

高等学校教学用书



GAODENGXUEXIAOJIAOXUEYONGSHU

化工原理

南京
化工
大学

赵汝溥
管国锋 编



化学工业出版社

高等学校教学用书

化工原理

南京化工大学
赵汝溥 管国锋 编

化学工业出版社
·北京·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

化工原理/赵汝溥编. —北京: 化学工业出版社,
1996 (1999.7 重印)
高等学校教学用书
ISBN 7-5025-1586-0

I. 化… II. 赵… 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 (95) 第 15729 号

高等学校教学用书

化 工 原 理

南京化工大学

赵汝溥 管国锋 编

责任编辑: 徐世峰

责任校对: 关雅君

封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社出版发行

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

新华书店北京发行所经销

北京市昌平振南印刷厂印刷

三河市前程装订厂装订

*

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 27 字数 638 千字

1995 年 9 月第 1 版 1999 年 7 月北京第 2 次印刷

印 数: 5051—10100

ISBN 7-5025-1586-0/G·407

定 价: 29.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责调换

前 言

《化工原理》是以单元操作为背景的一门课程，是化工及其相近专业的一门主课。学习此课程对单元操作设备设计、设备运转情况分析、工艺评价乃至新工艺、新设备的开发都有重要作用。

单元操作种类很多，每种单元操作都有十分丰富的内容。要在此课程的有限学时内介绍单元操作，只能是少而精，加强理论基础并重视方法论，即通过对若干典型单元操作的介绍，阐明针对不同性质的问题如何选用有效分析问题的方法。此外，根据此课程特点，还应重视设备与运行以及工程运算能力的训练。

当前国内已有多种版本的《化工原理》教材，而且各具特色。本书力求在汲取各家之长的基础上，融入自己的教学心得，写出自己的风格。这次重印，编者除对原书中的一些疏漏及不当之处作了修正外，还对原习题作了较多补充。在版面编排上也充分考虑到读者阅读的方便，作了适当调整。

本书由赵汝溥主编。书中第四、八、九章由管国锋执笔，第十章由徐南平执笔，第五章由赵汝溥、管国锋共同完成，其余均由赵汝溥执笔。

本次重印得到了南京化工大学教务处、化工原理教研室全体同志的支持和帮助。在此，谨向他们致以深切的谢意。

限于编者的水平和经验，书中难免仍有不妥之处，恳请读者批评指正。

编者

1999年5月

高等学校工科本科《化工原理》课程教学基本要求

一、课程的地位、性质和任务

化工原理课程是化学工程、化学工艺类及其相近专业的一门主干课，为学生在具备了必要的高等数学、物理、物理化学、计算技术等基础知识之后必修的技术基础课。

化工原理的主要研究内容是以化工生产中的物理加工过程为背景，按其操作原理的共性归纳成的若干“单元操作”。

化工原理属工科科学，用自然科学的原理考察、解释和处理工程实际问题。研究方法主要是理论解析和在理论指导下的实验研究。本课程强调工程观点、定量运算、实验技能和设计能力的训练。强调理论与实际的结合、提高分析问题、解决问题的能力。

本教学基本要求是为高等学校本科化学工程和化学工艺类及其相近专业制定的。现按课堂教学、实验教学和课程设计三部分分述如下：

二、课堂教学

通过课堂教学，学生应掌握流体流动、传热和传质的基础理论、主要单元操作的基本原理和典型设备的工艺计算。教学时数为 120 学时左右。其基本内容是：

1. 流体流动与输送

静力学原理及其应用。

流动流体的质量衡算和机械能衡算。

牛顿粘性定律、层流和湍流，管流速度分布，流动边界层概念。

流体流动时的机械能损失，因次分析方法。

非牛顿流体的概念。

简单管路和分支管路的计算，流速、流量的测定。

常用流体输送机械。离心泵的理论压头与实际压头(扬程)，功率和效率。离心泵的气缚与汽蚀现象。泵的安装高度，流量调节方法和泵的选择。离心式风机的性能与选择。

2. 流体—固体相对运动

颗粒及固定床床层的特性。流体通过固定床的压降。

流体与单个固体颗粒的相对运动，沉降速度。

重力沉降、离心沉降的原理与设备。

过滤，过滤速率方程及其在恒压、恒速条件下的应用。过滤设备，过滤机的生产能力。

流化床的基本知识及主要特征。

3. 热量传递

傅利叶定律及其在一维稳态热传导中的应用。

对流传热过程，牛顿冷却定律，对流传热系数及其主要影响因素。

两物体间辐射换热的基本知识。

两流体间壁传热过程的计算。

加热和冷却方法，常用换热设备，传热的强化与削弱，典型换热器的传热计算。

4. 物质传递

分子扩散和菲克定律。等分子反向扩散和通过静止组分的单向扩散。对流传质、相际传质、传质速率和传质系数。

常用传质单元操作的目的、原理及实施。通过相平衡和物料(能量)衡算分析传质过程的方法。主要操作参数对过程的影响及其选择。

气体吸收：气体的溶解度与亨利定律，微分接触式物理吸收(包括解吸)过程计算，传质单元高度和传质单元数的计算。

液体精馏：双组分混合液的汽液平衡，平衡蒸馏和简单蒸馏，精馏原理；理论板、理论板数的计算方法，塔板效率，等板高度；间歇精馏。

汽—液传质设备：典型的填料塔和板式塔；塔内的流体流动状况；设备的工艺计算方法。

固体干燥：湿空气的性质和湿度图；干燥器的热量衡算和物料衡算；湿分在气—固两相间的平衡，气—固或气—液两相间的传质，恒定气流条件下的固体干燥速率，临界湿含量，干燥时间的计算；典型的干燥设备。

说明：

(1)各校的化学工程和化学工艺类专业在达到上述基本要求的前提下，可根据本校的特长及专业要求适当增加其它单元操作的内容，如搅拌、蒸发、萃取、增减湿以及新型分离过程、新理论、新动向等，以拓宽学生的知识面。其它专业可根据具体情况酌情增减部分内容，学时数也作相应调整。

(2)课堂教学包括自学、讨论课、习题课和各种形象教学(电教、实验室和工厂参观)等，提倡灵活多样的、理论联系实际的教学方法。

(3)本课程的课内外学时比例为 1 : 1.5 ~ 1 : 2。

三、实验教学

通过实验教学学生应能巩固和加深对课堂教学内容的理解，并得到化工实验技能的基本训练。教学时数约为 30 学时，课内外学时比例为 1 : 2。

1. 实验内容在下列实验中至少选做 6~7 个(流体力学 2 个，传热 1~2 个，传质 3 个)，即：直管摩擦系数和局部阻力系数的测定；离心泵的操作与性能的测定；过滤常数的测定；导热系数的测定；传热实验；蒸发实验；精馏塔性能试验；吸收系数的测定；干燥速度曲线的测定；萃取实验及板式塔流体力学性能实验等。

2. 进行每一个实验应包含如下四个环节：

实验预习——理解实验原理，确定实验方案；

实验操作——掌握有关测量仪表的使用方法并了解其安装注意事项，操作参数的调节与稳定，实验现象的观察与分析，正确读取实验数据；

数据处理——实验数据的整理和计算，实验结果的图示或关联；

实验报告——实验原理，流程简图，操作要点，数据图表(附计算示例)，主要结论，实验结果的分析讨论。

说明：

(1)实验教学还包括理论教学、演示教学和实物教学等；

(2)实验单独设课的专业，实验教学时数可适当增加；

(3)为了调动学生学习的主动性，让学生有较多动手机会，每套装置学生人数一般不超过 4 人。

(4)实验应单独考核。

四、课程设计：

课程设计是综合应用本门课程和有关先修课程所学知识，完成以单元操作为主的一次设计实践。通过课程设计使学生掌握化工设计的基本程序和方法，并在查阅技术资料，选用公式和数据，用简洁文字、图表表达设计结果及制图能力等方面得到一次基本训练。在设计过程中还应培养学生树立正确的设计思想和实事求是、严肃负责的工作作风。课程设计教学时数约为 1.5~2 周(课内时数不少于 36 学时)。其基本内容为：

1. 设计方案简介：对给定或选定的工艺流程、主要设备的型式进行简要的论述。
2. 主要设备的工艺设计计算：物料衡算、工艺参数的选定。设备的结构设计和工艺尺寸的设计计算。
3. 辅助设备的选型：典型辅助设备主要工艺尺寸的计算，设备规格型号的选定。
4. 工艺流程图：以单线图的形式绘制，标出主体设备与辅助设备的物流方向、物流量、能流量、主要测量点。
5. 主要设备的工艺条件图：图面应包括设备的主要工艺尺寸，技术特性表和接管表。
6. 设计说明书内容：设计任务书；目录；设计方案简介；工艺计算及主要设备设计；辅助设备的计算和选型；设计结果汇总；设计评述；参考资料等。

内 容 提 要

本书介绍化工及其相近工业生产中常见“单元操作”的原理、设备和工艺计算方法，并介绍必需的流体流动、传热和传质学基础知识。全书取材范围以全国高校《化工原理》课程教学指导委员会制订，化工部教育司批准执行的“化工原理课程教学基本要求”为依据，编有绪论、流体流动、流体输送机械、颗粒流体力学与机械分离、传热与换热器、气体吸收、液体蒸馏、塔设备及固体干燥等章，此外，根据科技应用情况，还编入吸附与膜分离两章。本书重物理概念，强调方法论，注重教学法，注意对学生工程观点和分析、解决问题能力的培养，可作为高校本科及专修科《化工原理》课程教材，或作为夜大、函大、职大或各种类型大专短训班教材；有关部门的生产、设计、研究人员亦可用作参考。

目 录

绪论	1	1.6 管路计算	39
第一章 流体流动	8	1.6.1 管路的分类和管路计算图表	39
1.1 概述	8	1.6.2 简单管路计算	40
1.1.1 流体及其特性	8	1.6.3 并联管路计算	46
1.1.2 连续介质模型	8	1.6.4 分支管路计算	48
1.1.3 流体力学与“流体流动”	8	1.7 流速与流量测定	49
1.2 流体静力学	9	1.7.1 毕托管	49
1.2.1 流体静压强	9	1.7.2 文丘里流量计	50
1.2.2 流体密度	10	1.7.3 孔板流量计	51
1.2.3 流体静力学基本方程	10	1.7.4 转子流量计	52
1.2.4 U形压差计	13	第二章 流体输送机械	60
1.3 流体在单通道中流动时的物料衡算 及能量衡算	14	2.1 概述	60
1.3.1 流体在流道中的流量与流速	15	2.1.1 流体输送机械的作用	60
1.3.2 定态流动与非定态流动	15	2.1.2 离心泵与离心式风机简介	60
1.3.3 流线	15	2.1.3 离心力场中流体的修正压强 分布规律	61
1.3.4 连续性方程	15	2.1.4 速度三角形	62
1.3.5 流体的粘度	16	2.2 离心泵操作性能的基本方程	63
1.3.6 机械能衡算方程	18	2.2.1 离心泵操作性能参量	63
1.4 流动阻力分析与层流阻力计算	24	2.2.2 欧拉方程	63
1.4.1 流动型态的分类	24	2.3 实际离心泵的性能曲线	65
1.4.2 流体流动的阻力分析	25	2.3.1 各种叶片类型离心泵的操作 性能比较	65
1.4.3 圆直管内流体层流时的流速分布 与阻力计算	26	2.3.2 离心泵的各项效率分析	66
1.4.4 沿壁流动中的速度边界层	29	2.3.3 离心泵采用后弯叶片的原因	67
1.5 湍流阻力计算	29	2.3.4 实际离心泵的性能曲线	68
1.5.1 湍流的特征	29	2.4 离心泵的操作	68
1.5.2 湍流阻力的类型	30	2.4.1 灌泵及对吸入管路的要求	68
1.5.3 涡流粘度与圆管内湍流的流速 分布规律	31	2.4.2 离心泵的工作点	68
1.5.4 相似原理	32	2.4.3 离心泵的串联操作	69
1.5.5 流体流过圆直管内时由实验 测得的“ $\lambda-Re$ ”图线	36	2.4.4 离心泵的并联操作	70
1.5.6 流体流过圆直管内的沿程 阻力计算	37	2.5 离心泵的安装高度限制	71
1.5.7 局部阻力计算	38	2.5.1 离心泵的安装高度问题	71
1.5.8 流体流过非圆形截面管道 的阻力计算	38	2.5.2 汽蚀现象	71
		2.5.3 离心泵正常操作必须满足 的条件	72
		2.5.4 离心泵最大安装高度计算	73
		2.6 相似原理在离心泵操作分析中	

的应用	75	3.5.2 固体流态化的流体力学特性	132
2.6.1 离心泵操作状况动力相似的条件	75	第四章 传热及换热器	138
2.6.2 离心泵操作性能的普遍化曲线	76	4.1 概述	138
2.7 离心泵的类型与选型	78	4.1.1 传热在化工生产中的应用	138
2.7.1 离心泵的类型	78	4.1.2 加热介质与冷却介质	138
2.7.2 离心泵的选型	80	4.1.3 传热的基本方式	139
2.8 离心式风机	80	4.1.4 冷、热流体热交换形式	139
2.8.1 使用风机的目的及离心式风机的分类	80	4.1.5 传热速率与热通量	140
2.8.2 离心式风机主要性能参量与性能曲线	81	4.1.6 定态传热与非定态传热	141
2.8.3 离心式风机选型计算	82	4.2 热传导	141
2.9 其它类型的泵与风机	86	4.2.1 热传导的基本概念	141
2.9.1 往复泵	86	4.2.2 傅立叶定律	141
2.9.2 隔膜泵	87	4.2.3 导热系数	142
2.9.3 齿轮泵	87	4.2.4 平壁的热传导	142
2.9.4 旋涡泵	88	4.2.5 圆筒壁的热传导	145
2.9.5 罗茨鼓风机	89	4.3 对流传热概述	146
2.9.6 纳氏泵	89	4.3.1 给热和给热的类型	146
2.9.7 水环真空泵	89	4.3.2 给热速率与给热系数	148
2.9.8 喷射泵	90	4.4 无相变流体的给热	148
第三章 颗粒流体力学基础与机械分离	93	4.4.1 影响给热的因素	148
3.1 概述	93	4.4.2 温度边界层	148
3.1.1 流体非均相混合物的分离问题与颗粒流体力学	93	4.4.3 与给热有关的准数及准数关联式的确定方法	149
3.2 单颗粒与颗粒群的几何特性	94	4.4.4 流体在管内强制对流给热	152
3.2.1 单颗粒的几何特性	94	4.4.5 流体在管外强制对流给热	154
3.2.2 颗粒群的几何特性	94	4.4.6 大空间自然对流给热	157
3.3 流体通过固定床层的流动与液体过滤	98	4.5 有相变流体的给热	158
3.3.1 流体通过固定床层的流动	98	4.5.1 蒸汽冷凝给热	158
3.3.2 液体过滤概念与过滤速度基本计算式	100	4.5.2 液体沸腾给热	162
3.3.3 恒压与恒速过滤	103	4.6 辐射传热	165
3.3.4 过滤常量的测定	105	4.6.1 辐射传热的基本概念与定律	165
3.3.5 滤饼洗涤	108	4.6.2 固体壁面间的辐射传热	168
3.3.6 过滤设备	109	4.6.3 对流与辐射并联传热	170
3.4 颗粒沉降与沉降分离设备	114	4.7 串联传热过程计算	171
3.4.1 重力沉降与重力沉降设备	114	4.7.1 传热速率方程	171
3.4.2 离心沉降与离心沉降设备	122	4.7.2 热量衡算	172
3.5 固体流态化	130	4.7.3 传热系数	172
3.5.1 固体流态化现象	130	4.7.4 换热器的平均温度差	175
		4.7.5 传热效率法	180
		4.8 换热器	184
		4.8.1 间壁式换热器	184
		4.8.2 换热器传热过程的强化	190
		4.8.3 列管式换热器设计与选型原则	191
		第五章 气体吸收	202

5.1 概述	202	6.3 双组分简单蒸馏	245
5.1.1 吸收与传质	202	6.3.1 简单蒸馏	245
5.1.2 物理吸收与化学吸收	202	6.4 双组分连续精馏	246
5.1.3 吸收与解吸	203	6.4.1 连续精馏原理与过程分析	246
5.1.4 溶剂的选择	203	6.4.2 基本型连续精馏塔的设计型 计算	253
5.2 气液相平衡	203	6.4.3 基本型连续精馏塔的操作型 计算	259
5.2.1 平衡溶解度	203	6.4.4 其它类型的连续精馏	261
5.2.2 过程方向判断与过程推动力	206	6.5 双组分间歇精馏	266
5.3 分子扩散	207	6.5.1 间歇精馏的特点与计算	266
5.3.1 分子扩散速率——菲克定律	208	6.6 特殊精馏	269
5.3.2 分子扩散传质速率	208	6.6.1 萃取精馏	269
5.3.3 组分在气相中的分子扩散系数	211	6.6.2 恒沸精馏	270
5.3.4 组分在液相中的分子扩散系数	213	第七章 塔设备	275
5.4 对流传质	213	7.1 概述	275
5.4.1 吸收过程中溶质气体由气相 转移至液相的过程	214	7.1.1 生产上对塔器的要求	275
5.4.2 吸收机理模型	214	7.2 填料塔	275
5.4.3 对流传质速率	216	7.2.1 填料塔简介	275
5.4.4 总传质系数	216	7.2.2 填料的种类与特性	276
5.5 在填料塔中低浓度气体吸收过程 的计算	218	7.2.3 填料层内气液逆流的流体 力学特性	280
5.5.1 填料塔简介	218	7.2.4 填料层内的气液传质	283
5.5.2 低浓度气体吸收的特点	219	7.2.5 填料塔的附属设备	287
5.5.3 物料衡算——操作线方程	219	7.3 板式塔综述	289
5.5.4 填料层高度的计算式	219	7.3.1 板式塔的气液流动类型	289
5.5.5 传质单元高度的计算	221	7.3.2 几种主要板式塔型简介	290
5.5.6 传质单元数的计算	222	7.4 筛板塔	292
5.5.7 填料吸收塔的设计型计算	224	7.4.1 筛板塔的结构	292
5.5.8 填料吸收塔的操作型计算	227	7.4.2 筛板塔正常操作的气液流量 范围	295
5.5.9 其它吸收流程	229	7.4.3 筛板塔的设计	302
5.6 气体解吸	231	7.5 浮阀塔	304
5.6.1 气体解吸的特点与常用的 解吸方法	231	7.5.1 浮阀塔的结构	304
5.6.2 逆流气体解吸塔的计算	231	7.5.2 浮阀塔正常操作的气液流量 范围	305
5.7 高浓度气体吸收	231	7.6 塔板效率	306
5.7.1 高浓度气体吸收的特点	231	7.6.1 塔板效率的不同表示方法 及其应用	306
5.7.2 高浓度气体吸收过程计算	232	7.6.2 提高塔器操作传质效果须 注意的问题	308
第六章 液体蒸馏	237	7.6.3 总板效率的经验图线	308
6.1 概述	237	第八章 固体干燥	311
6.1.1 蒸馏原理与蒸馏操作	237	8.1 概述	311
6.1.2 闪蒸	238		
6.2 双组分物系的汽液相平衡	238		
6.2.1 理想物系的汽液相平衡	238		
6.2.2 非理想物系的汽液相平衡	242		

8.2 湿空气的性质和湿度图	312	9.4.1 固定床吸附器与固定床吸附 过程计算	352
8.2.1 湿空气的性质	312	9.4.2 移动床吸附器与移动床吸附 过程计算	356
8.2.2 湿空气的“ <i>I-H</i> ”图及其应用	316	第十章 膜分离技术	360
8.3 干燥过程的物料衡算和热量衡算	319	10.1 概述	360
8.3.1 物料衡算	319	10.1.1 膜的概念	360
8.3.2 热量衡算	321	10.1.2 膜分离技术发展简史	360
8.3.3 干燥器出口空气状态的确定	322	10.1.3 各种膜分离过程简介	361
8.3.4 干燥器的热效率和干燥效率	323	10.1.4 膜分离设备	362
8.4 干燥速率和干燥时间	324	10.2 反渗透	364
8.4.1 物料中所含水分的性质	325	10.2.1 反渗透过程原理	364
8.4.2 干燥速率及其影响因素	326	10.2.2 反渗透过程的操作	367
8.4.3 恒定干燥条件下干燥时间的 计算	330	10.2.3 反渗透的应用	370
8.5 干燥器	331	10.3 超滤和微滤	370
8.5.1 干燥器的主要型式	332	10.3.1 过程原理	370
8.5.2 干燥器设计原则与举例	337	10.3.2 过程与操作	372
第九章 吸附	344	10.3.3 应用	373
9.1 概述	344	10.4 电渗析	374
9.1.1 吸附现象及其工业应用	344	10.4.1 电渗析原理	374
9.1.2 常用吸附剂	345	10.4.2 离子交换膜及其性质	375
9.2 吸附平衡	346	10.4.3 电渗析设备与操作	376
9.2.1 吸附等温线	346	10.4.4 电渗析的应用	378
9.2.2 单一气体(或蒸汽)的吸附平衡	348	10.5 其它膜过程	380
9.2.3 液相吸附平衡	349	10.5.1 气体膜分离	380
9.3 吸附机理和吸附速率	350	10.5.2 渗透汽化	381
9.3.1 吸附机理	350	10.5.3 液膜分离技术	382
9.3.2 吸附速率	350	附录	385
9.3.3 吸附的传质速率方程	351		
9.4 吸附设备与吸附过程计算	352		

绪 论

(一) 化工过程与单元操作

(1) 化工过程

一般说, 工业生产过程是具有一定规模的对物料的加工过程, 在“原料→半成品→成品”的加工过程中, 提高物料的价值, 产品用以满足社会需要。工业生产过程可按被加工物料是否经历了化学变化而划分为两大类。凡物料在被加工过程中未发生化学变化者, 属机械加工过程或物理过程; 若物料在生产过程中发生了化学变化, 该生产过程便属化工过程。例如, 合成氨生产中含有下列反应: $N_2 + H_2 \longrightarrow NH_3$, 该过程便是化工过程。

须说明一点, 目前工业门类的划分, 并非把凡含有物料化学反应的生产过程均归并为化工过程。例如, 在高炉中铁矿石被还原为铁, 有下列化学反应发生: $Fe_2O_3 + CO \longrightarrow Fe$, 但这一生产属冶金工业。又如水泥、陶瓷生产中都有化学变化发生, 但这些生产属建材工业。此外, 如制药、染料、涂料、轻工、食品及生化等工业部门的生产过程中都有化学变化发生, 但都不属化工, 而是各自发展为独立的工业门类。

可见, 凡化工过程必含有化学变化, 而含有化学变化的工业过程未必都属化工。此外还可见到, 有许多工业部门的生产情况与化工相近, 相互间有着内在的密切联系。

(2) 化工工艺学与化学工程学

研究化工生产过程的学科大体分为工艺学与工程学两大类。化工工艺学以研究特定产品生产的全过程为目标。化学工程学则是跨越各化工产品的生产界限, 集中研究化工生产中具有共同性工程问题的学科。化学工程学中包括了单元操作、传递过程原理、化工热力学、反应工程及化工系统工程等。

(3) 单元操作

单元操作指在化工及其相近工业生产中常见且各有特点的物理加工过程, 如物料的输送、沉降、过滤、流态化、物料的加热与冷却、蒸发、结晶、气体吸收、液体蒸馏、吸附、膜分离、增湿与减湿以及固体干燥等。虽单元操作的探讨范畴为化工生产中除反应器操作以外的各项物理操作, 但并不排除为强化这些操作而采用的化学手段。

在化工及其相近工业中各单元操作设备投资的比例从表 0-1 中可见一斑。表中除“反应器”及“炉子、窑炉和锅炉”外, 均为单元操作设备。

“单元操作”学科的任务是搜集与比较来自化工及其相近工业部门的各种单元操作的技术资料, 对不同单元操作的原理、设备、操作与计算方法进行集中研究, 开展技术改革和新技术、新设备的开发, 把新技术、新设备推广应用于生产中, 促进生产的发展。

(二) 《化工原理》课程

(1) 课程内容: 本课程以介绍单元操作知识为主, 并介绍为掌握各单元操作原理所必需的基础理论知识。为此, 本课程包含两方面内容:

① 基础理论——流体力学、传热学及传质学基础; ② 若干典型的单元操作。

(2) 课程性质: 属技术基础课, 是数学、物理、物理化学及算法语言等基础课的后续课, 是化工工艺学及其它化学工程学课程的前修课。

(3) 课程作用:①教给学生一些最常见、最典型的单元操作知识和有关的基础理论知识。
②引导学生逐步掌握分析与解决工程问题的方法论, 熟练实验技能, 提高在化学工程领域的自学能力。

(三) 物料衡算

物料衡算是对质量守恒原理的具体应用而列出的计算式及其运算, 其要点如下。

① 根据需要, 人为地划定一个封闭的空间, 并称此空间为“控制体”(control volume)。控制体的表面称为“控制面”(control surface)。控制体就是要进行物料衡算的空间范围。

② 确定衡算的基准。可取一定的时间间隔为衡算基准, 如取 1s 或 1h 为基准等。亦可取一定量的某股进料或出料为基准。

③ 对总的物料质量来说, 在对应于基准时间范围内, 对于控制体存在着下述关系:

$$\text{“输入质量”} - \text{“输出质量”} = \text{“积累质量”}$$

即

$$\sum m_i - \sum m_o = m_a$$

式中: 下标“i”为穿过控制面进入控制体; 下标“o”为穿过控制面离开控制体; 下标“a”为控制体内的积累。

④ 在没有化学反应条件下, 可对每一种组分(分子)作物料衡算; 当有化学反应时, 可按每种元素(原子)作物料衡算。

⑤ 若进、出控制体的物料均为连续流股, 各流股的质量流量均恒定, 满足 $\sum m_i - \sum m_o = 0$ 的关系, 在控制体内任一位置物料的各参量——如温度、压强、组成、流速等都不随时间而变, 则该控制体内物料处于定态过程。对于定态过程, 对控制体作物料衡算时可不考虑控制体内的过程细节, 只须考虑穿越控制面的各个流股。

使用控制体除了作物料衡算外, 还常用作能量衡算和动量衡算等, 但物料衡算是基础。物料衡算的原则与方法同样可推广应用于其它衡算。

[例 0-1] 有一内直径 D 为 2m 的水槽, 其下部有一内直径 d 为 20mm 的排水管。现以排水管的中心线所在水平面作为衡量水槽内水位高度的基准面。简况如图 0-1 所示。已知排水时排水管内水的流速 u 与水位高度 H 间的关系式为: $u = 0.60 \sqrt{2gH}$ m/s (式中: g 为重力加速度, 9.81m/s^2 , H 的单位是 m)。试问: 当水位由 $H_1 = 4\text{m}$ 下降到 $H_2 = 2\text{m}$ 需多长时间。水温为 20°C 。

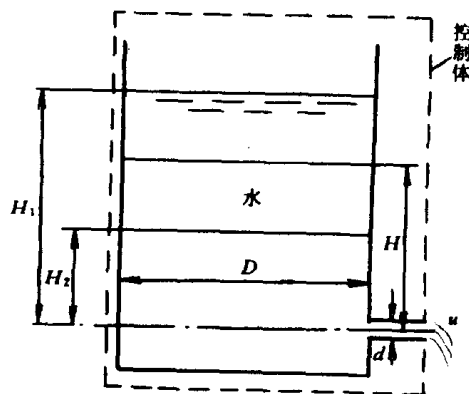


图 0-1 例(0-1)附图

[解] 取控制体如图 0-1 中的虚线所示。由于过程非定态, 须取 dt 时间为基准。

对水作物料衡算。由于水的密度为常量, 为简化计, 水的质量衡算式可换成体积衡算式。令 V 表示水的体积, 则

$$V_i - V_o = V_a$$

$$\therefore V_i = 0, V_o = 0.60 \sqrt{2gH} \frac{\pi}{4} d^2 dt, V_a = \frac{\pi}{4} D^2 dH$$

$$\therefore 0 - 0.60 \sqrt{2gH} \frac{\pi}{4} d^2 dt = \frac{\pi}{4} D^2 dH$$

$$\frac{0.60 \sqrt{2gd^2}}{D^2} \int_0^{t_1} dt = - \int_{H_1}^{H_2} \frac{dH}{\sqrt{H}}$$

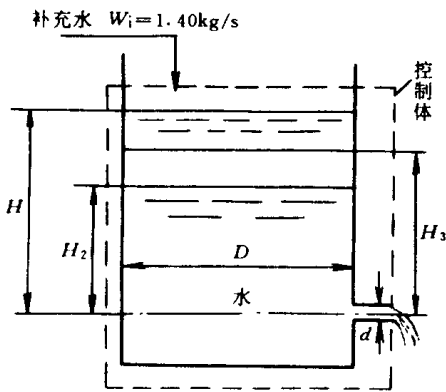
$$\frac{0.60 \sqrt{2gd^2} t_1}{D^2} = 2(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2})$$

代入数据得

$$0.60 \sqrt{2 \times 9.81} \times \frac{0.020^2 t_1}{2^2} = 2(\sqrt{4} - \sqrt{2})$$

$$t_1 = 4.408 \times 10^3 \text{s} = 1.225 \text{h}$$

【例 0-2】 在上题基础上增加一个条件：有恒定的补充水加入，进水流量为 1.40kg/s。开始时水位高度仍为 4m。问：① 当水位高度变至恒值时，这时水位高度 H_2 是多少米？② 水位下降的幅度是最大下降幅度之半，需多长时间？并与无补充水条件下需要的时间对比。



【解】 ① 水位恒定时， $m_a = 0$ ，则 $m_i = m_o$ 。水的密度 ρ 为 1000kg/m^3 。取 1s 为基准。

$$\therefore m_i = 1.40 \text{kg/s}, m_o = 0.60 \sqrt{2gH_2} \times \frac{\pi}{4} d^2 \rho$$

$$\therefore 1.40 = 0.60 \sqrt{2 \times 9.81 H_2} \times \frac{\pi}{4} \times (0.020)^2 \times 10^3$$

$$\text{解得 } H_2 = 2.812 \text{m}$$

图 0-2 例(0-2)附图

② 令水位下降幅度为最大下降幅度之半时的水位高度为 H_3 ，则

$$H_3 = H_1 - 0.5(H_1 - H_2) = 4 - 0.5 \times (4 - 2.812) = 3.406 \text{m}$$

令水位由 H_1 下降至 H_3 需时 t_2 ，可列出下式：

$$[1.40 - 0.60 \sqrt{2gH} \times \frac{\pi}{4} d^2 \rho] dt = \frac{\pi}{4} D^2 \rho dH$$

$$\therefore t_2 = \int_0^{t_2} dt = \frac{\pi}{4} D^2 \rho \int_{H_1}^{H_3} \frac{dH}{1.40 - 0.60 \sqrt{2g} \times \frac{\pi}{4} d^2 \rho \sqrt{H}}$$

其中

$$\int_{H_1}^{H_3} \frac{dH}{1.40 - 0.60 \sqrt{2 \times 9.81} \times \frac{\pi}{4} \times (0.020)^2 \times 1000 \sqrt{H}} = \int_{H_1}^{H_3} \frac{dH}{1.40 - 0.8349 \sqrt{H}}$$

$$= \frac{2}{0.8349} (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_3}) - \frac{2 \times 1.40}{0.8349^2} \ln \frac{1.40 - 0.8349 \sqrt{H_3}}{1.40 - 0.8349 \sqrt{H_1}}$$

$$= \frac{2}{0.8349} (\sqrt{4} - \sqrt{3.406}) - \frac{2 \times 1.40}{0.8349^2} \ln \frac{1.40 - 0.8349 \sqrt{3.406}}{1.40 - 0.8349 \sqrt{4}}$$

$$= 2.981$$

$$\therefore t_2 = \frac{\pi}{4} \times 2^2 \times 1000 \times 2.981 = 9.365 \times 10^3 \text{s} = 2.60 \text{h}$$

若无补充水，可按上例所得算式计算由 $H_1 = 4\text{m}$ 至 $H_3 = 3.406\text{m}$ 所需时间 t_3 。

$$\frac{0.60 \sqrt{2gd^2} t_3}{D^2} = 2(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_3})$$

$$\text{即} \quad 0.60 \sqrt{2 \times 9.81} \times \frac{0.020^2 t_3}{2^2} = 2(\sqrt{4} - \sqrt{3.406})$$

$$\therefore \quad t_3 = 1.162 \times 10^3 \text{s} = 0.323 \text{h}$$

* 注: $\int_{H_1}^{H_3} \frac{dH}{A - B\sqrt{H}}$ 的解法如下: 令 $\sqrt{H} = u$, 则 $H = u^2$, $dH = 2u du$, 则

$$\begin{aligned} \text{原式} &= 2 \int_{u_1}^{u_3} \frac{u du}{A - Bu} \\ &= \frac{-2}{B} \int_{u_1}^{u_3} \left(1 - \frac{A}{A - Bu} \right) du \\ &= -\frac{2}{B} (u_3 - u_1) + \frac{2A}{B} \int_{u_1}^{u_3} \frac{du}{A - Bu} \\ &= -\frac{2}{B} (\sqrt{H_3} - \sqrt{H_1}) - \frac{2A}{B^2} \ln \frac{A - B\sqrt{H_3}}{A - B\sqrt{H_1}} \end{aligned}$$

[例 0-3] 浓缩 NaOH 水溶液的流程如图 0-3 所示, F 、 G 、 E 皆为 NaOH 水溶液的质量流量, x 表示溶液中含 NaOH 的质量分数, W 表示各蒸发器产生水蒸汽的质量流量。试根据图示的各已知量, 计算 W_1 、 W_2 、 G 、 E 之值。

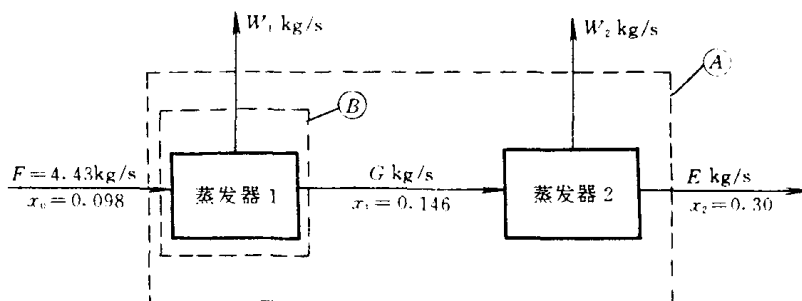


图 0-3 例(0-3)附图

[解] 作控制体①, 以 1s 为基准作物料衡算:

$$\text{NaOH:} \quad Fx_0 = Ex_2$$

$$\text{即} \quad 4.43 \times 0.098 = E \times 0.30 \quad \therefore E = 1.447 \text{kg/s}$$

$$\text{总的物料: } W_1 + W_2 = F - E = 4.43 - 1.447 = 2.983 \text{kg/s}$$

作控制体②, 以 1 秒为基准作物料衡算:

$$\text{NaOH:} \quad Fx_0 = Gx_1$$

$$\text{即} \quad 4.43 \times 0.098 = G \times 0.146 \quad \therefore G = 2.974 \text{kg/s}$$

$$\text{总的物料:} \quad W_1 = F - G = 4.43 - 2.974 = 1.456 \text{kg/s}$$

$$\therefore \quad W_1 + W_2 = 2.983 \text{kg/s}$$

$$\therefore \quad W_2 = 2.983 - W_1 = 2.983 - 1.456 = 1.527 \text{kg/s}$$

(四) 物理量的单位换算与公式换算

(1) 单位换算——同一个物理量可用不同的“数×单位”方式表达。例如某直线的长度为 1 in., 亦可表示为 25.4mm, 则 1 in. 与 25.4mm 是“等价”的。对于除温度以外的物理量, 可把“等价”的两种物理量表达式写成相比形式, 即构成“转换因子”。“转换因子”可用作单位换算。例如, (1 in./25.4mm) 及 (25.4mm/1 in.) 均为“转换因子”, 当欲知 158.8mm 相当于多少 in., 可按右式算得: $158.8 \text{mm} \times (1 \text{ in.} / 25.4 \text{mm}) = 6.25 \text{in.}$; 又若欲知 2.05in. 相当于多