

# 多种燃料供给的燃料电池混合电推进技术\*

## Fuel Cell Hybrid Electric Propulsion Technology Using Alternative Fuel Supplies

■ 梁凤丽 陈昭亿 张业鹏 毛军逵 / 南京航空航天大学

固体氧化物燃料电池 (SOFC) 与燃气轮机组成的混合电推进系统效率高, 有着巨大的发展潜力, 但在实际应用场景中, 需要落实燃料选择、动力方案优化等措施, 以提升燃料供给保障性和长期运行的可靠性。

**固**体氧化物燃料电池以固态金属氧化物作为电解质在中高温下运行, 具有能量转换效率高、噪声低、工作稳定和使用寿命长的优点, 且不受卡诺循环的限制可以与燃气轮机 (GT)、蒸汽轮机等组成联合发电系统, 系统的发电效率可以达到70%以上, 显著高于传统的涡轮发动机装置 (35%~42%), 如图1所示。但SOFC-GT混合电推进系统无法直接利用航空煤油等大分子碳氢燃料, 否则阳极催化剂会在几分钟甚至数十秒内失活并破坏电池, 造成不可逆的失效, 致使整个燃料电池系统无法正常工作<sup>[1]</sup>。常用的氢燃料由于超高的扩散性, 以及液氢储存和运输中需要的高压和超低温条件, 使得燃料电池在航空领域的应用成本高、风险大, 对于燃料供给系统提出了苛刻的要求。目前, 可以选择直接使用氨等氢载体, 或者设置蒸汽燃油催化重整环节, 将碳氢燃料转化为氢、一氧化碳等可以使SOFC直接发电的气态燃料。从燃料选择、蒸汽重整制氢、SOFC-GT混合电推进架构优化等方面展开分析, 可以提高混合电推进系统用作航空

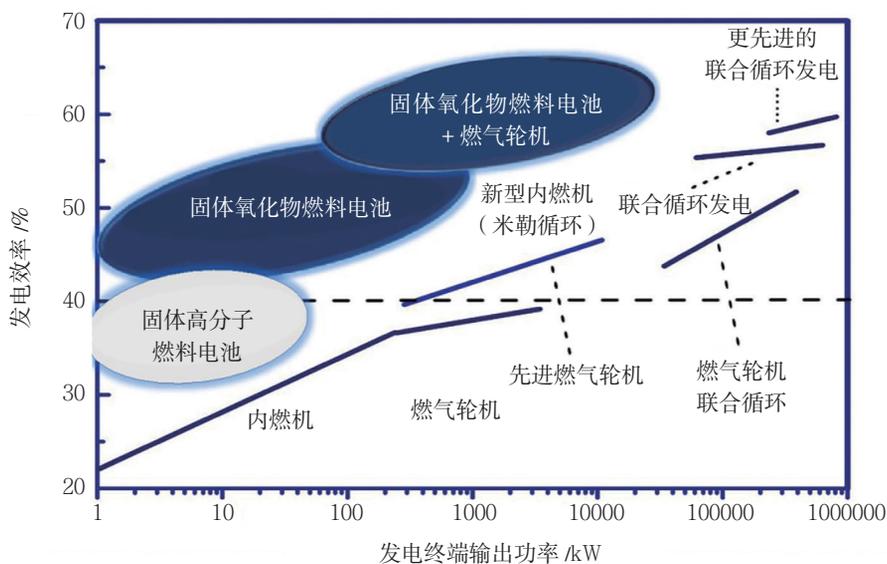


图1 各类发电装置输出功率和发电效率比较

动力的燃料供给保障性和长期运行可靠性。

### 多种燃料供给策略

燃料电池发电常用的氧化剂和还原剂分别是氧气和氢气。然而, 气态氢的体积能量密度很低, 需要庞大的储存系统; 若使用液态氢, 严苛的液化条件耗能多, 且液态氢的能量密度也仅为航空煤油的30%左右。由于SOFC具有燃料灵活性的特点, 因此可以寻找一种合适的替代燃料。

在选择燃料时, 需要考虑燃料成分、可获得性和可再生性等, 表1展示了氢、甲烷和航空煤油等燃料的物理特性<sup>[2]</sup>。在这些燃料中, 航空煤油在能量密度和储存运输方面具有明显优势, 已经被广泛使用; 甲烷和氢作为飞机燃料存在许多困难, 气态甲烷和气态氢的能量密度较低, 而航空动力系统对燃料密度非常敏感, 需要加压至70MPa, 而液态甲烷和液态氢储存温度过低, 难以运输和储存, 两种储存方式都

\*基金项目: 先进航空动力创新工作站项目 (HKCX 2022-01-002)

表1 几种典型燃料的物理特性

燃料	摩尔质量/ (g/mol)	温度/K	压力/MPa	能量密度	
				MJ/L	MJ/kg
氢(气态)	2	300	70	5.47	140
氢(液态)	2	13.15	0.145	9.94	140
甲烷(气态)	16	300	70	10.6	50.2
甲烷(液态)	16	110.65	0.101	21.3	50.2
氨(液态)	17	300	1.01	16.9	18.6
航空煤油(液态)	170	300	0.101	34.2	44.1

会额外消耗大量的能量。尽管如此，由于它们的环保性能和可以直接供给SOFC电堆使用的特性，仍然是非常有前景的燃料。液氨在生产运输成本、污染物排放等诸多方面具有优势，并且氨可以直接被SOFC电堆利用，在完全燃烧的前提下，排放产物仅有氮气和水，是理想的清洁能源，近年来也是研究者们研究的重点燃料。由于SOFC-GT系统对燃料的敏感性很强，因此选用不同的燃料会对系统的效率和功重比产生较大影响，一些研究者们对氨、氢、甲醇、乙醇、二甲醚和沼气等不同燃料供给的SOFC-GT混合电推进系统进行了对比研究，发现混合电推进系统中使用的燃料类型很大程度上决定了阳极再循环的气体量，并一致认为碳氢燃料经过外部重整后可以显著提高系统效率。

大分子液体碳氢燃料具有单位体积能量密度和单位质量能量密度高的特点，液体不仅具有良好的运输特性，还便于储存，所以在可预见的未来，大分子液体碳氢燃料仍然会是航空航天及交通运输方面燃料的首要选择。SOFC不能直接使用航空煤油等高碳氢燃料，需要在混合电推进方案中设置催化重整环节。

### 碳氢燃料催化重整

目前，燃料催化重整技术的研究重点是发展可以使用甲烷、甲醇、乙醇、汽油、煤油等多种燃料为氢源的催化重整制氢装置，考察燃料的重整效率、工作温度和重整器寿命。大多数研究都是分别针对重整制氢或者燃料电池技术展开，也有少部分研究是将两种技术相结合。当前，重整制氢路线主要包括水蒸气重整、二氧化碳干重整、部分氧化重整、催化裂解以及近年来的自热式重整等技术路线。表2总结性给出了甲醇、乙醇、煤油、正十二烷、航空煤油等各种燃料的催化重整参数。

对于反应工况而言，除甲醇外，大部分液态燃料的重整制氢采用500℃以上的高温 and 3:1以上的水碳比，而煤油类的高碳氢液态燃料甚至需要超过700℃以上的高温，对催化剂提出了严苛的要求。对于甲醇、乙醇类的低碳氢燃料而言，由于反应温度偏低，除贵金属外，过渡金属铜(Cu)、锌(Zn)、镍(Ni)也常被选用为催化剂活性组分。而煤油的反应温度偏高，研究主要集中于铑(Rh)、钌(Ru)等贵金属和镍基催化剂。同时，与催化活性相比，煤油类的高碳氢液态燃料的水蒸气

重整反应耐久性是该反应的研究重点和难点。以煤油水蒸汽重整(SRK)反应为例，煤油的分子碳链较长并含有芳烃成分，SRK过程中极易在催化剂表面结焦积碳，因此迄今为止关于SRK反应的报道并不丰富。为了保证SRK反应顺利进行并获得较高的煤油转化率和氢收率，要求催化剂具有高活性和高抗积碳能力。贵金属掺杂的催化剂由于活性高和稳定性强，广泛应用于重整制氢反应。

催化剂的开发是多种燃料催化重整的核心和关键。一方面，现有研究受催化剂种类的限制，各燃料重整反应温度存在较大差异，且一种催化剂只能重整一种燃料类型，限制了燃料重整与燃料电池组成的混合电推进技术的应用。另一方面，SOFC样机材料本身是良好的燃料重整催化剂，内重整也是一种简化燃料重整和电池发电结构的有效途径，例如，美国国家航空航天局(NASA)报告了内部重整SOFC的潜在优势，SOFC可以提供重整反应所需的热量，并且在SOFC阳极产生重整所需水蒸汽，而重整反应吸收的热量将电堆冷却使工作温度满足外部要求，从而使整个系统更小更轻。因此，在航空领域应用多种燃料供给的燃料电池混合电推进技术未来的发展趋势，一是开发一种燃料重整催化剂，能够同时重整甲烷、甲醇、乙醇、航空煤油等多种燃料，同时缩小各燃料的重整反应温度，确保催化剂在复杂的多种燃料重整反应过程中能够持久稳定地发挥作用；二是发展碳氢燃料内部直接重整SOFC发电技术，以期早日实现多种燃料重整在SOFC-GT混合电推进系统应用。

表2 各类燃料重整效率与重整条件之间的关系 (来源: 催化文献)

原料	使用催化剂	压力	氧气/碳	水/碳	空速	温度/°C	转化率/%
甲醇	CuO/ZnO/MO <sub>x</sub> (M=Cr、Mn、Y、Sr、La、Mo、V、W)			(0.5~2) : 1	2000~4400h <sup>-1</sup>	230~280	90~99
	Cu <sub>1.0</sub> /La <sub>0.02-0.5</sub> /Zr <sub>0.15-1.0</sub> /Fe <sub>0-0.5</sub>			1 : 3	1~2.5h <sup>-1</sup>	230	98
	CuO/ZnO/La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>					230~260	87.5
	Cu/La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ZrO <sub>2</sub>			1 : 3	1~3h <sup>-1</sup>	210~240	> 90
	Cu/Zn (5/5)		0.2 : 1		2.0h <sup>-1</sup>	250	94
	Au/TiO <sub>2</sub>	1atm**	0.3 : 1			210	85.2~100
乙醇	Ni/Ce <sub>1-x</sub> Zr <sub>x</sub> O <sub>2</sub>	1atm				600	100
	Cu <sub>2</sub> -Ni <sub>14</sub> /SiO <sub>2</sub>			3.7 : 1	12.7h <sup>-1</sup>	600	100
	Cu <sub>2</sub> -Ni <sub>14</sub> /sba-15			3.7 : 1	12.7h <sup>-1</sup>	600	95.4
	Rh-CeO <sub>2</sub>		0.7 : 1		1 × 10 <sup>3</sup> h <sup>-1</sup>	700	> 95
	18%Ni/0.08%Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			3 : 1	38000mL / gcat / h	550	100
煤油	Ru/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /CeO <sub>2</sub>			3.5 : 1	1.0mL / gh*	800	98~99
	Ni-La-k/cordierite	1atm		3.5 : 1	20mL / gh*	650	90
	Ru/Ce/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1atm		3 : 1	40mL / gh*	700	≈ 100
	0.1%Ru/Ni/NiAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			3 : 1	40mL / gh*	750	≈ 100
	18%Ni/0.08%Pt/Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1atm		3 : 1	20mL / gh*	700	≈ 100
正十二烷	Ni-CoCeO <sub>2</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			4 : 1	20mL / gh*	700	90
	Ru/Ce <sub>0.75</sub> Zr <sub>0.25</sub> O <sub>2</sub>	1atm		4 : 1	12mL / gh*	650	98
航空煤油	RhCl <sub>2</sub> /CeO <sub>2</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			3 : 1	1.38mL / gh*	535	95

\* mL/g h 是根据文献数据所折算出的以燃料的液态进料速度为基准的液时空速; \*\*1atm (标准大气压) = 101.325 kPa。

## 燃料电池混合电推进系统

SOFC在中高温(600~1000°C)下运行,可以和燃气轮机、蒸汽轮机等组成混合电推进系统或联合发电系统,西门子西屋公司在2000年开展了世界上第一台SOFC-GT混合电推进系统示范工程,目前正计划向市场提供500kW~5MW级的SOFC-GT系统,系统的发电效率预计达到62%~72%。

### 系统架构设计

常见的SOFC-GT系统架构如图2所示:SOFC发电并通过电动机输出功,与涡轮动力同步输出;将SOFC工作产生的高温气体,再次引入涡轮动力系统中的燃烧室,实现热量再注入;采用涡轮动力排出的高温尾气和

SOFC运行相结合,余热回收;采用燃料重整方式,通过联合循环来提高碳氢燃料的能量转化率。从各类混合电推进架构和设计方案的理论分析中,可以发现采用SOFC-GT混合电推进方式,有效提升了循环的总效率,耗油率明显降低。

为了追求高能量转化效率,大多数SOFC-GT混合电推进系统设计中新增了换热器等部件,同时也构想出多种燃气工质的输运和再利用通道,部分方案中还新增了二次循环工质,但会造成质量明显增加,并对传统涡轮动力系统带来突出的影响。例如,将SOFC的排气再引入涡轮发动机的燃烧室,两股工质气

热参数的匹配困难、稳定燃烧的控制难度大、同时面对实际多变的飞行包线工况,其全过程安全稳定工作几乎难以保证。

### 综合能量调控

碳氢燃料重整-燃料电池混合电推进系统是一种能源转化和传输的复杂体系,将热能、电能和气体等多种能源进行相互转化和传输。整个系统包括燃料重整-电堆发电装置<sup>[3]</sup>(见图3)和SOFC-GT混合电推进架构。为了更高效地进行能量转化和利用,除了燃料电池电堆本身的热量控制,燃料电池发电系统中还涉及到电化学反应产生热量的二次利用以及重整器加温热量的产



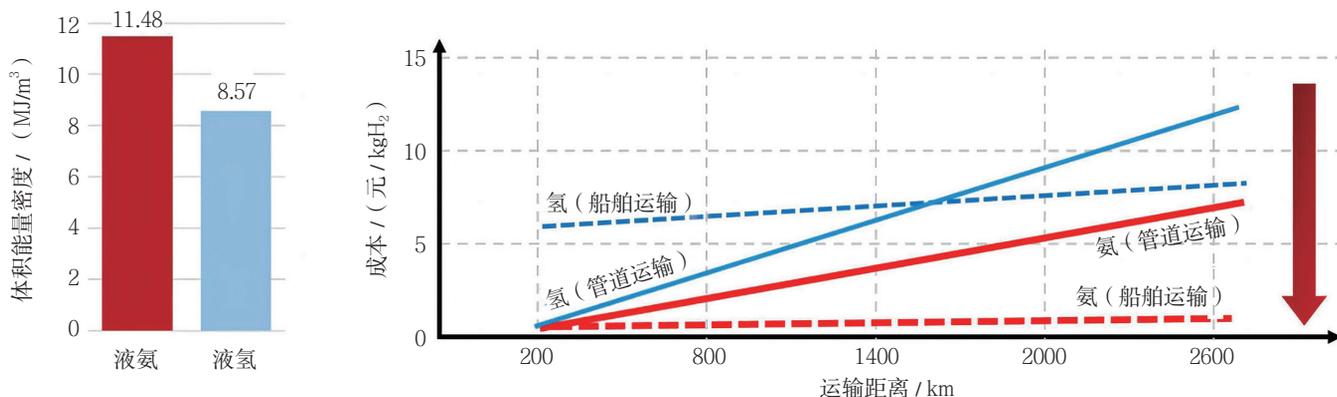


图4 氨、氢物理特性及运输成本对比 (来源: 国际能源署氢能报告)

本也远低于氢<sup>[4]</sup>, 如图4所示。除此之外, 氨泄漏很容易被检测到, 爆炸范围非常狭窄仅16%~25%, 表明氨从能量密度、安全性、存储、运输及应用等方面均具有独特优势。

以氨作为燃料的SOFC研究已经取得了一定的进展, 研究表明, 直接使用氨燃料电池(DA-SOFC)相对使用氢气的SOFC具有更好的性能, 一方面氨分解的理想催化剂正是SOFC阳极常用的镍基催化剂, 另一方面, 氨分解是吸热反应, 而SOFC电堆中发生的电化学反应又释放大量的热, 这是同时发生的两个吸放热不同的反应, 通过优化耦合其物质-能量流, 可进一步提高DA-SOFC的系统效率。

然而, 虽然所设计的混合电推进系统热效率很高, 性能优越, 但质量非常大, 功率质量比低于传统燃气轮机, 难以应用于航空航天领域。在2015年, SOFC-GT用于辅助动力装置(APU)的功率质量比大约为0.315kW/kg, 对此美国能源部的太平洋西北国家实验室(PNNL)认为<sup>[4]</sup>至少将系统功重比提升至0.73kW/kg才能比传统APU具有更大优势。由于混合电推进系统的大部

分质量来源于SOFC电堆, 因此, 未来开发能够在高效与高功率质量比之间平衡的SOFC构型(如金属支撑型SOFC)是非常重要的。同时, 面向航空应用的低温和低氧环境、有限的空间和质量要求, 混合电推进系统结构上需要紧凑且集成度高, 全飞行包线下需要变工况动态响应和启停速度快, 均有待进一步研究。

## 结束语

在SOFC-GT混合电推进系统中设置燃料催化重整环节, 使得包括航空煤油在内的碳氢燃料转化为甲烷、氢气、一氧化碳等可以直接通入SOFC发电的小分子气态工质, 简化所携带燃料的种类。但这些重整制氢技术大多重点关注反应过程中的转化率和制氢效率等催化活性指标, 仅能以短期试验来验证技术路线的可行性, 尚无法解决重整反应中催化剂长期稳定性以及长期使用碳氢燃料带来的SOFC阳极衰减等难题。选用真正零碳排放的氢载体氨作为航空用SOFC-GT的燃料是一种可靠方案, 尤其是采用金属支撑型SOFC与GT或其他辅助电源(如锂离子电池组)与其组成混合电源系统, 可

与质子交换膜燃料电池的快速、重复启停性相媲美, 又兼具传统SOFC材料廉价和燃料适应性强的优势, 商业价值大, 特别是在航空动力电源领域有着广阔的空间。

**航空动力**

(梁凤丽, 南京航空航天大学, 副教授, 主要从事面向航空应用的燃料电池及其混合电推进技术研究工作)

## 参考文献

- [1] 胡焦英, 毛军逵, 贺振宗. 基于航空煤油重整的SOFC-GT混合动力系统性能[J]. 航空动力学报, 2020, 35(2):325-336.
- [2] 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(07):6-23.
- [3] CHRISTOPHER J, JOSHUA E, LOUIS M, et al. Solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid cycle technology for auxiliary aerospace power[J]. NASA/TM, 2005-213586.
- [4] 徐乐根, 毛军逵, 梁凤丽, 等. 直接氨SOFC-GT混合动力系统性能及航空应用[J/OL]. 航空动力学报. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20220346>.