

DOI: 10.12086/oe.2022.210326

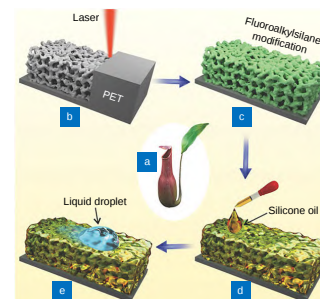
# 仿生超滑表面的飞秒激光微纳制造及应用

杨青<sup>1,2</sup>, 成扬<sup>1,2</sup>, 方政<sup>1,2</sup>, 张嘉亮<sup>2,3</sup>,  
侯洵<sup>2,3</sup>, 陈烽<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>西安交通大学机械工程学院, 陕西 西安 710049;

<sup>2</sup>西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049;

<sup>3</sup>西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西省信息光子技术重点实验室,  
陕西 西安 710049



**摘要:** 仿猪笼草的超滑表面由于可以抵抗多种液体的粘附, 具有优异的稳定性和自修复性, 受到越来越广泛的关注。而飞秒激光由于其对加工材料的普适性、高精度, 以及高可控性, 成为仿生超滑表面制备的有力手段。本文以仿猪笼草的超滑表面为背景, 以飞秒激光微加工技术为手段。从超滑表面的飞秒激光微纳制备和应用两个方面, 概述了超滑表面的微纳制造和应用。针对不同材料, 通过对飞秒激光进行调控, 实现了在聚合物、硬脆透明材料, 以及金属上的超滑表面制备。制备的超滑表面可应用于液滴、气泡操控、生物抗凝、防污和防腐等领域。最后总结超滑表面所面临的挑战。

**关键词:** 超滑表面; 飞秒激光; 微纳加工; 血液相容性; 超疏液

**中图分类号:** TN249

**文献标志码:** A

杨青, 成扬, 方政, 等. 仿生超滑表面的飞秒激光微纳制造及应用 [J]. 光电工程, 2022, 49(1): 210326

Yang Q, Cheng Y, Fang Z, et al. The preparation and applications of bio-inspired slippery surface by femtosecond laser micro-nano manufacturing[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(1): 210326

## The preparation and applications of bio-inspired slippery surface by femtosecond laser micro-nano manufacturing

Yang Qing<sup>1,2</sup>, Cheng Yang<sup>1,2</sup>, Fang Zheng<sup>1,2</sup>, Zhang Jialiang<sup>2,3</sup>, Hou Xun<sup>2,3</sup>, Chen Feng<sup>2,3\*</sup>

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;

<sup>2</sup>State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China;

<sup>3</sup>Shaanxi Key Laboratory of Photonics Technology for Information, School of Electronics & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

**Abstract:** The slippery surface inspired by Nepenthes has received research and industry attentions due to its excellent liquid repellency, stability and self-repair property. The femtosecond laser is a powerful method to prepare

收稿日期: 2021-10-09; 收到修改稿日期: 2021-11-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (62175195, 61875158); 国家重点研发计划项目 (2017YFB1104700); 中央高校基本科研业务费资助项目

通信作者: 陈烽, chenfung@mail.xjtu.edu.cn。

版权所有©2022 中国科学院光电技术研究所

the slippery surfaces due to its universality in processing materials with high precision, and high controllability. In this paper, taking the lyophobicity of slippery surfaces as a background, using femtosecond laser micro/nano-manufacturing technology as a method, the development of slippery surfaces by femtosecond laser was summarized from two perspectives, including the femtosecond laser micro/nano-manufacturing and applications of slippery surfaces. By controlling the processing parameters of femtosecond laser, the slippery surfaces could be fabricated on various materials, such as polymers, hard brittle transparent material, and metals. The prepared slippery surface can be applied in the fields of droplet and bubble manipulation, biological anticoagulation, antifouling, and anti-corrosion. Finally, the challenges of slippery surfaces were summarized.

**Keywords:** slippery surface; femtosecond laser; micro-nano manufacture; hemocompatibility; lyophobicity

## 1 引言

猪笼草是一种热带食虫性植物(图 1(a),(b)), 其笼口处阵列排布的孔隙结构使得润滑液可以定向充满, 形成一层润滑层, 所以笼口边缘的润滑性极强, 使得周围的昆虫很容易从笼口处滑落到笼内部被消化液消化吸收<sup>[1-2]</sup>。受到猪笼草超滑特性的启发, 2011 年, Wong 等人首次报道仿猪笼草的液体灌注多孔超滑表面, 通过在材料表面构建一层多孔网状结构, 注入润

滑液, 润滑液会存储在多孔网状结构内部, 并在表面形成一层润滑层, 最终通过润滑层来提升材料表面的滑动性, 简称超滑表面(图 1(c))<sup>[1]</sup>。超滑表面的制备有三个基本规则: 1) 润滑液可以通过毛细力渗透进基底并保持稳定, 一般是通过构建微纳尺度纹理结构来提升润滑液的亲和力; 2) 相比于被排斥液滴, 润滑液更容易润湿材料表面从而牢牢粘附在微纳尺度纹理结构内部形成润滑层; 3) 被排斥液体与润滑液不混溶。

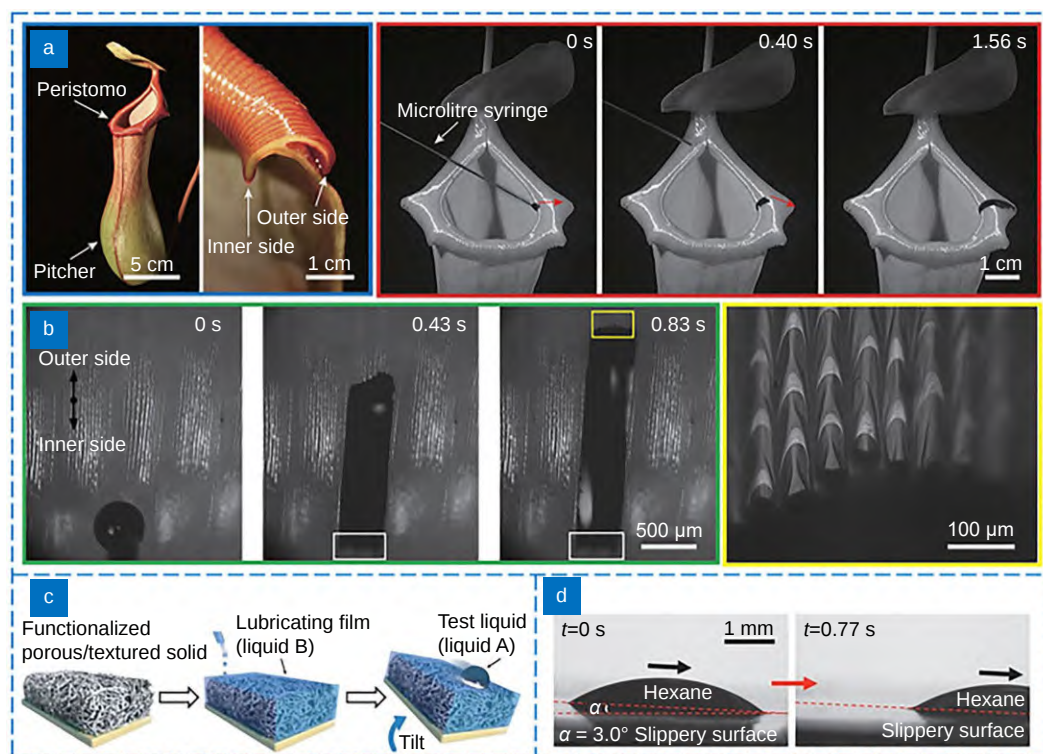


图 1 猪笼草的表面结构及其超滑性能。

(a) 猪笼草的光学照片<sup>[2]</sup>; (b) 猪笼草的电镜图<sup>[2]</sup>; (c) 仿猪笼草超滑表面的制备流程<sup>[1]</sup>;  
(d) 正十六烷在超滑表面的滑动性<sup>[1]</sup>

Fig. 1 The surface structure and slippery property of Nepenthes.

(a) The optical photos of Nepenthes<sup>[2]</sup>; (b) The scanning electron microscopy images of the Nepenthes<sup>[2]</sup>; (c) The preparation process of slippery surface inspired by Nepenthes<sup>[2]</sup>; (d) The mobility of hexane on slippery surface<sup>[1]</sup>

因此超滑表面的制备往往是通过在材料表面构筑微纳尺度纹理结构, 然后进行低表面能处理以及润滑液注入, 最终在材料表面形成一层稳定的润滑层来实现<sup>[1]</sup>。由于被排斥液体和材料表面是稳定的液-液接触, 所以相比于仿荷叶的疏水表面和仿跳虫的疏液表面, 仿猪笼草的超滑表面具有更强的疏液性和稳定性(图 1(d))。又因为润滑液的流动性, 在材料受到外力损伤后, 润滑液可以自行流向受损部位, 恢复表面的润滑层及超滑特性, 所以超滑表面还具有优异的自修复性<sup>[1-11]</sup>。仿猪笼草超滑表面优异的疏液性, 稳定性和自修复性, 使其在液滴操控、生物抗凝、防污自清洁涂层、防腐等领域具有广阔的应用前景, 越来越多的科研工作者开始了对超滑表面的研究<sup>[3-22]</sup>。

超滑表面的制备方法有很多, 大都是通过微纳尺度纹理结构的制备、低表面能处理和润滑液灌注实现的, 而超滑表面制备的核心则是用于储存润滑液的微纳尺度纹理结构的制备。现有制备微纳尺度纹理结构的方法有很多, 如光刻、水热法、阳极氧化、颗粒涂层等<sup>[20-27]</sup>。虽然制备微纳结构的方法有很多, 但是都存在各种各样的问题, 如光刻法成本高, 工艺复杂, 对材料表面和形状要求高; 水热法在制备过程中需要高温高压环境, 所以制备条件要求高, 而且重复性差; 阳极氧化法只能针对特定的材料, 大多数都为铝合金, 所以材料的普适性差; 涂层法工艺简单, 但是由于涂层和基材属于两种不同物质, 所以稳定性差, 在受到外力冲击后容易脱落而引起失效。飞秒激光作为一种新型微纳加工技术, 广泛应用于各个领域<sup>[28-29]</sup>。相较于传统的微纳加工技术, 飞秒激光具有超短脉冲宽度和超高峰值功率, 所以具有热效应小、加工精度高、可控性强等优点<sup>[30-31]</sup>。因此飞秒激光微加工技术成为制备超滑表面微纳结构的有力手段。由于是在材料本体上进行减材制造, 所以稳定性高, 不存在涂层脱落的问题。综上所述, 飞秒激光微加工技术在仿生超滑表面的制备上显示出独特的优越性, 接下来我们将从飞秒激光的特点出发, 从超滑表面的制备和应用两个方面进行总结。

## 2 飞秒激光的特点

自 1981 年第一台飞秒激光器诞生以来, 人类进入了超快时代。飞秒激光器是一种以千兆分之一秒左右的超短时间放光的“超短脉冲光”产生装置。产生的飞秒激光脉冲持续时间仅为飞秒量级( $10^{-15}$  s), 峰

值功率最高可超过全世界发电厂发电功率的总和。飞秒激光超高的峰值功率和超短的脉冲持续时间使其可以加工绝大多数材料(包括金刚石), 而且加工精度高, 是一种非接触的加工方式<sup>[30-35]</sup>。因此, 飞秒激光成为微纳加工领域的有力工具, 广泛应用于航空航天、生物医疗等领域。飞秒激光在微纳加工领域有以下优点:

### 1) 普适性强

飞秒激光由于脉冲持续时间极短, 仅为飞秒量级( $10^{-15}$  s), 所以峰值功率很大( $\geq 10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>), 远超过绝大多数材料的损伤阈值, 可以加工绝大多数固体材料, 包括金属、半导体、玻璃、高分子聚合物等, 甚至可应用于生物样本<sup>[28-29, 36-38]</sup>。Yong 等人在玻璃表面制备微纳结构用于实现水下超疏聚合物(图 2(a))<sup>[36]</sup>; Vorobyev 等人在铝表面通过制备纳米周期性条纹结构获得彩色金属铝(图 2(b))<sup>[37]</sup>; 而在医疗上, 飞秒激光已经广泛应用于临床上的近视矫正。飞秒激光的普适性使其应用范围更加广阔。

### 2) 加工精度高

飞秒激光脉冲的持续时间为飞秒量级, 而热传递过程中的能量传递大都发生在皮秒量级( $10^{-12}$  s), 远超过脉冲持续时间。因此飞秒激光在与物质相互作用的过程中, 能量的热传递近似可以忽略, 极大地抑制了飞秒激光在材料内部的热影响区域, 所以飞秒激光微加工可近似为一种“冷加工”技术, 具有极高的加工精度<sup>[34, 39]</sup>。图 3(a) 展示了纳秒激光(3.3 ns)和飞秒激光(200 fs)在铝箔上打孔精度的差异<sup>[40]</sup>。纳秒激光打孔周围有很多不规则的熔融重铸层, 边缘结构粗糙。而飞秒激光加工出的孔周围仅有一些“灰尘”, 而且无任何熔融重铸层。证实了飞秒激光的“冷”加工和高精度。图 3(b) 为 Kawatal 和孙洪波等人利用飞秒激光双光子聚合技术制备了长 10  $\mu$ m、宽 7  $\mu$ m 的纳米牛, 其空间分辨率可达亚衍射极限( $\geq 120$  nm)<sup>[41]</sup>。图 3(c) 是洪明辉等人利用正交偏振双脉冲飞秒激光束的耦合, 以及高重频下多个飞秒激光脉冲产生的孵化效应, 成功的在空气环境下实现了硅片表面 10 nm 特征尺寸的直写<sup>[42]</sup>。这些结果都证实了飞秒激光在高精度微加工领域的优越性。

### 3) 可控性强

飞秒激光是一种可实现真三维的微加工技术, 可以实现各种复杂微细结构的三维微加工。飞秒激光的重复频率、脉宽时间、单脉冲能量、功率、偏振态, 以及光场分布等都会影响材料的形貌<sup>[43-45]</sup>。搭

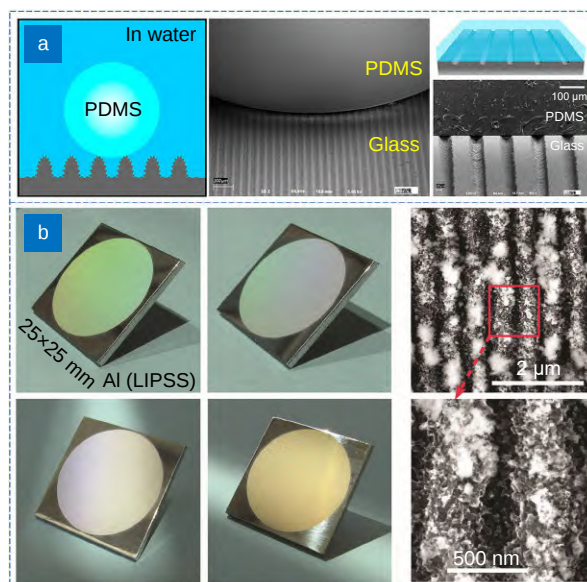


图2 飞秒激光在各种材料表面的微纳加工。

(a) 飞秒激光在玻璃表面制备微纳粗糙结构用于水下超疏聚合物<sup>[36]</sup>;(b) 飞秒激光在铝表面制备纳米周期性条纹获得彩色铝<sup>[37]</sup>

Fig. 2 The micro-nano manufacturing of femtosecond laser on all kinds of materials.

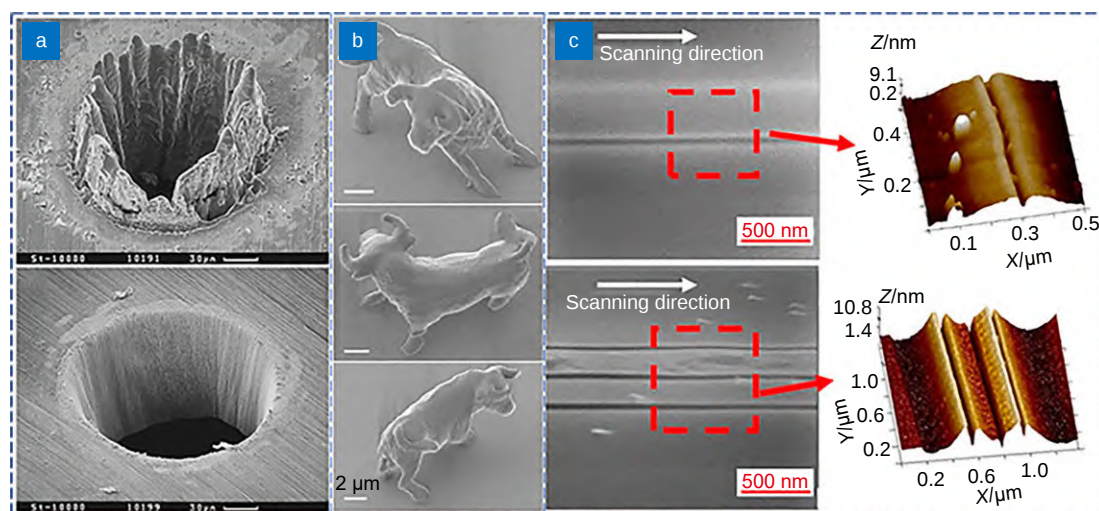
(a) The micro-nano rough structure on glass fabricated by femtosecond laser to realize underwater superpolymphobicity<sup>[36]</sup>;(b) The color aluminum due to femtosecond laser-induced nano-periodic structure<sup>[37]</sup>

图3 飞秒激光的高精度微纳加工。

(a) 纳秒激光和飞秒激光的打孔对比<sup>[40]</sup>; (b) 飞秒激光双光子聚合技术制备的纳米牛<sup>[41]</sup>;(c) 硅片表面的 10 nm 特征尺寸飞秒激光直写<sup>[42]</sup>

Fig. 3 The high precision machining of femtosecond laser.

(a) The comparison of holes fabricated by nanosecond laser and femtosecond laser<sup>[40]</sup>; (b) The “micro-bull” created by femtosecond laser two-photon absorption<sup>[41]</sup>; (c) The femtosecond laser directly writes the 10 nm characteristic size on the silicon wafer surface<sup>[42]</sup>

配使用精密加工平台, 可以实现任意形貌的精准微纳加工<sup>[46-47]</sup>。如图4所示, Deng 等人在有机玻璃上通过飞秒激光倒模压印的方法制备仿生曲面复眼(图4(a))<sup>[38]</sup>; Bian 等人利用飞秒激光和湿法刻蚀在聚

二甲基硅氧烷 (PDMS) 内部制备出三维金属微螺旋结构(图4(b))<sup>[48]</sup>; 以及 Zou 等人利用飞秒激光等离子体刻蚀技术在石墨烯表面制备纳米光栅(图4(c))<sup>[49]</sup>。所有三维微结构的制备都无需掩膜, 显示出飞秒激光

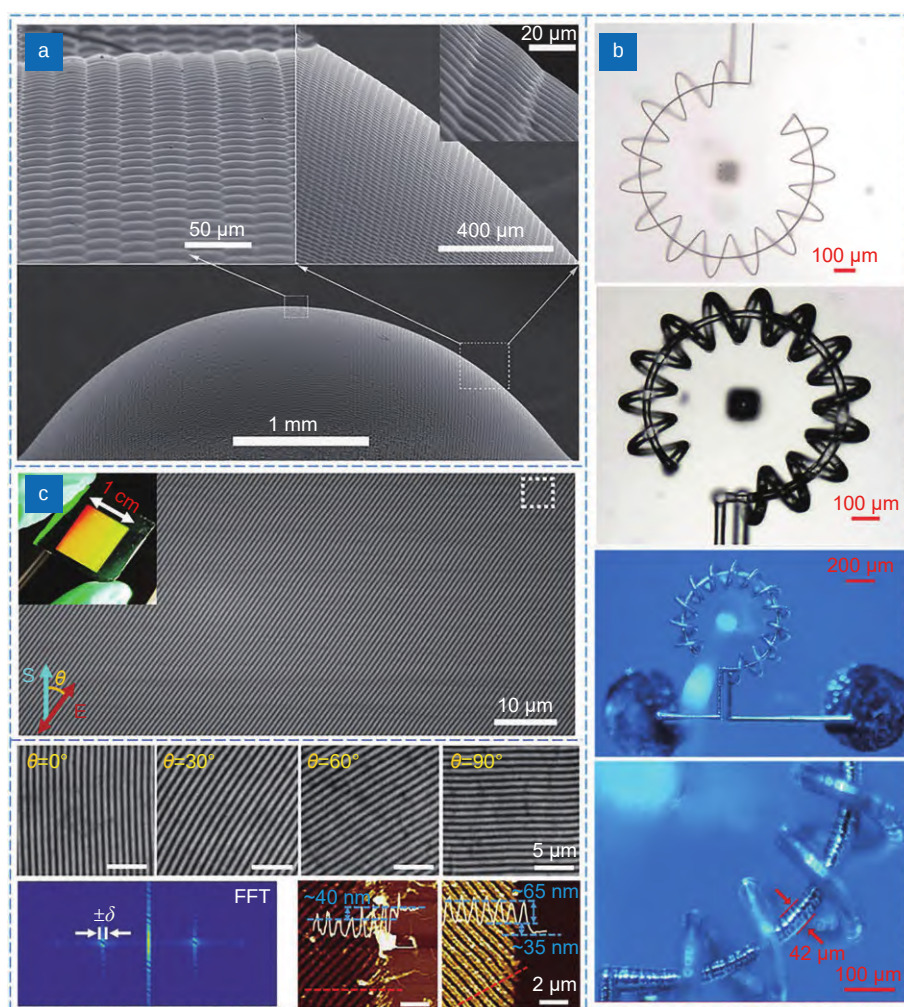


图4 飞秒激光在微纳加工领域的高可控性。

飞秒激光制备的 (a) 仿生复眼<sup>[38]</sup>, (b) 三维微螺旋结构<sup>[48]</sup>, 和 (c) 纳米光栅<sup>[49]</sup>

Fig. 4 The high controllability of femtosecond laser on micro-nano manufacturing field.

(a) The bio-inspired compound eyes<sup>[38]</sup>, (b) the coil<sup>[48]</sup>, and (c) the nanograting structure fabricated by femtosecond laser<sup>[49]</sup>

超强的可控性。

### 3 超滑表面的制备

不同的材料具有不同的属性和对应的加工方法, 按照超滑表面的基底材料属性大致可分为聚合物、硬脆透明材料以及金属材料。由于不同材料属性上的巨大差异, 针对不同形貌的飞秒激光微纳加工原理也不尽相同。因此首先从材料出发, 针对不同属性的材料, 总结超滑表面的飞秒激光微纳制备。

#### 3.1 聚合物

聚合物具有低密度、高强度和高模量, 以及优良的绝缘性, 被广泛应用在日常的生产生活中。2017年Yong等人率先利用飞秒激光直写技术在聚酰胺

(PA6)上制备出超滑表面(图5(a))<sup>[50]</sup>。激光扫描过后的PA6表面分布着厚度约为10 μm、直径1 μm的三维网状多孔结构。在激光烧蚀过程中, 多光子的非线性吸收使得表面瞬时产生高温高压的等离子体, 与此同时产生的大量气体会不断溢出, 熔融物在气体溢出时重新固化, 生成三维网状多孔结构。经过后续的氟化处理以及硅油灌注, 形成的超滑表面不仅对低表面张力的十六烷(表面张力=27.5 mN/m)具有疏液性, 还对各种混合液如咖啡牛奶、蛋黄等具有良好的疏液特性。该方法不仅可应用于PA6, 还同样可应用于PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯、俗称亚克力)、PA(聚酰胺, 俗称尼龙)等高分子材料<sup>[51]</sup>。所制备的超滑表面具有良好的稳定性(图5(b))。经过弯折、摩擦磨损后, 超滑表面仍能保持良好的疏液性。此外, 即使超滑表面受

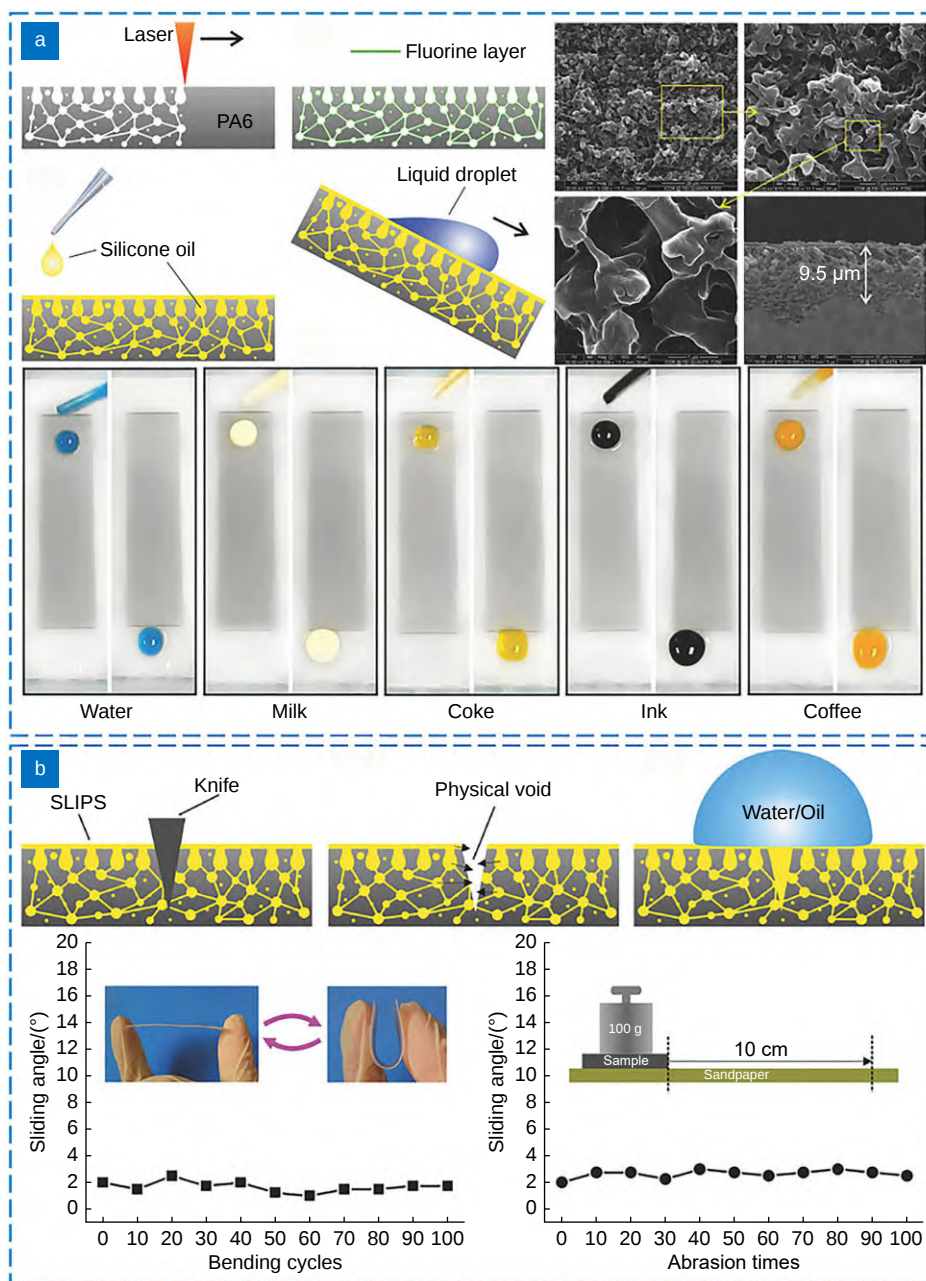


图5 飞秒激光在PA6表面上的超滑表面制备及超滑表面的稳定性测试<sup>[50]</sup>。

(a) 超滑表面在PA6表面的制备流程、表面结构以及疏液性测试; (b) 超滑表面的稳定性测试

Fig. 5 The femtosecond laser fabricates the slippery surface on PA6 and the stability testing<sup>[50]</sup>.

(a) The fabrication process, surface structure, and the lyophobicity testing of slippery surface on PA6;

(b) The stability measurement of slippery surface on PA6

到小刀划刻产生裂纹, 由于润滑液的流动性, 也能自发流向损伤部位, 超滑表面显示出优异的自修复性。

后来 Liang 等人进一步通过飞秒激光选区扫描在 PET(聚乙烯对苯二甲酸酯, 俗称涤纶树脂) 基底上制备出图案化的超滑表面 (图 6(a))<sup>[52]</sup>。通过激光的选区粗糙化、选区低表面能处理与润滑液注入, 最终实现了菱形、圆形、三角形等图案的阵列化超滑表面。加

工区域由于与硅油的粘附性更强, 所以形成超滑表面, 用于抵抗液滴在加工区域的粘附。因此当液滴涂覆在材料表面时, 液滴会自发从超滑区域滑落流向未加工区域, 使得血液、牛奶等液滴仅会停留在未加工区域内, 实现微液滴的阵列化, 该方法为医学、生物检测等领域提供新思路。Lv 等人在超滑表面的基础上, 进一步将猪笼草的超滑表面和水稻叶的各向异性相结

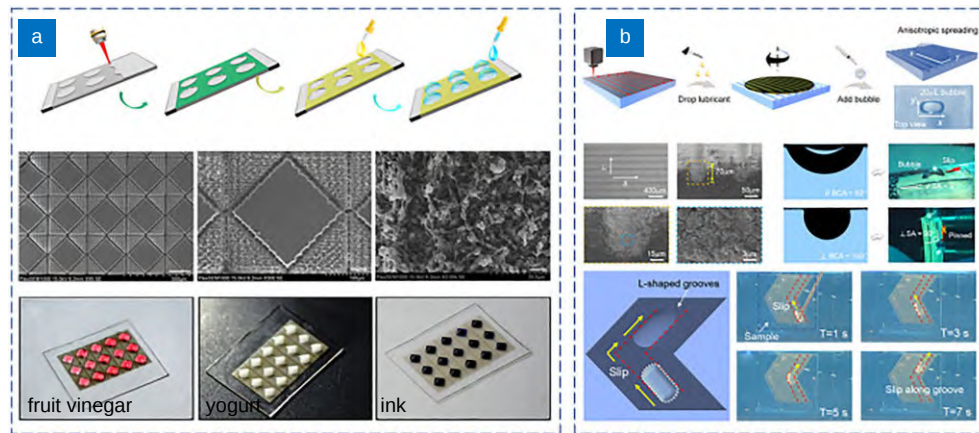


图6 图案化的超滑表面以及各向异性超滑表面。

- (a) 图案化超滑表面的制备流程、激光烧蚀后的表面电镜图, 以及液滴在图案化超滑表面的阵列排布<sup>[52]</sup>;  
 (b) 各向异性超滑表面的制备过程以及水下气泡在其表面的定向输运<sup>[53]</sup>

Fig. 6 The patterned slippery surface and anisotropic slippery surface.

- (a) The fabrication process of patterned slippery surface, the scanning electron microscopy images of surface ablated by laser, and the array arrangement of droplets on patterned slippery surface<sup>[52]</sup>; (b) The fabrication process of patterned slippery surface and the directional movement of bubble on patterned slippery surface<sup>[53]</sup>

合, 通过两步法在 PDMS 表面制备水下各向异性超滑表面 (图 6(b))<sup>[53]</sup>。利用透镜聚焦飞秒激光在 PDMS 表面制备周期性微沟槽结构, 沟槽表面随机分布大量纳米颗粒溅射物使得普通的疏水 PDMS 变为超疏水表面, 随后涂覆硅油形成各向异性超滑表面。由于各向异性结构的存在, 气泡可以在水下呈现静态和动态的各向异性滑动。各向异性超滑表面为水下气泡的收集运输提供新的解决方案。

### 3.2 硬脆透明材料

Deng 等人利用湿法刻蚀辅助的飞秒激光微加工技术在玻璃表面制备了具有相互作用腔体的透明仿生超滑表面 (图 7)<sup>[54]</sup>。飞秒激光的选择性刻蚀在玻璃表面产生改性区, 氢氟酸在改性区的腐蚀速率相比激光未改性区会加快很多, 这种腐蚀速率差可以在玻璃表面制备出微腔结构。通过控制激光改性区域的相互间隔以及氢氟酸的腐蚀时间, 可在玻璃内部生成互相贯通的三维网状多孔结构, 这些多孔结构在低表面能处理后可以牢牢锁住润滑液, 形成一个稳定的、惰性的超滑表面。由于润滑液和玻璃的折射率近似, 所制备的超滑表面同时具有高透光率。这种透明的超滑表面为自清洁、光学传感、生物镜头等领域提供了新的解决方案。

### 3.3 金属

金属由于其良好的导电性、高密度、高机械强度

等优点, 被广泛应用于航空航天、生物医疗、海洋船舶以及工业生产的方方面面, 但是也存在耐腐蚀性差, 容易污染等缺点<sup>[55-58]</sup>。现有的飞秒激光制备超滑表面大都是应用在聚合物。因为金属具有较强的导电导热性能, 所以电子很容易在金属表面进行热传导, 因此利用飞秒激光在金属表面加工出能够储存润滑液的微纳尺度纹理结构具有一定困难。

Karkantonis 等人系统研究了金属表面微纳结构对超滑表面性能的影响 (图 8(a),(b))<sup>[59]</sup>。利用 1030 nm 波长的飞秒激光在食品级不锈钢表面制备出周期性的亚微米条纹结构 (LIPSS) 以及微米-亚微米复合结构 (MS)。注入润滑液后形成的超滑表面, 可用于降低不锈钢对水、牛奶、蜂蜜等食品的粘附, 从而抵御食品在加工、包装上的污染浪费。测试分析表明, 单一尺度、高度规则的亚微米条纹结构能够更好地抵抗润滑剂损耗、具有相对优良的抗震动和抗剪切能力, 这主要归因于亚微米条纹的高毛细力提升了对润滑油的粘附, 增强了润滑层的稳定性 (图 8(b))。该方法解决了食品在加工、运输过程中, 由于设备以及包装对食品的粘附引起的污染及浪费等问题。

由于条纹结构的纵深浅, 对润滑液的存储能力有限。所以通过条纹结构制备的超滑表面容易因为润滑液的流失而性能失效。Fang 等人利用酒精辅助的飞秒激光微加工技术, 在不锈钢等多种金属表面直接构建出直径为 0.5  $\mu\text{m}$ ~2  $\mu\text{m}$  的微纳多孔结构 (图 8(c))<sup>[60]</sup>。当

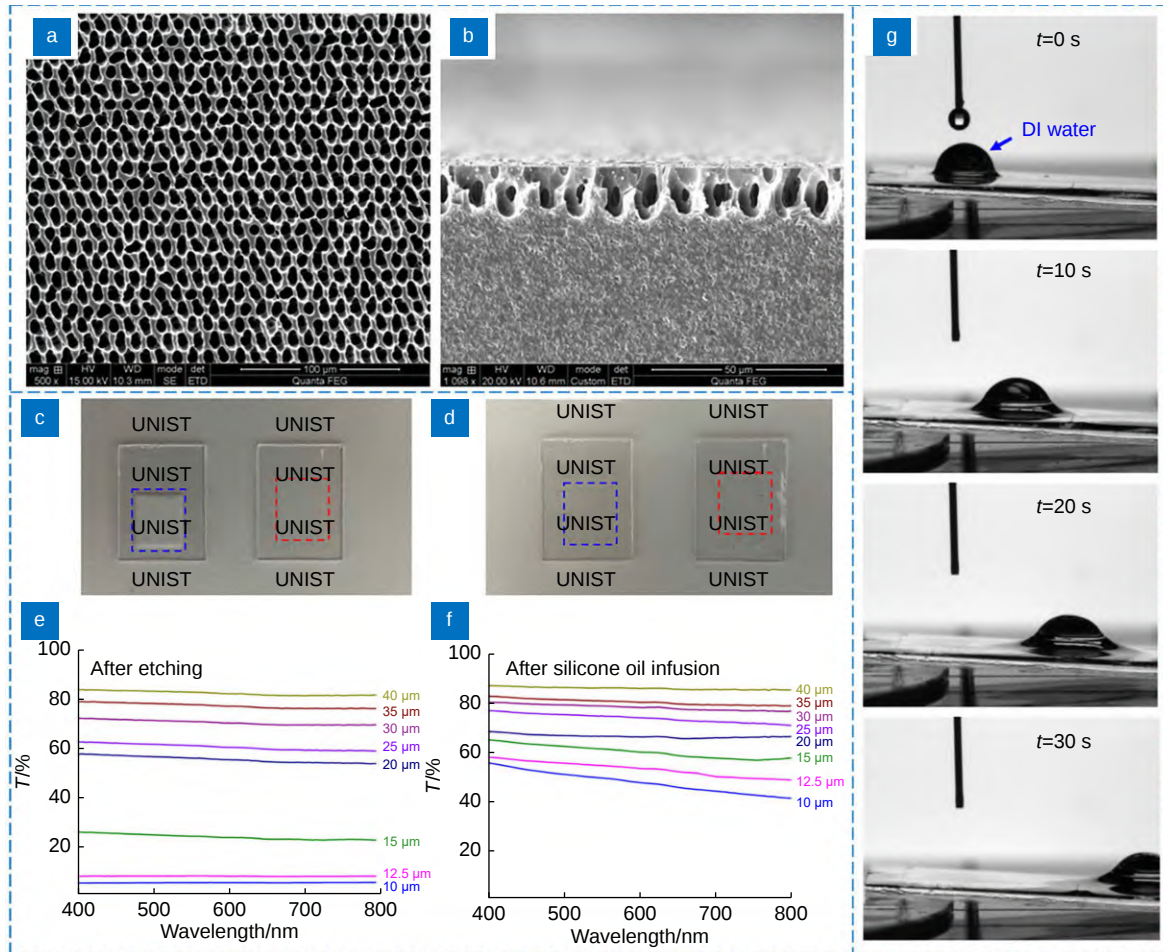


图7 飞秒激光和湿法刻蚀相结合在玻璃表面制备透明超滑<sup>[54]</sup>。

(a), (b) 飞秒激光和湿法刻蚀共同作用后的玻璃表面电镜图; (c) 湿法刻蚀后微腔间隔分别为 10  $\mu\text{m}$  和 40  $\mu\text{m}$  的玻璃透光性; (d) 硅油注入微腔间隔分别为 10  $\mu\text{m}$  和 40  $\mu\text{m}$  的玻璃后, 玻璃的透光性; (e) 湿法刻蚀后具有不同微腔间隔的玻璃在可见光范围内 (400 nm~800 nm) 的透射率曲线; (f) 具有不同微腔间隔的玻璃注入硅油后在可见光范围内 (400 nm~800 nm) 的透射率曲线; (g) 去离子水在超滑表面的滑动特性

Fig. 7 The fabrication of transparent slippery surface on glass via femtosecond laser patterning and wet etching<sup>[54]</sup>.

(a), (b) The scanning electron microscopy images of glass after laser ablation and wet etching; (c) Transmittance of wet etched glasses with microvoid separation distances of 10  $\mu\text{m}$  and 40  $\mu\text{m}$  after wet etching; (d) Transmittance of lubricant oil infused glasses with microvoid separation distances of 10  $\mu\text{m}$  and 40  $\mu\text{m}$ ; (e) Transmittance curves for etched samples with different microvoid separation distances in the visible light range (400 nm~800 nm); (f) Transmittance curves for silicone oil infused samples with different microvoid separation distances in the visible light range (400 nm~800 nm); (g) The slippery property of DI water on slippery surface

飞秒激光聚焦在不锈钢和乙醇界面时, 不锈钢通过非线性多光子吸收产生等离子体羽流, 由于激光诱导的不锈钢连续汽化和乙醇的限制作用, 等离子体羽流以超音速绝热膨胀产生冲击波, 冲击波产生的额外压力引起等离子体羽流的温度和压力上升, 同时产生很多微气泡。在高温高压的等离子体羽流和微气泡的共同作用下, 不锈钢表面产生微孔。与此同时由于乙醇对喷射粒子的分散作用, 这些微孔在烧蚀过程中没有被溅射物覆盖, 最终在表面形成较为光滑的微纳多孔表

面。用于存储润滑油的多孔结构在受到外力如高温高压、机械磨损、有机溶剂浸泡后仍然能保持不变, 所制备的超滑表面显示出优良的疏液性、耐久性与机械稳定性。

在酒精辅助飞秒激光加工金属表面微纳多孔结构的过程中, 由于乙醇的易挥发性, 以及三维加工台运动过程中的酒精晃动, 很容易导致激光在金属表面的离焦。所以酒精辅助的飞秒激光微加工技术加工效率低, 很难加工大面积样品。为此 Cheng 等

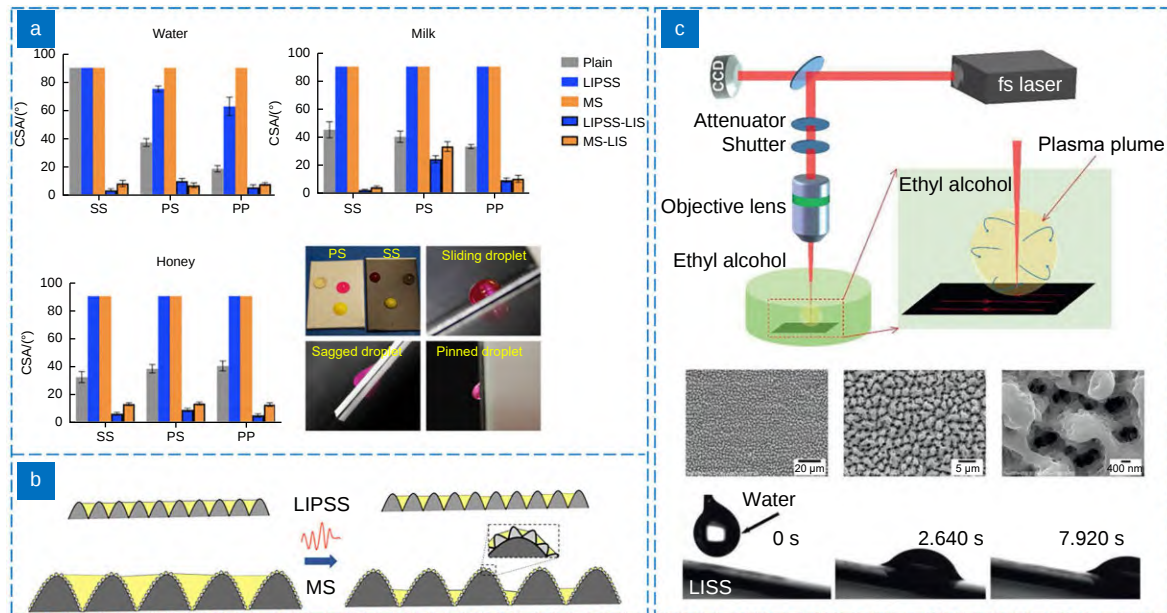


图8 飞秒激光在金属上的超滑表面制备。

(a) 飞秒激光在不同材料上加工不同结构所制备的表面不同液体的疏液性 (Plain: 本征表面; LIPSS: 激光诱导的周期性亚微米条纹结构表面; MS: 微米-亚微米复合结构表面; LIPSS-LIS: 润滑油注入激光诱导的周期性亚微米条纹结构形成的超滑表面; MS-LIS: 润滑油注入微米-亚微米复合结构形成的超滑表面)<sup>[59]</sup>; (b) 亚微米条纹结构和微米-亚微米复合结构在受到外界震动影响下的储油能力<sup>[59]</sup>; (c) 酒精环境下飞秒激光在不锈钢表面的微纳多孔结构制备以及注入润滑油后形成的超滑表面疏液性<sup>[60]</sup>

Fig. 8 The slippery surface fabricated by femtosecond laser on metal.

(a) Different surfaces prepared by femtosecond laser on different materials and the lyophobicity of different liquids. (Plain: untreated surface; LIPSS: laser induced periodic surface structures; MS: multi-scale structure; LIPSS-LIS: laser induced periodic surface after lubricant oil infusing; MS-LIS: multi-scale structure surface after lubricant oil infusing)<sup>[59]</sup>; (b) The illustration of vibration-induced loss of lubricant infused into LIPSS and MS topographies<sup>[59]</sup>; (c) The preparation of micro-nano porous structure on stainless steel by femtosecond laser in alcohol environment and its lyophobicity<sup>[60]</sup>

人提出通过对飞秒激光进行时间整形和空间整形, 在空气环境下利用飞秒激光在金属表面直接制备多孔超滑表面的新方法 (图9)<sup>[58]</sup>。在时间域上通过外触发脉冲波选频的方式, 实现一定频率的脉冲串输出, 在空间域上利用锥透镜将飞秒激光光场从高斯分布转换为贝塞尔分布, 最终在空气环境下直接在镍钛合金表面构建出具有高深径比的微纳多孔结构。随后通过空气放置来吸收空气中的烃基实现自身的低表面能化, 进一步的医用级全氟萘烷灌注实现了镍钛合金超滑表面的制备。这种超滑表面的制备不仅效率高, 可以实现大面积样品加工, 而且没有使用化学处理, 真正做到安全环保。

超滑表面微纳尺度纹理结构的制备方法有很多。针对聚合物而言, 主要是通过激光烧蚀在材料表面形成三维网状结构和沟槽结构。三维多孔网状结构由于具有一定纵深而且孔隙之间相互贯通, 所以稳定性与自修复性会更好一些, 沟槽结构则因为沟槽宽度较大,

所以润滑液容易流失。因此沟槽结构的稳定性会弱于三维网状多孔结构。针对玻璃, 飞秒激光需要辅助湿法刻蚀工艺才能实现多孔网状结构的制备, 而且必须经过氟化处理才能实现低表面能化, 所以如果应用在安全性要求较高的场合, 可能会具有一定局限性。对于金属超滑表面制备, 主要是利用飞秒激光烧蚀在表面构建微纳粗糙结构以及多孔结构来实现的, 这些结构都具有一定的局限性, 如润滑油存储能力有限、或加工效率低, 目前而言仍然缺乏一种高效的、完全仿猪笼草的三维网状多孔结构的制备方法, 这将是今后研究工作的一个重点。

## 4 超滑表面的应用

超滑表面由于其优异的疏液性、稳定性与自修复性, 在生物芯片、医疗抗凝、防污防腐等领域具有广泛应用<sup>[17,61-67]</sup>。针对不同应用构筑不同的结构, 配备与之相适应的润滑液可以广泛扩展超滑表面的应用:

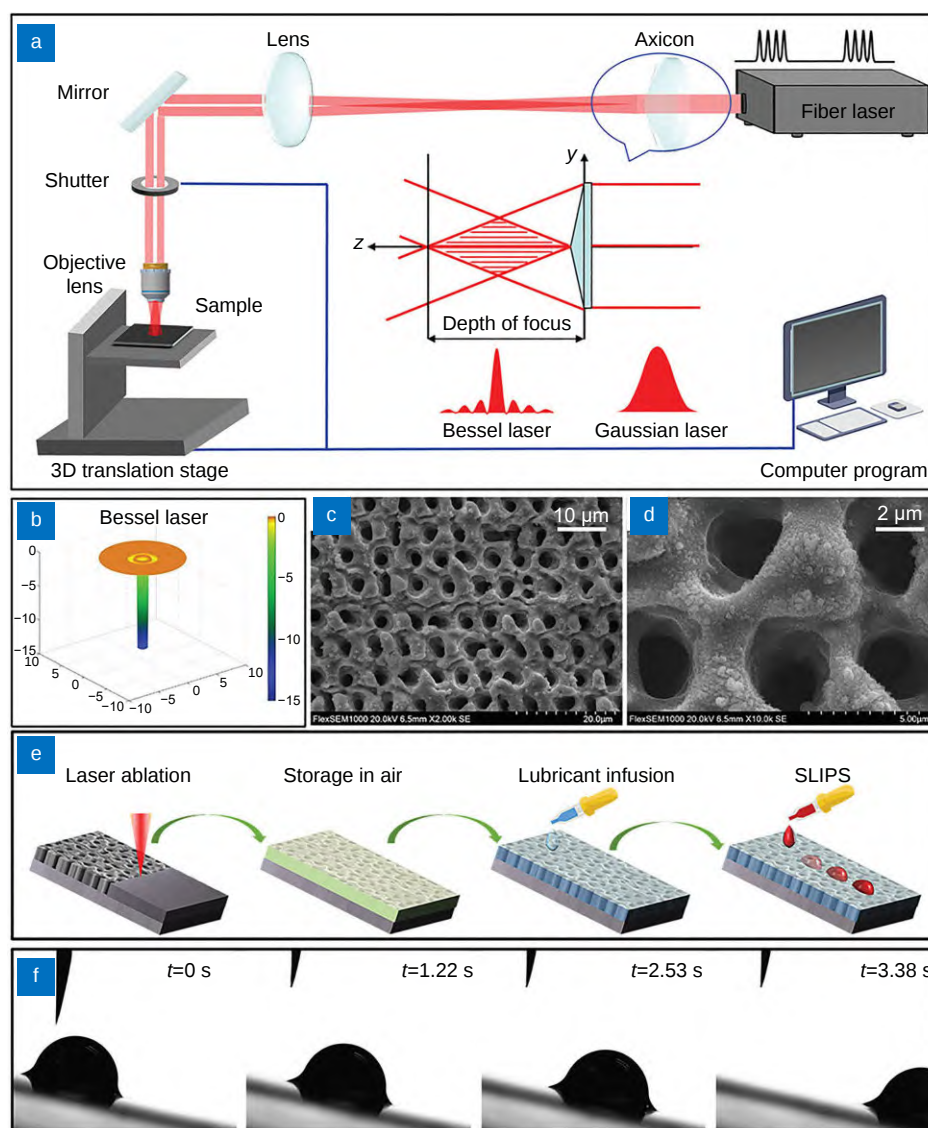


图9 飞秒贝塞尔光在镍钛合金上的超滑表面制备<sup>[58]</sup>。

(a) 飞秒贝塞尔光的微加工系统; 贝塞尔光在镍钛合金表面加工的 (b) 仿真结果和 (c), (d) 实际形貌;

(e) 镍钛合金超滑表面的制备过程; (f) 水滴在镍钛合金超滑表面上的滑动性能

Fig. 9 The fabrication of slippery surface on NiTi alloy by femtosecond laser<sup>[58]</sup>.

(a) Microfabrication system based on the femtosecond Bessel laser beam. (b) Simulation result of the NiTi alloy surface treated with a single pulse train of the femtosecond Bessel laser and (c), (d) surface morphology of the NiTi alloy after being processed by the femtosecond Bessel laser; (e) The fabrication process of SLIPS; (f) The slipper property of water on NiTi SLIPS

制备各向异性结构可以实现液滴定向输运, 使用安全性符合医疗要求的润滑液可以使超滑表面应用在生物抗凝领域等。接下来, 我们将具体介绍飞秒激光制备的超滑表面在各个领域的应用。

#### 4.1 液滴、气泡操控

液滴操控是微流控技术的一个重要分支, 广泛应用于化学、材料、生物、医疗等领域。通过液滴、气泡的操控可以实现高通量的化学合成、新药物的快速

筛选以及微环境下的细胞培养等, 所以液滴、气泡的智能操控在生化检测、芯片实验室等领域具有重要意义<sup>[6,8,61,68-70]</sup>。

Fang 等人<sup>[12]</sup>在一种环氧树脂聚合物基底上制备出各向异性和各向同性可磁性切换的超滑表面, 用于实现液滴在磁场下的可控运动 (图 10(a))<sup>[12]</sup>。利用飞秒激光在基底表面加工出各向异性微沟槽结构, 经过氟硅烷修饰和磁流体注入形成超滑表面。在不施加外部

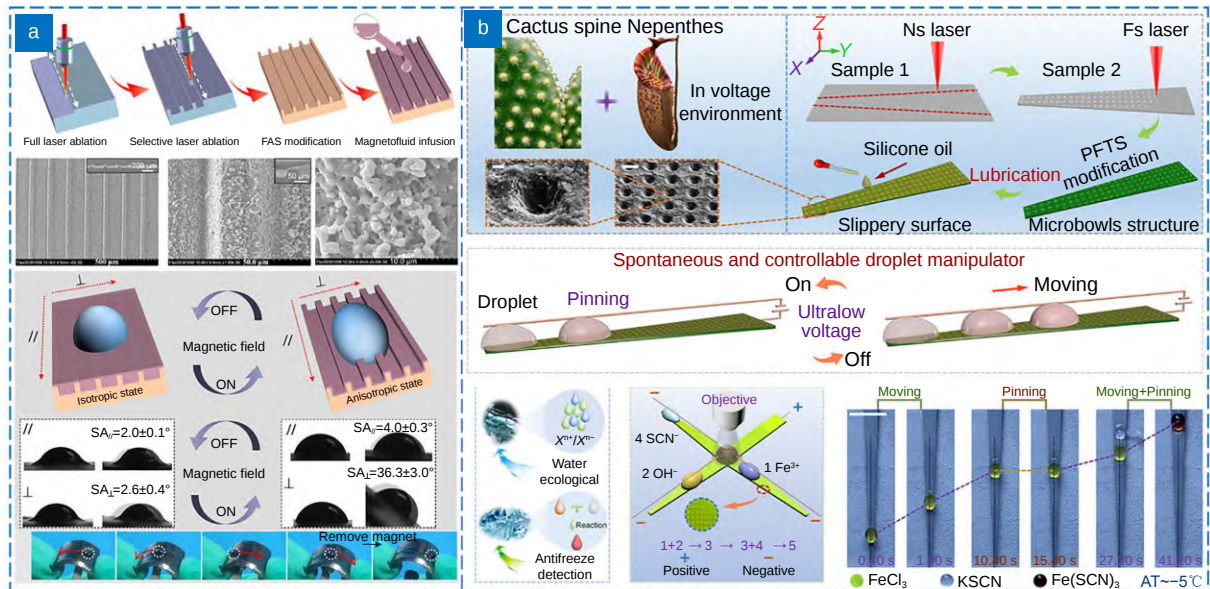


图 10 超滑表面在液滴操控方面的应用。

- (a) 飞秒激光在环氧树脂表面制备各向异性结构用于液滴的磁性操控<sup>[12]</sup>;  
 (b) 仙人掌和猪笼草相结合用于液滴自推进和电刺激的协同操控<sup>[71]</sup>

Fig. 10 Applications of slippery surface in droplet manipulation.

- (a) Femtosecond laser fabricated anisotropic structure on epoxy resin surface for droplet manipulation by magnetic field<sup>[12]</sup>;  
 (b) Droplet control platform with self-actuation and electrobraking inspired by cactus and nepenthes<sup>[71]</sup>

磁场时, 磁流体可以均匀覆盖在材料表面, 形成各向同性超滑表面, 通过小磁铁控制液滴在倾斜、弯曲的表面运动。当施加外部磁场以后, 磁流体重新分布露出底部的各向异性沟槽结构, 可以实现液滴在无外力作用下的主动定向运输和液滴的原位凝结。磁控超滑表面可以实现液滴的无接触输运, 为药物运输、液体机器人、芯片实验室等领域的发展提供新的思路。

Cao 等人在猪笼草超滑表面的基础上, 进一步将仙人掌形态梯度和猪笼草超滑特性相结合, 制备出自推进和电刺激协同的液滴操控平台, 用于实现液滴的自发和可控运动 (图 10(b))<sup>[71]</sup>。利用纳秒激光切割铝板使其具有不同的楔形度, 然后再用飞秒激光制备出微型碗状的多孔阵列结构, 通过三乙氧基硅烷低表面能处理以及硅油 (粘度 = 5 cst) 灌注, 获得自推进和电刺激协同的液滴操控平台。该平台可以在 5  $\mu\text{L}$  的液滴内实现低温微采样、微反应和微分析, 为低温保存微生物样品提供新思路。此外, 在自推进和电刺激的协同作用下还可以实现对水中重金属超标的实时、便捷检测。该工作为高效的微量液体分析提出新策略。

超滑表面很容易实现液滴的无损运输, 但实现液滴的定向钉扎却很困难。吴等人通过控制加热器的通断来控制石蜡的熔融, 从而实现液滴在超滑表面的可

控钉扎与运动 (图 11)<sup>[72]</sup>。首先, 利用飞秒激光在锌板表面通过激光烧蚀加工出微柱状阵列结构, 然后在微柱状结构内部注入熔融石蜡, 在锌板的上表面形成超滑表面。与此同时, 在锌板的下表面结合一个柔性银纳米线加热器, 通过电压控制银纳米线加热器来控制石蜡的熔融。当加热器处于加热状态时, 石蜡融化形成超滑表面, 液滴可以在表面轻松滑落; 当加热器停止加热后, 石蜡凝固成固态, 成为普通疏液表面显示出高粘滞性从而呈现出液滴钉扎的状态。因此可以通过控制电压间接控制温度实现对液滴的可控操作。这种电感应加热电子器件可以适应于多种材料, 为广泛的液滴操控以及防雾防结冰等问题提供了独特的解决方案。

#### 4.2 生物抗凝

凝血反应、生物膜形成以及植入材料在植入后引起的细菌感染是医疗植入领域长期存在以及不可避免的问题, 术后的长期抗凝等免疫治疗不仅给病患造成严重的经济精神压力, 严重者还会威胁病人的生命安全<sup>[73-77]</sup>。因此, 寻求一种新方法, 从根本上抑制生物膜形成、凝血反应的发生对健康医疗的发展至关重要。超滑表面由于其表面的低粘附性, 可以有效抑制血液

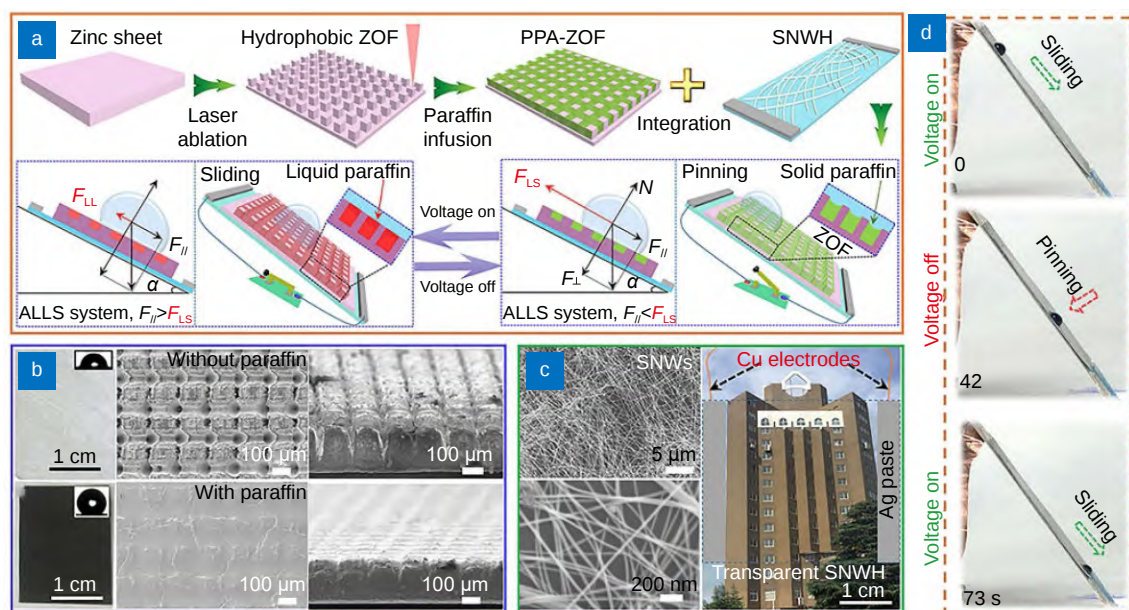


图 11 电压控制的超滑表面用于液滴的定向运动和钉扎<sup>[72]</sup>。

(a) 电压控制的超滑表面制备流程; (b) 注入石蜡前后样品的表面形貌; (c) 银纳米线加热器的电镜图以及透明加热器的数码照片; (d) 电压通断下液滴的不同运动状态

Fig. 11 Voltage reversibly control liquids on slippery surface between sliding and pinning<sup>[72]</sup>.

(a) Strategy for preparing slippery surface controlled by voltage; (b) Surface morphologies for micropillar-arrayed zinc oxide before and after infusing the paraffin; (c) The scanning electron microscopy images of silver nanowire heater and digital picture of transparent heater; (d) Different motion states of droplet under voltage on and off

成分如纤维蛋白、血小板在植入材料表面的凝结, 从而从根本上抑制凝血反应的发生以及生物膜的聚集与形成, 所以超滑表面为生物医疗的健康发展提供一种新的解决思路<sup>[78-84]</sup>。

Doll 等人首先探究了不同类型的表面结构以及润滑油对超滑性能以及生物性能的影响(图 12)<sup>[85]</sup>。利用飞秒激光超短脉冲烧蚀技术在钛片上构建四种不同的粗糙结构(分级的微纳米尖刺、微沟槽、纳米级波纹、非结构化表面), 并灌注了五种不同粘度的全氟聚醚润滑油用于抗生物膜测试。实验结果表明, 微纳米分级的仿生尖刺结构与中等粘度的润滑油(20 cSt~60 cSt, 37 °C, 143 AZ, GPL 104)结合形成的超滑表面显示出最优的疏液特性。微纳米分级结构可以有效捕获并存储润滑油, 而中等粘度的润滑油使润滑层在受到外界刺激后仍然可以稳定存在使其具有稳定的低粘滞性。超滑表面的低粘滞性抑制了细菌以及细胞的初始粘附, 从而进一步抑制了生物膜在其表面的生长, 抗生物膜性能相比于本征表面提升了 100 倍。而且超滑表面可以在外界环境下保持其性能最长达到十五天。值得注意的是, 超滑表面所具有的抗菌和抗生物膜粘附性都归因于表面对液体或固体的低粘附性, 所以它

只是被动的抗细菌粘附, 而没有主动的杀菌性能, 在细菌存在的情况下仍然会不可避免地引起感染等问题。

随后 Seo 等人利用飞秒激光在用于内窥镜的 bk9 玻璃上制备仿生超滑表面(图 13)<sup>[86]</sup>。飞秒激光首先作用在玻璃表面形成纳米级粗糙结构, 然后自组装一层三乙氧基硅烷, 增强玻璃对注入润滑油的化学亲和力, 最后注入与基底材料折射率近似的氟碳基润滑油 GPL103, 从而构建出透明、防污、抗雾的内窥镜。在微观尺度上, 纳米级的粗糙结构容易降低光散射从而提升透光率; 自组装分子层则促进了润滑油与基板之间的粘附, 提升了超滑表面的透光性和稳定性。宏观上的稳定性试验, 如胶带剥离试验、线性磨损测试以及高温杀菌循环试验证实了超滑表面的机械稳定性, 以及能够在极端环境下保持超滑性能的优异性。由于超滑表面优异的疏液性, 所以在体外测试如高湿度、血液喷洒和浸泡等测试中能保持对水分、血液、纤维蛋白等分子的抗粘附, 展示出优异的生物防污以及抗雾性能, 为解决内窥镜使用过程中由于生物液体粘附以及雾气凝结引起的视野模糊提供一种新的解决方案。

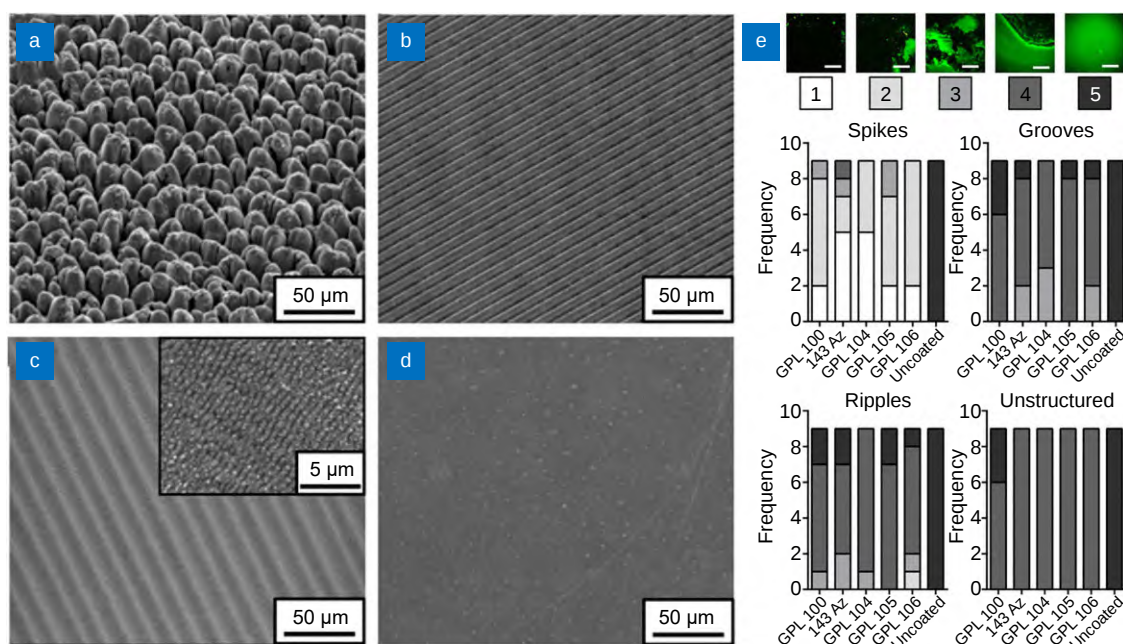


图 12 飞秒激光在钛片上构建的不同结构以及生物膜在钛超滑表面上的粘附情况<sup>[85]</sup>。

(a~d) 飞秒激光在钛表面产生的不同种结构电镜图: (a) 分级的微纳米尖刺, (b) 微沟槽, (c) 纳米级波纹和 (d) 非结构化表面; (e) 生物膜在不同结构和不同润滑剂组合的超滑表面上的粘附情况

Fig. 12 Femtosecond laser construct different structures on titanium and the adhesion of biofilm on slippery surface<sup>[85]</sup>.

Differently structured titanium samples constructed by femtosecond laser: (a) laser-generated spikes, (b) grooves, (c) ripples, and (d) unstructured titanium; (e) Biofilm formation screening on titanium slippery surface made of different structure and lubricant combinations

Cheng 等人利用飞秒激光在医用镍钛合金上构建出多孔超滑表面, 所制备的超滑表面显示出优异的血液相容性(图 14)<sup>[58]</sup>。由于超滑表面具有低粘滞性, 所以超滑表面能够抑制血液在其表面的粘附。进一步的血液相容性测试表明, 与未处理的镍钛合金相比, 纤维蛋白在超滑表面上的粘附率显著降低了 12 倍。超滑表面的形成使镍钛合金的溶血率由 4.69% 降低到 1.56%, 明显低于国家标准 (5%)。此外, 超滑表面还能增强镍钛合金的抗菌性。镍钛合金超滑表面对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抑菌率分别达到 98.14% 和 99.32%。实验结果表明, 超滑表面大大提高了镍钛合金的血液相容性。虽然超滑表面能够降低血液成分以及细菌对表面的粘附, 但是对于已经粘附的血液成分和细菌, 超滑表面并没有办法将其去除。

### 4.3 防污

乳制品在热处理过程中, 会不可避免地在不锈钢壁上产生污垢, 如何解决加工运输过程中的食品粘附是食品加工领域一个尤为突出的问题, 这些食品污垢不仅增加了热传递的阻力造成能源浪费, 而且很容易引起食品污染, 从而使消费者的健康受到

威胁。超滑表面优异的疏液性为提升乳制品加工器材的防污性提供了一个新思路<sup>[87-91]</sup>。2017 年 Zouaghi 等人利用飞秒激光在食品级不锈钢表面制备出花椰菜状粗糙结构, 经过氟硅烷处理和惰性全氟化油浸泡后形成超滑疏液表面(图 15)<sup>[92]</sup>。在巴氏杀菌试验中, 相比于未处理表面, 超滑表面的防牛奶污染性能提升了 63%。经过巴氏杀菌以及水冲洗实验, 超滑疏液特性会有略微降低从而导致防污性能减弱。经过二次润滑油注入后, 超滑表面的疏液性又会 100% 恢复, 乳制品沉淀的痕迹在超滑表面上完全没有被发现, 从而使得不锈钢具有出色的防污防垢性能。该工作首次在实际的工业巴氏杀菌场景中展示了超滑疏液表面对抗牛奶污染的巨大潜力, 为食品业的健康发展提供新的解决方案。随后, Karkantonis 等人继续在食品级塑料上进行飞秒激光微加工制备周期性微结构 (LIPSS) 和具有微米和亚微米的多尺度结构, 注入硅油形成超滑表面, 用于抵御牛奶、蜂蜜等食品在包装盒上的黏附<sup>[59]</sup>。结果表明, 注入润滑液之后的超滑表面在测试液体中循环 25 次后仍能产生有效的抗粘附性能。实验证明, 超滑表面对于提升

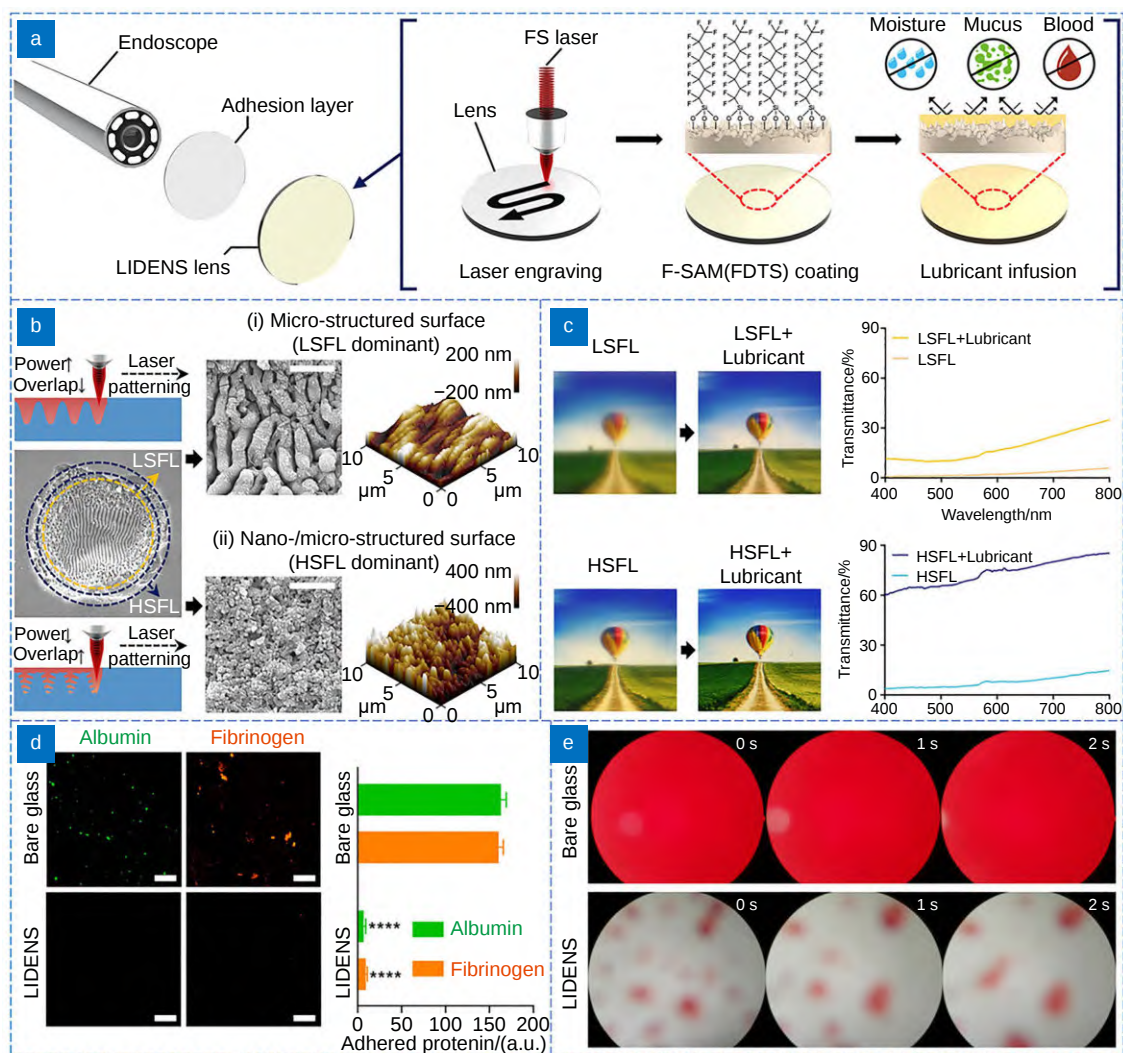


图 13 在内窥镜表面制备超滑用于防污、抗雾<sup>[86]</sup>。

- (a) 用于防污、抗雾的内窥镜制备流程; (b) 飞秒激光作用在玻璃表面形成的表面结构; (c) 表面具有不同结构的玻璃透光率; (d) 白蛋白和纤维蛋白原在本征玻璃表面和液体注入的微纳结构表面上的荧光显微图; (e) 血液喷雾在本征玻璃表面和液体注入的微纳结构表面上附着的时序图

Fig. 13 Lubricant infused directly engraved nano microstructures for mechanically durable endoscope lens with anti-biofouling and anti-fogging properties<sup>[86]</sup>.

- (a) The fabrication process of the anti-biofouling and anti-fogging endoscope lens; (b) The surface morphologies of glass after femtosecond laser ablation; (c) The transmittances of surface with different structure; (d) The confocal microscopy images of protein (albumin and fibrinogen) adsorptions on bare and slippery surface; (e) The sequential images of blood spray attachment to untreated glass and the slippery surface

食品在包装和加工过程中的防污性具有重要意义。值得注意的是, 氟化物的长期使用会影响人体健康, 所以在食品防污领域, 润滑液的选择需要尤为谨慎。

#### 4.4 防腐

Li 等人通过光纤激光烧蚀铝板形成规则的蜂窝状多孔阵列, 通过二氧化硅纳米颗粒喷涂和润滑油灌注在铝材料的表面实现了超滑表面的制备 (图 16)<sup>[93]</sup>。激光烧蚀产生的微米级多孔结构和二氧化硅纳米颗粒形

成的纳米孔隙共同组合形成微纳米复合结构。微纳米复合结构显著增强了润滑油的储存空间, 制备的超滑表面显示出良好的疏水性和在水流冲击下的长期稳定性。本征铝板、超疏水表面和超滑表面在氯化钠溶液中的极化曲线结果表明, 超疏水表面显示出较高的耐腐蚀性, 因为疏水涂层包埋的空气层使得腐蚀液难以渗透进表面的微纳结构中, 因此耐腐蚀性提高了三个数量级。超滑表面未检测到明显的阳极或者阴极电流,

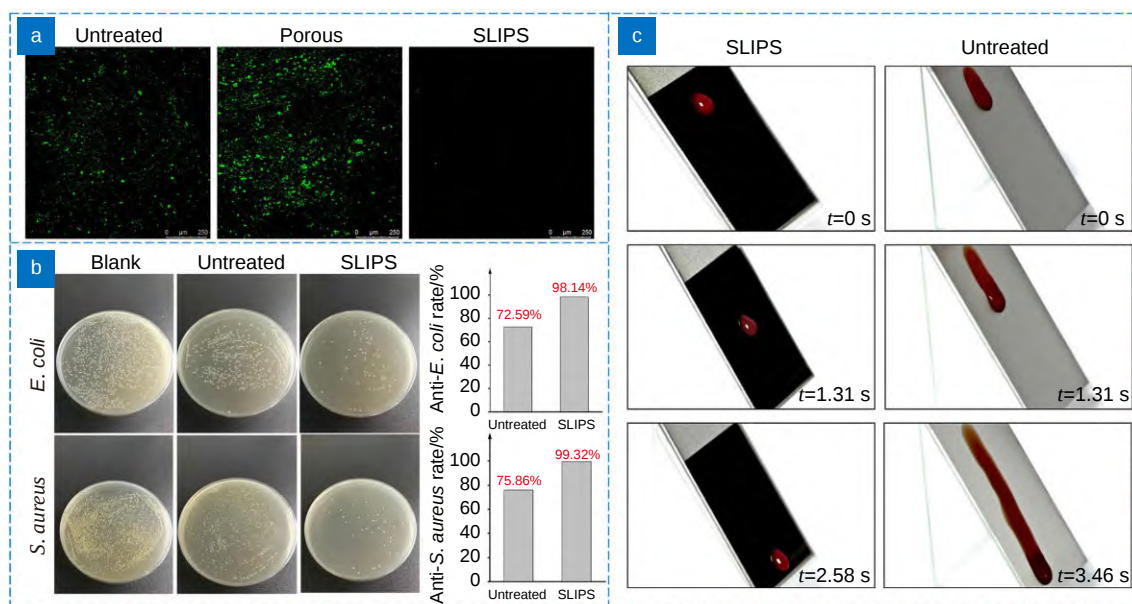


图 14 镍钛合金超滑表面的血液相容性<sup>[58]</sup>。

(a) 纤维蛋白在本征表面、多孔表面、以及超滑表面的粘附荧光图; (b) 不同结构的镍钛合金样品对大肠杆菌和金黄色葡萄球菌的抗菌性测试; (c) 抗凝羊血在未处理表面和超滑表面的滑动性

Fig. 14 The hemocompatibility of NiTi alloy slippery surface<sup>[58]</sup>.

(a) The fluorescence distributions of bovine fibrinogen on untreated surface, porous surface, and slippery surface;  
(b) The growth conditions of *E. coli* and *S. aureus* on NiTi alloy with different structures;  
(c) Anticoagulant sheep blood move on the untreated surface and slippery surface

表明没有腐蚀行为发生。所制备的超滑表面不仅具有良好的疏水性, 还具有优异的耐腐蚀性。超滑表面在海洋防腐等方面显示出巨大潜力。

超滑表面因为其优异的疏液性, 广泛应用于液滴、气泡操控、生物抗凝、防污、防腐等领域。表 1 针对不同的材料, 总结了不同的加工方法以及超滑表面在各个领域的应用。通过表 1 可知, 激光直写结合不同的辅助方法可以实现在大多数材料上的超滑表面制备, 这极大扩展了超滑表面的应用前景。

## 5 结论与展望

仿猪笼草的超滑表面相较于仿荷叶的超疏水表面和仿跳虫的超疏油表面, 具有更优异的疏液性、稳定性与自修复性, 因而具有更广阔的应用前景。而飞秒激光作为一种新型微纳加工技术, 因其对加工材料的普适性、高精度、高可控性等优势逐渐吸引着人们的眼光。飞秒激光成为在各种材料上制备仿生超滑表面的强有力工具。

本文以猪笼草超滑表面为背景, 飞秒激光微加工技术为手段, 从仿生超滑表面的制备和应用两个方面对其发展现状进行了总结。针对不同材料, 通过对飞

秒激光进行不同形式的整形, 辅助以其他手段, 实现了飞秒激光在聚合物、硬脆透明材料与金属表面的仿生超滑表面制备。针对不同的结构与润滑油性能, 概述了超滑表面在液滴操控、生物抗凝、防污, 以及防腐等领域的应用。

虽然有关超滑表面飞秒激光微纳制备的研究很多, 人们也在逐渐扩展仿生超滑表面的制备和应用, 但是仍然存在很多问题: 1) 超滑表面的自修复性来源于液体在三维多孔网络中的流动性。对于现有的金属超滑表面研究, 如 Cheng 等人在镍钛合金表面制备的深孔结构以及 Fang 等人在不锈钢面制备的微结构, 均没有实现三维多孔结构的互通, 在受到外部损伤以后, 无法实现良好的自修复<sup>[58,60]</sup>。所以真正仿猪笼草的三维多孔网状结构依然在金属表面实现, 这也是我们今后研究的努力方向之一。2) 液态润滑层在疏液过程中会不可避免地与被排斥液体接触, 所以针对昂贵的液滴检测与操控, 存在样本受到污染的风险。Tian 等人通过硅烷化反应将类液性的柔性分子层全氟聚醚嫁接到硅片表面, 实现了液滴的无损、无污染运输<sup>[70]</sup>。但是该方法只能在硅基材料表面实现, 无法应用于金属、聚合物等材料。因此, 如何在保持超滑特性的基

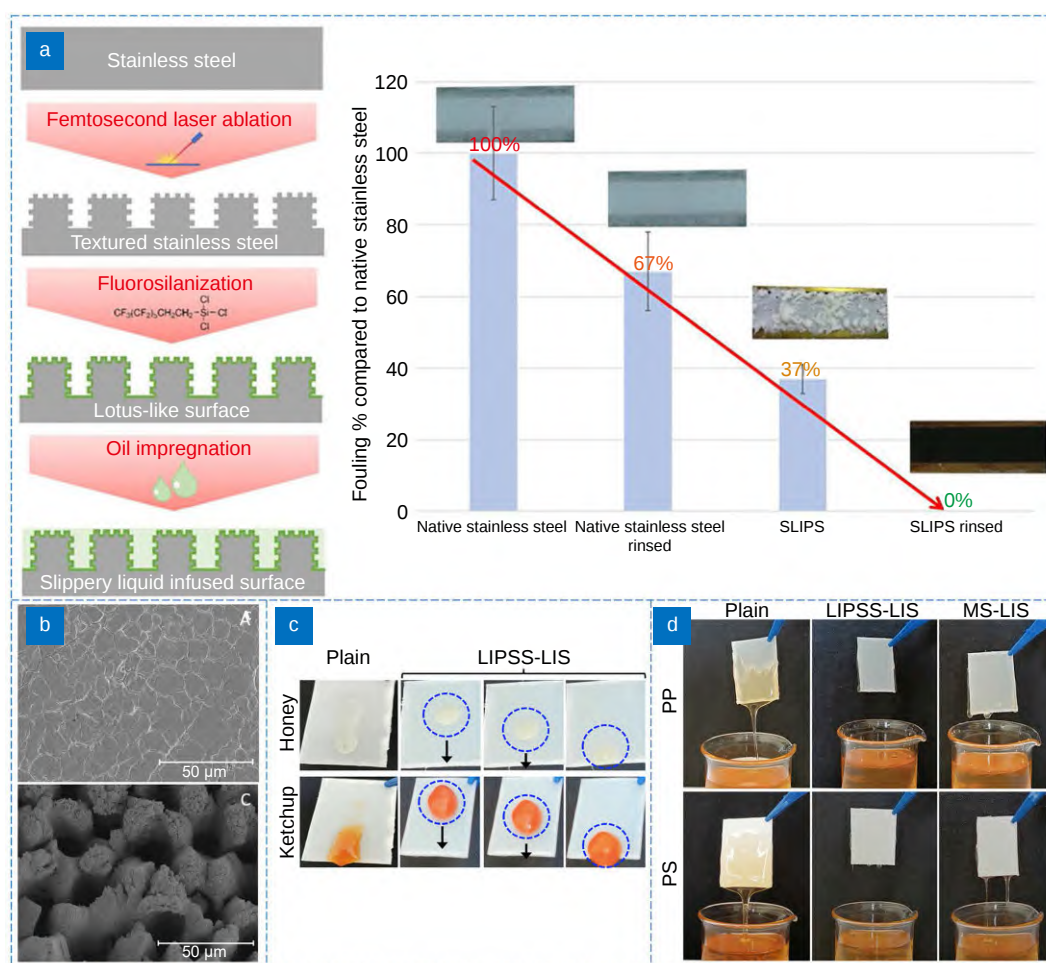


图 15 超滑表面在食品防污方面的应用。

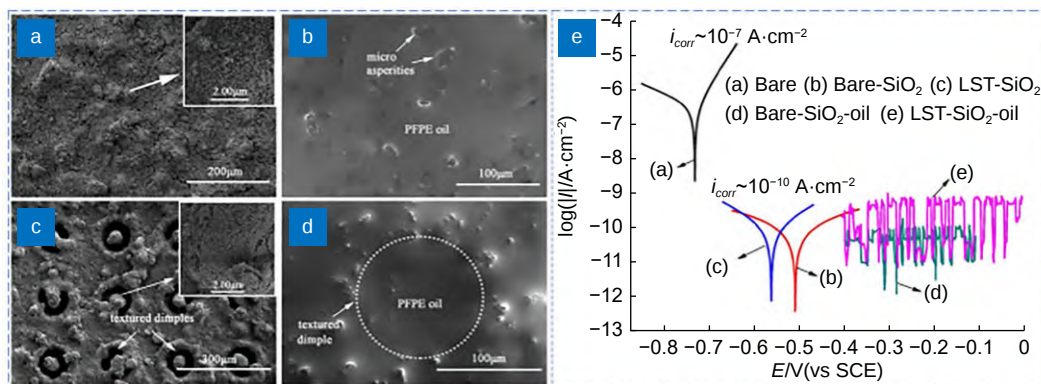
- (a) 不锈钢超滑表面的制备过程以及不同表面的污染物覆盖率<sup>[92]</sup>; (b) 飞秒激光在食品级塑料表面的形貌电镜图<sup>[92]</sup>;  
(c) 蜂蜜和番茄酱在本征表面和超滑表面的滑动性<sup>[59]</sup>; (d) 不同样品在蜂蜜中浸泡后取出, 经过 25 次循环后的样品表面粘附情况<sup>[59]</sup>

Fig. 15 Application of slippery surface in food antifouling.

- (a) The fabrication process of slippery surface and contaminant coverage on different surfaces<sup>[92]</sup>; (b) Surface morphologies of food-grade plastic after femtosecond laser ablation<sup>[92]</sup>; (c) Movement of honey and tomato sauce on untreated surface and slippery surface<sup>[59]</sup>;  
(d) The dripping behavior of different samples after honey sipping cycles<sup>[59]</sup>

基础上,降低对所接触样本的污染也是未来研究的一个重要方向。3) 超滑表面的所有优良特性都基于表面润滑层的稳定存在,润滑液一旦发生流失,所有的功能都将不复存在。Atsushi 等人通过将有机溶剂与 PDMS 混合,制备热响应型有机凝胶用于抗冰冻。当温度低于零下 15  $^{\circ}\text{C}$  时,凝胶中的有机液体会渗出自发形成超滑表面,加热三小时后,有机液体又会重新回到凝胶内部<sup>[63]</sup>。这种热响应型超滑表面可以大大提升润滑液的利用率从而提升超滑表面的稳定性。但是相关研究并不多见,还需进一步扩展。4) 现有关于超滑表面的研究大都用到氟化物<sup>[17,94-95]</sup>。氟化物的使用

不仅会对安全性造成影响,而且也不符合绿色可持续发展的理念<sup>[16,67]</sup>。尤其针对医疗植入材料而言,安全性是最先考虑的问题。虽然有相关研究在超滑表面的制备过程中没有使用含氟物质,但使用的材料如甲基丙烯酸酯或者丙烯酸酯大都是从不可再生的化石燃料中提取得到,除了原材料不可再生以外,提取过程还相当繁琐,需要消耗巨大的能源<sup>[96]</sup>。所以寻求一种安全、稳定的润滑液也显得尤为重要与迫切。综上所述,寻求一种方法以获得具有长期稳定性、高安全性的仿生超滑表面将对微量检测、生物抗凝、减阻、防污防腐等领域的发展具有重要意义。

图 16 不同样品的表面形貌和极化曲线<sup>[93]</sup>。

(a~d) 不同样品的表面形貌: 喷涂 SiO<sub>2</sub> 纳米颗粒的表面 (a) 本征形貌和 (b) 注入硅油后的形貌; 激光烧蚀和纳米颗粒喷涂后的表面 (c) 本征形貌和 (d) 注入润滑油后的形貌; (e) 不同样品的极化曲线 (Bare: 本征表面; Bare-SiO<sub>2</sub>: 二氧化硅纳米颗粒表面; LST-SiO<sub>2</sub>: 激光烧蚀和纳米颗粒喷涂后的表面; Bare-SiO<sub>2</sub>-oil: 喷涂 SiO<sub>2</sub> 纳米颗粒后注入润滑油的表面; LST-SiO<sub>2</sub>-oil: 润滑油注入激光烧蚀和纳米颗粒喷涂后形成的表面)

Fig. 16 Surface morphology and polarization curves of different samples<sup>[93]</sup>.

Surface morphology of different samples: surface sprayed with SiO<sub>2</sub> nanoparticles (a) intrinsic morphology and (b) morphology with silicone oil infusion; surface processed by laser ablation and spraying with nanoparticles (c) intrinsic morphology and (d) morphology with silicone oil infusion; (e) Polarization curves of different samples (Bare: intrinsic surface; Bare-SiO<sub>2</sub>: surface sprayed with silica nanoparticles; LST-SiO<sub>2</sub>: laser ablated and nanoparticle sprayed surface; Bare-SiO<sub>2</sub>-oil: surface injected with lubricant after sprayed with SiO<sub>2</sub> nanoparticles; LST-SiO<sub>2</sub>-oil: surface processed by lubricant infusion after laser ablation and nanoparticle spraying)

表 1 激光在不同材料上制备超滑表面概述

Table 1 Overview of SLIPS on different materials by laser processing

| 材料   | 聚合物                        | 硬脆透明材料                   | 金属                            |
|------|----------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 方法   | 激光直写                       | 激光直写; 飞秒激光+湿法刻蚀          | 短脉冲激光脉冲整形; 飞秒激光+酒精辅助          |
| 应用   | 液滴阵列化; 液滴、气泡运输;<br>食品包装防污  | 透明防污窗口; 光学传感;<br>生物镜头自清洁 | 海洋、食品防污; 海洋减阻;<br>生物抗凝; 防腐 防冰 |
| 参考文献 | 12, 50, 51, 52, 53, 71, 72 | 54, 86                   | 59, 60, 58, 85, 92, 93        |

## 参考文献

- [1] Wong T S, Kang S H, Tang S K Y, et al. Bioinspired self-repairing slippery surfaces with pressure-stable omniphobicity[J]. *Nature*, 2011, **477**(7365): 443-447.
- [2] Chen H W, Zhang P F, Zhang L W, et al. Continuous directional water transport on the peristome surface of *Nepenthes alata*[J]. *Nature*, 2016, **532**(7597): 85-89.
- [3] Li J S, Ueda E, Paulssen D, et al. Slippery lubricant-infused surfaces: properties and emerging applications[J]. *Adv Funct Mater*, 2019, **29**(4): 1802317.
- [4] Zhao X, Wei J F, Li B C, et al. A self-healing superamphiphobic coating for efficient corrosion protection of magnesium alloy[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2020, **575**: 140-149.
- [5] Zhao H X, Sun Q Q, Deng X, et al. Earthworm-inspired rough polymer coatings with self-replenishing lubrication for adaptive friction-reduction and antifouling surfaces[J]. *Adv Mater*, 2018, **30**(29): 1802141.
- [6] Xiao X, Zhang C H, Ma H Y, et al. Bioinspired slippery cone for controllable manipulation of gas bubbles in low-surface-tension environment[J]. *ACS Nano*, 2019, **13**(4): 4083-4090.
- [7] Wei D S, Wang J G, Li S Y, et al. Novel corrosion-resistant behavior and mechanism of a biomimetic surface with switchable wettability on Mg alloy[J]. *Chem Eng J*, 2021, **425**: 130450.
- [8] Wang H J, Zhang Z H, Wang Z K, et al. Improved dynamic stability of superomniphobic surfaces and droplet transport on slippery surfaces by dual-scale re-entrant structures[J]. *Chem Eng J*, 2020, **394**: 124871.
- [9] Liu W J, Pan R, Cai M Y, et al. Oil-triggered switchable wettability on patterned alternating air/lubricant-infused superamphiphobic surfaces[J]. *J Mater Chem A*, 2020, **8**(14): 6647-6660.
- [10] Leslie D C, Waterhouse A, Berthet J B, et al. A bioinspired omniphobic surface coating on medical devices prevents thrombosis and biofouling[J]. *Nat Biotechnol*, 2014, **32**(11): 1134-1140.
- [11] Badv M, Imani S M, Weitz J I, et al. Lubricant-infused surfaces with built-in functional biomolecules exhibit simultaneous repellency and tunable cell adhesion[J]. *ACS Nano*, 2018, **12**(11): 10890-10902.
- [12] Fang Y, Liang J, Bai X, et al. Magnetically controllable isotropic/anisotropic slippery surface for flexible droplet manipulation[J]. *Langmuir*, 2020, **36**(50): 15403-15409.
- [13] Yang J, Li J Y, Jia X H, et al. Fabrication of robust and

- transparent slippery coating with hot water repellency, antifouling property, and corrosion resistance[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, **12**(25): 28645–28654.
- [14] Yang S K, Dai X M, Stogin B B, et al. Ultrasensitive surface-enhanced raman scattering detection in common fluids[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016, **113**(2): 268–273.
- [15] Deng R, Shen T, Chen H L, et al. Slippery liquid-infused porous surfaces (SLIPSs): a perfect solution to both marine fouling and corrosion?[J]. *J Mater Chem A*, 2020, **8**(16): 7536–7547.
- [16] Zeng X, Guo Z G, Liu W M. Recent advances in slippery liquid-infused surfaces with unique properties inspired by nature[J]. *Bio-Des Manuf*, 2021, **4**(3): 506–525.
- [17] Zhang P F, Liu G, Zhang D Y, et al. Liquid-infused surfaces on electrosurgical instruments with exceptional antiadhesion and low-damage performances[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2018, **10**(39): 33713–33720.
- [18] Chen Y, Guo Z G. An ionic liquid-infused slippery surface for temperature stability, shear resistance and corrosion resistance[J]. *J Mater Chem A*, 2020, **8**(45): 24075–24085.
- [19] Liang Y Z, Wang P, Zhang D. Designing a highly stable slippery organogel on Q235 carbon steel for inhibiting microbiologically influenced corrosion[J]. *ACS Appl Bio Mater*, 2021, **4**(8): 6056–6064.
- [20] Anand S, Paxson A T, Dhiman R, et al. Enhanced condensation on lubricant-impregnated nanotextured surfaces[J]. *ACS Nano*, 2012, **6**(11): 10122–10129.
- [21] Jiang D, Xia X C, Hou J, et al. A novel coating system with self-reparable slippery surface and active corrosion inhibition for reliable protection of Mg alloy[J]. *Chem Eng J*, 2019, **373**: 285–297.
- [22] Li H, Feng X L, Peng Y J, et al. Durable lubricant-infused coating on a magnesium alloy substrate with anti-biofouling and anti-corrosion properties and excellent thermally assisted healing ability[J]. *Nanoscale*, 2020, **12**(14): 7700–7711.
- [23] Song F, Wu C Q, Chen H L, et al. Water-repellent and corrosion-resistance properties of superhydrophobic and lubricant-infused super slippery surfaces[J]. *RSC Adv*, 2017, **7**(70): 44239–44246.
- [24] Lee J, Jiang Y H, Hizal F, et al. Durable omniphobicity of oil-impregnated anodic aluminum oxide nanostructured surfaces[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2019, **553**: 734–745.
- [25] Sun J, Wang C, Song J L, et al. Multi-functional application of oil-infused slippery al surface: from anti-icing to corrosion resistance[J]. *J Mater Sci*, 2018, **53**(23): 16099–16109.
- [26] Gheraldi N R, Guan J H, Dodd L E, et al. Double-sided slippery liquid-infused porous materials using conformable mesh[J]. *Sci Rep*, 2019, **9**(1): 13280.
- [27] Zhang M L, Chen R R, Liu Q, et al. Long-term stability of a liquid-infused coating with anti-corrosion and anti-icing potentials on al alloy[J]. *ChemElectroChem*, 2019, **6**(15): 3911–3919.
- [28] Yong J L, Chen F, Yang Q, et al. Rapid fabrication of large-area concave microlens arrays on pdms by a femtosecond laser[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2013, **5**(19): 9382–9385.
- [29] Cheng Y, Yang Q, Fang Y, et al. Underwater anisotropic 3D superoleophobic tracks applied for the directional movement of oil droplets and the microdroplets reaction[J]. *Adv Mater Interfaces*, 2019, **6**(10): 1900067.
- [30] Sugioka K, Cheng Y. Femtosecond laser three-dimensional micro- and nanofabrication[J]. *Appl Phys Rev*, 2014, **1**(4): 041303.
- [31] Kodama N, Takahashi T, Inoue T, et al. Morphological characteristics of nanoholes induced by single-shot femtosecond laser ablation of borates and aluminate silicates[J]. *J Laser Appl*, 2020, **32**(1): 012015.
- [32] Livakas N, Skoulas E, Stratakis E. Omnidirectional iridescence via cylindrically-polarized femtosecond laser processing[J]. *Opto-Electron Adv*, 2020, **3**(5): 190035.
- [33] Zhou Y, Chen L W, Du Z R, et al. Tunable optical nonlinearity of silicon nanoparticles in solid state organic matrix[J]. *Opt Mater Express*, 2015, **5**(7): 1606–1612.
- [34] Gattass R R, Mazur E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials[J]. *Nat Photonics*, 2008, **2**(4): 219–225.
- [35] Chen L W, Yin Y M, Li Y, et al. Multifunctional inverse sensing by spatial distribution characterization of scattering photons[J]. *Opto-Electron Adv*, 2019, **2**(9): 190019.
- [36] Yong J L, Zhan Z B, Singh S C, et al. Microfluidic channels fabrication based on underwater superpolyphobic microgrooves produced by femtosecond laser direct writing[J]. *ACS Appl Polym Mater*, 2019, **1**(11): 2819–2825.
- [37] Vorobyev A Y, Guo C L. Colorizing metals with femtosecond laser pulses[J]. *Appl Phys Lett*, 2008, **92**(4): 041914.
- [38] Deng Z F, Chen F, Yang Q, et al. Dragonfly-eye-inspired artificial compound eyes with sophisticated imaging[J]. *Adv Funct Mater*, 2016, **26**(12): 1995–2001.
- [39] Sundaram S K, Mazur E. Inducing and probing non-thermal transitions in semiconductors using femtosecond laser pulses[J]. *Nat Mater*, 2002, **1**(4): 217–224.
- [40] Momma C, Nolte S, Chichkov B N, et al. Precise laser ablation with ultrashort pulses[J]. *Appl Surf Sci*, 1997, **109–110**: 15–19.
- [41] Kawata S, Sun H B, Tanaka T, et al. Finer features for functional microdevices - micromachines can be created with higher resolution using two-photon absorption[J]. *Nature*, 2001, **412**(6848): 697–698.
- [42] Lin Z Y, Liu H G, Ji L F, et al. Realization of ~10 nm features on semiconductor surfaces via femtosecond laser direct patterning in far field and in ambient air[J]. *Nano Lett*, 2020, **20**(7): 4947–4952.
- [43] Kontenis G, Gailevičius D, Jonušauskas L, et al. Dynamic aberration correction via spatial light modulator (SLM) for femtosecond direct laser writing: towards spherical voxels[J]. *Opt Express*, 2020, **28**(19): 27850–27864.
- [44] Pavlov D, Porfirev A, Khonina S, et al. Coaxial hole array fabricated by ultrafast femtosecond-laser processing with spatially multiplexed vortex beams for surface enhanced infrared absorption[J]. *Appl Surf Sci*, 2021, **541**: 148602.
- [45] Yalozay B, Ersoy T, Soyulu B, et al. Fabrication of nanometer-size structures in metal thin films using femtosecond laser bessell beams[J]. *Appl Phys Lett*, 2012, **100**(3): 031104.
- [46] Zhao Y Z, Su Y L, Hou X Y, et al. Directional sliding of water: biomimetic snake scale surfaces[J]. *Opto-Electron Adv*, 2021, **4**(4): 210008.
- [47] Su Y L, Zhao Y Z, Jiang S Y, et al. Anisotropic superhydrophobic properties of bioinspired surfaces by laser ablation of metal substrate inside water[J]. *Adv Mater Interfaces*, 2021, **8**(16): 2100555.
- [48] Bian H, Shan C, Liu K Y, et al. A miniaturized rogowski current

- transducer with wide bandwidth and fast response[J]. *J Micromech Microeng*, 2016, **26**(11): 115015.
- [49] Zou T T, Zhao B, Xin W, et al. High-speed femtosecond laser plasmonic lithography and reduction of graphene oxide for anisotropic photoresponse[J]. *Light Sci Appl*, 2020, **9**: 69.
- [50] Yong J L, Chen F, Yang Q, et al. *Nepenthes* inspired design of self-repairing omniphobic slippery liquid infused porous surface (SLIPS) by femtosecond laser direct writing[J]. *Adv Mater Interfaces*, 2017, **4**(20): 1700552.
- [51] Yong J L, Huo J L, Yang Q, et al. Femtosecond laser direct writing of porous network microstructures for fabricating super-slippery surfaces with excellent liquid repellence and anti-cell proliferation[J]. *Adv Mater Interfaces*, 2018, **5**(7): 1701479.
- [52] Liang J, Bian H, Yang Q, et al. Femtosecond laser-patterned slippery surfaces on PET for liquid patterning and blood resistance[J]. *Opt Laser Technol*, 2020, **132**: 106469.
- [53] Lv X D, Jiao Y L, Wu S Z, et al. Anisotropic sliding of underwater bubbles on microgrooved slippery surfaces by one-step femtosecond laser scanning[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2019, **11**(22): 20574–20580.
- [54] Deng C, Ki H. Tunable wetting surfaces with interacting cavities via femtosecond laser patterning and wet etching[J]. *J Appl Phys*, 2020, **128**(1): 015306.
- [55] Gopal V, Manivasagam G. Wear - corrosion synergistic effect on Ti-6Al-4V alloy in H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and albumin environment[J]. *J Alloys Compd*, 2020, **830**: 154539.
- [56] Sharma A, Oh M C, Kim J T, et al. Investigation of electrochemical corrosion behavior of additive manufactured Ti-6Al-4V alloy for medical implants in different electrolytes[J]. *J Alloys Compd*, 2020, **830**: 154620.
- [57] Zhang Z, Wu X Q, Tan J B. In-situ monitoring of stress corrosion cracking of 304 stainless steel in high-temperature water by analyzing acoustic emission waveform[J]. *Corros Sci*, 2019, **146**: 90–98.
- [58] Cheng Y, Yang Q, Lu Y, et al. A femtosecond laser for preparing a nontoxic slippery liquid-infused porous surface (slips) for improving the hemocompatibility of NiTi alloys[J]. *Biomater Sci*, 2020, **8**(23): 6505–6514.
- [59] Karkantonis T, Gaddam A, See T L, et al. Femtosecond laser-induced sub-micron and multi-scale topographies for durable lubricant-impregnated surfaces for food packaging applications[J]. *Surf Coat Technol*, 2020, **399**: 126166.
- [60] Fang Y, Yong J L, Cheng Y, et al. Liquid-infused slippery stainless steel surface prepared by alcohol-assisted femtosecond laser ablation[J]. *Adv Mater Interfaces*, 2021, **8**(5): 2001334.
- [61] Jiang J K, Gao J, Zhang H D, et al. Directional pumping of water and oil microdroplets on slippery surface[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2019, **116**(7): 2482–2487.
- [62] Tenjimbayashi M, Nishioka S, Kobayashi Y, et al. A lubricant-sandwiched coating with long-term stable anticorrosion performance[J]. *Langmuir*, 2018, **34**(4): 1386–1393.
- [63] Urata C, Nagashima H, Hatton B D, et al. Transparent organogel films showing extremely efficient and durable anti-icing performance[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, **13**(24): 28925–28937.
- [64] Ware C S, Smith-Palmer T, Peppou-Chapman S, et al. Marine antifouling behavior of lubricant-infused nanowrinkled polymeric surfaces[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2018, **10**(4): 4173–4182.
- [65] Wu D Q, Ma L W, Zhang F, et al. Durable deicing lubricant-infused surface with photothermally switchable hydrophobic/slippy property[J]. *Mater Des*, 2020, **185**: 108236.
- [66] Yao X, Dunn S S, Kim P, et al. Fluorogel elastomers with tunable transparency, elasticity, shape-memory, and antifouling properties[J]. *Angew Chem Int Ed*, 2014, **53**(17): 4418–4422.
- [67] Movafaghi S, Wang W, Bark D L, et al. Hemocompatibility of super-repellent surfaces: current and future[J]. *Mater Horiz*, 2019, **6**(8): 1596–1610.
- [68] Sun L Y, Bian F K, Wang Y, et al. Bioinspired programmable wettability arrays for droplets manipulation[J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2020, **117**(9): 4527–4532.
- [69] Sun Q Q, Wang D H, Li Y N, et al. Surface charge printing for programmed droplet transport[J]. *Nat Mater*, 2019, **18**(9): 936–941.
- [70] Huang S L, Li J, Liu L, et al. Lossless fast drop self-transport on anisotropic omniphobic surfaces: origin and elimination of microscopic liquid residue[J]. *Adv Mater*, 2019, **31**(27): 1901417.
- [71] Fang J H, Zhang Y B, Xiao L, et al. Self-propelled and electrobraking synergetic liquid manipulator toward microsampling and bioanalysis[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, **13**(12): 14741–14751.
- [72] Chen C, Huang Z C, Jiao Y L, et al. *In situ* reversible control between sliding and pinning for diverse liquids under ultra-low voltage[J]. *ACS Nano*, 2019, **13**(5): 5742–5752.
- [73] Chauhan A, Bernardin A, Mussard W, et al. Preventing biofilm formation and associated occlusion by biomimetic glycocalyxlike polymer in central venous catheters[J]. *J Infect Dis*, 2014, **210**(9): 1347–1356.
- [74] Chen G Q, Wu Q. The application of polyhydroxyalkanoates as tissue engineering materials[J]. *Biomaterials*, 2005, **26**(33): 6565–6578.
- [75] Huang N, Yang P, Leng Y X, et al. Hemocompatibility of titanium oxide films[J]. *Biomaterials*, 2003, **24**(13): 2177–2187.
- [76] Sun T L, Tan H, Han D, et al. No platelet can adhere-largely improved blood compatibility on nanostructured superhydrophobic surfaces[J]. *Small*, 2005, **1**(10): 959–963.
- [77] Fan H L, Chen P P, Qi R M, et al. Greatly improved blood compatibility by microscopic multiscale design of surface architectures[J]. *Small*, 2009, **5**(19): 2144–2148.
- [78] Daniello R J, Waterhouse N E, Rothstein J P. Drag reduction in turbulent flows over superhydrophobic surfaces[J]. *Phys Fluids*, 2009, **21**(8): 085103.
- [79] He W Q, Liu P, Zhang J Q, et al. Emerging applications of bioinspired slippery surfaces in biomedical fields[J]. *Chem Eur J*, 2018, **24**(56): 14864–14877.
- [80] Li X Y, Gao P, Tan J Y, et al. Assembly of metal-phenolic/catecholamine networks for synergistically anti-inflammatory, antimicrobial, and anticoagulant coatings[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2018, **10**(47): 40844–40853.
- [81] Manabe K, Kyung K H, Shiratori S. Biocompatible slippery fluid-infused films composed of chitosan and alginate via layer-by-layer self-assembly and their antithrombogenicity[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2015, **7**(8): 4763–4771.

- [82] Moradi S, Hadesfandiari N, Toosi S F, et al. Effect of extreme wettability on platelet adhesion on metallic implants: from superhydrophilicity to superhydrophobicity[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, 8(27): 17631–17641.
- [83] Villegas M, Zhang Y X, Abu Jarad N, et al. Liquid-infused surfaces: a review of theory, design, and applications[J]. *ACS Nano*, 2019, 13(8): 8517–8536.
- [84] Yuan S S, Luan S F, Yan S J, et al. Facile fabrication of lubricant-infused wrinkling surface for preventing thrombus formation and infection[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2015, 7(34): 19466–19473.
- [85] Doll K, Fadeeva E, Schaeske J, et al. Development of laser-structured liquid-infused titanium with strong biofilm-repellent properties[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2017, 9(11): 9359–9368.
- [86] Lee Y, Chung Y W, Park J, et al. Lubricant-infused directly engraved nano-microstructures for mechanically durable endoscopy lenses with anti-biofouling and anti-fogging properties[J]. *Sci Rep*, 2020, 10(1): 17454.
- [87] Liu X W, Wang L Q, Qiao Y F, et al. Adhesion of liquid food to packaging surfaces: mechanisms, test methods, influencing factors and anti-adhesion methods[J]. *J Food Eng*, 2018, 228: 102–117.
- [88] Schaidler L A, Balan S A, Blum A, et al. Fluorinated compounds in U. S. fast food packaging[J]. *Environ Sci Technol Lett*, 2017, 4(3): 105–111.
- [89] Williams H, Lindström A, Trischler J, et al. Avoiding food becoming waste in households – the role of packaging in consumers' practices across different food categories[J]. *J Clean Prod*, 2020, 265: 121775.
- [90] Williams H, Wikström F, Otterbring T, et al. Reasons for household food waste with special attention to packaging[J]. *J Clean Prod*, 2012, 24: 141–148.
- [91] Wohner B, Pauer E, Heinrich V, et al. Packaging-related food losses and waste: an overview of drivers and issues[J]. *Sustainability*, 2019, 11(1): 264.
- [92] Zouaghi S, Six T, Bellayer S, et al. Antifouling biomimetic liquid-infused stainless steel: application to dairy industrial processing[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2017, 9(31): 26565–26573.
- [93] Qin Y K, Li Y, Zhang D, et al. Wettability, durability and corrosion properties of slippery laser-textured aluminum alloy surface under water impact[J]. *Surf Coat Technol*, 2020, 394: 125856.
- [94] Zhang G Y, Liang B, Zhong Z X, et al. One-step solvent-free strategy for covalently attached, substrate-independent transparent slippery coating[J]. *Adv Mater Interfaces*, 2018, 5(20): 1800646.
- [95] Zhong X M, Hu H F, Yang L, et al. Robust hyperbranched polyester-based anti-smudge coatings for self-cleaning, anti-graffiti, and chemical shielding[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2019, 11(15): 14305–14312.
- [96] Lei L, Buddingh J, Wang J D, et al. Transparent omniphobic polyurethane coatings containing partially acetylated  $\beta$ -cyclodextrin as the polyol[J]. *Chem Eng J*, 2020, 380: 122554.

## 作者简介



杨青 (1968-) 女, 博士, 西安交通大学机械学院副教授, 博士生导师。1992年毕业于四川大学光电子科学技术系, 获理学学士。2009年毕业于中国科学院西安光学精密机械研究所, 获理学博士学位。研究领域主要包括: 飞秒激光仿生微纳制造, 微流控生物芯片以及微纳光学等。

E-mail: yangqing@mail.xjtu.edu.cn



方政, 西安交通大学机械工程学院 2020 级硕士生, 主要研究方向为猪笼草启发的仿生超滑表面飞秒激光微纳制造。



成扬, 西安交通大学机械工程学院 2019 级博士生, 主要研究方向为飞秒激光制备仿生超滑表面用于提升医疗植入材料的血液相容性。



张嘉亮, 西安交通大学电子科学与工程学院 2020 级博士生, 主要研究方向为飞秒激光制备金属稳定润湿性表面及其机理研究。



侯洵 (1936-), 中国科学院院士, 西安交通大学电子与信息工程学院教授。主要从事瞬态光学方面的研究工作。主持参与中国核试验、激光核聚变及重大基础研究项目, 研制了 8 种变象管高速摄影机, 使中国超快现象诊断的时间分辨率提高 6 个量级, 响应范围覆盖红外到软 X 射线整个波段, 为开创中国光电子类高速摄影领域做出了贡献。在中国首创转移阴极与冷、热钢封技术, 最先研制成双近贴聚焦象增强器。提出联用激光照明、干涉滤光及象增强器技术, 解决快、暗、小目标测量难题, 发展了中国新一代靶场光测设备。在国内率先研究透射式负电子亲和势 GaAs 阴极及场助 III-V 族光阴极与第三代象增强器, 发明了钨银氧铯阴极, 为中国光电器件及夜视技术的发展做出了贡献。先后参与研制一系列光电子类型的高速摄影机, 不仅为国内首创, 而且多数达到了国际先进水平。



【通信作者】陈烽 (1968-) 男, 博士, 西安交通大学电子科学与工程学院教授, 博士生导师, 陕西省信息光子技术重点实验室主任, 教育部微纳制造与测试技术国际合作联合实验室副主任。主要研究方向为: 激光仿生微纳制造、超快光子学和微纳光子学等。先后提出了硬脆性材料飞秒激光三维微纳制造、飞秒激光仿生微纳制造、飞秒激光微纳工程制造、压缩超快光谱成像技术等, 在 *Chem. Soc. Rev.*, *Adv. Funct. Mater.*, *Phys. Rev. Lett.* 等学术期刊上发表论文 300 余篇, ESI 高被引论文 9 篇, H 因子 38 (WOS), SCI 被引 5000 余次。

E-mail: chenfeng@mail.xjtu.edu.cn

## 团队介绍



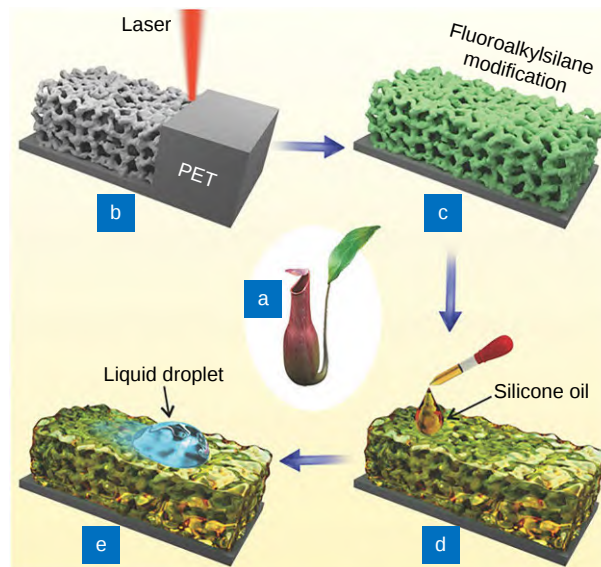
# UPL<sup>®</sup> 超快光子实验室

## Ultrafast Photonic Laboratory

超快光子实验室创建人为西安交通大学电子科学与工程学院陈烽教授, 团队成员包括 6 个副教授, 2 个访问学者, 11 个博士生, 以及 12 个硕士生。团队主要聚焦超快光学国际学术前沿, 开拓激光制造与超快成像共性技术。探索飞秒激光微纳制造在三维光子集成、仿生智能表面结构、微光学、微流控、微纳电磁控制与感应、微纳米光机电系统等领域的应用; 发展基于飞秒激光的微纳米结构与器件制备的新原理和新方法; 在分子尺度上研究飞秒激光与材料相互作用超快动力学与先进超快成像技术。

# The preparation and applications of bio-inspired slippery surface by femtosecond laser micro-nano manufacturing

Yang Qing<sup>1,2</sup>, Cheng Yang<sup>1,2</sup>, Fang Zheng<sup>1,2</sup>, Zhang Jialiang<sup>2,3</sup>, Hou Xun<sup>2,3</sup>, Chen Feng<sup>2,3\*</sup>



**Overview:** Nepenthes pitcher plant is a tropical insectivorous plant which is able to trap and digest insects. This unique property is mainly due to the rich micro/nano porous structures on the surfaces filled with a layer of lubricating, thus forming a slippery liquid-infused porous surface (SLIPS). When the insects stand on the mouth of pitch plant, they can easily fall into the pitcher because its inner surface is too smooth and thus digested by the digestive juices. Due to the mechanism of liquid-liquid contact between the lubricant and repelled object, SLIPS shows high stability and versatile liquid-repellency compared with superhydrophobic surfaces inspired by lotus leaves. Due to the fluidity of the lubricant, it can timely flow to the surface defects caused by external force and help recover the favorable slippery property. These excellent liquid repellency, stability and self-healing properties of SLIPS have attracted wide attentions from researchers, who carried out a large number of related studies. Methods to prepare SLIPS are mostly based on the three parts: fabrication of micro/nano-structures, low surface energy treatment and lubricant infusion. The fabrication of rough structure is the essential part during the process. Femtosecond laser has the ultra-short pulse width and ultra-high peak power, so it can process the majority of materials with high processing accuracy and strong controllability. Therefore, femtosecond laser has become a powerful tool for preparing the micro/nano-structure on the SLIPS. In addition, the femtosecond laser processing is directly performed on the material for subtractive manufacturing. It shows more stability compared with chemical treatment. In this paper, we focus on the preparation of SLIPS on different materials by femtosecond laser, including polymers, hard and brittle transparent materials, and metals. Then, the application of SLIPS is summarized in the fields of droplet bubble manipulation, biological anticoagulation, anti-fouling, and corrosion prevention. Finally, challenges of slippery surfaces were summarized.

Yang Q, Cheng Y, Fang Z, et al. The preparation and applications of bio-inspired slippery surface by femtosecond laser micro-nano manufacturing[J]. *Opto-Electron Eng*, 2022, 49(1): 210326; DOI: [10.12086/oe.2022.210326](https://doi.org/10.12086/oe.2022.210326)

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (62175195, 61875158), National Key Research and Development Program of China (2017YFB1104700), and Fundamental Research Funds for the Central Universities

<sup>1</sup>School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China; <sup>2</sup>State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China; <sup>3</sup>Shaanxi Key Laboratory of Photonics Technology for Information, School of Electronics & Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China

\* E-mail: [chenfeng@mail.xjtu.edu.cn](mailto:chenfeng@mail.xjtu.edu.cn)