

质子交换膜燃料电池双极板导电涂层耐久性测试

刘炳

中国石化陕西延安公司 陕西延安

【摘要】质子交换膜燃料电池双极板的导电涂层对电池高效与稳定运行至关重要，其耐久性直接影响寿命与性能。本研究通过构建系统测试方法，从电化学腐蚀、接触电阻变化、涂层剥落及形貌演变等维度展开评价，并结合加速老化实验与材料表征揭示失效机制。结果显示，在高湿和循环负载条件下，涂层易出现接触电阻升高和局部剥离，但优化涂层组成与工艺能显著提升稳定性。研究为双极板导电涂层的耐久性验证与改进提供了参考，对燃料电池产业化具有重要意义。

【关键词】质子交换膜燃料电池；双极板；导电涂层；耐久性测试

【收稿日期】2025年8月14日 **【出刊日期】**2025年9月18日 **【DOI】**10.12208/j.jccr.20250054

Durability testing of conductive coatings on bipolar plates for proton exchange membrane fuel cells

Bing Liu

Sinopec Shaanxi Yan'an Company, Yan'an, Shaanxi

【Abstract】The conductive coating on the bipolar plate of proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs) is crucial for the efficient and stable operation of the cell, and its durability directly affects the cell's lifespan and performance. In this study, a systematic testing method was established to evaluate the coating from multiple dimensions, including electrochemical corrosion, contact resistance variation, coating peeling, and morphological evolution. Combined with accelerated aging experiments and material characterization, the failure mechanism of the coating was revealed. The results show that under high-humidity and cyclic load conditions, the coating is prone to increased contact resistance and local peeling; however, optimizing the coating composition and preparation process can significantly improve its stability. This study provides a reference for the durability verification and improvement of conductive coatings on bipolar plates, and is of great significance for the industrialization of fuel cells.

【Keywords】Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC); Bipolar plate; Conductive coating; Durability testing

引言

质子交换膜燃料电池因其清洁高效、响应迅速而被广泛认为是未来能源领域的重要技术路径。在燃料电池的核心部件中，双极板不仅起到气体分配与支撑的作用，还承担着电子传导的重要职责。为降低接触电阻并提高耐腐蚀性，导电涂层被广泛应用于双极板表面。燃料电池运行环境复杂，长期高湿度、酸性及循环载荷条件会对涂层稳定性造成挑战，进而影响电池整体性能与寿命。如何科学评价并提升导电涂层的耐久性，已成为推动燃料电池商业化应用的关键问题。本文将聚焦导电涂层的耐久性测试方法与结果解析，探讨其失效机理及优化路径，为燃料电池材料设计与工程应用提供可靠依据。

1 导电涂层在双极板中的作用与失效风险

质子交换膜燃料电池的双极板作为电堆结构的关键支撑单元，不仅承担气体传输、散热及机械支撑的作用，更直接影响电堆的内阻和整体电化学性能。导电涂层在双极板表面的引入，有效降低了金属基体与膜电极之间的接触电阻，使得电荷传递更加顺畅，同时避免了基体材料因直接暴露在酸性环境中而发生严重腐蚀^[1]。在长时间运行过程中，导电涂层的致密性、均匀性及导电性直接关系到燃料电池的效率与耐久性。由于燃料电池运行环境具有高湿度、高温度及电化学反应多变的特点，导电涂层不仅需要具备优异的导电特性，还必须在极端工况下保持稳定的结构形貌与化学惰性，否则会造成局部电池性能下降乃至整体失效。

导电涂层在实际运行条件下的失效风险主要集中在化学腐蚀、电化学腐蚀以及机械剥落等方面。酸性电解质环境中,涂层表面易发生氧化反应,导致涂层厚度逐渐减薄,最终失去保护功能。循环负载过程中,由于电流密度波动和温度应力作用,涂层易在界面产生裂纹,进而引发接触电阻升高。长时间运行下气体流道内的冷凝液可能造成局部环境更加苛刻,涂层在不同区域表现出不均匀的降解趋势,严重时会形成局部热点,导致燃料电池单体间电性能差异加大。以上失效过程不仅降低电池的效率,还可能引起电堆不均衡工作,加剧整体寿命衰退。

在燃料电池产业化快速发展的背景下,对导电涂层失效风险的研究逐渐受到学界和工业界的高度关注。不同材料体系的涂层在导电性、耐腐蚀性与附着力方面差异显著,例如碳基涂层在稳定性方面表现突出,但其工艺复杂性较高;金属氮化物与碳氮化物涂层在导电性方面优势明显,却在长期耐湿腐蚀性方面存在不足。研究者通过加速老化实验模拟数千小时的运行工况,发现接触电阻的缓慢上升往往是涂层失效的早期信号,而涂层剥落和局部脱落则是导致性能突降的关键节点。深入分析导电涂层在双极板中的作用与失效风险,不仅有助于理解其本质规律,更为后续测试方法优化和材料改进提供了理论依据。

2 耐久性测试方法与实验设计

导电涂层耐久性测试的科学性与系统性,直接决定了对涂层性能评价的可靠性。实验设计中需要同时考虑燃料电池实际工况与加速老化条件的平衡,从而在有限的时间内获得能够反映长期使用情况的结果。常见的测试方法包括恒电流腐蚀实验、恒电位腐蚀实验、循环伏安法以及电化学阻抗谱分析,这些手段能够从不同角度揭示涂层在电化学环境中的稳定性与降解趋势^[2-6]。恒电流腐蚀实验通过模拟电堆工作电流条件,评估涂层在持续载荷下的腐蚀速率;恒电位实验则更适合考察特定电极电位下涂层的抗腐蚀性能;而电化学阻抗谱可以反映涂层与基体界面上的电荷转移动力学,帮助研究者解析涂层失效机制。

在实验设计中,为更接近燃料电池的实际运行环境,通常会设置高湿度与高温度的苛刻条件,并辅以循环负载过程,使导电涂层在较短时间内经受反复电流冲击与温度波动,以加速暴露潜在失效模式。在此过程中,研究者不仅注重电化学性能的监测,还引入多种材料表征手段,如显微观察、元素成分分析及表面化学状态解析,对涂层在不同阶段的形貌演变与界面变化进

行系统追踪。这种电化学测试与结构表征相结合的方式,使得耐久性评价更加全面和深入,有助于揭示涂层在复杂环境下的降解机理,并为进一步的优化提供可靠依据。

为了确保测试结果具有代表性,样品的制备与对比选择同样关键。通常会在相同金属基体上制备不同工艺、不同厚度及不同组成的导电涂层,通过对比实验评估各种因素对耐久性的影响。部分研究还引入实际堆叠环境测试,即将涂层双极板组装成小型电堆,在真实运行条件下进行长时间测试,再与单片样品测试结果进行对照,从而验证实验方法的可靠性。通过这种多层次、多角度的实验设计,能够实现对涂层耐久性的全面评估,为工业界提供科学的数据支撑。

3 实验结果分析与失效机理探讨

耐久性测试结果表明,导电涂层在长期运行中呈现出接触电阻逐渐升高的趋势,这一现象通常与涂层表面发生的微观结构变化密切相关。初期阶段,涂层在酸性和湿热环境下会出现表面粗糙度增加的情况,从而导致界面接触不均匀,进而使局部电阻上升。随着测试时间的延长,部分涂层出现微裂纹和孔洞,这些缺陷为腐蚀介质提供了渗透通道,造成涂层与金属基体之间的界面反应加剧,最终导致大面积剥落。通过电化学阻抗谱分析可发现,涂层的电荷转移电阻随时间降低,说明界面腐蚀过程不断加剧,涂层保护效果逐步丧失。

进一步的显微结构分析揭示了失效机理的复杂性。扫描电子显微镜观察显示,耐久性较差的涂层在长时间循环后表面出现明显的片状剥落和裂纹扩展,而耐久性较优的涂层则保持相对完整的表面形态。能谱分析结果表明,失效区域往往伴随氧元素含量的显著增加,说明涂层在电化学环境下发生了严重的氧化反应。X射线光电子能谱进一步确认了涂层中金属元素价态的变化,例如TiN涂层在长期测试后部分区域转变为TiO₂,显著降低了其导电性。这些结果表明,化学转化与机械剥落共同作用,构成了导电涂层失效的主要途径。

在机理探讨方面,导电涂层的失效可归纳为多种典型模式,并且往往呈现出复杂的交互作用。第一类是酸性腐蚀引发的界面失效,涂层在酸性环境下逐步氧化,保护能力随之减弱,最终失去隔绝腐蚀介质的功能。第二类是由循环载荷及热应力造成的结构破坏,裂纹在界面处萌生并不断扩展,进而导致涂层局部或整体剥落。第三类则是电化学反应分布不均引起的局部失效,表现为电流集中与局部温度升高,加快了涂层的劣

化过程^[7]。这些失效模式并非孤立存在,而是彼此耦合、相互叠加,共同加速了涂层性能的衰退。通过系统化的测试数据与表征分析,可以更准确地识别不同涂层体系在耐久性方面的优势与不足,为针对性优化设计和工艺改进提供理论依据与实践方向。

4 导电涂层耐久性提升的工艺与应用策略

针对导电涂层的失效机理,研究者提出了多种提升耐久性的工艺与应用策略。在材料选择方面,碳基涂层因其优异的化学惰性和导电性而被广泛关注,然而其沉积成本较高,且在大规模应用中存在工艺复杂的问题。为此,研究者尝试通过复合涂层的方式,结合金属氮化物与碳基材料,形成具有多重防护机制的结构,以同时提升导电性与抗腐蚀性。纳米结构设计逐渐成为涂层优化的重要方向,通过调控涂层的晶粒尺寸与取向分布,可以有效提高其致密性和抗裂纹扩展能力,从而延缓失效过程。

在工艺优化层面,物理气相沉积、化学气相沉积以及电沉积等方法被广泛用于导电涂层的制备。通过控制沉积温度、气氛及沉积速率,可以获得更为均匀致密的涂层,减少孔洞与缺陷的形成。脉冲电沉积与磁控溅射等新工艺不断发展,为涂层的结构可控性提供了更多可能。采用脉冲电沉积能够在基体与涂层界面形成更强的结合力,从而提高整体耐久性。部分研究者提出在涂层表面引入自修复功能材料,如含有微胶囊的复合结构,当涂层出现微裂纹时可释放修复剂,自动修复缺陷,延缓涂层劣化进程。

在应用策略方面,导电涂层不仅需要在实验室条件下表现出优异的耐久性,还必须在实际燃料电池运行中经受长期考验。产业界逐渐重视从材料研究到堆栈应用的全链条验证。小型燃料电池堆的耐久性测试已经成为涂层推广的重要环节,通过数千小时的运行考察涂层的稳定性和一致性^[8]。针对不同应用场景,如车用燃料电池与固定式发电系统,研究者提出了差异化的涂层设计策略,前者更注重循环冲击下的稳定性,后者则强调长期恒定运行下的耐蚀性。通过这种应用导向的工艺优化与策略制定,导电涂层的耐久性不断提升,为质子交换膜燃料电池的规模化商业应用提供了坚实保障。

5 结语

本研究围绕质子交换膜燃料电池双极板导电涂层的耐久性开展系统分析,结合电化学测试与材料表征揭示了涂层在长期服役条件下的失效模式与关键影响因素。结果表明,酸性腐蚀、循环载荷及电化学反应不均衡是导致涂层退化的主要机制,而这些因素常常交织作用,加速性能衰退。通过优化涂层组成、结构设计与制备工艺,可以显著提升其稳定性与导电性能,为燃料电池的高效与长寿命运行提供有力保障。本研究为相关材料改进与工程应用提供了可靠的参考依据。

参考文献

- [1] 刘文森,李建中,章雷其,等. 质子交换膜电解槽和燃料电池故障机理与诊断综述[J/OL]. 洁净煤技术,1-17[2025-08-19].
- [2] 李聪,靳荣桢,任延杰,等. 质子交换膜燃料电池双极板表面改性研究进展[J]. 材料保护,2025,58(06):13-31.
- [3] 张宗铄,董博,郑雅如,等. 铝合金产品在质子交换膜燃料电池系统中的应用研究[J]. 有色金属加工,2025,54(03):4-8+46.
- [4] 李洪义,徐怡平,王心心. 质子交换膜燃料电池钛基双极板改性涂层研究进展[J/OL]. 北京工业大学学报,1-14[2025-08-19].
- [5] 朱熙. 质子交换膜燃料电池超薄金属双极板成形机制及封装载荷研究[D]. 湖南理工学院,2025.
- [6] 梁家维,邢彦锋,曹菊勇,等. 质子交换膜燃料电池密封结构表面形貌性能分析与研究[J/OL]. 润滑与密封,1-8[2025-08-19].
- [7] 王宁波,范晓杰,张少辉,等. 质子交换膜燃料电池双极板材料的研究与应用[J]. 全面腐蚀控制,2024,38(10):150-154.
- [8] 穆丹宁,尹胜利,杨娟丽,等. 质子交换膜燃料电池双极板用钛材研究进展[J]. 世界有色金属,2024,(14):9-11.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS