

超防垢复合涂料的制备及其特性研究

吴绍伟¹, 李鹏飞², 吴娴², 王佳伟¹, 程利民¹, 王山林²

(1.中海石油(中国)有限公司湛江分公司, 广东 湛江 524057;

2.西南科技大学 环境友好能源材料国家重点实验室, 四川 绵阳 621010)

摘要: **目的** 表面结垢行为是影响海上油田石油开采的重要因素之一, 为了解决这一问题, 设计并研制了一种可大规模喷涂的超防垢复合涂料。**方法** 以超疏水二氧化硅纳米粉、硅微粉、醋酸丁酯和丙烯酸树脂为主要原料, 采用两步喷涂工艺技术制备具有超疏热水特性的超防垢复合涂料, 通过接触角测量仪、延时拍摄手段和沸水蒸发结垢实验分别评价了涂层的润湿性、耐磨性、自清洁特性、防垢防腐特性, 并且借助场发射扫描电子显微镜和体式显微镜对其表面形貌的变化进行表征。**结果** 将该复合涂层喷涂于 N80 钢片表面后, 其表面上 95 °C 热水的接触角大于 150°、滚动角小于 10°。该复合涂层在经砂纸打磨 70 周期或 10 h 的水冲实验后, 接触角大于 150°, 说明表面仍保持了优异的疏水性能。沸水蒸发结垢实验表明, 与未处理的 N80 钢片相比, 该复合涂层在沸水结垢实验 50 h 后, 表面无明显结垢现象, 阻垢率约为 98.00%, 且仍然保持优异的超疏热水特性。在经王水浸泡 60 min 和 1 mol/L 氢氧化钠溶液浸泡 12 h 后, 接触角大于 150°, 说明表面具有优异的抗化学腐蚀性能。**结论** 研制了一种超防垢复合涂料, 喷涂于 N80 钢片后获得的超疏热水涂层具有优异的疏热水特性、高温稳定性和抗水冲特性。可以有效保护基底表面, 大幅增强表面的防垢、防腐特性, 为解决海上油田井筒的防垢问题提供了新的思路。

关键词: 超防垢; 超疏热水; 涂料; 二氧化硅; 丙烯酸树脂

中图分类号: TQ630.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2022)03-0110-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2022.03.011

Preparation and Properties of Super-Anti-Scaling Composite Paint

WU Shao-wei¹, LI Peng-fei², WU Xian², WANG Jia-wei¹, CHENG Li-min¹, WANG Shan-lin²

(1. Zhanjiang Branch of China National Offshore Oil Corporation Ltd., Zhanjiang 524057, China; 2. State Key Laboratory for Environment Friendly Energy Materials, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

ABSTRACT: Surface scaling behavior is one of the important factors affecting oil production in offshore oil fields. The work aims to design and develop a super-anti-scaling composite paint which can be sprayed on a large scale to solve this issue. The composite paint of super hydrophobic property was prepared by two-step spraying method with superhydrophobic silica

收稿日期: 2021-03-16; 修订日期: 2021-08-01

Received: 2021-03-16; Revised: 2021-08-01

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金 (51901196)

Fund: The Youth Science Funds of the National Natural Science Foundation of China (51901196)

作者简介: 吴绍伟 (1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为采油采气工程。

Biography: WU Shao-wei (1983—), Male, Master, Senior Engineer, Research focus: oil and gas production engineering.

通讯作者: 王山林 (1986—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为表界面应用材料。

Corresponding author: WANG Shan-lin (1986—), Male, Doctor, Associate Professor, Research focus: surface and interface application materials.

引文格式: 吴绍伟, 李鹏飞, 吴娴, 等. 超防垢复合涂料的制备及其特性研究[J]. 表面技术, 2022, 51(3): 110-116.

WU Shao-wei, LI Peng-fei, WU Xian, et al. Preparation and Properties of Super-Anti-Scaling Composite Paint[J]. Surface Technology, 2022, 51(3): 110-116.

nano-powder, silica micro-powder, butyl acetate and acrylic resin as the main raw materials. The wettability, wear resistance, self-cleaning and anti-scaling effects of the coating were evaluated by means of contact angle instrument, time-lapse photography, and boiling water evaporation scaling test. The field emission scanning electron microscope and stereomicroscope were used to characterize the morphology. After the composite paint was sprayed on the surface of N80 steel sheet, the contact angle of the composite coating was greater than 150° and the rolling angle was less than 10° in hot water at 95°C . After 70 circles of sanding or 10 h of water flushing test, the contact angle was greater than 150° , indicating that the surface still retains excellent hydrophobic performance. The boiling water evaporation scaling test showed that the composite coating had no obvious scaling phenomenon on the surface after boiling water scaling test for 50 h compared with the untreated N80 steel sheet, still maintains excellent superhydrophobic property, and the scale inhibition rate was up to 98.00%. After soaking in aqua regis for 60 min and 1 mol/L sodium hydroxide solution for 12 h, the contact angle was greater than 150° , indicating that the surface had excellent chemical corrosion resistance. The hot water super-repellant coating is obtained by spraying super-anti-scaling composite paint on N80 steel sheet, which have excellent hydrophobic thermal stability, high temperature stability and anti-water flushing property. It can effectively protect the base surface and greatly enhance the anti-scaling and anti-corrosion properties of the surface, providing a new idea for anti-scale of offshore oilfields wellbore.

KEY WORDS: super-anti-scaling; hot water super-repellency; coating; silica; acrylic resin

天然能量不充足的海上油田主要采用注水补充能量的方式进行开发^[1-2], 这个过程包括向输入井注入水, 迫使石油通过周围地层流向输出井, 然后从输出井中回收石油。受环境限制, 所用注入水基本为海水, 含有高浓度的硫酸根离子、钙离子及镁离子等。由于部分油藏地层水含有高浓度的钡离子、锶离子及碳酸氢根离子等, 形成注入海水与地层水不配伍的现象, 在油田生产中后期, 造成油井井筒及地层大量结垢^[3-4]。所形成的垢的种类主要为硫酸钡和硫酸锶垢, 含有少量碳酸钙垢, 其中, 碳酸钙垢属于软垢, 通过药剂或机械方式较易去除, 但是硫酸钡和硫酸锶垢属于硬垢, 采用现有的阻垢药剂技术和机械手段极难消除^[3], 已经成为海上油田采油工程的难点问题。以南海西部油田涠洲油田群为例, 自 2003 年发现结垢以来, 统计出的结垢井高达 100 余井次, 且随着含水量的增加, 结垢井数仍将持续增加, 保守估计, 油井受结垢影响, 每天制约原油产量约 600 m^3 。虽然目前已经开发了注入纳滤海水^[5-6]、挤注防垢剂^[7-9]、贵金属^[10]及涂层^[11-13]等防垢技术, 但是实际效果并不理想, 结垢带来的生产问题依然严峻。

随着科技水平的不断进步, 通过表面防护技术来有效拓展表面防护的多元化应用已经势在必行。尤其是纳米技术的快速发展, 使表面防护技术也逐渐由宏观转向微观, 微纳米尺度上的精确调控不但能够深度发掘材料的本征性能, 而且可以赋予材料众多新颖的防护功能^[14-18], 例如, 自然界中荷叶出淤泥而不染^[19-20]、水黾能在水上行走^[21-22]、蝴蝶鞘翅五彩斑斓^[23-24]、变色龙变色隐身^[25]等现象, 都是因为其表面各种奇特的微纳米结构和化学物质的配合产物。这种通过破解自然界中各种特定的现象, 集成现代化工业制造技术应用, 有针对性地制备出具有特定功能表面

的仿生技术已经逐渐成熟。文中受荷叶表面的超疏水特性启发^[26], 通过微纳复合结构的大规模构建技术, 研制了一种具有超疏热液特性的超防垢复合涂层, 其优异的防腐防垢特性为解决海上油田井筒防垢问题提供了新的思路。

1 实验

1.1 样品制备

涂料制备步骤如下: ①取 100 g 疏水气相二氧化硅 (7~40 nm) 分散于 5 L 无水乙醇中, 超声波震荡 30 min 后, 形成均匀的超疏水纳米涂料 (命名为 NS 涂料); ②取 1.6 kg 硅微粉分散于 10 L 醋酸丁酯有机溶液中, 超声波震荡 30 min 后加入 3.2 kg 丙烯酸树脂, 继续超声波震荡 30 min (命名为 MSA 涂料)。

涂层制备步骤如下: ①将 MSA 涂料均匀喷涂于经除油、清洗、吹干后的 N80 钢片上; ②通风静置 10 min 后再均匀喷涂 NS 涂料; ③于 90°C 环境下干燥 12~24 h 后即可获得稳定的超防垢复合涂层 (命名为 NMSA 涂层)。

1.2 性能测试

样品表面形貌采用 JEOL JSE-7500F 型场发射扫描电子显微镜 (FESEM) 进行观察, 测试前对样品进行 5 min 的喷金处理。采用 DSA30 视频光学接触角测量仪对试样表面润湿特性进行表征, 其中水静态接触角 (SCA) 采用 $6\text{ }\mu\text{L}$ 水滴测量, 滚动角 (RA) 采用 $10\text{ }\mu\text{L}$ 水滴测量。为减小测量误差, 最终值为该样品表面上 3—5 个测试点的平均值。采用 Photron FASTCAM Mini UX100 型高速相机采集水滴动态过程, 其他光学照片采用 Navitar 6000 体式显微镜或 Nikon D 3400 相机拍摄。

沸水蒸发结垢实验步骤如下：①分别称取 4.89 g 的 $\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 和 3.17 g 的 SrCl_2 于 20 L 去离子水中完全溶解后备用（称为 A 液）；②称取 5.68 g 的 Na_2SO_4 于 20 L 去离子水中完全溶解后备用（称为 B 液）；③取等体积 A、B 溶液混合于烧杯中，将质量为 m_0 的样品悬挂并浸没于混合溶液中；④通过油浴加热使混合溶液沸腾蒸发至样品完全露出液面，每次蒸发时间约为 10 h；⑤称量样品质量 m_i (i 为蒸发次数， $i=1,2,3,\dots$)，样品 i 次结垢率为：

$$W_i = \frac{m_i - m_0}{A} \times 100\% \quad (1)$$

式中： A 为样品面积 (m^2)。

2 结果与分析

2.1 超防垢复合涂层的制备与表征

图 1a 为超防垢复合涂层的制备示意图，首先通过 MSA 涂料构建微米结构，再通过 NS 涂料构建微-纳复合结构，再经干燥后即可获得 NMSA 涂层，厚度为 $(270 \pm 20) \mu\text{m}$ 。通过场发射扫描电子显微镜观察 NMSA 涂层的微观形貌，从图 1b 所示的低倍率扫描电镜图片可以看出，N80 钢片表面上形成了微米级的乳突结构。进一步从涂层的高倍率扫描电镜图片（见图 1c）可以看出，微米级的乳突结构由二氧化硅纳米颗粒构成，这些球形的纳米颗粒团聚形成了连

续多孔的微米级乳突结构。表面存在的微-纳米双级粗糙结构是超防垢复合涂料呈现出超疏水特性的重要元素之一。其中纳米多孔结构保证了表面疏热水特性，微米级乳突提供的微腔可承载由热水蒸发产生的蒸汽凝结物，避免了蒸汽凝结物的“搭桥”效应，从而为其表面超疏热水效果提供了重要保障^[23]。如图 1d 所示，将处理后的超疏水 N80 钢片浸入 95 °C 热水中，由于表面存在微腔结构，固-液界面形成大量的“微气囊”，最终在 NMSA 涂层表面形成了一层明显的“空气垫”，使热水在该涂层表面也能维持 Cassie 状态。样品取出后表面无任何残留，说明了滞留的空气能有效防止热水对涂层进行润湿，进一步证实了 NMSA 涂层的超疏热水特性。

为了进一步比较表面润湿特性，测量各表面不同温度液滴（23 °C 和 95 °C）的静态接触角和滚动角。如图 2 所示，未处理的 N80 钢片的 23 °C 水静态接触角为 73.74°，当水温升至 95 °C 时，静态接触角降至 57.09°，表明 N80 钢片的疏热水性降低，导致固液接触面积增加，不利于表面防垢特性。为了对比，将 NS 涂料均匀喷涂于 N80 钢片，构建了纳米超疏水涂层（命名为 NS 涂层，厚度为 $(13 \pm 3) \mu\text{m}$ ），该涂层的 23 °C 水静态接触角为 159.47°、滚动角为 4.4°，当水温升至 95 °C 时，静态接触角降至 137.97°、滚动角大于 180°，说明 NS 涂层对常温下的水表现出优异的超疏水效果，但热水则易粘附于表面。这是由于高温液

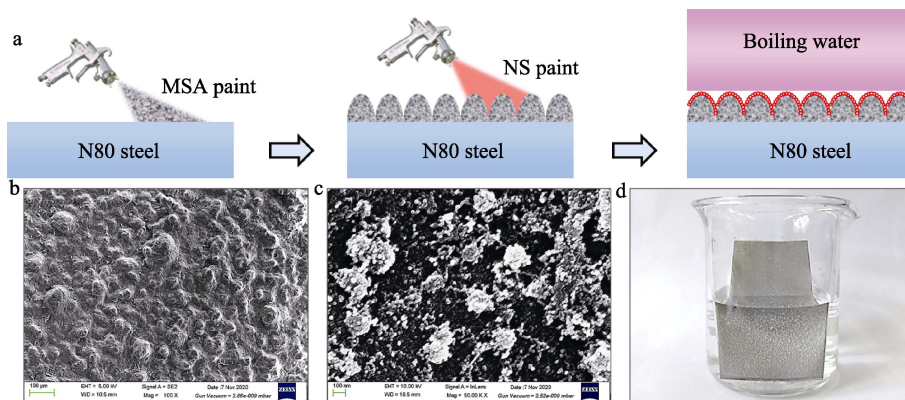


图 1 NMSA 涂层的制备示意图 (a) 及其微观 (b、c) 和宏观 (d) 照片

Fig.1 Schematic diagram of NMSA coating preparation (a) and its micro- (b, c) and macroscopic (d) images

	N80 steel	NS coating		NMSA coating	
23 °C	SCA=73.74°	SCA=159.47°	RA=4.4°	SCA=156.57°	RA=2.9°
95 °C	SCA=57.09°	SCA=137.97°		SCA=151.46°	RA=3.2°

图 2 不同表面的 SCAs 和 RAs

Fig.2 SCAs and RAs on different surfaces

体极易破坏 NS 涂层的纳米结构,引起固-液界面接触面积增加,进而导致液滴的黏附现象。与之形成鲜明对比的是 NMSA 涂层,涂层的 23 ℃ 水静态接触角为 156.57°、滚动角为 2.9°,当水温升至 95 ℃ 时静态接触角降至 151.46°、滚动角为 3.2°,表明 NMSA 涂层不仅具有优异的疏常温水特性,而且在应对热水时同样具有优异的排斥性。这是由于在涂层表面微米-纳米双级粗糙结构之间的缝隙中存在大量的滞留空气,有效阻隔了液体与涂层之间的接触,为表面防垢提供了重要的支撑。

为了更直观地了解不同表面疏热水特性,将 100 mL 热咖啡(约 90 ℃)直接泼洒于倾斜的表面上。如图 3 所示,未处理的 N80 钢片被热咖啡浇筑时,液体在其表面迅速铺展开来,结束后表面存在大量残留;NS 涂层被浇筑时因其具有一定疏热水性,相比于未处理钢片表面液体铺展面积减小,但随着时间的推移,涂层被严重破坏,从而导致结束后表面同样存在大量液体残留;然而对于 NMSA 涂层,由于其优异的超疏热水特性,液面铺展面积进一步减小且全部流走,结束后表面无残留。

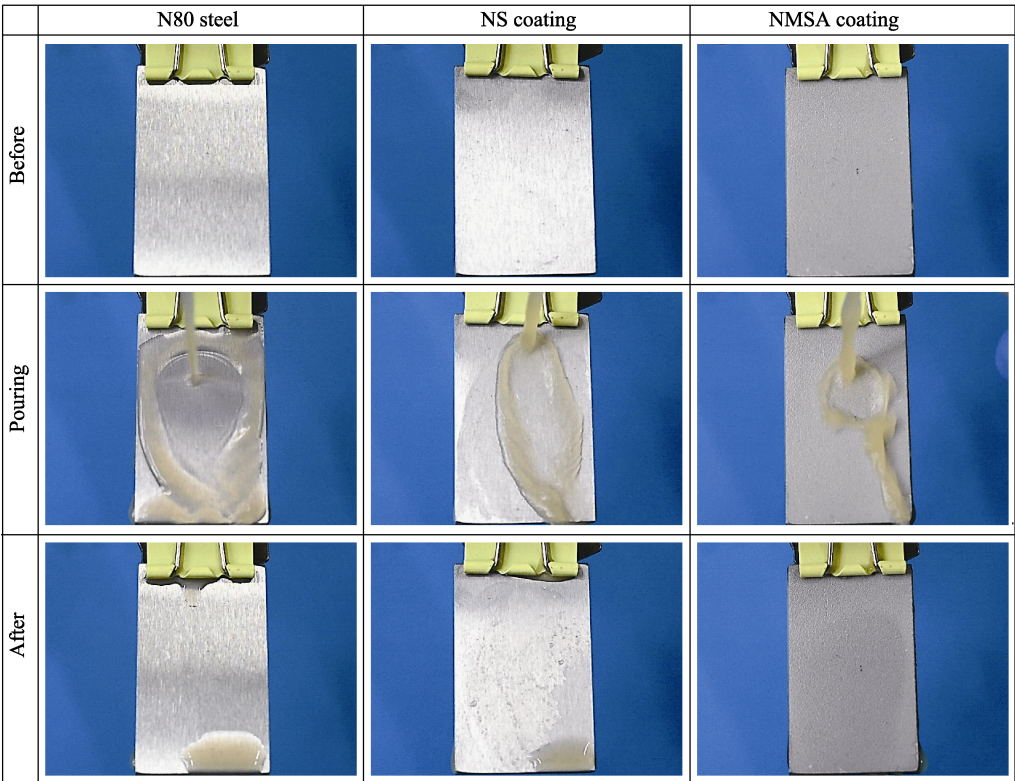


图 3 不同表面的热咖啡浇筑过程
Fig.3 Pouring process of hot coffee on different surfaces

2.2 抗砂纸打磨和水冲击稳定性

抗砂纸打磨稳定性是目前评价超疏水耐磨性的重要技术指标之一。文中采用文献[27]的实验方法,对 NS 涂层和 NMSA 涂层进行了抗砂纸打磨稳定性评价。首先将 240#砂纸水平固定于平台上,再将尺寸为 2 cm×2 cm 的涂层样品水平倒扣在砂纸上,使涂层表面与砂纸自然接触,将 100 g 砝码负载于样品上,形成压强为 2.5 kPa,在此负载下通过水平移动样品进行打磨实验。考虑到打磨的均匀性,采用纵向和横向交替打磨的方式进行,且设定纵向和横向分别打磨 10 cm 为一个周期,每 5 个周期测量一次涂层表面的接触角。测量结果如图 4a 所示,NS 涂层在砂纸打磨 5 个周期后即失去超疏水特性。NMSA 涂层在经过 70 个周期后,涂层接触角略有下降,但依然保持在 150°

以上,表明 NMSA 涂层具有优异的抗砂纸打磨稳定性。抗水冲击稳定性是涂层在油田井筒工作环境中影响其使用寿命的关键因素之一。为进一步探究涂层表面的抗水冲击稳定性,以流速为 4 L/min 的水流对水平放置的表面进行水冲实验(其中水柱的高度为 20 cm,截面直径为 8 mm),每隔 2 h 测量一次涂层表面的接触角。统计结果如图 4b 所示,NS 涂层在前 4 h 内接触角逐渐下降,表面出现了部分润湿;在经过 6 h 的水冲实验后接触角呈现出断崖式下降,从 141°降至 79.6°,说明 NS 涂层在经过 6 h 水冲实验后完全失去超疏水特性。NMSA 涂层在经过 10 h 的水冲实验后,涂层接触角无明显变化,维持在 150°以上,表明 NMSA 涂层具有优异的抗水冲击稳定性,在实际应用中具有潜在价值。

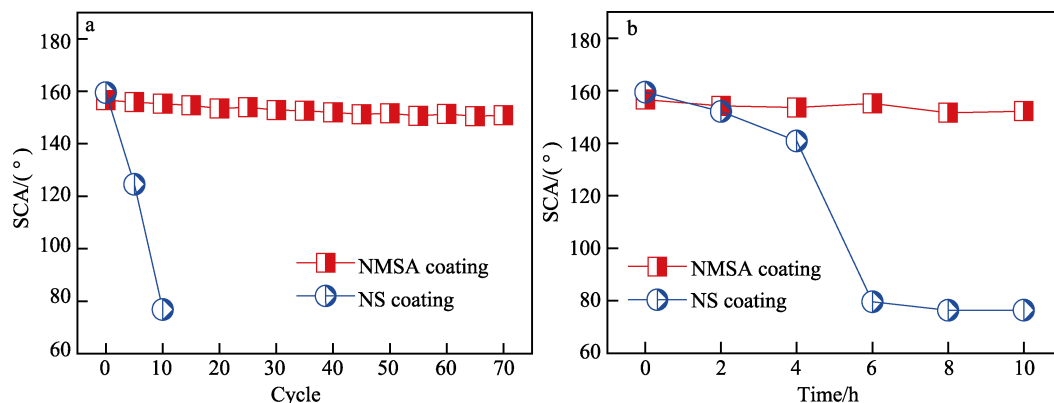


图4 砂纸打磨不同周期 (a) 和水冲击不同时间后 (b) 的 SCAs
Fig.4 SCAs after sand-papered with different cycles (a) and impingement by different time of water (b)

2.3 沸水蒸发结垢特性

结垢率是评价涂层防垢性能的重要指标之一,样品的结垢率小说明防结垢效果越好。根据1.2小节的沸水蒸发结垢实验,评价了N80钢片、NS涂层和NMSA涂层的阻垢效果。如图5所示,未处理的N80钢片在沸水蒸发结垢10 h后表面出现明显结垢和腐蚀现象,通过体式显微镜观察表面的腐蚀和结垢产物,可以发现表面基本被垢盐覆盖,根据式(1)计算得出其结垢率约为 1.71 g/m^2 。随着沸水蒸发结垢的进一步增加,表面结垢和腐蚀现象均持续加重,经过50 h结垢实验后,表面已经完全被垢盐覆盖,结垢率高达 24.46 g/m^2 。相比之下,NS涂层随沸水蒸发结垢时间的增加,其表面结垢和腐蚀程度有所减缓,经过10 h结垢实验后,其表面没有出现大面积的结垢和腐蚀现

象。但随着结垢时间的持续增加,经过40 h结垢实验后,涂层被完全破坏,并且表面结垢程度出现明显加重,同时也出现了明显的垢下腐蚀现象。结垢50 h后,表面基本被垢盐覆盖,结垢率约为 12.06 g/m^2 ,与未处理的N80钢片相比,阻垢率达50.70%。相同实验条件下,与此形成鲜明对比的是NMSA涂层,该涂层的结垢率整体最低,并随着沸水蒸发结垢时间的增加,其表面没有出现大面积的结垢和腐蚀现象。通过体式显微镜可以发现表面相貌变化不大,经过50 h结垢实验后,结垢率约为 0.49 g/m^2 ,与未处理的N80钢片相比,阻垢率高达98.00%。上述结果说明,超防垢复合涂层阻碍了腐蚀性离子与金属基底直接接触,显著降低了表面的结垢速率和腐蚀概率,具有良好的阻垢防垢、防腐性能,进而能够有效缓解油田注水管及其设备结垢堵塞和腐蚀造成的安全问题。

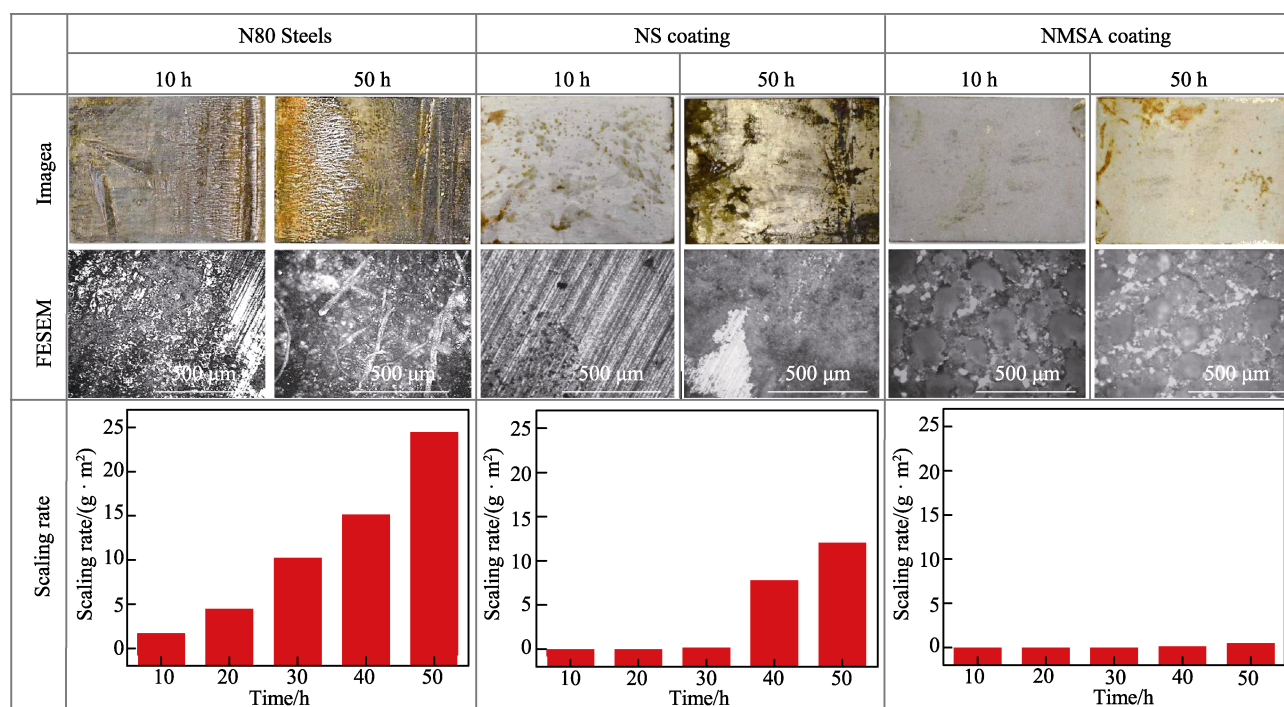


图5 不同表面的结垢特性
Fig.5 Scaling properties on different surfaces

为了进一步展示 NMSA 涂层的优异疏水性能, 在沸水蒸发结垢 50 h 后对其表面进行了相关性能表征, 结果如图 6a 所示。涂层表面热水 (95 °C) 接触角为 152.23°、滚动角为 3.6°, 表明 NMSA 涂层在结垢过程中没有遭遇到毁灭性的破坏, 依然保持优异的超疏热水特性。将 10 μ L 水滴从 20 mm 高度释放, 当自由下落的水滴撞击样品表面时, 采用延时拍摄技术记录水滴撞击样品表面和弹跳整个过程, 结果如图 6b 所示。表面水滴在接触涂层表面后快速

铺展, 2 ms 时铺展程度最大, 由于水具有足够的表面张力, 9 ms 时又收缩成完整水滴从涂层表面弹起。在整个水滴撞击实验过程中, 水滴的撞击并没有对涂层造成任何的渗透、损坏或沾染, 充分表明了水滴在 NMSA 涂层表面以 Cassie 状态存在。低表面张力液体的弹跳是超排斥表面的重要标志, 进一步说明了 NMSA 涂层在结垢实验 50 h 后依然保持优异的超疏热水特性, 为其长期高效防垢和防腐提供了理论依据。

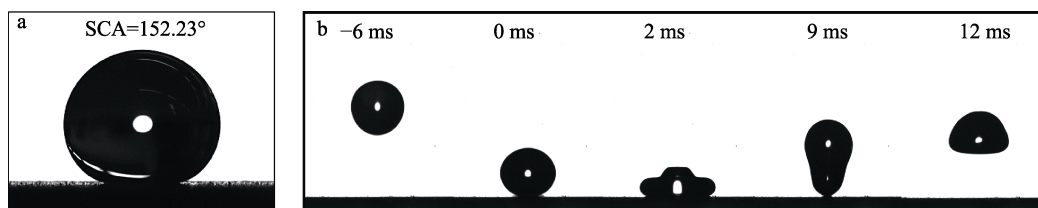


图 6 NMSA 涂层结垢 50 h 后的 SCA (a) 和水滴撞击实验 (b)
Fig.6 SCA (a) and droplet impact test (b) on NMSA coating after scaling for 50 h

2.4 化学防腐特性

如上实验所述, NMSA 涂层在防腐蚀方面也具有潜在的优势, 为了进一步探究该涂层的化学腐蚀特性, 文中采用文献[28]的实验方法, 对其进行了苛刻的化学腐蚀性能评估。该实验直接将 NMSA 涂层浸泡于王水和 1 mol/L 氢氧化钠溶液中, 定期将样品取

出并用水冲洗, 干燥后测量样品表面的接触角, 通过接触角变化对其化学腐蚀性能进行评价。如图 7 所示, NMSA 涂层在经王水浸泡 60 min 和 1 mol/L 氢氧化钠溶液浸泡 12 h 后, 其表面的水静态接触角略有下降, 但仍维持在 150°以上, 且王水在 NMSA 涂层表面依然可以滑落, 表明 NMSA 涂层具有优异的抗化学腐蚀特性。

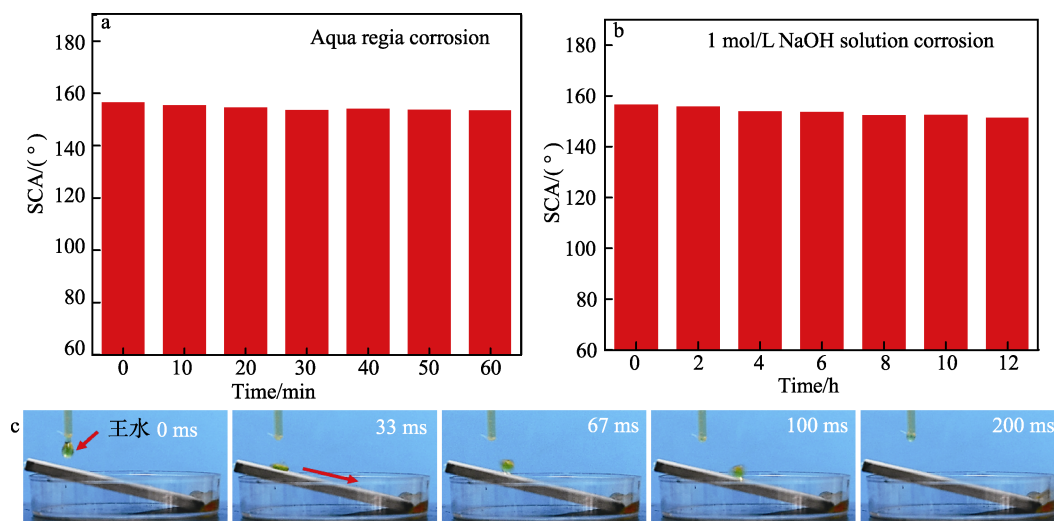


图 7 NMSA 涂层经王水 (a) 和 1 mol/L 氢氧化钠溶液 (b) 浸泡不同时间的 SCAs 及王水在 NMSA 涂层表面的滑落过程 (c)

Fig.7 SCAs on NMSA coating after immersed in aqua regia (a) and 1 mol/L NaOH solution (b) for different time, and the sliding process of aqua regia on the surface of NMSA coating (c)

3 结论

1) 通过两步喷涂技术在 N80 钢片上构建了具有微米-纳米粗糙结构的 NMSA 涂层, 该涂层具有优异的超疏热液特性, 其 95 °C 水的静态接触角大于 150°、滚动角小于 10°。

2) NMSA 涂层在经 4 L/min 的水冲击后, 依然保持水的静态接触角大于 150°、滚动角小于 10°, 体现了涂层具有良好的抗水冲击性。

3) NMSA 涂层在经沸水蒸发结垢 50 h 后, 表面依然保持优异的超疏热液特性, 与未处理的 N80 钢片相比, 阻垢率高达 98.00%, 说明涂层具有良好的

防垢性能以及热稳定性。

4) NMSA 涂层在经王水浸泡 60 min 和 1 mol/L 氢氧化钠溶液浸泡 12 h 后, 依然保持水的静态接触角大于 150°, 说明涂层具有良好的抗化学腐蚀性能。

参考文献:

- [1] 刘合, 裴晓含, 罗凯, 等. 中国油气田开发分层注水工艺技术现状与发展趋势[J]. 石油勘探与开发, 2013, 40(6): 733-737.
LIU He, PEI Xiao-han, LUO Kai, et al. Current Status and Trend of Separated Layer Water Flooding in China[J]. Petroleum Exploration and Development, 2013, 40(6): 733-737.
- [2] 张启龙, 许杰, 高斌, 等. 以抑制管柱结垢腐蚀为目标的注水井水源选择方法研究及应用[J]. 表面技术, 2019, 48(11): 290-296.
ZHANG Qi-long, XU Jie, GAO Bin, et al. Research and Application of Water Source Selection Method for Water Injection Well Aiming at Inhibiting Scaling and Corrosion of Pipe String[J]. Surface Technology, 2019, 48(11): 290-296.
- [3] 程利民, 梁玉凯, 李彦闯, 等. 南海西部油田井下除防垢工艺探索与实践[J]. 断块油气田, 2018, 25(6): 827-830.
CHENG Li-min, LIANG Yu-kai, LI Yan-chuang, et al. Exploration and Practice of Underground Scale Removal in Oilfields of Western South China Sea[J]. Fault-Block Oil and Gas Field, 2018, 25(6): 827-830.
- [4] BADER M S H. Sulfate Removal Technologies for Oil Fields Seawater Injection Operations[J]. Journal of Petroleum Science and Engineering, 2007, 55(1): 93-110.
- [5] SU Bao-wei, DOU Mao-wei, GAO Xue-li, et al. Study on Seawater Nanofiltration Softening Technology for Offshore Oilfield Water and Polymer Flooding[J]. Desalination, 2012, 297: 30-37.
- [6] RYABCHIKOV B E, PANTELEEV A A, GLADUSH M G. Performance Testing of Seawater Desalination by Nanofiltration[J]. Petroleum Chemistry, 2012, 52(7): 465-474.
- [7] 张继伟, 金曦, 孙吉星, 等. 渤海某油田生产水处理系统管线刺漏原因探究[J]. 涂层与防护, 2018, 39(5): 31-34.
ZHANG Ji-wei, JIN Xi, SUN Ji-xing, et al. Research on Leakage of Pipelines for Sewage Treatment System in Bohai Offshore Oilfield[J]. Coating and Protection, 2018, 39(5): 31-34.
- [8] LIU Wen-jun, HUI F, LÉDION J, et al. Anti-Scaling Properties of Zinc Ion and Copper Ion in the Recycling Water[J]. Ionics, 2009, 15(3): 337-343.
- [9] ZHU Yan-ji, LI Hong-wei, ZHU Ming-liang, et al. Dynamic and Active Antiscaling via Scale Inhibitor Pre-
Stored Superhydrophobic Coating[J]. Chemical Engineering Journal, 2021, 403: 126467.
- [10] 程子非, 金文倩, 马春红, 等. 金属材料在模拟地热水环境中的腐蚀与结垢特性[J]. 表面技术, 2015, 44(8): 92-96.
CHENG Zi-fei, JIN Wen-qian, MA Chun-hong, et al. Corrosion and Scaling Characteristics of Metal Pipes in Simulated Geothermal Water Environment[J]. Surface Technology, 2015, 44(8): 92-96.
- [11] LI Hao, YU Si-rong, HAN Xiang-xiang, et al. A Stable Hierarchical Superhydrophobic Coating on Pipeline Steel Surface with Self-Cleaning, Anticorrosion, and Anti-Scaling Properties[J]. Colloids & Surfaces A, 2016, 503: 43-52.
- [12] LI Hao, YU Si-rong, HU Jin-hui, et al. Modifier-Free Fabrication of Durable Superhydrophobic Electrodeposited Cu-Zn Coating on Steel Substrate with Self-Cleaning, Anti-Corrosion and Anti-Scaling Properties[J]. Applied Surface Science, 2019, 481: 872-882.
- [13] YIN Xiao-li, YU Si-rong, BI Xiong-jian, et al. Robust Superhydrophobic 1D Ni₃S₂ Nanorods Coating for Self-Cleaning and Anti-Scaling[J]. Ceramics International, 2019, 45(18): 24618-24624.
- [14] ZHANG Bin-bin, XUA Wei-chen, XIA Da-hai, et al. Spray Coated Superamphiphobic Surface with Hot Water Repellency and Durable Corrosion Resistance[J]. Colloids and Surfaces A, 2020, 596: 124750.
- [15] XIAO Zhen, ZHU Hai-yan, WANG Shan-lin, et al. Multifunctional Superwetting Composite Coatings for Long-term Anti-Icing, Air Purification, and Oily Water Separation[J]. Advanced Materials Interfaces, 2020, 7(8): 2070041.
- [16] TIAN Ning, WEI Jin-fei, LI Ya-bin, et al. Efficient Scald-Preventing Enabled by Robust Polyester Fabrics with Hot Water Repellency and Water Impalement Resistance[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2020, 566: 69-78.
- [17] WANG Shan-lin, YU Xin-quan, ZHANG You-fa. Large-Scale Fabrication of Translucent, Stretchable and Durable Superhydrophobic Composite Films[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2017, 45: 23489-23496.
- [18] HUAN Yua-na, PAN Ya-min, WANG Xiao-long, et al. Simple Water Tunable Polyurethane Microsphere for Super-Hydrophobic Dip-Coating and Oil-Water Separation[J]. Polymer, 2020, 204: 122833.
- [19] FENG Lin, LI Shu-hong, LI Ying-shun, et al. Super-Hydrophobic Surfaces: from Natural to Artificial[J]. Advanced Materials, 2003, 34(7): 1857-1860.
- [20] XUE Xiao, YANG Zhuo, LI Yan-wen et al. Superhydrophobic Self-Cleaning Solar Reflective Orange-Gray Paint Coating[J]. Solar Energy Materials and Solar Cells, 2018, 174: 292-299.

(下转第 166 页)