

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2022.07.008

不锈钢基超疏水表面的制备及其性能研究

唐浩铭^{1,2}, 孙国富¹, 潘高峰², 徐静莉^{1*}

(1. 许昌学院化工与材料学院, 河南 许昌 461000;

2. 吉林化工学院石油化工学院, 吉林 吉林 132022)

摘要: 通过水热法和化学修饰法在2000目304不锈钢基体上制备了超疏水不锈钢表面。研究了十四酸溶液浓度和修饰时间对表面疏水性的影响。采用扫描电镜、接触角测定仪、X射线衍射等表征技术对所制备的疏水表面进行了表征。结果表明十四酸溶液浓度为0.05 mol/L、修饰时间为1~5 h时能够制备出水接触角为157°、滚动角为5.9°的超疏水表面。表面具有良好的耐磨性, 在经过20次胶带剥离后表面仍为超疏水表面。

关键词: 超疏水表面; 水热法; 表面修饰; 水接触角

中图分类号: TB333

文献标识码: A

Preparation of Stainless Steel-Based Superhydrophobic Surface and Its Performance

TANG Haoming^{1,2}, SUN Guofu¹, PAN Gaofeng², XU Jingli^{1*}

(1. Chemical and Material College, Xuchang University, Xuchang 461000, China;

2. Petrochemical Engineering College, Jilin Institute of Chemical Technology, Jilin 132022, China)

Abstract: A superhydrophobic stainless steel surface was prepared on the 304 stainless steel substrate with 2000 mesh by hydrothermal and chemical modification methods. The influence of the concentration of myristic acid solution and modification time on the surface hydrophobicity was studied. Characterization techniques such as scanning electron microscopy, contact angle meter, and X-ray diffraction were used to characterize the prepared hydrophobic surface. The results show that a superhydrophobic surface with a water contact angle of 157° and a sliding angle of 5.9° can be prepared successfully when the concentration of myristic acid solution is 0.05 mol/L and the modification time is 1 to 5 hours. The surface has excellent abrasion resistance and is still super-hydrophobic after 20 times of tape peeling.

Keywords: Superhydrophobic surface; hydrothermal method; surface modification; water contact angle

超疏水(Super-Hydrophobic)是固体表面对于水的一种特殊的润湿性质, 这种特性与水或固体表面的化学性质有关, 也与固体表面的微观结构有关^[1-2]。水对于固体表面的润湿性可以通过水接触角(Water Contact Angle, WCA)和滚动角(Water

Sliding Angle, WSA)直观地反映。杨氏方程^[3]描述了在光滑的固体表面上固气、液固、液气间表面张力与接触角之间的关系:

$$\cos \theta = \frac{\gamma_{sv} - \gamma_{sl}}{\gamma_{lv}} \quad (1)$$

收稿日期: 2021-10-15

修回日期: 2021-10-31

作者简介: 唐浩铭(1997—), 男, 硕士研究生, Email: 2834996812@qq.com

*通信作者: 徐静莉(1971—), 女, 博士, 教授, Email: 331736135@qq.com

式中: θ 为本征接触角, γ_{sv} 为固气表面张力, γ_{sl} 为固液表面张力, γ_{lv} 为气液表面张力。在非理想的粗糙表面上有 Wenzel 方程^[3]描述了液体在粗糙固体表面上的润湿行为:

$$\cos \theta_r = r \cos \theta \quad (2)$$

式中: θ 为本征接触角, θ_r 为在粗糙表面的表观接触角, r 为粗糙度。由 Wenzel 方程可知:当本征接触角 $\theta < 90^\circ$ 时,表面粗糙度的增大会使 $\theta_r < \theta$;当 $\theta > 90^\circ$ 时,表面粗糙度的增大会使 $\theta_r > \theta$,即粗糙度的增大会增强固体表面的润湿性。滚动角则体现了固体表面对于液体的粘附力,滚动角越小,表面对于液体的粘附力越小^[4]。通常认为在 WCA $> 90^\circ$ 时固体表面是疏水表面,在 WCA $> 150^\circ$ 且 WSA $< 10^\circ$ 时可以认为固体表面为超疏水表面^[3-5]。超疏水表面因为其对于水具有的独特润湿性在许多领域引起了人们的关注。例如经过低表面能修饰后的二氧化钛微粒,就可以用于改善膜蒸馏用膜表面的疏水性,使膜蒸馏过程更加高效^[6];超疏水表面在油水分离^[7-8]、自清洁^[9-10]、防雾/防霜^[11-12]、金属表面保护^[13-14]等方面也显现出很好的应用前景。

用于制备超疏水表面的基底分为有机基底和无机基底两种。常用的有机基底为聚四氟乙烯(PTFE),聚丙烯(PP)和聚偏氟乙烯(PVDF)等^[15],一般用于膜蒸馏过程,但是这类有机材料存在机械强度差,不耐高温的缺点,导致了其使用寿命短;用于油水分离的金属基底^[16-17]具有机械强度高,耐高温的优点^[18],但是疏水性和有机基底相比较差。

制备超疏水表面主要有两种方法:一种是通过增大疏水表面粗糙度的方法,使疏水表面变为超疏水表面,另一种是对粗糙的亲水表面进行改性,从而降低材料的表面能,使其变为超疏水表面^[19]。通过使用水热法^[20]和气相沉积^[21]等方法使固体表面生长微小晶粒,也可以利用皮秒激光在固体表面上刻蚀^[22],或者将小微粒附着在固体表面上^[23]能够增大固体表面的粗糙度;如果使用的基质具有导电性,那么还可以采用电镀法也可以增大基质表面的粗糙度^[24]。表面能的降低,可以通过附着聚二甲基硅氧烷^[25]、带有长链的硅烷类^[26]、脂肪酸^[27]或硫醇^[28]等具有低表面能物质来实现。

水热法相比激光表面处理,表面电镀等方法,具有操作简单的优点,仅需要简单的实验仪器和药品就可以制备出较好的氧化锌晶体,而且易于控制纳

米氧化锌的微观结构,通过往溶液中添加不同类型的表面活性剂,就可以制备出颗粒状、柱状、片状、花状等不同形貌的氧化锌晶体,为表面赋予不同程度的粗糙度^[29]。Wang 科研团队^[30]使用水热法使铜网表面生长出了柱状的纳米氧化锌晶体,然后将聚二甲基硅氧烷附着在氧化锌晶体上,最终制备出了超疏水铜网。Zhang 等人^[31]使用水热法在铜片基底上生长出了金字塔状的纳米氧化锌晶体,然后以全氟癸基三乙氧基硅烷为化学修饰剂对氧化锌晶体表面进行低表面能修饰,最终制备出了超疏水表面。Mao 等人^[32]仅使用不同的表面活性剂加入锌盐溶液中,再经过水热处理,就使纳米氧化锌呈现了颗粒状、柱状、花状等不同的形貌,对于增大表面的粗糙度十分有利。十四酸与聚二甲基硅氧烷、硅烷类、硫醇类等其他低表面能物质相比,具有安全性和经济性方面的优势。十四酸又称肉豆蔻酸,是一种天然的脂肪酸,广泛存在于各种植物和动物的脂肪中,也经常作为日化产品的添加剂,不会对人们的健康造成威胁^[33]。十四酸是一种脂肪酸,脂肪酸类物质也因为相比于其他低表面能物质更为低廉的价格^[34],常被用来对固体表面进行化学修饰。

本文提出了采用水热法和化学修饰法相结合的方法,首先实验以氯化锌溶液为前驱体,在不使用任何助剂的情况下在不锈钢网膜表面上制备出了花状的纳米氧化锌晶体,显著提高了表面的粗糙度;然后使用了十四酸的乙醇溶液对表面进行化学修饰,使十四酸分子上的长碳链覆盖在纳米氧化锌的表面,显著降低了表面能;最终在不锈钢网上制备出了具有良好耐磨性的超疏水表面,有望应用于膜蒸馏过程中。

1 实验

1.1 原料和试剂

2000 目 304 不锈钢网膜(河北港天筛过滤网厂),盐酸(洛阳昊华化学,36%),丙酮(洛阳市化学试剂厂,99.5%),氧化锌(郑州派尼化学试剂厂,99%),尿素(天津科密欧化学试剂,99%),氯化铵(天津凯通化学,99.5%),氨水(天津福晨化学,25%),十四酸(麦克林,99.5%),无水乙醇(天津富宇精细化工,99.7%),去离子水。

1.2 超疏水表面的制备

首先将不锈钢网膜分别用丙酮和稀盐酸在超声

仪中超声 5 min, 去除不锈钢膜表面的污垢、有机物和金属氧化物。取 4.28 g 氧化锌, 加入 10.65 g 盐酸和 100 mL 去离子水, 使氧化锌和盐酸进行反应, 搅拌至溶液中的粉末状白色沉淀全部溶解后, 倒入 1 L 的容量瓶中, 加去离子水至刻度线, 上下摇匀, 即制得浓度为 0.0526 mol/L 的氯化锌溶液。取 47.5 mL 的氯化锌溶液, 加入 0.1515 g 的尿素和 0.027 g 的氯化铵, 再滴入 2.5 mL 氨水, 首先会生成白色沉淀, 继续搅拌至无色透明溶液, 即制得锌盐溶液。将不锈钢网膜浸入锌盐溶液中, 再将该体系放入水浴锅中, 温度设置为 90 °C, 水浴 60 min, 然后将不锈钢网膜取出, 用去离子水冲洗后放入 60 °C 烘箱中 30 min, 烘干后即得到表面生长有氧化锌晶体的不锈钢网膜 (ZnO-Mesh)。

称取 0.114 g 十四酸溶解于 50 mL 无水乙醇中, 制得浓度为 0.001 mol/L 的十四酸溶液; 然后将制得的表面生长有氧化锌晶体的不锈钢网膜放入十四酸溶液中, 浸泡 60 min。取出后用乙醇清洗表面残留的十四酸溶液, 再放入 60 °C 烘箱中烘干 20 min。即制得不锈钢基超疏水表面 (SH-Mesh)。

1.3 性能测试及表征

超疏水金属基膜的表面形貌通过场发射扫描电子显微镜 (Nova Nano SEM 450) 进行观测; 不锈钢网膜表面的氧化锌晶体通过 X 射线衍射仪 (D8-ADVANCE) 进行表征; 氧化锌晶体表面成分通过红外光谱仪 (Nicolet 6700) 进行分析; 最终制得的超疏水不锈钢网膜的表面润湿性通过光学法触角的测试 (C60) 进行验证。

2 结果与讨论

2.1 超疏水不锈钢网膜的表面晶体结构及形貌

使用了 X-射线衍射技术对超疏水不锈钢网的表面晶体进行表征。图 1 是经氧化锌晶体生长的不锈钢网膜和空白的不锈钢网膜的 XRD 图谱。对照两个不同表面的 XRD 图谱可以明显看出: 在 $2\theta = 43.5^\circ$ 、 50.7° 和 74.5° 处为不锈钢基底的衍射峰位置 (在图中用“#”号标注), 而氧化锌晶体附着的不锈钢网膜在 $2\theta = 31.6^\circ$ 、 34.3° 、 36.1° 、 47.4° 、 56.5° 、 62.7° 、 66.3° 、 67.7° 和 68.9° 处有不同于空白不锈钢网膜的衍射峰 (在图中用“*”标注)。通过标准卡片比对分析, 在金属网膜上生长的为氧化锌晶体 (编号 36-1451)。这说明在不锈钢金属网膜上生长了氧化

锌晶体, 成功地制备出了氧化锌不锈钢网。

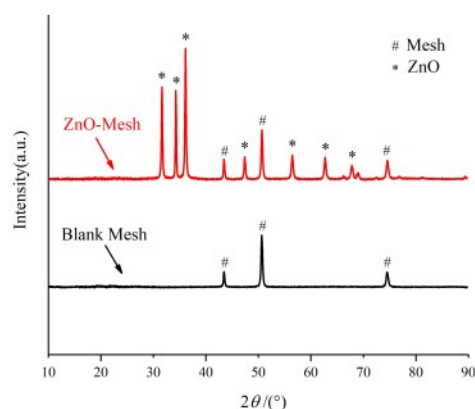


图1 不锈钢网不同表面的XRD图谱

Fig.1 X-ray diffraction patterns of different surfaces of stainless steel mesh

图2为仅在不锈钢网上生长氧化锌晶体的表面和经过十四酸修饰后表面的红外光谱。经对比可以发现: 超疏水表面在 2917 cm^{-1} 、 2850 cm^{-1} 、 1624 cm^{-1} 和 1463 cm^{-1} 处有明显的吸收峰 (在图中用“*”标注), 其中 2917 cm^{-1} 和 2850 cm^{-1} 处的峰分别是十四酸长碳链中 $-\text{CH}_2-$ 的不对称伸缩振动吸收峰和对称伸缩振动吸收峰; 1463 cm^{-1} 处的峰是十四酸中长碳链末端 $-\text{CH}_3$ 的不对称弯曲振动吸收峰; 1624 cm^{-1} 处的峰是十四酸中 $-\text{C}=\text{O}$ 的伸缩振动吸收峰。经过红外光谱的表征和分析, 可以确定十四酸在氧化锌晶体表面的成功附着。

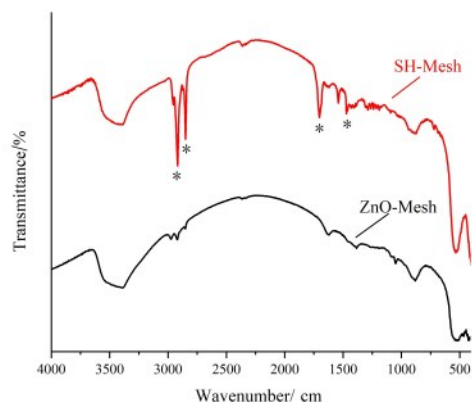


图2 不锈钢网不同表面的红外光谱

Fig.2 Infrared spectra of different surfaces of stainless steel mesh

未经处理的清洗干净的不锈钢网膜为银灰色,表面有金属光泽,其形貌如图3所示,空白不锈钢网膜由直径约为25 μm 的不锈钢丝编织构成,不锈钢丝表面较光滑,上下交错排列,紧密且有规律。

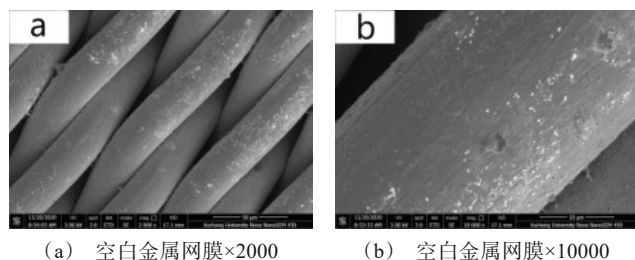
(a) 空白金属网膜 $\times 2000$ (b) 空白金属网膜 $\times 10000$

图3 空白不锈钢网的SEM照片

Fig.3 SEM of blank stainless steel mesh

经过锌盐溶液处理后不锈钢网膜表面变为灰白色,其形貌如图4(a)所示,不锈钢金属网膜已经被一层粗糙的晶体覆盖,原本的金属丝交错结构由于被覆盖已不可见。继续放大可以观察到在表面上致密排列的柱状晶体,许多晶体一侧会生长在一起,形成花状晶体球,这种在凸起上又生成凸起的多级粗糙结构极大地增加了表面的粗糙程度,对于最后超疏水表面的制成十分有利(图4(b))。通过更高倍数下的SEM照片(图4(c)和4(d))继续观察该表面,可以清楚地观察到晶体的细致结构:花状晶体的花瓣呈柱状,截面呈正六边形,并且从晶体底部至顶部逐渐变细,是纳米氧化锌的六方晶体结构。实验以 ZnCl_2 溶液为前驱体,仅使用简单的实验仪器,在不添加表面活性助剂的条件下,制备出了具有多级粗糙结构的花状纳米氧化锌晶体,显著增大了表面的粗糙度。

在经过十四酸溶液进行修饰过后,表面仍为灰白色,其形貌如图5所示,十四酸溶液的表面修饰基本上没有改变氧化锌晶体的结构,纳米氧化锌晶体表面仍然具有多级粗糙结构。

2.2 超疏水不锈钢网膜表面润湿性

实验通过使用不同浓度的十四酸溶液对 ZnO -Mesh进行低表面能修饰,研究了十四酸溶液浓度对表面疏水性的影响;通过改变十四酸溶液对 ZnO -Mesh进行低表面能修饰的时间,研究了修饰时间对表面疏水性的影响。

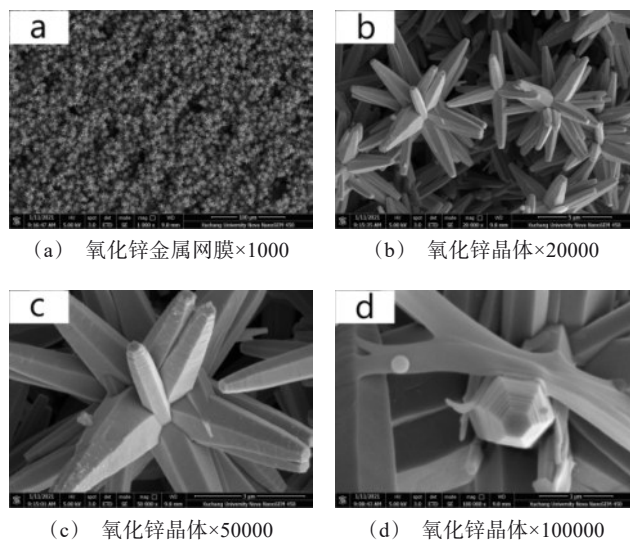
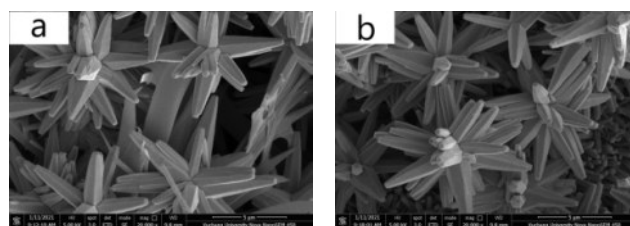
(a) 氧化锌金属网膜 $\times 1000$ (b) 氧化锌晶体 $\times 20000$ (c) 氧化锌晶体 $\times 50000$ (d) 氧化锌晶体 $\times 100000$

图4 水热法处理后的不锈钢网的SEM照片

Fig.4 SEM of stainless steel mesh after hydrothermal treatment

图5 经过十四酸溶液修饰过的氧化锌晶体 $\times 50000$ Fig.5 ZnO crystal modified by myristic acid solution $\times 50000$

2.3.1 十四酸溶液浓度对表面疏水性的影响

分别使用0.01 mol/L、0.03 mol/L、0.05 mol/L、0.07 mol/L、0.1 mol/L和0.15 mol/L的十四酸乙醇溶液对生长有纳米 ZnO 的不锈钢基进行低表面能修饰,研究十四酸溶液浓度对表面疏水性的影响。

十四酸溶液浓度影响表面水接触角的实验结果如图7所示,空白不锈钢网膜的水接触角为 85° 左右,经过生长纳米氧化锌晶体,水接触角突然降为 0° 。这是因为原本的不锈钢表面虽然为亲水表面,但网膜表面较为平整,粗糙度不够,亲水性表现的不明显。但经过水热反应,不锈钢网膜的表面被纳米氧化锌取代,纳米氧化锌晶体极小而且存在多级粗糙结构,极大地增强了氧化锌原本亲水的润湿性,使水滴接触到表面就迅速铺展开来。但经过浓度为0.01 mol/L的十四酸溶液的低表面能修饰后,水接

触角迅速从 0° 增大至 140° 以上。这是因为经过十四酸的修饰,氧化锌的表面被十四酸的长碳链取代,且没有改变氧化锌晶体的表面结构,而长碳链的疏水性较强,又利用了纳米氧化锌的多级粗糙结构,进一步增强了表面的疏水性。随着十四酸溶液浓度的升高,表面的水接触角逐渐增大,然后又缓慢降低,中间存在极大值。在十四酸溶液浓度为 0.05 mol/L 时水接触角最大,为 157° 左右,在约 0.03 mol/L 至 0.14 mol/L 的浓度范围之间时,所制备表面的水接触角大于 150° 。十四酸溶液浓度影响表面滚动角的实验结果如图 7 所示,随着十四酸浓度的升高,滚动角呈现先逐渐降低至某一极小值,然后再逐渐增加的趋势。在十四酸溶液为 0.05 mol/L 时表面地滚动角最小,为 5.9° 左右。

实验结果表明:随着十四酸溶液浓度的升高,出现了表面水接触角先增大后减小,滚动角先减小后增大的趋势。出现这种趋势的原因为:在十四酸溶液浓度升高时,与氧化锌晶体结合的十四酸分子逐渐增多,降低了表面的表面能,使水接触角逐渐升高,滚动角降低,但随着溶液浓度的继续升高,过多的十四酸会覆盖在氧化锌的表面,从而填平了一部分粗糙结构(见图 8),导致表面的粗糙度下降,进而使表面的疏水性减弱,造成了水接触角的下降和滚动角的上升。Lu Y 等^[35]在使用硬脂酸处理铜网表面的实验中也发现了类似规律。

综上,浓度约 0.033 mol/L 至 0.094 mol/L 的十四酸溶液制备出表面的水接触角均大于 150° ,滚动角均小于 10° ,此时表面均为超疏水表面。其中,十四

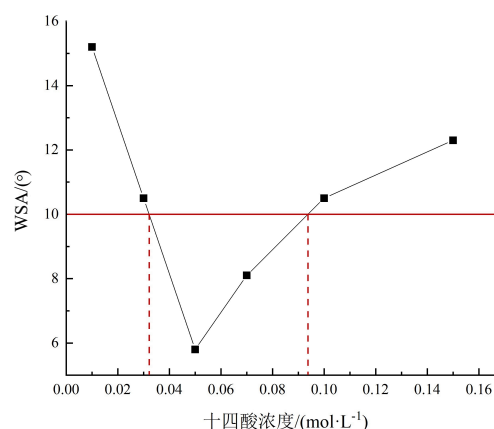


图 7 不同浓度十四酸溶液修饰表面的滚动角

Fig.7 Water sliding angle of surfaces modified by different concentrations of myristic acid solutions

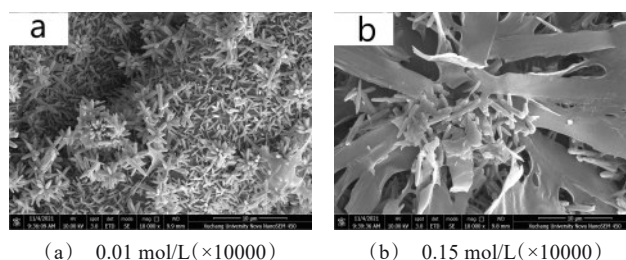


图 8 表面经过不同浓度十四酸溶液修饰的 SEM 照片

Fig.8 SEM of the surface modified by different concentrations of myristic acid solution

酸溶液为浓度为 0.05 mol/L 时,水接触角最大,滚动角最小,此条件制备的超疏水表面最佳。

2.3.2 十四酸溶液的修饰时间对表面疏水性的影响

使用 0.05 mol/L 的十四酸乙醇溶液分别对生长氧化锌晶体的不锈钢网膜修饰 0.5、1、5、10、20 h,研究了低表面能修饰时间对表面疏水性的影响。

十四酸溶液修饰时间影响表面水接触角的实验结果如图 9 所示。实验结果表明:即使进行短时间的修饰(0.5 h),表面的水接触角也达到了 150° 左右,说明该表面具有了较强的疏水性。随着修饰时间的增长,表面的水接触角缓慢上升,随后又缓慢下降,但上升和下降的幅度都很小。当修饰时间为 5 h 时,表面的水接触角达到最大,为 155° 左右。

十四酸溶液修饰时间对表面滚动角的影响如表 1 所示,由表中数据可知,修饰时间对表面的滚动角的影响较小,无论时间长短,滚动角始终小于 10° ,

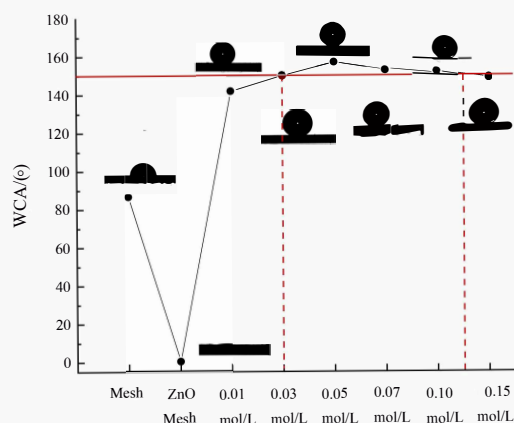


图 6 不同表面的水接触角

Fig.6 Water contact angle of different surfaces

符合超疏水表面的条件。这可能是由于十四酸与氧化锌表面的结合速度较快,短时间内氧化锌的表面就达到饱和,所以长时间的修饰并不能对表面的疏水性带来显著的变化。

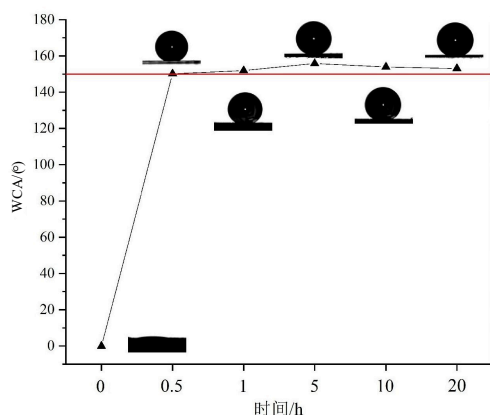


图9 不同修饰时间的水接触角

Fig.9 Water contact angle of surface with different modification time

表1 不同修饰时间的滚动角

Tab.1 Water sliding angle of surface with different modification time

修饰时间/h	滚动角/(°)
0.5	5.6
1	7.2
5	8.5
10	8.2
20	6.4

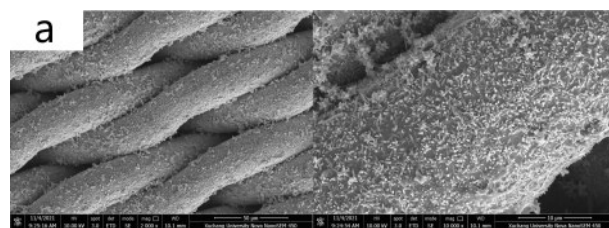
综上,由于修饰时间对表面水接触角的影响较小,而且与表面滚动角没有明显关联。在修饰1 h后表面已经显现较强的疏水性,所以最佳的修饰时间在1~5 h。

2.4 超疏水表面耐磨性

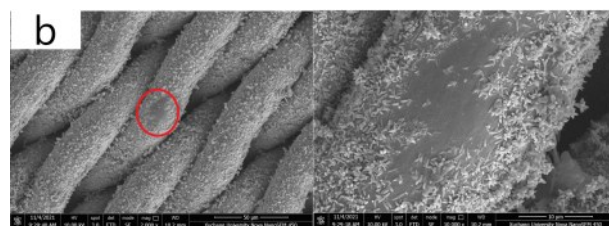
实验采用胶带,对通过上述方式制备的不锈钢基超疏水表面进行剥离^[19],在先后剥离了5、10、20、30次后,再检测表面与水的接触角,研究了剥离次数对表面疏水性的影响。

经过不同次数剥离后的电镜照片如图10所示,在经过5次胶带剥离后,不锈钢网膜表面的氧化锌晶体没有出现缺失,在经过10次胶带剥离后,出现了小面积裸露的不锈钢丝表面,在经过20次胶带剥离后,氧化锌晶体缺失的点位变多,缺失面积变大,

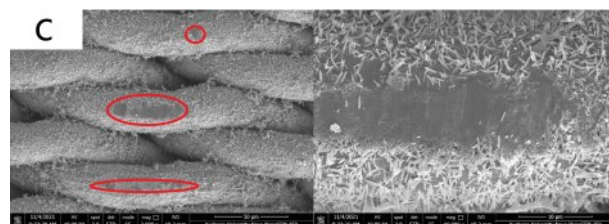
在经过30次胶带剥离后,表面的氧化锌晶体缺失的点位进一步变多,缺失面积也进一步增大。不同剥离次数对表面疏水性影响的研究结果如图11所示,研究表明:即使对表面进行多次剥离,表面的疏水性依旧良好。使用胶带剥离5次对表面的疏水性基本上没有影响;剥离10次后,表面的水接触角出现了轻微下降;在剥离20次后,表面的水接触角为150°左右,仍然具有超疏水性能;在剥离30次后,表面的水接触角为145°左右,虽然失去了超疏水性,但表面仍然具有良好的疏水性能。说明通过水热法和化学修饰法相结合制备的不锈钢基超疏水表面具有良好的耐磨性能。



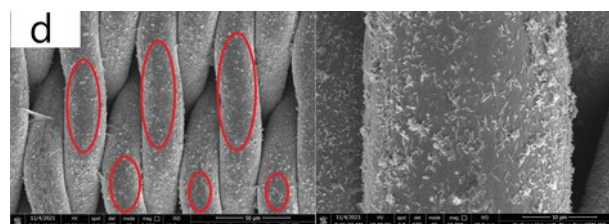
(a) 剥离5次



(b) 剥离10次



(c) 剥离20次



(d) 剥离30次

图10 表面经过不同剥离次数后的电镜照片

Fig.10 SEM of the surfaces after different peeling times

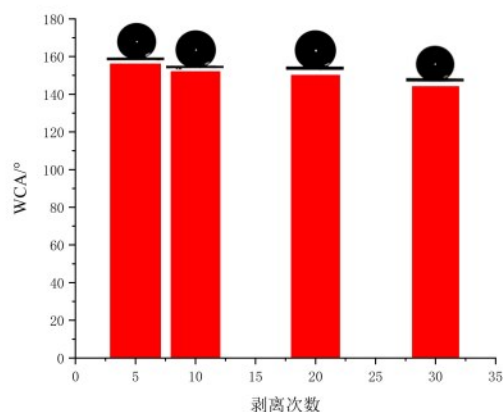


图 11 表面经过不同剥离次数后的水接触角

Fig.11 Water contact angle of the surfaces after different peeling times

3 结论

通过水热法和化学修饰法相结合成功地在不锈钢基体上制备出了超疏水表面。

(1)采用水热法使柱状纳米氧化锌晶体在不锈钢基体上生长,成功地在表面上构建出多级粗糙结构,随后使用十四酸的乙醇溶液对纳米氧化锌的表面进行化学修饰,制备出了超疏水表面。并通过扫描电镜、X射线衍射和红外光谱对表面结构进行表征和成分分析,证明了纳米氧化锌-十四酸超疏水表面的成功制备。

(2)考察了十四酸溶液的浓度和修饰时间对表面疏水性的影响,随着十四酸溶液浓度的升高,表面的疏水性先增强,最后缓慢减弱,浓度为 0.05 mol/L 的十四酸溶液可以制备出最好的超疏水性表面。

(3)通过胶带剥离对表面耐磨性进行了测试。在使用胶带剥离超疏水表面 20 次后,表面的水接触角为 150°左右,仍具有超疏水性质,剥离 30 次后,表面失去超疏水性,但疏水性仍然较好。水热法和化学修饰法在不锈钢基体上制备的超疏水表面具有良好的耐磨性。

参考文献

- [1] 肖成龙,梁世雍,于兆勤.可控阵列微柱超疏水表面实验研究[J].电镀与精饰,2020,42(7):27-32.
- [2] 赵美蓉,周惠言,康文倩,等.超疏水表面制备方法的比较[J].复合材料学报,2021,38(2):361-379.
- [3] Celia E, Darmanin T, Givenchy E T, et al. Recent advances in designing superhydrophobic surfaces[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2013, 402: 1-18.
- [4] Parvate S, Dixit P, Chattopadhyay S. Superhydrophobic surfaces: insights from theory and experiment[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2020, 124(8): 1323-1360.
- [5] 郑益华,张成春,孙金焕.表面动态脱水仿生技术及其应用[J].表面技术,2021,50(8):28-39+50.
- [6] Lee E J, An A K, Hadi P, et al. Advanced multi-nozzle electrospun functionalized titanium dioxide/polyvinylidene fluoride-co-hexafluoropropylene (TiO₂/PVDF-HFP) composite membranes for direct contact membrane distillation[J]. Journal of Membrane Science, 2017, 524: 712-720.
- [7] Wang J, Zou Z, Geng G. Construction of superhydrophobic copper film on stainless steel mesh by a simple liquid phase chemical reduction for efficient oil/water separation[J]. Applied Surface Science, 2019, 486: 394-404.
- [8] 侯珂珂,陈新华,张万强,等.电沉积法制备仿生超疏水滤网及其油水分离性能[J].电镀与精饰,2020,42(4):1-6.
- [9] 徐凯乐,付超,张哲鹏,等.自清洁型超疏水铜网的制备及其油水分离性能[J].应用化工,2020,49(1):5-10.
- [10] Yu C, Sasic S, Liu K, et al. Nature - inspired self - cleaning surfaces: mechanisms, modelling, and manufacturing [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2020, 155: 48-65.
- [11] Wang L, Lu J, Wang M, et al. Anti-fogging performances of liquid metal surface modified by ZnO nano-petals[J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2019, 95: 65-70.
- [12] 白景奇,白珊,任丽霞,等.海藻糖改性聚乙烯醇及其防雾/防霜涂层[J].高等学校化学学报,2021,42(8):2683-2688.
- [13] Zhang Q, Zhang H. Corrosion resistance and mechanism of micro-nano structure super-hydrophobic surface prepared by laser etching combined with coating process[J]. Anti-Corrosion Methods and Materials, 2019, 66(3): 264-273.
- [14] 宋政伟,丁莉峰,王沛霖,等.镁合金表面Ni-P/Cu-Zn超疏水复合涂层制备及耐蚀性研究[J].电镀与精饰,2021,43(7):10-14.
- [15] Khayet M. Membranes and theoretical modeling of membrane distillation: a review[J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2011, 164(1-2): 56-88.
- [16] Chen Q, de Leon A, Advincula R C. Inorganic-organic

- thiolene coated mesh for oil/water separation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(33): 18566-18573.
- [17] Raturi P, Yadav K, Singh J P. ZnO-nanowires-coated smart surface mesh with reversible wettability for efficient on-demand oil/water separation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(7): 6007-6013.
- [18] 刘羊九, 王云山, 韩吉田, 等. 膜蒸馏技术研究及应用进展[J]. 化工进展, 2018, 37(10): 3726-3736.
- [19] 李娜. ZnO/泡沫镍超疏水材料的制备及其性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- [20] 徐凯乐, 付超, 徐梦亚, 等. 低粘附超疏水金属网的制备及在溢油清理中的应用[J]. 表面技术, 2017, 46(11): 37-46.
- [21] Du X, Huang X, Li X, et al. Wettability behavior of special microscale ZnO nail-coated mesh films for oil-water separation[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2015, 458: 79-86.
- [22] Yan Z, Liang X, Shen H, et al. Preparation and basic properties of superhydrophobic silicone rubber with micro-nano hierarchical structures formed by picosecond laser-ablated template[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1743-1750.
- [23] Cho Y K, Park E J, Kim Y D. Removal of oil by gelation using hydrophobic silica nanoparticles[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2014, 20(4): 1231-1235.
- [24] Yang Z, Liu X, Tian Y. Fabrication of super-hydrophobic nickel film on copper substrate with improved corrosion inhibition by electrodeposition process[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2019, 560: 205-212.
- [25] Wang G, Zeng Z, Wang H, et al. Low drag porous ship with superhydrophobic and superoleophilic surface for oil spills cleanup[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(47): 26184-26194.
- [26] Gou X, Guo Z. Hybrid Hydrophilic-hydrophobic CuO@TiO₂-coated copper mesh for efficient water harvesting [J]. Langmuir, 2019, 36(1): 64-73.
- [27] Khosravi M, Azizian S. Preparation of superhydrophobic and superoleophilic nanostructured layer on steel mesh for oil-water separation[J]. Separation and Purification Technology, 2017, 172: 366-373.
- [28] Zhong L, Feng J, Guo Z. An alternating nanoscale (hydrophilic - hydrophobic)/hydrophilic Janus cooperative copper mesh fabricated by a simple liquidus modification for efficient fog harvesting[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2019, 7(14): 8405-8413.
- [29] Cao X, Wang N, Wang L. Ultrathin ZnO nanorods: facile synthesis, characterization and optical properties[J]. Nanotechnology, 2010, 21(6): 65603.
- [30] Wang G, Zeng Z, Wang H, et al. Low drag porous ship with superhydrophobic and superoleophilic surface for oil spills cleanup[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(47): 26184-26194.
- [31] Zhang S, Zheng X, Wang P, et al. Fabrication of superhydrophobic micro-needle ZnO surface as corrosion barrier against corrosion in simulated condensation environment[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2020, 585: 124087.
- [32] Mao Y, Li Y, Zou Y, et al. Solvothermal synthesis and photocatalytic properties of ZnO micro/nanostructures [J]. Ceramics International, 2019, 45(2): 1724-1729.
- [33] Burdock G A, Carabin I G. Safety assessment of myristic acid as a food ingredient[J]. Food and Chemical Toxicology, 2007, 45(4): 517-529.
- [34] 吴洁, 余新泉, 张友法, 等. 铝合金表面构建超疏水性的化学改性机理[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2011, 41(5): 1036-1041.
- [35] Lu Y, Li Z, Hailu G, et al. Study on the oil/water separation performance of a super-hydrophobic copper mesh under downhole conditions[J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2019, 72: 310-318.