



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

清华大学化学工程系列教材

化学工程基础

(第2版)

林爱光 阴金香 编著

清华大学出版社



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

清华大学化学工程系列教材

化学工程基础

(第2版)

林爱光 阴金香 编著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书为清华大学“化工原理”课程所用教材,在清华大学多个院系使用多年。

全书分7章,包括流体的流动与输送、传热过程和传热设备、精馏、吸收、气液传质设备、化学反应工程和膜分离过程。为便于学生理解和掌握课程内容,书中提供了典型的例题和习题。书末附有做化工习题常用的物性参数图表及管子、泵、通风机的部分规格。

本书可用作高等院校工科有关专业及理科化学和应用化学专业“化工基础”课程的教材,也可供上述专业从事设计、开发和运行的科技人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

化学工程基础/林爱光,阴金香编著. —2版. —北京:清华大学出版社,2008.8
(清华大学化学工程系列教材)

ISBN 978-7-302-17264-2

I. 化… II. ①林… ②阴… III. 化学工程—高等学校—教材 IV. TQ02

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第041255号

责任编辑:柳 萍

责任校对:赵丽敏

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦A座

<http://www.tup.com.cn>

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:北京嘉实印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:27

字 数:655千字

版 次:2008年8月第2版

印 次:2008年8月第1次印刷

印 数:1~4000

定 价:39.80元

本书如存在文字不清、漏印、缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。
联系电话:010-62770177 转 3103 产品编号:019348-01

第2版前言

本书第1版1999年由清华大学出版社出版,已由清华大学多个院系及不少兄弟院校使用多年,作者感谢读者、同行及专家对本教材的厚爱,承蒙高度评价:“该教材概念清楚,内容全面,重点突出,阐述严谨。在保证化学工程学科特征的前提下,在内容的深度和广度上能够力求符合培养目标的需要。”

由于科学技术的发展和教学的需要,第2版更新和增加了部分内容,适当介绍一些新近发展的技术,拓宽了课程覆盖面,以为学生发展提供了空间,激发学习兴趣。第2版继续保持各章自成体系,适应不同领域、不同层次、不同教学时数教学的特点,赋予使用者较大的机动性,使用者可根据教学要求进行选用。

第2版对第1版内容进行了修订,并新增了第7章膜分离过程,更新了部分附录。第2章传热过程和传热设备、第3章精馏及部分附录的更新整理由阴金香负责完成,其余工作由林爱光负责完成。

在再版过程中,作者参考了国内外有关书籍及教材,并引用了其中的一些材料和数据,在此向各书的作者和出版社表示深深的谢意。

本书第1版问世以来,承蒙许多读者和同行的支持和鼓励,并提出不少有益的意见和建议,在此表示衷心的感谢。

编者感谢清华大学化工原理教研室的同事在修订过程中给予的大力支持和帮助;出版过程中得到清华大学出版社有关负责人、审稿人和编辑的关心和支持,对此表示感谢。

本书有配套教材《化学工程基础学习指引和习题解答》(清华大学出版社,林爱光,2003),还有配套教学软件《化学工程基础多媒体课件》(清华大学出版社,林爱光等,2006)。这些将有益于对本书内容的深入理解与掌握。

由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2007年12月于北京清华园

目 录

绪论	1
1 流体的流动与输送	11
1.1 概述	11
1.2 流体静力学方程	12
1.2.1 流体的性质	12
1.2.2 流体的压强	13
1.2.3 流体静力学基本方程	14
1.2.4 流体静力学方程的应用	16
1.3 流体流动的基本方程	18
1.3.1 流量与流速	18
1.3.2 粘度	20
1.3.3 流体流动的类型及其判断	22
1.3.4 流动边界层	24
1.3.5 流体稳定流动时的连续性方程	26
1.3.6 流体流动过程的能量守恒和转化(伯努利方程式)	26
1.4 流速与流量的测量	32
1.4.1 测速管	32
1.4.2 孔板流量计	33
1.4.3 转子流量计	35
1.5 流体流动时的阻力	37
1.5.1 管路的沿程阻力	37
1.5.2 非圆形管内的流体阻力	46
1.5.3 局部阻力	46
1.5.4 乌氏粘度计测粘度的原理	51
1.6 管路计算	52
1.6.1 管路计算的类型和基本方法	52
1.6.2 简单管路的计算	53
1.6.3 复杂管路的计算	55
1.7 两相流动	56
1.7.1 球形颗粒在流体中运动时的阻力	56
1.7.2 曳力系数与雷诺数的关系	57
1.7.3 重力沉降	58
1.7.4 固体流态化	61

1.8 流体输送设备	69
1.8.1 离心泵	70
1.8.2 离心压缩机	80
1.8.3 往复压缩机和往复泵	82
1.8.4 其他常用流体输送设备	88
习题	91
讨论题	96
本章符号说明	97
2 传热过程和传热设备	99
2.1 概述	99
2.1.1 化工生产中的传热	99
2.1.2 热传递的基本方式	101
2.1.3 热量衡算	101
2.1.4 稳定与不稳定传热	101
2.2 热传导	102
2.2.1 基本概念与傅里叶定律	102
2.2.2 热导率	103
2.2.3 通过平壁的稳定热传导	106
2.2.4 通过圆筒壁的稳定热传导	109
2.3 对流传热	113
2.3.1 基本概念与牛顿冷却定律	113
2.3.2 用量纲分析法求无相变时流体的给热系数 α	115
2.3.3 管内强制对流时的给热系数	116
2.3.4 大空间自然对流传热	119
2.3.5 保温层的临界直径	120
2.4 辐射传热	121
2.4.1 基本概念与定律	121
2.4.2 物体间的辐射传热	124
2.4.3 对流和辐射的联合传热	126
2.5 热交换过程的传热计算	128
2.5.1 热交换器的传热机理和传热基本方程式	128
2.5.2 总传热系数	130
2.5.3 传热的平均温度差	132
2.5.4 传热面积的计算	135
2.5.5 热交换设备	137
2.5.6 热交换过程的强化途径	142
习题	144
讨论题	148

本章符号说明	148
3 精馏	149
3.1 传质分离过程	149
3.1.1 混合物的类型、分离方法和分离目的	149
3.1.2 混合物组成的表示方法	149
3.1.3 精馏概述	151
3.2 双组分溶液的气液相平衡	152
3.2.1 气液平衡时的自由度	152
3.2.2 气相为理想气体、液相为理想溶液时的气液平衡	153
3.2.3 液相为非理想溶液的气液平衡简介	158
3.3 平衡蒸馏和简单蒸馏	160
3.3.1 平衡蒸馏(闪蒸)	160
3.3.2 简单蒸馏	163
3.4 双组分连续精馏的分析和计算	165
3.4.1 精馏原理	165
3.4.2 精馏过程的物料衡算	168
3.4.3 精馏段操作线方程	170
3.4.4 理论塔板和理论塔板数	176
3.4.5 回流比的影响和选择	181
3.4.6 理论塔板数的简捷算法	185
3.4.7 实际塔板数与塔板效率	187
3.4.8 连续精馏装置的热量衡算	189
3.4.9 两组分精馏过程的几种特殊情况	191
3.5 间歇精馏	194
3.5.1 回流比恒定的间歇精馏	194
3.5.2 馏出液组成恒定的间歇精馏	197
3.6 两组分精馏的操作型计算与操作	199
3.6.1 两组分精馏的操作型计算	199
3.6.2 连续精馏操作条件的优化	201
3.7 特殊精馏	205
3.7.1 恒沸精馏	205
3.7.2 萃取精馏	206
3.7.3 加盐精馏和加盐萃取精馏	207
3.7.4 水蒸气蒸馏	208
习题	209
讨论题	214
本章符号说明	215

4 吸收	217
4.1 概述	217
4.2 气液相平衡	218
4.2.1 气液平衡关系(溶解度曲线)	218
4.2.2 亨利定律	220
4.2.3 相平衡与吸收过程的关系	224
4.3 传质机理和传质速率	225
4.3.1 分子扩散	226
4.3.2 对流扩散	231
4.4 两相间的传质	233
4.4.1 双膜理论	233
4.4.2 吸收传质速率方程	234
4.4.3 其他传质理论简介	240
4.5 吸收塔的设计及计算	242
4.5.1 吸收塔的物料衡算及操作线方程	243
4.5.2 吸收剂的选择和用量	244
4.5.3 塔径的确定	247
4.5.4 吸收塔填料层高度的计算	247
4.5.5 理论级数与塔高的计算	255
4.5.6 吸收过程的操作型计算	257
4.5.7 解吸	259
4.6 多组分吸收与化学吸收	262
4.6.1 多组分吸收	262
4.6.2 化学吸收	264
习题	264
讨论题	268
本章符号说明	269
5 气液传质设备	270
5.1 填料塔	270
5.1.1 填料塔结构	271
5.1.2 填料	271
5.1.3 填料塔的附件	275
5.1.4 填料塔的流体力学特性	276
5.1.5 填料塔的传质与塔高的计算	280
5.2 板式塔	280
5.2.1 板式塔结构	281
5.2.2 常用塔板类型	281
5.2.3 板式塔主要工艺尺寸的计算	285

习题	293
本章符号说明	294
6 化学反应工程学	296
6.1 概述	296
6.1.1 化学反应器的作用	296
6.1.2 化学反应工程学的研究对象与方法	296
6.2 基本反应器	297
6.2.1 化学反应器的类型	297
6.2.2 几种典型的基本反应器	298
6.3 物料在反应器内的流动模型	301
6.3.1 全混流模型	301
6.3.2 平推流模型	301
6.3.3 轴向返混模型	302
6.3.4 多釜串联流动模型	302
6.4 均相反应器的计算	303
6.4.1 间歇釜式反应器	303
6.4.2 连续操作的管式反应器	306
6.4.3 连续操作的搅拌釜	308
6.4.4 多釜串联反应器	310
6.5 理想均相反应器的优化选择	314
6.5.1 以生产强度为优化目标选择反应器	314
6.5.2 以产率和选择性为优化目标选择反应器	317
6.6 物料停留时间分布和流动模型	321
6.6.1 物料返混合停留时间分布	321
6.6.2 停留时间分布的测定方法	326
6.6.3 理想反应器的停留时间分布	330
6.6.4 停留时间分布在非理想流动均相反应器中的应用和计算	335
6.7 非理想流动反应器内的流动模型——扩散模型	339
6.7.1 扩散模型	339
6.7.2 扩散模型参数的确定	341
6.8 气固相催化反应器	343
6.8.1 固定床催化反应器	344
6.8.2 流化床催化反应器	357
习题	362
本章符号说明	364
7 膜分离过程	366
7.1 膜分离概述	366
7.1.1 膜分离概况	366

7.1.2 膜分离机理	367
7.1.3 膜的种类和结构	368
7.1.4 膜分离组件	369
7.2 微滤	371
7.3 超滤	372
7.4 纳滤和反渗透	373
7.5 气体分离	374
7.6 渗透汽化	376
7.7 电渗析	377
习题	380
本章符号说明	380
本书配套多媒体课件简介	382
附录	387
附录1 化工常用法定计量单位	387
附录2 常用单位的换算	387
附录3 某些气体的重要物理性质	390
附录4 某些液体的重要物理性质	391
附录5 干空气的物理性质(101.33 kPa)	394
附录6 水的物理性质	395
附录7 饱和水蒸气表(按温度排列)	396
附录8 饱和水蒸气表(按压强排列)	397
附录9 一些有机物的蒸气压	399
附录10 常用固体材料的密度和比热容	400
附录11 某些固体材料的热导率	401
附录12 某些液体的热导率	402
附录13 某些气体和蒸气的热导率	403
附录14 管内流体常用流速范围	404
附录15 列管换热器的传热系数的参考值	404
附录16 壁面污垢的热阻	406
附录17 管子规格(摘录)	407
附录18 泵规格(摘录)	409
附录19 4-72型离心通风机规格(摘录)	416
附录20 某些工业管道的绝对粗糙度	417
附录21 泰勒标准筛的规格	418
附录22 换热器规格(摘录)	418
参考文献	421

绪 论

1. 本课程的内容和教学目的

化学工程是研究改变物料的化学组成和物理性质的工程技术学科。它研究的内容不但包括具有化学变化的过程,而且还包括分离混合物为较纯净的不同组分的过程,以及改变物料的物理状态和性质的各种过程。因此,它需要高等数学、物理学、物理化学等课程为基础,研究化学、石油、冶金、轻工、生物、食品、环保等工业中具有共同特点的单元操作和化学反应工程等,以及有关的流体力学,热量传递和物质传递的原理,热力学和化学动力学等,以求得工业生产上的优质、高效、低能耗,并防止环境污染。

据考证,早在1万年前中国人就已掌握了用窑穴烧制陶器的技艺;5000年前埃及人开始酿制葡萄酒,并用布袋对葡萄汁过滤……但在相当长的时间里,这些操作都仅仅是规模很小的手工作业。化学工程真正成为一门独立的学科,是19世纪下半叶随着大规模制造化学产品的生产过程的发展而形成的。

1791年N. 吕布兰发明的吕布兰工业制碱法标志着化学工业的诞生。到了19世纪70年代,制碱、制酸、化肥、煤化工等都已有了相当规模,许多新发明、新技术被应用到化学工业中,此时主要研究对象是采用化学加工技术、涉及各种行业的化工生产工艺,研究内容涉及原料特点、生产原理、工艺流程、最适宜操作条件以及所用机械设备的构造与使用,开设的课称为化学工艺学。

作为一门独立的学科,化学工程始于20世纪初。1901年英国人G. E. 戴维斯出版的《化学工程手册》成为世界上第一本阐述各种化工生产过程共性规律的著作。第一本系统阐述单元操作原理和计算方法的著作是1923年W. H. Walker, W. K. Lewis和W. H. McAdams合著的《Principles of Chemical Engineering》。

此后20年,化学工程学主要是对单元操作,尤其是对于流体流动、传热、传质等单元操作进行研究,并把它们归纳于传递的理论之中。到了20世纪40年代,化工技术的突破发展,促进了工程上对化学反应过程的研究,50年代形成了化学反应工程分支。化学反应工程研究反应器内传递过程和化学反应的相互关系和影响,阐明工业反应过程的实质,目的在于控制生产规模下的化学反应过程,实现反应器的最佳设计。化学反应过程涉及化工生产问题的核心问题,与早先发展起来的传递过程共同形成化学工程学两大支柱,解释和解决化学工程中的理论问题。“三传一反”(动量传递、热量传递、质量传递和化学反应工程)应运而生。

20世纪70年代以后,随着化工生产日趋大型化、连续化以及计算机技术的迅速发展,化学工程学的研究已不再限于单个单元操作或化学反应工程,而是深入到整个工厂,甚至是整个行业的大系统研究,从而形成化学系统工程,其主要任务是研究系统的设计、控制和管理。

化学工程学经过近100年的发展,现已形成一个体系完整、研究内容丰富、研究方法先

进的工程技术学科。然而,近几十年来高新技术的迅速发展对每个学科都提出了崭新的要求,化学工程学亦面临新的挑战,在解决面临的问题中自身完善,也形成了一些具有学科特色、富有开创性的前沿研究领域:

1) 化学工程学与高新技术学科结合形成新的前沿学科

(1) 材料化学工程

材料化学工程是化学工程与材料化学及物理相结合而产生的新学科。高技术的发展要求开发具有高强度和特殊性能的新型材料,除金属材料由冶金工程学科研究外,聚合物材料、无机非金属材料、复合材料等都是材料化学工程研究的对象。新型材料的制备、加工处理、性能与组成及结构间关系等都是材料化学工程学的研究领域。

(2) 生物化学工程

生物化学工程是生物工程和化学工程相结合的交叉学科。发酵工程(各种抗菌素医药、维生素药物、氨基酸、柠檬酸、乳酸等的生产)、酶工程(各类酶制剂与辅酶、核酸与核苷药物等制备)、基因工程(各种 α 与 γ 干扰素的研制、DNA 重组等)和细胞工程(各类动植物细胞培养疫苗、免疫试剂等)都是生物化学工程的研究和开发领域,通过发酵、酶催化、基因工程、细胞培养等技术,可以在条件温和、设备简单、选择性好、副反应少、产品性能优良、污染少的条件下生产多种化学品。生化反应动力学,各类生化反应器的研制和放大设计,生物产品的提取、分离和精制技术等,都需要依靠化学工程的基本理论和技术。

(3) 能源和资源化学工程

化学工业是高能耗产业,存在能量供求平衡关系;化学工业又是资源消耗大户,亦面临着资源日趋匮乏的挑战。如何充分利用能源和资源,这便是化学工程学与能源技术、资源学、人类生态学相结合而产生的新领域——能源和资源化学工程。

(4) 环境化学工程

由化学工程和环境化学、生态化学相结合而形成的环境化学工程的研究涉及现有化工厂生产中的“三废”治理,化工工艺无害化的研究与开发,建立“生态化工”。另外,还涉及一些重要的环境化学工程问题,诸如化工原料的无害化、 CO_2 的综合利用、机动车尾气净化等。

随着社会发展,新兴技术与产业对高新合成物质与工艺及设备的需求剧增,化学工程还将向更广阔的领域延伸,诸如超细粉体化学工程、表面与界面化学工程、微电子化学工程、信息化学工程、电子化学工程、海洋化学工程、生态化学工程等都将为化学工程学渗透发展的方向。

2) 化学工程学的前沿研究

(1) 过程耦合技术

采用反应-分离、反应-反应等耦合研究技术,在同一设备中完成两个或多个过程,是反应工程与反应器开发的一个热点。反应-蒸馏已在工业生产中获得成功应用,如甲醇与含异丁烯的混合气体反应生产甲基叔丁基。技术核心是通过耦合突破了平衡转化率的限制,蒸馏过程避免了共沸物的出现,反应热还可供蒸馏使用,大大节省了投资和能源消耗。反应与膜分离结合的膜反应器,可在反应过程中不断除去反应物,增大反应速率和转化率,适用于各类可逆反应和产物对反应有抑制作用的过程。近期工业化的反应-分离结合的过程还有反应-萃取、反应-吸附、反应-结晶等。

(2) 新催化技术

研究开发新型催化剂,包括生物催化剂、固体酸和碱催化剂、相转移催化剂以及膜催化与纳米级催化材料。在催化工艺上,将会用对环境无害的过程代替有害过程。场效催化(如光催化、电催化、等离子催化技术)将进入实用阶段。

(3) 非传统反应与分离技术

非传统反应与分离系统是指采用极端操作条件,如超短接触、超重力、超临界、等离子体、微波、光、电、磁能、深冷、高温高压、非稳态操作等去完成常规操作条件下难于进行的诸多过程,例如利用超临界流体的高化学活性、高渗透性、高溶解力等进行新型反应-再生系统的开发,低浓废水的回收处理,从生物质中高效提取高价值的有机物,超细粉的制备等。

膜分离技术以具有选择透过性的膜为组分分离手段实现混合物的分离。膜技术从电渗析和反渗透起步,超滤、纳滤、微滤、渗析、气体分离、渗透汽化、液膜等各种膜过程和膜技术已处于高速发展阶段。膜分离技术与传统的分离技术的结合又派生出诸如膜蒸馏、膜萃取、膜吸收、膜色谱、膜亲和、膜反应器和膜控制释放等许多新型膜过程和膜技术,这些膜技术的应用产生了巨大的经济效益和社会效益,已成为当今分离科学中最重要的手段之一。

(4) 超细粉技术

超细粉通常指粒径小于 100 nm 的微粒,所以又称纳米材料。进入纳米数量级的粒子其表面电子结构和晶体结构发生结构变化,产生了块状材料所不具有的表面效应、小尺寸效应、量子效应和宏观量子隧道效应,从而具有一系列优异的物理和化学性质,使之在电子、冶金、化学、生物和医学等领域具有广阔的应用前景。超细粉体制备技术涉及物理、化学、化工、材料、表面、胶体等众多学科,在制备过程中还涉及诸多工程问题。从化学工程学的角度,研究超细粉体在大规模制备工程中涉及的单元操作的特殊性,在工业装置重现小尺寸设备上所得超细粉体的物理形状与结构,是超细粉放大过程涉及的新课题。对超细粉体的研究还包括粉体表面改性和产品表征两个内容。

(5) 工程放大方法

化工过程本身的复杂性,使之过去只能依靠经验放大。随着近代计算机技术的发展,特别是计算流体力学、计算传递学的发展,解决这一工程难题应有所突破。

(6) 化工动态过程的优化

利用计算机技术及快速、高精度的分析和监测仪器,可在短时间内获取动态过程的大量信息,以了解达到定态过程中出现的各种现象及其中的速率控制步骤、过程的本质和机理,可对过程的改善、强化和优化控制提供依据。分批操作的动态模拟和过程优化,在近代精细化工迅速发展形势下日显重要,对各类间歇操作的操作参数进行深入研究,并建立比较精确和实用的模型,以实现优化设计和操作,可明显提高设备效率和降低能耗。利用强制周期改变操作参数的方法以强化反应和分离过程,是近 20 年化学工程学的的一个重要研究前沿。

由上可知,化学工程学科经过不断发展并与其他学科交叉,其应用对象远远超出了化学工程原来涉及的化学产品,几乎覆盖了所有物理和化学的物质加工过程,如环保、生物、材料、石化、能源、轻化工、医药和食品等工业过程。因此许多学者认为将狭义的“化学工程”提升为覆盖面更广阔的“过程工程”似更为确切合理。

许多化工生产需要进行一个或几个化学反应,而化学反应必须在一定的条件下才能进

行,并取得较高的产率,这些条件包括压强、温度、反应物料的配比等。另外,化学反应前后的原料和产品的提纯,副产物的利用以及反应热的排除(吸热反应则要供热)等,都需要诸如流体输送和压缩、蒸馏、吸收、热交换等一系列单元操作来完成。

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物分离制成纯净产品的单元操作,在生产过程中占据着重要的地位,它们在工厂的设备投资和操作费用中常常占主要的比例,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。若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六大类:

(1) 流体动力过程

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、搅拌、过滤、流态化等。

(2) 传热过程

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,如热交换、蒸发等。

(3) 传质过程

研究物质通过相界面的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,如气体的吸收,液体的蒸馏、萃取、吸附和膜分离等。

(4) 热质传递过程

质量传递和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与传热过程。

(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。

本课程主要讨论前3类中最常用的单元操作:流体流动和输送、传热、精馏、吸收、膜分离;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。

本课程还讨论化学反应工程,通过基本反应器、气固相催化反应器、反应器内物料停留时间分布和流动模型来阐明化学反应工程学的基本原理。

当今技术创新的一个重要特征是交叉领域、边缘学科的发展,带动了传统技术的发展。为适应当今科技飞速发展和国民经济发展的需要,学生应具有综合性、跨学科的广博基础。化学工程是一门涉及广泛的知识领域,既有系统的理论,又有很强的工程特点的课程。化学系和生物科学与技术系的学生中的不少人将从事与国民经济有关的技术开发工作,他们只有与这些领域的工程技术人员合作或互相渗透,才能把科研成果尽快地转化为生产力;而自动化系的学生要搞好化工自动化、过程优化,也必须掌握化学工程的基本理论。

本课程的教学目的是对学生进行化学工程的教育,进一步提高学生在今后工作中分析

问题和解决问题的能力。

2. 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,只要空间两处温度不同,即温度不平衡,热量就会从高温处向低温处传递,直到两处温度相同为止,此时过程达到平衡,两处便没有热量传递。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学工程的一个重要基础。

过程的速率是指过程进行的快慢,可以近似地用推动力除以阻力表示。在实际工作中,一个过程以多快的速率由不平衡向平衡移动,是极为重要的问题。如果一个过程以极慢的速率进行,那么生产过程所需的设备将极为庞大。

一个过程的速率与推动力成正比,而与过程的阻力成反比,可表示为:

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

推动力的性质决定于过程的内容。如传热过程的推动力是温度差。过程阻力是各种因素对过程速率影响的总的体现。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与动量传递、热量传递或质量传递有关,所以传递过程原理是化学工程的另一个重要基础。

2) 三种衡算

质量衡算、能量衡算与动量衡算是化学工程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。下面只就总质量衡算与总能量衡算中的热量衡算加以说明。

(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计的基础。物料衡算即是对某一过程中的总物料或其中某一组分列出方程求解,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1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:

$$\sum F = \sum D + A \quad (0-1)$$

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。

式(0-1)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,得出与式(0-1)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,故式(0-1)变为:

$$\sum F = \sum D \quad (0-2)$$

即输入的物料质量等于输出的物料质量。

例 0-1 在生产 KNO_3 的过程中,质量分数为 0.2 的纯 KNO_3 水溶液以 1000 kg/h 的流量送入蒸发器,在 422 K 下蒸发出部分水,得到 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如图 0.1 所示。

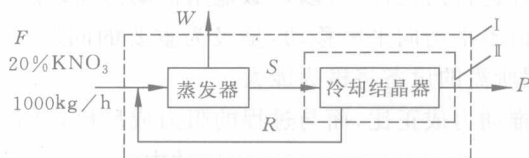


图 0.1 例 0-1 附图

① 求 KNO_3 结晶产品量 P 和蒸发水量 W

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 为时间衡算基准,分别以总物料和 KNO_3 为衡算对象,因系稳态操作,故可得

$$F = W + P \quad (a)$$

$$F \times 0.2 = W \times 0 + P \times 0.96 \quad (b)$$

联立解(a),(b)两式可得

$$P = 208.3 \text{ kg/h}$$

$$W = 791.7 \text{ kg/h}$$

② 求循环的饱和溶液量 R

设进入冷却结晶器的质量分数为 0.50 的 KNO_3 溶液量为 $S(\text{kg/h})$ 。取冷却结晶器为系统(系统 II),衡算基准为 1 h ,以总物料为衡算对象,进行总物料的衡算,得:

$$S = P + R \quad (c)$$

以 KNO_3 为衡算对象,进行 KNO_3 的衡算,可得:

$$S \times 0.50 = 208.3 \times 0.96 + R \times 0.375 \quad (d)$$

联立解(c),(d)两式可得:

$$R = 766.5 \text{ kg/h}$$

(2) 热量衡算

热量衡算是能量衡算的一种形式,在很多化工过程中主要涉及物料温度和热量的变化,所以热量衡算是化工计算中最常用的能量衡算。热量衡算的基础是能量守恒定律。

热量衡算不仅要划定衡算系统和选取基准,而且除选取时间基准外,还必须考虑物态与温度基准,因为反映物料所含热量的焓值是温度和物态的函数。通常以 273 K 下物质的液态为基准。热量除了通过物料输入和输出外,还可以通过热量传递从系统输入或输出。

根据能量守恒定律,热量衡算式一般为:

$$\sum H_F + Q = \sum H_P + Q_A \quad (0-3)$$

式中: $\sum H_F$ ——单位时间内输入系统的焓值的总和,即物料带入的热量总和;

$\sum H_P$ ——单位时间内从系统输出的物料焓值的总和,即物料带出的热量总和;

Q ——单位时间内从环境传入(或传给环境)的热量;

Q_A ——单位时间内系统中热量的积累。

对于稳态过程,系统内无热量积累, Q_A 等于零,则

$$\sum H_F + Q = \sum H_P \quad (0-4)$$

例 0-2 一罐内盛有 20 t 重油,温度为 20℃。用外循环加热法进行加热(见图 0.2),重油循环量 W 为 8 t/h。循环的重油在换热器中用水蒸气加热,其在换热器出口温度恒为 $t_3 = 100^\circ\text{C}$,罐内油均匀混合。问罐内油从 20℃ 加热到 $t_2 = 80^\circ\text{C}$ 需要多少时间。假设罐与外界绝热。

解: 罐内油的温度随时间变化,所以是一非稳态的加热过程,由于罐内油均匀混合,从罐内排出的油温与罐内油的温度相同,设在某一时刻为 $t^\circ\text{C}$ 。

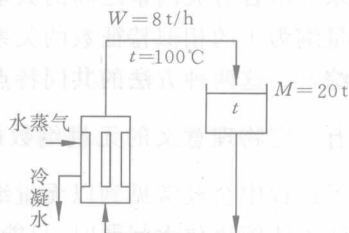


图 0.2 例 0-2 附图

以罐为系统进行热量衡算,以 $d\tau$ 为时间基准,以 0°C 的油为温度物态基准,则在 $d\tau$ 时间内进出系统及系统内积累的热量分别为

输入系统的重油的焓 $= Wc_p \times 100 \times d\tau$

从系统输出的重油的焓 $= Wc_p t d\tau$

系统内积累的焓 $= Mc_p dt$

式中: c_p 为重油的平均质量定压热容。

根据式(0-1)可得:

$$Wc_p \times 100 \times d\tau = Wc_p t d\tau + Mc_p dt$$

整理上式可得:

$$d\tau = \frac{M}{W} \frac{dt}{100 - t}$$

按照下列条件进行积分:

开始时, $\tau=0$, $t_1=20^\circ\text{C}$

终了时, $\tau=\tau$, $t_2=80^\circ\text{C}$

$$\int_0^\tau d\tau = \frac{20 \times 10^3}{8 \times 10^3} \int_{20}^{80} \frac{dt}{100 - t}$$

所以

$$\tau = \frac{20}{8} \ln \frac{100 - 20}{100 - 80} = 3.47(\text{h})$$

3. 研究方法

化学工程学之所以成为一门学科,除了有具体的研究对象外,它还有统一的研究方法。化学工程学作为一门工程技术学科,面临着真实的、复杂的化工生产过程——特定的物料在特定设备中进行特定的过程,其复杂性不完全在于过程的本身,首先在于化工设备复杂的几