

无人机用空冷燃料电池长时间运行特性研究

公昆颖¹, 郭子阳¹, 田晨琪¹, 韦 帅¹, 何泽鸿¹, 徐伟强², 陈 黎¹, 陶文铨¹
(1. 西安交通大学 能源与动力工程学院 热流科学与工程教育部重点实验室, 陕西 西安 710049;
2. 北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100191)

摘要:空冷型开放阴极质子交换膜燃料电池由于需要将空气同时作为反应物和冷却剂,其阴极直接暴露在多变和可能的恶劣空气条件下,这对电堆的性能提出挑战。针对无人机用空冷型燃料电池进行了模拟真实飞行条件下的电堆运行实验,验证了电堆能够在数小时内独立为无人机提供动力。随后完成了电堆在200 h长时间尺度下的性能测试,实验结果表明电堆的平均单片电压每小时下降约0.38 mV。研究发现电堆性能的降低主要是来自于操作参数和环境条件的改变,且下降幅度与主要空气污染物水平呈现明显的正相关关系。同时发现,即使在电堆性能下降后氢气消耗仍保持在原水平,表明更多的能量转化为了热能而不是电能。

关键词:空冷燃料电池;多旋翼无人机;空气污染物;电热分析

中图分类号: TM 911.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-087 X(2025)11-2438-11

DOI: 10.3969/j.issn.1002-087X.2025.11.031

Experimental study on long-term operating characteristics of air-cooled fuel cells for UAVs

GONG Kunying¹, GUO Ziyang¹, TIAN Chenqi¹, WEI Shuai¹, HE Zehong¹, XU Weiqiang²,
CHEN Li¹, TAO Wenquan¹

(1. Key Laboratory of Thermo-Fluid Science and Engineering of MOE, School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an Shaanxi 710049, China; 2. School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Air-cooled open-cathode proton exchange membrane fuel cell requires air as both reactant gas and coolant medium, causing its cathode directly exposed to variable and potentially harsh air conditions, which is a serious challenge to performance of stack. This study conducts simulating flight experiments with air-cooled fuel cells, verifying that the stack can independently provide power for the UAV within a few hours. Subsequently, this study completes a 200 h performance test for this stack on rated conditions, and results show that the hourly average single-cell voltage drop is about 0.38 mV. The study indicates that the decline of voltage is mainly due to changes in operating parameters and environmental conditions, especially showing a significant positive correlation with the levels of major air pollutants. Meanwhile, experimental results show that even after stack voltage de-

收稿日期:2025-09-12

基金项目:能源陕西实验室科技项目(ESLB202408);陕西省创新人才推进计划-科技创新团队基金(2024RS-CXTD-35)

作者简介:公昆颖(1995—),男,山西省人,博士研究生,主要研究方向为氢能与燃料电池应用。

通信作者:陶文铨,教授,E-mail: wqtao@mail.xjtu.edu.cn

clines, hydrogen consumption remains at original level, indicating more energy is converted into thermal energy rather than electrical energy.

Key words: air-cooled fuel cell; multi-rotor UAV; air pollutants; electric and thermal analysis

质子交换膜燃料电池(PEMFC)是一种采用可传导质子的聚合膜作为电解质,将存在于燃料中的化学能通过电化学反应直接转化为电能的发电装置,由于不受卡诺循环的限制,其能量转换效率显著,通常可达到45%~60%。在使用氢气作为反应物时,其产物只有水。因其诸多优点,在过去的数十年中,质子交换膜燃料电池技术得到了长足发展。其中,使用空气作为冷却剂的质子交换膜燃料电池由于大幅简化了辅助部件,结构小巧,系统集成度高,在近年来得到广泛关注。它可应用于无人机、单兵电源、小型叉车等小功率场景,并快速实现商业化^[1]。

为了最大程度地提升系统集成度,目前市面上的空冷燃料电池多为开放阴极设计,即阴极流道直接与大气环境连通,使用冷却风扇引导空气快速流过阴极通道,在此过程中空气通过气体通道进入膜电极参与反应,起到氧化剂的作用,同时过量的空气带走电化学反应产生的热量^[2]。开放式阴极使得电堆中的电化学反应处于多变和相对恶劣的空气环境下,环境的温度、湿度、压强、污染物等因素都将影响燃料电池的工作特性^[3-6]。在无人机平台上,空冷电堆能否在真实空气环境中保持长时间的高性能输出,即高输出电压和高发电效率,是氢能无人机实现长续航指标的关键所在^[7-10]。

近年来,随着低空经济概念的认同和实际发展以及科学家们对燃料电池机理认识的不断深入,空冷型燃料电池的相关研究和其在无人机上的应用逐渐增加。刘文明^[11]对阴极开放式空冷质子交换膜燃料电池的结构与性能开展了研究,获取了千瓦级空冷电堆内温度和空气流速的分布以及不同膜电极所带来的性能差异,指出膜电极的保水能力对电堆的性能和稳定性有重要影响。诸祥^[12]对一个50 W空冷型燃料电池在实际运行工况中的性能变化规律进行了研究,研究了其在怠速、额定、变载和启停四种工况循环加载时的性能变化情况,发现启停工况下电堆的性能下降最快。Arat等^[13]设计了一个由质子交换膜燃料电池和锂电池共同驱动的小型四旋翼无人机,证明了将燃料电池用于提升无人机续航时间的有效性,并建议增大燃料电池在动力系统中的作用占比。Zeng等^[14]设计了一个由3 kW燃料电池混

合动力系统驱动的四旋翼无人机,分析了燃料电池在混合动力系统中实时功率的变化情况,并验证了采用动态能量管理策略可以有效提升无人机整体的续航能力。

然而为了确保空冷燃料电池作为飞行器主要动力源的安全性,必须对其经过长时间的实际工作验证,目前仍旧缺乏此方面的研究内容的报道。且由于长时间性能测试耗时长^[15],耗氢量大,各方的研究方法各不相同,多数是基于推荐工况的加速性能测试^[16-17]。然而空冷燃料电池真实的使用环境十分复杂,短时加速测试很难反映实际应用条件下电堆的运行特性^[18]。此外尽管多个新闻已经报道了氢能无人机长时间飞行的可行性,但大多数研究还是独立对空冷燃料电池开展理论或实验研究,而忽略了无人机对于动力的需求,难以反映电堆在无人机上长时间运行的真实性能表现^[19]。

本文选取真实应用于多旋翼无人机上的空冷型开放阴极质子交换膜燃料电池作为研究对象,首先以电堆在无人机空机悬停工况下的运行状态为基准进行了模拟飞行实验,研究了氢燃料电池动力系统在数小时内的运行特性。随后对其开展了接近最大电流水平下的200 h实验,以探明长时间运行后无人机带载能力的变化情况,同时结合操作参数、环境温度湿度及主要空气污染物水平数据,分析了造成电堆性能下降的主要原因。

本文后续章节的内容安排如下:第1节中介绍了本研究的实验对象和实验设备;第2节中介绍了模拟无人机空机悬停工况的恒功率模式实验,并对该条件下电堆的实际表现进行了分析;第3节中介绍了空冷电堆200 h长时间恒电流模式实验,对比了实验前后的电堆性能的变化,分析了其与主要空气污染物水平的关系,对实验前后电堆“电-热”性能的变化进行了对比分析;第4节中对本文的主要结论进行了陈述和总结。

1 实验

1.1 实验对象

本研究使用了一款额定功率约2 000 W的空冷型开放阴极质子交换膜燃料电池,如图1(a)所示。该燃料电池由西安交通大学和氢鹏科技(浙江)有限公

司联合设计,并由氢鹏科技(浙江)有限公司生产。在额定工作电流 40 A 下,电池输出电压约为 50 V,该电压能够很好地兼容当前市面上的无刷电机和电子调速器,从而可为多旋翼无人机提供动力。该燃料电池包含 83 个单电池,双极板的主体材料为石墨,其中阳极采用蛇形流道,阴极采用直流道并直通空气。燃料电池阴阳极气体的流通方向如图 1(b)所示。在燃料电池外壳上固定有两个 48 V 轴流风扇,由广东晟辉科技股份有限公司生产,在运行过程中,扇叶的高速旋转在阴极流道出口处形成负压区,空气受此驱动流经燃料电池阴极,带走燃料电池运行过程中产生的热量,并经风扇排出。风扇由 PWM(pulse width modulation) 占空比信号控制,其调节范围为 0~100%;当 PWM 信号提高时,风扇的转速相应提高,反之降低。实际使用过程中由于大风量轴流风扇轴芯的质量较重,PWM 需高于 15%,风扇才可启动旋转。该燃料电池的初始性能曲线如图 1(c)所示。

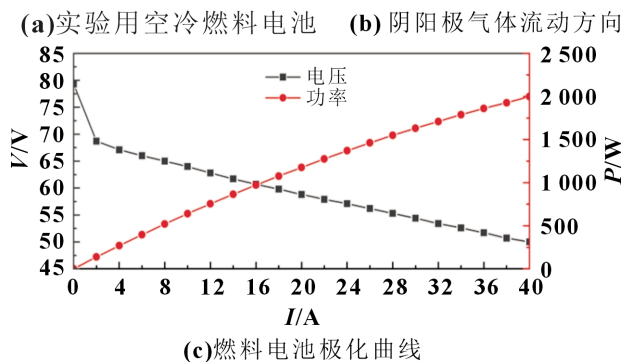
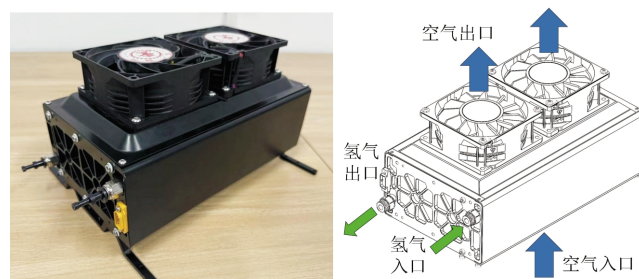


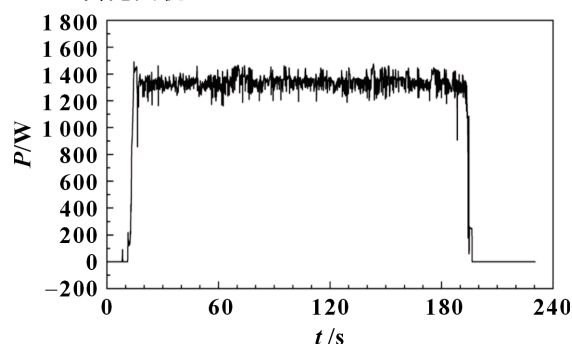
图 1 空冷燃料电池及其极化曲线

该燃料电池与氢气瓶、混合动力控制板、锂电池等结合组成了无人机用氢燃料电池发电系统^[20]。氢燃料电池作为无人机的主要动力源,在悬停和巡航阶段为无人机提供动力;锂电池作为辅助动力源,用于满足无人机起降和机动过程中的瞬间高功率需求。该氢燃料电池动力系统搭载在一台由西安交通大学自主设计的四旋翼无人机上,如图 2(a)所示。该无人机的空机质量为 13.6 kg,最大起飞质量 17 kg。在此质量参数组合下,无人机的悬停功率和满载功

率分别为 1 350 和 1 800 W。图 2(b)为该无人机空机状态起飞后进入悬停工况的实际飞行图片,该过程中无人机的功率曲线在图 2(c)中给出。实验中使用的燃料电池和搭载该燃料电池的四旋翼无人机的相关参数在表 1 中给出。



(a) 搭载氢动力系统的四旋翼无人机 (b) 氢动力无人机实飞图



(c) 无人机飞行功率曲线图

图 2 搭载空冷燃料电池的四旋翼无人机及其飞行功率数据

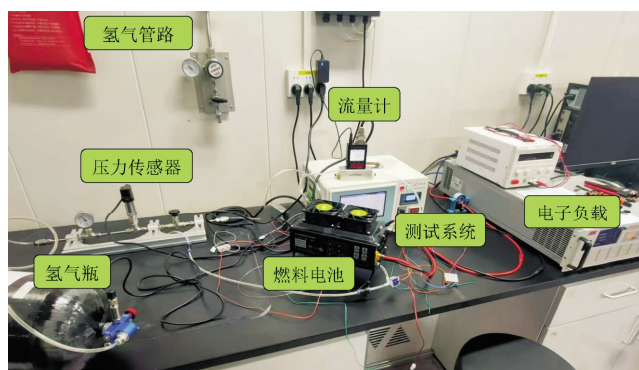
表 1 实验用空冷型燃料电池及无人机设计参数

类别	参数	值
空冷燃料电池	质量/kg	2.7
	单电池数/个	83
	单电池活性面积/cm ²	51
	质子交换膜厚度/μm	12
	额定工作电流/A	40
	额定工作电压/V	50
无人机	最大起飞质量/kg	17
	空机质量/kg	13.6
	机身结构质量/kg	3.32
	空机悬停功率/W	1 350
	满载悬停功率/W	1 800
	螺旋桨直径/mm	736.6
	轴距/mm	1 275
	气瓶容量/L	12
	气瓶质量/kg	3.45

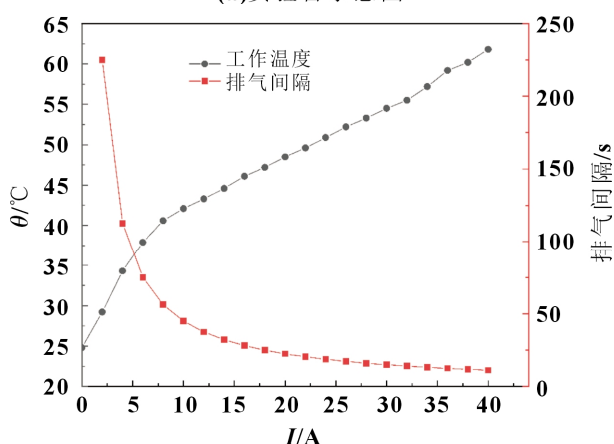
1.2 实验设备

本研究使用了本实验室自主搭建的风冷燃料电池性能测试台,其由多个部件组成,如图 3 所示。实

验中使用一台电子负载作为消耗能量的功率器件,由湖南恩智测控技术有限公司生产,型号为N69204-150-400。通过电子负载,燃料电池可在多种耗能模式下工作,包括恒电流模式、恒电压模式、恒电阻模式和恒功率模式。实验中使用了一台流量计来评估各电流水平下氢气的消耗情况,由美国Alicat公司生产,型号为M-100SLPM-D。实验台具备两种氢气供给方式,分别为气瓶供气和管道供气。当使用气瓶供气时,由于气瓶的容量固定,氢气气源的总量为一个有限值,该值与瓶内压力成正相关关系,瓶内压力越高,则气量越多,反之越少;当使用管道供气时,管道上游可通过更换氢气钢瓶的方式以实现氢气无限供应,便于开展长时间运行实验。



(a) 实验台示意图



(b) 温度与脉冲排气控制逻辑

图3 空冷燃料电池测试台和电堆的温度与排气间隔曲线

通过测试台可以获取燃料电池运行过程中的电压、电流、温度、入口压力、耗氢量等关键物理量。基于以上功能,本研究开展了空机悬停工况模拟测试和200 h长时间运行测试两组实验。模拟飞行测试实验采用了气瓶供气方式和恒功率运行模式,这是因为在实际飞行中,无人机携带的是固定容量的气瓶,且由于氢气本身的质量很小,所以在飞行过程

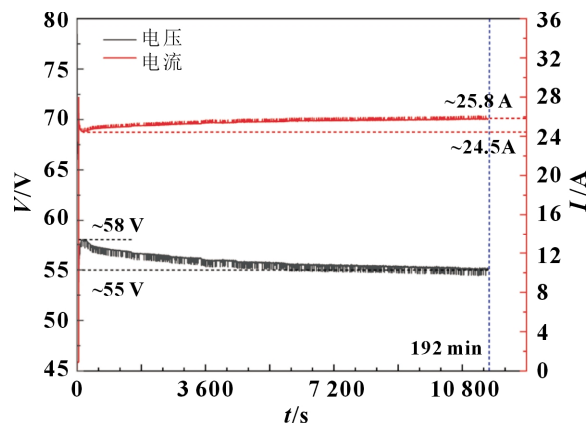
中,无人机本身的质量不会发生过多的改变,因此在无人机悬停过程中,其功率基本维持在变化幅度较小的区间内。而200 h长时间运行实验采用了管道供气和恒电流运行模式,管道供气可以满足长时间运行实验大量的氢气需求;同时在恒电流模式下,电堆性能的下降直接表现为输出功率的减少和无人机带载能力的下降。

在实验过程中,电堆外罩上的两个风扇和中心的K型热电偶连接至测试系统的PWM控制模块,通过调节PWM值变更风扇的转速,以控制电堆的中心温度;电堆氢气通道的出口连接有常闭电磁阀,该阀门也连接至测试系统,并由测试系统的继电器模块控制开闭,以实现脉冲排气,单次排气时间被设置为0.5 s。电堆温度和排气间隔时间随电堆工作电流变化,由电堆生产厂商提供,如图3(b)所示。

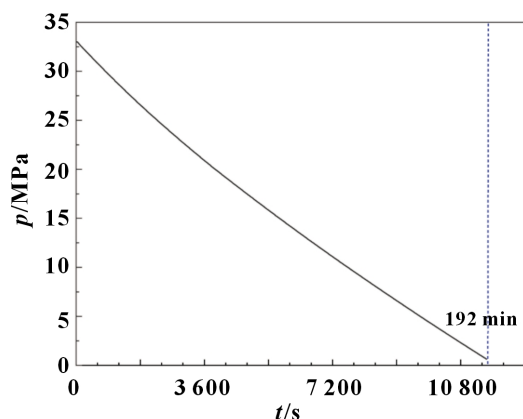
2 空机悬停工况模拟实验

为了探明无人机在数小时的飞行过程中氢燃料电池电压和电流的变化情况,本研究设计了模拟飞行实验。由图2(c)及表1可知,无人机在悬停时功率约1 350 W。在保留一定的余量与损耗后,设定电子负载以1 400 W恒定功率运行,以模拟无人机空机状态的悬停飞行工况。

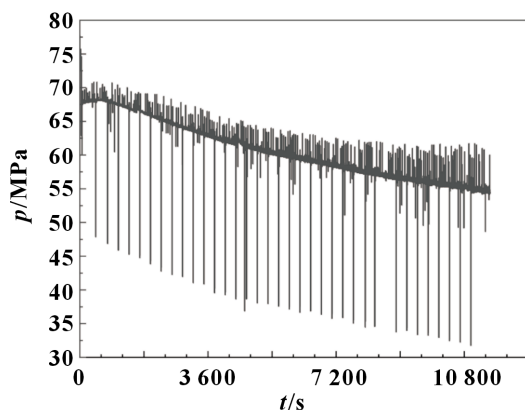
由图4(a)和(b)可知,模拟飞行实验持续运行了192 min,氢气瓶的瓶内气压从33 MPa下降至0.65 MPa后实验终止。在此期间,电堆输出电压下降了约3 V;由于整套系统工作在恒功率模式下,电堆的输出电流从初始的约24.5 A上升至约25.8 A。这说明随着运行时间增加,电堆由于无法在24.5 A电流下对外输出1 400 W的功率而不得不增加电流,结合图1(c)中电堆初始极化曲线可知,当运行电流为26 A时,电堆电压应维持在56.2 V附近,但此时产生了约2.14%的电压下降。如图4(c)所示,电堆的入口压力



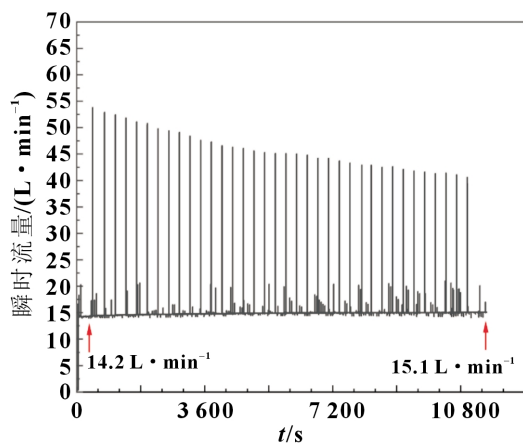
(a) 电压及电流变化曲线



(b)瓶内压力变化曲线



(c)电堆入口压力变化曲线



(d)电堆耗氢速度变化曲线

图4 燃料电池模拟真实飞行测试实验结果

随着时间增加逐渐减少,从最初的约68 kPa下降至约52 kPa,这是因为使用的是固定容量的气瓶供气,气瓶瓶口减压阀在瓶内压力下降的过程中,供给电堆的压力会有一定衰减。在本团队此前的实验研究中发现,压力下降在40~80 kPa的区间内会在30 A的电流下产生约3.37%的电堆电压下降^[21],多项研究也证明氢气压力的下降会造成空冷电堆性能下降^[22-23]。图4(d)中给出了电堆氢气消耗速度的变化情况,可知随时间增加,氢气的流速逐渐增加,即电堆的耗氢速

率逐渐增加,从初始的14.2 L/min增长至15.1 L/min,增加幅度约6.34%。这表明随着飞行时间增加,氢气瓶内气体消耗速度会越来越快,在气体完全消耗之前,无人机必须终止飞行以确保安全。在电化学反应中,氢气得失电子的速率与产生电流的电荷量直接相关,因此氢气消耗速度的增加与电流的增加相关,这说明电流的增加将使得无人机续航时间降低。

以上分析表明,在192 min的持续运行中,电堆的真实性能下降实际上可能非常小,而是由于受到压力和温度等操作参数的影响才产生较大幅度的电压下降^[24],且由于阴极开放的特性,环境因素也可能在电堆的长时间运行中对其性能产生影响,因此有必要在更长的时间尺度和足够真实条件下对电堆进行测试。同时,本实验也验证了在3 h级别的时间尺度下,氢燃料电池动力系统能够持续为多旋翼无人机提供充足动力,实现远超传统锂电池无人机的续航。

3 200 h 长时间运行实验

3.1 实验流程

实验选择恒电流模式,为了尽可能保证实验的完整性和安全性,选择略低于额定电流的36 A作为工作电流,此时燃料电池的初始工作电压约为51.7 V,平均单片电压约为0.623 V,该电流的选择可以一定程度上提高初始工作电压,从而使平均单片电压经历200 h的运行后不会过低。此外,燃料电池在该电流下能够提供约1 800 W的电功率,接近无人机以最大起飞质量飞行时电堆的工作状态,因此该工作电流下的长时间运行实验能够直观地表征电堆作为无人机主要供能装置的持续工作能力。

在正式实验过程中,每天开始时,燃料电池以2 A为梯度进行恒流拉载工序,在每个电流下运行2 min,直至达到36 A时开始计时;在每天结束时,燃料电池以4 A为梯度进行恒流卸载工序,在每个电流下运行1 min,直至电流归零。在卸载完成后对燃料电池进行约3~5 min的氮气吹扫,直至没有液态水排出,以尽可能避免残留在电堆内部的液态水对电堆的影响。在每个夜晚,电堆保存在透明防潮箱体中避光保存。整个实验过程持续约13 d,从2025年1月9日持续至1月22日凌晨,日均运行时间约15.5 h(加载和降载的时间不包含在此时间内),详细情况视每日早上实验开始的时间而略有变动。测试系统每30 s记录一次数据,实验结束时总计获得24 004组记录数据,据此判断在设定工况下的运行时间已经超

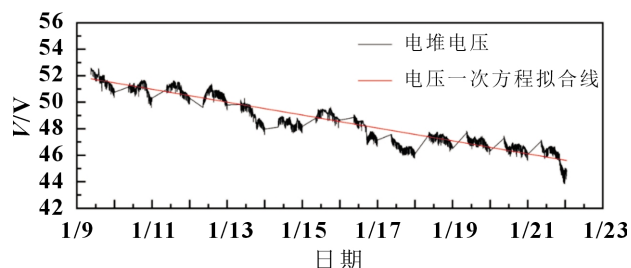
过 200 h。在实验的全过程中,使用的氢气均为 99.999% 的高纯氢气,且无任何加热与加湿。

3.2 200 h 性能测试实验结果

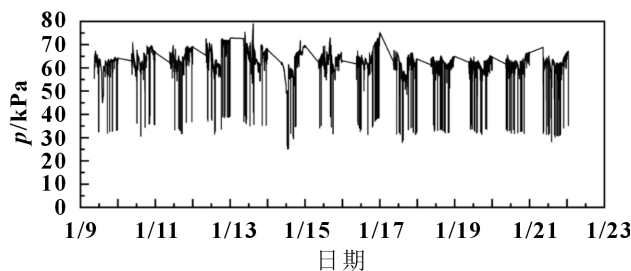
图 5(a)展示了整个实验过程中输出电压的变化情况,在持续约 13 d 的实验过程中,电堆整体性能处在波动变化中,整体下降过程近似一条直线,但在个别天数存在偏离整体趋势的性能骤降,其中 14 日和 17 日较为显著。以 h 为横坐标轴,实时电压为纵坐标轴绘制实时电压曲线并使用一次方程对其进行拟合,结果如式(1)所示:

$$y = -0.03184x + 51.881658 \quad (1)$$

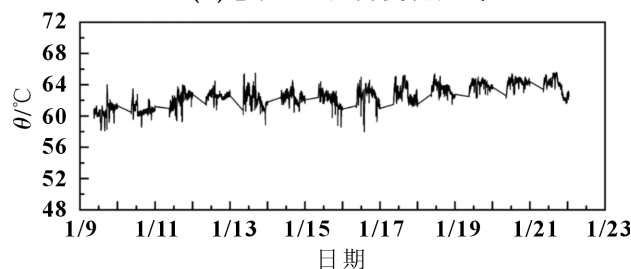
式中: y 为电堆电压; x 为运行小时数;式(1)的拟合斜率即为电堆的电压下降速率。根据式(1)和实验数据的第一个电压数据 52.52 V 计算,200 h 后电堆电压下降 12.12%,平均单片电压下降约 76.7 mV,平均每小时下降 0.38 mV。而在 192 min 内,电堆性能下降仅为约 0.19%,该值远低于第 2 节中得出的 2.14%,这也进一步说明了在单个架次的无人机飞行过程中产生的电压下降可能是由于进口压力等操作参数的原因所造成的而非真实性能衰减。同时该数值是在单日持续运行 15.5 h 的条件下得出的,在实际的使用过



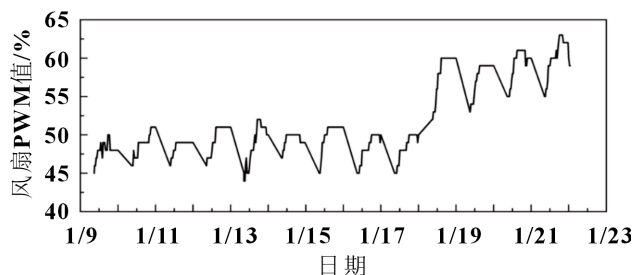
(a) 电堆电压变化曲线



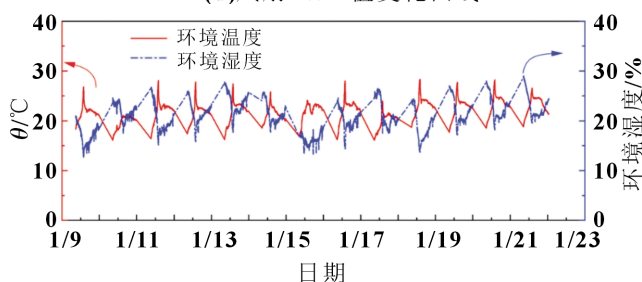
(b) 电堆入口压力变化曲线



(c) 电堆堆芯温度变化曲线



(d) 风扇 PWM 值变化曲线



(e) 环境温湿度变化曲线

图 5 空冷电堆 200 h 性能测试实验结果

程中,无人机的单次飞行时间不超过 192 min,则电压的真实衰减幅度预计将会更小。

图 5(b)展示了实验运行过程中的入口压力控制曲线。在整个实验过程中,入口压力保持在约 60 kPa 附近,同时可以观察到间断的接近 30 kPa 的压力下冲,这是燃料电池的阳极在进行脉冲排气的过程中阳极电磁阀打开造成的短暂压力泄放。值得注意的是,尽管希望将阳极入口压力控制在稳定值,但实际控制的精准性存在不足,如 12 日、14 日和 17 日,均出现了压力骤降,尤其 14 日全天的压力控制明显低于 60 kPa。而在其他时间,压力总是保持在略高于 60 kPa 的水平。

图 5(c)和(d)展示了实验过程中电堆的温度控制曲线和风扇 PWM 值曲线。在 36 A 恒定运行过程中,电堆的温度控制在 60 °C,随着运行时间的增加,温度逐渐上升至 63 °C。同时可以观察到风扇的 PWM 值也在逐步上升,尤其在 1 月 17 日后有了显著增长。这说明了随着运行时间的增加,电堆的产热在逐步增加,且电堆性能可能在 17 号剧烈下降导致产热大幅上升。

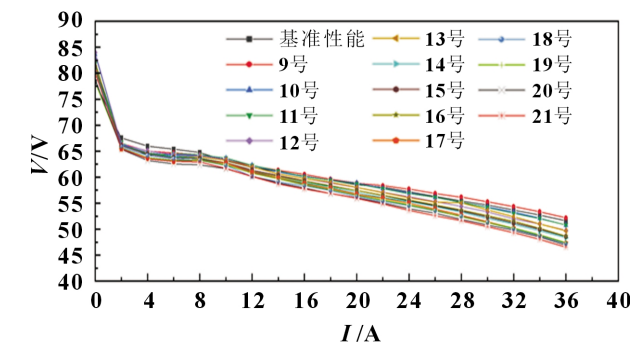
图 5(e)展示了实验过程中每一天的温湿度变化情况,温度全程保持在 15~30 °C 之间,湿度全程保持在 10%~30% 之间,且温湿度与时钟呈现明显的相关关系,即午后一般是一天中温度最高和湿度最低的时刻,每日上午,温度上升,湿度下降,并在中午 12 点到 14 点达到各自峰值,随后温度下降,湿度增加。结合图 5(a)可知,在 1 月 11 号、12 号、15 号等多日内,电

压变化与温度变化呈现正相关。

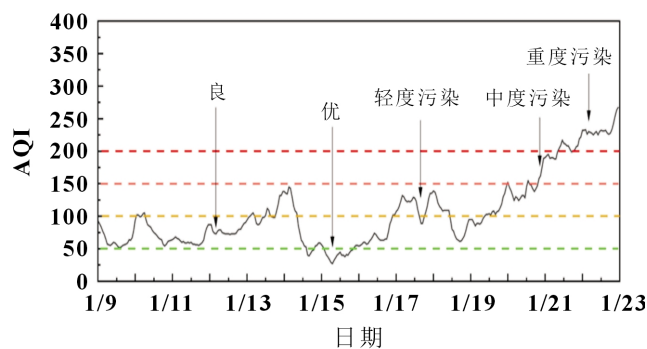
3.3 环境中主要污染物对电堆电压的影响

尽管电堆的电压在200 h全过程中近似于以相同速度下降,但该速度仍旧明显超出预期,图5中各参数变化趋势图仍旧不足以对电压的快速下降做出解释,因此考虑环境条件中空气污染物可能对电堆性能产生了较大影响。

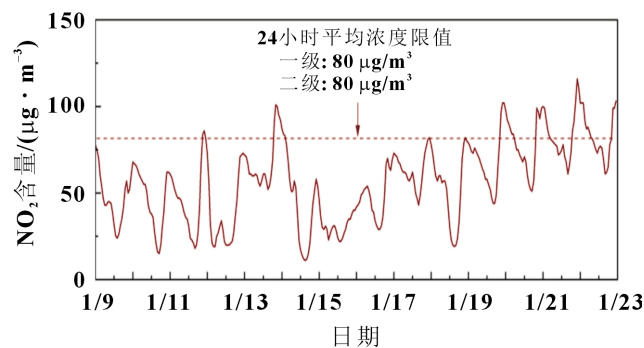
在实验全过程中,电堆每日均会经历从0 A加载至36 A的过程,实验记录了每日的加载曲线,如图6(a)所示。从中国环境监测总站获取了西安市在2025年1月9日至2025年1月22日的环境污染物相关数据^[25],包括空气质量指数AQI数据, SO_2 、 NO_2 、CO等可能对燃料电池产生较严重影响的有害气体数据^[26]以及空气悬浮微粒PM2.5与PM10数据^[27],如图6(b)~(f)所示。



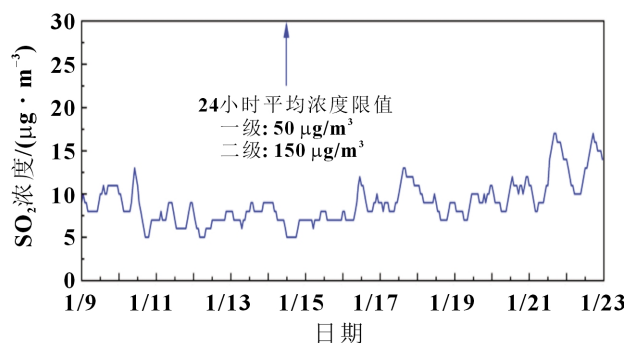
(a)每日加载过程极化曲线



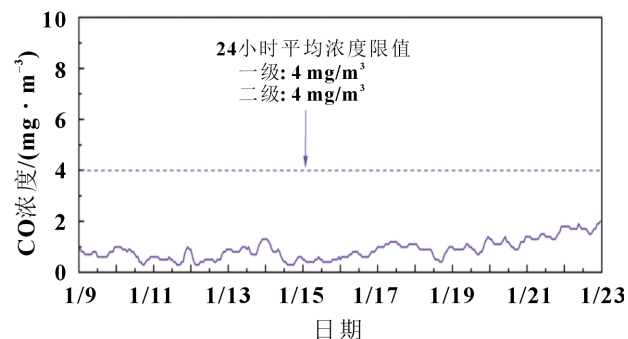
(b)空气质量指数AQI变化曲线



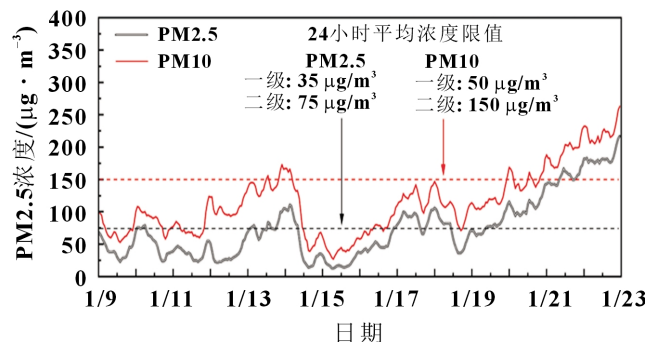
(c) NO_2 含量变化曲线



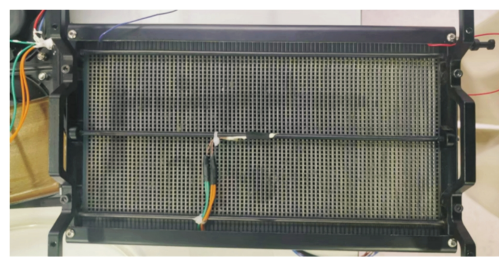
(d) SO_2 含量变化曲线



(e)CO含量变化曲线



(f)空气悬浮微粒含量变化曲线



(g)电堆进风口灰尘覆盖情况



(h)电堆出风口灰尘覆盖情况

图6 实验过程中单日极化曲线及主要空气污染物数据和实验图片

由图 6(b)可知,AQI 的数值在 14 日和 17 日出现尖峰,空气质量为轻度污染状态,同时在 14 日和 17 日电堆电压明显低于其他日期;在 19 日附近空气质量短暂恢复为良,这对应了 19 日电堆电压的恢复;20 日之后空气质量逐渐恶化,在 1 月 22 日凌晨进入重度污染状态,这对应了 22 日零点附近电堆电压的断崖式下降。为了判断 AQI 数据与电堆电压之间是否具有较强的相关关系,按照式(2)计算皮尔逊相关系数:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (2)$$

式中: X 和 Y 分别为电堆电压和空气质量指数,其中

X 的取值为对应时段内的 120 组电压数据的平均值。当 r 值的绝对值为 1 时,则表明两个变量之间完全线性相关; r 值为 0 时,则表明两个变量之间无线性相关性。在本研究中, r 值的计算结果为 -0.75 ,这表明 AQI 数值与电堆电压之间呈现较强的相关性。

空气质量指数根据其数值可被划分为多个质量等级,AQI 在 50 以下的空气质量为优。因此筛选出了本次实验中 AQI 小于 50 时段的实验数据,根据时段首末电堆性能数值按照式(3)计算了电堆的小时衰减率,结果如表 2 所示。在 17 组数据中,电堆性能处于下降和上升的波动过程中,整体均小于 $\pm 3\%$,表明电堆处在正常的性能波动过程而产生衰减^[28]。

$$\delta = \frac{V_{\text{首}} - V_{\text{末}}}{V_{\text{首}}} \times 100\% \quad (3)$$

表 2 空气质量指数(AQI)小于 50 对应时段电压衰减率

序号	时段	AQI	时段开始电压/V	时段结束电压/V	小时变化率/%
1	2025-1-14 15:00:16 至 15:59:46	40	48.73	48.83	-0.21
2	2025-1-14 16:00:16 至 16:59:47	39	48.89	48.27	1.27
3	2025-1-14 17:00:17 至 17:59:47	43	48.29	48.15	0.29
4	2025-1-14 18:00:17 至 18:59:47	47	48.21	48.24	-0.06
5	2025-1-14 19:00:17 至 19:59:48	48	48.15	48.36	-0.44
6	2025-1-15 09:00:24 至 09:59:55	36	48.92	49.42	-1.02
7	2025-1-15 10:00:25 至 10:59:55	40	49.49	49.34	0.30
8	2025-1-15 11:00:25 至 11:59:56	42	49.34	49.34	0.00
9	2025-1-15 12:00:26 至 12:59:56	45	49.32	49.42	-0.20
10	2025-1-15 13:00:26 至 13:59:56	40	49.48	49.34	0.28
11	2025-1-15 14:00:26 至 14:59:57	40	49.39	49.34	0.10
12	2025-1-15 15:00:27 至 15:59:57	38	49.34	49.12	0.45
13	2025-1-15 16:00:27 至 16:59:57	41	49.17	49.32	-0.31
14	2025-1-15 17:00:27 至 17:59:58	40	49.37	49.42	-0.10
15	2025-1-15 18:00:28 至 18:59:58	44	49.45	49.24	0.42
16	2025-1-15 19:00:28 至 19:59:58	47	49.25	49.04	0.43
17	2025-1-15 20:00:28 至 20:59:59	48	49.09	48.49	1.22

根据相关文献^[29],在三种主要空气污染物中, SO_2 对燃料电池的影响最为严重,且易产生不可逆损失;其次为 NO_2 ,但可通过洁净空气吹扫以恢复性能^[30]。 CO 会对阳极产生非常严重的影响,但在阴极 CO 会被快速氧化为 CO_2 ,因此其对电池的影响较小^[31]。图 6(c)~(e)中绘制了三种主要有害气体的变化情况,并根据我国现行环境空气质量标准^[32]标注了二类区域(居住区、商业交通居民混合区、文化区、工业区和农村地区)的污染物浓度限值,可知仅 NO_2 在少数时间段超出了限值,这说明在本次实验中 NO_2

可能对电堆产生了较大影响。对照图 5(a)可以发现,在 NO_2 浓度超出限值的 1 月 13 日,电堆电压出现了明显的电压骤降,而这一天中其他污染物水平没有明显升高。此前的研究表明^[33],提高阴极电势可在一定程度上去除 NO_2 对电堆的影响,由于在本实验中电堆每天都会进行加载和减载,电堆在高阴极电位运行的时段可能起到了一定的性能恢复作用,这在图 5(a)中表现为 1 月 19 日、20 日、21 日在实验开始时电压较高,而开始持续运行后电压快速降低。

此外由图 6(d)可知,尽管 SO_2 在实验全过程中的

数值整体较为稳定,但由于其可能对燃料电池的影响最大^[34],分析其浓度波动情况可知,在10日、16日、17日和21日出现了尖峰,这可能是如图5(a)中所示这四天中电压有较大幅度降低的原因之一。

由图6(f)可知,空气悬浮微粒PM2.5和PM10在大部分时段均超过了二级浓度限值标准,尤其以14日和17日为两个较明显的峰值,这可能加剧了当日电压下降的趋势。在实验结束后拍摄了电堆进出风口的照片,发现均覆盖有大量灰尘,如图6(g)与(h)所示。尽管空气悬浮微粒对于空冷电堆性能的影响原因尚未探明,但其可能堵塞气体扩散层或沉积在电极表面而影响电堆性能,因此在开放阴极电堆的进出风口处配置防尘网等装置可能是规避电堆性能损失的方法之一。

3.4 实验前后“电-热”性能对比分析

在200 h实验结束后,重新进行恒流拉载测试,记录电堆在各电流水平下的输出电压、电堆温度、风扇PWM值和耗氢速率。如表3所示,氢气的消耗速率以L/min为单位统计,参考状态为0℃和101 325 Pa。在进行200 h实验后,电堆的耗氢速率仅表现为轻微增长,但输出电压却大幅下降,这表明电堆发电

表3 实验前后各电流水平下耗氢速率

I/A	衰减前耗氢速率/(L·min ⁻¹)	衰减后耗氢速率/(L·min ⁻¹)
0	0.02	0.04
2	1.17	1.17
4	2.34	2.36
6	3.53	3.54
8	4.69	4.71
10	5.85	5.88
12	7.03	7.05
14	8.20	8.21
16	9.36	9.38
18	10.53	10.54
20	11.68	11.70
22	12.84	12.86
24	14.01	14.02
26	15.16	15.19
28	16.33	16.35
30	17.48	17.50
32	18.64	18.66
34	19.80	19.81
36	20.95	20.98
38	22.11	22.12
40	23.26	23.27

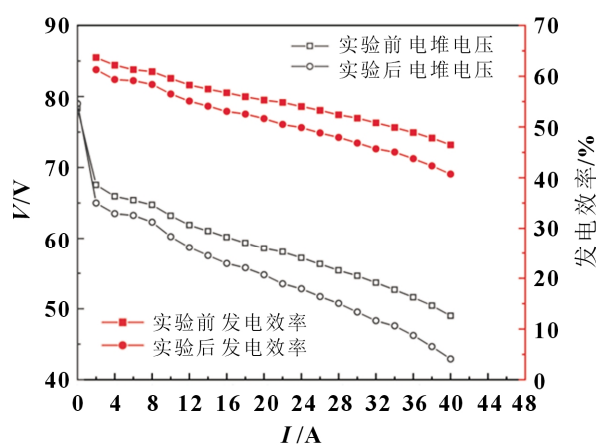
效率降低了,可根据式(4)计算反应过程中的发电效率:

$$\eta = \frac{P_E}{\rho v_{H_2} \Delta H} \quad (4)$$

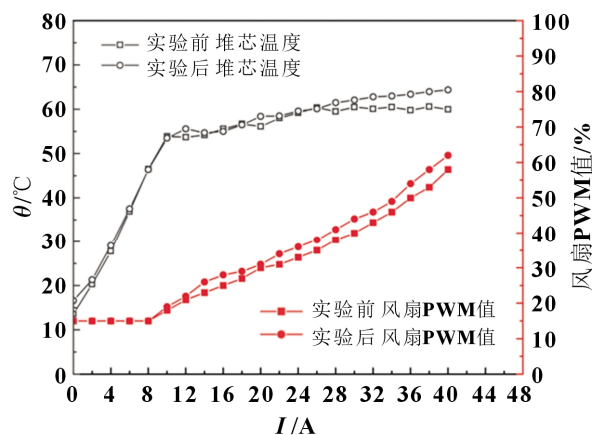
式中: P_E 为电堆电功率; ρ 为氢气密度; v_{H_2} 为氢气流速; ΔH 为氢气热值。在图7(a)中绘制了实验前后各电流段电堆的电压和发电效率变化情况。在36 A电流下,实验前电堆的发电效率约为48.91%,实验后该值下降至43.76%。

燃料电池的能量转换过程是将氢气中蕴含的化学能转化为电能和热能,因此当电堆的发电效率下降,必然伴随着产热的增加^[35],即氢气中蕴含的化学能更多地转换为热能而不是电能^[36],由图7(b)可知,在200 h实验后,电堆的温度和风扇PWM值均有小幅度增长,即在增强散热的情况下,电堆温度仍高于实验前。

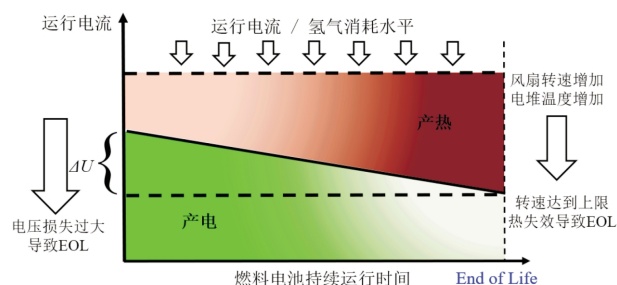
图7(c)绘制了电堆“电-热”性能变化概念图,相同的运行电流代表着大致相同的氢气消耗速度,即大致相同的能量输入量,但由于操作参数和各种空气污染物的影响,电堆的产电和产热比例逐渐发生



(a) 实验前后“电性能”对比



(b) 实验前后“热性能”对比



(c) 电堆性能下降过程中“电-热”生成情况对比

图7 200 h实验前后电堆“电-热”性能变化情况

变化,通常表现为产电量下降,产热量增加,当电压的损失 ΔU 足够大而不能满足负载需求时,电堆抵达使用寿命的终点,即End of Life(EOL);同时,当电堆的产热量大于其热设计余量时,即风扇全速旋转仍旧无法将电堆的温度维持在稳定值时,电堆将由于热失效而抵达使用寿命的终点,因此在空冷燃料电池的热管理系统设计时,需要考虑由于长时间运行带来的热负荷增长而在进行风扇风量选择时,保留有足够的余量。

4 结论

本文针对无人机用空冷型开放阴极质子交换膜燃料电池开展了模拟飞行测试和200 h长时间运行测试,获取了电堆经过长时间运行后输出电压产生下降的真实数据,分析了主要空气污染物水平对电堆性能的影响,并从能量转换的角度分析了实验前后电堆电热生成效率的变化。本文的主要结论如下:

(1)通过将燃料电池的输出功率设计在合理的水平,氢燃料电池发电系统能够支持无人机实现3 h以上的续航。

(2)入口压力的下降将显著影响燃料电池的性能,其所带来的性能损失远大于电堆真实的老化和寿命下降。

(3)在完全自然的环境下经过200 h的长时间运行后,电堆的输出电压下降12.12%。在此过程中,电堆的性能与空气污染物水平呈现较为明显的相关关系,而在空气质量指数小于50的17 h内,电池性能未出现明显下降。

(4)电堆在自然环境条件下长时间运行后,其发电效率会下降。具体表现是,在相同的电流密度下,氢气的消耗速度一致而发电量减少,产热量增加,这将导致无人机续航能力和载重能力的下降,在极端情况下可能会导致燃料电池热失效。

参考文献:

- [1] 向锦武,马凯,阚梓,等. 氢能源无人机关键技术研究进展[J]. 航空学报, 2025(1): 1-31.
- [2] 苗宇航. 风冷质子交换膜燃料电池运行特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2021.
- [3] 易定勋. 无人机用质子交换膜燃料电池水热分布及性能研究[D]. 岳阳: 湖南理工学院, 2024.
- [4] 杜恒. 空冷型质子交换膜燃料电池堆水热分布研究及优化[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2024.
- [5] ZHANG J K, WANG C J, ZHANG A F. Experimental study on temperature and performance of an open-cathode PEMFC stack under thermal radiation environment[J]. Applied Energy, 2022, 311: 118646.
- [6] 唐嘉钰. 空冷型质子交换膜燃料电池多场耦合仿真建模与分析[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
- [7] QIU D K, ZHOU X Y, CHEN M X, et al. Optimization of control strategy for air-cooled PEMFC based on in-situ observation of internal reaction state[J]. Applied Energy, 2023, 350: 121752.
- [8] MENG X C, REN H, YANG X K, et al. Experimental study of key operating parameters effects on the characteristics of proton exchange membrane fuel cell with anode recirculation[J]. Energy Conversion and Management, 2022, 256: 115394.
- [9] 赵润贤. 空冷型质子交换膜燃料电池内部传递特性的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2021.
- [10] LUO L Z, HUANG B, CHENG Z Y, et al. Rapid degradation characteristics of an air-cooled PEMFC stack[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(6): 4784-4799.
- [11] 刘文明. 阴极开放式空冷质子交换膜燃料电池结构与性能的研究[D]. 南京: 南京大学, 2017.
- [12] 诸祥. 燃料电池空冷电堆性能和加速老化寿命的研究[D]. 南京: 南京大学, 2019.
- [13] ARAT H T, SÜRER M G. Experimental investigation of fuel cell usage on an air vehicle's hybrid propulsion system[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(49): 26370-26378.
- [14] ZENG D, GUO X Y, GUO K X, et al. Design and management of a hydrogen fuel cell powered quadrotor[C]//2023 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS). Warsaw, Poland: IEEE, 2023: 644-651.
- [15] XI F Q, SHEN Y Y, LIU S Y, et al. A 4750 hours' durability investigation of the PEMFC stack based on fuel cell hybrid vehicles conditions[J]. International Journal of Green Energy, 2024, 21(8): 1874-1885.
- [16] CONG M, WANG K, YAO N Y, et al. Study on the degradation of proton exchange membrane fuel cell under load cycling conditions[J]. International Journal of Hydrogen

- Energy, 2022, 47(91): 38736-38746.
- [17] CHU T K, XIE M, YU Y, et al. Experimental study of the influence of dynamic load cycle and operating parameters on the durability of PEMFC[J]. Energy, 2022, 239: 122356.
- [18] ZHANG F, ZU B F, WANG B W, et al. Developing long-durability proton-exchange membrane fuel cells[J]. Joule, 2025, 9(3): 101853.
- [19] 马立英, 潘文龙, 侯永平, 等. 实际运行工况下燃料电池的功率衰减规律[J]. 电池, 2025, 55(1): 19-24.
- [20] YAN Y Z, WANG B, WANG C H, et al. Novel synergistic framework design and optimization for hydrogen-electric hybrid power system in unmanned aerial vehicle applications[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2025, 11(1): 337-347.
- [21] GONG K Y, TIAN C Q, GUO Z Y, et al. Experimental investigation on the open cathode air-cooled proton exchange membrane fuel cells: Optimum operating parameters and control strategies[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2024, 60: 1134-1146.
- [22] 张丽, 石文荣, 梁琦, 等. 氢气进气压力对空冷 PEMFC 性能的影响[J]. 化工学报, 2023, 74(11): 4730-4738.
- [23] ZHAO C, XING S, LIU W, et al. Comprehensive anode parameter study for an open-cathode PEMFC[J]. Energy & Fuels, 2020, 34(6): 7582-7590.
- [24] 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(5): 1-12.
- [25] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 反应气中杂质对质子交换膜燃料电池性能影响的测试方法第 1 部分: 空气中杂质: GB/T 31886.1—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [26] NAGAHARA Y, SUGAWARA S, SHINOHARA K. The impact of air contaminants on PEMFC performance and durability[J]. Journal of Power Sources, 2008, 182(2): 422-428.
- [27] 杨代军, 马建新, 邬敏忠, 等. 城市大气污染物对 PEMFC 性能的影响[J]. 环境科学与技术, 2006(4): 106-108, 114, 121.
- [28] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 质子交换膜燃料电池 第 2 部分: 电池堆通用技术条件: GB/T 20042.2—2023[S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [29] 杨代军, 卢奕睿, 明平文, 等. 质子交换膜燃料电池原理及耐久性[M]. 北京: 化学工业出版社, 2024: 212-262.
- [30] 杨代军, 马建新, 徐麟, 等. 城市大气中 NO_x 和 CO 对质子交换膜燃料电池性能的影响研究[J]. 环境污染与防治, 2005(6): 416-419.
- [31] 王薇, 杨代军, 沈猛, 等. 氢气杂质 CO 对质子交换膜燃料电池性能影响建模[J]. 电源技术, 2009, 33(4): 329-332.
- [32] 环境保护部, 国家质量监督检验检疫总局. 环境空气质量标准: GB 3095—2012[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.
- [33] 弗朗诺·巴尔伯. PEM 燃料电池: 理论与实践[M]. 李东红, 连晓峰, 译. 北京: 机械工业出版社, 2016: 314-315.
- [34] 杨代军, 马建新, 马晓伟, 等. SO_2 气体对质子交换膜燃料电池阴极性能的影响[J]. 高等学校化学学报, 2007(4): 731-734.
- [35] SHAHSAVARI S, DESOUZA A, BAHRAMI M, et al. Thermal analysis of air-cooled PEM fuel cells[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(23): 18261-18271.
- [36] MEYER Q, RONASZEGI K, PEI-JUNE G, et al. Optimization of air cooled, open-cathode fuel cells: current of lowest resistance and electro-thermal performance mapping [J]. Journal of Power Sources, 2015, 291: 261-269.