

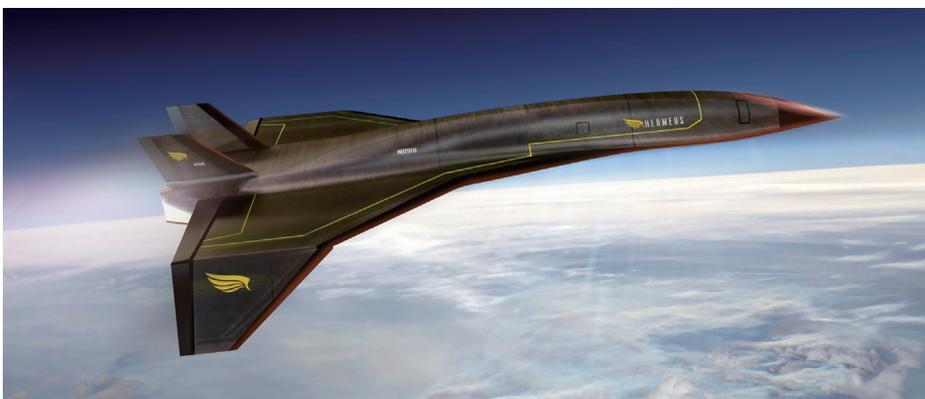
赫尔墨斯高超声速客机研制进展

The Progress of Hermeus Hypersonic Jet

■ 颜瑾钊 / 中国航发研究院

美国初创企业赫尔墨斯 (Hermeus) 公司于2020年3月完成了用于高超声速飞机的涡轮基冲压组合发动机缩比验证机高速试验。该公司于2019年5月宣布要研制一型最大巡航速度为 $Ma5$ 、航程为7400km、载客20人左右的高超声速客机，并初步计划在21世纪20年代末投入商业运营。

自“协和”黯然退役以来，人们一直没有放弃对超声速客机的追求。进入21世纪，越来越多的国家和科研机构开始涉足高超声速客机的研发。2011年，英国Hypermach公司宣布研制Sonic Star高超声速公务机。2015年，欧洲和日本联合开展未来高速运输关键技术 (HIKARI) 研究计划，研究和发​​展高超声速商用飞机技术。2018年6月，波音公司发布高超声速客机概念。2019年5月，又一家美国初创企业——赫尔墨斯 (Hermeus) 公司宣布加入高超声速客机研制之列。



赫尔墨斯公司高超声速客机概念图 (来源：赫尔墨斯公司)

空中交通运输的革新者

赫尔墨斯公司成立于2018年，总部位于美国亚特兰大。公司以希腊神话中掌管旅行、交通和商业的神Hermes的名字命名，创始人认为高速旅行不应该只属于神灵，所以在后面增加了“我们”(us)一词，表达其“用前所未有的速度连接世界”的愿景。

赫尔墨斯公司提出的高超声速客机可以将纽约和伦敦之间的空中旅行时间从7h缩短至90min，主要面向高端商务旅客，单程票价约为3000美元。该公司计划先在5年内研发一型 $Ma5$ 的验证机，在21世纪

20年代末投入商业运营。

赫尔墨斯公司的4位创始人都来自美国时代轨道 (Generation Orbit) 发射服务公司，其中A. J. 普利卡担任首席执行官 (CEO)，其余3位担任技术主管，曾共同参与美国空军的X-60A高超声速飞行器的研发工作。同时，赫尔墨斯公司还成立了顾问委员会，成员均是来自航空科技、私人和商业航空以及监管等领域的专业人士，包括蓝色起源前董事长、洛克希德-马丁 (洛马) 公司前执行副总裁、美国联邦航空局 (FAA) 前副局长等。这些顾问将从安全、市场、技术和发展等方面帮助赫尔墨斯公司制定公司战略，以加速创新，实现公司愿景。

采用成熟技术以提高可实现性

尽管拥有技术基础扎实的研发团队和经验丰富的顾问委员会，但要在如此短的时间内研制一型全新的高超声速客机并实现商业运营也是颇有难度的。因此，赫尔墨斯公司自启动之初便明确提出，飞机的设计将围绕现有和近期可实现的机体、材料、系统和推进技术进行，并立足于使其能够在对当前航空基础设施进行最小改动的情况下运行，包括采用常规的航空燃油、兼容现有的机场跑道等。

从目前披露的信息来看，确实处处体现了“做工程而非科学”的基本遵循。在速度指标上，赫尔墨

斯公司与波音公司的高超声速客机概念方案一样，选择了Ma5。

对于商务出行而言，时间是一个非常非常重要的要素，其核心在于人们究竟希望花多长时间来完成一段旅行。超声速并不算快，因为仅仅是超声速还无法实现在一天之内完成跨洋往返飞行。而能够在一天内往返，对于民航班机来说非常重要。波音公司研究了在当前网络环境下以更高巡航速度飞行的潜在优势，包括缩短飞行时间、提高资产利用率以及增加创收等。根据估算，以Ma5速度巡航即可完成2h左右跨大西洋飞行或3h左右跨太平洋飞行，这将是一个革命性的突破。而速度达到Ma5以上，速度提升带来的边际收益在减小，而边际成本却在增加。更高的速度可能意味着更大的推力和更高的油耗，也会更晚投入运营。因此，波音公司认为，Ma5是高超声速飞机在民用和非运输类军用之间的速度分水岭。可见，速度是影响技术难度进而决定研制进程的核心指标，而将速度限制在Ma5是项目在短期内具备可实现性的关键。

材料方面，当飞行速度超过Ma5后，燃烧室内的总温、前缘部件的温度等将超出现有材料能承受的范围。以实际飞行过的X-15试验机为例，在Ma5的真实飞行环境下，机头和翼根处记录到的温度分别是600℃和718℃；根据预测分析，一旦飞行速度达到Ma8，这两处的平衡温度将分别飙升至2200℃和1700℃。温度升高若超出轻质材料的耐受范围，则需要采用镍基高温合金材料；若再超过高温合金的极限，则必须采用陶瓷基复合材料，而这些材料已然超出了

目前能够成熟应用的技术范畴。

动力方面，赫尔墨斯公司将采用涡轮基冲压组合（TBCC）发动机。此前，美国国防预先研究计划局（DARPA）经过长期预研和论证，已经在2016年明确了全尺寸TBCC发动机是高超声速飞机动力系统的最佳解决方案。一般认为，Ma5是选择亚燃冲压发动机或超燃冲压发动机的分界线：当速度低于Ma5时，采用亚燃冲压发动机；当速度高于Ma5时，采用超燃冲压发动机。赫尔墨斯公司认为，虽然超燃冲压发动机已经开展过大量研究，但距实际应用还需要20年左右的时间，而且必须依靠国家级的投入才行；而亚燃冲压发动机在Ma5的条件下仍具有较高的比冲，且技术难度明显小于超燃冲压发动机。因此，将最大巡航速度限制在Ma5意味着不需要采用超燃冲压发动机，从而可以简化推进系统。

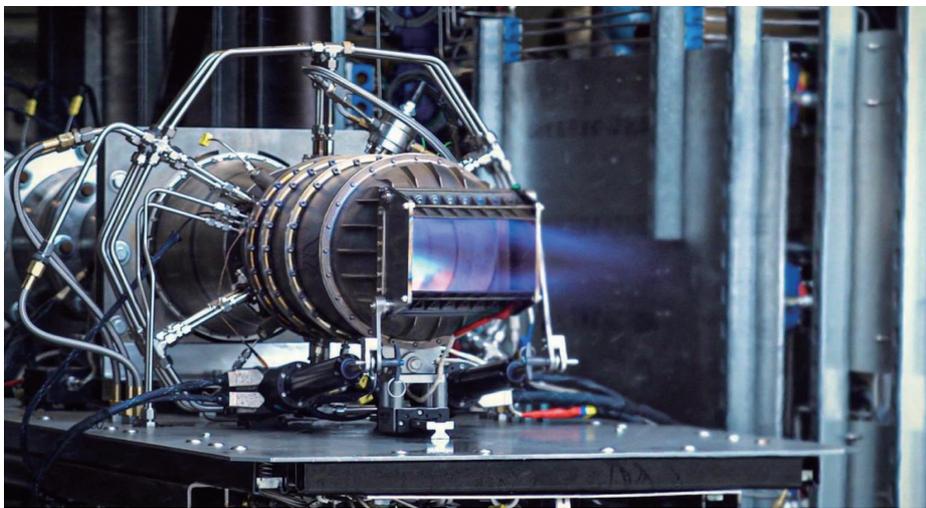
在机体方面，从目前披露的概念图来看，飞机采用大后掠三角翼无平尾加双垂尾布局，翼尖部分采用了可弯折变体翼尖设计。此翼尖在起降和低速段呈平直或小角度弯

折状态，在高速飞行时则会大角度向下弯折，以强化乘波效应、显著增加升力，同时也可起到垂直安定面的作用，提高高速飞行状态的航向稳定性。推进系统布置在机体腹部，利用前机体压缩效应，配合机腹进气方式对来流空气增压。

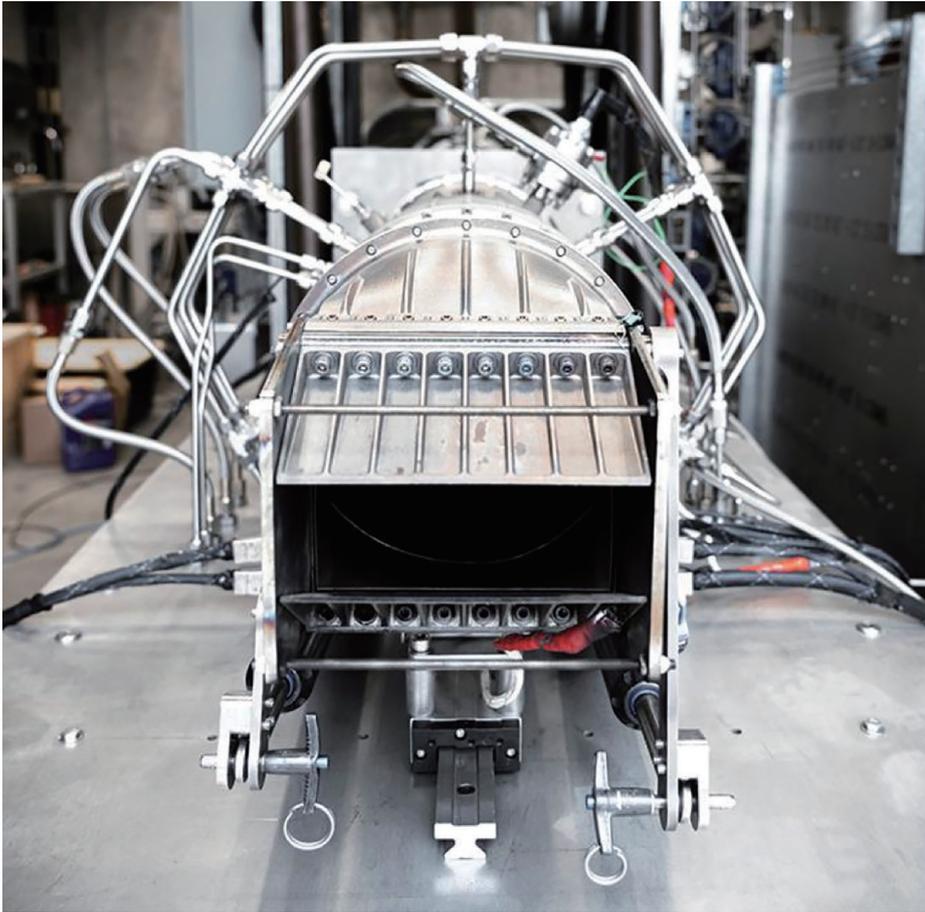
已完成TBCC缩比验证机静态和高速试验

自2019年5月公布高超声速客机研制计划后，赫尔墨斯公司将发展推进系统作为其宏伟计划的首要任务。研发团队用6个月的时间在亚特兰大迪卡尔布-皮奇特里机场的一个改装后的集装箱中搭建了试验设施，并开展了100多次发动机试验；仅用9个月的时间，便在2020年3月完成了TBCC缩比验证机的海平面静态试验和高速模拟试验（达到Ma5）。其中海平面静态试验在赫尔墨斯公司位于亚特兰大的内部试验台完成，而高速试验在普渡大学完成。

本轮试验所用的缩比验证机由现货涡轮喷发动机、内部开发的预冷器、亚燃冲压发动机，以及涡轮



TBCC缩比验证机试验（来源：赫尔墨斯公司）



涡喷发动机和冲压发动机共用同一喷管（来源：赫尔墨斯公司）

组件与冲压组件共用的进气道和喷管组成。其中涡喷发动机的工作范围是 $Ma_0 \sim 3.3$ ，模态转换区间为 $Ma_{2.8} \sim 3+$ ，之后由亚燃冲压发动机继续加速至 Ma_5 。迄今为止，试验主要集中在组合动力中各动力单元单独运行的试验，接下来将着手模态转换这一关键技术的验证。

赫尔墨斯公司拒绝透露预冷装置和涡轮发动机的详细信息，但皮普利卡称，发动机很小，尺寸介于JetCat发动机和威廉姆斯国际公司的发动机之间。JetCat微型涡轮发动机推力大约在100N量级，而威廉姆斯国际公司的明星产品FJ44系列小型涡扇发动机推力在10 ~ 20kN之间，直径约为0.5m，由此推测赫尔墨斯公司所用的

发动机推力可能在1kN量级。

赫尔墨斯公司通过其社交平台公开了试验现场的照片。图中可见，试验样机采用二维喷口设计，带有控制喷管收扩的装置，喷管前端的疑似冲压发动机或涡轮加力燃烧室部分呈圆截面构型，试验台处于开放式环境中，应是在进行海平面静态试车。未见进气道、预冷装置和涡轮发动机。根据照片亦可推测该TBCC缩比验证机可能采用了串联式布局。

此外，赫尔墨斯公司还透露已经在普渡大学的实验室开展了进气道直连试验，并认为进气道的研制是推进系统乃至整个飞机最困难的部分，至今尚未攻克，接下来还将利用其他试验设施开展更多的进气道试验。

通过缩比验证机和现有的硬件，赫尔墨斯公司得以快速而有效地降低技术风险并成倍地削减试验成本。如果进行全尺寸试验可能要花费几千万甚至几亿美元，而采用缩比验证机，并充分利用美国国内的试验设施，则花费要低得多。而且，增材制造的广泛使用也有助于节省成本和时间。据赫尔墨斯公司透露，其成本比DARPA的先进全状态发动机（AFRE）项目降低了近两个数量级。

AFRE项目旨在研发和验证一种能够在 $Ma_0 \sim 5+$ 范围内无缝工作的TBCC发动机，满足航程大于2200km、速度大于 Ma_5 ，且飞行高度大于18000m的高超声速飞行器的要求。该项目采用罗罗公司的F405发动机作为基准涡轮发动机，地面推力约为30kN，直径约为0.6m。根据最新预算，AFRE项目总投入达到约1.4亿美元，将在2021年完成一型 Ma_5 级高超声速飞机用全尺寸TBCC发动机地面集成验证。

面临诸多挑战，任重而道远 环境要求

对于一型商用飞机来说，技术成功和市场成功两者缺一不可。高超声速客机投入商业运营除了要解决一系列技术难题之外，还要面临乘客的接受能力和运营舒适度等挑战。尽管美国的X-42、X-51高超声速无人试验飞行器速度已经能够达到 Ma_5 以上，但在将该技术应用到商用领域时，还必须考虑到人体的承受极限和对环境的影响。同时，超声速客机想要重返民用航空市场还需要经过适航认证的考验，其中最难的就是解决声爆问题。

声爆是指超声速飞行器在突破声障时产生的巨大能量传到地面



赫尔墨斯公司4位创始人在首台发动机前留影（来源：《亚特兰大人》期刊）

形成的短暂而强烈的爆炸声。目前FAA规定，禁止民航客机飞行速度超过 $Ma0.99$ ；国际民航组织（ICAO）也规定，禁止任何民用飞行器制造“声波干扰”。当然，ICAO已在2019年2月得出结论，认为现有的标准不足以涵盖更高速的飞机，正在推进新标准的修订工作；国际清洁交通委员会（ICCT）也认为，在陆地上空严格限制超声速可能会影响新技术的应用，这意味着制造商现在很难将超声速客机推向市场。但要想改变现有的民用航空管理条例，高超声速客机必须展示出优异的降噪性能。

融资压力

“协和”飞机的开发成本约为70亿美元，波音公司和空客公司的每一型商用飞机的研发费用均在25亿~60亿美元范围内，如此规模的资金对于任何一家初创公司来说都堪称天文数字。

赫尔墨斯公司曾在2019年5月宣布成功完成了由美国科斯拉风险投资

公司（Khosla Ventures）牵头的首轮融资，这笔资金将主要用于高超声速推进系统的研发和验证工作，并未透露具体金额。本轮发动机试验已经花费了百万美元量级的经费，如果进展顺利，在近期完成TBCC模态转换试验之后，赫尔墨斯公司将着手启动飞机整机的设计研发工作。赫尔墨斯公司表示将有至少两架较小的验证机用于试验和迭代。在地面上构建 $Ma5$ 的测试环境是非常困难的，这意味着必须进行飞行试验，因此需要建设大量的硬件设施。有分析称，赫尔墨斯公司近期密集地披露试验进展可能也是出于融资压力。所幸的是，太空探索技术公司（SpaceX）、蓝色起源公司（Blue Origin）等公司的崛起让投资者愿意相信，航空航天领域可以提供长期的财务回报，赫尔墨斯公司或许也有能力让投资者对其充满信心。

人才需求

扩大研发团队规模是赫尔墨斯公司近期面临的又一挑战。尽管团队建设在短时间内已经取得了较大进

展，但与最终成功还有非常大的距离。材料与结构是高超声速客机无法避开的技术难题，此外，还有模态转换、宽速域气动布局、综合热管理、飞发一体化等核心关键技术等待赫尔墨斯团队一一攻克。赫尔墨斯公司计划在今年年底将团队人数从1月份的8人扩充至25人或30人。截至目前，已经有一名空气动力学工程师和一名机体机械工程师加入团队，后续招聘的职位还包括航空电子工程师、飞行软件工程师和动力机械工程师等。

结束语

近年来，人们对高超声速旅行的再度关注，与更加成熟的材料和技术以及商业航天的崛起给投资者的信心不无关系。赫尔墨斯公司的方案目前表现出较高的可行性，但综合美国发展高超声速飞行器的历程来看，抛开飞机的全新设计、新材料的生产应用等问题不谈，仅飞行试验就需要10年时间。再考虑到市场、法规、环保要求等因素，高超声速客机在未来10~20年内投入运营的前景似乎并不乐观。赫尔墨斯公司提出的几乎是一个不可能完成的任务。但鉴于其创始人团队与美国空军的合作经历，而且方案明确采用航空燃油使其具备了军事应用的潜力，该项目后期或有可能得到美国军方的支持；又或者公司在利用商业资本取得技术突破后，被洛马公司、波音公司等巨头收购也未可知。当然人们更乐于看到，随着技术的成熟、材料工艺的改进以及法规的完善更新，新一代高超声速客机的命运或将与“协和”有所不同。

航空动力

（颜瑾钊，中国航发研究院，工程师，主要从事航空发动机发展战略研究）