引用格式：肖鉴，贾雪娇，吴彦霖，等. 电化学测试技术在腐蚀与防护中的应用研究进展[J]. 材料工程，2026，54(8)：251-263.
XIAO Jian，JIA Xuejiao，WU Yanlin，et al. Research progress in electrochemical testing techniques for corrosion and protection applications[J]. Journal of Materials Engineering，2026，54(8)：251-263.

电化学测试技术在腐蚀与防护中的应用研究进展

肖　鉴[1,2]，贾雪娇[1,2]，吴彦霖[1,2]，王　戎[1,2]，张　杏[1,2]，
马　超[3]，王春琪[3]，于　美[1,2*]

（1 北京航空航天大学 材料科学与工程学院，北京 100191；2 北京航空航天大学 热带海洋工程材料及评价全国重点实验室，北京 100191；3 中信戴卡股份有限公司，河北 秦皇岛 066000）

摘要：电化学测试技术以其高灵敏度、原位实时监测及多尺度分析等优势，已成为研究材料腐蚀机理与防护性能评价的核心手段之一。本文综述了电化学测试技术的分类及其在腐蚀研究中的应用进展，分析对比了传统电化学方法与微区电化学技术的特性与适用范围，探讨了多技术联用及人工智能数据分析在复杂腐蚀体系测试与机理解析中的作用，并从腐蚀行为和机理研究、防护性能评估及腐蚀在线监测等方面对电化学技术的应用进行了系统总结。最后指出，电化学测试技术不只在于单一技术的普及，而是重点发展多技术联用与高时空分辨原位电化学表征，实现从界面本征反应参数提取到腐蚀机制的深度解析。在此基础上，融合数据驱动与智能算法构建电化学响应与材料服役寿命的定量关联，并依托集成化、轻量化的智能监测系统实现复杂工程场景下的实时评估与寿命预测，从而推动腐蚀电化学测试从实验室机理研究走向实际工程材料的全周期安全管理。

关键词：电化学测试；腐蚀；防护；多技术联用
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2025.000593　**CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2025.000593
中图分类号：TB37　**文献标识码**：A　**文章编号**：1001-4381(2026)08-0251-13

Research progress in electrochemical testing techniques for corrosion and protection applications

XIAO Jian[1,2]，JIA Xuejiao[1,2]，WU Yanlin[1,2]，WANG Rong[1,2]，ZHANG Xing[1,2]，
MA Chao[3]，WANG Chunqi[3]，YU Mei[1,2*]

（1 School of Materials Science and Engineering，Beihang University，Beijing 100191，China；
2 State Key Laboratory of Tropic Ocean Engineering Materials and Materials Evaluation，Beihang University，Beijing 100191，China；3 CITIC Dicastal Co.，Ltd.，Qinhuangdao 066000，Hebei，China）

Abstract：Electrochemical testing techniques，featuring high sensitivity，*in-situ* real-time monitoring，and multi-scale analysis，have become a core tool for studying corrosion mechanisms and evaluating protective performance of materials. This paper reviews the classification and recent advances of electrochemical testing methods. The characteristics and applicable conditions of traditional and localized electrochemical techniques are analyzed and compared. The role of multi-technique coupling and artificial intelligence data analysis in testing complex corrosion systems and elucidating mechanisms are discussed. The application of electrochemical techniques from the perspectives of corrosion behavior and mechanism research，protective performance evaluation，and online corrosion monitoring are systematically summarized. Finally，it points out that the development of electrochemical testing techniques lies not only in the popularization of single techniques but also in prioritizing the advancement of multi-technique coupling and high-spatiotemporal-resolution *in-situ* electrochemical characterization，enabling in-depth analysis from the extraction of intrinsic interfacial reaction parameters to the comprehensive understanding of corrosion mechanisms. On this basis，data-driven approaches and intelligent algorithms are integrated to establish quantitative

correlations between electrochemical responses and the service life of materials. Furthermore, integrated and lightweight intelligent monitoring systems enable real-time assessment and lifetime prediction under complex engineering conditions, thereby promoting the transition of corrosion electrochemical testing from laboratory-based mechanistic studies to full-life-cycle safety management of engineering materials.

Key words: electrochemical testing; corrosion; protection; multi-technique coupling

腐蚀是材料与环境发生化学或电化学反应而导致的破坏现象，这是一个全球性问题，遍及各行各业，会造成巨大的资源浪费。根据中国工程院“我国腐蚀状况及控制战略研究”调查结果[1]，2014 年，我国腐蚀成本约占当年国内生产总值的 3.34%，高达 2.1 万亿元人民币。同时，腐蚀易引起安全隐患，对装备安全服役造成严重威胁。

腐蚀与电化学密切相关，大多数腐蚀过程（尤其是金属腐蚀），本质上是电化学过程，涉及电子转移和氧化还原反应[2]。因此，电化学测试方法可深入研究材料腐蚀行为，为腐蚀机理研究及耐蚀性能评价提供依据[3]。

相对于传统的腐蚀行为和材料耐蚀性评价技术，如增失重、深度、形貌等，电化学测试技术因具有操作简单、灵敏度高、动态监测、测量耗时短以及获得腐蚀动力学信息全面等优点，被广泛应用于腐蚀科学的研究中。

电化学测试技术应用至今已有百年历史，一些重要测试方法的出现推动了该领域从宏观表征向微观机制解析的进步[4]。早期稳态方法奠定了电化学热力学研究基础，20 世纪 50 年代，Gerischer 等创建的多种快速暂态测量方法以及 Randles-Sevcik 对循环伏安（cyclic voltammetry，CV）法的理论完善，实现了电极反应动力学过程的可逆性与反应机理解析。线性极化理论的提出和恒电位仪的诞生促进了不可逆电极过程的研究。随着电子技术的革新，20 世纪 70 年代，交流阻抗谱等技术的不断发展，将电化学表征拓展至多时间尺度动态过程，推动腐蚀研究深入到界面反应动力学层面，至今仍被广泛应用。1989 年，Bard 团队开发扫描电化学显微镜，实现电极表面微米级化学活性成像[5]。随着理论和设备的更新和迭代不断发展，微区电化学方法从空间分辨率最初的微米级达到纳米级，乃至单颗粒或单分子水平，并支持实时动态监测和多模式检测，解决了传统电化学方法难以满足腐蚀微观机制解析需求的难题。

此外，随着其他测试方法的创新以及人工智能与大数据技术的发展，电化学技术也迎来了新的技术创新。例如，电化学-光谱/显微联用发展出原位拉曼电化学[6-7]、通过微流控与阵列电极实现高通量筛选[8-9]、通过机器学习辅助电化学数据分析，预测腐蚀速率[10-11]。

目前，电化学技术不断发展，助力腐蚀与防护领域的研究，在腐蚀速率研究、腐蚀在线监测、缓蚀剂相关研究、防护涂层评价以及阴极保护方面等具有广泛应用。

本文综述了各类电化学测试方法，介绍了电化学技术分类与前沿发展，包括传统电化学技术、微区电化学技术和电化学相关多技术联用，并对电化学技术在腐蚀和防护领域的应用进行了综述。电化学技术方法分类及其在腐蚀与防护的应用总结如图 1 所示。最后，展望了电化学技术在腐蚀和防护领域的未来发展趋势。

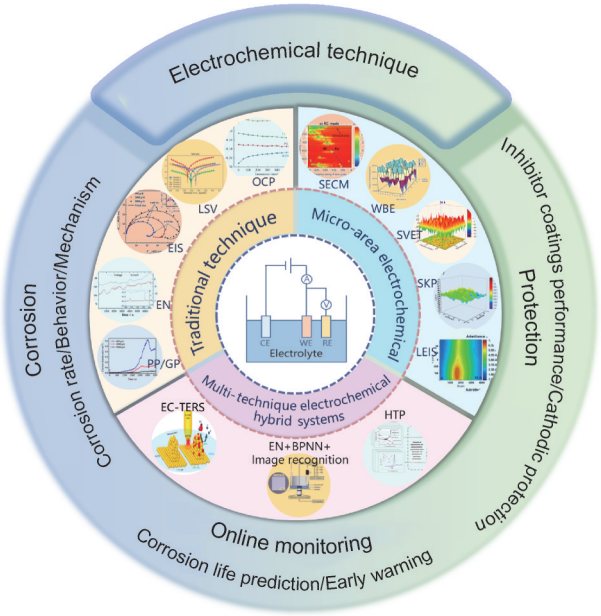


图 1 电化学技术方法分类及其在腐蚀与防护的应用示意图

Fig.1 Schematic diagram of classification of electrochemical technology methods and their applications in corrosion and protection

1 电化学技术分类与前沿发展

1.1 传统电化学技术

1.1.1 开路电位测试

开路电位（open-circuit potential，OCP）可用于衡量电极腐蚀的热力学倾向，为评估材料的耐腐蚀性能

提供依据。但腐蚀电位本身并不代表腐蚀速率，电位较高并不一定意味着腐蚀速率较慢。OCP 测试操作简单，通常在其他电化学测试之前进行，用以验证电化学体系的稳定性。

1.1.2　恒电位/恒电流极化

恒电位/恒电流极化（potentiostatic/galvanostatic polarization，PP/GP）通过固定工作电极的电位/电流，同时监测电流/电位随时间变化，来研究材料的电化学行为。

一般来说，控制电流或电位均可采用，但在某些特殊应用中两者存在一定差别。PP 能够控制工作电极表面的电化学环境，适用于研究电位敏感的过程，常用于金属腐蚀、电化学反应动力学及钝化膜稳定性等方面。GP 则适用于需要固定反应速率的体系，如电沉积、电池充放电测试等，也用于研究腐蚀抑制剂的吸附动力学。需要指出的是，当电流与电位并非简单的一一对应关系时，应根据具体情况进行选择。例如，钢等金属由于存在钝化区，同一电位可能对应不同的电流密度，此时应选用 PP。

1.1.3　线性扫描伏安法

线性扫描伏安（linear sweep voltammetry，LSV）法通过以恒定速率扫描电极电位，同时记录相应的电流响应，从而获得电位-电流密度关系曲线。该方法在金属腐蚀行为分析、膜层耐蚀性能评估、腐蚀抑制剂作用机理研究以及局部腐蚀检测等方面应用广泛。

1.1.4　交流阻抗谱

交流阻抗谱（electrochemical impedance spectroscopy，EIS）通过在不同频率下测量体系的阻抗响应，提供界面反应动力学和表面状态信息，主要用于评估涂层的防护性能，具有非破坏性、高灵敏度和可分离不同时间尺度过程等特点。因此，EIS 成为解析复杂腐蚀体系的核心工具，在材料腐蚀和防护领域具有广泛应用。

1.1.5　电化学噪声

电化学噪声（electrochemical noise，EN）通过测量电极在自然腐蚀状态下自发产生的电位或电流随机波动信号，分析材料的局部腐蚀行为或膜层稳定性。EN 具有非破坏性的特点，对点蚀等局部腐蚀引起的微小波动极为敏感，且无外加扰动，适合原位监测和长期跟踪[12]，常与传感器技术结合，在实际环境中对设备的腐蚀行为进行实时监测[13-14]。然而，EN 对环境干扰同样敏感，需保证屏蔽干扰信号和滤波[15]。

1.2　微区电化学技术

传统的宏观电化学技术空间分辨率有限，难以有效解析多相界面腐蚀、局部失效等微观过程中的电化学信息。在过去 30 年间，微米级和亚微米级的微区电化学测量技术得到了快速发展。这些微区电化学技术能够高精度地测量材料表面的微区电化学分布，并灵敏地捕捉界面处的微小变化[16-17]。

1.2.1　扫描开尔文探针技术

扫描开尔文探针（scanning Kelvin probe，SKP）是一种无损非接触的微区电化学技术，通过测量金属或半导体样品与探针之间的电势差，获得材料表面高分辨率的电势分布图像。常规的 SKP 测量探头直径约为 150 μm，难以进行亚微观区分。为解决这个问题，研究人员结合原子力显微镜（atomic force microscopy，AFM）针尖进行电位测量，即扫描开尔文探针力显微镜（scanning Kelvin probe force microscopy，SKPFM）[18]。SKPFM 可以实现约 0.1 μm 甚至在纳米范围内的空间分辨率[19]，可同时测量表面形貌和电位分布。然而，SKPFM 测量容易受到尖端到表面距离、表面形貌和尖端表面结垢/氧化引起的伪影等因素影响[20]，因此需要通过合理的实验参数设置和正确的校准以避免数据失真。Efaw 等[21]通过密度泛函理论量化探针相对于惰性金标准的功函数，对此进行了改进。

1.2.2　扫描电化学显微镜

扫描电化学显微镜（scanning electrochemical microscopy，SECM）通过微米尺度的探针微电极尖端在浸入溶液的材料表面移动，测量流经该尖端的电流来表征基底表面过程和结构特征。SECM 具有较高的空间分辨率，适用于绝缘和导电表面，常与其他技术结合使用，用于表征电极表面发生腐蚀时电化学反应的微观分布[5,22]。SECM 具有多种工作模式[23]，仍在不断地发展应用。Li 等[24]开发了改进的 SECM 反应性尖端生成/衬底收集模式，定量研究了金属与可变价阳离子的阳极反应。

1.2.3　扫描振动电极技术

扫描振动电极技术（scanning vibrating electrode technique，SVET）通过微电极在样品表面扫描并检测局部电流密度分布，实时可视化金属表面腐蚀或电化学反应的活性区域。SVET 的灵敏度受噪声水平影响，与溶液浓度有关，通常可检测 nA/cm^{2}级微小电流，在低电导率溶液（如乙醇）中可达 pA/cm^2[25]。SVET 具有非接触、高时空分辨率和多场景体系适用等优点，在腐蚀研究中占据重要地位。然而，SVET 受高电导率溶液噪声等环境干扰，且对厚涂层或深层腐蚀信号捕捉困难。随着技术的发展，研究人员通过数值建模和仿真等方法提升了 SVET 的数据可靠性，并通过与 SECM、pH 微电极等电位和电流微电极技术结合使用，进一步提升化学分析能力。

1.2.4 局部电化学阻抗谱

局部电化学阻抗谱(local electrochemical impedance spectroscopy,LEIS)使用微电极在微米尺度上施加局部交流扰动并测量阻抗响应,可用于表征材料表面微观区域的电化学非均匀性,广泛应用于材料的耐腐蚀评价。LEIS可直观显示表面活性差异,对绝缘表面适用性好,特别适用于涂层缺陷以及自修复机理的研究。LEIS仪器的灵敏度约为1 nV,分辨率约为30~40 μm[26],研究人员通过采用SVET电化学装置[27]、降低电解质电阻以及利用微毛细管设置定位被测区域[28]等方法,进一步提高了测试分辨率。

1.2.5 丝束电极

丝束电极(wire beam electrode,WBE)技术将样品表面划分为多个绝缘的微小电极,检测每根电极相对于参比电极的开路电位以及每根电极之间的短路电流,确定每个电极的电化学参数,目前已广泛应用于大气腐蚀、电偶腐蚀、缓蚀剂评估和涂层耐腐蚀性能评估等研究[29-30]。WBE测试系统具有自动化程度高、测量速度快、可连续测量等优点,适用于测试复杂电极表面状态下合金界面的腐蚀参数信息分布特性。

1.3 电化学相关多技术联用

由于各类电化学测试方法均存在独特的优点和局限性,在腐蚀与防护研究中,通常采用多种技术联用,优势互补,共同获取多方面的电化学数据。此外,大数据技术的发展也为电化学数据的分析提供了先进、准确的新手段。

图2展示了电化学技术与其他技术联用的关系。电化学技术与其他测试方法及先进的数据分析技术共同联用,形成了电化学多技术联用策略,包括数据关联、同步测试、设备集成以及结构-性能一体化测试,以下将对此进行进一步阐述。

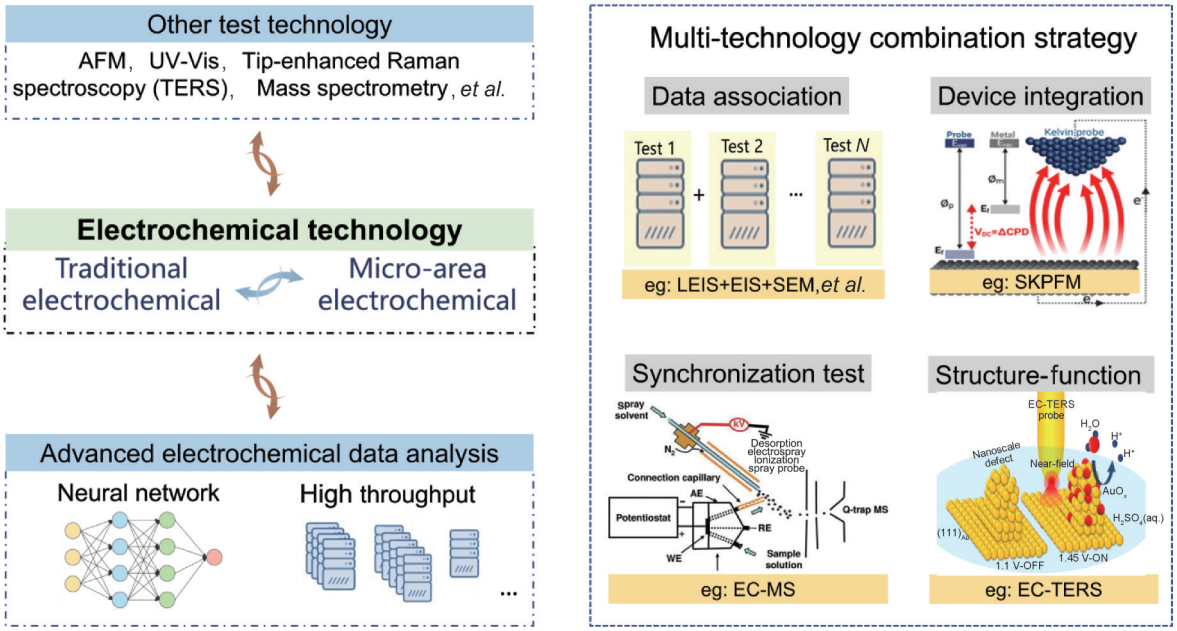


图2 电化学技术与其他技术联用关系图

Fig.2 Schematic diagram of the coupling relationship between electrochemical techniques and other techniques

1.3.1 电化学多技术联用方法

按照多技术联用方法的紧密程度,电化学多技术联用方法可分为数据关联、同步测试以及设备集成。

最简单的多技术联用方法是数据关联,即通过多种测试技术分别获取实验数据,随后进行关联分析。例如,将传统电化学方法与微区电化学技术相结合,可在宏观与微观多尺度上耦合研究材料的电化学性能。王健生等[31]采用LEIS和EIS技术,研究了铁红环氧酯底漆在海水介质中干湿循环条件下的失效过程,充分解析了涂层的失效机制。

同步测试主要通过软件控制,实现多种测试同时进行,从而获取同一样品在同一时间下的多种电化学等信息。例如,同时采用EIS和SVET监测带有微裂纹的涂层钢腐蚀过程,通过两种电化学技术所获结果的趋势,研究其腐蚀机制[32]。传统电化学方法难以区分具有相似氧化还原电位的物质,而质谱(mass spectrometry,MS)则能提供精确的分子量信息。为此开发出电化学-质谱联用(EC-MS)装置,实现电化学与质谱测试的同步,利用高分辨串联质谱对电化学反应中间体进行原位捕获与鉴定[33]。此外,通过同步实时

测量镁电极腐蚀以及阳极、阴极动电位极化过程中表面析出的氢气及腐蚀表面的图像，从而量化水和大气条件下的阴极动力学和界面反应机制[34]。

从硬件整合的角度出发，还可以通过设备集成联用，将电化学技术与适配的其他技术系统物理整合于同一平台。例如，前文提到的SKP与AFM联用系统（SKPFM），便将SKP的空间分辨率从100 μm左右提升至0.1 μm甚至纳米范围[19]。

此外，针对材料结构-性能一体化测试的电化学多技术联用方法也被广泛应用于材料腐蚀行为和机理的研究中。基于连续循环伏安-扫描电化学显微镜（CV-SECM）和方波伏安（square wave voltammetry，SWV）-扫描电化学显微镜（SWV-SECM）的新型方法，可对铜表面腐蚀过程以及苯并三唑的抑制作用进行原位化学成像[35]。Domke团队[36]采用电化学针尖增强拉曼光谱（electrochemical tip-enhanced Raman spectroscopy，EC-TERS）观察了Au纳米缺陷的电化学氧化活性位点分布，共同关联材料的表面结构和化学反应性质，展示了能量转换和腐蚀反应的能谱，化学空间分辨率约为10 nm。

电化学测试方法联用使得各测试方法优势互补，克服了单一技术的局限性。

1.3.2　智能驱动的电化学数据分析

近年来，计算机和人工智能等技术发展迅速，机器学习（machine learning，ML）等技术已成功应用于电化学领域。例如，采用基于循环伏安图像的深度神经网络（deep neural network，DNN）识别电化学系统中的反应机理，在分类任务中表现出高性能[37]。此外，对于EIS数据解析难题，随着人工智能等先进技术的发展，通过DNN对EIS电路模型进行分类和参数预测的机器学习[38]，优化了EIS数据的拟合和分析方法，模型可靠性提升[39]。奇数随机相位电化学阻抗谱（odd random phase electrochemical impedance spectroscopy，ORP-EIS）也逐渐发展起来[40-41]，通过创新的信号设计和处理方法显著提高了电化学测量的信噪比和可靠性。Doonyapisut等[38]提出了一种使用ML和DNN的自动EIS等效电路分类方法，评估了每个电路模型的置信度，通过研究EIS频谱数据并根据仿真数据集确定等效电路。Li等[42]基于皮尔逊相关系数、余弦相似度和欧几里得距离3种高级相关分析方法，开发了一种算法和计算机程序，分析了60个样品的涂层阻抗数据，确定了中频相位角变化与涂层性能之间的相关性。

高通量（high-throughput，HTP）电化学方法通过大规模实验设计和数据驱动分析，显著缩短传统电化学研究的时间周期[9]。图3展示了EIS高通量电化学测试及深度神经网络分析框架[38,43-44]。通过多根工作电极线组成高通量测试装置，同时进行不同样品或者不同溶液环境的高通量电化学测试，获得EIS测试的数据集。从EIS数据结果中提取有意义的特征，对5个常见的等效电路，构建EIS等效电路分类和参数回归的DNN模型，并进行训练与评估，最终输出每个样品对应的等效电路模型及EIS参数，实现向量化表征。

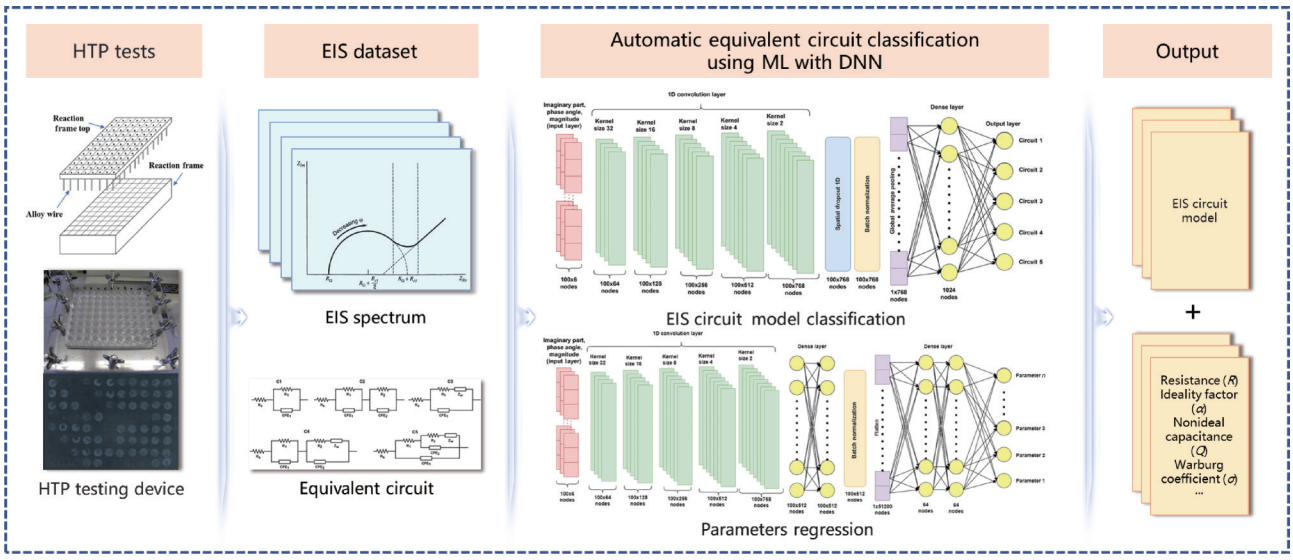


图3　以EIS为例的高通量电化学测试及深度神经网络分析框架[38,43-44]

Fig.3　Schematic diagram of a high-throughput electrochemical testing and deep neural network analysis framework using EIS as an example[38,43-44]

1.4　主要电化学评价参数

各电化学技术方法的主要评价参数、优缺点以及在腐蚀与防护领域的应用总结列于表1中。通过电化学相关的多技术联用手段，优势互补，为材料的腐蚀

表 1 电化学技术的主要测试参数、评价参数及其在腐蚀与防护领域的应用和优缺点总结

Table 1 Summary of main testing parameters, evaluation parameters, applications in corrosion and protection, and advantages/disadvantages of electrochemical techniques

Electrochemical technique	Method	Test data	Main evaluation parameter	Application	Advantage	Disadvantage
Traditional electrochemistry	OCP	OCP-time	OCP	Semi-quantitative corrosion evaluation	Simple, rapid, no applied potential needed	Qualitative only; no kinetic information; limited mechanistic insights; unreliable in complex environments
	PP	Current-potential curve	Current	Corrosion rate assessment; passive film studies	Study of passivation behavior; rapid kinetic parameter acquisition	Limited corrosion rate information; damages sample surface
	GP	Potential-time curve	Potential	Electroplating	Constant current; simulation of real conditions; dynamic response; corrosion mechanism identification	Complex interpretation; corrosion product interference requires precise current control
	LSV	Current-potential curve	E_b; E_{rep}; E_{corr}; i_{corr}; b_a and b_c; R_p	Corrosion rate assessment; passive film studies	Quantitative analysis; determination of local corrosion susceptibility; passivation evaluation	Sensitive to scan rate; not applicable to non-conductive coatings
	EIS	Impedance spectra (Nyquist/Bode)	$\|Z\|_{0.01\ Hz}$; R_{ct}; C_{dl}; W; θ; f_b	Coating performance; interface analysis	Detailed information; identification of time constants of processes; non-destructive; multi-time-scale analysis	Complex data interpretation; requires specialized equipment
	EN	Potential/current noise spectra	R_n; Z_n; R_{sn}	Early-stage localized corrosion detection	*In-situ* monitoring; non-perturbative	Weak signals; easily interfered
Micro-area electrochemistry	SECM	Probe current-position mapping	Current	Catalyst activity mapping; biofilms	High spatial resolution; reveals corrosion kinetics; non-destructive	Complex operation; surface topography interference
	SKP	Surface work function mapping	Electron work function	Semiconductor devices; coating failure	Non-contact; operable in air	Surface-sensitive only; no electrolyte information
	SVET	Local current density mapping	Current	Localized corrosion; coating defects	Spatially resolved data; study of localized corrosion; real-time *in-situ* imaging	Surface topography interference; requires specialized equipment; complex data
	LEIS	Local impedance spectra	Local impedance	Coating defects; weld corrosion	Spatially resolved impedance information	Point-by-point scanning; time-consuming
	WBE	Multi-electrode potential/current distribution	Potential/current	Non-uniform corrosion studies	Simulation of macro-galvanic effects	Electrode spacing affects results

与防护研究提供了技术支持和数据保障。

2 电化学技术在腐蚀与防护领域的应用举例

2.1 腐蚀速率研究

腐蚀速率的定量分析是揭示材料腐蚀机理的核心手段，通过电化学技术可以测定工作电极在特定环境中的腐蚀速率。采用电化学技术研究腐蚀速率的方法已得到普遍认可。以LSV为例[45]，通过扫描开路电位附近宽电位窗口（通常为±(200～250) mV），获得极化曲线。对于理想的活化控制体系，阴/阳极分支在塔菲尔区呈线性关系，其外推交点对应腐蚀电流

密度 i_{corr}。更为精确的方法是利用非线性最小二乘法将数据拟合至动力学方程，如式(1)所示：

$$i_{net}=i_{corr}\left(\exp\left[\frac{2.3(E-E_{corr})}{b_a}\right]-\exp\left[\frac{-2.3(E-E_{corr})}{|b_c|}\right]\right) \tag{1}$$

式中：i_{net} 和 i_{corr} 分别为净电流密度和自腐蚀电流密度，A/cm²；E 和 E_{corr} 分别为施加电极电位和自腐蚀电位，V；b_a 和 b_c 分别为阳极塔菲尔斜率和阴极塔菲尔斜率。

LSV 方法不仅能够获取腐蚀速率，还可以直接获得 b_a 和 b_c 以及钝化电位等信息，但由于其测量过程偏离稳态电位，因此通常被视为实验室诊断工具，而非常规监测手段。

线性极化电阻(linear polarization resistance，LPR)法则在微扰区间(±(5～10) mV)内测量极化电阻 $\left(R_p=\left.\frac{dE}{di}\right|_{i=0}\right)$，再通过 Stern-Geary 方程(式(2))计算腐蚀速率。

$$i_{corr}=\frac{B}{R_p},\text{其中}B=\frac{b_a b_c}{2.3(b_a+b_c)} \tag{2}$$

式中 R_p 为极化电阻，Ω·cm²。EIS 则通过频域响应获取阻抗谱，其低频极限与 R_p 相关。EN 利用电位/电流噪声的功率谱密度比定义噪声电阻 R_n，其量级通常与 R_p 可比。

LPR 等方法适用于在线监测，但 b_a 和 b_c 往往采用经验值(如±100 mV/dec)，因此所获得的腐蚀速率误差通常在2～3倍之间。

2.2　腐蚀行为和机理研究

基于材料腐蚀速率等研究，可以明确材料的腐蚀行为与机理。例如，本课题组测试了不同打磨表面粗糙度的 2297 铝锂合金在硼酸盐缓冲的 0.001 mol·L⁻¹ NaCl 溶液(pH=7.4)中的 LSV 和 PP 曲线，分析了不同打磨表面粗糙度下 2297 铝锂合金的点蚀行为以及影响点蚀萌生的关键因素——金属间化合物[46]。结果表明：一方面，在稳态点蚀扩展前，3 种试样在 LSV 测试中的平台电流密度、背景电流密度以及孕育期内的极化电流密度均无明显差别，因此，表面粗糙度对 2297 铝锂合金的点蚀行为影响较小。另一方面，相比于光滑表面，粗糙表面含有更多且尺寸更大的金属间化合物。这些金属间化合物可促进点蚀(亚稳态及稳态)的萌生和扩展。因此，含有更多大尺寸析出相的粗糙表面产生更多的电流暂态，且电流暂态的峰值电流更大、寿命更长。综上可知，2297 铝锂合金的点蚀行为受表面粗糙度的影响较小，而金属间化合物的分布是其主要影响因素。

此外，基于电化学技术可分析金属表面氧化膜的腐蚀失效机制。采用 SVET 分析氢含量对 2050 铝合金表面活性的影响，在－500 mV(相对于 OCP)下充氢 0.5 h 后，合金相比于未充氢条件，最大阳极电流密度增加了 44.4%，达到 39 μA·cm⁻²，表明氢的渗入破坏了合金表面的氧化膜，显著增强了合金的电化学活性，从而促进了局部腐蚀的发生[47]。通过循环伏安扫描测试研究了超高强钢(ultra-high strength steel，UHSS)在 0%、4% 和 9% 应变下的氧化膜状态[48]。应变为 0% 的 UHSS 处于钝化状态，而应变为 4% 和 9% 的 UHSS 在 0.10 V(相对于 SCE)时出现阳极腐蚀电流。应变为 4% 的 UHSS 腐蚀电流约为 0.2 mA·cm⁻²，应变为 9% 的 UHSS 则增加到 5.0 mA·cm⁻²。这些电化学数据反映了在应变与腐蚀环境协同作用下 UHSS 氧化膜的失效过程。

腐蚀原位电化学与微区电化学技术结合，可用于确定微米级特征区域的电位特征，对金属间化合物及多相合金体系中电化学活性差异的评价具有重要作用[49]。本课题组通过放电等离子体烧结法制备了 2050-T84 合金的 AlCuMnFe 金属间化合物的组成成分 Al_7Cu_2Fe、Al_6Mn，并对其进行了 SKP 和 SVET 表征[50]。从 Al_7Cu_2Fe、Al_6Mn 与 Al 基体构成的偶联体的 SKP 电位分布可以看出，Al_6Mn 的电位比合金基体低 150 mV，且远低于 Al_7Cu_2Fe 的电位，表明 Al_6Mn 在与周围基体和 Al_7Cu_2Fe 形成腐蚀微电池时具有更大的腐蚀倾向。在－0.72 V(相对于 SCE)恒定电位下于 3.5%NaCl 溶液中浸泡 1 h 后进行 SVET 测试，发现 Al_6Mn 和 Al_7Cu_2Fe 的表面分别形成局部阳极电流和阴极电流，证实了 Al_6Mn 为阳极相，Al_7Cu_2Fe 为阴极相，2050 合金的腐蚀溶解更容易发生在 Al_6Mn 表面，而耦合效应有利于 Al_7Cu_2Fe 表面发生氧还原反应。通过微区电化学技术，阐明了铝合金中 AlCuMnFe 金属间化合物的腐蚀机制。

2.3　腐蚀在线监测

实时、准确地监测腐蚀过程并及时获取腐蚀信息，对于制定腐蚀防护策略、保障设备安全至关重要。电化学监测技术，包括 EN、LPR、EIS 和 OCP 等常规方法[51-52]，可在不破坏材料表面和环境的情况下，实时监测金属的腐蚀过程，为腐蚀过程在线监测提供技术支持。目前，电化学技术已与传感器技术相结合，在实际工程监测中发挥重要作用，并在石油管道、桥梁、管道、混凝土钢筋及海洋装备等领域的在线监测中获得了实际应用[53-54]。Freire 等[55]设计、开发并验证了一种基于 EIS 技术的测试系统，用于在线和现场监测暴露于实际服役条件下金属管道的腐蚀速率和结垢

增长。德国达姆施塔特工业大学基于LPR和EIS技术开发了膜壁传感器(membrane wall sensor, MWS)[56]用于褐煤燃烧锅炉的高温腐蚀在线监测以及数据分析量化。MWS测量系统的示意图及膜壁安装实物图如图4(a)所示,该系统实现了32.5个月的高温腐蚀长期在线监测。此外,通过腐蚀过程的原位监测还可以研究腐蚀机理,例如,Ramírez等[57]通过对2060铝合金铜绿假单胞菌微生物腐蚀过程进行原位OCP监测,阐明了特定腐蚀产物膜在金属表面的形成和积累过程,如图4(b)所示。

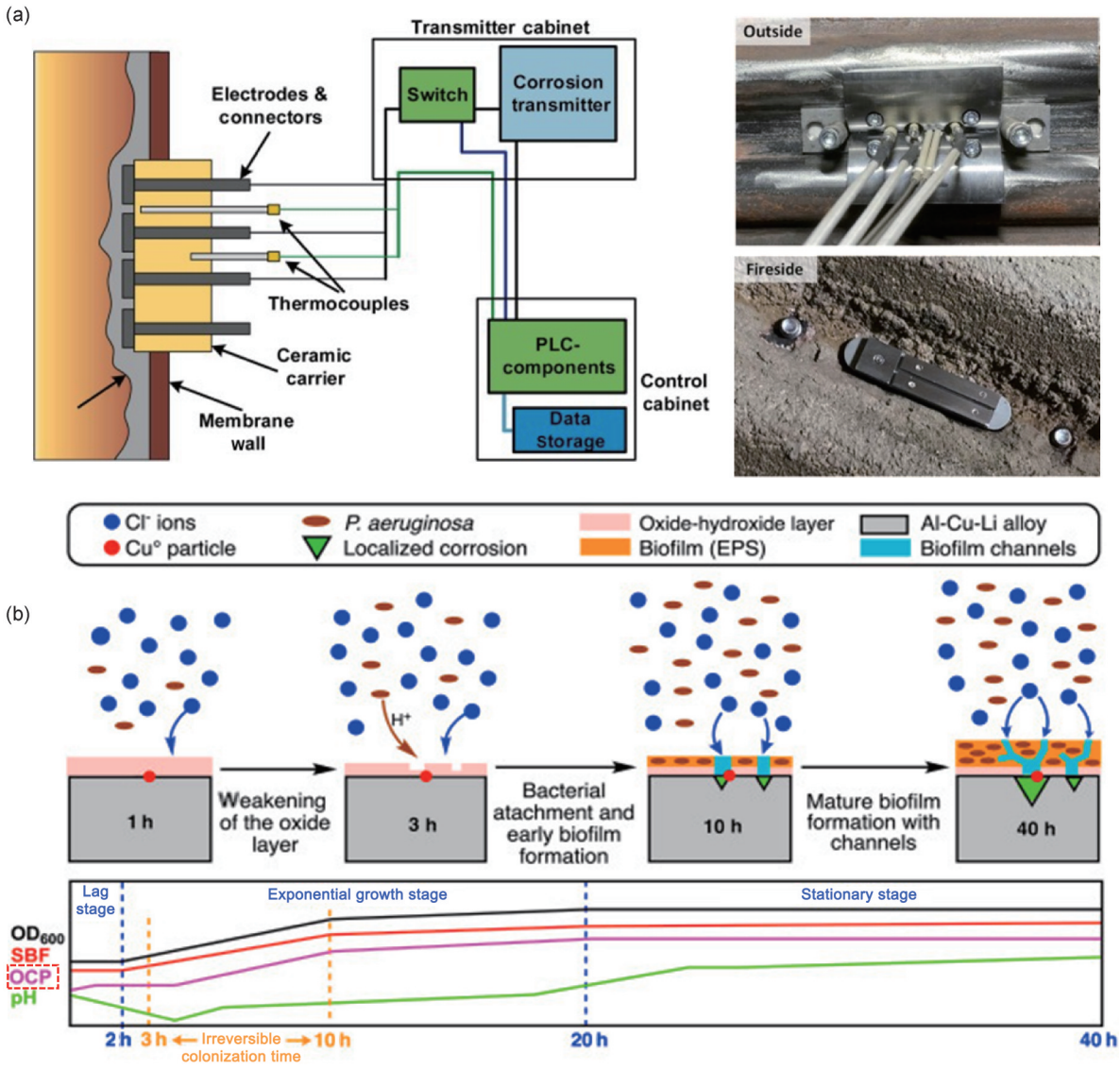


图4 电化学技术腐蚀在线监测的实际应用

(a)基于LPR和EIS技术开发的膜壁传感器及测量系统示意图[56];(b)结合OCP监测AA2060-T8铝-铜-锂合金表面在铜绿假单胞菌生长期和生物膜形成过程[57]

Fig.4 Practical applications of electrochemical techniques in corrosion online monitoring

(a)schematic diagrams of a membrane wall sensor and measurement system developed based on LPR and EIS techniques[56]; (b)combined OCP monitoring of AA2060-T8 aluminum-copper-lithium alloy surface during the growth phase and biofilm formation process of *Pseudomonas aeruginosa*[57]

电化学监测技术正从传统实验室向复杂工程环境的长期、在线与智能化方向快速发展。EIS和EN等技术已逐步与无线通信、人工智能算法等相结合,实现对腐蚀过程的实时追踪与健康评估。近年来,已开发出将原位电化学技术与声发射、人工智能等技术相结合的动态监测体系,通过数据融合与智能算法分析,实现对材料腐蚀行为的深度解析与动态预测,为腐蚀防护策略的制定提供更可靠的依据。例如,将EN和声发射技术相结合,原位监测AZ31镁合金在0.5 mol·L^{-1} NaCl溶液中的腐蚀过程,通过瞬态形状

观察、希尔伯特谱和递归量化研究分析电化学噪声信号，识别出表面膜形成、点蚀萌生和点蚀扩展3个腐蚀阶段[58]。采用改进的EN和人工神经网络相结合的瞬时腐蚀监测技术，原位监测2014铝合金在NaCl和$Ce(NO_3)_3$溶液中的电位和电流噪声信号，通过小波变换和人工神经网络分析腐蚀类型，并解析了合金在钝化、点蚀等不同阶段对应的腐蚀速率[59]。通过EN和图像识别联合分析，提取腐蚀表面的形状因子等特征，基于遗传算法开发反向传播神经网络模型，并针对电化学噪声和图像特征进行联合训练，最终建立具有联合图像识别和电化学噪声分析能力的反向传播神经网络，用于原位监测304不锈钢在HCl溶液中的腐蚀行为[60]。这些研究不仅推动了电化学技术在油气、海洋和桥梁设施等领域的工程化应用，也为智能防腐体系与预测性维护提供了技术基础。

2.4　缓蚀剂相关研究

在缓蚀机理研究方面，电化学技术具有独特优势，其中LSV是最常用的电化学测量方法之一。通过对比空白溶液和含缓蚀剂溶液的极化曲线，可分析腐蚀抑制机理。例如，研究者利用极化曲线研究了2-甲基咪唑(2MI)和苯并三氮唑(BTA)两种缓蚀剂对铝合金富铜相之间的吸附性[61]。加入2MI和BTA后，阳极塔菲尔斜率(b_a)和阴极塔菲尔斜率(b_c)均发生变化，阳极和阴极过程均受到抑制，表明两者均为混合型腐蚀抑制剂，且BTA的抑制效率高于2MI。通过在铜表面测量添加2MI和BTA后的极化曲线，获得了Langmuir吸附等温线。拟合直线的斜率和线性相关系数接近于1，表明这两种腐蚀抑制剂在3.5%NaCl溶液中对铜表面的吸附符合Langmuir吸附模型。

研究人员通常采用LSV定量测定缓蚀效率[62]。对LSV测得的极化曲线，使用Tafel外推法获得腐蚀电流，再通过公式(3)计算出该浓度下缓蚀剂的缓蚀效率η_p。

$$\eta_p=\frac{i_{corr,0}-i_{corr}}{i_{corr,0}}\times 100\% \tag{3}$$

式中：$i_{corr,0}$和i_{corr}分别为未添加缓蚀剂与添加缓蚀剂的样品腐蚀电流密度，A/cm²。

2.5　防护涂层性能评价

涂层的防护性能可通过多种电化学技术进行评估，其中最常用的是EIS方法。例如，本课题组通过EIS评估了添加2MI和8HQ@Ce-MOF的高耐蚀硅锆溶胶-凝胶涂层在3.5%NaCl溶液中的防护性能[63]。为深入解析涂层结构演变，采用双层等效电路进行拟合，相比于无金属腐蚀体系，有金属腐蚀的等效电路结构中出现金属界面处的电荷转移电阻(R_{ct})和双电层电容(C_{dl})。等效电路拟合参数表明，添加2MI显著提升了涂层交联度，使其内层电阻(R_{in})增大约1000倍，达到$10^7\ \Omega\cdot cm^2$量级。进一步引入8HQ@Ce-MOF填料后，涂层缺陷被有效填充，涂层电阻(R_c)与$|Z|_{0.01\ Hz}$在504 h浸泡期内保持最高。EIS结果验证了交联度提升与填料腐蚀抑制的双重作用机制，使硅锆溶胶-凝胶涂层展现出长期防护效果。

此外，微区电化学技术常用于分析防护涂层的局部腐蚀信息，评价其耐腐蚀性能。例如，Yuan等[64]采用SKPFM研究人工划痕海泡石粉末改性复合涂层在浸泡一定时间后划痕附近的电势变化，结果表明改性涂层相较于未改性涂层具有更好的耐腐蚀性能。Zheng等[65]利用LEIS观察到添加脲醛树脂改性石墨衍生物的环氧涂层中的电偶腐蚀现象，并发现剥离程度最高的石墨衍生物因其最低的电导率而表现出最轻微的电偶腐蚀行为。

2.6　阴极保护

电化学技术在阴极保护中发挥着至关重要的作用，通过电化学技术优化材料的阴极保护参数，提供实时腐蚀监测数据，保证材料的安全服役。由于EIS参数与剥离涂层面积之间存在相关性，可通过局部EIS测量，确定与局部剥离区域相关的参数，从而定量确定涂层阴极剥离面积[66]。Mahlobo等[67]开发了一种伏安法预处理技术，用于监测埋地钢在阴极保护电位下的电化学行为。对模拟土壤溶液中的碳钢进行为期4天的预处理，再施加阴极保护，腐蚀速率从411 μm/a降低到8 μm/a，随后在21～40 μm/a之间波动，从而提升了碳钢的耐腐蚀性能。

3　未来发展趋势

电化学测量方法因其高灵敏度、快速响应和原位检测能力，已成为现代腐蚀科学研究的标准工具，并为工程防腐蚀决策提供了数据支持。随着微区电化学和联用技术的发展，其在腐蚀研究中的应用广度和深度仍在持续拓展。基于现有研究技术，电化学技术未来的研究重点应集中在以下方面：

(1)多技术多方法联用

电化学技术未来发展的重要趋势是将多种原位、实时和微区表征技术与传统电化学测量方法相结合，实现对腐蚀过程的多尺度、多维度解析。例如，将电化学技术与原位拉曼、原位红外、同步辐射和电子显微表征等技术联用，同时获得腐蚀电流、电位分布、界面膜结构、腐蚀产物组成以及局部形貌演化等信息。这种多技术联用有助于突破单一电化学测试仅能提

供整体平均响应的局限性，更准确地揭示腐蚀从萌生、发展到扩展的全过程。

然而，多技术联用仍面临较大挑战。不同表征技术的空间分辨率、时间分辨率和探测深度并不一致，而腐蚀反应又具有明显的瞬态性和局部性，导致不同信号之间难以严格对应。同时，多设备同步采集过程中还存在实验环境难以统一、反应区域难以完全重合、信号触发难以同步、数据格式难以融合以及装置集成度有限等问题。因此，未来研究需要开发高时空分辨探针技术、微型原位电化学池、多通道同步采集系统和算法辅助的数据融合方法。其核心目标不是简单叠加多种测试手段，而是实现电化学信号、结构信息、化学信息和动力学参数之间的定量对应。

(2)从表观电化学参数到界面本征反应参数的深入理解

未来电化学参数分析应更加关注腐蚀反应的基本动力学参数，例如，阳极溶解反应和阴极还原反应的电荷转移速率常数、传递系数、反应级数、扩散系数、局部离子迁移参数以及多步骤反应路径等。对于局部腐蚀体系，还应通过电化学测试参数进一步解析局部阳极溶解、邻近阴极反应、Cl^-富集、pH变化和氧扩散限制等因素的相对贡献。未来电化学技术需要与动力学建模、等效电路物理约束、反应传输模型和多物理场模拟相结合，使电化学数据从现象描述进一步转化为本征反应机制参数。

(3)电化学-耐腐蚀性能对应关系智能数据解析

电化学测试数据结果虽然可以反映材料的耐腐蚀性能并揭示相关机理，但在实际工程应用中，短时电化学响应与材料长期服役寿命之间并不存在简单的一一对应关系。微观组织、加工缺陷、涂层状态、介质成分、温湿度、流速和外加载荷等因素均会共同影响腐蚀过程。因此，如何建立电化学测试结果与材料实际寿命之间的定量关联，并实现准确的寿命预测，仍是工程实践高度关注且亟待解决的难题。

因此，未来研究需要从单一电化学参数评价转向多参数、多因素和多尺度综合分析。随着人工智能、材料基因组工程和数据驱动建模的发展，通过长期服役数据、加速腐蚀实验数据、原位电化学监测数据和多尺度组织表征数据，从复杂电化学信号中识别腐蚀敏感因素，建立材料组织、环境因素、电化学响应和服役寿命之间的定量关联。需要注意的是，智能算法不能只依赖黑箱式拟合，而应尽量引入具有明确物理意义的特征参数，从而提高模型的可解释性、泛化能力和工程可信度。

(4)高效智能电化学监测开发

传统电化学测试设备通常体积较大、操作条件要求较高，并且对实验环境、噪声控制、电极布置和溶液状态具有较强依赖性，限制了其在桥梁、航空航天结构、地下管线、储能系统、化工设备等复杂工程现场的长期在线监测。实际服役环境通常具有温湿度波动、介质成分变化、机械振动、电磁干扰、空间受限和维护困难等特点，这对电化学监测系统的稳定性、抗干扰能力和长期可靠性提出了更高的要求。

未来电化学监测设备的发展方向是集成化、轻量化、低功耗、智能化和远程化。一方面，需要开发小型化传感电极、柔性电化学传感器、嵌入式参比电极、多通道采集模块和适用于现场环境的稳定电极体系，实现对电化学信号的实时采集。另一方面，需要结合无线传输、边缘计算、云端数据库和自动诊断算法，实现腐蚀状态的在线分析、异常识别、风险预警和寿命预测。

参考文献

[1] 侯保荣.中国腐蚀成本[M].北京:科学出版社,2017.
Hou B R. The cost of corrosion in China[M]. Beijing: Science Press,2017.

[2] 刘玉项,朱胜,韩冰源.金属镁电化学腐蚀阳极析氢行为研究进展[J].材料工程,2020,48(10):17-27.
Liu Y X, Zhu S, Han B Y. Research progress in anodic hydrogen evolution of magnesium electrochemistry corrosion[J]. Journal of Materials Engineering,2020,48(10):17-27.

[3] 贾雪娇,丁德一,韩超,等.高强铝合金腐蚀行为及评价方法研究进展[J].航空材料学报, 2024, 44(5):139-153.
Jia X J, Ding D Y, Han C, et al. Research progress on corrosion behavior and evaluation methods of high strength aluminum alloys[J]. Journal of Aeronautical Materials,2024, 44(5):139-153.

[4] 于美,刘建华,李松梅,等.电化学测量技术与方法[M].北京:北京航空航天大学出版社,2020.
Yu M, Liu J H, Li S M, et al. Electrochemical measurement techniques[M]. Beijing: Beihang University Press,2020.

[5] Bard A J, Fan F R F, Kwak J, et al. Scanning electrochemical microscopy. Introduction and principles[J]. Analytical Chemistry, 1989,61(2):132-138.

[6] Zong C, Chen C J, Zhang M, et al. Transient electrochemical surface-enhanced Raman spectroscopy: a millisecond time-resolved study of an electrochemical redox process[J]. Journal of the American Chemical Society,2015,137(36):11768-11774.

[7] 苏敏,董金超,李剑锋.单晶电极界面反应过程的电化学原位拉曼光谱研究[J].电化学,2020,26(1):54-60.
Su M, Dong J C, Li J F. *In-situ* Raman spectroscopic study of electrochemical reactions at single crystal surfaces[J]. Journal of Electrochemistry,2020,26(1):54-60.

[8] Chai H C, Zhu J W, Feng Y X, et al. Capillarity enabled large-array liquid metal electrodes for compact and high-throughput dielectro-

phoretic microfluidics [J]. Advanced Materials, 2024, 36 (21): 2310212.

[9] Wang Y F, Goh B, Moorehead M, et al. High-throughput electrochemistry to study materials degradation in extreme environments [J]. Analytical Chemistry, 2022, 94(48): 16528-16537.

[10] 王莎莎,马帅杰,车琨,等.机器学习在自然环境腐蚀评估与预测领域的应用现状[J].中国腐蚀与防护学报,2023,43(3):441-451.
Wang S S, Ma S J, Che K, et al. Application status of machine learning in field of natural environment corrosion assessment and prediction[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(3): 441-451.

[11] Zou Y, Qian J H, Wang X, et al. Machine learning-assisted prediction and interpretation of electrochemical corrosion behavior in high-entropy alloys [J]. Computational Materials Science, 2024, 244: 113259.

[12] 张鉴清,张昭,王建明,等.电化学噪声的分析与应用—Ⅰ.电化学噪声的分析原理[J].中国腐蚀与防护学报,2001,21(5):310-320.
Zhang J Q, Zhang Z, Wang J M, et al. Analysis and application of electrochemical noise Ⅰ. theory of electrochemical noise analysis [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2001, 21(5): 310-320.

[13] Xia D H, Deng C M, MacDonald D, et al. Electrochemical measurements used for assessment of corrosion and protection of metallic materials in the field: a critical review [J]. Journal of Materials Science & Technology, 2022, 112: 151-183.

[14] 张鉴清,张昭,王建明,等.电化学噪声的分析与应用Ⅱ.电化学噪声的应用[J].中国腐蚀与防护学报,2002,22(4):241-248.
Zhang J Q, Zhang Z, Wang J M, et al. Analysis and application of electrochemical noise technology Ⅱ. application of electrochemical noise[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2002, 22(4): 241-248.

[15] Liu W, Miao H D. Estimation of the pitting stability transition according to the electrochemical noise transient analysis [J]. Corrosion Communications, 2025, 19: 118-128.

[16] Santana J J, Izquierdo J, Souto R M. Uses of scanning electrochemical microscopy (SECM) for the characterization with spatial and chemical resolution of thin surface layers and coating systems applied on metals: a review [J]. Coatings, 2022, 12(5): 637.

[17] 王力伟,李晓刚,杜翠薇,等.微区电化学测量技术进展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 L W, Li X G, Du C W, et al. Recent advances in local electrochemical measurement techniques and applications in corrosion research [J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2010, 30(6): 498-503.

[18] Zhang X, Sloof W G, Hovestad A, et al. Characterization of chromate conversion coatings on zinc using XPS and SKPFM [J]. Surface and Coatings Technology, 2005, 197(2/3): 168-176.

[19] Mallinson C F, Harvey A, Watts J F. The nobility of second phase particles in S-65 beryllium studied by scanning kelvin probe force microscopy [J]. Corrosion Science, 2016, 112: 669-678.

[20] Rohwerder M, Hornung E, Stratmann M. Microscopic aspects of electrochemical delamination: an SKPFM study [J]. Electrochimica Acta, 2003, 48(9): 1235-1243.

[21] Efaw C M, da Silva T, Davis P H, et al. Toward improving ambient Volta potential measurements with SKPFM for corrosion studies [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2019, 166(11): C3018-C3027.

[22] Fushimi K, Nakagawa R. Some microelectrochemical methods for the investigation of passivity and corrosion [J]. Corrosion Reviews, 2018, 36(1): 3-15.

[23] Jadhav N, Gelling V J. Review: the use of localized electrochemical techniques for corrosion studies [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2019, 166(11): C3461-C3476.

[24] Li X R, Meng X Z, Huang Q Y, et al. Quantitative study on the metal dissolution reaction with multivalent cations by a modified SECM mode: pure Ti as a case [J]. Corrosion Science, 2024, 235: 112212.

[25] Bastos A C, Quevedo M C, Karavai O V, et al. Review: on the application of the scanning vibrating electrode technique (SVET) to corrosion research [J]. Journal of the Electrochemical Society, 2017, 164(14): C973-C990.

[26] Huang V M, Wu S L, Orazem M E, et al. Local electrochemical impedance spectroscopy: a review and some recent developments [J]. Electrochimica Acta, 2011, 56(23): 8048-8057.

[27] Bayet E, Huet F, Keddam M, et al. A novel way of measuring local electrochemical impedance using a single vibrating probe [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1997, 144(4): L87-L90.

[28] Pilaski M, Hamelmann T, Moehring A, et al. Impedance spectroscopy in micro systems [J]. Electrochimica Acta, 2002, 47(13/14): 2127-2134.

[29] 范林,邢青,邱日,等.阵列电极技术在腐蚀领域的应用进展[J].腐蚀科学与防护技术,2015,27(5):509-513.
Fan L, Xing Q, Qiu R, et al. Advances in application of array electrode technology in corrosion research [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2015, 27(5): 509-513.

[30] Kou J, Ma D X. Galvanic corrosion based on wire beam electrode technique: progress and prospects [J]. Corrosion Reviews, 2022, 40(3): 205-220.

[31] 王健生,仇性启.利用LEIS和EIS研究铁红环氧酯底漆在海水介质中的失效行为[J].材料保护,2016,49(5):23-25.
Wang J S, Qiu X Q. Failure behavior of iron red epoxy primer in seawater by LEIS and EIS [J]. Materials Protection, 2016, 49(5): 23-25.

[32] De Vooys A, Van Der Weijde H. Investigating cracks and crazes on coated steel with simultaneous SVET and EIS [J]. Progress in Organic Coatings, 2011, 71(3): 250-255.

[33] Chen J X, Wang X Y, Cui X, et al. *In situ* probing and identification of electrochemical reaction intermediates by floating electrolytic electrospray mass spectrometry [J]. Angewandte Chemie International Edition, 2023, 62(12): e202219302.

[34] Curioni M. The behaviour of magnesium during free corrosion and potentiodynamic polarization investigated by real-time hydrogen measurement and optical imaging [J]. Electrochimica Acta, 2014, 120(7): 284-292.

[35] Hernández-Concepción B, Souto R M, Izquierdo J. Novel dynamic method based on CV-SECM and SWV-SECM for the *in situ* chemical imaging of reactive metal surfaces undergoing corrosion and corrosion inhibition illustrated with the case of copper corrosion inhibition by benzotriazole[J]. Electrochimica Acta, 2024, 474: 143538.

[36] Pfisterer J H K, Baghernejad M, Giuzio G, et al. Reactivity mapping of nanoscale defect chemistry under electrochemical reaction conditions[J]. Nature Communications, 2019, 10: 5702.

[37] Noé F, De Fabritiis G, Clementi C. Machine learning for protein folding and dynamics[J]. Current Opinion in Structural Biology, 2020, 60: 77-84.

[38] Doonyapisut D, Kannan P K, Kim B, et al. Analysis of electrochemical impedance data: use of deep neural networks[J]. Advanced Intelligent Systems, 2023, 5(8): 2300085.

[39] 张鉴清, 曹楚南. 电化学阻抗谱方法研究评价有机涂层[J]. 腐蚀与防护, 1998, 19(3): 99-104.
Zhang J Q, Cao C N. Study and evaluation on organic coatings by electrochemical impedance spectroscopy[J]. Corrosion & Protection, 1998, 19(3): 99-104.

[40] Van Gheem E, Pintelon R, Vereecken J, et al. Electrochemical impedance spectroscopy in the presence of non-linear distortions and non-stationary behaviour part Ⅰ: theory and validation[J]. Electrochimica Acta, 2004, 49(26): 4753-4762.

[41] Van Gheem E, Pintelon R, Hubin A, et al. Electrochemical impedance spectroscopy in the presence of non-linear distortions and non-stationary behaviour part Ⅱ: application to crystallographic pitting corrosion of aluminium[J]. Electrochimica Acta, 2006, 51(8/9): 1443-1452.

[42] Li S H, Hu S H, Wang F N, et al. Study on correlation between the protection performance of coatings and phase angles[J]. Electrochimica Acta, 2024, 480: 143887.

[43] White P A, Smith G B, Harvey T G, et al. A new high-throughput method for corrosion testing[J]. Corrosion Science, 2012, 58: 327-331.

[44] Chambers B D, Taylor S R. The high throughput assessment of aluminium alloy corrosion using fluorometric methods. part Ⅱ: a combinatorial study of corrosion inhibitors and synergistic combinations[J]. Corrosion Science, 2007, 49(3): 1597-1609.

[45] Frankel G S. Electrochemical techniques in corrosion: status, limitations, and needs[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2014, 42(3): 517-538.

[46] Liu J H, Zhao K, Yu M, et al. Effect of surface abrasion on pitting corrosion of Al-Li alloy[J]. Corrosion Science, 2018, 138: 75-84.

[47] Jia X J, Yu M, Han C, et al. Effect of interaction between hydrogen and intermetallic compound particles on stress corrosion cracking behavior of 2050 aluminum alloy[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2025, 1037: 182449.

[48] Zhao Z J, Yu M, Han C, et al. Effect of HAGBs for ultra-high strength stainless steel on pitting/microcrack initiation with synergy between strain and corrosion environment[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2025, 232: 74-88.

[49] Nazarov A, Thierry D. Application of scanning Kelvin probe in the study of protective paints[J]. Frontiers in Materials, 2019, 6: 192.

[50] Han C, Yu M, Xiao J, et al. Coupling effect on corrosion behavior of multi-phase AlCuMnFe IMPs in 2050-T84 Al-Li alloy[J]. Corrosion Science, 2023, 223: 111462.

[51] 刘静, 刘尊年, 刘荣达, 等. 原油管道内腐蚀在线监测技术现状及发展趋势[J]. 材料保护, 2025, 58(3): 16-27.
Liu J, Liu Z N, Liu R D, et al. Status and development trend of online monitoring technology for internal corrosion of oil pipelines[J]. Materials Protection, 2025, 58(3): 16-27.

[52] 周梦鑫, 吴军, 樊志彬, 等. 大气腐蚀在线监测技术研究现状与展望[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2023, 43(1): 38-46.
Zhou M X, Wu J, Fan Z B, et al. Current situation and prospect of on-line monitoring technology for atmospheric corrosion testing of metallic materials[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2023, 43(1): 38-46.

[53] Khan A, Qurashi A, Badeghaish W, et al. Frontiers and challenges in electrochemical corrosion monitoring; surface and downhole applications[J]. Sensors, 2020, 20(22): 6583.

[54] Jiryaeisharahi Z, De Keukeleere D, Desmet Y, et al. Exploring transport properties and onset of corrosion in organic coated metals using an innovation sensor-based methodology supported by ORP-EIS[J]. Progress in Organic Coatings, 2025, 207: 109388.

[55] Freire L, Ezpeleta I, Sánchez J, et al. Advanced EIS-based sensor for online corrosion and scaling monitoring in pipelines of geothermal power plants[J]. Metals, 2024, 14(3): 279.

[56] Marx A, Hülsbruch D, Ströhle J, et al. Analysis and quantification of high-temperature corrosion in lignite fired boilers using an online monitoring system[J]. Corrosion Science, 2025, 253: 113012.

[57] Ramírez C G, Monsalve A, Montero C, et al. Microbiologically influenced corrosion of Al-Cu-Li alloy by *Pseudomonas aeruginosa*[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 36: 5286-5297.

[58] Zhang Z, Zhao Z Y, Bai P K, et al. *In-situ* monitoring of pitting corrosion of AZ31 magnesium alloy by combining electrochemical noise and acoustic emission techniques[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 878: 160334.

[59] Hu Q F, Zhang T, Chen S H, et al. An instantaneous corrosion monitoring technique based on combining modified electrochemical noise and artificial neural network for determination of corrosion type and 2014 aluminium alloy corrosion rate in NaCl and $Ce(NO_3)_3$ solutions[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2022, 17(2): 220213.

[60] Zhang H F, Wu Z Q, Chen Y, et al. Real-time monitoring of the corrosion behaviour of the 304SS in HCl solution using BPNN with joint image recognition and electrochemical noise[J]. Corrosion Science, 2024, 228: 111779.

[61] Chen C, Yu M, Xiao J, et al. One-step *in-situ* growth by one-pot method for uniform BTA@ZIF-8 layer to improve the corrosion protection of sol-gel coatings[J]. Corrosion Science, 2025, 250: 112887.

[62] Xiao J, Zhang Y, Chen C, et al. 8-hydroxyquinoline directly loaded on graphene oxide for active protective performance of sol-gel coatings on aluminum alloys[J]. Surfaces and Interfaces, 2024, 55:

105450.

[63] Chen C, Yu M, Zhan Z W, et al. Dual strategy of improved cross-linking degree and incorporated inhibitory fillers for high corrosion resistance sol-gel coatings [J]. Corrosion Science, 2024, 234: 112145.

[64] Yuan S, Zhao X, Jin Z Q, et al. Fabrication of an environment-friendly epoxy coating with flexible superhydrophobicity and anti-corrosion performance[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 633: 127545.

[65] Zheng H P, Zhou Y L, Shao Y W, et al. Effect of graphite exfoliation degree on the corrosion protection for epoxy composite coating[J]. Composites Communications, 2021, 25: 100751.

[66] Mahdavi F, Tan M Y J, Forsyth M. Electrochemical impedance spectroscopy as a tool to measure cathodic disbondment on coated steel surfaces: capabilities and limitations[J]. Progress in Organic Coatings, 2015, 88: 23-31.

[67] Mahlobo M G R, Seadira T W P, Mabuza M M, et al. Application of voltammetry as a technique to monitor cathodic protection performance of steel in simulated soil solution[J]. Electrochemistry Communications, 2024, 166: 107777.

基金项目：国家自然科学基金资助项目(52471060)

收稿日期：2025-10-24；**录用日期**：2025-11-28

通讯作者：于美(1981—)，女，教授，博士，研究方向为腐蚀与防护，联系地址：北京市海淀区学院路37号北京航空航天大学材料科学与工程学院(100191)，E-mail：yumei@buaa.edu.cn

(本文责编：寇凤梅)