http://bhxb.buaa.edu.cn jbuaa@buaa.edu.cn
DOI: 10.13700/j.bh.1001-5965.2025.0796

燃料电池航空动力谱系——重塑零碳飞行新格局

李致朋[1,*]，高子博[1]，刘伟栋[1]，彭飞扬[1]，刘鸿[1]，韩庆[2]

(1. 西北工业大学 柔性电子研究院，西安 710072；2. 西北工业大学 航空学院，西安 710072)

摘 要：在全球航空业加速推进碳中和的背景下，燃料电池航空推进系统凭借高能效和零碳排放等优势，成为替代传统燃油动力的关键方向之一。该研究聚焦质子交换膜燃料电池(PEMFC)与固体氧化物燃料电池(SOFC)，系统梳理了两类燃料电池的工作原理、系统架构、关键技术瓶颈及适用场景，并从能量载体类型、功率特性、使用寿命及环境效益等多个方面，与锂电推进系统进行了比较分析。结果表明，PEMFC更适合用于短途及支线航空，而SOFC则在长航时任务中展现出显著潜力。尽管目前在储氢、热管理、系统集成与成本方面仍存在挑战，燃料电池航空动力系统通过结构优化与混合能源架构的持续发展，预期将在续航能力与减排效果等方面获得显著提升，有望成为支撑绿色航空转型的重要技术途径。

关 键 词：燃料电池；航空；固体氧化物燃料电池；质子交换膜燃料电池；可持续航空；混合动力系统

中图分类号：V237; TM911.4

文献标志码：A **文章编号**：1001-5965(2026)10-3369-27

在全球加速推进碳中和的背景下，航空业作为碳排放大户，年排放 CO_2 约 9.3×10^{11} kg，占全球交通运输领域碳排放的12%，面临着深度脱碳的严峻压力[1]。为应对此挑战，国际民航组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)推出了“国际航空碳抵消与减排计划”(Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation, CORSIA)，旨在推动行业采用可持续航空燃料(sustainable aviation fuel, SAF)、引入先进低碳推进技术，并优化航线管理[2]。然而，当前主流减排路径仍存在显著局限：SAF全球使用比例不足1%，面临规模化应用瓶颈[1]；纯电池推进系统虽技术成熟，但其能量密度(约300 Wh/kg)难以满足高航程与大载重需求[3]。

因此，发展与应用新型替代推进系统已成为行业迫切需求。在此背景下，燃料电池航空推进系统凭借其高能效、零碳排放和燃料灵活性等优势，被视为替代传统燃油动力的重要技术方向[4]。质子交换膜燃料电池(proton exchange membrane fuel cell, PEMFC)与固体氧化物燃料电池(solid oxide fuel cell, SOFC)是2种最具代表性的技术路线。PEMFC系统效率通常可达50%以上，具有快速启动、高功率密度等特点[5]；SOFC本身发电效率可达65%以上，其与燃气轮机(gas turbine, GT)构成的混合系统SOFC-GT热效率可进一步提高至80%左右[6-7]。此外，燃料电池能量密度可达1 000～1 500 Wh/kg，远高于锂电池，能更好地适配航空业对质量的敏感性[8]。

目前，基于PEMFC-锂电池的混合动力系统已被应用于小型无人机与短途通勤飞机[3]。而SOFC凭借其高温工作特性与多燃料兼容性，在大型无人机和干线客机中展现出潜力[9]。尽管在储氢、热管理、系统集成和成本等方面仍面临挑战，但通过结

收稿日期：2025-11-17；**录用日期**：2025-11-28；**网络出版时间**：2025-12-17 19:07

网络出版地址：link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20251217.1313.001

基金项目：中央高校基本科研业务费专项资金 (D5000230358)；陕西省重点研发计划 (2024GX-YBXM-456)

* **通信作者**. E-mail：iamzpli@nwpu.edu.cn

引用格式：李致朋，高子博，刘伟栋，等. 燃料电池航空动力谱系——重塑零碳飞行新格局 [J]. 北京航空航天大学学报，2026，52（10）：3369-3395. Li Z P，Gao Z B，Liu W D，et al. Fuel cells for aviation: a new paradigm for carbon-neutral flight[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics，2026，52（10）：3369-3395（in Chinese）.

构优化与发展混合能源架构，燃料电池航空动力系统的续航能力与减排效果有望获得显著提升，从而成为支撑绿色航空转型的重要技术途径。

本文旨在系统分析PEMFC与SOFC的工作原理、系统架构、关键技术及适用场景，并从能量载体、功率特性、寿命及环境效益等维度，与锂电推进系统进行对比。此外，鉴于航空动力系统的设计与应用场景紧密相关，本文将进一步界定各项技术挑战的具体应用边界，从而阐明PEMFC与SOFC在从城市空运到干线飞行的任务谱系中，各自的适配路径与核心瓶颈。

1 燃料电池航空动力系统

燃料电池凭借其高能效、低排放和高度可扩展的特性，被视为推动航空业绿色转型的关键技术。燃料电池航空动力系统是实现这一目标的核心，其性能与可靠性直接决定了飞行器的可行性。该系统绝非简单的燃料电池电堆，而是一个高度集成的复杂工程体系，由电堆、燃料供给、氧化剂供给、热管理、水管理及功率控制等关键子系统精密耦合而成。PEMFC动力系统和SOFC动力系统架构分别如图1和图2所示。深刻理解这些子系统的基本构成、功能及其相互作用，是设计和优化整个动力系统的基石。

1.1 燃料电池电堆

燃料电池动力系统的核心是燃料电池电堆，其是实现化学能向电能高效转换的关键单元，目前，主要的技术路线包括PEMFC和SOFC，无论哪种技术路线，其电堆均由多个单电池串联堆叠而成，以满足不同功率需求，如图3所示。PEMFC的单电池由双极板、膜电极组件（membrane electrode assembly，MEA）和密封件构成。其中，双极板负责气体分配、电流收集并提供结构支撑；MEA则由质子交换膜、催化剂层和气体扩散层组成。质子交换膜仅允许质子通过，构建质子传导通道；催化剂层以贵金属铂为主，用于降低反应活化能；气体扩散层由碳布制成，用于支撑催化剂层及传输气体和电子[10]。而SOFC的单电池则由致密的氧化物陶瓷电解质、多孔的阴阳极和连接件组成，通常采用电解质支撑或阳极支撑结构。其高达600～1 000 ℃的运行温度，能显著提升电解质离子传导速率与电极反应活性，这一特性使SOFC无需使用贵金属催化剂，从而大幅降低了成本。金属或陶瓷连接件负责电流收集和单电池串联[11]。2种电堆均通过端板、拉杆或壳体提供机械压紧力，保障组件间良好的电接触与气密性，防止气体泄漏和短路现象[12-13]。

1.2 燃料储存与供给系统

燃料存储与供给系统的核心功能在于持续、稳定且安全地向燃料电池电堆提供符合其严格运行参数要求的燃料气体。在纯氢供给系统中，核心存储设备为高压储氢容器。氢气通过多级减压装置逐步降低压力至电堆所需的入口水平。精密流量控制阀依据电堆功率需求，精确调节氢气供给流量[12]。系统集成了压力传感器、温度传感器、吹扫阀、安全泄放阀、紧急切断阀等安全装置与监测元件，并通过专用氢气管路确保密封性。为提高燃料利用率，通常配备氢气循环泵或引射器，将电堆阳极出口尾气中的未反应氢气循环输送至电堆入口[13]。对于PEMFC，燃料气体通常需要加湿处理，以防电堆内的质子交换膜干燥，从而确保质子传导效率。加湿器通常集成在循环回路或主供气管路中，用于将燃料气体的湿度提升至电堆要求的水平。SOFC使用纯氢燃料时，燃料管路中通常需注入体积分数为3%～10%的水蒸气来抑制阳极镍颗粒的粗化（Ostwald熟化）过程，维持其微观结构稳定性，水蒸气供给一般通过蒸汽发生器或尾气循环模块实现[14]。当系统使用碳氢燃料（如汽油、柴油或天然气）时，需集成燃料重整子系统。液态燃料由燃料泵增压输送，气态燃料则由压力调节器稳定供给。燃料首先进入脱硫单元，该单元通常采用氧化锌脱硫剂吸附脱除硫化物，以防止下游催化剂中毒。净化后的燃料随后在重整反应器转化为主要成分为氢气和CO的富氢合成气。合成气中的CO需进一步净化处理，通过水气变换反应器，利用催化反应将CO体积分数大幅降低至1%以下。对于要求严格的PEMFC，还需通过CO深度净化设备降至低于10 ppm（12.5 mg/m^3）级别，以避免电堆催化剂中毒[15]。净化后的富氢气体流经换热器，并通过包含控制阀的配气系统精确调节其流量与温度后供给电堆。同样，对于PEMFC电堆，此最终供给的富氢合成气通常也需要进行加湿处理，以满足其燃料侧对湿度的严格要求。若SOFC直接使用碳氢燃料，则需维持高水碳比防止积碳，同样通过蒸汽发生器或尾气循环模块供给水蒸气，以防止重整过程及阳极内部发生积碳[16]。

1.3 氧化剂供给系统

氧化剂供给系统的核心任务是向电堆阴极提供足量的氧气（通常来自空气）并维持适当压力。对于PEMFC，通常需要较高的工作压力来维持质子交换膜的水合状态和中低温运行，因此，多采用效率较高的离心式空压机或压比可调的螺杆式空压机。空压机是辅助系统中耗能最大的部件，其能

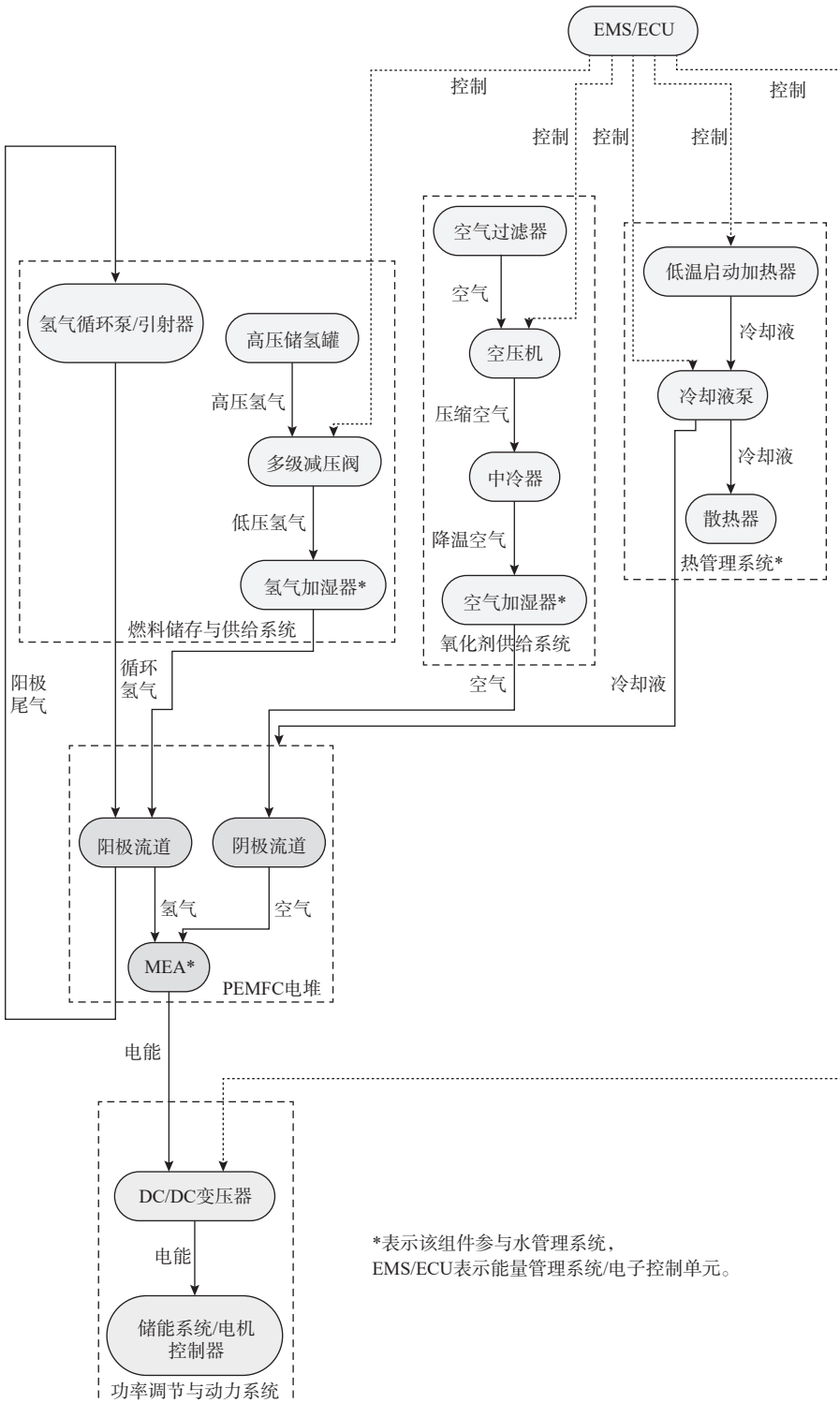


图 1　PEMFC 动力系统架构

Fig. 1　PEMFC power system architecture

耗最高可达电堆输出功率的 30%[17]。相比之下, SOFC 在高温下运行, 阴极侧压力要求较低, 接近常压, 因此, 多选用结构更简单且能耗更低的鼓风机或罗茨风机。净化后的气流由空气过滤器处理, 流量计负责实时监测其流量[18]。对于 PEMFC, 压缩后的高温空气需要经过中冷器降温, 并由加湿器调节湿度以确保质子交换膜充分水合。SOFC 则利用空气预热装置回收尾气余热来提升进气温度, 通常无需额外加湿。背压阀用于稳定整个系统的工作压力。温度传感器、压力传感器和湿度传感器等关键传感器部署在压缩机出口、热交换器、电堆入口及背压阀等关键位置, 提供实时状态反馈。整个系统在闭环控制策略下运行, 依据传感器数据和负载需求, 动态调节空压机或风机的转速、背压阀的开度、加湿量或预热功率等参数, 确保为电堆持续稳定地提供压力、流量、温度、湿度及洁净度均符合要求的氧化剂[19]。

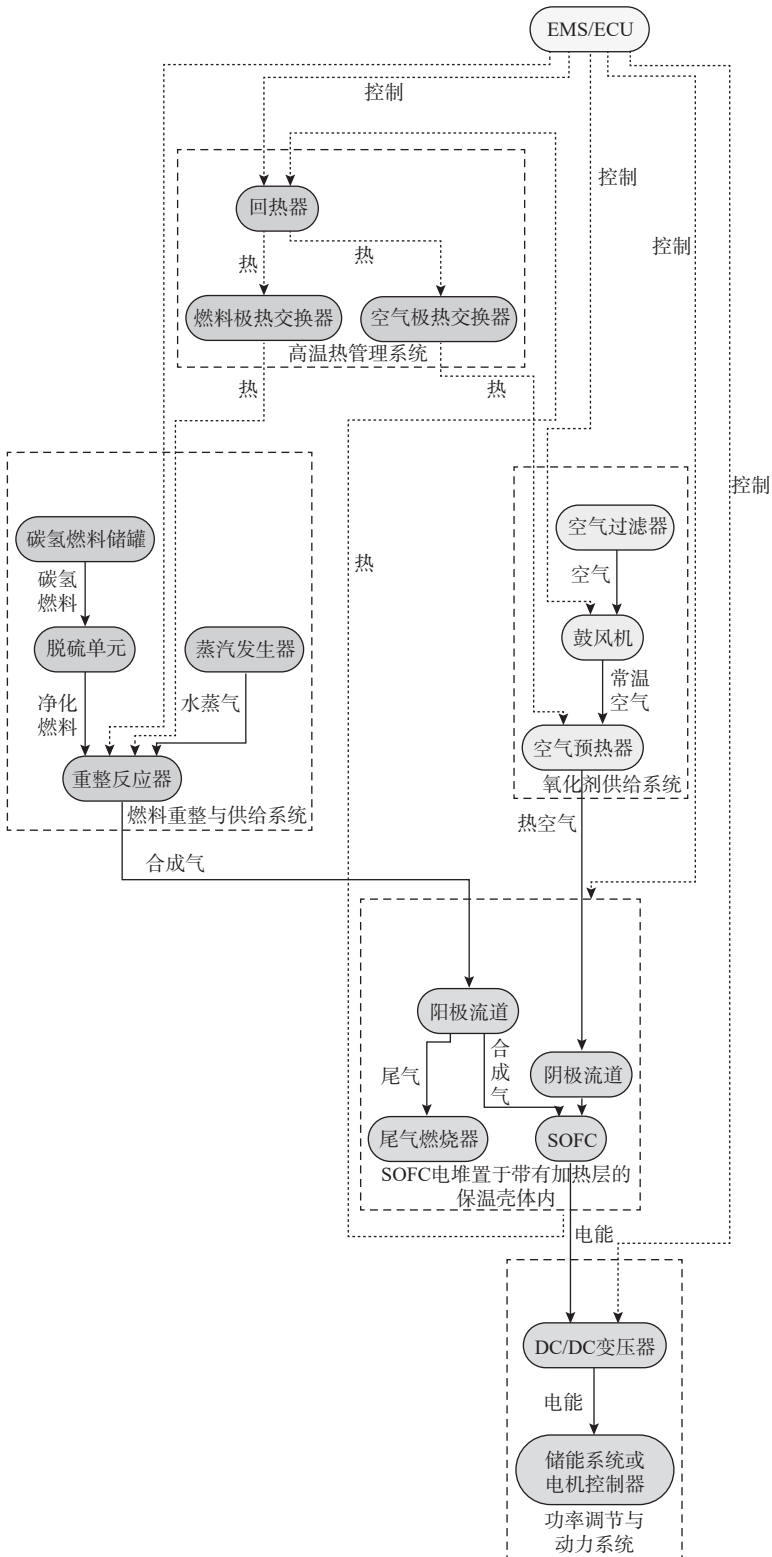
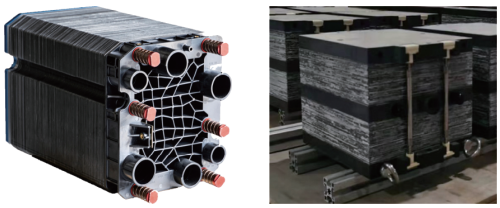


图2 SOFC动力系统架构

Fig. 2 SOFC power system architecture

1.4 热管理系统

热管理系统是保障燃料电池电堆高效、可靠及长期稳定运行的核心子系统，其设计策略因电池类型固有的工作温度与电化学特性差异而迥异。在PEMFC中，较低的工作温度区间（60～80 ℃）结合其实际运行中存在的输出电压损失，导致约40%～60%的能量以废热形式释放。加之其运行温度逼近膜脱水临界点且关键材料耐热性有限，实现电堆内部高效且均匀的热量散失成为热管理的首要目标，以防止性能衰减或材料失效[20]。为此，PEMFC普遍采用液冷方案，核心在于由循环泵驱动冷却介质流经精密集成于双极板内部的冷却流道，直接带



(a) AIR LIQUIDE生产的 20 kW PEMFC电堆　　(b) 索福人生产的 5 kW SOFC电堆

图 3　PEMFC 与 SOFC 电堆实物图

Fig. 3　Photographs of PEMFC and SOFC stacks

走反应热量。该系统还包含散热器、膨胀水箱、维持冷却液绝缘性的去离子装置、用于低温启动的电加热器、多点温度传感器及根据实时工况动态调节冷却强度的控制系统。SOFC 系统则呈现截然不同的热管理逻辑, 其运行在 600～1 000 ℃ 的极高温度下, 实际系统效率通常在 40%～60% 之间, 在此高温下产生的大量废热具有极高的品质[21]。因此, SOFC 热管理的核心挑战在于利用高性能保温材料严密隔绝电堆, 以最小化热损失并维持运行温度。同时, 通过燃烧器处理未反应燃料产生高温排气, 并借助空气预热器、燃料预热器、蒸汽发生器(为燃料重整提供蒸汽)及利用废热驱动的燃料重整器等热回收装置, 深度利用电堆与排气中的高品位余热, 以提升系统总能效。对于发电应用, 该热能还可进一步驱动蒸汽轮机实现联合循环。整个高温系统的稳定运行, 高度依赖复杂控制系统对热平衡的精准管理[22]。

1.5　水管理系统

水管理系统是保障 PEMFC 稳定运行的核心子系统, 通过协调电池内部水的生成传递与相态转换过程, 解决质子交换膜充分水合维持高质子传导率与阴极液态水积聚阻碍反应气体传输之间的固有矛盾[23]。该系统的实现深度集成于电堆相关子系统。膜内水的平衡通过两种相反的传输过程实现。在电渗拖拽效应下, 水随质子由阳极向阴极迁移; 与此同时, 阴极侧的水则依赖膜内水含量(λ, H_2O/SO_3H)梯度向阳极反向扩散, 对阳极侧形成补水。阳极侧水合保障直接由燃料供给系统集成于管路的加湿装置实现, 该加湿器向氢气注入水分以补偿电渗拖拽引发的水损失。阴极侧湿度调控则由氧化剂供给系统配置的空气加湿器执行, 该单元协同中冷器温度调节功能精准抑制过量冷凝水生成[24]。液态水管理依托三重机制协同作用, 紧贴催化剂层的气体扩散层经疏水改性在微孔域构建毛细压力梯度, 持续驱动液态水脱离催化剂活性位点。双极板表面精密加工的蛇形或交指构型流道利用高速气体流动剪切力剥离电极界面附着液滴, 并将游离液体定向输送至集水区[25]。最终由电堆外壳低点集水区配置的排水阀实时响应流道进出口压差传感器信号, 主动清除积聚液体。热管理系统通过冷却液温度场调控水的饱和蒸气压, 既联动氧化剂供给系统中冷器功率防止低温工况水淹恶化, 又联动燃料供给系统燃料温度规避高温膜脱水风险。闭环控制策略基于湿度传感器、压差传感器、温度传感器及单电池电压监测网络反馈, 动态优化反应气体化学计量比、系统背压设定值及双路加湿单元的输出量[26]。

而 SOFC 运行于 600～1 000 ℃ 高温环境, 生成水以蒸汽相态随尾气自然排出, 无液态水管理需求, 系统复杂性显著降低。

1.6　功率调节与动力系统

燃料电池动力系统的功率调节与控制系统是实现电堆与驱动负载之间高效能量传递与动态协调的关键环节。该系统主要由电力转换单元和控制系统两大部分构成, 并通过集成化的功能设计, 确保动力系统稳定、高效、安全地运行。

电力转换单元负责处理电能形式, 以满足负载需求。其中, DC/DC 转换器将电堆随工况动态变化的输出电压进行宽范围升压或降压, 稳定至动力总线的标称电压, 为驱动电机控制器或高压储能系统提供稳定直流电。若负载采用交流电机, 则需通过 DC/AC 逆变器将直流电转换为频率、幅值及相位精准可控的交流电。

控制系统包括专用控制器、多传感器网络及执行机构, 构成一个闭环架构。其持续采集并融合电堆单体电压/电流、温度分布梯度、反应气体流量压力及冷却回路参数等关键数据。通过执行分层控制策略, 以实现空压机转速、氢气供给阀开度、冷却液流量及功率转换器工作点的精细化动态协调并管理包括冷热启动、恒功率运行及负载跟随等多种模式的无扰切换。依托实时诊断触发涵盖过压限流、低温吹扫与气体饥饿防护等的多级安全保护机制, 并运用自适应氧化学计量比控制及温度-压力协同寻优等策略, 最大化系统净输出功率。该系统的控制精度、动态响应速度及鲁棒性, 直接决定了动力系统的输出稳定性、瞬态负荷适应能力、故障容错水平及电堆整体耐久性[27-28]。

2　PEMFC 航空动力系统

2.1　PEMFC 技术原理与特点

PEMFC 是一种基于电化学原理、直接将氢气的化学能转化为电能的装置。其核心在于利用质子交换膜(如 Nafion®膜)在 60～80 ℃ 的低温环境

下传导质子，从而实现高效发电[29]。其工作原理如图4所示，在阳极上，氢气在催化剂作用下氧化分解为质子(H^+)和电子(e^-)。质子通过膜内的水合通道迁移至阴极，而电子则经由外电路形成电流做功。最终在阴极上，氧气与抵达的质子及电子结合生成水并释放能量。这一独特的低温运行机制，既奠定了PEMFC高效率和快速响应的基础，也使其运行严重依赖膜的良好水合状态。因此，水热管理的平衡至关重要。

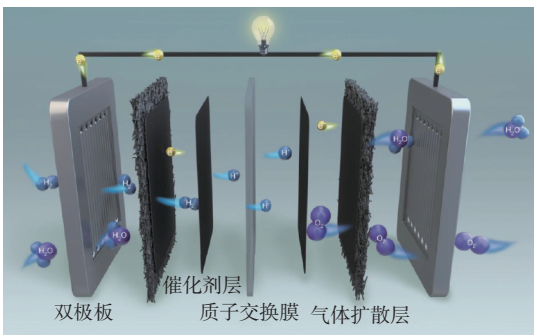


图4 PEMFC工作原理图[30]

Fig. 4 PEMFC schematic diagram[30]

基于该原理，PEMFC展现出高功率密度、高能量效率及快速响应等核心优势。目前，量产的功率密度已达4.4 kW/L(堆级，含端板)，2030年路线图目标指向6 kW/L以上，这得益于纳米级催化剂的应用和结构的创新[31]。通过直接的电化学反应，其电能转换效率高达50%～60%；在热电联产(combined heat and power, CHP)模式下，通过回收利用系统产生的低品位废热(如用于供暖或预热)，其综合能源利用率可超过80%，远超传统热机[32]。此外，低温运行使其具备数十秒内快速启动和对负载变化毫秒级响应的能力，特别适合动态应用场景[33-34]。

然而，该技术也面临固有挑战。一方面，其对燃料纯度极为敏感，微量的CO等杂质即可导致催化剂严重中毒，通常要求氢气纯度高于99.97%，或需开发抗毒催化剂[35]。另一方面，水热管理极具复杂性，必须在运行中精准平衡膜的湿度，既要防止脱水导致电阻增大，又要避免水淹阻碍气体传输，这对系统控制提出了持续性的高要求。这些基本特点与挑战共同构成了PEMFC技术应用于航空领域的出发点与基础。

2.2 PEMFC系统的核心优势

PEMFC技术凭借其独特的工作特性，在航空动力领域展现出显著的多维优势，为其应用奠定了坚实基础。其核心竞争力源于4个方面，即经过验证的技术成熟度、卓越的动态响应特性、优异的功率性能和卓越的环境兼容性。

首先，技术成熟度高，可靠性经过验证，大幅降低了航空应用的开发风险。PEMFC并非停留在实验室阶段的概念性技术，而是在汽车与固定式发电领域已实现大规模商业化应用的成熟平台。丰田Mirai、本田Clarity等量产车型的长期稳定运行，积累了海量的工程经验与宝贵的耐久性数据，其电堆寿命突破1万小时已成为行业标杆。这种经过实践检验的可靠性，为技术移植到航空领域提供了强有力的保障。一个典型的成功案例是H2Fly的HY4验证机项目，为其提供PEMFC系统的Hydrogenics公司同样为汽车提供燃料电池动力系统，如图5所示。该型飞机成功获得了斯图加特机场所在地航空监管机构的试飞许可，这充分表明，利用成熟技术极大缩短了概念到原型的研发周期[36-37]。



(a) 搭载Hydrogenics公司燃料电池系统的公交车



(b) HY4验证机搭载的PEMFC系统

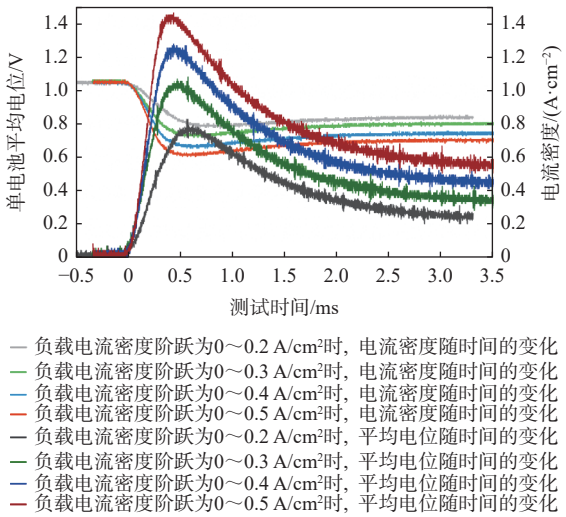
图5 PEMFC动力系统从车用领域向航空领域的迁移应用

Fig. 5 Migration of PEMFC power systems from automotive to aviation applications

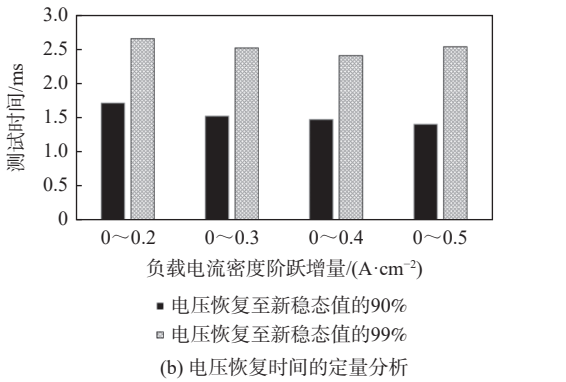
其次，卓越的动态响应能力是PEMFC适应航空复杂工况的关键特性。系统具备极快的启动速度与功率调节能力，即使在−30 ℃的低温环境下，亦可在30 s内完成冷启动，并在数分钟内达到额定功率[38]。面对负载的剧烈波动，如飞机起飞阶段功率需求的阶跃上升，PEMFC展现出优异的瞬态响应特性。在美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Adiministration, NASA)的测试中，当电流密度在0～0.5 A/cm^{2}范围内发生阶跃变化时，端电压在3 ms内即可从初始跌落恢复至对应新稳态值的90% [39]，如图6所示。该性能显著优于存在惯性延迟的燃气涡轮发动机，尤其适用于无人机频繁起降及载人飞机爬升加速等对动力响应要求严苛的场景。

此外，在功率密度方面，PEMFC展现出可持续竞争力。当前航空级系统的功率密度已达1.5 kW/kg(系统级，不含储氢设备)，通过纳米级Pt-Co合金催化剂优化电化学活性面积，以及使用新型高温质子交换膜，未来功率密度有望达到3 kW/kg(系统级，不含储氢设备)，逐步接近传统涡桨发动机水平[40-41]。

最后，在环境兼容性方面，当采用可再生能源制取的绿氢为燃料时，系统全生命周期可实现近零碳排放。此特性完全契合欧盟“净零航空”战略目标，不仅助力航空业深度脱碳，更能有效规避日



(a) 负载阶跃下的动态响应过程



(b) 电压恢复时间的定量分析

图 6　PEMFC 的毫秒级瞬态响应性能[39]

Fig. 6　Millisecond-scale transient response performance of PEMFC[39]

益严格的碳边境调节机制带来的贸易壁垒, 为运营商创造长期合规性与市场优势。

2.3　航空 PEMFC 系统设计关键

将 PEMFC 技术应用于航空领域, 必须解决一系列极端环境下的工程挑战。这些挑战的严峻程度与技术侧重点因飞行器的运营场景而异。本节聚焦于氢气存储、水热管理、高空空气供给及系统集成与轻量化四大关键技术瓶颈。

2.3.1　氢气储存方案

氢气储存是实现氢能航空的核心, 是所有氢动力航空器共同面临的基础性挑战。储氢技术的选择, 直接关系到飞行器的有效载荷与航程能力, 而不同应用场景(如小型无人机与大型客机)对能量密度、安全性和技术成熟度的需求侧重点截然不同。当前, 各技术路线均面临如何平衡高能量密度需求与储氢系统自重、体积及安全性之间的紧张关系。不同应用场景需依据其航程与规模, 做出不同的技术取舍。

70 MPa 高压气态储氢技术成熟度高, 适配现有加氢基础设施。但其发展受限于一个基本物理约束: 储氢量与压力成正比。为确保高压安全, 所需的容器壁厚与质量会随压力非线性增长。这导致系统质量储氢密度提升存在瓶颈, 使其更适用于对储氢密度要求不高的小型无人机或中短期内的实验型客机, 无法应用于大型远程氢能飞机[42]。此外, 氢气极易爆炸, 必须配备严密的泄漏监测、压力泄放和碰撞防护等安全措施, 这些措施不可避免地提高了系统质量和复杂度[32]。目前, 该领域的技术进展主要聚焦于通过先进复合材料和优化结构设计来减轻储罐自重, 属于工程层面的渐进式改进。

液氢存储方案能提供更高的能量密度, 是未来支线及干线飞机实现长航程的必然选择。研究表明, 采用液氢方案可使飞机最大起飞质量较传统方案降低 3.5%～11%[43]。然而, 液氢需要维持−253°C 的超低温环境, 面临着蒸发损失(每日质量损失率约 3%～5%)、材料低温脆化及系统复杂性等严峻挑战[43]。因此, 未来的技术发展必然指向高性能真空多层绝热结构、低漏热连接技术及耐低温材料和部件的深度研发, 以构建一个高效、可靠且轻量化的机载液氢存储与管理系统。

固态储氢技术凭借其高体积储氢密度与本质安全特性, 被视为极具潜力的氢储运方案。其根本瓶颈在于储氢材料的热力学与动力学性质, 目前, 具备实用性的主要是 AB_5、AB_2 型等金属氢化物, 但其质量储氢率通常<2.5%。而高容量的轻质材料如镁基合金(MgH_2, 7.6%)、配位氢化物(如 $NaAlH_4$, 5.6%)面临着放氢温度高、动力学缓慢及循环性能差等关键技术瓶颈[44]。当前, 固态储氢已在分布式储能等场景中得到示范应用, 但其系统质量储氢密度与快速响应能力距航空动力系统的大规模商用要求仍有显著差距。因此, 该领域的技术突破有赖于材料科学的创新, 重点在于降低储氢材料反应势垒、增强结构稳定性, 并同步开发与之匹配的高效传热传质储氢罐设计[44]。

2.3.2　水热管理

PEMFC 低温运行的特性使其水热管理在航空极端环境下变得尤为关键与复杂。其根本矛盾源于膜电极对精确水热环境的稳态需求与飞行全剖面中温度、压力剧烈动态变化之间的持续冲突。

在热管理方面, 挑战的核心是 PEMFC 产生的低品位废热与机上热需求(如客舱供暖、进气预热)在品位和时序上的不匹配。为提升系统能量利用效率, 通常需要设计紧凑式换热器回收电堆废热。然而, 热源与负荷在品位和时序上的不一致常导致供需失衡与能量损失[45-46]。因此, 未来的技术路径需超越简单的热回收, 转向基于热需求预测的智能

热流分配系统，并探索集成相变材料的缓冲单元，以实现能量的高效管理与利用。

结冰风险是航空PEMFC在低温环境下面临的独特挑战，对需在高空或寒冷地区运行的飞机尤为严峻，贯穿于启动与运行全程[47]。其本质是反应生成水在低温驱动下发生的相变失控。在冷启动阶段，阴极生成水易在气体扩散层孔隙中凝结并冻结，直接阻塞气体传质通道，导致冰堵。为应对该风险，需采取多级防护策略。在材料层面通过聚四氟乙烯（polytetrafluoroethylene, PTFE）改性气体扩散层，降低材料表面张力，以延缓结冰进程[48]。在系统层面，则需依赖电加热膜提供快速解冻能力，并执行阳极吹扫策略，利用干燥气体在启动和关闭阶段清除电堆内残留水分。此外，极端低温会威胁冷却回路的安全性，需添加低电导燃料电池专用防冻液。但工质流动特性的变化可能影响散热效率，需重新优化冷却系统设计。

PEMFC的水管理同样是低温运行的关键瓶颈，其核心矛盾在于水的分布与传输平衡。低温会削弱膜的水合能力，若湿度不足，将导致质子交换膜脱水，显著增大电阻，而阴极过量的液态水又会引发水淹，阻碍氧气传输[49]。这构成了膜脱水需求与电极防水淹要求之间的精细权衡。解决这一矛盾，必须通过高精度湿度传感器实时监测，并结合动态流量与湿度控制算法，精准调节反应气体的供给，以实现水在生成、电渗迁移与排出之间的动态平衡。这种精细化控制显著提升了系统的复杂性与技术难度。

2.3.3 高空空气供给系统

空气供给系统是PEMFC系统维持阴极侧氧化剂供应的关键，其性能直接决定电堆的输出能力。其核心矛盾在于满足电堆阴极反应所需的高质量氧化剂与为此在高空低密度、含污染大气环境中付出的巨大辅助功耗代价之间的权衡。

在支干线客机及大型无人机巡航阶段（通常高于6 000 m），随着飞行高度增加，大气密度与压力持续下降（高度每升高1 000 m，空气密度降低约11%），这使阴极测氧分压不足。为维持电堆高效运行，空压机必须提升压比或流量，导致其功耗急剧增加，有时可占电堆输出功率的30%以上[17]。因此，补偿性能衰减与抑制寄生功耗激增的矛盾成为制约系统的净输出效率与高空适用性的关键。在该背景下，离心式空压机凭借其高功率密度和快速动态响应（转速可达10^5 r/min以上），成为应对高空低压环境的首选方案[50]。提升空压机整体效率的关键在于优化其高速永磁同步电机的效率与流道气动设计[51]。在系统层面，则需通过采用更高压比（如采用多级压缩中间冷却技术）或引入涡轮增压技术等具备排气能量回收的复合增压方案，实现能量的梯级利用，从而系统性地提升高空工作条件下的总效率[52]。

对于在万米高空巡航的干线客机，其PEMFC的空气供给系统面临高空大气环境中的臭氧与悬浮颗粒物带来的独特挑战。高空臭氧具有强氧化性，促使阴极铂催化剂发生溶解，溶解后的铂物种迁移并在膜内再沉积，导致电化学活性面积减少并阻碍质子传导。同时，臭氧会攻击气体扩散层中的PTFE，削弱其疏水功能，从而影响水管理效率。此外，臭氧还可能诱发自由基反应，加速聚合物电解质膜的化学降解与碳载体腐蚀，共同导致电池性能的不可逆衰减[53]。大气中的细颗粒物则可能堵塞气体扩散层孔隙，阻碍反应气体传输，导致浓差极化加剧。

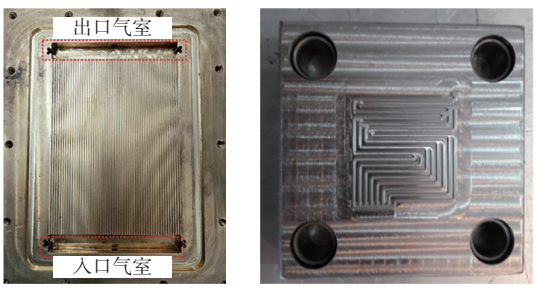
上述问题构成了进气净化需求与最小化附加流阻之间的矛盾。提高过滤精度与层级虽能有效去除污染物，但也会增加进气压降，反向增加空压机负载，降低系统净输出[54]。解决这一矛盾的核心在于发展低阻高效的多层净化方案。系统需配备集成式多级过滤装置。首层采用粗效滤网拦截大粒径颗粒，中间层布置高性能活性碳纤维毡（比表面积达1 500～2 000 m^2/g），通过物理吸附与催化氧化作用高效去除臭氧，末级采用纳米纤维膜（孔径为0.1～1 μm）实现亚微米级颗粒的精滤[55]。为优化流阻性能，需依托计算流体力学仿真，对滤材结构形态与流道布局进行设计优化，在保证污染物截留率的前提下，最大限度降低进气阻力。同时，可集成实时压差与污染物浓度监测模块，依据环境空气质量动态调整过滤策略，从而在保障电堆长期稳定运行的同时，维持系统整体运行效率。

2.3.4 系统集成与轻量化

PEMFC动力系统在飞行器上的成功应用最终取决于能否通过高度集成的设计，在满足极致轻量化要求的同时，确保其高可靠性与可维护性。这一系统级工程所面临的根本矛盾在于，飞行器对动力系统性能、质量、体积的极限追求，往往与系统的工程可靠性、可维护性及全生命周期成本产生直接冲突。化解这一矛盾，需要从部件创新与系统架构2个层面协同推进。

在部件层面，轻量化目标的实现主要依赖于微纳尺度结构设计与先进材料的应用，以突破传统技术条件下的性能与质量瓶颈。其中，微通道技术发挥着关键作用。例如，在热管理方面，采用微通道

的冷却板(通道宽度通常为 20～200 μm, 见图 7(a)), 可利用其巨大的比表面积与流动沸腾传热机制, 可在有限体积内高效排除电堆产生的热量。并通过内置孔板或挡板等优化结构保障冷却工质分布的均匀性, 对维持电堆温度一致性具有关键作用。同样, 在反应气加湿方面, 微通道式换热/加湿器依托类似的强化传热传质原理, 在实现高效加湿与热交换的同时, 显著缩减部件体积, 较传统设计可减少 50% 以上。与此同时, 材料与结构创新是轻量化的另一重要支柱。采用超薄金属双极板替代传统石墨板, 并借助化学蚀刻或激光加工技术在其表面加工精密流道, 如图 7(b) 所示, 可大幅降低电堆核心部分的质量。发展一体化气体扩散层设计, 如通过激光雕刻在碳纸基材上直接制备出集成波形流场与微通道脊结构。这种设计不仅强化了反应气体的传输与液态水的排出, 有助于缓解高电流密度下的水淹现象, 更能降低系统流阻, 从而间接减少辅助系统的功耗[56]。



(a) 微流道冷却板[57]　　(b) 微流道双极板[58]

图 7　基于微通道的轻量化燃料电池部件[57-58]

Fig. 7　Microchannel-based components for fuel cell lightweighting[57-58]

然而, 若极致的轻量化与高度集成设计缺乏系统层面的顶层设计考量, 往往会以牺牲可维护性和升级潜力为代价。因此, 在系统架构层面引入模块化设计理念, 是平衡上述矛盾、满足航空严苛运营要求的关键路径。模块化通过将整个系统按功能划分为相对独立的子模块(如电堆、空气供应、热管理、控制等), 并定义标准的机械、电气与流体接口, 实现了物理与功能的解耦。这种架构对于维护窗口短、系统复杂度高的支线及干线客机尤为重要。在实际执行中, 采用快速连接器与法兰式固定结构可实现关键模块的快速拆装, 大幅提升维护效率。在开发流程上, 坚持“先独立验证, 后系统集成”的策略, 通过预先完成各模块的测试以确保其接口兼容性与功能完整性, 从而从源头控制系统级风险, 奠定高可靠性的基础。

综上所述, PEMFC 动力系统凭借其低温快速启动、毫秒级动态响应及高功率密度等特性, 在航空脱碳领域展现出独特的应用价值。其核心竞争力不仅源于兼容绿氢的零排放潜力、模块化架构带来的高维护性, 更得益于已在汽车领域得到验证的技术成熟度。然而, 如前述各子系统分析所述, 将其成功应用于航空器仍面临严峻挑战。储氢系统需在有限质量与体积内实现超高能量密度; 水热管理必须在动态环境中维持膜电极精准的水合与温度平衡; 空气供给系统面临补偿高空低压、净化污染物与控制寄生功耗之间的艰难权衡; 而系统集成则需在极致轻量化与高可靠性、可维护性之间寻求最优解。未来的技术发展, 必须超越对单一问题的应对, 转而沿着轻量化/高密度储氢、智能水-热协同管理、高效低阻空气供给及模块化集成等系统性路径进行协同攻关, 才能使 PEMFC 动力系统在无人机及城市空中交通领域实现规模化应用。

3　SOFC 航空动力系统

3.1　SOFC 技术原理与特点

SOFC 是一种将燃料化学能直接、高效转化为电能的全固态能量转换装置, 主要由阳极、阴极和电解质 3 部分组成。其核心特征在于高温运行(通常为 600～1 000 ℃)。该温度下, 电解质材料的离子电导率显著提升, 阴阳极的电化学反应阻力显著降低。这一特性是成就其超高效率与燃料灵活性的基石, 也决定了其技术范式更适用于对效率极为敏感、而对快速启动要求相对宽松的中远程航空动力系统。

其工作原理如图 8 所示。以氢气作为燃料气为例, 氢气先吸附于阳极表面, 再经多孔阳极扩散至阳极与电解质的界面。同时, 空气里的氧气在阴极吸附, 变成氧离子, 随后在化学势驱动下, 经氧离子传导的电解质扩散至阳极与电解质的界面, 与氢气发生反应, 生成水并释放电子。电子经外电路回到阴

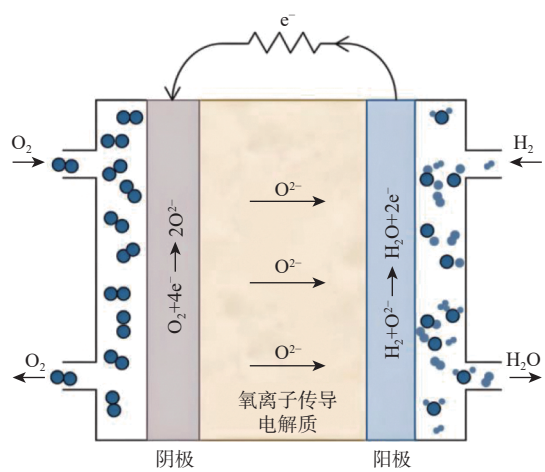


图 8　SOFC 工作原理图

Fig. 8　SOFC schematic diagram

极,从而实现电池的闭合回路和能量转化[59]。该过程不受卡诺循环的限制,因而具有很高的理论效率。

SOFC因其独特的高温运行特性,展现出若干显著优势。首先,高温环境显著提升了SOFC对燃料杂质的耐受性。在典型Ni基阳极上,CO的吸附作用相对较弱,且CO可直接参与电化学反应,发生电化学氧化生成CO_2,从而避免了其在催化剂活性位点上的过度积累[60]。这一特性与低温PEMFC中CO极易导致铂基催化剂中毒的现象形成鲜明对比。其次,高温条件下硫化物(如H_2S)在Ni基阳极表面的吸附能较低,赋予SOFC对较低体积分数(<0.002%)硫化物的较强耐受性。即使在0.005% H_2S气氛中发生中毒,移除H_2S后,其电化学性能也能在高温运行中恢复,这一特性显著优于PEMFC[61-62]。同时,SOFC的高温运行为碳氢燃料(如航空煤油、生物质衍生燃料、甲醇等)的原位重整提供了必要条件。这些燃料可在阳极催化层内部或其邻近区域,通过蒸汽重整(steam reforming, SR)或部分氧化重整(partial oxidation reforming, POX)等反应,直接转化为富含氢气和CO的合成气,随即参与阳极电化学反应。此过程有效降低了对复杂外部燃料预处理系统的依赖,简化了系统架构[63]。此外,SOFC运行产生的高温排气(通常高于600 ℃)蕴含高品位的热能。这使其排放的余热非常适合于构建高效的CHP系统,或用于驱动底部循环(如GT),通过构建联合循环系统将热能进一步转化为电能,从而显著提升整个能源系统的总效率[64]。

3.2 SOFC系统的多燃料适应性

SOFC在航空动力领域的战略价值核心在于其多燃料适应性,这一特性显著区别于低温燃料电池技术(如PEMFC)。其根本技术基础源于SOFC的高温运行特性,高温条件为碳氢燃料及氢载体的高效重整提供了必需的热力学与动力学环境,同时结合阳极对重整产物的本征耐受性,共同构成了SOFC燃料灵活性的核心支撑。

3.2.1 燃料重整机制

将复杂燃料转化为可直接参与电化学氧化的合成气(H_2+CO)的重整方法包括SR、POX和自热重整(autothermal reforming, ATR)3种。

SR是一种强吸热反应,碳氢燃料与水蒸气在催化剂(如Ni基催化剂)作用下转化为富氢合成气。该技术具有最高的产氢率(>70%),尤其适合甲烷及轻质燃料[65]。其核心优势在于最大化电效率。然而,强吸热特性需依赖外部热源,导致热管理系统复杂化。同时存在启动速度慢、系统传热传质复杂、热惯性大、动态响应滞后、难以匹配飞行瞬态工况等问题[66]。此外,反应器低温区易因Boudouard反应引发积碳,需维持高水碳比(S/C>3.0)缓解[67]。这样高的水碳比要求意味着需携带大量反应水,使其在航空动力系统中的应用面临巨大的挑战。

POX是碳氢燃料与不足量的氧气反应发生的不完全燃烧反应,生成以CO和H_2为主的合成气,具有反应产热高、启动速度快、产氢速率高的特点[68]。其优势在于无需外部持续供热,能够快速响应,系统传热结构简单,特别适合航空动力动态工况[69]。

ATR通过耦合吸热的SR与放热的POX反应,并精确调控水蒸气和氧气的比例,实现反应体系的热中性。该过程反应条件相对温和,产氢量较高[70]。ATR兼具较高的制氢效率、良好的动态响应能力及对复杂燃料的适应性等优势。尽管存在反应器结构复杂、质量增加及动态调节精度要求高等挑战,其仍是长航时航空器氢能系统中具有竞争力的技术选项[71]。

表1概括了以汽油、柴油、航空煤油等典型重烃燃料为原料时,3种重整路径的性能特征。根据催化剂种类、燃料组分和操作参数不同,具体数值会有所不同,但技术路线的特性趋势基本一致。在实际航空动力系统设计中,需根据具体燃料类型、任务剖面和平台要求进行详细权衡与优化。

表1 重烃燃料3种重整路径的性能对比[71-73]

Table 1 Performance comparison of three reforming pathways for heavy hydrocarbon fuels[71-73]

路径	外部供热需求	典型反应温度/℃	氢气体积分数	H_2/CO体积比	启动时间/min	动态响应	系统质量与体积	适用场景
SR	是	750～900	0.70～0.80	≈3～4	> 20	分钟级	大	固定式
POX	否	1 100～1 200	0.35～0.45	≈1～1.5	<1	秒级	紧凑	紧凑设备
ATR	否	900～1 150	0.40～0.55	≈2～2.5	10～20	<1 min	略大于POX	车载/航空

3.2.2 SOFC适配的燃料类型

SOFC能够兼容从传统化石衍生燃料到零碳可持续能源的广泛谱系,这一特性为长航程航空动力系统的低碳化转型提供了关键路径。具体适用的燃料类型包括但不限于下列燃料。

氢气是SOFC最清洁的燃料选择。然而,如2.3.1节所述,氢气的低体积能量密度对航空应用构成显著挑战。目前,高压气态储氢瓶(如25～35 MPa

碳纤维缠绕钢瓶)质量占总质量超过 98%, 且存在着氢脆的问题, 严重影响了储氢设备的安全与寿命[74]。低温液态储氢液化过程耗能极大, 对容器绝热性能要求高, 设备投资成本高, 因此, 仅在大规模存储, 长距离运输中具有一定的优势[75]。正是这些储氢瓶颈, 反向凸显了 SOFC 系统燃料灵活性的战略价值。

相比之下, 碳氢燃料, 包括汽油、柴油、航空煤油、液化天然气、SAF 及醇类燃料, 凭借其成熟的供应链和较高的能量密度, 成为航空领域当前及低碳化转型中期更现实的选择。SOFC 可直接利用或通过内部重整技术转化以下碳氢燃料。

汽油主要成分为 C_4～C_{12} 的烃类, 是轻型内燃机的常用燃料[76]。符合国 VI 标准[77](国家市场监督管理总局2016 年 12 月 2 日发布)的汽油具有超低硫含量(0.000 3% ～0.000 5%), 使其适用于作为 SOFC 的燃料。在 SOFC 应用中, 汽油既可直接输送至阳极作为燃料使用[78], 也可通过集成于电堆内部或外部的重整器进行 ATR 后供给利用[79]。

柴油中碳氢化合物的 H/C 摩尔比范围为 1.8～2.3, 其含碳量主要分布在 C_{10}～C_{20} 区间, 尤以 C_{16} 组分为主[72]。相较于其他碳氢燃料, 柴油具有较高的密度, 因而单位体积氢含量较高, 但其硫含量也显著更高, 如−10 号军用柴油的硫质量分数超过 0.003% [80]。鉴于柴油相对分子质量更大、硫含量更高的特性, 研究中通常采用外置重整器方案, 通过重整将柴油转化为合成气, 再供给至 SOFC 利用[81-83]。

航空煤油主要包括民用型(如 Jet A-1、Jet A 和 RP-3)和军用型(如 JP-8)2 类。以美国标准航空煤油 Jet A 为例, 其主要成分为 C_8～C_{16} 的烃类混合物, H/C 摩尔比范围为 1.6～2.0[84]。值得注意的是, 航空煤油通常含有较高的硫含量。Xu 等的研究综合了文献报道数据, 指出其平均值可达 0.071 4% [71]。这种高硫特性对 SOFC 系统的设计构成了显著挑战。因此, 开发高效紧凑的脱硫反应器是提升 SOFC 系统航空煤油兼容性的关键环节[85]。

天然气是固定式 SOFC 系统最广泛使用的燃料[86]。液化天然气是天然气经干燥、脱酸处理并在约−163 °C(110 K)以下低温液化制得的燃料, 其主要成分为甲烷, 体积分数通常超过 75%。与航空汽油相比, 储存相同能量时, 液化天然气储罐体积需增大 47.41%, 但燃料质量可减轻 16%[87]。虽然将天然气直接通入 SOFC 阳极进行电化学反应在技术上是可行的[88], 但目前更成熟的技术路径是通过重整器将天然气转化为富氢合成气[86]。

生物质类 SAF 原料来源广泛, 生产工艺多样。动植物油脂和废弃油脂可通过催化加氢或高温水热解技术转化为航空燃料; 糖类和木质纤维素则主要经发酵或生物催化过程转化为醇类, 并进一步提纯; 而城市垃圾和生物质废弃物则可先气化为合成气, 再通过催化合成工艺生产航空煤油。得益于其与现有航空基础设施的高度兼容性, 大规模应用 SAF 被视为当前航空运输业实现深度脱碳最具可行性的方案之一[89]。根据美国 ASTM D7566 标准[90], SAF 的硫质量分数低于 0.001 5%。这一显著的低硫特性使其成为 SOFC 驱动航空器更为理想的燃料来源。

甲醇等液态醇类燃料在储运安全性和基础设施兼容性方面具有优势[91]。其分子结构简单, 重整温度(如甲醇约 200～300 °C)显著低于长链碳氢化合物, 有助于简化系统设计并提升启动响应速度[92]。此外, 甲醇可由可再生能源电解水制取的氢气与碳捕集获得的 CO_2 合成, 实现全生命周期的低碳或零碳排放[93]。甲醇可直接用作 SOFC 的燃料, 有利于电堆小型化设计。然而, 相较于氢气燃料, 其更复杂的电化学反应动力学特性往往导致 SOFC 的功率密度和耐久性降低 [94]。

氨是全球产量最大的无机化工产品之一, 2021 年总产量约为 1.9×10^{11} kg, 其含氢质量密度高(17.7%), 是 SOFC 的理想燃料。得益于易液化的特性(−33℃常压或 1 MPa 压力常温下即可液化), 液氨可通过车船或管道便捷运输, 储运基础设施完善且制备工艺成熟[95]。更重要的是, 氨可通过可再生能源电解水制氢、再与空气中的氮气合成, 实现“绿氨”生产[96]。作为 SOFC 燃料, 氨既可直接输送至阳极原位分解, 也可在外部重整器中裂解产氢后供给[97]。研究表明, 直接利用氨的 SOFC 运行状态稳定性良好[98]。

图 9 直观展示了各类候选燃料在航空场景下的储能特性。传统液态碳氢燃料(如汽油、柴油和航空煤油)仍以最高的体积能量密度占据航程优势, 这解释了为何它们是目前大型航空器的首选。氢气虽质量能量密度出众, 却因储运体积庞大而受限。甲醇、乙醇等绿色合成燃料则介于两者之间, 为兼顾航程与储运可行性提供了折中且现实的解决方案。

3.2.3　燃料灵活性对航空的意义

燃料灵活性作为 SOFC 航空动力系统的核心特征, 为航空业向零排放转型带来了超越单一燃料解决方案的革命性优势, 其意义在航程、载重与运营成本最为敏感的支线及干线航空领域体现得最为充分和深远。

首先, 多燃料兼容性极大提升了燃料灵活性与运营韧性。传统航空业长期依赖航空燃料, 受国际

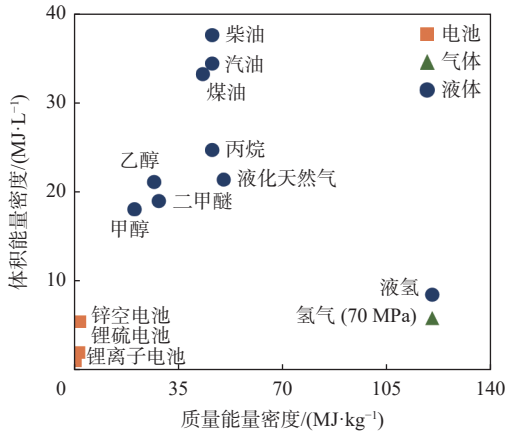


图 9 多元燃料与电池体系的能量密度对比[99]

Fig. 9 Comparation of energy densities among multi-fuel and battery systems[99]

原油价格变动、汇率波动影响大，如图 10 所示，供应链脆弱性高[100]。SOFC 系统允许航空公司根据航线、机场的燃料可用性、成本及可持续性等级，灵活选用多种传统化石燃料或氢气、SAF、甲醇和氨等可持续燃料，显著降低了对单一燃料供应链的依赖风险，增强了应对价格波动和地缘政治冲击的能源安全和运营韧性。

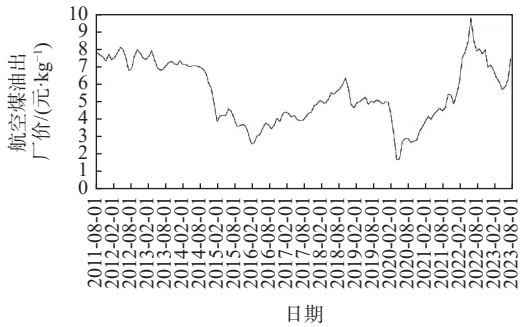


图 10 中国航油出厂价[101]

Fig. 10 Ex-works price of aviation fuel in China[101]

其次，多燃料兼容性，特别是对多种传统化石燃料的支持，实现了与现有基础设施的最大化兼容。建设全新的、大规模的氢或氨燃料机场基础设施成本高昂、周期漫长，是零排放航空早期部署的主要障碍[102]。而 SOFC 动力飞机能够最大程度地复用全球机场现有的燃油储存、运输管道和加注设施。这一特性显著降低了初期部署的门槛和成本，加速了 SOFC 动力飞机市场应用和验证。

在性能层面，多燃料优势直接关联到突破体积能量密度瓶颈并释放航程潜力。航空器对质量和体积极其敏感。气态氢或需要复杂绝热储罐的液态氢，其有效体积能量密度远逊于传统航油。而 SOFC 兼容的液态碳氢燃料（如 SAF、甲醇）或氨则具备显著优势，SAF 体积能量密度接近传统航油，甲醇和氨也远高于氢气方案。结合 SOFC 本身高达 60% 的电化学转化效率，使用这些高体积能量密度燃料的 SOFC 系统，为开发具有实用化、商业化中远程航程的纯电动或混合电动飞机提供了现实路径，成功突破了当前电池技术的能量密度限制。

最后，多燃料兼容性为航空业规划了一条清晰、平稳且低风险的脱碳过渡路径。航空脱碳涉及复杂的供应链转型和技术迭代，难以一蹴而就。SOFC 系统允许航空公司从使用现有成熟燃料起步（如传统化石燃料或低比例混合 SAF），随着可持续燃料供应链的成熟和绿氢/绿氨成本的下降，逐步过渡到使用 100% SAF 或零碳氢气/氨气。这种燃料来源的可切换性使航空公司、机场和燃料供应商能够根据自身发展节奏和市场条件分阶段调整，无需对飞机或基础设施进行颠覆性改造，从而构建了一条风险可控、投资可持续的清晰路径，是实现航空业长期净零排放目标的战略关键。

3.3 航空 SOFC 系统设计的关键与挑战

将 SOFC 技术成功应用于航空动力系统，面临着航空器对高功重比、快速响应、极端可靠性和燃料适应性的严苛要求。对于执行中远程任务的飞行器而言，其动力系统必须在长航时、高强度巡航状态下保持极致的效率与可靠性，这使下述挑战成为必须攻克的核心工程技术瓶颈。

3.3.1 燃料处理

SOFC 的多燃料适应性是其战略优势，但利用多元化燃料带来的运行灵活性同时，也引入了燃料中特定化学成分引发的性能衰减及系统复杂度的增加。不同燃料因其化学特性差异，对系统耐久性构成了独特挑战。

氨燃料具有含氢量高、零碳含量的优势。直接使用氨燃料会导致运行功率密度较纯氢基准下降 10%～15%。在较低的运行温度下（500～650 ℃），性能衰减可能超过 30%，并伴随着镍基阳极与氨反应生成脆性 Ni_3N 相的风险，严重影响电堆寿命与稳定性[103]。未来需要对应开发抗氮化的高性能新型阳极材料，或优化运行温度窗口以规避有害反应。

烃类燃料（如汽油和柴油）具有来源广泛、能量密度高的优点。然而，直接使用烃类燃料的系统因燃料中存在的芳香烃和烯烃易发生积碳[71]。研究表明，采用 ATR 的柴油 SOFC 系统在运行 40 h 后就因积碳导致燃料利用率由 100% 降低至 90%，重整效率由 65% 降低至 45%[104]。解决方案在于催化剂创新，即设计具有高抗积碳能力的结构化重整催化剂。通过活性组分的选择、载体改性，以及构建特殊的微观形貌，从化学本质上抑制有害副反应，以保证长航时下的耐久性[105]。

对于含硫量高的航空煤油, 还需要对燃料进行深度脱硫预处理。当前可行的机载脱硫技术包括吸附式脱硫与加氢脱硫。其中, 吸附式脱硫虽无需消耗氢气且能在常温常压下实现深度脱硫, 但其硫吸附容量限制了燃料处理通量。即使在最佳工况下, 每克吸附剂仅能处理几毫升燃料[85,106]。加氢脱硫虽能处理大量燃料, 但需持续消耗重整产生的氢气, 直接降低净输出功率。同时, 其必需的高压操作环境(3～7 MPa)与低压重整器及电堆之间存在巨大的压力失配, 增加了系统复杂度与寄生功耗[107]。因此, 技术发展需双线推进。对于规模较小的 SOFC 辅助电源, 对应研发超高硫容的低温吸附材料。而对于更大规模的 SOFC 动力系统, 需要开发新型加氢脱硫工艺, 同时开发与 SOFC 系统更好的压力集成方案。

综上, SOFC 燃料处理的技术发展路径, 核心是面向具体燃料的催化剂与工艺创新, 旨在化解燃料化学复杂性带来的性能与可靠性衰减, 从而真正发挥其多燃料适应的优势。

3.3.2　高温热惯性

航空应用对动力系统的轻量化、快速启动与瞬态响应能力提出了极限要求。传统用于固定式发电的平板式 SOFC 通常升温缓慢, 耗时数十分钟甚至数小时, 难以满足航空器快速启动和应对动态负载变化的需求[108]。这揭示了一个贯穿 SOFC 系统的核心物理矛盾: 高温运行所必须的高热容量, 与航空快速响应要求的低热惯性之间存在根本冲突。破解这一核心矛盾, 需从材料到系统架构实施多层级协同创新。

从材料体系上进行根本革新, 是降低热惯性的终极路径。通过采用质子导体电解质(如掺杂的 $BaZrO_3$ 或共掺杂 $Ba(Ce,Zr)O_3$), 可将 SOFC 的高效工作温度窗口从 800～1 000 °C 显著下移至 350～600 °C[109]。工作温度的降低直接意味着电堆热容的减少。这样既能缩短加热时间, 又能增强其在反复热循环下的耐受性[110], 从而从物理本源上缓解了高温热惯性矛盾。尽管该技术目前仍在攻关其长期化学稳定性与高功率密度输出等挑战, 但其代表了解决 SOFC 动态特性问题的根本方向。

部件级减惯涉及重整器、电堆、热交换器与保温壳体等关键组件, 其核心是通过降低质量与材料热容实现系统热惯性的下降。以重整器为例, 核心是发展微通道反应器。其能够提供极高的比表面积, 并因尺度效应极大增强反应物与催化表面的传质效率。Jin 等的研究表明, 在相同燃料供给速率下, 采用微通道结构的重整器, 其甲烷转化率可比传统反应器提升 71.9%～86.6%[111]。这种反应速率的跃升, 意味着重整器的处理通量密度大幅提高, 使满足相同功率需求所需的反应器体积与质量得以显著减小, 直接带来了热惯性的降低, 为系统实现秒级动态响应奠定了基础。

热管理是主动应对高热惯性的直接手段, 其核心任务是对系统内有限热流进行智能调度, 在启动和运行阶段面对着不同的挑战。

在启动阶段, 需要高效地将电堆、重整器等核心部件从环境温度迅速加热至工作点。为界定航空 SOFC 系统的快速启动时间, 明确的量化目标至关重要。美国能源部(United States Department of Energy, DOE)为 SOFC 辅助动力系统设定的快速启动目标为 30～45 min[112]。为实现该目标, 技术关键在于集成高功率辅助加热器, 直接对电堆和重整器的核心区域进行快速预热[113]。Özece 等的研究即通过将电加热器集成在热交换器下游, 将启动时间由 4 610 s 大幅减少至 3 130 s, 这不但验证了该路径的有效性, 也清晰标定了当前技术水平与目标之间的距离[114]。

进入运行阶段, 热管理的根本目的是精确维持电堆内部的温度分布均匀性, 以避免局部过热或过冷引发的热应力与性能衰减[115]。为达成此目的并大幅提升全系统能量效率, 必须构建深度热集成网络, 将系统内部热量充分应用于重整反应预热、驱动底部循环(如微型 GT[116])及环控除冰等多元场景。该策略的核心价值在于, 通过将“废热”转化为系统内快速循环的“有效热”, 构建了一个高度自洽的内部热循环, 从而显著降低了对独立、缓慢且低效的外部热源的依赖。这不仅提供了关键的热流调配柔性, 更通过为富余热量创造智能去路, 极大地增强了系统应对剧烈热波动的内在稳健性。然而, 这种高效集成也使电堆、动力、环控等子系统深度耦合, 构成了一个多目标、强干扰的复杂控制难题[117]。

为从根本上规避 SOFC 的热惯性短板, 必须在系统架构层面进行创新。核心路径是通过引入高功率电池或超级电容器作为辅助电源, 在 SOFC 启动期间或负载发生瞬态变化时提供瞬时功率支撑, 待 SOFC 达到稳定运行状态后再进行平滑过渡, 从而将 SOFC 本体的动态响应要求从秒级放宽至分钟级[118]。驾驭这种复杂的混合系统需要发展基于模型的智能控制算法, 根据实时飞行状态和燃料特性, 动态优化重整器工况(温度、空速、水碳比)与电堆运行参数, 并在电堆和辅助电源之间进行能量分配。在保障 SOFC 系统平稳运行下, 最大限度满

足航空动力系统的瞬变需求。

综上所述，通过材料本源创新降低工作温度、部件结构革新减少热容、热管理主动调度控制热流，以及混合架构解耦规避动态需求，形成了一套从本源到系统、逐层递进的综合解决方案，以应对SOFC航空应用中最核心的高温热惯性矛盾。

3.3.3 可靠性与系统集成挑战

SOFC动力系统要达到商用航空数万飞行小时与起降循环的可靠性要求，必须攻克由高温和复杂性带来的集成难题。这一挑战主要集中于高温密封与系统集成2个相互关联的维度。

高温密封是保障SOFC系统在严酷航空环境下长期可靠运行的基础。密封材料必须在600～1 000 °C的高温下，长期暴露于氧化性(空气侧)和还原性(燃料侧)气氛中稳定工作，并能承受频繁的热循环考验。这对于需经历数万次起降循环的商用飞机而言，是保证其全生命周期内气密性与安全性的基础，其要求远高于地面固定式发电系统。因此，航空级密封绝非简单的材料选型问题，而是一个涉及热-机械-化学多场耦合的界面科学难题。理想的密封材料必须具备与相邻部件(如连接体、电解质)高度匹配的热膨胀系数(coefficient of thermal expansion, CTE)，以缓解循环热应力；在运行温度下需具有合适的黏度与润湿性，以确保封接完整并能弥合微裂纹；同时，必须在复杂气氛中保持长期化学稳定性，避免与相邻材料发生有害反应或自身发生晶相转变[119]。

系统复杂性与高度集成则将可靠性挑战放大至系统层级。与依赖纯氢、系统相对简单的PEMFC相比，SOFC系统包含了燃料处理单元、高温气体管理系统、复杂的排气热回收装置及可能的混合动力子系统(如SOFC-锂电池或SOFC-GT)等多个组成部分，其架构明显更为复杂[120]。这种复杂性在航空领域被极致轻量化的要求进一步放大，要求每个子系统都必须在极小的体积与质量约束下实现极高的功能密度与可靠性[121]。这带来了双重工程压力：一方面，子系统数量的增加意味着故障概率的叠加，对系统级冗余设计与故障容错策略提出了前所未有的要求；另一方面，各子系统间强烈的热、质、电耦合使系统成为一个多变量、强干扰的复杂控制对象，任何单一参数的扰动都可能通过耦合链被放大，威胁全局稳定。驾驭这种复杂性，实现从功能集成到稳健集成的跨越，是SOFC航空动力系统实用化的核心考验。

综上分析，SOFC凭借其高温运行所实现的高效能量直接转化与卓越的多燃料适应性，为航空动力系统的深度脱碳提供了一条革命性的路径。其核心价值在于能够突破传统电池的能量密度瓶颈，并为利用现有航空燃料基础设施向SAF乃至零碳燃料(如氢、氨)过渡提供了技术兼容性。然而，将其成功集成于航空平台，必须直面并攻克一系列严峻工程挑战：在燃料处理方面，需解决特定燃料引发的性能衰减与重整催化剂失活问题，实现轻量化、高可靠性的机载燃料预处理与重整；在系统动态特性方面，必须破解高温运行所必需的高热容量与航空应用要求的低热惯性、快速响应之间的根本矛盾，这需要通过材料体系革新、部件级结构优化、主动式热管理策略及混合动力架构等多层级协同创新来系统解决；在长期可靠性方面，则需攻克能耐受数万次热循环与复杂气氛的高温密封这一界面科学难题，并驾驭由燃料处理、电堆、热回收及混合子系统高度集成所带来的多变量、强耦合的复杂系统控制与鲁棒性挑战。尽管前路艰巨，但通过在新材料、核心部件与系统集成层面的持续突破，SOFC技术有望在未来中远程绿色航空的动力谱系中扮演关键角色，展现出重要的战略价值。

4 燃料电池与锂电池航空动力系统的技术范式对比

航空动力系统的技术演进正处在多元化探索的十字路口。燃料电池与锂电池作为两条核心的电动化技术路径，并非简单的竞争替代关系，而是基于其物理化学本质，演化出了截然不同的技术范式与应用边界。为系统呈现不同动力技术的应用边界，本节首先在图11中综合构建了一个基于任务航程需求与系统功率动态需求的二维适配性图谱。该图谱是对后续4.1节与4.2节核心结论的可

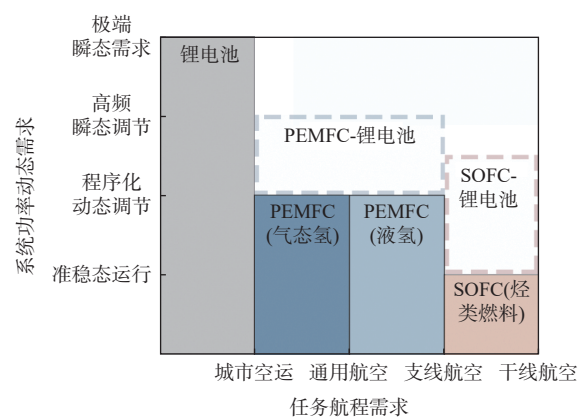


图11 燃料电池与锂电池航空动力系统的技术范式谱系及其任务适配性分析

Fig. 11 Spectrum of technological paradigms and mission adaptability analysis for fuel cell and lithium battery aviation powertrains

视化总结, 其横轴映射了 4.1 节所剖析的能量载体范式如何根本性地决定航程潜力, 而纵轴则对应了 4.2 节将揭示的功率架构与动态响应极限如何制约技术对任务动态性的适应能力。进而, 衰减机理(4.3 节)与安全环境特性(4.4 节)将作为关键的约束条件, 深入探讨各技术在图示的适配区域内是否具有实现商业化所必需的耐久性、可靠性及合规性, 从而完整刻画从技术匹配到应用落地的全要素图景。

4.1　能量载体范式与航程特性

航空动力系统设计首要与核心的决策在于对能量载体的选择, 这直接导致了封闭式与开放式 2 种系统范式的分野, 并从根本上锚定了飞行器的航程能力、载荷裕度及运营模式, 衍生出截然不同的技术发展路径。

锂电池系统本质上是一个封闭的储能系统。其能量存储于电极材料的晶格结构之中, 通过锂离子的嵌入和脱出反应实现电能的储存与释放。其能量密度的理论上限由正负极材料的理论比容量和工作电压窗口严格限定, 当前锂离子电池的工程可用能量密度已逼近 250～300 Wh/kg 的阶段性瓶颈[122-124]。任何能量密度的提升都需在材料体系上进行革新, 且不可避免地与循环寿命、充放电倍率性能及热安全性等关键指标相互权衡, 面临巨大的技术挑战。这种物理本质决定了其航程与电池质量呈近似线性但边际效益递减的关系。增加电池质量虽能延长航程, 但也会同步增加飞行器的结构质量和飞行中的寄生能耗, 导致航程的净收益递减。因此, 锂电池动力系统的设计哲学是在有限的能量密度边界内进行极致的优化, 通过提升电芯能量密度、优化 pack 集成效率、减轻结构质量等手段挖掘每一分潜力, 这使其天然更适配于对质量高度敏感、航程需求相对有限的短途高频飞行任务, 如城市空中交通或轻型飞机。

反观燃料电池系统, 其核心是一个开放的能量转换装置[125]。其将存储于外部燃料中的化学能通过电化学反应直接转化为电能, 其系统总能量密度理论上限取决于燃料本身的质量能量密度及燃料储存系统的质量与体积效率。燃料电池电堆及其辅助子系统可以视为一个相对固定的基础质量, 而航程则与所携带的燃料质量成正比。系统总质量为基础质量与携带燃料质量之和。航程虽可以通过增加燃料携带量来延长, 但其收益并非线性, 因此, 定义一个航程盈亏平衡点至关重要。该点是指, 所增加燃料带来的航程收益足以抵消因其自身质量引起的额外能耗与间接结构增重。一旦设计越过此临界点, 增加燃料带来的航程收益将变得极为显著。这种“基础质量 + 可变燃料”的模型, 使其在追求长航时的应用场景中展现出无可比拟的潜力。此外, 其在补能方式上采用“加注”而非“充电”, 能够在分钟级别完成燃料补充, 极大地贴近了传统航空的运营节律, 对于提升飞机日利用率和高繁忙度机场的周转效率具有革命性意义。尽管目前储氢技术仍面临质量、体积或蒸发损失等挑战, 但其技术发展路径清晰, 旨在不断降低“基础质量”并提升储氢效率, 从而持续释放其对长航程、大载重任务的支撑能力。

综上, 能量载体的本质差异决定了两者不同的航程逻辑与发展范式。锂电池在封闭系统内“精耕细作”, 使其天然适配于对质量高度敏感、航程需求相对有限的短途高频飞行任务, 如城市空中交通。而燃料电池则通过开放系统寻求突破, 为其在支线及干线航空领域支撑长航程、大载重任务奠定了基础。这一根本分野为它们在航空动力谱系中处于各自不可替代的战略定位, 如图 11 所示。

4.2　功率特性与混合动力系统架构

飞行器在起降、爬升、巡航及突发机动等多变的任务剖面中, 对其动力系统的功率响应特性提出了多维度的严苛要求。燃料电池与锂电池因能量转换机理的根本性差异, 在该维度上展现出迥异的动态响应能力, 并直接塑造了截然不同的系统架构演化路径。

锂电池的功率输出基于固相离子嵌入/脱出反应, 具有高功率密度(最大放电倍率下超过 3 kW/kg, 单电池级)与毫秒级响应速度的显著优势, 能近乎瞬时地满足飞行器的瞬态大功率需求[126-128]。然而, 高倍率放电会诱发电池内部急剧的欧姆热与反应热积累, 这不仅加速电极活性材料衰减、固态电解质界面(solid electrolyte interphase, SEI)膜持续增厚, 更潜藏着热失控的安全风险。因此, 锂电池动力系统的设计核心在于实施精细而保守的功率管理策略, 通过精确规划功率剖面、严格限制峰值功率持续时间, 在性能、寿命与安全性之间寻求最佳权衡。

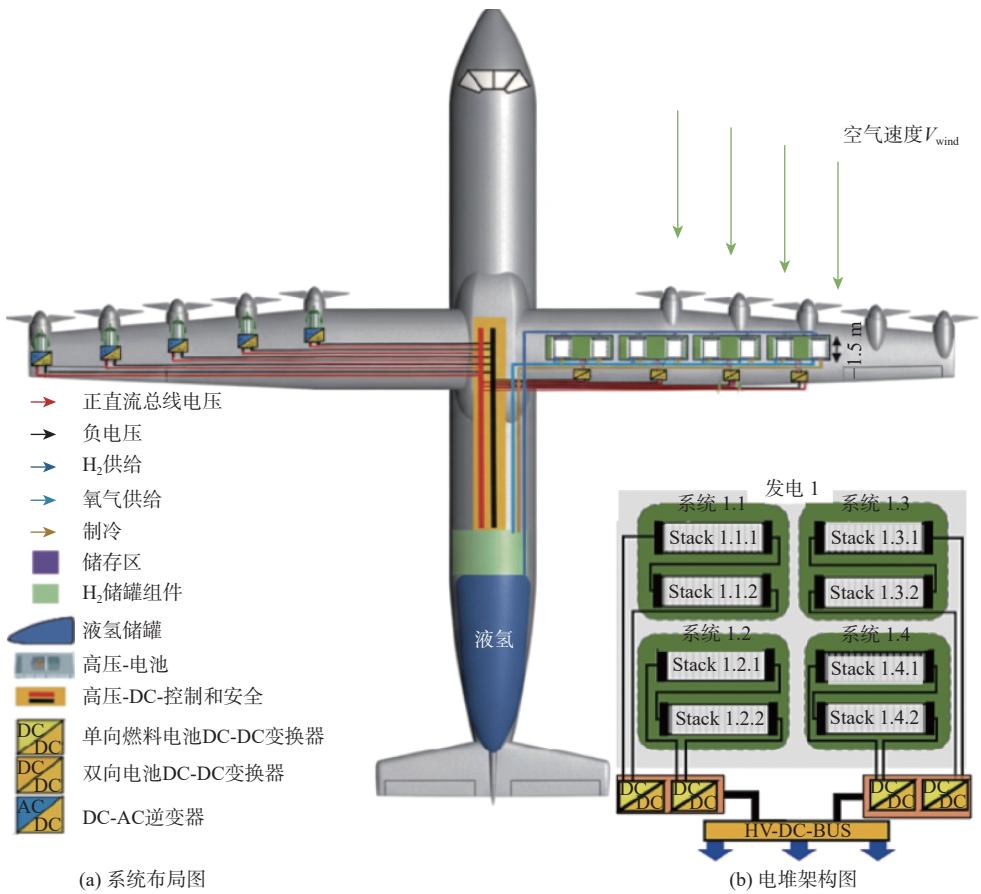
PEMFC 的动态响应主要受限于其空气供应系统的机械惯性(如空压机转速调节)与电化学反应动力学, 其功率响应通常存在秒级延迟(约 1～10 s)[50]。这种“慢速”的特性使其难以独立应对频繁变化的负载需求。

SOFC 面临的动态响应挑战源于其工作原理。高达 600～1 000 ℃ 的运行温度带来了巨大的热惯性, 使电堆的温度变化极为缓慢。实验研究表明,

即使对于功率仅为100 W的SOFC短堆，在经历从15～25 A的中等幅度电流阶跃后，其输出电压也需要5～25 s才能重新稳定，而即使在最优变载模式下，其内部温度场达到新的稳态也需要约300 s[129]。对于功率更大，热耦合更复杂的系统，这种惯性效应将进一步放大。针对5 kW级SOFC系统的模拟显示，集成热管理后，由电流或燃料扰动引发的热平衡恢复时间将延长至300～800 s[130]。由此可以合理推断，当航空推进用电堆的功率规模扩大至数百千瓦乃至兆瓦级（跨数个数量级）时，其质量、热容量及内部传热路径将显著增加，热惯性可能呈数量级增加，功率调节过程可能需要数分钟至数十分钟。任何超过热力学限制的快速功率调节都会产生巨大的热应力，导致陶瓷电解质、电极及连接体等关键脆性部件因CTE不匹配而开裂、剥落，造成不可逆的机械损伤与性能永久性衰减[131-133]。

然而，将PEMFC与SOFC的上述动态响应特性置于航空推进系统的实际应用场景中评估，其与真实需求之间存在显著差距。中国民用航空局颁布的《航空发动机适航规定》要求航空发动机必须能在不超过5 s的时间内，完成从低功率状态到95%额定起飞推力的瞬变[134]。该条款为航空推进系统的瞬态响应能力设定了必须满足的法律与技术门槛。与此强制性标准进行对比，PEMFC的秒级延迟已接近其极限，而SOFC的数分钟至数十分钟响应时间与标准要求存在数量级差距。因此，单一燃料电池系统在动态响应上均无法独立满足航空适航的严苛要求。这种源自合规性的约束决定了引入高功率密度、毫秒级响应的锂电池构成“燃料电池-锂电池”系统，由锂电池作为功率缓冲单元，提供起飞、爬升及机动所需的瞬态高功率，是满足航空推进瞬态性能需求的必然且唯一可行的技术路径。

图12展示了一种混合动力飞机燃料电池动力系统集成方案。对于PEMFC系统，通常采用功率混合型架构。在此架构中，燃料电池作为高效、稳定的主能量源，而锂电池则作为功率缓冲单元。其能量管理策略（energy management strategy, EMS）的核心在于功率分配，根据预设规则平滑燃料电池的功率输出，使其工作在高效率区间，由锂电池来削峰填谷。这种架构的本质是功率协同与性能优化。尽管PEMFC的秒级动态响应与锂电池的毫秒级响应存在差距，但两者处于同一数量级的时间尺度，在航空推进5 s瞬变要求的框架内具备协同



(a) 系统布局图　　(b) 电堆架构图

图12　混合动力飞机集成的燃料电池动力系统[135]

Fig. 12　Fuel-cell powertrain integrated in a hybrid-electric aircraft[135]

工作的基础。因此, 其设计哲学的核心是在满足动态需求的前提下, 追求系统整体的效率最大化、寿命延长与运行经济性(氢耗最低)。这决定了其 EMS 的复杂性主要集中于实时、多目标的功率分配优化算法, 如等效氢耗最小化策略、模型预测控制等, 旨在使 PEMFC 尽可能规避有害的动态负载波动, 从而优化其工作点[136]。总而言之, PEMFC 混合系统的设计是一种在既定性能边界内寻求经济性与可靠性最佳平衡的优化范式。

对于 SOFC 系统, 则需要采用更深层次的能量-功率结构型混动架构, 其控制逻辑的复杂性与设计哲学同 PEMFC 系统存在根本差异。SOFC 的动态调节过程与飞行器毫秒级的电功率需求之间存在巨大的时间尺度差异。这种物理根源决定了其混合架构的最高设计准则不是优化, 而是功能使能与安全隔离。SOFC 的角色被严格限定在恒定或极其缓慢变化的工况下提供背景基载功率, 而锂电池则必须升级为应对所有动态负载的主功率执行器。因此, 其 EMS 的核心目标是不惜一切代价维持电堆的热稳定性, 避免任何可能引发灾难性热机械应力的快速功率变化。这导致其控制逻辑上升为多时间尺度的、强制的解耦与预测控制。必须基于长期(如任务剖面)的功率预测, 为 SOFC 规划一条极其缓慢、平滑的功率设定曲线, 而将所有瞬时波动完全交由锂电池管理[137]。因此, SOFC 混合系统的设计是一种由物理安全边界强制的、以电堆安全为绝对前提的使能范式。

由此可见, PEMFC 与 SOFC 混合架构的分野, 远非简单的动态响应性能之别, 而是从物理约束(时间尺度)、首要设计目标(优化/安全), 到系统角色定义(协同/解耦)及控制哲学(实时分配/预测规划)的、贯穿技术范式各层次的本质性差异。这种差异, 是两者基础电化学原理与材料特性作用于复杂工程系统的必然结果, 也直接决定了两者在图 11 所示谱系的纵轴上具有不同的拓展极限。

4.3　衰减机理与寿命管理

动力系统的耐久性是决定其全生命周期经济性与可靠性的核心指标。锂电池与燃料电池的寿命衰减源于其内部材料体系在工作环境下发生的不可逆物理化学变化, 但两者的衰减机理、主导因素及可管理性存在根本差异。

锂电池的衰减是一个持续且累积性的不可逆过程, 主要表现为循环老化与日历老化。循环老化源于高倍率充放电、深放电及工作温度不当所加剧的副反应, 包括由于负极 SEI 膜的持续增厚, 不断消耗活性锂离子与电解液, 导致的容量持续衰减[138]; 正极活性材料的结构相变、晶格坍塌及金属离子溶出[139]; 以及在极端情况下锂枝晶的析出, 可能刺穿隔膜引发内短路[140]。日历老化即使在搁置状态下也会发生, 与环境温度、电池荷电状态(state of charge, SOC)密切相关, 主要表现为电解液的氧化分解与界面稳定性的缓慢退化[141]。电池管理系统(battery management system, BMS)的策略核心在于通过优化充放电区间、控制温度、限制倍率来延缓这些老化进程, 但无法逆转已发生的衰减。

PEMFC 的衰减机理复杂且与运行工况紧密耦合, 但其衰减在一定程度上是可管理与可部分缓解的。其主要衰减模式包括催化剂衰减[142]、碳载体腐蚀[143]及质子交换膜退化[144]。催化剂衰减表现为铂纳米颗粒的溶解、迁移和奥斯特瓦尔德熟化过程, 导致电化学活性面积持续减小[145]。碳载体腐蚀主要发生在高电位和启停工况下, 阴极碳载体发生电化学氧化, 造成催化剂流失和孔隙结构坍塌[146]。质子交换膜的退化则包括化学降解和机械损伤两方面, 前者源于自由基攻击导致的聚合物链断裂, 后者由于湿循环引发的溶胀-收缩应力所致。

SOFC 的衰减主要由高温环境下材料的持续退化所驱动, 这构成了其长期耐久性的核心挑战。在长期高温运行过程中, 阳极镍催化剂颗粒会通过表面扩散和奥斯特瓦尔德熟化过程不断粗化长大, 导致三相界面长度减少, 阳极活化极化显著增大, 从而降低电池输出性能[147]。当系统采用含铬合金作为连接体材料时, 挥发性六价铬物质会在阴极沉积, 对氧还原反应的活性位点产生毒化作用, 进一步加剧性能衰减[148]。同时, 密封材料在长期高温服役条件下会发生蠕变和脆化, 加之其与连接体、电解质之间 CTE 的不匹配, 容易引发密封失效和气体交叉问题[149]。更严重的是, 频繁的热循环或不均匀的温度分布会产生显著的热机械应力, 可能导致陶瓷电解质开裂、电极涂层剥落等不可逆的结构损伤。值得注意的是, SOFC 的寿命表现高度依赖于维持稳定的高温运行状态及实施极其缓慢、可控的负荷变化, 以最大限度地降低热应力带来的负面影响。与 PEMFC 不同, SOFC 的衰减过程通常难以通过在线手段进行恢复, 其寿命提升的关键路径在于开发新一代中温材料体系、具有抗铬毒特性的阴极材料, 以及展现更强热机械鲁棒性的电池结构设计。

综上所述, 三者在寿命维度呈现出不同的图景。锂电池的衰减是持续且不可逆的, 管理策略的核心在于延缓; PEMFC 的衰减是可干预的, 通过系统控制策略和维护手段有望部分恢复; 而 SOFC 的

寿命则与热历史强绑定，其衰减是累积且难以逆转的，设计与管理的第一要务是维持温度稳定，避免一切可能带来机械损伤的剧烈操作。这种衰减机理的本质差异，从根本上决定了其适航验证策略与维护周期的制定，进而影响其在高频次短途航线与低频次长航程航线中的经济性与适用性。

4.4 安全与环境特性

航空动力系统的安全性设计与环境效益评估，需建立在对不同技术路线风险本源与全生命周期影响的深刻理解之上。燃料电池与锂电池在此维度上呈现出截然不同的风险图谱与环境悖论，直接决定了其适航路径与可持续性认证的焦点。

在安全性方面，2种技术的风险本源截然不同。锂电池的风险本质源于内短路引发的链式热失控[150]。电池内部隔膜局部失效导致正负极直接接触，引发剧烈放热反应，进而点燃有机电解液并导致相邻电芯发生热蔓延。这一过程具有突发性、快速蔓延性及难以扑救的特点，其机制可以通过图13所示的链式反应来解释。其防护体系采用深度防御策略，依赖高精度BMS实现早期故障预警，并通过电芯级热屏障、模组级隔热及系统级高效冷却等多重措施物理阻断热扩散。

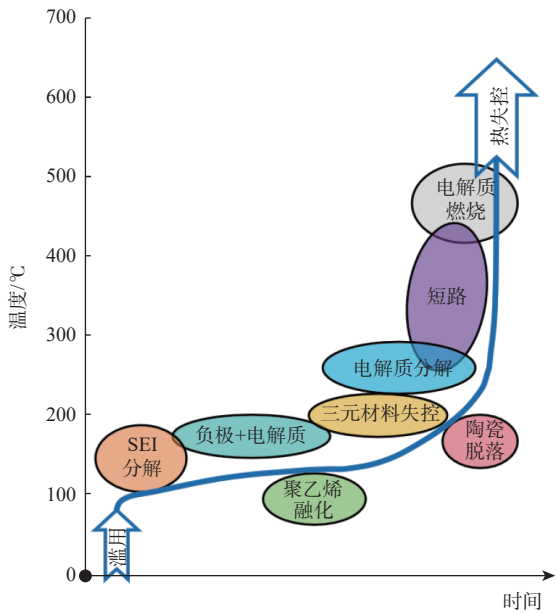


图13 热-温度-反应回路

Fig. 13 Heat-temperature-reaction loop

与之相比，燃料电池本体的电化学反应完全可控，其核心风险并非来自反应本身。对于采用纯氢燃料的PEMFC，风险集中于氢气泄漏后的燃烧与爆炸。氢气具有极宽的爆炸极限范围、较低的点燃能量和极强的扩散能力，其安全性高度依赖于“故障-安全”设计理念，即采用高度集成、冗余的氢气管路系统，配备多级快速切断阀、基于氢敏传感器的实时泄漏监测系统、碰撞感知与自动泄压装置，并通过精心设计的气体流场避免氢气的局部聚集。其安全设计旨在确保即使发生单一部件失效，也能将氢气泄漏的风险降至最低。而SOFC面临的首要风险来自600～1 000 ℃高温运行环境带来的热危害，包括高温部件可能造成的灼伤风险及特殊工况下的热失控可能。此外，当使用氨、甲醇等替代燃料时，还需要考虑这些燃料特有的毒性和腐蚀性风险，要求系统具备相应的防护措施。

在环境表现方面，必须采用“Well-to-Wake”全生命周期视角进行客观评估。锂电池在使用阶段是真正的零排放，但其碳足迹和环境代价大幅转移至上游的电池材料开采、冶炼、生产制造环节及下游的报废回收阶段。正极材料(如镍、钴、锂)的开采具有高能耗、高水耗和生态破坏性，电池生产过程也属于高碳排环节。其环保优势的兑现，最终依赖于绿色电网和闭环回收技术的成熟。

首先，燃料电池的环境正当性则完全依赖于燃料的来源。当使用由可再生能源电解水产生的绿氢时，其全生命周期可实现近零碳排放，展现出巨大的环境优势。然而，若使用当前主流化石能源重整制得的灰氢或蓝氢为燃料，其全生命周期的碳足迹可能甚至高于直接使用航空煤油的传统发动机。对于可使用SAF或生物甲醇的SOFC系统，其碳中和程度则取决于这些燃料的原料来源与生产工艺。因此，燃料电池技术的环境效益并非其固有属性，而是一个与整个国家或地区的能源结构和氢能战略紧密绑定的外部变量。图14展示了当前阶段氢气从生产到利用的全链条。

综上所述，安全与环境并非静态的优劣对比，而是一个动态的系统工程。安全性要求根据不同的风险本源，设计截然不同的防护体系。环境效益则要求超越使用阶段的局部排放，从能源系统的全局视角进行审视。这2种技术的真正清洁与安全未来共同依赖于绿色能源基础设施的完善、高标准全生命周期碳核算体系的建立及闭环材料循环经济的实现。

本节从能量载体与功率特性2个根本范式出发，系统阐释了燃料电池与锂电池在航程与动态响应能力上的本质分野，并在图11呈现的任务适配性图谱中对其互补的战略定位进行了可视化总结。然而，一项动力技术要从理论匹配走向商业应用，还必须通过衰减机理与安全环境特性这两大可行性维度的严格评估。前者决定了系统在长期运行中的经济性与可靠性边界，后者则关乎其全生命周期的环境合规性与社会接受度。因此，锂电池、

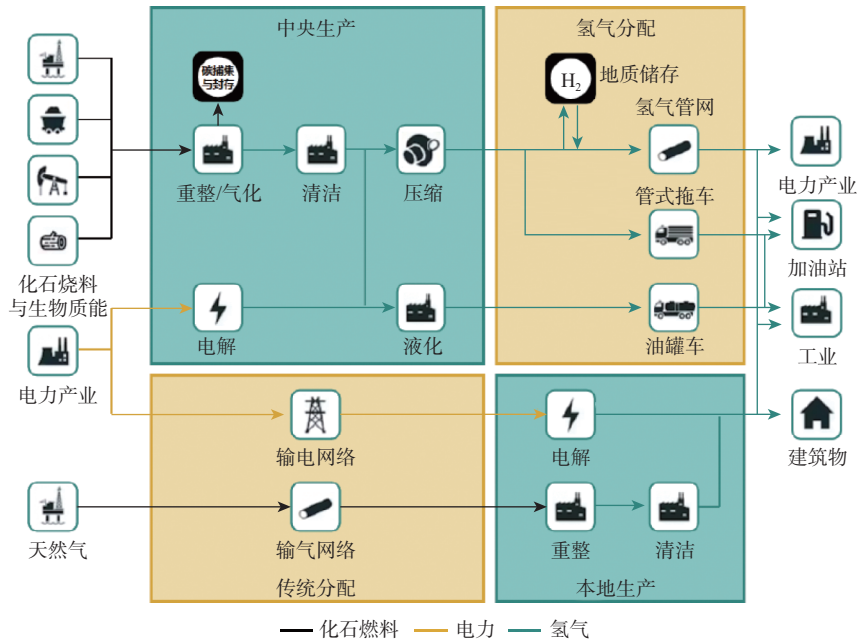


图 14　氢气全产业链示意图

Fig. 14　Schematic of the full hydrogen value chain

燃料电池及其混合架构在绿色航空未来的角色是由核心性能边界、长期运行耐久性及全周期可持续性这三大支柱共同定义的。它们在此多维评估框架下, 构成了互补共生的技术谱系, 为航空业的深度脱碳提供了多元且坚实的解决方案。

5　燃料电池在航空领域的应用案例与发展路径

在上文对 PEMFC 与 SOFC 的技术原理、系统架构及挑战进行深入剖析, 并从技术范式角度将其与锂电池系统进行全面对比的基础上, 燃料电池航空动力系统的研究已逐步从理论探索走向工程实践。当前, 全球多个创新项目通过原型机试飞与示范运行, 验证了燃料电池在不同航空平台中的应用潜力, 同时也揭示了从实验室走向商业化所需跨越的鸿沟。本节将结合代表性案例, 分析燃料电池在航空领域的实际应用成效, 并据此展望其未来发展的可能路径与关键挑战。

5.1　典型案例剖析

燃料电池在航空领域的应用呈现出多样化的技术路线和平台适配性。以下案例分别体现了 PEMFC 和 SOFC 系统的当前发展水平及其对应的应用场景, 如图 15 所示。

ZeroAvia 公司的 HyFlyer II 项目代表了 PEMFC 技术向支线航空领域拓展的积极尝试。如图 15(a) 所示, 该公司开发了 ZA600 氢电推进系统, 基于 19 座道尼尔 228 飞机平台进行飞行测试, 将 ZA600 安装在左翼替代原有的霍尼韦尔 TPE-331 涡桨发



(a) HyFlyer II原型机　(b) HY4验证机

(c) Prodrone无人机　(d) Stalker VXE无人机

图 15　燃料电池航空示范应用

Fig. 15　Demonstration of fuel cell applications in aviation

动机。该混合动力系统集成了额定功率为 400 kW 的 PEMFC 电堆(由 PowerCell 提供)和锂电池组, 通过电机提供峰值功率为 660 kW 的动力输出[151]。这一设计实践了 4.2 节所述的功率混合型架构, 其中, 燃料电池作为高效巡航的基载电源, 锂电池则负责满足高功率需求阶段(如起飞和爬升)的能量补充, 有效弥补了 PEMFC 动态响应相对滞后的不足。该项目目前实现了约 556 km 的设计航程, 标志着 PEMFC 系统正向更大载重、更远航程的航空平台迈进。然而, 其所采用的高压气态储氢方案也面临着能量密度限制的挑战, 这正是当前行业积极探索液氢储运技术的直接原因。

在液氢储运技术验证方面, H2FLY 公司的 HY4 四座验证机取得了突破性进展。如图 15(b) 所示, 该机采用独特的双机身设计, 中央动力舱集成了 80 kW 的电动机。项目最初采用 35 MPa 高压气态

储氢系统，储氢量为9 kg，航程为750 km。后续升级为液氢储罐系统后，储氢量大幅提升至24 kg，航程相应扩展至1 500 km[152]。这一成果不仅证明了深冷液氢技术在航空应用中的可行性，也彰显了其在提升航程方面的显著优势。液氢极高的质量能量密度为破解航空器储氢难题提供了切实可行的解决方案，但同时也带来了绝热、液化耗能高和蒸发损失控制等新的技术挑战，这些问题的解决将成为决定液氢技术在航空领域大规模应用的关键。

日本Prodrone公司开发的液化石油气燃料无人机展现了SOFC多燃料适应性的独特优势。如图15(c)所示，这款工业级无人机集成了新型平板式SOFC电堆，能够在电极内部直接将液化石油气转化为合成气进行发电，省去了外部重整器，显著提高了系统功率密度。采用SOFC-锂电池混合架构后，系统实现了超过1 h的连续飞行能力，且可通过更换市售液化石油气罐在1 min内完成燃料补充[153]。这一创新设计充分体现了SOFC燃料灵活性的工程价值，使其能够摆脱对氢气基础设施的依赖，在工业巡检、长航时监视等特殊应用场景中展现出独特的实用性。同时，混合动力架构的应用也是对SOFC动态响应较慢这一固有问题的有效解决方案，为SOFC系统在航空领域的应用提供了重要参考。

在长航时军事应用领域，洛克希德·马丁公司开发的Stalker VXE无人机将SOFC系统的性能发挥到了新的高度。该无人机采用SOFC-锂电池混合动力系统，以丙烷为燃料，在搭载2.5 kg任务载荷时续航时间可达8 h[154]。更令人瞩目的是，其原型机通过外置燃料箱扩容后，如图15(d)所示，实现了连续飞行超过39 h的卓越表现，创下了5～25 kg级无人机续航时间的世界纪录[155]。这一成就不仅验证了SOFC系统在高能量转换效率方面的优势，也展示了其在军事侦察、持久监视等特殊场景下的应用价值。该项目的成功依赖于先进的热管理、系统集成和燃料处理技术，特别是在应对高温密封、热循环耐受性等挑战方面取得了重要进展，代表了当前SOFC系统集成技术的最高水平。

5.2 发展路径与未来挑战

当前原型机与无人机项目的成功，为燃料电池航空动力系统勾勒出了一条从特定场景验证逐步走向大规模商业化的发展路径。近期，技术应用将聚焦于小型无人机与通勤飞机市场，依托PEMFC的快速响应与SOFC的燃料灵活性，在工业巡检、区域物流等细分领域率先实现商业化突破。随着液氢储运等关键技术的成熟，中期目标将瞄准支线航空领域，推动系统向更大功率、更高集成度发展。而远期愿景则是进军单通道干线客机市场，这无疑依赖于革命性新材料和新架构的突破，最终实现航空动力的深度脱碳[156]。

然而，实现这一蓝图绝非易事，诸多挑战横亘于前。首当其冲的是技术成熟度问题，将实验室的高性能转化为满足航空严苛要求的可靠性，仍需跨越巨大鸿沟。极致提升系统的功重比与功率密度，需要对整个动力系统进行前所未有的轻量化和集成化设计，其难度远超其他应用场景。同时，航空器数万小时的耐久性与可靠性要求，对燃料电池系统，特别是SOFC的抗热震疲劳性能、启停循环寿命及长期运行下的材料衰减等方面提出了极其苛刻的考验。此外，应对飞行中复杂多变工况的高智能控制策略，也是决定系统能否稳定高效运行的关键。

超越技术本身，绿色氢能供应链的缺失构成了另一个基础性挑战。燃料电池的环境效益本质上取决于燃料来源，而当前绿氢的产能、成本及储运技术远未满足航空规模应用的需求。这导致了一个典型的发展困境：航空业等待氢能基础设施的完善，而能源领域则期待航空应用带来明确的需求信号。破解这一“鸡与蛋”的困局，需要跨行业的深度协同与顶层设计。

最后，所有这些挑战都汇聚于商业化的经济性门槛。在产业发展初期，高昂的研发与制造成本使燃料电池飞机难以与传统机型竞争。其商业化进程在相当长时间内仍需依赖碳定价机制和政策支持来弥补成本劣势，直到技术突破和规模化效应带来成本的实质性下降。这条发展路径上的每个环节都充满挑战，但也正是这些挑战，定义了未来研究的方向与价值所在。

6 结束语

燃料电池航空动力系统作为航空业迈向碳中和的重要技术路径，展现出广阔的应用前景和独特的技术价值。本文围绕PEMFC与SOFC两类主流技术，系统分析了其工作原理、系统架构、关键挑战及适用场景，并从能量载体、功率响应、寿命机制、安全与环境等多维度，与锂电池推进系统进行了对比。研究表明，锂电池、PEMFC和SOFC在任务谱系上呈现出明确的互补协同关系：锂电池凭借其高功率密度与快速响应能力，在城市空中交通领域占据主导；PEMFC则凭借其快速启动、较高功率密度和技术成熟度，在通用航空及短途支线领域展现出强大的应用潜力；而SOFC依托其超高效率与

卓越的多燃料适应性, 成为未来中远程支线及干线航空最具竞争力的技术方案。

展望未来, 燃料电池航空动力系统仍处于从实验室走向工程应用的关键阶段。下一步的发展应持续聚焦于高温材料、抗毒催化剂、轻量化储氢、智能热管理、高效空气系统等核心技术的突破, 不断提升系统的功重比、可靠性和环境适应性。具体而言, PEMFC 技术需重点攻克适用于小型飞机的低成本、轻量化、高耐久性系统集成; 而 SOFC 技术则需着力解决适用于大型飞机的功率变化与燃料重整等核心瓶颈。

在系统层面, 混合架构仍是重要发展方向。通过将燃料电池与高功率储能单元有机结合, 可有效弥补燃料电池在动态响应方面的不足, 实现功率与能量的优化分配, 提升系统整体性能。同时, 推动电堆-重整器-热管理-功率调节等多子系统的高度集成与智能协同, 也是实现航空级动力系统轻量化、高可靠性的必由之路。

值得强调的是, 燃料电池的环境效益高度依赖于氢源和其他燃料的全生命周期绿色化。未来需依托可再生能源制备绿氢、绿氨或 SAF, 构建“能源-燃料-动力”一体化的零碳航空能源体系。这不仅需要技术突破, 更依赖政策支持、产业链协同和跨学科合作, 共同推动标准建立、场景验证和示范运行。

总之, 燃料电池航空动力系统正处于技术快速演进与应用场景不断拓展的历史机遇期。尽管在储氢、耐久性、系统控制等方面仍面临诸多挑战, 但其在实现长航时、低排放飞行方面的潜力已得到初步验证。通过持续的技术创新、系统优化与产研协同, 锂电池、PEMFC 与 SOFC 将共同构成覆盖从城市空运到干线飞行的完整绿色航空动力谱系, 为实现航空业深度脱碳提供坚实且多元化的技术支撑。

参考文献（References）

[1] Kroyan Y, Wojcieszyk M, Kaario O, et al. Modeling the impact of sustainable aviation fuel properties on end-use performance and emissions in aircraft jet engines[J]. Energy, 2022, 255: 124470.

[2] International Civil Aviation Organization. Carbon offsetting and reduction scheme for international aviation (CORSIA)[EB/OL]. (2025-05-15)[2025-09-19]. https://www.icao.int/CORSIA.

[3] 张毅伟, 薛健敏. 新能源飞机动力系统的发展现状与趋势[J]. 军民两用技术与产品, 2025(4): 22-27.
Zhang Y W, Xue J M. Development of power systems for new energy aircraft[J]. Dual Use Technologies & Products, 2025(4): 22-27 (in Chinese).

[4] 国旭涛, 蔡洁聪, 韩高岩, 等. 分布式能源技术与发展现状[J]. 分布式能源, 2019, 4(1): 52-59.
Guo X T, Cai J C, Han G Y, et al. Technologies and development status for distributed energy resources[J]. Distributed Energy, 2019, 4(1): 52-59(in Chinese).

[5] 童鑫, 熊哲, 高新宇, 等. 质子交换膜燃料电池研究现状及发展[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(9): 3243-3258.
Tong X, Xiong Z, Gao X Y, et al. Research status and development of proton exchange membrane fuel cell[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2022, 41(9): 3243-3258(in Chinese).

[6] 陈烁烁. 固体氧化物燃料电池产业的发展现状及展望[J]. 陶瓷学报, 2020, 41(5): 627-632.
Chen S S. Development and prospects of solid oxide fuel cell industry[J]. Journal of Ceramics, 2020, 41(5): 627-632(in Chinese).

[7] Chan S H, Ho H K, Tian Y. Modelling of simple hybrid solid oxide fuel cell and gas turbine power plant[J]. Journal of Power Sources, 2002, 109(1): 111-120.

[8] Sugano K, Mair S, Ganti-Agrawal S, et al. Sodium-air fuel cell for high energy density and low-cost electric power[J]. Joule, 2025, 9(6): 101962.

[9] 秦江, 姬志行, 郭发福, 等. 航空用燃料电池及混合电推进系统发展综述[J]. 推进技术, 2022, 43(7): 1-18.
Qin J, Ji Z X, Guo F F, et al. Review of aviation fuel cell and hybrid electric propulsion systems[J]. Journal of Propulsion Technology, 2022, 43(7): 1-18(in Chinese).

[10] 王梦琦. 质子交换膜燃料电池的研究进展与前景微探[J]. 当代化工研究, 2020(12): 8-10.
Wang M Q. Research progress and prospect of PEMFC[J]. Modern Chemical Research, 2020(12): 8-10(in Chinese).

[11] 陈汝妍, 高九涛, 高圆, 等. 管式固体氧化物燃料电池技术进展[J]. 硅酸盐学报, 2024, 52(6): 1900-1916.
Chen R Y, Gao J T, Gao Y, et al. Development of tubular solid oxide fuel cells technology[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2024, 52(6): 1900-1916(in Chinese).

[12] Chen X B, Zhong J, Wei J Z. Research on modeling and simulation of fuel cell bus power system based on forward-backward energy flow balance method[J]. Science Progress, 2022, 105: 00368504211064476.

[13] Zhang J M, Yan F W, Du C Q, et al. A multi-feature fusion method for life prediction of automotive proton exchange membrane fuel cell based on TCN-GRU[J]. Materials, 2024, 17(19): 4713.

[14] Wang F K, Han S R, Zhang Y L, et al. Constructing rapid water vapor transport channels within mixed matrix membranes based on two-dimensional mesoporous nanosheets[J]. Communications Chemistry, 2022, 5: 65.

[15] Li C J, Cheng K L, Ma S S, et al. Performance analysis of solid oxide fuel cell/piston engine hybrid system for aviation[J]. Applied Thermal Engineering, 2022, 214: 118797.

[16] Wade F, Roche R, Chailan A, et al. Optimal sizing and energy management of an integrated energy system coupling a hydrogen-fueled gas turbine with storage for power-to-power and hydrogen supply[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 135: 31-47.

[17] Mancino A N, Menale C, Vellucci F, et al. PEM fuel cell applications in road transport[J]. Energies, 2023, 16(17): 6129.

[18] Arjmandi M, Fattahi M, Motevassel M, et al. Evaluating algorithms of decision tree, support vector machine and regression

for anode side catalyst data in proton exchange membrane water electrolysis[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 20309.

[19] 马智文, 曾怡达, 李伦. 大功率 PEMFC 空气供给系统建模与实验验证[J]. 化工学报, 2016, 5(5): 2109-2116.
Ma Z W, Zeng Y D, Li L. Modeling and experimental verification of air supply system in large power PEMFC[J]. CIESC Journal, 2016, 5(5): 2109-2116(in Chinese).

[20] Fang R R, Li Z K, Zhang X H, et al. Spreading and drying dynamics of water drop on hot surface of superwicking Ti-6Al-4V alloy material fabricated by femtosecond laser[J]. Nanomaterials, 2021, 11(4): 899.

[21] Yakubu A U, Zhao J H, Jiang Q, et al. A comprehensive review of primary cooling techniques and thermal management strategies for polymer electrolyte membrane fuel cells PEMFC[J]. Heliyon, 2024, 10(19): e38556.

[22] Zahedi R, Forootan M M, Ahmadi R, et al. Exergy-economic assessment of a hybrid power, cooling and heating generation system based on SOFC[J]. Heliyon, 2023, 9(5): e16164.

[23] Wang H, Yang G G, Li S A, et al. Pore-scale modeling of liquid water transport in compressed gas diffusion layer of proton exchange membrane fuel cells considering fiber anisotropy[J]. Membranes, 2023, 13(6): 559.

[24] Hsu C H, Pan Z B, Qu H T, et al. Green synthesis of nitrogen-doped multiporous carbons for oxygen reduction reaction using water-caltrop shells and eggshell waste[J]. RSC Advances, 2021, 11(26): 15738-15747.

[25] Tellez-Cruz M M, Escorihuela J, Solorza-Feria O, et al. Proton exchange membrane fuel cells (PEMFCs): advances and challenges[J]. Polymers, 2021, 13(18): 3064.

[26] Rofiansyah W, Zalianty F R, Ahmad La Ito F, et al. IoT-based control and monitoring system for hydroponic plant growth using image processing and mobile applications[J]. PeerJ Computer Science, 2025, 11: e2763.

[27] 娄凤强. 燃料电池并网发电系统前端 DC/DC 变换器研究[D]. 济南: 山东大学, 2011.
Lou F Q. Study of the front-ended DC/DC converter in grid-connected fuel cell generation power system[D]. Jinan: Shandong University, 2011(in Chinese).

[28] Liu X F, Song E S, Zhang L M, et al. Design and implementation for the state time-delay and input saturation compensator of gas turbine aero-engine control system[J]. Energy, 2024, 288: 129934.

[29] Luo Y Q, Jiao K. Cold start of proton exchange membrane fuel cell[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2018, 64: 29-61.

[30] Jiao K, Xuan J, Du Q, et al. Designing the next generation of proton-exchange membrane fuel cells[J]. Nature, 2021, 595(7867): 361-369.

[31] Ahmed S, Beauger C, Zada A, et al. Recent advancements in designing high-performance proton exchange membrane fuel cells: a comprehensive review[J]. Applied Energy, 2025, 390: 125753.

[32] Majlan E H, Rohendi D, Daud W R W, et al. Electrode for proton exchange membrane fuel cells: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 89: 117-134.

[33] Tajiri K, Tabuchi Y, Wang C Y. Isothermal cold start of polymer electrolyte fuel cells[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2007, 154(2): B147.

[34] Chacko C, Ramasamy R, Kim S, et al. Characteristic behavior of polymer electrolyte fuel cell resistance during cold start[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2008, 155(11): B1145.

[35] 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汽车用燃料 氢气: GB/T 37244—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Fuel specification for proton exchange membrane fuel cell vehicles—Hydrogen: GB/T 37244—2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018(in Chinese).

[36] Borras J. HY4 passenger plane sets hydrogen altitude record [EB/OL]. (2022-04-23)[2025-11-10]. https://cleantechnica.com/2022/04/23/hy4-passenger-plane-sets-hydrogen-altitude-record/.

[37] DLR. Zero-emission air transport-first flight of four-seat passenger aircraft Hy4 [EB/OL]. (2016-09-29)[2025-11-10]. https://www.dlr.de/en/latest/news/2016/20160929_zero-emission-air-transport-first-flight-of-four-seat-passenger-aircraft-hy4_19469.

[38] Liu P C, Xu S C. A review of low-temperature proton exchange membrane fuel cell degradation caused by repeated freezing start[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2023, 48(22): 8216-8246.

[39] Smith P J, Bennett W R, Jakupca I J. Proton exchange membrane fuel cell transient load response: NASA/TM-20210018094[R]. Washington, D. C. : NASA, 2021.

[40] ZeroAvia. ZeroAvia-ZA600-Caravan-Whitepaper-2023[R]. Washington, D. C. : NASA, 2023.

[41] PowerCell Group. PowerCell and ZeroAvia to collaborate on next generation fuel cell stack development[EB/OL]. (2024-10-29)[2025-09-21]. https://powercellgroup.com/press-releases/powercell-and-zeroavia-to-collaborate-on-next-generation-fuel-cell-stack-development/.

[42] Mazzoni F, Accardo G, Biga R, et al. Hydrogen storage system design: case studies for airborne application[C]//Proceedings of the 34th ICAS Congress. Bonn: The International Council of the Aeronautical Sciences, 2024.

[43] 朱斌, 杨少柒, 郭梁, 等. 机载液氢燃料储供系统发展现状与展望[J]. 航空学报, 2025, 46(16): 123-141.
Zhu B, Yang S Q, Guo L, et al. Development and prospects of onborne liquid hydrogen fuel storage and supply system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2025, 46(16): 123-141(in Chinese).

[44] 张晓飞, 蒋利军, 叶建华, 等. 固态储氢技术的研究进展[J]. 太阳能学报, 2022, 43(6): 345-354.
Zhang X F, Jiang L J, Ye J H, et al. Research progress of solid-state hydrogen storage teachnology[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(6): 345-354(in Chinese).

[45] Gao R H, Cai B A, Zhao Y Q, et al. Advanced performance analysis and life cycle assessment of a coupled system: MSR, LT-PEMFC and spray flash desalination[J]. Energy, 2025, 323: 135859.

[46] Yu S, Fan Y, Shi Z R, et al. Innovative heat management method and metaheuristic algorithm optimized power supply-demand balance for PEMFC-ASHP-CHP system[J]. Applied Energy, 2024, 361(C): 122806.

[47] Khandelwal M, Mench M M. Direct measurement of through-plane thermal conductivity and contact resistance in fuel cell materials[J]. Journal of Power Sources, 2006, 161(2): 1106-1115.

[48] Ji W C, Lin R. Strategy optimization of proton exchange membrane fuel cell cold start[J]. Chinese Science Bulletin, 2022, 67(19): 2241-2257.

[49] González-Espasandín Ó, Leo T J, Raso M A, et al. Direct methanol fuel cell (DMFC) and H_2 proton exchange membrane fuel (PEMFC/H2) cell performance under atmospheric flight conditions of unmanned aerial vehicles[J]. Renewable Energy, 2019, 130: 762-773.

[50] 欧凯, 胡皓文, 吴雨衡, 等. 载运工具用燃料电池空气压缩机技术综述[J]. 交通运输工程学报, 2025, 25(1): 66-93.
Ou K, Hu H W, Wu Y H, et al. Review on technologies of fuel cell air compressors for vehicles[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2025, 25(1): 66-93(in Chinese).

[51] 潘涛. 空压机用高速永磁同步电动机的设计及损耗分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
Pan T. Design and loss analysis of high-speed permanent magnet synchronous motor for air compressor[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022(in Chinese).

[52] 赵冬冬, 华志广, 梁艳, 等. 飞机燃料电池的离心空气压缩机特性研究[J]. 航空科学技术, 2017, 28(2): 64-68.
Zhao D D, Hua Z G, Liang Y, et al. Centrifugal air compressor characteristic research on the fuel cells in the aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2017, 28(2): 64-68(in Chinese).

[53] Franck-Lacaze L, Bonnet C, Besse S, et al. Effects of ozone on the performance of a polymer electrolyte membrane fuel cell[J]. Fuel Cells, 2009, 9(5): 562-569.

[54] Guo X J, Xu B, Ma Z S, et al. Performance analysis based on sustainability exergy indicators of high-temperature proton exchange membrane fuel cell[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(17): 10111.

[55] Lyu C X, Zhao P, Xie J, et al. Electrospinning of nanofibrous membrane and its applications in air filtration: a review[J]. Nanomaterials, 2021, 11(6): 1501.

[56] He C, Wen Q L, Ning F D, et al. A new integrated GDL with wavy channel and tunneled rib for high power density PEMFC at low back pressure and wide humidity[J]. Advanced Science, 2023, 10(28): 2302928.

[57] Li Y Y, He J C, Luo X L, et al. Experimental study on flow boiling-based micro-channel configurations for the PEMFC cooling[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2023, 46: 102210.

[58] Khatir F A, Barzegari M M, Ghadikolaee H T. Optimal geometry selection for the microchannel in bipolar plates of PEM fuel cells from a multi-criteria decision analysis point of view[J]. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM), 2025, 19(4): 2789-2800.

[59] 韩敏芳, 杨翠柏, 王玉倩, 等. 固体氧化物燃料电池[J]. 物理, 2004(2): 90-94.
Han M F, Yang C B, Wang Y Q, et al. Solid oxide fuel cell[J]. Physics, 2004(2): 90-94(in Chinese).

[60] 陈志远, 王丽君, 李福燊, 等. 碳基燃料 SOFC 的 Ni-YSZ 阳极过程动力学[J]. 电源技术, 2014, 38(7): 1377-1379.
Chen Z Y, Wang L J, Li F S, et al. Process kinetics of SOFCs Ni-YSZ anode using carbon based fuels[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2014, 38(7): 1377-1379(in Chinese).

[61] Khan M S, Lee S B, Song R H, et al. Fundamental mechanisms involved in the degradation of nickel-yttria stabilized zirconia (Ni-YSZ) anode during solid oxide fuel cells operation: a review[J]. Ceramics International, 2016, 42(1): 35-48.

[62] 李一倩, 李敬威, 吕喆. 固体氧化物燃料电池阳极的硫毒化与再生活化[J]. 硅酸盐学报, 2021, 49(1): 126-135.
Li Y Q, Li J W, Lyu Z. Poisoning and activation of anode for solid oxide fuel cell[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2021, 49(1): 126-135(in Chinese).

[63] 乔金硕, 孙克宁, 张乃庆, 等. 固体氧化物燃料电池燃料重整技术研究进展[J]. 化工进展, 2004, 23(11): 1189-1194.
Qiao J S, Sun K N, Zhang N Q, et al. Process of fuel reforming technology for SOFC'S[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2004, 23(11): 1189-1194(in Chinese).

[64] 吴雨泽, 王宇旸, 范红途. 固体氧化物燃料电池 (SOFC) 系统的研究现状[J]. 能源研究与利用, 2019(1): 40-46.
Wu Y Z, Wang Y Y, Fan H T. Research status of solid oxide fuel cell (SOFC) system[J]. Energy Research & Utilization, 2019(1): 40-46(in Chinese).

[65] 张莉, 邢耀华, 钟杰, 等. 1kW SOFC-CHP 系统用催化燃烧耦合蒸汽重整反应器的实验研究[J]. 化工学报, 2016, 67(2): 557-562.
Zhang L, Xing Y H, Zhong J, et al. Experimental study on reactor integrating catalytic combustion and steam reforming for 1 kW SOFC-CHP[J]. CIESC Journal, 2016, 67(2): 557-562(in Chinese).

[66] Reuse P, Renken A, Haas-Santo K, et al. Hydrogen production for fuel cell application in an autothermal micro-channel reactor[J]. Chemical Engineering Journal, 2004, 101(1-3): 133-141.

[67] Laosiripojana N, Assabumrungrat S. Catalytic steam reforming of methane, methanol, and ethanol over Ni/YSZ: the possible use of these fuels in internal reforming SOFC[J]. Journal of Power Sources, 2007, 163(2): 943-951.

[68] 牛海涛. 二甲醚部分氧化重整制氢催化剂作用的研究[D]. 锦州: 辽宁工业大学, 2014.
Niu H T. Study on roles of catalysts in hydrogen production by partial oxidation and reforming of DME[D]. Jinzhou: Liaoning University of Technology, 2014(in Chinese).

[69] Edwards N, Ellis S R, Frost J C, et al. On-board hydrogen generation for transport applications: the HotSpot™ methanol processor [J]. Journal of Power Sources, 1998, 71(1-2): 123-128.

[70] 张伟, 李世安, 刘聪敏, 等. 车载甲醇重整微型反应器研究进展[J]. 现代化工, 2019, 39(7): 27-32.
Zhang W, Li S A, Liu C M, et al. Research progress in vehicle-mounted methanol reforming microreactor[J]. Modern Chemical Industry, 2019, 39(7): 27-32(in Chinese).

[71] Xu X H, Li P W, Shen Y S. Small-scale reforming of diesel and jet fuels to make hydrogen and syngas for fuel cells: a review[J]. Applied Energy, 2013, 108: 202-217.

[72] 袁斌, 潘建欣, 王傲, 等. 燃料电池用柴油重整制氢技术现状与展望[J]. 化工进展, 2020, 39(S1): 107-115.
Yuan B, Pan J X, Wang A, et al. Research progress and perspective of diesel reforming to hydrogen production for fuel cell applications[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2020, 39(S1): 107-115(in Chinese).

[73] Samsun R C, Prawitz M, Tschauder A, et al. An autothermal reforming system for diesel and jet fuel with quick start-up capability[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2019, 44(51): 27749-27764.

[74] 曹军文, 覃祥富, 耿嘎, 等. 氢气储运技术的发展现状与展望[J]. 石油学报 (石油加工), 2021, 37(6): 1461-1478.
Cao J W, Qin X F, Geng G, et al. Current status and prospects of hydrogen storage and transportation technology[J]. Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section), 2021, 37(6): 1461-1478(in Chinese).

[75] Staykov A, Yamabe J, Somerday B P. Effect of hydrogen gas impurities on the hydrogen dissociation on iron surface[J]. International Journal of Quantum Chemistry, 2014, 114(10): 626-635.

[76] 刘志军. 车用汽油及其添加剂综述[J]. 化工设计通讯, 2018, 44(1): 233.
Liu Z J. Review of automotive gasoline and its additives[J]. Chemical Engineering Design Communications, 2018, 44(1): 233(in Chinese).

[77] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 车用柴油: GB 19147—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016-12-02.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Automotive diesel fuel: GB 19147—2016[S]. Beijing: China Standards Press, 2016-12-02(in Chinese).

[78] Hou X X, Marin-Flores O, Kwon B W, et al. Gasoline-fueled solid oxide fuel cell using MoO_2-based anode[J]. Journal of Power Sources, 2014, 268: 546-549.

[79] Kale G R, Kulkarni B D. An alternative process for gasoline fuel processors[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2011, 36(3): 2118-2127.

[80] 王昊, 梁卫忠, 周雨霏. 柴油制氢催化工艺开发[J]. 齐鲁石油化工, 2025, 53(1): 5-10.
Wang H, Liang W Z, Zhou Y F. Development of catalytic process for hydrogen production form diesel[J]. Qilu Petrochemical Technology, 2025, 53(1): 5-10(in Chinese).

[81] Höber M, Königshofer B, Boškoski P, et al. Diesel operated combined heat and power SOFC system: SOFC characterization and proof of concept[J]. Journal of Power Sources, 2023, 585: 233635.

[82] Lawrence J, Boltze M. Auxiliary power unit based on a solid oxide fuel cell and fuelled with diesel[J]. Journal of Power Sources, 2006, 154(2): 479-488.

[83] Shilov V A, Potemkin D I, Burmatova M A, et al. Development of diesel fuel processor and optimisation of the thermal circuit of a power plant based on sofc with a power of 1 kW[J]. Chemistry for Sustainable Development, 2024(3): 387-398.

[84] Edwards T, Maurice L Q. Surrogate mixtures to represent complex aviation and rocket fuels[J]. Journal of Propulsion and Power, 2001, 17(2): 461-466.

[85] Panthi D, Du Y H, Feng H, et al. Onboard miniature jet fuel desulfurizer for mobile fuel cell power systems[J]. Energy Technology, 2024, 12(6): 2400008.

[86] 阮鹏, 林梓荣, 白帆飞, 等. 天然气水蒸气重整与 SOFC 耦合应用[J]. 新能源进展, 2023, 11(1): 29-37.
Ruan P, Lin Z R, Bai F F, et al. Coupling of steam reforming in natural gas SOFC system[J]. Advances in New and Renewable Energy, 2023, 11(1): 29-37(in Chinese).

[87] 刘爱虢, 朱悦, 李鹏超, 等. 应用 LNG 的通用飞机动力系统[J]. 沈阳航空航天大学学报, 2016, 33(6): 28-34.
Liu A G, Zhu Y, Li P C, et al. The LNG power system for general aircraft[J]. Journal of Shenyang Aerospace University, 2016, 33(6): 28-34(in Chinese).

[88] 刘军民, 廖世军. 天然气直接固体氧化物燃料电池研究进展[J]. 天然气工业, 2005, 25(11): 107-110.
Liu J M, Liao S J. Advance of study on solid oxide fuel cells directly from gas[J]. Natural Gas Industry, 2005, 25(11): 107-110(in Chinese).

[89] 李蕴, 田涛. 可持续航空燃料技术经济分析进展与启示[C]//第七届中国航空科学技术大会论文集. 北京: 中国航空学会, 2024: 782-788.
Li Y, Tian T. Progress and insights on techno-economic analysis of sustainable aviation fuel[C]//Proceedings of the 7th China Aeronautical Science and Technology Conference. Beijing: CSAA, 2024: 782-788(in Chinese).

[90] ASTM International. Standard specification for aviation turbine fuel containing synthesized hydrocarbons: ASTM D7566[S]. West Conshohocken: ASTM International, 2024-03-01.

[91] Badwal S P S, Giddey S, Kulkarni A, et al. Direct ethanol fuel cells for transport and stationary applications—a comprehensive review[J]. Applied Energy, 2015, 145: 80-103.

[92] 李季铭, 杨扬, 朱恂, 等. 甲醇水蒸汽重整制氢装置及系统研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(18): 7276-7292.
Li J M, Yang Y, Zhu X, et al. Review on hydrogen production reactor and system of methanol steam reforming[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(18): 7276-7292(in Chinese).

[93] 姚春德, 姚安仁. 甲醇燃料的应用现状及其展望[J]. 汽车安全与节能学报, 2023, 14(5): 521-535.
Yao C D, Yao A R. Review on methanol as fuel for engines and its future prospect[J]. Journal of Automotive Safety and Engergy, 2023, 14(5): 521-535(in Chinese).

[94] Yang B C, Koo J, Shin J W, et al. Direct alcohol-fueled low-temperature solid oxide fuel cells: a review[J]. Energy Technology, 2019, 7(1): 5-19.

[95] 邓俊彦. 氨氢联动促进氢能源的发展[J]. 科技资讯, 2024, 22(1): 158-161.
Deng J Y. Development of hydrogen energy promoted by ammonia-hydrogen linkage[J]. Science & Technology Information, 2024, 22(1): 158-161(in Chinese).

[96] 刘书贤, 杨霞, 李文霄, 等. 绿氨制取与燃料电池利用技术研究进展[J]. 能源化工, 2025(1): 1-10.
Liu S X, Yang X, Li W X, et al. Research progress of green ammonia production and fuel cell utilization technology[J]. Energy Chemical Industry, 2025(1): 1-10(in Chinese).

[97] 倪士栋, 魏胜利, 杜振华, 等. 氨燃料固体氧化物燃料电池性能研究进展[J]. 精细化工, 2024, 41(4): 750-760.
Ni S D, Wei S L, Du Z H, et al. Research progress on performance of ammonia solid oxide fuel cells[J]. Fine Chemicals, 2024, 41(4): 750-760(in Chinese).

[98] Kishimoto M, Muroyama H, Suzuki S, et al. Development of

1 kW-class ammonia-fueled solid oxide fuel cell stack[J]. Fuel Cells, 2020, 20(1): 80-88.

[99] Liu H, Qin J, Xiu X Y, et al. Comparative study of fuel types on solid oxide fuel cell-gas turbine hybrid system for electric propulsion aircraft[J]. Fuel, 2023, 347: 128426.

[100] 邢睿. 汇率、油价对国内航空公司股价影响的研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
Xing R. An empirical study on the effect of exchange rate and oil price on the stock price of domestic airlines[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023(in Chinese).

[101] 王姿涵, 黄建伟. 基于国内出厂价的航油价格预测与波动风险测度研究[J]. 物流科技, 2024, 47(24): 104-111.
Wang Z H, Huang J W. Research on jet fuel price forecast and volatility risk measurement based on domestic ex-factory price[J]. Logistics Sci-Tech, 2024, 47(24): 104-111(in Chinese).

[102] 王翔宇, 刘向雷, 韩枫. 氢能航空产业配套分析[J]. 航空动力, 2023(3): 50-53.
Wang X Y, Liu X L, Han F. Analysis to the industrial supporting of hydrogen powered aviation[J]. Aerospace Power, 2023(3): 50-53 (in Chinese).

[103] Rathore S S, Biswas S, Fini D, et al. Direct ammonia solid-oxide fuel cells: a review of progress and prospects[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(71): 35365-35384.

[104] Yoon S, Kang I, Bae J. Effects of ethylene on carbon formation in diesel autothermal reforming[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2008, 33(18): 4780-4788.

[105] Meng H, Zhang J, Yang Y S. Recent status in catalyst modification strategies for hydrogen production from ethanol steam reforming[J]. ChemCatChem, 2023, 15(17): e202300733.

[106] Xu X H, Zhang S Y, Li P W, et al. Adsorptive desulfurization of liquid Jet-A fuel at ambient conditions with an improved adsorbent for on-board fuel treatment for SOFC applications[J]. Fuel Processing Technology, 2014, 124: 140-146.

[107] Wang Y, Pasel J, Peters R. Hydrodesulfurization process with presaturation using reformate for application in a 5 kW fuel cell system[J]. Fuel Processing Technology, 2014, 127: 59-65.

[108] Kobayashi Y, Kosaka K, Tomida K, et al. Start-up characteristics of segmented-in-series tubular SOFC power modules improved by catalytic combustion at cathodes[J]. Fuel Cells, 2014, 14(6): 1028-1035.

[109] Chun O, Jamshaid F, Khan M Z, et al. Advances in low-temperature solid oxide fuel cells: an explanatory review[J]. Journal of Power Sources, 2024, 610: 234719.

[110] Wang Y Q, Shi J X, Gu X, et al. Toward mobility of solid oxide fuel cells[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2024, 102: 101141.

[111] Jin M H, Lee C B, Lee D W, et al. Microchannel methane steam reformers with improved heat transfer efficiency and their long-term stability[J]. Fuel, 2016, 176: 86-92.

[112] Simopoulos G N. Solid oxide fuel cell development for auxiliary power in heavy-duty vehicle applications[C]//Proceedings of the DOE Hydrogen Program Annual Progress Report. Washington, D. C. : Department of Energy, 2005: 1115-1124.

[113] Mirahmadi A, Valefi K. Study on preheating techniques for start-up of tubular solid oxide fuel cells[J]. Journal of Fuel Cell Science and Technology, 2011, 8(6): 061008.

[114] Özece B, Şenyüz S, Tokdemir İ K, et al. Model-based analysis of electrical heater implementation in solid oxide fuel cell systems for improved heat-up performance[C]//Proceedings of the IEEE 19th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering. Piscataway: IEEE Press, 2025: 1-4.

[115] 杨博然, 陈志光, 秦朝葵. 固体氧化物燃料电池 (SOFC) 外围热管理系统研究进展[J]. 城市燃气, 2019(3): 4-10.
Yang B R, Chen Z G, Qin C K. Progress of SOFC balance of plant(BOP)[J]. Urban Gas, 2019(3): 4-10(in Chinese).

[116] Chen Z Y, Liang F L, Mao J K, et al. Optimization design of SOFC-GT hybrid power system for aviation application[J]. Energies, 2024, 17(15): 3681.

[117] Majewski A J, Bossel U, Steinberger-Wilckens R. Catalytic reforming system suitable for transportation applications[J]. Fuel Cells, 2018, 18(4): 535-542.

[118] Shen M H. Solid oxide fuel cell-lithium battery hybrid power generation system energy management: a review[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2021, 46(65): 32974-32994.

[119] 朱庆山, 彭练, 黄文来, 等. 固体氧化物燃料电池密封材料的研究现状与发展趋势[J]. 无机材料学报, 2006, 21(2): 284-290.
Zhu Q S, Peng L, Huang W L, et al. Present status and development trends of sealing materials for solid oxide fuel cells[J]. Journal of Inorganic Materials, 2006, 21(2): 284-290(in Chinese).

[120] 梁爽, 毛军逵, 贺振宗, 等. 基于神经网络的航空 SOFC-GT 混合动力系统功率匹配多目标优化研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2025, 38(2): 119-132.
Liang S, Mao J K, He Z Z, et al. Multi-objective optimization of power matching for aviation SOFC-GT hybrid power system based on neural network[J]. Gas Turbine Experiment and Research, 2025, 38(2): 119-132(in Chinese).

[121] 张钰凡, 马睿, 张羽翔, 等. 航空燃料电池推进系统能量管理策略研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(13): 5012-5025.
Zhang Y F, Ma R, Zhang Y X, et al. A review on the energy management strategy for aviation fuel cell propulsion system[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(13): 5012-5025(in Chinese).

[122] 孙创超, 陈立新, 范修林. 锂硫电池用高效大孔催化正极[J]. 材料导报, 2021, 35(1): 1001-1002.
Sun C C, Chen L X, Fan X L. An efficient macroporous catalytic cathode for Li-S battery[J]. Materials Reports, 2021, 35(1): 1001-1002(in Chinese).

[123] Staub J W, Dzara M J, Crompton K R, et al. Balancing irreversible capacity in germanium nanoparticle: HE5050 lithium ion batteries for improved energy densities exceeding 250 Wh/kg[J]. Electrochimica Acta, 2020, 332: 135455.

[124] Kwasi-Effah C C, Rabczuk T. Dimensional analysis and modelling of energy density of lithium-ion battery[J]. Journal of Energy Storage, 2018, 18: 308-315.

[125] Ellis M W, Von Spakovsky M R, Nelson D J. Fuel cell systems: efficient, flexible energy conversion for the 21st century[J]. Proceedings of the IEEE, 2001, 89(12): 1808-1818.

[126] Great Power. Great power hosts transport batteries launch event [EB/OL]. (2024-12-18)[2026-06-29]. https://www.greatpower.net/en/news/323.html.

[127] 西北工业大学. Amprius 发布适用于电动航空的超高功率高能

量锂离子电池-飞机电推进技术工业和信息化部重点实验室[EB/OL]. (2023-08-19)[2025-12-02]. https://epal.nwpu.edu.cn/info/1034/1238.htm.
Northwestern Polytechnical University. Amprius unveils ultra-high power and high-energy lithium-ion battery for electric aviation-key laboratory of aircraft electric propulsion technology, ministry of industry and information technology[EB/OL]. (2023-08-19)[2025-12-02]. https://epal.nwpu.edu.cn/info/1034/1238.htm(in Chinese).

[128] Xiao C W, Wang B, Zhao D, et al. Comprehensive investigation on lithium batteries for electric and hybrid-electric unmanned aerial vehicle applications[J]. Thermal Science and Engineering Progress, 2023, 38: 101677.

[129] 马秦慧, 陈钢, 范光涛, 等. 多工况下固体氧化物燃料电池短堆变载特性研究[J]. 热力发电, 2025, 54(3): 12-21.
Ma Q H, Chen G, Fan G T, et al. Study on variable load characteristics of a solid oxide fuel cell stack under multiple operating conditions[J]. Thermal Power Generation, 2025, 54(3): 12-21(in Chinese).

[130] Li X R, Zhao Q B, Chong D T, et al. Dynamic behavior analysis of solid oxide fuel cell system with auxiliary components under variable operating conditions[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2025, 146: 150001.

[131] Xiang Y, Da Y L, Zhong Z, et al. Thermo-mechanical stress analyses of solid oxide fuel cell anode based on three-dimensional microstructure reconstruction[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2020, 45(38): 19791-19800.

[132] Zhang X Q, Yu S Q, Wang M K, et al. Thermal stress analysis at the interface of cathode and electrolyte in solid oxide fuel cells[J]. International Communications in Heat and Mass Transfer, 2020, 118: 104831.

[133] Xu M, Li T S, Yang M, et al. Solid oxide fuel cell interconnect design optimization considering the thermal stresses[J]. Science Bulletin, 2016, 61(17): 1333-1344.

[134] 中国民用航空局. 航空发动机适航规定: CCAR-33-R2 [S]. 北京: 中国民用航空局, 2016.
Civil Aviation Administration of China. Airworthiness regulations for aero-engines: CCAR-33-R2 [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2016(in Chinese).

[135] Meindl M, Forster F, Eckardt B, et al. Fuel Cell systems in hybrid-electric aircraft[C]//Proceedings of the European Fuel Cell Forum. Lucerne: European Fuel Cell Forum, 2025.

[136] Lyu X Q, Qu Y, Wang Y D, et al. A comprehensive review on hybrid power system for PEMFC-HEV: issues and strategies[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 171: 1273-1291.

[137] Tsai A, Tucker D, Clippinger D. Simultaneous turbine speed regulation and fuel cell airflow tracking of a SOFC/GT hybrid plant with the use of airflow bypass valves[C]//Proceedings of the ASME 9th International Conference on Fuel Cell Science, Engineering and Technology. New York: ASME, 2011: 365-374.

[138] Zhao Q, Stalin S, Archer L A. Stabilizing metal battery anodes through the design of solid electrolyte interphases[J]. Joule, 2021, 5(5): 1119-1142.

[139] Yan P F, Nie A M, Zheng J M, et al. Evolution of lattice structure and chemical composition of the surface reconstruction layer in $Li_{1.2}Ni_{0.2}Mn_{0.6}O_2$ cathode material for lithium ion batteries[J]. Nano Letters, 2015, 15(1): 514-522.

[140] Liu L S, Feng X N, Zhang M X, et al. Comparative study on substitute triggering approaches for internal short circuit in lithium-ion batteries[J]. Applied Energy, 2020, 259: 114143.

[141] Di Prima P, Dessantis D, Versaci D, et al. Understanding calendar aging degradation in cylindrical lithium-ion cell: a novel pseudo-4-dimensional electrochemical-thermal model[J]. Applied Energy, 2025, 377: 124640.

[142] Chung C G, Kim L, Sung Y W, et al. Degradation mechanism of electrocatalyst during long-term operation of PEMFC[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2009, 34(21): 8974-8981.

[143] Fan L X, Zhao J J, Luo X B, et al. Comparison of the performance and degradation mechanism of PEMFC with Pt/C and Pt black catalyst[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(8): 5418-5428.

[144] Singh R, Sui P C, Wong K H, et al. Modeling the effect of chemical membrane degradation on PEMFC performance[J]. Journal of the Electrochemical Society, 2018, 165(6): F3328-F3336.

[145] Yu K, Li C Z, Xie J, et al. Understanding the degradation mechanisms of Pt electrocatalysts in PEMFCs by combining 2D and 3D identical location TEM[J]. Nano Letters, 2023, 23(5): 1858-1864.

[146] Strandberg L, Shokhen V, Skoglundh M, et al. Carbon support corrosion in PEMFCs followed by identical location electron microscopy[J]. ACS Catalysis, 2024, 14(11): 8494-8504.

[147] Hoffrogge P W, Schneider D, Wankmüller F, et al. Performance estimation by multiphase-field simulations and transmission-line modeling of nickel coarsening in FIB-SEM reconstructed Ni-YSZ SOFC anodes I: influence of wetting angle[J]. Journal of Power Sources, 2023, 570: 233031.

[148] Li J, Zhang Y J, Zhao K, et al. An investigation of Cr vaporization from SUS430 metallic interconnect and deposition on (La, Sr)MnO3 cathode of intermediate temperature solid oxide fuel cells[EB/OL]. (2023-07-14)[2025-09-22]. https://webofscience.clarivate.cn/wos/woscc/full-record/WOS:001021227400001.

[149] Govindaraju N, Liu W N, Sun X, et al. A modeling study on the thermomechanical behavior of glass-ceramic and self-healing glass seals at elevated temperatures[J]. Journal of Power Sources, 2009, 190(2): 476-484.

[150] Papas P. Meeting the challenge of mitigating Li-ion battery fires for aviation[J]. Applications in Energy and Combustion Science, 2024, 20: 100286.

[151] 韩玉琪. 2023年航空氢动力进展[J]. 航空动力, 2024(1): 38-42.
Han Y Q. Progress of hydrogen powered aviation in 2023[J]. Aerospace Power, 2024(1): 38-42(in Chinese).

[152] 纪宇晗. 氢能航空时代加速来临: H2FLY完成全球首次液氢电动飞机试飞[EB/OL]. (2023-11-17) [2025-09-08]. https://ep.cannews.com.cn/publish/zghkb7/html/4994/node_209857.html.
Ji Y H. Aviation hydrogen era accelerates: H2FLY completes world's first liquid hydrogen-electric aircraft test flight[EB/OL]. (2023-11-17)[2025-09-08]. https://ep.cannews.com.cn/publish/zghkb7/html/4994/node_209857.html(in Chinese).

[153] National Institute of Advanced Industrial Science and Technology. Development and demonstration of long-duration flight with world's first solid oxide fuel cell drone[EB/OL]. (2020-06-15)[2025-09-08]. https://www.aist.go.jp/aist_j/press_release/pr2020/

pr20200615/pr20200615.html.

[154] Lockheed Martin Corporation. Stalker XE: fixed-wing VTOL-capable small UAS product sheet[EB/OL]. (2019-10-25) [2025-09-08]. https://www.lockheedmartin.com/content/dam/lockheed-martin/aero/documents/Stalker/Stalker%20XE_Product_2019.pdf.

[155] Gamble D E. World record duration flight of group 2 unmanned aircraft with VTOL and hybrid propulsion system using solid oxide fuel cell[C]//Proceedings of the AIAA SciTech 2023 Forum. Reston: AIAA. 2023.

[156] 韩玉琪. 2024 年航空氢动力进展[J]. 航空动力, 2025(1): 44-49.
Han Y Q. Progress of hydrogen powered aviation in 2024[J]. Aerospace Power, 2025(1): 44-49(in Chinese).

Fuel cells for aviation: a new paradigm for carbon-neutral flight

LI Zhipeng[1,*], GAO Zibo[1], LIU Weidong[1], PENG Feiyang[1], LIU Hong[1], HAN Qing[2]

(1. Institute of Flexible Electronics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;
2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Due to their great energy efficiency and zero carbon emissions, fuel cell aircraft propulsion systems have become a crucial alternative to conventional fossil fuel-based power in the context of the aviation industry's increasing attempts to become carbon neutral. This study focused on proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) and solid oxide fuel cell (SOFC), systematically analyzing their working principles, system architectures, key technological challenges, and applicable scenarios. The research also compared these systems with lithium battery propulsion systems from multiple perspectives, including energy carrier type, power characteristics, service life, and environmental benefits. The findings reveal that while SOFC have great promise for long-endurance missions, PEMFC are better suited for short-range aircraft applications. Although challenges remain in hydrogen storage, thermal management, system integration, and cost, continued advances in structural optimization and hybrid energy architectures are expected to significantly improve the endurance and emission reduction performance of fuel cell-based aviation power systems. These developments support their role as a critical technological pathway toward green aviation.

Keywords: fuel cell; aviation; solid oxide fuel cell; proton exchange membrane fuel cell; sustainable aviation; hybrid powertrains

Received: 2025-11-17; **Accepted**: 2025-11-28; **Published Online**: 2025-12-17 19:07

URL: link.cnki.net/urlid/11.2625.V.20251217.1313.001

Foundation items: The Fundamental Research Funds for the Central Universities (D5000230358); Shaanxi Province Key Research and Development Plan (2024GX-YBXM-456)

* **Corresponding author**. E-mail: iamzpli@nwpu.edu.cn