

普通高等院校“十一五”规划教材

化工原理

——流体流动与传热分册

学习指导书

张洪流 主编

国防工业出版社

·北京·

普通高等院校“十一五”规划教材

化工原理

——流体流动与传热分册 学习指导书

张洪流 主编

江苏工业学院图书馆
藏书章

国防工业出版社

· 北京 ·

前 言

“化工原理”课程是化工类一切专业以及材料工程、过程装备与控制、制药工程、生物工程、环境工程、矿物加工、石油加工、林产加工、酿造、纺织染整等专业的重要技术基础课程之一。该课程在化工行业素有“万精油”之美称,是直接服务生产一线的课程。流体流动与传热分册主要研究流体力学和传热学基本理论,以及相关单元操作的原理、典型设备的结构与操作调控方法、单元操作计算、典型设备的选型和设计方法。由于单元操作理论在化工类及其相关专业的专业课程教学中被作为重要基础知识反复应用,故本课程也是化工类及其相关专业的“平台课程”。

为确保课程教学,编者继《化工原理——流体流动与传热分册》后特编撰本书,与《化工原理——流体流动与传热电子教材光盘》一道作为《化工原理——流体流动与传热分册》的配套教材。

本书浓缩了《化工原理——流体流动与传热分册》教材中的知识点和常用计算公式,以及教材中的全部课后习题解答。为便于读者复习,根据原教材顺序分章、节按照知识点聚焦、常用计算公式浓缩、相关习题解答三部分进行编写。

本书共分7章,由安徽理工大学张洪流同志负责全书的文字统筹及审定工作。其中,绪论和第一章、第二章由张洪流编写,第三章由陶昭才编写,第四章、第五章由王剑波编写,第六章、第七章由李广学编写。在本书的编撰过程中,安徽理工大学陈晶玲、汪晓艳参与了部分工作,并得到国防工业出版社的大力支持,在此致以诚挚的谢意。

由于水平有限,加之工程问题的解答不可能十分准确,书中的习题答案仅供读者参考。最后,还望各位同仁对不完善之处给予批评指正,以使本系列教材日臻完善。

张洪流

2008年6月
于安徽理工大学

目 录

绪论	1
第一章 流体力学	4
第一节 流体的基本物性	4
第二节 流体静力学	7
第三节 流体动力学	11
第四节 管流过程	15
第六节 管流系统的能量损失	17
第七节 管路计算	22
第八节 流量测量	25
第二章 流体输送机械	27
第一节 离心泵	27
第二节 其他化工生产用泵	34
第三节 气体输送机械	36
第三章 非均相物系的分离	39
第一节 重力沉降及设备	39
第二节 离心沉降及设备	43
第三节 过滤	45
第四节 离心机	48
第五节 其他气体净制设备及选择	50
第四章 固体流态化	51
第一节 流体在固定床层中的流动	51
第二节 固体的流态化	52
第三节 气力输送	55
第五章 搅拌	57
第一节 概述	57
第二节 搅拌功率计算及搅拌器选型	58
第三节 搅拌器的放大	60
第六章 传热	61
第一节 概述	61
第二节 传热基本方程与传热速率	62
第四节 传热平均温度差	64
第五节 热传导	66

第六节 对流传热 70

第七节 传热系数与强化传热的途径 74

第八节 传热应用计算 77

第九节 工业换热器 79

第十节 列管式换热器的工艺设计 80

第七章 蒸发与结晶 84

第一节 概述 84

第二节 单效蒸发的工艺计算 85

第三节 蒸发系统的节能与多效蒸发 90

第四节 结晶分离技术 91

绪 论

知识点聚焦

单元操作——指在化工生产过程中普遍使用的、遵循一定的物理学定律、所用设备相似、具有类似作用的物理操作。引入单元操作概念可以将化工生产过程分成单元操作过程与化学反应过程两部分研究,从而缩短化工产品的研发周期。

三传——包括:动量传递、热量传递和质量传递。流体输送、过滤等在外力作用下进行的单元操作过程,由牛顿第二定律可知是涉及动量传递的过程;对象加热、汽化、冷却、冷凝等单元操作过程属于因温度差导致的热量传递过程;对于吸收、蒸馏、萃取、吸附等单元操作属于因浓度差导致的质量传递过程。“三传”过程往往是同时进行并相互影响,如水的蒸发过程涉及传热与传质过程。

三传类似性——“三传”之间存在一定的类似性,如过程进行的方向都是从高(动量、能量、温度、浓度)到低;三传过程的阻力均集中于某一区域;过程速率均可表达为过程推动力除以阻力的形式等。

单位与单位制——单位是衡量物理量的大小的依据,有基本单位和导出单位之分。基本单位与导出单位的集合则称为单位制(度)。由于不同时期对研究的需要和出发点的不同,先后有不同的单位制。由于国际单位制(SI)有“通用性”与“一贯性”两大优点,所以我国目前使用的法定单位制是以国际单位制为基础并结合国情增添了必要的辅助单位及词冠而构成的。

流体——具有流动性质的物体,包括气体和液体。液体的密度随压强的变化可忽略,故称为不可压缩流体;气体的密度随压强有明显的变化,故称为可压缩流体。无流动阻力的流体称为理想流体;满足牛顿黏性定律的流体称为牛顿型流体;实际流体多为非牛顿型流体。

系统——工程上指研究的对象,是指定研究的某个区域范围。

稳定流动系统与不稳定流动系统的概念——稳定流动系统又称定态或定常流动系统,是指流动系统中各物理量的大小仅随位置变化的系统,也即在指定截面上物理量的值恒为常数的流动系统。若流动系统中各物理量不仅随位置变化且随时间变化的,则称为不稳定流动系统,又称非定态或非定常流动系统。对连续生产系统,在正常操作状况下可视为稳定流动系统;在生产的开、停车及事故恢复阶段为不稳定流动系统。

稳定流动系统的连续性——欲使流动系统中指定截面上的物理量均为常数,系统中必须充满流体、无空隙。用数学语言描述就是系统中的流体质点处于连续状态。对此特性则称为稳定流动系统的连续性。

稳定流动系统的守恒性——包括质量守恒与能量守恒(在特定条件下可以转化为热量守恒),即输入、输出系统的质量或能量相等。

平衡——平衡状态是过程可能到达的极限,且随过程条件的变化而变化(如溶解度随温度的变化而变化等),故称为“动(态)平衡”。

过程速率——指过程进行的速度,如热量传递的速度、质量传递的速度等。对任意过程的

速率,大小总是和过程推动力成正比而与过程的阻力成反比,即过程速率的计算通式类似于欧姆定律。

实验关联法——是获得经验公式的主要手段。当某个物理参数的影响因素较多,无法用逻辑演绎的方法得到它的计算关系式时,可以先对该物理参数的影响因素作定性分析,然后在固定其他影响因素的前提下,用实验方法测出该物理参数与某个影响因素间的关系,并将所测出的关系通过特定的坐标绘成曲线,最后利用所得曲线建立数学模型,以获得该物理参数与某影响因素间的数学关系。以此类推,逐一获得该物理参数与各影响因素间的数学关系,最后通过实验校正,从而获得该物理参数的计算关系式。此法则称为实验关联法,所得的公式称为经验关联式或经验公式。

准数——又称特征数,是指由若干物理量构成的无单位(因次)代数式。

计算公式浓缩

稳定流动系统的物料衡算式——连续性方程:

(1) 一般式

$$\sum_{i=1}^n q_{m,i} = \sum_{j=1}^m q_{m,j}$$

式中: $\sum_{i=1}^n q_{m,i}$ 为单位时间内输入系统物料量之和(kg/s); $\sum_{j=1}^m q_{m,j}$ 为单位时间内输出系统物料量之和(kg/s)。

(2) 对无分支系统

$$q_{m,1} = q_{m,2}$$

(3) 对不可压缩流体

$$q_{v,1} = q_{v,2}$$

(4) 不可压缩流体在圆管中流动

$$\frac{u_1}{u_2} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2$$

稳定流动系统的能量守恒:

(1) 一般式

$$\sum_{i=1}^n E_i = \sum_{j=1}^m E_j$$

式中: $\sum_{i=1}^n E_i$ 为单位时间内输入系统的能量之和(J/s 或 W); $\sum_{j=1}^m E_j$ 为单位时间内输出系统的能量之和(J/s 或 W)。

(2) 当系统除热量以外不涉及其他能量转化时

$$\sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{j=1}^m Q_j$$

式中: $\sum_{i=1}^n Q_i$ 为单位时间内输入系统的热量之和(J/s 或 W); $\sum_{j=1}^m Q_j$ 为单位时间内输出系统的热量之和(J/s 或 W)。

(3) 对可近似为恒压的传热设备,在不涉及其他能量转化时

$$\sum_{i=1}^n H_i = \sum_{j=1}^m H_j$$

式中： $\sum_{i=1}^n H_i$ 为单位时间内输入系统的热焓之和(J/s 或 W)； $\sum_{j=1}^m H_j$ 为单位时间内输出系统的热焓之和(J/s 或 W)。

过程速率计算通式

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

第一章 流体力学

第一节 流体的基本物性

知识点聚焦

密度、相对密度和比容——单位体积流体所具有的质量称为流体的密度。相对密度又称比重,系指流体的密度与 277K 水的密度比,可用比重计实测,流体的相对密度与密度之间的关系为 $1/1000$ 。比容又称比体积或质量体积,在数值上等于密度的倒数。

流体静压强的定义与特性——流体垂直作用于单位面积上的力称为流体的静压力强度,简称静压强。流体静压强的两个特性:①作用方向总是和作用面相垂直,并指向所考虑的那部分流体的内部;②任意一点的静压强在各个方向上大小相等。

绝对零压强、绝对压强、表压强及真空度——流体的静压强是一个相对量,计算确定需要规定基准,用人为规定的压强为 0 的状态称为绝对零压强,以绝对零压强为起点计量的压强称为绝对压强。工程上为便于计算和测量,常以大气压为基准,规定:系统压强高于大气压强的部分称为表压强,简称表压;系统压强低于大气压强的部分称为真空度。相应上述两种场合下的测压表分别称为压力表和真空表。

流量与流速——单位时间内通过流道有效截面的流体量称为流量;单位时间内通过单位有效流道截面的流体量称为流速。由于对流体量的衡量通常用体积或质量,因此,流量和流速都有用体积及质量分别计量的两种。此外,由流速的定义可知,此处的体积流速实际为流动截面上点流速的平均值。

内摩擦——系指流体在运动过程中质点间的相互约束作用。内摩擦是形成流动阻力的主要原因之。

黏度的概念——黏度是反映流体黏性大小的物理量,从某种程度上也反映流体的内摩擦性能,有(动力)黏度和运动黏度两种。(动力)黏度也是牛顿黏性定律 $\tau = -\mu \frac{du}{dy}$ 中的系数,因大小与流体的黏性有关故称为黏度。对满足牛顿黏性定律的流体称为牛顿型流体。

计算公式浓缩

密度计算公式:

(1) 密度、相对密度与比容间的换算

$$\rho(\text{密度}) = 1000 \times d_{277}^T(\text{相对密度}) \quad v(\text{比容}) = \frac{1}{\rho}$$

(2) 混合液的密度

$$\frac{1}{\rho_L} = \sum_{i=1}^n \frac{x_{w,i}}{\rho_{L,i}}$$

式中: $x_{w,i}$ 为混合液中 i 组分的质量分率; $\rho_{L,i}$ 为混合液中 i 组分的密度 (kg/m^3)。

公式应用前提:混合液体中各组分间无氢键及缔合作用。

(3) 气体的密度

$$\rho_v = \frac{m}{V} = \frac{pM}{RT}$$

式中: p 为气体的压强(kPa); R 为气体通用常数, $R = 8.314 \text{ kJ}/(\text{kmol} \cdot \text{K})$; T 为气体的温度

(K); M 为气体的千摩尔质量, 对混合气体 $M = \sum_{i=1}^n y_i \cdot M_i (\text{kg/kmol})$ 。

公式应用前提: 气体的压强不太高、温度不太低, 可近似为理想气体。

绝对压强、表压强及真空度之间的换算:

表压强 = 绝对压强 - 大气压强

真空度 = 大气压强 - 绝对压强 = - 表压强

流量与流速换算:

q_m (质量流量) = ρq_v (体积流量)

G (质量流速) = $\frac{q_m}{A} = \frac{q_v \rho}{A} = \rho u$ (体积流速)

混合物的黏度:

(1) 常压气体混合物的黏度

$$\mu_G = \frac{\sum_{i=1}^n y_i \cdot \mu_i \cdot M_i^{1/2}}{\sum_{i=1}^n y_i \cdot M_i^{1/2}}$$

式中: y_i 为气体混合物中 i 组分的摩尔分数; μ_i 为相同温度下纯 i 组分的黏度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$); M_i 为 i 组分的摩尔质量 (kg/kmol)。

(2) 液体混合物的黏度

$$\lg \mu_L = \sum_{i=1}^n x_i \cdot \lg \mu_i$$

式中: x_i 为液体混合物中 i 组分的摩尔分数; μ_i 为相同温度下纯 i 组分的黏度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)。

公式应用前提: 液体混合物中各组分之间无氢键及缔合作用。

相关习题解答

1-1 已知丙酮的比重为 0.81, 试求其密度和比容。 ($810, 1.23 \times 10^{-3}$)

【解】根据题意丙酮的密度:

$$\rho = d_{277K}^T \times 1000 = 0.81 \times 1000 = 810 (\text{kg/m}^3)$$

$$\text{丙酮的比容: } v = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{810} = 1.23 \times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{kg})$$

1-2 293K 下苯-甲苯混合液, 已知苯的质量分率为 0.4, 试求其密度。 (872 kg/m^3)

【解】查表知, 在 293K 下, 苯密度 $\rho_{\text{苯}} = 879 \text{ kg/m}^3$, 甲苯密度 $\rho_{\text{甲苯}} = 867 \text{ kg/m}^3$

$$\text{由 } \frac{1}{\rho_L} = \sum_{i=1}^n \frac{x_{w,i}}{\rho_{L,i}} = \frac{0.4}{879} + \frac{0.6}{867} = 1.15 \times 10^{-3} (\text{m}^3/\text{kg})$$

$$\text{则 } \rho_L = 872 \text{ kg/m}^3$$

1-3 已知汽油、煤油、柴油的密度分别为 700 kg/m^3 、 760 kg/m^3 和 900 kg/m^3 , 若三种油品混

合物中汽油、煤油、柴油的质量百分数分别为 20%、30% 和 50%，求此混合液的密度。
(809kg/m³)

【解】由 $\frac{1}{\rho_L} = \sum_{i=1}^n \frac{x_{w,i}}{\rho_{L,i}} = \frac{0.2}{700} + \frac{0.3}{760} + \frac{0.5}{900} = 1.24 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$

得 $\rho_L = 809 \text{ kg/m}^3$

1-4 试估算 CO₂ 在 360K 和 4MPa 时的密度和比容。(58.8kg/m³, 0.017m³/kg)

【解】根据题意

密度 $\rho = \frac{pM}{RT} = \frac{4 \times 10^3 \times 44}{8.314 \times 360} = 58.8 (\text{kg/m}^3)$

比容 $\nu = \frac{1}{\rho} = \frac{1}{58.8} = 0.017 (\text{m}^3/\text{kg})$

1-5 试估算含氮的体积百分率为 25% 的氮、氢混合气体在 400K 和 600MPa 下的密度。
(1530kg/m³)

【解】根据题意

$$\overline{M} = \sum_{i=1}^n y_i \cdot M_i = 0.25 \times 28 + 0.75 \times 2 = 8.5 (\text{kg/m}^3)$$

$$\rho = \frac{p \overline{M}}{RT} = \frac{600 \times 10^3 \times 8.5}{8.314 \times 400} = 1530 (\text{kg/m}^3)$$

1-6 某生产设备上真空表的读数为 100mmHg，试计算设备内的绝对压强与表压强各为若干千帕；已知该地区大气压力为 760mmHg。(115kPa, -13.3 kPa)

【解】真空度 = 大气压 - 绝对压强 = - 表压强

故 绝对压强 = 760mmHg - 100mmHg = 660mmHg = 115kPa

表压强 = -100mmHg = -13.3kPa

1-7 某水泵进口管处真空表读数为 650mmHg，出口管处压力表读数为 2.6at。试求水泵前后水的压强差为多少千帕？多少米水柱？(341.76kPa, 34.85m)

【解】根据题意 $p_1 = -650 \text{ mmHg(表)} = -86.66 \text{ kPa(表)}$

$$p_2 = 2.6 \text{ at(表)} = 255.1 \text{ kPa(表)}$$

故 $p_2 - p_1 = 255.1 + 86.66 = 341.76 (\text{kPa}) = \frac{341.76}{101.3} \times 10.33 = 34.85 (\text{mH}_2\text{O})$

1-8 某设备进出口压差为 500mmHg，试求该设备进、出口压差为多少千帕？(66.7kPa)

【解】根据题意

压差 = 500mmHg = $0.5 \times 13600 \times 9.81 = 66.7 (\text{kPa})$

1-9 管子内直径为 100mm，当 277K 的水流速为 2m/s 时，试求水的体积流量和质量流量。
(0.0157 m³/s, 15.7kg/s)

【解】根据题意

体积流量 $q_v = u \cdot A = u \times \frac{\pi d^2}{4} = 2 \times \frac{3.14 \times (0.1)^2}{4} = 0.0157 (\text{m}^3/\text{s})$

因 277K 下水的密度为 1000kg/m³，故

质量流量 $q_m = \rho \cdot q_v = 10^3 \times 0.0157 = 15.7 (\text{kg/s})$

1-10 温度为 300K 的 N₂ 在内径为 150mm 的管道中流动，已知入口处压强为 150kPa，出口处压强及流速分别为 120kPa、20m/s。试求 N₂ 的入口处流速及质量流速。(16m/s,

$$13.59\text{kg/m}^2\cdot\text{s})$$

【解】根据题意设入口处 N_2 的密度为 ρ_1 , 体积流量为 q_{v1} , 质量流量为 q_{m1} , 流速为 u_1 , 出口处 N_2 的密度为 ρ_2 , 体积流量为 q_{v2} , 质量流量为 q_{m2} , 流速为 u_2 , 则

$$\text{出口处 } \text{N}_2 \text{ 的密度 } \rho_2 = \frac{pM}{RT} = \frac{120 \times 28}{8.314 \times 300} = 1.35(\text{kg/m}^3)$$

$$\text{出口处体积流量 } q_{v2} = u \cdot \frac{\pi d^2}{4} = 20 \times \frac{3.14}{4} \times \left(\frac{0.15}{2}\right)^2 = 0.18(\text{m}^3/\text{s})$$

$$\text{出口处质量流量 } q_{m2} = \rho_2 \cdot q_{v2} = 1.35 \times 0.18(\text{kg/m}^3) = 0.24(\text{kg/s})$$

$$\text{根据质量守恒: } \rho_1 \cdot u_1 \cdot A = \rho_2 \cdot u_2 \cdot A$$

$$u_1 = \frac{\rho_2}{\rho_1} \cdot u_2 = \frac{p_2}{p_1} \cdot u_2 = \frac{120}{150} \times 20 = 16(\text{m/s})$$

$$G_1 = \frac{q_{m,2}}{A} = \frac{0.24 \times 4}{3.14 \times 0.15^2} = 13.59(\text{kg/m}^2 \cdot \text{s})$$

- 1-11 硫酸流经由大小管组成的串联管路, 硫酸的比重为 1.83, 体积流量为 150L/min, 大、小管尺寸分别为 $\phi 76 \times 4\text{mm}$ 和 $\phi 57 \times 3.5\text{mm}$ 。试分别求硫酸在小管和大管中的(1)质量流量;(2)流速;(3)质量流速。(4.575kg/s, 1.274m/s, 0.6888m/s, 2331kg/m²·s、1261kg/m²·s)

【解】(1) 根据质量守恒定律可知, 大小管中的质量流量相等。即

$$q_m = \rho \cdot q_v = 1.83 \times 1000 \times \frac{150 \times 10^{-3}}{60} = 4.575(\text{kg/s})$$

$$(2) \text{ 小管中流速 } u_1 = \frac{0.15 \times 4}{60 \times 3.14 \times 0.05^2} = 1.274(\text{m/s})$$

$$\text{大管中流速 } u_2 = u_1 \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2 = 1.274 \times \left(\frac{50}{68}\right)^2 = 0.6888(\text{m/s})$$

$$(3) \text{ 小管的质量流速 } G_1 = u_1 \cdot \rho = 1.274 \times 1830 = 2331(\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$$

$$\text{大管的质量流速 } G_2 = u_2 \cdot \rho = 0.6888 \times 1830 = 1261(\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}))$$

第二节 流体静力学

知识点聚焦

流体静力学——是研究静止流体内部各物理量间的定量关系, 即流体静力学基本方程式及其应用的学科。

流体静力学基本方程式及其推论: $p_2 = p_1 + (z_2 - z_1)\rho g$ 或 $p = p_a + h\rho g$

对上两式进行分析可得到的结论有: 在静止(并连通)的同种流体内部, 同一水平面上流体的静压强相等; 在静止(并连通)的同种流体内部, 压强相等的面(称为等压面)应同处在一个水平面。

液柱压差计——是用玻璃管制作的简易压差测量装置, 有正 U 形管、倒 U 形管、双液柱微差计、单管压差计、斜管压差计及复式压差计等, 测量精度随被测流体与指示剂密度差的减小而增大。由于玻璃的耐压能力较差, 故仅适用于常低压流动系统, 并不能完全替代测压表。

惰性组分——在工程中系指与工质不发生物理或化学作用的物质。

液封——系指在一定的压强范围内用液体密封气相系统的装置, 由于工程上多数液封过

程的密封液为水故又称为水封。按密封液的流动与否可分为静液封和动液封两种；按液封的目的可分为安全液封、阻断液封(也称切断液封)和溢流液封等。

(煤)气柜——是一切涉及煤气化过程的生产工艺(如合成氨生产系统、城市煤气供应系统等)中必不可少的设备。气柜的功能有以下几点：配气(如空气煤气与水煤气按 1:3.01~1:3.02 混合成半水煤气)、稳压(出口表压强恒等于钟形顶盖的重量及配重与顶盖截面积的商)、净化。

计算公式浓缩

液柱压差计测量计算：

(1) 正 U 形管

$$p_1 - p_2 = R(\rho_{\text{示}} - \rho)g$$

式中左端下标 1、2 分别表示高压面和低压面(下同)。

应用前提：指示剂密度应大于被测流体密度且相互不发生作用。

(2) 倒 U 形管

$$p_1 - p_2 = R(\rho - \rho_{\text{示}})g$$

应用前提：指示剂密度应小于被测流体密度且相互不发生作用。

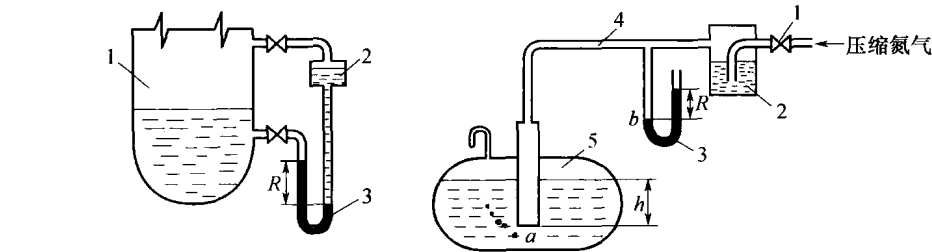
(3) 双液柱微差计

$$p_1 - p_2 = R(\rho_{\text{示}1} - \rho_{\text{示}2})g$$

式中右端下标 1、2 分别表示指示剂 1、2，其中 R 为指示剂 1 的液面高差。

应用前提：密度应满足 $\rho_{\text{示}1} > \rho_{\text{示}2} > \rho$ ，且指示剂 2 和被测流体不发生作用。

液柱压差计测量液位：



$$h = H - R \frac{\rho_{\text{示}} - \rho}{\rho} \quad h = \frac{p_a + R\rho_{\text{示}}g - p'_a}{\rho g}, \text{当容器与大气相通时 } h = R \frac{\rho_{\text{示}}}{\rho}$$

液封计算通式

$$h \geq \frac{p(\text{表})}{\rho_L \cdot g}$$

相关习题解答

1-12 对高 30m 的塔进行水压实验时，在离塔底 10m 高处的压力表读数为 500kPa，当地大气压力为 100kPa，试求塔底及塔顶处水的绝对压强。(698.1kPa, 403.8kPa)

【解】根据题意

离塔底 10m 处水的绝对压强：

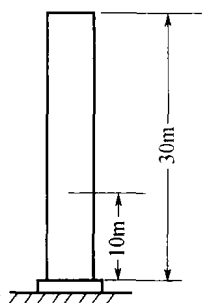
$$p = \text{大气压} + \text{表压} = 100 + 500 = 600(\text{kPa})$$

塔底处水的绝对压强为：

$$p_1 = p + h_1 \rho g / 1000 = 600 + 10 \times 1000 \times 9.81 / 1000 = 698.1 (\text{kPa})$$

塔顶处水的绝对压强为:

$$p_1 = p - h_2 \rho g / 1000 = 600 - 20 \times 1000 \times 9.81 / 1000 = 403.8 (\text{kPa})$$



习题 1-12 附图

- 1-13** 在本题附图所示的贮油罐中, 盛有密度为 960kg/m^3 的油品, 油面高于罐底 9.6m , 油面上方为常压。在罐壁下部有一直径为 760mm 的圆孔, 其中心距罐底 800mm , 孔盖用 14mm 的钢制螺钉紧固。若螺钉材料的工作应力取为 400at , 问至少要用多少根螺钉? (14 根)

【解】根据题意孔盖中心截面处的压强为:

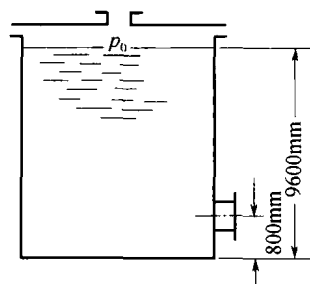
$$p = p_0 + \rho g h = 1 + \frac{960 \times 9.81 \times (9.6 - 0.8)}{1.01 \times 10^5} = 1.82 (\text{at})$$

$$\text{故孔盖受力为 } \frac{\pi}{4} \times 0.76^2 \times 1.82 \times 10^4 = 8252 (\text{kg})$$

每个螺钉的允许受力为

$$\frac{\pi}{4} \times 0.014^2 \times 400 \times 10^4 = 615.4 (\text{kg})$$

故至少需螺钉数为 $8252 / 615.4 = 13.4 \approx 14$ (根)



习题 1-13 附图

- 1-14** 用 U 管压差计测定管道两点间的压强差。管中气体的密度为 2kg/m^3 , 压差计中指示液为水, 当压差计中指示液的读数为 600mm 时, 管道两端点间的压强差是多少? (5.9kPa)

【解】根据题意, 压强差为:

$$p_2 - p_1 = R(\rho_A - \rho_B)g = 600 \times 10^{-3} \times (1000 - 2) \times 9.8 = 5.9 (\text{kPa})$$

- 1-15** 某水管的两端设置一水银 U 管压差计以测量管内的压差, 指示液的读数最大值为 2cm 。现因读数值太小而影响测量的精确度, 拟使最大读数放大 20 倍左右, 试问应选择密度为多少的液体为指示液? (1630kg/m^3)

【解】根据题意: 水银密度 $\rho_A = 13.6 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, 水密度为 $\rho_B = 1.0 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 。

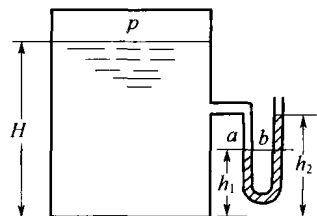
由 $p_2 - p_1 = R(\rho_A - \rho_B)g$ 得

$$\frac{R}{R'} = \frac{\rho_A' - \rho_B}{\rho_A - \rho_B} = \frac{\rho_A' - 1000}{13600 - 1000} = \frac{1}{20}$$

所以

$$\rho_A' = \frac{1}{20} \times (13600 - 1000) + 1000 = 1630 (\text{kg/m}^3)$$

- 1-16** 如本题附图所示, 用 U 管压差计测量某密闭容器中比率为 1 的液体的液面压强, 指示液为水银, 一端与大气相通。已知 $H = 4 \text{m}$, $h_1 = 1 \text{m}$, $h_2 = 1.3 \text{m}$ 。试求液面上方的表压强为多少千帕? (10.58kPa)



习题 1-16 附图

- 【解】根据题意设大气压强为 P_0 , 容器中液体的密度 $\rho = 1000 \text{kg/m}^3$ 水银的密度 $\rho_1 = 13.6 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 。

对 U 形管左侧: $p_a = p + (H - h_1)\rho g$

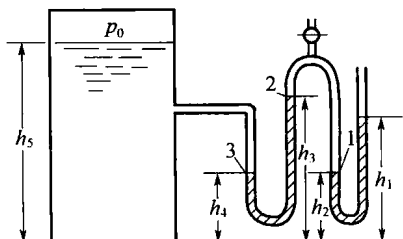
对 U 形管右侧: $p_b = p_0 + (h_2 - h_1)\rho_1 g$

由 $p_a = p_b$ 得:

$$\begin{aligned} p &= p_0 + (h_2 - h_1)\rho_1 g - (H - h_1)\rho g = \\ &= p_0 + (1.3 - 1) \times 13600 \times 9.8 - (4 - 1) \times 1000 \times 9.8 = \\ &= p_0 + 10.58(\text{kPa}) \end{aligned}$$

所以液面上方的表压强为 10.58kPa。

- 1-17 某锅炉用本题附图所示的复式汞—水压差计以测量液面上方的蒸汽压。已知汞液面与基准面距垂直距离分别为 $h_1 = 2.3\text{m}$ 、 $h_2 = 1.2\text{m}$ 、 $h_3 = 2.5\text{m}$ 、 $h_4 = 1.4\text{m}$ ，两 U 形管间的连接管内充满了水。锅炉中水面与基准面间的垂直距离 $h_5 = 3.0\text{m}$ ，当地大气压强 $p_a = 745\text{mmHg}$ 。试求锅炉上方水蒸气的压强为多少千帕。(364.3kPa)



习题 1-17 附图

【解】根据题意

$$1 \text{ 点处压强: } p_1 = p_a + (h_1 - h_2)\rho_{\text{Hg}}g \quad (1)$$

$$2 \text{ 点处压强: } p_2 = p_1 - (h_3 - h_2)\rho_{\text{H}_2\text{O}}g \quad (2)$$

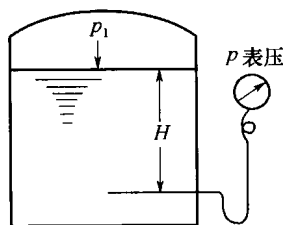
$$3 \text{ 点处压强: } p_3 = p_2 + (h_3 - h_4)\rho_{\text{Hg}}g \quad (3)$$

$$\text{锅炉上方水蒸气压强: } P_0 = P_3 - (h_5 - h_4)\rho_{\text{H}_2\text{O}}g \quad (4)$$

将上 4 式相加并化简得:

$$\begin{aligned} p_0 &= p_a + (h_1 - h_2 + h_3 - h_4)\rho_{\text{Hg}}g - (h_3 - h_2 + h_5 - h_4)\rho_{\text{H}_2\text{O}}g = \\ &= 745 \times 133.3 + 2.2 \times 13600 \times 9.807 - 2.9 \times 1000 \times 9.807 = 364.3(\text{kPa}) \end{aligned}$$

- 1-18 如图所示,在密闭容器内盛有比重为 1.2 的液体,已知液面上的压强 $p_1 = 1.26\text{at}$,当地大气压强为 1at;接在容器某点的压力表其读数为 0.5at。试问液面到压力表接口处的距离 H 为多少米?(2.07m)



习题 1-18 附图

【解】根据题意,液体密度 $\rho = 1.2 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 。

距液面 H 处压强 $p = 0.5 + 1 = 1.5(\text{at})$

由 $p_1 + \rho gH = p$ 得:

$$H = \frac{p - p_1}{\rho g} = \frac{1.5 - 1.26}{1.2 \times 10^3 \times 9.8} = 2.07(\text{m})$$

- 1-19 混合冷凝器在真空下操作,若真空度为 600mmHg、当地大气压强为 760mmHg。试计算:(1)设备内的绝对压强为多少千帕?(2)如果此设备管子下端插入水池中,管中水柱高度 H 为多少米?(21.33kPa, 8.153m)

【解】(1) 根据题意

设备内绝对压强 $p = \text{大气压} - \text{真空度} = 760 - 600 = 160 = 21.33(\text{kPa})$

(2) 由静力学基本原理有

$$H = \frac{p_a - p}{\rho g} = \frac{600 \times 133.3}{1000 \times 9.807} = 8.153(\text{m})$$

1-20 有一内径为 18m 的水煤气柜(如附图)。其钟罩及加重物共重为 150 吨,若不计水对钟罩的浮力。试求:

(1) 气体的压强要达到多少才能将罐顶起(已知当地大气压强为 760mmHg)?

(2) 煤气量增加时罐中气体的压强是否增加? 为什么?

(3) 内外水面差 h 为多少米?

(102.746kPa, 不增加, 0.148m)

【解】(1) 根据题意

当地大气压强为 $p_0 = 760\text{mmHg} = 101.3(\text{kPa})$

$$\text{钟罩及加重物压强 } p' = \frac{mg}{A} = \frac{150 \times 1000 \times 9.81}{\frac{3.14}{4} \times 18^2} = 1.446(\text{kPa})$$

故柜中气体承受的压强为 $p = p' + p_0 = 102.746(\text{kPa})$

即气体的压强要达到 102.746kPa 才能将罐顶

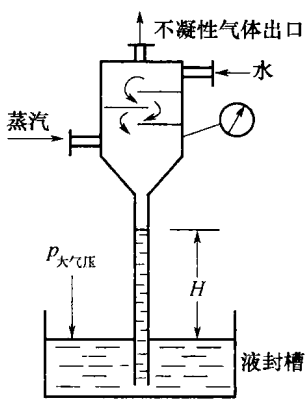
起。

(2) 煤气量增加时罐中气体的压强没有增加。因为根据钟罩及加重物受力平衡原理, 气体的压强应等于大气压加钟罩及加重物压强, 所以气体的压强应保持不变。煤气量增加时, 气体压强没有增加, 但气体的体积增加。

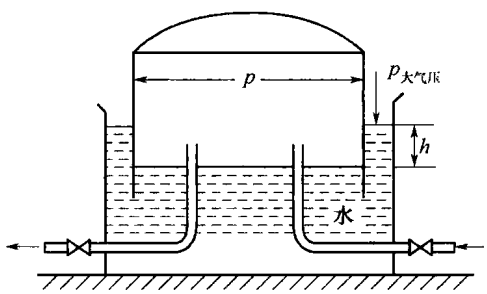
(3) 由 $p = p_0 + h\rho g$ 得

$$\text{内外水面差 } h \text{ 为: } h = \frac{p - p_0}{\rho g} = \frac{1446}{998.2 \times 9.81} =$$

0.148(m)



习题 1-19 附图



习题 1-20 附图

第三节 流体动力学

知识点聚焦

流动系统的能量类型:

能量类型	说 明	1kg 流体为基准 /J/kg	1N 流体为基准 /J/N 或 m, 俗称压头
流体自身的能量	内能——是贮存于物质内部的能量; 是物体内部如分子、原子、电子等所含能量的总和。其大小主要取决于流体的种类和温度, 当种类及温度一定时内能恒定	U	U/g
	位能——又称势能, 是因流体处于地球重力场内而具有的能量。其值等于将流体自基准水平面举起至所在高度所需做的功	gz	z
	动能——是因流体按一定速度运动而具有的能量。数值等于将流体由初速度为 0 加速到现有速度所需做的功	$u^2/2$	$u^2/2g$
	静压能——是流体因存在有一定的静压强而具有的能量, 又称压强能、流动功。其值等于将流体自绝对压强为 0 增压到现有压强所需做的功	p/ρ	$p/\rho g$

(续)

能量类型	说 明	1kg 流体为 基准/J/kg	1N 流体为基准 /J/N 或 m, 俗称压头
与环境交 换的能量	功——指流体通过系统中串接的做功设备获得的能量或对环境做的功。这里往往是指系统要求串接的做功设备对单位质量流体提供的能量	W_e	$H_e = W_e/g$
	热——系指流体通过系统中串接的传热设备与环境交换的热量	Q	Q/g
	损失能——指流体在流动过程中因克服系统阻力所损耗的能量	$\sum h_f$	H_f

伯努利方程——稳定流动系统的能量衡算方程;最早由伯努利根据稳定流动系统的能量守恒性,以理想流体(即无流动阻力的流体)为研究对象导出。由于理想流体与实际流体间存在较大的差异,故本教材中主要讨论实际流体的能量衡算方程,即拓展的伯努利方程式及其应用。

计算截面及其选择原则——计算截面是界定系统起点(1-1')和终点(2-2')的两个截面。计算截面的选取是应用伯努利方程式的关键,选择原则有以下几点:所选计算截面必须和流体的流动方向相垂直;所选择的计算截面(上)应包含所需求解的未知量;所选择的计算截面上的物性参数及系统能量损失等要尽可能已知;以流入系统截面为 1-1' 截面、以流出系统截面为 2-2' 截面。

基准水平面——即位能为 0 的面。由于位能为一相对量,故需规定一基准水平面作为位能的零起点。为简化计算起见,人们通常采用低位计算截面位能为 0 的原则来选定基准水平面。

高位槽供液系统——是利用位差将液体的位能转化动能从而实现供液的装置,在常压生产系统对液体流量的要求很严或批量供液时广泛使用。流程为用泵先将液体由贮槽送至高位槽直至溢流(溢流的液体通过接管返回到贮槽),然后控制在供液流量略小于泵工作流量的条件下对系统供液,从而使得槽面的高度恒定。显然,当系统及流体的物性一定时,高位槽供液系统的流量恒定。

轴功率、有效功率、机械效率——轴功率是指做功机械自驱动设备获得的功率;有效功率是指做功机械在单位时间内对工质(流体)做的有效功;机械效率则是指有效功率与轴功率的比值。由于输送机械在工作过程中存在机械能损失,所以机械效率恒小于 1。

车间供液系统——指车间内的批量供液装置,特点是距离短、间歇性操作。多采用生产系统中的压缩气体为动力,以节省设备投资和减少场地的占用。

计算公式浓缩

部分拓展的伯努利方程式:

(1) 以 1kg 流体为基准

$$gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + W_e = gz_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \sum h_f$$

(2) 以 1N 流体为基准(即以压头形式表示)

$$z_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + H_e = z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + H_f$$

应用前提:系统为不涉及化学变化、温度变化和热量传递的稳定、不可压缩流动系统。