

英国零碳飞行氢燃料电池技术分析

Hydrogen Fuel Cell Technologies of FlyZero

■ 赵姝晗 / 中国航发动研所

氢燃料电池可应用于多种航空平台，包括新型和改装的小型飞机、支线飞机、干线飞机、电动垂直起降 (eVTOL) 飞行器、远程无人机以及氢动力飞机的辅助动力装置 (APU)，英国航空航天技术研究所 (ATI) 的零碳飞行 (FlyZero) 项目将氢燃料电池技术作为重点研究方向之一。

氢 燃料电池通过电化学反应将氢燃料中的化学能直接转变为电能，具有能量转换效率高、零排放、无噪声等优点。与常见的锂电池不同，氢燃料电池系统更为复杂，主要由电堆和辅助系统 (包括空气压缩机、增湿器、氢循环泵、储氢罐等) 组成。电堆是整个电池系统的核心，包括膜电极 (MEA)、双极板 (BPP) 构成的各电池单元，以及集流板、端板、密封圈等。MEA 的关键材料是质子交换膜 (PEM)、催化剂、气体扩散层，这些部件及材料的耐久性与其它性能决定了电堆的使用寿命和工况适应性。相比其他燃料电池类型，PEM 电堆具有更高的效率 (50% ~ 60%) 和功率质量比 (4kW/kg)。近年航空燃料电池最具可行性的方案为低温质子交换膜 (LT-PEM) 燃料电池，但是其 80°C 及以下的工作温度给热管理提出了挑战，为解决这一问题，业界研发了高温质子交换膜 (HT-PEM) 燃料电池，其至少 160°C 的工作温度更容易保持。

为保持在可持续技术领域的竞争力，研发和商业化下一代航空先进燃料电池系统，ATI 的零碳飞行项目发布了氢燃料电池技术发展路线图，旨在提供战略目标和航空燃料

电池系统的潜在实现方法，该路线图评估了相关技术指标、关键部件和系统，以及预测了技术发展阶段和趋势等。

技术指标

氢燃料电池主要技术指标有电堆功率质量比、电堆及辅助系统功率质量比、电堆最高效率、耐久性目标、工作温度和电堆成本及系统成本等，见表 1。其中，功率质量比和效率数据由工业合作伙伴和内部评估提供；

耐久性目标由重型汽车用燃料电池相关文献数据外推得出。

电堆功率质量比

航空业要求燃料电池电堆尽可能轻且功率高。LT-PEM 电堆功率质量比实现了重大发展，已达到 4kW/kg，根据电堆未来的质量和每平方米有效面积功率发展历史数据，预测电堆功率质量比将如表 1 所示，并且到 2026 年 LT-PEM 燃料电池的技术成熟度 (TRL) 将达 6 (在相关环境中进行子系统模型和原型机验证)；HT-

表 1 LT-PEM 及 HT-PEM 燃料电池技术指标预测

时间		2026 年	2030 年	2035 年	2050 年
L T - PEM 燃料电池飞机	LT-PEM 电堆功率质量比 / (kW/kg)	7	9	11	16
	LT-PEM 电堆及辅助系统功率质量比 / (kW/kg)	1.5 ~ 2.0	2.0 ~ 2.5	2.5 ~ 3.0	3.0 ~ 3.5
	电堆最高效率 / %	60	65	70	75
	耐久性目标 / h	5000	10000	15000	25000
	工作温度 / °C	80	90	100	100
	电堆成本 / (美元 / kW)	920	600	320	160
	系统成本 / (美元 / kW)	1560	1100	640	500
H T - PEM 燃料电池飞机	HT-PEM 电堆功率质量比 / (kW/kg)		≤ 3	≤ 5	16
	HT-PEM 电堆及辅助系统功率质量比 / (kW/kg)		1.5 ~ 2.0	2.5 ~ 3.0	5.0 ~ 6.0
	工作温度 / °C		120	160	≥ 160

PEM电堆不容易受杂质影响，并能使用较低纯度的燃料，但目前工业化的HT-PEM电堆技术成熟度还较低，因此可实现能力存在较大的不确定性，随着相关材料技术的研发，预测功率质量比达标应为2030年之后。

电堆及辅助系统功率质量比

燃料电池包括电堆和辅助系统，电堆是核心，而辅助系统则是维持电堆持续稳定安全运行的关键。辅助系统主要由散热、供气、燃料调节和水管理系统组成。路线图利用内部工具评估了各个子系统发展的交互作用，预测了电堆和辅助系统的功率质量比范围。如果到2050年HT-PEM电堆的功率质量比和LT-PEM电堆达到相同水平，考虑到前者散热系统的简化，相比于后者，未来采用HT-PEM能获得明显更高的电堆及辅助系统功率质量比。

电堆最高效率

电堆最高效率受燃料电池设计影响。由于燃料电池和燃气涡轮之间存在差异，因此基于燃料电池效率曲线来优化系统显得尤为重要。巡航效率须接近最高效率，以符合载荷百分比需求。

耐久性目标

提高燃料电池功率质量比的同时提高耐久性并降低成本，被公认为极具挑战。但如果将燃料电池作为燃气涡轮的替代，则耐久性的提高是非常必要的。路线图认为可以通过可替代方法来增强燃料电池的耐久性，例如，采用中期翻新的方法及密封的单次使用装置等。路线图基于重型汽车用燃料电池预测了耐久性目标的实现情况。

工作温度

提高燃料电池的工作温度对

于航空燃料电池的长期成功应用是必不可少的。更高的工作温度提高了电化学反应动能和效率，提高了MEA的耐杂质性，并降低了辅助系统的复杂性。此外，较高工作温度降低了散热难度，并减少了辅助系统的质量和成本。

电堆成本

路线图预测使用高强度、轻量化材料能大幅优化航空电堆的高功率质量比。目前燃料电池为手工组装，是劳动密集型产品，根据目前文献，预估航空用燃料电池成本为重型汽车用燃料电池的8倍，将来的电堆研发需要制造和组装过程的自动化，以减少成本、提升质量。随着使用燃料电池的窄体飞机、APU、eVTOL飞行器的增多和燃料电池制造自动化的规模化，电堆成本将会随之减少。

系统成本

燃料电池系统包括电堆和辅助系统，当电堆技术成熟时，辅助系统将成为最大的成本因素。另外，减小尺寸和去除加湿需求会降低HT-PEM燃料电池系统的复杂度，从而降低成本。

部件技术发展路线图

燃料电池部件技术发展路线如图1所示，包括端板、双极板、膜电极组件、HT-PEM燃料电池和电堆优化等，其中端板、双极板和电堆优化的研发适用于LT-PEM及HT-PEM燃料电池。

端板

端板是无源元件，将压力施加在电堆，占电堆质量的15%~45%。目前端板由不锈钢制成，为了满足功率质量比目标，将来可用轻量化材料（如复合材料）制造。未来新

型电堆的集成将进一步提高电堆的功率质量比，包括将多个电堆放置到单个轻量化保护罩中，或将辅助系统部件整合到电堆外部，以提供压力载荷。

双极板

双极板是多功能部件，占电堆质量的60%~80%，可以通过改进材料和流场减少质量和优化性能。复合材料可替代目前的石墨或金属双极板，应用前必须达到燃气渗透性、热传导性和耐久性目标，也可以增材制造双极板。燃料电池中反应物最初的接触点是双极板流场，优化流场设计可以改进反应物分布和排水，三维网格和开孔泡沫流场设计可以提高反应物分布和排水，直接提高电堆性能。另外，加入组件（如单元级带传感器的电路板）使其具有全面诊断能力。

膜电极组件

膜电极组件的性能影响因素包括膜、催化剂、气体扩散层（GDL）和其极化曲线。高性能燃料电池所需的质子交换膜具有高质子传导率、较低透气性，能提高耐久性；使用有机或无机填料的复合膜可以实现较高的质子传导率、低电子传导率和良好的保水性；减小膜厚度能提高性能，但是须同时关注耐久性问题；非增湿膜能储水，可大大降低系统的复杂性，减少质量和成本。

在催化剂和气体扩散层方面，使用较高浓度的铂族金属能提高膜电极组件性能；促进阴极排水的气体扩散层能显著改善大电流特性；催化剂和气体扩散层在高于80℃的工作温度下才具有抗腐蚀性；将来采用高性能的非铂族金属基催化剂能降低电极成本并提升可制造性。

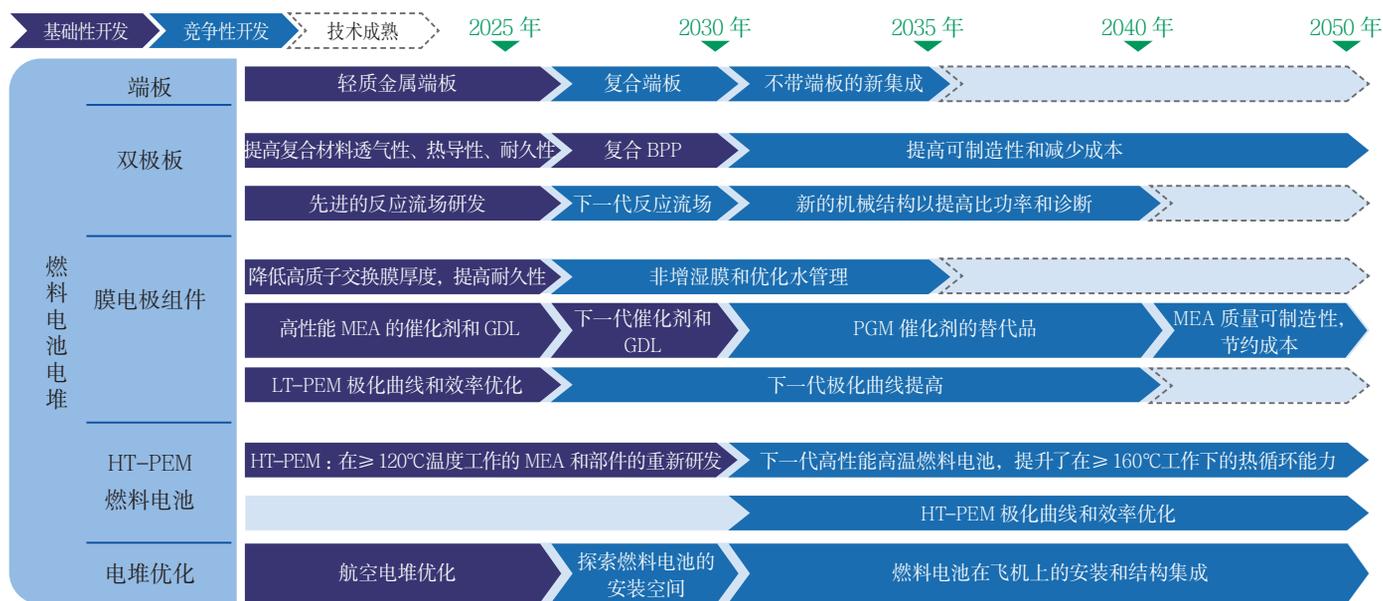


图1 燃料电池部件发展路线图

在极化曲线方面，为了提高LT-PEM燃料电池的功率密度和效率，应提高开路电压，以及在任意给定载荷下的电压和电流。较高的电压也使得有效面积产生的电流增加（行业目标为0.8V下3~4A/cm²），这样能增加燃料电池效率，减少电堆产生的热以及伴随的散热问题。

HT-PEM 燃料电池

HT-PEM燃料电池工作温度超过160℃，由于燃料电池工作温度和环境温度差的增加，HT-PEM燃料电池需要较轻质量的热管理系统，以获得具有竞争力的功率质量比。较高的工作温度增加了电化学反应动力，减少了对杂质的易感性，有利于简化辅助系统并提高效率，由于减轻了辅助系统质量，从而增加了系统级功率质量比。目前LT-PEM的部件（如MEA和双极板等）不适用于高温工作，因此需要重新开发部件防止腐蚀，同时有必要提高部件的热循环水平来增加电堆寿命和效率。一旦建立了高温膜和电

极，极化曲线也需要提高。由于各个部件需要再研发以适应高温工作，TRL 6的HT-PEM电堆预计会在2030年后出现。

电堆优化

燃料电池具有模块化设计、高效率 and 低工作温度特点，可以探索更多独特设计，如吊舱和外表面设计等。为了设计燃料电池动力飞机，须评估辅助系统的新型结构集成。研发过程须考虑如何设计飞机和分配适用于燃料电池技术的任务剖面。通过考虑耐久性、几何和电池结构来重新设计和优化航空燃料电池电堆。

系统发展路线图

燃料电池系统发展路线图如图2所示，分为辅助系统系统和电池系统，其中辅助系统系统包括电堆散热、供气、燃料调节和水管理系统，而电池系统的发展则包括电池、监控和可持续性要求。

电堆散热系统

电堆散热系统确保电堆在特定

温度范围工作，并管理散热方法。结合标准大气条件要求、热负荷和LT-PEM燃料电池技术，研发蒸汽压缩冷却技术来管理燃料电堆散热需求。对于HT-PEM而言，较高的工作温度允许简化热管理系统，加压的液体冷却和较小的设备对于HT-PEM而言足够了，特别是较轻和较低阻力的空气散热器。

电堆散热子系统需要多种换热技术在不同流体之间进行热交换，包括空气、制冷剂 and 潜在冷却剂。LT-PEM燃料电池需要空气制冷冷凝器、制冷压缩机和膨胀阀。对于HT-PEM燃料电池而言，技术关注点则是空气—液体冷却剂换热技术。

电堆供气系统

电堆供气系统确保有足够的空气传送到电堆，让氢气在催化剂部位发生反应，典型组件包括空气预冷器、压缩机、气滤和加湿器。新的空气系统要在不同功率条件和高度下给燃料电池传送一定压力的空



图2 燃料电池系统发展路线图

气。由于工作温度不同，LT-PEM燃料电池需要空气预冷技术，而HT-PEM燃料电池可以在没有空气预冷技术的情况下工作，从而简化其空气系统。

供气子系统需要新的压缩机技术和涡轮技术，有利于恢复损耗功率。LT-PEM燃料电池特别的冷却技术须将液氢当作吸热介质来预冷却空气至合适温度，还需要过滤技术来最小化质量和寄生功率损失，以及探索氧气浓度控制技术。

电堆燃料调节系统

电堆燃料调节系统将低温氢燃料加热到环境温度，以进入燃料电堆，需要优化的技术包括过滤、加压和温度预调节。使用液氢部分减少了过滤风险，但仍需必要的氢过滤技术确保燃料电池污染最小化；将氢燃料加压到超临界状态，更容易管理热传递过程；预调节氢燃料温度，在足够温度下将氢燃料送到燃料电堆以避免水凝结等问题。

燃料调节子系统部件会与氢燃料在不同压力和温度下相互作用。因此，必须考虑氢脆和外表面温度管理，涉及去除内部污染的氢气过滤器、与工作条件范围兼容的液氢泵技术，以及预调节氢气温度的换热器技术。

水管理系统

水管理系统包括排水调节和凝结尾迹管理系统。虽然废水对于技术指标而言不重要，但对评估环境影响很重要。氢燃料电池飞机在低温下混合液体和蒸汽会产生大量的水，由燃料电堆产生的水很容易被捕获，这比燃气涡轮发动机控制废水排出灵活性大很多。在排到大气之前预调节水，对防止凝结尾迹方面具有很重要的作用。

航空燃料电池系统

考虑燃料电池和燃气涡轮发动机之间效率曲线的不同，可以调整任务剖面和控制策略来优化燃料电池性能，如最高起飞功率、爬升功率、

起飞巡航功率比和巡航时间等。路线图提出，2035年后技术更新，须再评估技术性能。

监控系统

监控和诊断系统都与飞机健康检查和故障报告相关。监控电堆的极化曲线、温度和湿度必须集成到飞机现有监控系统中。路线图建议集成监控功能，关注飞机监控系统中对燃料电池的监控，并将燃料电池故障报告给机载维护系统。

可持续性

评估凝结尾迹的产生和氢燃料对环境的影响，有助于了解氢动力飞机对环境的准确和长期影响；低温水排放给水处理系统提供了更多的灵活性；可持续的制造和最大化未来燃料电堆的再循环能力十分重要，可以在制造时使用可持续能源、最小化材料损耗、在部件寿命结束时优先再循环和再使用，以及在复合材料中使用可替代自然纤维。

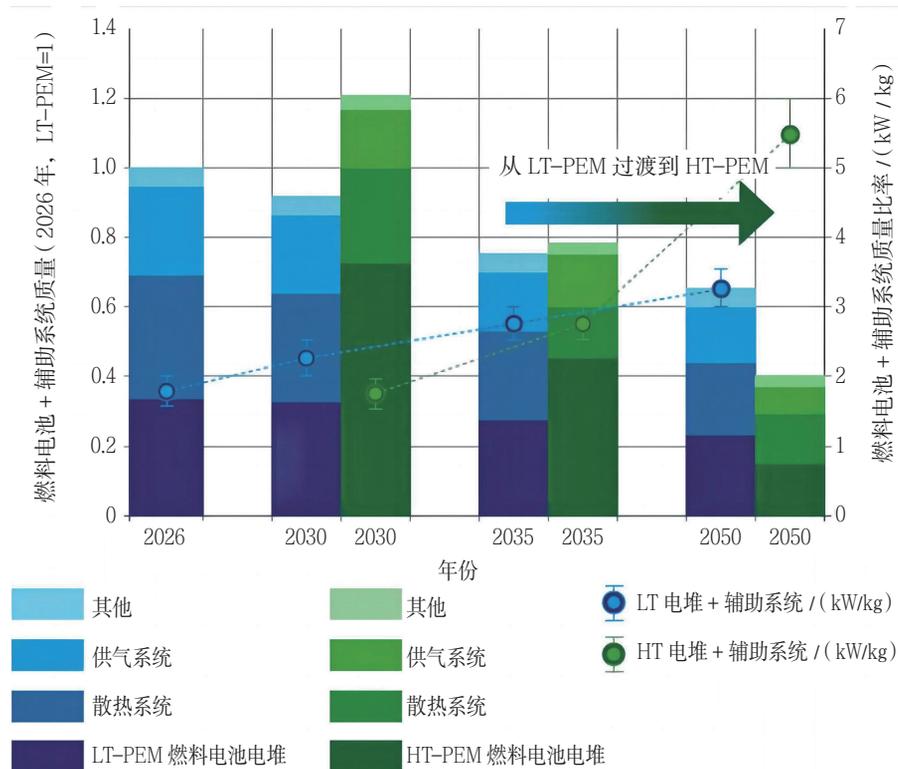


图3 燃料电池电堆和辅助系统功率质量比技术指标和质量分解

技术发展趋势及阶段

路线图预测了2025—2050年期间，系统各部分对航空氢燃料电池整体功率质量比影响的变化趋势，如图3所示。2025—2035年，对LT-PEM

燃料电池影响最大的因素为电堆和散热系统；2030年，HT-PEM燃料电池的技术成熟度预计达到6级，其散热和供气系统的质量影响会大大降低；2035年后，LT-PEM燃料电

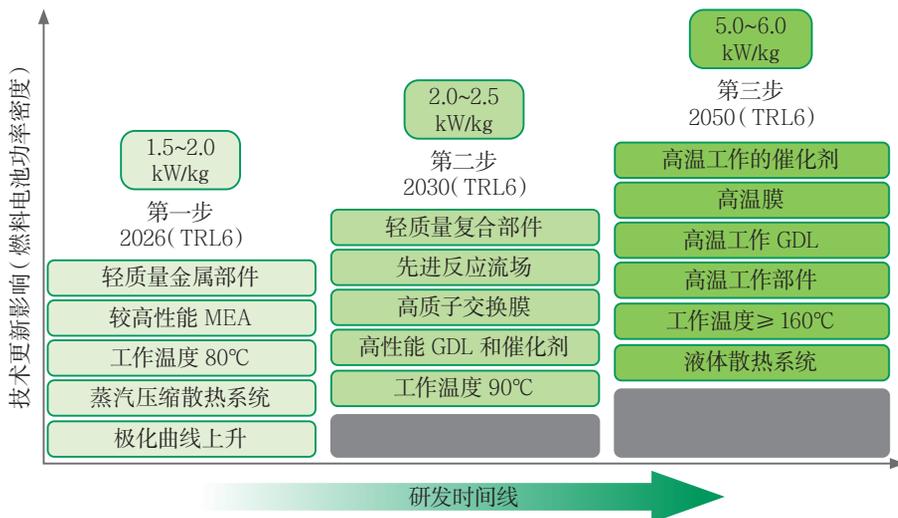


图4 技术发展阶段

池系统功率质量比提升空间小，为了提高效率、减少热挑战，会导致其尺寸过大；提高供气和散热系统的功率质量比，需要较高的工作温度，所以HT-PEM技术成熟后，燃料电池系统功率质量比会急剧增加，使得在2035—2050年间，燃料电池会由LT-PEM过渡到HT-PEM。

根据对燃料电池系统功率密度发展的预测，ATI制订了技术发展阶段计划，包括重要研发阶段、时间，以及对燃料电池系统功率密度的影响，如图4所示。特别注意的是，需结合新型机体设计（如翼身融合或翼式吊舱等）来考虑这些功率密度数值。2050年的目标是采用HT-PEM燃料电池技术，然而这些技术的研发时间节点还存在很大的不确定性。

结束语

从近期来看，LT-PEM为航空燃料电池提供了最可行的解决方案，但由于操作温度较低（80°C或更低），热管理具有挑战性，预计未来会过渡到HT-PEM燃料电池（工作温度至少为160°C）。尽管HT-PEM系统处于早期开发阶段，改进时间存在很大不确定性，但已成为研发的方向和趋势。未来航空氢燃料电池的发展将配备复合双极板和端板、新型膜电组件和更高的铂催化剂负载，改进散热、供气、燃料调节和水管理系统，引入用于热管理的蒸汽压缩循环和对排水预处理系统、燃料电池监控以及可持续材料和方法。

航空动力

（赵妹晗，中国航发研研所，工程师，主要从事航空发动机科技情报研究）