

## 超浸润涂层在材料保护中的应用专栏

材料防护技术的发展,对国家建设、科技进步、技术创新以及学科的进一步发展具有重要意义,一直是人们极为关注的课题。良好的材料保护不仅能够维持材料自身性能的完整性,而且能够实现在更为苛刻工况下的长期应用。目前,采用涂镀层和表面改性从而将材料与介质隔开是材料保护研发的常用手段。受自然界众多生物表面的特殊浸润现象的启发,仿生超浸润涂层的开发成为了近年来研究的热点之一,并逐渐受到材料保护工作者的关注。通过在材料设计中构建具有超浸润特性的涂层表面,可获得自清洁、阻垢、防腐、防冻、防雾、减阻、抗菌等众多优异的性能,在材料保护领域展现出极大的发展空间。目前,超浸润技术多用于调节液滴对材料的附着及渗透能力,解决材料表面甚至内部易受污染失效的问题,在提高金属材料的耐腐蚀性以延长材料的使用寿命方面,展现出了在材料防护和应用领域扩展的广阔前景。

超浸润涂层在材料保护中的蓬勃发展得到了社会各界的广泛关注。为进一步推动相关领域的发展和应用,《材料保护》特开辟“超浸润涂层在材料保护中的应用”专栏,诚挚邀请了在仿生超浸润及材料防护领域有所成就的部分专家学者撰稿,重点推介我国在该领域的研究进展。我们期待这些举措能为相关研究人员和企业从业人员提供更好的交流平台推动材料技术产学研用融合创新,引领相关产业高质量发展,也希望能为产业发展抛砖引玉,期待并热诚欢迎行业从业专家及工程技术人员进一步深入探讨和继续赐稿交流。

西安科技大学 屈孟男

2023年6月

## 润滑液体注入的多孔表面在金属防腐蚀的应用进展

朱雪丹, 姚亚丽, 李杰辉, 何金梅, 屈孟男

(西安科技大学化学与化工学院, 陕西 西安 710054)

[摘要] 以猪笼草为仿生原型的润滑液体注入的多孔表面(SLIPS)是将润滑剂注入具有低表面能的粗糙多孔结构形成的超光滑表面。由于SLIPS润滑层优良的阻隔效果而在金属防腐蚀领域有较好的应用前景。介绍了SLIPS的构建机理并从基材直接结构化处理、原位生长和涂层处理3方面对SLIPS在金属表面的制备方法进行了归纳;对SLIPS在铝、铜、镁、钢4种不同金属表面的防腐蚀应用进行了综述;指出了应用于金属防腐蚀的SLIPS材料存在的不足并对其发展趋势进行了展望。

[关键词] 光滑表面; 金属防腐蚀; SLIPS; 猪笼草; 润滑液

[中图分类号] O647; TB34 [文献标识码] A doi: 10.16577/j.issn.1001-1560.2023.0128

[文章编号] 1001-1560(2023)06-0001-13

## Application Progress of Slippery Liquid Infused Porous Surfaces in Metal Corrosion Protection

ZHU Xue-dan, YAO Ya-li, LI Jie-hui, HE Jin-mei, QU Meng-nan

(College of Chemistry and Chemical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** The slippery liquid infused porous surfaces (SLIPS) with employing pitcher plants as a biomimetic prototype are ultra-smooth surfaces formed by injecting lubricants into rough porous structures with low surface energy. Owing to the excellent barrier effect, the SLIPS lubricating

[收稿日期] 2022-12-26

[基金项目] 陕西高校青年创新团队资助项目(21JP068);陕西省科技厅资助项目(2019JM-371);西安科技大学胡杨学者计划资助;西安科技大学优秀青年科学基金(2019YQ2-09)资助

[通信作者] 屈孟男,教授,博士生导师,研究方向为仿生功能材料,E-mail:mnanqu@gmail.com

layer has a good application prospect in the field of metal corrosion protection. In this work, the construction mechanism of SLIPS was introduced, and the preparation methods of SLIPS on metal surfaces were summarized from three aspects: direct substrate structuring, in-situ growth and coating treatment. The anti-corrosion applications of SLIPS on four different metal surfaces of aluminum, copper, magnesium and steel were reviewed. Furthermore, the shortcomings of SLIPS materials used in metal anti-corrosion were pointed out, and its development trend was prospected.

**Key words:** smooth surface; metal corrosion protection; SLIPS; pitcher plant; lubricant

## 0 前言

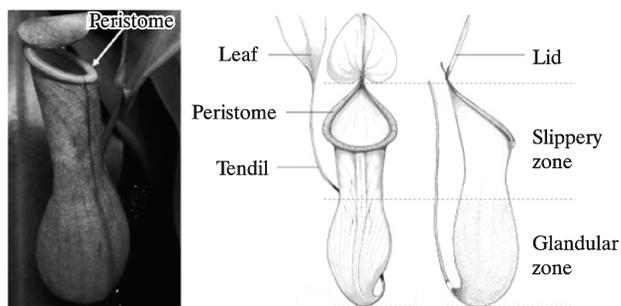
金属及其合金是许多领域的核心工程材料。铝(Al)、铜(Cu)、镁(Mg)、钢及其合金是广泛应用于工业、建筑、海洋和航空领域的常见金属。尽管金属在延展性、刚度和高强度重量比等许多物理特性方面非常有优势,但它们的局限性也是显而易见的。金属材料腐蚀就是其中之一<sup>[1]</sup>。金属腐蚀会导致金属部件过早失效,从而导致经济损失、环境污染甚至人员伤害等问题<sup>[2]</sup>。由腐蚀造成的能源和材料损失占全球能源使用量的20%。2014年,我国由于腐蚀造成的经济损失为21 278.2亿元,占国民生产总值的3.34%<sup>[3]</sup>。因此,采取有效的方法减缓腐蚀成为了目前科研和工程领域亟待解决的问题。

因腐蚀通常发生在金属表面,因此减缓甚至阻碍腐蚀性离子渗入金属内部形成微电池,就可以达到有效防腐的目的<sup>[4]</sup>。较为常见的防腐技术有2种:一种是在金属表面涂上一层防腐层,另一种是直接对金属表面进行处理。这2种方式都是为了改变腐蚀性液体在金属表面的润湿性能,降低界面张力或提高表面防水性能,从而在金属和腐蚀环境之间形成有效的保护屏障<sup>[5, 6]</sup>。

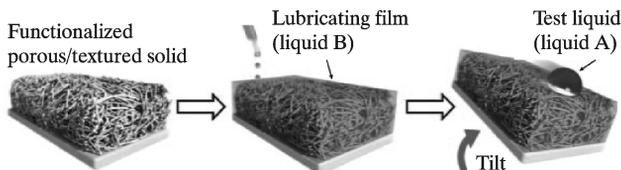
目前,由于仿生超疏水材料在防结冰<sup>[7, 8]</sup>、防污染<sup>[9, 10]</sup>、抗菌<sup>[11, 12]</sup>、自清洁<sup>[13, 14]</sup>等方面具有广阔的应用前景,引发了人们的广泛关注。以荷叶为灵感制备的超疏水表面,模仿了荷叶典型的微纳米复合粗糙结构和具有低表面能的蜡状物质,从而形成了高于 $150^\circ$ 的水接触角<sup>[15-17]</sup>。根据Cassie-Baxter模型,超疏水表面很容易捕获空气形成空气穴。这层气穴可以形成阻隔层对外部液体起到防御作用,从而保护金属基材免受外界的腐蚀,因此超疏水涂层在金属防腐方面有许多应用<sup>[18, 19]</sup>。然而,由于空气阻隔层的不稳定,尤其在含水环境中,粗糙表面上的气穴很容易被液体取代<sup>[20]</sup>。此时,超疏水表面的润湿状态转变为Wenzel模型,表面与腐蚀性液体的接触面积大大增加,防腐的效力大大降低。

另一种与仿荷叶表面不同的是以猪笼草作为仿生原型的润滑液体注入的多孔表面,简称SLIPS<sup>[21]</sup>,如图1a。SLIPS是将润滑剂注入微纳米多孔结构,从而在表

面形成一层光滑的润滑液体层,制备原理如图1b。自2011年Aizenberg团队首次人工制造出SLIPS表面<sup>[22]</sup>以来,越来越多的科研人员开始关注此方面的研究。SLIPS材料在液体排斥、防结冰<sup>[23, 24]</sup>、防污染<sup>[25, 26]</sup>、防结霜<sup>[27, 28]</sup>和防腐蚀等各种领域表现出卓越的非润湿性能。由于SLIPS注入的润滑剂通常不溶于水,不会像空气那样容易溶解<sup>[29]</sup>,因此在恶劣的外部环境中,SLIPS中的润滑层比超疏水表面的空气阻隔层更稳定。许多关于SLIPS进行金属腐蚀防护的研究进行了灌注润滑剂前的超疏水表面与注入润滑剂后得到的SLIPS的电化学阻抗谱和极化曲线的比较,发现SLIPS比超疏水表面的电化学阻抗通常高出2~3个数量级,腐蚀电流密度会低1~2个数量级,当长期浸泡于腐蚀性介质中时,超疏水表面的电化学阻抗值下降更快,证明SLIPS通常具有更优异的长期耐腐蚀性能<sup>[24, 30-32]</sup>。SLIPS和超疏水表面的长期耐腐蚀机理对比如图2。同时浸泡于腐蚀性介质时,由于空气层的不稳定,腐蚀性液体容易穿透超疏水表面接触到基材形成腐蚀点,而SLIPS由于注入了不易压缩的润滑液,有效地避免了一个问题。因此SLIPS比超疏水表面在保护金属免受腐蚀方面更有优势。



(a) 猪笼草的光学图像、组织及其纵断面<sup>[21]</sup>



(b) 仿猪笼草的SLIPS的制备原理图<sup>[22]</sup>

图1 猪笼草的光学图像、组织及其纵断面<sup>[21]</sup>及仿猪笼草的SLIPS的制备原理图<sup>[22]</sup>

Fig. 1 Optical image, tissue and profile of *Nepenthes*<sup>[21]</sup> and schematic diagram of preparation of *Nepenthes* imitation SLIPS<sup>[22]</sup>

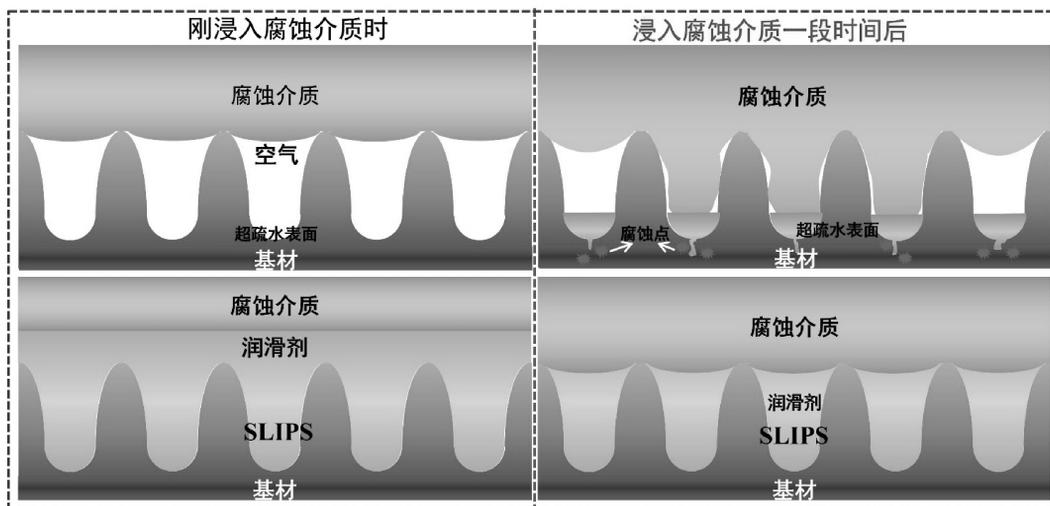


图2 超疏水表面与 SLIPS 的长期耐腐蚀机理图

Fig. 2 Long-term corrosion resistance mechanism diagram of superhydrophobic surface and SLIPS

本文讨论了 SLIPS 在金属表面的构建机理及制备方法,并对 SLIPS 在不同金属表面的应用进行了综述,同时指出了应用于金属防腐的 SLIPS 材料存在的不足,并对其发展趋势进行了展望。

## 1 SLIPS 的构建机理及制备方法

进行 SLIPS 的设计时需要注意 3 个要素<sup>[33]</sup>: (1) 进行润滑液体灌注的固体表面必须具有粗糙的疏水多孔结构以提供高效的毛细力来储存和稳定润滑液层; (2) 润滑剂和外部水相必须是不发生互溶的; (3) 润滑剂对固体表面的亲和力大于其对外部水性介质的亲和力。

通常,SLIPS 由 2 个主要部分构成:具有适当表面张力的粗糙多孔结构化表面和具有低表面张力的润滑液体<sup>[34]</sup>。结构化表面可以提供孔隙或凹坑等微结构,这些微结构因具有毛细管效应可以有效吸附保留润滑液体,而润滑液体被结构化表面吸附固定后可以形成具有低黏附性且动态可恢复的液体表面。许多已报道的用于金属耐腐蚀的 SLIPS 大多都是以疏水或超疏水表面作为灌注润滑液体的前驱体,因为它们对于低表面能的润滑液具有很好的亲和力,且它们的微纳米级粗糙结构非常有利于润滑层的稳定。因此,在金属表面上制备超疏水粗糙结构的方法也可以被应用于创建防腐的 SLIPS<sup>[29]</sup>。下面对构建 SLIPS 的方法进行详细介绍。

### 1.1 对基材直接进行结构化处理

基材的结构化处理是指在基材上通过蚀刻或雕刻过程构造所需要的结构(图 3)。光刻法是一种广泛用于制造图案表面的技术,包括影印光刻法<sup>[35, 36]</sup>、电子束光刻法<sup>[37]</sup>和软光刻法<sup>[38]</sup>等。Guo 等<sup>[39]</sup>受天然芦苇叶

纹理各向异性润湿性的启发,采用软光刻法利用聚二甲基硅氧烷成功地复制了芦苇叶的表面微结构。随后,将各种润滑剂注入仿芦苇表面制造出了各向异性的疏水或亲水光滑表面,成功实现了水(在空气中)和气泡(在水下)的定向转移。

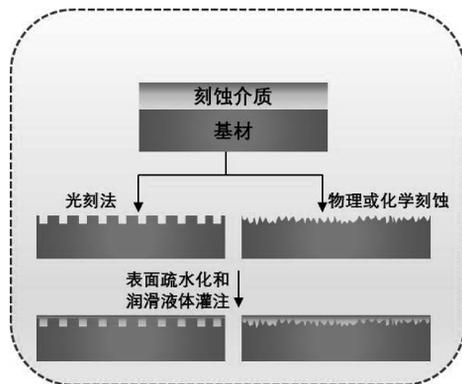


图3 对基材直接进行结构化处理制备 SLIPS 示意图

Fig. 3 Schematic diagram of preparing SLIPS by structural processing of substrate directly

对于金属基材,传统的物理或化学蚀刻工艺是对表面进行结构化处理的常用方法。Yang 等<sup>[40]</sup>将低合金钢浸入含有十四烷酸和高氯酸锂的电解质中,形成了十四酸铁的疏水表面,然后将全氟润滑剂注入该疏水表面制备出的 SLIPS 表现出优异的耐腐蚀性。Zhang 等<sup>[41]</sup>使用阳极氧化结合化学蚀刻在铝板上制造粗糙结构,该粗糙表面经过氟化处理后利用溶剂交换法注入润滑剂,得到了一种用于预防海洋腐蚀的 SLIPS。铝基板和钛基板可以通过阳极氧化构建较为规整的垂直多孔结构或密集柱状结构。阳极氧化是一种成熟的工业生产技术,具有广阔的实际应用前景。许多应用阳极氧化铝(AAO)为基础制备 SLIPS 进行防腐的例子将

在 2.1 节进行综述。

对金属基材进行直接结构化处理的优点是结构形态的可控性较好,缺点是成本高和制造面积及结构规模有限。由于表面结构与基材之间没有界面,因此界面黏附不会成为问题。

### 1.2 在基材表面进行原位生长

除了直接在基板上进行结构塑造外,还可以在基板上原位生长多孔或粗糙结构。这种方法通常要求整个基板浸泡在反应介质中(如气体或溶液环境),如图 4,所以所制备的 SLIPS 的面积在很大程度上取决于制造设备或容器的大小。

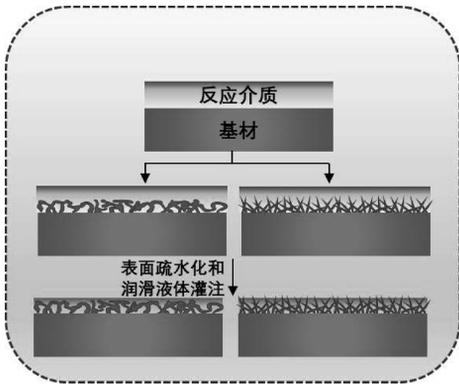


图 4 在基材表面进行原位生长制备 SLIPS 示意图

Fig. 4 Schematic diagram of preparing SLIPS by in-situ growth on the substrate surface

对于金属基材,电化学沉积是原位生长制备粗糙结构的常用方法<sup>[42, 43]</sup>。这种方法可以直接以目标基材作为电极进行制备。Hussain 等<sup>[43]</sup>采用电沉积法将  $\text{TiO}_2\text{-Ni}$  微纳米粗糙结构沉积于 Cu 片表面,再用肉豆蔻酸进行修饰以降低表面能,随后用 Krytox 润滑剂进行灌注,制备了协同响应光滑表面。该表面具有良好的耐腐蚀性、防污性和自清洁特性。

逐层组装(LBL)是另一种常见的构建微米级或者纳米级粗糙表面涂层的工艺<sup>[44, 45]</sup>。LBL 是通过化学键、氢键、静电力或者配位键等作用力驱动目标化合物自发地交替沉积在在模板上形成一层结构完整、具有一定功能的薄膜。Zhu 等<sup>[46]</sup>以甲醇为溶剂,将枝化聚乙烯亚胺(BPEI)和一种全氟聚电解质(Nafion)进行了逐层组装,制备了一种无需进一步低表面能修饰的粗糙多层超疏水表面。然后,用全氟聚醚润滑剂 Krytox100 对其进行灌注制备了 SLIPS,整个制备过程简便易行,耗时不到 10 min,且可应用于不锈钢、玻璃、硅片、高分子膜等多种基材,具有巨大的工业化大规模生产的潜力。通过加入无机纳米颗粒,可以大大提高表面粗糙度,使润滑剂能够更好地渗透进去<sup>[47, 48]</sup>。Sunny

等<sup>[49]</sup>通过沉积带负电荷的二氧化硅纳米颗粒和带正电荷的聚电解质在不同基材上(如玻璃、铝片、不锈钢和塑料等)构建纳米级的多孔结构。经 1H, 1 H, 2H, 2 H-全氟辛基三氯硅烷表面改性后注入氟化润滑油 Krytox100,形成了一个热力学稳定的 SLIPS。LBL 工艺操作简单,环境友好,实现了表面形貌和厚度的可控性,缺点是成本较高,不适用于大规模生产。

层状双氢氧化物(LDHs)和电镀也是用于原位生长制备金属超疏水基材的技术。Tuo 等<sup>[50]</sup>利用水热反应在铝的表面制备了一种 Zn-Al 层状双氢氧化物,用氟烷基硅烷对其进行改性,然后对其注入润滑剂(Krytox100),得到了 SLIPS。Xiang 等<sup>[30]</sup>采用电镀与化学置换反应相结合的方法在低碳钢表面制备了一种新型的金属多孔结构(Zn-Ni-Co),注入润滑剂(Krytox100)后制备了 SLIPS。以上 2 种方法制备的 SLIPS 均对金属基材起到了很好的防腐蚀效果,但是所涉及到的水热反应及电镀与化学置换反应均能耗较高。

### 1.3 在基材表面进行涂层处理

通过将结构化材料直接涂覆在基板上是一种相对简单且方便的微结构制造方法。这个过程通常包括 2 个步骤:先在基材上涂覆具有超疏水粒子、交联剂的混悬液,然后进行化学(例如聚合、交联)或物理(例如自组装、相分离)过程得到多孔粗糙微结构,如图 5。与原位生长的策略相比,表面涂层策略的制备面积不受设备大小的限制。

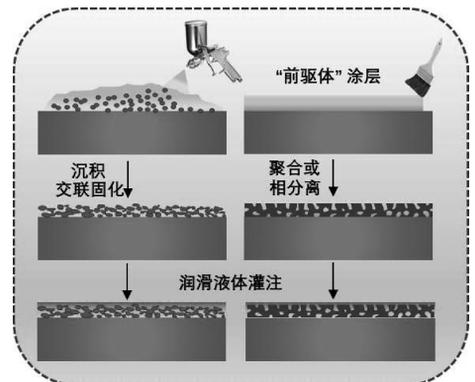


图 5 在基材表面进行涂层处理制备 SLIPS 示意图

Fig. 5 Schematic diagram of preparing SLIPS by coating on the surface of the substrate

喷涂法和旋涂法是最常用的简单且成本低廉的制备表面涂层的方法。这 2 种方法都要求涂覆前的液体涂料体系必须包含具有微米或纳米结构的材料和黏合剂。有机-无机复合体系较为常用,其中聚合物分子作为基体并黏附在基板上,无机纳米颗粒提供粗糙结构。关于以这种类型的超疏水涂层为基础制备 SLIPS 已有

大量报道<sup>[51, 52]</sup>。直接复合结构涂层的主要问题是结构层与基体之间的界面附着力差。因此,可以通过调整黏合剂来提高界面黏附力。Long 等<sup>[24]</sup>使用无机磷酸铝作为黏合剂,以具有天然多孔结构的凹凸棒石为无机纳米颗粒提供粗糙度,用简单的一步喷涂法在镁合金表面制备了超疏水涂层,具有良好的机械耐久性。经硅油灌注后得到的 SLIPS 对镁合金在 3.5% 的 NaCl 溶液中的腐蚀电流密度较裸镁合金降低了 2 个数量级。Yuan 等<sup>[53]</sup>通过原位聚合将 TiO<sub>2</sub> 沉积于凹凸棒石上,大大提高了纳米级粗糙度及表面羟基数量,同时选用聚醚砜和聚偏氟乙烯-六氟丙烯 2 种高分子黏合剂,由于这两种黏合剂对金属较好的黏附性及高分子和无机粒子之间的氢键作用使得超疏水涂层的机械强度大大提升。注入硅油后得到的 SLIPS 也具有良好的耐酸碱及耐热水性。

相分离通常用于在单一聚合物涂层中产生多孔结构。Hao 等<sup>[54]</sup>使用热诱导相分离工艺(TIPS)制备了多孔 PVDF 基板,注入硅油后得到了 SLIPS。它可用于提高多种金属基材的耐腐蚀性。除了 TIPS 工艺,其他相分离工艺如溶剂诱导相分离(NIPS)<sup>[55]</sup>和气相诱导相分离(VIPS)<sup>[56]</sup>都是很有前途的制备 SLIPS 前驱体的方法。

电喷涂和静电纺丝是在基材上制造粗糙表面的另一种简单可行的方法。Liu 等<sup>[57]</sup>通过电喷涂工艺在 Al 基板上制备了一种分层微米级结构的硅橡胶,然后进行氟化和润滑剂注入得到了 SLIPS。Vicente 等<sup>[58]</sup>利用静电纺丝技术在航空合金 AA7075 样品上沉积聚偏氟乙烯-六氟丙烯涂层,注入硅油后得到了防冰、耐腐蚀的 SLIPS。

## 2 SLIPS 在防腐蚀方面的应用

对于 SLIPS 的腐蚀性评估,根据不同的应用领域可以选择不同的介质,如去离子水、盐酸、NaOH 溶液、NaCl 溶液、Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> 溶液、NaHCO<sub>3</sub> 溶液等。评估的方法主要有失重测量、中子反射率、动电位曲线和电化学阻抗谱(EIS),其中后 2 种方法较为常用<sup>[59]</sup>。

### 2.1 SLIPS 在铝表面的防腐蚀应用

铝是地壳中最丰富的金属元素之一,具有良好的导热性和导电性以及强度系数高、比重低和阻隔性好等优点。2010~2018 年,我国氧化铝、电解铝和铝材产量逐年稳步攀升<sup>[60]</sup>。铝合金的应用范围从家庭用品、包装、电器、船舶和建筑,到航空航天、飞机和国防应用<sup>[61, 62]</sup>。铝在氧化介质(空气或水)中可以形成连续的表面氧化层(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),该氧化层有数纳米厚,这使得

铝自身具有一定的耐腐蚀性,有效地防止了后续氧化。然而,在某些情况下,将铝暴露在高浓度的酸性或碱性溶液中时会溶解这一氧化层,使其极易受到腐蚀。尤其在 pH 值为 4~9 的溶液中,在具有攻击性的阴离子(如氯离子)的存在下,这一稳定层很容易被局部攻击破坏<sup>[63, 64]</sup>。因此,人们采用了多种方法来提高铝合金在不同环境下的耐蚀性。

在铝表面制备润滑液体灌注的多孔表面是减缓甚至防止氧化铝层降解的一种很有前途的技术。Tuo 等<sup>[50]</sup>通过化学刻蚀和水热反应在铝表面制备了 Zn-Al 双层氢氧化物层,经氟硅烷改性得到了超疏水表面,注入润滑剂后得到了 SLIPS。通过电化学测试对其抗腐蚀性能进行了评价,结果 SLIPS 复合材料的腐蚀电流密度比未经处理的铝片和超疏水表面的腐蚀电流密度低约 2 个数量级。Zhang 等<sup>[65]</sup>制备了二氧化硅固体球、杨梅状空心球和海胆状空心球 3 种纳米颗粒,经氟硅烷改性后喷涂于铝合金表面,制备了 3 种不同形貌的超疏水表面,并注入润滑剂得到了 SLIPS。通过考察抗剪切、耐腐蚀、接触角滞后等性能,结果发现无论是超疏水表面还是 SLIPS,多级结构都表现出更好的性能。具有海胆状结构的 SLIPS(U-SLIPS)在旋转剪切测试中,经历 8 000 r/min 的旋转剪切后,滞后接触角仍小于 7°。在 3.5% 的 NaCl 溶液中浸泡 7 d 后, Nyquist 曲线显示 U-SLIPS 仍具有 10<sup>9</sup> Ω·cm<sup>2</sup> 的阻抗值,说明具有良好的防腐蚀耐久性。这是由于多级结构具有更高的比表面积和毛细管压力,使得超疏水表面贮存润滑油的能力变强,润滑剂损失减少。

阳极氧化是一种成熟的工业生产技术,具有广阔的实际应用前景。目前有许多应用阳极氧化铝(AAO)为基础的制备 SLIPS 进行防腐的例子。Zhang 等<sup>[41]</sup>通过电化学阳极氧化工艺构造了具有几十纳米有序孔隙的铝基板(图 6b 和 6c),然后用 1H,1H,2H,2H-全氟癸基三乙氧基硅烷对 AAO 层进行改性,经过 Krytox GPL107 润滑剂的注入,得到 SLIPS,其制备过程如图 6a,该 SLIPS 在较宽的温度范围内(293~353 K)具有较高的耐蚀性(涂层电阻  $R_c$  值为  $2.06 \times 10^9 \Omega \cdot \text{cm}^2$ )。在另一项研究中,Wang 等<sup>[66]</sup>对铝基板经过电解抛光后再进行阳极氧化,获得了具有柱孔结构的粗糙氧化铝层,经过氟化并注入润滑剂后得到 SLIPS。当该 SLIPS 浸没在硫酸盐还原菌(SRB)介质中时,SLIPS 可以抑制 SRB 的黏附和腐蚀介质的渗透。铝氧化物层和注入液体层都对 SLIPS 的保护有贡献。对于 AAO 基板,孔隙的直径和高度比是影响润滑层稳定性的重要参数。

Wu 等<sup>[67]</sup>在真空下采用两步润滑剂浸渍长且直的孔隙,使这些孔隙可以存储更多的油,制备的 SLIPS 表现出优越的长期稳定性和自愈合性能。AAO 层的纳米孔结构的几何特征也会影响其对润滑油的储存能力和耐腐蚀能力。Lee 等<sup>[68]</sup>研究了一种特殊设计的瓶形阳极氧化铝纳米孔,该孔上部孔隙直径小于下部孔隙直径。结果表明,与传统的直壁圆柱形孔和附加柱状结构的混合孔相比,瓶状孔有助于固定纳米结构中的润滑油,显著提高了 SLIPS 的耐久性和防腐蚀效果。此外,瓶状孔隙还可以增大润滑油的容量,使润滑油有效地覆盖在金属表面的裂纹处,具有独特的自愈能力。

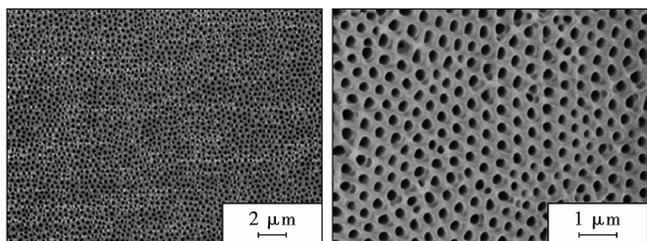
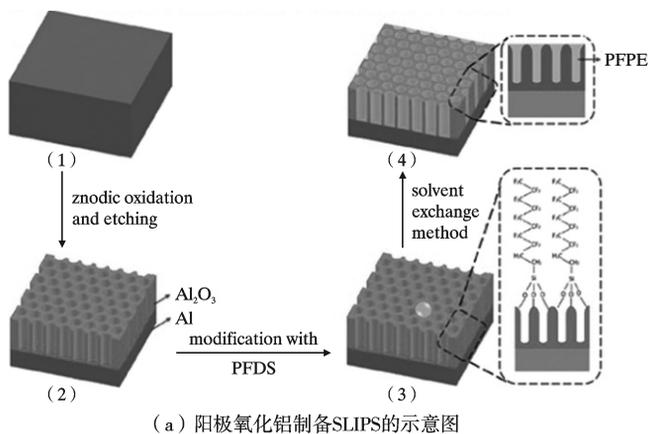


图6 阳极氧化铝制备 SLIPS 的示意图及铝基板被阳极氧化和蚀刻后形成的致密多孔的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 层的 SEM 形貌<sup>[41]</sup>

Fig. 6 Schematic diagram of anodized alumina preparation and low-magnification and high-magnification SEM images of dense porous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> layer formed after anodizing and etching of aluminum substrate<sup>[41]</sup>

## 2.2 SLIPS 在铜表面的防腐蚀应用

铜是一种应用广泛的重要材料,具有优良的电导率、导热性、抗压性和延展可塑性。铜在电力线路中用作导体,是家庭和工业供水管道的主要材料,也用作热导体和换热器<sup>[69]</sup>。然而,铜作为一种活性金属很容易被腐蚀,特别是在氯离子等腐蚀性离子存在的情况下。当氯离子浓度较低时,形成 CuCl 和 CuCl<sub>2</sub><sup>-</sup> 的不稳定膜,浓度时较高则形成 CuCl<sub>3</sub> 和 CuCl<sub>4</sub><sup>-</sup> 不稳定膜<sup>[70, 71]</sup>。因此,防止铜的腐蚀一直是人们关注的焦点。使用缓蚀剂是防止金属腐蚀的常用方法。用于铜的缓蚀剂通

常是含有极性基团、杂环化合物和共轭双键的有机抑制剂,这些抑制剂的固有毒性会对环境和人类健康造成危害<sup>[59]</sup>。超疏水涂层是一种有效的、环境友好的防止铜腐蚀的方法,而 SLIPS 则是基于超疏水涂层的更为持久地保护铜基材的方法。

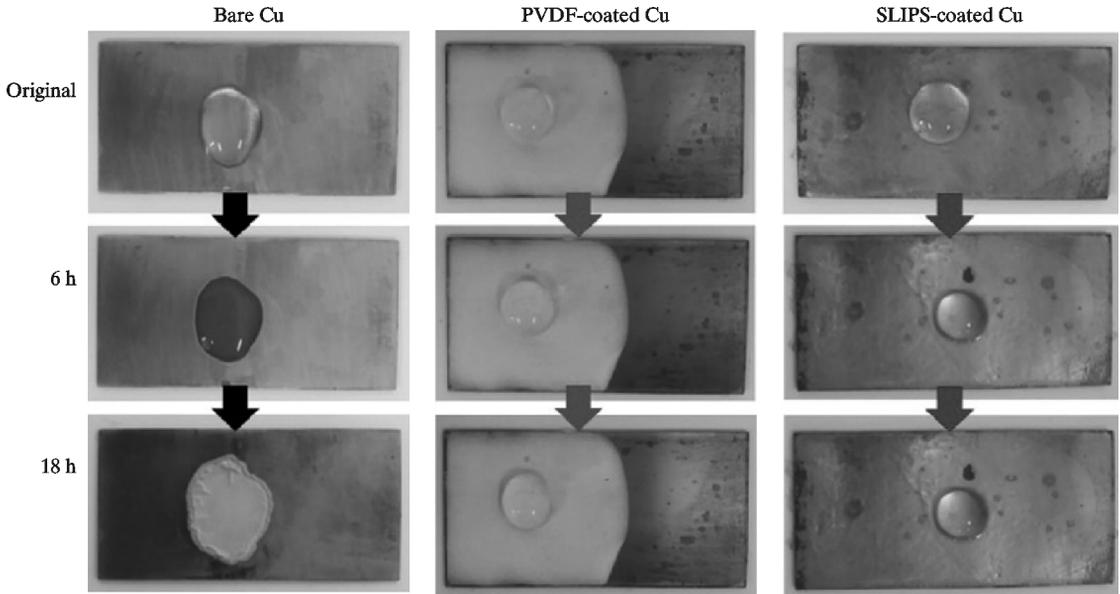
Hao 等<sup>[54]</sup>采用热诱导相分离的方法在铜片上制备了基于多孔聚偏氟乙烯(PVDF)的 SLIPS。如图7所示,该 SLIPS 较多孔 PVDF 涂层和裸铜表现出更好的耐酸性能(图7a)。电化学阻抗谱测试结果(EIS)显示有划痕的 SLIPS 较未划痕的 SLIPS 的 |Z| 值变化不大,而有划痕的 PVDF 涂层较未划痕的 PVDF 涂层的 |Z| 降低很多(图7b和7c),说明由于润滑油的高流动性能够恢复表面损伤,通过开尔文探针技术(SKPF)记录了该 SLIPS 涂层具有出色的自愈合性能(图7d)。

Ryu 等<sup>[72]</sup>将二氧化硅纳米颗粒(SiNP)组装在具有氢氧化铜纳米棒的基板上,然后进行低表面能处理和氟碳油灌注制备了 SLIPS。实验证明,在氢氧化铜纳米棒上通过逐层组装工艺引入的 SiNP 可以有效提高储油能力,提高了铜基板的抗酸能力和耐久性。

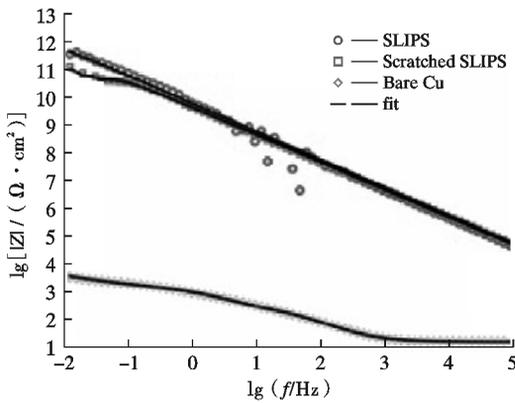
Hussain 等<sup>[43]</sup>在铜片表面沉积了一层 Ni-TiO<sub>2</sub> 微米粗糙结构,用脂肪酸进行修饰后用 Krytox 润滑剂进行灌注,制备了润滑油注入的光滑表面。该表面具有较好的长期耐腐蚀性,其腐蚀速率(0.101 53 m/a)低于脂肪酸修饰的 Ni-TiO<sub>2</sub> 表面(0.129 22 m/a)和未修饰的 Ni-TiO<sub>2</sub> 表面(0.226 135 m/a)。

## 2.3 SLIPS 在镁表面的防腐蚀应用

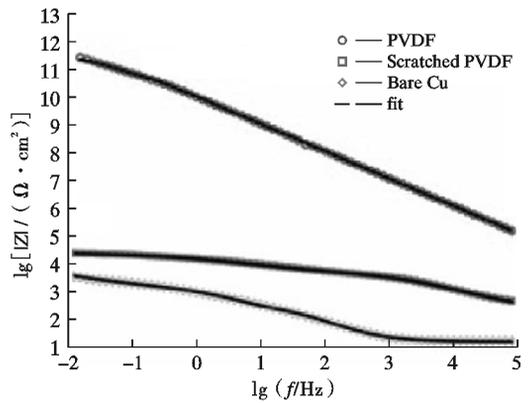
镁是一种最有前途的绿色工程材料,是用作基础结构合金的所有金属中最轻的一种。镁合金作为结构材料具有以下优点:高强度重量比、低比重、高导热率、良好的冲击吸附能力、良好的可加工性和可回收性。镁及其合金因在汽车、航空航天、电子工业以及医用植入材料的应用而引起了人们的极大兴趣<sup>[73, 74]</sup>。在干燥的空气中,镁对氧的高亲和力导致其表面形成一层薄薄的氧化镁。然而,即使在相对湿度很低的情况下,该氧化层的水化作用也会形成金属黏附性较弱的氢氧化镁脆性层<sup>[75]</sup>。因此,镁很容易在水溶液或潮湿的大气中发生腐蚀,从而严重阻碍了其室外的应用。在不牺牲镁优异的物理和力学性能的前提下,生成抗腐蚀表面是至关重要的。化学防腐蚀涂层(如化学转化、阳极氧化等)和物理防腐蚀涂层(如有机涂层、气相沉积等)是改善镁合金耐蚀性的一些方法<sup>[76]</sup>。但这些方法制备的涂层容易形成气孔、销孔、裂纹,这些缺陷结构成为了腐蚀性液体的渗透通道,使镁合金的耐腐蚀性能大



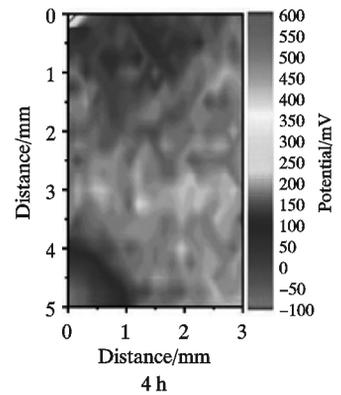
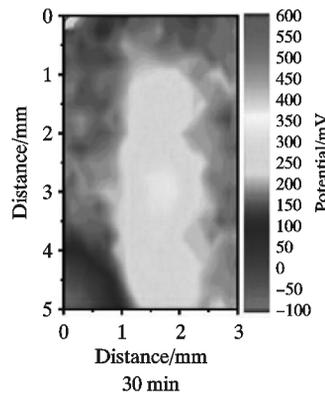
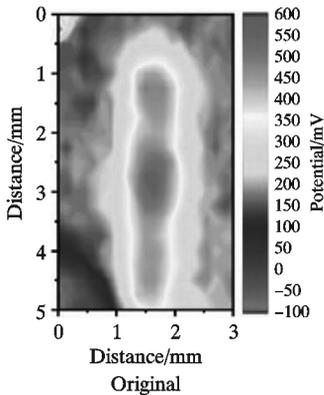
(a) 盐酸液滴 (1 mol/L) 在裸铜、PVDF涂层铜和SLIPS涂层铜表面的演变



(b) SLIPS、划痕SLIPS涂层和裸铜的波德谱



(c) PVDF、划痕PVDF涂层和裸铜的波德谱



(d) 原始划痕SLIPS和划痕30 min和4 h后的2D电位分布图

图 7 基于多孔 PVDF 的 SLIPS 的防腐蚀性能研究

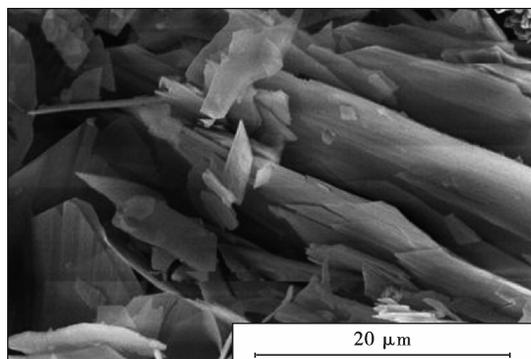
Fig. 7 Corrosion resistance of porous PVDF-based SLIPS

大降低<sup>[77]</sup>。在镁及其合金表面制备润滑液体注入的多孔表面是减少表面腐蚀的有效手段。制备这些表面的方法多种多样,其中水热法和喷涂法使用较多。

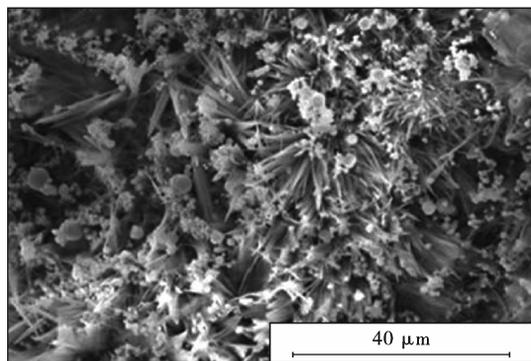
水热法是直接在镁合金表面制备 SLIPS 的常用方法,不同的水热反应会造就不同的粗糙微结构。Li 等<sup>[78]</sup>通过水热法在 AZ31B 镁合金表面制备了垂直交叉的纳米薄片粗糙结构(如图 8a),用硬脂酸进行改性

后形成了超疏水表面,再用全氟甲基异丙基醚(PFIE)作为润滑剂进行注入,得到了具有自清洁、抗污染、耐腐蚀性能的 SLIPS。这项研究中 SLIPS 表现出良好的热辅助修复能力,这是由于 PFIE 液体分子受热迁移和滞留在微孔中的润滑液分子的汽化所致,而超疏水表面则并不具有这样的修复能力。Fan<sup>[79]</sup>在  $MnSO_4$  水溶液和硬脂酸的乙醇溶液的混合液体中加入 AZ31 镁合

金片,通过一步水热法制备了具有微米级“花”结构超疏水镁合金片(如图 8b)。将该超疏水镁合金片浸入全氟聚醚(PFPE)中 4 h 后得到的 SLIPS 具有长久的稳定性及耐腐蚀性能。



(a) 垂直交叉的纳米薄片粗糙结构<sup>[76]</sup>



(b) 微米级“花”结构<sup>[79]</sup>

图 8 水热法在镁合金表面制备的不同粗糙结构

Fig. 8 Different rough structures prepared on magnesium alloy surface by hydrothermal method

原位生长也可用于在镁合金表面制备粗糙结构。Kan 等<sup>[80]</sup>用  $\text{Sm}(\text{NO}_3)_3$  溶液简单浸泡 AZ31B 镁合金,不需要复杂工艺和苛刻的温度压力,就在合金表面生成了  $\text{Sm}_2\text{O}_3$  沉淀,从而形成了一种纳米片环绕的粗糙结构,经过硬脂酸与  $\text{Sm}^{3+}$  的配位形成了超疏水表面。该表面经灌注二甲基硅油形成的 SLIPS 具有良好的自清洁、耐腐蚀及自修复性能。

近年来出现了应用具有微纳米结构的粗糙颗粒制备涂层保护镁合金的研究。Wang 等<sup>[81]</sup>将蜡烛灰和聚氨酯的乙醇溶液喷涂于镁合金表面形成疏水表面,接着注入硅油得到 SLIPS。该 SLIPS 具有良好的抗污性能及耐腐蚀性能。SLIPS 比蜡烛灰疏水表面及裸镁片的腐蚀电流密度分别小 10 倍和 100 倍。本课题组将海泡石经十六烷基三甲基硅烷改性后与无机磷酸铝黏合剂混合后喷涂于 AZ31B 镁合金表面,得到了力学性能良好的多孔超疏水表面,经硅油灌注后得到了 SLIPS。该 SLIPS 在 3.5%NaCl 溶液中浸泡 2 h 后的腐蚀电流密

度是  $2.431 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ ,比超疏水表面和裸镁合金的腐蚀电流密度分别低 2 个和 3 个数量级<sup>[32]</sup>。

## 2.4 SLIPS 在钢表面的防腐蚀应用

钢及其合金是用途最为广泛的工程材料之一,在人类的日常生活以及工业应用中发挥着重要作用。全球粗钢年产量超过 15 亿 t<sup>[82]</sup>,我国的钢铁出口量在 2017 年就已经达到了全球第一,进口量为全球第 11 名<sup>[83]</sup>。钢的类型基于化学成分的不同有成千上万种,可以满足多种用途。通常钢中的合金元素包含铁、碳、铬、钨、铜、铝和锰。改变钢材料中合金元素的量可以改变其硬度、延展性和抗拉强度等性能。将钢中的碳含量从 0.25% 提高到 2.00%,就得到了碳钢。碳钢由于成本低、强度高成为海洋、化工、石油生产等领域最常用的材料之一。不锈钢是一种低碳钢,通常含有 10%~20% 的铬作为主要合金元素,可以在表面形成钝化膜,具有较好的耐腐蚀性。不锈钢在石化、建筑、海事和航空工业领域有广泛的应用<sup>[84, 85]</sup>。然而,不锈钢在卤素离子等侵蚀性离子存在的条件下容易发生钝化膜击穿出现点蚀<sup>[86]</sup>。而碳钢跟不锈钢相比单位重量成本要低得多,因此在腐蚀性介质中被广泛应用为结构钢材<sup>[59]</sup>。结构钢材失效的主要原因就是腐蚀。中国目前每年因腐蚀而报废的钢材占 20% 左右<sup>[87]</sup>。因此,提高钢合金在腐蚀环境下的稳定性是一项重大挑战。润滑液注入的多孔表面的研究对提高钢的耐蚀性和扩大其应用领域具有重要意义。在钢基板上制备 SLIPS 的方法主要有蚀刻<sup>[88, 89]</sup>、喷涂<sup>[31, 90]</sup>、阳极氧化<sup>[91, 92]</sup>等。

电解和电镀是在钢材表面原位制备涂层的常用方法。Yang 等<sup>[40]</sup>采用溶解-沉淀的策略,利用铁与十四烷酸和高氯酸锂的电解反应,在低合金钢表面形成了基于十四酸铁的粗糙表面,然后将全氟润滑剂注入该疏水表面制备出 SLIPS。该 SLIPS 与未灌注润滑液的粗糙表面和裸钢相比,具有更好的长期耐腐蚀性能。同时实验结果也表明润滑剂注入量的增加可以提高 SLIPS 的耐腐蚀性能。Xiang 等<sup>[30]</sup>采用电镀与化学置换反应相结合的方法在低碳钢表面制备了一种新型的金属多孔结构(Zn-Ni-Co),经氟硅烷改性后得到超疏水表面 SC,注入润滑剂(Krytox100)后制备了 SLIPS。所制备的 SLIPS 比 SC 和裸钢的腐蚀电流密度分别低了 2 个和 4 个数量级。SLIPS 经小刀刻划出划痕后放置于空气中 2 h 后的腐蚀电流密度明显高于刚经历划痕的 SLIPS,并接近未划痕的 SLIPS,表现出良好的自修复性能。

喷涂法是用来制备 SLIPS 前驱体的简便方法,所

制备涂层不仅可以应用于保护钢表面,还可以应用于多种表面。Yuan 等<sup>[53]</sup>利用 Ti-O-Si 共价键和氢键,将大量的 TiO<sub>2</sub>沉积于凹凸棒石纳米棒上,使得超疏水涂层中形成了独特的仿生“玉米状”结构,大大提高了润滑油的储存能力。所制备的 SLIPS 不仅可以保护钢材,还可以在木材、玻璃、PTFE 板和尼龙泡沫上进行应用。Sun 等<sup>[90]</sup>首先在钢板表面喷涂了氧化石墨/环氧树脂的丙酮溶液,干燥后再喷涂一层  $\alpha$ -磷酸锆/聚四氟乙烯的乙醇溶液得到了超疏水耐摩擦涂层,注入 PFPE 润滑剂后得到了润滑液注入表面(LIS)。LIS 表现出优异的润滑特性和自洁特性,LIS 涂层在浸泡 30 d 后仍能抵抗强酸或强碱腐蚀,在电化学腐蚀试验中也具有优异的防腐性能。Liang 等<sup>[31]</sup>用 1H,1H,2H,2H-全氟癸基三乙氧基硅烷改性 SiO<sub>2</sub>颗粒,得到超疏水 SiO<sub>2</sub>纳米颗粒,然后将其喷涂于提前涂抹了虫胶的 Q235 碳钢表面,干燥 4 h 后得到了机械耐久性优良的超疏水表面,再进行 PFPE 注入得到 SLIPS。SKP 结果表明,由于润滑油的流动性,SLIPS 表面划痕在 60 min 后可完全愈合。细菌沉降和电化学实验结果表明,在硫酸盐还原菌培养液中浸泡 14 d 后,SLIPS 具有稳定、优良的防污和防腐蚀性能。

### 3 总结与展望

受猪笼草启发的润滑液体注入的多孔表面 SLIPS 因其特殊的性质和潜在的工业应用而受到了广泛的关注。制备 SLIPS 的前驱体固体表面通常为粗糙的超疏水表面以保证高的毛细效应对润滑剂的亲和力,用来灌注的润滑剂和外部水相必须是不发生互溶的。由于 SLIPS 的润滑剂层对外界液体的有效阻隔,因而 SLIPS 在保护金属免受腐蚀方面表现出优异的性能。SLIPS 表面的耐腐蚀性能在动电位极化测试中表现在腐蚀电位向正值的转移和腐蚀电流密度较裸金属的降低超过 2 个数量级 2 个方面。

本文总结了 SLIPS 的制备方法,并分别对其在铝、铜、镁和钢等金属防腐蚀方面的应用分别进行了介绍。基于以上综述,SLIPS 在金属防腐蚀方面的应用还存在一些问题:

(1) 在 SLIPS 的制备方面:直接在金属上制备粗糙表面和在金属上原位生长制备粗糙表面的工艺较为复杂,成本较高,不利于实现大规模生产;喷涂法制备粗糙表面简便易行,但是涂层与金属之间的黏附力问题需要重点关注;

(2) 为了达到较好的效果,所使用的低表面能改性

剂和进行灌注选用的润滑剂为含氟化学品,价格昂贵且毒性大;

(3) 由于润滑剂的挥发或被外界液体挟带等原因会造成损失,严重影响 SLIPS 的持久性。可以将溶胀法制备的自润滑的 SLIPS 与金属表面应用进行结合,开发新型的金属耐腐蚀 SLIPS。

### [ 参 考 文 献 ]

- [ 1 ] WANG D, BIERWAGEN G P. Sol-gel coatings on metals for corrosion protection [ J ]. Progress in Organic Coatings, 2009, 64 ( 4 ): 327-338.
- [ 2 ] EJENSTAM L, OVASKAINEN L, RODRIGUEZ-MEIZOSO I, et al. The effect of superhydrophobic wetting state on corrosion protection - The AKD example [ J ]. Journal of Colloid and Interface Science, 2013, 412: 56-64.
- [ 3 ] 侯保荣. 腐蚀成本与经济发展 [ J ]. 中国科技产业, 2020 ( 2 ): 21-22.  
HOU B R. Corrosion cost and Economic Development [ J ]. China Science and Technology Industry, 2020 ( 2 ): 21-22.
- [ 4 ] 杨晓娜. Q235 碳钢表面超疏水自修复防腐蚀涂层的制备及其性能研究 [ D ]. 吉林: 吉林大学, 2021.  
YANG X N. Preparation and properties of self-healing superhydrophobic coating on carbon steel Q235 [ D ]. Jilin: Jilin University, 2021.
- [ 5 ] MOMEN G, FARZANEH M. Facile approach in the development of icephobic hierarchically textured coatings as corrosion barrier [ J ]. Applied Surface Science, 2014, 299: 41-46.
- [ 6 ] WANG P, ZHANG D, LU Z. Advantage of super-hydrophobic surface as a barrier against atmospheric corrosion induced by salt deliquescence [ J ]. Corrosion Science, 2015, 90: 23-32.
- [ 7 ] JIANG Z, WANG X, JIA H, et al. Superhydrophobic Polytetrafluoroethylene/Heat-Shrinkable Polyvinyl Chloride Composite Film with Super Anti-Icing Property [ J ]. Polymers, 2019, 11 ( 5 ): 805.
- [ 8 ] WENG C, CHANG C, PENG C, et al. Advanced Anticorrosive Coatings Prepared from the Mimicked Xanthosoma Sagittifolium - leaf - like Electroactive Epoxy with Synergistic Effects of Superhydrophobicity and Redox Catalytic Capability [ J ]. Chemistry of Materials, 2011, 23 ( 8 ): 2 075-2 083.
- [ 9 ] CHAPMAN J, LE NOR L, BROWN R, et al. Antifouling performances of macro-to micro-to nano-copper materials for the inhibition of biofouling in its early stages [ J ]. Journal of Materials Chemistry B, 2013, 1 ( 45 ): 6 194-6 200.
- [ 10 ] BROWN R, RUSSELL S, MAY S, et al. Reproducible Superhydrophobic PVC Coatings; Investigating the Use of Plas-

- ticizers for Early Stage Biofouling Control[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2017, 19 (7) : 1700053.
- [11] GHASEMI N, SEYFI J, ASADOLLAHZADEH M J. Imparting superhydrophobic and antibacterial properties onto the cotton fabrics: synergistic effect of zinc oxide nanoparticles and octadecanethiol[J]. *Cellulose*, 2018, 25 (7) : 4 211–4 222.
- [12] SEYFI J, PANAHI -SARMAD M, ORAEIGHODOUSI A, et al. Antibacterial superhydrophobic polyvinyl chloride surfaces via the improved phase separation process using silver phosphate nanoparticles [J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2019, 183; 110438.
- [13] LI H, YU S. A robust superhydrophobic surface and origins of its self-cleaning properties[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 420; 336–345.
- [14] LATTHE S S, SUTAR R S, KODAG V S, et al. Self-cleaning superhydrophobic coatings: Potential industrial applications[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2019, 128; 52–58.
- [15] FENG L, LI S, LI Y, et al. Super-Hydrophobic Surfaces: From Natural to Artificial[J]. *Advanced Materials*, 2002, 14 (24) : 1 857–1 860.
- [16] NEINHUIS C, BARTHLOTT W. Characterization and Distribution of Water-Repellent, Self-Cleaning Plant Surfaces [J]. *Annals of Botany*, 1997, 79(6) : 667–677.
- [17] BARTHLOTT W, NEINHUIS C. Purity of the sacred lotus, or escape from contamination in biological surfaces [J]. *Planta*, 1997, 202(1) : 1–8.
- [18] MOHAMED A M A, ABDULLAH A M, YOUNAN N A. Corrosion behavior of superhydrophobic surfaces: A review [J]. *Arabian Journal of Chemistry*, 2015, 8(6) : 749–765.
- [19] LI C, ZHU M, OU J, et al. Dynamic corrosion behavior of superhydrophobic surfaces [J]. *RSC Advances*, 2018, 8 (51) : 29 201–29 209.
- [20] POETES R, HOLTZMANN K, FRANZE K, et al. Metastable Underwater Superhydrophobicity [J]. *Physical Review Letters*, 2010, 105(16) : 166104.
- [21] HUANG C, GUO Z. Fabrications and Applications of Slippery Liquid-infused Porous Surfaces Inspired from Nature: A Review [J]. *Journal of Bionic Engineering*, 2019, 16 (5) : 769–793.
- [22] 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 (7 365) : 443–447.
- [23] WANG C, GUO Z. Liquid infused surfaces with anti-icing properties [J]. *Nanoscale*, 2019, 11 (47) : 22 615 – 22 635.
- [24] LONG Y, YIN X, MU P, et al. Slippery liquid-infused porous surface (SLIPS) with superior liquid repellency, anti-corrosion, anti-icing and intensified durability for protecting substrates[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2020, 401; 126137.
- [25] WANG P, ZHANG D, LU Z. Slippery liquid-infused porous surface bio-inspired by pitcher plant for marine anti-biofouling application[J]. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2015, 136; 240–247.
- [26] ZHANG M, YU J, CHEN R, et al. Highly transparent and robust slippery lubricant-infused porous surfaces with anti-icing and anti-fouling performances [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019, 803; 51–60.
- [27] MA Q, WANG W, DONG G. Facile fabrication of biomimetic liquid-infused slippery surface on carbon steel and its self-cleaning, anti-corrosion, anti-frosting and tribological properties [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2019, 577; 17–26.
- [28] KIM P, WONG T S, ALVARENGA J, et al. Liquid-Infused Nanostructured Surfaces with Extreme Anti-Ice and Anti-Frost Performance[J]. *ACS Nano*, 2012, 6 (8) : 6 569–6 577.
- [29] DENG R, SHEN T, CHEN H, et al. Slippery liquid-infused porous surfaces (SLIPSs): a perfect solution to both marine fouling and corrosion? [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2020, 8 (16) : 7 536–7 547.
- [30] XIANG T, ZHANG M, SADIG H R, et al. Slippery liquid-infused porous surface for corrosion protection with self-healing property [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 345; 147–155.
- [31] LIANG Y, LI C, WANG P, et al. Fabrication of a robust slippery liquid infused porous surface on Q235 carbon steel for inhibiting microbiologically influenced corrosion [J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 631; 127696.
- [32] ZHU X, HE J, YAO Y, et al. A substrate-friendly, sepiolite-based porous surface infused with slippery liquid with outstanding liquid repellency and metal corrosion resistance [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2022, 449; 128935.
- [33] WANG C, GUO Z. A comparison between superhydrophobic surfaces (SHS) and slippery liquid-infused porous surfaces (SLIPS) in application [J]. *Nanoscale*, 2020, 12 (44) : 22 398–22 424.
- [34] ZHANG L, LIU G, GUO Y, et al. Bioinspired Functional Surfaces for Medical Devices [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 35(1) : 43.
- [35] SUBRAMANYAM S B, RYKACZEWSKI K, VARANASI K K. Ice Adhesion on Lubricant-Imregnated Textured Sur-

- faces[J]. *Langmuir*, 2013, 29 (44): 13 414–13 418.
- [36] HE W, LIU P, JIANG J, et al. Development of multifunctional liquid-infused materials by printing assisted functionalization on porous nanocomposites[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2018, 6(9): 4 199–4 208.
- [37] EPSTEIN A K, WONG T S, BELISLE R A, et al. Liquid-infused structured surfaces with exceptional anti-biofouling performance[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109 (33): 13 182–13 187.
- [38] KAJIYA T, WOOH S, LEE Y, et al. Cylindrical chains of water drops condensing on microstructured lubricant-infused surfaces[J]. *Soft Matter*, 2016, 12 (46): 9 377–9 382.
- [39] GOU X, GUO Z. Reed leaf-inspired anisotropic slippery lubricant-infused surface for water collection and bubble transportation[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 411: 128495.
- [40] YANG S, QIU R, SONG H, et al. Slippery liquid-infused porous surface based on perfluorinated lubricant/iron tetradecanoate: Preparation and corrosion protection application[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 328: 491–500.
- [41] ZHANG M, DONG M, CHEN S, et al. Slippery Liquid-infused Porous Surface Fabricated on Aluminum Maintains Stable Corrosion Resistance at Elevated Temperatures[J]. *Engineered Science*, 2018(3): 67–76.
- [42] SABLowski J, LINNEMANN J, HEMPEL S, et al. Electrodeposited metal-organic framework films as self-assembled hierarchically superstructured supports for stable omniphobic surface coatings[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8 (1): 15400.
- [43] HUSSAIN M M, KUNWAR A, MAJEED M K, et al. Superhydrophobic Surface and Lubricant-Infused Surface: Implementing Two Extremes on Electrodeposited Ni-TiO<sub>2</sub> Surface to Drive Optimal Wettability Regimes for Droplets' Multifunctional Behaviors[J]. *Advanced Engineering Materials*, 2021, 23(10): 2100266.
- [44] CHEN X, REN K, WANG J, et al. Infusing Lubricant onto Erasable Microstructured Surfaces toward Guided Sliding of Liquid Droplets[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(2): 1 959–1 967.
- [45] HUANG W, CHEN X, HU M, et al. Patterned Slippery Surface through Dynamically Controlling Surface Structures for Droplet Microarray[J]. *Chemistry of Materials*, 2019, 31(3): 834–841.
- [46] ZHU G H, CHO S H, ZHANG H, et al. Slippery Liquid-Infused Porous Surfaces (SLIPS) Using Layer-by-Layer Polyelectrolyte Assembly in Organic Solvent[J]. *Langmuir*, 2018, 34(16): 4 722–4 731.
- [47] SUNNY S, CHENG G, DANIEL D, et al. Transparent anti-fouling material for improved operative field visibility in endoscopy[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2016, 113 (42): 11 676–11 681.
- [48] TSUGE Y, MORIYA T, MORIYAMA Y, et al. Slippery Liquid-Immobilized Coating Films Using in Situ Oxidation-Reduction Reactions of Metal Ions in Polyelectrolyte Films[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(17): 15 122–15 129.
- [49] SUNNY S, VOGEL N, HOWELL C, et al. Lubricant-Infused Nanoparticulate Coatings Assembled by Layer-by-Layer Deposition[J]. *Advanced Functional Materials*, 2014, 24 (42): 6 658–6 667.
- [50] TUO Y, ZHANG H, CHEN W, et al. Corrosion protection application of slippery liquid-infused porous surface based on aluminum foil[J]. *Applied Surface Science*, 2017, 423: 365–374.
- [51] WANG N, XIONG D, LU Y, et al. Design and Fabrication of the Lyophobic Slippery Surface and Its Application in Anti-Icing[J]. *Journal of Physical Chemistry C*, 2016, 120 (20): 11 054–11 059.
- [52] WANG Y, ZHANG H, LIU X, et al. Slippery liquid-infused substrates: a versatile preparation, unique anti-wetting and drag-reduction effect on water[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2016, 4(7): 2 524–2 529.
- [53] YUAN S, PENG J, ZHANG X, et al. A mechanically robust slippery surface with 'corn-like' structures fabricated by in-situ growth of TiO<sub>2</sub> on attapulgite[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2021, 415: 128953.
- [54] HAO Z, CHEN C, SHEN T, et al. Slippery liquid-infused porous surface via thermally induced phase separation for enhanced corrosion protection[J]. *Journal of Polymer Science*, 2020, 58(21): 3 031–3 041.
- [55] OKADA I, SHIRATORI S. High-Transparency, Self-Standable Gel-SLIPS Fabricated by a Facile Nanoscale Phase Separation[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6 (3): 1 502–1 508.
- [56] BROWN P S, BHUSHAN B. Liquid-impregnated porous polypropylene surfaces for liquid repellency[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2017, 487: 437–443.
- [57] LIU Q, YANG Y, HUANG M, et al. Durability of a lubricant-infused Electro spray Silicon Rubber surface as an anti-icing coating[J]. *Applied Surface Science*, 2015, 346: 68–76.
- [58] VICENTE A, RIVERO P J, GARCÍA P, et al. Icephobic

- and Anticorrosion Coatings Deposited by Electrospinning on Aluminum Alloys for Aerospace Applications[J]. *Polymers*, 2021, 13(23): 4164.
- [59] VAZIRINASAB E, JAFARI R, MOMEN G. Application of superhydrophobic coatings as a corrosion barrier: A review [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2018, 341: 40–56.
- [60] 余欣未, 蒋显全, 谭小东, 等. 中国铝产业的发展现状及展望[J]. *中国有色金属学报*, 2020, 30(4): 709–718.  
SHE X W, JIANG X Q, TAN X D, et al. Status and prospect for aluminum industrial development in China[J]. *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*, 2020, 30(4): 709–718.
- [61] 洪海波, 魏庆丰, 杜坤. 铝点焊技术在汽车轻量化中的应用[J]. *汽车工艺师*, 2022(8): 14–16.  
HONG H B, WEI Q F, DU K. Application of Aluminum Spot Welding Technology in Automobile Lightweight [J]. *Automotive Technologist*, 2022(8): 14–16.
- [62] 张强. 铝、镁合金铸件在航天惯性器件上的应用:2019中国铸造活动周论文集[C]. 北京:中国机械工程学会铸造行业生产力促进中心, 中国机械工程学会铸造分会, 2019:446.  
ZHANG Q. Application of aluminum and magnesium alloy castings in space inertial devices:2019 China Casting Week Proceedings [C]. Beijing: Chinese Mechanical Engineering Society, Foundry Industry Productivity Promotion Center, Foundry Branch of Chinese Mechanical Engineering Society, 2019: 446.
- [63] TROMPETTE J L, ARURAUULT L, FONTORBES S, et al. Influence of the anion specificity on the electrochemical corrosion of anodized aluminum substrates[J]. *Electrochimica Acta*, 2010, 55(8): 2 901–2 910.
- [64] ABDULSTAAR M, MHAEDE M, WAGNER L, et al. Corrosion behaviour of Al 1050 severely deformed by rotary swaging[J]. *Materials & Design*, 2014, 57: 325–329.
- [65] ZHANG M, SUN G, GUO H, et al. Effect of Morphology Evolution on the Anticorrosion Performance of Superhydrophobic Surfaces and Lubricant - Infused Surfaces [J]. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 2020, 8(8): 3 170–3 180.
- [66] WANG P, LU Z, ZHANG D. Slippery liquid-infused porous surfaces fabricated on aluminum as a barrier to corrosion induced by sulfate reducing bacteria[J]. *Corrosion Science*, 2015, 93: 159–166.
- [67] WU D, ZHANG D, YE Y, et al. Durable lubricant-infused anodic aluminum oxide surfaces with high - aspect - ratio nanochannels [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 368: 138–147.
- [68] LEE J, LEE M, CHOI C. Design of Robust Lubricant - Infused Surfaces for Anti - Corrosion [J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(1): 2 411–2 423.
- [69] Núñez L, REGUERA E, CORVO F, et al. Corrosion of copper in seawater and its aerosols in a tropical island [J]. *Corrosion Science*, 2005, 47(2): 461–484.
- [70] SHERIF E M, PARK S M. Effects of 2-amino-5-ethylthio-1,3,4-thiadiazole on copper corrosion as a corrosion inhibitor in aerated acidic pickling solutions [J]. *Electrochimica Acta*, 2006, 51(28): 6 556–6 562.
- [71] WANG P, LIANG C, WU B, et al. Protection of copper corrosion by modification of dodecanethiol self - assembled monolayers prepared in aqueous micellar solution [J]. *Electrochimica Acta*, 2010, 55(3): 878–883.
- [72] RYU M, CHOI H, YOON J, et al. Silica-nanoparticle reinforced lubricant-infused copper substrates with enhanced lubricant retention for maintenance - free heat exchangers [J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 451: 138657.
- [73] LI W, KANG Z. Fabrication of corrosion resistant superhydrophobic surface with self-cleaning property on magnesium alloy and its mechanical stability [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2014, 253: 205–213.
- [74] 于文韬. AZ31B 镁合金表面羟基磷灰石基涂层材料的制备及其性能研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2020.  
YU W T. Preparation and Properties of Hydroxyapatite - based Coating on the Surface of AZ31B Magnesium Alloys [D]. Qingdao: Qingdao University of Science and Technology, 2020.
- [75] GNEDENKOV S V, EGORKIN V S, SINEBRYUKHOV S L, et al. Formation and electrochemical properties of the superhydrophobic nanocomposite coating on PEO pretreated Mg - Mn - Ce magnesium alloy [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 232: 240–246.
- [76] 钱志强. AZ31B 镁合金超疏水表面的制备及性能研究 [D]. 西宁: 中国科学院大学(中国科学院青海盐湖研究所), 2018.  
QIAN Z Q. Preparation and Characteristics of Superhydrophobic Surface on AZ31B Magnesium Alloy [D]. Xining: University of Chinese Academy of Sciences (Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences), 2018.
- [77] 张超. 超声辅助 AZ31B 镁合金微弧氧化关键技术研究 [D]. 青岛: 山东理工大学, 2019.  
ZHANG C. Research on Key Technology of Ultrasound-assisted Micro Arc Oxidation of AZ31B Magnesium Alloy [D]. Qingdao: Shandong University of Technology, 2019.
- [78] LI H, FENG X, PENG Y, 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.
- [79] FAN S. Water-repellent and corrosion-resistance properties of superhydrophobic and lubricant-infused super slippery surfaces[J]. *RSC Advances*, 2017, 7(70): 44239-44246.
- [80] KAN Y, ZHENG F, LI B, et al. Self-healing dual biomimetic liquid-infused slippery surface in a partition matrix: Fabrication and anti-corrosion capability for magnesium alloy[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2021, 630: 127585.
- [81] WANG X, LONG Y, MU P, et al. Silicone oil infused slippery candle soot surface for corrosion inhibition with anti-fouling and self-healing properties[J]. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2021, 35(10): 1057-1071.
- [82] OHNO H, MATSUBAE K, NAKAJIMA K, et al. Unintentional Flow of Alloying Elements in Steel during Recycling of End-of-Life Vehicles[J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2014, 18(2): 242-253.
- [83] 万洁雯. 后疫情时代我国钢材需求预测[D]. 南昌: 江西财经大学, 2021.
- WAN J W. Prediction of China's Steel Demand in the late stage of COVID-19[D]. Nanchang: Jiangxi University of Finance and Economics, 2021.
- [84] 王冰, 赵凯月, 王文涛, 等. 不锈钢在跨海桥梁工程防腐中的应用[J]. *混凝土*, 2021(8): 141-145.
- WANG B, ZHAO K Y, WANG W T, et al. Application of stainless steel rebar on corrosion resistance of sea-crossing bridges[J]. *Concrete*, 2021(8): 141-145.
- [85] 刘振宝, 梁剑雄, 杨哲, 等. 高强度不锈钢应用及研究进展[J]. *中国冶金*, 2022, 32(6): 42-53.
- LIU Z B, LIANG J X, YANG Z, et al. Progress of application and research on high strength stainless steel[J]. *China Metallurgy*, 2022, 32(6): 42-53.
- [86] 关鹤. 304 不锈钢在 FeCl<sub>3</sub> 体系中的腐蚀行为研究[D]. 沈阳: 沈阳大学, 2019.
- GUAN H. The Study of Corrosion Behavior for 304 Stainless Steel in FeCl<sub>3</sub> System[D]. Shenyang: Shenyang University, 2019.
- [87] 唐鋈磊, 颜安, 张海龙, 等. 腐蚀防护对钢铁材料降低碳排放的重要影响: 以钢质管道全生命周期碳排放计量研究为例[J]. *中国科学: 技术科学*, 2023, 53(1): 53-70.
- TANG J L, YAN A, ZHANG H L, et al. Importance of corrosion protection on steel materials in reducing carbon emissions: Carbon emission measurement throughout the life cycle of steel pipeline as an example [J]. *Scientia Sinica Technologica*, 2023, 53(1): 53-70.
- [88] ZHANG P, CHEN H, ZHANG L, et al. Anti-adhesion effects of liquid-infused textured surfaces on high-temperature stainless steel for soft tissue[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 385: 249-256.
- [89] ZHANG P, CHEN H, ZHANG L, et al. Stable slippery liquid-infused anti-wetting surface at high temperatures[J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2016, 4(31): 12212-12220.
- [90] SUN H, LEI F, LI T, et al. Facile Fabrication of Novel Multifunctional Lubricant-Infused Surfaces with Exceptional Tribological and Anticorrosive Properties[J]. *ACS Applied Materials Interfaces*, 2021, 13(5): 6678-6687.
- [91] PRADO L H, ANASTASIOU E, VIRTANEN S. Corrosion behavior of a slippery liquid infused porous surface on anodized stainless steel[J]. *Materials Letters*, 2021, 296: 129892.
- [92] TESLER A B, PRADO L H, THIEVESSEN I, et al. Non-toxic Liquid-Infused Slippery Coating Prepared on Steel Substrates Inhibits Corrosion and Biofouling Adhesion[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2022, 14(25): 29386-29397.

[编校: 魏兆军]

## 第十二届全国腐蚀与防护大会第二轮通知

为促进腐蚀与防护学科的发展, 加强国内外的学术交流与合作, 中国腐蚀与防护学会将于 2023 年 7 月 19~21 日在武汉召开"第十二届全国腐蚀与防护大会", 深入探讨腐蚀领域前沿问题、先进技术, 积极推动防腐蚀科研成果的转化, 全面展示近年来国内外本学科研究领域的重要成果。

"全国腐蚀与防护大会"是中国腐蚀与防护学会每两年举办一次的全国性学术年会。至今已成功举办十一届, 是国内腐蚀科学领域学术水平最高、范围最广、影响最大的全国性重要会议。

会议力求全面展示最新研究动态和研究成果, 热忱欢迎广大高校、科研院所、企事业单位等专家、学者及相关从业人员参会交流和展示。同时欢迎企事业单位积极赞助本次大会!

会议时间: 2023 年 7 月 19~21 日

会议地点: 武汉欧亚会展国际酒店

联系方式:

010-62397591

靳婉平 杨帆

15011185793

靳婉平(会议咨询)

18610665505

杨帆(展位及赞助)

13520520296

杨吉可(论文摘要提交)

010-62333931-513

张博威(墙报交流)

13476178600

廖萌(酒店预订)

中国腐蚀与防护学会

2023 年 6 月 6 日