

高职高专教材

化工原理

上册

主 编：薛 雪
主 审：易卫国

副主编：何灏彦

 湖南科学技术出版社

高 职 高 专 教 材

化 工 原 理

上 册

主 编：薛 雪 副主编：何灏彦
主 审：易卫国

湖南科学技术出版社

高职高专教材
化工原理 (上)

主 编: 薛 雪

副 主 编: 何灏彦

主 审: 易卫国

责任编辑: 杨 林

出版发行: 湖南科学技术出版社

社 址: 长沙市湘雅路 276 号
<http://www.hnstp.com>

印 刷: 湘潭市霞城印刷厂
(印装质量问题请直接与本厂联系)

厂 址: 湘潭市青少年宫后侧

邮 编: 411101

出版日期: 2006 年 8 月第 1 版第 1 次

开 本: 787mm×1092mm 毫米 1/16

印 张: 14.75

字 数: 344000

书 号: ISBN 7-5357-4704-3/O·249

本套书共两本总定价: 53.00 元

(版权所有·违者必究)

前 言

《化工原理》是一门基础理论与生产实际相结合的技术基础课，过去的教材试图通过理论来分析和解决实际问题，繁琐的数学推导多。经过多年的研究和反复酝酿，我们在不断总结和大胆探索的基础上，完成了本教材的创作和编写。

在创作和编写过程中，我们不仅从本科教材的模式中跨越出来，而且对传统的专科教材作了较大突破，根据高职培养目标来突出教材特色，围绕培养学生分析问题和解决问题的动手能力来突出学科特色。

本教材在体系和内容上，与过去的教材也有所区别。上册以流体流动与热量的传递为主，下册以传质单元操作为主。对基本概念和理论的阐述以够用为度，强化应用技能的培养。

参加本书编写的有：长沙航空职业技术学院薛雪老师（绪论、第五章）、郑越老师（第二章），湖南化工职业技术学院何灏彦老师（第一章）、易卫国老师（第三章），湖南机电职业技术学院谭平老师（第四章）。本书由薛雪老师担任主编，易卫国老师担任主审。在编写过程中，得到了湖南化工职业技术学院、长沙航空职业技术学院、湖南机电职业技术学院领导的大力支持，在此表示衷心的感谢！

由于时间仓促，编者水平有限，错漏之处在所难免，还望各位同仁批评指正！

编 者

2006年6月25日

目 录

绪 论

一、化工生产过程与化工单元操作	(1)
二、基本概念	(2)
三、单位、单位制和单位换算	(4)
复习思考题	(5)
习题	(5)

第一章 流体流动

第一节 流体的基本性质	(6)
一、密度、相对密度	(6)
二、粘度	(8)
第二节 流体静力学	(10)
一、压力	(10)
二、流体静力学基本方程式	(11)
第三节 流体流动的物料衡算	(15)
一、流量与流速	(15)
二、定态流动与非定态流动	(16)
三、定态流动系统的物料衡算——连续性方程式	(16)
第四节 流体流动的能量衡算	(17)
一、流动系统的能量类型	(17)
二、流动系统的总能量衡算——柏努利方程式	(18)
第五节 流体流动现象	(22)
一、雷诺准数与流动类型	(22)
二、流体在圆管内的速度分布	(24)
第六节 化工管路	(24)
一、化工管路的构成与标准化	(24)
二、管子的选用	(30)
三、化工管路的布置与安装	(30)
第七节 流体流动阻力	(32)
一、直管阻力	(32)

二、局部阻力	(36)
三、管路总能量损失及降低措施	(38)
第八节 流量测量	(41)
一、孔板流量计	(41)
二、文丘里流量计	(42)
三、转子流量计	(43)
复习思考题	(44)
习题	(45)
本章符号说明	(49)
参考文献	(50)

第二章 流体输送机械

第一节 概述	(51)
第二节 离心泵	(51)
一、离心泵的主要部件及工作原理	(51)
二、离心泵的主要性能参数与特性曲线	(54)
三、影响离心泵性能的主要因素	(56)
四、离心泵的吸上高度(安装高度)	(57)
五、离心泵的工作点与流量调节	(59)
六、离心泵的类型与选用	(62)
七、离心泵的安装与操作	(66)
第三节 其他类型泵	(67)
一、往复泵	(67)
二、计量泵	(69)
三、齿轮泵	(70)
四、螺杆泵	(70)
五、旋涡泵	(70)
六、各类泵的性能比较	(72)
第四节 气体输送机械	(72)
一、往复式压缩机	(72)
二、离心式通风机	(74)
三、罗茨鼓风机	(75)
四、离心式鼓风机	(76)
五、离心式压缩机	(76)
六、真空泵	(77)
复习思考题	(78)
习题	(79)

本章符号说明	(81)
参考文献	(82)

第三章 传 热

第一节 概 述	(83)
一、传热在化工生产中的应用	(83)
二、传热的基本方式	(84)
三、换热器的类型	(84)
第二节 传热基本方程	(85)
一、典型间壁式换热器及其传热过程	(85)
二、传热基本方程	(87)
第三节 传热速率与热负荷	(88)
一、热负荷	(88)
二、热负荷与传热速率的关系	(88)
三、热量衡算与热负荷的确定	(89)
第四节 传热平均温度差	(91)
一、恒温传热时的传热平均温度差	(91)
二、变温传热时的传热平均温度差	(91)
第五节 热传导	(97)
一、傅立叶定律	(97)
二、导热系数	(98)
三、平壁导热	(99)
四、圆筒壁导热	(101)
第六节 对流传热	(103)
一、对流传热分析	(103)
二、对流传热基本方程——牛顿冷却定律	(103)
三、对流传热系数	(104)
第七节 传热系数	(113)
一、传热系数的获取方法	(113)
二、污垢热阻的影响	(115)
三、强化传热途径	(116)
四、传热基本方程应用举例	(118)
第八节 换热器	(120)
一、换热器的分类	(120)
二、间壁式换热器简介	(121)
三、列管换热器的型号与系列标准	(128)
四、列管换热器的选用与设计	(128)

复习思考题	(135)
习题	(136)
本章符号说明	(138)
参考文献	(138)

第四章 蒸 发

第一节 概 述	(139)
一、蒸发流程	(139)
二、蒸发操作的特点	(139)
三、蒸发操作的分类	(140)
第二节 蒸发设备	(141)
一、蒸发器的型式与结构	(141)
二、蒸发器的辅助设备	(145)
第三节 单效蒸发的工艺计算	(146)
一、蒸发水量	(146)
二、加热蒸汽消耗量	(147)
三、蒸发器的传热面积	(150)
第四节 节能与多效蒸发	(156)
一、蒸发器的生产强度与蒸汽的经济性	(156)
二、多效蒸发	(157)
三、提高加热蒸汽经济性的其他措施	(159)
复习思考题	(160)
习题	(160)
本章符号说明	(161)
参考文献	(162)

第五章 冷 冻

第一节 概 述	(163)
一、工业生产中的冷冻操作	(163)
二、人工制冷途径	(164)
第二节 压缩制冷	(164)
一、单级压缩蒸发制冷的工作过程	(164)
二、多级压缩制冷	(167)
三、冷冻能力、冷冻剂与载冷体	(169)
四、压缩制冷装置	(175)
第三节 其他人工制冷方法	(177)
一、吸收制冷装置	(178)

二、蒸汽喷射制冷装置	(178)
第四节 深度冷冻	(179)
复习思考题	(180)
本章符号说明	(180)
参考文献	(181)

附 录

一、不同计量单位的换算	(182)
二、某些气体的重要物理性质	(185)
三、某些液体的重要物理性质	(186)
四、空气的重要物理性质 ($P=101.3\text{kPa}$)	(187)
五、水的重要物理性质	(188)
六、水的饱和蒸汽压 ($-20^{\circ}\text{C}\sim 100^{\circ}\text{C}$)	(189)
七、水的粘度	(190)
八、饱和水蒸汽表 (以温度排列)	(191)
九、饱和水蒸汽表 (以压力排列)	(192)
十、液体在常压下粘度共线图及密度	(194)
十一、气体在常压下粘度共线图	(195)
十二、气体的比热容 ($P=101.3\text{ kPa}$)	(196)
十三、液体的比热容	(197)
十四、液体气化潜热共线图	(199)
十五、某些气体的导热系数	(200)
十六、某些液体的导热系数	(201)
十七、某些固体材料的导热系数	(201)
十八、无机盐水溶液在 $P=101.3\text{ kPa}$ 下的沸点	(202)
十九、管子规格	(203)
二十、常用离心泵的规格 (摘录)	(204)
二十一、4-72-11 型离心式通风机的规格	(210)
二十二、列管式换热器的规格 (摘录)	(211)
二十三、氨的热力学性质	(213)
二十四、几种冷冻剂的沸点和饱和蒸汽压的关系	(214)
二十五、几种冷冻剂的物理性质	(214)
二十六、氨压-焓图	(215)

绪 论

一、化工生产过程与化工单元操作

化学工业、石油化学工业、医药工业及轻工、食品、冶金等工业，尽管它们所生产的产品性质、加工方法、工艺流程以及设备等并不完全相同，甚至相差很大，但是，它们的生产过程却具有一些共同的特点。将原料大规模进行加工处理，使其化学性质和物理性质发生变化并生成新的、符合要求的产品，这就是化工生产过程。

图 0-1 表示的是用甲醇氧化法生产福尔马林流程图。甲醇和水混合液由泵送到高位槽内，然后送入蒸发器内蒸发成气态，与此同时，鼓风机把氧化剂（空气）送入，这两种气态原料经加热器加热至 923K 左右，在氧化器内进行化学反应，生成甲醛，然后，使其迅速通过氧化器下部的冷却器降温至 $353\text{K}\sim 393\text{K}$ ，最后在吸收塔内被水吸收后而成为产品。

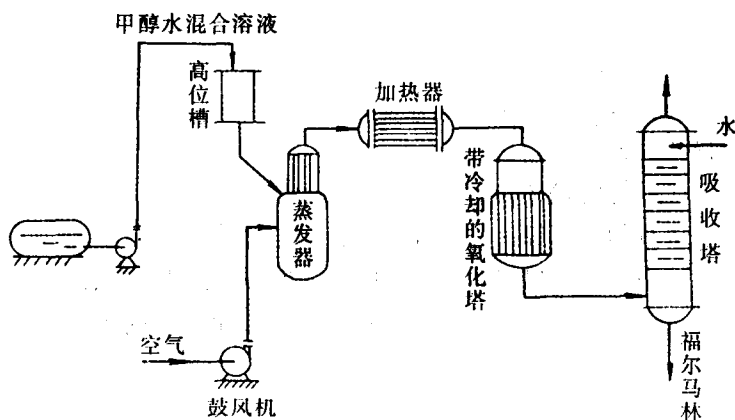


图 0-1 福尔马林的生产流程示意图

从福尔马林的生产过程可以看出，一个化工生产过程，是由一系列化学反应操作（如氧化、还原、硝化……）和一系列物理操作所构成。习惯上把化学反应操作称为化工单元过程，把物理操作称为化工单元操作，简称单元操作。应当指出，世界上所有化工性质的工业生产过程，都是由一系列化工单元过程和化工单元操作，按照不同方式串联组合而成。化工原理的研究对象就是单元操作。其中，常见的单元操作只有十多个，有人把这些单元操作比作英文中的 26 个字母，虽为数不多，却可以组成成千上万个单词。

化工生产过程中常见的单元操作有：流体流动、流体输送、传热、蒸发、冷冻、非均相分离、气体的吸收、液体的蒸馏、固体的干燥、萃取、结晶、膜分离等。

在生产过程中，化学反应是化工生产过程中的核心，而化工单元操作，在多数情况下是为化学反应这一核心服务的，只有少数单元操作（吸收、精馏）有时是直接制造产品。研究各种化工单元操作的基本原理和规律，熟悉操作的基本原理、典型设备的结构、主要性能，并掌握一定的计算能力，以便在工程实践中能运用这些知识去分析和解决实际问题，使各项操作在最优化的条件下进行，从而使生产获得最大限度的经济效益。这就是学习本课程——《化工原理》的目的。

二、基本概念

化工原理课程是高等数学、物理化学等课程后开设的一门基础技术课。它既不同于自然科学的基础学科，又区别于研究具体化工生产工艺学，它是各类化工专业课程的基础。

各单元操作的基本原理及设备的计算都是以物料衡算、能量衡算、平衡关系和过程速率四个基本概念为依据的。下面介绍这几个基本概念。

(一) 物料衡算

物料衡算是质量守恒定律在化工计算中一种表现形式。根据质量守恒定律，任何一个化工生产过程中，凡向该系统输入的物料总和必等于从该系统中输出的物料量与积累该系统中的物料量之和。即：

$$\sum G_1 = \sum G_2 + G_A \quad (0-1)$$

式中 $\sum G_1$ ——单位时间内输入系统物料量之和，kg/h；

$\sum G_2$ ——单位时间内输出系统物料量之和，kg/h；

G_A ——积累在系统中的物料量，kg/h。

式 (0-1) 是总物料衡算式。当过程没有化学反应时，它适用于物料中任一组分的衡算；当有化学反应时，它只适用于任一元素的衡算。若过程中积累的物料量为零，则式 (0-1) 可简化为：

$$\sum G_1 = \sum G_2 \quad (0-2)$$

进行物料衡算时，首先按题意画出简单流程示意图，并用虚线框画出衡算范围，在工程计算中，可以根据具体情况以一个生产过程或一个设备、甚至设备某一部作为衡算范围。其次，确定衡算基准，对连续操作，常以单位时间为基准；对间歇操作，常以一批操作为基准。

式 (0-1)、式 (0-2) 中各股物料可用质量或物质量衡算，对于液体及理想气体还可用体积衡算。

例 0-1 如图 0-2 所示，有一连续精馏塔分离苯-甲苯混合液。已知：混合液流量 F 为 5000 kg/h，其中苯含量为 40%（质量分数，下同），要求经精馏操作后，塔顶产品中苯的含量不低于 98%，塔底产品中苯的含量不高于 1%。试计算塔顶产品 D 、塔底产品 W 的流量 (kg/h)。

解：确定衡算范围：全塔（虚线框所示）

确定衡算基准：单位时间

$$5000 = D + W \quad (1)$$

$$0.40 \times 5000 = 0.98 \times D + 0.01 \times W \quad (2)$$

联解式 (1)、(2) 可得：

$$D = 2010 \text{ kg/h}$$

$$W = 2990 \text{ kg/h}$$

(二) 能量衡算

机械能、热能、电能、化学能、原子能等统称为能量，各种能量可以相互转换，化工原理计算中不考虑能量间的转换问题，而只进行总能量衡算，有时甚至简化为热能或热量衡算。

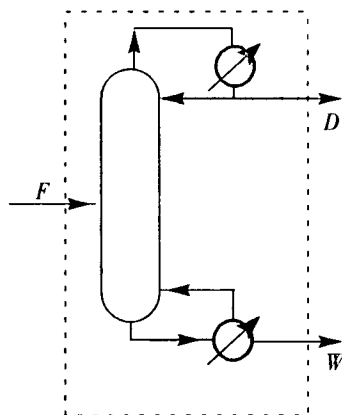


图 0-2 例 0-1 附图

能量衡算的依据是能量守恒定律，对热量衡算可以写成：

$$\sum Q_1 = \sum Q_2 + Q_L \quad (0-3)$$

式中 $\sum Q_1$ ——随物料进入系统的总热量，kJ/h；

$\sum Q_2$ ——随物料离开系统的总热量，kJ/h；

Q_L ——向衡算周围散失的热量，kJ/h。

式 (0-3) 也可写成：

$$\sum (W \times I)_1 = \sum (W \times I)_2 + Q_L \quad (0-4)$$

式中 W ——物料的质量流量，kg/h；

I ——物料的焓，kJ/kg。

热量衡算和物料衡算一样，需要确定衡算范围和衡算基准。另焓为相对值，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，这一点在计算时可以不说明。但有时为了方便，要以其他温度作基温，这时应加以说明。

例 0-2 在换热器中将平均比热容为 3.56kJ/kg 的某种溶液从 25°C 加热至 80°C ，溶液流量为 3600kg/h 。加热介质为 120°C 的饱和蒸汽，若蒸汽冷凝为同温度下的饱和水排出，热损失忽略不计。试计算加热介质的消耗量。

解：根据题意画出流程示意图如图 0-3 所示。

确定衡算范围：换热器（虚线框）

确定衡算基准：单位时间

由附录查出 120°C 饱和蒸汽的焓值为 2708.9 kJ/kg ， 120°C 饱和水的焓为 503.67kJ/kg 。

设蒸汽消耗量为 W_h

带入系统的总热量：

蒸汽带入的热量 $Q_1 = W_h \times 2708.9$

溶液带入的热量 $Q_2 = 3600 \times 3.56 \times 25$

带出系统的总热量：

冷凝水带出系统的热量 $Q_3 = W_h \times 503.67$

溶液带出系统的热量 $Q_4 = 3600 \times 3.56 \times 80$

因： $\sum Q_{\text{进}} = \sum Q_{\text{出}} + Q_L$

$$W_h \times 2708.9 + 3600 \times 3.56 \times 25 = W_h \times 503.67 + 3600 \times 3.56 \times 80$$

$$W_h = \frac{3600 \times 3.56 \times (80 - 25)}{2708.9 - 503.67} = 319.64\text{ kg/h}.$$

(三) 平衡关系

物系在自然变化时，其变化必趋于一定方向，如任其发展，在一定的条件下，过程变化必达到极限，即平衡状态。例如：液体从水位较高的容器流到水位较低的容器时，将一直进行到两个容器中水位相等为止；热量从高温物体传到低温物体直至两物体的温度相等为止。

任何一种平衡状态的建立都是有条件的。当条件改变时，原有平衡状态被破坏并发生移动，直至在新的条件下建立新的平衡。

在生产中常用改变平衡条件的方法使平衡向有利生产的方向移动。为了能有效地控制生产，对许多化工生产过程，应了解过程的平衡状态和平衡条件的相互关系。可以从生产过程的物系平衡关系来推知过程能否进行以及能进行到何种程度。平衡关系也为设备尺寸的计算提供了理论依据。

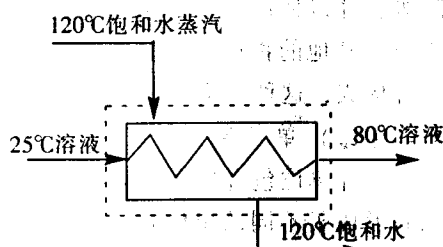


图 0-3 例 0-2 附图

(四) 过程速率

单位时间内过程的变化率称为过程速率。平衡关系只表明过程变化的极限，而过程的速率则表明了过程进行的快慢。

任何一个物系，如果不是处于平衡状态，必然会发生使物系趋向平衡的过程，但过程以什么样的速率趋向平衡，这不决定于平衡关系，而是被诸多方面的因素所影响。理论和科学实验证明，过程速率是过程推动力与过程阻力的函数，过程推动力越大，过程阻力越小，则过程速率越大，可用下式表示：

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

由于过程不同，推动力与阻力的具体内容各不相同。通常，过程偏差平衡状态越远，过程推动力越大，达到平衡时，过程推动力为零。例如，引起热物体与冷物体间热量传递的推动力是两物体间的温度差，温度差越大，过程速率越大，温度差为零时，两物体处于热平衡状态，彼此间不会有热量的传递。过程阻力较为复杂，将在有关的章节中分别介绍。

由上述可知，改变过程推动力或过程阻力即可改变过程速率。在学习各单元操作时，要注意分析影响推动力和阻力的各种因素，探求改进生产的措施。

三、单位、单位制和单位换算

(一) 单位

任何物理量都是用数字和单位联合表达的。一般先选几个独立的物理量，如长度、时间等，并以使用方便为原则规定出它们的单位。这些物理量称为基本量，其单位称为基本单位。其他的物理量，如速度、流量等的单位则根据其本身的物理意义，由有关基本单位组合构成，这种单位称为导出单位。

(二) 单位制

一种单位包含选定的基本单位和对应的导出单位。由于历史的原因和学科领域的不同，先后形成了不同的单位制，如物理单位制、工程单位制、英制等。长期以来，工程计算中存在多种单位制并用的局面，而同一物理量在不同单位制中又具有不同的单位与数值，致使计算与交流极为不便，而且易引起错误。鉴于此，1960年10月第十一届国际计量大会通过了一种新的单位制，简称国际单位制，代号为SI。我国国务院于1977年确定逐步采用国际单位制，1984年又发布命令，确定我国实行以国际单位为基础，包括由我国指定的若干非国际单位在内的《中华人民共和国计量单位制度》（简称法定单位制），规定从1991年起，除个别领域外，不允许再使用非法定单位制。

SI制具有“一贯性”和“通用性”优点。同一种物理量只有一个单位，如能量、热功的单位都采用焦耳，从而避免了重力单位制中热、功之间的换算因子的引入。

(三) 单位换算

我国规定各学科领域采用以SI制为基础，结合国情增加了必要的辅助单位。但要全面实施尚需经历一定时间，而且旧文献资料中的数据又是多种单位并存，使用时要进行换算，所以应掌握不同单位制中不同物理量的换算方法。

同一物理量，在不同单位制中其数值不同，但量是相同的。物理量由一种单位制的单位换成另一种单位制的单位时，量本身并无变化，只是在数值上要改变。在进行单位换算时要乘以两单位间的换算系数。所谓换算系数，就是彼此相等而各有不同单位的两个物理量之比。

复习思考题

1. 什么是化工单元操作？常见的化工单元操作有哪些？
2. 物料衡算与能量衡算的依据是什么？
3. 在物料衡算及能量衡算过程中，衡算范围和衡算基准的选择原则有哪些？
4. 过程速率的主要影响因素有哪些？请写出过程速率的通式。
5. 什么是换算系数？请举例说明。

习 题

1. 试从附录中查出醋酸（100 %）在 293K 时的密度及其在 350K 时的粘度。
2. 干燥器将含水量 10%（质量分数，下同）的湿物料干燥至含水量为 0.8%，试求每吨湿物料除去的水分。
3. 如图 0-4 所示的常压连续精馏塔中分离 A、B 二组分，原料液 5000kg/h，含 A 组分 35%（质量分数），要求塔顶产品含 A 组分不低于 93%，塔底残液含 A 组分不高于 2%，试求塔顶、塔底的产品。
4. 试求在 1atm 下将 20kg/h、20℃的水加热至饱和蒸汽所需的热。
5. 某换热器中用 130℃的饱和蒸汽加热苯，并在其冷凝温度下排出。苯的流量为 4500kg/h，其进、出口温度分别为 20℃和 70℃，若设备的热损失为 9kW，试求水蒸汽的用量。
6. 某设备压力表读数为 1.75atm，试将其数据换算成为 kPa、mmHg、mH₂O、at (kgf/cm²)。
7. 某流体的流量为 4L/s，试将其数据换算为 m³/s 和 m³/h。

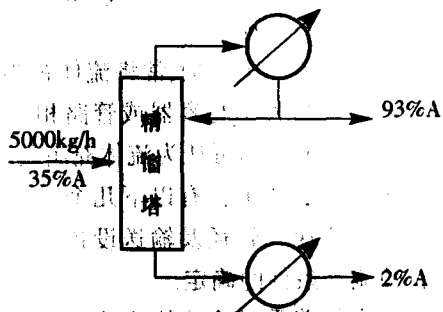


图 0-4 习题 3 附图

参考文献

1. 汤金石，赵锦全. 化工过程及设备. 北京：化学工业出版社，1996
2. 姚玉英. 化工原理（上册）. 天津：天津科学技术出版社，1998

第一章 流体流动

流体流动是化工生产中最常见的现象。在化工生产中，不论是待加工的原料还是已制成的产品，常以液态或气态存在。在各种工艺生产过程中，往往需要将液体或气体输送至设备内进行物理处理或化学反应，这就涉及选用什么形式、多大功率的输送机械，如何确定管道直径及如何控制物料的流量、压强、温度等参数以保证操作或反应正常进行，这些问题都与流体流动密切相关。

流体是液体和气体的统称。流体具有流动性，其形状随容器的形状而变化。液体有一定的液面，气体则没有。液体几乎不具压缩性，受热时体积膨胀不显著，所以一般将液体视为不可压缩的流体；与此相反，气体的压缩性很强，受热时体积膨胀很大，所以气体是可压缩的流体。但如果在操作过程中，气体的温度和压强改变很小，气体也可近似地按不可压缩流体来处理。

在研究流体流动时，常将流体视为由无数分子集团所组成的连续介质，把每个分子集团称为质点，其大小与容器或管路相比是微不足道的。质点在流体内部一个紧挨一个，它们之间没有空隙，即可认为流体充满其所占据的空间。

在化工生产中，有以下几个主要方面经常要应用流体流动的基本原理及其流动规律：管内适宜流速、管径及输送设备的选定；压强、流速和流量的测量；传热、传质等过程中适宜的流动条件的确定。

本章将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流动和输送问题。

第一节 流体的基本性质

一、密度、相对密度

(一) 密度

1. 定义

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度，用符号 ρ 表示。其表达式为

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

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 。

常用气体、液体及其混合物的密度，可从有关书刊或手册中查取。

2. 液体的密度

液体为不可压缩性流体，其密度随压力的变化很小（极高压力下除外），可忽略不计；

但温度对液体密度有一定影响,故查取液体密度时,要注意其温度条件。

若几种液体混合前的分体积等于混合后的总体积,则混合物的平均密度可按式(1-2)计算:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} + \cdots + \frac{w_n}{\rho_n} \quad (1-2)$$

式中 ρ_m ——液体混合物的平均密度, kg/m^3 ;

$w_1, w_2, \dots, w_n$ ——液体混合物中各组分的质量分率, $w_1 + w_2 + \cdots + w_n = 1$;

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

例 1-1 已知 20°C 正戊烷和正辛烷的密度分别为 626kg/m^3 和 703kg/m^3 。试求正戊烷含量为 70% (质量百分率) 的正戊烷-正辛烷溶液的密度。

解: 依式 (1-2) 计算

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{w_1}{\rho_1} + \frac{w_2}{\rho_2} = \frac{0.7}{626} + \frac{0.3}{703} = 1.54 \times 10^{-3}$$

$$\rho_m = 647 \text{ kg/m}^3$$

3. 气体的密度

气体为可压缩流体,其密度随温度和压力变化较大。当没有气体密度数据时,如果压力不太高、温度不太低,气体的密度可近似按理想气体状态方程式计算,即

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

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT} \quad (1-3)$$

式中 p ——气体的压力, kPa ;

T ——气体的温度, K ;

M ——气体的千摩尔质量, kg/kmol ;

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

气体的密度亦可按式 (1-4) 计算:

$$\rho = \rho_0 \frac{T_0 p}{T p_0} \quad (1-4)$$

式中 ρ_0 ——标准状态下气体的密度, $\rho_0 = \frac{M}{22.4} \text{ kg/m}^3$;

T_0 ——标准状态温度, K , $T_0 = 273\text{K}$;

p_0 ——标准状态压力, kPa , $p_0 = 101.33\text{kPa}$ 。

气体混合物的平均密度 ρ_m 可用式 (1-5) 计算

$$\rho_m = \frac{pM_m}{RT} \quad (1-5)$$

式中 p ——混合气体的总压, kPa ;

M_m ——混合气体的平均千摩尔质量, 即

$$M_m = M_1 y_1 + M_2 y_2 + \cdots + M_n y_n \quad (1-6)$$

式中 $M_1, M_2, \dots, M_n$ ——气体混合物各组分的千摩尔质量, kg/kmol ;

$y_1, y_2, \dots, y_n$ ——气体混合物各组分的摩尔分率, $y_1 + y_2 + \cdots + y_n = 1$ 。

气体混合物平均密度亦可用式 (1-7) 计算:

$$\rho_m = \rho_1 y_1 + \rho_2 y_2 + \cdots + \rho_n y_n \quad (1-7)$$

式中 $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$ ——在气体混合物的压力下, 各组分的密度, kg/m^3 ;

$y_1, y_2, \dots, y_n$ ——气体混合物中各组分的体积分率。

例 1-2 干空气的组成近似为 21% 的氧气, 79% 的氮气 (均为体积百分率)。试求压力为 294 kPa、温度为 80°C 时空气的密度。

解: $T = 273 + 80 = 353\text{K}$

$$M_m = M_1 y_1 + M_2 y_2 = 32 \times 0.21 + 28 \times 0.79 = 28.84$$

由式 (1-5) 得

$$\rho_m = \frac{294 \times 28.84}{8.314 \times 353} = 2.89 \text{ kg/m}^3$$

(二) 相对密度

在一定条件下, 某种流体的密度与在标准大气压和 4°C (或 277K) 的纯水的密度之比, 称为相对密度, 又称比重, 用符号 d 表示。

$$d = \frac{\rho}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{\rho}{1000} \quad (1-8)$$

式中 ρ ——流体在 $t^\circ\text{C}$ 时的密度, kg/m^3 ;

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$ ——水在 4°C 时的密度, kg/m^3 。

相对密度值由实验测定, 也可查有关手册。

(三) 比体积

单位质量流体所具有的体积称为流体的比体积, 用符号 v 表示, 其单位为 m^3/kg 。其表达式为

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho} \quad (1-9)$$

二、粘度

(一) 牛顿粘性定律和粘度

流体内部产生的相互作用力, 通常称为内摩擦力 (或称粘滞力)。流体在流动时产生内摩擦的性质, 称为流体的粘性。

内摩擦力是剪力, 单位面积上的剪力为剪应力, 以符号 τ 表示, 单位为 Pa。若剪力为 F 、面积为 A , 则剪应力可用牛顿粘性定律来表示:

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-10)$$

式中 τ ——剪应力, Pa;

$\frac{du}{dy}$ ——速度梯度, 即在与流动方向相垂直的 y 方向上流体速度的变化率, $1/\text{s}$;

μ ——比例系数, 称为粘度系数, 简称粘度, $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ 或 $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

粘度的物理意义: 当速度梯度 $du/dy=1$ 时, 流体在单位面积上由于粘性所产生的内摩擦力 (即剪应力) 在数值上与粘度相等, 即 $\tau = \mu$ 。显然, 在同样流动情况下, 流体的粘度越大, 流体流动时产生的内摩擦力越大。可见, 粘度是度量流体粘性大小的物理量。粘度越小, 越容易流动。

(二) 粘度的单位