



普通高等教育“十三五”规划教材

化工原理

HUAGONGYUANLI



赠教学课件

朱明娟 刘玉星 黄浩 主编



延边大学出版社

普通高等教育“十三五”规划教材

化 工 原 理

主 编 朱明娟 刘玉星 黄 浩

延边大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

化工原理/朱明娟,刘玉星,黄浩主编. —延吉:
延边大学出版社, 2017.1

ISBN 978-7-5688-1811-7

I. ①化… II. ①朱… ②刘… ③黄… III. ①化工原
理—高等学校—教材 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 027194 号

化工原理

主编:朱明娟 刘玉星 黄浩

责任编辑:王思宏

封面设计:曾宪春

出版发行:延边大学出版社

社址:吉林省延吉市公园路 977 号 邮编:133002

网址:<http://www.ydcbs.com>

E-mail:ydcbs@ydcbs.com

电话:0433-2732435

传真:0433-2732434

发行部电话:0433-2732442

传真:0433-2733266

印刷:北京文星印刷厂

开本:787×1092 毫米 1/16

印张:14

字数:350 千字

版次:2017 年 1 月第 1 版

印次:2017 年 1 月第 1 次

ISBN 978-7-5688-1811-7

定价:38.00 元

前言

我国的高等教育已经迈入大众化门槛。在坚持精英教育办学层次的基础上,培养研究型、复合型、应用型人才是当前研究的重要课题。按照培养复合型与应用型人才的要求和特点,应着重加强培养复合型与应用型人才的工程素质与实践能力。化工原理是化工类专业的基础课之一,是一门应用型课程,它不但要阐明过程的基本规律,而且面临的是真实的、复杂的实际生产问题。将工程观点以及研究工程问题的方法论贯穿始终,加强实习、实验、设计等实践环节的培养,提高学生的实践能力,培养学生的工程素质是编者编著本书的根本出发点。

从宏观上,本书将认识实习、化工原理、化工原理实验、化工原理课程设计与生产实习五个环节紧密联系起来,充分体现实践与理论的辩证关系。加强学生对化工生产基本单元过程的理解,实现从感性认识到理性认识的结合。

全书共分七章,包括:绪论、流体流动与输送、传热、气体吸收、蒸馏、干燥和蒸发与结晶技术。每章后面附有适量的习题。

本书可以作为普通高等学校化学化工类复合型与应用型人才培养的试点教材,也可供炼油、冶金、能源、轻工、制药、环保、材料及安全等有关行业的科研、设计及生产单位的科技人员参考。

限于编者的学识和水平,书中疏漏不妥之处在所难免,恳请读者指正。

目录

第一章 绪论	1
第一节 化工生产过程与单元操作	1
第二节 化工原理课程的任务及特点	2
第三节 基本知识点回顾	2
复习题	5
第二章 流体流动与输送	6
第一节 流体静力学	6
第二节 管内流体流动基本方程式	12
第三节 管内流体流动阻力	17
第四节 流量测量	28
第五节 液体输送设备	32
第六节 气体输送设备	42
复习题	46
第三章 传 热	50
第一节 传热的基本概念和理论	50
第二节 热传导	53
第三节 对流传热	60
第四节 稳定传热过程的计算	69
第五节 换热器	81
复习题	87
第四章 气体吸收	89
第一节 概述	89

第二节	气液相平衡	92
第三节	传质机理与吸收速度方程	99
第四节	填料吸收塔的计算	109
复习题		122
第五章	蒸馏	123
第一节	概述	123
第二节	溶液的气液相平衡	124
第三节	蒸馏与精馏原理	130
第四节	双组分连续精馏塔的计算	133
第五节	间歇精馏	155
复习题		157
第六章	干燥	158
第一节	概述	158
第二节	湿空气的热力学基础	160
第三节	干燥器的物料衡算和热量衡算	170
第四节	干燥过程的机理	178
第五节	干燥设备	184
复习题		190
第七章	蒸发与结晶技术	191
第一节	单效蒸发	191
第二节	多效蒸发	197
第三节	蒸发设备	202
第四节	结晶分离技术	208
复习题		215
参考文献		217

第一章

绪 论

第一节 化工生产过程与单元操作

化学工业是将自然界中的各种原料加工成有用产品的工业。一种产品的生产过程中,从原料到产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。

化学生产的原料不同,产品不同,经历的加工过程就会不同,从而会形成各种各样的化工生产过程。任一化工产品的生产过程都是由化学反应和若干物理操作串联而成,所以不必将每一生产过程都作为一种特殊的或独有的技术去研究,只需研究组成生产过程的每一个单独操作即可。这些物理操作统称为化工单元操作,简称单元操作。

单元操作可作用于不同的化工生产过程。根据单元操作所遵循的基本规律,可将其划分为三大类:

- (1) 遵循流体动力基本规律的单元操作,包括流体输送、过滤、沉降、固体流态化等。
- (2) 遵循热量传递基本规律的单元操作,包括加热、冷却、蒸发等。
- (3) 遵循质量传递基本规律的单元操作,包括吸收、蒸馏、吸附、萃取、干燥、结晶、膜分离等。

随着对单元操作研究的不断深入,科研工作者发现遵循流体动力基本规律的单元操作大都涉及流体流动,并伴随着动量的传递,所以都可以用动量传递理论去研究;其余两大类单元操作则可分别用热量传递理论和质量传递理论去研究。各种单元操作都可以建立在动量传递、热量传递、质量传递这三种传递理论的基础之上,三种传递现象中存在相似的规律和内在的联系,“三传”理论作为一根主线贯穿了上述所有的单元操作。

各单元操作都在相应的设备中进行。例如,蒸馏操作在蒸馏塔内进行,吸收操作在吸收塔内进行,干燥操作在干燥器内进行。单元操作设备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。单元操作不仅用在化工生产中,而且在石油、冶金、轻工、制药、核工业及环境保护工程中也有广泛应用。

第二节 化工原理课程的任务及特点

化工原理课程是化工及其相关专业的一门基础技术课程,是自然科学的基础课向工程学科的专业课过渡的入门课程,主要研究化工单元操作的基本原理和基本规律、所用典型设备的结构、设备工艺尺寸的计算或设备选型。本课程与传统的自然科学基础课有所区别,它具有工程学科特点,与实践活动联系更加紧密,涉及各种工程实际问题。

本课程在不断完善的过程中逐渐形成了两套研究方法,即实验研究法(经验法)和数学模型法(半经验半理论法)。实验研究法能够跳过方程的建立,直接观察变量间的关系。但如果实验中的设备规格、物料种类和状态等不断变化,相应的工作量就会大大增加,研究效率及准确度会大打折扣。数学模型法则是建立在对过程机理的探索之上,通过对实际问题的合理简化得出数学模型,该法较实验研究法更能反映实际过程的真实情况,因此在化工领域中发展较为迅速。

本课程的实践性很强,学生在学习的过程中应试着用“工程”的观点看待问题和分析问题,有意识地培养自己运用基本原理分析、解决问题的能力。通过这门课程的学习,应初步掌握以下技能:针对具体的生产环境、条件,经济、合理地选择单元操作及其相应设备;可进行典型工艺的理论计算和设备设计;正确操作和调节生产过程;能够分析生产中的故障成因。

第三节 基本知识点回顾

研究单元操作离不开物料衡算、能量衡算等基本知识点,下面对这些知识点进行一个扼要的回顾。

一、物理量的单位



1. 单位制与单位换算

任何物理量都要用数值和单位共同表示。由于历史、地区及学科的不同要求,对基本量及单位的选择也有所不同,因而产生了多种不同的单位制度。目前,国际上逐渐统一采用国际单位制(SI),它由基本单位和包括辅助单位在内的导出单位构成。我国采用中华人民共和国法定计量单位(简称法定单位),它以国际单位制为基础,根据我国情况,适当增加了一些其他单位构成。

在查阅文献及参考书时,可能遇到多种单位制度并存的情况,使用时要换算成目前采用



的单位制度。

同一物理量,单位不同,数值也不同。例如,重力加速度 g ,在法定单位制中的单位为 m/s^2 ,数值约为 9.81;在物理单位制中的单位为 cm/s^2 ,数值约为 981。二者包括单位在内的比值称为换算因子,即重力加速度 g 在物理单位制和法定单位制间的换算因子为

$$\frac{981\text{cm/s}^2}{9.81\text{m/s}^2}=100\text{cm/m}$$

任何单位换算因子都是两个相等量之比,所以包括单位在内的任何换算因子本质上都是 1,任何物理量乘以或除以单位换算因子,都不会改变原量的大小。很多化学化工手册上均列出了常用单位的换算因子,可以直接使用;复杂单位的换算因子无表可查时,可将其分解成较简单的单位逐个换算。

【例 1-1】 从相关化学手册中查得 0°C 下水的黏度为 1.792cP [$1\text{cP}=0.01\text{P}=0.01\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{s})$],试将其单位换算成帕·秒。

解 先查出原单位与新单位间的换算关系

$$1\text{g}=\frac{1}{1000}\text{kg}$$

$$1\text{cm}=\frac{1}{100}\text{m}$$

$$1\text{N}=1\text{kg}\cdot\text{m/s}^2$$

$$1\text{Pa}=1\text{N/m}^2$$

再代入上述换算关系

$$\mu=1.7921\text{cP}$$

$$=1.7921\times 10^{-2}\frac{\text{g}}{\text{cm}\cdot\text{s}}$$

$$=\left(1.7921\times 10^{-2}\frac{\text{g}}{\text{cm}\cdot\text{s}}\right)\left(\frac{100\text{cm}}{\text{m}}\right)\left(\frac{\text{kg}}{1000\text{g}}\right)$$

$$=\left(1.7921\times 10^{-3}\frac{\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}}{\text{m}^2\cdot\text{s}^2}\right)\left(\frac{\text{s}^2\cdot\text{N}}{\text{kg}\cdot\text{m}}\right)$$

$$=\left(1.7921\times 10^{-3}\frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{m}^2}\right)\left(\frac{\text{m}^2\cdot\text{Pa}}{\text{N}}\right)$$

$$=1.7921\times 10^{-3}\text{Pa}\cdot\text{s}$$

2. 单位一致性

化工计算中的公式可分为物理方程和经验公式。物理方程是根据物理规律建立的,公式中的符号(比例系数是除外)各代表一个物理量,将某一单位制的数据代入物理方程中,解得的结果也属于同一单位制。所以,物理方程又称为单位(或因次)一致性方程,使用时必须保持各项单位的一致性。经验公式是根据实验数据整理总结出来的,式中每一个符号只代表物理量数字部分,它们的单位必须采用指定单位,因此经验公式也称为数字公式。若计算过程中物理量的单位与公式中规定的单位不相符,则应先将已知的数据换算成经验公式中指定的单位后才能进行运算。

二、重要衡算关系式

物料衡算和能量衡算在化工单元操作设备的设计、选型及操作优化中都有重要作用。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。

进行物料和能量衡算时,首先需选定衡算范围,既可以是一个生产过程或一个单元设备,也可以是设备的某一局部。同时,也需选定衡算基准。对连续操作常以单位时间为基准,对间歇操作,常以一个操作循环为基准。

1. 物料衡算

物料衡算是以生产过程或生产单元设备为研究区域,对其进、出口处物料进行定量计算。通过物料衡算可计算原料与产品间的定量转变关系,以及各原料的消耗量,各种中间产品、副产品的产量、消耗量及组成。物料衡算遵循质量守恒定律,即输入的物料质量等于输出的物料质量与累积的物料质量之和

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

若衡算对象为稳态过程,即过程中无物料积存,可将衡算关系简化为

$$\text{输入量} = \text{输出量}$$

物料衡算可按下列步骤进行:

(1)根据研究过程的实际情况绘制出简明流程示意图,并标明设备、各股物料的数量和单位以及具体流向。

(2)明确衡算范围。可以是单个设备或若干个设备串联而成的生产过程,也可以是设备的某一部分,视实际情况而定。

(3)规定衡算基准。一般地,连续操作中常以单位时间为基准;间歇操作中则以一批参与过程的物料为基准。

(4)列出衡算式,求解未知量。

【例 1-2】 利用常压操作的连续精馏塔分离甲醇—水溶液,已知进料流量 F 为 1200kg/h ,甲醇组成 x_F 为 0.30 ,馏出液甲醇含量 x_D 为 0.95 ,且占原料液中甲醇含量的 0.97 ,试求塔底釜液的甲醇含量 x_W ,题中的甲醇含量均以摩尔分数计。

解 本题拟采用单位时间 h 为基准。同时,需将进料量由质量流量转换为摩尔流量。进料的平均摩尔质量

$$M = 0.3 \times 32 + (1 - 0.3) \times 18 = 22.2 (\text{kg/kmol})$$

所以
$$F = 1200 \div 22.2 = 54.1 (\text{kmol/h})$$

连续操作过程中“输入=输出”,所以 $F = D + W$ 。

又
$$\frac{D x_D}{F x_F} = 0.97$$

联立,得

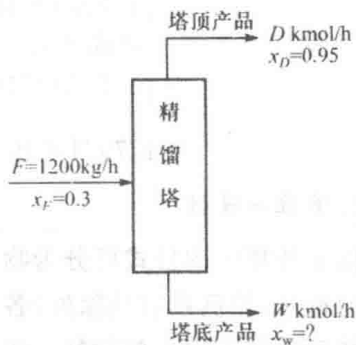


图 1-1



$$D=16.6\text{kmol/h}$$

$$W=37.5\text{kmol/h}$$

根据甲醇的质量守恒,有

$$Fx_F = Dx_D + Wx_W$$

所以,塔底釜液的甲醇含量

$$x_W = 0.01$$

2. 能量衡算

化工生产中的主要能量形式为热能和机械能。若操作中涉及几种不同形式的能量,则需进行总能量衡算;若只涉及热能,则衡算关系可简化为热量衡算。因为化工过程中热交换广泛存在,所以本课程主要探讨能量衡算中的热量衡算。能量衡算遵循能量守恒定律,以热量的形式体现

$$\text{输入量} = \text{输出量} + \text{耗散量}$$

热量衡算与物料衡算的方法大致相同,但热量衡算需指明基准温度,因为焓的大小与从哪一个温度算起有关。物料的焓通常从 0°C 算起,所以习惯上选择 0°C 为基准温度,无特殊说明均按此计算。



复习题



1-1 已知摩尔气体常量 $R=82.06\text{atm}\cdot\text{cm}^3/(\text{mol}\cdot\text{K})$,试通过单位换算,将其用 SI 制单位 $\text{J}/(\text{mol}\cdot\text{K})$ 表示。

1-2 在化工手册中查得黄铜在 20°C 时的导热系数为 $110\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,若用工程单位 $\text{kcal}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot^\circ\text{C})$ 表示,换算后的数值应为多少?

1-3 化工生产中经常会对含水溶液进行前期的浓缩处理,10%(质量分数,下同)的某水溶液经第一阶段的蒸发操作可浓缩至 25%,接着将浓缩后的溶液进行第二阶段的蒸发,最后可得 45% 的浓缩液。若该工段的处理能力为 4200kg/h ,试求各阶段蒸发的水量。

第二章

流体流动与输送

化工生产中所涉及的物料(原料、半成品以及产品等)大多为流体或具有流体的性质。所谓流体是指气体和液体的总称,其特征是具有流动性。化工生产中的流体输送、热量传递、质量传递以及化学反应等大多是在流体流动的情况下完成的。例如,通过各种设备之间的连接管路实现流体输送;强化被加热(冷却)流体的对流来提高传热速率,以缩短加热时间或提高传热设备的使用效率;加强流体的流动程度来强化对流传质过程等。因此流体流动是化工生产的基础。

流体流动的本质是在分子微观运动基础上的宏观运动,在化工生产中研究流体流动时通常将流体视为无数流体质点(微团)组成的连续介质,质点间没有间隙,能够用连续函数进行描述。实际流体都是可压缩的,由于液体的体积受压力、温度的变化影响很小,因此通常把液体视为不可压缩流体,而气体的体积受压力和温度变化影响较大,因此将气体视为可压缩流体。

本章将重点介绍流体流动过程的基本原理以及流体在管内流动的规律;为完成一定的流体输送任务所进行的管路计算,包括流体输送管路管径的选择、估算流体流动所需的能量以确定流体输送机械的类型和功率;流速、流量、压力(真空度)等流体流动相关物理量的测定。

第一节 流体静力学

流体静力学是研究流体在外力作用下保持静止或者相对静止的规律。

一、流体基本性质



1. 密度

单位体积流体所具有的质量即为该流体的密度,密度的表达式为

$$\rho = m/V \quad (2-1)$$

式中 ρ ——密度,单位为 kg/m^3

m ——质量,单位为 kg

V ——体积,单位为 m^3

密度是物质的物理性质之一,流体的密度是温度和压力的函数,通常用 $\rho = f(p, T)$ 表示。由于液体分子之间的距离远小于气体,因此除在极高的压力条件下外,压力对液体密度的影响可忽略不计,但密度受温度的变化影响较大,因此在表示流体密度时一定要指明其所处的温度条件。

当化工生产中液体混合物由若干组分构成时,通常将此混合液作为理想溶液进行处理。混合液的总体积为各组分体积之和,混合液的密度可用平均密度 ρ_m 表示。

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{\omega_1}{\rho_1} + \frac{\omega_2}{\rho_2} + \dots + \frac{\omega_n}{\rho_n} \quad (2-2)$$

式中 ρ_m ——混合液的平均密度,单位为 kg/m^3

$\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ ——混合液各组分的质量分数,单位为 kg/kg

$\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——混合液各组分的密度,单位为 kg/m^3 。

气体的密度受压力和温度的影响较大,但在压力不太高、温度不太低的情况下,实际气体可视为理想气体,因此可按照理想气体状态方程计算气体密度。

$$pV = nRT = \frac{m}{M}RT$$

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (2-3)$$

式中, p 为气体的绝对压力,单位为 kPa ; n 为气体的物质的量,单位为 kmol ; R 为摩尔气体常量, $8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$; T 为气体的热力学温度,单位为 K ; M 为气体的摩尔质量,单位为 kg/kmol 。

当气体混合物接近理想气体时,仍然可用式(2-3)进行计算,只是气体的摩尔质量需要以相应混合气体的平均摩尔质量 M_m 代替。

$$M_m = M_1 y_1 + M_2 y_2 + \dots + M_n y_n \quad (2-4)$$

式中 $M_1, M_2, \dots, M_n$ ——混合气体中各组分的摩尔质量,单位为 kg/kmol

$y_1, y_2, \dots, y_n$ ——混合气体中各相应组分的摩尔分数,单位为 kmol/kmol 。

气体混合物的平均密度可用式(2-5)进行计算。

$$\rho_m = \rho_1 y_1 + \rho_2 y_2 + \dots + \rho_n y_n \quad (2-5)$$

【例 2-1】 空气中各组分的摩尔分数为氧气:0.21,氮气:0.78,氩气:0.01。(1)求标准状况下空气的平均密度 ρ_0 ; (2)求绝对压力为 $3.8 \times 10^4 \text{ Pa}$ 、温度为 20°C 时空气的平均密度 ρ , 并比较两者的结果。

解 (1)已知空气中各组分的摩尔质量: $M_{\text{O}_2} = 32, M_{\text{N}_2} = 28, M_{\text{Ar}} = 40$, 单位均为 kg/kmol 。

①先求出标准状况下空气的平均摩尔质量 M_m :

$$M_m = M_{\text{O}_2} y_{\text{O}_2} + M_{\text{N}_2} y_{\text{N}_2} + M_{\text{Ar}} y_{\text{Ar}} = 32 \times 0.21 + 28 \times 0.78 + 40 \times 0.01 = 28.96 (\text{kg}/\text{kmol})$$

$$\textcircled{2} \quad \rho = \frac{M_m p_0}{RT_0} = \frac{101.33 \times 28.96}{8.314 \times 273} = 1.293 (\text{kg/m}^3)$$

(2) $3.8 \times 10^4 \text{ Pa}$ 、 20°C 时空气的平均密度 ρ :

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0 p}{T p_0} = 1.293 \times \frac{3.8 \times 10^4 \times 273}{101.33 \times 10^3 \times (273 + 20)} = 0.452 (\text{kg/m}^3)$$

由计算结果可看出:空气在标准状况下的密度与其在 $3.8 \times 10^4 \text{ Pa}$ 、 20°C 状态下的密度相差很大,因此气体的密度一定要标明状态。

2. 压力

流体在单位面积上所受到的垂直作用力称为流体的压强,但在工程上仍然习惯称为压力。

$$p = \frac{P}{A} \quad (2-6)$$

式中 p ——流体的压力,单位为 N/m^2 或 Pa

P ——垂直作用于流体面积 A 上的总压力,单位为 N

A 为作用于流体的表面积,单位为 m^2

压力的单位包括: Pa (帕斯卡)、 atm (大气压)、 at (工程大气压)、 mH_2O (水柱高度)、 mmHg (汞柱高度)、 kgf/cm^2 (千克力)、 bar (巴)等。

$$1 \text{ atm (标准大气压)} = 101325 \text{ Pa} = 760.0 \text{ mmHg} = 10.33 \text{ mH}_2\text{O} = 1.033 \text{ kgf/cm}^2 = 1.0133 \text{ bar}$$

$$1 \text{ at (工程大气压)} = 98070 \text{ Pa} = 735.6 \text{ mmHg} = 10.0 \text{ mH}_2\text{O} = 1.0 \text{ kgf/cm}^2 = 0.9807 \text{ bar}$$

流体的压力是相对值,当以绝对真空作为基准时称为绝对压力。以流体所在的当地大气压为基准时,若压力大于大气压,两者之差称为表压。通常压力设备上压力表的读数为容器内的表压。

$$\text{表压} = \text{绝对压力} - \text{大气压}$$

当容器内的压力小于当地的大气压时,可用真空度表示大气压与绝对压力的差值。设备上安装的真空表读数为真空度。真空度也可用负的表压进行表示。

$$\text{真空度} = \text{大气压} - \text{绝对压力} = -\text{表压}$$

绝对压力、表压以及真空度三者之间的关系可用图 2-1 直观表示。

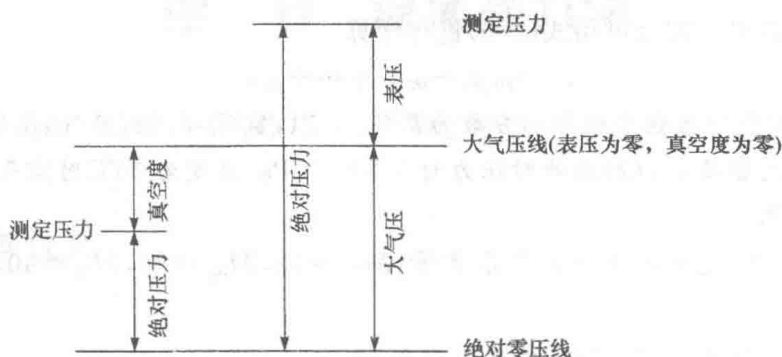


图 2-1 绝对压力、表压以及真空度三者之间的关系

二、流体静力学基本方程式

在重力场中静止或相对静止的流体内部压力随流体高度变化的数学表达式称为流体静力学基本方程。

从图 2-2 所示敞口容器的静止流体中任取一垂直液体柱,该液柱的横截面积为 A ;液体视为不可压缩流体,密度为 ρ ;液面上方受到大气压力 p_0 ;液柱上截面受到的压力为 p_1 ,距离容器底面的垂直高度为 z_1 ;液柱下截面受到的压力为 p_2 ,距离容器底面的垂直高度为 z_2 。在重力场中对该液柱在垂直方向上进行受力分析。

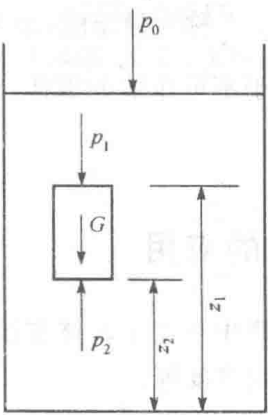


图 2-2 流体静力学基本方程推导

上端面受到向下的压力: p_1A

下端面受到向上的压力: p_2A

液柱本身受到向下的重力: $\rho gA(z_1-z_2)$

由于流体处于静止状态,在垂直方向上的合力为零,即

$$p_2A=p_1A+\rho gA(z_1-z_2) \tag{2-7a}$$

化简得

$$p_2=p_1+\rho g(z_1-z_2) \tag{2-7b}$$

若将液柱的上端面取作液面, h 表示液柱高度,则液体内部

任意液面上受到的压力可表示为

$$p=p_0+\rho gh \tag{2-7c}$$

式(2-7b)、式(2-7c)均称为流体静力学基本方程,根据上述各式可以得出以下结论:

(1)在液体上方压力 p_0 不变的情况下,静止的液体内任意一点所受到的压力与流体本身的密度以及该点距离液面的深度 h 有关,因此在静止、连续的同一种液体内,处于相同高度水平面上各点的压力相等,同时将这一水平面定义为等压面。同样,液体内部各点的压力也会随液体上方压力发生同样大小的变化。

(2)将式(2-7c)改写为式(2-7d),压力或压力差的大小可用液柱高度进行表示,由液柱高度和密度共同决定。

$$h = \frac{p - p_0}{\rho g} \quad (2-7d)$$

(3)式(2-7b)两边同除以液体的密度 ρ , 整理后得式(2-7e)。

$$\frac{p_1}{\rho} + z_1 g = \frac{p_2}{\rho} + z_2 g \quad (2-7e)$$

由于液柱的上、下端是任意取的, 因此对于静止液体内部的任一等压面都具有以下关系:

$$\frac{p}{\rho} + z g = \text{常数} \quad (2-7f)$$

式(2-7e)中各项的单位为 J/kg, $\frac{p}{\rho}$ 称为静压能, $z g$ 称为势能。

流体静力学基本方程不仅适用于不可压缩的液体, 对于密度随容器高度变化微小的气体也同样适用。

三、流体静力学基本方程式的应用

流体静力学基本方程在化工生产中可用于流体在设备或管道中的压力测量、液体在储罐内液位的测定以及确定设备的液封高度等。

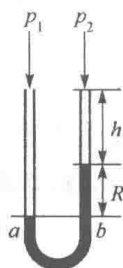


图 2-3 U 形管压差计结构

1. U 形管压差计

U 形管压差计结构如图 2-3 所示。在 U 形玻璃管中加入指示液, 指示液与被测量的流体之间不能发生化学反应及产生互溶, 其密度大于被测量的流体。常用的指示液有水、乙醇、水银、四氯化碳以及液体石蜡等。使用时将 U 形管压差计的两端与管道的两截面相连通, 当所测定管道的两个截面的压力不相等时, U 形管压差计的指示液就会出现相应的高度差, 利用流体静力学基本方程即可计算出两截面的压力差。

被测量的流体的密度为 ρ , U 形管内指示液的密度为 ρ_0 , 与之相连的管道两截面的压力分别为 p_1 、 p_2 , 达到稳定状态后指示液高度差为 R , 根据流体静力学的结论, a 、 b 两点处于同一静止液体的同一水平面上, 即两点所在的平面为等压面, $p_a = p_b$ 。

U 形管的左侧压力等式

$$p_a = p_1 + (R + h) \rho g$$

同样, U 形管的右侧压力等式

$$p_b = p_2 + \rho g h + R \rho_0 g$$

由于

$$p_a = p_b$$

因此

$$p_1 + (R + h) \rho g = p_2 + \rho g h + R \rho_0 g \quad (2-8a)$$

化简得

$$\Delta p = p_1 - p_2 = (\rho_0 - \rho) R g \quad (2-8b)$$

当被测量的流体为气体时, 气体密度相对于指示液可忽略不计, 因此可将式(2-8b)进行

简化

$$p_1 - p_2 = \rho_0 R g \tag{2-8c}$$

2. 液位的测量

在化工生产中,常需要了解容器中液体的储存量,或者要控制设备中的液面,这就需要对液位进行测量。大多数的液位计仍然以流体静力学基本方程为设计依据。

液位计结构如图 2-4 所示。U 形管压差计分别与容器的顶端和底端连接,压差计的读数 R 即表示出容器内液面的高度。

3. 液封

液封是利用液封管插入液体的深度来控制设备内气体的压力,当压力超过所设定值时气体就会从液封管中排出,以保证设备(容器)安全,液封高度可用流体静力学基本方程式计算得到。液封装置如图 2-5 所示。

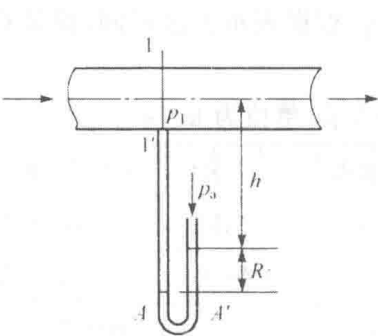


图 2-4 液位计结构

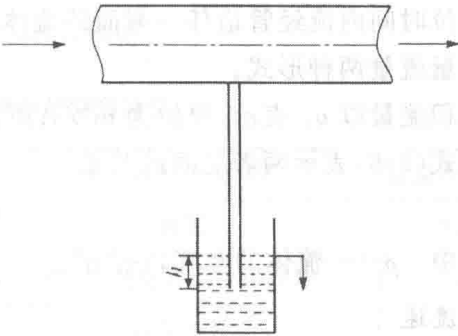


图 2-5 液封装置

【例 2-2】 水在图 2-6 所示的水平管内流动,在管壁 A 处连接一 U 形管压差计,指示液为汞, $\rho_{\text{Hg}} = 13\,600\text{kg/m}^3$, U 形管开口右支管的汞面上注入一小段水(此小段水的压力可忽略不计),当地大气压 $p_0 = 101.33\text{kPa}$, $\rho_{\text{水}} = 1000\text{kg/m}^3$, 其他数据见图(图中水银柱和水柱高度单位为 mm),求 A 处的绝对压力。

解 (1)取 U 形管中处于同一水平面上的 B、C、D 三点,根据等压面的判定条件可得

$$p_B = p_C \qquad p_C = p_D$$

于是可得

$$p_B = p_C = p_D$$

(2)根据流体静力学基本方程式可得

$$p_D = p_0 + R\rho_{\text{Hg}}g = p_0 + 0.25\rho_{\text{Hg}}g = p_B$$

$$p_A = p_B + h\rho_{\text{H}_2\text{O}}g = p_D + h\rho_{\text{H}_2\text{O}}g = p_0 + 0.25\rho_{\text{Hg}}g + 0.20\rho_{\text{H}_2\text{O}}g$$

于是 A 处的绝对压力

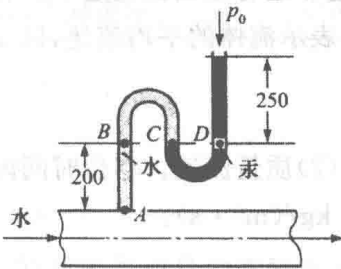


图 2-6