学会根据生产、科研要求和物料性质,以及技术上可行的、经济合理的原则选择单元操作和设备。
- (3) 根据所选定的单元操作过程和设备进行过程计算和设备设计,培养学生的工程设计能力。
- (4) 了解化工单元操作过程的操作方法和参数调节,了解强化和优化单元操作过程的途径。

第1章 流体流动

学习内容提要

通过本章学习,了解流体的重要性质,流体静力学方程及其在压强、流量测量方面的应用;掌握流体流动的基本原理、流体在管内流动的连续性方程和机械能衡算方程的物理意义及其应用条件;分析流体滞流和湍流的本质区别,并了解边界层与边界层分离现象;掌握管路系统的摩擦阻力、局部阻力和总阻力的计算;学会运用流体流动的基本原理及规律分析和解决流体流动过程的相关问题,如流速的选择、管路的计算、流体输送机械的选型、流动参数(如压强、流速与流量的测量等)。

重点掌握黏性流体在管内流动的基本原理和规律,并运用这些原理与规律分析和计算流体的输送问题。

1.1 概 述

一般而言,物质的存在状态有三种:气态、液态和固态。通常将气体和液体统称为流体。

化工过程中加工处理的对象大多是流体。为了实现生产产品,通常要通过管道把流体送往各个加工场所,进行化学加工或物理处理,因此研究流体在流动过程中的基本原理和流动规律就显得很有必要。这个规律在化工过程中极为重要,因为它不仅是研究流体在管路或设备内流动的基础,而且对处于流动状态下流体的传热、传质过程也有极其重要的影响。应用流体流动规律具体解决以下几个主要工程问题:①流体在输送系统中压强的变化与测量;②输送管路尺寸及输送设备所需功率的计算;③流量的测量;④传热传质过程的强化。流体流动现象在化工生产中很普遍,因此对流体流动规律的认识便成为学习其他各单元操作的基础。

流体在输送设备、流量计以及管道中的流动等是流体动力学问题;流体在压差计、水封箱中处于静止状态则是流体静力学问题。本章重点学习流体流动过程的基本原理和流体在管内的流动规律,以及这些原理和规律在流体输送中的应用。

1.1.1 流体的分类和特性

流体有多种分类方法:

- (1) 按流体的状态分为气体、液体和超临界流体等。
- (2) 按流体的可压缩性分为不可压缩流体和可压缩流体。
- (3) 按是否可忽略流体中分子之间作用力分为理想流体和黏性流体(或实际流体)。
- (4) 按流体的流变特性可分为牛顿型流体和非牛顿型流体。

流体具有三个主要特征:①具有流动性,抗剪应力、抗张力的能力很小;②无固定形状,随容器的形状而变化;③在外力作用下其内部发生相对运动。正是由于流体流动时其内部发生相对运动所产生的内摩擦力,才构成了流体力学研究的复杂内容之一。

1.1.2 流体流动的研究方法——连续性假设

流体是由大量的彼此间有一定间隙的单个分子所组成。不同的研究方法对流体流动情况的理解有所不同。在物理化学中重点研究单个分子的微观运动,分子的运动是随机的、不规则的混乱运动,因此这种研究方法认为流体是不连续的介质,所需处理的运动是一种随机的运动,问题将非常复杂。

在化工原理中研究流体在静止状态和流动状态下的规律性时,常将流体视为由无数质点(微团)组成的连续介质,流体质点(微团)则是由大量分子组成的分子集合。连续性假设的内容为:流体是由大量的质点组成、彼此间没有间隙、完全充满所占空间的连续介质,流体的物性及运动参数在空间做连续分布,从而可以使用连续函数的数学工具加以描述。也就是说,化工原理研究流体的宏观(或整体)运动,把流体视为连续介质,其目的是为了摆脱复杂的微观分子运动。

在绝大多数情况下流体的连续性假设是成立的,只是在高真空稀薄气体的情况下连续性假定不能应用。

1.1.3 流体流动中的作用力

流动中的流体受到的作用力有两种:一种是体积力;另一种是表面力。

体积力是指作用于流体的每个质点上的力,它与流体的质量成正比,所以又称质量力。对于均匀质量的流体,这个力的大小与其体积成正比,因此称为体积力。流体在重力场中所受的重力和在离心力场中所受的离心力都是典型的体积力。

表面力是指作用于流体质点表面的作用力,它的大小与其表面积成正比。对于任意一个流体微元表面,作用于其上的表面力可分为垂直于表面的力和平行于表面的力。垂直于表面的力称为压力,平行于表面的力称为剪力。

以下分别讨论体积力和表面力,并同时分析与这些作用力相关的物理量。

1. 流体的体积力和密度

流体在重力场运动时受到的重力是典型的体积力,很明显均匀质量流体所受的重力与流体的体积和密度成正比。

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度,通常以 ρ 表示,其表达式为

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

式中,当 $\Delta V \rightarrow 0$ 时, $\Delta m / \Delta V$ 的极限值即为流体中某点的密度,即

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (1-1a)$$

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 。

流体的密度一般可在物理化学手册或有关资料中查得,本书附录 3 和附录 4 中列出某些常见气体和液体的密度,仅供做习题时查用。

不同的单位制,密度的单位和数值都不同,应掌握各单位制之间的换算。

1) 纯组分的密度

纯组分密度的定义式不变,同式(1-1)。