

第四章 燃烧室的工作原理与特性

第二讲 混合气燃烧过程的基本概念

4.2 混合气燃烧过程的基本概念

燃油与空气的混合气在发动机燃烧室中的燃烧是一个复杂的物理—化学过程，可以认为是由一些逐次进行的过程所组成，如燃油的雾化与蒸发，燃油蒸汽与空气的掺混，混合气的着火以及随后进行的燃烧反应等过程。混合气燃烧过程稳定与否，燃烧过程进行的效率高低都直接影响着燃烧室的工作性能。下面，着重介绍有关混合气燃烧的基本概念。

4.2.1 混合气的形成

混合气的形成大致有三个物理过程，即燃油雾化、蒸发以及与空气的掺混。燃油的雾化是通过喷嘴的喷射过程形成的。在外部阻力以及燃油射流本身内部紊流所产生的内力的共同作用下，燃油在喷射中被撕碎成大量微小的雾状油珠，雾状油珠愈细小，表面积越大，愈容易蒸发，而且形成所需要的混合气分布的时间和距离越短，越有利于燃烧。燃油的雾化与喷嘴的形式和供油压力有关，常用的喷嘴有：直射式喷嘴、离心式喷嘴、气动雾化喷嘴、蒸发管式喷嘴和甩油盘式喷嘴。图 4-5 为离心式喷嘴在不同供油压力下的雾化情况，由图可知，供油压力越大，离心式喷嘴的雾化质量就越好。

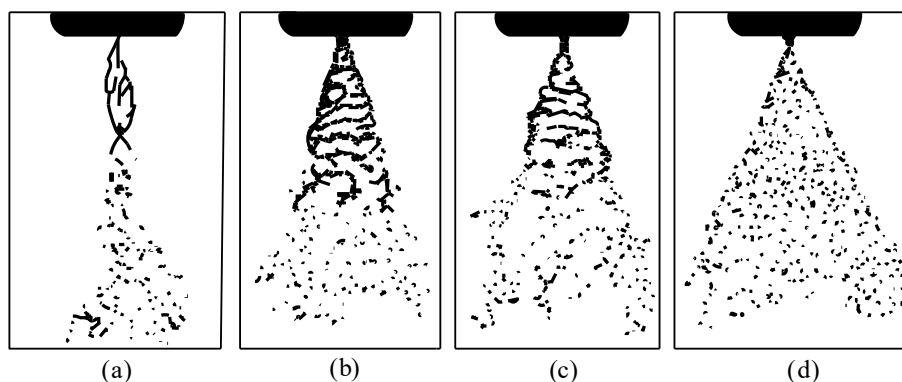


图 4-5 离心式喷嘴在不同供油压力下的雾化情况

雾化的油珠吸收热量而蒸发，并且通过扩散的方式与空气进行掺混形成混合气，燃油与空气的混合气可能是均相的（这时的燃油是完全蒸发的），也可能是两相的（这时混合气中含

有没有被蒸发的油滴)。混合气形成的质量(均匀程度)对混合气燃烧有很大的影响。在下面的分析中假设混合气是均匀的。

4.2.2 混合气的着火

混合气的温度达到一定的数值时,开始出现火焰而燃烧起来的现象,叫做混合气的着火。可燃混合气的着火方式通常可分为自燃和点燃两种,可燃物质由于自身化学反应速度的急剧升高而引起的着火,称为自燃。反之,由于外界能量的加入,而使可燃物质的化学反应速度急剧升高而引起的着火,则称为点燃,也称为强迫着火。点燃的外界能量通常是电火花或炽热物体,航空发动机燃烧室中的燃烧就是采用专门的点火装置(如电嘴)产生的电火花使混合气局部区域受到强烈的加热而首先着火、燃烧,随后,这部分已燃的火焰传播到整个充满可燃混合气的空间。从本质上来说,自燃和点燃都是化学反应由低速突然加速为极高速度的过程。这种非常迅速的化学反应在燃烧学上称为爆炸或爆炸反应。

混合气着火所需要的最低温度,叫做着火温度。混合气温度达到着火温度,是混合气燃烧不可缺少的条件。供给混合气热量并使之达到着火温度的热源称为点火源。

混合气的着火温度随组成混合气的燃料与氧化剂种类的不同而不同,并且与混合气的压力大小有关。在压力为989253.2 Pa的条件下,煤油与空气组成的混合气的着火温度为229°C。

实验表明,即使形成了初始的火焰中心也并不一定能点燃所有的混合气。在混合气过丰富油或过分贫油的情况下,点火时所发出的热量不足以把邻近的混合气层加热到燃点,结果在点火源处所出现的火焰就会熄灭。能够使火焰从点火源开始在整个的混合气空间范围内传播的余气系数(或油气比)的极限值称为混合气的可燃极限。该值取决于燃油的种类、混合气的均匀程度以及混合气的压力、温度等参数。

4.2.3 混合气的燃烧

混合气被点燃后,在合适的余气系数(或油气比)下,产生的火焰就在混合气中传播而使所有的混合气逐渐地燃烧起来。在发动机的燃烧室中,混合气是流动的,如何在流动的混合气中实现稳定的燃烧是燃烧室工作的核心问题。下面来研究火焰的传播机理和火焰稳定的条件。

4.2.3.1 火焰在静止混合气中的传播

先来考察一个较为简单的情形。设在一个长玻璃圆管内,充满了新鲜混合气。当点火装置点燃了邻近一小部分混合气之后,可以观察到在已燃气体与新鲜混合气之间,有一层向前推进并正在起剧烈氧化反应,而且发热、发光的薄气层,这薄气层称为火焰前锋。火焰前锋很薄,一般只有十分之一毫米左右。火焰前锋是燃烧产物和新鲜混合气的分界面,它的后面是燃烧产物,前面是新鲜混合气,所以火焰前锋又叫做火焰面,或简称为焰锋。如图4-6所示。

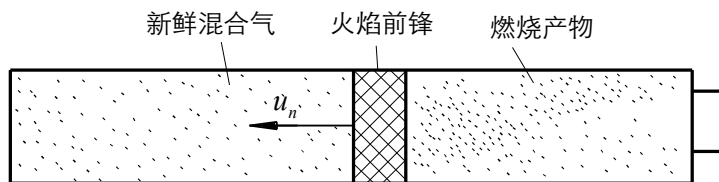


图 4-6 静止混合气中火焰传播的示意图

火焰前锋相对于新鲜混合气运动的速度叫做火焰传播速度。由于火焰传播速度的方向与火焰前锋的表面垂直，所以，火焰传播速度又叫做火焰传播正交速度或火焰传播法线速度，用 u_n 表示。在静止的均匀混合气中，火焰向四面八方传播的速度大小相等，所以火焰前锋的形状应是球面形。

从微观上来看，火焰前锋大致可分为两个部分。靠近新鲜混合气的部分叫做预热区，在这个区域内，温度开始时缓慢升高，达到一定程度后开始急剧上升，但发光和发热微弱。后面的部分为化学反应区，其中参数变化十分激烈，发出强烈的光和热。火焰能自动地向前传播是因为传热传质的结果。焰锋的高温已燃气体向上游的新鲜混合气传热，使其加热达到自燃的程度，同时，化学反应加速高温燃气分子与新鲜混合气分子之间的扩散而出现强烈的传质现象。

4.2.3.2 火焰在流动混合气中的传播

如果管内的混合气是运动的，其流动速度为 c ，当点火源点燃了混合气后，产生的火焰同样会在混合气中进行传播。相对于层流流动的混合气而言，火焰传播的速度仍为 u_n （注意，当流动混合气处于紊流状态时，火焰的传播速度要大一些），传播的机理同在静止混合气中的传播一样。但是，由于混合气是以一定速度流动的，所以对于静止观察者（绝对坐标系）来说，火焰前锋的位置与在静止混合气中是不相同的。

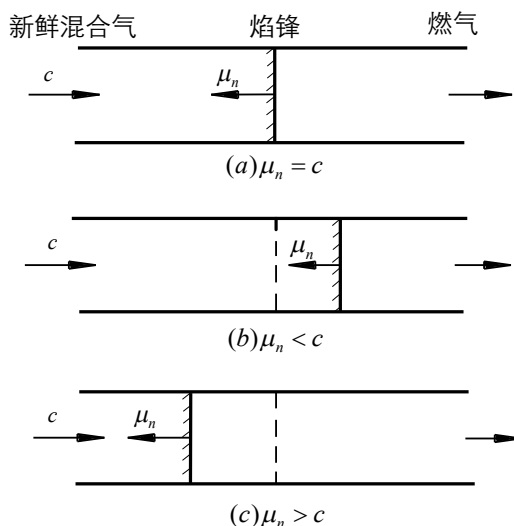


图 4-7 火焰在流动混合气中的传播

当火焰传播速度与混合气的流速相等时，即 $u_n = c$ ，焰锋稳定在管中某一位置上，形成稳定的点火源。不断流来的新鲜混合气经过这一位置时，被加热、点燃、燃烧。而后变成燃烧产物离开这一位置，但焰锋则相对于管壁保持不动，这就是火焰稳定现象，如图 4-7（a）所示。火焰之所以能稳定在管中某一位置，是由于 c 与 u_n 相等，形成了稳定点火源的缘故。

当混合气的速度 c 大于火焰传播速度 u_n 时，焰锋将被混合气以相对速度 $(c - u_n)$ 吹向下

游，直到被推出管口而熄灭，如图 4-7 (b) 所示。这种情况如发生在燃烧室中，则会因焰锋不断后移，最终使发动机熄火停车。

当火焰传播速度 u_n 大于混合气流速 c 时，即 $u_n > c$ ，焰锋要向上游移动。移动速度为 $(u_n - c)$ ，比在静止混合气中的传播速度要小，犹如逆水行舟，又称为回火。显然，在这种情况下火焰也是不能稳定的。当焰锋逆气流前移后，管内均充满了燃烧产物，如图 4-7 (c) 所示。若这种情况发生于燃烧室中，同样也不能形成稳定的燃烧，导致发动机熄火停车。

由此可知，火焰传播速度越大，火焰就可以在较大的混合气流速下在管内保持稳定。

4.2.3.3 流动混合气中的稳定燃烧

由上面的分析可知，当火焰传播速度与混合气的流动速度相等时，火焰是稳定的，即燃烧是稳定的。从形式上看，稳定的条件是速度平衡。但当在剖析火焰内部时，就会发现，稳定燃烧的实质是由于存在一个具有一定强度的稳定点火源的缘故。由前面的分析可知，火焰对流向它的混合气进行加热、点燃，使混合气发生燃烧反应，因此，火焰对于新鲜的混合气而言就是一个点火源。当混合气的流动速度与火焰的传播速度平衡时，这个点火源就稳定在某一位置，因而在流动的混合气中始终可以实现稳定燃烧。推而广之，在流动速度比火焰传播速度大的混合气中，要靠火焰本身形成一个稳定的点火源已经不可能，为此，要维持稳定的燃烧，必须要由外界加入具有足够强大的点火能量，使其在固定的位置上形成稳定的点火源，不断地点燃流过来的混合气，因而也就形成了稳定的燃烧。

因此，要在流动的混合气中建立起稳定的燃烧，其条件是必须具有足够强大的、稳定的点火源。而此点火源可以由火焰自身产生，也可由外界供给。

在航空发动机的燃烧室中，稳定的点火源是靠火焰自身形成的（其方法与措施将在后面讨论）。但是火焰的形状和位置与直管中的情形有较大差别，在燃烧室中，大部分区域的混合气速度都比火焰传播速度大，在这种情况下，由点火源产生的火焰的传播有什么特点呢？如图 4-8 所示， A 点为稳定的点火源，产生的火焰将在一个区域内传播，火焰前锋与混合气的流动方向成一夹角 φ ，此角度可由火焰传播速度与混合气流动速度的平衡求得，即

$$u_n = c \cdot \sin \varphi \quad (4-13)$$

该式说明在垂直于火焰前锋的法线方向上，当火焰传播速度与混合气的法向分速相平衡时，火焰就稳定在这一位置上，形成点火源，使得全部的混合气得以燃烧。但此时必须注意，稳定点火源才是形成稳定燃烧的核心，这可以作如下的分析：

取一段火焰前锋为研究对象，如图 4-8 所示，把混合气速度 c 分解成平行于火焰前锋表

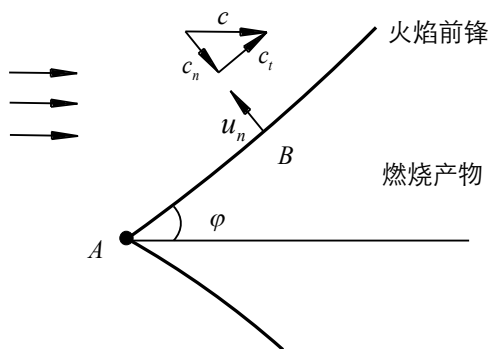


图 4-8 燃烧室中 $c > u_n$ 时的火焰前锋

面的切向分速 c_t 和垂直于火焰前锋表面的法向分速 c_n 。假定在 B 点上 $u_n = c_n$ ，则在垂直于火焰前锋表面的法线方向上火焰位置固定不动，但从切向方向看，因混合气有切向分速 c_t ，该分速使得 B 点的点火源沿火焰前锋表面向下游移动，使 B 点点火源丧失，为此，要维持稳定的燃烧必须有新的点火源向 B 点补充。由此可知，稳定的点火源 A 是产生点火源的源泉。若在接近火焰根部的 A 点处点火源不存在，对于 B 点来说，就不会有新的点火源来补入，火焰就会被气流吹走，那么整个燃烧室内混合气的稳定燃烧也就不复存在。

综上所述，要使在燃烧室内的流动混合气流中稳定燃烧，必须具备两个基本条件：

(1) 火焰传播速度 u_n 应于垂直于火焰前锋表面的可燃混合气的法向分速 c_n 相等，即

$$u_n = c_n = c \cdot \sin \varphi$$

(2) 必须要有稳定的点火源。

很显然，当 c 或 u_n 变化时，火焰的位置也会发生变化。例如 c 增大（或 u_n 减小）将使 φ 减小，火焰前锋更加倾斜。相反 c 减小（或 u_n 增大），会使 φ 增大。

4.2.4 影响火焰传播速度的因素

从上面的分析中可以看出，火焰的传播速度是一个十分重要的参数，提高火焰传播速度有利于火焰在更高流速的混合气中保持稳定，从而形成稳定的燃烧。

火焰传播速度的大小与混合气达到着火温度所需时间和火焰前锋内化学反应进行的速度（率）有着密切的关系，而混合气达到着火温度所需的时间又与混合气的传热、传质的效果有关。传热量大，新鲜可燃混合气分子与已燃高温燃气分子之间相互扩散得快，则混合气达到着火温度所需的时间短，火焰传播速度就大。另外，火焰前锋内的化学反应速度越大，火焰传播速度也就越大。因此，所有影响混合气传热、传质和化学反应速度的诸因素，都是影响火焰传播速度的因素。这些因素归纳起来有：混合气的性质、混合气的余气系数、混合气的流动状态以及混合气的初温和初压。

4.2.4.1 混合气的性质

不同性质的燃料和氧化剂组成的混合气，由于燃料的热值、燃料与氧化剂进行化学反应的速度以及混合气的导热系数、扩散系数等不同，有着不同的火焰传播速度。

燃料的热值越大，混合气燃烧时，火焰前锋内燃气的温度越高，化学反应的速度就越快。同时，扩散、传热的能力越强，所以火焰传播速度就越大。

燃料与氧化剂进行化学反应所需的活化能越小，化学反应速度越大，所以火焰传播速度越大。

混合气的扩散、导热的能力越强，混合气达到着火温度所需的时间就越短，因而火焰传播速度也越大。

航空煤油在常温、常压下的层流火焰传播速度约为 0.45 m/s 左右。

4.2.4.2 混合气的余气系数

同一种可燃混合气，当余气系数不同时，火焰的传播速度也不同。实验表明，任何碳氢燃料与空气组成的混合气都是在余气系数接近于 1（约为 0.9~1 之间）时，火焰传播速度达最大值。当混合气偏离这一最佳成分（配比）时，不论混合气是偏贫油还是偏富油（即 α 增大或减小），都会使火焰传播速度减小，其影响情形见图 4-9。这是因为，混合气中燃油过多或空气过多，燃料和空气配合比例不当，都会使化学反应速度减小，火焰温度降低，并使传热、传质作用减弱，从而引起火焰传播速度下降。

4.2.4.3 混合气的流动状态

由流体力学可知，流体的运动有层流和紊流两种流动状态。流动状态不同对火焰传播速度有很大影响，火焰在紊流混合气中的传播速度要比在层流中的大许多。

这是因为，当气体作紊流流动时，气体微团的运动极为紊乱，使管道同一截面上各点的气流速度变化很大，火焰前锋的表面呈极不规则的曲面，这种弯曲的表面，增大了火焰前锋内已燃气体与新鲜可燃混合气的接触面积，使在同一时间内的新鲜混合气数量增多，从而加快了新鲜混合气的燃烧。同时，气体微团的无规则运动还加强了已燃气体与新鲜混合气之间的热传递和活性中心的扩散作用，新鲜混合气的温度能够比较迅速地达到着火温度，这也加快了新鲜混合气的燃烧。

在紊流程度增大的情况下，火焰前锋表面显著弯曲，甚至某些正在燃烧的气团可能脱离火焰前锋而进入新鲜混合气内，某些新鲜混合气的气团也可能穿入火焰前锋，使火焰前锋表面碎裂，形成犬牙交错的形状（见图 4-10），大大地增大了已燃气体与新鲜混合气的接触面积、热传递作用和活性中心的扩散作用，因而火焰传播速度显著地增大。

4.2.4.4 混合气的初温和初压

混合气的初温对火焰传播速度有明显的影响。由图 4-9 可知，初温升高使火焰传播速度增大。这是因为混合气的初温升高后，从初温上升到着火温度所需的时间相应地缩短，而且，燃烧后气体的温度也升高，活性中心的浓度增大，使活性中心的扩散作用加强，因此，火焰传播速度增大。混合气的初温越高，火焰传播速度也越大。

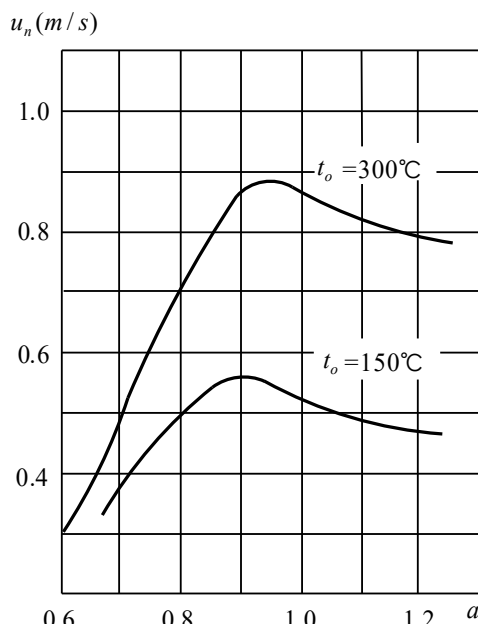


图 4-9 层流火焰传播速度与 α 的关系曲线

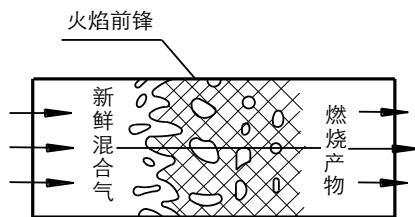


图 4-10 紊流中的火焰前锋示意图

实验表明，当混合气的初压在 $0.81 \sim 4.0452 \times 10^5 \text{Pa}$ 时，对火焰传播速度没有明显的影响。但当初压低于上述范围时，由于扩散加剧，焰锋增厚，散热增加，使化学反应速度变慢，导致火焰传播速度下降。