



异种金属电偶腐蚀防护方法研究进展

张学敏^{1,2}, 林贤坤¹, 王旭东^{1,2}, 杨焜^{2*}, 张小锋²

(1. 广西科技大学机械与汽车工程学院, 广西柳州 545006; 2. 广东省科学院新材料研究所/现代材料表面工程技术国家工程实验室/广东省现代表面工程技术重点实验室, 广东广州 510650)

摘要: 铝合金、钛合金等轻质合金材料广泛应用于飞机、舰船等高端装备的管路系统中, 用来传送水、油/气等工质并连接各种机械设备。在应用过程中, 异种金属在电解液中接触而引起电化学反应并发生明显的电偶腐蚀现象, 直接影响设备的结构完整性和服役安全性, 必须采取措施预防此类电偶腐蚀的发生。介绍了电偶腐蚀发生的原理及影响因素, 总结了近年来电偶腐蚀防护方法及绝缘防护涂层的研究现状, 提出了电偶腐蚀防护值得关注的问题。

关键词: 电偶腐蚀; 影响因素; 防护方法; 涂层防护; 异种金属; 电化学反应; 阴极保护; 阳极氧化

中图分类号: U177.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9981(2024)01-0095-11

引文格式: 张学敏, 林贤坤, 王旭东, 等. 异种金属电偶腐蚀防护方法研究进展[J]. 材料研究与应用, 2024, 18(1): 95-105.

ZHANG Xuemin, LIN Xiankun, WANG Xudong, et al. Research Progress of Protection Methods Against Dissimilar Metals Galvanic Corrosion[J]. Materials Research and Application, 2024, 18(1): 95-105.

0 引言

铝合金、钛合金等轻质材料在船舶、油气、航空、建筑和医疗器械等领域中, 为了满足使用条件且符合经济要求, 广泛应用于各种管路系统中, 用来传送水、油/气等工质并连接各种机械设备, 在这之中不可避免的会存在异种金属之间的接触, 造成电偶腐蚀^[1]。电偶腐蚀是指两种或两种以上的金属在同一腐蚀介质中相互接触时, 由于异种金属的腐蚀电位不同而产生电偶电流, 从而引发电化学腐蚀的现象, 其也被称为接触腐蚀^[2]。异种金属中电位较低的金属作为阳极发生氧化反应, 加上本身的自腐蚀从而加速溶解; 而电位较高的金属则作为阴极发生还原反应, 得到电子使自腐蚀得到抑制, 从而得到保护。电偶腐蚀是一种潜在的、危害极为广泛和严重的腐蚀类型, 会导致低电位材料如钢、铜等加速腐蚀, 其发生与发展往往伴随着多种局部腐蚀发生, 如应力腐蚀、点蚀、缝隙腐蚀、氢脆等, 从而加速设备的破坏, 严重威胁各应用装备的安全性和可靠性, 造成严重损失^[3]。因此, 必须采取措施防止异种金属接触界面电偶腐蚀的发生。

由电偶腐蚀原理可知电偶腐蚀的发生必须要同

时具备以下几点。(1) 电位差, 即存在两种不同腐蚀电位的材料; (2) 电子通路, 即异质材料直接接触; (3) 离子通路, 即电解质覆盖或浸没接触的异质材料^[4]。基于这一原则, 可通过降低电位差或阻隔电子或离子通路的方式进行电偶腐蚀防护。

本文在介绍电偶腐蚀发生影响因素的基础上, 综述了近年来国内外电偶腐蚀防护方法及绝缘防护涂层的研究现状。

1 电偶腐蚀影响因素

1.1 电极电位

不同材料在不同溶液介质中具有不同的自腐蚀电位值, 并且会随着腐蚀时间的增长而发生变化。丁国清等人^[5]研究了多种金属合金材料在青岛海水与舟山海水中不同时间的电位变化(见图1)。从图1可见: 在不同海域中材料的稳定电位不同且电偶序也有些变化, 如在青岛海水中 Pure-Q235 的腐蚀稳定电位最高, 而在舟山海水中 E460 的腐蚀稳定电位最高; 总的来说, 无论是在青岛海水还是舟山海水中材料的腐蚀电位随着浸泡时间的延长先减小后略微增大并趋于稳定, 但所有的稳定电位均小于初始

收稿日期: 2023-06-20

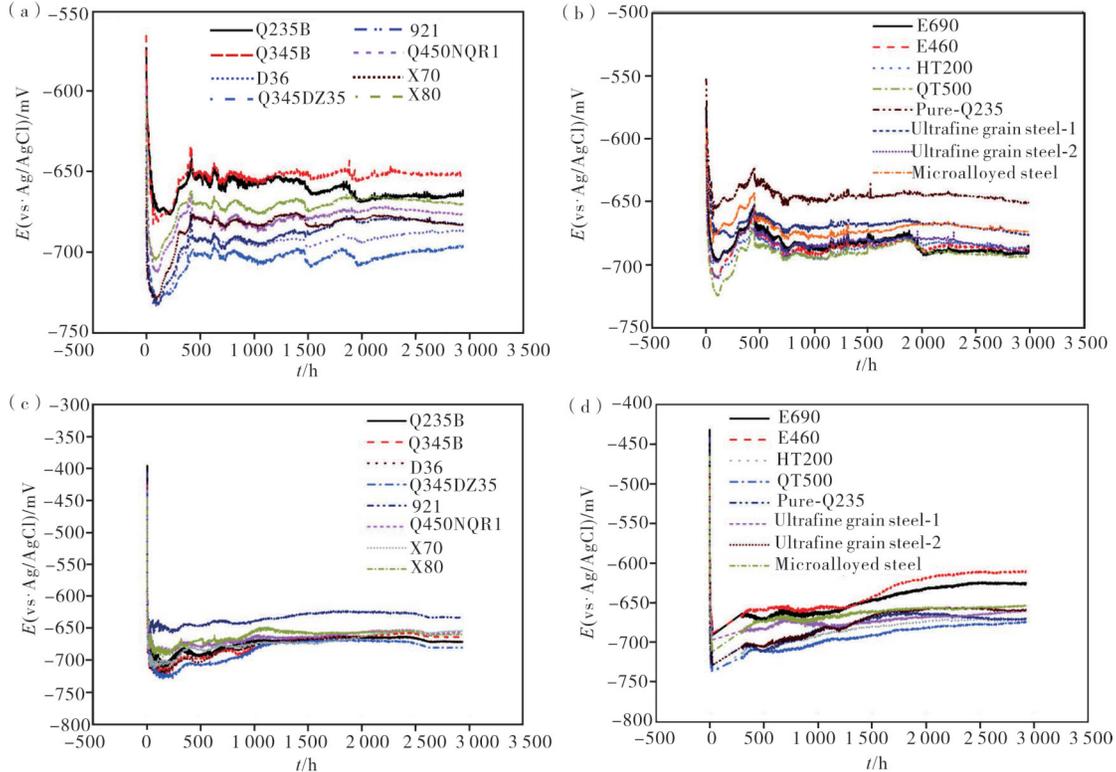
基金项目: 广东特支计划项目(2019BT02C629); 中国航空发动机集团产学研合作项目(HFZL2019CXY015)

作者简介: 张学敏, 硕士研究生, 研究方向为热喷涂技术。E-mail: 1986726609@qq.com。

通信作者: 杨焜, 博士, 正高级工程师, 研究方向为热喷涂技术。E-mail: yangkun@gdinm.com。

电位。由于材料腐蚀电位随环境的变化而变化,导致其在电偶腐蚀过程中阴阳极之间的电位差也在变化,进而对电偶腐蚀产生影响。一般来说,阴阳极之间的电位差越大,充当阳极的金属腐蚀速率也就越

大^[6]。当两种金属之间的电位差(ΔE)大于50 mV时,就会在接触位置发生电偶腐蚀;当 ΔE 大于250 mV时,两种金属之间的电偶腐蚀就会变得异常严重^[7-8]。



(a)—铸铁和低合金钢在青岛海水中的电位变化;(b)—碳钢和低合金钢在青岛海水中的电位变化;(c)—铸铁和低合金钢在舟山海水中的电位变化;(d)—碳钢和低合金钢在舟山海水中的电位变化。

(a)—potential change of cast iron and low alloy steel in Qingdao seawater; (b)—potential change of carbon steel and low alloy steel in Qingdao seawater; (c)—potential change of cast iron and low alloy steel in Zhoushan seawater; (d)—potential change of carbon steel and low alloy steel in Zhoushan seawater.

图1 不同时间下金属合金材料在青岛海水和舟山海水中的电位变化图^[5]

Figure 1 Diagram of potential variation of metal alloy materials in Qingdao seawater and Zhoushan seawater at different times

在腐蚀过程中,金属的电位值还会受到腐蚀产物、温度等因素的影响,进而影响电位差,使得腐蚀速率发生变化。Xiao等^[9]研究了AZ91D镁合金与2A12铝合金在中性盐雾试验过程中的电偶腐蚀并发现,合金的腐蚀速率呈先增大后减小的趋势,初始阶段腐蚀速率由镁合金与铝合金之间的自腐蚀电位差决定,但随着镁合金的腐蚀导致了强碱环境的产生,而铝合金在强碱环境中稳定性差,造成自腐蚀速率加快,使自腐蚀产物不断覆盖而导致其电势增大,进而增大了镁合金与铝合金之间的电位差,使得二者之间的腐蚀速率增大。

1.2 极化作用

腐蚀电位差作为电偶腐蚀的热力学因素可用于判断电偶腐蚀发生的倾向,但并不能反映电偶腐蚀

的速度。石鹏飞等^[10]在静态和动态2种全浸海水环境下对8种电偶对进行了电偶腐蚀实验,通过测量电偶对在静态海水和动态海水下的电偶腐蚀电位差与电流密度(见表1),发现与静态海水中电偶腐蚀电位差相比,动态海水中电偶腐蚀电位差有所增加但相差不大,然而在动态海水中的电流密度比静态海水中的电流密度大很多,导致电偶对在动态海水中电偶腐蚀更严重,这是因为偶对回路中的阴阳极的极化率影响了电偶腐蚀速度。一方面,流动的海水间接为电偶对提供了O和H⁺,使去极化加快,即极化率小而腐蚀加快;另一方面,海水的冲刷作用导致金属表面的腐蚀产物膜脱落,加快了阳极的极化和去极化过程,使得阳极腐蚀加快^[11]。因为动态海水在这两方面的作用改变了电偶对的极化率,使得

在电偶对腐蚀电位差几乎不发生改变的情况下增大了电流密度,增加了腐蚀速度。1020碳钢-304不锈钢电偶对在氯化物溶液中与铜-304不锈钢电偶对在LiBr溶液中的电偶腐蚀速率也遵循此规律,即电偶腐蚀速率随着流速的增大而增加^[12-13]。

表1 异种材料的腐蚀电位差与电偶腐蚀电流密度^[10]
Table 1 Corrosion potential difference and galvanic corrosion current density of dissimilar materials

序号	电偶对	$\Delta E_{corr}/V$		$I_g/(\mu A \cdot cm^{-2})$	
		静态	动态	静态	静态
1	ZTi60/QDXXX	0.490	0.502	15.82	55.42
2	ZQA19-2/QDXXX	0.355	0.367	15.88	55.78
3	蒙乃尔 K500/925A	0.510	0.516	14.34	53.14
4	B30/ZCuAlMn13Fe3Ni2	0.058	0.067	1.12	2.31
5	B30/ZCuZn16Si4	0.025	0.037	1.50	20.36
6	B30/ZQA19-2	0.075	0.082	2.78	6.36
7	Ti75/B30	0.025	0.032	0.37	2.62
8	022Cr25Ni6MoN/B30	0.011	0.024	0.26	2.62

极化速率除了受电解质的流动速度的影响,还受钝化膜稳定性、外界应力等因素的影响。Chen等^[14]对比了电偶对17-4不锈钢-C110碳钢与单独17-4不锈钢的腐蚀情况并发现,在电偶对中作为阴性的17-4不锈钢比单独的17-4不锈钢的耐蚀性小,这主要是由于17-4不锈钢阴极极化导致钝化膜失稳,使其耐蚀性降低。Ren等^[15]研究了C110钢与G3合金(镍基合金)电偶对在有无应力刺激下的电偶腐蚀情况并发现,在屈服应力的作用下促进了 Fe^{2+} 的形成,而随着 Fe^{2+} 的积累增强了阳极极化。因此,考虑材料的极化特性对了解电偶腐蚀进程的影响是必不可少的。

1.3 阴极和阳极面积比

阴极与阳极的面积比也会对电偶腐蚀产生影响,当阴阳极面积比增大时,阳极金属的腐蚀速率会加快^[16-17]。祝慧鑫等^[18]比较了5种面积比下6061铝合金-304不锈钢电偶对在30%硝酸环境下的腐蚀行为并发现,阴阳极面积比增加会导致电偶电位减小而腐蚀电流增大。在碳钢与不锈钢组合的电偶对中也遵循此规律,即阴阳极面积比增大,作为阳极的碳钢腐蚀速率也增大^[12,19]。这种现象出现的原因是腐蚀电偶对中阴极和阳极的电流强度是相等的,当阳极面积比阴极面积小时,阳极电流密度就比阴极电流密度大,腐蚀速度也就越高^[20]。但对于B10铜镍合金与Tup紫铜电偶对来说,当其阴阳极面积比为5:1时,随着浸泡时间的延长出现了阴阳极反转

的现象,这主要是由于阴阳极面积比增大,导致作为阳极的B10腐蚀速率增大,迅速在表面生成了致密的钝化膜而转化为阴极^[21]。

1.4 温度

温度也会对电偶腐蚀速率有所影响,在一定范围内温度升高会导致电极反应速度加快^[16,22]。温度变化会影响反应物或产物的扩散速度,使得阴阳极附近的溶质浓度发生改变,而引起电极的浓差极化,进而影响电偶腐蚀速率^[23]。Soltis等^[24]研究了铈-碳钢电偶对在不同温度下的电偶腐蚀,发现铈和碳钢的电位随着温度的升高而向更活跃的值转变,在所有的实验条件下铈的电负性都低于碳钢,这说明铈在电偶腐蚀过程中都是以阳极的形式存在的,电偶电流随着温度的升高而升高。在LiBr溶液中铜-304不锈钢电偶对的电流密度,也会随着温度的升高而升高^[13,25]。

温度的变化不仅会使电偶对的电偶腐蚀速率发生改变,还会使某些电极表面膜或腐蚀产物的结构发生变化,进而产生极化或极性逆转的现象^[26-28]。AZ91D镁合金与铜电偶对在蒸馏水中电偶效应随着温度的升高而增强,作为阳极的AZ91D镁合金的腐蚀速率也增强,导致释放更多的氢气,破坏了铜表面的致密腐蚀产物膜使铜阴极极化,进一步加速了AZ91D镁合金的腐蚀^[26]。文献[27]指出,在 $0.05 mol \cdot L^{-1}$ 的 $NaHCO_3$ 溶液中,由于锌-低碳钢电偶对中锌的钝化,导致该电偶对在50—70℃的温度范围内发生极性反转。

1.5 pH值

pH值也会对电偶腐蚀产生影响,酸性或碱性环境会对金属表面的钝化膜形成或稳定性产生影响,从而影响电偶腐蚀过程。龙开琳等^[29]发现,电偶对TC1钛合金-1Cr11Ni2W2MoV钢对酸性环境较为敏感,随着 H^+ 浓度的增加电偶电流密度增大。Ni等^[30]发现,在含有 Cl^- 的酸性溶液中,Cu-304不锈钢电偶对随着pH值的降低电偶电流逐渐增大,当 $pH=0$ 时电偶电流急剧增加,这是由于金属表面的钝化膜随着pH值的降低而稳定性减弱,当 $pH=0$ 时304不锈钢表面的钝化膜完全溶解而导致极性发生反转。对于5050铝合金-45钢电偶对来说,当NaCl溶液的pH值从7降低到4时原电流增加不大,但当pH值继续降低到2时原电流是 $pH=4$ 溶液的5倍,这是由于低pH值可以促进5050铝合金的阴极退极化反应而加速电化学腐蚀过程;特别是当pH值降低到2时,很难在5050铝合金表面形成稳定的

钝化膜,因此电偶腐蚀非常严重^[31]。对于镁合金-铝合金电偶对来说,镁合金电偶腐蚀会产生强碱环境,导致在强碱环境下不稳定的铝合金迅速腐蚀,使得铝合金表面的腐蚀比镁合金更明显^[9,32]。

1.6 其他因素

除了上述因素外,还有一些因素或多种因素耦合均会对电偶腐蚀产生一系列的影响。5050铝合金在拉伸应力的作用下导致表面的钝化膜击穿,同时提高铝合金的电化学活性,电化学电位增大,电偶腐蚀严重^[31]。电解质溶液的浓度,也会对电偶腐蚀产生影响^[17,22]。Hur等^[22]研究了在不同浓度的NaCl溶液中碳纤维增强塑料与7075T6铝合金电偶对之间的电偶腐蚀,发现随着浓度的增大电偶对的腐蚀速率增大。

2 阴极保护

阴极保护就是在外加电流的作用下,将被腐蚀的材料作为阴极保护起来以减弱甚至避免腐蚀的发生^[33]。阴极保护是目前公认的有效的、经济的、成熟的腐蚀防护方法^[34],被广泛用于油、气、水管道,船舶、码头、海上平台。阴极保护方法是指外加电流阴极保护和牺牲阳极阴极保护。外加电流阴极保护是指受保护金属与外部的直流电源负极相连,选择耐腐蚀的材料作为辅助阳极与外加直流电源正极相连,电源提供保护电流以起到保护阴极的目的。邵麟^[35]研究了铝合金在静止和流动状态下在3.5% NaCl溶液中的外加电流的阴极保护并发现:在静止溶液中,外加电压为-0.9 V至-0.95 V时保护效果最好;在流动溶液中,外加电压为-0.95 V至-1.0 V时保护效果最好;观察阴极保护后的微观腐蚀形貌图可以发现,铝合金还是依次受到了点蚀、晶间腐蚀。牺牲阳极阴极保护是将比被保护材料电位更负的金属与其相连,形成电偶腐蚀回路,被保护金属作为阴极不发生氧化反应,从而使其腐蚀得到缓解或完全抑制^[36]。张海兵等^[37]在Al-Zn-Ga-Si低电位牺牲阳极材料中分别添加不同含量的Sn、Bi、Ti、Sb等合金元素以改善对高强度钢的阴极保护,发现当Sb含量为0.5%(质量分数)时阳极综合电化学性能良好,能满足高强钢阴极保护要求。牺牲阳极阴极保护,还可在阳极表面涂覆Zn、Mg等活性金属的底漆。D. Vu等^[38]利用表面沉淀对铝合金进行了牺牲腐蚀保护,主要是对7050和6061铝合金进行表面冶金热处理,诱导表面均匀地形成MgZn₂、Al₂MgCu和Mg₂Si析出相,从而对基体进行阴极保护。

在某些情况下会同时采用外加电流阴极保护和牺牲阳极阴极保护,以提高被保护材料的使用寿命。廖臻等^[39]就对穿越水域管段的管道采用了外加电流联合牺牲阳极阴极保护的防护措施,发现保护率从52.6%提高到了100%,这说明联合阴极保护明显比单独保护效果更好。当然,传统阴极保护需要外加持续的电源或大量消耗活泼金属,存在消耗能源、浪费资源、环境污染等问题,而绿色阴极保护逐渐成为一种探索趋势^[34]。

3 阳极氧化

阳极氧化是利用电化学方法使金属或者合金的表面氧化,通常把需要保护的金属作为阳极,石墨作为阴极,将他们放于电解液中使金属表面长出一层氧化物薄膜^[40]。梁明辉等^[41]研究了硫酸阳极氧化铝合金-1Cr18Ni9Ti不锈钢电偶对在NaCl溶液中的腐蚀行为,发现铝合金表面的阳极氧化膜具有自修复功能。王沙沙等^[42]对6061铝合金进行硼硫酸阳极氧化并与有/无低氢脆镀镉处理的30CrMnSiNi2A结构钢电偶对在工业海洋大气环境下进行电化学测试,发现硼硫酸阳极氧化铝合金与低氢脆镀镉钛30CrMnSiNi2A结构钢电偶对中,铝合金的腐蚀程度最低。尽管阳极氧化在电偶腐蚀中对基体起一定的保护作用,但是对于酸性氧化物来说,阳极氧化生成的氧化膜在酸性环境下稳定性较差,易受到损伤,不能很好的保护基体^[43]。

微弧氧化(Micro-arc Oxidation, MAO),也被称为等离子体电解氧化(Plasma electrolytic oxidation, PEO),是由传统的阳极氧化工艺不断发展而来的,但是与阳极氧化有所不同^[44]。该法是在一种直接非铁金属表面原位生长陶瓷层的技术,通过调整其工艺参数可以使膜层的最大厚度达200 μm左右。Bai等^[45]利用MAO技术在AZ31镁合金表面制备了MAO涂层,并研究了有/无MAO涂层的AZ31镁合金分别与2024铝合金和7075铝合金在5%NaCl盐雾中的电化学腐蚀并发现,微弧氧化处理的AZ31镁合金与2024铝合金和7075铝合金耦合的寿命比无涂层的AZ31镁合金分别延长了8.3倍和7.5倍。Ostapiuk等^[46]研究了采用PEO和PEO/溶胶-凝胶两种方式制作的涂层对碳纤维增强复合材料(CFRP)与镁合金之间电偶腐蚀的影响,发现单一的PEO层不能阻止AZ31镁合金与CFRP之间的电偶联,但是PEO和溶胶-凝胶层的组合可减缓电偶腐蚀活性而提供短期的腐蚀保护。

金属的阳极氧化保护在电偶腐蚀保护中不仅仅被用于作为阳极的金属上,也可应用于作为阴极的

金属,降低电位差或增加腐蚀电阻以缓解电偶腐蚀。例如,钛合金自腐蚀电位高,在与异种材料接触时不可避免的会造成与其接触的异种材料的腐蚀,故采用阳极氧化或微弧氧化技术在钛合金表面生成 TiO_2 薄膜或涂层,阳极氧化处理后的钛合金与铜合金电偶对在3.5%的NaCl溶液中的腐蚀速度减缓^[47-48]。

4 涂层防护

目前,涂层防护是常用的保护金属免受腐蚀的方法之一,涂层对电偶腐蚀的防护是从电绝缘的角度进行的,即对于异种材料的接触面用涂层涂覆加以防护^[49]。同时,涂层也隔绝了水分、氧气及其他腐蚀物质与基材的接触^[50]。按照涂层的化学组成,其分为有机涂层、陶瓷涂层和复合涂层。

4.1 有机涂层

有机涂层具有很高的抗离子电导率,以及良好的阻隔性能,被广泛用于机械设备的腐蚀防护,常见的用于防腐的有机涂层材料是环氧树脂^[50-51]。

环氧树脂具有较强的耐化学性能及良好的绝缘性能,被广泛用于金属构件的腐蚀防护中。固化后的环氧树脂呈三维网状结构,固化体交联密度较高,存在内应力大、脆性大、韧性低、耐冲击性差、耐候性较差等缺点^[52]。所以,一般在环氧树脂中加入有机或无机颗粒粉末以改善防腐性能,同时获得满足设备工况下所需的其它性能。在环氧树脂中加入锌或镁粉得到的富锌或富镁涂层,他们在钢与铝合金表面得到广泛地使用^[53-54]。在环氧树脂基体中加入碳纳米管、二氧化硅、氮化硼、石墨烯(GO)等无机颗粒粉末,使涂层的阻隔性、附着力、耐磨性、耐蚀性、热稳定性等性能得到增强^[55-57]。白炜琛^[58]研究了不同掺杂量的石墨烯对环氧富锌防腐性能的影响并发现,在添加一定量的石墨烯后,能够提高涂层的阴极保护的持久性,但是其会与锌粉和基体之间发生电偶腐蚀。卢向雨^[59]研究了环氧富镁涂层对镁合金的阴极保护能力,发现仅单层富镁涂层不能起到完全阻止镁合金的腐蚀,在富镁涂层中加入三聚磷酸铝会进一步增强涂层的防护性能。Wang等^[60]开发了一种新型纳米 CaCO_3 /环氧树脂纳米复合材料绝缘层,使用纳米 CaCO_3 在增强环氧树脂的韧性和拉伸强度,改善了其力学性能的同时也增强了绝缘性能。

大多数有机涂料都是溶剂型涂料,其坚韧耐用但有毒。随着人们环保意识的增强,环境友好型的水性涂料已成为涂料行业的关注对象。兰芬芬^[61]以水性聚氨酯改性水性环氧树脂为基体树脂,分别

加入钛白粉、硫酸钡、高岭土、云母粉不同颜填料,通过比较4种涂层的极化曲线与电化学阻抗发现,选用云母粉作为颜填料的涂层防腐效果最好。

4.2 陶瓷涂层

对于普通部件来说,通常采用将有机绝缘涂料涂覆在对偶接触面,形成电绝缘隔离。但对于承载载荷和/或有相对运动的关键部件,则需采用绝缘性能优异、耐磨和防腐性能的陶瓷涂层,满足使役要求。典型的绝缘陶瓷材料,包括 Al_2O_3 、 TiO_2 、 SiO_2 、 ZrO_2 、 CaO 、 MgO 、 Si_3N_4 、BN等。

TiO_2 具有独特的电学、光学和光化学性质及生物相容性,被广泛应用于各个领域,研究人员其在电偶腐蚀防护方面的适用性也进行了研究。其中,A. Hartwig等^[62]通过反应性射频溅射在304不锈钢表面沉积了不同厚度的 TiO_2 薄膜,通过测量带涂层与不带涂层304不锈钢与碳纤维增强复合材料(CFRP)之间的电流密度(见图2)发现, TiO_2 薄膜明显降低了电偶腐蚀电流密度。

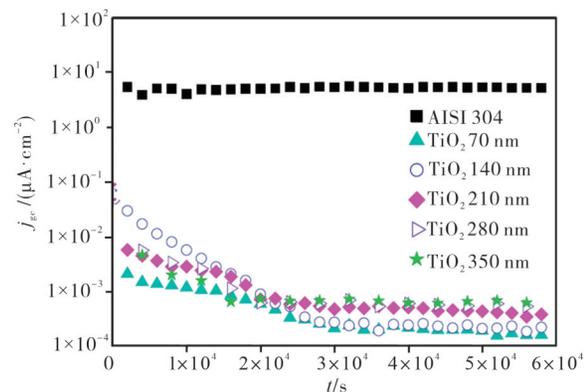


图2 涂有 TiO_2 涂层的AISI 304钢与CFRP之间的电偶腐蚀^[62]

Figure 2 Galvanic corrosion between TiO_2 coated AISI 304 steel and CFRP

氧化铝是使用最广泛的高熔点氧化物材料,具有耐高温、高硬度(莫氏硬度为9)、耐化学腐蚀性和绝缘性等多方面的优良性能,故也常被用作电绝缘防护^[63]。但是,通过大气等离子喷涂制备的 Al_2O_3 涂层的体积电阻率和单位击穿电压均比烧结氧化铝块体低^[64]。大气等离子喷涂是热喷涂的一种,是目前常用的表面工程技术之一,可以赋予基体材料不具备但服役环境所需要的性能,从而给予基体材料保护^[65]。然而,由于热喷涂工艺的特点,涂层中难以避免存在一定量的孔隙,在腐蚀环境下腐蚀介质将沿着空隙到达涂层或基体界面发生腐蚀,最终导致涂层过早失效^[66]。由于热喷涂工艺的特点及陶

瓷材料本身存在的脆性问题,导致高纯度氧化铝具有更佳的绝缘性能,但纯 Al_2O_3 涂层的体积电阻率与氧化铝块体差了多个数量级,同时也因为涂层的多孔性,导致单一的 Al_2O_3 涂层在 3.5% 的 NaCl 溶液中随着浸泡时间的增长变得更为疏松,不适合用于电偶腐蚀防护^[67]。因此,为减少涂层中的孔隙与裂纹等缺陷,提高涂层的性能,可以从材料选择和工艺优化的角度进行改善,如以 Al_2O_3 涂层为基体添加适量的氧化物、碳纤维/碳纳米管或稀土元素等其他物质作为增强相或添加剂,来提高涂层的性能,以改善其机械、电气和化学性能^[68-73]。

在 Al_2O_3 中加入 TiO_2 , 制备出的 Al_2O_3 - TiO_2 系列复合涂层与 Al_2O_3 涂层相比具有高的致密性和结合强度^[74-75], 并且 TiO_2 也可起到抑制稳定的 α - Al_2O_3 向亚稳定的 γ - Al_2O_3 转变的作用,同时还可以提高涂层的延展性,但 TiO_2 的占比过多会影响涂层的电绝

缘效果。胡裕龙等^[76]采用等离子喷涂在铜合金表面制备了不同配比的 Al_2O_3 - TiO_2 涂层,研究了 Al_2O_3 与 TiO_2 的配比对 10CrNiCu-B10 电偶对电绝缘处理后的腐蚀行为,发现 TiO_2 含量增加会降低涂层的电绝缘作用。

吴护林等^[77]研究了等离子喷涂的 Al_2O_3 -13% TiO_2 涂层经过封孔处理后对 TC4-H70 异种金属电偶对的腐蚀防护效果,将 TC4-H70 (未经过喷涂和封孔处理) 电偶对与 T-AT13-HS/H-AT13-HS (喷涂和封孔处理) 电偶对在 3.5% NaCl 溶液中电偶腐蚀 15 天 (见图 3), 发现封孔处理后的 AT13 涂层表面完整、无腐蚀产物,这是因为封孔后涂层具有高电阻,以及表层高致密性几乎阻隔了异种金属间的电子传输。美、英、法国在上世纪八十年代开始将等离子喷涂 Al_2O_3 - TiO_2 陶瓷涂层技术用于零部件的绝缘、耐磨防护,取得了较好的效果。

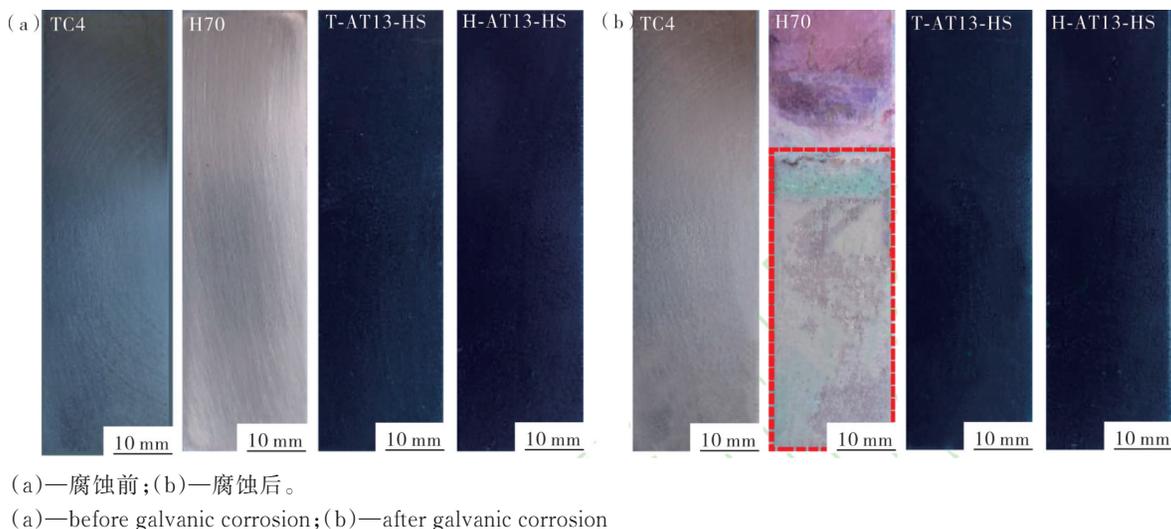


图3 TC4-H70电偶对与T-AT13-HS/H-AT13-HS电偶对电偶腐蚀前后外观^[77]

Figure3 Macrograph of TC4-H70 pair and T-AT13-HS/H-AT13-HS pair before and after corrosion

在陶瓷涂层中加入少量稀土元素或稀土氧化物,可提高陶瓷涂层的致密性及韧性,弥散陶瓷硬质相使涂层组织趋向均匀化,减少复合涂层中杂质和孔隙的不良影响,减缓微裂纹的萌生和扩展,提高涂层的结合强度、摩擦学性能和抗热冲击性能。但是,在面临更严苛的服役工况下,对涂层的韧性和抗冲击性能仍有继续提升的需求。纳米技术的诞生使传统材料的强度和韧性得到显著提高,而热喷涂纳米涂层技术是纳米材料和热喷涂技术的综合应用,通过涂层材料纳米化及借助纳米材料高强韧特性,可显著提高陶瓷涂层材料韧性及强度。

八十年代末,德国研制了具有高韧性和低温超塑性的纳米陶瓷。进入九十年代,日本首先报道了在 Al_2O_3 粉末中加入纳米级的 SiC 可大幅度提高陶

瓷材料的抗弯强度和韧性。美国海军在本世纪初成功研发出等离子喷涂纳米结构陶瓷涂层,已在美海军军舰、潜艇、扫雷艇和航空母舰设备上得到应用,包括进气和排气阀件、舱门支杆、电机和油泵的轴、主推进杆、螺旋泵转子和燃料泵部件等的近百种零部件。与传统微米涂层相比,纳米涂层韧性及强度提高一倍以上,大大提高了涂层服役可靠性。瑞典研究人员采用悬浮液等离子喷涂技术制备了纳米结构陶瓷涂层,并将其用于航空发动机热端部件的防护,其使用寿命是传统涂层的 3 倍,同时具有较好的韧性和抗冲击性能。广东省科学院新材料研究所的研究人员,采用大气等离子喷涂技术制备了微米和纳米 AT13 涂层,发现纳米 AT13 涂层的显微硬度、耐磨性与腐蚀电流密度均优于微米 AT13 涂层^[79]。尽

管目前纳米材料或稀土材料的加入会提高涂层的性能,但是关于对电偶腐蚀性能影响的研究并不多见。

4.3 其他涂层

目前,涂层的种类繁多、应用范围广泛,除了上述的有机涂层与陶瓷涂层用于电偶腐蚀防护外,还有金属镀层也可用于电偶腐蚀防护。王慧婷^[81]在作为阳极的铝合金表面电镀铜,将原有的铝-铜接触面变为铜-铜接触面,从而减少电偶腐蚀电位差,明显提高了铝-铜接触件的耐电偶腐蚀性能。林凯^[82]使用热浸镀的方法在作为阴极的TC4钛合金表面制备了Al-Zn合金镀层,该镀层在TC4钛合金-铝合金电偶对中起到了很好的防护作用:一方面,减少了电偶的电位差;另一方面,随着腐蚀的进行含Zn的腐蚀产物高电阻膜增多,他与固有的 Al_2O_3 膜起到了增加接触电阻的作用,减弱了电偶腐蚀,使得铝合金的接触腐蚀使用寿命提高了2—3倍,也保护了钛合金基体。低氢脆镀镉镍也是常用的防电偶腐蚀方法,但是此方法只起到降低阴阳极电位差及缓解电偶腐蚀的作用,而无法完全防止电偶腐蚀,一般会与阳极氧化或涂层一起对金属进行防护^[83-85]。

在某些情况下,单一的涂层并不能满足所需的性能(如高韧、高强度、耐高温、耐腐蚀等)需求,这就需要不同涂层之间合理选择搭配,以达到更好的防护效果。解辉^[86]将聚多巴胺改性的六方氮化硼添加到环氧树脂涂料中,在钛合金表面制备出绝缘防腐涂层并进行盐雾腐蚀试验并发现,涂覆该绝缘涂层的钛合金-铜镍合金及钛合金-结构钢这两组电偶对的电偶电流密度,比未涂覆涂层的电偶对电流密度分别降低了67倍和44倍,并且与纯环氧树脂相比绝缘涂层具有更好的附着力和抗冲击性能。

5 复合防护

在某些情况下单一的腐蚀防护措施并不能起到很好的腐蚀防护效果,常需要多种防护方法一起对基体进行防护,这些防护中大都以降低腐蚀电位差或者增大阴阳极之间的电阻来减弱或消除电偶腐蚀。

夏江敏等^[87]就对比了钛与铜镍合金在直接连接、电绝缘连接和电绝缘+涂层连接这3种不同防护方式下的腐蚀情况,发现电绝缘+涂层这种方式相对有更好的绝缘性。Srinivasan等^[88]对于铝合金和碳纤维增强聚合物基复合材料电偶对之间的防护,则采用电绝缘加疏水涂层的方式,疏水涂层可以通过破坏连续电解膜的形来帮助减弱电偶腐蚀。

除了电绝缘加涂层防护方法,还可以对阴极和

阳极同时进行不同的表面处理^[80,83,88]。如在钛合金与钢电偶对中,不仅需要钛合金表面微弧氧化,同时还需对18Ni钢化学氧化,这样才能完全有效地控制两者间的电偶腐蚀^[89]。在铝合金与钢电偶对中,在对铝合金阳极氧化或与钢表面低氢脆镀镉钛处理,可起到降低电位差及在一定程度上缓解电偶腐蚀^[84],在对铝合金阳极氧化后再进行环氧聚酰胺和丙烯酸氨酯的复合涂层处理后发现,涂层对水、氧气、腐蚀性离子起到了有效地屏蔽作用,并且加大了阴阳两极间的电阻,对减缓电偶腐蚀效果明显^[83]。

6 结语

电偶腐蚀是常见的一种表面腐蚀失效现象,主要是由于异种材料接触位置产生的电化学反应导致材料失效,影响设备运行的稳定性和使用寿命。目前,对于电偶腐蚀防护的方法除了合理选材和合理的结构设计外,还有阴极保护、阳极氧化和涂层保护。阴极保护是应用时间最长、应用范围最为广泛的技术,可分为牺牲阳极阴极保护和外加电流阴极保护两种。牺牲阳极阴极保护不需要外加直流电源,但对阳极的选择要求较高,要有稳定的性能,对临近设备的干扰小。外加电流阴极保护可以根据外界环境的变化自动调节输出电流,故对长期使用中电位的稳定性、准确性和灵敏性具有一定的要求。阳极氧化可以微调氧化膜的厚度、特征形貌、化学性质等以提高基体的抗腐蚀性,但是在不能钝化的体系中不能使用。涂层保护可以有效的防止基体与环境的接触,起到好的阻隔效果。但是,没有完美的符合各种防护要求的涂层,如何在各种使用环境要求下寻找最合适的材料是目前研究的重点。

随着我国社会经济的不断发展,构建资源节约与环境友好型社会要求的提出,对各种工程设备的长周期安全服役问题提出了新的要求。未来人们对电偶腐蚀防护的关注点可能会在以下几个方面。

(1)开发既环保又满足防护需求的电偶腐蚀防护方法。环境问题一直是人们关注的重点,传统的阴极防护会造成能源消耗、资源浪费、环境污染等问题,目前已对光生阴极保护和摩擦纳米发电机阴极保护等用于阴极保护的供电系统进行了探索,未来对于太阳能、自然机械能等绿色能源的利用会受到更为广泛地关注。环保型涂层防护技术也将是未来人们关注的主要方向之一,如采用水溶性溶剂代替传统的溶剂型溶剂。

(2)纳米材料及技术的应用。随着科技的不断发展,设备的使用环境也会不断发生变化,对涂层的性能也就会有更严格的要求,而纳米材料的加入显

著提高了传统材料的强度和韧性,可以更好的满足设备在承受更高载荷冲击或磨损等恶劣环境中的使用要求。

参考文献:

- [1] 张文毓. 电偶腐蚀与防护的研究进展[J]. 全面腐蚀控制, 2018, 32(12): 51-56.
- [2] 魏宝明. 金属腐蚀理论及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 1984: 362.
- [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.
- [4] 张天宇, 何宇廷, 张腾, 等. 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[J]. 装备环境工程, 2020, 17(5): 40-46.
- [5] 丁国清, 李向阳, 张波, 等. 金属材料在天然海水中的腐蚀电位及其变化规律[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2019, 39(6): 543-549.
- [6] 曹楚南. 腐蚀电化学原理: 第3版[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 268.
- [7] 陈兴伟. 船舶典型结构材料电偶腐蚀行为研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2011.
- [8] 朱相荣, 王相润. 金属材料的海洋腐蚀与防护[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999: 287.
- [9] XIAO K, DONG C, WEI D, et al. Galvanic corrosion of magnesium alloy and aluminum alloy by kelvin probe [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed, 2016, 31(1): 204-210.
- [10] 石鹏飞, 唐波, 周海波, 等. 海洋工程装备异种材料的电偶腐蚀兼容性[J]. 船舶工程, 2022, 44(1): 154-159.
- [11] 王振华, 白杨, 马晓, 等. 钛合金和铜合金管路电偶腐蚀数值仿真[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2018, 38(4): 403-408.
- [12] DONG C F, XIAO K, LI X G, et al. Erosion accelerated corrosion of a carbon steel-stainless steel galvanic couple in a chloride solution[J]. Wear, 2010, 270(1): 39-45.
- [13] SÁNCHEZ-TOVAR R, MONTAÑÉS M T, GARCÍA-ANTÓN J. The effect of temperature on the galvanic corrosion of the copper/AISI 304 pair in LiBr solutions under hydrodynamic conditions[J]. Corrosion Science, 2010, 52(3): 722-733.
- [14] CHEN L. The corrosion behavior of 17-4 stainless steel in a stainless steel-carbon steel galvanic couple [J]. International Journal of Electrochemical Science, 2017, 12: 9445-9455.
- [15] REN C, ZENG D, LIN J, et al. Sour corrosion of C110 steel and its influence by galvanic couple and stress [J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2012, 51(13): 4894-4904.
- [16] SHALABY L A. Galvanic coupling of Ti with Cu and Al alloys in chloride media [J]. Corrosion Science, 1971, 11(10): 767-778.
- [17] ZHANG X G, VALERIOTE E M. Galvanic protection of steel and galvanic corrosion of zinc under thin layer electrolytes[J]. Corrosion Science, 1993, 34(12): 1957-1972.
- [18] 祝慧鑫, 黄智勇, 金国锋, 等. 面积比对 Al 6061-SS 304 电偶腐蚀行为的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(8): 3103-3109.
- [19] ZHANG Q, ZHANG C, ZHANG Z, et al. Galvanic corrosion behavior of dissimilar casing steels in high sulfur-containing gas wells [J]. Engineering Failure Analysis, 2020, 108: 104320.
- [20] 凡杰. 2205/B10 偶对在海水中的电偶腐蚀行为研究 [D]. 上海: 华东理工大学, 2018.
- [21] 孙宝库, 李宁, 杜敏, 等. B10 铜镍合金与 T1p 紫铜的电偶腐蚀及电绝缘[J]. 腐蚀与防护, 2010, 31(7): 544-547.
- [22] HUR S, KIM K, YOO Y, et al. Effects of NaCl and temperature on the galvanic corrosion between CFRP and AA7075T6 [J]. Corrosion Science and Technology, 2020, 19: 75-81.
- [23] 李晓刚. 材料腐蚀与防护概论: 第2版[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017.
- [24] SOLTIS J, LICHTI K A. Galvanic corrosion of carbon steel coupled to antimony [J]. Corrosion Science, 2013, 68: 162-167.
- [25] SÁNCHEZ-TOVAR R, MONTAÑÉS M T, GARCÍA-ANTÓN J. Contribution of the flowing conditions to the galvanic corrosion of the copper/AISI 316L coupling in highly concentrated LiBr solutions [J]. Corrosion Science, 2013, 68: 91-100.
- [26] YANG W, LIU Z, HUANG H. Galvanic corrosion behavior between AZ91D magnesium alloy and copper in distilled water[J]. Corrosion Science, 2021, 188: 109562.
- [27] VON FRAUNHOFER J A, LUBINSKI A T. Polarity reversal in the zinc-mild steel couple [J]. Corrosion Science, 1974, 14(3): 225-232.
- [28] 崔艳雨, 迪力木拉提迪丽努尔, 禹浩, 等. 4J36 及 4J36-X80 偶对电化学腐蚀行为研究[J]. 材料保护, 2020, 53(9): 18-25.
- [29] 龙开琳, 刘凤坤, 朱化强. TC1 与 1Cr11Ni2W2MoV 紧固件的防电偶腐蚀设计研究[J]. 材料保护, 2021, 54(12): 72-78.
- [30] NI Q, XIA X, ZHANG J, et al. Electrochemical and SVET Studies on the typical polarity reversal of Cu-304 stainless steel galvanic couple in Cl⁻-containing solution with different pH [J]. Electrochimica Acta, 2017, 247: 207-215.

- [31] CUI T F, LIU D X, SHI P A, et al. Effect of NaCl concentration, pH value and tensile stress on the galvanic corrosion behavior of 5050 aluminum alloy[J]. *Materials and Corrosion*, 2016, 67(1): 72-83.
- [32] LI S, KHAN H, HIHARA L H, et al. Marine atmospheric corrosion of Al-Mg joints by friction stir blind riveting [J]. *Corrosion Science*, 2016, 111: 793-801.
- [33] 颜东洲, 黄海, 李春燕. 国内外阴极保护技术的发展和进展[J]. *全面腐蚀控制*, 2010, 24(3): 18-21.
- [34] 官自超, 赵继忠, 郭文熹, 等. “绿色”电化学阴极保护研究进展[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2020, 59(5): 767-777.
- [35] 邵麟. 铝合金在3.5%NaCl溶液中的腐蚀行为研究及外加阴极电流保护[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [36] 黄永昌. 电化学保护技术及其应用第二讲阴极保护原理及其应用[J]. *腐蚀与防护*, 2000(4): 191-193.
- [37] 张海兵, 张一哈, 马力, 等. 深浅交变环境牺牲阳极电化性能研究[J]. *中国腐蚀与防护学报*, 2022, 42(5): 867-872.
- [38] VU DINH T, SUN W W, YUE Y, et al. On the miniaturised sacrificial protection achieved by surface precipitation in aluminium alloys [J]. *Corrosion Science*, 2018, 145: 67-79.
- [39] 廖臻, 李洪福, 罗小武, 等. 特殊条件下长输管道外加电流联合牺牲阳极阴极保护措施[J]. *油气储运*, 2023, 42(3): 320-327.
- [40] WU H, HEBERT K R. Electrochemical transients during the initial moments of anodic oxidation of aluminum [J]. *Electrochimica Acta*, 2002, 47(9): 1373-1383.
- [41] 梁明辉, 吴向清, 谢发勤, 等. Cl^- 浓度对阳极氧化5A06铝合金/1Cr18Ni9Ti不锈钢偶接件腐蚀行为的影响[J]. *表面技术*, 2022, 51(7): 161-168.
- [42] 王沙沙, 杨浪, 肖葵, 等. 工业海洋大气环境下阳极氧化6061铝合金的电偶腐蚀行为[J]. *工程科学学报*, 2018, 40(7): 833-841.
- [43] 侯悦, 田原, 赵志鹏, 等. 海洋工程用铝合金的腐蚀与防护研究进展[J]. *表面技术*, 2022, 51(5): 1-14.
- [44] 张瑞珠, 邵玉飞. 钛合金微弧氧化研究现状与进展[J]. *河南科技*, 2021, 40(13): 42-44.
- [45] BAI L JING, 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.
- [46] OSTAPIUK M, TARYBA M G, CALADO L M, et al. A study on the galvanic corrosion of a sol-gel coated PEO Mg-CFRP couple[J]. *Corrosion Science*, 2021, 186: 109470.
- [47] 杨勇进, 张晓云, 刘明辉. TB5钛合金脉冲阳极氧化膜电偶腐蚀性能研究[J]. *航空材料学报*, 2015, 35(5): 57-62.
- [48] 周科, 王树棋, 娄霞, 等. TA15合金微弧氧化陶瓷涂层制备与电偶腐蚀性能[J]. *表面技术*, 2019, 48(7): 72-80.
- [49] 徐丽萍, 毛杰, 张吉卓, 等. 表面工程技术在海洋工程装备中的应用[J]. *中国材料进展*, 2014, 33(1): 1-8.
- [50] SALEH B, FATHI R, SHI H, et al. Advanced corrosion protection through coatings and surface rebuilding[J]. *Coatings*, 2023, 13: 180.
- [51] RAMEZANZADEH B, GHASEMI E, MAHDAVIAN M, et al. Covalently-grafted graphene oxide nanosheets to improve barrier and corrosion protection properties of polyurethane coatings [J]. *Carbon*, 2015, 93: 555-573.
- [52] BRAND S, VEITH L, BAIER R, et al. New methodical approaches for the investigation of weathered epoxy resins used for corrosion protection of steel constructions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 395: 122289.
- [53] KNUDSEN O Ø, STEINSMO U, BJORDAL M. Zinc-rich primers—Test performance and electrochemical properties [J]. *Progress in Organic Coatings*, 2005, 54(3): 224-229.
- [54] BATTOCCHI D, SIMÕES A M, TALLMAN D E, et al. Electrochemical behaviour of a Mg-rich primer in the protection of Al alloys [J]. *Corrosion Science*, 2006, 48(5): 1292-1306.
- [55] CONRADI M, KOCIJAN A, KEK-MERL D, et al. Mechanical and anticorrosion properties of nanosilica-filled epoxy-resin composite coatings [J]. *Applied Surface Science*, 2014, 292: 432-437.
- [56] CHEN Y, REN B, GAO S, et al. The sandwich-like structures of polydopamine and 8-hydroxyquinoline coated graphene oxide for excellent corrosion resistance of epoxy coatings[J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2020, 565: 436-448.
- [57] ATTAEI M, VALE M, SHAKOOR A, et al. Hybrid shell microcapsules containing isophorone diisocyanate with high thermal and chemical stability for autonomous self-healing of epoxy coatings [J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2020, 137(22): 48751.
- [58] 白炜琛. 石墨烯改性和锌粉梯度分布的环氧富锌涂层的防腐性能研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
- [59] 卢向雨. AZ91D镁合金/环氧富镁涂层体系制备及其耐蚀性的研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2013.

- [60] WANG F, DONG Y, CHANG L, et al. High performance of Fe-based soft magnetic composites coated with novel nano-CaCO₃/epoxy nanocomposites insulating layer[J]. *Journal of Solid State Chemistry*, 2021, 304: 122634.
- [61] 兰芬芬. 聚氨酯改性水性环氧树脂及其在防腐涂料中的应用[D]. 合肥:安徽大学, 2021.
- [62] HARTWIG A, KLEIN O, KARL H. Sputtered titanium dioxide thin films for galvanic corrosion protection of AISI 304 stainless steel coupled with carbon fiber reinforced plastics[J]. *Thin Solid Films*, 2017, 621: 211-219.
- [63] 丛霄. 等离子喷涂氧化铝陶瓷涂层介电性能研究[D]. 大连:大连海事大学, 2012.
- [64] 曾威, 邓春明, 刘敏, 等. 等离子喷涂 Al₂O₃涂层的介电性能[J]. *材料研究与应用*, 2011, 5(4): 275-278.
- [65] 陈雄伟, 牟治国, 陈利刚. 等离子喷涂 CuNiIn 涂层性能研究[J]. *材料研究与应用*, 2019, 13(3): 207-210.
- [66] 李长久. 热喷涂技术应用及研究进展与挑战[J]. *热喷涂技术*, 2018, 10(4): 1-22.
- [67] XIAO Y, SHAO F, ZHUANG Y, et al. Comparative study of the corrosion resistance of air-plasma-sprayed Ca₂SiO₄ and Al₂O₃ coatings in salt water[J]. *Coatings*, 2018, 8(4): 116.
- [68] 路广明, 刘宏伟, 艾依提乌日开西. 等离子喷涂氧化铝复合涂层的研究进展[J]. *热加工工艺*, 2018, 47(6): 5-8.
- [69] VARGHESE P, VETRIVENDAN E, KRISHNAN R, et al. Plasma sprayed alumina-yttria composite ceramic coating for electrical insulation applications[J]. *Surface and Coatings Technology*, 2021, 405: 126566.
- [70] STAHR C C, SAARO S, BERGER L M, et al. Dependence of the stabilization of α -alumina on the spray process [J]. *Journal of Thermal Spray Technology*, 2007, 16(5): 822-830.
- [71] CHEN Y, WU D, MA G, et al. Coaxial laser cladding of Al₂O₃-13%TiO₂ powders on Ti-6Al-4V alloy [J]. *Surface and Coatings Technology*, 2013, 228: S452-S455.
- [72] WAHAB J A, GHAZALI M J, SAJURI Z, et al. Effects of micro-grooves on tribological behaviour of plasma-sprayed alumina-13%titania coatings [J]. *Ceramics International*, 2017, 43(8): 6410-6416.
- [73] JANG B K, ENOKI M, KISHI T, et al. Effect of second phase on mechanical properties and toughening of Al₂O₃ based ceramic composites [J]. *Composites Engineering*, 1995, 5(10-11): 1275-1286.
- [74] GECU R, BIROL B, ÖZCAN M. Improving wear and corrosion protection of AISI 304 stainless steel by Al₂O₃-TiO₂ hybrid coating via sol-gel process [J]. *Transactions of the IMF*, 2022, 100(6): 324-332.
- [75] 马然, 贺定勇, 蒋建敏. Al₂O₃含量对等离子喷涂 TiO₂-Al₂O₃陶瓷涂层组织性能的影响[J]. *中国表面工程*, 2010, 23(2): 60-63.
- [76] 胡裕龙, 艾建阳, 卜世超. 氧化铝复合陶瓷涂层电绝缘处理对10CrNiCu-B10电偶对腐蚀行为的影响[J]. *表面技术*, 2022, 51(1): 150-160.
- [77] 吴护林, 张智峰, 彭冬, 等. Al₂O₃-13%TiO₂绝缘防护复合涂层组织及电偶腐蚀性能[J]. *表面技术*, 2023, 52(3): 266-275.
- [78] 颜建辉, 张厚安, 唐思文. 氧钨化掺杂对等离子喷涂 Al₂O₃-40%TiO₂涂层组织和耐磨性能的影响[J]. *润滑与密封*, 2008(4): 81-84.
- [79] 邓春明, 张小水, 毛杰, 等. 等离子喷涂微米和纳米 Al₂O₃-13wt%TiO₂涂层的防护性能[J]. *材料研究与应用*, 2012, 6(4): 236-239.
- [80] SONG G L, DUDNEY N J, LI J, et al. The possibility of forming a sacrificial anode coating for Mg [J]. *Corrosion Science*, 2014, 87: 11-14.
- [81] 王慧婷. 6061铝合金-紫铜接触件在海洋大气环境中的腐蚀与防护[D]. 西安:长安大学, 2018.
- [82] 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.
- [83] 冯驰, 黄运华, 申玉芳, 等. 6061铝合金与30CrMnSiA结构钢在模拟工业-海洋大气环境下的电偶腐蚀防护[J]. *中国有色金属学报*, 2015, 25(6): 1417-1427.
- [84] 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.
- [85] ZHAO Q, WANG H, FAN E, et al. Insight into the galvanic corrosion behavior of the LHE Cd-Ti 300 M steel coupled with TC4 titanium alloy in different atmospheric environments [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2022, 923: 116827.
- [86] 解辉. 船用钛合金与其它金属电偶腐蚀行为及其防护涂层技术应用研究[D]. 北京:北京化工大学, 2022.
- [87] 夏江敏, 李竹影, 林育锋, 等. TA2-B10管不同电偶腐蚀防护方式对B10管腐蚀特性的影响[J]. *国防科技大学学报*, 2022, 44(3): 148-155.
- [88] SRINIVASAN R, 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.
- [89] 邓建青, 刘道新, 唐长斌, 等. 表面处理对TC16钛合金和18Ni钢电偶对的腐蚀防护[J]. *材料保护*, 2011, 44(5): 69-71.

Research Progress of Protection Methods Against Dissimilar Metals Galvanic Corrosion

ZHANG Xuemin^{1,2}, LIN Xiankun¹, WANG Xudong^{1,2}, YANG Kun^{2*}, ZHANG Xiaofeng²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Liuzhou 545006, China; 2. Institute of New Materials, Guangdong Academy of Sciences/National Engineering Laboratory of Modern Materials Surface Engineering Technology/Guangdong Provincial Key Laboratory of Modern Surface Engineering Technology, Guangzhou 510650, China)

Abstract: Aluminum alloy, titanium alloy and other lightweight materials are widely used in the pipe system of aircraft, ships and other high-end equipment, used to transfer water, oil/gas and other working medium and connect various mechanical equipment. In the process of practical application, the contact of dissimilar metals in the electrolyte causes electrochemical reaction and obvious galvanic corrosion phenomenon occurs. The occurrence of galvanic corrosion will affect the structural integrity of the equipment and service safety, it is necessary to take measures to intervene in the occurrence of galvanic corrosion at the contact interface of dissimilar metals. This paper introduces the principle of galvanic corrosion and its influencing factors, and reviews the current status of research on galvanic corrosion protection methods and insulating protective coatings in recent years.

Keywords: galvanic corrosion; influence factors; protective methods; coating protection; dissimilar metals; electrochemical reaction; cathodic protection; anodic oxidation

(学术编辑:黎小辉)