

国外高超声速飞机发展分析

潘锐,赵群力

中国航空工业发展研究中心, 北京 100029



摘要:高超声速飞机突破现有飞机的速度与高度包线,具有可重复使用、宽速域飞行的技术优势,是未来飞行器技术发展的重大方向之一。国外正加快高超声速导弹向飞机平台的技术转化,已设立多个高超声速飞机研究项目,研究进展较快。本文总结了国外高超声速飞机的研发历程与研究项目整体情况,梳理了在研重点型号的概念方案和研究进展,分析了国外高超声速飞机的主要发展趋势。研究认为,面对国外高超声速飞机加速研制的态势,我国应加强对动力等关键技术的攻关,提高试验能力,为高超领域的科技竞争奠定基础。

关键词:高超声速飞机;发展历程;概念方案;发展趋势

中图分类号:V221

文献标识码:A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2023.11.001

速度与高度是航空技术追求的永恒主题。高超声速飞机通常是指采用吸气式动力、可在临近空间以马赫数5以上的速度进行长时间巡航飞行、具备水平起降能力、可重复使用的航空飞行器^[1]。作为航空与航天领域的交汇点,高超声速飞机相较于常规作战飞机,具有显著的速度与高度优势,因而可显著提升对现有防空系统的突防概率,大幅压缩从发现到摧毁目标的时间周期,可实现对时敏目标的快速响应,具有巨大的军事应用潜力,是未来大国之间非接触对抗与空天对抗的战略支点^[2]。世界范围内多个国家已针对高超声速飞机开展概念设计、关键技术研究 and 验证机研制等工作。

本文将简述美国高超声速飞机的研究历程,总结已开展的高超声速飞机研究项目的发展情况。针对当前典型型号,梳理最新发展现状,重点分析概念方案的演进及变化原因,对其发展前景和挑战进行分析判断。根据项目发展现状,总结高超声速飞机的三个主要目标图像,并就我国高超声速飞机技术发展提出启示建议。

1 国外高超声速飞机发展概况

1.1 国外高超声速飞机发展历程

高超声速飞机概念可追溯到钱学森先生在1946年发表的《高超声速流动相似性定律》一文^[3]。近70年来,人类从未停止过对高超声速飞机的探索,其发展历程可大致分

为三个阶段。

(1) 技术探索阶段

1950—1980年为技术探索阶段。这期间,欧美、苏联等航空强国针对水平起降高速飞机关键技术开展了大规模研究,提出了诸如涡轮基组合循环(TBCC)发动机、乘波体、热结构等关键技术概念,高超声速理论水平不断得到提升。在此阶段,美国多次完成X-15高超声速技术试验机的飞行试验,最大速度达到马赫数6以上,获取了丰富的高超声速飞行数据。

(2) 试验尝试阶段

1980—2000年为试验尝试阶段。在SR-71、米格-25等马赫数3系列的超声速飞机服役后,美、欧相继启动国家空天飞机(NASP)、“霍托尔”空天飞机、“桑格尔”空天飞机等计划,准备研制可入轨的空天飞机。由于理念超前且技术成熟度不足,这些空天飞机计划均宣告失败。但各国为此开展了大量计算流体力学、高速风洞试验、热材料、热管理等方面的研究,加深了对高超声速飞机设计的认识。

(3) 技术突破与能力转化阶段

2000年一至今为技术突破与能力转化阶段。这期间,美国审视并重新制定了高超声速飞行器发展路线图,设立了一系列的高超声速总体、气动、结构、动力等领域的研究项目,并通过X-43、X-51验证了氢燃料和碳氢燃料超燃发动机技术的可行性。欧洲各国在广泛开展高超声速飞机概

收稿日期: 2023-07-06; 退修日期: 2023-09-07; 录用日期: 2023-10-09

引用格式: Pan Rui, Zhao Qunli. Analysis on the development of hypersonic aircraft abroad[J]. Aeronautical Science & Technology, 2023, 34(11): 2-7. 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.

念研究的基础上,针对动力和结构开展了深入研究^[4]。

近年来,世界范围内高超声速飞机发展明显提速,动力技术取得重大突破。在官方机构的支持下,美国洛马、波音、赫尔墨斯公司,英国罗罗公司和反作用发动机公司相继提出了多项高超声速飞机整机研制计划。高超声速飞机正进入集成验证和整机研制的新阶段^[5-6]。

1.2 国外典型高超声速飞机项目

按照不同项目背景,国外高超声速飞机项目可分为已完成的概念研究项目和正在进行的型号研制计划。

2010年前后,美欧完成了一系列高超声速飞机概念探索研究,为高超声速飞机构型设计和多学科优化提供了广泛的思路^[7]。主要的高超声速飞机概念研究项目见表1。

表1 国外高超声速飞机概念研究项目

Table 1 Foreign hypersonic aircraft concept research projects

项目	年份	速度指标	主要任务
美国 HTV-3X 黑雨燕	2002—2008	Ma 6	探索 TBCC 组合动力系统和热结构技术
美国 Manta 2025	2007—2009	Ma 7	探索高超声速飞机布局 and 动力模式转换
欧洲 LAPCAT-A2	2005—2013	Ma 5	探索 300 座高超声速民机
欧洲 LAPCAT-MR1	2005—2013	Ma 8	探索 300 座高超声速民机
欧洲 StratoFly-MR3	2018—2020	Ma 8	探索 300 座高超声速民机

近年来,随着高超声速动力技术的逐渐成熟,美国率先提出了高超声速整机研制计划,投入最大,进展较快,处于领先位势,并重视建立高超声速飞行试验能力,加速高超声速技术向飞机设计的转化。英国紧随其后,成为第二个官方宣布军用高超声速飞机研制计划的国家。高超声速飞机主要在研项目见表2。

2 典型项目研究最新进展

2.1 美国波音“女武神”

继2018年首次展出“女武神”高超声速飞机模型后,波音公司在2022年公布了其演进迭代的新版高超声速飞机方案,如图1所示^[8]。

2022年展示的新方案在总体参数上仍与2018年保持一致,最大速度为 Ma 5,将采用无人驾驶,航程约为 5500km,最大起飞重量(质量)和有效载荷分别为 80t 和 2.3t 左右。在方案布局上,新方案沿用了三角翼、局部乘波体布局、双发 TBCC 左右并联的布置方式。与2018年的模型相

表2 国外高超声速飞机在研项目

Table 2 Foreign hypersonic aircraft under research

项目	速度指标	发展愿景	当前状态
美国洛马 SR-72	Ma 6	情监侦打一体军用飞机	投资受限,已推迟研制计划
美国波音“女武神”	Ma 5	情监侦打一体军用飞机和民用飞机	公布两款概念方案,持续迭代
美国赫尔墨斯“夸特马”	Ma 4-5	无人高超声速技术验证机	完成 TBCC 地面测试和缩比模型超声速风洞测试
美国维纳斯“观星者”	Ma 9	高超声速公务机	成功试验旋转爆震发动机原型机
美国莱多斯“混乱”	Ma 5 以上	可消耗、情监侦打一体高超声速飞行器	正采用数字工程启动概念设计
美国 DIU “飞镖 AE”	Ma 5-7	高频次、低成本高超声速试验平台	正与澳大利亚合作开展研究
美国平流层发射系统公司“鹰爪-A”	Ma 6	高频次、低成本高超声速飞行试验平台	完成载机分离试验
英国“5号方案”	Ma 5	高超声速技术验证机	公布布局和动力系统概念



(a) 2018年

(b) 2022年

图1 波音“女武神”高超声速飞机概念演进

Fig.1 Conceptual evolution of Boeing “Valkyrie” hypersonic aircraft

比,新方案将尖机头改钝;取消高脊背机身设计,改为更加扁平的中段机身;机翼和双尾翼更短,机身侧部外模线与机翼根部增加阶梯设计;机身下方的两个发动机由机身中心下方并排排列改为分开放置在两个单独的整流罩中,分离式的圆形进气口贯穿整个机身长度。

波音“女武神”脱胎于 Manta 2025 计划,连续展出表明了波音公司正基于丰富的高超声速技术积累,综合评估宽速域和热结构防护等要求,持续开展高超声速飞机总体方案的迭代优化,以期在未来军民用高超声速飞机领域中抢占先机。

2.2 美国赫尔墨斯“夸特马”

“夸特马”是由美国初创公司赫尔墨斯在美国空军资助下研制的一款高马赫数小型无人技术验证机。

2022年,赫尔墨斯“奇美拉”TBCC 发动机取得重大突破,6月完成发动机全部地面静态试验,实现地面全油门运行,最大速度可至 Ma 5。11月,在来流高温高压的模拟飞

行测试中,“奇美拉”TBCC发动机成功实现由涡轮发动机向亚燃冲压发动机的模态转换,如图2所示^[9]。这标志着赫尔墨斯已基本掌握TBCC发动机关键技术,具备研制“夸特马”验证机的动力基础。

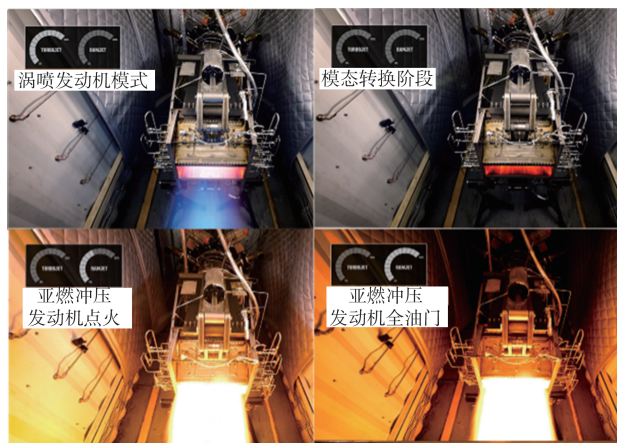


图2 “奇美拉”模拟飞行试验模态转换过程

Fig.2 Mode transition process of “Chimera” simulation flight test

2023年2月,赫尔墨斯正式将“夸特马”验证机速度指标由原先最高 Ma 5下调至 Ma 4,并公布了经过大量计算优化后的新型总体布局方案,完成了验证机缩比模型 Ma 0.3~1.3的风洞测试,同时研究亚声速和跨声速飞行中气流对“夸特马”控制面和起落架的影响^[10]。

速度指标调整的原因主要是“奇美拉”发动机最高只能在 Ma 4环境中运行,尚未解决如何在 Ma 5下的高温来流环境保持稳定燃烧的难题。这意味着“夸特马”验证机已由高超声速(Hypersonic)飞行器下调至高马赫数(High-Mach)飞行器范畴,但也标志着赫尔墨斯正基于现有动力系统水平,加快推进高马赫数验证机的首飞试验。

相较于2021年展示模型,2023年方案最大的改变在于将与发动机进气道高度融合的“凹形”机头改为了乘波体形式的“锥形”机头,如图3所示。新“夸特马”验证机模型与当前主流局部乘波体(如SR-72)常规布局趋同,沿用大长细比机体,在大后掠的双三角翼上设置副翼,发动机尾喷管附近除原先的单垂尾外增加了两个五边形平尾,进气方式由机头改为机腹,并增加了起落架。

尽管赫尔墨斯将“夸特马”首飞时间由2023年底推迟至2024年,并提出首飞速度可能是亚声速,但“夸特马”仍然是目前成熟度最高、最有可能率先完成高超声速飞行测试的研发项目之一,其距离完成一架高马赫数验证机仍需解决飞控、导航、结构、制造等一系列问题,高超声速整机飞行验证短期内可能无法实现。



(a) 2021年 (b) 2023年

图3 “夸特马”概念演进

Fig.3 Evolution of the concept of “Quarterhorse”

2.3 美国国防创新单元“飞镖AE”

根据美国政府问责局公布的信息,2015—2024财年,美国国防部并行开展了70余个高超声速项目,现阶段的试验能力无法满足剧增的试验需求。美国国防创新单元(DIU)在2022年9月发布高超声速与高节奏机载试验能力(HyCAT)项目通知,旨在引入商业研发力量,开发低成本、高频次的高超声速飞行试验平台,加速高超声速导弹向飞机技术的转化^[11]。

2023年3月,DIU宣布选择澳大利亚高超声速发射系统公司研发的“飞镖AE”飞行器,为其HyCAT计划新型高超声速飞行试验平台。“飞镖AE”飞行器如图4所示。



图4 “飞镖AE”概念方案

Fig.4 Concept scheme of “Dart AE”

根据概念方案,“飞镖AE”是一款小型高超声速试验飞行器,采用超燃冲压发动机,最大飞行速度超过 Ma 7;采用大长细比机身,机长2.84m,翼展长约0.9m;机身使用增材制造(3D)打印的高温合金材料制造,重量约为300kg;动力系统使用自行研发的“斯巴达”氢燃料超燃冲压发动机;巡航速度将维持在 Ma 5~7范围内,最大速度可超过 Ma 7,飞行时间可达400s,航程约为1000km。根据HyCAT项目要求,“飞镖AE”将具备9kg的模块化有效载荷舱,具备外部

挂载和内部集成的安装选项,可近实时收集和加密传输试验参数,预计2024年进行首飞,首飞12~18个月后开展对平台、组件、传感器、通信系统和控制系统的试验活动。

“飞镖AE”的研制,一方面,表现出美国正从多方面努力,着力提高高超声速飞行试验能力;另一方面,联合盟友开展研究工作,表明美国拟通过国际合作增强技术研发能力。

2.4 美国平流层发射系统公司“鹰爪-A”

如图5所示,“鹰爪-A”是平流层发射系统公司设计的一款由双载体机空中发射、以火箭为动力的高超声速试验飞行器,是目前唯一完成样机制造和空中分离试验的高超声速试验飞行器。2023年5月,“鹰爪-A”飞行器首次完成分离试验,按计划在2023年夏末开展首次“鹰爪-A”飞行器的动力飞行试验^[12]。

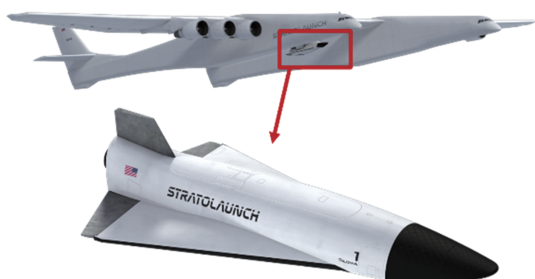


图5 “鹰爪-A”高超声速飞行器与“大鹏”载机
Fig.5 “Talon-A” hypersonic aircraft and “Roc” aircraft

“鹰爪-A”高超声速试验飞行器与X-37B轨道飞行器较为相似,采用下单三角翼布局,机身长8.5m、翼展长4.3m、发射质量约为3.2t,设计最大飞行速度为 Ma 6。“鹰爪-A”飞行器通过试验证明了多项重要能力:(1)迅速、安全地与载机挂架分离;(2)数据收集系统按预期运行;(3)飞行器与范登堡基地地面设施维持遥测通信,可支撑未来高超飞行测试过程中的数据实时备份。预计,“大鹏”载机和“鹰爪-A”可为美军提供高效、低成本的高超声速试验手段,加强其高超声速技术研发能力。

2.5 英国“5号方案”

2022年7月,英国公布了高超声速航空器试验(HVX)项目,并在范堡罗航展上首次公布了“5号方案”军用高超声速验证机模型及其概念方案,如图6所示^[13]。HVX项目旨在加速新型吸气式高马赫数发动机架构设计、发动机与飞机集成设计、高超声速飞机作战概念开发、飞机方案设计等关键技术的研究进度,实现高超声速飞行器可重复使用和降低研发成本。这标志着英国成为继美国之后,第二个官

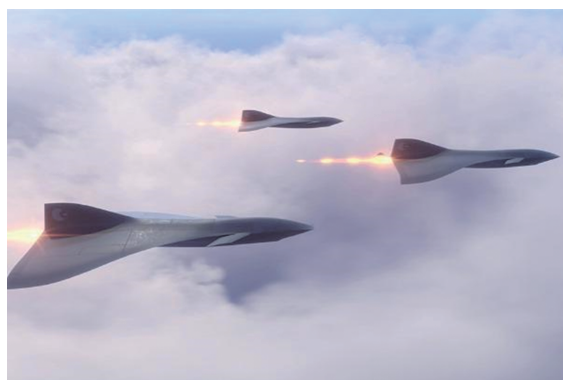


图6 “5号方案”概念图
Fig.6 “Concept V” design

方宣布开展军用高超声速飞机研制计划的国家。

根据模型和概念设想图,“5号方案”采用了鸭式、单垂尾、翼身高度融合的总体布局;宽大的三角翼前缘呈S形,采用鸥翼设计,翼梢带有下反角,以加强高马赫数时的乘波效应;机头进气方式采用二维进气道设计。“5号方案”验证机长约9m,翼展长约4m,起飞总重为4~6t量级,将采用单台串联式TBCC发动机,依靠加装预冷却器的涡轮发动机水平起飞并加速至 Ma 3左右,完成模态转换后,冲压发动机将飞机推进至 Ma 5及以上。

英国推动HVX项目及“5号方案”高超飞机验证机研究表明,英国正从国家层面推动高超声速技术发展,加速技术成熟,使英国成为可重复使用的吸气式高超声速系统的领先者。

3 国外高超声速飞机发展趋势

通过跟踪现有国外高超声速飞机的发展情况,发现总体需求以军用需求为主,主要用于满足情报、监视、侦察、打击一体高超声速飞机的发展愿景和日益增加的高超声速试验平台建设需求;部分考虑了民用商业需求,构想了未来高超声速远程运输和空天飞行的场景。国外军用超声速飞机的发展目标主要分为以下三类。

(1) 高超声速试验飞行器

高超声速试验飞行器用于快速实现高超声速飞行试验,测试总体布局或机载系统等技术,并收集数据,加快推动高超声速技术成熟,预计从2024年投入使用。此类飞行器主要设计特点为:采用灵活的发射形式,包括空中载机分离发射或地面火箭发射,以快速达到 Ma 5以上;采用灵活的动力系统,使用火箭发动机或超燃冲压发动机;携带数据记录和传输系统,可实时传输和备份高超声速试验数据;尺

寸大小根据研究目的灵活设计。

(2) 高超声速技术验证机

高超声速技术验证机用于测试TBCC发动机性能、总体布局、水平起降和可重复使用能力,预计在2024年开始飞行测试,但短时间内无法达到高超声速。此类飞行器主要设计特点为:采用水平起降方式;采用TBCC发动机,串联式为主,采用预冷器拓展涡轮发动机工作包线;机长在10m左右,重量在5t左右;速度在 Ma 4~5区间内,重点验证高马赫数飞行性能。

(3) 高超声速飞机

高超声速飞机未来实现情报、监视、侦察、打击一体的任务能力或开发点对点运输能力和空天运输能力,预计在2030年开始完成原型机制造并逐步开展测试。此类飞行器主要设计特点为:采用水平起降方式,可重复使用;采用TBCC发动机,并联式为主;机长在30m以上,起飞重量在80t左右,有效载荷大于2t;速度在 Ma 5~6区间内,航程在5500km左右。无人驾驶为主,可选有人驾驶,携带情、监、侦载荷或武器系统,按需执行任务。

4 启示与建议

在综合考虑国外高超声速飞机发展趋势和我国国情的基础上,提出以下建议。

(1) 积极谋划,警惕出现高超声速飞机代差。高超声速飞机具有突防能力强、响应速度快、灵活机动的作战优势,将成为未来大国竞争和空天对抗的重要装备。国外高超声速技术呈提速和蔓延趋势,多个国家设立高超声速武器项目,高超声速飞机项目近年来显著增加。我国应充分把握同场竞争的机遇窗口,加强作战能力论证、布局基础研究和关键技术攻关,防止出现代差。

(2) 动力先行,大力开展高超声速动力技术攻关。高超声速飞机与动力的关系非常密切。国外近年来高超声速飞机提速的背后支撑正是动力技术的突破。高超声速飞机要实现自主水平起降,TBCC发动机是主要技术路径,建议持续加强大推力高速涡轮发动机、大尺寸重复使用宽域超燃发动机、多动力模式转换等技术攻关。

(3) 系统布局,全面开展关键技术研究。高超声速技术是一项流、固、热多学科高度耦合技术,材料、热结构、能量管理、通信导航等方面仍存在巨大的挑战,需加强多学科总体优化研究,全面开展各专业内关键技术研究及多学科耦合影响研究,为未来飞行器的研制奠定基础。

(4) 重视验证,加快建设飞行试验能力。高超声速技

术的成熟需基于坚实的理论基础和足够的试验验证,而试验又是推动理论完善和验证设计方案的关键手段。高超声速风洞建设成本高,模拟高温高速来流难度大、能耗高,需加强试验技术研究。同时,要注重飞行试验能力建设,打造适应不同试验需要的试验设施体系,为高超声速飞机研制和技术攻关提供可靠的物质保障。

AST

参考文献

- [1] Liu Q, Baccarella D, Lee T. Review of combustion stabilization for hypersonic air-breathing propulsion[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2020, 119:100636.
- [2] 李宪开,王霄,柳军,等. 水平起降高超声速飞机气动布局技术研究[J]. 航空科学技术, 2020, 31(11):7-13.
Li Xiankai, Wang Xiao, Liu Jun, et al. Research on aerodynamic layout technology of hypersonic aircraft for horizontal takeoff and landing [J]. Aeronautical Science & Technology, 2020, 31(11):7-13. (in Chinese)
- [3] 刘济民,颜仙荣,张朝阳,等. 高超声速飞机气动外形概念设计[J]. 航空科学技术, 2022, 33(7):15-22.
Liu Jimin, Yan Xianrong, Zhang Chaoyang, et al. Conceptual design of aerodynamic shape of hypersonic aircraft [J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(7): 15-22. (in Chinese)
- [4] 孙聪. 高超声速飞行器强度技术的现状、挑战与发展趋势[J]. 航空学报, 2022, 43(6): 8-27.
Sun Cong. Development status, challenges and trends of strength technology for hypersonic vehicles [J]. Acta Aeronauticae Astronautica Sinica, 2022, 43(6): 8-27. (in Chinese)
- [5] Ding Yibo, Yue Xiaokui, Chen Guangshan, et al. Review of control and guidance technology on hypersonic vehicle[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2022, 35(7):1-18.
- [6] 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 aerodynamic layout design characteristics of hypersonic aircraft [J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(2):6-11. (in Chinese)
- [7] 张灿,刘都群,王俊伟. 2020年国外高超声速领域发展综述[J]. 飞航导弹, 2021(1):29-37.

- Zhang Can, Liu Duqun, Wang Junwei. Overview of the development of hypersonic field abroad in 2020 [J]. Aerodynamic Missiles, 2021(1):29-37. (in Chinese)
- [8] Joseph T. Boeing reveals new hypersonic aircraft model evolved from previous Valkyrie concept [EB/OL]. (2022-01-06). <http://www.thedrive.com/the-war-zone/43743/boeing-reveals-new-hypersonic-aircraft-concept-evolved-from-one-it-unveiled-four-years-ago>.
- [9] Hermeus Corp. Hermeus completes hypersonic milestone with engine tests [EB/OL]. (2022-11-17). <http://www.hermeus.com/blog-quarterhorse-wind-tunnel-testing>.
- [10] Hermeus Corp. Quarterhorse wind tunnel testing [EB/OL]. (2023-02-27). <http://www.hermeus.com/press-release-tbcc-milestone>.
- [11] Nina P. Australia's hypersonix selected by US defense innovation unit (DIU) for test vehicle [EB/OL]. (2023-03-16). <http://hypersonix.com/hypersonix-selected-by-us-defense-innovation-unit-diu-for-test-vehicle>.
- [12] Guy N. Stratolaunch Talon separation test paves way for hypersonic flight [EB/OL]. (2023-03-16). <http://aviationweek.com/defense-space/space/stratolaunch-talon-separation-test-paves-way-hypersonic-flight>.
- [13] Reaction Engine Corp. Delivering the future of UK hypersonic capabilities [EB/OL]. (2022-07-18). <http://reactionengines.co.uk/delivering-the-future-of-uk-hypersonic-capabilities>.

Analysis on the Development of Hypersonic Aircraft Abroad

Pan Rui, Zhao Qunli

Aviation Industry Development Research Center of China, Beijing 100029, China

Abstract: Hypersonic aircraft breaks through the speed and altitude envelope of existing aircraft, and has the technical advantages of reusable and wide-speed flight, which is one of the major directions of aircraft technology development in the future. Foreign countries are accelerating the technological transformation from hypersonic missiles to aircraft platforms, and several hypersonic aircraft research projects have been set up, which have made rapid progress. This paper summarizes development history and the overall situation of research projects of hypersonic aircraft abroad, combs the conceptual schemes and development progress of key models under research, and analyzes the main development trends and target images of hypersonic aircraft abroad. It is considered that in the face of the situation of accelerating the development of hypersonic aircraft abroad, we should press ahead, strengthen the research on key technologies such as engine, systematically arrange and improve the test ability, and lay the foundation for scientific and technological competition in the hypersonic field.

Key Words: hypersonic aircraft; development history; conceptual scheme; development trends