

美国高超声速武器及动力装置发展

The Development of American Hypersonic Weapon and Power Plant

■ 王晓鹤 / 中国航空工业发展研究中心

近年来，高超声速武器的作战运用和威慑效能受到高度重视。一些国家，特别是美国，正加大资金的投入，增强对关键技术研究的攻关力度，积极推进高超声速巡航导弹的实战化进程。

高超声速武器是指以高超声速技术为基础、飞行马赫数 (Ma) 大于5的武器。与传统的亚声速或超声速制导武器相比，具有飞行速度快、作战射程远、突防能力强、攻击范围广、结构质量轻和打击效能好等优点，主要对时间敏感目标、移动目标、加固目标等实施远程精确打击。

总体情况

美国高超声速飞行器技术发展始于20世纪50年代，它以飞行速度快、突防能力强等潜在能力备受各方关注和重视。

自20世纪90年代末以来，美国先后实施了可负担得起的快速反应导弹演示 (ARRMD)、高速打击导弹 (HyStrike)、高超声速飞行导弹 (HyFly) 和高超声速滑翔飞行器 (HTV-2) 等多个以高超声速导弹为应用背景的演示验证项目，但由于技术难度大、经费投入不足以及试验能力支撑不足等原因，这些项目多半未能顺利向工程型号转化。

目前，美国采用吸气式巡航和助推滑翔两种技术方案并行推进的思路，一方面研制试验以超燃冲压发动机为动力、飞行速度达到马赫数 (Ma) 5以上、飞行高度一般为30000 m左右的高超声速巡航导弹；



吸气式高超声速武器概念图

另一方面，研制试验自身不带动力，仅由火箭助推至预定高度，之后再与火箭分离，能以高超声速飞行的助推滑翔打击武器。2019年7月，美国高超声速技术界知名专家格雷格·沙利文披露了高超声速常规打击武器 (HCSW)、空射快速响应武器 (ARRW，即AGM-183A)、吸气

式高超声速武器概念 (HAWC)、战术助推滑翔 (TBG)、有翼高能再入飞行器试验 (SWERVE) 和常规快速打击 (CPS) 等高超声速导弹项目。从这些公开的项目来看，美国高超声速导弹谱系完备，如表1所示，既涵盖了巡航导弹和助推滑翔导弹 (具体有楔形布局和双锥体布局之分)，

表1 美国高超声速导弹谱系

	巡航导弹	助推滑翔
空基	吸气式高超声速武器概念 (HAWC)	战术助推滑翔 (TBG)、空射快速响应武器 (ARRW)、高超声速常规打击武器 (HCSW)
陆基		先进高超声速武器 (AHW)、远程高超声速武器 (LRHW)、战术助推滑翔 (TBG)
海基		常规快速打击 (CPS)、战术助推滑翔 (TBG)

又涵盖了空基、陆基和海基等方式。

项目进展

2019年12月17日，洛克希德-马丁（洛马）公司在其官方网站发布招聘公告，为作战火力（OpFires）项目招聘火箭发动机工程师。公告披露，OpFires项目推进系统由两级火箭组成，第一级火箭为传统的固体火箭发动机，第二级火箭则具有推力可调的能力。其中，第二级火箭发动机是该项目第二阶段推进系统子项目的科研重点。洛马公司将负责对第二级火箭发动机进行设计优化，并集成为整弹。公告要求应聘工程师具有与各类供应商沟通协调的能力，包括能够评估81cm直径火箭发动机的技术和设计方案。2020年1月14日，美国国防预先研究计划局（DARPA）与美国陆军联合主管的OpFires项目授予洛马公司总额3190万美元的第三阶段武器系统集成子项目合同，由洛马导弹与火控公司牵头深化发展前两个阶段研发的推进系统，并将其与发射车、电子系统和载荷集成为导弹系统，最终完成全系统飞行演示验证。按照计划，OpFires项目将在2021年下半年完成关键设计评审（CDR），2021年年底前完成各部件和子系统的试验，并在2022年开始进行集成飞行试验。

2020年2月10日，美国空军发言人确认空军已正式取消HCSW项目，而另一个高超声速导弹型号项目ARRW将继续推进。空军取消HCSW项目的主要原因并不是技术或性能指标的问题，而是来自2021财年预算紧缩的压力。由于预算压缩，美国空军必须在上述两个高超声速导弹型号项目中取消一个。

ARRW得以保留的原因在于，与HCSW相比拥有“独特的滑翔体设计”，而HCSW则与陆军和海军在研的两个高超声速导弹项目（即美国陆军远程高超声速武器项目和美国海军常规快速打击项目）较为相似。ARRW项目的既定目标仍是在2022财年形成早期作战能力。美国空军在2019年12月2日向洛马公司授予了一份总额9.89亿美元的确定性合同，要求在2022年12月31日前完成AGM-183A空射快速响应武器（ARRW）项目的详细设计、试验与生产就绪保障等工作。

推进装置

2019年6月20日，在法国的巴黎航展上，雷神公司透露HAWC项目正在研发的空射型高超声速巡航导弹演示验证样机因发动机技术问题，无法在2020年年底前完成首次飞行试验。高超声速巡航导弹采用的超燃冲压发动机在鲁棒性等工程问题上面临诸多难题，如进气道不起动、发动机冷重起等，距离实战使用还有较大差距。

美国国防部（DoD）和挪威国防部（MoD）于2020年4月20日宣布，计划在新的美国联合原型倡议

（API）下继续进行双边合作，以推进固体燃料冲压喷气发动机（SFRJ）技术的发展。挪威的Nammo公司已被选为增程战术进攻高速冲压发动机（THOR-ER）项目的工业合作伙伴。THOR-ER项目的目标是合作开发固体燃料冲压发动机技术，并将其降低至合理的价格，可在高速和扩展范围的全尺寸原型中实现，最终在与作战相关的条件下进行飞行演示。THOR-ER项目融入了挪威在导弹和火箭技术领域长期研发的成果，并使美国与挪威最先进的推进技术融合在一起。2019年9月，Nammo公司曾展示了正在研制的弹用超燃冲压发动机，并称采用这种发动机的防空导弹，其最大射程有望达到400km以上，而且该发动机还可根据任务需要和发射平台进行适应性修改，导弹的飞行速度可达 $Ma3.5 \sim 5$ 。

2020年4月27日，美国空军在网上发布了未来高超声速项目的公告。美国空军表示，未来高超声速项目旨在开发一种“可以从现有的战斗机或轰炸机上空射的固体火箭推进、吸气式、高超声速的常规巡航导弹”。美国空军正在寻找具有各种专业技能的机构开展相关研究，包括：持续的吸气式高超声速推进



Nammo公司测试超燃冲压发动机

技术，如冲压发动机、超燃冲压发动机或双模发动机；稳定的高超声速空气动力学技术；气热耦合保护系统；固体火箭发动机；弹头和导弹一体化技术；先进的高超声速制导、导航和控制技术。未来的超声速计划是美国空军的第二次吸气式巡航导弹计划。

近期动向 预算大涨

2020年2月，美国各军种和直属机构在官方网站上陆续公布了2021财年国防预算申请文件。DoD发布的2021财年预算申请概要文件明确指出，2021财年在高超声速领域（含反高超）申请的科研经费预算总额高达32亿美元，比上一年提出的2020财年申请额26亿美元增长了23%，再次创下近10年来的历史新高。总体上，美国陆海空三军加速推动3型高超声速助推滑翔导弹型号研制是2021财年美国高超声速科研预算再创新高的主要原因。从项目渠道来看，美国海军2021财年为常规快速打击项目申请10亿美元，采用通用滑翔器加潜射助推方案，于2028财年在“弗吉尼亚”级潜艇上实现初始作战能力；美国陆军2021财年为远程高超声速武器项目申请8.01亿美元，将采用通用滑翔器加海军助推系统方案，射程可达3000~4000km；美国空军2021财年为AGM-183空射快速响应武器项目申请3.82亿美元，将研发能以Ma9以上速度飞行且射程达1000km以上的空射高超声速滑翔器原型；DARPA 2021财年为战术助推滑翔项目申请1.17亿美元，将与空军合作继续试验该项目，DARPA还将继续

研发高超声速吸气式武器概念，提高高超声速防御能力。美国国防部导弹防御局（MDA）发布了“高超声速区域滑翔段武器系统”拦截弹原型征询建议书，并研发天基传感器原型，扩大对来袭导弹探测、跟踪的范围。

技术走向

为应对潜在对手，美国将加速助推滑翔类武器研制并形成作战能力，同时继续推进超燃冲压发动机研制。

一是将型号研制项目由4个削减为3个，数量更少，但投资强度更大，加速形成战斗力是第一要务。其中，空军取消了HCSW空射型战略级高超声速助推滑翔导弹，海军和陆军继续加速推进CPS潜射型和远程高超声速武器（LRHW）陆射型战略级高超声速助推滑翔导弹，分别计划在2025年和2023年形成作战能力。同时，空军继续加快ARRW空射型战术级高超声速助推滑翔导弹的研制，计划在2022年形成作战能力。

二是3个演示验证项目进入到收官阶段，巡航导弹技术研发投资强度降至谷底，装备转化前景不容乐观。其中，TBG主要是验证采用面对称楔形滑翔弹头的高超声速助推滑翔导弹技术，HAWC主要是验证采用液体碳氢燃料超燃冲压发动机的高超声速巡航导弹技术。前者继续保持了1.17亿美元的高强度预算，而后者仅剩700万美元。TBG和HAWC都将在2020年进行飞行试验，但从投资强度上看，TBG的飞行试验将持续到2021年，HAWC项目在2021财年的预算可能仅够开展试验数据分析而无法支撑更多飞行试验，其装备转化前景不容乐观。

三是面向高超导弹的专用技术研发稳步推进，正储备多种动力技术。其中，空军继续稳步推进弹用液体碳氢燃料超燃冲压发动机等技术成熟，海军瞄准Ma3~8超声速/高超声速导弹应用，正加强固体燃料冲压发动机等技术的探索和储备。美国主要高超声速武器项目如表2所示。

表2 美国主要高超声速武器项目

项目	2020财年 / 百万美元	2021财年 / 百万美元	计划
常规快速打击（CPS）	512	1008	2028财年具备初始作战能力
远程高超声速武器（LRHW）	404	801	飞行试验持续到2023年
空射快速响应武器（ARRW）	286	382	飞行试验持续到2022年
高超声速常规打击武器（HCSW）	290	0	2020年取消
战术助推滑翔（TBG）	152	117	飞行试验至少持续到2021年
作战火力（OpFires）	50	40	飞行试验至少持续到2021年；2021年开始转入武器系统集成规划与设计
吸气式高超声速武器概念（HAWC）	20	7	2020年完成飞行试验，2021年进行最终的项目审查

发展重点

重视实验设施建设

通过各种试验，可大大缩短设计试验周期、加速技术迭代过程、加快推进包括高超声速飞机技术在内的高超声速技术发展成熟。2019年2月20日，美国D风洞重新授权定位于开展常规性研究型试验。在随后的7周时间内，美国空军研究实验室（AFRL）的研究人员应用了多项试验技术，完成了70多次超声速状态下运行调试试验，测量标定了该风洞自由气流的品质，评价了角区湍流特性，评估识别了气流与结构件之间的耦合干扰。表3列举了美国国防部高超声速地面试验设施，它们可建立不同温度、不同速度的试验环境。

积极推动防御技术发展

随着高超声速武器的服役，其防御已成为严峻的现实问题，美国已加大投入，通过多个项目推动技术逐步走向成熟。据美国《防务内情》报道，美国《2020财年国防授权法案》最终给MDA批准了3.9亿美元预算用于高超声速防御项目，比2019年2月申请的1.57亿美元预算增加了2.32亿美元。

2019年8月30日至9月4日，MDA的高超声速防御武器系统概念定义项目陆续从第一轮入选的21个方案中挑出了5个方案，并逐个授出了第二轮的研究合同，要求承研单位在2020年5月前围绕被选中的方案再完成一轮深化研究工作。2020年1月24日和2月10日，DARPA分别授予诺斯罗普-格鲁门（诺格）公司和洛克达因公司的滑翔破坏者项目基线研究阶段合同，合同金额分别是1300万美元和1213万美

表3 美国国防部高超声速地面试验设施

试验设施	能力
美国空军阿诺德工程发展综合体（AEDC）冯·卡门气体动力学设备A/B/C风洞	风洞A：101cm， Ma 1.5 ~ 5.5；超过143℃ 风洞B：127cm， Ma 6、 Ma 8；超过482℃ 风洞C：127cm， Ma 10；超过926℃
AEDC 高焓气动热测试电弧加热设施H1、H2、H3	模拟 Ma 8以上速度条件下的热、压力环境
AEDC 9号风洞	149cm， Ma 7、 Ma 8、 Ma 10、 Ma 14、 Ma 18；超过143℃
AEDC 气动与推进试验装置	Ma 3.1 ~ 7.2；超过704℃
AEDC 空气弹道学G靶场	可发射口径在20.32cm以上、速度在 Ma 20以上的射弹
霍洛曼高速试车跑道	18279m跑道；可发射速度超过 Ma 8射弹
AFRL 18、22装置	Ma 3 ~ 7
AFRL 激光硬化材料评估实验室（LHMEL）	高温材料测试
AFRL Ma 6高雷诺数（ Re ）设施	25.4cm、 Ma 6
试验设施管理中心高超声速航空推进纯净空气试验台设施	超过 Ma 8；超过2226℃

元，让二者在该项目的初始阶段开展竞争性研究。滑翔破坏者项目旨在研发先进拦截器的支撑技术，以支撑该拦截器在高空拦截机动式高超声速目标。滑翔破坏者项目最终将完成应用能力演示验证试验，试验结果将用于支撑后续开展全系统拦截能力的分析。2020年1月29日，MDA公开发布了区域性滑翔段（拦截）武器系统（RGPWS）项目招标书草案，该项目将完成一型在滑翔段拦截区域级（中程）高超声速助推滑翔导弹的拦截弹原型机的设计、发展和非拦截式飞行验证。RGPWS项目是MDA高超声速防御专项的重点项目，计划在2021年年底前完成拦截武器的原型机及其飞行试验，并完成相关高精度建模与仿真工作。RGPWS项目的核心目标

是降低拦截武器的关键技术风险和集成风险，将拦截武器的技术成熟度等级提升到5级。项目最终将完成一次拦截武器的飞行试验，验证该拦截武器除拦截杀伤以外的关键性能特征。

结束语

美国高超声速导弹种类多样、技术齐全，在快速形成装备的同时夯实技术储备，提前部署反制措施研发，未来将形成攻防兼备的装备体系。其各型装备即将不断列装，对我国现有防御体系构成严重威胁，为此必须加快预警探测、快速拦截等装备的研发，确保国家安全。 **航空动力**

（王晓鹤，中国航空工业发展研究中心，高级工程师，主要从事机载武器研究）