

高等学校教材



● 杨国泰 杨继红 等编

化学工程基础 学习指导



化学工业出版社
教材出版中心

高等学校教材

化学工程基础

学习指导

杨国泰 杨继红 曾坤伟
高竹林 姚瑰妮 姚 赞 编

化学工业出版社
教材出版中心
· 北 京 ·

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

化学工程基础学习指导/杨国泰等编. —北京:
化学工业出版社, 2003. 7
高等学校教材
ISBN 7-5025-4565-4

I. 化… II. 杨… III. 化学工程-高等学校-教
学参考资料 IV. TQ02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 059566 号

高等学校教材

化学工程基础学习指导

杨国泰 杨继红 曾坤伟 编
高竹林 姚瑰妮 姚 赟

责任编辑: 王文峡

文字编辑: 林 媛

责任校对: 顾淑云

封面设计: 于 兵

*

化学工业出版社 出版发行
教材出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销
中国纺织出版社印刷厂印刷
三河市宇新装订厂装订

开本 787 毫米×1092 毫米 1/16 印张 12 字数 287 千字

2003 年 8 月第 1 版 2003 年 8 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-4565-4/G·1234

定 价: 22.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

前言

对于理科化学和应用化学专业学生而言,“化学工程基础”是一门十分重要的工程技术基础课程。之所以重要不仅因为它是化学基础理论与化工实际生产过程之间的桥梁,而且也是化学与材料、环境保护、生物技术和制药等学科交叉发展必不可少的内容。作为一个当代的化学工作者,除了应具有扎实的化学基础理论知识外,还应具有一定的工程技术基础知识。因此,无论今后是直接参加国民经济建设还是继续深造,它都是一门值得大家花工夫学好的课程。

“化学工程基础”课程涉及的内容较多,要学好本课程并非是轻松事。我们编写这本学习指导的目的,旨在对初学者有所帮助。《化学工程基础学习指导》就是“化学工程基础”课程的教学参考书。

本学习指导共分十章,参照武汉大学主编的《化学工程基础》第二章~第十一章的内容(该书第一章类似于绪论),并适当兼顾了国内其它同类教材。本学习指导共分为四大部分:一、流体流动与输送(第一章);二、传热过程(第二章);三、传质过程(第三章~第六章),包括了传质的基本理论(第三章),两个经典的化工传质单元过程[吸收(第四章),精馏(第五章)]及膜分离、超临界萃取等新型分离技术(第六章);四、化学反应工程(第七章~第十章),包括了化学反应工程学的基本原理(第七章)及三类反应过程[均相反应过程(第八章)、非均相气-固反应过程(第九章),生物和酶催化反应过程(第十章)]。这四个部分内容概括了化工过程的基本理论、基本计算及有关设备的原理。针对该课程信息量大、公式多、练习分量重的特点,本学习指导对每一种单元操作和反应过程都给出了提纲及要点,给出了例题和习题详解,以帮助初学者了解重点、分析难点、加深理解和消化课程内容。并且本学习指导的例题和习题都结合了化工生产及科学实验的需要,通过对例题和习题的阅读,不仅能提高初学者分析和解决化工生产和科学实验中的一些实际问题的能力,也能更好地扩大他们的视野和思维。

在学习“化学工程基础”课程和使用本教材时,有以下几点要提醒初学者。

一、注意单位的使用和换算。首先要熟悉国际单位制(SI)和国家标准规定的习用单位。在练习中,要求使用SI等法定单位制。同时,对于非SI单位,应能进行有关换算。

二、有两个概念贯穿全课程。一是物料衡算,即质量守恒定律;另一个是能量衡算,即能量守恒定律,应注意学习和领会。

三、了解两个常见的工程实验数据处理方法,即量纲分析和数学模型法。它们与学生在化学基础实验中常见的数据处理方法不同,工程实验数据经两种方法处理后,不仅能成为对工业过程有指导意义的经验和半经验公式,而且还能培养学生处理复杂的实际问题和在科学研究中如何化繁就简的能力。

四、学会用图示方法处理问题是非常重要的。图示是一种工程语言，正确的图示可以使抽象的问题形象化、具体化，使隐性的条件显示出来，从而有利于解决实际问题。

作者希望本学习指导对初学者有所帮助，也十分乐意得到由他们反馈的信息，以便修订时参考。

参加本书编写的人员有：杨国泰、杨继红（第一章）；杨国泰、杨继红、高竹林（第二章）；杨国泰、姚瑰妮（第三章）；杨国泰、高竹林、曾坤伟、姚瑰妮（第四章）；杨继红（第五章）；杨继红、姚赞（第六章）；曾坤伟（第七、八、九、十章）。全书由杨国泰、杨继红组织编写并统稿。

本书承蒙武汉大学马玉龙教授，昆明理工大学夏光榕教授，云南大学戴镇泽、杨阳等教授审阅，提出了许多宝贵意见，在此一并致谢。本书部分习题选自公开发行的书籍和刊物，对于所选习题的编著者，谨表谢意。

由于作者学识有限，本书难免有疏漏和不足之处，恳请读者指正，以便今后改进。

编者

2003年6月于昆明

内 容 提 要

本书共分十章,包括流体流动与输送、传热过程、传质过程、吸收、精馏、新型分离技术、化学反应工程学基本原理、均相反应过程、气-固相催化反应过程、生化反应工程基础等。本书每章都简明扼要地列出读者应该掌握的知识要点,着重阐述知识难点以及指出读者最容易出错的地方;各章例题的选择尽量贴近生产实际和科研实践,以满足读者学习化学工程基础知识的需要,并分析了每道例题正确的思维过程。为方便读者理解、掌握化工知识,书中选择了大量习题,每道习题均给出了详细的解答过程,以方便读者自测。本书还介绍了一些化学工程技术的新进展。

本书为高等院校理科化学各专业的化学工程基础课程的辅导用书,还可供研究生入学考试以及有关科研工作者和化学工程技术人员参考。

目 录

第一章 流体流动与输送	1
一、提纲及要点.....	1
二、例题.....	8
三、习题及解答.....	17
第二章 传热过程	34
一、提纲及要点.....	34
二、例题.....	40
三、习题及解答.....	51
第三章 传质过程	63
一、提纲及要点.....	63
二、例题.....	66
三、习题及解答.....	67
第四章 吸收	71
一、提纲及要点.....	71
二、例题.....	79
三、习题及解答.....	86
第五章 精馏	94
一、提纲及要点.....	94
二、例题.....	101
三、习题及解答.....	106
第六章 新型分离技术	114
一、提纲及要点.....	114
二、扩展性知识介绍.....	117
第七章 化学反应工程学基本原理	120
一、提纲及要点.....	120
二、例题.....	125
三、习题及解答.....	130
第八章 均相反应过程	138
一、提纲及要点.....	138
二、例题.....	141
三、习题及解答.....	145

第九章 气-固相催化反应过程 151

 一、提纲及要点 151

 二、例题 156

 三、习题及解答 161

第十章 生化反应器 168

 一、提纲及要点 168

 二、例题 176

 三、习题及解答 178

一、提纲及要点

1. 主要研究对象和解决的问题

研究对象：牛顿型流体——符合牛顿黏滞性定律 ($\tau = \mu \frac{du}{dy}$) 的气体和液体。

解决的问题：定常态下常压或低压流体输送的能量转换、能量传递的计算。在工业上主要运用于流体的管路计算和设计、输送设备的选用等。

2. 内容要点

(1) 流体流动的连续性方程（物料衡算——质量守恒定律在流体力学中的体现）

$$A_1 u_1 = A_2 u_2 = A_3 u_3 = \text{常数} \quad (\text{见图 1-1}) \quad (1-1)$$

(2) 伯努利方程（能量衡算——能量守恒定律在流体力学中的体现）

以单位重量流体的能量衡算为例。

伯努利方程（伯努利方程特例）：

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

推论：① $z_1 = z_2$, $p_1 = p_2$ (ρ 一定)

② $p = p_0 + \sum \rho g h$ (为液体任一点的压强，见图 1-2)

理想流体：流体流动时无摩擦阻力和不可压缩的流体（见图 1-3）

$$z_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} = \text{常数} \quad (1-3)$$

实际流体：计入流体流动时的阻力损失和输送机械补充的能量

$$z_1 + \frac{u_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + H'_e = z_2 + \frac{u_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + \sum H_f \quad (1-4)$$

说明：以上三式中，能量表达的形式为压头，即单位重量流体的能量，单位为 $J \cdot N^{-1} = N \cdot m \cdot N^{-1} = m$ (液柱)。

式中，三项机械能分别如下。

单位重量流体的位能—— z
 单位重量流体的动能—— $\frac{u^2}{2g}$
 单位重量流体的压力能—— $\frac{p}{\rho g}$

位压头
 动压头 } 总压头 (见图 1-4)
 静压头 }

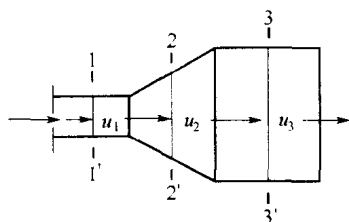


图 1-1 流体稳定流动的物料衡算

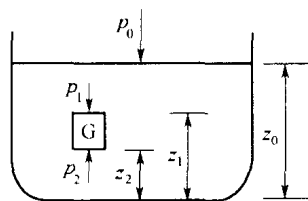


图 1-2 流体静力学方程

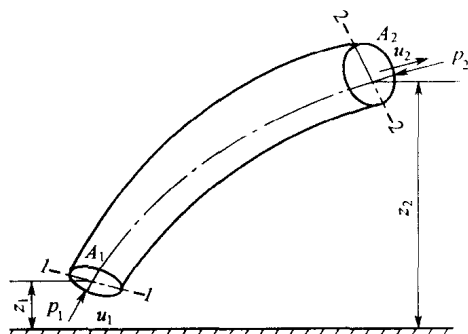


图 1-3 伯努利方程推导

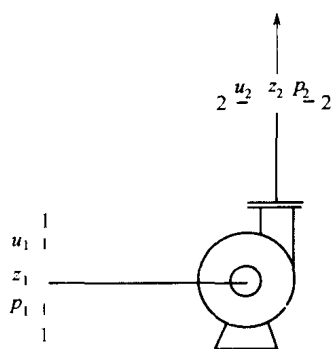


图 1-4 流体的三项机械能

H'_e 为输送机械对单位重量流体提供的能量，以压头表示，称为扬程（泵的铭牌上用米水柱表示）。

$\sum H_f$ 为单位重量流体因阻力而损失的能量，以压头表示，简称压头损失。

伯努利方程式还经常用单位质量的流体所具有的能量 ($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$) 来表示，如

$$gz_1 + \frac{u_1^2}{2} + \frac{p_1}{\rho} + H_e = gz_2 + \frac{u_2^2}{2} + \frac{p_2}{\rho} + \sum h_f \quad (1-5)$$

式 (1-1)~式 (1-5) 中

A ——管道某横截面的面积， m^2 ；

u ——通过管道某横截面流体的流速， $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ；

z ——管道某横截面中点距基准面的垂直距离， m ；

p ——管道某横截面上流体的平均压强， Pa ；

p_0 ——液面上方的压强， Pa ；

h ——液体中某点距液面的高度， m ；

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

g ——重力加速度， $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ ；

H_e ——流体输送机械对 1 kg 流体提供的能量， $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ；

H'_e ——流体输送机械对 1 N 的流体提供的能量，也称扬程， $\text{J} \cdot \text{N}^{-1}$ 或 m 液柱；

$\sum h_f$ ——两截面间 1 kg 的流体因克服管路阻力流动而消耗的能量， $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ；

$\sum H_f$ ——两截面间 1 N 的流体因克服管路阻力流动而消耗的能量，也称压头损失， m 液柱。

3. 与主要内容相关的基本知识

- (1) 压强的表示：绝对压强、表压及真空度。
(2) 牛顿黏性定律和黏度：牛顿黏性定律。

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \tag{1-6}$$

式中 μ ——黏滞系数或动力黏度，通常称为黏度， $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

- (3) 流体流动类型的判定：雷诺数。

$$Re = \frac{du\rho}{\mu} \text{ (量纲为 1)} \tag{1-7}$$

对光滑直管

$Re < 2000$	层流
$2000 < Re < 4000$	过渡流
$Re > 4000$	湍流

- (4) 流体的速度分布及流体流动边界层（略）
(5) 流体流动时的阻力损失

- ① 直管段的沿程阻力系数 λ 和范宁因子 f ， $\lambda = 8f$

- a. 用公式计算 λ 或 f

(a) 层流时
$$\lambda = \frac{64}{Re} \text{ (或 } f = \frac{8}{Re} \text{)} \tag{1-8}$$

- (b) 稳定湍流时

- i 对光滑管，经实验确定，当 $5000 < Re < 2 \times 10^5$ 时

其一为
$$\lambda = \frac{0.316}{Re^{0.25}} \text{ (或 } f = \frac{0.0395}{Re^{0.25}} \text{)} \text{ 柏拉修斯式} \tag{1-9a}$$

其二为
$$\lambda = \frac{0.184}{Re^{0.2}} \text{ (或 } f = 0.023 Re^{-0.2} \text{)} \tag{1-9b}$$

- ii 对于一般的钢管或铁管，当 $Re = 3 \times 10^3 \sim 3 \times 10^6$ 时

$$\lambda = 0.01227 + \frac{0.7543}{Re^{0.38}} \tag{1-10}$$

- b. 查图法求 λ 或 f 对粗糙管，通过相对粗糙度 ϵ/d 和 Re 查图 1-5 得 λ （或 f ）。此法较为准确，也适用于光滑管。 ϵ 称管壁的绝对粗糙度（mm），可由表 1-1 查得。

表 1-1 管壁的绝对粗糙度

管子材料及使用情况	绝对粗糙度 ϵ/mm	管子材料及使用情况	绝对粗糙度 ϵ/mm
干净的拉制管、黄铜、铅管及玻璃管	0.0015~0.01	煤气管路上用过一年的无缝钢管	约 0.12
橡胶软管	0.01~0.03	略受腐蚀的无缝钢管	0.2~0.3
水泥浆粉管	0.45~3.0	旧的上锈钢管	0.6~0.7
陶土排水管	0.35~6	镀锌管或新铸铁管	0.25~0.4
新无缝钢管	0.04~0.07	受腐蚀的旧铸铁管	>0.85

- c. 直管段的阻力损失（范宁公式） 用压降表示阻力损失（单位 Pa）

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \times \frac{\rho u^2}{2} \tag{1-11}$$

式中 l ——管子长度，m。

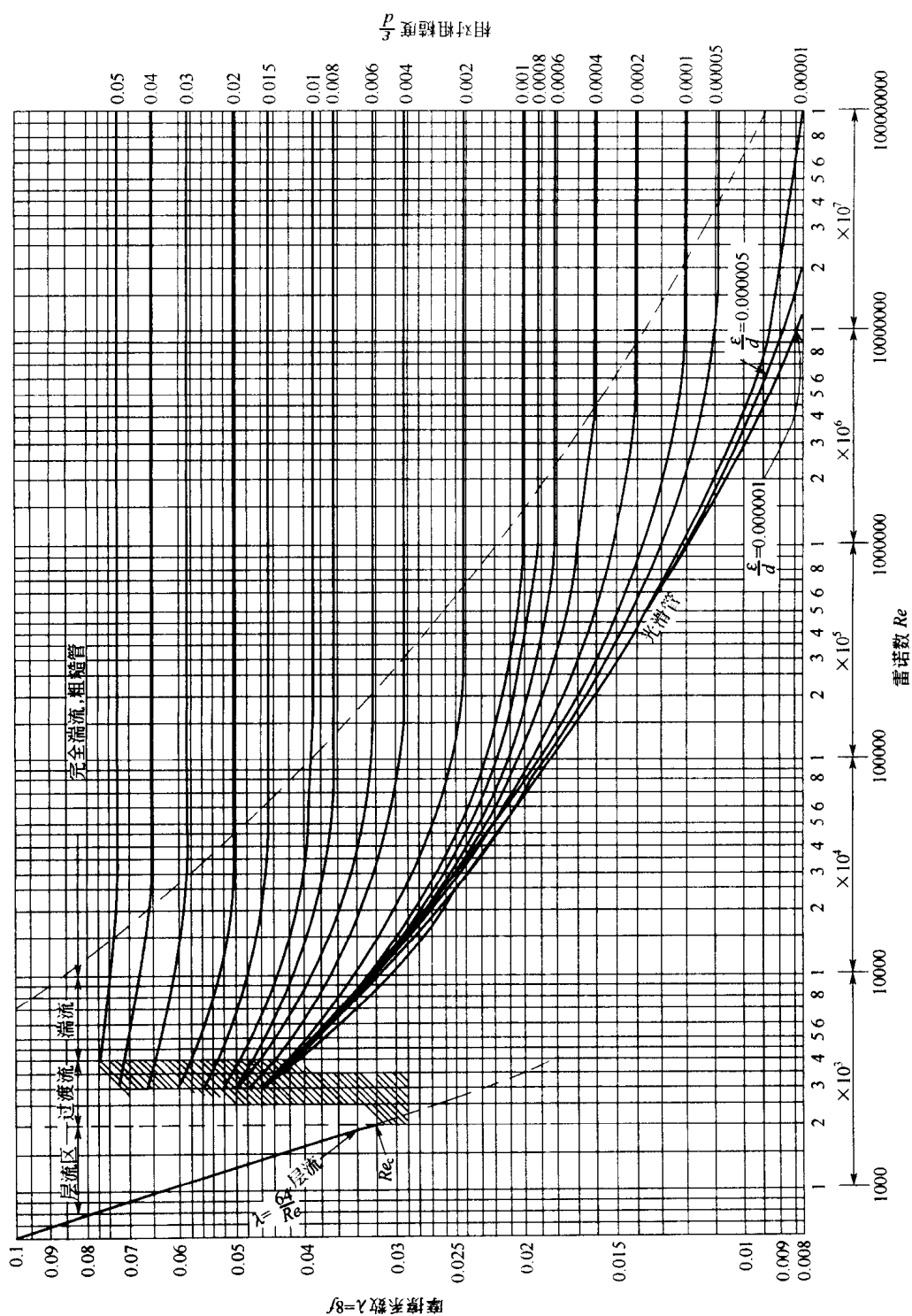


图 1-5 摩擦系数与雷诺数和相对粗糙度的关系

用单位质量流体的能量损失表示阻力损失

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \times \frac{u^2}{2} \quad (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (1-12)$$

用单位重量流体的能量损失表示阻力损失

$$H_f = \lambda \frac{l}{d} \times \frac{u^2}{2g} \quad (\text{J} \cdot \text{N}^{-1} = \text{m 液柱}) \quad (1-13)$$

② 局部阻力损失

a. 当量长度法

$$h'_f = \lambda \frac{l_e}{d} \times \frac{u^2}{2} \quad (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (1-14)$$

$$H'_f = \lambda \frac{l_e}{d} \times \frac{u^2}{2g} \quad (\text{m 液柱}) \quad (1-15)$$

式中 l_e/d ——当量长度与管内径之比（查表 1-2）。

表 1-2 管件与阀门的阻力系数和当量长度数据（适用于湍流）

名 称	阻力系数 ζ	当量长度与管径之比 l_e/d	名 称	阻力系数 ζ	当量长度与管径之比 l_e/d
弯头, 45°	0.35	17	标准截止阀		
弯头, 90°	0.75	35	全开	6.4	300
三通	1.0	50	半开	9.5	475
回弯头	1.5	75	角阀, 全开	2.0	100
管接头, 活接头	0.04	2	止逆阀		
闸阀			球式	70.0	3500
全开	0.17	9	摇板式	2.0	100
半开	4.5	225	水表, 盘式	7.0	350
			孔板流量计		200

b. 阻力系数法

$$h'_f = \zeta \frac{u^2}{2} \quad (\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}) \quad (1-16)$$

$$H'_f = \zeta \frac{u^2}{2g} \quad (\text{m 液柱}) \quad (1-17)$$

式中 ζ ——局部阻力系数，量纲为 1（查表 1-2）。

c. 全程阻力损失

全程阻力损失 = 直管阻力损失 + 局部阻力损失。

单位可根据流体能量的表达形式分别采用 Pa、

$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 m（液柱）表示。

4. 应用举例

(1) 静力学基本方程的应用

① U 形管压强计（见图 1-6）

$$p_1 - p_2 = (\rho_0 - \rho) g R \quad (1-18)$$

② 液面计（见图 1-7）

$$p_0 + \rho g h_1 = p_0 + \rho g h_2 \quad (1-19)$$

$$h_1 = h_2 \quad (1-20)$$

注：该液面计适用于测试液和被测液皆为同一种液体。

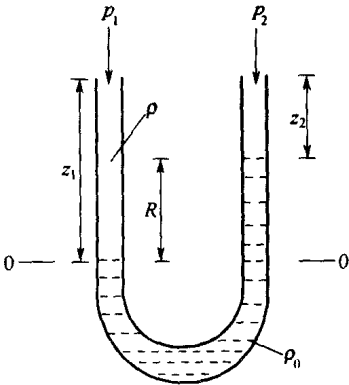


图 1-6 U 形管压强计

(2) 伯努利方程式的应用

① 孔板流量计

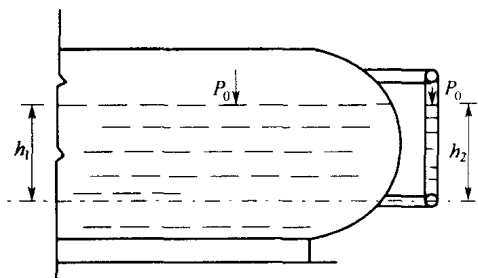


图 1-7 液面计

$$q_V = A_0 C_0 \sqrt{2gR \frac{\rho_0 - \rho}{\rho}} \quad (1-21)$$

式中 A_0 ——小孔面积, $A_0 = \frac{\pi}{4} d_0^2$, m^2 ;

d_0 ——小孔直径, m ;

C_0 ——孔流系数, 可由实验测定, 量纲为 1;

ρ_0, ρ ——分别为指示液和被测液体的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

该式为流量 q_V 与孔板流量计 U 形管两臂液位差 R 的关系式, 即流量 q_V 与 $\sqrt{R}$ 为线性关系。

$k = A_0 C_0 \sqrt{2g \frac{\rho_0 - \rho}{\rho}}$ 为孔板流量计关系式的斜率, 在具体测量时 k 为常数。

② 转子流量计

$$q_V = C_R A_R \sqrt{\frac{2gV_t(\rho_t - \rho)}{A_t \rho}} \quad (1-22)$$

式中 A_R ——转子与管壁之间的环隙面积, m^2 ;

C_R ——流量系数, 由实验测定, 量纲为 1;

V_t ——转子的体积, m^3 ;

A_t, ρ_t ——分别为转子的最大截面积 (m^2) 和密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$);

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

因此流量 q_V 与 A_R 成正比。这样, 随转子高度的改变, A_R 也改变, 所以, 由转子的高度就可测得 q_V 的值。

(3) 管路计算 (详见例题及习题)

(4) 流体输送机械的原理和有关计算

① 离心泵

a. 离心泵的原理 (略)

b. 离心泵的安装高度 离心泵的安装高度 H_g 是指吸入端液面至泵吸入口间的垂直距离, 它与吸入端液面上方的压强 p_0 、液体工作温度 t 下的饱和蒸气压 p_i^* 、液体的密度、流速和吸入管路的阻力损失等有关, 所以 H_g 受到一定的限制。

(a) 对水泵, 在泵的铭牌上标出允许吸上真空高度 H_s (m 水柱), H_s 的值是在压力为 $9.81 \times 10^4 \text{ Pa}$ (即 10 m 水柱) 下输送 20°C 的清水时的实验值, 在此条件下, 不发生气蚀现象的最高安装高度 H_g 为

$$H_g = H_s - \frac{u^2}{2g} - \sum H_f \quad (1-23)$$

为了求得密度为 ρ 的工作液体在操作压力和温度下泵的安装高度, 应对 H_s 作如下校正:

$$H'_s = \frac{H_s \rho_{\text{水}}}{\rho_{\text{液}}} - \left(\frac{10 \rho_{\text{水}}}{\rho_{\text{液}}} - \frac{p_0}{\rho_{\text{液}} g} \right) - \frac{p_i^* - p_{20}^*}{\rho_{\text{液}} g} \quad (1-24)$$

式中 p_i^*, p_{20}^* ——分别为工作液体在 T 和 20°C 时的饱和蒸气压, Pa ;

$\rho_{\text{水}}, \rho_{\text{液}}$ ——分别为水和工作液体的密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

式 (1-24) 中, 因温度对水的密度影响不大, 水在 20°C 时的饱和蒸汽压很小, 可忽

略，故可简化为

$$H'_s = H_s - \left(10 - \frac{p_0}{\rho_{\text{液}} g}\right) - \frac{p_i^*}{\rho_{\text{液}} g}$$

则该条件下离心泵的安装高度为

$$H'_g = H'_s - \frac{u^2}{2g} - \sum H_f \quad (1-25)$$

(b) 有一些化工泵铭牌上不标示出 H_s ，而是标出气蚀余量 Δh (m 水柱) 时，可直接用下式计算安装高度

$$H_g = \frac{p_0 - p_i^*}{\rho_{\text{液}} g} - 1.3 \Delta h' - \sum H_f \quad (1-26)$$

式中 p_0 ——吸入端液面上方的压强；

$\Delta h'$ ——将 Δh (m 水柱) 值换算为该液体的 (m 液柱) 值。参见习题 1-21。

② 其它输送机械原理 (略)

a. 往复压缩机

b. 离心式压缩机

c. 出口压力较高的多级压缩

5. 工程实验数据的一个重要处理方法——量纲分析法 (略)

6. 本章学习应注意的问题

(1) 应用伯努利方程时，衡算截面和基准面的正确选取。

① 衡算截面的选取一定要垂直于流体流动方向，如图 1-8 中的 1-1 截面，2-2 截面，3-3 截面而且流向必须 1-1 → 2-2 → 3-3。对于 2-2 面，虽与液槽内液面平行，但仍与流动方向垂直，因为液面是逐渐上升或下降的。

② 截面流速的取舍 由于储槽的截面与管道截面相比很大，因而槽内液面的升降，亦即流速的大小与管道流速相比很小，故可近似认为 $u_{\text{槽}} = 0$ ；对于计算截面选在 1-1、3-3 之处的管路上，流速不能忽略 $u_{\text{管}} \neq 0$ 。

③ 基准面的选取 一般基准面多选在计算范围的最低水平面上，这样可使各计算截面的位能均为正值或 0，有利于计算的简化。当然基准面如果不选在最低位置也可以，这样低于基准面的计算截面的位能为负值，计算不太方便。在后面所述的离心泵的安装高度就是一例，对于初学者，一般应将基准面选在通过最低截面的水平面上。

(2) 有关图示 在流体动力学中，正确的图示可使某些不易理解的问题得到简化。

如题目中条件是密闭容器，有些初学者画成敞口，将液面上的压强误认为大气压；反之，题目中容器应通大气，可能又忘了必要的图示 [见图 1-9 (a)]，而画成了图 1-9 (b)；又如基准面的选取应保持两衡算截面之间流体的连续性，如图 1-9 (c) 所示，若画成图 1-9 (d)，则进口管与储槽液面间流体不连续，故不能将 2-2 截面选在储槽液面上，应如图 1-9 (d) 将 2-2 截面选在进口管处。

(3) 离心泵安装高度的正和负 离心泵安装高度的计算结果有正、负之分。一般情况可先假设泵口在吸入端液面之上，画出图示并列伯努利方程。但若计算结果为负值，说明假设错误，泵口应在吸入端液面之下，则应重新画图，表示出正确的结果 (见习题 1-20 和 1-21)。

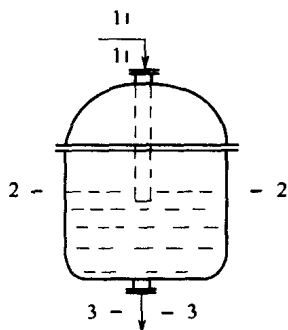


图 1-8 选取截面和基准面

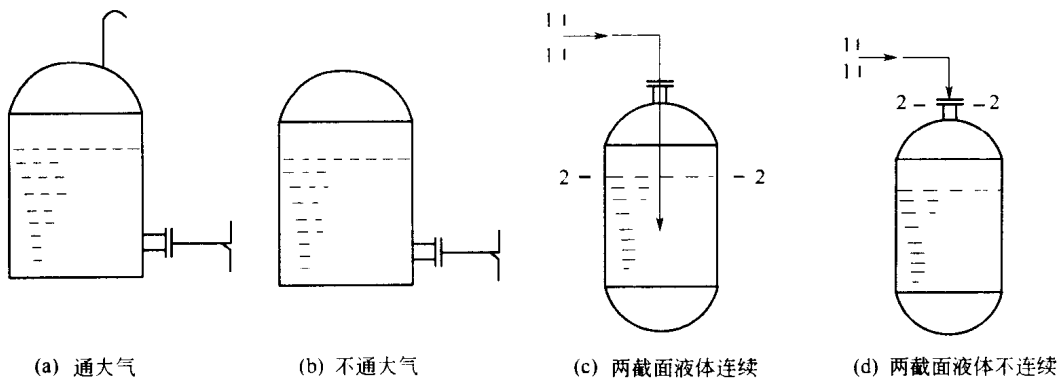


图 1-9 正确画图

二、例题

1. 静力学原理

【例 1-1】 图 1-10 所示为用 U 形管压强计测量高塔水溶液液位的装置示意。

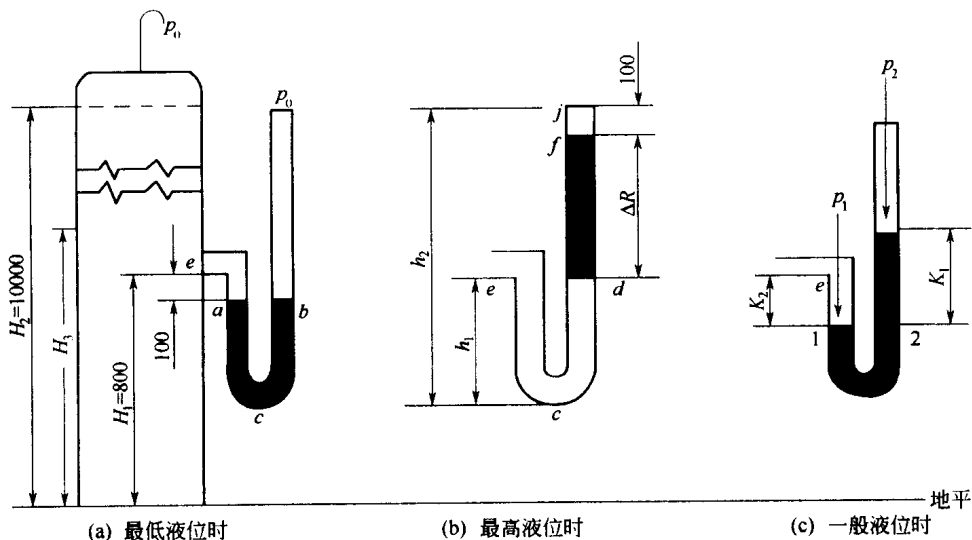


图 1-10 用 U 形管压强计测量高塔水溶液液位的装置示意 (图中尺寸以 mm 计)

已知：要求塔内最低液位 $H_1 = 0.8 \text{ m}$ ，最高液位 $H_2 = 10 \text{ m}$ 。当塔内为最低液位时，为使水银不致溢出进入塔内， ae 间的垂直距离应 $\geq 0.1 \text{ m}$ ，如图 1-10 (a) 所示；当塔内为最高液位时，为使水银不致溢出 U 形管右侧管口， $jf \geq 0.1 \text{ m}$ ，如图 1-10 (b) 所示。高塔液体密度 $\rho = 1.0 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ；U 形管规格为 $\phi 20 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。

试设计：(1) 汞的用量 (kg)；

(2) U 形管底部距右管口的高度 h_2 [见图 1-10 (b)]；

(3) U 形管底部距左管口的高度 h_1 [见图 1-10 (b)]；

(4) 当高塔内液体在某液位时，测得 U 形管汞柱值 $K_1 = 0.40 \text{ m}$ ， $K_2 = 0.30 \text{ m}$ ，试计算容器内液位高度 H_3 ，[见图 1-10 (a)，图 1-10 (c)]。

分析：(1) 这是一个根据高塔液位（最高和最低液位）来设计 U 形管压强计的实例。

其原理是流体静力学方程 [式 (1-2)] 的两个推论。

① 同一流体同一水平面上的压强相等。

② 液体内任一点压强 $p = p_0 + \sum \rho gh$, p_0 为液面上压强或大气压。

(2) 设计 U 形管压强计时, 当 p_0 和 g 一定时, 要根据被测液体的最高液位来选择指示液 (本题已选为汞), 在足够精确的条件下, 使指示液尽可能少, U 形管尽可能短, 并让观察者容易读数。

解: (1) 当高塔内液位最低时, $H_1 = 0.8 \text{ m}$, 可设定 U 形管与高塔的接口 e 点距地面 0.8 m [见图 1-10 (a)]。

当液体在最高位, 即液位 $H = H_2 = 10 \text{ m}$ 时, 为了容易观察并节省水银指示液, 应使水银集中于右管内, 可设定此时水银底部 d 与 e 在同一水平面上, 即距地面 0.8 m [见图 1-10 (b)]。与高塔最低液位相比较, 液压增加了 $\Delta H = 10 \text{ m} - 0.8 \text{ m} = 9.2 \text{ m}$ 水柱, 根据静力学方程式 (1-2) 的两个推论得

$$p_e = p_d$$

$$p_0 + \Delta H \rho g = p_0 + \Delta R \rho_{\text{Hg}} g$$

$$\Delta R = \frac{\Delta H \rho}{\rho_{\text{Hg}}} = \frac{9.2 \text{ m} \times 1.00 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}{13.6 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} = 0.676 \text{ m}$$

由以上计算, 当高塔内液位最高时, 水银柱最高点距地面高度等于 $\Delta R + H_1 = 0.676 \text{ m} + 0.8 \text{ m} = 1.476 \text{ m}$, 便于观察。

这样, 当塔内最低液位时, 水银柱底面距地面为 0.8 m ; 当塔内最高液位时, 水银柱顶面距地面 1.46 m , 都较容易观察, 说明原设定的 e 点较适宜。

U 形管内的水银用量

当最低液位时 [见图 1-10 (a)]

$$m = \frac{\pi}{4} d^2 \Delta R \rho_{\text{Hg}} = 0.785 \times (0.02 \text{ m} - 2 \times 0.002 \text{ m})^2 \times 0.676 \text{ m} \times 13.6 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \\ = 1.848 \text{ kg}$$

(2) 确定 U 形管底部 c 到接管口 e 的垂直高度 h_1 [见图 1-10(a)、图 1-10(b)]

$$h_1 \approx \frac{1}{2} \Delta R + ea = \frac{1}{2} \times 0.676 \text{ m} + 0.1 \text{ m} = 0.438 \text{ m}$$

(3) 确定 U 形管总高度 h_2

$$h_2 = h_1 + \Delta R + jf = 0.438 \text{ m} + 0.676 \text{ m} + 0.10 \text{ m} = 1.21 \text{ m}$$

(4) 当测得 U 形管压强计的值 $K_1 = 0.40 \text{ m}$, $K_2 = 0.30 \text{ m}$ 时, 根据静力学方程的两个推论, 可求水位高 H_3 。

图 1-10 (c) 中, 取 1、2 两点组成的水平面分析。结合图 1-10 (a) 和图 1-10 (b)

$$p_1 = p_2 \quad (1-27)$$

$$p_1 = p_0 + (H_3 - H_1 + K_2) \rho g \quad (1-28)$$

$$p_2 = p_0 + K_1 \rho_{\text{Hg}} g \quad (1-29)$$

将式 (1-28)、式 (1-29) 代入式 (1-27) 得

$$(H_3 - H_1 + K_2) \rho = K_1 \rho_{\text{Hg}}$$

$$H_3 = \frac{K_1 \rho_{\text{Hg}}}{\rho} + H_1 - K_2 = \frac{0.40 \text{ m} \times 13.6 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}}{1 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}} + 0.80 \text{ m} - 0.30 \text{ m} = 5.94 \text{ m}$$