

汽油机的燃烧

马春霆 张志强 编译

国防工业出版社

内 容 简 介

本书系根据日本“内燃機関”杂志中有关汽油机燃烧的内容编译而成。

本书共分十章，对各种火花点火式发动机的燃烧问题作了全面而深入的叙述，总结了世界上有关的研究成果，引用了大量的资料，不仅有理论分析而且还有大量的实验结果，同时还指出了今后的发展趋势和研究方向。

本书可供从事内燃机研究、设计制造有关人员参考，亦可作为大专院校有关专业师生的教学参考书。

本书由马春庭和张志强编译，并经潘承孝教授审阅定稿，限于水平，谬误之处在所难免，欢迎广大读者给予批评指正。

汽油机的燃烧

马春庭 张志强 编译

国防工业出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

850×1168 $1/32$ 印张6 $9/16$ 166千字

1984年10月第一版 1984年10月第一次印刷 印数：0,001—4,700册

统一书号：15034·2660 定价：0.84元

目 录

第一章 火花点火式发动机的混合气形成与燃烧概论	1
§1 内燃机点火方式的变迁	1
§2 火花点火式发动机的燃烧概论	3
§3 火花点火式发动机的爆震	6
§4 混合气的形成	10
§5 过稀混合气的燃烧	14
第二章 正常燃烧	17
§1 概述	17
§2 点火	18
1 点火的机理	18
2 点火界限	19
3 火花点火式发动机的点火	20
§3 火焰传播	21
1 火焰传播过程	22
2 运转条件对火焰速度的影响	25
3 火焰传播与压力上升	28
4 燃烧室壁的熄火作用	31
第三章 四行程火花点火式发动机不规则燃烧	33
§1 概述	33
§2 各循环之间的燃烧变动	34
1 各指示值与指示作用	34
2 P_{max} 指示值等的统计测量与处理	37
3 与发动机燃烧有关的各种条件同燃烧变动的关系	41
4 决定燃烧变动的因素	49
§3 各缸之间的燃烧差异	56
1 缸内燃烧状态与火焰电导率	58
2 由火焰电阻推定气缸混合比以及进气管壁温和负荷等的影响	59
第四章 二行程火花点火式发动机不规则燃烧	63
§1 概述	63
§2 四行程与二行程的不同点	64

§3	不规则燃烧的类型	65
§4	燃烧的变动	69
1	表示燃烧变动的特性值	69
2	平均指示压力的变动	70
3	火焰传播速度的变动	71
4	缸内气体的流动	74
5	缸内气体组成的变动	75
§5	空转的稳定问题	76
§6	断电后点火和热面点火	78
1	热面点火	78
2	运转条件对断电后点火的影响	80
3	后期着火	81
第五章 不正常燃烧		83
§1	概述	83
§2	不正常燃烧的分类	84
§3	爆震	88
1	爆震机理	88
2	先期反应	94
3	抗爆剂的作用机理	97
4	对爆震有影响的因素及其防止法	100
§4	爆震以外的自然现象	102
1	断电后点火	102
2	热态起动噪声, 热态转动困难	105
§5	热面点火	106
1	点火源与点火机理	106
2	热面点火测定法	112
3	燃料抗热面点火的性能	115
4	燃料、添加剂、润滑油对热面点火的影响	116
5	发动机设计和运转条件对热面点火的影响	119
6	加速性热面点火	120
7	热面点火的防止法	122
第六章 燃烧室形状与燃烧		123
§1	概述	123
§2	燃烧室大小对燃烧的影响	124
§3	火花塞位置对燃烧的影响	125
§4	燃烧室内气体扰动对燃烧的影响	126
1	进气涡流	127
2	压缩涡流(挤流)	130

§5 充量系数与燃烧室形状	132
§6 工作粗暴性与燃烧室形状	133
§7 改变燃烧室构造的实验示例	135
第七章 燃料的性质与燃烧的关系	138
§1 抗爆性测定条件的差别	138
§2 各种碳氢化合物的抗爆性	140
§3 汽油的抗爆性	142
§4 混合辛烷值	143
§5 运行辛烷值和各馏分辛烷值的分布	145
§6 运行辛烷值的实验室评定法	146
§7 汽油的加铅效果	151
第八章 汽油喷射式发动机的燃烧	155
§1 汽油喷射式发动机	155
§2 喷射装置	157
§3 汽油喷射式发动机的燃烧	159
§4 汽油在爆发槽内的燃烧	159
§5 气缸内的燃烧	164
§6 四行程汽油喷射式发动机	167
§7 二行程汽油喷射式发动机	171
第九章 层状给气式发动机的燃烧	174
§1 概述	174
§2 成层燃烧法的原理	175
§3 燃料的分配方式和成层燃烧式发动机的实例	176
§4 成层燃烧法对性能的改进实例	181
§5 成层燃烧法的展望	187
第十章 汽油机的燃烧与其排气组成的关系	189
§1 概述	189
§2 理论空燃比(A/F) ₀	190
§3 进气混合气与排气组成	191
1 完全燃烧	193
2 不完全燃烧	194
3 一氧化碳(CO)	196
4 未燃碳氢化合物(HC)	197
5 氧化氮(NO _x)	200

第一章 火花点火式发动机的 混合气形成与燃烧概论

§ 1 内燃机点火方式的变迁

火花点火式发动机是一种吸入空气和燃料的混合气并用电火花将其点燃的发动机。最初实用的内燃机法国雷诺瓦赫煤气机就是采用本生电池和感应线圈（带有振动物子）来跳火花的。虽然在正常状态下能顺利运转，但其火花塞瓷瓶经常破损。在雷诺瓦赫发动机工作中，点火前并没有对混合气进行压缩，这一点与如今的内燃机有显著的差别。

法国铁路技师罗沙在其专利说明书（1862年）中曾指出过，为了提高发动机的热效率，压缩是必要的，而德国的奥托（1832—1891年）制作的煤气机（1876年）首先实现了这一点。此即实用的四冲程发动机的鼻祖。奥托并不知道罗沙的专利，而是独自进行

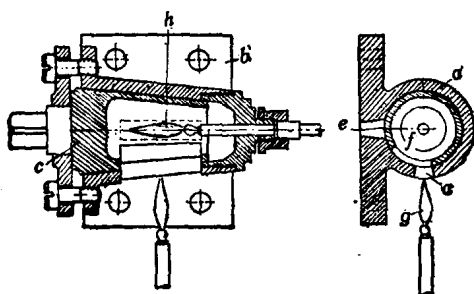


图 1 火焰点火的最初方案

e 孔左侧为发动机燃烧室； g 为经常着火的第一火焰； h 则为第二火焰； c 是 f 室的回转阀使 e 孔与 f 室的孔对正，将燃烧室内的可燃气体点燃，与此同时吹灭第二火焰，然后重新旋转 c 至图示位置，使第二火焰再次点火，等待再次工作。

这一发明的。奥托的这种四行程发动机与雷诺瓦赫发动机不同，他是采用了火焰点火。

火焰点火的最初方案是由英国的伯纳特提出的，刊登在1838年英国的专利公报上，见图1。然而以后首先采用火焰点火成功的尤岡发动机（1864年）所采用的实际构造更要复杂得多。奥托发动机为了要有压缩，在其结构中采用了火焰吹灭法，由于点火不可靠，为此对其重新进行了改进，使之具有复杂而又巧妙的结构，至80转/分左右尚能顺利地进行点火。在第五节中述及的所谓火炬式点火发动机，则是最近新出现的新型火焰点火法。

上述发动机都用城市煤气作为燃料。如今用得更多的是使用液体燃料的内燃机，这是达姆勒（1834—1900年）首先试制成功的（1883年）。该发动机采用了热管式点火。该方案已经分别在1885年由牛顿取得了英国的专利和在此以前由德莱克取得了美国的专利。图2为牛顿的专利，也可以说是一种烧球式的。

众所周知，现在的火花点火装置并没有像雷诺瓦赫发动机那样带有振动子的感应线圈，而是采用无振动子的所谓点火线圈。当电流通过该线圈的初级线圈时，用断电器将其迅速切断，并利用次级线圈在此瞬时产生的高电压在火花塞上跳过火花。电池点火方式就是用电池来供给初级电流，而磁电机点火方式则是用永久磁铁作磁极的发电机来供给初级电流。

采用无振动子点火线圈的电池点火方式的发明者不知道是谁。磁电机点火方式是由在比利时出生的维纳德取得了专利（1887年）。与此同时，德国

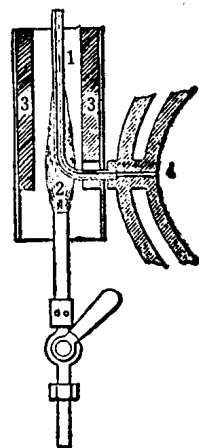


图2 热管式点火法的最初方案

1 为一端闭合而另一端开口并插入发动机气缸内的热铸铁管；2 为加热铁管的煤气燃烧器；4 为气缸。当时这种发动机是一种没有压缩过程的发动机，活塞在进气过程中将开口打开时就将气缸内混合气点燃。

著名的波许(1861—1942年)将命名为低压磁电点火的电弧点火方式付诸实现(1887年),随后又将高压磁电点火方式,即如今所说的磁电机点火方式付诸实现(1901年)。

与上述几种点火方式本质上不同的压缩点火方式是由狄塞尔(1858—1917年)在其试验样机上于1891年首先试验成功的。柴油机中没有专门的点火装置。

§ 2 火花点火式发动机的燃烧概论

在火花点火式发动机中,用火花将燃烧室内一部分混合气点燃,火焰就像波那样在混合气中进行传播,从而使燃烧室中的全部混合气燃烧完了。这种火焰是由一个地方开始向外传播的,这

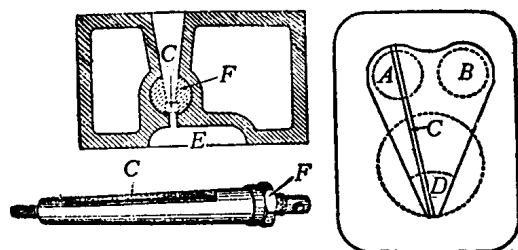


图3 设置在侧置气门式发动机缸头上的窗口

*A*为进气门;*B*为排气门;*C*为石英窗(长×宽=127毫米×9.52毫米);*D*是末端气体部分;火花塞置于窗的*A*端;火焰由*A*处向*D*处传播;*E*为燃烧室;*F*为石英夹持器;发动机压缩比为5.9。

是火花点火式发动机燃烧的特征,与具有无数着火点的压燃式发动机的燃烧不同。关于可燃气体中火焰传播问题,与内燃机无关的很多人作了研究,据此很容易想像出在火花点火式发动机燃烧室中当然也会产生这样的火焰传播。最初将火花点火式发动机燃烧室内火焰传播情况拍成照片的是通用发动机研究所的威思路和包义德(1931年)。

图3所示为侧置阀式发动机的燃烧室顶部上作出的细长石英窗,将胶卷绕在一个与窗相平行的转筒上,使胶卷可沿着与窗相垂直的方向移动。这样就可拍出流动的照片。图4上纵轴表示

火焰前锋从火花塞的一端向着另一端沿该窗移动的距离。横轴则表示时间。

在这张照片的火焰面（正确地说是一定宽度的火焰带）处，正在进行燃烧，其后方可以认为是已经燃烧完了的已燃气体部分。火焰面的移动速度，即所谓火焰速度，可从该照片的火焰面的曲线斜率来求得。

照片上 A 、 B 处所示的白点是火花塞中跳出的火花。 A 是原来用于点火的火花， B 是比这落后一定曲轴转角所跳出的火花。据此可定出时间轴的单位。从这张照片上可以看出，在 A 处虽然已跳出火花，但暂时还没有描绘出火焰。此后火焰从几乎停止传播的状态逐渐增加速度。当传播至某一距离后，火焰就具有差不多一定的速度。通常就以这个速度作为该运转状态下的火焰速度。

在火花点火式发动机的燃烧室内，由于火焰进行这样的传播而燃烧，燃烧气体的温度分布并不是一样的，可以料想得到随地点的不同而当然有差别。当火焰面传播到完全终了时，燃气在最初燃烧处的温度与在最终燃烧处的温度究竟是那一处高。应是前者为高。这一点已由中西和浅野从理论上予以证实。为要实测燃气温度需要有高级的测量技术，他们使用了圆筒形燃烧室的发动机，在上面同时装有三个火花塞，巧妙地设想由测定火花塞中心电极的温度间接地予以证明。

如上所述，因为火焰传播保持着有限的速度，所以在火焰传

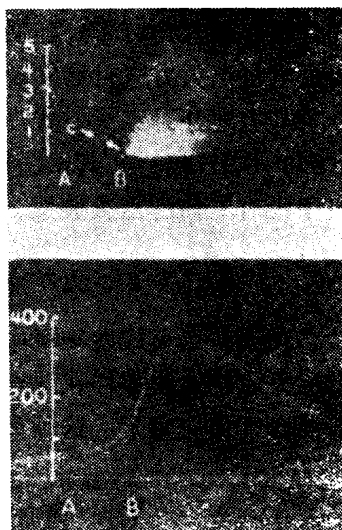
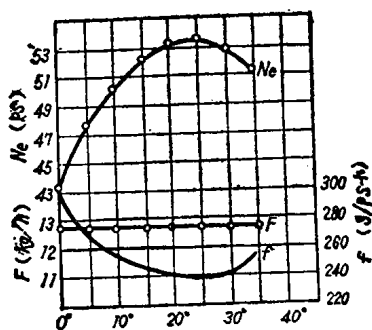


图 4 火焰面沿图 3 所示的窗口移动的照片

A 处白点为火花塞中跳出的正常火花， B 是为了测定横轴时间单位而在曲轴转角比 A 落后 20° 时所跳出的火花。上图是表示火焰面传播的照片，白与黑之间的边界是表示火焰面。纵轴的单位为英寸。下图为同时取得的示功图，其纵轴的单位为磅/英寸²。 C 表示火焰带的宽度。

播进行燃烧的期间, 活塞就要移动, 使发动机燃烧室的容积发生变化。因此, 火花点火式发动机的燃烧, 在热力学上假定为定容循环, 但严格地说, 并不是定容燃烧。发动机越在高速情况下, 其与定容燃烧的差别就越大。于是, 例如当使火花塞在上止点跳火花时, 则火焰在燃烧室内传播到终了时活塞已经下移。为了获得良好的发动机性能, 由此可见, 火花塞跳火花的时刻, 即点火时刻必须提到上止点之前, 即有所谓的点火提前角, 另外还有提前角大小的问题。

图 5 是在其他条件为一定的情况下, 改变点火时刻时, 发动机性能变化的示例。图 6 则为改变点火时刻时的示功图 (使用与图 5 不同的发动机)。在图 5 中最佳的点火提前角为 25° , 而该值是随发动机转速与混合气的混合比而变化的。越在高速情况下, 最佳点火提前角就越大。但该值并不与转速成正比。



点火时刻(上止点前曲柄角度) α

图 5 点火时刻与发动机性能变化的关系

N_e 为有效功率, F 为燃料消耗量, f 为燃料消耗率。试验样机为水冷式六缸卡车发动机, 缸径 $\times$ 行程 = 82 毫米 $\times$ 110 毫米, 排量为 3.48 升, 转速为 2000 转/分, 化油器全开。

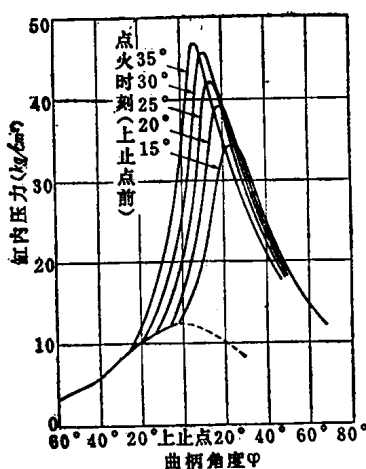


图 6 点火时刻与示功图变化的关系

试验样机为水冷式四缸轿车发动机, 缸径 $\times$ 行程 = 92 毫米 $\times$ 92 毫米, 排量为 2.45 升, 转速为 2000 转/分, 化油器全开, 过量空气系数为 0.9。

例如在 2000 转/分的情况下, 25° 为最佳值, 而在 4000 转/分

是否能说 50° 为最佳值。并不是这样的，而是取更小一些的值才能获得最佳的性能，这是因为转速增高后，进入燃烧室内的进气速度增加，从而使燃烧室内气体扰动增加，以及随发动机转速增高的同时火焰速度也增大之故。

§ 3 火花点火式发动机的爆震

在火花点火式发动机的燃烧中存在着所谓爆震现象，这种现象就如小汽车等在急转弯时，尽管车速减慢，但排档却在最高档，油门全部踏入进行加速，这时经常会觉察到从发动机内部发出金属的敲击声。

← 时间



↑ 点火火花

图 7 描绘爆震时火焰面流动的照片

发动机在低速、高进气压力的情况下最容易引起爆震，如在发动机发生爆震的同时对上述火焰进行流动摄影，则拍下的照片就如图 7 所示。

从这张照片中可以看出，距离口一段距离以后，火焰就以差不多一定的速度进行传播，其后这种传播速度就急剧增大，使余下的未燃气体同时燃烧。在终了处的火焰传播速度理应达到无穷大。

但是，实际上火焰速度并不是无穷大。其终了处的未燃气体，即末端气体中还可能有如火花塞那样的其他发火点，由这些点产生的火焰是在与细长窗长轴相垂直的方向上进行传播。这种情况可从高速摄影机通过侧置气门式发动机石英气缸头拍摄下来的全部火焰传播情况的照片上得到证明。

这种照片最初是由通用发动机研究所的威思路和拉斯威勒拍摄成功的（1936年）。图8为所拍摄的照片。

在末端气体中所形成的发火点不一定就是一个。由于发火点的产生，末端气体将在极短的时间内全部着火。爆震并不是由火花塞方面传来的火焰速度急剧增大所引起的，而是由于末端气体自身被压缩而着火所引起的，即所谓自行着火所造成的。关于这部分是与压燃式发动机的燃烧相似。发火点的核心就是悬浮在末端气体中的微小碳粒子，这种粒子是在前面循环的燃烧中产生的，并与残余废气一起遗留下来的。

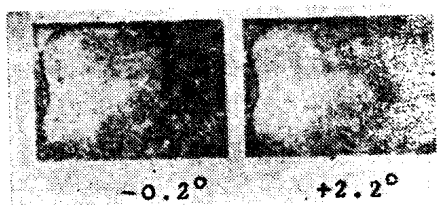


图8 爆震时末端气体燃烧情况的高速照片示例

试验样机为侧置气门式发动机，其缸头的顶部用石英制成，缸径×行程=73.0毫米×120.7毫米，压缩比为4.7，转速为900转/分。图上所示是用每秒2250张的高速摄影机所拍的照片。左图是在上止点前 0.2° 曲轴转角所拍摄的，可以看到在末端气体的右端发生了火焰。右图是在下一镜头中在上止点后 2.2° 的情景，右端发生的火焰已经传播到整个末端气体中。

由于末端气体的急剧燃烧，使燃烧室内压力迅速上升，并在燃烧室内产生与燃烧室形状有关的气体自由振动所引起的压力波。由于这种气体振动使缸壁受到强迫振动，并因此使周围空气振动，构成人们耳朵所听到的具有某种特征的爆震声音。这种情况是通用发动机研究所的格林史迪德证明的，他用录音器将爆震声音记录下来，同时还用示功器将燃烧室内压力记录下来，将二种波形一一对照即可看出这一点。另外，在活塞下移时，燃烧室容积增大，燃气温度下降，所以该振动的频率也应减小。这一点从上述记录中也可看出。

图7照片中所示即为由压力波所形成的使气体又压缩又膨胀的情景。这就是用火焰通过后的悬浮在已燃气体中的白热沉积粒子的振动来表示出来的。

在汽车发动机中，发生爆震时大多使乘坐感到不舒服，而在

使用增压的平均有效压力高的航空发动机中，发生爆震则大多会在短时间内使铝合金活塞烧熔成孔，而引起重大事故。尤其是在起飞和爬高时需要高增压，这种故障在飞机重大事故中是经常出现的，故在航空活塞式发动机中，爆震是一个极为重要的问题。

爆震的产生以及由此引起的气体振动将使活塞和缸壁表面的边界层之热阻急剧减小，由气体至金属壁的传热系数将会显著增大，所以气缸、气门、活塞等零件的温度就增高，既烧坏了活塞环，又使铝合金活塞部分烧熔，最后在活塞上烧成孔。对于一定发动机的一定气缸的活塞来说，由经验可知其因爆震引起活塞烧熔之处也是一定的，这一点是很值得注意的。如上所述，由于爆震之故在燃烧室内引起的压力波将使相当于振动波腹处的边界层受到扰乱，使其热阻减小，而在相当于波节处则没有减小，关于这一点是可以想像出来的。如果发生爆震使传热增强时，也将使热损失增加，排气温度下降。

原来熔点为 600°C 左右的铝合金活塞虽然与超过 2500°C 的燃烧气体相接触，但是并不熔化，这是由于其边界层热阻的作用，而爆震则破坏了这种防御效果。

即使在产生爆震的情况下，最初燃烧的气体温度仍比最后燃烧的气体温度要高，这一点与上述中西和浅野实验所证明的正常火焰传播时燃烧情况并没有什么不同。活塞的熔化并不是由于气体温度分布不正常所引起的，仅仅是该处的传热系数显著增大之故。

虽然从末端气体被压缩到自行着火为止的时间是很短暂的，但是也是要时间的，故在此时间内正常火焰通过末端气体并不会引起爆震。压缩比越高的发动机越容易引起其末端气体自行着火，所以很自然容易引起爆震。另外，爆震还根据燃料的种类而不同。燃料的辛烷值越高，到其自行着火就越费时间，也就难以引起爆震。在汽油中添加微量的四乙基铅 $[(\text{C}_2\text{H}_5)_4\text{Pb}]$ 、四甲基铅 $[(\text{CH}_3)_4\text{Pb}]$ 以及混合烷基铅（例如二甲基二乙基铅 $(\text{CH}_3)_2(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{Pb}$ 等）将使其辛烷值显著提高。此即所谓的抗爆

剂。其中需要有铅那样的重金属分子，以阻碍末端气体的反应和延长其自行发火时间，使正常火焰在此时间内通过完，以防止爆震发生。

当燃料及其他条件一定时，进气温度、进气压力、缸壁等温度越高，则其自行着火时间就越短，越容易引起爆震。此外发动机转速越高就越难引起爆震，这是由于前节所述转速越大，火焰速度也就越快之故。

还有如图9所示那样一种燃烧室，它是在压缩行程终了时将末端气体压入这个燃烧室内。最近就称为挤流式燃烧室，这与以前的理卡多所提出的涡流室的想想法完全相同。将末端气体挤出是为了要增大气体的扰动，增大火焰速度，并且还要使同末端气体的单位体积相接触的冷却面积增大，使气体冷却，从而使其在燃烧室内难以发生爆震。

也有在一个燃烧室内使用二个火花塞的，可使火焰从燃烧室

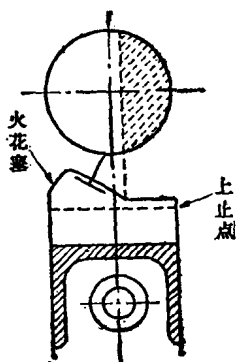


图9 挤流式燃烧室

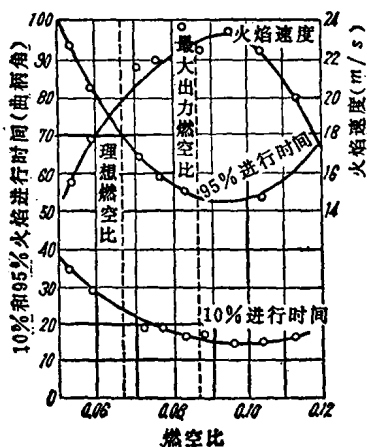


图10 火焰速度随混合气浓度的变化
利用图3所示那样的窗口，从火焰进行10%和95%距离的时间差来计算出火焰速度。
发动机的缸径×行程 = 111.1毫米×114.3毫米，900转/分，点火提前角为上止点前30°，进气温度为13℃，节流阀全开。

内两边通过而不会引起末端气体自行着火，有效地防止了爆震。像航空活塞式发动机燃烧室那样大小，都使用了二个火花塞。而且有意识地使这二个火花塞的点火时刻稍微差一点，以使末端气体在燃烧室内占有一定地方。但希望末端气体尽可能不要处于排气门等高温部位处。

混合气中燃料浓度与爆震也有关系。根据实验，下一节中所述的最大出力的混合气是最容易引起爆震的，而比这浓的或稀的混合气则都不易于引起爆震。如图10所示那样，火焰速度在最大出力的燃-空比时为最快，而比这浓的或稀的都要慢一些，如果只从火焰速度来考虑的话，应该是最大出力的燃空比处最难引起爆震，可是实验正与此相反，这是因为下述作用对其有强烈影响的缘故。

亦即末端气体的自行着火特性本身是随混合气浓度而变化的，对于同一温度来说，在最大出力燃空比处点火延迟要短一些。而燃烧气体温度在最大出力燃空比处为最高，所以末端气体温度也高，也就容易引起自行着火。

在汽车发动机中，可由上述爆震声音得知其发生爆震，而在航空发动机中则由于其他噪音之故听不到爆震声音。在光线暗的运转场所可以安装短的排气管来观察之，可以看到在爆震时从排气管内间歇地喷出火星。由于爆震所产生的气体振动，可从燃烧室壁上剥落一部分沉积物，而这种剥落下来的沉积物微粒等可以认为就是上述作为自行着火时核心的粒子。

不言而喻，在航空发动机中，如在排气管喷出火星的情况下长期连续运转，结果会造成活塞烧熔那样的大事故。安装在飞机上还不可能根据排气来得知其爆震，而发生爆震又是最危险的事情，所以总是在谋求运转中绝对不会引起爆震的各种方案。

§ 4 混合气的形成

混合气中燃料浓度对火焰速度有很大的影响。混合气的浓度是用混合比来表示的。混合比是采用混合气中燃料与空气的重量

百分比来表示的燃空比和其倒数空燃比二种，通常所谓混合比则是指后者。

此外还有很多情况是用空气过量系数来表示的。它是实际空燃比与理论空燃比之比值。理论空燃比就是为了将供给的燃料完全燃烧理论上所必须的空气重量与燃料重量之比。所谓理论上，即按其燃料化学成分中C和H转变为 CO_2 和 H_2O 等所必须的氧分子量计算出的空气重量。汽油的理论空燃比为14.5~15，故其理论燃空比为0.069~0.067。近来都将理论混合比称之为当量混合比。

图10所示为火焰速度与燃空比的关系。该图是从第二节中所载的照片中测定出来的。最大火焰速度是在比最大出力混合气还要浓的燃空比处得到的。如果火焰速度有变化，根据第二节末所述的同一理由，当然示功图的形状也不同。最后发动机性能也随混合比而变化。图11即为其示例。这是用六缸汽车发动机得出的，这个曲线形状为一般形状。当发动机转速和进气压力保持一定时，调整化油器就可改变燃料消耗量，结果就可测定出有效出力和燃料消耗率。虽然此图没有表示出混合比与性能之间的关系，但在该运转情况下空气消耗量差不多是常值，故就间接地表示出混合

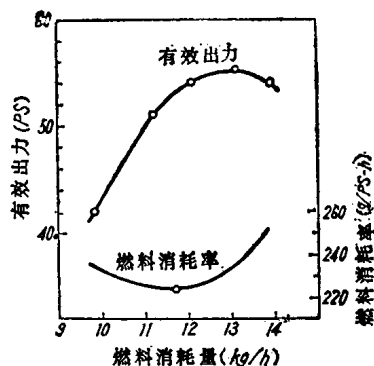


图11 随混合气浓度而变化的发动机性能曲线

试验样机与图5相同，转速为2000转/分，
化油器全开。

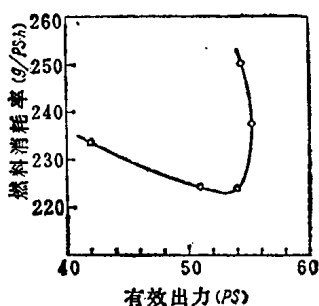


图12 鱼钩曲线

将图11的坐标轴改画成的曲线

比与性能之间的关系。

亦可将图11的坐标轴改画成图12所示的坐标轴，因为所得曲线形状与鱼钩相似，故也叫鱼钩曲线。当转速和转矩保持一定的情况下，横轴也可取为进气压力，依然可求得鱼钩状的曲线。

从图11和图12中可见，最大出力的混合比与最低燃料消耗率的混合比是有区别的。前者的混合气即所谓最大出力混合气，后者即所谓最经济混合气。最大出力的混合气比理论混合比要稍浓一些，风冷发动机与水冷发动机也不同，其空气过量系数约为0.8~0.9。

如果其他条件为一定时，随着混合比的变化，排气温度、气缸温度、排气成分等也将发生变化。通常，排气温度是用热电偶在排气管中测出。气缸温度是用热电偶在风冷发动机火花塞垫片处取得，在水冷发动机中则用特殊火花塞测出其中心电极的温度。

一边运转，一边将燃料从最大出力混合气处调稀，排气温度一度升高，然后开始下降。排气颜色最初为天蓝色，接着带一些淡红色，随后就有淡黄色的稍长火苗，至最后变成无色，常常发生失火，发动机出现振动和运转情况不稳定等现象，有时在进气管处出现回火现象。如果再调稀的话就停车了。由于过稀而停车的发动机是很容易起动的。无论从实验上或从热力学方面都可得出排气温度最高时为理论混合比。

一边运转，一边将燃料从最大出力混合气处加浓。从排气管排出的废气仍在进行着激烈燃烧，即所谓后燃现象，排气颜色由红色变成冒黑烟。发动机出现振动，运转情况不稳定，接着就停车。因加浓而停车的发动机，如果不用新鲜空气清扫燃烧室内，起动就很困难。

在这种火花点火式发动机中，可能燃烧的混合比具有比较窄的上下界限。这一点与压燃式发动机有显著的区别。所以要使火花点火式发动机运转，不管燃料是气体，还是液体，都需要能保持空气与燃料适当混合比的那样装置。在第一节中所述的雷诺瓦赫煤气机和奥托煤气机都采用了使用简单的手动阀。1900年初期