

2020年高超声速推进技术发展综述

Development Review of Hypersonic Propulsion Technology in 2020

■ 李茜 崔艳林 / 中国航发涡轮院

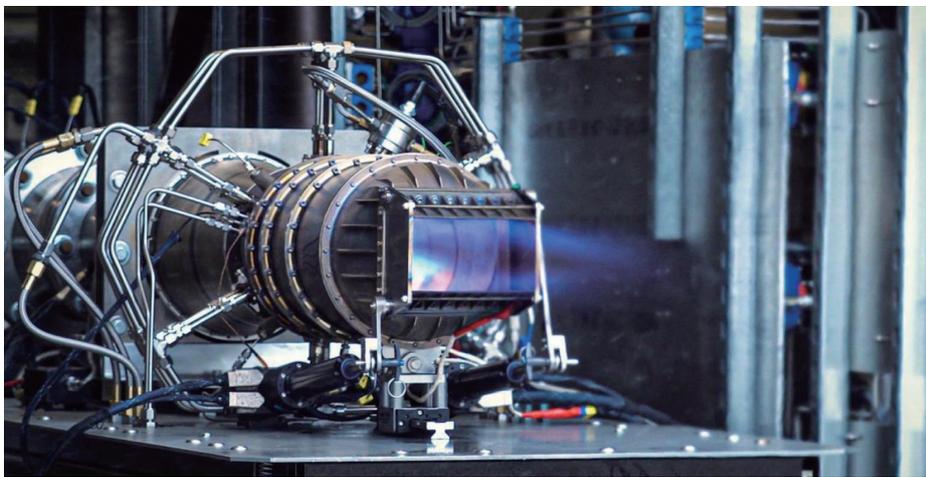
高超声速飞行是未来航空航天领域的制高点，具有重要的战略性和前瞻性。2020年，以美国、俄罗斯等为代表的世界航空强国继续深化高超声速领域，尤其是吸气式组合动力的技术研究，在包括高超声速飞机动力、高超声速导弹动力、基础研究和组织管理等几个方面进行了不懈探索。

近年来，随着科技日趋完善和快速远程运输需求的增长，传统的制约超声速民用飞机发展的因素逐渐消除，超声速和高超声速民机再次成为了全球航空领域的研究热点，以多家初创公司为代表的多个创新的涡轮基冲压组合（TBCC）技术方案浮出水面。与此同时，以美国为代表的西方航空强国在高超声速动力成果军事应用方面的投入力度也进一步加大。美国国防部公布的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（含高超声速防御）申请的科研经费预算总额高达32亿美元。其中，海军和陆军均大幅提升各自高超声速武器研制项目的经费。美国国防部在2020年成立了联合高超声速转化办公室（JHTO），希望通过国家/学术机构联合的方式填补高超声速项目研制所需的人才缺口，同时吸引高校、企业和科研院所等机构组成应用高超声速联盟（University Consortium for Applied Hypersonics），以实现各技术领域的齐头并进。

积极开展高超声速飞机动力关键技术攻关

赫尔墨斯公司完成TBCC发动机缩比验证机高速试验

2020年3月，美国初创公司赫



赫尔墨斯公司发布的试验现场照片

尔墨斯（Hermeus）完成了高超声速飞机TBCC发动机缩比验证机静态和高速（ $Ma5$ ）试验。其中，海平面静态试验在赫尔墨斯公司位于亚特兰大的试验台完成，而高速试验在普渡大学完成。

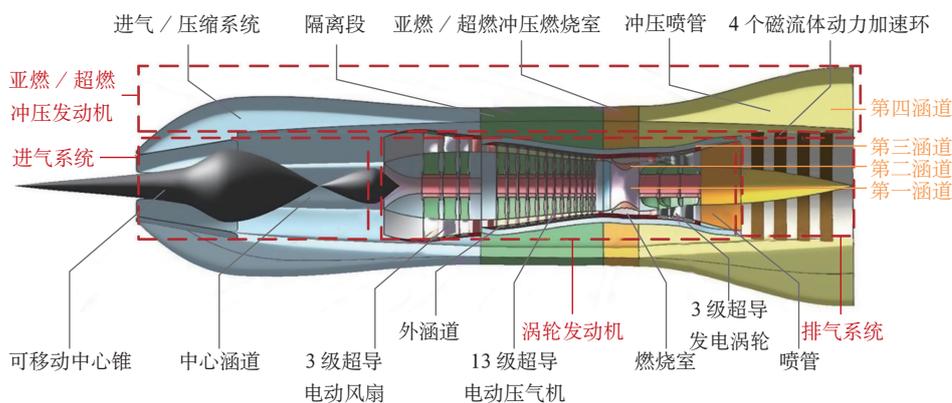
试验用的验证机包含1台现货涡轮发动机、公司开发的预冷器和亚燃冲压发动机，以及共用的进气道和喷管。其中涡轮发动机的工作区间是 $Ma0 \sim 3.3$ ，亚燃冲压发动机是 $Ma2.8 \sim 5$ 。根据公司发布的试验现场图片，试验样机采用了二维喷管设计，带有控制喷管收扩的装置，喷口前端的冲压发动机或涡轮加力燃烧室部分呈圆截面构型。赫尔墨

斯公司披露，目前已经完成了组合动力中各动力单元单独运行的试验，接下来就是完成模态转换这一关键技术的验证。

2020年8月，美国空军对赫尔墨斯公司进行投资，研发用作未来“空军一号”动力装置的TBCC发动机。为该项目提供资金的是美国空军的“空军一号”管理团队，称1架 $Ma5$ 的飞机可以让总统在90min内从纽约飞到伦敦，而不是现在的7h。

HSP公司推出新概念组合动力

2020年3月，总部位于美国加州的初创公司HSP（HyperSpace Propulsion）声称其正在开发一种名为高超声速混电超导冲压磁流体



Hyscram发动机示意

(Hyscram) 发动机的创新型组合动力概念。公司将其定性为超导电混合TBCC发动机，在传统TBCC基础上融合了超导电力、磁流体力学(MHD)等技术，提供了一种实现从静止启动到Ma 8以上飞行速度的动力方案，可用于高超声速飞机和导弹，也可用于运载系统。

作为一种TBCC发动机，Hyscram的“涡轮”(即核心机)部分是一个配置磁悬浮风扇、压气机和涡轮级的涡扇发动机，并在轴向配置了一系列超导发电机。Hyscram发动机的“冲压”部分是环绕在核心机外围的9个亚燃/超燃双模冲压发动机。通过一个进气锥或中心锥来调节进入亚燃/超燃冲压通道的空气量，这类类似于洛克希德公司SR-71所使用的设计，可以根据飞行条件前后移动锥体。进气锥采用电力驱动，当移到最前端时，气流被引导到亚燃/超燃冲压通道；而当缩回时，大部分气流被分流到产生电力的涡轮核心机。项目负责人称，“涡轮+冲压+MHD”的3保险方式可以保证任何时候都有推力输出。

维珍银河公司选择罗罗公司为其商用超声速飞机开发动力

英国维珍银河(Virgin Galactic)

公司及其子公司航天飞机(The Spaceship)于2020年8月披露了其高速飞机第一阶段设计方案，将与罗罗公司合作设计、开发用于高速商用飞机的超声速推进技术。维珍银河公司高速商用飞机的主要设计目标是完成一种可在全球现有机场条件下起降，飞行速度达到Ma 3的三角翼飞机，可搭载9~19名乘客，飞行高度超过18000m，并且可结合客户需求实现客舱布局定制(如定制商务或头等舱等)。

反应发动机公司进行高超声速试验台概念研究

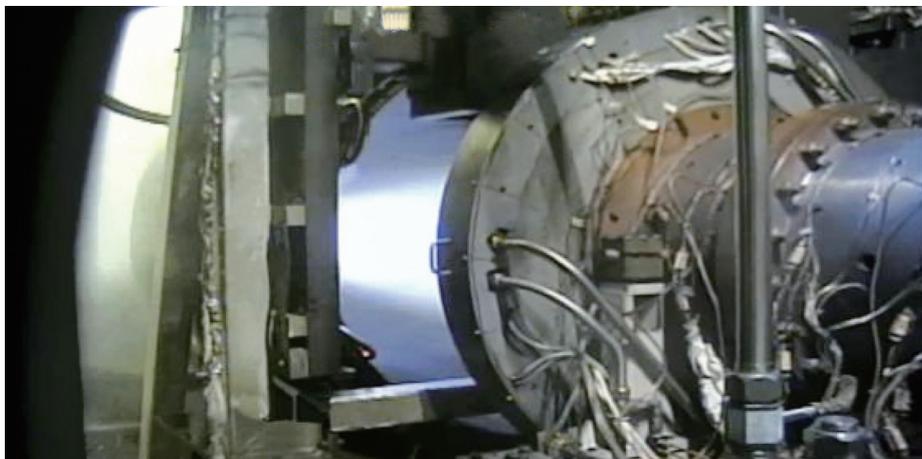
英国反应发动机公司(REL)在2020年5月18日公布，该公司启动了一项概念研究，开发用于协同吸

气式火箭发动机(SABRE,“佩刀”)的飞行验证高超声速试验台。该研究由英国航天局发起，将在欧洲航天局通用支持技术计划(GSTP)下进行，参与方有克兰菲尔德航空解决方案公司(包括克兰菲尔德大学)、反应发动机公司、BAE系统公司和弗诺斯特与沙利文(Frost & Sullivan)公司等。

该项研究的目的是：一是研究测试用飞行器的远期概念，这将有助于SABRE相关技术的演示验证；二是评估以SABRE为动力的飞行器在未来空间运输领域的竞争地位。反应发动机公司的SABRE研究将使得采用水平发射技术的可重复使用型太空飞行器具有成本低廉、性能可靠和响应迅速等优点，并具备快速有效的载荷返回选项。与消耗性或部分消耗性的垂直发射系统相比，具有此类特性的飞行器可降低进入太空的成本。

航空喷气-洛克达因公司研发的大推力超燃冲压发动机完成地面试验

2020年12月，在美国空军研究实验室(AFRL)的中等尺寸超燃冲



航空喷气-洛克达因公司超燃冲压发动机在APTU试验台架上运行

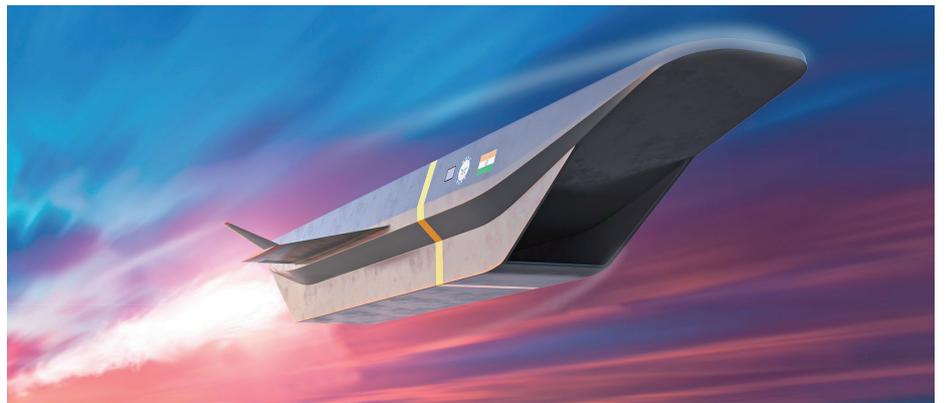
压关键部件 (MSCC) 项目支持下, 美国航空喷气-洛克达因公司研发的大推力超燃冲压发动机在阿诺德工程发展综合体的气动与推进试验装置 (APTU) 试验台完成了一轮为期12个月以上的地面试验, 验证了发动机在不同马赫数条件下的性能, 其中在高超声速条件下的工作时长累计超过了1h, 并获得最大超过57.8kN的推力。公司称, 与2010年的X-51A飞行器动力相比, 当前的超燃冲压发动机性能和经济性都得到了很大的提升。根据美国空军的定义, 中等尺寸的超燃冲压发动机是指空气流量为X-51A飞行器发动机10倍的超燃冲压发动机, 主要定位为配装高超声速飞机。

加速高超声速导弹成果转化 日本披露其新型高超声速反舰导弹

日本防卫副大臣山本智广于2020年7月7日参观了位于东京郊区的自卫队航空和火箭技术研究中心, 并在其推特账户上发布了一张图片。据报道, 图片上是一种新的高超声



日本采用DMSJ为动力的高超声速反舰导弹



印度HSTDV飞行器方案示意

速反舰导弹, 采用了双模态超燃冲压发动机 (DMSJ) 为动力。DMSJ是冲压发动机和超燃冲压发动机的组合, 能够以多种速度飞行。该导弹将具有全天候作战能力, 配备无线电信和光波图像搜寻器用于识别目标。日本防卫省计划在2026年部署该导弹的早期型号, 并将于2028年后部署增强型导弹。

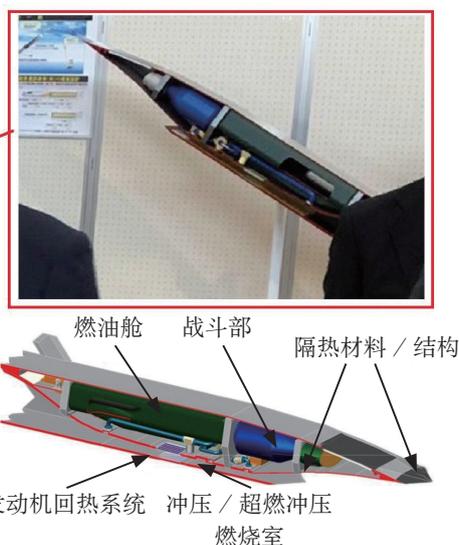
印度国防研究与发展组织开展高超声速技术验证机飞行试验

印度国防研究与发展组织 (DRDO) 在2020年9月7日开展了高超声速技术验证机 (HSTDV) 飞行试验。HSTDV是一架高超声速超燃冲

压演示飞行器, 其技术可用于高超声速远程巡航导弹, 也用于低成本发射小型卫星。HSTDV飞行器由固体火箭助推器带至30000m高空, 在此气动隔热罩以高超声速分离, 巡航飞行器从助推器分离。进气道按计划打开, 高超声速燃烧室保持燃烧, 巡航飞行器以Ma 6的速度在飞行轨迹飞行20s以上。超燃冲压发动机在整个试验的飞行过程中运行良好。

俄罗斯成功试射“锆石”高超声速巡航导弹

2020年12月10日, 22350型“戈尔什科夫上将”护卫舰从白海试射了1枚3M22型“锆石”高超声速导弹, 导弹飞行距离超过350km, 速度超过Ma 8, 成功击中阿尔汉格尔斯克地区北部奇扎靶场的沿海目标。“锆石”高超声速巡航导弹的关键技术是采用碳氢燃料超燃冲压发动机, 速度可达Ma 8, 发射方式包括海基、空基和陆基。自2020年10月6日首次试射, 俄罗斯已成功完成了“锆石”巡航导弹的3次试射。此间, 导弹的最高射程可达450km, 进一步验证了其性能的持续性与稳定性, 目前已被计划纳入常备武器序列。



加大高超声速动力基础研

究投入

得克萨斯大学和Ansys公司 共同推进高超声速软件开发

据Ansys公司消息称，正与美国得克萨斯大学阿灵顿分校（UTA）开发一种先进的设计分析流程，该工作流程将快速验证仿真软件代码，有助于减少高超声速技术的开发费用并提高工程效率。

美国国防部（DoD）和美国国家航空航天局（NASA）将高超声速飞机、航天器和导弹列为优先发展事项。但由于每次飞行测试将耗资多达1亿美元，且缺乏具有设计经验的工程师，相关技术发展受到制约。而Ansys公司的仿真解决方案将推动从飞行器再入热保护系统到超燃冲压发动机燃烧技术等一系列关键高超声速技术的发展。Ansys公司的基于物理的高保真解算器促进了高超声速试验研究，无论是模拟超燃冲压发动机内部空气和燃料混合的设计和分析，还是测量热应力对在恶劣环境下运行的传感器的影响。采用Ansys公司的高超声速系统模型后，UTA研究人员可以在先进的电弧喷射加热高超声速风洞中进行物理高速飞行测试来验证软件代码的准确性。

美国高校积极开展高超声速地 面试验设施建设

2020年，美国得克萨斯农工大学建成了1个高超声速扩展风洞，并在2月全面投入使用。该风洞可提供高达 $Ma\ 15$ 的风速，并在激光、电磁和光学航空航天实验室的帮助下引入大量先进的激光诊断技术。10月，得克萨斯大学阿灵顿分校在其弧形射流风洞中展示了第一个飞秒级（ $1 \times 10^{-15}s$ ）双光子吸收激光诱导荧光和飞秒激光电子激发标记诊断

测量技术。

高超声速研究和管理机构 发生变革和整合

美国国防部成立联合高超声速转 化办公室

2019年年底，美国正式通过《2020财年国防授权法》，批准国防部斥资1亿美元成立联合高超声速转化办公室与高超声速研究与人才队伍发展大学联盟，旨在整合各界力量，加速美国国防部高超声速能力的发展。2020年4月，联合高超声速转化办公室正式成立，负责应用高超声速联盟的建立工作。6月，美国国防部研究和工程副部长办公室（OUSD）面向各机构发布征询白皮书（RWP），进一步推动应用高超声速联盟的发展。美国政府在本次发布的白皮书中对应用高超声速联盟在时间和资金投入方面进行了规划，希望通过应用高超声速联盟各成员组织，开展大量的高超声速原型开发/研究工作，研究内容将贯穿高超声速基本理论、实际应用和高级研究等各个领域，以加速高超声速技术的发展。10月，高超声速转化办公室邀请得克萨斯农工大学建立和管理一个应用高超声速技术的大学联盟，并在未来5年的时间里，每年向其支付2000万美元的研究经费。

洛马收购航空喷气-洛克达因

2020年12月，美国第一军工企业洛克希德-马丁（洛马）公司宣布将以44亿美元收购国防工业供应商航空喷气-洛克达因公司（Aerojet Rocketdyne）。该交易预计将于2021年下半年完成，需要满足常规交易条件，包括监管批准和航空喷气-洛克达因股东的批准。

航空喷气-洛克达因公司生产的推进系统是洛马公司航空、导弹、火控和航天业务需要的关键部件。2017年，航空喷气-洛克达因和洛马公司联合参与了美国空军研究实验室的先进全速域发动机（AFRE）项目，旨在对全尺寸TBCC发动机开展地面自由射流试验。航空喷气-洛克达因公司在2020年12月取得MSCC项目的中等尺寸超燃冲压发动机（配备高超声速飞机）地面直连试验的成功。航空喷气-洛克达因公司还在2019年收购了位于佛罗里达州的从事增材制造的3D材料技术（3DMT）公司，该公司拥有开展批量生产所需的工具、方法和能力，能以经济实惠的方式生产超燃冲压发动机。

洛马公司在2013年提出SR-72飞行器研制计划，旨在通过采用并联TBCC发动机实现 $Ma\ 6$ 飞行。此次洛马公司对航空喷气-洛克达因的收购，实现了动力和飞行器两家单位的合并，势必加速飞行器和动力的一体化研究，推进高超声速飞行器的研制。

结束语

毋庸置疑，高超声速飞行器有着巨大的军事价值和潜在的经济价值，而研制出满足需求的动力装置是其成功应用的关键所在。通过对2020年高超声速领域发展脉络的梳理，可以看到，无论是在民用还是军用领域，吸气式组合动力技术依然是各国发展的重中之重。因此，除了加大对其工程应用的直接投入之外，对相关基础研究和科研管理创新的关注也不容忽视。

航空动力

（李茜，中国航发涡轮院，高级工程师，主要从事航空发动机科技情报研究）