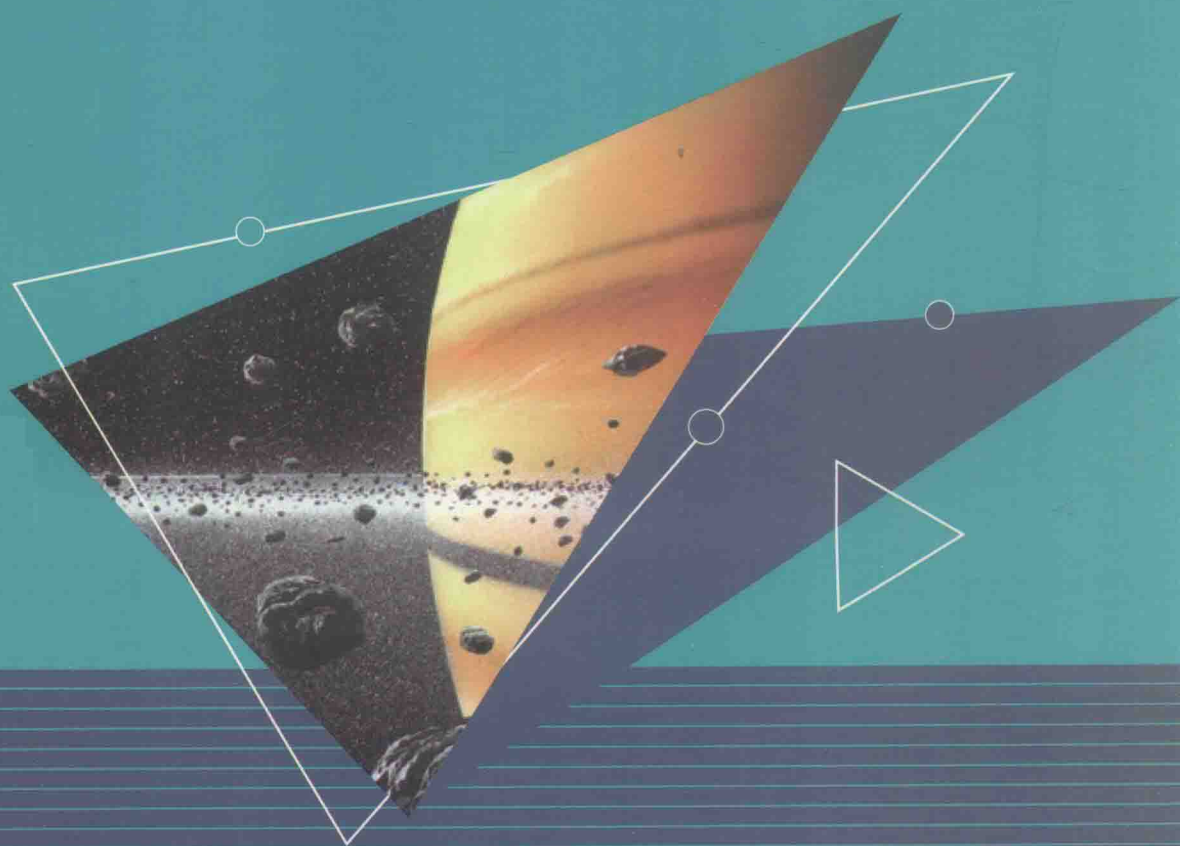


大学物理 教学辅导

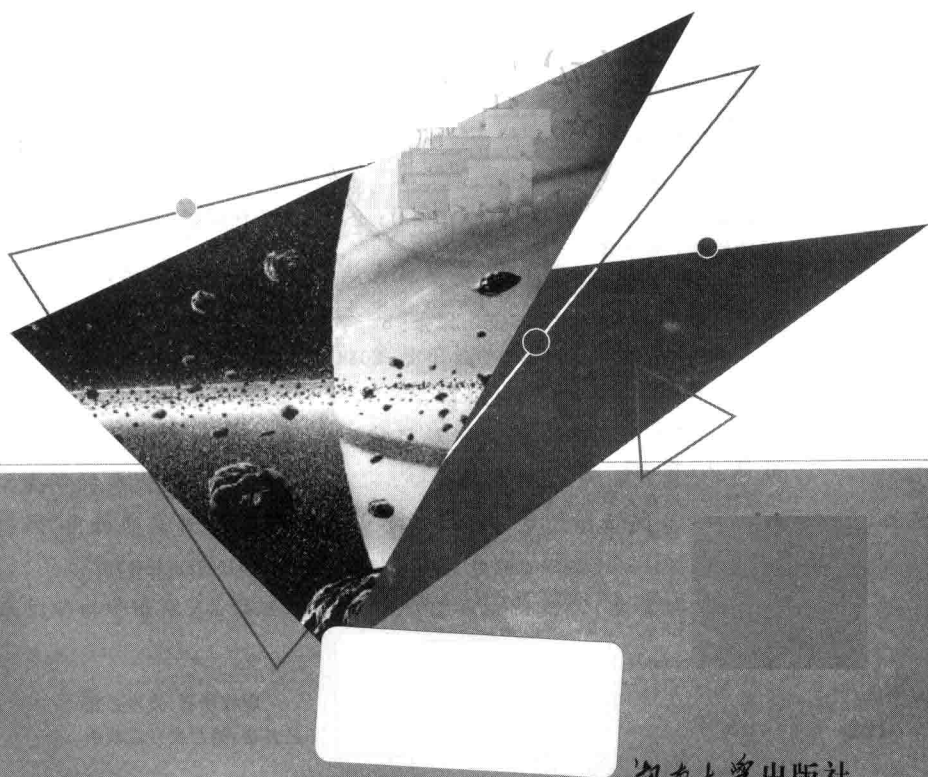
主编 李光



湖南大学出版社

大学物理 教学辅导

主编 李光



湖南大学出版社

内 容 简 介

本书是根据李光主编的机械工业出版社出版的《大学物理》教材而编写的教学辅导书。全书的章节安排与主教材一致,包括液体的表面性质、流体力学、分子动理论、热力学基础、静电场、稳恒磁场、电磁感应、振动和波、光学、量子物理基础等十章。每章包括内容提要、重点难点和习题解答三部分。

本书主要适合使用李光主编的《大学物理》教材的师生作为教学参考,对高等院校农、林、渔、生命科学和海洋科学等专业的师生也有参考作用。

图书在版编目 (CIP) 数据

大学物理教学辅导/李光主编. —长沙:湖南大学出版社, 2014. 10

ISBN 978 - 7 - 5667 - 0749 - 9

I. ①大… II. ①李… III. ①物理学—高等学校—教学参考资料 IV. ①04

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 242294 号

大学物理教学辅导

DAXUE WULI JIAOXUE FUDAO

主 编: 李 光

责任编辑: 严小涛 张建平 责任校对: 全 健 责任印制: 陈 燕

特约编辑: 胡小锋

印 装: 长沙超峰印刷有限公司

开 本: 787×1092 16 开 印张: 8 字数: 195 千

版 次: 2014 年 11 月第 1 版 印次: 2014 年 11 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 5667 - 0749 - 9/O · 93

定 价: 20.00 元

出 版 人: 雷 鸣

出版发行: 湖南大学出版社

社 址: 湖南·长沙·岳麓山 邮 编: 410082

电 话: 0731 - 88822559(发行部), 88821343(编辑室), 88821006(出版部)

传 真: 0731 - 88649312(发行部), 88822264(总编室)

网 址: <http://www.hnupress.com>

电子邮箱: yanxiaotao@hnu.cn

版权所有, 盗版必究

湖南大学版图书凡有印装差错, 请与发行部联系

前言

物理学是研究自然界中物质基本结构、作用规律、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,其概念、原理、定律都具有极大的普遍性。大学物理课程是农、林、水等院校的学科基础课。物理学作为一门完整的学科,包括了力学、热学、电磁学、光学和量子物理等基本内容,农、林、水等院校的大学物理基础课程虽然比理工科的物理类课程在要求上大大降低,教学内容上有所侧重,但为相关专业打好物理基础,物理教学内容仍然保持完整,内容覆盖率也较广。

然而,与教学内容多相矛盾的是教学课时却大大缩减了。由 80 学时降到 64 学时再到现在的 48 学时,在这样的背景前提下,物理习题课或讨论课几乎很难在课堂内进行。但对于物理学这类的学科,要学好基础知识,没有一定的习题训练是不行的。索末菲曾经写信告诫他的学生海森堡:“要勤奋地去做练习,只有这样,你才会发现,哪些你理解了,哪些你还没有理解。”大多数教材一般都会选择一定的课后习题让学生去练习,但学生往往反映,凭着教材的讲解,要完成课后习题却是似懂非懂。在这样的情况下,我们组织编写了这本大学物理教学辅导书,作为主教材的辅助读物。

本书是与李光主编的机械工业出版社出版的《大学物理》教材相配套的教学辅导书。全书按主教材章节内容顺序编排,每章内容包括内容提要、重点和难点、习题解答。内容提要是主教材内容的概括和适当补充;重点和难点除了指出本章节的重点、难点,还适当对本章节内容学习做出适当的提示;习题解答主要选出主教材课后习题和其他一些典型题目,按照学生习惯的思考题、填空题、选择题和计算题等题型,详细给出解题思路。考虑农、林专业学生物理基础和数学基础的薄弱,同时也为了学生自学需要,在解题中,本书的分析尽可能详细,解答尽可能规范。为避免题海战术,习题选择少而精。

本书由海南大学多年从事大学物理教学工作的教师编写,是一项集体成果。具体分工如下:第 1 章由郭惠编写,第 2 章由郭惠、彭玉霞编写,第 3 章由陈文钦、彭玉霞编写,第 4 章由陈文钦编写,第 5 章、第 6 章、第 7 章由巫志玉编写,第 8 章、第 9 章由虞学红编写,第 10 章由李光编写,度名槐、周诗文、袁珍和张月芳也参与精选和编写了部分章节的习题。在编写过程中,海南大学物理教研室其他教师提出了许多宝贵意见。

在本书的编写过程中,我们借鉴和吸纳了很多相关教材和文献,在此,对这些教材和文献的作者表示衷心的感谢。

本书得到“中西部高校提升综合能力项目(大学物理创新团队)”的大力支持,在此表示感谢。

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

2014 年 9 月

目 次

第 1 章	液体的表面性质	(1)
	一、内容提要	(1)
	二、重点和难点	(4)
	三、习题解答	(4)
第 2 章	流体力学基础	(11)
	一、内容提要	(11)
	二、重点和难点	(13)
	三、习题解答	(13)
第 3 章	气体动理论	(21)
	一、内容提要	(21)
	二、重点和难点	(23)
	三、习题解答	(23)
第 4 章	热力学基础	(28)
	一、内容提要	(28)
	二、重点和难点	(32)
	三、习题解答	(32)
第 5 章	静电场	(43)
	一、内容提要	(43)
	二、重点和难点	(45)
	三、习题解答	(46)
第 6 章	稳恒磁场	(58)
	一、内容提要	(58)
	二、重点和难点	(60)
	三、习题解答	(61)
第 7 章	电磁感应	(75)
	一、内容提要	(75)
	二、重点和难点	(77)

三、习题解答	(77)
第 8 章 振动和波	(87)
一、内容提要	(87)
二、重点和难点	(90)
三、习题解答	(91)
第 9 章 光学	(100)
一、内容提要	(100)
二、重点和难点	(103)
三、习题解答	(103)
第 10 章 量子物理基础	(113)
一、内容提要	(113)
二、重点和难点	(115)
三、习题解答	(116)
参考文献	(121)

第 1 章 液体的表面性质

一、内容提要

液体广泛地存在于生物体中,它对生物体的生长、发育有很大的影响,而液体与固体、气体相邻的界面处又有特殊的性质,这些界面的特殊性又影响了液体的运动。本章主要介绍表面张力现象产生的本质及其影响因素,弯液面的附加压强,毛细现象以及蒸发与凝结。

1. 表面张力

液体的表面犹如张紧的弹性薄膜,具有收缩的趋势,即液体表面存在着张力,称为表面张力。它是液体表面层内分子力作用的结果。

2. 表面张力系数

用于反映液体表面性质的物理量,三种定义如下:

①表面张力系数表示在单位长度直线两旁液面的相互拉力。由 $f = \gamma l$, 得

$$\gamma = \frac{f}{l} \quad (1-1)$$

在国际单位制中, γ 的单位用 $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ 表示。

②表面张力系数在数值上等于增加单位表面积时,外力所做的功。即

$$\gamma = \frac{W}{\Delta S} \quad (1-2a)$$

③表面张力系数在数值上等于增加液体单位表面积所增加的表面能,由 $\Delta G = W = \gamma \Delta S$, 得

$$\gamma = \frac{\Delta G}{\Delta S} \quad (1-2b)$$

严格说来,表面能是在温度不变的条件下可转变为机械能的那部分表面能。

3. 影响表面张力系数 γ 的几个因素

①物质性质:不同液体的表面张力系数不同,它与液体的成分有关,取决于液体分子的性质。

②温度:同一种液体的表面张力系数与温度有关。温度越高, γ 就越小。

③杂质:液体表面张力系数还与液体中的杂质有关。加入杂质能显著改变液体的表面张力系数。

④液体表面张力系数的大小还与相邻物质的化学性质有关。

4. 表面张力的微观本质

微观理论认为,液体的表面张力是由于液体表面层分子之间相互作用力的不对称性引起的。所谓液体的表面层是指位于液体表面处,与表面平行,厚度等于液体分子有效作用半径(一般不超过 $6 \times 10^{-9} \text{ m}$)的那层液体。从能量的角度出发,分子处于液体表面层时,分子的相互作用势能要比处于液体内部的分子的相互作用势能大,而且越靠近液面,分子的相互作用势能就越大。而液体处于稳定平衡时,分子的相互作用势能最小,因此,液体表面层中的分子都

有挤进液体内部的趋势,结果液体的表面就会尽量地收缩。从力的观点来看,就是在液体表面内存在一种使其收缩的力,这种力就称为表面张力。

所谓表面张力,无论从力或是从能量的角度来解释,都是由表面层内分子相互作用的不对称性所引起的。

5. 附加压强

对于弯曲液面来说,由于液体表面张力的存在,在靠近液面的内外就形成一个压强差,称为附加压强。令 p_s 为由附加压力引起的液体表面内侧与外侧压强之差,液面内压强为 $p_{内}$,液面外压强为 $p_{外}$ (即外界压强),则

$$p_s = p_{内} - p_{外}$$

① 水平液面:液内压强等于液外压强,即 $p_{内} = p_{外}$,则 $p_s = p_{内} - p_{外} = 0$;

② 凸液面:液内压强大于液外压强,即 $p_{内} > p_{外}$,则 $p_s = p_{内} - p_{外} > 0$;

③ 凹液面:液内压强小于液外压强,即 $p_{内} < p_{外}$,则 $p_s = p_{内} - p_{外} < 0$ 。

6. 球形液面下的附加压强

① 球形凸液面的附加压强

$$p_s = p_{内} - p_{外} = \frac{2\gamma}{R} \tag{1-3a}$$

② 球形凹液面的附加压强

$$p_s = p_{内} - p_{外} = -\frac{2\gamma}{R} \tag{1-3b}$$

式(1-3a)和(1-3b)表明,弯曲液面附加压强的数值与表面张力系数 γ 成正比,与液滴曲率半径 R 成反比。且球形凸液面的附加压强为正,球形凹液面的附加压强为负。

③ 球形液泡(厚度很小,近似认为内外径均为 R)的内外压强差

$$p_s = p_{内} - p_{外} = \frac{4\gamma}{R} \tag{1-4}$$

7. 拉普拉斯公式

$$p_s = \gamma \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \tag{1-5}$$

拉普拉斯公式是表示液面曲率与液体压力之间的关系的公式。 R_1, R_2 分别表示经过考察点所作两个相互垂直的平面与曲面相交线的曲率半径。

8. 附着层

液体与固体接触处,厚度很薄(等于液、固分子有效作用距离)的那层液体,和自由液体表面层一样,也处于一种特殊状态,这一薄层称为附着层。

9. 内聚力与附着力

在附着层内将液体分子间的相互吸引力称为内聚力,固体与液体分子间的吸引力称为附着力。

10. 润湿与不润湿现象

由于内聚力和附着力的大小不同,使得有些液体能润湿固体,有些液体不能润湿固体。在附着层中当内聚力大于附着力时,附着层收缩,液面呈现向下弯曲的形状,表现为液体不润湿固体。反之,在附着力大于内聚力的情况下,附着层扩展,液面呈现向上弯曲的形状,表现为液体润湿固体。

11. 接触角

在液体和固体的接触处,作液体表面的切线和固体表面的切线,这两条切线通过液体内部所夹的角 θ 称为接触角。当 $\theta < 90^\circ$ 时,液体润湿固体;当 $\theta > 90^\circ$ 时,液体不润湿固体;当 $\theta = 0$ 时,液体在固体表面上铺展,固体被完全润湿;当 $\theta = 180^\circ$ 时,液体完全不润湿固体。

12. 毛细现象

润湿管壁的液体在细管中液面升高,而不润湿管壁的液体在细管中液面降低的现象,称为毛细现象。能够产生毛细现象的细管称为毛细管。当液体润湿管壁时,毛细管内液体上升高度为

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r} \quad (1-6)$$

式中 γ 是液体的表面张力系数, θ 为接触角, ρ 为液体密度, r 为毛细管半径。当液体不润湿管壁时,由于 $\theta > 90^\circ$,故 h 为负值,表明毛细管内液面下降。液体与管壁的接触角决定管中液面的升或降。

13. 气体栓塞现象

当液体在细管中流动时,如果管中出现气泡,液体的流动就要受到阻碍,气泡产生得多了,就能堵住毛细管,使液体不能流动,这种现象称为气体栓塞现象。

14. 液体和气体接触处的表面现象(蒸发与凝结)

①蒸发。

常温下发生在液体表面上的汽化过程叫做蒸发。蒸发过程是指单位时间内液体分子逸出液面的数目大于蒸气分子进入液面的数目的过程。

影响蒸发的因素主要有(对同一种液体):

- 表面积:表面积越大,蒸发就越快。
- 温度:温度越高,蒸发越快。
- 通风状况:液面上通风情况好,可以促使从液体中跑出来的分子更快地向外扩散,减少它们重新返回液体的机会,因而蒸发就会加快。

②凝结。

物质由气态变为液态的过程称为凝结。凝结过程是指单位时间内离开液体的分子数小于蒸气分子进入液体的数目的过程。

饱和蒸气及饱和蒸气压:单位时间内逸出液体的分子数等于单位时间内返回液体的分子数时,这种液体上方保持动态平衡的蒸气称为饱和蒸气,由它而产生的压强称为饱和蒸气压。饱和蒸气压具有恒定的值,与体积的大小以及有无其他气体存在无关,但随温度的升高而增大,且与液面弯曲情况有关。设液珠和平面液体的饱和蒸气压分别为 p_r 和 p_0 ,则弯曲液面的饱和蒸气压为

$$\ln \frac{p_r}{p_0} = \frac{2\gamma M}{RT r \rho} \quad (1-7)$$

上式为开尔文方程,式中 γ 是液体的表面张力系数, M 为液体摩尔质量, ρ 为液体密度, r 是液滴半径, R 为摩尔气体常量, T 为室温。它表示:

- 液滴半径越小,与之相平衡的蒸气压就越大;
- 当 $r \rightarrow \infty$ 时,即平面液体, $p_r = p_0$;
- 凹面(r 为负值)上的平衡蒸气压小于 p_0 。

二、重点和难点

重点:有关表面张力现象的概念,弯曲液面附加压强的计算,毛细管内液面上升的高度。

难点:弯曲液面附加压强的计算及正负的判断,毛细现象实际应用的分析。

三、习题解答

1. 简答题

1.1.1 如何理解液体的表面张力现象?

解答:在液体表面上厚度约等于分子有效作用距离的薄层液体(称为液体的表面层)内存在的表面现象,处在液体表面层中的分子都有向液体内部靠拢的趋势,犹如张紧了的弹性薄膜。从力的角度看,在液体表面内形成一种向内收缩的力,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,表面张力的方向处处与液面相切。在液体内部的分子受到其周围以分子有效距离为半径的范围内其他分子的引力,由于对称性,其他分子对它的合引力为零;而对处于液体表面层内部的分子,以分子有效作用距离为半径的范围有一部分落在液面外侧,对称性受到破坏,故此分子受到一垂直液面并指向液体内部的合引力作用。这样,处于液体表面层内的分子都受到一垂直向下的合力,而使表面层中的分子都有向液体内部靠拢的趋势,液体分子越靠近,表面所受到的合力也越大。如果液体内部分子试图到达表面层,则必须克服上述的指向液体内部其他分子合引力作用,所消耗的功将转变为表面层中分子间相互作用的势能,称为表面能。表面张力的存在,使得液体表面积尽量减小,直至表面能为最小。表面张力的存在使液体表面以及与固体相接触的液面都呈弯曲形状,同时还使液面两侧的压强具有不同的值,引起附加压强的产生。毛细现象也是由液体的表面张力所引起的。

评注:液体的表面张力现象广泛存在于气液接触面、液液分界面及固液接触面上,在日常生活中处处可见。表面张力现象在宏观上是沿着液体表面的相互拉力,而在微观上是分子力的作用引起的。正确理解其内在与外在的实质,可以有效地利用或克服表面张力现象。

1.1.2 液体表面张力现象有什么应用?

解答:液体表面张力所引起的毛细现象在植物及土壤方面等领域的研究中已得到很好的应用。对植物的研究表明,毛细作用是植物体内液体运输的重要途径之一,在植物细胞壁中含有大量的毛细管,这些毛细管是由原纤维间的细小空间形成的,它是植物长距离运输水分、养料的重要途径。

毛细现象还对保持土壤水分起着重要的作用。在土壤内部水分的传输以毛细作用为主,有的土壤毛细管结构不好,植物不能很好地生长。增加腐殖质不仅能增加肥料,还可以改变土壤的毛细结构,增加毛细水的储量。旱季播种后常把地表压实,这样可使土壤颗粒之间形成很好的毛细管,水分沿管上升到地面,浸润种子使其发芽;而冬耕的目的之一在于破坏土壤表层的毛细管,使较深层的水分不易上升到地面而被蒸发散失掉。

但在某些情况下,我们需要尽量减小表面张力所产生的影响。如在洗衣服时,由于水的表面张力,使衣服纤维和水之间不能很好地接触;喷洒农药时,表面张力的存在也使农药不能均匀地展开在叶面上。这时若在水中加入一些表面活性物质来减小水的表面张力系数,就可以使衣物与水更好地接触从而使污渍易被洗净,也可使农药均匀地展开在植物枝叶上而易被

吸收。

以上只是简单介绍了液体表面张力现象的几点应用,其实液体表面张力现象在医学、生物学等很多学科领域均得到了广泛应用。

1.1.3 两根水平放置的毛细管,管径粗细不均,管中装有少量液体,a管中为润湿性液体,b管中为不润湿液体。问两管内液体最后平衡位置在何处?为什么?

解答:液体两侧表面张力相同,影响附加压力的是曲率半径。a管为凹液面, $r<0$,附加压强 P_c 的方向指向液体外部,左侧曲率半径小, P_c 更大些,液体向左移动,直至两侧的曲率半径相同处为最后平衡位置;b管为凸液面, $r>0$, P_c 指向液体内部,左侧曲率半径小, P_c 更大些,液体向右移动,直至两侧的曲率半径相同处为最后平衡位置。

1.1.4 在装有部分液体的毛细管中,将其一端小心加热时,问a管为润湿液体,b管为不润湿液体,它们各向毛细管哪一端移动?为什么?

解答:毛细管的半径均匀,影响附加压力大小的是表面张力。液体的表面张力随温度的升高而降低。a管为凹液面,附加压强 P_c 方向指向液体外部,左侧液体受热,使液体的表面张力系数 γ 下降,使 P_c 减小,所以液柱向右移动;b管为凸液面,附加压强 P_c 方向指向液体内部,左侧液体受热,使液体的表面张力系数 γ 下降,使 Δp 减小,所以液柱向左移动。

2. 填空题

1.2.1 某小朋友在吹肥皂泡的娱乐中,恰好吹成一个直径为2.00 cm的肥皂泡,若在此环境下,肥皂液的表面张力系数为0.025 N/m,则此时肥皂泡内外压强差为_____ Pa。

解答:答案为10 Pa。

根据(1-4)式
$$p_{\text{内}} - p_{\text{外}} = \frac{4\gamma}{R} = \frac{4 \times 0.025}{1.0 \times 10^{-2}} = 10 (\text{Pa})。$$

1.2.2 当液体与固体接触时,通常把接触角 $\theta=90^\circ$ 作为液体是否润湿固体的界限,当 $\theta>90^\circ$,称为液体_____固体,如汞在玻璃表面;当 $\theta<90^\circ$ 时,称为液体_____固体,如水在洁净的玻璃表面。

解答:答案为不润湿;润湿。

1.2.3 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;将毛细管插入液体,当液体润湿管壁时,管内液面上升为_____形;当液体不能润湿管壁时,接触角大于 90° ,管内液面下降为_____形。

解答:答案为凹;凸。

3. 选择题

1.3.1 如图1-1所示,在一连通管两端吹两半径不同的肥皂泡A、B,已知 $R_A>R_B$,开通活塞,将出现的现象为()。

- (A) A和B均无变化
- (B) A变大,B变小
- (C) A变小,B变大
- (D) A和B均变小

解答:答案选B。

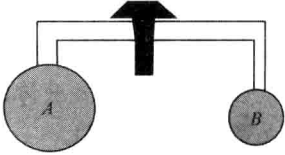


图 1-1

由(1-4)式可知,对于一球形肥皂泡,其内外压强的压强差与曲率半径成反比。对于图中所示大、小肥皂泡,其外部压强一样,而大肥皂泡由于曲率半径大于小肥皂泡之曲率半径,故小肥皂泡内气体压强大于大肥皂泡内气体压强。因此,小肥皂泡内气体向大肥皂泡内移动,最后

小肥皂泡收缩为与大肥皂泡曲率半径相同的帽状。

评注:有的同学一看到连通管,便不假思索地认为大的肥皂泡变小,小的变大。理由是大的内部气体多,因而压强大,一旦连通,则一定是大的肥皂泡内气体压向小的一边,出现大的变小,小的变大。但是若考虑到,表面张力使肥皂泡表面出现球形弯曲而产生附加压强,则分析结果正好相反。

1.3.2 下列事件中与毛细现象有关的是()。

- (A)植物水分吸收
- (B)石油开采
- (C)地下水开采
- (D)天然气开采

解答:答案选 ABCD。

由于储藏在地下的石油、水与天然气混合形成弯曲液面,存在附加压强阻碍石油、水或天然气的流动,所以 B、C 和 D 都与毛细现象有关。A 可参考简答题 1.1.1 的说明。

评注:大家可能不熟悉石油开采和天然气开采。石油是自然界中存在的包括气态、液态和固态烃类化合物在内以及少量杂质组成的复杂混合物。它和水、天然气一起储藏在地下岩层中,所以石油开采也包括了天然气开采。

1.3.3 在自然界中经常会出现这样一种现象,在傍晚时地面是干燥的,而在清晨时地面却变得湿润了。可能原因有下列五项,下列哪项组合是最合适的成因解释()。

- (A)根据对毛细现象的物理分析可知,由于水的表面张力系数与温度有关,毛细水上升的高度会随着温度的变化而变化,温度越低,毛细水上升的高度越高
- (B)在白天,由于日照的原因,土壤表面的温度较高,土壤表面的水分蒸发快使傍晚时地面变得干燥
- (C)土壤颗粒之间的毛细水会因白天温度升高而下降,使土壤表层变得干燥
- (D)在夜间,土壤表面的温度较低,而土壤深层的温度变化不大,使得土壤颗粒间的毛细水上升
- (E)夜间空气中的水汽也会因为温度下降而凝结,因而使清晨土壤表层变得湿润

解答:答案选 ABCDE。

1.3.4 同一体系,比表面自由能和表面张力系数都用 γ 表示,它们()。

- (A)物理意义相同,数值相同
- (B)量纲和单位完全相同
- (C)物理意义相同,单位不同
- (D)物理意义不同,单位不同

解答:答案选 D。

1.3.5 通常称为表面活性剂的物质是指将其加入液体中后()。

- (A)能降低液体的表面张力
- (B)能增大液体的表面张力
- (C)能显著增大液体的表面张力
- (D)能显著降低液体的表面张力

解答:答案选 D。

1.3.6 一个玻璃毛细管分别插入 25℃ 和 75℃ 的水中,则毛细管中的水在两种不同温度水中上升的高度()。

- (A)相同
- (B)无法确定
- (C)25℃ 水中高于 75℃ 水中
- (D)75℃ 水中高于 25℃ 水中

解答:答案选 C。

由影响表面张力系数的因素可知,温度升高,表面张力系数降低。玻璃毛细管中能升高的液柱高度与表面张力系数成正比,温度越高,相同玻璃管及液体下形成的高度越低。

1.3.7 在液面上,某一小面积 S 周围表面对 S 有表面张力,下列叙述不正确的是()。

- (A)表面张力与液面垂直
- (B)表面张力与 S 的周边垂直
- (C)表面张力沿周边与表面相切
- (D)表面张力的合力在凸液面指向液体内部(曲面球心),在凹液面指向液体外部

解答:答案选 A。

表面张力的方向处处与液面相切。

1.3.8 对处于平衡状态的液体,下列叙述不正确的是()。

- (A)凸液面内部分子所受压力大于外部压力
- (B)凹液面内部分子所受压力小于外部压力
- (C)水平液面内部分子所受压力大于外部压力
- (D)水平液面内部分子所受压力等于外部压力

解答:答案选 C。

根据(1-4)式,受附加压强影响,凹液面内部压强小于外部压强,凸液面内部压强大于外部压强,平液面不受附加压强影响。

1.3.9 对于指定的液体,恒温条件下,有()。

- (A)液滴的半径越小,它的蒸气压越大
- (B)液滴的半径越小,它的蒸气压越小
- (C)液滴的半径与蒸气压无关
- (D)蒸气压与液滴的半径成正比

解答:答案选 A。

根据(1-7)式可知,液滴半径越小,饱和蒸气压越大。

1.3.10 下列叙述不正确的是()。

(A)比表面自由能的物理意义是,在定温定压下,可逆地增加单位表面积引起系统吉布斯自由能的增量

(B)表面张力的物理意义是,在相表面的切面上,垂直作用于表面上任意单位长度边线的表面紧缩力

(C)比表面自由能与表面张力量纲相同,单位不同

(D)比表面自由能单位为 J/m^2 ,表面张力单位为 N/m 时,两者数值不同

答案选 D。

解答:量纲都是 $[\text{M}][\text{T}]^{-2}$,但单位不同,数值相同。

1.3.11 已知 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 时水/空气的表面张力系数为 $7.27\times10^{-2}\text{ N}/\text{m}$,当在 $20\text{ }^\circ\text{C}$ 和 100 kPa 下可逆地增加水的表面积 4 cm^2 ,则系统的表面能 ΔG 为()。

- (A) $2.91\times10^{-5}\text{ J}$
- (B) $2.91\times10^{-1}\text{ J}$
- (C) $-2.91\times10^{-5}\text{ J}$
- (D) $-2.91\times10^{-1}\text{ J}$

解答:答案选 A。

根据式(1-2b),单位表面积对应的表面能数值上等于表面张力系数,所以,当表面积可逆增加时,表面能相应增加。

4. 计算题

1.4.1 某同学在用毛细管升高法测量蒸馏水表面张力系数时,如图 1-2 所示,测得毛细

管的内径为 1.005 mm,液柱高度差 h 为 29.000 mm,考虑水能完全润湿玻璃毛细管壁,且不考虑凹液面下端以上液体重量,试问该同学测得的水的表面张力系数为多少?(重力加速度 $g=9.8 \text{ m/s}^2$,水密度 $\rho=1\,000 \text{ kg/m}^3$)

解:根据(1-3b)式,凹液面内外压强满足

$$p_R - p_0 = \frac{-2\gamma}{R}$$

毛细管内和水平液面等高的压强为 p_0 ,与最高处凹液面内压强 p_R 满足

$$p_0 - p_R = \rho gh$$

得

$$\begin{aligned}\gamma &= \frac{1}{2} \rho ghR = \frac{1}{4} \rho gh d \\ &= \frac{1}{4} \times 1\,000 \times 9.8 \times 29 \times 10^{-3} \times 1.005 \times 10^{-3} \\ &= 0.071 (\text{N/m})\end{aligned}$$

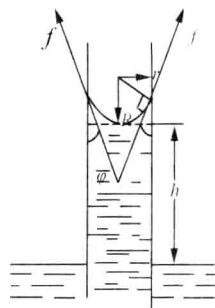


图 1-2

1.4.2 如图 1-3(a)为一粗细 U 形玻璃管,右端半径 $R=1.5 \text{ mm}$,左端半径 $r=0.50 \text{ mm}$,将 U 形管注入适量水银(两边管内水银面离管口有一段距离),已知玻璃完全不润湿水银,重力加速度 $g=9.8 \text{ m/s}^2$,水银密度 $\rho=1.36 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$,水银表面张力系数 $\gamma=520 \times 10^{-3} \text{ N/m}$,问:

(1) 哪端液面高,液面是凸还是凹?

(2) 两边水银面的高度差?

解:

(1) 右端高,凸。

(2) 根据式(1-3a),有

$$\begin{aligned}p_{\text{left}} &= p_0 + \frac{2\gamma}{r} \\ p_{\text{right}} &= p_0 + \frac{2\gamma}{R}\end{aligned}$$

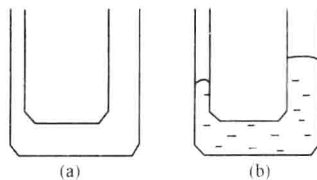


图 1-3

左右两端液面最高处压强满足

$$p_{\text{left}} - p_{\text{right}} = \rho gh$$

得

$$h = \frac{2\gamma}{\rho g} \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R} \right) = \frac{2 \times 520 \times 10^{-3}}{1.36 \times 10^4 \times 9.8} \left(\frac{1}{0.5 \times 10^{-3}} - \frac{1}{1.5 \times 10^{-3}} \right) = 10.4 (\text{mm})$$

玻璃完全不润湿水银,所以是凸液面。

1.4.3 汞对玻璃表面完全不润湿,若将直径为 1.00 mm 的玻璃毛细管插入大量汞中,试求管内汞面的相对位置。已知汞的密度 $\rho=1.36 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$,表面张力系数 $\gamma=520 \times 10^{-3} \text{ N/m}$,重力加速度 $g=9.8 \text{ m/s}^2$ 。

解:依据(1-6)式

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r}$$

完全不润湿 $\theta=\pi$

$$h = \frac{2\gamma \cos \theta}{\rho g r} = -\frac{2 \times 520 \times 10^{-3}}{13\,600 \times 9.8 \times 5 \times 10^{-4}} = -15.6(\text{mm})$$

玻璃完全不润湿水银,负号表示液面下降。

1.4.4 在 293 K 时,把半径为 10^{-3} m 的水滴分散成半径为 10^{-6} m 小水滴,表面吉布斯能增加了多少? 完成该变化时,环境至少需做功多少? 已知 293 K 时水的表面张力为 0.073 N/m。

解:(1)分散后液滴数

$$n = \frac{V_1}{V_2} = \left[\frac{4}{3}\pi(10^{-3})^3 \right] / \left[\frac{4}{3}\pi(10^{-6})^3 \right] = 10^9 \text{ 个}$$

分散前后表面积的变化

$$\Delta S = S_2 - S_1 = 10^9 \times 4\pi(10^{-6})^2 - 4\pi(10^{-3})^2 \approx 4\pi \times 10^{-3}(\text{m}^2)$$

表面能变化

$$\Delta G = \gamma \Delta S = 0.073 \times 4\pi \times 10^{-3} = 9.17 \times 10^{-4}(\text{J})$$

(2) $W = -\Delta G = -9.17 \times 10^{-4}(\text{J})$

1.4.5 在水下深度为 30 cm 处有一直径 $d=0.02$ mm 的空气泡,求空气泡内压强。设水面压强为大气压, $p_0=1.013 \times 10^5$ Pa,水密度 $\rho=1.0 \times 10^3$ kg/m³,水的表面张力系数 $\gamma=7.27 \times 10^{-2}$ N/m。

解:

$$\begin{aligned} p &= p_0 + p + p_s = p_0 + \rho g h + \frac{2\gamma}{R} \\ &= 1.013 \times 10^5 + 1.0 \times 10^3 \times 9.8 \times 0.3 + \frac{2 \times 7.27 \times 10^{-2}}{0.01 \times 10^{-3}} \\ &= 1.188 \times 10^5(\text{Pa}) \end{aligned}$$

1.4.6 图 1-4 中表示土壤中的悬着水,其上、下两液面都与大气接触。已知上、下两液面的曲率半径分别为 R_A 和 R_B ,且 $R_A < R_B$,水的表面张力系数为 γ ,密度为 ρ 。求悬着水的高度。

解:

$$\begin{aligned} p_A + \rho g h &= p_B \\ p_A &= p_0 - p_{sA} = p_0 - \frac{2\gamma}{R_A} \\ p_B &= p_0 - p_{sB} = p_0 - \frac{2\gamma}{R_B} \\ h &= \frac{2\gamma}{\rho g} \left(\frac{1}{R_A} - \frac{1}{R_B} \right) \end{aligned}$$

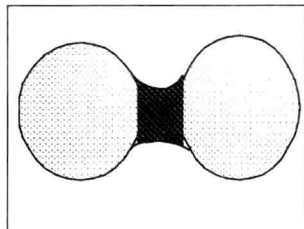


图 1-4

1.4.7 植物的根毛上有一层很薄的水膜套,根毛的尖端表面可视为半径为 R_1 的半球形,而根毛的其他部分可视为半径为 R_2 的圆柱形。求根毛其他部分及尖端的水膜所产生的附加压强。已知 $R_1=R_2=5 \times 10^{-6}$ m,土壤溶液的表面张力系数 $\gamma=7.0 \times 10^{-2}$ N/m。

解:圆柱形液面的曲率半径可选底面和侧面两个垂直的截面,所以曲率半径各为 $R_2=5 \times 10^{-6}$ m, $R'_2=\infty$,由拉普拉斯公式(1-5)式得

$$p_s = \gamma \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R'_2} \right)$$

所以,根毛其他部分的附加压强

$$p_{s2} = \frac{\gamma}{R_2} = \frac{7.0 \times 10^{-2}}{5 \times 10^{-6}} = 1.4 \times 10^4 \text{ (Pa)}$$

根毛尖端是球形液面,所以,尖端的附加压强

$$p_{s1} = \frac{2\gamma}{R_1} = \frac{2 \times 7.0 \times 10^{-2}}{5 \times 10^{-6}} = 2.8 \times 10^4 \text{ (Pa)}$$

1.4.8 有一株高 $H=40 \text{ m}$ 的树,木质部导管(树液传输管)可视为均匀的圆管,其半径 $r=3.0 \times 10^{-4} \text{ mm}$,设树液的表面张力系数 $\gamma=5.0 \times 10^{-2} \text{ N/m}$,接触角 $\theta=45^\circ$ 。问树根部的最小压强应为多少时,方能使树液升到树的顶端? 树液的密度 $\rho=1.0 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ 。

解: 设树液面顶端为 A 点,树根部为 B 点,则

$$p_A + \rho g H = p_B$$

$$p_A - p_0 = p_s$$

$$p_B - p_0 = p_{\min}$$

$$\rho g H = 1.0 \times 10^3 \times 9.8 \times 40 = 3.92 \times 10^5 \text{ (Pa)}$$

$$p_s = -\frac{2\gamma \cos \theta}{r} = -\frac{2 \times 50 \times 10^{-3} \times \cos 45^\circ}{3 \times 10^{-7}} = -2.36 \times 10^5 \text{ (Pa)}$$

$$p_{\min} = \rho g H + p_s = 1.56 \times 10^5 \text{ (Pa)}$$

第2章 流体力学基础

一、内容提要

流体力学是研究流体运动规律及与其相邻物体相互作用规律的科学。本章主要讲述理想流体的定常流动、流线和流管、连续性方程、伯努利方程及其应用；了解黏滞流体的定常流动、层流、湍流、雷诺数、泊肃叶定律、斯托克斯定律，并对生物流体的黏滞性作了简要介绍。

1. 理想液体的定常流动

① 流体：由许多彼此能够相对运动的流体元（物质微团）所组成的连续介质，具有流动性，常被称为流体。流体是液体和气体的总称。

② 流体元：微团或流体质量元，是由大量分子组成的集合体。从宏观上看，流体质量元足够小，小到仅是一个几何点，只有这样才能确定流体中某点的某个物理量的大小；从微观上看，流体质量元又足够大，大到包含相当多的分子数，使描述流体元的宏观物理量有确定的值，而不受分子微观运动的影响。因此，流体元具有微观大、宏观小的特点。

③ 理想流体：指绝对不可压缩、完全没有黏滞性的流体，它是实际流体的理想化模型。

④ 定常流动：指流体的流动状态不随时间发生变化的流动。流体做定常流动时，流体中各流体元在流经空间任一点的流速不随时间发生变化，但各点的流速可以不同。

⑤ 流线：是分布在流体流经区域中的许多假想的曲线，曲线上每一点的切线方向和该点流体元的速度方向一致。流线不可相交，且流速大的地方流线密，反之则稀。

⑥ 流管：由一束流线围成的管状区域称为流管。对于定常流动，流体只在管内流动。流线是流管截面积为零的极限状态。

2. 两个基本原理

① 连续性原理：流体在同一细流管内，任意两个垂直于该流管的横截面积为 S_1 、 S_2 ，流速为 v_1 、 v_2 ，密度为 ρ_1 、 ρ_2 则有

$$\rho_1 S_1 v_1 = \rho_2 S_2 v_2 \quad (2-1a)$$

它表明，同一细流管中任一截面处的质量密度、流速和截面面积的乘积是一个常数，也称为质量守恒方程。若流体不可压缩， ρ 为常量，则有

$$Q = Sv = \text{常量} \quad (2-1b)$$

它表明，对于不可压缩流体的定常流动，同一细流管中任一截面处的流速与截面面积的乘积是一个常量，也称为体积流量守恒定律或连续性方程。

② 伯努利方程：理想流体在同一细流管中任意两截面处其截面积 S 、流速 v 、高度 h 、压强 p 之间有

$$p_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho gh_2 = p_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_1 \quad (2-2a)$$

或写成

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 + \rho gh = \text{常量} \quad (2-2b)$$