

超亲水-水下超疏油镍镀层材料制备 及其油水分离性能研究

喻溪亭, 侯晓丹, 张延宗

(四川农业大学 环境学院, 成都 611130)

摘要: **目的** 为进一步解决油水分离材料目前存在的制备成本高、制备流程复杂和药品种类繁多的问题。**方法** 提出一种以不锈钢网为基底, 运用一步电化学沉积法制备超亲水-水下超疏油材料的方法。在电沉积的过程中, 阴极表面发生还原反应生成金属 Ni, 通过调整制备过程中的时间、电流、温度, 进一步优化参数, 使阴极材料表面形成一种钟乳石状的微纳米粗糙结构。利用接触角测试仪测定其接触角, 同时采用扫描电子显微镜 (SEM)、X 射线能谱仪 (EDS) 和 X 射线衍射仪 (XRD) 对其进行表征分析。**结果** 制备超亲水-水下超疏油材料的最优条件为: 电流 0.6 A, 电沉积时间 23 min, 温度 50 °C。在该条件下制备的阴极镍镀层材料, 其表面在水下的油接触角 (OCA) 达到 $152^{\circ} \pm 3^{\circ}$, 在空气中的水接触角 (WCA) 达到 0° , 表现出超亲水-水下超疏油性能。在油水分离实验中, 阴极镍镀层材料对正己烷的分离效率最高, 达到了 99.3%, 并在 20 次油水分离循环实验过程中保持了相对稳定的分离效率, 同时表现出高效耐用的油水分离性能。**结论** 通过一步电化学沉积法制备出的阴极镍镀层材料具备超亲水-水下超疏油性能, 且高效耐用, 油水分离效率稳定, 同时具备制备成本较低、制备流程简单和药品使用种类少的优点。

关键词: 一步制备; 电沉积法; 镍镀层; 微纳米结构; 超亲水; 水下超疏油

中图分类号: TQ153.1; O647.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)06-0177-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.06.018

Preparation of Superhydrophilic and Underwater Superoleophobic Nickel-coating Material and Oil-Water Separation Performance

YU Xi-ting, GOU Xiao-dan, ZHANG Yan-zong

(School of Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

ABSTRACT: In order to solve the problems of high cost, complicated preparation process and various kinds of reagent of oil-water separation materials, a new method is proposed to prepare superhydrophilic and underwater superoleophobic materials by one-step electrodeposition based on stainless steel mesh. In the process of electrodeposition, the surface of cathodic stainless steel mesh occurred reduction reaction and generated metal Ni. The parameters were further optimized by adjusting the time, current and temperature of preparation process and a rough stalactite-shaped micro/nano structure was formed on the cathodic

收稿日期: 2020-05-29; 修订日期: 2020-09-21

Received: 2020-05-29; Revised: 2020-09-21

基金项目: 四川省科学技术厅资助项目 (2018JY0457, 2019YFS0502, 2021YFG0275)

Fund: Supported by the Science and Technology Department of Sichuan Province (2018JY0457, 2019YFS0502, 2021YFG0275)

作者简介: 张延宗 (1968—), 男, 博士, 教授, 研究方向为环境能源新材料研发及应用。邮箱: zyz1000@163.com

Biography: ZHANG Yan-zong (1968—), Male, Doctor, Professor, Research focus: research and application of new environmental energy materials. E-mail: zyz1000@163.com

引文格式: 喻溪亭, 侯晓丹, 张延宗. 超亲水-水下超疏油镍镀层材料制备及其油水分离性能研究[J]. 表面技术, 2021, 50(6): 177-183.

YU Xi-ting, GOU Xiao-dan, ZHANG Yan-zong. Preparation of superhydrophilic and underwater superoleophobic nickel-coating material and oil-water separation performance[J]. Surface technology, 2021, 50(6): 177-183.

surface. Contact angle measurement was used to determine contact angle. Scanning electron microscopy (SEM), energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS) and X-ray diffraction (XRD) were employed to investigate the morphology and chemical composition. The results showed that the condition is optimal when the current is 0.6 A, the time is 23 min, and the temperature is 50 °C. Under these conditions, the oil contact angle (OCA) and the water contact angle (WCA) of the cathodic surface respectively reach $152^{\circ} \pm 3^{\circ}$ and 0° and the material possesses superhydrophilic and underwater superoleophobic performance. During the oil-water separation experiment, the cathodic separation efficiency of n-hexane/water is the highest, which can reach 99.3% and maintain relatively stable during a test involving 20 cycles. Thus, the mesh exhibits high separation efficiency and good reusability in oil-water separation. The superhydrophilic and underwater superoleophobic nickel-coating prepared by the one-step electrochemical deposition method are efficient, durable with stable oil-water separation efficiency, having advantage of low cost, simple preparation process and few types of chemicals.

KEY WORDS: one-step preparation; electrodeposition method; nickel coating; micronanostructure; superhydrophilic; underwater superoleophobic

超润湿性是指材料表面对液体的接触角大于 150° 、滚动角小于 10° 的一种特性^[1]。超润湿性材料常常采用的制备方法有喷涂法^[2]、溶胶-凝胶法^[3]、高温处理法^[4]、浸涂法^[5]、化学沉积法^[6]、电化学沉积法^[7]、静电纺丝法^[8]、层层自组合法^[9]、气相沉积法^[10]等。电化学沉积法由于其过程简单而快速,且具有可重复性好、成本低、可获得多种可能的表面形态等优点,被广泛应用在超润湿性材料的制备上^[11]。随着材料学科的发展,大量的超亲油超疏水材料被开发出来,用于分离油水混合物^[12-14]。但由于其适用于油多水少的条件^[15],且难以运用于轻油的分离^[6],并且容易受到油的污染^[16],从而降低材料的使用寿命,因此越来越多的人开始关注超亲水-水下超疏油结构功能材料的制备^[17-20]。

从水下超疏油理论可知,制备水下超疏油涂层需从亲水物质与粗糙结构这两方面考虑^[21]。亲水物质包括水聚合物(如 PAM、聚乙二醇、多肽等)、无机物(金属、金属氧化物及表面含有丰富亲水基团的酸碱盐类物质)以及有机-无机杂化材料。涂层的粗糙结构可来自于纳米材料的构筑,也可由基材本身赋予^[22]。良好的亲水性和水下疏油性使水能渗透下去而油被水膜阻隔,从而实现优良的油水分离效果^[15]。

由于 Ni 表面含有丰富的亲水基团,可采用电化学沉积的方式制备^[23-24],因此在本实验的处理过程中,采用电化学沉积并辅助超声的方法在阴极不锈钢网基底上生成 Ni,从而一步制备出超亲水-水下超疏油阴极镍镀层材料,并运用于油水分离中,可以很好地解决海上石油泄漏的收集^[25]及含油废水的处理问题^[26]。该材料的制备仅依靠电化学沉积的方法,无需后续复杂处理。同时,在制备过程中,大大减少了种类复杂、价格昂贵的药品的使用,缩减了制备流程,使操作变得简单可行。

1 实验

1.1 材料及仪器

所使用的材料包括 304 不锈钢网(网丝粗为

0.12 mm, 孔径为 0.2 mm), 由安平利学丝网制品有限公司提供。所使用的药品包括: 六水合硫酸镍($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$)、氨水(质量分数 25%~28%)、无水乙醇、二氯甲烷和正己烷(以上均为分析纯)、液体石蜡(化学纯), 均由成都市科隆化工有限公司提供; 菜籽油, 由丰益贸易私人有限公司提供; 原装机油, 由一汽大众汽车有限公司提供; 苏丹 IV、亚甲基蓝(均为分析纯), 由天津市光复精细化工研究所提供; 石油醚(60~90, 分析纯), 由四川西陇化工有限公司提供。

表征分析仪器包括: X 射线能量色谱仪(EDS); 场发射扫描电子显微镜(SEM), S-4800 型, 日本 Hitachi 公司; 接触角测试仪, JC2000C2 型, 上海中晨仪器有限公司; X 射线衍射仪(XRD), 布鲁克 D8 ADVANCE 型。

所用电化学装置示意图见图 1。

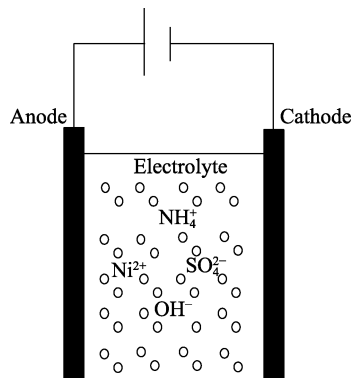


图 1 电化学装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of electrochemical device

1.2 超亲水-水下超疏油材料的制备

选用 6 cm×5 cm 大小的 304 不锈钢网, 用无水乙醇超声清洗 5~10 min, 再用蒸馏水洗净, 烘干备用。

配制 1 mol/L 的硫酸镍溶液作为电解液备用。 $m(\text{NiSO}_4) : m(\text{氨水}) = 5 : 1$, 溶液 pH 为 9.0~9.5, 在 $(50 \pm 1)^{\circ}\text{C}$ 条件下预热一段时间, 倒入电解槽中,

阴阳两极都为预处理后的不锈钢网。设置电流为 0.6 A, 在 $(50 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、50 W 条件下, 超声反应 23 min。反应结束后取出阴极, 用蒸馏水冲洗表面残留的电解液, 在 60°C 条件下烘干。

1.3 镀层表征分析

使用接触角测试仪测定接触角, 接触角包括水在空气中的接触角 (WCA) 和水下油接触角 (OCA)。测量 WCA 时, 通过容量为 1 mL 的注射器注射 1 滴水到材料表面, 通过切线法算得到 WCA 值。测量 OCA 时, 将不锈钢网放置在装有蒸馏水的比色皿中, 通过容量为 2.5 mL 的注射器注射 1 滴二氯甲烷 ($3\ \mu\text{L}$) 到阴极不锈钢网表面 (图 2), 通过切线法算得到 OCA 值, 且测量结果为不锈钢网三个不同点的平均值。利用 X 射线能量色谱 (EDS) 研究阴极不锈钢表面化学元素组成; 使用 X 射线衍射仪 (XRD) 进一步确定材料表面化学物质及晶型; 使用场发射扫描电子显微镜 (SEM) 观察阴极不锈钢表面微观形貌。

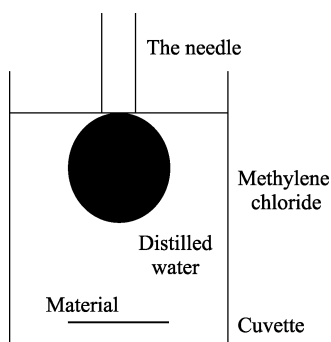


图 2 水下油接触角测定装置

Fig.2 Equipment to measure the underwater oil contact angle

1.4 油水分离测试

室温下, 使用自制的油水分离装置 (图 3), 分别测试菜籽油、原装机油、正己烷、石油醚和液体石蜡这 5 种油的油水分离效率。制备好的阴极不锈钢网需提前用蒸馏水润湿。将油用苏丹 IV 染色, 水用亚甲

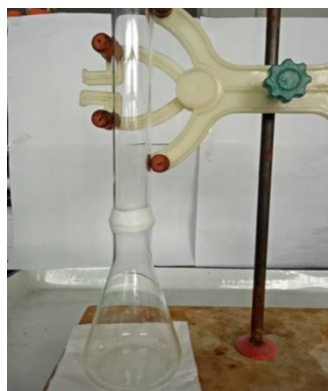


图 3 油水分离装置

Fig.3 Equipment of oil-water separation

基蓝染色。按 $m(\text{油}):m(\text{水})=1:10$ 配制好, 从装置上方倒入油水混合物, 水通过不锈钢网, 油被拦截在网上。收集过网的水后, 称其质量, 并通过公式 (1) 计算油水分离效率。

$$\omega = \frac{m_2}{m_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中: ω 表示油水分离效率; m_1 表示分离前的水的质量, 单位为 g; m_2 表示分离后通过不锈钢网收集到的水的质量, 单位为 g。

1.5 循环实验

使用制备好的阴极材料, 按与油水分离测试相同的油水质量比做同一种油 (正己烷) 的油水分分离循环实验。每次油水分分离后, 将该材料用蒸馏水冲洗干净, 再进行下一次循环, 分别计算每次循环的分离效率, 计算方法同公式 (1)。

2 结果与讨论

2.1 表面润湿性能及机理分析

图 4a 和 4b 分别对应原始不锈钢网和处理后的阴极不锈钢网的水下油浸润性图。可以看出, 原始不锈钢网上的 OCA 为 $115^\circ \pm 1^\circ$ (图 4a); 而阴极不锈钢网表面则达到了 $152^\circ \pm 3^\circ$ (图 4b), 具有水下超疏油性能。图 5a 和 5b 分别对应原始不锈钢网和处理后的阴极不锈钢网在空气中的水浸润性图。可以看出, 原始不锈钢网上的 WCA 为 $97^\circ \pm 1^\circ$ (图 5a), 经过电化学沉积 23 min 后的阴极不锈钢网表面的 WCA 则达到了 0° (图 5b), 水滴迅速浸润。由此可见, 制备的阴极镍镀层材料具备了超亲水性能。

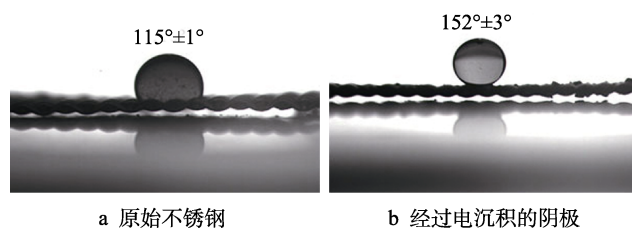


图 4 材料水下油浸润性图

Fig.4 Wetting images of underwater oil droplets: a) original stainless steel mesh; b) cathode after electrodeposition

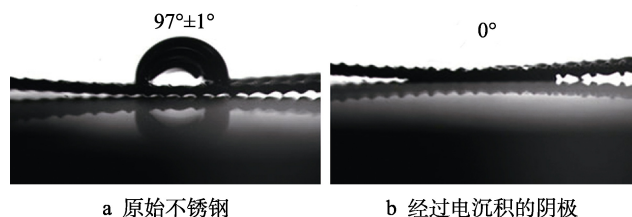


图 5 材料在空气中的水浸润性图

Fig.5 Wetting images of water droplets in the air: a) original stainless steel mesh; b) cathode after electrodeposition

图6为原始不锈钢网和阴极不锈钢网表面的EDS能谱图。对比图6a和6b,可以看出,阴极不锈钢网表面的Ni元素相较于原始不锈钢网有显著的提高,且几乎只含有镍元素,说明电镀液中的镍离子成功地镀在阴极上。

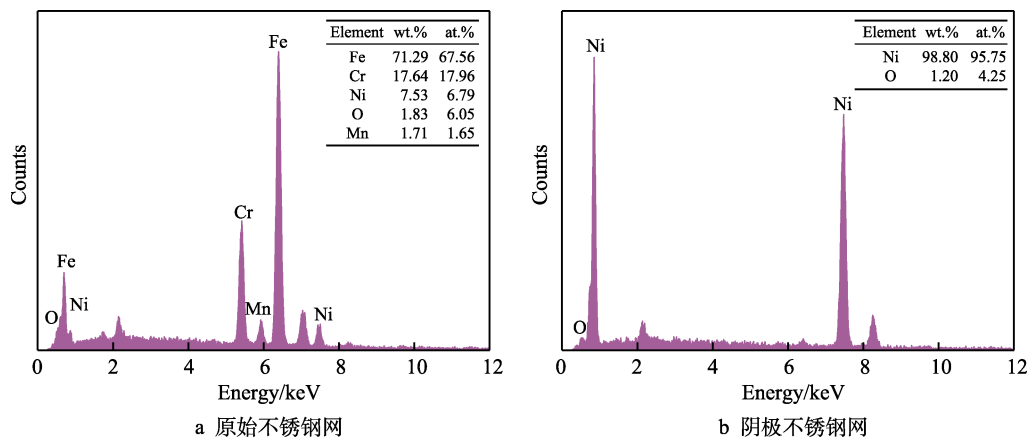


图6 材料表面能谱图

Fig.6 Energy dispersive spectrogram of surface: a) original stainless steel mesh; b) cathodic stainless steel mesh

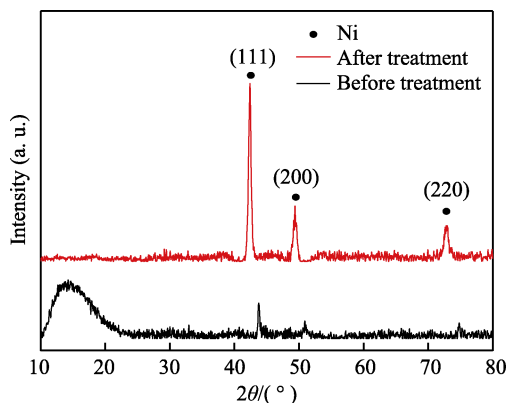


图7 材料表面XRD图

Fig.7 X-Ray diffraction of surface

2.2 影响因素分析

2.2.1 不同时间对阴极材料水下疏油性的影响

图8是不同时间条件下阴极材料的OCA。可以看出,当沉积时间小于23 min时,阴极材料表面的OCA随沉积时间延长而增大。当沉积时间为23 min时,阴极材料的OCA达到 $152^{\circ} \pm 3^{\circ}$ 。随着电沉积时间继续增加,阴极材料的OCA也有所增加,当沉积时间从23 min增加到26 min时,阴极材料表面的油滴均保持可滚动的状态。但当沉积时间增加到30 min后,阴极材料的OCA降低。这可能是电沉积时间的改变使材料表面粗糙结构和比表面积改变造成的。

为进一步分析时间对阴极表面水下疏油性能的影响机理,选取两个不同电沉积时间下的阴极表面进行SEM表征分析。图9为原始不锈钢网的表面微观形貌,图10a为电沉积23 min时的阴极表面微观形貌,图10b为电沉积30 min时的阴极表面微观形貌。

为进一步确定阴极材料表面生成的物质,对电化学沉积后的阴极不锈钢网片进行了XRD分析,结果如图7。在 $2\theta=44.2^{\circ}$ 、 51.5° 和 76.2° , Ni的三个特征峰为(111)、(200)和(220) (PDF No.04-0850)。由此证明,阴极生成的是金属镍单质。

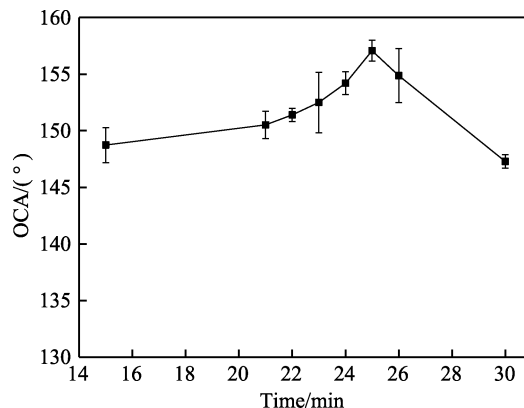


图8 阴极材料经不同时间电沉积后的水下油接触角

Fig.8 OCA of cathode under different electrodeposition time conditions

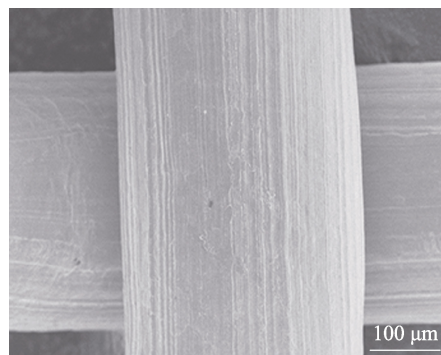


图9 原始不锈钢网表面微观形貌

Fig.9 Morphology of original stainless steel mesh surface

由图9可以看出,原始不锈钢网表面较为光滑,没有任何结晶或者其他形貌出现。在电沉积23 min时,阴极表面沉积了物质,放大后可观察到一种钟乳

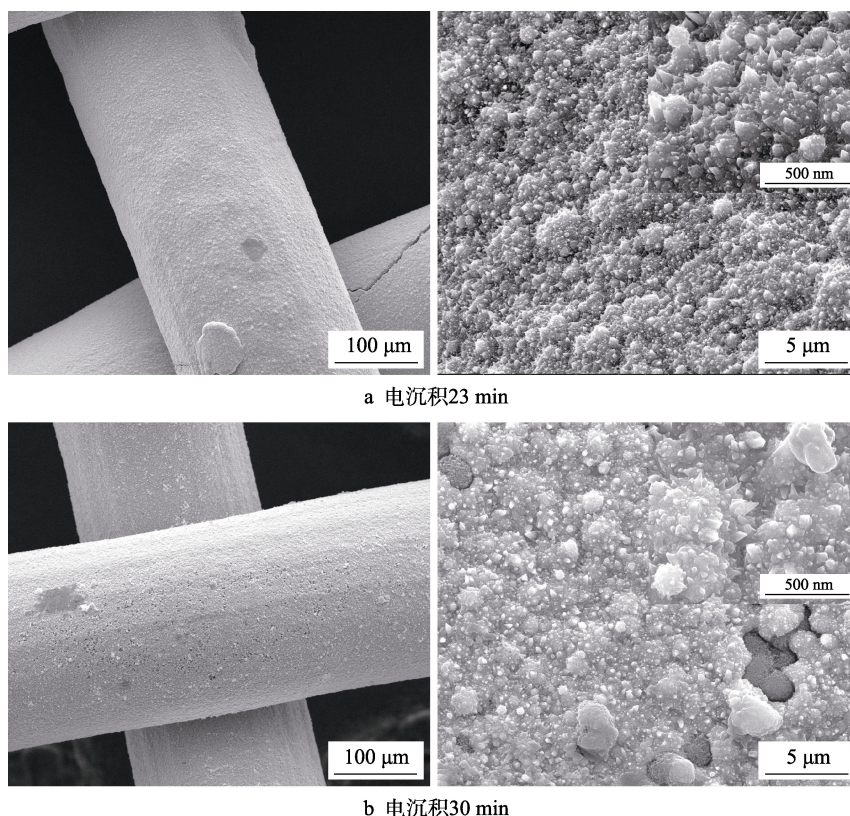


图 10 不同沉积时间下阴极材料表面的微观形貌

Fig.10 Micro-morphology of the cathodic surface under different deposition times: a) deposit for 23 minutes; b) deposit for 30 minutes

石状的微纳米粗糙结构 Ni, 见图 10a。这种微纳米结构会增大材料的粗糙度与比表面积, 为材料表面的水下疏油提供良好的结构基底。而沉积时间增加到 30 min 后, 其表面结构 (图 10b) 与电沉积 23 min 时相比, 原有的乳石状微纳米粗糙结构的粗糙度下降, 甚至表面变得光滑, 使整个表面原有的比表面积减小, 捕获水的能力下降, 从而导致材料的水下疏油性能降低。

2.2.2 不同电流对阴极材料水下疏油性的影响

设置电流为 0.4、0.5、0.6、0.7、0.8 A, 其余实验条件相同, 所制备的材料的水下疏油性能随电流变化如图 11 所示。随着电流从 0.4 A 增加到 0.8 A, 阴

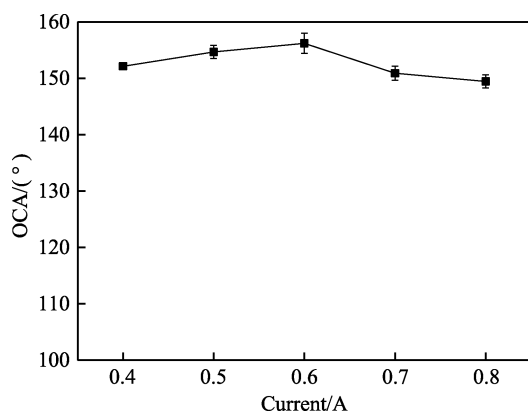


图 11 阴极在不同电流下沉积后的水下油接触角
Fig.11 OCA of cathode under different current conditions

极不锈钢网的 OCA 先增大, 后减小。当电流为 0.6 A 时, OCA 可达到最大值 $156^{\circ} \pm 2^{\circ}$, 阴极不锈钢网表现为水下超疏油性。

2.2.3 不同温度对阴极材料水下疏油性的影响

由图 12 可以看出, 大于 50°C 时, 阴极的 OCA 随温度升高而降低; 在 50°C 时, 阴极的 OCA 达到 $152^{\circ} \pm 3^{\circ}$, 此时阴极不锈钢网表现为水下超疏油性; 而当温度低于 50°C 时, 阴极的 OCA 先减小, 后增大。

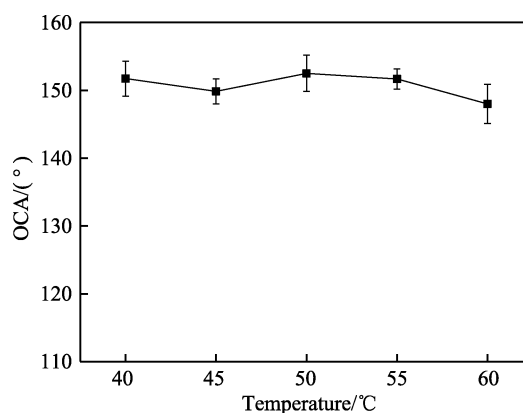


图 12 阴极在不同温度条件下的水下油接触角
Fig.12 OCA of cathode under different temperature conditions

2.3 油水分离测试结果

阴极材料在做油水分离效率测试时, 其油水分离前后的光学图如图 13 所示。经测试, 发现该材料对

石油醚的分离效率达到了 98.8%；对另外四种油（即正己烷、机油、菜籽油和液体石蜡）的分离效率分别达到了 99.3%、98.5%、97.2%和 98.3%（图 14）。在对阴极材料进行 20 次循环实验过程中，发现阴极材料保持相对稳定的效率，且在 20 次循环使用后仍能实现高效分离（图 15）。综上所述，一步电沉积法制备的超亲水-水下超疏油阴极材料，不仅可以分离多种油类，并且具备多次循环使用、稳定、高效的分离性能。

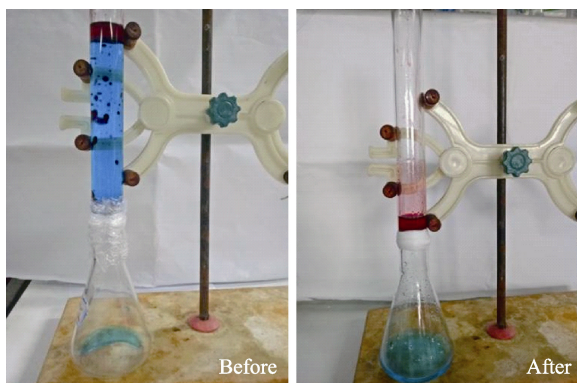


图 13 材料油水分离前后光学图

Fig.13 Optical image of the material before and after oil-water separation

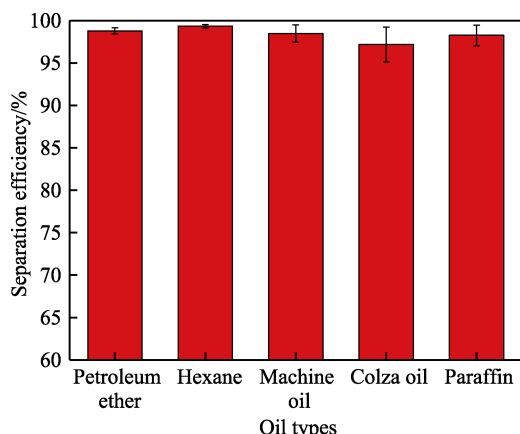


图 14 不同种类油分离效率

Fig.14 Separation efficiency for several types of oils

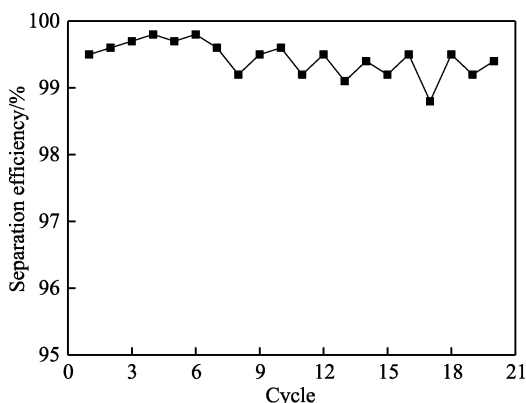


图 15 材料油水分离循环 20 次

Fig.15 20 cycles of repeating usage of the material for the n-hexane/water separation

3 结论

1) 采用一步电化学沉积法在阴极不锈钢网表面制备出具有微纳米粗糙结构的材料，该材料具备超亲水-水下超疏油性能。该制备方法与此前报道的电沉积方法相比，明显缩减了实验药品的种类和用量，并加入了超声、加热的手段，且在电沉积之后无后续处理，因此大大降低了成本，缩减了实验流程。

2) 电沉积时间对该方法制备的阴极含镍镀层材料具有较大的影响。当电沉积时间为 23 min 时，阴极材料具备钟乳石状的微纳米结构。该结构增大了材料的粗糙度和比表面积，为其超亲水-水下超疏油性能提供了良好基底。

3) 一步电化学沉积法制备的阴极超亲水-水下超疏油含镍镀层材料适用于分离不同种类的油水混合物，且具有稳定、高效、可多次循环使用的油水分离性能。

4) 该材料是否适用于分离实际生活中含有复杂成分的含油废水，还有待后续实验的进一步研究。

参考文献:

- [1] 贺赛环, 张富青, 凌宇杰, 等. 超亲水-水下超疏油不锈钢油水分离膜的制备及性能研究[J]. 化工新型材料, 2019, 47(S1): 217-221.
HE Sai-huan, ZHANG Fu-qing, LING Yu-jie, et al. Preparation and property of superhydrophilic underwater superoleophobic membrane on stainless steel mesh[J]. New chemical materials, 2019, 47(S1): 217-221.
- [2] DU Y Q, LI Y J, WU T, et al. A superhydrophilic and underwater superoleophobic chitosan-TiO₂ composite membrane for fast oil-in-water emulsion separation[J]. RSC advances, 2017, 66(7): 41838-41846.
- [3] 聂云亮, 张贤明. 纳米材料在油水分离应用方面的研究进展[J]. 应用化工, 2017, 46(12): 2467-2471.
NIE Yun-liang, ZHANG Xian-ming. Research progress in application of nano materials in oil/water separation[J]. Application of chemical, 2017, 46(12): 2467-2471.
- [4] YU Z W, YUN F F, GONG Z Y, et al. A novel reusable superhydrophilic NiO/Ni mesh produced by a facile fabrication method for superior oil/water separation[J]. Journal of materials chemistry A, 2017, 22(5): 10821-10826.
- [5] SONG J L, LI S D, ZHAO C L, et al. A superhydrophilic cement-coated mesh: An acid, alkali, and organic reagent-free material for oil/water separation[J]. Nanoscale, 2018, 10(4): 1920-1929.
- [6] 李文涛, 雍佳乐, 杨青, 等. 基于特殊润湿性材料的油水分离[J]. 物理化学学报, 2018, 34(5): 18-37.
LI Wen-tao, YONG Jia-le, YANG Qing, et al. Oil-water separation based on special wetting materials[J]. Journal

- of physical chemistry, 2018, 34(5): 18-37.
- [7] LIU Y, ZHANG K T, YAO W G, et al. A facile electro-deposition process for the fabrication of superhydrophobic and superoleophilic copper mesh for efficient oil-water separation[J]. Industrial & engineering chemistry research, 2016, 55(10): 2704-2712.
- [8] ANAND G V, SREEKUMARAN N A, HEMANT K R, et al. Photocatalytic superhydrophilic TiO_2 coating on glass by electrospinning[J]. RSC advances, 2012, 2(5): 2067-2072.
- [9] 田苏君. 氧化石墨烯基类贝壳结构超亲水-水下超疏油网膜的构筑及其油水分离性能研究[D]. 江苏: 江苏大学, 2018.
TIAN Su-jun. Construction of graphene oxide-based nacre-inspired superhydrophilic and underwater superoleophobic mesh and study on their oil/water separation performance[D]. Jiangsu: Jiangsu University, 2018.
- [10] ZHANG F, ZHANG W B, SHI Z, et al. Nanowire-haired inorganic membranes with superhydrophilicity and underwater ultralow adhesive superoleophobicity for high-efficiency oil/water separation[J]. Advanced materials, 2013, 25(30): 4192-4198.
- [11] SHEN L D, FAN M Z, QIU M B, et al. Superhydrophobic nickel coating fabricated by scanning electrodeposition[J]. Applied surface science, 2019, 483: 706-712.
- [12] ZHANG M, LI J, ZANG D L, et al. Preparation and characterization of cotton fabric with potential use in UV resistance and oil reclaim[J]. Carbohydrate polymers, 2016, 137: 264-270.
- [13] 蒋美慧子, 罗方, 向美苏, 等. 超疏水超亲油 Cu-Ni 复合镀层的制备及油水分离应用[J]. 中国表面工程, 2017, 30(6): 11-17.
JIANG Mei-hui-zi, LUO Fang, XIANG Mei-su, et al. Preparation of superhydrophobic and superoleophilic Cu-Ni composite coatings and application in oil-water separation[J]. China surface engineering, 2017, 30(6): 11-17.
- [14] 党钊, 刘利彬, 向宇, 等. 超疏水-超亲油材料在油水分离中的研究进展[J]. 化工进展, 2016, 35(Z1): 216-222.
DANG Zhao, LIU Li-bin, XIANG Yu, et al. Research progress of superhydrophobic and superoleophilic materials for oil-water separation[J]. Progress of chemical industry, 2016, 35(Z1): 216-222.
- [15] 袁腾, 陈卓, 周显宏, 等. 基于超亲水超疏油原理的网膜及其在油水分离中的应用[J]. 化工学报, 2014, 65(6): 1943-1951.
YUAN Teng, CHEN Zhuo, ZHOU Xian-hong, et al. Coated mesh film based on superhydrophilic and superoleophobic principle and its application in oil-water separation [J]. Ciesc journal, 2014, 65(6): 1943-1951.
- [16] SUNHEE J, YOUNGHUN K. Superhydrophilic-underwater superoleophobic TiO_2 -coated mesh for separation of oil from oily seawater/wastewater[J]. Korean journal of chemical engineering, 2016, 33(11): 3203-3206.
- [17] XU C, YAN F, WANG M X, et al. Fabrication of hyper-branched polyether demulsifier modified PVDF membrane for demulsification and separation of oil-in-water emulsion[J]. Journal of membrane science, 2020, 602: 117974.
- [18] MENG X H, DENG D. Bio-inspired formation of nano-structured arrays on flexible substrates with superoleophobicity[J]. Crystengcomm, 2015, 44(17): 8441-8448.
- [19] LI G Q, LU Y, WU P C. Fish scale inspired design of underwater superoleophobic microcone arrays by sucrose solution assisted femtosecond laser irradiation for multifunctional liquid manipulation[J]. Journal of materials chemistry A, 2015, 36(3): 18675-18683.
- [20] ZHANG R R, LIU C S, YANG T T. Fabrication of superhydrophilic and underwater superoleophobic copper mesh and oil/water separation property[J]. Surface technology, 2017, 46(5): 202-208.
- [21] SOHEIL Z, TORAJ M, MOHTADA S. Superhydrophilic and underwater superoleophobic membranes—A review of synthesis methods[J]. Progress in polymer science, 2019, 98: 101166.
- [22] 罗华丽, 何婵, 周树学, 等. 水下超疏油涂层的研究现状与评述[J]. 涂料工业, 2016, 46(9): 80-87.
LUO Hua-li, HE Chan, ZHOU Shu-xue, et al. Research status and review of underwater superoleophobic coating [J]. Paint & coating industry, 2016, 46(9): 80-87.
- [23] XIANG T F, DING S B, LI C, et al. Effect of current density on wettability and corrosion resistance of superhydrophobic nickel coating deposited on low carbon steel[J]. Materials & design, 2017, 114: 65-72.
- [24] HOU Y Y, LI R Q, LIANG J. Superhydrophilic nickel-coated meshes with controllable pore size prepared by electrodeposition from deep eutectic solvent for efficient oil/water separation[J]. Separation and purification technology, 2018, 192: 21-29.
- [25] 曹思静, 潘子鹤, 杜志平, 等. 超亲水/水下超疏油膜的制备及油水分离性能[J]. 化工进展, 2018, 37(10): 3744-3750.
CAO Si-jing, PAN Zi-he, DU Zhi-ping, et al. Fabrication of superhydrophilic/underwater superoleophobic membrane and oil-water separation performance[J]. Chemical industry and engineering progress, 2018, 37(10): 3744-3750.
- [26] 岳程. 超亲水水下超疏油石英砂滤料的制备及其油水分离研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2019.
YUE Cheng. Superhydrophilic and underwater superoleophobic quartz sand filter material and its oil/water separation[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019.