

美国吸气式高超声速技术近期进展及对我国的启示

赵 军

(四川达宇特种车辆制造厂, 成都 610100)



摘要: 介绍了美国在 2010 年上半年进行的两个标志性飞行试验: X-51A、HTV-2。鉴于高超声速技术的潜在军用背景, 我国应理性认识自身发展现状、存在的问题, 以美国的经验和教训为鉴, 尽快行动争取早日掌握该项技术, 避免未来可能出现的“高超声速”威慑和讹诈。

关键词: 吸气式; 高超声速技术; 超燃冲压发动机

Recent Progresses of American Inspiratory Hypersonic Technology and Apocalypses to Our Country

Zhao Jun

(Sichuan Dayu Special Vehicles Manufacturing Factory, Chengdu 610100)

Abstract: This article introduces X-51A and HTV-2 two symbolic fight tests conducted by America in the front half of year 2010. In view of potential military background of hypersonic technology, we should realize our actuality and question, learn from American experiences and lessons, and hold this technology as soon as possible to avoid future hypersonic threat.

Key words: inspiratory; hypersonic technology; scramjet engine

1 引言

自 20 世纪 60 年代以来, 以火箭为动力的高超声速技术(飞行速度达到 $Ma=5$ 以上)已广泛应用于各类导弹和空间飞行器。由于火箭需要携带沉重的氧化剂和燃料箱, 降低了有效载荷, 增加了使用成本; 目前世界各国正在积极发展另一类以吸气式发动机——超燃冲压发动机为动力的高超声速飞行技术, 该技术是未来航空航天领域发展的核心技术, 其发展对于飞航导弹、空天飞行器将产生革命性影响。

2 超燃冲压发动机技术

冲压发动机是一种吸气式发动机, 通过极高的速度将空气吸入, 并将空气压缩使其达到上千度高温

后, 与燃料混合产生巨大推力, 可比其它喷气式发动机提供更高的速度。

超燃冲压发动机是指燃料在超声速气流中进行燃烧的冲压发动机, 而目前所有航空发动机的燃料都是在亚声速气流中燃烧。使用超声速燃烧可减少气流压缩和膨胀损失, 降低气流温度和压力, 减轻发动机结构负荷。采用液氢或碳氢燃料, 可在 $Ma=5\sim 25$ 的范围内工作, 将飞行高度延伸到大气层边缘(50~60km)。

2.1 超燃冲压发动机的优点

对于普通的喷气式发动机来说, 为了保证涡轮叶片不被烧蚀, 飞行器的飞行马赫数不能超过 3; 而采用火箭发动机的飞行器速度虽然可达到 $Ma=25$, 但却需要携带大量的液氧, 以实现燃料的燃烧。如净质量只有 74.8t 的航天飞机需要使用 102.5t 的液氢和 635t

作者简介: 赵军(1980-), 副总设计师, 流体机械与工程专业; 研究方向: 航空发动机气动分析。

收稿日期: 2010-11-18

的液氧才能入轨。而像超燃冲压发动机这样的吸气式发动机没有活动或可被融化的部件,是一种很好的解决方案。但是吸气式发动机中的亚燃冲压发动机必须使来流减速到亚声速才能保证其工作效率,而且压缩后的空气温度过高,无论采取何种降温措施,飞行器的速度都无法超过 $Ma=5$,所以亚燃冲压发动机也有一定的局限性。超燃冲压发动机作为一种比较先进的冲压发动机,摒弃了亚燃冲压发动机用来降低来流速度的扩散装置,可使来流以超声速通过发动机,因而飞行器的飞行马赫数可以超过 5。

因为超燃冲压发动机具有空天能力的无缝集成优点:既可以利用大气层中的氧气,摒弃了沉重的氧化剂和燃料箱;又可以实现高超声速的飞行,飞行速度可以达到轨道速度的 60%,所以成为各国竞相发展的热点。

2.2 超燃冲压发动机的缺点

超燃冲压发动机虽然适合于高超声速飞行,但存在着无法静止起动(需要助推加速)、噪声大、环境污染严重、只能在大气层内工作等缺陷,需要和其他形式的动力系统组合工作。

2.3 超燃冲压发动机的用途

超燃冲压发动机可作为高超声速巡航导弹、高超声速飞机(侦察机、轰炸机、战斗机)、跨大气层飞行器、可重复使用的空间发射器和单级入轨的空天飞机的动力装置;由于发动机工作时间相对较短,超燃冲压发动机很可能将首先应用在武器领域,用这种高超声速巡航导弹发动攻击,不仅会给敌人带来巨大的压力,还会令现有的防空体系措手不及。

2.4 超燃冲压发动机的技术进展

超燃冲压发动机的关键技术与技术难点主要有:燃料的喷射、掺混、点火和燃烧;燃烧室的设计和试验技术;发动机与机体(弹体)的一体化设计;耐高温材料和吸热燃料。

2.4.1 燃料循环冷却技术

借鉴火箭发动机设计中使用的方法(使燃料循环起来),让燃料在进入燃烧室之前,先在发动机壁内的管路里流动。这样不仅可对燃烧室进行冷却,还可以预处理燃料,使之变成热燃气,从而使燃烧产生的能量更高。

2.4.2 激波引燃冲压发动机

其显著特点是燃料从飞行器头部下面喷入,燃料与空气的混合在燃烧室前完成;通过激波提高燃料——空气混合流的温度,直到燃烧室入口处温度超过

燃料的自燃温度,使燃料在燃烧室迅速完全燃烧。这些特点使激波引燃冲压发动机的燃烧室长度远小于超燃冲压发动机的燃烧室长度。

2.4.3 支板簇引射发动机

支板簇引射发动机是一种新型的 RBCC 发动机。这种发动机在起飞阶段使用火箭引射冲压发动机加速;达到 2.5 马赫数后,进入亚燃冲压状态;当马赫数在 5~8 时,发动机工作在超燃冲压状态;当马赫数超过 8,超燃冲压和火箭同时工作;在大气层外,以常规火箭状态工作。各个状态之间过渡平稳,发动机通过一级变换通道几何形状、燃料喷射分布来实现这些不同模式,使各种模态的燃烧在同一燃烧室中完成。

3 美国近期进展

3.1 概述

2001 年, NASA 和美国国防部联合提出了国家航空航天倡议(NAI),重申了美国高超声速飞行器的发展战略:近期发展高超声速巡航导弹;中期重点发展全球到达的高超声速飞机;远期发展廉价、快速、可重复使用的航天运载器。由于 NAI 项目的实施,美国新的高超声速研究项目不断涌现,从 Hyper-X、HyFly 到 FALCON(从美国大陆投送和应用)再到 X-51,这些项目的目标基本都是在 2010~2020 年之间取得重大成果。

2001 年 6 月到 2004 年 11 月, NASA Hyper-X 计划的 X-43A 进行了 3 次飞行试验,除第一次以失败告终外,第二次飞行试验实现了 7 倍声速飞行,第三次在大约 33.5km 高度飞行时以 $Ma=9.8$ (11270km/h) 的惊人速度载入世界飞行速度记录。X-43A 的成功飞行试验,验证了高超声速飞行器的设计概念、设计方法和地面试验结果。

Hyper-X 计划已经结束,目前仍在进行中的高超声速项目包括:美国海军的 HyFly 计划、DARPA 的 FALCON“猎鹰”计划、空军研究实验室(AFRL)和 DARPA 领导的 X-51A 计划等。同时,美国还积极参与了一些国际合作计划,如美澳合作的 HiFire 项目也计划在 2012 年之前进行几次飞行试验。

3.2 HTV-2 项目

DARPA 的 FALCON 计划目前已经进入第二阶段,研究无动力高超声速试验飞行器(HTV),由于预算削减等原因,只有洛马公司获得资金进入第二阶

段研究。

2010年4月22日,美国空军使用“米诺陶”-4运载火箭发射了美国快速响应全球打击系统的高超音速滑翔试验平台——“兵力运用与本土发射高超音速技术飞行器”-2(Falcon Hypersonic Technology Vehicle 2, HTV-2),但Falcon HTV-2发射后9min即与美军失去了联系。美国DARPA宣称,HTV-2高超音速试验飞行器在遥测联系丢失9min之前已经实现了可控飞行:“最初的数据检查表明,HTV-2在大气层内以 $Ma=20$ 的速度实现了可控飞行。”

HTV-2设计理念超前,是目前飞得最快的战机。这种黑色的楔形战机在2h内可以飞行近17km公里,相当于地球周长的一半,而洲际导弹的射程,也仅5500~15000km。

DARPA原本计划在2011年初进行第二次试验飞行,那将标志本项目第三阶段(也是最后阶段)的结束。

3.3 X-51A项目

美国当地时间2010年5月26日上午10时左右,左翼装载了X-51A的空军飞行试验中心的B-52同温层堡垒从加利福尼亚州南部太平洋海岸的军事基地起飞。这枚X-51A型巡航导弹悬挂在B-52轰炸机机翼下,从加利福尼亚州爱德华兹空军基地起飞,飞行至14km高空后被弹射。弹射后的导弹依靠一套固态燃料火箭推进器提供动力,当速度达到4.8马赫、高度达到30km后,导弹与推进器分离,凭借导弹自身推进器继续加速飞行。地面测控数据显示,导弹最高速度达到6马赫(6倍音速)后,保持速度飞行200多秒,随后坠入太平洋。

AFRL早在2003年就已经开始研制X-51A飞行器,并在2004年1月决定采用普惠公司的超燃冲压发动机验证机——乘波器(Scramjet Engine Demonstrator-Wave Rider, SED-WR)。2004年12月SED通过初始设计评估,2005年1月开始详细设计,2007年5月通过关键设计评估,是现有最先进的超燃冲压发动机。

美国空军官员称这次试验为四次试飞中的第一次,但是非常成功。项目经理查理·布林克认为这次引擎技术的飞跃等同于第二次世界大战后期螺旋桨式动力飞机向喷气式飞机的跨越。布林克还称空军官员打算在2010年秋天进行X-51A的其余三次飞行测试。

本次飞行试验与之前的X-43A的飞行试验相比,

有如下三个不同点:

a. X-51A飞行试验是使用碳氢燃料冲压引擎驱动的首次飞行,2004年底X-43A飞行试验时采用的是液氢燃料;

b. 本次冲压动力持续工作200s;之前最长的动力冲压时间来自美国航空航天局所制造的试验机X-43A,可提供12s的动力支持;

c. X-51A采用新型冷却系统,燃料从发动机表面的管道中通过,不仅可以带走热量,防止发动机熔化,还可以加热燃料达到点火所需,同时保证冲压发动机可以回收;而X-43超燃冲压发动机完成试验后在大气层内燃尽,不能再回收利用。

使用超燃冲压发动机作为动力的高超声速巡航导弹,具有明显的优点:首先它综合了弹道导弹和巡航导弹的优点,飞行时不需要像火箭那样自身携带氧化剂,可以直接从大气中吸取氧气,在射程、反应性方面具备了弹道导弹的优点,在精度和成本方面具有巡航导弹的长处;同时它具有比弹道导弹和亚音速巡航导弹更强的突防性能,能有效突破现代多层防御体系。

4 对我国的启示

美国在过去的40年中开展了三个主要的高超声速计划:航天飞机计划、国家空天飞机计划(NASP)、国家航空航天倡议(NAI)。回顾前两个计划,尽管启动时都得到了广泛的关注和支持,并一度增加投入,然而最后却以项目延期,技术方案未解决,甚至项目取消而收场;汲取了失败的教训,美国近些年来第三个计划的开展取得了较好的成绩。纵览美国近些年的发展,对我国高超声速技术发展具有如下启示:

a. 要从国家安全战略上高度重视高超声速技术的发展。以高超声速为支撑技术的高超声速武器/发射平台的作战特点可归纳为“三高一远一增强”,即:高飞行速度、高飞行高度、高突防能力、远航程,可以利用动能增强摧毁力,因而它既是一种效能很高的实战武器,也是一种高技术威慑武器。我们即使不能与美国同时拥有此类武器,也不应落后过多,否则就会陷入“高超声速威慑”的被动国际环境中;

b. 要对整个研制过程有一个科学的规划。探究美国高超声速诸多计划的发展规律,近些年对高超声速的支持呈现出循环起伏的曲线,近几年仅有X-43A项目是完整的。如果前期顶层策划不够细致、科学,那

么在后续发展中就有可能走回头路,贻误发展时机;

c. 要成立国家队,协调组织、协同作战、资源共享、不搞低水平竞争。2006年7月普惠公司宣布GDE-2在NASA兰利研究中心完成了试验,包括AFRL、DARPA、NASA、普惠公司和波音公司在内的政府-工业团队都可以利用GDE-2验证的技术为X-51A飞行验证计划研发推进系统。同时,要在组织机构上予以落实。例如:2006年5月,美国国会签署命令成立联合办公室以加强高超声速技术的联合研究,该联合办公室将统管国防部主要的高超声速项目研究;

d. 要加强基础研究,不要急于求成,否则欲速则不达。美国在2004年底成功进行了X-43A的飞行试验后,2006年年初NASA反而表示,“将把航空领域的研究重点从之前的飞行演示验证重新转向基础研究和设计工具开发”,同时NASA对其组织结构进行调整,将高超声速研究纳入基础航空部分。X-43高超声速研究小组的项目重点将进行基础性的技术研究而不是飞行试验;

e. 加强试验设施的先期建设。美国20世纪60年代建造HTT风洞用于再入试验,并在80年代进行了改造,可以在 $Ma=4\sim 7$ 的速度下试验发动机。该风洞已经用于试验缩比30%的NASP概念验证机发动机、X-43的超燃冲压发动机、HyTech地面验证发动机和目前的X-1;战场作战讲究“兵马未动,粮草先行”,超高声速技术的攻关亦要“试验设施建设先行”;

f. 要重视技术的积累。X-15A的历次试飞积累了大量的试验数据和经验,涉及多个方面,至今仍然是高超声速技术研究的宝贵资料;

g. 不要低估技术风险;可采取小步快跑的策略;美国在NASP项目下马之后,从1996年开始在发展和应用高超声速技术方面采取了更为稳妥的循序渐进策略;

h. 要能容忍失败,正确对待失败。科技的发展总是充满坎坷,过去一些超燃冲压发动机计划未能逃脱失败的命运,现在在研的一些计划也接受着挫折的洗礼。在过去的50年中,已经有很多SSTO空间飞行器和高超声速巡航飞行器概念被提出并研究,同时也终止了很多相关计划;

i. 要加强CFD领域的研究和专业软件开发。“对于X-51A来说,NASA正在贡献其全面的航空器计算

流体力学分析能力。”充分利用CFD的研制手段可以加快研制进度,降低研制费用;

j. 要做好巨大财政支持的心理准备;有条件的話,加强国际合作、分担研制风险也是不错的开发方式。

5 结束语

吸气式高超声速飞行技术将是未来航空航天领域发展的核心技术,而在其动力系统的选择中,超燃冲压发动机因具有空天能力无缝集成的优点脱颖而出,成为各国竞相发展的热点。

美国在2010年上半年进行了该领域的两个标志性飞行试验,通过X-51A飞行试验初步验证了X-1超燃冲压发动机的设计是成功的,并为以后的改进完善提供了宝贵的试验数据;通过高超音速滑翔试验平台HTV-2初步实现了 $Ma=20$ 的高超音速飞行器的可控飞行;可以推测的是,在丰富地面试验数据、飞行试验数据的基础上,通过稳妥、循序渐进的策略,美国的高超声速技术发展会比过去顺利的多。这种情况下,需要我国理性认识自身发展现状、存在的问题,以美国的经验和教训为鉴,并尽快行动,争取早日掌握该项技术,避免未来可能出现的“高超声速”威慑和讹诈。

参考文献

- 1 刘兴洲. 中国超燃冲压发动机研究回顾. 推进技术, 2008, 29(4): 385~395
- 2 刘大响, 金捷. 21世纪世界航空动力技术发展趋势与展望. 中国工程科学, 2004, 6(9): 1~8
- 3 陈英硕, 叶蕾, 苏鑫鑫. 国外吸气式高超声速飞行器发展现状. 飞航导弹, 2008(12): 25~32
- 4 叶蕾. 美国高超声速计划发展规律探索. 飞航导弹, 2008(12): 20~24
- 5 何煦虹, 陈英硕. 高超声速发动机. 飞航导弹, 2008(12): 33~36
- 6 臧晓京, 朱爱平. HiFire高超声速技术项目正准备进行试验. 飞航导弹, 2008(12): 3
- 7 盛德林, 李文杰. 一种新概念高超声速推进方案——激波引燃冲压发动机. 飞航导弹, 2009(6): 44~46
- 8 何国强, 刘佩进, 王国辉, 等. 支板簇引射发动机——21世纪新型航天动力. 宇航学报, 2000(11): 111~115