

· 研究进展 ·

## 双疏涂层及其在极端环境油气领域应用探索

彭建文<sup>1, 2†</sup> 王池嘉<sup>1, 2, 3†</sup> 刘战剑<sup>3</sup> 汪怀远<sup>1, 2\*</sup>

1. 天津大学 化工学院, 天津 300350
2. 天津大学 化学工程联合国家重点实验室, 天津 300350
3. 东北石油大学 化学化工学院, 大庆 163318

**[摘要]** 面对许多极端工况的油气装备管道腐蚀磨损防护的重大需求, 本文围绕当前深地油井管涂层存在的耐温力学强度低和耐磨性能差的关键问题, 以及原油生产过程中的蜡沉积造成的严重结蜡问题, 以涂层表界面强化和组成—微观结构设计为突破点, 通过将商业聚偏氟乙烯树脂(PVDF)和高度氟化的坡缕石@二氧化硅(Pal@SiO<sub>2</sub>-F)复合填料有机结合, 制备了具有高耐磨性能的双疏功能填料, 并开发了面向苛刻环境下石油化工装备用防腐耐磨双疏纳米粉末涂料。在涂层表面构建了独特的微/纳米分层结构, 并与 Pal@SiO<sub>2</sub>-F 的低表面能及 PVDF 的化学惰性相协同, 在涂层表面形成了稳定的气膜结构。所制备的涂层不仅具有优异的防腐耐磨性能, 还对原油具有超强的抗粘附性能, 将其应用于管道时可大幅提升原油运输效率。进而开发出防腐耐磨双疏涂层, 该涂层在极端环境油气领域具有广阔的应用潜力。

**[关键词]** 双疏涂层; 极端工况; 油气装备防护; 防粘附

### 1 研究背景

随着经济的快速发展, 我国对石油产品需求不断增加, 从原油和天然气的采出, 到石化产品的管道运输、储存、炼油生产和成品油的储存, 都需要建设储罐、管道和加热设备等钢结构装置。然而, 在油气生产过程中金属设备面临严重的腐蚀和磨损问题,



**汪怀远** 天津大学教授、博士生导师, 天津大学化工学院副院长。国家杰出青年科学基金获得者, 国家百千万人才工程入选者, 享受国务院特殊津贴。主要从事深地和深海装备的表界面设计与强化, 能源装备的防腐防污、减阻耐磨技术, 新型功能涂层研究, 芯片封装与高导热涂层, CO<sub>2</sub> 驱油装备腐蚀防护等方面的研究。主持 20 余项科研项目, 发表主要学术论文 160 余篇, 获国际和国家发明专利 30 余项。曾获国家技术发明奖二等奖, 黑龙江省自然科学奖二等奖, 侯德榜化工科技奖以及孙越崎能源科技奖等。



**彭建文** 天津大学硕士研究生, 目前研究方向为面向能源行业的聚合物基防污防腐涂层, 重点围绕先进纳米功能填料的制备、涂层表界面设计调控及应用开展研究。



**王池嘉** 东北石油大学石油与天然气化工研究院副教授、硕士研究生导师。2018 年 7 月在东北石油大学化学化工学院取得博士学位, 2020 至今在天津大学进行博士后研究工作。先后参加国家自然科学基金项目 3 项, 作为主要完成人参与防腐功能涂层的研究。主要从事功能防腐涂层、CO<sub>2</sub> 驱油装备腐蚀防护、功能型多维填料以及涂层工业应用转化的相关研究。近年来, 在功能防腐领域发表论文 20 余篇, 授权国际发明专利两项, 国内发明专利 10 项, 获得黑龙江省自然科学奖二等奖一项。

很大程度降低了系统的生产效率和安全性。此外, 伴随高含砂井、高含气井、稠油井逐渐增多, 设备腐

收稿日期: 2021-5-20; 修回日期: 2021-12-18

† 共同第一作者

\* 通信作者, Email: wanghyjiji@163.com

本文受到国家自然科学基金项目(51925403, 91934302, 21676052)的资助。

蚀磨损现象更加严重,使用的采油装备的寿命通常无法满足油井的长寿命安全运行的需求。此外,根据国际外交形势,铁矿石价格处于高价位,国内成品钢的价格也一直在上涨,钢铁的防护可为油田节约巨大成本。因此,急需研制开发一种具有优异防腐耐磨性能的功能涂料,解决石油生产过程中的油气管道及设备的腐蚀磨损问题。同时,在石油的生产开采和运输过程中,溶解在原油中的石蜡会随着温度和压力的变化,在管道壁面沉淀和沉积<sup>[1]</sup>。高粘性含蜡原油输送过程中的蜡沉积是一个棘手的问题,它会导致管道有效面积下降和生产能耗增加,严重时甚至会导致管道破裂和设备故障<sup>[2, 3]</sup>。长期以来,人们开发了许多清除和防止蜡沉积的方法<sup>[4-8]</sup>。其中,防蜡涂层技术具有成本低、效率高、应用范围广等优点,是一种较理想的防蜡方法<sup>[9]</sup>。

目前,研究人员重点关注和研究的防蜡涂层主要是低表面能聚合物涂层和超亲水/水下超疏油涂层。Zhang 等人<sup>[10]</sup>曾通过冷点法,对聚偏氟乙烯、聚氨酯、环氧树脂和硫化硅橡胶等 8 种聚合物涂层的防蜡效果进行测试,结果表明含氟聚合物涂层和低表面能硫化硅橡胶具有较明显的防蜡性能。Quintella 等人<sup>[11]</sup>首次比较了聚丙烯、高密度聚乙烯以及醋酸乙烯酯共聚物这三种聚合物涂层的防蜡性能,结果显示聚丙烯涂层在流动的原油中对石蜡沉积抑制作用更强。然而,由于缺乏微/纳米分层结构,单一的聚合物涂层防原油粘附的能力较弱,这也导致其防蜡沉积应用受到极大限制。

亲水防蜡涂层以润湿性为突破口,采用的是在原油运输管道内壁构建亲水表面的策略,在管道内壁形成水膜,以此抵御石蜡和油的污染。2013 年,Wang 等人<sup>[12]</sup>基于仿生思想,利用原位交流沉积方法得到由无定形磷酸铁组成的花状涂层,该涂层具有优异的超亲水/水下超疏油性,且展现出防蜡性能。2015 年,Liang 等人<sup>[13]</sup>采用镀锌、化学转化和旋涂方法,在碳钢表面制备了具有超亲水/水下超疏油性能的仿生复合涂层。该复合涂层结合了镀锌层的耐腐蚀功能、磷化学转化膜和旋涂亲水 SiO<sub>2</sub> 的防蜡功能,并且首次考虑并探究了亲水防蜡涂层的防腐和耐磨性能。然而,超亲水防蜡涂层在力学强度上比较脆弱,且容易被腐蚀介质损坏。尽管在防蜡涂层的开发上已经取得了一定的进展,但目前仍对具有较强机械性能和多功能的防蜡涂层具有迫切的需求。

近来,双疏涂层的防原油粘附性能已经得到了

初步的探索<sup>[14-16]</sup>,并且有一些学者已经关注了其在原油运输中的应用潜力<sup>[17]</sup>。Wang 的团队<sup>[15]</sup>以喷涂法制备的聚苯硫醚/聚四氟乙烯(PPS/PTFE)复合涂层对于原油和油田采出水均实现了优异的拒液性,接触角分别为 151°和 168°。Zhang 等人<sup>[16]</sup>受蜗牛启发而制备的可重复附着的超双疏涂层在各类基材上附着后均可实现对于原油的低粘附效果,且原油液滴在涂层表面的滚动角低于 5°。因此,从理论上讲,具有抗原油粘附性能的双疏涂层可以作为含蜡原油体系中的防蜡涂层的理想选择。众所周知,双疏涂层的拒液性和寿命之间的协同是其在极端环境中应用的先决条件<sup>[18]</sup>。到目前为止,已有一些学者致力于结合有机和无机材料的优点,开发有机/无机杂化双疏涂层,以满足上述要求<sup>[19-22]</sup>。尽管研究学者做出了巨大的努力,仍然存在诸如基材和涂层之间的附着力强度弱<sup>[23]</sup>,功能性颗粒被粘合剂包裹<sup>[24]</sup>和表面粗糙结构强度不足等问题,所有的一切使得双疏涂层很难同时具备机械和化学稳定性。因此,应开发一种长效双疏并具有防腐耐磨性能的功能涂层,以适应极端环境油气领域需求。

针对上述问题,本文提出了新型双疏功能防腐粉末涂料,采用新型纳米材料作为功能填料,有效增强了涂层的防腐耐磨性能,引入功能型聚合物填料 PVDF@SiO<sub>2</sub>-F 对涂层的表界面性质进行改性设计,赋予了涂层减阻、防垢、疏水、疏油等特性。此外,还克服了传统涂料在高温高压或强酸强碱条件下使用寿命短的缺陷。研发的防腐耐磨功能型涂层已在中盐集团高压储能项目以及大庆油田、吉林油田、长庆油田进行规模化现场试验,取得了很好的实验结果,该产品在石油防腐领域具有广阔应用前景。

## 2 研究内容

本技术首先通过溶胶-凝胶法在纳米黏土坡缕石(Pal)表面生长二氧化硅层,再经氟化处理,获得了低表面能功能填料(Pal@SiO<sub>2</sub>-F)。随后,将其与商业聚偏氟乙烯(PVDF)复合,构建了具有独特的微/纳米粗糙度的超双疏(PVDF@SiO<sub>2</sub>-F)填料。该填料添加到防腐耐磨粉末涂层(PVDF@SiO<sub>2</sub>-F-EP, PSFE 涂层)中经高温固化展示出高疏、原油防粘附、原油高效运输性能,进而开发出防腐耐磨双疏涂层,在极端环境油气领域具有广阔的应用前景。

表征测试标准:耐磨性测试:标准:SY/T1768-2006;盐雾测试:标准:GB/T1771-1991;抗冲击测试:

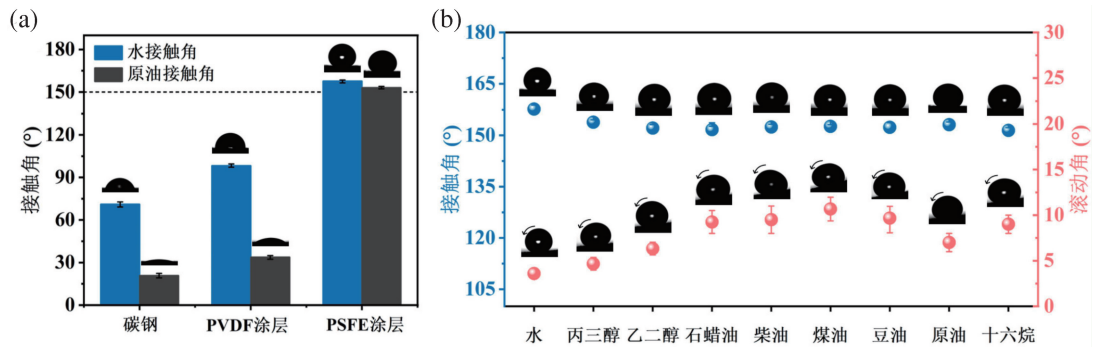


图1 (a) 不同样品上的水和原油的润湿性, (b) PSFE 涂层上各类油滴的润湿性

标准:SY/T0442-1997;弯曲测试:标准:SY/T0442-2010;苛刻工况测试:标准:SY/T 6717-2016。

### 2.1 涂层的表面润湿性

碳钢板、PVDF 涂层和 PSFE 涂层对于水和原油的润湿性通过接触角测量仪所测试得到的接触角及滚动角数据来评价。如图 1(a)所示,未处理的钢板是亲水和亲油表面,而 PVDF 涂层则为疏水和亲油性表面。相比之下,PSFE 涂层对水和原油的接触角分别为  $157 \pm 0.7^\circ$  和  $153 \pm 0.8^\circ$ ,液滴在涂层表面接近球形。此外,图 1(b)显示了 PSFE 涂层对于各类油滴的接触角和滚动角数据,可以明显看出涂层具有优异双疏性能,各类油滴都能够在涂层表面以极低的角度滚落,这说明该涂层具有优异的拒液性。

### 2.2 涂层的防原油粘附和原油运输性能

为进一步探究 PSFE 涂层的防原油粘附性能,对其进行了浸入—提出循环测试,将涂层垂直浸入原油中,随后垂直提出,并测试水和原油在涂层表面的接触角。如图 2 所示,涂层在经过 1800 次测试循环后,仍然保持超疏水性和高疏油性,对于水和原油的接触角分别为  $151.0 \pm 0.8^\circ$  和  $142.2 \pm 0.9^\circ$ ,实验

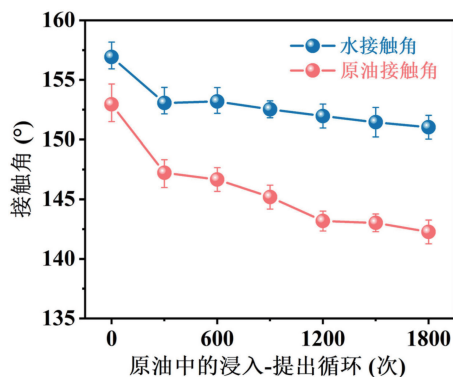


图2 PSFE 涂层上水和原油的接触角随浸入—提出循环测试的变化

结果证明涂层具有优异的防原油粘附性能。值得一提的是,如此苛刻的原油浸泡循环测试,与以往同类型的工作相比是极为罕见和极具优势的。

基于可拓展性的喷涂技术,在铝制半管内部制备了 PSFE 涂层,并测试了不同倾斜角度下的原油在铝管上的通过速度和收集率。如图 3(a)所示,PSFE 涂层铝管上的原油通过速度明显快于无涂层的初始铝管,这说明 PSFE 涂层能够显著降低原油与管道之间的流动阻力,从而提高运输速度。此外,由图 3(b)可以看出,原油通过不同倾斜角度的涂层管道后,收集率均高于 99%,原油在 PSFE 涂层管道上几乎不会残留。以上结果说明 PSFE 涂层对于原油具有优异的防粘附效果,能够提升原油的运输效率,在原油输送管道中具有巨大的应用潜力。

### 2.3 涂层的防蜡沉积性能及作用机理

为了探索涂层的防蜡性能,对双疏 PSFE 涂层的防蜡沉积性能进行了评价。如图 4(a)所示,基于冷指法<sup>[25]</sup>设计了一套用于评价涂层表面防蜡沉积性能的装置。将涂层样品固定在冷指管上,该冷指管带有冷却水系统,用于保持管内的持续低温,以模拟原油运输过程中周围地层的温度。随后,带有样品的冷指管被浸入到含蜡原油中,并且在  $60^\circ\text{C}$  水浴下保持搅拌状态,确保油中的蜡完全溶解和分散,整个蜡沉积测试过程为 1 小时。当溶解在原油中的石蜡遇到温度较低的冷指管时会降温析出并沉积在样品上,通过对比各种样品的蜡沉积质量来评价其防蜡性能。防蜡沉积率通过以下公式计算:

$$R = \frac{\Delta M - \Delta m}{\Delta M} \times 100\% \quad (1)$$

其中,  $R$  为防蜡沉积率,  $\Delta M$  和  $\Delta m$  分别为无涂层碳钢板和含涂层的碳钢板上的质量增量。在本测试中,  $R$  值越大,意味着防蜡沉积性能越好。

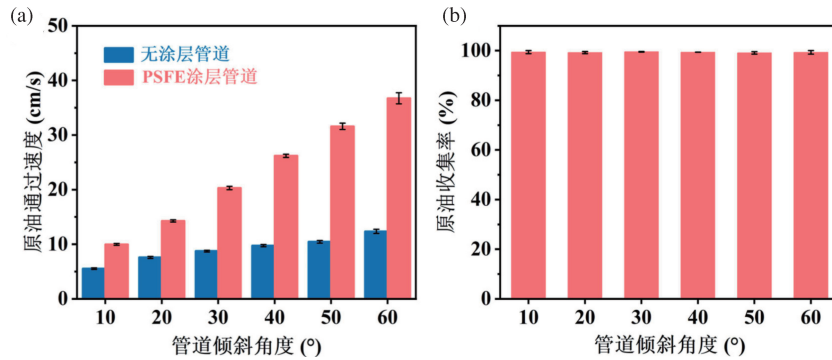


图 3 (a) 原油在无涂层管道和 PSFE 涂层管道上的通过速度, (b) 原油在 PSFE 涂层管道上的收集率

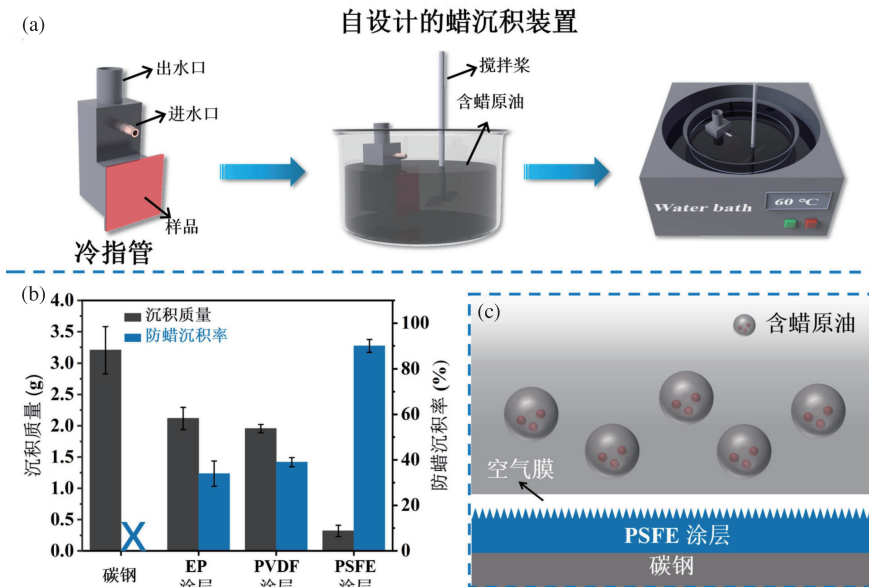


图 4 (a) 基于冷指法自行设计的蜡沉积评价装置, (b) 不同样品的蜡沉积量和防蜡沉积率, (c) PSFE 涂层的防蜡机理示意图

如图 4(b)所示,对于商业涂层环氧树脂(EP)和聚偏氟乙烯(PVDF),它们的防蜡沉积率均低于40%,防蜡效果很有限。这是因为具有高表面能的EP涂层与含蜡原油之间具有很强的相互作用,导致石蜡在其表面的牢固沉积。而对于PVDF涂层,虽然具有较低的表面能,但其宏观的粗糙结构为石蜡提供了较多的沉积位点,也会导致蜡沉积。相比之下,PSFE涂层具有特殊设计的微/纳米分层粗糙结构和低的表面能,其表面稳定存在的气膜可作为物理屏障来阻挡蜡沉积,从而其在测试中展现出高达90.0%的防蜡沉积率。

为了进一步理解和阐述双疏表面气膜在原油体系中防粘附、运输和防蜡沉积的作用机理,以图4(c)作为机理示意图。首先,PSFE涂层表面气膜所具有的强大稳定性来源于涂层结构稳定性和组成稳定性之间的协同。其可以作为优异的防粘层,实现对

原油的超强拒液性。其次,原油在涂层管道中的高效运输,降低了蜡在管道上的附着概率。最后,涂层表面气膜中的空气作为热的不良导体,导热值仅为 $25 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。本涂层中所用的坡缕石纳米黏土是具有随机取向和高孔隙率的热障材料之一,它可以作为填料来提高复合涂层的隔热性能<sup>[26, 27]</sup>。因此,该双疏涂层表面的气膜可以减弱温度较低的固体表面与温度较高的原油之间的传热过程。当涂层浸没在原油中时,气膜可以起到热障层的作用,减缓蜡的沉积。综上所述,双疏涂层表面稳定的气膜的多重作用为制备具有防粘/运输和防蜡功能的双疏涂层提供了有效的策略。

#### 2.4 涂层机械性能测试

在此基础上制备防腐耐磨 PSFE 双疏涂层,图 5 (a)为深地抽油管用 PSFE 涂层耐磨性能测试图。从图中可以看出,涂层表面坚实致密,无明显缺陷。

经过 SY/T1768-2006 标准测试后,涂层表面仅有轻微磨痕,经测试 PSFE 涂层最小磨损量仅为 0.8 mg,最大磨损量为 8 mg,性能优于同类的商业耐磨涂层。

图 5 (b)为涂层耐冲击测试性能示意图,由图中可以看到。涂层经过 6~9J 的冲击后 PSFE 涂层表面仅有一凹坑,并未见到涂层崩裂或基板漏出等情况。经过电火花测试也未见露底,由此证明涂层的耐冲击性能已达到并超过油田应用中 6~8J 的指标要求。涂层表面双疏单元可为涂层提供润滑作用,有效提升涂层耐磨性能。图 5 (c)为深地抽油管用 PSFE 涂层模拟油井管工况摩擦测试图,抽油杆与涂层的初始压力 62 MPa,终了压力 2 MPa,介质中往复运行 8.2 万米,磨损深度仅为 15  $\mu\text{m}$ 。按照此数据计算,抽油机中抽油杆循环摩擦运行 30 万米,涂层的厚度磨损仅仅为 55  $\mu\text{m}$ ,其耐磨性是现在服役耐磨涂层的 2~3 倍。磨损厚度远远低于大庆油田拟采用的熔覆涂层摩擦 30 万米、磨损小于 150  $\mu\text{m}$  的耐磨指标。

### 2.5 其他主要性能测试

研发的 PSFE 涂层在喷涂 120  $\mu\text{m}$  条件下浸泡在 90  $^{\circ}\text{C}$ 、12% 的盐水 60 天后,EIS 测试结果低频阻抗均超过  $10^{10} \Omega/\text{cm}^2$ ,涂层的综合性能指标展示在表 1 中。

## 3 工程示范应用

双疏涂层在吉林油田、大庆油田以及宝钢钢铁公司进行了工程试验和测试,现场反馈表明:(1)吉林油田松原区块应用至今(2021 年 5 月)已有 5 年,还可正常工作,防腐及耐磨性能远远高于油田同类同价位产品。(2)大庆油田采油四厂对双疏纳米涂

层及同类产品进行了对比,结果表明,本双疏涂层耐磨性能远远高于市面同价位同类产品。复合耐磨双疏涂层表面光滑性能好,具有减磨、耐磨和防腐蚀特性,能够保护油管、抽油杆接箍及杆体不受磨损,防止油井原液及井下气体对油管的腐蚀,延长油井检泵周期。(3)与中盐集团合作将开发双疏涂层应用于高压氧腐蚀困扰盐穴压缩空气储能国家示范项目,前期测试涂层性能得到宝钢及中盐集团认可,认为涂层在解决压缩空气储能抗氧腐蚀方面起到至关重要的作用。2021 年进行两口井工业示范应用(图 6),该成果将在大型空气储能、空气驱—油气开采等领域具有巨大应用潜力。

表 1 新型防腐耐磨涂层综合性能指标

技术参数	双疏涂层性能指标
颜色	黑色
耐磨性(1000 g, 1000 转)/mg	$\leq 8$
附着力	2 级以上
硬度	$\geq 4\text{H}$
柔韧性	抗 2 $^{\circ}$ 弯曲( $-30 \pm 3^{\circ}\text{C}$ )
抗冲击性	$\geq 8\text{J}$
耐酸浸泡(12% HCl+9% HF, 25 $^{\circ}\text{C}$ )	$\geq 72$ hrs
盐雾实验	$\geq 5000$ hrs
耐化学介质腐蚀	90 天, 10% HCl、10% NaOH 的常温浸泡 90 天, 油田污水, 原油的 80 $^{\circ}\text{C}$ 浸泡, 合格 90 天, 汽油、柴油、煤油常温浸泡, 合格
使用温度	$\leq 150^{\circ}\text{C}$ (水热环境、10% 酸或碱)
主要应用范围	油田结垢结蜡严重工况及防腐耐磨工程

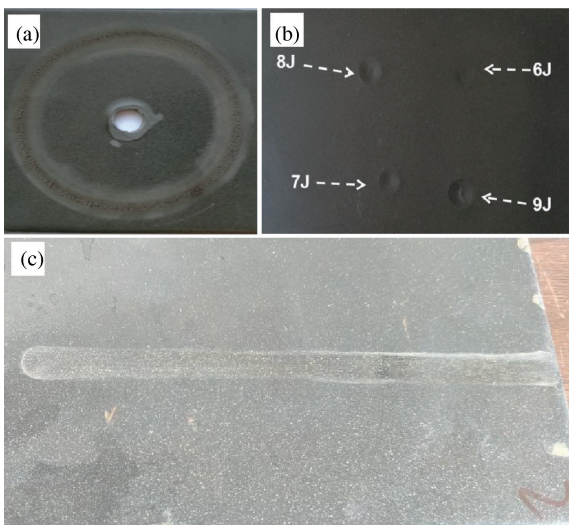


图 5 (a) 深地油管用 PSFE 涂层耐磨性能测试图;  
(b) 深地油管用涂层耐冲击能测试图;  
(c) 模拟介质中双疏防腐耐磨涂层摩擦测试

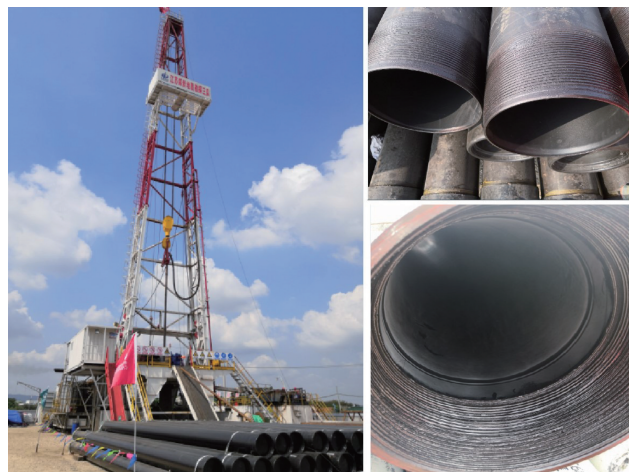


图 6 双疏涂层在中盐集团金坛分公司盐穴压缩空气储能防腐抗氧方面应用

## 4 总 结

随着二次采油、三元复合驱的逐渐推广,油管涂层需要具有高的防腐耐磨性能与防蜡性能,本团队研制的双疏防腐粉末涂料不仅可以应用于采油或输油管道设备,还可以作为许多化工设备表面腐蚀的防护。该粉末涂料生产过程采用了新型的纳米填料和功能型聚合物材料对涂料进行改性,使涂层具有了高质量多功能性。通过材料设计、表界面强化,在粉末涂料制备过程中引入防腐、耐磨、防蜡等优异的性能,具有防原油粘附和提高原油运输效率的能力,相信该产品在石油石化及高压极端工况装备领域具有广阔的市场前景。

## 参 考 文 献

- [1] Dotto MER, Martins RN, Ferreira M, et al. Influence of hydrogenated amorphous carbon coatings on the formation of paraffin deposits. *Surface and Coatings Technology*, 2006, 200(22/23): 6479—6483.
- [2] Azevedo LFA, Teixeira AM. A critical review of the modeling of wax deposition mechanisms. *Petroleum Science and Technology*, 2003, 21(3/4): 393—408.
- [3] Huang ZY, Lu YD, Hoffmann R, et al. The effect of operating temperatures on wax deposition. *Energy & Fuels*, 2011, 25(11): 5180—5188.
- [4] Merino-Garcia D, Corraera S. Cold flow: a review of a technology to avoid wax deposition. *Petroleum Science and Technology*, 2008, 26(4): 446—459.
- [5] Gonçalves JL, Bombard AJF, Soares DAW, et al. Reduction of paraffin precipitation and viscosity of Brazilian crude oil exposed to magnetic fields. *Energy & Fuels*, 2010, 24(5): 3144—3149.
- [6] Zhang JH, Lai HX, Gao H, et al. Prevention and mitigation of paraffin deposition by biosurfactant-producing and paraffin-degrading *Bacillus amyloliquefaciens* strain 6-2c. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 335: 510—519.
- [7] Taheri-Shakib J, Shekarifard A, Kazemzadeh E, et al. Characterization of the wax precipitation in Iranian crude oil based on wax appearance temperature (WAT): the influence of ultrasonic waves. *Journal of Molecular Structure*, 2020, 1202: 127239.
- [8] Aiyejina A, Chakrabarti DP, Pilgrim A, et al. Wax formation in oil pipelines: a critical review. *International Journal of Multiphase Flow*, 2011, 37(7): 671—694.
- [9] Bai J, Jin X, Wu JT. Multifunctional anti-wax coatings for paraffin control in oil pipelines. *Petroleum Science*, 2019, 16(3): 619—631.
- [10] Zhang XJ, Tian J, Wang LJ, et al. Wettability effect of coatings on drag reduction and paraffin deposition prevention in oil. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2002, 36(1/2): 87—95.
- [11] Tou MJ, Luo ZG, Bai S, et al. Sequential coating upconversion NaYF<sub>4</sub>: Yb, Tm nanocrystals with SiO<sub>2</sub> and ZnO layers for NIR-driven photocatalytic and antibacterial applications. *Materials Science and Engineering: C*, 2017, 70: 1141—1148.
- [12] Wang ZW, Zhu LQ, Li WP, et al. Bioinspired *in situ* growth of conversion films with underwater superoleophobicity and excellent self-cleaning performance. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2013, 5(21): 10904—10911.
- [13] Liang WT, Zhu LQ, Li WP, et al. Bioinspired composite coating with extreme underwater superoleophobicity and good stability for wax prevention in the petroleum industry. *Langmuir: the ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2015, 31(40): 11058—11066.
- [14] Li Q, Guo ZG. A highly fluorinated SiO<sub>2</sub> particle assembled, durable superhydrophobic and superoleophobic coating for both hard and soft materials. *Nanoscale*, 2019, 11(39): 18338—18346.
- [15] Wang HY, Yan L, Gao D, et al. Tribological properties of superamphiphobic PPS/PTFE composite coating in the oilfield produced water. *Wear*, 2014, 319(1/2): 62—68.
- [16] Zhang ZQ, Yu DF, Xu XB, et al. Versatile snail-inspired superamphiphobic coatings with repeatable adhesion and recyclability. *Chemical Engineering Science*, 2021, 230: 116182.
- [17] Wu Y, Zhao MY, Guo ZG. Multifunctional superamphiphobic SiO<sub>2</sub> coating for crude oil transportation. *Chemical Engineering Journal*, 2018, 334: 1584—1593.
- [18] Liu H, Wang YD, Huang JY, et al. Superamphiphobicity: bioinspired surfaces with superamphiphobic properties: concepts, synthesis, and applications (adv. funct. mater. 19/2018). *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(19): 1870123.
- [19] Li BC, Zhang JP. Durable and self-healing superamphiphobic coatings repellent even to hot liquids. *Chemical Communications (Cambridge, England)*, 2016, 52(13): 2744—2747.
- [20] Qu MN, Ma XR, He JM, et al. Facile selective and diverse fabrication of superhydrophobic, superoleophobic-superhydrophilic and superamphiphobic materials from Kaolin. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2017, 9(1): 1011—1020.

- [21] Han XT, Peng JY, Jiang SH, et al. Robust superamphiphobic coatings based on raspberry-like hollow SnO<sub>2</sub> composites. *Langmuir; the ACS Journal of Surfaces and Colloids*, 2020, 36(37): 11044—11053.
- [22] Huang C, Wang FY, Wang DH, et al. Wear-resistant and robust superamphiphobic coatings with hierarchical TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> composite particles and inorganic adhesives. *New Journal of Chemistry*, 2020, 44(4): 1194—1203.
- [23] Wang S, Fan BB, Lv C, et al. Influence of adhesives on the construction of a robust superamphiphobic surface. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 831: 154741.
- [24] Wang KL, Liu XR, Tan Y, et al. Highly fluorinated and hierarchical HNTs/SiO<sub>2</sub> hybrid particles for substrate-independent superamphiphobic coatings. *Chemical Engineering Journal*, 2019, 359: 626—640.
- [25] da S T dos Santos J, Fernandes AC, Giuliatti M. Study of the paraffin deposit formation using the cold finger methodology for Brazilian crude oils. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2004, 45(1/2): 47—60.
- [26] Liu Y, Wang XZ, Wang YM, et al. Ultra-low thermal conductivities of hot-pressed attapulgite and its potential as thermal insulation material. *Applied Physics Letters*, 2016, 108(10): 101906.
- [27] Jin HR, Zhou XY, Xu TT, et al. Ultralight and hydrophobic palygorskite-based aerogels with prominent thermal insulation and flame retardancy. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2020, 12(10): 11815—11824.

## Application Research of Amphiphobic Coating in Oil and Gas Field with Extreme Environment

Peng Jianwen<sup>1,2†</sup>    Wang Chijia<sup>1,2,3†</sup>    Liu Zhanjian<sup>3</sup>    Wang Huaiyuan<sup>1,2\*</sup>

1. School of Chemical Engineering and Technology, Tianjin University, Tianjin 300350

2. State Key Laboratory for Chemical Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350

3. College of Chemistry & Chemical Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163318

**Abstract** There is a great demand for anti-corrosion and wear-resistance of oil and gas equipment and pipelines under extreme conditions. In addition, the weak temperature resistance and poor wear-resistance of deep oil well and pipeline coatings, and the wax deposition problem in the crude oil production process should be resolved urgently. In this work, the interface enhancement of the coating surface and the composition-microstructure design were taken as the breakthrough point, and the commercial polyvinylidene fluoride (PVDF) was organically combined with the highly fluorinated palygorskite@silica (Pal@SiO<sub>2</sub>-F) composite filler to fabricate amphiphobic functional filler with excellent wear-resistance. Furthermore, anti-corrosive and wear-resistant amphiphobic nanopowder coatings for petrochemical equipment under a harsh environment have been developed. Unique micro-/nano-hierarchical structures were constructed by a powder coating method, which cooperated with the low-surface-energy of Pal@SiO<sub>2</sub>-F and chemical inertness of PVDF to establish a stable air film on the coating surface. The as-prepared coating has a strong anti-adhesion property for crude oil, which can greatly improve the transportation efficiency of crude oil when applied to pipes. More importantly, the coating showed excellent anti-waxing deposition performance. Therefore, the coating has great application potential in oil and gas field with extreme environments.

**Keywords** amphiphobic coating; extreme conditions; oilfield equipment protection; anti-adhesion

(责任编辑 吴征天)

\* Corresponding Author, Email: wanghyjji@163.com

† Contributed equally as co-first authors.