

航空氨动力发展分析

Development of Ammonia Powered Aviation

■ 王翔宇 刘锋 / 中国航发研究院

得益于氨燃料的诸多理化特性优势，航空氨动力有望在航空业可持续发展进程中发挥积极的作用，是快速实现现有航空动力系统零碳排放不容忽视的备选技术路线。不过随着对其市场前景和技术瓶颈认识的不断深入，未来航空氨动力能否在与氢动力以及其他新能源动力的竞争中脱颖而出仍难下定论。

在绿色航空这一时代主题下，世界各国都在积极探索新一代能源技术，氨动力已成为航空业实现零碳排放发展目标的重要途径。鉴于当前氢能航空发展受到技术、成本和安全性等一系列因素的困扰与制约，氨能的比较优势开始得到业界的关注。氨是一种能量密度较高、易于储存和运输、产业链非常成熟的氢合成物，氨和氢之间可相互转化，二者融合发展有助于解决氢能航空产业配套的瓶颈问题，更为关键的是，氨还能够以燃料的形式直接或间接应用，有效减少航空动力系统碳排放，是航空氢动力系统衍化发展的重要形式，有望成为未来航空业可持续发展的又一能源选项。

灾危险性仅为乙类，爆炸极限范围（16% ~ 25%）比氢（4% ~ 76%）更窄更安全。如此的理化特性意味着氨不只是一种较为理想的储运介质，也是其能够作为无碳燃料在航空发动机上应用的核心因素，氨储罐的容积和隔热需求明显低于氢储罐，经过简单改造在机翼内部直接储存氨燃料是完全可行的，既无须像液氢那样在机翼外布置单独的储罐，也无须对现有机体的总体设计架构进行大的调整。

虽然管理氨燃料的复杂性大大降低了，但由于纯氨燃烧不稳定、点火延迟长、火焰传播速度低，有必要将氨与氢混合后再用于航空动力装置。这里的氢来自氨的裂解反应，即将氨分解为氢和氮。对于燃

料电池系统，氨需要100%裂解并让氢以非常高的纯度接入电池阳极，此时的氨只是单纯的一种氢燃料媒介；对于燃气涡轮系统，裂解比例可能在30%左右，此时氨氢物质的量之比为1.5，氢主要用来改善氨的燃烧特性而不是作为燃料提供能量。为了使裂解反应能够快速进行，在选取合适的催化剂的同时，还需要专门的外部热源为裂解提供足够高的反应温度（一般在650℃以上），这意味轻质化乃至一体化的换热器和裂解装置将是未来航空氨动力系统的重要组成部分。

30%的裂解比例只是使氨动力系统具有与燃气涡轮发动机类似的燃烧性能和功率水平的举措之一。例如，氨氢混合燃料的热值低于传

氢、氨和航空煤油在储存条件下的特性比较（来源：ATI）

指标	氢		氨	航空燃料	
	液态	气态			
质量能量密度 / (MJ/kg)	≈ 120		≈ 18	≈ 43	
正常储存条件下	温度 / °C	-253	25	-33	25
	压力 / MPa	0.15	70	0.1	0.1
	密度 / (kg/m ³)	71	39	682	804
	质量效率*	60%	10%	95%	98%

*质量效率=燃料质量 / (燃料质量+燃料箱质量)。

从氢到氨

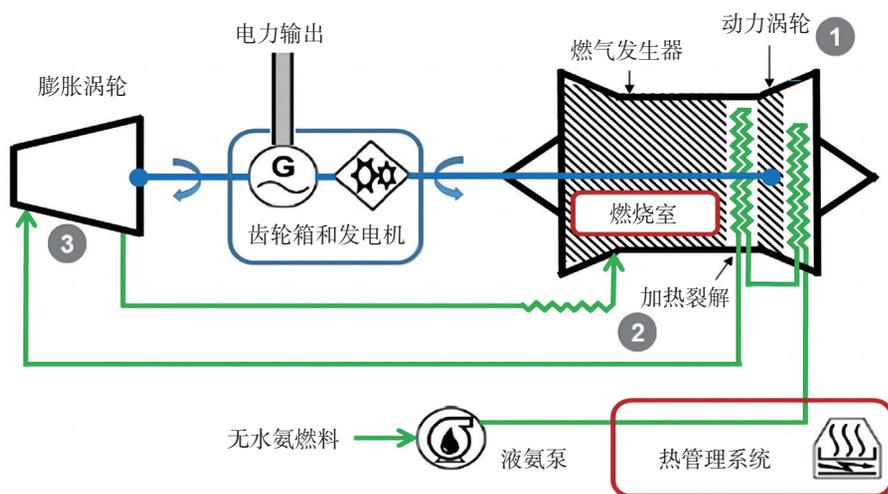
氨可以利用可再生的电力、水和空气制备，在化肥、环保和制冷等领域有着极为广泛的应用，是关系国计民生的基础化工原料和潜在的新型燃料。氨的体积能量密度约为液氢的1.7倍，储存温度和压力要求远低于氢，在标准大气压下-33℃的低温即可液化后储存，综合运输成本仅相当于液氢的1% ~ 5%，同时火

统航空燃料，单位质量的燃烧放热也会发生变化，需要根据能量匹配关系在保持燃烧室进出口温度不变的情况下对氨和氢的流量进行精细调节与控制。

考虑到氨燃烧的化学反应速率较慢、燃烧很难充分完全进行，不但会有部分氨直接排出，而且极易部分氧化生成氮氧化物（ NO_x ），对环境的破坏性影响比二氧化碳更大。为此，除了在氨氢混合燃料中添加燃烧促进剂从而调节氨的反应动力学特性外，一些当前主要应用于电力、煤炭等能源行业的脱硝（ DeNO_x ）技术也有望移植到氨动力系统中起到减少非碳污染物排放的效果。

技术进展

2021年1月，雷神技术公司宣布从美国能源部能源预先研究项目局（APRA-E）获得260万美元的资金支持，以开展零碳氨动力涡电混合动力系统（ZAPturbo）关键技术研究。整个混合动力系统为串联构架，储存在机翼燃料箱中的液氨燃料首先进入增压泵加压，然后被加热转化为气态，接着进入裂解装置分解为氢和氮，燃烧做功驱动齿轮箱和发电机，最后由电动机和螺旋桨系统为飞行器提供动力。从雷神技术公司2022年年中披露的信息来看，第一阶段的工作主要集中在氨燃料的安全处理与材料兼容性研究，以及高温高压环境下氨裂解催化剂的选取、裂解装置耐久性测试，与氨燃烧相关研究将在后续第二阶段进行。在ZAPturbo项目推进的同时，雷神技术公司还通过美国能源部资助的另一个项目验证在FT4000航改燃气轮机中使用氨氢混合燃料的可行性。



ZAPturbo项目总体方案概念

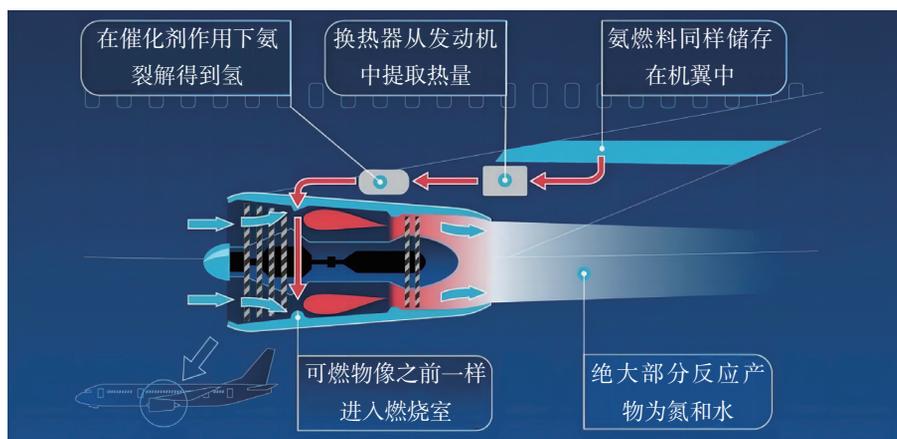
对美国国家航空航天局（NASA）来说，氨动力系统并不是一个很新的概念。NASA早在20世纪50年代就研发了X-15高超声速验证机，以液氨和液氧为燃料的XLR99-RM-2火箭发动机创造了迄今为止有人驾驶飞行器的最高速度纪录，对之后的航空氨动力技术发展起到了巨大的引领示范作用。2022年1月，NASA授予由中佛罗里达大学（UCF）领衔的产学研联合体一份为期5年、总投资1000万美元的研究合同，以波

音787-8飞机动力需求为牵引开发全新的氨燃料航空发动机。该项目的负责人希望能够在2040—2050年左右实现商业化的氨动力飞行，并呼吁业界进一步重视氨相较于氢的鲁棒性优势，毕竟不可能指望每个机场都像肯尼迪航天中心那样建立大型低温液氢使用系统。

类似地，一些初创公司也对航空氨动力的市场前景持乐观态度。2021年11月，在第26届联合国气候变化大会期间，英国反应发动机公



X-15高超声速验证机



反应发动机公司航空氨动力系统设计构架

司 (REL) 宣布与英国科学技术设施委员会 (STFC) 和 IP 集团成立合资公司共同推动航空氨动力的发展。REL 认为“航空氨动力系统可以基于目前的航空发动机改造而成，氨燃料并不会完全颠覆已有的飞机设计，低成本快速过渡到氨动力飞行的未来是可能的”，研发与发动机高度集成的轻质紧凑型裂解装置将是当下的工作重点。通过将 REL 在吸气式协同火箭发动机 (SABRE) 项目上开发的先进换热技术、STFC 的高效氨催化裂解技术以及 IP 集团在

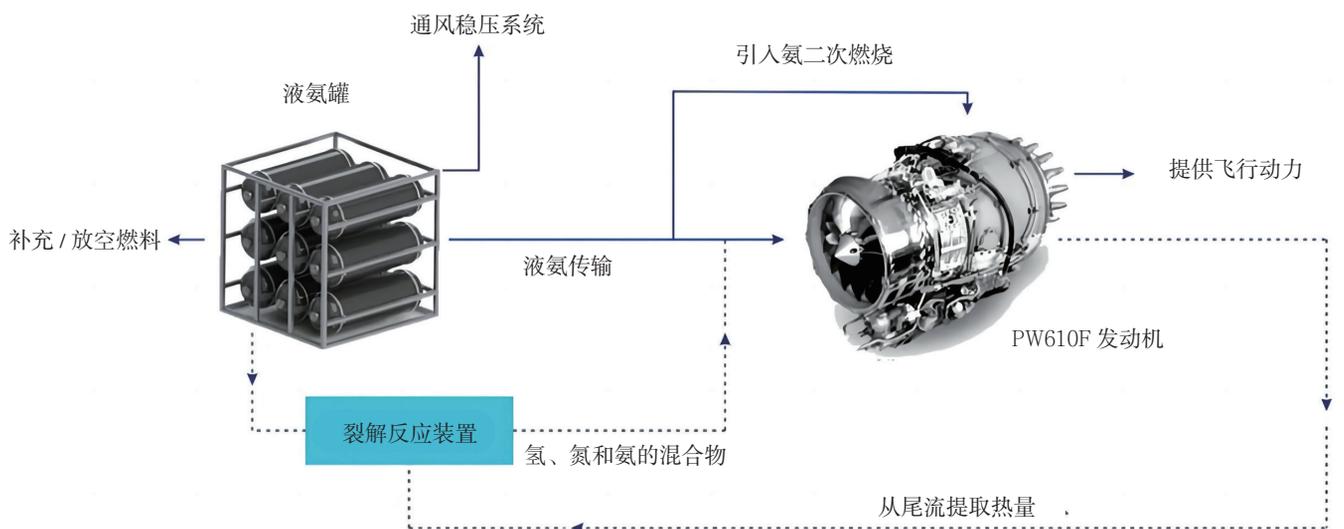
资金保障和风险管理上的优势整合起来，预计两年后即可完成航空氨动力系统的地面测试，2035 年前有望实现商业运营。

2022 年 5 月，在经过几个月的方案论证之后，澳大利亚 Aviation H2 公司选择基于氨燃料的涡扇发动机作为未来无碳飞行的最佳动力途径，将对达索公司的“猎鹰”50 公务机进行氨动力改造，位于垂尾底部的燃气涡轮发动机首先会被氨动力系统替换，最终全部 3 台发动机将采用氨燃料。Aviation H2 公司强

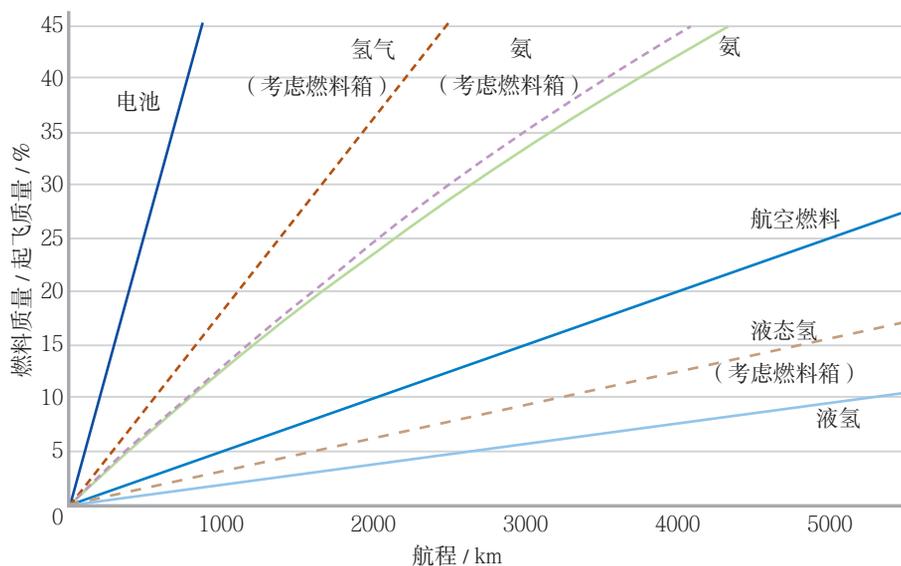
调了使用现有的技术和基础设施的重要性，希望通过对现有动力系统的升级改造，使那些已经购买“猎鹰”50 公务机的客户无须再次购买新机即可从燃油切换到氨燃料。2022 年 11 月，Aviation H2 公司开始对航空氨动力系统进行初步的测试、比较油转氨后的性能变化，并称改造后的“猎鹰”50 公务机将在 2024 年进行飞行验证，一旦试飞成功公司将谋求上市，以便获取更多资金从而加速产品适航认证和商业化进程。

市场前景

航空氨动力到底能不能完全覆盖氨动力的市场需求，二者之间将是一种怎样的市场关系？这是航空氨动力系统发展无法回避的问题。根据业界较为普遍的观点，未来氢能航空发动机可为支线飞机、窄体飞机和中小型宽体飞机提供动力支持，其中窄体飞机和中小型宽体飞机也是长期以来商用航空市场的绝对主体。然而，虽然按体积计算氨携带的能量比液氢多 70%，但氨的质量



Aviation H2 公司航空氨动力系统设计构架



不同质量比例下几种无碳燃料对应的飞行航程范围 (来源: ATI)

能量密度约为液氢的五分之一，会对氨动力飞行的最大航程和有效载荷产生极大限制。以英国航空航天技术研究院(ATI)零碳飞行(FlyZero)项目的研究结论为例，按照当前飞机起飞质量中燃料占比中位数20%估算，采用氨燃料后的航程将限制在1600km左右(氢燃料对应值在6000km以上)，甚至还不如一些支线飞机的运载能力。

事实上，即便是REL也承认配备其研发的氨动力系统后，像A320这样的机型的航程可能会从如今的6700km下降到2000km，如果想要增大航程只能对现有飞机结构进行更多调整与改变。此外，随着业界对氨动力系统理解的深入，一些之前未引起足够关注的技术问题也开始显现，并可能会对氨动力系统的大型商业应用产生一定的负面影响。例如，为满足适航要求氨动力系统必须要解决NO_x排放问题，过高的尾流温度使得现有DeNO_x技术难以直接应用到氨燃料涡扇发动机

排放后的处理上。活塞式发动机或涡轴/涡桨发动机虽然更容易安装DeNO_x装置，不过也会把氨动力系统进一步限制在支线乃至通用航空市场，在此将面临常规动力电池和氢燃料电池动力系统的激烈市场竞争。

从欧美国家公开的绿色航空顶层战略来看，氨动力发展路线并未像电推进、氢动力和可持续航空燃料(SAF)那样被显著提及，给予的资金和项目支持总体上还是零敲碎打、规模不大，如ATI等研究机构也对市场应用前景给出了较为消极的评价。从某种程度上说，氨燃料的降碳潜力、相比氢燃料的一些优势毋庸置疑，特别是在车辆和船舶等其他交通运输领域已取得的巨大成功更是有目共睹，然而航空应用的特殊性可能使得氨动力的发展存在较大不确定性。一方面，航空氨动力似乎更像是航空氢动力发展过程中的一种过渡形态，能否从市场服务能力有限的小众产品真正变成

航空绿色转型的重要力量，将与氢能航空的成熟速度有很大关系；另一方面，航空氨动力发展的技术问题不应被低估，在提升氨混合比例的同时降低NO_x和未反应氨排放水平的困扰始终存在，对现有机队的氨动力改造也许并不会像某些市场参与者想象的那么简单容易。

结束语

为尽快实现零碳排放这一宏伟愿景，关于航空氨动力系统的讨论正在升温。与氢燃料相比，氨大大简化了燃料储存运输等配套环节的支持难度，通过加装氨催化裂解系统，合理调节燃料中的氨氢组分并正确分配二者流量就有可能快速实现航空发动机从油到氨的燃料转化。但是也必须认识到，航空氨动力系统的市场受众范围要比氢动力系统小很多，在对现有机队的氨动力改造过程中还有很多新的问题有待解决，目前来看至少在航空领域将其称为“氢动力2.0”似乎还为时过早，氨是否会成为航空新能源动力的下一个风口、航空氨动力的时代是否会真正到来尚有待进一步观察。

航空动力

(王翔宇，中国航发研究院，高级工程师，主要从事航空发动机发展战略研究)

参考文献

- [1] 牟奕赫. 航空发动机氨燃料分析及流量需求计算[J]. 航空发动机, 2022, 48(4): 56-62.
- [2] BORETTI A, CASTELLETTO S. NH₃ prospects in combustion engines and fuel cells for commercial aviation by 2030[J]. ACS Energy Lett, 2022(7): 2557 - 2564.