

# 油气田用缓蚀剂制备与性能评价 综合实验设计



徐中英<sup>1,2</sup>, 曹学文<sup>2</sup>, 吴亚<sup>1,3</sup>, 汤颖<sup>1,3,\*</sup>

<sup>1</sup> 西安石油大学陕西省油气田环境污染控制技术与储层保护重点实验室, 陕西西安 710000

<sup>2</sup> 中国石油大学 (华东) 储运与建筑工程学院, 山东青岛 266000

<sup>3</sup> 西安石油大学油气田化学陕西省高校工程研究中心, 陕西西安 710000

**摘要:** 为进一步提高本科生的综合实验技能并渗透绿色化学教育理念, 设计了一项针对油田管道腐蚀问题的酰肼型缓蚀剂综合性本科实验。首先分析了影响腐蚀的因素以及缓蚀机理, 使用植物油与水合肼发生肼解反应, 结合静态挂片失重法和电化学方法, 评价酰肼型缓蚀剂的缓蚀效果, 测定钢片在模拟腐蚀溶液中的腐蚀速率与缓蚀率, 测试不同浓度缓蚀剂在模拟腐蚀液中的动电位极化曲线以及电化学阻抗谱。该综合性实验让学生了解缓蚀剂的缓蚀机理, 电化学原理与电化学工作站操作, 通过数值计算与分析, 评价不同缓蚀剂效果并分析参数变化原因。该综合实验设计将有机化学知识应用到油田化学领域, 同时将实验技能与现场作业相结合, 提升学生的专业技能和油田现场适应能力, 并能够掌握其在不同腐蚀介质下的缓蚀评价方法和数据处理能力。

**关键词:** 综合实验; 绿色化学; 植物油; 酰肼型缓蚀剂

**DOI:** [10.57237/j.cse.2023.02.001](https://doi.org/10.57237/j.cse.2023.02.001)

## Comprehensive Experimental Design for the Preparation and Performance Evaluation of Corrosion Inhibitors for Oil and Gas Fields

Xu Zhongying<sup>1</sup>, Cao Xuewen<sup>2</sup>, Wu Ya<sup>1,3</sup>, Tang Ying<sup>1,3,\*</sup>

<sup>1</sup> Shaanxi Province Key Laboratory of Environmental Pollution Control and Reservoir Protection Technology of Oilfields, Xi'an Petroleum University, Xi'an 710000, China

<sup>2</sup> College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266000, China

<sup>3</sup> Shaanxi University Engineering Research Center of Oil and Gas Field Chemistry, Xi'an Petroleum University, Xi'an 710000, China

**Abstract:** To further enhance the comprehensive experimental skills of undergraduate students and promote the concept of green chemistry education, we have developed a comprehensive undergraduate experiment focusing on acylhydrazide corrosion inhibitors for oilfield pipeline corrosion. Initially, a thorough analysis of corrosion factors and the mechanism of corrosion inhibition was conducted. Subsequently, the corrosion inhibition effect of acylhydrazide corrosion inhibitors

基金项目: 西安石油大学教改项目和西安石油大学研究生精品案例库建设项目 (2022-X-YAL-001).

\*通信作者: 汤颖, [tangying78@xsyu.edu.cn](mailto:tangying78@xsyu.edu.cn)

收稿日期: 2023-04-20; 接受日期: 2023-06-20; 在线出版日期: 2023-06-29

<http://www.chemscieng.com>

was evaluated using the hydrazinolysis reaction between vegetable oil and hydrazine hydrate, employing both the static weight loss method and electrochemical techniques. The corrosion rate and corrosion inhibition rate of steel sheets immersed in simulated corrosion solutions were quantified. Moreover, dynamic potential polarization curve and electrochemical impedance spectroscopy were utilized to examine the performance of different concentrations of corrosion inhibitors in the simulated corrosion solution. This comprehensive experiment not only enables students to comprehend the corrosion inhibition mechanism of these inhibitors, but also equips them with knowledge of electrochemistry principles and the operational skills required for electrochemical workstations. Through numerical calculations and data analysis, students are able to evaluate the efficacy of various corrosion inhibitors and elucidate the underlying factors influencing parameter variations. The integration of organic chemistry knowledge with practical applications in oilfield chemistry elevates students' professional proficiency and their ability to adapt to real-world oilfield scenarios. Furthermore, this experiment enables students to proficiently employ corrosion evaluation methods and effectively process relevant data across different corrosive environments.

**Keywords:** Comprehensive Experiment; Green Chemistry; Vegetable Oil; Acylhydrazide Corrosion Inhibitor

## 1 引言

原油的生产包括钻井、采油、集输等过程，其中涉及了大量化学剂的使用，因此，油田化学在油田生产中扮演着重要的角色[1, 2]。石油类高等院校开设的《油田化学》是的一门重要的专业课程，它涵盖的内容有钻完井液、油井水泥、压裂酸化、堵水调剖、油田污水处理、原油破乳、清防蜡、原油降凝降粘及化学驱油等[3-6]。要求学生在掌握油田化学基本理论的基础上，结合室内实验与现场实践，培养学生的分析问题和解决问题能力。随着高校人才培养模式的多样化和创新化，综合性实验被越来越多的应用于理工科学生的科技素质训练。尤其是对于石油院校来说综合性实验是实验教学不可缺少的实验类型，是培养具有现代思维的高素质人才的需要。让应化专业油田化学方向的本科生设计油田化学综合性实验，使其通过文献调研、实验设计、数据处理、结果讨论和撰写实验报告等程序的训练，在短时间内可以进行系统的科研素质训练。

金属在油田水中的腐蚀过程并不是独立进行的，腐蚀过程、结垢过程、细菌繁殖和沉积物形成过程既密切相关又互相影响[7, 8]。在油气田生产系统中，金属的腐蚀是一个严重的普遍问题，如美国石油工业每年因腐蚀而造成的直接经济损失高达 108-144 亿美元[9, 10]。油气田防腐措施有用高熵合金耐腐蚀材料[11]、玻璃钢[12]、聚四氟乙烯[13]、聚氯乙烯塑料[14]、各种橡胶以及各种防腐涂料[15]。但由于上述措施成本太高，易老化，使用条件受到限制，因而目前在美国油气田中，有 90%以

上的腐蚀部位是采用缓蚀剂保护，因为其成本低，使用方便，缓蚀效率高而被广泛应用[16]。

本课题组长期致力于利用环保的植物材料开发绿色油田化学品，同时结合应用化学专业教学需要，将科研成果应用到实验教学中，设计综合性的油田污水处理实验，同时推行绿色环保实验教学理念。为了提高实验的综合性，渗透绿色化学教育理念，设计了利用以植物油为原料通过与水合肼发生肼解反应制备得到酰肼型缓蚀剂的综合性实验。综合性体现在原料的预处理和化学改性、缓蚀剂的制备和缓蚀性能评价、数据处理及结果讨论；环保性体现在利用植物油作为原料，通过化学改性制备绿色酰肼型缓蚀剂。该实验需要 4 个学时，需要学生课前预习，合理安排实验步骤，多个实验穿插进行。本实验设计符合学生较全面掌握缓蚀剂相关知识的要求，同时能将基础化学知识应用到油田化学。该实验设计需要对学生进行分组实验，每组进行不同实验内容，最终各组实验数据汇总，进行对比分析，有利于锻炼学生之间的团队协作能力。

## 2 实验目的

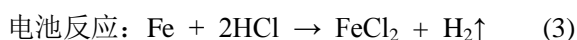
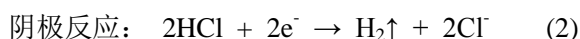
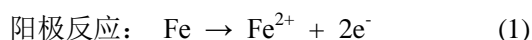
- (1) 掌握一种测定钢片腐蚀速率的方法（静态挂片失重法）；
- (2) 了解缓蚀剂的缓蚀机理；
- (3) 学会通过数据处理、分析及相关参数的计算，进一步评价不同缓蚀剂的缓蚀效果并分析相

关参数变化的原因;

- (4) 了解电化学相关原理, 掌握电化学工作站的相关操作, 并能够对其动电位极化曲线和阻抗谱的谱图进行分析。

### 3 实验原理

金属材料尤其是钢铁材料的腐蚀问题几乎存在于工业生产和生活的各个方面, 由此造成的经济损失是非常巨大的。尤其, 在石油田开采过程中, 需要注入酸液以求增产, 造成的各方面的经济损失。为了降低酸液对金属管线和设备的腐蚀、控制酸岩反应速率、提高酸化效果、放置底层污染和降低施工成本, 必须要加入缓蚀剂。钢片在酸性介质中的腐蚀是电化学腐蚀。若在盐酸中, 钢片的腐蚀反应为:



通常把氧化反应即释放自由电子的反应称为阳极反应; 把还原反应即接受自由电子的反应称为阴极反应。一个腐蚀过程至少由一个阳极反应和阴极反应构成。阴极和阳极形成一对腐蚀电池, 构成腐蚀必须有推动电子流动的电动势和一个完整的回路。油田水系统里钢材的主要是铁元素, 其次是重金属元素, 如锰 (Mn)、镍 (Ni)、钛 (Ti) 等。锰钢中铁与锰可构成一对腐蚀电池。锰元素的电动势高于铁, 则电流是通过钢内部的锰流向铁, 而电子运动方向是由铁流向锰。由于在油田水处理系统里钢材浸泡在油田水中, 油田水本身为电解质溶液, 这样就构成了完整的电路。

就当前国内外腐蚀现状而言, 对于缓蚀剂分子缓蚀机理的研究主要有以下三种理论, 分别为: 膜理论、吸附理论、电极过程抑制理论。

- (1) 膜理论: 是指缓蚀剂在金属表面与具有腐蚀性的物质发生化学反应, 由此在金属表面生成一层保护膜 (氧化膜或沉淀膜), 将金属表面与具有腐蚀性的物质分离开, 以此达到缓蚀的目的。
- (2) 吸附理论: 是由于缓蚀剂分子可以在金属表面发生反应从而吸附在金属表面, 从而阻止金属的腐蚀。一般可以将吸附类型分为: 物理吸附与化学吸附。物理吸附也称为范德华吸附, 是

指吸附质和吸附剂分子间相互作用所引起的吸附。化学吸附主要是由于电子的转移, 导致缓蚀剂分子与金属之间形成配位键, 并形成吸附在金属表面的配合物。但是, 在腐蚀环境中某些缓蚀剂会同时存在两种吸附。

- (3) 电极过程抑制理论: 是指向溶液介质中加入缓蚀剂后, 减缓了溶液中的阳极或阴极发生反应, 以此减弱金属腐蚀的程度, 达到缓蚀的效果。

## 4 仪器与试剂

### 4.1 仪器与试剂

#### 4.1.1 仪器

CS350 型电化学工作站, HH-2 型电热恒温水浴锅, DF-101S 型恒温加热磁力搅拌器, 三口圆底烧瓶 1 个, 三口平底烧瓶 1 个, 自制工作电极, 铂电极, 饱和甘汞电极。

#### 4.1.2 试剂

NaCl、CaO、无水乙醇、石油醚、丙酮、水合联氨、植物油、盐酸、六次亚甲基四胺。

### 4.2 酰肼缓蚀剂的合成

酰肼型缓蚀剂的制备按照图 1 的实验装置进行, 合成反应的通式如下所示。

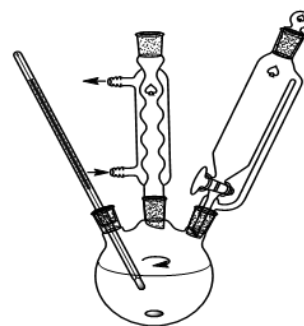
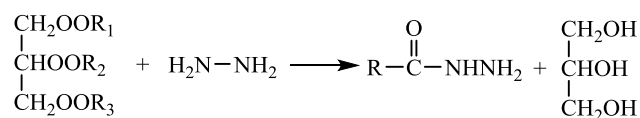


图 1 实验装置图



本章所用的植物油分别为菜籽油、蓖麻油、大豆油与玉米油。按照一定比例先将植物油加入圆底烧瓶

中，然后按比例称取一定质量的水合肼，使用滴液漏斗向烧瓶中缓慢滴加水合肼溶液，在 10 min 中内滴加完毕。最后，在温度为 75 ℃，转速为 2000 r/min 的水浴锅内持续反应并搅拌回流 4 h。趁热倒入烧杯中备用。将制备得到的酰肼入非离子型分散剂（AEO-7 或 OP-10），使其能在水中均匀分散。

4.3 静态挂片失重实验

实验中所使用的钢片试件材质为 Q235 钢，试件规格为Ⅲ型 40 mm×13 mm×2 mm，表面粗糙度 Ra 的最大容许值为 0.8 μm±0.3 μm。钢片成分含量如表 1 所示，拉伸性能和工艺性能如表 2 所示。

表 1 钢片成分含量

成分	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Cu
含量（%）	0.16	0.26	0.15	≤0.015	≤0.09	/	0.02	0.025	0.024

表 2 钢片拉伸性能和工艺性能

抗拉强度 σ (b/MPa)	屈服强度 σ (0.2/MPa)	伸长率 δ (5%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )
425	310	35	7.85

4.3.1 模拟腐蚀溶液的配制

首先将约 1g 的 CaO 溶于 1000 mL 自来水中，当烧杯底部出现沉淀，即烧杯中的溶液为饱和 Ca(OH)<sub>2</sub> 溶液。使用循环式真空泵对饱和 Ca(OH)<sub>2</sub> 溶液进行抽滤，去除沉淀。然后，向抽滤后的溶液加入 30 g 的 NaCl，搅拌溶解后定容于 1000 mL 容量瓶中，含 3.0wt% NaCl 的饱和 Ca(OH)<sub>2</sub> 模拟海水溶液需要现用现配。

4.3.2 静态挂片失重

(1)钢片预处理

在钢片使用前，依次采用 400、600、800、1200、2000 目的砂纸将表面打磨光滑后，用游标卡尺测量出长、宽、高、圆孔内径。丙酮浸润擦拭去除油脂，再使用沾有乙醇的脱脂棉擦拭，吹风机冷风吹干，检查无锈痕后放入干燥器中备用。

(2)实验步骤

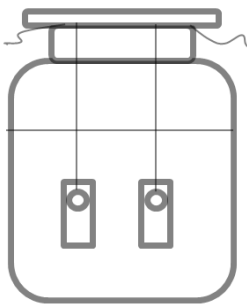


图 2 钢片挂片实验简图

向 6 个玻璃磨口瓶中分别加入 120 mL 模拟腐蚀溶液，然后再分别加入 0 ppm、50 ppm、100 ppm、200 ppm、

500 ppm、1000 ppm 的缓蚀剂，并向每个玻璃磨口瓶内通空气 5 min。将干燥器内的钢片取出称重，精确至 0.0001 g。向每个瓶内悬挂两枚 Q235 钢片，在悬挂过程中需注意保持高度一致，钢片需完全浸没于溶液中，并且避免钢片和瓶壁的接触，从而减小实验误差。实验简图如图 2 所示。悬挂完毕设置不同温度放置于水浴锅中放置一定时间（4h、7d 等）。

(3)挂片后清洗处理

配制酸洗液对取出的腐蚀试片进行表面除锈。酸洗液配制方法为：100 mL 的 HCl 溶液，3.5 g 六次亚甲基四胺，蒸馏水稀释至 1000 mL。使用酸洗液清理钢片表面的腐蚀结垢产物后，再用蒸馏水洗去酸洗液，而后放入无水乙醇中去除多余水分，吹风机干燥后用分析天平再次称重，精确至 0.001 g，腐蚀速率、缓蚀率按以下公式进行计算。

4.4 电化学测试

采用武汉科斯特仪器有限公司的 CS350 型电化学工作站进行电化学测试。使用 CorrTest 电化学测试系统，通过线性极化、弱极化来进行腐蚀监测，可以连续测量材料的瞬时腐蚀速度；通过对极化曲线进行电化学解析，计算出极化电阻  $R_p$  值，Tafel 斜率  $\beta_a$ 、 $\beta_c$  值，腐蚀电流密度  $I_{corr}$  等。本章实验采用三电极测试体系，其中参比电极为甘汞电极，辅助电极为铂电极，工作电极为自制 Q235 钢电极。通过动电位极化曲线扫描和阻抗谱测试，测定相关的电化学参数，并使用 Zview 软件对电化学参数进行分析。

工作电极的制备：将试件规格为 50 mm×10 mm×5 mm 的 Q235 圆柱型钢，使用 400 目的砂纸进行抛光处



理, 在圆柱底面使用电焊枪与锡丝, 将直径为 1 mm, 长度为 40 mm 的铜丝焊接于工作面。焊接完成后使用万用表测试其导电情况, 在导电良好的情况下, 按照质量比为 A:B=3:1 的比例配制环氧树脂 AB 胶, 将工作电极放入规格为 20 mm×20 mm 的圆柱模具内, 再将除工作面以外, 其余各面使用环氧树脂 AB 胶密封。密封过程中要防止 AB 胶产生气泡, 若产生气泡, 可能会发生缝隙腐蚀, 导致实验误差。待模具中的环氧树脂风干后脱模, 工作电极制备完成。

电极预处理: 将脱模后的工作电极待测面依次使用粗砂纸、金相砂纸依次打磨至镜面光亮, 并用蒸馏水清洗后, 用丙酮擦拭待测面以除去表面油脂。

电解液的配制: 电解液①250 mL 含 3.0wt% NaCl 的饱和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶液; ②250 mL 含 3.0wt% NaCl 的饱和  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  溶液+不同浓度缓蚀剂。

采用三电极体系, 根据所需的腐蚀体系制备电解液, 配制完成后将 250 mL 电解液倒入三口平底烧瓶中。按照图 3 中的电化学工作装置图连接完毕, 使用 CorrTest 测试软件, 在测试方法中选择稳态极化, 开路电位监测 20 min, 开路电位 5 min 内在  $\pm 5$ -10 mV 内变化视为稳定, 可进行后续测试。

#### (1) 电化学阻抗谱扫描

交流阻抗法是一种以小振幅正弦波电位 (或电流) 为扰动信号, 叠加在外加直流电压上并作用于电解池, 通过测量系统在较宽频率范围的阻抗谱, 获得研究体系相关动力学信息及电极界面结构信息的电化学测量方法。交流阻抗测量方法是通过阻抗-频率扫描曲线, 测量体系在不同频率下的阻抗谱, 一般以 Nyquist 和 Bode 图来表示其阻抗谱形式。设置阻抗谱的频率范围为 0.01 Hz~100 KHz, 激励正弦波信号幅值为 10 mV。

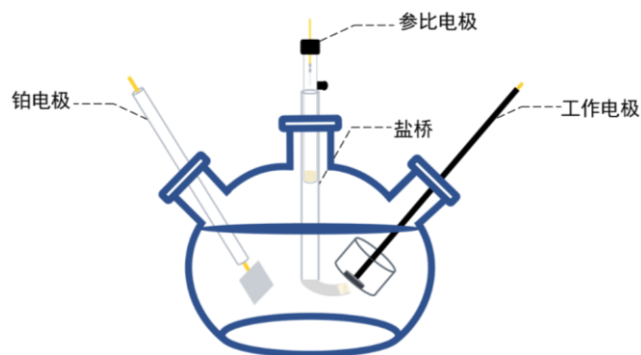


图 3 电化学工作装置图

#### (2) 动电位极化曲线扫描

动电位扫描法的应用十分广泛, 可以测定阴/阳极

的极化曲线、阴极电沉积析出电位、孔蚀特征电位的测定等。动电位极化曲线扫描是在测试方法中选择稳态测试中的动电位扫描, 其中扫描范围为  $\pm 250$  mV, 扫描速度为 0.5 mV/S。

## 4.5 数据处理

### (1) 均匀腐蚀速率计算公式

$$V = \frac{8.76 \times 10^{-4} \times W}{S \times t \times \rho} \quad (4)$$

式中:  $V$ —均匀腐蚀速率, mm/a;  $W$ —钢片失重,

g;

$S$ —钢片腐蚀面积,  $\text{cm}^2$ ;  $t$ —腐蚀时间, h;

$\rho$ —钢片密度,  $\text{g/cm}^3$ 。

### (2) 缓蚀率计算公式

$$\eta = \frac{M_0 - M}{M_0} \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $\eta$ —缓蚀率;

$M_0$ —空白样失重质量, g;

$M$ —样品失重质量, g;

### (3) 极化曲线数据处理

通过 Cview 软件对极化曲线进行塔菲尔斜率的拟合, 得出腐蚀电流、自腐蚀电位和阴阳极斜率等参数, 通过与空白组参数的对比, 得出缓蚀剂对电极的控制作用类型, 了解缓蚀剂的电化学机理。缓蚀效率  $IE(\%)$  也可由公式(6)计算, 其中  $I_{\text{corr}}^0$  为未添加缓蚀剂的腐蚀电流密度,  $I_{\text{corr}}$  为加入缓蚀剂的腐蚀电流密度:

$$IE(\%) = \frac{I_{\text{corr}}^0 - I_{\text{corr}}}{I_{\text{corr}}^0} \times 100 \quad (6)$$

### (4) 阻抗数据处理

经过 Zview 软件的拟合, 使用标准的 Randles 电路, 如图 4 所示。计算得到该电路的电阻分量 ( $R_s$ )、电荷转移电阻 ( $R_p$ ) 和电容分量 (CPE) 等阻抗数据, 并借助这些参数计算抑制效率, 通过电阻值的变化, 了解缓蚀剂在电极表面的成膜情况。由公式(7)计算缓蚀效率, 其中  $R_p$  和  $R_p^0$  分别为存在和不添加缓蚀剂时的电荷转移电阻。

$$E_{R_p} = \frac{R_p - R_p^0}{R_p} \quad (7)$$

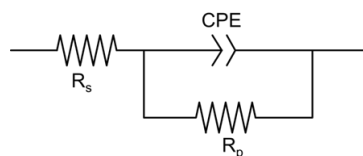


图4 等效电路图

## 5 总结

本实验设计利用植物化学、有机化学和油田化学的知识,对酰肼型缓蚀剂,在模拟腐蚀介质中的性能进行考察。实验过程采用国标规定的测试方法,通过本实验的训练掌握钻井液性能现场测试仪器与方法即能够很好的与油田作业现场衔接。在此实验教学中,对学生从文献调研、实验设计、数据处理、结果讨论等进行了系统训练,提高分析问题和解决问题的能力,提高科研素养。同时采用植物油作为原料,使得学生既能学习掌握专业知识,又能践行绿色环保理念。本实验综合性强、内容丰富,需分组完成,可以提高学生之间的团队合作的能力。

## 参考文献

- [1] Dong, S. G., Zhao, B., Lin, C., et al. Corrosion behavior of epoxy/zinc duplex coated rebar embedded in concrete in ocean environment [J]. *Construction & Building Materials*, 2012, 28 (1): 72-78.
- [2] Malik, A. U., Andijani, I., Al-Moaili, F., et al. Studies on the performance of migratory corrosion inhibitors in protection of rebar concrete in Gulf seawater environment [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2014, 26 (3): 235-242.
- [3] Saxena, A., Prasad, D., Haldhar, R. Use of syzygium aromaticum extract as green corrosion inhibitor for mild steel in 0.5M  $H_2SO_4$  [J]. *Surface Review and Letters*, 2019, 53 (11): 8523-8535.
- [4] Raja, P. B., Ghoreishiamiri, S., Ismail, M. Natural corrosion inhibitors for steel reinforcement in concrete-a review [J]. *Surface Review and Letters*, 2015.
- [5] 战风涛, 高统海, 杨震, 丁鹏鹏, 周昕媛, 吕志凤. 一种双缩水合肼Schiff碱的合成及其酸化缓蚀性能 [J]. *腐蚀与防护*, 2017, 38 (1): 45-49.
- [6] Haleem, S., Wanees, S., Aal, E., et al. Environmental factors affecting the corrosion behavior of reinforcing steel III. Measurement of pitting corrosion currents of steel in  $Ca(OH)_2$  solutions under natural corrosion conditions [J]. *Corrosion Science*, 2010, 52 (2): 292-302.
- [7] Dan, S., Ma, A. B., Jiang, J., et al. Corrosion behavior of equal-channel-angular-pressed pure magnesium in NaCl aqueous solution [J]. *Corrosion Science*, 2010, 52 (2): 481-490.
- [8] Chousidis, N., Ioannou, I., Rakanta, E., et al. Effect of fly ash chemical composition on the reinforcement corrosion, thermal diffusion and strength of blended cement concretes [J]. *Construction and Building Materials*, 2016, 126 (9): 86-97.
- [9] Grgur, B. N., Elkais, A. R., Gvozdenovi, M. M., et al. Corrosion of mild steel with composite polyaniline coatings using different formulations [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2015, 79 (3): 17-24.
- [10] Zhuang, J., Song, R., Xiang, N., et al. Corrosion Behavior of Micro-arc Oxidation Coatings Formed on 6063 Aluminum Alloy [J]. *Corrosion Science and Protection Technology*, 2017, 29 (5): 492-498.
- [11] Yang, F., Liu, T., Li, J., et al. Anticorrosive behavior of a zinc-rich epoxy coating containing sulfonated polyaniline in 3.5% NaCl solution [J]. *RSC Advances*, 2018, 8 (24): 13237-13247.
- [12] Ishizaki, T., Masu, Da., Sakamoto, M. Corrosion Resistance and Durability of Superhydrophobic Surface Formed on Magnesium Alloy Coated with Nanostructured Cerium Oxide Film and Fluoroalkylsilane Molecules in Corrosive NaCl Aqueous Solution [J]. *Langmuir*, 2011, 27 (8): 4780-4788.
- [13] Lgaz, H. Corrosion Inhibition Behavior of 9-Hydroxyrisperidone as a Green Corrosion Inhibitor for Mild Steel in Hydrochloric Acid: Electrochemical, DFT and MD Simulations Studies [J]. *International Journal of Electrochemical Science*. 2018, 13 (1): 250-264.
- [14] Khaled, K. F., Hamed, M., Abdel-Azim, K. M., et al. Inhibition of copper corrosion in 3.5% NaCl solutions by a new pyrimidine derivative: electrochemical and computer simulation techniques [J]. *Journal of Solid State Electrochemistry*, 2011, 15 (4): 663-673.
- [15] Ghanbari, A., Attar, M. M., Mahdavian, M. Corrosion inhibition performance of three imidazole derivatives on mild steel in 1M phosphoric acid [J]. *Materials Chemistry & Physics*, 2010, 124 (2): 1205-1209.
- [16] Wang, P., Gu, X., Wang, Q., et al. Corrosion inhibition of triazines in sulfur containing oilfield wastewater [J]. *Desalination and Water Treatment*, 2021, 235: 107-116.