

异种结构材料电偶腐蚀及防护技术的 研究现状及发展方向

张天宇, 何宇廷, 张腾, 张胜, 马斌麟

(空军工程大学, 西安 710038)

摘要: 从包括阴阳极、电位、偶对间距在内的材料自身因素, 以及包括含氧量、温度、流动状态在内的环境因素两个方面, 综述了异种结构材料电偶腐蚀的主要影响因素。探讨了目前国内外针对异种结构材料电偶腐蚀预防措施的研究现状, 对比了国内外针对设计制造阶段和服役使用阶段的不同电偶腐蚀预防措施, 最后指出我国在电偶腐蚀预防方面, 规范、标准和措施匮乏以及存在的其他问题, 并为接下来电偶腐蚀及防护技术的发展方向提出了建议, 指出需要进一步研究实际结构因素对异种材料电偶腐蚀的影响机理和规律, 并提出典型耦接件的腐蚀防护技术途径。

关键词: 电偶腐蚀; 异种结构; 预防措施; 电位差; 电偶电流

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.05.006

中图分类号: TG172

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2020)05-0040-07

Research Status and Development Direction of Galvanic Corrosion and Protection Technology for Heterogeneous Structural Materials

ZHANG Tian-yu, HE Yu-ting, ZHANG Teng, ZHANG Sheng, MA Bin-lin

(Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

ABSTRACT: In this paper, main factors affecting galvanic corrosion of heterogeneous structure materials were summarized from two aspects: the material's own factors, including anode and cathode, potential, pair spacing, and the environmental factors, including oxygen content, temperature and flow state. The research status of preventive measures against galvanic corrosion of heterogeneous structural materials at home and abroad was discussed. The preventive measures against galvanic couple corrosion at home and abroad were compared in stages of design, manufacture and service. Finally, it pointed out the lack of specifications, standards, and measures as well as other issues on galvanic corrosion prevention. It pointed out that it was needed to further study the influencing mechanism and rule of actual structure on galvanic corrosion of dissimilar materials, and put forward corrosion protection technology way of typical coupling joint.

KEY WORDS: galvanic corrosion; heterogeneous structure; preventive measures; potential difference; galvanic current

收稿日期: 2020-03-16; 修订日期: 2020-04-17

Received: 2020-03-16; Revised: 2020-04-17

基金项目: 装备预研领域基金 (61409220202); 陕西省自然科学基金基础研究计划 (2018JQ5012); 中国博士后科学基金 (2017M623418)

Fund: Supported by the National Defense Pre-Research Foundation of China (61409220202), the Basic Research Project of Natural Science in Shaanxi Province (2018JQ5012) and the China Postdoctoral Science Foundation (2017M623418)

作者简介: 张天宇 (1993—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为结构完整性。

Biography: ZHANG Tian-yu (1993—), Male, Doctor candidate, Research focus: structural integrity.

电偶腐蚀也称异种金属腐蚀或接触腐蚀,是指两种不同电化学性质的材料在与周围环境介质构成回路时,电位较高的材料腐蚀速率减缓,而电位较低材料腐蚀加速的现象^[1-4]。造成电偶腐蚀的原因是两种材料间存在电位差,形成了宏观腐蚀原电池^[5-6]。

产生电偶腐蚀应同时具备三个条件:同时存在两种不同腐蚀电位的材料;两种材料直接接触,形成电子导电支路;电解质连续覆盖两种材料,形成离子导电支路。同时,这也是进行电偶腐蚀预防,阻断电偶腐蚀发生的根本依据。

一般认为,当电位差大于 0.25 V 时,会产生较严重的电偶腐蚀。现代飞机的机体结构大量采用铝合金、钛合金、复合材料等连接制成,在标准海水中,航空铝合金、钛合金和复合材料的腐蚀电位一般分别在 -0.6~-0.7 V、+0.2~+0.3 V 和 +0.3~+0.4 V 左右^[7-9]。可以看出,在飞机结构中,当铝合金、钛合金、碳纤维复合材料分别相互连接时,铝合金极易成为阳极而被腐蚀;而钛合金与碳纤维复合材料电位相近,很少发生电偶腐蚀问题。

影响电偶腐蚀的因素主要有^[10-15]:阴极/阳极材料的面积比、腐蚀介质(包括离子组成、浓度、温度、电导率、pH、流动状态等)、接触或连接方式、材料表面氧化膜等。它们表现在实际工程问题上就可能有更多的形式,如服役大气温湿度、结构局部积水、表面液膜的干湿交替时间等均对电偶腐蚀造成影响,但在本质上均属于影响了腐蚀介质的浓度。

随着新材料的发展和应用,钛合金和复合材料在飞机结构上的用量显著增多^[16-20]。我国军用飞机的材料用量与国外对应机型类似,钛合金用量达到 15%~20%,复合材料用量达到 20%~30%,与高强度铝合金共同构成机体结构材料的主体,钛合金-铝合金、复合材料-铝合金连接部位明显增加,使得主战飞机结构发生异种材料电偶腐蚀的情况明显增多。在实际结构中,电偶腐蚀通常与缝隙腐蚀伴随发生,在其造成的结构初始损伤下,极易诱导和加速点蚀、剥蚀等腐蚀行为,进一步造成结构的大面积腐蚀,威胁飞行安全。

1 电偶腐蚀的影响因素

1.1 材料自身因素

影响电偶腐蚀的首要因素为偶接材料自身。材料的自身材质、偶对级的电位差以及存在状态、不同合金元素的组成与所占比例、表面粗糙度以及表现出来的物理化学性能等,也是影响电偶腐蚀的重要因素^[3]。有研究指出^[21],通常在 3.5%的 NaCl 溶液中,不同的铝合金与钛合金紧固件偶接时,LY12 铝合金较 LC4 铝合金的电偶腐蚀敏感性低,而高强度钢 1Cr17Ni2 材料的结构件与 TC2 钛合金偶接时,表现出较强的

电偶腐蚀敏感性。电偶腐蚀的敏感性可以通过提高表面粗糙度来降低^[22]。缝隙腐蚀速率会随着合金元素中 Fe 元素含量的增加而增加^[23],这是因为钝化电位逐渐变为负值,缩短了缝隙腐蚀的诱导期。

1.1.1 电位

在腐蚀电化学中,同一腐蚀介质中各种金属的腐蚀电位从低到高排列以形成序列,即金属腐蚀电流序列。在电偶腐蚀中,电位差越大,腐蚀的趋势越大。两种金属之间的自腐蚀电势差越大,具有低电势的金属就越容易充当阳极,而具有高电势的金属越容易充当阴极^[1]。当腐蚀电位差大于 0.25 V 时,会发生更严重的电化学腐蚀,阳极金属的腐蚀损失增加,并且阴极金属的腐蚀损失减少。研究人员对金属的电阶进行了许多测量,并获得了某些特定水域的数十种金属的电阶^[24-25]。通常仅列出各种金属稳定电位的相对关系,很少列出特定金属的稳定电位值。主要原因是腐蚀性介质的性质发生很大变化,测得的电位值波动范围大,数据再现性差。

1.1.2 阴阳极

在热力学意义上,不仅由驱动力来决定腐蚀电流的大小,而且还需要考虑诸如极化行为等动态因素^[25]。钛具有很强且稳定的钝化作用,在非酸性环境中,与铂结合使用时,腐蚀是通过减少负氢离子来控制的,此时钛以腐蚀态被活化,但电偶腐蚀速率却低于自腐蚀速率^[26]。阴极与阳极面积之比对接触腐蚀有很大影响,接触腐蚀电池的阳极面积越小,则阴极面积越大,这会增加阳极金属腐蚀。这是因为当发生接触腐蚀时,阳极电流始终与阴极电流相同。阳极面积越小,阳极的电流密度越大,即阳极金属的腐蚀速率越高。国外学者从理论角度就接触腐蚀中面积比变化对接触腐蚀的影响进行了更详细的分析,并讨论了在含氧量的扩散速率控制下接触腐蚀面积比的变化^[27]。当阴阳极面积比为 500 时,阳极质量损失率的变化率往往更容易发生。随着阳极面积比的增加,阳极腐蚀速率将受到限制^[28]。

1.1.3 偶对间距

电偶对之间的距离对电偶腐蚀行为有重要影响。根据腐蚀电化学原理,增加电偶对之间的距离,会增加带电阴离子的扩散距离,这将干扰电解质中的质量转移过程。考虑到阴极和阳极的面积比,偶对之间的距离越大,电流密度越小。有研究证实,偶对间距的影响程度与介电阻有关^[29]。随着腐蚀电流密度和阳极与阴极之间距离的增加,电偶腐蚀的程度呈指数分布^[30-31]。

1.2 环境因素

1.2.1 温度

随着动力学温度的升高,由于高温下金属的接触

腐蚀,热活化过程的动力学加速,导致更快的电化学反应,增大了电流密度,形成更大的破坏力^[32-34]。文献[35-37]指出,碳钢和铜在氯化钠溶液中形成偶对时,温度对电流的影响非常明显。温度不仅影响电偶腐蚀速率,而且还会改变金属表面膜或腐蚀产物的结构,导致阴极和阳极反向,但这可以防止锌在高于70℃的温度下受到热水侵蚀。目前,温度研究的范围通常集中在中温区。

1.2.2 含氧量

由于空气的摄入量在腐蚀过程中持续增加,从而增加了氧气含量。在静态的深海或密闭系统中,氧气含量会相应降低。氧气是海水腐蚀的主要催化剂,极大地影响了材料的腐蚀程度。有学者模拟了氧气含量的状态,并用氧气和氩气对其进行了研究^[13,38]。钛铝/镁合金电偶的腐蚀行为表明,在氩气流动条件下,电偶腐蚀速率明显降低^[36,39-40]。

1.2.3 流动状态

海水流动引起的搅拌导致浓差极化的减少或消除,从而加速接触腐蚀。海水流动也会改变材料的表面状态,从而改变腐蚀速率和电偶极性。许多研究部门正在对金属腐蚀进行研究,包括高速海水中的电偶腐蚀^[41-43]。结果表明,电偶腐蚀随海水的流动而显著增加,速度越高,电偶腐蚀的作用越大。有研究表明,电偶腐蚀对流量的变化非常敏感,并且电偶敏感系数基本上与海水的速度成正比^[44-45]。

2 电偶腐蚀预防措施研究

揭示电偶腐蚀机理是提出电偶腐蚀预防措施的依据。国内外针对电偶腐蚀机理开展了大量研究^[7,46-51],以美国为首的发达国家经常在世界各地举办联合军演,特别是美军航母已带着飞机在海上训练了几十年,飞机结构电偶腐蚀的问题已充分暴露,针对电偶腐蚀机理的研究有深厚的基础。从国外发表的有关电偶腐蚀研究论文来看^[13-14,30,50,52-54],近年来研究的重点在实际结构电偶腐蚀原因剖析,表面镀膜、腐蚀产物、载荷作用等结构因素对电偶腐蚀的影响机理,以及碳纤维金属层板等新材料,搅拌摩擦盲铆(FSBR)、搅拌摩擦焊等新工艺的电偶腐蚀机理等方面。国外针对电偶腐蚀的研究内容往往来源于实际服役中暴露出的问题,与工程应用结合紧密。

相比较而言,我国军用飞机前期在恶劣腐蚀环境下的服役较少,结构电偶腐蚀问题也暴露得较少,相关研究的目的是为结构选材和工艺设计提供依据。因此,我国的相关研究主要还是面向不同材料间的电偶腐蚀机理及表面处理对电偶腐蚀的影响等^[55-61]。例如,针对铝合金与钛合金、铝合金与复合材料的电偶腐蚀行为和机理开展了大量研究,探索了表面处理工

艺和环境因素对电偶腐蚀的影响。这些研究均奠定了良好的基础,为结构设计提供了重要依据。然而,飞机上的实际结构材料往往不是直接接触的,材料表面一般有复杂的防护体系,实际结构尺寸、装配应力、缝隙等均对电偶腐蚀产生影响。面向当前军用飞机的服役需求,开展实际结构的电偶腐蚀机理研究将是下一步的发展趋势。

制定电偶腐蚀的预防措施是开展电偶腐蚀规律和机理研究的最终目的,分为设计制造和服役使用两个阶段的内容^[62]。

总体来说,国内外在设计制造阶段的电偶腐蚀防护措施基本相同^[11-12],包括选用电偶序相近的材料^[13,63]、在材料接触面采取绝缘措施^[64-65]、采用适当的涂层/密封料/缓蚀剂或表面处理^[64-65]、避免大阴极和小阳极的组合^[66-67]、设计排水措施等。在无法避免异种材料接触时,通常会钛合金/铝合金的表面做阳极氧化或微弧氧化处理^[63,68-70],对与铝合金接触的碳纤维复合材料进行共固化玻璃布处理^[60],以阻断电子导电通路;对钛合金表面进行离子镀铝或施涂铝涂料^[71-73],以减小电位差等。

在服役使用阶段,由于国外军用飞机电偶腐蚀问题暴露较多,国外在电偶腐蚀预防方面的标准、指南、措施和配套设备明显比我国完善。通过对国外相关技术资料的调研,外军部队/工厂使用的技术标准/指南资料中均有具体的飞机结构电偶腐蚀预防措施。国外军用飞机在维修过程中采用的一些电偶腐蚀预防措施主要为外场定期冲洗、控制机库温度、关键部位密封处理以及修理中涂胶等。

3 结语

与国外相比,我国在电偶腐蚀预防方面的规范、标准和措施匮乏,不仅缺少必要的预防手段和技术资料,还缺少与之配套的工具设备。国内外各行业的腐蚀控制经验表明,腐蚀问题重在预防,必须在装备运行期间采取必要手段及时阻止、减缓和修复结构腐蚀。我国现阶段的规范、标准不足,将导致在严苛环境下开展飞机结构的腐蚀预防工作时,没有科学、系统、定量的手段和措施,极易发生飞机结构的大规模腐蚀问题,给部队训练和国家财产造成巨大损失。

综上所述,针对目前面临的电偶腐蚀问题,需要进一步研究实际结构因素对异种材料电偶腐蚀的影响机理和规律,提出典型耦接件的腐蚀防护技术途径及配套措施,为改进结构设计和编制电偶腐蚀控制手册奠定理论基础,为我国军用飞机的未来提供技术支撑,这也是进一步维护军用飞机作战完整性的重要环节。

参考文献:

- [1] 曹楚南. 腐蚀电化学原理[M]. 北京: 化学工业出版社,

2004.
CAO Chu-nan. Principle of corrosion Electrochemistry[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [2] 刘华剑, 邓春龙, 王佳, 等. 海洋环境中电偶腐蚀研究进展[J]. 装备环境工程, 2011, 8(2): 58-61.
LIU Hua-jian, DENG Chun-long, WANG Jia, et al. Research Progress of Galvanic Corrosion in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2011, 8(2): 58-61.
- [3] 陈兴伟, 吴建华, 王佳, 等. 电偶腐蚀影响因素研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2010, 22(4): 363-366.
CHEN Xing-wei, WU Jian-hua, WANG Jia, et al. Progress in Research on Factors Influencing Galvanic Corrosion Behavior[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2010, 22(4): 363-366.
- [4] 王春丽, 吴建华, 李庆芬. 海洋环境电偶腐蚀研究现状与展望[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(5): 416-420.
WANG Chun-li, WU Jian-hua, LI Qing-fen. Recent Advances and Prospect of Galvanic Corrosion in Marine Environment[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 30(5): 416-420.
- [5] 陈跃良, 王安东, 卞贵学, 等. CF8611/AC531 复合材料性能及与 7B04 铝合金电偶腐蚀的电化学研究[J]. 材料工程, 2019, 47(1): 97-105.
CHEN Yue-liang, WANG An-dong, BIAN Gui-xue, et al. Electrochemical study on performance of CF8611/AC531 composite and galvanic corrosion coupled with 7B04 aluminum alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 2019, 47(1): 97-105.
- [6] 殷利涛. 微孔电沉积与微区电偶腐蚀过程的有限元数值仿真研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2019.
YIN Li-tao. FEM Modeling and Simulation of the Electrodeposition in Micro Via and Micro-galvanic Corrosion[D]. Beijing: University Of Science & Technology Beijing, 2019.
- [7] 卞贵学, 陈跃良, 张勇, 等. 基于电偶腐蚀仿真的铝/钛合金在不同浓度酸性 NaCl 溶液中与水介质中的当量折算系数[J]. 材料导报, 2019, 33(16): 2746-2752.
BIAN Gui-xue, CHEN Yue-liang, ZHANG Yong, et al. Equivalent Conversion Coefficient of Aluminum/Titanium Alloy Between Acidic NaCl Solution with Different Concentration and Water Based on Galvanic Corrosion Simulation[J]. Materials Review, 2019, 33(16): 2746-2752.
- [8] 史美慧. AA2024 铝合金的电偶腐蚀行为及缓蚀剂影响研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
SHI Mei-hui. Study on Galvanic Corrosion Behavior of AA2024 Aluminum Alloy and Effect of Corrosion Inhibitor[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.
- [9] 魏景超. 复合材料结构新型紧固件连接强度与失效机理[D]. 西安: 西北工业大学, 2014.
WEI Jing-chao. Strength and Failure Mechanisms of Bolted Composite Joints with New Fastener[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2014.
- [10] 陈子光. 腐蚀损伤模型研究进展[J]. 固体力学学报, 2019, 40(2): 99-116.
CHEN Zi-guang. Advances in Corrosion Damage Modeling[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2019, 40(2): 99-116.
- [11] YIN L, LI W, WANG Y, et al. Numerical Simulation of Micro-galvanic Corrosion of Al Alloys: Effect of density of $\text{Al}(\text{OH})_3$ Precipitate[J]. Electrochimica Acta, 2019, 164(14): 1035-1043.
- [12] LIU Y, LIU X, ZHANG Z, et al. Comparative, Real-time in Situ Monitoring of Galvanic Corrosion in Mg-Mg₂Ca and Mg-MgZn₂ Couples in Hank's Solution[J]. Corrosion Science, 2019, 161: 108185.
- [13] SHI L, YANG X, SONG Y, et al. Effect of Corrosive Media on Galvanic Corrosion of Complicated Tri-metallic Couples of 2024 Al Alloy/Q235 Mild Steel/304 Stainless Steel[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2019, 35(9): 1886-1893.
- [14] SNIHIROVA D, HÖCHE D, LAMAKA S, et al. Galvanic Corrosion of Ti6Al4V-AA2024 Joints in Aircraft Environment: Modelling and Experimental Validation[J]. Corrosion Science, 2019, 157: 70-78.
- [15] WU X, SUN J, WANG J, et al. Investigation on Galvanic Corrosion Behaviors of CFRPs and Aluminum Alloys Systems for Automotive Applications[J]. Materials and Corrosion, 2019, 70(6): 1-8.
- [16] 曲宜超. 盐雾环境下 2A12 铝合金与 Ti-15-3 钛合金的接触腐蚀研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
QV Yi-chao. Study on Contact Corrosion of 2A12 Aluminum Alloy and Ti-15-3 Titanium Alloy in Salt Spray Environment[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [17] 陈跃良, 黄海亮, 卞贵学, 等. 多电极偶接对金属大气腐蚀影响的试验与仿真[J]. 航空学报, 2018, 39(6): 210-220.
CHEN Yue-liang, HUANG Hai-liang, BIAN Gui-xue, et al. Test and Simulation of Effects of Multi-electrode Coupling on Atmospheric Corrosion of Metals[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2018, 39(6): 210-220.
- [18] 杨竹芳, 耿明睿, 何光宇, 等. 钛合金表面 CrAlTiN 单层涂层冲蚀损伤机理研究[J]. 表面技术, 2019, 48(1): 256-261.
YANG Zhu-fang, GENG Ming-rui, HE Guang-yu, et al. Erosion Damage Mechanism of the Single CrAlTiNi Coating on the Titanium Alloy Surface[J]. Surface Technology, 2019, 48(1): 256-261.
- [19] 黄河源, 赵美英, 万小朋, 等. 一种复合材料螺栓连接结构非线性刚度模型及应用[J]. 西北工业大学学报, 2018, 36(1): 66-73.
HUANG He-yuan, ZHAO Mei-ying, WAN Xiao-peng, et al. A Composite Bolted Joints Non-linear Stiffness Model and Its Application[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University, 2018, 36(1): 66-73.

- [20] 陈跃良, 王安东, 卞贵学, 等. CF8611/AC531 复合材料的电化学特性及其与 7B04-T74 铝合金的电偶腐蚀仿真[J]. 材料导报, 2018, 32(16): 2889-2896.
CHEN Yue-liang, WANG An-dong, BIAN Gui-xue, et al. Electrochemical Characteristic of CF8611/AC531 Composite and the Galvanic Corrosion Simulation when Coupled with 7B04-T74 Aluminum Alloy[J]. Materials Review, 2018, 32(16): 2889-2896.
- [21] 刘建华, 吴昊, 李松梅, 等. 高强合金与钛合金的电偶腐蚀行为[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(2): 124-127.
LIU Jian-hua, WU Hao, LI Song-mei, et al. Galvanic Corrosion Behavior between Titanium Alloy and High Strength Alloys[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(2): 124-127.
- [22] 刘建华, 吴昊, 李松梅, 等. 表面处理对 TC2 钛合金电偶腐蚀的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2003, 15(1): 13-17.
LIU Jian-hua, WU Hao, LI Song-mei, et al. Effect of Surface Treatments on Galvanic Corrosion Behavior of Titanium Alloy TC2 Coupled with Aluminum Alloys and Steels[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2003, 15(1): 13-17.
- [23] 梁成浩, 金守训. 合金元素铁对钛缝腐蚀性能的影响[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1995, 15(3): 210-216.
LIANG Cheng-hao, JIN Shou-xun. Influence of Iron as Alloying Element on Crevice Corrosion Behavior of Titanium[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 1995, 15(3): 210-216.
- [24] 朱相荣, 黄桂桥. 金属材料在海水中的接触腐蚀研究[J]. 海洋科学, 1994(6): 55-59.
ZHU Xiang-rong, HUANG Gui-qiao. An Analysis of Characteristics of Thermohaline Structures in the South Yellow Sea in Spring[J]. Marine Sciences, 1994(6): 55-59.
- [25] 赵麦群, 雷阿丽. 金属的腐蚀与防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
ZHAO Mai-qun, LEI A-li. Corrosion and Protection of Metals[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2002.
- [26] 刘道新. 材料的腐蚀与防护[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
LIU Dao-xin. Corrosion and Protection of Materials[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2006.
- [27] MANSFELD F. Area Relationships in Galvanic Corrosion[J]. Corrosion, 1971, 27(10): 436-442.
- [28] 杜敏, 郭庆银, 周传静. 碳钢/Ti 和碳钢/Ti/海军黄铜在海水中的电偶腐蚀的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2006, 26(5): 263-266.
DU Min, GUO Qing-kun, ZHOU Chuan-jing. Galvanic Corrosion of Carbon Steel/Titanium and Carbon Steel/Titanium/Naval Brass in Seawater[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2006, 26(5): 263-266.
- [29] ARYA C, VASSIE P R W. Influence of Cathode-to-Anode Area Ratio and Separation Distance on Galvanic Corrosion Currents of Steel in Concrete Containing Chlorides[J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(5): 989-998.
- [30] SONG G, JOHANNESSON B, HAPUGODA S, et al. Galvanic Corrosion of Magnesium Alloy AZ91D in Contact with an Aluminium Alloy, Steel and Zinc[J]. Corrosion Science, 2004, 46(4): 955-977.
- [31] 赵华莱. 油套管及封隔器用钢在封隔液环境下的电偶腐蚀行为研究[D]. 成都: 四川大学, 2007.
ZHAO Hua-lai. Galvanic Corrosion Research of Production Tubing Production Casing and Packer Materials in Packer Fluid[D]. Chengdu: Sichuan University, 2007.
- [32] BLASCO-TAMARIT E, IGUAL-MUÑOZ A, ANTÓN J G. Effect of Temperature on the Galvanic Corrosion of a High Alloyed Austenitic Stainless Steel in Its Welded and Non-welded Condition in LiBr Solutions[J]. Corrosion Science, 2007, 49(12): 4472-4490.
- [33] VARELA F E, KURATA Y, SANADA N. The Influence of Temperature on the Galvanic Corrosion of a Cast Iron-stainless Steel Couple (Prediction by Boundary Element Method)[J]. Corrosion Science, 1997, 39(4): 775-788.
- [34] BLASCO-TAMARIT E, IGUAL-MUÑOZ A, ANTÓN J G, et al. Comparison between Open Circuit and Imposed Potential Measurements to Evaluate the Effect of Temperature on Galvanic Corrosion of the Pair Alloy 31-welded Alloy 31 in LiBr Solutions[J]. Corrosion Science, 2008, 50(12): 3590-3598.
- [35] 李淑英, 陈玮. 碳钢/紫铜在 NaCl 介质中的电偶行为[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2000, 12(5): 300-302.
LI Shu-ying, CHEN Wei. Galvanic Coupling Behavior on Carbon Steel Red Copper in NaCl Media[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2000, 12(5): 300-302.
- [36] 李焱周. 应力和缝隙耦合作用下 N80 碳钢腐蚀行为研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
LI Yan-zhou. Corrosion Behavior of N80 Carbon Steel under the Synergistic Effect of Stress and Crevice[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [37] 杨飞. 碳钢与不锈钢在海洋环境中的电偶腐蚀问题研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
YANG Fei. The Study of the Galvanic Corrosion Behavior between the Carbon Steel and Stainless Steel in Marine Environment[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [38] SHALABY L A. Galvanic Coupling of Ti with Cu and Al Alloys in Chloride Media[J]. Corrosion Science, 1971, 11(10): 767-778.
- [39] 刘东, 艾俊哲, 郭兴蓬. 二氧化碳环境中碳钢电偶腐蚀行为研究[J]. 天然气工业, 2007(10): 114-116.
LIU Dong, AI Jun-zhe, GUO Xing-peng. Galvanic Corro-

- sion Behaviors of Carbon Steel under Carbon Dioxide (CO₂) Environment[J]. Natural Gas Industry, 2007(10): 114-116.
- [40] 艾俊哲. 二氧化碳环境中缓蚀剂抑制电偶腐蚀机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- AI Jun-zhe. Study on Inhibition Mechanism of Galvanic Corrosion Using Inhibitors in CO₂ Containing Environment[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [41] 张英, 戴明安. 海水中舰船钢低电位差电偶的腐蚀[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1993, 13(1): 86-90.
- ZHANG Ying, DAI Ming-an. Galvanic Corrosion of Ship-Building Steel Couple with Low Potential-Difference in Seawater[J]. Journal of Chinese Society of Corrosion and Protection, 1993, 13(1): 86-90.
- [42] 戴明安, 张英, 殷正安, 等. 流动海水中电偶腐蚀动力学规律[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1992, 4(3): 209-211.
- DAI Ming-an, ZHANG Ying, YIN Zheng-an, et al. Kinetic Law of Galvanic Corrosion in Flowing Seawater[J]. Corrosion Science and Protection Technique, 1992, 4(3): 209-211.
- [43] 朱相荣, 戴明安, 陈振进, 等. 高流速海水中金属材料的腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 1992, 12(2): 173-179.
- ZHU Xiang-rong, DAI Ming-an, CHEN Zhen-jin, et al. Corrosion Behaviour of Metallic Materials in High Velocity Seawater[J]. Journal of Chinese Society of Corrosion and Protection, 1992, 12(2): 173-179.
- [44] EL-DAHSHAN M E, SHAMS EL DIN A M, HAGGAG H H. Galvanic Corrosion in the Systems Titanium/316 L Stainless Steel/Al Brass in Arabian Gulf Water[J]. Desalination, 2002, 142(2): 161-169.
- [45] 李君, 董超芳, 李晓刚. pH值对Q235碳钢与304L不锈钢在典型含硫环境中电偶腐蚀行为的影响[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(1): 52-58.
- LI Jun, DONG Chao-fang, LI Xiao-gang. Effect of pH Value on the Galvanic Corrosion Behaviour of Q235-304L Couples in Sulfur Environment[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(1): 52-58.
- [46] 卞贵学, 陈跃良, 张勇, 等. 飞机用铝合金腐蚀行为和腐蚀预测研究现状及问题分析[J]. 装备环境工程, 2018, 15(5): 48-55.
- BIAN Gui-xue, CHEN Yue-liang, ZHANG Yong, et al. Research Status and Problems Analysis on Corrosion Behavior and Corrosion Prediction of Aircraft Aluminum Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(5): 48-55.
- [47] 陈跃良, 卞贵学, 衣林, 等. 腐蚀和疲劳交替作用下飞机铝合金疲劳性能及断裂机理研究[J]. 机械工程学报, 2012, 48(20): 73-79.
- CHEN Yue-liang, BIAN Gui-xue, YI Lin, et al. Research on Fatigue Characteristic and Fracture Mechanics of Aluminum Alloy under Alternate Action of Corrosion and Fatigue[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(20): 73-79.
- [48] 陈跃良, 黄海亮, 张勇, 等. 不同液膜厚度下电偶腐蚀当量折算研究[J]. 材料导报, 2018, 32(9): 1571-1576.
- CHEN Yue-liang, HUANG Hai-liang, ZHANG Yong, et al. Study on Equivalent Conversion of Galvanic Corrosion under Different Liquid Film Thickness[J]. Material Review, 2018, 32(9): 1571-1576.
- [49] 王安东, 陈跃良, 卞贵学. 异种金属结构电偶腐蚀的边界元仿真及验证[J]. 南京航空航天大学学报, 2017, 49(5): 62-68.
- WANG An-dong, CHEN Yue-liang, BIAN Gui-xue. Boundary Element Simulation and Verification of Galvanic Corrosion of Dissimilar Metal Structures[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2017, 49(5): 62-68.
- [50] HÅKANSSON E, HOFFMAN J, PREDECKI P, et al. The Role of Corrosion Product Deposition in Galvanic Corrosion of Aluminum/Carbon Systems[J]. Corrosion Science, 2017, 114: 10-16.
- [51] MANDEL M, KRÜGER L. Determination of Pitting Sensitivity of the Aluminium Alloy EN AW-6060-T6 in a Carbon-fibre Reinforced Plastic/Aluminium Rivet Joint by Finite Element Simulation of the Galvanic Corrosion Process[J]. Corrosion Science, 2013, 73: 172-180.
- [52] ZCAN M, DEHRI İ, ERBİL M. EIS Study of the Effect of High Levels of SO₂ on the Corrosion of Polyester-coated Galvanised Steel at Different Relative Humidities[J]. Progress in Organic Coatings, 2002, 44(4): 279-285.
- [53] WANG B B, WANG Z Y, HAN W, et al. Atmospheric Corrosion of Aluminium Alloy 2024-T3 Exposed to Salt Lake Environment in Western China[J]. Corrosion Science, 2012, 59: 63-70.
- [54] BAEK J S, KIM J G, HUR D H, et al. Anodic Film Properties Determined by EIS and Their Relationship with Caustic Stress Corrosion Cracking of Alloy 600[J]. Corrosion Science, 2003, 45(5): 983-994.
- [55] ZHANG S, ZHANG T, HE Y, et al. Long-term Atmospheric Pre-corrosion Fatigue Properties of Epoxy Primer-coated 7075-T6 Aluminum Alloy Structures[J]. International Journal of Fatigue, 2019, 129: 1-12.
- [56] CAI G, WANG H, JIANG D, et al. Degradation of Fluorinated Polyurethane Coating under UVA and Salt Spray. Part I: Corrosion Resistance and Morphology[J]. Progress in Organic Coatings, 2018, 123: 337-349.
- [57] ZHANG S, ZHANG T, HE Y, et al. Effect of Coastal Atmospheric Corrosion on Fatigue Properties of 2024-T4 Aluminum Alloy Structures[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 802: 511-521.
- [58] 王春雨, 武高辉, 张强, 等. 铝基复合材料的腐蚀与防护研究现状[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2008, 28(1): 59-64.
- WANG Chun-yu, WU Gao-hui, ZHANG Qiang, et al. A Review for Corrosion Resistance and Protection Meth-

- ods for Aluminum Matrix Composites[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2008, 28(1): 59-64.
- [59] 张凯, 范敬辉, 马艳, 等. 碳纤维复合材料与金属的电偶腐蚀及防护[J]. 电工材料, 2008(3): 20-23.
ZHANG Kai, FAN Jing-hui, MA Yan, et al. Electrocouple Corrosion and Protection of Carbon Fiber Composites and Metals[J]. Electrical Material, 2008(3): 20-23.
- [60] 杨专钊. 钛合金紧固件连接结构接触腐蚀行为及其控制技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2004.
YANG Zhuan-zhao. Study on Contact Corrosion Behavior of Titanium Alloy Fasteners and Its Control Technology[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2004.
- [61] 林凯. TC4热浸镀Al-Zn及其在钛/铝合金接触腐蚀防护中的应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
LIN Kai. Hot-Dip Al-Zn Alloys Coating on TC4 Surface to Prevent Titanium/Aluminum alloys Galvanic Corrosion[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2011.
- [62] 何宇廷. 飞机结构寿命控制原理与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017.
HE Yu-ting. Principle and Technology of Aircraft Structure Life Control[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2017.
- [63] BAI L J, KOU G, ZHAO K, et al. Effect of In-situ Micro-arc Oxidation Coating on the Galvanic Corrosion of AZ31Mg Coupled to Aluminum Alloys[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 775: 1077-1085.
- [64] SAKAIRI M, SASAKI R, KANEKO A, et al. Evaluation of Metal Cation Effects on Galvanic Corrosion Behavior of the A5052 Aluminum Alloy in Low Chloride Ion Containing Solutions by Electrochemical Noise Impedance[J]. Electrochimica Acta, 2014, 131: 123-129.
- [65] HAQUE Z, CLARK B A, LILLARD R S. Experimental Considerations for Modeling Galvanic Corrosion in Aluminum and Its Alloys[J]. Corrosion, 2018, 74(8): 16-30.
- [66] PAN Y, WU G, CHENG X, et al. Galvanic Corrosion Behaviour of Carbon Fibre Reinforced Polymer/Magnesium Alloys Coupling[J]. Corrosion Science, 2015, 98: 672-677.
- [67] MEHNER A, HEHL A V, ZOCH H W. Galvanic Corrosion of Aluminum Wrought Alloys in Integral Hybrid Components with Carbon Fiber Reinforced Plastics (CFRP) and Titanium[J]. Materials and Corrosion, 2018, 69(5): 648-660.
- [68] 郅青, 高瑾, 董超芳等. AZ91D镁合金微弧氧化膜的腐蚀行为研究[J]. 金属学报, 2008, 44(8): 986-990.
ZHI Qing, GAO Jin, DONG Chao-fang, et al. Corrosion Behavior of Microarc Oxidation Film on AZ91D Magnesium Alloy[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(8): 986-990.
- [69] 陈龙. 碳纤维复合材料与金属电偶腐蚀规律及防护研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
CHEN Long. The Research of Galvanic Corrosion Rule and Protection Between Carbon Fiber Composite Material and Metal[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [70] 叶作彦. 新型铝合金的腐蚀行为及表面改性的影响[D]. 西安: 西北工业大学, 2015.
YE Zuo-yan. Corrosion Behavior of New Aluminum Alloy and the Effect of Surface Modification[D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2015.
- [71] 牛雪莲, 陈昌平. 海洋工程钢结构腐蚀防护的研究进展[J]. 船舶工程, 2019, 41(4): 100-103.
NIU Xue-lian, CHEN Chang-ping. Research Progress of Corrosion Protection of Steel Structure in Marine Engineering[J]. Ship Engineering, 2019, 41(4): 100-103.
- [72] 张国栋, 王生辉. 金属腐蚀防护有机涂料的研究进展[J]. 化工管理, 2016(17): 29.
ZHANG Guo-dong, WANG Sheng-hui. Research Progress of Metal Corrosion Protection Organic Coatings[J]. Chemical Management, 2016(17): 29.
- [73] 何筱姗, 吕平, 陈凯华, 等. 深海环境中金属腐蚀防护的研究新进展[J]. 上海涂料, 2014, 52(4): 40-43.
HE Xiao-shan, LYU Ping, CHEN Kai-hua, et al. New Development about the Research on Corrosion and Protection of Metal Structures in Deep-sea Environment[J]. Shanghai Coatings, 2014, 52(4): 40-43.