

仿生多尺度超浸润界面材料

王鹏伟 刘明杰 江雷

Bioinspired multiscale interfacial materials with superwettability

Wang Peng-Wei Liu Ming-Jie Jiang Lei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 65, 186801 (2016) DOI: 10.7498/aps.65.186801

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.186801>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2016/V65/I18>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

限位液滴瞬时失重自激振荡

Self-excited oscillation of droplets on confined substrate with instantaneous weightlessness

物理学报.2015, 64(19): 196801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.196801>

纳观接触角的确定方法

The method for determining nano-contact angle

物理学报.2015, 64(11): 116802 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.116802>

高生长速度条件下的“层片 ↔ 棒状”共晶转变机理研究

“Lamellar ↔ rod” transition mechanism under high growth velocity condition

物理学报.2013, 62(21): 216801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.216801>

稳定超疏水性表面的理论进展

Theoretical progress in designs of stable superhydrophobic surfaces

物理学报.2013, 62(14): 146801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.146801>

多台阶器件结构深层表面光刻工艺优化

The optimization of lithography process on the deep multi-stepped surface

物理学报.2012, 61(20): 206801 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.206801>

专题: 软物质研究进展

仿生多尺度超浸润界面材料*

王鹏伟¹⁾ 刘明杰^{1)†} 江雷^{1)2)‡}

1) (北京航空航天大学化学与环境学院, 仿生智能界面材料科学与技术教育部重点实验室, 北京 100191)

2) (中国科学院理化技术研究所, 仿生智能界面科学中心, 北京 100190)

(2016年6月22日收到; 2016年8月1日收到修改稿)

仿生多尺度超浸润界面材料是20世纪90年代末以来迅速发展起来的一类新型功能材料, 该研究领域突出的特点是基础研究和应用研究紧密结合、仿生理念与材料制备技术紧密结合. 近年来, 研究人员围绕仿生多尺度超浸润界面材料的构筑与应用中的若干关键科学问题开展了深入研究, 取得了一系列有特色、有创新意义的研究成果, 开发出了一系列的材料制备新方法和新技术. 本文首先介绍仿生多尺度超浸润界面材料的发展历程和固体表面浸润性的理论基础; 然后讨论对自然界中具有特殊浸润性能的功能表面的原理揭示和仿生设计; 对仿生多尺度超浸润界面材料的典型应用领域, 例如自清洁、集水、防冰、油水分离以及化学反应等进行了总结; 最后对仿生多尺度超浸润界面材料的发展前景进行了讨论.

关键词: 仿生, 多尺度结构, 固体表面浸润性, 界面材料**PACS:** 68.03.Cd, 68.08.-p, 68.35.Ct, 68.35.Np**DOI:** 10.7498/aps.65.186801

1 引言

仿生多尺度超浸润界面材料是涉及物理学、化学、材料学、生物学等的多学科交叉性研究领域, 在国际新材料发展趋势中表现出迅猛的势头. 如图1所示, 对于该领域中研究最广泛的超疏水材料的研究论文数量从2000年的5篇迅速增长至2015年的1190篇, 同时2011年的全球研究报告数据显示对于超疏水表面的研究已经位于438项材料科学研究前沿方向中的第7位^[1]. 仿生多尺度超浸润界面材料研究领域突出的特点是基础研究和应用研究相结合、仿生理念与材料制备技术相结合. 通过向自然学习, 揭示生命体系内具有超浸润界面性质的机理, 为超浸润材料的研发找到科学依据. 对超

浸润材料的研发及产业化涉及材料科学的前沿研究、传统产业关键技术的更新换代、新兴产业重大关键技术开发, 为国民经济和社会发展主要领域提供持续性的支撑和引领. 近年来, 研究人员以当今世界在能源、环境、资源以及健康等领域的重大需求为导向, 以二元协同纳米界面材料为设计思想, 围绕仿生特殊浸润性多尺度界面材料的构筑与应用中的若干关键科学问题开展深入研究, 取得了一系列有特色、有创新意义的研究成果, 形成了一批跨区域、跨行业、跨领域的新兴学科和产业增长点. 其应用地域覆盖西部干旱地区的雾水收集、北方寒冷地区的防覆冰、海洋防污以及资源富集等; 涉及的产业涵盖了智能制造、组织工程、能源材料、资源高效分离富集等众多行业.

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2013CB933000)、国家自然科学基金 (批准号: 21421061, 21431009, 21434009, 21504098)、中国科学院重点部署项目 (批准号: KJZD-EW-M03) 和 111 项目 (批准号: B14009) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: liumj@buaa.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: jianglei@iccas.ac.cn

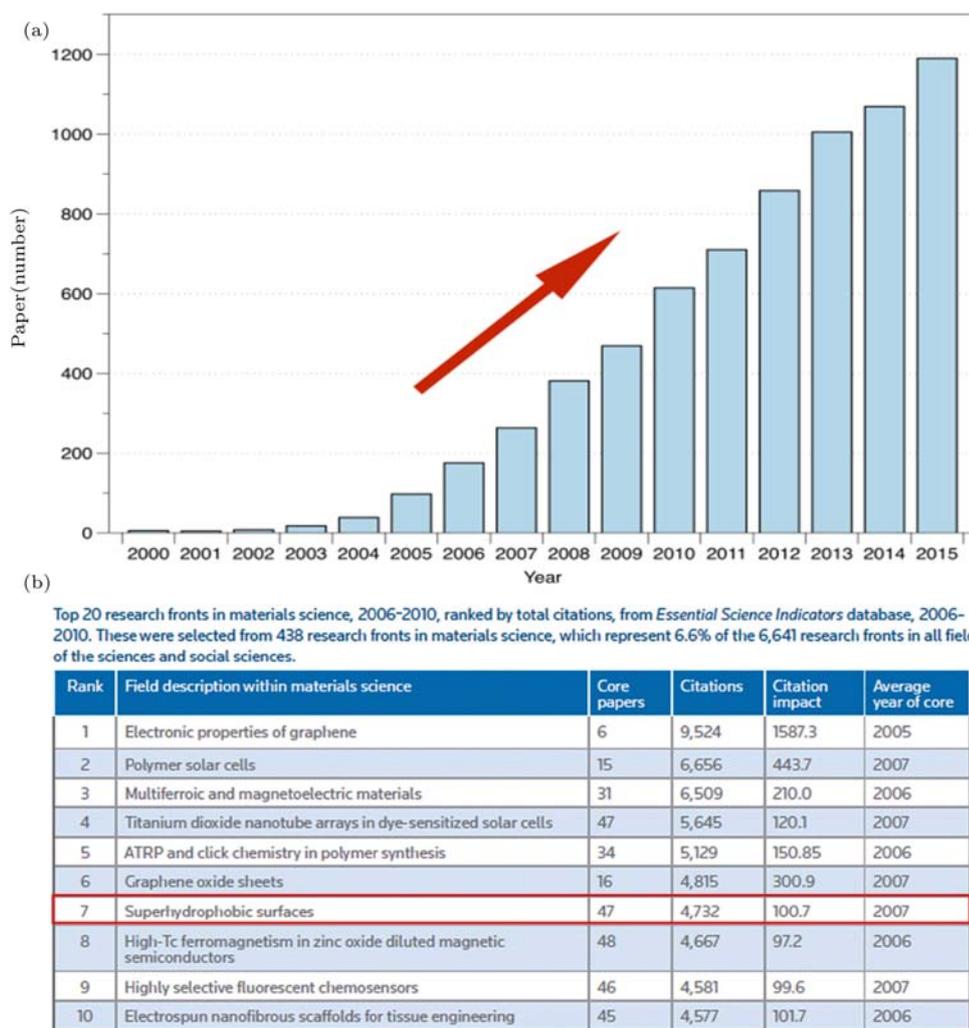


图1 超疏水引起了广泛关注 (a) 在 ISI web of science 中每年收录的关于超疏水的文献数量; (b) 超疏水表面基于基本科学指标数据库中 2006—2010 年前 20 位材料科学前沿领域中排名第 7(只列出 10 位) [1]

Fig. 1. Superhydrophobicity attracts interest in diverse fields: (a) Number of papers indexed in the ISI web of science by the topic of "superhydrophobic"; (b) "superhydrophobic surfaces" were ranked 7 th in top 20 research fronts in materials science during 2006–2010 from Essential Science indicators [1].

向自然学习是自然科学的基本原则之一。自 1990 年以来, 化学领域诺贝尔奖中超过 40% 的成果与生物化学界面有关 [2]。受自然中诸多功能性生物界面的启发, 科学家们已经制备出许多具有优异特殊性能的界面材料。

1997 年, Barthlott 和 Neinhuis [3] 指出荷叶表面的微米尺度的结构导致了其超疏水的性质, 引起了科学家们尝试基于这种微米尺度的结构构筑超疏水材料的兴趣。2001 年, Li 等 [4] 制备出了具有超双疏(超疏水和超疏油)性质的取向排列碳纳米管薄膜, 揭示了纳米结构在超浸润性质中的重要作用。Feng 等 [5] 进一步证实了微米/纳米多尺度结构是荷叶能够在空气中保持超疏水性的根本原因。微米结构或纳米结构与微米/纳米多尺度结构的区别

可以通过 Wenzel [6] 以及和 Cassie 和 Baxter [7] 的理论解释。Verho 等 [8] 也证实了微米/纳米多尺度结构对超疏水性的重要作用。

除了这种各向同性的静态浸润状态之外, 自然界中还有许多各向异性的动态浸润现象, 比如蝴蝶的翅膀。Zheng 等 [9] 通过研究发现蝴蝶翅膀表面的水滴可以沿某一个方向轻易滑落, 这证实了动态浸润性的存在。

除空气之外的其他介质, 关于水下或者油下浸润性的研究近年来同样备受关注。2009 年, Liu 等 [10] 首次报道了鱼皮表面具有水下超疏油自清洁的性质。自此之后研究者们开始关注非气相体系的浸润性研究, 例如充满液体的光滑表面 [11]、可开关控制的水下疏油表面 [12]。除了二维平面, Jiang 等

还将二元协同概念延伸到了—维纳米通道和纤维领域. 最近, Jiang 等^[13]进一步将超浸润的概念应用到界面化学领域的基础性研究, 发现了一系列化学反应的新媒介和制备纳米材料的新方法.

通过归纳总结不同介质中表面的超浸润状态, 如图 2 所示, Tian 等^[14]提出了超浸润体系, 在这个体系中, 包含了各种多相超浸润状态, 包括空气中的超亲水、超亲油、超疏水和超疏油; 水相下的超

亲油、超疏油、超亲气和超疏气; 油相下的超亲水、超亲气、超疏水和超疏气.

本文着重介绍了近年来仿生多尺度超浸润界面材料领域所取得的研究进展, 包括固体表面浸润性的基础理论、多尺度超浸润界面材料的仿生设计与制备以及仿生多尺度超浸润材料的应用, 并对仿生多尺度超浸润界面材料领域的发展现状和前景进行了总结和展望.

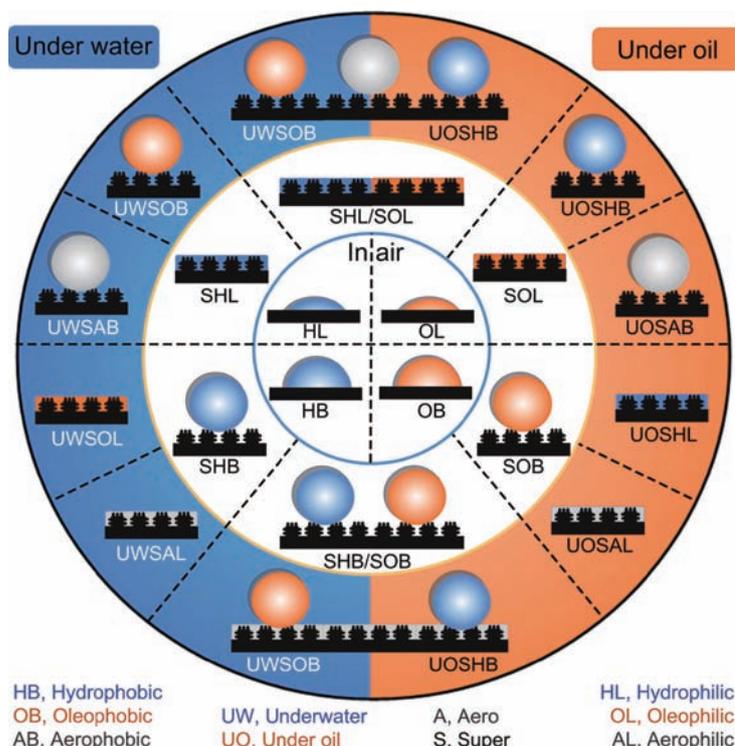


图 2 超浸润系统 中间部分为空气中平面基底上的, 亲水 (HL), 疏水 (HB), 亲油 (OL), 疏油 (OB) 性质; 超亲水 (SHL), 超疏水 (SHB), 超亲油 (SOL) 以及超疏油 (SOB) 的状态可以通过引入微/纳尺度的二元粗糙度结构获得; 左侧蓝色的半圆形区域分别是: 粗糙基底上的水下超亲油 (UWSOL), 水下超疏油 (UWSOB), 水下超亲气 (UWSAL) 和水下超疏气 (UWSAB) 性质; 右侧橙色的半圆形区域分别是粗糙基底上的油下超亲水 (UOSHL), 油下超疏水 (UOSHB), 油下超亲气 (UOSAL), 油下超疏气 (UOSAB) 性质^[14]

Fig. 2. The system of “superwettability”. The middle part: Hydrophilicity (HL), oleophilicity (OL), hydrophobicity (HB) and oleophobicity (OB) upon flat substrates in air. Superhydrophilicity (SHL), superoleophilicity (SOL), superhydrophobicity (SHB) and superoleophobicity (SOB) states can be generated in air via introducing micro/nanoscale two-tier roughness. Left blue circle: underwater superoleophobicity (UWSOB), superoleophilicity (UWSOL), superaerophobicity (UWSAB) and superaerophilicity (UWSAL) upon rough substrates; right orange circle: under-oil superhydrophobicity (UOSHB), superhydrophilicity (UOSHL), superoleophobicity (UWSOB) and superoleophilicity (UWSOL) upon rough substrates^[14].

2 固体表面的浸润性

2.1 接触角与 Young 式方程

接触角于 19 世纪初由 Thomas Young 引入界面科学. 如图 3 所示, 一般情况下, 当固体表面接触到一个液滴时, 液滴不会在固体表面完全铺展, 而

是在液滴边缘与固体表面呈现出一定的角度, 这个角度被称作接触角 (contact angle), 一般表示为 θ . 接触角定义为在静态的固-液-气三相接触中, 在三相交点处气-液界面的切线与固-液接触线之间的夹角. 液滴在理想光滑固体表面达到稳态时满足界面张力平衡方程 Young 式方程^[15]:

$$\gamma_{sv} = \gamma_{sl} + \gamma_{lv} \cdot \cos \theta, \quad (1)$$



图3 (a) 接触角示意图; (b) Wenzel 态示意图; (c) Cassie 态示意图

Fig. 3. The schematic diagram of (a) Contact angle; (b) Wenzel state; (c) Cassie state.

其中 γ_{SV} , γ_{SL} 和 γ_{LV} 分别代表固-气、固-液和液-气的表面张力, θ 代表平衡状态下的表观接触角.

接触角是判断某种液体能否浸润固体表面的重要指标. 基于 Young 式方程, 对亲液疏液体表面的分界线被定位为 90° . 而在 1998 年, Vogler [16] 对浸润性分界线重新进行划分, 从材料对水分子构型影响的角度将亲水疏水界限划分为 65° .

2.2 Wenzel 方程和 Cassie 方程

Young 式方程是理想状态下的表面张力平衡方程, 仅适用于光滑均匀的固体表面, 而在实际应用中, 科学家发现 Young 式方程并不适用于粗糙表面. 1936 年, Wenzel 在 Young 式方程中引入了粗糙度, 对理想状态 Young 式方程进行了修订 [6]:

$$\cos \theta_r = r \cdot \cos \theta, \quad (2)$$

其中, θ 和 θ_r 为固体表面的本征接触角和表观接触角; r 为固体表面的粗糙度因子, 定义为粗糙表面的实际固液接触面积与表观接触面积之比, r 的数值在理论上大于等于 1. 因此, 在 Wenzel 模型下, 固体表面粗糙度的增加会增加固体表面的亲疏水性.

Wenzel 方程揭示了粗糙表面表观接触角与本征接触角之间的关系, 然而在疏水粗糙表面与液体的接触中, 液体很难完全浸润固体表面, 这种情况下与固体表面相接触的包括了液体与空气. 非均相由不同化学成分组成的粗糙表面上 Wenzel 方程并不适用. 1944 年, Cassie 和 Baxter [7] 进一步拓展了 Wenzel 的理论并优化了 Young 式方程, 将表面组成分量加入了方程:

$$\cos \theta_r = f_1 \cdot \cos \theta_1 + f_2 \cdot \cos \theta_2, \quad (3)$$

其中, f_1, f_2 为两组分的表面组成分量, 加和为 1; θ_1 和 θ_2 分别为两种组分的本征接触角.

Wenzel 模型与 Cassie 模型是对 Young 式方程的重要补充, 也是超浸润界面体系重要的理论基础.

3 仿生多尺度超浸润界面材料的设计与制备

经过亿万年的进化与选择, 自然界中诞生了无数具有特殊功能的生物, 人们在惊奇大自然的无限魅力之余, 也在大自然的鬼斧神工中找到了无数灵感. 如图 4 和图 13 所示, 伴随着深入的观察和研究, 人们发现了众多生物为了适应生存需要进化而形成的具有特殊浸润性的功能界面. 这些发现为科学家设计超浸润功能界面材料提供了关键的灵感与思路, 而科学家也在复制自然超浸润界面的基础上, 做了进一步的组合提升, 衍生出了功能更为智能、更为实用的仿生多尺度超浸润界面材料.

3.1 超浸润二维界面功能材料的仿生设计制备

3.1.1 超疏水自清洁表面——荷叶表面

荷叶素有“出淤泥而不染”的清誉, 荷叶上滚过的露珠和雨滴往往能带走灰尘和污垢. 荷叶表面上的液滴呈现出 160° 左右的接触角, 并且液滴可以容易地从荷叶表面滚走并带走附着的灰尘, 这种卓越的自清洁功能被称作荷叶效应 (lotus effect). 1997 年, Barthlott 和 Neinhuis [3,17] 揭示了荷叶表面的微米乳突结构以及蜡物质是其拥有自清洁功能的关键. 而 Feng 等 [5] 进一步发现了超疏水荷叶表面的微纳米分层结构的复合作用, 在荷叶表面的微米乳突上以及乳突之间存在着树枝状的纳米结构, 这种多尺度结构在荷叶与液滴之间形成了空气层, 有效地阻止了乳突之间被水润湿. 基于荷叶效应的发现与深入研究, 科学家通过构造微纳米多尺度结构结合疏水物质制备了各种各样的仿生超疏水材料, 这也成为超浸润材料研究的基础. 自清洁玻璃等材料已经被广泛应用到了日常生活中.

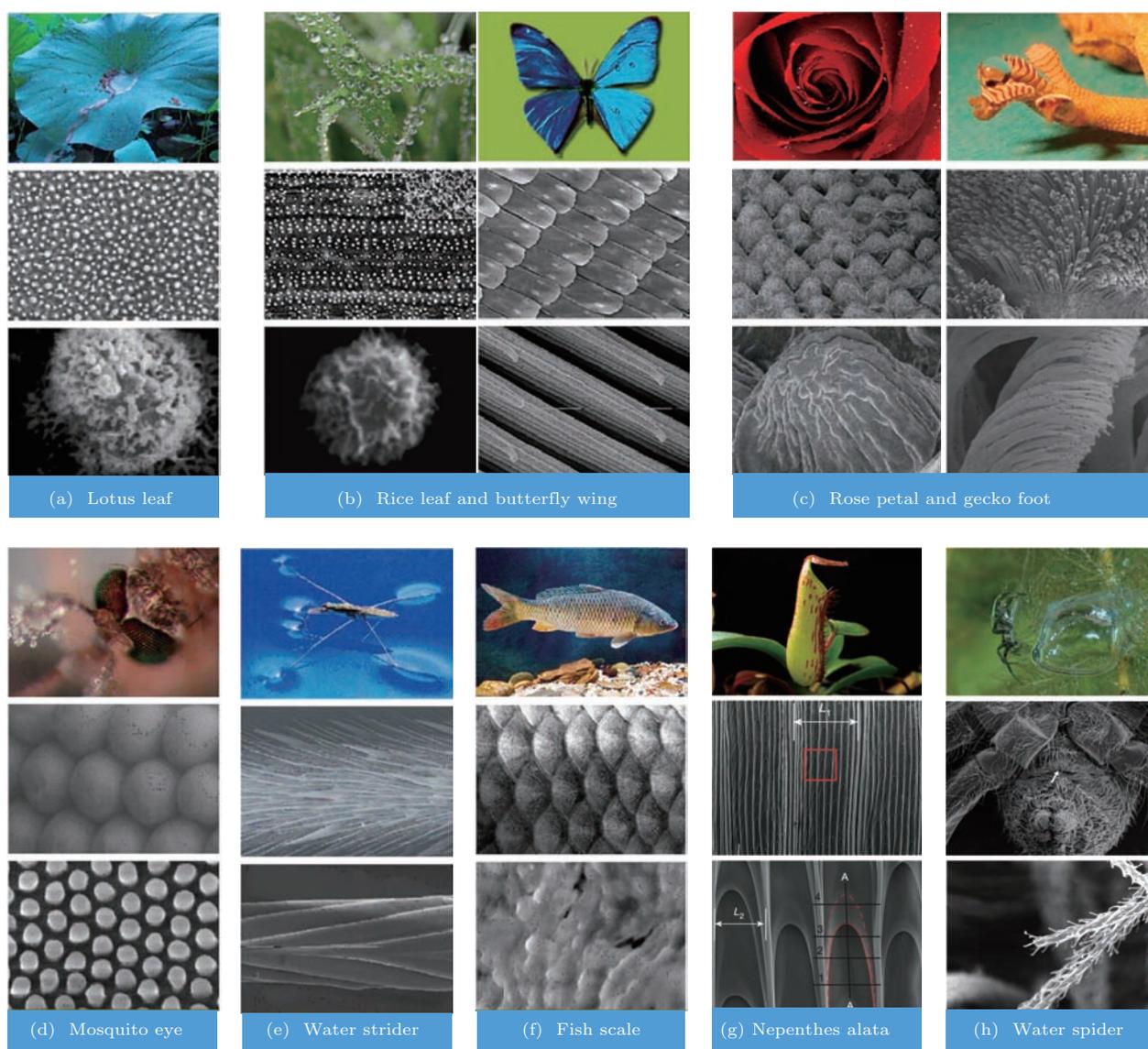


图4 自然界中的超浸润界面 (a) 超疏水的荷叶^[5]; (b) 各向异性浸润性的稻叶和蝴蝶翅膀^[5,9]; (c) 超疏水高黏附的玫瑰花瓣和壁虎脚^[21,23]; (d) 防雾的蚊子复眼^[24]; (e) 强健超疏水水黾腿^[27]; (f) 水下超疏油的鱼鳞^[10]; (g) 定向运输液体的猪笼草口缘区^[30]; (h) 水下超亲气的水蜘蛛

Fig. 4. Biological surfaces with superwettability: (a) Superhydrophobic lotus leaf^[5]; (b) superhydrophobic rice leaf and butterfly wing with anisotropic wettability^[5,9]; (c) superhydrophobic rose petal and gecko foot with high adhesive^[21,23]; (d) superhydrophobic and anti-fogging mosquito compound eyes^[24]; (e) robust superhydrophobic water strider legs^[27]; (f) underwater superoleophobic fish scales^[10]; (g) peristome surface of *Nepenthes alata* which can transport water continuously and directly^[30]; (h) underwater superaerophilic water spider.

3.1.2 各向异性超浸润表面——水稻叶片、蝴蝶翅膀

荷叶表面上的水滴可以向任意方向滚动, 这说明荷叶表面的浸润性是各向同性的. 与荷叶不同, 水稻叶片拥有着各向异性的浸润性表现. 水稻叶片具有线形定向排列的突起阵列以及一维的沟槽结构. 在水平于叶片生长的方向上, 液滴的滚动角为 3° — 5° , 在垂直方向, 滚动角则为 9° — 15° . 稻叶表面乳突结构的线性定向排列为液滴提供了在两个

方向上浸润的不同的能量壁垒^[5].

蝴蝶翅膀是典型的各向异性浸润现象的另一个案例. 蝴蝶翅膀扇动时, 水滴会沿着轴心放射方向滚动从而使得液滴不会沾湿蝴蝶的身体. Zheng等^[9]揭示了蝴蝶翅膀的表面呈现出方向性浸润特性的原因. 蝴蝶翅膀被大量的沿着轴心放射方向定向排列的微纳米鳞片覆盖. 这种高度方向性的微纳米结构有效地影响了水滴的润湿表现, 使得水滴可以容易地沿着放射方向滚走, 同时会在相反方向嵌

住. 两种不同的状态可以通过控制翅膀扇动的姿势或空气通过翅膀表面的方向来调整. 这种各向异性的黏附, 使得蝴蝶翅膀可以在湿度环境下定向清洁, 从而保证蝴蝶飞行时的稳定性, 避免灰尘的堆积.

水稻叶片和蝴蝶翅膀是各向异性浸润性的典型代表, 通过对定向排列的微纳米结构表面的研究, 科学家制备了一系列具有明显各向异性浸润性的材料. 如图 5 所示, Malvadkar 等 [18] 制备了基于光诱导聚合的聚二甲苯类倾斜纳米阵列表面, 在此材料的表面上液滴可以定向的滚落. 同时, 当外加

振动时, 液滴可以在表面上沿阵列倾斜的方向定向地进行传递. 而 Chu 等 [19] 利用精细加工技术制备了定向弯曲的硅基纳米线, 液滴在表面上表现出了定向的铺展, 液体可以沿硅纳米线倾斜的方向自发地定向铺展, 而在相反的方向上保持截然不同的不浸润状态. Cai 等 [20] 发现了马面鱼皮的表面存在着油滴单方向滑动的性质, 通过硅橡胶二次复型技术, 制备了仿马面鱼皮各向异性浸润性功能表面, 从而将各向异性浸润性的研究发展到了水下的条件.

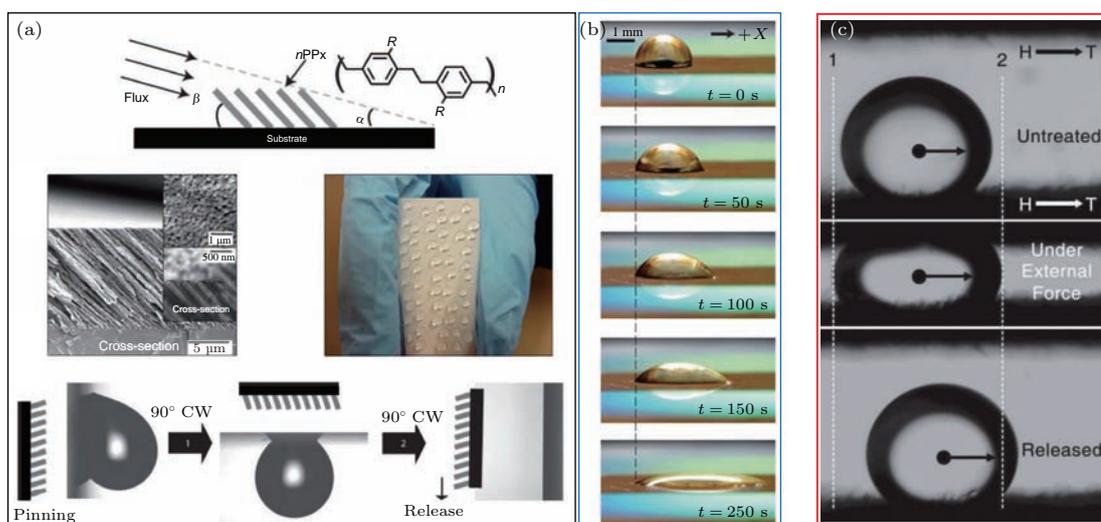


图 5 具有定向浸润性的各向异性人造表面 (a) 具有定向浸润性的各向异性纳米膜 [18]; (b) 各向异性亲水表面上的液体定向铺展 [19]; (c) 具有各向异性水下疏油性能的仿马面鱼皮表面 [20]

Fig. 5. Artificial surfaces with anisotropic wettability: (a) An anisotropic nano film with unidirectional wetting properties [18]; (b) unidirectional liquid spreading on hydrophilic asymmetric surfaces [19]; (c) the filefish-inspired material with anisotropic underwater oleophobicity [20].

3.1.3 超疏水高黏附表面——玫瑰花瓣、壁虎脚

荷叶上的液滴可以轻易滚落, 而玫瑰花瓣上的液滴却往往牢固地附着在表面. 这些附着的小液滴可以使玫瑰花保持鲜丽水润的外观, 只有比较大的液滴例如雨滴才可以从玫瑰花瓣滚落. Feng 等 [21] 探索了玫瑰花瓣的微观结构, 揭示了玫瑰花瓣高黏附特性的原理. 玫瑰花瓣表面由微米尺度的乳突组成, 而在乳突的尖端则是许多纳米尺度的折叠结构, 而这种纳米折叠结构正是导致玫瑰花瓣高黏附特性的关键因素. 气体可以存在于纳米折叠结构之中, 而水则可以轻松刺入微米乳突之间, 从而形成 Wenzel 状态的液滴镶嵌. 如图 6 所示, Bhushan 和

Her [22] 深入地研究了高低两种不同黏附特性的玫瑰花瓣, 证实了微米乳突的高度以及纳米折叠结构的密度是影响玫瑰花瓣表面黏附力高低的关键, 从而进一步制备出了拥有不同黏附特性的仿玫瑰花瓣超疏水薄膜.

壁虎可以在光滑的墙面高速灵活地移动, 这归功于具有超高黏附作用的壁虎脚. 壁虎脚的表面为良好排列的微米刚毛 (长度约 110 μm , 直径约 5 μm), 这些刚毛的末端则为上百个更小的纳米尺度末端组成. 由壁虎刚毛纳米末端和固体表面接触所产生的范德瓦耳斯力则是壁虎能够在各种角度墙面爬行的支持. 壁虎脚有着自清洁、超疏水以及对水的高度黏附性能. Autumn 等于 2002 年首

次观察到壁虎刚毛的接触角约为 160° ，而 Jiang 等进一步对壁虎脚表面的浸润性进行了表征，壁虎脚与水的黏附力在 $10\text{--}60\ \mu\text{N}$ 的范围。受到壁虎脚启

发，Jin 等^[23]制备出了类似壁虎脚结构的拥有对水高黏附力的聚苯乙烯纳米管阵列膜，该材料显示出了高黏附超疏水的特性(图 7)。

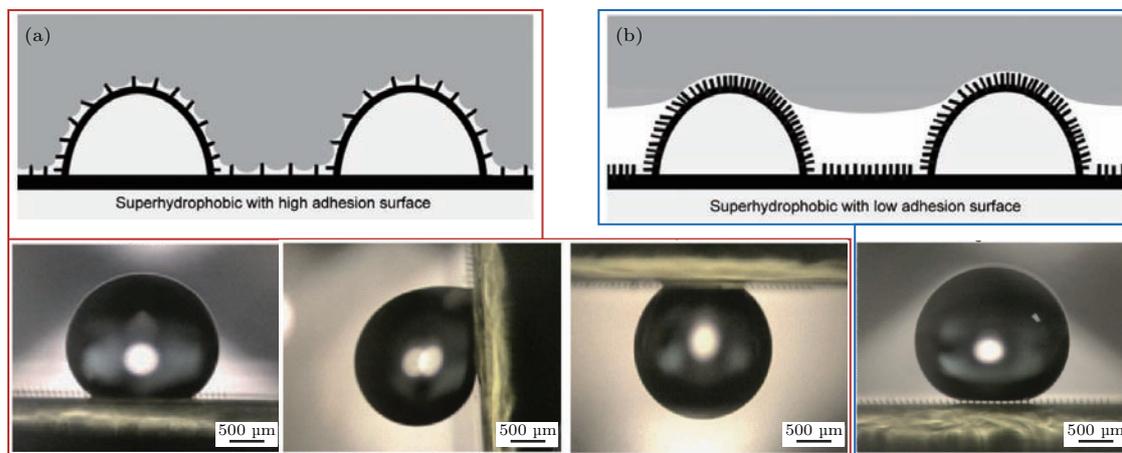


图 6 不同纳米尺度超疏水表面表现对水不同的黏附力^[22] (a) 拥有低密度纳米结构的高黏附超疏水表面; (b) 拥有高密度纳米结构的低黏附超疏水表面

Fig. 6. Surfaces with different nano structure exhibited different adhesive property^[22]: (a) High adhesive surface with low density of nano structure; (b) low adhesive surface with high density of nano structure.

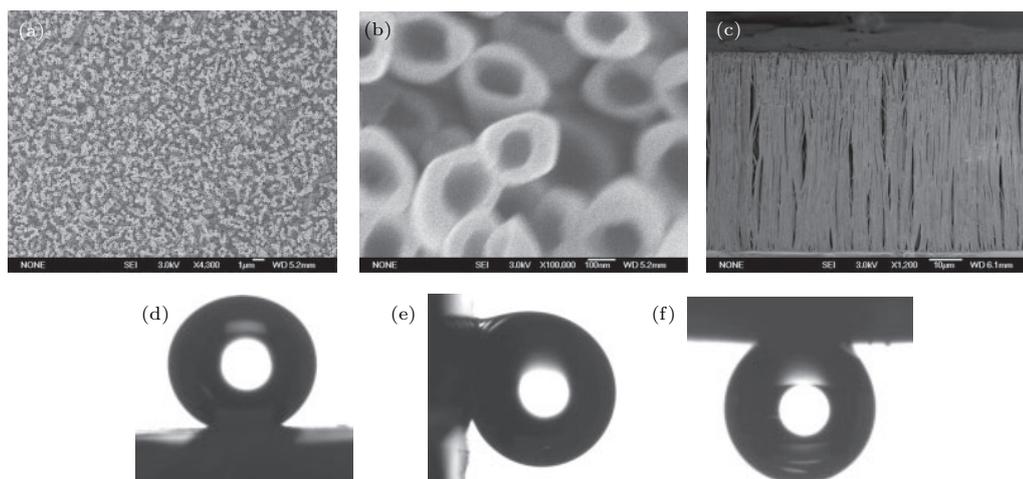


图 7 超疏水高黏附聚苯乙烯纳米管阵列膜^[23] (a), (b), (c) 膜表面微观结构; (d), (e), (f) 表面不同倾斜角度下的液滴黏附

Fig. 7. Superhydrophobic aligned polystyrene nanotube films with high adhesive force^[23]: (a), (b), (c) Micro/nano structure of film; (d), (e), (f) droplet was captured by surface in different angle of inclination.

3.1.4 超疏水防雾表面——蚊子眼睛

蚊子可以在雾气和黑暗的环境中保持卓越的视觉。Gao 等^[24]对蚊子复合眼睛微观结构进行了研究。蚊子复合眼睛排列有紧密的六边形小眼，而在每个小眼上都排列有紧密的六边形突起。这种独特的复合结构使得蚊子的复眼拥有了极强的疏水性。当蚊子暴露于雾气环境中时，可以发现在蚊子眼睛表面并不能形成极小的液滴，而在蚊子眼睛周围的绒毛上雾气凝结了大量液滴。这种极强的疏水

性可以阻止雾滴在蚊子眼睛的表面附着和凝聚，从而给蚊子带来清晰的视野。这个发现为开发干性防雾表面材料提供了研究思路。

受到类似于蚊子眼睛的苍蝇复合眼睛的启发，Sun 等^[25]通过低成本的一步水热法制备了仿苍蝇复合眼镜分层微纳米结构，如图 8 所示，这种材料表面具有极大的接触角和极小的滚动角，可以使表面的液滴轻易滚落。通过实验证实了这种材料极强的防雾性能。

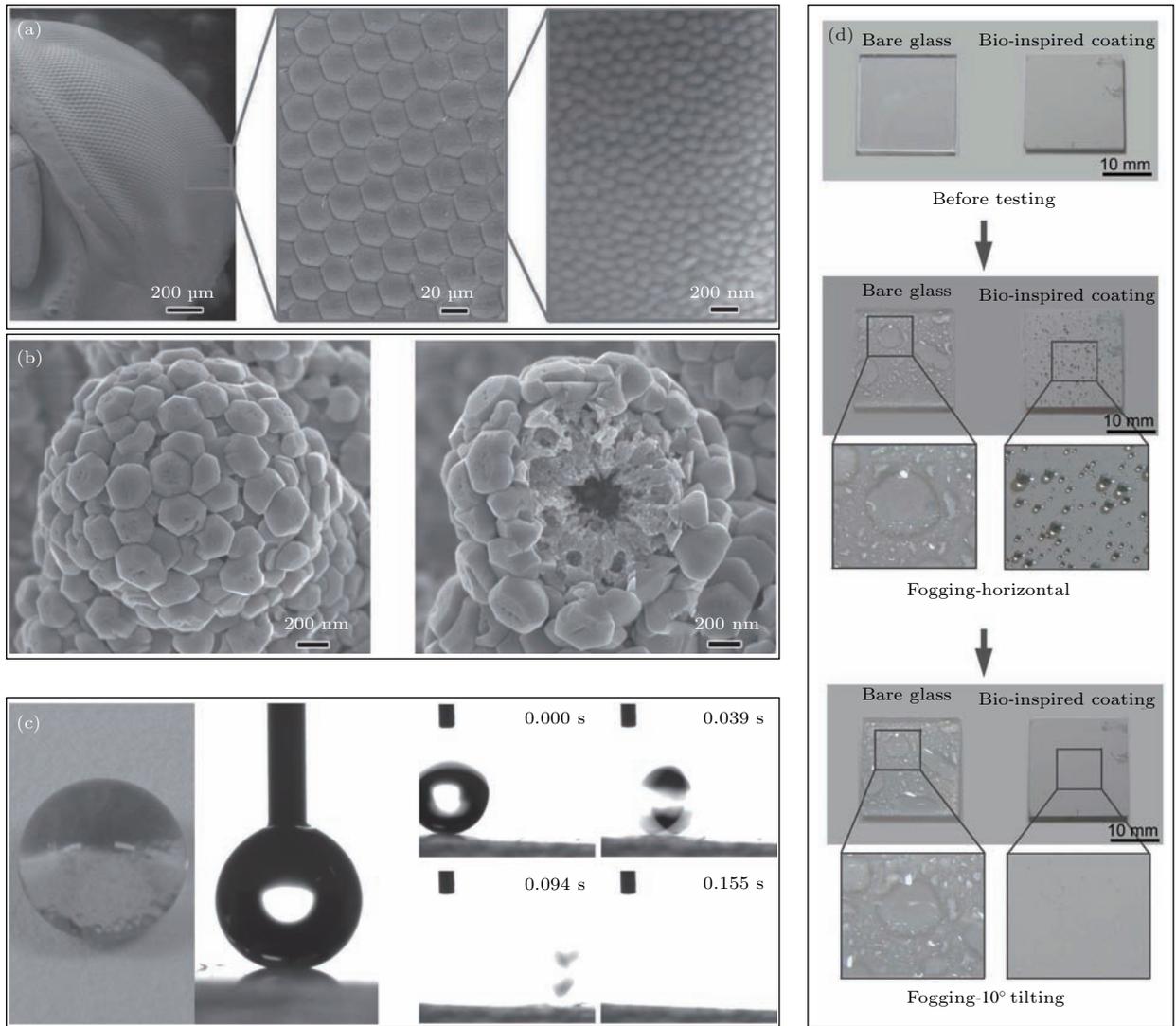


图8 仿苍蝇复眼表面^[25] (a) 苍蝇复眼结构; (b) 人工表面结构; (c) 人工表面具有极大接触角和极小的滚动角; (d) 人工表面可以有效延缓雾滴凝结
 Fig. 8. Fly-eye inspired surface^[25]: (a) The Micro/nano structure of fly eye; (b) structure of artificial fly-eye inspired surface; (c) the surface exhibited extremely high contact angle and low sliding angle; (d) bio-inspired surface could delay fogging condensing.

3.1.5 高强度超疏水表面——水黾腿

水黾可以在水面上轻松行走甚至跳跃。早期的科学家认为水黾行走跳跃的能量来源于腿部滑动所带来的波动, 类似划船的效应。而Denny认为, 若以此为理论依据, 则幼年水黾腿部游动过慢, 不足以产生波浪而推动其在水面移动。2003年, Hu等^[26]利用高速摄像机捕捉到了水黾在水面上行走的过程。他们的研究表明, 水黾转换自身动能到水面的关键因素是通过驱动多毛的腿部与水面形成半球形液面, 而弯曲液面给予水黾一个反作用力, 通过计算, 这个作用的总动量远远大于波浪的动量, 与水黾运动的动量相当。2004年, Gao和

Jiang^[27]更深入地揭示了水黾在水面上站立和行走的秘密, 这就是其多毛腿部的强大超疏水性。水黾在水面站立时, 其腿部与水面形成了大约4 mm深度的涡旋而不是刺入水面下方, 每一条腿所具有的强健持久的超疏水作用力可以支撑其大约15倍的体重。同时, 水黾腿部的特殊微观结构也被发现, 大量有序的条状微米结构覆盖了水黾的腿部, 这些微米结构以约20°的角度定向排列。而每个微米条状结构又由呈螺旋状的纳米沟槽组成。这种独特的分层微纳米多尺度结构可以在水黾腿与水面之间有效地捕捉气体而形成有力的气膜。水黾腿的强健超疏水能力为设计全新的水栖设备带来了灵感。

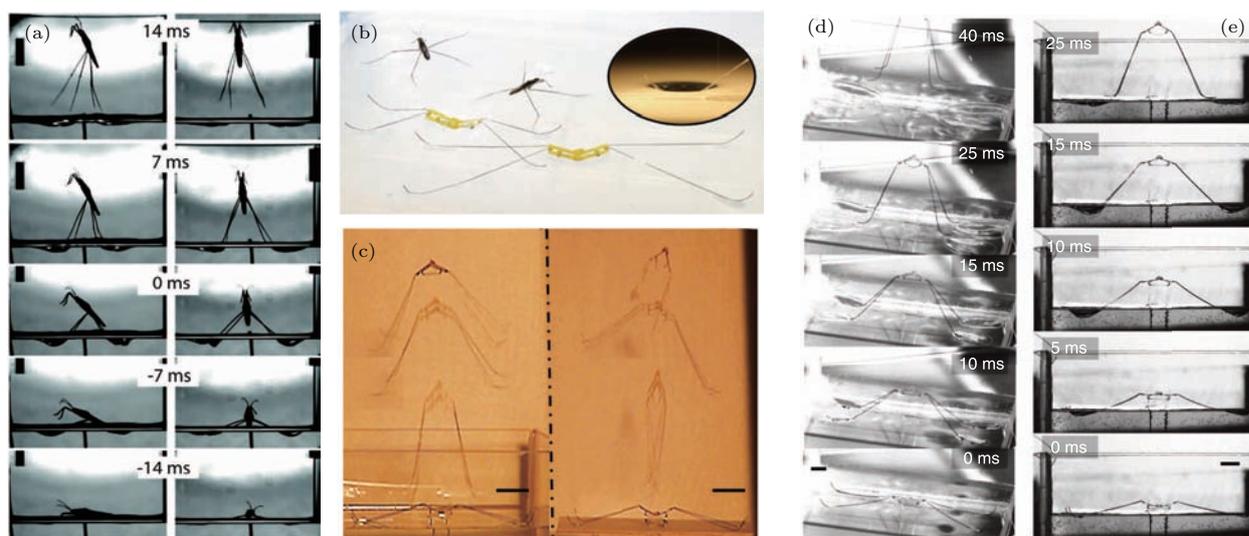


图9 水黾和昆虫机器人^[28] (a) 水黾跳跃过程侧视和正视图; (b) 不同腿长的水黾机器人和水黾; (c) 水黾机器人在水中跳跃可以达到地面上跳跃的高度; (d) 水黾机器人跳跃过程侧视图; (e) 机器人跳跃过程正视图

Fig. 9. Water striders and robotic insects^[28]: (a) Jumping sequence of a water strider in side view and front view; (b) two robotic insects with different leg lengths; (c) superimposed frames of robot jumping on water and rigid ground; (d) jumping sequence of a robotic insect in side view and (e) front view.

最近, Koh等^[28]通过对水黾在水面跳跃过程的观察研究和计算, 成功制备出了能够在水面跳跃的仿水黾微型机器人, 如图9所示. 这种机器人具备不俗的跳跃能力, 在水面上可以跳起与在地面上跳跃类似的高度, 表现出了非凡的特性. 美国、日本、中国等国科学家都成功研制出了不同功能的仿水黾机器人, 仿水黾机器人以其高效率、低扰动等特性在军事侦察、环境检测等军用民用领域有着广泛的应用前景.

3.1.6 超疏油自清洁表面——鱼鳞

鱼鳞在水下表现出了良好的自清洁和减阻的性能. Liu等^[10]揭示了鲫鱼鱼鳞的水下超疏油和空气中的超亲水的性能. 鱼鳞通常会被一层很薄的黏液覆盖, 这为鱼鳞提供了很强的空气中亲水性能. 扇形的鲫鱼鳞片密集排列, 而在鱼鳞上则有定向排列的长度100—300 μm、宽度30—40 μm的微米尺度乳突以及乳突上的粗糙纳米结构. 这种多尺度的组合结构可以在水下轻易地捕捉到水, 从而形成一个复杂的水相界面而导致疏油特性, 这在鱼鳞逆转被油浸湿的过程中起到了关键的作用. 这在油/水/固系统中有着潜在的应用.

如图10所示, 受到水下超疏油鲫鱼鳞片的启发, Liu等^[10]通过模仿鱼鳞的天然结构, 在硅片表面制备了微纳米分层结构, 该表面在水中能对二氯甲烷油滴具有接近180°的接触角, 同时在于水下油

滴的接触分离过程中表现出了极低的黏附力. Su等^[29]通过使用合适微观结构的磨砂玻璃, 无需额外的复杂修饰就成功制备了水下超疏油表面. 将这种磨砂玻璃制作成夹子可以轻松地移动水下油滴. 在水性介质中, 该夹子可以将苯乙烯的四氯化碳液滴作为微型反应容器来制备1, 2-二溴苯乙烯. 水下超疏油材料在油/水/固三相系统中有着潜在的应用, 例如船舶防腐蚀、防止油溢出、微流体技术和生物黏附等.

3.1.7 定向液体输运自润滑表面——猪笼草口缘区

猪笼草是远近闻名的肉食性植物, 而捕虫笼是其捕获昆虫的关键所在. 在捕虫笼的开口部位, 有着极为湿润光滑的口缘区域, 昆虫一旦落下很容易滑落到捕虫笼中而被捕获. 最近, Chen等^[30]揭示了猪笼草口缘区保持湿润的原因, 也就是口缘区的定向连续输运液体的能力. 这种定向输运液体的根本在于其多尺度的微纳米结构. 楔形盲孔组成的不对称沟槽, 能在运输方向上优化并加强毛细上升, 同时阻止反方向的回流, 从而完成单方向液膜的输运(图11). 这种无外部动力的液体输运方式对于开发设计新型定向流体输运系统具有指导意义, 在微药物传输、自润滑防黏医用器具设备的设计等领域具有光明的应用前景.

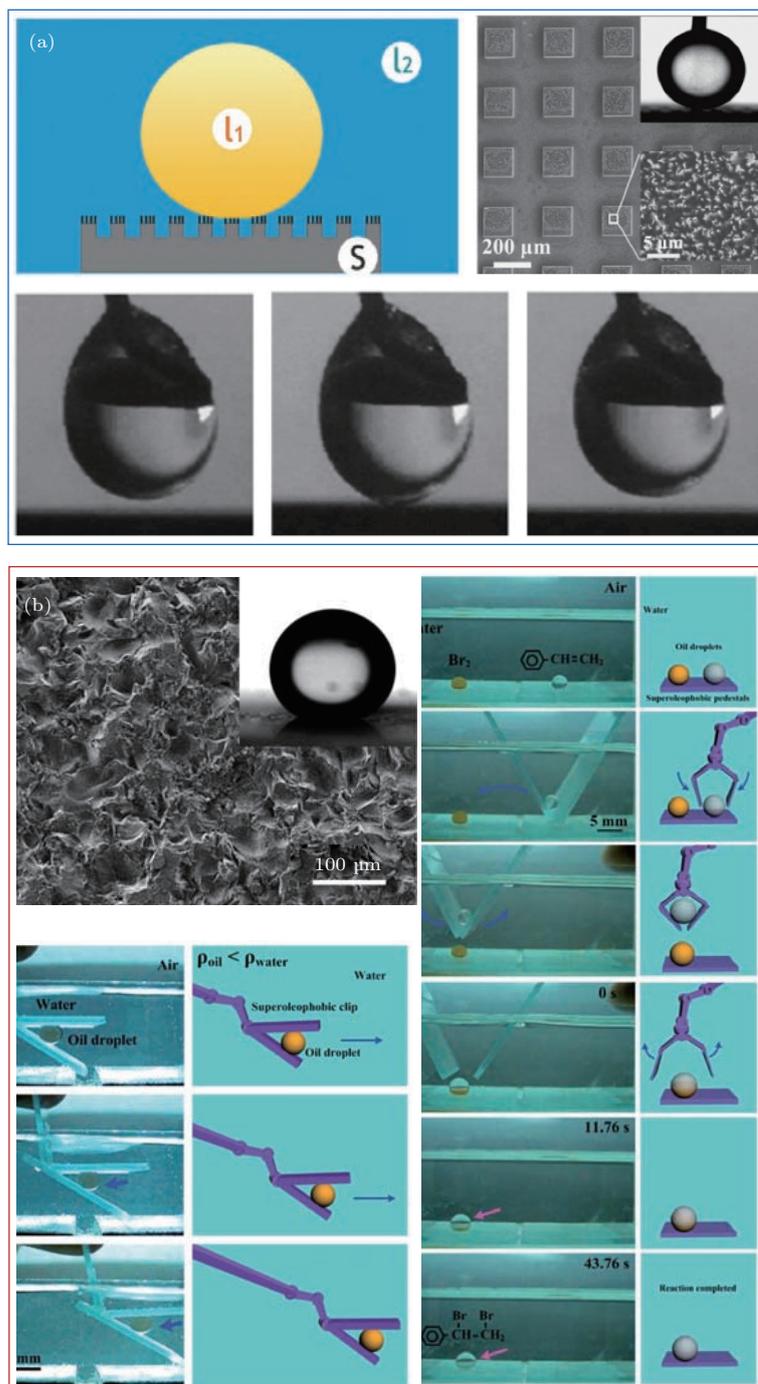


图 10 水下超疏油表面 (a) 水下超疏油表面对油滴表现出极低的黏附力^[10]; (b) 水下超疏油材料可以移动水下油滴^[29]
 Fig. 10. Underwater superoleophobic surfaces: (a) Underwater superoleophobic surface showed low adhesive force to oil droplet^[10]; (b) superoleophobic materials could manipulate oil droplets arbitrarily in water^[29].

3.1.8 水下超亲气表面——水蜘蛛

水蜘蛛常年生活在水下，产卵进食等一切活动都在水下进行，它们会使用一种水下气泡蛛网，在气泡蛛网中充满了空气以便于它们在水下呼吸。这种气泡蛛网功能相当于一个腮部，可以从水中提取氧气，并向水外排出二氧化碳。为了能够向水下蛛

网补充氧气，水蜘蛛会使用腹部的超疏水绒毛将水面的气泡搬运到水下。通过测试气泡内外的氧气含量，Seymour 和 Hetz^[31]发现了一种气体交换机理，这种机理与一些动物在水中用腮呼吸的机理类似。随着气体被不断消耗，气泡最终会破灭，但这个过程是极度缓慢的。实验结果证实，这一过程持续时间大约为一天。

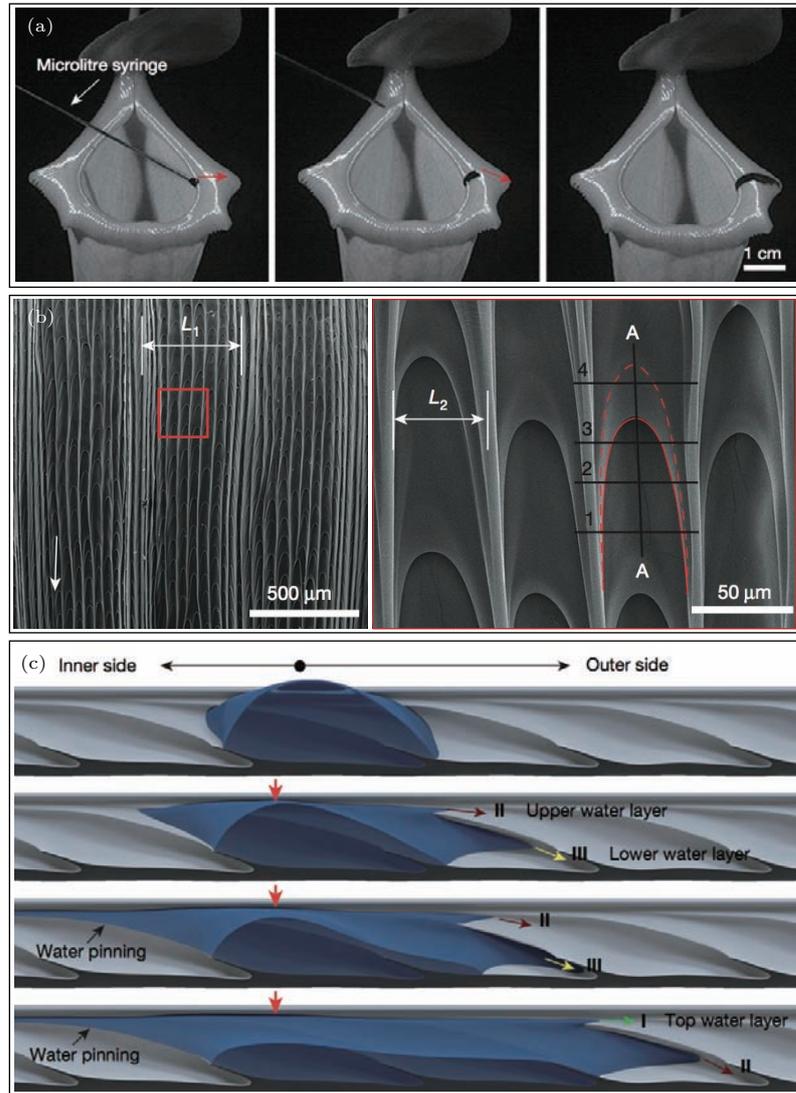


图 11 猪笼草口缘区的液体运输^[30] (a) 猪笼草口缘区液滴自内而外输运; (b) 猪笼草口缘区的微观结构; (c) 液体运输机理示意图
 Fig. 11. Water transport on the peristome surface of *Nepenthes alata*^[30]: (a) Droplet could be directionally transported from the inner side to the outer side; (b) surface features of the peristome; (c) illustration of the water-transport process.

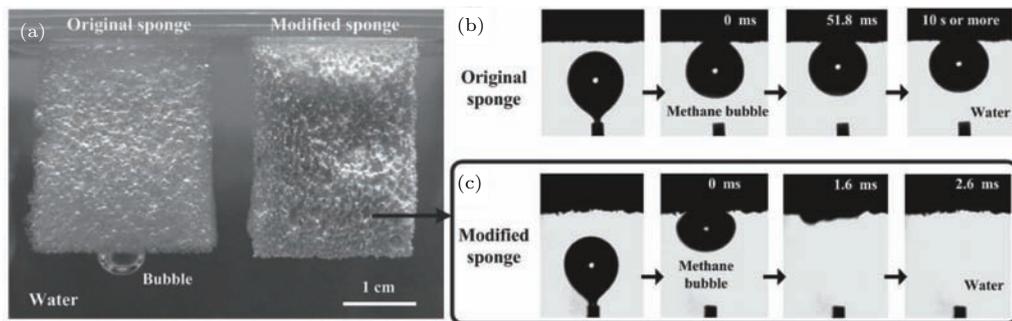


图 12 水下超亲气海绵^[32] (a) 普通海绵和修饰过海绵水下光学照片; (b) 气泡卡在普通海绵表面不能被吸收; (c) 超亲气海绵可以在 2.6 ms 内迅速吸收气泡
 Fig. 12. Underwater superaerophilic sponge^[32]: (a) Optical photograph of original/modified sponges; (b) the bubble pinned itself to the original sponge surface; (c) the bubble could be absorbed on superaerophilic sponge surface within 2.6 ms.

这种水下呼吸的机理, 为科学家设计水下收集气体材料提供了灵感. Chen 等 [32] 开发了一种具有宏观多孔结构的超疏水海绵. 如图 12 所示, 这种多孔超疏水海绵展现出了卓越的水下吸气性能, 可以在水下高效收集甲烷气泡. 这一研究为解决海洋甲烷污染以及甲烷泄露事故提供了新的思路.

3.2 超浸润一维纤维材料的仿生设计制备

3.2.1 定向集雾纤维-蜘蛛丝

清晨的蜘蛛网上往往会挂满水珠, 这说明蜘蛛网可以高效地从潮湿空气中收集雾气. Zheng 等 [33] 发现筛孔蜘蛛的捕获丝在湿度环境下, 能够形成由纳米尺度纤维构成的周期性纺锤节结构. 这种微纳米多尺度结构可以使表面的能量梯度与拉普拉斯压差发生协同作用, 驱动微小的液滴方向性的输运到纺锤节上, 从而实现定向连续的雾气收集. 自然界中的超浸润纤维见图 13.

如图 14 所示, 受到蜘蛛丝的启发, 一系列的仿蜘蛛丝周期性纺锤结纤维被不同的方法制备出来 [34], 包括溶液浸涂法、流体浸涂法、电纺丝、微流体技术以及湿态自组装. Bai 等 [35] 利用溶液涂覆法, 利用 PMMA 等聚合物溶液在尼龙纤维上发生的瑞利不稳定性, 大规模制备得到了具有周期纺锤结构的仿蜘蛛丝纤维, 这种纤维具有类似蜘蛛丝的

定向集水功能. 更进一步, Bai 等 [36] 研究了仿蜘蛛丝结构纤维与液滴之间的黏附行为, 理论分析了纺锤节结构与普通圆形纤维相比可以挂嵌更大液滴的原因. Xue 等 [37] 通过控制流体浸涂时拉丝的速度变化, 制备了具有梯度大小变化的仿蜘蛛丝周期性纺锤节纤维, 通过观察发现液滴自发性由小纺锤节向大纺锤节移动, 最终实现了可调控的定向雾气收集与输运. 而 Feng 等 [38] 使用偶氮苯聚合物制备了具有微纳米多尺度结构的仿蜘蛛丝周期性纺锤结纤维, 实现了紫外光与可见光下液滴在纺锤结上的聚集和分散, 实现了光响应性微小液滴的操控. Du 等 [39] 通过电纺丝制备了放射形排列的周期纺锤结结构的仿蜘蛛丝纤维阵列, 利用纺锤结结构的集水性能以及放射形分布纤维夹脚所产生的拉普拉斯压差协同作用进行高效率的集水.

3.2.2 高效集雾纤维——仙人掌刺

仙人掌以其顽强的生命力著称, 即使在极度干旱的环境下也能生存. Ju 等 [40] 通过对生长在沙漠的仙人掌的观察研究, 发现了仙人掌刺独特的分级结构. 在人工雾气流体的实验条件下, 这种独特的微观分级结构可以有效地发生协同作用, 从而将水从雾气中高效地收集并输运到刺的根部. 对仙人掌刺高效集水输运性能的研究为解决干旱地区缺水这一问题提供了新的思路.

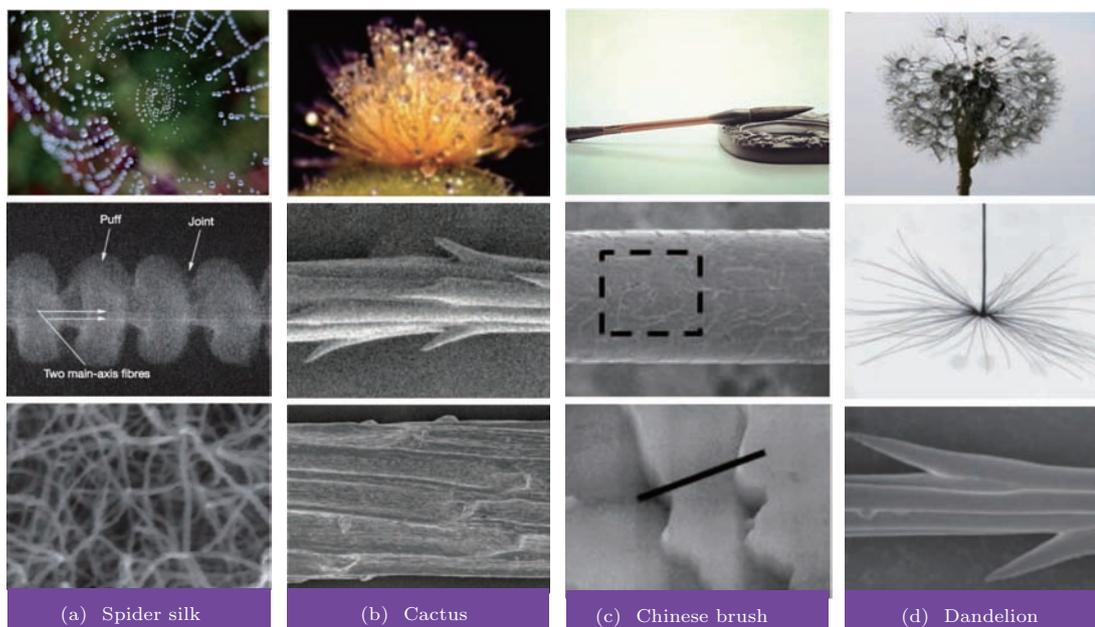


图 13 自然界中的超浸润纤维 (a) 蜘蛛丝 [33]; (b) 仙人掌 [40]; (c) 毛笔 [45]; (d) 蒲公英 [48]

Fig. 13. Biological fibers with superwettability: (a) Spider silk [33]; (b) cactus [40]; (c) chinese brush [45]; (d) dandelion [48].

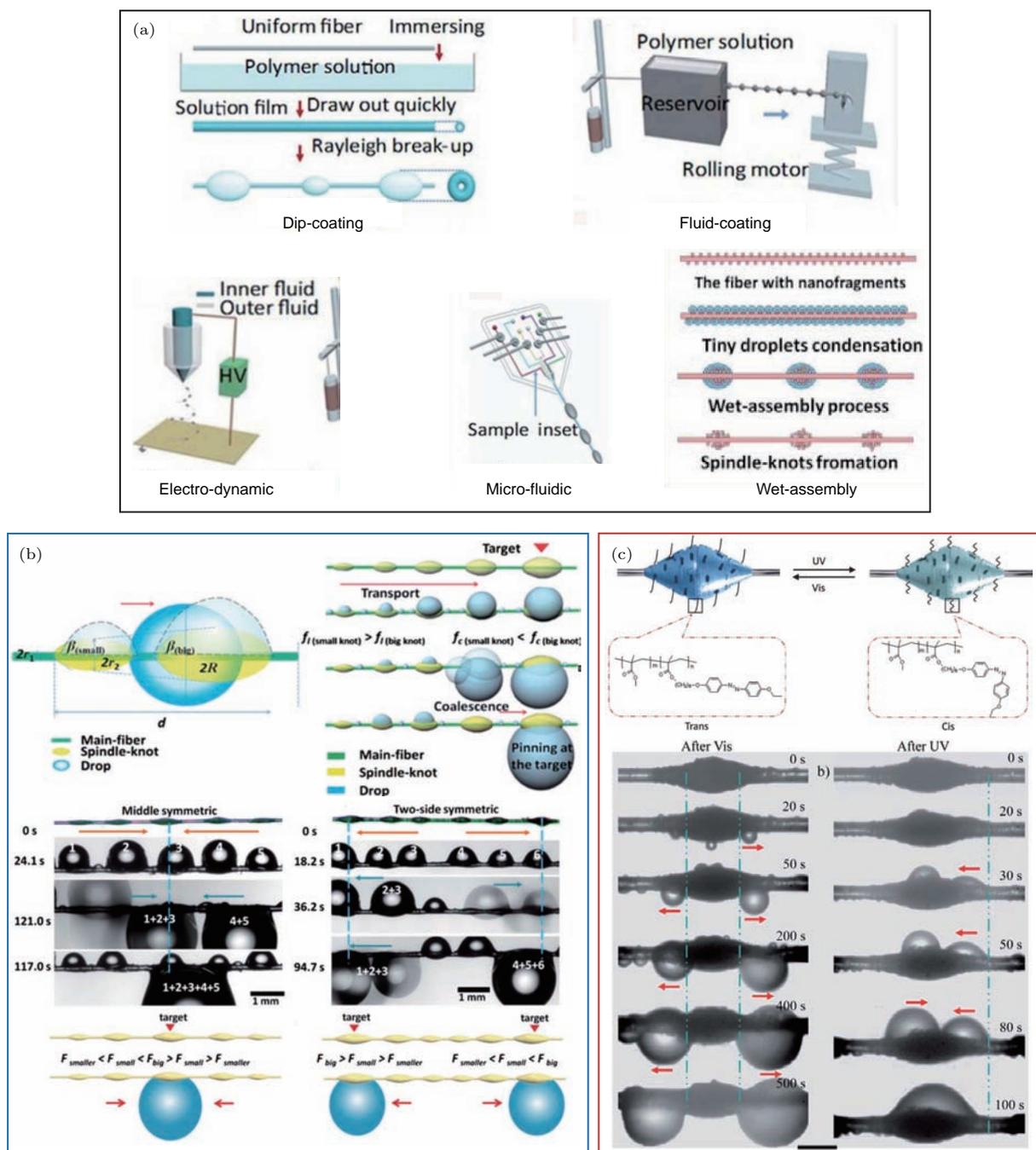


图 14 纺锤结纤维的应用 (a) 纺锤结纤维的制备方法 [34,35]; (b) 纺锤结大小梯度变化的纺锤结纤维远距离液体运输 [37]; (c) 光响应性液滴操控 [38]

Fig. 14. Applications of spindle-knotted fibers: (a) Methods of spindle-knotted fibers fabrication [34,35]; (b) long distance transport on an increasing-size spindle-knotted fiber [37]; (c) photo-responsive directional droplet movement [38].

如图 15 所示, 受到仙人掌刺高效收集运输液体的启发, Ju 等 [41] 通过反复提拉的电化学腐蚀方法成功制备了锥度可调节的锥形铜丝, 进而通过梯度修饰的方法成功在铜锥表面实现了化学梯度修饰. 这种具有浸润性梯度的铜锥具有比亲水或疏水单一浸润性铜锥更高的雾气收集效率. 而 Cao 等 [42] 采用纳米粒子组装的方法制备了大面积的阵

列结构, 将这种锥形阵列固定于亲水的纤维基底上, 表现出了高效的定向集雾性能. Li 等 [43] 通过模仿仙人掌针刺的微观结构, 制备出了具有微纳米复合结构的亲油性锥形阵列, 利用锥形曲率梯度收集并驱动油滴, 实现了智能可循环的油水分离模式, 该材料可以将分散于水中的微米尺度液滴高效连续地进行收集, 是油水分离领域的重大突破.

Yu等^[44]制备了亲水、超亲水、疏水、超疏水四种不同浸润性的铜锥,通过观察证实超疏水铜锥在水下

具有自发定向运输气泡的功能,并研究了不同锥度超疏水铜锥传输气泡的功能差别。

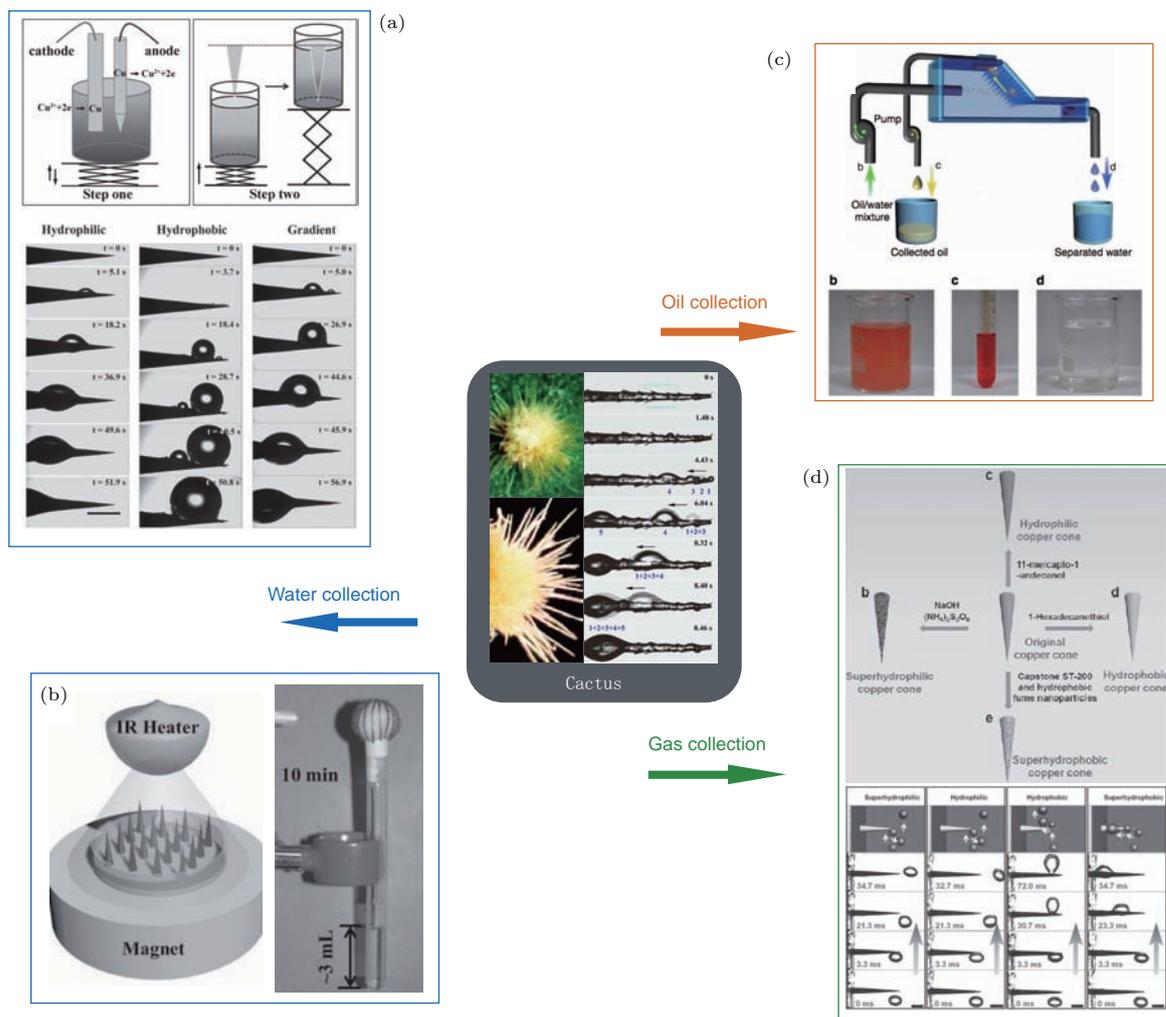


图 15 仿仙人掌锥形结构的应用 (a) 浸润性梯度铜锥的高效集雾^[41]; (b) 仙人掌启发的连续集雾器^[42]; (c) 仙人掌启发的水下定向吸油器^[43]; (d) 不同浸润性锥形结构的气泡运输表现^[44]
 Fig. 15. Applications of bioinspired cones: (a) Efficient fog collection by copper cones with gradient wettability^[41]; (b) cactus-inspired continuous fog collector^[42]; (c) underwater cactus-inspired directional oil collector^[43]; (d) bubbles transportation process on copper cones with different wettabilities^[44].

3.2.3 可控运输液体纤维——毛笔

毛笔由动物秋毫制作而成,是中国五千年历史中的重要书写工具,是“文房四宝”之一。而中国毛笔与西方油画笔的重要区别就是毛笔可以大量储存水性油墨并且能够可控地进行书写。Wang等^[45]经过对毛笔纤维的研究,揭示了毛笔可控运输液体的秘密。毛笔的秋毫具有独特的各向异性微纳结构,包括直径向末端逐渐变小的锥形主要结构,以及表面梯度排列的定向鳞片结构。在各向异性黏附力、拉普拉斯力以及液体重力的协同作用下,

液滴在各向异性微纳结构的锥形秋毫之间达到动态平衡,从而大量储存水性油墨。受此启发,使用新生的动物毛发可以直接书写出 10 μm 分辨率的微米尺度细线。

如图 16 所示,受到毛笔的启发, Wang 等^[46]利用动态电化学法制备出了锥度可控的锥形铜纤维,通过调控电化学反应条件,实现了对表面微纳米复合结构的调控,在合适的条件下使其与毛发尺度一致。制备得到的锥形铜纤维可以实现高效的液滴操控,操控重量是纤维本身 428 倍的液滴。利用液滴在纤维的锥形尖端处所处的动态平衡是实现高

效液体操控的关键因素. 在前面对毛笔运输液体的研究基础之上, Wang 等^[47]进一步设计并构筑了拥有不同三维拓扑结构的纤维阵列, 实现了精确地调控液体的动态平衡, 从而进一步实现了对多种功

能液体分子(量子点、荧光染料、有机小分子和有机聚合物)的可控输运, 制备了可精确调控的功能图案化表面(宽度分辨率为10 μm, 厚度的分辨率为100 nm).

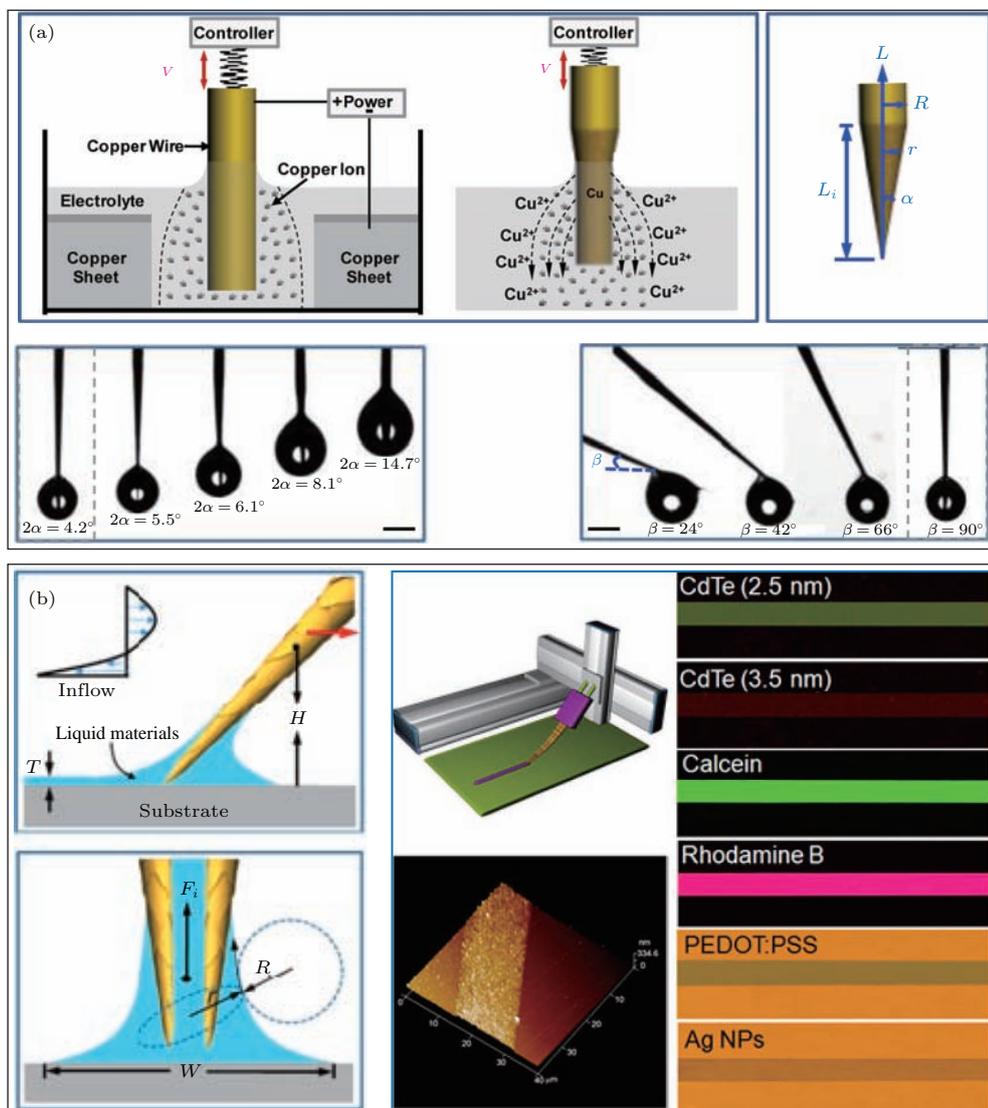


图 16 (a) 多尺度结构铜纤维不同角度下的高效液滴操控^[46]; (b) 纳米厚度的微米线的可控书写^[47]

Fig. 16. (a) Efficient liquid manipulation by multistructured conical copper wires^[46]; (b) controllable patterning of functional nanoscale microwires^[47].

3.2.4 高效抓取液滴弹性纤维——蒲公英冠毛

自然界中的蒲公英冠毛可以在清晨雾气环境下抓取大滴的水珠, Meng 等^[48]发现单根蒲公英冠毛可以稳定容易地抓取质量为其自重96倍的液体. 研究表明, 开放式辐射状的空间分布是蒲公英弹性冠毛有效抓取液滴的关键因素, 其中单根冠毛以及

中间圆盘的对水的高黏附性、单根冠毛形变产生的弹性以及冠毛独特的微纳米结构所产生的局部毛细现象的协同作用使得蒲公英冠毛可以稳定高效地抓取液滴.

4 仿生多尺度超浸润界面材料的应用

仿生超浸润界面材料的应用列于图 17.

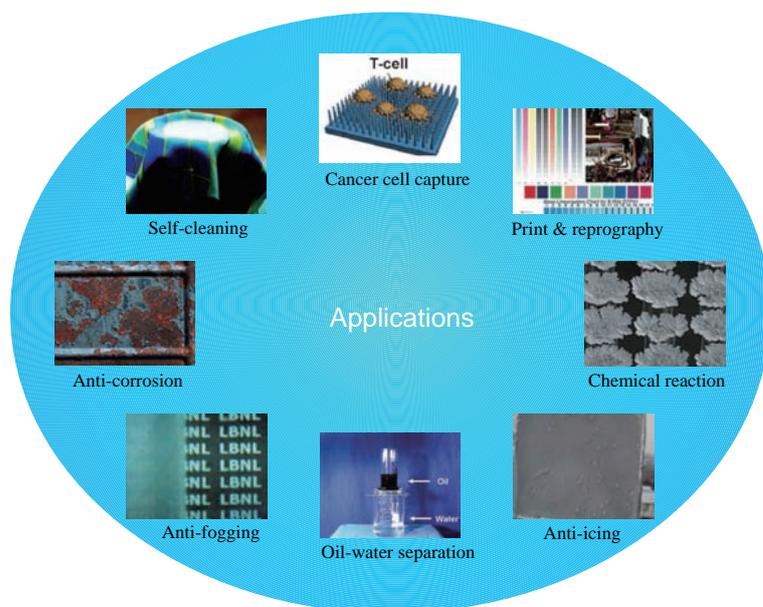


图 17 仿生超浸润界面材料的应用: 自清洁、防腐蚀、防雾、油水分离、防覆冰、化学反应、绿色印刷、癌细胞捕获
 Fig. 17. Applications of bioinspired superwetable materials: self-cleaning, anti-corrosion, anti-fogging, oil-water separation, anti-icing, chemical reaction, printing and cancer cell capture.

4.1 自清洁

自清洁材料是材料智能化的典型代表, 在生产领域拥有极大的应用价值. 自清洁材料有效地解决了清洁高处玻璃、水下船舶等成本高昂以及人力浪费的难题. 自清洁涂层在玻璃以及纺织品等材料上的商业化应用已经带来了显著的经济效益和环境效益. 自清洁材料大致分为以下四类: 1) 基于二氧化钛光催化分解有机物的超亲水材料; 2) 基于荷叶效应的超疏水材料; 3) 基于壁虎脚刚毛效应的干态自清洁材料; 4) 基于鲫鱼皮效应的水下超疏油材料.

二氧化钛具有光降解和超亲水性, 这两种作用协同作用于自清洁材料表面的二氧化钛薄膜. 二氧化钛薄膜在光照下产生羟基自由基, 凭借极强的氧化性可以将绝大多数有机污染物氧化降解, 同时薄膜在光照下表现出超亲水性质, 形成水膜, 使薄膜表面具有自清洁防雾等性质. 目前, 基于二氧化钛薄膜的自清洁材料已经广泛应用于生活中, 例如国家大剧院所使用的自清洁玻璃.

荷叶上的液滴具有极大的接触角以及极小的滚动角, 这使得水滴可以轻松从荷叶表面滚落并带走灰尘. 而荷叶表面所具有的微纳米多尺度粗糙结构以及低表面能的蜡物质则是荷叶自清洁性能的关键. 受荷叶的启发, Jiang 等 [49] 研发出自清洁双疏纳米领带, 可以保证领带不被水和油污污染.

壁虎脚最为人知的就是其多尺度刚毛阵列结构的高黏附作用, 这使得壁虎能够飞檐走壁. 而壁虎长期在布满灰尘的墙壁爬行, 其黏附作用却能够得到有效保持, 这归功于壁虎脚脱尘的神奇能力, 与荷叶不同, 不需要水的参与, 壁虎脚的脱尘作用在奔跑中就能实现, 所以这种能力被称为干型自清洁. Yang 等 [50] 受到壁虎脚启发, 提出了功能表面自清洁的机理, 制备出可以主观调控的功能表面, 实现了对固体颗粒的自由操控.

鲫鱼鱼鳞拥有超亲水和水下超疏油的特性, 在油滴与鱼鳞之间形成一层水膜, 从而保证鱼鳞不被油滴污染. 诸多水下生物都具有超疏油的特性, Liu 等 [51] 发现, 文蛤壳的内表面的外套膜覆盖区凭借高能无机组分碳酸钙及该区域的表面微纳复合结构表现出了水下对油的超低黏附. 受此启发, 通过简单的氨水腐蚀法制备了水下对油超低黏附的高能无机氧化铜表面, 通过调节腐蚀时间可以调控氧化铜表面微纳结构的粗糙度, 进而调节表面对油的黏附力. 这一功能表面在水相设备抗油污等领域有着潜在的应用价值. Xu 等 [52] 通过层层自组装方法, 利用柠檬酸包裹的金纳米粒子和聚二烯丙基二甲基氯化铵制备超疏油、低黏附有机/无机杂化薄膜, 并在仿造海水中表现出很好的稳定性. 这一研究, 在防生物黏附、微流控、工业金属清洁和海洋防污涂层等领域有潜在的应用前景. Xu 等 [53] 受贻贝高机械强度“砖-混凝土”层状结构启发, 使用层层

自组装的方法, 制备出高机械强度、水下超疏油的仿海水环境中稳定性极高的微纳米涂层, 纳米压痕和磨损实验证实涂层的超疏油性质没有受到影响, 这种新型涂层在海洋防污及微流控等领域有着极高的应用价值.

4.2 防腐蚀

腐蚀给人们带来了巨大的经济损失, 是生产生活中面临的重大问题. 目前为止, 防腐蚀所采用的方法大多数是在表面覆盖一层含铬的重金属涂层, 由此带来的成本消耗以及健康损害不容忽视. 而超疏水涂层则是解决这一问题的有效方案. 无论是化学腐蚀还是电化学腐蚀, 溶液与材料表面的接触是必不可少的, 超疏水超亲气涂层在水下所产生的连续气膜则有效地隔绝了水和材料表面, 阻止了腐蚀的产生. Zhang 等^[54]在钛箔基底表面制备了二氧化钛转化膜, 经过化学修饰表现出超疏水性, 经过电化学阻抗测试发现, 基底在盐水电解质溶液中浸泡90天仍保持优良的耐腐蚀性. Yuan 等^[55]使用含氟的低表面能聚合物修饰铜基底制备了具有优异性能的抗腐蚀表面.

4.3 防雾

雾气是自然界普遍存在的现象, 对玻璃、镜子等光学设备的使用有着极大的干扰和影响. 在日常生活和科技开发中, 防雾都是非常重要的技术手段. 利用超浸润性质进行防雾的材料主要分为两种: 1) 超疏水防雾材料; 2) 超亲水防雾材料.

具有防雾功能的超疏水材料是受到蚊子以及苍蝇等昆虫的复眼结构启发而制备的. 蚊子复眼独特的微纳米分级结构可以抵抗雾滴极大的拉普拉斯压力, 能够有效地防止雾滴浸入结构内部, 由于微纳尺度和线张力的作用, 复眼上液滴处于Wenzel态时的自由能高于Cassie态, 这抑制了雾滴在结构底部的形成. 而微米结构之间形成的液滴受毛细力的驱动在长大过程中自内而外排出, 形成大液滴滚落表面. 受到昆虫眼睛的启发, 科学家制备了多种干型防雾材料.

在雾气环境下, 超亲水防雾涂层上的液滴并不会形成分散附着分布而是迅速铺展形成连续的水膜, 从而起到防雾的作用. 常见的超亲水防雾材料有二氧化钛超亲水薄膜、超亲水聚合物薄膜以及超亲水粗糙结构多孔材料薄膜. Li 等^[56]通过精确地

控制微纳米结构以及化学成分, 制备了蛾眼型仿生防反射防雾超亲水聚合物薄膜, 该薄膜在先进光学设备上有着广阔的应用前景. Park 等^[57]通过一步二氧化硅纳米粒子涂层法制备了具有防雾以及防反射性能的超亲水涂层, 这种涂层可以有效提高固态燃料敏化太阳能电池的效率.

4.4 油水分离

油水分离一直是困扰世界的难题. 随着工业发展, 海洋油污染、工业漏油事故频发, 如何高效地进行油水分离成为亟待解决的问题. 超浸润材料作为新兴智能材料, 为解决油水分离问题提供了新思路. 基于超浸润材料的油水分离材料主要分为两类: 1) 超疏水/超亲油材料; 2) 超亲水/超疏油材料.

Feng 等^[58]制备了有特氟龙涂层的超疏水/超亲油不锈钢网, 首次利用超亲油材料进行了油水分离工作. Zhang 和 Seeger^[59]通过化学气相沉积法制备了超疏水/超亲油聚酯织物. 该织物具有高分离效率并且可以回收再利用. Zhang 等^[60]制备了疏水亲油的碳纳米管海绵, 具有互通的三维网络结构, 该海绵具有极高的稳定性可以克服反复的压迫, 表现出高选择性和可回收能力. Sun 等^[61]制备了碳纤维气凝胶, 实现了对油和有机溶剂的高效可循环吸附. 通过分子设计, 以巯基-双键点击反应制备了含有硫醚链段的桥联倍半硅氧烷前驱体, 其凝胶可直接在室温下真空干燥得到优异弹性的气凝胶, 这种新型干燥技术极大地简化了气凝胶的制备, 经疏水改性后表现出优异的吸油性能, 可在几秒内吸附自重十几倍的甲苯, 实现快速油水分离. Zhang 等^[62]将荷叶表面微纳米多尺度结构与贻贝强黏附特性结合, 制备出利用聚多巴胺修饰的微粒表面, 进一步制得磁性超疏水/超亲油颗粒, 实现了油水分离并在磁场控制下对油进行定向输运.

最近, Xue 等^[63]设计了新型的超亲水/超疏油水凝胶网格涂层, 实现了选择性地从油水混合物(汽油、柴油、植物油、原油等)中将水排除, 该材料具有循环使用、抗油污染的特性. 与常用的超疏水/超亲油材料不同, 这项工作实现了油水分离功能材料的新尝试. Gao 等^[64]选择了超亲水/超疏油硝酸纤维素膜(NC), 在膜上进行机械打孔, 得到了双尺度孔洞p-NC膜(perforated NC膜), 这种膜材料实现了高效率的油水分离. Wang 等^[65]通过纤维素溶解再生以及成孔剂占位的方法制备了多孔

纤维素海绵. 该材料无需化学修饰即表现出了空气中亲水亲油、水下超疏油的性质, 在各类水性溶液中对各种油滴均表现出超疏油的性质. 海绵表层的纳米尺度微孔有效地阻止了微小油滴的渗透, 而水则可以快速通过海绵实现油水分离. 该材料表现出了极高的分离效率以及良好的抗油污污染的性质.

4.5 防覆冰

覆冰问题对公路、飞机、雷达等其他室外设施的正常运行造成严重的影响和干扰, 而传统的除冰手段需要花费大量的人力物力. 生产生活中解决覆冰的方法主要分为两类: 防冰和除冰. 防冰是指采取有效的办法延缓固体表面结冰, 而除冰是指在结冰发生后, 到达一定界限时采取主动或被动手段除去固体表面覆冰. 基于仿生超浸润材料的防结冰策略主要分为两种: 1) 延缓和防止覆冰形成的超疏水防结冰材料; 2) 能够使覆冰轻易滑走的超亲水除冰材料.

Tourkine 等^[66]揭示了超疏水多尺度表面可以有效地延缓结冰过程. 超疏水防结冰材料基于超疏水材料可以减少水滴与表面的接触面积, 从而延缓结冰速率, 同时可以减少水滴在材料表面的附着, 使水滴不易积累或在结冰之前滚落表面. 超疏水表面的气层可以作为隔绝传热的壁垒, 在这个过程中起到了关键作用. 当过冷度不大时, 过冷水结冰需要克服的能垒较大, 所以表面上的过冷水需要等一段时间后才能变冰. 因而, Zhang 等提出并构建了能使过冷水在结冰前自动移离的防冰表面材料. 受孢子与冷凝水合并时将表面能转化为动能后使孢子得以传播这个现象的启发, 构筑了能使冷凝水合并后自动快速弹离的表面材料. 通过制备对冷凝微米水滴具有系列黏附功的表面, 研究了冷凝水滴合并跳离与黏附功的相互关系, 提出了过冷水快速移离材料表面的阻力主要来源于固体表面对水的黏附力的结论. 针对冷凝水滴与材料表面的黏附功随着温度降低、过饱和度增加而变大, 使冷凝水滴跳离表面效率降低甚至无法跳离的情况, 利用气-液-固三相线钉扎效应 (pinning of the three phase contact line), 在具有纳米结构的材料表面上引入与冷凝水滴尺寸相当的微米结构, 使冷凝水滴在长大过程中由于在微米结构边界的钉扎效应而偏离

球形, 从而增大了水滴的表面能. 同时利用三相线在微米结构边缘的钉扎效应, 减小了冷凝水滴与材料表面的接触面积, 使冷凝水滴与材料表面的黏附功变小, 实现了在零度以下、高过饱和度条件下, 冷凝水滴的能够高效率跳离的表面材料^[67]. 将这种材料应用于防冰试验, 发现表面上冰霜的生成得以大大延缓. 冷凝水的有效跳离不但对防覆冰有重要意义, 在雾水收集、冷凝换热及热二极管中都有重要的应用.

当过冷度较大时, 如零下 40 °C 或更低的温度, 冷表面上结冰不可避免. 针对这种情况, Chen 等^[68]通过研究具有不同结构和化学组成的系列材料表面与冰的黏附功, 提出了决定冰黏附力的主导因素是机械锁交力的分析, 从而得出有微纳结构的超疏水表面不能有效降低冰黏附力的结论. 为了有效降低冰与材料表面的黏附力, 实现材料表面上的冰能在自然风力或自身重力的作用下自行脱落, 受滑冰运动启发, 进一步构建了亲水高分子和无机材料的复合涂层. 其中亲水高分子能降低水活性, 使液态水的冰点和冰的融点得以降低, 这样冰与基材之间能够形成一层液态水润滑层, 从而使基材表面的冰能在风力或重力的作用下自动脱离基材表面, 达到防冰的效果. 而无机材料的引入大大提高了涂层表面的机械强度和耐磨性, 能够延长涂层的使用寿命, 使这种复合涂层具有重要的实际应用意义^[69]. 另外, Dou 等^[70]利用风洞试验证实了所制备的具有水润滑层的高分子涂层上的冰能在强劲风的作用下自动脱落.

超疏水表面的防覆冰作用主要在于通过使过冷液滴在结冰前滚落表面而延缓结冰, 适用于对覆冰更加敏感的设备, 其缺点是在湿度较大或温度极低的情况下效果不好. 而超亲水表面的防覆冰作用则在于在表面结冰后, 固体表面与覆冰之间形成由水构成的超润滑表面, 使得覆冰在风等外力作用下脱落表面, 适用于极低的温度条件以及可以耐受一定结冰而不影响正常工作的设备, 其缺点是覆冰受风力等造成的不均匀或不同期滑落可能会造成安全事故. 相对于传统的热力融冰法以及机械除冰法 (振动、刮铲、电磁), 两种仿生超浸润防覆冰表面都体现出了新型智能材料低能源浪费、低环境污染以及低人力浪费的优势.

4.6 化学反应

通常情况下, 浸润性并没有被考虑为影响化学反应的因素, 然而, 在涉及多相反应物生成物的化学反应体系中, 浸润性作为调节固-气-液相互作用的重要工具, 近年来已经得到了科学家积极的探索.

在气相参与或生成的电化学反应中, 界面的浸润性会显著影响气-液在固体电极表面的行为. Lu等^[71]通过设计制备了具有微纳米粗糙结构的超亲水/超疏气 MoS₂ 电极, 这种超疏气电极可以在电解水析出氢气的反应中凭借对生成物氢气的超低黏附使得氢气泡可以轻松脱离电极, 从而减小生成物浓度并避免因固-气黏附导致的电极与电解液的隔离, 从而得到了极高的析氢反应效率. 最近, Lu等^[72]进一步制备了微纳米结构超亲水铜薄膜, 并将其运用于发生肼还原生成氮气反应的燃料电池, 获得了较高的电池效率以及良好的稳定性. 最近, Lei等^[73]制备了超疏水/超亲气富氧酶生物传感器, 该表面可以在电解质中高效地收集氧气, 形成一层氧气膜, 为氧还原反应提供较大的三相接触界面, 实现了高效稳定的氧还原反应测试.

Wu等^[74]使用超疏水微米硅柱阵列基底作为电极, 凭借基底的疏水性使液滴固定于硅柱顶端, 将电化学反应限域于硅柱顶端的固-气-液三相接触界面, 制备出形貌可以调控的“金花”阵列. Wang等^[75]将硫化氢气体通过硅柱表面的连续气膜导入反应, 从而在三相接触界面发生反应生成各类金属硫化物, 比如 CdS, PbS, MnS, Ag₂S, CuS 以及 CdS-PbS 复合物, 通过对硅柱浸润性的调控实现了生成物形貌的控制. Ding等^[76]探索了界面浸润性对微生物细胞外电荷传递过程行为的调控, 最终在亲水电极上实现了比疏水电极上增强十倍的生物电流. 研究证明亲水表面可以有效诱导还原态血红素分子更多地暴露于生物膜之外, 实现与溶液中核黄素分子的有效结合, 协同作用传递电子到电极上. 这项研究首次揭示了利用非电化学方法调控电荷传递行为的方法.

4.7 绿色印刷

传统印刷技术存在环境污染、资源浪费等问题, 而浸润性在印刷技术中扮演了重要的角色, 对于发

展传统印刷技术的大量研究都聚焦于精准操控油墨在表面的图案化排列上.

平板印刷技术基于阳极氧化铝平板, 平板上的疏水性和亲水性区域选择性地被油性墨水和水浸润. 在彩色印刷中, 平板的浪费是影响印刷效率的关键性因素. Nakata等^[77]发明了一项新的平板印刷技术, 利用钛基底上的超亲水和超疏水图案, 使彩色印刷的分辨率达到每英寸 150 行. 而氧化钛基底可以在紫外光催化分解之后回收再利用. 这项技术可以有效地减少资源浪费和环境污染. Tian等^[78]报道了通过各向异性浸润性和各向异性实现的用于印刷技术的液体图案化浸润性转换. 在印刷过程中, 由超疏水氧化锌纳米棒阵列排列的表面图案的浸润性可以从 Cassie 态转换为 Wenzel 态. 为了提高图案表面的机械强度和浸润性的可控性, 制备出了整齐排列的用于可再生印刷的纳米孔阵列, 这是一种新型的液体印刷技术.

基于对传统印刷技术的探索与改进, Tian等^[79]提出了一种非感光、无污染、低成本的直接打印制版技术: 将特制转印材料精确打印在超亲水版材上, 通过转印材料与版材纳米尺度界面性质的调控, 在打印的印版上形成具有相反浸润性(超亲油/超亲水)的纳米微区, 实现直接制版印刷. 与现有印刷制版技术相比, 该技术摒弃了感光成像的思路, 有效缩短了制版流程, 大大降低了制版成本; 制备过程无需避光操作, 并彻底克服了感光冲洗过程中的化学污染问题; 此外, 用过的印版可以回收, 是一种绿色的高质量快速制版技术, 具有多方面的综合优势.

4.8 癌细胞捕获

癌症是当今世界上最具挑战性的医学问题之一, 全球癌症死亡人数持续增加, 成为导致人类死亡的重要因素. 对于癌症的治疗而言, 早期诊断非常重要, 发展高效选择性识别癌症早期诊断材料具有重要的意义.

Zhang等^[80]通过电化学方法制备了与之相似的分型金纳米结构. 该结构可以通过增强与癌细胞的拓扑相互作用实现血液中痕量癌细胞的高效捕获. 通过施加微小的电压, 这些捕获的癌细胞又可以被高效地释放. 这一工作为血液中痕量癌细胞进一步的基因分析、抗癌药物的筛选提供了一个很好的平台.

近年来, 循环肿瘤细胞等稀有细胞的高效快速检测已成为肿瘤检测与研究的热点并开始临床应用. Yang 等^[81]以烟灰为模板, 快速有效地构筑了一种新型的树枝状纳米二氧化硅涂层. 在修饰肿瘤相关黏附抗体之后, 这种纳米涂层可以非常有效地从血液中直接提取稀有癌细胞. Li 等^[82]利用抗体修饰的还原氧化石墨烯基底与循环肿瘤细胞的多重匹配作用, 达到对循环肿瘤细胞非常高的特异性捕获.

Liu 等^[83]通过将柔性聚合物与特异性识别分子、表面结构相结合, 制备了软聚苯乙烯纳米管细胞捕获基底. 该基底能实现对血液中乳腺癌细胞的快速、高效、高特异性的捕获, 并且具有良好的细胞相容性.

4.9 其他应用

除了上面介绍的应用之外, 仿生多尺度超浸润表面还在微流体、集水、水下减阻等领域发挥了重要作用. 得益于对于液体的高移动速率, 低黏附超疏水表面成为基于液滴的微流系统的理想原件. Mumm 等^[84]制备了铜基超疏水表面, 可以用于线诱导的液滴微流体系统. 而在本文前段部分已经介绍了仿生蜘蛛丝纤维以及仿生仙人掌针刺材料的优异集水性能. 对于水下的超疏水材料而言, 由于气膜的存在可以显著减小材料表面在水下的阻力, 这种超疏水水下减阻材料在军事领域具有潜在的应用前景.

4.10 应用现状及前景分析

仿生多尺度超浸润界面材料以其独特的性质在建筑业、工农业生产、医疗、国防军事等领域具有较为广阔的应用前景. 目前, 具有自清洁功能的玻璃、优异防水性能的织物、金属以及合金表面的超疏水防腐涂层、室外天线的防结冰涂层、以超浸润表面为基础的绿色打印纸版设备和超浸润微流体控制设备等已经在人们的生产生活中得到了较为广泛的应用. 超浸润界面材料符合新型环保的消费理念, 是新型智能材料中的研究前沿领域. 然而, 目前大多数的超浸润界面材料存在着实验条件苛刻、步骤繁琐以及成本高昂等问题, 许多良好性能的最新研发的超浸润材料并没有实现产业化. 同时, 已经投入市场的超浸润表面也存在着表面微观结构耐磨性低、易老化磨损、易污染等影响使用寿命

的缺点. 目前, 相当一部分科学家已经在着力研究制备成本合理、恶劣条件下坚固耐用以及抗污染可循环使用的超浸润界面材料, 而工业上制备工艺的优化以及制备方法的创新也将会使得超浸润材料在实际应用领域发挥更重要的作用.

5 结论与展望

本文主要介绍了仿生多尺度超浸润界面材料的发展历史、固体表面浸润性的理论基础, 自然界中特殊功能浸润性表面的原理揭示和仿生设计以及超浸润材料在生产生活中的应用前景. 基于超浸润材料的广阔应用前景, 越来越多的科学家将会对其进行更加深入的探索和研究. 在基础研究方面, 目前超浸润界面材料仅仅局限于水-固体系, 对水-油-固体系只进行了初步的探索性研究, 将水换成有机溶液或者气体, 把固体换成凝胶类材料, 将会使超浸润界面材料成为一个不可预测的庞大的对众多学科产生重大影响的科学前沿. 在应用研究方面, 目前为止, 超浸润界面材料已经在传统催化、电化学等领域取得了重大成就, 未来在对超浸润材料的深入研究基础上, 发展规模化制备技术, 实现仿生多尺度超浸润界面材料在资源、能源、环境和生物医学等领域的广泛应用指日可待.

参考文献

- [1] Adams J, Pendlebury D 2011 *Global Research Report: Materials Science and Technology*, Thomson Reuters *Science Watch*
- [2] All Nobel Laureates in Chemistry, Nobelprize.org
- [3] Barthlott W, Neinhuis C 1997 *Planta* 2021
- [4] Li H J, Wang X, Song Y L, Liu Y Q, Li Q S, Jiang L, Zhu D B 2001 *Angew. Chem. Int. Ed.* **113** 1793
- [5] Feng L, Li S H, Li Y S, Li H J, Zhang L J, Zhai J, Song Y L, Liu B Q, Jiang L, Zhu D B 2002 *Adv. Mater.* **14** 1857
- [6] Wenzel R N 1936 *Ind. Eng. Chem.* **28** 988
- [7] Cassie A B D, Baxter S 1944 *Trans. Faraday Soc.* **40** 546
- [8] Verho T, Korhonen J T, Sainiemi L, Jokinen V, Bower C, Franze K, Franssila S, Andrew P, Ikkala O, Ras R H A 2012 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **109** 10210
- [9] Zheng Y M, Gao X F, Jiang L 2007 *Soft Matter* **3** 178
- [10] Liu M J, Wang S T, Wei Z X, Song Y L, Jiang L 2009 *Adv. Mater.* **21** 665
- [11] Wong T S, Kang S H, Tang S K, Smythe E J, Hatton B D, Grinthal A, Aizenberg J 2011 *Nature* **477** 443
- [12] Liu M J, Xue Z X, Liu H, Jiang L 2012 *Angew. Chem. Int. Ed.* **51** 8348

- [13] Su B, Wu Y C, Jiang L 2012 *Phys. Chem. Soc. Rev.* **41** 7832
- [14] Tian Y, Su B, Jiang L 2014 *Adv. Mater.* **26** 6872
- [15] Young T 1805 *Philos. Trans. R. Soc. London* **95** 65
- [16] Vogler E A 1998 *Adv. Colloid Interface Sci. Lett.* **74** 69
- [17] Neinhuis C, Barthlott W 1997 *Ann. Bot.* **79** 667
- [18] Malvadkar N A, Hancock M J, Sekeroglu K, Dressick W J, Demirel M C 2010 *Nat. Mater.* **9** 1023
- [19] Chu K H, Xiao R, Wang E N 2010 *Nat. Mater.* **9** 413
- [20] Cai Y, Lin L, Xue Z X, Liu M J, Wang S T, Jiang L 2014 *Adv. Funct. Mater.* **24** 809
- [21] Feng L, Zhang Y N, Xi J M, Zhu Y, Wang N, Xia F, Jiang L 2008 *Langmuir* **24** 4114
- [22] Bhushan B, Her E K 2010 *Langmuir* **26** 8207
- [23] Jin M H, Feng X J, Feng L, Sun T L, Zhai J, Li T J, Jiang L 2005 *Adv. Mater.* **17** 1977
- [24] Gao X F, Yan X, Yao X, Xu L, Zhang K, Zhang J H, Yang B, Jiang L 2007 *Adv. Mater.* **19** 2213
- [25] Sun Z Q, Liao T, Liu K S, Jiang L, Kim J H, Dou S X 2014 *Small* **15** 3001
- [26] Hu D L, Chan B, Bush J W 2003 *Nature* **424** 663
- [27] Gao X F, Jiang L 2004 *Nature* **432** 36
- [28] Koh J S, Yang E J, Jung G P, Jung S P, Son J H, Lee S I, Jablonski P G, Wood R J, Kim H Y, Cho K J 2015 *Science* **349** 517
- [29] Su B, Wang S T, Song Y L, Jiang L 2011 *Soft Matter* **7** 5144
- [30] Chen H W, Zhang P F, Zhang L W, Liu H L, Jiang Y, Zhang D Y, Han Z W, Jiang L 2016 *Nature* **532** 85
- [31] Seymour R S, Hetz S K 2011 *J. Exp. Biol.* **214** 2157
- [32] Chen X, Wu Y C, Su B, Wang J M, Song Y L, Jiang L 2012 *Adv. Mater.* **24** 5884
- [33] Zheng Y M, Bai H, Huang Z B, Tian X L, Nie F Q, Zhao Y, Zhai J, Jiang L 2010 *Nature* **463** 640
- [34] Chen Y, Zheng Y M 2014 *Nanoscale* **6** 7703
- [35] Bai H, Sun R Z, Ju J, Yao X, Zheng Y M, Jiang L 2011 *Small* **7** 3429
- [36] Bai H, Tian X L, Zheng Y M, Ju J, Zhao Y, Jiang L 2010 *Adv. Mater.* **22** 5521
- [37] Xue Y, Chen Y, Wang T, Jiang L, Zheng Y M 2014 *J. Mater. Chem. A* **2** 7156
- [38] Feng S L, Hou Y P, Xue Y, Gao L C, Jiang L, Zheng Y M 2013 *Soft Matter* **9** 9294
- [39] Du M, Zhao Y, Tian Y, Li K, Jiang L 2016 *Small* **12** 1000
- [40] Ju J, Bai H, Zheng Y M, Zhao T Y, Fang R C, Jiang L 2012 *Nat. Commun.* **3** 1247
- [41] Ju J, Xiao K, Yao X, Bai H, Jiang L 2013 *Adv. Mater.* **25** 5937
- [42] Cao M Y, Ju J, Li K, Dou S X, Liu K S, Jiang L 2014 *Adv. Funct. Mater.* **24** 3235
- [43] Li K, Ju J, Xue Z X, Ma J, Feng L, Gao S, Jiang L 2013 *Nat. Commun.* **4** 2276
- [44] Yu C M, Cao M Y, Dong Z C, Wang J M, Li K, Jiang L 2016 *Adv. Funct. Mater.* DOI:10.1002/adfm.201505234
- [45] Wang Q B, Su B, Liu H, Jiang L 2014 *Adv. Mater.* **26** 4889
- [46] Wang Q B, Meng Q A, Chen M, Liu H, Jiang L 2014 *ACS Nano* **8** 8757
- [47] Wang Q B, Meng Q A, Wang P W, Liu H, Jiang L 2015 *ACS Nano* **9** 4362
- [48] Meng Q A, Wang Q B, Liu H, Jiang L 2014 *NPG Asia Mater.* **6** e125
- [49] Cyranoski 2001 *Nature* **414** 240
- [50] Xu Q, Wan Y Y, Hu T S, Liu T X, Tao D S, Niewiarowski P H, Tian Y, Liu Y, Dai L M, Yang Y Q, Xia Z H 2015 *Nat. Commun.* **6** 8949
- [51] Liu X L, Zhou J, Xue Z X, Gao J, Meng J X, Wang S T, Jiang L 2012 *Adv. Mater.* **24** 3401
- [52] Xu L P, Zhao J, Su B, Liu X L, Peng J T, Liu Y B, Liu H L, Yang G, Jiang L, Wen Y Q, Zhang X J, Wang S T 2013 *Adv. Mater.* **25** 606
- [53] Xu L P, Peng J T, Liu Y B, Wen Y Q, Zhang X J, Jiang L, Wang S T 2013 *ACS Nano* **7** 5077
- [54] Zhang F, Chen S G, Dong L H, Lei Y H, Liu T, Yin Y S 2011 *Appl. Surf. Sci.* **257** 2587
- [55] Yuan S J, Pehkonen S O, Liang B, Ting Y P, Neoh K G, Kang E T 2011 *Corros. Sci.* **53** 2738
- [56] Li J, Zhu J, Gao X F 2014 *Small* **10** 2578
- [57] Park J T, Kim J H, Lee D 2014 *Nanoscale* **6** 7362
- [58] Feng L, Zhang Z Y, Mai Z H, Ma Y M, Liu B Q, Jiang L, Zhu D B 2004 *Angew. Chem. Int. Ed.* **43** 2012
- [59] Zhang J P, Seeger S 2011 *Adv. Funct. Mater.* **21** 4699
- [60] Zhang Y L, Wei S, Liu F J, Du Y C, Liu S, Ji Y Y, Yokoi T, Tatsumi T, Xiao F S 2009 *Nano Today* **4** 135
- [61] Sun H Y, Xu Z, Gao C 2013 *Adv. Mater.* **25** 2632
- [62] Zhang L, Wu J J, Wang Y X, Long Y H, Zhao N, Xu J 2012 *J. Am. Chem. Soc.* **134** 9879
- [63] Xue Z X, Wang S T, Lin L, Chen L, Liu M J, Feng L, Jiang L 2011 *Adv. Mater.* **23** 4270
- [64] Gao X F, Xu L P, Xue Z X, Feng L, Peng J T, Wen Y Q, Wang S T, Zhang X J 2014 *Adv. Mater.* **26** 1771
- [65] Wang G, He Y, Wang H, Zhang L, Yu Q Y, Peng S S, Wu X D, Ren T H, Zeng Z X, Xue Q J 2015 *Green Chem.* **17** 3093
- [66] Tourkine P, Le M M, Quéré D 2009 *Langmuir* **25** 7214
- [67] Zhang Q L, He M, Chen J, Wang J J, Song Y L, Jiang L 2013 *Chem. Commun.* **49** 4516
- [68] Chen J, Liu J, He M, Li K Y, Cui D P, Zhang Q L, Zeng X P, Zhang Y F, Wang J J, Song Y L 2012 *Appl. Phys. Lett.* **101** 111603
- [69] Chen J, Dou R M, Cui D P, Zhang Q L, Zhang Y F, Xu F J, Zhou X, Wang J J, Song Y L, Jiang L 2013 *Appl. Mater. Interfaces* **5** 4026
- [70] Dou R M, Chen J, Zhang Y F, Wang X P, Cui D P, Song Y L, Jiang L, Wang J J 2014 *Appl. Mater. Interfaces* **6** 6998
- [71] Lu Z Y, Zhu W, Yu X Y, Zhang H C, Li Y J, Sun X M, Wang X W, Wang H, Wang J M, Luo J, Lei X D, Jiang L 2014 *Adv. Mater.* **26** 2683
- [72] Lu Z Y, Sun M, Xu T H, Li Y J, Xu W W, Chang Z, Ding Y, Sun X M, Jiang L 2015 *Adv. Mater.* **27** 2361
- [73] Lei Y J, Sun R, Zhang X C, Feng X J, Jiang L 2016 *Adv. Mater.* **28** 1477

- [74] Wu Y C, Liu K S, Su B, Jiang L 2014 *Adv. Mater.* **26** 1124
- [75] Wang S S, Wu Y C, Kan X N, Su B, Jiang L 2014 *Adv. Funct. Mater.* **24** 7007
- [76] Ding C M, Lü M L, Zhu Y, Jiang L, Liu H 2015 *Angew. Chem.* **127** 1466
- [77] Nakata K, Nishimoto S, Kubo A, Tryk D, Ochiai T, Murakami T, Fujishima A 2009 *Chem. Asian J.* **4** 984
- [78] Tian D L, Chen Q W, Nie F Q, Xu J J, Song Y L, Jiang L 2009 *Adv. Mater.* **21** 3744
- [79] Tian D L, Song Y L, Jiang L 2013 *Chem. Soc. Rev.* **42** 5184
- [80] Zhang P C, Chen L, Xu T L, Liu H L, Liu X L, Meng J X, Yang G, Jiang L, Wang S T 2013 *Adv. Mater.* **25** 3566
- [81] Yang G, Liu H L, Liu X L, Zhang P C, Huang C, Xu T L, Jiang L, Wang S T 2014 *Adv. Healthcare Mater.* **3** 332
- [82] Li Y Y, Lu Q H, Liu H L, Wang J F, Zhang P C, Liang H G, Jiang L, Wang S T 2015 *Adv. Mater.* **27** 6848
- [83] Liu X L, Chen L, Liu H L, Yang G, Zhang P C, Han D, Wang S T, Jiang L 2013 *NPG Asia Mater.* **5** e63
- [84] Mumm F, Helvoort A T J V, Sikorski P 2009 *Acs Nano* **3** 2647

SPECIAL TOPIC — Progress in Soft Matter Research

Bioinspired multiscale interfacial materials with superwettability*

Wang Peng-Wei¹⁾ Liu Ming-Jie^{1)†} Jiang Lei^{1)2)‡}

1) (*Key Laboratory of Bio-Inspired Smart Interfacial Science and Technology of Ministry of Education, School of Chemistry and Environment, Beihang University, Beijing 100191, China*)

2) (*Laboratory of Bioinspired Smart Interfacial Science, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

(Received 22 June 2016; revised manuscript received 1 August 2016)

Abstract

Nature always supplies inspirations to scientists and engineers. Many newfangled materials have been fabricated by learning from and mimicking nature. In daily life and industrial processes these bioinspired novel materials have been widely used. The special wettability of natural organisms is significant to their life and attractive to researchers, which inspires us to fabricate the functional interfacial materials with high performances. In the last decade, the bioinspired multiscale interfacial materials exhibiting superwettability have emerged as a new type of functional material. Superwetable materials offer great chances to solve numerous issues ranging from fundamental research to practical exploration, and from bionic philosophy to fabricating technology. Inspired by nature's example, researchers developed a series of scientific strategies of new materials and fabricating methods, technologies, and applications. Based on the requirement of developing advanced materials in the fields of energy, environment, healthcare and resource, superwetable materials possessing binary cooperative nanostructure have been widely investigated to solve scientific and technical problems. In this review, we firstly present the development history of bioinspired multiscale interfacial materials with superwettability and the theoretical basis of the wettability of solid surfaces. Secondly, the principles of superwetable functional surfaces in nature is revealed and the bionic designs of bioinspired materials are discussed in detail. Meanwhile the typical applications of superwetable materials such as self-cleaning, oil-water separation and green printing are introduced. Finally, the perspectives of the future development of bioinspired superwetable materials are proposed for further studying the superwetable materials.

Keywords: bioinspired, multiscale structure, wettability of solid surface, interfacial materials

PACS: 68.03.Cd, 68.08.-p, 68.35.Ct, 68.35.Np

DOI: 10.7498/aps.65.186801

* Project supported by the National Basic Research Program for of China (Grant No. 2013CB933000), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 21421061, 21431009, 21434009, 21504098), the Key Research Program of the Chinese Academy of Sciences (Grant No. KJZD-EW-M03), and the 111 Project, China (Grant No. B14009).

† Corresponding author. E-mail: liumj@buaa.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: jianglei@iccas.ac.cn