

## 第四章 燃烧室的工作原理与特性

### 第三讲 燃烧室的工作过程

#### 4.3 燃烧室的工作过程

燃烧室是以空气作为工作介质，在其中与喷入的燃料混合，形成余气系数合适的油气混合气，然后点火燃烧，对空气进行加热，增大热焓，获得其膨胀作功能力。可见，燃烧室工作的好坏，归根结底是能否在其中获得适合于燃烧工作条件的理想的流场结构和燃料浓度场。良好的气流结构能促进燃料与空气的混合，并有利于在燃烧区内得到所需要的燃料浓度场，是实现可靠点火和稳定燃烧的关键。燃烧室内燃烧的组织与燃烧室在发动机上的位置和自身的结构，即燃烧室的工作条件息息相关。

##### 4.3.1 燃烧室的工作条件

航空燃气涡轮发动机燃烧室位于压气机和涡轮之间，因而其工作受前、后部件的影响与制约，具体的工作条件有如下特点：

(1) 燃烧室进口气流速度很大，燃料要在高速气流中进行燃烧。

为了适应现代空战的需要，高速飞机要求发动机推力大，飞行阻力小，这就必须增大空气流量和减小燃烧室的横截面积，从而导致燃烧室进口气流速度达到很大的数值，有的发动机，燃烧室进口气流速度甚至高达  $200\text{ m/s}$  以上。

(2) 燃烧室容积很小，但要在短时间内发出大量的热能，而且随着现代发动机技术的发展，燃烧室长度还在缩短，体积进一步减小。

(3) 燃烧室出口气流温度受到涡轮叶片材料强度的限制。

由于涡轮是在高温燃气推动下高速旋转的，因此，涡轮叶片不仅承受着极大的离心力，而且还处在高温条件下工作。金属材料的强度极限是随着温度的升高而降低的，为了保证涡轮安全可靠地工作，就必须把燃烧室出口燃气温度限制在一定的范围内。目前一般允许在  $1200\text{K}$  左右。叶片有冷却的某些发动机，可达  $1500\text{K}\sim 1800\text{K}$  左右。

上述这些条件给在燃烧室内组织稳定高效的燃烧带来了很大的困难。

首先，要保证稳定的燃烧，必须要有一个稳定可靠的点火源，在航空发动机上采取纯外界提供的点火源是不现实的，稳定点火源必须由已燃混合气产生的火焰自身来建立。由前面的分析可知，形成稳定点火源的条件是要求混合气的流动速度与火焰的传播速度相等，而燃烧室出口的气流速度很大（约为  $150\sim 200\text{ m/s}$ ），在这样高的气流速度下实现稳定的燃烧

几乎是不可能的，因此必须降低气流速度。

再者，为了保证稳定燃烧，应尽可能地增大火焰传播速度，这就要求混合气的余气系数应接近于1，使火焰传播速度最大。但是，若在 $\alpha=1$ 的混合气中进行燃烧，其燃烧室出口的燃气温度是涡轮叶片所不可接受的。这可从下面简单的定量分析说明。

经过燃烧后，1kg 空气的焓增量为

$$\Delta i^* = \bar{c}_p (T_4^* - T_3^*)$$

其中， $\bar{c}_p$  为平均定压比热。

由热平衡，加给空气的热量应等于空气总焓的增加，即

$$Q_1 = W_a \Delta i^* = W_a \bar{c}_p (T_4^* - T_3^*)$$

又由

$$\xi_b = \frac{Q_1}{Q_0} = \frac{W_a \bar{c}_p (T_4^* - T_3^*)}{W_f \cdot H_f}$$

代入

$$\alpha = \frac{W_a}{W_f \cdot L_0}$$

有

$$T_4^* = T_3^* + \frac{\xi_b H_f}{\alpha L_0 \bar{c}_p}$$

如某发动机  $T_3^* = 577 \text{ K}$  ,  $\xi_b = 0.97$

若取  $\alpha = 1$  ,  $\bar{c}_p = 1.4217 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$

则

$$T_4^* = 2558.78 \text{ K}$$

显然，这样高的出口燃气温度是涡轮所不能承受的。因此，必须增大燃烧室的余气系数，而增大 $\alpha$ 又不利于组织稳定的燃烧。

#### 4.3.2 燃烧室内保证稳定燃烧的措施

由上面的分析可知，稳定燃烧的要求与燃烧室的工作条件是相矛盾的，因而燃烧室内组织稳定燃烧就是要解决这些矛盾，具体地说就是要从降低气流速度和增大火焰传播速度两个方面入手来采取相应的措施。

#### 4.3.2.1 降低燃烧室内的气流速度

##### (1) 采用扩压器

很自然的想法是利用扩散形管道来降低气流的速度。故进口采用扩压器，将燃烧室的进口段设计成扩散形通道，使进入燃烧室的气流速度降低。

但是，扩压器的长度和扩张角要受到燃烧室几何尺寸要求的限制，因此，扩压器对气流的减速是有一定限度的，还不能达到将气流速度降至与火焰传播速度相等的程度。因此，必须采用其他的方法。最为常用的方法是用火焰稳定器建立回流区来减速。

##### (2) 采用火焰稳定器

常见的有两种结构型式的火焰稳定器：叶片旋流器和锥形火焰稳定器。它们都是在燃烧室头部装置后面建立起回流区的气流结构。

##### ○叶片旋流器

旋流器由若干旋流片按一定角度斜向排列而成（图 4-11）。空气流经旋流器进入火焰筒头部，由于旋流片的导流作用，由轴向运动变成旋转运动，形成具有轴向、切向和径向分速的三维旋转气流，气流被惯性离心力甩向四周。又由于空气的粘性作用，旋转扩张着的进气气流把火焰筒中心附近的气体带走，使中心区变得稀薄，压力降低，这样，在燃烧室的中心形成低压区，在轴线方向形成逆主流方向的压力差。于是，在此压作用下，火焰筒后部的一部分燃气便向火焰筒中心的低压区倒来形成回流。在燃烧区中，有回地方叫做回流区，回流区的外边叫做主流区。

由于气流在火焰筒内形成了回流区，加之主流区同回流区之间的粘性作用，因此，火焰筒内同一截面上气流的速度是不相等的，如图 4-12 所示。轴

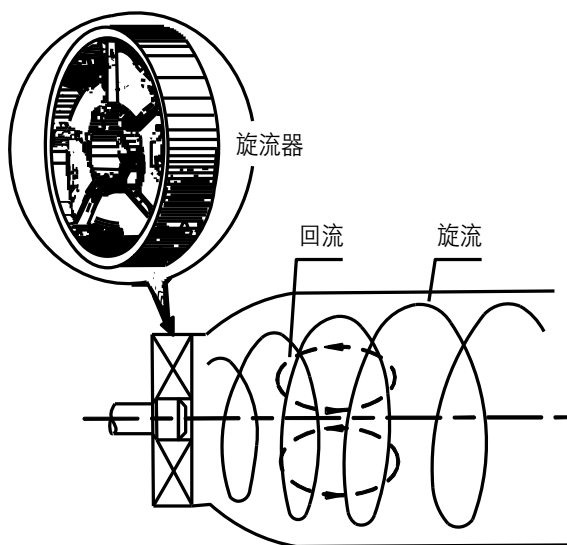


图 4-11 旋流器工作原理示意图

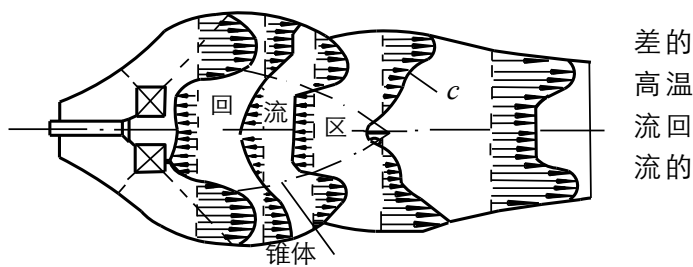


图 4-12 火焰筒内不同截面上气流轴向速度的分布

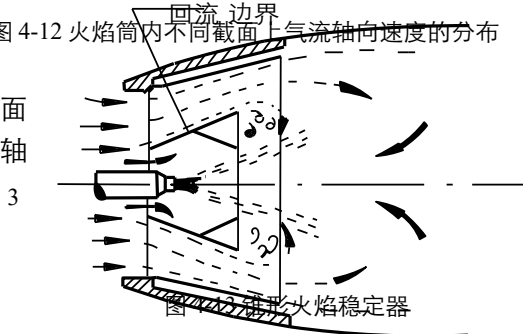


图 4-13 锥形火焰稳定器

向速度等于零的地方，叫做回流边界。从图 4-12 中靠近火焰筒头部截面的速度分布来看，气流速度是由主流区的正向速度（设顺流方向为正）逐渐过渡到回流区的负向速度，因此，在这个截面上必然能找到气流速度与火焰传播速度相等的位置，此处有可能成为稳定的点火源。可见，回流区的建立可有效地降低气流速度，但随之而来的是总压损失有所增大。

#### ○锥形火焰稳定器

锥形火焰稳定器是一个空心锥体，如图 4-13 所示。气流经过锥体流向四周，同时借粘性作用不断地把锥体后面的气体带走，使锥体后面气体的压力减小，于是，火焰筒后部的高温燃气便向锥体后面倒流回来，形成了回流，从而达到降低气流速度的目的。

#### 4.3.2.2 增大火焰传播速度

##### （1）气流分股进入火焰筒

前面已经分析过，使  $\alpha = 1$  虽可使火焰传播速度大大增加，但却会使燃烧室出口的燃气温度超出限制条件，为解决这一矛盾采用气流分股进入火焰筒的方案。

把火焰筒划分为燃烧和掺混两个区域，空气分为两股或多股进入火焰筒，如图 4-14 所示。第一股气流（约占进入燃烧室全部空气流量的 30%）由头部和前半段的进气孔进入火焰筒，与喷入的燃油形成余气系数接近于 1 的混合气，以获得尽可能大的火焰传播速度。其他的气流（二股气流）则通过掺混孔进入掺混冷却区，与燃烧区出来的炽热燃气掺混，一方面进行冷却，使燃气温度降低，以保证涡轮工作的安全。另一方面，还可以使尚未完全燃烧的混合气进行补充燃烧，提高燃烧效率。

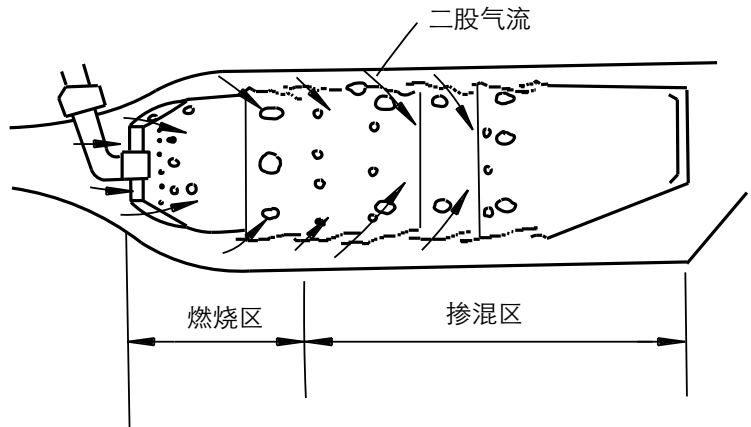


图 4-14 气流分股进入火焰筒的示意图

在此需要强调指出的是，燃烧室的余气系数与燃烧区的余气系数在同一燃烧室工作状态下是不相同的，在计算与分析中两者不能混淆。实际上，以后常用的是燃烧室的余气系数，

用  $\alpha_b$  来表示，依定义则有  $\alpha_b = \frac{W_a}{W_f \cdot L_0}$ ，式中  $W_a$  是进入燃烧室的空气流量。由上面的分析

可知， $\alpha_b$  应是始终大于 1 的。与燃烧室的余气系数  $\alpha_b$  相对应的还有燃烧室的油气比，记为

$f_b$ ，同理可得  $f_b = \frac{W_f}{W_a}$ ，其中  $W_a$  是进入燃烧室的总空气流量。

##### （2）组成余气系数分布合理的混合气

事实上，由于燃料的喷射作用，燃料在燃烧室内的分布不可能做到绝对均匀，因此会造成余气系数分布不均匀。如图 4-15 所示，其中图 (a) 是燃油从常用的离心式喷嘴喷出时形成的油雾锥，在锥面附近，燃油量较为集中，燃料浓度较高，而在其他地方则燃料浓度很低，因此，为保证稳定燃烧，应使得余气数的分布如图 4-15 (b) 所示，在回流边界附近的主流区内使余气系数接近于 1.0。

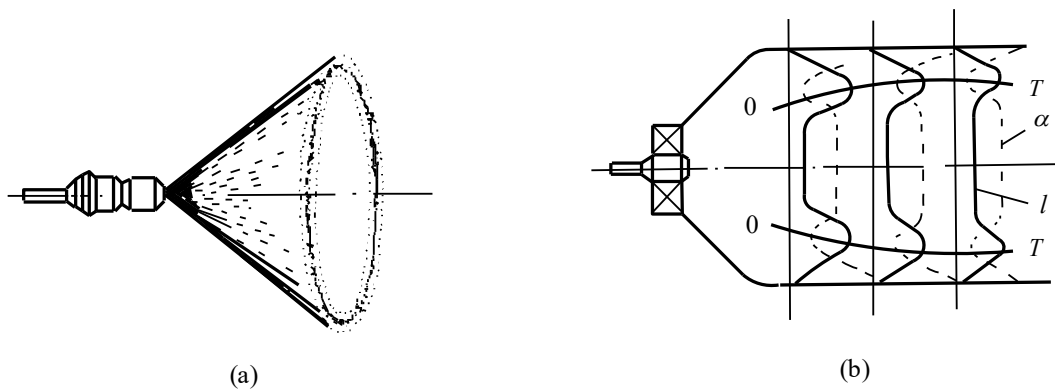


图 4-15 余气系数分布图

混合气的均匀程度也是影响稳定燃烧的一个重要方面，为使混合气的组成更为均匀合理，关键是燃料的喷射雾化应做到尽可能地均匀。

目前大多数燃烧室使用压力雾化的燃油喷嘴（如图 4-15 (a) 的离心式喷嘴），其优点是结构简单，流量范围宽，在燃油压力高时可有较好的雾化质量。但是其缺点也明显，在燃油压力低时雾化质量明显下降，且燃油在喷嘴附近较为集中。为了克服其不足，随着燃烧室技术的发展，尤其是要求缩短燃烧室长度，减小体积，必须要使燃油的雾化、蒸发、掺混在极短的时间内完成，所以又出现了新的燃油喷射方式，如气动喷嘴、蒸发式喷嘴、预混预蒸发式燃油喷射方式等等。

### 4.3.3 燃烧室内的燃烧过程

当空气从火焰筒头部进入，燃料从喷嘴喷入后，空气与油雾迅速掺混，由放置在头部的点火器对其点燃，那么，当燃烧室中的混合气被点燃以后，是怎样组织稳定的燃烧过程呢？下面就来讨论这个问题。

前面已经提到，火焰稳定的条件是要有稳定的点火源。稳定的点火源也就是焰锋的起始点，其存在的条件是该处新鲜混合气的气流速度等于混合气中火焰传播的速度。新鲜混合气的气流速度与气流的分配和气流的结构有关；而火焰传播速度则主要取决于燃料的浓度分布及气流的紊流强度。下面从这两个方面来分析稳定点火源可能存在的位置。

首先来分析稳定点火源的径向位置。稳定点火源

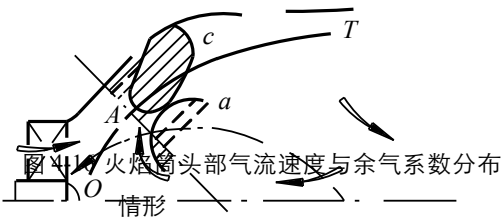


图 4-16 火焰筒头部气流速度与余气系数分布情形

能不能处于回流区和主流区内呢？由前面的分析可知，混合气被点燃后，进入回流区的气体是已经燃烧过的高温燃气，并夹杂着从小孔进来的少量新鲜空气。所以回流区里绝大多数是燃烧产物，氧的含量很少，燃烧反应的速度很低，因此稳定点火源不可能在回流区内存在。主流区主要是新鲜混合气流动的地方，含氧量虽然很高，但因气流速度太高，而燃料浓度又太稀，所以火焰传播速度很小，甚至不能燃烧，因此该区也不可能存在稳定点火源。那么，稳定点火源能否在靠近回流边界的主流侧边界层内呢？下面就来分析这个问题。

回流边界的主流侧边界层内具有较大的速度梯度，若任意取一截面，并在此截面上作出燃料浓度分布及气流速度分布，就能得到如图 4-16 所示的曲线。由图可以看出，气流速度是由大逐渐减小到零；燃料浓度由富到不能燃烧的富油混合气变为可以燃烧且火焰传播速度逐渐增大的正常混合气。显然，在这个区域里容易找到局部气流速度等于火焰传播速度的位置（图上的  $A$  点）。实际上，不仅能找到一点，而且有许多个点都能满足这个条件。也就是说，稳定点火源存在于靠近回流边界的主流侧边界层内，它不仅是一个点而且是一个区域。

其次，再来分析稳定点火源的轴向位置。从上游开始，稳定点火源能否在靠近旋流器出口或喷嘴出口截面呢？我们知道，燃料燃烧必须首先形成混合气，要经过雾化、汽化和掺混等过程。显然，这些过程需要有一定的时间才能完成。因此，稳定点火源与喷嘴之间必须具有一定的轴向距离，以便完成上述混合气形成的各个过程。

综上所述，燃烧室中稳定点火源的位置（也就是火焰的起始位置），是在离喷嘴一定距离的回流区边界线附近的主流侧边界层内，而且是混合气成分合适的地方。

以上分析局限于在一个平面内。火焰筒头部是一个空间容积，因此，实际的稳定点火源，既不是一个点，也不是一个面，而是在火焰筒头部内的一个圆环面或旋转体。在燃烧过程中，稳定点火源的位置也不是固定不变的，因为当发动机的工作状态改变时，燃烧室内气流速度和混合气余气系数的分布情况都会发生变化。如发动机在某一状态工作时，稳定点火源在  $O-T$  线附近。当推油门增大转速时，由于进入燃烧室的空气量比供油量增加得慢，燃烧室中混合气就变得富油一些。 $O-T$  线附近原来比较贫油的混合气，却变成了余气系数接近于 1 的混合气，火焰传播速度较大，在那里就形成了新的稳定点火源。

正因为如此，在实际工作中，虽然燃烧室余气系数的变化范围很大（有时达 3~60，甚至更大一些），但是，在燃烧区前端气流速度较小的地方，仍能形成稳定的点火源，保持稳定燃烧。

但是，若剧烈地改变供油量或进入燃烧室空气的含氧量太少（例如吸入废气的情况）时，会使混合气的余气系数在短时间内变化很大，有可能使稳定的点火源丧失，导致燃烧室熄火。

以上分析了点火源的形成及变化情况，下面来简单分析一下在火焰筒内火焰的传播与稳定情形。点火源形成后，火焰逆气流进行传播，由前面的分析可知，在主流区的大部分范围内，气流速度要比火焰传播速度大，因而在这些区域内，稳定点火源处的火焰应与气流速度方向有一夹角（即火焰前锋倾斜于气流速度方向），如图 4-17 所示。

综上所述，可以把燃烧室内的燃烧组织过程概括如下：当空气从火焰筒头部进入，燃料从喷嘴喷入后，空气与油雾迅速掺混形成可燃混合气，由头部的点火器对其点燃进行燃烧，其后，由于火焰筒头部回流区的存在，部分已燃气体回流加热从火焰筒头部进入的空气和燃油混合气至着火燃烧，并形成稳定的点火源。然后，除小部分燃烧产物进入回流区，补充回流区消耗掉的气体质量和能量外，大部分燃烧产物则流到火焰筒后段，并与二股空气掺混后

获得需要的燃烧室出口温度分布流向涡轮。这一过程连续不断，就可以使火焰在火焰筒头部保持稳定，从而组织起可靠的燃烧过程。应该指出的是，以上的分析都是从理论上对燃烧室的燃烧过程进行的描述，着重阐述稳定燃烧的机理。实际的燃烧室中气流的流动是相当复杂

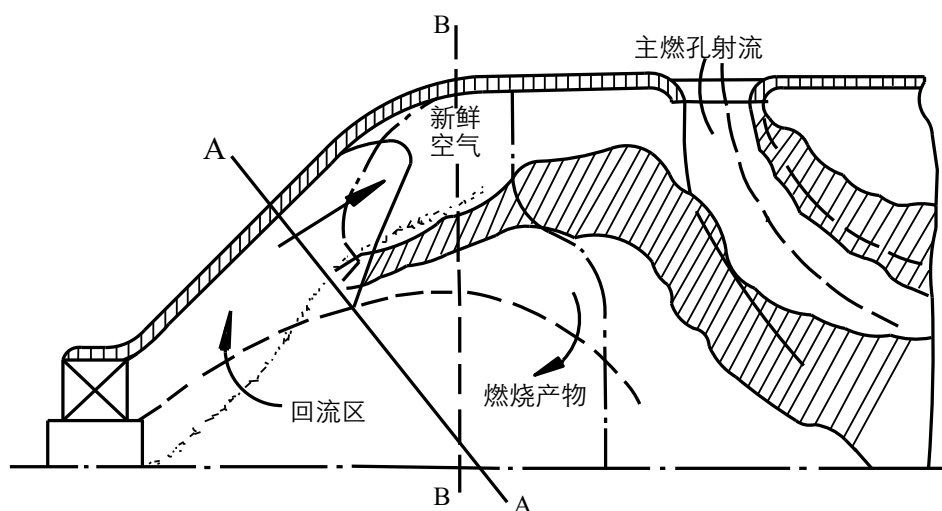


图 4-17 燃烧室内燃烧过程示意图

的，具有强烈的三维流动特征，并且有大量的旋涡等复杂流动现象。因此火焰在燃烧室中的实际分布也是很复杂的。