

美国高超声速技术飞行试验平台发展展望



谭思场,曾宏刚,廖孟豪,田傲

中国航空研究院,北京 100029

摘要:本文基于美国在研高超声速技术研究项目,分析了未来5年美国开展高超声速技术飞行试验的需求,梳理总结了当前美国高超声速飞行试验平台的发展现状以及所面临的挑战,并对飞行试验平台的发展方向进行了研判。分析认为,未来5年美国在高超声速技术领域将面临巨大的飞行试验需求,开展飞行试验主要依靠空基发射平台或地基发射平台,地基发射平台主要发展探空火箭,空基发射平台则采用成熟飞机改装和新研专用载机平台相结合的发展思路,全面提升高超声速技术飞行试验能力。

关键词:高超声速;飞行试验;空基发射;载机;探空火箭

中图分类号:V217+.3

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.11.007

20世纪50年代起,美国通过开展X系列验证机飞行试验,极大地推动了飞行器新概念、新技术、新布局的创新发展,为美国持续保持航空航天技术的领先地位做出了重要贡献。近年来,美国大力发展高超声速技术,相继启动了多个高超声速技术研究项目。在并行发展数量众多的高超声速项目背景下,未来5年美国将面临巨大的飞行试验需求。为了快速提升飞行试验能力,美国采取了空基发射与地基发射相结合的发展思路,以空基发射平台为发展重点,加快研制各类飞行试验平台。本文将基于以上背景,梳理当前美国高超声速飞行试验平台的发展现状,从空基发射平台和地基发射平台两方面对美国高超声速技术飞行试验平台的发展方向进行研判。

1 未来5年美国高超声速技术飞行试验需求

1.1 美国高超声速飞行器研发项目情况

随着世界主要军事强国高超声速技术快速发展,美国军方正以最高优先级大力发展高超声速装备和技术,同步开展了多个研究项目,包括高超声速导弹项目、高超声速飞机项目及关键技术验证项目,见表1^[1-3]。

1.2 美国高超声速技术飞行试验需求分析

鉴于风洞和试验台等基础设施的可用率不高,目前高

超声速技术研究项目每年只能进行少数几次试验,这极大地限制了美国高超声速技术的发展。因此,美国意图通过大量高超声速技术飞行试验提升测试能力。

高超声速技术飞行试验是在真实的飞行条件下对高超声速导弹/飞机/关键技术进行测试和验证的过程,是高超声速技术研究的重要手段之一,通过开展飞行试验能够快速验证核心技术指标,实现关键技术突破。

按照上述项目计划列装/首飞时间估计,未来5年美国高超声速技术飞行试验需求巨大,主要来自全机/全弹飞行试验和部件级飞行试验。全机飞行试验以“夸特马”高超声速飞行验证机为代表,赫尔墨斯计划在2024年前完成一型涡轮基冲压组合发动机的飞行验证和三架“夸特马”高超声速验证机的研发工作。按此计划,“夸特马”将于2024年底前完成全部飞行试验。围绕全弹飞行试验,美国军方已经有多型高超声速导弹进入试验阶段。美国国防部宣称,“计划从2020年起启动大规模高超声速飞行试验,未来4年的试验总数可能高达40次^[4]。”这一指标主要针对全弹飞行试验。除了全机/全弹飞行试验,为了推进高超声速技术快速发展,美国还将围绕推进、结构、热防护等关键技术开展大量部件级飞行试验。总体而言,未来美国在高超声速技术

收稿日期: 2023-07-14; 退修日期: 2023-09-15; 录用日期: 2023-10-10

引用格式: Tan Siyang, Zeng Honggang, Liao Menghao, et al. Development prospects of U.S. hypersonic technology flight test platform[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(11): 51-56. 谭思场, 曾宏刚, 廖孟豪, 等. 美国高超声速技术飞行试验平台发展展望[J]. 航空科学技术, 2023, 34(11): 51-56.

表1 美国高超声速技术在研项目
Table 1 The U.S. hypersonic technology research projects

类型	项目名称	拟列装/ 首飞时间	项目定位	主要技术指标
导弹 ^[1]	美国国防预研局(DARPA)“战术助推滑翔”(TBG)	—	滑翔导弹演示验证	—
	DARPA作战火力(OpFires)	—	滑翔导弹演示验证	—
	DARPA“高超声速吸气式武器概念”(HAWC)	—	巡航导弹演示验证	—
	美国空军“空射快速响应武器”(ARRW)	2023年	空射型助推滑翔导弹型号	Ma 9、1000~2000km
	美国海军“中程常规快速打击”(IRCPS)	2028年	潜射型助推滑翔导弹型号	Ma 8、3000~4000km
	美国陆军“远程高超声速武器”(LRHW)	2023年	陆射型助推滑翔导弹型号	Ma 12、3000~4000km
	美国空军“高超声速打击巡航导弹”(HACM)	2027年	空射型巡航导弹型号	Ma 5~6、600~1000km
飞机	美国空军“夸特马”高超声速飞行验证机 ^[2]	2024年	TBCC技术飞行演示验证,执行情报任务或作总统专机	Ma 5
关键技术验证 ^[3]	美国空军“高速作战系统支撑技术”(ETOHS)	2024年 (项目结束)	总体、气动、推进、结构、试验、建模与仿真等关键技术的识别、研发、成熟和验证	Ma 3~6
	美国空军“一次性高超声速多任务情报监视与打击”(Mayhem)	2025年	设计和制造具备情报监视和打击能力的验证机	—

领域面临着巨大的飞行试验需求。

2 美国高超声速技术飞行试验平台现状与挑战

2.1 美国高超声速技术飞行试验平台发展现状

为了应对巨大的飞行试验需求,美国通过空基发射和地基发射两种方式开展高超声速技术飞行试验,空基发射方式通过载机平台空射高超声速飞行器,地基发射方式依靠探空火箭搭载高超声速试验载荷。

空基发射载机平台主要是基于B-52大型轰炸机改进的载机。20世纪50年代起,美国研制X系列技术验证机,在飞行试验过程中,美国空军和美国国家航空航天局(NASA)主要采用B-52作为空基发射平台,挂载X-15验证机开展飞行试验,完成了多项高超声速理论和技术研究工作;挂载X-43A验证机,成功验证了超燃冲压吸气式高超声速推进技术;挂载X-51A“乘波者”验证机,分离后成功

完成Ma 5速度下飞行,见表2。X系列验证机飞行试验取得了巨大的成功,极大地推动了新概念、新技术、新布局的创新发展。近年来,美国空军还利用B-52开展空射型高超声速导弹飞行试验。

地基发射平台主要是探空火箭。探空火箭是一种小型、低成本测试工具,飞行高度为40~300km,通过搭载有效载荷对新材料、新技术、仪器设备开展验证性试验,具有结构简单、研制周期短的优点,能够弥补地面测试和全系统飞行测试之间的空白^[5]。2021—2022年,美陆军和海军先后两次发射了4枚探空火箭,测试与高超声速导弹相关的多项技术,包括通信、导航设备以及耐高温先进材料等;NASA也通过发射探空火箭成功完成了高超声速边界层转捩基础研究项目的飞行试验,获取高超声速飞行器表面气流从层流过渡到湍流状态的过程数据。

2.2 美国高超声速技术飞行试验平台面临的挑战

过去,美国平均两年至两年半开展一次主要的高超声

表2 基于空基发射平台开展飞行试验
Table 2 Flight tests based on air-based launch platform

时间	载机平台	试验机	载荷尺寸	载荷重量/kg	飞行试验取得成果	飞行试验次数
20世纪50年代	B-29/B-50	X-7	长度9.98m 翼展3.66m	3600	测试超燃冲压发动机和导弹制导技术	130次
20世纪60年代	B-52	X-15	长度15.45m 翼展6.8m	15420	研究有人驾驶或无人驾驶飞机以速度Ma 4~6.7在高度20~80km的飞行所出现的问题	199次
20世纪70年代	B-52	X-24	长度7.47m 翼展3.51m	4853	测试升力体布局,进行无动力滑翔再入大气层试验	X-24A(28次) X-24B(36次)
2000—2004年	B-52	X-43	长度3.7m 翼展1.5m	1360	验证超燃冲压吸气式推进技术,速度达到Ma 9.6	3次
2010—2013年	B-52	X-51	长度7.62m	1814	开展超燃冲压发动机飞行试验,以速度Ma 5飞行	4次

速飞行试验,为了加快高超声速技术成熟,2019年起美国国防部计划将高超声速项目的测试频率提高到平均一个月一次^[4],而当前飞行试验平台的数量 and 能力是无法满足测试需求的。地基发射平台方面,基于探空火箭的高超声速飞行试验主要围绕部件开展测试,提供材料和系统在真实高超声速环境中的性能数据,无法支撑全机/全弹飞行试验。探空火箭发射前的准备时间较长,且飞行剖面单一,试验场景有限,无法满足多样化的飞行试验需求。空基发射平台方面,虽然能够支持全机/全弹飞行试验,但美国现有的可用于实施飞行试验的B-52改装载机数量较少,不足以支撑后续开展大量全机/全弹飞行试验。

3 美国高超声速技术飞行试验平台发展展望

围绕高超声速技术飞行试验,美国仍将采用地基平台与空基平台相结合的解决方案,并将重点放在发展空基飞行试验平台上。

3.1 空基高超声速技术飞行试验平台

在空基平台方面,美国主要采用成熟飞机改装和新研专用载机平台相结合的发展思路。一方面,通过对成熟飞机进行改装,快速低成本地扩充载机数量规模;另一方面,通过新研大型通用载机平台解决载机平台能力不足的问题。

(1) 研制大型双机身载机平台,满足大尺寸飞行器整机飞行试验的需求

大型双机身载机平台主要指采用双机身布局、挂载重量和空间更大、专门用于投放大型试验飞行器的载机平台。双机身载机平台具有较大的性能优势,空射载荷挂载于中央机翼下方,能够提供良好的几何相容性和气动特性,载荷能力强。美国平流层发射系统公司的“大鹏”双机身载机作为高超声速飞行试验载机平台,至今已成功进行了4次滑翔测试和11次飞行测试,技术成熟度不断提高^[6]。在2023年5月的测试中,“大鹏”挂载“泰伦-A”(Talon-A)高超声速试验飞行器成功完成了首次分离飞行试验,如图1所示,意味着“大鹏”载机具备了投放高超声速飞行器的能力。

“大鹏”载机最大起飞重量590t,最大挂载重量230t,适合挂载大型高超声速飞行器,前期挂载“泰伦-A”高超声速试验飞行器,后期将挂载“泰伦-Z”大型高超声速试验飞行器,后续可能挂载航天飞机或多架“泰伦”系列飞行器。“泰伦”系列飞行器定位为可重复使用高超声速试验飞行器,由液体火箭发动机推进,采用空基发射、无动力水平着陆的起降方式,携带有效载荷开展高超声速飞行试验,其性能指标



图1 “大鹏”载机成功完成“泰伦-A”高超声速试验飞行器的分离投放

Fig.1 Carrier “ROC” successfully completed the separation and delivery of the hypersonic test vehicle “Talon-A”

见表3^[7]。

表3 “泰伦”系列高超声速试验飞行器性能指标

Table 3 Performance Index of Talon-Z and Talon-A

性能指标	泰伦-Z	泰伦-A
机长/m	25.5	8.6
翼展/m	9.9	3.5
起飞总质量/t	29.5	2.7
最大飞行速度 Ma	10+	6+

“泰伦-Z”高超声速试验飞行器的典型飞行剖面是:首先,在 Ma 0.63、高度9km处与载机分离,发动机点火69s后达到速度 Ma 7.1、高度27.7km;其次,进入水平加速状态,在发动机点火103s后关机,达到最大速度 Ma 11,进入无动力滑翔状态;最后,在从载机分离约300s后,于跑道上水平着陆^[7]。

(2) 基于中大型现役飞机进行改装,解决中等尺寸高超飞行器飞行试验平台数量规模的问题

在美国众多空基发射项目中,绝大多数采用了基于现有飞机平台进行改装的模式,改装后执行空基发射任务,成本相对较低,研发难度较小。美国空军“空射快速响应武器”项目利用改装的B-52轰炸机在机翼下挂载AGM-183A高超声速滑翔导弹,如图2所示,在2021—2022年期间开展了5次飞行试验,在第4次试验中机弹成功分离,在第5次试验中助推器成功点火。美国诺格公司利用L-1011“三星”(TriStar)飞机作为载机,在机腹挂载空射载荷,2022年5月首次开展了高超声速飞行试验,如图3所示。

作为常规构型飞机,B-52和L-1011“三星”主要在机翼下或机腹部设置挂点挂载高超声速飞行器。参考二者曾开



图2 B-52H挂载AGM-183A导弹并完成投放
Fig.2 AGM-183A is mounted and dropped by B-52H



图3 L-1011“三星”挂载高超声速导弹开展飞行试验
Fig.3 L-1011 Tristar mounted hypersonic missile to carry out flight tests

表4 B-52和L-1011“三星”挂载能力

Table 4 Load capability of B-52 and L-1011 Tristar

参数	B-52	L-1011-500
最大起飞质量/t	220	230
挂载位置	翼下挂点 (翼根侧)	机腹部
最大单点挂载质量/t	21	24
载荷尺寸	长度 15m 翼展 6.8m 高度 4m (参考 X-15)	高度 17.6m 直径 1.27m (参考 飞马座 XL)

展过的飞行试验的情况,推算B-52和L-1011“三星”的挂载能力见表4。从挂载能力看,二者设计构型不适合挂载单个大型载荷,因此主要作为中等尺寸高超声速飞行器的空基发射平台。

(3) 研制中小型专用飞行试验平台,用以满足大规模的部件级飞行试验需求

专用飞行试验平台主要是指面向特定技术领域飞行验

证需求、又无法依托成熟飞机而必须专门研发的试验平台,通常服务于某领域内多项技术的逐项验证或集成验证。2016年,美空军提出高频次使用的低成本高超声速飞行试验平台(HyRAX)项目,计划研制一型可重复使用的高超声速飞行试验平台(X-60A)。该计划表明美国期望通过增加高超声速飞行试验的频率,一方面大规模成体系地完成高超声速气动、推进、结构、热防护、系统等单项技术验证,另一方面降低飞行试验成本。该项目原计划研制3架飞行试验平台,并于2020年底首飞,推测由于技术难度大,目前只完成了地面测试,里程碑节点推迟。2022年9月,美国防部发布高超声速快节奏机载试验能力(HyCAT)项目通知,期望依托商用高超声速飞行器技术,开发一型新的高超声速飞行试验平台,并提出计划两年内试飞。HyCAT项目并未像HyRAX项目一样强调低成本,“依托商用技术”和“两年内试飞”意味着美国防部研制专用飞行试验平台的需求极为迫切。

从HyCAT项目发布的技术要求来看,这种专用飞行试验平台如果研制成功,其飞行速度将能达到 Ma 5以上,具有机动和非弹道飞行剖面,能够对高超声速系统及组件进行响应性和长寿命试验,能够在高超声速试验环境中飞行3min以上,动压达到143kPa以上,有效载荷能力在9kg以上。

3.2 地基高超声速技术飞行试验平台

地基平台方面,美国将继续探索利用探空火箭搭载高超声速有效载荷开展飞行试验的技术路线。

2022年10月,NASA沃洛普斯航天飞行发射场内,桑迪亚国家实验室发射了一枚精密探空火箭,火箭携带了高超声速试验用有效载荷。本次测试获取的高超声速飞行数据将用于支持美国海军常规快速打击(CPS)项目、陆军远程高超声速武器(LRHW)项目或其他高超声速项目。后续还将第二次发射探空火箭,针对更多的技术开展高超声速试验。

此前,美国海军向动力系统公司(Dynetics)授出多军种先进高超声速试验台(MACH-TB)项目合同,该项目意图通过强键、敏捷和模块化试验技术开发一种经济可承受的试验台原型,该试验台将提供一型模块化的实验型高超声速滑翔体(EGB),利用商用火箭运载高超声速有效载荷推动高超声速导弹系统的发展^[8-9]。

根据有限的信息推测,美国计划通过MACH-TB项目开发试验型高超声速滑翔体,EGB作为陆海军CPS/LRHW项目中常规高超声速滑翔体(C-HGB)的过渡,可能体积更小、重量更轻;后续利用探空火箭对EGB开展经常性测试,

提高测试效率,降低测试成本,收集测试数据。

4 结论

(1) 美国通过开展高超声速飞行试验极大地推动了高超声速技术的研究进程

先进的飞行试验能力是美国快速发展和成熟先进航空技术的保障。半个多世纪以来,美国开展了多项X系列飞行试验机项目,突破和掌握了超声速、高超声速、电传飞控、隐身等跨代航空技术,催生了F-86、F-15、F-117等尖端航空装备,为美国牢牢占据全球空中作战优势做出了不可替代的贡献。20世纪60年代成功实施的X-15试验机项目,利用三架X-15飞机开展了199架次的飞行试验,几乎涉及了高超声速研究的所有领域,完成高空高速条件下的气动、材料、结构、飞行控制、飞行员生理等飞行试验研究,为后来的“水星”“双子星”“阿波罗”太空飞行计划和航天飞机的发展积累了极其珍贵的试验数据。

(2) 美国当前依然非常重视高超声速飞行试验,并正在加快研制各类飞行试验平台

2015—2024年期间,美国将投入150亿美元支持高超声速技术发展,在这场热潮中,剧增的飞行试验需求和稀缺的飞行试验资源之间形成了突出的矛盾。飞行靶场有限、飞行试验平台不足、飞行试验支持能力缺乏等直接影响了高超声速技术飞行试验的开展。2022年6月,美国国会在《2023财年国防授权法案》中提出“国家高超声速倡议”条款,要求国防部开展高超声速试验基础设施评估^[10],提升高超声速技术试验能力,高超声速飞行试验能力就是其中重要的一环。为了快速提升飞行试验能力,美国制定了一系列举措,包括高度关注“大鹏”载机的研制进展,由美国空军研究实验室授出合同支持“泰伦-A”高超声速试验飞行器开展飞行试验,国防部提出HyCAT计划、美国海军授出MACH-TB项目合同研制专用高超声速飞行试验平台等。从一系列行动来看,美国开展高超声速飞行试验的需求极为迫切,对研制飞行试验平台的支持力度极大。

(3) 我国应统筹规划,全面布局,加速高超声速技术发展

进入2022年以来,美国国防部预先研究计划局(DARPA)高超声速吸气式武器概念(HAWC)项目、NASA兰利研究中心边界层转捩与湍流(BOLT II)项目相继成功完成飞行试验,如图4所示,赫尔墨斯公司开展了“夸特马”高超声速飞机缩比模型风洞试验,如图5所示,“大鹏”双机身载机成功完成与“泰伦-A”高超声速飞行器的分离投放。美国高

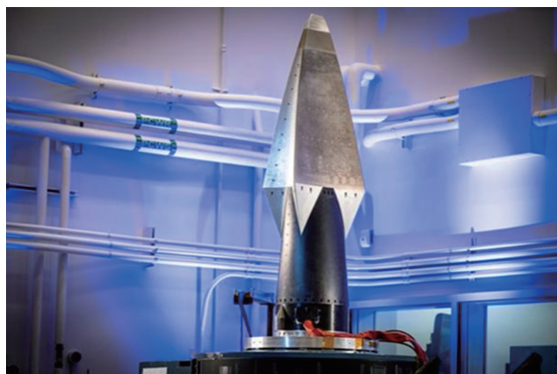


图4 BOLT飞行试验中利用探空火箭携带楔形试验载荷

Fig.4 Wedge test payload carried by the sounding rocket in BOLT project



图5 “夸特马”1/10缩比模型风洞试验

Fig.5 1/10 scaled-model wind tunnel test of “Quarterhorse”

超声速飞行试验能力的提升,将极大地加速武器装备发展进程。在此形势下,我国应未雨绸缪,统筹规划,全面布局,以谋求高超声速技术的快速发展。

AST

参考文献

- [1] 廖孟豪.美国高超声速导弹发展现状与前景分析[J].飞航导弹,2021(6):24-27+32.
Liao Menghao. Development status and prospect analysis of American hypersonic missile[J]. Flying Missile, 2021(6): 24-27+32. (in Chinese)
- [2] Hermuse goes full throttle at unveil of Quarterhorse prototype [EB/OL].(2021-11-09). <https://www.hermes.com/>.
- [3] Steve T. Hypersonic mayhem linked to multi-cycle air-breathing engine[EB/OL]. (2020-08-20). <https://www.thedrive.com/>.
- [4] 胡冬冬,祝贺.未来几年美国高超声速飞行试验计划及实施举措[J].战术导弹技术,2020(6): 87-90+126.
Hu Dongdong, Zhu He. Hypersonic flight test program and

- implementation measures of the United States in the next few years[J]. *Tactical Missile Technology*, 2020(6): 87-90+126. (in Chinese)
- [5] 姜秀杰, 刘波, 于世强, 等. 探空火箭的发展现状及趋势[J]. *科技导报*, 2009, 27(23):101-110.
- Jiang Xiujie, Liu Bo, Yu Shiqiang, et al. Development status and trend of sounding rocket[J]. *Science and Technology Review*, 2009, 27(23):101-110. (in Chinese)
- [6] 谭思场, 廖孟豪. 美国“洛克”巨型双机身载机发展动向[J]. *国际航空*, 2022(7):39-41.
- Tan Siyang, Liao Menghao. New mission for the U. S. ROC twin-fuselage carrier[J]. *International Aviation*, 2022(7):39-41. (in Chinese)
- [7] 朱长军, 廖孟豪. 泰伦-A/Z高超声速飞行试验平台项目发展动因及前景分析[J]. *飞航导弹*, 2018(12):25-28.
- Zhu Changjun, Liao Menghao. Development motivation and prospect analysis of Talon-A/Z hypersonic flight test platform project[J]. *Flying Missile*, 2018(12):25-28. (in Chinese)
- [8] Dynetics reveals launch providers for MACH-TB hypersonic flights[EB/OL].(2022-10-21). <https://www.aviationweek.com>.
- [9] New glide body in development for hypersonic testbed[EB/OL].(2022-10-07).<https://www.aviationweek.com>.
- [10] House Armed Services Committee. Summary of the fiscal year 2023 national defense authorization act[Z]. House Armed Services Committee, 2022.

Development Prospects of U.S. Hypersonic Technology Flight Test Platform

Tan Siyang, Zeng Honggang, Liao Menghao, Tian Ao

Chinese Aeronautical Establishment, Beijing 100029, China

Abstract: Based on U. S. hypersonic research projects under development, this paper analyzes the demand for hypersonic technology flight tests for the U. S. in the next five years, summarizes the development status and challenges of the current hypersonic flight test platform, and researches and judges the development direction of hypersonic flight test platform. According to the analysis, the U.S. will face a huge demand for flight tests in the field of hypersonic technology in the next five years. Flight tests will mainly rely on air-based launch platform or ground-based launch platform. The United States will focus on the development of air-based launch platforms, and adopt the routine of combining mature aircraft modification with newly developed special-purpose aircraft platforms to comprehensively improve the flight test capabilities of hypersonic technology.

Key Words: hypersonic speed; flight test; air-based launch; carrier aircraft; sounding rocket