

严酷环境下飞机典型结构异种材料 电偶腐蚀特点与防护对策

史洪微¹, 崔常京², 韦涛¹, 陈群志², 刘福春¹, 韩恩厚¹

(1. 中国科学院金属研究所 中国科学院核用材料与安全评价重点实验室, 沈阳 110016;

2. 北京航空工程技术研究中心, 北京 100076)

摘要: 介绍了电偶腐蚀的原理, 以飞机结构上容易出现的三种电偶腐蚀(碳纤维增强环氧树脂复合材料-铝合金、钛合金-铝合金、铝合金-不锈钢)为例, 对目前关于这三种电偶腐蚀的研究进行了综述, 分析了电偶腐蚀的环境影响因素, 综述了耦合材料的失效特点和形式, 探讨了利用阻隔、涂层和缓蚀剂等手段减缓和防止电偶的防护措施, 指出利用微区测试技术、联合多种研究手段和复合环境因素在研究电偶腐蚀方面的重要性。在多因素条件下, 设计模拟耦合件的试验, 有利于模拟实际工况的特征。

关键词: 电偶腐蚀; 电偶电流; 铝合金; 防护措施

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2020.05.008

中图分类号: TG172 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2020)05-0052-06

Behaviours and Protective Measures of Galvanic Corrosion on Dissimilar Materials of Typical Aircraft Structure in Harsh Environment

SHI Hong-wei¹, CUI Chang-jing², WEI Tao¹, CHEN Qun-zhi², LIU Fu-chun¹, HAN En-hou¹

(1. Key Laboratory of Nuclear Materials and Safety Assessment, Institute of Metal Research, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. Beijing Aeronautical Technology Research Center, Beijing 100076, China)

ABSTRACT: This paper introduced the mechanism of galvanic corrosion. The study on three typical types of galvanic corrosion prone to happen in aircraft structure (carbon fiber reinforced epoxy composite-aluminium alloy, titanium alloy-aluminium alloy, aluminium alloy-stainless steel) was reviewed. The influence of environmental factors on galvanic corrosion was analyzed and the failure characteristics and behaviors of coupling materials were given. The protective measures for mitigation of galvanic corrosion, such as separation, coatings and inhibitors were reviewed. The use of micro-zone techniques, the combination of multi-methods and the consideration of environmental factors are important to research galvanic corrosion. Under multi-factors, the design of simulated galvanic components is beneficial to simulate the actual working conditions.

KEY WORDS: galvanic corrosion; galvanic current; aluminium alloy; protective measure

收稿日期: 2019-05-20; 修订日期: 2019-06-20

Received: 2019-05-20; Revised: 2019-06-20

基金项目: 国家自然科学基金(51571202)

Fund: National Natural Science Foundation of China (51571202)

作者简介: 史洪微(1975—), 男, 博士, 副研究员, 主要研究方向为金属的腐蚀与防护。

Biography: SHI Hong-wei (1975—), Male, Ph. D., Associate researcher, Research focus: corrosion and protection of metals.

异种金属或导电材料(以下简称异种材料)接触,在自然环境或工业环境中是常见的现象,异种材料接触形成电偶腐蚀。电偶腐蚀发生的结果,作为阳极的活泼材料腐蚀加速,而作为阴极的惰性材料腐蚀减慢而得到保护^[1]。电偶腐蚀在耦合材料连接处十分常见,耦合材料在连接处会形成局部阳极和局部阴极,进而形成局部微电池,使电偶腐蚀的速度加快,降低耦合部件的使用寿命。对于很多装备而言,异种材料的电偶腐蚀很容易导致结构件的腐蚀失效。从结构腐蚀情况看,电偶腐蚀问题不仅普遍存在,而且是最严重的腐蚀类型之一,危害性极大。电偶腐蚀不仅会大幅度增加腐蚀修理费用,降低装备的服役寿命,甚至会显著增加安全隐患。目前,飞机上的一些金属材料或导电的非金属材料(如铝合金、钛合金、不锈钢以及碳纤维增强环氧树脂材料等),由于连接容易形成电偶腐蚀。在苛刻的腐蚀环境下,电偶腐蚀会造成连接件的破坏,导致腐蚀失效问题。

1 电偶腐蚀的基本原理

在腐蚀电化学中,同一种腐蚀介质中的不同金属存在各自的腐蚀电位,由高到低排列,形成电偶序。对于腐蚀电位差越大的异种金属,其电偶腐蚀发生的趋势也越大。通常当腐蚀电位差大于 0.25 V 时,产生的电偶腐蚀较严重。就非金属导电材料而言,其与金属材料的耦合也会产生电位差,产生电偶腐蚀。就异种材料而言,当两者存在的电位差>50 mV 时,电偶腐蚀即可发生。产生电偶腐蚀的基本条件如下:具备腐蚀介质,如氯化钠溶液,酸碱等;在同一腐蚀介质中存在异种金属或非金属;金属或非金属间存在导电连接;异种材料间存在电位差异。电偶腐蚀的主要影响因素包括腐蚀介质温度、pH、离子浓度以及异种材料的面积比等。

以异种金属材料为例,电偶腐蚀的原理如图 1 所示,腐蚀情况会首先出现在接触位置。若有电解质存在,会生成大量的腐蚀产物。其中,阳极反应为金属失电子变成金属离子,而阴极则是 H_2O 、 O_2 得电子反应生成 OH^- ,或是 H^+ 得电子生成 H_2 ,如式(1)~(3)所示。

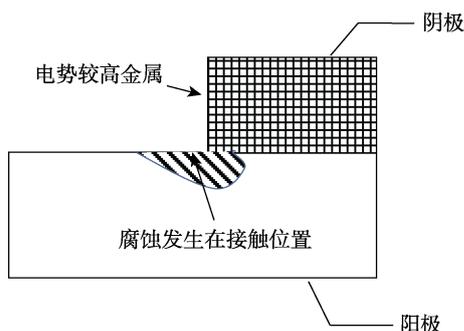
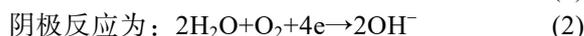
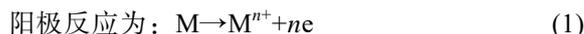


图 1 电偶腐蚀基本原理

Fig.1 Basic principle of galvanic corrosion



2 国内外研究概况和研究趋势

电偶腐蚀是一种常见的腐蚀现象,各种耦合体系的腐蚀机制不同,电偶腐蚀机制的研究也在不断发展。下面以飞机结构件容易出现的三种电偶腐蚀为例,即碳纤维增强环氧树脂材料-铝合金、钛合金-铝合金、铝合金-不锈钢的电偶腐蚀,综述了近年来的研究进展。

在新型飞机的结构设计中,碳纤维增强环氧树脂材料在飞机结构中应用的比例大幅增加,飞机上存在碳纤维增强环氧树脂材料与铝合金耦合的部位。碳纤维增强环氧树脂材料和铝合金之间具有较大的电位差,当二者通过腐蚀介质接触时,容易发生电偶腐蚀。目前,针对飞机结构碳纤维增强环氧树脂材料与铝合金的电偶腐蚀,国内外已经关注并开展了相关研究。陈跃良^[2]、苏培博等^[3]研究了碳纤维增强环氧树脂材料与铝合金的电偶腐蚀行为,结果发现,改变腐蚀介质 pH、腐蚀介质浓度以及温度等条件对碳纤维增强环氧树脂材料的影响较小,腐蚀主要出现在铝合金表面。随着这些条件的改变,耦合电流受到了较大的影响,在 pH=3 和温度为 30 °C 时,耦合件不能接触使用或需要采取防护措施才能使用。陆峰等^[4-5]研究了碳纤维增强环氧树脂材料与两种铝合金耦合后对铝合金的腐蚀影响,结果发现,碳纤维增强环氧树脂材料增加了铝合金的腐蚀倾向,加快了铝合金的溶解速率,促进了铝合金表面点蚀的形成与发展。铝合金的腐蚀随全浸腐蚀试验时间的延长,腐蚀质量损失速率先上升后下降。虽然电偶腐蚀造成的影响主要发生在铝合金表面,但有报道认为,碳纤维增强环氧树脂材料表面由于氧还原反应造成的碱化,也会造成碳纤维增强环氧树脂材料的降解^[6-8]。

钛合金由于其综合力学性能优异、密度小、抗腐蚀性能良好,广泛应用在飞机的大型整体结构件上。由于钛合金的电位较正,与铝合金的电位差大,钛合金和铝合金的电偶腐蚀也会成为经常发生的现象,使铝合金的腐蚀速率大大加快^[9]。针对飞机结构钛合金和铝合金的耦合体系的研究表明,钛合金和铝合金耦接时,铝合金表面会发生严重的点蚀,而钛合金基本不腐蚀。由于铝合金钝化的影响,钛合金-铝合金耦合体系在腐蚀液中浸泡后期的电偶腐蚀会受到一定程度的抑制^[10-12]。张晓云等^[5,13]探究了 TC21 和 TA15 钛合金与铝合金耦合体系的腐蚀情况,结果发现,钛合金不能与铝合金直接接触使用,接触后会对两种材料表面产生影响,导致该体系极易发生电偶腐蚀,进而促使铝合金表面点蚀的发生,所以该体系在使用过程中需采用防护手段。TA15 钛合金与 2B06 铝合金耦

合,在海南万宁进行3年的大气暴露试验后,铝合金腐蚀严重,铝合金的力学性能明显下降^[14]。杨勇进等^[15]对TC4钛合金与四种铝合金(2024,2124,7050,7475)的电偶腐蚀行为进行了探究,发现铝合金均出现了明显的点蚀。苏艳等^[16]探究了Ti8LC钛合金与7710铝合金接触后的电偶腐蚀情况,结果发现,两种材料接触后电偶腐蚀敏感程度达到E级($J_g > 10 \text{ A/cm}^2$),属于严重的电偶腐蚀。

当铝合金和不锈钢耦合时,由于不锈钢的电位较正,也容易发生电偶腐蚀。刘艳洁等^[17]研究了盐雾试验条件下,2024铝合金与316L不锈钢之间的电偶腐蚀过程,发现耦接后2024铝合金的质量损失是非耦接条件下的10倍,耦接后点蚀坑则主要在横向扩展,在纵深方向扩展较小。刘宇等^[18]研究了海水环境下5083铝合金和2205不锈钢的电偶腐蚀情况,发现无论阴阳极面积相等还是在大阴极小阳极的情况下,5083铝合金与2205不锈钢均形成电偶腐蚀,都会加速5083铝合金的腐蚀,2205不锈钢则会受到保护。Matzdorf等^[19]研究了飞机耦合连接件的电偶腐蚀情况,分析发现,2024铝合金板和不锈钢紧固件连接时,2024铝合金的电偶腐蚀受阴极电流控制,2024铝合金的局部腐蚀发生在接近不锈钢紧固件的位置,如图2所示。陈群志等^[20]研究了飞机钢螺栓与LY12-CZ铝合金电偶腐蚀的情况,发现铝合金的腐蚀出现在螺栓紧固件周围的涂层下,容易由点蚀发展到晶间腐蚀,甚至剥蚀。史平安等^[1]发现当施加应力到2A12铝合金和45钢的耦合体系后,铝合金的腐蚀由表面向基体内部方向发展,且2A12铝合金的拉伸强度、弹性变形和塑性变形能力都下降。Rafla等^[21]研究了7050铝合金与316不锈钢电偶腐蚀的情况,发现在薄液膜条件下,作为阴极的316不锈钢表面的氧还原速率是在浸泡条件下的10倍以上。

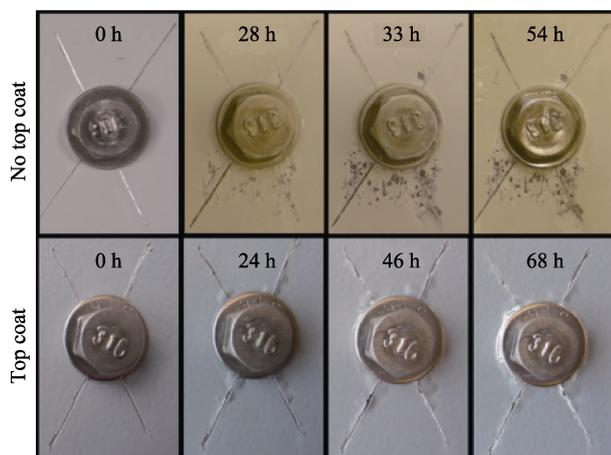


图2 2024-T3铝合金与SS316不锈钢紧固件耦合的涂层失效情况

Fig.2 Coating failure of 2024-T3 aluminium alloy and SS316 stainless steel fastener

影响电偶腐蚀的因素较多,当固定了耦合的材料以后,阴阳极面积比和腐蚀介质的环境因素等都对电偶腐蚀行为有很大影响。例如,对于一般耦合体系,腐蚀液的温度升高、Cl⁻浓度升高,都会使耦合电流增大。增大阴阳极的面积比,也会增大耦合电流,加速电偶腐蚀。在实际工况条件下,电偶腐蚀受多种环境因子的影响^[22-23]。因此,需要综合考虑温度、腐蚀介质浓度等多种环境因子,以模拟实际工况进行电偶腐蚀研究。针对苛刻的服役工况,除上述环境影响因素外,也需要考虑干湿交替、温变等环境特点,并通过设计多因素条件下的电偶腐蚀试验模拟耦合件服役的情况,获得耦合件电偶腐蚀的特征和规律。

测试耦合体系的零电阻电流是考察耦合体系电偶腐蚀趋势常用且有效的方法。另外,电位、极化曲线测量也是研究电偶腐蚀趋势的常用方法。电偶腐蚀发生后,对电偶体系的耦合材料进行扫描电镜形貌观察、元素成分和腐蚀产物分析以及测量腐蚀质量损失,是常用的手段。由于电偶腐蚀发生在微区范围,宏观的电化学信息不足以真实反映局部的电偶腐蚀行为。因此,利用微区腐蚀测试技术,原位获得耦合试样表面腐蚀发生、发展的规律,有利于从微观层次理解电偶腐蚀机制。微区腐蚀测试技术用于电偶腐蚀的研究近年来也有很大进展。

3 电偶腐蚀的防护措施

针对耦合体系施以合理的防护措施,可有效降低电偶腐蚀对结构件的破坏程度,甚至完全阻止电偶腐蚀的发生。电偶腐蚀的防护手段主要有:接触使用的金属电位接近($< 50 \text{ mV}$);正极金属面积尽量大,避免出现小阳极大阴极的情况;若有金属接触使用的情况,应尽量使金属间电绝缘,并且将腐蚀介质的电阻增大;使用耐腐蚀材料保护阴极;采用保护层、腐蚀抑制剂以及外加电位等方式。对于结构件来说,应充分利用绝缘材料(如垫片等)或施加密闭绝缘材料(如密封胶、涂层等),以充分减少电偶腐蚀带来的危害。

阻止或减缓碳纤维增强环氧树脂材料和铝合金的电偶腐蚀,采取隔离回路的方法是有效的。据报道,采用铝合金的表面处理或有机涂层来阻隔碳纤维增强环氧树脂材料和铝合金的接触,是可行的方法。陆峰等^[24]报道了通过对LY12铝合金进行阳极化,对碳纤维增强环氧树脂材料固化玻璃布和涂漆可有效地减少电偶腐蚀的程度。Raghu等^[25]提出减缓6061-T6铝合金与碳纤维增强环氧树脂材料用钛螺栓连接时发生电偶腐蚀的方法,即用疏水涂层绝缘铝合金和碳纤维增强环氧树脂材料,通过防止在耦合件之间形成盐桥,大大减少电子传输的路径,从而降低电偶腐蚀发生的可能性。针对钛合金和铝合金的耦合体系,在铝合金或钛合金表面进行阳极氧化,可减轻钛合金和

铝合金电偶腐蚀的程度。刘建华等^[26]研究了铝合金和钛合金的电偶腐蚀, 将铝合金进行阳极化, 虽然可以降低电偶电流, 但电偶电流密度仍然大于 $5 \mu\text{A}/\text{cm}^2$, 需要其他防护手段进一步降低电偶腐蚀。上官晓峰等人^[27]探究了经过阳极氧化处理的 7050 铝合金与 TC18 钛合金的电偶腐蚀行为, 结果发现, 在两种材料表面进行阳极氧化处理后, 金属表面有保护膜生成, 降低了两种材料的电位差, 进而降低了体系的电流密度, 最终有效缓解该体系的电偶腐蚀程度。分别对 Ti8LC 钛合金和 7710 铝合金进行氧化处理后, 再涂装环氧底漆和聚氨酯面漆, 也可有效防止电偶腐蚀。

在溶液状态下, 使用缓蚀剂来减缓电偶腐蚀, 也是一种有效的手段^[28]。Coelho 等^[29-30]研究了碳纤维与 2024 铝合金耦合时电偶腐蚀的情况, 发现当 2024 铝合金与碳纤维的面积比较大时, 铝合金倾向于发生点蚀; 而当 2024 铝合金与碳纤维的面积比较小时, 铝合金倾向于发生全面腐蚀。添加几种缓蚀剂的组合, 可有效降低电偶电流, 腐蚀抑制效率达到 66%。在双金属表面的涂层中添加针对双金属的缓蚀剂, 也可以有效减轻电偶腐蚀^[31]。在耦合体系不适合涂装的部位(如螺栓连接处)加入密封材料也是减缓电偶腐蚀可行的手段^[32-33]。

4 结语

对于飞机典型结构异种材料连接件, 电偶腐蚀现象容易发生。在苛刻环境下, 耦合件的电偶腐蚀程度受温度、湿度和 Cl^- 浓度等多种环境因素的影响, 开展复合因素下电偶腐蚀的研究工作, 并从微观角度分析和理解电偶腐蚀发生和发展的规律, 有利于深刻理解电偶腐蚀规律。针对电偶腐蚀的防护措施研究, 目前的手段仍然比较单一, 未来的发展趋势将针对电偶腐蚀采用新型手段进行更为系统的防护, 并注重多种防护措施的结合使用, 保证耦合件的长期有效隔绝, 防止电偶腐蚀, 实现飞机结构耦合件的安全可靠服役。

参考文献:

- [1] 史平安, 刘道新, 万强. 电偶腐蚀的微观机理及其对材料性能的影响[J]. 中国机械工程, 2017, 28(12): 1504-1511.
SHI Ping-an, LIU Dao-xin, WAN Qiang. Micro-mechanism of Galvanic Corrosion Behavior and Its Effects on Materials' Performance[J]. China Mechanical Engineering, 2017, 28(12): 1504-1511.
- [2] 陈跃良, 王冬冬, 张勇, 等. T700 碳纤维环氧树脂复合材料与 2A12 铝合金电偶腐蚀研究[J]. 装备环境工程, 2014, 11(6): 40-44.
CHEN Yue-liang, WANG Dong-dong, ZHANG Yong, et al. Research for Galvanic Corrosion between T700 CFRP and 2A12 Aluminum Alloy[J]. Equipment Environmental Engineering, 2014, 11(6): 40-44.
- [3] 苏培博, 吴晓宏, 姜兆华, 等. 碳纤维增强环氧复合材料与 LY12 铝合金的电偶腐蚀[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(1): 37-39.
SU Pei-bo, WU Xiao-hong, JIANG Zhao-hua, et al. Galvanic Corrosion of Carbon Fiber Epoxy Composite Coupled with LY12Al Alloy[J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(1): 37-39.
- [4] 陆峰. 复合材料/金属电偶腐蚀研究[J]. 表面技术, 1991, 20(3): 39-42.
LU Feng. Study on Composite/Metal Galvanic Corrosion[J]. Surface Technology, 1991, 20(3): 39-42.
- [5] 陆峰, 张晓云, 汤智慧, 等. 碳纤维增强环氧复合材料与铝合金电偶腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2005, 25(1): 39-43.
LU Feng, ZHANG Xiao-yun, TANG Zhi-hui, et al. Galvanic Corrosion Behavior between Carbon Fiber Reinforced Plastic Materials and Aluminum Alloy[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2005, 25(1): 39-43.
- [6] 陆峰, 曹春晓. 碳纤维环氧复合材料腐蚀行为的研究[J]. 材料工程, 2004(4): 16-19.
LU Feng, CAO Chun-xiao. Study on the Corrosion Behavior between Graphite/Epoxy Composite Materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2004(4): 16-19.
- [7] TUCKER W C. Crystal Formation on Graphite/polymer Composites[J]. Composite Materials, 1988, 22(8): 742-748.
- [8] 胡艳玲, 李荻, 郭宝兰. 碳纤维/环氧树脂复合材料与金属的电偶腐蚀行为[J]. 腐蚀科学与防护技术, 1998, 10(2): 93-98.
HU Yan-ling, LI Di, GUO Bao-lan. Galvanic Corrosion Behavior of carbon fiber / epoxy Composite Material and Metal[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 1998, 10(2): 93-98.
- [9] 陈跃良, 王哲夫, 卞贵学, 等. 不同浓度 NaCl 溶液下典型铝/钛合金电偶腐蚀当量折算关系[J]. 航空学报, 2017, 38(3): 1-9.
CHEN Yue-liang, WANG Zhe-fu, BIAN Gui-xue, et al. Equivalent Conversion of Galvanic Corrosion of Typical Aluminum-Titanium Alloy in NaCl Solution with Different Concentrations[J]. Acta Aeronautica ET Astronautica Sinica, 2017, 38(3): 1-9.
- [10] 张晓云, 赵胜华, 汤智慧, 等. 表面处理对 TC21 钛合金与铝合金和钢电偶腐蚀行为的影响[J]. 材料工程, 2006(12): 40-45.
ZHANG Xiao-yun, ZHAO Sheng-hua, TANG Zhi-hui, et al. Effect of Surface Treatment on Galvanic Corrosion Between TC21 Titanium Alloy and Aluminium Alloys and Steels[J]. Journal of Materials Engineering, 2006(12): 40-45.

- [11] 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(9): 124-127.
- [12] 王绍明, 陈立庄, 赵勇. TA2 钛合金与 5083 铝合金电偶腐蚀行为和连接工艺的研究[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2012, 26: 133-136.
WANG Shao-ming, CHEN Li-zhuang, ZHAO Yong. Study on Galvanic Corrosion Behaviors of TA2 Titanium Alloy & 5083 Aluminum Alloys and Connection Technology[J]. Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2012, 26: 133-136.
- [13] 张晓云, 汤智慧, 孙志华, 等. 钛合金的电偶腐蚀与防护[J]. 材料工程, 2010(11): 74-78.
ZHANG Xiao-yun, TANG Zhi-hui, SUN Zhi-hua, et al. Galvanic Corrosion and Protection Between Titanium Alloy and Other Materials[J]. Journal of Materials Engineering, 2010(11): 74-78.
- [14] 张晓云, 孙志华, 马颀军, 等. TA15 钛合金与铝合金和结构钢接触腐蚀大气暴露试验研究[J]. 装备环境工程, 2006, 3(6): 1-7.
ZHANG Xiao-yun, SUN Zhi-hua, MA Yi-jun, et al. Research on the Galvanic Corrosion of Aluminum Alloy and Steels Coupled with TA15[J]. Equipment Environmental Engineering, 2006, 3(6): 1-7.
- [15] 杨勇进, 张晓云, 孙志华, 等. TC4 钛合金厚板电偶腐蚀与防护研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(4): 149-156.
YANG Yong-jin, ZHANG Xiao-yun, SUN Zhi-hua, et al. Galvanic Corrosion and Protection of TC4 Titanium Alloy Thick Plate[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(4): 149-156.
- [16] 苏艳, 朱玉琴, 康凤. Ti8LC 钛合金与主要结构材料的电偶腐蚀及防护研究[J]. 表面技术, 2010, 39(5): 39-41.
SU Yan, ZHU Yu-qin, KANG Feng. The Study on Galvanic Corrosion and Surface Protection between Ti8LC Titanium Alloy and Central Structural Material[J]. Surface Technology, 2010, 39(5): 39-41.
- [17] 刘艳洁, 王振尧, 柯伟. 薄液膜下铝合金与不锈钢电偶腐蚀研究[J]. 装备环境工程, 2015, 12(1): 1-5.
LIU Yan-jie, WANG Zhen-yao, KE Wei. Study on the Galvanic Corrosion of Aluminium Alloy and Stainless Steel under a Thin Electrolyte Film[J]. Equipment Environmental Engineering, 2015, 12(1): 1-5.
- [18] 刘宇, 石勇, 李宁, 等. 5083 铝合金与 2205 不锈钢在天然海水中的电偶腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(6): 532-534.
LIU Yu, SHI Yong, LI Ning, et al. Influence of Subzero Quenching and Annealing on Shape Memory Effect of FeMnSiCrNi Alloy[J]. Corrosion & Protection, 2012, 33(6): 532-534.
- [19] Matzdorf C, Nickerson W, RINCON TROCONIS B C, et al. Galvanic Test Panels for Accelerated Corrosion Testing of Coated Al Alloys: Part 1-Concept [J]. Corrosion, 2013, 69(12): 1240-1246.
- [20] 陈群志, 程宗辉, 席慧智. 飞机铝合金结构连接部位的腐蚀行为[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2007, 27(6): 334-337.
CHEN Qun-zhi, CHENG Zong-hui, XI Hui-zhi, et al. Corrosion Behavior on Joint Section of Aircraft Aluminium Alloy Structure[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2007, 27(6): 334-337.
- [21] VERONICA N R, PIYUSH K, ROBERT G K, et al. Coupled Multi-Electrode Array with a Sintered Ag/AgCl Counter/Reference Electrode to Investigate AA7050-T7451 and Type 316 Stainless Steel Galvanic Couple under Atmospheric Conditions[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2018, 165 (9): 562-572.
- [22] BELLUCCI F. Galvanic Corrosion between Nonmetallic Composites and Metals, I. the Effect of Dissimilar Metal and of Temperature[J]. Corrosion, 1991, 47(10): 808-819.
- [23] 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. Galvanic Corrosion and Protection Between Carbon Fibre Composite Materials and Metal[J]. Electrical Engineering Materials, 2008(3): 20-23.
- [24] 陆峰. 复合材料表面防护对 LY12CZ 铝合金电偶腐蚀的影响[J]. 材料工程, 1996(12): 28-30.
LU Feng. Effect of the Geom Surface Protection on Galvanic Corrosion of LY12CZ Aluminum Alloy[J]. Journal of Materials Engineering, 1996(12): 28-30.
- [25] RAGHU S, HIHARA L H. Utilization of Hydrophobic Coatings on Insulative Skirts to Attenuate Galvanic Corrosion between Mechanically-fastened Aluminum Alloy and Carbon-Fiber Reinforced Polymer-Matrix Composites[J]. Electrochemistry Communications, 2016, 72: 96-99.
- [26] 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.
- [27] 上官晓峰, 杜志杰. 表面阳极化对 7050 铝合金电偶腐蚀的影响[J]. 西安工业大学学报, 2011, 31(1): 62-64.
SHANGGUAN Xiao-feng, DU Zhi-jie. Effect of Surface Anodization on Galvanic Corrosion of 7050 Aluminum Alloys[J]. Journal of Xi'an Technological University, 2011, 31(1): 62-64.
- [28] MOUANGA M, ANDREATTA F, DRUART M E. A Localized Approach to Study the Effect of Cerium Salts as Cathodic Inhibitor on Iron/Aluminum Galvanic Coupling[J].

- Corrosion Science, 2015, 90: 491-502.
- [29] COELHO L B, TARYBA M, ALVES M, et al. Unveiling the Effect of the Electrodes Area on the Corrosion Mechanism of a Graphite-AA2024-T3 Galvanic Couple by Localized Electrochemistry[J]. *Electrochimica Acta*, 2018, 277: 9-19
- [30] COELHO L B, OLIVIER M G. The Inhibition Efficiency of Different Species on AA2024/Graphite Galvanic Coupling Models Depicted by SVET[J]. *Corrosion Science*, 2018, 136: 292-303.
- [31] MARIA S, SILVAR K, MARIO G S F, et al. Active Self-healing Coating for Galvanically Coupled Multi-material Assemblies[J]. *Electrochemistry Communications*, 2014, 41: 51-54.
- [32] 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, JYU 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.
- [33] 陈群志, 房振乾, 康献海. 军用飞机外场腐蚀防护方法研究[J]. *装备环境工程*, 2011, 8(2): 72-77.
CHEN Qun-zhi, FANG Zhen-qian, KANG Xian-hai. Methods for Military Aircraft Field Corrosion Prevention and Control[J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2011, 8(2): 72-77.