

0 绪论

0.1 化工生产过程与化工单元操作

化工生产是将其原料通过化工手段加工成产品的生产过程。其原料广泛 产品种类繁多 加工过程复杂多样。但是各种化工产品的生产过程，不论其规模大小其核心均为化学反应过程及其设备——反应器。为使化学反应过程得以有效地进行，反应器必须在某种适宜条件下进行 如反应物料要有适当的组分、结构和状态 对化学反应的操作条件要有有效的控制等。为此，必须对含有多种杂质处于某环境状态下的初始原料进行一系列前处理过程 以满足反应的需要 例如 纯度、结构、状态、温度、压强、速率等。同样，从反应器出口的产物 通常都是处于某反应温度、压强和一定相状态下的混合物 也必须经过各种后处理过程 经分离精制 以获得合乎要求的最终产品或中间产品 并使排入环境中的废料符合环保要求。

乙炔与氯化氢用加成法生产聚氯乙烯的工艺流程如图 0-1所示：

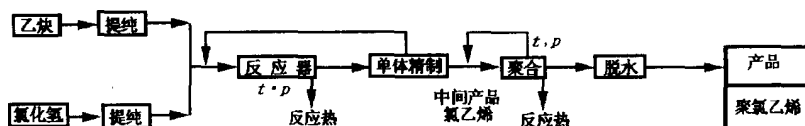


图 0-1 乙炔与氯化氢用加成法生产聚氯乙烯的工艺流程图

此工艺分为两个阶段 第一阶段生产氯乙烯 第二阶段氯乙烯聚合生成聚氯乙烯。过程可概括为（见图 0-2）：

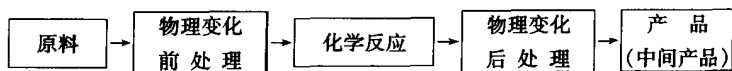


图 0-2 生产过程示意图

上述化工生产过程中的原料前处理过程与反应产物的后处理过程中都有一系列的物理变化过程 如加热、冷却、增减压、相变化、过滤、沉降等。即使在反应器中进行反应过程时,为了维持适宜的反应条件,也需要进行一系列物理过程 如热量的输入与移走 混合、搅拌等。经过长期的化工生产实践发现,各种化工产品的生产过程中所涉及的各种物理变化过程均可归纳为若干个称之为化工单元操作,如表 0-1 所示。这些化工单元操作有下列特点:①它们都是具有共同物理变化为主的基本操作。这些操作只改变物料的状态或其物理性质,并不改变其化学性质。它们都是化工生产过程中共有的基本操作。化工过程虽差别很大,但它们都是由若干个化工单元操作适当地串联而组成的。一个化工单元操作用于不同的化学生产过程时,其基本原理是相同的,进行该操作的设备往往也是通用的。

化工原理就是研究这些实现物理变化的化工单元的操作。研究化工单元操作不仅对化工生产 而且对石油、冶金、食品、制药、原子能等工业的生产、改进和发展都起着重要的作用。

表 0-1 常用化工单元操作及原理

单元操作	原 理
流体输送	输入机械能,将定量流体由一处输送到另一处
沉降	密度差在力场中发生非均相分离操作
过滤	强制通过多孔过滤介质、利用尺寸不同发生非均相分离
流化态	利用流体运动使固体粒子群发生悬浮并使之具有流体的某些表现特性,实现生产操作
加热、冷却	利用温度差输入或移走热量
蒸发	提供热量使溶剂汽化
吸收	利用气相中各组分在某一溶剂中溶解度的不同,进行物质分离的操作
蒸馏	利用各组分间挥发性能的差异,进行物质分离的操作
萃取	利用液体混合物中各组分对某溶剂中的溶解度不同,进行物质分离操作
干燥	提供热量、使水或溶剂汽化的进行热量及质量传递过程的操作

0.2 本课程的性质、任务和内容

化工原理课程是在学了高等数学、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产品的生产工艺学，它是各种化工专业课程的基础。

通过本课程的学习，要求掌握各个化工单元操作的基本原理和有关典型设备的工艺尺寸的设计或选型并熟悉其结构、性能。通过本课程的学习，培养学生从工程观点分析和处理有关化工单元操作中各种问题的能力以便学生在生产实践中能对生产设备具备操作管理设计的本领。

本书主要讨论常用化工单元操作，如表 0-1 所示。按其基本过程分为以下三类：

流体动力过程。遵循流体动力学基本规律的单元操作，如流体输送、沉降、过滤、固体流态化等。

传热过程。遵循传热基本规律的单元操作如加热、冷却、蒸发等。

传质过程。遵循传质基本规律的单元操作，如蒸馏、吸收、萃取、干燥等。

由于流体动力过程的单元操作都涉及到流体流动，流体流动时都会发生动量传递，所以这些操作也可以从动量传递过程去研究。其余两大类的单元操作则分别从热量传递过程和质量传递过程去研究。这三种传递过程中存在着类似的规律和内在的联系，而且可以用数学公式进行表达从而形成了传递理论 俗称“三传”理论它是单元操作在理论方面的进一步发展和深化。有关三传理论的深入讨论不属于本课程的范围。

根据操作方式 单元操作可分为连续操作 定态操作 和间歇操作（非定态操作）两类。

间歇操作 即物料分批进行的过程 适合小规模短线生产过程 具有周期性 即物料在每次操作之初投入设备 经过一番处理后 将物料

全部排出，再重新投料。间歇操作的设备内的同一位置在不同时间进行着不同操作步骤 因此设备内同一位置的操作参数如组成、温度、压强、流速等随时间是不断改变的，导致设备内部发生物料和能量的积累 属于非定态操作。

连续操作，即原料不断地从设备送入，产品又不断地从设备排出。设备内 在同一时间各个位置进行着各个操作步骤 即设备内的各个位置的操作参数如组成、温度、压强、流速等均可不同 但同一位置上的各个操作参数一般不随时间而变 进出设备的物料和能量应相等 不发生物料和能量的积累 属于定态操作 但在开、停车阶段和处理量变化时属于非定态操作。多数化工生产过程是连续的，正常情况下的操作是定态操作 在本书中讨论对象均为连续操作（定态操作）

0.3 四个基本概念

对各单元操作进行分析和计算时 常引用物料衡算、能量衡算、过程速率和平衡关系四个基本概念。

0.3.1 物料衡算

它是以质量守恒定律为基础，分析和计算进、出物料和组成间的相关数量关系。

首先，根据衡算对象，选定适当的衡算范围，它可以是一个生产过程 或一组设备 或一个设备 甚至设备的某一局部。其次 定出衡算基准 对连续操作 常以单位时间内处理物料量为基准 对间歇操作 常以一批原料或单位质量（或摩尔量）原料量为基准。基准的选择有一定的任意性，原则是使计算尽量简化，然后列出物料衡算式。根据质量守恒定律，输入衡算范围的各段物流量必须等于输出衡算范围的各段物流量与积累于衡算范围的物料量之和。即

$$\sum G_1 = \sum G_0 + G_A$$

式中， $\sum G_1$ ——输入物料的总和；

$\sum G_0$ ——输出物料的总和；

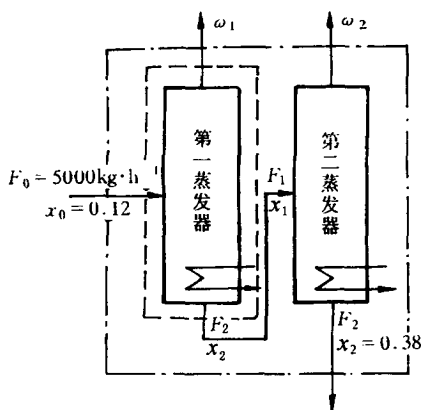
G_A ——物料积累量。

式(0-1)为总物料衡算式。由于物流常常是多组分的混合物，因此当衡算范围内没有化学反应时，此衡算式也适用各组分的组分衡算式。当有化学反应时，它可适用任一元素的衡算。

对于连续操作，衡算范围内物料积累量等于零，即式(0-1)可以简化为

$$\sum G_1 = \sum G_0 \quad (0-2)$$

[例 0-1] 图示中(见图 0-3) 3) 某电解化工厂两个连续操作的串联蒸发器浓缩来自电解槽中烧碱溶液，每小时将 5000kg NaOH10% 质量%，下同)浓缩到 38%，两个蒸发器均蒸发出相同的水分，试求 各蒸发器每小时蒸发水的量 ②从第一蒸发器送到第二蒸发器的浓度。图中，



例 0-1 附图

F ——溶液质量流量 ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)；

x ——溶液中 NaOH 的质量分数；

w ——每小时蒸发出的水分量 ($\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$)。

下标 0 表示原料；

1 表示第一蒸发器；

2 表示第二蒸发器。

解 基准：1h

求各蒸发器每小时蒸发的水分量：在图中点划线范围内，列出 NaOH 总物料衡算得

$$\text{NaOH: } F_0 x_0 = F_2 x_2 \quad \text{即 } 5000 \times 10\% = F_2 \times 38\%$$

$$\text{解得 } F_2 = 1315.8 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \text{ 浓溶液}$$

$$\text{总物料 } 5000 = 1315.8 + \omega_1 + \omega_2$$

$$\text{由题意 } \omega_1 = \omega_2$$

$$\text{则 } 2\omega_1 = 5000 - 1315.8 = 3684.2 (\text{kg} \cdot \text{h}^{-1})$$

$$\omega_1 = \omega_2 = 1842.1 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$$

求第一蒸发器送出溶液浓度：在图中虚线范围内；列出 NaOH 及总物料衡算

$$\text{NaOH: } F_0 x_0 = F_1 x_1$$

$$\text{得 } 5000 \times 10\% = F_1 x_1 \quad (0-3)$$

$$\text{总物料 } F_0 = \omega_1 + F_1$$

$$\text{得 } 5000 = 1842.1 + F_1 \quad (0-4)$$

联立式 (0-3) 及式 (0-4) 解得

$$F_1 = 3157.9 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1} \quad x_1 = 15.83\%$$

从以上例子的解题过程可以归纳物料衡算的步骤为

画一简图表示进行的过程，可用方块图表示，用箭头表示物流的进出方向 注明物流的参数 如流量、温度、压力等。

确定衡算范围 用虚线划出 使其边界与待计算的物流相交 这样使列出的衡算式中包含所需求的计算量。

确定衡算基准，它是衡算式所确定已知量数值的依据，解出的待求量也应符合此基准。

列出衡算式求解。

0.3.2 能量衡算

它是能量守恒定律为基础，用来确定进、出衡算范围内各项能量（如机械能、热能、化学能、电能等）间的相互数量关系。但化工单元设备过程往往没有或者不需考虑能量转换问题 而是总能量衡算 甚至简化到热量衡算。本书以热量衡算作为重点。热量衡算是在物料衡算基准上进行的。与物料衡算不同的是，衡算基准除时间基准或物料量基准外，还需选取物流焓的基准态。

物流焓的基准态包括物流的基准压强 p_0 基准温度 t_0 和基准相状态 ϕ 。

基准压强，通常取 $p_0 = 101.3 \text{ kPa}$ 。一般压强不高时压强对焓的影响常可忽略。

基准温度，通常取 $t_0 = 0^\circ\text{C}$ 。这是便于直接应用手册数据，有时为了计算方便也可以将某物流实际温度作基准温度。

基准相态，可视具体情况选择而定，如当进出衡算范围的物流均为气相时，基准相态可取气态较方便。

根据能量守恒定律，其热量衡算式可写为

$$\sum Q_1 = \sum Q_0 + Q_L \quad (0-5)$$

式中， $\sum Q_1$ ——随物料进入衡算范围的总热量 (kJ 或 kW)；

$\sum Q_0$ ——随物料离开衡算范围的总热量 (kJ 或 kW)；

Q_L ——向衡算范围以外损失的热量 (kJ 或 kW)。

式(0-5)也可写成

$$\sum (\omega H)_1 = \sum (\omega H)_0 + Q_L \quad (0-6)$$

式中， ω ——物料的质量 (kg 或 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)；

H ——物料的焓 ($\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

式(0-5)及式(0-6)既适用于连续操作(此时 Q 的单位为 kW, ω 的单位为 $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$)也适用于间歇操作(此时单位为 kJ, ω 的单位为 kg)。

[例 0-2] 在一换热器中，用 $0.01 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$, 120°C 饱和水蒸气间接加热常压 25°C 空气，空气流量 $1 \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ，冷凝液在饱和温度 90°C 排出。已知空气的平均比热为 $1.005 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$ ，换热器热损失为 2 kW ，试计算空气出口温度。

解 根据题意画出示意图(见附图)

计算基准： s

从附录查出 120°C 饱和水蒸气焓值为 $2708.9 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ， 90°C 饱和水的焓值为 $376.81 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。在图中虚线范围作热量衡算。

式(0-4)各项为

随物流段带入换热器总热量

$$\sum Q_1 = Q_1 + Q_2$$

饱和蒸气带入热量 $Q_1 = \omega_1 \cdot H_1 = 0.01 \times 2708.9 = 27.09(\text{kW})$

空气带入热量 Q_2 设空气出口温度为 t_0 ，选基准温度 t_1 为 25°C 设进口空气的焓为零。

$$Q_2 = 0$$

随物流段带走换热器总热量

$$\sum Q_0 = Q_3 + Q_4$$

饱和液带走热量

$$Q_3 = \omega_3 H_3 = 0.01 \times 376.81 = 3.77(\text{kW})$$

出口空气带走热量

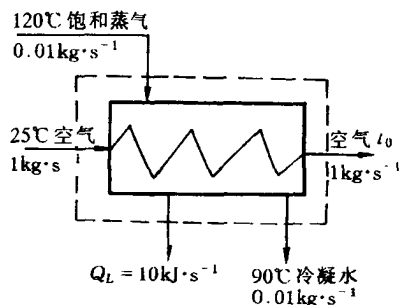
$$Q_4 = \omega_4 H_4 = \omega_4 \times C_p(t_0 - t_1) \\ = 1 \times 1.005 \times (t_0 - 25)$$

换热器热损失为 $Q_L = 2\text{kW}$

将以上各值代入式 (0-5) 得

$$27.09 = 3.77 + 1 \times 1.005 \times (t_0 - 25) + 2$$

得 $t_0 = 46.21^\circ\text{C}$



例 0-2 附图

0.3.3 过程速率

过程速率的大小决定于过程进行的快慢 其通用表达式为

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

在各个化工单元操作中，过程的速率对于设备的工艺尺寸及操作性能起着重要的影响 不同的单元操作 其速率、推动力、阻力均有着不同的含义。如传热过程中 过程速率以单位时间传递热量来表示 过程的推动力以温度差表示。在气体吸收操作中，过程速率以单位时间传递质量来表示，过程推动力以浓度差来表示。

有关各化工单元操作的过程速率计算将在有关章节逐一讨论。

0.3.4 平衡关系

当设备或系统内过程达到热力学平衡 两相物流间的温度、浓度与压强均为相同 平衡两相各组分的组成间存在着确定的相平衡关系 两相间宏观质量传递和热量传递停止了。平衡关系表示物系变化的极限，是实际过程追求的理想条件。因此通常可以从物系平衡关系来推知具体的单元操作过程能否进行和能进行到何种程度，它也为设备的工艺尺寸设计计算提供了理论依据。

0.4 量纲一致性和单位一致性

物理量通过几个基本物理量的幂次方的乘积来表达的关系，称为物理量的量纲（过去称为因次）。不同的单位制，选用的基本物理量也不同，物理量的量纲表达式也不同。

根据物理规律建立的理论公式，式中每一个符号代表一个物理量，因此又称为物理量方程，此方程中以各项的量纲必须相等，称之为量纲一致性（因次一致性）。

判别一个由基本物理规律导出的物理方程是否正确可以用量纲一致性来进行判断 若方程正确 量纲必定一致。

化工原理课程将会用到与过程有关的若干物理量幂次方乘积的组的各种无量纲数的概念来反映过程或事物的某些基本特征。无量纲数是一个纯数。如流体流动中反映流体流动类型的雷诺数 Re 其量纲：

$$[Re] = \left[\frac{d u \rho}{\mu} \right] = [M^0 \cdot L^0 \cdot Q^0]$$

化工原理是一门工程性较强的课程 由于其过程的复杂性 存在着错综复杂的因素 至今对某些过程还列不出方程 或者即使能列出 也因列不出必要的边界条件，而无法求解。通过工程性实验建立一些经验关联式，以符合事物内在规律。这些关联式通常是几个无量纲数之

间的函数关系，这些内容将在有关章节里介绍。

物理量的单位是表征物理量大小的要素，根据物理量与其单位及数字三者之间关系 即 $\text{物理量} = \text{数字} \times \text{单位}$ 可写出 $\text{数字} = \frac{\text{物理量}}{\text{单位}}$ ，单位制不同 物理量的单位也不同 本书所用的单位均采用国际单位制 (SI制) 为基础的法定计量单位。

在对某个化工单元操作进行计算时，必须养成写出每一个物理量的单位 使计算式中各项单位保持一致。

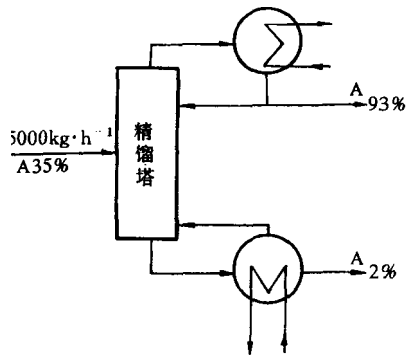
习 题

0-1 湿物料由最初含水量 10% (质量 %) 下同) 在干燥器内干燥至 0.8% 试求每吨湿物料除去的水量。

0-2 图 0-2 所示的常压连续精馏塔中分离 A、B 二组分 原料液 $5000\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 含 A 组分 35% (质量 %) 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% 试求塔底的产量。

0-3 在一换热器中用 130 的饱和蒸气加热苯。苯的流量为 $4500\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$ 其进、出口温度分别为 20 和 70°C 若设备的热损失为总热量的 8% 试求饱和水蒸气的用量。

0-4 在重力作用下，液体从一个始终充满液体的敞口容器的壁面小孔处流出，小孔距液面高度为 H 液体流出的速度为 $u = C \cdot \sqrt{2gH}$ 请写出常数 C 的量纲是什么？



习题 0-2 图

1 流体流动

在化工生产过程中所处理的物料大多是处在液体和气体状态下，这种状态下的物体通称为流体。按照生产工艺要求，物料将从一个设备输送到另一个设备，完成各种物理变化和化学变化过程从而得到所需的产品。整个生产过程的完成都会涉及到流体流动，如化工单元操作中流体输送、流量测量、输送机械所需功率计算、管道计算等。因此流体流动是本课程的基础。

流体包括气体和液体。它具有流动性，抗剪和抗张能力很小，无任何固定形状，变形容易。在外力作用下，流体内部将发生相对运动。

流体是由大量彼此间有一定间隙的分子组成，是个进行着杂乱运动的体系。如果研究单个分子的随机运动那将会使问题变得更加复杂。对一般工程问题讨论往往不需要知道单个流体分子的行为。在化工原理课程中将流体看成由无数的质点（或微团）所组成的一个连续介质。所谓质点（或微团）其大小与管道或容器相比微不足道，但比分子自由程要大得多。因此对流体作这样的连续性假定后，流体的这些质点（或微团）可以使用连续函数的数学公式来描述流体的物性及运动参数。

实践证明，这样的连续性假定在绝大多数情况下是适用的，但对高真空稀薄气体或流道极其微小的情况就不成立了。

1.1 流体的基本性质

1.1.1 流体的密度

单位体积流体所具有的质量称为流体的密度其表达式为

$$\rho = \frac{m}{V}$$

式中, m ——流体的质量 (kg);

V ——流体的体积 (m^3);

ρ ——流体的密度 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

流体的密度一般可在有关手册中查得, 本教材附录也列出常见的气体和液体的密度数值, 供做习题时查用。

单位质量流体的体积称为比容用 v 表示:

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

其单位为 $\text{m}^3\cdot\text{kg}^{-1}$ 数值上等于密度的倒数。

1) 液体的密度

压强对液体体积变化极小 如水 当压强增至 1000atm 时 体积仅比原来减小 5% 因此可把压强对液体的密度影响忽略不计 故常称液体为不可压缩流体。温度对密度有其一定影响 所以在手册中 对液体的密度都注明了温度条件。

2 气体的密度

由于气体体积与压强成反比 与绝对温度成正比 因此压强、温度对气体的密度有较大影响。在使用时, 必须标明其状态。一般当压强不太高 温度不太低的情况下, 气体的密度与压强温度间的关系可用理想气体方程式表示:

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

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

式中, p ——气体的绝对压强 (Pa);

T ——气体的绝对温度 (K);

V ——气体的体积 (m^3);

R ——气体常数 ($8.315\text{J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$)。

当已知某气体在指定条件 T', p' 下的密度 ρ' 后可通过下列公式换算为操作条件 (p, T) 下的密度

$$\rho = \rho' \frac{T' p}{T p'} \quad (1-3a)$$

或

$$\rho = \frac{M T' p}{22.4 T p'} \quad (1-3b)$$

3) 混合物的密度 ρ_m

化工生产中常遇到各种液体或气体混合物，在没有实测数据时，通常采用下列公式进行计算：

(1) 液体混合物的密度 ρ_m

以 1kg 混合物为基准 假定混合前后各组分的体积不变 在 1kg 混合液里的各组分单独存在时的体积等于 $\frac{x_{wA}}{\rho_A} + \frac{x_{wB}}{\rho_B} + \dots + \frac{x_{wi}}{\rho_i}$ 而 1kg 混合物体积为 $1/\rho_m$ 于是

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{wA}}{\rho_A} + \frac{x_{wB}}{\rho_B} + \dots + \frac{x_{wi}}{\rho_i}$$

式中 x_{wA}, x_{wB}, x_{wi} —— 液体混合物中各组分的质量分率。

(2) 气体混合物的密度 ρ_m

以 1m^3 混合气体的基准，若各组分在混合前后各组分的质量不变 则 1m^3 混合气体的质量等于各组分的质量之和，即

$$\rho_m = \rho_A x_{VA} + \rho_B x_{VB} + \dots + \rho_n x_{Vn} \quad (1-5)$$

式中 x_{VA}, x_{VB}, x_{Vn} —— 气体混合物中各组分的体积分率。

气体混合物的密度也可按式 (1-3) 或 (1-3b) 计算。此时应以气体混合物的平均分子量 M_m 代替气体分子量 M 气体混合物的平均分子量 M_m 可按下式求得

$$M_m = M_A y_A + M_B y_B + \dots + M_n y_i \quad (1-6)$$

式中 M_A, M_B, M_i —— 气体混合物各组分的分子量；

y_A, y_B, y_i —— 气体混合物中各组分的摩尔分率。

[例 1-1 苯 - 甲苯组成的二元混合液，其中苯的质量分率为

0.45 求在常压, 20 时混合液的密度。

解 由附录查得 $\rho_{\text{苯}} = 879 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ $\rho_{\text{甲苯}} = 867 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{wA}}{\rho_A} + \frac{x_{wB}}{\rho_B} = \frac{0.45}{879} + \frac{1-0.45}{867} = 1.146 \times 10^{-3}$$

所以 $\rho_m = 872 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

[例 1-2] 已知某焦炉气的组成为 $\text{CO} 6.5\%$; $\text{CH}_4 24\%$; $\text{H}_2 5.8\%$; $\text{N}_2 7.5\%$; $\text{CO}_2 4\%$ 均为体积分率 试求 $1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$, 25°C 时焦炉气密度。

$$\begin{aligned} \text{解: } M_m &= M_A y_A + M_B y_B + M_C y_C + M_D y_D + M_E y_E \\ &= 28 \times 6.5\% + 16 \times 24\% + 2 \times 5.8\% + 28 \times 7.5\% + 44 \times 4\% \\ &= 10.68 \end{aligned}$$

$$\rho_m = \frac{p M_m}{RT} = \frac{1.013 \times 10^5 \times 10.68}{8.315 \times (273 + 25)} = 0.4366 (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$$

1.1.2 流体的粘度

流体具有流动性, 其形状随容器的变化而变化。在外力作用下, 流体内部各层之间产生相对运动。同时, 流体运动时, 它还具有一种抗拒内在向前运动的特性, 此种特性称为粘性。粘性越大, 其流体的流动性就越弱, 反之流动性就越强。如同是液体的油与水, 油的粘性比水大, 流动性则比水差。流体粘性是流体固有的性质, 无论是静止还是流动状况, 流体都具有粘性, 只不过粘性只有在流体流动时才会显现出来。

流体粘性的大小与影响因素通过牛顿粘性定律得到说明。

1) 牛顿粘性定律

如图 1-1 所示在两块面积很大而相距很近的平板, 其间充满某种液体。令下板保持不动 并以一定的力 F 向右推动上板 此力即通过平板以速度 u 沿 x 方向运动。粘附在上板底面的薄层液体以同一速度 u 随上板运动。两板间的液体分成无数平行的薄层而运动, 其速度依次降低, 粘附在下板面的速度为零。速度快的一层流体层对与其相邻的速度慢的一层流体层产生一个推动向前运动的力, 而速度慢的一

层流体层对与其相邻的一层速度快的流体层产生一个阻碍向前运动的力，这种作用于运动的流体内部相邻两流体层间的相互作用力，称为流体的内摩擦力。

实验证明 对一定液体 内摩擦力 F 与两流体层的速度差 Δu 成正比 与两层间垂直距离 Δy 成反比，与两层间的接触面积 S 成正比 即

$$F \propto \frac{\Delta u}{\Delta y} \cdot S$$

若写成等式 就需要引进一个比例系数 即

$$F = \mu \frac{\Delta u}{\Delta y} \cdot S \quad (1-7)$$

式中的内摩擦力 F 与作用面 S 平行，单位面积上的内摩擦力称为剪应力 以 τ 表示。于是上式写成

$$\tau = \frac{F}{S} = \mu \frac{\Delta u}{\Delta y} \quad (1-8)$$

式 (1-8) 只适用于 u 与 y 成直线关系的场合。当流体在管内流动时，

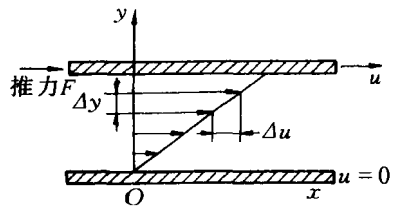


图 1-1 平板间液体速度变化图

由于径向速度的变化并不是直线关系，而是如图 1-2 所示的曲线关系，则式 (1-8) 应改写成

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1-8a)$$

式中 $\frac{du}{dy}$ ——速度梯度 即在与流动方向垂直的方向上单位距离的速度变化值；

μ ——比例系数，其数值与流体性质有关，流体的粘性愈大 其值愈大 所以也称为粘滞系数或动力粘度，简称粘度。

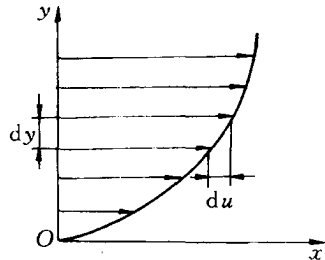


图 1-2 一般速度分布示意图

式 (1-8) 或 (1-8a) 所显示的关系称为牛顿粘性定律。

凡符合牛顿粘性定律的流体称为牛顿型流体。一般气体和分子结构简单的液体如水，以及大多数液体都是牛顿型流体。不符合牛顿粘性定律的液体称为非牛顿型流体 如泥浆、油漆、阿拉伯胶等。本课程仅讨论牛顿型流体的问题。

2 流体的粘度

由式 (1-8a)可改写成

$$\mu = \frac{\tau}{du/dy}$$

所以粘度的物理意义是促使流体流动产生单位速度梯度的剪应力。由上式可知管壁处速度梯度最大，该处剪应力最大。管中心速度梯度为零 剪应力应应为零。

液体的粘度随温度升高而减小，气体的粘度随温度升高而增加。

压强对于液体粘度影响可忽略不计，对气体只有在极高或极低的压强下才考虑其影响。

在 SI 制中粘度单位为

$$[\mu] = \frac{[\tau]}{[du/dy]} = \frac{Pa}{m/s/m} = Pa \cdot s$$

对于常用流体粘度，可以从本教材附录或有关手册中查得。但目前很多旧的手册所列粘度常用 CGS 制单位泊 (P) 或厘泊 (cP) 表示 其换算关系如下：

$$1 \text{ 厘泊 (cP)} = 10^{-2} \text{ 泊 (P)} = 10^{-3} Pa \cdot s$$

有时流体的粘度还可以用运动粘度表示，其定义为

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \tag{1-9}$$

其单位为 $m^2 \cdot s^{-1}$ 。当用 $cm^2 \cdot s^{-1}$ 表示时称为沱 则有

$$1 \text{ 沱} = 10^{-4} m^2 \cdot s^{-1}$$

混合物粘度在缺乏实验数据时，可以从有关手册，选择适当的经验公式进行估算。

(1) 常压下气体混合物粘度

$$\mu_m = \frac{\sum y_i \mu_i M_i^{1/2}}{\sum y_i M_i^{1/2}} \quad (1-10)$$

式中 μ_m ——常压下混合体的粘度；
 y_i ——混合气体中 i 组分的摩尔分率；
 μ_i ——混合气体中 i 组分的粘度 (Pa·s)；
 M_i ——混合气体中 i 组分的分子量。

(2) 对不缔合的混合液体

$$\log \mu_m = \sum x_i \log \mu_i \quad (1-11)$$

式中 x_i ——混合液体中组分 i 的摩尔分率。

气体的粘度比液体的粘度小得多，如 20℃ 下水的粘度为 1×10^{-3} Pa·s 即 1cP) 而空气的粘度为 1.18×10^{-5} Pa·s 即 0.0118cP)

1.2 流体静力学

流体静力学主要是研究流体在外力（重力和压力）的作用下，流体处于平衡状态的规律。

1.2.1 流体的压强

(1) 压强的定义

垂直作用于单位面积上的压力称为流体的静压强，简称为压强。习惯上也把压强称为压力 其表达式为

$$p = \frac{P}{A} \quad (1-12)$$

式中 p ——流体的静压强 ($\text{N} \cdot \text{m}^{-2}$ 即 Pa)；
 P ——垂直作用于流体表面的压力 (N)；
 A ——作用面的面积 (m^2)。

在 SI 制使用之前，常用的压强单位有 atm(标准大气压), bar(巴), 某流体柱 (如水柱 mH_2O)。等，由于这些单位在有关手册中仍有应用，它们之间的换算关系为

$$1 \text{ atm} = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa} = 1.033 \text{ kgf} \cdot \text{cm}^{-2} = 1.013 \text{ bar} = 760 \text{ mmHg}$$