

环境效应与防护

海洋大气环境下装备材料的腐蚀与防护 研究进展

沈剑¹, 丁星星², 宋凯强², 张敏², 丛大龙²

(1.海装装备项目管理中心, 北京 100166; 2.西南技术工程研究所, 重庆 400039)

摘要: 叙述了海洋大气环境下装备典型金属材料的腐蚀与防护研究进展。介绍了高强钢、不锈钢和铝合金等装备材料在高温、高湿、高盐雾和强辐射等海洋大气环境下的腐蚀特征和主要腐蚀形式, 总结了海洋大气腐蚀防护技术的研究进展。最后, 提出了海洋大气环境下装备防护需从装备选材与结构环境适应性设计、有效表面防护、环境控制、加强维护保养等方面着手, 在充分利用现有防腐技术的基础上, 加强金属涂/镀层与有机涂层的技术组合; 大力开发研制海洋环境下长期有效、绿色环保的表面处理技术和涂层技术; 针对铝合金等易腐蚀材料, 开展腐蚀结构修复技术研究。采用系统工程方法来解决海洋大气环境中装备的腐蚀问题, 进而提高舰载武器、船舶、海岸工程、近海工程等服役装备的安全性、寿命和可靠性。

关键词: 海洋大气环境; 铝合金; 不锈钢; 腐蚀与防护

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.10.016

中图分类号: TG172.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)10-0103-07

Research Progress on Corrosion and Protection of Equipment Materials in Marine Atmosphere

SHEN Jian¹, DING Xing-xing², SONG Kai-qiang², ZHANG Min², CONG Da-long²

(1. Marine Equipment Project Management Center, Beijing 100166, China;

2. Southwest Technology and Engineering Institute, Chongqing 400039, China)

ABSTRACT: This work reviewed the research progress on corrosion and protection of typical metal materials for equipment in the marine atmosphere. The corrosion characteristics and main corrosion forms of equipment materials such as high-strength steel, stainless steel and aluminum alloy under high temperature, high humidity, high salt and strong radiation were introduced, and the research progress of marine atmospheric corrosion protection technology was summarized. Finally, it was proposed that equipment protection in the marine atmosphere should be started from the aspects of equipment selection and structural environmental adaptability design, effective surface protection, environmental control, strengthening maintenance, etc. Existing anti-corrosion technologies should be made full use to strengthen the technical combination of metal coating/plating. Long-term effective, green and environmentally friendly surface treatment technology and coating technology in the marine environment should be researched and developed with great effort. Especially for aluminum alloy and other easily corrosive materials, research on corrosion structure repair technology should be focused. System engineering methods should be used to solve the corrosion problem of equipment in the marine atmosphere, thereby improving the safety, life and reliability of service equipment

收稿日期: 2020-08-25; 修订日期: 2020-08-30

Received: 2020-08-25; Revised: 2020-08-30

作者简介: 沈剑(1981—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为装备管理。

Biography: SHEN Jian (1981—), Male, Master, Engineer, Research focus: equipment management.

such as shipborne weapons, ships, coastal engineering, and offshore engineering.

KEY WORDS: marine atmosphere; aluminum alloy; stainless steel; corrosion and protection

在海洋大气环境中, 高强钢、不锈钢和铝合金等装备材料的腐蚀是一个值得关注的问题, 其严重影响了海洋武器装备服役寿命、可靠性和战技性能^[1]。海洋环境腐蚀防护的实质是降低材料与海洋环境之间的电化学反应速度, 改善材料、改变环境、把材料和环境两者隔离、或者减少腐蚀性介质在材料与环境之间的交换等均是相应的有效措施。因此, 在研究装备材料海洋大气腐蚀与防护方面, 发展更先进的腐蚀控制技术具有重要意义。

1 海洋大气腐蚀

1.1 特征

海洋大气腐蚀是材料在海洋大气温度、湿度和盐雾介质等作用下发生化学、电化学或物理相互作用的结果。海洋大气环境的特点是长期高温、高湿、高盐雾和强辐照, 金属材料在海洋大气中的腐蚀速率显著高于其他大气环境, 为内陆大气腐蚀的 2~5 倍^[2-3]。许凤玲等^[4]研究了高强度低合金钢在模拟海洋大气环境下的光照对腐蚀的影响规律, 发现当外界合适波长的光辐射到其表面时, 这种光伏效应产生的电子和空穴会影响阴阳极反应从而影响大气腐蚀。Song 等^[5]发现紫外线 (UV) 照射对 Q235 碳钢在含 NaCl 的大气环境中的腐蚀行为影响尤为强烈。高强钢、不锈钢和铝合金等材料广泛用于舰船、水陆两栖车辆、舰载飞机等装备^[6-7]。腐蚀是影响海洋武器装备服役寿命、可靠性和战技性能的主要因素之一, 掌握武器装备典型结构材料在海洋大气服役条件下的腐蚀规律和腐蚀控制方法, 有利于提高装备的环境适应性, 具有显著经济效益和军事效益^[8]。

1.2 主要形式和机理

在高温、高湿、高盐雾、强辐照、干湿交替等自然环境以及磨损、冲击、拉伸、弯曲、扭转等服役工况综合作用下, 装备关键结构件常常发生点蚀、晶间腐蚀、层状腐蚀、电偶腐蚀、应力腐蚀开裂、腐蚀疲劳等环境损伤行为^[9-12]。

1) 点蚀又称孔蚀 (Pitting), 常出现于金属表面的敏感微区, 形核后会向金属内部纵深不断扩展, 是金属材料在钝态下的一种最常见腐蚀形态。当点蚀发生形核时, 表明局部钝化膜被破坏, 因此探究点蚀的形核机理首先应阐明局部钝化膜的破裂机理, 目前其主要理论模型包括竞争吸附模型、阴离子穿透模型和化学-机械模型等^[13-16]。Vera 等人^[17]研究了相对湿度、温度、大气污染物和 Cl⁻浓度等环境因素对 2A12、

AA6201 铝合金腐蚀行为的影响, 结果表明, 点蚀通常发生在潮湿时间最长的区域, 大气污染物的不均匀分布促进了铝合金的局部腐蚀。中科院金属所的刘莉等人^[18]通过模拟加速海洋大气环境, 研究了 2A02 铝合金在海洋大气环境中的腐蚀发生和扩展规律, 发现铝及其合金的腐蚀发生在较薄电解质膜下的金属表面, 早期腐蚀主要发生在第二相颗粒周围的铝基体上, Cl⁻不仅可以吸附在第二相附近, 还可以吸附其他不完整和有缺陷的部分。因此, Cl⁻引起的腐蚀点蚀不仅发生在第二相颗粒附近, 而且也发生在其他区域。点蚀逐渐扩展到整个试样表面, 腐蚀类型由点蚀转变为均匀腐蚀, 后期形成连续的内腐蚀层。

2) 晶间腐蚀 (Intergranular Corrosion, IGC) 是指腐蚀沿着金属或合金的晶粒边界或其附近区域发展, 造成晶粒间的结合力丧失。通常情况下, 晶间腐蚀的扩展速度快、腐蚀深度低, 主要是氧气与侵蚀性溶液难以在狭窄的腐蚀通道中传输引起的。关于晶间腐蚀理论主要有阳极溶解理论、晶界附近无沉淀析出带与晶内击穿电压差异理论和晶界析出相溶解形成闭塞电池区域引起腐蚀扩展理论。2Cr13Mn9Ni4 钢常用来制作翼梁、机身、机尾及武器系统中的重要零件, 但熔炼、焊接和热处理等过程造成晶界及其附近区域形成贫铬区, 在海洋大气交变腐蚀环境下, 腐蚀速度加快^[19]。Sara Bocchi 等人^[20]在摩擦搅拌焊接 AA2024-T3 接头上发现, 在载荷作用下, 裂纹尖端处的阳极溶解速率提高, 因此进一步加速裂纹尖端的阳极溶解和氢脆, 证明了应力能够促进晶间腐蚀。近年来还有学者^[21]发现, 铝合金晶间腐蚀会促进局部腐蚀的发生, 在特定的晶粒内部发展成为点蚀。

3) 层状腐蚀又称剥蚀 (Exfoliation Corrosion, EXCO), 是指腐蚀从金属或合金表面开始, 沿平行于表面的晶界扩展, 腐蚀产物使未发生腐蚀的金属脱离金属基体, 导致层状剥落的一种腐蚀现象。剥蚀会导致铝合金材料的强度、塑性及疲劳性能大幅下降, 严重缩短材料的使用寿命。剥蚀现象主要存在于 Al-Cu-Mg 系、Al-Mg 系、Al-Mg-Si 系和 Al-Zn-Mg 系等合金中。剥蚀兼具晶间腐蚀和应力腐蚀的特征, 是一种复杂的化学和力学综合作用结果。目前研究普遍认为, 拉长的晶粒和晶界的电化学腐蚀是发生剥蚀的两个必要条件^[22], 同时剥蚀扩展动力学遵循应力腐蚀机理^[23-24]。

4) 应力腐蚀开裂 (Stress Corrosion Cracking, SCC) 是指合金在一定拉伸应力的作用下, 由于腐蚀介质与应力的协同作用导致的脆性断裂现象, 其发生需同时具备三个条件: 敏感材料、特定介质以及足够

大的拉应力。SCC 过程分为三个不同阶段, 包括孕育期(裂纹形核)、裂纹扩展期和快速断裂期。研究 SCC 的最基本问题是探索裂纹萌生和裂纹扩展的成因。其中裂纹萌生机理主要有阳极溶解理论和氢脆理论; 裂纹扩展机理主要有“闭塞电池”理论、膜破裂理论和氢原子吸附理论。北京科技大学的杜翠微教授等人^[25]发现, 在模拟的热带海洋大气中, 多用途高强度低合金贝氏体钢对 SCC 非常敏感。厚而紧致的钢锈层中腐蚀性介质的分布不均匀, 离子传质过程加速, 产生局部活性溶解区域(例如腐蚀坑)。电化学阳极过程受到抑制, 阴极过程得到促进, 特别是氢的释放反应, 导致点蚀坑处微裂纹的形成并跨晶粒扩展。

5) 电偶腐蚀(Galvanic Corrosion)通常是指由于电位差的存在, 两种不同的金属相分别作为阳极和阴极, 形成电偶对, 产生电偶电流, 进而导致的电化学腐蚀。其中电偶腐蚀阴极可以是与合金接触的电位更正的其他金属, 也可以是内部的第二相或杂质颗粒。金属材料在使用过程中, 极易受到电偶腐蚀破坏。钢中复合夹杂物和钢基体之间存在电势差, 以 Al-Ti-Mg 脱氧钢为例, 在海洋大气腐蚀环境中, MnS 夹杂物起阳极作用, 优先腐蚀和溶解; $MgAl_2O_4$ 和 Al_2O_3 起阴极作用, 导致铁基体的腐蚀, $MgTiO_3$ 和 $MgTi_2O_4$ 的不同端面同时起阳极和阴极的作用, 因此促进了钢基体的腐蚀, 这是内部因素对材料腐蚀的直接加速作用^[26-28]。异种金属接触也会导致严重的电偶腐蚀。中科院的宋影伟研究员等^[29]发现, 电偶腐蚀不仅会加速 2024 铝合金的溶解, 而且会改变其腐蚀形式, 未与合金钢耦合的 2024 铝合金呈现点蚀, 但耦合的 2024 铝合金则表现出典型的晶间腐蚀(IGC)形态。

2 海洋大气腐蚀的表面防护对策

目前, 海洋大气环境腐蚀防护已从被动防护向主动控制方向发展。海洋环境腐蚀防护的实质是降低材料与海洋环境之间的电化学反应速度, 改善材料、改变环境、把材料和环境两者隔离、或者减少腐蚀性介质在材料与环境之间的交换等均是相应的有效措施。因此, 需从装备选材与结构环境适应性设计、有效表面防护、环境控制、加强维护保养等方面着手, 采用系统工程方法来解决海洋大气环境中装备的腐蚀问题。

2.1 选材与环境适应性设计

选用耐腐蚀/老化性能优异的海洋材料并进行合理的结构设计是提高舰载武器、海洋工程装备、基础设施等耐腐蚀性能的有效措施。首先要充分考虑所选材料环境适应性, 采用有针对性的腐蚀防护措施, 考虑装备寿命周期内费效比。选材设计时要注意不同材料的相容性, 结构上要考虑防凝露和积水设计、防缝

隙腐蚀设计或密封设计等。

2.2 表面防护

2.2.1 电化学保护

利用电化学阴极保护是控制海洋腐蚀的重要措施之一。阴极保护可选择牺牲阳极或外加电流保护方法。阴极保护技术的发展主要体现在两个方向: 一是阴极保护设计技术的提高, 如采用计算机辅助优化设计; 二是外加电流阴极保护系统各部件材料的不断改进和性能的不断提高, 如辅助阳极以及混合金属氧化物阳极等。值得注意的是, 对于阴极保护系统, 阴阳极的电化学行为受海水的深度、含氧量、pH、温度、盐度等多种因素的影响, 最佳的阴极保护系统设计应综合考虑阳极电流容量、平均电流密度、极化性能等因素的影响^[30-32]。此外, 阴极保护往往需要与涂层保护联合使用, 以达到更为理想的防护效果。

2.2.2 隔离防护

1) 表面改性主要包括离子注入^[33]、激光表面处理^[34]、热扩散和电子束调制等, 主要是改变金属表面层的成分、相组成或结构, 使表面层的耐蚀性能得到提高, 以达到提高金属材料耐蚀性的目的。近年来, 表面疏水化改性处理成为新的发展趋势。Ruiz de Lara 等^[35]用激光制造超疏水铝表面技术, 由于氧化层的形成和空气在微结构中的滞留, 得到的超疏水表面表现出改善的腐蚀速率和抗极化性。Trdan 等^[36]通过激光织构方法获得了超疏水不锈钢, 耐蚀性显著提高。吉林大学的 Wang 等人^[37]开发了一种结合了纳秒激光烧蚀和化学浸没处理表面改性化技术, 经处理的低碳钢表面达到了超疏水性(水接触角为 158.9°), 提高了在海洋大气环境中的耐腐蚀性。

2) 表面转化就是通过一些化学与电化学的手段, 使金属表面与一定的介质发生化学反应而转变成非金属表面, 如氧化膜或盐膜等。阳极氧化和微弧氧化是提高铝合金、镁合金、钛合金等轻质材料最为常见的转化膜技术。氧化转化膜的孔隙率是决定其耐蚀性的主要因素之一, 降低膜层孔洞数量、尺寸和封孔是研究的热点和难点^[38-42]。Zhao 等人^[39]在电解液中加入氧化石墨烯, 发现微弧氧化膜层上的孔的数目明显减少。Wu 等人^[43]在阳极氧化或者微弧氧化膜的基础上, 通过原位生长制备出层状双羟基金属氧化物(LDHs), 实现孔洞封闭并形成复合膜层, 具有协同防护效果, 显著提高轻合金耐蚀性。

3) 涂层保护是海洋装备保护中目前最主要的措施之一, 涂层种类可分为金属涂层、有机涂层、陶瓷涂层和复合涂层。单一涂层已不能满足装备材料的防护需求, 复合涂层具有优异的综合性能成为解决装备腐蚀问题的有效途径^[44-46]。北京科技大学的李晓刚团队^[47]综合采用铝合金阳极氧化和高强钢低氢脆镀

Cd-Ti 方法,有效降低了 7050 铝合金和 300M 钢的电偶腐蚀。Branagan 等^[48]用热喷涂的方法以低临界冷却速率(104 K/s)在铁基金属表面制备了多元非晶复合涂层,涂层具有优异的耐磨性和耐腐蚀性。Lima 和 Marple 等^[49-51]采用热喷涂制备团聚的纳米结构陶瓷颗粒方法,制备出了硬度高、致密度高的纳米涂层,同时提高了涂层耐磨和耐蚀性能。朱爱萍等人^[52-53]成功制备了聚苯胺/石墨烯/纳米三氧化二铁智能防腐纳米复合涂层,实现涂层自修复,显著提高了涂层使用寿命。

2.2.3 缓蚀剂法

缓蚀剂通过在金属表面上首先进行物理吸附,然后转化为化学吸附,占据金属表面的活性点,从而达到抑制腐蚀的作用。在相对封闭的海洋环境中,通常可以采取添加缓蚀剂的方法来抑制金属及合金材料的腐蚀,如在海水循环系统和海底管线中添加缓蚀剂以防腐。缓蚀剂主要包括钼酸盐、锌盐、铝系金属盐、葡萄糖酸盐、咪唑啉及其衍生物、胺类、醛类及季铵盐等。

2.3 环境控制

装备面临的环境包括自然环境和服役(诱发)环境两类。环境控制是通过调节装备所处的局部自然环境,将温度、湿度、腐蚀介质、辐照等自然因素降低至一定水平,从而减轻关键构件的腐蚀损伤。如岛礁环境下的枪械、弹药等武器装备必须存放在恒温恒湿的仓库内,温度不超过 30℃,相对湿度不超过 70%;导弹发射筒内充填惰性气体,形成无腐蚀介质的微区环境;舰载弹药需贮存在具有阻隔和吸湿功能的包装箱内,其内部是低盐雾、低湿、无辐照的微区环境,可满足长久贮存要求。

2.4 维护保养

装备在使用和服役过程中,不可避免要遭受环境效应的损伤,由“轻”到“重”,从“小”到“大”,由影响“结构、尺寸”到影响“功能、性能”,损伤是缓慢发生的过程。因此,定期检查、监测、清洗、涂油、防护涂层/密封剂修补等维护保养方法至关重要,做到“早预防、早发现、早处理”^[54]。同时,视腐蚀损伤程度采取腐蚀产物清除、防护涂层修补、零部件替换等措施减轻腐蚀损伤带来的后续影响,延长装备的使用寿命^[55]。

3 结语

海洋大气环境具有高温、高湿、高盐雾和强辐射等特点,使高强钢、不锈钢和铝合金等装备材料发生严重的点蚀、晶间腐蚀、层状腐蚀、电偶腐蚀、应力腐蚀开裂、腐蚀疲劳等环境损伤行为。腐蚀已经成为

影响舰载武器、船舶、海岸工程、近海工程等服役安全、寿命、可靠性的最重要因素,需加强技术组合,大力研制防腐新材料以及开发腐蚀防护新方法。一是采用系统方法提高装备的环境适应性,方案设计、材料选型、零部件制造、腐蚀防护、系统安装、维护保养等进行详细规定;二是在充分利用现有防腐技术的基础上,加强金属涂/镀层与有机涂层的技术组合,开展组合涂层腐蚀机理研究及腐蚀性能评估,为工程应用奠定基础;三是大力开发研制海洋环境下长期有效、绿色环保的表面处理技术和涂层技术;四是针对铝合金等易腐蚀材料,开展腐蚀结构修复技术研究,延长构件使用寿命。

参考文献:

- [1] 任勇,成光. 海洋环境金属材料腐蚀与防护仿真研究进展[J]. 装备环境工程, 2019, 16(12): 93-98.
REN Yong, CHENG Guang. Research Progress on Corrosion and Protection Simulation of Metal Materials in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(12): 93-98.
- [2] MORALES J, MARTIN K S, DIAZ F, et al. Atmospheric Corrosion in Subtropical Areas: Influences of Time of Wetness and Deficiency of the ISO 9223 Norm[J]. Corrosion Science, 2005, 47(8): 2005-2019.
- [3] MENDOZA A R, CORVO F. Outdoor and Indoor Atmospheric Corrosion Of Non-Ferrous Metals[J]. Corrosion Science, 2000, 42(7): 1123-1147.
- [4] 许凤玲,侯健. 光照对高强度低合金钢大气腐蚀的影响研究[J]. 装备环境工程, 2017, 14(6): 13-16.
XU Feng-Ling, HOU Jian. Study on the Effect of Light on Atmospheric Corrosion of High Strength Low Alloy Steel[J]. Equipment Environmental Engineering, 2017, 14(6): 13-16.
- [5] SONG L Y, CHEN Z Y. The role of UV-illumination on-the NaCl-induced Atmospheric Corrosion of Q235 Carbon Steel[J]. Corrosion Science, 2014, 86: 318-325.
- [6] CHEN R C, HONG C, LI J J, et al. Austenite Grain Growth and Grain Size Distribution in Isothermal Heat-Treatment of 300m Steel[J]. Procedia Engineering, 2017, 207: 663-668.
- [7] LUO J, LI M Q, LIU Y G, et al. The Deformation Behavior in Isothermal Compression of 300M Ultra-high-Strength Steel[J]. Materials Science and Engineering: A, 2012, 534: 314-322.
- [8] 刘雨薇,赵洪涛,王振尧. 碳钢和耐候钢在南沙海洋大气环境中的初期腐蚀行为[J]. 金属学报, 2020, 56(9): 1247-1254.
LIU Yu-wei, ZHAO Hong-tao, WANG Zhen-yao. Initial Corrosion Behavior of Carbon Steel and Weathering Steel in Nansha Marine Atmosphere[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2020, 56(9): 1247-1254.

- [9] CHAN C W, LEE S, SMITH G, et al. Enhancement of Wear and Corrosion Resistance of Beta Titanium Alloy by Laser Gas Alloying with Nitrogen[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 367: 80-90.
- [10] ÇOMAKLI O, YAZICI M, YETIM T, et al. Effect of Ti Amount on Wear and Corrosion Properties of Ti-Doped Al₂O₃ Nanocomposite Ceramic Coated CP Titanium Implant Material[J]. *Ceramics International*, 2018, 44(7): 7421-7428.
- [11] WANG Y, ZHANG D, LU Z. Hydrophobic Mg-Al Layered Double Hydroxide Film on Aluminum: Fabrication and Microbiologically Influenced Corrosion Resistance Properties[J]. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2015, 474: 44-51.
- [12] YASAKAU K A, KUZNETSOVA A, KALLIP S, et al. A Novel Bilayer System Comprising LDH Conversion Layer and Sol-Gel Coating for Active Corrosion Protection of AA2024[J]. *Corrosion Science*, 2018, 143: 299-313.
- [13] 宋诗哲, 唐子龙. 工业纯铝在 3.5%NaCl 溶液中的电化学阻抗谱分析[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 1996(2): 127-132.
SONG Shi-zhe, TANG Zi-long. Electrochemical Impedance Spectroscopy Analysis of Industrial Pure Aluminum in 3.5% NaCl Solution[J]. *Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection*, 1996(2): 127-132.
- [14] 石强, 张旭强, 孔祥顺, 等. 点蚀对镀锌高强钢点焊熔核形成的影响[J]. *电焊机*, 2017, 47(2): 84-87.
SHI Qiang, ZHANG Xu-qiang, KONG Xiang-shun, et al. Effect of Pitting Corrosion on Nugget Formation in Spot Welding of Galvanized High Strength Steel[J]. *Electric Welding Machine*, 2017, 47(2): 84-87.
- [15] 郝文魁. 海洋工程用 E690 高强钢薄液环境应力腐蚀行为及机理[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
HAO Wen-kui. Environmental Stress Corrosion Behavior and Mechanism of E690 High Strength Steel for Offshore Engineering[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2015.
- [16] 颜晨曦, 于洋, 张天翼, 等. 含氯环境下温度对 2205 双相不锈钢点蚀行为的影响[J]. *材料热处理学报*, 2020, 41(5): 110-117.
YAN Chen-xi, YU Yang, ZHANG Tian-yi, et al. Influence of Temperature on Pitting Corrosion Behavior of 2205 Duplex Stainless Steel in Chlorine Environment[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment | T Mater Heat Treat*, 2020, 41(5): 110-117.
- [17] VERA R, DELGADO D, ROSALES B M. Effect of Atmospheric Pollutants on the Corrosion of High Power Electrical Conductors: Part 1. Aluminium and AA6201 Alloy[J]. *Corrosion Science*, 2006, 48(10): 2882-2900.
- [18] CAO M, LIU L, YU Z, et al. Electrochemical Corrosion Behavior of 2A02 Al Alloy under an Accelerated Simulation Marine Atmospheric Environment[J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2019, 35(4): 651-659.
- [19] 韩凤军, 于宗洋, 许强, 等. 2Cr13Mn9Ni4 冷作硬化钢板晶间腐蚀[J]. *金属世界*, 2020(1): 37-40.
HAN Feng-jun, YU Zong-yang, XU Qiang, et al. Intergranular Corrosion of 2Cr13Mn9Ni4 Cold Work Hardening Steel Sheet[J]. *Metal World*, 2020(1): 37-40.
- [20] BOCCHI S, CABRINI M, DURSO G, et al. Stress Enhanced Intergranular Corrosion of Friction Stir Welded AA2024-T3[J]. *Engineering Failure Analysis*, 2020, 111: 104483.
- [21] ZHANG X, ZHOU X, HASHIMOTO T, et al. Localized Corrosion in AA2024-T351 Aluminium Alloy: Transition From Intergranular Corrosion to Crystallographic Pitting[J]. *Materials Characterization*, 2017, 130: 230-236.
- [22] ROBINSON M J, JACKSON N C. The Influence of Grain Structure and Intergranular Corrosion Rate on Exfoliation and Stress Corrosion Cracking of High Strength Al-Cu-Mg Alloys[J]. *Corrosion Science*, 1999, 41(5): 1013-1028.
- [23] ROBINSON M J. The Role of Wedging Stresses in The Exfoliation Corrosion of High Strength Aluminium Alloys[J]. *Corrosion Science*, 1983, 23(8): 887-899.
- [24] ROBINSON M J. Mathematical Modelling of Exfoliation Corrosion in High Strength Aluminium Alloys[J]. *Corrosion Science*, 1982, 22(8): 775-790.
- [25] WU W, HAO W, LIU Z, et al. Comparative Study of the Stress Corrosion Behavior of A Multiuse Bainite Steel in the Simulated Tropical Marine Atmosphere and Seawater Environments[J]. *Construction and Building Materials*, 2020, 239: 117903.
- [26] 侯延辉, 刘林利, 李光强, 等. 钢中复合夹杂物/钢基体的电势差与电偶腐蚀的关系[C]// 第十二届中国钢铁年会论文集. 北京, 2019.
HOU Yan-hui, LIU Lin-li, LI Guang-qiang, et al. The Relationship between the Potential Difference of Composite Inclusions in Steel/Steel Matrix and Galvanic Corrosion[C]// Proceedings of the 12th China Iron and Steel Annual Conference. Beijing, 2019.
- [27] 雷冰, 胡胜楠, 卢云飞, 等. 海水环境中 B10 合金与高强钢的电偶腐蚀行为与电绝缘防护技术[J]. *腐蚀与防护*, 2019, 40(7): 497-518.
LEI Bing, HU Sheng-nan, LU Yun-fei, et al. Galvanic Corrosion Behavior and Electrical Insulation Protection Technology of B10 Alloy and High-Strength Steel in Seawater Environment[J]. *Corrosion & Protection*, 2019, 40(7): 497-518.
- [28] 胡裕龙, 卜世超, 王智峤. 微弧氧化处理对钛-钢电偶腐蚀行为的影响[J]. *表面技术*, 2019, 48(7): 122-134.
HU Yu-long, BU Shi-chao, WANG Zhi-qiao. Influence of Micro-Arc Oxidation Treatment on Galvanic Corrosion Behavior of Titanium-Steel[J]. *Surface Technology*, 2019, 48(7): 122-134.
- [29] SHI L, SONG Y, ZHAO P, et al. Variations of Galvanic

- Currents and Corrosion Forms of 2024/Q235/304 Tri-Metallic Couple with Multivariable Cathode/Anode Area Ratios: Experiments and Modelling[J]. *Electrochimica Acta*, 2020, 359: 136947.
- [30] YANG Y J, LEE J H, PARK C, et al. Investigation on Electrochemical Cathodic Protection for Cavitation-Erosion Reduction of Anodized Al Alloy[J]. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 2020, 20(9): 188-196.
- [31] 黄家坪. 牺牲阳极的阴极保护在港工钢管桩防腐中的应用[J]. *中国水运*, 2020, 20(6): 152-155.
HUANG Jia-ping. Application of Cathodic Protection of Sacrificial Anode in Anti-Corrosion of Steel Pipe Piles of Port Engineering[J]. *China Water Transport*, 2020, 20(6): 152-155.
- [32] 李文浩, 左锐, 莫春萍, 等. 电化学保护技术在锌冶炼废电解液加热器上的应用研究[J]. *中国有色金属学报*, 2020, 49(3): 79-93.
LI Wen-hao, ZUO Rui, MO Chun-ping, et al. Application of Electrochemical Protection Technology in Zinc Smelting Waste Electrolyte Heater[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2020, 49(3): 79-93.
- [33] ANDRIANOV V A, BEDELBEKOVA K A, OZERNOY A N, et al. Mössbauer Study of the Implantation of Fe-57 Ions into Metallic Ta and Mo and Stainless Steel[J]. *Journal of Surface Investigation: X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*, 2020, 14(2): 88-96.
- [34] KHALIL A M, LOGINOVA I S, SOLONIN A N, et al. Controlling Liquation Behavior and Solidification Cracks by Continuous Laser Melting Process of AA-7075 Aluminum Alloy[J]. *Materials Letters*, 2020, 277: 128364.
- [35] DE LARA L R, JAGDHEESH R, OCANA J L. Corrosion Resistance of Laser Patterned Ultrahydrophobic Aluminium Surface[J]. *Materials Letters*, 2016, 184: 100-103.
- [36] TRDAN U, HOCEVAR M, GREGORCIC P. Transition from Superhydrophilic to Superhydrophobic State of Laser Textured Stainless Steel Surface and Its Effect on Corrosion Resistance[J]. *Corrosion Science*, 2017, 123: 21-26.
- [37] WANG H, ZHUANG J, QI H, et al. Laser-Chemical Treated Superhydrophobic Surface as a Barrier to Marine Atmospheric Corrosion[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 401: 126255.
- [38] NARAYANAN T S N S, PARK I S, LEE M H. Strategies to Improve the Corrosion Resistance of Microarc Oxidation (MAO) Coated Magnesium Alloys for Degradable Implants: Prospects and Challenges[J]. *Progress in Materials Science*, 2014, 60(3): 1-71.
- [39] CUI L Y, ZENG R C, GUAN S K, et al. Degradation Mechanism of Micro-Arc Oxidation Coatings on Biodegradable Mg-Ca Alloys: the Influence of Porosity[J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2017, 695: 2464-2476.
- [40] ZHAO J M, XIE X, ZHANG C. Effect of the Graphene Oxide Additive on the Corrosion Resistance of the Plasma Electrolytic Oxidation Coating of the AZ31 Magnesium Alloy[J]. *Corrosion Science*, 2017, 114: 146-155.
- [41] LV G H, CHEN H, GU W C, et al. Effects of Current Frequency on the Structural Characteristics and Corrosion Property of Ceramic Coatings Formed on Magnesium Alloy by PEO Technology[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 208(1-3): 9-13.
- [42] HUNG TOAN D L. Effects of Copper Additive on Micro-Arc Oxidation Coating of LZ91 Magnesium-Lithium Alloy[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2016, 307: 781-789.
- [43] ZHANG G, WU L, TANG A T, et al. A Novel Approach to Fabricate Protective Layered Double Hydroxide Films on the Surface of Anodized Mg-Al Alloy[J]. *Advanced Materials Interfaces*, 2017, 4(12): 1700163.
- [44] 黄晓梅, 彭琴. 电镀锌-磷合金镀层[J]. *电镀与环保*, 2020, 40(4): 8-11.
HUANG Xiao-mei, PENG Qin. Electroplated Zinc-Phosphorus Alloy Coating[J]. *Electroplating & Pollution Control*, 2020, 40(4): 8-11.
- [45] 黄晓梅, 张蕾. Zn-Ni 合金/Ni-P 合金双层镀层性能的研究[J]. *电镀与环保*, 2020, 40(4): 4-7.
HUANG Xiao-mei, ZHANG Lei. Study on Properties of Zn-Ni Alloy/Ni-P Alloy Double Layer Coating[J]. *Electroplating & Pollution Control*, 2020, 40(4): 4-7.
- [46] 潘建乔, 吴迪, 张晓忠, 等. 热浸锌钢板钝化工艺及自修复性能的研究[J]. *电镀与环保*, 2020, 40(4): 47-51.
PAN Jian-qiao, WU Di, ZHANG Xiao-zhong, et al. Research on Passivation Process and Self-Repairing Performance of Hot-Dip Galvanized Steel Sheet[J]. *Electroplating & Pollution Control*, 2020, 40(4): 47-51.
- [47] ZHAO Q, ZHAO J, CHENG X, et al. Galvanic Corrosion of the Anodized 7050 Aluminum Alloy Coupled with the Low Hydrogen Embrittlement CdTi Plated 300M Steel in an Industrial-Marine Atmospheric Environment[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2020, 382: 125171.
- [48] BRANAGAN D J, SWANK W D, MEACHAM B E. Maximizing the Glass Fraction in Iron-Based High Velocity Oxy-Fuel Coatings[J]. *Metallurgical&Materials Transactions A*, 2009, 40: 1306-1313.
- [49] LIMA R S, MARPLE B R. Thermal Spray Coatings Engineered from Nanostructured Ceramic Agglomerated Powders for Structural, Thermal Barrier and Biomedical Applications: Review[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2007, 16(1): 40-63.
- [50] MARCHAND C, VARDELLE A, MARIAUX G, et al. Modelling of the Plasma Spray Process with Liquid Feedstock Injection[J]. *Surface Coating and Technology*, 2011, 202: 4458-4464.
- [51] SCHEIN J. Improving Power Injection in Plasma Spraying by Optical Diagnostics of the Plasma and Particle Characterization[J]. *Journal of Thermal Spray Technology*,

- 2011, 20(1-2): 3-11.
- [52] ZHANG F, ZHANG Y, ZHANG G, et al. Exceptional Synergistic Enhancement of the Photocatalytic Activity of SnS₂ by Coupling with Polyaniline and N-Doped Reduced Graphene Oxide[J]. *Applied Catalysis B Environmental*, 2018: S092633731830420X.
- [53] ZHU A P, WANG H S, SUN S S, et al. The Synthesis and Antistatic, Anticorrosive Properties of Polyaniline Composite Coating[J]. *Progress in Organic Coatings*, 2018, 122: 270-279.
- [54] 张皓玥, 张菲玥, 钟勇, 等. 装备的环境腐蚀效应抑制技术[J]. *兵器装备工程学报*, 2017, 38(3): 180-187.
- ZHANG Hao-yue, ZHANG Fei-yue, ZHONG Yong, et al. Equipment's Environmental Corrosion Effect Suppression Technology[J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2017, 38(3): 180-187.
- [55] 赵全成, 罗来正, 黎小锋, 等. 两种典型大气环境下 7A85 铝合金的腐蚀行为研究[J]. *装备环境工程*, 2020, 17(07): 70-75.
- ZHAO Quan-cheng, LUO Lai-zheng, LI Xiao-feng, et al. Research on Corrosion Behavior of 7A85 Aluminum Alloy in Two Typical Atmospheric Environments[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2017, 38(3): 180-187.