

超疏水网状材料在多液体介质中的承载能力研究

徐向辉, 安俊超, 左寒松, 金文中, 王猛, 叶乾乾

(洛阳理工学院 材料学院, 洛阳 471023)

摘要: **目的** 利用浸润性调控来实现网状材料表面超疏水, 从而使其在不同液体介质表面的承载能力得到提升。**方法** 通过简单的化学镀和十八硫醇修饰制备出了超疏水的铜网, 分别研究了铜网在 pH=1~13 的溶液和 5%~30% 氯化钠溶液体系中的承载力。**结果** 在 pH=7 时, 铜网承载能力最大为 12.97 g, 可达其自身质量的 8 倍, 随液体介质酸碱性的增加, 铜网表面包覆的十八硫醇出现脱附情况, 造成铜网承载能力出现下降趋势, 但是仍然比原始铜网承载能力大 5 倍。在不同浓度盐水中, 超疏水铜网承载力基本与纯水中保持一致, 这是液体密度变化和超疏水共同作用的结果。并且通过计算分析, 证实了疏水效应产生的附加浮力作用是承载能力提升的原因。**结论** 通过对铜网进行表面疏水化处理, 使其在不同液体介质表面承载能力有较大提升, 研究结果在航海船舶与水面航行体增载减重方面具有一定的应用前景, 并提供了一种可行的思路。

关键词: 化学镀; 表面浸润性; 液面承载力; 附加浮力; 液体介质

中图分类号: TQ153; TB303 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2020)11-0177-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2020.11.019

Loading Capacity of Superhydrophobic Mesh Materials on Different Liquid Medium

XU Xiang-hui, AN Jun-chao, ZUO Han-song, JIN Wen-zhong, WANG Meng, YE Qian-qian

(School of Materials Science and Engineering, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China)

ABSTRACT: The work aims to realize the superhydrophobic surface of mesh materials by adjusting the wettability, so as to enhance the loading capacity of mesh material on different liquid medium surfaces. The superhydrophobic copper mesh was obtained by electroless plating and chemical modification with n-octadecyl mercaptan. The loading capacity of copper mesh in solution (pH=1~13) and sodium chloride solution (concentration of 5%~30%) was studied. Through calculation, it was verified that the additional buoyancy generated by hydrophobic effect was the cause to improve the loading capacity. When the pH=7, the maximum loading capacity of copper mesh was 12.97 g, 8 times bigger than the dead weight of copper mesh. As the alkalinity or acidity of liquid medium increased, the desorption of n-octadecyl mercaptan coated on the surface of copper mesh caused the loading capacity of copper mesh to decline, but the loading capacity was still 5 times larger than that of the original copper mesh. In different concentrations of brine, the loading capacity of superhydrophobic copper mesh was basically consistent with that in pure water, which was the result of the combination of liquid density change and superhydrophobicity.

收稿日期: 2020-01-07; 修订日期: 2020-03-31

Received: 2020-01-07; Revised: 2020-03-31

基金项目: 河南省高等学校重点科研项目 (18A430019)

Fund: Supported by Key Scientific Research Projects of Colleges and Universities in Henan Province (18A430019)

作者简介: 徐向辉 (1983—), 女, 博士, 主要从事材料表面界面性能、仿生复合材料等研究。邮箱: xxh2973133@126.com

Biography: XU Xiang-hui(1983—), Female, Doctor, Research focus: property of material surface and interface, biomimetic composites. E-mail: xxh2973133@126.com

引文格式: 徐向辉, 安俊超, 左寒松, 等. 超疏水网状材料在多液体介质中的承载能力研究[J]. 表面技术, 2020, 49(11): 177-183.

XU Xiang-hui, AN Jun-chao, ZUO Han-song, et al. Loading capacity of superhydrophobic mesh materials on different liquid medium[J]. Surface technology, 2020, 49(11): 177-183.

Through surface superhydrophobic treatment, the loading capacity of copper mesh on different liquid medium has been improved and the research results have a certain application prospect in increasing load and reducing weight of sailing ships and surface vehicles, and provide a feasible idea.

KEY WORDS: electroless plating; surface wettability; loading capacity; additional buoyancy; liquid medium

公元前 245 年,阿基米德发现了浮力原理,定义物体浮力等于物体下沉时排开液体的重力,即 $F_{\text{浮}} = \rho_{\text{液}} g V_{\text{排}}$,其中 $V_{\text{排}}$ 是由物体的体积所决定。当物体承载力大于其所受的浮力时,物体会沉入水中,物体若要获得高的水面承载能力,就必须通过增加排水体积来实现。自然界中存在着许多奇异的现象,水黽、蚊子等小型昆虫腿部细长,但是它们在水面上却可以自由快速行走、跳跃而不沉入水中。如果仅从这些昆虫腿部的体积来考虑,腿部所受浮力不能支撑它们漂浮在水面上。且研究发现^[1-4],水黽腿部的水面支撑能力可达其体重的 60 倍以上,这绝不仅仅是由水黽腿部排水体积所造成的。随着人们对自然界现象的深入研究,发现这些昆虫腿部均为超疏水状态。正是这种特殊的表面浸润现象使水黽、蚊子等可以实现“水上漂”。

润湿性是固体表面的一个重要特征,可用表面水滴的接触角来表征。超疏水是指固体表面水滴的接触角超过 150° ,滚动角小于 10° 的特殊现象^[5-7]。固体表面浸润性主要受两个因素影响,一是固体的表面微观结构^[8-10],二是固体的表面化学成分^[11-13]。仿生制备超疏水表面必须要从这两个方面入手,构建多级微纳米结构且同时降低表面能。具有超疏水表面的漂浮体可以有效利用表面张力,在水面产生水涡,增大排水量,从而提高其水面承载力。漂浮体的最大承载力与其表面接触角、截面形状、几何尺寸等因素密切相关,其中表面接触角是主要因素。吴承伟等^[14-15]发现,蚊子在水面拥有超强承载力是通过其腿部表面蜡质和微纳多级结构形成的超疏水效应来实现的。王庆成^[16]等将多种典型疏水植物叶粘贴到不同尺寸的长方体小盒上,研究各模型在水面的最大承载力,发现叶片表面接触角越大,承载力越大。Dominic 等^[17-18]对玻璃棒表面进行处理,使其表面从亲水状态转变为疏水状态,发现表面接触角最大的玻璃棒可以漂浮在水面。通过对自然界生物体水面超大承载力的研究,发现影响水面承载能力的因素众多。要增加圆柱物体在水面的承载能力,可以从以下几个方面入手^[17-18]:增大物体表面接触角;增大圆柱半径;增加圆柱长度;降低物体密度;增加水表面张力。除了改变物体本身物理参量之外,想要提高水面承载力就只能从改变物体表面接触角入手。

网状材料由于其自身具有微米级孔洞结构的特点,单位面积密度比整体材料低得多,在制备超疏水材料方面具有一定的优势。为了提高网状材料在水面

的承载能力,拟通过增大物体表面接触角的办法来实现。目前,对材料在液体表面的承载能力研究主要集中在中性的水介质表面,很少有对不同介质特性和承载能力之间变化关系的研究。本文通过化学镀制备出了超疏水的网状材料,研究了网状材料在不同液体介质表面的承载能力,通过计算,证实了疏水效应产生的附加浮力作用是承载能力提升的原因,并分析了液体介质特性对承载能力的影响。这也使得超疏水材料在航海船舶与水面航行体的增载减重领域具有一定的应用前景。

1 试验

1.1 试验材料

铜网(孔径 400、250、90 μm),河北伊利达金属丝网有限公司;硝酸银(AgNO_3)、无水乙醇($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$),天津市化学试剂一厂;十八硫醇($\text{C}_{17}\text{H}_{35}\text{COOH}$),上海奥斯贝特化工有限公司;盐酸(质量分数为 36%,化学纯),西安鼎天化工有限公司;氢氧化钠(化学纯)、氯化钠(分析纯),天津致远化学试剂有限公司。

1.2 试验方法

仿生铜网“小船”的制备:将一块尺寸为 $3.5\text{ cm} \times 2.5\text{ cm}$ 的铜网折叠为 $2.5\text{ cm} \times 1.5\text{ cm} \times 0.5\text{ cm}$ 的立方体,将所得立方体状的“小船”在丙酮、乙醇等溶剂中清洗后待用。

配制 0.03 mol/L 的硝酸银乙醇溶液,将上述铜网“小船”浸入硝酸银乙醇溶液中 5 s 进行化学镀银。取出后,使用去离子水清洗。配制 0.06 mol/L 的十八硫醇的乙醇溶液,将化学镀后的铜网放入十八硫醇中 30 min,取出清洗后,在 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 下干燥,即可得到超疏水的铜网“小船”。

仿生“小船”承载能力的测量:将铝线剪成长度为 2 mm 的小段,在测试承载能力时作为砝码使用。在烧杯中加入适量的不同液体介质($\text{pH}=1\sim 13$ 的溶液,5%~30%氯化钠溶液),把“小船”放入液体表面,逐渐往“小船”上添加铝线段,直至“小船”沉入水底,将所添加的铝线段收集,烘干并称量。

1.3 表征与分析

采用 JSM-6701F 型场发射扫描电子显微镜表征表面微观结构;使用 Smart APEX II 型 X 射线衍射仪

对化学镀银层进行成分分析; 采用 DSA100 接触角测量仪测定表面接触角, 测试液体体积 $5\ \mu\text{L}$, 五点测量取平均值。

2 结果与分析

2.1 表面物相分析

化学镀后铜网表面 XRD 图谱如图 1 所示。化学镀前铜网图谱中, 在 2θ 值为 43.3° 、 50.5° 和 74.2° 处的三个较强的衍射峰分别对应于铜的(111)、(200)

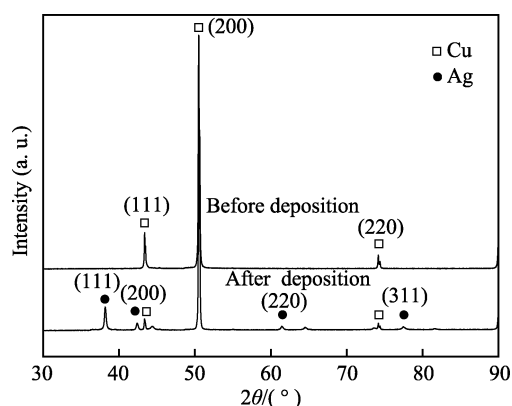


图 1 铜网表面化学镀银 30 s 前后表面 XRD 图谱
Fig.1 XRD spectra of copper mesh before and after deposition of Ag for 30 s

和(220)晶面 ([JCPDS] Card No. 04—0836)。化学镀银后, 图谱中出现四个新的衍射峰, 分别是 2θ 值为 38.2° 、 42.4° 、 61.5° 和 77.4° 处的单质银特征峰, 分别对应银的(111)、(200)、(220)和(311)晶面 ([JCPDS] Card No. 4—783), 铜的三个较强的特征衍射峰仍然存在。这表明化学镀后在铜网表面确实沉积了一层银^[19-20]。

2.2 表面微观形貌

图 2 给出了不同孔径铜网疏水化处理前后的电镜照片, 插图为表面水滴的数码照片。可以看出, 处理前铜网表面光滑, 由于具有一定的微米级的孔结构, 所以接触角比光滑的铜片 ($CA=40^\circ$) 要大一点, 孔径为 400、250、90 μm 的光滑铜网接触角分别为 91° 、 73° 和 80° 。当表面化学镀一层疏水的硫醇银之后, 接触角分别增至 158° 、 159° 和 161° (滚动角分别为 5° 、 5° 和 4°)。从图中也可以明显看出, 铜网表面由原来的光滑状态变得粗糙不平, 存在一些小的突起, 这些是沉积在表面的银颗粒。并且从处理前后铜网的电镜照片可知, 化学镀的银层没有出现堵塞铜网孔径的现象。对处理前后铜丝直径进行五点测量取平均值, 结果如表 1 所示。由结果可知, 化学镀后, 铜网直径增加在 6 μm 以下, 结合 XRD 图谱结果分析可知, 银层较薄对网状材料的孔径影响不大。

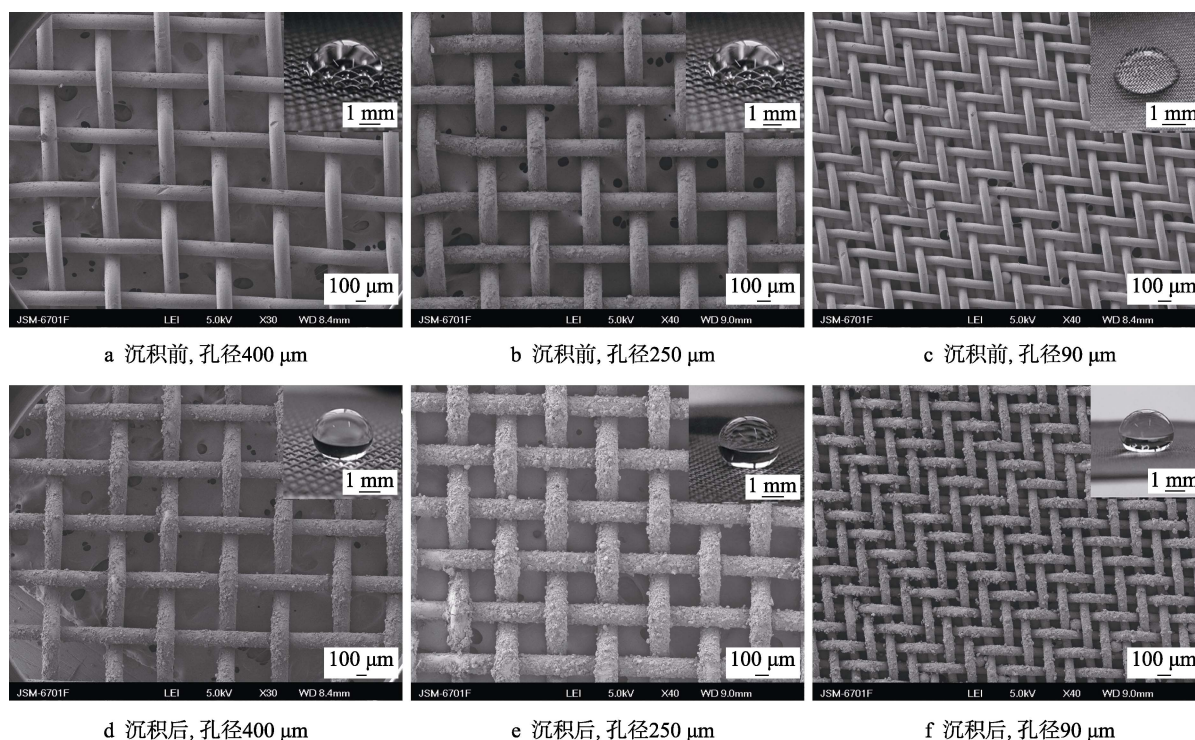


图 2 不同孔径铜网化学镀前后的电镜照片 (插图为水珠在表面的数码照片)

Fig.2 SEM images of the copper mesh with different pore size before and after deposition of Ag: a) 400 μm before deposition; b) 250 μm before deposition; c) 90 μm before deposition; d) 400 μm after deposition; e) 250 μm after deposition; f) 90 μm after deposition, the inset pictures are the photos of the water droplet on mesh surface

表1 化学镀银前后铜丝直径及镀银层厚度

Tab.1 Diameter of the copper mesh before and after deposition of Ag and the thickness of the Ag layer

Pore size of Cu mesh/ μm	Diameter of bare Cu mesh/ μm	Diameter of the deposited Cu mesh/ μm	Thickness of Ag layer/ μm
400	157.55	162.86	5.31
250	152.48	158.02	5.54
90	65.54	70.18	4.64

构建具有超疏水特性的表面, 需要从两个方面入手, 一是构建具有微纳相间的阶层结构, 二是降低表面能^[21-23]。不同微米孔径的铜网, 本身具有结构上的优势, 化学镀银旨在添加纳米级的结构。图3是单根铜丝的场发射电镜照片。化学镀银后表面变得很粗糙, 放大5000倍之后, 如图3b所示, 可以看到表面

是由银颗粒堆积的较疏松的枝晶结构, 枝晶间形成几十个微米的孔洞; 继续放大到30 000倍(图3c), 可以看到枝晶结构由90~120 nm的颗粒有序排列形成。化学镀过程是在铜网表面构出微纳相间的阶层结构, 这是铜网表面具有超疏水特性的结构因素。

对超疏水铜网表面进行化学成分分析, 图4给出了超疏水铜网表面的XPS图谱。从全谱(图4a)中可以明显看到银、碳和硫元素的三个峰。图4b给出了银的分谱。在368.1 eV和374.1 eV处的两个峰对应于 $\text{Ag}3\text{d}_{3/2}$ 和 $\text{Ag}3\text{d}_{1/2}$ 。可证实经硫醇修饰后, 银与硫醇中的巯基硫结合形成了 $\text{Ag}-\text{S}$ 键。这是由于在银元素(软酸)与巯基(软碱)之间会遵循软硬酸碱理论, 优先形成稳定的 $\text{Ag}-\text{S}$ 共价键^[24-25]。表面能较低的碳氢链在铜网表面形成一层包覆膜, 这是铜网表面具有超疏水特性的成分因素。

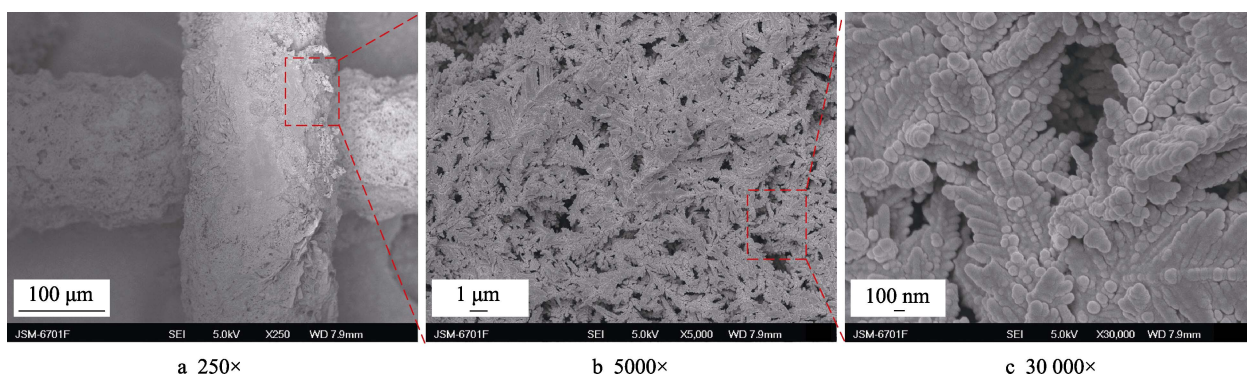


图3 单根铜丝的场发射扫描电镜照片

Fig.3 FESEM images of the single wire of the copper mesh after deposition

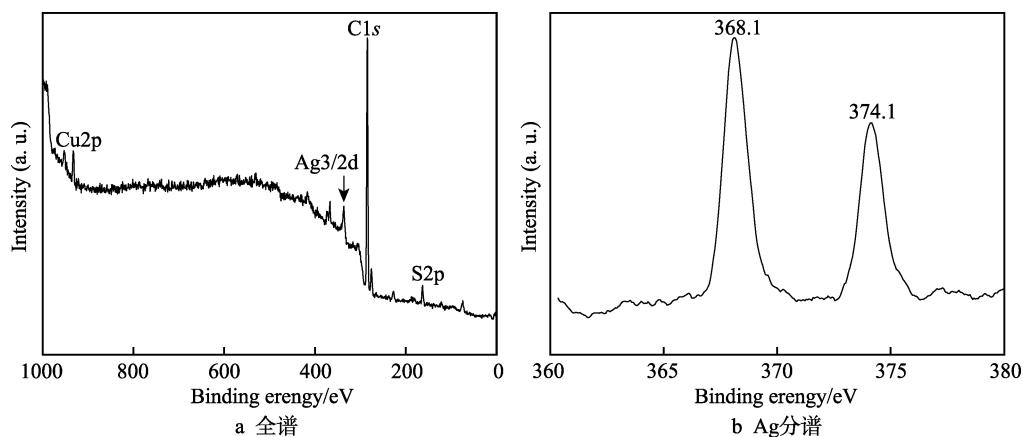


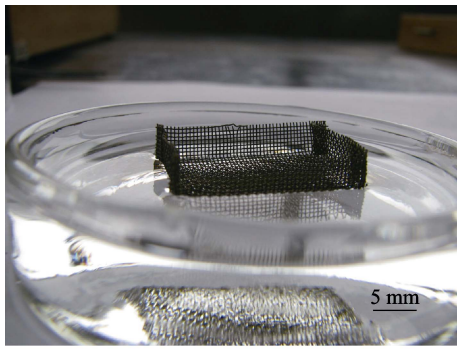
图4 超疏水铜网表面的XPS图谱

Fig.4 XPS spectra of the outer surfaces of super hydrophobic copper mesh: a) survey scan; b) $\text{Ag}3\text{d}_{3/2}$

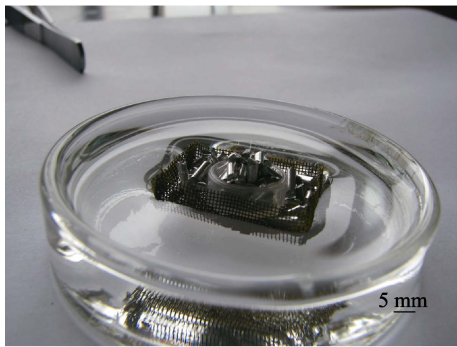
2.3 不同液体介质表面的承载力

对铜网在液体介质中的承载能力进行考察, 疏水化处理后, “小船”漂浮在液面之上, 水并不能渗过铜网, 如图5a所示。加载后, “小船”的边缘逐渐接

近水面, 但是“小船”并不沉入水中, 即使当“小船”的边缘低于水面时, 仍然能够漂浮在液体表面, 如图5b所示。继续加载直到最终“小船”沉入水底, 以确定最大承载力。



a 铜网孔径90 μm下的空载侧视



b 铜网孔径90 μm下的加载侧视

图 5 超疏水铜网漂浮在水上的数码照片

Fig.5 Optical images of super hydrophobic copper mesh floating on water surface: a) non-load side view of copper mesh with pore size of 90 μm; b) loaded side view of copper mesh with pore size of 90 μm

根据文献[26-27], 铜网“小船”的承载能力包含两部分: 一是水的浮力 (F_b), 这由“小船”的体积和液体介质密度所决定; 二是表面超疏水所引起的附加浮力 (F_a), 这部分浮力是由于超疏水使铜网表面周围产生的空气层所引起的, 这层空气层在一定承载条件下, 阻止“小船”被水润湿。因此体积为 $a \times b \times c$ (长 a , 宽 b , 高 c) 的疏水“小船”的最大承载力 (F) 可以表述为:

$$F = F_b + F_a = \rho g V + \rho g (S_{\text{底}} + S_{\text{侧}}) \cdot h \quad (1)$$

$$F_a = F - F_b = F - \rho g V \quad (2)$$

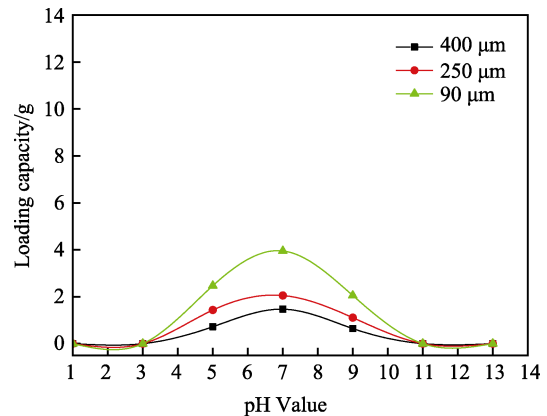
$$h = (F - \rho g V) / \rho g (S_{\text{底}} + S_{\text{侧}}) \quad (3)$$

式中: ρ 是液体密度, 本研究使用的是水, 因此 ρ 为 1; g 为重力常数, 单位为 N/kg; h 为超疏水引起的空气层厚度, 单位为 mm。

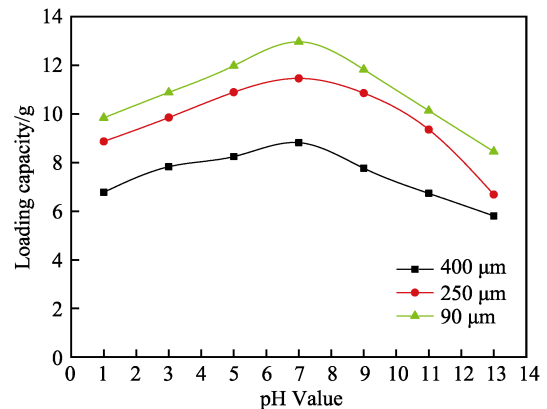
根据方程 (2), 可以计算出由空气层引起的附加浮力 (F_a), 根据方程 (3), 可以计算出空气层厚度 h 。当铜网“小船”放置在水中时, 由于表面的超疏水效应会产生一定厚度的空气膜, 正是这层空气膜使得“小船”能够在加载大于水所产生浮力时, 仍然不下沉, 显示出较高的水面承载能力。

超疏水铜网在 pH=1~13 溶液中的承载能力如图 6 所示。可以看出, 随着液体介质酸碱度变化, 未处理铜网和超疏水铜网的承载力随着酸碱度增加, 均呈现先增加后降低的趋势。未处理铜网在 pH>11 和

pH<3 时, 基本没有承载能力, 放进去就沉没; 在 pH=7 时, 承载力最大。并且随铜网孔径增加, 承载力降低, 最大承载力出现在孔径为 90 μm 处, 最大承载达到 3.95 g。超疏水处理后, 铜网承载能力大大提高, 即使 pH>11 和 pH<3 时, 承载能力提升也比较明显; 承载力在 pH=7 时最大, 并且随铜网孔径增加, 承载力降低, 最大承载力出现在孔径为 90 μm 处, 最大承载达到 12.97 g, 可达其自身质量的 8 倍, 与未处理铜网相比, 承载能力提升 3.2 倍。



a 未处理铜网“小船”



b 超疏水铜网“小船”

图 6 铜网“小船”在溶液表面承载能力随酸碱度变化曲线
Fig.6 Loading capacity curve of copper mesh miniature boat on the solution surface with pH value: a) original copper mesh miniature boat; b) superhydrophobic copper mesh miniature boat

分析原因, 疏水化处理后, 铜网表面的微纳结构以及孔洞结构中, 可以滞留大量空气, 使得液体在表面铺展的时候液-固接触线变得不连续, 表面接触状态从液-固接触逐渐转变为液-气-固接触, 甚至是液-气接触, 在铜网表面和液体介质之间形成一层很薄的空气膜, 这层空气膜阻止液体穿过, 并形成附加浮力, 使铜网在液体表面承载能力大幅度提高。通过计算可得空气膜厚度如表 2 所示, 铜网疏水化处理后, 承载时, 表面会产生 0.27~1.89 mm 厚的空气膜层, 从而引起附加浮力, 提高铜网“小船”液体表面承载能力。

表 2 不同 pH 值溶液中铜网“小船”表面附着的空气膜厚度

Tab.2 Thickness of air film of superhydrophobic copper mesh in solution with different pH solutions

Solution	pH	Thickness/mm
Hydrochloric acid solution	1	0.27~0.88
	3	0.34~0.89
	5	0.56~1.42
Water	7	0.87~1.89
Sodium hydroxide solution	9	0.30~1.35
	11	0.25~0.54
	13	0.13~0.67

超疏水铜网“小船”在加载过程中,由于承载逐渐增大,超疏水表面形成的空气膜会逐渐被排挤掉并溢出,从而使得少部分铜网表面直接与液体介质接触。当液体介质酸碱度发生变化时,溶液中的质子氢(H^+)和氢氧根负离子(OH^-)会攻击 $Ag-S$ 键。根据软硬酸碱理论^[24-25],随着酸碱度的增加,溶液中 H^+ (硬酸)和 OH^- (硬碱)浓度大幅提高,使得 H^+ (硬酸)与软碱(巯基硫)、 OH^- (硬碱)和 Ag (软酸)逐渐出现结合,原先稳定的 $Ag-S$ 键出现少量断开,使得铜网表面键合的硫醇链减少,这使低表面能的碳氢包覆层逐渐出现缺陷,造成表面浸润性局部变化。承载时,液体介质会从表面缺陷处进入铜网“小船”,导致“小船”沉没。因而在酸碱介质中,超疏水的铜网“小船”承载能力发生下降。当 $pH>11$ 和 $pH<3$ 时,溶液中质子氢和氢氧根负离子大幅度增加,承载能力明显降低,但是仍然比未疏水化处理的铜网的最大承载力要高。

超疏水铜网在 5%~30%氯化钠溶液中的承载能力如图 7 所示。原始铜网“小船”和超疏水铜网“小船”的液面承载力都随氯化钠浓度增加呈现线性增加,但是跟在纯水中相比,承载能力略有下降。由软硬酸碱理论可知,在盐水溶液中, Na^+ (硬酸)与软碱(巯基硫)、 Cl^- (硬碱)和 Ag (软酸)会出现少量的结合,从而在银层表面引入极性较大的 Cl 基团,极性 Cl 基团与水分子间存在亲和作用^[28],而对其周围碳氢长链产生排斥作用,使得原本在铜网表面包覆的碳氢链部分链段远离铜网表面呈现垂直取向,从而使表面部分能量状态发生变化,出现表面能的少量增加。同时固-气接触线变得局部不连续,固-液-气三相接触线比重增加,从而使附加浮力变小,造成液面承载下降。但是由于氯化钠盐水密度较纯水大,随着氯化钠浓度的增加,溶液密度提升较大,从 1.04 提升到 1.19^[29],使得阿伏伽德罗浮力随盐度增加而变大,这部分浮力持续增加,可以补偿部分附加浮力的降低,从而使超疏水的铜网在盐水介质中也表现出较高的承载能力。

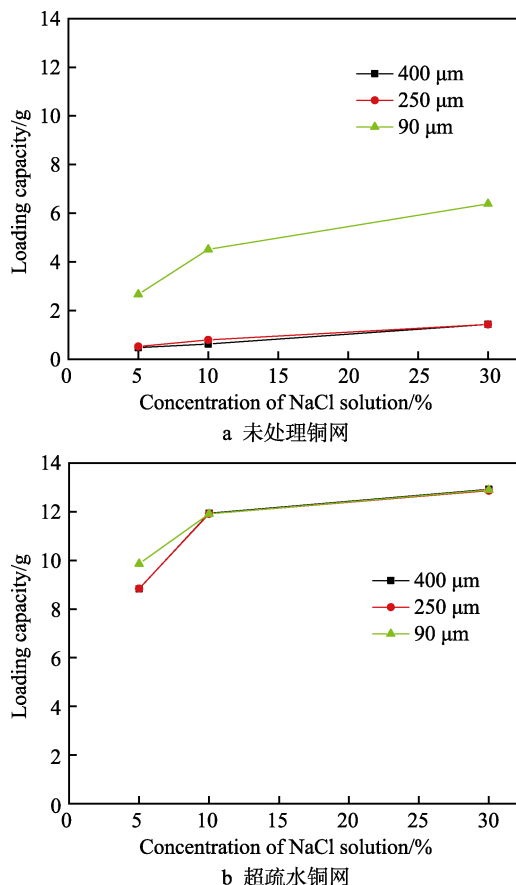


图 7 超疏水“小船”在盐水表面承载力随盐度(5%、10%、30%氯化钠溶液)变化曲线

Fig.7 Loading capacity curve of superhydrophobic miniature boat on the sodium chloride solution surface with different concentration (5%, 10% and 30%): a) original copper mesh; b) superhydrophobic copper mesh

3 结论

本文通过简单的化学镀制备出了超疏水铜网,分别研究了铜网在 $pH=1\sim13$ 的溶液和 5%~30%氯化钠溶液体系中的承载力,通过计算分析证实了疏水效应产生的附加浮力作用是承载力提升的原因,得出以下结论:

1) 随溶液酸性增加,铜网表面的十八硫醇低表面能包覆层出现脱附情况,造成铜网承载力逐渐下降,但是仍然比未处理铜网承载力高 5 倍。在 $pH=7$ 时,铜网承载能力最大,可达其自身质量 8 倍。

2) 在 5%~30%氯化钠溶液体系中,超疏水铜网承载力基本可与在纯水中保持一致,最大承载力为自重 8 倍,增重 2 倍,这是液体密度变化和超疏水共同作用的结果。

参考文献:

- [1] FENG X Q, GAO X F, WU Z N, et al. Superior water repellency of water strider legs with hierarchical structures: Experiments and analysis[J]. Langmuir, 2007, 23(9):

- 4892-4896.
- [2] LIU J L, FENG X Q, WANG G L. Buoyant force and sinking conditions of a hydrophobic thin rod floating on water[J]. *Physical review E*, 2007, 76: 066103.
 - [3] CHEN N, PAN Q M. Versatile fabrication of ultralight magnetic foams and application for oil-water separation[J]. *ACS nano*, 2013, 7: 6875-6883.
 - [4] ZHANG J, ZHANG W D, ZHOU N C, et al. Photoresponsive superhydrophobic surfaces from one-pot solution spin coating mediated by polydopamine[J]. *RSC advances*, 2014, 4: 24973-24977.
 - [5] XU L, SHEN Y, DING Y, et al. Superhydrophobic and ultraviolet-blocking cotton fabrics based on $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ composite nanoparticles[J]. *Journal of nanoscience and nanotechnology*, 2018(8): 6879-6886.
 - [6] 丁元迪, 周潼, 王若云, 等. 金属基体上超疏水表面的制备及其机械耐久性的研究进展[J]. *表面技术*, 2019, 48(12): 68-86.
DING Yuan-di, ZHOU Tong, WANG Ruo-yun, et al. Research progress of the preparation and mechanical durability of superhydrophobic surfaces on metal substrates[J]. *Surface technology*, 2019, 48(12): 68-86.
 - [7] ZHANG X X, WANG Y Y, GU L, et al. Superhydrophobic surface modified by Sol-Gel silica nanoparticle coating[J]. *Materials science forum*, 2019, 960: 155-160.
 - [8] SHU F, WANG M, PANG J, et al. A free-standing superhydrophobic film for highly efficient removal of water from turbine oil[J]. *Frontiers of chemical science and engineering*, 2019, 13(2): 393-399.
 - [9] SIVADAS D L, NARASIMMAN R, RAJEEV R, et al. Solvothermal synthesis of microporous superhydrophobic carbon with tunable morphology from natural cotton for carbon dioxide and organic solvent removal applications[J]. *Journal of materials chemistry A*, 2015, 3: 16213-162214.
 - [10] 蒋帆, 赵越, 胡吉明. 超疏水表面在金属防护中应用的研究进展[J]. *表面技术*, 2020, 49(2): 109-123.
JIANG F, ZHAO Y, HU J M. Research advance in application of superhydrophobic surfaces in corrosion protection of metals[J]. *Surface technology*, 2020, 49(2): 109-123.
 - [11] HE X K, ZHAO L, CHENG J T. Coalescence-induced swift jumping of nanodroplets on curved surfaces[J]. *Langmuir*, 2019, 35(30): 9979-9987.
 - [12] ALEXANDER S, EASTOE J, LORD A M, et al. Branched hydrocarbon low surface energy materials for superhydrophobic nanoparticle derived surfaces[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2016, 8: 660-666.
 - [13] LYTH S M, MA W, LIU J, et al. Solvothermal synthesis of superhydrophobic hollow carbon nanoparticles from a fluorinated alcohol[J]. *Nanoscale*, 2015, 7: 16087-16093.
 - [14] 孔祥清, 吴承伟. 蚊子腿表面多级微纳结构的超疏水特性[J]. *科学通报*, 2010, 55(16): 1589-1564.
KONG X Q, WU C W. Superior water repellency of mosquito legs with hierarchical micronano structures[J]. *Chinese science bulletin*, 2010, 55(16): 1589-1564.
 - [15] 吴承伟, 张伟, 孔祥清. 生物与仿生材料表面微纳力学行为[J]. *力学进展*, 2010, 40(5): 542-562.
WU C W, ZHANG W, KONG Y Q. The surface micro/nanomechanical behaviors of bio and bionic-materials[J]. *Advances in mechanic*, 2010, 40(5): 542-562.
 - [16] 王庆成. 超疏水生物水面超大承载机制及其仿生研究[D]. 长春: 长春理工大学, 2012.
WANG Q C. The mechanism of the super-supporting force of super-hydrophobic biological and its bionic research[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2012.
 - [17] VELLA D. Floating objects with finite resistance to bending[J]. *Langmuir*, 2008, 24(16): 8701-8706.
 - [18] VELLA D, LEE D G, KIM H Y. The load supported by small floating objects[J]. *Langmuir*, 2006, 22(14): 5979-5981.
 - [19] SUN Y G, XIA Y N. Large-scale synthesis of uniform silver nanowires through a soft, self-seeding, polyol process[J]. *Advanced materials*, 2002, 14: 833-837.
 - [20] TANG S C, MENG X K, LU H B, et al. PVP-assisted sonoelectrochemical growth of silver nanostructures with various shapes[J]. *Materials chemistry and physics*, 2009, 116: 464-468.
 - [21] ZHOU Q, CHEN G, XING T. Facile construction of robust superhydrophobic tea polyphenol/Fe@ cotton fabric for self-cleaning and efficient oil-water separation[J]. *Cellulose*, 2018, 25(8): 1513-1525.
 - [22] 曹琨, 胡玲寓, 刘春森, 等. 超疏水泡沫铜的制备及油水分离应用研究[J]. *表面技术*, 2018, 47(8): 71-76.
CAO K, HU L Y, LIU C M, et al. Fabrication of superhydrophobic copper foam and its application in oil-water separation[J]. *Surface technology*, 2018, 47(8): 71-76.
 - [23] YANG J, ZHANG Z Z, XU X H, et al. Superhydrophilic-superoleophobic coatings[J]. *Journal of materials chemistry*, 2012, 22(7): 2834-2837.
 - [24] DUBIOS L H, NUZZO R G. Synthesis, structure, and properties of model organic surfaces[J]. *Annual review of physical chemistry*, 1992, 43: 437-463.
 - [25] HUANG Y K, QIU X H. Development and application of the concept of hard-soft-acid-base (HSAB)[J]. *University chemistry*, 2016, 31(11): 45-50.
 - [26] FENG L, ZHANG Y, MA Y M, et al. A super-hydrophobic and super-oleophilic coating mesh film for the separation of oil and water[J]. *Angewandte chemie international edition*, 2004, 43: 2012-2014.
 - [27] JIANG Z X, GENG L, HUANG Y D. Design and fabrication of hydrophobic copper mesh with striking loading capacity and pressure resistance[J]. *The journal of physical chemistry C*, 2010, 114: 9370-9378.
 - [28] 范雅珣. 两亲性壳聚糖衍生物制备及基础性质研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2009.
FAN Y X. Study on preparation of amphiphilic chitosan derivatives and its property[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2009.
 - [29] 王辉, 周丽霞, 周伟, 等. 声光衍射法测量不同浓度NaCl溶液的密度[J]. *当代化工*, 2018, 47(11): 236-239.
WANG H, ZHOU L X, ZHOU W, et al. Determination of density of sodium chloride solution at different concentrations by acousto-optic diffraction[J]. *Contemporary chemical industry*, 2018, 47(11): 236-239.