国外高速飞行器及两大关键技术发展动向研究

刘晓波,武凤莺,李文佳,黄克非
(中国空气动力研究与发展中心 计算空气动力研究所,四川 绵阳 621000)

摘 要:高速飞行器领域始终是国外投资的重点,其中动力推进技术和拦截技术的研发更是重中之重。近期,以美国为代表的国家在高速飞行器研制领域迈入新的发展阶段,其在动力推进技术和拦截技术方面取得的进展值得高度关注。基于文献综述方法,系统梳理了国外高速飞行器的战略规划实施与调整情况,详细阐述了高速导弹、高速飞机和相关试验平台的最新试飞进展,深入分析了支撑吸气式推进技术和新型爆震推进技术发展的研究工作,并对高速飞行器拦截技术的发展态势与未来动向进行了研判。研究表明:在战略规划层面,美国持续强化核心盟友的协同作用;在装备发展层面,美国将工作重心放在高速导弹的武器化飞行试验验证及高速飞机的首飞准备上,同时着力打造低成本、高频次的高速技术演示验证平台;在动力推进方面,国外推动吸气式高速推进技术中固体燃料冲压发动机在实际装备中的应用,同时积极推进旋转爆震发动机的工程化落地;在拦截技术研究领域,国外将飞行演示的全面联调联试与优化发展作为重点方向。

关键词:高速飞行器;动力推进;拦截技术;飞行演示;地面试验;发展动向
中图分类号:V27;V23 **文献标识码**:A **文章编号**:1672-2620(2025)04-0092-09
DOI:10.3724/j.GTER.20250049

Development trend of overseas high speed flight vehicles and two key techniques

LIU Xiaobo, WU Fengying, LI Wenjia, HUANG Kefei
(Computational Aerodynamics Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China)

Abstract: The development of high speed flight vehicles has always been the investment focus overseas, especially the research on power propulsion and interception technology. Recently, high speed flight vehicle development in the United States has entered into a new stage, and its progress in power propulsion and interception technology deserves close attention. Based on the method of literature review, the implementation and adjustment of strategic planning of high speed flight vehicles overseas were investigated. The latest flight tests of high-speed missiles, aircraft, and test bed were described. Research work on supporting the development of air-breathing propulsion and new detonation propulsion technology was analyzed. The development trend of interception technology related to high speed flight vehicles was obtained. The results show that the role of the core ally is still highlighted for high speed flight vehicles in strategic planning in the United States. As for the development of hypersonic flight vehicles, high speed flight weaponization test and high-speed aircraft initial flight test were two important aspects during recent activities. Meanwhile, high-speed flight demonstration activities paid more attention to low-cost and high-frequency. For power propulsion technology, soild fuel ramjet technology is advanced in the field

收稿日期:2025-05-10
作者简介:刘晓波(1974−),男,湖南隆回人,高级工程师,从事空气动力学领域情报研究。
引用格式:刘晓波,武凤莺,李文佳,等. 国外高速飞行器及两大关键技术发展动向研究[J]. 燃气涡轮试验与研究,2025,38(4):92−100. LIU Xiaobo,WU Fengying,LI Wenjia,et al. Development trend of overseas high speed flight vehicles and two key techniques[J]. Gas Turbine Experiment and Research,2025,38(4):92−100.

application , and the rotating detonation propulsion is turned into an engineering application stage. For high speed interception technologies, the flight demonstration has fully entered the stage of comprehensive testing and optimization development.

Key words: high speed flight vehicle; power propulsion; interception technology; flight demonstration; ground test; development trend

1 引言

2024年,国外的高速飞行器研究取得了较大进展,尤其是美国,不仅依托核心盟友持续落地了新版高速飞行器的战略规划,还快速推进了高速飞行器的发展,如高速导弹加强实战化测试,高速飞机进入试飞前的最后准备阶段。高速飞行器的相关测试技术发展态势也异常活跃,其飞行试验平台呈现低成本、高频次、常态化演示验证等特点,而地面试验技术充分结合新型激光诊断技术和大数据融合分析的优势,进一步提高了测量精准度。与高速飞行器研究相关度最高的两大关键技术均取得了新的研究成果。在动力推进技术领域,一方面是继续推动气液两相型双模态超燃冲压推进与固体燃料冲压燃烧两种吸气式高速推进技术竞相获得成果;另一方面则持续看好爆震推进技术,尤其是旋转爆震的发展潜力,大力推动其工程研制上的成果转化。而且,除美国外,日本、加拿大也在持续推动吸气式高速推进技术的发展。在拦截技术领域,美国的高速防御飞行器已全面进入联调联试并进一步优化发展阶段,俄罗斯计划2025年列装具备击落高速飞行器目标能力的S-500新型防空系统。国外高速飞行器及动力推进与拦截技术的最新发展动向值得我们高度关注。

2 高速飞行器

2.1 战略规划研究

国外高速飞行器的战略规划研究包括进攻型高速飞行器和防御型高速飞行器两个方面。

在进攻型高速飞行器研究方面,2024年11月,美、英、澳组成的“奥库斯(AUKUS)”国家联盟签署了一份新的高速飞行器技术共享协议[1]。该协议名称为“高速飞行测试和实验(HyFliTE)”,将在2028年前开展包括“多达6次”的三方试飞活动,经费规模达2.52亿美元。三方通过开展系列测试和实验来提高高速飞行器技术的开发和交付能力,加速高速飞行器概念的更新和关键使能技术的开发。该协议致力于保持美、英、澳三国在高速国防技术前沿方面的优势,以在战场上领先对手,加强集体安全。据报道,HyFliTE协议以美国和澳大利亚已合作研发15年的高速飞行器项目为基础,包括两国于2020年启动的“南十字星综合飞行研究实验”项目。英国加入HyFliTE协议表明“奥库斯”联盟正通过技术资源共享,加速实现安全防御承诺。新协议中确定的“高速技术和能力发展框架”将为市场注入活力,未来将有90余家供应商参与其中,商业价值达12.7亿美元[2]。HyFliTE协议的基本情况见表1。

表1 HyFliTE协议基本情况

Table 1 Brief information of HyFliTE agreement

项目	内容
背景	在美、澳前期开发高速飞行器的基础上,推动美、英、澳三国在此方面的技术研发和联合测试
投资领域	高温材料、先进推进系统、制导与控制系统
试验情况	2028年前至少飞行6次
经费	2.52亿美元
产业影响	90余家供应商参与,工业能力提升

在防御型高速飞行器战略规划方面,2024年4月,美国导弹防御局向洛克希德·马丁空间系统公司(简称洛马公司)授予了一份价值170亿美元的合同,用于研发“下一代拦截器(NGI)”,进而升级现有陆基中段防御(GMD)系统,在大气层外通过碰撞杀伤拦截来袭导弹。图1为洛马公司的下一代拦截器渲染图。同年5月,美国导弹防御局和日本防卫省签署



图1 洛马公司的下一代拦截器渲染图[3]

Fig.1 Rendering of next generation interceptor of Lockheed Martin Space Systems Company

了一份合作协议,允许日本加入“滑翔段拦截器(GPI)”项目,共同提高高速导弹防御能力,最终实现在配备“宙斯盾”弹道导弹防御系统的驱逐舰上对处于滑翔段飞行阶段的高速导弹实施拦截。在日本加入之前,美国的雷神公司与诺斯罗普·格鲁曼公司(简称诺格公司)已于2022年6月赢得了GPI项目的设计合同,不过该项目目前仍处于早期开发阶段。美2024财年《国防授权法案》透露,GPI项目将在2029年底前形成初始作战能力,2032年形成全面作战能力,2040年前至少交付24套装备。日本加入该项目的主要任务是主导GPI火箭发动机和推进系统的开发[3]。

由此可见,国外在高速飞行器的战略规划研究方面主要以美国为主,而美国的战略规划研究在特朗普政府时期,研究资源不再进行全球配置,但仍然十分重视英国、日本、澳大利亚等核心盟友的作用。

2.2 发展现状研究

国外高速飞行器的发展现状研究主要体现在高速导弹和高速飞机两个方面。

在高速导弹研究方面,实战化测试是发展研究的重点。近年来,美国各军种均在投资高速导弹飞行武器计划。其中,陆军和海军主要投资一种通用的高速滑翔体,空军主要投资几项空射型高速飞行武器计划。2024年7月,美国政府问责局(GAO)确定了6种进攻型高速导弹项目[4],如表2所示,并强调这6个进攻型高速导弹项目均需高度重视快速交付能力。2024年,这6种高速导弹的实战化测试动作频频,表明其已接近实战化部署阶段。

陆军的LRHW(官方代号为“暗鹰”)项目于2024年成功进行了2次试射。6月的第一次试射在与海军联合开展的“坚毅猎人24-2”演习中进行,标志着美军首次将高速能力集成至两年一次的联合训练演习中。12月,美国陆军对“暗鹰”远程高速导弹成功进行了第二次试射。2025财年,LRHW的研究、发展、试验与鉴定(RDT&E)预算请求经费为5.380亿美元,并预算了7.442亿美元用于采购LRHW的地面支持装备。陆军已经部署了LRHW的样弹,并计划于2027年部署另外2个导弹连。海军的CPS项目于2024年6月在夏威夷考艾岛的太平洋导弹靶场(PMRF)完成了通用型高速导弹的端到端飞行试验。2025财年预算文件透露,海军原计划于2025年底将CPS部署在朱姆沃尔特级驱逐舰上,不过现已推迟到2027年。CPS项目2025财年的RDT&E经费预算为9.039亿美元,高于2024财年的9.011亿美元,但并没有采购方面的预算。海军的HALO项目原计划由雷神公司和洛马公司负责完成初步开发,但据海军新闻网2025年4月10日消息,该项目由于预算限制已于2024年秋季终止[5]。海军的标准-6 Block IB高速导弹项目正在紧锣密鼓地开发中,旨在通过采用两级固体燃料火箭发动机,使其具备更强的反舰和防空能力。空军的ARRW(官方代号为“AGM-183A”)项目原本计划于2023年底列装,但由于试验屡屡失败,项目面临终止风险,但空军仍坚持完成余下原型弹测试,并于2024年3月17日完成最后一次全弹测试。美国国防部2025年6月公布的最新预算文件表明,空军重新启动了ARRW项目,并申请了2026财年的经费预算[6]。另外,空军的HACM项目取得了快速进展(图2),计划于2024年10月至2027年3月期间对HACM导弹开展13次飞行试验,如果项目获得成功,将做出生产决定[7]。

另外,高速导弹的实战化测试也呈现国际化发展的趋势。2024年3月,俄罗斯在战场上首次使用了

表2 美军6个进攻型高速飞行武器项目

Table 2 Six offensive high speed weapon projects of the United States armed forces

军种	项目名称	最新进展
陆军	远程高速武器(LRHW)项目	2024年6月和12月成功进行了2次试射,2025年列装部队,计划于2027年部署另外2个导弹连
海军	常规快速打击(CPS)项目	2024年6月完成通用型导弹端对端飞行试验,2027年在朱姆沃尔特级驱逐舰上部署
	高速空射进攻性反水面作战武器(HALO)项目	2024年大幅增加研发投入,分别授予雷神公司和洛马公司1.16亿美元开展初步开发,但由于预算限制原因在2024年秋季被海军终止
	标准-6 Block IB高速导弹项目	2024年12月导弹用固体火箭发动机完成静态测试,导弹进入小批量生产
空军	空射快速响应武器(ARRW)项目	2024年3月完成了最后一次全弹测试,10月获得1300余万美元追加资金,2025年6月项目重启并申请预算
	高速攻击巡航导弹(HACM)项目	2024年10月至2027年3月期间将对HACM导弹开展13次飞行试验



图2 HACM高速导弹渲染图[7]
Fig.2 Rendering of HACM missile

“锆石”高速导弹。同月,朝鲜声称其首枚中程高速导弹的固体火箭发动机推进系统地面试验取得成功,可能在7月进行了该导弹的首次试射,但韩国官员表示该导弹在空中爆炸。2024年5月,英国向澳大利亚的Hypersonix发射系统公司和加拿大的太空发动机系统公司授予了13亿美元合同,用于开发新型高速导弹。2024年7月,日本发布视频,展示了在高速滑翔弹头研发方面取得的进展。同月,美国陆军已明确规划,计划从2026年起将高速飞行武器部署在欧洲地区。澳大利亚Hypersonix发射系统公司和美国火箭实验室正朝着计划中的飞行试验迈进,试验对象为颠覆性自主快速运输(DART)高速飞行器。

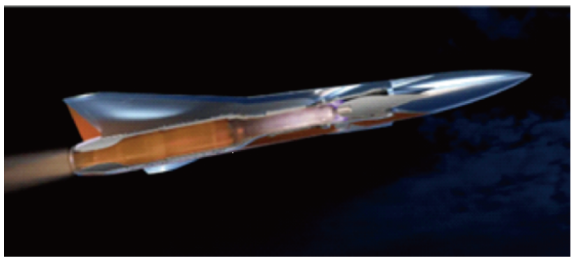
在高速飞机研究方面,顺利开展首飞是近期追求的最为重要的目标。美国洛马公司承研的SR-72飞机计划于2025年首次试飞,其采用涡轮冲压组合(TBCC)发动机作为动力系统,飞行速度将达到6马赫[8]。另外,美国空军还向赫尔默斯(Hermeus)公司提供资金,支持开展“夸特马(Quarterhorse)”高速飞机的飞行测试[9]。“夸特马”飞机同样采用TBCC发动机(代号为“奇美拉(Chimera)”)作为推进系统,能够以5马赫的速度飞行。赫尔默斯公司于2024年专门投资1.35亿美元建设了一座名为HEAT(高焓吸气式测试设施)的先进地面设施,应用其连续的高流量、高焓和低压飞行条件来对“奇美拉”发动机进行测试。该发动机除装备“夸特马”高速飞机外,未来还将装备更大尺寸的“黑马(Darkhorse)”飞机和“翠鸟(Halcyon)”高速客运飞机。除此之外,美国维纳斯航空航天公司(也译为金星宇航公司,简称维纳斯公司)的“观星者(Stargazer)”高速飞机也取得较大研究进展。“观星者”是维纳斯公司利用其在旋转爆震发动机研究方面积累的技术优势,正在研制的一款民用高速飞机[10]。该飞机于2020年开始研制,采用新颖的外观设计和先进的旋转爆震发动机作为动力装置,其飞行速度将达到9马赫,飞行高度约为51 km。图3为美国在研的3种高速飞机。



(a) SR-72



(b) “夸特马”



(c) “观星者”

图3 美国在研的3种高速飞机渲染图[8-10]
Fig.3 Renderings of three high-speed aircrafts currently under development in the United States

综上,国外以高速导弹和高速飞机为代表的高速飞行器的发展已进入快车道。美国在该领域的研究进展尤为突出,尽管前几年在高速导弹的实战化测试方面不太顺利,但从其重新将助推滑翔技术与吸气式巡航技术作为并行发展的两大关键测试技术来看,一旦这些高速飞行器交付部队使用,将形成较大战略优势。高速飞机的发展呈现多条路线齐头并进趋势,技术突破指日可待。

2.3 测试技术研究

国外高速飞行器测试技术研究主要包括飞行演示验证研究和地面试验技术研究两个方面。

在飞行演示验证研究方面,国外的关注重点为发展高效的飞行演示验证平台。2024年,美国政府持续资助高速飞行演示验证平台的建设,尤其是低成本、高频次的高速飞行试验平台取得了进一步突

破。2024年3月,美国平流层发射系统公司在范登堡空军基地西部靶场成功完成了“利爪”-A高速试验飞行器(TA-1)的首次带动力飞行试验。2024年6月,美国导弹防御局首次试飞了奎托斯(Kratos)公司建造的高速飞行试验平台,通过收集飞行试验数据加速推进了高速技术的发展。2024年9月,约翰·霍普金斯大学应用物理实验室与德国航空航天中心携手,在挪威对美空军的高速飞行器BOLT-1B进行了试验(图4),获取了边界层转捩和湍流的相关信息[11]。2024年12月,美国国防部授予奎托斯公司一份价值14.5亿美元的合同,旨在支持国家高速技术倡议2.0,通过建立经济实惠的飞行测试平台,快速提升高速飞行测试能力,减少高速飞行武器技术研发风险及缩短开发周期[12]。此外,美国导弹防御局近期成功完成了高速试验台(HTB)的第二次飞行测试(HTB-2)。



图4 在挪威开展的BOLT-1B飞行测试[11]
Fig.4 BOLT-1B flight test conducted in Norway

地面试验技术研究的目标在于利用先进测试手段获得更高质量的试验数据。2024年1月,美国新墨西哥州桑迪亚国家实验室开发了一种基于相干反斯托克斯拉曼散射的氮气和氧气温度测量技术,利用这种新型激光吸收光谱诊断技术全面表征了其自由活塞高速激波风洞中的流场特性。同月,研究人员在普渡大学的波音/美国空军科学研究办公室(AFOSR)6马赫静音风洞(ANDLM6QT)中演示了一氧化碳的双光子激光诱导荧光测量技术,频率达到100 kHz,将最先进技术水平提高了两个数量级,有力推动了边界层和尾流中烧蚀产物与气体混合的耦合测量研究的发展[13]。2024年5月至6月,美国加利福尼亚州的MetroLaser公司分别向田纳西州阿诺德工程发展中心的冯·卡门气体动力学设施风洞和得克萨斯A&M大学的两级轻气炮交付了多套高速与超高速聚焦纹影系统,这些系统具备以100 kHz的频率生成高质量图像的能力。2024年8月,MetroLaser公司与密歇根大学合作,共同开发并建造了一种极为先进的超高速传感器。该传感器采用双色外差干涉测量法,在NASA艾姆斯研究中心的电弧激波管设施(EAST)中进行了兆赫兹频率的电子数密度测量[14]。目前,美国已建成两座6马赫静音风洞。图5为圣母大学和波音公司在美国空军科学研究办公室资助下建成的6马赫静音风洞结构简图[15]。2024年11月,圣母大学还建成首座速度可达10马赫的静音风洞,能够模拟高速飞行条件下的极端环境,促进了高速飞行动力学、湍流、飞行控制和推进等方面的研究[16]。

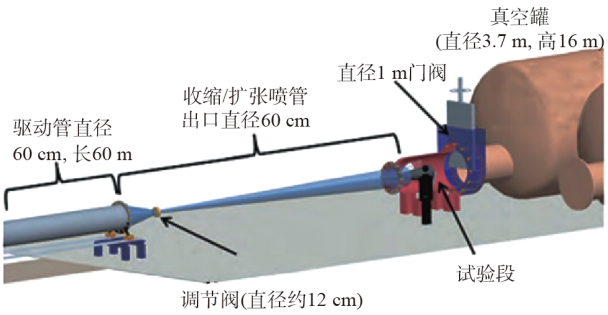


图5 圣母大学6马赫静音风洞示意图[15]
Fig.5 Schematic of the Mach 6 quiet tunnel built by the University of Notre Dame

可以看出,开展高速飞行器相关测试技术研究是保证高速飞行器发展的关键。开发低成本、高频次的高速飞行试验平台,建设先进的地面试验设施,研究高效的试验技术,是未来发展相关测试技术的重点研究方向。

3 动力推进技术

动力推进技术是支持高速飞行器发展最为关键的技术之一,尤其是吸气式动力推进技术的快速进步,推动了高速飞行器在多个领域的应用,具有很大的发展潜力。2024年以来,国外吸气式动力推进技术取得长足进展,具有以下两个方面的明显特征。

一是在传统气液燃料超燃冲压发动机通过飞行演示和地面测试持续优化和完善运行性能的同时,固体燃料超燃冲压推进技术也取得重大进步。气液燃料超燃冲压发动机的研究已有几十余年的历史,取得了丰富的研究成果。其中,美国的研究成果尤为突出,大量研究成果正从实验室层面向战术应用层面转化。2024年,美国在气液燃料超燃冲压发动

机研究方面取得的最大进展是高速吸气式武器概念(HAWC)项目完成了超燃冲压发动机的持续燃烧测试,速度达6马赫,射程超1 000 km,其衍生项目MoHAWC启动后也进展良好,有望实现低制造成本、多平台兼容的目标。日本宇宙航空研究开发机构(JAXA)于2024年4月在角川太空中心的冲压发动机试验设施中测试了6马赫超燃冲压发动机,另外在高焓激波风洞中进行了速度超过8马赫的超燃冲压发动机测试,并为"高马赫综合控制冲压发动机实验"(HIMICO)进行了部件测试[17]。加拿大航天发动机系统公司于2024年7月和8月在各种空气燃料当量比下,对接近全尺寸的DASS GNX涡轮冲压发动机进行了测试,并在2024年10月将该发动机集成到全尺寸的Hello-1X演示验证飞行器中,实现了32 km高空飞行,速度达到5马赫。

除液体和气体燃料超燃冲压推进技术取得重大进展外,固体燃料冲压推进技术也有重大进步[18-19]。2024年4月,荷兰应用科学研究组织(TNO)对固体燃料冲压发动机的超声燃烧速率测量系统进行了改进,采用一种创新的后处理方法,能够将原始测试数据转换为燃烧速率,从而提高研究人员在固体燃料冲压发动机地面试验中评估燃烧室性能的能力。图6为通过石英窗侧壁观察到的固体燃料超燃冲压发动机燃烧室情况。2024年7月,TNO的飞机推进试验设施实施了一项地面试验计划,以验证系统改进后的功能和性能。美国中佛罗里达大学的研究人员利用3D打印技术生成增材制造粒子,在两座设备中对固体燃料超燃冲压发动机的性能进行了测试,以模拟固体燃料的冲压与超燃冲压环境,取得了较为理想的结果[19]。

二是以旋转爆震发动机为代表的爆震推进技术采用多条技术路线,加速推进爆震发动机由实验室研究向工程研制过渡。美国在旋转爆震发动机技术研究方面的最新进展主要体现在维纳斯公司、普惠公司和通用电气航空航天公司(简称GE公司)等的相关研究取得了重要突破。这三家公司在旋转爆震发动机研究方面采用的技术路线尽管均突出了旋转爆震发动机的性能优势,但各有侧重。维纳斯公司侧重与NASA合作,开展火箭式旋转爆震发动机(RDRE)的技术攻关,探索航空航天前沿技术;普惠公司侧重与军方合作,开展纯旋转爆震发动机(RDE)研究,并以补充路线的形式探索与其他循环的组合,以服务于紧凑型高速武器或导弹平台;GE公司侧重与NASA和军方的双重合作,利用在涡轮发动机和变循环发动机技术方面的深厚积累,开展旋转爆震燃烧室(RDC)的替换研究,并追求旋转爆震发动机与双模冲压的组合运行,以实现多模无缝集成模式下高速飞行器的持续高效工作。

2025年5月14日,维纳斯公司成功在新墨西哥州太空港完成了旋转爆震火箭发动机的首次飞行试验,验证了发动机在飞行条件下的性能和系统完整性[20],如图7所示。这次飞行试验是维纳斯公司在2025年1月首次对旋转爆震与冲压相结合的VDR2发动机成功实现点火的基础上进行的,测试时间相对较短,仅约30 s,发动机产生了8 896 N的推力,且飞行速度按计划并没有突破音障。VDR2发动机是维纳斯公司提出的一种创新型高速发动机方案,结合了旋转爆震火箭发动机的高推力、高效率与冲压发动机的高效巡航性能。该发动机能够将飞行器加速至6马赫,实现51 km的高空飞行,且效率提高了15%。

2025年3月4日,普惠公司宣布完成了旋转爆震发动机的测试,并取得了令人鼓舞的结果,使其集成

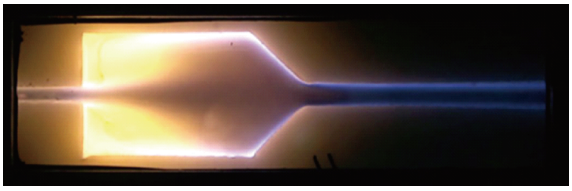


图6 通过石英窗侧壁观察固体燃料超燃冲压发动机燃烧室[18]

Fig.6 A model solid-fuel scramjet with an optically accessible combustor by replacing two side walls with quartz windows

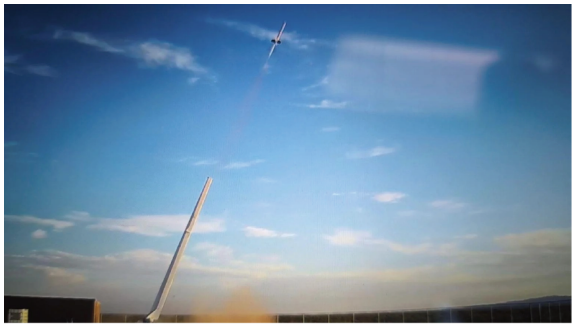


图7 维纳斯公司旋转爆震火箭发动机首次飞行试验[20]

Fig.7 First flight test of Venus Aerospace's rotating detonation rocket engine

到“元彗星(Metacomet)”项目成为可能[21]。图8为普惠公司测试的旋转爆震发动机。该公司证实,这次测试是根据2022年3月与美国空军研究实验室签署的合同完成的,下一步将对发动机和飞行器的一体化开展飞行测试,但其拒绝透露后续的测试是与空军还是海军开展合作。这种推进概念在相对紧凑的外形中提供了较高的热效率和性能,而且由于外形紧凑,燃烧室距离较短,所以整个推进系统较小,有助于减轻发动机的质量,并缩短燃烧模块的长度,其集成于高速巡航导弹后,特别适用于舰载战斗机搭载,同时还可以使可重复使用高速飞行器中的TBCC发动机的长度减少约1/3。

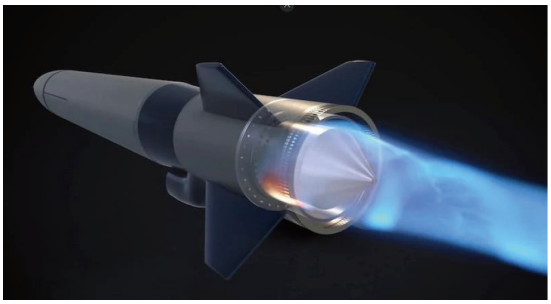


图8 普惠公司测试的旋转爆震发动机[21]
Fig.8 Rotating detonation engine tested by Pratt & Whitney Group

2024年7月,美国GE公司完成了飞行尺度的双模态冲压喷气发动机的试验,验证了该公司提出的旋转爆震双模态冲压发动机概念[22-23]。图9为该发动机的外观示意图。在此次试验过程中,该发动机在多种工况下运行,包括涡轮基组合循环推进系统的模态转换工况,以及预期的超过4马赫的飞行焓值和压力条件下的巡航工况。旋转爆震发动机作为美国国防部“王牌(Gambit)”项目的核心技术,其重大

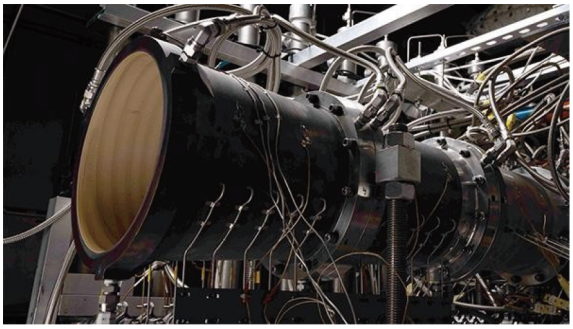


图9 GE公司提出的旋转爆震双模态发动机
Fig.9 GE's dual-mode ramjet paired with a rotating detonation combustor

进展将为未来高速导弹动力系统提供解决方案,对远程精确打击武器发展产生重要影响[24]。

综上所述,国外的冲压发动机技术呈现气液燃料和固体燃料协同并进的态势,而以美国为代表的旋转爆震发动机技术已从实验室研究层面迈向了工程化应用阶段。

4 拦截技术

国外在高速飞行器拦截技术方面的研究主要以美国为主,重点依托GPI项目和NGI项目开展相关研究,如图10所示。在GPI项目方面,2024年9月25日,美国导弹防御局宣布选择诺格公司作为GPI项目的唯一承包商[25]。目前,GPI项目已完成首次模拟拦截试验,计划于2030年完成部署,其中的天基传感器层(HBTSS)子项目进入实战化测试阶段,强化对高速飞行目标的早期预警。在NGI项目方面,其将取代波音公司目前在格里利堡和范登堡空军基地开发的拦截器,每个NGI将携带多个杀伤拦截器,可多次撞击同一枚来袭导弹,或同时对抗多个目标,具备机动性更强、生存能力更广、可靠性更高、射程更远等特征[26]。



图10 诺格公司的GPI项目渲染图[25]
Fig.10 Rendering of Northrop Grumman's GPI project

另外,雷神公司于2024年11月透露,将利用“标准-3”导弹和“标准-6”导弹开展高速防御飞行武器的技术验证,尤其是“标准-6 Block IB”导弹,其作为“标准-6”导弹的衍生型号,凭借高速飞行速度和先进制导系统,可有效地拦截包括高速飞行武器在内的空中目标,因而可作为一种反高速武器导弹;不过雷神公司认为反高速武器导弹的关键技术主要为材料问题,尤其需要解决材料的加热和封装。该导弹于2024财年开始小批量生产,将于2026财年实现初步作战能力。

日本主要通过加入美国的GPI项目,共同开发

高速导弹防御能力。欧盟的高速防御(HYDEF)项目于2021年启动,旨在开发大气层内的高速飞行目标拦截器,研究团队包括来自欧盟7个成员国的14家公司,正在进行概念研究,目的是评估拟开发拦截器的可行性,后续将进行关键技术的初步开发。

综上所述,美国在高速飞行器拦截技术方面尽管主要依托GPI项目和NGI项目开展相关研究工作,也积极突出发挥核心盟友的作用。但是,从框架体系搭建来看,特朗普政府推出的"金穹"项目规模将更大,投入的经费也将更多,后期是否会将上述相关拦截技术项目进行整合,还有待观察。

5 结束语

国外在高速飞行器及动力推进与拦截技术两大关键技术研究方面取得了较大进展,主要体现在:高速飞行战略规划仍然突出核心盟友作用;高速飞行武器化试验接近实战部署边缘;高速飞机进入试飞准备阶段;高速飞行试验平台技术演示验证活动更注重低成本、高频次;吸气式高速推进技术进入液体/气体燃料双模态超燃冲压推进与固体燃料冲压燃烧协同并进的过程;旋转爆震发动机转入工程化应用阶段;相关地面试验技术充分利用新型激光诊断技术的优势提高测量精度;拦截技术飞行演示全面进入联调联试并进一步优化发展阶段。

参考文献:

[1] NGUYEN P. AUKUS partners sign landmark hypersonics agreement[EB/OL]. (2024-11-18). https://www.defense.gov/News/Releases/Release/Article/3966986/aukus-partners-sign-landmark-hypersonics-agreement/.

[2] HEINRICHS R L. Key takeaways: The future of US and allied hypersonic missile programs[EB/OL]. (2024-11-03). https://www.hudson.org/missile-defense/key-takeaways-future-us-allied-hypersonic-missile-programs-space-foundation-rebeccah-heinrichs-ryan-tully.

[3] DAVID F. Missile defense industry takes steps to meet modern demands[J]. Aerospace America,2024,62(11):66.

[4] SAYLER K M. Hypersonic weapons: background and issues for Congress[R]. Congressional Research Service,2025.

[5] JOHNSTON C. U.S. navy cancels critical HALO hypersonic missile citing cost concerns[EB/OL]. (2025-04-10). https://www.navalnews.com/event-news/sea-air-space-2025/2025/04/u-s-navy-cancels-critical-halo-hypersonic-missile-citing-cost-concerns/.

[6] The Joint Staff. Department of Defense fiscal year (FY) 2026 budget estimates[Z]. 2025.

[7] 苑桂萍,肖　益,韩丛英. 2023年国外飞航导弹发展综述[J]. 战术导弹技术,2024,(2):1−8.
YUAN Guiping,XIAO Yi,HAN Congying. A summary of development of foreign cruise missiles in 2023[J]. Tactical Missile Technology,2024,(2):1−8. (in Chinese)

[8] 陈扶鼎. 2022年国外高超声速武器发展回顾[J]. 中国航天,2023,(2):31−37.
CHEN Fuding. Review of the development of hypersonic weapons abroad in 2022[J]. Aerospace China,2023,(2):31−37. (in Chinese)

[9] 潘　锐,赵群力. 国外高超声速飞机发展分析[J]. 航空科学技术,2023,34(11):2−7.
PAN Rui,ZHAO Qunli. Analysis on the development of hypersonic aircraft abroad[J]. Aeronautical Science & Technology,2023,34(11):2−7. (in Chinese)

[10] 陈召斌,廖孟豪,李　飞,等. 高超声速飞机总体气动布局设计特点分析[J]. 航空科学技术,2022,33(2):6−11.
CHEN Zhaobin,LIAO Menghao,LI Fei,et al. Analysis of design characteristics of overall aerodynamic layout of hypersonic aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology,2022,33(2):6−11. (in Chinese)

[11] STEIN L,VIGANÒ D. Hypersonic flight tests get democratized[EB/OL]. (2024-12-01). https://aerospaceamerica.aiaa.org/year-in-review/hypersonic-flight-tests-get-democratized/.

[12] ALBON C. Pentagon picks Kratos for hypersonic testbed program[EB/OL]. (2025-01-07). https://www.defensenews.com/pentagon/2025/01/07/pentagon-picks-kratos-for-hypersonic-testbed-program/.

[13] WANG R B,WEBB A M,CAMACHO R,et al. Characterization of reactant refill and detonation wave dynamics in a NG/GO_x rotating detonation engine using simultaneous high repetition-rate OH-PLIF and chemiluminescence[R]. AIAA 2024-1032,2024.

[14] FRANCIS A A,JEWELL J S. Effect of angle of attack on separation bubble instability and transition on a cone-slice-ramp in Mach-6 quiet flow[R]. AIAA 2024-1104,2024.

[15] 罗月培,孙宗祥,孙杭义,等. 美国高超声速风洞试验能力发展综述[J]. 飞航导弹,2021,(6):33−41.
LUO Yuepei,SUN Zongxiang,SUN Hangyi,et al. Overview of the development of hypersonic wind tunnel testing capabilities in the United States[J]. Aerodynamic Missile Journal,2021,(6):33−41. (in Chinese)

[16] ALBON C. Notre Dame unveils first-ever hypersonic

Mach 10 wind tunnel[EB/OL]. (2024-11-19). https://www.defensenews.com/pentagon/2024/11/18/notre-dame-unveils-first-ever-hypersonic-mach-10-wind-tunnel/.

[17] SARACOGLU B H,SALLAM K,STRAUSS F. High-speed air-breathing propulsion pushes the limits of Mach numbers[EB/OL]. (2024-12-01). https://aerospaceamerica.aiaa.org/year-in-review/high-speed-air-breathing-propulsion-pushes-the-limits-of-mach-numbers/.

[18] KULATILAKA W,MENON S. Advances reported in detonation-based systems and solid-fuel scramjets[EB/OL]. (2024-12-01). https://aerospaceamerica.aiaa.org/year-in-review/advances-reported-in-detonation-based-systems-and-solid-fuel-scramjets/#:~:text=Among%20the%20year%E2%80%99s%20advancements%2C%20milestones%20related%20to%20cutting-edge,simplify%20engine%20components%20while%20increasing%20the%20power-to-weight%20ratio.

[19] PATTEN J,PADILLA N,CLARK C R,et al. Additively manufactured energetic solid fuels in airbreathing propulsion[R]. AIAA 2025-1762,2025.

[20] NORRIS G. Venus marks rotating detonation flight-test milestone[EB/OL]. (2025-05-14). https://aviationweek.com/defense/missile-defense-weapons/venus-marks-rotating-detonation-flight-test-milestone.

[21] NORRIS G. Pratt & Whitney accelerates rotating detonation engine development[EB/OL]. (2025-03-04). https://aviationweek.com/aerospace/aircraft-propulsion/pratt-whitney-accelerates-rotating-detonation-engine-development.

[22] TRIMBLE S. Ground tests validate GE's hypersonic propulsion concept[EB/OL]. (2024-07-10). https://aviationweek.com/defense/aircraft-propulsion/ground-tests-validate-ges-hypersonic-propulsion-concept.

[23] TEASLEY T W,FEDOTOWSKY T M,GRADL P R,et al. Current state of NASA continuously rotating detonation cycle engine development[R]. AIAA 2023-1873,2023.

[24] CHEN Zhenyi,RAO Sihang,PENG Jian,et al. Effects of the inflow total temperature on the non-premixed rotating detonation engine performances[J]. Combustion and Flame,2025,272:113726.

[25] TRIMBLE S. Raytheon protests hypersonic interceptor program defeat[EB/OL]. (2024-11-14). https://aviationweek.com/defense/missile-defense-weapons/raytheon-protests-hypersonic-interceptor-program-defeat.

[26] WALKER J D. Missile defense, hypersonics and high-energy lasers versus drones[EB/OL]. (2024-12-01). https://aerospaceamerica.aiaa.org/year-in-review/missile-defense-hypersonics-and-high-energy-lasers-versus-drones/.