

HUAGONG
YUANLI

HUAGONG
YUANLI

HUAGONG
YUANLI

安徽省高等学校重点课程建设成果

化工原理

崔 鹏 魏凤玉 主编

HUAGONG
YUANLI

HUAGONG
YUANLI

HUAGONG
YUANLI

HUAGONG
YUANLI

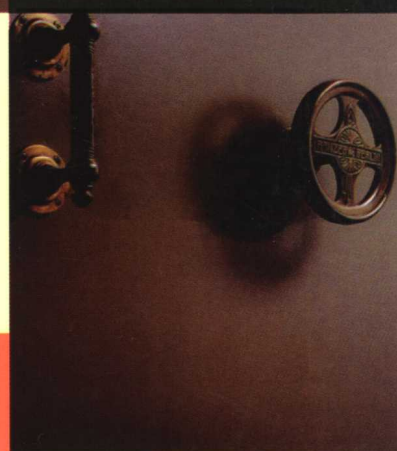
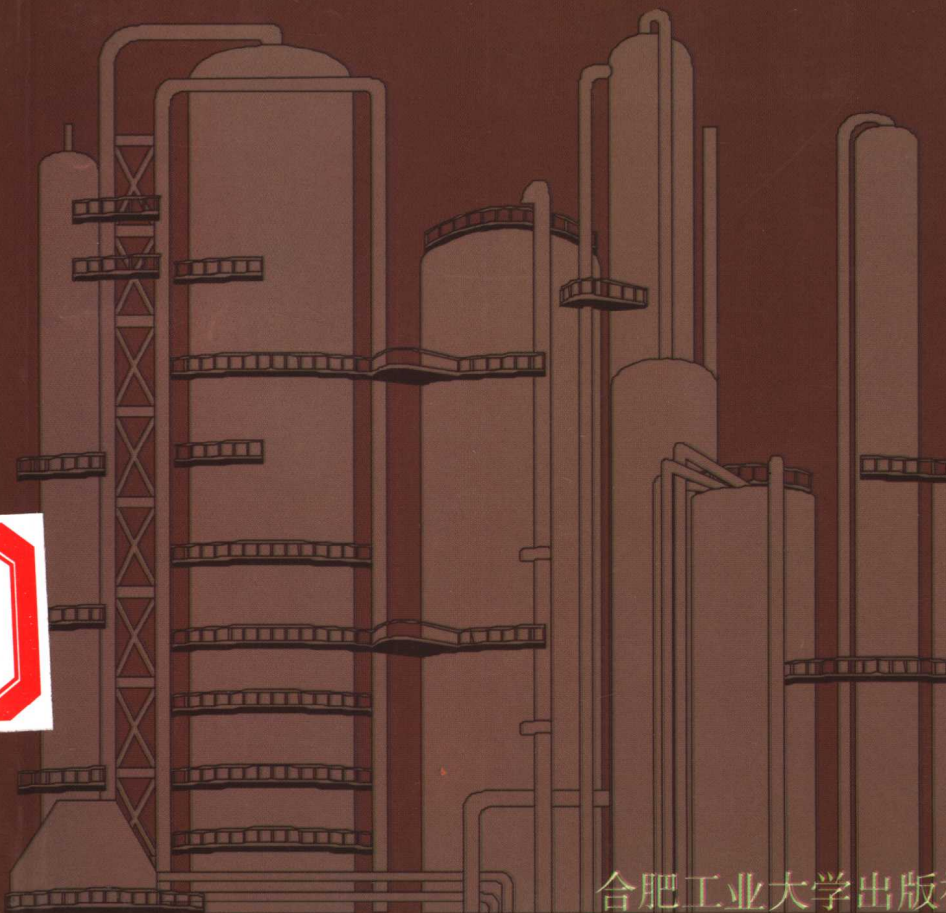
HUAGONG
YUANLI

HUAGONG
YUANLI

HUAGONG
YUANLI

HUAGONG
YUANLI

合肥工业大学出版社



高等学校教材

化 工 原 理

崔 鹏 魏凤玉 主编

合肥工业大学出版社

化 工 原 理

主 编 崔 鹏 魏凤玉

责任编辑 陆向军

出 版	合肥工业大学出版社	印 刷	合肥市星光印务有限责任公司印刷
地 址	合肥市屯溪路 193 号 邮编 230009	开 本	787×1092 1/16
电 话	0551-2903038(总编室) 2903198(发行部)	印 张	27 字 数 650 千字
网 址	www.hfut.edu.cn/出版社	版 次	2003 年 8 月第 1 版
发 行	全国新华书店	印 次	2003 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 7-81093-001-X/TQ·1

定价:35.00 元

如有影响阅读的印装质量问题,请与出版社发行科联系调换

前 言

化学工程与技术在 20 世纪对人类的经济、社会和生活产生了重大的影响,在 21 世纪的今天,化学工业和化工高等教育正面临着深刻的变化和巨大的挑战。化工原理是世界各国高等院校化工类及相关专业的一门重要的技术基础课程,具有基础理论与工程实践并重的特点,是培养工科大学生工程观念,奠定工程基础的重要教学环节。

本书是合肥工业大学化工原理教研室在多年教学实践基础上,结合安徽省“化工原理”重点课程建设成果而编写的。本书在系统介绍各单元操作的基本原理和过程特点的基础上,强调理论与实际相结合,突出工程观念和工程问题方法论的培养。在内容安排上,注重对学生的基本技能的训练和对学生的综合能力、创新能力的培养。本书通过每章的习题,进一步加深学生对基本概念的理解,拓宽知识面,有利于学生综合能力的提高。同时,教材配套了计算机多媒体辅助教学课件,从疑难点讲授、例题分析、设备结构和动画操作等多方面辅助课程教学。

参加教材编写工作的有崔鹏(绪论,第 4 章、第 10 章)、魏凤玉(第 5 章、第 7 章、第 8 章)、彭书传(第 6 章、第 9 章)、刘雪霆(第 2 章、第 3 章)和杨则恒(第 1 章)。崔鹏负责统稿。

本书承蒙范文元教授主审,他以渊博的学识和丰富的教学经验为教材编写提出了许多宝贵意见,对此,编者致以最诚挚的谢意。

合肥工业大学将本书列为重点教材建设并给予资助,化工学院化工原理教研组各位老师对编写工作给予了极大的支持和帮助,对此,编者一并致以诚挚的谢意。

由于编者学识水平和教学经验有限,书中疏漏、不妥甚至错误之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

编 者

2003 年 8 月

安徽省高等学校重点课程建设成果

内 容 提 要

全书共分十一章,包括:绪论,流体流动,流体输送设备,沉降与过滤,传热,蒸发,吸收,蒸馏,萃取,干燥,其他单元操作过程。每章后面附有本章符号说明和适量的习题。

本书既是高等院校化工类及相关专业,如化工、制药、食品、环境、材料、轻工、生物工程等专业的技术基础课程教材,也可供从事有关科研、设计和生产的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

化工原理/崔鹏主编. —合肥:合肥工业大学出版社,2003.7

ISBN 7-81093-001-X

I. 化… II. 崔… 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(2003)第 065423 号

目 录

0 绪 论	(1)
0.1 化工原理课程的性质与任务	(1)
0.2 单元操作	(1)
0.3 基本概念和方法	(2)
0.4 单位与单位制	(6)
习 题	(7)
1 流体流动	(8)
1.1 静止流体的基本方程	(8)
1.2 流体流动的基本方程	(15)
1.3 管内流体流动现象	(24)
1.4 流体流动的阻力损失	(35)
1.5 管路计算	(46)
1.6 流速和流量测定	(53)
1.7 非牛顿型流体的流动	(58)
本章符号说明	(62)
习 题	(64)
2 流体输送设备	(68)
2.1 概 述	(68)
2.2 离心泵	(68)
2.3 其他类型泵	(81)
2.4 气体输送设备	(85)
本章符号说明	(91)
习 题	(91)
3 沉降与过滤	(93)
3.1 概 述	(93)
3.2 流体与颗粒的相对运动	(93)
3.3 重力沉降	(94)
3.4 离心沉降	(98)
3.5 过滤	(103)
本章符号说明	(112)

习 题	(113)
4 传 热	(114)
4.1 概 述	(114)
4.2 热传导	(117)
4.3 对流传热	(123)
4.4 传热计算	(136)
4.5 辐射传热	(145)
4.6 传热过程的强化与削弱	(150)
4.7 传热设备	(152)
4.8 列管式换热器的设计和选用	(159)
本章符号说明	(164)
习 题	(165)
5 蒸 发	(168)
5.1 概 述	(168)
5.2 蒸发设备	(169)
5.3 单效蒸发	(175)
5.4 多效蒸发	(181)
本章符号说明	(189)
习 题	(190)
6 吸 收	(191)
6.1 概 述	(191)
6.2 气液相平衡	(192)
6.3 传质机理与吸收速率	(197)
6.4 吸收塔的计算	(211)
6.5 填料塔	(227)
本章符号说明	(234)
习 题	(236)
7 蒸 馏	(238)
7.1 概 述	(238)
7.2 双组分溶液的气液相平衡	(238)
7.3 蒸馏方式	(244)
7.4 二元连续精馏的分析和计算	(248)
7.5 其他精馏方式	(271)
7.6 板式塔	(279)
本章符号说明	(298)

习 题	(301)
8 液液萃取和固液浸取	(304)
8.1 液液萃取	(304)
8.2 固液浸取	(318)
本章符号说明	(323)
习 题	(324)
9 干 燥	(325)
9.1 概 述	(325)
9.2 湿空气的性质及湿度图	(326)
9.3 干燥过程的物料衡算和热量衡算	(334)
9.4 干燥速率和干燥时间	(339)
9.5 干燥设备	(346)
本章符号说明	(359)
习 题	(360)
10 其他单元操作过程	(362)
10.1 膜分离	(362)
10.2 结 晶	(370)
10.3 吸 附	(377)
10.4 泡沫分离法	(383)
附 录	(388)
附录 1 化工常用法定计量单位	(388)
附录 2 常用单位的换算	(388)
附录 3 干空气的物理性质($p=101.33\text{kPa}$)	(391)
附录 4 水与蒸汽的重要物性	(392)
附录 5 液体及水溶液的物理性质	(396)
附录 6 气体的重要物理性质	(405)
附录 7 常用固体材料的重要物理性质	(410)
附录 8 管子规格	(411)
附录 9 离心泵的规格(摘录)	(412)
附录 10 管壳式热交换器系列标准(摘自 JB/T 4714、4715—92)	(415)
附录 11 扩散系数	(418)
附录 12 某些气体水溶液的亨利系数	(420)
附录 13 某些二元物系的气液平衡组成	(420)
参考文献	(421)

0 绪 论

化学工业是将自然界中各种物质通过化学和物理方法处理,制造成具有规定质量的物质的工业。在化工、制药、食品及生物加工等工业领域,一个产品的生产,往往需要经过从原料到成品的若干个加工过程,其中除含有发生化学反应的过程外,还有大量物理加工过程的存在,这些过程统称为化工过程。

化学工程学科是继冶金、机械、土建、电气等四个工程学科之后,在 20 世纪初期诞生的一个新的工程技术学科。它研究化工生产过程中化学过程和物理过程的基本规律,并应用这些规律解决化工生产过程中的各种问题。化学工程学科发展至今,已形成完整的学科体系,其中化工原理(Principles of Chemical Engineering)是形成最早、基础性最强、应用面最广的学科分支。

0.1 化工原理课程的性质与任务

化工原理是在高等数学、物理学、化学、物理化学等课程的基础上,研究化工单元操作基本原理的课程,是化工及其相关专业的一门重要的技术基础课程,是从自然科学领域的基础课程向工程科学的专业课程过渡的入门课程。化工原理课程的主要内容是介绍化工单元操作的基本原理、典型设备的结构与性能、设计计算、设备选型和实验研究方法等。

过去,化工原理课程的名称曾被称为“单元操作”、“化工过程及设备”、“化学工程”等。与大学低年级的基础课程相比,化工原理课程的一个显著特点就是强调工程观念的培养,即针对过程工业生产实际和工程师的任务,以过程开发、装置设计和操作管理中必须解决的问题为研究对象。因此,课程的教学目的并不只是使学生认识一些自然现象,而是以实验研究方法为主,研究真实、复杂的生产问题,学习如何从复杂事物中寻找主要因素,确定关键环节,以科学合理的方式建立物理和数学模型,解决工程实际问题。同时,由于化工过程中真实的、复杂的生产问题,即特定的物料,在特定的设备内,进行特定的过程,使得问题的复杂性不完全在于过程本身,而首先在于过程工业复杂设备的几何形状和多变的物性。所以,研究工程问题的方法论和解决生产实际问题的能力,在化工原理课程的学习中十分重要。

0.2 单 元 操 作

在化学工程成为一门学科以前,世界上已经建立了各种化工厂,有的已具有相当大的规模,生产不同的化工产品。那时,每一种产品的生产方法均被视为一种专门的生产技术,各种产品的生产技术,被看做很少有相同之处,人们只是从一种产品到另一种产品,逐个地去认识产品生产过程的规律。反映工业生产技术的科学,被视为每一种产品的工艺学,如硫酸工艺学、酿酒工艺学、制糖工艺学等等。经过长期的生产实践和科学研究,人们发现,尽管不同产品的原料、工艺路线千差万别,但所发生的各种物理变化过程及原理的共同之处是很明显的,所用设

备也可以大同小异。如聚氯乙烯和纯碱生产中最后工序都要脱水、干燥；酿酒和乙烯生产中都要将液体混合物分开；制糖和制盐生产中都要将水溶液中的水分蒸发掉等。这些操作工序是过程工业中共有的，而且有些工序也广泛地用于食品、制药、纺织、钢铁等其他工业领域。正是这些共有的操作工序，引起了人们的研究兴趣。在 20 世纪 20 年代“单元操作”(unit operations)概念在化学工程学科中建立起来了。

单元操作具有以下特点：(1) 它们都是物理操作过程，即只改变物料的状态或物理性质，并不改变其化学性质；(2) 它们都是化工过程中共有的操作过程，但不同的化工过程所包含的单元操作数目、名称和顺序各异；(3) 某单元操作应用于不同的化工过程，其基本原理并无不同，进行该操作的设备往往也是通用的。

常用的单元操作有几十种，主要包括：流体流动、流体输送设备、机械分离、蒸发、传热、蒸馏、吸收、萃取、干燥、吸附、膜分离、搅拌、流态化、结晶等。

单元操作按其基本原理和主要物理特征可以归纳为以下三类过程：

(1) 流体流动过程(fluid flow process)。以流体力学为主要理论基础的单元操作，如流体输送、沉降、过滤、离心分离、搅拌等；

(2) 传热过程(heat transfer process)。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(mass transfer process)。以质量传递为主要理论基础的单元操作，如蒸馏、吸收、吸附、萃取、膜分离等。

由于流体流动时其内部发生了动量传递，故这类操作也可以按照动量传递(momentum transfer process)理论来研究。于是，各种单元操作的基础又可以归纳为动量、热量和质量三种传递理论，这三种传递具有彼此相互类似的规律可以进行共同研究。

0.3 基本概念和方法

0.3.1 平衡关系与过程速率

平衡关系(equilibrium relation)与过程速率(rate of transfer process)是研究、分析单元操作过程的两个基本关系。

过程的平衡关系说明过程进行的方向和所能达到的极限。自然过程的变化总是向体系具有的能量趋向最稳定的方向变化，变化的极限就是过程的平衡状态。在过程工业的许多单元操作中，如传热、吸收、蒸馏等，平衡关系都具有重要的意义。过程进行的方向和所能达到的极限都可以由平衡关系推知，化工过程的平衡关系是化工热力学研究的内容。

过程的速率是指过程进行的快慢。如果一个体系不是处在平衡状态，则必然会发生趋向平衡的过程。一般来说，过程所处的状态和平衡态之间的差距称为过程的推动力(driving force)，如传热推动力是温度差、流体流动推动力是压力差等。与推动力相对应的称为过程的阻力(resistance)，阻力是各种因素对过程速率影响的总的体现，一般与操作条件和物性有关。过程速率通常表示为：

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

即过程速率总是和过程推动力成正比,与过程阻力成反比。过程速率指明了过程进行的快慢程度,其大小取决于过程的机理,属于动力学在工程问题中的应用。大多数单元操作过程的进行与动量、热量和质量传递密切相关。

0.3.2 三种衡算

质量衡算(material balance)、能量衡算(energy balance)和动量衡算(momentum balance)是化工原理课程中分析问题的基本方法。质量衡算的基本依据是质量守恒定律,能量衡算的基本依据是能量守恒定律和热力学第一定律,动量衡算的基本依据是动量守恒定律,即牛顿第二运动定律。衡算的一般步骤是:首先确定衡算的范围,即衡算的系统,根据系统的大小,可分为微分衡算和总衡算两种。微分衡算是取微元体为衡算范围,总衡算的衡算范围不是微元体,而是单个装置或装置的大部分,也可以是一段流程、一个车间或一个工厂;其次确定衡算对象和衡算基准;最后按衡算的通式进行计算。衡算通式一般为:

$$\text{输入的量} = \text{输出的量} + \text{累积的量}$$

当过程为定态时,在衡算范围内累积的量等于零,即:

$$\text{输入的量} = \text{输出的量}$$

上述三种衡算中,质量衡算和能量衡算最为常用。因此,本节只对总质量衡算和能量衡算加以讨论。

(1) 质量衡算

质量衡算一般又称物料衡算,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、操作情况与进行过程与设备设计的基础。

对于划定的衡算系统,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中输出的物料质量和系统内累积的物料质量之和。即:

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

式中 $\sum F$ —— t 时间内输入系统物料质量的总和;

$\sum D$ —— t 时间内输出系统物料质量的总和;

A —— t 时间内系统中累积的物料质量的总和。

前述的时间 t 是衡算的基准。对连续操作过程来说,通常取单位时间的物料量,如单位时间为 1 h、1 min 时的物料质量等;对间歇操作过程来说,可取每处理一批物料为衡算基准。同时此衡算式既可以以总物料为衡算对象,也可以在无化学反应的体系中以某种物质作为衡算对象。

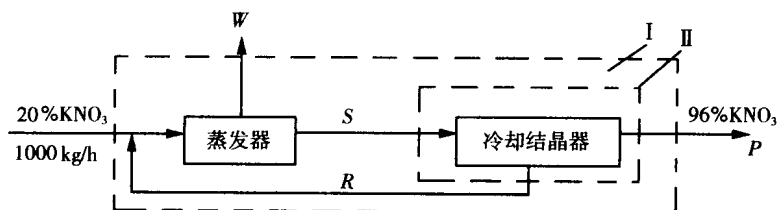
对于稳态操作过程,系统中各处的操作参数均不随时间而变化,系统中无物料的积累,即 $A = 0$,故(1)式可以写为:

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

即输入的物料质量等于输出的物料质量。

例 0-1 在生产硝酸钾的过程中,质量百分数为 20 % 的 KNO_3 水溶液以 1000 kg/h 的流量送入蒸发器,在 422 K 下蒸发出部分水而得到 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 4 % 的 KNO_3 结晶和含 KNO_3 37.5 % 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。



例 0-1 附图

解 首先根据题意作出过程的物料流程图。

① 求 KNO_3 结晶产品量 P

取包括蒸发器和冷却器的整个过程为衡算系统(虚线框 I), 取 1 小时为衡算基准, 以 KNO_3 为衡算对象, 因系统稳态操作, 输入系统的 KNO_3 量应等于输出系统的硝酸钾量, 即

$$1000 \times 0.2 = 0.96 P$$

所以

$$P = \frac{1000 \times 0.2}{0.96} = 208.3 \text{ kg/h}$$

② 求水蒸发量 W

仍取系统 I, 衡算基准为 1 h, 以总物料为衡算对象, 则

$$1000 = W + P$$

所以

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

③ 求循环的饱和溶液量 R

假设进入冷却结晶器的质量分率为 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, 作总物料的衡算, 可得

$$S = 208.3 + R$$

以 KNO_3 为衡算对象, 作 KNO_3 的衡算, 可得

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

联立求解上述两式, 可得

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

(2) 能量衡算

根据能量守恒定律, 能量衡算的一般表示式为

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

式中 $\sum H_F$ ——单位时间内输入系统物料的焓值总和, 即物料带入热量的总和;

$\sum H_D$ ——单位时间内从系统输出物料的焓值总和, 即物料带出热量的总和;

Q ——单位时间内从环境传入系统的热量;

Q_A ——单位时间内系统总累积的热量。

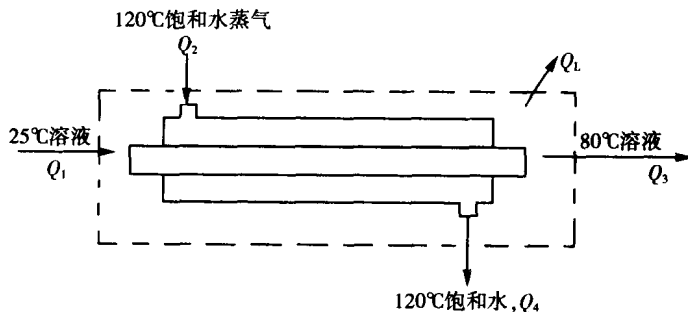
能量衡算也和物料衡算一样, 要表示清楚衡算范围和衡算基准。此外, 由于焓值的大小与温度基准有关, 故要指明热量衡算基准温度。物料的焓值常从 0°C 算起, 如果以 0°C 为温度基准, 可不再注明。有时为了计算方便, 以进料温度或环境温度作为基准温度, 或采用数据资料的

基准温度(如反应热的基准温度 25 °C 等),此时一定要注明基准温度。

对于稳态过程,系统内无热量累积, Q_A 等于零,则

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

例 0-2 在换热器内将平均比热为 3.56 kJ/(kg·°C) 的某种溶液自 25 °C 加热至 80 °C,溶液量为 3600 kg/h,加热介质为 120 °C 的饱和水蒸气,蒸汽冷凝成相同温度下的水排出。已知此换热器的热损失占水蒸气所提供热量的 6.5 %,试求水蒸气用量为多少 kg/h?



例 0-2 附图

解 首先根据题意作出过程的物料流程图见附图,在图上表示出衡算范围和流体参数。

确定时间基准:1 h,温度基准:0 °C。

从附录中可以查得 120 °C 饱和水蒸气的焓为 2708.9 kJ/kg,120 °C 饱和水的焓为 503.67 kJ/kg。则在附图中虚线范围内列焓衡算:

$$Q_1 + Q_2 = Q_3 + Q_4 + Q_l$$

式中 Q_1 —— 溶液带入系统的焓, kJ/h;

Q_2 —— 饱和蒸汽带入系统的焓, kJ/h;

Q_3 —— 溶液带出系统的焓, kJ/h;

Q_4 —— 冷凝水带出系统的焓, kJ/h;

Q_l —— 系统向周围环境损失的焓, kJ/h。

令 D 为饱和蒸汽的消耗量, kJ/h。各项的计算如下:

$$Q_1 = 3600 \times 3.56(25 - 0) = 320400 \text{ kJ/h}$$

$$Q_2 = 2708.9 D \text{ kJ/h}$$

$$Q_3 = 3600 \times 3.56(80 - 0) = 1025280 \text{ kJ/h}$$

$$Q_4 = 503.67 D \text{ kJ/h}$$

$$Q_l = (2708.9 - 503.67) D \times 0.065 = 143.34 D \text{ kJ/h}$$

所以

$$320400 + 2708.9 D = 1025280 + 503.67 D + 143.34 D$$

解得

$$D = 342 \text{ kg/h}$$

0.3.3 研究方法

在单元操作的研究发展过程中,形成了两种基本的研究方法:实验研究方法和数学模型方法。

(1) 实验研究方法

早期的工业设备放大,主要采用逐级经验放大法,即通过小型设备进行试验,优选出操作条件和设备类型,确定所能达到的技术经济指标,再设计和制造规模稍大一点的设备,进行所

谓模型实验,根据模型试验的结果,再进行中间试验,由中间试验的结果放大到工业规模的生产装置,这种研究方法称为实验研究方法。在放大的过程中,如果放大倍数太大而无把握时,应进行多次不同规模的中间试验。由此可见,逐级经验放大法不是一种满意的放大方法。而且,该方法的主要依据是不同规模的宏观实验结果而没有深入到事物的内部,没有把握住事物的规律性,所以是经验性的,难以做到高准确性和高倍数放大。

(2) 数学模型方法

现代工业设备放大,主要采用数学模型法,其实质是通过数学模型来放大和设计工业过程和设备。用数学模型方法研究化工过程时,首先要分析过程的机理,在充分认识过程机理的基础上对过程机理进行合理简化,建立基本能反映过程机理的数学模型。该方法的关键在于所建立的数学模型是否能够描述过程的本质问题,而对过程本质的认识又来源于实践,因此,实验仍然是数学模型法的主要依据。

一般来说,数学模型是指某种关系的数学表达。所谓的某种关系可以是以下情况:

① 是某系统工况特性的关系,该系统可以是多个单元过程组成,也可以是其中的一个单元过程;

② 是某种现象的主要影响因素之间的关系,如物理化学中的气体状态方程、各反应模式的动力学方程、估算物性的关联式等;

③ 是某种普通的计算关系,如设备投资费用同设备尺寸之间的关系等;

④ 其他,如描述过程单元之间或设备之间是否有物流相通的流程结构关系。

由于数学模型有理论的指导,而且计算技术特别是计算机技术的迅猛发展,使得复杂数学模型的计算成为可能,所以数学模型研究方法已成为单元操作研究的主要方法。

数学模型大体可分为四类,即:理论模型、经验模型、半经验半理论模型和人工智能模型。

本教材主要介绍应用经验模型和半经验半理论模型。

0.4 单位与单位制

(1) 基本单位和导出单位

任何物理量的大小都是由数字和单位两部分组成的,而物理量的单位可分为基本单位和导出单位两类。在描述单元操作的众多物理量中,独立物理量叫基本量,其单位叫基本单位,如时间、长度、质量等。不独立物理量叫导出量,其单位叫导出单位,如速度、加速度、密度等。

(2) 单位制度

基本单位加上导出单位称为单位制度。国际制(SI制)的基本单位有7个,在化工原理教学中常用的有5个:长度单位米(m)、质量单位千克(kg)、时间单位秒(s)、温度单位开尔文(K)、物质量单位摩尔(mol)。本课程教学一律采用国际单位制(SI)。

由于历史和地区的原因,有些化工文献、手册、资料上出现了其他单位制度,即非SI单位制,非SI单位制主要有物理单位制、重力单位制(工程单位制)。物理单位制与国际单位制都以质量为基本单位,属于绝对单位制系统。物理单位制的基本单位是长度单位厘米(cm)、质量单位克(g)、时间单位秒(s)。工程单位制的基本单位是长度单位米(m)、力或重量单位千克(力)(kgf)、时间单位秒(s),这种单位制的特点是以力而不以质量作为基本单位,属于重力单位制体系。

(3) 单位换算

单位换算虽然简单,但必须认真对待,如何根据几个基本关系和定义自行得出换算系数,是学好化工原理课程的重要基础之一。如重量与重力在 SI 制与工程单位制的换算等。

在 SI 制中 1 kg 质量的物体,若用工程单位制表示,该物体的重力为 1 kgf,即同一物体用 SI 制表示的质量与用工程单位制表示的重力在数值上相等。所以在有关手册中查得工程单位制的重力,SI 制的质量可直接取其数值。但必须特别注意,在不同单位制中,尽管两者数值相等,但概念不同。质量是物体所含物质的多少,而重力是物体受地球引力的大小,一般认为地球附近的引力大小近似不变。

化工计算中常用的单位及换算因数见本教材附录。

习 题

1. 求 1 大气压等于多少 Pa?

(1) 直接查表;

(2) 无表可查,但知 1 大气压等于 1.033 kgf/cm^2 。

2. 湿物料原含水的质量分数为 16 %,在干燥器中干燥 200 分钟后,含水 0.6 %,试求每吨物料干燥出的水量为多少 kg?

3. 1000 kg 的电解液中含 NaOH 质量分数为 10 %,NaCl 的质量分数为 10 %,H₂O 的质量分数为 80 %,采用真空蒸发器浓缩,食盐结晶分离后的浓缩液中含 NaOH 为 50 %、NaCl 为 2 %、H₂O 为 48 %。若在操作全过程中,溶液中的 NaOH 量保持不变。试求:

(1) 水分蒸发量;

(2) 分离的食盐量;

(3) 食盐分离后的浓缩液量。

1 流体流动

气体和液体统称为流体。在化工、制药、食品等工业生产中所处理的物料、半成品以及产品大多数是流体。根据生产要求,往往需要将这些流体物料由一个设备输送到另一个设备;从上一道工序转移到下一道工序,逐步完成物理变化或化学变化。流体流动是化工过程中最普遍的单元操作之一,除了流体输送外,化工中的传热和传质过程及化学反应大都是在流体流动下进行的,流体流动状态及规律对这些单元操作有着很大影响。研究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《化工原理》这一课程的重要基础。

从工程实际出发研究流体流动,主要是研究流体的宏观运动规律。一般是把流体视为由无数微团(或称质点)组成的,彼此无间隙的,完全充满所占空间的连续介质。

1.1 静止流体的基本方程

流体静力学主要研究静止流体内部静压力的分布规律,即研究流体在外力作用下处于静止或相对静止的规律。流体静力学的基本原理在工业生产中有着广泛的应用,本节主要讨论流体静力学的基本原理及其应用。

1.1.1 流体的密度与比容

(1) 密度

单位体积流体的质量,称为流体的密度,其表达式为

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

式中 ρ ——流体的密度, kg/m^3 ;

m ——流体的质量, kg ;

V ——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到,本书附录中也列有某些常见液体和气体的密度数值。

液体的密度随压力的变化甚小(极高压力下除外),可忽略其影响,常称液体为不可压缩的流体,而液体的密度随温度稍有改变。气体的密度随压力和温度的变化较大,是可压缩性流体。当压力不太高,温度不太低时,气体的密度可近似地按理想气体状态方程式计算。

由
$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT \quad (1-2)$$

得
$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (1-3)$$

式中 p ——气体的压力, kPa ;

M ——气体的摩尔质量, kg/kmol ;

T ——气体的热力学温度, K ;

R ——摩尔气体常数, $8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$;

n ——气体的量, kmol 。

理想气体在标准状态 ($T_0 = 273.15 \text{ K}$, $p_0 = 101.325 \text{ kPa}$) 下的摩尔体积 $V_0 = 22.4 \text{ m}^3/\text{kmol}$, 密度为:

$$\rho_0 = \frac{M}{22.4} \quad (1-4)$$

可按下式计算在温度 T 和压力 p 下该气体的密度

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0}{T} \frac{p}{p_0} \quad (1-5)$$

实际生产中遇到的流体常常是由若干组分所构成的混合物。当气体混合物接近理想气体时, 其密度仍可用式(1-3)计算。但式中的气体摩尔质量 M , 应以混合气体的平均摩尔质量 M_m 代替。

当气体混合物各组分的密度为已知, 气体混合物的组成通常以体积分率 ψ 表示, 则混合气体的密度可用以下方法计算: 以 1 m^3 混合物为基准, 其中各组分的质量以 kg 计, 分别为 $\psi_1 \rho_1$, $\psi_2 \rho_2, \dots, \psi_n \rho_n$, 这些数值之和即为 1 m^3 气体混合物的质量, 故混合气体的密度为:

$$\rho_m = \psi_1 \rho_1 + \psi_2 \rho_2 + \dots + \psi_n \rho_n \quad (1-6)$$

理想气体混合物中各组分的体积分率又与其摩尔分率 y 相等。故式(1-6)中的 ψ 也可用 y 代替, 即

$$\rho_m = y_1 \rho_1 + y_2 \rho_2 + \dots + y_n \rho_n \quad (1-6a)$$

液体混合时, 体积往往有所改变。假设混合液为理想溶液, 则其体积等于各组分单独存在时的体积之和。当混合液中各组分的密度为已知, 液体混合物的组成通常以质量分率 w 表示, 要计算其密度, 可取 1 kg 混合物为基准。其中的各组分单独存在时的体积以 m^3 计, 分别为 $w_1/\rho_1, w_2/\rho_2, \dots, w_n/\rho_n$, 假定混合后总体积不变, 则这些数值之和就是 1 kg 混合物的体积, 亦即其密度的倒数 $1/\rho_m$, 于是 ρ_m 可用下式近似计算。

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} + \dots + \frac{w_n}{\rho_n} \quad (1-7)$$

(2) 比容

单位质量流体的体积, 称为流体的比容, 用符号 v 表示, 单位为 m^3/kg , 则

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1-8)$$

即流体的比容是密度的倒数。

此外, 有些手册还给出物质的比重 d (相对密度), 即液体密度与 4°C 水的密度之比值, 4°C 水的密度为 $1000 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

例 1-1 已知氮氢混合气体中的 N_2 与 H_2 的体积比为 $1:3$, 试求氮氢混合气体在压力 100 kPa (绝对压力) 和温度 25°C 时的密度。

解 $p = 100 \text{ kPa}$, $T = 273 + 25 = 298 \text{ K}$

各组分的摩尔质量 N_2 $28.02 \text{ kg}/\text{kmol}$, H_2 $2.016 \text{ kg}/\text{kmol}$

各组分的摩尔分数 N_2 0.25 , H_2 0.75

混合气的平均摩尔质量 $M_m = 28.02 \times 0.25 + 2.016 \times 0.75 = 8.52 \text{ kg}/\text{kmol}$

用式(1-3)计算氮氢混合气体的密度