

内燃机燃烧模拟

(美) J.N. 马塔维 编
C.A. 阿曼

(论文集)



1976年11月在英国通用汽车公司研究中心举行了“往复式内燃机燃烧模拟”国际学术讨论会，本书的十五篇论文选自《Combustion Modeling in Reciprocating Engines》一书，代表了该次会议的主要内容。第一、九篇文章是有关燃烧模拟的文章综述，可供了解这方面的目前世界水平和发展趋势。第二、三篇文章着重论证燃烧模型的实用用处。第四、五篇文章以分层充积内燃烧为例探讨各种燃烧模型的能力。第六、七、八篇文章着重介绍气缸内流动的模拟，而流动结构对燃烧过程有决定性的影响。第十篇文章介绍燃烧模型在预测燃烧上的结果。最后第十一到十五篇文章讨论内燃机排放的模拟。

本书可供从事内燃机设计、研究工作的工程技术人员，大专院校内燃机专业师生，研究生等参考。

Combustion Modeling
in Reciprocating Engines

James N. Mattavi

Charles A. Amann

Plenum Press, New York

1980

内燃机燃烧模拟

(论文集)

J. N. 马塔维
〔美〕 C. A. 阿曼 编

刘兴俊 译

责任编辑：袁明

封面设计：方芬

机械工业出版社出版 (北京东黄城根北街24号)

(北京市书刊出版业营业登记证出字第117号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092¹/₃₂·印张 16·字数 356千字

1987年8月北京第一版·1987年8月北京第一次印刷

印数 0,001—1,400·定价：4.00元

统一书号：15033·6503

目 录

一、内燃机燃烧模拟	1
二、内燃机燃烧模型的应用	42
三、通过燃烧模拟改进内燃机	63
四、预燃室式分层充量内燃机的模拟	112
五、关于直接喷射分层充量内燃机燃烧的完全模型的 初步研究	145
六、内燃机中流体运动的模拟	178
七、往复式内燃机中缸内流动过程预测方法的开发	207
八、内燃机中紊流的发生	269
九、内燃机中火焰传播和放热的模拟	297
十、烃自燃模型在模拟内燃机爆燃和其他燃烧现象 上的应用	329
十一、内燃机废气排放模拟概述	362
十二、直接喷射柴油机的排污形成模型	376
十三、柴油机中燃料喷雾体的特性及其模拟	397
十四、火花点火式内燃机烃排放的模拟	438
十五、往复式内燃机排气中烃消失的模拟	475

一、内燃机燃烧模拟

美国麻省理工学院 J. B. Heywood

符 号 表

a	常数
$(A/F)_0$	总空燃比
$(A/F)_{p, soc}$	燃烧始点预燃室中的空燃比
A_f	火焰前锋面积
b	常数
B	气缸直径
B_k	第 k 种反应阿累尼乌斯速率常数中的指数前因子
c	常数
$c_{p,i}$	第 i 种物质的定压比热
CA	曲轴转角
D_{ij}	对物质 i 和 j 的二元扩散系数
e	比内能
E_k	第 k 种反应阿累尼乌斯速率常数中的活化能
F_T/V_P	预燃室通道面积对预燃室容积之比
h_i	第 i 种物质的比焓
k	粘度系数
K	常数; 化学反应数
L	紊流的积分长度尺度
m	维贝函数中的常数
m_b	已燃质量
m_e	被卷入紊流火焰前锋面中的质量
M_i	第 i 种物质的符号

N	物质种数
NO_x	氮氧化物
Nu	努赛德数
p	压力
$\underline{p}$	压力张量
Pr	普朗特数
q	热流矢量
$\dot{Q}$	传热速率
R	气体常数
Re	雷诺数
S_L	层流火焰速度
S_T	紊流火焰速度
t	时间
T	温度; 下标 a 、 b 和 u 分别指绝热核心气体、已燃气体和未燃气体的温度
u	速度分量
$\underline{u}$	速度矢量; 表 1-1 方程 (1-11) 中加上上角标 T , 表示张量的转置
u_e	未燃混合气卷入火焰前锋面的速度
u_i	扩散速度矢量
v	速度分量
V	气缸容积
V_P/V_C	预燃室容积对总余隙容积之比
w_i	第 i 种物质的源项
W_i	第 i 种物质的分子量
$\dot{W}$	功传递速率
x	已燃质量分数
X_i	第 i 种物质的摩尔分数
Y_i	第 i 种物质的质量分数

α	常数
Δx	网格尺寸
δ_T	热边界层厚度
θ	曲轴转角
$\Delta\theta_{cm}$	主燃烧室中的燃烧持续角
$\theta_s, \theta_0, \Delta\theta_{id}, \Delta\theta_b$	在图 1-8 中定义
λ	混合气的导热率
μ	混合气的粘度
μ_i	紊流粘度
ν_i	第 i 种物质的化学计量系数
ρ	气体密度
ρ_u	未燃混合气密度
$\hat{c}$	粘性剪切张量
τ	特征反应时间
ϕ	燃空当量比

引 言

环境保护和节约能源的要求使内燃机的设计大为复杂化，要在排放限制、燃料经济性标准和可用燃料辛烷值水平下获得最佳的使用特性。数学模型这一工具在应付这一挑战中变得越来越重要。在过去十年中，在内燃机模拟方面的努力程度以及所得出模型的适应能力大为增长。这一方面是由于对数学模型威力的认识提高了，另一方面是由于计算机的应用普及了。所谓内燃机的数学模型，一般是指支配工质通过运转中的内燃机的气缸时的流体力学和热力学行为的一组方程式，并用计算机求数值解。

内燃机区别于其他热机的独特之处在于其燃烧过程与内燃机的基本运行特性，如功率、效率和排放等直接关连。所

以，燃烧模型是整个内燃机工作循环模拟的中心环节。与此同时，工作循环的所有各方面如进气、压缩、膨胀和排气冲程的细节，都直接影响燃烧过程。

内燃机的燃烧过程极端复杂。即使在常规的火花点火式内燃机中，很多模型假定燃料和空气是预混合的，燃烧过程仍然是在一个三维的随时间变化的紊流中发生的，燃料是由几百种不同的有机化合物混合而成的，其燃烧化学特性所知不多，而且发生燃烧的燃烧室其形状随时间而变，其壁面直接影响过程的进展。由于我们不能精确描述其中绝大多数过程，怪不得燃烧模拟还是一个众说纷纭的领域。

燃烧模拟可以分为下列三个发展阶段：（1）通过分析在内燃机工作循环中互相联系的各个过程开发模型；（2）试用模型，验证模型，研究模型的预测对原始假定的敏感性；（3）应用模型进行广泛的多参数研究，考察内燃机设计和使用参数对发动机性能、效率和排放的影响。

上述三个阶段对于内燃机的研究和发展分别有三大贡献：（1）更全面地理解从构成模型的需求中显露出来的重要物理过程；（2）找出关键的控制变量，以拟定更合理、因而更省钱的实验程序和数据处理方法；（3）可以在很宽广的设计和使用变量范围内预测性能，可用在动手进行硬件程序（如绘图、试制）之前筛选某些想法，确定变化趋势和折衷效果，而且如果模型足够精确的话，优化设计和控制。

我认为上述三种贡献中每一种都是很有价值的和意义重大的。即使对于某一特定问题，上述第三个即最后目标暂时不能实现，致力于实现（1）和（2）所述的收益的模拟活动也仍然很有价值。

内燃机燃烧模拟所关心的问题可分为如下三类：（1）内燃机动力性能和效率；（2）内燃机排放（氮氧化物、一氧化碳、未燃烃类、颗粒物、多环芳香烃、醛类、臭味和噪声）；（3）爆震。对于常规火花点火式内燃机来说，这些问题与燃烧过程的关系如图 1-1 所示。火焰传播过程本身决定燃烧室内未燃和已燃气体的热力状态，因而决定内燃机的功率和效率。氧化氮在大团的已燃气体中形成，主要在火焰后面。烃类源出壁面附近的淬灭区。一氧化碳排放当混合气浓时受大团已燃气体的控制，而当混合气变稀时，淬灭区变得越来越重要。醛类来源于淬灭区的外边缘。末端气体状态以及燃料特性，决定是否发生爆震。

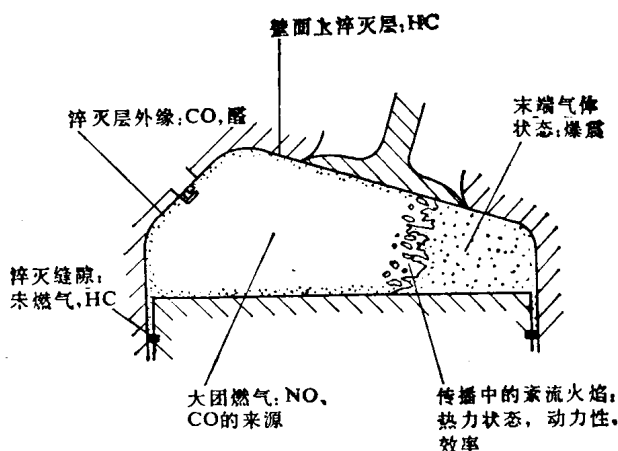


图 1-1 火花点火式内燃机燃烧过程简图

在燃料喷射内燃机中、柴油机中以及某些类型的分层充量内燃机中，由于燃料在燃烧室中的不均匀分布以及燃料与空气混合过程的重要性，燃烧过程更加复杂。图 1-2 表示这种类型的燃烧过程的不同时期如何影响上列问题。燃料喷流

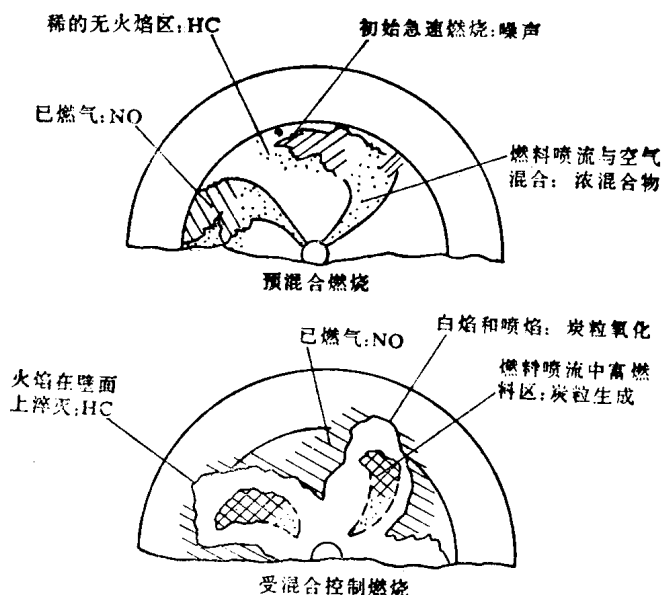


图1-2 直接喷射压燃式内燃机的燃烧过程在其初始“预混合”的急速燃烧时期以及紧接着的“受混合控制”的缓慢燃烧时期的简图

的发展即燃料的蒸发及其与空气的混合控制放热率，因而控制内燃机的功率和效率。氧化氮与前面一样在高温燃气中生成，但现在在已燃气体区域中温度和燃空比都是不均匀的，这是最重要的特征。炭粒在火焰带中的富燃料未燃地区生成。炭粒在火焰带中氧化，使火焰发出具有标识性的黄光。烃类和醛类源于火焰在壁面上被淬灭或者由于空气过多使燃烧过程不能完成的地区。燃烧噪声受燃烧过程的开始部分，即紧接着着火落后期的初始快速放热率的控制。

在内燃机循环期间发生的事件，以及燃烧过程与内燃机

运行特性和排放特性之间的关系如图 1-3 所示，它表示一台火花点火式内燃机在中速中负荷时循环模拟的输出。顶上两个图表示内燃机的两个几何关系——气缸容积变化和气门升程图。下面各条曲线分别表示不同曲轴转角下通过进排气门

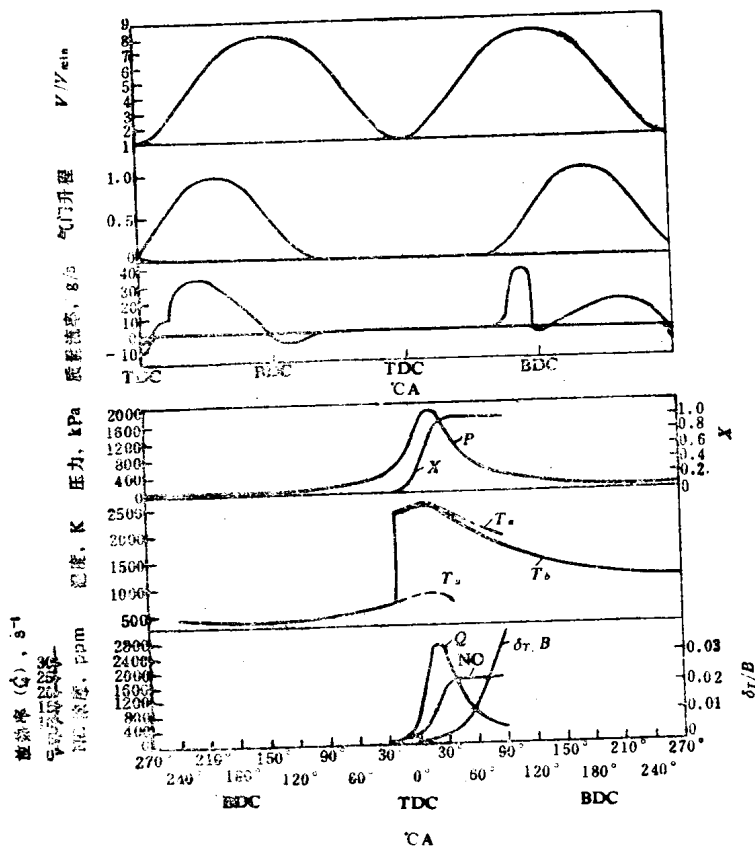


图1-3 火花点火式内燃机循环模拟计算输出实例^[1]，
内燃机排量 5 L，当量比 1.0，转速 1400 r/min，平均有效压力
328 kPa，燃烧定时为最佳值（TDC—上止点，BDC—下止点）

的质量流率、气缸压力 p 、已燃烧的质量分数 x 、未燃混合气的温度 T_u 、已燃气体的平均温度 T_b 、已燃气体绝热核心的温度 T_c 、瞬时放热率 $\dot{Q}$ （已除以缸内燃料-空气混合气的初始焓值而归一化），氧化氮浓度 NO ，以及热边界层厚度 δ_T （已除以缸径 B 而归一化）。

在这个特定的模拟中，已燃的质量分数曲线，即其燃烧模型，是计算的输入，而已燃气体的温度用内燃机传热的边界层模型确定。由于热的传递，绝热燃气核心的温度高于燃气平均温度。根据泽耳多维奇的化学动力学 NO 生成机理和燃气中碳-氧-氢系统的平衡浓度，以燃气压力和温度为输入，算出氧化氮的浓度 $\text{NO}^{[1]}$ 。燃烧过程的细节控制压力和温度随曲轴转角而变的曲线，从而控制功率、效率、燃料消耗和排放。对于这个实例来说，循环的这些平均量为：平均指示压力（只考虑压缩膨胀冲程）454kPa，泵气平均压力 54kPa，指示燃料消耗率 232g/kW·h，指示效率 35%，散热量占输入热量的 29%，指示氧化氮排放率 7.8g/kW·h。

内燃机燃烧的高速摄影

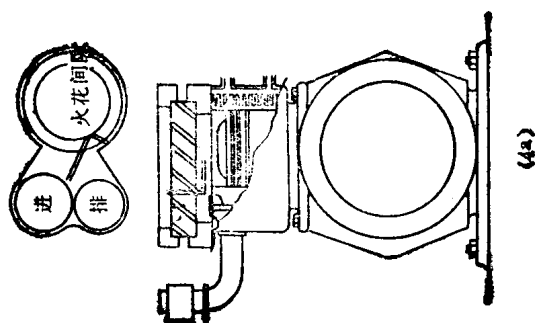
在专门集中讨论燃烧模拟之前，先看一看各种类型内燃机中燃烧过程的若干高速摄影照片。对于所要模拟的物理过程拍摄一张很好的照片是至关重要的。图 1-4 表示从各种不同类型内燃机中燃烧过程的高速彩色摄影得出的几张照片。在每种情况下，被研究内燃机的气缸盖都已被改造，装上一个透明的窗，如图所示。

图 1-4 a (K. Nakanishi 等^[2]) 表示侧置气门式火花点火内燃机在刚刚点火不久，即上止点前 6°CA (6°BTDC) 时，以及接近气缸内达到最高压力的曲轴转角，即上止点后

18° CA (18° ATDC) 时燃烧室内火焰的形状和结构, 亮光 是从实际火焰反应带发出的。火焰前锋面大致呈球形, 中心 在火花塞位置附近, 包含较小尺度的不规则性, 拥有较小尺 度的结构。图 1-4 b (V. W. Wong 等^[3]) 表示从一台用来 模拟所谓德士古可控燃烧过程 (Texaco Controlled Com- bustion Process, TCCP) 的分层充量内燃机的快速压缩机 器燃烧高速摄影的两幅照片。活塞顶上有一个直径大约等于 气缸直径一半的深坑。进入的空气有逆时针方向的旋流。当 空气流入燃烧室坑中时旋流速率被增大。第一幅照片表示在 燃烧开始以前活塞顶燃烧室坑内的燃料喷注。燃料被喷入活 塞顶坑内高速旋转着的空气流中, 建立起了空间上不均匀且 随时间迅速变化的燃空比。第二幅照片表示在放热过程中途 (对应总放热量为 50% 左右) 时的火焰位置。火焰稳定在火 花塞的尾流中。已燃气体区被旋转着的空气流带着转, 并在 这种输送过程中不断卷入空气。

图 1-4 c (J. F. Alcock 和 W. M. Scott^[4]) 表示一台 具有逆时针方向旋流的小型高速直接喷射柴油机中的火焰。 第一幅照片在 3° BTDC 拍摄, 燃料喷射尚在继续。可以看 到两股燃料喷注。活塞顶上 ω 形燃烧室外周区域可以看见燃 烧, 这是早期喷入的在着火落后期内与空气“预混合”的燃 料着火的结果。第二幅照片在 6° ATDC 摄取, 表示所谓“受 混合控制”的燃烧阶段的火焰。考察这幅照片的彩色版, 可 看到高度富燃料的炭烟形成区, 如图上箭头所指之处。

图 1-4 d (J. F. Alcock 和 W. M. Scott^[4]) 表示一台李 卡图彗星五号涡流室柴油机燃烧过程高速摄影得出的两幅照 片。第一幅照片是在 1° ATDC 摄取的, 可看出涡流室中燃 烧已经开始 (沿着垂直气缸轴线的方向观察), 跟着被空气涡



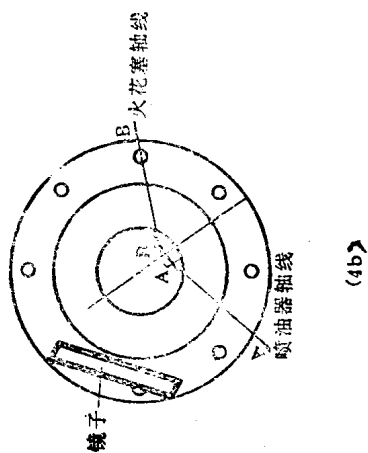
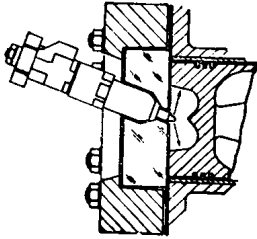
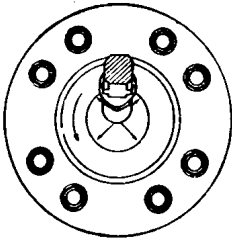


图1-4 从各种不同类型内燃机燃烧过程高速彩色摄影得出的照片 (2-4)



炭烟生成区
(4c)



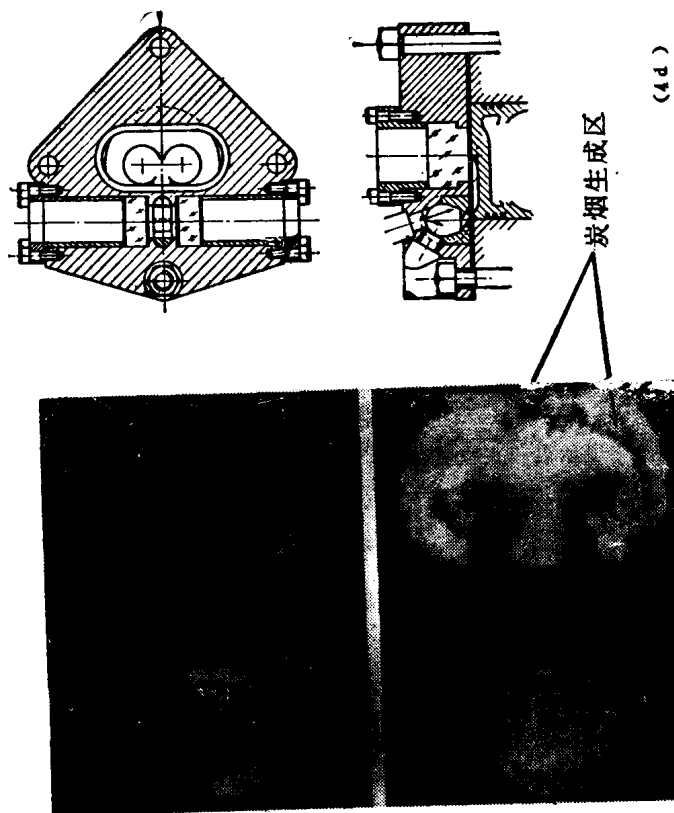


图 1-4 (续)

流带着旋转的燃料喷注有一个碳燃烧火焰，周围是一个较稀的火焰。第二幅照片是在 15° ATDC 摄取的，这时白色的碳火焰充满了整个涡流室。主燃烧室中，从涡流室喷出的燃气喷流已经撞上活塞顶表面，与此表面上的眼镜形凹坑和喷口对面的气缸壁相互作用，把过量空气卷入火焰区，并可看出（在此照片的彩色版上）明显存在炭烟的区域。

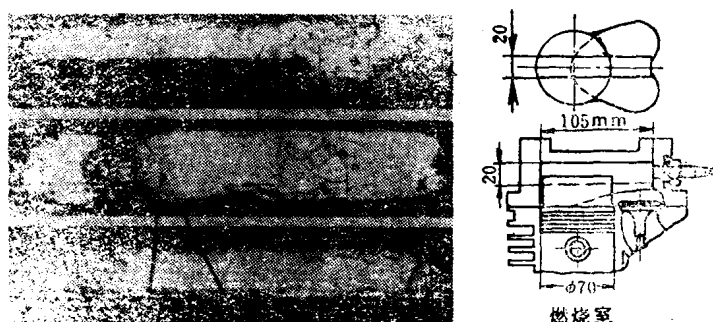


图1-5 表示火花点火式内燃机中紊流火焰结构的纹影照片，上为火焰发生时，中为火焰传播中间，下为火焰在壁面上终止时

即使在常规的火花点火式内燃机这样最简单的情况下，紊流火焰的详细结构也尚未完全弄清。从火焰传播穿过火花点火式内燃机燃烧室的纹影照片可以得知某些细节。图 1-5 (K. Iinuma 和 Y. Iba^[5]) 表示了三幅高速摄影照片，一幅在燃烧过程的早期，一幅对应燃烧中期，一幅对应燃烧末期。同时表示了用来摄影的内燃机的有关几何尺寸。如此图所示，这台机器被设计成有一条长槽作为燃烧室的一部分，使能得到几乎完全是平面的火焰前锋面。中间这幅照片表示正在传播中的已完全发育的火焰。总的看来火焰很“厚”，但具