

岛礁油料装备的腐蚀特性及全寿命 腐蚀控制策略

王争荣¹, 向永华¹, 杨潇², 李永²

(1.92228 部队, 北京 100072; 2.中国科学院理化技术研究所, 北京 100190)

摘要: 岛礁属于亚热带、热带海洋性气候, 具有长期高温、高湿、高盐雾、高太阳辐射等环境特征, 会加速保障装备的腐蚀进程, 严重制约了装备的使用可靠性。针对该难题, 文中对岛礁保障装备的工作环境特征、腐蚀失效现象以及腐蚀机理进行了系统的分析, 提出了开展油料装备腐蚀故障数据收集和分析以及全寿命腐蚀控制是今后岛礁油料装备腐蚀防控领域的重点研究方向。最后针对装备腐蚀不同的机理特征, 提出了油料装备全寿命腐蚀控制策略, 为岛礁油料装备的腐蚀寿命预测、维修与保养提供技术支持和理论指导。

关键词: 岛礁油料装备; 腐蚀机理; 全寿命腐蚀控制

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.10.003

中图分类号: TB304

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)10-0014-06

Corrosion Characteristics and Life Cycle Corrosion Control Strategy for Oil Equipment on Islands and Reefs

WANG Zheng-rong¹, XIANG Yong-hua¹, YANG Xiao², LI Yong²

(1. Unit 92228, PLA, Beijing 100072, China;

2. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

ABSTRACT: Islands and reefs belong to subtropical and tropical marine climate, with long-term high temperature, high humidity, high salt fog, high solar radiation and other environmental characteristics, which will accelerate the corrosion process of support equipment and seriously restrict the use reliability of equipment. In view of this problem, this paper systematically analyzed the working environment characteristics, corrosion failure phenomenon and corrosion mechanism of the island and reef support equipment, and put forward that the key research direction in the field of corrosion prevention and control of the island and reef oil equipment in the future was to carry out the collection and analysis of corrosion failure data and the whole life-cycle corrosion control. Finally, according to the different corrosion mechanism characteristics, the whole life corrosion control strategy of oil equipment was proposed, providing technical support and theoretical guidance for the prediction, maintenance and repair of oil equipment corrosion life.

KEY WORDS: oil equipment on islands and reefs; corrosion mechanism; life cycle corrosion control

收稿日期: 2020-06-10; 修订日期: 2020-06-28

Received: 2020-06-10; Revised: 2020-06-28

作者简介: 王争荣(1976—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为装备工程。

Biography: WANG Zheng-rong (1976—), Female, Master, Senior engineer, Research focus: equipment engineering.

随着岛礁的建设和发展,越来越多的油料装备部署到岛礁进行保障。油料装备主要是承担油料运输、储存、加注等任务的油罐、泵站、过滤计量设备、加油车和输送管线等设施设备、装备器材。由于岛礁苛刻的腐蚀气候环境原因,油料装备的腐蚀情况较内陆及沿海地区更为严重。一是金属材料的腐蚀问题,主要包括车辆底盘和上装腐蚀。车辆底盘腐蚀生锈主要存在于尾气管、支架、蹬车踏板等部位;上装腐蚀生锈主要存在于踏板、基座平台、结构件、紧固螺栓(含放松垫圈)、电缆插头、液压管路和阀门等部位。此外,车辆暴露在外的螺母、车窗外边框、天窗盖合页、焊接接缝处、排气管、钢板弹簧腐蚀以及各种输油管路、阀门、转换接头、油泵机组底座、流量计、过滤器及其配套的螺栓螺母等油料设施设备、器材锈蚀也非常严重,严重影响油料装备及器材的保障效益和使用寿命。二是橡胶、塑料、合成材料等非金属材料,主要存在老化加速、强度减弱、变脆易碎等情况。三是电子装备出现的腐蚀,主要是电路板、线路接头、插头等容易出现氧化,导致线路打火、短路、断路、连接不稳定、装备性能下降等问题发生,影响装备使用。上述腐蚀问题降低了油料装备的完好率和部队的

保障能力。

目前,国内在油料装备及其附件的腐蚀失效机理及其防护控制研究方面,还缺乏系统性和理论研究支撑,岛礁保障人员对油料装备的腐蚀防护与控制措施还缺乏必要的手段。因此,针对南海岛礁的环境特点,开展油料保障装备的腐蚀分析和防护策略研究,对提高油料装备完好率和保障能力具有至关重要的作用和意义^[1-4]。

1 西南沙岛礁环境典型特征及其腐蚀等级

由于西南沙海域接近赤道,接受太阳辐射的热量较多,年平均气温为 25~28℃。最冷月份的平均温度在 20℃以上,最热时,极端温度达 33℃左右,一年中温差较小。南沙及其邻近海区湿度相对较高,年平均相对湿度达 83.6%。南沙及其邻近海区温度和相对湿度的平均数值见表 1。除高温和高湿外,西南沙岛礁区域属于强日照环境,年平均太阳辐射总量为 1820.04 J/(cm²·d)。4—6 月平均太阳辐射总量为 2092 J/(cm²·d),为全年最高值。

表 1 南沙及其邻近海区温度和湿度平均值
Tab.1 Mean temperature and relative humidity of Nansha and its adjacent area

温度			年均	年均	年均盐雾	年均太阳辐射总
年均气温/℃	气温大于 30℃的天数/d	年均海水表面温度/℃	相对湿度/%	降雨量/mm	浓度/(mg·m ⁻³)	量/(J·cm ⁻² ·d ⁻¹)
27.8	160.8	28.6	83.6	1600.0	29.67	1820.04

通过 ISO 9223-9226 大气腐蚀分级分类标准,西南沙岛礁海域的大气环境下钢、铝合金、铜合金以及锌的腐蚀速率见表 2。据此可判断该区域的腐蚀环境等级应该为 C5 级,具有较为广泛的南海严酷环境代表性^[5]。

表 2 通过腐蚀速率分类西沙大气腐蚀等级
Tab.2 Classification of atmospheric corrosion grade of Xisha by corrosion rate

材料	牌号	腐蚀速度/(μm·a ⁻¹)	腐蚀性分级(ISO 9223)
钢	Q235	87.59	C5
铝合金	2A12	12.4	C5+
	7A04	7.38	C5+
铜合金	QSn6.5-0.1	6.71	C5+
锌	Zn	4.31	C5

2 西南沙岛礁环境对油料装备腐蚀的影响及其腐蚀形式

2.1 岛礁环境对油料装备金属构件的影响

岛礁油料装备所处的自然环境恶劣,昼夜温差

大,夜晚容易在其表面形成冷凝水汽。沿海地区空气中含有大量随海水蒸发的盐分,其溶于小水滴中,便形成浓度很高的盐雾。盐雾对油料装备的腐蚀作用主要表现在两个方面^[6]:一是直接作用,即盐雾会腐蚀油料装备的金属部件,当材料表面的相对湿度达到露点时,就会在材料表面形成一层薄液膜,污染气体、灰尘等就会溶解于其中,形成腐蚀性电解液,金属部件产生均匀腐蚀,即整个金属表面以几乎相同的速度进行腐蚀,无明显的腐蚀形态差别。

在油料装备上,均匀腐蚀的主要部位有:踏板、基座平台、结构件以及车辆暴露在外的螺母、车窗外边框、天窗盖合页等表面部位。均匀腐蚀是油料装备中广泛存在的腐蚀形式,如图 1 所示。

另一方面是岛礁的三高环境对油料装备的间接作用,即会改变油料装备周边的环境条件。油料装备作为结构复杂的金属多元体,组成材料成分复杂。装备长期受到岛礁潮湿大气的腐蚀作用,在使用期间会与海水这种强电解质接触。不同的金属有不同的电极电位,在海水这种电解质中,油料装备中异种结构件就会构成严重的电偶腐蚀^[7],如图 2 所示。



图1 油料装备的均匀腐蚀
Fig.1 Uniform corrosion of oil equipment



图2 油料管线及阀门(电偶腐蚀)
Fig.2 Oil pipeline and valve
(galvanic corrosion)

油料装备中的许多结构都是由众多零部件连接而成的,这些连接部位可能出现缝隙,为缝隙腐蚀创造了有利的条件。这些缝隙在化学介质中,会形成闭塞电池腐蚀,电解质一旦进入缝隙,就会长期存在里面。缝隙距离较宽时,导电阻力较小,易形成连续、长期的电化学腐蚀,腐蚀速率加快。油料装备产生缝隙腐蚀的主要部位较多,如焊缝气孔、法兰连接面、紧配合的轴销、零部件的连接处等。

高温氧化腐蚀在油料装备中也是一种十分典型的腐蚀类型,如发动机的排气支管(图3),所处的温度较高,发动机排出的废气,更加剧了这些高温部件的腐蚀。此类腐蚀对高温部件的危害是极其严重的。



图3 油料装备排气管道高温腐蚀
Fig.3 High temperature corrosion of oil equipment exhaust pipe

2.2 岛礁环境对储油罐体腐蚀影响

岛礁环境不仅会腐蚀油料装备的金属构件,还会对储油罐体安全构成危害。储油罐体的环境影响失效过程如下:在岛礁长时间日照辐射传热的作用下,油料罐体持续吸收热量,吸收了超出正常设计范围的大量辐射热,热量通过罐体向内部传递,导致罐体内部温度不断升高。温度的升高使得罐内压力逐渐升高,当压力超过密封件所能承受的临界压力时,密封件

破裂;当压力降低到外部环境压力后,罐体通过泄露孔发生介质交换,外部潮湿空气进入罐体加速了腐蚀速率。

当密闭罐体发生换气时,会使装备与外部环境发生介质交换,致使大气环境中含有的霉菌、盐雾等腐蚀性成分的湿热空气进入油料罐体内部。此外,湿热环境也会加速装备表面防腐涂层和橡胶密封件的失效,从而导致过早出现防护涂层的起泡、龟裂、脱落、密封件老化、润滑剂黏度降低等。

3 油料装备全寿命腐蚀控制研究

3.1 油料装备腐蚀故障数据收集和分析以及关键防腐技术研究

目前国内岛礁环境下装备腐蚀研究主要通过实验室加速腐蚀模拟的方式获得基础数据^[8],岛礁实际环境下材料腐蚀数据缺乏。针对这一研究现状,依托北京科技大学“国家材料腐蚀与防护数据中心”,并结合实地调研,开展针对南海岛礁环境下使用的油料装备的腐蚀数据进行收集、分析和挖掘利用,确定腐蚀薄弱环节、易腐蚀部位、易腐蚀部件的类型,明确技术攻关的方向,了解油料装备的耐腐蚀设计和控制基础。另一方面,开展油料装备在岛礁环境下腐蚀防护关键技术研究,通过实验室加速和实际环境对比试验研究,确定岛礁环境下油料装备特征腐蚀形式和机理,建立腐蚀因素关系模型,获得油料装备在岛礁环境下性能演化的基本规律^[9]。

3.2 油料装备腐蚀控制一体化解决方案

1) 岛礁环境下油料装备的防护体系设计原则。为确保岛礁装备在西南沙海洋环境下的结构完整性、使用寿命和可靠性,防护体系应由结构材料表面的金属防护层或化学覆盖层外加有机涂层组成。针对该防护体系的设计原则如下:为应对苛刻的海洋环境,岛礁装备的金属结构防护体系需采用立体复合厚膜化模式(立体复合:表面处理+防锈底涂层+屏蔽中间涂层+耐候面,涂层;厚膜化:在不影响使用的前提下应提高涂层厚度,参照ISO 12944推荐的300~400 μm

以上)；2) 金属基材、金属镀覆层/化学覆盖层和有
机涂层应良好相容，防护体系应有良好的附着力
(10 MPa 以上)，防护体系的耐腐蚀性、耐大气老化
性能、“三防”性能以及涂层系统内之间的适配性和
工艺性应经过相应标准检验(如 ISO 12944)；选择合
适的表面处理方式，确保涂装体系与不锈钢基材的良
好附着，同时注意检查涂层的完整性，防止基材在涂
层保护下的局部腐蚀；在工况允许的条件下，可以通
过选择烘烤、粉末涂料等性能优异的涂料涂装工艺确
保防护体系的有效性；印刷电路板应采用高质量的三
防漆，在不影响性能的前提下，适量增加涂层厚度；
严格管理涂装全过程，涂料质量验证、涂装前基材处
理、涂装环境控制、涂装工艺管理、涂装后涂层质量
检验与养护的各个过程都需进行严格管理。

2) 发展综合性能优良的油料装备耐蚀关键结构
材料。针对岛礁苛刻的腐蚀环境，油料装备中关键的
耐蚀结构件多采用不锈钢材质，以提升装备的保障性
能。对于不锈钢材料而言，虽然面心立方结构的(奥
氏体)不锈钢(如 304 不锈钢、316 不锈钢等)，具
备了优异耐腐蚀能力，可以有效抵抗 Cl⁻ 的侵蚀，但
这类材料强度偏低。如果通过冷加工提高其强度，又
会显著降低其抗腐蚀性能和疲劳性能。马氏体不锈钢
尽管在常温下具有良好的强度、韧塑性和热加工性
能，但其体心立方结构，有利于 Cl⁻ 和氢的扩散，容
易造成材料的腐蚀破坏和氢致开裂，尤其是抗应力腐
蚀性能较低，同样不能满足关键结构部件对耐腐蚀性
能及使用寿命的需求。为保障岛礁环境下油料装备的
长期保障能力，急需研发一种高性能的油料装备耐
蚀合金材料，以打破无材料应对方案的困局。

近年来快速发展的高熵合金，凭借其优异的综合
性能而引人注目，为我国岛礁环境下油料装备关键结
构材料的研制提供了一个全新的方向^[10-11]。在众多高
熵合金体系中，以 Co、Cr、Fe、Ni 等为主要组元的
面心立方结构(FCC)单相高熵合金具有“优秀的耐
腐蚀能力”已经成为国际共识。现有研究表明，该类
材料具有均匀的无序固溶体结构，其表层易形成稳定
的高熵化非晶钝化膜，导致其在 NaCl、H₂SO₄、NaOH
等溶液中具备高腐蚀电位、低腐蚀电流密度、高点蚀
电位和宽钝化范围的突出特性，表现出了超越奥氏体
不锈钢的电化学稳定性，见表 3^[12-17]。更可贵的是，
FCC 单相高熵合金还可有效抵抗氢原子的扩散和侵
蚀，抗氢脆性能也优于奥氏体不锈钢^[18-22]。此外，有
关 FCC 单相高熵合金强化机制的研究工作也已取得
长足进展，形变强化、细晶强化、析出强化等强化措
施均被证实可有效提升合金的强度。其中，析出强化
方法因效果显著、工艺成熟度高而最受关注。实验证
明，合理调整合金成分和加工工艺，可获得室温拉伸
强度≥1200 MPa，且塑性变形量>15%的高熵合金体
系，其力学性能完全满足岛礁苛刻腐蚀环境使用的要

求。因此，基于这种兼具优异耐腐蚀性能和力学性能
的新型材料体系开发的油料装备用耐蚀部件，有望实
现油料装备耐腐蚀性能跨越式提升。

表 3 典型 FCC 高熵合金在 3.5% NaCl 溶液中的
电化学腐蚀性能(参比电极: SCE)

Tab.3 Electrochemical corrosion performance of typical
FCC high entropy alloy in 3.5% solution
(reference electrode: SCE)

合金成分	$J_{\text{corr}}/(\text{A}\cdot\text{cm}^{-2})$	E_{corr}/V	E_{pit}/V
CoCrFeNi	3.15×10^{-8}	-0.26	0.31
CoCrFeNiCu _{0.5}	7.23×10^{-7}	-0.29	0.09
CoCrFeNiMn	1.47×10^{-7}	-0.35	0.08
Al _{0.1} CoCrFeNi	4.80×10^{-8}	-0.21	0.86
Al _{0.5} CoCrFeNi	3.05×10^{-7}	-0.64	0.14

3.3 油料装备腐蚀维护策略

成功的油料装备腐蚀控制依赖于一个全面的维护
和保养策略。在油料装备维护、维修和保养方面，每
一个相关人员都需要进行腐蚀检查、维修和保养方面
的培训。建立完善管理制度，成立腐蚀防护与控制办
公室或腐蚀防护联合攻关团队，确立责任制，完善机
制管理，制定控制文件，建立油料装备腐蚀控制管
理体系、完善腐蚀控制文件体系以及腐蚀控制人员
培训系统^[7-8]。维护保养的目的是保证装备能够正
常地工作，并适当地延长使用寿命，在装备由于腐
蚀原因而导致性能出现下降时，应对腐蚀进行及时
的处理，一般流程如图 4 所示。最后，对装备开展
全寿命腐蚀控制评价。

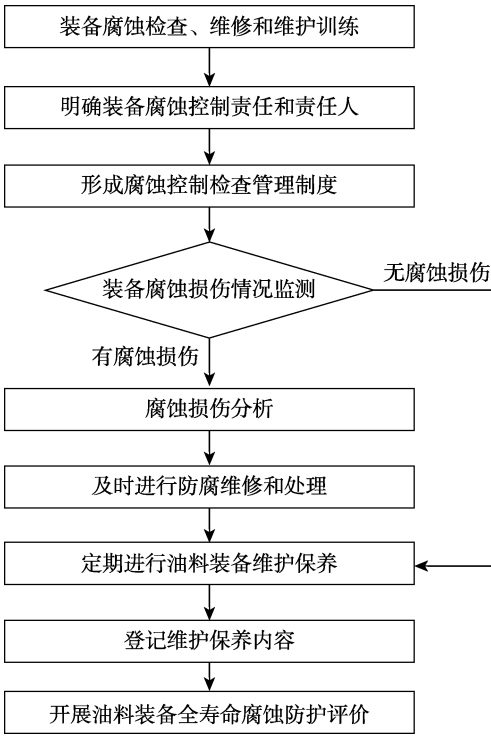


图 4 油料装备腐蚀维护策略
Fig.4 Corrosion maintenance strategy of oil equipment

3.4 整体技术路线

针对目前油料装备在岛礁环境下腐蚀机理认识不足、防护对象不明确、维护方法不科学的现状,提出岛礁油料装备的全寿命腐蚀控制技术路线,如图5所示。

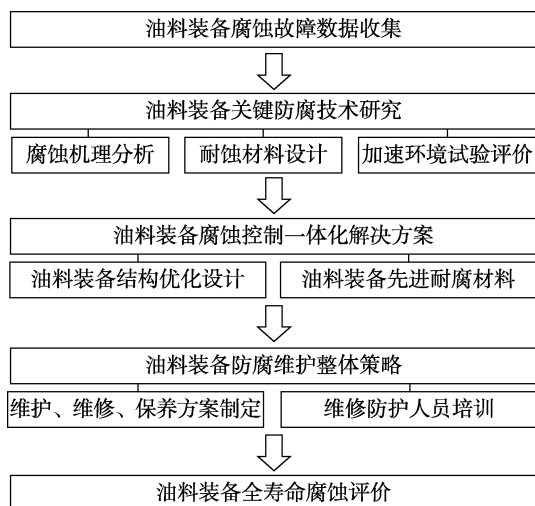


图5 油料装备腐蚀控制研究整体技术路线
Fig.5 Overall technical route of corrosion control research of oil equipment

4 结语

腐蚀是岛礁油料装备在使用过程中面临的重要关键问题之一,不仅影响其保障效能,对后续维修和保养也影响巨大。文中针对油料装备的使用环境特征、腐蚀失效现象以及腐蚀机理进行了系统的分析,提出开展油料装备腐蚀故障数据收集和分析以及全寿命腐蚀控制研究作为今后的重点研究方向。最后针对腐蚀不同的机理特征,提出了油料装备全寿命腐蚀控制策略,为岛礁油料装备的腐蚀寿命预测、维修与保养提供技术支持和理论指导。

参考文献:

- [1] 郁大照, 张代国, 王琳, 等. 南海海洋环境下机载电子设备的腐蚀及外场防护对策[J]. 装备环境工程, 2019, 16(7): 8-12.
YU Da-zhao, ZHANG Dai-guo, WANG Lin, et al. Corrosion of Airborne Electronic Equipment and Field Protection Measures in Marine Environment of South China Sea[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(7): 8-12.
- [2] 陈群志, 鞠明, 余文波, 等. 严酷环境下飞机外场腐蚀防护对策与措施[J]. 装备环境工程, 2017, 14(3): 1-7.
CHEN Qun-zhi, JU Ming, YU Wen-bo, et al. Countermeasures for Aircraft Field Corrosion Protection under the Severe Environment Condition[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(3): 1-7.
- [3] 孙志华, 汤智慧, 李斌. 海洋环境飞机的全面腐蚀控制[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 35-39.
SUN Zhi-hua, TANG Zhi-hui, LI Bin. Comprehensive Corrosion Control of Naval Aircraft[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 35-39.
- [4] 穆山, 李军念, 王玲. 海洋大气环境电子设备腐蚀控制技术[J]. 装备环境工程, 2012, 9(4): 59-63.
MU Shan, LI Jun-nian, WANG Ling. Corrosion Control Technology of Electronic Facility in Marine Atmosphere[J]. Equipment Environmental Engineering, 2012, 9(4): 59-63.
- [5] 彭文山, 侯健, 郭为民, 等. 西沙海洋大气环境中典型材料腐蚀形貌识别[J]. 装备环境工程, 2019, 16(7): 1-7.
PENG Wen-shan, HOU Jian, GUO Wei-min, et al. Corrosion Morphology Identification of Typical Materials in Xisha Marine Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(7): 1-7.
- [6] 程玉峰, 杜元龙. 电子设备的大气腐蚀[J]. 材料保护, 1995, 28(12): 16-19.
CHENG Yu-feng, DU Yuan-long. Atmospheric Corrosion of Electronic Devices[J]. Materials Protection, 1995, 28(12): 16-19.
- [7] 罗九林, 张其勇, 郭金茂, 等. 两栖装甲装备腐蚀规律探讨[J]. 车辆与动力技术, 2005(1): 52-57.
LUO Jiu-lin, ZHANG Qi-yong, GUO Jin-mao, Dong Yuan-sheng. The Study of Rules of the Amphibious Armored Equipment Erosion[J]. Vehicle & Power Technology, 2005(1): 52-57.
- [8] 赵朋飞, 苏晓庆, 吴俊升. 典型岛礁大气环境室内加速腐蚀试验谱研究[J]. 装备环境工程, 2019, 16(12): 14-21.
ZHAO Peng-fei, SU Xiao-qing, WU Jun-sheng. Accelerated Corrosion Test Spectrum of Typical Reef Atmospheric Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(12): 14-21.
- [9] 李亮, 曹京宜, 李旭, 等. 海洋环境设备涂层老化和失效的影响因素研究[J]. 装备环境工程, 2020, 17(2): 97-103.
LI Liang, CAO Jing-yi, LI Xu, et al. Influencing Factors of Aging and Failure of Ocean Equipment Coatings[J]. Equipment Environmental Engineering, 2020, 17(2): 97-103.
- [10] CHANG X, ZENG M, LIU K, et al. Phase Engineering of High-entropy Alloys[J]. Advanced Materials, 2020, 32(14): 1907226.
- [11] GEORGE E P, RAABE D, RITCHIE R O. High-entropy Alloys[J]. Nature Reviews Materials, 2019, 4(8): 515-534.
- [12] LUO H, LI Z M, Mingers A M, et al. Corrosion Behavior of an Equiatomic CoCrFeMnNi High-entropy Alloy Compared with 304 Stainless Steel in Sulfuric Acid Solution[J]. Corrosion Science, 2018, 134: 131-139.
- [13] SHI Y Z, COLLINS L, BALKE N, et al. In-situ Electrochemical-AFM Study of Localized Corrosion of Al_x

- CoCrFeNi High-entropy Alloys in Chloride Solution[J]. Applied Surface Science, 2018, 439: 533-544.
- [14] SHI Y Z, Yang B, Xie X, et al. Corrosion of $Al_xCoCrFeNi$ High-entropy alloys: Al-content and Potential Scan-rate Dependent Pitting Behavior[J]. Corrosion Science, 2017, 119: 33-45.
- [15] LUO H, ZOU S W, CHEN, Y H, et al. Influence of Carbon on the Corrosion Behaviour of Interstitial Equiatomic CoCrFeMnNi High-entropy Alloys in a Chlorinated Concrete Solution[J]. Corrosion Science, 2020, 163: 108287.
- [16] SHUANG S, DING Z Y, CHUNG D et al. Corrosion Resistant Nanostructured Eutectic High Entropy Alloy[J]. Corrosion Science, 2020, 164: 108315.
- [17] WANG L T, MERCIER D, ZANNA S, et al. Study of the Surface Oxides and Corrosion Behaviour of an Equiatomic CoCrFeMnNi High Entropy Alloy by XPS and ToF-SIMS[J]. Corrosion Science, 2020, 167: 108507.
- [18] ZHAO Y K, LEE D H, SEOK M Y, et al. Resistance of CoCrFeMnNi High-entropy Alloy to Gaseous Hydrogen Embrittlement[J]. Scripta Materialia, 2017, 135: 54-58.
- [19] NYGREN K E, WANG S, Bertsch K M, et al. Hydrogen Embrittlement of the Equimolar FeNiCoCr Alloy[J]. Acta Materialia, 2018, 157: 218-227.
- [20] YANG G H, ZHAO Y K, LEE D H, et al. Influence of Hydrogen on Incipient Plasticity in CoCrFeMnNi High-entropy Alloy[J]. Scripta Materialia, 2019, 161: 23-27.
- [21] ZHAO Y K, Park J M, LEE D H, et al. Influences of Hydrogen Charging Method on the Hydrogen Distribution and Nanomechanical Properties of Face-centered Cubic High-entropy Alloy: A Comparative Study[J]. ScriptaMaterialia, 2019, 168: 76-80.
- [22] BELO J S, MARQUES S C, CASTILHO A V, et al. Hydrogen Diffusivity and Interaction with $Fe_{20}Mn_{20}Ni_{20}Co_{20}Cr_{20}$ and $Fe_{22}Mn_{40}Ni_{30}Co_6Cr_2$ High-entropy Alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2020, 815: 152314.