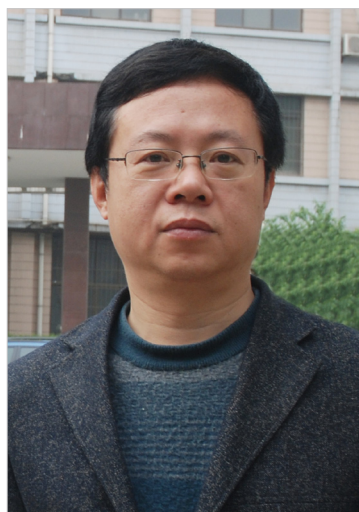


TAPS低排放燃烧室的发展与设计特点分析

Development and Analysis of Design Feature for TAPS Low Emission Combustor

西北工业大学动力与能源学院 黎明 刘海杰



黎明

副教授,研究方向为航空发动机燃烧室与燃烧;在研课题包括“某微型涡喷发动机燃烧室的设计”、“高温升蒸发型双腔燃烧室的设计”、“环形折流燃烧室的数值计算”、“某型燃烧室火焰筒的性能对比试验研究”。

随着人们环保意识的增强和全球航空运输业的快速发展,控制民用航空发动机污染物的排放,已成为现代民用航空发动机设计中必须遵循的重要原则。按照国际民航组织(ICAO)下属的航空环境保护委员会(CAEP)的规定,航空发动机的排放

低污染燃烧室的研发必须满足两条基本原则,一是要遵循低污染燃烧的基本原理;二是要满足燃烧室的基本性能要求。采用贫油直接混合加径向分级燃烧技术的TAPS燃烧室在这两者之间做出了很好的平衡与折衷,而且燃烧效率更高、燃烧室出口温度场更均匀、污染排放更低,能够满足ICAO对2016年后宽体客机发动机 NO_x 排放的目标。

污染物共有4种,分别是气态的一氧化碳(CO)、未燃碳氢(UHC)、氮氧化物(NO_x)和颗粒状冒烟。虽然从全球燃烧污染物排放的总量来看,航空发动机的排放所占份额很小,目前仅占大气总污染量的2%以下,但其污染排放具有局部性和高空性的特点,是机场附近地区和高空大气污染的主要来源。因此,很多国家对航空发动机污染排放水平进行严格的限制,并制定了一系列强制性的污染排放规定。CAEP根据ICAO总章程附件16第II卷《航空发动机的排出物》,分别对用于亚声速和超声速飞行器的涡轮喷气和涡轮风扇发动机的污染排放也做出了一系列的规定^[1]。该标准不仅规定了两类航空发动机的污染排放指标,同时对污染排放的

测试方法、测试仪器和系统、测试过程和数据处理方法等也都做出了规定。民用航空发动机要取得适航证进入国际市场,必须按照ICAO的上述规定执行。航空发动机排放的污染物来自其燃烧室,因此,低污染燃烧室的研发是降低航空发动机污染排放的关键。在CAEP颁布的航空发动机污染排放系列标准中,对 NO_x 的排放规定日趋严格,而对CO、UHC和冒烟的规定维持不变。原因一是 NO_x 对环境的危害越来越严重;二是控制 NO_x 排放是控制所有排放物中最困难的。从民用大涵道比涡扇发动机发展的角度来看,其低污染燃烧室技术的关键难点也是控制 NO_x 排放^[2]。

由于航空发动机在低工况和高

工况下的排放污染物有所不同,因而,目前国外在研或已服役的先进低污染燃烧室主要采用分级燃烧的概念,即将燃烧室分成几个燃烧区,通过控制各区的燃油和空气分配来控制各燃烧区的油气比,以使燃烧室在所有工况下均保持较低的污染排放水平并具有良好的燃烧性能^[3]。分级燃烧技术一般可分为径向、轴向和径/轴向分级3种燃烧分区模式。其中,径向分级燃烧室主要有双环腔燃烧室(DAC)、双环预混旋流燃烧室(TAPS)、驻涡燃烧室(TVC)、双头部燃烧室等;轴向分级燃烧室主要有富油燃烧/焯息/贫油燃烧室(RQL)、贫油预混预蒸发燃烧室(LPP)等。此外,还有喷嘴内部中心分级的贫油直接喷射燃烧室(LDI)、可变几何燃烧室(VGC)和催化燃烧室等^[4]。在这些先进低污染燃烧室中,美国GE公司研发的TAPS燃烧室是一种新型的并具有广阔应用前景的低污染燃烧室方案,代表了现代航空发动机燃烧室工程技术的最新成就与发展方向,该燃烧室可在满足其他设计要求的同时进一步降低 NO_x 的排放。目前,GE公司已将此项技术应用于CFM56、GE90和GENx发动机上。经试验验证,TAPS燃烧技术的 NO_x 排放要比目前常规燃烧室的降低50%,且具有持续降低50%~75%的潜力。为了满足ICAO未来中长期的排放标准,GE公司正与美国国家航空航天管理局(NASA)合作,以TAPS燃烧室为基础,期望在2025年将 NO_x 排放降低至比CAEP/2标准低70%~80%的水平。

TAPS 燃烧室发展历程

GE公司为民用飞机研发新型低污染燃烧室的计划始于20世纪70年代中期。最初的大飞机发动机减排计划是由NASA发起的实验清洁燃烧室计划(ECCP),用来支持GE公司研发双环腔燃烧室。经过多年

的努力,双环腔燃烧室终于在90年代中期于CFM56-5B和CFM56-7B发动机上服役。双环腔燃烧室采用径向分级,由环形中心体将火焰筒分隔为内外两个燃烧区,即主燃级和预燃级。预燃级按低工况设计保持较高的油气比,在启动点火和慢车状态只有预燃级喷油工作,这样气流速度低,燃烧时间长,可满足慢车贫油熄火、燃烧效率、低CO和UHC排放的要求。主燃级按贫油设计,空气流量和流速较高。在高工况下,两级同时喷油工作,整个燃烧区处于相对贫油燃烧状态并且燃气停留时间短,保证了低 NO_x 和冒烟的产生。虽然,双环腔燃烧室采用的是贫油燃烧技术,但由于其燃油和空气仍由常规的燃油喷嘴和旋流杯供给,其火焰不是预混燃烧,因而,双环腔燃烧室在低工况下会带来出口温度分布不均匀的问题。

TAPS燃烧室于20世纪90年代开始研制,实际上是GE公司70~90年代研制的单环腔燃烧室(SAC)和双环腔燃烧室的后续发展型,尤其是得益于双环腔燃烧室燃油分级的

概念和与其相关的大量试验研究^[5]。TAPS燃烧室的头部设计是采用了一个同轴的预燃级,在低工况可提供一个中心较高的温度分布,因而,可避免双环腔燃烧室可能出现的出口温度分布不均匀的问题。为了比双环腔燃烧室更进一步降低 NO_x 排放,TAPS燃烧室的主燃级采用了环形多点喷嘴和主混合器的结构,从而,在主燃级可最大程度上实现预混燃烧。

在NASA的先进亚声速技术(AST)和超级高效发动机技术(UJET)等计划的支持下,GE公司对TAPS燃烧室的研发持续了10余年之久,并综合运用了两项已成熟的技术,即,1980年首次研发并获得专利的预混旋流技术和早在1970年就在GE发动机上得到应用的常规值班级燃烧技术。20世纪90年代末,双环腔TAPS燃烧室在GE90发动机上得到验证。2000年初,单环腔TAPS燃烧室在CFM56-7B发动机上得到验证。目前,单环腔TAPS燃烧室已应用于GENx发动机并取得适航证,即将在波音787和747宽体客机上服役。

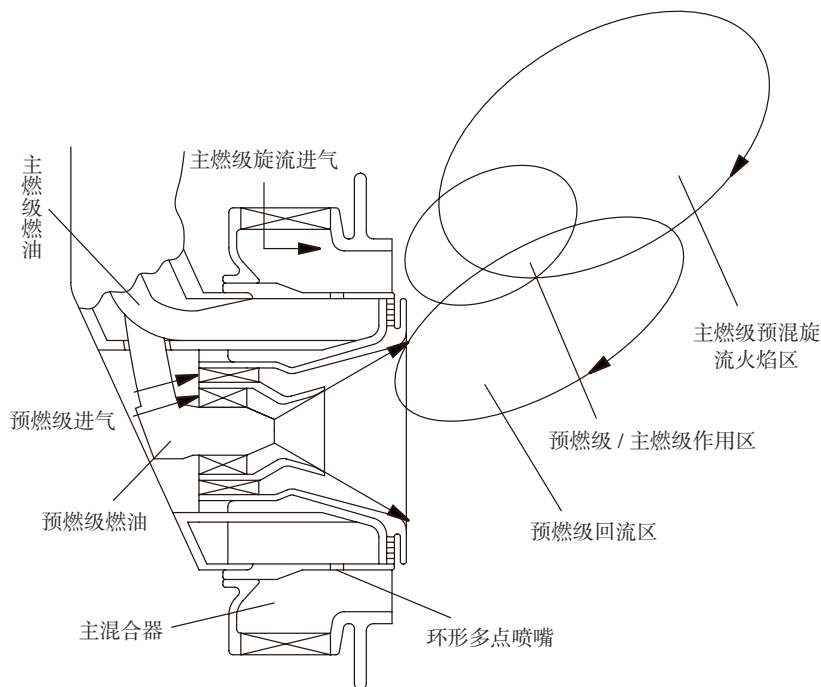


图1 TAPS燃烧室头部结构和气路及油路

TAPS 燃烧室设计特点

1 结构特征

在先进航空发动机燃烧室的设计中,由于燃烧室的温升较高,油气比较大,参加燃烧的空气增多,因而,燃烧区的空气动力特性主要由头部进来的流动空气而决定。所以,就先进燃烧室而言,一个好的头部设计方案对燃烧室的燃油和空气分配组织及各项性能要求至关重要。TAPS 燃烧室的头部结构主要由一个中心扩散火焰的预燃级和一个同轴预混燃烧的主燃级构成,两级之间由一定高度的台阶隔开。预燃级由一个高流量数的压力雾化喷嘴、内外两个围绕喷嘴的同向双级旋流器、文氏管及套筒组成,而主燃级则由一个径向旋流器、环状空腔型主混合器及环形多点喷嘴组成,其头部几何结构和气路及油路分布如图 1 所示^[6]。

预燃级采用扩散燃烧方式,有利于起动和火焰稳定。预燃级喷嘴加内外两级旋流器构成组合式空气雾化喷嘴,这也是当前先进航空发动机燃烧室普遍采用的燃油雾化技术,可以改善起动和低工况下的燃油雾化质量,获得满足点火、起动、贫油燃烧稳定性和燃烧效率等设计要求所需要的流场。从结构设计特点来看,预燃级的喷嘴可以采用单、双油路离心喷嘴或直射喷嘴。采用单油路离心喷嘴,结构简单,燃油控制反应快,在低油气比下点火性能好,采用双油路离心喷嘴更有利于控制慢车状态下的污染排放,而采用直射喷嘴在贫油时有利于稳定燃烧。但一般来说,离心喷嘴的综合性能如雾化质量、点火及贫油熄火范围等要优于直射喷嘴。文氏管是一个先收缩后扩张的圆形管,预燃级内旋流器的空气由此通过。文氏管的主要作用是控制燃油浓度分布的区域,形成典型的扩散状分布,并限制火焰向上游发展,防止喷嘴积碳。套筒与文氏管的外型面

一起构成了预燃级外旋流器空气的出口环形通道。内旋流器主要控制预燃级的燃油雾化质量,外旋流器主要控制预燃级燃烧区的气流结构,这种控制作用主要是通过调整两级旋流器的旋流强度及空气流量比来实现的。

TAPS 燃烧室的核心技术是在保持分区燃烧的同时,引入了创新的预混概念,燃油和空气在燃烧之前做到了很好的预先混合,属于一种改进的贫油直接混合(LDM)低污染燃烧技术^[7]。其主燃级的燃油喷射采用的也是气动雾化方式。位于主混合器上的环形多点直射喷嘴,喷出的燃油沿周向形成多股径向射流,与通过主燃级径向旋流器的主旋流相互作用并在主混合器内充分预混,可使主燃级燃油雾化得更细,油气混合度更高,在高工况下使燃烧室内形成稳定的主燃级燃烧区。主燃级和预燃级之间的台阶可以减小低工况下主燃级空气对预燃级火焰的淬熄作用,有助于改善慢车状态贫油熄火性能,提高燃烧效率,降低 CO 的排放。

在先进贫油低污染燃烧组织中,由于参与燃烧的空气比例很高,因此,TAPS 燃烧室除了冷却头部和火焰筒所需的空气外,其余空气都流经

预燃级和主燃级的旋流器,火焰筒上不开主燃孔和掺混孔,这也是 TAPS 燃烧室结构设计的最大特点之一。另外,由于旋流形成的燃烧区使火焰筒与高温燃烧区相隔离,同时因燃油与空气的预先混合,使得火焰筒壁温较低、燃烧区温度较低、燃烧效率更高、出口温度场更均匀,从而可提高火焰筒和发动机下游部件的寿命,降低发动机的使用维护成本。

2 低污染燃烧原理

TAPS 燃烧室低污染燃烧原理的核心是采用了一个中心扩散火焰的预燃级和一个同轴预混燃烧的主燃级。两级旋流器在主燃区中产生了 3 个回流区,分别为主回流区、角回流区和台阶回流区,如图 2 所示。相应的燃烧区域被 3 个回流区划分为预燃级扩散火焰区、剪切层火焰区和主燃级预混火焰区。在低工况下,仅预燃级喷嘴喷油工作。气流在预燃级两级旋流器、文氏管和套筒的共同作用下,在其下游形成一个强大的预燃级主流区,燃油在该区域内进行富油充分燃烧,其富油燃烧产物在剪切层及主燃区下游与主燃级新鲜空气进行快速掺混燃烧,以此来实现低工况下的高效燃烧,同时获得较低的污染物排放。

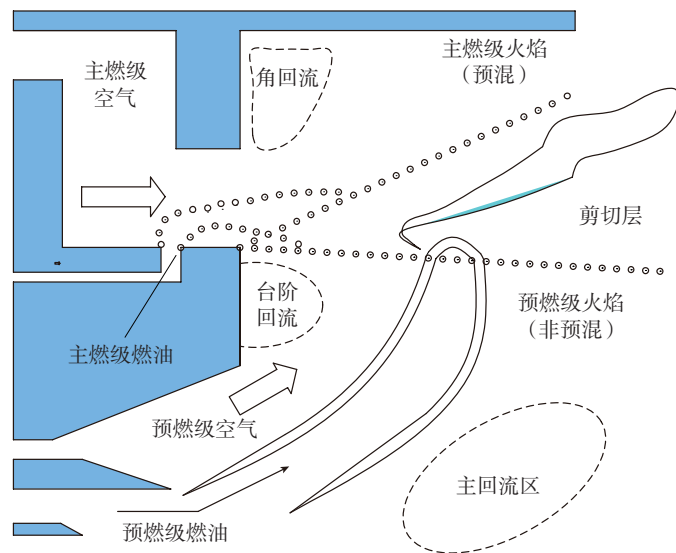


图2 TAPS燃烧室的流场结构

TAPS 燃烧室旋流器的径向分级结构决定了主燃级较冷的新鲜空气射流会对预燃级火焰产生淬熄作用,如果在预燃级燃烧不完全的情况下,加入大量主燃级新鲜空气,则淬熄作用会导致燃烧室 CO 排放的大幅增加,燃烧效率下降,而且对慢车状态贫油熄火性能也不利。在主燃级和预燃级之间设置一定高度的台阶可将两级射流隔开一段距离,这样可以延缓主燃级射流与预燃级火焰的混合,为预燃级的充分燃烧提供时间。文氏管结构将预燃级分为两级旋流,燃油与预燃级内旋流混合燃烧,外旋流则包裹在内旋流混气的外侧,可以延缓内外两级旋流的混合,以此来调节预燃级套筒内燃烧区的局部油气当量比,避开污染物排放较大的当量比区间,从而实现低污染燃烧。在高工况下,主燃级和预燃级同时喷油工作,主燃级分配了大部分的燃油和空气,在主燃级的主混合器中形成均匀贫油混气,以实现低污染燃烧。而预燃级分配的燃油和空气较少,燃烧时形成的扩散火焰用于稳定主燃级火焰。由于大部分燃油进行贫油燃烧,故在高工况下,TAPS 燃烧室能够大幅度降低 NO_x 的排放量^[8]。由于 TAPS 燃烧室的流场呈现出清晰的分区燃烧结构,因此,在进行 TAPS 燃烧室的空气和燃油流量分配设计时,需要综合考虑在不同工况下各燃烧区低污染和稳定燃烧对局部当量比的不同要求。在用 CFM56-7B 发动机所做的燃烧对比试验中,分别采用了富油头部单环腔燃烧室、贫油头部双环腔燃烧室和 TAPS 燃烧室。结果显示,采用 TAPS 燃烧室的 NO_x 排放要比富油头部单环腔燃烧室和贫油头部双环腔燃烧室分别降低 46% 和 22%,其 UHC 排放与富油头部单环腔燃烧室大致相当但远低于贫油头部双环腔燃烧室,而 CO 排放要高于富油头部单环腔燃烧室但比贫油头部双环腔燃烧室减少 23%,如图 3 所示。

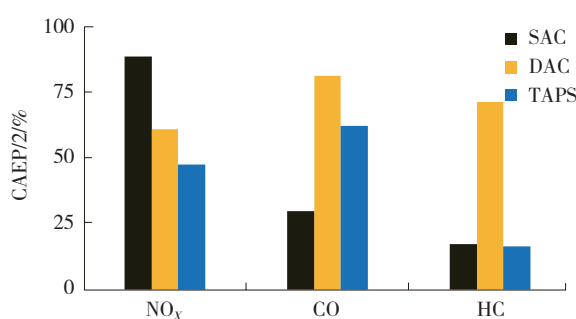


图3 SAC、DAC和TAPS燃烧室污染排放值比较

在 GEnx 发动机的台架全环试验验证中,TAPS 燃烧室的 NO_x 、CO、UHC 和冒烟的排放分别只有 ICAO 最新规定的 CAEP/6 排放标准的 48%、22.2%、5.4% 和 42.3%。

下一代 TAPS 燃烧室

第一代 TAPS 燃烧室的 NO_x 排放经试验验证比目前常规燃烧室的降低了 50%,而对燃烧室其他设计要求如燃烧效率、出口温度分布、慢车贫油熄火、可操作性和耐久性等没有产生不利影响,并已成功应用于 CFM56-7B、GEnx-1B、GEnx2B 和 GE90-94B 发动机的单环腔和双环腔燃烧室。为了争夺未来一代窄体客机发动机的市场份额,下一阶段 GE 公司将基于第一代 TAPS 燃烧室所取得的成功技术,借助于计算流体力学(CFD)手段和大量的基础试验,不断对第一代 TAPS 燃烧技术加以改进和完善,并应用于该公司的 LEAP 窄体客机发动机项目^[9]。其主要目标是保持或减少 NO_x 排放,将 TAPS 技术小型化以满足小尺寸发动机的需要,并力争充分拓宽分级燃烧室的工作范围。为了实现这一目标,在 2011 年已完成了一个关键的核心技术验证试验。目前,GE 公司已获得美国联邦航空委员会(FAA)的连续低能耗、低排放、低噪音(CLEEN)计划项目的资助并正在与 NASA 合作,以 TAPS 燃烧室为基础,期望在 2025 年将 NO_x 排放降低至比 CAEP/2 排放标准低 70% ~ 80% 的水平。为

为了满足未来中长期的排放标准,GE 公司已着手开展下一代双环预混旋流(TAPS II 和 TAPS III)低污染燃烧室的技术研发,新技术的核心特点是在主燃级的油气掺混上采用更加先进的燃油喷射和油气混合技术来强

化掺混的均匀性,以达到更加均匀的油气分布,从而在现有技术水平基础上以实现更低的污染排放^[10]。

结束语

民用航空发动机的研发,必须采用先进的低污染燃烧技术以减少对环境的影响。TAPS 燃烧室与传统的常规燃烧室的主要区别在于一是火焰筒壁面上不开主燃孔和掺混孔,除冷却空气外燃烧空气全部从燃烧室头部的预燃级旋流器和主混合器进入火焰筒;二是燃油喷射方式不同,TAPS 燃烧室除了具有中心燃油喷嘴外,在主混合器中还设置有环形多点喷嘴,燃油分级可根据预先确定的流量分配进行调节^[11]。

低污染燃烧室的研发必须满足两条基本原则,一是要遵循低污染燃烧的基本原理;二是要满足燃烧室的基本性能要求^[12]。采用贫油直接混合加径向分级燃烧技术的 TAPS 燃烧室在这两者之间做出了很好的平衡与折衷,而且燃烧效率更高、燃烧室出口温度场更均匀、污染排放更低,能够满足 ICAO 对 2016 年后宽体客机发动机 NO_x 排放的目标。因此,TAPS 燃烧室是一种更为先进,结构相对简洁的低污染燃烧室,代表了当前民用航空发动机燃烧室工程技术进展的最新成就与发展方向。

本文共有参考文献 12 篇,因篇幅有限,未能一一列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。(责编 日午)