

引用格式: 朱刚, 陈洲. 燃料电池发动机性能测试标准现状综述 [J]. 标准科学, 2026 (2):84-93+144.

ZHU Gang, CHEN Zhou. Current Status of Performance and Durability Testing Standards for Fuel Cell Engines [J]. Standard Science, 2026 (2):84-93+144.

燃料电池发动机性能测试标准现状综述

朱刚^{1*} 陈洲²

(1. 上海新能源科技成果转化与产业促进中心; 2. 西华大学 汽车与交通学院)

摘要: 【目的】分析当前燃料电池发动机性能测试领域存在的主要问题, 以明确研究重点并推动我国燃料电池产业化发展。

【方法】通过系统调研国内外燃料电池发动机性能测试方法与评估体系, 对比分析了现有技术方案的差异性与适用性, 梳理了燃料电池发动机性能检测技术的发展现状与关键挑战。【结果】揭示了当前性能测试方法分散、评价标准不统一等问题, 总结了国内外测试体系的异同, 提出了建立统一性能测评标准的必要性与可行性。【结论】统一且规范的性能测试方法与评价体系对燃料电池技术发展至关重要, 为推动行业标准制定、加速燃料电池产业化进程提供理论支撑与实践参考。

关键词: 燃料电池发动机; 测试标准; 耐久性; 性能指标

DOI编码: 10.3969/j.issn.1674-5698.2026.02.011

Current Status of Performance and Durability Testing Standards for Fuel Cell Engines

ZHU Gang^{1*} CHEN Zhou²

(1. Shanghai New Energy Technology Achievement Transformation and Industrial Promotion Center; 2. School of Automobile and Transportation, Xihua University)

Abstract: [Objective] This paper analyzes the key issues in the current performance testing of fuel cell systems, aiming to clarify research priorities and accelerate the industrialization of fuel cell technology in China. [Methods] By systematically examining performance testing methods and evaluation systems for fuel cell systems both domestically and internationally, it compares the differences and applicability of existing technical approaches, while also reviewing the development status and major challenges in performance testing technologies. [Results] The study reveals problems such as fragmented testing methods and the absence of unified evaluation standards, summarizes the commonalities and distinctions among testing systems worldwide, and underscores the necessity and feasibility of establishing standardized performance evaluation criteria. [Conclusion] Developing a consistent and unified testing methodology and evaluation framework is critical for advancing fuel cell technology. The findings of this research provide both theoretical guidance and practical reference for the development of industry standards and for accelerating the industrialization of fuel cells.

Keywords: fuel cell engines; test standards; durability; performance index

基金项目: 本文受四川省科技计划项目“基于物理信息机器学习的车载燃料电池剩余寿命预测关键技术研究”(项目编号: 2024YFHZ0314)资助。

作者简介: 朱刚, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为新能源汽车技术。

陈洲, 硕士, 研究方向为燃料电池系统建模。

0 引言

燃料电池发动机是实现氢能向电能转换的重要载体。在新一轮能源革命驱动下,燃料电池发动机在世界范围内备受青睐,投入研发的国家众多,其中以欧美和日韩为引领者^[1-3]。德国博世、英国IE、荷兰Nedstack、美国Plug Power、加拿大巴拉德、日本丰田、韩国现代等公司在燃料电池发动机领域布局多年。目前,量产产品的功率范围从800 W到600 kW不等,部分设备可在-30℃环境下起动,寿命最高达到20 000 h,峰值效率超过60%。探索氢能利用,发展燃料电池技术是实现我国“双碳”目标的重要路径,国内企业在燃料电池领域通过多年的研发探索也取得了一定的成果,其中国鸿氢能、捷氢科技、重塑能源和亿华通等代表性企业技术进步明显。公开资料显示,在燃料电池发动机功率方面,国内已基本实现对国外技术的追赶,但关键技术还处于亟待突破阶段,如催化剂性能、膜电极制备工艺等^[4]。目前燃料电池发动机的应用领域涵盖移动电源、发电系统、交通运输、船舶等大多数能源需求高的行业,这对于全球能源转型和减少碳排放意义重大^[5-6]。

随着技术的进一步突破,与燃料电池发动机相关的测评标准和方法的重要性日益凸显,特别是性能和耐久性能测试标准逐渐被重点关注,但目前全球燃料电池发动机测试标准的发展出现不一致化、复杂化及滞后化。具体表现为同一指标存在不同测试方法和评价体系,测试要求愈加繁复,测试指标覆盖不全面等^[7-8]。本文针对国内外燃料电池发动机的性能和耐久性能测试标准及方法进行差异化对比分析,通过详细对比指出目前在标准制定方面存在的问题,对未来发展具有一定参考意义。

1 燃料电池标准组织概述

随着燃料电池发动机技术的不断成熟和广泛应用,对其性能和耐久性的要求也日益严格。为了

确保燃料电池发动机在实际使用中的可靠性和安全性,制定并遵循科学、规范的测试标准和方法显得尤为重要。在全球氢能产业的相关标准方面,欧美和日本长期作为主导国家,其标准体系较为完善。相较之下,我国在这方面由于起步较晚而发展滞后。虽然在近十年的发展下标准体系结构已基本建成,但内容上还待完善^[9-10]。标准制定的前提是成立相应的标准管理组织,目前全球范围内主要负责燃料电池相关标准制定的组织如表1所示。在国际层面,国际电工委员会(IEC)和国际标准化组织(ISO)作为标准行业的先行者,针对燃料电池的测试标准制定成立分管组织IEC/TC 105和ISO/TC 197,从事燃料电池零部件和性能指标试验方法的制定以及完善工作^[11-12]。为规范燃料电池标准体系,美国、日本、中国也成立相应的标准组织,如美国的汽车工程师学会(SAE),日本的汽车研究所/日本产业标准调查会(JARI/JISC),中国的全国燃料电池及液流电池标准化技术委员会(SAC/TC 342)和全国汽车标准化电动车辆分技术委员会等。同时国内部分研究学会或行业组织也从事燃料电池相关团体标准制定工作,如中国汽车工程学会(CSAE)和“领跑者”企业标准组织^[13-14]。

这些标准组织针对燃料电池发动机的各方面性能制定相应标准,涉及术语、性能、耐久性、安全等,虽然标准众多但统一度不足,这对全球燃料电池发动机的标准发展不利。本文通过对性能和耐久性能两大关键指标的主要标准或测试方法进行对比分析,指出目前存在的问题及下一步需要完善的工作内容。

2 性能测试标准和方法

燃料电池发动机性能测试标准和方法对确保其可靠性和高效运行至关重要。截至目前,全球范围内从事燃料电池发动机相关标准制定的组织所发布的部分标准如表2所示(只包括现行标准)。

这些标准涉及多种类型燃料电池发动机的性能测试,如乘用车、固定发电系统、工业车辆、

表1 全球燃料电池标准制定组织		
组织	名称	国家/地区
ISO/TC 22/SC 21	道路车辆技术委员会/电动车辆分委会	法国
ISO/TC 197	氢技术委员会	加拿大
IEC/TC 105	燃料电池技术委员会	德国
IEC/TC 69	电动工业车辆和电动工业卡车技术委员会	比利时
SAE	汽车工程学会/燃料电池汽车标准委员会	美国
JARI/ JISC	日本汽车研究院/日本工业标准委员会	日本
CEN/TC 301	欧洲标准化技术委员会/电驱动道路车辆委员会	欧盟
CENELEC/TC69X	欧洲电工委员会/电动车辆电气系统委员会	
UN/ECE	联合国欧洲经济委员会	
SAC/TC 309	全国氢能标准化技术委员会	
SAC/TC 342	全国燃料电池及液流电池标准化技术委员会	
SAC/TC 114	全国汽车标准化技术委员会	中国
SAC/TC 31	全国气瓶标准化技术委员会	
SAC/TC 262	全国锅炉压力容器标准化技术委员会	
CSAE	中国汽车工程学会	

无人机、移动设备等,涉及的试验包括起停特性试验、功率特性试验、效率特性试验、动态响应特性试验等。以下针对起停特性、功率特性、效率特性等关键性能指标,对比分析各标准在这些指标测试上的差异。

2.1 启停特性

燃料电池发动机在实际使用过程中会面临复杂工况,特别是在极寒条件下,冷启动成为严峻挑战,能否正常且快速启动燃料电池发动机是评价其性能的一项关键指标^[15],为此部分标准针对燃料电池发动机的起停特性制定了测试方法和评判指标,如表3所示。

标准IEC 62282-3-200:2015主要适用于固定

表2 燃料电池发动机性能测试标准		
标准制定组织	标准号	测试对象
IEC	IEC 62282-3-200:2015	固定式燃料电池发动机
	IEC 62282-3-201:2017	功率<10 kW的小型发动机
	IEC 62282-4-102:2022	工业卡车用燃料电池发动机
	IEC 62282-4-202:2023	无人机用燃料电池发动机
	IEC 62282-4-600:2022	挖掘机用燃料电池发动机
	IEC 62282-6-200:2016	微型/移动设备用燃料电池发动机
ISO	ISO/TR 11954:2024	燃料电池电动汽车动力性能
	ISO/TR 17326:2023	燃料电池电动汽车低温冷启动性能
SAE	J2615_201110	燃料电池发动机
	J2617_201108	质子交换膜燃料电池电堆子系统性能
SAC	GB/T 26991—2023	整车动力性能
	GB/T 43255—2023	整车冷启动性能
	GB/T 24554—2022	燃料电池发动机
	GB/T 27748.2—2022	固定式燃料电池发动机
	GB/T 41134.2—2021	工业车辆
	GB/T 23751.2—2017	微型/移动设备
	GB/T 27748.4—2017	功率<10kW的小型发动机
	GB/T 33979—2017	质子交换膜燃料电池发动机低温启动性能
CSAE	GB/T 33983.2—2017	直接甲醇型燃料电池发动机
	T/CSAE 122—2019	整车冷启动性能
JARI/JISC	T/CSAE 183—2021	电堆和发动机
	JEVS Z 113-2018	燃料电池发动机输出性能
	JISC62282-3-200	固定式燃料电池发动机
	JISC62282-3-201	功率<10 kW的小型发动机
	JISC62282-4-102	工业车辆用燃料电池发动机
JISC	JISC62282-6-200	微型/移动设备用燃料电池发动机

表3 起停特性试验对比

标准号	IEC 62282-3-200:2015	SAE J2615_201110	GB/T 24554—2022	JEVS Z 113-2018
测试区别	将发动机保持在常温状态或存储状态至少48 h, 然后再启动测试	在测试前需要将发动机在 规定温度（冷启动或热起 动）下保持一定时间	预处理后按测试要求启动 发动机, 需在怠速状态下 稳定运行不少于10 min	按照规定将系统置于常 温、低温、高湿热环境中 完成预处理
测试参数	启动\停机时间, 测试期 间的电能输入、输出和净 电能	启动\停机时间, 测试阶段 的能量输入	启动\停机时间, 燃料电池 发动机(电堆)电压和电流	启动\停机时间, 氢气消耗 量, 外加电能消耗量

式燃料电池发电系统, 主要针对常温起停进行测试规范, 在热起停方面并没有详细的测试规范要求, 并且没有涉及极端环境下的起停测试。SAE J2615_201110主要针对车用燃料电池发动机, 在测试内容上更丰富, 包括了常温起停和高低温起停测试, 更符合道路车辆在实际使用场景中的复杂性要求。国内的标准和SAE基本一致, 不过在2种起停方式的预处理上存在差异。JARI的标准JEVS Z 113-2018在测试内容上增加了高湿热的起停条件, 能更好地应对日本燃料电池车辆的实际情况。

2.2 功率特性

燃料电池发动机的功率特性是评价燃料电池发动机性能的重要指标, 它涉及燃料电池发动机输出功率与各种操作条件 and 环境因素的关系。主要标准中功率特性测试对比如表4所示。

IEC的测试标准重点关注了燃料电池发动机的动态功率响应特性, 内容上包括了电输出功率

和热输出功率, 针对加载和卸载2种测试工况, 在标准中给出了相应的测试方法, 但并没有给出具体的操作参数, 同时还给出了90%额定功率响应特性测试的方法作为参考。GB/T 24554—2022对燃料电池发动机的动态响应特性进行测试方法的规定的同时还考虑了稳态特性, 在测试方法上相较于IEC也更加详细; 与此同时, 在额定功率和峰值功率的测试方法上也进行了详细规定, 更符合实际的测试需求。T/CSAE 183—2021参考了GB/T 24554—2022, 因此除测试条件存在些许差异, 在测试方法上基本一致。

2.3 效率特性

燃料电池发动机的效率特性是指燃料电池在不同条件下的能量转换效率, 能直观反映系统的性能和经济性, 一般是指整个系统的效率, 考虑了所有辅件的能耗^[16]。国内外测试标准都把效率特性作为重点测试指标, 效率特性试验的对比如表5所示。

在所有辅件消耗功率一定的情况下, 系统效率

表4 功率特性测试对比

标准号	IEC 62282-3-200:2015	SAE J2615_201110	GB/T 24554—2022	T/CSAE 183—2021
测试区别	在确定燃料电池发动机处于最低净功率的稳定状态下后, 按照给定的功率变化规则进行功率上升（或下降）操作	按要求将系统加载到稳定工况, 测试环境为25 ℃、100 kPa大气压, 相对湿度为30%至70%	热机后按规定加载到额定功率持续运行63 min, 取后60 min的平均值作为额定功率; 在额定功率点至少稳定10 min后加载至设置的峰值功率点, 在峰值功率点持续稳定一段时间（时长自定）	按规定热机后回到怠速状态运行10 s, 加载到规定功率后持续运行60 min, 其间电池平均电压不低于0.6 V
测试参数	空气/氢气流量, 辅助电源输入量, 燃料电池发动机电压和电流, 操作时间	燃料电池发动机电压和电流	燃料电池发动机电压和电流, 辅助系统电压和电流, 氢气消耗量	燃料电池堆的电压和电流, 辅助系统的电压和电流, 氢气流量

表5 效率特性试验

标准号	IEC 62282-3-200:2015	SAE J2615_201110	GB/T 24554—2022	T/CSAE 183—2021
测试区别	以额定输出功率运行至满足稳定要求, 测量相关指标不少于1 h, 总的测试值不少于60组	将燃料电池系统在不同负载条件下运行	按规定热机后回到怠速状态运行10 s	—
测试参数	空气/氢气流量, 辅助电源输入量, 燃料电池发动机电压和电流	燃料电池发动机电压和电流, 空气/氢气流量	燃料电池发动机电压和电流, 氢气流量	—

会随着输出功率的提高而升高, 而燃料电池发动机的工作条件是影响其输出功率的关键因素之一, 因此动态效率特性成为燃料电池发动机性能测试的重点内容。GB/T 24554—2022针对动态平均效率特性进行了测试方法的规定, 与实际效率值更接近, 更有参考价值; IEC 62282-3-200:2015的测试中关于效率测试的内容只涉及了额定功率下的稳定效率, 但测试内容更为丰富, 包括了电效率、热回收效率以及总体效率。SAE的测试标准同样关注不同负载下的系统效率。

通过分析发现, 我国在燃料电池发动机性能测试标准方面, 基本框架已初步形成, 在关键测试项目上与国际标准基本实现同步, 并针对国内的实际情况将测试方法和要求进一步详细制定, 但在测试项目上覆盖不够广泛, 尤其缺乏与环境相关的振动和噪音性能指标测试^[17], 后续应尽快完善相关内容。

3 耐久性测试标准和方法

燃料电池发动机的耐久性测试对确保其在实际应用中的可靠性和寿命至关重要。根据美国能源部(DOE)和交通运输部建议, 乘用车用燃料电池发动机寿命要达到8 000 h以上(性能衰减低于10%)。中国的《节能与新能源汽车技术路线图 2.0》明确指出, 燃料电池寿命在2025年达到5 500 h^[18]。日本NEDO和欧洲HFP针对耐久性也有相关研究计划^[19]。国内外众多燃料电池企业为此投入大量资金和精力, 重点开展燃料电池耐久性研究。但是, 由于燃料电池发动机的部件种类和数量众多, 各

零部件的评价指标又不同, 很难通过某种耐久工况对所有部件进行寿命考核^[20]。调研发现, 国内外与燃料电池发动机耐久性试验相关的标准基本上仍以考察氢燃料电池电堆耐久性为主, 如GB/T 38914—2020《车用质子交换膜燃料电池堆使用寿命测试评价方法》^[21]。近期发布实施的GB/Z 44116—2024《燃料电池发动机及关键部件耐久性试验方法》意在填补国内在燃料电池寿命测试方面的空白^[22]。

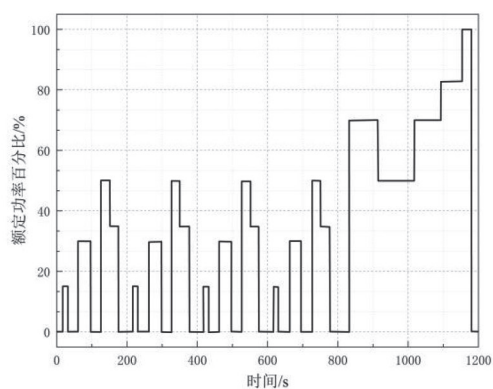
虽然标准性文件目前数量较少, 但很多标准组织或企业都通过制定耐久工况, 在试验台架上进行燃料电池发动机耐久性测试。早先的耐久性测试多采用稳态测试, 主要有恒电流、恒电压等测试方法^[23-24]。稳态测试虽然操作方法和原理较为简单, 但耗时长, 且不符合燃料电池发动机实际的运行状况。目前的耐久性测试多用另一种测试方法——非稳态测试。非稳态测试是指燃料电池发动机在变化的外部负载和操作条件下进行的测试, 以模拟实际应用中燃料电池发动机可能面临的各种动态工况^[25]。燃料电池发动机常见的运行工况包括开路、额定、负载及怠速4种工况, 其中开路或怠速工况会导致阴极出现高电势, 过载会引起缺氧和水淹, 均会对燃料电池发动机的寿命产生不利影响^[26]。目前国内外的科研机构或学者通过合理配比不同状态工况制定非稳态耐久性测试工况, 使之符合燃料电池发动机实际的运行状态, 反映在工况曲线上通常表现为功率或电流随时间的加载变化。

在国外, IEC和美国能源部(DOE)分别根据新欧洲驾驶循环(NEDC)和美国SC03行驶工况制定出“功率-时间”和“电流-时间”耐久性测试工

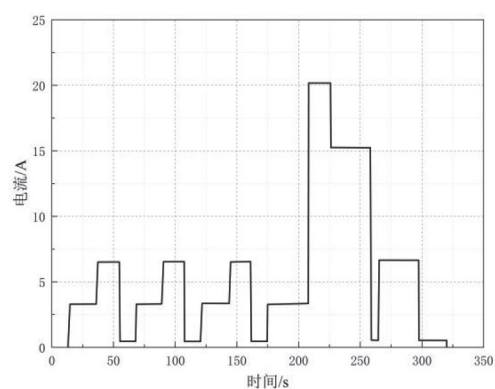
况,如图1(a)和(b)所示^[27-28]。IEC的测试工况模拟了城市驾驶状况,考虑了更多的频繁负载变化和开关机操作,对于日常使用的全功率燃料电池发动机或混合动力系统的耐久性能测试更合适。DOE的测试工况则考虑了更高的行驶速度和更多的爬坡,对于燃料电池发动机长期耐久性能的评价更适宜。法国电气实验室和运输与安全研究所参考混合动力

技术零排放(HYZEM)行驶工况制定相应的耐久工况,重点关注市内行驶、市郊行驶和高速行驶3种行驶状况对发动机耐久性能的影响^[29]。

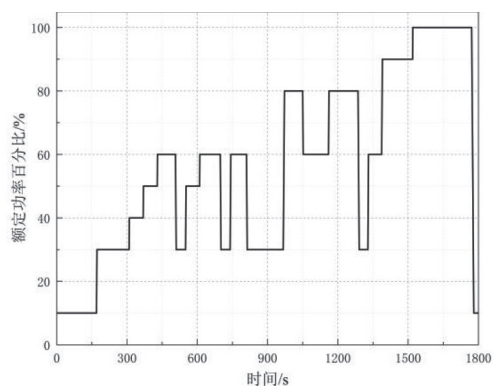
在国内,最新发布的GB/Z 44116—2024^[22]中也制定了燃料电池发动机耐久性的测试工况,如图1(c)所示。同济大学在NEDC测试工况的基础上还考虑了过载工况对燃料电池发动机耐久性的影



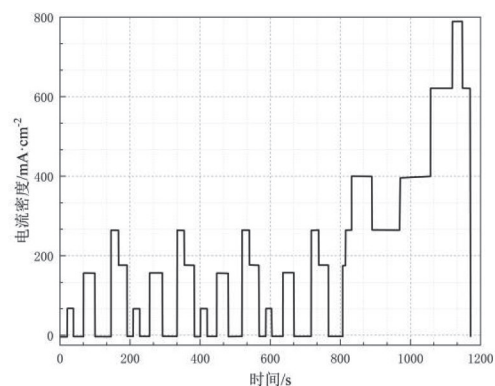
(a) IEC测试工况



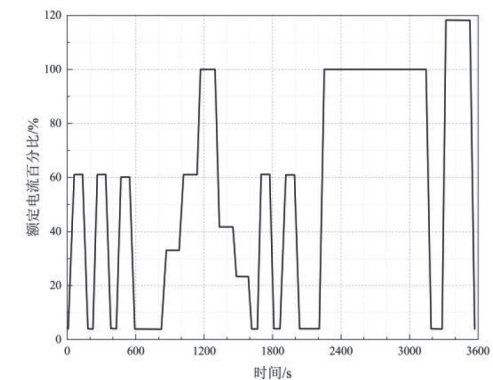
(b) DOE测试工况



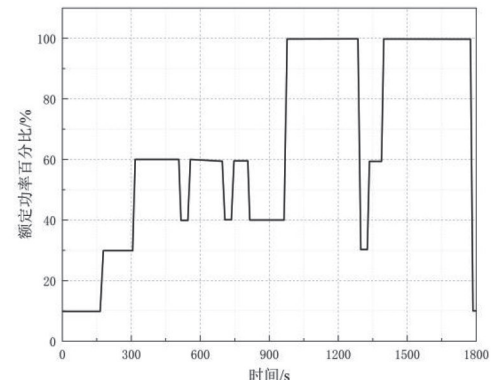
(c) GB/Z 44116—2024测试工况



(d) 同济大学测试工况



(e) 清华大学测试工况



(f) 张晓鹏等动态测试工况

图1 耐久性测试工况

响,如图1(d)所示^[30]。清华大学则基于中国城市公交循环工况(CCBC)制定出电流随时间变化的耐久测试工况,如图1(e)所示。该工况对怠速工况和全功率行驶工况的占比考虑更多,更适合反映城市客车在实际情况下的耐久性能^[31]。

除了根据典型汽车行驶工况进行耐久性测试工况的制定,大量学者也根据实车运行工况进行制定。郭温文等^[32]结合实车功率需求,制定出基于整车实际应用且易于操作的氢燃料电池发动机耐久性试验工况,并对其进行了测试验证。研究发现,在额定电流密度(1.2 A/cm^2)下,电压从初始状态的 0.66 V 下降至 0.57 V ,衰减率约为 14% 。王克勇等^[33]采用基于车辆实际运行功率谱得到的循环工况,对Hy SYS-30燃料电池发动机进行 $6\,000\text{ h}$ 的耐久性测试,试验发现在额定电流下的电压衰减率约为 8.1% 。张晓鹏等^[34]通过制定的动态工况对某 55 kW 燃料电池系统进行 $1\,000\text{ h}$ 的耐久性测试,测试工况如图1(f)所示,试验结束发现在额定功率下系统功率下降 6.01% ,系统效率下降 6.92% ,冷却液电导率升高 175.10% ,发动机各性能参数均出现一定下降。根据实车工况进行耐久性测试工况制定的意义在于它能够真实反映燃料电池发动机在实际使用中的工作状态和环境条件,提供比实验室条件下更具现实意义的性能和耐久性数据。这种测试方法有助于识别潜在问题,如起动和停止过程中的应力、负载波动引起的电化学反应变化以及环境因素对燃料电池性能的影响,从而提高测试结果的可靠性并指导实际应用中的优化和改进。

在关注整个运行周期内燃料电池发动机耐久性能的同时,部分学者还重点关注工作或操作条件的改变对其耐久性能的影响,如湿度变化、多次启停等,分别对应干湿循环测试、启停循环测试等耐久性测试方法^[35]。低湿度条件会导致质子交换膜干燥,降低质子传导效率并增加膜的裂纹风险;高湿度条件会导致膜过度膨胀和气体扩散层堵塞,影响反应气体的传输^[36]。此外,湿度变化增加了水管理系统的负担,可能导致内部材料的腐蚀和降解,从而缩短燃料电池的使用寿命^[37-38]。

干湿循环测试就是通过循环改变反应气体的相对湿度,影响电堆内部水管理的效果,进而测试其耐久性的方法。Wang等^[39]对质子交换膜燃料电池进行机械耐久性和化学耐久性测试,通过干湿循环 $20\,000$ 次,运行时长超过 400 h 的测试后发现电堆开路电压衰减超过 14% ,而正常衰减时仅为 6.9% 。燃料电池发动机在每次起停过程中都会经历热循环和机械应力,导致膜电极组件的机械疲劳和性能下降^[40];电化学环境的剧烈变化导致催化剂层和电极材料的降解^[41];频繁的冷凝和蒸发增加了水管理的难度和故障风险^[42];频繁起停要求燃料电池系统具有快速响应能力,增加了系统的复杂性和故障风险^[43]。起停循环测试则是用于模拟燃料电池在实际运行中的频繁起动和停止,以测试燃料电池发动机在该工作条件下的耐久性。彭祖雄等^[44]对一台峰值功率为 70 kW 的燃料电池发动机进行 288 h 的空空起停和 480 h 的正常起停试验,2种起停工况对比如表6所示,阴极脉冲吹扫用于模拟长时间静置导致的空气进入与渗透。2种起停方式下内部电堆在额定功率点的平均单体电压衰减率分别为 12.42% 和 2.21% ,平均衰减速率分别为 0.432 mV/h 和 0.036 mV/h 。燃料电池发动机在实际工作中难免会出现上述特殊情况。探究特殊工作条件下燃料电池发动机的耐久性能不仅对确保其在极端温度、高湿度、高负荷等特殊条件下的可靠性和安全性至关重要^[45-46],还有助于提升产品质量,优化设计和材料选择,满足法规和标准要求,推动技术进步和创新,从而延长燃料电池发动机的使用寿命。

表6 起停工况

步骤	项目	空空起停	正常起停
1	起动	起动至50%额定功率	起动至50%额定功率
2	运行	50%额定功率运行	50%额定功率运行
3	降载	降载至怠速功率	降载至怠速功率
4	运行	怠速功率运行	怠速功率运行
5	关机	正常关机	正常关机
6	静置	阴极脉冲吹扫(吹扫时长为 $1\,300\text{ s}$)	静置

部分组织或文献中涉及的燃料电池发动机耐久性测试方法如表7所示。从表7中可以看出,各标准组织或机构在燃料电池发动机耐久性测试标准以及方法方面存在差异,在测试工况制定方面考虑的重点并不一致,因此,在量化同一性能参数上存在困难,这不利于燃料电池发动机技术在全球范围内的技术交流和推进。

燃料电池发动机的耐久性测试是一个多维度、综合性的评价过程,涉及从基础性能测试到长期运行稳定性的多个方面。燃料电池发动机耐久性测量和评估体系系统框架如图2所示。通过这些评价指标,可以更全面地了解燃料电池发动机的性能表现,并为技术改进和市场推广提供指导。随着后续测试方法的继续完善,评价指标所能涉及的

范围也将更加广泛。

伴随着全球化的不断深入,燃料电池发动机相关产品在不同国家和地区之间的流通日益频繁。然而,目前各国和企业在耐久性测试方面存在的^[47-48]不一致情况,不仅影响了产品质量的评估,也给国际贸易带来了障碍。为了提高产品的可靠性和安全性,建立统一的耐久性测试方法和评价体系显得尤为重要^[47-48]。这需要国际标准化组织和相关机构的积极参与,通过制定和推广全球认可的标准来协调各方的差异。同时,技术的不断进步也要求我们不断创新测试方法,以适应新材料和工艺的发展。此外,建立一个全面的评价体系和持续改进机制,以及对相关人员进行教育和培训,都是实现这一目标的关键步骤。建议呼吁所有相关方共

表7 燃料电池发动机耐久性测试方法

测试方法	特点	参考文献或组织
稳态测试法	恒定电流密度测试	[22]
	恒定电压测试	[23]
工况循环法	开路/怠速工况55%, 额定工况12%, 变载工况33%, 未考虑过载工况	[30]
	开路/怠速工况30%, 额定工况9.7%, 过载工况5.6%	DOE
	开路/怠速工况41.4%, 额定工况3.7%, 未考虑过载工况	IEC
	开路/怠速工况9.4%, 额定工况13.9%, 变载工况2.7%, 未考虑过载工况	SAC
	开路/怠速工况37.9%, 额定工况9.2%, 过载工况2.4%	同济大学
	开路/怠速工况38.9%, 额定工况28.2%, 变载工况17.7%, 过载工况1.8%	清华大学
	开路/怠速工况11.6%, 额定工况34.9%, 变载工况51.2%, 过载工况2.3%	武汉理工大学
	开路/怠速工况21.1%, 额定工况31.6%, 过载工况2.1%	大连物化所
	开路/怠速工况25%, 额定工况25%, 未考虑过载工况	U.S.DRIVE Technical Team
干湿循环法	开路/怠速工况50%, 额定工况50%, 未考虑过载/变载工况	FC Test NET
	测试气体采用空气	DOE
	测试气体采用氮气	FCCJ
起停循环法	在0%相对湿度运行30 s, 随后在90 ℃露点温度下运行45 s, 每75 s为一个循环周期, 循环测试20 000次	[33]
	测试湿度为100%, 采用500 mV/s的速度在1.0 ~ 1.5 V之间扫描	DOE
	测试湿度为95%, 采用0.9 ~ 1.3 V的方波, 每个循环在1.3 V和0.9 V各保持30 s	FCCJ
	测试湿度为70%, 采用20 mV/s的速度在0.05 ~ 1.5 V之间扫描	[34]
	阴阳极露点温度为65 ℃, 测试电压在0.05和0.88之间循环, 斜坡速率为0.415 V/s, 在一个周期中, 电压在0.88 V保持 30 s, 然后在0.05 V保持18 s, 总循环次数为30 000次	[36]

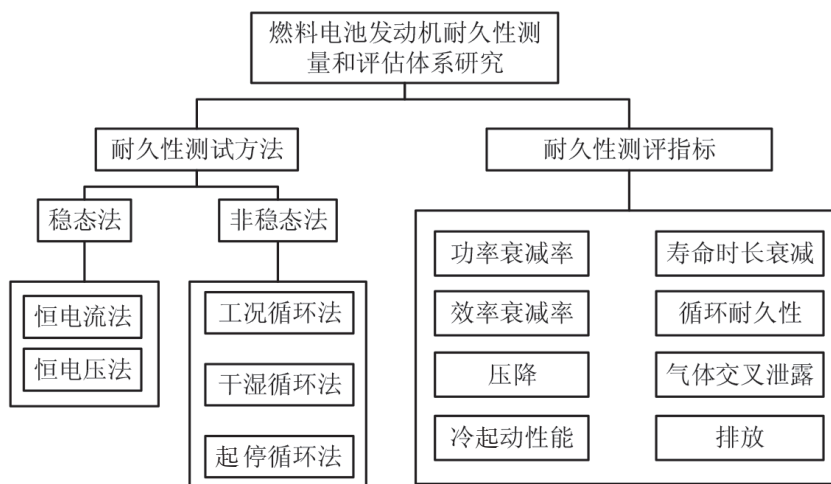


图2 燃料电池发动机耐久性测量和评估体系系统框架

同努力,推动耐久性测试方法的统一化,以促进行业的健康发展和全球市场的繁荣。

4 总结与展望

随着全球燃料电池发动机技术的不断进步,国内外企业在整体功率和效率上已能满足多场景需求。然而,商业化成本高昂和系统寿命不足仍是制约其广泛应用的关键因素。此外,燃料电池发动机的测评标准存在不完善、不统一和滞后性问题,导致全球标准的互通性面临挑战。为了推动燃料电池发动机及其测试标准的持续优化发展,本文分别从技术层面和标准层面提出以下建议。

(1) 在技术层面,燃料电池发动机的性能和耐久性较大程度上取决于电堆内部的膜电极,因此具有稳定活性和高耐久性的催化剂材料、高质子电导率和高低温性能强的质子交换膜材料成为当前和未来的重点研究方向。

(2) 在标准制定层面,需要制定更严谨和全面的测试方法,涵盖耐久性、可靠性、动态性能和环境适应性,推动国际标准的统一和协调,以提高测试结果的可比性和一致性,从而促进燃料电池技术的推广和应用。

通过上述措施,期望能够解决燃料电池发动机在商业化和标准化方面存在的问题,推动其在全球范围内的广泛应用和健康发展。

参考文献

- [1] 胡光明,王睿迪,郝冬,等.燃料电池膜电极耐久性试验技术的现状和展望[J].电源技术,2025,49(1):82-91.
- [2] 倪耀琪,朱恒恺.“双碳”目标下氢能发展机遇、难点与路径选择[J].现代化工,2024,44(2):1-8.
- [3] 齐志刚.燃料电池技术硬核及政策市场双轮驱动[J].电源技术,2024,48(11):2085-2096.
- [4] HAIDER R, WEN Y C, MA Z F, et al. High temperature proton exchange membrane fuel cells: progress in advanced materials and key technologies[J].Chemical Society Reviews,2021,50(2):1138-1187.
- [5] 董格,许广健,吴胜男.燃料电池汽车整车技术现状与发展趋势[J].汽车工业研究,2024(2):32-39.
- [6] 兰昊,何云堂,郝冬,等.燃料电池电动汽车标准体系研究[J].标准科学,2020(2):19-26.
- [7] 王璐,张静珠,孙阳阳,等.“双碳”背景下氢能产业链标准化现状及建设思考[J].标准科学,2024(3):93-97.
- [8] 陈向春.浅谈“双碳”战略目标下我国氢能标准化的发展[J].标准科学,2022(10):36-41.
- [9] XU S R, LI C D, DI X, et al. Challenges towards hydrogen economy in China[J].International Journal of Hydrogen

- Energy, 2020, 45(59):34326–34345.
- [10] 张戈, 杨燕红, 刘峰. 我国氢燃料电池汽车标准体系的现状及分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2018, 32(12):21–30.
- [11] 马秋玉, 赵子亮, 赵洪辉, 等. 燃料电池行业标准现状综述[J]. 汽车文摘, 2020(1):14–17.
- [12] 王少武. 氢能标准化国内外研究进展及福建省实施策略探讨[J]. 标准科学, 2024(11):87–92.
- [13] 中国标准化编辑部. 中国汽车团体标准先行者: 中国汽车工程学会标准化故事[J]. 中国标准化, 2023 (15):20–24.
- [14] 赵美焕. 地方实践视角下的企业标准“领跑者”制度实施探讨[C]//中国标准化年度优秀论文(2023)论文集. 天津市标准化研究院, 2023:462–467.
- [15] 吴迪, 吴诗雨, 王宇鹏, 等. 燃料电池汽车低温冷启动测试方法对比分析[J]. 中国标准化, 2024(14):173–176.
- [16] 陈新. 热电联供燃料电池系统效率分析[J]. 机械制造, 2024, 62(3):24–26.
- [17] 孙田, 张妍懿, 陈光, 等. 车用燃料电池发动机NVH试验方法分析[J]. 汽车实用技术, 2023, 48(23):95–98.
- [18] 王贺武, 欧阳明高, 李建秋, 等. 中国氢燃料电池汽车技术路线选择与实践进展[J]. 汽车安全与节能学报, 2022, 13(2):211–224.
- [19] 黄晟, 杨振丽, 李振宇. 氢产业链发展的路径分析[J]. 化工进展, 2024, 43(2):882–893.
- [20] 郑宏, 王国卓, 郭婷, 等. 燃料电池汽车关键性能指标现状[J]. 中国汽车, 2024(7):8–13.
- [21] 中国电器工业协会. 车用质子交换膜燃料电池堆使用寿命测试评价方法: GB/T 38914—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [22] 工业和信息化部. 燃料电池发动机及关键部件耐久性试验方法: GB/Z 44116—2024[S]. 北京: 中国标准出版社, 2024.
- [23] WANG X F, HUANG X Y, LEONARD J. BONVILLE, et al. Impact of in-cell water management on the endurance of polymer electrolyte membrane fuel cells[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2014, 161(6):F761–F769.
- [24] 黄豪, 杨座国, 王亚蒙, 等. 开路电压工况下燃料电池膜电极耐久性研究[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2018, 44(5):638–643.
- [25] 贺凤, 倪江鹏, 邓宇飞, 等. PEMFC耐久性影响因素及测试方法研究进展[J]. 电源技术, 2020, 44(7):1066–1069.
- [26] 黄彦维, 侯永平, 张健文, 等. 燃料电池耐久试验循环工况对比[J]. 电池, 2017, 47(6):354–357.
- [27] YUAN X Z, LI H, ZHANG S S, et al. A review of polymer electrolyte membrane fuel cell durability test protocols[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(22):9107–9116.
- [28] BLOOM I, WALKER L K, BASCO J K, et al. A comparison of Fuel Cell Testing protocols – A case study: Protocols used by the U.S. Department of Energy, European Union, International Electrotechnical Commission/Fuel Cell Testing and Standardization Network, and Fuel Cell Technical Team[J]. Journal of Power Sources, 2013, 243:451–457.
- [29] WAHDAME B, CANDUSSO D, FRANÇOIS X, et al. Comparison between two PEM fuel cell durability tests performed at constant current and under solicitations linked to transport mission profile[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2007, 32(17):4523–4536.
- [30] HOU Y P, OUYANG Y H, PEI F L, et al. Voltage and voltage consistency attenuation law of the fuel cell stack based on the durability cycle condition[J]. SAE Technical Paper, 2019–01–0386, 2019.
- [31] 邵静玥. 燃料电池堆性能评价试验方法[D]. 北京: 清华大学, 2005.
- [32] 郭温文, 李剑铮. 氢燃料电池发动机耐久试验方法研究[J]. 汽车技术, 2021(9):33–37.
- [33] 王克勇, 石伟玉, 王仁芳, 等. 车用燃料电池系统耐久性研究[J]. 电化学, 2018, 24(6):772–776.
- [34] 张晓鹏, 吴鹏, 张斌, 等. 动态耐久工况下燃料电池系统电性能及安全性试验研究[J]. 汽车科技, 2023(4):2–7.
- [35] 梁思哲, 曾蓉. 质子交换膜燃料电池耐久性评价方法[J]. 电源技术, 2019, 43(12):2044–2047.
- [36] 高楠, 李文杰, 耿占柏, 等. 质子交换膜燃料电池水淹膜干故障诊断方法综述[J]. 汽车工程学报, 2024, 14(4): 599–613.
- [37] 周苏, 纪光霁, 陈凤祥, 等. 车用质子交换膜燃料电池系统技术评估与分析[J]. 汽车工程, 2010, 32(9):749–756.
- [38] BAZ F B, ELZOHARY R M, OSMAN S, et al. A review of water management methods in proton exchange

(下转第144页)

- [S.l.]: Partnership on AI, 2024[2025-09-26]. <https://partnershiponai.org/>.
- [25] LEIBOWICZ C R, CARDONA C H. From principles to practices: lessons learned from applying Partnership on AI's (PAI) synthetic media framework to 11 use cases[Z/OL]. arXiv preprint arXiv:2407.13025, 2024-07-17[2025-09-26]. <https://arxiv.org/abs/2407.13025>.
- [26] Partnership on AI. Model deployment & society: current landscape[Z/OL]. [S.l.]: Partnership on AI, 2024[2025-09-26]. <https://partnershiponai.org/modeldeployment/?ref=maginate.com#landing>.
- [27] Linux Foundation. SPDX specification version 3.0.1[S/OL]. 2024-07[2025-09-26]. <https://spdx.github.io/spdx-spec/v3.0.1/>.
- [28] VerityAI. Microsoft responsible AI standard: an overview[Z/OL]. VerityAI Blog, 2025-03-10[2025-09-26]. [https://verityai.co/blog/microsoft-responsible-ai-](https://verityai.co/blog/microsoft-responsible-ai-standard)
- standard.
- [29] LARDINOIS R. Google drops AI weapons ban: what it means for the future of artificial intelligence[Z/OL]. VentureBeat, 2024-01-27[2025-09-26]. <https://venturebeat.com/ai/google-drops-ai-weapons-ban-what-it-means-for-the-future-of-artificial-intelligence/>.
- [30] Google Cloud Community. Understanding A2A: the protocol for agent collaboration[Z/OL]. 2025-05-14[2025-09-26]. <https://www.googlecloudcommunity.com/gc/Community-Blogs/Understanding-A2A-The-Protocol-for-Agent-Collaboration/ba-p/906323>.
- [31] IBM aims to set industry standard for enterprise AI with Itbench SaaS launch[Z/OL]. CIO, 2024-03-18[2025-09-26]. <https://www.cio.com/article/3981175/ibm-aims-to-set-industry-standard-for-enterprise-ai-with-itbench-saas-launch.html>.

(上接第93页)

- membrane fuel cells[J].Energy Conversion and Management,2024,302:118150.
- [39] WANG D,MIN H T,SUN W Y, et al. Durability study of frequent dry-wet cycle on proton exchange membrane fuel cell[J]. Energies,2023,16(11):4284.
- [40] 时佳威,谢金法,赵勇.车用燃料电池耐久性控制策略研究[J].现代制造工程,2021(8):56-63.
- [41] 吕沁阳,滕腾,张宝迪,等.增程式燃料电池车经济性与耐久性优化控制策略[J].哈尔滨工业大学学报,2021,53(7):126-133.
- [42] 赵洪波.质子交换膜燃料电池启停和变载工况下的动态特性研究[D].北京:北京交通大学,2020.
- [43] KIM J,LEE J H,TAK Y S. Relationship between carbon corrosion and positive electrode potential in a proton-exchange membrane fuel cell during start/stop operation[J].Journal of Power Sources,2009,192(2):674-678.
- [44] 彭祖雄,李伟明,李剑铮.乘用车用燃料电池系统的启停耐久实验[J].电池,2022,52(5):522-524.
- [45] 伏圣祥.温度影响下的车用质子交换膜燃料电池的衰减研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2023.
- [46] 徐寅嵩,李文浩,杜常清,等.考虑运行参数可寻优范围的PEMFC系统净功率优化[J].汽车工程,2024,46(7):1137-1146.
- [47] 邱硕涵,于秀明,刘廷钰,等.技术标准的价值评估体系研究[J].标准科学,2025(4):70-82.
- [48] 余珍凤.“双碳”背景下氢能产业标准化建设现状与对策分析[J].标准科学,2025(5):6-11.