

# Progress on the Application of Slippery Liquid Infused Porous Surface

Yin He<sup>1</sup>, Yongmao Hu<sup>2</sup>, Shuhong Sun<sup>1</sup>, Yan Zhu<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan

<sup>2</sup>Dali University, Dali Yunnan

Email: zhuyankmust@foxmail.com

Received: Mar. 20<sup>th</sup>, 2018; accepted: Apr. 30<sup>th</sup>, 2018; published: May 7<sup>th</sup>, 2018

---

## Abstract

The slippery liquid infused porous surface, which mimics the structure of Nepenthes, has a wide range of application in the field of self-cleaning, anti-bacterial and drag reduction. In this paper, the recent research process on the application of slippery liquid infused porous surface and their development prospects are reviewed.

## Keywords

SLIPS, Micro and Nano Structures, Biomimetic

---

# 超滑表面的应用进展

贺胤<sup>1</sup>, 胡永茂<sup>2</sup>, 孙淑红<sup>1</sup>, 朱艳<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>昆明理工大学, 云南 昆明

<sup>2</sup>大理大学, 云南 大理

Email: zhuyankmust@foxmail.com

收稿日期: 2018年3月20日; 录用日期: 2018年4月30日; 发布日期: 2018年5月7日

---

## 摘要

模仿猪笼草结构的液体灌注型多孔超滑表面在自清洁、抗菌、减阻等领域具有广泛的应用前景,是目前仿生自清洁材料方向的研究热点。本文对近年来液体灌注型多孔超滑表面的应用领域进行了总结,并对液体灌注型多孔超滑表面的前景进行了展望。

---

\*通讯作者。

## 关键词

液体灌注型多孔超滑表面, 微纳结构, 仿生

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

猪笼草的捕虫笼内壁常年润湿, 停于其上的昆虫由于无法落脚而滑入其中成为养分。受此启发, 哈佛大学的 Joanna Aizenberg 及其组员在 2011 年首次提出了液体灌注型多孔超滑表面 (slippery liquid infused porous surface, SLIPS) (以下简称为超滑表面) 的概念[1]。超滑表面不同于超疏水表面的气-液层, 它通过在微纳结构中灌注各类润滑油获得光滑、连续且化学组分均匀的液-液表面[1]。该表面能够不被绝大多数液体所浸润, 呈现出了极小的接触角后退角。并且表面的油膜显著降低了基体表面的粗糙度, 减少了与外力接触时的摩擦力。同时, 该表面的动态液体自修复层使得其使用寿命大大提高。这些优点使其在诸多领域拥有广泛的应用前景。本文简要介绍了超滑表面的构造准则及制备方法, 详细综述了近年来超滑表面在各个领域的应用进展, 并对其未来的发展进行了展望。

## 2. 超滑表面的构造准则

Joanna Aizenberg [1]总结了构造超滑表面所需遵循的三大条件:

- 1) 润滑油必须渗透进基底中并被牢牢锁住;
- 2) 润滑油能浸润基底材料, 且与基底之间的化学亲和力必须大于测试液体与基底之间的化学亲和力;
- 3) 润滑油与测试液体互不相溶。

满足条件 1) 需要基底拥有微米或纳米级的粗糙结构, 提高比表面积以增加基底与润滑油之间的化学亲和力; 满足条件 2) 需要润滑油的稳定性高、表面能低, 一般选用全氟聚醚类润滑油, 因为其拥有挥发性低、化学惰性强, 受环境温度影响小等优点, 能够在基底表面形成稳定的润滑油层。

构造超滑表面的方法大致可以分为两类——自上至下型和自下至上型。第一类方法包括自组装[2]或喷涂、刷涂[3] [4]等, 在涂料中混入微米/纳米级  $\text{TiO}_2$ 、 $\text{SiO}_2$  等颗粒以构造微纳结构, 之后填充润滑油得到超滑表面, 这一类方法的优势是可以无视基底的形状、大小, 但存在着结合力较差的缺点; 第二类方法则是直接在基底表面通过刻蚀[5]、打印[6]等手段构造微结构, 并填充润滑油形成超滑表面, 这一类方法得到的超滑表面大多结构稳定性高, 耐用性强。

## 3. 超滑表面在自清洁领域的应用

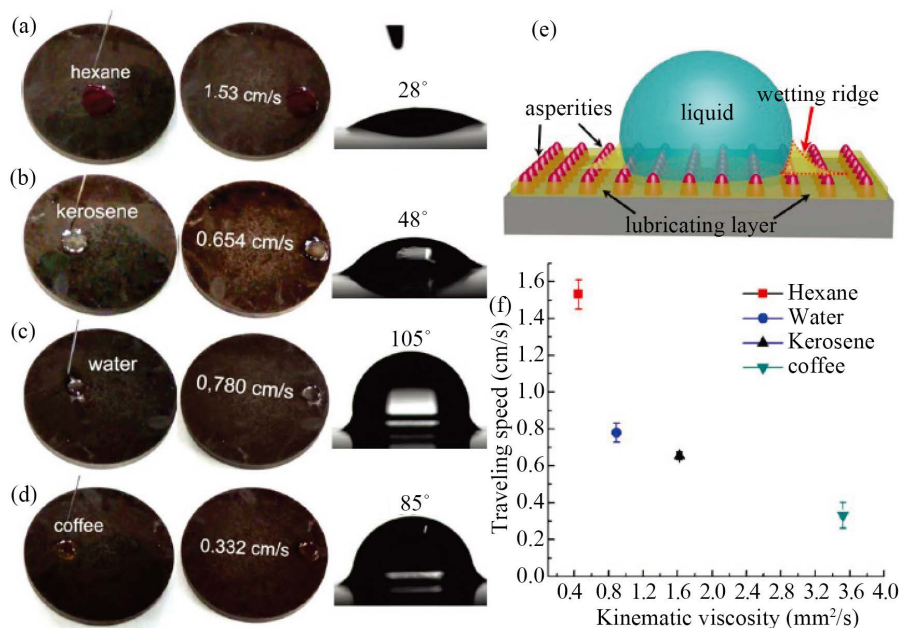
自清洁是超滑表面的主要功能, 不同于超疏水表面直接与水滴接触的固-气 Cassie-Baxter 状态, 超滑表面由流动的润滑油层作为接触液滴的界面, 被疏液体不与固体结构直接接触, 形成了特殊的液-液状态, 液滴漂浮在润滑油表面, 只需要一个很小的角度便能滑动滴落, 同时带落附着其上的灰尘沙砾, 能够有效防止表面污损粘连。另一方面, 由于润滑油不与绝大多数液体相溶, 故而可以排斥诸如咖啡、酱油、食用油、红酒等绝大多数污染物, 起到了隔绝液体污染物的作用。

传统的超疏水材料由于本身特性的限制, 面对低表面能液体时便束手无策, 无法进行有效的隔绝。而 Nan Wang 等[7]以钢为基底构造超滑表面, 实验证明, 其表面能够有效防止煤油、己烷及咖啡等低表面能液体的浸润, 同时还证明了不同液体在超滑表面的滑动速度与运动黏度系数成反比, 而与液体的表面能、自重或者接触角无关(如图 1)。Yang Wang 等[8]利用溶胶-凝胶法在纳米复合材料表面构造出粗糙结构。实验证明不管是氯化铜等可溶物还是灰尘等不溶于水的杂质, 都能在超滑表面被滚落的水滴带落。

工业/生活用水中常常含有钙镁离子, 长期使用下容易产生水垢堆积从而影响设备的导热, 严重时甚至引起生产事故。Charpentier 等[9]创造性地利用超滑表面来减少水垢的产生, 实验表明与普通的不锈钢相比, 灌注了离子液体(BMIm)的超滑表面, 碳酸钙水垢的沉积率减少了 18 倍。超滑表面防止水垢沉积的原因在于, 碳酸钙的生成需要一个固定成核点, 而超滑表面的流动性抑制了碳酸根离子与钙离子直接与基底的接触, 从而延缓了水垢的形成。

#### 4. 超滑表面在抑菌(微生物)领域的应用

传统的抑菌/防藻方法通过表面释放抗生素等抑菌剂或者在表面复合银离子实现抑菌作用, 但释放的抑菌剂浓度会随时间流逝而降低, 使得抑菌效果也逐步减弱; 而借助化学基团进行抑菌处理的表面则会因为基体表面被细菌分泌物黏附或者周边蛋白质含量过高而逐渐失效; 利用二氧化钛、硫化镉等半导体进行的抑菌反应则需要光线的照射, 且反应前后会出现损耗, 并且大部分对人体有一定的毒性。超滑表面则通过降低表面粗糙度, 减小摩擦力的方法让细菌或藻类无处附着, 减少了微生物的大规模繁殖。



**Figure 1.** Contact angles of 50 mL droplets on SLIPS. (a) Hexane ( $\gamma = 18.6 \text{ mNm}^{-1}$ ,  $m = 0.032 \text{ g}$ ), (b) Kerosene ( $\gamma = 24.5 \text{ mNm}^{-1}$ ,  $m = 0.041 \text{ g}$ ), (c) Water ( $\gamma = 72.0 \text{ mNm}^{-1}$ ,  $m = 0.050 \text{ g}$ ), (d) Coffee ( $\gamma = \sim 45.0 \text{ mNm}^{-1}$ ,  $m = 0.051 \text{ g}$ ). The droplets slide smoothly without wetting the surface, the sample tilt angle is  $5^\circ$ , (e) Schematic diagram of the SLIPS structure, (f) The relationship between kinematic viscosity and sliding speed at  $25^\circ\text{C}$  [7]

**图 1.** 50 mL 液滴在超滑表面的接触角。(a) 正己烷( $\gamma = 18.6 \text{ mNm}^{-1}$ ,  $m = 0.032 \text{ g}$ ), (b) 煤油( $\gamma = 24.5 \text{ mNm}^{-1}$ ,  $m = 0.041 \text{ g}$ ), (c) 水( $\gamma = 72.0 \text{ mNm}^{-1}$ ,  $m = 0.050 \text{ g}$ ), (d) 咖啡( $\gamma = \sim 45.0 \text{ mNm}^{-1}$ ,  $m = 0.051 \text{ g}$ )。样品倾斜角  $5^\circ$  时, 液滴能自由滑动且不浸润表面, (e) 超滑表面结构示意图, (f) 在  $25^\circ\text{C}$  时运动粘度与滑动速度的关系[7]

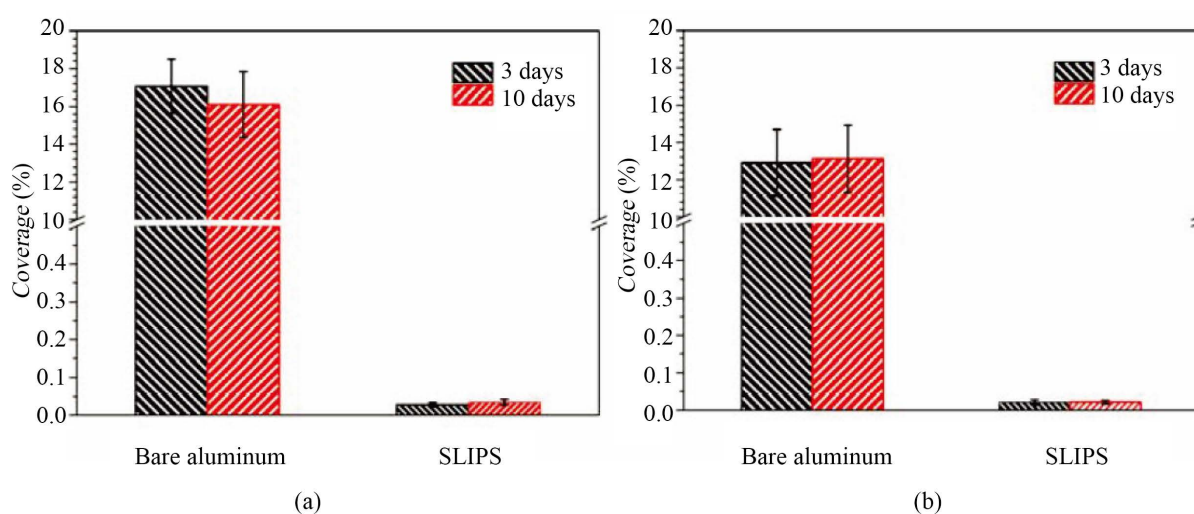
Epstein 及其团队[10]率先研究了超滑表面的抑菌特性。由于润滑油层的存在,超滑表面表现出了持续的动态特性,使得细菌微生物无法黏附其上,从而失去了大量繁殖形成菌落的可能,达到了抑菌效果。Peng Wang 等人[11]系统研究了微米结构、纳米结构、微纳复合结构对超滑效果的影响,证明了均匀排布、起伏平缓的微米级结构在铝表面能构建出最稳定的超滑表面,并分别研究了在动静态海水环境下超滑表面的抗藻能力,由于水流剪切力的存在,藻类便无法依附于光滑平整的铝片表面,从而达到了防生物淤积的目的(如图 2 所示)。

## 5. 超滑表面在防冰冻霜冻领域的应用

在自然环境中,水凝固成冰往往以一些微粒(烟尘、微生物、粉尘)作为晶核,而后围绕晶核生长出子晶直至各相连冰粒连接成一块完整的冰。具有荷叶效应的超疏水材料往往由微纳复合结构组成,这些粗糙结构能够降低冰粒的附着;但是,在高湿环境下,大量冰晶形成,这些粗糙结构反而容易引起晶核的堆积[12],从而影响防冰冻的效果。超滑表面由于其低表面能、低粗糙度及化学均相的特性,一方面能降低过冷水的成核温度,另一方面能够减少各类粉尘及微生物的附着,在本质上减少了冰核的形成。从而降低了冰在高湿度环境下生成的速率,提高了冰冻附着的难度,从防凝核和防附着两方面保证了抗冰霜的效果。

Yong Han Yeong 及其团队[12]利用激光打印法在铝片表面构造出粗糙结构,使用倒膜法在 PDMS 上制备超滑表面。分别研究了灌注不同含量及不同黏度的润滑油对超滑表面防冰冻效果的影响。实验表明,同在微米级的粗糙度下,润滑油含量越高,防结冰性能越好。与不做处理的 PDMS 薄膜相比,添加了 15 wt.% 润滑油的超滑表面只需约 22% 的力便能剥离冰块。相对的,润滑油黏度越高(1000 cps),防冰冻能力越强,使用寿命越长。

Rykaczewski [13]通过模仿南美丛林中的箭毒蛙,借鉴其双层表皮能够同时分泌毒液和黏液的原理,设计出了能够自动释放防冻液的超滑表面。涂层分为上下两层,上层为多孔超疏水薄膜,下层为灯芯状的灌注了丙二醇防冻液的尼龙膜。上层的超疏水薄膜起到了降低冰晶生成附着的作用,使黏附的水滴能够及时滑落;当表面出现液体堆积或者霜冻渗透表面孔隙时,下层结构自动分泌出储存的防冻液,使得冰冻得以融化消散。



**Figure 2.** Surface algae coverage after 3 days and 10 days of untreated aluminum plate and treated SLIPS aluminum plate soaked with culture liquid, (a) static environment, (b) dynamic environment [11]

**图 2.** 未处理铝板及超滑表面铝板浸泡培养液 3 天及 10 天后表面海藻覆盖率, (a) 静态环境, (b) 动态环境[11]

Philseok Kim 等[14]利用电化学沉积法在铝表面制备了超滑表面, 并对冰冻形成的原理进行了研究, 他们揭示了水蒸气在超滑表面冷凝形成液滴滑落所需的最小半径, 公式如下:

$$D_C = \left( \frac{24 \sin^3 \theta_A \gamma (\cos \theta_R - \cos \theta_A)}{\pi \rho (1 - \cos^2 \theta_A) (2 + \cos \theta_A) g \sin \alpha} \right)^2$$

$$\Delta_\theta = \theta_A - \theta_R$$

其中  $\theta_A$  表示液滴的前进角,  $\theta_R$  表示液滴的后退角,  $\gamma$  表示液滴的表面张力,  $\alpha$  表示液滴的滑动角,  $\Delta_\theta$  表示接触角滞后。由此可见接触角滞后越小, 液滴的滚动半径就越小。液滴在尚未结冰前就已经从超滑表面滑落, 如此便不会形成大面积起雾。而在已经结冰的情况下, 相较于普通表面, 超滑表面上融化的小液滴会直接滚落脱离, 不用等待蒸发(如图 3 所示)。

## 6. 超滑表面在医疗中的应用

导尿管作为不可缺少的医疗器具, 在临床治疗中被广泛使用。虽然导尿管经过严格的无菌消毒, 但是在导尿过程中仍然有极大的几率滋生细菌进而感染病人。将导尿管超滑处理, 将碘伏或抗菌剂与聚乙烯吡咯烷酮(PVP)结合制作超滑导尿管。实验表明, 超滑导尿管对金黄色葡萄球菌和大肠杆菌的抑菌率高达 95%以上, 结合抗菌剂的超滑导尿管更能在 3 个月的使用中保持较高的抑菌率, 且生物相容性好, 不会刺激黏膜, 没有明显的过敏反应。

超滑表面还能应用于血栓的治疗。当不溶性纤维蛋白、沉积的血小板、积聚的白细胞和红细胞在血管内的受损处或者愈合处堆积时便会形成血栓, 一般使用抗凝血药、抗血小板聚集药和溶血栓药进行治疗, 其中广泛使用的药剂肝素会带来术后出血、血小板减少、酯血症等一系列危害生命健康的并发症。Leslie 等[15]开创性的提出将超滑表面应用于血栓的治疗, 超滑表面能够避免血液与血管壁之间的直接接触, 进而避免不溶性纤维蛋白聚集产生血栓。但是文中所述方法构造的粗糙表面是以涂层的形式黏附于基底表面, 在长时间的使用过程中有脱落的风险, 一旦脱落超滑性能便会失去, 反而成为各类不溶物的堆积之处, 并且脱落的涂层参与血液循环会危害生命健康。Shuaishuai Yuan 等[16]通过聚合物固化技术构造出超滑表面, 在体外实验中, 润滑油层牢牢抵御了蛋白液的渗透, 血小板及不溶性纤维蛋白的附着率比对照组下降了 96% (如图 4 所示)。

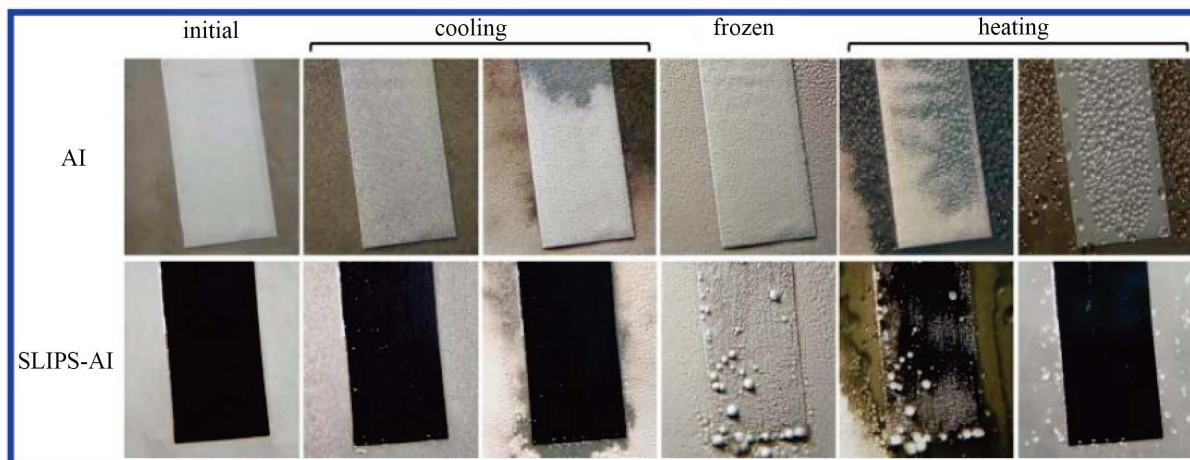
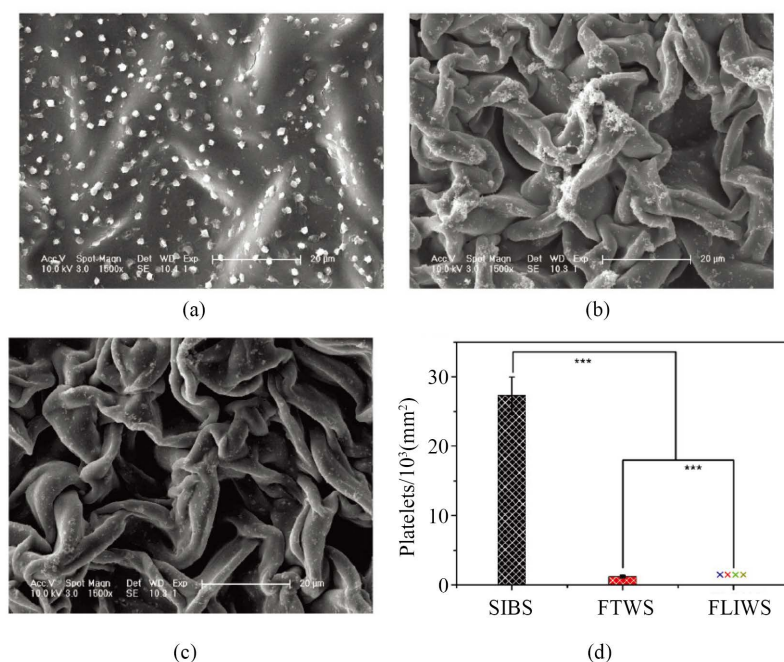


Figure 3. Simulates icing and deicing at 60% humidity and  $-10^{\circ}\text{C}$  [14]

图 3. 模拟冰形成和消除的过程 (60%湿度,  $-10^{\circ}\text{C}$ ) [14]



**Figure 4.** Environmental scanning electron micrographs (a) SIBS, (b) FTWS, (c) FLIWS after 30-minute PRP breeding, (d) Number of platelet attachments [16]

**图 4.** 环境扫描电镜图(a) SIBS, (b) FTWS, (c) 30 分钟 PRP 繁殖后的 FLIWS, (d) 血小板附着数[16]

## 7. 超滑表面在减少阻力领域的应用

超滑基底由于表面覆盖润滑油，其摩擦阻力非常小，这一特性可以被应用于轴承、各类输水输油管道、微流控芯片以及航运领域。Solomon 等提出将石油天然气管道超滑化，相较需要不断持续添加特定高分子聚合物进行减阻并且只能在湍流中方能运用的传统减阻手段，超滑表面不仅可以提供良好的减阻特性，还能减少实际应用中管道易发生的污染及堵塞的可能性。Solomon 等系统研究了超滑表面的减阻原理[17]：

$$(1-DR)^{-1} = \frac{\Delta P_0}{\Delta P} = 1 + \frac{4\delta}{R} \left( \frac{\mu_w}{\mu_0} - 1 \right) - \frac{2\delta^2}{R^2} \left( \frac{2\mu_w}{\mu_0} - 1 \right)$$

其中， $DR$  为阻力降低的百分比， $\Delta P_0$  为初始推动压力， $\Delta P$  为经超滑表面改造后的推动压力， $\delta$  为超滑表面浸润的润滑油厚度， $\mu_0$  为所需传输流体的黏度， $\mu_w$  为浸润润滑油的黏度， $R$  为管道半径。在润滑油层远小于管道半径的前提下，该式表明超滑表面的减阻抗效果和润滑油黏度与传输流体的黏度比值成正比，黏度比越大，减阻效果越好[12]。

## 8. 超滑表面在调节透光率领域的应用

光学器件被广泛应用于摄影器材、显微镜、望远镜等一系列生活、医学、军事领域。当一束光线通过透明介质时，完整的光线被分为三部分，一部分被介质反射，一部分被介质吸收，最后一部分则透过介质。在吸收光不变的情况下，尽可能的减少反射光，就能提高介质的透光率。对于单层增透膜来说，有以下最优公式[18]：

$$n_c = \left( n_a^2(1-f) + n_s^2 f \right)^{0.5}$$

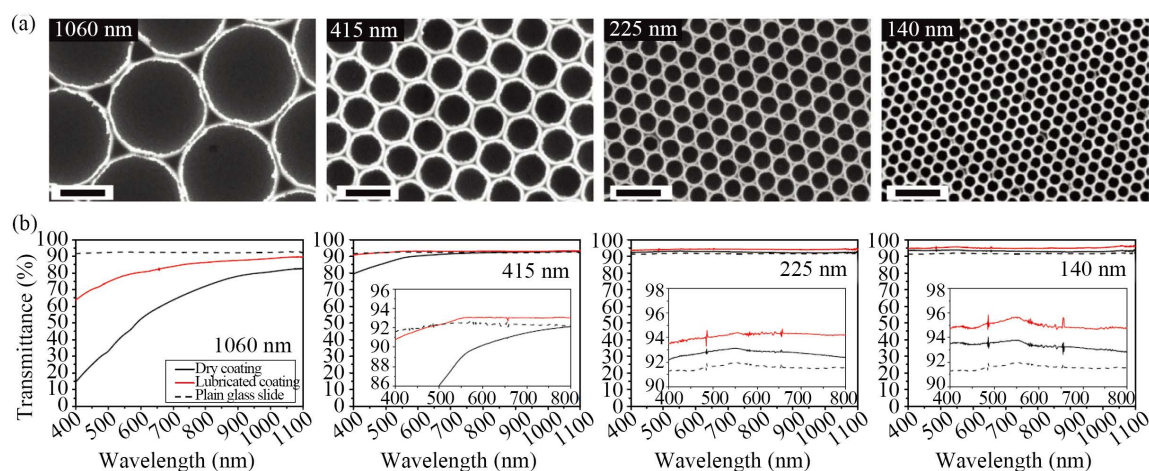
其中,  $n_c$  代表薄膜的折射率,  $n_a$  代表空气的折射率,  $n_s$  代表基底的折射率,  $f$  代表填充因子, 随薄膜形貌改变而改变。可以看出, 当增透膜两边介质不同时, 若想使透光率达到 100%, 则薄膜厚度必须为四分之一波长的奇数倍且同时满足薄膜的折射率为空气和基底折射率之积的平方根。

Nicolas Vogel 等[19]通过单层胶体模板回填二氧化硅颗粒构造多孔粗糙结构, 通过共价键连接二氧化硅、润滑油以及玻璃基底, 最终得到稳定的超滑表面。单层凝胶保证了表面的各向同性及光学稳定性, 通过控制纳米二氧化硅颗粒大小, 调控了薄膜的透光性, 紫外可见测试表明, 在颗粒大小为 415 纳米时, 薄膜在大部分可见光波段的透光都超过了普通玻璃。当降低颗粒大小至 225 纳米和 140 纳米时, 透光率在全可见光及红外波段都高于普通玻璃, 薄膜的增透效果显著(如图 5 所示)。

Seimei Shiratori 等[19]通过层层自组合法分别制备了仿蛾眼结构的多孔表面、仿荷叶效应的超疏水表面、仿猪笼草效应的超滑表面, 实验表明超疏水表面和超滑表面有着最高的折射率, 接近 1.23, 与普通玻璃 91% 左右的透光率相比, 超滑表面将透光率提高到了 97%, 并且伴随防雾防冰冻等特性。

伴随外界环境的改变而改变自身性状的材料目前仅限于在两种单一属性之间切换, 并且其中只有极少数材料可以做到连续不断的持续调节。Xi Xiao 及其团队[20]将多孔特氟龙(TEFLON)层和松紧 PDMS 层粘合构造出了具有形变能力的超滑表面, 在不同的外力或不同温度的作用下, 该超滑表面的松紧层会受激而发生改变, 从而控制孔洞的大小。在结构伸展时, 薄膜的透光率就下降, 同时失去超滑性能, 在结构放松时, 孔隙缩小, 薄膜透光率提高的同时获得超滑性能。

随着蛟龙号的下海, 深海潜水器受到外界的广泛关注。与普通的光学仪器不同, 在海洋湖泊中, 深潜器、潜水艇、水下摄影机等仪器将面临昏暗的环境及不断冲刷的水流的影响, 因此对各类玻璃器材有着更高的性能要求。Peng Wang 等人[5]通过碱腐蚀玻璃构造超滑表面, 通过控制腐蚀液浓度调控基底结构大小, 从而获得适合的水下透光率。实验表明, 改性后的玻璃在水下的透光率可以达到 98.9%, 并且自带的抑菌特性可以让其不受海水中的藻类侵袭。



**Figure 5.** Light transmittance and lyophobic properties of different colloidal template substrates. (a) The SEM image shows that the single-layer structure that can be constructed has a minimum of 140 nm (the colloid size is shown in the upper left corner). All scales are 500 nm. (b) Optical properties of a glass sheet covered with a monolayer film in the dry (black line) and lubricated (red line) states. After the film structure size is less than 415 nm, the light transmittance begins to increase. With the feature sizes changed to 225 nm and 140 nm monolayer structures, the light transmittance was enhanced over the entire visible spectrum (see inset) [19]

**图 5.** 不同胶体尺寸模板衬底的透光率和疏液性能。(a) SEM 图像表明所能构造的单层结构最小为 140 nm (胶体尺寸显示在左上角)。所有的比例尺都是 500 nm。(b) 在干燥(黑线)和润滑(红线)状态下用单层膜覆盖的玻璃片的光学特性。薄膜结构尺寸小于 415 nm 后透光率开始增强。随着特征尺寸变为 225 nm 和 140 nm 单层结构, 透光率在整个可见光谱下得到增强(见内插图) [19]

## 9. 超滑表面在其他领域的应用

超滑表面应用于传热领域。水蒸气在固体表面受冷液化通常被分为两大类，膜状冷凝和滴状冷凝，膜状冷凝的热传导系数通常只有滴状冷凝的几分之一甚至几十分之一。在生产中，冷凝塔等设备通常需要维持较高的热传导系数，因此，将液化过程控制在滴状冷凝十分必要，超滑表面可以使液滴迅速滑落从而减小冷凝液的体积，这些都有利于提高热传导系数和冷凝效率。Xiao 及其团队[21]通过气相沉积法在微纳复合结构的基底表面沉积三氯甲烷，形成疏水的单分子层。并且，高温下发生的相变导致表面形成了纳米级的高表面能团聚体。灌注润滑油后形成的超滑表面能够滑落极小的液滴，高表面能的团聚体为液滴冷凝提供了成核点，因此水蒸气冷凝成核后便快速滑动脱落，使得水蒸气能够再次快速冷凝，实验表明，与普通基底相比，超滑表面的滴状冷凝的热传导系数是其两倍。

Moyuan Cao 及其团队[21]开创性的将超滑表明应用于水下气泡收集，他们利用浸涂法在收集叉上制备出超滑表面，使得水下的气泡可以被收集叉轻松的捕获，并且在浮力的作用下沿着拟定的路线运动。

Manna 等[22]将不锈钢网表面超滑化应用于油水分离领域。利用层层自组合法将聚乙烯-4, 4-二氢唑酮(PVDMA)与聚乙烯亚胺(PEI)在不锈钢网的复杂拓扑结构上形成多孔结构，选择癸胺与表面的二氢唑酮反应，得到癸胺化多孔层，再灌注润滑油获得超滑特性。将不锈钢网倾斜后，水即可以从表面滑落，而油则会顺利透过网格，从而达到油水分离的目的。

由于超滑表面用液-液系统替代超疏水的气-液系统，所以表面粗糙度降低到分子层级。由于其特殊的界面润湿性能，超滑表面可以应用在自清洁、抑菌、热传递、防霜冻、油水分离及生物医学材料等领域。然而，现有的超滑表面构造都以超疏水的微纳复合结构为基础，尚未有实验来研究微米结构、纳米结构及微纳复合结构对超滑表面耐用性的影响。

## 10. 总结及展望

超滑表面虽然相较于同类超疏水产品有更高的稳定性，但是就实际应用来看，其仍旧存在不足：例如在润滑油的储存方面，不仅要考虑到其自然挥发，还要考虑到外物的接触也会带走润滑油。而且，现有各类制备方法亦存在或多或少的缺点，因此，如何能够做到环保、经济、简单地制备超滑表面是其投入工业化生产的另一大挑战。可以想见，当以上问题被解决后，超滑表面将被防污抗菌、减阻等领域所彻底接纳并可大量应用于玻璃幕墙、抗菌管道、轴承等方方面面。

## 基金项目

国家自然科学基金(No. 11764003)。

## 参考文献

- [1] Wong, T.S., Kang, S.H., Tang, S.K.Y., *et al.* (2011) Bioinspired Self-Repairing Slippery Surfaces with Pressure-Stable Omniphobicity. *Nature*, **477**, 443-447. <https://doi.org/10.1038/nature10447>
- [2] Manabe, K., Nishizawa, S., Kyung, K.H., *et al.* (2014) Optical Phenomena and Antifrosting Property on Biomimetics Slippery Fluid-Infused Antireflective Films via Layer-by-Layer Comparison with Superhydrophobic and Antireflective Films. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **6**, 13985-13993. <https://doi.org/10.1021/am503352x>
- [3] Ogihara, H., Xie, J., Okagaki, J., *et al.* (2012) Simple Method for Preparing Superhydrophobic Paper: Spray-Deposited Hydrophobic Silica Nanoparticle Coatings Exhibit High Water-Repellency and Transparency. *Langmuir*, **28**, 4605-4608. <https://doi.org/10.1021/la204492q>
- [4] Ge, D.T., Yang, L.L., Zhang, Y.F., *et al.* (2014) Spray Coating: Transparent and Superamphiphobic Surfaces from One Step Spray Coating of Stringed Silica Nanoparticle/Sol Solutions (Part. Part. Syst. Charact. 7/2014). *Particle & Particle Systems Characterization*, **31**, 811. <https://doi.org/10.1002/ppsc.201470029>
- [5] Wang, P., Zhang, D., Sun, S., *et al.* (2016) Fabrication of Slippery Lubricant-Infused Porous Surface with High Un-



- derwater Transparency for the Control of Marine Biofouling. *Applied Materials & Interfaces*, **9**, 972-982. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b09117>
- [6] Yong, H.Y., Wang, C., Wynne, K.J., *et al.* (2016) Oil-Infused Superhydrophobic Silicone Material for Low Ice Adhesion with Long Term Infusion Stability. *Applied Materials & Interfaces*, **8**, 32050-32059.
- [7] Wang, N., Xiong, D., Pan, S., *et al.* (2016) Fabrication of Superhydrophobic and Lyophobic Slippery Surface on Steel Substrate. *Applied Surface Science*, **387**, 1219-1224. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.07.012>
- [8] Wang, Y., Zhang, H., Liu, X., *et al.* (2016) Slippery Liquid-Infused Substrates: A Versatile Preparation, Unique Anti-Wetting and Drag-Reduction Effect on Water. *Journal of Materials Chemistry A*, **4**, 2524-2529. <https://doi.org/10.1039/C5TA09936F>
- [9] Gohar, R. and Rahnejat, H. (2002) Introduction to Tribology.
- [10] Epstein, A.K., Wong, T.S., Belisle, R.A., *et al.* (2012) Liquid-Infused Structured Surfaces with Exceptional Anti-Biofouling Performance. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **109**, Article ID: 13182.
- [11] Wang, P., Zhang, D. and Lu, Z. (2015) Slippery Liquid-Infused Porous Surface Bio-Inspired by Pitcher Plant for Marine Anti-Biofouling Application. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, **136**, 240-247. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfb.2015.09.019>
- [12] Jung, S., Dorrestijn, M., Raps, D., *et al.* (2011) Are Superhydrophobic Surfaces Best for Icephobicity? *Langmuir*, **27**, 3059-3066. <https://doi.org/10.1021/la104762g>
- [13] Sun, X., Dandle, G., Liu, S., *et al.* (2015) Bioinspired Stimuli Responsive and Antifreeze Secreting Anti Icing Coatings. *Advanced Materials Interfaces*, **2**, 37.
- [14] Kreder, M.J., Alvarenga, J., Kim, P., *et al.* (2016) Design of Anti-Icing Surfaces: Smooth, Textured or Slippery? *Nature*, **1**, Article ID: 15003. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2015.3>
- [15] Leslie, D.C., Waterhouse, A., Berthet, J.B., *et al.* (2014) A Bioinspired Omniphobic Surface Coating on Medical Devices Prevents Thrombosis and Biofouling. *Nature Biotechnology*, **32**, 1134-1140. <https://doi.org/10.1038/nbt.3020>
- [16] Yuan, S., Luan, S., Yan, S., *et al.* (2015) Facile Fabrication of Lubricant-Infused Wrinkling Surface for Preventing Thrombus Formation and Infection. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **7**, 19466-19473. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b05865>
- [17] Solomon, B.R., Khalil, K.S. and Varanasi, K.K. (2014) Drag Reduction using Lubricant-Impregnated Surfaces in Viscous Laminar Flow. *Langmuir the ACS Journal of Surfaces & Colloids*, **30**, 10970-10976.
- [18] Vogel, N., Belisle, R.A., Hatton, B., *et al.* (2013) Transparency and Damage Tolerance of Patternable omniphobic Lubricated Surfaces Based on Inverse Colloidal Monolayers. *Nature Communications*, **4**, Article ID: 2167.
- [19] Yao, X., Hu, Y., Grinthal, A., *et al.* (2013) Adaptive Fluid-Infused Porous Films with Tunable Transparency and Wettability. *Nature Materials*, **12**, 529-534. <https://doi.org/10.1038/nmat3598>
- [20] Xiao, R., Miljkovic, N., Enright, R., *et al.* (2013) Immersion Condensation on Oil-Infused Heterogeneous Surfaces for Enhanced Heat Transfer. *Scientific Reports*, **3**, Article No. 1988. <https://doi.org/10.1038/srep01988>
- [21] Yu, C., Zhu, X., Li, K., *et al.* (2017) Manipulating Bubbles in Aqueous Environment via a Lubricant infused Slippery Surface. *Advanced Functional Materials*, **2017**, Article ID: 1701605.
- [22] Manna, U. and Lynn, D.M. (2015) Fabrication of Liquid Infused Surfaces using Reactive Polymer Multilayers: Principles for Manipulating the Behaviors and Mobilities of Aqueous Fluids on Slippery Liquid Interfaces. *Advanced Materials*, **27**, 3007-3012. <https://doi.org/10.1002/adma.201500893>