

# 电偶腐蚀研究方法综述

胡鹏飞<sup>1,2</sup>, 张慧霞<sup>2</sup>, 李相波<sup>2</sup>, 唐晓<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东) 材料科学与工程学院, 山东 青岛 266580;  
2. 中船重工第七二五研究所 海洋腐蚀与防护重点试验室, 山东 青岛 266101)

**摘要:** 从研究方法角度综述了电偶腐蚀的研究进展, 包括失重法、形貌观察法、传统电化学测量技术等常见的电偶腐蚀研究方法。另外, 着重介绍了丝束电极、扫描开尔文电极、扫描振动电极、微区电化学阻抗等微区电化学测试技术和有限元多物理场数值模拟仿真技术等新技术在电偶腐蚀研究中的应用, 并对以上方法在电偶腐蚀研究中的应用情况和局限性进行了比较详尽的总结。最后针对复杂电偶腐蚀体系研究方法思路, 提出了自己的建议, 进行了分析与展望。

**关键词:** 电偶腐蚀; 研究方法; 微区电化学技术; 数值模拟仿真

**DOI:** 10.7643/issn.1672-9242.2020.10.017

**中图分类号:** TG172      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2020)10-0110-08

## Summary of Research Methods for Galvanic Corrosion

HU Peng-fei<sup>1,2</sup>, ZHANG Hui-xia<sup>2</sup>, LI Xiang-bo<sup>2</sup>, TANG Xiao<sup>1</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China;  
2. State Key Laboratory for Marine Corrosion and Protection, Luoyang Ship Material Research Institute, Qingdao 266101, China)

**ABSTRACT:** In this paper, the research progress of galvanic corrosion was reviewed from the perspective of research methods, including the common galvanic corrosion research methods such as weight loss method, morphology observation method and traditional electrochemical measurement technology. In addition, this paper focused on the application of new techniques such as wire beam electrode, scanning Kelvin electrode, scanning vibrating electrode, micro-area electrochemical impedance and other micro-area electrochemical testing techniques and finite element multi-physics numerical simulation technology in galvanic corrosion research. At the same time, the application and limitations of the above methods in galvanic corrosion research were summarized in detail. Finally, the research methods and ideas of complex galvanic corrosion system were put forward, and our own suggestions were put forward.

**KEY WORDS:** galvanic corrosion; research methods; micro-area electrochemical technology; numerical simulation

电偶腐蚀是指电连接的两种或以上的金属在同种导电介质中, 因腐蚀电位差的存在, 形成了腐蚀原电池, 加速了低电位金属的腐蚀, 并使高电位金属腐

蚀减缓的现象, 也称为接触腐蚀<sup>[1]</sup>。有时电偶腐蚀还会引起其他类型的局部腐蚀<sup>[2-4]</sup>, 从而造成更加严重的破坏。因此, 电偶腐蚀一直是多材料系统中最重大

收稿日期: 2019-10-21; 修订日期: 2019-11-19

Received: 2019-10-21; Revised: 2019-11-19

作者简介: 胡鹏飞(1995—), 男, 硕士, 主要研究方向为金属材料的海洋腐蚀与防护。

**Biography:** HU Peng-fei (1995—), Male, Master, Research focus: metal material of marine corrosion and protection.

通讯作者: 张慧霞(1981—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为金属材料的海洋腐蚀与防护。

**Corresponding author:** ZHANG Hui-xia (1981—), Female, Master, Senior Engineer, Research focus: metal material of marine corrosion and protection.

的安全隐患, 应当引起相关科研人员的重视。

早在 20 世纪 60 年代<sup>[5]</sup>, 就已经出现了电偶腐蚀的相关研究, 但是仅局限于异种金属在接触状态下的裂纹扩展, 对于电偶腐蚀本身并没有进行探讨。经过几十年的发展, 电偶腐蚀已经成为一门独立的分类, 形成了较为完整的研究体系。针对不同的电偶腐蚀体系, 研究人员尝试了不同的测试和试验方法, 同时诞生了多个标准<sup>[6-11]</sup>, 目前关于双金属偶合体系的电偶腐蚀机理已经较为明确<sup>[12]</sup>。随着当前表征技术的迅速发展和研究人员对不同复杂偶合体系的电偶腐蚀行为的深入研究, 一些新的技术手段被引入到电偶腐蚀研究中。文中针对目前电偶腐蚀研究过程所使用的方法进行了总结归纳, 大致分为以下几类: 失重法、形貌观察法、传统电化学测量技术、微区电化学测试技术、数值模拟仿真技术。

## 1 失重法

失重法是根据试样腐蚀前后的质量损失来表征腐蚀速率的一种测试方法。其主要试验过程是将不同金属试样分别配成偶对, 并置于试验溶液, 同时放置未连接的对比试样进行未偶联状态下的腐蚀试验。试验结束后, 按标准<sup>[13]</sup>规定清除腐蚀产物, 并烘干, 最终得到异种金属在偶联状态下的腐蚀质量差。利用该质量差与未偶联状态下的腐蚀质量差, 可以计算出当前电偶腐蚀体系的平均电偶腐蚀速率, 从而对电偶腐蚀的严重性进行评价<sup>[14-16]</sup>。

失重法是目前最常使用的电偶腐蚀试验方法之一, 简单易操作, 具有极高的普适性。当电极形状不规则、电接触区域复杂或者试验环境恶劣时, 其他试验难以开展, 失重法便成为了最为可靠、最实用的研究方法。通过计算异种金属的腐蚀速率, 不仅可以总结出金属在当前体系的极性趋向, 而且可以通过计算电偶腐蚀效应量化电偶腐蚀的严重程度。如果失重法在实海环境中进行, 可开展长周期的试验, 更具有可靠性和真实性。然而, 失重法通常用于表征电偶腐蚀中的平均速率, 难以体现腐蚀过程中的具体变化。郭娟<sup>[17]</sup>和李正勇<sup>[18]</sup>在研究电偶腐蚀体系时, 均发现当异种金属之间存在阴阳极逆转时, 失重法无法准确判断极性趋向和极性变化。除此以外, 陆峰等<sup>[19]</sup>在研究碳纤维与铝之间的电偶腐蚀体系时发现, 材料表面发生严重点蚀, 并提前失效, 而质量差并未有效表现出失效机理。因此, 失重法往往需要结合腐蚀形貌的观察等方法对电偶腐蚀过程中出现的点蚀、缝隙腐蚀等局部腐蚀进行评价, 从而对电偶腐蚀过程进行综合分析。

## 2 形貌观察法

对于腐蚀形貌的观察是电偶腐蚀试验中常用的

研究手段之一。在常见的腐蚀体系中, 存在十余种腐蚀形态<sup>[20-21]</sup>。通过使用相应的观察手段对形貌进行观察, 可以对腐蚀类型进行区分与评价。按照观察维度可以将形貌观察分为宏观观察与微观观察两大类。

宏观观察一般指用肉眼直接进行观察试样表面, 通常直接用相机进行记录, 适用于腐蚀比较严重的情况。吴志勇等<sup>[3]</sup>在研究钛与铝在盐雾条件下的电偶腐蚀时, 主要使用了宏观观察法, 发现铝合金为阳极, 主要发生点蚀, 而进行阳极化处理后, 表面未有明显点蚀现象, 从而证明该处理手段能显著降低电偶腐蚀敏感性。

腐蚀形貌的微观观察则有较多技术手段, 常见的有光学显微镜、扫描电镜等。因此微观的腐蚀形貌观察是极为重要的研究手段。朱敏等<sup>[22]</sup>在研究铜包钢电极时, 使用扫描电镜对腐蚀前后的形貌进行观察, 发现连铸铜包钢的形貌在一定程度上加剧了电偶腐蚀。对于某些腐蚀体系而言, 腐蚀速率与表面的腐蚀产物膜密切相关, 不同形态的产物膜对基体的保护作用也略有不同<sup>[23-24]</sup>。

从宏观和微观两个角度对于腐蚀形貌进行的观察, 能够获得试样表面基本的表面状态, 弥补了失重法无法体现除电偶腐蚀外其他局部腐蚀类型的缺陷。同时, 在对微观腐蚀形貌进行观察时, 结合 EDS、XRD 等成分分析手段, 可辅助分析金属的腐蚀过程和机理<sup>[25]</sup>。然而, 形貌观察法多用于定性判断, 单独使用时无法完全明确电偶腐蚀过程, 因此需要借助电化学测量技术等其他表征手段。

## 3 传统电化学测量技术

通过检测电化学信号来表征电偶腐蚀过程是目前研究电偶腐蚀的主要方法之一。传统电化学测量在电偶腐蚀研究中主要使用自腐蚀测量、动电位极化测量和电偶腐蚀电位/电流测量。

自腐蚀电位测量主要用于表征两种材料在接触后的电偶腐蚀倾向性, 腐蚀电位差越大, 电偶腐蚀倾向越大。动电位极化曲线主要是测量材料在电偶腐蚀介质中的阳极和阴极极化曲线, 对偶接的两种材料阴阳极过程进行分析, 计算其阴极极化率和阳极极化率, 从而考察其在电偶腐蚀介质中的极化能力。例如当两对电偶对电位差接近时, 阴极反应中极化率较大的阴极, 阴极反应难以进行, 电偶腐蚀较不严重; 而极化率较小的阴极, 阴极反应更易于完成, 电偶腐蚀效应更严重<sup>[26]</sup>。同时, 使用阴阳极的极化曲线可以预测电偶腐蚀的电偶电位和电偶电流, 并推测阳极腐蚀速率<sup>[27]</sup>。因此, 电偶腐蚀体系中的电偶电位和电偶电流由异种金属的自腐蚀电位差和极化特征共同决定。监测电偶腐蚀体系中的电偶电位和电偶电流, 从而得到电极状态随时间的变化规律, 是进一步研究电偶腐

蚀过程的重要手段。电偶电流往往直接代表金属的瞬时腐蚀速率,是电偶腐蚀研究中最常用的数据类型。但因其其在试验室测量值较小,一般使用零电阻电流计(Zero Resistance Ammeter, ZRA)来开展监测试验<sup>[28-30]</sup>。电偶电位往往由电极材料的表面状态和电解质共同决定,面积比等变量由于并不能直接改变电极表面状态,所以理论上对于电偶电位稳态值的影响较小<sup>[31]</sup>。然而,当电极材料或者腐蚀介质等发生改变时,电偶电位往往会发生较为明显的变化<sup>[32]</sup>。如宗广霞<sup>[33]</sup>在研究 X65 与 316L 的电偶腐蚀时发现, pH 值越小,电偶电位值越大。

在电偶腐蚀体系中,阳极的失效就意味着整体的失效,因此工程中往往更关心阳极腐蚀速率,所以电偶电流中最值得关注的是阳极电偶电流密度。当影响因素发生改变时,电偶电流的变化会更加明显。李淑英等<sup>[34]</sup>在研究碳钢与紫铜间的电偶腐蚀时发现,面积比、温度、氯离子浓度对电偶电流的影响比电偶电位明显,其中温度的影响最为突出。对于电偶腐蚀试验而言,因为阳极电偶电流密度往往可以代表阳极腐蚀速率<sup>[35]</sup>,主要利用阳极金属的电偶电流  $I_g$  和自腐蚀电流  $I_{corr}$  计算出电偶腐蚀效应  $\gamma$ , 计算公式如式(1)所示<sup>[36]</sup>。

$$\gamma = \frac{I_a}{I_{corr}} = \frac{I_g}{I_{corr}} + \exp\left[\frac{-2.303(E_g - E_{corr})}{b_c}\right] \quad (1)$$

式中:  $E_{corr}$  和  $I_{corr}$  分别为阳极的自腐蚀电位和自腐蚀电流;  $E_g$  和  $I_g$  分别为阳极的电偶电位和电偶电流;  $b_c$  为阳极的阴极极化 Tafel 斜率。除此以外,按照电偶电流的均值大小,可以将电偶腐蚀敏感性分成 5 个等级。电偶电流越小,电偶腐蚀敏感性等级越低,电偶腐蚀效应越小。一般电偶腐蚀敏感性最低等级即为绝缘状态<sup>[37]</sup>。

在一般性的电偶腐蚀研究中,电化学测试技术是最常见的研究方法。通过使用传统的电化学监测手段,既可以利用瞬时数据对电偶腐蚀体系当前状态进行分析,也可以利用稳态数据对长期的腐蚀情况进行预测,从而从多个方面对电偶腐蚀体系进行综合评价和研究。相比较于失重法和形貌观察法,电化学测量技术可以实现对腐蚀过程的动态研究。然而,刘双梅等<sup>[38]</sup>发现,当电偶腐蚀体系的阳极为钝性材料时,会发生极为严重的点蚀,但此时实测电偶电流密度极小,平均电偶电流密度指标不适合作为评价腐蚀敏感性的唯一判据。因此,在微观电偶腐蚀领域,微区电化学测试技术的引入便格外重要。

## 4 微区电化学测试技术

工程中的电偶腐蚀通常指宏观的异种金属之间的腐蚀,但是对于焊接接头、局部腐蚀等微观区域,电偶腐蚀现象也极为严重。Shirinzadeh-Dastgiri 等<sup>[39]</sup>

在对低碳钢的焊接接头进行失效分析时率先发现,不同的组织成分间同样可以产生电偶腐蚀,并最终导致了焊接接头失效。因此,如何考察局部区域的电偶腐蚀效应,以及如何研究电偶腐蚀中的微观腐蚀特征,是电偶腐蚀微观领域的主要研究方向。目前常见的微区电化学手段主要包括丝束电极技术(WBE)、扫描开尔文探针技术(SKP)、扫描振动电极技术(SVET)、局部电化学阻抗谱技术(LEIS)等。

### 4.1 丝束电极技术(WBE)

丝束电极(Wire Beam Electrode, WBE),也称阵列电极,由 Jun 等<sup>[40]</sup>提出,早期主要应用于研究涂层的局部失效<sup>[41]</sup>,现已被广泛应用于多个研究领域。丝束电极技术是一种由常规电化学方法和探针技术相互结合的研究手段<sup>[42]</sup>,是将一系列相互绝缘的片状或丝状电极按照一定规律排列,以模拟金属原始分布状态。依次对不同位置下的电极开展电化学测试,最终得到电流或电位的分布情况。张大磊等<sup>[43-45]</sup>利用丝束电极对镀锌层与钢基体间电偶腐蚀进行了多次研究,发现在所有面积比下,锌和钢均存在电位与电流的分布不均情况,而当镀锌层有缺陷时,阴极电流密度随钢的暴露面积比例增大而减小。曹快乐等<sup>[46-47]</sup>使用丝束电极先研究了面积比对于黄铜与不锈钢的电偶腐蚀的影响,发现腐蚀面非均匀性与黄铜面积呈正相关,面积的增加甚至提高了局部腐蚀速率。之后又研究了流速对于不锈钢/碳钢电偶对的影响,发现静水下碳钢表面主要为阳极电流,而随着流速的增大阳极区域非均匀程度不断增加。

丝束电极能够有效结合宏观测试与微观测试,从微观角度体现宏观上的不均匀性,通过精确的电化学信息来表征局部腐蚀的发生<sup>[42]</sup>。然而丝束电极技术的测量精度取决于试样尺寸,因此对于更小的尺度,需要应用更加精密的技术手段。

### 4.2 扫描开尔文探针测量技术(SKP)

扫描开尔文探针测量技术(Scanning Kelvin Probe, SKP),是一种能在空气中测量金属表面电子逸出功的测试手段,主要原理是通过调节一个外加的前级电压来测量出试样表面和扫描探针的参比针尖之间的功函差<sup>[48]</sup>。该技术早期曾用于大气腐蚀的研究<sup>[49]</sup>,目前同样被广泛应用于电偶腐蚀研究领域。曹增辉等<sup>[50]</sup>用 SKP 发现随着浸泡时间的增加,焊缝和母材的电偶电流逐渐稳定,且母材区因电位较高而成为阴极。肖葵等<sup>[51-53]</sup>在研究镁合金与其他金属在盐雾环境下的电偶腐蚀时,使用了 SKP 测得的试样间的伏打电位差来对电偶腐蚀敏感性进行评价,发现镁合金腐蚀产物在接触区域的覆盖面积不断扩大,表面伏打电位不断正移,抑制了电偶腐蚀效应。Tahara 等<sup>[54]</sup>用 SKP 技术研究了 Fe 和 Zn 的分界线发

现电位的过渡区仅在 Fe 一侧, 表征出了 Zn 对 Fe 的阴极保护范围。同时还发现液膜越薄, 或电解质浓度越小, 过渡区则越小。

扫描开尔文探针测量技术有着非接触性、不干扰测定体系、对界面区状态变化敏感等优点, 能够有效观察不同位置的腐蚀电位和反应活性的差异, 对于研究电偶腐蚀的腐蚀萌生、扩展具有重要意义。同时, 结合原子力显微镜 (AFM) 可用于针对合金中第二相的研究, 从而深入研究第二相特征对电偶腐蚀的影响。然而该技术易受试验环境影响, 在使用该项技术时, 应考虑到种种干扰因素对测量结果的影响, 并结合其他测试手段进行综合验证。

### 4.3 扫描振动电极技术 (SVET)

扫描振动电极 (Scanning Vibrating Electrode Technique, SVET) 是一种利用扫描振动探针在不接触试样的情况下, 检测试样在溶液中的局部腐蚀电位的技术<sup>[55]</sup>。其工作原理是电解质溶液中的金属材料表面因存在局部阴极而形成离子电流, 从而形成表面电位差, 通过测量不同点的电势差, 从而获得表面电流的分布<sup>[56]</sup>。在电偶腐蚀领域, SVET 可以对局部的阳极、阴极电流进行评价从而进一步探究腐蚀机理。Souto 等<sup>[57]</sup>使用 SVET 技术观察到, “Zn/Fe”电偶体系中氧化反应首先发生于 Zn 的局部区域, 而 Fe 表面的还原反应则分布较为均匀。Simoes 等<sup>[58]</sup>在使用 SVET 联合 SCEM 研究了 Zn 与 Fe 之间的电偶腐蚀行为, 发现随着距离偶接表面距离的减小, 电偶电流越大越集中。

与 SKP 相比, SVET 同样具有非接触性等优点, 同时 SVET 对于离子电流的测量使得对微观电偶腐蚀机理的研究更进一步。然而, 由于其准确性受探针与被测表面距离的影响, 对试验人员及试验环境提出了更高的要求<sup>[59]</sup>。因此 SVET 通常与其他技术手段联合使用, 以获得更准确的电化学信息。

### 4.4 微区电化学阻抗技术 (LEIS)

微区电化学阻抗技术 (Local Electrochemical Impedance Spectroscopy, LEIS) 是在电化学阻抗谱技术 (EIS) 的基础上发展出来的一种技术手段。其工作原理是对被测电极施加微扰电压, 从而感生交变电流, 通过两个电极来确定金属表面局部溶液的交流电流密度, 从而获得局部阻抗<sup>[60]</sup>。该技术能够针对固液相的交界面精确测量微区的阻抗参数, 从微观层面表征电极表面的不均匀性。M. Mouanga 等<sup>[61]</sup>综合使用 EIS 和 LEIS 对“钢/锌”进行分析发现锌在交界面处的溶解最为显著。Lacroix 等<sup>[62]</sup>使用 LEIS 研究了铝合金中 S 相颗粒 (Al-Cu-Mg) 与基体 (Al-Cu) 间的电偶腐蚀行为, 从阻抗角度解释了极化曲线特征和极性的逆转行为, 并结合成分分析, 发现主要原因是 S 相中

Mg 元素的优先腐蚀。

LEIS 技术适用于焊缝、涂层等腐蚀领域的研究, 可以从阻抗角度精确观测试样表面在局部的腐蚀情况。然而该技术过度依赖双重电极, 仅能用于静态介质<sup>[60]</sup>。在流动介质等复杂工况下, 电荷转移、传质过程、表面状态等与静态下的存在差异, 阻抗测量中的误差较大, 使用范围较为狭窄。

### 4.5 数值模拟仿真技术

最早的电偶腐蚀预测, 是腐蚀电位序推测法。腐蚀电位序是在特定的环境下, 测量的一系列金属材料自腐蚀电位的大小排序。同时结合两种金属的极化特征, 能够大致预测出异种金属的电偶腐蚀特征<sup>[63]</sup>。数值模拟仿真技术的核心就是利用两种金属的极化曲线作为边界条件求解关于电解质溶液的 Laplace 方程, 最终得到电极上的电偶电流分布, 从而对腐蚀行为进行分析与预测。

目前国内外多使用边界元技术来对电偶腐蚀体系进行模拟仿真, 而现阶段已有一定数量的文献<sup>[64-67]</sup>验证了数值模拟仿真技术用于电偶腐蚀领域的可靠性, 因此数值模拟也成为研究电偶腐蚀的重要手段之一。Palani 等<sup>[68]</sup>在研究薄液膜状态下铝合金与碳纤维环氧树脂复合材料 (CFRP) 的电偶腐蚀行为时, 针对有限元模型开发了新试验装置, 并验证了该模型在电流、电位分布上的有效性。Murer 等<sup>[69]</sup>在对铝和铜之间的电偶腐蚀进行数值模拟仿真时, 结合了 SVET 等微区测试技术, 有效验证了数值模拟技术在预测局部电化学特征的可行性。

值得一提的是, 数值模拟仿真技术并不简单适用于所有电偶腐蚀环境。Armita 等<sup>[70]</sup>在研究不锈钢/碳钢在混凝土孔隙溶液中的电偶腐蚀时, 使用了“蒙特卡罗模拟”这一数学模型, 同时开展了简易的电化学试验予以验证。然而, Armita 等发现, 由于混凝土是一种复杂的非均质多孔介质, 普通电化学试验并不能完全模拟混凝土环境, 仍需要进一步试验以确定仿真模型的可行性。因此, 对于较为复杂的电偶腐蚀环境, 开展合理的验证试验对于验证仿真模型的有效性有着极为重要的作用。

## 5 结语

目前的电偶腐蚀研究主要集中在两种不同电位的材料间发生的腐蚀行为。然而在目前工程应用中, 三种及以上金属的偶合结构更为普遍, 严苛的、复杂的工况也较多, 而关于多元复杂偶合腐蚀体系的研究较为有限。在该领域中, 常见的研究是仅通过失重试验来进行极性判断和腐蚀速率计算, 而采用电化学技术, 如电偶电流、电偶电位监测等, 目前研究比较缺乏。如何使用上述电化学测量等手段研究多元复杂偶

合腐蚀体系的腐蚀行为,是当前亟需解决的难题。如何有效利用当前成熟的表征技术或对不同表征技术进行合理整合,也是值得探索的方向之一。

#### 参考文献:

- [1] 魏宝明. 金属腐蚀理论及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 1984.  
WEI Bao-ming. Metal Corrosion Theory and Application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1984.
- [2] 田永芹, 常炜, 胡丽华, 等. APIX65、316L 不锈钢及 Inconel 625 间电偶腐蚀风险研究[J]. 表面技术, 2016,45(5):128-134.  
TIAN Yong-qin, CHANG Wei, HU Li-hua, et al. Study on Corrosion Risk of APIX65, 316L Stainless Steel and Inconel 625[J]. Surface Technology, 2016, 45(5): 128-134.
- [3] 吴志勇, 李雪源, 赵黎宁, 等. 钛合金与铝合金及铝合金转化膜的电偶腐蚀研究[C]// 第九届全国转化膜及表面精饰学术年会论文集. 合肥, 2012.  
WU Zhi-yong, LI Xue-yuan, ZHAO Li-ning, et al. Galvanic Corrosion of Titanium Alloy and Aluminum Alloy and Aluminum Alloy Conversion Film[C]// The 9th National Conference on Transforming Film and Surface Finishing. Hefei, 2012.
- [4] 陆峰, 孙志华, 钟群鹏, 等. 碳纤维环氧复合材料对铝合金应力腐蚀性能的影响[J]. 航空材料学报, 2003(1): 44-48.  
LU Feng, SUN Zhi-hua, ZHONG Qun-peng, et al. Effect of Carbon Fiber Epoxy Composites on Stress Corrosion Properties of Aluminum Alloys[J]. Journal of Aeronautical Materials, 2003(1): 44-48.
- [5] CHAEVSKII M I, POPOVICH V V. Mechanism of corrosion Cracking of Metals Deformed in Contact with Molten Lithium[J]. Soviet Materials Science, 1968, 3(3): 180-183.
- [6] HB 5374—1987, 不同金属电偶电流测定方法[S].  
HB 5374—1987, Method for Determining the Galvanic Current of Different Metals[S].
- [7] GB/T 15748—2013, 船用金属材料电偶腐蚀试验方法[S].  
GB/T 15748—2013, Marine Metal Materials Galvanic Corrosion Test Method[S].
- [8] DIN 50919—1984, 金属的腐蚀 电解溶液里接触腐蚀的试验[S].  
DIN 50919—1984, Corrosion of Metals Test of Contact Corrosion in Electrolytic Solutions[S].
- [9] ASTM G71—1981(2009), 用电解液实施并评价电解腐蚀试验的指南[S].  
ASTM G71—1981 (2009), Guidelines for the Implementation and Evaluation of Electrolytic Corrosion Tests with Electrolytes[S].
- [10] T/CSTM 00046.12—2018, 低合金结构钢腐蚀试验 第12部分: 电偶腐蚀试验方法[S].  
T/CSTM 00046.12—2018, Low Alloy Structural Steel Corrosion Test—Part 12: Galvanic Corrosion Test Method S].
- [11] JIS T0305—2002, 疑似体液(生理溶液)中异种金属间接触腐蚀试验方法[S].  
JIS T0305—2002, Test Method for Contact Corrosion between Dissimilar Metals in Suspected Body Fluids (Physiological Solutions)[S].
- [12] DECEASED P P. Galvanic Corrosion[M]. Berlin: Springer International Publishing.
- [13] GB/T 6384—2008, 船舶及海洋工程用金属材料在自然环境中的海水腐蚀试验方法[S].  
GB/T 6384—2008, Marine and Marine Engineering Metal Materials in the Natural Environment of Seawater Corrosion Test Method[S].
- [14] 徐宏妍, 李智勇. AZ91D 镁合金电偶腐蚀的研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2013, 33(4): 298-305.  
XU Hong-yan, LI Zhi-yong. Study on Galvanic Corrosion of AZ91D Magnesium Alloy[J]. Chinese Journal of Corrosion and Protection, 2013, 33(4): 298-305.
- [15] 艾俊哲, 梅平, 郭兴蓬. 用失重法研究二氧化碳环境中的电偶腐蚀[J]. 材料保护, 2008(2): 60-62.  
AI Jun-zhe, MEI Ping, GUO Xing-peng. Study on Galvanic Corrosion in Carbon Dioxide Environment by Weightlessness Method[J]. Journal of Materials Protection, 2008(2): 60-62.
- [16] 刘俊超, 陈胜利, 赵景茂. 镍基合金与碳钢的电偶腐蚀及其影响因素[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2010, 27(2): 25-27.  
LIU Jun-chao, CHEN Sheng-li, ZHAO Jing-mao. Galvanic Corrosion of Nickel-base Alloy and Carbon Steel and Its Influencing Factors[J]. Petrochemical Corrosion and Protection, 2010, 27(2): 25-27.
- [17] 郭娟. 紧固件材料与偶对材料在海水间浸下电偶腐蚀研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.  
GUO Juan. Study on Galvanic Corrosion of Fastener Materials and Coupled Materials in Seawater Immersion[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [18] 李正勇. 油田用材在含 HAc 的 CO<sub>2</sub> 饱和盐溶液中的电偶腐蚀研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.  
LI Zheng-yong. Study on Galvanic Corrosion of Oilfield Materials in CO<sub>2</sub> Saturated Salt Solution Containing HAc[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2013.
- [19] 陆峰, 张晓云, 汤智慧, 等. 碳纤维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(1): 40-44.  
LU Feng, ZHANG Xiao-yun, TANG Zhi-hui, et al. Study on Galvanic Corrosion Behavior of Carbon Fiber Composites and Aluminum Alloys[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2005(1): 40-44.
- [20] FONTANA M G, GREENE N D. Corrosion Engineering[M]. ZUO Jing-yin, Trans. Beijing: Chemical Industry Press, 1982.
- [21] GB/T 10123—2001, 金属和合金的腐蚀 基本术语和定义[S].

- GB/T 10123—2001, Corrosion of Metals and Alloys Basic Terms and Definitions[S].
- [22] 朱敏, 杜翠薇, 李晓刚, 等. 铜包钢在截面暴露条件下的电偶腐蚀行为研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013, 25(4): 265-270.  
ZHU Min, DU Cui-wei, LI Xiao-gang, et al. Study on Galvanic Corrosion Behavior of Copper-clad Steel under Cross-section Exposure Conditions[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2013, 25(4): 265-270.
- [23] DE MORAES F, SHADLEY J R, CHEN J, et al. Characterization of CO<sub>2</sub> Corrosion Product Scales Related to Environmental Conditions[C]// Corrosion 2000. Florida: NACE International 2000.
- [24] 张国安, 路民旭, 吴荫顺. CO<sub>2</sub> 腐蚀产物膜的微观形貌和结构特征[J]. 材料研究学报, 2005(5): 537-548.  
ZHANG Guo-an, LU Min-xu, WU Yin-shun. Micromorphology and Structural Characteristics of CO<sub>2</sub> Corrosion Product Films[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2005(5): 537-548.
- [25] NICOLAS A, MELLO A W, SANGID M D. Relationships between Microstructure and Micromechanical Stresses on Local Pitting During Galvanic Corrosion in AA7050[J]. Corrosion Science, 2019, 154: 208-225.
- [26] 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.  
ZHU Xiang-rong, WANG Xiang-run. Marine Corrosion and Protection of Metallic Materials[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1999.
- [27] 丁莉. 海水淡化装置中 TA2/HAl77-2/316L SS 腐蚀体系微区电化学反应行为和机理研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2016.  
Ding Li. Electrochemical Behavior and Mechanism of TA2/HAl77-2/316L SS Corrosion System in Seawater Desalination Unit[D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2016.
- [28] 台闯, 刘烁. 新型零电阻电流计在异种金属电偶腐蚀测量中的应用[C]// 2018 年全国腐蚀电化学及测试方法学术交流会论文集. 北京, 2018.  
TAI Chuang, LIU Shuo. Application of New Zero Resistance Current Meter in Measurement of Dissimilar Metal Galvanic Corrosion[C]// 2018 National Symposium on Corrosion Electrochemistry and Test Methods. Beijing, 2018.
- [29] 彭泽焯, 吴建华, 王春丽. 温度对工业纯钛与低合金钢电偶腐蚀行为的影响[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2013, 25(6): 463-469.  
PENG Ze-xuan, WU Jian-hua, WANG Chun-li. Effect of Temperature on Galvanic Corrosion Behavior of Industrial Pure Titanium and Low Alloy Steel[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2013, 25(6): 463-469.
- [30] NÓVOA X R, IZQUIERDO M, MERINO P, et al. Electrochemical Impedance Spectroscopy and Zero Resistance Ammeters (ZRA) as Tools for Studying the Behaviour of Zinc-Rich Inorganic Coatings[J]. Materials Science Forum, 1991, 44-45: 223-234.
- [31] 陈兴松, 徐永锋, 闫康平. 钛钢复合板在海水中电偶腐蚀研究[J]. 化工设备与管道, 2015, 52(5): 21-24.  
CHEN Xing-song, XU Yong-feng, YAN Kang-ping. Study on Galvanic Corrosion of Titanium Steel Composite Plate in Seawater[J]. Chemical equipment and pipeline, 2015, 52(5): 21-24.
- [32] KUMAR VARMA D P, CHIDAMBARAM S, BABURAM REDDY K, et al. Comparison of Galvanic Corrosion Potential of Metal Injection Molded Brackets to that of Conventional Metal Brackets with Nickel-Titanium and Copper Nickel-Titanium Archwire Combinations[J]. The Journal of Contemporary Dental Practice, 2013, 14: 488-495.
- [33] 宗广霞, 张洋, 方军锋, 等. X65/316L 电偶对在模拟油田产出水中的电偶腐蚀行为[J]. 腐蚀与防护, 2012, 33(7): 589-592.  
ZONG Guang-xia, ZHANG Yang, FANG Jun-feng, et al. Galvanic Corrosion Behavior of X65/316L Galvanic Pair in Simulated Oilfield Produced Water[J]. Corrosion and Protection, 2012, 33(7): 589-592.
- [34] 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(5): 300-302.  
LI Shu-ying, CHEN Wei. The Galvanic Behavior of Carbon Steel/Copper in NaCl Medium[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2000(5): 300-302.
- [35] MOMOI Y, ASANUMA A, KOHNO A, et al. A Measurement of Galvanic Current and Electrical Potential in Extracted Human Teeth[J]. Journal of Dental Research, 2016, 65(12): 1441-1444.
- [36] 宋诗哲. 腐蚀电化学研究方法[M]. 北京: 化学工业出版社, 1988.  
SONG Shi-zhe. Corrosion Electrochemical Research Method [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 1988.
- [37] 潘大伟, 闫永贵, 高心心, 等. 高强度钢与典型管系材料 B10 和 TA2 之间的电偶腐蚀及其电绝缘[J]. 腐蚀与防护, 2017, 38(8): 589-592.  
PAN Da-wei, Yan Yong-gui, Gao Xin-xin, et al. Galvanic Corrosion and Electrical Insulation between High Strength Steel and Typical Piping Materials B10 and TA2[J]. Corrosion and Protection, 2017, 38(8): 589-592.
- [38] 刘双梅, 刘道新, 樊国福. TA7 钛合金耐热不锈钢电偶腐蚀敏感性研究[J]. 材料工程, 2000(1): 17-19.  
LIU Shuang-mei, LIU Dao-xin, FAN Guo-fu. Study on Galvanic Corrosion Sensitivity of TA7 Titanium Alloy Heat-resistant Stainless Steel[J]. Journal of Materials Engineering, 2000(1): 17-19.
- [39] SHIRINZADEH-DASTGIRI M, MOHAMMADI J, BEHNAMIAN Y, et al. Metallurgical Investigations and Corrosion Behavior of Failed Weld Joint in AISI 1518 Low Carbon Steel Pipeline[J]. Engineering Failure Analysis, 2015, 53: 78-96.
- [40] JUN T Y, SHITI Y. The Effects of Inhomogeneity in Organic Coatings on Electrochemical Measurements Us-

- ing a Wire Beam Electrode[J]. Progress in Organic Coatings, 1991, 19(3): 257-263.
- [41] STERN M, GEABY A L. Electrochemical Polarization[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1957, 104(1): 56.
- [42] 韩光哲, 石博, 李明启, 等. 国内外丝束电极的发展现状及应用[J]. 全面腐蚀控制, 2018, 32(10): 66-68.  
HAN Guang-zhe, SHI Bo, LI Ming-qi, et al. Development Status and Application of Wire Beam Electrode at Home and Abroad[J]. General Corrosion Control, 2018, 32(10): 66-68.
- [43] 张大磊, 王伟, 李焰. 热镀锌钢材的电偶腐蚀行为-划痕型缺陷[J]. 材料研究学报, 2009, 23(4): 343-346.  
ZHANG Da-lei, WANG Wei, LI Yan. Galvanic Corrosion Behavior of Hot-Dip Galvanized Steel-Scratch Type Defects[J]. Chinese Journal of Materials Research, 2009, 23(4): 343-346.
- [44] 张大磊, 王伟, 李焰. 热镀锌钢材的电偶腐蚀行为的微区电化学表征[C]//2010年全国腐蚀电化学及测试方法学术会议论文集. 杭州, 2010.  
ZHANG Da-lei, WANG Wei, LI Yan. Micro-area Electrochemical Characterization of Galvanic Corrosion Behavior of Hot-Dip Galvanized Steel[C]//2010 National Conference on Corrosion Electrochemistry and Test Methods. Hangzhou, 2010.
- [45] 张大磊, 王伟, 金有海, 等. 丝束电极研究镀锌层存在点缺陷的锌/钢电偶腐蚀行为[J]. 中国有色金属学报, 2011, 21(9): 2168-2174.  
ZHANG Da-lei, WANG Wei, JIN You-hai, et al. Study on Zinc/Steel Galvanic Corrosion Behavior of Point Defects in Zinc Coating by Wire Beam Electrode[J]. Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011, 21(9): 2168-2174.
- [46] 曹快乐. 丝束电极研究黄铜/不锈钢电偶腐蚀的非均匀性[D]. 大连: 大连理工大学, 2016.  
CAO Kuai-le. Study on Non-uniformity of Brass/Stainless Steel Galvanic Corrosion by Wire Beam Electrode[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016.
- [47] 曹快乐, 程从前, 赵杰. 丝束电极技术研究流体对不锈钢/碳钢电偶腐蚀非均匀性行为的影响[J]. 材料保护, 2016, 49(7): 27-30.  
CAO Xing, CHENG Cong-qian, ZHAO Jie. Effects of Fluids on the Non-uniformity of Stainless Steel/Carbon Steel Galvanic Corrosion by Wire Beam Electrode Technology[J]. Material protection, 2016, 49(7): 27-30.
- [48] 王力伟, 李晓刚, 杜翠薇, 等. 微区电化学测量技术进步及在腐蚀领域的应用[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2010, 30(6): 498-503.  
WANG Li-wei, LI Xiao-gang, DU Cui-wei, et al. Progress in Electrochemical Measurement of Micro-area and Its Application In Corrosion[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 30(6): 498-503.
- [49] STRATMANN M. The Investigation of the Corrosion Properties of Metals, Covered with Adsorbed Electrolyte Layers—A New Experimental Technique[J]. Corrosion Science, 1987, 27(8): 869-872.
- [50] 曹增辉, 廖柯熹, 李伟, 等. X56 钢焊接接头在海水中的腐蚀行为研究[J]. 热加工工艺, 2017, 46(10): 70-73.  
CAO Zeng-hui, LIAO Ke-zhen, LI Wei, et al. Corrosion Behavior of X56 Steel Welded Joints in Seawater[J]. Thermal Process Technology, 2017, 46(10): 70-73.
- [51] 肖葵, 董超芳, 李晓刚, 等. AZ91D 镁合金电偶腐蚀的扫描 Kelvin 探针研究[J]. 稀有金属材料与工程, 2011, 40(9): 1589-1593.  
XIAO Kui, DONG Chao-fang, LI Xiao-gang, et al. Scanning Kelvin Probe for Galvanic Corrosion of AZ91D Magnesium Alloy[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2011, 40(9): 1589-1593.
- [52] 肖葵, 董超芳, 魏丹, 等. AZ91D 镁合金电偶腐蚀的扫描开尔文探针原位表征[J]. 材料保护, 2011, 44(3): 24-26.  
XIAO Kui, DONG Chao-fang, WEI Dan, et al. In Situ Characterization of Scanning Kelvin Probe for Galvanic Corrosion of AZ91D Magnesium Alloy[J]. Journal of Materials Protection, 2011, 44(3): 24-26.
- [53] 肖葵, 董超芳, 李晓刚, 等. 采用开尔文扫描探针技术研究镁合金偶接铜合金的电偶腐蚀规律[J]. 北京科技大学学报, 2010, 32(8): 1023-1028.  
XIAO Kui, DONG Chao-fang, LI Xiao-gang, et al. Study on Galvanic Corrosion of Magnesium Alloy Coupled Copper Alloy by Kelvin Scanning Probe Technology[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2010, 32(8): 1023-1028.
- [54] AHARA A, KODAMA T. Potential Distribution Measurement in Galvanic Corrosion of Zn/Fe Couple by Means of Kelvin Probe[J]. Corrosion Science, 2000, 42(4): 655-673.
- [55] 骆鸿, 董超芳, 肖葵, 等. 金属腐蚀微区电化学研究进展(3)—扫描振动电极技术[J]. 腐蚀与防护, 2009, 30(9): 631-635.  
LUO Hong, DONG Chao-fang, XIAO Kui, et al. Progress in Electrochemical Research of Metal Corrosion Microdomains(3)—Scanning Vibrating Electrode Technology[J]. Corrosion and Protection, 2009, 30(9): 631-635.
- [56] AKID R, GARMA M. Scanning Vibrating Reference Electrode Technique: A Calibration Study to Evaluate the Optimum Operating Parameters for Maximum Signal Detection of Point Source Activity[J]. Electrochimica Acta, 2004, 49(17): 2871-2879.
- [57] SOUTO R M, GONZÁLEZ-GARCÍA Y, BASTOS A C, et al. Investigating Corrosion Processes in the Micrometric Range: A SVET Study of the Galvanic Corrosion of Zinc Coupled with Iron[J]. Corrosion Science, 2007, 49(12): 4568-4580.
- [58] SIMÕES A M, BASTOS A C, FERREIRA M G, et al. Use of SVET and SECM to Study the Galvanic Corrosion of an Iron-Zinc Cell[J]. Corrosion Science, 2007, 49(2): 726-739.
- [59] 张彭辉, 逢昆, 丁康康, 等. 扫描振动电极技术在腐蚀

- 领域的应用进展[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2017, 37(4): 315-321.
- ZHANG Peng-hui, PANG Kun, DING Kang-kang, et al. Progress in the Application of Scanning Vibrating Electrode Technology in the Field of Corrosion[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2017, 37(4): 315-321.
- [60] 李祝文, 李岩, 秦永坤, 等. EIS、LEIS 和 DEIS 在金属腐蚀与防护研究中的应用进展[J]. 电镀与涂饰, 2018, 37(9): 404-410.
- LI Zhu-wen, LI Yan, QIN Yong-kun, et al. Progress in the Application of EIS, LEIS and DEIS in Metal Corrosion and Protection Research[J]. Electroplating and Finishing, 2018, 37(9): 404-410.
- [61] MOUANGA M, PUIGGALI M, TRIBOLLET B, et al. Galvanic Corrosion between Zinc and Carbon Steel Investigated by Local Electrochemical Impedance Spectroscopy[J]. Electrochimica Acta, 2013, 88: 6-14.
- [62] LACROIX L, BLANC C, PÉBÈRE N, et al. Simulating the Galvanic Coupling between S-Al<sub>2</sub>CuMg Phase Particles and the Matrix of 2024 Aerospace Aluminium Alloy[J]. Corrosion Science, 2012, 64: 213-221.
- [63] BABOIAN R, 陈旭俊. 用电化学技术预测电偶腐蚀[J]. 北京化工学院学报, 1980(4): 92-99.
- BABOIAN R, CHEN Xu-jun. Prediction of Galvanic Corrosion by Electrochemical Techniques[J]. Journal of Beijing Institute of Chemical Technology, 1980(4): 92-99.
- [64] ZAMANI N G. Boundary Element Simulation of the Cathodic Protection System in a Prototype Ship[J]. Applied Mathematics and Computation, 1988(2): 119-134.
- [65] 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.
- [66] LIU G C, SUN W, WANG L, et al. Modeling Cathodic Shielding of Sacrificial Anode Cathodic Protection Systems in Seawater[J]. Materials and Corrosion, 2013, 64(6): 472-477.
- [67] 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.
- WANG Zhen-hua, BAI Yang, MA Xiao, et al. Numerical Simulation of Galvanic Corrosion of Titanium Alloy and Copper Alloy Pipelines[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2018, 38(4): 403-408.
- [68] PALANI S, HACK T, DECONINCK J, et al. Validation of Predictive Model for Galvanic Corrosion under Thin Electrolyte Layers: An Application to Aluminium 2024-CFRP Material Combination[J]. Corrosion Science, 2014, 78: 89-100.
- [69] MURER N, OLTRA R, VUILLEMIN B, et al. Numerical Modelling of the galvanic coupling in Aluminium Alloys: A Discussion on the Application of Local Probe Techniques[J]. Corrosion Science, 2010, 52(1): 130-139.
- [70] MOHAMMADIAN A, RASHETNIA R, LUCIER G, et al. Numerical Simulation and Experimental Corroboration of Galvanic Corrosion of Mild Steel in Synthetic Concrete Pore Solution[J]. Cement and Concrete Composites, 2019, 103: 263-278.