

# 航空固体氧化物燃料电池涡轮动力系统发展\*

## Development of Solid Oxide Fuel Cell Turbine Power System for Aircraft

■ 曾泽智 钱煜平 张扬军 / 清华大学

固体氧化物燃料电池涡轮动力系统兼具燃料电池效率高和燃气涡轮发动机功率密度高的综合优势，在航空领域具有广阔的应用前景。但目前固体氧化物燃料电池存在功率密度低、循环寿命短等技术瓶颈，亟须进一步突破。

航空动力目前以燃气涡轮发动机为主，通过热力循环将燃料燃烧释放的热能转换为机械能。在燃烧过程中，由于燃料化学焓损大，且动力系统效率受到卡诺效率限制，现有燃气涡轮动力系统发电效率较低（40%左右），通过提升循环参数（如提高总压比和涡轮前温度等）来提升发动机热效率的潜力越来越小，即使考虑部件效率改进与循环参数提高，系统效率也很难超过45%。固体氧化物燃料电池能够连续将燃料的化学能直接转化为电能，其效率不受卡诺循环限制，具有发电效率高的优势，理论上可达70%，且效率与发电功率等级无关。固体氧化物燃料电池涡轮动力系统采用燃料电池替换燃烧室的方案，通过中低温化学反应，实现燃料化学能的高效综合利用，具备效率高、工作温度低和成本低等优势，可有效提升航空动力系统效率，增加飞行航程或减少燃料需求。

### 总体技术研究

固体氧化物燃料电池涡轮动力系统

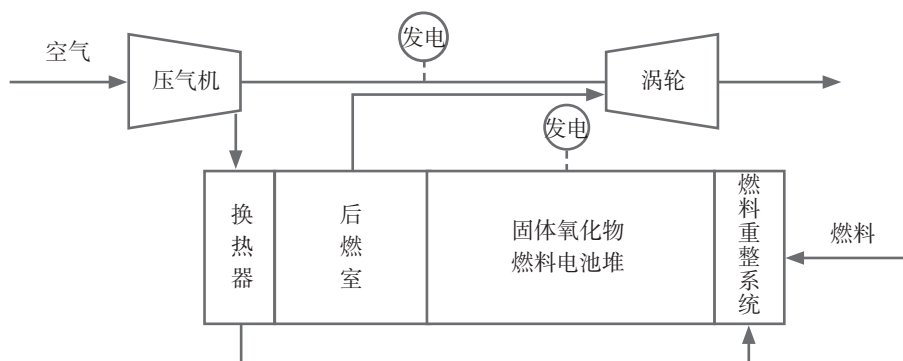


图1 固体氧化物燃料电池涡轮动力系统构型

一般包括固体氧化物燃料电堆、燃料重整系统、压气机、涡轮和换热器等主要部件，如图1所示。由于燃料电池可以将燃料化学能直接转化为电能，动力系统发电效率可达60%以上。在动力系统中，空气首先经压气机压缩为高压空气，小部分高压空气经预热后进入燃料重整系统，与喷入的碳氢燃料进行充分混合后进行部分氧化重整，而重整反应释放的热量可进一步用来预热空气。碳氢燃料被重整为 $H_2$ 与CO后进入固体氧化物燃料电堆进行电化学反应，由于并非所有的 $H_2$ 与CO都会在燃料电池中反应，未参与电化学反应的 $H_2$ 与CO在后燃室进行燃烧，形成高温气体推动涡轮做功，

燃烧室释放的热量经过换热器和压气机出口的高压空气进行换热，进行余热利用，进一步提升系统效率。由于固体氧化物燃料电池工作温度在700~1000℃左右，进入燃料电池中的 $H_2$ 、CO和空气需尽可能接近其工作温度，以保证燃料电池高效稳定运行，涡轮排出的气体也可通过回热器进行余热利用，从而进一步提高系统效率，但会进一步增加系统复杂度。

美国国家航空航天局（NASA）格伦研究中心针对X-57电动飞机设计了100kW级固体氧化物燃料电池动力系统，并初步规划了在飞机中的集成，如图2所示，针对动力系统提出了两种设计方案。方案一的

\*基金项目：先进航空动力创新工作站项目（HKCX 2019-01-009）

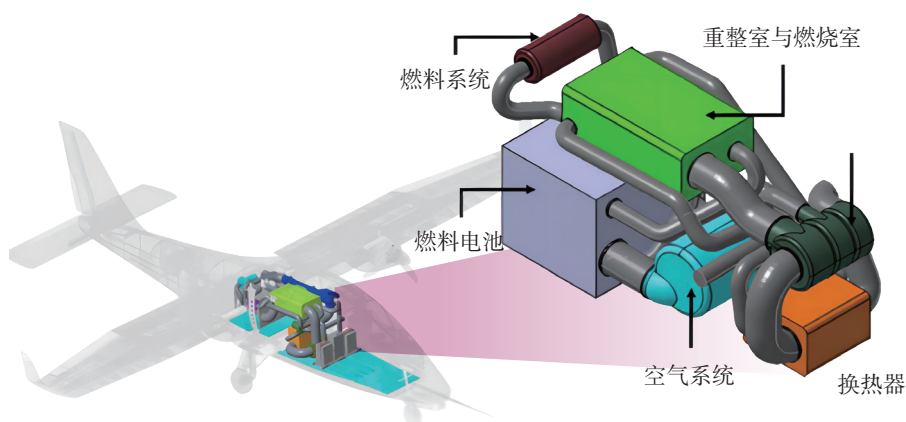


图2 X-57电动飞机的固体氧化物燃料电池动力系统

系统效率可达62%，功率质量比可达302W/kg，但该方案需针对900℃以上的高温排气加工新的高温风机，导致技术难度显著提升，可行性较低；方案二中动力系统效率可达55%，功率质量比可达281W/kg，但部件加工与系统集成难度较方案一更低，具备更高的可行性。

马里兰大学的卡杜（Cadou）课题组针对不同构型的固体氧化物燃料电池涡轮动力系统进行了系统层面的热力学仿真，也计算了在涡喷发动机、大涵道比分排涡扇发动机、小涵道比混排涡扇发动机中集成固体氧化物燃料电堆的效果，研究了关键循环参数对动力系统效率的影响。研究表明：在高空长航时飞机上，将固体氧化物燃料电堆整合进机体内可以降低至少8%的耗油率，而集成在短舱内可以降低至少4%的耗油率。在飞机中集成固体氧化物燃料电池涡轮动力系统时，应尽量避免迎风面积增加而带来的空气阻力增大的问题。

除传统固体氧化物燃料电池涡轮混合动力构型外，哈尔滨工业大学秦江课题组提出去掉传统燃气涡轮，用固体氧化物燃料电池驱动压

气机的新循环构型，并针对新循环进行了系统层面的性能计算。研究表明：新循环可有效提高燃料转化效率，动力系统比推力与燃料种类关联性不高，当压比增加时，动力系统效率随之增加，以碳氢燃料和氢气作燃料的动力系统性能差异也随之增大。在固体氧化物燃料电池涡轮动力系统中，一般来说，燃料电池输出功率在动力系统中占比越高，动力系统总体效率越高，固体氧化物燃料电池的性能将直接影响动力系统的整体性能。虽然动力系

统层面的热力学仿真具备快速预测的能力，但无法考虑运行过程中电堆内反应物浓度分布不均和燃料电池温度分布不均带来的影响。

哈里（Hari）和郝（Hao）等基于动力系统中固体氧化物燃料电池入口边界条件，模拟了管式固体氧化物燃料电池内的温度分布与反应物速度分布，如图3所示。相关研究指出：在设计电堆具体结构时，应进一步考虑进气结构、反应物流量对电堆内温度分布及电流密度分布的影响，确保没有局部热点的出现。局部热点的出现会显著降低燃料电池寿命，而反应物分布不均则会影响电堆的功率密度，在未来针对固体氧化物燃料电池涡轮动力系统的仿真中，可首先基于具体的燃料电池结构和进气方式，模拟不同工况下燃料电池的温度分布与输出功率，得出不同工况下燃料电堆的工作特性曲线后，再联合系统热力学模型计算起飞、巡航等工况下的系统效率，进一步提升系统仿真结果的准确性。此外，由于燃烧室温度比固体

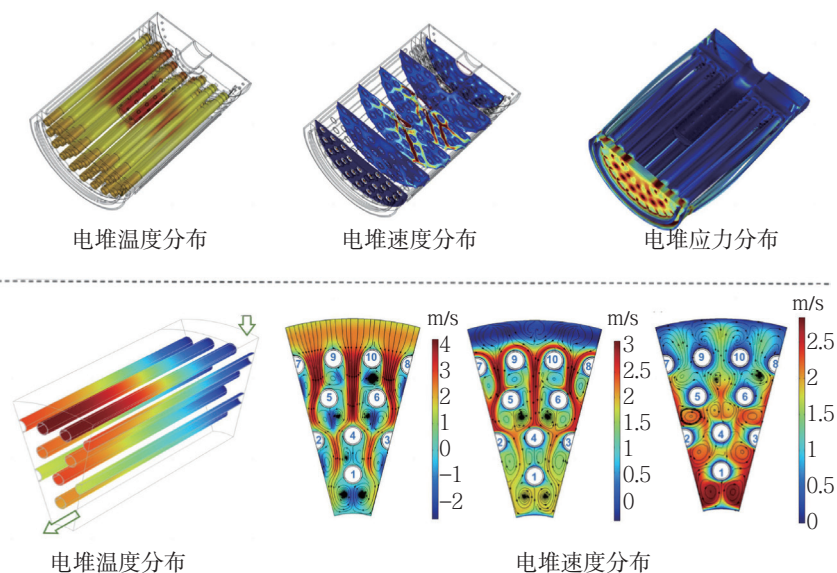


图3 固体氧化物燃料电堆温度分布不均及反应物速度分布不均

氧化物燃料电池高，可能会导致电堆出口附近出现高温区而引起损坏，针对固体氧化物燃料电池和燃烧室的匹配集成需要进一步试验验证。

从上述针对固体氧化物燃料电池涡轮动力系统的研究可看出：固体氧化物燃料电池是整个动力系统的核心，其工作性能直接影响动力系统的效率与功率密度。NASA曾提出了针对航空动力固体氧化物燃料电池的具体要求：固体氧化物燃料电池质量功率密度需至少达到1.0kW/kg，并可在30min内完成启动；电堆需具备良好的抗热循环能力且保证每10000h的功率衰减率小于2%；此外，在将电堆集成于飞机动力系统的过程中不能增加额外的空气阻力代偿。目前固体氧化物燃料电池存在功率密度低、启动速度慢、循环寿命短等关键瓶颈，无法直接应用于航空动力。研制大功率、高功率密度、长寿命的固体氧化物燃料电池是决定固体氧化物燃料电池能否应用于航空动力的关键。

## 功率密度研究

固体氧化物燃料电池的功率密度是决定其能否应用于航空动力的关键指标。图4统计了目前固体氧化物燃料电池的功率等级和质量功率密度的关系，其中包括应用于地面固定式发电的固体氧化物燃料电池和初步探索用于交通工具动力源的固体氧化物燃料电池。

针对地面固定式发电的燃料电池的研究主要聚焦于如何提升电堆的功率等级与寿命，其中美国Bloom Energy公司、潮州三环公司等企业已具备生产高效率百千瓦级固体氧化物燃料电池堆的能力，此类电堆发

电效率可超过60%，并可稳定运行上万小时，但由于质量功率密度与体积功率密度较低，需进一步突破后才可应用于航空动力。

除地面固定式发电外，业界近年来也探索了将固体氧化物燃料电池应用于交通工具动力源的可行性。在航空动力方面，具有代表性的为NASA格伦研究中心研制的高功率密度板式电堆与自适应材料公司（AMI）研制的微管式电堆。NASA指出：固体氧化物燃料电池堆中金属连接体总质量占比可达75%，大幅降低了电堆的质量功率密度，通过改进冰冻流延工艺，实现陶瓷电极-流道的一体化加工以减少连接体在电堆中的占比，成功研制出质量功率密度为1.1kW/kg、体积功率密度为4kW/L的板式固体氧化物燃料电池堆，但电堆功率等级不高。除板式固体氧化物燃料电池外，微管式固体氧化物燃料电池近年来也受到业界的重视，由于管式燃料电池本身抗热循环能力优于板式燃料电池，且直径小于10 mm的微管式燃

料电池具有比表面积大的几何特性，有潜力同时满足未来动力对高功率密度和抗热循环能力的需求。此外，美国洛克希德-马丁（洛马）公司联合AMI研发的千瓦级微管式固体氧化物燃料电池也可用于无人机增程器。

但从图4可看出，目前应用于动力的固体氧化物燃料电池在功率密度与功率等级上仍有待突破，需要注意的是，电堆功率等级的提升也会导致功率密度的下降。NASA的研究表明：将当前实验室级的瓦级小型纽扣电池功率提升至数百千瓦级的电堆时的功率密度会下降70%左右。在固体氧化物燃料电池输出功率层面，随着电堆输出功率大幅提高，电堆内燃料浓度分布不均、温度分布不均、电流收集损失增大等因素会导致其电化学性能下降，使输出功率损失显著增加；在系统质量层面，从燃料电池单体到航空燃料电池涡轮动力系统，功率等级的提升需考虑到集流器、换热器和

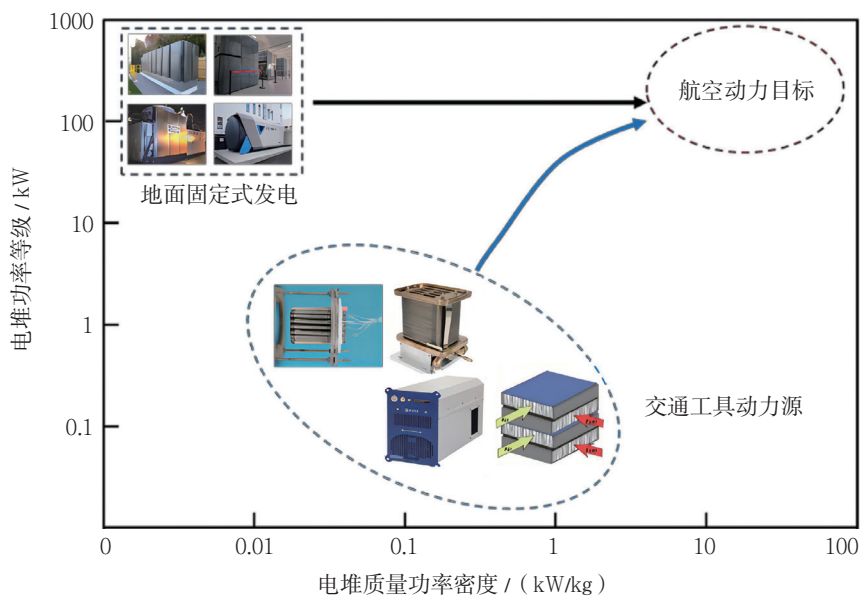


图4 固体氧化物燃料电池功率等级与质量功率密度统计

支撑件等一系列系统辅件的质量与体积，会进一步降低固体氧化物燃料电池涡轮动力的功率密度。当固体氧化物燃料电池功率等级提升时，如何提升电化学性能、减轻系统质量是提高其功率密度的关键。

## 起动速度与热循环研究

传统应用于地面固定式发电的固体氧化物燃料电池起动时间为小时级，由于燃料电堆内所有组件温度均需接近700~800℃左右的工作温度才可进行电化学反应。在起动过程中，燃料电池需经历从室温加热到工作温度的温度变化过程，由于起动过程中燃料电池各位置受热不均并受加热方式影响，极易在电极-电解质内产生大的温度梯度，且由于电极-电解质各层材料特性不同，各位置受热不均易引起电极脱落或在其内部形成微裂纹，使电极损坏或电堆密封失效。传统地面固定式发电的燃料电堆为保证其稳定运行，起动速度约为1~5℃/min。图5所示为文献中统计的固体氧化物燃料电池热循环次数与加热速率关系图，需要注意的是，图中的热循环次数为文献中所汇报的燃料电池在试验中运行的热循环次数，而非其所能实现的最大热循环次数。

从图5可以看出：极少数固体氧化物燃料电池可稳定运行1000次热循环以上。目前英国Ceres Power公司在金属支撑板式电堆的研究中取得突破，其电堆工作温度可降至500~600℃，通过在不锈钢基板上沉积电极和电解质，并在单元集成时采用焊接方式密封，电堆本身与密封点的强度得到保证。由于电堆工作温度的降低与支撑体强度的增

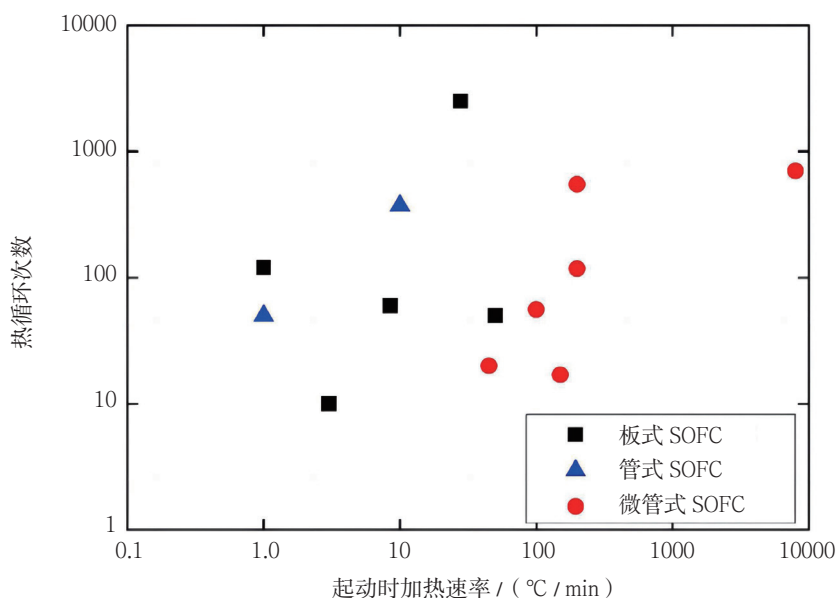


图5 固体氧化物燃料电池加热速率与热循环次数统计

加，Ceres Power公司所生产的电堆在起动时间与循环寿命上有优异的表现，所研发的金属支撑板式电堆可实现9min的快速起动，且经历了2500次热循环后仍无明显的性能衰减，其平均衰减率约为1.5%/1000次热循环。

除金属支撑板式固体氧化物燃料电池外，微管式固体氧化物燃料电池由于热惯性小且密封容易，也有潜力满足航空动力快速起动与多次热循环的需求，近年来亦受到重视。英国伯明翰大学肯德尔课题组曾尝试以大于100℃/min的加热速率对燃料电池进行升温，并成功实现了上百次燃料电池热循环，同时还尝试了将输出功率为250W左右的小型电堆用于质量6kg、翼展2m的无人机上，电堆体积功率密度与质量功率密度分别约为270W/L和350W/kg。

综上所述可以看出：金属板式与微管式固体氧化物燃料电池是应用于航空动力的固体氧化物燃料电池的

研究重点和重要发展方向。未来有必要研究保证电堆均温性的加热方式，并探索不同起动方式下固体氧化物燃料电池的温度变化，研究提升电堆循环寿命的方法。

## 结束语

固体氧化物燃料电池涡轮动力系统具备燃料电池效率高和燃机功率密度高的优势，其中燃料电堆的功率密度、起动速度与循环寿命是决定动力系统能否应用于航空动力的关键，下一步研究建议聚焦电堆功率密度、起动速度与循环寿命提升方法，开展电堆与燃烧室匹配集成试验，建立考虑燃料电堆温度分布与电流密度分布的动力系统模型，为航空固体氧化物燃料电池涡轮动力系统研发提供关键技术支撑。

**航空动力**

(曾泽智，清华大学，助理研究员，主要从事固体氧化物燃料电池气动热力学研究，聚焦固体氧化物燃料电池功率密度与循环寿命提升机制)