

化工原理学习辅导材料及实验

第 一 册

李 云 倩 编

中央广播电视大学出版社

编写说明

《化工原理学习辅导材料及实验》(简称《辅导材料》)是为学习电视大学“化工原理”课程的学生而编写的。目的是为了帮助学生在各章时了解其基本要求及应掌握的主要内容。

由于电视大学“化工原理”课为100学时,而目前现有的大学“化工原理”教材不是偏多偏深,就是偏少偏简,为此,我们将根据100学时及电视大学“化工原理教学大纲”的要求,编写一套适合电视大学学生用的“化工原理”教材。而这本《辅导材料》就是基于此“化工原理”教材的深广度而编写的。

考虑到目前尚没有一本适合电视大学学生用的“化工原理”教材,故暂选用天津大学化工原理教研室编的《化工原理》上、下册(由天津科学技术出版社出版)作为主要参考书(以下简称参考书)。学员亦可参看其它版本的“化工原理”,但本《辅导材料》中指出的复习、自学内容、例题、习题及图、表等所在页数,均指天津大学编的“化工原理”,特予以说明。

“化工原理”课是一门基础技术课程,也是一门工程技术课程。根据100学时的要求,所选取内容多侧重于基本原理和方法,及如何运用这些最基本的原理来解决一些工程实际问题,或为解决这些问题创造一定的条件。基于以上考虑,故对一些较深的内容,如边界层概念、因次分析法、多组分精馏、高浓度气体吸收等未予安排;对一些较复杂的公式推导或不作要求,或用简单方法导出,或直接介绍公式推导的结果,着重于公式的应用,如离心泵基本方程式、过滤基本方程式等。

《辅导材料》中每章分为四个部分:第一部分为基本要求,本章主要内容及学习本章应掌握的内容;第二部分为学习提要,按照大纲要求,对一些概念、必须掌握的定义、公式和主要内容作了扼要的叙述,并对主要节次提出了注意点,且对某些易混淆的概念和学生易发生的一些错误作了阐明;第三部分为补充习题,为了便于学生复习,编了一定数量的补充复习思考题及补充习题;第四部分为实验,对本门课程必做的实验,提出实验目的、要求等(实验装置及操作要点等,由进行实验所在院校根据具体情况而定)。

在编写学习提要部分,由于篇幅所限,兼“参考书”内容已很详尽,故尽量扼要,具体说明如下:

1. 每一章的节次、内容安排顺序,基本上与讲课顺序相同。
2. 因“参考书”中公式的推导过程已很详尽,故计算公式的推导过程基本从略。但对本门课程中一些基本的、重要的公式推导过程,要求学生了解,这样有利于对公式的理解和正确使用;对一些较复杂的公式则不要求了解推导过程,如离心泵基本方程式;或要求了解推导结果,并能运用公式进行一些简单的计算,如过滤基本方程式等。
3. 物理量的符号及公式中的符号,尽量与“参考书”中一致,以便于学生复习。所用图、表也基本上采用“参考书”中有的图、表,因限于篇幅,故《辅导材料》中多指出图、表所在页数及图、表号。
4. 由于学时所限,因此课上不能举很多例题,请学生复习时看指定的“参考书”上的例题。同时,《辅导材料》中又补充了一些例题及复习思考题,以便于学生复习时自我检查对所

学内容的理解、掌握和应用。

5. 各章中的设备部分请参看“参考书”中指定章、节。

6. 学习提要中未提及的章节不作要求。

7. 习题中选作题目，供学习有余力的学生选作，但不作要求。

对于实验部分，考虑到各地区的实际情况，暂编了四个实验。实验的内容配合讲课。实验时注意理论联系实际，通过实验既要进一步巩固所学知识，也应注意培养、掌握工程实验的基本方法、基本操作技能，如怎样组织实验、如何读取数据及整理数据等。

本《辅导材料》分两册：第一册有绪论、第一至第四章及两个实验；第二册为第五至第七章及两个实验。

由于编者首次接触电视大学的“化工原理”课程，加上既无教材，又无类似的《辅导材料》作参考，仅有一份教学大纲，所以在课程内容的安排、取舍、难易、繁简等方面的处理上肯定问题不少；又由于编者水平所限，时间仓促，故《辅导材料》中的错误及不妥之处在所难免，恳请读者予以指正，以助日后之修订及编写教材，编者深表感谢。

本《辅导材料》中实验部分由北京化工学院化工原理实验室编写，其余部分由李云倩编写。

本《辅导材料》在编写过程中曾蒙有关同志大力协助，提出宝贵意见，部分章节经莫锡荣副教授审阅，在此一并表示感谢。

编 者

1985年 8 月

目 录

绪 论	(1)
第一章 流体流动	(4)
I. 基本要求	(4)
II. 学习提要	(4)
III. 习 题	(28)
IV. 流体阻力实验	(30)
第二章 流体输送机械	(32)
I. 基本要求	(32)
II. 学习提要	(32)
III. 习 题	(43)
第三章 沉降和过滤	(45)
I. 基本要求	(45)
II. 学习提要	(45)
III. 习 题	(55)
第四章 传 热	(56)
I. 基本要求	(56)
II. 学习提要	(56)
III. 习 题	(85)
IV. 测定总传热系数实验	(88)
习题参考答案	(89)

绪 论

一、《化工原理》课程的研究对象与性质

《化工原理》课程是研究化工生产过程中共有的物理操作过程的基本原理、典型设备及其选用、计算方法。通常将这些物理过程称为单元操作。

单元操作按操作的目的分类如下：

- | | |
|---------------------|----------|
| 1. 物料的加压、减压和输送 | } 动量传递过程 |
| 2. 物料的混合 | |
| 3. 非均相混合物的分离 | |
| 4. 物料的加热或冷却——热量传递过程 | |
| 5. 均相混合物的分离——质量传递过程 | |

《化工原理》课程是一门基础技术课，是工程学科，具有工程性、应用性。

二、《化工原理》课程的任务

1. 研究与掌握化工单元操作过程的基本原理并能进行过程的选择；
2. 进行设备工艺尺寸的计算及设备的选型计算；
3. 根据生产的不同要求进行操作和调节，并具有一定寻找故障的原因及排除故障的能力；
4. 了解强化过程的途径。

三、学习本课程的基础

1. 物料衡算 根据质量守恒定律，即在稳定过程中，依进入的物料=离开的物料，进行物料衡算；
2. 能量衡算 根据能量守恒和转换定律，即在稳定过程中，依输入的能量=输出的能量，进行能量衡算；
3. 物系动平衡 决定过程能否进行，以及进行到何种程度；
4. 物系的变化速率 决定过程进行的快慢。

四、单位制度

1. 单位制度

物理量的大小由数字与单位两部分组成，如管长为5m，水的流速为2.5m/s等。

我国的法定计量单位(简称法定单位)是以国际单位制单位为基础，同时选用了一些非国际单位制的单位构成。国际单位制见“参考书”p.6，在此不详述。

与本课程有关的国家选定的非国际单位制单位如下表所示(见 p.2)：

2. 单位换算

在化工计算中，各种数据的来源不同，故其单位不一定符合公式的要求，计算时则需进行单位换算。

物理量由一种单位换算成另一种单位时，不仅单位改变，其数字也必须跟着改变，即换

量 的 单 位	单 位 名 称	单 位 符 号	换 算 关 系 和 说 明
时 间	分	min	1 min = 60 s
	(小)时	h	1 h = 60 min = 3600 s
	天(日)	d	1 d = 24 h = 86400 s
旋 转 速 度	转每分	r/min	1 r/min = (1/60) s ⁻¹
质 量	吨	t	1 t = 10 ³ kg
体 积	升	L(l)	1 L = 1 dm ³ = 10 ⁻³ m ³

算时需换算因数。例如：因为1m=100cm，故由m换算成cm时，换算因数为100。

化工计算中常用的换算因数可见“参考书”p.144，附录一、二及其它书籍。

单位换算注意点如下：

1. 物理量方程必须使用同一单位制的单位，经验方程则必须采用指定的单位；
2. 国际单位制及绝对单位制中质量为基本单位，而工程单位制中重量(力)为基本单位，应注意质量和重量之间的换算。在同一单位制中，质量与重量的换算是依牛顿第二定律，即 $F=ma$ 进行换算。在重力场中为 $F=mg$ ，式中 F 是力(即重量)， m 为质量，而 g 为重力加速度，取 $g=9.81 \text{ m/s}^2$ 。

〔例1〕 SI中质量为1kg的物体在重力场的作用下受到多大作用力？

解

$$\begin{aligned}
 F &= mg \\
 &= 1 \times 9.81 \\
 &= 9.81 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2 \\
 &= 9.81 \text{ N}
 \end{aligned}$$

定义 1kgf(公斤力)=9.81N

可见，SI中的质量与工程单位制中的重量(力)数值上相等。

〔例2〕 工程单位制中1kgf的物体其质量为若干。

解

$$\begin{aligned}
 F &= mg \\
 m &= \frac{F}{g} \\
 &= \frac{1}{9.81} \\
 &= 0.102 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}
 \end{aligned}$$

〔例3〕 一标准大气压(1atm)的压力等于1.033kgf/cm²，换算成N/m²。

解 须将kgf换算成N，cm²换算成m²。

$$\begin{aligned}
 1 \text{ kgf} &= 9.81 \text{ N} \\
 1 \text{ cm} &= \frac{1}{100} \text{ m} \\
 1 \text{ atm} &= 1.033 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \left(\frac{9.81 \text{ N}}{1 \text{ kgf}} \right) \left(\frac{100 \text{ cm}}{1 \text{ m}} \right)^2
 \end{aligned}$$

$$= (1.033 \times 9.81 \times 100^2) \left(\frac{\text{kgf} \times \text{N} \times \text{cm}^2}{\text{cm}^2 \times \text{kgf} \times \text{m}^2} \right)$$

$$= 1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$$

〔例4〕 通用气体常数 $R = 82.06 \text{ atm} \cdot \text{cm}^3 / \text{mol} \cdot ^\circ\text{K}$ ，将其换算成国际单位： $\text{kJ/kmol} \cdot \text{K}$ 。

解 换算时，需将每个简单单位逐个按要求替换。

$$\begin{aligned} R &= 82.06 \frac{\text{atm} \cdot \text{cm}^3}{\text{mol} \cdot ^\circ\text{K}} \\ &= 82.06 \left(\frac{1.013 \times 10^5 \text{N}}{\text{m}^2} \right) (0.01\text{m})^3 \left(\frac{1}{0.001\text{kmol}} \right) \left(\frac{1}{\text{K}} \right) \\ &= 8314 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{kmol} \cdot \text{K} \\ &= 8.314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K} \end{aligned}$$

第一章 流体流动

I. 基本要求

流体流动规律是本门课程的重要基础, 因为:

1. 化工生产中所涉及的物料及产品中以流体占大多数, 所以流体的输送是化工过程中的普遍问题。这就需要研究流体的流动规律, 以便计算流体输送机械所需的功率、选择适宜的输送机械, 进行管路计算, 选择测量流体流速和流量的装置等。

2. 流体流动规律是传热、传质及反应过程的基础。因传热、传质及化学反应过程大多都在物料流动状态下进行, 故过程进行的程度与流体的流动状态密切相关。

为此, 本章着重讨论有关流体流动过程的基本原理, 及流体在管内的流动规律。

在流体流动规律的研究中, 不是研究流体单个分子的微观运动, 而是将流体视为由无数分子团(或称质点)组成的连续介质, 从而可以避免复杂的分子运动, 而研究流体的宏观的机械运动, 并可使用连续函数的数学工具。

学习本章的基本要求:

了解流体平衡和运动的基本规律, 要求熟练地掌握静力学方程式, 连续性方程式, 柏努利方程式的内容和应用, 在此基础上解决管路计算、输送设备功率计算等。

学习本章应掌握的内容:

1. 掌握流体的主要物性(密度、粘度等)数据的求取及不同单位制间的换算;
2. 了解流体流动中的连续性、稳定性和两种流动类型及其判别;
3. 掌握流体静力学方程式, 连续性方程式, 柏努利方程式的内容及其应用;
4. 掌握流体在管路中流动时流动阻力的计算(包括直管阻力和局部阻力), 流体适宜流速的选择及管路直径的确定;
5. 了解管路的构成, 管件、阀门的作用及简单管路和复杂管路的计算要点;
6. 掌握管路中流体的压力、流速和流量的测定原理及方法, 毕托管、孔板流量计和转子流量计的测量原理、简单结构和性能。

II. 学习提要

第一节 流体静力学

流体静力学是研究流体在外力(本节中所指外力仅限于重力和压力)作用下的平衡规律。

一、密度 ρ 、比容 v 、比重 d 和重度 γ

1. 密度 ρ

单位体积内流体的质量称为流体的密度。若流体的质量为 $m(\text{kg})$, 体积为 $V(\text{m}^3)$, 则密

度 ρ (kg/m^3)的表达式为:

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

影响密度的因素: 物性、温度和压力。

(1) 液体的密度 通常视液体为不可压缩性流体, 故液体密度一般认为只随温度而变化(极高压力下除外)。

液体的密度可在物理化学手册或有关资料中查得。“参考书”p.348列有水的密度数据。

液体混合物的密度 ρ_m 可用下式计算:

$$\frac{1}{\rho_m} = \frac{x_{wA}}{\rho_A} + \frac{x_{wB}}{\rho_B} + \cdots + \frac{x_{wn}}{\rho_n}$$

式中: $\rho_A, \rho_B, \dots, \rho_n$ ——液体混合物中A、B、 $\dots$ 、n组分的密度, kg/m^3 ;

$x_{wA}, x_{wB}, \dots, x_{wn}$ ——液体混合物中A、B、 $\dots$ 、n组分的质量分率。

用上式计算时应注意以下两点:

- ① 混合物的体积应等于各组分单独存在时的体积之和;
- ② 若各组分的质量分别为 $m_A, m_B, \dots, m_n$, 则A组分的质量分率为:

$$x_{wA} = \frac{m_A}{m_A + m_B + \cdots + m_n}$$

且

$$\sum x_w = 1$$

(2) 气体的密度 气体是可压缩性流体, 故密度与压力、温度有关。当压力不太高、温度不太低时, 可按理想气体处理。

纯组分气体的密度:

(a) 查有关手册, 如:

[1] 化学工程手册, 第一篇, 《化工基础数据》, 化工出版社, 1980.11。

[2] 谢端绶、璩定一、苏元复合编化工工艺算图, 第一册, 《常用物料物性数据》, 化工出版社, 1982.10。

[3] Perry, R.H.: “Chemical Engineers’ Handbook”. 6th ed., McGraw-Hill, New York 1985。

[4] 化学工学协会编: 《化学工学便览》, 第四版, 丸善株式会社, 1978。

(b) 计算

$$\rho = \frac{M}{22.4} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{p}{p_0}$$

或

$$\rho = \frac{Mp}{RT}$$

式中: p ——气体的压力, kN/m^2 (或采用其它单位);

T ——气体的绝对温度, K;

p_0 ——标准状态下的压力, $p_0 = 101.33 \text{ kN}/\text{m}^2$ (kpa)

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

M ——气体的分子量, kg/kmol ;

R ——气体常数, $R = 8.314 \text{ kJ}/\text{kmol} \cdot \text{K}$ (或根据 p 采用的单位取相应的值)。

混合气体的密度:

$$(a) \quad \rho_m = \frac{PM_m}{RT}$$

式中: P ——气体的总压, kN/m^2 ;

M_m ——气体的平均分子量, kg/kmol 。

若气体混合物中各组分的分子量分别为 M_A 、 $M_B \cdots M_n$, 摩尔分率分别为 y_A 、 $y_B \cdots y_n$, 则混合气体的平均分子量为:

$$M_m = M_A y_A + M_B y_B + \cdots + M_n y_n$$

$$(b) \quad \rho_m = \rho_A x_{vA} + \rho_B x_{vB} + \cdots + \rho_n x_{vn}$$

式中 x_{vA} 、 $x_{vB} \cdots x_{vn}$ 为混合气体中各组分的体积分率。

计算气体密度时注意以下两点:

① 由手册查取的气体密度, 应注意其标明的状态, 并根据使用条件下的压力与温度依公式进行换算;

② 通用气体常数 R 值依所采用的单位制不同而异。

$$R = 1.987 \text{ cal/mol} \cdot ^\circ\text{K} \quad (\text{CGS制})$$

$$= 8.314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K} \quad (\text{SI})$$

$$= 848 \text{ kgf} \cdot \text{m/kmol} \cdot ^\circ\text{K} \quad (\text{工程单位制})$$

$$= 82.06 \text{ atm} \cdot \text{cm}^3/\text{mol} \cdot ^\circ\text{K}$$

$$= 0.08206 \text{ atm} \cdot \text{m}^3/\text{kmol} \cdot ^\circ\text{K}$$

2. 比容 v

比容为单位质量流体具有的体积, 它是密度的倒数, m^3/kg 。

3. 比重 d

比重又称相对密度, 是物质的密度与水的密度之比, 其表达式为:

$$d = \frac{\rho}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}$$

通常水的密度以 4°C 为标准比较。液体比重同样可从“参考书”p.387 或有关手册中查到。

4. 重度 γ

单位体积内流体的重量称为流体的重度, kgf/m^3 。同一单位制中重度与密度的关系为:

$$\gamma = \rho g$$

对一种物质而言, SI 单位中的密度与工程单位制中的重度数值相等。如水, SI 单位中 $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, 而工程单位制中 $\gamma = 1000 \text{ kgf/m}^3$ 。工程单位制中密度 ρ 的单位则为 $\text{kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ 。

〔例题1〕 烟道气的组成为 N_2 76%、 CO_2 13%、 H_2O 11% (均为质量百分数), 温度为 500°C , 压力为 760 mmHg 。试计算该混合气体的密度。

解 取 1 kg 烟道气为基准进行计算。 1 kg 烟道气中 N_2 、 CO_2 和 H_2O 的质量各为 0.76 kg 、 0.13 kg 和 0.11 kg , 而 N_2 、 CO_2 和 H_2O 的分子量各为 28 、 44 和 18 , 故其 kmol 数分别为 $\frac{0.76}{28}$ 、 $\frac{0.13}{44}$ 和 $\frac{0.11}{18}$ 。烟道气的平均分子量为:

$$M_m = \frac{1}{\frac{0.76}{28} + \frac{0.13}{44} + \frac{0.11}{18}} = 27.6$$

混合气的密度 ρ_g

$$\begin{aligned}\rho_m &= \frac{M_m}{22.4} \cdot \frac{p}{p_i} \cdot \frac{T_0}{T} \\ &= \frac{27.6}{22.4} \times \frac{760}{760} \times \frac{273}{273+500} \\ &= 0.435 \text{ kg/m}^3\end{aligned}$$

二、压 力

流体垂直作用于单位面积上的力称为流体的压强(压力强度), 习惯上称压力。而整个面积上所受到的作用力称为总压力。

压力的表示方法:

1. 压力的单位

(1) 按压强的定义表示

SI: N/m^2 或帕斯卡(Pa)

工程单位制: kgf/m^2 , 习惯用 kgf/cm^2 。

(2) 以流体柱高度表示, 如米水柱, mH_2O ; 毫米汞柱, mmHg 等。

若流体的密度为 ρ , 则压力 p 与流体柱高度 h 的关系如下:

$$p = \rho gh$$

注意: 用流体柱高度表示时, 必须注明流体种类, 否则将失去意义。

(3) 以大气压为计量单位

标准(物理)大气压(atm)

$$\begin{aligned}1 \text{ atm} &= 1.0133 \times 10^5 \text{ N/m}^2 (\text{Pa}) \\ &= 101.33 \text{ kN/m}^2 \\ &= 1.0133 \text{ bar (巴)} \\ &= 10330 \text{ kgf/m}^2 \\ &= 1.033 \text{ kgf/cm}^2 \\ &= 10.33 \text{ mH}_2\text{O} \\ &= 760 \text{ mmHg}\end{aligned}$$

2. 压力的基准

(1) 以绝对真空为基准测得的压强为绝对压强。

(2) 以当时当地大气压为基准所测得的压强称为表压, 如表压值低于当地大气压时, 则其表压的负值称为真空度(即大气压与绝对压的差值)。

表压 = 绝对压 - 大气压 (见p.8, 图1-1)

真空度 = 大气压 - 绝对压 (见p.8, 图1-2)

见“参考书”p.14, [例1-1]。

三、静力学基本方程式

在静止流体中, 流体质点间的作用力及流体与周围(如容器)的作用力主要是压力。

流体静力学基本方程式是描述在重力场中流体在重力和压力作用下的平衡规律。

流体静力学方程以能量的形式表示为:

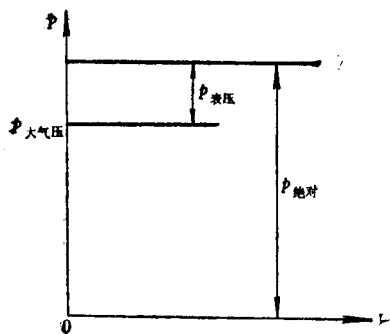


图 1-1

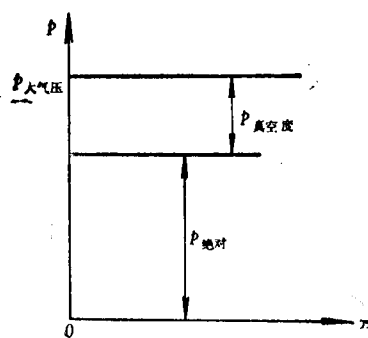


图 1-2

$$\frac{p_1}{\rho} + gZ_1 = \frac{p_2}{\rho} + gZ$$

流体静力学方程以力的形式表示为:

$$p_2 = p_1 + \rho g(Z_1 - Z_2)$$

见“参考书”p.15, 图1-2。

静力学方程式的推导条件: 在重力场中, 不可压缩的静止、连续、均质的流体中, 且流体密度视为常量。

学习静力学方程注意点:

① 在重力场中, 静止流体内任一点的静压力大小与该点所在的垂直位置(Z)及流体的密度有关, 与该点所在水平位置及容器的形状无关。

② 在连续、静止流体中, 在同一水平位置上流体的静压力相等, 即若 $Z_1 = Z_2$, 则 $p_1 = p_2$ 。这是连通器的基本原理。

③ 在一个容器内静止流体中, 当位置 1 处的流体压力 p_1 发生变化, 则位置 2 处的流体压力 p_2 必发生与 p_1 同样大小的变化。这一关系即巴斯噶定律。

④ 静力学方程中各项的单位

$$\frac{p}{\rho} \text{ 的单位: } \frac{\text{N/m}^2}{\text{kg/m}^3} = \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg}} = \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$gZ = \frac{mgZ}{m} \text{ 的单位 (} m \text{ 为流体的质量):}$$

$$\frac{\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot \text{m}}{\text{kg}} = \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg}} = \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

可见, $\frac{p}{\rho}$ 和 gZ 皆是 1kg 流体具有的静压能与位能。由静力学方程可知, 在静止流体中, 不同位置上流体具有的静压能与位能之值不同, 但两项能量之和恒为常量。这说明静止流体中能量守恒且可以相互转换。

见“参考书”p.16, [例1-2]。

四、静力学基本方程式的应用

1. 压力与压差的测量

U型管压差计中, 流体密度为 ρ_B , 指示液密度为 ρ_A 。在等压面 $a-a'$ 上, 流体的静压力相等, 由 $p_a = p_{a'}$ 得:

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

若被测流体是气体, 由于 $\rho_A - \rho_B \approx \rho_A$, 则上式可简化为:

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

微差压差计, 见“参考书”p.17, 2.微差压差计及〔例1-3〕~〔例1-5〕。

2. 测量液位

见“参考书”p.20及〔例1-6〕。

3. 计算液封高度

见“参考书”p.21及〔例1-7〕、〔例1-8〕。

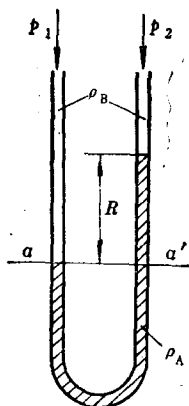


图 1-3

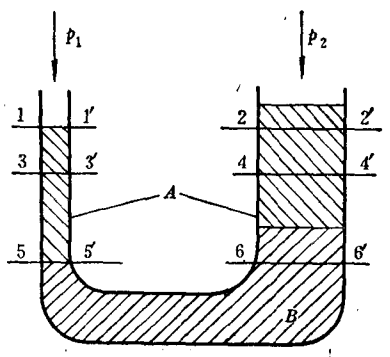


图 1-4

〔例题〕 在如图1-4所示的U型管中, 放置两种密度不同又不互溶的液体A与B。试问:

(1) (1-1')、(2-2')两截面上压强是否相等?

(2) (3-3')、(4-4')两截面上压强是否相等?

(3) (5-5')、(6-6')两截面上压强是否相等?

解 (1) $p_{1-1'} \neq p_{2-2'}$ 因不是同一种均质流体。

(2) $p_{3-3'} \neq p_{4-4'}$ 理由同(1)。

(3) $p_{5-5'} = p_{6-6'}$

五、本节注意点

1. 气体的密度与压力及温度有关。由手册中查取密度时, 应注意其标明的状态, 在换算成操作状态下的密度时, 要注意各物理量及常数(p 、 T 、 R)的单位, 如 p 和 R 的对应关系等。而压力 p 只能用绝对压力。

2. 由于压力的表示方法不同, 且计算时常需要进行换算, 所以应掌握压力的各种表示方法及它们之间的换算关系。

3. 静力学方程式是静止流体中的能量守恒与转换定律。工程上应用此定律可解决压差、液位测量和液封高度等计算问题。应用此方程的关键是如何选取等压面, 其实质即为在连续、静止、均质的流体中同一水平面上静压强相等这一概念的应用。所取等压面的位置(指高度)不同, 仅涉及计算是否简便, 而不影响计算结果。计算时应注意各物理量的单位制要统一。

第二节 流体动力学

一、流速与流量

1. 流量

体积流量 V_s 单位时间内流体流过管道任一截面的体积量, m^3/h 或 m^3/s 。

质量流量 W_s 单位时间内流体流过管道任一截面的质量, kg/h 或 kg/s 。

2. 流速

平均流速 u 单位时间内流体在流动方向上流经的距离, m/s 。若管内截面积为 A , 则

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

通常所指流速一般均为平均流速。

质量流速 G 单位时间内流体流过单位截面管道的质量, 又称质量通量, $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 或 $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 。

3. V_s 、 W_s 、 u 、 G 之间的关系

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

$$V_s = uA$$

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

4. 圆形管道直径 d 的选定

$$V_s = uA = u \frac{\pi}{4} d^2$$

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

流量 V_s 一般由生产任务决定, 选定流速 u 后即可用上式计算出管径 d , 再根据标准圆整成标准管径。见“参考书”p.382, 二十六、管子规格。

适宜流速的选择应在操作费与基建费之间通过经济核算来确定。通常水及低粘度液体的流速为 $1.5 \sim 3.0 \text{m}/\text{s}$, 一般常压气体流速为 $10 \sim 20 \text{m}/\text{s}$, 而饱和蒸汽流速为 $20 \sim 40 \text{m}/\text{s}$ 等。

某些流体在管道中的常用流速范围见“参考书”p.23, 表1-1。

见“参考书”p.23, [例1-9]。

二、稳定流动与不稳定流动

1. 稳定流动

在流动系统中, 流体的流速、密度、压力等物理量仅是位置的函数, 不随时间而变化, 称该流动系统为稳定流动, 如流速

$$u = f(x, y, z)$$

x 、 y 、 z 为位置坐标。化工生产多属连续稳定流动。

2. 不稳定流动

在流动系统中, 若流体的流速、密度及压力等参数不仅随位置变化, 而且亦随时间而变, 则称该流动为不稳定流动, 如流速

$$u=f(x,y,z,\theta), \theta \text{ 为时间。}$$

三、连续性方程式

在稳定流动系统中，管道内任一截面的流体质量流量恒为常量，即

$$W_{s1}=W_{s2}=\cdots=W_s=\text{常数}$$

或

$$u_1 A_1 \rho_1 = u_2 A_2 \rho_2 = \cdots = u A \rho = \text{常数}$$

对不可压缩性流体， ρ 可视为常量，故

$$u_1 A_1 = u_2 A_2 = \cdots = u A = \text{常数}$$

上式为连续性方程式。

可用连续性方程计算稳定流动系统中某一流量的下管路中不同管径截面上的流速大小。

见“参考书”p.25, [例1-10]。

四、柏努利方程式

1. 理想流体的机械能守恒——柏努利方程式

理想流体是一种无压缩性、无粘性，在流动过程中没有能量损失的假想流体。

如p.12, 图1-5示，有 m kg流体从截面1-1'流至截面2-2'。当满足下列两个条件：

(1) 不可压缩的理想流体作稳定流动；

(2) 在流动过程中系统与外界无能量交换。

则该流动系统的机械能守恒。流体的机械能有动能 $u^2/2$ 、位能 gZ 和静压能 p/ρ 。若1-1'截面上的流体具有的机械能为 $m \frac{u_1^2}{2}$ 、 mgZ_1 和 $m \frac{p_1}{\rho}$ ，2-2'截面上流体具有的机械能为 $m \frac{u_2^2}{2}$ 、 mgZ_2 和 $m \frac{p_2}{\rho}$ ，对1kg质量的流体，从1-1'截面流至2-2'截面机械能守恒关系式，即为柏努利方程式。即：

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2}$$

工程单位制是以1kgf重量的流体为基准的，其能量衡算式为：

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{u_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{u_2^2}{2g}$$

由柏努利方程式可见：

(1) 不可压缩的理想流体在与外界无能量交换的稳定流动系统中，机械能守恒，且可以相互转换。即每1kg理想流体在各截面上所具有的总机械能相等，但每一种形式的机械能在不同截面上之值不一定相等，可以转换成另一种形式的机械能。

(2) 柏努利方程式中的各项皆为机械能。

式中各项的单位：

在SI单位中，表示1kg质量流体具有的能量，单位为J/kg。

在工程单位制中，表示1kgf流体具有的能量，习惯用单位为m。其物理意义是1kgf流体所具有的机械能可将自身从基准面升举的高度。又因m是长度单位，故通常称为压头，如位能 Z 称为位压头，动能 $\frac{u^2}{2g}$ 称为动压头或速度头， $\frac{p}{\rho g} = \frac{p}{\gamma}$ 称为静压头或简称压头。

2. 实际流体的总能量衡算式

实际流体因有粘性，在流动过程中有摩擦故有能量损失。如p.12, 图1-6所示，实际流

体由截面1-1'流至截面2-2'，且在两截面间装有泵时，则流体的总能量衡算式为：

$$\text{SI单位:} \quad gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{u_1^2}{2} + W_e = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{u_2^2}{2} + \Sigma h_f$$

$$\text{工程单位制:} \quad Z_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + H_e = Z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + H_f$$

流体的总能量衡算式为柏努利方程式的引伸，习惯也称为柏努利方程式。

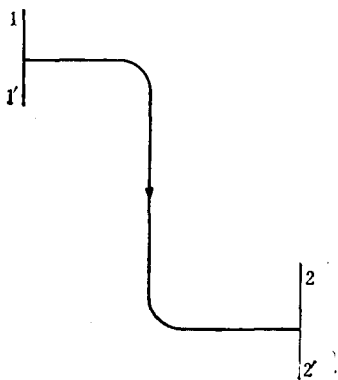


图 1-5

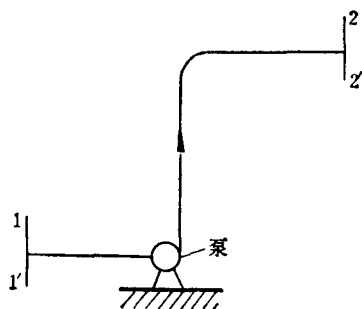


图 1-6

3. 柏努利方程式的讨论

(1) 实际流体的柏努利方程式中 gZ_1 、 $\frac{p_1}{\rho}$ 、 $\frac{u_1^2}{2}$ 及 gZ_2 、 $\frac{p_2}{\rho}$ 、 $\frac{u_2^2}{2}$ 分别为 1kg 质量流体在 1-1'、2-2' 截面上本身具有的机械能，而 W_e 为 1kg 流体在两截面间获得的能量，即流体输送设备对 1kg 流体所作的有效功，此值是选择输送设备的主要参数之一。而 Σh_f 是 1kg 质量流体由 1-1' 截面流至 2-2' 截面所消耗的能量。

W_e 和 Σh_f 的单位与机械能的单位相同。SI 单位中为 J/kg，工程单位制中为 m。

(2) 对可压缩性流体的流动系统中，当 $\frac{p_1 - p_2}{p_1} < 0.2$ 时，仍可用柏努利方程式进行计算，但式中的流体密度 ρ 应取平均值 ρ_m 代替，即压力为 p_1 的密度为 ρ_1 ，压力为 p_2 的密度为 ρ_2 ，取其平均值 $\rho_m = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2}$ 。

(3) 流体静止时， $u_1 = u_2 = 0$ ， $W_e = 0$ ， $\Sigma h_f = 0$ ，则为静力学方程式，即：

$$gZ_1 + \frac{p_1}{\rho} = gZ_2 + \frac{p_2}{\rho}$$

4. 柏努利方程式的应用

柏努利方程式(有时需与连续性方程式联合)可用于计算输送设备的有效功率、管道中流体的流量、管路中流体的压力及设备间的相对位置等。

见“参考书”p.30~34，〔例1-11〕~〔例1-14〕。

5. 柏努利方程式的应用条件、注意点及解题步骤

应用条件：

(1) 稳定、连续不可压缩的流动系统；

(2) 在选定的两截面间，系统与周围无能量、质量交换，满足连续性方程。

注意点:

(1) 选定的两截面均应与流体流动方向垂直, 两截面均应取在平行流处, 不要取在阀门、弯头等部位。

(2) 截面宜选数据多, 计算方便处, 即待求的未知量应在截面上或在两截面之间, 且截面上的有关数据如 p 、 u 、 Z 等, 除待求量外, 都应是已知数或通过计算可求出的数据。

(3) 截面上的物理量均取该截面上的平均值, 如位能 Z , 对水平管取管中心位能值; 动能用截面上的平均速度进行计算; 静压能用管中心处的压力值计算等。

(4) 为计算截面上的位能, 需取基准面, 基准面必须是水平面, 基准面的位置(指高度)对计算结果无影响。

(5) 计算截面上的静压能时, 需用截面上的压力, 压力可用表压计算, 亦可用绝对压力计算, 但对同一流动系统中, 两截面的压力值需用同一种表示法表示压力, 千万不可一个截面用表压, 另一个截面用绝对压力计算。

(6) 柏努利方程式中, W_e 是流体在两截面间获得的能量, 故此项应在起始截面一侧, 而 Σh_f 是流体自起始截面至终了截面所消耗的能量, 故在终了截面一侧。

解题步骤:

(1) 根据题意画出简图, 确定衡算范围;

(2) 选取两个截面;

(3) 选取基准面;

(4) 计算各截面上能量, 求解。

〔例题〕 列出下列几种情况的柏努利方程式, 并写出其简化形式。(各图中 p_2 为表压)

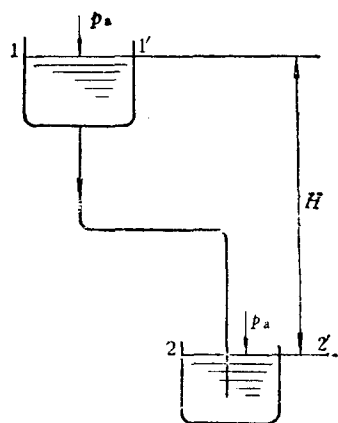


图 1-7

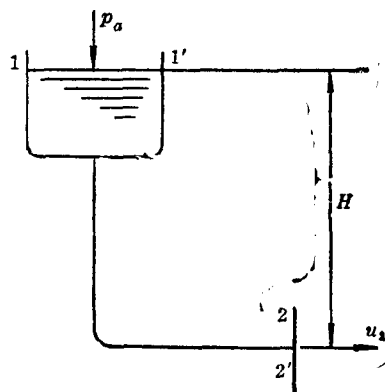


图 1-8

解 图1-7, 截面1-1'、2-2'

基准面2-2'

1-1' 截面:

$$p_1 = p_a = 0 \text{ (表压)}$$

$$u_1 = 0 \text{ (槽面)}$$

$$Z_1 = H$$

$$H_e = 0$$

2-2' 截面:

$$p_2 = p_a = 0$$