

高超声速技术译丛

Road to Mach 10 :

Lessons Learned from the X-43A Flight Research Program

通向马赫数10之路：

X-43A飞行研究计划的经验教训

(美)柯蒂斯·皮布尔斯(Curtis Peebles) 著

郑耀 徐徐 译

航空工业出版社

LIBRARY OF FLIGHT

高超声速技术译丛

通向马赫数 10 之路： X-43A 飞行研究计划的 经验教训

(美) 柯蒂斯·皮布尔斯 (Curtis Peebles) 著
郑 耀 徐 徐 译

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书讲述了 X-43A 项目研制过程中的经验教训,从项目起因、初步设计、技术开发,一直到试验试飞,以及研究过程中遇到的各种问题及其解决方案。内容涉及半实物仿真试验、可靠性试验、惰性气体试验、短组复合冷却和净化试验、系统定时试验、布局变更申请、系统试验报告、豁免签发、紧急操作训练、故障模式分析和效果测试、样机研制、推进剂减载、飞行器分离及回收和数据采集等。同时对首次试飞失败后的事故调查等内容进行了介绍,包括查找问题、分析原因、改进办法,此外还介绍了研制过程中的技术通报会等工作形式。本书适合从事航空航天相关专业的科研人员参考使用,并可作为航空航天院校师生的参考书。

图书在版编目 (C I P) 数据

通向马赫数 10 之路: X-43A 飞行研究计划的经验教训
/ (美) 皮布尔斯 (Peebles, C.) 著; 郑耀, 徐徐译. --
北京: 航空工业出版社, 2012. 6

(高超声速技术译丛)

书名原文: Road to Mach 10: Lessons Learned
from the X-43A Flight Research Program
ISBN 978-7-80243-870-5

I. ①通… II. ①皮… ②郑… ③徐… III. ①超音速
飞机—飞机试验—经验—美国 IV. ①V271.9

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 256732 号

北京市版权局著作权合同登记

图字: 01-2011-2796 号

Translated from the English language edition: *Road to Mach 10: Lessons Learned from the X-43A Flight Research Program*, by Curtis Peebles. Originally published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. ISBN 978-1-56347-932-8. Copyright © 2008 by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. All rights reserved.

通向马赫数 10 之路: X-43A 飞行研究计划的经验教训

Tongxiang Maheshu 10 Zhilu:

X-43A Feixing Yanjiu Jihua de Jingyan Jiaoxun

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里 14 号 100029)

发行部电话: 010-64815615 010-64978486

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2012 年 6 月第 1 版

2012 年 6 月第 1 次印刷

开本: 710 × 1000 1/16

印张: 13.25

字数: 260 千字

印数: 1—3000

定价: 50.00 元

《高超声速技术译丛》编委会

顾问：(按姓氏笔画排序)

王礼恒	史新兴	包为民	乐嘉陵
冯志高	刘永才	杜善义	杨卫
李椿萱	张立同	俞鸿儒	陶文铨
黄伯云	黄瑞松		

主任委员：郑耀

副主任委员：符松 孟华

委员：(按姓氏笔画排序)

王振国	方文军	刘洪	刘卫东
关成启	杨超	李仲平	李存标
李建林	李跃明	何国强	沈清
张天序	张香文	张蒙正	张新宇
陈振乾	林均品	周毅	宗群
桂业伟	高正红	高效伟	韩杰才
程克明	樊菁		

《高超声速技术译丛》序言

飞得更快、更高、更远，是人类永恒的追求。通常人们把大气层中飞行速度达到5倍声速以上的飞行称为高超声速飞行。相关的高超声速流动的理论研究始于20世纪40年代后期，我国的著名科学家钱学森先生和郭永怀先生都是高超声速概念的最早倡导者。

早在20世纪60年代，在突破3倍声速之前，人类就已经开始研究高超声速技术。美国开展的X-43A、X-51A、X-37B和HTV-2（Hypersonic Technology Vehicle 2）“猎鹰”等飞行器的飞行试验在高超声速领域占据了领先地位，并积累了宝贵的技术和经验。受其鼓舞，更是由于其潜在的重要战略意义和极高的应用价值，使得高超声速技术成为21世纪航空航天领域的研究热点之一，得到了世界范围的广泛关注。

我国在高超声速技术领域的研究方兴未艾，相关的科研院所和高等学校取得了令人瞩目的突破和积累，但与美国等航空航天发达国家相比仍有一定差距，亟待汲取其先进的研究经验，并藉此能够系统培养相关的科研人员。《高超声速技术译丛》的出版适逢其时，译丛旨在借鉴和总结美国等航空航天领先国家的经验，使其理论化、科学化和系统化，进而结合工程实践，以形成具有我国特色的高超声速技术理论与实践相结合的知识体系。

《高超声速技术译丛》主要涵盖飞行器总体技术、推进技术、气动力与气动热、材料与结构热防护、制导与控制、数值模拟与试验测量技术等专业方向，知识领域覆盖了高超声速飞行器研发设计、制造和试验等关键技术。译丛择优选取了美国航空航天学会等国外机构出版的高超声速及相关技术的经典著作，以飨读者。

本套译丛的出版得到了国内众多方面的大力支持。丛书凝结了高超声速研究领域专家智慧和成果，承担着记载与弘扬科学成就、积累与传播科技知识的使命，具有较强的系统性、完整性、实用性和技术前瞻性，既可以作为实际工作的指导用书，也可以作为相关专业人员的学习参考书。期望这套丛书能够有益于高超声速技术领域人才的培养，有益于高超声速技术的发展，有益于高超声速飞行器的研制工作。同时，希望能够吸引更多的读者来关心、支持和热爱高超声速技术，并投身其中做出贡献。

《高超声速技术译丛》编辑委员会
2012年5月

译 序

美国国家航空航天局（NASA）自 1996 年以来一直在研究 X-43A 高超声速飞行器的相关技术，美国科学家称 X-43A 将成为继“莱特兄弟首次飞行以来航空航天技术的最重大突破”。X-43A 于 2004 年在美国西海岸试飞成功，并以每小时约 8000 千米的速度创造了飞行时速的新世界纪录。

本书作者以历史学家的视点，记录了作者全程伴随 X-43A 几次飞行试验时的见闻与感受，采访了与研发和试验相关的技术与管理人員，为读者提供了弥足珍贵的来自 X-43A 项目的第一手资料。本书重点关注 NASA 德莱顿飞行研究中心开展的关于 X-43A 的飞行活动，详细记录了飞行项目相关人员在飞行准备、装备集成和实际飞行等阶段的实际工作经历，分析了飞行试验中的困难与得失，全面而有重点地介绍了 X-43A 项目中的关键技术。译者希望通过本书中文版的出版，能与广大读者分享这一航空航天飞行器的研制史，探讨和学习其中的经验与教训。他山之石可以攻玉，同我国实际国情相结合，希望能对我国相关领域的科学研究有所裨益。

本书初译稿完成后，得到了许多同行的关心，他们与译者有益的讨论使译者能更好地把握全书的主旨。本书在翻译和译校过程中得到了研究团队成员的大力支持与帮助，在此谨向解利军、石兴、邹建锋、邓见、张帅、邢菲、季廷炜、杨永健、潘海滨等表示诚挚的感谢。

感谢中航出版传媒有限责任公司（航空工业出版社）的大力支持，他们的周全安排使本书得以与读者见面。感谢责任编辑李苏楠细心的工作和辛勤的劳动。由于译者水平有限，在对原著的理解上难免有不当之处，敬请读者谅解。

郑耀 徐徐

2011 年 12 月 8 日

于浙江大学航空航天学院

我扑入未来，远至人眼所及，
看到世界景象，以及一切奇迹；
看到商业天堂，大批有着魔幻风帆的大商船，
紫色晨曦微光，飞行员带着珍贵的货物从天而降。

——阿尔弗雷德·坦尼森爵士，《洛克斯利大厅》，1842 年

For I dipped into the future, far as human eye could see,
Saw the Vision of the world, and all the wonder that would be;
Saw the heavens fill with commerce, argosies of magic sails,
Pilots of the purple twilight, dropping down with costly bales.

——*Alfred, Lord Tennyson, "Locksley Hall,"* 1842

原 版 序

《飞行图书馆系列丛书》(Library of Flight) 是美国航空航天学会 (American Institute of Aeronautics and Astronautics, AIAA) 日益增长的信息服务的组成部分。它以航空政策、案例分析、航空法律研究、管理等越来越多的相关课题来扩展学会已经出版的两种书籍系列——《航空航天进展系列丛书》(Progress in Aeronautics and Astronautics) 和《AIAA 教育系列丛书》(AIAA Education Series)。本书中柯蒂斯·皮布尔斯将 X-43 高超声速试验的故事娓娓道来, 从技术开发的根基到飞行试验的里程碑等一系列叙述, 成为展示《飞行图书馆系列丛书》作用的最好范例。在实现高超声速飞行和低成本进入太空的道路上, X-43 项目依然是一个重要的里程碑。

《飞行图书馆系列丛书》致力于记录航空航天在启动、促进和加速全球商贸、交流和国防中的关键作用。与学会的其他系列图书不同,《飞行图书馆系列丛书》的作者们善于通过政策或热点事件表达其鲜明的观点。随着全球航空航天项目的不断发展和变化, 本系列丛书计划推出大量具有一定国际影响力的作者, 让他们在航空航天远景、事件和问题上各抒己见。由于人们盼望世界航空航天系统能支持无人飞行器、国际救援、农业管理、环境监督等, 因此本系列丛书也将记录划时代的事件、新涌现的潮流以及一些新出炉的观点。

柯蒂斯·皮布尔斯不但是位经验丰富、广受尊敬的作者, 也是本系列丛书倍受欢迎的撰稿人。

内德·艾伦

《飞行图书馆系列丛书》主编

加利福尼亚州帕姆代尔市洛克希德·马丁公司

原版前言：亲身参与的历史学家

历史学家难得有写这种书的机会。2004 年夏末，随着第三次即最后一次 X-43A 飞行的临近，我被任命为项目历史学家，任务是讲述 X-43 项目发展过程中的经验教训。目标读者是航空航天专业的大学生，帮助他们了解投身尖端项目所要面对的困难。尽管已经有很多记录航空和航天项目历史的文字被发表，但那些通常是在项目结束后数年甚至数十年的作品。

作为 X-43 项目全程的参与者，我接收邮件和文件，参加工程会议，目睹飞行操作员的紧急操作训练，出席飞行就绪审查和飞行前情况通报会，在控制室里观看第三次飞行，并接触到许多各种各样的项目工程师和人员。第三次飞行后，我采访了美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）德莱顿飞行研究中心的许多 X-43A 工程师和管理人员，询问他们新鲜出炉的经验和回忆。

这样的历史记录具有相当的即时性，即故事由亲历的人讲述，而这对于历史来说是难得一见的。伴随着高超声速历史的是极高的期望和反复的失望。在遥遥无期的研发时间里，X-43A 的工程师不仅饱尝了困难，也体验了成功。当这个姗姗来迟的发射时刻到来时，第一次飞行在发射后数秒便宣告结束。随后展开了事故调查，伴随着历时三年的严格技术审查，最后终于又重返天空。2004 年进行了第二次和第三次 X-43A 飞行，速度分别达到马赫数 7 和马赫数 10，并提供了超声速燃烧冲压喷气发动机（超燃冲压发动机）的首个飞行数据。

这本书的问世离不开 X-43A 项目参与人员的协助。他们欢迎我这个外行来到他们当中，一起解答无数关于飞行物理和飞行技术的问题。因为他们，我才得以亲身经历这航空航天史上伟大的里程碑。在此向他们表达最热情的谢意。

柯蒂斯·皮布尔斯

2007 年 11 月

加利福尼亚州爱德华兹市 NASA 德莱顿飞行研究中心历史办公室
分析服务和资料公司

目 录

第 1 章 历史回眸	(1)
1.1 超燃冲压发动机的发展历程	(2)
1.2 机体推进一体化的超燃冲压发动机	(11)
1.3 美国国家高超声速飞行研究设施 (NHFRF)	(13)
1.4 美国国家空天飞机 (NASP)	(17)
1.5 超燃冲压发动机的发展历程——1958—1994 年间被忽略的 经验教训	(20)
1.6 参考资料与注释	(21)
第 2 章 凤凰涅槃	(23)
2.1 小尺寸高超声速飞行器	(23)
2.2 戈尔丁法则	(27)
2.3 起源和决定	(30)
2.4 从纸上谈兵到初步设计	(35)
2.5 推进剂减载	(37)
2.6 飞行器回收	(38)
2.7 组合体频率	(40)
2.8 难舍难分	(41)
2.9 最初的汗水——经验总结	(44)
2.10 参考资料与注释	(44)
第 3 章 走向第一次飞行的征途	(48)
3.1 Hyper - X 运载火箭改进和风洞试验	(48)
3.2 Hyper - X 分离焦虑症	(50)
3.3 建造 X - 43A Hyper - X 试验飞行器	(56)
3.4 马赫 7 超燃冲压发动机开发和试验	(64)
3.5 处女地——马赫 10 下的 Hyper - X 超燃冲压发动机	(69)
3.6 参考资料与注释	(71)

第 4 章 X-43A 检验和紧急操作训练	(74)
4.1 逐步渐进	(76)
4.2 差异报告、布局变更申请、系统试验报告、 豁免签发——配置控制的基础知识	(83)
4.3 紧急操作训练	(87)
4.4 发射日	(94)
4.5 参考资料与注释	(97)
第 5 章 13.5 秒	(99)
5.1 2001 年 6 月 2 日	(99)
5.2 事故调查委员会	(106)
5.3 决策是艺术，而非科学	(114)
5.4 面对失败	(114)
5.5 参考资料与注释	(115)
第 6 章 重返飞行	(117)
6.1 回到仿真和程序改进	(117)
6.2 降低接近声速动压的选择	(118)
6.3 尾翼作动系统	(122)
6.4 尾翼作动系统门锁	(124)
6.5 最终改进办法	(125)
6.6 参考资料与注释	(127)
第 7 章 $C_t > C_d$	(130)
7.1 第二次飞行	(131)
7.2 世界上最快的飞机	(138)
7.3 飞行之后	(143)
7.4 第二次飞行的意义	(146)
7.5 参考资料与注释	(146)
第 8 章 飞向天际	(149)
8.1 再谈尾翼作动系统	(151)

8.2	技术通报会.....	(156)
8.3	漫长的一天.....	(158)
8.4	飞向天际.....	(160)
8.5	参考资料与注释.....	(170)
第9章	遥远的地平线	(173)
9.1	关于高超声速的经验教训.....	(174)
9.2	遥远的地平线.....	(185)
9.3	参考资料与注释.....	(186)
辅助材料		(190)

第1章 历史回眸

即使把一生都献给天空，也不够研究这如此广袤的对象。我们的后代将会惊异，在他们看来如此简单的知识，现在的我却一无所知。——塞涅卡，《第七册》，公元1世纪。

航空航天工程师在大学阶段需要学习空气动力学、热力学、结构、稳定性分析和控制、动力学、设计、推进、计算机科学，以及与之相关的数学、物理、统计、化学等基础课程。只有这样，到毕业的时候，初出茅庐的工程师才能够掌握制造飞行器所需的基本知识。

飞行器设计与制造过程存在无数未知的情况，只有通过实践经验才能学到，这一过程是将基本概念转化为有用实物的大胆冒险经历。由于项目工程师经常会面对模棱两可的情形，而管理层也经常要求他们对项目进行风险评估，因此再怎么仔细分析，不确定性也无法消除。当项目必须在有限的时间和预算内完成时，工程师需要回答潜在问题的解决方案是否对得起经费的投入和项目的延期，或者回答解决方案是否会比问题本身更加糟糕。人们通常采用审查检讨的方法来确保每个未知情况不被忽略，却无法应付一无所知的情况。

在X-43A高超声速试验（Hypersonic Experiment, Hyper-X）计划的历史上就发生过这种情况。美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration, NASA）的这个项目在缩比飞行器上进行了超燃冲压发动机（Supersonic Combustion Ramjet, Scramjet）的飞行试验。从B-52B载机发射X-43A Hyper-X试验飞行器（Hyper-X Research Vehicle, HXRV），然后由改进的“飞马座”火箭第一级（被称为Hyper-X运载火箭，即Hyper-X Launch Vehicle, HXLV）将之提升到试验速度。一旦到达指定的速度和高度，X-43A就和助推器分离、自稳，然后开始发动机试验。

本书重点关注NASA德莱顿飞行研究中心开展的关于X-43A的飞行活动。书中详细记录了飞行项目相关人员在飞行准备、装备集成和实际飞行等阶段的实际工作经历，以及由此获得的经验与教训。本书的目的并非提供一部正式而完整的X-43A Hyper-X项目历史记录，因此本书在描述过程中没有进行全面的介绍。

20世纪50年代末期，虽然人们已对超燃冲压发动机进行了风洞试验，但在Hyper-X项目之前却从未用合适的机体平台搭载发动机进行过实质性的飞行试

验。因此，尽管超燃冲压发动机在风洞的人造气流中成功运行过，但仍然需要在“实际空气”中得到验证。这些条件意味着密度和温度的改变，以及自由飞行过程中迎角和侧滑角的变化。由于风洞对这些条件模拟的真实程度有限，而真实条件相对于风洞的变化对任何飞行器都有较大影响，所以其对超燃冲压发动机性能的影响尤其严重。

Hyper-X 项目的目的是为地面试验提供验证标准。首先，全尺寸的 X-43A 发动机在风洞中运行试验，然后模拟飞行，并将试验所得数据与发射数据进行比较，如果匹配，未来风洞数据即可成为超燃冲压发动机的可靠设计依据。如果差异明显，则需要查明原因。如果没有获得这些数据信息，超燃冲压发动机就不能够成为在未来太空发射或高速航空器中应用的成熟技术。

1.1 超燃冲压发动机的发展历程

吸气式喷气推进的基本概念开始于冲压发动机。第一次世界大战爆发前，法国人雷恩·罗兰对冲压发动机进行了理论研究。该发动机是喷气式发动机最简单的形式，由进气口处的尖锥产生激波，使进入的气流减速到亚声速，进入发动机的高速气流的动能转化为燃烧室的压力（称为压力恢复），然后用一组喷油孔为燃烧室注入燃料，燃料与压缩空气混合后点燃，通过火焰稳定器提供稳定燃烧，产生的热气流通过收缩—扩张型喷管排出，从而产生推力。该冲压发动机是一个形状简单的管道，没有涡轮叶片或其他活动部件。

尽管冲压发动机研发工作在 20 世纪 30—50 年代间有所进展，但它的应用却仅限于靶标或地空导弹等领域。这是由于设计所限——冲压发动机只有在摄入足够多气流后才能起动。因此携带冲压发动机的飞行器必须拥有另一个独立的推进系统（如火箭助推器）使之加速到冲压发动机可以点燃的速度。独立推进系统导致的重量^①增加和复杂性是主要的限制因素。例如，使用冲压发动机的战斗机需要一个起飞用的涡轮喷气发动机，但这并不现实。附加推进系统带来的重量则削弱或消除了冲压发动机在性能方面的获益。

此外，因为空气在减速至亚声速并压缩的过程中会发热，使得冲压发动机飞行器的最高速度被限制在马赫数（简称马赫）6 左右。而其最高温度可达到足以损坏飞行器结构的程度^{[1]②}。

解决热问题的一种方案是使燃烧在超声速气流中进行。20 世纪 50 年代中期，在炮弹壳底部进行了一些超声速燃烧试验，并挂在一个机翼表面进行外部燃烧来提高性能。为了验证这一想法的可行性，美国国家航空咨询委员会（National Ad-

① 本书所提“重量”均为“质量”概念，单位为千克、吨等。

② 参考资料与注释均置于各章末。

visory Committee for Aeronautics, NACA) 刘易斯飞行推进实验室的研究人员在超声速风洞中燃烧硼化铝。试验中,他们确信观察到了硼化铝在马赫 1.5、马赫 2 和马赫 3 下长达 2 秒的燃烧过程^[2]。

刘易斯飞行推进实验室的研究人员理查德·J. 韦伯和约翰·B. 麦凯受风洞气流中的外部超声速燃烧启发,开始考虑超声速气流中的持续内部超声速燃烧。假如这个设想可以实现的话,他们断定可以提高发动机性能并且减少内部热量。受到这个研究结论的激励,韦伯和麦凯于 20 世纪 50 年代开始对超燃冲压发动机的设计进行理论分析。

韦伯和麦凯最早提出了制造超燃冲压发动机所需的设计要求,涉及使进气道设计压力恢复最大化、燃烧温度效应、喷口速度和扩张比、燃烧区域和冷却载荷、壁面摩擦、喷管压力损失最小化,以及以氢气作为燃料的优点。他们的报告指出速度在马赫 5 以上时,超燃冲压发动机比传统冲压发动机的效率更高^[3]。

具有讽刺意味的是,韦伯和麦凯认为他们的研究结果没有实际应用价值,不会引起人们的兴趣,所以并不重视。直到 1958 年 9 月 NACA 改组为 NASA 的前一个月,韦伯和麦凯才发表其研究结果。他们的研究成果使人们对超声速推进技术的兴趣高涨到了一个新的时期。

同年,约翰·霍普金斯大学应用物理实验室(Applied Physics Laboratory, APL)的弗雷德·比利希和 G. L. 达格尔进行了超燃冲压发动机的首次地面试验,获得第一个超燃冲压发动机的专利。该试验利用烷基铝燃料作为小型超声速冲压发动机的燃料得到正推力。20 世纪 60 年代早期,APL 在此基础上进一步研究了进气道、燃料喷嘴和燃烧室的设计。与此同时,安东尼奥·费里也在通用应用科学实验室(General Applied Sciences Laboratory, GASL, 一家私人工程公司)进行了超燃冲压发动机的风洞试验。由于其在超燃冲压发动机领域的孜孜追求,以及强烈支持将超燃冲压发动机应用于可再用轨道运载器,使 GASL 声名大噪^[4]。

超燃冲压发动机从大气中获得燃烧所需的氧气,与之相对的,火箭则自行携带燃料和氧化剂。尽管火箭可以在真空中运行,但携带推进剂增加了飞行器尺寸和重量。相比而言,以超燃冲压发动机为动力的飞行器只需携带燃料,从大气中获取氧气,由此带来了许多优势。基于超燃冲压发动机的飞行器不仅比火箭小巧轻便,而且发动机效率(称为比冲)得到极大的提高。使用氧燃料和氢燃料的火箭比冲仅仅为 400 多秒,而使用氢燃料的超燃冲压发动机理论比冲在马赫 7 时为 3000 多秒,在马赫 10 时为 2000 多秒。

用吸气式推进系统为轨道飞行器提供动力的想法符合人类宇宙飞行的现有概念。20 世纪 50 年代,航空工程师就设想过通过一系列试验飞行器实现宇宙飞行,每个试验飞行器都比上一个飞得更快更高,直到有一个到达轨道。随着超燃冲压

发动机的出现,这一飞行器模式似乎在技术上可以实现。20 世纪 40—60 年代,人类的飞行计划已从活塞式发动机时代跨越到载人轨道飞船时代。其后十年,美国计划人类登月。人们坚信这类技术将持续发展,使一切都成为可能^[5]。

20 世纪 50 年代末期和 60 年代初期,美国空军的空天飞机项目首次尝试开发以超燃冲压发动机为动力的飞行器。美国空军征募了费里和 GASL 的工程师们来设计轨道飞行器。费里提出了一个可以从马赫 8 运行到马赫 25 轨道速度的超燃冲压发动机推进系统。通用动力 (General Dynamics)、洛克希德 (Lockheed)、道格拉斯 (Douglas)、波音 (Boeing)、固特异 (Goodyear)、北美航空 (North American Aviation) 等公司都参与其中,并提出了多个设计和实施方案。空天飞机概念的吸引力在于它能以较低成本的常规方式进入太空,并且能完成的任务包括轨道再补给、太空救援、轨道打击和低成本卫星发射。

但是空天飞机存在着一系列未解决的基本问题。例如,它的单级入轨设计要求使用深思熟虑的轻量结构设计,以及能将庞大飞行器推进到近轨道速度的巨大超燃冲压发动机还只是小比例风洞模型。1962 年,虽然美国空军将空天飞机项目改为两级入轨,转移了人们的关注焦点,但问题仍然存在。1964 年,美国国会取消了该项目的财政年度经费,项目随之终止^[6]。

但这并不意味着超燃冲压发动机的研发就此止步。20 世纪 60 年代初期空天飞机项目结束后,NASA 提出了高超声速研究发动机 (Hypersonic Research Engine, HRE) 研究计划。最初的 HRE 要求在 NASA 和美国空军的 X-15A-2 火箭飞机上对发动机进行飞行试验。该飞行器在 1962 年 11 月迫降之后进行了改造:携带两个大型外部油箱使飞行器的最高速度增加到马赫 8 左右;通过外部的烧蚀热蔽层 (热防护层) 来保护它不受高速下的热流损伤。为了容纳一个小型液氢储罐和超燃冲压发动机的管道,机身也被加长。HRE 连接在 X-15A-2 的机翼下表面。

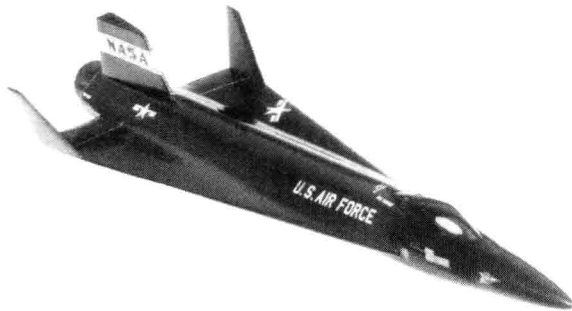


图 1-1 三角翼 X-15 飞行器模型。如果当时获得批准,飞行器可以用于试验各种吸气式推进系统。(NASA 图, E65-13857)



图1-2 有烧蚀热蔽层的X-15A-2。速度接近马赫8、高度约10万英尺^①时，它能进一步防止飞行器被较高热载荷损坏。（NASA图，E67-17336）

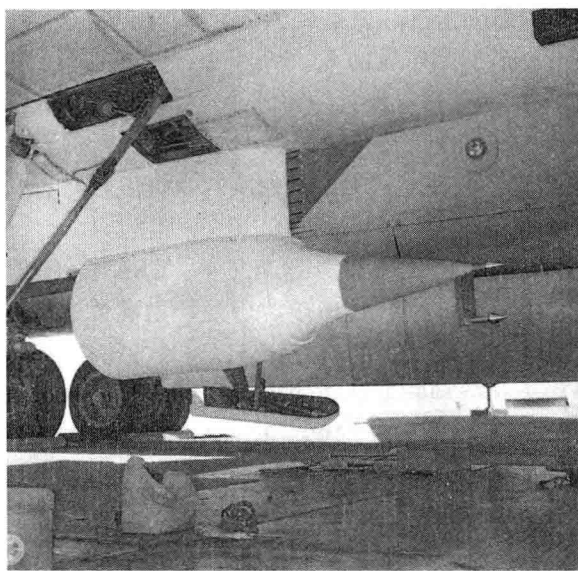


图1-3 连接在X-15A-2机翼下表面上的高超声速研究发动机（HRE）模型。发动机模型没有工作部分，用途是检验X-15飞行特征的空气动力效应。（NASA图，E67-17493）

1967年春天，打算在X-15A-2机翼下表面接上一个试验HRE进行飞行研究。1967年10月3日，该飞行器试验最大速度为马赫6.7。由于没有考虑到模拟

^① 1英尺=0.3048米。