

化工过程原理 及其处理方法探究

HUAGONG GUOCHENG YUANLI JIQI CHULI FANGFA TANJIU

田继兰 孙 洋 贾利侠 编著

中国原子能出版社

化工过程原理 及其处理方法探究

田继兰 孙 洋 贾利侠 编著

中国原子能出版社

图书在版编目(CIP)数据

化工过程原理及其处理方法探究 / 田继兰, 孙洋,
贾利侠编著. -- 北京: 中国原子能出版社, 2019. 3

ISBN 978-7-5022-9711-4

I. ①化… II. ①田… ②孙… ③贾… III. 化工过
程—研究 IV. ①TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 050224 号

内 容 简 介

本书以过程原理的共性和处理工程问题的方法论作为贯穿化工单元操作的两条主线,力求阐述严谨、突出工程学科特点,致力于解决工程实际问题,并注意吸收工业领域的新理论、新技术、新设备等新成果,主要内容包括:引言、流体流动与输送机械、沉降与过滤过程、传热过程、蒸发过程、蒸馏过程、吸收过程、干燥过程、萃取过程、结晶过程、其他传质分离过程等。本书结构合理,条理清晰,内容丰富新颖,是一本值得学习研究的著作,可供从事化工生产和管理的工程技术人员参考。

化工过程原理及其处理方法探究

出版发行 中国原子能出版社(北京市海淀区阜成路 43 号 100048)

责任编辑 张琳

责任校对 冯莲凤

印 刷 三河市铭浩彩色印装有限公司

经 销 全国新华书店

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 17

字 数 413 千字

版 次 2019 年 7 月第 1 版 2019 年 7 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5022-9711-4 定 价 68.00 元

网址: <http://www.aep.com.cn>

E-mail: atomep123@126.com

发行电话: 010-68452845

版权所有 侵权必究

前 言

对于化学工业而言,人们最初以具体的产品为对象,分别进行各种产品生产过程的设备的研究,随着化工生产的发展,人们逐渐认识到不同产品的生产是由为数不多的基本操作和化学反应过程所组成,包括蒸馏、干燥、萃取等单元操作。相较于传统操作,化工单元操作领域的新理论、新装置和应用技术给化工生产企业节约了劳动成本,带来了巨大的经济效益。化工单元操作的发展,将推进化工工艺过程日臻完善,推动化工及相关产业产品品质和效率的跨越。

化工生产岗位上运用频率最高、范围最广的能力和知识大多集中在化工单元过程和操作上。化工单元过程和操作不仅知识面广、实践性强,而且也是基础知识向专业技能过渡的重要媒介。本书在编撰过程中对化工单元操作的内容进行了重新整合、编排,力求突出本书的“先进性、开放性、实用性”特色。

本书共 11 章,以过程原理的共性和处理工程问题的方法论作为贯穿化工单元操作的两条主线,力求阐述严谨、突出工程学科特点,致力于解决工程实际问题,并注意吸收工业领域的新理论、新技术、新设备等,主要内容包括:引言、流体流动与输送机械、沉降与过滤过程、传热过程、蒸发过程、蒸馏过程、吸收过程、干燥过程、萃取过程、结晶过程、其他传质分离过程等。

本书在编撰过程中,参考了大量有价值的文献与资料,吸取了许多人的宝贵经验,在此向这些文献的作者表示敬意和感谢。此外,本书的编撰还得到了出版社领导和编辑的鼎力支持和帮助,同时也得到了学校领导的支持和鼓励,在此一并表示感谢。由于作者自身水平及时间有限,书中难免有错误和疏漏之处,敬请广大读者和专家给予批评指正。

作 者
2018 年 12 月

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 化工生产过程与单元操作	1
1.2 化工过程中的守恒定律	2
1.3 单元操作的研究方法	3
第 2 章 流体流动与输送机械	5
2.1 流体静力学	5
2.2 流体动力学	11
2.3 流体流动阻力	16
2.4 管路计算	26
2.5 流体输送机械	30
2.6 气体输送机械	34
第 3 章 沉降与过滤过程	38
3.1 概述	38
3.2 重力沉降	38
3.3 离心沉降	44
3.4 沉降过程的强化	48
3.5 过滤	49
3.6 过滤过程的强化	60
第 4 章 传热过程	63
4.1 概述	63
4.2 热传导	64
4.3 对流传热	72
4.4 两流体间传热过程的计算	82
4.5 换热器	87
第 5 章 蒸发过程	94
5.1 概述	94
5.2 单效蒸发	95
5.3 多效蒸发	99
5.4 蒸发设备	105
第 6 章 蒸馏过程	114
6.1 概述	114

6.2	两组分溶液的气液相平衡	115
6.3	简单蒸馏与平衡蒸馏	120
6.4	精馏原理和流程	124
6.5	两组分连续精馏的计算	127
第 7 章	吸收过程	145
7.1	概述	145
7.2	气液相平衡	148
7.3	吸收过程的传质速率	153
7.4	吸收塔的计算	159
第 8 章	干燥过程	172
8.1	概述	172
8.2	湿空气的性质与湿度图	174
8.3	固体物料的干燥平衡	181
8.4	干燥速率与干燥过程的计算	183
8.5	干燥器	190
第 9 章	萃取过程	200
9.1	萃取原理与过程	200
9.2	液液相平衡	202
9.3	萃取过程的流程	208
9.4	萃取设备	220
第 10 章	结晶过程	228
10.1	结晶	228
10.2	结晶原理	230
10.3	结晶器	237
第 11 章	其他传质分离过程	240
11.1	吸附	240
11.2	膜分离	248
11.3	超临界流体萃取	256
参考文献	262

第 1 章 引 言

1.1 化工生产过程与单元操作

化工生产过程泛指对原料进行化学加工,最终获得有价值产品的生产过程。由于原料、产品的多样性及生产过程的复杂性,形成了数以万计的化工生产工艺。纵观纷杂众多的化工生产过程都是由化学反应及若干物理操作有机组合而成,其操作步骤多,原料在各步骤中依次通过若干设备,经历相应的处理方式后方能成品。由于化学工业中不同行业所用的原料与所得产品不同,所以各种化工过程的差别很大。

一个化工过程所包含的操作步骤可分为两大类:

- ①以进行化学反应为主,通常是在反应器中进行。
- ②不进行化学反应的物理过程,包括原料预处理过程和反应产物后处理过程。

虽然反应过程是生产过程的核心,但它在工厂的设备投资和操作费用中通常并不占据主要比例,实际上起决定作用的往往是众多的物理过程,它们决定了整个生产的经济效益。构成多种化工产品生产的物理过程按其原理都可归纳为几个基本过程。这些基本的物理操作统称为化工单元操作,简称为单元操作。只有对各种不同的化工生产中的单元操作进行研究,才能揭示其共性的本质、原理和规律。

各种单元操作依据不同的物理化学原理,采用相应的设备,达到各自的工艺目的。对于单元操作,可从不同角度加以分类。根据各单元操作所遵循的基本规律,将其划分为如下几种类型:

- ①遵循流体动力学基本规律的单元操作,包括流体输送、沉降、过滤、搅拌等。
- ②遵循热量传递基本规律的单元操作,包括加热、冷却、冷凝、蒸发等。
- ③遵循质量传递基本规律的单元操作,包括蒸馏、吸收、萃取、吸附、膜分离等。从工程目的来看,这些操作都可将混合物进行分离,故又称为分离操作。

- ④遵循热质传递规律的单元操作,包括气体的增湿与减湿、结晶、干燥等。

另外,还有热力过程、粉体工程等单元操作。

单元操作有下列特点:

- ①它们都是物理性操作,即只改变物料的状态或其物理性质,而不改变其化学性质。
- ②它们都是化工过程中共有的操作,但不同的化工过程中所包含的单元操作数目、名称与排列顺序各异。

- ③某单元操作用于不同的化工过程,其基本原理并无不同,进行该操作的设备往往也是通

用的。当然,具体运用时也要结合各化工过程的特点来考虑。

随着化工的发展,单元操作也不断发展。随着新产品、新工艺的开发或为实现以低碳、可持续发展为目标的绿色化工生产,对物理过程提出了一些特殊要求,又不断地发展出新的单元操作或化工技术,如膜分离、参数泵分离、电磁分离、超临界技术等。同时,以节约能耗、提高效率、洁净无污染生产为特点的集成化工艺将是未来的发展趋势。

随着对单元操作研究的不断深入,人们逐渐发现若干个单元操作之间存在着共性。从本质上讲,所有的单元操作都可分解为动量传递、热量传递和质量传递这三种传递过程或它们的结合。前述的四大类单元操作可分别用动量、热量、质量传递的理论进行研究。三种传递现象中存在着类似的规律和内在联系,可用相类似的数学模型进行描述,并可归结为速率问题进行综合研究。三传(传质、传热、传速)理论的建立,是单元操作在理论上的进一步发展和深化,构成了联系各种单元操作的一条主线。

1.2 化工过程中的守恒定律

1. 质量守恒定律

质量守恒定律是物料衡算的依据,物料衡算反映化工生产过程中各种物料之间的量的关系,是分析生产过程与设备的操作情况,进行过程与设备设计的基础。物质既不会产生,也不会消失,参与任何化工生产过程的物料质量是守恒的。根据质量守恒定律,则在任何一个化工生产过程中,一定时间内向系统输入的物料质量,必等于从该系统输出的物料质量与积累在该系统中的物料质量之和,即

$$\sum F = \sum D + A \quad (1-1)$$

式中, $\sum F$ 为输入物料质量总和; $\sum D$ 为输出物料质量总和; A 为积累的物质质量。

式(1-1)是物料衡算的通式,既适用于连续操作,也适用于间歇操作。由此式可对总物料或其中某一组分列出物料衡算式,然后进行求解。对于操作参数不随时间变化的连续定态过程,积累的物料质量为零,则式(1-1)可以化简为

$$\sum F = \sum D$$

2. 能量守恒定律

能量一般包括机械能、热能、磁能、化学能、电能、原子能等,各种能量之间可以相互转化。化工计算时遇到的不是能量转化问题,而是总能量衡算,有时可以简化为热能或热量衡算。化工生产过程中一般只涉及机械能和热能。

能量衡算的依据是能量守恒定律,能量衡算的步骤与质量衡算的基本相同。能量衡算可写成如下等式

$$\sum Q_{in} = \sum Q_{out} + Q_A \quad (1-2)$$

式中, $\sum Q_{in}$ 为随物料进入系统的总能量; $\sum Q_{out}$ 为随物料离开系统的总能量; Q_A 为系统累积的能量。

对于定态过程, 系统内无能量累积, 即 $Q_A = 0$, 所以能量衡算关系为

$$\sum Q_{in} = \sum Q_{out}$$

式(1-2)也可以写成

$$\sum (\omega H)_{in} = \sum (\omega H)_{out} + Q_A \quad (1-3)$$

式中, ω 为物料的质量; H 为物料的焓。

能量衡算等式既适用于间歇过程, 也适用于连续过程。作热量衡算时也和物料衡算一样, 要规定出衡算基准和范围。此外, 由于焓是相对值, 与从哪一个温度算起有关, 所以进行热量衡算时还要指明基准温度, 简称基温。习惯上选 0°C 为基温, 并规定 0°C 时液态的焓为零, 这一点在计算中可以不指明。有时为了方便, 要以其他温度作基准, 这时应加以说明。

3. 动量守恒定律

动量守恒定律是动量衡算的理论依据, 是研究动量随时间而变化的速率, 即牛顿第二定律。

任何一个过程, 如果不是处于平衡状态, 那么此过程就趋于平衡。过程所处的状态间的距离通常称为过程的推动力, 与推动力相应的称为过程阻力, 它是各种因素对过程速率影响的总体现, 较为复杂, 通常与操作条件及物性有关。过程速率通常表示为

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

不同过程的传递速率不同, 其推动力、阻力和比例系数的表达方式都取决于过程的传递机理。过程速率的大小直接影响到设备的大小与经济效益等。

1.3 单元操作的研究方法

单元操作目前主要的研究方法是实验研究法和数学模型法(又称为半理论半经验法)。

1. 实验研究法

化工过程十分复杂, 除极少数简单的问题可以用理论分析的办法解决以外, 都需要依靠实验研究加以解决。化工研究的任务和目的是通过小型实验、中间试验揭示过程的本质和规律, 然后用于指导生产实际, 进行实际生产过程与设备的设计与改进。实验研究方法直接用实验寻求各变量之间的联系, 避免了方程的建立。但是, 若实验工作必须遍历各种规格的设备和各种不同的物料, 则这样的实验将不胜其烦, 而且失去了指导意义, 因此必须建立实验研究的方法论。为此, 实验研究方法一般以量纲分析和相似论为指导, 依靠试验确定过程变量之间的关系, 把各种因素的影响表示成为由若干个有关因素组成的、具有一定物理意义的无量纲数群的影响, 以使实验结果在几何尺寸上能由小见大, 在物料品种方面能由此及彼, 具有指导意义。

2. 数学模型法

数学模型法需要对实际问题的机理做深入分析,并在抓住过程本质的前提下做出某些合理的简化,得出能基本反映过程机理的物理模型。通常数学模型法所得结果包括反映过程特性的模型参数,其值须通过实验才能确定,并以实验检验模型的可靠性。因而它是一种半理论、半经验的方法。

随着计算机及计算技术的发展,复杂数学模型的求解已成为可能,所以数学模型法将逐步成为单元操作中的主要研究方法。

第 2 章 流体流动与输送机械

2.1 流体静力学

2.1.1 流体的压力

流体垂直作用于单位面积上的力称为流体的压强,习惯上称为流体的压力。作用于整个面积上的力称为总压力。在静止流体中,从各方向作用于某一点的压力大小均相等。

压强的单位是 N/m^2 ,称为帕,以 Pa 表示。其物理表达式为

$$p = \frac{F}{A}$$

式中, p 为流体的静压强, Pa; F 为垂直作用力, N; A 为流体作用的横截面积, m^2 。

此外,压力的大小也间接地以流体柱高度表示,如用 mH_2O 或 mmHg 等。如果流体的密度为 ρ ,则液柱高度 h 与压力 p 的关系为

$$p = \rho gh$$

用液柱高度表示压力时,必须指明流体的种类,如 500 mmHg , $10 \text{ mH}_2\text{O}$ 等。

按压强的定义,压强是单位面积上的压力,其单位应为 Pa,常用单位有 Pa、kPa、MPa。

为了各行各业使用方便,除采用统一的法定计量单位制中规定的压强 Pa 外,还以 atm(物理大气压)、 kgf/cm^2 、 mmHg (毫米汞柱)、 mH_2O (米水柱)、bar(巴)等为压强单位。

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

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

工程上为了使用和换算方便,常将 $1 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ 近似地作为 1 个工程大气压,以 at 表示,于是有

$$1 \text{ at} = 1 \text{ kgf}/\text{cm}^2 = 735.6 \text{ mmHg} = 10 \text{ mH}_2\text{O} = 0.9807 \text{ bar} = 9.81 \times 10^4 \text{ Pa}$$

压力可以有不同计量标准。如果以绝对真空为基准测得的压力称为绝对压力,是流体的真实压力。如果以外界大气压为基准测得的压力则称为表压。工程上用压力表测得的流体压力,就是流体的表压。它是流体的绝对压力与外界大气压力的差值,即

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

表压为正值时,通常称为正压;为负值时,则称为负压。通常把其负值改为正值,称为真空度。真空度与绝对压力的关系为

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

测量负压的压力表,又称为真空表。

绝对压力、表压和真空度的关系如图 2-1 所示。为了避免混淆,在写流体压力时要注明是绝对压力还是表压或真空度。

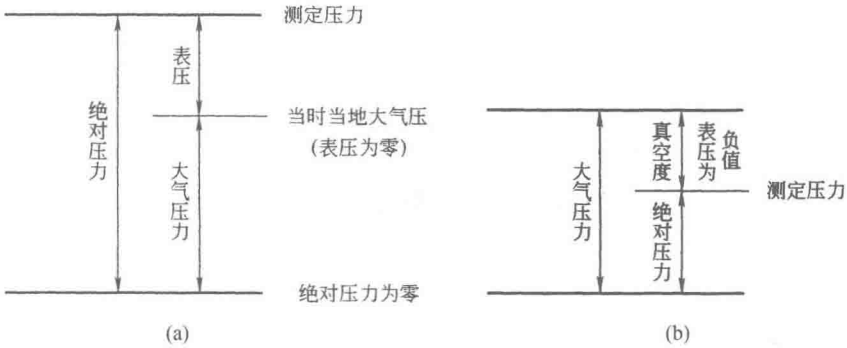


图 2-1 绝对压力、表压和真空度的关系

(a)测定压力>大气压力;(b)测定压力<大气压力

2.1.2 流体静力学基本方程

静止的流体处于相对静止状态时,其所受重力和压力达到静力平衡,此时其内部质点将受到重力和各个方向的压力。由于重力可看作是不变的,压力是变化的,当所受合力为零时,流体就达到力学平衡。流体静力学基本方程是用于描述静止流体内部的压力沿着高度变化的数学表达式。对于不可压缩流体,密度随压力变化可忽略,其静力学基本方程可用下述方法推导。

如图 2-2 所示,假设容器内装有密度为 ρ 的不可压缩液体,在静止液体中取一段液柱,其截面积为 A ,以容器底面为基准水平面,液柱的上、下端与基准水平面的垂直距离分别为 z_1 和 z_2 ,作用在上、下两端面的压力分别为 p_1 和 p_2 。

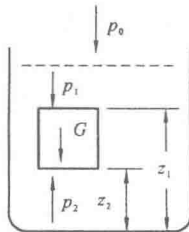


图 2-2 液柱受力分析

重力场中在垂直方向上对液柱进行受力分析:

- ①上端面所受总压力 $F_1 = p_1 A$,方向向下。
 - ②下端面所受总压力 $F_2 = p_2 A$,方向向上。
 - ③液柱的重力 $W = \rho g A (z_1 - z_2)$,方向向下。
- 液柱处于静止时,上述三项力的合力应为零,即

$$p_2 A - p_1 A - \rho g A (z_1 - z_2) = 0$$

整理并消去 A , 得

$$p_2 = p_1 + \rho g (z_1 - z_2) \text{ 或 } \frac{p_1}{\rho} + z_1 g = \frac{p_2}{\rho} + z_2 g \quad (2-1)$$

如果将液柱的上端面取在容器内的液面上, 设液面上方的压力为 p_0 , 液柱高度为 h , $p = p_2$, 则式(2-1)可改写为

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

式(2-1)和式(2-2)称为流体静力学基本方程。

流体静力学基本方程适用于在重力场中静止、连续的同种不可压缩流体, 如液体。而对于气体来说, 密度随压力变化, 但当气体的压力变化不大, 密度近似地取其平均值而视为常数时, 流体静力学基本方程也适用。

当容器液面上方的压力 p_0 一定时, 静止液体内部任一点压力 p 的大小仅与液体本身的密度 ρ 和该点距液面的深度 h 有关。因此, 在静止的、连续的同一种液体中, 处于同一水平面上各点的压力都相等, 压力相等的水平面称为等压面。压力具有传递性。液面上方压力变化时, 液体内部各点的压力也将发生相应的变化。式(2-1)中, $z g$ 、 $\frac{p}{\rho}$ 分别为单位质量流体所具有的位能和静压能, 在同一静止流体中, 处在不同位置流体的位能和静压能各不相同, 但总和恒为常量。因此, 静力学基本方程也反映了静止流体内部能量守恒与转换的关系。

由(2-2)可得

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

此式说明压差的大小可以用一定高度的液体柱来表示。由此可以引申出压力的大小也可用一定高度的液体柱表示, 这就是压力可以用 mmHg、mH₂O 单位来计量的依据。当用液柱高度来表示压力或压差时, 必须注明是何种液体。

由此可推, 连通器中, 在静止液体的同一水平面上, 各点的压强相等。不同质点间的压强差可用一定高度的流体液柱来计算。

2.1.3 流体静力学基本方程式的应用

1. 测量流体压力或压差

测量压强差与任意面上压强的仪表种类很多, 以流体静力学基本方程式为依据的测压仪表, 这种仪表称为液柱压差计或 U 管压差计。

(1) U 管压差计

U 管压差计的结构如图 2-3 所示, 系由两端开口的 U 形玻璃管, 中间配有读数标尺构成。对指示液的要求: 指示液要与被测流体不互溶, 不起化学作用, 其密度应大于被测流体的密度。

$$p_1 - p_2 = (\rho_A - \rho_B) g R$$

对于气体, 则

$$p_1 - p_2 \approx \rho_A g R$$

如图 2-4 所示为用 U 管压差计测量容器表压的情况,此时 U 管压差计指示液的液面与测压口相连的一端液面低,与大气相通的一端液面高,读数即为表压。

如图 2-5 所示为用 U 管压差计测量容器负压的情况,此时 U 管压差计指示液的液面与测压口相连的一端液面高,与大气相通的一端液面低,读数即为真空度。

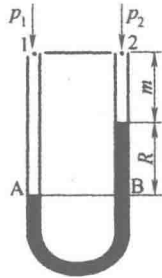


图 2-3 U 管压差计

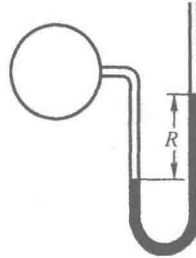


图 2-4 测量表压

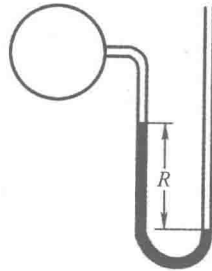


图 2-5 测量真空度

(2) 双液柱压差计

双液柱压差计又称为微差压差计。如果所测压强差很小,则 U 形管压差计的读数 R 很小,可能导致读数的相对误差很大,这时如果采用如图 2-6 所示的双液柱压差计则可使读数放大几倍或更多。该压差计在 U 形管两侧增设两个小室,小室的横截面积远大于管的横截面积;在小室和 U 形管中分别装入两种互不相溶而密度又相差不大的指示液,其密度分别为 ρ_1 、 ρ_2 ,且 ρ_1 略小于 ρ_2 。

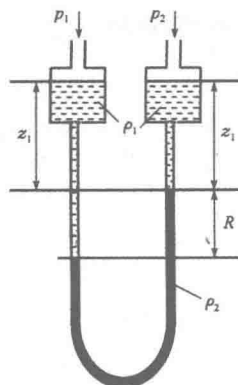


图 2-6 双液柱压差计

将双液柱压差计与两侧压点相连,在被测压差作用下,两侧指示液显示出高度差。因为小

室截面积足够大,故小室内液面高度变化可忽略不计。由静力学原理可推知

$$p_1 - p_2 = (\rho_2 - \rho_1) gR$$

由于 ρ_2 与 ρ_1 相差不大,即 $(\rho_2 - \rho_1)$ 很小,因而读数 R 也可能较大。

(3) 斜管压差计

当被测量的压强差或压强较小,如测量气体压强时,除用密度较小的指示液外,还可采用斜管压差计。

如图 2-7 所示的斜管压差计的一臂与水平面成 α 角,由图 2-7 可以看出,玻璃管经斜放后,可使读数由原来的 R 加大到 R' ,放大的倍数为

$$\frac{R'}{R} = \frac{1}{\sin\alpha}$$

α 越小,放大的倍数就越大。

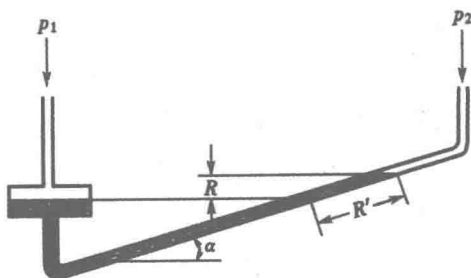


图 2-7 斜管压差计

2. 液位的测量

化工厂中经常要了解容器内液体的贮存量,或者要控制设备内的液面,因此要测量液面位置。大多数测液面位置的液面计作用原理都遵循静止液体内部压力变化规律。最原始的液面计是于容器底部及液面上方空间的器壁上各开一个小孔,用玻璃管将两孔相连,玻璃管中所显示的液面即为容器内的液面。这种液面计易损坏,且不利于远距离观察。

如图 2-8 所示的液面计是在连接容器 1 的下部与液面上方空间的 U 管中灌有比待测液体密度大的指示液,且在 U 管上方装有平衡小室 2,小室内的液体即为容器内的液体,其液面高度维持在容器液面允许到达的最大高度处。根据静力学基本方程式即可算出容器内液面的高度。它与压差计读数的关系为

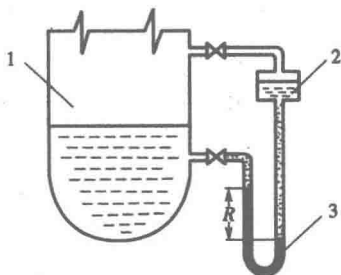


图 2-8 液面计

1—容器;2—平衡小室;3—U 管

$$h = \frac{\rho_A - \rho_R}{\rho}$$

显然, $R=0$ 时, 容器内液面可以达到最高高度。

3. 液封高度的确定

在化工生产中常遇到设备的液封问题。设备内操作条件不同, 采用液封的目的也就不同。但其液封的高度都是根据流体静力学基本方程确定的。

化工生产中经常遇到设备的液封问题。如图 2-9 所示, 为了控制乙炔发生炉内的压强不超过规定的数值, 炉外装有安全液封。其作用是当炉内压力超过规定值时, 气体就从液封管排出, 以确保设备操作的安全。若设备要求压力不超过 p_1 (表压), 按静力学基本方程式, 液封管插入液面下的深度 h 为

$$h = \frac{p_1}{\rho_{H_2O} g}$$

真空蒸发产生的水蒸气, 往往送入如图 2-10 所示的混合冷凝器中与冷水直接接触而冷凝。为

了维持操作的真空度, 冷凝器上方与真空泵相通, 不时将器内的不凝气体(空气)抽走。同时为了防止外界空气进入, 在气压管出口装有液封。如果真空表读数为 p , 液封高度为 h , 则根据流体静力学基本方程可得

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

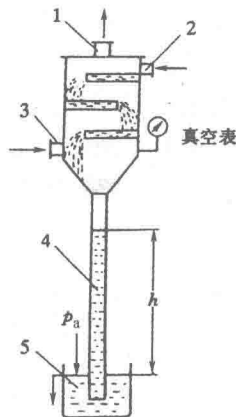


图 2-10 混合冷凝器

- 1—与真空泵相通的不凝性气体出口; 2—冷水进口;
3—水蒸气进口; 4—气压管; 5—液封槽

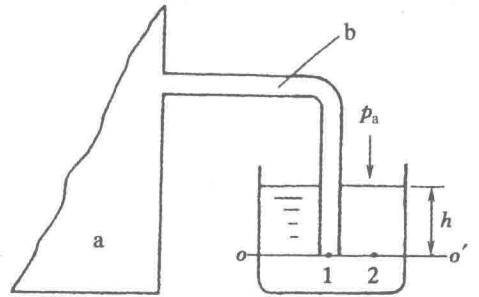


图 2-9 液封

a—乙炔发生炉; b—液封管

2.2 流体动力学

2.2.1 流量与流速

1. 流量

单位时间里流过管道任一截面的流体量,称为流量。常用体积流量和质量流量来表示。体积流量即单位时间内通过管路任一截面的体积,用符号 V_s 表示,其单位为 m^3/s ;质量流量,即单位时间内通过管路任一截面的质量,用 W_s 表示,其单位为 kg/s 。二者之间的关系为

$$W_s = V_s \rho$$

式中, ρ 为流体的密度, kg/m^3 。

2. 流速

流速是指单位时间内流体在流动方向上所流过的距离。因流体流经管道任一截面上各点的流速随管径变化而变化,故流体的流速通常是指整个管截面上的平均流速。工程上采用体积流量除以管路截面积所得的值来表示流体在管路中的流速,以 u 表示,其单位为 m/s 。流速与流量之间的关系为

$$u = \frac{V_s}{A} = \frac{W_s}{A\rho}$$

式中, A 为与流体流动方向相垂直的管道截面积, m^2 。

由于气体的体积流量是温度和压力的函数,则气体的流速也随温度和压力而变,但其质量流量不变。因此,采用质量流速较为方便。质量流速即单位时间内流体流过管道单位截面积的质量,以 G 表示,其单位为 $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。其表达式为

$$G = \frac{W_s}{A} = \frac{V_s \rho}{A} = u\rho$$

通常情况下,流体输送管路的截面均为圆形,流量一般由生产任务决定,根据流体的流速可以估算及选择管路的直径,如果以 d 表示管路内径,则

$$d = \sqrt{\frac{4V_s}{\pi u}} = \sqrt{\frac{V_s}{0.785u}}$$

式中, d 为管内径, m 。

2.2.2 定态流动与非定态流动

在流动空间的各点上,流体的流速、压强等所有的流动参数仅随空间位置变化,而不随时间变化,这样的流动称为定态流动;如果流动参数既随空间位置变化,又随时间变化,这样的流