

# 神奇的表面浸润

朱重钦 李 晖 孟 胜

(中国科学院物理研究所 100190)

## 1. 自然界中的浸润现象

当把一种液体沉积于固体表面上时,由于液体、气体以及固体分子间的作用力,液体最后会处于平衡状态,这时气、液、固三相交点处气、液界面的切线会与固液界面线成一定角度的夹角,这种现象称为浸润,形成的角度称为接触角。对于水这种常见液体,一般人们把水滴接触角小于 $90^\circ$ 的表面称为亲水表面,接触角大于 $90^\circ$ 的表面称为疏水表面。

浸润在生物、物理、化学、仿生、工业等过程中都起着至关重要的作用。比如,非洲西南部纳米布沙漠降雨很少,但是早晨的时候雾气很浓,并且常常刮大风。每当刮风的时候,沙漠中的一种甲壳虫(图1(a))会倾斜它的身体,使它的背部对着风来收集水分。水滴会顺着甲虫的背部流到它的嘴里,这得益于甲壳表面特殊的微观结构(图1(b),图1(c)),这种微观

结构使得甲壳表面产生亲疏水交替的构造,从而使甲虫能够在沙漠中收集水并使这些水不被蒸发。再比如,在微观尺度下氨基酸基团的疏水作用是生物体中蛋白质折叠的主要驱动力。可见,理解表面浸润现象对于理解生命活动具有重要的意义,同时,模仿自然界生物利用表面浸润又可以给人类生活生产带来福祉。

## 2. 接触角与杨氏方程

由于浸润是一种发生在界面的现象,它与表面张力(即表面能)有很大的关系。那什么是表面张力呢?简单来说,表面张力就是形成一个单位面积的表面所需要的能量。我们以液体作为例子,如图2(a),在体相中,每个分子受到周围各个方向的分子对它的作用力,结果使其净受力为0。但是处于液体表面的分子,并不是各个方向都受力,这种受力的不均匀,导致其有指向内部的净受力,这就是

表面张力的来源。从能量方面讲,由于分子之间存在作用力,当一个分子与别的分子接触时它的能量会低于孤立存在时的能量,而分子在表面的近邻分子数明显少于体相中的近邻分子,为了使其总能量降低,它会尽量减少表面积。正是存在了表面张力,才使得液体在固体表面上呈现不同的浸润现象。

早在1804年,英国科学家托马斯·杨就发现液滴与固体接触时具有恒定的接触角( $\theta$ )。浸润也可以分成部分浸润( $\theta > 0^\circ$ )和完全浸润( $\theta = 0^\circ$ )两类。对于部分浸润情形,固体表面被液体浸润的部分被一条三相线 $\mathcal{L}$ 所限定(对于图2(b),它是一个圆)。在三相线 $\mathcal{L}$ 附近,结构非常复杂且依赖于具体的体系,我们把这个区域称为核心区域。然而,我们可以避开这个区域去讨论浸润角与表面能之间的关系。托马斯·杨提出当液体在表面处于稳态时,将液滴的界线移

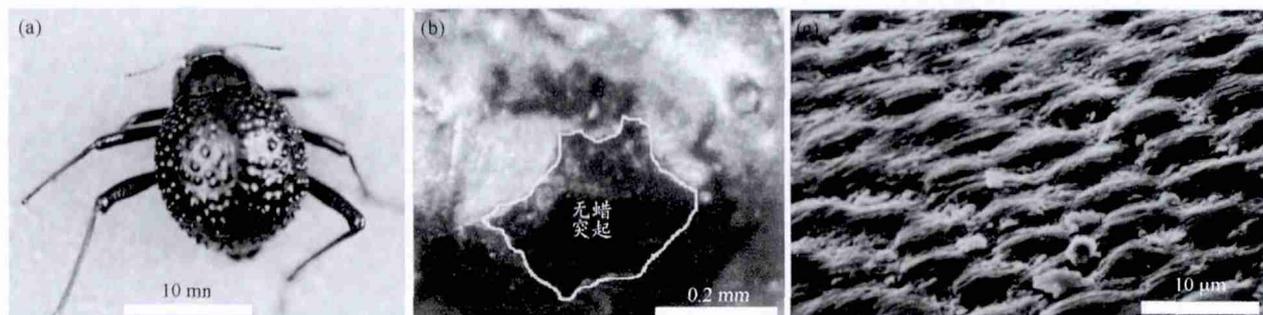


图1 (a) 沙漠中的一种甲虫,在它的背部可以清楚地看到突起和凹槽。(b) 甲虫的一个凸起,在凸起的峰位没有被染色(仍是黑色),而其他部分则被染色。(c) 被染色部位的扫描电子显微镜图

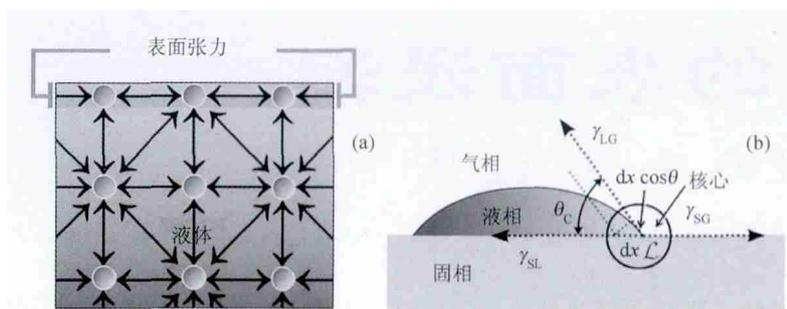


图2 (a) 表面液体分子和体相液体分子所受作用力的情况 (b) 液滴在固体表面上的示意图,  $L$ 给出的是垂直于纸面的三相线

动  $dx$  并不会让它的能量产生变化。根据图 2 (b), 我们知道, 当  $L$  移动  $dx$  时: (1) 它体相的能量并不会变化; (2) 考虑到核心区域只是个简单的平移, 所以核心区域的能量也不会产生变化; (3) 这时候固/气、固/液和气/液面积分别升高了  $dx$  (对于固/气界面),  $-dx$  (对于固/液界面), 和  $-dx \cos \theta_c$  (对于气/液界面)。这时候可得:  $\gamma_{SG}dx - \gamma_{SL}dx - \gamma_{LG} \cos \theta_c dx = 0$  约去  $dx$ , 可得  $\gamma_{SG} - \gamma_{SL} - \gamma_{LG} \cos \theta_c = 0$ , 这就是非常著名的杨氏方程。在这里,  $\gamma_{SG}$ 、 $\gamma_{SL}$  和  $\gamma_{LG}$  分别是固/气、固/液和气/液的界面能。 $\theta_c$  是液滴在三相点的切线与底面的夹角, 也就是接触角, 它的大小可以表征一个固体表面对液体的浸润性。当固气表面能大于固液表面能和液气表面能之和时, 为了使其表面能降低, 固体表面会有一层液膜, 也就是说这时候液体在固体表面达到完全浸润。相应的接触角为  $0^\circ$ 。这也就是为什么很多空气中的固体表面会有一层水膜的原因。

### 3. 表面张力之来源: 界面作用

进一步的, 我们自然会问, 表面的浸润性与液体或者固体的组成有什么关系呢? 让我们先看一下固体, 根据原子间力的不同, 我们可

以简单的把固体分成两类: (a) 硬固体 (原子间通过共价键、离子键和金属键这种强的键相互作用)。(b) 弱分子固体 (通过范德华力, 或氢键这种较弱的力相互作用)。由于硬固体表面带有很多未饱和的悬挂键, 因此具有较高的表面能 ( $\gamma_{SO} \sim 500 \sim 5000 \text{ ergs/cm}^2$ ), 而分子固体的表面能相对较小 ( $\gamma_{SO} \sim 50 \text{ ergs/cm}^2$ )。在 高能表面, 大多数液体能达到完全浸润。这是为什么呢? 可能有人会认为这是由于高能表面能量比较高导致的。其实不然, 正如前面所说的是否完全浸润是由固气界面能是否大于固液界面能和气液界面能之和决定的。进一步的推导可以得到要达到完全浸润, 固液间的作用势要大于液液间的作用势, 而考虑到固体和液体分子, 以及液体分子间多是范德华力, 而范德华作用势正比于物质的极化率, 这里极化率是一个衡量中性原子或分子在外电场作用下电子云形状的改变大小的一个物理量。所以只要满足固体的极化率大于液体的极化率就可以达到完全浸润。也就是说正是由于硬固体相对于大部分液体具有更大的极化率, 才使得高能表面对大多数液体完全浸润。

而对于低能表面, 往往只有极性很弱的液体才能完全浸润。以  $n$ -烷烃液滴在固体表面的浸润为例子, 对于聚乙烯固体, 这一系列的烷烃都可以达到完全浸润。但当将其置于聚四氟乙烯固体表面时, 西斯曼 (Zisman) 等发现它会形成一个有限的浸润角  $\theta_c$ , 且随着烷烃链长的不同而变化。通过拟合这些浸润角我们就可以得到临界的表面能  $\gamma_c$ , 使得浸润角正好为  $0^\circ$ 。通常我们会认为  $\gamma_c$  只依赖于固体本身; 事实上, 它还与液体的性质有关。然而, 如果仅仅是处理简单液体 (主要通过范德华作用力), 西斯曼等发现  $\gamma_c$  与液体无关, 而仅仅与固体本身有关。

那  $\gamma_c$  与固体的哪些物理参数有关呢? 很多科学家 (包括 Girifalco、Good、Fowkes) 都做了很多工作试图去解答这个问题。在这里, 我们只作简单的讨论。在上面举的例子中, 短的烷烃相对长的烷烃具有更大的极化率, 这就是为什么  $\theta_c$  会随着  $n$  变小而表大。粗略上, 我们可以认为  $\gamma_c$  只与固体的性质有关, 随着其极化率增大而增大。进一步的, 它还与其他因素有关, 比如:

(a) 由于实际上除了范德华力, 还有很多其他的力在固液作用中也会有贡献, 比如氢键和库仑力。所以  $\gamma_c$  或多或少会与液体的性质有关 (可以参照 Good, 1964)。

(b) 即使在固液作用中只存在范德华力, 采用平均的极化率去描述作用势也是非常粗略的。欧文斯等就指出更精确的做法是要考虑

极化率的频率依赖 (Owens et, al., 1978)。

(c) 考虑到界面液体的结构与固体和液体的界面作用有莫大的关系, 所以实际上我们在研究浸润问题时还要考虑液体的界面结构。

#### 4. 接触角滞后

浸润理论似乎告诉我们可以 在实验上很容易地精确测得一种液体在固体上的接触角。事实上并非如此。很多情况下, 人们发现三相线即使在  $\theta = \theta_c$ , 即在  $\theta_c$  附近的一定范围内, 也能稳定存在, 而不会移动, 这种现象被称为钉扎现象。也就是说我们实验上测得的角度很可能不是  $\theta_c$ , 而是在其周围一定范围内 ( $\theta_r < \theta < \theta_a$ )。  $\theta_a$  和  $\theta_r$  分别被称为前进接触角和后退接触角。它们可以通过测量一滴滑移的液滴在滑动方向前后两个不同的接触角得到 (如图 3)。这就是接触角滞后效应。前后接触角的差可以达到  $10^\circ$ , 甚至更大。那么是什么原因导致的这种接触角滞后呢? 已发现主要有 3 个原因:

(a) 表面粗糙度。早在 1932 年, 特里亚 (Trillat) 和弗里兹 (Fritz) 就发现当三相线  $\perp$  平行于系统中的凹槽时, 很容易会受困。这是产生

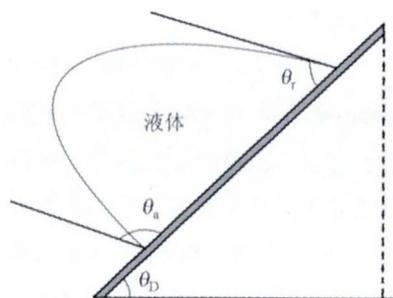


图3 在表面上往下滑的液滴的动态接触角, 其中  $\theta_a$  和  $\theta_r$  分别指的是前进角和后退角

接触角滞后的主要原因。

(b) 化学上的不均一性。

1964 年, 特里亚 (Dettre) 和约翰逊 (Johnson) 将玻璃液珠浸入固体石蜡时, 发现玻璃和石蜡的不同的浸润性质会对接触角滞后性质会产生影响。

(c) 液体中的溶质 (比如表面活性剂和高分子) 可能会在固体表面上沉积, 这会对接触角滞后产生影响。

#### 5. 经典的浸润模型

正如前面所说, 真实固体表面并不是绝对光滑、坚硬, 或者化学均匀的。因此我们在这里引入一些模型希望能帮助理解真实固体表面的浸润现象。在这里我们主要介绍条纹表面的表面模型。我们知道, 表面上很容易会产生一些微观的裂缝, 在这些裂缝的地方相对于其他地方更加容易发生化学反应。所以理解这些裂缝对表面浸润的影响是非常重要的。前面我们已经提到了它对接触角滞后会产生很大的影响。在这里我们主要介绍两种条纹表面模型: Wenzel 模型和 Cassie-Baxter 模型。

##### Wenzel 模型

文策尔 (Wenzel) 是最早开始研究表面粗糙程度对浸润影响的几个科学家之一。图 4 (a) 给出的是 Wenzel 模型, 液滴填充了条形表面模型的凹槽, 在这里我们假设表面的粗糙尺度比我们的液珠的尺度小得多。仿照杨氏方程的推导, 我们可以得到:  $\cos\theta^* = r\cos\theta_c$

上式中的  $\theta_c$  是杨氏接触角, 而  $r$  为表面的粗糙度, 当  $r=1$ , 为

光滑表面, 当  $r>1$ , 则为粗糙表面。

由上可以得到:

1. 如果  $\theta_c < 90^\circ$  (亲水表面), 那么  $\theta^* < \theta_c$ 。

2. 如果  $\theta_c > 90^\circ$  (疏水表面), 那么  $\theta^* > \theta_c$ 。

可见表面的粗糙度能改变衬底的浸润性, 对于 Wenzel 模型, 它能使亲水表面更加亲水, 使疏水表面更加疏水。

##### Cassie-Baxter 模型

对于化学异构的表面, 我们可以引入一个类似的模型来描述。如图 4 (b), 一个表面由两种物质组成, 这两种物质都有自己的接触角, 分别为  $\theta_1$  和  $\theta_2$ 。我们用  $f_1$  和  $f_2$  来表示这两种物质所占的面积的比例 ( $f_1 + f_2 = 1$ )。同样的, 我们假设条纹宽度相对于液滴的尺寸非常小。类似于 Wenzel 关系, 可以得到 Cassie-Baxter 关系:

$$\cos\theta^* = f_1\cos\theta_1 + f_2\cos\theta_2$$

由上可以知道这时候的接触角度介于  $\theta_1$  和  $\theta_2$  之间。

#### 6. 原子尺度下的浸润机制

以上介绍的都是宏观尺度上对浸润的理解, 这一小节我们将重点介绍一下近期微观原子尺度上对水浸润的一些研究进展。当表面结构的不均匀性尺度与一个水分子的大小可比拟时, 表面浸润呈现非常丰富、奇特的现象, 与经典的宏观理解完全不同。首先, 让我们先来看一个有趣的问题: 水表面是亲水的还是疏水的? 如果从前面我们介绍的宏观理论分析, 当将一个水滴到一平面水层上时, 为了保证能量最低, 那么它需要一个最小的表

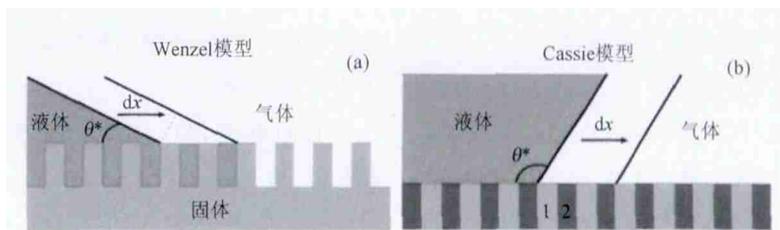


图4 (a) 条形粗糙表面的 Wenzel 模型; (b) 条形粗糙表面的 Cassie-Baxter 模型。dx 给出了推导过程中液/气分界线的平移距离

面积, 则水滴会完全铺展开。然而近期, 中科院上海应用物理所的方海平等 (PRL, 2009) 通过分子动力学模拟的方法发现“常温下的液态水在一个特定的表面上时可以不亲水”, 也就是说常温下水是可以疏水的, 这与前面我们的分析相悖, 但是后来却被实验证明 (*Soft Matter*, 2011)。为什么在室温下会有疏水的水层? 进一步的分析发现由于表面电荷的作用, 表面水层形成了有序的六角排列, 正是这种特定的结构导致了室温下水层疏水这种奇异的现象出现。早在 2005 年一些低温下的表面科学实验也发现了这一现象 (Kimmel, PRL 2005)。

方海平的另一个工作研究了水在带有极性基团表面的浸润表现 (*Sci.Rep.*2012)。考虑到水是极性分子。因此, 传统认为带有极性的表面容易被水润湿, 是亲水表面。而现实中, 在表面修饰极性分子基团是使表面变亲水的重要手段。事实真是如此吗? 分子动力学模拟显示固体表面的浸润性明显依赖于表面上极性分子的偶极长度。偶极长度存在一个临界值, 当表面上极性分子的偶极长度小于这个临界值时, 水分子就无法“感受到”偶极的存在, 而不管极性有多强。这时候带有极性基团的表面仍是疏

水的。但是如果偶极长度大于这个临界值时, 随着极性增强, 固体表面会变得越来越亲水。

从上面两个研究中可以看出表面微观结构会对表面的浸润性质产生很大的影响。近期, 中科院物理所的孟胜等 (PRL, 2013) 系统地模拟了水在不同晶格常数的面心立方固体(111)表面的浸润性质(图 5(a))。他们发现对疏水表面水平拉伸  $\pm 3\%$  时, 表面对水的浸润性变化很小。而对亲水表面拉伸  $\pm 3\%$  时, 水在界面的浸润角会有非常大的变化。此外, 接触角并不是随着表面晶格常数单调变化, 而是当表面晶格常数与体相水的 0—0 距离在界面的投影相等时, 水滴的接触角会有个最小值(图 5(b))。进一步分析界面水层的结构发现, 这时候界面致密水层的微观结构会被破坏, 从而更加接近体相水的特征(图 5(c))。而在疏水表面上, 表面晶格基本不改变界面水层的结构。可见界面水层的微观结构对表面浸润有着很大的影响。

上面 3 个工作都是用模拟的方法去探测微观结构对表面浸润的影响, 那么是否也有类似的实验呢? 答案是肯定的。杰弗里 (Jeffrey) 等 (*Nature Materials*, 2009) 用尺度与溶液分子尺度相比拟的两种组件去组成不同的表面, 他们发现表

面上的水的浸润性质除了与构成表面的两种组件成分比有关外, 还与组件组成的具体的纳米结构有关。进一步说明了在纳米尺度上理解表面浸润是非常重要的; 甚至可以说, 在表面组分和小结构的纳米尺度排列没有确定以前, 表面的浸润性无法定义。

## 7. 浸润性的微观表征方法

前面我们讲的都是用宏观的接触角来表征一种物质对某种液体浸润性的强弱。然而对于碳纳米管、纳米颗粒和蛋白质分子这类纳米尺度的物质, 显然测量液滴在其上的接触角是非常困难的, 所以我们需要有其他的、微观尺度上的表征方法。在这里我们主要介绍密度波动的方法。

图 6 给出了分子动力学模拟的水在自组装薄膜上的浸润情况。在体系中, 自组装膜分子是由一个端基和一个癸烷连接组成, 通过改变端基, 可以得到不同亲疏水性的表面。图 6 下给出了不同表面上水分子在距表面不同高度处的密度。从图中可以看出, 不管表面的亲疏水性如何, 水在固体表面都会产生层状结构。但是第一层水密度的大小跟表面的亲疏水性却没有必然的关系!

进一步的, 古德瓦特 (Rahul Godawat) 等 (PNAS, 2009) 利用分子动力学模拟的方法研究了水在不同亲疏水表面密度波动的表现。图 7(a)、(b) 分别给出了疏水表面 ( $-\text{CH}_3$ ) 和亲水表面 ( $-\text{OH}$ ) 附近固定体积空间内的水分子数目随着时间的变化关系。可以看出这

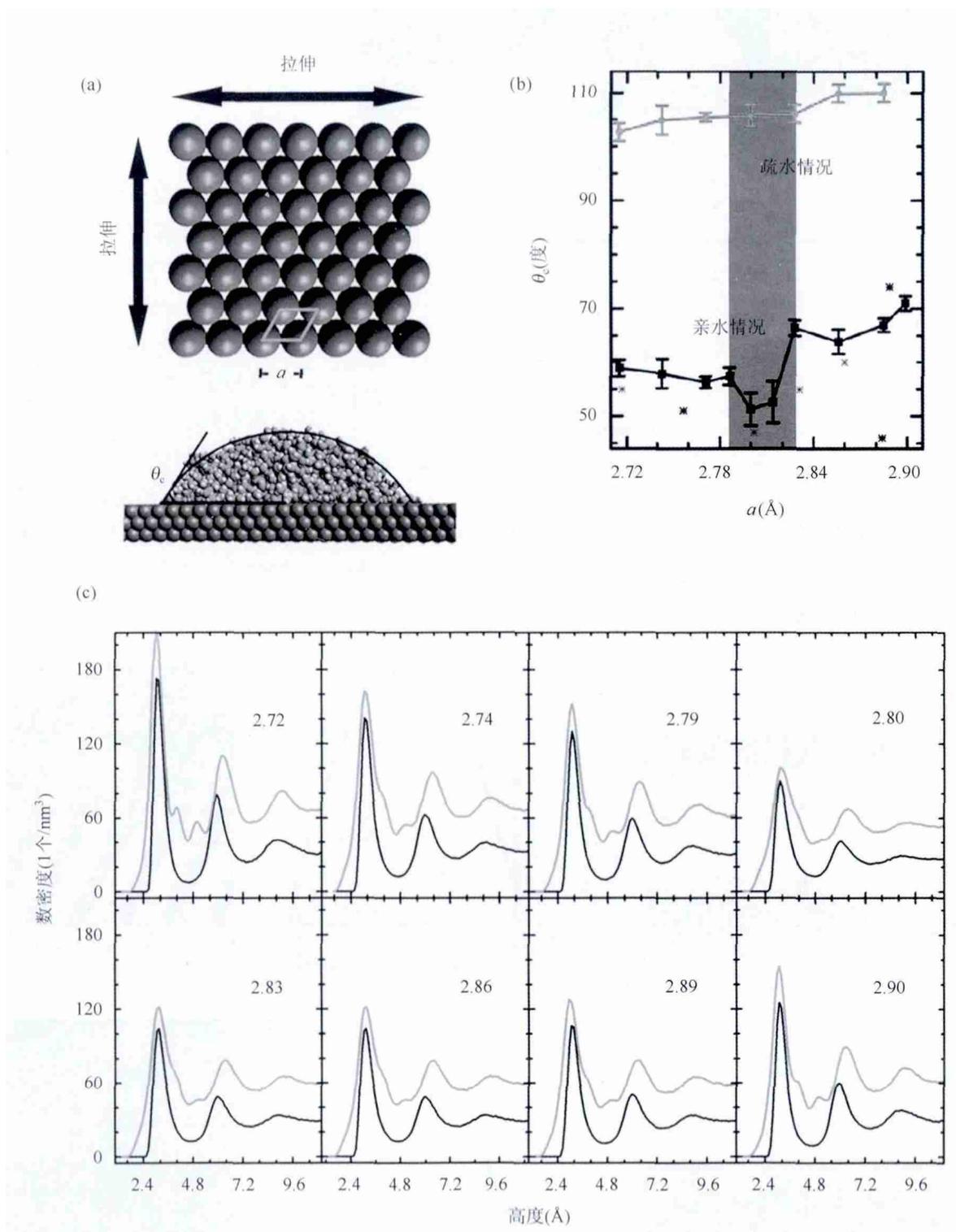


图5 (a) 上图：面心立方晶体(111)面模型的几何构型。下图：水滴在模型衬底上的侧视图。(b) 水滴在亲水和疏水表面上的接触角随晶格常数的变化。星号给出的是实验上测得的水在不同金属表面上的浸润角数据 (*J. Phys.Chem.* 69, 1306(1965))。(c) 不同晶格常数的亲水表面的水分子中氢氧原子数密度随着高度的变化。红线对应的是氢原子，黑线对应的是氧原子。图中数字是表面晶格常数

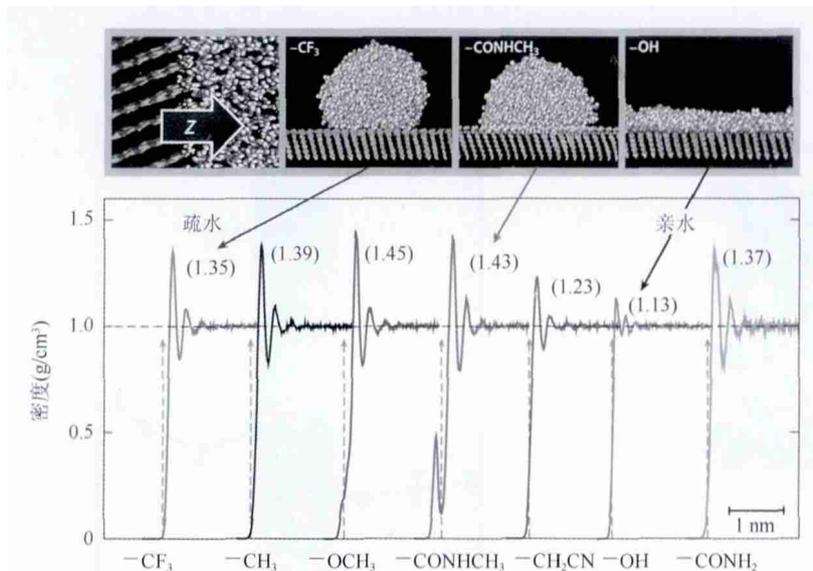


图6 水在不同自组装薄膜上的密度随着其距表面的高度的变化。从左到右自组装膜越来越亲水

两个不同表面的固定体积空间中的平均水分子数差不多,也就是说我们不能通过平均密度大小来区分它

们。但是,我们可以很清楚地看到在疏水表面(-CH<sub>3</sub>)水分子数目的起伏比亲水表面(-OH)要大得

多。图7(d)左给出的是图7(d)右中所示圆圈内水分子数目的概率的对数(y轴)随着归一化的水分子数目(x轴)的变化。从图中可以看出,表面越亲水,函数的图线越窄,也就意味着越不容易被压缩。所以我们可以通过界面水的压缩性来确定其亲疏水性。利用该方法,近期,阿查里雅(Acharya)等(Faraday Discuss, 2010)成功地计算出了一种蛋白质的各个部位的亲疏水性。

除了利用密度波动的办法可进行微观尺度的浸润性表征外,人们还提出其他很多办法。比如在2003年,孟胜等通过第一性原理计算发现,表面水层氢键和水分子

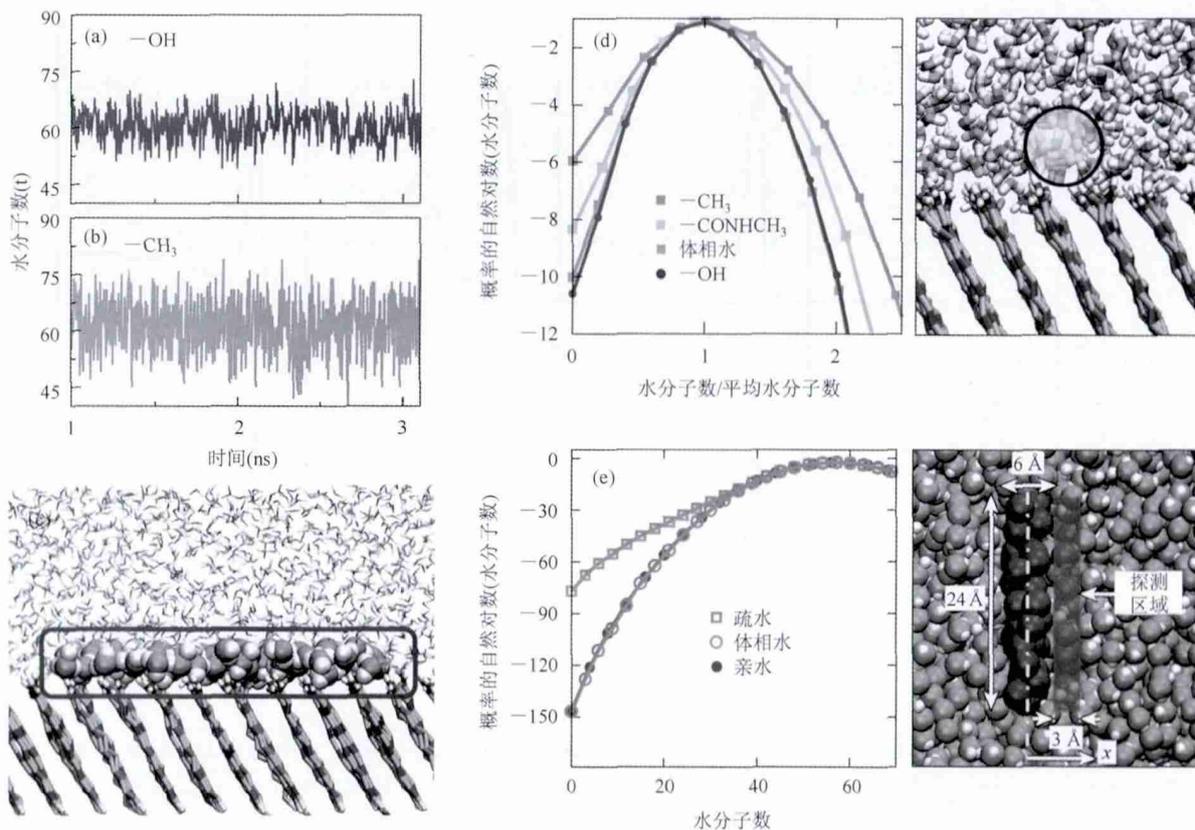


图7 水在亲水(-OH)和疏水(-CH<sub>3</sub>)表面附近 $2.5 \times 2.5 \times 0.3 \text{ nm}^3$ 方格子(c)内水分子数随时间的波动(a, b)。(d)自组装薄膜附近圆圈内( $r=0.33 \text{ nm}$ ) (右)观察到 $N$ 个水分子的概率 $p(N)$ 的对数。(e)自组装薄膜附近更大的空间( $2.5 \times 2.5 \times 0.3 \text{ nm}^3$ )内观察到 $N$ 个水分子的概率 $p(N)$ 的对数

吸附能的比值  $\omega$  也是一个很好的浸润性标度： $\omega$  越大表面越疏水， $\omega$  越小表面越亲水。对于修饰的碳基表面，宏观接触角与微观  $\omega$  近似有  $\theta=108^\circ-108^\circ/\omega$  的关系 (PRL 2006)。

#### 8. 表面浸润的实际应用

浸润现象已经被研究了上百年，那它又对实际生活有什么重要意义呢？在前几节的内容里我们已经提到了一些应用。显然自然界比人类更早的认识到了浸润性质的重要性，并加以利用。例如荷叶，想

必大家对其“出淤泥而不染，濯清涟而不妖”的特性都相当熟悉。从浸润的角度来看，这是荷叶超疏水特性的表现 (图 8 (a))。那是什么导致的它的超疏水的特性呢？电子显微镜观察 (图 8 (b)、(c)) 发现荷叶的上表面布满了非常多微小的乳突，乳突的平均直径约为  $6 \sim 8 \mu\text{m}$ ，高度约为  $11 \sim 13 \mu\text{m}$ ，间距约为  $19 \sim 21 \mu\text{m}$ 。在这些微小乳突之中还分布有一些较大的乳突，平均大小约为  $53 \sim 57 \mu\text{m}$ ，它们也是由  $6 \sim 13 \mu\text{m}$  大小

的微型突起聚在一起构成。这些大大小小的突起在荷叶表面犹如一个挨一个隆起的“小山包”，“小山包”之间的凹陷部分充满空气，这样就形成一层极薄，只有纳米级厚度，紧贴叶面的空气层。考虑到水滴最小直径为  $1 \sim 2 \text{mm}$ ，比荷叶表面上的乳突要大得多，因此液滴处于荷叶表面上时，会隔着一层极薄的空气，只能同液面上“小山包”的顶端形成少数几个点的接触。用 Cassie-Baxter 模型来分析，我们可以把空气和荷叶的乳突看成两种材料，对于空气它是完全疏水的，同时它占了大部分比例，因此水不能浸润荷叶表面。而水滴在自身表面张力作用下能形成球状液滴，水球在滚动中吸附灰尘，并滚出液面，从而达到清洁叶面的效果。相似的微观结构也可以在水蜘蛛的腿上和蝉翼上发现。

自然是最好的老师，正是基于对“荷叶效应”的理解，中科院化学所的江雷研究组成功地用烷吡啶的微管 (图 8 (d)) 和聚乙苯烯的微球/纳米纤维 (图 8 (e)) 做出了类似微观结构的薄膜 (Adv. Mat. 2005)。而这种薄膜确实具有超疏水的特性。后来这种技术被成功地应用在生产上，生产出了纳米自清洁领带，和自清洁的瓷砖、玻璃等。江雷还制备出了“光”调控的超疏水/超亲水“开关”材料。以及“温度”调控结合表面化学修饰和表面粗糙化实现的超疏水/超亲水“开关”材料。这两项研究成果未来可能应用于基因传输、无损液体输送、微流体、药物缓释等领

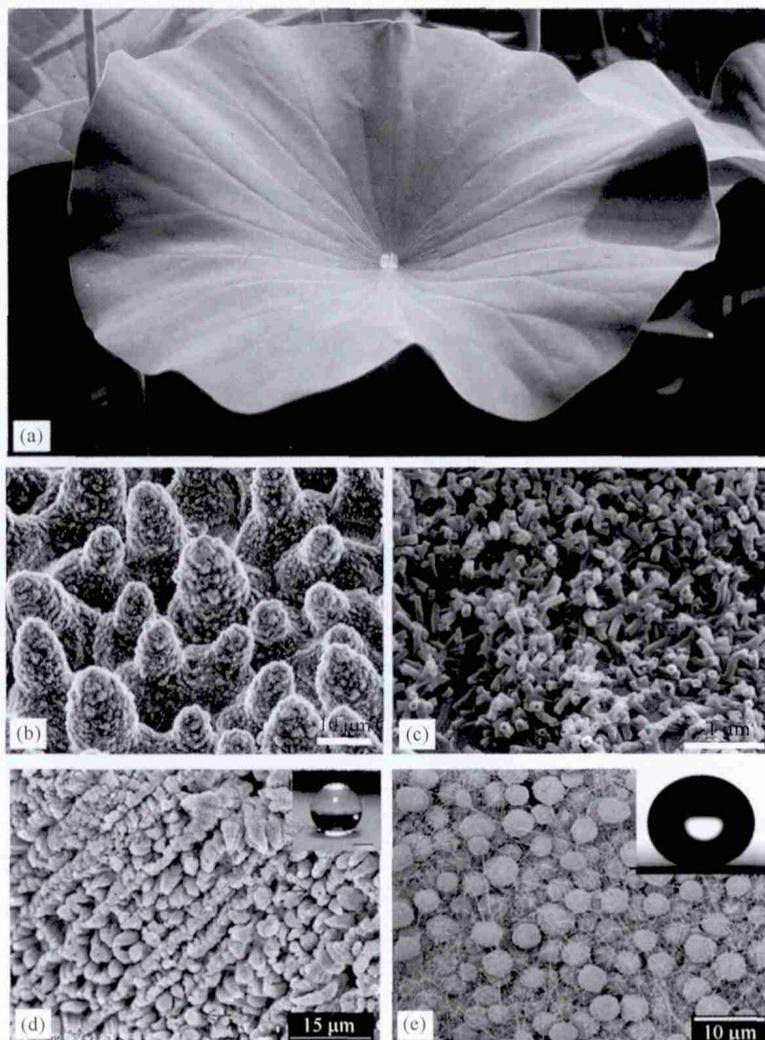


图 8 荷叶 (a) 的微观结构 (b)、(c)；江雷等制备的聚乙烯微管薄膜 (d) 和聚苯乙炔微球/纳米纤维薄膜 (e) 的扫描电子显微图像；(d) 和 (e) 均为超疏水的薄膜

域。例如如果用第二种材料制作服装，那么夏天温度高时衣服是亲水的，亲水吸汗就不会感到太热；而冬天温度低时衣服就变成疏水的，防寒又保暖。

防冻是表面浸润研究的另一个有意义的应用。想必大家对2008年的雪灾还记忆犹新吧，造成雪灾的一个很重要的原因就是冰冻。一旦冰冻就非常难以去除，会造成电力受损，而冰冻积累多了甚至能压垮房屋，使铁路、公路、民航交通中断。日常生活中，冰箱里的冰冻会使冰箱的效率大大降低，虚耗能源。目前很多研究发现表面亲疏水性质与结冰有很大的关系，这说不定会成为防结冰材料研究的一个突破口。

## 9. 尚待解决的问题

上面我们已经介绍了很多关

于浸润的基本知识以及当前的一些研究进展。然而目前对于浸润的理解仍存在不清楚的地方。这主要集中在两方面：一方面是液体中添加剂的作用；另一方面则是缺少微观上理解表面浸润的完整图像。这两个方面本身也是相互关联的。

在实际的生活生产中，相比于纯液体，我们更加常见的是液体中带有表面活性剂、高分子等杂质的情况。它们的存在对液体在表面的浸润产生了怎样的影响还不是很清楚。比如，早在1964年，巴斯科姆(Bascom)等发现当液体中含有易挥发的杂质时，会有些特殊的液体结构被观察到。然而对于导致这种现象的原因，到目前尚未有定论。液体中含有的表面活性剂和高分子物质，它们很容易会出现在各种界面(固/液、固/气、液/气)。

在实际的应用中，它们的影响是非常大的。比如雷(Lelah)和马米尔(Mammur)(1981)发现很少的表面活性剂就会改变表面的浸润性。

另一个我们需要解决的问题就是对于表面浸润的微观理解。上面我们提到了一些工作，这些工作均发现当考虑到微观结构时(与液体分子尺度相比拟)，经典的宏观模型已经很难理解这些物理现象了。这时候我们需要重新建立模型从微观角度理解表面浸润，比如界面水的结构对于表面浸润到底有多大影响？这些问题还在进一步的研究中。期待不久的将来，人们对表面浸润的微观尺度理解会更上一层楼，会发现更奇特、更丰富的浸润现象，并对表面浸润性进行简单、方便、低能耗的调控以满足人们不断增长的生活和经济发展的需求。

## 科苑快讯

### 防止鸟撞飞机有新招

鸟类与飞机是死敌，它们通常会延误飞行，最坏的情况是撞进机窗和发动机导致飞机坠毁。鸟类与飞机相撞的事故，每年会给航空业造成大约10亿美元的损失。工程师们千方百计减少事故的发生，比如采用扩音器、照明弹，甚至猎狗和激光。

现在，DNA测序又成为对付小鸟的新武器，不过不是鸟的DNA，而是它们粪便中的DNA。昆虫和种子中的DNA(对于大型猛禽来说，它们捕食小型哺乳动物

或蜥蜴)透露，最初是食物将它们吸引到机场的。减少食物来源就能减少鸟类，但是首先需要知道它们吃什么。澳大利亚珀斯的机场就率先尝试了这种方法。

研究者从跑道上收集了77具鸟类尸体，通过从肠道中提取样本，对15.1万个DNA测序，确定了老鼠、草蚶和草籽是其食物来源，并在《调查遗传学》(*Investigative Genetics*)网站上做了报告。对于珀斯，最好的计划应该是控制鼠类和栽种不适合美味昆虫生活的草坪。澳大利亚和美国的其他机场也将开展类似研



究。澳大利亚研究的部分鸟类，比如红尾黑凤头鸚鵡(如图)，研究者对其食谱仍然知之甚少。所以，对那些导致撞机鸟类粪便中的DNA测序，不但能够减少经济损失和人员伤亡，也有助于生态学研究。

(高凌云编译自2014年12月10日 [www.sciencemag.org](http://www.sciencemag.org))