

民用航空发动机低排放燃烧室技术

Low Emission Combustor Technology of Civil Aero Engine

徐华胜 邓远灏 马存祥 / 中国燃气涡轮研究院

导读:国际上对民用航空运输污染排放的限制标准越来越严格,燃烧室作为民用航空发动机污染排放的唯一来源,降低污染排放物的生成量是燃烧室研制面临的重要任务,低排放燃烧技术作为民用航空发动机的关键技术之一,是支撑民用航空发动机研制和进入市场的核心技术。本文简述了民用航空发动机污染排放标准的发展趋势、污染物的生成机理和控制、先进低排放燃烧室技术和未来超低排放燃烧技术发展方向。

关键词: 民用航空发动机; 低排放燃烧室; 贫油燃烧技术; 富油燃烧技术

Keywords: civil aero engine; low emission combustor; lean burn technology; rich burn technology

0 引言

经济性、舒适性、安全性和环保性是当今民用航空发展永恒的追求,环保性体现在航空发动机上最直接的要求是越来越低的油耗和污染物排放量,发动机的污染排放物指的是燃料燃烧后产生的气态污染物,如氮氧化物(NO_x)、一氧化碳(CO)和未燃碳氢(UHC)、二氧化硫(SO_2),以及固态污染物,如烟粒子(soot)或称冒烟,这些物质对大气造成破坏,影响生态环境,在发动机研制中通过限制这些有害物质的生成以减少对环境的影响。由于污染排放是民用航空发动机适航取证的重要指标,燃烧室又是发动机污染排放的唯一来源,因此,低排放燃烧室是民机发动机能否成功研制的关键,也是民用航空发动机能否顺利通过适航取证、取得商业成功的“门槛”。低排放燃烧技术已有40多年的发展历史,从起初的减少冒烟和控制低工况CO和UHC的生成,到现在主要以控制 NO_x 的生成为目的,按照通用电气(GE)公司的划分,大约为四代。低排放燃烧技术

的核心是采用合理的组织燃烧原理,有效控制燃烧区温度,抑制燃烧室内污染排放物的生成,当前该技术主要有两种途径:贫油燃烧和富油燃烧,最具代表性的是GE公司采用了基于贫油燃烧的贫油预混预蒸发(Lean-Premixed-Prevaporized, LPP)技术和普惠公司基于富油燃烧的富油燃烧/快速淬熄/贫油燃烧(Rich burn-quick Quench-Lean burn, RQL)技术,都取得了商业成功。

1 民用航空发动机污染排放控制要求发展趋势

1.1 民用航空发动机污染排放标准

虽然民航客机产生的污染排放占整个人类活动产生的污染排放比例很小(2%~3%),但民用发动机产生的污染排放具有局部性的特点,在高空中更是周围环境污染的“罪魁祸首”,如图1所示。国际民航组织(ICAO)现行的环境保护方面的活动由下属的航空环境保护委员会(CAEP)组织。航空环境保护委员会于1981年制定了第一部排放标准

CAEP/1,于1996年制定了CAEP/2、2004年制定了CAEP/4、2008年开始执行CAEP/6,2010年召开了CAEP/8标准的会议,明确了近期和远期目标。

ICAO规定的气态污染物包括 NO_x 、CO和UHC,固态污染物主要是碳烟粒子。从广义上来说,二氧化碳(CO_2)和水蒸气(H_2O)是地球温室气体的主要成分,对地球变暖产生很大影响。因此,2002年ICAO/CAEP工作会议声明: CO_2 和 NO_x 对全球气候变化产生了重要影响,将来ICAO/CAEP会议主要目标就是在严格要求 CO_2 排放的同时对 NO_x 的排放进行严格要求。因为在飞机飞行高度处,氮氧化物对臭氧层的破坏十分严重。因此几项标准对氮氧化物的排放越来越严格,而对CO和UHC等污染物的排放要求保持不变,如图2所示。

在ICAO的CAEP标准中,针对不同压比、不同推力量级的发动机作出了不同的污染排放的规定。随着民用航空发动机沿着更高涵道比,更高油气比的方向发展,排放标准会越来越严格。目前,绝大多数民用航空发动

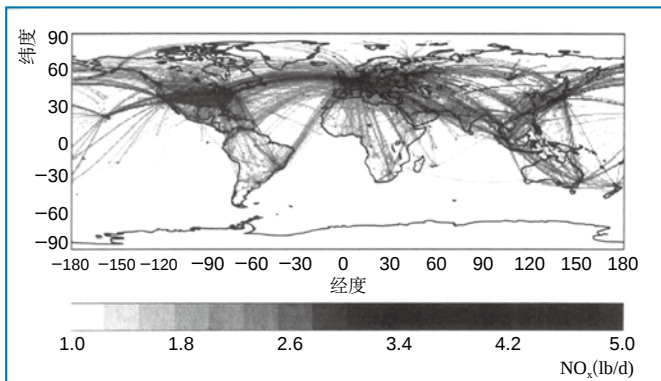


图1 每天民航客机产生的 NO_x 全球分布

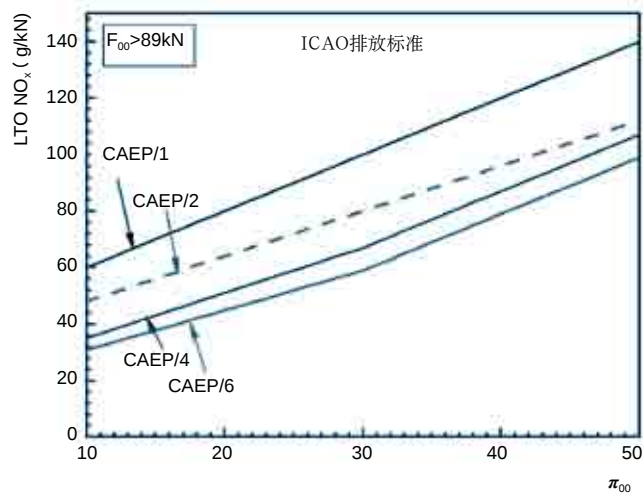


图2 不同CAEP标准下氮氧化物排放比较

机污染排放标准执行的是CAEP/2和CAEP/4。对于2007年12月31日后制造并运行的民用航空发动机必须执行CAEP/6标准。2010年2月在加拿大蒙特利尔召开了ICAO的CAEP/8的会议，对 NO_x 排放做了更为严格的规定——比CAEP/6降低15%，2013年12月31日以后的民用航空发动机将执行CAEP/8标准，这对我国民用航空发动机低排放燃烧室的研制提出了巨大的挑战。

1.2 民用航空发动机适航取证要求

民用航空发动机适航取证过程非常严格，必须按照ICAO的CAEP标准中规定的要求进行。图3所示为ICAO规定民用航空发动机适航取证工作过程。一般在适航取证中至少需对3台同参数（推力、压比）发动机进行测试，最后对各发动机排放测试结果乘以某个系数就可得到这个参数下的发动机的污染排放结果。

ICAO规定的亚声速民航客机的发动机测试状态为一个着陆起飞（Landing and Take-Off, LTO）循环过程中的起

飞（100%额定推力）、爬升（85%额定推力）、返场（30%额定推力）和滑行/地面慢车（7%额定推力）等4个工况，并且每个工况都规定了相应的运行时间，如图4所示。

目前ICAO/CAEP标准中只规定了4个状态，没有包括发动机运行时间最长的巡航状态。由于民用航空发动机在巡航状态中，其污染排放（ NO_x 、UHC、CO和Soot）和温室气体排放（ CO_2 和水蒸气 H_2O ）对周围环境产生巨大影响。因此，未来将会加强对温室气体排放的限制，并很可能将巡航状态也纳入到ICAO的CAEP标准中。这使得民用航空发动机适航取证更加严格，更加艰巨，对燃烧室设计以及整个发动机研制来说都是具有挑战性的任务。

2 污染物的生成机理和控制

CO和UHC污染物的生成机理类似，一般有两种原因：一种是由于燃料燃烧不完全引起的，比如在低工况，由于

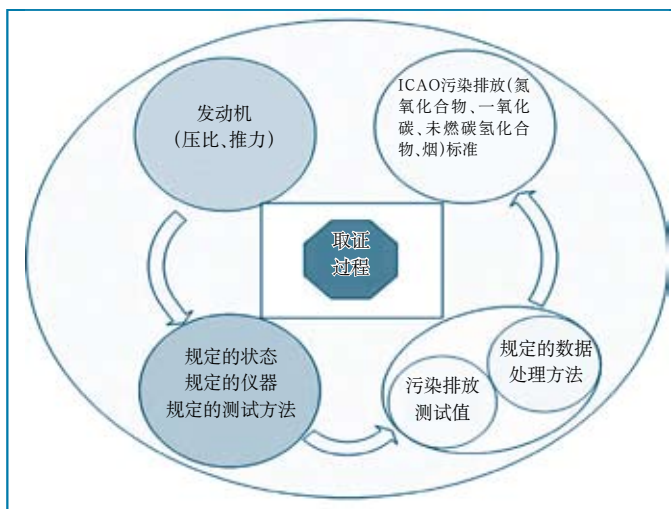


图3 ICAO规定的民用航空发动机适航取证流程

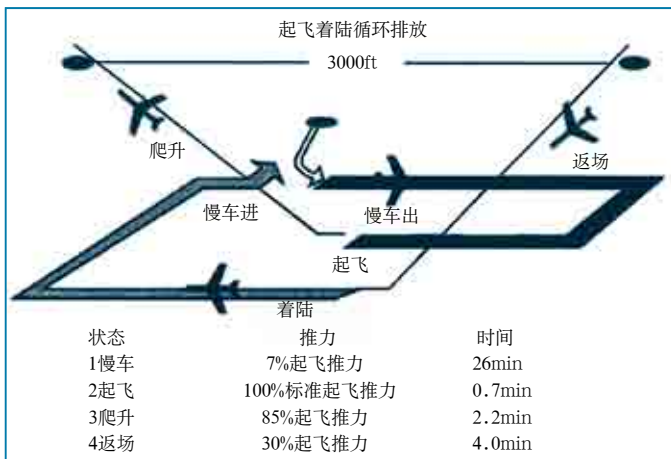


图4 一个LTO循环中各运行模式的推力和时间设置示意图

燃烧室进口空气压力和温度偏低,且油气比低,导致燃烧区温度低,反应不彻底;另一种是部分燃烧产物进入火焰筒壁面冷却空气流域,导致化学反应被淬熄,产生CO和UHC。此外,对UHC生成影响较大的因素还有燃油雾化质量不好,有些比较大的油珠,直到燃烧室出口都没有燃烧完全。显然,要控制CO和UHC,应提高低工况的燃烧效率,尽量避免燃烧区受到冷却空气的干扰。

氮氧化物(NO_x)主要指一氧化氮(NO)和二氧化氮(NO_2),以及氧化亚氮(N_2O)。生成的NO排入大气后,经过长时间的演化,最后变成 NO_2 。 N_2O 很不稳定,最后转变为NO或者 NO_2 。因此,一般用 NO_x 表示其总排放量。根据 NO_x 生成机理的不同,将 NO_x 分为“热力型(thermal)”、“瞬发型(prompt)”和“燃料型”。目前最关注的是热力型 NO_x ,它由空气中的氮和氧在高温燃烧区中生成,是民用发动机燃烧室要降低的主要排放物,低排放燃烧技术研究的核心就是围绕降低 NO_x 的生成展开的,其最关键的手段是控制燃烧区的温度。

在燃烧室的主燃区燃气温度越高,燃料燃烧越完全,CO、UHC和碳粒子的生成量就越低,但 NO_x 的生

成量随燃烧区温度升高急剧增加,反之,则相反,如图5所示。低排放燃烧技术研究必须在全面满足所有排放要求和燃烧性能的相互矛盾中寻求合理的解决方案。基于对发动机污染排放机理的研究,人们认识到,以 NO_x 排放量的降低为主要目的,并兼顾其他排放物也能够控制在限制标准范围内的有效措施,是将主燃区温度控制在合理范围内。有两种途径是可行的:一是先通过富油不完全燃烧降低燃烧温度,然后通过贫油补燃的方式将未燃物烧尽;二是通过油气混合贫油燃烧的方式降低燃烧区温度。两种途径都是在保证燃料完全燃烧的情况下使 NO_x 的生成维持在一个比较低的水平,如图6所示。基于对 NO_x 、CO和UHC等污染排放机理的认识,要将污染物控制在较小的生成范围,燃烧区燃气温度控制在1670~1900K之间是合理的。

3 先进低排放燃烧室技术

3.1 降低燃烧室污染排放的技术发展历程

低排放燃烧技术发展始于20世纪70年代,主要目的是减少可见冒烟及降低低工况的CO及UHC的生成,其中最具代表性的是GE公司通过改变J79-17A燃烧室的空气流量分配和喷嘴,达到不可见冒烟的目的。在

20世纪80年代,低排放燃烧的重点转向降低 NO_x ,首先研究了 NO_x 生成机理,提出富油燃烧和贫油燃烧两种发展策略,当时主要开发了气动雾化喷嘴技术,燃油雾化质量大幅度提高,而且燃料与空气混合更充分,燃烧更完全。目前广范使用的民用航空发动机燃烧室基本都是采用这种技术,最具代表性的是CFM56单环腔燃烧室(Single Annular Combustor, SAC)。为了进一步降低 NO_x ,在富油主燃区的基础上,又提出了分级燃烧的概念,简单的说就是燃烧室内有两个燃烧区,一个燃烧区负责启动点火和低工况燃烧,一个燃烧区负责高工况燃烧,在高低工况燃烧室都能保持在合适的油气比范围内工作,保证燃烧室可靠启动和燃料完全燃烧,比如GE90发动机的双环腔燃烧室(Dual Annular Combustor, DAC)。

贫油燃烧首先应用在工业燃气轮机上,典型的如GE公司的LM6000工业低排放燃烧室, NO_x 排放小于25ppm,CO排放小于10ppm。通过工业低排放燃烧室的研发,得到的设计经验和方法对航空发动机低排放燃烧室的研发具有重要的指导意义,比如GE公司在贫油燃烧技术路线上发展了一种中心分级贫油预混预蒸发燃烧室,即双环预混旋流(Twin Annular

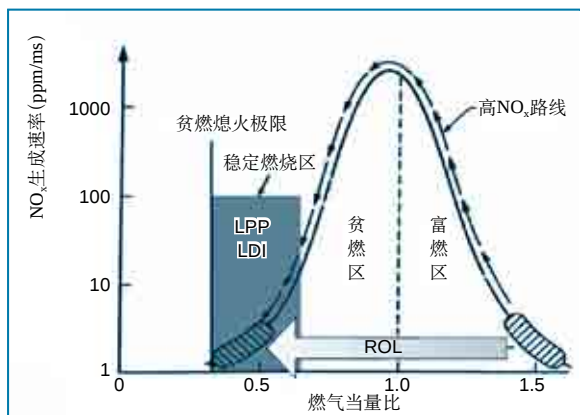
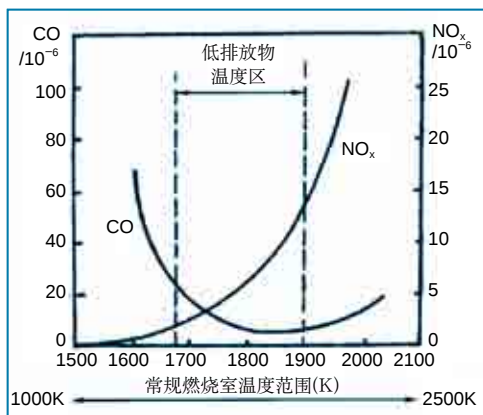


图5 NO_x 生成与燃烧温度的关系(左)

图6 NO_x 生成速率与燃气当量比关系示意图(右)

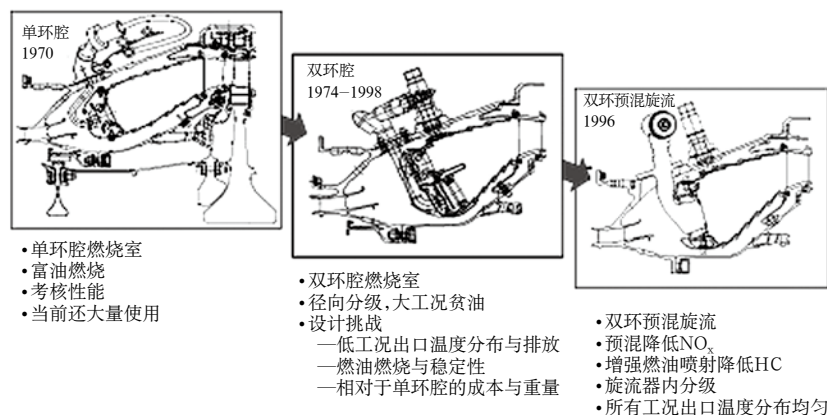


图7 GE公司低排放燃烧室发展

Premixing Swirler, TAPS) 燃烧室, 该燃烧室已成功应用于GENx发动机, 且降低 NO_x 的潜力巨大。与此同时, 普惠公司在富油燃烧技术路线上发展的富油燃烧/快速淬熄/贫油燃烧 (RQL) 技术的先进低氮氧化物排放技术 (Technology for Advanced Low NO_x , TALON) 燃烧室, 也取得了成功。

3.2 贫油燃烧技术

在多种低污染燃烧技术中, LPP燃烧方式在降低发动机污染排放上有很大的潜力, 同时在性能和排放之间能达到更好的平衡, 因此成为低污染燃烧室的一个主要发展方向。实施的技术方案是大部分空气从燃烧室头部进入, 燃油预先蒸发并与空气进行预先混合, 在燃烧区形成均匀的贫油混气, 并控制燃气停留时间, 使污染物均处于很低的生成量。目前GE公司的

TAPS燃烧室采用的是贫油燃烧技术。但是LPP技术存在点火与稳定边界窄的问题, 同时预混预蒸发存在自燃和回火的风险。

1) TAPS燃烧室

TAPS燃烧室结合了分级分区燃烧和贫油预混燃烧的思想。如图8所示, 其值班级 (预燃级) 由一个双级旋流器和一个离心喷嘴组成; 主燃级由一个径向旋流器和直射式喷嘴组成, 以此形成值班级燃烧区和主燃级燃烧区。值班级为扩散火焰模式, 主要是为了保证发动机起动点火可靠和较为宽广的贫油熄火边界; 主燃级为贫油预混燃烧模式, 主要工作于大工况, 以减少 NO_x 的生成。主燃级油路在径向旋流器通道中采用横向射流雾化以形成较好的油雾与空气进行预混, 之后进入燃烧区进行贫油燃烧。

TAPS燃烧室是GE公司20世纪90年代新发展的一种低排放燃烧室, 该燃烧室分别用到TECH56计划下的CFM56-7B发动机试验样机和NASA的AST计划下的GE90-94B发动机试验样机上。通过试验发现, 这两种燃烧室均比同条件下的富油头部 (DAC) 在一个LTO过程可降低近50%的 NO_x , 如图9所示。

目前, TAPS燃烧室已发展了三代, 分别为TAPS1、TAPS2和TAPS3。TAPS1技术目标是要比传统富油头部设计的燃烧室或CAEP/2标准降低50%的 NO_x 排放, 并且技术成熟度已达到9级 (TRL9), 成功用于GENx发动机上; TAPS2的目标是在TAPS1的基础上再降50%的 NO_x 排放, 主要是针对总增压比大于40的发动机, 比CAEP/2标准 NO_x 排放降低70%, 目前技术成熟度为7级, 并首先用于LEAP-X上; TAPS3目标是比CAEP/6降低75%的 NO_x 排放, 比CAEP/2降低85%, 目前, 技术成熟度处于TRL3~TRL4的水平。

2) Lean-Burn燃烧室

1994年, 德国启动了经济、环保、高效 (3E) 发动机技术计划, 是德国航空研究项目的一部份, 目标是发展环境保护和使用经济性的航空发动机。1999年取得良好进展, 并在部件试验中达到设计指标。计划研究目标到2010年 NO_x 比

CAEP/2标准降低85%。由英国罗-罗 (RR) 公司和德国宝马 (BMW) 公司组成的位于德国柏林的罗-罗德国 (RRD) 公司为3E发动机开展了一系列低排放燃烧技术方面的研究。RRD以BR715为原型机发展了三代E3E燃烧室。

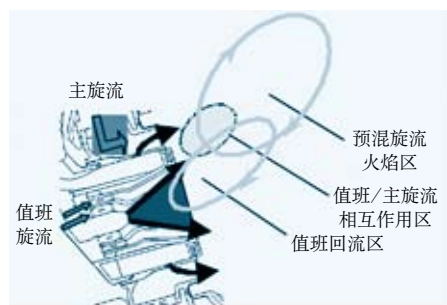


图8 TAPS燃烧室结构及原理示意图

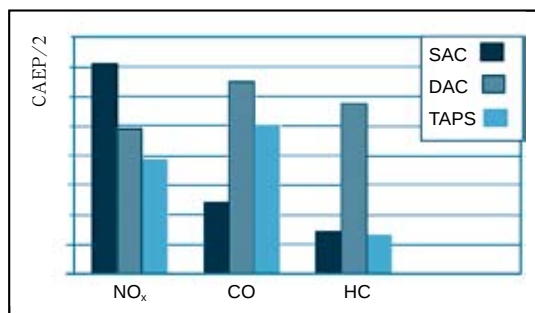


图9 相同条件下SAC/DAC/TAPS试验结果对比

第一代E3E燃烧室是一种轴向分级(Axially Staged Combustor, ASC)的燃烧室。该燃烧室的主燃级采用传统的燃油喷嘴进行富油燃烧,而且大量的空气用于壁面冷却,不利于降低排放物。RRD公司认为 NO_x 的形成主要取决于燃气的温度和燃气停留时间。通过对RQL燃烧室和贫油燃烧室比较发现:RQL燃烧室在大功率状态下产生大量的 NO_x ,在一个ICAO/LTO过程中产生的 NO_x 要明显高于贫油燃烧室的 NO_x 排放量,如图10所示。尽管RQL燃烧室可通过油气混合等其他措施进一步降低 NO_x 排放,但其发展潜力有限。因此,RRD公司发展了第二代E3E燃烧室,也是单环腔ASC,但主燃级采用贫油预混燃烧方式,因此大量的空气从头部进入参加燃烧,减少了冷却气量,但这给火焰筒壁面冷却设计带来困难。

RRD公司发展的第三代E3E燃烧室,称之为Lean-Burn燃烧室。它也是一种中心分级的低排放燃烧室,采用副油路值班燃烧火焰和主油路火焰通

过喷嘴分级的低排放燃烧室,与TAPS燃烧室有着异曲同工之处,结构如图11所示,与罗-罗公司研发的ANTLE低排放燃烧室结构基本相同,也采用简单型面的浮动瓦块冷却结构,减少冷却气量,增加用于燃烧空气量以降低 NO_x 排放。

3.3 富油燃烧技术

富油燃烧的基本特点是主燃区空气量低于燃料完全燃烧所需空气量,当燃烧区为富油燃烧时,因燃烧不完全,燃气温度较低, NO_x 生成量也较低,但是经过富油燃烧后,有大部分燃油未燃烧完全,随着燃气向下游流动,必定要在化学恰当比附近燃烧,此时,燃气温度很高,是 NO_x 大量产生的区域,为了跳过该区域,通过在富油燃烧区末端加入大量空气瞬时降低燃气温度,此后未完全燃烧的可燃成分在贫油状态继续燃烧,使整个燃烧过程的温度降低。

典型的富油燃烧技术是普惠公司研制的RQL技术,见图12。其基本原理为:在燃烧室头部区域进行富油燃

烧,温度较低,产生少量瞬发 NO_x ,但热力 NO_x 的产生大大减少;富燃段之后的燃气没有烧完全,需要加入空气,在淬熄区中当量比接近化学恰当比,控制燃气停留时间,抑制热力 NO_x 的生成。富燃段的燃气与淬熄区的空气混合速度太快则达不到充分混合的作用且UHC和CO氧化不充分;

太慢则富油燃烧产物与掺混空气混合易形成接进化学恰当比的混气进行燃烧,这样会增加 NO_x 的生成。因此,在淬熄区中的油气快速混合是RQL燃烧室设计的关键之一。

普惠公司将RQL燃烧技术用在V2500发动机扇形试验段上试验,其结果比当时的排放标准低50%。之后,普惠公司进行一系列的低排放燃烧室的研发,其低排放燃烧室称为TALON燃烧室,分别发展了TALON I、TALON II和TALON X等一系列燃烧室,如图13所示。TALON燃烧室的主要设计技术为优化油气混合以降低 NO_x 和冒烟、控制燃油雾化和冷却,改善UHC排放,采用最小冷却空气量的多段浮动壁火焰筒结构设计技术。首台TALON燃烧室在PW4000中使用, PW4000-100型发动机燃烧室以TALON II技术为基础,在TALON II的基础上进行改进,进一步增大燃烧区,改进了掺混设计,排放水平进一步降低。PW6000系列发动机也采用改进后的TALON II燃烧室, PW8000发动机采用新研发的TALON X燃烧室。TALON X燃烧室进一步增大了主燃区容积,确保了最佳化的快速熄灭(淬火)和混合,燃烧时间进一步缩短,着陆和起飞时 NO_x 排放比CAEP/2标准减少了70%。

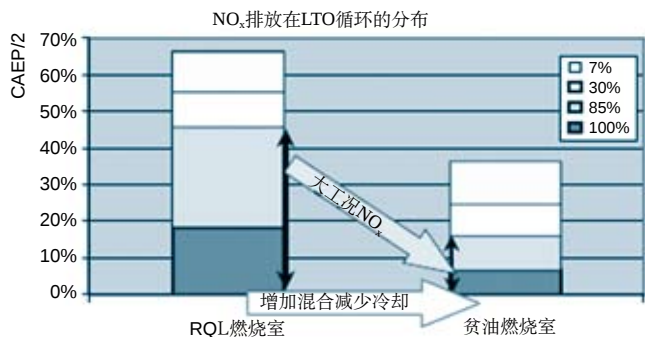


图10 RQL燃烧室和贫油燃烧室在一个LTO过程中 NO_x 排放的典型分布



图11 E3E核心机燃烧室结构和全环燃烧室



图12 RQL燃烧室原理图

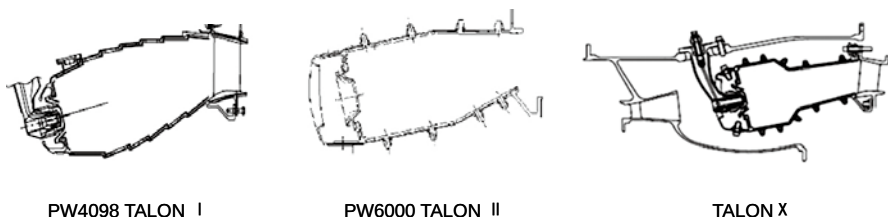


图13 TALON I/II和先进的TALON X燃烧室结构图

4 未来超低排放燃烧技术发展趋势

目前看来, 贫油燃烧技术和富油燃烧技术在低排放燃烧室上均有应用, 并且都取得了不错的成绩, 那么未来超低排放燃烧室到底应该采用哪种技术呢? 2010年2月, ICAO在加拿大蒙特利尔进行的CAEP/8会议给出了答案, 会议明确了近期(2015年) NO_x 将达到50%的CAEP/6, 远期(2020年后) NO_x 将达到30%的CAEP/6, 预测在 NO_x 排放方面采用富油燃烧的RQL技术能达到近期目标, 但是要达到远期目标将非常困难, 相对而言, 贫油燃烧技术将更容易达到远期目标。

以配装波音787飞机的两款发动机为例, 两款发动机目前各有6个型号取证, 其中GENx-1B58与遛达1000E的总增压比和推力相近, 但GENx-1B58发动机采用贫油燃烧的TAPS技术, 遛达1000E采用富油燃烧的ORQL(优化RQL)技术, 而GENx-1B58的 NO_x 排放比遛达1000E低很多, 可见贫油燃烧技术比富油燃烧技术更具有优势, 是未来超低排放燃烧室的主要发展方向。

5 结束语

随着国际民航组织对排放标准的不断修订, 对降低民用发动机污染排放的要求日益严苛。国外的低排放燃烧室技术研究已有40余年历史,

经过不同阶段各种专项计划的持续实施(如ECCP、E3、AST、UEET、TECH56、LEAP56等), 促使低排放燃烧室技术不断进步, 发展了多种方案的低排放燃烧技术, 成功应用于民用飞机上。我国在大型民用飞机项目的牵引下, 已开展低排放燃烧室技术研究, 作为一项与民机市场密切相关的核心技术, 研究工作需要持续和承接, 不断提出新的思路 and 方案, 加强基础原理的研究和验证, 发展具有自主特色和知识产权的低排放燃烧技术, 助推我国民用航空发动机的发展。

AST

参考文献

- [1] ICAO. International standard and recommended practices environment protection, annex16, vol II: aircraft engine emissions[S]. Second Edition, 1993-07.
- [2] Mongia H C. Recent progress in low-emissions gas turbine combustors[R]. ISABE 1997 Paper.
- [3] Mongia H C. GE aviation low emissions combustion technology evolution[R]. SAE 2007 Paper.
- [4] Mongia H C. TAPS—a 4th generation propulsion combustor technology for low emission[R]. AIAA, 2003-2657.
- [5] Klinger H, etc. The engine 3E core enging[R]. ASME, GT2008-

50679.

[6] Lazik W, Doerr T, etc. Development of lean-burn low- NO_x combustion technology at Rolls-Royce Deutschland[R]. ASME, GT2008-51115.

[7] Lazik W, Doerr T, etc. Low NO_x combustor development for the Engine3E core engine demonstrator [R]. ISABE-2007-1190.

[8] ICAO CAEP. CAEP/8-WP/10, report of the independent experts to CAEP/8 on the second NO_x review & long term technology goals[Z]. 2010-02.

[9] ICAO. ICAO engine emissions databank[Z]. Issue 18A, 2012-01.

[10] 林宇震, 许全宏, 刘高恩. 燃气轮机燃烧室[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.

[11] 赵坚行. 民用发动机污染排放及低排放燃烧技术发展趋势[J]. 航空动力学报, 2008, 23(6).

[12] 金捷, 岳明. 燃气涡轮发动机低排放燃烧室的发展趋势及思考[C]. 中国航空学会2007年学术年会, 动力专题81.

[13] 张正国. 未来航空低排放燃烧技术的发展途径[J]. 国际航空, 2010(9).

作者简介

徐华胜, 中航工业燃烧室技术首席技术专家, 研究员, 副总工程师, 长期从事先进航空发动机燃烧室技术研究工作。

邓远灏, 在读博士, 高级工程师, 主要从事先进航空发动机燃烧室技术研究工作。

马存祥, 工程师, 主要从事先进航空发动机燃烧室技术研究工作。