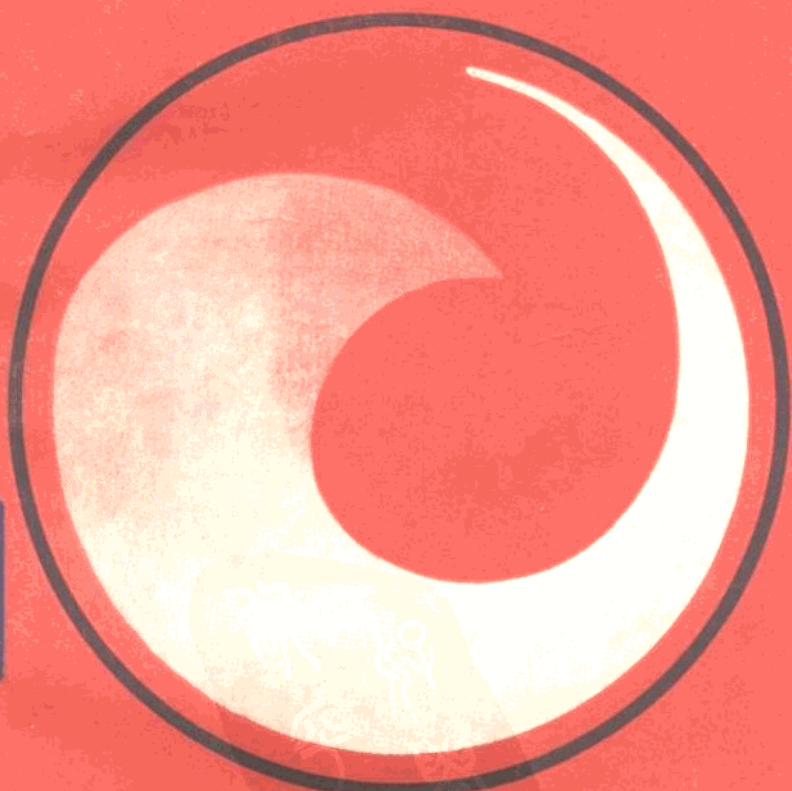


船用柴油机 燃烧

胡国栋 编著



国防工业出版社

船用柴油机燃烧

胡国栋 编著



国防工业出版社

2082/20

内 容 简 介

本书阐述了柴油机燃烧过程的基本现象和特点,并讨论分析了燃烧过程对柴油机机械负荷、热负荷和排烟产生影响的主要原因。书中还针对船用柴油机的特点,着重介绍了直接喷射式燃烧室,结合实际对组织雾化燃烧有关的设计问题进行了分析;介绍了油膜-雾化燃烧在直接喷射式燃烧室中的运用特点;并扼要讨论了预燃室燃烧室的性能和工作特点以及有关设计的原则问题。此外,还提出了今后改进燃烧性能的展望。本书可供有关工程技术人员,大专院校师生和科研实验工作者参考。

船 用 柴 油 机 燃 烧

胡国栋 编著

*

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

*

787×1092¹/₃₂ 印张6 插页1 126千字

1983年3月第一版 1983年3月第一次印刷 印数: 0,001—2,500册

统一书号: 15034·2341 定价: 0.67元

序 言

柴油机从十九世纪末叶出现以来,至今已有八十多年的历史。由于它具有较好的适应性和经济性,因此,被人们广泛使用。

随着国防工业、工农业生产的进一步发展,对柴油机的工作性能相应提出更高的要求。对船用柴油机来说,在不过多增加柴油机体积和重量的条件下,力求提高比功率;与此同时,还要求不断提高经济性、可靠性和使用寿命。

柴油机是通过将燃油喷入气缸与空气混合,形成可燃混合气并进行燃烧,使化学能转换为热能,从而对外输出机械功的。因此,如何有效地进行这种转换,并满足上述三项性能指标的要求,关键之一是能否促使气缸内部的矛盾,在一定的条件下,向着有利的方面转化。要进行这种转化,条件是很重要的。因此,组织燃油喷射,向缸内输送大量空气,并组织气流运动以及设计出与这两方面要求相适应的燃烧室等,都是促进转化的主要环节。

几十年来经过大量实验研究,船用柴油机的比功率已有很大提高。当前国际上生产的四冲程增压柴油机已达到平均有效压力 $p_e = 20$ 公斤/厘米² 以上,二冲程增压柴油机已达到 $p_e = 15$ 公斤/厘米² 左右,今后还要进一步提高。小型柴油机在提高转速方面也做了大量研究工作,当前国际上小型柴油机的转速已能达到 6000 转/分。

在柴油机的发展上存在着不同的途径。小型柴油机之所以能适应高速工作,主要是因为比较成功地研究了缸内混合

气的形成和燃烧；而船用大、中型增压柴油机的发展，却一直沿着提高进气压力的途径来提高它的比功率。随着增压压力的提高，当 $p_k \geq 3$ 公斤/厘米² 时，又向着两级增压的方向发展。

应当指出的是，当前中、低速增压柴油机气缸内燃烧的情况是很不理想的。这种类型的柴油机在全负荷时，缸内“空气燃油比”通常在 30 左右，其空气量比缸内燃油完全燃烧时所需要的空气量多了一倍左右，机器的转速又比较低，一般中速机的转速每秒约 10 转左右，有相当长的时间可用于组织混合气的形成和燃烧，然而，这类机型的燃烧却异常缓慢。例如：在中、低速二冲程增压柴油机扫气过程中，从扫气箱观察窗处还能看到缸内仍在燃烧，这说明其后燃现象比较严重。

由此看出，中、低速大型柴油机和高速小型柴油机的发展途径是各有不同的。

在发展我国船用柴油机的道路上，我们需要运用唯物辩证法的对立统一这个根本规律，正确处理发展工作中存在着的矛盾。事物发展的根本原因是在事物的内部，在于事物内部的矛盾性，所以要改进增压柴油机的性能，提高其比功率，最基本的着眼点是研究柴油机气缸内部能量转化的规律和存在的矛盾，从而创造一定条件，促进内部矛盾的转化。提高增压压力，增加缸内的空气量，诚然是提高柴油机比功率的很重要的条件。但是，能否发挥这些增压空气的作用，则要根据能否促进内部矛盾的转化而定。因此，在提高船用柴油机的性能时，既要为比功率的提高创造外因条件，增进增压系统的效能，又要不断改善缸内燃油与空气的混合与燃烧，消除或减轻后燃现象，以便多快好省地发展我国柴油机工业，加速社会主义四个现代化的步伐。

目 录

第一章 燃烧过程总论

§ 1 燃烧过程的四个阶段	1
一、第一阶段——滞燃阶段	2
二、第二阶段——快燃阶段	9
三、第三阶段——主燃阶段	13
四、第四阶段——后燃阶段	14
§ 2 柴油机混合气形成和燃烧的特点	15
一、不均匀性	15
二、滞燃角	29

第二章 燃烧过程对柴油机性能的影响

§ 1 机械负荷	35
§ 2 热负荷	51
§ 3 冒烟	55

第三章 直接喷射式燃烧室

§ 1 燃烧室的比较	60
§ 2 直接喷射式燃烧室	65
一、雾化燃烧	65
1. 燃烧室	67
2. 气流运动	73

VI

3. 燃油喷射	81
4. 雾化燃烧中几个问题的讨论	95
二、油膜-雾化燃烧	117
1. 简论柴油机燃烧的放热规律	117
2. M燃烧系统	125
3. 直接喷射式 ω 型燃烧室的油膜-雾化燃烧	131
§ 3 改进直接喷射式燃烧性能的展望	147

第四章 预燃室式燃烧室

§ 1 预燃室式燃烧性能的特点	166
§ 2 预燃室式燃烧的组织	171
一、预燃室燃烧的组织	171
1. 燃油喷射	171
2. 预燃室设计和气流运动	176
二、主燃室设计	179
§ 3 改进预燃室式燃烧性能的展望	180

第一章 燃烧过程总论

§ 1 燃烧过程的四个阶段

柴油机气缸中的燃油燃烧过程是在活塞将进入缸内的空气压缩到接近于上死点时，高压燃油从喷油器喷入气缸后开始的。直到活塞越过上死点进入膨胀行程后一段时间，火焰完全熄灭时结束，其中包括混合气形成与燃烧。

整个过程中充满着燃油与气体间相互运动，其物理状态与化学状态不断的变化，与此同时，还由于活塞在压缩和膨胀过程中作着两种不同方向的运动，从而引起缸内气体压力和

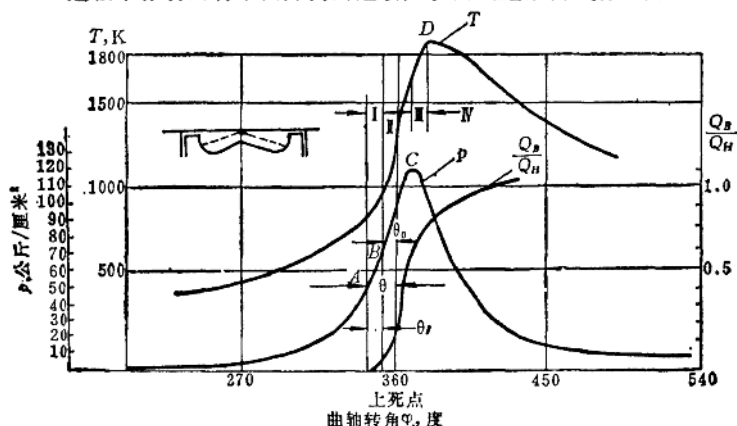


图1 12 V 240 Z 柴油机示功图、温度及放热曲线
 $N_s = 2700$ 马力, $n = 1100$ 转/分, $\theta = 18.6^\circ$, $p_{z\max} = 123$ 公斤/厘米², $(dp/d\varphi)_{\max} = 3.73$ 公斤/厘米²/度, $T_{\max} = 1860\text{K}$.

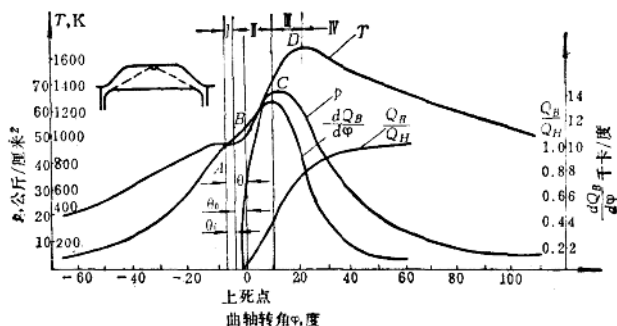


图 2 6ESDZ76/160柴油机示功图、温度及放热曲线

$N_e = 9000$ 马力, $n = 115$ 转/分, $\theta = 6.5^\circ$, $p_{z\max} = 68.5$ 公斤/厘米²,
 $(dp/d\varphi)_{\max} = 2.11$ 公斤/厘米²/度, $T_{\max} = 1690$ K.

温度的不断变化。这些气体参数的变化,直接影响着柴油机的动力性、经济性和可靠性等主要性能。

在整个燃烧过程中,缸内气体运动和参数的变化对柴油机性能的影响,可通过示功图进行分析。示功图中反映出气缸内气体压力随曲轴转角的变化情况。通过气体压力的变化,并按照气体压力、温度与容积间的状态关系和放热、作功与散热间的能量平衡关系,从示功图可计算出气体温度变化和放热曲线,如图 1^[13]和图 2^[12]所示。

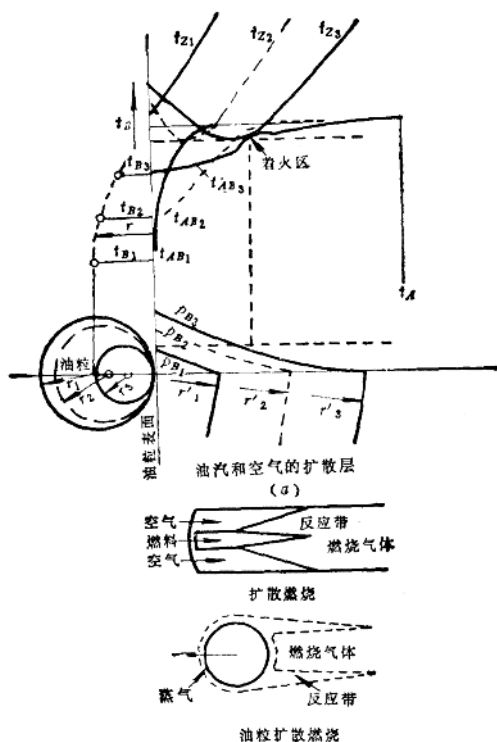
一、第一阶段——滞燃阶段

当柴油机压缩到接近上死点时,随着机型的增压度、压缩比等不同,压缩空气的温度有所差异,可达到 $500 \sim 900^\circ\text{C}$,远远超过燃油的自燃温度。在此时刻,高压燃油以雾状喷入

缸内，但不能立即着火。油粒与空气接触形成混合气，发生物理和化学的变化，最后达到自燃温度而着火，这一阶段是燃烧准备阶段，即图 1, 2 示功图上表示的第一阶段 (AB 段)，亦称为滞燃阶段。这一阶段经历的时间称为滞燃期 τ_i ，所占曲轴转角为滞燃角 θ_i 。这一阶段时间的长短，特别是所占曲轴转角的大小，对于着火后的燃烧状况，有着极其重要的影响。为此，需要认识滞燃阶段是如何形成的。

图 3 (a)⁽¹⁾ 表示油粒在静止的热空气中的着火过程。在高温高压空气中雾状油粒，首先吸收其周围空气的热量，使本身温度上升，从表面开始蒸发、汽化，并且油粒逐渐变小。在油粒周围已蒸发的油气与空气混合形成混合气。在油粒的表面，因为，蒸发要吸收汽化潜热，所以温度低，而油气的浓度最高。离油粒表面愈远，油气的浓度愈低，温度愈高。图 3 (a) t_B 表示油粒的温度， t_A 表示空气的温度， t_{AB} 表示混合气的温度。纵坐标上 t_{B_1} 、 t_{B_2} 、 t_{B_3} 表示时间经过的各点，油粒由较大半径 r_1 ，到 r_2 、 r_3 ，逐渐变小， t_B 温度相应上升。油粒外围是混合气，混合气温度 t_{AB} 线向右延伸逐步升高。 t_z 是混合气的自燃温度，它是随着浓度不同而变化。 p_B 表示燃油蒸汽压。在油粒进行物理状态变化的同时，在混合气中进行焰前反应，放出热量，比单纯的空气传热使其温度上升的更快，因而在图 3 (a) 上形成了如温度曲线 t_{AB} 的凸起，在这个温度曲线 t_{AB_3} 与 t_{z_3} 相交处引起着火。此处的浓度和温度均较适当。如离油粒近，浓度大，但温度低；离油粒远，则温度高，但浓度小，均不适于首先着火。

实际在柴油机中是几条喷射油束在空气中运动，由于射流的作用，空气被带进来，油束之间相互还有干涉，而不是



(b)
图 3

(a) 油粒的着火过程; (b) 油粒的扩散燃烧。

一个单独油粒，再加上空气流本身的运动，其着火过程与上述静止状态有所不同。这是需要深入一步考虑的。

油粒的焰前反应先是在油粒外层富氧混合气中进行的。在燃烧反应过程中，由于在柴油机工作温度的条件下，参与反

应的物质分解出自由基如H、O自由原子和OH、CH₃等自由原子团，引起链式反应。这些自由基有强烈的化学反应能力，它们形成链反应中的“活性中心”。由于链的支化，活性中心的浓度不断增加。但同时由于活性中心也会与壁或惰性气体以及不能促进链反应的自由基之间碰撞，消耗能量，使链支化发生衰退现象而消失，因此单纯由于链反应尚不足以达到自燃程度。自燃所以能够发生，是因为在链反应的过程中，能增加热的积累，从而加速链的反应。链反应加速，又使温度提高，进一步使热积累不断加速，终于爆发了自燃。在这样的反应过程中，其反应区的温度和参与反应的反应剂、氧化剂及惰性气体间的浓度比例关系，对自燃期的长短起着决定性的作用。

在烃类燃料中，有的碳氢化合物，例如苯、甲烷等着火前反应少，一达到自燃温度即发生热焰，而高分子石蜡族烷烃、环烷烃、烯烃等成分，经实验证实，经历着冷焰、蓝焰、热焰等三级低温着火的过程。在初始链反应过程中，先产生活性中间产物——过氧化氢，当其浓度达到临界值时，就产生了爆炸性分解。其主要产物之一甲醛，在自由基反应中激发，从而发出浅蓝色的光源，称为冷焰。冷焰只放出少量的燃料燃烧热（约占完全燃烧的10~15%），并稍稍升高一点温度。冷焰中的甲醛，再经过链式氧化，从而形成蓝色的火焰，称为蓝焰。此时产生CO。在氧过剩时，发展蓝焰较易，同时尚需具备比冷焰更高的温度条件。因此考虑温度条件，发展蓝焰则需要接近于化学计算比的燃料混合气的浓度。发生蓝焰后，由于活性中心的高浓度和高温的关系，在非常短的滞燃期内，最后爆发成热焰。燃油焰前反应就是按着三级

火焰发展过程而完成的。

在滞燃期中，发生物理和化学的变化。在空气温度高的时候，由于化学原因所引起的滞燃期短，而加热所引起的物理滞燃期占的比例大。但在机器刚开动时，缸内温度较低，化学原因所占的比例就较大了。

柴油机中燃油着火的地点，需要具备一定的浓度和温度条件，不象汽油机总是从火花塞那里引火的。高压燃油喷入缸内形成的油雾，包含着大小不同的微粒，缸内各处的温度也不相同。另一方面，在燃油喷射过程中，燃油与空气间产生相对运动。混合气的浓度和温度，也是不断改变的。一般直接喷射式燃烧室中开始着火的火源，发生在靠近燃烧室壁外围、较早射入缸内的燃油混合气处，如图4⁽²⁾照片所示。着火火源发生的位置是很重要的，因为它会影响着火后的燃烧。如果着火火源发生在喷射油束刚离开喷油器不远的地方，则着火后继续喷入缸内的燃油，一喷出就触及高温火焰而汽化，贯穿力减弱，从而严重影响燃油在空气中的均匀分布。图4燃烧室中没有绕气缸轴心旋转的气流运动，如有较强的旋转涡流，而喷射油束的贯穿力又不够强时，颗粒较细的油束易被旋流吹歪，燃油着火点就不能如图4所示，将达不到燃烧室外围。

影响滞燃期的因素较多，情况比较复杂，主要有以下三点：

(1) 燃油的成分和自燃温度。一般以燃油的十六烷值来衡量其着火性。通常使用的燃油，其十六烷值在40~60左右。十六烷值愈低，滞燃期愈长。此外，还要考虑燃油的挥发性，它影响着物理滞燃期。例如，重油是由长链碳氢化合

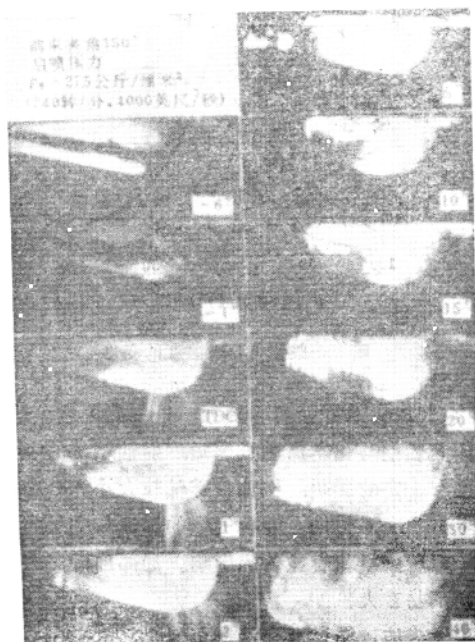
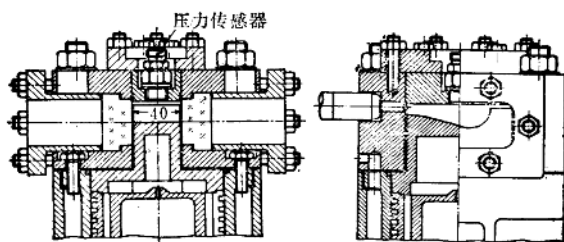


图 4 二冲程柴油机燃烧照相装置及火焰形成过程图

物组成的,易于分裂并在低温下着火;但由于其挥发性差,所以实际滞燃期却延长了。

(2) 压缩空气的温度和压力的大小,直接影响着滞燃期。显然,气温愈高,愈促进燃油早着火。燃油的自燃温度又和其所处环境的气压有关。气压愈高,则燃油的自燃温度愈低,如图 5^[1]所示, t_c 是压缩空气温度, t_z 是燃油着火的温度。

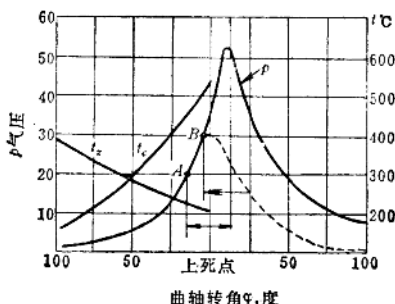


图 5 柴油机自燃温度的变化

(3) 气流运动的强弱。例如,进气旋流组织适当,往往会使物理滞燃期与化学滞燃期缩短。射油系统的喷油特性对滞燃期也有一定的影响,例如喷雾油粒大小和分布等,在一定程度上会改变滞燃期。混合气中的燃油与空气的比值,即当量比,对着火早晚有显著的影响。局部地区的燃油过浓或过稀,均不易着火。

为了适当估计滞燃期和滞燃角大小,可应用下列经验计算公式,按其压缩压力和温度的大小进行计算。

$$\tau_i = \frac{C_1}{p^{n_1}} \cdot e^{C_2/T} \quad (\text{秒}) \quad (1-1)$$

$$\theta_i = 6\pi\tau_i \quad (\text{曲轴转角, 度})$$

式中 p ——压缩空气压力, 公斤/厘米²;

T ——压缩空气温度, °K;

C_1, C_2, n_1 = 常数, 一般可取 $C_1 = 0.44 \times 10^{-3}$, $C_2 = 4650$, $n_1 = 1 \sim 1.2$;

n ——柴油机转速, 转/分。

由于柴油机具体条件不同, 计算值与实际情况不完全符合。对于一般直接喷射式雾化燃烧, 上述计算值可作为分析问题参考, 并可根据具体机型, 适当改变 p 的指数 n_1 值。对于油膜-雾化燃烧, 由于散布于空间的燃油量减少, 混合气的局部当量比, 需要较长时间才能达到着火条件, 从而其滞燃期比上述计算值长。因此, 为控制滞燃期创造一定条件, 适当改变空间燃油分布的当量比是有必要的。

二、第二阶段——快燃阶段

缸内开始着火后, 即进入图 1 与图 2 中所示燃烧过程的第二阶段 (BC 段), 从开始脱离压缩线压升那一点起 (近似认为即着火点 B), 缸内气体压力急剧上升, 经过上死点后, 活塞下行气体膨胀, 气压上升到最高点 C 。一般称此阶段为快燃阶段。

从图 2 放热率曲线看出, 放热率 $dQ/d\varphi$ 迅速上升, 一般放热率高峰都是在这阶段中出现。这是由于滞燃阶段内喷入缸内的燃油, 陆续进行了不同程度的焰前反应和形成相当量的可燃混合气, 一旦其中一个地方或几个地方着火, 立即向

各处极迅速地传播，引起已形成的可燃混合气迅速燃烧的结果。这一现象在高速机中表现更为强烈，这是因为高速机的滞燃阶段的滞燃角大，形成可燃混合气的量多，因而一旦缸内着火，压升率 $dp/d\varphi$ 及最大燃烧压力 p_z 均比较高，一般最大燃烧压力 p_z 与压缩压力 p_c 的比值在 $p_z/p_c \approx 2$ 左右。 $dp/d\varphi$ 值通常超过 4 公斤/厘米²/度，而低速机的 p_z/p_c 值不过 1.4 左右， $dp/d\varphi$ 不过 2 公斤/厘米²/度左右。

缸内着火后再喷入缸内的燃油中一部分也参与这一阶段的燃烧，在火焰区中这部分燃油被点燃而燃烧，滞燃期很短，但其燃烧快、慢，或未燃烧而裂化，取决于燃油在空气中分布的情况。氧的供应，对后喷燃油的燃烧起着决定性作用。

图 6⁽³⁾ (见书后插页) 是 $n = 1250$ 转/分， $p_c = 8.4$ 公斤/厘米² 小型高速柴油机 ω 型直接喷射式燃烧室中火焰发展情况的照片。在燃烧室中有逆时针的旋转涡流。上止点 -7° 以前示出喷射油束，由于旋流的作用，油束前端稍稍吹弯。 -3° 时缸内已经着火，火焰正由 ω 凹坑外围向中部传播，在上死点时，燃油室内已布满火焰。初期的火焰是滞燃期内混合好的可燃混合气燃烧后呈现出的热蓝火焰。当不存在自由碳时，是完全燃烧的产物。在火焰传播期间，燃油仍在继续喷射，由于受高压气体和高温火焰包围，燃油很快汽化，油束的贯穿力减弱，燃油与空气混合情况不如初期理想。这时火焰在传播过程中形成扩散火焰，其中包含高温碳粒，是由于油粒受火焰包围而裂解出来的。

根据彩色照相中的火焰判断，最初出现的预混合的热蓝火焰，这种颜色保持到约 1790°C 。而在扩散火焰中（其中有热分解），包含高温碳粒，在彩色底片上表示出来的是白