

63



北京市高等教育精品教材立项项目

T 602-43

T 53(2)

1

# 化工原理

(第2版) 上册

蒋维钧 戴猷元 顾惠君 编著

清华大学出版社  
北京

## 内 容 简 介

本书为清华大学一类课“化工原理”的教材,在清华大学多个系所使用多年。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、气液传质设备、液液萃取、干燥、吸附分离、膜分离过程和其他分离过程等9章。

本教材与“化工原理”课的实验教材《化工原理实验》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、食品、轻工、制药和材料等专业的师生,以及从事上述专业的设计、开发和运行的科技人员。

### 图书在版编目(CIP)数据

化工原理(上册)/蒋维钧,戴猷元,顾惠君编著. —2版. —北京:清华大学出版社,2002

ISBN 7-302-05920-9

I. 化… II. ①蒋… ②戴… ③顾… 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(2002)第 074574 号

出 版 者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

责任编辑:刘明华

印 刷 者: 北京牛山世兴印刷厂

发 行 者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×960 1/16 印张: 32.75 字数: 605 千字

版 次: 2003 年 3 月第 2 版 2003 年 3 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-05920-9/TQ·10

印 数: 0001~5000

定 价: 56.00 元

## 第 2 版前言

1992年由清华大学出版社出版的《化工原理》已由清华大学多个系所及十余所兄弟院校使用多年,反映良好。1997年被评为全国优秀教材二等奖(原化工部推荐)。由于化学工程与工艺学科的发展,部分内容需要更新及修订。

作为清华大学一类课,近十年来《化工原理》的教学按照“掌握基本原理、突出过程强化、体现前沿进展”的3层次教学指导思想,讲授基本理论与激发创新意识并重,引导学生从掌握基本原理出发,注重培养创新能力。第2版仍将化工单元操作按过程共性归类,以动量传递为基础,阐述了流体流动、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;以热量传递为基础,阐述了传热及蒸发操作;以质量传递为基础,阐述了吸收、精馏、萃取、干燥、吸附、膜分离和其他分离过程等单元操作。

本教材不仅可读性强、易于自学,同时强调流动、传热、传质等概论方面的描述,注意在内容中引入过程强化部分和新型分离技术的前沿领域研究状况,并通过思考题或讨论题,培养学生综合能力和解决问题能力。

本教材第1版各章分别由蒋维钧(绪论,第三、四、六、七、九章)、戴猷元(第一、二章)、顾惠君(第五章)、雷良恒(第十、十一章)和刘茂林(第八、十二、十三章)编写,最后由蒋维钧修改,统一定稿。

第2版对第1版进行了修订,并新增了膜分离与其他分离过程两章,更新了部分附录。修订工作由戴猷元和余立新负责完成。膜分离由戴猷元和余立新编写,其他分离过程由余立新编写。全书由蒋维钧审阅定稿。

编者感谢清华大学化工原理教研组的同事在修订工作中给予的大力协助。

编者

# 目 录

0 绪论	1
0-1 本课程的内容	1
0-2 基本概念与方法	3
0-2-1 过程的平衡与速率	3
0-2-2 3种衡算	4
0-2-3 研究方法	9
0-3 单位制与单位换算	10
习题	11
参考文献	12
1 流体流动	14
1-1 流体流动中的作用力	14
1-1-1 体积力和密度	14
1-1-2 压力	16
1-1-3 剪力、剪应力和粘度	17
1-2 流体静力学基本方程	20
1-2-1 流体静力学基本方程	20
1-2-2 流体静力学基本方程的应用	23
1-2-3 流体在离心力场内的静力学平衡	27
1-3 流体流动的基本方程	28
1-3-1 概述	28
1-3-2 连续性方程式	31
1-3-3 柏努利方程式	32
1-3-4 柏努利方程式的另一种推导方法	37
1-3-5 柏努利方程式的应用	41
1-4 流体流动现象	47
1-4-1 两种流动型态和雷诺数	47
1-4-2 管内层流与湍流的比较	50
1-4-3 边界层概念	55
1-5 管内流动的阻力损失	59
1-5-1 阻力损失及计算通式	59
1-5-2 圆形直管内层流流动的阻力损失	61

1-5-3	因次分析法 .....	62
1-5-4	圆形直管内湍流流动的阻力损失 .....	64
1-5-5	流体在非圆形管道内流动的阻力损失 .....	69
1-5-6	局部阻力损失 .....	70
1-5-7	伴有传热过程的流动阻力损失计算 .....	77
1-5-8	可压缩流体流动的阻力损失计算 .....	79
1-6	管路计算 .....	83
1-6-1	管路计算的类型和基本方法 .....	83
1-6-2	简单管路的计算 .....	84
1-6-3	复杂管路的计算 .....	86
1-6-4	阻力对管内流动的影响 .....	91
1-7	流速和流量的测量 .....	93
1-7-1	测速管 .....	93
1-7-2	孔板流量计和文丘里流量计 .....	95
1-7-3	转子流量计 .....	98
1-8	非牛顿型流体的流动 .....	100
1-8-1	乘方规律流体 .....	100
1-8-2	乘方规律流体管内流动的阻力损失 .....	100
	习题 .....	102
	思考题 .....	116
	符号说明 .....	118
	参考文献 .....	120
<b>2</b>	<b>流体输送机械</b> .....	<b>121</b>
2-1	离心泵 .....	121
2-1-1	离心泵的工作原理及主要构件 .....	122
2-1-2	离心泵的基本方程式 .....	125
2-1-3	离心泵的主要性能参数 .....	130
2-1-4	离心泵的特性曲线 .....	131
2-1-5	离心泵的安装高度 .....	137
2-1-6	离心泵的工作点与流量调节 .....	140
2-1-7	离心泵的组合操作 .....	143
2-1-8	离心泵的类型和选用 .....	145
2-2	往复泵 .....	148
2-2-1	往复泵的工作原理 .....	148
2-2-2	往复泵的输液量和流量调节 .....	149
2-3	其他类型的化工用泵 .....	151

2-4	气体输送机械 .....	153
2-4-1	离心式通风机 .....	154
2-4-2	离心鼓风机和压缩机 .....	156
2-4-3	旋转鼓风机和压缩机 .....	157
2-4-4	往复压缩机 .....	158
2-4-5	真空泵 .....	166
	习题 .....	167
	思考题 .....	170
	符号说明 .....	172
	参考文献 .....	174
<b>3</b>	<b>流体流过颗粒和颗粒层的流动 .....</b>	<b>175</b>
3-1	流体流过颗粒的流动 .....	175
3-1-1	单颗粒的几何特性参数 .....	175
3-1-2	曳力与曳力系数 .....	177
3-1-3	流体流过球形颗粒 .....	178
3-1-4	流体流过其他形状规则的颗粒(圆柱与圆片) .....	180
3-1-5	流体流过形状不规则的颗粒 .....	180
3-2	颗粒在流体中的流动 .....	181
3-2-1	重力沉降 .....	181
3-2-2	离心沉降 .....	187
3-3	流体流过颗粒床层的流动 .....	189
3-3-1	混合颗粒的几何特性 .....	189
3-3-2	颗粒床层的几何特性 .....	192
3-3-3	流体通过颗粒固定床的压降 .....	194
3-4	固体流态化 .....	197
3-4-1	流态化过程 .....	197
3-4-2	流化床的流化类型与不正常现象 .....	198
3-4-3	流化床的主要特性 .....	201
3-4-4	流化床的操作范围 .....	202
3-4-5	流化床的直径与高度 .....	206
3-4-6	流化质量及改善流化质量的措施 .....	208
3-4-7	气流输送 .....	210
	习题 .....	215
	思考题 .....	216
	符号说明 .....	217
	参考文献 .....	219

<b>4 非均相混合物的分离</b> .....	220
4-1 沉降.....	221
4-1-1 沉降分离的一般原理.....	221
4-1-2 重力沉降分离.....	221
4-1-3 离心沉降分离.....	230
4-1-4 电沉降——电除尘器.....	242
4-2 过滤.....	243
4-2-1 概述.....	243
4-2-2 过滤设备.....	246
4-2-3 过滤过程计算的理论基础.....	255
4-2-4 过滤机生产能力的计算.....	267
4-3 其他分离方法.....	272
4-3-1 惯性分离器.....	272
4-3-2 湿法除尘器.....	273
4-4 非均相混合物分离方法的选择及过程强化.....	274
4-4-1 分离方法的选择.....	274
4-4-2 非均相混合物分离过程的强化.....	275
习题.....	278
思考题.....	282
符号说明.....	283
参考文献.....	285
<b>5 传热</b> .....	286
5-1 热传导.....	291
5-1-1 有关热传导的基本概念.....	291
5-1-2 热传导速率——傅里叶定律.....	292
5-1-3 导热系数.....	293
5-1-4 通过平壁的稳定热传导.....	295
5-1-5 通过圆筒壁的稳定热传导.....	300
5-1-6 导热微分方程式.....	303
5-2 对流传热概说.....	307
5-2-1 对流传热速率和对流传热系数.....	307
5-2-2 对流传热机理.....	309
5-3 传热过程计算.....	311
5-3-1 总传热速率方程.....	312
5-3-2 热量衡算.....	313
5-3-3 总传热系数.....	314

5-3-4	传热的平均温差 .....	318
5-3-5	传热面积的计算 .....	324
5-3-6	传热单元数法 .....	325
5-3-7	保温层的临界直径 .....	331
5-3-8	不稳定传热 .....	332
5-4	无相变的对流传热 .....	333
5-4-1	影响对流传热的因素 .....	333
5-4-2	对流传热系数经验公式的建立方法 .....	334
5-4-3	管内强制对流传热 .....	338
5-4-4	管外强制对流传热 .....	345
5-4-5	大空间自然对流传热 .....	349
5-4-6	非牛顿型流体的传热 .....	351
5-5	有相变的对流传热 .....	354
5-5-1	冷凝传热过程简介 .....	355
5-5-2	纯蒸气膜状冷凝时的对流传热系数 .....	356
5-5-3	影响冷凝传热的因素和冷凝过程的强化 .....	361
5-5-4	沸腾传热过程简介 .....	364
5-5-5	沸腾传热机理 .....	365
5-5-6	影响沸腾传热的因素及强化沸腾传热的途径 .....	368
5-5-7	沸腾传热系数的计算 .....	370
5-6	辐射传热 .....	372
5-6-1	热辐射的基本概念 .....	372
5-6-2	物体的辐射能力 .....	374
5-6-3	物体间的辐射传热 .....	377
5-6-4	气体的热辐射 .....	382
5-6-5	对流和辐射的联合传热 .....	384
5-7	换热器 .....	386
5-7-1	间壁式换热器的类型及选用 .....	386
5-7-2	换热器传热过程的强化 .....	395
5-7-3	列管式换热器的设计和选用 .....	397
	习题 .....	407
	思考题 .....	417
	符号说明 .....	418
	参考文献 .....	420
<b>6</b>	<b>蒸发</b> .....	<b>421</b>
6-1	蒸发设备 .....	426



6-1-1	循环型蒸发器 .....	426
6-1-2	非循环型(单程型)蒸发器 .....	429
6-1-3	各类蒸发器的性能比较 .....	432
6-1-4	蒸发的辅助设备 .....	432
6-2	单效蒸发的计算 .....	433
6-2-1	物料衡算 .....	434
6-2-2	热量衡算 .....	434
6-2-3	传热面计算 .....	439
6-2-4	单效蒸发计算小结 .....	446
6-3	多效蒸发器及其计算 .....	447
6-3-1	多效蒸发流程 .....	447
6-3-2	多效蒸发的温度差损失和有效温度差 .....	449
6-3-3	多效蒸发最佳效数的确定 .....	450
6-3-4	多效蒸发的计算 .....	452
6-4	蒸发过程的设计 .....	460
	习题 .....	461
	思考题 .....	462
	符号说明 .....	463
	参考文献 .....	464
附录 A	化工常用法定计量单位 .....	465
附录 B	常用单位的换算 .....	466
附录 C	某些气体的重要物理性质 .....	469
附录 D	某些液体的重要物理性质 .....	470
附录 E	干空气的物理性质(101.33kPa) .....	472
附录 F	水的物理性质 .....	473
附录 G	饱和水蒸气表(按温度排列) .....	474
附录 H	饱和水蒸气表(按压力排列) .....	475
附录 I	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 .....	477
附录 J	液体的粘度共线图 .....	479
附录 K	气体及蒸气的粘度共线图 .....	482
附录 L	液体的定压比热容共线图(常压下) .....	484
附录 M	气体及蒸气的定压比热容共线图(常压下) .....	487
附录 N	常用固体材料的密度和定压比热容 .....	489
附录 O	某些固体材料的导热系数 .....	490
附录 P	某些液体的导热系数 .....	491
附录 Q	气体的导热系数共线图(常压下) .....	492

附录 R	蒸发潜热(汽化热)共线图 .....	494
附录 S	液体的表面张力共线图 .....	496
附录 T	壁面污垢的热阻 .....	498
附录 U	无机盐溶液在 101.33kPa 下的沸点 .....	499
附录 V	101.33kPa 下溶液的沸点升高与浓度的关系图 .....	500
附录 W	管子规格(摘录) .....	501
附录 X	泵规格(摘录) .....	504
附录 Y	4-72 型离心通风机规格(摘录) .....	511
附录 Z	换热器规格(摘录) .....	512

# 0 结 论

## 0-1 本课程的内容

化工原理是化工及其他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为“化工原理”,20 世纪 50 年代曾改为前苏联习用的名称“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”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,单元操作作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,在生产过程中占有极重要的地位。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 0-1),可以从不同的角度加以分类。

表 0-1 常用单元操作

类 别	名 称	目 的
流体动力过程	流体输送	将流体以一定流量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	使液体与其他物质均匀混合
	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

续表

类别	名称	目的
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去除某些离子
热质传递过程	膜分离	用固体或液体膜分离气体或液体混合物
	干燥	加热固体使其所含液体(如水)汽化而去除
	增湿与减湿	调节与控制空气或其他气体中的水蒸气含量
热力过程	结晶	使溶液中的溶质变成晶体析出
	压缩	提高气体的压力
机械过程	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 3 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他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。

本课程按照操作的主要物理特征和基本原理分类,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。

值得提及的是,对化学工业各个行业中的单元操作加以研究,这是生产发展的需要。各单元操作依据不同的原理,适应于不同的体系,达到实际生产的目的。单元操作中所发生的过程是多种多样的,从本质上来说属于下列3种:

- (1) 动量传递过程——单相或多相流动;
- (2) 热量传递过程——传热;
- (3) 质量传递过程——传质。

传递过程成为统一的研究对象,也是联系各单元操作的一条主线。

## 0-2 基本概念与方法

### 0-2-1 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,氨在两相间呈不平衡状态,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。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他很多因素有关。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:

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

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。

### 0-2-2 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 0-1)。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。

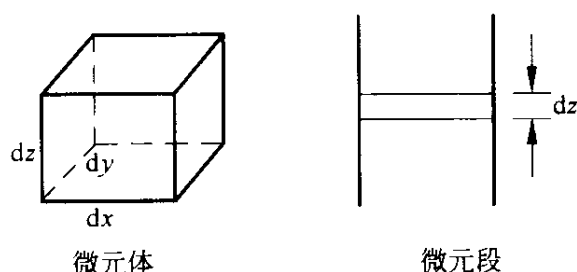


图 0-1 微分衡算系统

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

#### 1) 质量衡算

质量衡算常称为物料衡算,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

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

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。

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 1h, 1min 等。根据过程的具体情况，为便于分析问题和计算，也可以取其他的基准，例如对于间歇操作，可取每处理一批物料为基准。

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进行衡算，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、压力、密度等不随时间而变，系统中无物料的积累，即  $A$  等于零，故

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

即输入物料质量等于输出的物料质量。

**例 0-1** 在生产  $\text{KNO}_3$  的过程中，质量分数为 0.2 的纯  $\text{KNO}_3$  水溶液以 1 000kg/h 的流量送入蒸发器，在 422K 下蒸发出部分水而得 50% 的浓  $\text{KNO}_3$  溶液，然后送入冷却结晶器，在 311K 下结晶，得到含水 0.04 的  $\text{KNO}_3$  结晶和含  $\text{KNO}_3$  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  $\text{KNO}_3$  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 0-2)。

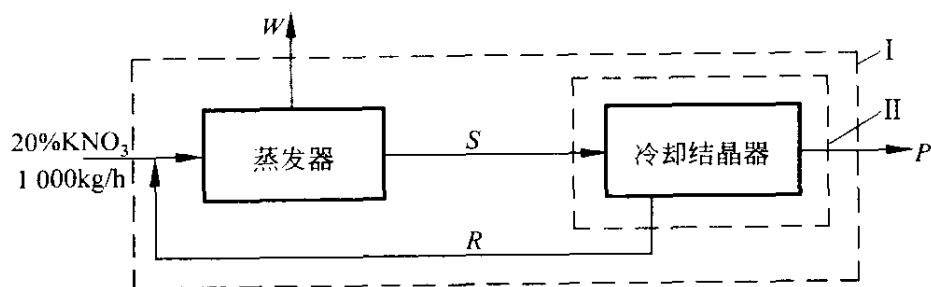


图 0-2 例 0-1 附图

(1) 求  $\text{KNO}_3$  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 1h 为衡算基准，以  $\text{KNO}_3$  为衡算对象，因系稳态操作，输入系统的  $\text{KNO}_3$  量等于从系统输出的量，即

$$1\ 000 \times 0.2 = 0.96P$$

所以 
$$P = \frac{1\,000 \times 0.2}{0.96} \text{kg/h} = 208.3 \text{kg/h}$$

(2) 求蒸发水量  $W$

仍取系统 I, 衡算基准为 1h, 以总物料为衡算对象, 则

$$1\,000 = W + P$$

所以 
$$W = 791.7 \text{kg/h}$$

(3) 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  $\text{KNO}_3$  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 1h, 以总物料为衡算对象, 做总物料的衡算, 得

$$S = 208.3 + R$$

以  $\text{KNO}_3$  为衡算对象, 作  $\text{KNO}_3$  的衡算, 得

$$S \times 0.5 = 208.3 \times 0.96 + R \times 0.375$$

联立解上述二式, 可得

$$R = 766.6 \text{kg/h}$$

从这个例题, 可以体会如何根据解题的需要取不同的系统和不同的衡算对象。

**例 0-2** 一车间体积为  $30 \times 10 \times 8 \text{m}^3$ 。车间内生产一种有害气体, 按安全标准规定它在空气中的体积分数不得超过 0.002, 因此其含量达到 0.002 时就自动通风, 通风量为  $120 \text{m}^3/\text{min}$ 。问通风 20min 后, 有害气体含量为多少?

(假设: 车间内的空气始终混合均匀, 在通风这段时间内新产生的有害气体可以忽略不计。)

**解:** 首先根据题意画出过程的示意图(图 0-3)。

在通风过程中, 车间内及排出的气体中有害气体的含量都是在变化的, 所以该过程属非稳态过程。假设过程中温度和压力均不变, 则气体物料量可用体积表示。因车间内空气始终混合均匀, 故任何瞬间车间内和排出的气体中有害气体含量相等, 设其值为  $x$  (摩尔分数)。

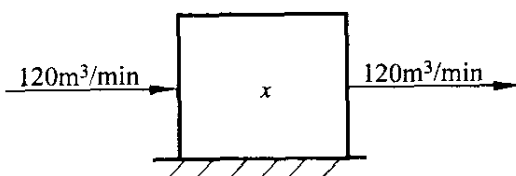


图 0-3 例 0-2 附图

取整个车间为系统, 取时间  $dt \text{min}$  为衡算基准, 以有害气体为衡算对象, 则

$$\text{输入量} = 0$$

$$\text{输出量} = 120x \times dt$$

$$\text{积累量} = (30 \times 10 \times 8)dx = 2\,400dx$$

所以 
$$120xdt + 2\,400dx = 0$$



$$dt = \frac{-2400}{120} \frac{dx}{x}$$

从时间 0 到 20min, 相应的有害气体浓度从 0.002 降低到  $x$ , 积分上式得

$$\int_0^{20} dt = -20 \int_{0.002}^x \frac{dx}{x}$$

$$20 = -20 \ln\left(\frac{x}{0.002}\right)$$

所以

$$x = 0.00074$$

## 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与热量的变化, 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。

与物料衡算相似, 进行热量衡算时首先也要划定衡算系统和选取衡算基准。但是与物料衡算不同, 进行热量衡算时除了选取时间基准外, 还必须选物态与温度基准, 因为反映物料所含热量的焓值是温度与物态的函数。通常以 273K 物质的液态为基准。物态基准除了指物质的不同物态(液、固或气)外, 对于有化学反应发生的系统, 还必须考虑物质本身的不同, 因为反应的热效应, 反应物与生成物在同温度下的焓值是不同的。进行热量衡算的另一个必须指出的特点是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, 热量衡算式的一般式为

$$\sum H_F + q = \sum H_p + A_q \quad (0-3)$$

式中:  $\sum H_F$ ——单位时间内输入系统的物料的焓值的总和, 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系统的热量;

$A_q$ ——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,  $A_q$  等于零, 则

$$\sum H_F + q = \sum H_p \quad (0-4)$$

**例 0-3** 在一系列管式换热器中, 用 373K 的饱和水蒸气加热某溶液, 溶液流量为 1000kg/h。从 298K 加热到 353K, 溶液的平均比热容为 3.56kJ/(kg·K)。饱和水蒸气冷凝放热后以 373K 的饱和水排出。换热器向四周的散热速率为 10000kJ/h。稳态操作。试计算所需的加热蒸气用量。