

教材：内燃机燃烧科学与技术，自编教材，2004 年 4 月。

教材中的第 1、3、4、5、6、7、11、12、15 章

参考文献：

- (1) 蒋德明著。内燃机燃烧与排放学。西安交通大学出版社，2001. 7
- (2) 傅维镛等。燃烧学。高等教育出版社，1989. 4
- (3) 张平编著。燃烧诊断学。兵器工业出版社，1988. 12
- (4) 徐旭常等编。燃烧理论与燃烧设备。清华大学热能工程系，1988. 10
- (5) 何学良等编著。内燃机燃烧学。机械工业出版社，1990. 5。TK407. 9/2
- (6) 龚允怡编。内燃机燃烧基础。机械工业出版社，1989。TK401/16
- (7) 陈家骅等编。内燃机燃烧。哈尔滨船舶工程学院出版社，1986。TK413. 2/2
- (8) 陈义良等编译。燃烧原理。航空工业出版社，1992。TK16/17
- (9) 常弘哲等编。燃料与燃烧。上海交通大学出版社，1993。
- (10) 魏道远主编。内燃机燃烧与排放控制。中国铁道出版社，1992。TK401/19
- (11) 魏象仪编。内燃机燃烧学。大连理工大学出版社，1992。TK401/20
- (12) 解茂昭著。内燃机计算燃烧学，大连理工大学出版社，1995. 12
- (13) 岑可法著。高等燃烧学，浙江大学出版社，2002. 12

北京理工大学图书馆馆藏参考文献：

- (1) 许晋源等。燃烧学。机械工业出版社，1990. 5。TK16/4=2
- (2) (美) 威廉斯著。燃烧理论—化学反应流动系统的基础理论。科学出版社，1990. 6。
0643. 2/2=2
- (3) 何学良等编著。内燃机燃烧学。机械工业出版社，1990. 5。TK407. 9/2
- (4) 张斌全编著。燃烧基础理论。北京航空航天大学出版社，1990. 8。0643. 2/16
- (5) 周力行著。湍流两相流动与燃烧的数值模拟。清华大学出版社，1991。TK121/5
- (6) 岑可法等编。燃烧流体力学。水利电力出版社，1991。TK16/14
- (7) (美) 肯尼斯著。燃烧原理。华中理工大学出版社，1991。TK16/15
- (8) 魏道远主编。内燃机燃烧与排放控制。中国铁道出版社，1992。TK401/19
- (9) 魏象仪编。内燃机燃烧学。大连理工大学出版社，1992。TK401/20
- (10) 陈义良等编译。燃烧原理。航空工业出版社，1992。TK16/17
- (11) 范维澄等编著。流动及燃烧的模型及计算。中国科学技术大学出版社，1992。
TK121/6

- (12) (美)格拉斯曼著。燃烧学。科学出版社, 1983。0643.2/7
- (13) 王应时等著。燃烧过程数值计算。科学出版社, 1986。0643.2/11
- (14) 曲作家等编。燃烧理论基础。国防工业出版社, 1989。0643.2/13
- (15) 程显辰编著。脉动燃烧。中国铁道出版社, 1994
- (16) 常弘哲等编。燃料与燃烧。上海交通大学出版社, 1993。
- (17) 胡震岗等编。燃料与燃烧概论。清华大学出版社, 1995。
- (18) 龚允怡编。内燃机燃烧基础。机械工业出版社, 1989。TK401/16
- (19) 马春庭等编译。汽油机的燃烧。国防工业出版社, 1984。TK413.2/1
- (20) 陈家骅等编。内燃机燃烧。哈尔滨船舶工程学院出版社, 1986。TK413.2/2
- (21) 马春庭编译。柴油机的燃烧。国防工业出版社, 1983。TK422/1
- (22) (苏)斯维利朵夫。柴油机的混合气形成与燃烧。国防工业出版社, 1984。TK423.2/2
- (23) 燃料与燃烧。TK16/18
- (24) 燃料与燃烧概说。TQ51、R7=5
- (25) D.F.G. Durao, Instrumentation for combustion and flow in engines, Kluwer Academic Pub. 89. X/TK406-2/1/87
- (26) 解茂昭著。内燃机计算燃烧学, 大连理工大学出版社, 1995. 12 TK401-43/01

第一部分 燃烧基础.....	5
1 燃烧概念及重要性.....	5
2 化学动力学.....	6
2.1 概述.....	6
2.2 反应速率及速率方程.....	6
2.3 简单反应	7
2.4 复合反应	8
2.5 反应速率与温度的关系	8
2.6 活化碰撞理论.....	9
2.7 活化络合物理论.....	9
2.8 压力对反应速率的影响.....	10
2.9 链反应	10
3 着火过程.....	11
3.1 着火的分类.....	11
3.2 研究着火的方法.....	12
3.3 热着火过程.....	12
3.4 烃的着火特点.....	12
3.5 均质混合气自燃的发展.....	14
3.6 液体燃料喷雾的着火.....	14
3.7 电火花点火.....	15
4 预混火焰传播的基础知识.....	16
4.1 概述.....	16
4.2 燃烧速度的测定.....	16
4.3 层流火焰传播原理.....	17
4.4 各种因素对法向火焰传播速度的影响.....	17
4.5 湍流燃烧.....	17
5 扩散燃烧.....	19
5.1 扩散燃烧.....	19
5.2 油滴燃烧.....	20
5.3 燃料雾的燃烧.....	21
5.4 有害成分生成机理	22
6 内燃机的燃烧模型.....	23
第二部分 汽油机燃烧与控制.....	26
1 正常燃烧.....	26
1.1 测试装置.....	26
1.2 燃烧过程分期.....	26
1.3 火焰传播和压力上升.....	27
1.4 燃烧气体中的温度梯度和气体的移动.....	27
1.5 影响火焰传播的各种因素.....	27
1.6 燃烧过程热量利用.....	27
1.7 有害成分的生成.....	28
2 各循环间燃烧的变动.....	30
2.1 循环变动带来的问题	30
2.2 影响变动的因素.....	31
2.3 支配燃烧变动的主要因素.....	31

2.4 燃烧变动对排气污染的影响.....	32
2.5 减少燃烧变动的措施.....	32
3 火花点火发动机爆燃.....	32
3.1 爆震基本知识.....	32
3.2 汽油机爆燃的特点.....	34
3.3 爆燃的理论.....	34
3.4 辛烷值.....	34
3.5 防止爆燃的方法.....	34
4 表面点火.....	35
5 其它自动着火现象.....	35
6 稀混气燃烧的发动机.....	35
6.1 燃烧稀混气的问题.....	35
6.2 提高压缩比对稀化的影响.....	36
6.3 改善点火系统.....	36
6.4 预室喷流发动机.....	36
6.5 二级活塞式发动机.....	36
6.6 其它稀混气燃烧发动机.....	37
7 层状充量发动机.....	37
第三部分 柴油机燃烧与控制.....	39
1 燃烧过程分段.....	39
2 有害成分的生成与排放特性.....	39
2.1 碳烟和 NO 生成倾向.....	39
2.2 气流的影响.....	40
3 着火延迟期及其控制.....	41
3.1 概念.....	41
3.2 滞燃期的影响因素.....	41
3.3 滞燃期的计算.....	41
3.4 滞燃期对燃烧过程和柴油机性能的影响.....	41
3.5 滞燃期的控制.....	42
4 主燃期及其控制.....	42
5 机械负荷与热负荷的控制.....	43
6 柴油机的过渡过程及电控系统的发展.....	43
7 MK 燃烧.....	44
8 HCCI.....	44

第一部分 燃烧基础

1 燃烧概念及重要性

燃烧的概念：伴随[发热] [发光]的[激烈]的化学反应(氧化反应)

(1) (2) (3) 三个要素

燃烧的许多机理还未研究清楚

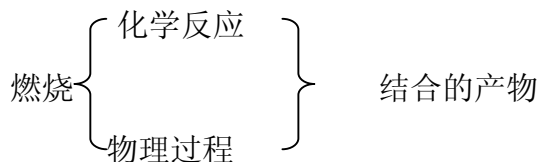
气相状态中的燃烧的外部表现称为火焰。

火焰分为：冷焰、热焰，通常所称的火焰指热焰

其它特点：热运动和物质迁移，如：火苗的形状；还有辐射、电离、自行传播等性质

预混火焰：传热、分子扩散

扩散火焰：扩散、传热、混合



初期燃烧研究：研究物质转化，化学过程

现代控制燃烧的研究：物理过程

概念： (1) 定置火焰和进行火焰

(2) 预混火焰和扩散火焰

(3) 自燃和外源点火

外源点火的三个特例：电火花点火、热面点火和火焰点火(与发动机的联系)

发动机的燃烧决定：(1) 功率和效率

(2) 排气污染 a. NO_x: 汽油机多

b. 颗粒：柴油机多，因为扩散燃烧

c. HC、CO 等

(3) 噪音，应力

(4) 多燃料

与燃烧关联的问题是：

燃料性质及供给方式，喷油及雾化，空燃比（进气量），油、气温度，流动，油、气定时，点火定时与能量，排气压力波（脉冲、等压），压缩比，转速，燃烧室形状，冷却（传热）...

燃烧是发动机的核心过程！

2 化学动力学

2.1 概述

化学反应动力学：描述反应速率与反应机理的科学

速率的影响因素：（1）组分浓度、温度、压力（主要指气相）

（2）反应具体步骤（实际过程）

反应类型：（1）基元反应：反应物一步转化为生成物，反应物粒子有：原子、分子、自由基、离子

（2）非基元反应：由基元反应组成

总的化学反应方程或化学计量方程（未反映中间过程），如： $\text{C}_2\text{H}_6 + 3\frac{1}{2}\text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$

中间产物的稳定性：稳定的：如上述反应中的 CH_4 、 C_2H_2 、 CO 、 H_2

不稳定的：如 H 、 OH 、 O 、 C 、 C_2 、 CH

2.2 反应速率及速率方程

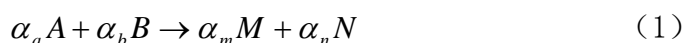
2.2.1 反应速率

反应速率：反应物或生成物浓度对时间的导数 $w = -dC/dt$ （注意正负号，与系统反应速率不同）

系统反应速率为：参与反应的某一物质的反应速率除以其计量系数，因此测定任一反应物或生成物的反应速率即可知道系统反应速率

2.2.2 速率方程与反应级数

设化学反应计量式为：



式中， α_i 是物质 i 的化学计量系数，对产物取正值，对反应物取负值。

反应系统内，当温度不变时，参加反应的各物质的浓度与反应速率的一般关系为

$r = f(C_A, C_B, C_M, \Lambda)$ ，称为速率方程或动力学方程。其中比较简单的情况，如

$$r = k C_A^{\alpha_a} C_B^{\alpha_b} \quad (\text{用于基元反应时，称为质量作用定律})$$

式中， C 为浓度， k 为反应速率常数，反映了活性，与温度有关。各浓度项指数之和称为反应级数 n ：

$$n = \alpha_a + \alpha_b \quad (2)$$

当 $n = 0, 1, 2, \dots$ ，称为零级反应，一级反应，二级反应，...

对基元反应，反应级数与反应物的分子数一致。所以，一级反应即单分子反应，二级反应即双分子反应等。

反应级数可以是整数，分数和零，甚至是负值。简单反应的级数一般为正整数，复合反应的级数很复杂，甚至说不清。反应级数是重要的动力学参数，需由试验确定。

2.2.3 律速步骤和表观参数

某化学反应如按总化学方程式写出的质量作用定律，其反应级数与实验不符，即(2)式不成立，则此反应必为复合反应。如与实验结果相符，则有三种可能：一是反应是基元反应；二是反应为若干基元反应组成的复合反应，但其中某一反应步骤最慢，成为限制性环节，特称为**律速步骤**或控制步骤，而此步骤的反应级数刚好等于总的反应级数；三是反应由几步控制，而综合表现的反应级数刚好与总反应级数相等。后两种情况反应级数称为**表观反应级数**，其速率常数则称为**表观速率常数**。在此情况下，质量作用定律可推广应用。

复杂反应的反应级数一般不能直接由总化学方程式中的分子数来直接确定，其级数有可能是分数，个别情况也许是负值，甚至无级数可言。下表给出一些常用燃料的反应级数。

常用燃料	反应级数
煤油	2
轻油	1.5~2
重油	1
煤粉	1

2.3 简单反应

即一个基元反应，指的是一级、二级、三级和零级反应等，但某些复合反应也可能有简单级数。

(1) 一级反应 大多数的分解反应，如氯气的分解

(2) 二级反应 最常见，如： $2CO \rightarrow C + CO_2$ $Cl + Cl \rightarrow Cl_2$

(3) n 级反应 大于 3 级的反应很少，如 $2NO + O_2 \rightarrow 2NO_2$

2.4 复合反应

非基元反应是若干基元反应组成的反应，又称为复合反应或复杂反应。

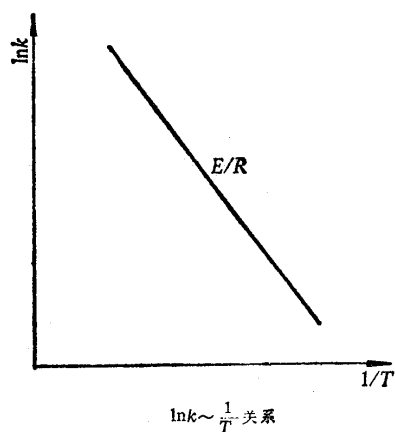
- (1) 可逆反应 $A \rightleftharpoons B$
- (2) 平行反应 $A \rightarrow B$ 同时 $A \rightarrow C$
- (3) 连串反应 $A \rightarrow B \rightarrow C$

2.5 反应速率与温度的关系

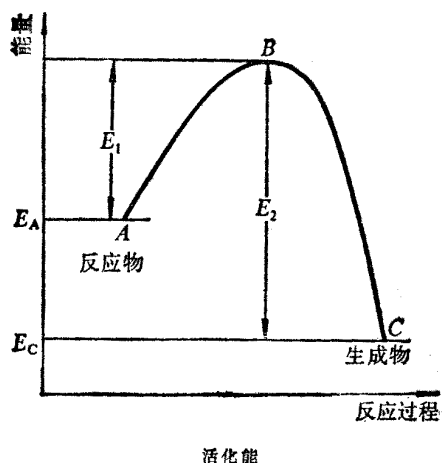
Arrhenius 定律

$$\text{速率常数 } k = Ae^{-E_a/RT} \quad \ln k = \ln A - \frac{E_a}{RT} \quad (\text{注意温度的取值范围不能太宽})$$

A——幂前因子，或频率因子； E_a/R ——温度系数； E_a ——为活化能(此值越小，反应速率越大)；R——通用气体常数；



插图：活化能的测定（斜率 $-E/R$ ）



插图：正、逆反应的活化能

从左→右：放热

从右→左：吸热

活化能的大小决定于二个因素：（1）分子间静电斥力；（2）结合键能

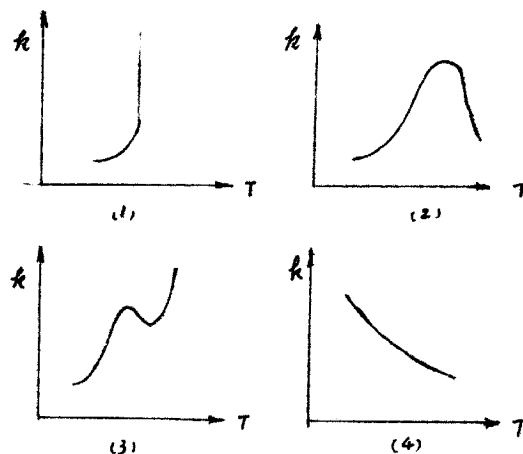


图 3.5-3 几种少见的 $k \sim T$ 曲线

化学反应中，速率常数 k 对温度 T 的关系不一定都符合阿累尼乌斯表达式。就目前所知的几种少见的 $k \sim T$ 曲线示于图 3.5-3。图中，（1）是有爆炸极限的反应，（2）是典型酶催化反应，（3）是某些烃类气相氧化反应，出现负温度系数区。（4）是反常的 $k \sim T$ 线，温度升高 k 减少，实例有 NO 氧化成 NO_2 的反应。

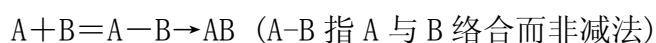
2.6 活化碰撞理论

反应速率正比于碰撞频率

2.7 活化络合物理论

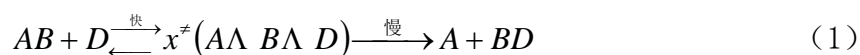
活化碰撞理论是从分子的整体出发，不考虑分子内部的电子和原子核的运动。

埃林 (H. Eyring) 等人提出活化络合物理论，又称过渡态理论。该理论以量子力学和统计力学为基础提供了一个由反应分子内部结构特性计算基元反应速率常数的近似方法。认为反应系统中分子互撞或互相接近，一旦产生过渡态的活化络合物，会很快达到平衡；活化络合物沿反应路径振动分解成产物，但反应较慢（律速步骤）。



势能面和反应路径

设基元反应为



其势能 $E = E(r_{AB}, r_{BD}, \theta)$

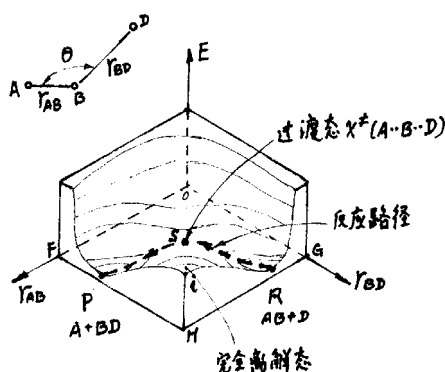


图 三原子系统，三维势能面， $\theta = \pi$

反应一般总是选择势能升高最小的路径进行，就像人们要越过起伏的高山时，总选山口处（两山头之间最低处）过去一样。最低势能路径并非实现反应的唯一路径，应该说是概率最大的反应路径。

2.8 压力对反应速率的影响

气相反应中，压力的影响实际上是浓度的影响

生成物分子数与反应物分子数

即系统的总分子数的变化，是增大还是减小

对一级反应， $n=1$ ，反应速率 r 与压力无关。对二级反应， $n=2$ ， $r \propto p$ 。 n 级反应， $r \propto p^{n-1}$ 。

2.9 链反应

所谓链式反应就是反应过程中，经历一系列中间反应，如自由原子或自由基组成的一连串的基元反应，最后形成终产物。引发——传播——终止三个阶段

2.9.1 直链反应

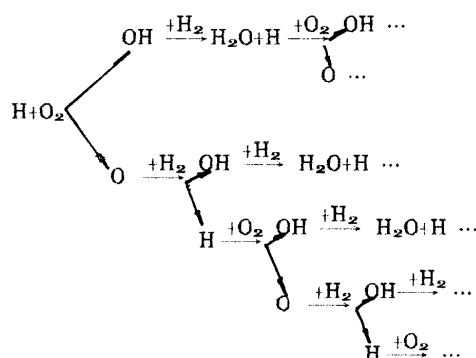
在链传播的每一步，每一个自由原子或自由基经反应后消失（消耗），而同时又新生一个（不多于一个）自由原子或自由基，并由它继续反应下去，这种链反应称为直链反应。没有分支

2.9.2 支链反应

支链反应有时也称燃烧或爆炸反应。它在链传播反应中，每一步基元反应产生的新自由原子或自由基数目比在反应中消耗的数目要多，从而使链传播过程形成如树枝发射形状

氢燃烧：放射状，爆炸

链传播图



CO 燃烧和甲烷的燃烧也为支链反应

2.9.3 链反应动力学

I：活化中心的销毁速度快于繁殖速度，渐近线， C^A ——生成物浓度

II：活化中心的销毁速度等于繁殖速度，着火不着火的分界线

III：活化中心的繁殖速度大于销毁速度，指数增长，称为反应的自加速。这是支

链反应的基本特征。

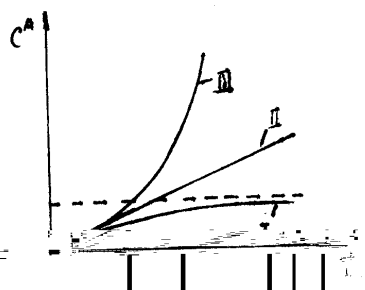


图 3.9-1 C^A 随时间的变化

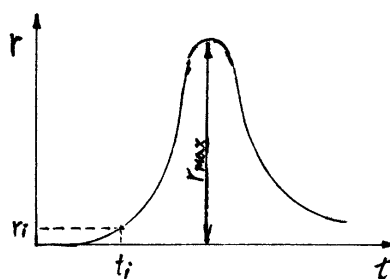


图 3.9-2 有限反应系统反应速率的变化(内燃机燃烧)

支链反应的最大速率: r_{\max} 反应速率最终因反应物浓度的剧烈下降而出现最大值后也逐渐下降。

$$\text{孕育期: } t_i \propto e^{\frac{E_a}{RT}} \quad (3.9-9)$$

温度升高, 孕育期大大缩短

2.9.4 爆炸反应

热爆炸: 热爆炸的起因主要是反应放热。反应速率 $r \propto e^{\frac{E_a}{RT}}$, 若反应系统中反应放出的热不能及时散出, 会引起温度升高, 温度升高又使反应速率进一步加速, 如此发展下去, 最后导致爆炸燃烧。

链爆炸: 由支链反应引起的

3 着火过程

3.1 着火的分类

按火源分: 压缩自燃

外源点火

按化学反应的性质分: 热式着火(反应放热大于散热)

链式着火(活化中心生成速度大于消失速度)

热—链式着火, 如柴油机

热式着火: 在外部供应一定能量(热和光等)条件下, 混合气反应生成的热量大大超过同一时间内散失的热量。这过剩的热量又使混合气温度提高和反应加速, 从而生成更多的热, 如此循环而最终达到很高的放热速率而着火。

链式着火: 前已讲到链式化学反应。其中存在链载体(自由原子或自由基等活化中心), 或支化物质, 而且链载体的生成速度超过其销毁速度。使反应速度随时间成指数增加。这种反应不断加速, 最终导致着火。即使在等温条件下也能着火。这种着火称为链式着火。链式着火是一种自催化着火。

按着火过程分: 高温单阶段着火, 中、低温多阶段着火

3.2 研究着火的方法

容弹法或定容容器法

绝热压缩法

快速压缩机

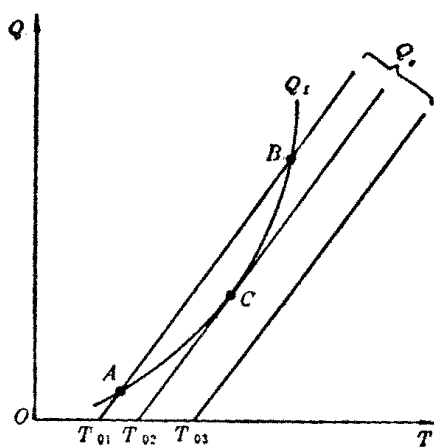
实机

激波管

3.3 热着火过程

热着火理论：

零维模型，强烈掺混模型，设混合气成分、温度、压力均匀



$Q_f \sim T$ 与 $Q_s \sim T$ 的变化

Q_1 为燃烧放热； Q_2 为容器散热(三种散热情况)；第一种情况：A—稳定，向左、向右均回到 A 点，熄灭状态；B—不稳定，向右着火，向左熄灭至 A 点；第二种情况：切点 C 也是不稳定的，向左能回到 C 点，向右则继续上升而着火， T_{02} 为着火温度；第三种情况：积热使混合气自动着火。

着火温度的影响因素：

1. 燃料活性强，具有低一些的着火温度
2. 散热条件加强时，着火温度提高
3. 可燃混合物压力升高，着火温度低一些

3.4 烃的着火特点

3.4.1 着火界限：

1. 温度界限：浓度一定时，温度越高，对压力的要求越低，

柴油机冷启动

2. 压力界限
- } 贫燃极限 }
- } 2 }

温度和压力越低，浓度着火范围越窄

3. 浓度界限：富燃极限

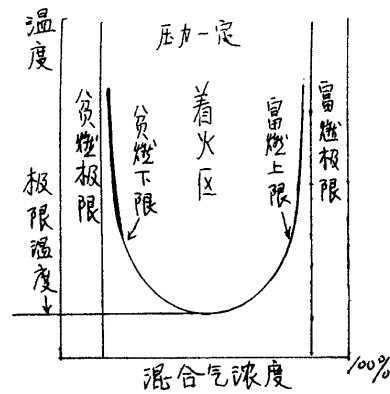


图 4.4-2 着火温度随浓度的变化

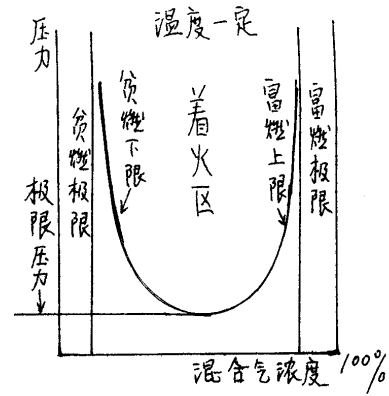
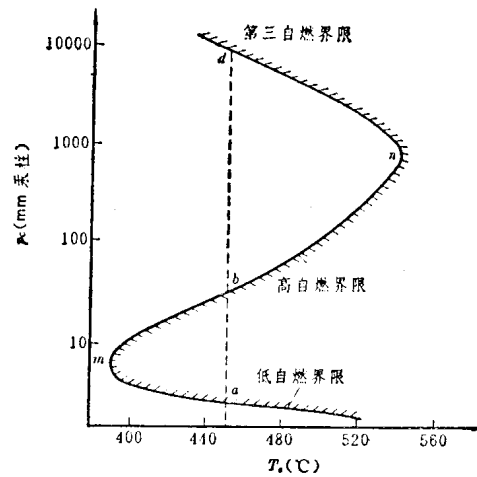


图 4.4-3 着火压力随浓度的变化

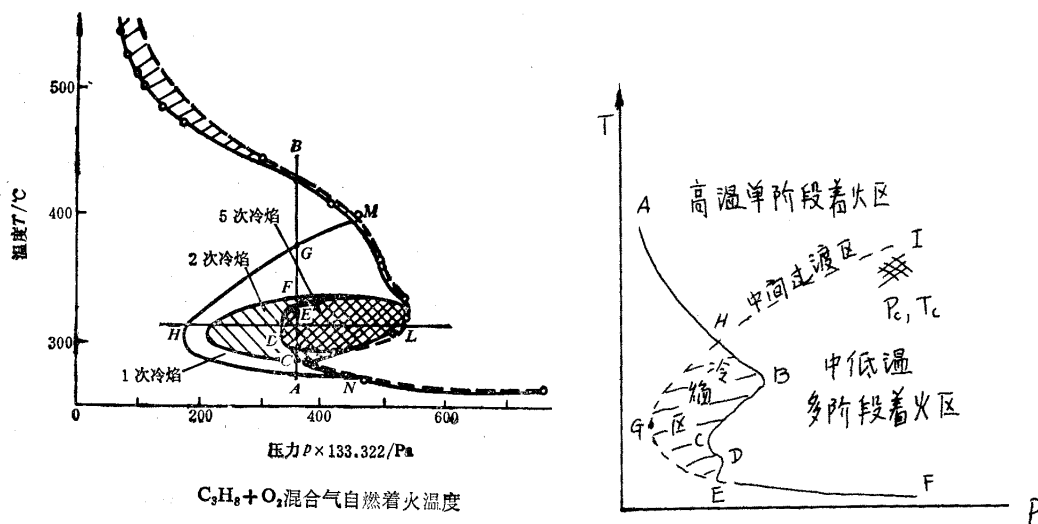
3. 4. 2 氢氧的着火界限



$H_2 + O_2$ 反应的自然着火界限

反 S 形，着火半岛，第一着火界限线，第二着火界限线，第三着火界限线
分为非着火区(左边)和着火爆炸区(右边)

3. 4. 3 烃类的着火界限



分为高温单阶段着火区、中间过渡区、中低温多阶段着火区、冷焰区

高温单阶段着火：高温条件下不经过冷焰过程直接进入蓝热焰的连续发展的热链反应

中低温多阶段着火：着火过程经历冷焰、蓝焰和热焰三个阶段，柴油机（非强化）按此三个阶段进行

3.4.4 烃类的三阶段和单阶段着火过程

冷焰：主要生成甲醛，放热 5~15%

淡绿色荧光来源于激发态的甲醛

蓝热焰：生成醛基 HCO，淡蓝色辉光，最终生成物为 CO，时间短

热焰：热量和活性分子自积累，反应速度自加速，形成爆炸性燃烧，自由基 C_2 和 CH 发出较强光线，最终生成 CO_2

3.5 均质混合气自燃的发展

自燃的发生和发展的三种典型方式

1. 点源式着火
2. 空间式着火，爆炸
3. 混合式着火（包括 1 和 2）

3.6 液体燃料喷雾的着火

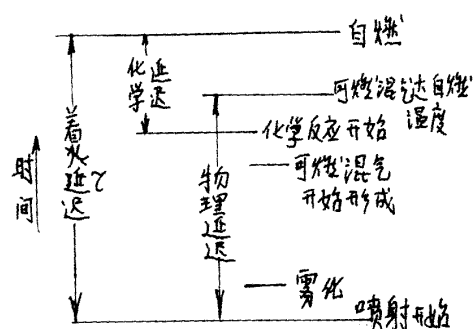
物理延迟和化学延迟

通过喷嘴将液体燃料喷入炽热的空气内，从喷入开始到发生着火要经历非常复杂的动量、质量和热量的交换过程。首先是燃料与高密度的热空气的撞击、撕裂、破碎、雾化、吸热气化，卷吸空气并与空气(氛围气)掺混、扩散等物理过程的进行；同时，在燃料蒸发、扩散并与空气混合时就开始了着火前的化学准备过程，直到达到着火的程度。从燃油喷入热空气到着火发生的瞬间为止的时间称为燃料喷雾的着火延迟期。

着火延迟期(ms 级): 物理延迟——时间较长(柴油机中)

化学延迟

温度高时: 物理延迟其占比例较大; 温度低时: 化学延迟期占比例较大



(1) 空气静止时: 在 α 小于 1 的较浓的混合气内焰前反应发展的较快, 过浓则温度太低对着火不利, 过稀则浓度条件不利。因此第一个火核通常发生在雾注的外表面附近, 独立的火核数一般不多。

(2) 空气有扰动时: 火核数较多

(3) 有涡流时: 初火核的位置大体上在外缘区附近。那里浓度、温度等条件较适于首先形成火核。

3.7 电火花点火

希望点燃, 如发动机中

不希望点燃的场合, 如矿井

电火花的分类: 高压火花, 狭义火花

低压火花, 电弧

从另一角度: 电容火花

电感火花——内燃机中较普遍

电极间的火花通道上可达 10000 度, 气体产生热离解和电离, 使混合气燃烧生成足够的热量以继续燃烧

影响临界点火能量 Q 的因素: 压力, 压力减小, 则 Q 需要增加

浓度, 浓度小, Q 大, 太小则无法点燃

流速, 流速大, Q 上升, 接近静止时 Q 也大(电极冷却)

混合气种类及其自身特性

火花点火的传播方式: 静止混合气内为球形火焰

4 预混火焰传播的基础知识

4.1 概述

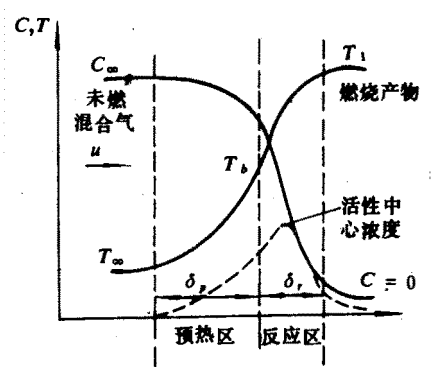


火焰传播分为：爆炸波：冲击波，有压差、大于音速（注意爆炸与爆炸燃烧的区别）

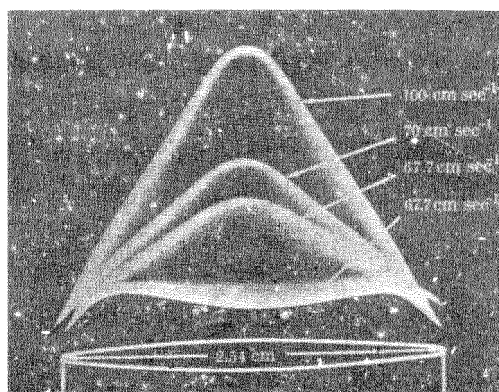
燃烧波：远比音速低，压差可以忽略

定置火焰——进行火焰

层流燃烧——湍流燃烧



层流火焰结构



预混合火焰锥体

火焰传播速度用燃烧速度表示

定义：火焰侵入未燃气体的速度在垂直火焰面上的分量

4.2 燃烧速度的测定

1. 玻璃管法：简单，但不太准确（因为未考虑火焰面前后的压差，而且层流的火焰实际上并不是规则的平面）

开口端点火 → 燃烧速度的区别
闭口端点火

2. 喷灯定置火焰法

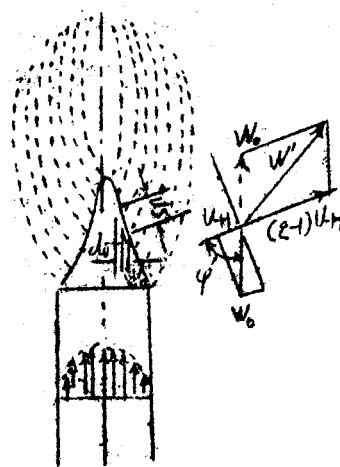
$$\cos \varphi = \frac{u_H}{w_0}$$

w_0 — 为某点的混合气速度

φ — 为火焰倾角

因管内层流流速的分布近似于抛物线，0.7R 处的速度等于管内平均速度 $\overline{w_0}$ ，则测出 0.7R 处的 φ 值 (φ')，

则法向燃烧速度：



$$u_H = \overline{w_0} \cos \varphi'$$

3. 球状火焰：定压：肥皂泡

定容：容器中

4. 湍流燃烧速度（平均面上）的测定：喷灯

4.3 层流火焰传播原理

两个理论：

火焰传播的热理论：认为传热速度是火焰传播的决定性因素——应用广泛

火焰传播的扩散理论：活化中心的扩散过程

根据热理论推导出： $u_H = C\sqrt{aw_{\max}}$ C—常数；a—导温系数； w_{\max} —最大反应速度

4.4 各种因素对法向火焰传播速度的影响

主要用上面的公式推导出结论，各种因素对导温系数和最大反应速度的影响来分析

1. 混合气组成和浓度的影响

过量空气系数为 1 时，汽油的浓度较小，对导温系数的影响可以忽略，因此主要过量空气系数对反应速度的影响，钟形曲线，存在一个最大火焰传播速度，如右图所示

临界熄火直径或缝隙：矿工安全灯

未燃混合气

2. 压力和温度的影响（对层流火焰）

(1) $w_{\max} \propto p^{n-1}$ (n 为反应级数) 压力对最大反应速度的影响，如烃—空气混合气随压力升高，层流火焰传播速度降低。

(2) $a = \frac{\lambda}{C_p \rho}$ 压力对密度有影响，从而影响导温系数

(3) 温度升高，最大反应速度增大

4.5 湍流燃烧

燃烧速率对内燃机的影响：如一台现代汽车发动机的转速为 6000 转/分，此时燃烧过程持续的时间不到 1.1 毫秒，如果火焰从火花塞点火处传播到燃烧室末端的路程为 80 毫米，那么火焰的传播速度约为 72 米/秒，此数值比层流火焰的传播速度约提高 60~70 倍。

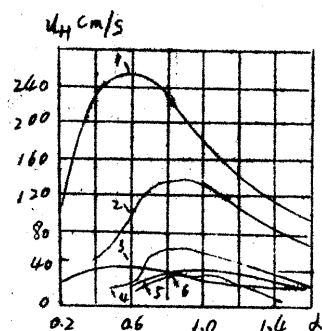


图 (5-4-1) $u_H \sim f(\alpha)$

P = 760 mm Hg

1. 氢, 2. 乙炔, 3. CO

4. 乙烯, 5. 丙烷, 6. 甲烷

湍流燃烧分三种情况：

(1) 小标度湍动，火焰传播例子较少

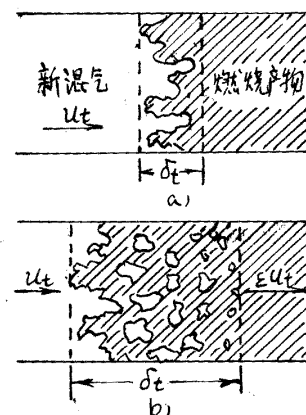
$$u_t = \text{常数} \times \sqrt{(a + a_t)w} \quad a_t - \text{湍动迁移引起的折算导温系数}$$

(2) 大标度（尺度）的弱湍流，火焰面有剧烈的弯曲

在很弱的湍动时， u_t 接近于 u_{cl} 。

(3) 在强湍流下，火焰区内零碎地分布着大量的独立火核 $u_t \approx \sqrt{u'^2}$

火焰传播速度与脉动速度的均方根成正比，与可燃气的物理—化学特性无关



湍流火焰

a - 弱湍动；b - 强湍动^[1]

P5.19 页上：注意标度（尺度）大小和湍流强弱的区别

温度、压力对湍流和层流的火焰传播速度的影响：

	温度的影响	压力的影响
湍流火焰速度	$u_t \propto e^{\frac{-E}{RT_h}}$ 温度增加，速度增加	$u_t \propto p^n$ 烃—空气混合物 $n = 0.3 \sim 0.5$ 压力增加，速度增加
层流火焰速度	$u_{cl} \propto e^{\frac{-E}{2RT_h}} \text{ (平方根)}$ 温度增加，速度较慢增加	$u_{cl} \propto p^{-m}$ 压力增加，速度减小 $m = 0.3 \sim 0.4$

温度、压力对湍流和层流的火焰传播速度的影响不同的原因：

对层流火焰传播：分子和活化中心的扩散，与可燃气的理化性质有关，反映在导温系数上

对于湍流燃烧：靠湍动速度将燃气团抛到新的混合气内进行燃烧，基本上与可燃气的物化特性无关。

5 扩散燃烧

5.1 扩散燃烧

象柴油机，其燃烧速度基本上决定于燃料与氧气的互相扩散速度，故称扩散燃烧

5.1.1 层流扩散火焰和湍流扩散火焰

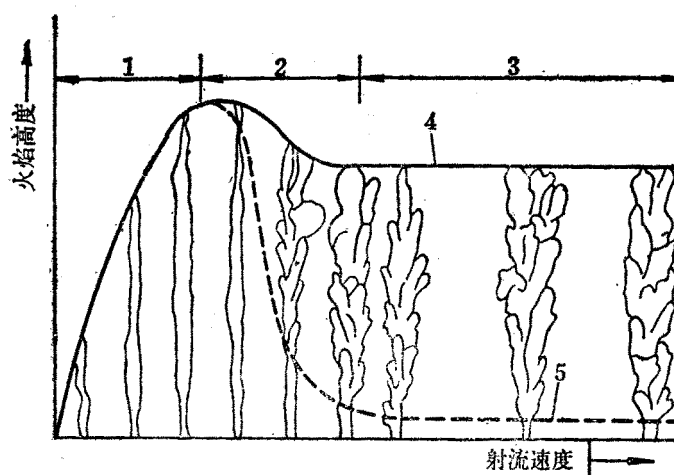


图4-3 射流速度对火焰的影响

1-层流火焰区 2-过渡火焰区 3-充分发展的湍流火焰区
4-火焰高度包络线 5-破裂点包络线

随着喷流速度的增大：（层流）火焰边界稳定、光滑，燃烧安静

层流

——火焰高度增大

过渡区

——顶端边界散开，高度缩短

湍流

——火焰高度与喷流速度无关，保持恒定，边界完全分散，噪音

——火焰离开管口，称悬浮火焰

——吹灭

5.1.2 湍流扩散火焰

扩散火焰燃烧时间不只靠增加湍流流动速度，也要减小它的尺度，且后一因素的影响大。

由于发动机燃烧室内充量的涡流速度的增长与曲轴转速大体成比例，所以扩散燃烧的相位周期以曲轴转角表示时与转速关系不大

5.1.3 湍流扩散燃烧机理

假想模型：（1）微小的层流扩散火焰的集合体

（2）ESCIMO 模型

Engulfment (卷吞)—Stretching (拉伸)—Coherence (粘附)—

5.2 油滴燃烧

5.2.1 试验方法：(1) 油滴下落（无重力油滴燃烧）

(2) 吊在耐火线上

(3) 从多孔小球中渗出

定常、非定常；球状火焰；强制对流、自然对流

d^2 —表面积

d^2 定律：燃尽时间与 d^2 成正比

燃烧速度取决于蒸发混合的速度

油滴的燃烧过程：(1) 受热膨胀

(2) 蒸发旺期

(3) 油滴升温

(4) 蒸发期

(5) 发生着火

(6) 形成准定常燃烧

5.2.2 周围条件对油滴燃烧的影响：

(1) 压力的影响

燃烧率以及蒸发系数大体上与绝对压力的 n 次方成正比（因为油滴表面与燃烧区距离缩短）

(2) 温度的影响

随着温度的上升，蒸发系数增大

(3) 周围氧的浓度的影响

随着氧的浓度的增大，蒸发系数也增大

(4) 周围空气的振动

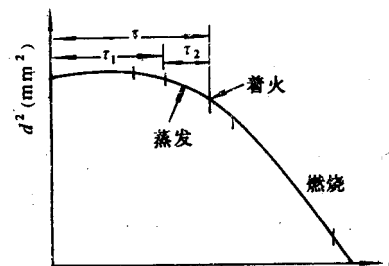
空气发生振动时，将使蒸发系数增大

5.2.3 油滴周围的浓度和温度分布

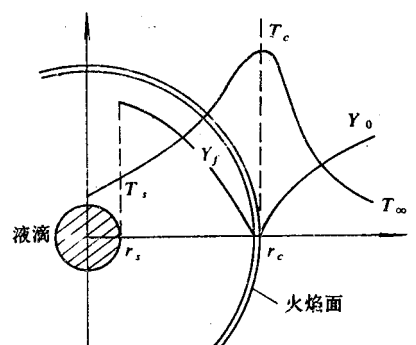
见图

5.2.4 油滴的燃烧的理论分析

1. 无重力场中的自由油滴的燃烧

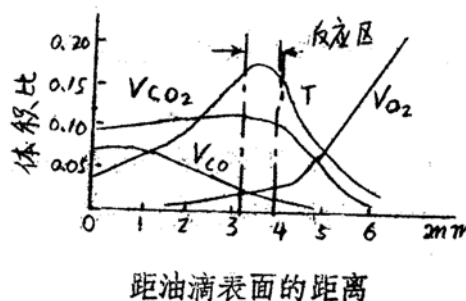
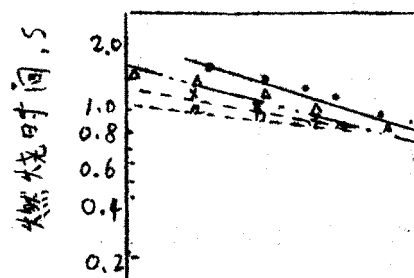


油滴直径随时间的变化



油滴燃烧模型

(o-氧气, f-fuel)



2. 油滴燃烧的理论分析(方程)

假设：(1) 油滴呈球形；(2) 忽略对流影响，火焰面和油滴表面为同心圆；(3) 火焰为扩散火焰，燃料与空气按理论混合比反应，反应速度无穷大，火焰锋面厚度趋于 0，火焰面为球面；

(4) 油滴直径一定，并处于定常状态；(5) 油滴的温度均匀一致，沸点为常数；(6) 燃烧过程压力不变；(7) 不考虑辐射热；(8) 物性值对温度的平均值一定；(9) 气相的物性值，定压比热、导热系数、扩散系数、比重与浓度、温度无关并一定，刘易斯数设为 1

(自己推导)

5.2.5 对流对油滴燃烧的影响

1. 自然对流：常压下，对流强度对蒸发系数的影响不大，火焰呈不对称的长椭圆形

2. 强迫对流：蒸发系数随上升空气速度的增大而增大，环形漂浮火焰—吹灭

5.2.6 油滴的非定常燃烧：油滴燃烧实际上不是定常的 研究成果少，有待探讨

5.3 燃料雾的燃烧

5.3.1 燃料雾的燃烧非常复杂，本质仍是油滴——燃料蒸汽——空气混合物的燃烧

液体燃料直接以液相进行燃烧是没有的，必须由气化开始燃烧

喷雾增加了燃料表面积和体积之比

油滴燃尽的时间与油滴直径的平方成正比

5.3.2 油滴群的燃烧

1. 燃烧形式

油滴群

气体燃料 ←—— 小 粒径 大 →—— 单独考虑，球扩散火焰

2. 油滴群的燃烧速度 (K—蒸发系数)

小

油滴群

K 下降 ←—— K 上升 ←—— 小 间距 大 →—— 单油滴式

供氧不足，相互热源

3. 油滴的阻力系数 (对确定油滴的运动非常重要，它与许多因素有关)

液滴的阻力系数 C_D^* ，固体球 C_D

$$C_D^*(1+B) = C_D$$

B—物质流动强度的参数，燃烧和非燃烧状态时 B 不同

4. 油滴群中的火焰传播

分类：预混火焰传播，小粒径，类似气体燃料预混

不连续火焰传播（火炬接力式），粒径大

5.3.3 喷雾燃烧

1. 将二相流假设为单相射流，宏观上解决一些问题，微观上并不符合液相射流，稀薄还是密集？稀薄喷雾的 DDM 模型

2. 喷雾燃烧

其机理与湍流扩散燃烧的机理一致

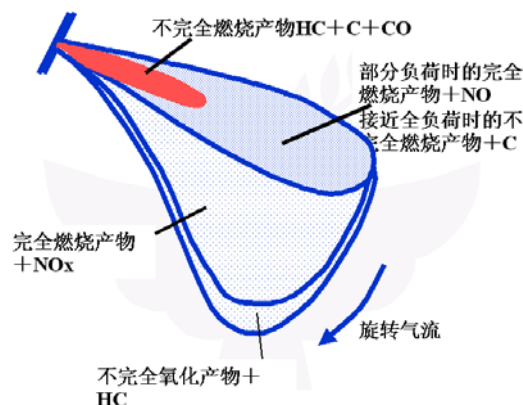
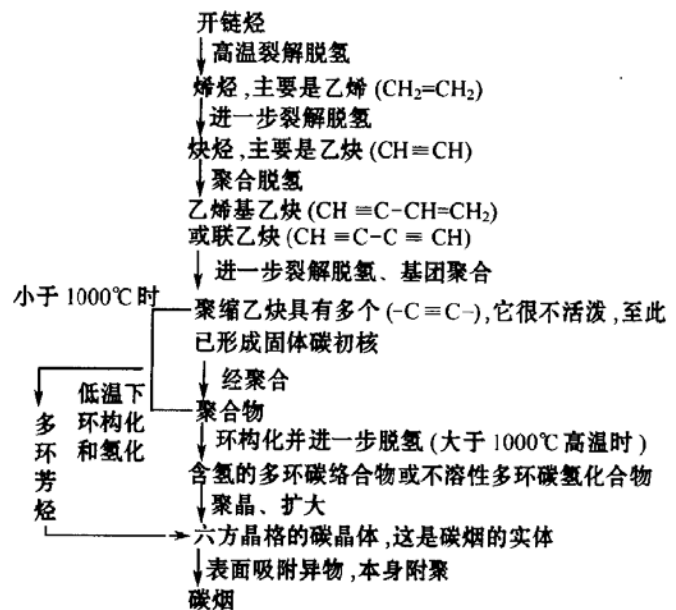
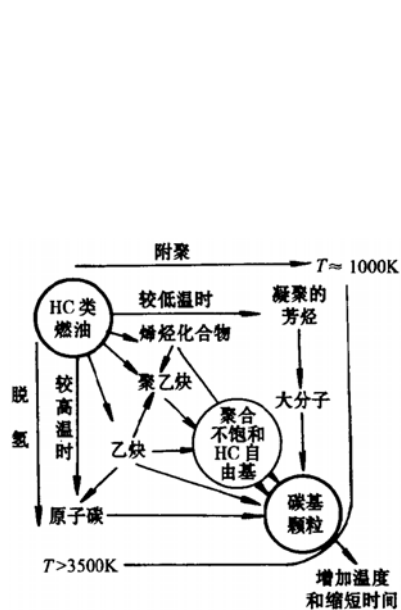
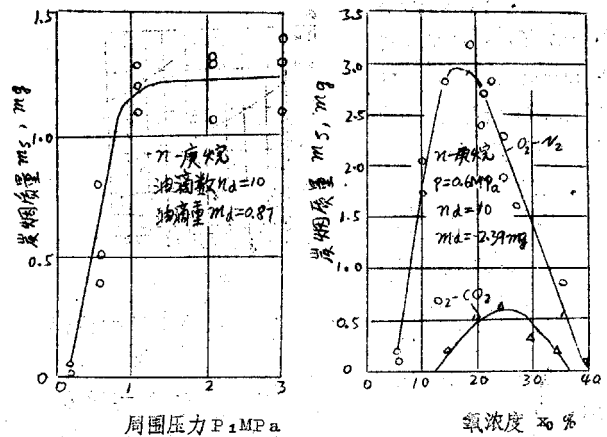
5.4 有害成分生成机理

1. 炭烟的生成

扩散火焰的严重缺点（气体燃料的扩散火焰也存在）

在高压下，均匀混合气燃烧时也能产生黑烟

- (1) CO 和 H_2 缺氧
- (2) 油(滴)热裂解（无氧时）



热混合作用

有旋流场合，油滴重向外侧飞，燃烧生成物轻向内运动，将中心新鲜空气向外挤，已燃、未燃分开，促进混合，叫热混合

2. NO_x 的生成机理

6 内燃机的燃烧模型

按模型的维数分：零维模型：热力学模型或单区模型

准维：卷入模型或多区模型

多维：精细模型

零维模型是以热力学第一定律为基础，把整个气缸内视为均匀场，不考虑所研究参数随空间位置的变化，其控制方程是以时间为唯一自变量的常微分方程，燃料燃烧率是从实验中获得。

准维模型对空间做分区处理，从而能在一定程度上反映缸内参数随空间的变化。以上两种模型对流动信息的反映很少。

在多维模型中，各控制偏微分守恒方程，与描述湍流过程、化学过程、边界层过程等相应的子模型一起，针对适当的边界条件，用数值方法求解。它可提供缸内气体速度、温度和组分等在燃烧室内的空间分布的详细信息。

按物理过程分：流动模型，喷雾模型，燃烧模型以及其子模型等

模拟的工作程序：（1）问题的提出，（2）建立物理模型，（3）建立数学模型，（4）编程计算。

数值模拟(或叫仿真)的作用：（1）计算可获取缸内过程的大量数据和方便地进行发动机试运转的模拟及燃烧系统的匹配，确定较佳匹配参数，可以大大减少新机型开发的试验工作量，节约人力、物力和时间；（2）通过分析计算，对现有机型存在的问题进行分析，提出改进方向；（3）对缸内燃烧性能参数、指示指标和有害排放物进行预测；（4）对缸内主要参数的场量变化进行分析，并为燃烧室周边零部件的设计提供边界条件数据；（5）为动力传动综合仿真提供动力模块。

发动机多维仿真技术已成为分析缸内流动、燃烧过程的实用而有效的工具，已直接参与内燃机研究和工程实践中，成为内燃机研究和设计的有力工具。如美国的 KIVA 系列程序已经进入发动机的制造厂家，说明其计算的准确性、实用性以及功效已得到认可。

KIVA 系列程序介绍

多维模型中最具代表性的工作过程模拟计算程序是美国 Los Alamos 国家实验室的研究者们开发出来的 KIVA 系列程序。除此之外，还有 RPM，PHOENICS 等。

KIVA 系列程序包括 KIVA、KIVA 改¹、KIVA-II、KIVA-3、KIVA-3V 等。

在 KIVA 程序之前，Los Alamos 国家实验室的研究者们就在这一领域做了大量工作。如 YAQUI、RICE、BAAL、CONCHAS、APACHE、SALE、SALE 3-D、CONCHAS-SPRAY 等等。从纯流体力学问题到带燃油喷雾的化学反应流问题，模型逐步复杂和完善。另外在计算流体力学和数学方法方面也取得了长足的进步，如 Hirt 等人提出的 ALE(Arbitrary Lagrangian-Euler)方法是求解控制流体运动方程的通用算法。它的网格可随活塞按规定速度运动，网格单元可以是任意多边形。这两个特点使该方法特别适用于求解发动机缸内的流动问题。同时计算机工业日新月异的发展和数值方法的提高也为 KIVA 系列程序的发展创造了条件。

下面简要介绍一下 KIVA 系列程序的发展过程：

1985 年，KIVA 程序发表，它基本上是二维程序 CONCHAS-SPRAY 的一个三维变形，用来求解二维或三维的非定常多元化学反应流及蒸发液体射流问题。它的数值求解方法具有普遍性，即可以用于层流或湍流，亚音速或超音速流，单相流或扩散两相流，可以有任意数目的物质和化学反应。除具有 CONCHAS-SPRAY 的基本功能外，KIVA 还有以下特点：(1)KIVA 使用声学子循环方法(Acoustic-subcycling Method)在低马赫数流动计算时提高了效率，代替了 CONCHAS-SPRAY 中的压力迭代方法。(2)湍流模型在亚网格尺度(SGS)单方程模型基础上加入了 $k-\epsilon$ 双方程模型，用来计算与亚网格尺度相联系的湍流动能。(3)在 CONCHAS-SPRAY 喷射模型的基础上，KIVA 又增加了油粒碰撞和聚合子模型。(4)KIVA 程序利用了大型计算机上的矢量计算功能。KIVA 源程序用 FORTRAN 77 语言编写，起初是在 Cray 巨型 64 位计算机上运行。目前已有不少地方将其非矢量化和微机化了。

KIVA-II 于 1989 年公布，它在计算效率、数值精确性、使用的简便性和通用性方面又有了新的提高。使用了改进的 $k-\epsilon$ 湍流模型，并增加了油粒气体动力学破裂模型，即 TAB(Taylor Analogy Breakup)模型。

KIVA-3 于 1993 年公布，它与 KIVA-II 的不同是采用块结构网格(Block)。因此它在模拟复杂几何形状时具有更高的效率。另外 KIVA-3 还使用了一个叫 Snapper 的新方法，允许活塞越过缸壁上的气口。至此 KIVA 可以模拟完整的发动机工作循环，涉及气体流动、喷油、传热、燃烧和排放物的生成等。

KIVA-3V 是 KIVA-3 的改进版，于 1997 年 2 月完成。最显著的特点是 KIVA-3V 增加了扩展 Hessel 气阀模型，可以处理气阀的运动和阀口的流动，气阀可以有各自的升程曲线，气阀可以垂直或倾斜一个角度。气阀进入活塞顶的避阀坑的情况也可以处理。KIVA-3V 的另一特点是增加了油膜流动模型，这扩展了 KIVA-3 中的气道喷油和缸内喷油时考虑与壁面相互作用的情况，它包括喷油附壁、溅射、任意复杂壁面上油膜在空气动力学效应下的流动和油膜重新进入气流时的热量与质量的交换。

KIVA-3V 还增加了混合控制的湍流燃烧模型和碳烟模型。同时可选择 RNG $k-\epsilon$ 湍流模型和标准 $k-\epsilon$ 模型。导热壁面定律模型已被改进，使计算结果与实验结果更一致了。另外在计算方法上，初始网格的自动生成和数据的输入、输出上都有了较大改进。

目前，人们对喷油的碰壁(Impingement)过程产生了浓厚兴趣，从试验测试和模拟计算等方面对柴油和汽油喷射(GDI)的碰壁过程中的粘着(Stick)、反弹(Rebound)、涂展(Spread)、溅射(Splash)、壁射流(Wall Jet)，以及油膜(Film)的形成、流动和蒸发等子过程进行了广泛的研究。包括在水平平面或倾斜面、冷态或被加热的壁面上的碰壁过程。其中许多是利用 KIVA 系列程序作平台进行的。

八十年代，美国麻省理工学院的 J.B.Heywood 曾就当时的多维模拟状况发表看法，认为多维模型是探索性和解说性的，多维模型最有用之处，与其说是进行广泛的定量的变参数研究，不如说是对决定内燃机运行特性很重要的内燃机内部过程细节进行详尽的定性研究以获得更好的概念上的理解。但 KIVA 程序发展到今天，一步步地改变了这一境况，多维模拟技术已成为分析缸内流动、燃烧过程的实用而有效的工具，使得多维模拟与内燃机研究和工程实践越来越靠近了，它正在成为内燃机研究和设计的有力工具。

KIVA 系列程序的快速发展也不仅在 Los Alamos 实验室或 Wisconsin-Madison 大学中，各国的科研人员已经加入进来。它的许多成熟模型已经加到商业软件中。

第二部分 汽油机燃烧与控制

1 正常燃烧

上止点前 12~15 度点燃，上止点后结束（活塞下移），最大爆发压力（最大燃烧压力）应处于上止点后 12~15 度范围内

发展：由于降低排放的需要，推迟点火，使 P_{max} 点后移

1.1 测试装置

- (1) 缸盖上开石英玻璃窗
- (2) 加长活塞——底面拍照
- (3) 单次循环压缩机

1.2 燃烧过程分期

初燃期：占 10% 小尺度湍流燃烧

主燃期：占 85% 中燃期 大尺度湍流燃烧，燃烧速度与混合气理化性质无关

末燃期：占 5% 燃尽期 小尺度湍流燃烧

发动机内的湍流强度可以看成与转速成正比：影响燃烧速度

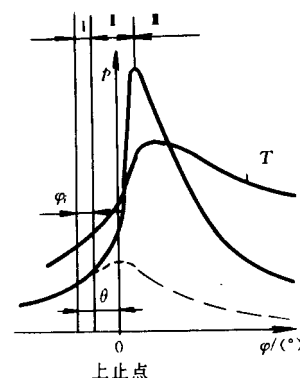
度，因此转速高，所给的燃烧时间短，但也能烧完，高低速时主燃期对应曲轴转角变化不大。

初燃期长度 θ_1 ，如以曲轴转角表示，基本上决定于混气形成、温度和压力等因素对火焰法向速度的影响。初燃期的增长大约与发动机曲轴转角的平方根成正比，即 $\theta_1 \approx u_H n^{0.5}$ 。

主燃期的燃烧速度服从大尺度湍流燃烧规律，与混气的物理、化学特性基本无关，实际上几乎只决定于强湍流的脉动速度。当其它条件相等时，发动机内的湍流强度可以看成与转速成正比，那么主燃期内火焰传播速度也随转速成正比。如果主燃期以曲轴转角来表示，则其火焰传播速度几乎成为与转速无关。但是，这一结论是有条件的，因为转速上升湍流增加，将使初燃期增加，因为初燃期与湍流强度与混气成分有关，由于初燃期的增加使主燃期初始点后移，因而引起主燃期的变化。因此，前面结论只是当点火提前角可以调整使得主燃期初始点保持不动时才是正确的。

火焰面接近活塞顶和燃烧室壁面时，湍流脉动尺度和速度显著地下降，因此相应地火焰传播速度也相应减少，其结果是在末燃期也和初燃期一样，重新服从小尺度湍流燃烧规律，其速度基本上决定于可燃混气的物——化性质。同样决定于混气的物——化性质的还有湍流火焰锋面内的单个微团的烧尽速度。随着发动机转速的增加火焰传播速度也增加，并导致湍流燃烧区的加宽，烧尽过程延长。因此，高速发动机内末燃期可能在相当多的一部分工质内进行，甚至燃烧过程显著地拖长到膨胀冲程内，这就减少了燃烧放热的利用率。

示功图和压缩线的“脱离点”为初燃期、主燃期的分界点



中期和末期的分界点为最大压力点

汽油机内有无着火延迟期？有些书上对燃烧过程的划分为：（1）着火延迟期 Ignition Lag 滞燃期 Delay Period –火花塞跳火到火焰中心出现（2）速燃期（3）后燃期

1.3 火焰传播和压力上升

点火位置不同，压力上升曲线不同，与火焰传播有关

火花塞的位置：应使火焰传播距离最小

放置 2 个火花塞：显著改善输出功率和效率

燃烧室形状：扁平燃烧室差，因为火焰面小

1.4 燃烧气体中的温度梯度和气体的移动

马赫效应：先烧和后烧区温度差别较大，先烧区温度高

火花塞附近温度要高 250 度以上，故需加强冷却，以免烧坏及热面点火

1.5 影响火焰传播的各种因素

1. 湍流的影响

湍流过强，增加壁面散热损失，火核易被吹散

涡流也不能过大

2. 转速的影响

如点火提前角不变，转速增加，压力线后移，压升率和最大压力下降

随转速的提高，点火提前角应该增大，主要是对初期和末期的影响，对主燃期基本上没有影响。

3. 混合气成分的影响

用点火定时来补偿初燃期时间的增加

4. 点火时间的影响

过早点火：初燃期长（因压力低），最高压力和散热损失大

过迟点火：主燃期长（湍流小，室容积大），后燃严重，排气系统过热，效率功率降低

5. 压力的影响：压缩比上升或下降 1，火焰速度上升或下降 1.5m/s

6. 温度的影响：温度上升，火焰速度略有降低

7. 残余气体的影响：火焰速度降低 (EGR)

1.6 燃烧过程热量利用

热量利用系数

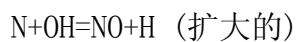
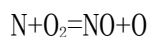
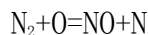
(1) 完全燃烧；(2) 放热及时；(3) 燃烧产物的膨胀比

1.7 有害成分的生成

1. NO_x 的生成（主要是 NO）

（1）热 NO 生成机理

Zeldovich 机理

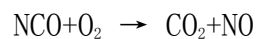
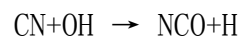
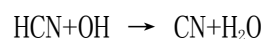
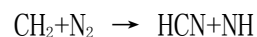


$$\frac{d[\text{NO}]}{dt} = 2k_1[\text{O}] \cdot [\text{N}_2]$$

温度高：O 原子浓度高， k_1 大

（2）急速 NO 生成机理

解释低温下 NO 生成，但量不多



（3）燃料 NO 的生成机理

燃料中有 N 的情况

（4）由 NO₂ 生成 NO

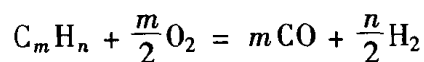
温度——氧——时间

2. CO 的生成

CO 的排出浓度决定于反应速度，当量比对其有支配性影响

二次空气可使之氧化

燃料的不完全燃烧：



经过一系列的中间过程：

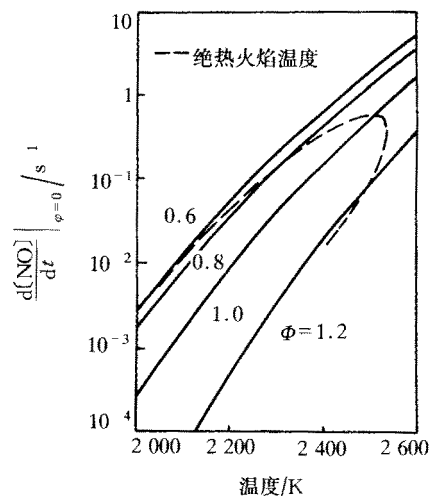
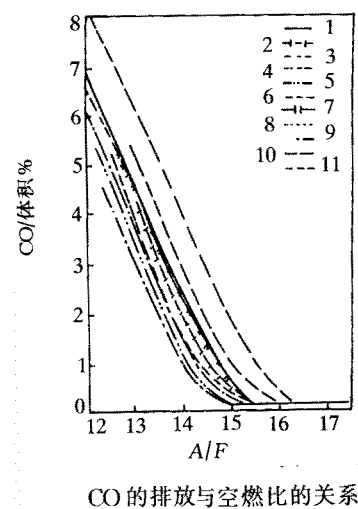


图 11.5 NO 的起始生成速率(质量分数/s)与温度和当量比 ϕ 的关系^[1]



CO 的排放与空燃比的关系



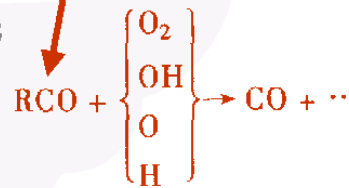
式中: RH——烃燃料分子;

R——烷基;

RO₂——过氧烷基;

RCHO——醛;

RCO——酰基。



在内燃机膨胀过程中, 只要氧化活化基 OH 供应充分, 高温下形成的 CO 在温度下降时仍能很快转变为 CO₂。然而在**供氧不足**的浓混合气情况下, 由于 OH 基被 H 夺走而束缚在 H₂O 中, 高温下形成的 CO 就会留在燃气中而最终排出发动机外。

CO 排出浓度基本上受**空燃比**所支配。当混合气过浓, 即 A / F 在理论空燃比以下时, 随着 A / F 的减小, CO 浓度上升很快。

空燃比增加, CO 排放减少;

减少不到 **0**, 混合气或燃烧室部位造成的局部混合不均匀;

高温促使 CO₂ 分解;

排气中的 H₂ 为强还原剂, 促使 CO₂ 分解

3. 未燃 CH 的生成

(1) 冷燃烧室壁面附近的火焰的淬灭

(2) 火焰传播不充分和断火可以引起汽油机排气中 HC 的显著上升。(3) 余隙效应

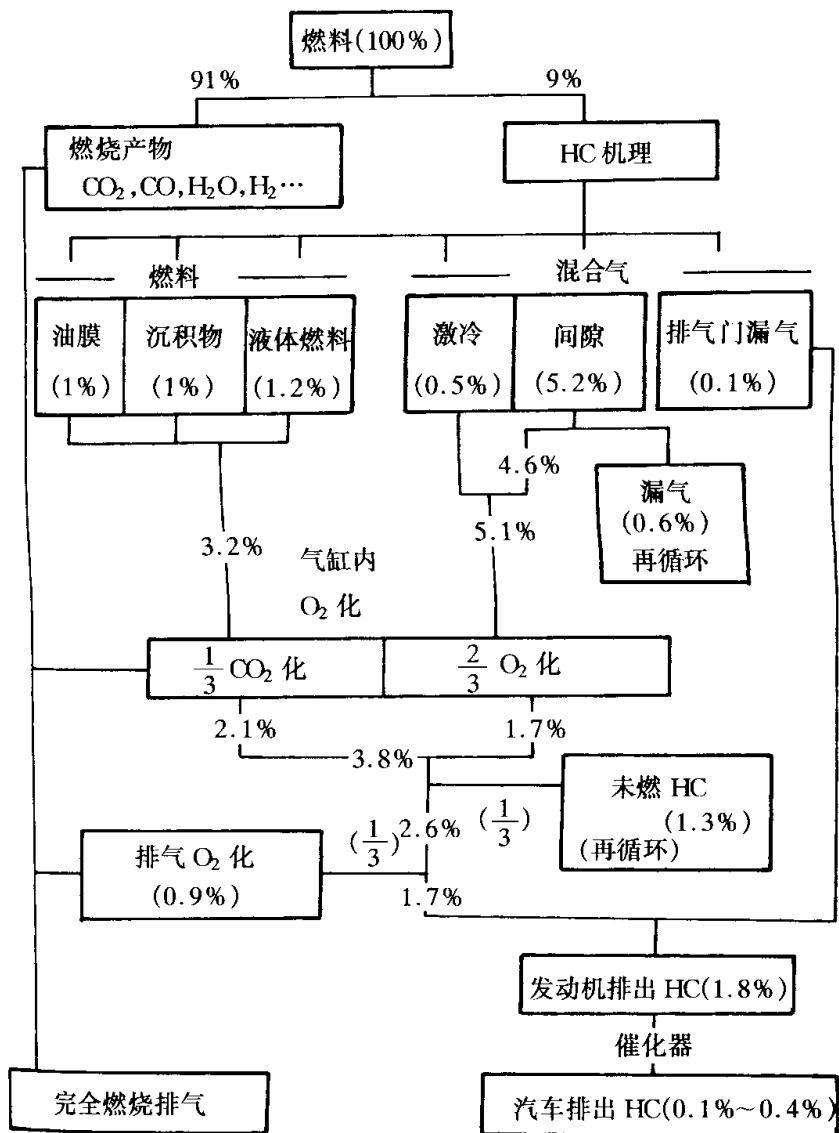


图11.31 进气道电控喷射火花点火式发动机正常工况下的未燃碳氢排放流程图^[16]

燃烧室的面积容积比大，CH 浓度高

初始压力高，CH 少

2 各循环间燃烧的变动

注意各缸不均匀性和各循环间变动的区别

燃烧循环变动是汽油机燃烧过程的一大特征。定义：发动机以某一工况稳定运转时，循环间燃烧过程的不断变化，具体表现在压力曲线、火焰传播情况以及发动机功率输出均不相同。

2.1 循环变动带来的问题

- (1) 发动机的点火提前角、空燃比是根据“平均”循环确定的，对绝大部分循环不是最佳值，发动机的压缩比和燃料的辛烷值是根据最倾向于敲缸循环的要

求确定的，因此只有减少循环变动，才有可能获得最佳性能；

(2) 导致较高的排气污染；

(3) 平均指示压力和输出扭矩的变化导致操纵性恶化；

表征燃烧循环变动的参数之一：

$$\text{平均指示压力变动系数} = \frac{\sigma p_i}{\bar{p}_i}$$

$$\text{平均指示压力的标准偏差 } \sigma p_i = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (p_{ij} - \bar{p}_i)^2}$$

$$\text{平均指示压力的平均值 } \bar{p}_i = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m p_{ij}$$

p_{ij} 为 j 循环的平均指示压力 (MPa)，m 为循环数。

一般认为平均指示压力变动系数超过 10%，会导致车辆操纵性能的恶化，是不可接受的。

导致循环变动的主要原因：

(1) 缸内流动的变动；尤其是湍流强度的循环变动，火花点火后火焰中心的轨迹以及火焰的起始成长率均随气流速度的大小和方向改变，其后的燃烧同样收到流动的影响。较强的进气涡流可以使火花塞附近的速度脉动变小，可以增加燃烧速率，减小循环变动。

(2) 混合气成分由于空气、燃料、EGR 和残余废气之间混合情况的变动
正常燃烧情况下也存在。

2.2 影响变动的因素

1. 混合气组分的影响，过浓或过稀混合气均使变动增大，理论空燃比附近火焰速度最高，变动最小。

2. 点火定时和位置的影响，循环变动随提前角的变化有一个最小值，该值对应于最佳点火提前角。点火提前角过大时，活塞处于上升阶段，火花塞处的气流不稳定；点火提前角过小时，活塞下行，燃烧压力、温度低，燃烧过程变长，甚至不完全燃烧

3. 负荷的影响，负荷增加，变动减小，负荷大时油气混合趋向于理论混合比

4. 转速上升，循环变动减小。因为湍流强度增大，燃烧速度提高，燃烧持续期缩短。

2.3 支配燃烧变动的主要因素

有许多问题没弄清楚

(1) 实验中发现，火花塞处气流速度大小和方向的随机变化，把火核吹向不同的地

点

(2) 火核接近椭球形，因此流动变化使起始火核尺寸、成长速率，以及与壁面的相交情况发生变化

(3) 在火焰传播过程中湍流强度的变化，影响从火核生成到燃烧结束的整个过程的湍流燃烧速率的大小。湍流强度的循环变动对燃烧循环变动起着决定性的影响，火花塞处的变动大于整个气缸内的平均值的变动，火焰尺寸增大后，湍流对循环变动的作用减小。

2.4 燃烧变动对排气污染的影响

燃烧速度快，温度高， NO_x 高；CO 和 HC 影响不大；

燃烧不完全或断火，HC 和 CO 排放增加

2.5 减少燃烧变动的措施

混合气在各缸和各循环间均匀

加速火焰，缩短持续期

3 火花点火发动机爆燃

3.1 爆震基本知识

火焰传播或燃烧： 正常燃烧或缓燃波——低亚音速

爆震燃烧或爆震波——超音速，甚至 $2000 \sim 3500 \text{ m/s}$

爆炸燃烧——无需燃烧波在介质中传播

3.1.1 冲波和爆震波气体动力学原理

冲波：波头被波尾赶上，连续变化区发展成突跃变化，这样的压缩波叫冲波（激波，冲击波），超音速

冲波内压缩导致的高温比绝热压缩要高得多，克服惯性力做功，内能增加

3.1.2 正冲波的性质

正冲波：波面与来流垂直的突跃压缩波

冲波锋面碰到固体壁反射时，在固体表面的压力要大大增加，十几倍以上

两个冲击波相碰时，压力和温度也要急剧增加

3.1.3 爆震波特性 $p-v$ 图，Hugoniot 曲线， H_0 曲线——无燃烧， H_1 曲线——有燃烧

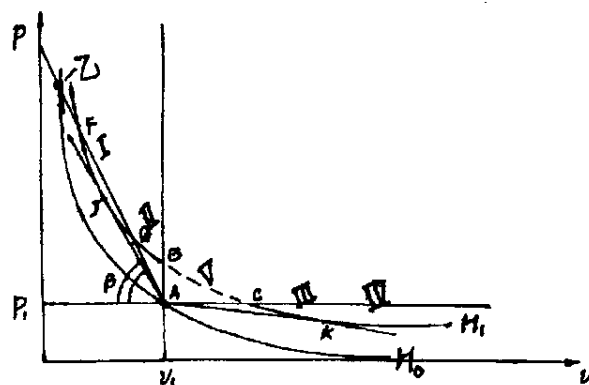


图 6.1-4 Hugoniot 曲线

(1) $B-C$ 区为 V 区，是虚构燃烧区。不存在

(2) B 点以上是 H_1 - 曲线上支，含 I、II 两区，统称为爆震燃烧区。

I 区： J 点以上，称为强爆震区。可能存在，瞬时的，不稳定，因为 p_2 无穷大

II 区： $J-B$ 之间，称为弱爆震区。稳定爆震波

(3) C 点以下为 H_1 - 曲线的下支，称为缓燃区。

IV 区： K 点以下，称为强缓燃区。实验中未观察到，来流为亚音速，流出为超音速，不符合质量守恒

III 区： $C-K$ 之间，称为弱缓燃区。来流为低亚音速，流出为高亚音速

冲波内的气体受热要比通常的绝热压缩受热强得多。因为冲波压缩是以超音速进行的，必须克服气体的惯性力，要消耗附加的功，这就使内能增加，因而引起气体温度有较大的增加。

当冲波锋面碰到固体壁反射时，在固体壁表面的压力要大大增加，例如，正冲波速度为 $655 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，与壁垂直撞击时，壁表面承受的压力是初始压力的 15 倍之多。同样，当两个冲击波相碰时，其碰撞处的压力和温度也要急剧增加。

此冲波的冲击压缩比绝热压缩造成更高的温升，使可燃气体加速燃烧放热，于是燃烧波不断得到能量补充，最终成为稳定的高速前进的燃烧波。波速甚至可达 $2000 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，超过当地音速。称这种燃烧波为爆震波。可定义爆震波是在可燃气体内运行的被燃烧放热能量所支持的超音速稳定燃烧波。

3.1.4 汽油机内爆震的特点

发动机内的爆震	典型爆震	冲波
1. 混气被压缩、加热，有焰前反应	无焰前反应	无燃烧
2. 火花点火后，火焰传播还未到达的部分充量发生早燃，容积式，诱发冲波产生	超音速稳定燃烧波	
3. 已具备自燃条件，易产生和保持弱冲波	波锋内压力、温度提高大，使着火延迟缩短，使混合气着火	
4. 多次周期性反射，每次激波通过时	一次	

只烧掉一部分燃料		
5. 共同点：在冲波锋面内燃烧了一定的可燃混合气，进一步供给能量		

3.2 汽油机爆燃的特点

现象：金属敲击声

- (1) 缸盖温度上升（水温上升）
- (2) 排气的颜色：黄色或黑色
- (3) 压力的测定

3.3 爆燃的理论

- 1. 自燃理论：末端气体自燃
- 2. 焰前反应：焰前反应产生的中间产物，其中醛和有机过氧化物对爆燃起重要作用
- 3. 低温型和高温型爆燃

低温型：烷烃和烯烃，由冷焰到热焰二级低温氧化

高温型：苯和甲烷，直接产生热焰

爆燃取决于焰前过氧化物的浓度（高点出现早），与混合比和机器转速无关

加四乙基铅会减小过氧化物浓度

3.4 辛烷值

抗爆性

异辛烷 C_8H_{18} 和正庚烷 C_7H_{16} 的比例

3.5 防止爆燃的方法

- 1. 爆燃引起的故障
 - (1) 气缸过热（激波导致散热增加）
 - (2) 功率和效率降低
 - (3) 相关零部件应力增加

2. 防止办法

- (1) 使用抗爆性好的燃料
- (2) 降低末端气体温度和压力
- (3) 增大火焰速度

a. 利用运转条件减轻爆燃

- (1) 降低冷却水温度和末端气体温度

- (2) 降低进气温度和末端气体温度
- (3) 混合气过浓或过稀
- (4) 延迟点火时间
- (5) 进气节流—进气压力低
- (6) 提高火焰速度

b. 利用设计方法

- (1) 缩短火焰传播距离
- (2) 冷却末端气体
- (3) 冷却排气阀
- (4) 增加湍流
- (5) 扫气
- (6) 喷水或甲醇

4 表面点火

爆燃表面点火

非爆燃表面点火

5 其它自动着火现象

- (1) 热状态后的续跑
- (2) 热启动杂音、困难(因为压缩自燃)
- (3) 放炮，未燃气体在排气管中着火引起

6 稀混气燃烧的发动机

6.1 燃烧稀混气的问题

A/F 约为 13 时火焰传播速度最快，汽油机的功率最大；A/F 为 13.5~14 时，火焰温度最高；A/F 为 19 时，汽油机的热效率最高。汽油机理论空燃比为 14.8

过量空气系数的一般范围：0.8~1.1，当过量空气系数在 1.2 以上时：

缺点：循环变动加大

油耗加大

工作过程粗暴

HC 排放增加

汽车操纵性能下降

排气后处理困难

优点：（1）燃温低，NO_x 少

（2）改善稀混气燃烧，可以提高部分负荷的经济性；因为燃烧温度低，离解损失、传热损失小

（3）爆燃极限允许采用大的压缩比

（4）可不用节气门，减少了泵损失

6.2 提高压缩比对稀化的影响

汽油机负荷是以节流来控制，所以实际压缩比随（节气门开度）变化！

压缩比由 8.5~12.5，部分负荷热效率改善 30%，一半是由于热效率增加，一半是改善了燃烧状况

压缩比提高：压缩终了 P、T 提高

减少了余气

电火花能量可降低

点火提前角可减小（压缩比提高有利于初燃期的发展）

因此提高压缩比可以扩展稀混气范围，但要防止爆燃

压缩比和对应的过量空气系数范围：

压缩比	过量空气系数
5	小于 1.0
7~8	1.1~1.2
12.5	1.15~1.25

6.3 改善点火系统

可以扩展稀混气范围， α ：1.2~1.4

增加火花能量；增加电极距离

但火花能量要增大几倍到十几倍，使烧损加速，绝缘要求提高，比较困难

6.4 预室喷流发动机

（预室容积占压缩容积的 2~3%， α ：1.5~1.6 甚至更高）

预室中引入油、气（相对浓一些），火花塞在预室，主副室可以可靠点火，可扩展主燃室内的稀混气范围；经济性好，排放小。缺点：结构复杂；由于喷速高，大负荷时发生弱冲波

6.5 二级活塞式发动机

（一缸给另一缸供新鲜空气，使总的 α 高 1~2，压缩比大）

旋流强烈，燃烧快，无爆燃，经济性好，但复杂

6.6 其它稀混气燃烧发动机

1. 双点火稀混气燃烧发动机，两个火花塞
2. 球状点火燃烧室，燃烧室在缸盖上，燃烧室高度大，利于火核的球状发展

7 层状充量发动机

层状充量发动机和稀混气发动机无严格界限，后者强调均匀混合

解决汽油机部分负荷时，经济性差，排放污染严重

原理：火花塞附近的混气较浓以利于点火，然后由此引燃相邻的稀混气

层状充量燃烧系统：

按燃烧室数目：单室，双室（预室喷流式）

按燃料供给方式：燃料喷射式、特殊汽化器或二者混合式

原机类型：汽油机改造，柴油机改造

喷射燃料的时间：早喷，迟喷

早期层状充量燃烧系统：Texaco 型：涡流，喷油

Witzky 型：单室，早喷

Broderson 型：双室，早喷

I. F. P 型：双室，汽化器

喷流点火

近期层状充量燃烧系统：LAG——快速燃烧过程：不完全燃烧喷流点火

RICARDO COMET：由涡流室式柴油机发展而来，预燃室与主室的容积比接近 1

CVCC：日本 Honda 公司，双室

Proco：直喷式，双火花塞，现发展为 GDI

Deutz：高涡流，喷油

FMUH 型：德国 MAN，

GDI 的优缺点：CFD 技术、激光流动燃烧测量技术、电控技术、可控缸内流动及滚流技术的应用，使 GDI 有了突破

优点：

- （1）经济性有了突破性进展
- （2）瞬态工况改善，可降低对加速加浓的要求
- （3）能快速启动，对启动加浓的要求降低
- （4）冷启动 HC、CO 排放降低

有待解决的问题：

- (1) 由于余隙效应，使 HC 排放比柴油机高得多
- (2) 喷油器压力低，无自洁作用，容易结垢
- (3) 要求高能点火，使火花塞寿命降低
- (4) 实现早喷和迟喷之间的平滑过渡，发动机负荷的“无级”变化较难
- (5) 缸内浓度、温度分布不均，NO_x、炭烟的生成不好控制
- (6) 结构比较复杂，可靠性、耐久性有待进一步考验。

层状充量发动机的发展趋向

- 1. 不断商品化
- 2. 油耗和污染不断降低
- 3. 燃料多样化：甲醇，乙醇，
- 4. 结构简化，电控

第三部分 柴油机燃烧与控制

喷射特性：喷油定时，持续期，喷射速率，油束形状等

发动机性能：功率，效率，排气污染，噪音，发动机应力状态（寿命），冷启动性能

1 燃烧过程分段

可控 1. 着火延迟期（滞燃期）：

喷油后，无明显压力升高

不可控 2. 速燃期（初燃期）：压力、温度急剧上升

压升率大于 $3 \sim 5$

$\text{kgf/cm}^2 \cdot \text{degCA}$ ，粗暴

爆压在上止点后 $6 \sim 10$ 度出现

速燃期约为 3 度曲轴转角，放热 $1/10$ 左右，至 P_z 止

可控 3. 缓燃期（主燃期）

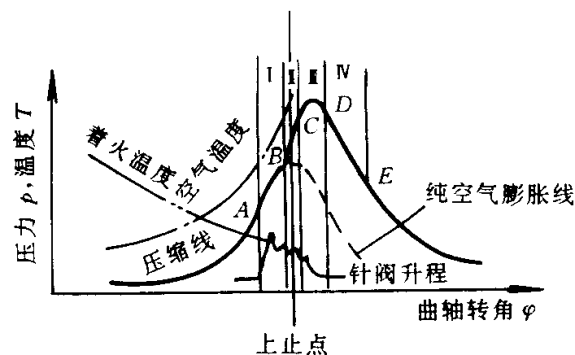
从 P_z 点到 T_z 点，放热 $70 \sim 80\%$

此期为扩散燃烧，受控于混合气形成速度（供油规律）

4. 后燃期

从 T_z 到最后，对热负荷和效率都不利

持续 $50 \sim 60$ 度 CA，放热 10% ，严重时 30%



2 有害成分的生成与排放特性

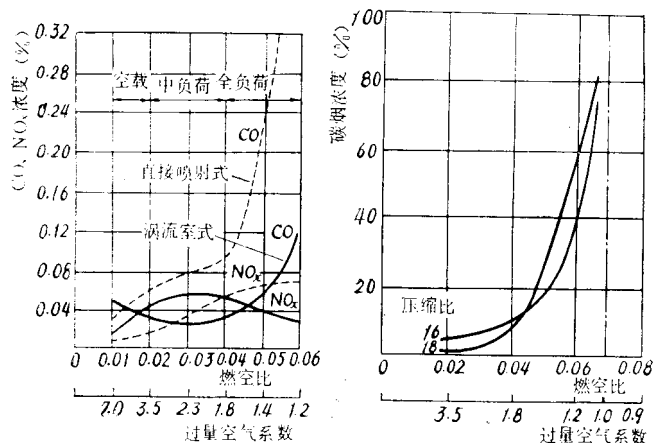
	柴油机	汽油机
微粒	多	少
CO	少	多
CH	少	多
NOx	较少	较多

黑烟：碳粒

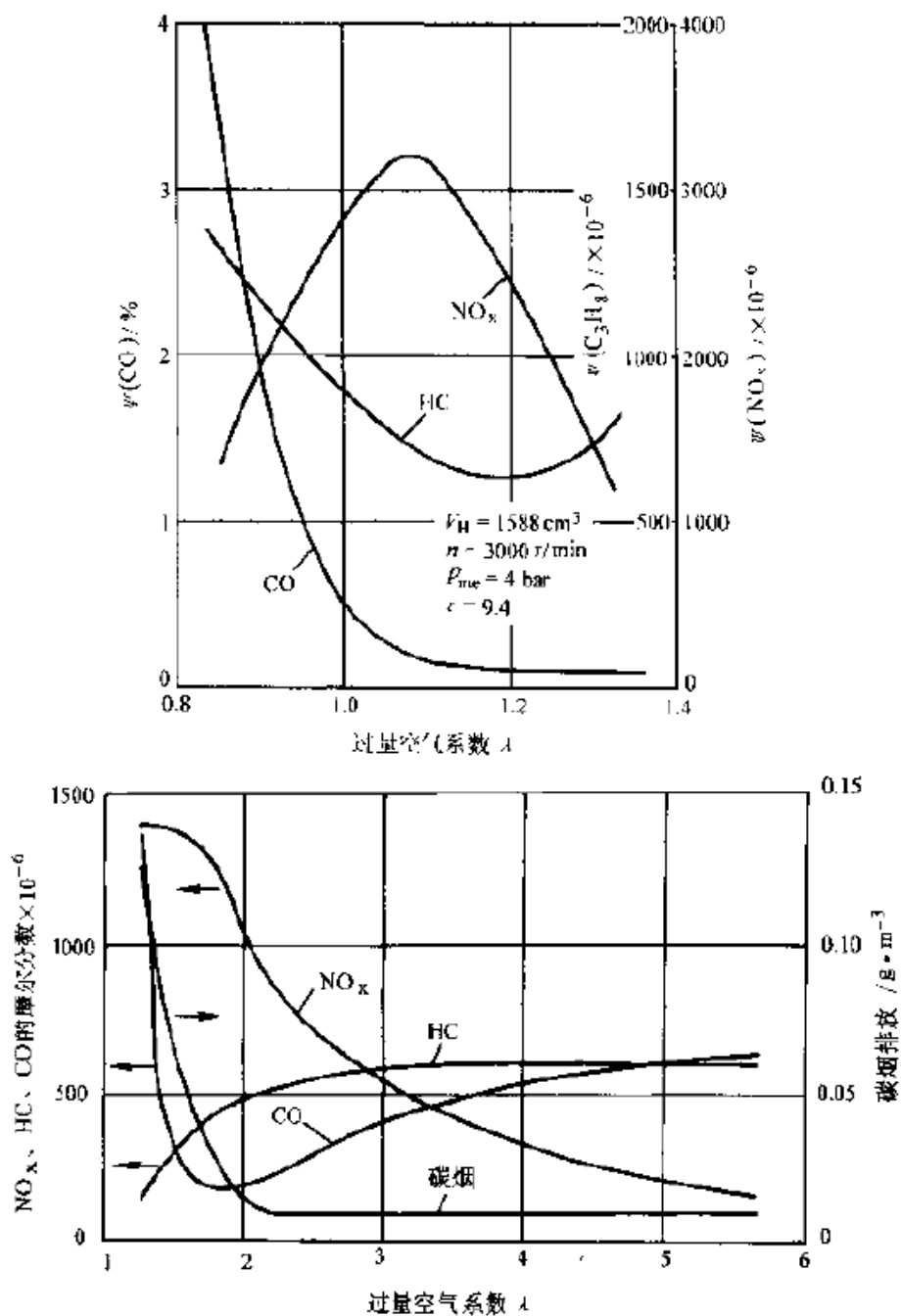
白烟：燃料或润滑油

蓝烟：醛类，过氧化碳氢混合物，有刺激性臭味

2.1 碳烟和 NO 生成倾向



空燃比与排放特性的关系



2.2 气流的影响

碳烟是限定柴油机功率的界限

柴油机中 NO 和碳烟排放量有着矛盾的关系

涡流过大或过小都会使油耗和碳烟增加

逆挤流会使燃料活塞顶隙内, 易形成碳烟

3 着火延迟期及其控制

3.1 概念

着火延迟期的三种确定法：压升延迟期（雾化吸热导致的压力损失使实测值长）

温升延迟期（误差大）

发光着火延迟期

按物理、化学性质分： $\left\{ \begin{array}{l} \text{物理滞燃期} \\ \text{化学滞燃期：二者有重合段} \end{array} \right.$

3.2 滞燃期的影响因素

（1）温度的影响

700K 以下，化学延迟起支配作用

高温下，物理延迟期起支配作用

（2）压力的影响，压力高，延迟短

（3）转速的影响：转速增加，着火延迟期减小，但对应曲轴转角却增加，因此随转速增加应适当增加供油提前角

（4）油品的影响：十六烷值高，着火延迟期短

汽油滞燃期大于柴油（有时到 2 倍）

3.3 滞燃期的计算

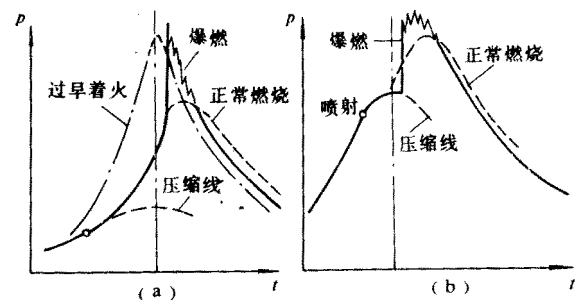
几种经验公式：如谢苗诺夫 (H. H. Semenov), Schmidt F. A. F., Wolf H., 广安博之, 上内所, 何学良等

3.4 滞燃期对燃烧过程和柴油机性能的影响

（1）对 P_z 和最大压升率的影响

滞燃期长 \rightarrow 预混气多 \rightarrow 初燃期放热增加 \rightarrow 最高温度和 P_z 增大，最大压升率增大 \rightarrow 机械负荷增大，寿命下降

因此，所有缩短滞燃期的方法都会使之工作柔和（不一定是 P_z 低）



（2）对示功图形状的影响

滞燃期长 \rightarrow 示功图面积减小（畸变） \rightarrow 后燃严重 \rightarrow 性能恶化

（3）对平均有效压力的影响

有一个最大的 P_e 存在，此时为最佳滞燃期

（4）对油耗的影响

有一个最佳油耗存在

3.5 滞燃期的控制

1. 滞燃期的控制

(1) 压缩比增大，滞燃期减小

启动性提高，CH 排放、噪音降低，但 NO_x 、 P_z 提高

注意区别：

压升率增大，工作粗暴，但 P_z 不一定上升

爆压 P_z ， P_z 高不一定压升率高

(2) 进气加热

滞燃期大为缩短，但部分负荷时 NO_x 增多

吸入气量下降，冒烟、功率下降

(3) 增压：滞燃期缩短，使排烟、CH、油耗均有所改善

(4) 补助燃料的吸入：进气过程吸入燃料进行焰前反应，使滞燃期缩短

(5) 补助燃料喷射：Pilot Injection, 先导喷射，使主喷射的滞燃期缩短， NO_x 和排烟大幅度下降

(6) EGR, Exhaust Gas Recirculation, 滞燃期缩短， NO_x 显著减少，但 EGR 率大时，使油耗、CH 和排烟增加

(7) 排气节流，机内 EGR

(8) 外部点火，强制点火缩短滞燃期

2. 始燃量的控制

(1) 喷射率的控制

初期喷油多，可燃混合气增多，理想的应该是斜坡形(Ramp)，或称为靴形

(2) MAN—M 燃烧法：油膜，滞燃期缩短，但燃烧期加长

(3) 附卷混合法：由于壁面的抑制，滞燃期内形成的预混气少

4 主燃期及其控制

受燃油喷射率和终止时间的影响

1. 燃油喷射率的影响

2. 空气运动的影响

3. 燃烧室形状的影响

主要控制措施（缩短主燃期）

(1) 提高燃油喷射率

(2) 改善空气运动

(3) 燃烧室匹配

柴油机控制策略：抑制初期，加速主期，减少后期

用延迟喷射和加速燃烧促使等压燃烧的近似实现，对控制排气污染有利

1. 副室柴油机中的近似等压燃烧

(1) 前导喷射

(2) 轻质燃料的使用

2. 直喷式柴油机中的近似等压燃烧

(1) 高压喷射(高喷射速率)

(2) 挤流口式

(3) 乳化燃料

5 机械负荷与热负荷的控制

当今发展趋势：平均有效压力上升

控制机械负荷、热负荷的措施：

(1) 燃烧室形状

涡流增强， P_z 降低，但热负荷高

滞燃期减小，机械负荷降低

(2) 降低压缩比

低压缩比下的燃烧：

压缩比减小，启动性变差，部分负荷工作粗暴，油耗上升，此时可提高进气温度

6 柴油机的过渡过程及电控系统的发展

过渡过程：指加速过程，燃烧恶化，工作粗暴，冒黑烟，对于增压柴油机来说，还有压气机的响应速度等问题

目前，主要是供油系统的电控，包括提前角、油量和供油规律，预喷、后喷等电控供油系统

(1) 传统直列泵的改造

(2) CR

(3) EUI EUP HEUI 蓄压

高强度柴油机发展趋势，魏熔，1983

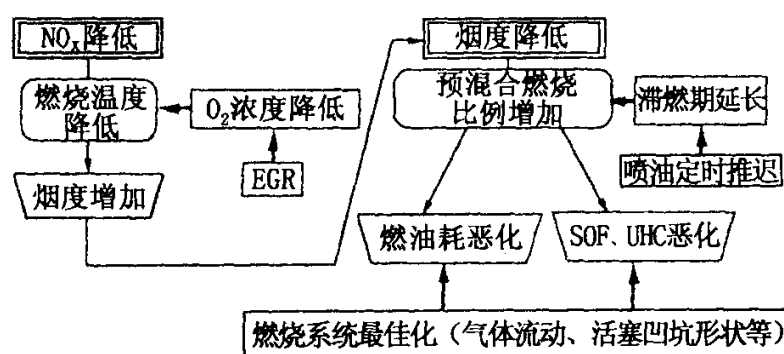
1. 直喷化

2. 缸径或排量由大向小发展
3. 喷油压力不断提高
4. 向低涡流统一
5. 燃烧室向开式浅 ω 形发展
6. 低散热
7. 电控
8. 高功率密度

7 MK 燃烧

(Modulated Kinetics, 谐振动力)

MK 燃烧是低温预混合燃烧方式，可同时实现利用高 EGR 率降低燃烧温度以减少 NO_x ，以及利用推迟喷油定时后，滞燃期和预混合燃烧比例的增加减少碳烟，原理如图所示
 NO_x 和碳烟的减少途径是互相矛盾的！



(来源：国外内燃机，2002(3)，超小型直喷式柴油机燃烧特性的研究，相吉泽英二等)

8 HCCI

Homogeneous Charge Compression Ignition, 均质充量压缩点燃，是目前发动机研究的一个热点，国内起步很晚。由于燃烧机理上的新颖性，它具有三维空间燃烧、燃烧温度低、效率排放污染低、可使用多种燃料、对供油系统要求低等特点。