

CHEMICAL ENGINEERING

化学工程

傅启民 编

中国科学技术大学出版社

化 学 工 程

傅启民 编

中国科学技术大学出版社

1992 • 合肥

[皖] 新登字08号

化 学 工 程

傅启民 编

*

中国科学技术大学出版社出版

(安徽省合肥市金寨路96号, 邮政编码: 230026)

中国科学技术大学印刷厂印刷

安徽省新华书店发行

*

开本: 787×1092/16 印张: 17 字数: 417 千

1992年6月第1版 1992年6月第1次印刷

印数: 1—5000册

ISBN7-312-00328-1/O·104 定价: 8.50元

内 容 简 介

本书是根据综合性大学化学系《化学工程基础》教学大纲，结合作者多年来在中国科学技术大学化学系的教学编写而成的。

本书主要介绍典型的化工单元操作及反应器的基本原理、典型设备的计算方法及其设计步骤。全书共分六章。内容包括：流体流动与输送、传热、气体吸收、液体精馏、固体干燥和基本反应器等。本书重视基本概念和理论，突出应用。

本书可作为综合性大学化学系“化学工程”课程的教材，也可作为化工生产、科研、设计的工程技术人员的参考书。

序

“化学工程”课程是高等理科院校化学系各专业的一门技术基础课。作者根据多年的教学经验，并参考了国内外有关教材和专著，结合化学系的教学时数（60~80学时），选编了流体流动与输送、传热、气体吸收、液体精馏、固体干燥、基本反应器等六章。虽然全书只包括典型的单元操作，但是学生掌握了这些内容，便可从理论上阐明化工生产中的各个过程，同时培养运用基础理论分析和解决实际问题的能力。

我浏览了本书的全部内容，认为此书具有下列特色：1）内容上少而精，公式推导力求删繁就简，着重于阐述过程的概念及其物理实质，突出应用；2）各章叙述方法，从概述→理论→速率方程→计算→设备介绍→典型设备设计步骤简介，层次分明，系统性、逻辑性强；3）在全书的体系上，每章前有学习目的，后有示例，并附有练习题、思考题和附表，有利于指导自学；4）全书文句流畅，通俗易懂。因此这本书也可作为化工院校本科生和化工领域工程技术人员的一本参考书。

虽然时间仓促，但作者能够编写出这样一本较为新颖的书，是难能可贵的，故乐为序。

全国“化工原理”教学指导委员会副主任委员

合肥工业大学化工系教授

范文元

1991年8月15日

前 言

多年来，作者在中国科学技术大学化学系主讲“化学工程”课程，曾得到同学们的好评。他们认为教材的系统性和逻辑性强，真正作到理论联系实际，突出应用。因而，对学习“化学工程”课程很有兴趣，要求将讲义尽快变成书。

为了满足同学们的迫切愿望，也为了与兄弟院校的同行们交流教学经验，进一步提高教学质量，作者将讲义进行整理，并修改、补充、博采众家之长，同时反映当前“化学工程”的进展，“化学工程”终于编写就绪。

本书根据综合性大学化学系教学的要求和化工生产中的共同特性，选择了流体流动与输送、传热、气体吸收、液体精馏、固体干燥、基本反应器等较为典型的化工单元操作。讲授时注重理论联系实际，使同学们通过学习，掌握“化学工程”中的基本原理、典型设备的计算及其设计步骤，更进一步地明确学习“化学工程”的目的。

为了便于教学，尽可能控制教材的篇幅，根据具体情况，在内容上可作适当增删。有关单位换算、水、空气和水蒸汽等物理性质的数据，需要时，可查有关手册或书籍。

在编写过程中，作者得到了校系领导和兄弟院校同行的关怀、支持和鼓励。合肥工业大学化工系范文元教授提供了部分资料，周斌等同志参与图纸整理及部分抄写工作，作者一并在此深表谢意。

全书由范文元教授审核。

限于作者水平，欠妥之处在所难免，敬希批评指正。

作 者

1991年8月于合肥

目 录

序	(i)
前言	(iii)
绪论	(1)
第一章 流体流动与输送	(3)
学习目的	(3)
第一节 概述	(3)
第二节 流体静力学基本方程式及其应用	(4)
一、流体静力学基本方程式	(4)
二、流体静力学基本方程式的讨论	(4)
三、流体静力学基本方程式的应用	(5)
第三节 流体流动的基本方程式	(7)
一、稳定流动与不稳定流动	(7)
二、流量与流速	(8)
三、连续性方程式	(9)
四、柏努利方程式	(10)
第四节 流体在管内的流动阻力	(12)
一、牛顿粘性定律与流体的粘度	(12)
二、流体流动的类型与雷诺数	(14)
三、流体在直管内流动的阻力	(15)
四、局部阻力的计算	(21)
第五节 管路计算	(21)
一、简单管路	(21)
二、复杂管路	(22)
三、管路计算	(23)
第六节 流速与流量的测量	(24)
一、测速管	(24)
二、孔板流量计	(25)
三、转子流量计	(29)
四、湿式气体流量计	(30)
第七节 液体输送机械——离心泵	(31)
一、离心泵的工作原理和主要部件	(31)
二、离心泵的主要性能参数	(33)

三、离心泵的特性曲线.....	(35)
四、离心泵的安装高度和汽蚀现象.....	(36)
五、离心泵的类型与选用.....	(38)
第八节 气体输送机械——离心通风机.....	(39)
一、离心通风机的结构及工作原理.....	(39)
二、离心通风机的主要性能参数.....	(40)
三、离心通风机的特性曲线.....	(41)
四、离心通风机的选择.....	(41)
例题.....	(42)
习题.....	(47)
思考题.....	(49)
附表.....	(50)
第二章 传热.....	(55)
学习目的.....	(55)
第一节 概述.....	(55)
一、传热过程在化工生产中的应用.....	(55)
二、传热的基本方式.....	(55)
三、稳定传热和不稳定传热.....	(56)
四、典型的换热器.....	(56)
第二节 热传导.....	(57)
一、傅立叶定律.....	(57)
二、导热系数.....	(57)
三、平壁的热传导.....	(58)
四、圆筒壁的热传导.....	(59)
第三节 对流传热.....	(61)
一、对流传热的分析.....	(61)
二、壁面和流体间的对流传热速率.....	(61)
三、流体有无相变的给热系数.....	(62)
第四节 传热的计算.....	(69)
一、传热基本方程式.....	(69)
二、换热器的热负荷计算.....	(69)
三、传热平均温度差的计算.....	(70)
四、传热系数.....	(75)
第五节 换热器.....	(79)
一、换热器的分类.....	(79)
二、间壁式换热器.....	(79)
三、板式换热器.....	(81)
第六节 列管式换热器的设计和选用.....	(83)

一、应考虑的问题·····	(83)
二、选用和设计计算步骤·····	(83)
例题·····	(85)
习题·····	(90)
思考题·····	(92)
附表·····	(93)
第三章 气体吸收 ·····	(99)
学习目的·····	(99)
第一节 概述·····	(99)
一、吸收过程及吸收类型·····	(99)
二、吸收在化学工业中的应用·····	(100)
三、吸收剂的选择·····	(100)
四、吸收流程·····	(100)
五、吸收设备·····	(101)
第二节 气液相平衡·····	(101)
一、气体在液体中的溶解度·····	(101)
二、亨利定律·····	(102)
三、相平衡和吸收过程的关系·····	(103)
第三节 扩散速率·····	(104)
一、分子扩散与费克定律·····	(104)
二、气相中的稳定分子扩散·····	(105)
三、液相中的稳定分子扩散·····	(107)
四、对流扩散·····	(107)
第四节 吸收速率方程式·····	(108)
一、双膜理论·····	(108)
二、单相传质速率方程式·····	(109)
三、总吸收速率方程式·····	(110)
四、吸收总系数与两相分系数的关系·····	(111)
第五节 填料吸收塔的计算·····	(112)
一、物料衡算与操作线方程式·····	(112)
二、吸收剂的用量与最小液气比·····	(113)
三、吸收塔塔径的计算·····	(115)
四、填料层高度的计算·····	(116)
第六节 填料塔·····	(121)
一、填料塔的结构及填料·····	(121)
二、填料塔内的流体力学性能·····	(123)
三、填料塔的附件·····	(125)
第七节 对填料塔的要求及设计步骤·····	(128)

一、要求	(128)
二、设计步骤	(128)
例题	(130)
习题	(135)
思考题	(137)
附表	(138)
第四章 液体精馏	(144)
学习目的	(144)
第一节 概述	(144)
一、精馏在化学工业中的应用	(144)
二、精馏原理	(144)
三、精馏流程	(145)
第二节 双组分溶液的气液相平衡	(146)
一、理想溶液气液相平衡关系的基本方程式	(146)
二、表示气-液相平衡的几种相图	(146)
三、挥发度及相对挥发度	(147)
第三节 双组分连续精馏塔的计算	(148)
一、全塔物料衡算	(148)
二、操作线方程式	(149)
三、操作线方程式在 $y-x$ 相图上的作法	(153)
四、回流比	(154)
第四节 理论塔板、理论塔板数及实际塔板数	(158)
一、理论塔板的概念	(158)
二、求理论塔板数的方法	(158)
三、塔板效率	(159)
四、实际塔板数	(161)
第五节 塔板形式与结构	(161)
一、塔板形式	(161)
二、塔板结构	(163)
第六节 塔高、塔径及塔板压力降的计算	(164)
第七节 填料塔与板式塔的比较	(167)
第八节 精馏塔的热量衡算	(168)
第九节 精馏塔的设计步骤	(169)
一、精馏操作对塔设备的要求	(169)
二、常用板式塔类型	(169)
三、设计步骤	(169)
例题	(171)
习题	(177)

思考题	(179)
附表	(180)
第五章 固体干燥	(181)
学习目的	(181)
第一节 概述	(181)
一、干燥的概念	(181)
二、干燥过程的实质	(181)
三、干燥过程的分类	(182)
第二节 湿空气的性质和湿度图	(182)
一、湿空气的性质	(182)
二、湿空气的湿度图及其应用	(187)
第三节 干燥过程的物料衡算和热量衡算	(190)
一、干燥过程的物料衡算	(190)
二、干燥过程的热量衡算	(192)
第四节 干燥时间的计算	(194)
一、物料中水分的性质	(194)
二、干燥速率	(195)
三、干燥过程的阶段	(196)
四、恒定干燥条件下干燥时间的计算	(198)
第五节 干燥设备	(199)
一、工业上常用的干燥器	(199)
二、沸腾干燥	(199)
第六节 干燥器的选择	(202)
例题	(204)
习题	(207)
思考题	(209)
第六章 基本反应器	(210)
学习目的	(210)
第一节 概述	(210)
第二节 化学反应器的类型	(210)
一、按物料的相态分类	(210)
二、按反应器的形状分类	(211)
三、按操作方法分类	(212)
第三节 反应器设计基础	(213)
一、化学反应动力学方程式的建立	(213)
二、物料在反应器内的流动模型	(214)
三、反应器基本方程	(215)
第四节 间歇反应器	(216)

一、反应时间的计算·····	(216)
二、容积的计算·····	(217)
第五节 活塞流反应器·····	(218)
第六节 理想混合反应器·····	(220)
一、理想混合反应器的特性·····	(220)
二、基本方程式·····	(221)
三、多釜串联反应器·····	(222)
第七节 反应器型式及操作方法的评比和选择·····	(224)
一、反应器生产能力的比较·····	(224)
二、关于收率的分析·····	(226)
第八节 非理想流动·····	(229)
一、偏离理想流动的原因及实际反应器的设计方法·····	(229)
二、停留时间分布的表示方法及其测定·····	(231)
三、理想反应器的物料停留时间分布·····	(235)
四、停留时间分布函数在分析和解决反应器问题中的作用·····	(237)
例题·····	(240)
习题·····	(244)
思考题·····	(246)
附录·····	(247)
化学工程进展简介·····	(247)
主要参考文献·····	(257)

绪 论

一、化工生产过程

化学工业是对原料进行一系列物理和化学加工过程，从而得到有用的产品。反应器是化学工业中的核心设备。为了使反应能顺利地进行，必须保证反应器内有一定的物料组成、温度和压力，因此原料必须经过预处理，除去杂质，提高纯度，这些过程称为前处理；而反应产物同样需要经过精制，以便获得合格的半成品或成品，这些过程叫作后处理。例如，电解食盐水制烧碱的过程，食盐水的精制过程属于前处理，而烧碱溶液的加工则属于后处理。在前、后处理工序中所进行的过程多数是纯物理过程。

实际上，在一个现代化的、设备数量多的大型化工厂中，反应器并不多，绝大多数的设备都在进行各种前、后处理操作。可见，前、后处理过程在化工生产中的重要作用。

二、单元操作

在各种化工产品的生产过程中，包含着各种物理加工过程。根据它们的操作原理，可以归纳为基本操作过程即单元操作。例如流体输送、热交换、吸收、精馏及干燥等。任何一种化工产品的生产，都是由若干单元操作及化学反应过程组合而成的。而每个单元操作，都是在一定的设备中进行的。例如，精馏操作是在精馏塔内进行的；干燥操作是在干燥器内进行的。就其内容而言，各单元操作包括过程和设备两个方面。研究各单元操作是为了掌握过程的规律，并设计出合理的设备，使过程能顺利地进行。

单元操作不仅在化工生产中占有重要的地位，而且在石油、轻工、食品和制药等工业中也得到广泛地应用。

三、单元操作中常用的基本概念

在研究化工单元操作时，经常用到物料衡算、能量衡算、物系的平衡关系及过程速率等基本概念。这些基本概念贯串于本课程的始终，现就其含义作简要说明。

1. 物料衡算 依据质量守恒定律，进出某一化工过程的物料量之差，等于该过程中积累的物料量，即

$$\text{输入量} - \text{输出量} = \text{积累量}$$

对于连续稳定的操作过程，过程中不应有物料的积累。其物料衡算关系式为

$$\text{输入量} = \text{输出量}$$

物料衡算可按下列步骤进行：（1）根据题意画出各物料的流程示意图，物料的流向用

箭头表示,并标注已知数据与待求量。(2)在写物料衡算式之前,要选定计算基准,一般选用单位进料量或出料量、时间及设备的单位体积等作为计算的基准。在较复杂的流程示意图上应圈出衡算的范围,列出衡算式,求解未知量。

2. 能量衡算 化工生产中能量主要包括机械能和热能。能量衡算的依据是能量守恒定律。机械能衡算将在流体流动章节中说明;热量衡算将在传热、蒸馏、干燥等章节中说明。热量衡算的步骤与物料衡算的步骤基本上是相同的,且与物料衡算密切相关。

3. 物系的平衡关系 平衡状态是自然界中广泛存在的现象。用平衡关系可以判断过程能否进行、进行的方向以及能达到的极限。气体吸收的极限是当时条件下气体在液体中的溶解度,反应的极限是当时条件下的平衡转化率等。利用平衡条件,可以找出当时条件下物料或能量利用的极限,为制定工艺方案提供依据。另外,还可以从实际操作结果与平衡数据远离的程度,得知过程效率的高低,从而找到改进实际操作的方法。

4. 过程速率 过程速率即过程进行得快慢。过程速率决定设备的生产能力,过程速率越高,单位设备体积的生产能力越大。过程速率可用下式表示:

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

过程的推动力是指过程在某瞬间距平衡的差额,它可以是压强差、温度差或浓度差。增大过程的推动力或减小过程的阻力均可以提高过程速率。当推动力一定时,要提高过程速率,应着重降低控制步骤的阻力。不管采用什么措施来提高过程的速率,都应考虑:(1)不降低物料和能量的利用率;(2)不产生副作用或副反应;(3)不增加过多设备。

四、化学工程学的内容、性质、研究对象及任务

化学工程的内容包括三传一反。三传即动量、热量和质量传递过程;一反即化学反应过程。它是研究大规模地改变物料的化学组成和物理性质的工程技术学科,因此,它是一门基础技术课程。它研究的对象不仅包括在化工生产装置中进行的化学变化过程,而且还包括把混合物分离为纯净组分的过程以及改变物料物理状态和性质的各种过程。它的任务是:从理论上阐明化工生产中的各个过程,找到其中的规律性,以求得在化工技术开发过程中减少盲目性,增加自觉性,培养学生运用基础理论分析和解决化工单元操作中各种工程实际问题的能力。

第一章 流体流动与输送

学习目的

- 1) 熟悉流体静力学基本方程式及其在化学工程中的应用;
- 2) 掌握流体流动时的能量互变规律, 学会运用柏努利方程解决化工生产中有关实际问题;
- 3) 明确流体流动时阻力产生的原因、阻力的计算方法及降低系统阻力应采取的措施, 以便为计算和设计管路系统提供有利条件;
- 4) 了解离心泵和送风机的结构、工作原理、主要参数及特性曲线, 以便在实际工作中合理选用。

第一节 概 述

液体和气体统称为流体。流体的特征是具有流动性; 无固定形状, 随容器的形状不同而变化; 在外力作用下其内部发生相对运动。

在化工生产中, 所处理的原料和产品大多数是流体。按照生产工艺的要求, 制造产品时往往让流体通过管道依次送入各设备进行化学反应或物理变化; 制成的产品常要输送到贮罐内贮存。过程进行的好坏、动力的消耗及设备的投资都与流体的流动状态密切相关。

在化工生产中, 主要有以下几个方面经常要应用流体流动的基本原理及其流动规律:

一、流体的输送

欲把流体按所规定的条件, 从一个设备送到另一个设备, 通常设备之间是用管道连接的, 这就需要选用适宜的流动速度以便确定输送管路的直径。在流体的输送过程中, 常常要采用输送设备, 例如泵或送风机。因此就需要计算流体在流动过程中应加入的外功, 为选用输送设备提供依据。

二、压强、流速和流量的测量

为了控制生产过程, 需要对管路或设备内的压强、流速及流量等一系列参数进行测定, 以便合理地选用和安装测量仪表。而这些测量仪表的操作原理又是以流体的静止或流动的规律为依据的。

三、为设备提供适宜的流动条件

化工生产的传热、传质等过程，都是在流体流动的情况下进行的。设备的操作效率与流体流动状况有密切关系，因此研究流体流动对寻求设备的强化途径具有重要意义。

第二节 流体静力学基本方程式及其应用

流体静力学是研究流体在重力和压力作用下达到平衡的规律。在工程实践中，流体的平衡规律应用广泛，如流体在设备或管道内压强的变化与测量、液体在贮罐内液位的测量、设备的液封等。

一、流体静力学基本方程式

讨论流体在重力和压力作用下的平衡规律，即流体处于相对静止状态。重力（地心引力）可以看作是不变的，起变化的是压力，所以实质上是讨论静止流体内部压力变化的规律。

如图 1-1 所示。容器中盛有密度为 ρ 的静止液体。现于液体内部任意划出一底面积为 A 的垂直液柱。若以容器底为基准水平面，液柱的上、下底面与基准水平面的垂直距离分别为 z_1 和 z_2 。

当液柱处于静止状态时，其垂直方向各力的代数和为零，即：

$$P_2 - P_1 - \rho g A (Z_1 - Z_2) = 0$$

将上式各项除以 A ，又因 $P_1/A = p_1$ ， $P_2/A = p_2$ ，整理后为：

$$p_2 = p_1 + \rho g (Z_1 - Z_2) \quad (1-1)$$

对式 1-1 进行适当的变换，即将液柱的上底面取在容器的液面上，设液面上方的压强为 p_0 ，则 $p_1 = p_0$ ，下底面取在距液面任意距离 h 处，即 $p_2 = p$ ， $Z_1 - Z_2 = h$ ，于是式 1-1 可改写为：

$$p = p_0 + \rho g h \quad (1-2)$$

图 1-1 流体静力学基本方程式的推导

式 1-1 及式 1-2 称为流体静力学基本方程式。它说明了在重力作用下，静止流体内部压强的变化规律。

二、流体静力学基本方程式的讨论

由流体静力学基本方程式可见：

1) 当容器液面上方的压强 p_0 一定时，静止流体内部任一点压强的大小与液体本身的密度 ρ 和该点距液面的距离 h 有关。因此，在静止的、连续的同一流体中，处于同一水平面

上的各点的压强都相等。

2) 当液面上方压强 p_0 改变时, 液体内部各点的压强 p 也发生同样大小的改变。

3) 式 1-2 可改写为:

$$\frac{p - p_0}{\rho g} = h$$

上式说明压强差的大小可以用一定高度的液柱来表示。由此引伸出压强的大小也可用一定高度的液柱来表示, 这就是压强可以用 mmHg, mmH₂O 等单位来计量的依据。当用液柱高度来表示压强和压强差时, 要注明是何种液体, 否则就失去了意义。

4) 如将式 1-1 两边同除以 ρg 并整理得:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g}$$

或

$$Z + p/(\rho g) = \text{常数}$$

式中 Z ——为流体距离基准面的高度, 称为位压头。若把重量 mg 的流体从基准面移到高度 Z 后, 该流体所具有的位能为 mgZ 。单位重量流体的位能为 $mgZ/mg = Z$ 。

式 1-1 及式 1-2 是以液体为例推导出来的。液体的密度可视为常数, 而气体的密度除随温度变化外还随压强变化。气体密度随容器高低变化很小, 一般也可认为是常数, 所以静力学基本方程式也适用于气体。

三、流体静力学基本方程式的应用

1. 压强与压强差的测量 测量压强的仪表很多, 现仅介绍以流体静力学基本方程式为依据的测压仪器, 这种测压仪器统称为液柱压差计, 可用来测量流体的压强和压强差, 较典型的有以下两种。

1) U形管压差计。U形管压差计的结构如图 1-2 所示。它是一根U形玻璃管, 内装有液体作为指示液。指示液与被测流体不互溶, 不起化学作用, 且其密度应大于被测流体的密度。

当测量管道中 1-1' 与 2-2' 两截面处流体的压强差时, 可将 U 形管的两端分别与 1-1' 及 2-2' 两截面相连通。由于两截面压强 p_1 和 p_2 不相等, 在 U 形管的两侧便出现指示液液面高度差 R , R 称为压差计的读数, 其值的大小反映了 1-1' 及 2-2' 两截面的压强差 ($p_1 - p_2$) 的大小。

在 U 形管内装有指示液 A , 其密度为 ρ_A , U 形管两侧臂上部及连接管内均充满待测液体 B , 其密度为 ρ_B , 图中 a, a' 两点处在连通的同一种静止流体内, 并且在同一水平面上, 所以这两点的静压强相等, 即 $p_a = p_{a'}$ 。根据流体静力学基本方程式推导得

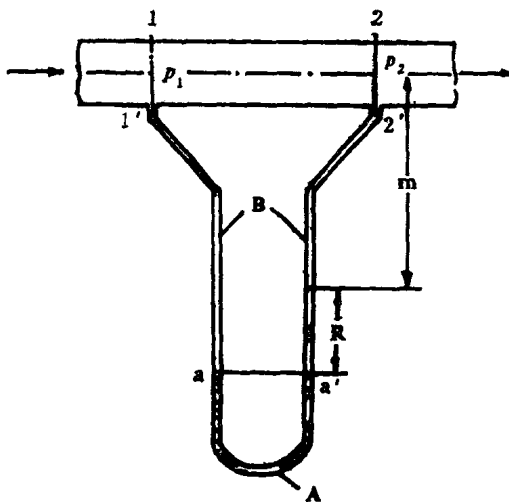


图 1-2 U形管压差计