

Progress of Surfaces with Stimuli-Responsive Wettability

Han Zhang¹, Danyuan Li², Yongmao Hu², Shuhong Sun¹, Yan Zhu^{1*}

¹Kunming University of Science and Technology, Kunming Yunnan

²Dali University, Dali Yunnan

Email: zhuyankmust@foxmail.com

Received: Mar. 23rd, 2018; accepted: May 7th, 2018; published: May 14th, 2018

Abstract

Stimuli-responsive wettability means that the surface wettability can vary with environmental stimuli such as temperature, solvent, electric field, pH or light. Due to the special properties, surfaces with stimuli-responsive wettability have great prospects in chemical engineering, medical treatment and agriculture. In this article, we summarize the research progress on surfaces with stimuli-responsive wettability.

Keywords

Stimuli-Responsive, Wettability, Smart Surface

外界刺激引发表面润湿性变化的研究进展

张 瀚¹, 李丹媛², 胡永茂², 孙淑红¹, 朱 艳^{1*}

¹昆明理工大学, 云南 昆明

²大理大学, 云南 大理

Email: zhuyankmust@foxmail.com

收稿日期: 2018年3月23日; 录用日期: 2018年5月7日; 发布日期: 2018年5月14日

摘 要

刺激响应润湿性是指通过在表面构建可根据环境刺激而产生形态结构改变、表面化学基团转换、表面孔洞填充情况变化的结构,使表面原有的润湿性发生改变,进而表现出刺激响应性的润湿变化。根据环境刺激的类型可以分为以下几类:温度响应、溶剂响应、电场响应、pH值响应和光响应刺激润湿性。刺激

*通讯作者。

响应性表面因其独特的性质，可在化工、医疗、农业等领域有极大的应用前景。本文对这些刺激响应表面的研究进展进行综述。

关键词

刺激响应，润湿性，智能表面

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

润湿性是固液接触面间的重要特性之一，其在日常生活、工业及农业等领域有着重要的科研及应用价值。随着目前科技的快速发展以及相关领域研究的逐渐深入，传统的单一润/抗湿性表面已无法满足实际应用的需求，因此相关领域对材料表面润湿性提出了新的要求，具有润湿可控性、亲/疏水切换性、润湿智能选择性等的表面成为未来需求的重点。

近年来，相关领域提出了智能表面(Smart Surface)概念，是指在外界环境的刺激下，材料表面几何微结构和表面化学组成均出现一定性质或形态响应性并进而影响其润湿性的表面，这样的表面具有智能可控的特征，因其独特的润湿响应性质，可在应用中根据实际需求，自由可控的进行亲水性/疏水性转变，在减少操作环节、降低工业消耗等方面都具有巨大的潜在价值。

表面润湿性主要由材料表面的微观几何结构和表面化学组成共同影响。目前对于刺激性润湿表面材料的设计及制备主要是通过物理吸附或通过共价键在材料表面组装单分子层或环境敏感性聚合物，然后通过改变外界环境来刺激高分子链的构象发生物理形态改变，从而使材料表面润湿性随外界刺激的变化而出现可逆的变化。

2. 固体表面润湿性的状态

1805年 T. Young 提出平坦表面上的固液模型，用接触角(图 1(a))来衡量材料的润湿性。通常定义接触角小于 65° 的表面为亲水性表面，接触角大于 65° 为疏水性表面。当液体在固体表面接触角大于 150° 时被认为是超疏水表面，而小于 5° 乃至接近 0° 时则被认为是超亲水性表面。但是 Young 的这种理想模型存在一定的缺陷，1936年 Wenzel 对 Young's 模型进行修改，认为固液接触时液体填充了接触面的凹槽(图 1(b))固体表面的微观粗糙度对材料的表面特性起增强作用，即随微观粗糙度增加材料表面的亲水性/疏水

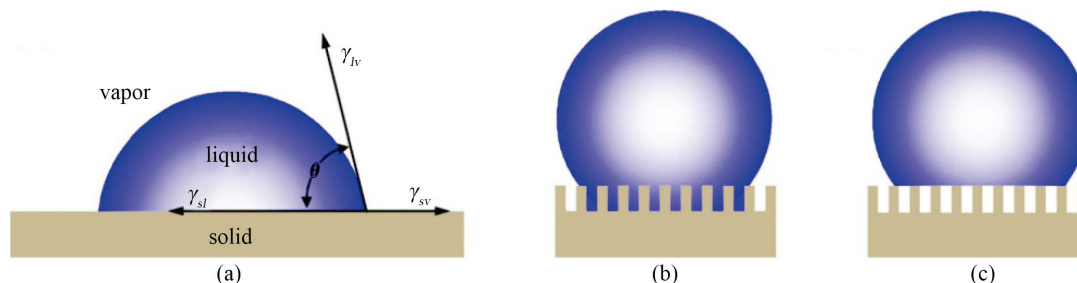


Figure 1. (a) Young's model; (b) Wenzel's model; (c) Cassie's model [1]

图 1. (a) Young's 模型; (b) Wenzel 模型; (c) Cassie-Baxter 模型[1]

性均会增强。1944年 Cassie 和 Baxter 提出了 Cassie-Baxter 模型(图 1(c)), 认为液体只在固体顶部的凸起部分接触, 非浸润性的空气填充在液体下方的空隙当中。

3. 外界刺激响应性润湿表面

3.1. 电刺激

A. Ahuja 等[2]在具有蜂窝结构的基底上, 通过使用纳米钉在液体和导电芯之间施加电压可得到具有对电刺激产生响应性变化的可控润湿性表面。通过不同的电压刺激, 材料表面的润湿性可由超疏水性至超亲水性进行动态转变[2]。实验装置需要几十伏到几百伏的电压和插入液滴中的电极(纳米钉)。在初始状态下, 这些表面表现出高达 150° 的接触角, 在施加电压时, 可观察到从超疏水状态到亲水状态的转变, 液体的接触角可以降低到 30° 以下(图 2)。

3.2. 光刺激

光刺激润湿性响应主要是依靠在基体表面构建的微结构或具有刺激响应性的化学基团, 在表面进行光照或暗处理, 使表面具有润湿性效果的基团进行键断裂或重组, 相应的空穴中的气体逸散或占据, 从而使基材在光刺激下达到润湿性的变化。光刺激润湿表面目前大体分两种, 以 TiO_2 为基底的表面和以 Si 为基底表面。

3.2.1. 以 TiO_2 为基底的表面

TiO_2 作为典型的光敏功能材料, 表现出光催化和光诱导的两亲性(亲水性和亲油性)。受光敏 TiO_2 的启发, 已经有许多不同的方法来制备响应性 TiO_2 表面, 其可在 UV 照射和暗室效果下可逆地表现出超疏水性和超亲水性。在紫外光照射下, 由于光生空穴与晶格氧反应形成表面氧空位, 与水分子在动力学上协作, 以致 TiO_2 薄膜表面的亲水性获得了巨大的提高。羟基吸附后, 表面转化为亚稳态, 吸附后的羟基在黑暗状态下逐渐被大气中的氧所取代。随后, 表面发展回到其原始的润湿状态[2] [3]。

最近 Caputo G.等[4]研究发现 TiO_2 薄膜也具有在紫外光刺激下的可调节疏油性, 在持续 10 h 的紫外光照射下, 纳米 TiO_2 薄膜由亲油性向疏油性转变。Wang D.等[5]通过新型阳极氧化或阳极氧化和激光的组合技术制备的具有表面微纳复合结构的功能性钛膜, 经全氟硅烷改性后, 其表面的 TiO_2/Ti 纳米结构对于多种液体呈现超疏油性。这些超疏油表面具有在不失去超疏油性的前提下, 同时实现润湿性可切换和油滴附着力可切换的能力[5]。Zhang M.等[6]通过复合液相沉积法制备的具有倒结构的超疏油 TiO_2/SWNT 涂层在紫外线照射下, 涂层的润湿性可以从抗湿性改变为浸润性。通过控制 UV 照射剂量, 表面张力差小于 5 mN/m 的液体可以在相同的涂层表面上以完全相反的润湿状态存在, 随着 UV 剂量的增加, 液体逐渐由抗湿性转变为浸润性[6] (图 3)。

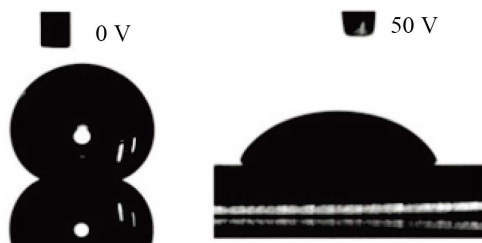


Figure 2. Droplet of octanol on a $2\text{-}\mu\text{m}$ -pitch nanonail substrate before and after the application of 50 V [2]

图 2. 间距为 $2 \mu\text{m}$ 的纳米钉基底上辛醇液滴在基底通电(50 V)前后的水接触角图[2]

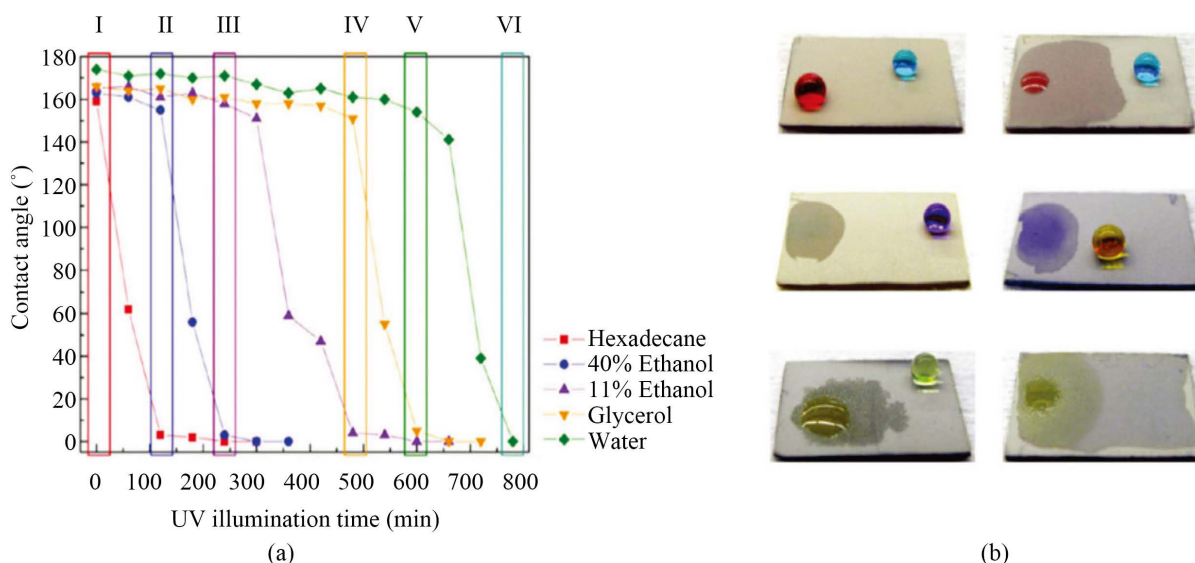


Figure 3. Wettability tuning of the TiO₂/SWNT coating using UV irradiation. (a) Contact angles for various liquids, including hexadecane, 40% ethanol, 11% ethanol, glycerol, and water as a function of UV irradiation time. Windows I-VI correspond to the surface states in which a liquid pair can be distinguished by complete converse wetting behavior on the coating surface. (b) Wetting behavior of liquid pairs on the coating with surface wetting states corresponding to windows I-VI in (A). I: Superphobic to both hexadecane (colored with Oil Red O) and 40% ethanol (dyed with methylene blue). II: Superphilic to hexadecane while superphobic to 40% ethanol. III: Superphilic to 40% ethanol while superphobic to 11% ethanol (dyed with methyl violet). IV: Superphilic to 11% ethanol while superphobic to glycerol (dyed with metanil yellow). V: Superphilic to glycerol while superphobic to water (methylene blue and metanil yellow were dissolved together in water to get a light green color). VI: Superphilic to both glycerol and water [6]

图 3. 紫外光照射下的 TiO₂/SWNT 涂层的润湿性变化。(a) 各种液体(包括十六烷、40%的乙醇、11%的乙醇、甘油和水)的接触角 θ 与 UV 光照时间的关系。(b) 对应于(a)中矩形框 I-VI 中的液体润湿行为。I: 对十六烷(红色)和 40% 的乙醇(亚甲基蓝染色)两者均呈超疏水性; II: 对十六烷呈超亲水态, 而对 40% 的乙醇呈超疏水态; III: 对 40% 的乙醇呈超亲水态, 而对 11% 的乙醇(甲基紫染色)呈超疏水态; IV: 对 11% 乙醇呈超亲水态, 同时对甘油呈超疏水态(用间胺黄染色); V: 对甘油呈超亲水态, 同时对水呈疏水态(亚甲基蓝和间胺黄一起溶于水得浅绿色); VI: 对甘油和水均呈超亲水态[6]

3.2.2. 以 Si 为基底的表面

Kim TI 等[7]研究了经化学蚀刻方法制造的具有超疏油性和超疏水性的硅表面, 通过氟化自组装单层分子修饰后, 可以获得具有对紫外光敏感响应性的润湿表面, 通过紫外光照, 可以由超疏水性转变为亲水性。由于暴露在紫外光下, 表面的自组装单分子膜的末端官能团被破坏, 暴露出表面氧离子, 导致润湿性从超疏水性转变为亲水性[7] (图 4)。

Lei J 等[8]以 SiO₂ 或蛋白石为模板, 将具有高折射率的材料填充在 SiO₂ 或蛋白石粒子间空隙中, 经煅烧或化学腐蚀方法除去原始的 SiO₂ 晶粒, 可得到具有规则气孔排列的反蛋白石结构(Inverse Opal) (图 5)。经此种方法制得的反蛋白石偶氮单层薄膜, 其润湿性可由 UV 照射时间进行调控[8]。在 UV 照射下, 表面水的接触角呈 121.8° 左右, 后经自然光照射, 水的接触角复原为 140.8° 左右(图 6)。

3.3. pH 刺激

孙伟等[9]在基材表面通过层层自组装(LBL)方式构建具有一定粗糙度的微纳复合结构的 SiO₂ 薄膜, 经多步官能团转化法在薄膜表面引入酰氯基团, 再将构建好的甲基丙烯酸叔丁酯(tBMA)-甲基丙烯酸羟乙酯(HEMA)-甲基丙烯酸-2-(二异丙基氨基)乙酯(DPAEMA)的三段嵌合物中的 PAEMA 与酰氯基团反应得到“V”型接枝链(图 7)。该表面可由 pH 值精确控制, 接触角随 PH 值增大呈现先增后减现象(图 8)。

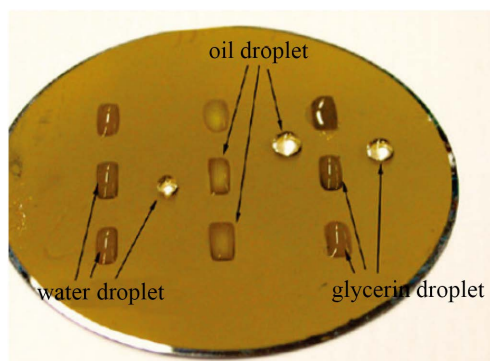


Figure 4. Image of super-repellent surface (4 in.wafer) etched for 80 min. The nine rectangular patches were exposed to deep UV through a SUS mask [7]

图 4. 经 80 min 刻蚀处理后的 Si 表面(4 英寸)上的水、油、甘油液滴, 在 SUS 形掩盖 UV 照射后的润湿性效果, 长方形液滴为暴露在 UV 下的部分[7]

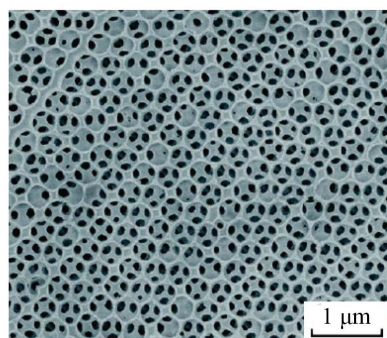


Figure 5. The micro structure of Inverse Opal [8]

图 5. 反蛋白石的微观结构[8]

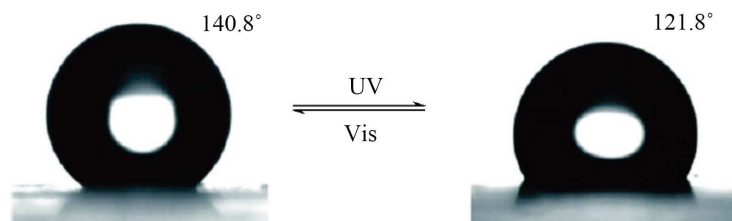


Figure 6. Contact angle of the irradiation with UV light and natural light [8]

图 6. 经 UV 照射与自然光照射下的接触角[8]

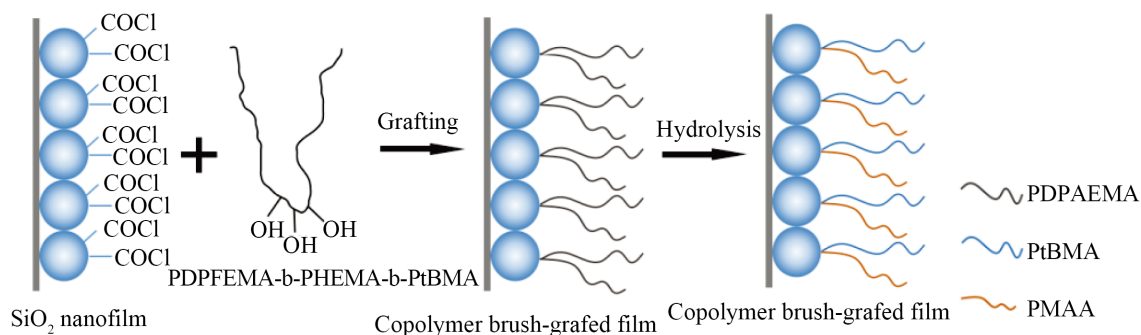


Figure 7. Graft chain construction of "V" type [9]

图 7. "V" 型接枝链构建[9]

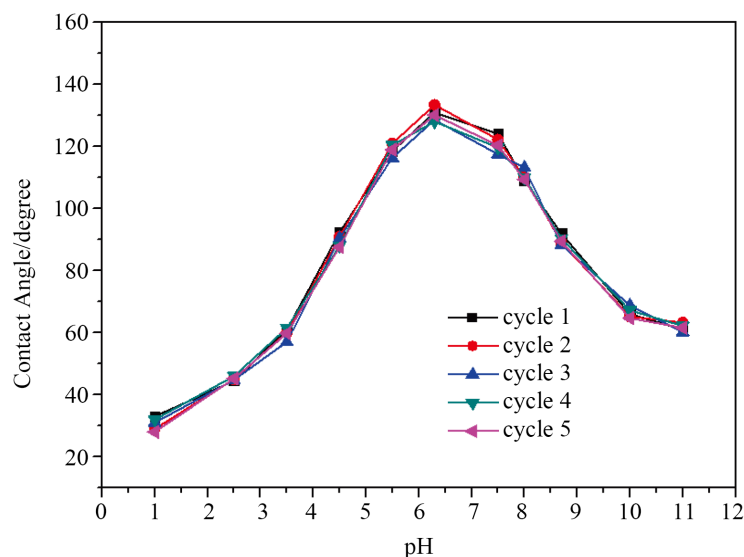


Figure 8. Change in contact angle with pH [9]

图 8. 接触角随 pH 值的变化[9]

3.4. 热刺激

3.4.1. 聚异丙基烯酰胺

聚异丙基烯酰胺(PNIPAAm)具有独特的热响应性, 通过温度的改变, 高/低于临界溶解温度(LCST)导致其分子内氢键与分子间氢键发生可逆转换(图 9), 从而使材料呈现亲疏水性的润湿性变化。由此, Lei J.等[8], 通过表面引发原子转移自由基聚合方法, 将 PNIPAAm 接枝在具有一定表面粗糙度的硅基底上, 制得了具有热响应润湿性变化的表面, 可在 20°C 范围内呈现亲疏水性的可逆变化。通过在粗糙的硅基底表面构建的该薄膜层可实现接触角由 0°到 150°的低温超亲水到高温超疏水的可逆变化(图 10)。

3.4.2. 聚己内脂

Lei J.等[8], 通过将聚己内脂接枝在具有一定粗糙度的基底表面上, 通过改变温度, 在低温下疏水链节暴露在最表层而呈现疏水性, 在高温下, 亲水酯基链节暴露在最表层而呈现亲水性(图 11)。由于表面微结构的促进作用, 此表面可呈现低温超疏水到高温超亲水的可逆润湿性变化(图 12)。

3.5. 离子交换

近来, Yang J.等[10]发现带电有机薄膜的离子抗衡交换可实现可逆润湿性转化。通过逐层组装沉积方法在纹理化铝基材上构建具有离子抗衡交换机制的薄膜, 制得具有可逆切换的润湿性智能表面。表面疏油性强烈依赖于沉积循环的次数[10]。通过多层聚电解质中的抗衡离子的迅速交换来控制表面组成, 从而获得可控制的润湿性。通过 PFO 和 DYS 阴离子之间的连续离子交换, (PDDA/PSS)_{1.5} 多层膜的润湿性可以快速切换为多周期的超疏油性和超亲油性, 具有完全的可逆性(图 13)。

3.6. 磁场诱导

磁场诱导下的润湿性转变因其不需要电、化学、光等条件的限制特性, 成为进来研究的热点。目前具有代表性的研究成果是 Grigoryev A.等[11]通过外部磁场的控制, 将通过模板辅助电沉积法制备的顶部具有微米大小半球形帽且具有高纵横比的 Ni 棒阵列的倾斜角从 0°增加到 23°而得到由超疏水状态到润湿态刺激响应表面[11] (图 14)。这些磁性微钉的二维随机阵列可以产生具有一定机械强度的微米表面, 可

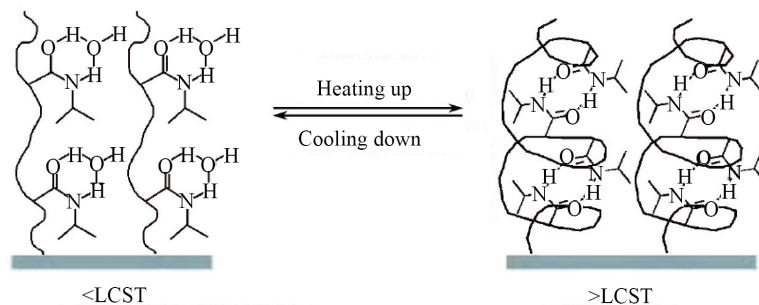


Figure 9. Internal hydrogen bond changes of the Lower Critical Solution Temperature of PNIPAAm [8]

图 9. PNIPAAm 的临界溶解温度的内部氢键变化[8]

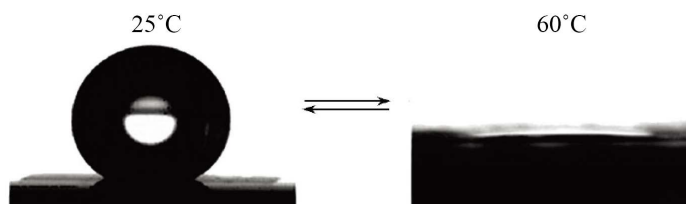


Figure 10. Change of contact angle of water under changing temperature [8]

图 10. 温度改变下的水的接触角变化[8]

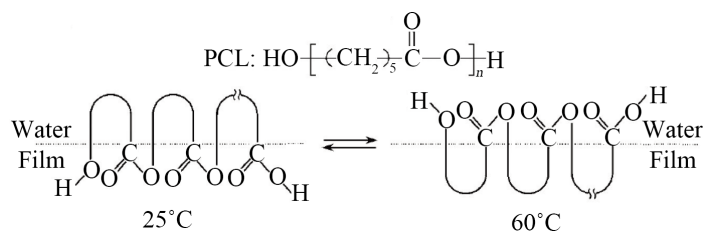


Figure 11. Schematic diagram of polycaprolactone at different temperatures [8]

图 11. 不同温度下的聚己内脂的链节示意图[8]

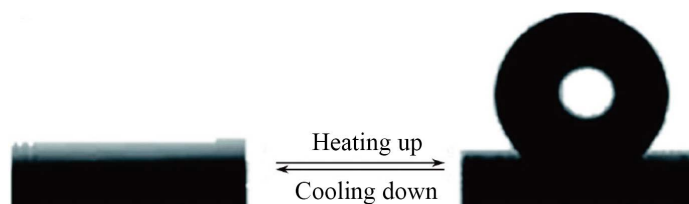


Figure 12. Change in contact angle of water at different temperatures [8]

图 12. 不同温度下水的接触角变化[8]

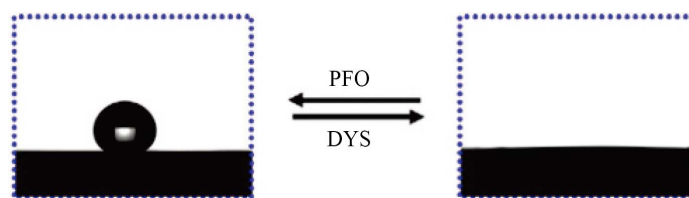


Figure 13. Hexadecane droplets on the (PDDA/PSS)_{1.5} multilayer coordinated with PFO and DYS anions, respectively [10]

图 13. 分别与 PFO 和 DYS 阴离子配位的多层(PDDA/PSS)_{1.5} 上的十六烷滴[10]

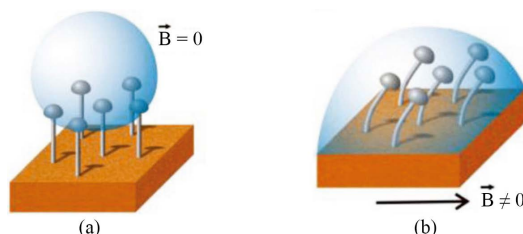


Figure 14. Magnetically induced nonwetting-to-wetting transition [11]

图 14. 经磁场作用下 Ni 纳米钉弯曲, 由抗湿性转变为润湿性[11]

提供呈现 Cassie-Baxter 状态且对多种液体具有支撑作用的结构。然而, 这些随机分配的磁性微钉不能承受磁场对顶部结构的作用力, 因此, 具有重构性的 Ni 微钉经磁场作用(对顶端的吸引)变为弯曲态, 使局部几何角度改变而表现出由抗湿向润湿性的转变。

3.7. 气体等离子化刺激

Zhu X.等[12]通过将铜片表面微结构化, 经过空气等离子体轰击, 表面生成-COOH、-CO 和其它相关官能团, 以此来提高润湿性, 从而得到亲油表面; 再经 1H, 1H, 2H, 2H-全氟癸硫醇浸泡得到疏油性的表面。这样通过空气等离子体和表面氟化的交替处理可实现超疏油和超亲油状态之间的润湿性转变[12](图 15), 同时油粘附性可以从滑动超疏油性变为粘性超疏油性(图 16)。只需 1.25 min 即可实现全程润湿性转变, 5 min 实现全程粘附转变。此外, 所产生的具有粘性的超疏油表面可作为“机械手”将小油滴从超疏油表面转移到亲油表面, 此铜基智能表面具有可迅速进行油润湿性/粘附切换, 在智能装置中具有很高的潜在应用价值。

3.8. 表面形态诱导的智能表面

表面的几何构型对材料的润湿性有很大的影响, 由此, 可通过改变表面的几何形貌来改变材料的润湿性[13]。

3.8.1. Si 表面

最近 Liu Y.等[14]研究发现可通过控制硅表面的结构来控制其表面的疏油性。目前其团队研究了基于金属溶液辅助的蚀刻工艺, 在 Si(111)表面上构建重入式几何结构。蚀刻时间、蚀刻溶液浓度和其他实验条件等, 均会对材料凹型结构产生显著影响, 从而影响 Si 表面的润湿性。通过调整微结构的表面几何形状, 可实现疏油性到超疏油性的可调润湿性转变[14]。这项研究工作有助于对表面疏油行为的设计提供所需的基础依据。同时, 亦可通过调整氧等离子体的处理时间, 来控制材料的表面结构, 进而调整分层微结构聚合物表面的润湿性[15]。

3.8.2. 聚酯纺织物

Choi W.等[16]将具有凹凸结构的聚酯纺织物在含氟癸基聚倍半硅氧烷(POSS)的氟橡胶溶液中浸泡后可得到具有超疏油性的表面, 通过简单的机械形变, 即可得到由超疏油向超亲油的可逆化转变且具有重复变化性[16]。

3.8.3. 气凝胶

气凝胶是一种具备低密度、低导热率、低介电常数、高比表面积等独特性能的重要制造材料。最近, Aulin C.等[17]通过真空冷冻干燥羧甲基纤维素纳米纤维的水分散体, 制备了纳米纤化纤维素的多孔气

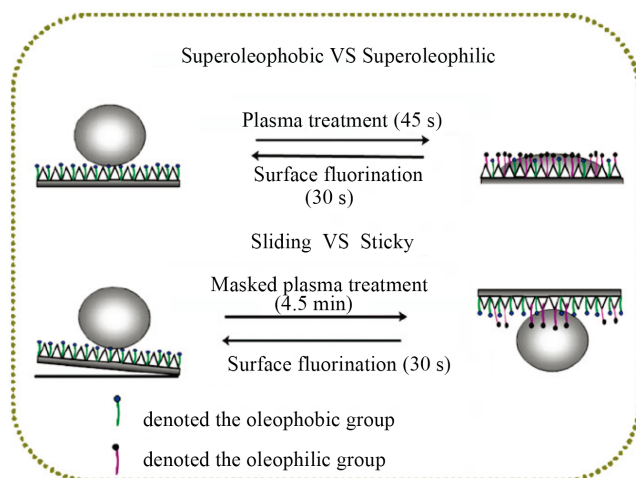


Figure 15. (a) The influence of plasma processing time on the oleophobicity of the surface with hexadecane; (b) rapidly switchable oil wettability of the structured Ag surface with hexadecane can be achieved by the alternation of plasma treatment and surface fluorination [12]

图 15. (a) 随铜表面等离子处理时间不同而变化的十六烷液滴接触角; (b) 通过氟化与等离子交替处理的 Ag 表面上十六烷液滴的润湿效果[12]

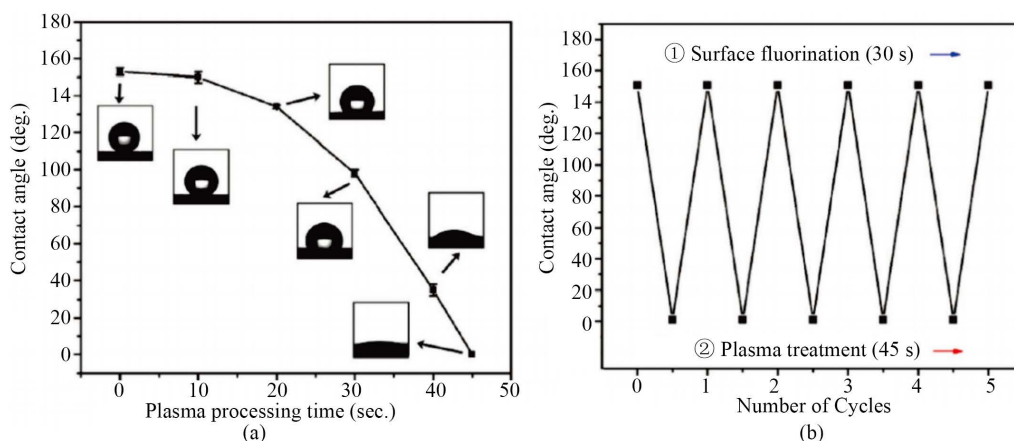


Figure 16. Schematic illustration showing the method for achieving switchable wettability and adhesion transition to oil droplets [12]

图 16. 获得油滴可切换润湿性和附着性转变的方法的示意图[12]

凝胶。用氟化硅烷改性后，由于其表面的粗糙结构，气凝的重新构型及氟化涂层的低表面能协同效应，气凝胶表面对低表面张力液体如蓖麻油和十六烷表现出疏油性。此外，通过对由冷冻干燥制备的气凝胶表面结构的调节和纳米纤维素分散液浓度的调整，实现了材料表面的超润湿和超抗湿之间的润湿性可控变化[17]。

4. 结论与展望

目前通过外界环境刺激来使材料表面润湿性发生变化主要可分为如下两种类型：

1) 通过外界环境刺激使表面微观结构发生形态改变，如伸直态、弯曲态的转变，使材料表面具有润湿性效果的微结构发生破坏/复原；或者通过外界环境刺激使表面具有润湿效果的基团发生改变，如亲水

基的断裂与重组、基团的链旋转, 在外界不同的刺激作用下, 发生相应的基团丢失/生成、隐匿/出现, 进而使材料表面发生相应的润湿性变化。

2) 两者兼而有之、共同作用。改变微结构形态同时构建新的具有润湿性效果的基团, 由此可构建单一刺激润湿响应或多种刺激润湿响应的表面。

具有润湿响应性的智能材料由于其独特的性能和应用前景而引起越来越多的关注。目前已制得多种响应形式的智能表面材料, 各种响应表面的响应类型、响应敏感性、润湿变化也在逐步提高, 但随着应用领域的扩展, 对润湿响应表面的要求也越来越复杂化, 单一的响应性已不能满足实际工作环境的要求, 实际的要求更趋向于多元化响应, 且要求具有良好的稳定性及往复操作的可靠性, 未来这将是研究方向的重点。

基金项目

国家自然科学基金(No. 11764003)。

参考文献

- [1] Liu, K.S., Tian, Y. and Jiang, L. (2013) Bio-Inspired Superoleophobic and Smart Materials Design, Fabrication, and Application. *Progress in Materials Science*, **58**, 503-564. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2012.11.001>
- [2] Ahuja, A., Taylor, J.A., Lifton, V., Sidorenko, A.A., Salamon, T.R., Lobaton, E.J., *et al.* (2008) Nanonails: A Simple Geometrical Approach to Electrically Tunable Superlyophobic Surfaces. *Langmuir*, **24**, 9-14. <https://doi.org/10.1021/la702327z>
- [3] Caputo, G., Cingolani, R., Cozzoli, P.D. and Athanassiou, A. (2009) Wettability Conversion of Colloidal TiO₂ Nanocrystal Thin Films with UV-Switchable Hydrophilicity. *Physical Chemistry Chemical Physics*, **11**, 3692-700. <https://doi.org/10.1039/b823331d>
- [4] Caputo, G., Nobile, C., Kipp, T., Blasi, L., Grillo, V., Carlino, E., *et al.* (2008) Reversible Wettability Changes in Colloidal TiO₂ Nanorodthinfilm Coatings under Selective UV Laser Irradiation. *Journal of Physical Chemistry C*, **112**, 701-714. <https://doi.org/10.1021/jp0777061>
- [5] Wang, D.A., Wang, X.L. and Liu, X.J.E. (2010) Engineering a Titanium Surface with Controllable Oleophobicity and Switchable Oil Adhesion. *Journal of Physical Chemistry C*, **114**, 9938-9944. <https://doi.org/10.1021/jp1023185>
- [6] Zhang, M., Zhang, T. and Cui, T.H. (2011) Wettability Conversion from Superoleophobic to Superhydrophilic on Titania/Single-Walled Carbon Nanotube Composite Coatings. *Langmuir*, **27**, 9295-9301. <https://doi.org/10.1021/la200405b>
- [7] Kim, T.I., Tahk, D. and Lee, H.H. (2009) Wettability-Controllable Super Water and Moderately Oil-Repellent Surface Fabricated by Wetchemical Etching. *Langmuir*, **25**, 6576-6579. <https://doi.org/10.1021/la900106s>
- [8] Du, C.G., Xia, F. and Jiang, L. (2010) Advances in Bio-Inspired Smart Surfaces with Special Wettability. *Chemical Journal of Chinese Universities*, **31**, 421-431.
- [9] 孙伟. 基于纳米粒子的界面组装制备刺激响应性纳米薄膜[D]: [博士学位论文]. 上海: 复旦大学, 2014.
- [10] Yang, J., Zhang, Z.Z., Men, X.H., Xu, X.H., Zhu, X.T., Zhou, X.Y., *et al.* (2012) Rapid and Reversible Switching between Superoleophobicity and Superoleophilicity in Response to Counterion Exchange. *Journal of Colloid and Interface Science*, **366**, 191-195. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2011.09.076>
- [11] Grigoryev, A., Tokarev, I., Kornev, K.G., Luzinov, I. and Minko, S. (2012) Superomniphobic Magnetic Microtextures with Remote Wetting Control. *Journal of American Chemical Society*, **134**, 12916-12919. <https://doi.org/10.1021/ja305348n>
- [12] Zhu, X.T., Zhang, Z.Z., Xu, X.H., Men, X.H., Yang, J., Zhou, X.Y., *et al.* (2011) Rapid Control of Switchable Oil Wettability and Adhesion on the Copper Substrate. *Langmuir*, **27**, 14508-14513. <https://doi.org/10.1021/la202753m>
- [13] Chhatre, S.S., Choi, W., Tuteja, A., Park, K.C., Mabry, J.M., McKinley, G.H., *et al.* (2010) Scale Dependence of Omniphobic Mesh Surfaces. *Langmuir*, **26**, 4027-4035. <https://doi.org/10.1021/la903489r>
- [14] Liu, Y., Xiu, Y.H., Hess, D.W. and Wong, C.P. (2010) Silicon Surface Structure-Controlled Oleophobicity. *Langmuir*, **26**, 8908-8913. <https://doi.org/10.1021/la904686c>
- [15] Gnanappa, A.K., Papageorgiou, D.P., Gogolides, E., Tserapi, A., Papathanasiou, A.G. and Boudouvis, A.G. (2012) Hierarchical, Plasma Nanotextured, Robust Superamphiphobic Polymeric Surfaces Structurally Stabilized through a

Wetting-Drying Cycle. *Plasma Process and Polymers*, **9**, 304-315. <https://doi.org/10.1002/ppap.201100124>

- [16] Choi, W., Tuteja, A., Chhatre, S., Mabry, J.M., Cohen, R.E. and McKinley, G.H. (2009) Fabrics with Tunable Oleophobicity. *Advanced Materials*, **21**, 2190-2195. <https://doi.org/10.1002/adma.200802502>
- [17] Aulin, C., Netrval, J., Wagberg, L. and Lindstrom, T. (2010) Aerogels from Nanofibrillated Cellulose with Tunable Oleophobicity. *Soft Matter*, **6**, 3298-3305. <https://doi.org/10.1039/c001939a>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2160-7613, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ms@hanspub.org