

全国高职高专药学类专业规划教材

药用物理

(第二版)

主编 丁桂祥



科学出版社

www.sciencep.com

全国高职高专药学类专业规划教材

药用物理

(第二版)

主 编 丁桂祥

副主编 楼渝英 郝炳金 郭树怀

编 委 (按姓氏汉语拼音排序)

白培军(四川中医药高等专科学校)

邓岩浩(沈阳药科大学高等职业技术学院)

丁桂祥(中国药科大学高等职业技术学院)

郭树怀(邢台医学高等专科学校)

郝炳金(山东中医药高等专科学校)

楼渝英(重庆医药高等专科学校)

科学出版社

北 京

· 版权所有 侵权必究 ·

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303(打假办)

内 容 简 介

本书根据药学类专业高职教育的特点和要求,充分体现高职教育的针对性和实用性,结合多年来读者使用此书的建议和意见,考虑了国内外物理教材改革的动态和发展修订而成。此次再版,保留了第一版的体系、风格和特色,调整了个别章节,重写了全书内容,增加了知识链接、拓展提高、生活探秘、小小案例等,充实了应用类的目标检测和实验实训内容。全书构思新颖,应用突出,通俗易懂,可读性强。

本书可作为高职类制剂工程、药学、药物分析、制药工程等专业的物理教材使用,也可作为各类成人大学的物理教材或参考书之用。

图书在版编目(CIP)数据

药用物理 / 丁桂祥主编. —2 版. —北京:科学出版社,2009

全国高职高专药学类专业规划教材

ISBN 978-7-03-026014-7

I. 药… II. 丁… III. 药理学:物理学-高等学校:技术学校-教材 IV. R912

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 205937 号

策划编辑:张 茵 / 责任编辑:张 茵 / 责任校对:桂伟利

责任印制:刘士平 / 封面设计:黄 超

版权所有,违者必究。未经本社许可,数字图书馆不得使用

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新 蕾 印 刷 厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2004 年 8 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2009 年 12 月第 二 版 印张:18 1/2

2009 年 12 月第三次印刷 字数:457 000

印数:6 001—10 000

定价:32.00 元

如有印装质量问题,我社负责调换

第二版编写说明

本书以丁桂祥、朱连喜主编的《药用物理》2004年第一版为基础,考虑了当前高职学生的实际及国内外物理教材改革的动态和发展,结合广大读者所提出的建议和意见编写而成。

此次再版,保留了第一版的体系、风格和特色。本着贴近实际、与时俱进的原则,本书调整了个别章节,重写了所有内容,增加了知识链接、拓展提高、生活探秘、小小案例等,充实了应用类的目标检测和实验实训内容。

与第一版相比,本书适度降低了气体动理论、原子核物理、交流电路的理论要求,增加了可编程控制器、变频器、传感器和安全用电等方面的知识。

本书采用国际单位制,估计讲授时数为68学时。全书分11章,对要求较高的基础理论,目录中加以“*”号,作为选讲或自学用。考虑到本书对高等数学有一定的要求,因此建议将物理课安排在一年级第二学期开设。

本书的实验内容是由负责相关章节理论的同志分别编写的,楼渝英同志审阅了第1~3章,中国药科大学朱连喜同志为本书的再版提出了许多宝贵意见,使本书的内容日臻完善,我们在此表示衷心的感谢。

本书的主要参考书为程守洙、江之永主编的《普通物理学》(高等教育出版社,1998年第5版)和秦曾煌主编的《电工学》(高等教育出版社,1999年第5版)。

由于编者水平有限,时间仓促,书中的缺点和错误在所难免,衷心希望广大读者,尤其是使用本书的教师和同学们批评指正。

全书配套有PPT课件,以方便教师教学与学生复习。课件下载请登陆科学出版社网站 www.sciencep.com,免费注册后进入右下方下载区→课件→医学,即可查找所需课件并下载。

编者
2009年6月

第一版编写说明

我国的高职教育正进入一个迅速发展的时期,高职教材建设关系到高职教育培养目标的实现和高职人才培养质量的保证,因此,编写出版与之相适应的、能够反映高职特色的教材成了当务之急。为此目的,根据高等职业教育的特点、充分考虑了医药生产的实际需要,本教材于2000年编写出第一稿。在中国药科大学校内,经过四届高职学生的使用。在此基础上,充分听取了后续课程教学和实训教学过程中教师的意见,重新组织编写了本教材。

编写本教材的指导思想是强化高职教育培养目标,体现基础性和实用性的统一。在教学内容的安排和取舍上,充分考虑到培养应用型人才的需要,以医药职业为导向,以实际工作岗位的需要为依据,以实际生产和管理部门需要的技能和技术为主要内容。遵循“够用会用”的原则,注重横向联系和与专业课的接口,力求为专业教学和实训教学搭建一个操作平台。本教材突破了传统的思路和框架,不再采用传统的物理章节,尝试建立一套新的实用性较强的物理课程体系。在教材体系上充分体现高职教育的针对性和实用性,又考虑课程结构的科学合理性;在教材内容上既要降低理论深度、难度,又要保证够用,同时还能及时反映物理科学的新技术。与众多高职物理教材不同之处在于,本教材内容以药学类专业课程的需要为主线,介绍与此有关的基本理论和基本概念。为了使學生能适应现代医药工业自动化生产的需要,本教材尝试将物理学、电工技术、电子技术三门课程整合在一起,构思新颖,应用性强是其特征。由于本教材选用了以上三门学科中的部分内容满足药学类专业的需要,所以定名为《药用物理》。

为了确保高职教育的教学质量,努力办出高职特色,在充分考虑了生源差异的情况下,本书力求做好与中学课程的衔接。考虑到高等职业教育学制较短的具体情况,本书充分体现了高职教育的针对性和实用性,根据药学类各专业对物理学、电工技术、电子技术三门课程的需求,将其整合在一起,因而书中涉及的内容可分为三个部分。根据各专业的实际情况,在教学过程中可以有所侧重地调整。

物理学部分是高职药学类各专业的理论课学习之前必须具备的基本知识,主要精选并适当加强了物理学中与之密切相关的内容,主要有流体力学、气体动理论,热力学、电磁学基础,振动与波、光的波动性,原子及原子核物理基础等基本概念及其主要应用。电工技术部分是高职药学类各专业在讲授现代医药工业自动化生产之前,必须具备的基本知识。目前,电工技术的应用普及到各个具体的生产岗位,制药生产中的技术人员当然不需要达到电工的专业水平,但如果不懂得电工知识,显然不能适应现代工业生产的需要。

为此,本书在电路方面,主要以交流电路为主;在电器方面,主要以异步电动机、变压器和常用低压电器的使用为主。本书注意到与后续专业课的分工,书中一

般不讨论专用设备,只介绍与之相关的一般规律和原理。另外,本书还适当加强了安全用电知识。电子技术是控制系统的基础之一,为了与现代药业生产相适应,本书按照“逐步完善”的思路,由简到难地对一些常用电子电路(包括分立元件电路、集成电路、数字电路)做了一般性介绍。本书在最后增加了传感器和自动控制的基本知识。

本教材建议讲授 68 学时,实施过程中可根据学生的具体情况和专业的不同需要做适当增减。书后的实验,可根据具体的教学设施和专业的需要,自行选择或自行设计实验内容。本书在每章后均给出了一定数量的习题,其计算部分的答案集中附于书后。

由于编者能力有限,书中难免有错误和不足之处,殷切期望广大读者,特别是使用本书的教师和同学提出宝贵意见,以便今后修订时提高。

编 者

2004 年 7 月

目 录

第1章 流体力学	(1)
第1节 液体的表面现象	(1)
第2节 理想流体的稳定流动	(6)
第3节 伯努利方程	(7)
第4节 黏滞性流体的流动	(11)
第5节 斯托克斯定律	(14)
第2章 分子物理学与热力学	(18)
第1节 理想气体的压强和温度	(18)
第2节 能量均分定理	(22)
第3节 气体分子速率的统计分布规律	(24)
第4节 热力学第一定律	(27)
第5节* 热力学第二定律	(31)
第3章 电磁学基础	(38)
第1节 静电场	(38)
第2节 磁场	(43)
第4章 振动与波	(53)
第1节 简谐振动	(53)
第2节 机械波	(59)
第3节 波的衍射	(62)
第4节 波的干涉	(64)
第5节 声波和超声波	(65)
第5章 光的波动性	(73)
第1节 光的干涉	(73)
第2节 光的衍射	(78)
第3节 光的偏振	(87)
第4节 旋光现象	(94)
第5节 光的吸收	(97)
第6章 原子结构及原子核物理	(103)
第1节 氢原子光谱 玻尔的氢原子理论	(103)
第2节 激光	(106)
第3节 光的粒子性和实物粒子的波动性	(109)
第4节* 波函数及薛定谔方程	(115)
第5节 原子核的基本性质	(118)
第6节 原子核的结合能	(120)
第7节 原子核的放射性衰变	(121)
第7章 直流电路	(127)
第1节 电路的基本概念	(127)
第2节 基尔霍夫定律	(130)
第3节 电源的等效变换	(132)
第4节 叠加原理	(135)

第8章 正弦交流电路	(140)
第1节 正弦交流电的基本概念	(140)
第2节 正弦量的相量图表示法	(143)
第3节 单一参数元件的交流电路	(144)
第4节 RL 串联的交流电路	(150)
第5节 RLC 串联的交流电路	(152)
第6节 功率因数	(156)
第7节 三相电源	(157)
第8节 三相负载	(160)
第9节 三相电路的功率	(164)
第10节 安全用电	(166)
第9章 变压器	(174)
第1节 磁路的基本概念	(174)
第2节 变压器的基本结构	(176)
第3节 变压器的工作原理	(177)
第4节 变压器的损耗与效率	(180)
第5节* 变压器的铭牌	(180)
第6节 特种变压器	(181)
第10章 交流电动机及其控制电路	(184)
第1节 三相异步电动机	(184)
第2节 单相异步电动机	(190)
第3节 常用低压电器	(192)
第4节 三相异步电动机的使用	(195)
第5节 三相异步电动机的继电器接触器控制	(200)
第6节* 可编程序控制器	(204)
第11章 电子技术基础	(214)
第1节 半导体元件	(214)
第2节 晶体管直流稳压电路	(221)
第3节* 晶体三极管放大电路	(226)
第4节* 模拟集成运算放大器	(235)
第5节 数字电路简介	(237)
第6节 传感器简介	(238)
实验一 测定规则物体的密度	(247)
实验二 测定流体的黏度	(251)
实验三 用模拟法测绘静电场	(253)
实验四 分光计的应用	(256)
实验五 利用旋光性测定溶液的浓度	(261)
实验六 验证基尔霍夫定律与叠加原理	(264)
实验七 电感性负载与电容器并联	(267)
实验八 三相负载的连接	(270)
实验九 三相异步电动机的继电器接触器控制	(273)
实验十 直流稳压电源的制作与调试	(275)
主要参考文献	(278)
药用物理教学基本要求	(279)
部分目标检测题参考答案	(284)

第1章 流体力学



1. 了解静止流体内部的压强、液体的表面现象、毛细现象、黏滞性和雷诺数
2. 理解液体的表面张力、表面张力系数、表面活性物质及斯托克斯定律
3. 掌握流体的连续性原理、伯努利方程及其应用、牛顿黏滞性定律

固体、液体和气体是物质存在的三种状态。液体和气体没有固定的形状,只要受到很小力的作用,各部分之间很容易发生相对运动,这种特性称为流动性。由于液体和气体都具有流动性,所以统称为**流体**。物理学中,研究流体运动规律的学科称为**流体力学**。

流体力学在工程技术和科学实验等方面都有广泛的应用,对于药学类专业,如药物合成和生产过程中,大量涉及有关流体的知识,如压缩空气、洁净空气、注射用水和液体药品原料的输送、测量和控制等。学习和掌握流体力学的基本知识将为学习药学知识打下基础。本章主要学习静止流体的力学性质和流动流体运动的基本规律。

第1节 液体的表面现象

一、静止流体内部的压强

由于流体受重力的作用,所以流体内部有压强存在。静止流体内部,产生的压强与哪些因素有关呢?如图1-1所示的液体,假设液体的密度为 ρ ,液柱截面积为 S ,液柱的深度为 h ,液柱上方压强为 P_1 ,液柱深 h 处的压强为 P_2 ,液柱深 h 处面积 S 上沿垂直方向的平衡条件为

$$P_2 S = P_1 S + \rho g h S$$

即

$$P_2 = P_1 + \rho g h \quad (1.1)$$

式(1.1)给出了静止流体内部的压强。静止流体内部的压强具有以下几个特点。

- (1) 液体除了对容器底部产生压强外,还对侧壁产生压强。
- (2) 在液体内部同一深度各个方向的压强都相等。
- (3) 液体压强的大小只与液体的种类(密度 ρ)和深度 h 有关,而与液体的质量、体积无关。
- (4) 密闭容器内的液体能把它受到的压强按原来的大小向各个方向传递。

1643年意大利的物理学家托里拆利用他发明的水银气压计测量了大气压。如图1-2所示,

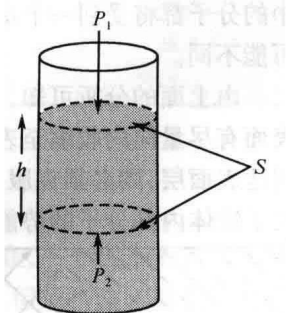


图1-1 静止流体的压强

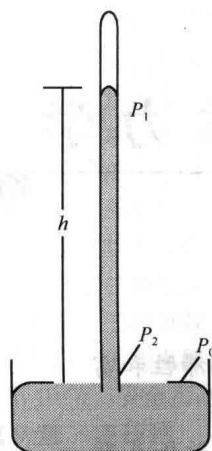


图 1-2 测量大气压

先将一端封闭的、长约 1m 的玻璃管充满水银,然后倒放于盛水银的槽中,管内水银面下降到一定程度即停止,留下的空间除水银蒸气外没有其他气体,在常温下水银蒸气压可忽略。测量得水银柱高 76cm,通过计算可得大气压为

$$P_0 = P_2 = P_1 + \rho gh = \rho gh$$

$$= 1.36 \times 10^4 \times 9.80 \times 0.76 = 1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$$

这就是我们通常所说的一个标准大气压的大小。

例 1-1 跳水运动员从水下 1m 沉到 3m 深处,他受到的水对他的压强增加了多少?

解: 运动员沉到 3m 深处水对他的压强减去 1m 处的压强,就是水对他增加的压强。

$$\Delta P = P_2 - P_1 = (P_0 + \rho gh_2) - (P_0 + \rho gh_1) = \rho g(h_2 - h_1)$$

$$= 1.0 \times 10^3 \times 9.8 \times (3 - 1) = 1.96 \times 10^4 \text{ Pa}$$

二、液体的表面张力

在雨天,我们发现荷叶上的小水滴呈球形,清晨的露珠也是球形的,为什么呢? 我们用一个简化的模型来分析产生这种现象的原因。

设分子间的有效作用距离为 r_e (r_e 大约为 10^{-10} m),当分子间距大于 10^{-9} m 时,就可以忽略它们间的相互作用。

在图 1-3 中,在液体内部以分子 A 为中心、以 r_e 为半径的球面内的所有其他分子对 A 分子有分子力的作用,由于对称性,其分子力的合力为零。但是对于液体表面的分子情况就不同了,对于表面的分子 B,以 B 为中心、以 r_e 为半径的球体的一部分落在了液面外侧,空气分子对 B 分子的作用可忽略不计,于是 B 受到一个垂直于液面并指向液体内部的合外力的作用。可以看出,所有位于表面层中的分子都将受到一个指向液体内部的作用力,尽管作用力的大小可能不同。

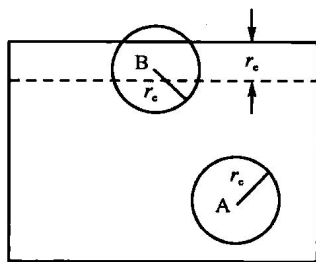


图 1-3 表面张力的形成

由上面的分析可知,处在表面层中的分子都有向液体内部靠拢的趋势,宏观上表现为液体表面有尽量向内收缩至表面积最小的趋势,犹如张紧了弹性薄膜。如果液体内部的分子试图到达表面层,则必须克服上述指向液体内部的其他分子引力做功,使表面层的分子的势能总是大于液体内部分子的势能,我们将液体表面层的分子比液体内部分子多出势能的总和称为表面能,用 E 表示。从力的角度看,在液体表面层内形成了一种向内收缩的力,这种力称为表面张力。表面张力的存在,使得液体尽量减小它的表面积而使表面能最小。

在液面上任取长为 l 的一段假想的线段,把液面分割为两部分,如图 1-4 所示,实验发现,表面张力的方向处处与液面相切,与分界线垂直,其大小与液面分界线的长度成正比,即

$$f = \alpha l \quad (1.2)$$

$$\alpha = \frac{f}{l} \quad (1.3)$$

式中, α 为液体的表面张力系数,它表示单位长度直线两侧液面的

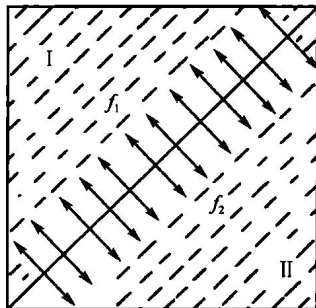


图 1-4 表面张力

拉力。在 SI 中,表面张力系数的单位是 $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

表面张力系数也可从做功的角度定义。如图 1-5 所示,取一个 U 形金属框,在上面放一个细金属丝 AB,AB 的左侧张满液膜,设金属框的宽度为 l ,则维持 AB 静止的力 f 必须与表面张力的的大小相等且方向相反,由于液膜有两个表面,所以

$$f = 2\alpha l$$

设想在 f 的作用下,AB 缓慢地向右移动一个微小距离 Δx ,则外力做的功为

$$\Delta A = f\Delta x = 2\alpha l\Delta x = \alpha\Delta S$$

式中, ΔS 为液膜表面积的增量。由上式可以看出,表面张力系数等于增大液体单位表面积时,外力所需做的功,即

$$\alpha = \frac{\Delta A}{\Delta S} \quad (1.4a)$$

由于外力所做的功完全用于克服表面张力而增大液膜的表面能 E ,所以表面张力系数也可以写作

$$\alpha = \frac{\Delta E}{\Delta S} \quad (1.4b)$$

式(1.4b)说明,表面张力系数等于增大液体单位表面积时所增加的表面能(表面层内分子间的相互作用势能)。

实验表明,表面张力系数与温度关系密切, α 的值随着温度的升高而减小,表 1-1 给出了几种液体的表面张力系数。另外,同种液体在与不同物质接触时表现出不同的 α 值。例如, 20°C 时,在与苯为界时,水的表面张力系数为 $33.6 \times 10^{-3} \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$;与醚为界时,水的表面张力系数则为 $12.2 \times 10^{-3} \text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

表 1-1 液体的表面张力系数 α

物质	$t/^\circ\text{C}$	$\alpha/(10^{-3} \text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	物质	$t/^\circ\text{C}$	$\alpha/(10^{-3} \text{N} \cdot \text{m}^{-1})$
水	20	72.8	乙醇	20	22.0
丙酮	20	23.7	氯仿	20	27.1
乙醇	20	22.8	苯	20	28.8
甲醇	20	22.6	甘油	20	63.4

三、润湿现象和不润湿现象

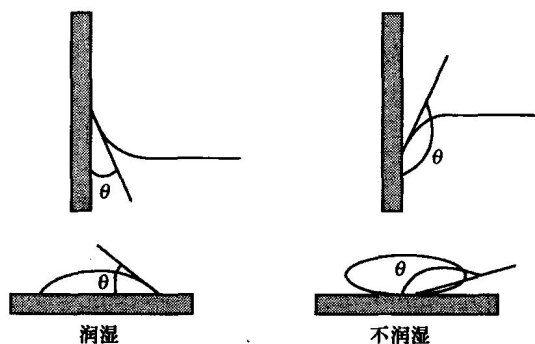


图 1-6 接触角

由于表面张力的存在,一个微小的液滴单独存在时它总是呈球形的,但是当液体和固体接触时却可能表现出不同的表面现象。例如,玻璃板上的小水银滴呈球形,如果在无油脂的玻璃板上放一滴水,水滴会附着在玻璃板上,如图 1-6 所示。在液体与固体相接触处,分别作液面和固体表面的切面,这两个切面间的夹角 θ 叫做接触角,当 θ 为锐角时,称液体润湿固体,这种现象称为润湿现象, $\theta = 0$ 产生完全润湿。当 θ 为钝角时,称液体不润湿固体,这种现象称为不润湿现象。

象。 $\theta = \pi$ 时产生完全不润湿。产生润湿现象和不润湿现象的原因是什么？我们将液体与固体接触的分子间有效作用距离为 r_e 的薄层叫做附着层。附着层的分子不仅受到液体分子的作用力，而且还受固体表面分子的作用力，同种物质分子之间的吸引力叫做内聚力，不同种物质分子之间的吸引力叫做附着力。当内聚力大于附着力时，接触面附近的液体分子受到一个指向液体内部的力，液面有收缩的趋势，从而使液体不能润湿固体。反之，附着层的液体分子将受到指向固体的力，液面有扩张的趋势，从而使液体润湿固体。

表面活性物质

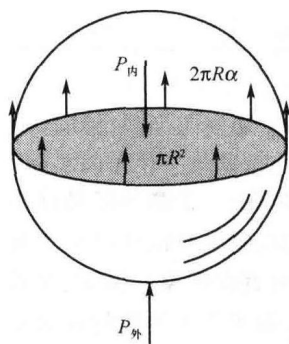
在一定温度下，液体的表面张力系数是一定的。例如， 20°C 时，水的表面张力系数为 $72.75\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ ，苯的表面张力系数为 $28.88\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。在纯净液体中加入少量溶质，可以使液体的表面张力系数发生很大的变化。我们将能够减小液体表面张力系数的物质，叫做表面活性物质（也称表面活性剂）。水的表面活性物质有胆盐、磷脂酰胆碱、肥皂等。另外一类物质能够增大液体表面张力系数，叫做表面非活性物质。水的表面非活性物质常见的有氧化钠、糖类、淀粉等。

固体表面也具有使表面能减到最小的趋势，使固体表面吸上一层表面活性物质分子。气体分子或液体分子附着在固体表面的现象叫做吸附。固体的吸附能力与它的表面积成正比，但随温度的增加而减弱。固体表面对被吸附分子的吸力是很大的。例如，吸附在玻璃表面的水蒸气分子，要将它们完全除去就要在真空中加热至 400°C 。多孔性和粉状物质的表面积大，吸附能力强，在医药上常利用粉状的白陶土或活性炭来吸附胃肠道中的细菌、色素以及食物分解出来的毒素等。活性炭吸附的气体体积往往是它本身体积的几百倍。在药物制剂中，表面活性剂具有增溶、乳化、润湿、去污、杀菌、消泡、起泡等用途。

知识链接

四、球形液面内、外的压强差

由于液体表面张力的作用，使液滴表面以及液体与固体相接触的液面都呈弯曲状，使液面内外侧压强不等，存在一定的压强差。为了简单起见，我们用半径为 R 的球形液滴来分析该压强差。



如图 1-7 所示，通过球心取任一轴线，并作垂直于此轴线的假想大圆把液滴分成两半，它们之间通过表面张力产生的相互拉力为 $2\pi R\alpha$ 。 R 是球的半径。此拉力为液滴内、外的压强差所平衡。内压力作用在半球的大圆面上，数值等于 $P_{\text{内}} \pi R^2$ 。故半球的平衡条件为

$$(P_{\text{内}} - P_{\text{外}}) \pi R^2 = 2\pi R\alpha$$

即

$$\Delta P = (P_{\text{内}} - P_{\text{外}}) = \frac{2\alpha}{R} \quad (1.5)$$

图 1-7 液滴内外的压强差

式(1.5)表示，球形液面内、外的压强差与液体的表面张力系数成正比，与球面半径成反比。式(1.5)适用于凸液面，对于凹液面，液体内部压强小于液体外部压强， ΔP 是负值，即

$$\Delta P = -\frac{2\alpha}{R} \quad (1.6)$$

拓展提高

肺泡中的压强

肺由肺支气管柱、肺泡和肺间质三者构成。肺的主要功能是与外界进行气体交换,吸入氧气,排出二氧化碳。人体的肺位于胸腔内,由3亿~4亿个大小不同的肺泡组成,其平均半径约为0.05mm,肺泡内壁附着一层黏性组织液,与肺泡内气体形成液、气分界面。由于表面张力的作用,肺泡表面内、外有附加压强(由表面张力产生),其大小与液体界面的表面张力系数成正比,与肺泡的半径成反比。

实验表明,人体肺泡表面黏液产生的附加压强大约为2000Pa,即肺泡内的气压比肺泡外胸腔内压高2000Pa。在呼吸过程中,要使气体进出肺泡,必须使肺泡内压强与外界气体压强有一定的压强差,以保证气体交换的进行。

生活探秘

婴儿出生时为什么要啼哭

肺的主要功能是与外界进行气体交换,在胸腔负压的环境下,人只靠膈肌下降和肋骨的抬高来增大胸腔的容积,减小胸膜腔内压是无法将气体吸入肺泡中的。人之所以能完成正常的呼吸,是借助于肺泡内壁中一种特殊细胞,它能分泌表面活性物质,使得肺泡内壁液层的表面张力下降很多,减小了肺泡的附加压强,从而使得呼吸可以正常进行。

妇女在生产时,胎儿的肺泡为黏液所覆盖,附加压强使肺泡完全闭合,尽管婴儿的肺泡壁也分泌表面活性物质,减小了附加压强,但仍无法顺利地将气体吸入肺泡。因此,需要借助大声啼哭的力量使肺泡张开,从而开始正常的呼吸。

五、毛细现象

将内径很小的玻璃管插入水中,管中的液面会升高,若插入到水银中,管中的液面却下降,这种管子内、外液面不等高的现象叫做毛细现象,能产生毛细现象的管子称为毛细管。毛细现象是由液体的表面张力引起的,而管中液面的升降则取决于液体与管壁的接触角。

图1-8为润湿液体的毛细现象。设毛细管的截面为圆形,半径为 r ,管内液面近似成半径为 R 的球面一部分。根据式(1.6),图1-8中A点的压强与液面外的差值为

$$P_A - P_0 = -\frac{2\alpha}{R}$$

图1-8中B点与管外液面上任一点C处在相同的高度,它们的压强都等于大气压强 P_0 ,即

$$P_B = P_C = P_0$$

因为A点与B点的高度差为 h ,所以B点与A点的压强差为

$$P_B - P_A = \rho gh$$

由以上三式可得

$$h = \frac{2\alpha}{\rho g R}$$

由图1-8可知,

$$R = \frac{r}{\cos\theta}$$

代入上式,可将毛细管中液面上升的高度表示成

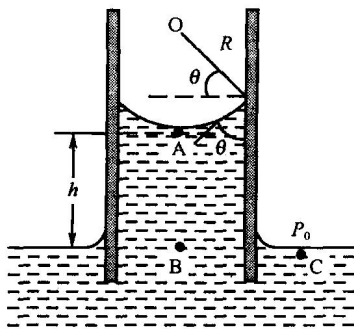


图1-8 润湿液体的毛细现象

$$h = \frac{2\alpha\cos\theta}{\rho g r} \quad (1.7)$$

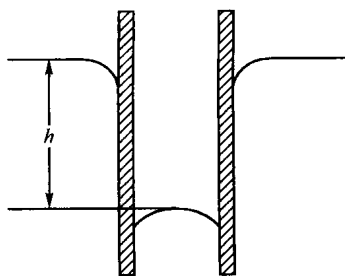


图 1-9 不润湿液体的毛细现象

在液体不润湿管壁的情况下,见图 1-9,毛细管内、外液面的高度差仍能用式(1.7)表示,这时接触角为钝角, h 为负值,表示管内的液面比管外的低,即液面下降的高度。

例 1-2 将半径为 0.3mm 的清洁玻璃管插入血液中(37℃),血液在毛细管中上升的高度为 32.3mm,试求人血液的表面张力系数(已知人血液的密度为 $1.054 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$)。

解: 血液在毛细管中上升,说明血液润湿管壁,由 $h = \frac{2\alpha}{\rho g R}$ 得

$$\begin{aligned} \alpha &= 0.5\rho g R h = 0.5 \times 1.054 \times 10^3 \times 9.8 \times 0.3 \times 10^{-3} \times 32.3 \times 10^{-3} \\ &= 5 \times 10^{-2} \text{ N} \cdot \text{m}^{-1} \end{aligned}$$

第 2 节 理想流体的稳定流动

一、理想流体

由于流体具有流动性,它只要受到很小外力的作用,就可以引起内部各流体层之间的相对运动(流动)。例如,液体在管道中流动时,在管的轴心处的流速最大,愈靠近管壁流速就愈小,与管壁接触处的流体流速为零。这是由于流体流动时,速度不同的各流体层之间有内摩擦力的存在,因而阻止各流体层之间作相对运动。这种现象,就是流体具有黏滞性的表现。液体的黏滞性比气体大。一般来说,流体是可以压缩的,当压强改变时,它的体积也要发生变化,因而密度也随着变化。

实际液体具有黏滞性和可压缩性。为了使问题简化,我们引入理想流体的物理模型,把绝对不可压缩,完全没有黏性的流体就叫做**理想流体**。实际生活中的很多流体非常接近理想流体,如水和乙醇等,一般情况下,它们的黏性是很小的。研究黏性很小的流体在较小范围内流动时,其黏性可以忽略不计。对液体来说,其压缩性是很小的,在压强不是很大的情况下也是可以忽略不计的。因此,水和乙醇一般可看作理想流体。气体的可压缩性非常显著,在压强增大的情况下,体积要缩小。但当气体处于可以自由流动的状态而不是局限在密闭的容器中时,只要有很小的压强差存在,就能使气体很快运动。而这样很小的压强差,所引起的气体体积变化和密度变化都很小。所以在研究气体的运动时,只要压强差不大,就可以把气体看成是不可压缩的。

二、稳定流动

一般情况下,流体流动时,流体粒子不但在同一时刻,空间各点的速度不同,而且不同时刻在空间同一点的流速也不同,即流体的流速随空间和时间变化而变化。这样的流动状态是比较复杂的。我们主要讨论的是**稳定流动**,即流体在流动的过程中,空间每一点的流速都不随时间变化,流体的这种流动也叫做定常流动。

在药物生产过程中,常用管道输送流体原料,设备在正常工作时,管道内各点的速度基本不变,我们可以将其视为稳定流动。为了形象地描绘每一瞬时流体空间各质点的流速分布情况,现在引进流线的概念。在沿着流体流动的方向上画出一系列曲线,使曲线上任一点的切线方向和该点流速的方向一致,我们将这些人为画出的曲线称为**流线**。在稳定流动时,流体微粒运动的轨迹线就是流线,如图 1-10(a)所示。很显然,流线不能相交,这是因为如果两条流线相交,就意味着在交点处,流体有两个流速,这和稳定流动的前提相矛盾。图 1-10(b)、(c)、(d)分别表

示流体通过圆柱体、薄板和流线型物体附近时形成的流线。

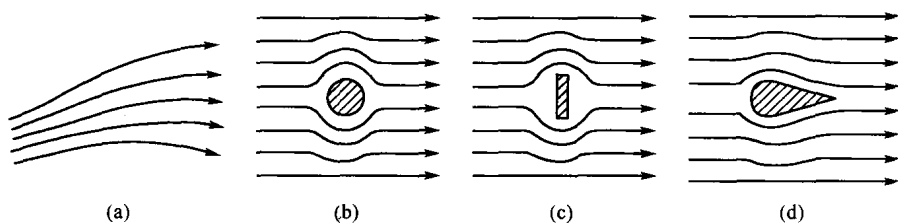


图 1-10 稳定流动时的流线

(a) 流体作稳定流动; (b)、(c)、(d) 流体绕过各种障碍物时的流线

在流体流动时,标出一个与流体的流动方向相垂直的面积 ΔS (图 1-11),通过该面积周界上的各点引出流线,这些流线所包围成的管状区域称为**流管**。流体作稳定流动时,每一点的流速都不变,流速方向都与通过各点的流线相切,所以管外流体不能流入管内,管内流体不能流出管外。只要对某一流管中流体的运动状态进行研究,就可以知道全部流体的运动规律。流体在管道内作稳定流动时,管道内壁可视为一个流管。下面我们所研究的是理想流体在某一流管中做稳定流动的情况。

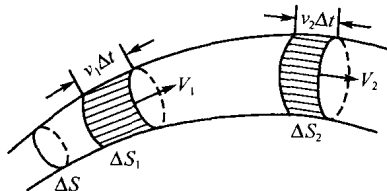


图 1-11 流管

三、流体的连续性原理

如图 1-11 所示,在流管中任取两个与流体流动方向垂直的截面 S_1 和 S_2 ,在两个截面处的流速分别为 v_1 和 v_2 。对于理想流体,在 Δt 时间内,流过这两个截面的流体的体积应该相等,所以

$$S_1 v_1 \Delta t = S_2 v_2 \Delta t$$

即

$$v_1 S_1 = v_2 S_2 \quad (1.8)$$

或

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1} \quad (1.9)$$

式(1.9)表明,理想流体作稳定流动时(不加压),流管截面面积大的地方流速小,截面面积小的地方流速大,即流管内流体的流速与流管该处的截面面积成反比。这种关系叫做**流体的连续性原理**,也被称为**连续性方程**。

生产实践中,通常把单位时间通过管道任一截面流体的体积叫做**体积流量**,用 Q 表示,单位是 $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。显然

$$Q_1 = v_1 S_1 = v_2 S_2 = Q_2 \quad (1.10)$$

把单位时间通过管道任一截面流体的重量叫做**重量流量**,用 G 表示,单位是 $\text{N} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

$$G_1 = r Q_1 = r Q_2 = G_2 \quad (1.11)$$

式中, $r = \rho g$ 为流体的重度,即单位体积流体的重量,单位为 $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$,这是流量方程的另一种表示形式。

第3节 伯努利方程

理想流体在流管中稳定流动时,各处的流速、高度和压强三者之间存在着一定的量值关系,

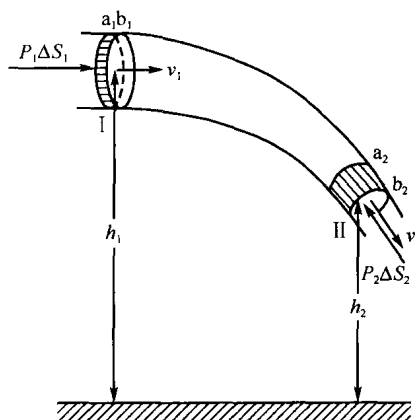


图 1-12 伯努利方程推导用图

我们在此利用功能原理来进行分析。

图 1-12 表示一段流体由左上方向右下方流动,它原先在 a_1b_1 位置,经过很短时间 Δt 后流到 a_2b_2 位置。对于稳定流动来说,当液体由 a_1b_1 位置经过时间 Δt 流到 a_2b_2 位置后,其中 b_1a_2 段的动能和势能是不改变的。因此,就能量的变化来说,可以看作原先在 a_1b_1 处(位置 I)的小流块在时间 Δt 内移到了 a_2b_2 (位置 II)。所以我们研究小流块的移动。

设位置 I 处流体的压强为 P_1 ,截面面积为 ΔS_1 ,流速为 v_1 ,高度为 h_1 ;位置 II 处流体的压强为 P_2 ,截面面积为 ΔS_2 ,流速为 v_2 ,高度为 h_2 。设小流块的质量为 m ,它在位置 I 处的机械能为 E_1 ,在位置 II 处的机械能为 E_2 ,则

$$E_1 = mgh_1 + \frac{1}{2}mv_1^2$$

$$E_2 = mgh_2 + \frac{1}{2}mv_2^2$$

理想流体在流动时没有黏滞性,因而无能量损耗。

根据功能原理,小流块机械能的改变量应等于外力对它所做的功, $E_2 - E_1 = W$,即

$$\left(mgh_2 + \frac{1}{2}mv_2^2\right) - \left(mgh_1 + \frac{1}{2}mv_1^2\right) = W \quad (1.12)$$

小流块所受的重力是它和地球这一系统的内力,因此,小流块所受的外力只有四周流体对它的作用力,但因流管外流体对小流块的压力与其运动方向是垂直的,因此该压力不做功。所以对小流块做功的外力,仅有它后面与前面的作用力,即压力 $P_1\Delta S_1$ 和 $P_2\Delta S_2$,并且 $P_1\Delta S_1$ 对小流块做正功, $P_2\Delta S_2$ 对小流块做负功,而外力的功应是这两部分功的代数和。即

$$W = P_1\Delta S_1 v_1 \Delta t - P_2\Delta S_2 v_2 \Delta t$$

根据流体的连续性原理,对于不可压缩的流体,在 Δt 时间内流过截面 ΔS_1 和 ΔS_2 的流体体积应该相等,即 $\Delta S_1 v_1 \Delta t = \Delta S_2 v_2 \Delta t = \Delta V$,上式可写成

$$W = (P_1 - P_2)\Delta V$$

代入式(1.12)得

$$\left(mgh_2 + \frac{1}{2}mv_2^2\right) - \left(mgh_1 + \frac{1}{2}mv_1^2\right) = (P_1 - P_2)\Delta V$$

用 ρ 表示流体密度,等式两边同除以流体体积 ΔV ($\Delta V = \frac{m}{\rho}$),并移项,得

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 + P_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 + P_2 \quad (1.13)$$

式(1.13)就是伯努利方程,1738年由瑞士物理学家丹尼尔·伯努利首先提出,它是理想流体稳定流动时的基本方程。它表明,理想流体作稳定流动时,在同一流管中任何两截面处,单位体积流体的动能、重力势能和该处压强的总和都是相等的。

式(1.13)也可写成

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh + P = \text{恒量} \quad (1.14)$$

从推导过程中可知,伯努利方程适用的条件:①理想流体的稳定流动。②只适用于同一个细流管。但在输送流体时,如果忽略流体各物理量在管道横截面上的变化,可以将管道看成细

流管,方程仍是适用的。③对于流动的气体,在不受压缩的情况下,也是适用的。

将式(1.14)中各项除以流体的重度 $\gamma = \rho g$,就得到伯努利方程的另一种表示式,即

$$\frac{v^2}{2g} + h + \frac{P}{\gamma} = \text{恒量} \quad (1.15)$$

这是医药化工中常采用的一种表示式。

例 1-3 设在流管中水的流量为 $0.12 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, A 截面的压强为 $2 \times 10^5 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, 截面面积为 100 cm^2 , B 截面的截面面积为 60 cm^2 , A、B 两截面的高度差为 2 m , 假设水的内摩擦力不计, 求 A、B 两截面的流速和 B 点的压强。

解: 根据连续性方程可知

$$v_A = \frac{Q}{S_A} = \frac{0.12}{100 \times 10^{-4}} = 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_B = \frac{Q}{S_B} = \frac{0.12}{60 \times 10^{-4}} = 20 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

又根据伯努利方程, 可得

$$\begin{aligned} P_B &= \frac{1}{2} \rho v_A^2 - \frac{1}{2} \rho v_B^2 - \rho g h_B + P_A \\ &= \frac{1}{2} \times 1000 \times 12^2 - \frac{1}{2} \times 1000 \times 20^2 - 1000 \times 9.8 \times 2 + 2 \times 10^5 \\ &= 5.24 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2} \end{aligned}$$

生活探秘

空吸作用与喷雾器

图 1-13 所示为一水平管, 流体由 A 向 B 流动。由流体的连续性方程可知, 某处流体的流速与该处流管截面面积的乘积为一恒量。由于 A、B 两处的横截面面积远大于 C 处, 因此 C 处的流速一定也远大于 A、B 两处。根据伯努利方程可知, 在水平流管中, 流速小处压强大, 流速大处压强小。增加管中流体的流量, 可以使 C 处的流速大大增加, 从而使 C 处的压强大大低于大气压强, 于是容器 D 中的流体因受大气压的作用被压入 C 处, 从而被水平管的流体带走。这一作用叫做空吸作用。喷雾器、水流抽气机和各种射流真空泵, 都是根据这个原理制造的。

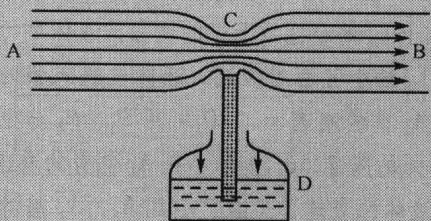


图 1-13 空吸作用

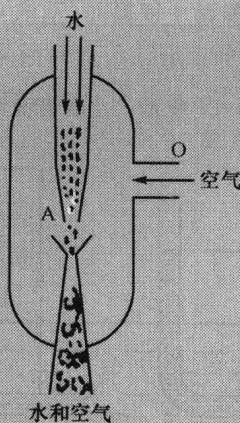


图 1-14 水流抽气机

图 1-14 为水流抽气机, 当水从圆锥形管的细口 A 流出时, 由于该处流速大, 所以, A 处的压强远小于大气压强, 因此能将空气从 O 管吸入, 经下面的管子由水流将空气带走。O 管与被抽的容器连接, 因此容器中的空气就逐渐被抽去。水流抽气机能将被抽容器减压到 $1/10$ 标准大气压, 常用于抽滤和减压蒸馏的操作。