



普通高等教育“十二五”规划教材

# 大学物理

DAXUE WULI

李光 陈文钦◎主编

 机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



013064505

04  
420

普通高等教育“十二五”规划教材

# 大学物理

主 编 李 光 陈文钦  
 副主编 周诗文 虞学红  
 参 编 郭 惠 李 娜 袁 珍  
 魏要丽 庾名槐 张月芳



机械工业出版社



北航

C1672164

04  
420

013084202

本书是为高等院校农林渔、生命科学和海洋科学等专业的“大学物理学”课程编写的教材。

全书内容包括液体的表面性质、流体力学、气体动理论、热力学基础、静电场、稳恒磁场、电磁感应、振动和波、光学、量子物理基础等共10章。本书对物理学基础理论进行了精简、凝练,适当增加了例题和习题,精选了一些与农林和生命科学紧密相关的内容,并简要介绍了一些物理学家和物理学史。

本书适合农林院校50学时左右的少学时“大学物理学”课程教学,对理工科和人文专业学生以及农林和生命科学工作者也有参考价值。

李文钦 李光 李光 主编

李永联 李永联 李永联 副主编

李惠 李惠 李惠 参编

李惠 李惠 李惠 参编

### 图书在版编目(CIP)数据

大学物理/李光, 李文钦主编. —北京: 机械工业出版社, 2013. 7

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-111-42670-7

I. ①大… II. ①李… ②陈… III. ①物理学—高等学校—教材  
IV. ①04

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第188003号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑: 李永联 责任编辑: 李永联 任正一

版式设计: 霍永明 封面设计: 马精明

责任印制: 张楠

北京振兴源印务有限公司印刷

2013年8月第1版第1次印刷

169mm×239mm·17.25印张·354千字

0001—2000册

标准书号: ISBN 978-7-111-42670-7

定价: 29.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294

机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649

机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

物理学是研究自然界中物质基本结构、作用规律和运动规律的科学，是人类认识自然、改造自然和推动社会进步的动力和源泉。物理学的概念、原理和定律具有普遍性，它渗透到自然科学的每个领域，成为包括生命科学在内的一切自然科学的基础，在培养学生的科学素质方面起着极为重要的作用，因此，物理学是高等院校学生重要的必修的公共基础课。

本书是为高等农、林、水院校各专业开设的大学物理公共基础课程所编写的教材，教学基本目标除了要求学生系统掌握物理现象和规律之外，更要重视掌握物理知识的科学应用，培养厚基础、宽专业、强能力、高素质的复合型人才。尤其是在学时少、内容多、学生基础弱的背景下，如何解决物理课学生难学、教师难教、学生厌学的问题。如何让学生系统地学习物理规律，掌握物理科学的应用，成为编写本书要着重考虑的问题。为了实现上述目标，本书编排了液体的表面性质、流体力学、气体动理论、热力学基础、静电场、稳恒磁场、电磁感应、振动和波、光学和量子物理基础等共10章内容，基本包括了大学物理教学所要求的知识点，强调了学生必备的基本概念和基本理论，推导了重要的定理和公式，并适量介绍了物理学在现代科技中的应用。本书内容的编排有利于培养学生的物理思想和科学素质，让学生比较系统地掌握物理学的基本知识，为后继课程的学习打好基础，同时激发学生的学习兴趣，培养学生的创新精神和创新能力。编写过程遵循了文字精练、深浅适中、通俗易懂、可读性强、篇幅适量等原则。

本书的编写人员全部都是一线的大学物理教师，他们根据教育部高等学校大学物理课程教学基本要求，汲取了国内外同类教材的优点，总结了自己多年在农林及生命科学类各专业物理课程教学和教材改革的实践经验，准确把握教学的热点、重点和难点，对教材内容的编写、例题安排、习题采编做到更加合理到位。参加编写的教师有：郭惠（第1章）、李娜（第2章）、陈文钦（第3章及附录）、李光（第4章）、袁珍（第5章）、周诗文（第6章）、魏要丽（第7章）、虞学红（第8章）、庾名槐（第9章）、张月芳（第10章）。陈文钦、虞学红、周诗文对各章内容进行了修改补充，李光审核定稿。

本书的编写参考了许多相关教材和文献，在此，对这些教材和文献的作者表示衷心的感谢。

由于我们的水平有限，在编写过程中难免有不足和缺点，敬请读者批评指正。

编 者



# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 液体的表面性质</b> .....	1
1.1 液体的表面张力 .....	1
1.2 弯曲液面下的附加压强 .....	6
1.3 固体表面润湿与毛细现象 .....	10
1.4 弯曲液面上方的饱和蒸气压 .....	14
习题 .....	15
<b>第 2 章 流体力学</b> .....	18
2.1 理想流体的流动 .....	19
2.2 黏滯液体的运动规律 .....	27
习题 .....	36
<b>第 3 章 气体动理论</b> .....	38
3.1 平衡态 状态方程 .....	38
3.2 理想气体的压强和温度 .....	41
3.3 能量按自由度均分定理 理想气体的内能 .....	45
3.4 气体分子速率分布规律 .....	48
习题 .....	52
<b>第 4 章 热力学基础</b> .....	54
4.1 热力学第一定律 .....	54
4.2 热力学第一定律在典型理想等值过程中的应用 .....	59
4.3 热力学第二定律 .....	65
4.4 熵 .....	71
习题 .....	77
<b>第 5 章 静电场</b> .....	82
5.1 电场 电场强度 .....	83
5.2 静电场中的高斯定理 .....	92
5.3 静电场的环路定理 电势 .....	97
5.4 静电场中的电介质 .....	105
5.5 静电场中的能量 .....	110
习题 .....	116
<b>第 6 章 稳恒磁场</b> .....	119
6.1 稳恒电流的磁场 .....	119
6.2 稳恒磁场的基本特性 .....	127

6.3	磁场对运动电荷的作用 .....	133
6.4	磁场与物质的相互作用 .....	143
	习题 .....	149
<b>第 7 章</b>	<b>电磁感应</b> .....	<b>155</b>
7.1	电磁感应定律 .....	155
7.2	动生电动势和感生电动势 .....	159
7.3	自感、互感和磁场中的能量 .....	162
7.4	麦克斯韦方程组 .....	166
	习题 .....	167
<b>第 8 章</b>	<b>振动和波</b> .....	<b>170</b>
8.1	机械振动 .....	170
8.2	机械波 .....	184
8.3	电磁振荡和电磁波 .....	192
8.4	多普勒效应 .....	195
	习题 .....	197
<b>第 9 章</b>	<b>光学</b> .....	<b>200</b>
9.1	光的干涉 .....	201
9.2	光的衍射 .....	213
9.3	光的偏振 .....	222
	习题 .....	229
<b>第 10 章</b>	<b>量子物理基础</b> .....	<b>232</b>
10.1	光的量子性 .....	233
10.2	波粒二象性 .....	239
10.3	不确定关系 .....	242
10.4	薛定谔方程 .....	244
	习题 .....	255
<b>附录</b>	.....	<b>256</b>
附录 A	国际单位制 (SI) .....	256
附录 B	常用物理常数 .....	257
附录 C	希腊字母 .....	258
附录 D	矢量 .....	258
附录 E	数学公式 .....	260
附录 F	习题参考答案 .....	261
<b>参考文献</b>	.....	<b>270</b>

# 第 1 章 液体的表面性质

从本章开始，我们将步入丰富多彩的物理世界，首先看看这样一组现象：雨水打在荷叶上很快就变成球形水珠滚落到地上；清晨的露水总是一个个晶莹剔透的水珠，它们的表面总是球形的，为什么不是方形的呢？水黾总能轻松地在水面上滑行而不掉入水中，如图 1-1 所示。要解释这些有趣的现象，就需要讨论液体在静止状态下的表面性质。

历史上对液体表面现象的研究是从力学开始的。早在 19 世纪初人们就提出了表面张力的概念。1805 年，托马斯·杨 (T. Young) 指出：系统中两个相接触的均匀流体，从力学的观点看，就像是被一张无限薄的弹性膜分开，界面张力则存在于这一弹性膜中。1806 年，拉普拉斯 (P. S. Laplace) 导出了弯曲液面两边附加压力与表面张力和曲率半径的关系，该公式可用于解释毛细现象。1859 年，开尔文 (Kelvin) 将表面扩展时伴随的热效应与表面张力随温度的变化联系起来，后来，他又导出蒸气压随表面曲率变化的方程，即著名的开尔文方程。随着测量技术的进步，表面现象的研究已经从宏观水平发展到微观水平的研究阶段，成为一门独立的学科。表面科学研究的内容涉及工农医科相关专业的很多领域，如能源科学、化肥、环保、催化技术、吸附过程及食品科学等。

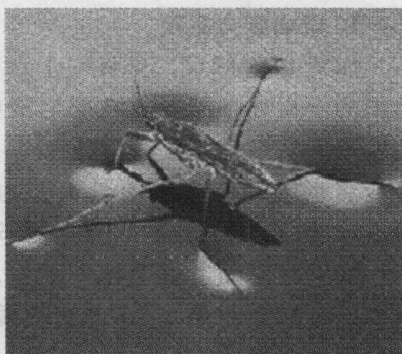


图 1-1 水黾在水面上滑行

## 本章内容提要

- ◆ 液体表面张力系数
- ◆ 球形液面下的附加压强
- ◆ 毛细现象
- ◆ 弯曲液面上方的饱和蒸气压

## 1.1 液体的表面张力

为了研究表面张力，我们先对液体表面作一个简单介绍。

### 1.1.1 液体表面的定义

通常，物质有三态，对应着三相：固、液、气相。在一个非均匀的体系中，至

少存在着两个性质不同的相。两相共存必然有界面，界面是相与相之间在交界处所形成的物理区域。

界面相是一个准三维区域，其广度无限，而厚度约为几个分子的线度。若其中一相为气体，这种界面称为表面。严格地说，表面应是液体或固体与其饱和蒸气之间的界面，但习惯上把液体或固体与空气的界面称为液体或固体的表面。常见的界面有：气-液表面，气-固表面，液-液界面，液-固界面，固-固界面。

### 1.1.2 液体表面张力的概念

水珠表面总是球形的，一些昆虫可以漂浮在水面，这些都是由于液体表面上存在表面张力的缘故，以下通过几个实验来认识表面张力的特点。

#### 1. 表面张力实验

如图 1-2a 所示，先将一个含有一活动边框的金属线框架浸放在肥皂液中（活动边在下方），然后向上提起悬挂，这时，由于金属框上的肥皂膜的表面张力的作用，可滑动的边会被向上拉，直至顶部。

如果在活动边框上挂一重物，如图 1-2b 所示，使重物质量  $m_2$  与边框质量  $m_1$  所产生的重力  $G = (m_1 + m_2)g$  与总的表面张力  $F$  大小相等、方向相反，则金属丝不再滑动。

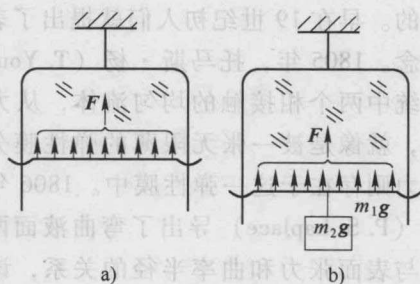


图 1-2 表面张力实验 1

再如图 1-3a 所示，将一个系有松软丝线的金属丝环放在肥皂液中，然后取出，用针刺破其中一边的液膜，这时由于剩下的一边的肥皂膜的表面张力的作用，使丝线被张紧如图 1-3b 所示。如果在金属丝环中间系一线圈，如图 1-3c 所示，再浸入肥皂液中，然后取出，上面形成一液膜。由于以线圈为边界的两边表面张力大小相等方向相反，所以成任意形状的线圈可在液膜上移动；如果刺破线圈中央的液膜，线圈内侧张力消失，外侧表面张力立即将线圈绷成一个圆形，如图 1-3d 所示。

通过以上两个实验说明：表面张力的作用是均匀分布的，力的方向与液面相切，使得液面都收缩至最小。我们把这种使液体表面具有收缩趋势的、存在于液体表面上的力称为表面张力 (Surface tension)。

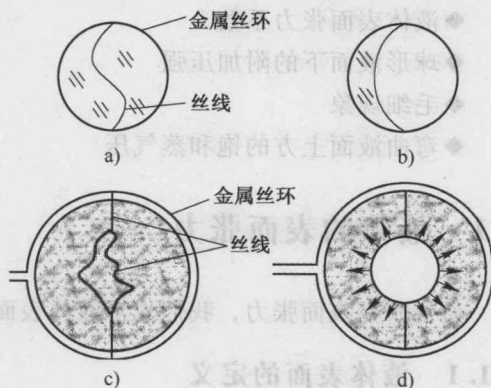


图 1-3 表面张力实验 2



## 2. 表面张力的微观解释

在液体中，虽然每个分子与最邻近分子之间的斥力和引力相互抵消，但其他分子对这个分子的作用却都表现为大小不等的引力作用。

图1-4揭示了液体中两个分子 $\alpha$ 和 $\beta$ 受周围分子引力作用的情形。分子 $\alpha$ 处于液体内部，受到邻近分子的引力必定是球对称的，合力等于零。处于表面层中的分子 $\beta$ 只受到液面处或液面下邻近分子的作用，合力不等于零。所以，处于表面层中的液体分子都受到垂直于液面并指向液体内部的引力的作用。把分子从液体内部移到表面层，需克服分子间引力做功；外力做功使分子势能增加，即表面层内分子的势能比液体内部分子的势能大，表面层为高势能区；各个分子势能增量的总和称为表面自由能（Surface energy），简称表面能，用 $G$ 表示，单位是J。

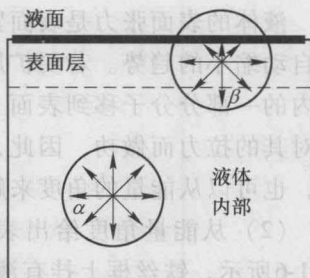


图1-4 表面张力的微观解释

对于任何系统，其能量越小越稳定。对于一个液体系统，在稳定状态下应该具有最低的表面能，这就要求表面层中应包含尽可能少的分子，从而也就要求液体系统应具有最小的表面积。因此，表面层内的分子有尽量挤入液体内部的趋势，即液面有收缩的趋势，液体的表面张力就是这种趋势在宏观上的表现。表面张力是宏观力，与液面相切。

### 1.1.3 液体表面张力系数

以上实验让我们从本质上对表面张力有了定性的认识。事实上，表面张力概念的建立要比表面自由能早一个世纪，现在我们从这两个角度定量地对表面张力下定义。

(1) 从力的角度给出表面张力系数的定义 可以想象，在液面上画一条直线段（见图1-5），线段两侧液面均有收缩的趋势，即有表面张力作用，该力与液面相切，与线段垂直，指向各自的一方，分别用 $F_s$ 和 $F'_s$ 表示，这恰为一对相互作用力，由于线段上各点均有表面张力作用，所以线段越长，合力越大。设线段长为 $l$ ，则有

$$F_s = \gamma l \quad (1-1)$$

或

$$\gamma = \frac{\Delta F_s}{\Delta l} \quad (1-2)$$

式中，比例系数 $\gamma$ 称为表面张力系数，表示表面张力在两相（特别是气-液）界面



图1-5 液体表面假想

线段处表面张力

上,方向垂直于表面的边界,指向液体方向,并与表面相切,它是作用于单位边界线上的力,单位是牛顿每米(N/m)。通常,液体的表面张力直接用表面张力系数来表示。

液体的表面张力是表面紧缩力,它使液体表面积有自动缩小的趋势。若要扩展液体的表面,即要把液相内的一部分分子移到表面上来,则必须克服液相内侧对其的拉力而做功,因此,液体自动收缩表面的趋势,也可以从能量的角度来解释。

(2) 从能量角度给出表面张力系数的定义。如图 1-6 所示,铁丝框上挂有液膜,将 AB 边无摩擦、匀速、等温地右移,在这个过程中, $F = F_s$ 。外力  $F$  所做的功  $W = F\Delta x$ , 在 AB 边上加的表面张力为  $F_s = \gamma l$ , 图 1-6 表面张力系数的推导

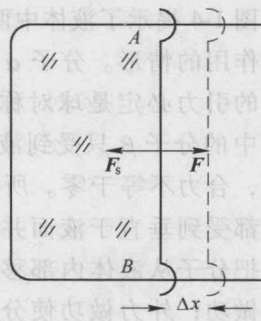


图 1-6 表面张力系数的推导

$$W = \gamma l \Delta x = \gamma \Delta S$$

$\Delta S$  是这一过程中液体表面积的增量, 所以

$$\gamma = \frac{W}{\Delta S} \quad (1-3)$$

式 (1-3) 表示增加单位面积时所需外力做的功。表面能的增加量  $\Delta G$  应等于外力所做的功  $W$ , 即

$$\Delta G = W = \gamma \Delta S$$

或

$$\gamma = \frac{\Delta G}{\Delta S} \quad (1-4)$$

从式 (1-4) 看出, 表面张力系数在数值上等于增加单位液体表面积时, 表面能的增加。

式 (1-4) 的物理意义是: 在恒温恒压条件下, 增加单位表面积表面所引起的体系自由能的增量, 也就是单位表面上的分子比相同数量的内部分子过剩的自由能, 因此, 叫比表面过剩自由能, 常简称为“比表面能”, 单位是  $\text{J}/\text{m}^2$  (焦耳每平方米)。因为  $1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m}$ , 所以, 一种物质的比表面能与表面张力数值上完全一样, 量纲也一样, 但物理意义有所不同, 所用的单位也不同。式 (1-3) 为测定表面张力提供了一种重要方法——拉脱法, 即只要测定外力所做的功及增加的表面积, 就可以计算出液体的表面张力系数。

**例题 1-1** 将  $1\text{g}$  水分散成半径为  $10^{-6}\text{m}$  的小水滴 (视为球形), 其表面积增加了多少倍? 吸收了多少能量? (假设水滴呈球状, 水的表面张力系数  $7.27 \times 10^{-2}\text{N}/\text{m}$ , 在此过程中温度保持不变。)

**解:** 质量为  $1\text{g}$  的大水滴的体积  $V$  和表面积  $S$  分别为

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{1 \text{ g}}{1 \text{ g/cm}^3} = 1 \text{ cm}^3 = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$S = 4 \pi R^2 = 4 \pi \left( \frac{3V}{4\pi} \right)^{2/3} = 4 \pi \left( \frac{3 \times 10^{-6}}{4\pi} \right)^{2/3} \text{ m}^2 = 4.84 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

分散成小水滴后的总表面积  $S'$  为

$$S' = \frac{1 \times 10^{-6} \text{ m}^3}{\frac{4}{3} \pi r^3} 4 \pi r^2 = \frac{3 \times 10^{-6} \text{ m}^2}{1 \times 10^{-6}} = 3.0 \text{ m}^2$$

分散成小水滴后，总表面积与大水滴原面积的比为

$$\frac{S'}{S} = \frac{3.0}{4.84} \times 10^4 = 6.2 \times 10^3$$

此过程吸收能量为

$$\begin{aligned} \Delta E &= \gamma \times \Delta S \\ &= 7.275 \times 10^{-2} \times (3 - 4.84 \times 10^{-4}) \text{ J} \\ &= 2.18 \times 10^{-1} \text{ J} \end{aligned}$$

同样地，如果 1g 水外形是一个立方体时，其表面积为  $6 \text{ cm}^2$ ，但把它喷洒成直径为 10nm 的小水滴时，它们表面积的总和将增大到约  $1600 \text{ m}^2$ ，这相当于一个篮球场的总面积，表面能急剧增加。

从结果可以看出，当系统表面积增大时，系统要吸收热量，同时表面能也增加。

综上所述，表面张力与表面能是描述液体表面状态的物理量。因此，知道了液体表面张力系数，就会知道两相界面处单位长度上的表面张力或增加单位面积所增加的表面能。下面讨论影响液体表面张力系数的因素。

### 1.1.4 影响表面张力系数的因素

表面张力是液体（包括固体）表面的一种强度性质，它受多种因素的影响。

(1) 物质性质 表面张力起源于净吸引力，而净吸引力又起因于范德华引力，因此，表面张力取决于物质分子间相互作用力的大小，即取决于物质本身的性质。例如，水的极性很大，分子间相互作用很强，常压下  $20^\circ\text{C}$  时的表面张力高达  $7.27 \times 10^{-2} \text{ N/m}$ ，而相同条件下非极性的正己烷的表面张力只有  $1.84 \times 10^{-2} \text{ N/m}$ 。水银分子间存在金属键作用，具有强大的内聚力，室温下其表面张力 ( $48.5 \times 10^{-2} \text{ N/m}$ ) 在所有液体中为最大。

(2) 温度 从实验中观察到，随着温度的上升，一般液体的表面张力都降低，表 1-1 给出了水的表面张力系数和温度的关系。这不难理解，因为温度升高时，分子间距离增大，吸引力减小。当温度升高至接近临界温度时，液-气界面消失，表面张力必趋向于零。故测定表面张力时，必须固定温度，否则会造成较大的测量误差。

表 1-1 水的表面张力系数和温度的关系

温度/°C	表面张力/ $\times 10^{-2}$ N/m
10	7.42
20	7.27
30	7.12
50	6.79
80	6.26
100	5.89

(3) 杂质 与液体内所含杂质有关：在液体内加入杂质，液体的表面张力系数将显著改变，有的使其值增加；有的使其值减小。使表面张力系数减小的物质称为**表面活性物质**（surface activator）。

大家熟悉的蛋白质由氨基酸构成，其实质上是高分子表面活性剂。蛋白质是人体必需的营养物，多用做食品乳化剂，其种类亦多，如牛奶、卵蛋白、酪蛋白、大豆蛋白等，均具有乳化、起泡及胶体的保护作用，在食品工业中多作为食品乳化剂应用。

长期以来，我国的农药使用技术较为落后，普遍为小型手动施药器具，而国外大多使用大型机械或飞机喷撒，甚至使用全球定位系统，其农药利用率是我国的2倍多。国内科研技术人员一直在为改进我国农药剂型的使用技术而不懈努力，同时也在研究药液表面张力与靶标植物的表面张力之间的关系，科学利用表面活性剂，提高农药在疏水植物上的利用率，从而有效减少农药用量。

(4) 与相邻物质性质有关 同一液体与不同物质交界，表面张力系数值并不相同。通常所说的某种液体的表面张力是指该液体与含有本身蒸气的空气相接触时的测量值。两个液相之间的界面张力是两液体已相互饱和（尽管互溶度可能很小）时，它们的表面张力系数之差。

## 1.2 弯曲液面下的附加压强

在实践中我们观察到下列现象：从一小管吹出一个肥皂泡，当停止吹气并让另一端连接大气时，肥皂泡将自动缩小，这表明气泡内外存在压力差。将一根细管插入液体，若液面呈凹形，液体在管内将上升一段距离；反之，若液面呈凸形，液体将在管内下降，这表明弯曲液面两侧也存在压力差，而且此压力差与弯曲液面的形状有关。本节讨论这种压力差与液面形状及液体表面张力的关系。

### 1.2.1 一般液面下的附加压强

由于表面张力的作用，在弯曲表面内外两侧存在压力差，或者说表面层处的液



体分子总是受到一种附加的收缩压力，该附加压力总是指向液面的曲率中心。定义  $p_s$  为由附加压力引起的液体表面内侧与外侧的压强之差， $p_0$  为外界大气压，则

(1) 水平液面 如图 1-7 所示，在表面层中取一小薄层液片，忽略重力，分析其受力情况，则水平液面的附加压强为零，即

$$p_s = p_{\text{内}} - p_{\text{外}} = p_1 - p_0 = 0$$

(2) 凸液面 如图 1-8 所示，分析小薄层液片的受力情况。表面张力的合力沿法线方向指向凸液面曲率中心，则凸液面的附加压强大于零，即

$$p_s = p_{\text{内}} - p_{\text{外}} = p_2 - p_0 > 0$$

(3) 凹液面 如图 1-9 所示，分析小薄层液片的受力情况。表面张力的合力沿法线方向指向凹液面曲率中心，则凹液面的附加压强小于零，即

$$p_s = p_{\text{内}} - p_{\text{外}} = p_3 - p_0 < 0$$

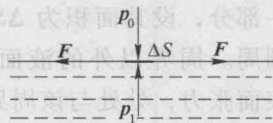


图 1-7 水平液面小薄层液片受力

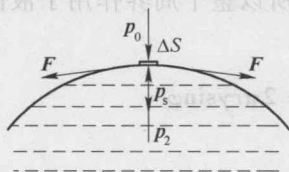


图 1-8 凸液面小薄层液片受力

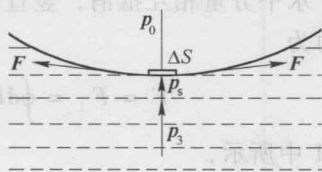


图 1-9 凹液面小薄层液片受力

### 1.2.2 球形液面下的附加压强

图 1-10 所示为一个半径为  $R$  的球形液珠，设液珠内外的压力分别为  $p_{\text{内}}$  和  $p_{\text{外}}$ ，在恒温条件下使液珠体积增加  $dV$ ，则液珠表面积增加  $dS$ 。在此过程中为克服表面张力，环境消耗的体积功等于液珠表面自由能的增加，即

$$(p_{\text{内}} - p_{\text{外}}) dV = dW \quad (1-5)$$

因为是球面，所以由球面积公式  $S = 4\pi R^2$  得  $dS = 8\pi R dR$ ，由球体积公式  $V = 4\pi R^3/3$  得  $dV = 4\pi R^2 dR$ ，将式 (1-4) 代入式 (1-5)，得

$$p_s = p_{\text{内}} - p_{\text{外}} = \frac{2\gamma}{R} \quad (1-6)$$

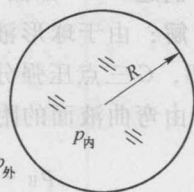


图 1-10 球状液滴的内外压差

式 (1-6) 表明：①球形弯曲液面的附加压强  $p_s$  与表面张力系数成正比，与液面的曲率半径  $R$  成反比。即  $\gamma$  越大， $R$  越小， $p_s$  越大，反之， $\gamma$  越小， $R$  越大，则  $p_s$  越小；②  $p_s$  与液面的形状有关，平液面  $R \rightarrow \infty$ ， $p_s = 0$ 。凸形液面  $R > 0$ ， $p_s > 0$ ；凹形液面  $R < 0$ ， $p_s < 0$ ；③液面下附加压强  $p_s = \pm 2\gamma/R$ ，其中，“+”对应凸液面，

“-”对应凹液面。

一般地,我们分析图 1-11 所示的球形液面的一部分,设其面积为  $\Delta S$ ,其周界是半径为  $r$  的圆周。周界以外的液面作用于所取液面  $\Delta S$  的表面张力,处处与该周界垂直并与球面相切。如果  $dF$  是周界以外的液面通过周界线元  $dl$  作用于液面  $\Delta S$  的表面张力,那么其大小可以表示为

$$dF = \gamma dl$$

如图 1-10 所示,其竖直分量  $dF_{\perp}$  和水平分量  $dF_{//}$  分别为

$$dF_{\perp} = dF \sin \varphi = \gamma dl \sin \varphi$$

$$dF_{//} = dF \cos \varphi = \gamma dl \cos \varphi$$

由于水平分量相互抵消,竖直分量各处相同,所以整个周界作用于液面  $\Delta S$  的表面张力为

$$F = F_{\perp} = \oint dF_{\perp} = \oint \gamma dl \sin \varphi = 2\pi r \gamma \sin \varphi$$

如图 1-11 中所示,

$$\sin \varphi = \frac{r}{R}$$

得

$$F = \frac{2\pi r^2 \gamma}{R}$$

凸形球状液面下的液体附加压强为

$$p_s = \frac{F_{\perp}}{\pi r^2} = \frac{2\gamma}{R}$$

**例题 1-2** 如图 1-12 所示,求球形液膜内、外的压强差。

**解:** 由于球形液膜很薄,则内外膜半径近似相等,设

$A, B, C$  三点压强分别为  $p_A, p_B, p_C$ ,

由弯曲液面的附加压强公式得

$$p_B = p_A + \frac{2\gamma}{R} \quad p_B = p_C - \frac{2\gamma}{R}$$

$$p_A + \frac{2\gamma}{R} = p_C - \frac{2\gamma}{R}$$

$$p_C - p_A = \frac{4\gamma}{R}$$

膜内压强大于膜外压强,并与半径成反比。

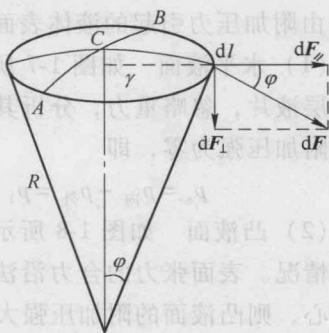


图 1-11 球形液面一部分

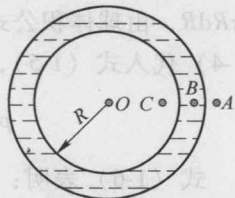


图 1-12 例题 1-2 图

**例题 1-3 动物肺泡的活动**

肺泡紧贴于胸腔壁，肺泡壁上分布着许多毛细血管，呼吸时新鲜空气进入肺泡，其中的氧气进入血液中，而血液中的二氧化碳则排至肺泡，再由气管排出体外，因此，肺泡是气体交换的场所。成人大约有 3~4 亿个肺泡，紧贴于封闭的胸腔壁，肺泡大小不一，可近似看做球形，其半径约为 0.05mm，肺泡内壁上附着一层黏性组织液，与肺泡内气体形成分界面，这层组织液的表面张力系数约为 0.05N/m。

肺泡内壁上的组织液层产生的附加压强为

$$p_s = \frac{2\gamma}{R} = \frac{2 \times 0.05}{0.05 \times 10^{-3}} \text{Pa} = 2 \times 10^3 \text{Pa}$$

肺泡内气体的压强  $p$  等于胸腔内压强  $p_i$  与肺泡内壁组织液层的附加压强  $p_s$  之和，即

$$p = p_i + p_s$$

一般在正常呼吸时， $p = -0.4 \text{kPa}$ ，则胸腔内压强应为

$$p_i = p - p_s = (-0.4 - 2.0) \text{kPa} = -2.4 \text{kPa}$$

但正常呼吸时，胸腔内负压实际上只有  $-0.7 \sim -1.3 \text{kPa}$ 。

肺泡如何能维持正常呼吸呢？原来，肺泡内壁的组织液层上覆盖着一层表面活性物质——磷脂类物质，使组织液层的表面张力系数降低为原来的  $1/7 \sim 1/15$ ，则肺泡内壁上的组织液层产生的附加压强变为

$$p_s = \frac{2\gamma}{R} = \frac{2 \times 0.05 \times 1/15}{0.05 \times 10^{-3}} \text{Pa} = 0.13 \times 10^3 \text{Pa}$$

这样就能使肺泡在上述负压下进行正常呼吸。

由于大小气泡是连通的，按照式 (1-6)，如果肺泡内壁组织液层的表面张力系数不变，小气泡附加压强大，而大气泡附加压强小，小气泡萎缩，大气泡则胀破，但实际上这种现象并没有发生。大小不同的所有肺泡能够维持正常呼吸的原因在于：肺泡内壁存在表面活性物质，这种活性物质能够调节大小肺泡的表面张力系数，使大小气泡的压强稳定，使小气泡不致萎缩，大气泡不致过分膨胀，从而维持大小不同的所有肺泡进行正常呼吸。

肺泡表面张力系数的调节过程为：肺泡内壁上表面活性物质的量是不变的，吸气时，肺泡扩张，表面积增大，表面活性物质的浓度相对减少，而使表面张力系数和附加压强相应增大，对肺泡的扩大起抑制作用。呼气时，肺泡收缩，表面积缩小，表面活性物质浓度相对增大，而使表面张力系数和附加压强相应变小，对肺泡的收缩起抑制作用。

**1.2.3 任意弯曲液面下附加压强和拉普拉斯公式**

任意非球形液面就是一个曲面，我们通常用相应的两个曲率半径来描述曲面，

如图 1-13 所示, 在曲面  $ABCD$  上过  $B$  点作垂直于表面的直线  $OO'$ , 再通过此线作一平面, 此平面与曲面的截线为曲线  $AB$ , 在  $O$  点与曲线相重合的圆半径  $R_1$  称为该曲线的曲率半径。通过表面垂线  $OO'$  并垂直于第一个平面  $AOB$  再作第二个平面并与曲面相交, 可得到第二条截线  $BC$  和它的曲率半径  $R_2$ , 用  $R_1$  与  $R_2$  即可表示出该液体表面的弯曲情况。

如图 1-13 所示, 在液面平衡时使其扩张无限小量, 即  $x \rightarrow x + dx$ ,  $y \rightarrow y + dy$ ,  $z \rightarrow z + dz$ , 则扩大表面积所需之功为  $p_s xydz$ , 表面能的增加为  $\gamma d(xy)$ , 两者应相等, 即

$$p_s xydz = \gamma d(xy) = \gamma(xdy + ydx)$$

由三角形  $AOB$  和三角形  $A'O'B'$  的相似性可得

$$\frac{x + dx}{R_1 + dz} = \frac{x}{R_1}$$

即有  $dx = xdz/R_1$ 。

同理可得,  $dy = ydz/R_2$ 。于是:

$$p_s xydz = \gamma(xydz/R_1 + xydz/R_2), \text{ 简化即得}$$

$$p_s = \gamma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (1-7)$$

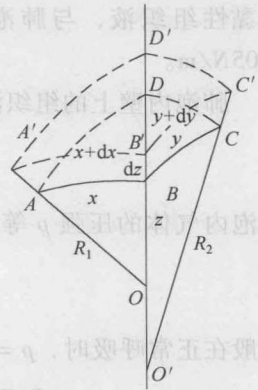


图 1-13 非球形曲面

式 (1-7) 即为著名的拉普拉斯公式 (Laplace formula), 它表示出了弯曲液面两侧的压力差与表面张力、曲率半径的关系。显然, 当  $R_1 = R_2$  时, 曲面即为球面, 上式还原为式 (1-6), 所以, 球形液面下的附加压强公式是拉普拉斯公式的特例。

拉普拉斯 (P. S. Laplace), 法国数学家、天文学家, 法国科学院院士, 天体力学的主要奠基人、天体演化学的创立者之一, 分析概率论的创始人, 因此可以说他是应用数学的先驱。1749 年 3 月 23 日生于法国西北部卡尔瓦多斯的博蒙昂诺日, 曾任巴黎军事学院数学教授。1799 年他担任过法国经度局局长, 并在拿破仑政府中任过 6 个星期的内政部长。1816 年被选为法兰西学院院士, 1817 年任该院院长。1827 年 3 月 5 日卒于巴黎。拉普拉斯在研究天体问题的过程中, 创造和发展了许多数学的方法, 以他的名字命名的拉普拉斯变换、拉普拉斯定理和拉普拉斯方程, 在科学技术的各个领域有着广泛的应用。他发表的天文学、数学和物理学的论文有 270 多篇, 专著合计有 4000 多页, 其中最具代表性的专著有《天体力学》、《宇宙体系论》和《概率分析理论》(1812 年发表)。

### 1.3 固体表面润湿与毛细现象

在实践中我们观察到一滴水在干净的玻璃上会铺开, 使玻璃表面变湿, 而一滴汞在玻璃表面则呈球状, 不能铺开。前面提到的将同一根细管插入不同液体, 液面形状也不同, 液面可能呈凹形, 也可能呈凸形。这就是自然界的一种普遍现象——润湿。



### 1.3.1 固体表面润湿

固体表面润湿 (wetting) 通常是指表面上一种液体或气体被另一种液体或气体取代的情况。我们这里分为润湿和不润湿加以讨论。

(1) 接触角 把液体滴在平滑的固体表面, 表面上便形成一液滴, 当液滴处于平衡状态时, 在固、液、气三相的交界处, 自“液-固”界面, 经液体内部, 到达“气-液”界面的夹角叫做接触角 (contact angle), 用  $\theta$  表示, 如图 1-14 所示。通常把  $\theta = 90^\circ$  作为润湿与否的界限, 当  $\theta > 90^\circ$ , 叫做不润湿, 如汞在玻璃表面; 当  $\theta < 90^\circ$  时, 叫做润湿, 如水在洁净的玻璃表面。 $\theta$  角愈小, 润湿性能愈好, 当  $\theta = 0^\circ$  时, 液体在固体表面上铺展平, 固体被完全润湿。当  $\theta = 180^\circ$  时, 液体完全不润湿固体。因此, 称  $\theta < 90^\circ$  的固体为亲液固体,  $\theta > 90^\circ$  的固体为憎液固体。若把干净的玻璃板浸入水中, 取出时将看到玻璃表面全沾上了水,  $\theta \rightarrow 0^\circ$ ; 而石蜡浸入水中却不沾水,  $\theta \rightarrow 180^\circ$ 。接触角的大小可以用实验测量, 也可以用公式计算。

(2) 润湿现象的微观解释 润湿与不润湿现象是由于分子力不对称而引起的。在固体与液体接触处, 厚度等于液体或固体分子有效作用半径 (以大者为准) 的一层液体称为附着层, 即图 1-14 中虚线与固-液界面之间的部分。在附着层内分子既受液体分子引力 (内聚力) 作用也受固体分子引力 (附着力) 作用。

1) 当  $F_{\text{附}} > F_{\text{内}}$  时, A 分子所受合力  $F$  垂直于附着层指向固体, 液体内部分子势能大于附着层中分子势能, 液体内的分子尽量挤进附着层, 使附着层扩展, 这就导致了液体与固体接触处的液面沿固体表面延展, 即向上弯曲, 如图 1-14a 所示, 宏观上表现为液体润湿固体。

2) 当  $F_{\text{附}} < F_{\text{内}}$  时, A 分子所受合力  $F$  垂直于附着层指向液体内部, 液体内部分子势能小于附着层中分子势能, 附着层中分子尽量挤进液体内部, 使附着层收缩, 这就导致了液体与固体接触处的液面沿固体表面收缩, 即向下弯曲, 如图 1-14b 所示, 宏观上表现为液体不润湿固体。

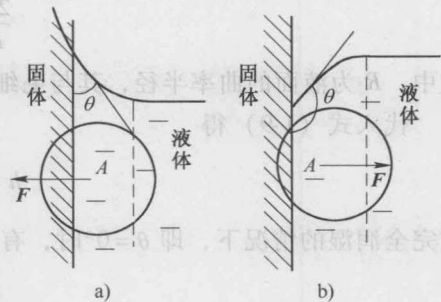


图 1-14 固液气三相界面

a) 润湿界面 b) 不润湿界面

### 1.3.2 毛细现象

#### 1. 毛细现象原理

将一根管径很小的管子插入液体中, 润湿管壁的液体在细管里升高, 不润湿管壁的液体在细管里下降的现象, 称为毛细现象 (capillarity)。能够发生毛细现象的