

文章编号: 1674-8190(2024)02-011-14

临近空间无人机液氢供能系统技术分析

高彦峰, 宋琦, 谢高峰, 王学科, 王明富

(中国航天科技集团有限公司第一研究院 北京航天发射技术研究所, 北京 100076)

摘要: 对于临近空间无人机而言, 高效的能源动力形式是支撑其实现长航时飞行的关键。经对比, 本文认为“机载液氢+氢燃料电池”的供能方案符合无人机长航时和大载荷的发展趋势。针对该方案, 综述了供氢工艺流程、机载液氢储罐、氢燃料电池的空气供应流程及水/热管理的技术现状, 对供氢系统中的氢输送方式、液氢储罐结构及材料, 以及氢燃料电池子系统中空压机吸气性能、电池散热性能受到高空低压环境的影响开展了技术分析和总结, 并对相关技术的发展方向进行了展望, 可为后续研究提供一定参考。

关键词: 临近空间; 无人机; 液氢; 供氢流程; 储罐; 氢燃料电池

中图分类号: V228.1; V279; TK91

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2024.02.02

Analysis of liquid hydrogen power systems for near space unmanned aerial vehicles

GAO Yanfeng, SONG Qi, XIE Gaofeng, WANG Xueke, WANG Mingfu

(Beijing Institute of Space Launch Technology, The First Academy of CASC, Beijing 100076, China)

Abstract: For near space unmanned aerial vehicles (NSUAVs), efficient power type is the key to support their long flights. It is considered that the "airborne liquid hydrogen storage + hydrogen fuel cell" scheme is in line with the trend of NSUAVs' greater endurance and larger payloads. In allusion to this scheme, the technology status of hydrogen supply processes, airborne hydrogen tanks, air supply processes and water/heat management for fuel cells are summarized in this paper. Technical analysis and summaries are carried out on hydrogen delivery methods, structures and materials of airborne hydrogen tanks, as well as the influences of low pressure environment on the suction performance of air compressors and heat dissipation performance of fuel cells. The development direction of relevant technologies is also discussed, providing reference for later studies.

Key words: near space; unmanned aerial vehicles; liquid hydrogen; hydrogen supply process; hydrogen tank; hydrogen fuel cell

收稿日期: 2023-04-06; 修回日期: 2023-06-24

通信作者: 高彦峰(1984-), 男, 博士, 高级工程师。E-mail: gaoyanfenghit@126.com

引用格式: 高彦峰, 宋琦, 谢高峰, 等. 临近空间无人机液氢供能系统技术分析[J]. 航空工程进展, 2024, 15(2): 11-24.

GAO Yanfeng, SONG Qi, XIE Gaofeng, et al. Analysis of liquid hydrogen power systems for near space unmanned aerial vehicles [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2024, 15(2): 11-24. (in Chinese)

0 引言

随着航空工业技术及信息技术的发展,无人机行业近年来蓬勃发展,国内外对无人机的研发和采购需求均呈现增长趋势。据统计,2015—2024年间,全球军用、民用无人机总市场价值超890亿美元,预测全球无人机需求将在2024年增长至115亿美元,其中军用无人机需求约占86%^[1]。除军用需求以外,通信中继、地图测绘等民用领域对长航时无人机的需求逐渐增大。在2020年河南暴雨救灾过程中,翼龙-2H无人机从贵州跨区域飞抵河南,在米河镇上空执行5 h通信中继任务,实现了约50 km²范围内长时稳定的移动信号覆盖,为全球首次大型无人机应急通信实战演练创建了中国应急救援通信体系建设的全新方案,彰显了无人机在民用领域的应用价值。

近年来,高度20~100 km的临近空间成为各国纷纷抢占的“空天结合”军事战略制高点,也成为研究热点领域。在此高度区间运行的飞行器在区域通信、环境监测、对地观测等领域展现了独特优势^[2]。根据飞行速度,临近空间飞行器可分为低速类(包括平流层飞艇、高空气球、高空无人机等)和高速类(包括高空侦察机、高超声速飞行器、亚轨道飞行器等)。其中,低速临近空间飞行器一般具有无人驾驶、亚声速飞行、续航能力强、信息获取处理能力强等特点,主要用于探测、侦查、情报收集、通信等^[3]。隶属此类的无人机因机动性在该领域脱颖而出,是未来低速临近空间飞行器的主要研究方向。

对于临近空间无人机而言,高效的能源动力形式是支撑其实现长航时飞行的关键。对于临近空间无人机动力形式,本文认为“机载液氢+氢燃料电池”的供能方案符合无人机长航时和大载荷的发展趋势。针对该方案,本文开展相关重点技术的探讨与分析。

1 无人机动力形式

目前临近空间无人机的动力形式主要包括涡轮增压发动机式和电池式。从燃料来源角度进一步细分,涡轮增压发动机燃料来源包括燃油(航空煤油)或氢,电池的燃料来源则包括太阳能或氢。

采用涡轮增压发动机的无人机继承了部分成熟发动机技术,但无论是使用燃油或氢燃料,均需要在发动机前加装涡轮增压器,将发动机进气压力恢复至海平面水平,克服高空动力衰减。多级涡轮增压可更好地平衡临近空间动力学和燃油经济性^[4]。由于液氢燃料的能重比约为航空煤油的3倍左右,具有显著优势^[5],美国的“全球观察者”“鬼眼”“猎户座”均采用液氢汽化后供给内燃机燃烧供能的模式。其中,“全球观察者”续航能力可达5~7天,“猎户座”能携带181 kg任务载荷分别在20 000 m/13 700 m高度上持续飞行100 h/160 h以上(设计目标)。“鬼眼”在2014年9月的试飞中实现了16 000 m以上飞行高度、留空9 h的最终记录^[6-10]。虽然“全球观察者”“鬼眼”进行了数次飞行试验,但仍有大量关键技术有待深入研究,如高空低压环境对空气压缩机吸气的考验、高空氢气排放堵塞的问题、保持液氢罐压的控制手段等^[11]。

采用太阳能电池的无人机多采用柔性轻质薄膜发电材料,通过太阳能转换电能以实现昼夜能量收支平衡,理论条件下续航时间可不受限制。但该供能方式能量来源单一且功率密度较低,储能电池的比能量提升遇到瓶颈,均制约了太阳能电池无人机跨昼夜飞行的能力。在昼夜飞行工况下,飞行器设计上一般表现为低翼载、大尺度、轻质量,这些特征导致飞行器受气流扰动较大,对飞行器的安全带来巨大挑战^[2]。另外,太阳辐射由赤道向两极递减,故太阳能动力无人机在高纬度地区的应用受到了限制^[2,12-13]。

采用氢燃料电池的无人机以自身机体内携带的气氢或液氢汽化形成的气氢作为燃料,以环境空气作为氧化剂,两者在适宜的条件下发生电化学反应产生电能,为机载储能电池充电或直接驱动机载设备。其生成物为水,可做到真正的零排放,符合目前减碳的发展目标;电化学反应将氢气的化学能转换为电能,可达40%~50%的热效率;燃料电池系统中仅有水泵、微小型氢泵等运动部件,振动和噪声均低于内燃机;不受昼夜交替和纬度限制,在太阳能动力无人机难以应用的高纬度地区有不可替代性。对于小型氢燃料电池无人机,多采用高压气瓶储氢方式^[12],但由于气瓶储氢的质量储氢率和体积储氢率均过低,难以满足大

型或长航时无人机的续航需求。

对比国外典型太阳能动力无人机“太阳神”“太阳鹰”“西风”“太阳能平台”,和典型氢动力无人机“全球观察者”“鬼眼”“猎户座”的主要性能参数(如表1所示),可见氢动力无人机的起飞质量、有效载荷和飞行速度均优于太阳能动力无人机。

表1 几种典型超长航时无人机的主要性能参数^[14]

Table 1 Main performance parameters of typical long endurance UAVs^[14]

能源	名称	起飞质量/kg	有效载荷/kg	飞行速度/(m·s ⁻¹)
太阳能	太阳神	755	68	14
	西风	53	2.27	25
	太阳鹰	1 361	90	—
	太阳能平台	816	100	20
氢能	全球观察者	4 127	450	56
	鬼眼	6 412	900	77
	猎户座	3 175	450	38

近年来,各国逐渐将目光投向临近空间的开发利用,所以临近空间长航时无人机的研发极具战略意义。根据前文所述的各种动力形式优缺点对比,氢动力系统在临近空间无人机领域脱颖而出。考虑到液氢数倍于气氢的密度,以及氢燃料电池相较于氢内燃机在热效率、振动、噪声等方面的综合优势,“机载液氢+氢燃料电池”的供能系统方案是临近空间无人机的优选。国内在氢动力无人机领域起步较晚,相关高校和科研院所等单位对无人机气氢供能系统有一定研究,但对机载液氢的供能系统方面仍处于初步探索阶段,所以开展该领域关键技术研究迫在眉睫。

2 机载液氢的燃料电池供能系统

无人机机载液氢的燃料电池供能系统主要包括供氢子系统和氢燃料电池子系统,直接利用储罐中蒸发的氢气,或采取挤压、泵送等形式将液氢输送至汽化器转化为气氢,再输送至氢燃料电池参与反应提供动力。氢气可作为碱性燃料电池(AFC)、磷酸盐型燃料电池(PAFC)、熔融碳酸盐型燃料电池(MCFC)、质子交换膜燃料电池

(PEMFC)和固体氧化物燃料电池(SOFC)的阳极燃料气。其中,AFC电解质为腐蚀性液体,PAFC、MCFC、SOFC工作温度较高,均不完全适用于无人机场景;特别是SOFC工作温度可达600~1 000℃,反而可考虑用于客机的辅助动力单元(APU),其高温排气可提高APU系统效率^[15]。

综上,采用固体聚合物膜作为电解质、工作温度适中的PEMFC成为了无人机用燃料电池的优选,其发电规模可覆盖1 kW~2 MW,完全满足无人机的用电功率^[16]。因此,下文无人机机载氢燃料电池均指PEMFC模式。在PEMFC的反应过程中,氢气进入阳极扩散到催化剂表面,被催化分解为质子和电子,质子通过交换膜去往阴极,电子则通过外电路流向阴极;氧气进入阴极扩散到催化剂表面,与质子、电子反应生成水。

2.1 供氢子系统

2.1.1 工艺流程

经文献调研,对于无人机机载供氢系统工艺流程,国内外缺乏详尽的技术报道,目前仅见少量文献。

NASA的Millis等^[11]针对采用氢内燃机、PEMFC和SOFC三种供能模式提供了不同的方案,分别如图1~图3所示。三种供能模式均采用两个同容积的液氢球罐和氢气稳压方式。球罐均设有液位计和压力安全泄放装置,罐底通过管道连接在一起,可通过自动触发的隔离阀来平衡两罐液位;同时球罐出口均设有20 W左右功率的液氢泵用于液氢输送。对于氢内燃机模式,液氢经泵输送至换热器,汽化、升温至-20~120℃并稳压在0.41~0.69 MPa范围内再送入内燃机燃烧供能;对于SOFC模式,液氢汽化的热量来自于燃料电池反应产生的阴极排气,氢气进一步被高温阳极排气加热到800℃才被送入燃料电池;对于PEMFC模式,液氢汽化后还要与阳极排气蒸发的水蒸气混合加湿后才进入燃料电池参与反应。经计算,在上述三种模式中,PEMFC的单位燃料消耗量最少,运行温度最低,所需的氢气输送压力最低,能量利用率(转化为飞行器动力的比例)最高,是三种方案的优选。

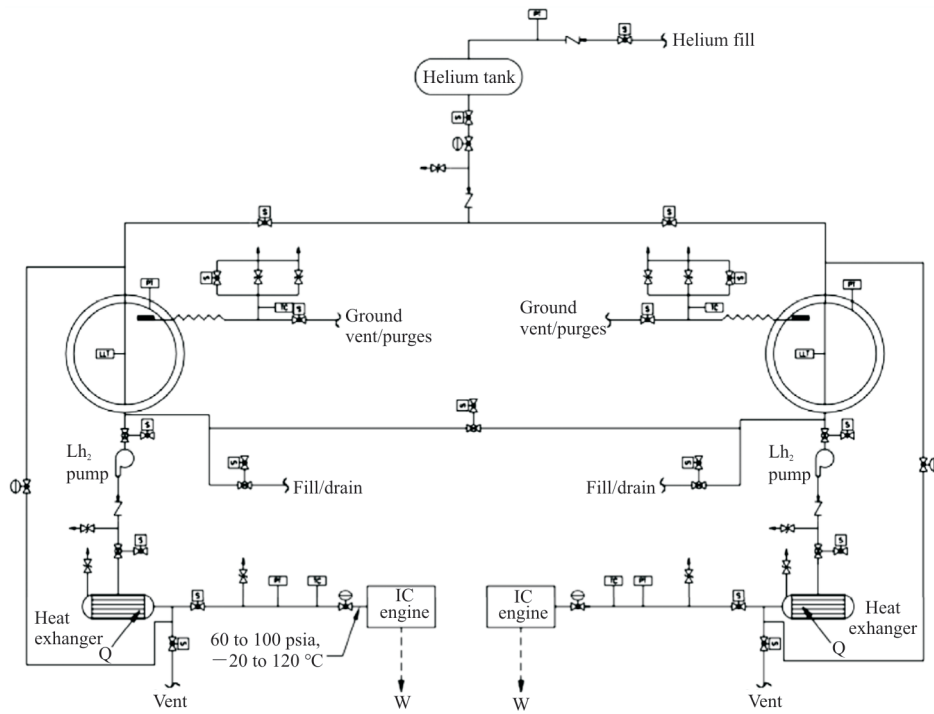


图 1 氢内燃机供氢系统原理图^[11]

Fig. 1 Schematic diagram of H₂ supply system for H₂ combustion engine^[11]

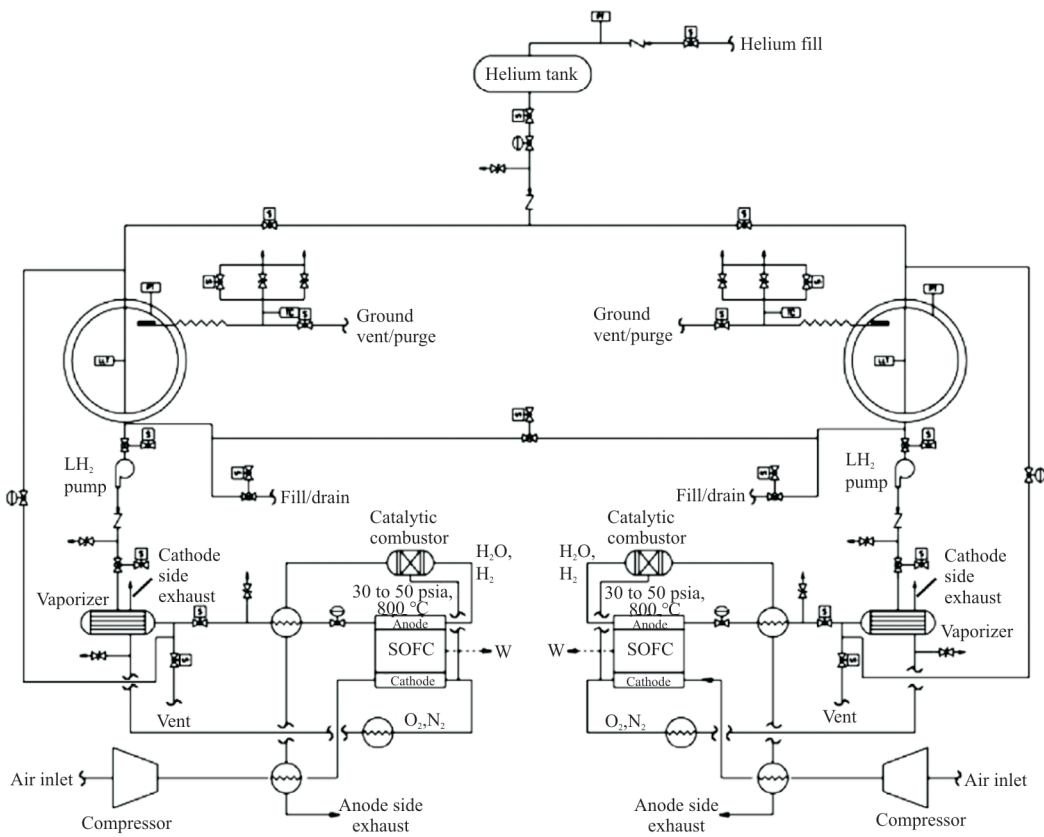


图 2 SOFC 供氢系统原理图^[11]

Fig. 2 Schematic diagram of H₂ supply system for SOFC^[11]

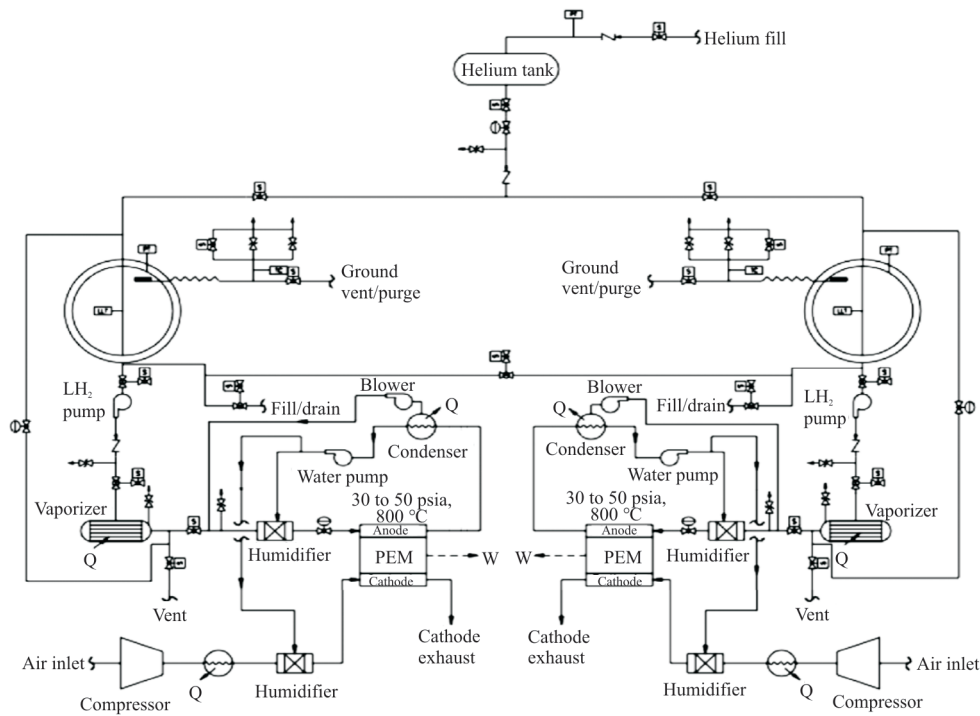


图 3 PEMFC 供氢系统原理图^[11]

Fig. 3 Schematic diagram of H₂ supply system for PEMFC^[11]

基于上述 PEMFC 模式,华盛顿州立大学 Leachman 等^[17]进一步考察了采用催化增压替代氢气增压的可行性。他们考虑在液氢泵(如图 3 所示的系统)后增加仲一正氢催化转化床,将液氢罐中的 BOG 引出升温后进行催化转化,增加气流中的正氢含量。这股气流一部分进入燃料电池,一部分经回热后节流返回液氢罐。返回液氢罐的正氢再经罐内的正一仲氢催化剂处理,转化为仲氢并放热,导致液氢蒸发为 BOG 以完成整个流程(如图 4 所示)。这样的方式可减小液氢储罐增压系统的占用空间。

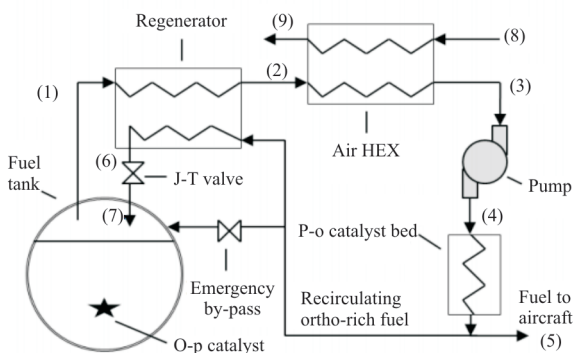


图 4 催化增压的供氢系统原理图^[17]

Fig. 4 Schematic diagram of H₂ supply system with catalytic pressurization^[17]

此外,美国海军实验研究室的 Stroman 等^[18]在携带 22 L、35 MPa 氢气瓶完成 26 h 飞行的小型低空无人机“离子虎”的基础上提出了携带液氢的方案,如图 5 所示,该方案在液氢杜瓦内胆中设置电加热器,依靠容器漏热和电加热蒸发液氢,使氢气压力和流量达到目标值,同时设置了泄压电磁阀用于耗氢量减小的工况。该液氢供应系统与气氢供应系统干重相同,已在“离子虎”上进行了演示验证试验,实现了 48 h 的不间断飞行。

基于长期从事地面低温推进剂存储及输送系统设计的经验,北京航天发射技术研究所针对机载工况下空间受限、轻量化等需求,提出了一种适用于飞行器的液氢贮存及供氢工艺流程。该流程采用挤压出液、机载热媒余热汽化液氢的模式,氢气经缓冲容器调压后输送给燃料电池。通过改变液氢球罐容积、热媒换热器面积等参数,可实现对不同耗氢量需求飞行器的模块化组合。在此工艺流程基础上,北京航天发射技术研究所搭建了简化的地面验证实验系统,利用水浴加热模拟机载热媒,实物图如图 6 所示。目前,该试验系统已使用液氮作为代介质进行了冷试、氮气调节及供应等试验,验证了工艺流程的可行性,后续计划持续开展进一步的低温试验。

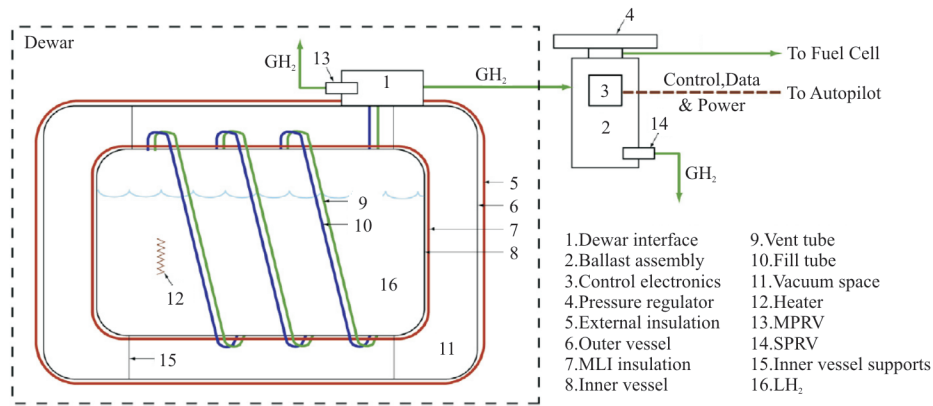


图 5 结合电加热的供氢系统原理图^[18]

Fig. 5 Schematic diagram of H₂ supply system with electric heating^[18]



图 6 地面验证试验系统实物图(北京航天发射技术研究所)
Fig. 6 Picture of ground-based test apparatus
(Beijing Institute of Space Launch Technology)

键设备之一。由于无人机空间和载荷重量要求是硬约束, 供能系统需在有限机舱包络范围内尽可能减轻重量。虽然部分地面液氢加注系统也追求小型化和轻质化设计, 但空间和重量还有相对可协调的余地。

无人机用液氢储罐的研究主要集中在美国相关机构, 如波音、NASA、Hyper Lab、Glenn Research Center 等。他们对液氢球罐和圆柱罐均有研究, 并已将球罐应用在“全球观察者”和“鬼眼”两型号无人机上。国内在该方面则处于起步阶段, 相关高校和航天院所等单位对液氢球罐的真空多层绝热性能、内外胆支撑结构设计及材料选用等方面进行了一定研究, 对国内无人机用液氢罐的后续研发起到了积极的促进作用。国内外无人机用液氢储罐的基本参数如表 2 所示。

2.1.2 液氢储罐

液氢的贮存是制约长航时无人机发展的主要瓶颈, 所以液氢储罐是无人机供氢系统中的关

表 2 国内外无人机用液氢储罐基本情况
Table 2 Parameters of domestic and foreign UAV liquid hydrogen tanks

单位	压力/ MPa	容积/ m ³	罐体材料	结构 形式	绝热方式	质量储氢比/%	蒸发率/%	文献
NASA	0.21	未报道	铝合金	球罐	高真空多层绝热	67.2 (1 200 kgLH ₂ -585 kg 罐)	未报道	[11]
波音 (鬼眼)	0.75	7(2个)	铝合金	球罐	泡沫材料绝热	72.4 (840 kgLH ₂ -320 kg 罐)	未报道	[6,8,14]
HYPER Lab	0.22	未报道	铝合金 6061	圆柱罐	高真空多层绝热	未报道	未报道	[19]
Hylum Industries	0.2	0.006	铝合金 6061-T6	圆柱罐	高真空多层绝热	12.3 (0.42 kgLH ₂ -3.0 kg 罐)	未报道	[20]
北京航空航天大学	0.5	0.38	304 不锈钢	球罐	高真空多层绝热	未报道	未报道	[21-22]
北京航天动力研究所	未报道	0.06	不锈钢	球罐	高真空多层绝热	9.2 (3.38 kgLH ₂ -33.32 kg 罐)	16.27 缩比试验	[23]
北京航天发射 技术研究所	0.07~ 0.15	0.18	铝合金 5083	球罐	高真空多层绝热	25.7 以液氮质量比换算	11.42 液氮蒸发率换算	-

从表 2 可以看出:采用真空多层绝热的金属双层球罐研究相对更多,此方案主要面临内胆支撑结构设计及其漏热问题。经文献调研,对于采用真空绝热方式小型液氢储罐的内胆支撑结构技术细节报道有限。北京航空航天大学徐伟强等^[21-22]设计了新型支撑杆(如图 7 所示),以氧化锆陶瓷小球与垫片和内胆内壁进行点接触来固定内胆位置,一根细杆穿过内胆再与外弹相连承力。北京航天动力研究所赵海龙等^[23]采用如图 8 所示的六个耳轴式支撑结构,耳轴一端与内胆外壁相连,另一端伸入外弹的突出结构中并固定,通过增加轴向长度来减小漏热。Glenn Research Center 的 Sullivan 等^[24]采用一根铝合金中心竖直杆(如图 9 所示)穿过球罐并上下固定于机身来实现罐体的支撑,内胆南北极焊接在中心杆上,同时在内胆的南北极处均焊接有连接环,该连接环提供了内外胆南北极处的真空密封和一定厚度的真空层以阻断漏热。另外, HYPER Lab 的 Adam 等^[19]设计的圆柱形液氢罐则采用由环氧树脂和玻璃纤维制成的 G10 材料杆状物对内胆进行长度方向的固定,如图 10 所示,其中一端是刚性杆,另一端则是同轴网状套筒型的杆状物,内含高压缩弹簧,以适应储罐的热变形。北京航天发射技术研究所设计了一种特殊支撑结构,采用导热率和线膨胀系数均较低的低温玻璃钢作为材料,在保证支撑强度的前提下实现与内、外胆球壳间的小面积接触以增大热阻;以液氮作为代介质的蒸发率测试表明,使用该支撑结构的 160 L(有效容积)球罐的质量储氢比和液氢蒸发率(均为换算值)达到了 25.7%/天和 11.42%/天。

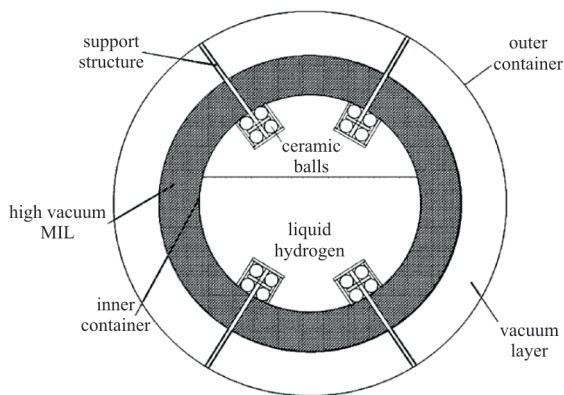


图 7 氧化锆球接触支撑结构^[21]
Fig. 7 Zirconia point-support structure^[21]

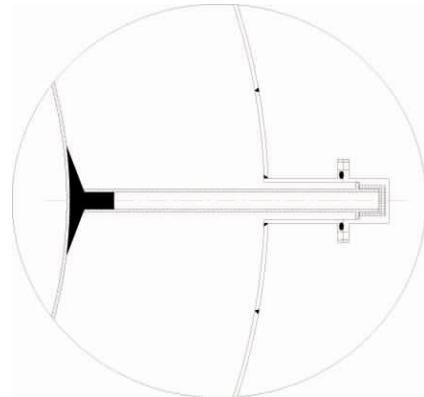


图 8 耳轴式支撑结构^[23]
Fig. 8 Trunnion support structure^[23]

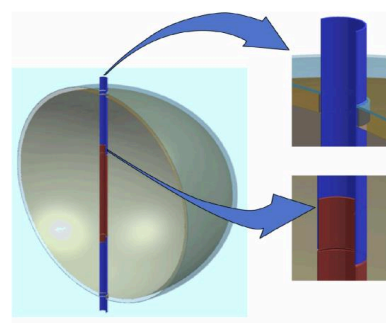


图 9 中心支撑杆结构^[24]
Fig. 9 Central rod support structure^[24]

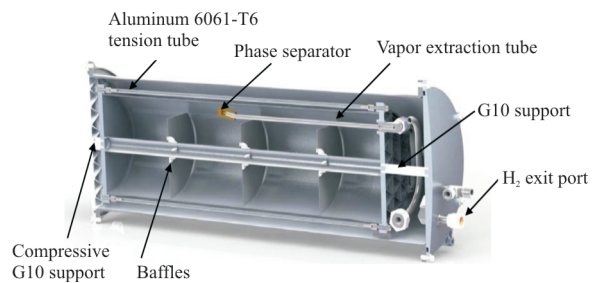


图 10 圆柱形罐 G10 材料支撑结构^[19]
Fig. 10 G10 support for cylindric tank^[19]

综上所述,目前报道的几种内胆支撑结构一般从傅立叶定律出发,从减小支撑材料导热系数、减小接触面积、增大温度梯度方向上的长度等方面减小漏热,以减缓液氢的蒸发。支撑材料根据承力情况选择氧化锆陶瓷、环氧树脂类或者导热系数小的金属类等,但其结构形式和材料选择的最优方案仍需要继续开展深入研究。

2.2 氢燃料电池子系统

本文讨论的适用于无人机的燃料电池聚焦在质子交换膜燃料电池 (PEMFC) 上。该类燃料电

池可在室温下快速启动、寿命长,无电解液流失。它主要由质子交换膜、催化层、扩散层、气体流道和双极板组成^[25],如图 11 所示。

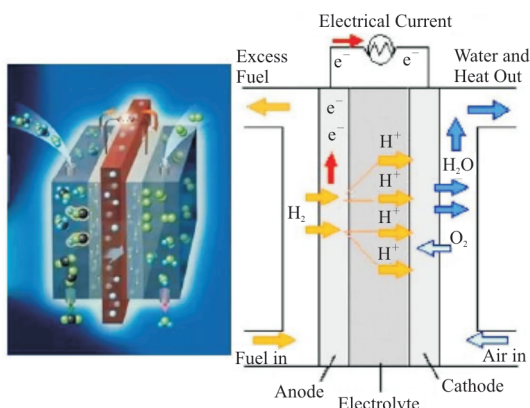


图 11 PEMFC 工作原理示意图^[25]

Fig. 11 Schematic diagram of PEMFC^[25]

2.2.1 空气供应

PEMFC 用氢气和空气作为原料,核心设备含空气压缩机,其主要作用是将空压加压至燃料电池所需的最佳操作压力,并提供所需流量的空气,保障电池顺利工作。空气压缩机性能好坏直接影响燃料电池效率。目前对车载空压机研究较多,对适用于临近空间低压环境的空压机性能的研究较少。燃料电池的电压、功率密度、效率等参数和空气供气流量及供气压力存在相关性^[26],可通过优化供气参数来提升燃料电池的性能。在不同进气压力下,燃料电池电压—电流关系如图 12 所示(注:1 atm=101 325 Pa),可以看出:随着电池进气口空气压力的升高,在相同电流密度下,电池电压随之提高。

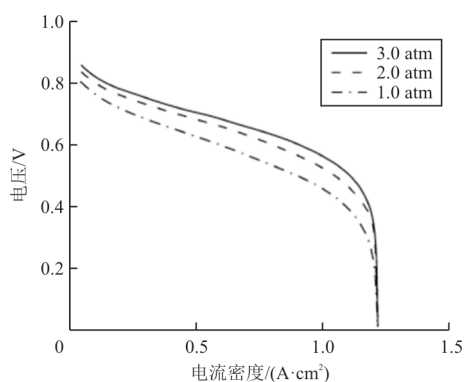


图 12 不同电池进气口空气压力下的电流密度—电压曲线^[26]

Fig. 12 Current density—voltage curve with different pressure of fuel cell air inlet^[26]

常见的燃料电池空压机有螺杆式、离心式、滑片式和涡旋式。螺杆式采用阴阳转子的啮合压缩气体,结构简单紧凑、力平衡性好、可压缩带液气体,但重量、体积较大,加工要求高,且转子之间存在摩擦导致噪声较大,在车载燃料电池领域开始被取代。离心式压缩机依靠高速回转的叶轮对空气做功,并通过扩压流道将空气获得的动能进一步转化为压力能,其动平衡特性好,在额定工况效率较高。滑片式压缩机利用叶片滑动改变压缩腔容积,滑片可采用自润滑材料避免润滑油的使用,但摩擦导致压缩机效率较低。涡旋式压缩机通过静盘和动盘的啮合实现空气的吸入和压缩排出,重量小、结构简单、效率较高,但其密封要求高、输出压力偏低^[26-27]。

由于目前基本未见针对高空无人机机载燃料电池工况开发的空压机产品,本文汇总车载燃料电池系统内空压机的相关研究成果,作为借鉴与参考,如表 3 所示。

表 3 车载燃料电池系统空压机性能参数

Table 3 Performance parameters of air compressors for vehicle fuel cells

单位	空压机形式	流量/(g·s ⁻¹)	压比	电机效率	文献
北京科技大学	离心式(水润滑轴承)	73	2.22	68%	[28]
浙江大学	单螺杆式	217 m ³ /h(换算约 72.3)	2.4	未报道	[29]
同济大学	单机离心式	80	1.5~2.5	未报道	[30]
雪人公司	双螺杆式	100	2.8	未报道	[31]
戴姆勒公司	喷水螺杆式	未报道	2.9	未报道	[32]
美国 Vairex	滑片式	75	2.5	—	[33]
美国 Honeywell	离心式	100	3.2	70%,匹配膨胀机后达 80%	[34]
韩国现代	离心式(空气箔片轴承)	80	未报道	未报道	[35-36]

严彦等^[26]认为,螺杆式压缩机和离心式压缩机的性能都处于前列,但由于前者叶片之间的摩擦,导致质量和噪声性能均大于后者;因此总体而言离心式空气压缩机性能更优,也是今后发展的主流方向^[37]。但是,临近空间的大气压力低,空压机的吸气工况十分恶劣。

2.2.2 水/热管理

氢燃料电池中,由于阳极处氢离子要与水分子结合才能穿过交换膜,阴极处反应物也含水,故电堆内膜组件需为湿润状态,并且调节电池系统内的水含量和水平衡,否则会导致燃料电池发生膜干或水淹,引起电池性能和耐久性的下降^[38-39]。

由于氢燃料电池内为放热反应,而电堆一般需工作在合适的温度区间内,温度过高可能导致膜电极脱水和性质改变^[40],目前常见采用冷却水带走电堆散热。在热管理系统内,水泵作为动力源驱动冷却水流入散热器,排出热量后,降温的冷却水回到电堆吸热,完成循环过程^[41-42]。和暖通行业的空调水系统一样,冷却水的容积会随温度升高而增大,热管理系统中会设置膨胀水箱起到“滤波”的作用^[42],一般设置在燃料电池冷却水出口上方。它可容纳温度变化带来的体积变化,还可在系统内形成一定正压,避免外界空气进入水系统,防止水泵气蚀。

但是,电堆的水管理和热管理耦合度高,两者同时调节易造成超调叠加,导致水含量和温度出现较大变动,长时间无法达到稳定。所以在进行水热管理时,可以考虑一个系统固定不变,仅通过另一个系统进行调节,以较快速度实现相对较优,有利于电堆的变负荷工作^[43]。

3 技术分析及展望

3.1 供氢子系统

综合文献调研结果及专业实践经验,本文认为在无人机机载液氢的燃料电池供能系统方案中,供氢子系统主要面临氢输送方式、液氢储罐结构及材料等技术问题。

3.1.1 氢输送方式

除前文所述的氢气增压和催化增压这两种液氢储罐增压模式,还可采用氢气自增压、液氢泵增压等方式来实现液氢或气氢的输送。

供氢系统输送方案比较如表4所示,在表4的输送方式中,氢气增压和氢气自增压技术较为成熟,本文不再赘述,但是要考虑到无人机机体结构会限制机载液氢容器的高度,形成的液位差可能较小,汽化驱动力较小,若要采用自增压方式则需结合实际机体结构进行核算;电加热增压也为传统成熟方式,但向氢环境中引入电加热装置有必要严格进行电气安全性设计,同时有必要根据无人机耗氢量核算电加热能耗占比,并关注电缆或加热丝穿过真空层处的密封;催化增压方式的流程仅见于Leachman等^[17]的研究,暂无相关工艺数据报道,所以压力和流量控制的可靠性尚未经验证。泵式增压虽常见,但考虑到输送介质是液氢,且用于无人机这种微小流量液氢输送的场合,仍有问题亟待解决,如:泵轴动密封、漏热及局部阻力等易使液氢蒸发进一步导致气蚀等^[44]。基于以上技术难点,国内目前尚无成熟可靠的国产化小流量液氢泵,但是液氢泵相关研究是该领域内的一大热点。

表4 供氢系统输送方案比较

Table 4 Comparisons of hydrogen supply methods

输送方式	优势	劣势
氢气增压输送	增压稳定	需携带高压氢气瓶,增加了整机重量
催化增压输送	相对于氢气瓶组而言可减小设备体积和重量	控制可靠性未经验证(暂无相关数据报道)
自增压输送	简单可靠,无需携带其他物料	无人机机载液氢容器的高度较小,形成的液位差较小,汽化驱动力较小
电加热增压输送	简单可靠,可实现无极调节	增压机载系统电能消耗;电缆穿过真空层,易导致真空密封失效
液氢泵输送	适于流量较小压差变化较大的场合	动密封方面存在严重的问题,尚无国产可靠产品

3.1.2 液氢储罐结构及材料

虽然地面液氢储罐的设计已经相当成熟,但在机载条件下液氢储罐的设计又会面临许多新

的、更高的技术要求和挑战。对于无人机用液氢储罐首要解决的问题是储罐用材和结构形式,首要满足的是轻质化、低温韧性等要求,同时要满足

低漏热和高储氢比等要求,同时还要关注加装罐体后对飞行器气动外形及性能的影响。相对于地面储罐,机载液氢储罐夹层薄,内外胆支撑材料轴向导热相对更大;因存在着飞行机动工况,罐上接管承载各向惯性载荷比地面球罐更苛刻。同时无人机起飞、降落、机动等过程中存在着绕不同轴的角度变化,液氢液面会随之出现较大变化。为尽量减小液氢液面波动,需深入论证球罐与机身的固定方式。这是地面液氢加注系统不曾面临的问题。

根据调研结果,常见的液氢储罐的结构形状一般有球形和圆柱形两种,不同结构外形的低温容器的特点、用途以及优势各不相同,在无人机领域均有应用。针对无人机高储氢比和轻量化等特殊要求,液氢储罐的结构形式不仅要考虑储罐重

量和液氢蒸发损耗,同时还要关注对飞行器气动性能的影响,需根据飞行器特点选用与之相比配的球形储罐和圆柱形储罐^[45-46]。

以相同几何容积、材料和工作压力球罐和圆柱形罐为例,经计算前者的表面积、壁厚、重量分别是后者的92%、92%、84.64%^[47],说明在同等条件下球形罐的蒸发损耗小^[45],节约材料、重量较轻,在无人机这一特定应用场合下对延长航时有积极作用。但飞行器设计时要考虑罐体与机身的结合方式^[45],在同容积的情况下球形罐的直径尺度要比圆柱形罐大,相应机身直径和迎风面积会增加,进一步增加了飞行阻力。另外圆柱形罐易于与机身集成,可达到较高的机内体积利用率,且有易成型、加工方便的优点^[48]。优缺点总结如表5所示。

表5 球形罐与圆柱形罐的对比
Table 5 Comparisons between spherical and cylindrical tanks

类别	LH ₂ 蒸发损耗/%	材料用量/%	整体重量比/%	加工	对整机影响
球形罐	92	92	84.64	成型难度较大	增加飞机迎风面积,增加飞行阻力
圆柱形罐	100	100	100	易成型、加工方便	易与机身集成,可达较高体积利用率

在储罐材料选择方面,要考虑选用在整个工作温区延展性、低温冲击韧性都较好的材料。除此之外,对材料的热导率、导磁性、可焊性、加工工艺性都要择优选择。目前,低温容器常用的结构材料有奥氏体不锈钢、铝合金和钛合金等。

奥氏体不锈钢具有高的耐腐蚀性、塑性、韧性、无磁性以及优异的延展性和强度^[49],地面常用低温储罐大部分采用该种材料。铝合金耐蚀性能、力学性能、焊接性能良好,密度低、比强度高、无低温脆性和磁性^[50],在船舶、飞机建造中广泛使用;近年来为实现结构轻量化相关要求,铝合金在低温容器结构材料方面的受重视程度逐渐提升^[51]。钛合金在低温下热导率低、膨胀系数小、无磁性、耐蚀性能好,广泛应用于航天、超导等领域^[52-53];但其延伸率、冲击韧性、断裂韧性会随着温度降低而下降^[54]。

对上述三类金属材料综合分析,不锈钢密度是三者中最大的,在无人机这一重量敏感型的应用场合是非常大的劣势。钛合金本身化学活性较高,易受氢、氧、氮等元素影响,导致较难冶炼和加工,生产成本相对更高;同时钛合金还有一些优良特性并未得到充分的工程验证,增加了其在工程

应用过程中的局限性。铝合金有三者中最小的密度,符合无人机轻量化这一特性要求,成型性能及其他物化性能均满足容器的使用、制造和检验要求,可作为无人机液氢储罐的优选材料。

3.2 氢燃料电池(PEMFC)子系统

综合调研结果,本文认为无人机机载液氢的燃料电池供能系统方案中,氢燃料电池子系统主要面临高空环境对空压机吸气性能及电池散热性能等技术问题。

3.2.1 空压机吸气性能

对于无人机机载燃料电池系统,其振动、加速度等工况和车载有类似之处,所以可以先从车载燃料电池空压机产品入手进行借鉴,但是车载和机载燃料电池堆工作压力不尽相同,而且机载工况最恶劣的考验在于高空气压低(20 km高空气压仅约5.5 kPa)、含氧量少、环境温度低。飞行高度升高,空压机进气压力、湿度及所含氧气浓度降低,压缩机容积效率与容积流量均降低,不仅导致压缩功耗增加,还可能影响燃料电池的运行工况^[55-60];为将低压空气升至燃料电池工作压力,以5.5 kPa升至150 kPa为例,压力高达27 kPa,

需使用多级压缩。此外,若供气系统引入润滑油而导致膜覆盖质子交换膜和催化剂,会影响电化学反应的进行,故燃料电池发动机系统要求空压机为无油型式^[61-62],增加了机载空压机研发难度。结合前文中对空压机型式的调研及讨论,机载空压机优选适应低吸气压、大压比、高容积流量的无油离心压缩机^[62]。

3.2.2 电池散热性能

在高空下,低环境气压导致空气密度降低,造成风冷散热器空气侧的对流换热系数降低、同面积下的进风质量流量降低,明显制约了风冷散热器换热性能^[63-65]。故燃料电池系统中空压机、直流电压变换器、控制器等设备的风冷散热会受到较大影响。以空压机为例,若散热困难,温度过高可能导致空压机内部零部件过热、永磁体退磁、轴承、转子等热应力作用下损坏等。因此,采用风冷散热的机载设备需设计更大的散热面积,或改进风机扇叶面积或型线等方法提高风量,以匹配所需的散热量^[66]。

另外,在车载水冷散热系统中常用的开式膨胀水箱不再适用于低压环境。若在低压环境下使用开式膨胀水箱,冷却水在低压下沸点降低,在燃料电池中升温后会沸腾。为避免出现此现象,机载电池水冷散热系统应采用闭式膨胀水箱,水箱上设置进气和出气电磁阀。当冷却系统内部压力超过压力上限时,散热器内热水流入膨胀水箱,水箱出气电磁阀相应打开;当冷却系统压力降低超下限时,水箱进气电磁阀打开,冷却水进入冷却系统管路^[67-68]。

在燃料电池系统的散热设计中,可考虑与供氢系统工艺流程进行集成设计,如将电堆散热、机载设备散热、空气压缩散热等热量用于低温氢介质的升温,更有利于提升全系统的能量综合利用效率。

3.3 展望

经过相关技术分析,机载液氢是未来氢动力无人机的必然发展方向,采用“机载液氢+质子交换膜燃料电池”方案是供能系统的优选。在供氢工艺流程和储罐设计方面,目前已有可行或优选方案,但仍有技术进步的空间;在氢燃料电池的空压机选型和散热系统设计方面,均有须注意的

要点。

1) 在满足无人机载重限制的条件下,氢气增压、电加热蒸发等是目前实现难度较小的机载液氢输送方式。液氢泵增压和催化增压还有待进一步工程化;其中,前者难点在于微小型液氢泵成熟产品的开发^[44],后者的难点在于催化反应过程及供氢参数的控制^[17]。

2) 相较于圆柱形液氢储罐,球形罐在液氢蒸发损耗^[45]、材料用量及总重量^[47]等方面有一定优势;铝合金力学、低温性能好,符合机载设备轻量化需求,国外已有多个项目采用其作为机载液氢储罐材料^[6,8,11,14,19-20],是罐体材料的优选。后续研究中,值得在铝合金球罐成型工艺、球罐与机体的结合设计方面开展更多工作。

3) 空压机是机载氢燃料电池空气供应的核心设备,综合对比发现离心式空压机是优选^[26,37]。低吸气压、大压比、高容积流量的无油离心空压机更适应于机载氢燃料电池系统的供气需求^[62],但目前调研基本未见成熟产品,这是空压机领域可持续发力的一个方向。

4) 受临近空间环境条件影响,机载水冷散热系统中应采用闭式膨胀水箱^[68],风冷散热系统中在设计时要充分考虑空气密度下降的影响,在散热面积或风量方面要考虑充足的余量^[66]。

4 结束语

本文梳理了无人机的动力形式,总结出“机载液氢+质子交换膜燃料电池”的供能系统方案是临近空间无人机的优选,并针对此方案综述了供氢工艺流程、机载液氢储罐、氢燃料电池的空压机形式及水/热管理的研究情况和应用现状。基于技术分析,本文总结了供氢、氢燃料电池两个子系统中工艺流程或重要设备的优选方案或设计要点,并展望了相关技术的发展方向。随着工程化的逐步实现,临近空间氢动力无人机定将在军用和民用领域发挥更关键的作用。

参考文献

- [1] 刘怡彪. 军用无人机时长发展前景研究[J]. 科技经济导刊, 2020, 28(17): 41, 11.
LIU Yibiao. Study on development prospects of military UAVs [J]. Technology and Economic Guide, 2020, 28 (17): 41, 11. (in Chinese)

- [2] 柳兆伟. 临近空间太阳能飞行器气动—结构—飞行动力学耦合问题研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.
LIU Zhaowei. Study on aerodynamic-structural-flight dynamics coupling problems of near space solar powered aircraft [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2018. (in Chinese)
- [3] 李怡勇, 李智, 沈怀荣. 临近空间飞行器发展与应用分析[J]. 装备指挥技术学院学报, 2008, 19(2): 61-65.
LI Yiyong, LI Zhi, SHEN Huairong. Analysis on development and application of near space vehicle[J]. Journal of the Academy of Equipment Command & Technology, 2008, 19(2): 61-65. (in Chinese)
- [4] 王奥林. 临近空间超高压比涡轮增压系统匹配关键技术研究[D]. 北京: 清华大学, 2019.
WANG Aolin. Research on the key technology of matching of near space super-high pressure ratio turbocharging system [D]. Beijing: Tsinghua University, 2019. (in Chinese)
- [5] 赵斐, 张宏杰. 氢动力内燃机应用前景分析[J]. 中国资源综合利用, 2020, 38(6): 72-74.
ZHAO Fei, ZHANG Hongjie. Analysis of application prospect for hydrogen combustion engines [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2020, 38(6): 72-74. (in Chinese)
- [6] MARQUARDT J, KELLER J, MILLS G, et al. An overview of ball aerospace cryogen storage and delivery systems [C]// Cryogenic Engineering Conference. Washington: Institute of Physics, 2015: 1-8.
- [7] MILLS G L, BUCHHOLTZ B W, OLSEN A D. Fabrication and testing of a liquid hydrogen fuel tank for a long duration aircraft[C]// Cryogenic Engineering Conference. Washington: American Institute of Physics, 2012: 773-780.
- [8] RICHARDSON T D. Phantom eye-accelerated air vehicle structural development thru prototyping[C]// 53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference. Hawaii: AIAA, 2012: 1-9.
- [9] 徐晨华. 美国非太阳能动力超长航时无人机发展综述[J]. 飞航导弹, 2018(8): 35-41.
XU Chenhua. Review of development of non-solar powered long endurance UAV in USA [J]. Aeronautical Missile, 2018(8): 35-41. (in Chinese)
- [10] 祝彬, 陈笑南, 范桃英. 国外超高空长航时无人机发展分析[J]. 中国航天, 2013(11): 28-32.
ZHU Bin, CHEN Xiaonan, FAN Taoying. Analysis of development of foreign ultra-high long-endurance UAV [J]. Aerospace China, 2013(11): 28-32. (in Chinese)
- [11] MILLIS M G, TORNABENE R T, JURNS J M. Hydrogen fuel system design trades for high-altitude long-endurance remotely-operated aircraft: NASA/TM-2009-215521 [R]. Cleveland: NASA, 2009.
- [12] 刘莉, 曹潇, 张晓辉, 等. 轻小型太阳能/氢能无人机发展综述[J]. 航空学报, 2020, 41(3): 6-33.
LIU Li, CAO Xiao, ZHANG Xiaohui, et al. Review of development of light and small scale solar/hydrogen powered unmanned aerial vehicles[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(3): 6-33. (in Chinese)
- [13] 朱立宏, 孙国瑞, 呼文韬, 等. 太阳能无人机能源系统的关键技术与发展趋势[J]. 航空学报, 2020, 41(3): 85-96.
ZHU Lihong, SUN Guorui, HU Wentao, et al. Key technology and development trend of energy system in solar powered unmanned aerial vehicles[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(3): 85-96. (in Chinese)
- [14] 马铁林, 郝帅, 甘文彪. 氢动力超长航时无人机关键技术及研究进展[C]// 第二届中国航空科学技术大会. 北京: 中国航空学会, 2015: 66-71.
MA Tielin, HAO Shuai, GAN Wenbiao. Research development and key technologies of the nearspace hydrogen-powered ultra-long endurance UAV[C]// The 2nd China Aeronautical Science and Technology Conference. Beijing: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2015: 66-71. (in Chinese)
- [15] MAZUR A M, DOMANSKI R. Hybrid energy systems in unmanned aerial vehicles[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2019, 91(5): 736-746.
- [16] 戴月领, 贺云涛, 刘莉, 等. 燃料电池无人机发展及关键技术分析[J]. 战术导弹技术, 2018(1): 65-71.
DAI Yueling, HE Yuntao, LIU Li, et al. Development of fuel cell UAV and analysis of key technology [J]. Tactical Missile Technology, 2018(1): 65-71. (in Chinese)
- [17] LEACHMAN J, STREET M J, GRAHAM T. Catalytic pressurization of liquid hydrogen fuel tanks for unmanned aerial vehicles[C]// Cryogenic Engineering Conference. Washington: American Institute of Physics, 2012: 1261-1267.
- [18] STROMAN R O, SCHUETTE M W, SWIDER-LYONS K, et al. Liquid hydrogen fuel system design and demonstration in a small long endurance air vehicle [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2014, 39(21): 11279-11290.
- [19] ADAM P, LEACHMAN J. Design of a reconfigurable liquid hydrogen fuel tank for use in the Genii unmanned aerial vehicle[C]// Cryogenic Engineering Conference. Washington: American Institute of Physics, 2014: 1299-1304.
- [20] GARCEAU N K, KIM S Y, LIM C M, et al. Performance test of a 6L liquid hydrogen fuel tank for unmanned aerial vehicles [C]// Cryogenic Engineering Conference. Washington: American Institute of Physics, 2015: 1-7.
- [21] 徐伟强, 杨国栋, 娄鹏. 无人机机载液氢储罐绝热结构设计及仿真[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(3): 266-270.
XU Weiqiang, YANG Guodong, LOU Peng. Design and simulation of airborne liquid-hydrogen tank for unmanned aerial vehicle [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015, 35(3): 266-270. (in Chinese)
- [22] 徐伟强, 李倩倩, 李万青. 无人机机载低温液氢储罐结构设计及强度分析[J]. 真空科学与技术学报, 2015, 35(8): 1017-1022.
XU Weiqiang, LI Qianqian, LI Wanqing. Simulation of mechanical strength of novel cryogenic liquid hydrogen tank for unmanned aerial vehicle [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2015, 35(8): 1017-1022. (in Chinese)
- [23] 赵海龙, 温鹏飞. 长航时无人机液氢储箱绝热方案与试验研究[J]. 低温工程, 2020(6): 54-61.
ZHAO Hailong, WEN Pengfei. Thermal insulation scheme and experimental research on liquid-hydrogen storage tank of long-endurance unmanned aerial vehicle [J]. Cryogenics, 2020(6): 54-61. (in Chinese)
- [24] SULLIVAN R M, PALKO J L, TORNABENE R T, et al. Engineering analysis studies for preliminary design of

- lightweight cryogenic hydrogen tanks in UAV applications: NASA/TP-2006-214094[R]. Cleveland: NASA, 2006.
- [25] 赵洪波. 质子交换膜燃料电池启停和变载工况下的动态特性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2020.
ZHAO Hongbo. Study on dynamic characteristics of proton exchange membrane fuel cell under start-stop and variable load conditions [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2020. (in Chinese)
- [26] 严彦, 周利彪, 白文涛, 等. 燃料电池用空气压缩机的现状研究[J]. 机电工程, 2021, 38(12): 1513-1519.
YAN Yan, ZHOU Libiao, BAI Wentao, et al. Research status of air compressors in fuel cells[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2021, 38(12): 1513-1519. (in Chinese)
- [27] 周拓, 白书战, 孙金辉, 等. 车用燃料电池专用空压机的现状分析[J]. 压缩机技术, 2021(1): 39-44.
ZHOU Tuo, BAI Shuzhan, SUN Jinhui, et al. Current analysis of air compressor special for vehicle fuel cell [J]. Compressor Technology, 2021(1): 39-44. (in Chinese)
- [28] 任天明. 高速水润滑轴承电动离心式空压机关键技术研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2017.
REN Tianming. Study on the high speed motorized centrifugal air compressor with water lubricated journal bearings [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2017. (in Chinese)
- [29] 吴震宇. 车载燃料电池用空气压缩机工作性能研究及能效分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
WU Zhenyu. Performance research and power analysis of air compressor in fuel cell vehicle [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007. (in Chinese)
- [30] 左曙光, 韦开君, 吴旭东, 等. 采用Kriging模型的离心压缩机叶轮多目标参数优化[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 77-83.
ZUO Shuguang, WEI Kaijun, WU Xudong, et al. Multi-objective parameter optimization of centrifugal compressor impeller with Kriging model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(2): 77-83. (in Chinese)
- [31] 李宏钦. 氢燃料电池车用高速离心式压缩机的设计及研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.
LI Hongqin. Design and research of high speed centrifugal compressor for hydrogen fuel cell vehicle [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019. (in Chinese)
- [32] VENTURI M, SANG J, KNOOP A, et al. Air supply system for automotive fuel cell application: SAE Technical Papers[R]. Warrendale: SAE, 2012.
- [33] STERLING B, STEVE C. Development and testing of a high-efficiency, integrated compressor/expander based on toroidal intersecting vane machine geometry: DOE Hydrogen Program 2005 Annual Progress Report VII. H. 3[R]. Washington: US Department of Energy, 2005.
- [34] GEE M K. Cost and performance enhancements for a PEM fuel cell system turbocompressor: DOE Hydrogen Program 2005 Annual Progress Report VII. H. 1[R]. Washington: US Department of Energy, 2005.
- [35] HA K K, JEONG T B, KANG S H, et al. Experimental investigation on aero-acoustic characteristics of a centrifugal compressor for the fuel-cell vehicle[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2013, 27(11): 3287-3297.
- [36] HA K K, LEE C H, KIM C M. A study on the characteristics of an oil-free centrifugal compressor for fuel cell vehicles [J]. SAE International Journal of Alternative Powertrains, 2016, 5(1): 167-174.
- [37] WU Yue, BAO Huanhuan, FU Jianqin, et al. Review of recent developments in fuel cell centrifugal air compressor: comprehensive performance and testing techniques [J/OL]. International Journal of Hydrogen Energy: 1-17 [2023-04-06]. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036031992302092X>.
- [38] 赵鑫, 郭建强, 杨运芄. 车用燃料电池准管理技术[J]. 电池工业, 2020, 24(3): 142-146.
ZHAO Xin, GUO Jianqiang, YANG Yunpeng. Water management technology of vehicle fuel cell [J]. Chinese Battery Industry, 2020, 24(3): 142-146. (in Chinese)
- [39] 于佳鑫. 质子交换膜燃料电池准管理建模与仿真研究[D]. 长春: 吉林大学, 2022.
YU Jiaxin. Water management of proton-exchange membrane fuel cell -a study by modelization and simulation [D]. Changchun: Jilin University, 2022. (in Chinese)
- [40] 张晓鹏, 朴世文, 钟兵, 等. 质子交换膜燃料电池系统的最佳工作温度研究[J]. 汽车科技, 2022(2): 2-5.
ZHANG Xiaopeng, PIAO Shiwen, ZHONG Bing, et al. Study on the optimal operating temperature of proton exchange membrane fuel cell system [J]. Auto Sci-Tech, 2022(2): 2-5. (in Chinese)
- [41] 周苏, 陈春光, 樊磊. 质子交换膜燃料电池动力系统热管理综述[J]. 汽车文摘, 2023(2): 1-14.
ZHOU Su, CHEN Chunguang, FAN Lei. Review on thermal management of automotive proton exchange membrane fuel cell power system [J]. Automotive Digest, 2023(2): 1-14. (in Chinese)
- [42] 叶书言. 质子交换膜燃料电池建模与工作温度控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2022.
YE Shuyan. Modeling and working temperature control of proton exchange membrane fuel cell [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2022. (in Chinese)
- [43] 展茂胜. 质子交换膜燃料电池热管理系统的优化与控制[D]. 济南: 山东大学, 2020.
ZHAN Maosheng. Optimization and control of thermal management system for PEMFC [D]. Jinan: Shandong University, 2020. (in Chinese)
- [44] 战颖. 全低温液氢泵的研制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2008.
ZHAN Ying. Research and development of cryogenic liquid hydrogen pump [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2008. (in Chinese)
- [45] KHANDELWAL B, SEKARAN P R, KARAKURT A. A review of hydrogen as a fuel for future air transport [C]// 48th AIAA/ ASME/ SAE/ ASEE Joint Propulsion Conference & Exhibit. Atlanta: AIAA, 2012: 1-12.
- [46] ALLIDIERIS L. Liquid hydrogen fueled aircraft-system analysis: cryoplane project final technical report (publishable version) 4.3 Work Package 3 systems and components [R]. Hamburg: Airbus Deutschland GmbH, 2003.

- [47] 徐烈, 朱卫东, 汤晓东, 等. 低温绝热与贮运技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
XU Lie, ZHU Weidong, TANG Xiaodong, et al. Cryogenic insulation and storage technology[M]. Beijing: China Machine Press, 1999. (in Chinese)
- [48] MITAL S, GYEKENYESI J, ARNOLD S, et al. Review of current state of the art and key design issues with potential solutions for liquid hydrogen cryogenic storage tank structures for aircraft applications: NASA/TM-2006-214346 [R]. Cleveland: NASA, 2006.
- [49] 张向峰, 龚代涛, 王均, 等. 不锈钢低温盐浴表面氮化技术发展现状[J]. 材料科学与工艺, 2017, 25(6): 75-81.
ZHANG Xiangfeng, GONG Daitao, WANG Jun, et al. Status and progress of surface nitriding technology of stainless steel in low temperature active salt bath[J]. Materials Science and Technology, 2017, 25(6): 75-81. (in Chinese)
- [50] 《中国航空材料手册》编委会. 中国航空材料手册(第3卷): 铝合金 镁合金[M]. 2版. 北京: 中国标准出版社, 2001: 39-83.
Board Editorial of *China Aeronautical Materials Handbook*. China aeronautical materials handbook (Vol. 3): aluminum alloy & magnesium alloy[M]. 2nd ed. Beijing: Standards Press of China, 2001: 39-83. (in Chinese)
- [51] 赵东升, 窦钧, 刘玉君. LNG/LPG 船耐低温材料的焊接发展综述[J]. 船舶, 2019, 30(3): 47-56.
ZHAO Dongsheng, DOU Jun, LIU Yujun. Summary of welding development of low-temperature-resistant materials used in LNG/LPG carriers[J]. Ship & Boat, 2019, 30(3): 47-56. (in Chinese)
- [52] 刘伟, 杜宇. 低温钛合金的研究现状[J]. 稀有金属快报, 2007, 26(9): 6-10.
LIU Wei, DU Yu. Research situation of the cryogenic titanium alloy[J]. Materials China, 2007, 26(9): 6-10. (in Chinese)
- [53] 黄琳, 孙艳, 郭唯明, 等. 当前新材料及所需战略性矿产概述[J]. 中国矿业, 2018, 27(8): 1-8.
HUANG Lin, SUN Yan, GUO Weiming, et al. Summary of current new materials and necessary strategic mineral resources[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(8): 1-8. (in Chinese)
- [54] 陈鼎, 黄培云. 钛和钛合金在低温下的力学性能[J]. 矿冶工程, 2002(3): 111-114.
CHEN Ding, HUANG Peiyun. Mechanical properties of pure titanium and titanium alloys at cryogenic temperatures [J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2002(3): 111-114. (in Chinese)
- [55] HARALDSSON K, ALVFORS P. Effects of ambient conditions on fuel cell vehicle performance[J]. Journal of Power Sources, 2005, 145(2): 298-306.
- [56] PRATT J W, BROUWER J, SAMUELSEN G S. Performance of proton exchange membrane fuel cell at high-altitude conditions[J]. Journal of Propulsion and Power, 2007, 23(2): 437-444.
- [57] HORDE T, ACHARD P, METKEMEIJER R. PEMFC application for aviation: experimental and numerical study of sensitivity to altitude[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2012, 37(14): 10818-10829.
- [58] DYANTYI N, PARSONS A, SITA C, et al. PEMFC for aeronautic applications: a review on the durability aspects [J]. Open Engineering, 2017, 7(1): 287-302.
- [59] SALEH I M, ALI R, ZHANG H W. Environmental impact of high altitudes on the operation of PEM fuel cell based UAS [J]. Energy and Power Engineering, 2018, 10(3): 87-105.
- [60] SONG Wenjing, CHEN Hao, GUO Hang, et al. Research progress of proton exchange membrane fuel cells utilizing in high altitude environments [J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(59): 24945-24962.
- [61] BLUNIER B, MIRAOUI A. Air management in PEM fuel cells: state-of-the-art and perspectives [C]// International Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics. Turkey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2007: 245-254.
- [62] WAN Yu, XU Sichuan, NI Huaisheng. Air compressors for fuel cell vehicles: a systematic review [J]. SAE International Journal of Alternative Powertrains, 2015, 4(1): 115-122.
- [63] 付仕明, 潘增富. 载人航天器舱内气压下降时的空气强制对流换热[J]. 中国空间科学技术, 2007, 27(4): 44-47.
FU Shiming, PAN Zengfu. Heat transfer of air forced convection with dropping atmosphere pressure in manned spacecraft cabin [J]. Chinese Space Science and Technology, 2007, 27(4): 44-47. (in Chinese)
- [64] 刘欣, 丁立, 杨春信, 等. 高空飞行器舱内强制对流换热随压降的衰减变化[J]. 热科学与技术, 2008, 7(4): 296-300.
LIU Xin, DING Li, YANG Chunxin, et al. Attenuation of air forced convection with air pressure dropping in high altitude aircraft cabin [J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2008, 7(4): 296-300. (in Chinese)
- [65] 王瑜, 牛潜, 康娜, 等. 高空机载电子设备冷却方法综述与优选[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(34): 14459-14470.
WANG Yu, NIU Qian, KANG Na, et al. Comparison and optimization of cooling methods for airborne electronic equipment in high-altitude environment [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(34): 14459-14470. (in Chinese)
- [66] BARROSO J, RENAULT J, LOZANO A, et al. Experimental determination of the heat transfer coefficient for the optimal design of the cooling system of a PEM fuel cell placed inside the fuselage of an UAV [J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 89: 1-10.
- [67] 尹玉婷, 曹志义. 膨胀水箱蒸汽压力形成的三种方案对比分析[J]. 内燃机, 2017(1): 6-11.
YIN Yuting, CAO Zhiyi. Comparison and analysis of three schemes for the formation of steam pressure in the expansion tank [J]. Internal Combustion Engines, 2017(1): 6-11. (in Chinese)
- [68] 王绍成, 齐济. 临近空间飞行器氢燃料电池电推进关键技术[J]. 空天技术, 2022(5): 58-67.
WANG Shaocheng, QI Ji. Key technologies of hydrogen fuel cell electric propulsion for near space vehicles [J]. Aerospace Technology, 2022(5): 58-67. (in Chinese)

(编辑: 马文静)