• 西华大学燃料电池关键技术与测评方法专题 •

燃料电池关键零部件耐久性测评技术研究现状*

朱刚[1]　马鹏飞[2]

（1.上海新能源科技成果转化与产业促进中心，上海 200001；2.西华大学汽车测控与安全四川省重点实验室，成都 610039）

【摘要】首先探讨了膜电极和双极板的退化机理，主要包括质子交换膜的机械、热、化学退化，催化层的铂降解和碳载体腐蚀，气体扩散层的碳腐蚀，以及双极板的气密性和耐腐蚀性问题，然后结合各组件的退化机理对当前各组件的耐久性测评技术进行了总结，提出当前各测评技术在测试条件、评价指标及老化方法上存在差异，指出当前测评体系存在标准不统一、测试覆盖度不足、与真实工况关联度不高等问题。最后，结合各组件的退化机理及测评技术研究现状，提出构建系统化、加速化、工况化的耐久测试标准体系是未来研究与产业发展的关键方向。

关键词：燃料电池　膜电极　双极板　耐久性　测评技术

中图分类号：TM911.4　　**文献标志码：**A　　**DOI：** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20250245

Current Status of Endurance Evaluation Technology for Key Fuel Cell Components

Zhu Gang[1], Ma Pengfei[2]

(1. Shanghai New Energy Technology Achievement Transformation and Industry Promotion Center, Shanghai 200001; 2. Key Laboratory of Automotive Measurement, Control and Safety of Sichuan Province, Xihua University, Chengdu 610039)

【**Abstract**】The paper firstly examines the degradation mechanisms of membrane electrode assemblies and bipolar plates (mainly including the mechanical, thermal and chemical degradation of proton exchange membranes), platinum dissolution and carbon support corrosion within the catalyst layer, carbon corrosion in the gas diffusion layer as well as the sealing integrity and corrosion resistance of bipolar plates. Subsequently, current durability evaluation methodologies for individual components are reviewed in light of their respective degradation mechanisms. It is identified that existing evaluation approaches exhibit significant variations in test conditions, performance metrics and aging protocols, leading to challenges such as lack of standardized criteria, limited test coverage and poor correlation with real-world operating conditions. Finally, drawing upon the understanding of component-specific degradation behaviors and the state of the art in evaluation techniques, it is proposed that the development of a systematic, accelerated and operationally representative durability testing framework represents a critical direction for future research and industrial advancement.

Key words: Fuel cell, Membrane electrode assembly, Bipolar plate, Durability, Measurement techniques

【引用格式】朱刚，马鹏飞．燃料电池关键零部件耐久性测评技术研究现状[J]. 汽车工程师，2026(4)：19-28.

ZHU G, MA P F. Current Status of Endurance Evaluation Technology for Key Fuel Cell Components[J]. Automotive Engineer, 2026(4): 19-28.

1　前言

近年来，随着化石能源的持续消耗，全球能源短缺和环境污染问题日益严重，推动绿色低碳能源开发以及高效清洁能源利用技术发展，已成为全球能源领域的重要课题。燃料电池能够将化学能直

*基金项目：四川省科技计划项目（2024YFHZ0314）。

接转化为电能，且能量转换效率高、无污染，是一种清洁、高效的能源转换装置，近年来在汽车、便携式电子设备和固定式电源等领域得到了广泛关注[1-2]。然而，燃料电池的耐久性仍是阻碍其商业化应用的原因之一[3-4]。

膜电极和双极板是燃料电池的核心组件。膜电极由质子交换膜（Proton Exchange Membrane，PEM）、催化层（Catalyst Layer，CL）和气体扩散层（Gas Diffusion Layer，GDL）组成。其中，质子交换膜主要负责质子的传导，以及隔离氢气（H_2）和氧气（O_2）。质子交换膜的耐久性主要受机械强度、化学稳定性和热稳定性等因素影响[5]。催化层是燃料电池电化学反应的核心，能够提高反应速率，理想的催化层应具有良好的导电性、导热性、耐腐蚀性和机械强度[6]。气体扩散层在燃料电池中起到支撑催化层、收集电流、传导气体和排出反应产物的重要作用，需具备良好的传质、传热和导电性能，以及良好的机械强度[7]。双极板是燃料电池的结构支撑和电流传导组件，其耐久性主要受材料的导电性、抗腐蚀性和机械强度等因素制约[8]。目前，双极板的材料主要有石墨、金属和复合材料3种，各类双极板的特性有所差异。

膜电极和双极板的耐久性能直接影响燃料电池的整体寿命和性能稳定性。因此，研究燃料电池关键零部件的耐久性测评技术，对于推动燃料电池技术的进步和产业化发展具有现实意义。本文从各组件的退化机理出发，结合各组件的退化原因，对当前各组件的耐久性测评技术进行对比分析，提出当前测评技术存在的问题，并给出相应建议。

2 膜电极退化机理

质子交换膜退化可分为机械退化、热退化和电化学退化3类。其中，机械退化是由于膜的穿孔、裂纹、撕裂或针孔导致的早期寿命失效，这可能是由于先天性膜缺陷或膜电极组装制造工艺不当造成的。高温下的热退化是膜退化的另一个重要原因，传统的全氟磺酸膜在80 ℃时会被分解[9]，当温度超过280 ℃时，具有侧链磺酸基团的类四氟乙烯骨架开始分解，这会对质子交换膜造成不可逆的损伤。膜的电化学退化包括膜减薄和膜中形成铂（Pt）带。材料的分解可导致薄膜厚度的减小[10]，Mukundan等[10]的研究表明，在开路电压下干湿循环（30 s干态运行+45 s湿态运行）634 h，Nafion膜的减薄率增加至1.93 nm/h，燃料电池稳定运行425 h后，H_2渗透率增加，导致燃料电池性能下降。此外，Pt在阴极被氧化成PtO和PtO_2，在溶液中形成Pt^{2+}和Pt^{4+}，在向催化层两侧移动时，与H_2发生还原反应，形成Pt单质[10]，在燃料电池长期运行后，容易形成一条Pt带[9]，进而对燃料电池的性能造成影响。

催化层的退化包括Pt的降解、碳载体的腐蚀、离聚物的降解[9]。Pt的降解包括Pt溶解、Pt分离和Pt烧结。Pt的溶解是指Pt被氧化后溶解到水中形成离子态，从而导致催化剂的电化学活性表面积（Electrochemical Active Surface Area，ECSA）减小。Pt烧结是指Pt纳米颗粒的增长。Shao等[11]研究表明，Pt从支撑材料表面剥离可能会导致催化剂的永久性流失或Pt烧结。Mayrhofer等[12]在电位循环0.4~1.4 V、扫描速率1 V/s的试验条件下对催化剂进行了循环测试，试验结束后，Pt粒径由4.9 nm变为5.6 nm，Pt粒径的增加导致催化剂的比表面积降低，进而影响其电化学活性表面积。催化剂碳载体腐蚀是影响催化层耐久性的另一个关键问题，在两种条件下会发生碳腐蚀：一是启动和关闭循环之间的过渡阶段，二是在稳态条件下，由于阳极的一部分阻塞H_2而导致燃料匮乏[13]。碳腐蚀会加速Pt的团聚，导致碳颗粒间连通性的丧失和电化学活性表面积的下降[14]，且在燃料电池实际运行过程中，高电位下碳颗粒极不稳定。此外，离聚物分子易受自由基攻击而导致离聚物分解，这是催化层退化的又一重要原因[15]。在电池实际运行过程中，Pt、H_2O和O_2能结合生成PtOH、PtO、HO和HOO，导致在燃料电池中自由基生成的可能性增大[9]，进而增加了离聚物被分解的可能性。

气体扩散层的退化包括质量传输阻力的增加、碳腐蚀增大接触电阻从而降低电导率和疏水性，以及聚四氟乙烯（Polytetrafluoroethylene，PTFE）的降解导致水淹。此外，在燃料电池装配时，采用错误装备步骤或装配压力不均匀等外在因素都可能增加电池运行时的质量传输阻力[9]。Mukundan等[16]比较了两种冻融（Freeze-Thaw，F-T）循环，当气体扩散层出现严重的机械故障和性能损失时，会产生界面分层，导致气体扩散层的欧姆电阻增大、电导率下降。在燃料电池运行时，气体扩散层中的PTFE和碳复合材料易受到电化学侵蚀和氧化而发生损坏，从而引起气体扩散层物理性质的变化，如电导率和疏水性降低，进一步降低膜电极性能[13]。

综上，燃料电池膜电极的退化机理复杂多样，主要包括质子交换膜性能下降、催化剂活性损失、气体扩散层质量传输阻力增加等。这些退化现象不仅影响燃料电池的性能，还会对其寿命产生影响。因此，提高膜电极的耐久性对于燃料电池的长时间稳定运行至关重要。

3 双极板退化机理

石墨双极板分为两类：一类是由碳粉或石墨粉与沥青或可石墨化树脂经过石墨化后，通过机加工制备而成的石墨双极板；另一类是由膨胀石墨与高分子树脂粉末混合后模压制备或将膨胀石墨压制成预压板后，对其进行浸渍处理而形成的柔性膨胀石墨双极板[17]。石墨具有良好的化学稳定性和耐腐蚀性，但在高温和具有腐蚀性的介质中，其性能可能会逐渐退化。其次，石墨的电导率高，有利于电子的传导。然而，石墨的结构若在长期使用中发生微小的裂纹或破损，可能会影响其电导率。石墨的机械强度较低，容易在机械应力下发生断裂或损伤，这对其使用寿命造成了一定影响。此外，在石墨化处理时，温度超过2 500 ℃，这会导致石墨双极板中的杂质蒸发，形成较多孔洞，导致双极板的气密性变差[18-19]，虽然柔性石墨双极板经过浸渍处理后孔洞会减少，但仍存在气密性的缺陷[18]。蔡海卫等[20]对柔性石墨双极板的泄漏进行原因分析，发现浸渍处理前石墨双极板上存在油污，占据了浸渍位置，高温环境下油污挥发导致了孔洞的形成。武涛和李国华等[21-22]提出了相对透气系数，用于表征柔性石墨双极板的气密性，结果表明，石墨双极板的相对透气系数与石墨板的密度、厚度等相关，与气体压力、工作时间等外界条件关联性不强。

金属双极板的耐久性能衰退程度绝大部分取决于其耐腐蚀性。纯金属双极板的常用材料有不锈钢、钛合金等[23]。但纯金属双极板在燃料电池运行过程中易受腐蚀，并释放可能毒害催化剂的金属离子，或形成可增加界面接触电阻（Interfacial Contact Resistance，ICR）的致密氧化膜，从而影响燃料电池的输出功率和使用寿命[24]。Asri等[25]综述了不锈钢和钛双极板的防腐涂层技术，发现在pH值为2~3、温度为80 ℃的运行环境下，金属双极板表面易发生腐蚀和溶解，进而形成表面腐蚀层，导致电池电阻增大、输出功率减小，间接影响燃料电池的使用寿命。Tawfik等[26]总结了金属双极板的腐蚀失效情况，包括双极板表面形成针孔导致腐蚀失效、电催化剂中毒导致腐蚀失效和极板表面钝化造成的腐蚀失效，上述失效都会对双极板的使用性能产生不可逆的影响，进而影响燃料电池的正常运行。Hermann等[27]研究发现，当质子交换膜燃料电池运行在pH值为2~3、温度为80 ℃的环境中时，使用合金材料制成的双极板极易发生腐蚀或溶解，进而对燃料电池的性能造成一定影响。Mani等[28]研究发现，金属双极板表面发生腐蚀时，会形成一层氧化膜，尽管该氧化膜能提升双极板表面的耐腐蚀性，但同时可增大双极板与气体扩散层之间的界面接触电阻，进而对整个燃料电池系统的性能造成影响。

复合双极板可分为结构复合和材料复合两大类。结构复合主要以薄不锈钢/钛或石墨箔作为致密隔板，配合多孔碳/金属网或薄碳板为流场，并以导电胶/聚合物夹层黏结[29]；材料复合主要以聚合物树脂（环氧、酚醛等）为基体，填充石墨/碳黑/碳纤维/石墨烯压制或注塑成型，亦含金属基复合（在金属板周边加入聚合物/碳边框与其密封）[30]。不同复合材料的退化机理也不相同，碳基复合材料在酸性水热以及机械循环作用下，树脂吸水易发生水解氧化、界面脱黏和微裂，进而导致双极板强度与气密性下降、实际接触面积减小，且后者会导致界面接触电阻增大[31-32]；此外，碳基复合板在启停高电位下还会引发碳腐蚀、表面粗化，从而破坏导电网络。同时，在金属/结构复合中，不锈钢/钛在含氟磺酸介质与阴极电位下易产生点蚀腐蚀，且金属离子迁移会毒化膜电极，进而导致整个燃料电池系统性能衰退[33]。

综上所述，石墨双极板的耐久性主要取决于其气密性，金属双极板的耐久性主要取决于其耐腐蚀性，而复合双极板则因复合材料的不同需从多方面考虑。因此，针对不同的双极板，若需提高其材料使用寿命，应主要从上述两个方面考虑，且提高双极板的材料使用寿命对提高燃料电池系统的整体性能和运行寿命也具有积极作用。

4 关键零部件耐久性测评技术

在燃料电池系统组装前，需对膜电极和双极板进行必要的耐久性测试，以验证产品的使用寿命并及时发现产品缺陷。

4.1 膜电极耐久性测评技术

国际上已制订了多个燃料电池膜电极耐久性测试规程或标准，包括美国能源部（Department of Energy，DOE）测试规程[34]、国际电工委员会（International Electrotechnical Commission，IEC）测试规程[35]、日本氢燃料电池工业协会（Fuel Cell Commercialization Conference of Japan，FCCJ）测试规程[36]和中国汽车工业协会团体标准T/CAAMTB 12—2020《质子交换膜燃料电池膜电极测试方法》[37]，内容主要涉及质子交换膜的化学稳定性和机械耐久性测试方法、催化剂及其载体耐久性测试方法等。关于质子交换膜化学稳定性测试方法，国内外测试规程中均使用持续开路电压（Open Circuit Voltage，OCV）500 h作为试验条件，且电池温度和阴阳极相对湿度（Relative Humidity，RH）均分别为90 ℃和30%。具体测试内容如表1所示。

由表1可知，各测试规程中进行化学耐久性测试的燃料电池状态主要在进气流量和压力方面存在差异。其次，在各测试规程中OCV的变化、透氢电流密度变化、是否达到测试时长是判定是否满足测试结束条件的依据。

质子交换膜的机械耐久性测试主要采用干湿循环方法，促使膜反复膨胀和收缩，进而加速膜裂纹和孔洞的形成与扩展。各测试规程中均采用20 000次干湿循环对质子交换膜进行机械耐久性测试，且均在电池温度为80 ℃的条件下进行。各测试规程的质子交换膜机械耐久性测试方法如表2所示。

由表2可知，各测试规程内容差异不大，干湿循环时，所用干气进气相对湿度为0%，加湿气体相对湿度为150%或露点温度为90 ℃。此外，进气压力和流量存在一定差异，且在测量透氢电流密度时，所选测量点有所区别。

表1 国内外质子交换膜化学稳定性耐久测试方法

机构	DOE	IEC	FCCJ	中国汽车工业协会
阴、阳极气体流量	阴阳极气体计量比均为10（电池密度0.2 A/cm^2）	未规定	阴、阳极气体流量均为829 mL/min（日本汽车研究所标准单电池）	阴阳极气体计量比均为10（电池密度0.2 A/cm^2）
压力	150 kPa	大气压	大气压	50 kPa
测量点	每24 h	每10~100 h	每50~100 h	每100 h
测试内容	测试透氢电流密度；在0.2 A/cm^{2}电流密度下测试短路电阻、高频电阻，持续监测OCV	测试透氢电流密度；在阴、阳极出口测试F^-浓度（非必要）	测试透氢电流密度；必要时测试极化曲线和ECSA	测试透氢电流密度，直至其大于15 mA/cm^2；持续监测OCV，直至其衰减20%，记录开路运行时间

表2 国内外质子交换膜机械耐久性测试方法

机构	DOE	IEC	FCCJ	中国汽车工业协会
循环方法	相对湿度0%（2 min）-露点温度90 ℃（2 min）	相对湿度0%（2 min）-露点温度80 ℃（相对湿度150%，2 min）	相对湿度0%（2 min）-露点温度90 ℃（相对湿度150%，2 min）	相对湿度0%（2 min）-露点温度90 ℃（2 min）
气体	阳极（O_2）：2 L/min 阴极（O_2）：2 L/min	阳极（O_2或N_2）：2 L/min 阴极（O_2或N_2）：2 L/min	阳极（O_2）：0.8 L/min 阴极（O_2）：0.8 L/min	阳极（H_2）：2 L/min 阴极（O_2）：2 L/min
压力	阴、阳极均为150 kPa			阴、阳极进堆压力为常压或无背压
测量点	每24 h	最初每1 000个干湿循环（67 h），后续每360个循环（24 h）	每1 000个干湿循环（67 h）	每循环5 000次
测试内容	测试透氢电流密度，测量短路电阻	每1 000个循环检测气体渗透频率，若渗透速率加快则每360个循环检测一次；高频阻抗测试	测量透氢电流密度；进行电流-电压和ECSA测试（非必要）	测量透氢电流密度

国内外对于催化剂及其载体耐久性的测试方法主要针对阴极铂碳催化剂Pt的衰减以及碳载体的加速腐蚀，主要规定了电压循环的模式、时长、次数，以及测试时燃料电池的状态及其性能测试方法。各测试规程对催化剂的耐久性测试主要采用方波电压循环，间隔时间6 s，且在电池温度和相对湿度分别为80 ℃和100%的试验条件下进行。具体测试内容如表3所示。

由表3可以看出：各标准针对阴极催化剂Pt的衰减采用的方波循环电压范围主要集中在0.6~1.0 V，

仅在高电位上略有区别，部分标准采用0.95 V；各标准规定的电池状态基本一致，电池阴、阳极侧通入的气体分别为N_2和H_2，但气体流量存在较大差异；各标准中均包含了极化曲线和ECSA的测试，氧还原反应（Oxygen Reduction Reaction，ORR）和催化剂质量活性测试一般作为非必要测试项目。

对于催化剂耐久载体的测试方法，各测试规程均采用三角波电压循环，间隔2 s，且均在电池温度为80 ℃、阴阳极相对湿度为100%的条件下进行测试，具体测试内容如表4所示。

由表4可以看出，针对碳载体的加速耐久测试，各标准的测试内容与催化剂耐久性测试相似，仅电压循环次数和性能测试循环次数有所差异。

此外，当前国内外在气体扩散层耐久性方面的测试主要集中于机械和电化学两类测试，其中电化学耐久性测试内容较多，其测试规程主要规定了电压循环模式、时长、次数以及测试结果处理流程和对比指标，部分测试规程还涉及腐蚀溶液的配比，具体测试内容如表5所示。

由表5可以看出，关于气体扩散层的耐久性测试方法，特别是在电化学耐久测试规程方面，各标准或研究机构之间的测试方法亦有差异，但在结果分析方面均大致包括气体扩散层的接触角、F含量、PTFE质量分数等。

表3　催化剂耐久性测试方法

机构	DOE	IEC	FCCJ	中国汽车工业协会
循环次数/次	30 000		400 000	30 000
循环方法	0.6 V(3 s)-0.95 V(3 s)，电位切换时间不超过0.5 s	0.6 V(3 s)-1.0 V(3 s)，循环前在0.6 V下停留30 s	0.6 V(3 s)-1.0 V(3 s)，循环前在0.6 V下停留30 s	0.6 V(3 s)-0.95 V(3 s)，电位切换时间不超过0.5 s
气体	阳极(H_2)：200 cm^3/min 阴极(N_2)：75 cm^3/min (50 cm^2单电池)	阳极：H_2 阴极：N_2 未规定气体流量	阳极(H_2)：0.2 L/min 阴极(N_2)：0.8 L/min	阳极(H_2)：0.5 L/min 阴极(N_2)：0.5 L/min
压力	大气压	大气压	大气压	阴、阳极进堆压力均为50 kPa
进行性能测试时的循环次数	0次、10次、100次、1 000次、3 000次、5 000次、10 000次、30 000次方波循环后	适当位置	500次、1 000次、2 000次、3 000次、……(以1 000次递增)、400 000次方波循环后	0次、1 000次、5 000次、10 000次、30 000次方波循环后
性能测试内容	催化质量活性；0~1.5 A/cm^2电流密度以上的极化曲线；循环后的ECSA	适当间隔测试质量活性、ORR、极化曲线；ECSA	极化曲线、ECSA和ORR	极化曲线和ECSA

表4　催化剂载体耐久性测试方法

机构	DOE	IEC	FCCJ	中国汽车工业协会
循环次数/次	5 000	60 000	60 000	5 000
循环方法	1.0~1.5 V范围内，以500 mV/s扫描			
气体	阳极：H_2 阴极：N_2 未规定气体流量	阳极：H_2 阴极：N_2 未规定气体流量	阳极(H_2)：0.2 L/min 阴极(N_2)：0.8 L/min	阳极(H_2)：0.5 L/min 阴极(N_2)：0.5 L/min
压力	大气压	大气压	大气压	阴、阳极进堆压力均为50 kPa
进行性能测试时的循环次数	0次、10次、100次、200次、500次、1 000次、2 000次、5 000次三角波循环后	适当位置	500次、1 000次、2 000次、3 000次、……(以1 000次递增)、400 000次三角波循环后	0次、10次、100次、200次、500次、1 000次、2 000次、5 000次三角波循环后
性能测试内容	催化质量活性；0~1.5 A/cm^2电流密度以上的极化曲线；循环后的ECSA	适当间隔测试ORR、极化曲线；ECSA	极化曲线、ECSA和ORR	极化曲线和ECSA

表5　气体扩散层耐性测试方法

测试方法	FCCJ测试规程	FCCJ测试规程	DOE测试规程	文献[38]
测试内容	GDL机械耐久	GDL电化学耐久	GDL电化学耐久	GDL电化学耐久
循环次数	10 000次（1 Hz）	恒电位4 h	按时间：15~24 h	恒电位24 h；三角波6 000次
循环方法	基准面压(1.0±0.2) MPa，1 Hz加载-卸载循环	在0.5 mol/L H_2SO_4溶液中2.0 V（相对于可逆氢电极）恒电位保持4 h；参比为Hg/Hg_2SO_4（饱和K_2SO_4溶液），对电极为碳	质量分数为30%的H_2O_2，95 ℃，累计≤15 h	1.4 V（相对于可逆氢电极）恒电位24 h；或1.0~1.5 V三角波6 000次，以500 mV/s扫描
气体	机械加载，无反应气体	腐蚀阶段：无气体要求； 限流测量阶段：阳极为H_2，阴极为O_2/N_2未规定气体流量		阳极（H_2）：0.5 L/min 阴极（N_2）：0.5 L/min
压力	大气压	腐蚀阶段，常压； 限流测量阶段背压：110 kPa、150 kPa、200 kPa、300 kPa		大气压
进行性能测试时的循环次数	0次、1 000次、5 000次、10 000次采样后	0 h、1 h、2 h、3 h、4 h后	0 h、8 h、15 h、24 h后	每隔6 h或0次、2 000次、4 000次、5 000次三角波循环后
性能测试内容	厚度/回弹（应力-位移，弹簧特性）；老化前、后气体扩散阻力、接触角等	腐蚀后GDL的传质阻力；接触角、质量、F含量、PTFE质量分数、贯穿电阻	接触角、质量、F含量、PTFE（聚四氟乙烯）质量分数；水渗透性、突破压力	极化曲线和ECSA；接触角、孔体积、贯穿电阻

综上，当前国内外针对膜电极耐久性测评技术的研究方法差异不大，但在膜电极中气体扩散层相关耐久性测试规程或标准方面均较为缺乏，特别是国内尚无相关标准或规程。气体扩散层作为膜电极的关键组件，若存在缺陷会直接影响膜电极的整体性能，进而间接影响整个燃料电池系统的使用性能和寿命，因此需根据气体扩散层性能老化机理建立气体扩散层相关耐久性测试标准及加速试验方法。

4.2　双极板耐久性测评技术

当前，国内外燃料电池双极板耐久性测试方法主要在T/ZJCX 0034—2023《质子交换膜燃料电池石墨双极板特性测试标准》中有所涉及，主要包括石墨双极板的热耐久性测试和电化学耐久性测试。国外DOE及国内部分高校也对双极板的耐久性展开了研究，主要涉及金属双极板的耐腐蚀性。

表6所示为部分机构或标准针对金属双极板耐腐蚀性的测试方法，主要区别在于动电位和恒电位两种测试方法。动电位电化学测试的极化曲线主要根据腐蚀电极电位与极化电流密度的关系来反映双极板材料的耐腐蚀性。恒电位测试下的极化曲线主要反映双极板测试时其腐蚀程度随时间变化的关系，进而反映双极板耐腐蚀的稳定性。

针对双极板单体的耐久测试，目前国内测试方法多集中于异位测试，其测试内容与燃料电池系统整体的关联度不大，而国外测试方法则集中于双极板在整个系统中的耐久性，模拟实际使用条件下的长时间运行测试，测试工况更接近双极板的真实工况，更有利于双极板的耐久性研究。双极板单体的在线测试方法如表7所示。

表6　双极板耐腐蚀性测试方法[39~43]

机构名称	电解液	温度/℃	电位类别	电位/V	扫描速率/mV·s^{-1}	测试时间/h
DOE	H_2SO_4+0.1×10^{-6} HF，pH=3	80	动电位	−0.4~0.6（Ag/AgCl）	0.1	
DOE	1 mol/L，H_2SO^4+2×10^{-6} HF	80	恒电位	0.6（Ag/AgCl）		≥24
上海交通大学	0.5 mol/L，H_2SO_4+5×10^{-6} HF	70	动电位	−0.6~1.2	1	
上海交通大学	0.5 mol/L，H_2SO_4+2×10^{-6} HF	80	恒电位	0.6（通入空气）~0.1（通入饱和H_2）		10
大连理工大学	0.5 mol/L，H_2SO_4+2×10^{-6} HF	80	动电位	−0.4~1.0（Ag/AgCl）	10	
大连理工大学	0.5 mol/L，H_2SO_4+5×10^{-6} HF	70	恒电位	0.6（通入空气）~0.1（通入饱和H_2）		7
T/ZJCX 0034—2023	0.5 mol/L，H_2SO_4+5×10^{-6} HF	80	恒电位	0.8（Ag/AgCl）		≥24

表7　双极板单电池参数及其测试内容

极板材料	空气流速 /cm³·min⁻¹	H_2流速 /cm³·min⁻¹	电池温度/℃	恒流密度 /mA·cm⁻²	测试时间/h	评估方法	测试机构
铝/NiCr、NiCrBSi	250	250	80	200	330	恒电位、极化曲线	伊斯法罕理工大学[44]
Al/Ni-P	300	300	80	200	24	恒电位、极化曲线	日本东北大学[45]
石墨/环氧树脂	500	30	70	500	200	恒电位、极化曲线	中国科学院大连化学物理研究所[46]
SS 316L			75		8 000	恒电位、极化曲线	上海智真新能源有限公司[47]
Ti/TiN-C	100	100	80		300	恒电位、极化曲线	北京科技大学[48]

由表7可以看出，国内外研究机构对于双极板的单电池耐久性研究多集中于有涂层的金属双极板，对石墨双极板和复合双极板的单电池耐久性测试研究较少，且不同双极板的测试时间和电堆参数设置也不相同，但对双极板的耐久性能评估均通过在恒电位下测试电堆的极化曲线完成。此外，在进行双极板的单体测试时，部分研究机构采用燃料电池堆的工况循环法。Shu等[49]利用自制的5 kW燃料电池试验台，针对含有镀金的316L不锈钢双极板电堆在新欧洲驾驶循环（New European Driving Cycle，NEDC）的动态负载工况下进行了5 000 h耐久性测试，最后选择性能退化明显的双极板进行离线测试和分析，并将退化后的双极板和全新的双极板重组为单个电池进行测试对比，以评估双极板失效对燃料电池性能的影响，进而反映其退化情况。

综上，当前针对双极板的耐久性测试方法繁多，且国内相关测试标准并不统一，测试内容多集中于双极板的耐腐蚀性测试，涉及双极板其他属性（如机械耐久性、热耐久性）的测试内容较少，因此建立统一全面的双极板耐久性测试标准和方法将是推动燃料电池发展的重要一环。

5　总结与展望

本文系统分析了燃料电池关键零部件的退化机理，探讨了膜电极中质子交换膜、催化层和气体扩散层的退化模式，以及双极板的气密性和耐腐蚀性问题。同时，本文对国内外燃料电池关键组件的耐久性测试方法进行了比较分析。针对现有的膜电极耐久测试标准，当前国内还缺少气体扩散层相关测试内容；针对现有的双极板耐久性测试，当前研究多集中于金属双极板，且多为耐腐蚀性测试。

未来，可重点从各组件的退化机理出发，建立健全相关耐久性测试及加速老化试验标准，并基于国内外现有标准或测评方法统一测试流程。合理且规范的耐久测试流程可为各组件提供更为准确的测试结果和明确的改进方向，进而为提升燃料电池关键零部件的耐久性，以及燃料电池的大规模推广应用提供有力支持。

参　考　文　献

[1] 刘应都, 郭红霞, 欧阳晓平. 氢燃料电池技术发展现状及未来展望[J]. 中国工程科学, 2021, 23(4): 162-171.
LIU Y D, GUO H X, OUYANG X P. Current Status and Future Prospects of Hydrogen Fuel Cell Technology Development[J]. Chinese Journal of Engineering, 2021, 23(4): 162-171.

[2] AMINUDIN M A, KAMARUDIN S K, LIM B H, et al. An Overview: Current Progress on Hydrogen Fuel Cell Vehicles [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(11): 4371-4388

[3] 焦道宽, 罗锡锋, 侯永平, 等. 质子交换膜燃料电池金属双极板老化衰减测评方法研究[J]. 电池工业, 2024, 28(6): 299-304.
JIAO D K, LUO X F, HOU Y P, et al. Study on the Evaluation Method of Aging and Degradation of Metal Bipolar Plates in Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. Battery Industry, 2024, 2(6): 299-304.

[4] WHISTON M M, AZEVEDO I L, LITSTER S, et al. Expert Assessments of the Cost and Expected Future Performance of Proton Exchange Membrane Fuel Cells for Vehicles[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2019, 116(11): 4899-4904.

[5] 张茹, 周斌, 王海波. 燃料电池质子交换膜的耐久性测试和研究[J]. 中国标准化, 2024(增刊1): 338-342.
ZHANG R, ZHOU B, WANG H B. Durability Testing and Research of Proton Exchange Membrane in Fuel Cells[J]. China Standardization, 2024(S1): 338-342.

[6] YU Y, LI H, WANG H J, et al. A Review on Performance Degradation of Proton Exchange Membrane Fuel Cells during Startup and Shutdown Processes: Causes, Consequences, and Mitigation Strategies[J]. Journal of Power Sources, 2012, 205: 10-23.

[7] CANDUSSO D, HAREL F, DE BERNARDINIS A, et al. Characterisation and Modelling of a 5 kW PEMFC for Transportation Applications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2006, 31(8): 1019-1030.

[8] 裴普成, 李子钊, 任棚, 等. PEM燃料电池用金属双极板及其涂层的研究进展[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2021, 61(10): 1025-1038.
PEI P C, LI Z Z, REN P, et al. Research Progress on Metal Bipolar Plates and Their Coatings for PEM Fuel Cells[J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2021, 61(10): 1025-1038.

[9] 晏伟. 低铂载量PEMFC膜电极及耐久性失效过程的研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2022.
YAN W. Study on Low Platinum Loading PEMFC Membrane Electrode and Its Durability Failure Process[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2022.

[10] MUKUNDAN R, BAKER A M, KUSOGLU A, et al. Membrane Accelerated Stress Test Development for Polymer Electrolyte Fuel Cell Durability Validated using Field and Drive Cycle Testing[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2018, 165(6): F3085-F3093.

[11] SHAO Y Y, YIN G P, GAO Y Z. Understanding and Approaches for the Durability Issues of Pt-Based Catalysts for PEM Fuel Cell[J]. Journal of Power Sources, 2007, 171 (2): 558-566.

[12] MAYRHOFER K J J, MEIER J C, ASHTON S J, et al. Fuel Cell Catalyst Degradation on the Nanoscale[J]. Electrochemistry Communications, 2008, 10(8): 1144-1147.

[13] WU J F, YUAN X Z, MARTIN J J, et al. A Review of PEM Fuel Cell Durability: Degradation Mechanisms and Mitigation Strategies[J]. Journal of Power Sources, 2008, 184(1): 104-119.

[14] MACAULEY N, PAPADIAS D D, FAIRWEATHER J, et al. Carbon Corrosion in PEM Fuel Cells and the Development of Accelerated Stress Tests[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2018, 165(6): F3148-F3160.

[15] HOLTON O T, STEVENSON J W. The Role of Platinum in Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. Platinum Metals Review, 2013, 57(4): 259-271.

[16] MUKUNDAN R, KIM Y S, GARZON F H, et al. Freeze/Thaw Effects in PEM Fuel Cells[J]. ECS Transactions, 2006, 1(8).

[17] 田润平, 孔戈, 茆晓雨, 等. 石墨复合双极板气密性和导电性的研究进展[J]. 应用化工, 2023, 52(1): 177-180.
TIAN R P, KONG G, MAO X Y, et al. Research Progress on Gas Tightness and Conductivity of Graphite Composite Bipolar Plates[J]. Applied Chemical Industry, 2023, 52(1): 177-180.

[18] 李俊超, 王清, 蒋锐, 等. 质子交换膜燃料电池双极板材料研究进展[J]. 材料导报, 2018, 32(15): 2584-2595+2600.
LI J C, WANG Q, JIANG R, et al. Research Progress on Bipolar Plate Materials for Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. Materials Reports, 2018, 32(15): 2584-2595+2600.

[19] SONG Y X, ZHANG C Z, LING C Y, et al. Review on Current Research of Materials, Fabrication and Application for Bipolar Plate in Proton Exchange Membrane Fuel Cell [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(54): 29832-29847.

[20] 蔡海卫, 周炳海. 石墨双极板泄漏原因分析及改善[J]. 精密制造与自动化, 2022(2): 56-60.
CAI H W, ZHOU B H. Analysis and Improvement of Leakage Causes in Graphite Bipolar Plates[J]. Precision Manufacturing and Automation, 2022(2): 56-60.

[21] 武涛, 郑永平, 黄正宏, 等. 柔性石墨双极板透气性的研究[J]. 材料科学与工程学报, 2005(2): 196-199.
WU T, ZHENG Y P, HUANG Z M, et al. Study on the Gas Permeability of Flexible Graphite Bipolar Plates[J]. Journal of Materials Science and Engineering, 2005(2): 196-199.

[22] 李国华, 潘朝光, 许莉, 等. 柔性石墨板的氢气透过率研究[J]. 材料导报, 2004(1): 97-99.
LI G H, PAN C G, XU L, et al. Study on Hydrogen Permeability of Flexible Graphite Plates[J]. Materials Reports, 2004(1): 97-99.

[23] TAHERIAN R. RETRACTED: A Review of Composite and Metallic Bipolar Plates in Proton Exchange Membrane Fuel Cell: Materials, Fabrication, and Material Selection[J]. Journal of Power Sources, 2014, 265: 370-390.

[24] 冯利利, 汤思遥, 陈越, 等. 质子交换膜燃料电池金属双极板表面改性研究进展[J]. 中国科学: 化学, 2021, 51(8): 1018-1028.
FENG L L, TANG S Y, CHEN Y, et al. Research Progress on Surface Modification of Metal Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. Scientia Sinica (Chimica), 2021, 51(8): 1018-1028.

[25] ASRI N F, HUSAINI T, SULONG A B, et al. Coating of Stainless Steel and Titanium Bipolar Plates for Anticorrosion in PEMFC: A Review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2017, 42(14): 9135-9148.

[26] TAWFIK H, HUNG Y, MAHAJAN D. Metal Bipolar Plates for PEM Fuel Cell—A Review[J]. Journal of Power Sources, 2007, 163(2): 755-767.

[27] HERMANN A, CHAUDHURI T, SPAGNOL P. Bipolar Plates for PEM Fuel Cells: A Review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2005, 30(12): 1297-1302.

[28] MANI S P, SRINIVASAN A, RAJENDRAN N. Effect of Nitrides on the Corrosion Behaviour of 316L SS Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2015, 40(8): 3359-3369.

[29] GAO X, CHEN J Y, XU R J, et al. Research Progress and Prospect of the Materials of Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFCs)[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 50: 711-743.

[30] ELFERJANI I, SERRE G, TER-OVANESSIAN B, et al. A Coupling Approach between Metallic Bipolar Plates Corrosion and Membrane Chemical Degradation in the Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(63): 32226-32241.

[31] IRSHAD H M, SHAHGALDI S. Comprehensive Review of Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Fuel Cells with a Focus on Materials, Processing Methods and Characteristics[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 111: 462-487.

[32] LI H M, BI F F, DONG L, et al. A Novel Ex-Situ Accelerated Evaluation Method for Metallic Bipolar Plates in Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. Journal of Power Sources, 2023, 580.

[33] LIU G Y, SHAN D F, FANG B Z, et al. Novel Hybrid Coating of TiN and Carbon with Improved Corrosion Resistance for Bipolar Plates of PEM Water Electrolysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(50): 18996-19007.

[34] Office of Energy Efficiency and Renewable Energy, U.S. Department of Energy. Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office Multi-Year Research, Development and Demonstraton Pan[R]. Washington, D.C., USA: U.S. Department of Energy, 2014.

[35] International Electrotechnical Commission. Fuel Cell Technologies-Part 7-1: Test Methods—Single Cell Performance Tests for Polymer Electrolyte Fuel Cells (PEFC): IEC TS 62282-7-1: 2017[S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2017.

[36] Daido University, Ritsumeikan University, Tokyo Institute of Technology, et al. Cell Evaluation and Analysis Protocol Guideline (Eletrocatalyst, Support, Membrane and MEA) [S]. Tokyo, Japan: Japan Automobile Research Institute, 2014.

[37] 中国汽车工业协会. 质子交换膜燃料电池膜电极测试方法: T/CAAMTB 12—2020[S]. 北京: 中国汽车工业协会, 2020.
China Association of Automobile Manufacturers. Test Methods of Membrane Electrode for PEMFC: T/CAAMTB 12—2020[S]. Beijing: China Association of Automobile Manufacturers, 2020.

[38] ZHANG X Y, LI S, HUANG P T, et al. Comparative Study on Carbon Corrosion Characteristics of Gas Diffusion Layer in PEMFCs under Two Accelerated Stress Tests[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2024, 19 (6).

[39] 刘颖, 赵洪辉, 盛夏, 等. 质子交换膜燃料电池双极板材料及制备综述[J]. 汽车文摘, 2021(5): 48-54.
LIU Y, ZHAO H H, SHENG X, et al. Review of Bipolar Plate Materials and Preparation for Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. Automotive Digest, 2021(5): 48-54.

[40] FENG K, HU T, CAI X, et al. Ex Situ and in Situ Evaluation of Carbon Ion-Implanted Stainless Steel Bipolar Plates in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells[J]. Journal of Power Sources, 2012, 199: 207-213.

[41] WANG W L, HE S M, LAN C H. Protective Graphite Coating on Metallic Bipolar Plates for PEMFC Applications [J]. Electrochimica Acta, 2012, 62: 30-35.

[42] WU B, LIN G Q, FU Y, et al. Chromium-Containing Carbon Film on Stainless Steel as Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(24): 13255-13261.

[43] 浙江省企业技术创新协会. 质子交换膜燃料电池石墨双极板特性测试标准: T/ZJCX 0034—2023[S]. 杭州: 浙江省企业技术创新协会, 2023.
Zhejiang Enterprise Technology Innovation Association. Test Standard of Graphite Bipolar Plates Characteristics for Proton Exchange Membrane Fuel Cells: T/ZJCX 0034—2023[S]. Hangzhou: Zhejiang Enterprise Technology Innovation Association, 2023.

[44] MADADI F, REZAEIAN A, EDRIS H, et al. Improving Performance in PEMFC by Applying Different Coatings to Metallic Bipolar Plates[J]. Materials Chemistry and Physics, 2019, 238.

[45] KIM S C, YAMAURA S I, MAKINO A, et al. Production of Ni-P Amorphous Alloy-Coated Bipolar Plate for PEM Fuel Cell by Electro-Less Plating[J]. Materials Transactions, 2011, 52(4): 709-713.

[46] DU C, MING P W, HOU M, et al. The Preparation Technique Optimization of Epoxy/Compressed Expanded Graphite Composite Bipolar Plates for Proton Exchange

Membrane Fuel Cells[J]. Journal of Power Sources, 2010, 195(16): 5312-5319.

[47] LI H M, BI F F, DONG L, et al. A Novel Ex-Situ Accelerated Evaluation Method for Metallic Bipolar Plates in Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. Journal of Power Sources, 2023, 580.

[48] LIU G Y, SHAN D F, FANG B Z, et al. Novel Hybrid Coating of TiN and Carbon with Improved Corrosion Resistance for Bipolar Plates of PEM Water Electrolysis[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(50): 18996-19007.

[49] SHU Q Z, SHI J F, LI Z X, et al. Failure of Au-Coated Metallic Bipolar Plates for Fuel Cell in a 3-kW Stack under the New European Driving Cycle[J]. Applied Energy, 2024, 355.

（责任编辑　斛　畔）

修改稿收到日期为2025年10月27日。

《汽车技术》征稿启事

《汽车技术》杂志是中国第一汽车集团有限公司主办的国内外公开发行的汽车前瞻与应用技术类月刊，为我国高质量科技期刊分级目录入选期刊、中国科学引文数据库（CSCD）来源期刊、中文核心期刊、中国科技核心期刊、RCCSE中国核心学术期刊（A）、Scopus数据库收录期刊、俄罗斯《文摘杂志》（AJ）收录期刊、日本科学技术振兴机构数据库入选期刊、EBSCO学术数据库收录期刊、欧洲学术出版中心（EuroPub）数据库收录期刊。

《汽车技术》杂志以报道汽车整车及其零部件设计、研究、试验等方面的前瞻与应用技术为主，并兼有理论研究内容，是中国汽车行业核心学术和知识传播与共享的平台。

《汽车技术》将在国家提出的“创新、协调、绿色、开放、共享”发展理念的指引下，把握《节能与新能源汽车技术路线图》和“低碳化、信息化、智能化”的汽车技术主流发展趋势，努力在传统内燃机汽车高效动力系统、轻量化、低阻力领域，新能源汽车和互联智能汽车技术领域，大力吸收优质稿源，为广大科研和工程技术人员服务，为我国汽车工程技术创新能力提升贡献力量。

《汽车技术》欢迎高等院校师生、研发工程技术人员、技术管理人员及相关人员不吝赐稿，反映国家重点扶持项目、自然科学基金项目和其他重点项目等研究成果的稿件将被优先选择刊登。

投稿要求：

1. 文章字数最好控制在6 000~8 000字范围之内；

2. 请按科技论文要求撰写文章摘要，摘要中文字数控制在180字左右；

3. 文章必须附有公开发表的、体现本领域最新研究成果的参考文献，且在文中应标注文献引用处；

4. 文章主要作者应提供其简介，包括出生年、性别、职称、学历、研究方向及技术成果等；

5. 来稿的保密审查工作由作者单位负责，确保署名无争议，文责自负；

6. 请勿一稿多投；

7. 本刊使用网站投稿，请先登陆网站注册成功后投稿，详细投稿要求见本刊网站中“下载中心”栏的“作者指南”，网址：http://qcjs.cbpt.cnki.net。

《汽车技术》编辑部