

2024年高超声速技术进展

Progress of Hypersonic Technology in 2024

■ 李茜 孙露 / 中国航发四川燃气涡轮研究院

高超声速技术极具战略意义，引领着一众航空航天强国进行着激烈的角逐。2024年，以美国为首的国家投入了大量资源，力图塑造未来战争与航空航天探索的新格局。

高 超声速导弹目前仍是全球高超声速领域的发展重心，继俄罗斯在俄乌冲突中继续使用“匕首”导弹外，其他多个国家在积极开展高超声速导弹的飞行试验。高超声速飞机的研制以美国赫尔墨斯（Hermeus）公司为代表，目前已完成“夸特马”（Quarterhorse）无人机地面测试，预计不久将开展飞行试验。高超声速动力方面，弹用超燃冲压发动机技术日趋成熟，涡轮基组合循环（TBCC）发动机技术在加速开展验证，旋转爆震发动机则成为新的高超声速动力研究热点。

美国加强高超声速技术应用步伐

高超声速导弹

2024年，美国各军种都积极推进高超声速导弹的飞行试验，强调采用数字工程加速高超声速导弹研制部署与性能升级，同步追求低成本量产。

2024年3月，美国空军在罗纳德·里根弹道导弹防御试验场，对高超声速AGM-183A空射快速反应武器（ARRW）原型进行了最终的全面试验。试验中，1架B-52H轰炸机从关岛安德森空军基地起飞



洛马公司新型“鲟鲨”高超声速导弹

后，发射了1枚具有完全作战能力的ARRW原型。美国空军未透露该试验的具体目标和结果，但表示试验所收集的数据将帮助美军确定所需的高超声速能力，并推进一系列高超声速项目的研发。ARRW是美国空军空射高超声速武器的两个主要项目之一，其飞行速度超过马赫数（Ma）5，具有高机动性。美国空军计划2024年完成该项目的快速原型设计，但由于遭遇多次测试失败，空军在2025财年中没有为该项目申请研发和采办资金。

2024年4月，美国洛克希德·马丁（洛马）公司在2024年“海空天”展会上联合推出名为“鲟鲨”（Mako）

的新型高超声速导弹，并称是该型导弹自研发7年多来首次公开展示。洛马公司表示，“鲟鲨”高超声速导弹具备高性能、强适配性、多用途、生存能力强、成本可负担等特点。该型导弹最高飞行速度超Ma5，动力采用固体燃料火箭发动机。

2024年6月，在进攻性反水面作战（OASuW）计划框架下，美国海军正在积极推进研发多种形式的高超声速反舰导弹。洛马公司、诺斯罗普-格鲁曼（诺格）公司都在积极研发能够从空中、水面和水下发射的吸气式高超声速反舰巡航导弹，该种导弹可以快速远程打击敌方水面舰艇，并减少其反应时间，提高



美国海军的高超声速反舰导弹方案

拦截难度。可从空中、水面和水下发射的特性，能够提高导弹装备规模，降低采购成本，通用的供应链还有助于保持较低的使用维护成本。未来还可能发展出地面发射型，进一步摊薄成本。

2024年11月，美国陆军授予美国动力系统公司一份价值6.705亿美元的合同，为美国陆军建造通用高超声速滑翔体和热保护系统，该滑翔体可应用于美国各军种，相关工作将在亚拉巴马州的亨茨维尔进行，预计完成日期为2029年10月31日。动力系统公司正与洛马公司合作，支持新型通用高超声速滑翔体的集成和原型设计，为空基、陆基和海基高超声速武器提供通用性。

2024年12月，美国陆军“暗鹰”高超声速导弹在卡纳维拉尔角空军基地成功进行端到端飞行试验。作为“暗鹰”高超声速导弹第二次全弹端到端飞行测试，试验中首次使用炮台作战中心和运输牵引发射车进行试射，旨在为美国陆军作战部署提供数据支撑。试验由美国陆军快速能力与关键技术办公室和美国海军战略系统计划合作进行。“暗鹰”导弹也被称为“远程高超声速武器”

(LRHW)系统，海军版为海基中程常规快速打击(IRCPS)武器系统，采用两级固体火箭发动机，顶部整流罩内搭载高超声速助推滑翔飞行器，最高速度为 $Ma17$ ，最大射程超过2775km。根据目前的试验和导弹生产计划，美国陆军要到2025财年才能部署第一套完整的LRHW导弹系统。与此同时，美国海军希望在2025财年在“朱姆沃尔特”级驱逐舰上完成武器系统的实弹试验；在2028年部署到“弗吉尼亚”级核潜艇上。

2024年7月，美国政府问责局(GAO)发布了关于美国国防部发展高超声速武器情况的报告，建议美国国防部在开发高超声速武器时扩大数字工程工具的使用，特别是在“标准”(SM-6)Block IB导弹、高超声速攻击巡航导弹、高超声速空射进攻性反水面目标导弹、空射快速反应武器和远程高超声速武器等项目中，这些工具可以帮助国防部提高开发效率，减少成本，并避免潜在的设计缺陷。国防部已经采取了一些措施来实施数字工程，例如，为高超声速打击计划提供额外的资金以支持数字工程活动。然而，

GAO指出，国防部在完全利用这些工具方面仍有改进空间。为了提高效率和降低成本，国防部需要确保在系统设计中整合用户反馈，并考虑是否将数字工程工具整合到开发流程中。

高超声速飞机

2024年1月，美国赫尔墨斯公司在空军阿诺德工程发展中心(AEDC)，完成了“夸特马”高超声速飞机首架缩比验证机的“动态铁鸟”系列地面试验。试验内容包括远程指挥控制滑行、集成关系的射频延迟和地面遥控信号处理的质量、人为因素评估，以及飞行员以“人在回路”方式对飞机的转向和控制等方面，旨在为2024年第二架缩比验证机开展飞行试验做准备。2024年8月，赫尔墨斯公司完成了其“夸特马”Mk1飞行器的低速滑行测试，旨在测试和展示高速起降下的高翼载飞行能力，为设计用于高超声速飞行的Mk2和Mk3测试飞行器奠定基础。目前完成的测试包括地面振动、极性检查、远程驾驶功能、前轮转向、闭环操纵面驱动、通信链路测试和直线滑行，还包括在公司机场基地跑道上进行的侧向或“障碍”滑行、90°转弯和滑跑。2024年11月，赫尔墨斯公司完成了“星链”与“夸特马”Mk1测试无人机的快速集成，实现了基于“星链”的超视距指挥控制能力。赫尔墨斯公司在17天内完成了需求、概念、集成、验证以及通过“星链”进行无人战斗机的滑行操作。无人机与“星链”集成旨在确保操作员和无人机之间建立稳定的通信链路，这是以高超声速执行无人任务和远程控制无人机的基本特征。该公



赫尔墨斯公司高超声速测试无人机实现与“星链”的快速集成

司表示，该系统的成功验证是推进其高超声速飞行计划的重要一步。2024年12月，赫尔墨斯公司对外宣称已经在美国爱德华兹空军基地用3周时间完成了“夸特马”Mk1的地面试验。此次地面试验主要用于验证飞行器的气动模型，评估飞行器的方向控制并评估控制界面的性能。“夸特马”Mk2预计将于2025年开展飞行试验并达到超声速，重点验证TBCC发动机的低速工作模式；“夸特马”Mk3计划于2026年推出，该验证机可验证TBCC发动机高速工作模式和飞行器的整体性能。

2024年2月，美国空军研究实验室（AFRL）以作战需求不足为由，决定逐步放缓其吸气式高超声速项目Mayhem的开发工作。AFRL给出的主要理由是由于作战方面的需求牵引还不够明确，无法保证投入大量资金来启动和交付该项目更完整的设计工作包。实验室并没有终止与雷多斯公司的现有2400万美元初始合同，并且计划于2024年完成Mayhem项目的概念设计评审/系统需求评审，结束首个任务订单。

这也意味着，AFRL短期内不会再向Mayhem项目合同中额外增加任务订单，将导致该团队无法获得除首个任务订单以外的资金支持。

AFRL还表示，美国空军全球打击司令部将在2025年开展备选方案分析，以进一步明确高超声速打击的需求，美国国防部长办公厅也正在继续投资和提升可重复使用的高超声速能力。因此，随着作战需求的不断发展，AFRL将继续推动高超声速关键技术发展，以实现高超声速能力。未来，AFRL可能会与雷多斯公司在原合同框架下签订更多的任务订单。

高超声速飞行试验

2024年，美国多家公司继续推进飞行试验平台的改造，按计划推进飞行试验项目。

2024年3月，美国平流层发射系统在范登堡太空军基地西部靶场，成功完成了“利爪”-A（Talon-A）高超声速试验飞行器TA-1的首次动力飞行试验。本次试验的一次性版本TA-1安全完成了空中发射、发动机点火、加速、持续爬升以及受控

水面着陆等主要目标。试验过程中，舰载机携带TA-1，在飞行高度接近6800m、速度为167km/h条件下，完成分离释放。飞行数据显示，TA-1实现了约200s的动力飞行并加速到高超声速，飞行速度接近Ma5，熄火后TA-1进行了长达5min的滑行，最终在加利福尼亚海岸附近溅落。2024年12月，平流层发射系统公司成功完成了高超声速飞行器TA-2的第二次动力飞行试验。虽然TA-2本次飞行试验最高速度没有得到确认，但公司之前公布的计划是希望飞行器加速到Ma5甚至Ma6以上。平流层发射系统公司今年取得的两次试飞成功，是可重复使用的高超声速试验能力开发进程中的一项重大成就，标志着美国首个可重复使用的高超声速飞行器有望投入使用，以满足其高超声速飞行试验的旺盛需求。

2024年4月，诺格公司目前将2架RQ-4“全球鹰”无人机改装成能够监控高超声速系统测试的飞机（该无人机被称为“靶场鹰”），并在2025年将其交付给国防部测试资源管理中心（TRMC）。这2架“靶场鹰”是美国空军近年来退役的24架“全球鹰”无人机中最先被改装的无人机。目前，美军使用老化的测量船队承担遥测数据收集，每年可进行的高超声速测试的数量和地点都受到严格限制。近年来，美国空军、NASA和TRMC一直在研究一种名为“空中靶场”的概念，即将传感器安装在“全球鹰”上，可以更容易地收集这些数据。

2024年6月，美国导弹防御局宣布其与供应商合作成功进行代号为“HTB-1”高超声速试验台首飞



诺格公司改装的“靶场鹰”

任务，旨在为美军高超声速试验提供通用平台。克雷托斯公司证实，其“厄里倪厄斯”高超声速试验飞行器执行此次任务。飞行试验在美国弗吉尼亚州的瓦罗普斯岛进行，试验过程中，导弹防御局发射的2颗高超声速和弹道跟踪天基传感器（HBTSS）卫星成功探测并跟踪了“厄里倪厄斯”的飞行轨迹，收集数据正在评估中。导弹防御局项目负责人表示，此次试验成功标志着一个可负担的高超声速试验台的开始。克雷托斯公司通过商业投资和美国国会资助，利用3年时间，耗资不到1500万美元研制出了“厄里倪厄斯”。研制“厄里倪厄斯”的初衷是为解决美国国防部高超声速测试基础设施不堪重负的困境，单个飞行器的成本约为500万美元，不包括为其提供动力的火箭发动机或定制要求。

高超声速推进系统

2024年3月，美国普渡大学应用研究所（PARI）的团队使用先进增材制造技术，打造了1型全尺寸、功能完备的超燃冲压发动机原型机，预计将大幅降低高超声速领域中的

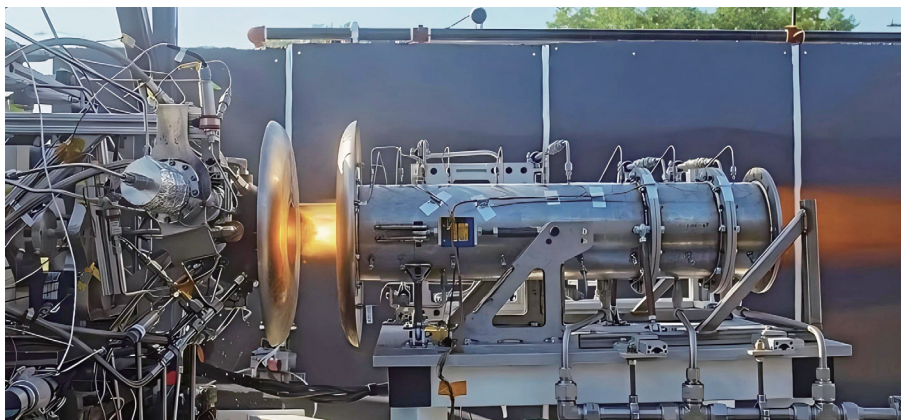
设计与制造成本和周期。大多具有增材制造能力的应用研究实验室只能打印小型、按比缩小的版本进行测试，然后通过这些模型创建全尺寸超燃冲压发动机，其部件必须单独打印然后组装。而利用PARI提供的增强型制造技术，研究人员可以直接实现全尺寸模型。

2024年5月，赫尔墨斯公司对高超声速推进系统采用的预冷器开展试验。试验在爱德华兹空军基地海平面静态条件下进行，试验收集到的数据为F100发动机在各种负载下如何处理预冷器提供了信息，并将为未来使用加热空气模拟高马赫数飞行条件的试验提供依据。赫尔墨斯目前正在开发其预冷系统，将与普惠公司F100涡扇发动机集成，该发动机将为赫尔墨斯即将推出的“夸特马” Mk2飞行器提供动力，并计划将该预冷器用于后续的飞行器设计。“奇美拉” II TBCC发动机由涡轮和冲压发动机串联组成，结构相对简单，可实现推进系统的快速研发。为解决TBCC发动机模态转换推力衔接难的问题，赫尔墨斯公司

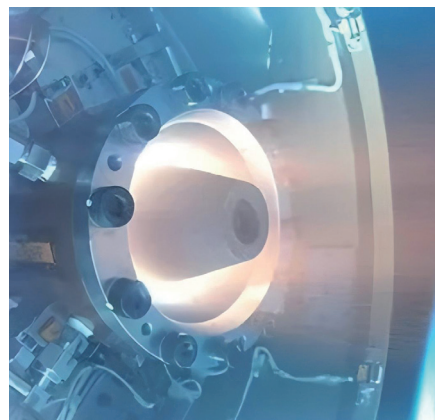
在进气道和压气机之间设置射流预冷装置，以水为冷媒在瞬间降低来流温度，将涡轮发动机的运行范围提升至 $Ma3$ 左右，填补了与冲压发动机之间的“推力陷阱”。此外，射流预冷技术成熟度较高、成本较低，但会增大飞行器的流动阻力和结构质量，可作为短期内实现高超声速飞行的过渡方案。

2024年2月，金星航空航天公司表示已经开始测试配套旋转爆震火箭发动机（RDRE）的飞行测试无人机。在3658m的高空放下了配套RDRE的长2.4m、质量为136kg的无人机。该公司表示，RDRE启动并飞行了大约10min，最高速度达到了 $Ma0.9$ 。2024年10月，金星航空航天公司推出8.9kN级爆震冲压发动机VDR2，预计于2025年使用测试无人机进行首次飞行试验。VDR2发动机具有大推力和高效率，可以驱动飞机达到 $Ma6$ 的速度和52000m的高度，并且比传统发动机的效率高出15%。2024年12月，金星航空航天公司研制的爆震冲压发动机在等效起飞速度下成功点火，技术得到验证。该公司计划在2025年第二季度完成VDR2发动机所有地面试验。

2024年3月，GE航空航天公司双模态冲压发动机开始在俄亥俄州埃文代尔的连续流高速推进试验设施中进行测试。测试结果超出了预期性能，证明双模态冲压发动机可稳定运行，与之前进行过飞行测试的高超声速技术验证机相比，气流增加了3倍。2024年7月，GE航空航天公司宣布成功测试了新型高超声速双模态冲压发动机。这一成果可使多任务飞机实现高速飞行和更远的航程，是高超声速项目多样化组



VDR2 发动机试验现场



日本 JAXA 液体燃料爆震发动机试验

合的最新里程碑。GE 航空航天公司计划在 2025 年年底对由高速涡轮发动机和双模态冲压发动机组合形成的 TBCC 发动机开展地面台架试验。与此同时，普惠公司也计划在 2025 年年初对外宣布由旗下鳄鱼工厂设计的旋转爆震发动机的研究结果。

英国知名强预冷技术企业反应发动机公司宣布破产

2024 年 10 月，致力于强预冷技术的英国反应发动机公司（REL）因资金短缺结束业务经营。REL 成立于 1989 年，致力于研究高超声速强预冷发动机——协同吸气式火箭发动机（SABRE）。该公司的先进微管预冷器技术在早期的测试和开发工作中曾被证明是非常成功的，2024 年 8 月还通过将其预冷器技术与现有的涡轮发动机集成，证明其关键技术要素的可行性。2019 年，根据与美国国防预先研究计划局（DARPA）签署的合同，REL 还在超过 1000℃ 的高温气流条件下评估了更大版本的预冷换热器（HTX），温度相当于 $Ma5$ 的高速飞行，不过该公司在美国对涡轮发动机的综合进气预冷器进行评估的努力无果而终。2023 年夏

天，REL 为英国皇家空军可重复使用的高超声速飞行器试验（HVX）计划在 $Ma3.5$ 条件下进行完全集成预冷器评估。REL 的倒闭可能将对英国基于该公司先进预冷器技术开发高超声速飞行器的愿景造成重大打击。

俄罗斯在实战中多次发射“匕首”高超声速导弹

“匕首”高超声速导弹以固体燃料火箭发动机为动力，可由米格-31 战斗机或图-22 轰炸机挂载，最大射程为 2000km，最高飞行速度达 $Ma10$ 。2022 年 3 月，俄罗斯空军首次在俄乌冲突中使用“匕首”高超声速导弹。2024 年，俄罗斯向基辅发射的“匕首”导弹数量创历史新高。该导弹以极强的突防性能完成任务，实战效果突出。

日本成功发射世界首个液体燃料爆震发动机

2024 年 12 月，日本宇宙航空研究开发机构（JAXA）成功从鹿儿岛县内之浦宇宙空间观测所发射 S-520-34 探空火箭，测试世界首个液体燃料爆震发动机（DES2）。火箭发射后，飞行至 217000m 高度，随后落入海

中。此次试验验证了液态乙醇和一氧化二氮燃料的“旋转爆震发动机系统”在太空环境下的性能，产生了 438N 的推力，并实现 244s 的比冲。这次试验是继 2021 年气体燃料爆震发动机成功测试后，又一次突破性进展。名古屋大学教授笠原次郎表示，爆震发动机的成功标志着向技术实用化迈出重要一步，将为未来深空探测和高效火箭推进技术铺平道路。

结束语

高超声速技术已然成为大国竞争博弈焦点，未来 5 年将是高超声速技术发展的关键阶段。根据各国发展计划，多型高超声速导弹将实现部署，甚至大规模生产交付，可重复使用高超声速平台将进入原型验证阶段，意味着高超声速作战能力将逐步成熟并融入作战体系。以 TBCC 发动机和旋转爆震发动机为代表的高超声速动力发展稳步推进。可以预见，这段时期内高超声速领域将出现重要进展，相关动向值得密切关注和高度重视。

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）