

教学拓展

疑难问题解析

关于与液体表面张力相关问题的探讨

蒋炜波

(清华大学附属中学 北京 100084)

赵 坚

(昆明市五华区基础教育科学研究中心 云南 昆明 650031)

(收稿日期:2020-03-01)

摘要:针对2019年人教版高中新物理教材中关于液体表面张力相关内容涉及的一些问题,从多个方面进行深入阐述分析,并在此基础上对教学提出一些建议.

关键词:表面张力 产生机制 教学建议

1 引言

2019年人教社出版发行了最新版的高中物理教材,在选择性必修3第二章“气体、液体和固体”第5节中,介绍了液体表面张力.从教材这部分的编写思路上看,基本沿袭了上一版的人教版高中物理教材^[1],新教材仅仅把原图9-2-5和图9-2-6统一成本文中的图1.

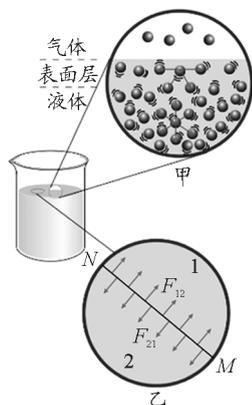


图1 液体的表面张力

由于液体表面张力并不是高考重点考查的内容,导致师生关注度不高,使得教学实践中部分师生对于液体表面张力相关知识的认识存在误区,另外,

或许是受限于中学教学要求制约,新教材对液体表面张力的产生机制未能有一个相对较为清晰严谨的说明.为此,本文试图在此对与液体表面张力相关的一些问题做点深入探讨,供大家教学中参考.

2 液体表面张力现象的典型例子分析

如图2所示,水黾(a)、曲别针(b)和硬币(c)均可停在水面上,这些现象都与液体表面张力有关,但是具体的物理机制是什么?

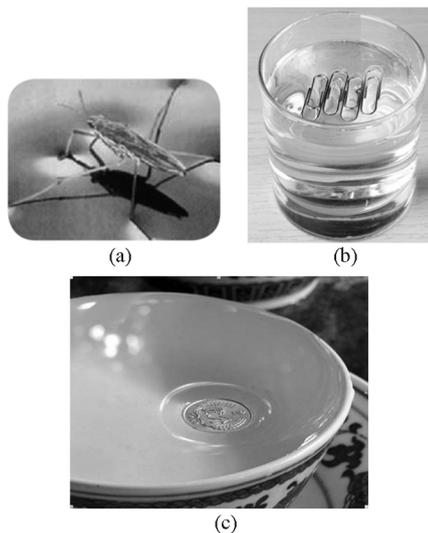


图2 停在水面的水黾、曲别针和硬币

作者简介:蒋炜波(1987-),男,中小学一级,海淀区骨干教师,主要从事中学物理教育教学研究.

通讯作者:赵坚(1969-),男,正高级,特级教师,享受国务院政府特殊津贴,先后被评为全国优秀教师、云南省有突出贡献优秀专业技术人才等,主要从事基础教育教育学科教研管理、中学物理教育教学改革研究.

要弄清楚这一问题,我们先得从液体表面张力的定量描述和张力系数的实验测量来看.我们知道,表面张力使得液体表面犹如张紧的弹性薄膜,具有收缩的趋势.因此,对于液体表面假想的一条线元 ΔL ,如图3所示,其受到左右两侧的液体表面张力的合力大小 ΔF 应该与线元长度 ΔL 成正比,即 $\Delta F = \gamma \Delta L$,此即为液体表面张力的计算公式,其中比例系数 γ 称为表面张力系数^[2].

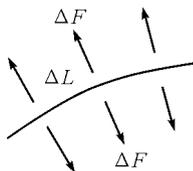


图3 表面张力

对表面张力系数 γ ,可以采用如图4所示的实验装置进行测量.用金属丝制成竖直放置的轻质框架,其下边框长度为 L ,可以无摩擦自由滑动,在框内形成液膜以后,在下边框下方悬挂一个重力为 M 的重物,待下边框静止平衡后,此时对于下边框而言,其受到的力有挂钩施加的向下的拉力和上方液膜表面施加的向上的拉力 $2\gamma L$,于是可以得到 $M = 2\gamma L$ (系数2是因为液膜有前后两个表面),就可以测量出液膜的表面张力系数 γ .如温度为 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的水,其表面张力系数约为 $7.280 \times 10^{-2} \text{ N/m}$.

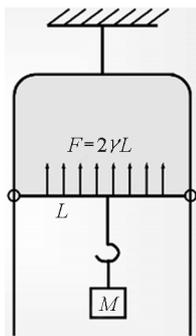
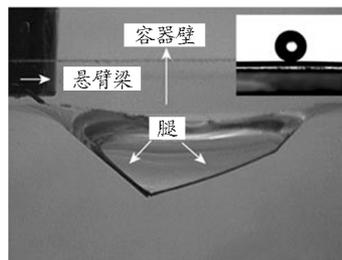


图4 测量表面张力

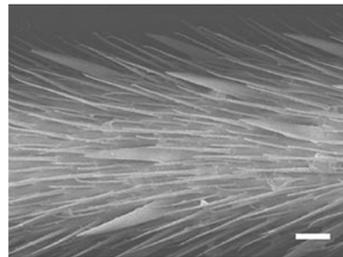
清楚以上问题后,我们以水黾、硬币停在水面上为例,来看看它们的受力情况.

水黾(měng)的腿上有极为特殊的结构,2004年《Nature》杂志发表了中国科学院江雷院士的研究文章,表明水黾腿上存在细长刚毛和螺旋状纳米沟槽,如图5所示,这种结构可以有效地吸附空气,

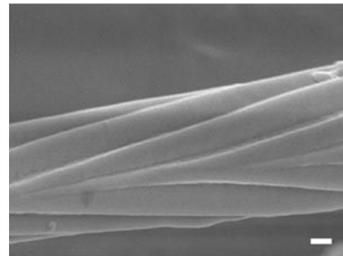
从而形成一层稳定的空气膜,阻碍了水的浸润,让水黾的腿在宏观上体现出超疏水的特性,此时的接触角最大可以达到约 172° (接触角达到 180° 即为完全疏水,不浸润).江雷院士在实验中发现,这种超疏水性,可以让水黾的腿最大可以浸入水面以下 4.4 mm 而不穿破水面^[3].



(a)



(b)



(c)

图5 水黾腿部结构^[3]

当水黾的腿进入水面以下但又不穿破水面的时候,水面犹如一层弹性薄膜向上托举着水黾的腿,如图6所示.

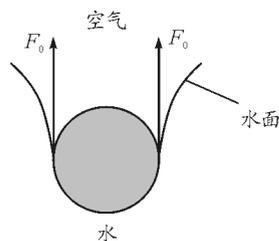


图6 水黾腿部受力

虽然水的表面张力并没有直接作用在水黾的腿上(因为表面张力始终在液面内且沿着液面的切向),但从效果来看可以等效为水黾腿的两侧受到与

表面张力等大的力 F_0 。

那么表面张力有多大呢? 我们不妨进行一下简单的估算. 参照图 2, 取水龟与水面接触的腿长为 5 mm, 水龟一共 3 对足, 因此与水面的接触长度总计约 $L = 30$ mm, 依据表面张力公式可以得到此长度 L 对应的液体表面张力 $F_0 = \gamma L = 2.18 \times 10^{-3}$ N (γ 取 7.280×10^{-2} N/m). 近似认为水龟的腿截面为圆形, 因为水龟的腿的超疏水性, 极限情况下近似认为腿两侧的力的方向都是竖直向上的, 于是得到水龟受到的合力 $F_1 = 2F_0 = 4.36 \times 10^{-3}$ N. 而一只中等大小的水龟质量约 30 mg, 即重力 G 约为 3×10^{-4} N, 可见极限情况下水的表面张力作用能支撑 15 倍的水龟自身重力.

不仅如此, 由于水龟的腿深陷水中却没有冲破水面, 因此还会受到腿底部的水的液体压力作用, 以江雷院士的实验为例, 取水龟的腿陷入水中的深度为 4 mm, 则液体压强 $p = 40$ Pa, 取水龟的腿的直径 $a = 0.1$ mm, 与水接触的腿总长仍然为 $L = 30$ mm, 可以得出水龟受到的水的压力作用 $F_2 = p a L = 1.2 \times 10^{-3}$ N. 因此水龟受到向上的合力极限情况下达到了约 $F = F_1 + F_2 = 5.56 \times 10^{-3}$ N, 约为自身重力 G 的 19 倍, 这足以让水龟在水面上如履平地.

类似地, 一枚 2 分硬币的直径约为 $D = 2.1$ cm, 厚度 $d = 1.25$ mm, 质量为 1.1 g, 即重力 $G = 0.011$ N. 利用表面张力公式可得到停在水面的硬币受到液体的表面张力最大值约为 $F = \gamma L = \gamma \pi D = 4.8 \times 10^{-3}$ N. 显然此时的表面张力小于硬币重力, 不足以维持硬币的状态, 因此硬币此时会在水面上向下凹陷较深的距离, 如图 2 所示, 以获得较大的液体压强和压力的支持. 设硬币下表面到水面的距离为 h , 则利用液体压力和表面张力之和等于硬币重力, 可以求解出此时的 h 约为 1.8 mm, 对照图 2 可知, 这是比较符合实际情况的.

可见, 水龟、硬币等物体之所以能够停在水面上, 的确与水的表面张力存在密切关系. 水的表面张力, 既直接对物体产生了向上的作用效果, 又防止了水面被物体冲破, 从而使得物体受到来自液体对其

下表面的压力和来自表面张力的共同作用, 让物体最终停在了水面上.

3 液体表面张力产生的微观机制

关于液体表面张力产生的微观机制, 一直以来都有不同的争论, 但总的来说, 表面张力起源于液体表面和内部分子间距不同的看法是大家的一种共识.

(1) 液体表面分子间距比液体内部分子间距更大

实际生活例子和实验表明, 液体表面张力是一种收缩吸引力, 既然是吸引力, 从分子动理论角度分析, 液体表面分子间距应当大于平衡位置距离 r_0 , 比液体内部分子间距更大. 这一观点在统计力学中也得到了印证. 设想液体表面是由分子和空位组成, 对于温度为 85 K 的氩, 假设表面上有 30% 的空位, 此时计算出的液体表面张力、总表面能以及表面熵值与实验结果符合得很好^[4], 这说明此时液体表面分子间距平均而言的确变大了, 即液体表面的分子间距比内部的分子间距要大.

既然液体表面分子间距是大于 r_0 的, 那么为什么这些分子的间距不会因为相互吸引而减小, 从而再次回到 r_0 呢? 这就要探讨造成液体表面分子间距变大的原因.

(2) 从受力角度分析液体表面分子间距变大

我们知道, 两种物质或者同种物质的两种物态在相互接触的时候, 会存在分界面. 界面是指接触的约几个分子厚度的过渡区, 若界面的其中一侧为气体, 这种界面通常称为表面. 严格讲表面应是液体或固体与其饱和蒸气之间的界面, 但习惯上我们也把液体或固体与空气的界面称为液体或固体的表面, 如图 7 所示为同种物质的液-气界面, 即液体表面.

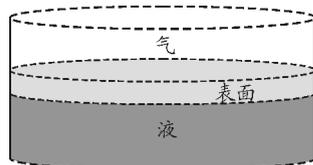


图 7 液体表面

以液体表面为例,液体内部分子所受四周邻近相同分子的作用力是对称的,各个方向的力彼此抵消.但是处在界面层的分子,其一侧受到液体分子的作用,另一侧面受到气体分子的作用,其作用力显然不能相互抵消,如图8所示.因为分子间引力作用半径大于斥力作用半径,因此在液体表面分子整体上受到一个指向液体内部的作用力,即分子有向着液体内部运动的趋势.这是导致液体表面出现空位从而平均分子间距大于液体内部的原因之一.

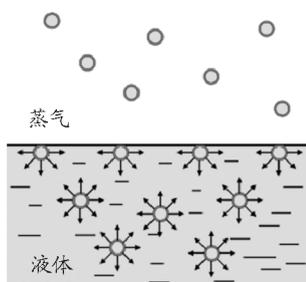


图8 液体分子引力作用

另一个导致液体表面出现空位的原因是表面分子的逃逸.分子在做永不停息的无规则热运动,在任何温度下都存在一定数量的液体分子因为不规则运动速度足够大从而可以从液体表面逃逸,由于逃逸只能发生在液体表面(除去温度达到沸点的情形),因而液体表面分子空位进一步增加,而且表面空位的增加反过来还会进一步加剧未逃逸的表面分子向液体内部运动的趋势,因为它们的受力不平衡因为分子逃逸而进一步加剧了.这样,液体表面的分子平均间距自然就会大于液体内部了.

不难发现,液体表面分子并不是固定的,这些分子在不断的逃逸和进入液体内部,在逃逸和进入液体内部以后,又总会有新的分子重新组成新的液体表面,可见液体表面的分子并不处于平衡状态.我们切不可将液体表面分子视为组成不变、固定不动、间距很大的分子,否则就会出现为什么这些分子的间距 r 不会因为相互吸引而减小,从而再次回到 r_0 的困惑.

(3) 从能量角度分析液体表面分子间距变大

赵凯华先生曾在《新概念物理教程——热学》一书中从能量角度对液体表面分子间距变大进行了

解释.在图9中,液体内分子A想要向外运动,会受到5和6的排斥阻力及2和3的吸引阻力,液体表面分子B想要运动到液体内部,只需要克服8和9的斥力,显然分子B向内运动相比分子A向外运动会更容易一些.

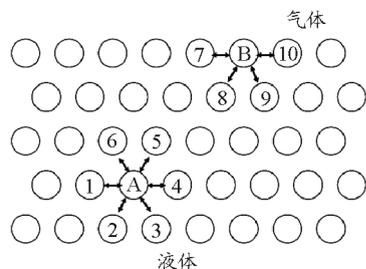


图9 液体分子运动

如果画出此时A和B两类分子的势阱,显然A的势阱应该比B更深,如图10(a)所示.这时候A类分子向外运动必须要越过势垒(从图中的A指向B),B类分子向内运动也需要越过势垒(从图中B指向A),但显然A越过势垒需要的能量更多.因此B这一类分子更容易进入液体内部,导致液体表面出现空位,从而增加分子平均间距.间距增大又会引起B的势阱深度增大,从而让B这一类分子进入液体内部所需要的能量增加,最终使得A和B的势阱深度相同,如图10(b)所示,让液体内部和表面分子间的运动达到动态平衡^[5].

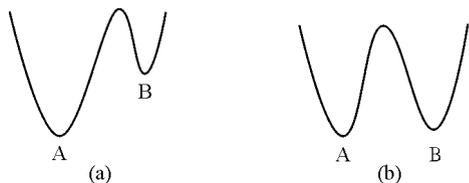


图10 分子势阱差异

4 关于液体表面张力的方向问题

从前面分析可知,液体表面分子的间距增大是导致液体分子之间出现相互吸引力的原因,那么液体表面分子受到的净吸引力是否就是表面张力呢?表面张力是指向液体内部吗?

国内《物理化学》的相关研究普遍认可液体会反抗其表面积的增加,也认可表面张力的存在,但有的回避讨论表面张力的方向^[6],有的明确表面张力

沿表面的切线方向^[7],有的认为表面张力的方向与液面的切线相垂直并指向液体内部^[8,9].然而,从图9可以看出,只有B分子受到的净吸引力才是指向液体内部的,可是这个力并不能直接让液体表面产生收缩效果从而出现张力,因此,认为表面张力垂直液面指向液体内部的观点显然是将净吸引力和表面张力混淆了.

所以,净吸引力与表面张力不是同一个力,表面张力是一个平行于界面或者说与界面相切的力,使表面有自动收缩的趋势.这就好比吹膨胀的气球表面一样,在气球表面相邻的两点之间始终存在指向收缩方向的作用力.我们还可以从如图11所示的戳破肥皂泡实验看出,当我们用手戳破它的时候,可以看到明显的表面收缩从右往左逐渐破损的现象,而看不到肥皂泡整体同时向内塌缩的现象.



图11 戳破肥皂泡

5 对液体表面张力教学的一些建议

鉴于液体表面张力这部分内容不是高考重要知识点,教学中往往不受到重视,同时涉及的物理机制相对复杂,为了避免出现理解上的误区,在此,建议教学中:

一是教师应该尽量简单又不失科学性地阐述清楚表面张力产生的原因.教材中已经阐述液体表面分子间距较液体内部更大,但却并没有解释为什么会更大.因此教学中可以增加这样一段描述:因为液体表面分子逃逸液体向外运动,以及表面液体分子只能受到来自液体内部一侧分子的吸引力从而向液体内部运动,最终导致液体表面分子分布稀疏,分子间距变大.这样学生就能在认可液体表面分子间距变大的基础上去理解表面张力的产生了.

二是应明确表面张力的方向.教材中阐述了表面分子间体现吸引力,并在液体表面任意划了一条细线MN,如图1所示,教材这时候只分析了在液体表面MN受到的两侧的拉力,并没有分析MN受到的指向液体内部的吸引力,也没有明确这个指向液体内部的吸引力是否是表面张力,因此容易导致学生产生误解,认为表面张力还有一个指向液体内部的分量.教学中教师应该让学生明确表面张力的方向,不只是说明表面张力沿着液体表面切线方向,更要明确指向液体内部的吸引力不是表面张力.

三是增加刺破肥皂泡的连续图片展示,让学生直观看到此时液面破损顺序,从而更直观地认识到表面张力的方向是沿液体表面切线方向的.另外,针对水黾停在水面的例子,可以利用校本课程对水黾的受力情况引导学生进行探讨研究,以此填补水面的表面张力究竟是如何让水黾停在水面上的思维空白,真正解决学生的疑惑.

注意以上三点建议,可能会避免理解上的误区.

参考文献

- 1 人民教育出版社课程教材研究所,物理课程教材研究开发中心.物理·选修3-3[M].北京:人民教育出版社,2005.44~45
- 2 赵凯华,罗蔚茵.新概念物理教程——力学(第2版)[M].北京:高等教育出版社,2010
- 3 Gao,X.,Jiang,L..Water-repellent legs of water striders. Nature,2004,432:36
- 4 张晋,杨亮,张毅,等.液体表面张力产生机理及方向分析[J].中国石油和化工标准与质量,2012,32(05):73~74
- 5 赵凯华,罗蔚茵.新概念物理教程——热学(第2版)[M].北京:高等教育出版社,2015
- 6 傅献彩,沈文霞,姚天扬,等.物理化学[M].北京:高等教育出版社,2006
- 7 顾惕人,朱王步遥,李外郎,等.表面化学[M].北京:科学出版社,2001
- 8 关振民.物理化学[M].北京:中国环境科学出版社,2010
- 9 刘志明,吴也平,金丽梅.应用物理化学[M].北京:化学工业出版社,2009