

# 霍尼韦尔的先进低排放单环燃烧室

## Analysis of Honeywell's SABER Combustor

李杰<sup>1</sup> 巨亚斌<sup>2</sup>/1 西安航空动力股份有限公司 2 中航发动机有限责任公司

**摘要:** 先进低排放单环燃烧室是霍尼韦尔公司研发的新一代燃烧室,用于大航程公务机的HTF7000系列涡扇发动机。本文在简要介绍HTF7000发动机的基础上,从技术突破、研发过程、技术特点和NO<sub>x</sub>排放性能等方面对先进低排放单环燃烧室进行了分析,对国内航空发动机的研制具有重要的借鉴和参考价值。

**Abstract:** SABER combustor is the new research finding of Honeywell and be used for HTF7000 engine series. Based on the brief introduction of HTF7000 engine, this paper analyses the SABER combustor from technological breakthrough, development process, technical characteristics and NO<sub>x</sub> emission performance, has important reference value for the development of domestic aviation engine.

**关键词:** 先进低排放单环燃烧室; HTF7000发动机; NO<sub>x</sub>排放性能

**Keywords:** SABER combustor; HTF7000 engine; NO<sub>x</sub> emission performance

### 0 引言

遵从国际排放标准已成为所有航空运营商和航空器制造商所必须考虑的主要成本控制因素之一,特别是氮氧化物的排放,要求越来越严格。为了应对越来越严的规则要求,航空发动机制造商都在大力研发低排放燃烧室并以最快的速度将其投入到自己的主力机型中去,以期赢得更多的用户和占据更大的市场份额。SABER燃烧室(Single Annular combustor for Emissions Reduction—先进低排放单环燃烧室)则是霍尼韦尔公司研发的新一代低排放燃烧室,与其他公司的低排放燃烧室相比,SABER燃烧室的排放性能毫不逊色,可在不牺牲任何性能参数的情况下使发动机的排放低于CAEP/6标准27%,并为发动机未来的改型预留了很大的空间<sup>[1]</sup>。

### 1 霍尼韦尔的HTF7000发动机

霍尼韦尔的HTF7000发动机为双轴混流涡扇发动机,由四级轴流式压气机,一级离心式压气机,轴流环形燃烧室,两级高压涡轮和三级低压涡轮构成,用于驱动5000km航程级别公务机,具有油耗少、重量轻、可维护性高和运营成本低等优点。图1是HTF7000系列涡扇发动机外形照片。

自2004年在庞巴迪挑战者300中型喷气公务机上投入运营以来,霍尼韦尔的HTF7000涡扇发动机已在用户中建立

起了良好地信誉,其安全性、可靠性和使用成本都达到了最佳级别。目前在翼的数目超过了700台,积累飞行小时超过1,250,000h,应急可靠性超过了99.95%。这促使更多的公务机制造商选择HTF7000系列涡扇发动机作为动力,如湾流公司的“湾流”280型中型喷气公务机和巴西航空的莱格赛450型和500型中型喷气公务机。

### 2 先进低排放燃烧室的发展

随着环境空气质量下降以及全球气候变暖,过去的10年



图1 HTF7000系列涡扇发动机外形照片

中各组织机构就航空对环境的影响展开了越来越多的调查,促使政府机构对排放标准的复审和修订越来越频繁,遵从现行和未来的排放标准已成为公务机运营商考虑的主要成本因素。正如霍尼韦尔不断改进HTF7000系列涡扇发动机的性能,减少排放始终是推进发动机设计改进的焦点。

1981年,美国国际民间航空组织(ICAO)委员会就飞行环境保护(CAEP)对四种标准污染物,氮氧化物( $\text{NO}_x$ )、一氧化碳(CO)、未燃碳氢化合物(UHC)和烟尘订立了第一个排放标准。由于考虑到 $\text{NO}_x$ 对人类健康和地球环境是最为有害的,CAEP在1996年、2004年、2008年和2012年的改版中一直在不断收紧其对 $\text{NO}_x$ 排放的要求。绝大多数ICAO成员,包括美国和欧盟国家已通过了这些严厉的标准。

市场的压力也在增加。许多欧洲机场已经开始就特殊的飞机依据其 $\text{NO}_x$ 排放总量征税,同时,就排放贸易计划的市场可行性(类似于火电厂和制造厂现行的)开展讨论。

由于对 $\text{NO}_x$ 排放的新标准适用于新取证的发动机,ICAO还分别在2000年和2013年贯彻了“产品断绝”标准。根据这些要求,所有现有OEM(原产制造商)生产的发动机必须完全遵从新的标准,而不管原发动机的取证日期。

在这些严厉的标准和规则之下,航空发动机制造商都在不遗余力地投入大量财力、人力和物力开展先进低排放燃烧室的持续研发。各发动机制造商研发并投入运营的低排放燃烧室都有其典型代表,如GE公司的双环预混旋流器燃烧室(TAPS),普惠公司的先进低氮氧化物排放燃烧室(TALON),罗罗公司的第五阶段燃烧室,及霍尼韦尔公司的SABER燃烧室<sup>[2-5]</sup>。

### 3 SABER燃烧室的突破

霍尼韦尔的工程技术人员在“富油燃烧-猝熄-贫油燃烧”技术的基础之上花了十年时间研究出了SABER燃烧室。

“富油燃烧-猝熄-贫油燃烧”(RQL-Rich-Burn/Quick-Quench/Lean-Burn)的概念是上世纪80年代提出的,主要目的是减少涡轮发动机的 $\text{NO}_x$ 排放。RQL燃烧技术是现代航空发动机减少 $\text{NO}_x$ 排放的最基本的燃烧策略之一,其发展经历了30多年。上世纪90年代末,美国航空航天局(NASA)将这一概念作为下一代航空发动机降低 $\text{NO}_x$ 排放的主要研究对象,进而发展出了RQL燃烧室<sup>[2]</sup>。

RQL燃烧是典型的纵向串列燃烧的分级燃烧技术,前面是富油燃烧级,中间为快速猝熄级,后面为贫油燃烧级。由于富油燃烧区的排出物富集了大量 $\text{H}_2$ 、CO、部分氧化及部分烃化的物质,是不能直接排放的,需要附加氧气对其做进一步燃烧。通过燃烧室壁的补燃空气进气孔,补充空气与富油燃烧区排出的物质混合,在燃烧室的出口前部创造出贫油燃烧环境,这样燃烧室排出的物质主要变为 $\text{CO}_2$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{N}_2$ 和 $\text{O}_2$ ,对环境的污染程度明显降低。当空气从补燃空气进气孔进入火焰筒时,燃烧室的高温富油燃烧区减小,火焰的温度急剧下降形成猝熄(Quench)效应,这就是RQL燃烧技术,而应用RQL燃烧技术的燃烧室就被称为RQL燃烧室<sup>[2]</sup>。

虽然,HTF7000发动机的基型燃烧室可以满足CAEP/6关于 $\text{NO}_x$ 的排放标准,但没有为发动机未来的改型预留空间,为此霍尼韦尔研发了SABER燃烧室。

SABER燃烧室是以RQL燃烧室技术为基础,通过严格的仿真和分析,以及燃烧分段、整环测试、发动机试车和飞行测试等手段打造出的新型低排放单环燃烧室,是在继承RQL燃烧室优点基础上的

突破。其第一代燃烧室SABER-1可在不牺牲任何性能参数的情况下使发动机的排放低于CAEP/6标准27%,为发动机未来的改型预留了很大的空间。SABER-1燃烧室的关键还在于其为非结构改变型技术改进,也就是发动机的软件、机械接口和发动机的性能保持完全不变,使用SABER-1燃烧室的HTF7000发动机可以实现与飞机的无缝对接<sup>[1]</sup>。

### 4 SABER燃烧室的研发和技术特点

在SABER燃烧室研发的早期,SABER燃烧室设计团队应用计算流体力学(CFD)进行大尺度涡旋仿真,确定出了影响燃油喷射、燃烧化学、紊流和热传输效率等的关键因素。这类仿真具有非常高的精确性,能使工程技术人员提前预知发动机将会达到的性能。当然这需要超大型计算机的支持。例如,使用单一高端工作站分析一个结构参数就需要3个月时间。为具备这一能力,霍尼韦尔于2010年在其亚利桑那州凤凰城的校园内建立了大型并行计算中心,是全球500计算速度最快的计算中心之一。目前SABER燃烧室研发一直在持续,目的是用所获得的技术支撑和扩大SABER燃烧室的能力和应用范围。

为了加快新型燃烧室的研发速度,SABER燃烧室设计团队引入了结合CFD分析的连续测试体系,包括燃烧室分段实验件测试和环形燃烧室整环试验件测试,在霍尼韦尔的C-100测试台上进行。燃烧室分段实验件采用了三个弧形排列的喷嘴以便快速测试和筛选燃烧室的设计因素。环形燃烧室测试对试验件直接加热和加压,模拟在不同飞行和动力条件下燃烧室的性能。

燃烧室分段实验件和环形燃烧室整环试验件测试显示了优异的燃焰气



图2 SABER燃烧室火焰气动分布图

动分布和燃烧室壁温度分布结果。图2为SABER燃烧室火焰气动分布图<sup>[1]</sup>。为了快速生产出SABER燃烧室的原型,霍尼韦尔为其在亚利桑那州凤凰城的校园内配备了先进制造设备,可以进行成形、焊接、机械加工和激光钻孔等操作。

在证明可以成功达到模拟状态下的性能后,SABER燃烧室的原型被装配到“Tech7000”验证发动机上进行地面测试,以评估其耐久性和地面排放性能。图3是SABER燃烧室在“Tech7000”验证发动机中的装配位置<sup>[1]</sup>。在成功完成一系列地面测试后,装配SABER燃烧室的“Tech7000”验证发动机在霍尼韦尔的飞行测试平台上进行了飞行测试。霍尼韦尔的飞行测试平台是改进的波音757,发动机直接装在机身上,可以用于测试新技术在全飞行包线下的运转能力和可操作性。

## 5 SABER燃烧室的NO<sub>x</sub>排放性能

在成功通过每一级研发测试后,SABER燃烧室在HTF7000发动机上进

行了取证测试,对排放性能、耐久性和可操作性进行了严格的评估。SABER燃烧室的NO<sub>x</sub>排放量降低了27%,同时UHC和烟尘排放也有明显的减少<sup>[1]</sup>。图4是装SABER-1燃烧室的HTF7000-1发动机与HTF7000基型发动机污染物排放对比。除此之外,取证测试还证实了SABER燃烧室与HTF7000原型的燃烧室相比耐久性也有显著改进。

SABER燃烧室的燃油喷嘴将燃油破碎成细小的油滴以利于其蒸发和燃烧。喷嘴可以产生循环气旋使燃烧的气体回流再次循环进入燃烧区而形成自主燃烧,然而,这一极端高温的火焰可达2300℃,该温度高于所有用于制造燃烧室的镍基或钴基高温合金的熔点。因此要求燃烧室壁在如此高温下要有优异的冷却方案,同时所使用的冷却空气要尽可能少,而冷却效率要高。为此霍尼韦尔的设计团队在SABER燃烧室的火焰筒壁上采用了切线隙透喷射冷却(tangential effusion cooling)技术,即由激光钻孔在火焰筒壁上形成带角度的细小的小孔网络。当燃烧室工作时,通入相应的冷却空气形成高效的冷却气膜,从而冷却高温合金制成的火焰筒壁。同时,火焰筒壁还涂有陶瓷材料的热障涂层,如氧化钇和氧化锆涂层。

由于SABER燃烧室仍属于RQL燃烧室,而就RQL燃烧室而言,大部分NO<sub>x</sub>产生是在燃烧室的中段,即“猝

熄区”,为此霍尼韦尔的设计团队在SABER燃烧室上进行了燃烧优化,减少燃气在燃烧室中段区域的停留时间,使其快速完全燃烧。

## 6 结束语

与众多更换了SABER-1燃烧室的HTF7000发动机一样,新型的应用SABER-1燃烧室的HTF7259G发动机已获得认证。湾流公司选择了HTF7259G发动机作为其G280超级中型喷气公务机的动力。这是将SABER-1燃烧室作为原配装置的首款飞机。

最近,巴西航空选取了HTF7500E发动机用于驱动莱格赛450型和500型中型喷气公务机。更高推力级别的HTF7500E发动机则装备了新的第二代SABER-2燃烧室,正在进行飞行测试和取证。根据已进行的分析和测试,SABER-2燃烧室的NO<sub>x</sub>排放有望比CAEP/6规定的标准低50%。

第三代SABER-3燃烧室计划已经提出,正在技术准备阶段,预期目标是比CAEP/6规定的NO<sub>x</sub>排放标准低60%,并为更严格的CAEP/8标准留出一定的余度。SABER-3燃烧室的另一目标是降低未燃颗粒物和烟尘的排放。

霍尼韦尔已在技术研发、过程分析和测试设备上投入了巨资用于优化其公务机发动机的环境性能。SABER燃烧室不仅可以减少现有HTF7000系列发动机的排放和提高其耐久性,还为霍尼韦尔研发下一代涡扇发动机和辅助动力装置打下了坚实的基础。

综上所述可知,好的燃烧室设计理念不但可以保证燃烧室功能的实现和优化,还为发动机带来高效率、低排放、长寿命和低运营成本等诸多益处。SABER燃烧室就是在各方面都达到了优化的先进燃烧室技术之一。对于国内

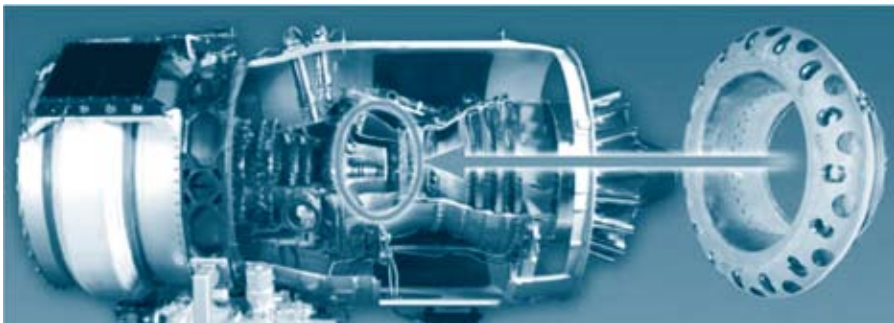


图3 SABER燃烧室在“Tech7000”验证发动机中的装配位置



# 航空货物集装箱化验证方法研究

## Research on Validating Method of Integration for Aeronautical Cargo

张恒铭 张靖 程德峰 / 中航工业一飞院

**摘要:** 为了验证单个集装箱或集装箱板装载小件军事航空货物的可行性, 本文提出了一种军事航空货物集装箱化验证方法。通过对军事航空货物的特殊性以及集装箱、集装箱板装载约束条件的分析, 建立了军事航空货物集装箱化验证模型, 编写航空货物集装箱化验证流程和算法, 利用VC++软件实现该批货物集装箱化验证界面并给出合理的集装箱化布局, 为军事航空运输中集装箱化货物快速规划提供参考。

**Abstract:** In order to validate the feasibility of individual containers or pallets loaded with small air cargo, this paper presents a cargo containerization verification method. Analysing the air cargo container, pallet loading particularity and the constraints, setting up the air cargo containerization verification model, it composes air cargo containerization verification process and algorithm and uses VC++ software to bring about the number of Containerized Freight Container interface layout verification and give reasonable to provide reference for the container in the air transportation of cargo fast planning.

**关键词:** 航空运输; 集装箱货物; 集装箱化方法

**Keywords:** aviation transportation; containerized cargo; containerization method

### 0引言

在军事货物航空运输中, 为了提高航空货物装卸效率, 一般需要对小件货物进行集装箱化处理后, 采用集装箱或

集装箱形式装入飞机<sup>[1]</sup>。不同类型的集装箱板或集装箱都存在装载重量、重心、空间等要求。而大批量的大型航空货物则无法进行快速的集装箱化处理, 进而影响

军事航空运输的装载规划, 降低装载效率。集装箱化货物(集装箱形式、集装箱形式等)的优化装载算法很多, 如启发式算法、空间分割算法、遗传算法等<sup>[2]</sup>。这些

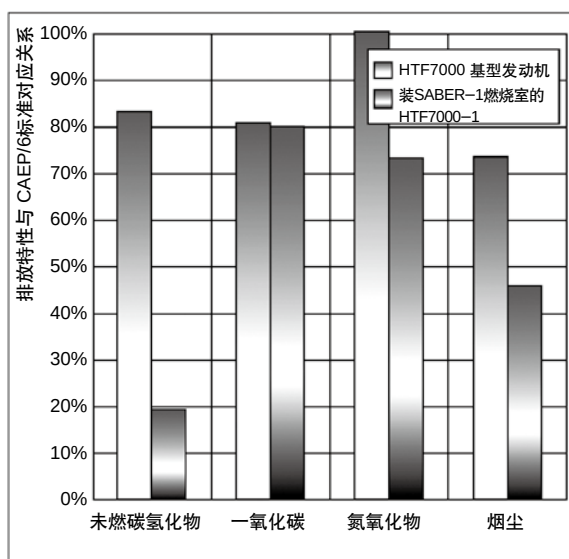


图4 HTF7000-1发动机与HTF7000型发动机污染物排放对比

航空发动机的研制机构来说, 借鉴和参考其RQL燃烧室设计理念, 统筹安排, 开展航空发动机技术的规划、攻关和发展十分必要。

AST

### 参考文献

- [1] Slashing emissions with SABER [J]. Engine Yearbook, 2013, 92-95.
- [2] 李杰. 富油燃烧—猝熄—贫油燃烧燃烧室技术分析[J]. 航空发动机, 2011, (2):50-52.
- [3] 李杰. TAPS燃烧室燃油

喷嘴结构设计特点分析及思考[J]. 航空科学技术, 2010, (1):8-10.

[4] 李杰. 先进低氮氧化物排放燃烧室技术分析[J]. 航空科学技术, 2010, (4):11-13.

[5] 李杰. 现代航空发动机分区燃烧策略分析[J]. 航空科学技术, 2011, (3):13-16.

### 作者简介

李杰, 高级工程师, 从事外贸技术与管理工作。

巨亚斌, 工程师, 从事外贸转包项目技术与管理工作。