



四行程点燃式活塞发动机完成一个工作循环,活塞在汽缸内要经过四个行程,作为工质的混合气则要经过进气、压缩、燃烧、膨胀和排气五个热力变化过程。工质经过五个工作过程的变化,促成了发动机中热能向机械能的转化。

在这五个工作过程中,每一个过程进行得好坏,如进气量的多少、压缩程度的大小、燃烧是否完全、膨胀是否充分以及排气是否干净等都直接影响热能向机械能的转化,影响发动机的功率和经济性。

对于定型的发动机,从使用角度来说,进气和燃烧两个工作过程对发动机的性能起决定性的作用,因此,本章在介绍五个工作过程时,着重讲解进气过程与燃烧过程。

### 3.1 进气过程

#### 3.1.1 进气过程的功用及进气情形

进气过程是指新鲜混合气充填汽缸的过程。进气过程的作用是使发动机得到工作时所需要的新鲜混合气。进入汽缸的新鲜气体的数量多少对于发动机是否能正常而连续地工作具有极重要的意义。只有新鲜气体正常地进入汽缸,发动机才能正常地工作。如果哪怕有一个汽缸没有获得其应有的混合气,发动机仍不能正常工作,因此,每个汽缸都应在进气过程中充填入适当的新鲜气体。

进气过程从进气门打开时开始,到进气门关闭时结束。在分析四行程发动机的工作时,认为进气门是当活塞到达上死点时突然打开的,活塞运动到下死点时突然关闭,曲轴在进气行程的转角是 $180^\circ$ 。实际上,为了增加进入汽缸的气体量,进气门在尚未达到上死点前(即在上一循环的排气行程的末期)就提前打开了,到活塞通过下死点后(即压缩行程的初期)才完全关闭。所以进气门是早开晚关的,在整个进气过程中曲轴转角是大于 $180^\circ$ 的,如图 3-1 所示。

对于吸气式发动机,空气(或者混合气)经过节气门调节后,进入分气室分配,最后直接进入各汽缸,如图 3-2 所示。这时进入汽缸的气体压力比大气压力稍小。

对于增压式发动机,外界空气(或者混合气)经过节气门调节后,在进入汽缸之前,先流经增压器,增压器将空气(或混合气)的压力提高,再由分气室分配后进入汽缸,如图 3-3 所示。这时进入汽缸的气体压力大于外界大气压力。

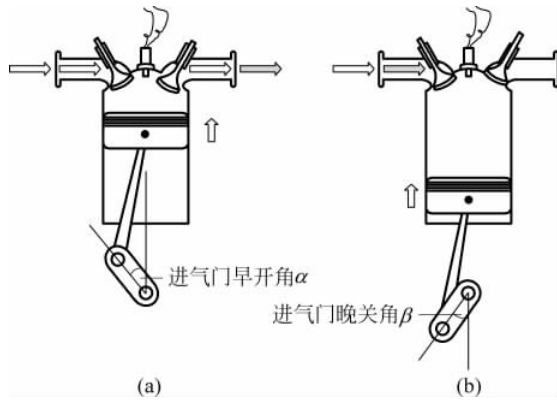


图 3-1 进气过程

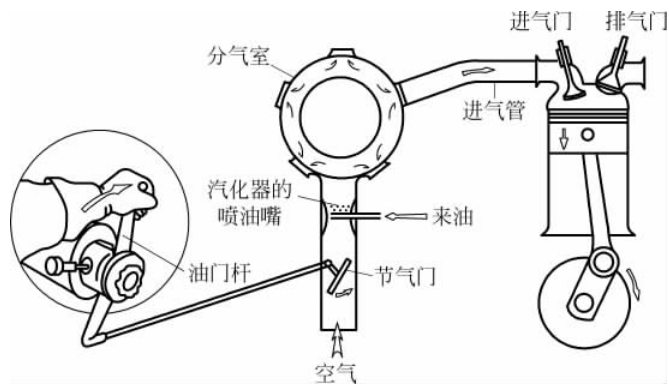


图 3-2 吸气式发动机的进气情形

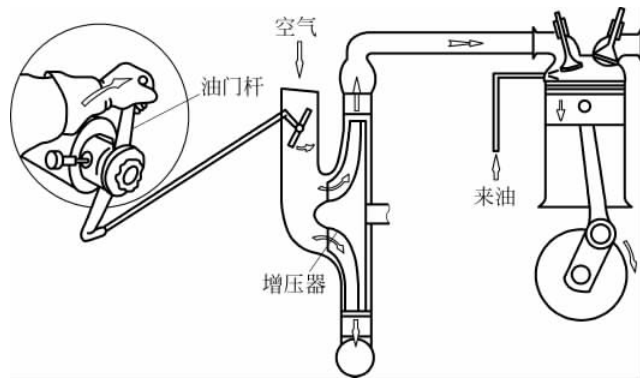


图 3-3 增压式发动机的进气情形

进气通道中的节气门与驾驶舱内的油门杆相连接。油门杆向后拉,节气门关小,进入汽缸的气体量减少;油门杆向前推,节气门开大,进入汽缸的充填量增多。因此,操纵油门杆可以改变进入汽缸的充填量,从而改变发动机的功率。

气体从外界进入汽缸后,温度有所提高,压力降低。气体温度之所以升高,是因为流入汽缸的气体与汽缸头、进气门、排气门和活塞等灼热的机件相接触,吸收热量的结果,一般情

况下,气体的温度会升高  $30\sim 60^{\circ}\text{C}$ 。气体压力之所以降低,是因为气体在进气流动过程中有流动损失的缘故,如图 3-4 所示。气体在进气过程中的速度较大,可达  $80\text{m/s}$  左右,使气流在管道弯曲处和进气门处不可避免地产生撞击损失,由于气体有黏性,气体与管道壁面的相对运动会产生摩擦损失,而且气体在管道弯曲处要产生附面层分离损失,所有这些损失都使气体的压力减小。实验和理论证明,压力降低的多少与发动机转速的平方成正比,与进气门流通截面积的平方成反比。当发动机的转速增大时,进入汽缸的气体速度增加,流动损失增大,因而压力下降得多。进气门流通截面积减小,流动损失也增大,压力下降也增大。



图 3-4 进气时的流动损失

### 3.1.2 进气门的早开和晚关

进气门早开是指进气门在活塞尚未到达上死点时就提前打开。进气门开始打开时,曲臂中心线与汽缸中心线的夹角  $\alpha$ ,叫进气门早开角,如图 3-1(a)所示。进气门晚关是指进气门延迟到活塞通过下死点以后才完全关闭。进气门关闭时,曲臂中心线与汽缸中心线的夹角  $\beta$ ,叫进气门晚关角,如图 3-1(b)所示。进气门早开和晚关的目的是为了增加在进气过程中进入汽缸的空气量,以提高发动机功率。

#### 1. 进气门早开

由于进气门是逐渐开大的,如果等活塞运动到上死点时,进气门才开始打开,那么在进气行程初期,进气门的开度必然很小。而这时汽缸内气体压力较小,汽缸内外的压差很大,气体将高速地进入汽缸,会产生很大的流体阻力,形成强烈的涡流,此时气体的部分动能将转换成热能,使气流温度升高,密度减小,结果使进气量减小。若使进气门提早打开,则活塞到达上死点时,气门开度已经很大,这样就可以减小进气行程初期气体进入汽缸时的流体阻力,使进气量增加。

对于增压式发动机,在节气门开度较大的情况下,进气管内的气体压力比汽缸内的废气压力大。进气门的早开可以使新鲜气体立即冲入汽缸将汽缸内的废气吹除得比较多,可以增加进入汽缸的新鲜气体量。

进气门早开有增大进气量的好处,但也不是进气门开得越早越好。进气门开启过早,在进气压力较大的情况下,新鲜气体过早进入汽缸并随废气一同从排气门排出,会浪费发动机的功率和燃料;在进气压力较小的情况下,废气可能倒流入进气管,有造成回火的危险。因此,进气门早开的时机必须适当,现代航空活塞发动机的进气门早开角一般在  $15^{\circ}\sim 35^{\circ}$  范围内。

#### 2. 进气门晚关

由于进气门也是逐渐关闭的,如果活塞运动到下死点时,进气门就完全关闭,那么在进气行程末期,进气门的开度已经减到很小,进气量就会显然减小。为了增加进气量,进气门延迟到活塞通过下死点以后再关闭,即进气门晚关。这是因为在活塞达到下死点时,进气流的速度和压力都还比较大,若进气门晚一点关,可以充分利用进气流的惯性和压力差,使一

部分气体继续进入汽缸,尽可能增加进入汽缸的气体量。

进气门的晚关时机也应恰当,如果进气门关得过晚,会使一部分已经进入汽缸的新鲜混合气被活塞压回进气管内,使进入汽缸的新鲜混合气充填量减小。如果进气门关得过早,也会使新鲜混合气充填量减小。一般来说,转速越大的发动机,进气门的晚关角越大。现代航空活塞发动机的进气门晚关角一般在  $40^{\circ}\sim 80^{\circ}$  范围内。

进气门的早开晚关,一方面可增大进入汽缸的气体量,另一方面避免了气门的突然开启和关闭,减小了气门运动的加速度,从而减轻了气门运动的惯性力。

吸气式发动机,进气行程的平均压力低于大气压力,故进气行程功为负,这就是说,在进气行程中活塞要消耗功,即活塞对气体做功。

增压式发动机,在节气门的开度较大时,进气行程的平均压力高于大气压力,故进气行程功为正,这就是说,在进气行程中气体对活塞做功。

### 3.1.3 充填量及其影响因素

#### 1. 充填量

在每一次进气过程中,进入一个汽缸的空气(或混合气)的质量叫充填量,用  $G$  表示。显然,在混合气余气系数不变的情况下,充填量越大,燃料含量越多,混合气燃烧后产生的热量越多,发动机发出的功率也越大;反之,充填量越小,发动机的功率也越小。

充填量  $G$ ,等于进入汽缸气体的密度  $\gamma$  和汽缸工作容积  $V_{\text{工}}$  之乘积,即

$$G = \gamma \cdot V_{\text{工}} \quad (3-1)$$

对于已经制成的发动机,汽缸的工作容积也是一个固定的值。因此,充填量  $G$  的大小与进入汽缸的气体密度  $\gamma$  成正比。气体密度越大,充填量越大;气体密度越小,充填量越小。因此充填量的大小,受与气体密度有关的因素影响。

#### 2. 影响充填量的因素

影响汽缸充填量的大小的因素有很多,对已制成的发动机来说,从使用的角度出发,主要有如下几个因素对充填量的影响较大。

##### 1) 进气压力

气体进入汽缸前在进气管处的压力叫进气压力,常用  $P_{\text{进}}$  表示。对增压式发动机来说,进气压力是指增压器出口处的气体压力。进气压力高,进入汽缸的气体的密度就大,进入汽缸气体的质量就多,充填量增大;反之,进气压力小,充填量就小。

进气压力的大小由节气门控制。飞行员操纵座舱中的油门杆,改变节气门的开度,来控制进气压力的大小,从而达到增大或减小充填量的目的。例如,前推油门杆,节气门开大,进气压力增高,充填量增大;后拉油门杆,进气压力下降,充填量减小。

当外界大气压力降低时,发动机的进气压力也随着降低,因而充填量减小;外界大气压力升高时,进气压力也升高,充填量也增大。例如,同一台发动机在高原机场工作比它在海拔高度低的机场工作时(在油门杆位置相同的情况下)发出的功率小,这是由于高原机场大气压力低,使进气压力下降而充填量减小的缘故。

##### 2) 进气温度

气体进入汽缸前在进气管处的温度叫进气温度。进气温度越低,气体的密度越大,充填

量也就越大；反过来，进气温度越高，充填量就越小。

进气温度是受大气温度影响的。由于季节或地区不同，大气温度发生变化，充填量也会发生变化。例如，发动机在冬季或低温区的充填量就比夏季或高温区的充填量大，早晨的充填量就比中午的充填量大。

### 3) 气体(或混合气)的受热程度

发动机工作时，机件受热温度升高。例如，汽缸头的温度可达  $200\sim 250^{\circ}\text{C}$ ，活塞温度可达  $250\sim 350^{\circ}\text{C}$ ，进气门可达  $350\sim 400^{\circ}\text{C}$ ，排气温度可达  $800^{\circ}\text{C}$ 。新鲜气体在进入汽缸的同时，和这些灼热的机件相接触。因而使本身受热。气体受热越厉害，则其密度越小，故充填量减小；反之，气体受热程度小，则充填量可以增大。因此，发动机冷却散热不良，发动机温度升高，会引起充填量减小。

### 4) 流体损失

气体在进气过程的流动中，有撞击、摩擦及气流分离损失，因此，产生了流体阻力。流体阻力会使进入汽缸气体的压力减低，密度减小，因而充填量减小。为了减小进气的流体阻力，要尽量注意保持进气道内壁的清洁，防止灰尘、油泥沾污管道，并防止进气导管受压变形。

### 5) 曲轴转速

在节气门开度保持一定的条件下，充填量随着转速变化的情形如图 3-5 所示。从图上可以看出，发动机只在某一转速  $n_2$  工作时，充填量才能达到最大，转速偏离这个数值，充填量都要减小。

充填量之所以随转速这样变化，这是因为当转速增大时，活塞运动速度也增大，进气管内气流速度也随着增大，由于气流速度增大，引起流动阻力加大，使进入汽缸的气体压力减小得多，因此，充填量随发动机转速增高(高于  $n_2$ )而减小。那么为什么当转速小于  $n_2$  时，充填量反而随着转速的降低而减小呢？这主要是因为当转速降低时，进气管内气流速度减慢，使整个进气过程延续时间增长了，气体和汽缸壁、活塞及气门接触时间较久，致使气体吸收的热量多，气体密度减小，使充填量减小。另一方面，我们从前面知道，进气门的晚关，是为了充分利用进气流的惯性，以便多进一些气。而进气门晚关角的大小决定于进气流的大小，当转速降低，进气速度减小时，进气门晚关角应小一些；在转速较大时，进气门晚关角应大些。但发动机的晚关角并不随转速的改变而改变，而是一个固定的值，并且这个值是适应大转速工作的需要而确定的。因此，在小转速工作时，由于活塞速度较慢，气体运动速度较小，这时气门晚关角就嫌过大。当活塞由下死点向上死点移动时，会发生气体倒流回进气管的现象，使充填量减小。转速越小，倒流现象越严重，充填量越减小。

发动机进气门的晚关角的确定，是根据实验得出的。综合各种条件，使发动机在设计转速下能获得最大充填量时而确定晚关角的大小。

### 6) 气门同开角

### 6) 气门同开角

气门同开角越大，充填量也越大。这是因为同开角大，汽缸中废气的吹除量大，进入汽

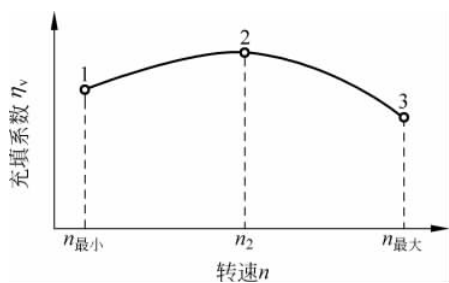


图 3-5 充填系数随转速变化的情况

缸的新鲜混合气多。

上述各个因素对充填量的影响程度是不同的。因此,必须结合实际,对于具体情况作具体分析,来确定影响充填量的主要因素。

### 3.1.4 进气过程的压容图和进气功

进气过程中汽缸内的气体压力随汽缸容积变化的特性,可用压容图来表示。下面分析吸气式和增压式发动机进气过程的压容图。

#### 1. 吸气式发动机进气过程的压容图

对于吸气式发动机进气过程的压容图,见图 3-6。整个进气过程由曲线 1—e—s—a—2 来表示。 $P_0$  表示大气压力,当活塞在上死点时,气体容积为燃烧室容积  $V_{燃}$ ; 当活塞在下死点时,气体容积为汽缸的全容积  $V_{全}$ 。

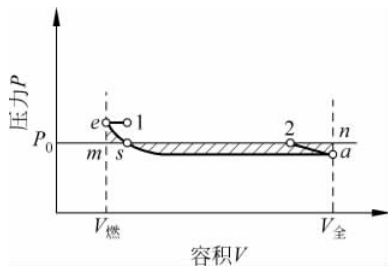


图 3-6 吸气式发动机进气过程压容图

图 3-6 中,点 1 表示进气门开始打开的时刻,曲线 1—e 表示进气门早开阶段。在这个阶段内,汽缸内的气体还是上一个工作循环残留下来的废气,废气压力比外界大气压力稍高。当活塞到达上死点(图上 e 点)时,汽缸内气体的压力和温度分别为

$$P_e = (1.05 - 1.1)P_0$$

$$T_e = 1000 \sim 1100\text{K}$$

曲线 e—s—a 段,表示进气行程阶段。在这个阶段中活塞由上死点向下死点运动,汽缸的容积逐渐加大,压力逐渐减小,新鲜气体不断被吸入汽缸,到达某一点(s 点)时,汽缸内压力等于大气压力。随着活塞继续运动,由于有流动损失的存在,汽缸内气体压力继续降低,当活塞达到下死点(a 点)时,汽缸内气体压力和温度分别大概为  $P_a = (0.9 \sim 0.95)P_0$ ,  $T_a = 340 \sim 360\text{K}$ 。

曲线 a—2 段表示进气门的晚关阶段。图上,点 2 表示进气门完全关闭时刻,在这个阶段内新鲜气体依靠惯性和压力差继续流入汽缸。由于活塞已经向上死点运动,气体已经开始被压缩因此气体的压力和温度会逐渐升高。

吸气式发动机的进气行程功在压容图上可用曲线 e—s—a 与大气压力线所包围的面积来表示。在进气行程开始的一段行程内,汽缸内的气体压力大于作用在活塞底面的大气压力,气体对活塞做功,大小以面积 esme 表示。然后汽缸内气体的压力小于作用在活塞底面的大气压力,活塞对气体做功大小以面积 sans 表示。面积 esme 和面积 sans 之差是进气行程活塞所消耗的功,即所谓进气行程功。

#### 2. 增压式发动机进气过程的压容图

增压式发动机的压容图,如图 3-7 所示。曲线 1—e—a—2 表示增压式发动机的进气过程,增压式发动机的进气压力比大气压力高。

在 1—e 阶段,活塞向上死点运动,汽缸内废气

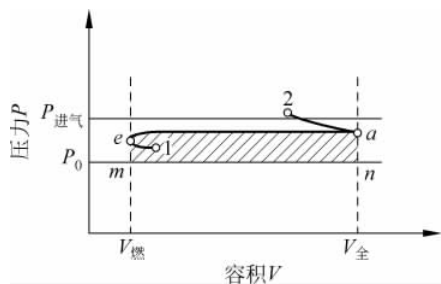


图 3-7 增压式发动机进气过程的压容图

压力比大气压力高,比进气压力低。当活塞到达上死点( $e$ 点)时,气体的压力和温度值分别为  $P_e = (1.05 \sim 1.1)P_0$ ,  $T_e = 1100 \sim 1200\text{K}$ 。

在  $e-a$  阶段,活塞从上死点向下死点运动,由于存在流动损失,汽缸内气体的压力小于进气压力,但是仍然比大气压力高。因此曲线  $e-a$  高于大气压力线,低于进气压力线。当活塞到达下死点( $a$ 点)时,气体的压力和温度值分别为  $P_a = (0.9 \sim 0.95)P_{\text{进}}$ ,  $T_a = 380 \sim 420\text{K}$ 。

在  $a-2$  阶段,活塞从下死点向上死点运动,气体受到压缩,压力逐渐增大。在此阶段由于进气压力仍高于汽缸内气体压力,新鲜气体继续进入汽缸。当活塞到达 2 点时,进气门完全关闭,汽缸内气体压力略高于进气压力。

由于气体增压作用,进气过程中,活塞顶面的压力大于活塞下面的压力,故活塞向下死点运动时,进气帮助推动活塞做功,即进气过程可获得有益功,这个功的大小可由压容图上曲线  $e-a$  与大气压力线所包围的面积  $eanme$  表示。

## 3.2 压缩过程

### 3.2.1 压缩过程的功用及进行情况

压缩过程是指混合气在汽缸内被活塞压缩的过程。混合气受到活塞的压缩,最明显的效果是混合气的温度、压力升高。混合气经过压缩后的好处如下。

(1) 有利于混合气着火。压缩后混合气温度升高,更接近于混合气的着火温度,只需要较小的点火能量就能方便可靠地点燃混合气。

(2) 有利于混合气的燃烧。混合气压缩后的温度升高使活性分子增多,压力提高使活性分子的浓度增大,这样可以加速化学反应速度和提高火焰传播速度,所以压缩过程为混合气燃烧创造了良好条件。

(3) 可以提高发动机的功率和改善经济性能。由于压缩后的混合气着火容易,燃烧加快,因而燃烧后的压力、温度更高,膨胀做功多,使发动机的功率增大;燃烧在小容积内快速进行,热损失减少,经济性好。

总之,压缩过程的作用是为混合气着火燃烧创造良好条件,可提高发动机的功率和经济性。

压缩过程从活塞在下死点时开始,到活塞行至上死点时结束,如图 3-8 所示。在压缩过程中曲轴旋转  $180^\circ$ 。在压缩过程开始的时候,进气门还开着,汽缸仍然在进气,但是由于此时活塞已经向上死点运动,汽缸的容积在逐渐减小,所以混合气已开始受到压缩,这一阶段也是进气过程和压缩过程相重叠的阶段。这个阶段曲轴的旋转角度一般为  $40^\circ \sim 80^\circ$ ,活塞在这个阶段所走的距离是整个行程的  $1/6 \sim 1/3$ 。当进气门关闭以后,活塞继续向上死点运动,混合气受到进一步的压缩,直到活塞到达上死点为止,压缩过程结束。混合气在经过压缩以后,其压力增大、温度升高。在压缩过程的末期,点火电嘴跳火,点燃混合气,燃烧开始。

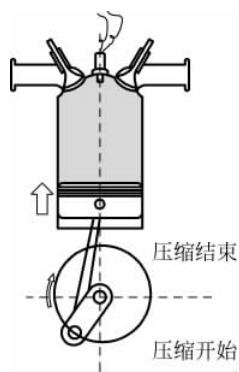


图 3-8 压缩过程

压缩过程所消耗的功与压缩比、进气温度有关。当进气温度保持不变的情况下,压缩比越大,压缩过程所消耗的功越多;当压缩比不变时,进气温度越高,压缩过程所消耗的功越多。压缩过程活塞所消耗的功,一小部分以热的形式经过汽缸壁传导到外界,大部分则用来提高混合气的内能,使混合气的温度升高、压力增大。

### 3.2.2 压缩比

压缩比就是汽缸全容积与燃烧室容积之比,压缩比是决定活塞发动机性能极其重要的因素之一,发动机的功率和经济性都与它有着紧密的关系。压缩比增大时,发动机的功率变大,经济性提高。在充填量相同的情况下,压缩比增大,则混合气在汽缸内被压缩的程度就增加,因此温度和压力就会升高得比较多,混合气的燃烧就会加快,燃烧后的压力和温度就会升高得更多一些。由于压缩比高则燃烧室的容积就会相应地减少一些,因此经过汽缸壁传出的热量就会减少,热损失小,经济性好。例如,当压缩比为 4.5 时,有 30% 的热能可以转变为机械能;当压缩比增大为 6 时,则可以利用的热能增至 35%;当压缩比为 7 时,可利用的热能则增至 37.5%。

但是压缩比也不能无限制地增大。因为压缩比进一步提高,虽然可以提高热能的利用程度,但随着压缩比的进一步加大,热能利用程度的提高已不明显,同时还会带来不良后果:首先压缩后混合气的压力、温度过高,容易出现早燃和爆震等不正常燃烧现象,破坏发动机的正常工作;其次,对于过大的压缩比,即使能正常燃烧,也会使燃烧后的温度、压力过高,从而发动机机件负荷过大,容易损坏。因此,采用过大的压缩比是不适宜的。目前,航空活塞发动机的压缩比在 5~9 的范围内。

对于使用中的发动机而言,汽缸的压缩比基本上是一个定值。但若使用、维护不当,引起发动机汽缸严重磨损、积炭、气门关闭不严、活塞涨圈密封不严等情况,将使实际的汽缸压缩比发生变化,可能增大或减小,影响发动机性能,甚至导致发动机严重故障。

### 3.2.3 压缩过程的压容图

#### 1. 吸气式发动机压缩过程的压容图

吸气式发动机压缩过程的压容图如图 3-9 所示,曲线  $a-2-3-b$  为压缩过程线。从图上可以看出,当活塞位于下死点时,汽缸内气体的压力低于大气压力(见图上  $a$  点)。当活塞向上死点运动时,气体的容积减小,压力逐渐增大,活塞到达上死点时,压力达到最大值(见图上  $b$  点),压缩过程结束。

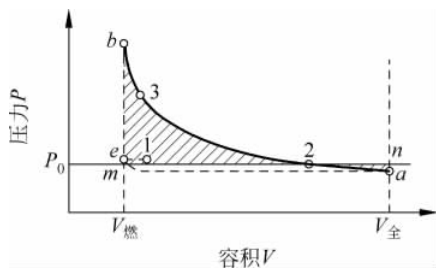


图 3-9 吸气式发动机压缩过程压容图

图中点 3 表示电嘴点火时刻,即在压缩过程末期,活塞到达上死点前某个时刻,电嘴点火,混合气开始燃烧。3— $b$  段是混合气压缩过程与燃烧过程的重叠阶段。

压缩行程功,在压容图上用压缩过程曲线和大气压力线所围成的面积(图中阴影部分面积)来表示。在压缩过程点 2 之前,由于汽缸内压力小于大气压力,这部分压缩功是有益的,是正功,由面积  $a2na$  表示。2 点以后到活塞在上死点的压缩功是

消耗功,是负功,用面积  $2bm2$  表示。所以总的压缩行程功可用上述两个面积之差来表示。

## 2. 增压式发动机的压容图

增压式发动机压缩过程的压容图如图 3-10 所示,曲线  $a-2-b$  为压缩过程线。由于气体增压,所以整个压缩过程,混合气压力都高于大气压力  $P_0$ ,当活塞运动到上死点时,混合气容积最小,气体压力最高( $b$ 点)。

增压式发动机压缩行程功都是活塞对气体做的消耗功,是负功,其大小由图中阴影部分的面积表示,即面积  $nabmm$ 。

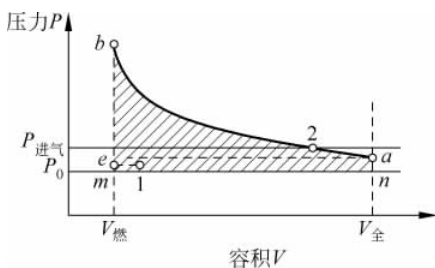


图 3-10 增压式发动机压缩过程压容图

## 3.3 燃烧过程

航空发动机是热机,是由热能转变为机械能的机器,所以燃烧是航空发动机能量的来源。实际燃烧过程的好坏,关系到有多少热量被利用,直接影响每个循环的做功量,进而影响发动机的功率和经济性能;燃烧过程的好坏,还关系到发动机能否正常工作,影响发动机的可靠性。本节主要介绍与发动机实际工作有关的燃烧方面的知识。

### 3.3.1 燃烧过程的功用和进行情形

燃烧过程是指混合气在汽缸内燃烧放热过程。混合气燃烧的作用是使燃料放出所含的热能,提高燃气的温度和压力,以便气体膨胀推动活塞做功。

在讨论四行程发动机的工作循环时,认为混合气的燃烧是在压缩行程结束、膨胀行程开始前的一瞬间完成的,即是在等容(燃烧室容积)的条件下完成的。实际上,燃烧时间虽然很短,但仍有一个过程。即燃烧是在压缩行程末期开始,到膨胀行程初期结束的,所以燃烧行程是介于压缩行程和膨胀行程之间,不可能是在等容条件下进行的。

活塞发动机汽缸中混合气的燃烧有如下特点:第一,混合气是在密闭容器(汽缸)中燃烧的,它的火焰传播速度比较快。因为汽缸内火焰传播除了火焰前锋本身向新鲜混合气推进外,还由于已燃气体温度升高、压力增大、体积膨胀,压缩新鲜混合气,未燃混合气受到压缩,温度、压力越来越高,化学反应速度越来越快,使火焰传播速度越来越快。

第二,汽缸中混合气的燃烧是在紊流情况下进行的,这是由于新鲜混合气进入汽缸产生涡流的缘故。

随着汽缸内混合气燃烧后,气体压力升高的程度不同,可将汽缸混合气的燃烧分为三个阶段,图 3-11 示出了燃烧后压力随曲轴转角变化的三个阶段。

(1) 燃烧过程第一阶段(隐燃期):从电嘴点火时开始到气体压力显著增大时的阶段,即图中  $3-3'$  段。这一阶段主要是混合气着火到火源的形成,汽缸内气体的温度和压力还不够高,燃烧后气体的压力变化与

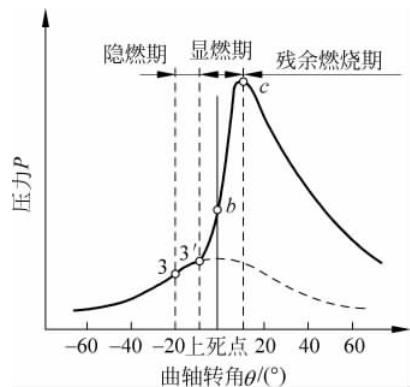


图 3-11 燃烧的三个阶段

气体受压缩后的压力变化大致相同(图中虚线表示的是混合气不燃烧而只受压缩时的压力随曲轴转角的变化情形)。

(2) 燃烧过程第二阶段(显燃期): 从汽缸内气体压力开始显著增大时开始, 到气体压力达到最大时结束, 即图中  $3'-b-c$  段。通常在活塞到达上死点后, 曲轴转角在  $10^\circ \sim 15^\circ$  时, 汽缸内燃气压力和温度达到最大值。

一般来讲, 第一和第二阶段燃烧的时间总和约为  $0.002 \sim 0.005s$ 。

(3) 燃烧过程第三阶段(残余燃烧期): 从气体压力达到最大时开始, 到混合气全部烧完时结束, 即图中  $c$  点以后的一段曲线。从图中可见, 这一阶段是在膨胀过程中进行的, 由于膨胀容积变大, 燃气压力和温度逐渐降低, 这段时间的长短主要取决于混合气的余气系数。残余燃烧期的燃料应控制在整个燃烧过程中燃料的  $6\% \sim 8\%$ , 否则, 该燃烧不经济。

为了能最大限度地利用汽缸中燃料所含的热能, 对混合气的燃烧过程有如下要求:

第一, 燃烧速度要快。如果燃烧很迅速, 燃烧过程进行得快, 可以使高温燃气与汽缸壁接触面积最小, 接触时间最短, 热量损失小, 经济性可以提高。同时燃气压力迅速到达最高点, 燃气在比较小的容积下膨胀, 可提高发动机的功率。如果燃烧缓慢, 则燃烧过程延长到差不多全部膨胀过程才结束, 会使发动机功率减小, 经济性变差。

第二, 燃烧要完全。为了最大限度地利用燃烧所含的热能, 燃烧尽量要完全, 使所有参与燃烧的燃料的热能尽可能全部地释放出来。

第三, 燃烧要适时。混合气燃烧的时机要适当, 即指混合气点燃的时刻要恰当。实践证明, 点火时刻过早或过晚, 对发动机的功率和经济性影响很大, 只有在某一恰当的时刻点燃混合气, 发动机工作才最有利。

### 3.3.2 燃烧完全程度分析

发动机是将热能转变为机械能, 热能越多, 转变的机械能就越大。因此, 应把燃料的热能最大限度地利用起来, 把燃料的热能全部地释放出来。实际上全部释放燃料的热能是不可能的, 但要求释放得越多越好, 也就是说要求燃料燃烧越完全越好。发动机中燃料燃烧的完全程度取决于两个因素。

#### 1. 混合气的余气系数

##### 1) 混合气中油气比例的表示方法

航空活塞发动机中, 燃料首先与空气均匀混合, 形成混合气, 然后才进行燃烧。要使混合气中的燃料完全燃烧, 混合气中汽油(气态)和空气的比例必须适当。因为一定量的燃料只有与适量的空气混合, 才能从空气中获得完全燃烧所需要的氧气。描述混合气中油和空气成分的参数有余气系数和油气比。

1kg 燃料完全燃烧所需要的最少空气量, 叫做理论空气量, 用  $L_{理}$  表示, 单位是  $kg(空气)/kg(燃料)$ 。燃料的种类不同, 理论空气量的数值也就不同。任何一种燃料的理论空气量都可由燃烧的化学反应式计算出来。常规大气条件下, 氧在空气中的质量含量约为  $23.2\%$ , 经计算, 航空汽油的理论空气量为  $15.1kg(空气)/kg(汽油)$ , 航空煤油的理论空气量为  $14.7kg(空气)/kg(煤油)$ 。所以近似地讲, 在常规大气条件下完全燃烧 1kg 汽油或煤油所需要的最少空气量为 15kg。

发动机实际燃烧时, 混合气中的空气量和燃油量都可能变化。实际同 1kg 燃料混合燃