

艾伦·邦德和“佩刀”发动机

范思儀, 郑思行, 秦云鹏, 胡鹏举, 费王华

中国运载火箭技术研究院研究发展部, 北京 100076

摘要 “佩刀”(SABRE)发动机结合了涡轮发动机、火箭发动机和冲压发动机的特点,是一款创新性的协同吸气式火箭发动机。通过回顾艾伦·邦德在“佩刀”发动机研发中发挥的作用,介绍了“佩刀”发动机组成和采用的新技术,分析了吸气式和火箭式两种工作模式及相应工作原理,展望了“佩刀”发动机广泛的应用前景。

关键词 “佩刀”发动机;吸气模式;空天飞机

在飞行器动力追求突破的进程中,英国天才工程师艾伦·邦德(Alan Bond)和他提出的协同吸气式火箭发动机“佩刀”(synergetic air breathing rocket engine, SABRE)发动机具有创新性,也取得了重要进展。“佩刀”发动机结合了涡轮发动机、火箭发动机和冲压发动机的特点,是一款协同吸气式火箭发动机。艾伦·邦德凭着对航天事业的热爱与执着,投身“佩刀”发动机研制,取得的成就在国际上引起了广泛关注^[1]。

1 不断积累经验,“佩刀”汲取“营养”

人类关于空天飞机的畅想已经延续了半个世纪,艾伦·邦德作为英国的喷气发动机有限公司(Reaction Engine Limited, REL)的创始人,现任首席工程师,参与并主持了 Daedalus 项目、Blue Streak 导弹、HOTOL 项目、SKYLON 项目、SABRE 项目,以及 A2 高超声速飞机项目研制,是一位富有创造力并极具天赋的工程师。

艾伦·邦德早期曾在罗尔斯-罗伊斯公司从事液体火箭发动机研究,主要研究了 RZ2 液氧煤油发动机以及 RZ20 液氢液氧发动机,在此期间参与了 Blue Streak 导弹在 Woomera 的飞行试验工作。之后 20 年时间,在英国原子能协会(UK Atomic Energy Authority)的 Culham 实验室从事核聚变研究,参与了 JET、RFX 核研究计划。这期间,艾伦·邦德主要从事核聚变在星际旅行中的应用研究。他主持完成了 Daedalus 核聚变动力恒星飞船计划报告,并由英国星际航行学会(British Interplanetary Society)出版。这一切都为“佩刀”发动机的诞生积累了丰富的经验^[2]。

2 不甘 HOTOL 夭折,“佩刀”应运诞生

随着 1981 年哥伦比亚号航天飞机的成功首飞,英国开始着手研制可重复使用的航天飞机系统。在 1982 年的英国星际航行学会年会上,法国国家空间研究中心介绍了阿里安-5 型火箭方案情

收稿日期:2019-11-12;修回日期:2020-04-20

作者简介:范思儀,助理工程师,研究方向为结构总体设计,电子信箱:776773695@qq.com

引用格式:范思儀,郑思行,秦云鹏,等. 艾伦·邦德和“佩刀”发动机[J]. 科技导报, 2020, 38(12): 176-180; doi:10.3981/j.issn.1000-7857.2020.12.017

况。艾伦·邦德等人士认为该方案不仅保守、缺乏远见,更不能适应欧洲航天技术发展的需求。同年,艾伦·邦德开始了先进航天运载系统的研究^[1]。

当时国际上比较热门的吸气式动力形式包括:涡轮冲压动力(turboramjet)、液化空气循环发动机(liquid air cycle engine, LACE)以及超燃冲压发动机(scramjet)。在当时,很多人认为吸气式动力技术将解决单级入轨问题,但各类动力方案皆有不足之处。

涡轮冲压发动机可工作至马赫数(Ma)5,之后需采用火箭动力加速入轨,而在这个阶段涡轮冲压发动机并不工作,于是便产生了“死重”问题,使得动力系统推重比降低。超燃冲压发动机可将飞行

器加速至Ma 6以上,在当时是人们认为最有可能实现单级入轨的动力形式,美国也将超燃冲压发动机加入到后来开展的NASP计划重点研究项目中。但是,使用超燃冲压发动机的飞行器需要其他动力将其加速至超燃冲压发动机可工作的速度,并且在结束后需采用火箭动力将飞行器送入轨道^[3]。

艾伦·邦德认为,超燃冲压发动机研制成本高、技术难度及风险大,不是实现低成本航天运输的有效途径,更适合用作高马赫数巡航动力。除超燃冲压发动机外,另一种解决高马赫数飞行的方法是采用冷却剂给空气降温。于是艾伦·邦德通过改进液化空气循环发动机(LACE,图1),结合涡轮发动机及火箭发动机特点,提出了一种新的发动机循环^[2]。

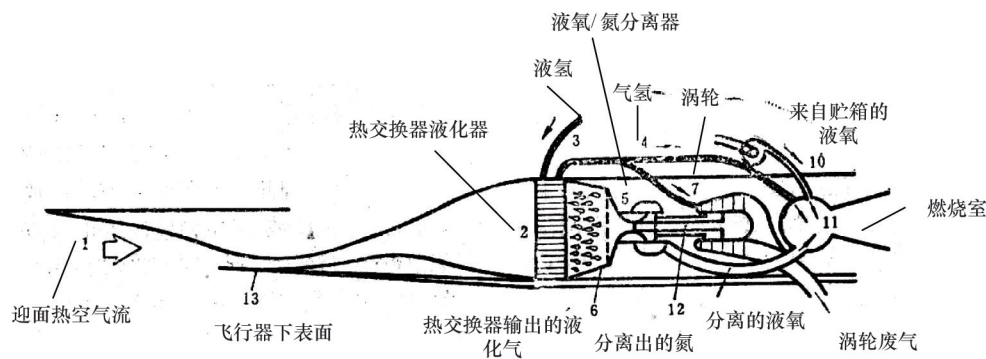


图1 液化空气循环发动机(LACE)结构示意图

艾伦·邦德认为可以通过减少冷却空气的氢量以提高发动机效率,还提出需研制更轻质、更有效的热交换器。当时影响热交换器效率的最大问题是结霜问题,罗尔斯-罗伊斯公司依据艾伦·邦德的想法进行了试验,证实可成功解决结霜问题使得热交换器更为有效。液化空气循环中冷却用液氢比燃烧所需的氢燃料多,若将这些多余的氢通入燃烧室进行燃烧会降低燃烧效率,故艾伦·邦德提议将经过热交换器后的氢排放掉,提高燃烧室的燃烧效率。随着研究的逐步深入,艾伦·邦德发现如增加一个溢流系统,将多余的空气通过喷管排出,可补充部分推力,还可在溢流涵道出口处加装燃烧室,构成简单的冲压发动机结构,利用排放的氢作为燃料,提高燃料利用率并能增加发动机推力,使

发动机的性能提高。采用这种新型循环的发动机叫做RB545“燕子”吸气式火箭发动机,其循环模式如图2所示^[4]。

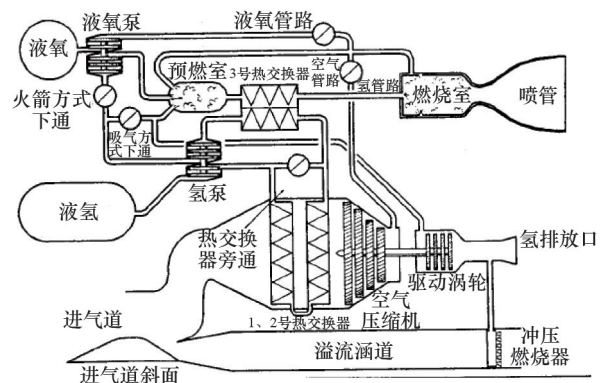


图2 RB545发动机简化循环示意图

最初在英国政府的支持下,罗尔斯-罗伊斯公司和英国宇航公司共同投资,合作开展HOTOL空天飞机及RB545发动机的研制。但最终由于国际形势的变化和英国政府中断投资,1988年,HOTOL计划被迫终止。

1989年,艾伦·邦德(图3,左一)不甘于HOTOL计划的夭折,与2名火箭工程师理查德·瓦威尔、约翰·斯科特一同成立了REL,并自筹资金继续对HOTOL计划中的技术问题攻关研究。“佩刀”发动机由此诞生。



图3 艾伦·邦德(左一)

“佩刀”发动机(图4)分成核心机和机舱两部分。核心机由2个独立的火箭发动机和1个空气供应系统组成。机舱由1个进气道、多个外涵冲压燃

烧室组成。“佩刀”发动机以氢氧火箭发动机为核心,利用了航空燃气涡轮发动机的进气道和压气机技术、亚燃冲压发动机技术以及闭式氦气布雷顿循环技术,是4种技术的有机结合。为提高发动机效率,“佩刀”发动机在原RB545发动机循环中引入了第三流体循环——氦循环,利用液氢冷却氦气,再利用低温氦冷却来流^[4]。

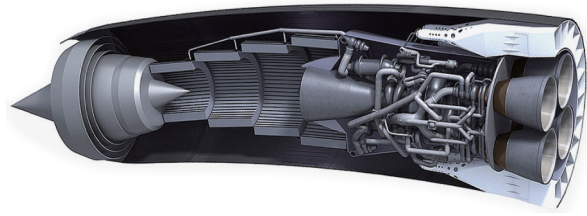


图4 “佩刀”发动机

“佩刀”发动机工作模式分为吸气式模式(Ma 0~5)和火箭模式(Ma 5+)。^[4]

吸气式模式循环如图5所示,来流空气经过进气道后,分成核心机空气路和外涵道空气路两部分。核心机空气路的空气依次通过预冷器的HX1和HX2,被低温氦气降温至接近空气的饱和温度,然后由压气机把空气压缩成高压空气。这股高压空气分成两部分,一部分进入预燃室,与氢燃烧产生富氢燃气,在氦加热器HX3中加热氦气后进入

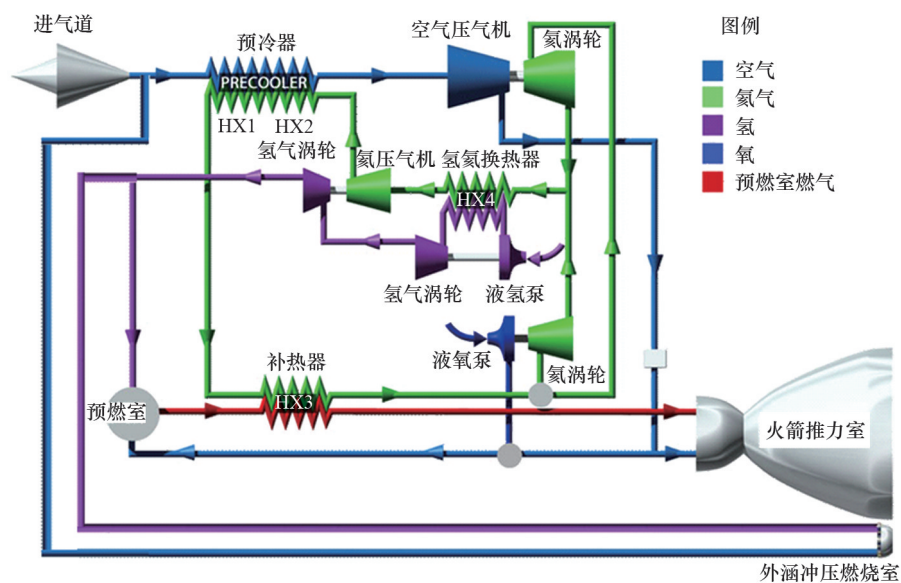


图5 “佩刀”发动机吸气式模式循环

推力室;另一部分空气则进入推力室再生冷却夹套,之后进入推力室内。外涵道空气路在外涵道燃烧室内与核心发动机排出的氢气燃烧,以补偿这部分空气的冲压动量损失。高压低温氦气依次进入预冷器的HX2和HX1,与进气道出口的核心机空气路的空气换热,然后进入氦加热器HX3,与富氢燃气换热进一步提高温度,之后驱动空气压气机的涡轮。对涡轮做功后的氦气在氦再生器HX4中与低温氢换热,温度降低至接近液氢温度,最后通过氦循环涡轮压气机恢复到初始的高压低温氦气状态,从而完成一个闭式布雷顿循环。从运载器贮箱来的液氢先后由氢预压涡轮泵和氢高压涡轮泵增压,然后进入氦再生器HX4,吸收氦气排出的废热形成具有做功能力的氢气,之后顺序驱动氢高压涡轮泵的涡轮和氦循环涡轮压气机的涡轮。做功后的氢气分成两路,第一路进入预燃室,与高压空气燃烧形成富氢燃气,在HX3中为氦气补热;第二路进入冲压燃烧室^[3]。

火箭模态如图6所示,此时进气道关闭,无空气进入发动机,预冷器不再冷却空气,预冷器内仅有低温氦气流过,空气涡轮压气机停转,发动机的外涵道不再工作。氦气仅在预燃室内的氦加热器HX3中被加热,然后驱动氧涡轮泵的涡轮,最后进入HX4与低温氢换热,温度降低至接近液氢温度,最后通过氦循环涡轮压气机恢复到初始的高压低温氦气状态,从而完成一个闭式布雷顿循环。液氧替代空气作为发动机的氧化剂,从贮箱来的液氧先后由氧预压涡轮泵和氧高压涡轮泵增压,液氧首先

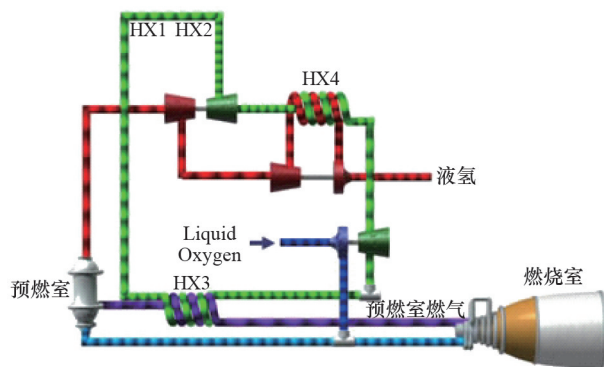


图6 “佩刀”发动机火箭模态循环

由氧泵增压,然后分成两路:一路进入预燃室与氢燃烧,形成富氢燃气;另一路进入推力室再生冷却夹套,之后进入推力室。液氢的流路与吸气模式时基本相同,区别在于没有氢输出到外涵道^[3]。

3 步步稳扎稳打,“佩刀”逐渐成长

1990年,REL开展了“佩刀”发动机的研制工作。2003年,REL在布里斯托大学研究成果基础上,突破了预冷器霜控技术。2009年,REL启动“涡轮基组合吸气式火箭发动机关键技术实验研究”项目(Experimental Investigation of Key Technologies for a Turbine Based Combined Rocket Engine),该项目获得了欧洲空间局(ESA)英国部分的部分支持,并通过3个阶段完成“佩刀”发动机关键技术的攻关^[3]。

在第1阶段(2009—2011年),REL联合英国宇航系统公司(BAE)和德国航天局(DLR),开展了氧化剂冷却燃烧室技术、先进膨胀偏转喷管技术、预冷器模块研究。

在第2阶段(2011—2013年),通过一系列风洞实验,验证了变几何进气道理论模型;在2012成功将空气无霜冷却至 -150°C ,ESA对试验结果给予了官方评价:“预冷器设计目标已全部成功实现,该试验验证了研制‘佩刀’发动机所需的关键技术。”2013年,成功完成了“佩刀”发动机核心部件预冷器的全尺寸演示验证试验,至此概念论证阶段工作全部完成。预冷器技术可使“佩刀”发动机在Ma 5条件下以吸气模式工作。

自此,REL的工作重心逐渐由关键技术验证转向发动机设计及研制阶段,并将进行“佩刀”吸气式循环的首次地面演示验证试验。

经过了前两个阶段的技术验证,艾伦·邦德带领的研制团队掌握了“佩刀-3”发动机的全部技术,并根据20多年来的发动机研制经验,提出了改进型的“佩刀-4”发动机循环。“佩刀-3”发动机火箭模式和吸气模式都采用常规燃烧室及喷管喉部,并要求各部件性能最佳化,这使得预冷器需将来流预冷到很低的温度,预冷器需要霜控处理,并且出

口温度低的同时,发动机的吸气式模态燃烧压力高、当量比高、燃料消耗较高。“佩刀-4”发动机使用一个能降燃料消耗的双喉部喷管。该改动带来了质量、部件数量以及成本的增加,但是,却使发动机研制的技术难度降低,吸气式发动机及火箭发动机能各自独立发展。并且,由于预冷器出口温度比“佩刀-3”发动机高,不再需要霜控系统。

在第三阶段(2013—2016年),REL开展了SCEPTRE地面静态演示验证发动机项目,采用氦作为第三工质,验证“佩刀”发动机循环,并开展舱体试验飞行器(Nacelle Test Vehicle, NTV)项目,验证可调进气系统,完成与飞行条件的匹配^[5]。

4 即将冲破云霄,“佩刀”未来光明

为了完成“佩刀”发动机的研制,REL扩展了与其他工业单位的合作关系,也吸引了更多人才。

2013年,英国政府宣布为“佩刀”试验发动机投资6000万英镑。2015年,英国宇航系统公司(BAE Systems)投资REL及其“佩刀”试验发动机项目2000万英镑,开展技术合作,加速开发新型“佩刀”发动机。美国空军实验室在“佩刀”发动机评估分析中指出佩刀发动机具有较好的发展潜力,获得了美国空军试验室的认可,达成合作共识^[6]。

目前,航天发射多向可重复运载系统发展,“佩刀”发动机是单级入轨空天飞行器的理想选择,采用“佩刀”发动机的飞行器甚至可以进行航线运营实现亚轨道点对点旅行。因此,“佩刀”发动机的应用方向可包括高超声速飞行器和两级或单级入轨的空天飞机,未来应用前景广泛。

参考文献(References)

- [1] 张连庆, 刘博, 李浩悦. “佩刀”发动机技术进展分析[C]//中国航天第三专业信息网第三十八届技术交流会暨第二届空天动力联合会议论文集——吸气式与组合推进技术. 大连: 中国航天第三专业信息网, 2017.
- [2] 康开华. 英国“云霄塔”空天飞机的最新进展[J]. 国际太空, 2014(7): 42-50.
- [3] 张志刚, 陈静敏, 李志勇, 等. SABRE发动机吸气模式下氦气闭式循环特性分析[J]. 战术导弹技术: 推进技术, 2016, 176(2): 61-66.
- [4] 杨新垒, 聂万胜, 刘晓慧. SABRE吸气模式热力循环及预冷器性能分析[J]. 战术导弹技术: 关键技术, 2018(1): 104-110.
- [5] 牛文, 李文杰. SABRE飞行器与SABRE发动机研究[J]. 飞航导弹: 推进技术, 2013(3): 70-75.
- [6] 周军, 邢娅. 云霄塔空天飞机的最终试验前景未卜[J]. 飞航导弹: 高超专递, 2014(1): 20-21.

Alan Bond and SABRE

FAN Siyi, ZHENG Sihang, QIN Yunpeng, HU Pengju, FEI Wanghua

Research and Development Department, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China

Abstract The SABRE engine combines the characteristics of turbo engine, rocket engine, and ramjet engine, and is an innovative, co-aspirated rocket engine. This article reviews the development process of the SABRE, introduces its compositions and the new technologies adopted, analyzes the two working modes of the aspirated and rocket, and explains their corresponding working principles. In the end its application prospect is presented.

Keywords SABRE; air-breathing mode; aerospace aircraft ●



(责任编辑 王丽娜)