

中心分级燃烧室技术和工程应用研究

The Technology and Engineering Application Research of Internally-Staged Combustors

林宏军 常峰 程明/中国航发动力所

对当前常规主燃烧室而言，低排放、高效率 and 高温升的设计要求往往是相互矛盾的。中心分级燃烧因其特有的燃烧组织方式，既能有效地解决高温升燃烧室面临的若干问题，又能大大降低燃烧室的排放，有效地缓解了这一矛盾，具有良好的工程应用前景。

随着要求的提高和性能的提升，作战飞机对航空发动机的要求越来越高，现役和即将服役的战斗机性能提升、新一代战斗机的设计都需要高推重比的航空发动机，而高推重比航空发动机急需新型的高温升主燃烧室。同时，参照现行的国际民航组织环境保护委员会CAEP/6标准以及中国大飞机发动机的研制时间表测算，未来大飞机发动机燃烧室 NO_x 污染排放至少应比CAEP/6标准减少30%~50%，其技术水平应与目前第四代低排放燃烧室相当，这样才能在大飞机发动机定型时使其 NO_x 排放满足更为严格的污染排放标准。由此可见，开展先进主燃烧室技术预研，满足未来军机高温升、民机低污染的设计需求，成为先进燃烧室研发的关键。

中心分级燃烧室的基本特点

中心分级燃烧是一种分级/分区燃烧组织模式，通常由中心的预燃级和同心环绕预燃级的主燃级构成。预燃级帮助产生适于点火和低功率工作状态所需的燃油雾化质量，以及满足点火、贫油稳定燃烧、高效燃烧等设计要求所需的流场特征；而主燃级则在大状态时工作，与预燃

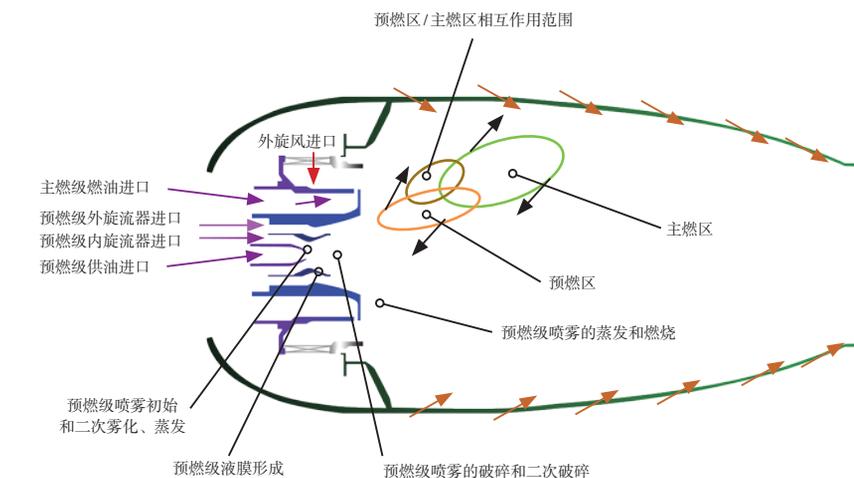


图1 中心分级燃烧室工作原理

级通过空气/燃油的匹配，实现低污染或高温升的燃烧。

中心分级主燃烧室的基本工作原理如图1所示，主要的技术特征包括：燃烧空气全部由火焰筒头部进入，冷却空气量较常规燃烧室大幅减少，取消主燃孔，视情设置少量掺混孔；火焰筒头部分别由预燃级和主燃级构成，并以同心圆的形式嵌套在一起，分别产生两股共轴的环形旋转射流；主燃级与预燃级通过流场、喷雾场、温度场匹配，可实现高油气比条件下的高容热燃烧。

中心分级燃烧组织技术的研究和发展

中心分级燃烧组织技术从原理上可以有效地解决低污染和高温升主燃烧室设计所面临的若干基本矛盾，可满足主燃烧室设计的指标要求，因此在军用高温升/民用低污染主燃烧室设计上具有较大的潜力，已成为先进主燃烧室设计技术研究的重要发展方向。

在军用高温升燃烧室设计方面，罗罗公司在承担F136发动机主燃烧室的设计任务时，把中心分级燃烧

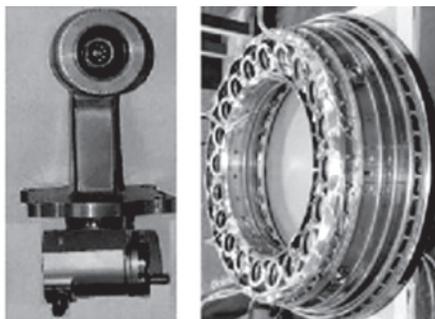
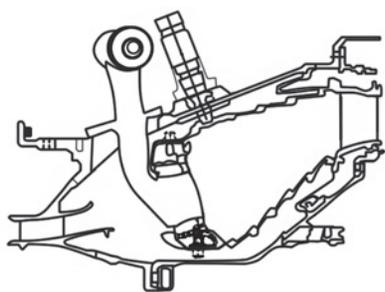


图2 TECH56/CFM SAC TAPS 燃烧室系统

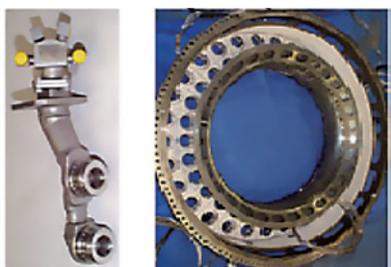
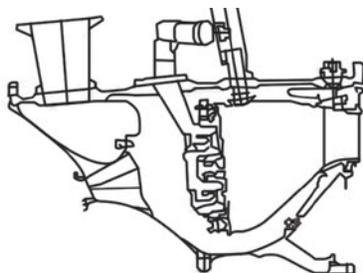


图3 GE90 DAC TAPS 燃烧室系统

技术作为主燃烧室方案之一，开展了大规模的研究工作，研究表明该技术可以满足油气比(FAR)为0.047、温升大于1300K的军用航空发动机主燃烧室设计和使用的要求。而美国GE公司在开发高温升主燃烧室的过程中，也将基于中心分级原理设计的双环预混旋流(TAPS)燃烧的修改方案作为头部燃烧组织结构。该方案起初是作为低污染民机燃烧室提出的，但低污染和高温升燃烧室方案的基本构造是一致的，只在一些细节特征上有差别，军民通用设计符合目前主燃烧室研发的潮流。

在低污染燃烧室设计方面，最典型的中心分级燃烧室是GE公司研发的TAPS燃烧室。20世纪90年代中期，为了进一步降低 NO_x 排放，GE公司在双环腔(DAC)燃烧室的基础上发展了TAPS-I燃烧室，并验证了两种双环预混旋流燃烧室的工程适用性：在TECH56技术研究

计划下研制的CFM56发动机尺寸的单环腔燃烧室——TECH56/CFM SAC TAPS，如图2所示；在美国国家航空航天局(NASA)的先进亚声速运输机(AST)研究计划下研制的GE90发动机(GE90-94B)的双环腔燃烧室——DAC TAPS，如图3所示。

自1999年以来，GE公司对这两种主燃烧室都进行了广泛的试验，结果表明：两种燃烧室都达到了预期的指标，如压降、燃烧效率、头部/火焰筒壁温值与梯度、燃烧室出口温度场、贫油熄火、点火、关键设计点的火焰传输等都满足设计的要求；着陆/起飞时的 NO_x 排放值较目前生产型富油头部燃烧室的都降低了50%左右，CO排放值符合高压比发动机的排放标准。

2007年6月，TAPS燃烧室火焰筒(如图4所示)应用于波音787飞机的GENx发动机完成了技术验证，

如图5所示。结果表明，其排放值比CAEP/6规定的值低很多。即使将其排放值与2008年的排放标准相比较，TAPS的 NO_x 、UHC、CO的排放减排裕度亦分别达到了58%、95%、98%和90%。

TAPS-I燃烧室的成功促使GE公司提出了下一代的TAPS-II方案，目标是进一步降低发动机的污染排放。这些新技术的主要特点是，在主燃级的油气掺混上采用更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比。采取的策略包括：改变主燃级旋流器的数量和布置方式，通过增加旋流器数量、采用多种位置组合来达到强化油气混合效果的目的；或对主燃级燃油喷射进行改进，主

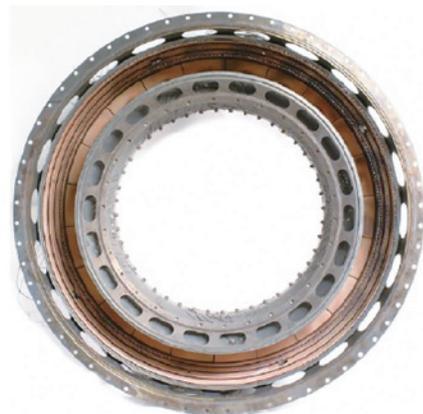


图4 TAPS主燃烧室火焰筒



图5 GENx发动机污染排放试验

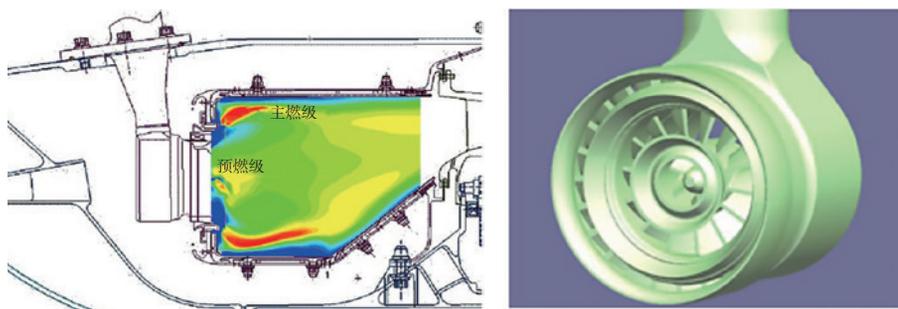


图6 罗罗公司低污染燃烧室

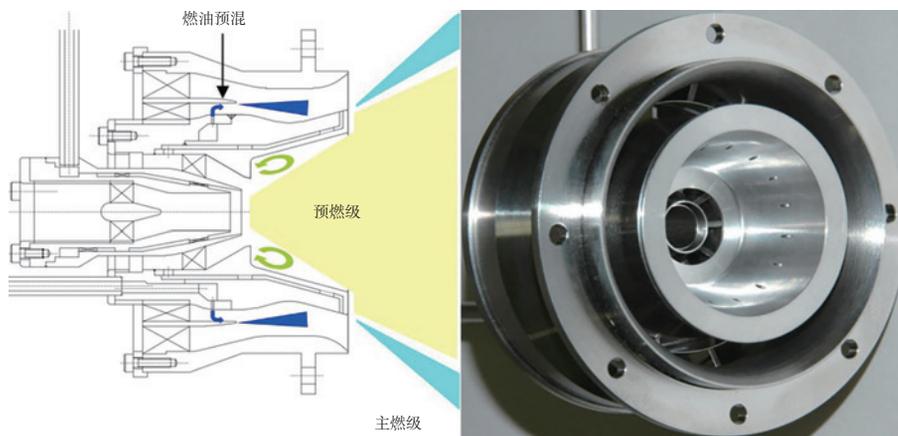


图7 Lean-Staged方案的燃烧室油气混合装置

燃级燃油直射喷嘴外圈开有若干进气孔，实现空气包裹燃油一起进入预混通道内的目的，从而增强燃油的雾化效果以及与空气的掺混效果。而在TAPS-II中，改进点包括：增大主燃级的气量分配、使主燃级的油气掺混更好、油气混合物的当量比更低；关注预燃级的油气混合效果，主要通过改进预燃级喷嘴、套筒出口以及预燃级燃油再次分级实现。目前，TAPS-II燃烧室已在商用的LEAP发动机上实现了工程应用。

罗罗公司基于发动机的效率、环保和经济性（Efficiency, Environment and Economic, E³）核心机项目，将中心分级燃烧组织技术应用于新型低污染主燃燃烧室的开发中，其设计目

标是：NO_x排放比CAEP/2标准降低35%、CO降低60%、UHC降低40%，并要求无可见冒烟。罗罗公司的贫油燃烧（Lean-Burn）方案采用了中心分级燃烧的结构布局，中心为预燃级，外围为主燃级，如图6所示。预燃级为扩散燃烧方式，采用的是罗罗公司的空气雾化喷嘴；主燃级是贫油预混燃烧方式，采用的是在主燃级出口周向均布若干喷嘴直接向燃烧区喷射燃油。同时，罗罗公司还与一些大学和研究中心合作，开展了关于Lean-Burn方案的研究工作，进行了不同设计参数下单头部、双头部、三头部和全环的常压、中压和高温高压试验，考察了预燃级旋流强度、主燃级旋流强度、主预两级气量分配、预燃级喷嘴雾化方式、主燃级雾化方式和套筒

几何结构等设计参数对污染物排放、点熄火性能影响研究。

此外，日本、法国、俄罗斯、德国等也分别针对不同的中心分级燃烧室方案进行了研究。日本宇航局（JAXA）在2003年10月启动了清洁发动机技术发展（TechCLEAN）计划，目标是在CAEP/4标准基础上使NO_x减少80%；自2011年开始，为发展小推力环保发动机（ECO），川崎重工对Lean-Staged方案开展了继续研究。法国针对中心分级燃烧室方案进行了数值模拟，并开展了冷、热态试验研究，研究了一些关键设计参数对流场、燃烧特性和排放特性的影响，如图8所示。俄罗斯中央航空发动机研究院（CIAM）则针对中心分级燃烧室结构开展了数值模拟研究，研究了旋流角等关键几何参数对气流结构的影响，并用冷态试验数据验证了CFD仿真方法和结果，如图9所示。德国、瑞典和

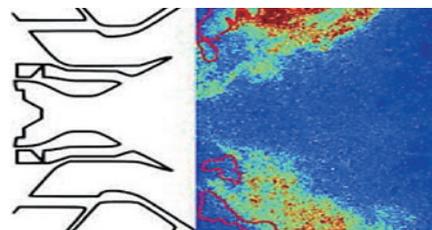


图8 法国中心分级燃烧室试验的结果

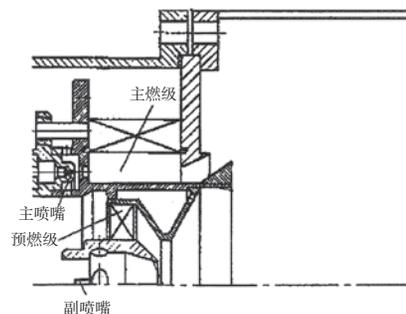


图9 俄罗斯中心分级燃烧室方案

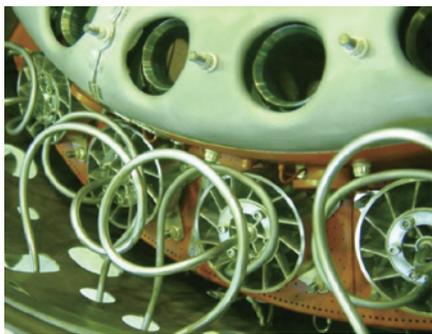


图10 德国、瑞典和法国联合设计的中心分级燃烧室

法国则针对中心分级燃烧室联合设计了一种新的燃烧组织结构，如图10所示。针对该结构方案开展了数值计算和冷热态试验研究，重点研究了中心分级燃烧室的稳定性及可操纵性等问题。

中心分级燃烧组织在高温升燃烧室上应用的关键技术分析

中心分级燃烧组织方式作为一种具有工程应用前景的低污染和高温升燃烧室设计方案，在不同的设计方向上，设计的思路和关注的技术略有不同。

将中心分级燃烧组织方式作为高温升主燃烧室的设计方案，为达到主燃烧室的设计温升并提高燃烧效率的目标，必须在设计中增加主燃烧室头部空气量，以确保其油气比大幅度增加的同时，能大幅度降低头部当量比（略低于1.0），避免主燃烧室出现明显的排气冒烟。而设计中主燃孔已被完全取消，仅保留有限的掺混孔对燃烧室的出口温度场进行调整，以便获得良好的出口温度分布。由此带来的主要设计问题是，在无主燃孔和补燃孔的条

件下，如何对高温升燃烧室的流场、油气掺混进行有效和合理的组织，合理控制燃油在燃烧室内的分区燃烧，确保小状态的稳定燃烧，同时避免火焰筒内出现高温燃烧区，保证大状态下主燃烧室获得良好的燃烧性能。因此中心分级燃烧模式下多旋流分区燃烧流场组织技术将成为高温升主燃烧室设计的关键。

在供油方案上，为满足军用发动机的高机动性要求，中心分级高温升燃烧室的主燃级不能采用预混的方式，而应采用多点直喷（LDI）、溅板式喷嘴、扇形喷嘴等较为特殊的供油方式。采用相应的喷射雾化方式，虽然可以保证燃烧室内部流动对燃油雾化和供油的最小影响，避免因预混燃烧产生的振荡燃烧和回火，但是相应的雾化方式必将带来燃料雾化质量降低，燃烧室点火特性、燃烧效率变差的问题。因此必须针对燃油供给方式（主要是主燃级喷嘴）设计技术，以及燃油与空气间的匹配技术进行深入的研究。

此外，由于燃烧空气全部从燃烧室头部进入，掺混空气和冷却空气量将大幅度减少，而高温升燃烧室的燃烧温度大幅提高，为保证燃烧室火焰筒具有较好的耐久性，如何采用先进的冷却方式（如多斜孔冷却，冲击+发散双层壁冷却等）有效地降低火焰筒的壁温，也是中心分级组织模式在高温升燃烧室设计应用研究中所必须考虑的研究方向。

结束语

中心分级燃烧组织技术作为高温升/低污染主燃烧室设计中最具潜力的方案之一，受到了国内外研究机构的重视。美国和欧洲的研究机

构通过综合高性能涡轮发动机技术（IHPTET）、通用经济可承受先进涡轮发动机（VAATE）等多个计划，针对中心分级燃烧技术在先进燃烧室设计中的应用开展了大量的预先研究，并已取得了显著的技术进步。尤其是低污染的中心分级燃烧室已经成功地应用于民用航空发动机，并投入商业运营，成为中心分级燃烧组织技术在航空发动机上应用的成功范例。此外，欧美的几家大公司和科研机构对中心分级燃烧组织技术在高温升燃烧室上的应用的研究仍在继续，并在工程应用设计上取得了一定进展。

近年来，国内的部分单位针对中心分级燃烧组织技术的发展开展了跟踪，并依靠数值模拟和机理试验的方法，对中心分级燃烧组织技术在低污染燃烧室上的应用进行了研究，提出了低污染燃烧室的设计方案并完成了验证，但以上研究仍不够系统，工程应用性较差。而针对中心分级燃烧组织模式在高温升燃烧室工程应用上的研究相对较少，距离工程应用仍有较大差距。

综合来看，我国在中心分级燃烧组织技术的研究方面还仅仅处于基础研究阶段，与世界先进水平的差距仍然很大。为了缩短我国在高温升/低污染燃烧室设计上与国外的差距，提升先进主燃烧室的设计能力，应当继续加强中心分级先进燃烧组织技术的工程应用研究和试验验证，推动中心分级燃烧组织技术在先进燃烧室工程设计中的应用。

航空动力

（林宏军，中国航发动力所，高级工程师，主要从事主燃烧室设计和先进燃烧室预先研究工作。）