

山东省普通高等学校试点课程教材

化工原理

赵文 王晓红 编
唐继国 周传光

石油大学出版社

山东省普通高等学校试点课程教材

化 工 原 理

赵 文 王晓红
唐继国 周传光 编

石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

化工原理/赵文等编. —东营:石油大学出版社,
2001.12

ISBN 7-5636-1562-8

I. 化… II. 赵… III. 化工原理 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 087799 号

化 工 原 理

赵 文 王晓红 唐继国 周传光 编

责任编辑: 宋秀勇(电话 0546—8392139)

封面设计: 孟卫东

出版者: 石油大学出版社(山东 东营, 邮编 257062)

网 址: <http://sunctr.hdpu.edu.cn/~upcpress>

电子信箱: upcpress@mail.hdpu.edu.cn

印刷者: 青岛胶南印刷厂

发 行 者: 石油大学出版社(电话 0546—8392563)

开 本: 787×1092 1/16 印张: 19.25 字数: 491 千字

版 次: 2001 年 12 月第 1 版第 1 次印刷

印 数: 1—3500 册

定 价: 26.00 元

前 言

“化工原理试点课程”为山东省教育厅《面向 21 世纪高等教育教学内容和课程体系改革计划》的首批项目,于 1999 年 6 月立项进行。该项目的主要内容之一就是编写《化工原理》教材和《化工原理辅导》。

从转变传统教育思想,拓宽专业范围出发,以培养学生的素质、知识与能力为目标,根据新的课程体系和 50~80 学时的课堂教学大纲,本教材从认识规律出发,以流体流动及输送机械、传热及传热设备、均相混合物分离及设备(气液传质原理、塔设备简介、蒸馏、吸收)为重点,论述了过程工业(化工、石油、轻工、医药、食品、冶金等)的过程原理及应用,对非牛顿流体与两相流、蒸发、萃取、吸附、干燥、膜分离、反应分离等单元过程作了简要介绍。

在增减教学内容的处理上,依据厚基础、重实践、引思考的基本原则,本教材力求重点突出,以点带面,举一反三。在精简了许多传统的教学内容和计算方法之后,注意吸取过程工业领域的新理论、新技术、新设备等最新成果,介绍学科的发展动态。同时,重点章末配有阅读资料,通过日常生活和生产实际中的一些与所学知识有关的问题,激发兴趣,启迪思维,以期达到传统与先进、科学与适用、教与学的有机统一。

在教学手段上,本教材配置了计算机多媒体辅助教学课件。针对传统教学中的薄弱环节,如流体输送机械、传热设备、塔设备等内容,基于 Powerpoint 的演示功能,充分利用了表格、动画、字体等对比手段,制作了课堂教学课件;同时,对主要的章节,从学习要点、例题分析、实验演示、资料查询等不同角度,利用 Authorware 的集成和多重分支功能,制作了教学辅导软件。

参加本书编写工作的有赵文(绪论、流体输送机械、传热、蒸馏)、王晓红(吸收、非均相混合物分离、塔设备简介、其他单元过程简介)、唐继国(流体流动、附录、习题)、周传光(气液传质原理、干燥)。

在编写过程中,青岛化工学院的韩方煜教授、李建隆教授给予了关心、支持和帮助;化工原理教研室的高军、朱兆友、王奔、王立新、李红海等老师参加了习题考核、稿件校对等工作;本书承蒙石油大学(华东)刘雪暖教授主审。对此,一并致以诚挚的谢意。

由于水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者提出宝贵意见。

编 者
2001 年 11 月

目 录

绪论	(1)
一、过程工业与单元操作	(1)
二、化工原理的研究基础与方法	(3)
三、单位与因次	(6)
四、现代过程工业	(7)
第一章 流体流动及输送机械	(8)
第一节 流体静力学基本方程	(8)
第二节 流体流动的基本方程	(13)
第三节 流体流动的内部特征	(22)
第四节 管内流动的阻力损失	(28)
第五节 管路计算与管路布置原则	(35)
第六节 流量测量	(37)
第七节 液体输送机械	(40)
第八节 气体输送与压缩机械	(54)
习题	(63)
第二章 传热及传热设备	(70)
第一节 热传导	(70)
第二节 对流传热	(76)
第三节 间壁两侧流体间的传热	(84)
第四节 换热器的传热计算	(91)
第五节 热辐射	(97)
第六节 换热器	(100)
习题	(111)
第三章 均相混合物的分离及设备	(116)
概述	(116)
第一节 气液传质原理	(116)
第二节 气液传质设备简介	(122)
第三节 吸收	(131)
第四节 蒸馏	(148)
习题	(171)

绪 论

一、过程工业与单元操作

1. 过程工业

过程工业是指对原料进行大规模加工处理,使其不仅在状态与物理性质上发生变化,而且在化学性质上也发生变化,最终得到具有特定物理化学性质产品的工业。如电石法聚氯乙烯生产,是以乙炔和氯化氢为原料经过提纯、单体合成、单体精制、单体聚合、脱水、干燥等加工处理得到聚氯乙烯树脂。又如,合成氨生产以石油或天然气(也有以煤)为原料,经过造气、精制、合成、分离等加工处理而得到液态的氨或固态产品尿素或碳酸氢铵等。再如,乙烯生产以轻柴油为原料,经过裂解反应、急冷脱油、压缩去水、裂解气分离、乙烯精制等加工处理而得到乙烯。过程工业涉及的范围相当广泛,如石油炼制、化工、冶金、食品、制药、原子能等,在国民经济中占有十分重要的地位。

概括地说,一个过程工业包括发生化学反应的过程和发生物理变化的过程。实际上,在过程工业里,核心和关键步骤应当是化学反应过程及设备(反应器)。然而,即使在现代化的、设备林立的、大型化的过程工业生产中,反应器的数量并不是很多,绝大多数的设备都是用于反应前、后工序的预处理、后处理,即物理过程。这种物理过程改变了物料的状态和物性,占有过程工业的大部分设备投资和操作费用,与产品的产量和质量密切相关,其地位是相当重要的。

2. 单元操作

过程工业是多行业、多品种的生产部门。很久以前,各种产品的生产技术,被看作很少有相同之处。那时,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,各种过程工业尽管工艺路线千差万别,但所发生的各种物理变化过程及操作原理是相同的,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等等。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纺织、钢铁等其他工业领域。像物料的加热与冷却,即传热操作几乎在所有的工业领域,甚至在日常生活中都是离不开的。正是这些共有的操作工序,引起了人们的研究兴趣。20世纪20年代提出了“单元操作”(Unit Operations)的概念。

单元操作在国内称为“化工原理”(Principles of Chemical Engineering),50~60年代曾称为“化工过程及设备”,80年代也曾称为“化学工程”、“化学工程基础”。

化工原理是过程工业类专业的一门重要的技术基础课。其主要任务是研究工业生产中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。

常用的单元操作有几十种之多。主要包括:流体流动、流体输送机械、机械分离、蒸发、传

热、蒸馏、吸收、萃取、塔设备、干燥、吸附、膜分离、搅拌、冷冻、流态化、结晶、升华等等。

顺便指出,化工原理不仅是化学工程与工艺专业的主干课,而且,凡是与过程工业有关的专业,如过程自动化、高分子材料科学与工程、过程机械制造等都要学习本课程,理科大学化学系也要讲授化工原理的有关章节。由此可知,化工原理带一个“化”字,乃是历史的原因,目前看来并不那么名副其实。为了照顾传统习惯,本书仍将采用化工原理的名称。

3. 化工原理的特点

化工原理与数、理、化等基础课相比,一个显著的区别在于其工程概念很强。所谓工程概念,从工程师的任务来看,是在过程开发、装置设计和操作管理中必须解决的问题。过程开发指的是探索过程的最佳操作条件。通常构成过程的工序是已知的,将这些工序加以组合以便使该过程在大规模装置生产中产生效益,这样的工作成为“开发”过程;设计方面的工作,指确定设备的某些通用规格和尺寸;操作管理不仅要管理日常生产,还要改进现有的过程来提高设备效率。

要做一个合格的工程师是不容易的,过程工业的复杂性和影响过程的众多因素,使得问题的解决十分困难,一般的处理方法是:理论分析,实验研究,经验估计,权衡调整。这是大学生在过去学习中不熟悉的。可以认为,化工原理是过程工业类专业大学学习中的一个转折点,是从基础课程过渡到专业课程的一个桥梁。

从化工原理课程本身来看,其另一特点是符号多、公式多、单位换算多。尤其是刚开始学习的时候总觉得没有头绪。尽管如此,只要下点功夫仍然可以把课程学好。然而,要强调指出的是,化工原理面临着真实的、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,这就使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,在化工原理的学习中上升到了显著的地位。

4. 化工原理与化学工程

虽然化工原理有时也叫做化学工程,实际上前者仅是后者的基础。就化学工程的发展来看,包括如下几个分支:

化工传递过程。在许多单元操作的发展过程中,人们逐渐认识到它们之间存在共同的原则,可进一步归纳为动量传递、热量传递和质量传递,总称为化工传递过程。动量传递是研究动量在运动的介质中所发生的变化规律,如流体流动、沉降和混合等操作中的动量传递;热量传递是研究热量由一个地方到另一个地方的传递,如传热、干燥、蒸发、蒸馏等操作中存在这种传递;质量传递涉及物质由一相转移到另一不同的相,在气相、液相和固相中,其传递机理都是一样的,如蒸馏、吸收、萃取等操作中存在这种传递。

化工热力学。热力学本身是物理学的一个分支,最初是研究热能与机械能间的转换,以后逐渐扩展到研究与热现象有关的各种能量转换和状态变化的规律。热力学具有普遍的意义,在许多领域内得到了广泛应用。应用于化学领域形成了化学热力学,主要研究热化学、相平衡和化学平衡理论。应用于热力工程形成了工程热力学,主要研究热机的工作原理、工质的热力学性质和能量转换效率等。化工热力学则是在化学热力学和工程热力学的基础上形成的,主要研究多组分系统的温度、压力、各相组成和各种热力学性质间相互关系的数学模型以及能量(包括低品位能量)的有效利用问题。

化学反应工程。自从单元操作概念提出之后,人们曾试图对化学工业的化学反应过程也进行系统化,找出共性的东西,如按照化学反应的共同点分为氧化、氯化、硝化、磺化等单元作业。

但这种划分仅侧重于化学方面,如反应机理、反应特性等,而与反应设备的联系则较小,以致未能建立起工程学的体系。针对这一缺陷,人们进一步从化学工业反应设备的实际出发,深入分析其中的过程规律性,找出其共同点逐渐形成了化学反应工程,其研究的核心问题是反应器中化学反应速率的快慢及其影响因素,从而能够正确选择反应器类型和操作条件,使化学反应实现工业化。

化工系统工程。系统工程指系统规划和计划,研究和试验,工程设计,生产运行和控制,企业组织管理中使用的科学方法,它是一种综合性技术,在化工中称为化工系统工程,主要研究化工过程模拟分析、综合和最优化等。简单的说,模拟指对描述某一实际过程的数学模型进行求解;过程分析指过程结构一定,过程数学模型已知,在计算机上模拟,从而预测该过程在不同条件下的性能和行为;过程综合指已知过程的输入和输出,确定过程的结构,即选择适宜的设备类型、流程结构和操作条件等;最优化指要求过程的性能指标达到某些最优数值,包含了过程最优设计、最优控制和最优管理等意义。

化学工程是直接支撑化学工业的主要工程技术,是重要的学科支持。化学工程经过近一个世纪的发展,其应用领域不但覆盖了几乎所有的过程工业,而且新的生长点正不断产生,如“生化工程”、“环境工程”等,其研究对象广泛而复杂,已远远地超出了化学工程的范畴,遍布于能源、资源、环境、运输、医药卫生、材料、农业以及生物等诸多领域。

二、化工原理的研究基础与方法

1. 平衡关系

自然现象总是向使它的体系所具有的力学或化学的能量趋向最稳定的方向变化的,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,如吸收、蒸馏等,平衡关系具有重要的意义。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。平衡关系是一种动态平衡,平衡条件可以用热力学法则来描述。因此,物理化学是化工原理的一个重要基础。

2. 过程速率

任何一个物系如果不是处在平衡状态,则必然会发生趋向平衡的过程,而过程变化的速率总是和它所处状态与平衡状态的差距(推动力)成正比,而与阻力成反比。即过程速率等于过程推动力比过程阻力。推动力的性质取决于过程的内容,如传热的推动力是温度差,流体流动的推动力是压力差;与推动力相对应的阻力则与操作条件和物性有关。过程速率指明了过程进行的快慢程度,属于动力学在工程问题中的应用,动力学特征主要取决于过程的机理,而大部分过程的机理与动量、热量和质量传递密切相关,所以,传递过程是化工原理的另一个重要基础。

3. 基础数据

基础数据包括物质的基础物性数据、物质的压力-体积-温度的关系数据、物质的热力学数据、相平衡数据、传递过程数据等。了解物料的性质和获取方法,不仅是设计计算所必需的,而且,对于深入理解过程原理、安全生产和事故处理都有重要意义,可以说,有关物料的相态、密度、粒度、沸点、熔点、挥发性、溶解度、纯度、粘度、导热系数、扩散系数等方面的数据知识是化工原理的又一个重要基础。基础数据除了可从有关手册获取外,国内、外开发的大型物性数据库已投入使用,如青岛化工学院开发成功的《ECSS(工程化学模拟系统)化工之星》的数据库包含一千多种物质的基础数据。目前,许多工程技术人员正在研究开发智能数据库,以改进数据

库的性能,增强数据库的功能。

4. 三种衡算

质量衡算、能量衡算和动量衡算是化工原理课程中分析问题采用的基本方法。衡算的一般步骤是:首先确定衡算范围,具体包括微分衡算和总衡算,微分衡算取微元体为衡算范围,而总衡算的衡算范围可以是单个装置,也可以是一段流程、一个车间或一个工厂;其次是确定衡算对象和衡算基准;最后按衡算的通式进行计算,即:

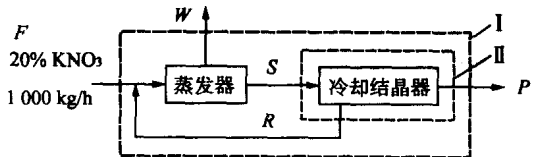
$$\text{输入的量} = \text{输出的量} + \text{累积的量}$$

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。在过程的开发设计、模拟优化、操作控制等工作中,质量衡算和能量衡算是必不可少的依据。

【例 1】如附图所示,在硝酸钾的生产过程中,20% (质量百分数,下同) 的硝酸钾水溶液以 1 000 kg/h 的流量送入蒸发器,在 422 K 下蒸发出部分水而得到 50% 的浓硝酸钾溶液,然后送入冷却结晶器,在 311 K 下结晶,得到含水 4% 的硝酸钾结晶和含硝酸钾 37.5% 的饱和溶液。前者作为产品取出,后者循环回到蒸发器。过程为定态操作,试计算硝酸钾结晶产品量、水蒸发量和循环的饱和溶液量。



例 1 附图

解 (1) 求硝酸钾结晶产品量 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, 以硝酸钾为衡算对象, 因系统定态操作, 输入系统的硝酸钾量应等于输出系统的硝酸钾量。则 $1\,000 \times 0.2 = 0.96 P$, 即

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

(2) 求水蒸发量 W

仍取系统 I, 衡算基准为 1 小时, 以总物料为衡算对象, 则

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

$$W = 1\,000 - P = 1\,000 - 208.3 = 791.7 \text{ (kg/h)}$$

(3) 求循环的饱和溶液量 R

取冷却结晶器为系统 II, 衡算基准为 1 小时, 以总物料为衡算对象, 作总物料衡算, 可得

$$S = 208.3 + R$$

以硝酸钾为衡算对象, 作硝酸钾的物料衡算, 得

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

上两式联立, 可得

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

5. 研究方法

一个新的产品从实验室研究成功到工业规模生产, 一般都要经历几个阶段, 即需进行不同规模的试验。随着规模的增加, 设备的尺寸也要相应地增大, 但到底要经历几个阶段, 尺寸增加到多大才能达到预期的效果, 这便是工业设备的放大问题, 是一个十分重要而又相当困难的工程问题。早期的工业设备放大, 主要采用逐级经验放大法。所谓逐级经验放大, 就是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。具此再设计和制

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,再将规模增大进行中间试验,由中间试验的结果放大到工业规模的生产装置。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,逐级经验放大法费事费钱,不是一种满意的放大方法。而且,该方法的主要依据是实验,是每种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,是“黑箱”而不是“白箱”,难以做到高倍数放大。

现代的工业设备放大,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。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。

应该明确的是,数学模型的定义具有一定的灵活性,同为一词所指却并非同一类概念。一般来说,数学模型指的是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,如描述过程系统中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;最优化问题中的目标函数;具有自学习功能的人工神经网络等也常被称为数学模型。总之,可以把针对各种问题写出的函数关系都称之为数学模型。

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。

理论模型。是指模型方程完全是在理论分析的基础上建立起来的数学表达式。尽管这类模型严格可靠,但面对复杂的工程问题常常是难以做到,只有那些过程十分简单,关系极其明确的少数操作才有可能属于此类。

经验模型。是指模型方程完全是靠回归实验数据得到的数学表达式,没有任何理论依据。这类模型的主要缺点是,从模型方程的形式上看不出所研究问题的内在规律,且受实验范围所限,外推性很差。但是,若其他类型的数学模型难以得到时,使用经验模型仍不失为一种补偿的方法。

半经验半理论模型。半经验半理论模型介于上述两种模型之间,是处理复杂工程问题的最有效、最常用的模型。这种模型的建立是理论与实验的结合,即:通过对所研究对象的过程机理进行理论分析,建立模型方程的表达式,进而通过实验确定模型参数。这样,可减少盲目性,增加可信性,外推性也有较大改善。

人工智能模型。模拟或部分模拟人类智能的数学模型称为人工智能模型。人工神经网络模型是典型的智能模型,它是由大量的神经元互连而成的网络,模拟人脑神经网络的学习和记忆功能是人工神经网络的核心任务。近些年来,人工智能模型的理论研究已取得了突破性进展,并在解决某些复杂的工程问题中获得了成功。相信随着计算机技术的发展和非经典数学方法的研究,人工智能模型必将广泛地应用到各种工程系统和生产系统中去。

本书主要介绍和应用经验模型、半经验半理论模型。

三、单位与因次

1. 基本单位和导出单位

凡是物理量均有单位,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,独立的物理量叫基本量,其单位叫基本单位,如时间、长度、质量等。不独立的物理量叫导出量,其单位叫导出单位,如速度、加速度、密度等。基本单位仅有几个,而导出单位由基本单位组成,数量很多。

2. 单位制度

基本单位加上导出单位称为单位制度。由于历史和地区的原因,出现了对基本单位的不同选择,因而产生了不同的单位制度。常用的单位制有绝对单位制、重力单位制(工程单位制)和国际单位制(SI制)。

绝对单位制与重力单位制的比较如表 0-1 所示。

表 0-1 绝对单位制与重力单位制的比较

基本物理量		长度 L	时间 T	质量 M	力或重力 F
绝对单位制度	cgs 制	cm	s	g	—
	mks 制	m	s	kg	—
	英制	ft	s	lb	—
重力单位制度 (工程单位制)	米制	m	s	—	kgf
	英制	ft	s	—	lb(f)

长期以来,科技领域存在多种单位制度并用的局面。同一个物理量,有时在不同的单位制中具有不同的单位和数值,给计算和交流带来麻烦,且很容易出错。为了改变这一局面,1960年10月,第十一届国际计量大会通过了一种新的单位制,叫国际单位制。该单位制共有七个基本单位,分别为长度、时间、质量、热力学温度、电磁强度、光强度和物质量,外加平面角和立体角两个辅助单位。其优点是,所有的物理量都可以用上述七个基本单位导出(有时要借助辅助单位),且任何一个导出量由上述七个基本单位导出时,都不需要引入比例系数。

1984年,国内确定了统一实行以SI制为基础,包括由我国指定的若干非SI制在内的法定单位制,并规定,自1991年起除个别领域外不允许使用非法定单位制。本课程主要采用法定单位制,兼顾各单位制之间的换算。

3. 单位换算

单位换算虽然简单,但即使是一个经验丰富的工程师,稍一马虎也会出错,所以必须认真对待。如SI制与工程单位制的换算:

质量与重力。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。但应注意,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。

质量与质量。在 SI 制中质量是基本单位,但在工程单位制中质量是导出单位。因此,在 SI 制中 1 kg 质量的物体,若用工程单位制表示,该物体的质量为 $1/9.81 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ 。

重力与重力。在工程单位制中重力是基本单位,但在 SI 制中重力是导出单位。因此,在工程单位制中重力为 1 kgf 的物体,若用 SI 制表示,该物体的重力为 9.81 N。

【例 2】 4℃时水的密度以绝对单位制表示是 $1.0[\text{g}/\text{cm}^3]$,换算成以工程单位制表示的物理量。

解 第一步先把密度单位由 $[\text{g}/\text{cm}^3]$ 变换成 $[\text{kg}/\text{m}^3]$

$$1[\text{g}/\text{cm}^3] = 1[\text{g}/\text{cm}^3](1 \text{ kg}/1000 \text{ g})(100 \text{ cm}/1 \text{ m})^3 = 1000[\text{kg}/\text{m}^3]$$

这是米制或 SI 制的密度单位,因为它以 kg 作基本单位,而工程制以 kgf 作基本单位,故还要作进一步换算,因

$$1[\text{kgf}] = 9.81[\text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2]$$

所以

$$\begin{aligned} 1000[\text{kg}/\text{m}^3] &= 1000[\text{kg}/\text{m}^3] \left(\frac{1 \text{ kgf}}{9.81 \text{ kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2} \right) \\ &= 102[\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4] \end{aligned}$$

4. 因次分析

因次与单位不是一个概念。如长度的单位有米、厘米、毫米、英尺和英寸等,为了明确长度的特性,可用因次 L 表示。人们规定,用一个符号表示一个基本量,这个符号连同它的指数叫基本因次。而基本因次的组合叫导出因次。基本因次和导出因次统称因次。各物理量均可以用因次表示,如长度用 L ,质量用 M ,时间用 θ ,温度用 T ,密度用 ML^{-3} 等。

在过程工业中,由于一些物理过程十分复杂,建立理论模型颇为困难。如果过程的影响因素已经明了,作为影响因素的物理量的相互关系,可进行某种程度的预测,这种预测方法称为因次分析。因次分析的依据是因次一致性原则或 π 定理。所谓因次一致性原则指,一个物理量方程的各项因次必相同。所谓 π 定理指,因次一致性的方程都可以化为无因次数群的形式,方法是将方程中的各项同除以其中的任何一项即可,且有:

$$\text{无因次数群的个数} = \text{变量数} - \text{基本因次的个数}$$

若能找出过程的影响因素,使用因次分析的方法将其归纳为无因次数群表示的经验模型,用实验确定模型的系数和指数,这在化工原理上是可行的。这样的经验模型不仅关联式简单,而且可减少实验的工作量。

四、现代过程工业

近 40 年来,随着科学技术的进步,过程工业发展异常迅速。如由丙稀和合成气生产丁辛醇的低压法开发成功,使原料丙稀耗量下降 22%、合成气耗量下降 45%,从而使成本下降 22%。又如计算机在过程工业中的应用,为过程装置实现大型化和高度自动化、最合理地利用原料和能源创造了条件,使过程工业的科研、设计、设备制造和生产发展迈上了一个技术上的新台阶。特别是太阳能、燃料电池等新能源,新型电子、光电、记录和显示材料,新型结构与功能材料,生物工程与环境工程等许多领域的技术创新,为重要的高科技过程工业的兴起创造了必要的条件。总之,现代过程工业的特点是:原料和能量消耗大幅度下降;新工艺、新产品不断开发成功;产品质量不断提高;自动化水平越来越高;清洁生产过程得到高度重视。

第一章 流体流动及输送机械

气体和液体总称为流体,其特点是具有流动性。过程工业中所处理的物料,包括原料、半成品及产品等,大多数是流体。流体的输送、传热、传质或化学反应,大多是在流体流动情况下进行的,因而流体流动状态对这些过程有很大影响,它是过程工业的基础。

讨论流体流动的问题,着眼点不在于流体的分子运动,而是把流体看成是大量质点组成的连续介质。因为质点的大小与管道或设备的尺寸相比是微不足道的,可认为质点间是没有间隙的,可用连续函数描述。但是,高真空下的气体,连续性假定不能成立。

流体流动主要是研究流体的宏观运动规律,讨论流体流动过程的基本原理和流体在管内流动的规律。运用流体流动的规律可以解决管径的选择及管路的布置;估算输送流体所需的能量,确定流体输送机械的型式及其所需的功率;测量流体的流速、流量及压强等;为强化设备操作及设计高效能设备提供最适宜的流体流动条件。

第一节 流体静力学基本方程

1-1-1 流体静力学涉及的主要物理量

一、流体的密度、比容、相对密度(比重)和重度

1. 密度 ρ

单位体积流体所具有的质量,称为流体的密度。通常以 ρ 示之,单位为 kg/m^3 。

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

式中: m ——流体的质量, kg ;

V ——流体的体积, m^3 。

不同流体的密度是不同的。对任何一种流体,其密度是压力与温度的函数,即 $\rho = f(p, T)$ 。其中,压力对液体的密度影响很小,可忽略不计,故液体可视为不可压缩流体。例如压力增加至 1 000 大气压时,水的体积只比原来减少 5%;温度对液体的密度有一定的影响,故在平时查取密度时应注明温度条件。

气体因具有可压缩性及膨胀性,其密度随温度、压力的变化较大,是可压缩流体。当温度不太低,压力不太高时,气体可按理想气体处理,根据理想气体状态方程

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

则:

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (1-2b)$$

式中: n ——气体的千摩尔数, kmol;

p ——气体的绝对压力, kPa;

T ——气体的绝对温度, K;

M ——气体的千摩尔质量, kg/kmol;

R ——气体常数, $R=8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$ 。

理想气体操作状态(压力 p , 温度 T)下的密度 ρ 与标准状态(压力 $p_0=1 \text{ atm}$, 温度 $T_0=273 \text{ K}$)下的密度 ρ_0 之间的换算可由下式进行:

$$\rho = \rho_0 \frac{p T_0}{p_0 T} \quad (1-3)$$

若气体按真实气体计算, 则需引入压缩系数进行校正。

流体混合物的密度可以用不同的方法求出。当计算不要求特别精确时, 可假设混合物各组分在混合前后质量不变, 则气体混合物的密度可由以下方法估算。

$$\rho_m = \rho_1 y_1 + \rho_2 y_2 + \rho_3 y_3 + \cdots + \rho_n y_n \quad (1-4)$$

式中: ρ_m ——气体混合物密度, kg/m^3 ;

$\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n$ ——气体中各组分的密度, kg/m^3 ;

$y_1, y_2, \cdots, y_n$ ——各组分的体积分数。

气体混合物的密度也可由式(1-2b)计算, 此时式中的千摩尔质量 M 应由混合气体的平均千摩尔质量 M_m 代替。

$$M_m = M_1 y_1 + M_2 y_2 + \cdots + M_n y_n \quad (1-5)$$

式中: $M_1, M_2, \cdots, M_n$ ——分别表示气体混合物中各组分的千摩尔质量, kg/kmol 。

液体混合物密度的计算, 可取 1 kg 混合物为基准, 并假定混合前、后总体积不变。液体混合物组成常用组分的质量分数表示, 故液体混合物密度 ρ_m 可表示为

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{a_1}{\rho_1} + \frac{a_2}{\rho_2} + \cdots + \frac{a_n}{\rho_n} \quad (1-6)$$

式中: $a_1, a_2, \cdots, a_n$ ——分别表示液体混合物中组分的质量分数;

$\rho_1, \rho_2, \cdots, \rho_n$ ——分别表示液体混合物中各组分的密度, kg/m^3 。

【例 1-1】 在盐酸制造过程中, 氯化氢气体混合物(其中含 $25\% \text{HCl}$; 75% 空气, 均为体积百分数), 在 50°C 及 743 mmHg (绝压)的条件下进入吸收塔, 试计算气体混合物的密度。

解 已知: HCl 的千摩尔质量为 36.5 , 空气的千摩尔质量为 29 , 混合气体中各组分的体积百分数为: $\text{HCl} = 0.25$, 空气 $= 0.75$ 。 $T = 50 + 273 = 323 \text{ K}$, $p = 743 \text{ [毫米汞柱]}$ 。

$$M_m = M_1 y_1 + M_2 y_2 = 36.5 \times 0.25 + 29 \times 0.75 = 9.125 + 21.75 = 30.875$$

气体混合物的密度, 由式(1-3)求得:

$$\begin{aligned} \rho_m &= \rho_0 \frac{p T_0}{p_0 T} = \frac{30.875}{22.4} \times \left(\frac{743}{760} \right) \times \left(\frac{273}{323} \right) \\ &= 1.377 \times 0.979 \times 0.845 = 1.14 \text{ (kg/m}^3\text{)} \end{aligned}$$

【例 1-2】 计算 293 K 时 60% (质量)的醋酸水溶液的密度。

解 293 K 时 $\rho_{\text{水}} = 998 \text{ kg/m}^3$, $\rho_{\text{醋酸}} = 1049 \text{ kg/m}^3$ 。

在 293 K 时醋酸水溶液的密度为

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{a_{\text{水}}}{\rho_{\text{水}}} + \frac{a_{\text{醋酸}}}{\rho_{\text{醋酸}}} = \frac{0.40}{998} + \frac{0.60}{1049}$$

所以

$$\rho_m = 1\,028 \text{ (kg/m}^3\text{)}$$

2. 比容

比容是密度的倒数,单位为 m^3/kg ,即

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1-7)$$

3. 相对密度(比重)

物质的密度与标准物质的密度之比,称为比重。对于固体和液体,标准物质多选用 4°C 的水;对于气体则多采用标准状况(0°C , $1 \times 10^5 \text{ kPa}$)下的空气。

4. 重度

单位体积流体所具有的重量,称为流体的重度。通常以 γ 示之,工程单位制为 kgf/m^3 ,SI 制为 $\text{kg}/(\text{m}^3 \cdot \text{s}^2)$ 。重度与密度的关系为

$$\gamma = \rho g \quad (1-8)$$

二、流体的压力

流体单位面积上所承受的垂直作用力,称之为流体的静压强,简称压强,通常习惯仍称为压力,以符号 p 示之。而流体的压力 P 称为总压力。

$$p = \frac{P}{A} \quad (1-9)$$

式中: p ——流体压力, N/m^2 或 Pa ;

P ——垂直作用于面积 A 上的总压力, N ;

A ——作用面的表面积, m^2 。

压力的单位除用 Pa 表示外,还可用大气压、米水柱(mH_2O)、毫米汞柱(mmHg)、巴(bar)等表示。压力不同单位间的换算十分重要。

$$\begin{aligned} 1 \text{ atm (物理大气压)} &= 760 \text{ mmHg} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O} = 1.033 \text{ kgf/cm}^2 \\ &= 101\,325 \text{ Pa} = 1.013\,3 \text{ bar} \end{aligned}$$

工程上为计算方便,还引入工程大气压换算系统。

$$1 \text{ at (工程大气压)} = 10 \text{ mH}_2\text{O} = 1 \text{ kgf/cm}^2 = 735.6 \text{ mmHg} = 9.807 \times 10^4 \text{ Pa} = 0.980\,7 \text{ bar}$$

设备内流体的真实压力称为绝对压力,简称绝压。当设备内流体压力高于外界大气压力时,常在设备上安装压力表,压力表上的读数称为表压,它反映流体绝压高于外界大气压的数值,此时流体的绝对压力可如下表示:

$$\text{绝对压力} = \text{外界大气压力(当地)} + \text{表压}$$

当设备内流体压力低于外界大气压,工程上视为负压操作,常在设备上安装真空表,真空表上的读数称为真空度,它反映流体绝压低于外界大气压的数值,此时流体的绝对压力可如下表示:

$$\text{绝对压力} = \text{外界大气压力(当地)} - \text{真空度}$$

绝对压力、外界大气压力、表压和真空度之间的关系如图 1-1 所示。不难看出,真空度实际上是流体表压的负值。例如,体系的真空度为 $3.3 \times 10^3 \text{ Pa}$,则其表压为 $-3.3 \times 10^3 \text{ Pa}$ 。

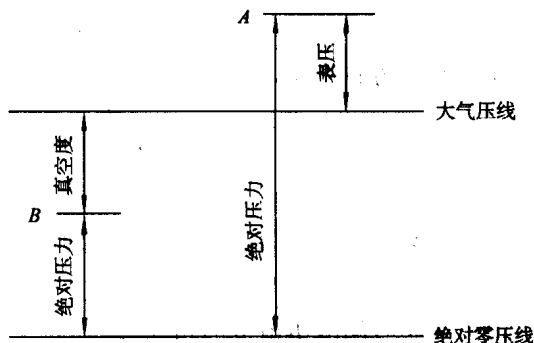


图 1-1 绝对压力、表压和真空度的关系

为了避免混淆,在工程计算中,必须在其单位后加括号注明压力的不同表示方法。例如: $p = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$ (表压), $p = 300 \text{ mmHg}$ (真空度), $p = 4.9 \times 10^5 \text{ Pa}$ (绝对压力)等。

1-1-2 流体静力学基本方程

一、静力学方程的导出

流体的静止状态是流体运动的一种特殊形式,它之所以能在设备内维持相对静止状态,是它在重力与压力作用下达到平衡的结果。所以,静止流体的规律就是流体在重力场的作用下流体内部压力变化的规律。该变化规律的数学描述,称为流体静力学基本方程,简称静力学方程。

静力学方程导出的思路是,在静止的流体中取微元体作受力分析,建立微分方程,然后在一定的边界条件下积分。

如图 1-2 所示,在面积为 A 的液柱(方形、矩形、圆形均可)上取微元高度 dz ,对微元体 Adz 作受力分析:

下底面总压力 pA

上底面总压力 $-(p+dp)A$

自身重力 $\rho g Adz$

流体静止时,上述三力之和等于零,即

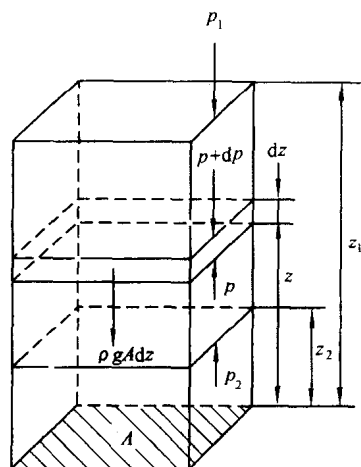
$$dp + \rho g dz = 0 \quad (1-10a)$$

对于不可压缩流体(即 $\rho = \text{常数}$),则上式不定积分求得

$$\frac{p}{\rho} + gz = \text{常数} \quad (1-10b)$$

若取边界条件为: $z = z_1, p = p_1; z = z_2, p = p_2$ 则式(1-10a)定积分得

$$\frac{p_1}{\rho} + gz_1 = \frac{p_2}{\rho} + gz_2 \quad (1-10c) \quad \text{图 1-2 静止流体内部力的平衡}$$



式(1-10a、b、c)均称为流体静力学基本方程式,方程中各项单位为 J/kg。

由式(1-10b)可以看出,同一流体的同一水平面为等压面。等压面可用静止、连续、均一、水平 8 个字来体现,等压面的正确选取是流体静力学基本方程应用的关键所在。基本方程还表明,静止流体内部任一处的压力与其位置及流体密度有关,所在位置愈低、密度愈大,则其压力愈大。而且,液面上方压力有任何数量的改变,液体内部任一点的压力也将有同样大小和方向的改变,即压力可以同样大小传至液体各点处。

二、静力学基本方程的应用

静力学方程的应用十分广泛,如流体在设备或管道内压力变化的测量,液体在储罐内液位的测量,设备的液封高度的确定等,均以静力学方程为依据。以下举例说明。

1. U 形管压差计

图 1-3 为 U 形管压差计。U 形管内装有指示液 A, U 形管两端连接被测的流体 B, 且指示液密度 ρ_A 要大于被测流体的密度 ρ_B 。

U 形管两端的流体压力是不相等的 ($p_1 > p_2$), 两端的压差值

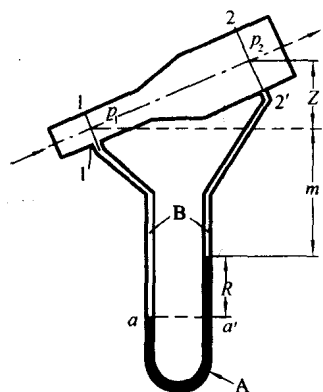


图 1-3 U 形管压差计示意图

($\Delta p = p_1 - p_2$) 可通过静力学方程的应用来得到。如图 1-3 所示, a, a' 二点的静压力相等。而且, 由此向下, 在 U 形管内的任意水平线都为等压面。按静力学方程可得到

$$p_a = p_1 + (m + R)g\rho_B$$

$$p_{a'} = p_2 + \rho_B g(Z + m) + \rho_A gR$$

因为 $p_a = p_{a'}$, 故

$$\Delta p = p_1 - p_2 = Rg(\rho_A - \rho_B) + \rho_B gZ \quad (1-11a)$$

当流体输送管段水平放置时, $Z = 0$ 则上式可化成

$$\Delta p = p_1 - p_2 = Rg(\rho_A - \rho_B) \quad (1-11b)$$

测量气体时, 由于气体密度远小于指示液密度, 即 $\rho_A \gg \rho_B$, 此时上式可简化写成:

$$\Delta p \approx Rg\rho_A$$

【例 1-3】 用 U 形管压差计测量水平管道中 1、2 两点的压差, 分别以 N/m^2 和 mH_2O 表示。已知管内流体为水, $\rho_K = 1000 \text{ kg/m}^3$, 指示液为四氯化碳, $\rho_K = 1595 \text{ kg/m}^3$, 压差计读数为 40 cm。

解 由式(1-11)可得

$$\begin{aligned} \Delta p = p_1 - p_2 &= Rg(\rho_A - \rho_B) = 0.4 \times 9.81 \times (1595 - 1000) \\ &= 2440 (\text{N/m}^2) = 0.248 (\text{mH}_2\text{O}) \end{aligned}$$

2. 液面测量

过程工业中经常需要了解各类容器的贮存量, 或要控制设备里的液面, 这就要对液面进行测定。液面测定是依据同一流体在同一水平面上的压力相等的原则来设计的。如图 1-4 为液柱压差计测定液面的示意图。将 U 形管压差计的两端分别接在贮槽的顶端和底端, 利用 U 形管压差计上 R 的数值, 即可得出容器内液面的高度。所测液面高度与液面计玻璃管粗细无关。

3. 液封

液封在化工生产中应用非常广泛。为了防止设备中气体的泄漏, 往往将带有压力的气体管路插入液体中, 让足够的液层高度阻止气体外泄。这个液层高度可用流体静力学基本方程加以计算而确定。

图 1-5 为乙炔发生炉的液封示意图。若炉内的表压为 p , 则水封高度 Z 可由下式确定:

$$Z \geq \frac{p}{\rho_K g} \quad (1-12)$$

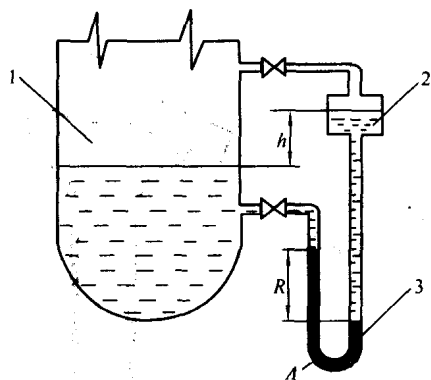


图 1-4 压差法测量液位

1—容器; 2—平衡器的小室; 3—U 形管压差计

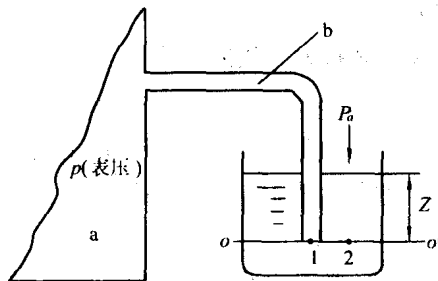


图 1-5 乙炔发生炉的液封图

a—乙炔发生炉; b—液封管