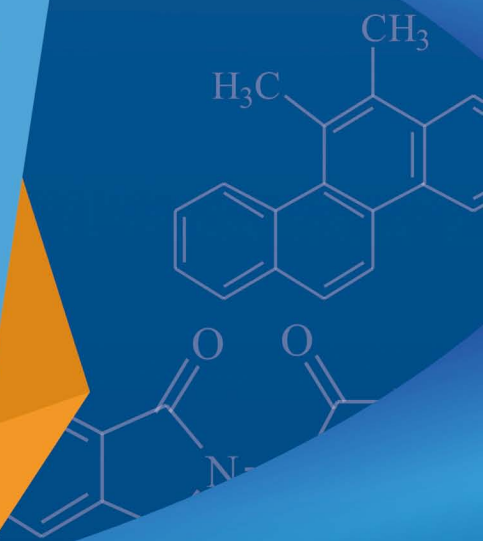


化工

操作原理

HUAGONG
CAOZUO YUANLI

焦桂柱 / 主编



化工

操作原理

HUAGONG
CAOZUO YUANLI

焦桂柱 / 主编



电子科技大学出版社

University of Electronic Science and Technology of China Press

· 成都 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

化工操作原理 / 焦桂柱主编. — 成都: 电子科技大学出版社, 2019.4

ISBN 978-7-5647-6800-3

I. ①化… II. ①焦… III. ①化工单元操作—高等职业教育—教材 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 060959 号

化工操作原理

焦桂柱 主编

策划编辑 罗 雅

责任编辑 万晓桐

出版发行 电子科技大学出版社

成都市一环路东一段 159 号电子信息产业大厦九楼 邮编: 610051

主 页 www.uestcp.com.cn

服务电话 028-83203399

邮购电话 028-83201495

印 刷 成都市和丰印刷有限公司

成品尺寸 185mm×260mm

印 张 12

字 数 300 千字

版 次 2019 年 4 月第一版

印 次 2019 年 4 月第一次印刷

书 号 ISBN 978-7-5647-6800-3

定 价 38.00 元

版权所有 侵权必究

前 言

本书根据教育部颁发的中等职业学校现行化工类及相关专业教学指导方案,结合中等职业学校化工类专业课程改革,并参照化工行业相关技能鉴定标准编写而成。

本教材兼顾就业和高职升学,强调工程技术观点,以能力培养为中心,立足化工厂生产实际,满足学生未来职业发展的需要,适应社会经济发展的要求。

全书共七章,主要介绍化工各单元操作的基本原理以及典型设备的结构及其操作方法。内容包括:第一章绪论、第二章流体流动、第三章流体输送机械、第四章传热、第五章吸收、第六章蒸馏、第七章干燥等。本书可作为中等职业学校化工类及相关专业教学用书,也可作为化工行业相关从业人员培训用书。

本书编写中,充分考虑中等职业学校学生高职升学和就业的实际情况,遵照精简实用的原则,简单而又系统地学习。通过“单元提示”“知识点总结”“单元检测”等内容,开拓学生视野,培养学生自学能力。

本书编者根据多年教学经验,历经多次修改而成。全书由东营职业学院张新锋担任主审。在编写中得到淄博市工业学校石贞芹等化工专业老师的帮助和支持,在此表示感谢。

由于编者水平所限,缺点和错误之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2018年6月

目 录

第一章 绪 论	1
【知识点总结】	5
【单元检测】	6
第二章 流体流动	7
第一节 概 述	7
第二节 流体的物理性质	8
第三节 流体的黏度	12
第四节 流体流动的基本方程	14
第五节 流体流动的阻力	21
第六节 流速和流量的测量	27
【知识点总结】	31
【单元检测】	31
第三章 流体输送机械	34
第一节 概 述	34
第二节 离心泵	35
第三节 其他类型化工用泵	44
第四节 气体输送机械	50
【知识点总结】	59
【单元检测】	59
第四章 传 热	62
第一节 概述	62
第二节 热传导	66
第三节 对流传热	74
第四节 热辐射	82
第五节 换热器	87
【知识点总结】	95
【单元检测】	95

化工操作原理

第五章 吸 收	97
第一节 概述	97
第二节 吸收过程及应用	100
第三节 气液相平衡	102
第四节 传质机理与吸收过程的速率	105
第五节 吸收填料层高度计算	121
第六节 吸收与解吸操作流程	126
【知识点总结】	128
【单元检测】	129
第六章 蒸 馏	131
第一节 概述	131
第二节 双组分溶液的汽-液平衡	132
第三节 蒸馏与精馏原理	138
第四节 双组分连续精馏塔的计算	142
第五节 间歇精馏	153
第六节 特殊精馏	155
【知识点总结】	157
【单元检测】	158
第七章 干 燥	160
第一节 概述	160
第二节 湿空气的性质和湿度图	162
第三节 对流干燥	172
第四节 固体物料的干燥平衡	172
第五节 干燥器	175
【知识点总结】	182
【单元检测】	183
参考文献	186

第一章 绪 论

【学习提示】

1. 了解单元操作的基本类型。
2. 理解单元操作的基本概念。
3. 了解化学工程的发展阶段。

一、化工过程

化学工业是将自然界的各种物质经过化学反应和物理方法处理,制造成生产资料和生活资料的工业。一种产品的生产过程中,从原料到成品往往需要几个或几十个加工过程。其中除了化学反应过程外,还有大量的物理加工过程,统称为化工过程。

化学工业产品种类繁多。各种产品的生产过程中,使用着各种各样的物理加工过程。根据它们的操作原理,可以归纳为应用较广的数个基本操作过程,如流体输送、搅拌、沉降、过滤、热交换、蒸发、结晶、吸收、蒸馏、萃取、吸附以及干燥等。例如,乙醇、乙烯及石油等生产过程中都采用蒸馏操作分离液体混合物,所以蒸馏为一个基本操作过程。又如合成氨、硝酸及硫酸等生产过程中,都采用吸收操作分离气体混合物,所以吸收也是一个基本操作过程。又如尿素、聚氯乙烯及染料等生产过程中,都采用干燥操作以除去固体中的水分,所以干燥也是一个基本操作过程。此外,流体输送和热交换也为基本操作过程,应用更为广泛。这些基本操作过程称为单元操作。任何一种化工产品的生产过程都是由若干单元操作及化学反应过程组合而成的。化学反应在反应器内进行;各个单元操作,也都在相应的设备中进行。例如,蒸馏操作是在蒸馏塔内进行的,吸收操作在吸收塔内进行,干燥操作在干燥器内进行,如图 1-1 所示。不同的单元操作设备其结构有很大不同,为相应的单元操作过程提供必要的条件,使过程能有效地进行。在过程进行中,需要进行操作控制,根据规定的操作指标调节物料的进、出口流量以及内部的温度、压力、浓度及流动状态等,使过程能以适当的速率进行,得到所规定流量的合格产品或中间产品。单元操作不仅在化工生产中应用,而且在石油、冶金、轻工、制药及原子能等工业及生物工程、环境保护工程中也广泛应用。

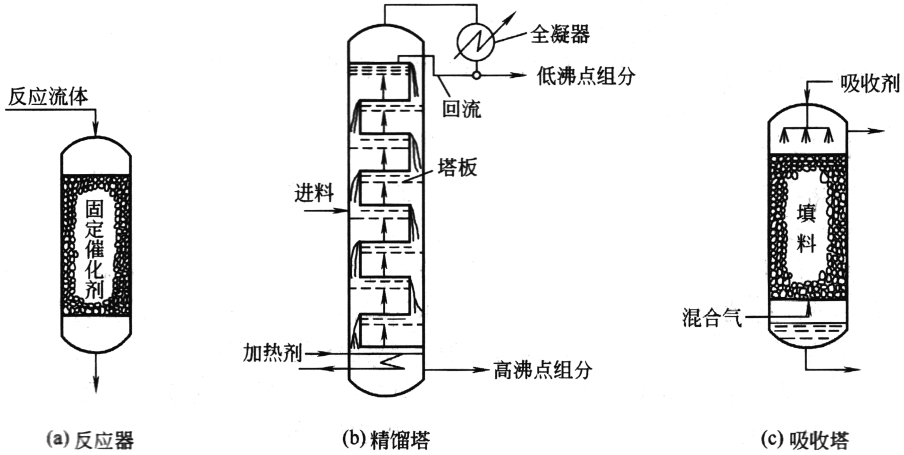


图 1-1 反应器与单元操作设备举例

单元操作按其理论基础可分为下列 3 类。

- (1) 流体流动过程。包括流体输送、搅拌、沉降、过滤等。
- (2) 传热过程(热量传递过程)。包括热交换、蒸发等。
- (3) 传质过程(质量传递过程)。包括吸收、蒸馏、萃取、吸附、干燥、结晶、膜分离等。

流体流动时,流体内部由于流体质点(或分子)的速度不同,它们的动量也就不同,在流体质点随机运动和相互碰撞过程中,动量从速度大处向速度小处传递,这称为动量传递。所以流体流动过程也称为动量传递过程。

动量传递与热量传递和质量传递类似,热量传递是流体内部因温度不同,热量从高温处向低温处传递;质量传递是因物质在流体内部存在浓度差,物质将从浓度高处向浓度低处传递。在流体中的这 3 种传递现象,都是由于流体质点(或分子)的随机运动所产生的。若流体内部有温度差存在,当有动量传递的同时必有热量传递;同理,若流体内部有浓度差存在时,也会同时有质量传递。若没有动量传递,则热量传递和质量传递主要是因分子的随机运动产生的现象,其传递速率较缓慢。要想增大传递速率,需要对流体施加外功,使它流动起来。

由上述可知流体流动的基本原理不仅是流体输送、搅拌、沉降及过滤的理论基础,也是传热与传质过程中各单元操作的理论基础,因为这些单元操作中的流体都处于流动状态。传热的基本原理不仅是热交换和蒸发的理论基础,也是传质过程中某些单元操作(例如干燥)的理论基础。因为干燥操作中不仅有质量传递,而且有热量传递。因此,流体力学、传热及传质的基本原理是各单元操作的理论基础。

人们会注意到上述的单元操作,有许多是用来分离混合物的。沉降与过滤用于非均相物系的分离,包括含尘或含雾的气体、含固体颗粒的悬浮液、由两种不互溶液体组成的乳浊液等。蒸发用于分离由挥发性溶剂和不挥发的溶质组成的溶液;吸收是利用各组分在液体溶剂中的溶解度不同分离气体混合物;蒸馏是利用各组分的挥发度不同来分离均相液体混合物;萃取是利用各组分在液体萃取剂中的溶解度不同来分离液体混合物或固体混合物;吸

附是利用气体或液体中各组分对固体吸附剂表面分子结合力的不同,使其中一种或几种组分进行吸附分离;干燥是对湿固体物料加热,使其所含水分汽化而得到干固体产品的操作;结晶是利用冷却或溶剂汽化的方法,使溶液达到过饱和而析出晶体的操作。膜分离是利用固体薄膜(有机高分子膜或无机膜)或液体薄膜,对液体或气体混合物的选择性透过滤离。

上述分离单元操作中,通常把沉降与过滤归属为机械分离操作,而其余归属为传质分离操作。

二、单元操作中常用的基本概念

在研究化工单元操作时,经常用到五个基本概念,即物料衡算、能量衡算、物系的平衡关系、传递速率及经济核算等。这五个基本概念贯穿于本课程的始终,在这里仅做简要说明,详细内容见各章。

物料衡算与能量衡算,在单元操作设备的设计、操作、研究中,都有重要作用。通过衡算,可以了解设备的生产能力、产品质量、能量消耗以及设备的性能和效率。在单元设备的理论研究中,也要通过衡算建立理论方程。

物料衡算和能量衡算时,要选定衡算系统,既可以是一个单元设备或几个单元设备的组合,也可以是设备的某一部分或设备的微元段。

(一)物料衡算

依据质量守恒定律,进入与离开某一化工过程的物料质量之差,等于该过程中累积的物料质量,即

$$\text{输入量} - \text{输出量} = \text{累积量}$$

对于连续操作的过程,若各物理量不随时间改变,即处于稳定操作状态时,过程中不应有物料的累积。则物料衡算(Material Balance)关系为

$$\text{输入量} = \text{输出量}$$

用物料衡算式可由过程的已知量求出未知量。物料衡算可按下列步骤进行:

(1)首先根据题意画出各物流的流程示意图,物料的流向用箭头表示,并标上已知数据与待求量;

(2)在写衡算式之前,要选定计算基准,一般选用单位进料量或排料量(质量、物质的量或体积等)、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。

(二)能量衡算

本教材中所用到的能量主要有机械能和热能。能量衡算(Energy Balance)的依据是能量守恒定律。机械能衡算将在第二章流体流动中说明;热量衡算也将在传热、蒸馏和干燥等章节中结合具体单元操作有详细说明。热量衡算的步骤与物料衡算的基本相同。

(三)物系的平衡关系

平衡状态是自然界中广泛存在的现象。例如,在一定温度下,不饱和的食盐溶液与固体

食盐接触时,食盐向溶液中溶解,直到溶液为食盐所饱和,食盐就停止溶解,此时固体食盐表面已与溶液形成动平衡状态;反之,若溶液中食盐浓度大于饱和浓度,则溶液中的食盐会析出,使溶液中的固体食盐结晶长大,最终达到平衡状态。一定温度下食盐的饱和浓度,就是这个物系的平衡浓度。当溶液中食盐的浓度低于饱和浓度,则固体食盐将向溶液中溶解。当溶液中食盐的浓度大于饱和浓度,则溶液中溶解的食盐会析出,最终都会达到平衡状态。从这个例子可以看出,平衡关系(Equilibrium Relation)可以用来判断过程能否进行,以及进行的方向和能达到的限度。

(四)传递速率

仍以食盐溶解为例说明。食盐溶液中食盐浓度低时,溶解速率(单位时间内溶解的食盐质量)大;食盐浓度高时,溶解速率小。当溶液达到饱和浓度(即平衡状态)时,不再溶解,即溶解速率为零。由此可知,溶液浓度越是远离平衡浓度,其溶解速率就越大;溶液浓度越是接近平衡浓度,其溶解速率就越小。溶液浓度与平衡浓度之差值,可以看作是溶解过程的推动力(Driving Force)。另外,由实验得知,把一个大食盐块破碎成许多小块,溶液由不搅拌改为搅拌,都能使溶解速率加快。这是因为由大块改为许多小块,能使固体食盐与溶液的接触面积增大;由不搅拌改为搅拌,能使溶液质点对流。其结果能减小溶解过程的阻力(Resistance)。因此,过程的传递速率(Rate of Transfer Process)与推动力成正比,与阻力成反比,即

$$\text{传递速率} = \frac{\text{推动力}}{\text{阻力}}$$

这个关系类似于电学中的欧姆定律。过程的传递速率是决定化工设备的重要因素,传递速率大时,设备尺寸可以小。

(五)经济核算

为生产定量的某种产品所需要的设备,根据设备的型号和材料的不同,可以有若干设计方案。对同一台设备,所选用的操作参数不同,会影响到设备费与操作费。因此,要用经济核算确定最经济的设计方案。

三、化学工程发展阶段

化工原理课程,不是教学生如何合成得到新物质、如何提取新物质、如何表征新物质,这是化学家的工作。化学工程研究的是,如何把化学家们的小试研究成果,开发放大为中试,再开发为生产规模,是在科学实验与化工生产之间架桥的工作。目前,学术界比较公认的讲法是,化学工程的发展经历了四个阶段,即化学工艺学阶段、化工单元操作阶段、传递过程阶段和“三传一反”阶段。“三传一反”即是指动量传递、热量传递、质量传递和化学反应工程。化工发展由最初提出的“优质、高产、低耗”到今天的“安全、环保、节能”,体现“绿色化工”的理念在逐步渗透。

(一)化学工艺学阶段

在20世纪以前的几百年时间里,出现了不少化学工业,如制糖工业、制碱工业、造纸工业等。

介绍每种工业从原料到成品的生产过程,作为一种特殊的知识讲解,这是最早的化学工艺。

(二)化工单元操作阶段

到20世纪初,人们逐渐发现,许多化学工业中,存在共性的操作原理。例如,无论在制糖业还是制碱业,从溶液蒸发得到固体糖或固体碱所遵循的原理是相同的,于是,蒸发成为最早提出的单元操作之一。经不断总结,被称为单元操作的有流体流动与输送、沉降与过滤、固体流态化、传热、蒸发、蒸馏、吸收、吸附、萃取、干燥、结晶、膜分离等。

(三)传递过程阶段

到20世纪50年代,人们又发现,各单元操作之间还存在着共性。例如,传热、蒸发都有热量传递的共性,蒸馏、吸附、吸收、萃取都存在质量传递的共性。于是将单元操作归纳为动量传递、热量传递、质量传递。此即化工传递过程阶段。

(四)“三传一反”阶段

20世纪50年代中期,化学工程中出现了“化学反应工程学”这一新的分支。对化学反应器的研究,不仅要运用化学动力学与热力学原理,而且要运用动量传递、热量传递、质量传递原理。于是“传递过程”与“化学反应”成为当今化学工程学的两大支柱。简称“三传一反”阶段。

现代化工科学与技术阶段

现代化工科学与技术阶段于20世纪90年代产生。该阶段具有四大特征:

特征1.多层次(多尺度)传递、反应与结构转化:(1)微观层次(分子水平层次),(2)亚微观层次(纳米、界面层次),(3)介微观层次(泡、滴、粒、团层次),(4)宏观层次(设备、产品层次),(5)大宏观层次(大环境、全球可持续发展层次)。

特征2.传统化工与高新技术的交叉,产生新的学科研究方向和新的化工分支:(1)计算传递(流体力学、传热、传质)学,(2)可控化学反应工程,(3)分子设计催化剂,(4)新型分离科学与技术(超重力反应与分离技术),(5)高效多相反应器与流体混合新技术,(6)计算化学工程,(7)纳米材料先进制备技术,(8)现代化工检测技术。

特征3.化工学科与其他学科特别是新兴学科的交叉,产生新兴的交叉学科及新兴产业:(1)环境化学工程,(2)能源化学工程,(3)材料化学工程,(4)医药化学工程,(5)生物化学工程,(6)分子化学工程,(7)农业化学工程,(8)安全化学工程,(9)食品化学工程。

特征4.化工学科与化学学科相结合(理工融合),强化基础性研究:(1)能源、环境、化工新材料的基础研究,(2)材料化学与物理,(3)分子模拟与材料设计。

【知识点总结】

一、本章六个概念

化工过程、物料衡算、能量衡算、物系的平衡关系、传递速率、经济核算。

二、常识性知识了解

1. 主要的化工过程有哪些？
2. 单元操作的分类。
3. 化学工程发展的四个阶段及每个阶段的特点。

【单元检测】

一、填空题

1. 单元操作按其理论基础可分为()、()、()三类。
2. 流体流动过程包括()、()等。
3. 传质过程包括()、()、()等。
4. 传热过程包括()、()、()等。
5. “三传一反”包括()、()、()、()。

二、选择题

1. 流体输送过程属于()。
A. 流体流动操作 B. 传热操作 C. 传质操作 D. 以上都不对
2. 吸收属于()。
A. 传质操作 B. 传热操作 C. 分离操作 D. 流体输送操作
3. 影响传递速率的两个因素()。
A. 推动力和阻力 B. 设备尺寸 C. 温度和压力 D. 流体流速
4. 平衡关系可以用来判断()。
A. 过程能否进行 B. 过程进行的方向 C. 过程能达到的限度 D. 以上都对

三、简答题

1. 化工单元操作按其理论基础可分为哪三类？
2. 化工上所说的“三传一反”指什么？
3. 物料衡算和能量衡算的依据是什么？
4. 简述化学工程发展的几个阶段。

第二章 流体流动

【学习提示】

1. 理解密度、压强、表压、绝压、流速、流量、稳定流动和不稳定流动的概念。
2. 理解牛顿黏性定律。
3. 掌握流体流动的两个基本方程及其应用。
4. 理解雷诺实验,掌握判断流动类型的方法
5. 了解阻力来源,了解简单的直管阻力和局部阻力计算方法。
6. 了解常见流量的测速方法。

第一节 概 述

液体和气体统称为流体。流体具有流动性的特征,即其抗剪和抗张的能力很小,无固定形状,随容器的形状而变化,在外力作用下其内部发生相对运动。

在研究流体流动时,常将流体视为由无数流体微团组成的连续介质。所谓流体微团或流体质点是指这样的小块流体:它的大小与容器或管道相比是微不足道的,但是比起分子自由程长度却要大得多,它包含足够多的分子,能够用统计平均的方法来求出宏观的参数(如压强、温度),从而可以观察这些宏观参数的变化情况。连续性的假设首先意味着流体介质是由连续的流体质点组成的,其次还意味着质点运动过程的连续性。在本书的研究范围内,可以将流体视为连续介质。但对于高真空下的气体等特殊情况,就不能将流体视为连续介质了。

在化工生产中所处理的物料有很多是流体,流体流动的基本原理及其流动规律主要应用于以下几个方面。

(1)流体的输送:通常设备之间是用管道连接的,要想把流体按所要求的条件,从一个设备输送到另一个设备,需要选用适宜的流速,以确定输送管路的直径。在流体的输送过程中,常常要采用流体输送设备,因此需要计算流体在流动过程中应加入的外功,为选用流体输送设备提供依据。这些都要应用流体流动规律的数学表达式进行计算,即研究推动流体流动的原因及流体流动中的特性。

(2)压强、流速和流量的测量:为了解和控制生产过程,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多以流体的静止或流动规律为依据。

(3)除了流体输送外,化工生产中的传热、传质过程以及化学反应大多是在流体流动状态下进行的,流体流动状态对这些单元操作有着很大影响。为了能深入理解这些单元操作的原理及为强化设备提供适宜的流动条件,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本课程的重要基础。本章着重讨论流体流动过程的基本原理及流体在管内的流动规律,并运用这些原理与规律去分析和计算流体的输送问题。

第二节 流体的物理性质

一、流体的密度

单位体积流体的质量,称为流体的密度,其表达式为

$$\rho = \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (2-1)$$

当 $\Delta V \rightarrow 0$ 时, $\Delta m / \Delta V$ 的极限值即为流体某点的密度,即

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (2-1a)$$

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 。

流体的密度随流体的种类、温度、压强的变化而变化,对一定流体,密度是压强 p 和温度 T 的函数,可用下式表示:

$$\rho = f(p, T) \quad (2-2)$$

式中 p ——流体的压强, Pa ;

T ——流体的温度, K 。

液体的密度随压强的变化甚小(极高压强下除外),可忽略不计,故常称液体为不可压缩流体,但其随温度的变化稍有改变。气体的密度随压强和温度的变化较大,当压强不太高、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

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT \quad (2-3)$$

得
$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (2-4)$$

式中 p ——气体的压强, kPa ;

T ——气体的温度, K ;

M ——气体的摩尔质量, kg/kmol ;

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

对于一定质量的理想气体,其体积、压强和温度之间的变化关系为

$$\frac{pV}{T} = \frac{p'V'}{T'}$$

所以,气体密度也可按下式计算

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0 p}{T p_0} \quad (2-5)$$

式中 ρ_0 为标准状态下气体的密度; T_0 、 p_0 分别为标准状态下气体的温度和压强。

化工生产中遇到的流体常常不是单一组分,而是由若干组分所构成的混合物。对于气体混合物,可按理想气体计算密度。但式中气体的摩尔质量 M 应以混合气体的平均摩尔质量 M_m 代替,即

$$M_m = M_1 x_1 + M_2 x_2 + \cdots + M_n x_n \quad (2-6)$$

式中 M_1, M_2, \cdots, M_n —— 气体混合物中各组分的摩尔质量;

x_1, x_2, \cdots, x_n —— 气体混合物中各组分的摩尔分数。

气体混合物的组成通常以体积分数表示。对于理想气体,体积分数与摩尔分数相等。对于液体混合物,各组分的组成常用质量分数表示。若混合前后体积不变,则 1kg 混合液的体积等于各组分单独存在时的体积之和,则可由下式求出混合液体的密度 ρ_m 。

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{w1}}{\rho_1} + \frac{x_{w2}}{\rho_2} + \cdots + \frac{x_{wn}}{\rho_n} \quad (2-7)$$

式中 $x_{w1}, x_{w2}, \cdots, x_{wn}$ —— 液体混合物中各组分的质量分数;

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

ρ_m —— 液体混合物的平均密度, kg/m^3 。

二、流体的压强

在日常生活和化工生产中经常提到各种压强,下面简单了解。

(一) 流体的压强

1. 定义和单位

垂直作用于单位面积上的表面力称为流体的静压强,简称压强。流体的压强具有点特性。工程上习惯上将压强称之为压力。

在 SI 中,压强的单位是帕斯卡,以 Pa 表示。但习惯上还采用其他单位,它们之间的换算关系为

$$1 \text{ atm} = 1.033 \text{ kgf}/\text{cm}^2 = 760 \text{ mmHg} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O} = 1.0133 \text{ bar} = 1.0133 \times 10^5 \text{ Pa} \quad (2-8)$$

2. 压强的基准

压强有不同的计量基准:绝对压强、表压强、真空度。

绝对压强是以绝对零压作起点计算的压强,是流体的真实压强。

表压强是指压强表上的读数,表示被测流体的绝对压强比大气压强高出的数值,即

$$\text{表压强} = \text{绝对压强} - \text{大气压强} \quad (2-9)$$

真空度是指真空表上的读数,表示被测流体的绝对压强低于大气压强的数值,即

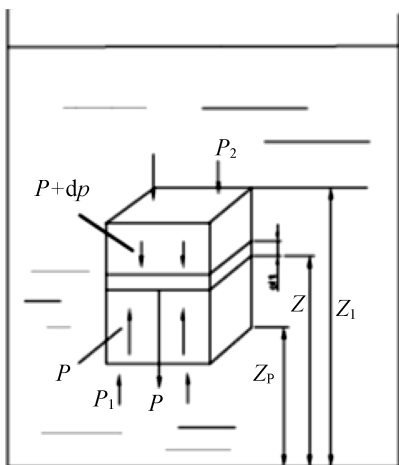
$$\text{真空度} = \text{大气压强} - \text{绝对压强} \quad (2-10)$$

(二) 流体压强的特性

流体压强具有以下两个重要特性:①流体压力处处与它的作用面垂直,并且总是指向流体的作用面;②流体中任一点压力的大小与所选定的作用面在空间的方位无关。

三、流体静力学基本方程

如图 2-1 所示的容器中盛有密度为 ρ 的均质、连续不可压缩静止液体。如流体所受的体积力仅为重力,并取 z 轴方向与重力方向相反。若以容器底为基准水平面,则液柱的上、下底面与基准水平面的垂直距离分别为 Z_1 、 Z_2 。现于液体内部任意划出一底面积为 A 的垂直液柱。设(1)向上作用于薄层下底的总压力, PA (2)向下作用于薄层上底的总压力, $(P+dp)A$ (3)向下作用的重力,由于流体处于静止,其垂直方向所受到的各力代数和应等于零,简化可得 $dp/\rho = -gdz$ 。



由定积分

$$\int_{p_2}^{p_1} \frac{dp}{\rho} = \int_{z_2}^{z_1} -g dz \quad (2-11)$$

得

$$z_1 g + \frac{p_1}{\rho} = z_2 g + \frac{p_2}{\rho} \quad (2-12)$$

$$p_2 = p_1 + \rho g(z_1 - z_2) \quad (2-13)$$

关于流体静力学方程使用说明:

(1)适用条件。

重力场中静止的,连续的同一种不可压缩流体(或压力变化不大的可压缩流体,密度可近似地取其平均值)。

(2)衡算基准。

衡算基准不同,方程形式不同。

(3) 压强或压强差的大小可用某种液体的液柱高度表示,但必须注明是何种液体。

(4) 物理意义。

① 总势能守恒。重力场中在同一种静止流体中不同高度上的微元其静压能和位能各不相同,但其总势能保持不变。

② 等压面。在静止的、连续的同一种液体内,处于同一水平面上各点的静压强相等(静压强仅与垂直高度有关,与水平位置无关)。

静止液体内任意点处的压强与该点距液面的距离呈线性关系,也正比于液面上方的压强。

③ 传递定律。液面上方的压强大小相等地传遍整个液体。

(5) 流体静力学方程的应用。

流体静力学原理的应用很广泛,它是连通器和液柱压差计工作原理的基础,还用于容器内液柱的测量,液封装置,不互溶液体的重力分离(倾析器)等。解题的基本要领是正确确定等压面。本节介绍它在测量液体的压力和确定液封高度等方面的应用。

① 压力的测量如图 2-2 所示。

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——液柱压差计。液柱压差计可测量流体中某点的压力,亦可测量两点之间的压力差。常见的液柱压差计有以下几种。普通 U 形管压差计、倒 U 形管压差计、倾斜 U 形管压差计、微差压差计。

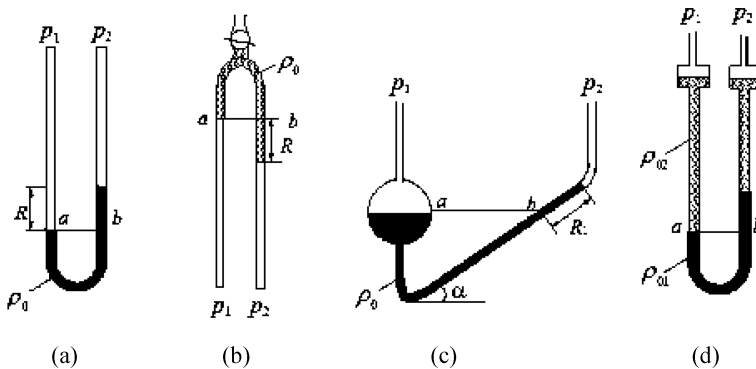


图 2-2 压力的测量

② 液封高度。

液封在化工生产中被广泛应用:通过液封装置的液柱高度,控制器内压力不变或者防止气体泄漏。为了控制器内气体压力不超过给定的数值,常常使用安全液封装置(或称水封装置)如图 2-3 所示,其目的是确保设备的安全,若气体压力超过给定值,气体则从液封装置排出。