

2023年高超声速技术进展

Progress of Hypersonic Technologies in 2023

■ 李茜 / 中国航发四川燃气涡轮研究院

鉴于高超声速技术在未来大国对抗中作为有力筹码的重要地位，其依旧是2023年各国在装备科技领域博弈的焦点之一。

各国在2023年持续推进高超声速技术的研究。从发展应用方向来看：高超声速导弹仍是各国发展重点，竞争范畴扩大至技术攻关、装备研制和实战部署等多个层面；而可重复使用高超声速飞机进展披露则相对较少，且主要处于以动力为核心的关键技术攻关阶段。

美国加速高超声速技术应用步伐

美国在高超声速武器推进方面未达预期，且至今未形成任何产品，由于高超声速助推滑翔导弹的试飞屡次不顺，美国空军后续或将侧重高超声速巡航导弹；可重复使用高超声速飞机方面，赫尔墨斯（Hermeus）公司根据规划节点稳步推进“夸特马”（Quarterhorse）高超声速无人机及其动力的研究，计划在2024年开展首飞；高超声速动力方面，GE公司成功开展了世界上首次旋转爆震涡轮/双模态冲压组合发动机验证，在超声速气流下完成了旋转爆震燃烧试验。

高超声速导弹

洛马公司选择洛克达因公司开发高超声速反舰导弹发动机。2023年3月，美国海军航空系统司令部（NAVAIR）向雷神导弹与防御公司和



高超声速导弹概念

洛克希德-马丁（洛马）公司授出了价值1.16亿美元的合同，用于初步开发一种高速反舰导弹。2023年10月，洛马公司宣布，在美国海军高超声速空射进攻性反水面作战武器（HALO）计划下选择洛克达因公司为其高超声速反舰导弹开发动力系统。

ARRW项目的飞行测试表现不尽人意。作为美国空军重点研究的高超声速助推滑翔项目，空射快速反应武器（ARRW）原计划在2023年形成初始作战能力并实现早期部署，但该项目的未来前景不明。除在2022年12月成功完成一次测试外，2023年3月和8月的两次飞行测试均失败。美国空军官员表示不打算继

续采购该弹，但仍会继续完成剩下的飞行试验，为未来高超声速项目提供数据。

DARPA开启高超声速巡航导弹研究项目后续研究计划。2023年7月，美国国防预先研究计划局（DARPA）授予美国雷神技术公司一份总额8100万美元的合同，用于开展高超声速吸气式武器概念带来的更多机遇（MoHAWC）计划研发工作，预计2026年1月前完成。在MoHAWC项目中，雷神/诺斯罗普-格鲁门（诺格）团队将充分利用此前在高超声速空射武器概念（HAWC）项目中积累的数据与经验，重点围绕原型制造改进开展导弹设

计与飞行试验，扩大超燃冲压发动机工作范围，验证系统性能模型，使武器系统设计继续成熟。

诺格公司启用新的高超声速推进系统工厂 2023年8月，诺格公司宣布在马里兰州启用高超声速推进系统工厂——高超声速能力中心(HCC)，将主要用于为空军高超声速攻击巡航导弹(HACM)生产超燃冲压发动机，以及未来高超声速系统适配的冲压发动机、战斗部及其他组件。该工厂于2021年动工，目前雇员50人，采用数字工程技术和数字化生产方式，在设计上可根据HACM及其他高超声速项目的需要迅速扩展和重构布局，从而提升产能，满足诺格公司“规模化”生产高超声速系统的愿景。

空军为HAWC项目增投大额资金 2023年12月，美国空军生命周期管理中心HAWC项目办公室授予雷神技术公司一份价值4亿美元的合同，资助其高超声速巡航导弹相关研发工作。HAWC项目中高超声速巡航导弹最大射程预计为1600km，以诺格公司的超燃冲压发动机为动力装置。美国空军希望该型导弹在2027年形成作战能力。

Gambit项目将动力合同授予雷神技术公司 2023年10月，雷神技术公司获得DARPA授予的合同，开发Gambit远程打击导弹。该导弹采用新型吸气式旋转爆震发动机，较传统动力更为紧凑和高效，并具备降低成本的潜力。通过该合同，雷神技术公司成为美国第一家将旋转爆震发动机技术应用于实际测试系统的公司。

高超声速飞机

赫尔墨斯公司顺利推进“夸特

马”及动力装置的研制 2023年，赫尔墨斯公司持续开发4架“夸特马”高超声速验证飞行器，以降低研制风险，加速技术迭代，实现产品快速开发。11月，赫尔墨斯公司获得国防创新单元(DIU)授予的一份合同，旨在利用“夸特马”作为验证平台，进一步成熟与高超声速飞机子系统和任务系统相关的技术。除了推进试验平台的研究，赫尔墨斯公司还重点发展推进系统。继在2022年12月宣布选定了普惠公司的F100-229涡扇发动机作为“奇美拉”II涡轮基组合循环(TBCC)发动机的涡轮部分，赫尔墨斯公司2023年3月确定了F100发动机的基准性能，对“奇美拉”II发动机的进气道、涵道系统、预冷器、冲压燃烧室和排气喷管等部件进行了改造。6月，赫尔墨斯公司接收了首台F100发动机，F100能够将飞机从静止状态加速到马赫数(Ma)2.8，然后“奇美拉”II过渡到冲压模态，进而将飞机加速到Ma5的目标速度。赫尔墨斯公司计划在2024年进行“奇美拉”II发动机测试。

金星航空航天公司获空客风投等公司投资 2023年6月，美国初创公司金星航空航天公司获空客风投等公司数千万美元的融资。该公司对外宣布正在利用旋转爆震发动机技术，将该公司的“观星者”高超声速客机从科幻概念转变为Ma9的公务机。“观星者”机长45.72m、翼展30.48m，可搭载十几名乘客以Ma9的速度飞行。

密歇根大学加入Mayhem项目 美国空军研究实验室(AFRL)的消耗性高超声速吸气式演示器(Mayhem)项目旨在设计研制一型大尺寸吸气式高超声速系统，由超燃冲压发动机推进，飞行马赫数超过5，将在射程、有效载荷能力等方面超越现有吸气式高超声速系统。继AFRL在2022年年底将项目合同授予美国雷多斯公司后，2023年3月，雷多斯公司将密歇根大学纳入其Mayhem项目合作伙伴行列。密歇根大学将在项目中采用基于模型的系统工程(MBSE)，开发虚拟生态系统，并将其过渡到雷多斯公司开发的数字环境中，以提高开发效率、降低成本。



“夸特马” MK0原型机

GE公司成功开展首次旋转爆震涡轮/双模态冲压组合循环发动机演示验证 2023年6月, GE公司公布其正在进行TBCC发动机演示样机的开发工作, 该项目由DARPA资助, 目的是为可重复使用的高超声速飞行器提供动力, 先期专注在高超声速下开展旋转爆震涡轮发动机(RDE)到冲压发动机的模态转换。11月, GE公司成功开展了世界上首次旋转爆震涡轮/双模冲压组合循环发动机演示验证, 在超声速气流下完成了旋转爆震燃烧试验, 为未来高速、远程飞行提供高效率解决方法。

斯佩克特航空航天公司聚焦等离子体点火助燃技术 2023年6月, 美国斯佩克特航空航天公司公布了等离子体点火助燃技术的研究进展, 计划将等离子体点火助燃应用于双模冲压发动机, 并在2年内进行高超声速演示器飞行验证。

试验能力

普渡大学启用新的高超声速试验设施 2023年6月, 普渡大学应用研究所启用了一个新的高超声速飞行技术设施, 以支持五角大楼的高速飞行器研究和测试工作。该高超声速应用研究设施拥有一个Ma8的静音风洞, 旨在模拟高超声速飞行, 并提供精确的系统性能数据。同时它也是高超声速脉冲激波隧道的所在地, 该隧道可以使用高温空气的冲击波来模拟Ma5~40的各种飞行场景。

DARPA希望工业界开发可在极端温度下工作的高超声速传感器 2023年5月, DARPA就高工作温度传感器(HOTS)计划发布了一份广泛机构公告, 希望工业界开发一种集成了传感器和信号调节微电子

技术的压力传感器模块, 这些传感器可在至少800℃的极端温度下工作, 用于未来的高超声速飞行器和喷气发动机等的健康状况精确监测。HOTS计划试图克服3个关键技术挑战: 耐高温、长寿命、大带宽晶体管; 耐高温、高灵敏度传感器; 在不降低性能的情况下集成耐高温传感器。

AFRL在AEDC开展高超声速飞行器结构试验 2023年8月, AFRL利用阿诺德工程发展中心(AEDC)的冯卡门高超声速风洞(VKF), 研究机身结构长时间在接近高超声速的气流中的空气动力学特性。高超声速飞行会产生大量的热, 机身变形, 会进一步改变飞行器周围的气流, 从而改变热量积聚的位置。了解这些影响既可以用于改进设计, 也可以提高设计的效率。

同温层发射公司成功完成Talon-A分离试验 2023年5月, 同温层发射(Stratolaunch)公司的空中发射平台“大鹏”(Roc)成功完成Talon-A高超声速飞行器分离试验。这次飞行总共持续了4h8min, 试验证明Talon-A飞行器能够迅速、安全地与Roc的中翼挂架分离, 数据收集系统

按预期运行。该试验还确认了飞行器与范登堡基地间的遥测通信, 在未来高超声速飞行试验中可进行备份遥测数据收集。11月, 同温层发射公司开展了Talon-A高超声速飞行器首次滑行试验, 为即将开展的系留飞行试验做好准备, 此次试验为Talon-A飞行器第一次高超声速飞行奠定了基础。

美国国防创新部门提出高超声速试验平台试飞计划 2023年6月, 美国国防创新部门宣布, 预计最早将于2024年夏天试飞试验性高超声速巡航飞行器。此次试验将是该飞行器首次全自主飞行, 也是国防部加快飞行试验节奏的举措之一。目前国防创新部门正在完善任务细节, 包括飞行器外观、飞行条件、发射供应商和地点。

材料工艺

美国国防部轻量化制造创新机构启动高超声速材料开发项目第二阶段工作 2023年6月, 美国国防部轻量化制造创新机构宣布启动第二阶段的高超声速“材料加速”和“热管理”项目。“材料加速”项目第一阶段侧重开发用于高温和高超声速



Talon-A高超声速飞行器分离试验

组件的金属、陶瓷材料及制造工艺，包括集成计算材料工程（ICME）数字孪生、材料性能评估等；第二阶段将进一步开发并扩大高超声速材料的先进制造，包括用于制备陶瓷基复合材料的反应熔渗工艺。“热管理”项目第一阶段推进高温热条件下的金属材料制造工艺研发，开发ICME材料数字孪生技术，并通过金属合金进行验证，以推动适用于高超声速环境的合金开发；第二阶段将计划开展高超声速材料性能预测，这些材料通过功能梯度优化设计并由直流烧结技术制造。

美国海军提出碳-碳复合材料研发计划 2023年6月，美国海军提出高超声速飞行器航空结构替代品联合加速（JAHVAA）计划，旨在为高超声速飞行器的热防护系统开发碳-碳复合材料的替代产品，其目标是大幅降低生产成本、加快工程制造速度，同时确保能够提供与碳-碳复合材料相似的性能。

势必锐航空系统开发公司用于高超声速飞行的先进材料 2023年8月，势必锐（Spirit）航空系统公司宣布与美国橡树岭国家实验室（ORNL）合作，开发用于高超声速飞行的先进材料，其中包括对碳-碳复合材料、陶瓷基复合材料以及增材制造合金的认证。

DARPA资助雷神技术公司研究导弹尖端“发汗”冷却技术 2023年10月，DARPA披露正在开展“发汗”（Sweating）冷却技术，为解决高超声速导弹高温问题提供支持。其基本原理为：基于导弹尖端蒸腾冷却通道的冷却机制，在导弹尖端嵌入可加热产生蒸气的化合物，通过蒸气扩散推进至数千个微通道，

实现散发热量的目的。目前，该技术尚处于原型阶段，正使用小型楔形耐热金属进行进一步测试。

俄罗斯高超声速武器应用进入新阶段

俄罗斯高超声速武器发展起步早，其高超声速武器发展已经处于世界前列。目前俄罗斯在役和即将入役的高超声速导弹主要有3种，包括“先锋”“匕首”和“锆石”等。

“先锋”导弹为战略级高超声速洲际弹道导弹，由导弹运载器、空气动力助推器和高超声速滑翔战斗部组成，最大飞行马赫数为27。目前，俄罗斯战略导弹部队已经列装4套“先锋”导弹系统。首个“先锋”高超声速导弹团于2021年进入作战值班状态，第二个导弹团在2023年年底开始作战值班。

“匕首”导弹是具有精确制导打击能力的高超声速空射弹道导弹，可用于打击地面/海面固定或移动目标，最高飞行马赫数为10。“匕首”导弹于2017年入役，并在2022年在俄乌冲突中投入使用，是高超声速武器的首次实战应用。2023年，俄罗斯使用该导弹打击乌克兰地下130m的地堡、摧毁其“爱国者”防空导弹系统等高价值目标。

“锆石”导弹是一种多用途高超声速反舰导弹，最大飞行马赫数为9，射程达1000km。目前，“锆石”高超声速导弹开始进入批量生产阶段。2023年1月，俄罗斯国防部长绍伊古表示，俄罗斯海军第一艘22350型护卫舰“戈尔什科夫海军上将”号已经开始部署并部分装备了该导弹。“锆石”后续研发工作已经列入俄罗斯《2018—2027年国家武器装备发

展计划》，包括空射型、潜射型和岸基型，以形成“锆石”高超声速导弹的综合打击能力。

除积极推进“先锋”“匕首”和“锆石”3型高超声速导弹进一步提升实战能力外，俄罗斯高度重视对现有高超声速打击体系的完善和发展。如对上百架空射型“匕首”高超声速导弹专用载机米格-31K进行升级改造，并开展下一代载机米格-41的设计工作；研制可携带高超声速武器的未来战略轰炸系统（PAK DA）以取代图-22M3、图-95和图-160战略轰炸机；以及开展可重复使用火箭研究，以期作为滑翔式高超声速飞行器载体等。

其他国家保持跟进

英国着手制定高超声速武器发展路线图

英国国防部于2023年7月初公布的招标文件显示，英国政府正着手制定高超声速武器发展路线图，将扩大对高超声速武器技术的研发力度。英国国防部已经建立了一个高超声速研究团队，计划通过3个方面的工作寻求获得先进的高超声速打击能力，包括通过美英澳三边安全伙伴关系（AUKUS）联合采购一种高超声速滑翔武器、在现有的高超声速武器项目上开展合作，以及开发一种高超声速巡航导弹。上述工作将通过与工业界达成的高超声速技术和能力开发框架协议开展。

英国高超声速研究工作的资金将来自国防部在2021年承诺用于国防研发的66亿英镑。英国国防科学技术实验室（DSTL）自2022年以来一直在开展一个高超声速武器计划，旨在10年内交付高超声速巡航导弹



Hypersonix公司设计的高超声速试验平台示意图

技术验证机，并投资下一代高超声速武器概念和技术。另外，DSTL正在与反应发动机公司（REL）、罗罗公司、皇家空军快速能力办公室和英国国家安全战略投资基金合作，开展高超声速飞行器试验项目，目前正在研究关键高超声速技术，包括新型吸气式推进架构、创新的热管理系统和先进的飞行器概念。

Hypersonix 公司接收首台高温复合材料超燃冲压发动机

2023年8月，总部位于澳大利亚墨尔本的Hypersonix公司通过与Amiga公司合作，利用Inconel 718材料和3D打印技术制造了SPARTAN超燃冲压发动机，其飞行速度可达Ma7。氢动力超燃冲压发动机技术验证机演示验证项目将进一步完善所需的设计和技术，以提供一种在高达Ma12的速度下运行的能力，并能够承受重复使用所面临的挑战。

Hypersonix公司目前正在开发DART AE，这是一种无人驾驶的高超声速飞行验证机，将由高温合金3D打印而成。该公司此前已与美国国防创新小组就其主导的高超声速和快节奏空中测试能力（HyCAT）

项目达成了协议。

瑞士“少女号”原型机开展飞行演示

瑞士初创公司Destinus正在设计一种使用氢燃料的Ma5高超声速客机“少女”号（Destiny-1），用于全球范围内的超远程运输，该飞机以液氢燃料火箭发动机和吸气式发动机为动力，计划于21世纪30年代推出。2023年5月，配装了氢燃料加力燃烧室的“少女”号原型机在德国慕尼黑进行了飞行演示，标志着自2021年首飞以来“少女”号的研制取得了重大进展。加力燃烧室由Destinus公司自主设计，采用了增材制造技术，并在瑞士的试验场地进行了地面测试。加力燃烧室通过燃烧额外注入的氢燃料来产生更大的推力，使飞机能够达到更高的速度和爬升率，实现超声速飞行。此外，这种配置可以在同一推进系统中使用两种燃料，从而加快了平台的开发速度。该加力燃烧室的设计与冲压发动机有很大的相似之处，因此加力燃烧室的试验也可以作为研制氢燃料冲压发动机的基础。

伊朗完成新型高超声速导弹试验

2023年5月，伊朗宣布完成新型高超声速导弹试验。伊朗军方表示，“这一发展标志着伊朗导弹领域的巨大飞跃，高超声速导弹飞行速度超过Ma5，可在地球大气层内外机动，能突破所有反导防御系统。”

法国高超声速滑翔飞行器成功首飞

2023年6月，法国国防部武器装备总署（DGA）成功完成V-MaX高超声速滑翔飞行器首次飞行试验。该滑翔飞行器是V-MaX高超声速助推滑翔导弹的弹头验证机，试验中使用火箭助推发射，飞行过程中成功实现多次机动。V-maX项目是法国提出的首个高超声速滑翔方案项目，旨在研发一型高超声速滑翔技术验证机。V-max滑翔飞行器长约2m，射程约3000km，主要目的是评估鉴定滑翔飞行器概念的潜在优势和局限，并开展相关关键技术研究。此次V-MaX高超声速滑翔飞行器飞行试验成功将带动法国诸多技术和能力发展，对法国推进高超声速武器实用化具有重要意义。

结束语

2023年，高超声速技术呈扩散态势，越来越多的国家加入高超声速技术研发行列。而高超声速导弹仍是现阶段各国发展重点；高超声速飞机研究则体现“动力先行”的特点，除了TBCC发动机的研究稳步推进，旋转爆震发动机技术在从概念转化为实用方面取得了重大进展，其研究进展值得关注。

航空动力

（李茜，中国航发四川燃气涡轮研究院，高级工程师，主要从事航空发动机科技情报研究）