

# 现代航空发动机分区燃烧策略分析

## Analysis of Staged Burning Strategies for Aeroengines

李杰 / 西安航空动力股份有限公司

**摘要:** 分区燃烧是现代航空发动机的基本燃烧策略, 不管是采用横向的或纵向的分级燃烧技术, 都是把降低 $\text{NO}_x$ 的排放作为燃烧室组织燃烧的重点, 采用分区燃烧可减少起动、慢车、起飞和巡航等工况下的排放指标。

**关键词:** 燃烧策略; 分区燃烧; 分区燃烧室

**Keywords:** burning strategy; staging combustion; staged combustor

### 0 引言

分区燃烧最早出现在NASA资助的实验清洁燃烧室(ECCP)项目, 并应用于E3发动机中。通用电气(GE)公司的双环腔燃烧室是典型的横向并列燃烧模式, 而普惠(P&W)公司的先进低氮氧化物排放燃烧室(TALON)和罗-罗公司的第五阶段燃烧室是纵向串联燃烧模式的代表。

横向并列燃烧室和纵向串联燃烧室的结构完全不同, 组织燃烧策略也不相同, 形成了现代先进民用发动机燃烧室技术中的两大发展方向。

### 1 分区燃烧策略

不管是采用双环腔还是单环腔的分区燃烧技术都是将降低 $\text{NO}_x$ 的排放作为燃烧室组织燃烧的重点考虑对象, 设计中主要考虑头部油气的预先混合以降低燃烧温度, 采用分区燃烧分别减少起动、慢车、起飞和巡航工况下的排放指标, 同时也使发动机在低工况和高工况下都能得到合理的燃烧状态和燃烧效率。

大型商用航空发动机分区燃烧策略分为: 横向并列燃烧模式, 纵向

串联燃烧模式, 以及纵横混合模式。典型的横向并列燃烧模式以双环腔燃烧室(DAC)为代表, 典型的纵向串联燃烧模式以富油燃烧-猝熄-贫油燃烧(RQL)燃烧室为代表, 典型的纵横混合燃烧模式, 以斯奈克玛设计的清洁燃烧室为代表。

### 2 横向并列燃烧模式燃烧室

#### 2.1 双环腔燃烧室

双环腔燃烧室是横向并列燃烧模式的代表, 其技术关键之一就是横向分区燃烧。该燃烧组织技术是GE公司通过ECCP、E3等计划逐步发展完善而来的, 并在CFM56-5B上首获工程应用(图1)。双环腔燃烧室的 $\text{NO}_x$ 排放量较单环腔燃烧室可降低45%。

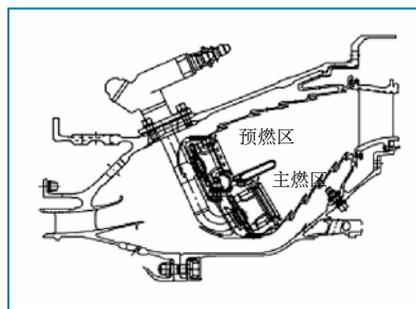


图1 CFM56双环腔燃烧室

双环腔燃烧室的主要结构特点是其火焰筒沿径向有两个并行燃烧区, 外侧的为预燃级, 内侧的为主燃级。其组织燃烧特点是不改变空气分配比例, 而是根据发动机工况调节从一个区到另一个区的燃油分配来改变油气比, 从而控制燃烧温度。低工况下, 仅预燃级工作; 高工况下, 预燃级和主燃级同时工作。在低工况时, 预燃级内气流速度较低, 油气比接近于化学恰当比, 火焰稳定性好, 燃烧效率高。尽管停留时间长、火焰温度高对控制 $\text{NO}_x$ 生成不利, 但此时工作状态低,  $\text{NO}_x$ 排放量非常有限。在高工况时, 主燃级内气流速度较高, 油气比小于化学当量比, 能有效控制 $\text{NO}_x$ 生成。尽管停留时间短对燃烧效率不利, 但此时燃烧室进口条件对燃烧十分有利, 因此主燃级燃烧效率仍可保持很高水平, 从而保证CO和UHC排放量不增加。通过分区燃烧, 双环腔燃烧室兼顾了性能及排放, 使二者达到更佳。

#### 2.2 优点与不足

除双环腔燃烧室外还有三环腔和多环腔燃烧室, 都属横向并列燃烧模式。在与常规燃烧室长度相当情况下,

横向并列燃烧模式的多环腔燃烧室技术的优点是性能好,排放物少,可实现低排放所有性能要求;长度短、重量轻,从常规燃烧室升级为双环腔燃烧室,整机结构不需大改,发动机转子动力学问题少。

横向并列燃烧模式的多环腔燃烧室技术可以大幅降低 $\text{NO}_x$ 的排放,但要继续进一步降低 $\text{NO}_x$ 就很困难了。对双环腔燃烧组织技术而言,主要缺点:双环结构使得火焰筒壁表面面积比常规燃烧室大,需更多冷却空气或用更先进冷却技术或耐热材料;在介于高、低工况之间的中间工况下,由于两级燃烧区都偏离其最优设计点,燃烧室出口温度场不易保证均匀性;喷嘴设计复杂,需要两套燃油喷嘴,使得燃烧室的头部结构变得非常复杂。因此,双环腔燃烧室不但增加了结构设计难度和制造难度,还增加了发动机的结构重量,降低了燃烧室的可靠性。

## 3 纵向串列燃烧模式燃烧室

### 3.1 RQL燃烧室

“富油燃烧-猝熄-贫油燃烧”(RQL)的概念是上世纪80年代提出的,主要目的是要减少 $\text{NO}_x$ 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,美国普惠公司将其用于商用航空发动机的RQL燃烧室命名为TALON燃烧室。

RQL燃烧室应用的是典型的纵向

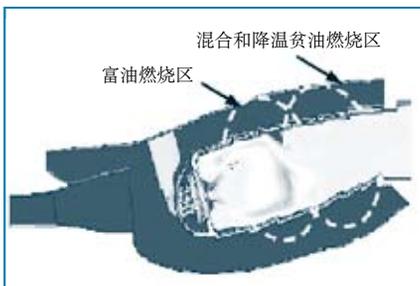


图2 RQL燃烧室燃焰示意图

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。在RQL燃烧室中,先将全部燃油和部分空气进行富油燃烧,通过降低燃烧温度来减少富油燃烧区的 $\text{NO}_x$ ,然后富油燃气快速与二股气流混合进行贫油燃烧。在RQL燃烧室中,形成了两个明显的燃烧区:富油燃烧区以及混合和降温贫油燃烧区(图2)。

### 3.2 TALON燃烧室

目前,普惠公司在其商用发动机上采用的先进低氮氧化物排放燃烧室(TALON燃烧室)是在RQL燃烧室技术基础上,利用浮壁式燃烧室技术,结合气动雾化喷嘴、单排二股气流进气孔等技术开发出来的。在RQL燃烧室基础上,TALON燃烧室的关键改进是优化了气动雾化喷嘴,使得燃料-空气混合当量比更合理,燃料-空气的混合更加充分,可在全动力范围内使燃料在很短的时间内充分雾化并在主燃烧区内快速燃烧。不但很好地传承了RQL燃烧室贫油熄火边界宽的优点,同时使污染物的排放更低。

由于气动雾化喷嘴可以使燃料在很短的时间内充分雾化并完全燃烧,使得TALON燃烧室的燃焰分区与RQL燃烧室相比已不十分明显(图3)。

### 3.3 第五阶段燃烧室

罗-罗公司在遑达系列发动机中全部应用了第五阶段燃烧室,不同型号



图3 TALON II 燃烧室燃焰示意图

的遑达系列发动机所应用的第五阶段燃烧室略有不同,但均为纵向串列燃烧的燃烧室。

图4是罗-罗公司第五阶段燃烧室结构简图。罗-罗公司第五阶段燃烧室为单环腔燃烧室,头部采用气动雾化喷嘴和旋流器结构。与RQL燃烧室类似,第五阶段燃烧室的室壁上有两排补燃空气进气孔,第五阶段燃烧室的组织燃烧也是轴向分区的。

### 3.4 优势和不足

纵向串列燃烧模式的优势是燃烧室的头部结构较多环腔燃烧室简单,但其缺点主要有:纵向串列分区燃烧使得燃烧室的长度变长;补燃空气进气孔使火焰筒壁的结构变得复杂;从常规燃烧室改型整机结构需大改;其火焰筒壁表面面积比常规燃烧室大,需更多冷却空气或更先进冷却技术或耐热材料。

由于纵向串列燃烧模式燃烧室的头部结构简单,通过改进燃油喷嘴的燃油喷射,如应用气动雾化喷嘴,可以大大改善燃烧室的组织燃烧,实现纵向串列燃烧区变短。特别值得一提的是纵向串列燃烧模式燃烧室仅需一套燃油喷嘴,使得其结构相对简洁,从而降低了结构设计难度和制造难度,还可降低发动机的结构重量。

## 4 纵横混合燃烧模式燃烧室

### 4.1 欧洲NEWAC清洁燃烧室

在欧洲新航空发动机核心机概念

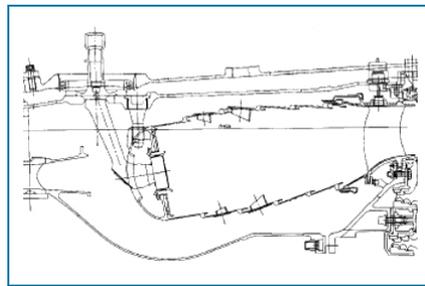


图4 第五阶段燃烧室结构简图

(NEWAC)项目中有一款燃烧室是由法国斯奈克玛设计的清洁燃烧室(图5),它是一款典型的纵横混合燃烧模式的燃烧室。

该款燃烧室横向排列了两种不同的燃烧技术,内环是典型的RQL燃烧室,外环是典型的贫油预混预蒸发(LPP)燃烧室,两个环腔共同构成了一个双环腔燃烧室。该款燃烧室融合了横

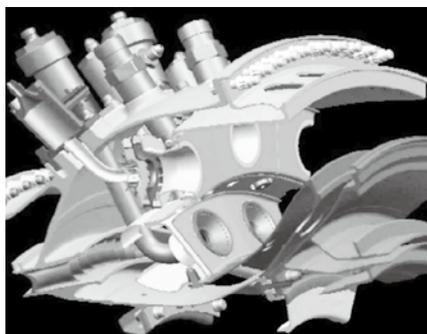


图5 斯奈克玛公司设计的一款清洁燃烧室

向并列燃烧和纵向串列燃烧两种模式,是典型的纵横混合燃烧模式。目前,该款燃烧室已完成了相关测试,但还未在发动机中得到应用。

#### 4.2 双环预混涡流器(TAPS)燃烧室

通用公司最新的双环预混旋流器(TAPS)燃烧室,从总体结构上来看属于贫油燃烧室,也是在保持分区燃烧优点的同时引入了创新的预混概念。

在结构特点上,TAPS燃烧室燃油喷嘴的主燃级燃油喷射采用的是气动雾化式。它通过主混合器空气旋流器的高压空气气流与主燃级燃油的射流相垂直,使主燃级燃油的雾化更充分,混合度更高;可在燃烧室内形成稳定的主燃级燃烧回流区。这种混合形式的燃烧模式在现代商用航空发动机燃烧室中采用较多,特别是用于具有多燃级燃烧

的主燃级燃烧中,以便实现贫油燃烧,从而达到低污染排放的目的。预燃级燃烧回流区和主燃级燃烧回流区可形成一定的交叠,从而形成预燃/主燃旋流交叠区。这样TAPS燃烧室就可以仅用一套喷嘴系统实现发动机不同工况燃烧的要求(图6)。

由于燃油预先与空气混合后喷入燃烧区进行燃烧,燃烧区也处于贫油状态。从燃烧室的燃烧区分布来看,TAPS燃烧室的燃烧分区更合理,可实现发动机全工况的贫油燃烧。就燃油燃烧效率而言,TAPS燃烧室的燃油燃烧效率更高,火焰温度更低,燃烧室出口温度场也更均匀,污染物排放更低。因此,TAPS燃烧室是更为先进,结构更为简洁的燃烧室,并大大降低了氮氧化物的排放。

TAPS燃烧室是单环燃烧室,从严格意义上讲,TAPS燃烧室应是纵向串列燃烧模式,但由于预燃级回流区和主燃级回流区形成一定的交叠,即预燃/主燃旋流交叠区;同时,火焰筒上不存在补燃空气进气孔,使得TAPS燃烧室的燃烧模式与RQL等纵向串列燃烧模式完全不同,因此,是否将TAPS燃烧室看作是纵横混合燃烧模式的燃烧室是值得同行商榷的。

## 5 燃烧模式的发展趋势

总之,现阶段发动机燃烧室技术的发展趋势是朝着贫油燃烧的方向发展的,如贫油直混(LDM)、贫油预混预蒸发(LPP)、部分蒸发和快速混合(PERM)、贫油直喷(LDI)和多点喷射贫油直喷(MP-LDI)等,重点是燃烧室的燃油喷嘴,其中气动雾化式喷嘴成为实现贫油低污染燃烧的主要手段。

由于气动雾化式喷嘴的不断完善与发展,同时为了简化燃烧室头部结

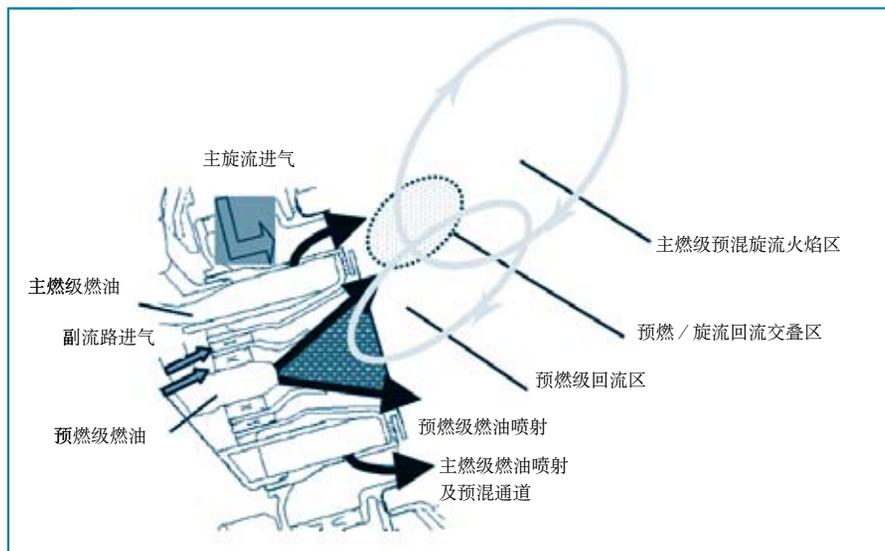


图6 TAPS燃烧室双环预混旋流器的气流及油路示意图

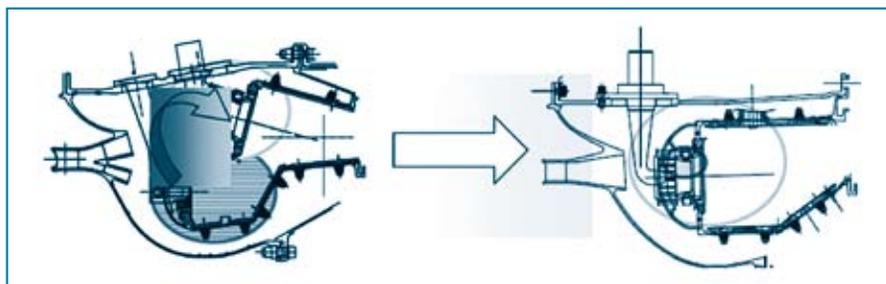


图7 现代航空涡轮发动机燃烧模式的发展趋势

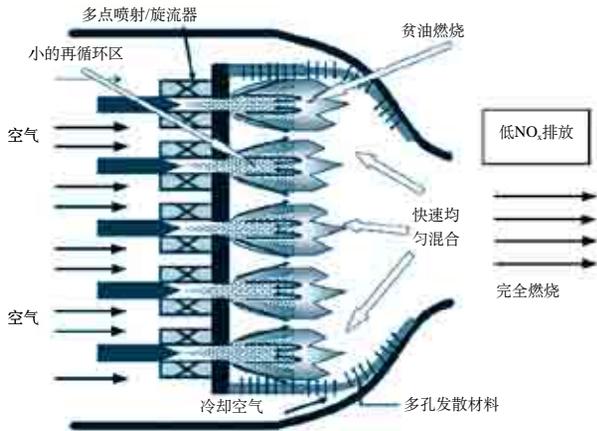


图8 多点喷射贫油直喷(MP-LDI)燃烧室示意图

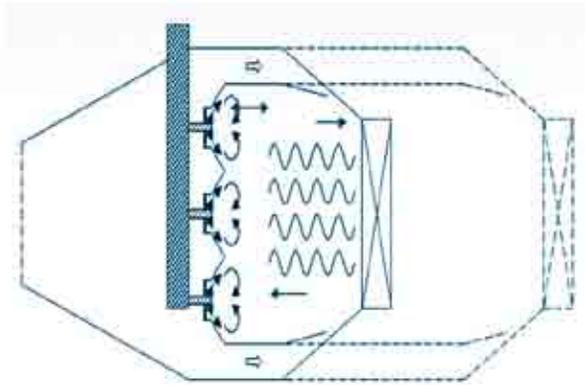


图9 MP-LDI燃烧室的长度与常规燃烧室长度对比

构,现代航空涡轮发动机燃烧室技术的发展趋势之一就是贫油燃烧的单环短燃烧室(图7)。

应用多点喷射贫油直喷(MP-LDI)燃烧技术的燃烧室是目前正在研究的一种先进燃烧模式(图8),属于横向并列燃烧模式。多点喷射贫油直喷燃烧技术的优点很多:燃烧均匀稳定,燃烧区短而小,可使燃烧室做得很短(见图9);燃油直接喷射入火焰区没有自燃或回火问题;火焰筒上没有掺混孔,进入燃烧室内的空气要么从燃烧室头部进入,要么作为冷却空气;油气混合快速而均匀,可以获得尽可能低的燃烧温度,燃烧充分,污染物排放很低;多点喷射便于调节,通过调节可适应不同的工况要求。

虽然,多点喷射贫油直喷燃烧技术尚未得到直接的应用,但其众多的优越性成为发动机燃烧技术发展的一个重要方向。

## 6 结束语

纵向串列燃烧模式燃烧室的几何结构相对简单,使得燃烧室的制造更为简单,制造成本也更低,燃烧室的结构重量也相对更轻,火焰筒的冷却更容易,使燃烧室单元体整个成本相对较低。结合气动雾化喷嘴,可使纵向串列燃烧模式

燃烧室满足现代航空发动机燃烧室发展的需求。目前,在已应用的航空发动机燃烧模式的发展中,纵向串列燃烧模式的优势略大于横向并列燃烧模式,也就是说,纵胜于横。

但对于正在研制的航空发动机燃烧模式而言,多点喷射贫油直喷燃烧技术具有明显的优点,成为燃烧模式研发的一个重要方向,有望在不久的将来得到应用。从这一点看,横向并列燃烧模式的优势大于纵向串列燃烧模式,即横胜于纵。

由此可见,现代航空发动机分区燃烧策略中的纵与横,孰优孰劣很难有确切的定论。

AST

## 参考文献

- [1] 尚守堂,程明,张军峰,李锋,马宏宇.低排放长寿命燃烧室关键技术分析[C].中国航空学会2007年学术年会论文集,动力专题58
- [2] 李杰.富油燃烧-猝熄-贫油燃烧(RQL)先进燃烧室技术[J].航空动力技术,2010(4).
- [3] 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).
- [4] 李杰.清洁动力PW1000G发动机发展历程与技术特点分析[J].航空科

学技术,2009(5).

[5] 李杰.遄达发动机及其第五阶段燃烧室[J].航空科学技术,2011(1).

[6] S. Colantuoni, S. Bake, J.P. Badet. Low emissions combustors development for new aero-engines core applications[C], 5th European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering, ECCOMAS 2008 in Venice, 30th June - 4th July, 2008.

[7] 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] 李杰.GEnx发动机TAPS燃烧室结构设计特点分析及启迪[J].航空动力技术,2008(2).

[9] 史家荣,徐华胜.民机发动机燃烧室设计特点与研制的关键技术[C].中国航空学会2007年学术年会论文集,动力专题57.

[10] 彭云晖,许全宏,张弛,林宇震,刘高恩.我国大飞机发动机低污染燃烧室发展考虑[C].中国航空学会2007年学术年会论文集,动力专题54.

[11] 金捷,岳明.燃气涡轮发动机低污染燃烧室的发展趋势及思考[C].中国航空学会2007年学术年会论文集,动力专题81.