• 西华大学燃料电池关键技术与测评方法专题 •

燃料电池堆关键技术与测评方法研究综述*

廖兴承[1] 沈安林[1] 焦道宽[2] 马鹏飞[1] 黄晓蓉[1] 武小花[1]

（1.西华大学汽车测控与安全四川省重点实验室，成都 610039；2.中汽研新能源汽车检验中心（天津）有限公司，天津 300300）

【摘要】总结分析了不同双极板电堆的关键技术及发展现状，梳理了电堆性能测评标准和耐久性测评方法，并对现行标准和高校的工况测试方法进行了概括分析，最后总结和展望了电堆技术的发展和性能测评方法，为电堆的关键技术研究和测评方法提出思路和建议。

关键词：燃料电池堆 双极板 电堆技术 测评方法 工况测试

中图分类号：TM911.4 **文献标志码：**A **DOI：** 10.20104/j.cnki.1674-6546.20250158

Research on Actuality and Trends of Fuel Cell Stack Technology and Evaluation Methods

Liao Xingcheng[1], Shen Anlin[1], Jiao Daokuan[2], Ma Pengfei[1], Huang Xiaorong[1], Wu Xiaohua[1]

(1. Key Laboratory of Automotive Measurement, Control and Safety of Sichuan Province, Xihua University, Chengdu 610039; 2. CATARC New Energy Vehicle Test Center (Tianjin) Co., Ltd., Tianjin 300300)

【Abstract】First, this paper summarizes and analyzes the key technologies and development status of different bipolar plate stacks. Secondly, the performance evaluation standards and durability evaluation methods of the stack are sorted out, and the condition test methods of current standards and universities are summarized and analyzed. Finally, the development of stack technology and performance evaluation methods are summarized and prospected, and ideas and suggestions are put forward for the essential technology research and evaluation methods of stack.

Key words: Fuel cell stack, Bipolar plate, Stack technology, Evaluation methods, Condition test

【引用格式】廖兴承, 沈安林, 焦道宽, 等. 燃料电池堆关键技术与测评方法研究综述[J]. 汽车工程师, 2026(4): 1-9.

LIAO X C, SHEN A L, JIAO D K, et al. Research on Actuality and Trends of Fuel Cell Stack Technology and Evaluation Methods[J]. Automotive Engineer, 2026(4): 1-9.

1 前言

氢能是一种来源广泛、绿色低碳和应用广泛的二次能源，正逐步成为实现碳中和目标的重要途径之一[1-4]。在交通运输领域，氢燃料电池汽车可以减少对石油的依赖，降低燃料成本，提高交通运输效率和经济效益[5]。

作为氢能产业链下游的重要应用场景，质子交换膜燃料电池发动机成为当前氢能广泛应用的主要突破口[6-7]。燃料电池发动机由燃料电池堆（电堆）、氢气系统、空气系统、水热管理系统等关键部件组成，其中，电堆为燃料电池辅件及系统负载提供动力[8]。近年来，电堆的额定功率、功率密度及寿命等关键性能已实现较大提升[9]。然而，在实际应用中，不同双极板电堆的参数差异较大，同时伴随燃料电池技术的高速发展，对电堆性能[10]和耐久性[11]的要求逐渐提高。

基于此，本文概括国内外企业在燃料电池堆关键技术方面的研究历程和现状，通过对比不同双极板电堆的额定功率、功率密度、寿命及应用

*基金项目：四川省科技计划项目（2024YFHZ0314）。

通信作者：武小花（1984—），女，教授，博士，主要研究方向为新能源汽车动力系统优化控制，xiaohuawu13@163.com。

领域等分析目前电堆行业的发展现状和不足之处，同时梳理目前电堆的性能和耐久性测评方法，重点分析不同的电堆耐久性循环工况，并对未来电堆技术及其性能测评的发展趋势进行展望。

2 燃料电池堆概述

燃料电池堆是将氢气的化学能转化为电能的主要部件，成本约占氢燃料电池系统总成本的60%[12]，在很大程度上决定了氢燃料电池技术的发展[13]。燃料电池堆作为一个多传质、多耦合的电化学能量转换核心，其结构如图1所示。电堆由多个燃料电池单体串联而成，其内部结构由双极板与膜电极依次交替排列，各单体之间通过嵌入的密封件实现有效隔离与密封。在组装过程中，通过前、后端板施加压力，并使用螺杆进行紧固，从而确保电堆结构的整体稳固性和密封性[14]。电堆工作时，反应气体通过气体主通道分配至各单体电池的双极板，经双极板导流均匀分配至膜电极，通过电极支撑体与催化剂接触进行电化学反应，从而为燃料电池辅件和负载提供足够的电压和电流，满足特定场景下的功率需求[15-16]。

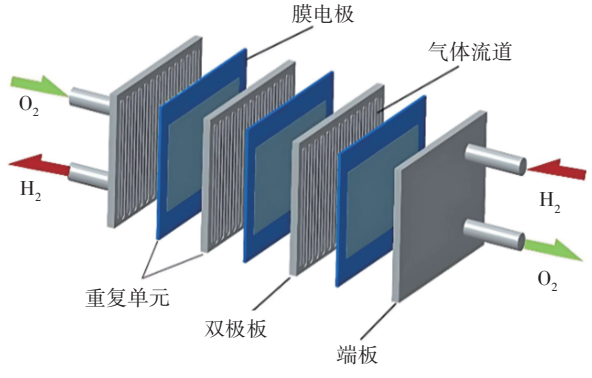


图1 燃料电池堆结构

膜电极是电堆的核心，成本约占电堆成本的65%[17]，关键材料包括质子交换膜、催化剂、气体扩散层，这些部件及材料的耐久性决定了电堆的使用寿命和工况适应性[18]。膜电极需要两侧的双极板实现气体分布、导电、支撑等作用，因此，双极板在电堆结构中的体积占比更大，对电堆性能的影响至关重要。根据双极板材料的差异，可将电堆分为金属板电堆、石墨板电堆和复合板电堆。

金属板电堆主要由不锈钢、铝合金、钛合金等材料制成，具有优异的导电性、高强度、薄厚度和良好的抗冲击性，使其在电堆的小型化、轻量化和批量化生产方面表现突出[19]。然而，在燃料电池潮湿且酸性的工作环境中，金属材料易发生腐蚀，腐蚀产物会降低质子交换膜的电导率，影响离子传输并加速催化剂溶解，导致性能下降[20-21]。石墨板电堆是燃料电池技术中的传统选择，具有导电性良好、质量轻、化学稳定性高等优点。石墨材料经过长期的技术发展，工艺相对成熟。与金属板相比，石墨板机械强度较低，体积较大且易碎[22]。此外，石墨板的制造需要在高温（超过2 500 ℃）条件下进行石墨化，生产过程复杂且成本较高[23]。在石墨化过程中，杂质的挥发可能导致微孔形成，从而影响气体密封性，降低电堆性能。复合板电堆结合了金属和石墨材料的优势，采用耐腐蚀的高分子材料与导电材料，兼具导电性、耐腐蚀性和较好的机械强度。尽管复合板的性能较为优异，但其生产工艺复杂，加工过程涉及多种材料的配比和精密成型，导致制造成本较高，目前应用较少[24]。金属板和石墨板电堆是目前行业研究的核心，所以对这两种双极板电堆的发展进行梳理和分析具有实际意义[25]。

3 燃料电池堆发展现状

电堆作为燃料电池产业链的核心，其性能、寿命和成本对燃料电池的产业化进程尤为重要[26-27]。电堆的关键技术参数包括额定功率、功率密度、使用寿命及启动温度[28-29]。根据双极板的不同，本文对国内外金属板电堆和石墨板电堆技术的关键参数进行梳理和对比分析。

3.1 金属板电堆

金属板电堆成本低、功率密度高，多应用在乘用车或轻型商用车上，同时适用于空间利用率高、功率需求高、成本控制要求高等领域。目前，国内外金属板电堆的关键参数如表1所示。

国外实现小批量投产的企业有丰田、现代、爱尔铃克铃尔（ElringKlinger，EK）等，在前期，双极板材料大多采用不锈钢。现代于2013年推出了全球第一代量产燃料电池乘用车iX35 FCHV，配备100 kW不锈钢金属板电堆[30]。丰田于2015年发布的Mirai 1电堆双极板同样采用不锈钢板成型，同时使用三维精细网格空气流场，提升了电堆的电流密度和电压稳定性[31]。EK的研发集中于中小功率电堆，其中NM5-EVO电堆功率范围为16~76 kW，可在轻型商用车等小功率场景下应用。铁素体不锈

表1 国内外金属板电堆关键参数

企业	典型型号	额定功率/kW	双极板类型	功率密度/kW·L^{-1}	冷启动温度/℃	寿命/×10^4 h	应用领域
现代	NEXO	95	铁素体不锈钢	3.11	−30		乘用车
爱尔铃克铃尔	NM12	100	铁素体不锈钢	4.8		1	乘用车
丰田	Mirai2	128	钛合金	5.4		0.5	乘用车
国氢科技	FC-ML80	88	钛合金	3.2	−30	3	乘用车
氢璞创能	X系列	110	金属	6.0		2	乘用车
新源动力	HYMOD-200	200	金属	6.0	−30	1	重型载货汽车

钢是不锈钢中抗腐蚀性较优的一种,因其成本低、导热性能好而被广泛应用,如EK的NM12[32]和现代NEXO[33]电堆,其中,现代于2018年发布的第二代燃料电池乘用车NEXO-95 kW电堆相比于第一代电堆,功率密度提升了2 kW/L,在降低成本的同时提升了电堆的冷启动性能。但不锈钢固有的密度高和不耐腐蚀特性使其难以满足乘用车在质量和长期使用方面的要求,因此,高耐腐蚀、高导电性的双极板成为技术发展的重点方向。以丰田为代表的碳纳米复合涂层技术对钛金属进行表面处理后可实现双极板成型,成功应用于Mirai 2,并且其极板流场采用阳极波浪形和阴极变径形[34-35],提升了电堆的气体扩散和排水性能。

国内的金属双极板还处于发展初期,国氢科技在2020年发布FC-ML80车用燃料电池,是国内首个采用钛基金属双极板的电堆产品,其电堆额定功率为88 kW,功率密度为3.2 kW/L。新源动力研发的金属板电堆覆盖36~200 kW的功率范围,其中HYMOD-150型电堆可在-40 ℃的低温环境下启动,最新发布的HYMOD-200采用低铂载、高性能膜电极匹配超薄金属双极板,与氢璞创能X系列金属板电堆体积功率密度均达到6 kW/L,电堆功率密度处于国内领先水平。

3.2 石墨板电堆

石墨板电堆寿命长且可靠性好,在重型载货汽车等重型商用车领域应用较为广泛,国内外石墨板电堆如表2所示。目前,国外石墨板电堆的研究较少:AFC能源(AFC Energy)公司主要生产百瓦级的石墨电堆;普拉格能源(Plug Power)公司只有早期的ProGen系列电堆采用石墨板;巴拉德(Ballard)公司在石墨板电堆领域的研究较多,于2020年发布了额定功率为140 kW的石墨板电堆FCgen-HPS,功率密度达到4.3 kW/L,适用于各类轻型、中型和重型车辆。

表2 国内外石墨板电堆关键参数

企业	典型型号	额定功率/kW	双极板类型	功率密度/kW·L^{-1}	冷启动温度/℃	寿命/×10^4 h	应用领域
Ballard	FCgenHPS	140	石墨	4.3	−30	2	客车
神力科技	B9P140S	146	柔性石墨	4	−35	2.5	中重型载货汽车、公交车
国鸿氢能	鸿芯GⅢ	200	柔性石墨	4.8	−35	2	重型载货汽车
氢璞创能	VI系列	300	石墨复合	4.6		3	重型载货汽车

石墨板电堆在国内已有较深入的研究,根据工艺不同,主要有模压及机加工两种类型:模压工艺是将膨胀石墨与高分子树脂粉末混合模压制备柔性膨胀石墨板;机加工工艺是将碳粉/石墨粉与沥青/可石墨化树脂石墨化后通过机加工制备石墨板。模压的柔性膨胀石墨板柔韧性强且耐腐蚀性能好,适合燃料电池商业化大批量生产。2022年,国内首款量产氢燃料电池轿车长安深蓝SL03搭载的神力科技B9P90S超薄柔性膨胀石墨板电堆寿命达到4×10^4 h。同系列产品还有B9P140S电堆,额定功率达到146 kW,可实现-35 ℃低温冷启动。国鸿氢能也实现了柔性膨胀石墨板的自主研发,2022年发布的鸿芯GⅢ电堆最大输出功率超过200 kW。同时,氢璞创能在石墨板电堆领域也处于技术前沿,V系列碳板电堆额定功率达到150 kW,在中小功率场景下应用广泛,2023年发布的第六代300 kW碳复合板电堆功率密度为4.6 kW/L,达到国内领先水平。相比于模压,机加工的石墨板导电性能好、机械强度高,其组装的电堆更适合高负荷应用场景,但由于工艺复杂且成本较高,目前研究的企业较少。

3.3 燃料电池堆参数对比

国内外燃料电池堆的关键参数对比如图2所示,目前,国内外研究主要集中于金属板燃料电池堆,体积功率密度可达到6 kW/L,同时,石墨板电堆由于其材质的可靠性,在寿命上性能更佳。在电堆额定功率方面,目前,中功率区间的电堆产品较多,且功率密度基本达到中国2025年发展目标[36]。相比于国外,国内在电堆的功率和寿命技术上更胜一筹,并且在300 kW大功率电堆方面,功率密度和设计寿命已达到发展目标,对于燃料电池未来的发展和技术进步具有重要意义。图2中部分寿命数据缺失,原因是部分企业采用行驶里程代表电堆的寿命[37],不同企业的电堆实际寿命存在一定差异性。未来,低成本、高性能和长耐久仍是电堆技术发展的重点,国内更需要在电堆技术上向乘用车领域靠近,以推进燃料电池商业化的快速发展。

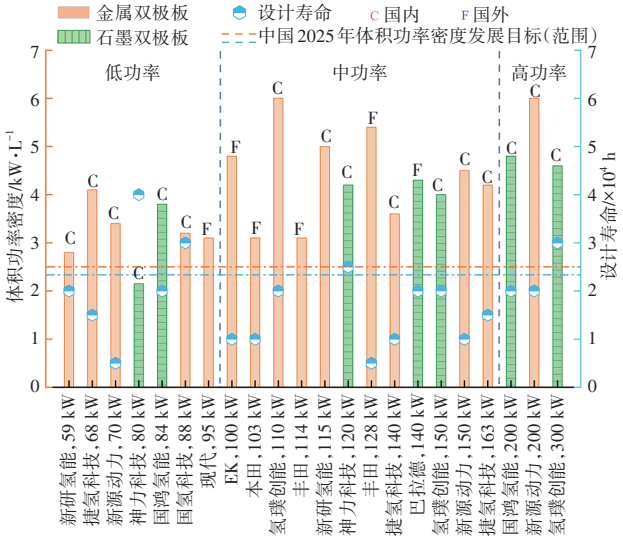


图2 国内外燃料电池堆关键参数

4 燃料电池堆技术测评现状

在实际应用中,由于受到外界环境、恶劣工况等因素的影响,电堆性能差异较大,且在长时间运行后,电堆性能呈现下降趋势,进而影响其耐久性,增加燃料电池的使用成本,所以开展电堆性能测评和耐久性测评研究具有重要意义[38]。

4.1 性能测试标准

燃料电池堆性能测试项目分为安全性、关键性能、环境适应性等方面,具体性能测试项目如图3所示。环境适应性体现了燃料电池堆在不同环境条件下的可靠性[39],关键性能指标则直接表征电堆的发电能力。在关键性能中,额定功率反映了燃料电池堆在长期稳定工作中的功率输出能力,功率密度则指示了在相同功率输出条件下,电堆所占用的空间或质量。

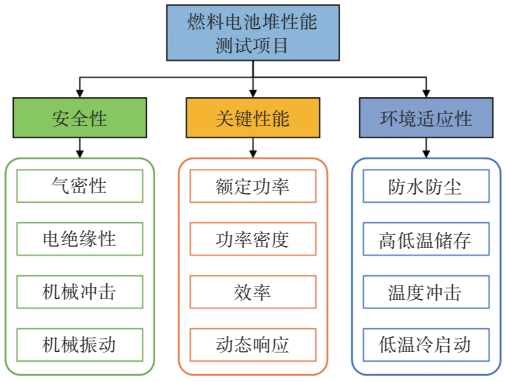


图3 燃料电池堆性能测试项目

国内电堆性能测试标准包括GB/T 20042.2—2023、GB/T 36288—2018和GB/T 31035—2014。GB/T 20042.2—2023作为最新且最完整的电堆技术测试国家标准,包含额定功率、电气过载、易燃气体浓度、环境适应性试验等测试项目,并规定了电堆功率密度的测试方法。GB/T 36288—2018为电堆外部安全标准,包括机械冲击、气密性和电安全试验要求。GB/T 31035—2014是燃料电池堆低温特性测试标准,包括低温存储和低温启动试验要求。

目前,电堆性能测评的范围较为广泛,主要包括通用技术测评、外部安全、低温特性等,但此方面的国家标准较少,没有较为系统的参考对比和评价标准。在行业实际应用中,部分企业会按照产品需求制定电堆测评标准,且相关标准并未公开,电堆的实际测评性能无法准确定性。

4.2 耐久性测试标准

电堆的耐久性直接影响使用成本,是考查电堆工作性能的重要技术指标[40]。通过测试电堆在严重影响寿命的特征工况下的性能衰减率,可以表征其耐久性[41]。耐久性测试项目主要包含极化曲线测试和工况测试,电堆极化曲线表征电流与电压之间的关系,可以了解电堆的性能和工作状态。图4所示为某燃料电池堆的极化曲线:初期,随着电流的增大,电压逐渐降低,这是由活化极化、欧姆极化和浓差极化的影响所致[42];电堆运行一段时间后,大电流下电压变化更大,是因为在大功率下会造成反应物供应不足和生成物堆积,增大浓差极化。工况测试可模拟电堆的真实运行工况,通过加速老化验证电堆的可靠性和安全性[43],典型测试工况包括怠速、额

定、过载、变载和启停工况。

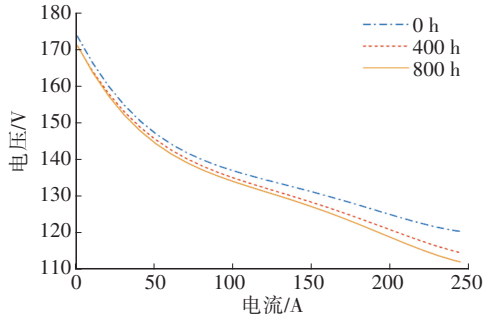
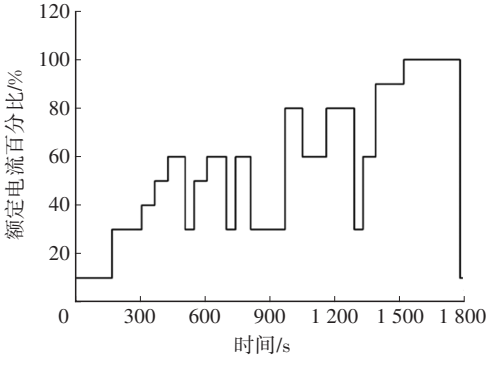
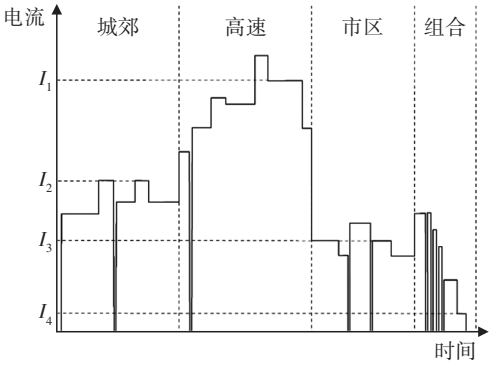


图4　燃料电池堆极化曲线

电堆耐久性测试标准包括GB/Z 44116—2024、GB/T 38914—2020和DB37/T 4097—2020，图5所示为现行标准中的循环工况曲线。GB/Z 44116—2024通过怠速、额定、变载和满载循环工况测试电堆的极化曲线，计算参考电流下的电压变化，评价电堆的耐久性。GB/T 38914—2020通过测量怠速、额定、变载和启停工况下的电压衰减率估计电堆寿命，这种方式考虑了不同工况对电堆耐久性的影响，寿命测评更加准确，但计算过程较为复杂。团体标准DB37/T 4097—2020基于重型商用车的城郊、高速、市区和组合工况制定循环工况，并以电堆的平均单片电压下降来评价其性能衰减率，多场景工况下的耐久性可以代表行业内电堆的整体退化情况。



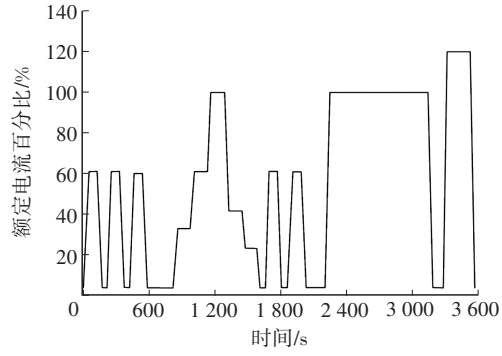
(a)GB/Z 44116—2024



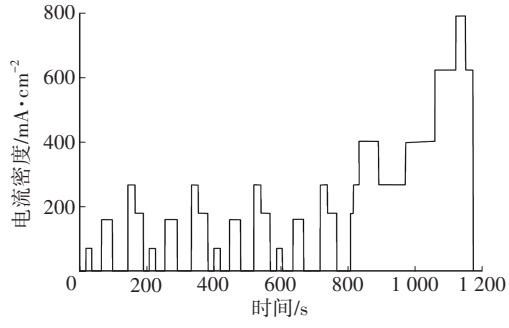
(b)DB37/T 4097—2020

图5　现行标准电堆耐久性循环工况

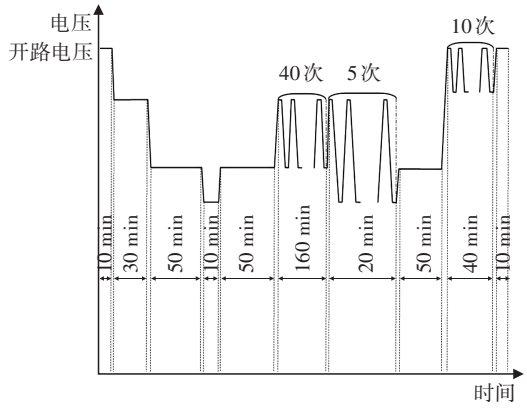
国内部分高校、研究所也定义了各自的电堆耐久性测试工况，如图6所示。相比于国家标准，清华大学[44]电堆耐久性测试工况加入了过载工况，同时变载的功率幅度更大且满载工况时间更长，工况更加恶劣。同济大学[45]耐久性试验工况以新欧洲驾驶循环（New European Driving Cycle，NEDC）为基础并考虑车辆实际运行工况，与武汉理工大学[46]测试工况中各类工况的占比相似，其中变载工况占比接近50%，怠速和过载工况占比较少，更好地体现了电堆实际运行条件下的工况复杂性，在这种测试工况中，电堆的衰减率更接近城市实际路况。中国科学院大连化学物理研究所[47]制定的循环工况使电堆在额定和恶劣工况下运行，更适于加速老化试验以测试电堆的耐久性。



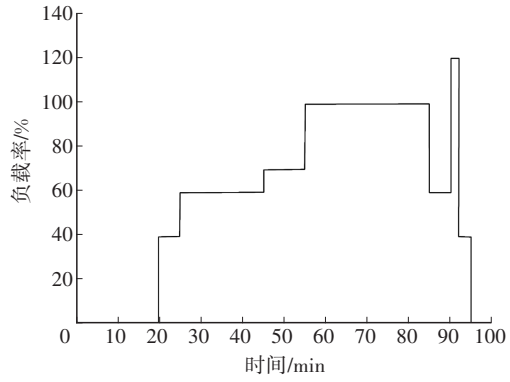
(a)清华大学



(b)同济大学



(c)武汉理工大学



(d)中国科学院大连化学物理研究所

图6 各高校、研究所电堆耐久性循环工况

可以发现,在耐久性方面已有较多的测评方法,但对启停工况的测试还较少,但是在实际运行中,与怠速和高功率工况相比,启停工况对电堆寿命的影响更大[48-49]。每次启停都会引起电堆内部压力、温度和湿度的剧烈变化,频繁的启停操作会导致质子交换膜在冷热交替和湿度变化下产生机械应力和化学应力,增加膜的破裂风险,导致气体交叉渗透和性能衰减[50]。在启停过程中,电极电势的波动会引发碳载体的电化学腐蚀,同时也易导致铂催化剂发生溶解和团聚现象,进而导致电堆电压下降,影响电堆的耐久性[51-52]。

现阶段,燃料电池堆耐久性测试主要通过工况试验下的电压变化计算电堆的寿命,但由于实际运行工况较为复杂,测试方法中工况占比存在较大差异,难以测评不同应用场景下的电堆寿命。同时,对于启停工况的循环测试还较少,这对于电堆实际耐久性和性能衰减的影响分析十分重要。因此,需要进一步研究燃料电池堆的实际运行工况和性能衰减因素,建立更加完善的车用燃料电池堆耐久性测试方法。

5 结束语

本文针对国内外燃料电池堆关键技术的发展历程及现状进行总结,分析了各企业不同双极板电堆技术的发展现状,在此基础上对电堆的性能和耐久性测评方法进行梳理,为电堆的技术研发和测评发展提供参考。

在电堆技术方面,金属板电堆因其具有更高的功率密度,在乘用车领域应用广泛,国内外的研究较多,石墨板电堆的耐久性更优,更适用于重型商用车。国内研究在电堆的功率、功率密度、寿命等关键参数方面均取得了显著提升,功率达到300 kW级及以上,且在多项参数上已达到我国电堆技术的2025年发展目标。未来,需进一步提升燃料电池堆的性能和耐久性,突破冷启动技术,进而降低电堆的使用成本,推动燃料电池商业化发展进程。

在电堆性能测评方面,测试项目涉及广泛,但目前标准较少,且各标准中和各高校、研究所的电堆耐久性测试方法工况测试参数差异较大,且对启停工况的研究较少,对电堆耐久性技术研究有较大影响。针对电堆性能测评,需进一步研究燃料电池实车的运行情况,分析实际项目测试需求和运行工况特性,根据不同的应用领域对电堆测评技术进行统一和规范,进而深入探究电堆性能和耐久性的影响因素。

参 考 文 献

[1] 王冉, 刘侃. 国内外氢能汽车发展现状及对我国未来氢能产业发展的思考[J]. 环境与可持续发展, 2022, 47(3): 44-52.
WANG R, LIU K. The Domestic and Oversea Development Status of Hydrogen-Powered Vehicles and Suggestions on China's Hydrogen Energy Development for Future[J]. Environment and Sustainable Development, 2022, 47(3): 44-52.

[2] HUANG Y, ZHOU Y, ZHONG R H, et al. Hydrogen Energy Development in China: Potential Assessment and Policy Implications[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 49: 659-669.

[3] JIANG W Y, LIU C, SUN Z G. Promoting Developments of Hydrogen Production from Renewable Energy and Hydrogen Energy Vehicles in China Analyzing a Public-Private Partnership Cooperation Scheme Based on Evolutionary Game Theory[J]. Energy, 2023, 278.

[4] 任怡, 代晓芳. 氢燃料电池汽车产业现状研究与前景分析[J]. 汽车实用技术, 2025, 50(11): 154-159.
REN Y, DAI X F. Research on the Current Situation and Prospects of Hydrogen Fuel Cell Vehicle Industry[J]. Automobile Applied Technology, 2025, 50(11): 154-159.

[5] 王歌, 赵云瑞, 罗艺, 等. "氢"还是"电"? ——考虑线路异质性的公交车脱碳路径成本效益分析[J]. 克拉玛依学刊, 2025, 15(2): 58-68.
WANG G, ZHAO Y R, LUO Y, et al. Hydrogen or Electricity? -Cost-Effectiveness Analysis of Bus Decarbonization Paths Considering Route Heterogeneity[J]. Journal of Karamay, 2025, 15(2): 58-68.

[6] WANG Y, CHEN K S, MISHLER J, et al. A Review of Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: Technology, Applications, and Needs on Fundamental Research[J].

Applied Energy, 2011, 88(4): 981-1007.

[7] DING D, WU X Y. Hydrogen Fuel Cell Electric Trains: Technologies, Current Status, and Future[J]. Applications in Energy and Combustion Science, 2024, 17.

[8] KAHRAMAN H, AKIN Y. Recent Studies on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Components, Review of the Literature[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 304.

[9] LUO Y, WU Y H, LI B, et al. Development and Application of Fuel Cells in the Automobile Industry[J]. Journal of Energy Storage, 2021, 42.

[10] ABOKHALIL A G, ALOBAID M, MAKKY A A, et al. Innovative Approaches to Enhance the Performance and Durability of Proton Exchange Membrane Fuel Cells[J]. Energies, 2023, 16(14).

[11] LI B, WAN K C, XIE M, et al. Durability Degradation Mechanism and Consistency Analysis for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack[J]. Applied Energy, 2022, 314.

[12] 于广欣, 纪钦洪, 刘强, 等. 氢能及燃料电池产业瓶颈分析与思考[J]. 现代化工, 2021, 41(4): 1-4+10.
YU G X, JI Q H, LIU Q, et al. Analysis and Reflection on the Bottlenecks of Hydrogen Energy and Fuel Cell Industry[J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(4): 1-4+10.

[13] 李慧敏, 涂淑平. 中国氢燃料电池技术发展现状、挑战及对策[J]. 现代化工, 2023, 43(11): 5-9.
LI H M, TU S P. Current Status, Challenges, and Countermeasures of Hydrogen Fuel Cell Technology Development in China[J]. Modern Chemical Industry, 2023, 43(11): 5-9.

[14] QIU D K, PENG L F, YI P Y, et al. Review on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack Assembly: Quality Evaluation, Assembly Method, Contact Behavior and Process Design[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 152.

[15] SONG K, WANG Y M, DING Y H, et al. Assembly Techniques for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack: A Literature Review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 153.

[16] 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.

[17] 铁宇, 王洪建, 金文龙, 等. 中国质子交换膜燃料电池行业市场现状及发展建议[J]. 油气与新能源, 2025, 37(1): 17-23.
TIE Y, WANG H J, JIN W L, et al. Market Status and Development Suggestions of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Industry in China[J]. Oil-Gas & New Energy, 2025, 37(1): 17-23.

[18] 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 Development Status and Future Outlook of Hydrogen Fuel Cell Technology[J]. Chinese Engineering Science, 2021, 23(4): 162-171.

[19] BOHACKOVA T, LUDVIK J, KOURIL M. Metallic Material Selection and Prospective Surface Treatments for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Bipolar Plates—A Review[J]. Materials, 2021, 14(10).

[20] WILBERFORCE T, IJAODOL O, BAROUTAJI A, et al. Effect of Bipolar Plate Material on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance[J]. Energies, 2022, 15(5).

[21] LIU R X, JIA Q, ZHANG B, et al. Protective Coatings for Metal Bipolar Plates of Fuel Cells: A Review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(54): 22915-22937.

[22] SAADAT N, DHAKAL H N, TJONG J, et al. Recent Advances and Future Perspectives of Carbon Materials for Fuel Cell[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 138.

[23] 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.

[24] HU B, HE G J, CHANG F L, et al. Low Filler and Highly Conductive Composite Bipolar Plates with Synergistic Segregated Structure for Enhanced Proton Exchange Membrane Fuel Cell Performance[J]. Energy, 2022, 251.

[25] KAHRAMAN H, AKIN Y. Recent Studies on Proton Exchange Membrane Fuel Cell Components, Review of the Literature[J]. Energy Conversion and Management, 2024, 304.

[26] 章俊良, 程明, 罗夏爽, 等. 车用燃料电池电堆关键技术研究现状[J]. 汽车安全与节能学报, 2022, 13(1): 1-28.
ZHANG J L, CHENG M, LUO X S, et al. Current Status of the Research on Key Technologies of Vehicle Fuel Cell Stack[J]. Automotive Safety and Energy, 2022, 13(1): 1-28.

[27] 付佩, 周紫佳, 兰利波, 等. 氢燃料电池汽车发动机关键技术研究现状及趋势展望[J]. 汽车工程学报, 2022, 12(4): 388-398.
FU P, ZHOU Z J, LAN L B, et al. Research and Development Trends of Key Technologies of Hydrogen Fuel

Cell Engines[J]. Chinese Journal of Automotive Engineering, 2022, 12(4): 388-398.

[28] CHITSAZ A, HAGHGHI M A, HOSSEINPOUR J. Thermodynamic and Exergoeconomic Analyses of a Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC) System and the Feasibility Evaluation of Integrating with a Proton Exchange Membrane Electrolyzer (PEME) [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 186: 487-499.

[29] ZHANG C Z, CHEN J J, LUO M Z, et al. Modelling, Validation and Analysis of Preheating Strategy of Fuel Cell Vehicle During Subzero Cold Start[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2024, 220.

[30] HONG B K, KIM S H. Recent Advances in Fuel Cell Electric Vehicle Technologies of Hyundai[J]. ECS Transactions, 2018, 86(13): 3-11.

[31] ENOMOTO K, IDA A, HARADA T, et al. Development of Safety Performance for FC Stack in the New Toyota FCEV [J]. SAE Technical Paper, 2022-01-0686, 2022.

[32] 本刊编辑部. 爱尔铃克铃尔:布局新能源汽车市场[J]. 汽车与配件, 2019(9): 53.
Editorial Department of This Journal. IAV: Expanding into the New Energy Vehicle Market[J]. Automotive & Parts, 2019(9): 53.

[33] HONG B K, KIM S H, KIM C M. Powering the Future Through Hydrogen and Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells: Current Commercialisation and Key Challenges with Focus on Work at Hyundai[J]. Johnson Matthey Technology Review, 2020, 64(3): 236-251.

[34] CARIGNAN M, COSTA-CASTELLO R. Toyota Mirai: Powertrain Model and Assessment of the Energy Management[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2023, 72(6): 7000-7010.

[35] YOSHIZUM T, KUBO H, OKUMURA M. Development of High-Performance FC Stack for the New MIRAI[R]. SAE Technical Paper, 2021-01-0740, 2021.

[36] 节能与新能源汽车技术路线图战略咨询委员会, 中国汽车工程学会. 节能与新能源汽车技术路线图[M]. 北京: 机械工业出版社, 2016.
Technology Road Map for Energy Saving and New Energy Vehicles Strategic Consulting Committee, SAE-China. Technology Road Map for Energy Saving and New Energy Vehicles[M]. Beijing: China Machine Press, 2016.

[37] WANG Y, YUAN H, MARTINEZ A, et al. Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell and Hydrogen Station Network for Automobiles: Status, Technology, and Perspectives[J]. Advances in Applied Energy, 2021, 2.

[38] WEN X H, WANG N, HUANG X J, et al. Dynamic Transport Characteristics and Performance Response of Commercial-Size Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Stack: An Experimental Study[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 486.

[39] 刘轩, 郝冬, 马明辉, 等. 燃料电池堆测试平台温控系统研究进展与趋势[J]. 汽车文摘, 2024(12): 27-33.
LIU X, HAO D, MA M H, et al. Research Progress and Trend of Temperature Control System for Fuel Cell Stack Test Platform[J]. Automotive Digest, 2024(12): 27-33.

[40] LI B, WAN K C, XIE M, et al. Durability Degradation Mechanism and Consistency Analysis for Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack[J]. Applied Energy, 2022, 314.

[41] TAKAHASHI T, IKEDA T, MURATE K, et al. Accelerated Durability Testing of Fuel Cell Stacks for Commercial Automotive Applications: A Case Study[J]. Journal of The Electrochemical Society, 2022, 169(4).

[42] ZHOU Z H, YE L F, QIU D K, et al. Experimental Investigation and Decoupling of Voltage Losses Distribution in Proton Exchange Membrane Fuel Cells with a Large Active Area[J]. Chemical Engineering Journal, 2023, 452.

[43] 蔡赛杰, 朱昊宁, 张卓, 等. 运行参数对质子交换膜燃料电池堆耐久性影响的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2025, 59(5): 1-11.
CAI S J, ZHU H N, ZHANG Z, et al. Experimental Study on the Influence of Operating Parameters on the Durability of Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stacks[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2025, 59(5): 1-11.

[44] LU L G, OUYANG M G, HUANG H Y, et al. A Semi-Empirical Voltage Degradation Model for a Low-Pressure Proton Exchange Membrane Fuel Cell Stack Under Bus City Driving Cycles[J]. Journal of Power Sources, 2006, 164 (1): 306-314.

[45] LIN R, LI B, HOU Y P, et al. Investigation of Dynamic Driving Cycle Effect on Performance Degradation and Micro-Structure Change of PEM Fuel Cell[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 34(5): 2369-2376.

[46] 唐建均. 质子交换膜燃料电池膜电极模拟工况耐久性研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
TANG J J. Investigation of MEA Degradation in PEM Fuel Cell by Driving Cycle[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2011.

[47] BANAN R, BAZYLAK A, ZU J. Combined Effects of Environmental Vibrations and Hygrothermal Fatigue on Mechanical Damage in PEM Fuel Cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 40(4): 1911-1922.

[48] HUANG R K, PENG Y Q, YANG J B, et al. Correlation

Analysis and Prediction of PEM Fuel Cell Voltage During Start-Stop Operation Based on Real-World Driving Data [J]. Energy, 2022, 260.

[49] ZHANG T, WANG P Q, CHEN H C, et al. A Review of Automotive Proton Exchange Membrane Fuel Cell Degradation Under Start-Stop Operating Condition[J]. Applied Energy, 2018, 223: 249-262.

[50] YEETSORN R, PETRONE R, HISSEL D, et al. Influence of Cycle Repetition on Stack Voltage Degradation During Fuel Cell Stress Tests[J]. Fuel Cells, 2022, 22(3): 85-101.

[51] MANSIR I B, OKONKWO P. A Focused Review of Carbon Corrosion Mechanism in Proton Exchange Membrane Fuel Cell During Start-up and Shut-down Processes[J]. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, 2023, 45(2): 3231-3245.

[52] ZHAO Z P, XU B, FU J, et al. Durability of Pt Nanowire Supported on Carbon Nanotubes under Simulated Start-up/Shut-down Conditions for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 50: 643-653.

（责任编辑　斛　畔）

修改稿收到日期为2025年8月22日。

《汽车文摘》征文

《汽车文摘》（月刊）于1963年7月3日创刊，由国务院国有资产监督管理委员会主管、中国第一汽车集团有限公司主办，为中国汽车工程学会会刊。《汽车文摘》以“览全球汽车技术文献，指中国汽车技术之道”为使命，以打造“中国汽车前沿与创新技术传播与交流的重要平台”为愿景，致力于成为汽车领域最具影响力的综述类期刊。

《汽车文摘》深耕电动化、智能化、网联化、共享化和智能制造5大方向和10大领域，聚焦新能源、燃料电池与混合动力汽车、智能网联汽车、氨氢融合零碳和碳中性燃料、汽车安全、健康与舒适、碳达峰与碳中和、生命周期评价（LCA）与技术经济分析、智能制造、材料轻量化与一体化压铸、飞行汽车前沿与创新技术综述论文，揭示相关领域的新动态、新趋势、新技术和新进展，为广大科研和工程技术人员进一步发展这一领域提供新突破口、新出发点和新基准。

欢迎高等院校师生、研发工程技术人员、技术管理人员，充分发挥专业领域优势，深度挖掘国内外高影响力学术期刊与其它文献，形成某个技术领域前沿综述。

《汽车文摘》选题范围：

电动化：混合动力关键技术；动力电池关键技术；先进充电技术；电驱动系统及电力电子技术；智能底盘及子系统线控关键技术；燃料电池动力系统设计与优化。

智能化：新型电子电气架构；自动驾驶感知、决策与运动控制；智能新能源汽车测试评价方法与工具链；车辆智能安全技术。

网联化：智能网联云控技术；车用通信及网络技术；车路协同技术；汽车人因、人机交互与智慧座舱；信息安全与预期功能安全；车网融合（V2G）及应用。

低碳化：汽车节能与排放技术；清洁能源动力系统技术；碳达峰、碳中和；氢燃料制、储、运、加及安全管控技术；生命周期评价（LCA）、标准法规与技术经济分析；氨氢融合零碳和碳中性燃料。

轻量化：新能源汽车新材料技术；混合材料轻量化设计；一体化压铸。

共享化：区块链技术与移动出行；车辆大数据挖掘方法与应用案例。

燃料电池：电池堆、电池系统与基础设施。

智能制造：机器人与自动化控制、四大工艺、物流技术、设计-制造-服务。

颠覆式出行：飞行汽车；未来低空智能交通体系及其关键技术。

汽车安全：主被动安全与融合；智能安全；健康与舒适。

《汽车文摘》发表论文的独特优势：

《汽车文摘》是国家级刊物、中国汽车工程学会会刊、汽车领域唯一的综述期刊。《汽车文摘》不收版面费、4个月左右可发稿。

投稿要求：

1. 综述篇幅在10 000～15 000字（6~10页），图文并茂，图、表和公式非原创要求标注引用文献；

2. 请按科技论文要求撰写文章摘要，摘要中文字数约200字；

3. 文章必须附有公开发表、体现本领域最新研究成果和高影响力出版物作为参考文献，一般要求参考文献在20篇以上，一半左右为外文参考文献，且在文中标注所引用文献；

4. 来稿保密审查工作由作者单位负责，确保署名无争议，文责自负；

5. 切勿一稿多投。

《汽车文摘》投稿网址：http://www.qcwz.cbpt.cnki.net

邮箱：autodigest@faw.com.cn

《汽车文摘》编辑部